

SICE 九州支部 50 周年特別企画

SICE 九州支部が次の 50 年に贈る高校生講座
工学部発 サイバーフィジカルシステムってなに？

日時：令和 3 年 11 月 6 日（土）13:00～15:30

会場：ホテルオークラ福岡（6F ケンジントン） Zoom・YouTube 同時配信

第 0 話：人間と社会と地球のためのシステム情報学

講師：藤田政之 教授（東京大学）／計測自動制御学会会長

概要：皆さんにはシステムという言葉を聞いたことがあるでしょうか。システムとは「組み立てた物」を意味する古代ギリシャ語に語源にもち、「共に」を意味する語（syn）と「立てる」を意味する語（histemi）を組み合わせた言葉です。例えば自動運転技術も人間と機械が共に協調するシステムと考えることができます。また地球温暖化により引き起こされる気候変動や新型コロナウイルス感染症の影響を受ける複雑な社会の問題に対処していくためにも、個別の要素に捉われず普遍的に全体を最適化する、「共に立てる」ためのシステム的アプローチが重要になってきます。この講演では、「計測と制御」や「認識と行動」の学理に基づき物理世界と情報世界を繋いで、人間と社会と地球のために進められているシステム情報学についてご紹介します。

第 1 話：超スマート社会をつくるサイバーフィジカルシステム

講師：永原正章 教授（北九州市立大学）

概要：「超スマート社会」という言葉をご存知でしょうか。超スマート社会とは、人工知能やロボット、ドローンなど最先端技術を活用した今よりもずっと住みやすく楽しい未来社会のことです。日本が国を挙げて研究開発に取り組んでいる社会的課題でもあります。この超スマート社会を支える重要な技術のひとつにサイバーフィジカルシステムがあります。サイバーは情報空間、フィジカルは物理空間を表し、コンピュータをうまく使いながら、我々の住むこの物理世界を良くしていこうというシステムです。今回の講演では、このサイバーフィジカルシステムについて分かりやすく解説します。

第 2 話：人と分かり合える知能化モビリティが未来を変える

講師：安井裕司 博士（本田技術研究所）

概要：今、自動車産業は 100 年に一度の大変革期を迎えています。労働力不足下での公共交通機関・物流の維持、交通事故の低減などのさまざまな課題がある一方、五感で感じる体験・経験を求めるより自由な移動のニーズがますます高まっています。これからモビリティは、単なる移動手段から互いにコミュニケーションしながら人と分かり合い共存するより知的なモノとなっていきます。ここでは未来を支える知能化モビリティについて紹介します。

第40回計測自動制御学会九州支部学術講演会 目次

[SICE九州支部50周年特別企画]

SICE 九州支部が次の50年に贈る高校生講座 工学部発 サイバーフィジカルシステムってなに?

人間と社会と地球のためのシステム情報学	v
藤田 政之(東京大学) / 計測自動制御学会会長	
超スマート社会をつくるサイバーフィジカルシステム	v
永原 正章(北九州市立大学)	
人と分かり合える知能化モビリティが未来を変える	v
安井 裕司(本田技術研究所)	

[一般講演]

講演番号	講演題目 ／ 著者	ページ
101A1	スケジュール型BAによって最適化されたNCによる自動車の操舵制御 ○藤澤 太郎(琉球大学), 中園 邦彦(琉球大学), 金城 寛(琉球大学)	1
101A2	GA学習によるニューロ制御器を用いた海洋ロボットの位置制御 ○石川 大貴(琉球大学), 山田 桃也(琉球大学), 金城 寛(琉球大学), 中園 邦彦(琉球大学), 上里 英輔(琉球大学)	3
101A3	ファジィ制御とPID制御を組み合わせた海洋ロボットの制御シミュレーション ○山田 桃也(琉球大学), 金城 寛(琉球大学), 中園 邦彦(琉球大学), 上里 英輔(琉球大学), 大城 尚紀(琉球大学)	7
101A4	バレーボール競技における動画の自動編集 ○末吉 紘大(熊本大学), 岡島 寛(熊本大学), 伊藤 優希(熊本大学)	11
101A5	多様な投資家モデルを含む人口株式市場のモデル構築と株式市場における影響分析 ○赤平 泰成(熊本大学), 岡島 寛(熊本大学), 黒岩 聖矢(熊本大学)	15
101A6	AR技術を用いたUSDモデルに基づくグラフの拡張現実表示 ○塙本 一貴(九州工業大学), 古賀 雅伸(九州工业大学)	19
102A1	大変形を伴う閉ループマルチボディシステムの最適軌道生成 ○梁元 航大(福岡大学), 福田 謙太(福岡大学), 赤星 雄太(福岡大学), 岩村 誠人(福岡大学)	23
102A2	粘弾性体を含むソフトロボットの高速かつ安定な動力学計算法の開発 ○平田 健登(福岡大学), 前田 能輝(福岡大学), 岩村 誠人(福岡大学)	27
102A3	マルチボディシステムの汎用的な力制御手法の検討 ○白 泳宙(福岡大学), 井手 俊佑(福岡大学), 岩村 誠人(福岡大学)	31
102A4	自律移動ロボットのための地図の更新手法 ○松岡 肇(福岡大学)	34
102A5	MRデバイスを用いた仮想空間と実空間のバイラテラル制御系の構築 ○桑原 聖貴(熊本大学), 松永 信智(熊本大学)	36
102A6	複数ロボットが連携する最短時間搬送同期制御問題の一定式化 ○松本 大輝(九州大学), 湯野 剛史(九州大学), 川邊 武俊(九州大学), 長山 森(日産自動車株式会社), 三輪 純敬(日産自動車株式会社)	38
103A1	PANOCによる非凸制約のある自動車の燃料消費最適制御 ○歐 鴻佳(九州大学), Themelis Andreas(九州大学), 湯野 剛史(九州大学), 川邊 武俊(九州大学)	40
103A2	半正定値計画問題の近似最適解の精度保証付き多倍長演算を用いた検証に関する一考察 ○吉山 裕朗(九州工業大学), 古賀 雅伸(九州工业大学)	42
103A3	逐次LMI化法のCAD実装 ○朱 九霖(九州工業大学), 瀬部 昇(九州工业大学)	46
103A4	協調型車間距離維持支援システムに対するリプレイ攻撃の相関関数による検出 ○松下 真也(大分大学), 大澤 豊(大分大学), 上野 尚平(大分大学), 末光 治雄(大分大学), 松尾 孝美(大分大学)	50
103A5	受動定理に基づく耐故障制御系のロバスト性について ○齋藤 華亦汰(熊本大学), 國松 穎明(熊本大学)	54
104A1	吊り上げ式歩行訓練装置のばね利用吊り上げ機構の製作 ○宮崎 隆誠(大分大学), 前崎 篤人(大分大学), 阿部 功(大分大学), 池内 秀隆(大分大学)	56
104A2	床反力センシング型立ち上がり補助装置へのマジックハンド機構の適用に関する検討 ○青野 将大(大分大学), 阿部 功(大分大学), 池内 秀隆(大分大学)	60
104A3	認知症診断への応用を目的とした脳波特徴解析システムの構築 ○藤松 孝浩(佐賀大学), 杉 剛直(佐賀大学), 後藤 和彦(東京都立産業技術高等専門学校), 松田 吉隆(佐賀大学), 後藤 聰(佐賀大学), 大石 文芽(三野原病院), 山崎 貴男(三野原病院)	64
104A4	シート型体振動計を用いた睡眠時の心拍数推定:精度改善のための特徴解析 ○池田 尚史(佐賀大学), 杉 剛直(佐賀大学), 松田 吉隆(佐賀大学), 後藤 聰(佐賀大学), 豊田 彩織(パナマウントベッド睡眠研究所), 木暮 貴政(パナマウントベッド睡眠研究所), 白川 修一郎(江戸川大学)	68
104A5	Ladder Variational Autoencoderを用いた動的心臓形状の特微量抽出 ○田 偉業(九州大学), 宮内 翔子(九州大学), 諸岡 健一(岡山大学), 倉爪 亮(九州大学)	72

104A6	マルチボディダイナミクスによるリクリーニング車椅子の摩擦低減機構の検討	74
	○井手 俊佑(福岡大学), 白 泳宙(福岡大学), 岩村 誠人(福岡大学)	
201A1	高調波磁化を用いた磁性ナノ粒子の固相・液相状態の識別	78
	○五藤 仁哉(九州大学), 山村 栄哉(九州大学), 圓福 敏二(九州大学), 吉田 敬(九州大学)	
201A2	組込式オプティカルフロー計測システムを利用した車両前方移動物の運動推定	81
	○尾崎 雅也(熊本大学), 山口 犀生(熊本大学)	
201A3	過去の情報を用いたQ-learning	83
	○大石 幸斗(九州大学), Vargas Danilo Vasconcellos(九州大学)	
201A4	単層フィードフォワード・ニューラルネットワークのモデル縮約と信頼性保証	86
	○藤井 達希(九州大学), 蛭原 義雄(九州大学)	
201A5	WebRTCを介した拡張現実による移動ロボットの遠隔制御	90
	○永江 快成(佐賀大学), 佐藤 和也(佐賀大学)	
201A6	マルチボディダイナミクスと深層学習を利用した自動車乗員身体制御モデルの構築	93
	○後田 功貴(福岡大学), 福田 智行(福岡大学), 岩村 誠人(福岡大学)	
202A1	台車と荷台の軌道最適化によるスタッカクレーンの残留振動抑制	97
	○福田 謙太(福岡大学), 赤星 雄太(福岡大学), 梁元 航大(福岡大学), 岩村 誠人(福岡大学)	
202A2	アームで結合された2台のドローンのマルチボディダイナミクス解析	101
	○財津 大翔(福岡大学), 新原 玄人(福岡大学), 岩村 誠人(福岡大学)	
202A3	ロボットモデル記述のためのUSDを拡張したファイルフォーマットの提案	105
	○井手 健吾(九州工業大学), 古賀 雅伸(九州工業大学)	
202A4	福祉車両の操縦支援システムにおける複合環境での視線分析	109
	○中村 怜央(熊本大学), 奥園 康太(熊本大学), 松永 信智(熊本大学)	
203A1	暗号化制御系への動的量子化器の適用と検討	111
	○近藤 晴人(熊本大学), 岡島 寛(熊本大学)	
203A2	入力振幅制約に基づくMIMO系に対する量子化制御系の設計	115
	○青木 郁弥(熊本大学), 岡島 寛(熊本大学), 松永 信智(熊本大学), 大城 裕貴(熊本大学)	
203A3	磁気ナノ粒子トモグラフィの逆問題解析手法における推定性能の向上	119
	○岡村 直樹(九州大学), 東野 光宇太(九州大学), 笹山 瑛由(九州大学), 吉田 敬(九州大学)	
203A4	FA調整型離散時間ガウシヤンプロセスモデルによる多段先予測とモデル予測制御	123
	○登 友也(鹿児島大学), 八野 知博(鹿児島大学)	
203A5	k-meansクラスタリングに基づく連続時間非線形システムのガウシヤンプロセス同定	125
	○西山 和宏(鹿児島大学), 八野 知博(鹿児島大学)	
203A6	ガウシヤンプロセスモデルによる離散時間Hammersteinシステムの二段階同定	127
	○田中 和樹(鹿児島大学), 八野 知博(鹿児島大学)	
204A1	フォーメーション変更を伴う協調搬送系のロバストな把持隊形の構成	129
	○村田 一陽(熊本大学), 宮崎 健太(熊本大学), 松永 信智(熊本大学)	
204A2	人混みにおける移動ロボットの最適な走行位置の探索アルゴリズム	133
	○山本 郁生(熊本大学), 松永 信智(熊本大学)	
204A3	畑の畝間の雑草を除草するクローラ型移動ロボット試作機の製作と検証実験	137
	○井立 晃太郎(崇城大学), 平 雄一郎(崇城大学)	
204A4	カメラを用いたマルチコプターの編隊飛行について	141
	○外本 賢暉(北九州市立大学), 岡田 伸廣(北九州市立大学), 外本 伸治(九州大学)	
204A5	床面カメラを用いた屋外移動車の自己位置推定	145
	○佐伯 透(久留米工業大学), 千田 陽介(久留米工業大学)	
204A6	グラフ理論を用いた障害物回避経路の探索とパーソナルモビリティによる実験	148
	○鈴鹿 真世(北九州市立大学), 永原 正章(北九州市立大学)	

[学生発表交流会]

発表番号	発表題目／発表者	ページ
101B1	伸縮式アームをもつ路面走行型打音検査ロボットの開発	150
	○水口 健史(宮崎大学)	
101B3	粒子フィルタを用いた歩行意図の推定と予測	151
	○福留 隆寛(宮崎大学)	
101B4	羽ばたき機構における翅の位置による飛行姿勢への影響の調査	152
	○岡部 光汰(宮崎大学)	
101B5	任意の場所へ投球可能な投球ロボットの開発	153
	○砥上 真久(宮崎大学)	
102B1	ボッチャ競技の支援を目的としたボール回収ロボットの開発	154
	○竹本 和馬(宮崎大学)	
102B2	適応性の向上を目的とした管内探査ロボットにおける移動モデルの提案	155
	○横山 大輝(宮崎大学)	
102B3	水上移動ロボットの旋回制御手法の提案	156
	○春日井 稔樹(宮崎大学)	

102B4	ロボット群における分散的移動制御手法	157
	○緒方 孝起(宮崎大学)	
103B1	気流可視化によるドローン間相互干渉の検証	158
	○上村 凌雅(九州大学)	
103B2	アクションカメラを用いたマーカ識別による移動ロボットの自律走行制御	159
	○下田 稔志(佐賀大学)	
103B3	Pure pursuit 法を用いた移動ロボットにおける滑らかな障害物回避手法の提案	160
	○築城 大知(九州大学)	
103B4	逐次LMI化法のCAD実装	161
	○朱 九霖(九州工業大学)	
104B1	協調型車間距離維持支援システムに対するウォーターマーリング信号によるリプレイ攻撃検出	162
	○大澤 豊(大分大学)	
104B2	適応オブザーバを用いた移動ロボットのオドメトリ較正	163
	○白鞘 真彦(大分大学)	
104B3	併進外乱のあるクアッドローターの位置制御	164
	○竹下 菜々子(大分大学)	
104B4	実験データを用いたCAM植物の信号分離	165
	○田中 俊介(大分大学)	
104B5	ワイヤレス給電制御システムの相互インダクタンス推定と最大効率制御	166
	○宮崎 恭寛(大分大学)	

スケジュール型 BA によって最適化された NC による自動車の操舵制御

Steering Control of Vehicle Using NC Optimized by Scheduled Bat Algorithm

琉球大学 ○藤澤太郎 中園邦彦 金城寛
Instruction for preparation of manuscript

Taro Fujisawa, Kunihiko Nakazono, Hiroshi Kinjo
University of the Ryukyus

Abstract: This paper proposes a neuro-controller (NC) for steering of vehicle system. The NC is optimized by scheduled Bat Algorithm (BA).

1. 序論

近年、自動運転技術は飛躍の一途を辿っており、今年ホンダから条件付き自動走行技術である「ホンダ・センシング・エリート」自動運転レベル3に達した車両が世界で初めて発売された。この車両は、渋滞時の低速運転や低速前走者と遭遇時に車線変更を行う機能などが実装されている。ヒューマンエラーを未然に防ぐ自動運転技術はこれから更に必要不可欠なものとなる。

本論文では、自動運転による安全性能向上、また、性能向上によって交通事故などのリスク軽減を開発の最大の目標としている。具体的には、コウモリアルゴリズム (Bat Algorithm: BA) 最適化による階層型のニューラルネットワークの制御器 (NC) を用い、あらかじめ設定された直線路面上にある車両等を避けながら走行する四輪自動車の自動操舵制御系を構築し、シミュレーションを通して検証を行う。このとき、BA の設計変数をスケジュール的に変化させ NC の制御性能を向上させる手法、スケジュール型 BA を提案し、本手法の有効性を検討する。

2. 操舵制御

2.1 四輪自動車モデル

四輪自動車モデルにおいて、車両のヨー角を θ 、車両の進行方向とのなす角を γ とし、車両速度を V 、車両の重心点 P の X 軸からの横変位を y 、左右前輪の車両前後方向に対してなす角である操舵角を δ 、前後車軸間距離を l_f と l_r とする。直線軌道を走行する四輪自動車モデルの条件を $\theta \ll 1$, $\gamma \ll 1$, $\delta \ll 1$ とすることで四輪自動車モデルは二輪等価自動車モデルとして扱うことができる。このモデルは後輪の操舵は行わず、車軸に関して左右の特性が対称であるものとする。このとき自動車モデルの運動方程式は式(1),(2)で表される¹⁾。ただし、 θ , γ については反時計回りを正とする。

$$m \frac{d^2y}{dt^2} + \frac{2(K_f + K_r)dy}{V} + \frac{2(l_f K_f - l_r K_r)}{V} \frac{d\theta}{dt} - 2(K_f + K_r)\theta = 2K_f \delta \quad (1)$$

$$\frac{2(l_f K_f + l_r K_r)dy}{V} + l \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{2(l_f^2 K_f + l_r^2 K_r)}{V} \frac{d\theta}{dt} - 2(l_f K_f - l_r K_r)\theta = l_f K_f \delta \quad (2)$$

ここで、 m は車両重量、 I はヨーイング慣性モーメント、 K_f , K_r は前輪後輪に作用するコーナリングパワーであり、タイヤ特性によって変化する定数である。

2.2 NC による制御系の構成

本論文では、NC を制御器として用いて、四輪自動車の操舵制御系を構築する。操舵制御系のブロック線図を Fig.1 に示す。ここで、目標値 $X^r = [y^r, \dot{y}^r, \theta^r]^T$ 、制御量 $X = [y, \dot{y}, \theta]^T$ とする。制御器である NC は、自動車の横変位 y と速度 \dot{y} 、ヨー角 θ とそれぞれ 3 つの目標値との偏差を入力とし、自動車モデルの操舵角 δ を出力する。NC の構造は入力層 3 個、中間層 8 個、出力層 1 個の 3 階層型である。

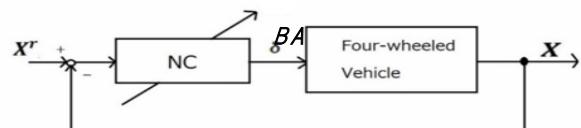


Fig. 1 Control system for four-wheeled vehicle

2.3 コウモリアルゴリズム (BA) による NC 最適化

BA は、2010 年に Xin-she Yang によって提案された最適解探索アルゴリズムである²⁾。本論文では、NC を最適化する際に BA を適用する。以下の手順に従って、NC を最適化していく。

BA による時刻tのコウモリの位置は、NC の結合重みとする。全てのコウモリの位置から操舵制御のシミュレーションを実行し、NC の各個体の評価値を求め、最良コウモリの位置と評価値を保存する。コウモリの位置は次の 3 つの方法で更新する。最良のコウモリへ向かって移動する場合、良いコウモリの近傍に向かう場合、ランダムに移動する場合の 3 つの方法である。これらの 3 つの飛行より評価値を算出し、最も良好な評価値の飛行を選択する。また、全個体群の中で最良の評価値を保存し、この過程を 1 世代とする。このとき、1000 世代繰り返すことを終了条件とする。ここで、時刻tとは世代を示している。

2.4 BA の評価関数

評価関数 E が最小となるように BA の最適化を行うとき、次のような評価関数を設定する。

$$E = E_y + E_\theta \quad (12)$$

$$E_y = \int_0^T (y^r - y)^2 dt \quad (13)$$

$$E_\theta = \int_0^T (\theta^r - \theta)^2 dt \quad (14)$$

ここで、 T は制御時間である。

2.5 スケジュール型 BA の設定

本論文では、スケジュール型 BA を提案する。BA の設計変数の 1 つ式(15)で示す周波数上限値 f_{max} をあらかじめ設定したスケジュールに従い変更し、進化過程で NC の制御性能を示す評価値が向上していくのかを検証する。このとき、設計変数を固定した従来型の BA との比較を行う。スケジュール型 BA は 1 世代から 100 世代、101 世代から 500 世代、501 世代から 1000 世代までの 3 段階に $f_{max} = 0.3, 0.9, 0.1$ と変更する。

$$f = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) \times rand(0,1) \quad (15)$$

ただし、 f_{min} は周波数の下限値、 $rand(0,1)$ は 0~1 の実数乱数を生成する関数である。

3. シミュレーション結果

従来法と、スケジュール型の BA 最適化による NC の進化過程の様子を Fig.2 に示す。BA 最適化した NC を用いて走行制御した NC の制御性能評価を Table 1 に示す。

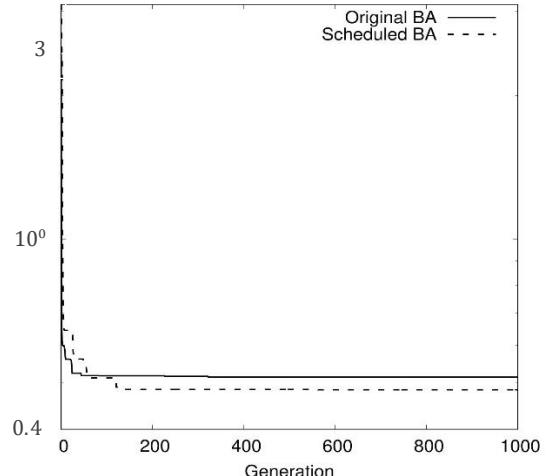


Fig.2 Evolution processes

Table 1 Control performance

	E	E_y	$E\theta$
Original BA	0.514423	0.028554	0.485868
Scheduled BA	0.483813	0.089103	0.39471

表中、各試行で評価値の 3 つの要素で最小になったものを太字で記している。Fig.2 より進化過程においてスケジュール型 BA は従来型 BA の結果と比べ良好であることが分かる。また、Table 1 からスケジュール型 BA は全体の評価値が良好なことが分かる。しかし、位置偏差による評価値 E_y において従来型 BA より評価値が低いことが分かる。

4. 結論

本論文では、スケジュール型 BA を用いて NC を最適化し、四輪自動車の自動操舵制御系を設計する方法を提案した。従来型の BA との比較実験を通じ、スケジュール型 BA は評価値の収束性において良好な制御性能を示すことが分かった。

今後の課題として、周波数上限値 f_{max} と変更を行う世代の関係について調整を行い、世代の各区間の周波数上限値 f_{max} の最適な数値を求めていく。

参考文献

- 1) 安部正人, 自動車の運動と制御, 山海堂 (2003), pp49-61
- 2) X.S Yang, "A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm", Nature Inspired Cooperative Strategies for: Optimization (NICSO 2010), Studies in Computational Intelligence, Vol.284(2010), pp.65-74
- 3) 大谷紀子, 進化計算アルゴリズム, オーム社 (2018) ,pp138-153

GA学習によるニューロ制御器を用いた海洋ロボットの位置制御

琉球大学大学院 ○石川大貴, 山田桃也
琉球大学工学部 金城寛, 中園邦彦, 上里英輔

Position control of marine robot using neuro-controller by GA learning

Daiki Ishikawa and Toya Yamada, Graduate school of University of the Ryukyus

Hiroshi Kinjo, Kunihiko Nakazono and Eiho Uezato, Faculty of Engineering, University of the Ryukyus

Abstract: This paper describes the position control of an underwater robot equipped with a neuro-controller trained by using a genetic algorithm. The underwater robot can be placed at any position with a neuro-controller to reach the origin, and the simulation is shown.

1. 緒言

近年では日本海近海の水産資源、石油、天然ガスや鉱石、レアメタルが注目されており、他にもメタンハイドレートなどの新しいエネルギー資源も存在する。しかし、海洋環境での資源調査は人間にとて難しい。その他、災害の対応や、まだ謎の多い海底の調査をするため、自律型無人潜水機 (Autonomous Underwater Vehicle, 以降AUVと略記する) の開発が日々行われている。本研究では過去に研究室で製作された簡易的なAUVの制御器を基礎に新たな制御器を設計する。この制御器は遺伝的アルゴリズム（以降GAと略記する）を用いて進化学習するニューロ制御器とする。

2. AUV機体

AUVのモデルについて述べる前に、本研究で用いられる2つの座標系と座標系の変換について記述する。AUVは通常、左右対称に設計されており、 x 軸、 z 軸をこの対称面内にとり、 x 軸は前方を、 z 軸は下方を、また y 軸は進行方向に向かって右方をそれぞれ正の方向とする。これを機体固定座標系とする。次にAUVの姿勢を定義するには、機体固定座標系の他に空間に固定した座標系をもう1つ導入し、これに対する動座標系の位置と向き

を定義することが必要になる。このため、地面に固定した座標系 X , Y , Z を導入する。地面固定座標系は直交右手系をなすものとし、 Z 軸は鉛直下向きを正にとり、 X 軸はAUVの水平速度の方向を正とする。 Y 軸は X 軸方向に対して右を正とする。

二つの座標系をFig. 1に示す。

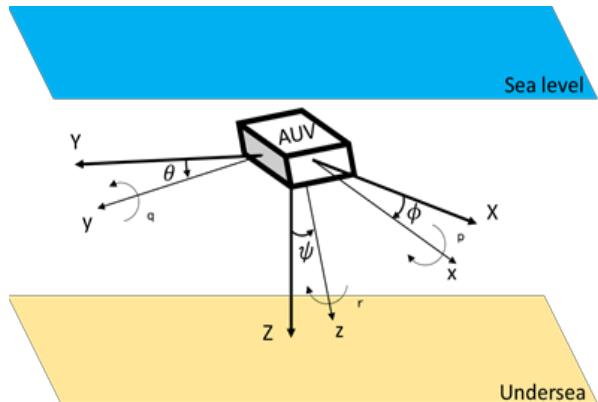


Fig. 1 Absolute coordinate system and AUV coordinate system.

AUVの姿勢は、地面固定座標系に対する機体固定座標系の向きとして、オイラー角を用いて定義する。 x 軸と X 軸の角度を ϕ とする。 y と Y の角度を θ とする。 z 軸と Z 軸の角度を ψ とする。



Fig. 2 Photograph of AUV.

Fig.2にAUVを示す。

モデルベースのコントローラを設計するためにはAUVの運動モデルが必要である。以下に本研究での制御対象の運動方程式を示す。また、紙面の都合上 $S(*) := \sin \theta$, $C(*) := \cos \theta$ と表記しており、 E^T はEの転置行列を表している。

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E^T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \phi \\ 0 & 0 & 0 & \sin \theta \sec \phi & \cos \theta \sec \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$E = \begin{bmatrix} C_{(\theta)}C_{(\phi)} & C_{(\theta)}S_{(\psi)} & -S_{(\theta)} \\ S_{(\phi)}S_{(\theta)}C_{(\psi)} - C_{(\phi)}S_{(\psi)} & S_{(\phi)}S_{(\theta)}S_{(\psi)} + C_{(\phi)}C_{(\psi)} & S_{(\phi)}C_{(\theta)} \\ C_{(\phi)}S_{(\theta)}C_{(\psi)} + S_{(\phi)}S_{(\psi)} & C_{(\phi)}S_{(\theta)}S_{(\psi)} - S_{(\phi)}C_{(\psi)} & C_{(\phi)}C_{(\theta)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} & 0 & 0 & 0 & z_G & 0 \\ 0 & \frac{1}{m} & 0 & z_G & 0 & x_G \\ 0 & 0 & \frac{1}{m} & 0 & x_G & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{I_x} & 0 & 0 & 0 & m \times \frac{z_G}{I_x} & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_y} & 0 & m \times \frac{z_G}{I_y} & 0 & m \times \frac{x_G}{I_y} \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_z} & 0 & m \times \frac{x_G}{I_z} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \\ \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ただし、 u, v, w, p, q, r は、 x, y, z 軸方向速度[m/s], x, y, z 軸回りの角速度[rad/s]である。その他の変数を以下に示す。

$F_* : x, y, z$ 軸方向外力[N]

$M_* : x, y, z$ 軸回りのモーメント[N · m]

m ：機体の質量[kg]

I_* ：慣性モーメント[kg · m²]

$(x_G, 0, z_G)$ ：重心座標[m]

$(x_B, 0, z_B)$ ：浮心座標[m]

3. ニューロ制御器の構造

Fig.3にAUVの制御系を示す。ここで、目標姿勢 $D=(X^r, Y^r, Z^r, \phi^r)$ と現在姿勢 $C=(X, Y, Z, \phi)$ の差がニューロ制御器への入力となっており、GAによって進化学習を行う構造になっている。

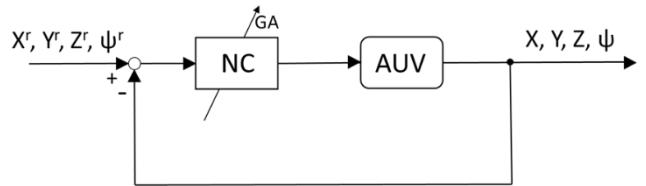


Fig. 3 AUV control system.

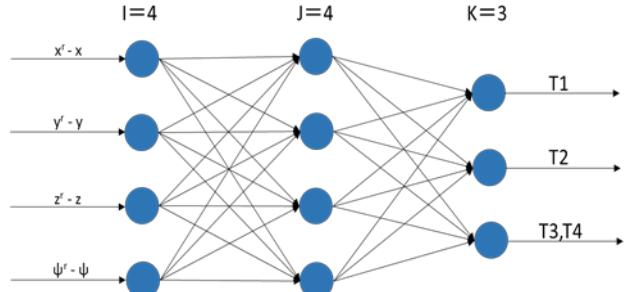


Fig. 4 Neuro-controller.

ニューロ制御器はFig.4に示すような階層型ネットワークを用いる。中間層ニューロンの活性度関数としてはシグモイド関数を用いる。

4. GAによるニューロ制御

GAによるニューロ制御の学習アルゴリズムを以下に示す。

Step1:一定数のNCを乱数で発生させる。

Step2:NCを用いて一定時間はロボットを動かし一定時間は止めようとする制御シミュレーションを行い、NCの性能を評価する。

Step3:NCの制御性能評価に基づいて、その一定数のNCの中から親NCを選択する。また、親NCの結合重みを用いて遺伝子操作により子NCを生成する。

Step4:子のNC集団に対して同様の制御シミュレーションを行い、制御性能を評価する。

Step5:親NC集団と子NC集団を合わせたNCの制

御性能評価による並び替えを行い、制御評価の低いNCを淘汰する。

Step6:一定数の世代交代を行えば終了、そうでないときはStep3の処理へ戻る。

NCの評価関数は目標値の座標と現在位置の座標の二乗誤差とx軸、y軸、z軸の速度の二乗の総和を t_1 から t_2 の間積分し、パターン数でさらに足したもので次式(5)のように表される。また、GA学習のパラメータをTable 1に示す。

$$E = \sum_{P=1}^P \int_{t_1}^{t_2} \{Q1(X^r - X)^2 + Q2(Y^r - Y)^2 + Q3(Z^r - Z)^2 + Q4(\psi^r - \psi)^2 + Q5u^2 + Q5v^2 + Q5w^2\} dt \quad (5)$$

Table 1 Learning parameter.

Population	50
Number of offspring	30
Generations	1001
Selection scheme	Roulette wheel
Blend crossover α	0.9
P	5
t_0	0
t_1	10
t_2	15
Q_1	1.0
Q_2	1.0
Q_3	1.0
Q_4	1.0
Q_5	1.0

ロボットは t_0 から t_2 の期間移動するがGAの評価は t_1 から t_2 の期間姿勢で評価される。

5. 数値実験

本研究ではTable 2に示す各象限の S^1 から S^4 のそれぞれの初期位置から目標位置D（原点）まで

Table 2 Initial attitudes.

S^p	(X, Y, Z, ϕ , θ , ψ)
S^1	(5.0, 5.0, 2.0, 0.0, 0.0, 0.0)
S^2	(5.0, -5.0, 2.0, 0.0, 0.0, 0.0)
S^3	(-5.0, -5.0, 2.0, 0.0, 0.0, 0.0)
S^4	(-5.0, 5.0, 2.0, 0.0, 0.0, 0.0)
D	(0.0, 0.0, 1.0, 0.0, 0.0, 0.0)

の学習のシミュレーションを行った。全象限でそれぞれ学習したAUVの軌跡をFig. 5に示す。

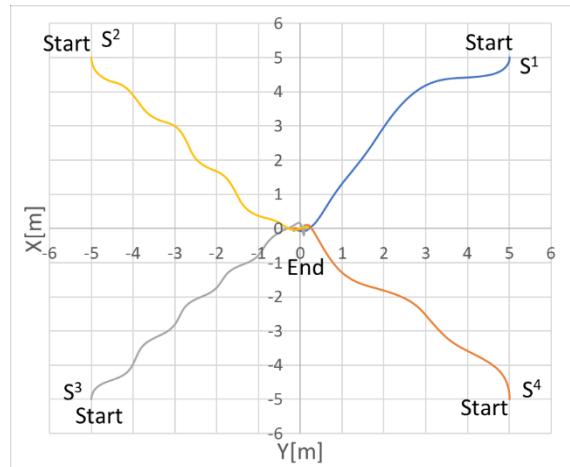


Fig. 5 AUV trajectories.

ここで、第一象限について説明する。GAの評価に用いるロボットの学習は S^1 を中心として (X, Y) それぞれ ± 0.2 ずつずらした初期位置からの $P=5$ の多点学習とする。

Table 3 Initial attitudes for multipoint learning.

S^p	(X, Y, Z, ϕ , θ , ψ)
S^5	(5.2, 5.2, 2.0, 0.0, 0.0, 0.0)
S^6	(4.8, 5.2, 2.0, 0.0, 0.0, 0.0)
S^7	(4.8, 4.8, 2.0, 0.0, 0.0, 0.0)
S^8	(5.2, 4.8, 2.0, 0.0, 0.0, 0.0)

GA学習は初期乱数の値を変えて20試行行った。そのときの評価関数Eの平均値及び最良値をFig. 6に示す。

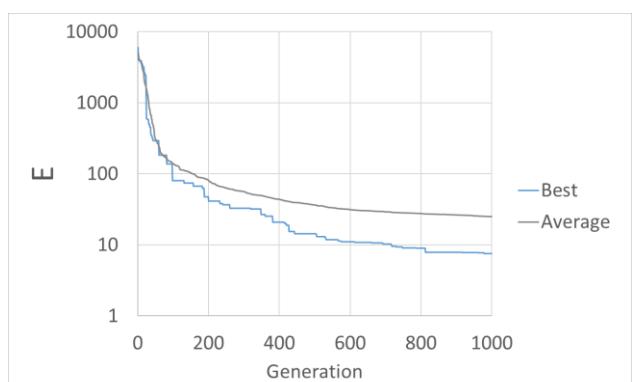


Fig. 6 Learning curve.

学習させたニューロ制御器を使い、15秒間シミュレーションした。そのときの結果がFig. 5の第一象限 (S^1) である。また、Fig. 7~Fig. 10にロボットのXY軸、Z軸、 ϕ 、スラスターT1、T2の出力を示す。

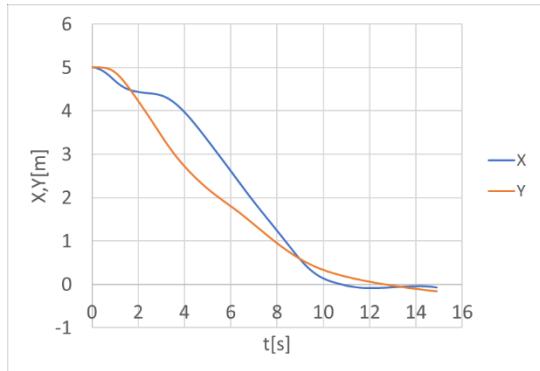


Fig. 7 X, Y coordinates.

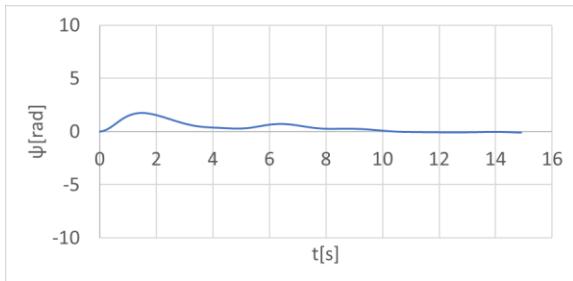


Fig. 8 Z coordinates.

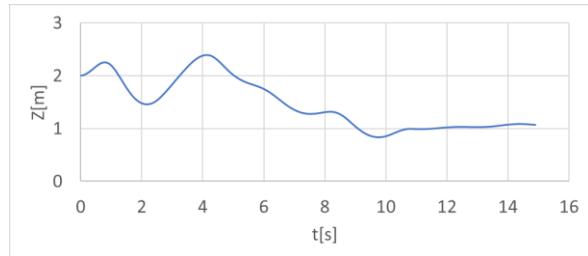


Fig. 9 ϕ coordinates.

他の象限の場合も同様に5点学習でニューロ制御器を作成した。

6. 考察

Fig. 5よりどの象限から動かしてもGA学習させたロボットは目標位置である原点に到達していることがわかる。だが、目標位置に着くまでに蛇行しているものがあることもわかる。

第一象限の S^1 からスタートさせた Fig. 7~Fig. 10より、学習させた0~10秒のときには目標位置に

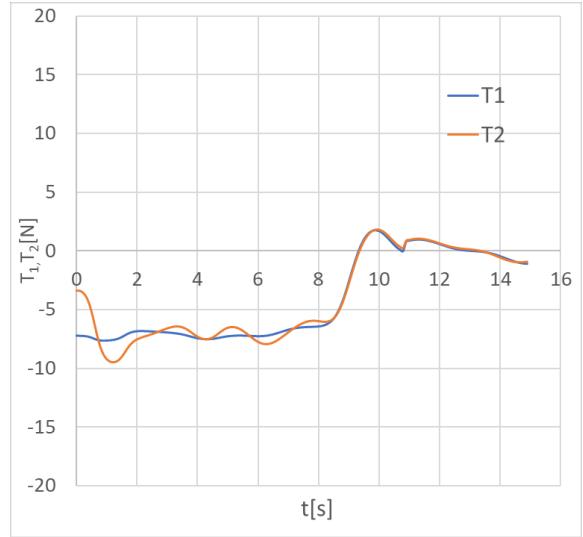


Fig. 10 Thruster input T1, T2.

ほぼたどり着くように動いていることがわかる。

7. 結言

本研究では遺伝的アルゴリズムを用いて進化学習が行われるAUVのニューロ制御器を構築した。構築したニューロ制御器を用いることで、各象限別々に学習させたものであれば、正しく目標位置にたどり着くことがわかった。今後は別々に学習させていなくても正しく目標位置にたどり着くように改良する必要があると考えられる。

参考文献

- (1) 金山佳広, 金城寛, 中園邦彦, 上里英輔, 「GA学習のニューロ制御器による海洋ロボットの運動制御」, 令和元年度電気学会電子・情報・システム部門大会, MC3-2, pp.920-923, 2019
- (2) 「小型AUV”MR-X1”」のスラスターによる運動制御」, 仲村昌彦, 百留忠洋, 吉田弘, 青木太郎, 日本船舶海洋工学論文集 第9号, pp.139-153, 2009
- (3) 金井喜美雄, 越智徳昌, 川邊武俊, 「ビーグル制御 一航空機と自動車一」, 横書店, pp.45-57, 2004
- (4) 中山司, 「流体力学—非圧縮性流体の流れ学ー」, 森北出版, pp.206-207, 2013
- (5) 田中敏幸, 「数値計算法基礎」, コロナ社, pp.99-106, 2006

ファジィ制御と PID 制御を組み合わせた海洋ロボットの制御シミュレーション

琉球大学大学院 ○山田 桃也

琉球大学工学部 金城寛, 中園邦彦, 上里英輔, 大城尚紀

Control Simulation of Marine Robot Using Fuzzy and PID Control

Toya Yamada, Graduate school of University of the Ryukyus

Hiroshi Kinjo, Kunihiko Nakazono, Eiho Uezato and Naoki Oshiro Faculty of Engineering, University of the Ryukyus

Abstract: Marine robots are used to investigate organisms, structures, and resources in the sea and on the ocean floor. In this paper, controller for marine robot is fabricated by combining Fuzzy control and PID control, and the results of simulation are described.

1. 緒言

日本は海に囲まれた島国でありその国土は約 6800 個以上の島々からなる海洋国家である。その周囲の海底には海底鉱床が発見されメタンハイドレートをはじめとする資源が埋蔵しているといわれている。また、特に沖縄県は亜熱帯の島嶼県であるため周囲の海域にはサンゴ礁や沖縄固有の生物が生息している。そのため、海中や海底の調査のニーズは高まっている。しかし、海中は地上と比べて過酷な環境であり人間が直接調査をするのが難しい。また、海底調査はまだ技術的な側面からコストが大きく採算が取れないといった課題がある。そのため海中を調査するには安価な海洋ロボットの開発が必要であります。いくつかある海洋ロボットの中でも特に人件費や経済的に優位である自律型海洋ロボット(AUV : Autonomous Underwater Vehicle)の開発が求められている。本研究はシミュレーションを通して AUV の制御器の開発を目的としている。

2. AUV 機体の概要

座標系を以下の Fig.1 に示す。座標系は機体固定座標と地面固定座標からなり、機体固定座標は機体の重心を原点とし、機体の前方方向を x 軸、機体の右方向を y 軸、機体鉛直下方方向を z 軸とする。機体の回転角度はオイラー角で表し φ, θ, ψ

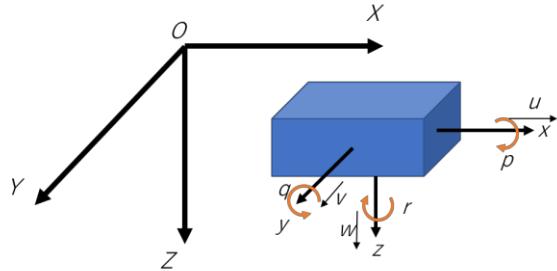


Fig. 1 Coordinate system.

とする。また、 x, y, z 軸方向速度を u, v, w とし、 x, y, z 軸回りの角速度を p, q, r とする。地面固定座標は機体固定座標と同様の向きに X, Y, Z 軸をとる。

今回のシミュレーションで想定する AUV の機体の概要図を Fig.2 に示す。この機体は 10kg 程度の小型のものとしており移動用に 4 つのスラスターが搭載されている。スラスターは前進、後退用の水平スラスターを 2 個、上昇、下降用の垂直スラスターを 2 個となっている。この機体には方向舵を搭載していないため横方向の移動は前進、後退用のスラスターの推力差で行う。制御を簡単にするために上昇下降用のスラスターの推力差は常に零とし x 軸、 y 軸回りの回転はしないものとする。

機体の運動方程式は以下の通りである。

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E^T & 0 & 0 & 0 & u \\ 0 & 0 & 0 & 0 & v \\ 0 & 0 & 0 & 0 & w \\ 0 & 0 & 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & 0 & 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & 0 & 0 & \sin \phi \sec \theta & \cos \phi \sec \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$E = \begin{bmatrix} C\theta C\psi & C\theta S\psi & -S\theta \\ S\psi S\theta C\psi - C\phi S\psi & S\phi S\theta S\psi + C\theta C\psi & S\phi C\theta \\ C\phi S\theta & C\phi S\theta S\psi - S\phi C\psi & C\phi C\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} m + A_1 & 0 & 0 & mz_g & 0 \\ 0 & m + A_2 & 0 & -mz_g & 0 \\ 0 & 0 & m + A_3 & 0 & -mx_g \\ 0 & -mz_g & 0 & I_x + A_4 & 0 \\ mz_g & 0 & -mx_g & 0 & I_y + A_5 \\ 0 & mx_g & 0 & 0 & I_z + A_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

ただし、 m , I , F , M , A , x_g , z_g はそれぞれ機体質量、慣性モーメント、力、モーメント、付加質量、機体重心のx座標、z座標である。また、 $S\phi, S\theta, S\psi, C\phi, C\theta, C\psi$ はそれぞれ $\sin \phi, \sin \theta, \sin \psi, \cos \phi, \cos \theta, \cos \psi$ である。スラスタの推力と力の関係は T_1, T_2 が F_x に、 T_3, T_4 が F_z に対応している。(3)式右辺の詳細については参考文献[1]-[3]を参照されたい。

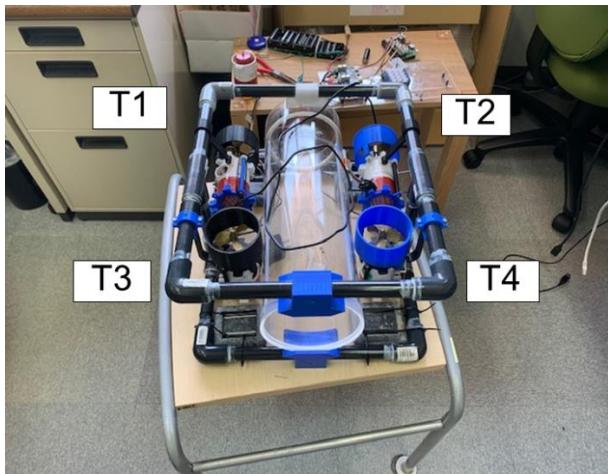


Fig. 2 Photograph of AUV.

3. 制御系

ここでは地面固定座標の原点に置かれた AUV を任意の位置へ移動させる制御を考える。制御系の概要図を Fig.3 に示す。この制御系は目標位置への角度に機体の向きを合わせた後に機体を目標位置へ移動させるものとしている。回転は PID 制御で行い、推進移動はファジィ制御で行う。制御系概要図の S の切り替え規則については Table 1 に示す。目標位置までの角度の誤差が ± 0.0001 rad を超えるか角速度が ± 0.0001 rad/s より大きい場合は PID 制御を行い、角度調節をする。ただしこれは最初の 1 回のみ行い、機体が進み出したあ

とはこの操作は行わない。PID 制御については比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲインをそれぞれ 5, 1, 5 としている。ファジィ制御は直進については現在位置から目標位置までの距離の差と機体速度からスラスタの推力 T_1, T_2 を求め、角度調節は目標角度と現在角度との差から右スラスタ T_1 と左スラスタ T_2 との差分 ΔT を求めて T_2 に加える。メンバシップ関数は Fig.4 のような 3 つの三角型のものとする。進行方向の制御に関するファジィルールを次のように示す。

$$\text{If } \Delta D \text{ is NB and } u \text{ is NB then } T_1 \text{ is NB.} \quad (4)$$

これ以降のファジィルールは Table.2 と Table.3 に示す。なお、以下の表は PB(Positive Big), Z(Zero), NB(Negative Big)と表す。また、 $\Delta D = \sqrt{X^r - X^s} - \sqrt{Y^r - Y^s}$, $\Delta \psi = \psi^r - \psi^s$ とする。Z 方向の制御は機体の特性上 XY 方向とは独立して P 制御で行うものとし、Z 方向に対する比例ゲインは 2 としている。推力の上限はどのスラスタも ± 8.0 N としている。

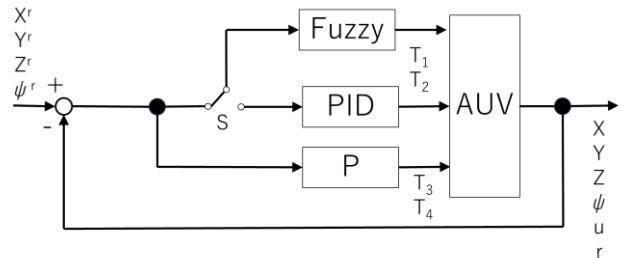


Fig. 3 Control system.

Table 1 Fuzzy or PID selection rules.

Fuzzy	When it is not PID
PID	$ \Delta D \geq 0.0001$ or $ r \geq 0.001$ (Only once)

Table 2 Fuzzy rules for straight line (T_1, T_2).

		u		
		NB	Z	PB
ΔD	NB	NB	NB	NB
	Z	PB	Z	NB
	PB	PB	PB	PB

Table 3 Fuzzy rules for angle adjustment
in straight line (ΔT).

		r		
		NB	Z	PB
$\Delta \psi$	NB	NB		
	Z	PB	Z	NB
	PB	PB		

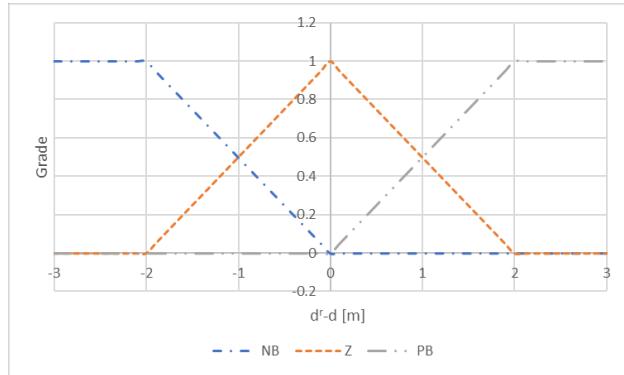


Fig. 4 Membership function for position in straight line.

4. シミュレーション実験

今回の研究でのシミュレーションは地面固定座標の原点から制御を開始し、以下の Table 4 のような目標位置に機体を移動させるようなものとする。また、目標位置を XY 平面について表したものが Fig.5 である。ただし、Z 軸の初期位置は 1.0 m とする。

Table 4 Initial and desired positions.

	No.	X [m]	Y [m]	Z [m]
Initial position	0	0.0	0.0	1.0
Desired position	1	10	10	5.0
	2	20	-10	5.0
	3	-10	30	5.0

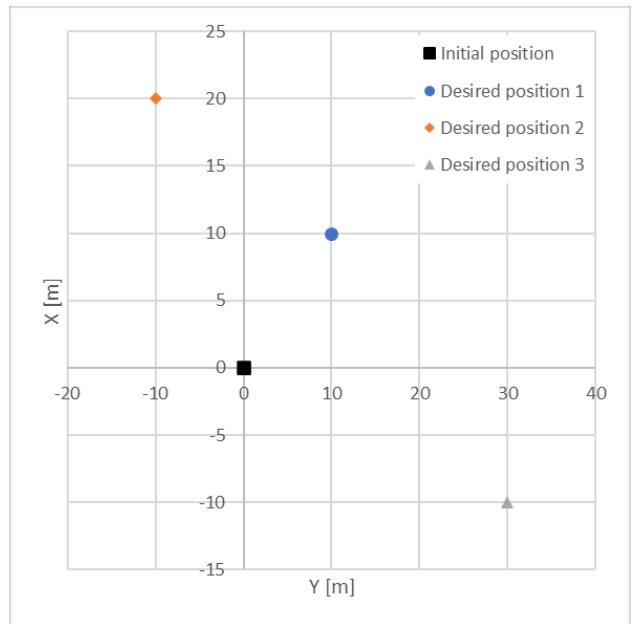


Fig. 5 Initial and desired positions in XY plane.

5. シミュレーション結果

シミュレーションの結果を以下の Fig.6 に示す。

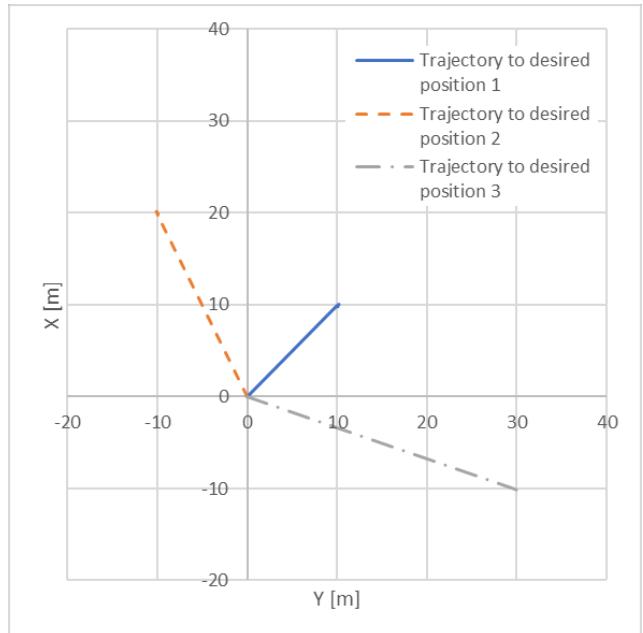


Fig. 6 Control trajectories in XY plane.

目標位置が $X^r = 10$ m, $Y^r = 10$ m, $Z^r = 5.0$ m のときの位置、角度、速度、角速度の状態について示した図が Fig.7 である。また、そのときの推力の状態を示したものが Fig.8 である。

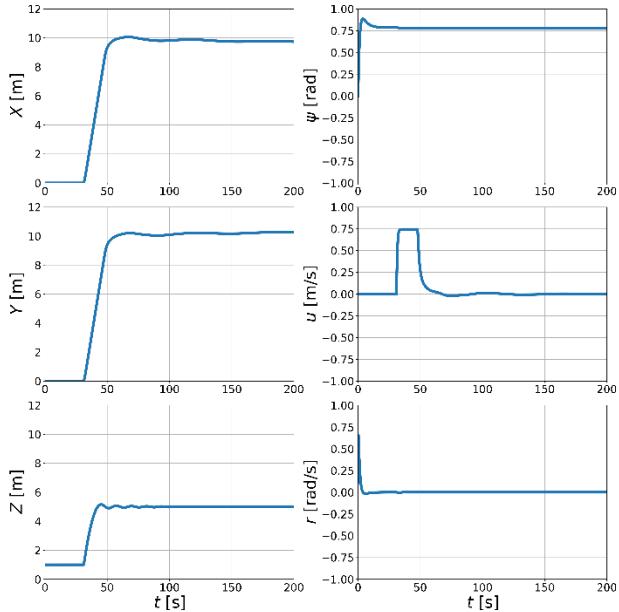


Fig. 7 Position, angle, velocity, and angular velocity for desired position 1.

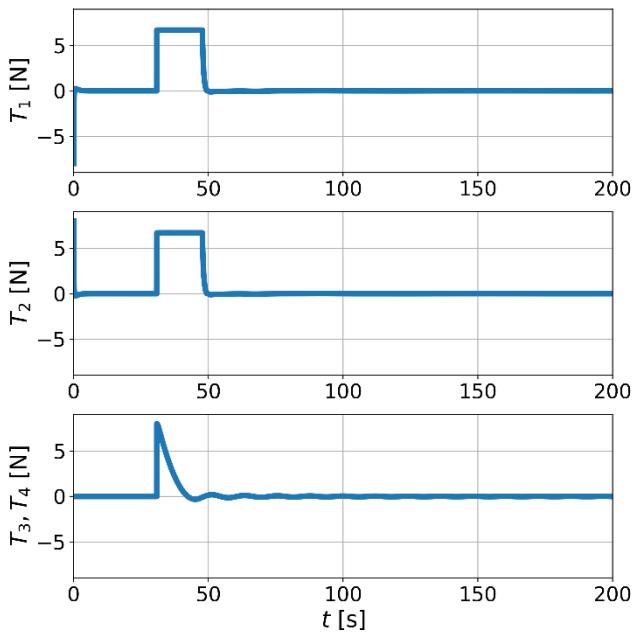


Fig. 8 Thruster input for desired position 1.

6. 考察

結果の Fig.6 より、どの場合も目標位置の近傍に到達していることがわかる。これは初期位置から目標位置までの角度を合わせてから直進させているためであるとみられる。しかし、目標位置に近づいた後そこで静止せず目標位置から 0.2m 程度ずれた位置に移動している。これはファジィ制御に切り替わったあと角度調節を行っているため角速度が発生しそれが位置決めのときに影響を及ぼしているためであると考えられる。

7. 結言

今回は目標位置までの制御を PID 制御とファジィ制御を組み合させてシミュレーションを行った。その結果目標位置に近づくことができた。今後はファジィ制御のメンバシップ関数の数を増やすことやメンバシップ関数の傾きの改善が必要になるとみられる。

8. 参考文献

- [1] 中村昌彦, 百留忠洋, 吉田弘, 青木太郎, 「小型 AUV”MR-X1” のスラスターによる運動制御」, 日本船舶海洋工学論文集 第 9 号, pp.139-153, 2009
- [2] 中村昌彦, 百留忠洋, 吉田弘, 石橋正二郎, 青木太郎, 「小型 AUV”MR-X1” の測線上航走性能向上に関する研究」, 日本船舶海洋工学会論文集第 12 卷, pp.165-173, 2010
- [3] 中村昌彦, 石橋正二郎, 百留忠洋, 吉田弘, 青木太郎, 「小型 AUV”MR-X1” の実海域試験」, 日本船舶海洋工学会論文集第 14 卷, pp.143-150, 2011
- [4] 金山佳広, 金城寛, 中園邦彦, 上里英輔, 「GA 学習のニューロ制御器による海洋ロボットの運動制御」, 令和元年度電気学会電子・情報・システム部門大会, MC3-2, pp.920-923, 2019
- [5] 金井喜美雄, 越智徳昌, 川邊武俊, 「ビーグル制御 一航空機と自動車一」, 槇書店, pp.45-57, 2004
- [6] 中山司, 「流体力学 – 非圧縮性流体の流れ学 – 」, 森北出版, pp.206-207, 2013
- [7] 寺野寿郎, 浅居喜代治, 菅野道夫, 「ファジィシステム入門」, オーム社, pp.149-158, 1987
- [8] 菅野道夫, 「ファジィ制御」, 日刊工業新聞社, pp.74-84, 1988
- [9] 安信誠二, 「ファジィ工学」, 昭晃堂, pp.40-76, 1991
- [10] 田中敏幸, 「数値計算法基礎」, コロナ社, pp.99-106, 2006
- [11] 佐藤和也, 平元和彦, 平田研二, 「はじめての制御工学」, 講談社, pp.113-128, 2010

バレーボール競技における動画の自動編集

熊本大学 ○末吉紘大, 岡島寛, 伊藤優希

Automatic Editing of Video in Volleyball Games

Kodai Sueyoshi, Hiroshi Okajima, and Yuki Ito, Kumamoto University

Abstract: In this paper, we construct a system for automatically editing volleyball videos. We propose a method to automatically generate high quality video from video captured by fixed-point cameras. This method eliminates the need for cameramen and editors, and provides viewers with high quality video at low cost. In addition, since the video is shot by a fixed-point camera and edited later, the video can be edited depending on each viewer's preference. We use Receding Horizon control as a powerful design method for the system to edit the video. The Receding Horizon control, which uses information from the past and the future, allows us to automatically edit the video taken by the fixed-point camera to a high quality.

1 はじめに

バレーボール競技における映像を作成する場合、プロ競技の試合においては専門のカメラマンや編集者によって撮影、編集された高品質な映像を提供することができる。しかし、学生の大会などアマチュア競技の試合においては予算を十分に費やすことができないため、カメラワークや編集を伴う高品質な映像を提供することは困難である。そこで、アマチュア競技の試合でも、視聴者にとって満足度の高い映像を提供するため、低成本で高品質な映像を作成する手法を検討する。

先行研究 [1] では、テレビ番組の「ピタゴラスイッチ」で知られるピタゴラ装置を、定点固定カメラを用いて撮影し、その動画像に Receding Horizon 戦略 (RH 戦略) による仮想的なカメラワーク処理を施して、高品質な動画像へと自動で再構成する手法を提案している。実際に、固定カメラで撮影された映像から動体を検出し、動体を追跡する仮想的なカメラワーク処理を施して動画像を自動で再構成している。

また、先行研究 [2] では、演奏風景を定点固定カメラで撮影し、RH 戦略による仮想的なカメラワーク処理を施して、自動で再構成する手法を提案している。この手法では、カメラマンや編集者による撮影および編集が不要となることから、低成本で映像を作成することが可能となる。実際に、固定カメラで撮影された映像に演奏者の画角切替を行う仮想的なカメラワーク処理を施して動画像を自動で再構成している。

本稿では、RH 戦略を用いた動画像の自動再構成を、バレーボールの競技動画像にも適用することを考える。この研究はバレーボールに限らず、プレーの範囲がある程度限られているスポーツの競技動画像に対して適用できる。バレーボールの競技動画像を手動で編集する場合、多くの選手がコート内を複雑に動き回るため、

各時刻のフレーム毎でどのような視点からの映像を使用するか検討しなければならない。また、バレーボールは一試合の時間も長く、編集にかなりの労力を伴う。そのため、RH 戦略によって自動で編集することができれば、労力やコストを抑えつつ視聴満足度の高い映像を作成することが出来ると期待される。

2 バレーボール競技における編集の問題設定

定点固定カメラを用いて撮影した動画像を基に視聴満足度の高い動画像を作成する上で、バレーボール特有の編集時のポイントについて検討する必要がある。本章では、バレーボールの映像に対する視聴者の目的と、編集の方針との関係について考える。

2.1 各視点からの競技動画像

本研究では、バレーボールの試合風景を Fig. 1 のように、計三個の定点固定カメラを用いて撮影を行った。

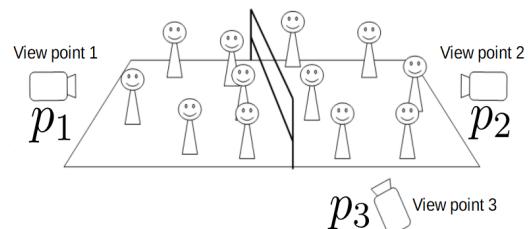


Fig. 1: Sports performance video by fixed cameras

また、Fig. 2 に実際の各視点からの映像を表示している。それぞれを視点 1 (p_1)、視点 2 (p_2)、視点 3 (p_3) とする。

2.2 本研究における編集方針

2.1 節で説明した視点で撮影した映像を視聴満足度の高い映像へと編集するまでの編集方針について以下で検討する。



(1)View point1 (2)View point2 (3)View point3

Fig. 2: Images from each perspective

2.2.1 リプレイシーンの挿入

テレビ等で配信されているバレーの映像に注目すると、得点を決めた直後にそのシーンのリプレイが流れることがある。そこで、バレーの映像を作成する上で、得点シーンのリプレイは必要であると考えた。本研究では得点シーンを検出してその後にそのシーンをリプレイとして流すことで、視聴満足度の高い映像となると考えられる。

2.2.2 視聴者の目的に合わせた映像の切り替え指針

2.2.1節で説明したリプレイシーンの挿入を各視点の映像で行い、それらの映像を組み合わせて新たな映像を作成する。

作成する映像の方針として、各視点の映像のうちどの視点の映像を選択するかを、視聴者一人一人の目的に合わせて選択し、映像を作成できるようにすることを考える。これは視聴者によって映像を視聴する目的が異なるからである。そこで、一般的に視聴者はどのような目的でバレーの映像を視聴しているかを検討する必要がある。

例えば、本研究の映像において視聴者が白いユニフォームのチームを応援したい場合、よりそのチームに近い視点1の映像を多く映すべきである。このようにどちらのチームに注目しているかという点は編集時に必要な項目であり、それに応じてどの視点の映像を多く映すかを選択できるようにする必要がある。

また、オフェンスかディフェンスのどちらのプレーに注目したいかということも視聴者によって異なる。とあるアタックで得点するシーンでも、視点によってはアタックを打つ選手が鮮明に映る視点もあれば、見えにくくなる視点もある。これはレシーブでも同様である。そこで、オフェンスかディフェンスのどちらのプレーに注目するかの目的に合わせて、注目しているプレーがより鮮明に映る視点を選択できるようにする。

他にも、オフェンスやディフェンス問わずプレーを行う選手がより大きく映っている視点を選択したり、視聴しづらい映像にならないようにシーンの切り替わりの頻度を抑えたりといった、視聴者の目的に沿うだけでなく、バレーの映像としての基本的な見やすさにも考慮して自動編集される必要がある。

3 リプレイシーンの挿入における画像処理

第2章で述べたリプレイシーンの挿入された映像を作成するために画像処理を用いて得点シーンを検出する。本章では、画像処理による得点シーンの検出を行い、リプレイとして自動で挿入する手順を説明する。

3.1 得点シーンの検出

本研究ではYOLO [3]を用いて得点シーンの検出を行う。ここでYOLOとは、Deep Learningを用いた物体検出アルゴリズムの一つである。

バレーにおける得点方法の大部分を占めるプレーとしてアタックが挙げられる。そこで、アタックによる得点シーンを検出することにする。アタックはジャンプの動作を行うため、YOLOによる検出時にアタックを打つ選手はY座標が高くなる。そこで、Y座標に対して閾値を設けることで、アタックによる得点シーンを検出できる。そして、その得点シーンをリプレイとして直後に挿入することで、競技動画へのリプレイシーンの挿入を自動で行うことが可能となる。

ここで、Fig. 3をリプレイ時の映像とする。このようなリプレイシーンの挿入を各視点の映像で行う。



Fig. 3: Example of replay scene

4 RH戦略に基づいた仮想カメラワーク手法

各視点の映像にリプレイを挿入した後、2.2節の方針に従いRH戦略を用いて編集を行う。そこで、本章ではRH戦略における評価関数について説明する。

4.1 RH戦略における評価関数の設計

RH制御 [4]の考えに基づくRH戦略を用いて仮想カメラワークの最適化を行う。ここで、映像を作成する上でどのタイミングでどの視点からの映像を用いるか、最適な視点を選択することを仮想カメラワークの最適化と呼ぶこととする。第2章で述べた編集方針に従い、仮想カメラワークの最適化をするための評価関数を設定する。この設定が自動編集で重要なとなる。視点の決定は評価関数の評価値を用い、評価値が最小となる視点とする。ここで扱う評価関数 E の構造を(1)

式に示す。

$$\begin{aligned}
 E = & w_1 f_d(r, L) \\
 & + w_2 \sum_{i=n_1}^{n_2} f_s(f(O, D), S(t+i), p(t+i)) \\
 & + w_3 \sum_{i=n_1}^{n_2} f_p(f_x(t+i), T_X, p(t+i)) \\
 & + w_4 \sum_{i=n_1+1}^{n_2} c(t+i)
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、 t は現在の時刻、 $w_1 \sim w_4$ は重み係数であり、評価区間は n_1 から n_2 までとする。また、 $p(t)$ は選択された視点を表す。 m 台のカメラで撮影を行う場合、視点の集合 P は $P = \{p_1, \dots, p_m\}$ 、映し出されるフレームは $p(t) \in P$ となる。

(1) 式の第 1 項 f_d は w_1 に掛かる項で、 m 個の視点の中からどの視点を選択するか、予め設定しておいた比率に基づいて決定する項である。この項は、視聴者が応援しているチーム側の視点を他の視点に比べて多く登場することを可能にする。それぞれの視点についてどれだけの割合で映し出すか、予め比率 r を設定しておき、その比率に従うように映し出す視点を決定する。比率に準じているかを表す評価値としては、関数 f_d を用いる。ここで、 L は各視点のこれまでに映し出された時間の長さの比率を表す変数である。この関数 f_d は、比率 L が設定した比率 r に近いほど小さい評価値を取り、設定した比率に近づくように視点を選択することが可能となる。

(1) 式の第 2 項 f_s は w_2 に掛かる項で、予めオフェンスかディフェンスのどちらのプレーに注目したいか設定することで、設定したプレーがより鮮明に映る視点を選択する項である。ここで、 $f(O, D)$ はオフェンスかディフェンスのどちらのプレーに注目したいかを表す関数、 $S(t)$ は時刻 t でサーブ権を持つチームを表す。第 3 章で説明した YOLO を用いてサーブ権を持つチームを判定し、オフェンスに注目したい場合はサーブ権を持たないチーム側、ディフェンスに注目したい場合はサーブ権を持つチーム側の視点 $p(t)$ を選択すると、関数 f_s は小さい評価値を返すため、注目したいプレーがより鮮明に映る視点を選択することが可能となる。

(1) 式の第 3 項 f_p は w_3 に掛かる項で、プレーが行われている場所に応じて、プレーが見やすいよう、その場所により近い視点を選択する項である。Fig. 2 の視点 1 の映像から見て右側で得点がされた場合、そのプレー時は視点 3 の映像を映すとよりそのプレーが見やすくなる。ここで、 $f_x(t)$ は時刻 t で得点となったプレーが行われた X 座標を返す関数である。そこで、X 座標の閾値 T_X を設定し、 $f_x(t)$ が閾値 T_X 以上となった場合、

つまり視点 3 側でプレーが行われた場合に、 $p(t) = p_3$ を選択すると関数 f_p は小さい評価値を返すため、得点となったプレーにより近い視点を選択することが可能となる。

(1) 式の第 4 項 c は w_4 に掛かる項で、選択した視点が頻繁に切り替わることを防ぐための項である。競技動画像を視聴する際、頻繁にシーンや画面が切り替わってしまうと、大変見づらくなってしまう。そこで、評価区間内において映し出す視点を切り替えた回数を評価関数に組み込むことにより、頻繁に視点が切り替わることを防ぐことが可能となる。

5 自動編集の評価実験

本章では、第 4 章で説明した RH 戦略を実際の競技動画像へ適用して、新たな動画像を自動で作成する。そして、作成された映像を確認して適切な編集が行えているか評価を行う。

5.1 RH 戦略を用いた自動編集の実行

本研究では、リプレイシーンの開始時と終了時に RH 戦略に基づいた仮想カメラワークの最適化を行い、評価区間は $n_1 = -10$ から $n_2 = 30$ の 40 秒間とする。(1) 式の各項の重み係数は、視聴者の目的に応じて増減させることでその目的に沿った編集ができるが、本研究では $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 1$ とする。また、編集時は Fig. 1 に示した通り、視点 1 から順に $P = \{p_1, p_2, p_3\}$ とする。そして、各視点の注目する時間の理想比率 r を $r = p_1 : p_2 : p_3 = 5 : 2.5 : 2.5$ とし、注目したいプレーをオフェンスとする。これは、白いユニフォームのチームを応援していると仮定し、そのチームのオフェンスに注目したいと考え、このように設定した。

Fig. 4 に編集結果を示す [5]。Fig. 4 のようにリプレイシーンを交えつつ映し出す視点を時間に応じて変化させ、仮想カメラワークの最適化に成功した。また、Fig. 5 に選択された視点の推移を示す。Fig. 5 より、全ての視点をバランスよく選択できていることが分かる。

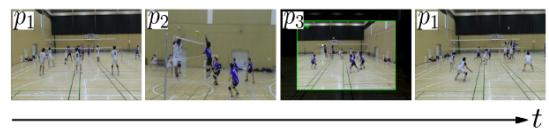


Fig. 4: Result of automatic editing

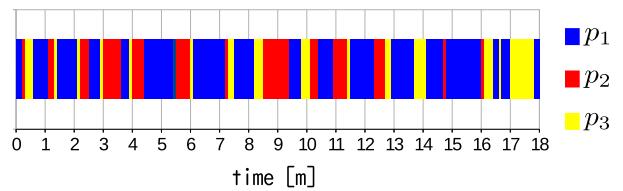


Fig. 5: Sequence of p_i by proposed method

5.2 編集結果における評価実験

4.2節で設計した(1)式によって適切に編集が行われているか検証を行う。

5.2.1 指定した表示時間の比率に応じた視点の選択

(1)式の第1項の効果の検証を行うため、本節では $w_1 = 1, w_2 = w_3 = w_4 = 0$ という条件で編集を行い、理想比率 r と自動編集の結果を比較する。Fig. 6は、左が設定した各視点の注目する時間の理想比率 r 、右が実際に映し出された各視点の時間の比率を表している。

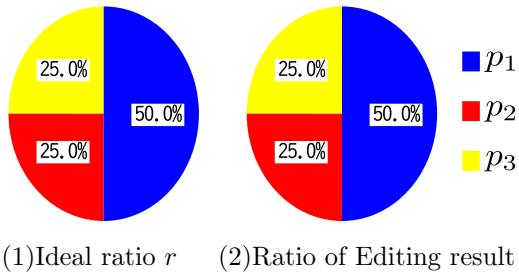


Fig. 6: Pie chart showing ratios

Fig. 6より、設定した理想比率 r に近い比率となるように視点の決定を行っていることが分かる。

5.2.2 注目したいプレーに応じた視点の選択

(1)式の第2項の効果の検証を行うため、本節では $w_2 = 1, w_1 = w_3 = w_4 = 0$ とし、注目したいプレーに応じて p_1 か p_2 のより鮮明にプレーが映る視点を選択するという条件で編集を行った。

ここで、Fig. 7はオフェンスに、Fig. 8はディフェンスに注目したいと設定した場合の選択された視点の推移を表す。Fig. 7, Fig. 8より注目したいプレーに応じて p_1 と p_2 のどちらかが選択されており、 p_3 が含まれていない。よって、設定したプレーに応じてより鮮明にプレーが映る視点を選択できていることが分かる。

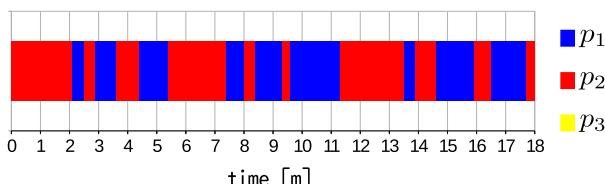


Fig. 7: Sequence of p_i for focusing on offense

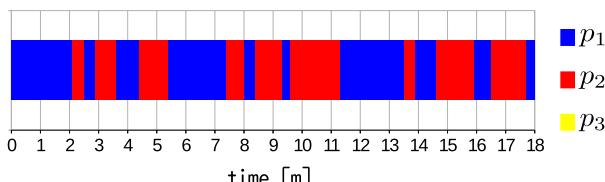


Fig. 8: Sequence of p_i for focusing on defense

5.2.3 得点シーンのプレーに近い視点の選択

(1)式の第3項の効果の検証を行うため、本節では $w_3 = 1, w_1 = w_2 = w_4 = 0$ という条件で編集を行った。

ここで、Fig. 9は上記の条件で編集を行った場合の選択された視点の推移を表す。本研究で用いた競技動画像では p_3 側でのプレーが多く、 p_3 を選択する回数が増えている。また、 p_3 から遠い位置でプレーを行った場合は p_3 の映像だと逆に見えにくくなってしまうため、 p_1 , p_2 を選択するようになっており、プレーの見やすさに配慮した視点の選択が出来ている。

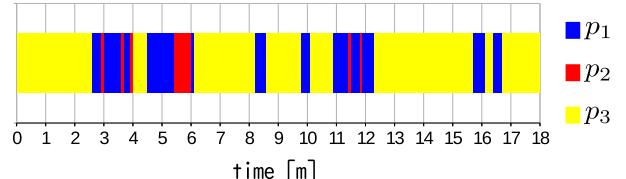


Fig. 9: Sequence of p_i by 3rd term of cost in (1)

6 おわりに

本稿では、定点固定カメラで撮影した競技動画像に対して、視聴満足度の高い動画像へと自動で編集する手法を提案した。画像処理により得点シーンのリプレイを挿入し、さらに、RH戦略および設定した評価関数により仮想的なカメラワークのある動画像へと編集することを可能にした。

今後は、競技者の中から注目する選手を追跡した映像を組み込む、得点シーンのみならず見応えのあるプレーのリプレイを挿入するといった、編集の幅を広げて映像の視聴満足度を向上させることを検討している。

参考文献

- [1] 橋爪, 岡島, 大石, 宮原: Receding Horizon 戰略に基づく固定カメラを用いた競技動画像の再構成, 計測自動制御学会論文集, Vol.55, No.2, p. 135-143 (2019)
- [2] 坂本, 岡島, 末吉: 動画像に対する切り替えを含む仮想カメラワークの実装, 計測自動制御学会論文集, Vol.56, No.11, p. 514-520 (2020)
- [3] Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, Ali Farhadi : You Only Look Once : Unified, Real-Time object Detection, arXiv:1506.02640(2016)
- [4] 児島, 大塚: モデル予測制御の考え方, 計測と制御, Vol.42, No.4, pp.310-312 (2003)
- [5] <https://youtu.be/muxA2JkpDxo>, 動画の自動編集 (バレーボールの試合1試合分), 制御工学チャンネル【H.Okajima】

多様な投資家モデルを含む人工株式市場のモデル構築 と株式市場における影響分析

熊本大学 ○赤平 泰成, 岡島 寛, 黒岩聖矢

Design and analysis of artificial stock market including investor models

Taisei AKAHIRA, Hiroshi OKAJIMA, Seiya KUROIWA

Kumamoto University

Abstract: This paper describes the dynamics of stock prices in cash transactions using artificial markets. One of the methods to investigate the internal mechanism of the stock market is the analysis using artificial markets. An artificial market is a virtual financial market model based on an agent model constructed on a computer. In recent years, there has been an increase in the ratio of margin transactions by individual investors, which carries the risk of bankruptcy due to excessive losses. In order to prevent such investors from going bankrupt, this study constructs an artificial market that focuses on the trading trends of individual investors. By using this artificial market to set up new systems and rules for margin trading, we aim to prevent investors from going bankrupt. In this presentation, as the initial stage of our research, we will analyze the changes in investors' assets and stock prices through trading simulations limited to cash transactions.

1 はじめに

経済のグローバル化や感染症の蔓延などによる社会不安の高まりに伴い、日本経済の先行きに対する人々の関心は年々高まっている。日本経済の動向を知るうえで、市場経済と密接に関わる株式市場を解析することは非常に有効な手段である。一般的な株式市場における投資家同士の株式取引は証券取引所を仲介して行われるが、この取引所には投資家の破産や不利益を出来る限り防ぐために、様々な取引に関するルールが存在している。また、株価は投資家間の需要供給関係により変動し決定されるものであり¹⁾、こうした株式市場内部の分析に用いられる手法の一つとして、人工市場を用いた分析がある。人工市場では計算機上に仮想的に構築されたエージェントモデルベースの金融市場モデルを用いたシミュレーションから、実証分析結果の再現やバブル発生のメカニズムの解析などの研究が盛んに行われている^{2), 3)}。

一般的な株式取引は現物取引が主流であるが、近年では個人投資家の参入が増え、信用取引により少ない資金でもレバレッジをかけることで多くの利益を出そうとする投資家も一定数以上存在している。現行の信用取引では資金の約3倍の取引が可能となっており、約3倍の利益を得られる反面、約3倍の損失を受ける危険性もはらんでいる。過去の例として、2008年のリーマンショックの際には約1か月半の間に日経平均株価が11000円から7000円まで下落し、2020年のコロナショックでは約2か月の間に日経平均株価が3割下落し、多くの投資家が破産に追い込まれる状況となつた。

本研究では、個々の投資家の売買動向に焦点を当てた人工市場を構築する。実装する投資家モデルは、実際の投資で用いられるファンダメンタル分析や、テクニカル分析を用いることで、実際の取引に即した市場を形成する。この人工市場を用いることで、信用取引における投資家の損失による破産を抑えるための新しい制度やルールの作成の設定、検証を将来的な目標としている。本稿では研究の端

緒として人工市場での取引シミュレーションを用いた、市場の傾向に応じた株価の変動や、投資家モデルに与える影響についての分析を行う。

2 人工市場の構築

本節では本研究に用いる人工市場モデルの構築について記す。本研究で作成した人工市場モデルは、証券取引所モデルと投資家モデルで構成されている。証券取引所は投資家が実際に株式の売買を行う場所であり、実際には一般の投資家は証券会社を仲介して取引を行っている。

本人工市場モデルでは、各企業には株価、発行済株式数、1月ごとの純利益が設定されている。1月ごとの純利益は、日本国内の証券取引所の年間営業日は約250日程度であることを考慮し、20営業日ごとに更新されるものとした。

2.1 証券取引所モデルの構築

本人工市場モデルにおける証券取引所モデルについて、簡易化のために以下の仮定を設ける。

- 発行済み株式数の増減はないものとする。
- 売買株式数は実数値として扱う。
- 1営業日における株価の変化に上下限値を設定する。
- 全ての注文は成行注文として扱う。

株式の売買は投資家間のみで行うため、市場における企業ごとの発行済み株式数は増減せず、シミュレーション全体で終了まで一定数で変化しないものとした。

また、株価の変動は各投資家の希望注文数の偏りに基づいて決定する。各投資家の希望株式売買数のうち、買い注文を正の数、売り注文を負の数として合計を求め、株価は合計値が正の場合は上昇、負の場合は下降するようにした。

取引日*i*における企業*k*の株価の変化率 $RC_{i,k}$ は、企業*k*の発行済み株式数を $S_{out,i,k}$ 、各投資家の希望売買数の合

計を $I_{all\ i,k}$ として, 以下の (1) で与えられるものとする.

$$RC_{i,k} = \frac{I_{all\ i,k}}{S_{out\ i,k}} \quad (1)$$

これにより求められた割合 $RC_{i,k}$ 分だけ, 自営業日の株価が変動するように設定した. このとき, 1日の株価の変化には値幅制限を設けており, 株価が 300 円以下の場合は 20%, それ以外の場合は 10% とし, 制限以上の変動は起こらないものとした.

投資家の取引成立については, 買い注文が多い場合は売り注文は希望数通りの取引を行い, 買い注文は比例分配で取引を行う. 売り注文が多い場合は買い注文は希望数通りの取引を行い, 売り注文は比例分配で取引を行う. 取引は, 株価変化率から株価の更新を行った後成立し, 実際に現金と株式の売買が行われる. このとき, 取引における売買株式数が少數になることが想定されるため, 株式数は実数値として扱うものとした.

また, 実際の証券取引では値段を指定して注文を行う指値注文と, 値段を決めず株式数のみで注文を行う成行注文があるが, 本人工市場モデルでは簡易化のため全ての注文を成行注文として扱っている.

2.2 投資家モデルの構築

本人工市場モデルにおける投資家のモデル化について記述する. 本研究は現物取引のみに限定したシミュレーションのため以下 2 つの制約を全投資家モデルに共通で与える.

(i) 株式の売却の際, 保有株式数以上の株式の売り注文を出さない

(ii) 株式の購入の際, 保有現金数以上の株式の買い注文を出さない

(i) は空売りを, (ii) は株式購入時の借金を防ぎ, 信用取引を行わないようとするための制約である.

また, 取引日 i におけるある投資家の総資産 $asset_i$ は以下の (2) で与えられるものとする.

$$asset_i = cash_i + \sum_{k=0}^n SP_{i,k} * H_{i,k} \quad (2)$$

式 (2) における $cash_i$ は投資家が現在保有する現金額を表し, $H_{i,k}$ は投資家が現在保有する企業 k の株式数を表しており, この式は総資産は現在保有する株式数とその株価との積と現金の和で表されることを示す.

また, 投資家は一定営業日毎にある人数が市場に新規参入する. 参加している投資家は総資産ある一定の値を下回ったとき市場を撤退し, 以降の取引日における取引には不参加とした. 以下に詳細な投資家モデルについて述べる.

2.2.1 ファンダメンタル投資家モデル

ファンダメンタル投資家モデルは, 企業の経済状態を表す指標を参考に株価や為替の値動きを予測するファンダメンタル分析により株式の売買タイミングを決定する投資家モデルである. 一般的に企業の財務状況や経済状態は

刻々と変化する物ではないことから, ファンダメンタル分析は中長期向けのトレードであるといわれている. 本人工市場モデルにおけるファンダメンタル投資家モデルは、企業の純利益から現在の株価が割安か割高かを判断する指標である株価収益率 (Price Earnings Ratio:PER) を用いて, 株式の売買判断を行う. 企業 k の取引日 i における $PER_{i,k}$ は $S_{out\ i,k}$ を発行済み株式数, $N_{income\ i,k}$ を純利益として (3) で与えられるものとする.

$$PER_{i,k} = \frac{SP_{i,k} * S_{out\ i,k}}{N_{income\ i,k}} \quad (3)$$

この PER が低いほど会社の利益に対して株価が割安であり, 高いほど株価が割高だと判断できる. 本人工市場モデルにおけるファンダメンタルモデル投資家は, PER が 15 よりも高いと売り注文を, 低いと買い注文を出し, 注文数は PER の大きさによって決定する.

2.2.2 移動平均線を考慮したテクニカル投資家モデル

テクニカル投資家モデルは価格や出来高の推移をグラフ化したチャートの形状などから, 将来の値動きを予測するテクニカル分析により株式の売買タイミングを決定する投資家モデルである. 本株価モデルにおけるテクニカル投資家モデルは, 株価の予想手段として過去数日間の株価の平均をグラフ化した移動平均線を用いて分析を行う. 短期間の移動平均線と長期間の移動平均線の 2 つを用意し, 投資家はそれぞれの平均線の推移の状態によって売買判断を行う.

各テクニカル投資家モデルが利用する企業 k の取引日 i における n 日間の移動平均線 $MA_{n,i,k}$ は (4) で与えられるものとする.

$$MA_{n,i,k} = \frac{1}{n} \sum_{j=i-n}^{i-1} SP_{j,k} \quad (4)$$

本研究では 5 日移動平均線, 25 日移動平均線, 75 日移動平均線の 3 種類を用意し, 5 日移動平均線と 25 日移動平均線を用いて判断を行うテクニカル投資家モデルと, 25 日移動平均線と 75 日移動平均線を用いて判断するテクニカル投資家モデルの 2 種類を準備した. 比較的長期間の移動平均線を使用するテクニカル投資家モデルでは, 突発的な株価の変動には反応せず株価の長期的なトレンドを把握した売買が行えるが, 短期間での儲けは少なくなることから利益に対する期待値は減少するといわれている.

本人工市場モデルにおけるテクニカル投資家モデルは, 買い注文を短期間の移動平均線が長期間の移動平均線を下から上に突き抜けるゴールデンクロスの発生をきっかけとして行い, 売り注文は以下の 3 つのタイミングで行う.

- (1) 短期間の移動平均線が長期間の移動平均線を上から下に突き抜けるデッドクロスが発生したとき, 持ち株の 8 割を売却
- (2) 株式購入から 10 日経過するたび持ち株の 2 割を売却
- (3) 株式購入時点での株価から 1 割値上がりしたとき, 持ち株の 6 割を売却

2.2.3 サイコロジカルラインを考慮したテクニカル投資家モデル

サイコロジカルラインを考慮したテクニカル投資家モデルは、前節で記述したテクニカル投資家モデルに、サイコロジカルラインの考えを組み込んだ投資家モデルである。サイコロジカルラインとは、ある計算期間内において、前日の株価よりも現在の株価が高くなった場合を勝ち、逆に低くなった場合を負けとして、勝率をパーセントで表したテクニカル指標の1つである。このサイコロジカルラインは一般的に判断材料としての精度はそれほど高くなく他の指標の補助として利用される場合が多いため、本研究では既存のテクニカル投資家モデルに組み込んで利用する。

本人工市場モデルにおいては、計算期間を12日間とし、投資家モデルは勝率が25%以下のとき買い意識が強く、75%以上のとき売り意識が強くなる逆張り意識を持つ。これらを考慮しながら売買注文数を決定する。

2.2.4 ランキング売買投機家モデル

ランキング売買投機家モデルは現在の株価と前日の株価を比較し、算出した変化率を用いて株式の売買タイミングを決定する投資家モデルである。変化率を上昇量順に並べ、上位3社には売り注文、下位3社には買い注文を出すという、相場に対し逆張りの売買判断を行う。このモデルは短期間の株価の変化から利益を出すデイトレーダー（イナゴトレーダー）を模したモデルとしており、株価変化率CRは(5)で与えられるものとする。

$$CR = \frac{SP_i - SP_{i-1}}{SP_{i-1}} \quad (5)$$

2.2.5 イナゴトレーダーモデル

イナゴトレーダーモデルは、ランキングモデルよりもイナゴトレーダーに倣ったモデルであり、短期間売買を行う個人投資家を模した投資家モデルである。イナゴトレーダーは中小株を好み、短期逆張りで売買を行う特徴がある。本人工市場モデルにおけるイナゴトレーダーモデルは、株価が下降傾向かつ平均株価より低い企業銘柄に対して一斉に買い注文を出す。その後株価が一定以上上がりしたときまたは、株価が下降傾向を見せたとき持ち株を全て売りに出すように設定した。

2.2.6 ランダム投資家モデル

ランダム投資家モデルは完全に不規則な動きをする投資家モデルである。それぞれ1/3の確率で買い注文、売り注文、待機のいずれかの行動を行うモデルである。このランダム投資家モデルは、市場における初心者投資家を模したモデルである。

3 シミュレーション

本稿で行うシミュレーションは現物取引を行った際の株価と投資家の資産の推移の確認が目的である。取引日数は約6年の1500日（年間の営業日数を250日と仮定）とし、初期の投資家人数は400人、企業数は8社であり、投資家は初期資金250,000円と、ランダムに5社分の株式を

100株ずつ所持している。このときランキングモデルのみ500株を8社分それぞれ平均的に均一量株式を所持している。初期の投資家人数400人の内訳はTable.1のように設定した。テクニカルモデルは移動平均線の日数、売却タイミングの決定、サイコロジカルラインを考慮するかの違いから12種類に分類し、それぞれ12人ずつ存在するものとする。

Table 1: Breakdown of model

Model	Number of people
Fundamentals	126
Technical	144
Inago	100
Ranking	15
Random	15

投資家は50営業日ごとに2人新規参入し、用いる投資家モデルはランダムに決定する。また投資家モデルは、各営業日で総資産が初期総資産の3割以下となった場合市場を撤退し、以降の取引を終了させる。本実験では以下の3パターンの市場における取引シミュレーションを行った。

- (a) 前半3年業績が上昇し後半3年業績が下降する市場
- (b) 前半3年業績が下降し後半3年業績が上昇する市場
- (c) 6年間業績が特に上昇下降傾向を持たない市場

4 シミュレーション結果

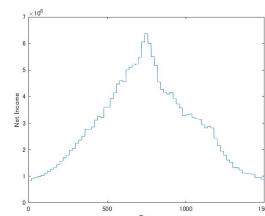
(a),(b),(c) それぞれの市場における企業業績の平均値推移をFig.1に、企業株価の平均値推移をFig.2に示す。

(b) の市場では企業の業績の変化に合わせて、株価もほとんど同じ変化が見られている。

(a) の市場では、業績の変化に対して株価の変化は業績上昇時は急勾配で上昇し、業績減少時はゆるやかに減少している。また、600日付近では業績上昇に対して、逆張りで売買を行う投資家モデルによる売り注文によって株価の下落が引き起こされているが、業績がさらに上昇することですぐに株価は上昇傾向に転じている。

(c) の市場では業績と株価は全体としては似た変化を示しているが、(b) の市場と比較しても違う変化をしている部分が多く見られた。

またどの市場でも、市場の傾向に対して逆の値動きが短期間でみられた。これは市場の傾向に対して逆張りで売買を行う、ランキング売買投機家モデルやイナゴトレーダー投資家モデルによって一時的な株価の高騰、暴落が引き起こされていると考えられる。



(a)

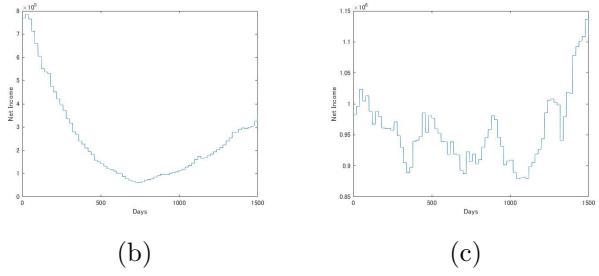


Fig.1: Net Income

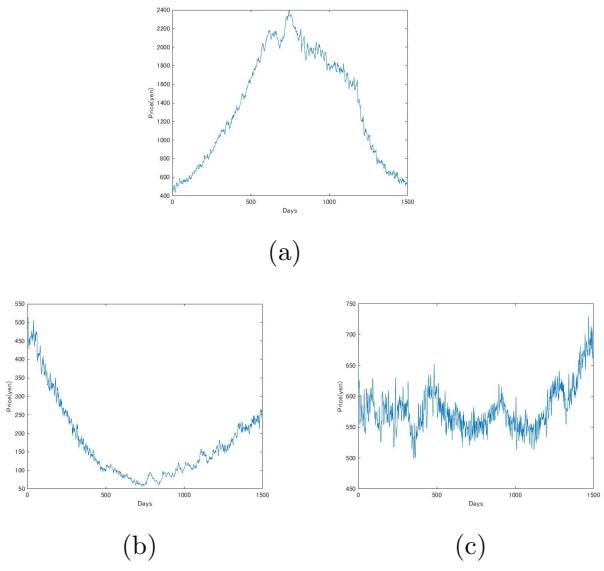


Fig.2: Stock Price

以下のTable2に(a),(b),(c) それぞれの市場における投資家モデルごとの撤退人数をまとめる。全市場で、短期間の移動平均線を使うテクニカルモデルが比較的多く撤退している。

(a) の市場では全体の 8割以上の投資家モデルが資産を減らしたが、ファンダメンタル投資家モデルの約 9割、ランディングモデルの約 8割、ランダム投資家モデルの全員が資産を初期資産以上に伸ばしている。また、多くのファンダメンタルモデルとイナゴトレーダーモデルは 700 日から 1200 日付近で資産を初期の 5倍以上まで増やしており、イナゴトレーダーモデルはモデル間で資産状況に大きく差が出る結果となった。

(b) の市場では最終日には 8割の投資家が資産を初期資産より減らす結果となったが、ランダムモデルは全員が総資産を増やして最終日を迎えていた。イナゴトレーダーモデルについては、資産を増やした投資家は少なかったが、撤退した投資家も 3つの市場で最も少ない結果となった。

(c) の市場では、テクニカル投資家モデルの多くが資産を初期資産より減らしている。またランディング投機家モデルの 8割以上、ファンダメンタル投資家モデル、ランダムモデルの全員が資産を初期資産以上に増やしていた。

Table 2: Number of retreat investors

投資家モデル	(a)	(b)	(c)
ファンダメンタル	0	0	0
デッドクロス型テクニカル (25-75)	0	0	0
10日経過型テクニカル (25-75)	0	0	0
1割値上がり型テクニカル (25-75)	0	2	0
デッドクロス型テクニカル (5-25)	2	12	12
10日経過型テクニカル (5-25)	2	12	0
1割値上がり型テクニカル (5-25)	3	12	0
サイコロジカル考慮	0	12	3
デッドクロス型テクニカル (25-75)			
サイコロジカル考慮	0	0	0
10日経過型テクニカル (25-75)			
サイコロジカル考慮	0	0	0
1割値上がり型テクニカル (25-75)			
サイコロジカル考慮	12	12	12
デッドクロス型テクニカル (5-25)			
サイコロジカル考慮	0	13	0
10日経過型テクニカル (5-25)			
サイコロジカル考慮	0	12	0
1割値上がり型テクニカル (5-25)			
イナゴトレーダー	40	1	27
ランディング	0	0	0
ランダム	0	0	0
合計	31	114	34

5 おわりに

本研究では、現物取引における株価の変動や、投資家の総資産の推移をシミュレーションにより推定を行った。シミュレーション結果より、企業の純利益の変化と株価の変化の関係性を確認した。また、市場の企業業績の変動が大きくなると撤退する投資家も多くなり、特に多くの長期的な移動平均線を用いるテクニカル投資家モデルが総資産を大きく減らし、市場を撤退していたことがわかる。

今後の研究ではより多様かつ実体に即した投資家モデルの実装や、信用取引に対応した市場を構築し、本稿の研究結果との比較や、新たな取引ルールの実装、効果検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 水野, 飯田, 株価変動パターンの可視化, 可視化情報, 25-99, 16/23(2005)
- 2) 八木, 水田, 和泉, 人工市場を利用した空売り規制が与える株式市場への影響分析, 人工知能学会論文
- 3) 八木, 水田, 和泉, 現実の価格決定メカニズムを考慮した人工市場の設定評価手法の開発, 人工知能学会論文誌, 27-6, 320/327(2011)

AR技術を用いたUSDモデルに基づくグラフの拡張現実表示

九州工業大学 ○塚本一貴 古賀雅伸

Augmented Reality of Graphs Based on USD Model

Kazuki Tsukamoto and Masanobu Koga, Kyushu Institute of Technology.

Abstract:

In the development of control systems, when evaluating the performance of a system by simulation or experiment, the results are often checked as graphs. However, when checking the experimental results in graphs, it is difficult to understand which part of the actual system each graph corresponds to. In this research, we will develop an augmented reality display tool that can display the graphs of simulations and experiments in AR around the actual device through the camera of a smartphone, making it easier to understand the relationship between the graphs.

1. はじめに

近年、拡張現実表示の研究が盛んに行われている。教育分野において、学習を目的とした様々なシステムの開発が行われ、その有用性についての議論がされてきた[1]。福祉分野においては、空間マッピングによる福祉車両の自動走行や障害物回避システムなども提案されている[2]。

制御系の開発では、シミュレーションや実験によりシステムの性能評価をする際に、結果をグラフとして確認することが多い。グラフの中には、形が似ているものもあり、ユーザが誤認してしまうことがある。また、グラフにラベルがある場合もあるが、ユーザの実機に対する知識がなければ、ラベルからグラフが実機のどの部分を指しているのか理解できないだろう。このように、実験結果をグラフで確認する際、各グラフが実機のどの部分に対応するのかわかりづらいという課題がある。

本研究では、スマートフォンのカメラを通して、実機の周りに実験結果のグラフをARで表示し、関連づけをわかりやすくすることのできる、グラフの拡張現実表示ツールの開発を行う。

本論文の構成は以下の通りである。まず、第二章でグラフの拡張現実表示の方法を提案する。次に、第三章で提案に基づくツールの開発に関する説明をする。第四章では、開発したツールの有用性についての評価を行う。

2. グラフの拡張現実表示

これまででもグラフの拡張現実表示に関する研究は行われており、スプレッドシートを現実空間上で3Dグラフに変換し重畳するアプリケーションもある[3]。本研究で開発するツールのグラフの拡張現実表示とは、図1に示すように、仮想的なグラフを現実空間の実機周辺に重畳することである。

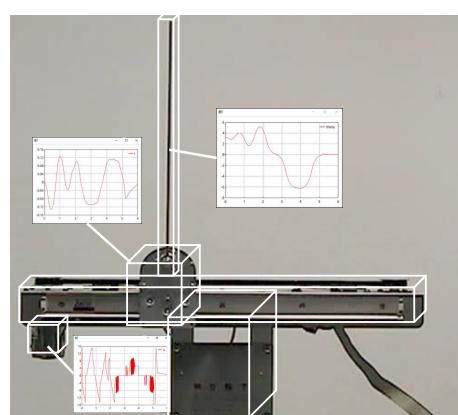


Fig. 1 Image of the tool

2.1 グラフの現実空間との関連付け

仮想的なグラフを現実世界の実機に直接結びつけるのは難しい。グラフを重畠する際の基準となるものが必要である。実機を元に作られた3Dモデルにならば、そのモデルにグラフを結びつけるのは難しくない。そこで、グラフを結びつけるための3Dモデルを作成し、そのモデルを実機に重ね合わせる方法をとる。そうすることで、実機にグラフを関連づけることが可能になる。

2.1.1 平面検出

3Dモデルを現実空間に重畠する際、3Dモデルを実機に重ね合わせる必要がある。重ね合わせを実現させるために平面検出機能を用いることを考える。この機能を用いて実機の置いてある平面が分かれれば、その平面上に3Dモデルを重畠することができ、実機と3Dモデルのxz平面を揃えることができる。

2.1.2 制御対象のUSDモデル

実機に重ね合わせる3DモデルはUSDファイルで作成する。3Dモデルが持つべき特徴として、パーツごとに作成できることが挙げられる。グラフを紐づける際、グラフの出力位置の設定をするには、対象となるパーツの個々の座標が必要になる。USDファイルならば、パーツごとに階層構造で作成できるため、グラフとの紐付けがしやすくなる。

2.2 グラフの作成

まず、グラフを作成し、それを画像形式に変換する。次に、平面オブジェクトを作成する。この平面オブジェクトを出力する位置は、USDモデルのグラフに関連するパーツの座標に準ずる。そして、平面オブジェクトのテクスチャとして、グラフの画像を貼り付ける。こうすることで、グラフをUSDモデルに紐づける。

グラフのサイズについては、USDモデルをxy平面で見た時に、USDモデルを覆うことができる最小の長方形を考え、その長方形を4*4の16等分したひとつ分のサイズをデフォルト大きさとする。

3. 開発

ツールのアーキテクチャを図3に示す。SceneKitを用いてグラフとUSDモデルの仮想シーンを作成し、その仮想シーンをARKitを用いて拡張現実表示させる。

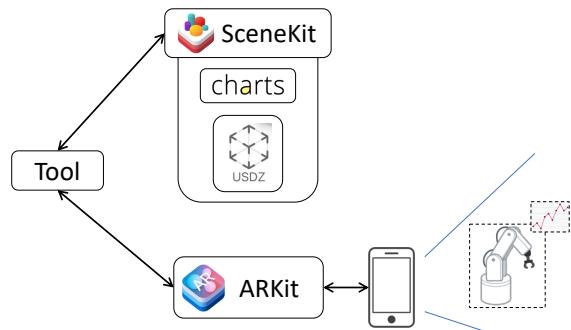


Fig. 2 Architecture of the tool

3.1 USDと実機の重ね合わせ

平面検出はARKitを用いて行う。実機のある平面を検出し、その平面にUSDモデルを重畠するが、実機に重ね合わせるためにには、USDモデルが平面上を移動できる必要がある。USDモデルの移動を行う方法として、図3の手法を提案する。

この手法は、デバイス画面中央からの鉛直線上に平面が検出されれば、その交点にUSDモデルを重畠するというものである。こうすることで、常にデバイスの中央にUSDモデルが出力され、デバイスを傾けるだけで、任意の位置にUSDモデルを移動させることができる。そして、重ね合わせができた段階で、画面をタップすると、USDモデルのノードが現実空間に固定される。こうすることで、USDモデルの実機との重ね合わせが容易にできる。

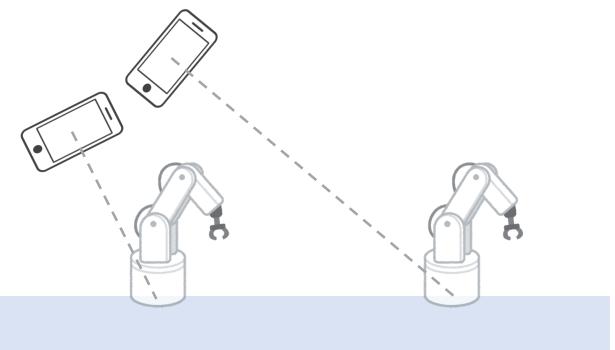


Fig. 3 Plane detection

3.2 制御対象のUSDモデル

制御系の性能評価によく利用される倒立振子を例に用いて説明する。倒立振子の実機を図4に示す。そして、この実機を計測し、計測した値にもとづいて同じ形、同じサイズで作成したUSDモデルを図5に示す。なお、このUSDモデルは図6に示すように、階層構造になっており、ペーツ個々の座標情報をもっている。

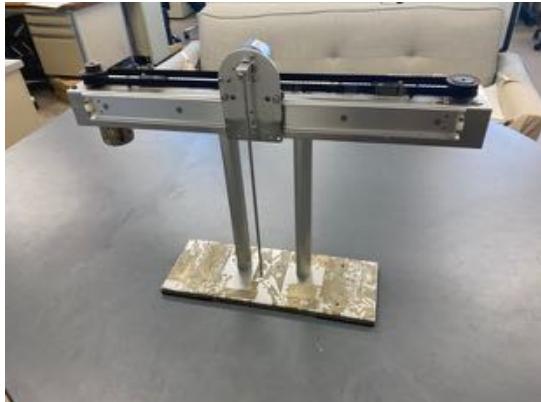


Fig. 4 Actual inverted pendulum

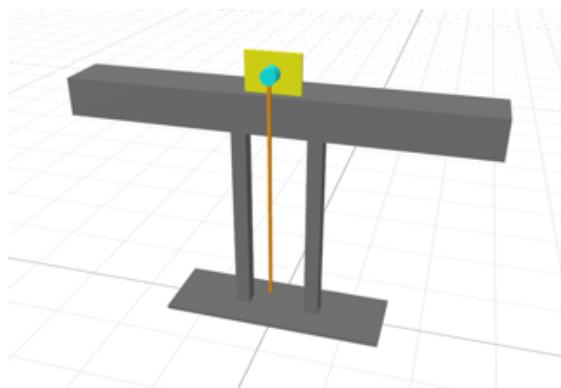


Fig. 5 USD model of inverted pendulum



Fig. 6 Structure of USD

3.3 グラフの作成

Charts[4]というグラフ作成のための外部ライブラリを利用する。作成したグラフを、USDモデルに紐付けられた平面オブジェクトに貼り付け、現実空間に重畠したものを、図7に示す。

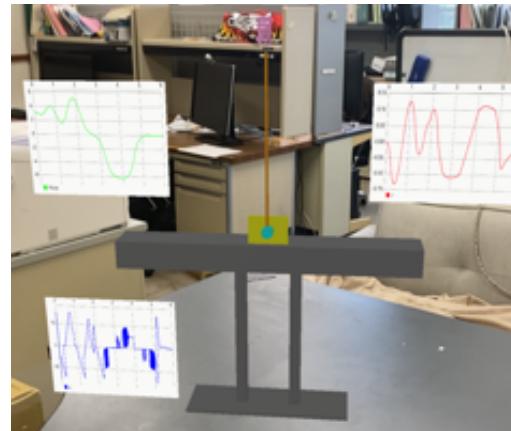


Fig. 7 Superimposing graphs on real space

4. 評価

4.1 平面検出

平面検出はARKitを用いるので、ここでは評価を行わない。

4.2 重ね合わせ誤差

USDモデルを現実空間に固定する際、図8に示すように多少の誤差が生じる。

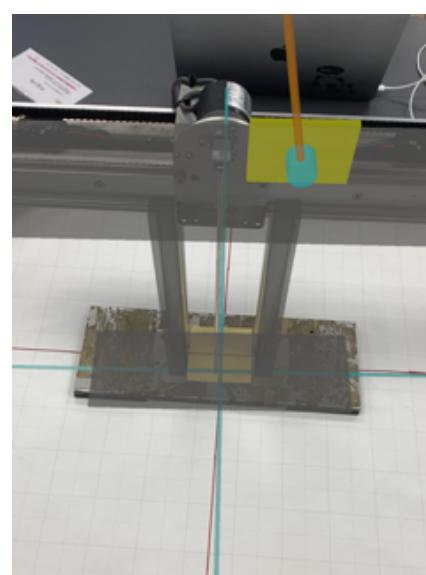


Fig. 8 Superimposition of real machine and USD model

実機のxz平面の中心に赤の十字、USDモデルのxz平面の中心に青の十字を表示する。重ね合わせを20回行い、この十字の中心間の距離と、ずれの角度を測定する。中心間の距離の測定の様子を図9左に、ずれの角度の測定の様子を図9右に示す。それぞれの誤差の平均を表2に示す。

この誤差が許容できるか評価を行う。誤差の許容率を5%で考える。誤差の平均は1.3cmなので、USDモデルのサイズが26cm以上あれば適用できることになる。今回用いた倒立振子は長辺が50cmであるため、これは許容範囲である。

また、ずれの角度の許容率も5%として考えると、ずれの最大値が 180° であるため、 9° 以内が許容範囲となる。そのため、今回の測定結果であるずれの角度の平均 6° は許容範囲となる。

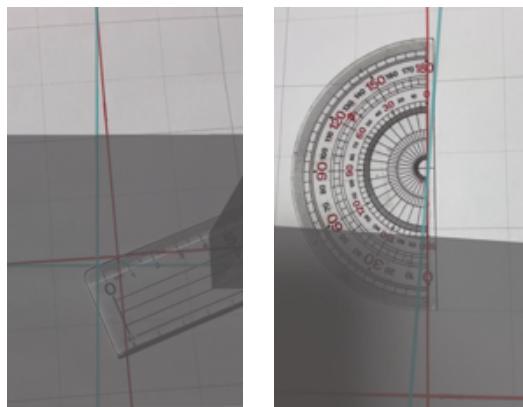


Fig. 9 Measuring the distance between the centers and the angle of misalignmentnace

Table. 2 Average value of overlap

	誤差の平均
中心間の距離	1.3cm
ずれの角度	6°

4.3 アンケート

主観的な意見を集めるためアンケートを行うことを検討している。アンケートでは、定量的には評価できないような、ツールを使った際にユーザの負担の軽減ができているかや、達成度などの評価を考えている。

5. おわりに

本研究では、スマートフォンのカメラを通して、実機の周りにシミュレーションや実験のグラフをARで表示し、関連づけをわかりやすくすることのできる手法を提案し、提案手法に基づいてグラフの拡張現実表示ツールを開発した。

USDモデルの作成、グラフの作成、そしてそれらを実機に重ね合わせたり、その評価をすることで、ツールの有用性を確かめることができた。グラフのサイズや出力する位置などは、今後検討すべき項目である。実機の重ね合わせに関しては、より精度を高くするために、USDモデルのドラッグ操作での移動や、回転機能を追加することを考えている。また、評価方法についても、主観的な意見を取るアンケートを実施することで、提案手法の有用性を調べていこうと思う。

参考文献

- [1] 山本翔, AR/VRの教育・学習支援システムへの利用と課題, 教育システム情報学会誌, Vol. 36, No. 2, pp. 49–56 (2019)
- [2] 松永信智, 武内雄大, 岡島寛, MRを用いた走行環境の空間マッピングによる福祉車両の障害物回避システムの一構成法, 日本機械学会論文集, Vol. 87, No. 894, pp. 1–16 (2021)
- [3] UploadVR, graphmented, <https://uploadvr.com/graphmented-brings-google-sheets-real-world-arkit/> (accessed 10 October, 2021)
- [4] Daniel Cohen Gindi, Charts, <https://github.com/danielgindi/Charts/> (accessed 10 October, 2021)

大変形を伴う閉ループマルチボディシステムの最適軌道生成

福岡大学 ○梁元航大, 福田謙太, 赤星雄太, 岩村誠人

Optimal trajectory generation for closed-loop multibody systems with large defomation

Kodai Ryomoto, Kenta Fukuda, Yuta Akahoshi and Makoto Iwamura, Fukuoka University

Abstract : In this study, we examine a modeling method and a trajectory planning method suitable for suppressing residual vibration in a flexible multibody system with large deformation. Here, the characteristics of the formulation and the residual vibration suppression effect are compared between the case where the floating frame of reference formulation is used and the case where the absolute nodal coordinate formulation is used to describe the flexible body. Until now, the absolute nodal coordinate formulation has hardly been used in the formulation of flexible robots, but it is shown that it is a very effective method when dealing with large deformation problems.

1. 緒言

近年、機械システムは高速化、省エネルギー化、低コスト化を目的として軽量化され、柔軟になる傾向にあり、運動中に生じる弾性振動の影響が無視できない場合が多くなってきている。そのため、柔軟ボディを含むロボットや機械システムの残留振動抑制を目的としたモデリングや制御に関する研究が活発に行われている。

ロボティクス分野では、柔軟ボディを質量とばねで近似する集中質量モデルやガラーキン法等を用いて梁の横振動の1次モード程度を考慮する近似モデルなどが主に用いられている。これらの近似モデルを利用した動力学計算法は、アルゴリズムが簡明であり計算コストも低いが、計算精度や汎用性の面で問題が残されている。一方、マルチボディダイナミクス分野では、柔軟ボディを取り扱うことが可能な動力学計算法として有限要素法をベースとした Floating Frame of Reference Formulation[1](以下「FFRF」と略記する)や Absolute Nodal Coordinate Formulation[2](以下「ANCF」と略記する)が提案されている。これらの手法は計算精度がよく汎用性にも優れているが、従来の相対座標を利用するロボット工学の動力学計算法とは考え方が大きく異なるため、ロボティクス分野ではほとんど用いられていないのが現状である。

そこで、本研究では従来のロボット工学の手法では解析が難しい図1に示す平面柔軟パラレルマニピュレータの定式化と振動制御にFFRFとANCFを適用し、それらの有効性を検証するとともに両手法の特徴を比較する。特にANCFはまだロボティクス分野での応用例がほとんど見当たらないが、大変形問題を取り扱う場合には非常に有効な手法であることを示す。

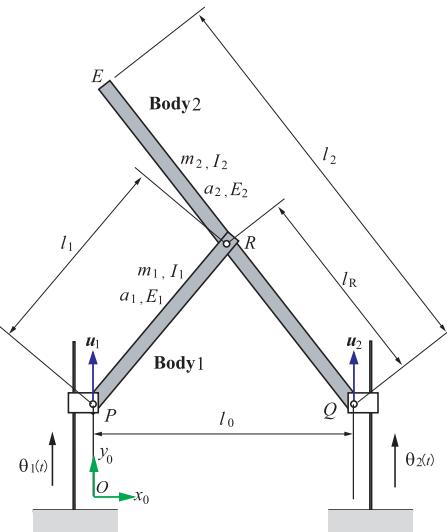


Fig. 1 Planar flexible parallel manipulator

2. 平面柔軟パラレルマニピュレータのマルチボディダイナミクス解析

図1に示すような2つの柔軟ボディが点Rでピン結合され、点Pと点Qがリニアアクチュエータで駆動される平面柔軟パラレルマニピュレータについて考える。ボディ*i*の無拘束状態の運動方程式は次式のように表せる。

$$\mathbf{M}_i \ddot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{Q}_i^c + \mathbf{Q}_i^v + \mathbf{Q}_i^k + \mathbf{D}_i u_i \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{q}_i は一般化座標、 \mathbf{M}_i は一般化質量行列、 \mathbf{Q}_i^c は一般化拘束力、 \mathbf{Q}_i^v は速度2乗慣性力、 \mathbf{Q}_i^k は一般化弾性力、 u_i はアクチュエータ駆動力、 \mathbf{D}_i は制御入力変換ベクトルである。この機構の運動学的拘束条件、すなわち点Pと点Qが y_0 軸方向のリニアスライダに沿って移動する条件、およびボディ1とボディ2が点Rにおいて回転ジョ

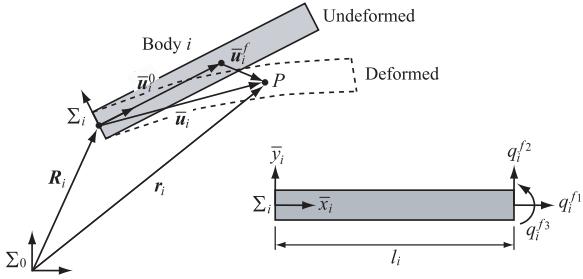


Fig. 2 Floating frame of reference formulation (FFRF)

イントによってピン結合される条件は $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2$ に関する次のような代数方程式で表せる。

$$C(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2) = \mathbf{0} \quad (2)$$

一般化拘束力 \mathbf{Q}_i^c は拘束ヤコビ行列 $C_{\mathbf{q}_i} = \partial C / \partial \mathbf{q}_i$ と拘束反力を表すラグランジュ乗数ベクトル λ を用いて

$$\mathbf{Q}_i^c = -C_{\mathbf{q}_i}^T \lambda \quad (3)$$

のように書ける。一方、式(2)を2回時間で微分することにより次のような加速度レベルの拘束条件が得られる。

$$C_{\mathbf{q}_1} \ddot{\mathbf{q}}_1 + C_{\mathbf{q}_2} \ddot{\mathbf{q}}_2 = \mathbf{Q}^d \quad (4)$$

式(1)に式(3)を代入して2つのボディの運動方程式を記述し、式(4)を随伴すると次の微分代数方程式を得る。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 & \mathbf{0} & C_{\mathbf{q}_1}^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_2 & C_{\mathbf{q}_2}^T \\ C_{\mathbf{q}_1} & C_{\mathbf{q}_2} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_1 \\ \ddot{\mathbf{q}}_2 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1^v + \mathbf{Q}_1^k + \mathbf{D}_1 u_1 \\ \mathbf{Q}_2^v + \mathbf{Q}_2^k + \mathbf{D}_2 u_2 \\ \mathbf{Q}^d \end{bmatrix} \quad (5)$$

この線形方程式を解いて、 $\ddot{\mathbf{q}} = [\ddot{\mathbf{q}}_1^T \ \ddot{\mathbf{q}}_2^T]^T$ を求め、数値積分を行って $\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}$ を計算する。以上の計算を適切な時間間隔で繰り返すことによって、平面柔軟パラレルマニピュレータの動力学シミュレーションが行える。

以下では、柔軟ボディをオイラー・ベルヌーイ梁と仮定し、式(1)の運動方程式を FFRF と ANCF によって定式化する。変換ベクトル \mathbf{D}_i は自明であり、一般化拘束力 \mathbf{Q}_i^c については既に式(3)で計算できることを述べた。したがって、以下では、一般化質量行列 \mathbf{M}_i 、速度2乗慣性力 \mathbf{Q}_i^v 、および一般化弾性力 \mathbf{Q}_i^k について説明する。

2.1 柔軟ボディの定式化

2.1.1 FFRF による柔軟ボディの定式化

本小節では、FFRF によって柔軟ボディ i の定式化を行う（図2参照）。FFRF では、ボディの弾性変形 $\bar{\mathbf{u}}_i^f = [u_i^{f1} \ u_i^{f2}]^T$ を微小と仮定し、時間に依存しない形状関数行

列 \mathbf{S}_i^t と節点座標 \mathbf{q}_i^f を用いて、ボディ座標系で以下のように表す。

$$\bar{\mathbf{u}}_i^f = \mathbf{S}_i^t \mathbf{q}_i^f \quad (6)$$

このとき、柔軟ボディ i 上の任意点 P の絶対位置は次のように記述することができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_i &= \mathbf{R}_i + \mathbf{A}_i \bar{\mathbf{u}}_i^f \\ &= \mathbf{R}_i + \mathbf{A}_i (\bar{\mathbf{u}}_i^0 + \bar{\mathbf{u}}_i^f) = \mathbf{R}_i + \mathbf{A}_i (\bar{\mathbf{u}}_i^0 + \mathbf{S}_i^t \mathbf{q}_i^f) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 \mathbf{R}_i は Σ_0 の原点から Σ_i の原点へのベクトル、 \mathbf{A}_i は Σ_i から Σ_0 への回転行列でボディ座標系の回転角 ϕ_i の関数、 $\bar{\mathbf{u}}_i^0$ は変形していない状態での点 P の位置である。FFRF では一般化座標は $\mathbf{q}_i = [\mathbf{R}_i^T \ \phi_i \ (\mathbf{q}_i^f)^T]^T$ となる。

式(7)に基づいて慣性力による仮想仕事を計算すると次式のようになる。

$$\delta W_i = - \int_{V_i} \rho_i \delta \mathbf{r}_i^T \ddot{\mathbf{r}}_i dV_i = (-\mathbf{M}_i \ddot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{Q}_i^v)^T \delta \mathbf{q}_i \quad (8)$$

これより、FFRF では一般化質量行列 \mathbf{M}_i および速度2乗慣性力 \mathbf{Q}_i^v が次のように求められる。

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_i &= \int_{V_i} \rho_i (\mathbf{L}_i^t)^T \mathbf{L}_i^t dV_i \\ \mathbf{Q}_i^v &= - \int_{V_i} \rho_i (\mathbf{L}_i^t)^T \mathbf{a}_i^v dV_i \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、 $\mathbf{L}_i^t = [\mathbf{E} \ (\mathbf{A}_i)_{\phi_i} \bar{\mathbf{u}}_i \ \mathbf{A}_i \mathbf{S}_i^t]$ 、 \mathbf{E} は単位行列、 $(\mathbf{A}_i)_{\phi_i} = \partial \mathbf{A}_i / \partial \phi_i$ 、 ρ_i は密度であり、 $\mathbf{a}_i^v = \dot{\mathbf{L}}_i^t \dot{\mathbf{q}}_i$ と定義している。

一方、式(6)を用いて弾性ポテンシャルエネルギーを求めるとき式のようになる。

$$\begin{aligned} U_i &= \frac{1}{2} \int_0^{l_i} \left\{ E_i I_i \left(\frac{\partial^2 u_i^{f2}}{\partial x^2} \right)^2 + E_i a_i \left(\frac{\partial u_i^{f1}}{\partial x} \right)^2 \right\} dx \\ &= \frac{1}{2} (\mathbf{q}_i^f)^T \mathbf{K}_i^{ff} (\mathbf{q}_i^f) \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{q}_i^T \mathbf{K}_i \mathbf{q}_i \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 E_i はヤング率、 I_i は断面2次モーメント、 a_i は断面積である。このとき、一般化弾性力 \mathbf{Q}_i^k は次式となる。

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_i^k &= - \left(\frac{\partial U}{\partial \mathbf{q}_i} \right)^T \\ &= -\mathbf{K}_i \mathbf{q}_i = - \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{K}_i^{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_i \\ \phi_i \\ \mathbf{q}_i^f \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

FFRF では、柔軟ボディの剛体運動と弾性変形を別々の座標で分離して記述しているため、変形について捉えやすいという特徴があるが、弾性変形を微小と仮定しているため収束が遅く、大変形問題に適用する場合は要素分割数を増やす必要がある。

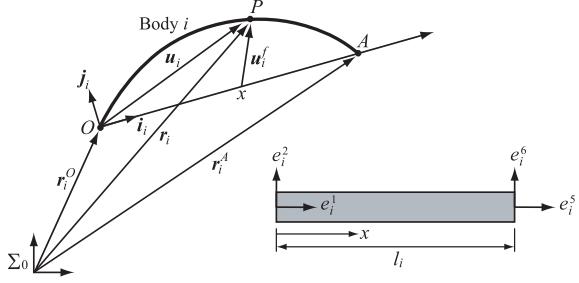


Fig. 3 Absolute nodal coordinate formulation (ANCF)

2.1.2 ANCF による柔軟ボディの定式化

本小節では、ANCF によって柔軟ボディ i の定式化を行う（図3参照）。ANCF では、絶対座標系 Σ_0 からみた両端点の変位 $e_i^1 = r_1|_{x=0}$, $e_i^2 = r_2|_{x=0}$, $e_i^5 = r_1|_{x=l}$, $e_i^6 = r_2|_{x=l}$ と絶対勾配

$$\begin{aligned} e_i^3 &= \frac{\partial r_1}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad e_i^4 = \frac{\partial r_2}{\partial x} \Big|_{x=0}, \\ e_i^7 &= \frac{\partial r_1}{\partial x} \Big|_{x=l}, \quad e_i^8 = \frac{\partial r_2}{\partial x} \Big|_{x=l} \end{aligned} \quad (12)$$

からなる節点座標 $\mathbf{e}_i = [e_i^1 \ e_i^2 \ \dots \ e_i^8]^T$ によりボディの運動と変形を記述する。柔軟ボディ i 上の任意点 P の位置は

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{S}_i \mathbf{e}_i \quad (13)$$

のように表せる。ここで、 $\mathbf{S}_i = [(\mathbf{S}_i^1)^T \ (\mathbf{S}_i^2)^T]^T$ は時間に依存しない形状関数行列である。ANCF では一般化座標は $\mathbf{q}_i = \mathbf{e}_i$ となる。

式(13)に基づいて慣性力による仮想仕事を計算すると次式のようになる。

$$\delta W_i^{iner} = - \int_{V_i} \rho_i \delta \mathbf{r}_i^T \ddot{\mathbf{r}}_i dV_i = (-\mathbf{M}_i \ddot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{Q}_i^v)^T \delta \mathbf{q}_i \quad (14)$$

これより、ANCF では一般化質量行列 \mathbf{M}_i および速度2乗慣性力項 \mathbf{Q}_i^v が次のように求められる。

$$\mathbf{M}_i = \int_{V_i} \rho_i \mathbf{S}_i^T \mathbf{S}_i dV_i, \quad \mathbf{Q}_i^v = \mathbf{0} \quad (15)$$

FFRF とは異なり、一般化質量行列 \mathbf{M}_i は定数行列、速度2乗慣性力項 \mathbf{Q}_i^v は $\mathbf{0}$ となることに注意する。

一方、ボディ i の変形量 \mathbf{u}_i^f は次式のように表せる。

$$\mathbf{u}_i^f = \begin{bmatrix} u_i^{f1} \\ u_i^{f2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_i^T \mathbf{i}_i - x \\ \mathbf{u}_i^T \mathbf{j}_i \end{bmatrix} \quad (16)$$

ただし、 $\mathbf{u}_i = [u_i^1 \ u_i^2]^T = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_i^O$ で表され、 $\mathbf{i}_i, \mathbf{j}_i$ はそれぞれ次のように定義される単位ベクトルである。

$$\mathbf{i}_i = \begin{bmatrix} i_i^1 \\ i_i^2 \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{r}_i^A - \mathbf{r}_i^O}{|\mathbf{r}_i^A - \mathbf{r}_i^O|}, \quad \mathbf{j}_i = \begin{bmatrix} j_i^1 \\ j_i^2 \end{bmatrix} = \mathbf{k}_i \times \mathbf{i}_i \quad (17)$$

ここで、 \mathbf{k}_i は紙面に対して垂直で奥から手前に向かう方向の単位ベクトルである。線形弾性モデルを仮定すると、式(16)を用いて弾性ポテンシャルエネルギーは次式のように表せる。

$$\begin{aligned} U_i &= \frac{1}{2} \int_0^{l_i} \left\{ E_i I_i \left(\frac{\partial^2 u_i^{f2}}{\partial x^2} \right)^2 + E_i a_i \left(\frac{\partial u_i^{f1}}{\partial x} \right)^2 \right\} dx \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{q}_i^T \mathbf{K}_i \mathbf{q}_i \end{aligned} \quad (18)$$

これより、一般化弾性力 \mathbf{Q}_i^k が次式のように求められる。

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_i^k &= - \left(\frac{\partial U}{\partial \mathbf{q}_i} \right)^T \\ &= -\mathbf{A}_i^{11} \mathbf{q}_i (i_i^1)^2 - (\mathbf{A}_i^{12} + \mathbf{A}_i^{21}) \mathbf{q}_i i_i^1 i_i^2 - \mathbf{A}_i^{22} \mathbf{q}_i (i_i^2)^2 \\ &\quad - \mathbf{B}_i^{11} \mathbf{q}_i (j_i^1)^2 - (\mathbf{B}_i^{12} + \mathbf{B}_i^{21}) \mathbf{q}_i j_i^1 j_i^2 - \mathbf{B}_i^{22} \mathbf{q}_i (j_i^2)^2 \\ &\quad + (\mathbf{A}_i^1)^T i_i^1 + (\mathbf{A}_i^2)^T i_i^2 \\ &\quad - \left\{ \mathbf{q}_i^T \mathbf{A}_i^{11} \mathbf{q}_i i_i^1 + \frac{1}{2} \mathbf{q}_i^T (\mathbf{A}_i^{12} + \mathbf{A}_i^{21}) \mathbf{q}_i j_i^2 - (\mathbf{A}_i^1)^T \mathbf{q}_i \right\} \left(\frac{\partial i_i^1}{\partial \mathbf{q}_i} \right)^T \\ &\quad - \left\{ \mathbf{q}_i^T \mathbf{A}_i^{22} \mathbf{q}_i i_i^2 + \frac{1}{2} \mathbf{q}_i^T (\mathbf{A}_i^{12} + \mathbf{A}_i^{21}) \mathbf{q}_i j_i^1 - (\mathbf{A}_i^2)^T \mathbf{q}_i \right\} \left(\frac{\partial i_i^2}{\partial \mathbf{q}_i} \right)^T \\ &\quad - \left\{ \mathbf{q}_i^T \mathbf{B}_i^{11} \mathbf{q}_i j_i^1 + \frac{1}{2} \mathbf{q}_i^T (\mathbf{B}_i^{12} + \mathbf{B}_i^{21}) \mathbf{q}_i j_i^2 \right\} \left(\frac{\partial j_i^1}{\partial \mathbf{q}_i} \right)^T \\ &\quad - \left\{ \mathbf{q}_i^T \mathbf{B}_i^{22} \mathbf{q}_i j_i^2 + \frac{1}{2} \mathbf{q}_i^T (\mathbf{B}_i^{12} + \mathbf{B}_i^{21}) \mathbf{q}_i j_i^1 \right\} \left(\frac{\partial j_i^2}{\partial \mathbf{q}_i} \right)^T \end{aligned} \quad (19)$$

ここで、 $\mathbf{A}_i^{ij}, \mathbf{B}_i^{ij}, \mathbf{A}_i^i$ は $\mathbf{S}_i, E_i, I_i, a_i, l_i$ から計算することができる定数行列である。ANCF では一般化弾性力は非常に複雑になる。FFRF では微小変形を仮定しているが、ANCF では大変形を行う場合にも有効な定式化となつておらず、大変形問題に対しても良好な収束が得られる。

2.2 軌道最適化による残留振動抑制

本節では、FFRF あるいは ANCF で記述された柔軟ボディからなる平面柔軟パラレルマニピュレータの残留振動抑制について検討する。ここでは、Bスプラインを用いた軌道最適化に基づく簡明なアルゴリズムを提案する。

動力学モデルに基づいてシミュレーションを行うためには、式(5)に含まれるアクチュエータ駆動力 u_1, u_2 、すなわち点 P および点 Q を y_0 方向に駆動する力を与える必要がある。ここでは、それらを PD フィードバック制御

$$u_i = -K_{Pi}(y_i - \theta_i) - K_{Di}(\dot{y}_i - \dot{\theta}_i) \quad (20)$$

によって決定することにする。ここで、 $\theta_i(t)$ は $y_i(t)$ の目標軌道である。また、 K_{Pi} および K_{Di} はそれぞれ位置と速度のフィードバックゲインであり、十分大きな値に設定する。目標軌道 $\theta_i(t)$ は加速度までの連続性を考慮して5次ユニフォーム Bスプラインを用いて生成することにす

る。全動作時間 $0 \leq t \leq t_f$ を等間隔 Δt をもつ p 個の区間に分割し、その区分点を $t_0 (= 0), t_1, \dots, t_k, \dots, t_p (= t_f)$ とする。時刻 $t = t_k$ における $\theta_i(t)$ の仮想目標値を $\hat{\theta}_i^k$ とし、これを B スプラインの制御点と考えると第 k 番目の区間 $t_k \leq t \leq t_{k+1}$ における $\theta_i(t)$ は次式のように表せる。

$$\begin{aligned} \theta_i(t(\xi)) &= \sum_{l=0}^5 N_l(\xi) \hat{\theta}_i^{k-2+l} \\ t(\xi) &= t_k + \xi \Delta t \quad (0 \leq \xi \leq 1) \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 $N_l(\xi)$ は B スプライン基底関数である。 $p+5$ 個の制御点 $\hat{\theta}_i^k$ ($k = -2, \dots, p+3$) を指定すれば、式 (21) により目標軌道 $\theta_i(t)$ を生成することができる。始点と終点の境界条件が指定されると両端の制御点 $\hat{\theta}_i^{-2}, \hat{\theta}_i^{-1}, \hat{\theta}_i^0$ および $\hat{\theta}_i^p, \hat{\theta}_i^{p+1}, \hat{\theta}_i^{p+2}$ は一意に決定されるため、自由に設定できる制御点は $\hat{\theta}_i^1, \dots, \hat{\theta}_i^{p-1}$ である。以下では、目標軌道の独立な制御点をまとめて $\hat{\Theta} \equiv [\hat{\theta}_1^1, \dots, \hat{\theta}_1^{p-1}, \hat{\theta}_2^1, \dots, \hat{\theta}_2^{p-1}] \in \mathbb{R}^{2(p-1)}$ と表す。

残留振動は動作終了時刻 $t = t_f$ における弾性ポテンシャルエネルギーを可能な限り小さくすることにより抑制することができる。そこで、FFRF と ANCF のそれぞれに対して評価関数を次のように定義する。

$$\begin{aligned} J_{\text{FFRF}} &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \{ (\mathbf{q}_i^f(t_f))^T \mathbf{Q} (\mathbf{q}_i^f(t_f)) \\ &\quad + (\dot{\mathbf{q}}_i^f(t_f))^T \mathbf{R} (\dot{\mathbf{q}}_i^f(t_f))^T \} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} J_{\text{ANCF}} &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \{ (\mathbf{q}_i^d - \mathbf{q}_i(t_f))^T \mathbf{Q} (\mathbf{q}_i^d - \mathbf{q}_i(t_f)) \\ &\quad + (\dot{\mathbf{q}}_i(t_f))^T \mathbf{R} (\dot{\mathbf{q}}_i(t_f)) \} \end{aligned} \quad (23)$$

ここで、 \mathbf{Q}, \mathbf{R} は適当な次元の重み行列、 \mathbf{q}_i^d はボディ i の終端時刻 $t = t_f$ における目標状態である。1組の制御点 $\hat{\Theta} = [\hat{\theta}_1^1, \dots, \hat{\theta}_1^{p-1}, \hat{\theta}_2^1, \dots, \hat{\theta}_2^{p-1}]$ を指定すれば、式 (21) により目標軌道 $\theta_i(t)$ を生成することができる。式 (20) のハイゲイン PD フィードバック制御則で駆動力 u_i を決定し、式 (5) の微分代数方程式を解くことにより一般化座標 $\mathbf{q}(t)$ および一般化速度 $\dot{\mathbf{q}}(t)$ が得られる。終端時刻における $\mathbf{q}_i(t_f)$ および $\dot{\mathbf{q}}_i(t_f)$ を式 (22) あるいは式 (23) に代入することにより評価関数の値 J_* を計算することができる。したがって、評価関数は $\hat{\Theta}$ の関数として $J_* = J_*(\hat{\Theta})$ と表せる。すなわち、軌道最適化の問題は B スプラインの制御点をパラメータとするパラメータ最適化問題に帰着できる。ここでは、Hill climbing algorithm を用いて評価関数を最小にする $\hat{\Theta}$ を探索し、残留振動を抑制する。

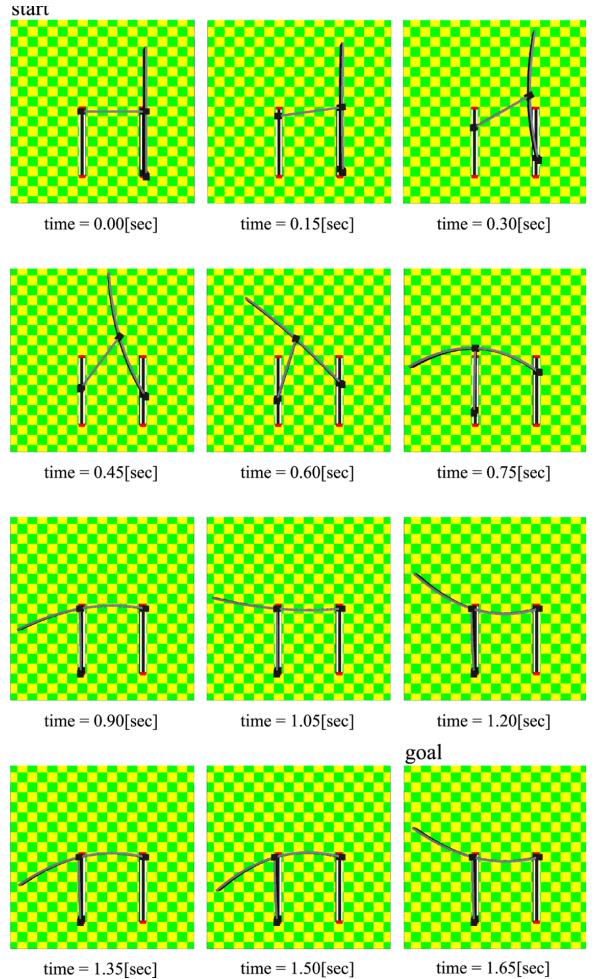


Fig. 4 Numerical simulation

3. 適用例

FFRF と ANCF を用いた場合のシミュレーションを行い、両手法の比較を行った。大変形問題に適用した場合のシミュレーション結果の一例を図 4 に示す。紙幅の制限のため、詳細については講演当日に発表する。(結言省略)

参考文献

- [1] Shabana, A. A. and Wehage, R., Variable Degree of Freedom Composent Mode Analysis of Inertia-Variant Flexible Mechanical Systems, TR No.81-12, Center for Computer Aided Design, University of Iowa, (1981).
- [2] Shabana, A. A., Hussien, H. A. and Escalona, J. L., Application of the Absolute Nodal Coordinate Formulation to Large Rotation and Large Deformation Problems, ASME Journal of Mechanical Design, 120 (1998), pp.188–195.

粘弾性体を含むソフトロボットの 高速かつ安定な動力学計算法の開発

福岡大学 ○平田健登, 前田能輝, 岩村誠人

Development of fast and stable dynamic calculation method for soft robotics including viscoelastic bodies

Kento Hirata, Yoshiki Maeda and Makoto Iwamura, Fukuoka University

Abstract : Since a multibody system including viscoelastic bodies is a stiff system, stable analysis is difficult with ordinary explicit numerical integration. In this study, we try to develop an approximate analysis method that can analyze the system including the viscoelastic body at high speed and stably by combining the approximate rigid link model, the recursive dynamics algorithm, the linear viscoelastic model and the implicit numerical integration method. In this paper, we explain the case where Maxwell model is used as the linear viscoelastic model.

1. 緒言

近年、介護や家庭用のロボットなどが多数開発され、人の生活空間内にロボットが深く入り込むようになってきている。人と接触する可能性を持つこれらのロボットでは、ボディが硬い部材で構成されていると、人と接触した際に重度の怪我を負わせてしまう可能性がある。一方、柔らかい材料を出力できる3Dプリンタが開発され、ゴムや樹脂などの粘弾性体を含む柔らかい素材を手軽に活用できる環境が普及してきた。そこで、これらの素材を使用して柔らかな身体をロボットに与えようとする試みがなされ、注目されている。このようなソフトロボティクスの研究開発を加速するためには、ゴムや樹脂などの粘弾性体を含むロボットシステムの高速かつ安定な動力学シミュレーション技術を確立する必要がある。これまでに粘弾性体を非線形有限要素法によって記述してマルチボディダイナミクス解析に取り込む研究はなされているが、理論が難解であり計算時間も膨大になるという問題があった。そこで、本研究では、近似剛体リンクモデル、リカーシブ動力学計算法、および陰的数値積分法である一般化 α 法を組み合わせて粘弾性体を含むマルチボディシステムの解析を高速かつ安定に行うことができる方法の構築を試みる。本稿では、初段階として直鎖状の剛体リンク系としてモデル化できる簡単なマルチボディシステムの関節部にMaxwellモデルが附加された場合に対して基本アルゴリズムの定式化を行う。

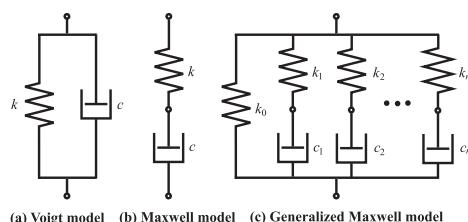


Fig. 1: Linear viscoelastic model

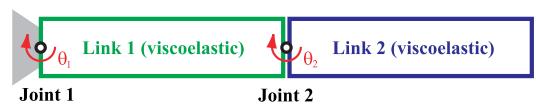


Fig. 2: 2 link manipulator made of silicone rubber

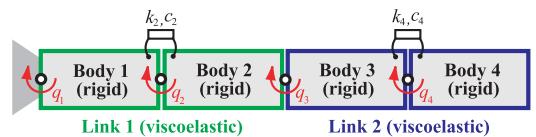


Fig. 3: Finite segment approximation

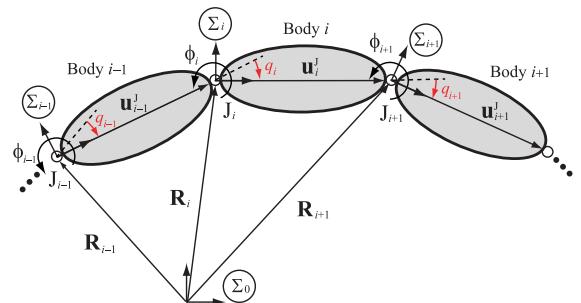


Fig. 4: Relationship between neighboring bodies

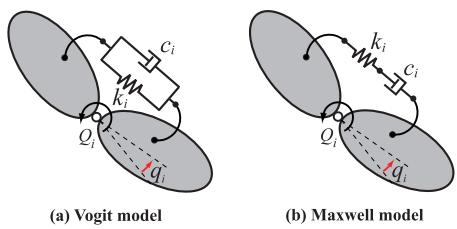


Fig. 5: Viscoelastic dynamics model added to joints

2. 粘弾性体を含むソフトロボットのモデル

粘弾性体の解析に非線形有限要素法が用いられることがあるが、高速計算には不向きである。一方、図1に示すようなばね要素とダンパ要素を組み合わせたVoigtモデル、Maxwellモデル、一般化Maxwellモデルなどによって近似的に粘弾性を表現する方法も用いられる。本研究では、一つの粘弾性体を回転または直動関節で連結した複数の剛体要素で近似し、関節部にばね・ダンパ要素を附加することによって粘弾性を表現することにする。

具体例として、図2に示すようなゴムのリンクで構成された2関節ロボットについて考える。ここでは、一つのゴムリンク（粘弾性体）を2つの剛体要素で近似し、軸変形は無視できると仮定して、回転関節で連結することにより曲げ変形を表現する。そして、関節部に回転ばねと回転ダンパを追加することで粘弾性を表す。このとき、図3のシステムは図4のようにモデル化できる。以下では、関節*i*の相対角変位を q_i 、関節*i*に付加するばねのばね定数を k_i 、ダンパーの粘性減衰係数を c_i とする。

本研究では、将来の一般的な計算法構築に向けた足がかりとして、図4のような直鎖状の剛体リンク系としてモデル化され、関節部に図5のようなVoigtモデルあるいはMaxwellモデルが付加されたシステムに対して高速かつ安定な計算が行えるアルゴリズムの定式化を目指す。本稿ではMaxwellモデルを中心にアルゴリズムの定式化を行う。粘弾性体を含むマルチボディシステムが剛体リンク系としてモデル化されると、動力学計算には高速なリカーシブ法が適用できる。数値積分には安定性に優れ、時間刻み幅を大きく取れる一般化 α 法を用いる。一般化 α 法のような陰解法では各ステップで収束計算を行う必要があり、その際にヤコビ行列（感度関数）を計算しなければならない。本稿ではリカーシブ動力学計算法の漸化式を利用してヤコビ行列を高速かつ厳密に計算できる方法を提案し、収束計算の反復回数も低減して計算時間短縮を図る。

3. リカーシブ動力学計算法

本章では、図4に示すような剛体が回転関節によって直列に結合され、関節部に図5(b)のようなMaxwellモデルが付加されたリンク系に対してリカーシブ動力学計算法を拡張する。粘弾性体を近似するために導入した剛体要素を含めて、全ボディ数が*N*であるとする。ここでは、ボディ*i*座標系 Σ_i を根元側の関節*i*に設置することにする。絶対座標系 Σ_0 の原点から Σ_i の原点へのベクトルを \mathbf{R}_i 、 Σ_0 に対する Σ_i の角度を ϕ_i とすると、隣接するボディ*i*とボディ*i-1*の速度、加速度の関係はそれぞれ次式のように表

せる。

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{D}_i \mathbf{v}_{i-1} + \mathbf{J}_i \dot{q}_i \quad (1)$$

$$\mathbf{a}_i = \mathbf{D}_i \mathbf{a}_{i-1} + \mathbf{J}_i \ddot{q}_i + \boldsymbol{\beta}_i \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{v}_i = [\dot{\mathbf{R}}_i^T \ \dot{\phi}_i]^T$ 、 $\mathbf{a}_i = [\ddot{\mathbf{R}}_i^T \ \ddot{\phi}_i]^T$ であり、 \mathbf{J}_i は関節角速度 \dot{q}_i がボディの速度 \mathbf{v}_i に与える影響を表すヤコビ行列、 $\mathbf{D}_i = \text{diag.}[\mathbf{A}_i, 1]$ 、 \mathbf{A}_i は Σ_i から Σ_{i-1} への回転行列、 $\boldsymbol{\beta}_i = \dot{\mathbf{D}}_i \mathbf{v}_{i-1} + \dot{\mathbf{J}}_i \dot{q}_i$ である。

一方、ボディ*i*の運動方程式は、次式のように表すことができる。

$$\mathbf{M}_i \mathbf{a}_i + \mathbf{h}_i = \mathbf{Q}_i \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{M}_i は一般化質量行列、 \mathbf{h}_i は速度2乗慣性力ベクトル、 \mathbf{Q}_i は一般化力ベクトルである。ボディ*i*に作用する一般化力 \mathbf{Q}_i^J 、ボディ*i*が関節*i+1*を介してボディ*i+1*に及ぼす一般化力 \mathbf{Q}_{i+1}^J の反力、およびそれ以外の一般化力 \mathbf{Q}_i^O に分けると $\mathbf{Q}_i = \mathbf{Q}_i^J + \mathbf{Q}_i^O - \mathbf{D}_{i+1}^T \mathbf{Q}_{i+1}^J$ となる。これを式(3)に代入して \mathbf{Q}_i^J について解き、 \mathbf{J}_i との内積をとることにより関節駆動トルク τ_i が求められる。すなわち、

$$\mathbf{Q}_i^J = \mathbf{M}_i \mathbf{a}_i + \mathbf{h}_i - \mathbf{Q}_i^O + \mathbf{D}_{i+1}^T \mathbf{Q}_{i+1}^J \quad (4)$$

$$\tau_i = \mathbf{J}_i^T \mathbf{Q}_i^J + \bar{Q}_i \quad (5)$$

である。ここで、 \bar{Q}_i は関節*i*に付加したMaxwellモデルにより印加されるトルク Q_i の反トルクである。

逆動力学計算は、まず根元*i=1*から先端*i=N*まで式(1)、(2)を計算し、その後先端*i=N*から根元*i=1*まで式(4)、(5)を計算することにより実行できる。この逆動力学計算を繰り返し用いると最小次元運動方程式

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau} \quad (6)$$

の一般化質量行列 \mathbf{M} および遠心力・コリオリ力・重力項 \mathbf{h} を効率よく計算することができる。

4. 数値積分法

数値積分法は、陽解法と陰解法に大別される。粘弾性体を含むマルチボディシステムはスティフな系となるため、安定範囲が制限される陽解法を用いる場合は時間刻み幅 h を極端に小さくする必要があり、膨大な計算時間を要する。一方、陰解法は安定性に優れており、時間刻み幅 h を大きくとることができるために短い計算時間で解を得ることができる。ここでは、陰解法である一般化 α 法[1]を用いることとする。陰解法では各ステップで反復計算が必要となり、その際にヤコビ行列（感度関数）を計算しなければならないが、ここでは第3章で定式化したリカーシブ法を利用して高速かつ厳密にヤコビ行列を計算する方法を提案し、計算時間の短縮を図る。

解を求める区間 $t \in [0, t_f]$ を $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_{p-1} < t_p = t_f$ のように分割し、時刻 t_n における $\mathbf{q}(t)$ の値を \mathbf{q}_n のように表す。また、次のような漸化式によって定義される加速度の次元をもつ補助変数ベクトル \mathbf{a}_n を導入する。

$$(1 - \alpha_m)\mathbf{a}_{n+1} + \alpha_m\mathbf{a}_n = (1 - \alpha_f)\ddot{\mathbf{q}}_{n+1} + \alpha_f\ddot{\mathbf{q}}_n, \quad \mathbf{a}_0 = \ddot{\mathbf{q}}_0 \quad (7)$$

そして、ニューマークの積分公式の $\ddot{\mathbf{q}}_n, \ddot{\mathbf{q}}_{n+1}$ をそれぞれ $\mathbf{a}_n, \mathbf{a}_{n+1}$ に変更した次の公式を用いる。

$$\dot{\mathbf{q}}_{n+1} = \dot{\mathbf{q}}_n + h(1 - \gamma)\mathbf{a}_n + h\gamma\mathbf{a}_{n+1} \quad (8)$$

$$\mathbf{q}_{n+1} = \mathbf{q}_n + h\dot{\mathbf{q}}_n + h^2 \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \mathbf{a}_n + h^2\beta\mathbf{a}_{n+1} \quad (9)$$

式 (7)~(9) より次の関係が得られる。

$$\dot{\mathbf{q}}_{n+1} = \frac{\gamma}{h\beta}(\mathbf{q}_{n+1} - \mathbf{q}_n) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right)\dot{\mathbf{q}}_n + h \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \mathbf{a}_n \quad (10)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_{n+1} = \frac{1 - \alpha_m}{h^2\beta(1 - \alpha_f)} \left\{ \mathbf{q}_{n+1} - \mathbf{q}_n - h\dot{\mathbf{q}}_n - h^2 \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \mathbf{a}_n \right\} + \frac{\alpha_m\mathbf{a}_n - \alpha_f\ddot{\mathbf{q}}_n}{1 - \alpha_f} \quad (11)$$

式 (10), (11) より、時刻 t_n 時点の $\mathbf{q}_n, \dot{\mathbf{q}}_n, \ddot{\mathbf{q}}_n, \mathbf{a}_n$ が既知であると $\dot{\mathbf{q}}_{n+1}$ および $\ddot{\mathbf{q}}_{n+1}$ は \mathbf{q}_{n+1} だけの関数になっていることがわかる。上式を \mathbf{q}_{n+1} で偏微分すると次の関係が得られる。

$$\frac{\partial \dot{\mathbf{q}}_{n+1}}{\partial \mathbf{q}_{n+1}} = \gamma' \mathbf{E}, \quad \frac{\partial \ddot{\mathbf{q}}_{n+1}}{\partial \mathbf{q}_{n+1}} = \beta' \mathbf{E} \quad (12)$$

ただし、 $\gamma' \equiv \gamma/(h\beta)$, $\beta' \equiv (1 - \alpha_m)/(h^2\beta(1 - \alpha_f))$ である。

$\dot{\mathbf{q}}_{n+1}, \ddot{\mathbf{q}}_{n+1}$ が \mathbf{q}_{n+1} の関数であることを明示して $t = t_{n+1}$ における運動方程式 (6) の残差を次のように表す。

$$\begin{aligned} e(\mathbf{q}_{n+1}) &\equiv M(\mathbf{q}_{n+1})\ddot{\mathbf{q}}_{n+1}(\mathbf{q}_{n+1}) \\ &+ h(\mathbf{q}_{n+1}, \dot{\mathbf{q}}_{n+1}(\mathbf{q}_{n+1})) - \tau_{n+1} \end{aligned} \quad (13)$$

上式より残差 e の \mathbf{q}_{n+1} に関するヤコビ行列（感度関数）は次のように計算することができる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial e}{\partial \mathbf{q}_{n+1}} &= \frac{\partial M(\mathbf{q}_{n+1})}{\partial \mathbf{q}_{n+1}}\ddot{\mathbf{q}}_{n+1}(\mathbf{q}_{n+1}) + M(\mathbf{q}_{n+1})\frac{\partial \ddot{\mathbf{q}}_{n+1}}{\partial \mathbf{q}_{n+1}} \\ &+ \frac{\partial h(\mathbf{q}_{n+1}, \dot{\mathbf{q}}_{n+1}(\mathbf{q}_{n+1}))}{\partial \mathbf{q}_{n+1}} \\ &+ \frac{\partial h(\mathbf{q}_{n+1}, \dot{\mathbf{q}}_{n+1}(\mathbf{q}_{n+1}))}{\partial \dot{\mathbf{q}}_{n+1}} \frac{\partial \dot{\mathbf{q}}_{n+1}}{\partial \mathbf{q}_{n+1}} \\ &= \beta' M(\mathbf{q}_{n+1}) + \gamma' D^t(\mathbf{q}_{n+1}) + K^t(\mathbf{q}_{n+1}) \\ &\equiv S(\mathbf{q}_{n+1}) \end{aligned} \quad (14)$$

ただし、 K^t, D^t はそれぞれ次のように定義される行列である。

$$\begin{aligned} K^t(\mathbf{q}_{n+1}) &\equiv \frac{\partial M(\mathbf{q}_{n+1})}{\partial \mathbf{q}_{n+1}} \ddot{\mathbf{q}}_{n+1}(\mathbf{q}_{n+1}) \\ &+ \frac{\partial h(\mathbf{q}_{n+1}, \dot{\mathbf{q}}_{n+1}(\mathbf{q}_{n+1}))}{\partial \mathbf{q}_{n+1}} \end{aligned} \quad (15)$$

$$D^t(\mathbf{q}_{n+1}) \equiv \frac{\partial h(\mathbf{q}_{n+1}, \dot{\mathbf{q}}_{n+1}(\mathbf{q}_{n+1}))}{\partial \dot{\mathbf{q}}_{n+1}} \quad (16)$$

感度関数 $S(\mathbf{q}_{n+1})$ が計算できると、許容誤差の範囲内で $e(\mathbf{q}_{n+1}) = \mathbf{0}$ を満たすまで以下の計算を繰り返すことにより、 $t = t_{n+1}$ 時点における $\mathbf{q}_{n+1}, \dot{\mathbf{q}}_{n+1}, \ddot{\mathbf{q}}_{n+1}$ を得ることができる。

$$\begin{aligned} S(\mathbf{q}_{n+1}^{(k)})\Delta \mathbf{q}_{n+1}^{(k)} &= -e^{(k)}, \quad \mathbf{q}_{n+1}^{(k+1)} = \mathbf{q}_{n+1}^{(k)} + \Delta \mathbf{q}_{n+1}^{(k)}, \\ \dot{\mathbf{q}}_{n+1}^{(k+1)} &= \dot{\mathbf{q}}_{n+1}^{(k)} + \gamma' \Delta \mathbf{q}_{n+1}^{(k)}, \quad \ddot{\mathbf{q}}_{n+1}^{(k+1)} = \ddot{\mathbf{q}}_{n+1}^{(k)} + \beta' \Delta \mathbf{q}_{n+1}^{(k)} \end{aligned} \quad (17)$$

本研究ではリカーシブ法の特徴をいかした計算効率のよいヤコビ行列計算法を提案し、上記の一般化 α 法の計算に導入して高速化を図る。式 (15), (16) より、 K^t および D^t は次のように表せることがわかる。

$$\begin{aligned} K^t(\mathbf{q}_{n+1}) &= \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \{M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + h(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\} \Big|_{t=t_{n+1}} = \frac{\partial \boldsymbol{\tau}}{\partial \mathbf{q}} \Big|_{t=t_{n+1}} \\ D^t(\mathbf{q}_{n+1}) &= \frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \{M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + h(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\} \Big|_{t=t_{n+1}} = \frac{\partial \boldsymbol{\tau}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \Big|_{t=t_{n+1}} \end{aligned} \quad (18)$$

接線剛性行列 K^t は、逆動力学の関係を \mathbf{q} で偏微分したものとなっているので、次の計算により求められる。

1) $i = 1$ から N , $k = 1$ から N まで以下の計算を行う。

$$\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial q_k} = \mathbf{D}_i \frac{\partial \mathbf{v}_{i-1}}{\partial q_k} + \frac{\partial \mathbf{D}_i}{\partial q_k} \mathbf{v}_{i-1} \quad (19)$$

$$\frac{\partial \mathbf{a}_i}{\partial q_k} = \mathbf{D}_i \frac{\partial \mathbf{a}_{i-1}}{\partial q_k} + \frac{\partial \mathbf{D}_i}{\partial q_k} \mathbf{a}_{i-1} + \frac{\partial \boldsymbol{\beta}_i}{\partial q_k} \quad (20)$$

2) $i = N$ から 1 , $k = 1$ から N まで以下の計算を行う。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{Q}_i^J}{\partial q_k} &= \mathbf{M}_i \frac{\partial \mathbf{a}_i}{\partial q_k} + \frac{\partial \mathbf{h}_i}{\partial q_k} - \frac{\partial \mathbf{Q}_i^O}{\partial q_k} \\ &+ \mathbf{D}_{i+1}^T \frac{\partial \mathbf{Q}_{i+1}^J}{\partial q_k} + \frac{\partial \mathbf{D}_{i+1}^T}{\partial q_k} \mathbf{Q}_{i+1}^J \end{aligned} \quad (21)$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{\tau}_i}{\partial q_k} = \mathbf{J}_i^T \frac{\partial \mathbf{Q}_i^J}{\partial q_k} + \frac{\partial \bar{\mathbf{Q}}_i^J}{\partial q_k} \quad (22)$$

これらの漸化式は、式 (1), (2) と式 (4), (5) を q_k で偏微分することによって得られる。式中に現れる $\partial \mathbf{D}_i / \partial q_k$, $\partial \boldsymbol{\beta}_i / \partial q_k$, $\partial \mathbf{h}_i / \partial q_k$ は事前に計算しておくことが可能であるため、既知の初期値から始めて上記の漸化式を順次解くことにより、偏微分計算を一切行うことなく、厳密に $\partial \boldsymbol{\tau} / \partial \mathbf{q} = K^t$ を求めることができる。接線減衰行列 $D^t = \partial \boldsymbol{\tau} / \partial \dot{\mathbf{q}}$ に関しても同様に次式のように計算できる。

1) $i = 1$ から N , $k = 1$ から N まで以下の計算を行う.

$$\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial \dot{q}_k} = \mathbf{D}_i \frac{\partial \mathbf{v}_{i-1}}{\partial \dot{q}_k} \quad (23)$$

$$\frac{\partial \mathbf{a}_i}{\partial \dot{q}_k} = \mathbf{D}_i \frac{\partial \mathbf{a}_{i-1}}{\partial \dot{q}_k} + \frac{\partial \boldsymbol{\beta}_i}{\partial \dot{q}_k} \quad (24)$$

2) $i = N$ から 1 , $k = 1$ から N まで以下の計算を行う.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{Q}_i^J}{\partial \dot{q}_k} &= \mathbf{M}_i \frac{\partial \mathbf{a}_i}{\partial \dot{q}_k} + \frac{\partial \mathbf{h}_i}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial \mathbf{Q}_i^O}{\partial \dot{q}_k} \\ &+ \mathbf{D}_{i+1}^T \frac{\partial \mathbf{Q}_{i+1}^J}{\partial \dot{q}_k} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\frac{\partial \tau_i}{\partial \dot{q}_k} = \mathbf{J}_i^T \frac{\partial \mathbf{Q}_i^J}{\partial \dot{q}_k} + \frac{\partial \bar{Q}_i}{\partial \dot{q}_k} \quad (26)$$

これらの漸化式は、式(1),(2)と式(4),(5)を \dot{q}_k で偏微分することによって得られる。式中に現れる $\partial \boldsymbol{\beta}_i / \partial \dot{q}_k$, $\partial \mathbf{h}_i / \partial \dot{q}_k$ は事前に計算しておくことが可能であるため、既知の初期値から始めて上記の漸化式を解くことにより、偏微分計算を行うことなく、厳密に $\partial \boldsymbol{\tau} / \partial \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{D}^t$ を求めることができる。 $\mathbf{M}(\mathbf{q}_{n+1})$ は単位ベクトル法により得られるので、以上の計算手順により式(14)のヤコビ行列 $\mathbf{S}(\mathbf{q}_{n+1})$ が高速かつ厳密に計算できる。ただし、動力学計算を行うためには式(5)の \bar{Q}_i , ヤコビ行列の計算を行うためには式(22)の $\partial \bar{Q}_i / \partial q_i$ および式(26)の $\partial \bar{Q}_i / \partial \dot{q}_i$ が必要である。図 5(b)に示す Maxwell モデルの場合、式(5)の $\bar{Q}_i = -Q_i$ は次式のように計算できる。

$$\bar{Q}_i(t) = e^{-\frac{k_i}{c_i} t} \left\{ \int_0^t e^{\frac{k_i}{c_i} \tau} k_i \dot{q}_i(\tau) d\tau - Q_i^0 \right\} \quad (27)$$

ここで、 Q_i^0 は $Q_i(t)$ の初期値である。上式を時間刻み幅 h で離散化すると $t = t_{n+1}$ のとき、次式のように表せる。

$$\bar{Q}_i(t_{n+1}) = k_i \dot{q}_{n+1} h + e^{-\frac{k_i}{c_i} h} \bar{Q}_i(t_n) \quad (28)$$

上式より、次の関係を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{Q}_i}{\partial q_i} \Big|_{t=t_{n+1}} &= \frac{\partial \bar{Q}_i(t_{n+1})}{\partial q_{n+1}} = 0 \\ \frac{\partial \bar{Q}_i}{\partial \dot{q}_i} \Big|_{t=t_{n+1}} &= \frac{\partial \bar{Q}_i(t_{n+1})}{\partial \dot{q}_{n+1}} = k_i h \end{aligned} \quad (29)$$

すなわち、 $\partial \bar{Q}_i / \partial q_k$ および $\partial \bar{Q}_i / \partial \dot{q}_k$ は次のように計算することができる。

$$\frac{\partial \bar{Q}_i}{\partial q_k} = 0, \quad \frac{\partial \bar{Q}_i}{\partial \dot{q}_k} = \begin{cases} k_i h & (k = i) \\ 0 & (k \neq i) \end{cases} \quad (30)$$

5. 数値計算による検証

図 3 のテストモデルに提案手法を適用し、有効性を確認した。図 6 および図 7 はそれぞれ関節に Maxwell モデル

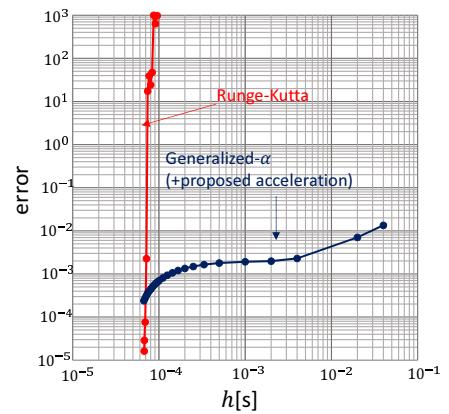


Fig. 6: Comparison of integration error

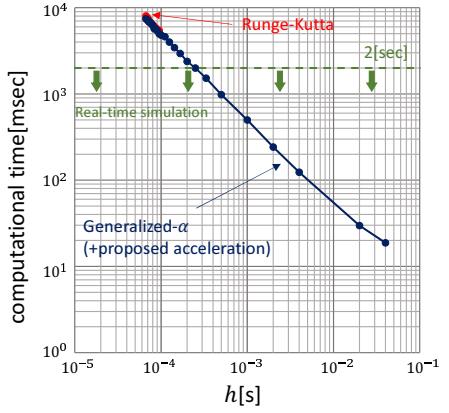


Fig. 7: Comparison of computational time

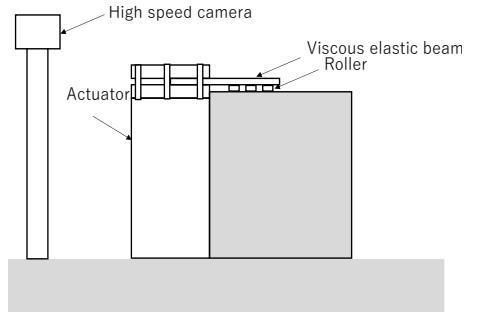


Fig. 8: Experimental system

を付加した場合の誤差と計算時間が時間刻み幅 h によってどのように変化するかを示したものである。これらの図より、高速かつ安定な計算法が構築できていることが確認できる。今後、図 8 のような実験システムを用いて提案手法の妥当性を実験により検証する予定である。(結論省略)

参考文献

- [1] Arnold, M., and Bruls, O., "Convergence of the generalized- α scheme for constrained mechanical systems", Multibody System Dynamics, Vol. 18, No. 2 (2007), pp. 185-202.

マルチボディシステムの汎用的な力制御手法の検討

福岡大学 ○白泳宙, 井手俊佑, 岩村誠人

Examination of general-purpose force control method for multibody systems

Yeongju Baek, Shunsuke Ide and Makoto Iwamura, Fukuoka University

Abstract : When making a robot perform tasks such as deburring, polishing, and assembling that are constrained by an object or environment, it is necessary to take into consideration not only the position and orientation of the robot hand but also the interaction force generated with the environment. Robot motion control technology in such a constrained space is generally called robot force control, and has been studied for a long time. However, the conventional force control method is mainly a formulation that gives desirable compliance to the hands of serial-type robot manipulators. In this study, we propose a general-purpose force control method that can give desirable compliance to any point of a mechanical system having an arbitrary topology by using multibody dynamics.

1. 緒言

ロボットにバリ取り, 研磨, 組み立てなどの対象物や環境から拘束を受ける作業を行わせるとき, ロボットハンドの位置姿勢だけでなく, 環境との間に発生する相互作用力を制御する必要がある。このような拘束空間におけるロボットの運動制御技術は一般にロボットの力制御と呼ばれています。古くから研究が行われている [1, 2, 3, 4]。しかし、従来の力制御手法は主に図 1(a) に示すような直鎖構造のロボットの先端に望ましいインピーダンスやコンプライアンスを与える定式化となっており、図 1(b) の木構造や図 1(c) の閉ループ構造等の複雑なトポロジーを有する一般的な機械システムに対しては直接には適用することができない。そこで、本研究ではマルチボディダイナミクス [5] を用いて任意のトポロジーを有する複雑な機械システムの任意点に望ましいインピーダンス特性を与えることができる汎用的な力制御手法を定式化することを試みる。まず、従来のロボットの力制御（インピーダンス制御）について簡単にまとめた後、提案する汎用的な力制御手法について述べる。ここでは、両手法の比較を行いやすくするために、鉛直平面内を動く 2 自由度システムの 1 点に作用する力を制御する場合について説明する。

2. ロボットの力制御

本章では、ロボットの力制御手法の一つであるインピーダンス制御についてまとめる。インピーダンス制御とは、ロボットの手先に外から力を加えた場合に生じる機械的なインピーダンス（慣性、減衰係数、剛性）を、目的の作業に都合の良い値に設定するための制御手法である。ここで

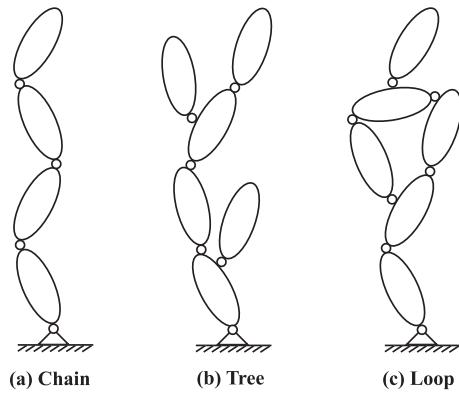


Fig. 1 Topology of multibody systems

は、簡単のために図 2 に示すような 2 関節ロボットマニピュレータの場合を想定して説明する。

手先の位置ベクトル \mathbf{r} と関節変数ベクトル $\boldsymbol{\theta}$, およびその速度, 加速度の関係は次式のように表せる。

$$\mathbf{r} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\theta}) \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (2)$$

$$\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{J} = \partial\mathbf{f}/\partial\boldsymbol{\theta}$ はヤコビ行列である。手先に加わる力 \mathbf{F} に対して作業座標系での手先の望ましいインピーダンス特性を次のように表す。

$$\mathbf{M}_d\ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{D}_d\Delta\dot{\mathbf{r}} + \mathbf{K}_d\Delta\mathbf{r} = \mathbf{F} \quad (4)$$

ただし、 $\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r} - \mathbf{r}_d$, $\Delta\dot{\mathbf{r}} = \dot{\mathbf{r}} - \dot{\mathbf{r}}_d$ と定義しており、 \mathbf{r}_d は手先位置 \mathbf{r} の目標軌道である。また、 $\mathbf{M}_d, \mathbf{D}_d, \mathbf{K}_d$ は望ましい慣性特性、減衰特性、剛性特性を表す行列である。

一方、手先に外力 \mathbf{F} が作用するロボットの運動方程式は次式のように表せる。

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta})\mathbf{F} \quad (5)$$

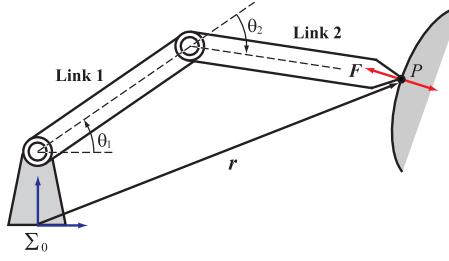


Fig. 2 Impedance control of robotic manipulators

ここで、 \mathbf{M} は慣性行列、 \mathbf{h} は遠心力・コリオリ力ベクトル、 \mathbf{g} は重力ベクトル、 $\boldsymbol{\tau}$ は関節駆動トルクベクトルである。

式(1)から(3)を式(5)に代入して整理することにより、次のような作業座標系におけるロボットの運動方程式

$$\mathbf{M}_r \ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{h}_r = \mathbf{J}^{-T} \boldsymbol{\tau} + \mathbf{F} \quad (6)$$

を得る。ここで、 \mathbf{M}_r , \mathbf{h}_r はそれぞれ

$$\mathbf{M}_r = \mathbf{J}^{-T} \mathbf{M} \mathbf{J}^{-1} \quad (7)$$

$$\mathbf{h}_r = \mathbf{J}^{-T} (\mathbf{h} + \mathbf{g}) - \mathbf{M}_r \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (8)$$

のように定義される行列およびベクトルである。

式(4)のインピーダンス特性を実現する関節駆動トルクは、式(4)を式(6)に代入して整理することにより、次式のように計算することができる。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \{ \mathbf{M}_r \mathbf{M}_d^{-1} (-\mathbf{D}_d \Delta \dot{\mathbf{r}} - \mathbf{K}_d \Delta \mathbf{r}) + \mathbf{K}_f \mathbf{F} + \mathbf{h}_r \} \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{K}_f = \mathbf{M}_r \mathbf{M}_d^{-1} - \mathbf{E}$ と定義しており、 \mathbf{E} は単位行列である。

以上の方針は、3次元空間内を移動する6関節ロボットマニピュレータの手先の力制御をする場合にも適用可能であるが、直鎖構造を仮定しており、他のトポロジーを有する機構に対しては直接には適用することができない。また、手先以外の点でのインピーダンス特性を指定することも難しいという問題がある。

3. 汎用的な力制御手法の提案

本章では、マルチボディダイナミクスを用いてロボットのインピーダンス制御を様々な機械システムに対して適用できるように拡張することを考える。マルチボディダイナミクスとは、図3のような多数の物体がジョイントや力要素を介して複雑に連成したシステムの運動方程式を効率的かつシステムチックに導出するための理論である[5]。全体で N 個のボディからなるシステムを考え、その i 番目のボディの一般化座標を \mathbf{q}_i とする。ロボット工学では、通常隣り合うボディ間の相対角度や相対変位が一般化座標と

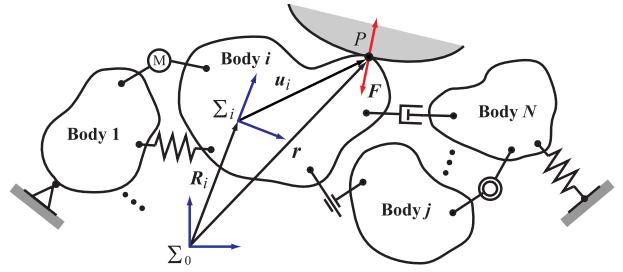


Fig. 3 Impedance control of multibody systems

して用いられるが、マルチボディダイナミクスでは、絶対座標系 Σ_0 の原点からボディ座標系 Σ_i の原点への位置ベクトル \mathbf{R}_i と絶対座標系 Σ_0 からみたボディ座標系 Σ_i の絶対角 ϕ_i が用いられ、 $\mathbf{q}_i = [\mathbf{R}_i^T \ \phi_i]^T$ となる。システムの全一般化座標は $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_1^T \ \mathbf{q}_2^T \ \dots \ \mathbf{q}_N^T]^T$ と定義される。

ボディ i 上の点 P に外力 \mathbf{F} が作用するとする。絶対座標系からみた点 P の位置、速度、加速度はそれぞれ次のように計算できる。

$$\mathbf{r} = \mathbf{R}_i + \mathbf{A}_i \bar{\mathbf{u}}_i \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{L}_i \dot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{L} \dot{\mathbf{q}} \quad (11)$$

$$\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{L}_i \ddot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{a}_i^v = \mathbf{L} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{a}^v \quad (12)$$

ここで、 \mathbf{A}_i はボディ座標系 Σ_i から絶対座標系 Σ_0 への回転行列、 $\bar{\mathbf{u}}_i$ はボディ座標系 Σ_i の原点から点 P への位置ベクトルであり、オーバーラインはそれをボディ座標系 Σ_i で成分表示していることを意味する。また、 $\mathbf{L}_i = [\mathbf{E} \ \mathbf{A}_i \mathbf{V}_i \bar{\mathbf{u}}_i]$, $\mathbf{a}_i^v = \mathbf{a}^v = -\mathbf{A}_i \bar{\mathbf{u}}_i (\dot{\phi}_i)^2$ である。第2章と同様に点 P に加わる力 \mathbf{F} に対して点 P における望ましいインピーダンス特性を次のように表す。

$$\mathbf{M}_d \ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{D}_d \Delta \dot{\mathbf{r}} + \mathbf{K}_d \Delta \mathbf{r} = \mathbf{F} \quad (13)$$

各種ジョイントによるボディ間の相対自由度の拘束は一般に式(14)のような非線形代数方程式によって記述できる。式(14)を時間で微分することにより、速度レベルの拘束式(15)および加速度レベルの拘束式(16)が得られる。

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, t) = \mathbf{0} \quad (14)$$

$$\mathbf{C}_{\mathbf{q}} \dot{\mathbf{q}} = \nu \quad (15)$$

$$\mathbf{C}_{\mathbf{q}} \ddot{\mathbf{q}} = \gamma \quad (16)$$

ここで、 $\mathbf{C}_{\mathbf{q}} = \partial \mathbf{C} / \partial \mathbf{q}$ はヤコビ行列であり、 $\nu = -\mathbf{C}_t$, $\gamma = -(\mathbf{C}_{\mathbf{q}} \dot{\mathbf{q}})_q \dot{\mathbf{q}} - 2 \mathbf{C}_{\mathbf{q}t} \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{C}_{tt}$ と定義している。

一方、点 P に作用する外力 \mathbf{F} を考慮したマルチボディシステムの運動方程式は次のように表せる。

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_{\mathbf{q}}^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q}^v + \mathbf{Q}^e + \mathbf{H} \boldsymbol{\tau} + \mathbf{L}^T \mathbf{F} \quad (17)$$

ここで、 \mathbf{M} は一般化質量行列、 \mathbf{Q}^v は速度2乗慣性力ベクトル、 \mathbf{Q}^e は重力やばね・ダンパ等の力による一般化外力

ベクトル, \mathbf{H} は入力変換行列, $\boldsymbol{\tau}$ はアクチュエータ駆動力・トルクベクトル, $\boldsymbol{\lambda}$ は拘束反力を表すラグランジュ乗数ベクトルである。

マルチボディダイナミクスでは、既に様々なタイプのジョイントについて、拘束方程式 \mathbf{C} やそのヤコビ行列 \mathbf{C}_q , 右辺ベクトル $\boldsymbol{\nu}$, $\boldsymbol{\gamma}$ が具体的に求められている。また、種々の要素に対する一般化外力 \mathbf{Q}^e 等も事前に求められライブラリ化されている。そのため、それらを利用して複雑な機械システムの運動方程式も効率的かつシステムアチックに構築することが可能である。

点 P において望ましいインピーダンス特性を実現するためには、式(13)より計算される $\ddot{\mathbf{r}}$ と式(12)の $\ddot{\mathbf{r}}$ が一致する必要があるため、次式が成り立つ。

$$\mathbf{L}\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{M}_d^{-1}(\mathbf{F} - \mathbf{D}_d\Delta\dot{\mathbf{r}} - \mathbf{K}_d\Delta\mathbf{r}) - \mathbf{a}^v \equiv \hat{\boldsymbol{\gamma}} \quad (18)$$

式(16)と式(18)をまとめると次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_q \\ \mathbf{L} \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\gamma} \\ \hat{\boldsymbol{\gamma}} \end{bmatrix} \quad (19)$$

一方、式(17)は次のように書き直すことができる。

$$[\mathbf{C}_q^T \ - \mathbf{H}] \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^v + \mathbf{Q}^e + \mathbf{H}\boldsymbol{\tau} + \mathbf{L}^T\mathbf{F} - \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} \quad (20)$$

式(20)の両辺に左側から \mathbf{M}^{-1} をかけて式(19)を用いると次式のようになる。

$$\begin{aligned} & \mathbf{M}^{-1}[\mathbf{C}_q^T \ - \mathbf{H}] \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{Q}^v + \mathbf{Q}^e + \mathbf{L}^T\mathbf{F}) - \left[\begin{bmatrix} \mathbf{C}_q \\ \mathbf{L} \end{bmatrix} \right]^{-1} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\gamma} \\ \hat{\boldsymbol{\gamma}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

さらに、式(21)の両辺に左から式(19)の左辺の係数行列を乗じると次のようなになる。

$$\begin{aligned} & \left[\begin{bmatrix} \mathbf{C}_q \\ \mathbf{L} \end{bmatrix} \mathbf{M}^{-1}[\mathbf{C}_q^T \ - \mathbf{H}] \right] \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} \\ &= \left[\begin{bmatrix} \mathbf{C}_q \\ \mathbf{L} \end{bmatrix} \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{Q}^v + \mathbf{Q}^e + \mathbf{L}^T\mathbf{F}) \right] - \begin{bmatrix} \boldsymbol{\gamma} \\ \hat{\boldsymbol{\gamma}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

上式を整理することにより次式が得られる。

$$\begin{aligned} & \left[\begin{bmatrix} \mathbf{C}_q \mathbf{M}^{-1} \mathbf{C}_q^T & -\mathbf{C}_q \mathbf{M}^{-1} \mathbf{H} \\ \mathbf{L} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{C}_q^T & -\mathbf{L} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{H} \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} \\ &= \left[\begin{bmatrix} \mathbf{C}_q \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{Q}^v + \mathbf{Q}^e + \mathbf{L}^T\mathbf{F}) - \boldsymbol{\gamma} \\ \mathbf{L} \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{Q}^v + \mathbf{Q}^e + \mathbf{L}^T\mathbf{F}) - \hat{\boldsymbol{\gamma}} \end{bmatrix} \right] \end{aligned} \quad (23)$$

この線形方程式を解くことによって、点 P に式(13)のインピーダンス特性を実現するために必要なアクチュエータ駆動力・トルク $\boldsymbol{\tau}$ を得ることができる。

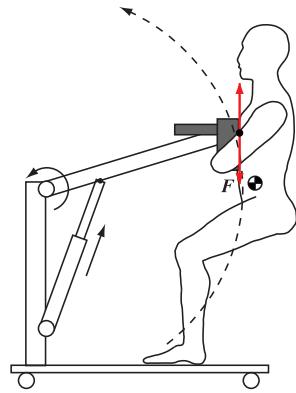


Fig. 4 Impedance control of standing lift for nursing care

4. 適用例

提案手法の妥当性を確認するために、まず直鎖状のロボットマニピュレータに対して適用し、従来のロボット工学の手法を適用した場合と同様の結果が得られることを確認した。その後、従来のロボット工学の手法は適用することができない図4に示すような移乗介護リフトの力制御問題に応用して適用範囲が拡大していることを確認した。計算結果の詳細については、講演当日に発表する。

5. 結言

本稿では、ロボット工学の分野で提案されている力制御手法（インピーダンス制御）をマルチボディダイナミクスを用いて拡張した。提案手法は、(1) 任意の構造の機械システムに適用可能、(2) 機構の先端だけでなく任意点のインピーダンスを指定可能、(3) モデリングおよび計算にマルチボディダイナミクスの豊富なライブラリを利用可能、などの特徴をもつ。今後は、様々な機械システムに適用することでその有用性を実証していく予定である。

参考文献

- [1] 吉川恒夫：ロボットにおける力制御の現状と将来，日本ロボット学会誌，9-6, pp. 746-750, (1991)
- [2] 小林尚登ら著，計測自動制御学会編：ロボット制御の実際，コロナ社，(1997)
- [3] 川崎晴久：ロボット工学の基礎（第2版），森北出版，(2012)
- [4] 山野辺夏樹：マニピュレーションにおける力制御の動向，計測と制御，56-10, (2017)
- [5] 岩村誠人：マルチボディダイナミクス入門，森北出版，(2018)

自律移動ロボットのための地図の更新手法

福岡大学 ○松岡毅

Update Method of Map for Autonomous Mobile Robot Takeshi Matsuoka, Fukuoka University

Abstract: We propose a map updating method for an autonomous mobile robot. For navigation, the robot has several "regional potential maps", a "target point potential map" and a "transfer transit MATRIX". When the robot has to change its route, it changes the "transfer transit MATRIX".

1. はじめに

自律移動ロボットが目標地点まで確実にナビゲーションを行うには、以下の機能が必要となる。

- 移動開始前に目標地点までの移動経路を生成する。
- 移動中は歩行者などの予期せぬ障害物を発見し、局所的に移動経路を修正する[2]。
- 移動中の局所的な移動経路修正を行ってもなお目標地点に到達可能か否かを判断し、否と判断した場合には移動経路を破棄して新たに移動経路を生成する[3]。

我々の移動ロボット[1]は、移動経路生成のために「ポテンシャル地図」を利用している。これは、水平2次元のビットマップ地図であり、目標地点のポテンシャル値を0とし、他の地点のポテンシャル値を目標地点から離れるほど大きな値としたものである。ロボットは、自己位置近傍のポテンシャル値を取得し、ポテンシャル値が低い方向への移動を繰り返すことにより、最終的にポテンシャル値0の目標地点に到達する。

この手法では、ロボットが移動開始前に生成したポテンシャル地図を破棄して新たにポテンシャル地図を生成しなくてはならなくなったり際に、多くの時間的コストを費やしてしまう。本稿では、ロボットの行動環境を複数の領域に分割し、目標地点への移動を(1)目標地点に近付くための領域間の移動、と(2)最終的な目標地点への移動、の2つのフェイズに分けることにより、この問題を解決する手法を提案する。

ところで、ロボットは、移動中は移動経路生成の他に、自己位置姿勢を決定しなければならないが、本稿では移動経路生成の問題のみに着目し、自己位置姿勢決定の問題には言及しない。

2. ロボットが生成する1つのMATRIXと2種類の地図

オペレータは、ロボットの行動環境について「ロボット存在許可地図」と「移動コストMATRIX」を作成する。ロボットはこれらを用いて「移動経由MATRIX」と「領域ポテンシャル地図」、「目標地点ポテンシャル地図」を生成する。

2.1. ロボット存在許可地図の作成

- オペレータは、ロボットが行動する環境を以下の4種に分類する。
- ロボットが存在可能で立入りが許可されている領域(A領域)
 - ロボットが存在可能で立入りが推奨されていない領域(B領域)
 - ロボットが存在可能で立入りが禁止されている領域(C領域)
 - 壁面内部など、ロボットが存在不可能な領域(D領域)
- オペレータはロボットが存在可能な領域を分割し、これを水平2次元ビットマップ形式の「ロボット存在許可地図」として以下のように作成する。
- 分割した各々の領域に番号をつける。ロボット存在許可地図のひとつひとつのピクセルに、そのピクセルが属する領域の番号を紐づける。
 - 各々の領域の中央付近をその領域の代表点として設定する。

2.2. 移動コストMATRIXの作成

オペレータは、ある領域が別の領域に接続している場合、領域間を移動するための移動コストを設定する。移動コストの設定によって、オペレータはA、B領域を間接的に設定できる。また、「領域が接続しているが移動が禁止されている」設定を行うことにより、C領域の設定や一方通行の指定を行うことができる。

Fig. 1に眼鏡状のフロアを7つの領域に分割した例を示す。矢印の先のカッコ内の数値が移動コストである。Hは領域が接続しているが移動が禁止されていることを示す。領域1、2、3、5、7はA領域である。領域6はB領域である。また、領域4はA領域であるが、一方通行が指定されている。C領域は設置されていない。黒で塗りつぶした領域がD領域である。

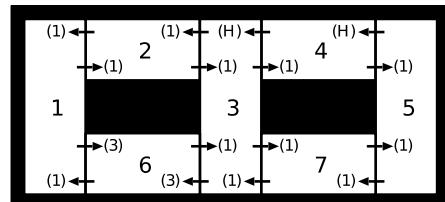


Fig. 1 Area Partitioning

オペレータは、設定した移動コストをもとに、「移動コストMATRIX」を作成する。Fig. 1に基づいて作成した移動コストMATRIXを、Table 1に示す。第i行第j列要素の数値は、領域jから領域iへの移動コストを示す。Hは領域が接続しているが移動が禁止されていることを示す。値が入力されていない要素は領域jと領域iが接続していないことを示す。

		From						
		1	2	3	4	5	6	7
To	1	-	1	-	-	-	1	-
	2	1	-	1	-	-	-	-
	3	-	1	-	H	-	1	1
	4	-	-	1	-	H	-	-
	5	-	-	-	1	-	-	1
	6	3	-	3	-	-	-	-
	7	-	-	1	-	1	-	-

Table 1 Transfer Cost Matrix

2.3. 移動経由MATRIXの生成

ロボットは、オペレータが作成した移動コストMATRIXをもとに、「移動経由MATRIX」を生成する。Table 1をもとに生成した移動経由MATRIXをTable 2に示す。第i行第j列要素の数字は、最終的に領域iに到達するために、領域jからひとまず移動しなくてはならない領域の番号を示す。カッコ内の数値は領域iに到達するための総移動コストを示す。

移動経由MATRIXの各要素は、最終的に到達したい領域を根ノードとした木構造を作成して決定していく。木構造の各ノードにおける処理は以下の通りである。

- ノードは「領域番号」と「移動コスト」の2つの要素を持つ。移動コストは最終的に到達したい領域までの総移動コストである。

- 親ノードの領域番号は、最終的に到達したい領域に移動するためにひとまず移動しなくてはならない領域の番号である。
- 各ノードにおいて、移動コストMATRIXを参照して子ノードを作成する。あるノードの領域番号が i の時、移動コストMATRIXの第 i 行を参照し、移動コストが設定されている列の番号が子ノードの領域番号になる。子ノードに設定する移動コストは、親ノードの移動コストに移動コストMATRIXから得られた移動コストを足したものになる。
- 領域番号が同じノードが複数現れた場合には、移動コストが小さいノードを残し、移動コストが同じか、または大きいノードは木構造から削除する。

		From						
		1	2	3	4	5	6	7
To	1	-	1(1)	2(2)	5(5)	7(4)	1(1)	3(3)
	2	2(1)	-	2(1)	5(4)	7(3)	1(2)	3(2)
	3	2(2)	3(1)	-	5(3)	7(2)	3(1)	3(1)
	4	2(3)	3(2)	4(1)	-	7(3)	3(2)	3(2)
	5	2(4)	3(3)	4(2)	5(1)	-	3(3)	5(1)
	6	6(3)	1(4)	6(3)	5(6)	7(5)	-	3(4)
	7	2(3)	3(2)	7(1)	5(2)	7(1)	3(2)	-

Table 2 Transfer Transit Matrix

2.4. 領域ポテンシャル地図の生成

ロボットは、オペレータが作成したロボット存在許可地図と移動コストMATRIXをもとに、領域ポテンシャル地図を生成する。1つの領域について、1つの領域ポテンシャル地図が生成される。ロボットが、ある領域の領域ポテンシャル地図を生成する手順は以下の通りである。

1. 移動コストMATRIXを参照して、ある領域と接続した領域を得る。
2. ある領域と、ある領域と接続した領域を合わせた領域について、ある領域の代表点を目標地点として各々のピクセルにポテンシャル値を設定し、領域ポテンシャル地図を得る。

Fig.1 の領域 1 の領域ポテンシャル地図は、領域 1, 2, 6 を合わせた領域の各ピクセルにポテンシャルを設定したものになる。

2.5. 目標地点ポテンシャル地図の生成

ロボットは、オペレータから与えられた移動目標地点をもとに「目標地点ポテンシャル地図」を生成する。これは、目標地点が存在する領域において、その各ピクセルにポテンシャルを設定したものである。

3. ロボットのナビゲーション

ロボットは、目標地点への移動を(1)目標地点に近付くための「領域間移動フェイズ」と(2)最終的な目標地点へ移動する「最終移動フェイズ」の2つのフェイズを通じて達成する。

3.1. 領域間移動フェイズ

ロボットが領域間を移動していく手順は以下の通りである。

1. ロボットは、自身が存在している領域を、自己位置とロボット存在許可地図をもとに得る。
2. ロボットは、移動経由MATRIXをもとに、自分がひとまず移動すべき領域を得る。
3. ロボットは、自分がひとまず移動すべき領域の領域ポテンシャル地図に従って移動を行う。1. ~ 3. を繰り返す。
4. 自身が存在している領域が、目標地点が存在する領域だった場合、この領域に達する直前に通過した領域を記録し、「最終移動フェイズ」に移行する。

3.2. 最終移動フェイズ

ロボットが目標地点に到達する手順は以下の通りである。

- ロボットは目標地点ポテンシャル地図に従って移動を行う。

3.3. 移動経路の再生成

ロボットが現状の移動経路では目標地点に到達できないと判断した場合、移動経路を破棄して以下の手順で移動経路を再生成する。

- ナビゲーションが領域間移動フェイズの場合
ロボットは移動コストMATRIXを更新し、自身が存在している領域からひとまず移動しようとしている領域への移動コストを「一時不通」にする。更新した移動コストMATRIXをもとに新たに移動経由MATRIXを生成し、ナビゲーションを再開する。

- ナビゲーションが最終移動フェイズの場合
ロボットは、まず、最終移動フェイズに移行する直前に通過した領域に移動する。次にロボットは移動コストMATRIXを更新し、自身が存在している領域から目標地点が存在する領域への移動コストを「一時不通」にする。そして更新した移動コストMATRIXをもとに新たに移動経由MATRIXを生成し、領域間移動フェイズでナビゲーションを再開する。

ロボットが Fig.1 の環境において領域 2 から領域 1 への移動が不可能であると判断した場合に書き直された移動コスト MATRIX を Table 3 に示す。第1行第2列が 1 から F (一時不通) に更新されている。また、新たに生成された移動経由 MATRIX を Table 4 に示す。

		From						
		1	2	3	4	5	6	7
To	1	-	F	-	-	-	1	-
	2	1	-	1	-	-	-	-
	3	-	1	-	H	-	1	1
	4	-	-	1	-	H	-	-
	5	-	-	-	1	-	-	1
	6	3	-	3	-	-	-	-
	7	-	-	1	-	1	-	-

Table 3 Reconstructed Transfer Cost Matrix

		From						
		1	2	3	4	5	6	7
To	1	-	3(5)	6(4)	5(7)	7(6)	1(1)	3(5)
	2	2(1)	-	2(1)	5(4)	7(3)	1(2)	3(2)
	3	2(2)	3(1)	-	5(3)	7(2)	3(1)	3(1)
	4	2(3)	3(2)	4(1)	-	7(3)	3(2)	3(2)
	5	2(4)	3(3)	4(2)	5(1)	-	3(3)	5(1)
	6	6(3)	3(4)	6(3)	5(6)	7(5)	-	3(4)
	7	2(3)	3(2)	7(1)	5(2)	7(1)	3(2)	-

Table 4 Reconstructed Transfer Transit Matrix

4. おわりに
屋内用自律移動ロボットが生成済みの移動経路を破棄して移動経路を再生成する手法を述べた。従来手法はポテンシャル地図を再生成しなくてはならないため、時間的コストがかかっていた。本稿で提案する手法は移動コストMATRIXと移動経由MATRIXの再構成のみを行うため、時間的コストを削減できる。

参考文献

- [1] 松岡毅：“屋内用全方位移動ロボット台車の作製”，第37回計測自動制御学会九州支部学術講演会予稿集，pp. 111-112，(2018)
- [2] 松岡毅：“屋内用移動ロボットのための地図システム”，第38回計測自動制御学会九州支部学術講演会予稿集，pp. 107-108，(2019)
- [3] 松岡毅：“屋内用移動ロボットの行動戦略”，第39回計測自動制御学会九州支部学術講演会予稿集，pp. 74-75，(2020)

MR デバイスを用いた仮想空間と実空間の バイラテラル制御系の構築

熊本大学 ○桑原 聖貴, 松永 信智, 岡島 寛

Construction of Bilateral Control System for Virtual and Real Spaces Using MR Devices

Masaki KUWAHARA, Naoki MIYAMURA, Nobutomo MATSUNAGA, Hiroshi OKAJIMA
Kumamoto University

Abstract: The use of 3D stone data is attracting attention in Kumamoto Castle restoration support. Digital data stones can be grabbed, turned, lifted, and so on in the same way as real stones. The actual stones are assembled at the castle. If the attitude angle of the virtual stone is controlled, an actual stone mounted on the crane will be controlled in coordination with the operation of the virtual stone. As a result, instinctive and safe assemble works can be realized using virtual stones. In this paper, as a preliminary experiment, we construct a bilateral control system in virtual space and real space using MR devices. The simple operation is experimented using the proposed system.

1 はじめに

熊本城修復支援において石垣石材の3Dデータの利用が注目されている。石材の3Dデータはアーカイブデータとして利用できるが、石垣の修復計画への利用も期待される¹⁾。筆者らは、CMG (Control Moment Gyro) クレーンを用いて石材を滑らかに回転させ、石材の3Dデータの高速計測装置を設計した²⁾。

近年では現実世界の形状などをデバイスが把握し、それらにデジタル映像を合わせる複合現実 (Mixed Reality:MR) を使った作業が注目されている。MR を用いることで操作者は仮想現実と実空間を同時に見ながら操作をすることができる。例えば修復計画への利用に際しては、実際の石材を移動させるのではなく、まず計測した仮想石材を操作することで石材が組み上げられる事を事前確認ができる。

Fig.1 は MR デバイスを用いて取得した模擬石材のデジタルデータを使って石垣の再配置を行っている様子である。デジタルデータの石材は掴む、回す、持ち上げるなどといった動作を実物の石材と同じように行うことができる。この作業の後に、現場では実際に石材を組み上げるが、石材のデータの操作と同じように、クレーンに搭載された石材と仮想石材の姿勢角を連動させて制御できれば、直感的で安全な作業が実現できると考える。

姿勢角を連動させる操作では、HoloLens2 を用いて仮想空間での仮想石材操作と CMG クレーンを使った石材操作のバイラテラル制御系を検討している。本論文では、



Fig.1: Ishigaki relocation simulation

その予備実験として MR デバイスを用いた仮想空間と実空間のバイラテラル制御系を構築し、操作実験を行う。

2 対称型バイラテラル制御

バイラテラル制御とはマスタからスレーブへ姿勢を指示し位置決めを行う制御系と、作業を伴う反力などをスレーブからマスタへ伝達する制御系を制御する方式のことである³⁾。バイラテラル制御には、いくつか制御方法が提案されており、主なものとして、対称型、力逆走型、力帰還型などが挙げられる。対称型はマスタとスレーブの両方に位置制御系を配置し、相手方の位置が目標値となるような閉ループ系を構成する。力逆走型と力帰還型では、スレーブ側で検出された力を目標値とするような力制御系をマスタに構成する。仮想空間では力センサが使いづらいことから、本研究では力センサの不要な対称型を用いる。

Fig.2 に予備実験に用いるバイラテラル制御のブロック線図を示す。スレーブは慣性負荷を装着した一軸モータを用いる。また、マスタ側は仮想空間上に構築する。MR 空間で作業を行うために HoloLens2 を用いる⁴⁾。アプリケーションの開発には Unity を用いる。Unity とはアプリケーションの統合開発環境である⁵⁾。

今回のシステムでは、マスタ側は仮想空間で操作され人間が直接操作する点が大きく異なっている。MR 空間に仮想空間で操作を行う際に直接実体を操作するわけではないため、手で反力を感じることができない。そのため、仮想空間での反力を表現するために、Fig.4 に示すように負荷をかける操作用の円板 Manipulate Master と実際に回す Virtual Master の二つのオブジェクトを用意した。なお、同図では説明用に Manipulate Master を画面上に表示しているが、実際の実験では操作者がわからない様に表示していない。また、Virtual Master の上にあるインジケーターは仮想空間上の操作者の感じる反力を示すインジケーターで、反力が大きくなると赤の棒が長く伸びる。

一般的な対称型バイラテラル制御の場合、マスタ、スレーブに発生する駆動力は f_m , f_s は、マスタ、スレーブ

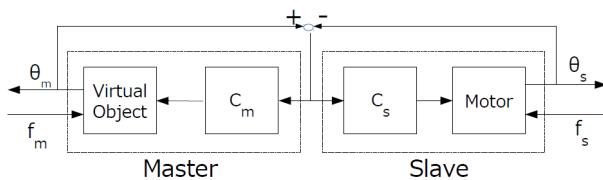


Fig.2: Symmetric bilateral control system

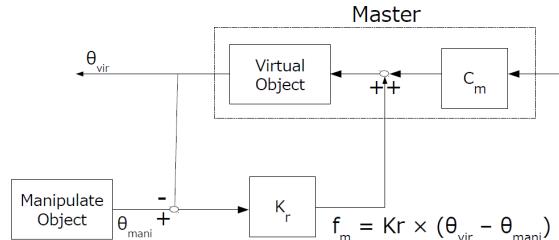


Fig.3: Block diagram of reaction force

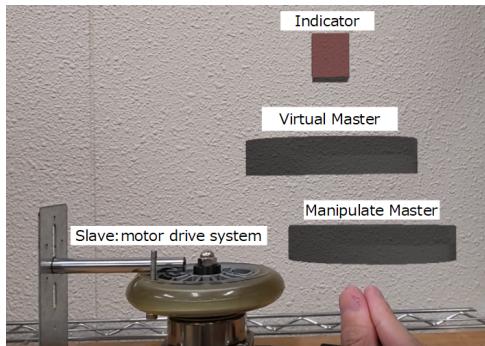


Fig.4: Experimental system

の変位をそれぞれ X_m , X_s , 位置ゲインを K_p として次式で表される⁶⁾.

$$f_m = K_p(X_s - X_m), \quad f_s = K_p(X_m - X_s) \quad (1)$$

上式より、自由空間ではマスタ, スレーブの両者の角度が一致し反力 f_m は小さい。また、モータが壁に接触している拘束空間ではマスタの操作に追従できていないため f_m は大きくなる。Fig.3 に本システムにおける仮想空間上で反力表現のブロック線図を示す。このシステムでは Manipulate Master と Virtual Master の間に仮想的なバネを配置した。仮想空間のマスタと実システムであるスレーブ間の角度情報は、UDP 通信によって送受信される。

3 操作実験

Fig.2 に示した対象型バイラテラル制御系を用いて操作実験を行う。操作実験では操作者は HoloLens2 を装着し、Manipulate Master を指で掴んで回転操作させる。

Fig.5 の実験が Virtual Master の角度を、点線がモータの角度を示す。図中で両者の角度が一致しているところは自由空間であり、マスタ, スレーブの角度の誤差は小さい。初期角から約 80[deg] の位置にモータの動きを止める障害物を設置している。拘束空間では Virtual Master は回転するが、スレーブのモータはそれ以上回転できてい

ない。Virtual Master を障害物から遠ざけると回転角は再び一致する。

Fig.6 にマスタ操作時の反力の応答波形を示す。図に示す様に自由空間では、ほとんど反力は発生していないが、拘束されたとき反力が発生していることが確認できる。

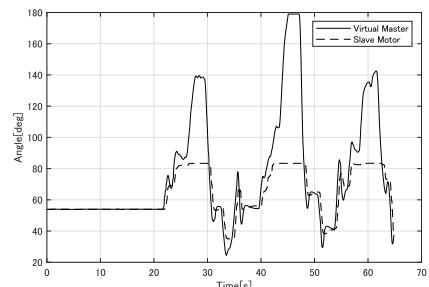


Fig.5: Angle of master-slave system

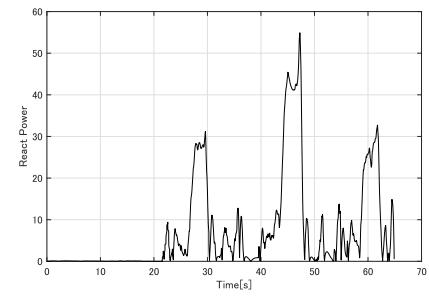


Fig.6: React force of master system

4 結言

本論文では、仮想空間と実空間における対象型マスタ・スレーブ制御系を構築した。実験結果では、仮想空間上の Manipulate Master を操作することで、マスタの Virtual Master, スレーブのモータの両者の角度が制御できることが確認できた。今後は本システムを CMG クレーンに適用し、VR 用の振動グローブを使って石材の操作を行う予定である。

参考文献

- [1] 小柳ほか, ジャイロ効果を利用した小型クレーンのモデル誤差抑制補償器による操作支援制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2A2-A05, 2018
- [2] 松永ほか, 熊本城の石垣石材の 3D デジタルモデルの計測を目的としたモデル誤差抑制補償器による CMG クレーンの制御, 日本機械学会論文集, Vol.87, No.893, 2021
- [3] 井上ほか, マスタスレーブ・マニピュレータのインピーダンス制御の一方法, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.4, pp.490-500, 1992
- [4] Microsoft HoloLens2, "https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens/hardware" (参照日 2021 年 10 月 11 日)
- [5] Unity, "https://unity.com/" (参照日 2021 年 10 月 11 日)
- [6] 小林ほか, "ロボット制御の実際", 計測自動制御学会, 1997

複数ロボットが連携する最短時間搬送同期制御問題の一定式化

九州大学 ○松本大輝 湯野剛史 川邊武俊
日産自動車（株） 長山森 三輪紘敬

A formulation of the minimum-time transfer and synchronization control problem for multiple-robot cooperation

Hiroki Matsumoto, Tsuyoshi Yuno and Taketoshi Kawabe, Kyushu University
Mori Nagayama and Hirotaka Miwa, Nissan Motor Co., Ltd.

Abstract: The goal of this research is to generate synchronized trajectories for multiple-robot manipulators that follow a target path composed by points in the 3-dimensional space, keeping given tolerance, with minimum traversing time to the destinations. In this paper, we present a formulation of the minimum-time transfer and synchronization control problem by constructing a tube-shaped target course based on the target path and the tolerance. We present the numerical results for the case of a single robot in order to verify the formulation.

Keyword: transport, robot, optimal control

1. はじめに

近年、ロボット工学の発達により、物体の搬送や加工などさまざまな場面でロボットマニピュレータが使用されている。このような場面において、ロボットの軌道を計画する際には、搬送（加工）精度が重視される反面、搬送時間の最短化が考慮されていないことが多い。また、複数台の汎用ロボットを同期させると、相互の通信が搬送時間を増加させることがある。

そこで本研究では、従来の搬送精度を重視した目標経路から、許容誤差を考慮したチューブ状の目標コースを構成し、ロボットにそのコース内を最速でたどらせるための軌道を導出する問題を最適制御問題として定式化する。さらに、ロボットが2台の場合の定式化の一例を示す。

また、ロボット1台分に関しての数値計算結果を示し、定式化の妥当性を検証する。

2. 最適制御問題への定式化

本研究では、事前に座標空間上の点群で目標経路と許容誤差情報が離散的なデータとして与えられていることを前提とする。目標経路と許容誤差データから3次スプライン補間を用いてチューブ状の目標コースを作成する。そのコース内を最速でたどる、ロボットの手先の軌道を導

出する。

ロボットのモデルは以下の式で与える。

$$\ddot{\mathbf{r}}(t) = \mathbf{u}(t) \quad (1)$$

\mathbf{r} はロボットの手先の位置ベクトル、 \mathbf{u} は制御入力である。

目標コースは、事前に与えられた目標経路と許容誤差データを3次スプライン補間し、(2)式で与える。

$$\boldsymbol{\eta}(s) = \begin{bmatrix} x_s(s) \\ y_s(s) \\ z_s(s) \end{bmatrix}, \sigma_s(s) \quad (2)$$

ここで、 x_s, y_s, z_s は目標コースの中心線、 σ_s は許容誤差を表す。なお、スプラインパラメータ s については、事前に与えられた目標経路の累積距離を用いる。

時刻 t におけるスプラインパラメータ s の位置を決定する制約は以下の式で与える。

$$\{\mathbf{r}(t) - \boldsymbol{\eta}(s)\}^T \frac{d}{ds} \boldsymbol{\eta}(s) = 0 \quad (3)$$

ロボットが目標コース内に存在するための条件は、以下の式で与える。

$$0 \leq \frac{\{\mathbf{r}(t) - \boldsymbol{\eta}(s)\}^T \{\mathbf{r}(t) - \boldsymbol{\eta}(s)\}}{\{\sigma_s(s)\}^2} \leq 1 \quad (4)$$

この他に、ロボットの手先の速度の上下限制約とスプラインパラメータの非負制約を与える。

さらに、2台のロボットを同期させるための条件

としてロボット間の相対距離に上下限を設ける。
以上から、ロボット2台分の最短時間搬送同期制御問題を以下のように定式化する。

$$\min_{\mathbf{u}_A, \mathbf{u}_B} J = \int_0^{t_f} 1 dt,$$

subject to

$$\ddot{\mathbf{r}}_A(t) = \mathbf{u}_A(t), \ddot{\mathbf{r}}_B(t) = \mathbf{u}_B(t),$$

$$\dot{s}_A = u_{sA}, \dot{s}_B = u_{sB},$$

$$\{\mathbf{r}_A(t) - \boldsymbol{\eta}_A(s_A)\}^T \frac{d}{ds_A} \boldsymbol{\eta}_A(s_A) = 0,$$

$$\{\mathbf{r}_B(t) - \boldsymbol{\eta}_B(s_B)\}^T \frac{d}{ds_B} \boldsymbol{\eta}_B(s_B) = 0,$$

$$0 \leq \frac{\{\mathbf{r}_A(t) - \boldsymbol{\eta}_A(s_A)\}^T \{\mathbf{r}_A(t) - \boldsymbol{\eta}_A(s_A)\}}{\{\sigma_{sA}(s_A)\}^2} \leq 1,$$

$$0 \leq \frac{\{\mathbf{r}_B(t) - \boldsymbol{\eta}_B(s_B)\}^T \{\mathbf{r}_B(t) - \boldsymbol{\eta}_B(s_B)\}}{\{\sigma_{sB}(s_B)\}^2} \leq 1,$$

$$\dot{\mathbf{r}}_A(t) \{\dot{\mathbf{r}}_A(t)\}^T \leq v_{\max A}^2,$$

$$\dot{\mathbf{r}}_B(t) \{\dot{\mathbf{r}}_B(t)\}^T \leq v_{\max B}^2,$$

$$D_1^2 \leq \{\mathbf{r}_A(t) - \mathbf{r}_B(t)\} \{\mathbf{r}_A(t) - \mathbf{r}_B(t)\}^T \leq D_2^2$$

$$s_A \geq 0, s_B \geq 0,$$

ここで、

$$\boldsymbol{\eta}_A(s_A) = \begin{bmatrix} x_{sA}(s_A) \\ y_{sA}(s_A) \\ z_{sA}(s_A) \end{bmatrix}, \boldsymbol{\eta}_B(s_B) = \begin{bmatrix} x_{sB}(s_B) \\ y_{sB}(s_B) \\ z_{sB}(s_B) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{r}_A(t) = \begin{bmatrix} x_A(t) \\ y_A(t) \\ z_A(t) \end{bmatrix}, \mathbf{r}_B(t) = \begin{bmatrix} x_B(t) \\ y_B(t) \\ z_B(t) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{u}_A(t) = \begin{bmatrix} f_{xA}(t) \\ f_{yA}(t) \\ f_{zA}(t) \end{bmatrix}, \mathbf{u}_B(t) = \begin{bmatrix} f_{xB}(t) \\ f_{yB}(t) \\ f_{zB}(t) \end{bmatrix}.$$

t_f は終端時刻である。

3. 数値例

2次元空間において、ロボットが1台の場合に関する数値例をFig. 1に示す。

目標経路に沿って最大速度で搬送させる場合にかかる時間は、4.60[s]であったのに対し、最適軌道を用いてロボットを搬送させる場合にかかる時間は4.15[s]であった。よって、搬送時間が短縮化でき

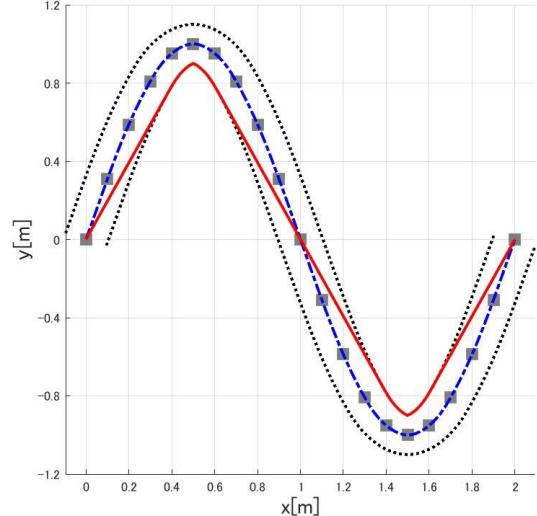


Fig. 1 Numerical results of the optimal trajectory.

■ : target path, ⋯ : target course,
— : center line of target course,
— : optimal trajectory.

ていることがわかる。また、最適軌道に応する経路が許容誤差内であることが確認できる。

4. まとめ

本稿では、ロボットが2台の場合における最短時間搬送同期制御問題に関して、最適制御問題を用いた定式化の一方法を示した。さらに、ロボット1台分に関しての数値例から、定式化した問題が数値的に解けることを確認した。

今後は、数値計算により本稿の定式化結果を用いた2台のロボットの同期制御が可能であることを示すとともに、ロボットのモデルを詳細化し、より現実的な形での検討を進めていく必要がある。

参考文献

- (1) Matthias Rieck, Guillermo P. Falconi, Matthias Gerdts and Florian Holzapfel, Periodic Full Circuit Race Line Optimization under Consideration of a Dynamic Model with Gear Changes, 2016 IEEE Conference on Control Applications, CCA 2016, art. no. 7588008, pp. 1470–1475, 2016.

PANOCによる非凸制約のある自動車の燃料消費最適制御

九州大学 ○欧鴻佳 Themelis Andreas 湯野剛史 川邊武俊

Optimal fuel consumption control of vehicles with nonconvex constraints by PANOC

Hongjia Ou, Andreas Themelis, Tsuyoshi Yuno, Taketoshi Kawabe,
Kyushu University

Abstract: This research aims to solve the nonconvex problem in vehicle fuel consumption function through PANOC algorithm, and realize the real-time fuel consumption optimization of automatic vehicles with nonconvex constraints through model predictive control.

1. はじめに

自動車の燃料消費最適問題は、グリーン経済の持続可能な発展に重要な課題である。自動車の燃料消費率と車両出力間の固有の非線形関係により、自動車の燃料消費率の数学モデルは非凸かつ非平滑な関数である。この特性は従来の研究ではシグモイド関数などを用い近似的に緩和されていた。また、自動車の走行環境の変化に常に対応できるようモデル予測制御系を構成するには、非凸最適制御問題を定式化し、リアルタイムで最適解を求める必要がある。最近開発されたPANOCアルゴリズムはこれらの問題を解決できる可能性がある。PANOCアルゴリズムは近接勾配法に基づいており、計算速度が速く、数値的悪条件に対するロバスト性があり、組み込みシステムに非常に適している。本研究は、PANOCアルゴリズムを適用し車両燃料消費の非凸性・非平滑性を緩和しない最適制御問題の数値解法を与える、低燃料消費のリアルタイム車両制御を実現することを目的としている。

2. 予測を用いた非凸制約のある自動車の燃料消費最適制御

2.1 車両モデルと燃料消費モデル

時刻 t における自動車の状態方程式をつぎのように表わす。

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (1)$$

$$f(x, u) = [v(t) \ a(t) \ W(u(t))]^T \quad (2)$$

ここで $x = [s \ v \ Q]^T$ は状態ベクトルで、 s は自動車の位置、 v は速度、 Q は燃料消費量である。 a は自動車の加速度、 $W(u)$ は燃料消費率で非凸関数である。 u は制御入力で自動車の駆動パワーを表す。自動車の加速度 a は

$$a(t) = \frac{u(t)}{v(t)M} - \frac{\left(\frac{1}{2}C_D\rho Av(t)^2 + \mu Mg\right)}{M} \quad (3)$$

と表される。ここで、 M, C_D, ρ, A, μ, g はそれぞれ、車両の質量、空気係数、空気密度、車両の前面投影面積、転がり抵抗定数、重力加速度を表す。車両の燃料消費率と車両出力関数 $W(u)$ は、図1に示すように、実測データを一次関数で近似した。燃料消費率と車両出力の固有の非線形性は原点近傍に現れ、車両出力が0未満の場合、燃料消費率は0となり、車両出力が0より大きい場合、燃料消費はステップ的にジャンプする。

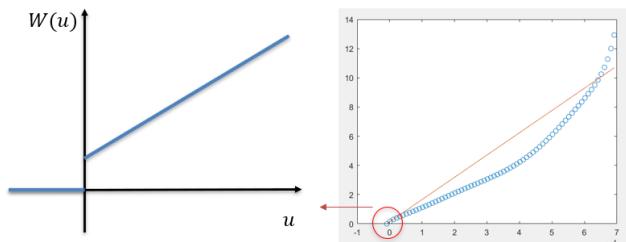


図 1 Nonlinear relationship between fuel consumption rate and vehicle output. When the vehicle output is less than or equal to 0, the fuel consumption rate is 0. When the vehicle output is greater than 0, it is positive with a discontinuity jump at $u = 0$.

2.2 PANOCアルゴリズムと近接作用素の計算

PANOCアルゴリズムでは下記の形の定式化が可能である。

$$\text{minimize}_u \varphi(u) \equiv \ell(u) + g(u) \quad (4)$$

ここでの $\ell(u)$ は平滑関数、 $g(u)$ は非平滑かつ非凸関数である。近接勾配法に基づいて、非平滑または非凸の $g(u)$ 部分に対する近接作用素をから以下のような反復計算から新たな u^{k+1} が得られる。

$$u^{k+1} \in T_\gamma(u^k) := prox_{\gamma g}(u^k - \gamma \nabla \ell(u^k)) \quad (5)$$

ここで、 $prox_{\gamma g}$ は g の近接作用素、 k は反復回数である。ここで

$$prox_{\gamma g}(u) = argmin_v \left\{ g(v) + \frac{1}{2\gamma} \|v - u\|^2 \right\} \quad (6)$$

本研究では、非凸の燃料消費率関数のL1ノルムが $g(u)$ に相当し、燃料消費量を表す。この部分の近接作用素の計算結果を図2に示す。

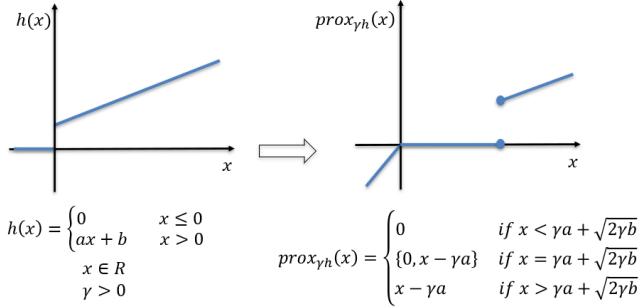


図2 Calculation of proximal mapping

2.3 モデル予測制御

燃料消費を考慮した自動車のモデル予測速度制御を考える。評価関数は

$$\min_u J = \int_{t_0}^{t_f} (v(t) - v_{ref})^2 dt + \omega_0 |W(u)|_1 \quad (7)$$

とおく。ここで、 v_{ref} は参照速度である。評価関数は速度追跡項と後の燃料消費項の二つの部分から構成されている。入力制約 $u_{min} \leq u \leq u_{max}$ を設定する。

3. シミュレーション結果

ここでは、自動車が初期速度から参照速度まで加速する状況を計算機シミュレーションする。

パラメータは $u_{max} = 70000$ 、 $u_{min} = -10000$ 、重み $\omega_0 = 1$ 、初期速度 $v_0 = 20$ m/s、参照速度 $v_{ref} = 40$ m/s、初期距離 $s_0 = 0$ 、初期燃料消費 $Q_0 = 0$ 、終端時間 $t_f =$

60s、予測ホライゾン $H = 3$ s、ステップサイズ $t_s = 0.1$ sである。

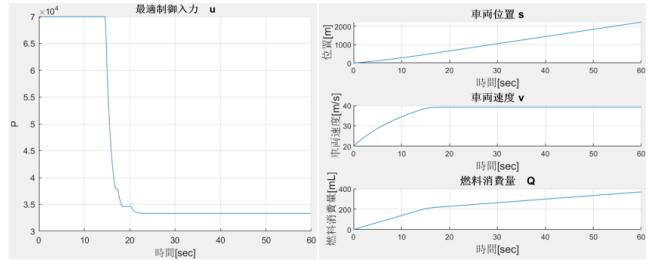


図3 The simulation results show that the speed successfully reaches the reference speed from the initial speed and maintains a low fuel consumption.

非凸燃料消費関数を考慮したPANOCアルゴリズムによって制御入力の最適解が得られた。60s分の計算は、PCに実装したMatlab環境下で13.73sを費やしただけで終了し、リアルタイム性が示された。

4.まとめ

本研究では、PANOCアルゴリズムを用い、自動車の燃料消費率の非凸かつ不連続な特性を近似せずに、評価関数を最小化するモデル予測制御が、リアルタイムで実行できる可能性を示した。

参考文献

- [1] L. Stella, A. Themelis, P. Sopasakis, and P. Patrinos, "A simple and efficient algorithm for nonlinear model predictive control," in IEEE CDC, Melbourne, Australia, 2017.
- [2] A. Sathya, P. Sopasakis, R. Van Parys, A. Themelis, G. Pipeleers, and P. Patrinos, "Embedded nonlinear model predictive control for obstacle avoidance using PANOC," in Proc. Eur. Control Conf., 2018, pp. 1523–1528.

半正定値計画問題の近似最適解の

精度保証付き多倍長演算を用いた検証に関する一考察

Verification of Approximate Optimal Solutions of Semidefinite Programming Using Guaranteed Accuracy in Multiple-Precision

九州工業大学 ○ 吉山 裕朗, 古賀 雅伸

Kyushu Institute of Technology Hiroaki Yoshiyama and Masanobu Koga

Abstract We are developing VSDPJ, a program that verifies approximate optimal solution of a semidefinite programming and finds rigorous error bounds for the optimal value using guaranteed accuracy in multiple-precision. We aim to find rigorous error bounds for the optimal value in many SDP problems.

1 はじめに

半正定値計画問題 (SDP:SemiDefinite Programming) は、最適化問題の一つであり、制御工学や構造設計、組み合わせ最適化、大域的最適化などの分野において役立つ [1]。現在、多数の SDP ソルバーが公開されているが [2]、多くは倍精度で設計されていて、計算誤差の影響によって正しい解を得られないことがある [3]。

我々のグループでは、SDP ソルバーが求めた近似最適解を精度保証付き多倍長演算を用いて検証を行い、厳密に SDP の制約条件を満たす最適解に近い実行可能解を求め、最適値の存在範囲を保証するソフトウェア (VSDPJ: Verified SemiDefinite Programming in Java) の開発を行っている。本研究では、VSDPJ で最適値の存在範囲を示すことができていないベンチマーク問題について考察し、改善を試みた。

2 SDP の検証

2.1 SDP

本論文で扱う SDP の主問題の標準形を示す。

$$\begin{aligned} f_p^* &:= \min c^T x \\ \text{s.t. } X_j &= \sum_{i=1}^m x_i F_{ij} - F_{0j} \succeq 0, \text{ for } j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

このとき、双対問題の標準形は

$$\begin{aligned} f_d^* &:= \max \sum_{j=1}^n \langle F_{0j}, Y_j \rangle \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^n \langle F_{ij}, Y_j \rangle &= c_i, \text{ for } i = 1, \dots, m \\ Y_j &\succeq 0, \text{ for } j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

となる。ここで F_{ij}, Y_j, X_j は $s_j \times s_j$ の実対称行列であり、 $c, x \in \mathbf{R}^m$ である。また、

$$\langle F, Y \rangle = \text{trace}(F^T Y)$$

であり、実対称行列の組の内積を表す。

2.2 VSDPJ

VSDPJ は SDP の最適値の精度保証を行う MATLAB ソフトウェアパッケージ VSDP[4] 同等の機能を Java 言語で実装したものである。VSDP との大きな違いとして、VSDPJ は多倍長精度演算を用いる。また、VSDPJ は SDP ソルバーとして多倍長精度演算に対応した SDPJ[5] を用いる。VSDPJ と SDPJ はともに多倍長精度演算のために MPFloat[6] を用いている。また、VSDPJ は精度保証演算のために CGA[7] を利用している。VSDPJ は [3] のアルゴリズムを修正したものを使用している。

2.3 最適値の下限を求めるアルゴリズム

このアルゴリズムでは SDP の近似双対最適解 \tilde{Y}_j for $j = 1 \dots n$ について検証をする。まず、 \tilde{Y}_j for $j = 1 \dots n$ を用いて、双対問題の等式制約を厳密に満たす Y_j for $j = 1 \dots n$ を含む区間行列 \mathbf{Y}_j for $j = 1 \dots n$ を求める。次に、双対問題の半正定値制約 $\mathbf{Y}_j \succeq 0$ for $j = 1 \dots n$ を満たすかを調べる。 $\mathbf{Y}_j \succeq 0$ for $j = 1 \dots n$ は区間内のすべての実対称行列が半正定値であることを表す。半正定値制約を満たすならば $\inf \sum_{j=1}^n \langle F_{0j}, \mathbf{Y}_j \rangle$ を最適値の下限とし、このアルゴリズムを終了する。満たさないのならば、 c に摂動を加えた SDP を SDP ソルバーによって解き、新たな近似双対解 \tilde{Y}_j for $j = 1 \dots n$ を得て初めの手順に戻る。繰り返しが最大数に達するか、SDP が実行不可能になったとき最適値の下限を $-\infty$ としてこのアルゴリズムを終了する。

2.4 ベンチマーク問題の検証結果

SDP のベンチマーク問題集である SDPLIB[8] のうち hinf1～hinf10 を評価に用いる。VSDPJ を用いて求めた最適値の存在範囲を Table1 に示す。演算精度は 10 進 64 桁とする。Table1 より、VSDPJ は 2 つの問題において最適値の存在範囲を示せたが、8 つの問題においては最適値の下限を求めることができなかった。VSDPJ の結果と比較すると、最適値の存在範囲を示せた問題は同じ 2 つの問題であった。その 2 つの問題において、VSDPJ のほうが最適値の存在範囲は狭かった。

Table 1: Results of hinf with VSDPJ

Problem	Lower bound	Upper bound
hinf1	$-\infty$	2.03259994e+00
hinf2	1.09670553e+01	1.09670558e+01
hinf3	$-\infty$	5.69407798e+01
hinf4	$-\infty$	2.74763836e+02
hinf5	$-\infty$	3.62213701e+02
hinf6	$-\infty$	4.48928330e+02
hinf7	$-\infty$	3.90811620e+02
hinf8	$-\infty$	1.16146000e+02
hinf9	2.36249254e+02	2.36249262e+02
hinf10	$-\infty$	1.08711806e+02

2.5 検証結果の考察

Table2 に SDP ソルバーが求めた近似双対最適解の最小固有値 λ_{\min} と双対問題の等式制約の誤差の指標

d_{error}_{\max}

$$:= \max \left(\left| c_i - \sum_{j=1}^n \langle F_{ij}, Y_j \rangle \right| : i = 1, 2, \dots, m \right)$$

を示す。Table2 より、最適値の存在範囲を示せた 2 つの問題において $\lambda_{\min} \gg d_{\text{error}}_{\max}$ となり、残りの 8 つの問題において λ_{\min} と d_{error}_{\max} は同程度の大きさとなっている。このため、VSDPJ において双対問題の等式制約を厳密に満たすように近似双対最適解を補正した結果、最小固有値も同程度の影響を受け、半正定値制約を満たせなかったと考える。

Table 2: Minimum eigenvalues and maximum errors of approximate dual solutions

Problem	λ_{\min}	d_{error}_{\max}
hinf1	1.72427778e-15	1.26173736e-13
hinf2	1.47196597e-13	8.79560829e-50
hinf3	3.31349749e-15	5.35496031e-13
hinf4	1.67652732e-14	9.03296328e-12
hinf5	1.78233243e-13	1.37091937e-10
hinf6	9.02854687e-12	3.65505552e-10
hinf7	7.08297712e-13	1.71762294e-10
hinf8	2.16034431e-14	5.49947338e-12
hinf9	5.13494701e-11	2.24028052e-54
hinf10	4.10501855e-17	3.29468600e-14

3 改善

3.1 等式制約誤差の改善

2.5 節を踏まえて、 d_{error}_{\max} が小さくなるように SDP ソルバーのパラメータ [3] を調整し、SDP を解きなおすように VSDPJ のプログラムを変更した。変更したパラメータについて Table3 に示す。解きなおしを行った 8 つの問題についての VSDPJ の実行結果を Table4、 λ_{\min} 、 d_{error}_{\max} を Table5 に示す。

Table4,5 より hinf3,5,6 において $\lambda_{\min} \gg d_{\text{error}}_{\max}$ となり最適値の下限を保証できた。

一方、hinf4,7,8 においては Table2 と比較して d_{error}_{\max} は大幅に小さくなつたが、 λ_{\min} も d_{error}_{\max} と同程度に減少して、最適値の下限を求められなかつた。

hinf1,10 においては Table2 と比較して Table5 の d_{error}_{\max} は小さくなつておらず、別の SDP ソルバーのパラメータを設定する必要がある。

hinf1 についてパラメータを再調整することで Table2 と比較して大幅に小さい d_{error}_{\max} を求められたが、hinf4,7,8 と同様に最適値の下限を求められていない。

hinf10 については d_{error}_{\max} を大幅に小さくする SDP ソルバーのパラメータを見つけられていない。

- maxIteration: 繰り返しの最大数
- betaBar: 探索方向を制御するパラメータ (実行不可能時)
- gammaStar: 主・双対のステップ幅の減少因子
- epsilonDash: SDPJ の解の許容誤差に関係するパラメータ

Table 3: SDPJ's parameters before and after the tuning

parameter	before tuning	after tuning
maxIteration	100	2000
betaBar	0.3	0.9
gammaStar	0.9	0.5
epsilonDash	1.0e-7	1.0e-40

Table 4: Results of hinf with VSDPJ 2

Problem	Lower bound	Upper bound
hinf1	$-\infty$	2.03259994e+00
hinf3	5.69407770e+01	5.69407798e+01
hinf4	$-\infty$	2.74763836e+02
hinf5	3.30103724e+02	3.62213701e+02
hinf6	4.48927736e+02	4.48928330e+02
hinf7	$-\infty$	3.90811620e+02
hinf8	$-\infty$	1.16146000e+02
hinf10	$-\infty$	1.08711806e+02

Table 5: Minimum eigenvalues and maximum errors of approximate dual solutions 2

Problem	λ_{\min}	d_{error}_{\max}
hinf1	2.65817009e-12	4.25948426e-11
hinf3	4.35211956e-15	1.75069745e-46
hinf4	2.43241263e-63	1.61409295e-61
hinf5	8.74476857e-22	2.02595930e-45
hinf6	2.50216276e-16	1.96576012e-45
hinf7	2.85990137e-63	4.46091475e-61
hinf8	1.25758128e-64	1.26099555e-62
hinf10	5.76544889e-05	1.40489257e-02

3.2 演算精度の変更

前節で d_{error}_{\max} と共に λ_{\min} が減少した hinf4,7,8 について、演算精度を上げて d_{error}_{\max} をさらに小さくする。演算精度を 10 進 100 桁とし、調整後の SDP ソルバーの epsilonDash を 1.0e-80 とした時の d_{error}_{\max} と λ_{\min} を Table6、演算精度を 10 進 200 桁とし、調整後の SDP ソルバーの epsilonDash を 1.0e-180 とした時の d_{error}_{\max} と λ_{\min} を Table7 に示す。

Table6,7 より、演算精度と epsilonDash の変更により d_{error}_{\max} を小さくできたが、 λ_{\min} も同程度の大きさに

減少する。結果として、最適値の下限を求めることができていない。

Table 6: Minimum eigenvalues and maximum errors of approximate dual solutions (precision: 100 decimal digits)

Problem	λ_{\min}	d_{error}_{\max}
hinf4	-1.02518158e-98	1.02463906e-97
hinf7	1.08862466e-99	1.69805221e-97
hinf8	9.39238659e-101	9.48269083e-99

Table 7: Minimum eigenvalues and maximum errors of approximate dual solutions (precision: 200 decimal digits)

Problem	λ_{\min}	d_{error}_{\max}
hinf4	-1.07929959e-198	1.17213097e-197
hinf7	1.24024674e-199	1.93455448e-197
hinf8	-9.92375394e-199	2.16834036e-198

4 おわりに

本研究では、SDP の検証ソフトウェア VSDPJ の実行結果を考察し、新たに 3 つの問題において最適値の下限を求め、最適値の存在範囲を保証することができた。今後の課題として、最適値の下限を求められなかった 5 つの問題で最適値の下限を求められるように、SDP パラメータの改良などの取り組みを行いたい。

参考文献

- [1] Christian Jansson. Rigorous error bounds for the optimal value in semidefinite programming. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, pp. 180–200, 2007.
- [2] 福田光浩. 半正定値計画問題に対するソルバーの紹介. オペレーションズ・リサーチ, Vol. 55, No. 7, pp. 11–17, 2010.
- [3] 橋本圭介. 半正定値計画問題の精度保証付きソルバーの開発と評価. Master's thesis, 九州工業大学, feb 2016.
- [4] Christian Jansson. Vsdp:a matlab software package for verified semidefinite programming, 2006. <http://www.ti3.tuhh.de/jansson/vsdp/>.

- [5] 古賀崇史. 多倍長計算を用いた半正定値計画問題に基づく制御系設計支援パッケージの開発. Master's thesis, 九州工業大学院, 2009.
- [6] 山村, 古賀, 矢野, 山田. 多倍長計算を用いた制御系設計パッケージ. 第 52 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI '08), 139/140, 2008.
- [7] CGA. <http://cga.mklab.org/>.
- [8] Brian Borchers. Sdplib 1.2, a library of semidefinite programming test problems, 1999. <http://euler.nmt.edu/~brian/sdplib/sdplib.pdf>.

逐次 LMI 化法の CAD 実装

九州工業大学 ○朱九霖 瀬部昇

A support program for overbounding approximation method for BMI

Kyurin Shu and Noboru Sebe, Kyushu Institute of Technology

Abstract: A support program that implements the overbounding approximation method for MATLAB and YALMIP is developed. The overbounding approximation is one of the method that provides sufficient LMI constraints for the given BMI constraints. With this method, one can obtain an approximate solution to the given BMI problem. However, it is not easy for ordinary users to convert BMIs into sufficient LMIs manually. To overcome the difficulty, we provide a function that converts BMIs into sufficient LMIs automatically. This function enables users to obtain solutions to the BMI problem easily.

1 はじめに

双線形行列不等式 (BMI) 制約問題は制御系設計において重要な問題である。一方で BMI 制約問題は数値的な求解が困難であることが知られている。BMI 制約問題を解く方法として、BMI 制約を線形行列不等式 (LMI) 制約に近似する手法が提案されており、中でも overbounding approximation method または逐次 LMI 化法と呼ばれる方法 [1, 2, 3, 4, 5] は BMI 制約を LMI 制約に近似し、繰り返し LMI 問題に対して最適化することで BMI 問題の近似解を得る方法である。逐次 LMI 化法は多くの制御系設計問題に適用することができるが、それぞれの設計問題ごとに設計者が実装する必要があり、開発時間や信頼性が問題となる。

本稿では、逐次 LMI 化法 [2] を MATLAB で利用する際に、BMI 制約を記述するのみで、その他の附加情報なしに LMI 制約に変換が可能な支援プログラムの提案を行う。

本稿では以下の記号を用いる。 O は零行列、 I は単位行列である。正方行列 M に対して、 $M \succ O$ は M が正定値対称行列であることを表し、 $\text{He}\{M\} = M + M^T$ とする。

2 逐次 LMI 化法

2.1 逐次 LMI 化法の概要

まず逐次 LMI 化法について説明する。解きたい設計問題の BMI 制約を

$$\text{He}\{Q_0 + LXNYR\} \prec O \quad (1)$$

とする。ただし、 X, Y は決定変数、 L, N, R は定数行列、 Q_0 は定数項と決定変数の線形項である。(1) 式は決定変数同士の積である双線形項とその他の項との和で記述される一般化された BMI の表現形式である。

ここで、(1) 式を満たす暫定解 (\hat{X}, \hat{Y}) が与えられているとする。これを用いて

$$X = \hat{X} + \Delta X, Y = \hat{Y} + \Delta Y \quad (2)$$

と置き換え、決定変数 X, Y の代わりに $\Delta X, \Delta Y$ を決定変数とする。(2) 式を(1)式に代入することで、BMI 制約は

$$\text{He}\{Q + L\Delta X N \Delta Y R\} \prec O, \quad (3)$$

$$Q = Q_0 + L(\hat{X}N\hat{Y} + \Delta X N \hat{Y} + \hat{X}N \Delta Y)R \quad (4)$$

と書き換えることができる。

このとき、BMI 制約(3)式の十分条件は

$$\text{He}\left\{\begin{bmatrix} Q & L\Delta X N \\ G\Delta Y R & -G \end{bmatrix}\right\} \prec O \quad (5)$$

で与えられ、これは $\Delta X, \Delta Y$ についての LMI 制約である。ただし G は

$$\text{He}\{G\} \succ O \quad (6)$$

を満たす任意の定数行列である。(5)式は、元の BMI 制約である(1)式と比べて次元が拡大しており、拡大 LMI と呼ばれる[2]。

逐次 LMI 化法では、(5)式を用いた最適化問題を繰り返し解くことで、最適化問題における目的関数

値は単調に減少し、暫定解を改善することができる。

2.2 逐次 LMI 化法の利用における問題点

次に、静的出力フィードバックによる H_∞ 制御に対して逐次 LMI 化法を適用する例について考える。

まず、次式で記述される一般化制御対象について考える。

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + B_1 w + B_2 u, \\ z &= C_1 x + D_{11} w + D_{12} u, \\ y &= C_2 x + D_{21} w.\end{aligned}\quad (7)$$

ただし、 $x \in \mathbb{R}^n$, $w \in \mathbb{R}^{m_1}$, $u \in \mathbb{R}^{m_2}$, $z \in \mathbb{R}^{p_1}$, $y \in \mathbb{R}^{p_2}$ である。また、フィードバックゲインを $K \in \mathbb{R}^{m_2 \times p_2}$ とすると、静的出力フィードバック制御則は次式で表される。

$$u = Ky. \quad (8)$$

このとき、静的出力フィードバックによる H_∞ 制御の制約条件は以下で与えられる。

$$\begin{bmatrix} \text{He}\{P(A + B_2 K C_2)\} & * & * \\ (B_1 + B_2 K D_{21})^T P & -I & * \\ C_1 + D_{12} K C_2 & D_{11} + D_{12} K D_{21} & -I \end{bmatrix} \prec O. \quad (9)$$

ここで、 $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$ は正定値対称行列であり、この制約条件は決定変数 P, K についての BMI 制約である。また、* は対称行列の対象部分を省略する記号である。

(9) 式に対して逐次 LMI 化法を適用することは、つまり、BMI である (9) 式を拡大 LMI である (5) 式の形に変換することである。その過程として、(9) 式を一般化 BMI である (1) 式の形に変換する必要があり、このときの (9) 式と (1) 式の対応関係は以下で与えられる。

$$X = P, Y = K, \quad (10)$$

$$L = \begin{bmatrix} I \\ O \\ O \end{bmatrix}, N = B_2, R = [C_2 \quad D_{21} \quad O], \quad (11)$$

$$Q_0 = \begin{bmatrix} \text{He}\{PA\} & * & * \\ B_1^T P & -I & * \\ C_1 + D_{12} K C_2 & D_{11} + D_{12} K D_{21} & -I \end{bmatrix}. \quad (12)$$

(10) 式は決定変数、(11) 式は決定変数の双線形項の係数行列、(12) 式は定数項と決定変数の線形項についての対応関係をそれぞれ表している。これらの対応

関係を (5) 式に当てはめることで、BMI を拡大 LMI に変換することが可能になる。まとめると、BMI 制約に対して逐次 LMI 化法を適用する手順は以下の通りである。

(i) 設計問題から BMI 制約を導出。

(式 : (7), (8) \rightarrow (9))

(ii) 導出した BMI を一般化 BMI の形式に変換。

(式 : (9) \rightarrow (1))

(iii) 一般化 BMI から拡大 LMI に変換。

(式 : (1) \rightarrow (5))

本来、ユーザが興味ある問題は BMI 問題を解くことで制御器を設計すること、つまり、手順 (i) のみである。しかし、逐次 LMI 化法を利用して BMI 問題を解くために、ユーザは解きたい BMI 問題ごとに応じた手順 (ii), (iii) を実装する必要があり、これはユーザにとって大変な作業である。

3 支援プログラム

本稿では、BMI を拡大 LMI に自動で変換する機能を持つ支援プログラムを提案する。本支援プログラムを利用することで、ユーザは BMI 制約の記述のみに集中することができ、本来の制御系設計問題に注力することができる。

3.1 YALMIP[6]

本支援プログラムでは、LMI の記述を支援するパーサである YALMIP を利用した実装を行った。YALMIP では直感的な制約の記述を MATLAB で利用することができる。ここでは例として、システム (7) が安定となる条件

$$PA + A^T P \prec O, P \succ O \quad (13)$$

を記述する YALMIP のコマンドを図 1 に示す。なお、YALMIP では厳密な正定値性を表現できないため、半正定値条件として記述している。

<code>P = sdpvar(n,n);</code>	% 決定変数
<code>F = [P*A+A'*P<=0, P>0];</code>	% 制約

図 1: YALMIP における決定変数と制約の記述

3.2 支援プログラムの仕様

本研究では、BMI を拡大 LMI に変換する MATLAB の関数として、`linearizebmi`を実装した(図 2)。また、`linearizebmi`は BMI を表す文字列を受け取り、拡大 LMI の YALMIP データを返すパーサである。

`linearizebmi`の仕様を表 1 に示す。第 1 引数の `Fstr` は、BMI の式を `string` 型で記述したものである。第 2 引数の `{'X', 'Y'}` 及び第 3 引数の `{'X0', 'Y0'}` は、BMI における 2 つの決定変数とそれに対応する暫定解の変数名の文字列を、それぞれ `cell` 配列としたものである。第 4 引数の `G` は、拡大 LMI における定数行列であり、(6) 式を満たす任意の行列である。また `G` は、デフォルトで適当な次元の単位行列となっており、ユーザは第 4 引数の入力なしに `linearizebmi` を利用できる。これらに対して `linearizebmi` の第 1 戻り値 `LMI` は、第 1 引数 `Fstr` に対応した拡大 LMI になっており、YALMIP の決定変数に関するデータ型である `sdpvar` 型として出力される。第 2 戻り値 `Lstr` では、`Fstr` に応じた拡大 LMI の文字列として `string` 型で出力される。

`linearizebmi`を利用するためにはユーザが必要な情報は、BMI、決定変数及び暫定解のみであり、拡大 LMI に変換するための情報は隠蔽されているため、ユーザは BMI 制約の記述のみに集中することができる。

```
[LMI,Lstr]
= linearizebmi(Fstr,{ 'X', 'Y'},{ 'X0', 'Y0'},G)
```

図 2: BMI を拡大 LMI に変換する関数

3.3 `linearizebmi`の処理プロセス

`linearizebmi`内の処理プロセスを図 3 に示す。まず `linearizebmi`は、BMI である第 1 引数 `Fstr` に対して字句解析や構文解析を実行することで、変数名、関数及び演算子を区別し、BMI に存在するそれぞれの項を文字列のデータとして格納する。

次に、BMI を一般化した形式に変換するため、第 2 引数 `{'X', 'Y'}`を利用し、それぞれの項の文字列データを定数項と線形項である `Q0` と双線形項

表 1: 関数 `linearizebmi`の仕様

変数	データ型	説明
引数:		
<code>Fstr</code>	<code>string</code>	BMI の文字列
<code>{'X', 'Y'}</code>	<code>cell</code> 配列	決定変数
<code>{'X0', 'Y0'}</code>	<code>cell</code> 配列	暫定解
<code>G</code>	<code>string</code>	定数行列 <code>G</code>
戻り値:		
<code>LMI</code>	<code>sdpvar</code>	拡大 LMI のデータ
<code>Lstr</code>	<code>string</code>	拡大 LMI の文字列

$\text{He}\{LXNYR\}$ に分解する。

拡張 LMI では双線形項 $\text{He}\{LXNYR\}$ の係数行列である L, N, R の情報が必要である。これはそれぞれの項に含まれる転置演算子に注目することで、 $\text{He}\{LXNYR\}$ を $LXNYR$ と $(LXNYR)^T$ に分解した後、 $LXNYR$ から導出できる。

最後に、これまでの処理で得られた Q_0, L, N, R 及び引数 `{'X', 'Y'}`, `{'X0', 'Y0'}` を利用することで、拡大 LMI を組み立てることができる。また、`Fstr` で文字列として記述された変数における値は、その変数名に対応する値が MATLAB のワークスペースから取得する。

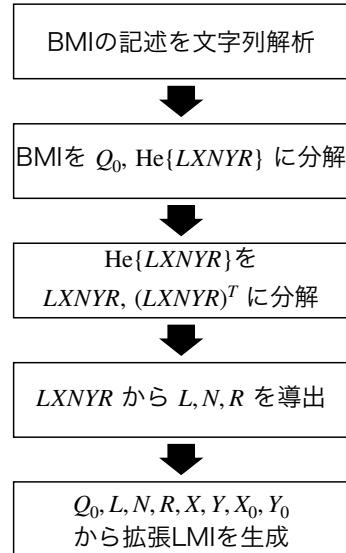


図 3: `linearizebmi`の処理プロセス

4 使用例

`linearizebmi`の使用例として、(9) 式を拡大 LMI に変換するためのプログラムを図 4 に示す。

`linearizebmi`を利用するためには、まず制御対象の係数行列や次元をあらかじめ定義する必要がある。また、逐次 LMI 化法は既に与えられている初期暫定解に対して、さらに値を改善する手法である。そのため、極配置法などを使用し、(1) 式を満たすような初期暫定解を求めておく必要がある。

`Fstr`で (9) 式を文字列として記述し、これを `linearizebmi`に渡すことによって、逐次 LMI 化法で変換された LMI を得られる。このとき、`linearizebmi`の戻り値である LMI は、図 5 の最後の拡大 LMI で示された YALMIP における LMI の表現として出力される。

5 おわりに

本稿では、逐次 LMI 化法とその支援プログラムの実装及び使用例について紹介した。本支援プログラムを利用することで、利用者は解きたい問題のみに注力することができ、制御器設計のプログラム開発時

間を短縮することができる。本支援プログラムは [7] にて公開している。

参考文献

- [1] T. Shimomura and T. Fujii, "Multiobjective control via successive over-bounding of quadratic terms", *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 15, pp. 6, 2007.
- [2] N. Sebe, "A New Dilated LMI Characterization and Iterative Control System Synthesis", *11th IFAC/I-FORS/IMACS/IFIP Symposium on Large Scale System: Theory and Applications*, 6 pages, 2007.
- [3] Q. T. Dinh, S. Gumussoy, W. Michiels and M. Diehl, "Combining Convex-Concave Decompositions and Linearization Approaches for solving BMIs, with application to Static Output Feedback", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 57-6, pp. 1377-1390, 2012.
- [4] D. Lee and J. Hu, "A Sequential Parametric Convex Approximation Method for Solving Bilinear Matrix Inequalities", *IEEE Int. Conf. Decision and Control*, pp. 1965-1970, 2016.
- [5] N. Sebe, "Sequential Convex Overbounding Approximation Method for Bilinear Matrix Inequality Problems", *Proceedings of IFAC symposium on Robust Control Design*, pp. 175-182, 2018.
- [6] J. Löfberg, "YALMIP, A Toolbox for Modeling and Optimization in MATLAB", *Proc. CACSD Conf.*, 2004.
- [7] <http://www.donald.ai.kyutech.ac.jp/~sebe/linearizebmi/index.ja.html>

```
% 制御対象の係数行列や次元の定義（省略）

% 初期暫定解の宣言（省略）

% 決定変数の定義
P = sdpvar(n,n);
K = sdpvar(m2,p2,'full');

% BMI の記述（文字列）
Fstr = "[P*(A+B2*K*C2)+(A+B2*K*C2)'*P'
P*(B1+B2*K*D21)
(C1+D12*K*C2)';
(B1+B2*K*D21)'*P'
-eye(p1)
(D11+D12*K*D21)';
C1+D12*K*C2
D11+D12*K*D21
-eye(p1)]";

% 支援プログラムによる拡大 LMI への変換
LMI = linearizebmi(Fstr,{'P','K'},{'P0','K0'});
LMI = [LMI < 0];
```

図 4: (9) 式を拡大 LMI に変換するプログラム

```
% 一般化 BMI の係数行列
L = [eye(n); zeros(m1,n); zeros(p1,n)];
N = B2;
R = [C2 D21 zeros(n,p1)];

% 一般化 BMI の定数項と線形項
Q0 = [P*A+A'*P'
P*B1
(C1+D12*K*C2)';
B1'*P'
-eye(p1)
(D11+D12*K*D21)';
C1+D12*K*C2
D11+D12*K*D21
-eye(p1)];

% 拡大 LMI
LMI = [Q0+L*X*N*YO*R+L*X0*N*Y*R-L*X0*N*YO*R
+(L*X*N*YO*R+L*X0*N*Y*R-L*X0*N*YO*R)';
L*(X-X0)*N+R'*(Y-Y0)'*G';
(L*(X-X0)*N+R'*(Y-Y0)'*G')',
-(G+G')];
```

図 5: `linearizebmi`の出力としての拡大 LMI

協調型車間距離維持支援システムに対するリプレイ攻撃の相関関数による検出

大分大学 ○松下真也 大澤 豊 上野尚平 末光治雄 松尾孝美

Attack Detection for Cooperative Adaptive Cruise Control System Using Correlation Coefficient

*M. Matsushita, Y. Osawa, S.. Ueno, H. Suemitsu, and T. Matsuo

Department of Mechatronics, Oita university

Abstract We have recently proposed three types of the repeated replay attacks: the open-loop-type repeated replay attack using stored data, the bias injection-type repeated replay attack, and the internal model-type repeated reply attack. Moreover, we performed the delay replay attacks and the open loop type repeat replay attacks, internal model type repeat replay attacks against cooperative adaptive cruise control systems (CACC) to confirm the control performance of CACC. In this report, we propose an attack detector using the cross-correlation function between the sensor signal and the input signal.

1 まえがき

サイバー物理系とは、物理システムと制御指令を出す情報システムとがネットワークを介して接続されているシステムを指し、近年の通信技術の発展が可能にした統合システムである。コンピュータと物理的対象のシステム統合により工業オートメーションが実現し、人の手による操作等、多くの作業をコンピュータで代替できるようになった。その結果、通信ネットワークによる情報システムと物理システムの統合によって、技術的かつ潜在的利益がもたらされるようになった。しかし、サイバー物理系において、通信網の拡大やシステムの複雑化はセキュリティの観点からは、リスクの増大を意味する。

我々の研究室の先行研究では、I制御を含む制御系においても有効な攻撃戦略として、リプレイ攻撃の新たなシナリオを考えた [2, 3, 4]。第一は、Mo ら [1] が定義したセンサ値を記録し、送らせて再生するだけの攻撃であり、これを遅延リプレイ攻撃と呼んだ。もう一つは我々が提案したもので、一定期間センサ値を記録し、その後、記録したセンサ値を繰り返し再生するという攻撃である。これを繰り返しリプレイ攻撃と呼んだ。攻撃の対象となるシステムは、Tiwari が扱った適応クルーズコントローラであるが、システムの状態変数を先導車と後続車の車間にしたもの用い、攻撃者は、後続車の速度センサをハッキングするとした。このシステムに対して、LQI コントローラを設計し、繰り返しリプレイ攻撃は、定常状態において検出が難しい攻撃であると確かめた。さらに提案した繰り返しリプレイ攻撃を

- 閉ループ型：センサをフィードバック系から切り離し、侵入して記録したデータを観測値としてコントローラに送る攻撃

- バイアス注入型：フィードバック系はそのまで、侵入して記録したデータをセンサ値に付加する攻撃
- 内部モデル型：繰り返し制御系と同様に周期信号を発生させる内部モデルをフィードバックループ内に仕込む攻撃

の3つのタイプに分けた [5, 6, 7]。さらに、性能を検証するために、協調型車間距離制御 (CACC) に対して、delay リプレイ攻撃と開ループ型繰り返しリプレイ攻撃、内部型繰り返しリプレイ攻撃を仕掛け、CACC の制御性能を確認し、delay リプレイ攻撃には強く、開ループ型繰り返しリプレイ攻撃と内部モデル型繰り返しリプレイ攻撃には弱いことを示した [8, 9, 10, 11]。特に、[9] では、外乱オブザーバを用いた攻撃検出器を設計したが、十分な性能は得られていなかった。本報告では、センサ信号と入力信号の時間相互相関関数を用いた検出器を提案し、攻撃性能を検証する。

2 問題設定

Yan ら [13] と同様に、以下の線形モデルを対象とする。

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + w(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t)\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}^m$, $y(t) \in \mathbb{R}^p$ は、それぞれ状態、システム入力および出力である。 w は、攻撃者がシステムに注入する可能性のある未知の外乱である。この項はシステムが正常に動作している場合、0 に設定する。

攻撃者は攻撃を受けているシステムのパラメーター A, B, C, D を本論文では知られない仮定する。特に、本論文では、Mo ら [1] の提案した制御信号を時間遅れで注

入する delay リプレイ攻撃と村上らが提案した開ループ型繰り返しリプレイ攻撃と内部モデル型繰り替えしリプレイ攻撃 [2, 3, 4, 5, 6, 7] を考える。

2.1 delay リプレイ攻撃

攻撃モデルは先行車から通信で送られてくる目標加速度信号 $u_1(s)$ に、攻撃者の侵入があり、delay リプレイ攻撃で行われるとする。

$$u'_1(t) = u_1(t - T) \quad (2)$$

ただし、 T は攻撃者が与える信号の時間遅れであるが、本論文では、ランダム信号を想定する。

2.2 開ループ型繰り返しリプレイ攻撃

次の手順でオープンループ型攻撃を実行します。

1. 攻撃者は、一定期間 $t_p = [t_1, t_1 + T]$ のセンサーの読み取り値を記録する。 T は攻撃の間隔となる。
2. 攻撃者は、センサー信号を切断し、記録された測定値を繰り返して改ざんを行い、測定値 $y'_{open}(t)$ をコントローラに送信する。

記録された測定値 $y_T(t)$ は、つぎのように表される。

$$y_T(t) = y(t)P_{\{t_1, T\}}(t) \quad (3)$$

$$P_{\{t_1, T\}}(t) = \begin{cases} 0, & (t < t_1) \\ 1, & (t_1 \leq t < t_1 + T) \\ 0, & (t_1 + T < t). \end{cases} \quad (4)$$

センサー信号を切断した後、 $t = t_1 + T$ から始まる改ざんした測定値 $y'_{open}(t)$ は次のようにになる。

$$y'_{open}(t) = \sum_{i=1}^{\infty} y(t - iT)P_{\{t_1 + iT, T\}}(t). \quad (5)$$

2.3 内部モデル繰り返しリプレイ攻撃

内部モデル繰り返し型リプレイ攻撃は、繰り返し制御系と同様の周期信号を発生させる内部モデルをフィードバックループ内に仕込む攻撃であり、制御系の相対時数が 0 でないため [12]、この攻撃がはいった瞬間に閉ループ系は不安定になる。そこでシミュレーションでは、センサ信号とコントローラの間に、繰り返し信号を発生する内部モデル $M(s) = \frac{e^{-Ls}}{1-e^{-Ls}}$ を挿入する。

3 車両縦方向ダイナミクスモデル

以下の伝達関数は [15] で提案された“current”モデルであり、CACC 隊列の各車両の縦方向ダイナミクスをモデル化するために用いられる。これは、駆動時間遅れ (τ_a, i) を考慮している [14, 16]。この車両縦方向モデルは隊列性能評価に広く使われている [17]。

$$P_i(s) = \frac{q_i(s)}{u_i(s)} = \frac{1}{s^2(\eta_i s + 1)} e^{-\tau a, i s} \quad (6)$$

ここで、 $q_i(s)$ はラプラス領域の車両 i の絶対位置、 $u_i(s)$ はラプラス領域の車両 i の目標加速度、 η_i は車両 i の車両アクチュエータの動的パラメータ、 $P_i(s)$ は車両 i のプラントである。

4 CACC コントローラ

CACC コントローラは string satbility を保持している間、車両間の目標の車間距離を維持することである。

本論文の対象とする CACC 隊列は、先行車 $i = 1$ (伝達関数 $P_1(s)$)、後続車 $i = 2$ (伝達関数 $P_2(s)$) とする。“current”モデルの伝達関数は、入力が自車の目標加速度信号であり、出力は自車の絶対位置である。また、先行車と後続車の絶対位置を $q_1(t), q_2(t)$ 、速度を $v_1(t), v_2(t)$ 、加速度を $a_1(t), a_2(t)$ とする。CACC では、先行車の目標加速度信号 $u_1(t)$ と先行車後続車の車間距離 $d_2(t) = q_1(t) - q_2(t)$ を測定して、フィードバックする。後続車の伝達関数 $P_2(s)$ は、状態変数を

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_2(t) \\ v_2(t) \\ a_2(t) \end{bmatrix}$$

とすると、状態方程式は次式で表される。

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \begin{bmatrix} \dot{q}(t) \\ \dot{v}(t) \\ \dot{a}(t) \end{bmatrix} \\ &= Ax + Bu_2(t) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\eta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q(t) \\ v(t) \\ a(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0(t) \\ 0(t) \\ \frac{1}{\eta_2}(t) \end{bmatrix} u_2(t) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、CACC コントローラの入力は、ラプラス変換形で次式で与えられる。

$$\begin{aligned} u_2(s) &= H(s)^{-1}(C(s)e_2(s) + D(s)u_1(s)) \\ H(s) &= hs + 1 \\ C(s) &= k_p + k_d s \\ D(s) &= e^{-\theta s} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで, $H(s)$ はローパスフィルタ, $C(s)$ は PD コントローラ, θ は CACC 系で想定されている通信遅れ時間である。また, $e_2(s)$ は実際の車間距離と目標車間距離の偏差であり, 次式で与えられる。

$$e_2(s) = d_2(s) - d_{r,2}(s)$$

ここで, $d_2(s)$ は実際の車間距離で, 次式で与えられる。

$$d_2(s) = q_2(s) - q_1(s)$$

また, $d_{r,2}(s)$ は目標車間距離で, 次式で与えられる。

$$d_{r,2}(t) = r_2 + hv_2(t)$$

ここで, r_2 は後続車の停止距離, h は時間ギャップと呼ばれ, 制御系全体の時間遅れに対応するための余裕を与える時間である。

5 相関関数を用いた攻撃の検出器

次式の SISO 系を対象とする。

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y'(t) &= Cx(t - \tau) \end{aligned} \quad (9)$$

ここで, $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}$, $y'(t) \in \mathbb{R}$ は, それぞれ状態, システム入力および攻撃されたセンサ出力である。

ここで, 連続時間の有限時間平均を次式で定義する。

$$\langle z(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T z(t) dt \quad (10)$$

ただし, T は事前に指定した時間幅とする。さらに, この有限時間平均を用いた $z(t) \in \mathbb{R}$ と $w(t) \in \mathbb{R}$ の相互相関関数を次式で定義する。

$$\langle z(t)w(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T z(t)w(t) dt \quad (11)$$

$x(t)$ の解表現は, 次式で与えられる。

$$x(t) = \int_{-\infty}^t e^{A(t-s)} Bu(s) ds \quad (12)$$

これより, $u(t)$ と $y'(t)$ の相互相関関数は次式となる。

$$\langle u(t)y'(t) \rangle = \int_{-\infty}^{t-\tau} Ce^{A(t-\tau-s)} B \langle u(t)u(s) \rangle \quad (13)$$

ここで, 計算を簡略化するために, 入力が白色ノイズであると仮定すると次式のように近似できる。

$$\langle u(t)u(s) \rangle = U_0 \delta(t - s) \quad (14)$$

ただし, U_0 は入力の強度で, δ はデルタ関数である。 (13) に (14) を代入して計算すると次式となる。

$$\begin{aligned} \langle u(t)y'(t) \rangle &= \int_{-\infty}^{t-\tau} Ce^{A(t-\tau-s)} B \delta(t - s) ds \\ &= Ce^{A\tau} BU_0 \\ &= \sum_{i=1}^n e^{\lambda_i \tau} CE_i BU_0 \\ &= \sum_{i=1}^n e^{\lambda_i \tau} \beta \end{aligned}$$

ただし, $\beta_i = CE_i BU_0$ とする。また, A の固有値はすべて異なると仮定し, λ_i, E_i は A の固有値とスペクトル行列である。つまり, 次式が成り立つ。

$$A = \sum_{i=1}^n \lambda_i E_i$$

この式から, 相互相関関数は, 時間遅れ τ に対応したインパルス応答を発生することがわかる。このことから, 開ループ型繰り返しリプレイ攻撃の際には, このインパルス応答が複数発生することにより, 攻撃を検出することが可能である。

6 シミュレーション

シミュレーションでは, 表 1 のパラメータを用いる。

表 1: 各種パラメータ

$\eta_1=0.1$	先行車時定数
$\eta_2=0.1$	後続車時定数
$\tau_1=0.2$	先行車反応遅れ時間
$\tau_2=0.2$	後続反応遅れ時間
$h=0.5$	時間ギャップ
$r_2=3$	後続車停止距離
$k_p=2$	CACC のコントローラの P ゲイン
$k_d=2$	CACC のコントローラの D ゲイン
$\theta=0.02$	ワイヤレス通信遅延時間
$u_1(t)=2 \sin(0.2t)$	先行車の目標加速度

6.1 delay リプレイ攻撃時の検出器

検出結果を図.1, 図 2 に示す。攻撃者は遅れ時間 T を, 比較的大きな値 [1,5] の一様外乱で与えている。delay リプレイ攻撃は攻撃なしの時に比べ、波形の違いが乏しいため攻撃の検出は困難である。

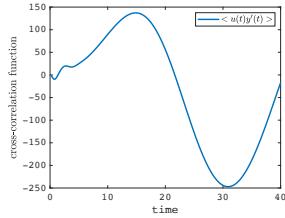


図 1: 攻撃がない時の検出器

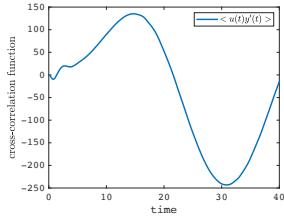
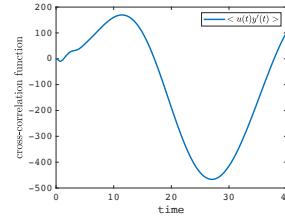
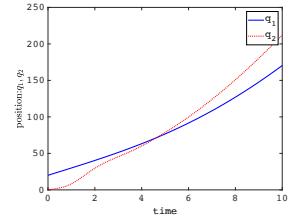
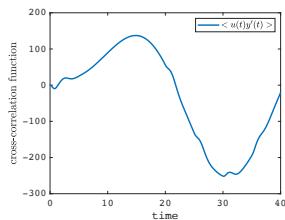
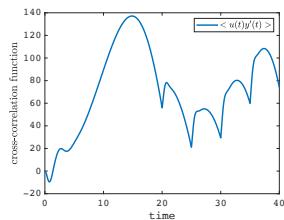


図 2: delay リプレイ攻撃時

図 5: 内部モデル型繰り返し
リプレイ攻撃時の検出器図 6: 先行車と後続車の絶対
位置

6.2 開ループ型繰り返し攻撃時の検出器

目標加速度 u_1 を測定し攻撃を行った場合と、先行車と後続車の車間距離 d_2 を測定し攻撃を行った場合の、それぞれの検出結果を図 3、図 4 に示す。どちらの攻撃でも $t = [15, 20]$ のときを記録し、攻撃を行った。開ループ型繰り返しリプレイ攻撃は攻撃開始から 5 秒ごとに波形に飛び上がりを確認出来たことから、この応答を観測すれば攻撃検出が可能である。

図 3: u_1 に対する開ループ
型繰り返しリプレイ攻撃時図 4: d_2 に対する開ループ
型繰り返しリプレイ攻撃時

6.3 内部モデル型繰り返しリプレイ攻撃時の検出器

繰り返し信号を発生する無駄時間は $L = 0.1$ と設定し、内部モデル繰り返しリプレイ攻撃を行った検出結果を図 5 に示す。波形のピーク時の値や時間が異なる事が確認された。しかし図 6 に示す攻撃結果より、ピーク時は先行車と後続車が衝突した後であり、システムに深刻な影響が与えられているため、内部モデル型繰り返しリプレイ攻撃の検出器に用いるのは困難である。

7 あとがき

協調型車間距離制御 (CACC) に対して、delay リプレイ攻撃と開ループ型繰り返しリプレイ攻撃、内部モデル型繰り返しリプレイ攻撃を仕掛け、相互相関関数を用いた攻撃検出器の性能を確認した。

謝辞

本研究は、公益財団法人三豊科学技術振興協会の研究助成により実施した。

参考文献

- [1] Y.Mo and B.Sinopoli,Secure Control Against Replay Attacks,Forty-Seventh Annual Conference,911/918(2009)
- [2] K.Murakami, H.Suemitsu, and T.Matsuo,Repeated Replay-Attack to a Feedback Control System,ICT-ROBOT2016,Busan,Korea,ThCT2.2,Sept.8(2016)
- [3] 村上, 末光, 松尾, クルーズコントロール系に対する繰り返しリプレイ攻撃, 第 59 回自動制御連合講演会, 北九州, 827/830, 11/10-11/12(2016)
- [4] 村上, 末光, 松尾, 繰り返しリプレイ攻撃の各種コントローラのセキュリティ性能, 第 35 回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 佐賀, 104-107, 11/26-11/27(2017)
- [5] 村上, 末光, 松尾, 繰り返しリプレイ攻撃の制御系性能と検出モニタ, 第 4 回計測自動制御学会制御部門マルチシンボジウム, 2F1-4, 3/6-3/9(2017)
- [6] K.Murakami,H.Suemitsu, and T.Matsuo,Classification of Repeated Replay-Attacks and Its Detection Monitor,2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics,10/24-10/27(2017)
- [7] 村上昂太郎: 制御システムへのリプレイ攻撃各種とその検出方法, 大分大学大学院工学研究科修士論文 (2017)
- [8] Masaya Matsushita, Shohei Ueno, Kotaro Murakami, Takami Matsuo: Repeated Replay Attacks and Detection Monitor for Adaptive Cruise Control System, Proc. of SICE2020 (Online), pp.1912-1915, Sept.23-26, 2020.
- [9] 松下真也, 上野尚平, 松尾孝美: 協調型車間距離維持支援システムに対するリプレイ攻撃と外乱オブザーバによる検出, 自動制御連合講演会 (Web), 1G3-3, 4pages, 11/21/2020.
- [10] 松下真也, 上野尚平, 松尾孝美: 協調型車間距離維持支援システムに対するリプレイ攻撃の性能評価, 第 39 回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 大分大学 (web), 11/28-11/29/2020, 102A3, 4pages, 2020.
- [11] M.Matsushita, S.Ueno, T.Matsuo: Delay and Repeated Replay Attacks on Cooperative Adaptive Cruise Control Systems, Proc. of SICE2021, pp.1384-1387, 2021, Online.
- [12] 山本 裕, 原辰次, 繰り返し制御系の内部モデル原理と安定化可能性, 計測自動制御学会論文集, 22-8, 830/834(1986)
- [13] Y.Yan,P.Antsaklis, and V.Gupta:A Resilient Design for Cyber Physical Systems under Attack,in Proc.of 2017 American Control Conference,Seattle,USA,4418-4423,2017
- [14] J. Ploeg, B. T. M. Scheepers, E. van Nunen, N. van de Wouw, and H. Nijmeijer, "Design and experimental evaluation of cooperative adaptive cruise control," in Proc. 14th Int. IEEE Conf. Intell. Transp. Syst. (ITSC), Oct. 2011, pp. 260-265.
- [15] K. S. P. Kumar and H. Zhou,"A 'current' statistical model and adaptive algorithm for estimating maneuvering targets," J. Guid. Control Dyn., vol. 7, no. 5, pp.596-602, 1984.
- [16] S. Onca, J. Ploeg, N. van de Wouw, and H. Nijmeijer,"Cooperative adaptive cruise control: Network-aware analysis of string stability," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 15, no. 4, pp. 1527-1537, Aug. 2014.
- [17] S. E. Li, Y. Zheng, K. Li, Y. Wu, J. K. Hedrick, F. Gao, and H. Zhang,"Dynamical modeling and distributed control of connected and automated vehicles: Challenges and opportunities," IEEE Intell. Transp. Syst. Mag., vol. 9, no. 3, pp. 46-58, Jul. 2017.

受動定理に基づく耐故障制御系のロバスト性について

○ 齋藤華弥汰（熊本大学），國松禎明（熊本大学）

On Robustness of Fault Tolerant Control System based on Passivity Theorem

*H. Saito (Kumamoto University) and S. Kunimatsu (Kumamoto University)

Abstract— In this paper, we consider the robustness of fault tolerant control systems based on the passivity theorem. The possibility to achieve the robust stability of the closed loop system is shown.

Key Words: Fault tolerant control, Robust stability

1 はじめに

近年，センサやアクチュエータの故障を想定した耐故障制御系の研究が行われている^{1, 2, 3)}。著者らは，アクチュエータに冗長性を持たせることで，センサおよびアクチュエータの各々1か所に同時故障が発生したとしても耐故障サーボを実現する手法を提案している³⁾。通常，センサないしアクチュエータ故障が発生した場合，閉ループ系には必ず原点極が含まれるため閉ループ系全体では漸近安定とはならず，原点極をループの外に追い出し，積分器の飽和を用いることで安定性が議論される。しかし，著者らの手法ではループから追い出す代わりに，不安定極零相殺を利用することによって見かけ上の安定性を証明している。この証明では，制御対象の定常ゲインが既知であると仮定して，その定常ゲインを制御器に用い，受動定理を適用することにより可能としていたが，実際のシステムを構築する際のモデル化誤差については考慮しておらず，ロバスト性について十分な議論がなされていなかった。

そこで本研究では，受動定理に基づく耐故障制御系にモデル化誤差が存在する場合のロバスト性について検討し，ロバスト安定性が保証される可能性が高いことを示す。

2 準備

著者らはセンサおよびアクチュエータの故障に対して，2自由度制御系を用いた耐故障制御系について研究を行っており，本研究でも，アクチュエータ故障に対する耐故障サーボの実現のために同様の制御系を採用する。

次の安定で可制御可観測な n 次元 $m+1$ 入力 m 出力線形時不变システムを考える。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad y = Cx \quad (1)$$

ただし， $A \in \mathbf{R}^{n \times n}$ ， $B \in \mathbf{R}^{n \times (m+1)}$ ， $C \in \mathbf{R}^{m \times n}$ ， $x \in \mathbf{R}^n$ は状態変数， $u \in \mathbf{R}^{(m+1)}$ は入力， $y \in \mathbf{R}^m$ は出力を表す。また，システム(1)の伝達関数を $G(s) = C(sI - A)^{-1}B$ で表し，その定常ゲイン $G(0)$ を $G_0 := G(0)$ と表記する。加えて G_0 は行フルランク，かつ G_0 から任意の1列を取り除いてできる $m+1$ 個の m 次正方行列はすべて正則であると仮定する。アクチュエータ故障に対して耐故障サーボの実現を目指すためには，入力に冗長性がないと断線故障時に目標値追従性が保証できないため，本研究では1つアクチュエータが冗長である場合を想定している。前述した2自由度制御

系の研究の特徴として制御対象の定常ゲイン G_0 のみで制御系を構成できるという点があるが，入力に冗長性を持たせるため定常ゲインは $m \times (m+1)$ 行列であり，正方行列ではなことに注意する。

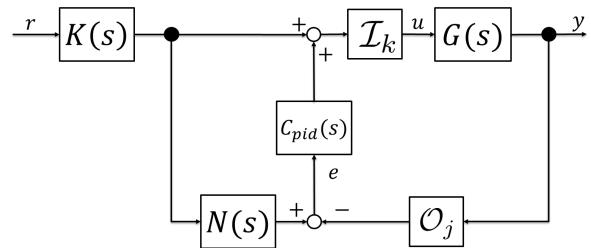


Fig. 1: センサ・アクチュエータの同時故障を想定した2自由度制御系

センサ，アクチュエータはそれぞれ1箇所のみに断線故障が発生するとし，故障時の伝達関数は0とする。また，センサ故障とアクチュエータ故障は同時に発生し得ると仮定する。 j 番目のセンサ故障を表す行列を \mathcal{O}_j ， k 番目のアクチュエータ故障を表す行列を \mathcal{I}_k とし，それぞれ次式で定義する。

$$\mathcal{O}_j := \underset{1 \leq i \leq m}{\text{diag}} \begin{cases} 1 & \text{for } i \neq j \\ 0 & \text{for } i = j \end{cases} \quad (2)$$

$$\mathcal{I}_k := \underset{1 \leq i \leq m}{\text{diag}} \begin{cases} 1 & \text{for } i \neq k \\ 0 & \text{for } i = k \end{cases} \quad (3)$$

次に Fig. 1 に示すセンサ・アクチュエータの同時故障に対応可能な2自由度制御系を考える。本研究では擬似逆行列 $G_0^\dagger := G_0^\top (G_0 G_0^\top)^{-1}$ を用いて，フィードフォワード補償器 $N(s)$ ， $K(s)$ を $N(s) = G_0$ ， $K(s)$ は $K(0) = G_0^\dagger$ を満たす安定な伝達関数として与える。また，フィードバック補償器には，次のPID制御器を用いる³⁾。

$$C_{pid}(s) := \Xi^\dagger \left\{ \frac{k_D s}{\tau s + 1} + k_P + \frac{k_I}{s} \right\} \quad (4)$$

PIDパラメータはスカラで， $k_D > 0$ ， $k_P > 0$ ， $k_I > 0$ ， $\tau > 0$ とし， $(k_P - \tau k_I)^2 \geq 4k_D k_I$ および $2k_D + \tau k_P > \tau^2 k_I$ の関係を満たしているとする。また， $\Xi^\dagger \in \mathbf{R}^{(m+1) \times n}$ は設計パラメータであり， $\mathcal{O}_j G_0 \mathcal{I}_k \Xi^\dagger$ が半正定行列に相似となるような正則行列であるとする。これを満たす Ξ^\dagger の1つとして， $\Xi^\dagger = G_0^\top$ などがある。

3 主要結果

制御対象の伝達関数の真値を $\tilde{G}(s)$ とし、 $G(s)$ と乗法的誤差 $\Delta(s)$ を用いて (5) 式で与える。 $\Delta(s)$ は安定かつプロパーであり、 $\Delta_0 := \Delta(0)$ 、 $\|\Delta_0\|_\infty \leq \gamma$ ($\gamma < 1$) とする。ただし、 $\|\cdot\|_\infty$ は \mathcal{H}_∞ ノルムを表す。

$$\tilde{G}(s) = G(s)\{I + \Delta(s)\} \quad (5)$$

文献³⁾より $\Xi^\dagger := G_0^\top$ とし、 $\hat{C}_{pid}(s)$ を $\hat{C}_{pid}(s) := \left\{ \frac{k_D s}{\tau s + 1} + k_P + \frac{k_I}{s} \right\} I_m$ とすると、(4) 式の PID 制御器は Δ_0 、 $\tilde{G}_0 := \tilde{G}(0)$ を用いて次式と表現できる。

$$C_{pid}(s) = (I + \Delta_0^\top)^{-1} \tilde{G}_0^\top \hat{C}_{pid}(s) \quad (6)$$

従来手法では制御対象の定常ゲインは既知であるとし、受動定理に基づいて安定性を証明していた³⁾。しかし、その手法ではモデル化誤差が存在した場合に、たとえ誤差が微小でも $\tilde{G}(0)G(0)^\top$ の半正定性が崩れてしまう可能性があり、受動定理を適用できない。そこで、システムを等価変換し、ノルム条件へ帰着させることで、ロバスト安定性を示すことを考える。

フィードフォワード部は安定性に影響を与えないので、フィードバック部のみに注目する。(6) 式をブロック線図で表すと Fig. 2 となり、さらに $(I + \Delta_0^\top)^{-1}$ を変形させることで Fig. 3 となる。

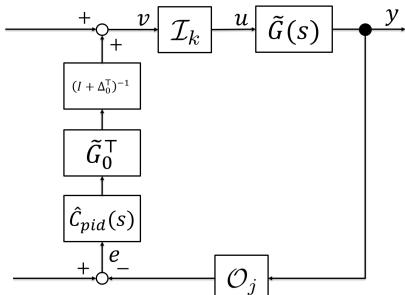


Fig. 2: PID 制御器変形後のフィードバック部

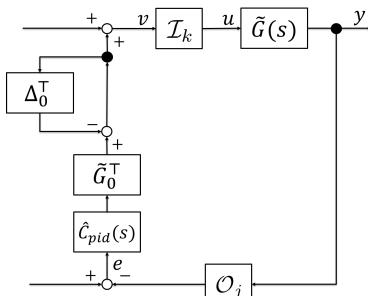


Fig. 3: $(I + \Delta_0^\top)^{-1}$ を変形したフィードバック部

Fig. 3 から、定常ゲインの乗法的誤差 Δ_0 とそれ以外の部分に分離して考えることができ、Fig. 4 の閉ループ系として表現できる。

Fig. 4 の点線で囲んだ部分の伝達関数を $M(s)$ とおくと、 $M(s)$ は (7) 式となる。

$$M(s) = \{I + \tilde{G}_0^\top \hat{C}_{pid}(s) O_j \tilde{G}(s) I_k\}^{-1} \quad (7)$$

ここで、 $M(s)$ は任意の 1 つにアクチュエータ故障が発生しても、アクチュエータの冗長性から文献³⁾により、安定となることが証明できる。一方、センサ故障が発

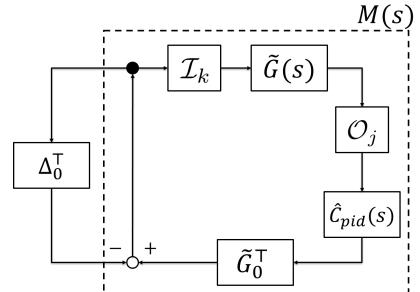


Fig. 4: 変形後の閉ループ系

生した場合には、 $\Delta(s)$ の有無に関係なく $M(s)$ は必ず原点極を持つてしまう。実際は、原点極は極零相殺されるため隠れたモードとして存在する。センサ故障を検出できるという条件のもと、 $M(s)$ の故障したセンサに対応する行の伝達関数をすべて 0 とすることで隠れたモードがなくなり、 $M(s)$ は安定となる³⁾。これによって、 $M(s)$ の \mathcal{H}_∞ ノルムが存在し、ロバスト性の考慮が可能となる。

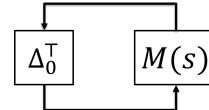


Fig. 5: モデル化誤差を陽に表現したシステム

これにより、定常ゲインにモデル化誤差が発生した場合のロバスト安定性は、Fig. 5 の Δ_0^\top と $M(s)$ による閉ループ系の安定化問題に帰着できる。よってスモールゲイン定理より、任意の $\|\Delta_0\| < \gamma$ に対して内部安定となるための十分条件は (8) 式で与えられる。

$$\|M(s)\|_\infty < \frac{1}{\gamma} \quad (8)$$

この閉ループ系のロバスト安定性は Δ_0 と $M(s)$ の \mathcal{H}_∞ ノルムが分かれば保証できる。しかし、 $M(s)$ はモデル化誤差 $\Delta(s)$ を含むため、その \mathcal{H}_∞ ノルムを正確に求めることは難しい。一方、モデル化時に $G(0)$ を精密に測定することは可能であるため、 Δ_0 のノルム γ をある程度小さい値 ($\gamma < 0.1$) として想定できる。したがって、(8) 式を満たす可能性が高いため、実用に耐え得るロバスト性を有していると考えられる。

4 おわりに

本研究では、受動定理に基づく耐故障制御系に対して、モデル化誤差が存在する場合でもロバスト安定性を保証できる可能性が高いことを示した。

本研究は JSPS 科研費 20K04537 の助成を受けたものである。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) K. Suyama and N. Sebe: Fault-tolerant servo systems against sensor failures using limited integrators, *Proc. of 2013 European Control Conference*, pp.3796-3802 (2013)
- 2) N. Sebe and K. Suyama: Passive fault tolerant servo control against one device failure out of sensors and actuators, *Proc. of 2014 European Control Conference*, pp. 644-651 (2014)
- 3) K. Makiyama, S. Kunimatsu and K. Motoyama: A Design Method of 2DOF Fault Tolerant Servo Controller against Simultaneous Sensor and Actuator Failure, *Proc. of SICE Annual Conference 2020*, pp. 1916-1920 (2020)

吊り上げ式歩行訓練装置のばね利用吊り上げ機構の製作

大分大学 ○宮崎隆誠 前崎篤人 阿部功 池内秀隆

Fabrication of spring-loaded lifting mechanism for lifting-type Gait Training System

Ryusei Miyazaki, Atsuto Maezaki, Isao Abe, Hidetaka Ikeuchi, OITA University

Abstract: Currently, most gait training have been conducting parallel bars or walkers. These training methods increase the load on the trainer. Our developing gait training device uses the feedback of trainer's foot load and reduces the load applied to the foot. In this report, new lifting mechanism that combine springs and a linear motion mechanism using a ball screw are proposed. We calculated torque and selected a motor for this mechanism. In addition, we assembled the mechanism and conducted trial runs with the motor.

1. はじめに

高齢者や障がい者のリハビリテーションの重要な目標の一つとして、日常生活の動作能力を高めることがある¹⁾。日常生活動作の中には「歩く」という動作が含まれており、何らかの理由で歩行能力が低下した場合は、歩行訓練が必要となる。現在の歩行訓練は平行棒や歩行器を用いることが多い。これらの訓練は訓練者自身が自らの体重を支えなくてはならないなど、負担が大きくなる。そこで我々は、歩行訓練の効果や効率の向上のために、Fig.1に示すような歩行訓練装置を導入することを考える。この歩行訓練装置は、吊り上げ機構部、保持ジャケット部、フォースプレート部、計測処理部、モニタ・カメラ部の五つから構成される。この歩行訓練装置の吊り上げ機構部の改良に関する提案と検討について報告する。

2. 歩行訓練装置の概要

2.1 訓練システムの概要

歩行訓練装置の概要をFig.2に示す。本装置は、訓練者を上部からの吊り上げ機構により支え、歩行訓練を行う。歩行路はフォー

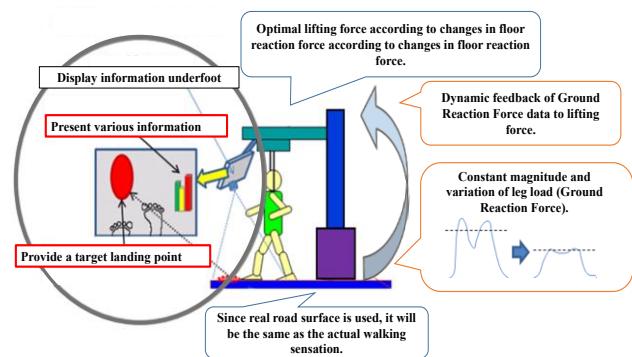


Fig.2 Gait Training System

スプレートとなっており、歩行中の床反力データを計測することができる。そのデータを吊り上げ部にフィードバックすることで支持張力を調整し、水中での浮力と同様の効果を再現する。これにより訓練者の身体的負担が軽減され、安全に歩行することができる。また、訓練者となる下肢疾患者は、片麻痺などの下半身の感覚がない場合が多く、歩行中に自分の足元を見てしまい姿勢が前かがみになるといった問題がある。そこで、訓練者の前方にディスプレイを設置し、足元の映像や目標足位置を表示した。訓練者は視覚的に正しい歩行を理解することができ、より効果的な歩行訓練を行うことができる。

2.2 吊り上げ機構部

改良前の吊り上げ機構部をFig.3に示す。この機構はバイラテラルサーボ油圧伝達機構と呼ばれているものである。この機構はモータとモータからの回転を得るために直動機構を取り付けたマスターシリンダ、マスターシリンダとチューブで連結させたスレーブシリンダから構成されている。モータを駆動させることでシリンダ内のオイルの流量が変化する。これにより吊り上げ機構部を上下させ、油圧によって大きな

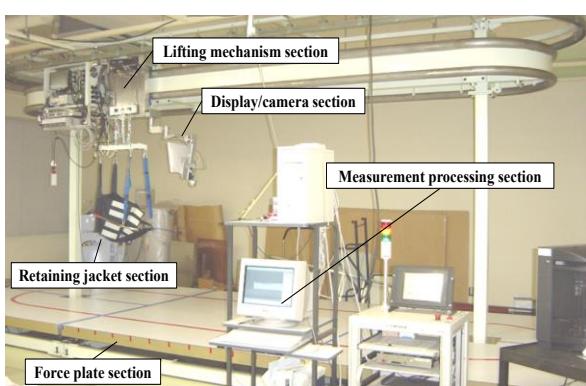


Fig.1 Appearance of Gait Training System

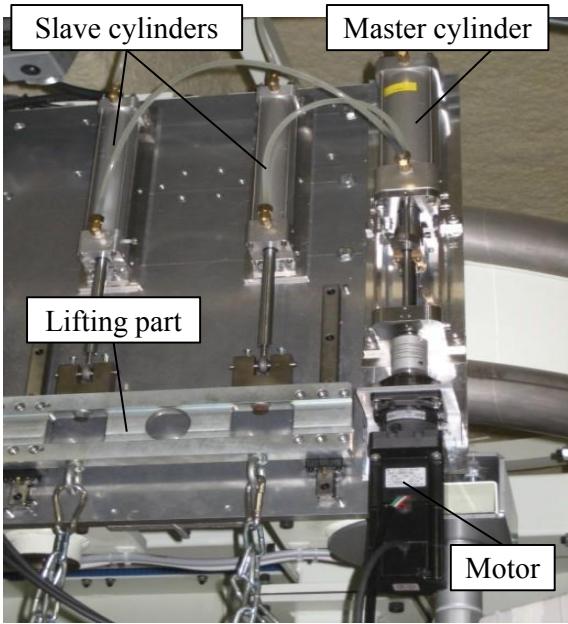


Fig.3 Bilateral servo hydraulic transmission mechanism

力を生み出すことができる。

この機構の長所は、簡単な構造であり、小型ながら高出力であるという点、および位置・力制御が容易であるという点である。短所としては、シリンドラ等の製作やオイル充填の手間など、製作やメンテナンスが困難な点である。本報告では、より簡便な機構の検討を行った。

3. 吊り上げ機構部の改良

3.1 新吊り上げ機構部

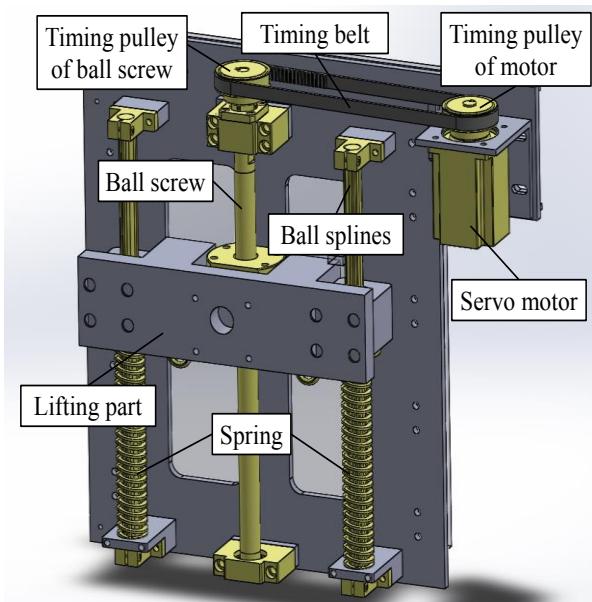


Fig.4 Lifting mechanism using ball screw and spring

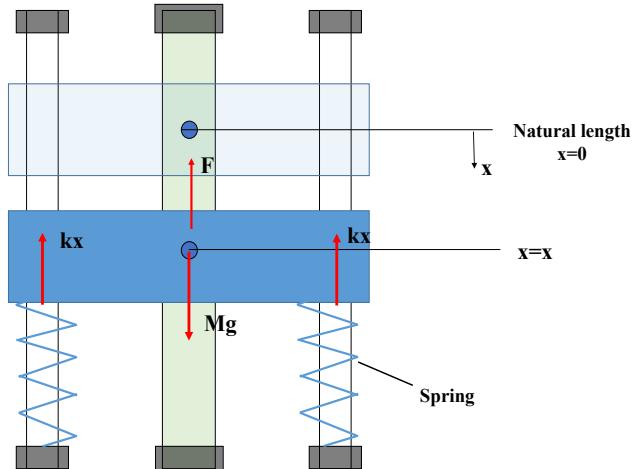


Fig.5 Simplified model drawing of the lifting mechanism

新たな吊り上げ機構は、ボールねじの直動機構にばねを組み合わせる。ばねによって必要なモータ出力を減らし、応答性の向上を図る。この吊り上げ機構の外観をFig.4に示す。中央にボールねじを取り付け、その左右にボールスライドを取り付ける。ボールスライドの下部に圧縮ばねを取り付ける。歩行訓練装置の構造上、モータを直接ボールねじに取り付けるスペースがないため、タイミングベルトを使用し、モータの回転を伝達する。

3.2 吊り上げ機構の簡略化モデル

Fig.5に吊り上げ機構を簡略化したモデル図を示す。このモデルでボールねじを動作させるために必要なトルクを求める。Mは吊り上げる対象の質量、gは重力加速度、Fはボールねじの推力、kはばね定数、xはばねの自然長からの距離とすると、垂直方向の力のつり合いより、式(1)となる。

$$Mg = F + kx \quad (1)$$

ボールねじの推力とトルクTの関係式は1をボールねじのリード、 η を効率とすると、次式で表される²⁾。

$$T = F1 / (2\pi\eta) \quad (2)$$

式(1)、(2)よりボールねじを動作させるのに必要なトルクとばねの変位との関係は、式(3)で表される。

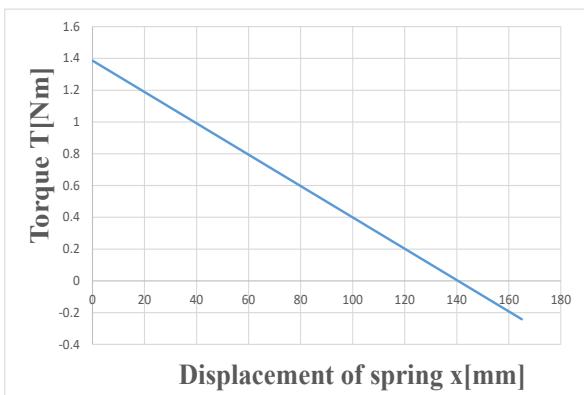


Fig.6 Calculation result of required torque

$$T = (Mg - kx) / (2\pi\eta) \quad (3)$$

3.3 トルクの計算

3.2節で求めた式(3)を用いて、吊り上げ機構に必要なトルクの計算を行った。M=80 kg, g=9.8 m/s², k=0.00279 N/m, l=0.01 mとした。設計資料²⁾より $\eta=0.9$ として計算を行った。機構に使用する圧縮ばねはコイルスプリング(ミスミ, SWU37-275, 許容たわみ量165 mm)を選定した。計算結果をFig.6に示す。縦軸がトルク、横軸がばねの変位である。計算の結果、ばねの変位が0 mmの時に最大トルク1.4 Nmとなった。ばねの変位が大きくなるにつれ、重力と逆向きの弾性力が大きくなるので、必要なトルク値は小さくなる。ばねの縮みが約140 mmになった時に重力とばねによる弾性力がつり合い、それ以上ばねが縮んだ際にはばねによる弾性力のほうが大きくなり、必要なトルク値がマイナスとなった。

3.4 吊り上げ速度の決定

モータに求められる吊り上げ速度を算出するために、健常者の歩行中の重心の移動量と歩行率に着目した。重心の上下移動距離は約4~5 cmであり、歩行率は男性で110歩/分、女性で116歩/分である³⁾。これにより、一歩当たりの秒数を算出し、その半分の時間で垂直方向の重心移動距離の5 cmを吊り上げることができれば良い。したがって、吊り上げ速度は約0.18~0.19 m/sとなる。

3.5 モータの選定

必要トルクと吊り上げ速度を考慮し、モータの選定を行った。ボールねじはTHK社のBTK2510V-5.3NUTを選定した。このボールね

Table.1 Calculation result of belt tension

Input		Output	
Max torque[Nm]	2.23	Distance between axes[mm]	308
Max rotation speed[rpm]	3000	Belt width[mm]	25
Rotation ratio	2.5	Deflection [mm]	4.9
Small pulley tooth count	22	Deflection load [N]	13.96~17.46
Large pulley tooth count	55	Axial load [N]	438.4

じのリードは10 mmであり、モータに求められる回転速度は1080~1140 rpmとなる。必要なトルクは、3.3節より最大1.4 Nmである。これらを考慮し、使用するモータはサーボモータ(安川電機, SGMJV-02ADA6C, 瞬間最大トルク2.23 Nm)を選定した。このモータの定格トルクは0.637 Nmで、最大回転速度は3000 rpmである。タイミングブーリのギア比を2.5とすることで、トルクは1.5925 Nm、回転数は1200 rpmとなり条件を満たす。

4. 吊り上げ機構の製作

4.1 ベルト張力の計算

本機構は、モータの回転をタイミングベルトで伝達するため、最適なベルト張力を求める必要がある。これに関して三ツ星ベルトの設計資料⁴⁾を参考にして計算を行った。その結果をTable.1に示す。ベルトを張った際にボールねじ、およびモータ軸に438.4 Nのラジアル荷重がかかることが分かった。これにより、軸が破損する可能性があるため、下記4.2節で機構の設計変更を行った。

4.2 軸荷重に耐えるための機構の変更

ボールねじの上部、およびモータ上部にベアリングを追加した(Fig.7)。これにより軸を両持ちで支えることができ、軸にかかる438.4 Nのラジアル荷重に耐えることができる。ベアリング(ミスミ, B6900ZZ)は

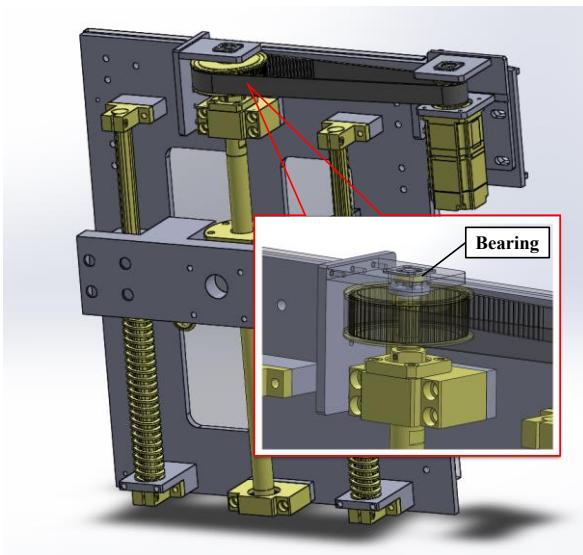


Fig.7 Lifting mechanism with additional bearing

許容回転数(32000 rpm)と許容定格荷重(2700 N)を基に選定した。

4.3 吊り上げ機構の製作と試運転

製作した吊り上げ機構をFig.8に示す。タイミングプーリーは歯数が22のもの(ミスミ, HTPP22S5M250-A-N14-KC90)をサーボモータ側に取り付け、歯数が55のもの(ミスミ, HTPP55S5M250-A-N15-KC90-QFC22-M3)をボールねじ側に取り付けた。タイミングベルト(三ツ星ベルト, 250S5M810G)を取り付ける際には、

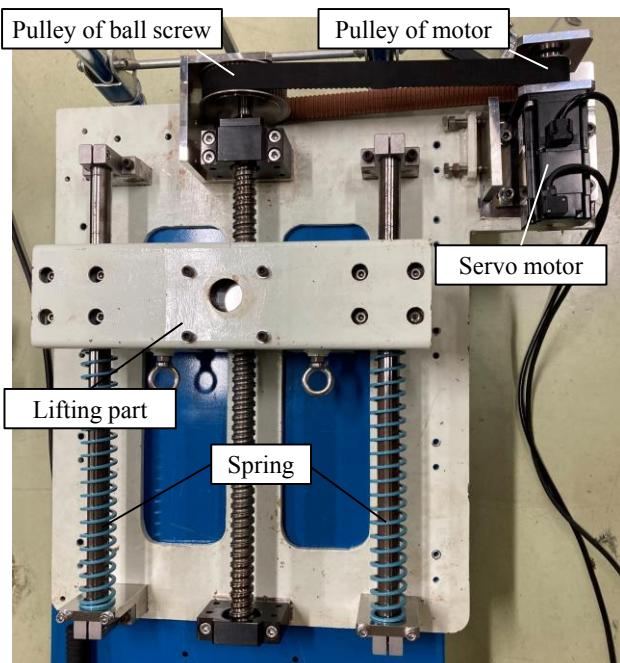


Fig.8 The lifting mechanism actually assembled

フォースゲージ(日本計測システム, HF-100)を用いて、ベルト張力が計算した範囲内となるように調整しながら取り付けた。

圧縮ばねは、ボールススライド(THK, LBF 25-500L)の外径と近い内径のばねを選定し、ボールススライドの外周に取り付けた。

組み立て後、試運転を行った。機構を床に置いた状態、および実使用を想定して、機構を床に対して垂直に置いた状態でモータ動作確認を行った。その結果、吊り上げ部がスムーズに上下駆動した。動作中にボールねじ部から音が発生するため、ボールねじ、およびススライドの平行度を確認し、調整を行う。また、この試運転は吊り上げ部に荷重を加えていないので、今後荷重実験を実施する。

5.まとめ

新たな吊り上げ機構を開発するために、必要なトルク、モータの選定、ベルト張力の計算により設計を行った。ベルト張力による軸荷重の問題を解決するために、モータとボールねじの軸の上部にベアリングを追加するように設計変更を行った。その後、実際に機構を組み立て、モータを動作させて試運転を行った。試運転の結果、機構に問題はないことを確認した。

今後は、今回製作した吊り上げ機構を歩行訓練装置に取り付け、吊り上げ部に荷重を加えた状態での動作確認を行う。また、健常者による歩行訓練のための同定実験を行っていく。

6.参考文献

- 1)「やさしい老人のためのリハビリテーション -自立のための援助の実際-」, 1984, 松村秩, 中央法規, p128
- 2)「MiSUMI-VONA技術情報 ボールねじの選定方法」
https://jp.misumi-ec.com/tech-info/categories/technical_data/td03/a0014.html
- 3)「歩行再建-歩行の理解とトレーニング-」, 2007, 大畠光司, 三輪書店, p30
- 4)「三ツ星ベルト タイミング伝動設計資料」
<https://www.mitsuboshi.com/japan/product/catalog/pdf/timingbelt-V802-C.pdf>, p64-84

床反力センシング型立ち上がり補助装置へのマジックハンド機構の適用に関する検討

大分大学 ○青野将大 阿部功 池内秀隆

A study on the application of foldable mechanism to a floor reaction force sensing type standing assist device

Masahiro Aono, Isao Abe, Hidetaka Ikeuchi, Oita University

Abstract: In this research, we are developing a device that assists the user to stand up by using feedback control for the floor reaction force generated when the user starts to move. Currently, the problem is the large size of the second prototype that has been produced. In this paper, we propose the application of the foldable mechanism to the miniaturization of a standing assist device, and confirmed its applicability by conducting measurement experiments using an actually fabricated device.

1. はじめに

立ち上がる動作は日常生活に不可欠な動作であるが、高齢者や下肢に疾患のある人にとって困難な動作の一つとして挙げられる。また、一般に市販されている補助装置は、スイッチによる操作が必要であり、装置に身を任せて補助する形式が多くみられる。本研究ではスイッチ操作ではなく、立ち上がる際に増加する、床から足へとかかる床反力を測定し、使用者の意思、状態を判断して支援を行うことで、使用者のリハビリにもつながる装置の開発を目指している。

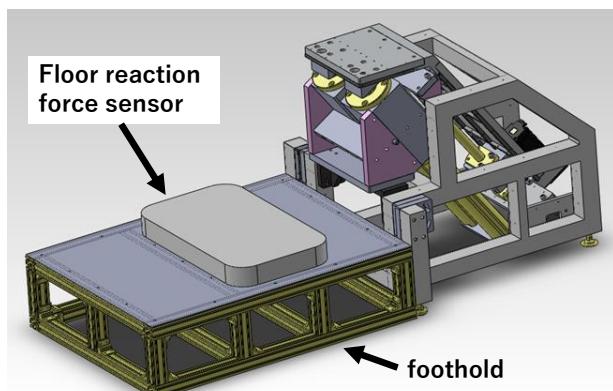


Fig. 1 standing assist device
(Second trial machine)

2. 立ち上がり補助装置

立ち上がり補助装置は使用者が立ち上る際に増加する床反力を測定し、フィードバック制御を行うことで立ち上がりの補助ができる装置である。現在 Fig. 1 に示す二次試作機まで研究が進められており、二次試作機は床反力センサとしてバランス Wii ボード (任天堂社 RVL-021) を使用し、直線軌道によって支持を行う¹⁾。

しかし、二次試作機は装置として立ち上がりの支援を行うことが可能ではあったが、機器のサイズに注目すると、必要なストロークを得るために、装置本体が大きくなり、本来は不要であった足場を設置したことで、日常的に使用するには大きすぎという問題点が挙げられた。この問題点を解決するために、腰を持ち上げる機構を変更することで、装置の小型化を目指している。今回、本論文で検討していくマジックハンド機構が適していると考え検討した。

3. マジックハンド機構

3.1 機構の概要

今回検討するマジックハンド機構を用いた持ち上げ機構を Fig. 2 に示す。装置の設計は Dassault

Systems 社製の SolidWorks で行った。この装置は、ボールねじ（THK 社 BTK 2502V-2.6）を稼働させることで上下に直線軌道で動作することができる。リンクを構成している各アームの長さは 440 mm（接続部から接続部までの長さは 390 mm）であり、座面が最も低い状態での高さは 353 mm、最も高い状態での高さは 950 mm となっている。また、それぞれの状態での各アームと水平面のなす角度は 8.55°, 73.02° となる。本機構の座面が最も低い状態と最も高い状態での高さの差は 597 mm であり、二次試作機のボールねじのストロークである 550 mm に比べると大きなストロークを出すことができている。また、二次試作機の問題点は不必要的足場がある事であり、足場をなくすために機構の最も低い状態での高さを 454 mm 以下にする必要があるが、この装置の最も低い状態での高さは 353 mm となっていることから寸法的には小型化が可能であるといえる。

3.2 動作に必要なトルク

装置にかかる負荷として 60 kg を支持できるように考えている。トルクの計算にはパンタジャッキのトルク計算式を用いることにした。ここで、必要なトルク T はねじ棒の有効直径を d 、ボールねじ部分にかかる力 F 、摩擦角 ρ 、ねじのリード角 φ を用いて式 (1) によって求められる²⁾。

$$T = \frac{d}{2} F \tan(\rho + \varphi) \quad (1)$$

式 (1) で考えているパンタジャッキは一段のものであるが、計算の中で必要になるボールねじ部分にかかる力にはリンクの段数によって次のような影響があると考えられる。

Fig. 3 には上方から等しく座面にかかる力 W で座面に力を加え、ボ-



Fig. 2 foldable mechanism

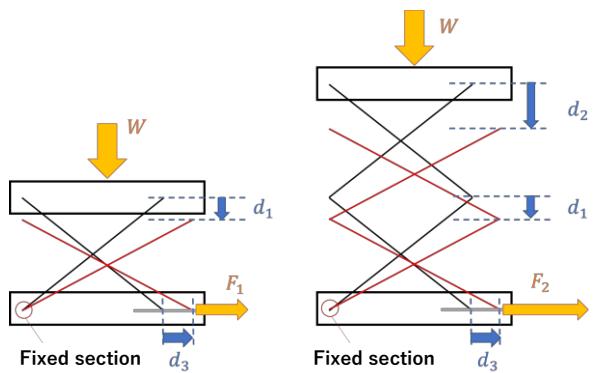


Fig. 3 Change by number of steps

ルねじ部分のスライダが d_3 だけ移動した状況を左図は一段（パンタジャッキの例）、右図は二段（マジックハンド機構）で示している。横向きに d_3 だけずれることにより一段では上下方向に d_1 だけ変化し、二段では二倍の距離である d_2 だけ変化している。このとき、座面にかかる力 W の仕事とボールねじ部分にかかる力 (F_1 と F_2) の仕事の保存を考慮すると、二段の場合にボールねじ部分にかかる力 F_2 は一段の場合にかかる力 F_1 の二倍であると考えられる。

以上のことと、ボールねじ部分にかかる力 F と座面にかかる力 W の角度変化による関係を考慮すると、式 (1) は式 (2) のように変形することができる。

$$T = dF \tan(\rho + \varphi) = d \frac{W}{\tan\theta} \tan(\rho + \varphi) \quad (2)$$

4. おもりによる計測実験

今回の検討で式 (2) を理論式として使用することが可能であるか確認するために実験と、今回検討しているマジックハンド機構のモータ接続部分の動き始めに必要な最大トルクの計測を行う実験を行った。計測にはフォースゲージとして日本計測システム社 HF-100 を用いた。

4.1 座面保持トルクの測定（実験 1）

Fig. 4 のように装置の座面上の人が座ると想定している箇所におもりを置き、ボールねじのモータ接続部分にかかるトルクについてフォースゲージを用いて計測した。本実験では Fig. 5 の器具をボール

ねじに装着することで、軸から 0.1 m あたりの力を計測し、その値を 1 m あたりの力に計算することでトルクの数値を得ている。今回は、おもりを 5, 10, 20 kg の三種類とし、アームと水平面のなす角度が 20, 30, 40, 50, 60 ° の際におもりを座面に乗せ、フォースゲージを動かさず、力が釣り合っている際のトルクの計測を 5 セット行った。Fig. 4 にはつり合い時のトルク測定の様子を示している。計測の結果を Fig. 7~9 に示す。図には、5 回の計測による平均値と、式 (2) から得た値を理論値として示す。

4.2 動き始めに必要なトルクの測定（実験 2）

実験 1 と同様に、座面上におもりを乗せ、計測部を Fig. 6 のようにフォースゲージを用いて引き上げた際に必要となる力の最大値を計測することで、装置の実際の動作方向での動き始めに必要なトルクの計測を行った。今回は 5 kg のおもりを用いて、

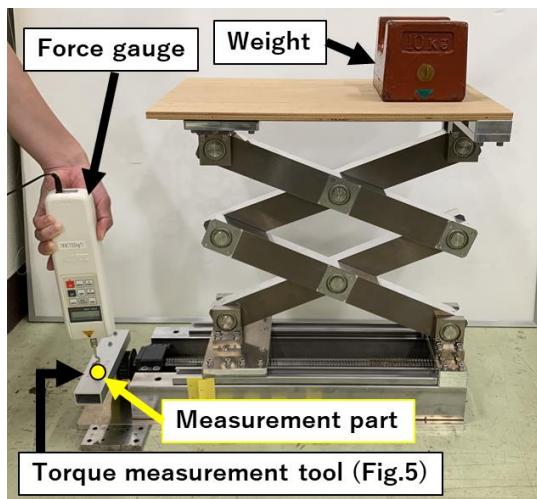


Fig. 4 Equipment being measured

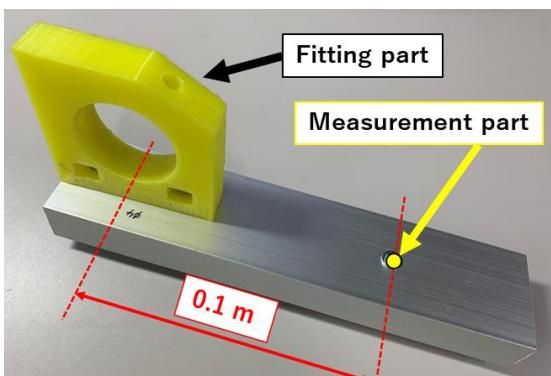


Fig. 5 Torque measurement tool

アームと水平面のなす角度が 10, 20, 30, 40, 50, 60 ° の場合のトルクの計測を 10 セット行った。計測の結果を Fig. 10 に示す。図には、10 回の計測からの平均値と、式 (2) から得た値を理論値として示す。また、計測値の平均による近似式を青色の点線で表している。

4.3 実験結果

実験 1 の結果 (Fig. 7~9) をみると、どの結果も多少の誤差はあるが、計測値の平均と理論値は非常に近い値を取っていることが読み取れる。このことから、式 (2) は本研究における理論式として使用することは問題ないと考えている。

次に、実験 2 の結果 (Fig. 10) をみると、アームと水平面のなす角度が大きいところでは計測による平均値と理論値の値は近い値を取っているが、角度が小さいところでは計測による平均値は理論値よりも大きい値を取っていることが読み取れる。

これらの結果から、本機構の動作中に必要なトルクの計算に用いるのは式 (2) で問題は無いが、実際に本機構を動作させるための最大必要トルクは少し大きくなると考えられる。機構を駆動させるのに必要なモータを選定し駆動制御に用いるため、実験 2 によって得られた計測値から近似式を求ることにした。

Fig. 9 から、座面上に 5 kg の負荷がかかった際の近似式は式 (3) である。

$$y = 1.1556e^{-0.061x} \quad (3)$$

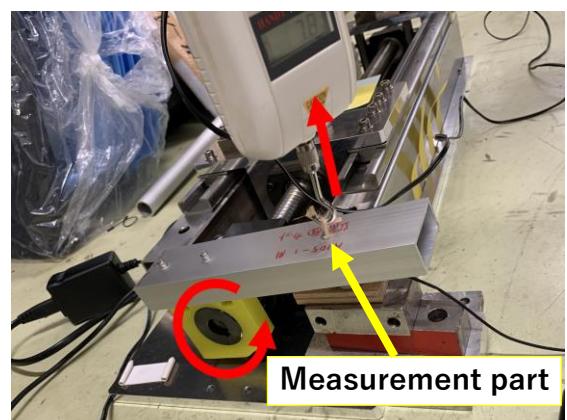


Fig. 6 Pulling up the measuring point

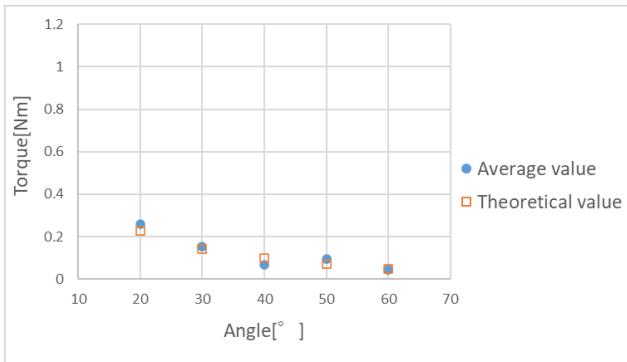


Fig. 7 Measurement result of 5[kg] (Experiment 1)

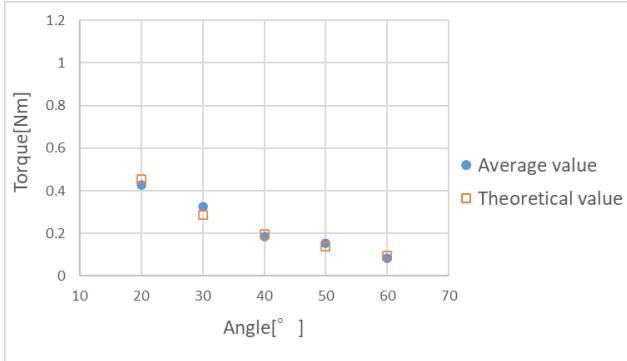


Fig. 8 Measurement result of 10[kg] (Experiment 1)

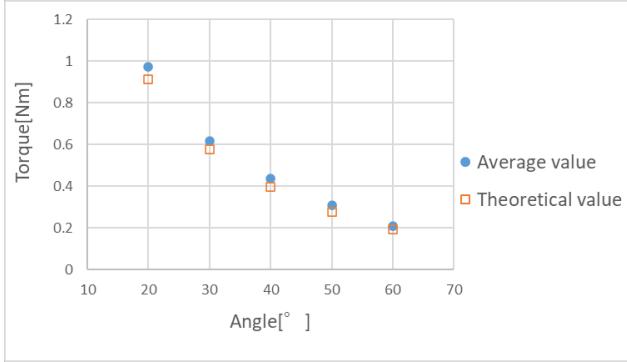


Fig. 9 Measurement result of 20[kg] (Experiment 1)

ここで、式(2)から、トルク T と座面にかかる力 W は比例の関係にあることから、式(3)を12倍して60 kg の負荷がかかった際の近似式としたものが式(4)である。

$$y = 13.8672e^{-0.061x} \quad (4)$$

以上のことから、本研究では式(4)の近似式を用いてモータの選定及び動作時の制御について検討を進めることにする。

本研究で検討しているマジックハンド機構は、最も座面が低い状態で大きなトルクが必要となるこ

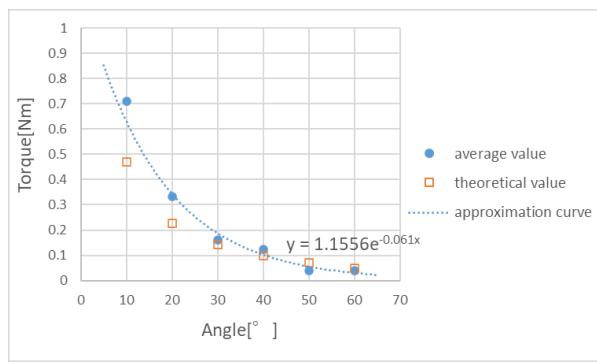


Fig. 10 Measurement result (Experiment 2)

とが考えられるため、アームと水平面のなす角度が8.5°の際のトルクを式(4)を用いて計算したところ、8.232 Nmであり、その際に必要なモータの出力は432.439 Wであることが分かった。現在、二次試作機に使用しているモータ（安川電機 SGMJV-06A3A6C）の定格出力は600 Wであり、本機構に必要な出力を十分満たしている。そのため、モータを変更することなく動作させることができると見える。

5.まとめ

今回の計測実験によって、マジックハンド機構のトルク計算にパンタジャッキの計算式が利用可能であり、段数が変化すると仕事の影響によって必要なトルクも変化することが確認できた。また、必要最大トルクを求めた結果、本論文で検討したマジックハンド機構は立ち上がり補助装置の小型化に適用することが可能であると考えられる。今後は、立ち上がり補助装置に組み込み、被験者実験が行えるよう、安全性等の検討を行い、装置の有用性を検証していく予定である。

6.参考文献

- 1) 床反力センシング型立ち上がり補助機構の研究－腰支持軌道の検討実験と二次試作機の設計－，青木夏海，卒業論文，2014年度
- 2) 実例で学ぶ機械設計製図，柳田秀記，実教出版，2019年

認知症診断への応用を目的とした脳波特徴解析システムの構築

佐賀大学 ○藤松孝浩 杉剛直

東京都立産業技術高等専門学校 後藤和彦

佐賀大学 松田吉隆 後藤聰

三野原病院 大石文芽 山崎貴男

Feature analysis system of EEG for extracting the parameters related to the progression of dementia

Takahiro Fujimatsu, Takenao Sugi, Saga University

Kazuhiko Goto, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology

Yoshitaka Matsuda, Satoru Goto, Saga University

Ayame Oishi, Takao Yamasaki, Minohara Hospital

Abstract: Electroencephalographic (EEG) record is a candidate of biomarkers for assessing the progression of dementia. We have been developing the analysis system of EEG parameters related to dementia progression. First, the system calculates the various parameters from segmented EEG data. Then, the comparison of parameters among EEG data is automatically obtained. This study shows an analysis result of a patient with Alzheimer's disease.

1. まえがき

現在、日本は急激な高齢化に伴い認知症の患者数は増加の一途をたどっている¹⁾。認知症の重症度や、認知症の手前である軽度認知障害 (Mild cognitive impairment, MCI) の診断、MCI から認知症へと移行する可能性の把握は、極めて重要である¹⁾。認知症そのものの診断は、脳 MRI 検査や脳 SPECT 検査などを用いることで可能である。しかし、いずれも診断的価値は高いが、放射線や強磁場を用いるなど侵襲性があることや、機器が大きいために設置場所を選び費用も高額であることから、広く一般的に利用できる状況ではない。そのため、認知症や MCI の早期発見に利用できる安価で広く普及可能なバイオマーカー開発に関する研究が盛んに行われている¹⁾²⁾。

認知症診断において、脳波検査は認知症と症状が似ていて混同されやすい疾患を除外する補助的な診断として用いられている²⁾。しかし近年、低侵襲性であること、検査場所を選ばず機器も安価であることから脳波検査の重要性が高まっている。また、近年では認知症特有の脳波が報告されていることから、早期診断の有力なバイオマーカー候補の一つに位置づけられる

2)3)4)5).

著者らは、安静閉眼覚醒脳波に対する脳波自動判読システム⁶⁾を認知症患者の脳波特徴抽出へと応用する研究を行ってきた⁷⁾⁸⁾。本研究では、脳波自動判読システムで用いている判読パラメータのほか、認知症の脳波定量分析による研究で成果が報告されているパラメータ⁹⁾を追加し、これらの特徴を詳細にかつ、効率よく解析するシステムの構築を目的とした。

2. 方法

2.1 対象と記録

三野原病院脳神経内科を受診し、アルツハイマー型認知症 (Alzheimer's disease, AD) と臨床診断された女性被検者の脳波データを本研究に用いた。本被検者は経年で3回の脳波記録を行っており、それぞれの記録年月は、2012年7月（78歳）、2014年6月（80歳）、2015年8月（81歳）である。脳波データは匿名化されており、三野原病院での倫理委員会審査を経たものである。デジタル脳波計 (Nihon-Koden, EEG1200) によって、両耳朶を含む頭皮上21電極から記録された脳

波データを、サンプリング周波数200 [Hz], バンドパスフィルタの帯域通過周波数0.53–60 [Hz] で解析用コンピュータに取り込んだ。

2.2 脳波特徴解析システムの概略

脳波特徴解析システムの概略を Fig.1 に示す。記録脳波データは、1 セグメント(5.12 秒)単位で計算機に取り込まれる(Data acquisition)。次に脳波に対して、筋肉のこわばりなどで出現する筋電図アーチファクト、瞬きなどで出現する瞬目アーチファクトの有無判定が行われ、有りと判定されたセグメントは解析から除外される(Artifacts detection)。続いて、アーチファクト無しと判定された脳波に対して、特徴パラメータのそれぞれの計算がなされる(Calculation of EEG parameters)。最後に脳波時系列やパワースペクトル、アーチファクト、導出パラメータ情報を 1 セグメントごとの表示、指定された区間におけるパラメータの最大値、最小値、平均値、標準偏差を呈示する(Analysis of EEG parameters)。

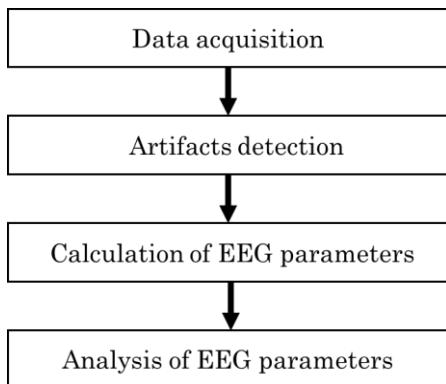


Fig.1 Flowchart of EEG analysis system.

2.3 脳波特徴パラメータ

Table 1 には、脳波自動判読システム⁶⁾ 特徴パラメータから後頭部優位律動(Posterior dominant rhythm, PDR)に関する 6 項目のパラメータに関する計算式と、認知症の脳波定量分析による研究で成果が報告されているパラメータ⁹⁾ の計算式を載せている。上から順に、PDR 出現の性状を表すオーガニゼーション(Organization), PDR の周波数帯域(6~14 [Hz])でのピーク周波数(Frequency), 振幅(Amplitude), およびそれらの左右差(Asymmetry)になる。次に、それ

ぞれ δ 帯域(Delta band, 0.5~4 [Hz]), θ 帯域(Theta band, 4~8 [Hz]), α 帯域(Alpha band, 8~13 [Hz]), β 帯域(Beta band, 13~25 [Hz])のパワー一値の成分比(Power ratio), 脳波チャンネル T5-O1 と T6-O2 の α 帯域成分の相関性を示すコヒーレンス(Coherence in alpha band), PDR の周波数帯域に限らず、4~10 [Hz], 8~13 [Hz], 4~13 [Hz] それぞれのピーク周波数(Peak frequency)である。これらのパラメータは、パワースペクトルより計算される。 σ_α は α 波成分の標準偏差, S_d , S_δ , S_θ , S_α , S_β , S_T は、それぞれ PDR, δ 波, θ 波, α 波, β 波, 脳波全体域の成分量である。 S_{xx} , S_{yy} は、それぞれチャンネル T5-O1 と T6-O2 のパワースペクトル, K_{xy} , Q_{xy} は、チャンネル T5-O1 と T6-O2 のクロススペクトルの実部成分と虚部成分である。特徴パラメータ計算は 1 セグメント単位で左右の半球ごとに行った。

Table 1 Parameters of the EEG analysis system.

Items	Equations
Posterior dominance rhythm	Organization $y = 0.49 + 0.58\sigma_\alpha - 0.0169S_d + 8.14 \times 10^{-5}(S_d)^2 - 0.053\frac{S_d}{S_T} + 3.12\frac{S_\delta}{S_T}$
	Asymmetry $ y_{(left)} - y_{(right)} $
	Frequency[Hz] f_d
	Asymmetry[Hz] $ f_d(left) - f_d(right) $
	Amplitude[μV] $10\sqrt{\hat{S}_d}$
Power ratio	Asymmetry[%] $\frac{ 10\sqrt{\hat{S}_d(left)} - 10\sqrt{\hat{S}_d(right)} }{10\sqrt{\hat{S}_d(MAX)}} \times 100$
	Delta wave[%] $\frac{S_\delta}{S_T} \times 100$
	Theta wave[%] $\frac{S_\theta}{S_T} \times 100$
	Alpha wave[%] $\frac{S_\alpha}{S_T} \times 100$
	Beta wave[%] $\frac{S_\beta}{S_T} \times 100$
Coherence in alpha band (T5-O1 and T6-O2)	$Coh(f) = \frac{K_{xy}^2 + Q_{xy}^2}{S_{xx} \cdot S_{yy}}$
Peak frequency[Hz]	f_d

3. 結果

Fig.2 には、1 セグメントの脳波データから得られた脳波特徴パラメータの計算結果を示す。左上には、セグメントを前後させることができボタンがある。ボタンを押すことにより、対応した各パラメータが表示される。左から順に、各チャンネルごとの双極導出時系列(Bipolar derivation time series), 時系列に対応したパワースペクトル(Power spectrum), 筋電図アーチファクト(Electromyographic artifacts)の有無判定、瞬目アーチファクト(Blink artifacts)の有無判定、左

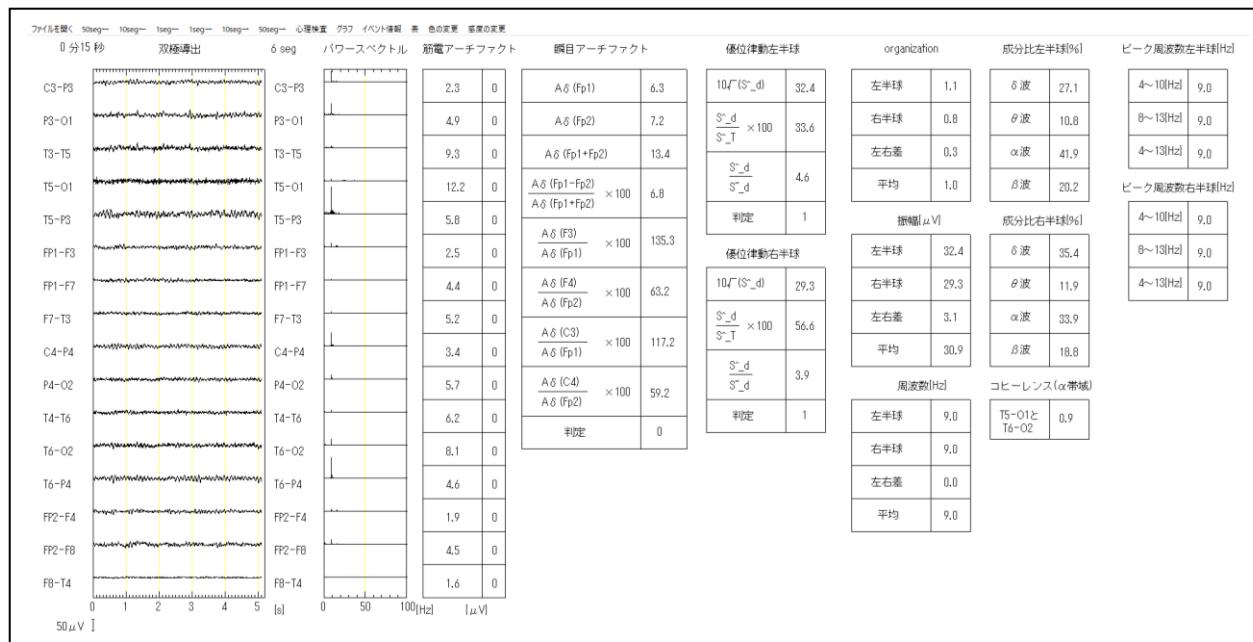


Fig.2 EEG parameters obtained from a segment.

右半球ごとの PDR の有無判定と各パラメータの値、今回新たに導入したパラメータである、各帯域ごとの成分比(Power ratio), α 帯域コヒーレンス(Coherence in alpha band), ピーク周波数(Peak frequency)である。筋電図アーチファクトもしくは瞬目アーチファクトのどちらかが混入されたセグメントでは、これらの脳波特徴パラメータは導出されない。

Fig.3 は、同一被検者 3 例の脳波データを読み込み、脳波記録中に検査技師の指示により閉眼した区間にについてパラメータの最大値(Maximum value), 最小値(Minimum value), 平均値(Mean value), 標準偏差(Standard deviation)を示す。導出したパラメータは、各帯域の成分比と脳波チャンネル T5-O1 と T6-O2 の α 帯域成分のコヒーレンスである。縦軸をそれぞれのパラメータ値、横軸を記録年月とした。

Fig.3 のように、PDR に関する判読パラメータやピーク周波数も同様のグラフを作成できる。今回使用したデータは 3 例分であるが、データ数を増やしても同様のグラフを作成でき、効率的な解析が可能となった。

4. 考察

一般に、AD 患者の脳波では、PDR に相当する α 波の徐波化、振幅減少、PDR 以外では徐波(δ 波, θ 波)の出現や速波(β 波)の減少があるとされる¹⁾。また、

AD 患者の脳波定量分析では、安静時脳波のコヒーレンスが全般的に低い値を示したという報告がある⁹⁾。

パラメータの最大値、最小値、平均値、標準偏差のグラフは、同一被検者の複数回記録を経年で評価できる。そのため、健常から MCI、認知症へと移行する際のパラメータ変化を捉えられる。症例数を増やすことで、認知症の診断において有用な特徴パラメータの抽出が期待される。

5. まとめ

本研究では、評価パラメータを脳波自動判読システムで用いている判読パラメータ並びに、認知症の脳波の定量分析による研究で成果が報告されているパラメータを詳細に提示するシステムを構築した。結果として、健常から MCI、認知症へと移行する際のパラメータ変化を捉えることが可能となった。今後は、症例数を増やしての検討を進めていく。

4. 参考文献

- 1) 山崎貴男, 飛松省三: アルツハイマー病の早期診断バイオマーカーを探る, 福岡医誌, 103(11), 215-225, 2012

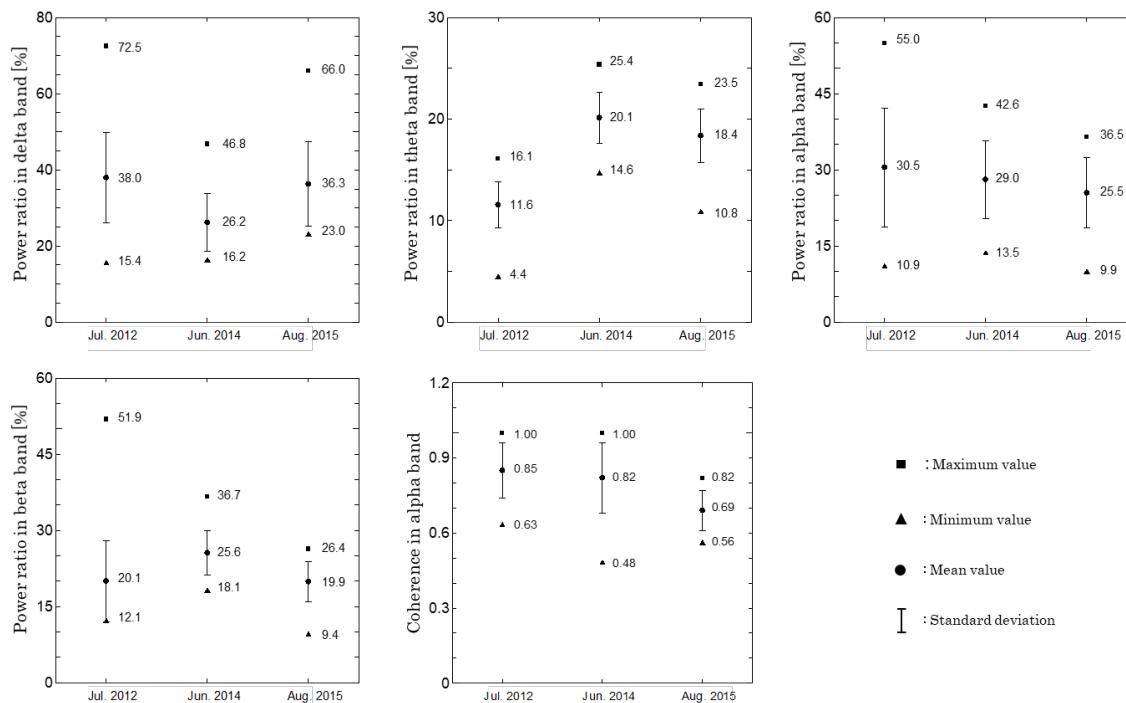


Fig.3 Comparison of parameters among aging in one subject.

- 2) 畑真弘, 石井良平, 青木保典, 池田俊一郎, 池田学:認知症疾患への臨床神経生理学の応用, 臨床神経生理学, 47巻 3号, 149-151, 2019
- 3) Jelic V, Johansson SE, Almkvist O, et al: Quantitative electroencephalography in mild cognitive impairment: longitudinal changes and possible prediction of Alzheimer's disease, *Neurobiol of Aging*, 21, 533–540, 2000
- 4) Lee H, Brekelmans GJF, Roks G: The EEG as a diagnostic tool in distinguishing between dementia with Lewy bodies and Alzheimer's disease , *Clinical Neurophysiology* , 126 , 1735-1739, 2015
- 5) Adamis D, Sahu S, Treloar A, et al: The utility fo EEGs in dementia: a clinical perspective, *Int J Geriatr Psychiatr* 20, 1038-1045, 2005
- 6) Shibasaki H, Nakamura M, Sugi T, et al: Automatic interpretation and writing report of the adult waking electroencephalogram, *Clinical Neurophysiology* , 125, 1081-1094, 2014
- 7) 杉剛直, 後藤和彦, 松田吉隆, 後藤聰, 大石文芽, 山崎貴男:認知症患者における脳波判読パラメータの特徴解析, 第 39 回計測自動制御学会九州支部学術講演会予稿集, 104A2, pp.36-39, 2020
- 8) 藤松孝浩, 後藤和彦, 杉剛直, 松田吉隆, 後藤聰, 大石文芽, 山崎貴男:認知症に関連した脳波特徴可視化のための解析システム構築, 2020 年度日本生体医工学会九州支部学術講演会, 2A1, 2021
- 9) 蒋正言:初老期アルツハイマー型痴呆の脳波学的研究-安静時および光刺激中脳波の定量分析とコヒーレンスによる検討-, 金沢大学十全医学会雑誌, 第 105, 第 6 号, 755-765, 1996

シート型体振動計を用いた睡眠時の心拍数推定:精度改善のための特徴解析

佐賀大学 ○池田尚史 杉剛直 松田吉隆 後藤聰
 パラマウントベッド睡眠研究所 豊田沙織 木暮貴政
 睡眠評価研究機構 白川修一郎

Estimation of heart rate during sleep by using a sheet-shaped body vibrometer : analysis and improvement

Naofumi Ikeda, Takenao Sugi, Yoshitaka Matsuda, Satoru Goto, Saga University
 Saori Toyoda, Takamasa Kogure, PARAMOUNT BED Sleep Laboratory
 Shuichiro Shirakawa, Sleep Assessment and Research Institute

Abstract: We have developed a method for estimating the heart rate during sleep by using a sheet-shaped body vibrometer (SBV) in the past. Total accuracy of the estimation achieved the level usable in a practical scene. However, the accuracy has sometimes deteriorated for individual data. This paper analyzed the estimation result in detail. Then, the condition of the estimation method was modified, and its accuracy was also investigated.

1. まえがき

現在の日本では、様々な要因で睡眠不足に陥り睡眠の質が低下傾向にある¹⁾。それに伴い睡眠障害を簡易的な睡眠計で診断する方法も日々研究がされている²⁾。シート型体振動計 (sheet-shaped body vibrometer, SBV) は、マットレスやベットの下に敷くことで睡眠時の体動や呼吸情報を抽出でき、心拍数や呼吸数などを非拘束・非接触で測定することが可能である。心拍、呼吸情報は自律神経系の働きが作用し、睡眠状態の変化に伴い自律神経活動も変化する³⁾。そのため心拍呼吸成分を抽出するできるSBVは、日常の睡眠に有効と考えられる。

これまで著者らは、SBVを用いた体動、心拍、呼吸情報に基づいた睡眠段階判定法の開発⁴⁾⁵⁾⁶⁾、実用化を念頭においた終夜睡眠データに対する心拍、呼吸の解析システムの開発⁶⁾を行ってきた。SBVを用いた心拍数と呼吸数の推定精度は、同時記録した睡眠ポリグラフ記録 (Polysomnography, PSG) から求めた値

と比較してデータ全体を通しては十分と考えられた。しかし、特に心拍数の推定精度に関しては、被検者によって差が大きく改善が求められた。

本研究では、SBVによる心拍数推定精度の改善を目的とした。PSGとSBVでの推定精度の一致率が低いデータを抽出し、散布図によって傾向を確認した。さらに、処理波形を解析し原因を探った。解析結果に基づいて、心拍数推定の判定条件を調整することで、推定精度が向上する可能性について検証した。

2. 方法

2.1 対象と記録

SBVを用いた睡眠データの記録は佐賀大学にて行われた。被検者22名 (Subject A-V, 男性15名、女性7名、21-28歳) は、午後に約2時間の睡眠を取った。内2例 (Subject B, I) は記録データ時間が短かったため、解析から除外した。記録はマットレス下に設置したSBVにて体振動2チャンネル (SBV1, SBV2) をサンプ

リング周波数128 Hzで記録した。またPSGは、脳波計にて脳波6チャンネル(F3, F4, C3, C4, O1, O2), 2チャンネル(LOC, ROC), 頸筋電図(EMG), 心電図(ECG), 呼吸のデータを, いずれも1000 Hzで記録した。

2.2 心拍数推定の概略

Fig.1 は, 記録した SBV データから心拍数を推定する手順を示している。図中の波形は横軸が時間, 縦軸は各波形の大きさである。SBV の生波形(Raw data)には, 体動などの原因でデータに飽和区間が生じるため, まずこれを検出し, 除外した。(a) の体動区間が除外されたデータ(Raw data without body movement segments)を用いて, 以降の処理を行った。(b) の主成分分析による信号分離(Signal separation by principal component analysis, PCA)では, 安静時の SBV 波形に心拍情報と呼吸情報が重畠して出現するため, PCA を利用して心拍成分と呼吸成分の分離をした。(c) のピーク検出(Peak detection)では, PCA 処理波形に対してフィルタ処理

(Filtering) と整流積分(Rectification integral)を行い, 心拍動による振動が明瞭となるようにした。この処理波形より心拍間隔を求めるための波形頂点を検出した。 $\theta = 0.4 [s]$ は頂点の検出範囲を示しており, 範囲内の最大値をとる点を頂点と判定した。

2.3 判定精度の評価

SBV による心拍数推定精度の評価は, 同時記録された PSG の心電図波形から求めた心拍数との比較によった。同一区間より求められた PSG の心拍数を H_p , SBV より得られたものを H_s としたとき

$$\frac{|H_s - H_p|}{H_p} \times 100 \leq 10 [\%] \quad (1)$$

を満たした場合に一致とみなした。(1)式は, PSG と SBV の心拍数の差が 10 [%]未満であることを意味する。心拍数は 1 秒毎に過去 10 秒間から抽出された頂点時刻より算出し, 記録データ全体の一致率を算出した。

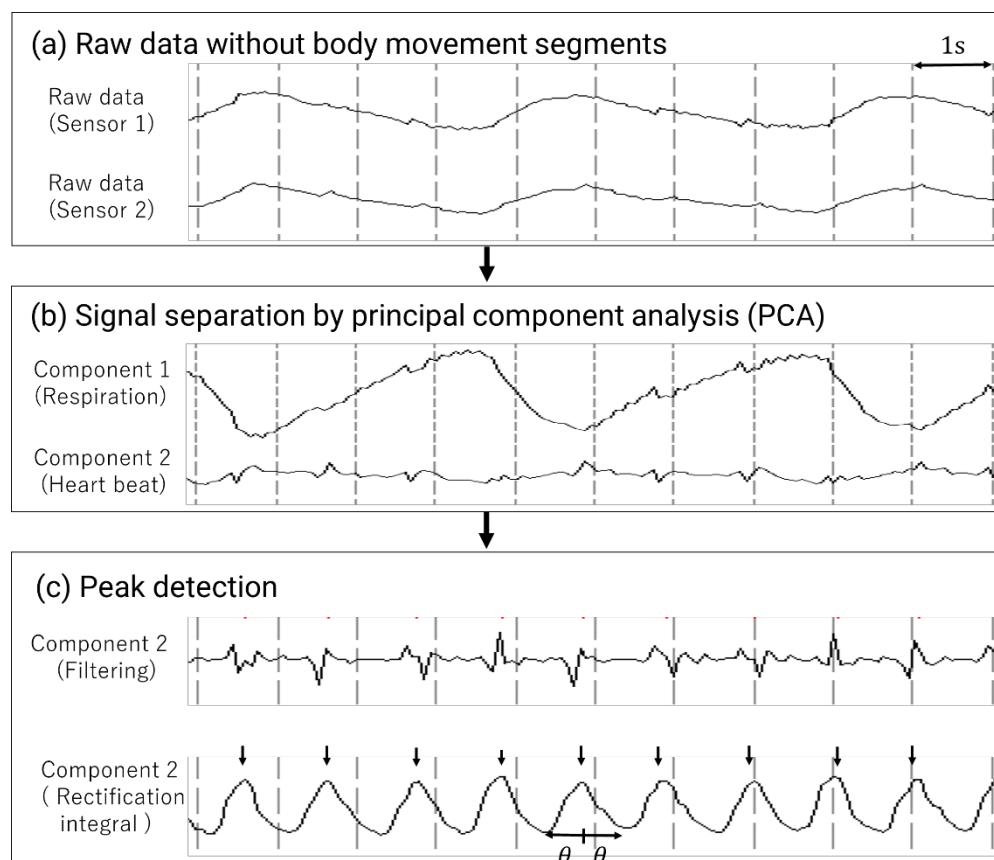


Fig.1 Flowchart for estimating heart rate.

2.4 心拍数推定結果の特徴解析

20例の被検者から得られた心拍数推定結果から、一致率の低いデータを選択し、その特徴を解析した。まず、1秒毎に得られた PSG と SBV の心拍数より散布図を作成し、分布の特徴を検討した。次に、不一致となった区間の波形と、その区間から抽出された頂点との関連を調べた。最後に、これらの特徴解析結果に基づいて、判定条件を変更し、推定精度への影響を検証した。

3. 結果と考察

20例の被検者に対する心拍数推定精度は 93.9 ± 6.0 [%] となった。最も高い一致率は 99.9 [%] (Subject K) で、最も低い一致率は 73.8 [%] (Subject O) であった。上記 2 例に加えて、一致率が 88.8 [%] と低い値となったデータ (Subject C) の計 3 例に対して、詳細に特徴を解析した。

Fig.2 は、各被検者データでの心拍数の散布図になる。横軸は SBV から得られた心拍数、縦軸は PSG から求めた心拍数を表している。図中の 2 本の破線は (1) 式の条件 10 [%] にあたるもので、破線内にあるデータが一致したものになる。また、右上の数字は相関係数を示している。一致率がよい (i) Subject K は、破線の範囲内にデータが集まっていた。(ii) Subject C では破線の右側に多く点が存在し、PSG から求めた心拍数が 50 - 60 [bpm] に対して SBV から得られた心拍数は、50 - 80 [bpm] と大きくなかった。一方で (iii) Subject O では破線の左側に多く、PSG の心拍数が 90 - 110 [bpm] に対して SBV の心拍数は 70 - 110 [bpm] と小さくなかった。(ii), (iii) の比較から、心拍数の平均値と分布の傾向に違いがあることが見てとれた。

Fig.3 は、検出範囲 θ を変更して求めた心拍数一致率のグラフである。横軸が検出範囲、縦軸が心拍数の一致率を示している。図中の黒丸 (●) は Subject K、白丸 (○) は Subject C、黒四角 (■) は Subject O を示している。Subject C は平均心拍数が遅い被検者であり、検出範囲を拡げることで心拍数一致率が向上したと考えられた。

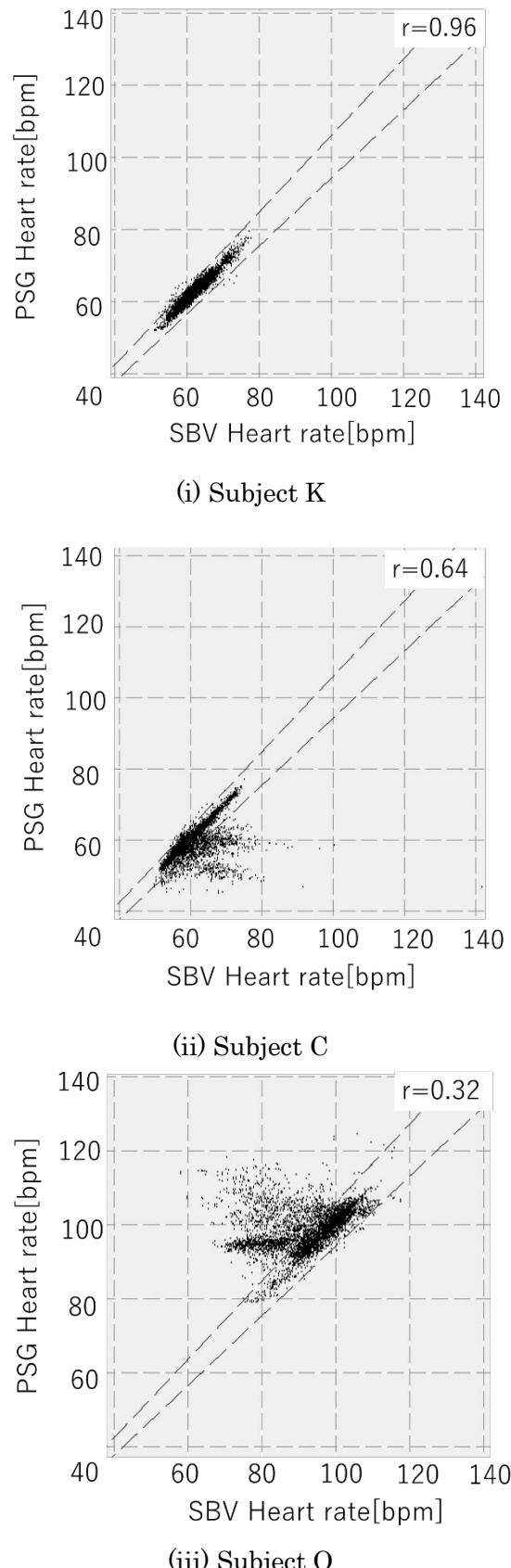


Fig.2 Scatter plots of heart rate for each subject (PSG vs. SBV).

Subject O は、平均心拍数が早い被検者であり、検出範囲を狭くすることで、頂点間隔の短いデータでの見逃しが減少し、一致率向上につながったと考えられた。

このように、被検者ごとの平均心拍数や整流積分波形に合わせた検出範囲を設定することで、データの検出精度の向上がみられた。

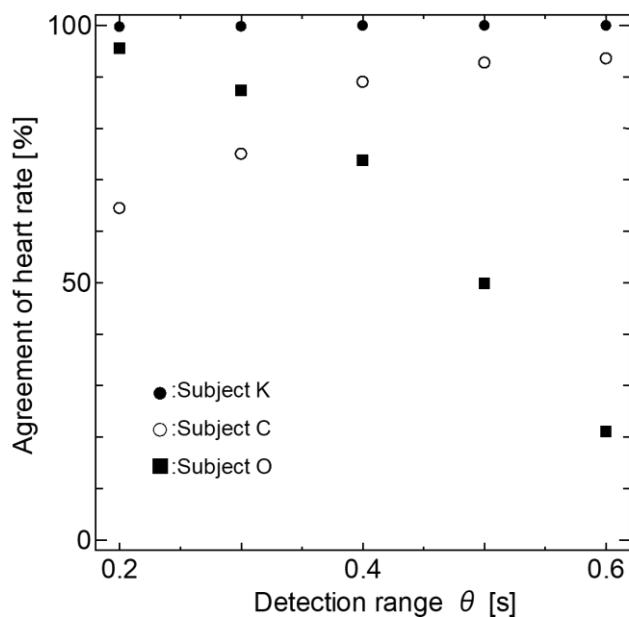


Fig.3 Relationship between the condition for detecting peaks and the accuracy of heart rate estimation.

4.まとめ

本研究では、SBV による心拍数推定精度の改善を目的とし、整流積分波形のピーク検出範囲を変更して心拍数の検出精度の検証を行った。検出範囲を変更することで心拍数の検出精度が向上することが確認できた。そこから平均心拍数や整流積分波形に合わせた検出範囲の設定が必要であると考えられる。

今後は、整流積分波形の要素から検出範囲を自動設定するシステムの構築を行っていく。

5.参考文献

- 1) 令和元年 国民健康・栄養調査結果の概要, 厚生労働省, p27, 2020
- 2) 高玉圭樹, 中理怡恒, 千葉伸太郎, 西野精治:

無拘束型マットセンサを用いた機械学習による睡眠時無呼吸症候群のスクリーニングの可能性, 日本睡眠学会第 46 回定期学術集会, S16-6, 2021

- 3) Herscovici S, Pe'er A, Popyan S, Lavie P : Detecting REM sleep from the finger: an automatic REM sleep algorithm based on peripheral arterial tone (PAT) and actigraphy. *Physiol. Meas.* 28(2), 129-140, 2007
- 4) 河原諒治, 杉剛直, 松田吉隆, 後藤聰, 木暮貴政, 椎野俊秀, 白川修一郎: シート型体振動計からの主成分分析を用いた呼吸・心拍情報の抽出, 日本睡眠学会第 46 回定期学術集会, P-056, 12-G-21, 2017
- 5) 渡邊一郎, 杉剛直, 松田吉隆, 後藤聰, 豊田彩織, 椎野俊秀, 木暮貴政, 白川修一郎: シート型体振動計による被検者特性を考慮した睡眠段階判定, 日本生体医工学会九州支部学術講演会, 1A2, 2021
- 6) 池田尚史, 杉剛直, 松田吉隆, 後藤聰, 豊田彩織, 木暮貴政, 白川修一郎, 林光緒: シート型体振動計による心拍数推定の終夜睡眠データへの適用, 日本生体医工学会九州支部学術講演会, 1A1, 2021

Ladder Variational Autoencoderを用いた動的心臓形状の特徴量抽出

九州大学 ○田偉業 宮内翔子 倉爪亮
岡山大学 諸岡健一

Dynamic Shape Feature Extraction for Heart using Ladder Variational Autoencoder

Weiyue Tian, Shoko Miyauchi and Ryo Kurazume, Kyushu University
Ken'ichi Morooka, Okayama University.

Abstract: We extracted dynamic heart shape features using Ladder Variational Autoencoder model, and evaluated its extraction accuracy.

1. はじめに

CTやMRIなどで取得された医用画像やゲノム情報などから、治療効果のモニタリングや予後予測を行うRadiogenomicsが近年注目を集めている。従来のRadiogenomicsでは、主に脳腫瘍や肺癌などの疾患が研究対象となっている。一方、日本では高齢化などの影響により、心疾患による死者数と死亡率が増加傾向にある。Radiogenomicsを心臓に適用することによって、非侵襲検査による心臓の疾患の診断や病気の早期発見が期待できる。

心疾患の診断では、心房と心室の大きさや心筋の厚さの変化量など、心臓の形状や動きに関する情報が重要な診断基準の一つとなる。しかし、従来のRadiogenomicsのアプローチでは主に特定の時刻における静的な臓器の形状特徴のみに着目しており、心臓の拍動のように、動的な臓器の形状変化に関する特徴については考慮されていない。

そこで、我々は、心臓の動きを考慮したRadiogenomics実現のため、一心周期分の心臓のボクセルモデル（心臓モデル）から、動的な形状変化を捉えた特徴量を抽出することを目指す。本研究では、Ladder Variational Autoencoder (LVAE) [1]をベースとするLVAEモデルを用いて特徴量抽出を行い、その精度を検証する。

2. LVAEモデル

実空間で近い形状を有するデータが、潜在空間内においても近い位置に写像さ

れるような潜在空間を求める生成モデルとして、Variational Autoencoder (VAE)がある。LVAE[1]は、VAEの潜在変数を多階層にすることで、より深い潜在表現を学習でき、入力データのより詳細な特徴を捉えた潜在空間を構築できる。

Biffiら[2]は、心周期中の時刻 t_1 および t_2 における心臓モデルから心疾患の有無を判別するため、潜在変数 $\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \mathbf{z}_3$ を有する3階層のLVAEに、Multilayer perceptron (MLP) と 3D畳み込みエンコーダ・デコーダを組み合わせた、LVAE+MLPモデル (Fig. 1) を提案している。このモデルでは、まず、3D畳み込み層エンコーダに2時刻分の心臓モデルを入力することで、1次元の特徴ベクトルを得る。次に、このベクトルをLVAEに入力することで求めた潜在変数 \mathbf{z}_3 を MLPに入力することで、疾患の有無を予測する。さらに、3D畳み込みデコーダを用いることで、 \mathbf{z}_3 から2時刻分の心臓モデルを復元している。

我々の目的は疾患の判別ではなく、特徴量の抽出のみであるため、このモデルから MLPを除いたLVAEモデル (Fig. 1赤枠)を本研究では使用する。また、一心周期分の形状変化を、10時刻分の心臓モデルの組として表し、これをLVAEモデルの

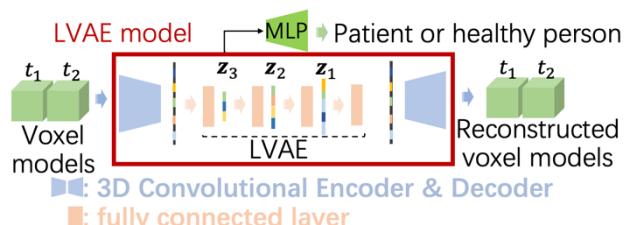


Fig. 1 LVAE+MLP model and LVAE model

入力とする。損失関数を以下に示す：

$$L = \sum_{i=1}^3 K_i + \sum_{j=1}^{10} (1 - D_j). \quad (2)$$

ここで、 D_j はLVAEモデルによって復元された時刻 j の心臓モデルとそれに対応する入力心臓モデルの一致度を評価するDice係数であり、 K_i は i 層目の潜在変数 \mathbf{z}_i の分布をガウス分布に近づけるためのKullback-Leibler情報量である。

3. 実験

LVAEモデルによって学習された潜在空間が、心臓の形状変化をどの程度捉えているかを検証した。まず、学習に用いていない心臓モデルの組を学習済みのLVAEモデルに入力し、 \mathbf{z}_3 の算出およびデコーダによる心臓モデルの組の復元を行った。次に、復元した心臓モデルと入力した心臓モデル間のDice係数を時刻ごとに計算し、形状復元精度を評価することで、抽出された特徴量 \mathbf{z}_3 の精度を検証した。

3.1 データセット

本実験では、UK Biobank[3]で公開されている健常者220人分の心臓のMR画像から、左心室領域をセグメンテーションすることで構築した、80(幅)×80(奥行き)×80(高さ)の心臓モデル10時刻分を一組の入力データ(Fig. 2)として用いる。学習用データ200組とテストデータ20組のデータセットを10パターン作成し、10分割交差検証を行った。

3.2 実験結果

テストデータから復元された心臓モデルの例として、時刻1の心臓モデルをFig. 4に示す。Fig. 4では、入力データと一致しているボクセルを灰色、それ以外のボクセルを赤色で表す。また、このモデルのDice係数は0.76である。Fig. 4より、心臓モデルの大部分は復元できているが、主に心臓の心尖部および心基部周辺の形状が復元できていないことが分かる。これは、心尖部と心基部周辺では、形状の個体差が特に大きいためと考えられる。



Fig. 2 One set of cardiac models

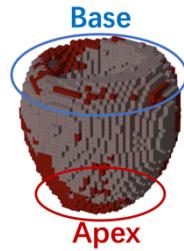


Fig. 3 Reconstructed model

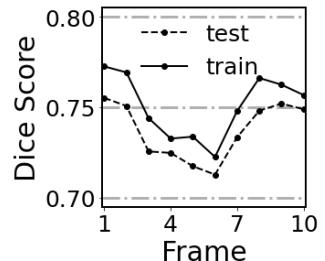


Fig. 4 Average dice score at each time

次に、学習データとテストデータから復元された心臓モデルの各時刻における平均Dice係数を、それぞれ実線と点線でFig. 3に示す。Fig. 3より、全時刻においてDice係数が0.71以上となっており、大まかな動的形状変化が捉えられていることが分かる。一方、心臓の体積が最小となる収縮末期前後に該当する時刻5付近では、Dice係数の値が他の時刻よりも全体的に低く、形状の復元精度が低い。LVAEモデルでは、時刻間の連続的な変化を考慮できていないため、収縮末期付近の大きな形状変化をとらえきれず、時刻間で精度のばらつきが発生したと考えられる。

4. まとめと今後の方針

LVAEモデルを用いて心臓の動的形状変化に関する特徴量抽出を行い、その抽出精度を検証した。その結果、抽出された特徴量は、おおまかな動的形状変化を捉えられていることが分かった。今後は、全時刻で安定した特徴量抽出が行えるよう、時刻間の相関関係を考慮したLVAEモデルの構築を目指す。

謝辞 本研究はJSPS科研費20K19924の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] C.K., Sønderby, et al. “Ladder variational autoencoders.” *Advances in neural information processing systems* 29 (2016): 3738-3746.
- [2] B. Carlo, et al. “Explainable anatomical shape analysis through deep hierarchical generative models.” *IEEE I-MI* 39(6):2088-2099, 2020.
- [3] UK Biobank: <https://www.ukbiobank.ac.uk/> (October 2, 2021).

マルチボディダイナミクスによる リクライニング車椅子の摩擦低減機構の検討

福岡大学 ○井手俊佑, 白泳宙, 岩村誠人

Examination of friction reduction mechanism for reclining wheelchairs using multibody dynamics

Shunsuke Ide, Yeongju Baek and Makoto Iwamura, Fukuoka University

Abstract : Many nursing beds and wheelchairs used in medical care have an electric reclining function. In the conventional reclining mechanism, there is a gap between the device and the body, causing friction. Elderly people and patients in need of long-term care are often bedridden or sitting in wheelchairs, increasing the risk of pressure ulcers. Pressure ulcer is a condition in which a part of the body is continuously compressed and the skin is not nourished, resulting in necrosis and skin ulcer. Friction between the device and the body can exacerbate pressure ulcers. Therefore, it is desired to develop a long-term care device that can reduce the risk of pressure ulcers. In this study, we propose a friction reduction mechanism for reclining wheelchairs using multibody dynamics.

1. 緒言

医療介護現場で使用される介護ベッドや車椅子には、リクライニング機能を有するものが多い。従来のリクライニング機構では、使用時にシートや背もたれ等と使用者の身体の接触部に接線方向の滑りが生じ、摩擦が発生している。介護を必要とする高齢者や患者は寝たきりの状態や車椅子に座っている状態が多く褥瘡ができるリスクが高まっている。褥瘡とは、身体の一部が圧迫され続けることによって皮膚に栄養がいきわたらず、壊死し皮膚潰瘍を生じた状態のことをいう。このような状態で、リクライニング機器と身体との間に摩擦が生じると、褥瘡のリスクをさらに高め悪化させる可能性がある。そのため、褥瘡のリスクを低減できる摩擦の少ない介護機器の開発が望まれている。

そこで、本研究では図1に示すような電動リクライニング機能を有する車椅子を対象とし、リクライニング時の摩擦を低減する機構について検討する。本稿では、マルチボディダイナミクス[1]を利用し、次のような3つのステップにより摩擦を低減できる機構の解析・評価を行う。

(1) まず、使用者の身体の理想的な動作軌道を仮定し、その動作を接触部の摩擦が生じないように実現するためには、リクライニング機器の主要部がどのように動かなければならぬかを運動学解析により求める。(第2章)

(2) 次に(1)で得られたリクライニング機器の主要部の動作を実現するためには、どのような関節配置でどのようにアクチュエータを設置する必要があるかを検討する。そして提案する機構の運動学解析を行い、実際に摩擦低減軌道を実現できることを確認する。(第3章)

(3) 最後に(2)で考案した機構に対して逆運動学解析を行い、摩擦低減軌道を実現するために必要なアクチュエータ所要力を逆運動学解析によって計算する。(第4章)

2. 摩擦低減軌道の解析

解析するリクライニング動作は、まず臀部がずれないように膝を曲げてから上半身を起こし、下腿部を下げるようなリクライニング動作を想定する。ここでは、摩擦低減軌道を解析するために、図1のような実際の対象を、図2のように人体モデルを3つ、車椅子モデルを3つのボディに分けてモデル化することにする。ボディ1がバックサポート部、ボディ2がシート部、ボディ3がレッグサポート部、ボディ4が上半身、ボディ5が上腿部、ボディ6が下腿部である。ボディ n の位置・姿勢は $\mathbf{q}_n = [\mathbf{R}_n^\top, \phi_n]^\top = [x_n, y_n, \phi_n]^\top$ で表され、システム全体の一般化座標は $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_1^\top, \mathbf{q}_2^\top, \mathbf{q}_3^\top, \mathbf{q}_4^\top, \mathbf{q}_5^\top, \mathbf{q}_6^\top]^\top \in \Re^{18}$ となる。ただし、システムには以下のような拘束が課される。

- ・ボディ2上の点 P_1 を点 P に固定。
- ・ボディ1とボディ4、ボディ2とボディ5、ボディ3とボディ6、それぞれを点 Q_1, Q_2, Q_3 において完全拘束。
- ・ボディ4とボディ5、ボディ5とボディ6を、点 S_1, S_2 において回転ジョイントで拘束。

以上の拘束条件は次のような代数方程式として記述できる。

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}) = \mathbf{0} \in \Re^{15} \quad (1)$$

一般化座標 $\mathbf{q} \in \Re^{18}$ に対して15個の独立な拘束条件があるため、この機構の自由度は3である。さらに、点 S_1, S_2 において $\gamma_d(t) = v_dt + \gamma_0 (d=1, 2, 3)$ となるように3つのアクチュエータで人体モデルを制御すると仮定すると、次のような駆動拘束を受ける。

$$\mathbf{C}^d(\mathbf{q}, t) = \begin{bmatrix} \phi_4 - \gamma_1(t) \\ \phi_5 - \gamma_2(t) \\ \phi_6 - \gamma_3(t) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \in \Re^3 \quad (2)$$

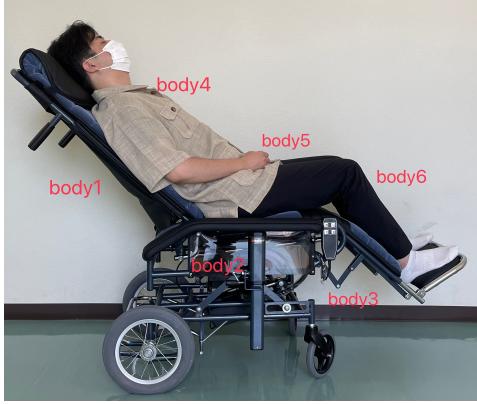


Fig. 1: Photo of reclining wheelchair and its user

式(1)と式(2)をまとめることにより、システムの全拘束条件は次式のように表せる。

$$\bar{C}(\mathbf{q}, t) = \begin{bmatrix} C(\mathbf{q}) \\ C^d(\mathbf{q}, t) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \in \Re^{18} \quad (3)$$

この非線形方程式は18個の一般化座標 \mathbf{q} に対して、18個の拘束条件を与えてるので \mathbf{q} について解くことができる。例えば、ニュートン法を用いる場合、式(3)が許容誤差の範囲で満たされるまで下記の計算を繰り返すことにより、各時刻における $\mathbf{q}(t)$ を得ることができる。

$$\bar{C}_{\mathbf{q}}(\mathbf{q}^{(k)}, t)\Delta\mathbf{q}^{(k)} = -\bar{C}(\mathbf{q}^{(k)}, t) \quad (4)$$

$$\mathbf{q}^{(k+1)} = \mathbf{q}^{(k)} + \Delta\mathbf{q}^{(k)}, k = 0, 1, \dots \quad (5)$$

ただし、 $\bar{C}_{\mathbf{q}} = \partial\bar{C}/\partial\mathbf{q}$ はヤコビ行列である。

式(3)を満たす \mathbf{q} が得られると、一般化速度 $\dot{\mathbf{q}}$ は $\dot{\bar{C}} = \mathbf{0}$ から導かれる次の線形方程式を解くことによって求めることができる。

$$\bar{C}_{\mathbf{q}}\dot{\mathbf{q}} = -\bar{C}_t \quad (6)$$

ただし、 $\bar{C}_t = \partial\bar{C}/\partial t$ である。

さらに、 \mathbf{q} および $\dot{\mathbf{q}}$ が得られると、一般化加速度 $\ddot{\mathbf{q}}$ は $\ddot{\bar{C}} = \mathbf{0}$ から導かれる次の線形方程式を解くことによって求めることができる。

$$\bar{C}_{\mathbf{q}}\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{Q}^d \quad (7)$$

ただし、 $\mathbf{Q}^d = -(\bar{C}_{\mathbf{q}}\dot{\mathbf{q}})\mathbf{q} - 2\bar{C}_{\mathbf{q}t}\dot{\mathbf{q}} - \bar{C}_{tt}$ である。

以上の方針により、仮定した人体モデルの動きに対して車椅子が追従するように運動学解析を行うことができる。ここでは、人体モデルとして身長177cm、体重60kgの人のパラメータを用いた。車椅子のパラメータは、フルリクライニング6型（松永製作所株式会社）を参考に設定した。運動学解析を行った際に、車椅子のボディが重なる部分があるので、それに応じてパラメータを修正した。修正後の運動学解析で得られた軌道を図3に示す。この軌道が、今回の人体モデルに対する摩擦低減軌道である。

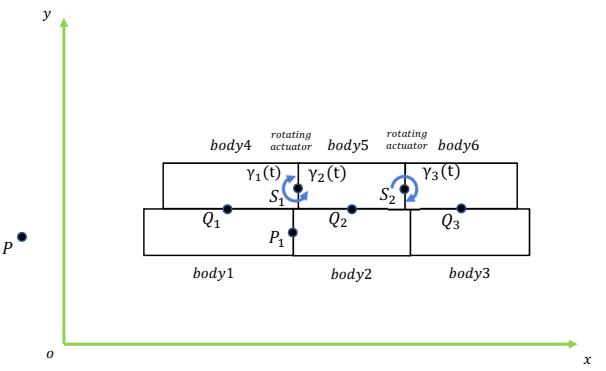


Fig. 2: Multibody model of wheelchair and human

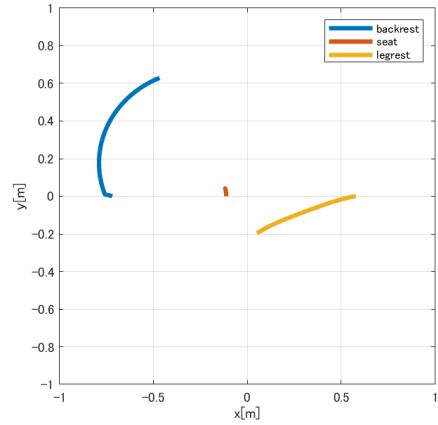


Fig. 3: Friction reduction trajectory after correction

3. 摩擦低減機構の提案

第2章で得られた摩擦低減軌道を実現するためには、ボディ1とボディ3が並進・回転しながら人体の動きに合うように動く必要がある。そこで、図4に示すようにボディ1とボディ2、およびボディ2とボディ3の間にジョイントを追加することを考える。前節の運動学解析で得られたデータを用いて、図4に示すように車椅子モデルに駆動力を与え、再度解析を行う。それにより、この機構で摩擦低減軌道を実現可能か確認することができる。前節と同様に、ボディ n の位置・姿勢は $\mathbf{q}_n = [\mathbf{R}_n^\top, \phi_n]^\top = [x_n, y_n, \phi_n]^\top$ で表され、システム全体の一般化座標は $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_1^\top, \mathbf{q}_2^\top, \mathbf{q}_3^\top, \mathbf{q}_4^\top, \mathbf{q}_5^\top, \mathbf{q}_6^\top]^\top \in \Re^{18}$ となる。ただし、システムには以下の拘束が課される。

- ・ボディ2上の点 P_1 を点 P に固定。
- ・ボディ2とボディ5を点 Q_2 において完全拘束。
- ・ボディ1とボディ4、ボディ3とボディ6、それぞれの接する面において直動ジョイントで拘束。

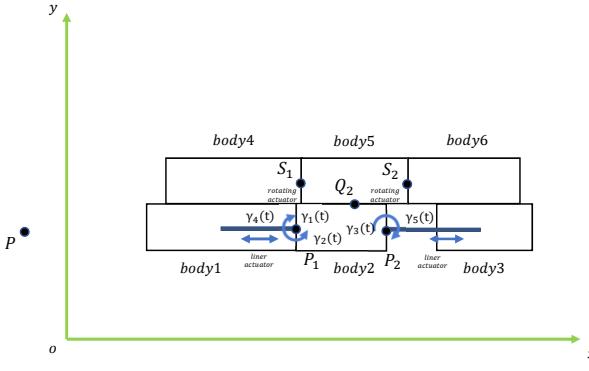


Fig. 4: Proposed wheelchair model

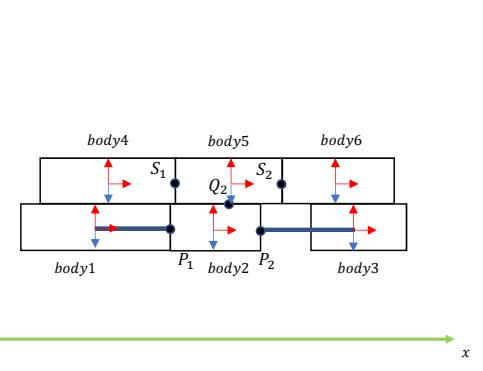


Fig. 5: External force acting on a multibody model

- ボディ 4 とボディ 5, ボディ 5 とボディ 6 を, 点 S_1, S_2 において回転ジョイントで拘束.
- 以上の拘束条件は次のような代数方程式として表せる.

$$C(\mathbf{q}) = \mathbf{0} \in \Re^{13} \quad (8)$$

一般化座標 $\mathbf{q} \in \Re^{18}$ に対して上式の 13 個の独立な拘束条件があるため, この機構の自由度は 5 である. さらに, 点 S_1, S_2 において $\gamma_d(t) = v_dt + \gamma_0(d = 1, 2, 3)$ となるように 3 つの回転アクチュエータで制御すると仮定すると, 次式のような駆動拘束を受ける.

$$C_1^d(\mathbf{q}, t) = \begin{bmatrix} \phi_4 - \gamma_1(t) \\ \phi_5 - \gamma_2(t) \\ \phi_6 - \gamma_3(t) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \in \Re^3 \quad (9)$$

また, ボディ 1 の重心位置と点 P_1 間, ボディ 3 の重心位置と点 P_2 間に直動アクチュエータを設け, 前節で得られた軌道のデータ $\gamma_d(d = 4, 5)$ を入力し, 制御すると仮定すると, 次式のような駆動拘束を受ける.

$$C_2^d(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \sqrt{\alpha_1^2 + \beta_1^2} - \gamma_4 \\ \sqrt{\alpha_2^2 + \beta_2^2} - \gamma_5 \end{bmatrix} = \mathbf{0} \in \Re^2 \quad (10)$$

ここで, $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ は次式のように定義される.

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - (x_2 - s_2 \cos \phi_2) \\ y_1 - (y_2 - s_2 \sin \phi_2) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_3 - (x_2 + s_2 \cos \phi_2) \\ y_3 - (y_2 + s_2 \sin \phi_2) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式 (8)～式 (10) より, システムの全拘束条件式は次のように表せる.

$$\bar{C}(\mathbf{q}, t) = \begin{bmatrix} C(\mathbf{q}) \\ C_1^d(\mathbf{q}, t) \\ C_2^d(\mathbf{q}) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \in \Re^{18} \quad (13)$$

この非線形方程式は 18 個の一般化座標 \mathbf{q} に対して, 18 個の拘束条件を与えてるので前節と同様に \mathbf{q} について解くことができる. 以上の運動学解析を行い, 提案する図 4 の機構で摩擦低減軌道が実現できることを確認した.

4. アクチュエータ所要力の解析

次に, 逆動力学解析を行い, アクチュエータ所要力を計算する. 車いすと人体モデルのそれぞれのボディに, 重力による一般化力が作用するとして計算を行う. 式 (8) の運動学的拘束を考慮した運動方程式は, 次式のように表せる.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_q^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q}^g + \mathbf{Q}^a \quad (14)$$

ここで, $\mathbf{M} = \text{diag}[m_1, m_1, I_1, m_2, m_2, I_2, m_3, m_3, I_3, m_4, m_4, I_4, m_5, m_5, I_5, m_6, m_6, I_6] \in \Re^{18 \times 18}$ は一般化質量行列, $\boldsymbol{\lambda} \in \Re^{13}$ は拘束反力を表すラグランジュ乗数ベクトルである. また, $\mathbf{Q}^g \in \Re^{18}$ は各ボディの重力による一般化力, $\mathbf{Q}^a \in \Re^{18}$ はアクチュエータによる一般化力であり, それぞれ次式のように表せる.

$$\mathbf{Q}^g = [Q_1^{g\top}, Q_2^{g\top}, Q_3^{g\top}, Q_4^{g\top}, Q_5^{g\top}, Q_6^{g\top}]^\top \quad (15)$$

$$\mathbf{Q}^a = \mathbf{D}\mathbf{f} = \begin{bmatrix} D_1^{r_1} & D_1^{r_2} & \mathbf{0} & D_1^{l_4} & \mathbf{0} \\ D_2^{r_1} & D_2^{r_2} & D_2^{r_3} & D_2^{l_4} & D_2^{l_5} \\ \mathbf{0} & D_3^{r_2} & D_3^{r_3} & \mathbf{0} & D_3^{l_5} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} \quad (16)$$

ここで, $\mathbf{f} = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5]^T$ はアクチュエータ駆動力ベクトル, $\mathbf{D} \in \Re^{18 \times 5}$ は制御入力変換行列である.

図 5 の青線は, 車いすと人体モデルに作用する外力を示している. 重力は各ボディの重心に作用し $\bar{\mathbf{u}}_i^{O_i} = \mathbf{0}$ となる

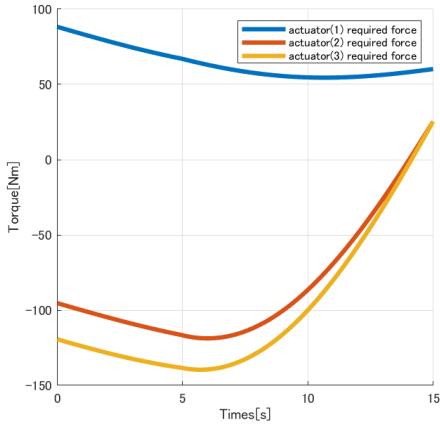


Fig. 6: Required force of actuators 1, 2 and 3

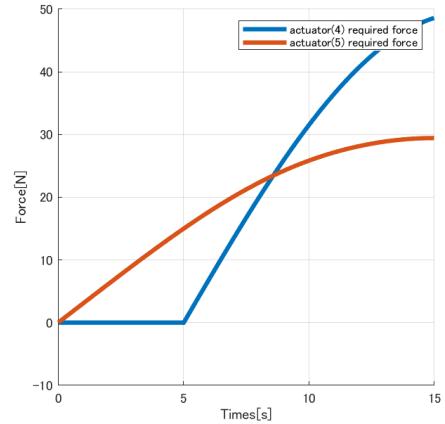


Fig. 7: Required force of actuators 4 and 5

ので、対応する一般化力は次式となる。

$$\mathbf{Q}_i^g = \begin{bmatrix} \mathbf{f}^{O_i} \\ (\mathbf{A}_i \mathbf{V} \bar{\mathbf{u}}_i^{O_i})^T \mathbf{f}^{O_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -m_i g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式 (14) の運動方程式は、次のように書き直せる。

$$\left[\begin{array}{c|c} \mathbf{C}_{\dot{\mathbf{q}}}^T & -\mathbf{D} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \boldsymbol{\lambda} \\ \mathbf{f} \end{array} \right] = \mathbf{Q}^g - \mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} \quad (18)$$

この線形方程式を解くことにより、アクチュエータ駆動力 \mathbf{f} および拘束反力 $\boldsymbol{\lambda}$ が求められる。特に動作が遅く $\ddot{\mathbf{q}} \simeq \mathbf{0}$ と近似できる場合、式 (18) は次式のようになる。

$$\left[\begin{array}{c|c} \mathbf{C}_{\dot{\mathbf{q}}}^T & -\mathbf{D} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \boldsymbol{\lambda} \\ \mathbf{f} \end{array} \right] \simeq \mathbf{Q}^g \quad (19)$$

式 (19) は力のつり合い方程式となっており、これを解くことによって、静力学的にアクチュエータ駆動力と拘束反力を求めることができる。以上の逆動力学解析を行って、摩擦低減軌道を実現するために必要なアクチュエータ所要力を計算した結果を図 6 および図 7 に示す。

5. 考察

以上では、解析手法と提案する機構について述べた。ここではそれについての考察を行う。本研究で述べている摩擦低減軌道とは、剛体でボディ同士が滑らないという条件で得られた軌道のことである。そのため、現実の動きとは異なると考えられる。しかし、従来の電動リクライニング軌道は、単純に回転させてリクライニングを行っているものがほとんどであり、その軌道よりは摩擦を低減できると

考えている。このことを証明するためには、実機による検証を行う必要がある。

その他の問題点として摩擦低減軌道を実現するために多数のアクチュエータが必要であることが挙げられる。今回提案する機構ではアクチュエータを 5 つ使用することを想定しているため、エネルギーを多く消費してしまうだけでなく車椅子の重量増加にも繋がり、実現することが難しくなる可能性がある。アクチュエータの数を減らして、摩擦を低減する軌道を実現することも今後の課題である。

さらに、今回の解析では人体モデルのパラメータをあらかじめ設定して解析を行っており、人体モデルのパラメータが変われば、摩擦低減軌道も変わってしまうため、ユニバーサルデザイン性に欠ける。摩擦低減軌道に大きく関係している人体モデルのパラメータは身長であると考えられるため、例えば事前に 3cm ごとに解析を行っておいて、使用者の身長に一番近い軌道を選択することで摩擦を低減できるのではないかと考えている。

6. 結言

本研究では、リクライニング車椅子の摩擦低減機構について検討した。マルチボディダイナミクスを用いて、摩擦低減のリクライニング軌道を導出し、その軌道を実現できるような車椅子の機構を提案した。また、逆動力学解析を行い、アクチュエータ所要力についても評価した。今後は、提案する機構の有用性を示すために、実機検証に向けて考察で述べた問題点を解決していく予定である。

参考文献

- [1] 岩村誠人，“マルチボディダイナミクス入門”，森北出版 (2018).

高調波磁化を用いた磁性ナノ粒子の固相・液相状態の識別

九州大学 ○五藤仁哉 山村柊哉 円福敬二 吉田敬

Discrimination of solid and liquid phase states of magnetic nanoparticles using harmonic magnetization

Jinya Goto, Shuya Yamamura, Keiji Enpuku and Takashi Yoshida,
Kyushu University

Abstract: In recent years, magnetic particle imaging (MPI) has been attracting attention for its ability to estimate the spatial distribution of magnetic nanoparticles (MNPs). In this paper, we prepared several MNPs samples with a mixture of liquid and solid phases and estimated the ratio of iron content of each phase in the samples using the third and fifth harmonic signals.

1. はじめに

近年、磁性ナノ粒子を高分子で被膜し、その表面に検査試薬等を結合させた磁気マーカーの医療応用が研究されている^[1]。我々は磁気粒子イメージング(Magnetic particle imaging, MPI)への応用を想定した磁性ナノ粒子の磁化特性に着目し研究を行っている。MPIは体内に注入した磁気マーカーに対して体外から励起磁界を印加し、磁気マーカーからの磁化信号を検出することで、がん細胞等の検出対象の位置を推定するというものである。MPIの利点として、磁性ナノ粒子の分布を直接画像化することで高感度・高分解能が期待できることや、腎臓病患者など造影剤が投与できない患者にも適応できる点、放射線による被曝の影響がない点などがあげられる。

MPIで磁化信号を検出する際、体内に注入した磁気マーカーが検査対象と結合したか否かを判別することが重要である。磁性ナノ粒子の磁化信号は、粒子の状態により変化するため、磁化信号から体内に注入した磁気マーカーが検査対象と結合したか識別可能である。しかし、識別に際し、交流励起磁界の周波数や強度の最適な条件が未知である。そこで本研究では、MPIにおける磁気マーカーの結合、未結合を識別するための励起周波数と磁界強度の最適な条件の検討を行った。

2. 原理・実験方法

2.1. 磁気緩和

MPIの検出信号である磁性ナノ粒子からの高調波磁化信号は粒子の磁化特性によって決まり、磁気緩和の影響を受ける。磁気緩和には粒子自身の回転によるブラウン緩和と、磁気モーメントの回転によるネール緩和がある。これらの磁気緩和は、磁性ナノ粒子周囲の粘度、粒子サイズ、温度といった要因で変化する^{[2][3]}。体内に注入された磁性ナノ粒子は検査対象と結合した動けない粒子（固相状態）と、血中や体液中を漂う動ける粒子（液相状態）の2種類に分類できる^[4]。この際結合した粒子では、粒子が回転することができないためネール緩和のみが発生し、結合していない粒子では、粒子が回転できるためブラウン緩和とネール緩和の2つの磁気緩和が生じ、両者の磁化信号に差が生じる。

2.2. 高調波磁化信号と液相・固相状態識別の原理

液相試料(Free粒子)と固相試料(Bound粒子)では高調波磁化信号に差異が生じる。FreeとBound粒子が共存した試料の第三高調波の実部 $M_{3,R}$ と第五高調波の虚部 $M_{5,I}$ はそれぞれ以下のように与えられる。

$$\begin{bmatrix} M_{3,R} \\ M_{5,I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{3,R,F} & m_{3,R,B} \\ m_{5,I,F} & m_{5,I,B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_F \\ n_B \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $m_{i,X,F}$ と $m_{i,X,B}$ ($i = 3,5$, $(X = R,I)$) は、それぞれ Free と Bound 粒子 1 個の信号であり、予め独立に測定することができる。また、未知数は Free と Bound 粒子の個数 n_F と n_B である。従って、 $M_{3,R}$ と $M_{5,I}$ を測定することで n_F と n_B を求めることが出来る。

2.3. 測定装置

測定回路を Fig. 1 に示す。交流励起コイルはリツ線（0.1 mm、60 本×10）64 ターン、検出コイルは単線（0.2 mm）9 ターンである。検出コイルの信号から交流 M-H カーブが得られ、フーリエ変換することで、高調波信号を得ることができる。

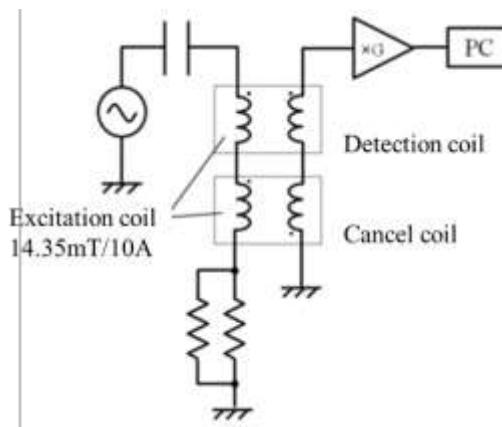


Fig. 1 Schematics of experimental setup

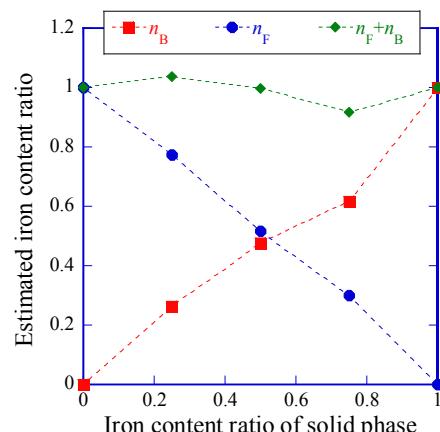
2.4. 測定サンプル

本実験では、1 つの容器に液相・固相状態の磁性ナノ粒子が混在しているサンプルを作製した。perimag (micromod, Germany) と呼ばれる磁性ナノ粒子を使用し、固相と液相の合計試料体積を 150 μl 、合計鉄量を 42.5 μgFe とした。固相に含まれる磁性ナノ粒子の割合を $a = 0$ から 0.25 刻みで 1 まで変化させた。なお、固相試料の作製にはエポキシ樹脂を、液相試料の作製には精製水を用いた。

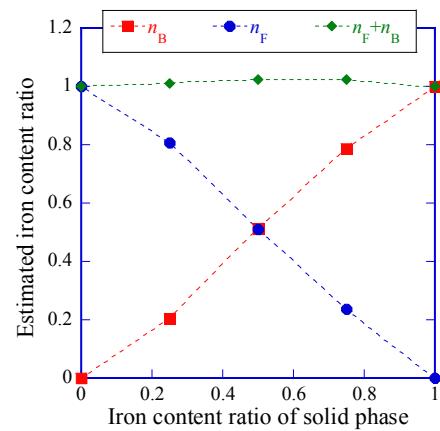
3. 実験結果

交流励起磁界は周波数を 20kHz とし、振幅を $\mu_0H = 8 \text{ mT}$ から 20 mT まで 3mT 刻みで変化させたときの実験結果を Fig. 2 に示す。また、理論値との 2 乗誤差を Table 1 に示す。傾向として、振幅

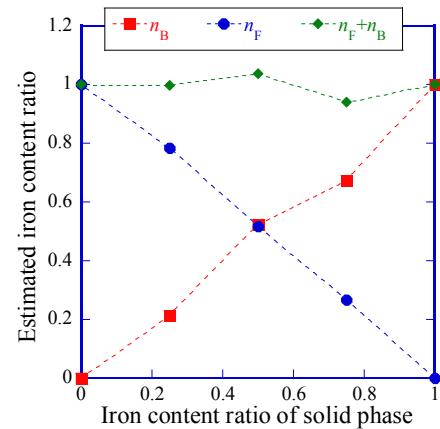
の小さいと推定誤差が大きく、振幅が大きくなるにつれ推定誤差が小さくなっている。今回の測定条件では、 $\mu_0H = 17 \text{ mT}$ の時に最も精度良く液相と固相の状態推定が行われていることがわかる。



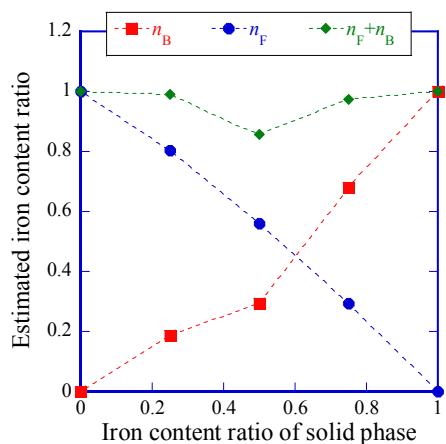
(a) $\mu_0H = 20 \text{ mT}$



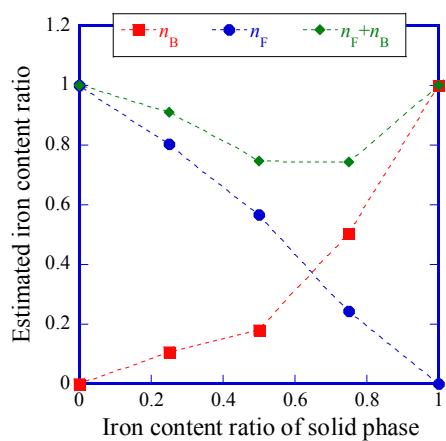
(b) $\mu_0H = 17 \text{ mT}$



(c) $\mu_0H = 14 \text{ mT}$



(d) $\mu_0H = 11\text{mT}$



(e) $\mu_0H = 8\text{mT}$

Fig. 2 Estimated ratio of iron content

した。しかし、今回の実験では試料の鉄量を一定として行っているため合計鉄量が増減した際の状態識別や、状態識別の再現性といった課題もある。そこで今後は振幅だけでなく励起周波数にも着目し同様の実験を行うことで、測定条件のさらなる最適化を進めていきたい。

参考文献

- [1] B. Gleich and J. Weizenecker, “Tomographic imaging using the nonlinear response of magnetic particles”, *Nature*, Vol. 435 (2005), 1214-1217.
- [2] U., Mustafa, Y. Muslu, and E.U. Saritas, “Relaxation-based viscosity mapping for magnetic particle imaging”, *Physics in Medicine & Biology*, 62, (2017) 3422.
- [3] K. Wu, D. Su, R. Saha, J. Liu, V.K. Chugh, and J. Wang, “Magnetic particle spectroscopy: A short review of applications using magnetic nanoparticles”, *ACS Applied Nano Materials*, 3 (2020) 4972-4989.
- [4]. S. Ota, T. Yamada, and Yasushi Takemura, “Magnetization Reversal and Specific Loss Power of Magnetic Nanoparticles in Cellular Environment Evaluated by AC Hysteresis Measurement,” *Journal of Nanomaterials*, Vol.2015, pp.836761(1-8).

Table 1 Square errors

μ_0H	n_B	n_F	$n_B + n_F$
20 mT	1.85×10^{-2}	3.42×10^{-3}	8.27×10^{-3}
17 mT	3.79×10^{-3}	3.49×10^{-3}	1.34×10^{-3}
14 mT	7.57×10^{-3}	1.76×10^{-3}	4.84×10^{-3}
11 mT	5.14×10^{-2}	8.48×10^{-3}	2.18×10^{-2}
8 mT	1.84×10^{-1}	7.26×10^{-3}	1.37×10^{-1}

4. 結論

本研究では交流励起磁界の振幅を変化させた際の固相・液相の状態識別を行い、振幅が大きいほど精度の高い状態識別ができていることを示

組込式オプティカルフロー計測システムを利用した 車両前方移動物の運動推定

熊本大学 ○ 尾崎雅也 山口晃生

Motion estimation of moving objects in front of the vehicle
using the embedded optical flow measurement system

Masaya Ozaki, Teruo Yamaguchi*,

Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University,

*Faculty of Advanced Science and Technology, Kumamoto University

Abstract : In recent years, the number of fatalities due to traffic accidents is decreasing year by year, but about 2,800 people still die each year from traffic accidents. Therefore, in order to reduce the damage caused by traffic accidents, we propose a method of accurately estimating the movement of pedestrians and other objects in front of the vehicle. As the first step of the process, we get the optical flow from the video obtained from the dashcam. Next, from the optical flow, the feature point in the image, called FOE, is obtained and the motion of the moving object is estimated. Experimental results show that the position of FOE can be estimated from the video. It is expected that the motion of the moving object will be estimated from the obtained FOE.

1. はじめに

現在、年々交通事故による死者数は減少傾向にあるものの令和2年度時点では年間約2800人が交通事故によって亡くなっている。令和2年度の年間死者数のうち歩行者が全体の約35%を占めている。^[1] 車両前方の歩行者や移動物を認識することができれば運転者に警告したり、車両に自動でブレーキをかけることで交通事故を未然に防ぐことができ、交通事故の死傷者数・重症者数の減少につながると考えられる。そこで本研究では、車両前方の歩行者や移動物の運動を推定する方法を提案する。

本研究では組込式のマイクロプロセッサを使用し実装することを最終目標としている。そのため推定するのに比較的計算量を必要としないFOEを用いて運動の推定を行う。

動画像から見かけ上の速度場を推定する方法にオプティカルフロー推定法がある。本研究ではまず、オプティカルフロー推定法を利用して、画面上における見かけの動き(オプティカルフロー)を推定する。次にこのオプティカルフローからFOEという画像中の特徴点を求め前方の移動物の運動を推定する。

今回の実験では、画像の拡大・縮小を繰り返した動画からFOEを推定する実験と、実際に車載カメラで撮影した動画からFOEを推定する実験の2つを行う。

2. 理論と装置

2.1 FOEの検出までの流れ

まず車載カメラから得られる動画を入力し、その動画からオプティカルフローを推定する。次に、求めたオプティカルフローからFOEの位置の候補点を推定し出力する。このFOEの情報を利用して前方の危険物を認識することを目指している。検出の流れをFig. 1に示す。

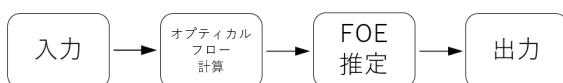


Fig. 1 Detection flow

2.2 オプティカルフロー推定 [3]

2.2.1 時空間微分法による推定

連続的に撮影された画像において、時刻 t における点 (x, y) の輝度値を $E(x, y, t)$ とする。対象パターンは輝度値が不变で、局所的に並進運動を行うと仮定すれば次式が導かれる。

$$\nabla \frac{\partial E}{\partial t} + H\mathbf{v} = \mathbf{0}, \quad (1)$$

$$H \equiv \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 E}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 E}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

しかし、時空間微分法で得られる速度推定は雑音の影響を受けやすい。そこで雑音の影響を最小にするような解を得るためのオプティカルフロー方程式の最適化を行う。

まず、ある点 i における微分係数行列を次のように定義する。

$$X_i \equiv \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 E}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 E}{\partial x \partial t} \\ \frac{\partial^2 E}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 E}{\partial y \partial t} \end{bmatrix} \quad (3)$$

すると、式(1)は X_i 用いて次のように表すことができる。

$$X_i \mathbf{V} = 0 \quad (4)$$

ここで \mathbf{V} は次式で表される。

$$\mathbf{V} \equiv (V_x, V_y, W)^T \quad (5)$$

また、点 $i = 1, 2, \dots, N$ における X_i の集合体 X を

$$\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_N)^T \quad (6)$$

とし、 X の観測値を Y で表す。 Y には残差 X_ε が含まれているとすると、 Y は式(??)を誤差ベクトル ε を用いて表すと、

$$Y = X + X_\varepsilon \quad (7)$$

$$Y\mathbf{V} = X_\varepsilon \mathbf{V} = \varepsilon \quad (8)$$

と表現される。ここで、 $\|\varepsilon\|$ が最小となるように \mathbf{V} を推定することで誤差の影響の少ない速度が得られる。

具体的には、 Y の最小固有値における固有ベクトルをヤコビ法によって求め、速度の推定値 \mathbf{V} を決定することができる。

2.3 FOE の位置推定方法

FOE は拡大・縮小運動の特徴点であり FOE を検出することによって、車両走行中の障害物等を検出することができる。この特徴点の推定手順を以下に示す。Fig. 2 にオプティカルフローと FOE の関係についての模式図を示す。

1. 動画像からオプティカルフローを取得する。
2. 得られた速度ベクトルを延長して得られる直線を Fig. 3 のように直線が通る座標を近似し、その座標に対応するセルの値に 1 を足していく。
3. 2 の作業を画素ごとに繰り返し試行する。
4. 2, 3 で求めた値が一定数を超える座標を FOE の候補とする。実験 1 では 70, 実験 2 では 35 を越える座標を FOE の候補点と推定した。

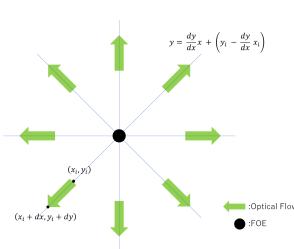


Fig. 2 Schematic diagram of FOE

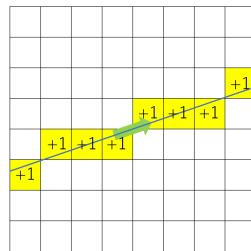


Fig. 3 Voting the candidate of FOE

2.4 オプティカルフロー計測システム

本研究では、演算装置として、ARMv8Cortex-A53 プロセッサを搭載したシングルボードコンピュータの“Raspberry Pi 3 Model B”を使用した。動画像の撮影には市販の USB 対応 WEB カメラを接続して使用した。

また、カメラからの入力映像を C/C++ プログラムに取り込むためオープンソースであるコンピュータビジョン向けライブラリ “OpenCV” を利用した。処理速度の高速化を行うために共有メモリ型並列プログラミングを可能にする標準 API である “OpenMP” を gcc 上で利用した。

3. 実験

3.1 実験 1

FOE の位置を推定できることを確かめるために、壁面を模したテクスチャを拡大および縮小した動画をサンプルとして入力し本手法で処理を行った。入力動画の大きさは 640×480pixels である。

3.1.1 実験結果

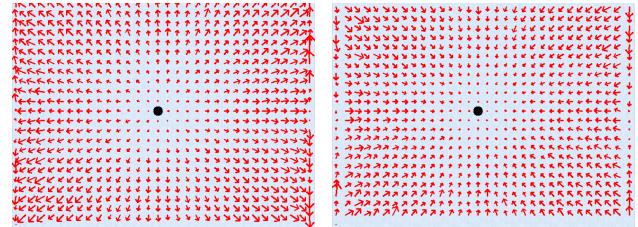
Fig. 4 に実験結果を示す。推定したオプティカルフローを赤色のベクトルで、FOE の候補点の座標を黒色の点で示している。

3.2 実験 2

車載カメラから得られる動画からオプティカルフローと FOE を推定する実験を行う。入力動画は iPhone11 の内蔵カメラを用いて撮影した動画の大きさを 640×480pixels に変換し入力した。

3.2.1 実験結果

Fig. 5 に実験結果を示す。推定したオプティカルフローを緑色のベクトルで、FOE の候補点の座標を黒色の点で示している。



(a)

(b)

Fig. 4 Results of Experiment 1

The direction of the camera is

- (a) Enlargement
- (b) Reduction

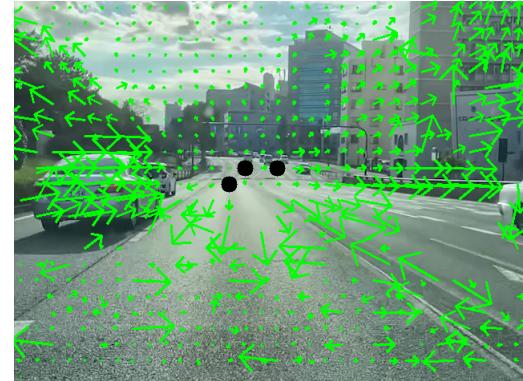


Fig. 5 Result of Experiment 2

4. おわりに

本研究は動画から得られるオプティカルフローを利用して FOE を推定する方法を検証した。実験 1 から理想的な動画からは画像の拡大・縮小を捉え、得られた情報から FOE を推定することができた。実験 2 では FOE を推定することはできているものの正確な FOE の位置は検出されないことが多かった。今後は車載カメラから得られるような動画からでも正確な FOE を検出し、求めた FOE を利用し画面上の運動物の推定を行うことが求められる。また、歩行者を認識するために、運動する歩行者の FOE を自車の動きから得られる FOE と区別して求められるかが今後の課題である。

参考文献

- [1] 警察庁交通局 “令和 2 年における交通事故の発生状況について” <https://www.npa.go.jp/bureau/traffic/bunseki/nenkan/030218R02nenkan.pdf> (参照日 2021 年 10 月 8 日)
- [2] S. Uras, F. Girosi, A. Verri, and V. Torre, “A computational approach to motion perception,” Biol. Cybern., **60**, 79–87, 1988
- [3] T. Yamaguchi, “Optical Flow Constraint in Homogeneous Coordinate and its Application to Optimal Velocity Estimation”, SICE(2002).

過去の情報を用いたQ-learning

九州大学 ○大石幸斗

Danilo Vasconcellos

Vargas

Q-learning with past information

Yukito Ohishi and Danilo Vasconcellos Vargas, Kyushu University

Abstract: We propose an algorithm, P-learning, which assigns Q-values to combinations of past states and actions, and compare it with the Q-learning algorithm.

1. はじめに

広く知られた強化学習アルゴリズムとして、Q-learningがある。Q-learningでは、環境の状態とエージェントの行動の各ペアにQ値と呼ばれる値を与え、環境から報酬を与えられるごとにこのQ値を更新していく。この値を用いることで、エージェントにある状態における最適な行動（将来的に得られる報酬が最大となる行動）を学習させることができる。

従来のQ-learningでは、状態と行動一つずつの組み合わせにQ値を割り当てていく。Fig. 1のように、状態 s_{t-1} で行動 a_{t-1} をとり状態 s_t に遷移、状態 s_t で行動 a_t をとり状態 s_{t+1} に遷移する場合、

(状態 s_{t-1} , 行動 a_{t-1})

(状態 s_t , 行動 a_t)

の各組み合わせにQ値が与えられる。

本研究では、過去に通過した状態および行動の組み合わせに対してQ値を割り当てるアルゴリズムP-learningを提案し、Q-learningアルゴリズムと比較する。

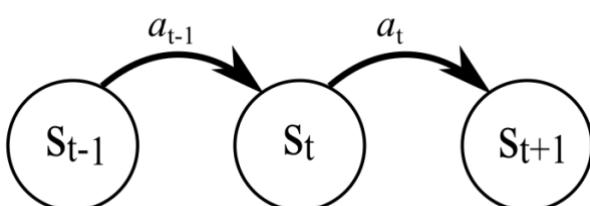


Fig. 1 State Transition

2. アルゴリズム詳細

以降、時刻tでの状態を s_t 、行動を a_t とする。

2.1 Q値

状態 s_t 、行動 a_t に対するQ値を $Q(s_t, a_t)$ とすると、Q値は次の式に従って更新される。

$$Q(s_t, a_t)$$

$$= Q(s_t, a_t) + \alpha \{r + \gamma \max Q(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_t, a_t)\}$$

ここで、 $0 \leq \alpha \leq 1$ は学習係数、 r は報酬、 $0 \leq \gamma \leq 1$ は割引率である。Q値は状態 s_t での行動 a_t の良さを表しており、エージェントは各状態において最もQ値の高い行動を選択する。また、探索的行動を行うために ϵ -greedy法を用いる。

2.2 P-learning

P-learningは、Q-learningの状態 s_t を変更しただけのとでもシンプルなアルゴリズムである。現在の状態 s_t と直前の状態 s_{t-1} の組み合わせを元に行動 a_t を決定する場合は、 $Q(s_t, a_t)$ を $Q((s_{t-1}, s_t), a_t)$ と置き換える。直前の行動 a_{t-1} も用いる場合は $Q((s_{t-1}, a_{t-1}, s_t), a_t)$ とする。このように、Q値の引数を変化させるのみで、他はQ-learningと同様である。

3. 実験詳細

行動 a_t を決定するのに時刻 $t-n$ から時刻 t までの状態を用いるエージェントをnS、行動を用いるエージェントをnAと呼ぶ。例として、 $Q((s_{t-1}, s_t), a_t)$ によってQ値が決定されるエージェントは1S、

$Q((s_{t-1}, a_{t-1}, s_t), a_t)$ によって決定されるエージェントは1S1Aと呼ぶ。

学習環境にはOpenAI GymのMountainCar、Pendulumを使用するが、どちらの環境も状態のパラメーターが連続値であるため離散化を行っている。

実験を行ったエージェントは1S、1A、2S、1S1A、2A、そして通常のQ-learningエージェントである。各エージェントは50,000,000ステップ学習を行い、学習率は0.1、割引率は0.9999、 ϵ は25,000,000ステップまでは1から0.01まで1ステップごとに線形的に下がっていき、それ以降は0.01となる。学習終了後、100エピソード分のテストを行う。

20回実験を行い、その平均値を各エージェントの値とする。

3. 実験結果

Fig. 2、Fig. 3に各エージェントの学習曲線、Table. 1にテストでの平均スコアを示す。なお、Fig. 2、Fig. 3内の帯とTable. 1の括弧内の数値は標準偏差を表し、Table. 1内の赤文字はその環境での最高スコアを示す。

Table. 1より、MountainCarでは1S1A、Pendulumでは1Sが通常のQ-learningアルゴリズムより高いスコアを出したことが分かる。また、Fig. 2およびFig. 3において、Q以外の一部のエージェントの学習曲線が収束していないことから、ステップ数を更に増やすことでこれらのエージェントはより高いスコアを出せるようになると考えられる。

4. これからの展望

他の環境およびパラメータを変更しての検証を行う予定である。また、P-learningの各エージェントの結果より、その環境での状態と行動の各組み合わせの重要度を比較することができる。その比較結果とクラスタリングアルゴリズムを組み合わせることで、より強力なエージェントを作成できないか検証していくつもりである。

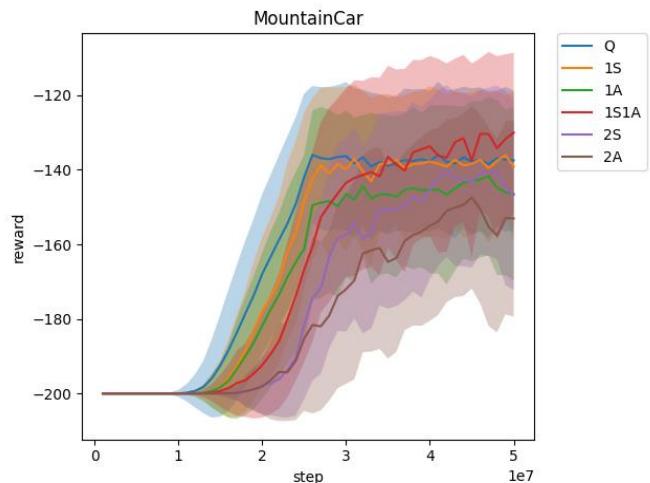


Fig. 2 MountainCar

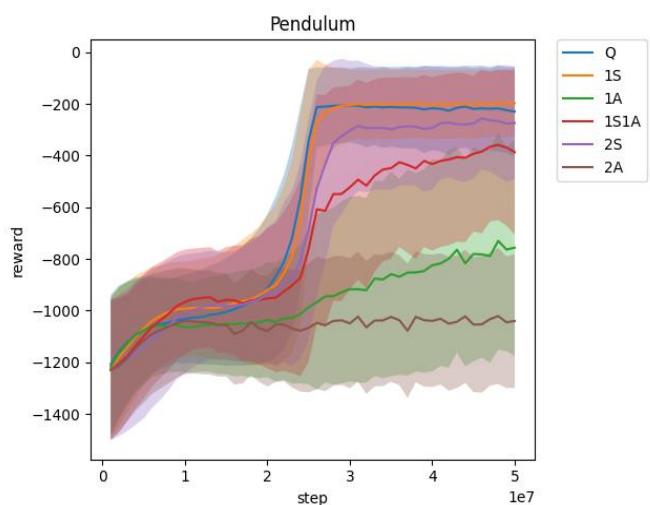


Fig. 3 Pendulum

Table. 1 各エージェントの平均スコア

	Q	1S	1A	1S1A	2S	2A
MountainCar	-138.72 (20.51)	-140.33 (21.40)	-147.19 (22.13)	-128.45 (22.168)	-145.48 (23.84)	-149.43 (23.71)
Pendulum	-207.9 (157.64)	-190.92 (117.61)	-771.88 (427.70)	-396.46 (352.67)	-278.11 (209.72)	-1053.43 (267.03)

5. 参考文献

- Will Dabney; Andre Barreto; Mark Rowland; Robert Dadashi; John Quan; Marc G. Bellemare; David Silver, 2021. The Value-Improvement Path: Towards Better Representations for Reinforcement Learning. In *The Thirty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-21)*
- Yaozhong Gan; Zhe Zhang; Xiaoyang Tan, 2021. Stabilizing Q Learning Via Soft Mellowmax Operator. In *The Thirty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-21)*

単層フィードフォワードニューラルネットワークの モデル縮約と信頼性保証

藤井 達希 蜂原 義雄 (九州大学)

Model Reduction and Reliability Verification of Single-Layer Feedforward Neural Networks

T. Fujii and Y. Ebihara (Kyushu University)

Abstract: This paper is concerned with the reliability verification of single-layer feedforward networks (FFNs) against adversarial perturbations. For quantitative evaluation of the reliability around a specified target input of interest, we introduce (local) Lipschitz constant. Then, for the computation of the Lipschitz constant, we represent the relationship between the input and output signals of the activation functions in quadratic form with a multiplier whose size is roughly twice as much as the number of the activation functions. This enables us to reduce the (upper bound) computation problem of the Lipschitz constant into a semidefinite programming problem (SDP). However, the resulting SDP is numerically intractable since the size of the multiplier (i.e., the number of activation functions) is huge in practical FFNNs. To get around this difficulty, we further propose a model reduction technique of FFNNs around the target input.

Keywords: feedforward neural networks, reliability verification, model reduction.

1 はじめに

近年、人工知能（Artificial Intelligence, AI）や機械学習技術の根幹をなす、ディープニューラルネットワーク（Deep Neural Network, DNN）の信頼性を数学的に保証するための研究が注目を集めている [1, 2, 3]。DNN は、順伝播型ニューラルネットワーク（Feedforward Neural Network, FNN）と再帰型ニューラルネットワーク（Recurrent Neural Network, RNN）に大別されるが、本研究では FNN に焦点を当てる。FNN の有効性は、画像認識やパターン識別などの分野でよく知られている。FNN の構造はシンプルであり、また学習方法も確立されていることから、FNN は今後も AI や機械学習分野の主要な DNN として中心的な役割を果たすものと考えられる。しかしながら FNN は、入力に微小な摂動を加えると（摂動前の入力に対するものとは）まったく異なる出力を生成するという信頼性の低い振る舞いをすることがあることが知られている [4]。そのような摂動は敵対的摂動（adversarial perturbation）と呼ばれおり、敵対的摂動の存在は FNN の信頼性の低さを示すものである。

本研究では、上記の観点から FNN の信頼性の度合いを定量的に評価するための尺度として、着目する入力（target input）に関する局所的な Lipschitz 定数を導入する。粗く言えばこの Lipschitz 定数は、target input の周りでの FNN の振る舞いの連続性の度合いを表すものである。Lipschitz 定数が小さければ、target input に対する微小変動のもとでの出力の変動は小さく抑えられるため、FNN の信頼性は高い（敵対的摂動は存在しない）と結論付けることが出来る。本研究では、文献 [3] と同様に、FNN の活性化関数の入出力特性を（活性化関数の個数のほぼ 2 倍のサイズの）マルチプライアを導入して 2 次形式で表現する。これにより、Lipschitz 定数（の上界値）を計算する問題を、マルチプライアを最適

化する半正定値計画問題（Semidefinite Programming Problem, SDP）に帰着することができる。しかしながら、実用的な FNN の活性化関数の個数は少なくとも数百程度であり、したがって得られる SDP のサイズが過大となり数値的解が困難（不可能）になる。そこで本研究では、局所的な Lipschitz 定数の計算問題に特化した、target input の周りでの FNN のモデル縮約手法を提案する。

本稿で用いる表記は以下の通りである。サイズが $n \times m$ の実行列の集合を $\mathbb{R}^{n \times m}$ と表し、そのうち要素がすべて非負であるものの集合を $\mathbb{R}_+^{n \times m}$ と表す。サイズが n の実対称行列の集合を \mathbb{S}^n で表す。また、行列 A が半正定（半負定）であることを $A \succeq 0$ ($A \preceq 0$) と表記する。行列 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ に対して、 $(*)^T AB$ は $B^T AB$ を略記したものである。行列 $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$ が $M_{ij} \leq 0$ ($i \neq j$) を満たすとき、これを Z 行列という。さらに $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$ が Z 行列でありかつ $M\mathbf{1}_n \geq 0$, $\mathbf{1}_n^T M \geq 0$ を満足するとき、これを doubly hyperdominant という。ただし $\mathbf{1}_n \in \mathbb{R}^n$ は要素がすべて 1 のベクトルを表している。本稿では、サイズが n の doubly hyperdominant 行列の集合を $\mathbb{DHD}^n \subset \mathbb{R}^{n \times n}$ で表す。また、 $v \in \mathbb{R}^n$ に対して $\|v\|_2 := \sqrt{\sum_{j=1}^n v_j^2}$ と定義する。さらに与えられた $v_0 \in \mathbb{R}^n$ および $\varepsilon > 0$ に対して、 $\mathcal{B}_{\varepsilon, 2}(v_0) := \{v \in \mathbb{R}^n : \|v - v_0\|_2 \leq \varepsilon\}$ と定義する。最後に、 n 次元ベクトルの i 番目の標準基底 $e_i \in \mathbb{R}^n$ および index 集合 $\mathcal{N} \subset \{1, \dots, n\}$ に対して、 $\bigoplus_{i \in \mathcal{N}} e_i \in \mathbb{R}^{|\mathcal{N}| \times n}$ を \mathcal{N} に属する index に対応した e_i^T を縦に並べた行列とする。例えば、 $n = 4$, $\mathcal{N} = \{1, 2\}$ であれば次式となる。

$$\bigoplus_{i \in \mathcal{N}} e_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

2 問題設定

次式で表される单層 FNN を考える.

$$G : z = W_{\text{out}} \Phi(W_{\text{in}} w + b_{\text{in}}) + b_{\text{out}}. \quad (1)$$

ここで, $w \in \mathbb{R}^m$, $z \in \mathbb{R}^l$ は, それぞれFNNの入力, 出力である. 一方, $W_{\text{out}} \in \mathbb{R}^{l \times n}$, $W_{\text{in}} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ はFNNの重みで構成される定数行列である. また, 定数ベクトル $b_{\text{in}} \in \mathbb{R}^n$, $b_{\text{out}} \in \mathbb{R}^l$ は, それぞれ入力端, 出力端のバイアスを表す. 最後に, $\Phi : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ は活性化関数を表しており, 通常は非線形なものが選ばれる. 以下では, FNN の入出力関係を $z = G(w)$ で表す.

本稿では, 典型的なケースとして, 活性化関数が次式で表される正規化線形ユニット (Rectified Linear Unit, ReLU) である場合を考える.

$$\Phi(q) = [\phi(q_1) \cdots \phi(q_n)]^T,$$

$$\phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_+, \quad \phi(\eta) = \begin{cases} \eta & (\eta \geq 0), \\ 0 & (\eta < 0). \end{cases} \quad (2)$$

以上の準備のもと, FNN の信頼性を定量的に評価するための指標として局所的 Lipschitz 定数を導入する.

定義 1 式(1)と(2)で与えられるFNN G を考える. このとき, 与えられた $\varepsilon > 0$ に対して, 着目する入力 (target input) $w_0 \in \mathbb{R}^m$ に関するFNN G の局所的 Lipschitz 定数を次式で定義する.

$$L_{w_0, \varepsilon, 2} := \min\{L : \|G(w) - G(w_0)\|_2 \leq L \ \forall w \in \mathcal{B}_{\varepsilon, 2}(w_0)\}. \quad (3)$$

注意 1 定義1から, 局所的 Lipschitz 定数は出力端のバイアス b_{out} には依存しないことがわかる. したがって以下では $b_{\text{out}} = 0$ とする.

局所的 Lipschitz 定数の計算は, FNN の信頼性解析 (敵対的な摂動の有無の解析) に強く動機づけられている. この動機づけを明確にするために, 以下では FNN G が分類器として機能する場合を考える. すなわち FNN G が m 個の特徴量を入力として受け取り, l 個のスコアを出力として返す場合である. 分類ルール $C : \mathbb{R}^m \rightarrow \{1, \dots, l\}$ は次式で定義されるものとする.

$$C(w) := \arg \max_{1 \leq i \leq l} G_i(w). \quad (4)$$

ここで, target input $w_0 \in \mathbb{R}^m$ が, FNN G によって正しく分類 (識別) される入力であると仮定する. このとき次式が成立すれば, 分類を誤らせるようなノルムが ε 以下の敵対的摂動は存在しない (したがって FNN G の信頼性は高い) と結論付けることができる.

$$C(w) = C(w_0) \ \forall w \in \mathcal{B}_{\varepsilon, 2}(w_0). \quad (5)$$

上式が成立するための十分条件として, 次の結果を容易に得ることができる.

命題 1 式(1), (2), (4)で与えられる分類機 $C : \mathbb{R}^m \rightarrow \{1, \dots, l\}$ を考える. target input $w_0 \in \mathbb{R}^m$ に対して, $i^* := C(w_0)$ とする. このとき, 与えられた $\varepsilon > 0$ に対して条件(5)が成立するための十分条件は, 次式が成立することである.

$$L_{w_0, \varepsilon, 2} < \frac{1}{\sqrt{2}} \min_{1 \leq j \leq l, j \neq i^*} G_{i^*}(w_0) - G_j(w_0). \quad (6)$$

証明 はじめに, 入力 $w, w_0 \in \mathbb{R}^m$ に対して $\delta := G(w) - G(w_0)$ と定義する. すると, $w \in \mathcal{B}_{\varepsilon, 2}(w_0)$ に関して, 式(3)より次式が成立する.

$$\delta_i - \delta_j \geq -\sqrt{2} L_{w_0, \varepsilon, 2} \ (1 \leq i, j \leq l).$$

また, 式(6)から, $w \in \mathcal{B}_{\varepsilon, 2}(w_0)$, $j \neq i^*$ に関して次式を得る.

$$\begin{aligned} G_{i^*}(w) - G_j(w) &= G_{i^*}(w_0) + \delta_{i^*} - (G_j(w_0) + \delta_j) \\ &= G_{i^*}(w_0) - G_j(w_0) + (\delta_{i^*} - \delta_j) \\ &\geq G_{i^*}(w_0) - G_j(w_0) - \sqrt{2} L_{w_0, \varepsilon, 2} \\ &> 0 \end{aligned}$$

以上より, $C(w) = i^* = C(w_0)$ が示された. \square

3 上界値計算のための SDP

3.1 基本的な結果

式(2)で表されるReLUの入出力特性を捉えるために, 次式で表されるマルチプライアの集合 $\Pi^* \subset \mathbb{S}$ を導入する.

$$\Pi^* := \left\{ \Pi \in \mathbb{S} : \begin{bmatrix} 1 \\ q \\ p \end{bmatrix}^T \Pi \begin{bmatrix} 1 \\ q \\ p \end{bmatrix} \geq 0 \ \forall q, p \in \mathbb{R}^n \text{ s.t. } p = \Phi(q) \right\}. \quad (7)$$

次の定理は, 本稿の主結果の一つである.

定理 1 式(1),(2)で表されるFNN G を考える. 与えられた入力 $w_0 \in \mathbb{R}^m$ および $\varepsilon > 0$ に対して, $z_0 := G(w_0)$ と定義する. このとき, 次式を満たす $\tau \geq 0$ および $\Pi \in \Pi^* \subset \mathbb{S}^{2n+1}$ が存在すれば, FNN G に関して $L_{w_0, \varepsilon, 2} \leq L$ が成立する.

$$\begin{bmatrix} -L^2 + z_0^T z_0 + \tau(\varepsilon^2 - w_0^T w_0) & \tau w_0^T & -z_0^T W_{\text{out}} \\ * & -\tau I_m & 0 \\ * & * & W_{\text{out}}^T W_{\text{out}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$+ (*)^T \Pi \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ b_{\text{in}} & W_{\text{in}} & 0 \\ 0 & 0 & I_n \end{bmatrix} \preceq 0.$$

証明 FNN G の入出力対 (w, z) に関して, $q = W_{\text{in}} w + b_{\text{in}}$, $p = \Phi(q)$ と定義する. すると, $z = W_{\text{out}} p$

を得る。式(8)に $[1 \ w^T \ p^T]^T$ を右から、その転置を左からかけると、次のようになる。

$$-L^2 + \|z - z_0\|_2^2 + \tau(\varepsilon^2 - \|w - w_0\|_2^2) + \begin{bmatrix} 1 \\ q \\ p \end{bmatrix}^T \Pi \begin{bmatrix} 1 \\ q \\ p \end{bmatrix} \leq 0.$$

$\Pi \in \Pi^*$ から以下の式を容易に得ることができる。

$$-L^2 + \|z - z_0\|_2^2 + \tau(\varepsilon^2 - \|w - w_0\|_2^2) \leq 0.$$

$\tau \geq 0$ であるため、上式は任意の $w \in \mathcal{B}_{\varepsilon,2}(w_0)$ に対して $-L^2 + \|z - z_0\|_2^2 \leq 0$ が成立することを意味する。以上より、式(8)のもとで $L_{w_0,\varepsilon,2} \leq L$ が成立する。□

定理1より、次のSDPを解くことで局所的Lipschitz定数の上界値を計算できることがわかる。

$$\inf_{L,\Pi} L \quad \text{s.t.} \quad (8), \quad \Pi \in \Pi^* \subset \mathbb{S}^{2n+1}. \quad (9)$$

3.2 具体的なマルチプライア

本節では、式(7)の条件を満たす具体的なマルチプライアの集合を紹介する。はじめに、以下の定義を示す。

定義2 [5] $\mu \leq 0 \leq \nu$ とする。 $\phi(0) = 0$ かつ次式が成立するとき、非線形要素 $\phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ は slope-restricted であるといい、 $\phi \in \text{slope}(\mu, \nu)$ と表記する。

$$\mu \leq \frac{\phi(x) - \phi(y)}{x - y} \leq \sup_{x \neq y} \frac{\phi(x) - \phi(y)}{x - y} < \nu \quad \forall x, y \in \mathbb{R}, \quad x \neq y.$$

一方、 $\alpha \leq 0 \leq \beta$ に対して次式が成立するとき、非線形要素 ϕ は sector-bounded であるといい、 $\phi \in \text{sec}[\alpha, \beta]$ と表記する。

$$(\phi(x) - \alpha x)(\phi(x) - \beta x) \leq 0 \quad (\forall x \in \mathbb{R}).$$

ここでReLU $\phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ が、 $\phi \in \text{slope}(0, 1)$ と $\phi \in \text{sec}[0, 1]$ を満たすことはあきらかである。したがって、ReLUの取扱いにおいては、slope-restrictedあるいはsector-bounded である非線形要素に関する既知のマルチプライアを利用できる。ここでslope-restrictedである非線形要素に対するZames-Falb マルチプライア[6]に関する結果より、次の補題を得る。

補題1 集合 $\widehat{\Pi}_{\text{ZF}} \in \mathbb{S}^{2n}$, $\widehat{\Pi} \in \mathbb{S}^{2n+1}$ をそれぞれ次式で定義する。

$$\begin{aligned} \widehat{\Pi}_{\text{ZF}} &:= \left\{ \widehat{\Pi} \in \mathbb{S}^{2n} : \widehat{\Pi} = (*)^T \begin{bmatrix} 0 & M \\ M^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_n & -I_n \\ 0 & I_n \end{bmatrix}, \quad M \in \mathbb{DHD}^n \right\}, \\ \widehat{\Pi} &:= \left\{ \text{diag}(0, \widehat{\Pi}) \in \mathbb{S}^{2n+1} : \widehat{\Pi} \in \widehat{\Pi}_{\text{ZF}} \right\}. \end{aligned}$$

このとき、 $\widehat{\Pi} \subset \Pi^*$ が成立する。

注意2 SDP(9)を解く際には、変数として $\Pi \in \Pi^* \subset \mathbb{S}^{2n+1}$ を取り扱う必要がある。ここで n は非線形活性化関数の個数を表しており、実用的なFNNではその数は少なくとも数百である（後述の数値例で用いるFNNは $n = 500$ である）。したがって実用的な問題設定において

SDP(9)の数値的求解は困難（不可能）である。この問題を回避するために次節では、局所的なLipschitz定数の計算問題に特化した、target input の周りでのFNNのモデル縮約手法（活性化関数の個数の低減手法）を提案する。

4 モデル縮約

本節では、target input w_0 の近傍 $\mathcal{B}_{\varepsilon,2}(w_0)$ に属するすべての入力 w に対して、(1), (2) で表されるFNN G とまったく同じ出力を生成する縮約モデル G_r を構成することを考える。この目的のために、 $w \in \mathcal{B}_{\varepsilon,2}(w_0)$ に対する活性化関数への入力信号を $q(w) := W_{\text{in}}w + b_{\text{in}}$ と定義する。さらに、 $W_{\text{in}} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ の i 行目を $W_{\text{in},i}$ とする。このとき、次のような考察が可能である。

- (i) $q_i(w)$ を最も小さくするような入力 $w \in \mathcal{B}_{\varepsilon,2}(w_0)$ は $w = w_0 - \frac{\varepsilon}{\|W_{\text{in},i}\|} W_{\text{in},i}^T$ であり、対応する最小値は $q_i(w_0) - \varepsilon \|W_{\text{in},i}\|$ である。したがって $q_i(w_0) \geq \varepsilon \|W_{\text{in},i}\|$ であるならば、 $q_i(w) \geq 0 \quad \forall w \in \mathcal{B}_{\varepsilon,2}(w_0)$ でありしたがって $\phi(q_i(w)) = q_i(w) \quad \forall w \in \mathcal{B}_{\varepsilon,2}(w_0)$ である。
- (ii) $q_i(w)$ を最も大きくするような入力 $w \in \mathcal{B}_{\varepsilon,2}(w_0)$ は $w = w_0 + \frac{\varepsilon}{\|W_{\text{in},i}\|} W_{\text{in},i}^T$ であり、対応する最大値は $q_i(w_0) + \varepsilon \|W_{\text{in},i}\|$ である。したがって $q_i(w_0) \leq -\varepsilon \|W_{\text{in},i}\|$ であるならば、 $q_i(w) \leq 0 \quad \forall w \in \mathcal{B}_{\varepsilon,2}(w_0)$ でありしたがって $\phi(q_i(w)) = 0 \quad \forall w \in \mathcal{B}_{\varepsilon,2}(w_0)$ である。

以上の考察のもと、次式を定義する。

$$\begin{aligned} \mathcal{Z}_n &:= \{1, 2, \dots, n\}, \\ \mathcal{N}_+ &:= \{i \in \mathcal{Z}_n : q_i(w_0) \geq \varepsilon \|W_{\text{in},i}\|_2\}, \\ \mathcal{N}_0 &:= \{i \in \mathcal{Z}_n : q_i(w_0) \leq -\varepsilon \|W_{\text{in},i}\|_2\}, \\ \mathcal{N}_r &:= \mathcal{Z}_n \setminus \{\mathcal{N}_+ \cup \mathcal{N}_0\} \end{aligned} \quad (10)$$

このとき次式が成立する。

$$\begin{aligned} \phi(q_i(w)) &= q_i(w) \quad \forall w \in \mathcal{B}_{\varepsilon,2}(w_0) \quad (i \in \mathcal{N}_+) \\ \phi(q_i(w)) &= 0 \quad \forall w \in \mathcal{B}_{\varepsilon,2}(w_0) \quad (i \in \mathcal{N}_0). \end{aligned} \quad (11)$$

すなわち、 $i \in \mathcal{N}_+$ に属する信号 $q_i(w)$ 関する出力はReLUの影響を受けず、また $i \in \mathcal{N}_0$ に属する信号 $q_i(w)$ は0になる。これらの事実を踏まえて、さらに次の定義を導入する。

$$\begin{aligned} E_+ &:= \bigoplus_{i \in \mathcal{N}_+} e_i, \quad E_r := \bigoplus_{i \in \mathcal{N}_r} e_i, \quad n_+ := |\mathcal{N}_+|, \quad n_r := |\mathcal{N}_r|, \\ \widetilde{W}_{\text{in}} &:= E_+ W_{\text{in}}, \quad \widetilde{b}_{\text{in}} := E_+ b_{\text{in}}, \quad \widetilde{W}_{\text{out}} := W_{\text{out}} E_+^T, \\ \widehat{W}_{\text{in}} &:= E_r W_{\text{in}}, \quad \widehat{b}_{\text{in}} := E_r b_{\text{in}}, \quad \widehat{W}_{\text{out}} := W_{\text{out}} E_r^T \end{aligned} \quad (12)$$

これらの定義のもとで、(11)より次の定理が成立する。

定理2 式(1),(2)で表されるFNN G に対して、 $\widetilde{W}_{\text{in}} \in \mathbb{R}^{n_+ \times m}$, $\widetilde{b}_{\text{in}} \in \mathbb{R}^{n_+}$, $\widetilde{W}_{\text{out}} \in \mathbb{R}^{l \times n_+}$, $\widehat{W}_{\text{in}} \in \mathbb{R}^{n_r \times m}$, $\widehat{b}_{\text{in}} \in \mathbb{R}^{n_r}$, $\widehat{W}_{\text{out}} \in \mathbb{R}^{l \times n_r}$ を(10), (12)で定義する。このとき、 n_r ($\leq n$) 個の活性化関数を用いて表現されるFNN G の縮約モデル

$$G_r : z = \widetilde{W}_{\text{out}}(\widetilde{W}_{\text{in}}w + \widetilde{b}_{\text{in}}) + \widehat{W}_{\text{out}}\Phi(\widehat{W}_{\text{in}}w + \widehat{b}_{\text{in}})$$

に対して、 $G_r(w) = G(w) \quad \forall w \in \mathcal{B}_{\varepsilon,2}(w_0)$ が成立する。

さらにこの縮約モデルに基づいて定理 1 と同様の考察を行うことで、次の定理を得る。

定理 3 式(1),(2)で表されるFNN G を考える。与えられた入力 $w_0 \in \mathbb{R}^m$ および $\varepsilon > 0$ に対して、 $z_0 := G(w_0)$ と定義する。このとき、次式を満たす $\tau \geq 0$ および $\Pi \in \mathbf{\Pi}^* \subset \mathbb{S}^{2n_r+1}$ が存在すれば、FNN G に関して $L_{w_0, \varepsilon, 2} \leq L$ が成立する。

$$\begin{bmatrix} -L^2 + (\widetilde{W}_{\text{out}} \tilde{b}_{\text{in}} - z_0)^T (\widetilde{W}_{\text{out}} \tilde{b}_{\text{in}} - z_0) + \tau(\varepsilon^2 - w_0^T w_0) \\ * \\ * \\ \tau w_0^T + (\widetilde{W}_{\text{out}} \tilde{b}_{\text{in}} - z_0)^T \widetilde{W}_{\text{out}} \widetilde{W}_{\text{in}} & (\widetilde{W}_{\text{out}} \tilde{b}_{\text{in}} - z_0)^T \widetilde{W}_{\text{out}} \\ -\tau I_m + \widetilde{W}_{\text{in}}^T \widetilde{W}_{\text{out}}^T \widetilde{W}_{\text{out}} \widetilde{W}_{\text{in}} & \widetilde{W}_{\text{in}}^T \widetilde{W}_{\text{out}}^T \widetilde{W}_{\text{out}} \\ * \\ + (*)^T \Pi \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \tilde{b}_{\text{in}} & \widetilde{W}_{\text{in}} & 0 \\ 0 & 0 & I_{n_r} \end{bmatrix} \leq 0. \end{bmatrix} \quad (13)$$

定理3より、次のSDPを解くことで局所的 Lipschitz 定数の上界値を計算できることがわかる。

$$\inf_{L, \Pi} L \quad \text{s.t.} \quad (13), \quad \Pi \in \mathbf{\Pi}^* \subset \mathbb{S}^{2n_r+1}. \quad (14)$$

との FNN G に基づいた Lipschitz 定数の上界値計算のための SDP (9) におけるマルチプライア Π のサイズは $2n + 1$ である。それに対して、縮約モデル G_r に基づいた SDP (14) におけるマルチプライア Π のサイズは $2n_r + 1$ である。 $n_r \leq n$ であり、とくに ε が小さければ $n_r \ll n$ となることはあきらかであることから、(とくに ε が小さい場合においては大幅な) 計算量の低減を実現できていることがわかる。

5 数値例

文献 [1, 2] では、MNIST データベースで公開されている 0 から 9 の手書き数字の画像データセットに対して、これを分類（認識）する (1) の形の单層 FNN の解析がなされている。本稿ではこの FNN の (local な) Lipschitz 定数を計算する問題を考える。この FNN においては、 $l = 10$, $n = 500$ であり、入力画像が 28×28 ピクセルであることから $m = 784$ である。分類ルールは (4) で与えられ、 $C(w) = i$ であれば分類結果（認識した数字）は $i - 1$ である。以下では、target input w_0 として Fig. 1 で表されるものを考える。 $\|w_0\|_2 = 9.9106$ である。Fig. 1 より $C(w_0) = 9$ であり、入力画像を正しく 8 と分類できていることが分かる。

この FNN に対して、4 節の手法にしたがい w_0 の周りでの厳密な縮約モデルを求めた。得られた縮約モデルのサイズ（縮約モデルに含まれる非線形関数の個数 n_r ）を Fig. 2 に示す。 ε が小さい場合には極めて小さなサイズの縮約モデルが得られており、とくに $\varepsilon = 0.1$ の場合には（とのサイズが $n = 500$ であるのに対して） $n_r = 22$ である。

次に $\varepsilon = 0.1$ のもとで得られた縮約モデルのもとで、SDP (14) を解いて Lipschitz 定数の上界値を求めた。

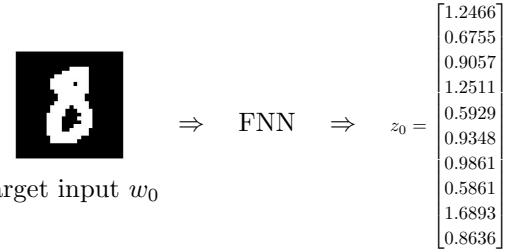


Fig. 1: Target input w_0 and corresponding output z_0 .

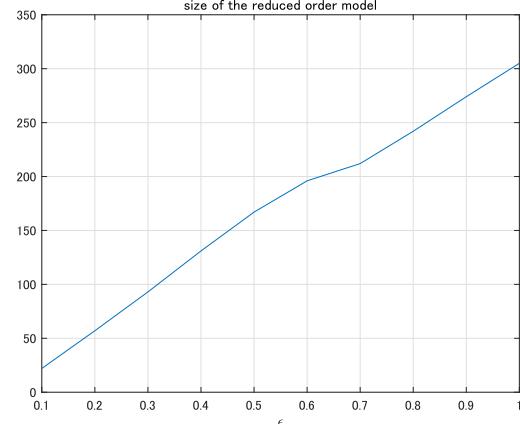


Fig. 2: Size (i.e., the number of activation functions) of the reduced order models.

得られた上界値は $L = 0.1517$ であった (SDP の求解に利用した計算機の CPU は Intel(R) Core(TM) i7-9700 CPU @ 3.00GHz 3.00 GHz, 計算時間は 260 秒であった)。この結果より次式が成立する。

$$L_{w_0, \varepsilon, 2} \leq 0.1517 < 0.3099 \approx \frac{1}{\sqrt{2}}(1.6893 - 1.2511)$$

したがって命題 1 より、 $\varepsilon = 0.1$ とした w_0 の ε 近傍には分類を誤らせる敵対的摂動は存在しないという、FNN の信頼性に関する絶対的な保証を与えることができる。

6 おわりに

本稿では、FNN の信頼性保証を目的とし、モデル縮約および SDP に基づいた FNN の (local な) Lipschitz 定数の計算手法を提案した。

参考文献

- [1] A. Raghunathan, J. Steinhardt, and P. Liang. Semidefinite relaxations for certifying robustness to adversarial examples. *Advances in Neural Information Processing Systems*, pp. 10900–10910, 2018.
- [2] A. Raghunathan, J. Steinhardt, and P. Liang. Certified defenses against adversarial examples. In *Proc. the International Conference on Learning Representations*, 2018.
- [3] M. Fazlyab, M. Morari, and G. J. Pappas. Safety verification and robustness analysis of neural networks via quadratic constraints and semidefinite programming. *IEEE Transactions on Automatic Control*, to appear.
- [4] K. Eykholt, I. Evtimov, E. Fernandes, B. Li, A. Rahmati, C. Xiao, A. Prakash, T. Kohno, and D. Song. Robust physical-world attacks on deep learning models. In *arXiv:1707.08945 [cs.CR]*.
- [5] M. Fetzer and C. W. Scherer. Absolute stability analysis of discrete time feedback interconnections. *IFAC PapersOnline*, Vol. 50, No. 1, pp. 8447–8453, 2017.
- [6] G. Zames and P. Falb. Stability conditions for systems with monotone and slope-restricted nonlinearities. *SIAM Journal on Control*, Vol. 6, No. 1, pp. 89–108, 1968.

WebRTC を介した拡張現実による移動ロボットの遠隔制御

佐賀大学 ○永江快成 佐藤和也

Instruction for preparation of manuscript

Kaisei Nagae and Kazuya Sato, Saga University

Abstract: In this paper, we propose a remote control system for mobile robots using WebRTC (Web Real-Time Communication) and Augmented Reality (AR). It assists the operator by using the real-time nature of WebRTC and the electronic information of AR. We also verify ROS communication via WebRTC.

1. はじめに

災害地などに人を派遣することは危険を伴なうことも多く、その代わりとして様々な状況でロボットの投入が求められている。しかし実際の現場では、自律制御のみでロボットを運用することは不具合が起きた際の対処が困難な場合があるため、ロボットの操作は人が関与し、常に周りの様子を確認しながら操縦できる操作性の高い遠隔操縦システムの重要度は高い。

佐賀大学では東日本大震災によって起きた福島第一原子力発電所での事故の後処理の手助けとなる水中ロボットの研究開発に対して貢献した[1]。この研究では自律制御と遠隔操縦の両方のシステムを併用して操作性を高めた。また、建設現場においては、鹿島建設と竹中工務店、アクティオ、カナモトとで共同でタワークレーン遠隔操作システム

「TawaRemo」を開発しており、運転席から操作する場合と同等の作業が行え、オペレーターの疲労軽減などの生産性向上効果を確認している[2]。さらに、操作性や安定性を損なうことなく遠隔操縦するために、高い技術力を用いて遅延補償を行っている[3]。すなわち、低遅延での通信環境が導入できれば、遠隔操縦が容易に実現できるため魅力的である。

一方、人間の視界にコンピュータの情報を投影し、現実世界と仮想世界が共存する技術である拡張現実（AR）が注目を浴びている。AR技術は、現実世界の視界と電子的な情報を重畠（オーバーレイ）して表示することによって、現実に情報が添付され強化されたような感覚を利用者に持たせることができになる[4]。これより、ディスプレイなどの映像のみでロボットを遠隔操縦した際に感じていた現実とのギャップ、それに伴った操縦のしに

くさなどの問題点をAR技術を用いることで補完可能である。

本稿では、簡単に導入が可能な低遅延通信技術であるWebRTC（Web Real-Time Communication）を介して取得した映像に、AR情報を付与し、オペレーターを支援する移動ロボットシステムを提案し、その有用性を検証する。

2. WebRTC

WebRTCは、ウェブアプリケーションやウェブサイトを介して、異なるブラウザ間で直接、任意のデータの交換や、取得したオーディオ／ビデオストリームの送受信を可能にする技術であり[5]、4つのサーバをAPI経由で利用可能である。4つのサーバのうち、1つ目は、シグナリングサーバで、通信を開始する前に、IPアドレスやコードックなど、Fig. 1に示すように通信に必要な情報を通信相手と交換するためのサーバである[6]。2つ目は、STUN（Session Traversal Utilities for NAT）サーバで、NAT_{※1}が存在する環境でP2P_{※2}通信を行う際に、Fig. 2に示すように必要なグローバルIPおよびポート番号を取得できる。3つ目は、TURN（Traversal Using Relays around NAT）サーバで、データを中継することで、企業で導入しているネットワークなどP2P通信が利用できない特定のネットワーク環境でのWebRTC利用をFig. 3に示すように可能にする。4つ目は、SFU（Selective Forwarding Unit）サーバで、P2P通信ではなく、サーバ経由で通信する技術である。Fig. 4に示すように配信者が直接相手に通信するのではなく、サーバを間に挟むことで、メディアの容量の大きさや視聴者の数による負荷を大幅に軽減することが可能である[7]。本稿では、使用する各端末での処理を軽減するために、SFUサーバを採用する。なお、時雨堂（しぐれどう）[8]が開発するWebRTC SFU Soraを無料で検証できるサー

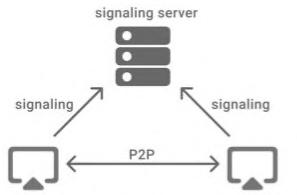


Fig. 1: signaling server

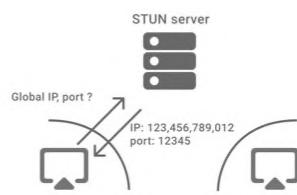


Fig. 2: STUN server

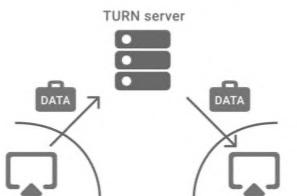


Fig. 3: TURN server

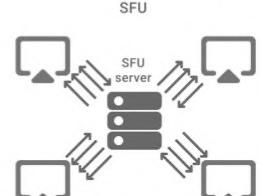


Fig. 4: SFU server

ビスである「Sora Labo」を使用する。

※1 : NAT とは、Network Address Translation の略で、ネットワークアドレスを交換する機能である[7]。

※2 : P2P とは、Peer-to-peer の略で、通信を行うノードおよび通信相手がデータを所持している際、他のノードに対しても対等にデータ共有やアクセス権を求めるなどの自立分散型ネットワークモデルを指す。要するに、WebRTCにおいてサーバーを介することなく、端末同士が直接通信できる仕組みである[9]。

3. システム構成

現時点で動作しているシステムの概要を Fig. 5, 6 にそれぞれ示す。なお、前提として、移動ロボットは、Jetson Nano と Realsense カメラ、Keigan Motor を搭載している。モーターに操作量を与えることで、モーターに取り付けた車輪が回転し、移動ロボットが移動できる。また、オペレーターは VR ゴーグルを装着し、移動ロボットを操縦する。操縦用のコントローラは、VR ゴーグルに付属しているコントローラを扱うものとする。

3.1. システム構成①（遠隔操縦）

システム構成①（Fig. 5）は、各機器が同じ Wi-Fi 環境下で動作しており、Jetson Nano と VR ゴーグル間で、ROS (Robot Operating System) の通信方式を利用して Wi-Fi を介して通信する。VR ゴーグル画面上に映し出される映像は、Realsense カメラからの映像データを使用する。この映像をもとにオペレーターは、移動ロボットの周囲の様子を観察しながら、移動ロボットをコントローラで操縦する。また、Realsense カメラには IMU センサが搭載されており、このセンサ値を使い、架空のモデルを VR ゴーグル画面上に投影し、移動ロボットの姿勢を常時確認できるようにしている。なお、PC は Jetson Nano に SSH で接続し、Jetson Nano 内部のプログラムを実行する。

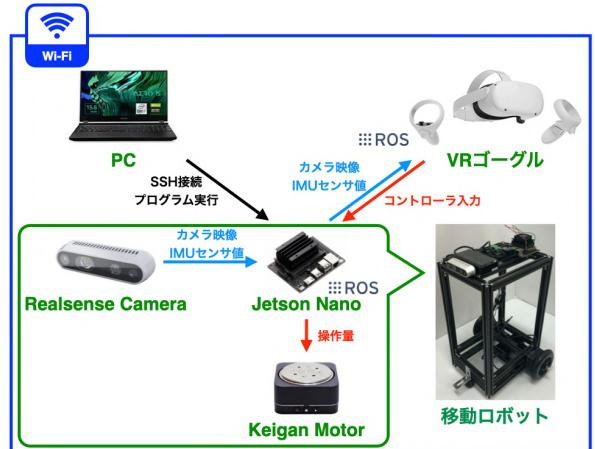


Fig. 5: System configuration①



Fig. 6: System configuration②

3.2. システム構成②（WebRTC）

システム構成②（Fig. 6）は、移動ロボットと VR ゴーグルがそれぞれ異なる Wi-Fi 環境下で動作しており、Jetson Nano と VR ゴーグル間で、WebRTC (Sora Labo) を介して通信する。VR ゴーグル画面上に映し出される映像は、移動ロボットに搭載された Realsense カメラからの映像データを使用する。

4. 遠隔操縦性能評価

3.1 項で示した遠隔操縦のシステム構成の性能評価を行う。まず Jetson Nano と VR ゴーグル間で ROS の通信方式を利用した通信が可能であることが確認できた。これに伴い、今後開発を進めしていく上で、自律地図制作や動作計画などの ROS のパッケージを本研究に組み合わせることにより、研究開発速度の向上を図ることができる。

一方、移動ロボットに取り付けた Realsense カメラからの映像を見ながらの操縦は、周囲の様子が限定的になってしまい、死角が多いため難しい状況である。また、VR ゴーグル画面上に架空モデルを投影し、Realsense カメラに搭載された IMU

センサ値をもとに架空モデルが動くことを確認したが、活かしきれていないため、仮想現実システムの改善が必要である。

5. WebRTC 通信性能評価

3.2 項で示した WebRTC を介した通信手段のシステム構成の性能評価を行う。WebRTC を利用した Sora Labo を使用することで、異なる Wi-Fi 環境下での通信が可能であることが確認できた。また、WebRTC は低遅延通信技術が簡単に導入可能であることが魅力であるとされている。Fig. 7 は、携帯端末（Fig. 7 の右手前側）でストップウォッチで時間を計測しながら、それを Realsense カメラで撮影し、WebRTC で配信した映像（Fig. 7 の左奥側）である。Fig. 7 より、リアルタイムは 7.15 秒であるのに対し、WebRTC 上のタイムが 7.02 秒であることが確認できた。人間の典型的な反応速度は 0.2~0.25 秒であるとされているため、0.13 秒の遅延は低遅延であると言える。

また、WebRTC を介して、ROS のノードの送受信ができるような環境が整いつつあるため[10]、今後はシステム構成①と②が混合した Fig. 8 のようなシステム構成で動作することを目指とする。このシステム構成が実現できれば、これまで ROS で開発してきたロボットへの応用もでき、遠隔操縦の枠が広がると考えられる。

6. 結論

本研究では、VR ゴーグルを使用した遠隔操縦システムと、WebRTC を使用した通信システムを構築した。Jetson Nano と VR ゴーグル間で ROS のノードの送受信が可能であること、WebRTC を介して、異なる Wi-Fi 環境下で Jetson Nano と VR ゴーグル間で映像データの送受信が可能であることが確認できた。今後は、仮想現実を利用した遠隔操縦の利便性の強化、Fig. 8 のような異なる Wi-Fi 環境下で ROS のノードの送受信可能なシステムの構築を検討する。

参考文献

- [1] 永江ら：“耐放射線カメラを用いた水中ロボットの半自律移動制御”，DOI:
<https://doi.org/10.1299/jsmrm.2020.2P1-P06>, J-STAGE, 2020
- [2]<https://www.kajima.co.jp/news/press/202104/7a1-j.htm>
- [3]<https://www.kajima.co.jp/news/press/202105/18c1-j.htm>



Fig. 7: WebRTC low latency
(Left: WebRTC 7.02[sec],
Right: Real time 7.15[sec])

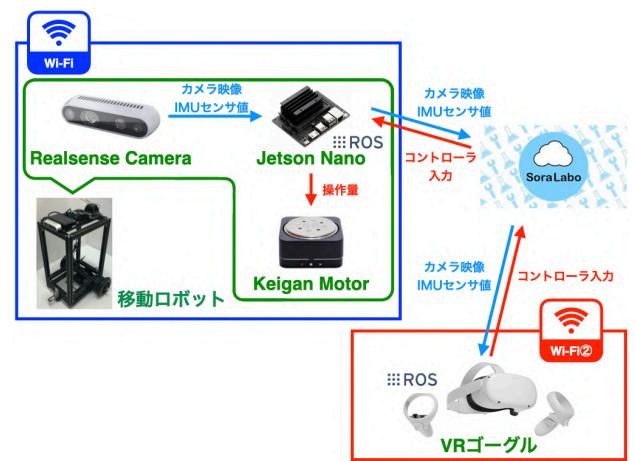


Fig. 8: Goal system configuration
(Sending and receiving ROS nodes via WebRTC)

- [4]https://www.jstage.jst.go.jp/article/itej/66/12/66_1048/_pdf
- [5]https://developer.mozilla.org/ja/docs/Web/API/WebRTC_API
- [6]<https://webrtc.ecl.ntt.com/skyway/overview.html>
- [7]<https://jp.vcube.com/sdk/blog/webrtc-general-server-configuration-signaling-turn-sfu.html>
- [8]<https://shiguredo.jp>
- [9]<https://admin.lfv.jp/trial/webrtc/sfu/>
- [10]<https://medium.com/shiguredo/ros-と-webrtc-の相性-bac564ffc1dd>

マルチボディダイナミクスと深層学習を利用した自動車乗員身体制御モデルの構築

福岡大学 ○後田功貴, 福田智行, 岩村誠人

Development of a vehicle occupant body control model using multibody dynamics and deep learning

Koki Ushiroda, Tomoyuki Fukuda and Makoto Iwamura, Fukuoka University

Abstract : Since the mass of a vehicle occupant is not negligibly small compared to the mass of the vehicle body, it is required to establish a vehicle design method considering the dynamic interaction between the occupant and the vehicle body. For that purpose, a model that can predict the behavior of the occupant when the vehicle is running is required. Therefore, in this study, we try to construct a simple mechanical model that can simulate the physical behavior of the occupant based on the data obtained from the human vibration test. In this paper, we report the results of examining a control model that combines nonlinear PD control and deep learning.

1. はじめに

自動車乗員の質量は自動車本体の質量に比べて無視できるほど小さくはないため、乗員と自動車本体の相互作用を考慮した車両設計法の確立が求められている。自動車乗車時の人間の身体挙動について実験的に検討した試みとして、例えば Qiu ら [1] は実車走行時におけるシートから乗員への振動伝達を計測しているが、従来の研究の多くは定常状態に着目した計測を行っており、実際の走行車両中に生じる過渡的な身体挙動に着目した研究は比較的少ない。過渡的な身体挙動に関する研究として、林ら [2] は車両乗員のシート着座時における横方向加速度入力に対する運動応答を計測できる簡易的な実験装置を製作し、身体運動の定量的評価を行っている。また、竹原ら [3] は得られた横方向加速度に対する身体挙動のデータに基づき、それを模擬する簡単な人体モデルを作成している。竹原らのモデルは、臀部とシート間の接触力を考慮したモデルとなっており、逆モデルによる駆動トルクの生成などを含む興味深いモデルであるが、横方向加速度入力以外の運動に対しても有効であるかは明らかでない。

本研究では、実際に車両走行時に生じる乗員の過渡的な身体挙動を模擬できる簡単な力学モデルを構築することを目的とする。まず、モーション装置を利用して、過渡応答が生じる比較的低い周波数範囲においてロール軸まわりの正弦加振を行い、モーションキャプチャにより身体挙動を計測する。そして、自動車乗員を 1 点が変位加振される簡単な 2 リンクモデルとして近似し、マルチボディダイナミクスを用いて運動方程式を導出する。本稿では、身体制御モデルとして、非線形 PD 制御と深層学習を併用したモデルを検討する。最後に提案するモデルにより予測される挙動と実験により計測された挙動とを比較することにより、提案する乗員モデルの妥当性を検証する。



Fig. 1: Shaker table for human vibration test



Fig. 2: Motion capture system

2. 自動車乗員の加振実験と身体挙動の評価

ロール軸回転振動を発生させる装置として、図 1 に示すモーション装置を使用した。ロール回転中心はシートの下方に設定し、シートに着座した被験者に実車と類似の振動が暴露されるように調整した。加振実験は、振幅を 13deg に固定し、振動数 f を 0.1Hz から 1.0Hz まで 0.1Hz 刻みで変化させて正弦加振により行った。本実験では、標準的な体格を持つ 20 代の健常な成人男性を被験者とした。加振時の身体挙動を図 2 に示す光学式モーションキャプチャシステム(株式会社ノビテック製 VENUS3D)で計測した。その際、カメラは地上 1.75m の高さでモーション装置から

3.6m 離して設置し、反射マーカーは図 1 に示すように被験者の腰部(点 Q)、胸部(点 S)、頭部(点 E)に貼付して、体幹の動作を観察できるようにした。図 3において θ_1, θ_2 はそれぞれ線分 QS 、線分 SE の鉛直軸からの傾角である。本実験より、被験者は無意識のうちに体をもとの位置に戻そうと制御しており、その際に頭部を加振方向に対して逆向きに傾けてバランスを取ろうとしていること、周波数が高くなるにつれより強い制御を行っており頭部を大きく傾けていること、などの傾向がみてとれた。各周波数につき 5 回実験を行ったが、いずれの周波数においても類似の特徴が確認できた。そこで、モデルの作成においては、個別の計測データに完全に一致させるのではなく、極力簡単なモデルでいずれの周波数においても大局的な動作を近似できることを目標とすることとする。

3. 自動車乗員身体制御モデル

3.1 動力学モデル

本研究では、乗員の体幹の解析を行うために、図 4 に示すような胴体と頭首の 2 部位からなり、各部位を剛体リンクとして回転関節で連結した簡単なモデルを用いることとする。このモデルは空間に対して固定された絶対座標系 Σ_0 に対して移動可能であり、骨盤の位置に相当する点 Q が外部から変位加振されるとする。各ボディの重心位置にも各々ボディ座標系 Σ_i を設定する。絶対座標系 Σ_0 の原点から点 * までの位置ベクトルを r^* 、絶対座標系 Σ_0 の原点 O からボディ座標系 Σ_i の原点までの位置ベクトルを R_i 、 x_0 軸と \bar{x}_i 軸のなす角を ϕ_i とする。また、ボディ座標系 Σ_i の原点からボディ i 上の点 * までの位置ベクトルを z_i^* と表し、ボディ座標系 Σ_i から絶対座標系 Σ_0 への回転行列を A_i とする。さらに、ボディ i の長さを l_i 、質量を m_i 、重心回りの慣性モーメントを I_i とする。ボディ i の位置・姿勢は $q_i = [R_i^T \ \phi_i]^T = [x_i \ y_i \ \phi_i]^T$ で表され、システム全体の一般化座標は $q = [q_1^T \ q_2^T]^T \in \mathbb{R}^6$ となる。本研究では、マルチボディダイナミクス [4] を用いて動力学モデルの定式化を行う。

モーションキャプチャで計測した腰部(図 3 の点 Q)の動作軌道を $r^Q(t) = [x^Q(t) \ y^Q(t)]^T$ とし、ボディ 1 上の点 Q がこれに追従すると仮定すると次の拘束が成立立つ。

$$\begin{aligned} C^1(q, t) &= r_1^Q - r^Q(t) = R_1 + A_1 \bar{z}_1^Q - r^Q(t) \\ &= \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \phi_1 & -\sin \phi_1 \\ \sin \phi_1 & \cos \phi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -s_1 \end{bmatrix} \\ &\quad - \begin{bmatrix} x^Q(t) \\ y^Q(t) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (1)$$

一方、ボディ 1 とボディ 2 が回転関節で結合される拘束

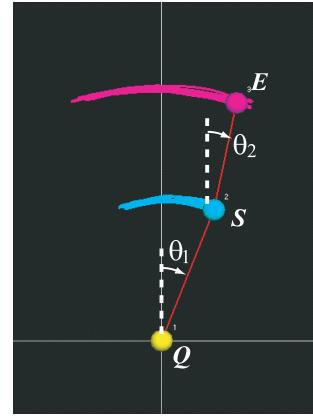


Fig. 3: Occupant behavior measured by motion capture

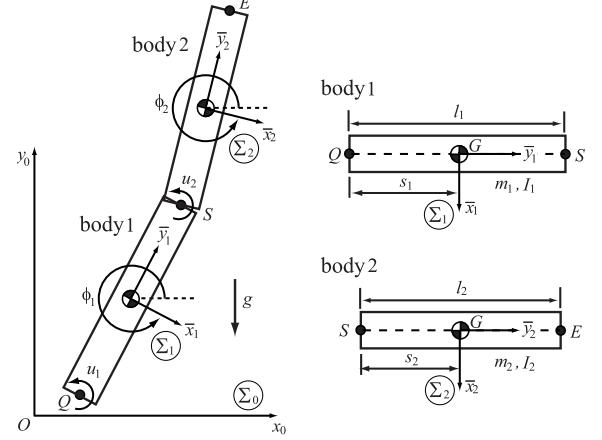


Fig. 4: Multibody dynamics model of the occupant

は次式のように表せる。

$$\begin{aligned} C^2(q) &= R_1 + A_1 \bar{z}_1^S - R_2 - A_2 \bar{z}_2^S \\ &= \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \phi_1 & -\sin \phi_1 \\ \sin \phi_1 & \cos \phi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ l_1 - s_1 \end{bmatrix} \\ &\quad - \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos \phi_2 & -\sin \phi_2 \\ \sin \phi_2 & \cos \phi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -s_2 \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (2)$$

式 (1) および式 (2) をまとめることにより、このシステムの全運動学的拘束条件は次式のように書ける。

$$\begin{aligned} C(q, t) &= \begin{bmatrix} C^1(q, t) \\ C^2(q) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x_1 + s_1 \sin \phi_1 - x^Q(t) \\ y_1 - s_1 \cos \phi_1 - y^Q(t) \\ x_1 - (l_1 - s_1) \sin \phi_1 - x_2 - s_2 \sin \phi_2 \\ y_1 + (l_1 - s_1) \cos \phi_1 - y_2 + s_2 \cos \phi_2 \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{0} \in \mathbb{R}^4 \end{aligned} \quad (3)$$

6 個の一般化座標 q に対して 4 個の独立な拘束条件があるため、このシステムの自由度は 2 である。

式(3)の拘束条件を考慮した運動方程式は次式のように表せる。

$$M\ddot{q} + C_q^T \lambda = Q^e + Hu \quad (4)$$

ここで、 $M \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ は一般化質量行列、 $C_q = \partial C / \partial q \in \mathbb{R}^{4 \times 6}$ は拘束ヤコビ行列、 $\lambda \in \mathbb{R}^4$ は拘束反力を表すラグランジュ乗数ベクトル、 $Q^e \in \mathbb{R}^6$ は重力による一般化外力ベクトル、 $H \in \mathbb{R}^{6 \times 2}$ は制御入力変換行列、 $u = [u_1 \ u_2]^T \in \mathbb{R}^2$ であり、 u_1, u_2 はそれぞれ乗員が身体を制御するための腰部および首部まわりに作用させるトルクである。 M, C_q, Q^e, H を具体的に表すとそれぞれ以下のようになる。

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_2 \end{bmatrix} \\ C_q^T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ s_1 \cos \phi_1 & s_1 \sin \phi_1 & -(l_1 - s_1) \cos \phi_1 & -(l_1 - s_1) \sin \phi_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -s_2 \cos \phi_2 & -s_2 \sin \phi_2 \end{bmatrix} \\ Q^e &= \begin{bmatrix} 0 \\ -m_1 g \\ 0 \\ 0 \\ -m_2 g \\ 0 \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

式(3)を2回時間で微分することにより得られる加速度レベルの拘束条件式 $\ddot{C} = C_q \ddot{q} - \gamma = 0$ 、 $\gamma = -(C_q \dot{q})_q \dot{q} - 2C_{qt} \dot{q} - C_{tt}$ を式(4)の運動方程式に随伴することにより、次のような微分代数型運動方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} M & C_q^T \\ C_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q^e + Hu \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (5)$$

現在の状態 q, \dot{q} および制御トルク u が与えられると上式の係数行列および右辺ベクトルが計算でき、この線形方程式を解くことによって \ddot{q} が得られる。 \ddot{q} が求められると、適当な数値積分法を適用することで、少し未来の時刻の状態 q, \dot{q} を計算することができる。以上の計算を適切な時間間隔で繰り返すことにより、動力学シミュレーションを行うことができる。

3.2 制御モデル

本稿では、乗員が身体を制御するために腰部および首部まわりに作用させるトルク $u = [u_1 \ u_2]^T$ を計算するモ

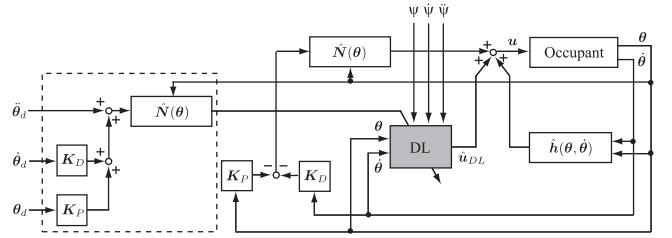


Fig. 5: Control scheme with DL

ルとして、非線形PD制御と深層学習を併用するモデルについて検討する。

制御系設計に適した最小次元運動方程式を導出するためには、一般化座標 q を独立座標 θ と従属座標 $\tilde{\theta}$ に分割して $q = [\theta \ \tilde{\theta}]$ のように表す。一般化速度 \dot{q} および一般化加速度 \ddot{q} は、独立座標の速度 $\dot{\theta}$ と加速度 $\ddot{\theta}$ 、および速度変換行列 B を用いてそれぞれ次式のように表せる。

$$\dot{q} = B\dot{\theta} + \kappa, \quad \ddot{q} = B\ddot{\theta} + \sigma \quad (6)$$

式(6)を式(5)の第1式に代入し、両辺に左から B の転置を乗じると次式のような最小次元運動方程式が得られる。

$$N(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) = u \quad (7)$$

ただし、 $B^T C_q^T = \mathbf{0}$ となることを用いた。また、 $N = (B^T H)^{-1} B^T M B$ 、 $h = (B^T H)^{-1} B^T (M\sigma - Q)$ と定義している。

ここでは、次のような二種類の入力からなる制御を行うことを考える。

$$u = u_{PD} + u_{DL} \quad (8)$$

$$u_{PD} = \hat{N}(-K_D \dot{\theta} - K_P \theta) + \hat{h} \quad (9)$$

$$u_{DL} = \hat{N}(\ddot{\theta}_d + K_D \dot{\theta}_d + K_P \theta_d) \quad (10)$$

ただし、 \hat{N}, \hat{h} はそれぞれ N, h の推定値、 $\theta_d(t)$ はモーションキャプチャによって計測したデータから計算した独立座標の軌道である。式(7)に式(8)～(10)を代入し、パラメータ同定誤差が小さく $\hat{N} \cong N, \hat{h} \cong h$ とみなせると仮定すると、誤差ベクトル $e(t) \equiv \theta(t) - \theta_d(t)$ に関して $\ddot{e}(t) + K_D \dot{e}(t) + K_P e(t) = \mathbf{0}$ なる関係が得られる。したがって、フィードバックゲイン行列 K_D, K_P を適切に選定することで $e(t)$ をゼロに収束させることができる。しかし、実際に乗員身体制御モデルを自動車の設計等に応用する際には $\theta_d(t)$ は利用することができないため、本研究では図5に示すような深層学習(Deep Learning: DL)によってこれを推定する制御系を提案する。すなわち、非線形PD制御 u_{PD} と u_{DL} を併用し、 u_{DL} の推定のみを深層学習で行うものである。深層学習とは、4層以上のニューラルネットワーク(Neural Network: NN)による機械学習手法である[5]。ここでは、図6に示す

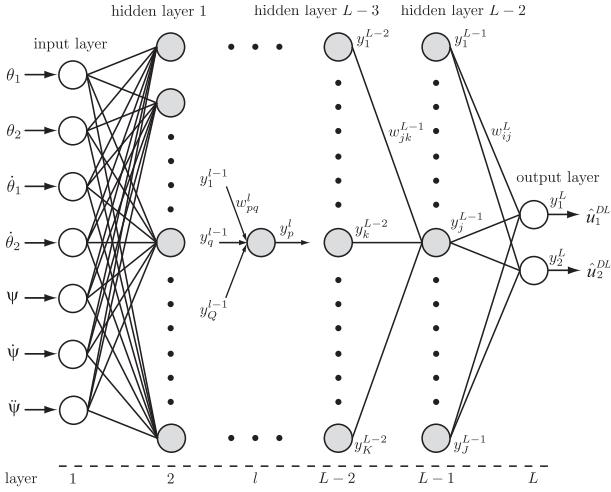


Fig. 6: Deep learning

ように深層学習への入力を角度 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2]^T$, 角速度 $\dot{\boldsymbol{\theta}} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2]^T$, およびモーション装置のロール軸角度 ψ , 角速度 $\dot{\psi}$, 角加速度 $\ddot{\psi}$ とし, 出力を $\mathbf{u}_{DL} = [u_1^{DL}, u_2^{DL}]^T$ の推定値 $\hat{\mathbf{u}}_{DL} = [\hat{u}_1^{DL}, \hat{u}_2^{DL}]^T$ とする. 損失関数は教師信号を $\mathbf{s} = [s_1, s_2]^T = \hat{N}(\ddot{\boldsymbol{\theta}}_d + \mathbf{K}_D \dot{\boldsymbol{\theta}}_d + \mathbf{K}_P \boldsymbol{\theta}_d)$ として次式のように定義する.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 (s_i - y_i^L)^2 \quad (11)$$

ここで, y_1^L, y_2^L は第 L 層の出力である. 本研究では, ニューラルネットワークの学習に誤差逆伝播法を利用し, 多層ニューラルネットワークの勾配消失問題に対処するためにスタックドオートエンコーダを用いた事前学習および AdaGrad による学習率の自動調整を行う. また, 過学習の問題を解決するために重み正則化を導入する.

4. 提案するモデルの妥当性の検証

第 2 章において実験的に計測した身体挙動と第 3 章において構築した乗員身体制御モデルによる予測結果を比較し, 提案モデルの妥当性を検証する. ここでは, 動力学モデルのパラメータを $l_1 = 0.2860\text{m}$, $l_2 = 0.2489\text{m}$, $s_1 = l_1/2\text{m}$, $s_2 = l_2/2\text{m}$, $m_1 = 20\text{kg}$, $m_2 = 10\text{kg}$, $I_1 = 0.1363\text{kgm}^2$, $I_2 = 0.0516\text{kgm}^2$ とし, 制御モデルにおける非線形 PD 制御のパラメータを $\mathbf{K}_P = \text{diag.}[50, 50]$, $\mathbf{K}_D = \text{diag.}[50, 50]$ に固定した. 図 7, 8 に検証結果の一例を示すように, 提案モデルにより乗員の身体挙動が予測できることを確認した. ニューラルネットワークの層数やニューロン数, 学習方法の違いによってモデルの精度がどのように変化するかについての比較も行った. 紙幅の制限のため, 詳細については講演当日に発表する.

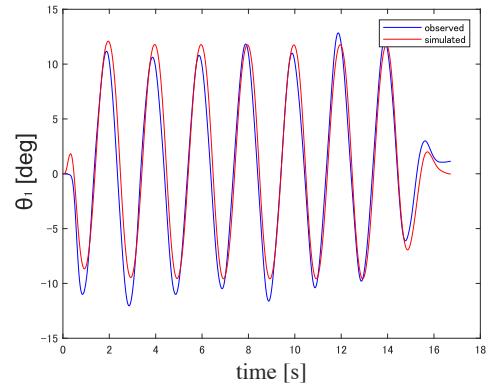


Fig. 7: θ_1 ($L = 6, n = 30, f = 0.5\text{Hz}$)

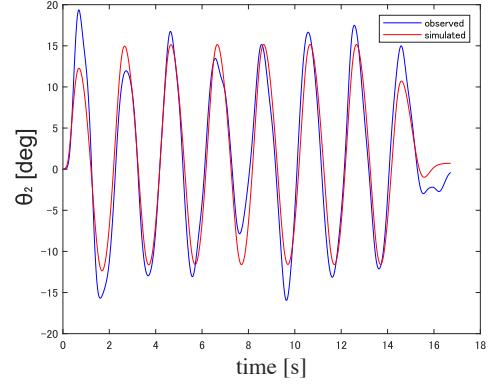


Fig. 8: θ_2 ($L = 6, n = 30, f = 0.5\text{Hz}$)

5. おわりに

本研究では, 自動車乗員の身体挙動を模擬できる簡単な力学モデルを提案した. 今後は, 時系列データの推定に有利な RNN や DQN を導入するなど, より高精度な予測ができるようモデルの改良を行っていく予定である.

参考文献

- [1] Qiu, Y. and Griffin, M.J., Transmission of fore-aft vibration to a car seat using field tests and laboratory simulation, Journal of Sound Vibration, Vol. 264, No. 1 (2003), pp.135-155.
- [2] Hayashi, Y., Hase, K., Takehara, S., Torigaki, T., and Hirao A., Quantitative biomechanical analysis of transient body behavior during lateral-directional motion of vehicle occupant, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (2015), pp.2133-2138.
- [3] Takehara, S., Takazawa, A., Unni, T., Takahashi, F., and Hase K., Development of a simplified human body dynamics model for motion control on a vehicle, Mechanical Engineering Journal, Vol.4, No.1 (2017), Paper No. 16-00455.
- [4] 岩村誠人, “マルチボディダイナミクス入門”, 森北出版 (2018).
- [5] 岡谷智之, 麻生英樹, 他, “深層学習”, 近代科学社 (2015).

台車と荷台の軌道最適化によるスタッカクレーンの残留振動抑制

福岡大学 ○福田謙太, 赤星雄太, 梁元航大, 岩村誠人

Residual vibration control of stacker crane by optimizing the trajectory of the cart and carriage

Kenta Fukuda, Yuta Akahoshi, Koudai Ryomoto and Makoto Iwamura, Fukuoka University

Abstract : The problem of suppressing residual vibration of stacker cranes has been studied for a long time, but many of methods proposed so far have restrictions on use, such as the need to adjust the operating time to an integral multiple of the natural period of the system. In this study, a detailed dynamic model of the stacker crane is derived based on the flexible multibody dynamics theory. Then, a new control method with less restrictions that suppresses residual vibration by utilizing the coupling of the translational motion of the cart and the carriage, and the elastic vibration of the mast.

1. 緒言

自動倉庫の荷役作業を行うスタッカクレーンは、図1および図2(a)に示すように走行レール上を往復する台車にマストが立設され、荷台が昇降する構造となっている。マストは高さが数メートルから数十メートルにもなり、その弾性変形が無視できないため、スタッカクレーンは柔軟構造物として取り扱う必要がある。スタッカクレーンの高速化・高精度化は生産性向上のために重要であるため、これまでにもそのモデル化や振動制御に関する研究が行われてきた。例えば、高橋ら[1]は、簡単な近似等価振動モデルに基づき、荷台とクレーンの上層部を非弾性衝突させて荷台のリフトアップのみによって台車停止時の残留振動を低減する方法を提案している。一方、浜松ら[2]は、走行台車の動作指令をマストの1次固有振動数に合わせ、ローパスフィルタに通して2次固有振動数を励起しないようにして振動抑制を図る手法を提案している。しかし、これらの研究では台車や荷台の並進運動とマストの弾性振動の連成については考慮していない。

本研究では、まずスタッカクレーンの運動と振動の連成を考慮した動力学モデルを導出する。その後、得られたモデルに基づいて台車と荷台の並進運動とマストの弾性振動の連成を利用した残留振動抑制手法を開発する。ここでは、Bスプラインと粒子群最適化法(Particle Swarm Optimization: PSO)を使用した手法を提案し、数値シミュレーションにより、提案手法の有用性を確認する。従来法では台車や荷台を固有周期の整数倍で動かす必要があるなど運用上の制約が多くあったが、提案手法ではそのような制約がなく、自由度の高い手法となっている。

2. スタッカクレーンの動力学モデル

実際のスタッカクレーンは図2(a)に示すようにフレーム構造になっていることが多いが、アスペクト比が大きい

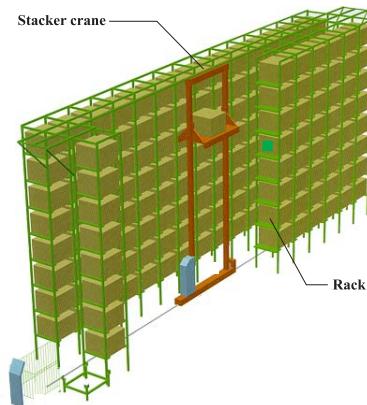


Fig. 1: Example of stacker crane (adapted from the website of Seibudenki Co.,Ltd.)

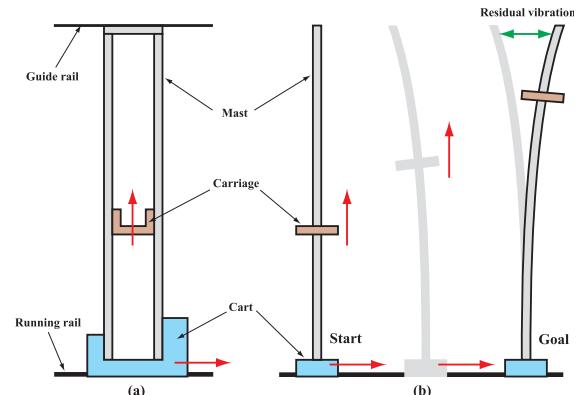


Fig. 2: Schematic drawing of stacker crane

ため一本のマストで表現することができる。また、通常マストの上部にガイドレールが設置されているが、マスト上端はガイドレールから水平方向の拘束を受けないため、自由端とみなすことが可能である。したがって、スタッカクレーンは一般に図2(b)のようにモデル化することができる。図3に座標系の定義を含むモデルの詳細を示す。ここ

では、台車 1 をボディ 1 (剛体)、マストをボディ 2 (柔軟体)、荷台をボディ 3(剛体) とし、それらの平面運動について考える。台車(ボディ1)と荷台(ボディ3)に対しては重心に、マスト(ボディ2)に対しては固定端に図 3 に示すようにボディ座標系 Σ_i を設定し、絶対座標系 Σ_0 の原点からみたボディ座標系 Σ_i の原点の位置ベクトルを $\mathbf{R}_i = [x_i, y_i]^T$ 、反時計回りに測った絶対座標系の x_0 軸とボディ座標系の \bar{x}_i 軸のなす角を ϕ_i 、 Σ_i から Σ_0 への 2 次元回転行列を \mathbf{A}_i と定義する。台車(ボディ1)と荷台(ボディ3)の一般化座標はそれぞれ $\mathbf{q}_1 = [x_1, y_1, \phi_1]^T, \mathbf{q}_3 = [x_3, y_3, \phi_3]^T$ 表せる。一方、マスト(ボディ2)の一般化座標は Σ_0 に対する Σ_2 の運動を表す $\mathbf{q}_2^r = [x_2, y_2, \phi_2]^T$ と一般化弾性座標 \mathbf{q}_2^e を合わせた $\mathbf{q}_2 = [\mathbf{q}_2^{rT}, \mathbf{q}_2^{eT}]^T$ となる。したがって、本モデルの全一般化座標は $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_1^T, \mathbf{q}_2^T, \mathbf{q}_3^T]^T$ である。

2.1 拘束条件式

2.1.1 マストと荷台間の直動ジョイントの定式化

マスト(ボディ2)に沿って荷台(ボディ3)が昇降する拘束条件の定式化を行う。 Σ_0 の原点からマスト(ボディ2)上の任意点 Q までの位置ベクトル \mathbf{r}_2^Q は、フローティングフレーム法 [3] の考え方を用いると次のように表せる。

$$\mathbf{r}_2^Q = \mathbf{R}_2 + \mathbf{A}_2 \bar{\mathbf{u}}_2^Q, \bar{\mathbf{u}}_2^Q = \bar{\mathbf{u}}_2^0 + \bar{\mathbf{u}}_2^e \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{u}}_2^0$ は変形前の点の位置を表すベクトル、 $\bar{\mathbf{u}}_2^e$ は、その点における変形を表すベクトルであり、オーバーラインはそれらが Σ_2 で成分表示されていることを意味している。フローティングフレーム法では、移動境界問題となる直動ジョイントの定式化が困難といわれているが [4]、本稿では図 3 に示すように時間とともに移動する拘束定義点 Q の位置を表す変数 s を導入し、これをダミー変数として一般化座標に追加することによって直動ジョイントを定式化する手法を提案する。マスト(ボディ2)を一つの 2 次元線形梁要素で記述する場合、変形前の拘束定義点の位置 $\bar{\mathbf{u}}_2^0$ および拘束定義点における変形 $\bar{\mathbf{u}}_2^e$ はダミー変数 s を用いてそれぞれ次式のように表せる。

$$\bar{\mathbf{u}}_2^0 = [s \ 0]^T \quad (2)$$

$$\bar{\mathbf{u}}_2^e = \mathbf{S}_2 \mathbf{q}_2^e \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{q}_2^e = [q_2^{e1}, q_2^{e2}, q_2^{e3}]^T$ は自由端の節点座標を表す一般化弾性座標であり、 $q_2^{e1}, q_2^{e2}, q_2^{e3}$ はそれぞれ縦変形、横変形、およびたわみ角を表す。また、 \mathbf{S}_2 は次のような時間に依存しない形状関数行列である。

$$\mathbf{S}_2 = \begin{bmatrix} (s/l_2) & 0 & 0 \\ 0 & 3(s/l_2)^2 - 2(s/l_2)^3 & l_2(s/l_2)^3 - (s/l_2)^2 \end{bmatrix}$$

ただし、 l_2 は変形前のマストの長さである。式 (2) および式 (3) を式 (1) に代入することにより、 Σ_0 の原点からみた

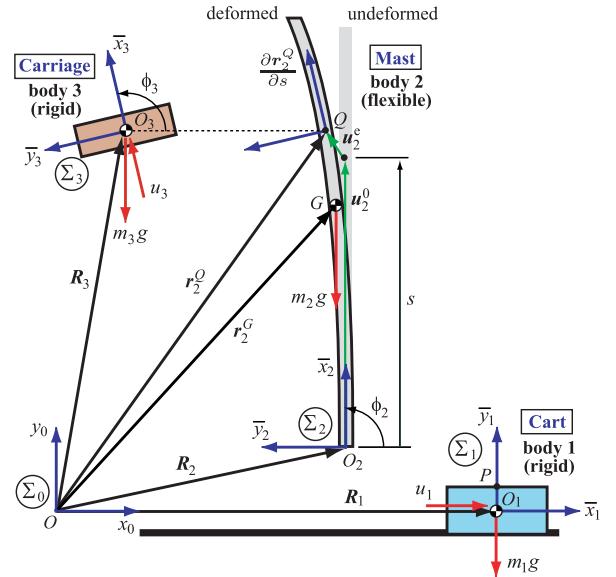


Fig. 3: Flexible multibody model of stacker crane

拘束定義点 Q の位置 \mathbf{r}_2^Q が計算できる。また、拘束定義点 Q における梁の軸線に沿った接線ベクトルは次のように計算することができる。

$$\frac{\partial \mathbf{r}_2^Q}{\partial s} = \mathbf{A}_2 \left(\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}_2^0}{\partial s} + \frac{\partial \mathbf{S}_2}{\partial s} \mathbf{q}_2^e \right) \quad (4)$$

このとき、荷台(ボディ3)がマスト(ボディ2)に沿って昇降する拘束条件は次式のように記述できる。

$$\mathbf{C}^3(\mathbf{q}, s) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_3 - \mathbf{r}_2^Q \\ \mathbf{j}_3^T \frac{\partial \mathbf{r}_2^Q}{\partial s} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \in \mathfrak{R}^3 \quad (5)$$

ここで、 \mathbf{j}_3 は Σ_3 の \bar{y}_3 軸方向の単位ベクトルを Σ_0 で成分表示したものである。上式の第 1 式は、荷台(ボディ3)の原点 O_3 がマスト(ボディ2)上の拘束定義点 Q に一致する条件、第 2 式は荷台(ボディ3)の姿勢が拘束定義点 Q における梁の軸線の接線方向に一致する条件である。

2.1.2 全拘束条件式

図 3 に示すスタッカクレーンのモデルには、その他に、台車(ボディ1)が絶対座標系 Σ_0 の x_0 軸方向に敷かれたレール上を走行する条件 $\mathbf{C}^1(\mathbf{q}) = \mathbf{0} \in \mathfrak{R}^2$ 、およびマスト(ボディ2)の一端 O_2 が台車(ボディ1)上の点 P に剛結される条件 $\mathbf{C}^2(\mathbf{q}) = \mathbf{0} \in \mathfrak{R}^3$ が存在する。したがって、本モデルの全拘束条件式は次のようにまとめられる。

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}) = [(\mathbf{C}^1(\mathbf{q}))^T \ (\mathbf{C}^2(\mathbf{q}))^T \ (\mathbf{C}^3(\mathbf{q}, s))^T]^T = \mathbf{0} \in \mathfrak{R}^8 \quad (6)$$

一般化座標 $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_1^T, \mathbf{q}_2^T, \mathbf{q}_3^T] = [x_1, y_1, \phi_1, x_2, y_2, \phi_2, q_2^{e1}, q_2^{e2}, q_2^{e3}, x_3, y_3, \phi_3]^T \in \mathfrak{R}^{12}$ にダミー変数 s を加えた全 13 変数に対して、式 (6) の 8 個の拘束条件が課されるので、このシステムの自由度 5 である。

2.2 運動方程式

2.2.1 マスト (ボディ2) の運動方程式

柔軟体であるマスト (ボディ2) の運動方程式をフローティングフレーム法に基づいて導出すると次式を得る。

$$\underbrace{\begin{bmatrix} M_2^{RR} & M_2^{R\phi} & M_2^{Re} \\ M_2^{\phi\phi} & M_2^{\phi e} & \\ Sym. & M_2^{ee} & \end{bmatrix}}_{M_2} \underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{R}_2 \\ \ddot{\phi}_2 \\ \ddot{q}_2^e \end{bmatrix}}_{\ddot{q}_2} + \underbrace{\begin{bmatrix} C_{R_2}^T \\ C_{\phi_2}^T \\ C_{q_2^e}^T \end{bmatrix}}_{C_{q_2}^T \lambda} \lambda = \underbrace{\begin{bmatrix} (\mathbf{Q}_2^v)^R \\ (\mathbf{Q}_2^v)^\phi \\ (\mathbf{Q}_2^v)^e \end{bmatrix}}_{\mathbf{Q}_2^v} + \underbrace{\begin{bmatrix} (\mathbf{Q}_2^g)^R \\ (\mathbf{Q}_2^g)^\phi \\ (\mathbf{Q}_2^g)^e \end{bmatrix}}_{\mathbf{Q}_2^g} + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 0 \\ -K\mathbf{q}_2^e \end{bmatrix}}_{\mathbf{Q}_2^k} \quad (7)$$

ここで、 M_2 は一般化質量行列、 \mathbf{Q}_2^g は重力による一般化力、 \mathbf{Q}_2^k は一般化弾性力、 $-C_{q_2}^T \lambda$ は一般化拘束力、 $C_{q_2} = \partial C / \partial q_2$ はヤコビ行列である。式(7)はマストの運動と振動の連成を厳密に考慮した運動方程式となっている。

2.2.2 全運動方程式

全ボディの運動方程式およびダミー変数 s に関する方程式をまとめると以下のようになる。

$$M_1 \ddot{q}_1 + C_{q_1}^T \lambda = \mathbf{Q}_1^g + \mathbf{D}_1 u_1 \quad (8)$$

$$M_2 \ddot{q}_2 + C_{q_2}^T \lambda = \mathbf{Q}_2^v + \mathbf{Q}_2^g + \mathbf{Q}_2^k \quad (9)$$

$$M_3 \ddot{q}_3 + C_{q_3}^T \lambda = \mathbf{Q}_3^g + \mathbf{D}_3 u_3 \quad (10)$$

$$C_s^T \lambda = 0 \quad (11)$$

式(9)は式(7)に示したマスト (ボディ2) の運動方程式である。式(8)および式(10)はそれぞれ台車 (ボディ1) と荷台 (ボディ3) の運動方程式であり、 u_i は駆動力、 \mathbf{D}_i は変換行列である。ダミー変数には対応する質量および外力が存在しないため、式(11)の関係が導出されていることに注意する。式(8)から式(11)の運動方程式に式(6)を2回時間で微分することにより得られる加速度方程式 $\ddot{\mathbf{C}} = \mathbf{C}_q \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_s \ddot{s} - \boldsymbol{\gamma} = \mathbf{C}_{q_1} \ddot{q}_1 + \mathbf{C}_{q_2} \ddot{q}_2 + \mathbf{C}_{q_3} \ddot{q}_3 + \mathbf{C}_s \ddot{s} - \boldsymbol{\gamma} = 0$ を随伴することにより、次のような微分代数型運動方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 & C_{q_1}^T \\ 0 & M_2 & 0 & 0 & C_{q_2}^T \\ 0 & 0 & M_3 & 0 & C_{q_3}^T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_s^T \\ C_{q_1} & C_{q_2} & C_{q_3} & C_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \\ \ddot{s} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1^g + \mathbf{D}_1 u_1 \\ \mathbf{Q}_2^v + \mathbf{Q}_2^g + \mathbf{Q}_2^k \\ \mathbf{Q}_3^g + \mathbf{D}_3 u_3 \\ 0 \\ \boldsymbol{\gamma} \end{bmatrix} \quad (12)$$

この線形方程式を解いて、 $\ddot{\mathbf{q}} = [\ddot{q}_1^T, \ddot{q}_2^T, \ddot{q}_3^T]^T$ および \ddot{s} を求め、数値積分を行って $\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}$ および \dot{s}, s を計算する。以上の

計算を適切な時間間隔で繰り返すことにより、スタッカクレーンの動力学シミュレーションが実行できる。

2.3 動力学シミュレーション

2.3.1 制御系設計

前章で導出した動力学モデルを用いてシミュレーションを行うためには、台車および荷台の駆動力 u_1, u_3 を与える必要がある。ここでは次のようなハイゲイン PD フィードバック制御によって決定することにする。

$$u_1 = -K_{P1}(x_1 - \theta_1) - K_{D1}(\dot{x}_1 - \dot{\theta}_1) \quad (13)$$

$$u_3 = -K_{P3}(s - \theta_3) - K_{D3}(\dot{s} - \dot{\theta}_3) \quad (14)$$

ここで、 $\theta_1(t)$ および $\theta_3(t)$ はそれぞれ台車の水平方向変位 $x_1(t)$ および荷台の位置 $s(t)$ の目標軌道である。また、 K_{Pi} および K_{Di} はそれぞれ位置と速度のフィードバックゲインであり、十分大きな値に設定する。全動作時間 $0 \leq t \leq t_f$ にわたって目標軌道 $\theta_1(t), \theta_3(t)$ が与えられると式(13)および式(14)により各時刻の u_1, u_3 が計算でき、それらを式(12)に代入することで動力学シミュレーションが実行できる。

2.3.2 目標軌道生成

スタッカクレーンの動作軌道は速度の台形側によって生成される場合が多いが、ここでは加速度までの連続性を考慮して目標軌道 $\theta_i(t)$ を5次のユニフォームBスプラインを用いて生成することにする。全動作時間 $0 \leq t \leq t_f$ を等間隔 Δt を持つ p 個の区間に分割し、その区分点を $t_0 (= 0), t_1, \dots, t_k, \dots, t_p (= t_f)$ とする。時刻 $t = t_k$ における $\theta_i(t)$ の仮想目標値を $\hat{\theta}_i^k$ とし、これをBスプラインの制御点と考える。このとき、第 k 番目の区間 $t_k \leq t \leq t_{k+1}$ における $\theta_i(t)$ は次式のように表すことができる。

$$\theta_i(t(\xi)) = \sum_{l=0}^5 N_l(\xi) \hat{\theta}_i^{k-2+l} \quad (15)$$

$$t(\xi) = t_k + \xi \Delta t \quad (0 \leq \xi \leq 1) \quad (16)$$

ここで、 $N_l(\xi)$ はBスプライン基底関数である。 $p+5$ 個の制御点 $\hat{\theta}_i^k (k = -2, \dots, p+3)$ を指定すれば、式(15)により目標軌道 $\theta_i(t)$ を生成することができ、それを時間微分することにより、 $\dot{\theta}_i(t), \ddot{\theta}_i(t)$ も得られる。初期時刻 $t = 0$ および終端時間 $t = t_f$ において位置、速度、加速度が指定されるとき、 $\hat{\theta}_i^{-2}, \hat{\theta}_i^{-1}, \hat{\theta}_i^0$ および $\hat{\theta}_i^p, \hat{\theta}_i^{p+1}, \hat{\theta}_i^{p+2}$ はこれらの境界条件を満たすために一意に決定される。そのため、自由に設定できる制御点は $\hat{\theta}_i^1, \dots, \hat{\theta}_i^{p-1}$ である。以下では、台車および荷台の目標軌道の独立な制御点をまとめて $\Theta \equiv [\hat{\theta}_1^1, \dots, \hat{\theta}_1^{p-1}, \hat{\theta}_3^1, \dots, \hat{\theta}_3^{p-1}] \in \mathfrak{N}^{2(p-1)}$ と表す。

3. 軌道最適化手法の検討

3.1 最適化問題の定式化

残留振動は動作終了時刻 $t = t_f$ におけるマスト（ボディ 2）の弾性ポテンシャルエネルギーを可能な限り小さくすることにより抑制することができる。ここでは評価関数を次のように設定することにする。

$$J = \frac{1}{2} \mathbf{q}_2^{eT}(t_f) \mathbf{W}_P \mathbf{q}_2^e(t_f) + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_2^{eT}(t_f) \mathbf{W}_D \dot{\mathbf{q}}_2^e(t_f) + \frac{1}{2} \int_0^{t_f} (\mathbf{q}_2^{eT} \mathbf{W}_{P'} \mathbf{q}_2^e + \dot{\mathbf{q}}_2^{eT} \mathbf{W}_{D'} \dot{\mathbf{q}}_2^e) dt \quad (17)$$

ただし、 $\mathbf{W}_P, \mathbf{W}_D, \mathbf{W}_{P'}, \mathbf{W}_{D'}$ は正定対称な重み行列である。1組の制御点 $\Theta \equiv [\hat{\theta}_1^1, \dots, \hat{\theta}_1^{p-1}, \hat{\theta}_3^1, \dots, \hat{\theta}_3^{p-1}]$ を指定すれば式 (15) により、台車と荷台の目標軌道 $\theta_1(t)$ および $\theta_3(t)$ を生成することができる。そして、式 (13) および式 (14) のハイゲイン PD フィードバック制御則により、台車と荷台の駆動力 u_1 および u_3 を決定し、式 (12) の微分代数方程式を解くことで一般化座標 $\mathbf{q}(t)$ および一般化速度 $\dot{\mathbf{q}}(t)$ が得られる。得られた $\mathbf{q}_2^e(t)$ および $\dot{\mathbf{q}}_2^e(t)$ を式 (17) に代入することで J が計算できるので、評価関数は Θ の関数として $J = J(\Theta)$ と表せる。すなわち、軌道最適化の問題は B スプラインの制御点 Θ をパラメータとするパラメータ最適化問題に帰着することができる。

3.2 粒子群最適化法

ここでは、式 (17) の評価関数を最小にする Θ を求めるための最適化手法として粒子群最適化法を用いる。粒子群最適化法 (Particle Swarm Optimization: PSO) とは、探索の対象となる評価関数が与えられたとき、解空間内に散りばめられた複数の粒子が互いに情報を共有しながら動き回り、最適解の探索を行う最適化手法である。ある時間ステップ τ における各粒子は、位置を次式に従って更新することによって移動する。

$$\mathbf{x}_l(\tau + 1) = \mathbf{x}_l(\tau) + \mathbf{v}_l(\tau + 1) \quad (18)$$

ここで、 \mathbf{x}_l および \mathbf{v}_l はある粒子 l の位置と速度のベクトルである。また、速度の更新式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_l(\tau + 1) &= w\mathbf{v}_l(\tau) + c_1 r_1 (\mathbf{P}_l(\tau) - \mathbf{x}_l(\tau)) \\ &\quad + c_2 r_2 (\mathbf{g}(\tau) - \mathbf{x}_l(\tau)) \end{aligned} \quad (19)$$

ここで、 r_1, r_2 は 0 から 1 までの一様乱数、 \mathbf{P}_l は粒子 l がこれまでに発見した最良な位置 (パーソナルベスト)、 \mathbf{g} は全粒子がこれまでに発見した最良な位置 (グローバルベスト)、 w, c_1, c_2 は重み定数である。パラメータ Θ を最適化する手法として粒子群最適化法を用いる場合、 $\mathbf{x}_l(\tau) = \Theta_l(\tau)$ となる。

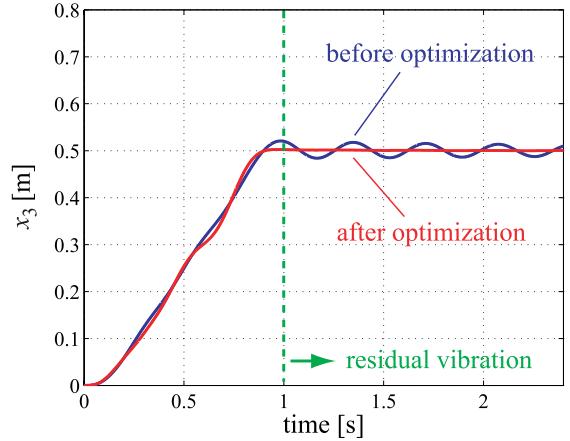


Fig. 4: Trajectory of x_3

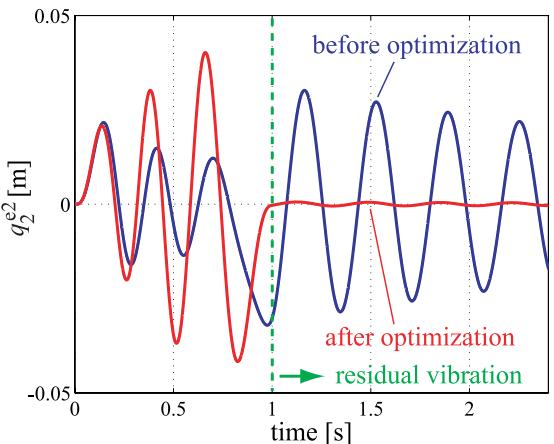


Fig. 5: Trajectory of q_2^{e2}

4. 適用例

提案手法の有効性を示すために数値シミュレーションを行った。図 4 および図 5 に一例を示すように大きな残留振動抑制効果が得られることを確認した。紙幅の制限のため、詳細については講演当日に発表する。(結言省略)

参考文献

- [1] 高橋将徳, 木下正作, 堤一起, 川崎義則, 岩井善太, “非弹性衝突による振動抑制とそのスタッカクレーンの残留振動抑制問題への応用”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.71, No.704 (2005), pp. 89-94.
- [2] 浜松弘, 佐藤匠, “柔軟構造物の振動抑制のための速度指令改善”, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会 D&D2013 講演会論文集, (2013).
- [3] Shabana, A.A., Dynamics of Multibody Systems, 2nd Edition, Cambridge University Press(1998).
- [4] Gestmayr, J., Sugiyama, H., and Mikkola, A., “Review on the Absolute Nodal Coordinate Formulation for Large Deformation Analysis of Multibody Systems”, Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, Vol. 8 (2013).

アームで結合された2台のドローンのマルチボディダイナミクス解析

福岡大学 ○財津大翔, 新原玄人, 篠原大和, 岩村誠人

Multibody dynamics analysis of two drones physically connected by an arm

Hiroto Zaitsu, Gento Niihara, Yamato Shinohara and Makoto Iwamura, Fukuoka University

Abstract : In recent years, drones have begun to be introduced in various fields, but their penetration rate is still low in Japan due to their small payload, risk of breakdowns and accidents due to crashes, and so on. In this study, we propose a method to increase the payload and reduce the risk of failure by physically connecting and coordinating multiple drones. In this paper, we report the results of multibody dynamics analysis, especially when two drones are connected by one arm.

1. 緒言

近年、小型無人航空機、とくにマルチロータヘリコプタ(以下、ドローンと呼ぶ)の利活用が急速に進んでいる。ドローンは、今後、少子高齢社会における慢性的な労働力不足、人件費高騰による省力化、無人化の促進と低コスト化、サービス向上などに貢献すると考えられており、宅配、測量、インフラ点検、災害調査、農薬散布他、様々な分野での応用が期待されている。しかし、故障や事故によって墜落し地上の人間や工作物に被害を与える危険性がある、輸送を目的とした場合可搬重量が不十分である、など様々な課題が残されており、現在それらの問題解決に向けて活発に研究が行われている[1, 2, 3]。

本研究では複数台のドローンを物理的に結合し、協調して運用する方法について検討する。図1(a)に示すように複数台のドローンをアームで結合することにより、何らかのアクシデントで飛行機能が低下した機体が出現しても、他の正常機体が飛行を補助することで落下事故を防止できる可能性がある。また、図1(b)に示すようにアームで結

合された複数台のドローンが協力して作業を行うことにより、重い荷物を運ぶこともできるようになると考えられる。このような複数台のドローンが物理的に結合された複雑なシステムの設計、開発、評価を効率的に行うためには、高精度な動力学シミュレータが不可欠である。そこで、本稿では初段階として、図2に示すようなクワッドロータのドローンを想定し、図1のように2台のドローンを剛体アームを用いて球関節で結合したシステムについて動力学モデルの構築を行う。まず、単体のドローンの動力学モデルについて説明した後、マルチボディダイナミクス[4]を用いて2台のドローンが協調して飛行する場合の非線形動力学方程式を定式化する。最後に数値シミュレーションによって提案モデルの妥当性を確認する。

2. 単体のドローンの動力学モデル

本章では、図2のような4つのモータ・プロペラを有するドローンの動力学モデルについて述べる。簡単のために、機体フレームおよびプロペラは対称であり、各パーツは剛体と見なせると仮定する。

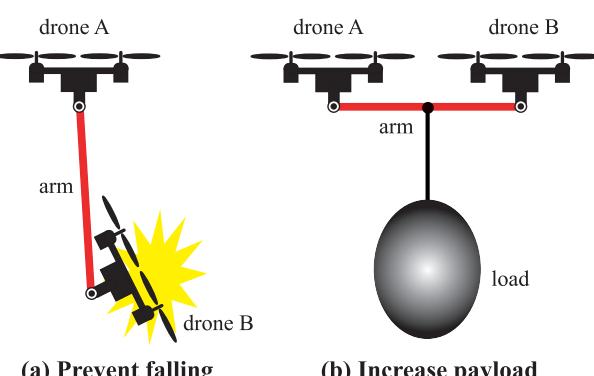


Fig. 1 Coordinated control of multiple drones

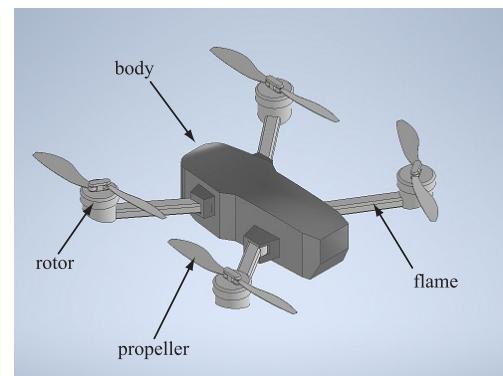


Fig. 2 Schematic drawing of the quadrotor drone

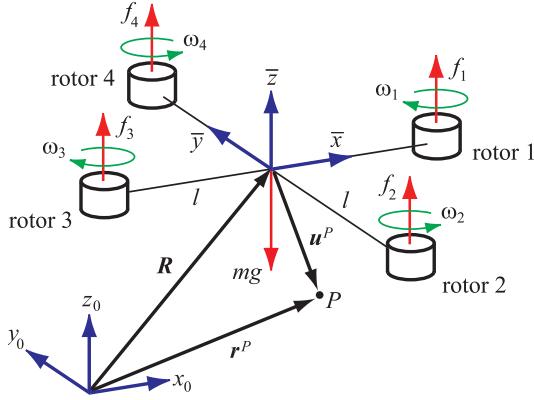


Fig. 3 Structure of drone and coordinate systems

2.1 運動学

図3に示すようにボディ座標系 $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ の原点をドローンの重心に設置し、各軸を機体の慣性主軸に一致させて定義する。絶対座標系 $x_0y_0z_0$ の原点からボディ座標系 $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ の原点への位置ベクトルを $\mathbf{R} = [x, y, z]^T$ 、ロール、ピッチ、ヨーで表した絶対座標系 $x_0y_0z_0$ に対するボディ座標系 $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ の姿勢角を $\Theta = [\phi, \theta, \psi]^T$ とする。このとき、ボディ座標系 $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ から絶対座標系 $x_0y_0z_0$ への座標変換行列は次式のようになる。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\sin\phi - \sin\psi\cos\theta \\ \sin\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\theta\sin\phi + \cos\psi\cos\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi \\ \cos\psi\sin\theta\cos\phi - \sin\psi\sin\theta & \\ \sin\psi\sin\theta\cos\phi - \cos\psi\sin\theta & \\ \cos\theta\cos\phi & \end{bmatrix} \quad (1)$$

また、ボディ座標系 $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ の原点から機体上の任意点 P までの位置ベクトルを \mathbf{u}^P とすると、絶対座標系 $x_0y_0z_0$ の原点からみた点 P の位置 \mathbf{r}^P は次式のように表せる。

$$\mathbf{r}^P = \mathbf{R} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{u}}^P \quad (2)$$

ただし、 $\bar{\mathbf{u}}^P$ は \mathbf{u}^P をボディ座標系 $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ で成分表示したベクトルである。

2.2 運動方程式

2.2.1 重心の並進運動

ニュートンの運動の第二法則より、ドローンの重心の並進運動の運動方程式は次式のように表せる。

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_x^G + F_x^P \\ m\ddot{y} = F_y^G + F_y^P \\ m\ddot{z} = F_z^G + F_z^P \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 m はドローンの質量、 $\mathbf{F}^G = [F_x^G, F_y^G, F_z^G]^T$ は重力、 $\mathbf{F}^P = [F_x^P, F_y^P, F_z^P]^T$ はプロペラによる推力である。

重力 mg は重心に対して絶対座標系の z_0 軸の負の向きに常に作用するため、次式のように表せる。

$$\mathbf{F}^G = [0, 0, -mg]^T \quad (4)$$

一方、ロータ*i*の回転によるプロペラの推力 f_i は回転数 ω_i の2乗に比例すると仮定でき、推力係数を**b**とすると $f_i = b\omega_i^2$ と表せる。よって、4つのロータの回転による推力の合力の大きさ U_1 は次のように書ける。

$$U_1 = b(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \quad (5)$$

これより、推力ベクトルはボディ座標系 $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ で $\bar{\mathbf{F}}^P = [0, 0, U_1]^T$ と表すことでき、これを絶対座標系 $x_0y_0z_0$ で成分表示すると次式のようになる。

$$\mathbf{F}^P = \mathbf{A}\bar{\mathbf{F}}^P = \begin{bmatrix} (\cos\psi\sin\theta\cos\phi - \sin\psi\sin\theta)U_1 \\ (\sin\psi\sin\theta\cos\phi - \cos\psi\sin\theta)U_1 \\ (\cos\theta\cos\phi)U_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(4)および式(6)を式(3)に代入することにより、並進運動の運動方程式は以下のようになる。

$$\begin{cases} m\ddot{x} = (\cos\psi\sin\theta\cos\phi - \sin\psi\sin\theta)U_1 \\ m\ddot{y} = (\sin\psi\sin\theta\cos\phi - \cos\psi\sin\theta)U_1 \\ m\ddot{z} = -mg + (\cos\theta\cos\phi)U_1 \end{cases} \quad (7)$$

2.2.2 重心まわりの回転運動

オイラーの運動方程式より、ドローンの重心まわりの回転運動の運動方程式は次式のように表せる。

$$\begin{cases} I_x\ddot{\phi} - (I_y - I_z)\dot{\theta}\dot{\psi} = N_x^G + N_x^P \\ I_y\ddot{\theta} - (I_z - I_x)\dot{\phi}\dot{\psi} = N_y^G + N_y^P \\ I_z\ddot{\psi} - (I_x - I_y)\dot{\phi}\dot{\theta} = N_z^G + N_z^P \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 I_x, I_y, I_z はそれぞれドローンの $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 軸まわりの慣性モーメント、 $\mathbf{N}^G = [N_x^G, N_y^G, N_z^G]^T$ はプロペラの回転に伴うジャイロ効果によるトルク、 $\mathbf{N}^P = [N_x^P, N_y^P, N_z^P]^T$ はプロペラの回転による推力および反トルクに起因する各軸まわりのトルクである。

4つのプロペラの機体重心に関する慣性テンソルは $\mathbf{J} \cong \text{diag}[0, 0, J_r]$ と近似でき、角速度ベクトルは $\boldsymbol{\omega} = [\dot{\phi}, \dot{\theta}, \Omega]^T$ と表せる。ここで、

$$\Omega = \omega_2 + \omega_4 - \omega_1 - \omega_3 \quad (9)$$

は4つのプロペラの合計回転数である。通常 Ω の時間変化率は小さいため $\dot{\Omega} \cong 0$ と仮定すると、オイラーの運動方程式より次式を得る。

$$\mathbf{N}^G = [J_r\dot{\theta}\Omega, -J_r\Omega\dot{\phi}, 0]^T \quad (10)$$

一方、ロータ i が回転するとその反作用でプロペラの回転方向とは逆向きに反トルク τ_i が発生する。このトルクも回転数 ω_i の 2 乗に比例するため、抗力係数を d とすると $\tau_i = d\omega_i^2$ と表せる。このとき、

$$U_2 = b(\omega_4^2 - \omega_2^2) \quad (11)$$

$$U_3 = b(\omega_3^2 - \omega_1^2) \quad (12)$$

$$U_4 = d(\omega_2^2 + \omega_4^2 - \omega_1^2 - \omega_3^2) \quad (13)$$

と定義すると、プロペラの回転により各軸まわりに発生するトルクは次式のように表せる。

$$\mathbf{N}^P = [U_2 l, U_3 l, -U_4]^T \quad (14)$$

ただし、 l は図 3 に示すようにプロペラの回転中心から機体重心までの距離である。

式 (10) および式 (14) を式 (8) に代入することにより、回転運動の運動方程式は以下のようになる。

$$\begin{cases} I_x \ddot{\phi} = (I_y - I_z) \dot{\theta} \dot{\psi} + J_r \dot{\theta} \Omega + U_2 l \\ I_y \ddot{\theta} = (I_z - I_x) \dot{\psi} \dot{\phi} - J_r \Omega \dot{\phi} + U_3 l \\ I_z \ddot{\psi} = (I_x - I_y) \dot{\phi} \dot{\theta} - U_4 l \end{cases} \quad (15)$$

2.3 動力学シミュレーション

一般化座標を $\mathbf{q} = [\mathbf{R}^T, \Theta^T]^T = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ と定義し、重心の並進運動の運動方程式 (7) と重心まわりの回転運動の運動方程式 (15) をまとめると次のように表せる。

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{Q} \quad (16)$$

ここで、 \mathbf{M} は一般化質量行列、 \mathbf{Q} は一般化力であり、それぞれ次式のように定義される。

$$\mathbf{M} = \text{diag}[m, m, m, I_x, I_y, I_z] \quad (17)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} (\cos \psi \sin \theta \cos \phi - \sin \psi \sin \phi) U_1 \\ (\sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi) U_1 \\ -mg + (\cos \theta \cos \phi) U_1 \\ (I_y - I_z) \dot{\theta} \dot{\psi} + J_r \dot{\theta} \Omega + U_2 l \\ (I_z - I_x) \dot{\psi} \dot{\phi} - J_r \Omega \dot{\phi} + U_3 l \\ (I_x - I_y) \dot{\phi} \dot{\theta} - U_4 \end{bmatrix} \quad (18)$$

動力学シミュレーションを行うためには、式 (18) に含まれる $U_i(i = 1, \dots, 4)$ を決定する必要がある。ここでは、次の制御則により、 z 方向の位置と 3 つの姿勢角 (ϕ, θ, ψ) を制御することにする。

$$\begin{cases} U_1 = m(g + \hat{U}_1) / (\cos \theta \cos \phi) \\ U_2 = -I_x(\phi - \phi_d)/l - k_1 \dot{\phi} \\ U_3 = -I_y(\theta - \theta_d)/l - k_2 \dot{\theta} \\ U_4 = -I_z(\psi - \psi_d)/l - k_3 \dot{\psi} \end{cases} \quad (19)$$

ただし、 \hat{U}_1 は

$$\hat{U}_1 = -k_4(z - z_d) - k_5 \dot{z} \quad (20)$$

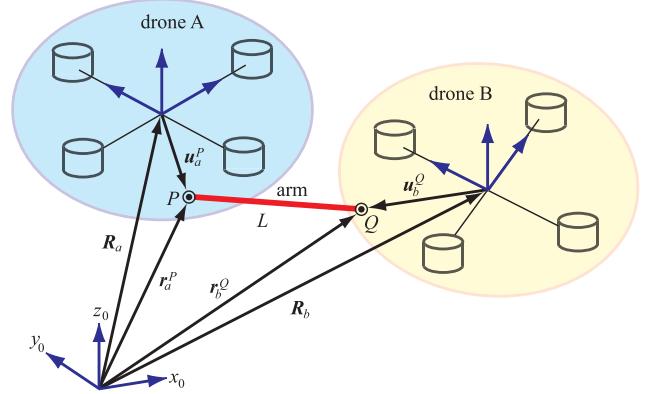


Fig. 4 Multibody dynamics model of two drones

である。また、 $k_1 \sim k_5$ はフィードバックゲイン、 z_d は目標高度、 $(\phi_d, \theta_d, \psi_d)$ は目標角度である。

式 (5) および式 (11)～(13) をまとめると次式を得る。

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b & b & b & b \\ 0 & -b & 0 & b \\ -b & 0 & b & 0 \\ -d & d & -d & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

上式より ω_i ($i = 1, \dots, 4$) は次のように計算できる。

$$\begin{cases} \omega_1 = \sqrt{(U_1 - 2U_3 - U_4)l/(4b)} \\ \omega_2 = \sqrt{(U_1 - 2U_2 + U_4)l/(4b)} \\ \omega_3 = \sqrt{(U_1 + 2U_3 - U_4)l/(4b)} \\ \omega_4 = \sqrt{(U_1 + 2U_2 + U_4)l/(4b)} \end{cases} \quad (22)$$

ただし、モータの回転数は次のように制限される。

$$0 \leq \omega_i \leq \omega_{i \max} \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (23)$$

式 (19) の制御則により得られた $U_i(i = 1, \dots, 4)$ を式 (22) に代入して $\omega_i(i = 1, \dots, 4)$ を求め、式 (23) の制約をチェックする。範囲を超えた場合はその下限値または上限値で飽和させる。修正した $\omega_i(i = 1, \dots, 4)$ を式 (21) に代入して $U_i(i = 1, \dots, 4)$ を再計算し、それを式 (18) に代入して式 (16) を数値積分することにより、モータの力学的限界を考慮したシミュレーションが可能となる。

3. アームで結合された 2 台のドローンの解析

本章では、図 4 に示すように 2 台のドローンがアームを用いて球関節で結合された場合の動力学モデルを導出する。ドローン A, B の諸量にそれぞれ添字 a, b を付して区別することにする。アームによる拘束がなく自由に飛行できる場合、式 (16) より運動方程式は次式のようになる。

$$\begin{cases} M_a \ddot{q}_a = Q_a \\ M_b \ddot{q}_b = Q_b \end{cases} \quad (24)$$

以下、全一般化座標を改めて $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_a^T, \mathbf{q}_b^T]^T$ と定義する。

図 4 に示すようにドローン A 上の点 P とドローン B 上の点 Q を長さ L の剛体アームで球関節によって結合する。絶対座標系からみた点 P および点 Q の位置は式 (2) より、それぞれ次式のように計算できる。

$$\begin{cases} \mathbf{r}_a^P = \mathbf{R}_a + \mathbf{A}_a \bar{\mathbf{u}}_a^P \\ \mathbf{r}_b^Q = \mathbf{R}_b + \mathbf{A}_b \bar{\mathbf{u}}_b^Q \end{cases} \quad (25)$$

点 P と点 Q の間の距離は常に L になる必要があるため、次の拘束条件が成り立つ必要がある。

$$C(\mathbf{q}_a, \mathbf{q}_b) = (\mathbf{r}_a^P - \mathbf{r}_b^Q)^T (\mathbf{r}_a^P - \mathbf{r}_b^Q) - L^2 = 0 \quad (26)$$

式 (26) の拘束条件を満たすために必要な拘束力を考慮すると、式 (24) の運動方程式は次式のように書き直せる。

$$\begin{cases} M_a \ddot{\mathbf{q}}_a + C_{\mathbf{q}_a}^T \lambda = \mathbf{Q}_a \\ M_b \ddot{\mathbf{q}}_b + C_{\mathbf{q}_b}^T \lambda = \mathbf{Q}_b \end{cases} \quad (27)$$

ここで、 λ はラグランジュの未定乗数、 $C_{\mathbf{q}_a} = \partial C / \partial \mathbf{q}_a$ 、 $C_{\mathbf{q}_b} = \partial C / \partial \mathbf{q}_b$ は拘束ヤコビ行列である。式 (26) を時間で 2 回微分することにより、次のような加速度レベルの拘束条件が得られる。

$$\ddot{\mathbf{C}} = C_{\mathbf{q}_a} \ddot{\mathbf{q}}_a + C_{\mathbf{q}_b} \ddot{\mathbf{q}}_b - \gamma = 0 \quad (28)$$

ただし、 $\gamma = -(C_{\mathbf{q}} \dot{\mathbf{q}})_{\mathbf{q}} \dot{\mathbf{q}}$ である。式 (28) を式 (27) に随伴することにより、次のような微分代数型運動方程式

$$\begin{bmatrix} M_a & \mathbf{0} & C_{\mathbf{q}_a}^T \\ \mathbf{0} & M_b & C_{\mathbf{q}_b}^T \\ C_{\mathbf{q}_a} & C_{\mathbf{q}_b} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_a \\ \ddot{\mathbf{q}}_b \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_a \\ \mathbf{Q}_b \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (29)$$

が得られる。この線形方程式を解いて $\ddot{\mathbf{q}} = [\ddot{\mathbf{q}}_a^T, \ddot{\mathbf{q}}_b^T]^T$ を求め、数値積分を行って $\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}$ を計算する。以上の計算を適切な時間間隔で繰り返すことによって、アームで結合された 2 台のドローンの動力学シミュレーションを行うことができる。ただし、式 (29) では本来の位置レベルの拘束条件式 (26) ではなく加速度レベルの拘束条件式 (28) を用いているため、式 (26) を厳密に満たす保証はない。そこで、 $|C|$ を十分に小さく保つために右辺の γ を $\hat{\gamma} = \gamma - 2\alpha \dot{C} - \beta^2 C$ と修正するバウムガルテの安定化法を併用する。

4. 数値計算例

提案する動力学モデルの妥当性を検証するために数値シミュレーションを行った。例として、ドローン A, B を 10 秒間ホバリングさせた後、ドローン B のプロペラを急停止させた場合の動的挙動を計算した。図 5 はプロペラ回転数の時間推移を表している。図 6 に示すように、ドローン A

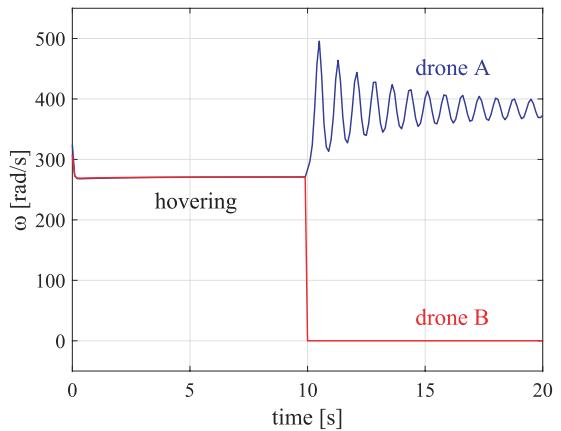


Fig. 5 Propeller speed

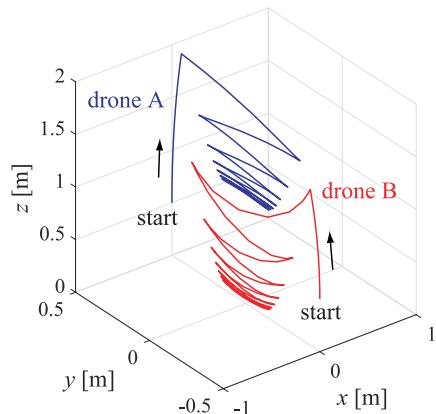


Fig. 6 Simulation results

がドローン B の落下を防ぎ、2 台が動的干渉によって振動しながら一定の高度に収束していく様子が確認できる。紙幅の制限のため、詳細については講演当日に発表する。今後は、ドローンの様々な結合方法について検討するとともに、台数を増やして複数台ドローンの協調制御手法について検討していく予定である。（結言省略）

参考文献

- [1] Bouabdallah, S., Murrieri, P. and Siegwart, R.: Design and control of an indoor micro quadrotor, IEEE Robotics and Automation, Vol. 5, pp. 4393-4398, (2004).
- [2] Nonami, K., Kendoul, S., Suzuki, S., Wang, W. and Nakazawa, D.: Autonomous Flying Robots, Springer, (2010).
- [3] 本仲君子, 渡辺桂吾, 前山祥一: クワッドロータのためのキノダイナミック動作計画と制御, 日本機械学会論文集, 81-825, (2015).
- [4] 岩村誠人: マルチボディダイナミクス入門, 森北出版, (2018).

ロボットモデル記述のための USD を拡張した ファイルフォーマットの提案

九州工業大学 ○井手健吾 古賀雅伸

An Extension of USD for Robot Description

Kengo Ide and Masanobu Koga
Kyushu Institute of Technology

Abstract— In this research, we propose a file format for describing a robot model as an extension of USD. The proposed file format uses USD customData, so you can easily check it in AR on your iOS device. It is easy to get, replace and animate robot model parts, because USD is a highly reusable format. It holds the values needed for the simulation, so it will be possible to simulate in USD in the future.

1 はじめに

近年、多くのロボット開発の現場では、URDF (Unified Robot Description Format)¹⁾ と呼ばれるロボットモデルを記述するためのファイルフォーマットが使用されている。URDFは、物理パラメータと可視化のための情報を持った再利用性の高いフォーマットである。しかしながら、可視化の点に関して、URDFはROS (Robot Operating System)で使用することを想定したファイルフォーマットであるため、ROSの環境を構築したり、ROSのツールを利用したりするための専門的な知識が必要であるという欠点がある。そのため、URDFで作られたロボットモデルは、専門知識を持たないロボットの一般ユーザーが利用したり、ARで表示したりすることは困難である。可視化に関する課題を解決するために、一般的なユーザーでも利用しやすい3Dファイルフォーマットに変換することが考えられる。現在、広く利用されている3Dファイルフォーマットの標準として、glTF(GL Transmission Format)とUSD(Universal Scene Description)がある。それぞれのフォーマットについて利点と欠点を以下に述べる。

glTFはWindowsやAndroid端末で簡単に3Dモデルを表示することができる。Android端末ではARでモデルを表示することもできるが、Androidには膨大な数の端末があり、様々なファームウェアのバージョンがあるため、ARをサポートできるのはごく一部に過ぎない²⁾。ただし、Androidスマートフォンの新しいモデルの多くがこの機能を備えている。しかしながら、glTFは見ることを目的とした完成した3Dモデルとして出力されているので、ロボットモデルの部品だけを取り出したり、再編集したりすることは難しい。

一方で、Pixar社が開発したUSDは、特別なアプリをダウンロードしなくとも、iOS端末でSafariブラウザやメッセージ、ノート、メールなどのアプリから3Dオブジェクトやシーンを直接開いて、アプリ内で回転拡大縮小したり、ARで確認したりすることができる。また、USDは再利用性の高い形式であるため、簡単に部品を入れ替えたり、取り出したりすることができる。

しかしながら、3Dファイルフォーマットにはシミュレーションに必要な物理パラメータが存在しないので、URDFで記述されているようなロボットモデルを記述することはできない。そこで本研究では、USDに物理

パラメータを追加した、URDFと相互変換可能な、ロボットモデルを記述するための新しいファイルフォーマットを提案する。

2 ロボットモデル記述ファイルフォーマット

本研究に関連するロボット記述フォーマットについて紹介する。

2.1 URDF

URDFは、Unified Robot Description Formatの頭文字を並べた略称である。ロボットモデルを記述するために策定され、ROSで使用することを想定されているXml形式のフォーマットである。部品ごとに情報がまとめて記述してあるため、部品の再利用性は高い。アニメーション(ロボットの動作)を含めることはできない。

2.2 SDF

SDFは、Simulation Description Formatの頭文字を並べた略称であり、Gazebo³⁾でモデルやシミュレートされる世界を定義するときに使われるXml形式のフォーマットである。URDFは少しの情報の追加で、SDFとして利用することが可能である。

2.3 RDTF

RDTF⁴⁾は、Robot Description Transmission Formatの頭文字を並べた略称であり、我々の研究グループで開発されたglTFを拡張したJSON形式のロボットフォーマットである。glTF自体が、見ることを目的とした完成したモデルとして出力されているので、再利用することには向いていない。アニメーション(ロボットの動作)を含めることができる。

3 USDR

本研究では、USDとしても利用できる、ロボットモデルを記述するためのUSDRを新たに提案する。

3.1 URDFとの対応関係

基本的なロボットのURDFの一部とそれに対応するUSDRの一部をList1とList2にそれぞれ示す。USDRのパラメータは、USDのcustomDataを用いて設定する。customDataは、既存のデータに影響を与えることなく、メタデータとして追加することができる。そのため、USDをサポートしているツールでそのままUSD

として利用することができる。また、customData の要素は dictionary を用いることでまとめることができるため、本研究では USDR 専用の dictionary を定義することで、他のデータとの差別化を図っている。

USDR は joint を階層的に表現するため、joint 同士のつながりがわかりやすくなっています。URDF よりも新しい joint を追加しやすいと考えられる。URDF の可視化に関する情報は List1 の 5 行目から 13 行目であり、それに対応する USDR の可視化に関する情報は List2 の 42 行目から 44 行目である。また、URDF の Link の物理パラメータは List1 の 24 行目と 25 行目、joint の物理パラメータは 33 行目から 35 行目であり、それに対応する USDR は List2 の 50 行目から 58 行目と 14 行目から 28 行目である。

List 1: ロボットモデル描画のための URDF

```

1 <?xml version="1.0"?>
2 <robot name="robot">
3   :
4   <link name="link2">
5     <visual>
6       <origin xyz="0 0 0.005" rpy="0 0
7         0" />
8       <geometry>
9         <cylinder radius="0.0225" length
10          ="0.05" />
11       </geometry>
12       <material name="green">
13         <color rgba="0 .8 0 1" />
14       </material>
15     </visual>
16
17     <collision>
18       <origin xyz="0 0 0.005" rpy="0 0
19         0" />
20       <geometry>
21         <cylinder radius="0.0225" length
22          ="0.05" />
23       </geometry>
24     </collision>
25
26     <inertial>
27       <origin xyz="0 0 0.005" />
28       <mass value="0.04" />
29       <inertia ixx="1.0" ixy="0.0" ixz
30         ="0.0" iyy="1.0" iyz="0.0" izz
31         ="1.0" />
32     </inertial>
33   </link>
34
35   <joint name="joint2" type="revolute">
36     <parent link="link2"/>
37     <child link="link3"/>
38     <origin xyz="0 0 0.06" rpy="0 0 0"
39       />
40     <axis xyz="1 0 0" />
41     <limit lower="-1.04666667" upper
42       ="1.04666667" effort="0.5293"
43       velocity="6.159937255" />
44   </joint>
45
46   <link name="link3">
47     :
48   </link>
49   :
50 </robot>
```

List 2: ロボットモデル描画のための USDR

```

1 #usda 1.0
2 (
3   defaultPrim = "ZUP2YUP"
4   upAxis = "Y"
5 )
6 def Xform "ZUP2YUP"{
7   :
8   def Xform "robot"{
9     :
10    def "link2"(prepend inherits = </link2
11      >){}
12    def Xform "joint2"(customData = {
13      dictionary USDR = {
14        string type = "revolute"
15        dictionary axis = {
16          double x = 1
17          double y = 0
18          double z = 0
19        }
20        dictionary limit = {
21          double lower = -1.04666667
22          double upper = 1.04666667
23          double effort = 0.5293
24          double velocity = 6.159937255
25        }
26        dictionary dynamics = {
27          double damping = 0.4
28          double friction = 0.1
29        }
30      })
31      {
32        :
33        def "link3"(prepend inherits = </
34          link3>){}
35        :
36        def "camera_link"(prepend
37          inherits = </camera_link>)
38        :
39      }
```

```

40 :
41 class "link2"{
42   def Xform "visual"{
43     :
44   }
45   class "collision"{
46     :
47   }
48   def Xform "inertial"(customData = {
49     dictionary USDR = {
50       double mass = 0.04
51       dictionary inertia = {
52         double ixx = 1.0
53         double ixy = 0.0
54         double ixz = 0.0
55         double iyy = 1.0
56         double iyz = 0.0
57         double izz = 1.0
58       }
59     }
60   })
61   {
62     :
63   }
64 }
65
66 class "link3"{
67   :
68 }
69 :

```

自動変換

urdf → mk3d → usdj → usdr

Fig. 1: USDR の生成

作成した USDR は usdz コマンドを用いて、usdz ファイルに圧縮する。usdz ファイルは iPhone に転送することで AR Quick Look によって確認することができる。

4 評価

4.1 URDF を USDR で表現する

3.1 節で示した List1 の URDF を Mikiy3D で表示した画面を図 2 に示す。また、それに対応する List2 の USDR を iPhone の AR Quick Look で AR で表示した画面を図 3 に示す。これらの比較により、URDF のモデルを USDR で表現でき、AR で表示できることがわかる。

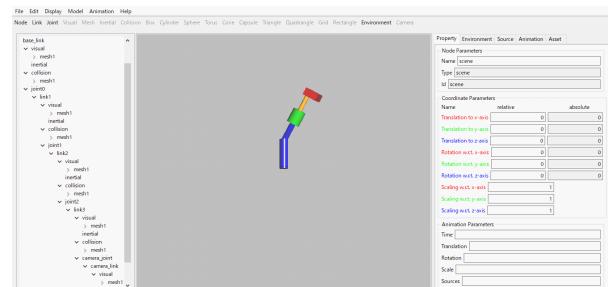


Fig. 2: robot.urdf

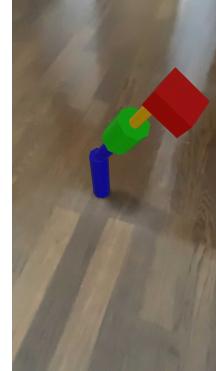


Fig. 3: robot.usdr

List2 で示した USDR のパラメータについての詳細を表 1 に示す。

Table 1: USDR のパラメータ

link	mass	link の質量
	inertia	3x3 の回転慣性行列
joint	type	joint の種類、6 種類ある
	axis	joint の回転軸、スライド軸
	limit	joint の可動範囲
	dynamics	摩擦係数、減衰係数といった joint の物理特性

3.2 USDR の作成

USDR は既存の USD への USDR パラメータの追加で作成することもできるが、URDF から USDR へ自動変換する方法を提案する。変換の流れを図 1 に示す。urdf ファイルを Mikiy3D⁵⁾ 専用の mk3d ファイルに変換し、mk3d ファイルから USDR を作成する。Xml 形式の mk3d ファイルからデータの読み書きに適した JSON 形式の USDJ を介して、テキスト形式の USDR に変換する。

4.2 部品の入れ替え

USDR は部品の参照により、モデルを表示しているため、参照先を変えることで、簡単に部品を入れ替えることができる。そこで、新たに parts.usdr というファイルを作成した。parts.usdr を iPhone の AR Quick Look で表示した画面を図 4 に示す。また、List2 の 35 行目を「def "camera_link" (prepend references = @parts.usdr.usda@)」という parts.usdr の参照に書き換えたモデルを iPhone の AR Quick Look で表示した画面を図 5 に示す。図 5 より、robot.usdr の部品の一部が parts.usdr に入れ替わっていることがわかる。また、USDR は図 4 のように、モデルを構成する部品を

単体で保存し、表示することができるため、robot.usdr の Link を 1 個ずつ別々の USDR として保存することでロボットを分解することも容易である。



Fig. 4: parts.usdr

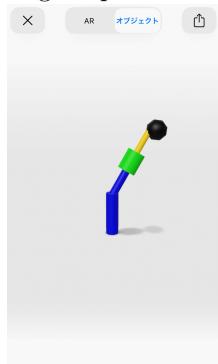


Fig. 5: robot.usdr(入れ替え後)

4.3 アニメーションの追加

USDR は、URDF とは異なり、簡単にアニメーションを追加することができる。List3 のように、アニメーション用のファイル anime.usda を作成し、robot.usdr の動作させたい joint の位置に「def Xform "anime"(prepend references = @anime.usda@)」という anime.usda の参照を追加した。変更後の USDR を、iPhone の AR Quick Look で再生した画面を、図 6 に示す。List3 のように時間ごとの座標を設定することで、ロボットのモデルにアニメーションを追加できることがわかる。今後は、URDF でのシミュレーションにより生成されたデータを用いて USDR にアニメーションを追加することを検討している。

List 3: anime.usda

```

1 #usda 1.0
2 (
3     defaultPrim = "anime"
4     upAxis = "Y"
5     endTimeCode = 10
6     startTimeCode = 1
7     timeCodesPerSecond = 1
8 )
9 def Xform "anime"{
10    uniform token[] xformOpOrder = [
11        xformOp:rotateXYZ"]
11    double3 xformOp:rotateXYZ.timeSamples =
12    {
13        1:(0,0,0),
14        2:(0,30,0),
15        3:(0,0,0),
16        4:(0,30,0),
17        5:(0,0,0),
18        6:(0,30,0),
19        7:(0,0,0),
20        8:(0,30,0),
21        9:(0,0,0),
22        10:(0,30,0)
22    }
23 }
```

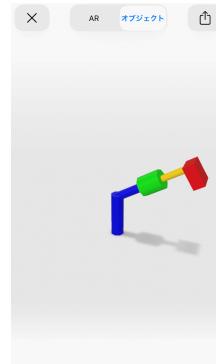


Fig. 6: robot.usdr(アニメーション付き)

5 おわりに

本研究では、USD に物理パラメータを追加した、URDF と相互変換可能なロボットモデルを記述するための新しいファイルフォーマットを提案した。今後は USDR を用いてシミュレーションを行うことができるよう、シミュレーションができるアプリケーションの開発等を検討していきたい。

参考文献

- 1) Ros.org. <http://wiki.ros.org/urdf/XML/>.
- 2) R.I.Kadyrov. Developing of USDZ models for 3D digital analysis results visualization in augmented reality. Scientific Visualization, volume 13, number 1, pages 83-103, 2021.
- 3) Gazebo. <https://gazebosim.org/>.
- 4) 井澤諒哉, 古賀雅伸. エンドユーザ指向のロボットシミュレーション環境を提供する Web アプリケーションの開発. 九州工業大学情報工学府修士論文, 2021.
- 5) Mikity3D. <https://mikity3d.mk.ces.kyutech.ac.jp/>.

福祉車両の操縦支援システムにおける複合環境での視線分析

○中村 恵央, 奥園 康太, 松永 信智 (熊本大)

Gaze Analysis for Maneuvering Support Systems of Welfare Vehicles using MR

○ Reo NAKAMURA, Kouta OKUZONO, Nobutomo MATSUNAGA (Kumamoto University)

Abstract: Recently, the driving assistance system of the welfare vehicle has been proposed in which the virtual vehicle is projected on Head Mounted Display and controlled by a third person viewpoint so that the vehicles can be easily operated by the aged. If we can analyze the difference in gaze during driving between a skilled driver and a novice driver in operation of a virtual vehicle, and apply it to a driver assistance system for a welfare vehicle, we will expect to improve maneuverability. In this paper, we measure the gaze of an expert and a novice driver in operating of a virtual vehicle using a training system, and analyze the differences of them.

1 はじめに

福祉車両の手動操縦の支援に関しては、近年ヴァーチャルリアリティ(VR)、拡張現実(AR)、複合現実(MR)などを利用したナビゲーションの研究が注目されている。

Matsunagaらは狭路での操縦に対して、透過型ヘッドマウントディスプレイ(HMD)に仮想車両を運転中に投影し疑似的な客観視点(第三者視点)で操縦することで、複雑なコースを走行できる仮想隊列制御系を示した¹⁾。その手法は、仮想車両を操縦することで後方で隊列を構成する福祉車両を安全に走行できる点が特徴である。

超高齢化社会ではARやMRを使った装置が出現し便利になっていくと思われるが、その利用の際には福祉車両の操縦の上達に時間がかかることが障壁になると見える。福祉車両の操縦の上達は、利用者自身の能力に依存することが知られている。MRなどを利用する場合は、利用者が仮想車両のような仮想空間にある物(仮想オブジェクト)を利用して操縦のトレーニングを行うことになる。仮想オブジェクトを使うトレーニングは事前準備がほとんど必要ないため、利用者にとって利用しやすいが、ログラムで表示される仮想車両の操縦性に関する具体的な検討は少ない。今後、熟練者の操作時の注意がどこに向けられているかがわかれば、視線誘導による支援も可能であると考える。

本論文では、福祉車両の操縦支援システムのトレーニングシステム中の視線移動を計測し、熟練者と初心者の視線の比較を行う。なお、視線計測はHoloLens2²⁾を使い、目視している物体までの距離を計測している。

2 福祉車両のトレーニングシステム

トレーニングシステムは、先行研究である操縦支援システム³⁾を基にしている。Fig.1にトレーニングシステムの概要図を示す。

操縦支援システムは利用者の装着したHMD上に仮想車両を表示し、利用者が表示された仮想車両を操作するシステムである。利用者は仮想車両を用いて操縦を行い、後方からインストラクタがアドバイスを行う。仮想車両の操作をサポートする様々な仮想オブジェクトはHMD上に表示される。Fig.2に、提案するトレーニングシステムを使った時のHMD上の仮想車両を示す。HMD上では

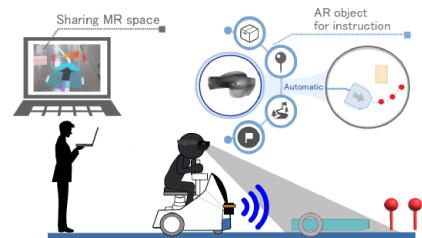


Fig.1: Driving instruction with virtual platoon control

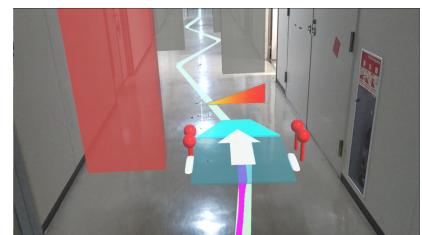


Fig.2: View of objects displayed on HMD

前方の仮想車両が見えており、それを操作することで利用者が乗った福祉車両を動かす。なお、本研究ではHMDとしてHoloLens2、福祉車両としてSTAViを用いる。

仮想障害物はHMDの位置を原点として、それぞれ前方4m、7m、9m、11mに左右交互に配置し、走行範囲を1.3mとしている。また、走行するコースの横幅は2.0mである。なお、このコースは1個目と2個目の障害物の間隔は3.0mであるが、2個目から3個目、3個目から4個目の障害物の間隔は2.0mとなっている。

Fig.2に表示される仮想オブジェクトを説明する。仮想障害物を配置すると、ゴールまでの理想経路が水色のラインで表示される。仮想車両が仮想障害物に接近すると仮想障害物が赤色に点滅する。走行する目標となるピンオブジェクトも表示され、走行をアシストしていることがわかる。なお、理想経路の経路探索にはUnityのナビゲーションシステムであるNavMeshを用いている。

3 トレーニング中の視線比較

熟練者と初心者を対象に走行実験を行う。熟練者はこのシステムの開発者で、同様のコースを障害物に衝突することなく完走できる。初心者は、仮想車両を1, 2回操縦したことがあり、同様のコースでは障害物に衝突することがある。

被験者には仮想車両の速度は常に0.3m/sで操作し、障害物や壁に仮想車両が衝突せずにコースを完走するように指示をした。Fig.3に、熟練者の走行実験時の経路を示す場合(経路あり)と経路を示さない場合(経路なし)の視線データを示す。なお、経路なしでは理想経路とピンオブジェクトは表示されない。

視線データは、Hololens2のアイトラッキング機能を使って、視線の原点の位置、視線の向いている方向が取得できる。視認している廊下や壁、障害物の位置を、視線の終点としている。同図において、赤色の○が視線の原点、青色の×が操縦者の向いている先を表しており、原点と向いている先を黒色の直線で結んでいる。黄緑の線で描かれた長方形は走行中に設置された仮想障害物で、水色の破線は理想経路である。視線データはすべて操縦者が7mから9m地点の比較的難しい経路を走行している時のデータである。

Fig.3(a), (b)とも、視線は3mから3.5m先に向いている。視線の終点を比較すると、経路ありでは操縦者の視線が理想経路を中心に視線が移動する事がわかる。経路なしでは、経路近辺を注目するのではなく壁や前方など様々なところを視線が移動している。

Fig.4に、初心者の走行実験時の経路ありと経路なしの視線データを示す。同図(a), (b)を見ると、経路ありでは3.5mから4m先を見ている、それに対して経路なしでは3mから3.5m先を見ている事がわかる。同図(a), (b)の視線の終点を比較すると、経路ありでは視線が中心に

集中しており、経路なしではばらつきは小さい。

Fig.3とFig.4の熟練者と初心者の視線を比較すると、経路ありでは、両者とも理想経路周辺に視線が集中しており、視線の終点の位置より初心者は熟練者よりも奥を見ている事がわかる。経路なしでは、両方とも視線が経路からばらけているが、注目点が異なる。熟練者は走行する走行していく空間(経路の左側)に視線が向いてるのに対して、初心者は避けようとする物体(右側の障害物)に視線を向けている。

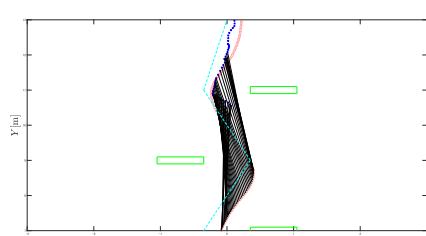
4 おわりに

本研究では、仮想隊列を使った福祉車両の操縦支援システムに関して、仮想オブジェクトを使ったトレーニングシステムを用いて視線計測を行った。理想経路を表示する場合、熟練者、初心者とも表示された経路を注視し、障害物に視線を向けていない。一方、経路を表示しないと、熟練者は視線が走行空間を広く見るのに対して、初心者は右側の障害物を中心に視線を向けていることがわかった。

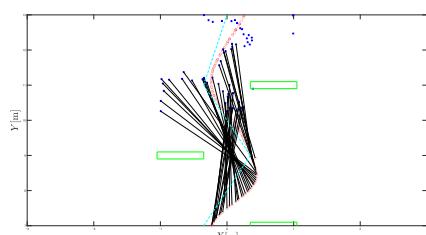
今後は、トレーニングシステムの障害物の配置を変更し、廊下の角での視線計測を行いたいと考えている。

参考文献

- [1] N. Matsunaga et al., "Driving Assistance of Welfare Vehicle with Virtual Platoon Control Method which has Collision Avoidance Function using Mixed Reality", IEEE International Conference on SMC, pp.1911–1816, 2018.
- [2] Microsoft HoloLens2, <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens> (参照日 2021年10月1日).
- [3] 松永他:「Mixed Reality を用いた仮想隊列走行制御による福祉用パーソナルビークルの操縦支援システム」, 日本機械学会論文集, Vol. 85, No. 872, 2018.

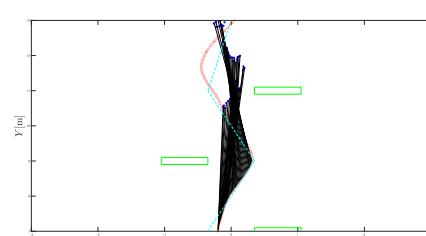


(a) Route visible

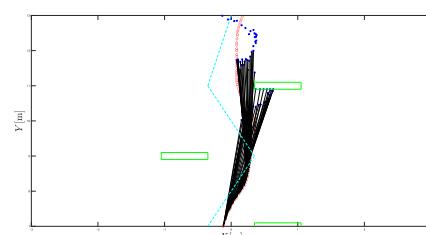


(b) Route not visible

Fig.3: Gaze data of expert



(a) Route visible



(b) Route not visible

Fig.4: Gaze data of beginner

暗号化制御系への動的量子化器の適用と検討

熊本大学 ○近藤 晴人, 岡島 寛

Application and Discussion of Dynamic Quantizers to Encrypted Control Systems

*H. Kondo and H. Okajima, Kumamoto University)

Abstract— Encrypted control systems are one of the methods to enhance the cyber security of control systems. Since Encrypted control systems use public-key cryptography, only integers can be used, and it is necessary to quantize real numbers. The quantization error generated in this process has a great influence on the stability of the control system. In this study, we apply a delta-sigma modulator to the Encrypted control system as an approach to reduce the effect of the quantization error, and verify the effect of the delta-sigma modulator by numerical simulation.

1 はじめに

制御システムへのサイバー攻撃は年々増加する傾向にある。攻撃の内容は、マルウェアやランサムウェアを利用したもの、リプレイ攻撃、DDoS攻撃、盗聴や改ざんなど多岐にわたる。これらの攻撃はシステムを破壊するだけでなく、人的被害をもたらす可能性もある。

内閣府により提唱されたSociety5.0ではすべての人とモノが繋がったサイバーフィジカルシステムによってさまざまな社会問題を解決することを目標としている。このようなシステムにおいて要となる制御システムのサイバーセキュリティは極めて重要であり、現在も活発に研究がなされている。暗号化制御は制御系のセキュリティに関する研究のひとつである。

暗号化制御^{1, 2, 3)}では制御系の信号やパラメータを暗号によって秘匿化するものである。暗号化には公開鍵暗号を用いており、本研究ではElGamal暗号⁴⁾を用いている。公開鍵暗号は公開鍵によって暗号化し、秘密鍵によって復号化するものである。ElGamal暗号は乗法における準同型性を有しており、制御系の演算を暗号化されたまま行うことができる。このとき、本来の制御系では実数空間上で計算を行うことを前提とするが、暗号化制御系では整数空間しか扱うことができない。そのため実数から整数へ丸める際に量子化誤差が発生する。このような暗号化制御系の量子化誤差に関する研究⁵⁾もなされているが、本研究では暗号化制御系に $\Delta\Sigma$ 変調器⁶⁾を適用し、量子化誤差に関する検討を行う。

2 準備

2.1 表記

本論文で用いる表記を示す。 \mathbb{R} : 実数集合, \mathbb{Q} : 有理数集合, \mathbb{Z} : 整数集合, \mathbb{P} : 素数集合, \mathbb{Z}^+ : 非負の整数集合, \mathbb{Z}_n : 0以上n未満の整数集合, \mathcal{K}_p : 公開鍵の集合, \mathcal{K}_s : 秘密鍵の集合。また鍵のペアの集合は $\mathcal{K} = \mathcal{K}_p \times \mathcal{K}_s$ で表される。 \mathcal{M} : 平文空間, \mathcal{C} : 暗号文空間, \mathbb{Z}_n^\times : \mathbb{Z}_n に属するnと互いに素な整数の集合, 1^k : 鍵長(kビット)。

ここで、有限集合 A , ランダムな変数 X とする。次の式,

$$\Pr(X = a) = \frac{1}{|A|} \forall a \in A,$$

が成り立つとき, X は離散一様分布に従うといい, $X \sim \mathcal{U}(A)$ と表す。

2.2 ElGamal 暗号

公開鍵暗号とは公開鍵と秘密鍵を生成し、公開鍵によって平文を暗号化し、秘密鍵によって暗号文を復号化するものである。鍵の生成、平文の暗号化、暗号文の復号化の3つの機能を $\text{Gen}, \text{Enc}, \text{Dec}$ とすると、ElGamal暗号システム $\mathcal{E} := (\text{Gen}, \text{Enc}, \text{Dec})$ は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \text{Gen} : \mathbb{P} &\ni p \mapsto (\text{pk}, \text{sk}) = ((\mathbb{G}, q, g, h), s) \in \mathcal{K} \\ \text{Enc} : \mathcal{M} \times \mathcal{K}_p &\ni (m, \text{pk}) \mapsto C = (g^r \bmod p, mh^r \bmod p) \in \mathcal{C} \\ \text{Dec} : \mathcal{C} \times \mathcal{K}_s &\ni (C, \text{sk}) = ((c_1, c_2), \text{sk}) \mapsto c_1^{-s} c_2 \bmod p \in \mathcal{M} \end{aligned}$$

ここで、 p は安全素数であり $p = 2q + 1$ を満たし、 g は $g^q \bmod p = 1$ となるような巡回群 $\mathbb{G} = \{g^i \bmod p | i \in \mathbb{Z}_q\} = \mathcal{M} \subset \mathbb{Z}_p^\times$ の生成元、 $\mathcal{C} = \mathbb{G} \times \mathbb{G}$ 、 $s \sim \mathcal{U}(\mathbb{Z}_q)$ 、 $h = g^s \bmod p$ である。

また、ElGamal暗号は下式の乗法に関する準同型性を有する。

$$\text{Dec}(\text{Enc}(m_1, \text{pk}) * \text{Enc}(m_2, \text{pk}) \bmod p, \text{sk}) = m_1 m_2 \quad (1)$$

ここで、*はアダマール積(要素ごとの積)を表す。

暗号化から復号化までの一連の流れを数値を用いて示す。まず Gen によって $(\text{pk}, \text{sk}) = ((\mathbb{G}, q, g, h), s) = ((\{1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 12, 13, 16, 18\}, 11, 2, 8), 3)$ が生成されたとする。また、ここでは $m = 3$ を暗号化する。生成された公開鍵とランダムな変数 $r = 2$ を用いて Enc によって暗号化する。

$$\begin{aligned} C &= \text{Enc}(m, \text{pk}) \\ &= (g^r \bmod p, mh^r \bmod p) \\ &= (2^2 \bmod 23, 3 \cdot 8^2 \bmod 23) \\ &= (4, 192 \bmod 23) \\ &= (4, 8) \end{aligned}$$

得られた暗号文 C を秘密鍵を用いて Dec によって復号化する。

$$\begin{aligned}
m &= \text{Dec}(C, \text{sk}) \\
&= c_1^{-s} c_2 \bmod p \\
&= 4^{-3} \cdot 8 \bmod 23 \\
&= (4^3)^{-1} \cdot 8 \bmod 23 \\
&= 64^{-1} \cdot 8 \bmod 23
\end{aligned}$$

ここで、64の23を法としたモジュラ逆数は9であるから、

$$\begin{aligned}
m &= 9 \cdot 8 \bmod 23 \\
&= 72 \bmod 23 \\
&= 3
\end{aligned}$$

以上のように暗号化および復号化を行う。

3 暗号化制御系

暗号化制御系ではElGamal暗号の準同型性を用いることによって、暗号化されたまま制御器で計算することができる。制御器 f は以下のように表せる。

$$f : \begin{cases} x_c(t+1) = A_c x_c(t) + B_c v(t), \\ u(t) = C_c x_c(t) + D_c v(t). \end{cases} \quad (2)$$

また、ブロック線図は以下のFig.1のように表すことができる。

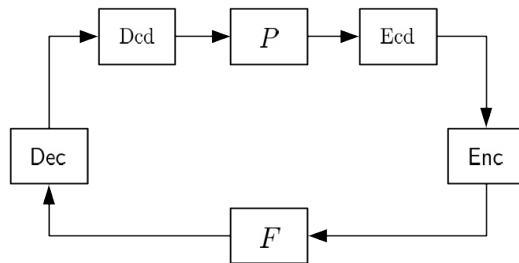


Fig. 1: Encrypted Control System

また、式(2)は以下のように書き換えることができる。

$$\psi(t) = \Phi \xi(t) =: f(\Phi, \xi(t)). \quad (3)$$

また、パラメータ Φ とその状態と入力 ξ を以下のように置き換える。

$$\psi(t) := \begin{bmatrix} x_c(t+1) \\ u(t) \end{bmatrix}, \Phi := \begin{bmatrix} A_c & B_c \\ C_c & D_c \end{bmatrix}, \xi := \begin{bmatrix} x_c(t) \\ v(t) \end{bmatrix}.$$

制御器 f は加算部分 f^+ と乗算部分 f^\times の合成積とみなすことができる。すなわち、

$$f = f^+ \circ f^\times.$$

f^\times, f^+ はそれぞれ以下のように定義される。

$$f^\times : ((\Phi_{ij}), (\xi_j)) \mapsto (\Phi_{ij} \xi_j) =: \Psi,$$

$$f^+ : (\Psi_{ij}) \mapsto (\Sigma_j \Psi_{ij}) = \psi.$$

定義 1. 時刻 $t \in \mathbb{Z}^+$ における $\Phi, \xi(t), \Psi(t)$ の暗号文をそれぞれ $C_\Phi, C_\xi(t), C_\Psi(t)$ とおく。制御器 f が $f = f^+ \circ f^\times$ と与えられるとき、 \mathcal{E} は $\mathcal{E}^* = (\text{Gen}, \text{Enc}, \text{Dec}^+, \mathcal{E}_\gamma, \mathcal{D}_\gamma)$ と表すことができる。ここで $\mathcal{E}_\gamma, \mathcal{D}_\gamma$ はそれぞれエンコーダーとデコーダーである。また、 $\mathcal{E}_\gamma, \mathcal{D}_\gamma$ は以下のように定義される。

$$\begin{aligned}
\mathcal{E}_\gamma &: \mathbb{R} \ni x \mapsto \check{x} = \lceil \gamma x + \alpha(\gamma x) \rceil \in \mathcal{M}, \\
\alpha(\gamma x) &:= \begin{cases} p, & \gamma x \leq 0, \\ 0, & \gamma x \geq 0, \end{cases} \\
\mathcal{D}_\gamma &: \mathcal{M} \ni \check{x} \mapsto \bar{x} = \frac{\check{x} - \beta(\check{x})}{\gamma} \in \mathbb{Q}, \\
\beta(\check{x}) &:= \begin{cases} p, & \gamma x \leq q, \\ 0, & \gamma x \geq q, \end{cases}
\end{aligned}$$

ここで $\gamma \in \mathbb{R}$ はスケーリングパラメータ、 $\lceil \cdot \rceil$ は \mathcal{M} 中の最も近い要素へ丸める閾数、また Dec^+ は $\text{Dec}^+ = f^+ \circ \text{Dec}$ と表すことができる。そして、暗号化制御器 $f_{\mathcal{E}^*}$ は以下のように定義される。

$$f_{\mathcal{E}^*} : (C_\Phi, C_\xi(t)) \mapsto C_\Psi(t) = (C_{\Phi_{ij}} * C_{\xi_j}(t) \bmod p).$$

ここで、

$$\begin{aligned}
(\text{pk}, \text{sk}) &= \text{Gen}(p), \\
C_\Phi &= \text{Enc}(\mathcal{E}_{\gamma_c}(\Phi), \text{pk}), \\
C_\xi(t) &= \text{Enc}(\mathcal{E}_{\gamma_p}(\xi(t)), \text{pk}), \\
\Psi(t) &= \mathcal{D}_{\gamma_c \times \gamma_p}(\text{Dec}^+(C_\Psi(t), \text{sk})),
\end{aligned}$$

であり、 $\text{Enc}, \text{Dec}, \mathcal{E}_\gamma, \mathcal{D}_\gamma$ はそれぞれ行列、ベクトルのどちらに対しても要素ごとに演算を行う。

暗号化制御系では以下の準同型性が成り立つ。

$$\begin{aligned}
\text{Dec}(\text{Enc}(\mathcal{E}_{\gamma_c}(\Phi), \text{pk}) * \text{Enc}(\mathcal{E}_{\gamma_p}(\xi(t)), \text{pk}) \bmod p, \text{pk}) \\
= f^\times(\mathcal{E}_{\gamma_c}(\Phi), \mathcal{E}_{\gamma_p}(\xi(t))).
\end{aligned}$$

また普通の制御系では実数を扱うが、ElGamal暗号システムでは整数の部分集合を扱う。そのため、 $\mathcal{D}_\gamma(\text{Dec}(\text{Enc}(\mathcal{E}_\gamma(x), \text{pk}), \text{sk}))$ は x と全く同じ値になるわけではない。それは次の式、

$$\begin{aligned}
\mathcal{D}_\gamma(\text{Dec}(\text{Enc}(\mathcal{E}_\gamma(x), \text{pk}), \text{sk})) \\
&= \mathcal{D}_\gamma(\mathcal{E}_\gamma(x)), \\
&= \frac{[x + \alpha(\gamma x)] - \beta(\check{x})}{\gamma}, \\
&= \frac{\gamma x + \alpha(\gamma x) + \delta - \beta(\check{x})}{\gamma}, \\
&= x + \frac{\delta}{\gamma},
\end{aligned}$$

に現れる量子化誤差 δ/γ によるものである。

ここで、量子化誤差を e 、鍵長を k とおく。このとき鍵長 k が十分に長いとき量子化誤差 e は無視することができる。つまり $e \rightarrow 0$ で $k \rightarrow \infty$ である。また以降簡単のため、 x の量子化誤差を $\tilde{x} = \mathcal{D}_\gamma(\mathcal{E}_\gamma(x)) - x$ と表す。

また以下の動的なElGamal暗号システム $\mathcal{E}_{dyn}(t)$ によって暗号化、復号化に用いる公開鍵、秘密鍵を毎時刻更新する。

$$\mathcal{E}_{dyn} := (\text{Gen}, \text{Enc}, \text{Dec}, T_K, T_C).$$

ここで、 T_K, T_C は鍵の遷移写像であり、

$$T_K : ((\mathbb{G}, q, g, h), s) \mapsto ((\mathbb{G}, q, g, hg^{w(t)} \bmod p), s + w(t) \bmod q), \\ T_C : (c_1, c_2) \mapsto (c_1, c_1^{w(t)} c_2 \bmod p),$$

と表せる。また、 $w(t) \sim \mathcal{U}(\mathbb{Z}_q)$ である。

4 暗号化制御系への $\Delta\Sigma$ 変調器の適用

暗号化制御系に用いられる ElGamal 暗号は整数上で暗号化、復号化の計算を行う。本来の制御系では実数を扱うため、暗号化するためには量子化を行う必要がある。そこで本研究では、実数から整数へ量子化するために以下の一次 $\Delta\Sigma$ 変調器 $Q_{\Delta\Sigma}$ を用いる。

$$Q_{\Delta\Sigma} : \begin{cases} \xi(k+1) &= \xi(k) + v(k) - u(k) \\ v(k) &= \mathcal{E}_\gamma(-\xi(k) + u(k)) \end{cases}$$

ξ は $\Delta\Sigma$ 変調器の状態、 u は入力、 v は出力である。また $\xi(0) = 0$ とする。

$\Delta\Sigma$ 変調器は、ただ値を量子化するのではなく量子化された信号と入力の差を積分し、その積分値に対して量子化を行う。このとき、量子化ノイズが高周波数帯域に分布し、低周波数帯域における量子化ノイズが抑えられる。

5 シミュレーション

5.1 制御対象

数値シミュレーションで用いる制御対象を以下に示す。連続時間系として以下のように与えられるものとする。

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(t)$$

また、サンプリング時間を 0.01 秒として以下のように離散化し、これを対象としたシミュレーションを行う。

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 1.01005 & -0.01015 \\ 0 & 1.02020 \end{bmatrix} x(k) \\ + \begin{bmatrix} -5.05029 \times 10^{-5} \\ 1.01007 \times 10^{-2} \end{bmatrix} u(k) \\ y(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(k)$$

5.2 誤差の評価方法

誤差を e 、シミュレーション時間を $T = 10000$ 、量子化前の値を x 、量子化後の値を \bar{x} として、以下の式によって量子化誤差を評価する。

$$e = \frac{1}{T} \sum_{k=0}^T \|\bar{x}(k) - |x(k)|\|$$

また本研究では、暗号化制御系に $\Delta\Sigma$ 変調器を適用したものとの比較対象として、静的量子化器を適用したもの用いている。

5.3 シミュレーション結果

本研究ではスケーリングパラメータを $\gamma = 10^8$ 、鍵長を 64bit とした。シミュレーションで得られた制御対象の状態 x と制御入力 u の波形を以下の Fig.2~Fig.5 に示す。

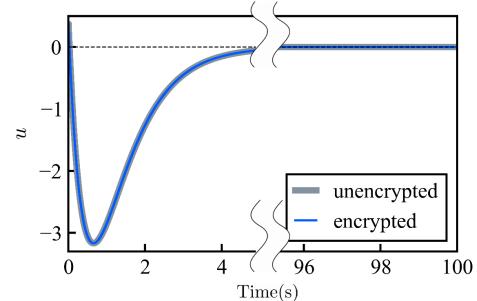


Fig. 2: input without $\Delta\Sigma$ modulator

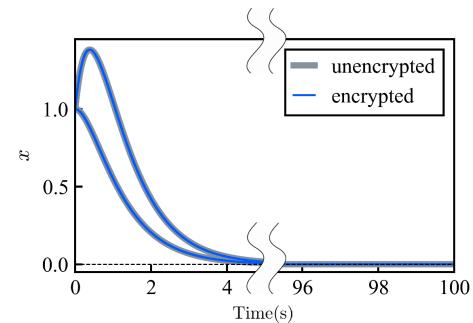


Fig. 3: states without $\Delta\Sigma$ modulator

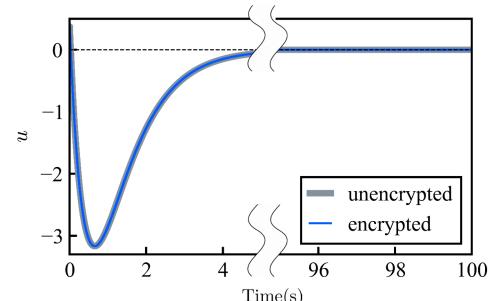


Fig. 4: input with $\Delta\Sigma$ modulator

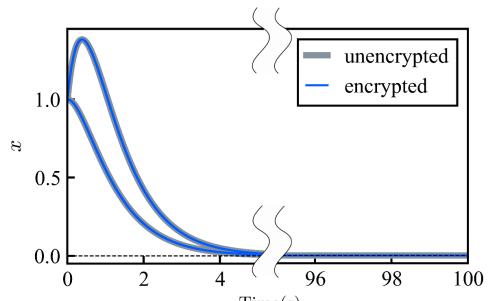


Fig. 5: states with $\Delta\Sigma$ modulator

また、各シミュレーションでの量子化誤差をまとめたものを以下の Table.1 に示す。また、Table.1 をグラ

フで表したものを見たものを Fig.6 に示す。

Table 1: Quantization error

		量子化誤差
静的量子化器	x_1	1.55×10^{-5}
	x_2	1.55×10^{-5}
$\Delta\Sigma$ 変調器	x_1	1.93×10^{-7}
	x_2	8.90×10^{-7}

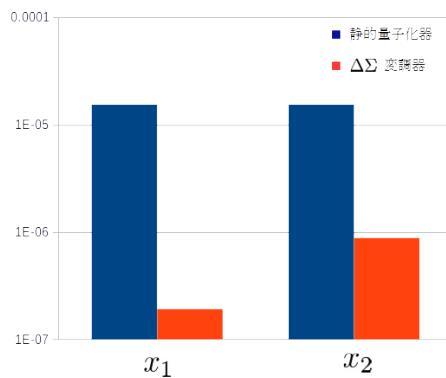


Fig. 6: Quantization error

Fig.2~Fig.5 から、 $\Delta\Sigma$ 変調器を用いた場合とそうでない場合の両方とも収束していることがわかる。これは、スケーリングパラメータを $\gamma = 10^8$ と十分大きく取っていたことから波形からは差が見られなかったといえる。

次に Table.1 では、 $\Delta\Sigma$ 変調器を用いた場合の方が誤差が小さくなっていることがわかる。

6 おわりに

本研究では、暗号化制御系へ $\Delta\Sigma$ 変調器を適用し、その効果について静的量子化器を適用した場合と比較した。結果として $\Delta\Sigma$ 変調器を用いることで制御対象の状態における量子化誤差が小さくなることが確認できた。ElGamal 暗号によって生成される平文空間は間欠的であり、実数から量子化される際にランダム性が生まれるが、 $\Delta\Sigma$ 変調器を用いることで実際に量子化誤差の影響を小さくすることができた。

参考文献

- 1) K. Kogiso and T. Fujita: Cyber-security enhancement of networked control systems using homomorphic encryption, IEEE Conference on Decision and Control, pp. 6838-6843, 2015/12/15-12/18.
- 2) K. Teranishi, N. Shimada, and K. Kogiso: Stability-guaranteed dynamic ElGamal cryptosystem for encrypted control systems, IET Control Theory and Applications, Volume 14, Issue 16, pp. 2242-2252, November 2020.
- 3) Kaoru Teranishi and Kiminao Kogiso (2021) ElGamal-type encryption for optimal dynamic quantizer in encrypted control systems, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 14:1, 59-66
- 4) Elgamal, T.: ‘A public key cryptosystem and a signature scheme based on discrete logarithms’ , IEEE Trans. Inf. Theory, 1985, 31, (4), pp. 469–472

- 5) K. Teranishi, N. Shimada, and K. Kogiso: Stability analysis and dynamic quantizer for controller encryption, IEEE Conference on Decision and Control, pp. 7184-7189, 2019/12/11-12/13.
- 6) 岡島寛, 南裕樹: 信号品質を保つディジタル化技術:ノイズシェーピング量子化-II- $\Delta\Sigma$ 変調器, システム/制御/情報, Vol.61, No.4, pp.58–163, 2017
- 7) R. Baba, K. Kogiso, O. Kaneko, M. Kishida, and K. Sawada: Theory and applications of encrypted control systems for cyber security, International Workshop on Security, 2018/9/3-9/5.
- 8) K. Teranishi, N. Shimada, and K. Kogiso: Development and examination of fog computing-based encrypted control system, IEEE Robotics and Automation Letters, Volume 5, Issue 3, pp. 4642-4648, July 2020.
- 9) K. Teranishi and K. Kogiso: Control-theoretic approach to malleability cancellation by attacked signal normalization, 8th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems, IFAC-PapersOnLine, Vol. 52, No. 20, pp. 297-302, 2019/9/16-9/17

入力振幅制約に基づく MIMO 系に対する量子化制御系の設計

熊本大学 ○青木 郁弥, 岡島 寛, 松永 信智, 大城 裕貴

Design of a Quantization Control System for MIMO Systems Based on Input Amplitude Constraints

Fumiya AOKI, Hiroshi OKAJIMA, Nobutomo MATSUNAGA, and Yuki OSHIRO ,Kumamoto University

Abstract— AD/DA conversion is an indispensable technology in various fields, as it digitizes analog signals, performs signal processing and transmission, and then restores digital signals to analog signals. In recent years, with the increase in the volume of communication, data compression during transmission is an important elemental technology. The $\Delta\Sigma$ modulator (DSM: Delta-Sigma Modulator) used for quantization and compression is a kind of noise-shaping AD converter, which has the advantage of being resistant to missing bits and suppressing low-frequency noise. In addition to the design of the DSM, the entire system, including post-filters, has been designed. In previous studies, a structure of AD/DA conversion using not only a post-filter but also a pre-filter for signal shaping has been proposed. By designing the post-filter and pre-filter to perform denoising and de-distorting, respectively, it is possible to improve the two performances of low quantization noise and low distortion. However, in these studies, the pre-filters were designed for specific signals, and although the designed pre-filters work effectively for input signals with similar bandwidth, there is no guarantee that they will satisfy the amplitude constraint. Since the amplitude of the input signal is one of the necessary factors in the design of a quantizer, it would be useful if we could guarantee that the amplitude constraint is satisfied even though the signal has passed through the pre-filter. In a previous study, we considered a signal with constraints on the rate of change of the signal as well as the amplitude, and designed an effective pre-filter for this signal that satisfies the amplitude constraint. Here, the filter was designed in a system with one input and one output. By taking advantage of the characteristics of a multiple-input, multiple-output system, we believe that we can achieve more accurate AD/DA conversion. In this presentation, we consider a signal with a constraint on the amplitude difference between two signals in a two-input, two-output system, and design an effective pre-filter for this signal.

1 はじめに

アナログ信号をデジタル化した上で信号処理や伝送を行い、その後デジタル信号をアナログ信号に復元する AD/DA 変換はさまざまな分野において欠かせない技術の 1 つである。近年の IoT 化にともなる通信量の増加に伴い、伝送時のデータ圧縮は重要となる。このとき、量子化圧縮に要求される性能は低量子化ノイズ特性と低歪性であり、これらの実現のために広く利用されている方式として $\Delta\Sigma$ 変調が挙げられる。 $\Delta\Sigma$ 変調器(以下、DSM : Delta-Sigma Modulator)^{1), 2)} はノイズシェイピング型の AD 変換器の一種であり、ビットの欠落に強いという利点、低周波のノイズを抑えられる利点がある。

通常、DSM を通過して得たデジタル信号は高周波の量子化ノイズを含む形に整形されており、ポストフィルタに通すことによって量子化ノイズが除去され元の信号が再現される。その再現性は DSM の性能とポストフィルタの特性に依存している。量子化ノイズを除去するためにポストフィルタの遮断周波数を低く設定すると、元の信号に歪みが生じる。一方で、信号の歪みを避けるために遮断周波数を高く設定すると十分に量子化ノイズを除去することができない。通常このようなトレードオフ下での設計が必要である。

これに対して先行研究^{3, 4, 5)}において、ポストフィルタだけでなく、信号整形のためのプレフィルタを用いた AD/DA 変換の構造が提案されている。ポストフィルタとプレフィルタの 2 つのフィルタでノイズ除去、歪み除去をそれぞれ行うように設計することで、低量子

化ノイズと低歪性の 2 つの性能を向上させることができる。文献^{3, 4)}では、フィルタの設計法を提案している。また、文献⁵⁾では帯域が絞られている音声信号を対象に応用実験を行い、その効果を検証している。

これらの研究においては特定の信号に対してプレフィルタ設計がなされており、類似の周波数特性を持つ入力信号に対しては設計したプレフィルタが効果的に働く。しかし類似した周波数特性であっても、必ずしも当初想定した振幅制約を満たすという保証はない。量子化器において入力信号の振幅が設計の必要要素の一つであることから、プレフィルタを通過した信号であるにも関わらず振幅制約を満たすことの保証をできれば有用といえる。

これを受けて、先行研究⁶⁾では、振幅だけでなく信号の変化速度の制約を持つ信号を考え、この信号に対してプレフィルタを通過した信号が振幅制約を必ず満たすような有効なフィルタの設計法を提案した。この研究では、1 入力 1 出力のシステムにおいてフィルタを設計していた。フィルタを対角に並べることで多入力多出力系にも適用できるが、多入力多出力系の特徴を活かすことにより精度の良い AD/DA 変換を行うことができると考えられる。

本稿では、先行研究⁶⁾を踏まえて拡張することで、2 入力 2 出力のシステムにおいて、2 つの信号の振幅差分に制約を有する信号を考え、このような信号に対して有効なフィルタの設計を行った。これによって信号間に相関があれば、それを有効活用した効率的な伝送ができる。なお本稿においてはフィルタの特性のみに着

目するため DSM は与えられているものとする。

本稿における記号の定義は以下のように与える。 \mathcal{Z} は整数値集合, \mathcal{R} は実数集合, $\mathcal{V} \subset \mathcal{R}$ は離散値入力集合である。

2 問題設定

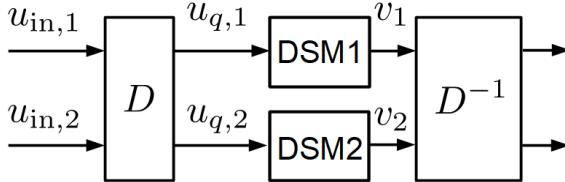


Fig. 1: Proposed System

Fig. 1 の 2 入力 2 出力のシステムを考える。ここで、次の 1 次の DSM1 と DSM2 が $Q_{\Delta\Sigma,i}(i=1,2)$ で与えられているものとする。

$$Q_{\Delta\Sigma,i} : \begin{cases} \xi_i(k+1) = \xi_i(k) - u_{q,i}(k) + v_i(k) \\ v_i(k) = Q_{stat,i}[-\xi_i(k) + u_{q,i}(k)] \end{cases} \quad (i=1,2) \quad (1)$$

$\xi_i \in \mathcal{R}$, $u_{q,i} \in \mathcal{R}$, $v_i \in \mathcal{V}$ は、それぞれ DSM の状態、入力、出力を表す。 $Q_{stat,i} : \mathcal{R} \rightarrow \mathcal{V}$ は静的量子化である。DSM1, および DSM2 の量子化ビット数をそれぞれ N_1, N_2 とする。また、DSM が満たさなければならない条件として DSM に入力される信号 $u_q(k)$ が

$$|u_{q,i}(k)| \leq U_{qmax,i}, \forall k \quad (i=1,2) \quad (2)$$

でなければならず、これを振幅制約とする。

また、入力信号 u_{in} の振幅と変化速度、2つの信号の差信号の振幅と変化速度の最大値がそれぞれ次のように事前にわかっているものとする。

$$\begin{aligned} |u_{in,i}| &\leq U_{max,i} \\ |\dot{u}_{in,i}| &\leq \dot{U}_{max,i} \\ u_{in,dif} &= |u_{in,1} - u_{in,2}| \leq U_{difmax} \\ \dot{u}_{in,dif} &\leq \dot{U}_{difmax} \quad (i=1,2) \end{aligned} \quad (3)$$

2.1 プレフィルタ D の設計方針

プレフィルタ D を次の式で表現する。

$$D = \begin{pmatrix} \frac{1+\alpha_1 s}{\beta_1} & 0 \\ \frac{1+\alpha_2 s}{\beta_2} & -\frac{1+\alpha_2 s}{\beta_2} \end{pmatrix} \quad (4)$$

ただし式(4)において、 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ は設計パラメータである。ポストフィルタ D^{-1} はローパスフィルタとなつており量子化ノイズの抑制が期待できる。プレフィルタ D 通過後の信号は、

$$\begin{pmatrix} u_{q,1} \\ u_{q,2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1+\alpha_1 s}{\beta_1} u_{in,1} \\ \frac{1+\alpha_2 s}{\beta_2} (u_{in,1} - u_{in,2}) \end{pmatrix} \quad (5)$$

となっており、入力信号のうちの 1 つと、差信号（入力 1 と入力 2 の差の信号）に変換されることが分かる。

例えば、DSM1 の量子化レベルを $N_1 = 6$, DSM2 の量子化レベルを $N_2 = 2$ というように、2つの DSM の量子化レベルを工夫することで、主要なデータを高レベルで量子化することができ、同じデータレート制約下でもより良い AD/DA 変換が期待できる。

2.2 振幅制約を考慮した設計

ここではプレフィルタ D を通過した信号が、振幅制約を満たすために必要な設計条件を示す。

プレフィルタ D を通過した信号 u_q は以下のようになる。

$$u_q = D \cdot u_{in} = \begin{pmatrix} \frac{u_{in,1} + \alpha_1 \dot{u}_{in,1}}{\beta_1} \\ \frac{(u_{in,1} - u_{in,2}) + \alpha_2 (\dot{u}_{in,1} - \dot{u}_{in,2})}{\beta_2} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{u_{in,1} + \alpha_1 \dot{u}_{in,1}}{\beta_1} \\ \frac{u_{dif} + \alpha_2 \dot{u}_{dif}}{\beta_2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

信号 u_q は量子化器の振幅制約 (式 (2)) を満たす必要がある。それは信号 u_q が量子化器へ入力されるためである。式 (3) の条件により、プレフィルタ D を通過した信号の振幅 $|u_q|$ は以下のように $|u_q|_{max}$ で制約することができる。

$$\begin{aligned} |u_q| &= \begin{pmatrix} \left| \frac{u_{in,1} + \alpha_1 \dot{u}_{in,1}}{\beta_1} \right| \\ \left| \frac{u_{dif} + \alpha_2 \dot{u}_{dif}}{\beta_2} \right| \end{pmatrix} \\ &\leq \begin{pmatrix} \left| \frac{U_{max,1} + \alpha_1 \dot{U}_{max,1}}{\beta_1} \right| \\ \left| \frac{U_{difmax} + \alpha_2 \dot{U}_{difmax}}{\beta_2} \right| \end{pmatrix} = |u_q|_{max} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで式 (8) の $|u_q|_{max}$ は与えられた $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ において信号 u_q が取り得る振幅の最大値である。この最大値が振幅制約を満たすようにプレフィルタ D を設計すれば、あらゆる入力信号 u_{in} に対して、信号 u_q が振幅制約を満たすようなフィルタを設計できる。よって以下の式を満たすようにフィルタを設計する。

$$|u_{q,i}|_{max} \leq U_{qmax,i} \quad (9)$$

2.3 評価関数

このフィルタ D の評価のために Fig. 2 に示す評価システムを考える。

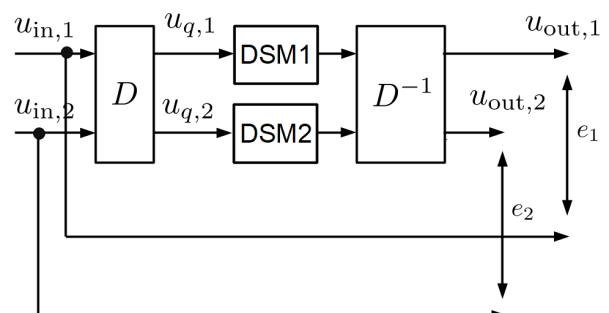


Fig. 2: Evaluation System

$|e_i| = |u_{\text{in},i} - u_{\text{out},i}|$ とすると、 $|e_i|$ は DSM における量子化ノイズの大きさを表している。AD/DA 変換においては、 $u_{\text{in},i} = u_{\text{out},i}$ となることが理想であるため、 $|e_i|$ はできるだけ小さいほうが望ましい。よって、この $|e_i|$ が小さくなるようにフィルタ D を設計する必要がある。

ここで評価関数として以下を用いる。

$$E(D) = \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^{t_e} |e_i(k)| \quad (10)$$

ただし、 t_e は実行時間である。 $E(D)$ が小さくなることで $|e_i|$ がそれぞれ小さくなると期待される。

2.4 設計方法

粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization : PSO) 法を用いて、プレフィルタ D (式 (4)) の設計パラメータを求める。PSO 法は、探索空間内にランダムに配置された複数の粒子が情報交換しつつ移動し、より良い評価値を持つ解を探索する手法である。PSO 法を用いてフィルタ D のパラメータを探索することで、評価関数 $E(D)$ を最小化する制約付き問題を効率よく求めることができる。

PSO 法を用いて、式 (9) の条件を満たしつつ、 D, D^{-1} が安定であり、式 (10) の評価関数 $E(D)$ が小さくなるような $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ の組み合わせを求める。これによってプレフィルタ D を設計する。

3 数値シミュレーション

ここでは、数値例を用いてプレフィルタ D の有効性を検証する。

3.1 シミュレーション条件

Fig. 1 に示すような、2 入力 2 出力のシステムを考える。ここで、DSM1 の量子化ビット数 $N_1 = 3$ 、振幅制約を 10、DSM2 の量子化ビット数 $N_2 = 1$ 、振幅制約を 0.5 とする。

入力信号 u_{in} は式 (11) のような制約を有する信号を考え、式 (12) で示す信号 u_{in} を用いる。 u_{in} において、 $F_s = 100$ であり、現在時刻の大きさ u_{in} と変化速度 \dot{u}_{in} は観測可能であるとする。

$$\begin{aligned} |u_{\text{in}}| &\leq 10 \\ |\dot{u}_{\text{in}}| &\leq 1 \\ u_{\text{in},dif} &= |u_{\text{in},1} - u_{\text{in},2}| \leq 0.5 \\ \dot{u}_{\text{in},dif} &= \leq 0.05 \end{aligned} \quad (11)$$

$$u_{\text{in}} = \begin{pmatrix} 4.5 \sin(\frac{0.1}{F_s} k) + 4.5 \sin(\frac{0.05}{F_s} k) + 0.5 \sin(\frac{0.3}{F_s} k) \\ 4.5 \sin(\frac{0.1}{F_s} k) + 4.5 \sin(\frac{0.05}{F_s} k) \end{pmatrix} \quad (12)$$

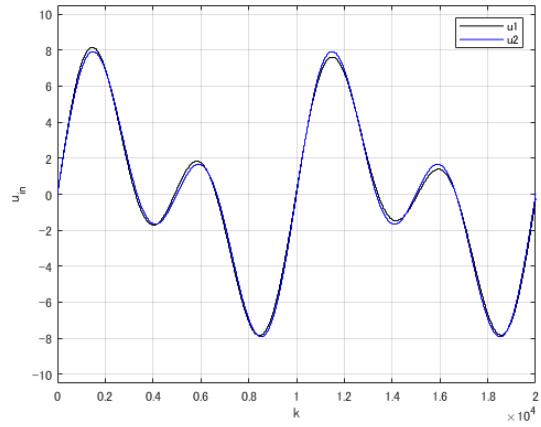


Fig. 3: Input Signal

有効性検証のための比較対象として、以下のプレフィルタ D_t を用いる。

$$D_t = \begin{pmatrix} \frac{1+\alpha_{1t}s}{\beta_{1t}} & 0 \\ 0 & \frac{1+\alpha_{2t}s}{\beta_{2t}} \end{pmatrix} \quad (13)$$

D_t は先行研究⁶⁾の SISO 系に対して設計されるフィルタを対角項に並べ、非対角項の値を 0 にしたものに相当する。また比較対象の DSM の量子化ビット数はそれぞれ 2、振幅制約を 10 とする。PSO におけるシミュレーション条件は、粒子数 300 個、繰り返し回数 500 回とする。

3.2 シミュレーション結果

PSO によって得られたプレフィルタ D 、比較対象のプレフィルタ D_t を以下に示す。

$$D = \begin{pmatrix} \frac{-1-5.33s}{1.54} & 0 \\ \frac{1+204.4s}{21.62} & -\frac{-1-204.4s}{21.62} \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$D_t = \begin{pmatrix} \frac{1+38.11s}{4.87} & 0 \\ 0 & \frac{1+39.97s}{5.00} \end{pmatrix} \quad (15)$$

またプレフィルタ D とポストフィルタ D^{-1} のゲイン線図を Fig. 4 に示す。

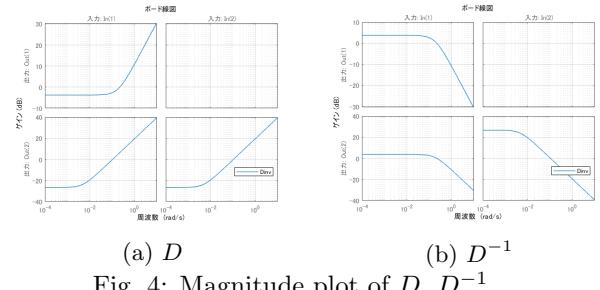


Fig. 4: Magnitude plot of D, D^{-1}

Fig. 4 より、プレフィルタはハイパス特性、ポストフィルタはローパス特性を持っており量子化ノイズ抑制の効果が期待できる。

シミュレーション結果を Fig. 5~9 に示す. Fig. 5 は従来手法の AD/DA 変換系の出力である. Fig. 6 は元信号との誤差である. Fig. 7 はプレフィルタ D を通過した信号であり, 量子化器へ印加されるため量子化器の振幅制約を満たす必要がある. Fig 8 は提案手法の AD/DA 変換系の出力, Fig 9 は提案手法の出力と元信号との誤差である. Table. 1 は元信号との誤差積分の合計値をまとめたものである.

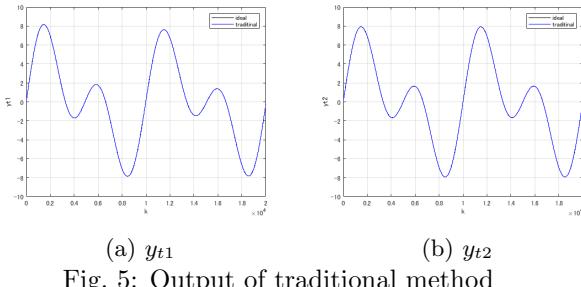


Fig. 5: Output of traditional method

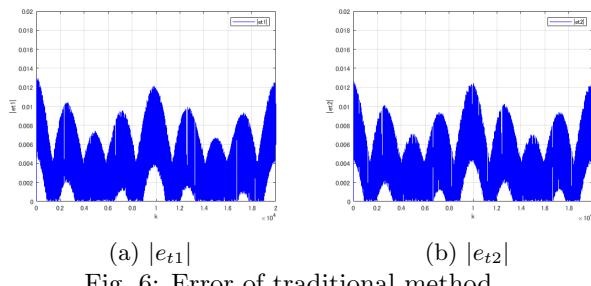


Fig. 6: Error of traditional method

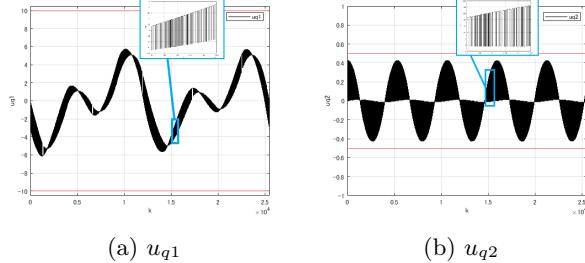


Fig. 7: Input for Q by proposed method

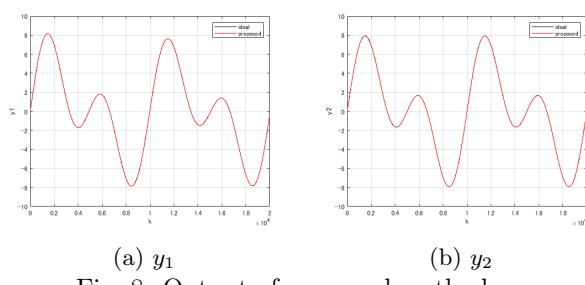


Fig. 8: Output of proposed method

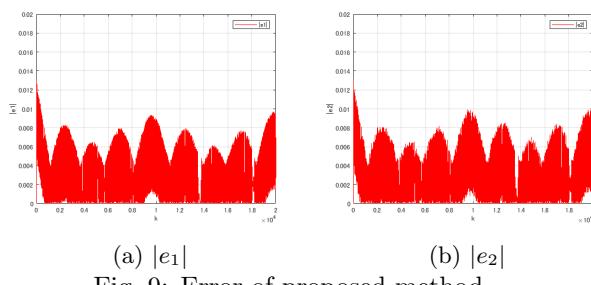


Fig. 9: Error of proposed method

Table 1: Error integration

	提案手法	従来手法
入力 1	125.323	164.595
入力 2	125.576	162.620
合計	250.899	327.215

Fig. 7 から量子化器への入力信号が、赤線で示す量子化器の振幅制約である $|u_{q1}| \leq 10$, $|u_{q2}| \leq 0.5$ を満たしていることが確認できる. Table. 1 から AD/DA 変換後の信号と元信号との誤差積分の合計値は、提案手法の方が小さくなっていることより提案手法のフィルタの有効性が確認できる.

4 おわりに

本稿では、2 入力 2 出力のシステムにおいて、2 つの信号の振幅差分に制約を有する信号を考え、このようなケースに対して有効なプレフィルタの設計を行った. SISO 系では、入力信号をそれぞれ整形し AD/DA 変換を行う. それに対し MIMO 系では複数の入力信号を干渉させることができるために、提案手法のプレフィルタによって 2 つ入力信号を、1 つの元信号と差信号の形に整形し、主要な信号の方を高レベルで量子化し AD/DA 変換を行った. 数値例を用いて PSO アルゴリズムで条件を満たす最適なプレフィルタを設計し、提案手法の MIMO 系におけるフィルタを介した量子化と、非対角項の値を 0 とした SISO 系のフィルタを介した量子化との性能を比較することで提案手法によるノイズ除去の有効性を示すことができた. 問題設定として、2 つの入力信号が類似している必要がある. また、その差信号の振幅と速度の最大値が予め必要であるものの、その仮定さえ満たせば本稿の手法が有効であることがわかる.

参考文献

- 1) 南裕樹: 信号品質を保つデジタル化技術: ノイズシェーピング量子化-1-量子化とノイズシェーピングの基礎, システム/制御/情報, Vol.61, No.2, pp.76-82, 2017
- 2) 岡島寛, 南裕樹: 信号品質を保つデジタル化技術: ノイズシェーピング量子化-2- $\Delta\Sigma$ 変調器, システム/制御/情報, Vol.61, No.4, pp.158-163, 2017
- 3) 岡島, 松永: AD/DA 変換におけるプレフィルタとポストフィルタの二段階設計; 計測自動制御学会論文集, Vol. 47, No. 4, pp.271-219(2011)
- 4) H. Okajima, M. Honda, R. Yoshino, N. Matsunaga: A Design Method of Delta-Sigma Data Conversion System with Pre-Filter; SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 8, No. 2, pp.154-160 (2015)
- 5) 鍋倉, 岡島, 松永: プレフィルタとポストフィルタを含む AD/DA 変換系の設計と音声信号圧縮系への適用; 計測自動制御学会論文集, Vol. 50, No. 3, pp.295-302(2014)
- 6) 青木, 岡島, 松永: 信号量子化を含むフィードフォワード系での S/N 比改善のための入力振幅制約に基づくプレフィルタとポストフィルタの設計; 第 63 回自動制御連合講演会 (2020)

磁気ナノ粒子トモグラフィの逆問題解析手法における推定性能の向上

九州大学 ○岡村直樹 東野光宇太 笹山瑛由 吉田敬

Improvement of estimation performance by inverse problem analysis
in magnetic nanoparticle tomography

Naoki Okamura, Kohta Higashino, Teruyoshi Sasayama,
and Takashi Yoshida, Kyushu University

Abstract: Magnetic nanoparticle tomography (MNT), which has multiple magnetic sensors, has been proposed as an application of magnetic nanoparticle (MNP) imaging techniques. The position of MNPs is estimated using inverse problem analysis. In MNT, the reduction of artefacts and calculation time is important to accurately estimate the position of the MNPs. In this study, we applied standardized low-resolution electromagnetic tomography (sLORETA) method to restrict the analysis region, and subsequently we applied non-negative least squares (NNLS) method in the restricted region. Using this method, MNP samples containing 500 µg of Fe and 300 µg of Fe placed at a depth of 30 mm were observed without no artefacts, and the calculation time was reduced to approximately 1/5.

1. はじめに

近年、磁気粒子イメージング (magnetic particle imaging: MPI) は、がん細胞などの特定のターゲットを対象とした新しい画像診断技術として注目されている^{[1]-[3]}。MPI では、磁気ナノ粒子 (magnetic nanoparticle: MNP) を高分子で被覆し表面に検査薬などを結合させた磁気マーカーを体内に注入し、磁場を印加して、標的部位に蓄積された MNP の位置と量を推定する^{[2][3]}。MPI は、MNP の非線形な磁化応答に起因する高調波磁界を検出し、直流通じて無磁場の点 (Field-Free Point: FFP) を生成することで、高い分解能を実現している。しかし、FFP を発生させるためには強い傾斜磁場 (一般に 1~2 T/m 程度) が必要であり、この傾斜磁場を高速で走査すると、強い磁気刺激が発生し、末梢神経の刺激や聴覚障害が生じるという問題がある^[4]。

以上のような問題を解決するために、我々は傾斜磁場を用いない新しいイメージング手法として磁気ナノ粒子トモグラフィ (magnetic nanoparticle tomography: MNT) を提案している^{[5], [6]}。MNT は、複数の磁気センサを用いて MNP の高調波信号の磁界データを取得し、逆問題解析によって MNP の位置や量を推定するものである。先行研究では、MNT による MNP の位置や量の推定には、MPI で一般的に適用されている逆問題解析手法である非負最小二乗法 (non-negative least squares (NNLS) 法) を用いていた^{[2], [3], [5], [6]}。NNLS 法は、高い感度と空間分解能を実現するが、測定ノイズが存在するために特定の MNP が不正確に推定され、アーチファクトが発生する。また、NNLS

法は反復解法であるため、計算時間が長くなるという問題もある。

一方、脳波や脳磁図で多チャンネル計測の解析手法に空間フィルタ法^[7]があり、その一つである sLORETA (standardized low-resolution electromagnetic tomography) 法^[8]がある。sLORETA 法はノンアダプティブ空間フィルタの 1 つであり、相関のある信号に対してロバストであるほか、位置推定誤差がゼロであることが特徴である。また各ボクセルで並列計算を行うことができるため計算時間を短くすることが容易である^[9]。一方、空間分解能は低い。

そこで本稿では、sLORETA 法と NNLS 法の組み合わせ手法を提案し、NNLS 法の短所を sLORETA 法の長所で補うことで、アーチファクトの除去と計算時間の短縮を図った。sLORETA 法によっておおよそのサンプル位置を推定し、その位置付近で NNLS 法を適用した。

2. 原理・方法

2.1 実験装置

実験装置を Fig. 1 に示す。励起コイルの高さは 22 mm、外径 280 mm、内径は 200 mm、巻数 50 ターンである。磁場の強度は、電流振幅が 20 A のとき、z = -40 mmにおいて約 4 mT を超え、高調波信号の発生に十分な強度となる^[10]。検出コイルは励起コイルの中に配置し、数は 16 個とした。各検出コイルは、高さ 6 mm、外径 8 mm、内径 2 mm、巻数 1200 ターンである。検出コイルの検出方向は、X 軸または Y 軸方向とし、励起コイルによる影響を抑制した。励起コイルの駆動には、バイポーラ電源 (PBZ20-20、菊水電子工業製) を用い

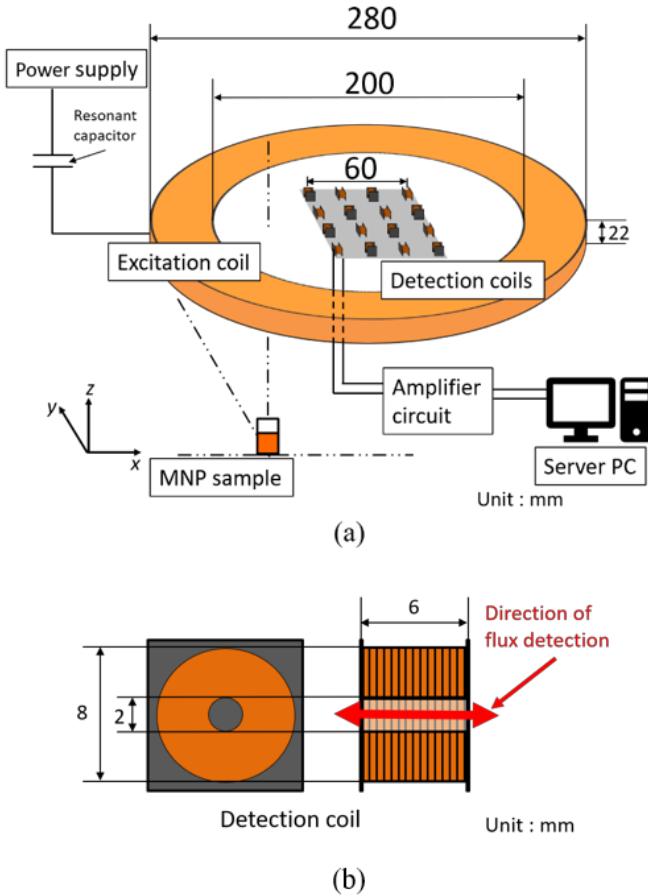


Fig. 1. Overview of the (a) experimental and (b) detection coil.

ており、周波数は $f_1 = 5.4 \text{ kHz}$ とした。検出コイルは增幅回路に接続しており、 $f_3 = 16.2 \text{ kHz}$ となる第3高調波信号を増幅した。

MNP からの基本波信号を抑制し、第3高調波信号を増幅して取得するシステムは、先行研究^[6]と同様のものを用いた。このシステムでは、補償回路とバンドエリミネーションフィルタ (SR-2BE2、NF 回路設計ブロック製) を用いて基本波信号を抑制した。さらに、低ノイズ計装アンプ (AD8429BRZ、ANALOG DEVICES 製) とオペアンプ (OP1177ARZ、ANALOG DEVICES 製) を用いて、第3高調波信号を約 50000 倍に増幅した。この出力信号を、24 ビット分解能の 32 チャンネル A/D コンバータ (NI PXIE-4303、NATIONAL INSTRUMENTS 製) を用いて記録した。なお、使用した A/D コンバータのサンプリングレートの上限が 51.2 kS/s であることから、高調波の中では第3高調波のみを解析に用いた。

2.2 順問題と逆問題

高調波電圧ベクトル \mathbf{v} は次のように表される。

$$\mathbf{v} = \mathbf{Ac} \\ = \iiint_{\Omega} \mathbf{a}(\mathbf{r}) c(\mathbf{r}) dV, \quad (1)$$

ここで

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_{\#J} \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{A}_{\#J} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

ここで \mathbf{v}_k ($= [v_{1,k}, v_{2,k}, \dots, v_{N_p,k}]^T$ 、 N_p は検出コイルの数 ($N_p = 16$)) は、励磁電流振幅が I_k ($I_k \in \mathcal{I}, \mathcal{I} = \{1, 2, \dots, 20\} (A), k = 1, \dots, \#J, \#$ は集合の要素数) のときの高調波電圧である。また、 $\mathbf{a}(\mathbf{r})$ は \mathbf{A} の列ベクトルであり、 Ω は磁気ナノ粒子が存在する領域である。 \mathbf{A}_k は励磁電流振幅を I_k としたときのシステム行列であり、 \mathbf{c} は位置 $\mathbf{r} \in \Omega$ での濃度 $c(\mathbf{r})$ を並べたベクトルである。式(1)は順問題として知られている^[7]。 \mathbf{v} と \mathbf{A} を用いて \mathbf{c} を計算する方法として、次式で表される NNLS 法に基づく逆問題解析法がある。

$$\hat{\mathbf{c}} = \underset{\mathbf{c}}{\operatorname{argmin}} \|\mathbf{Ac} - \mathbf{v}\|^2 + \lambda \|\mathbf{c}\|^2 \quad (3)$$

$$\text{subject to } \mathbf{c} \geq \mathbf{0}, \quad (4)$$

ここで $(\hat{\cdot})$ は推定量を示し、 λ は正則化パラメータである。本実験では、 $\lambda = 1.0 \times 10^{-3}$ とした。

空間フィルタ法における順問題は、時刻 t における測定データは列ベクトル $\mathbf{v}(t)$ 、時刻 t におけるソース信号 $s(t)$ は位置 \mathbf{r} のソースからなる列ベクトル $s(\mathbf{r}, t)$ と定義すると次のように表される。

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{As}(t) \\ = \iiint_{\Omega} \mathbf{a}(\mathbf{r}) s(\mathbf{r}, t) dV, \quad (5)$$

空間フィルタ法における逆問題は $\mathbf{v}(t)$ を用いて $s(\mathbf{r}, t)$ を推定することであり、次のように表される。

$$\hat{s}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{w}^T(\mathbf{r}) \mathbf{v}(t), \quad (6)$$

ここで $\mathbf{w}(\mathbf{r})$ が空間フィルタである。空間フィルタ出力のパワー $\hat{P}(\mathbf{r}, t)$ は次のように表される。

$$\hat{P}(\mathbf{r}, t) = \langle \hat{s}(\mathbf{r}, t)^2 \rangle \\ = \mathbf{w}^T(\mathbf{r}) \langle \mathbf{v}(t) \mathbf{v}^T(t) \rangle \mathbf{w}(\mathbf{r}) \\ = \mathbf{w}^T(\mathbf{r}) \mathbf{C} \mathbf{w}(\mathbf{r}), \quad (7)$$

ここで $\langle \cdot \rangle$ は時間平均、 \mathbf{C} は $\mathbf{v}(t)$ の共分散行列を示す。sLORETA 法における $\mathbf{w}(\mathbf{r})$ は次のように表される。

$$\mathbf{w}(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{G}^{-1}\mathbf{a}(\mathbf{r})}{\sqrt{\mathbf{a}^T(\mathbf{r})\mathbf{G}^{-1}\mathbf{a}(\mathbf{r})}}, \quad (8)$$

ここで \mathbf{G} ($\mathbf{G} = [\mathbf{A}\mathbf{A}^T]$) はグラム行列と呼ばれ、 \mathbf{G}^{-1} は正則化パラメータ λ_G を用いて次のように計算される。

$$\mathbf{G}^{-1} \leftarrow \{\mathbf{G} + \lambda_G \mathbf{I}\}^{-1}, \quad (9)$$

ここで \mathbf{I} は単位行列を示す。式(8)を式(7)に代入することにより磁気ナノ粒子の位置や量を推定することができる。本実験では、 $\lambda_G = 0.1 \times \text{tr}(\mathbf{G})/(N_p \times \#\mathcal{I})$ とした。 $\text{tr}(\cdot)$ はトレースを示す。

本稿では、逆問題解析には第3高調波のみを使用した。sLORETA 法を MNT に適用するために、式(7)の $\mathbf{v}(t)$ と $\hat{P}(\mathbf{r}, t)$ をそれぞれ式(3)の \mathbf{v} と $\hat{\mathbf{c}}$ に対応させ、 $(\hat{P}(\mathbf{r}, t))$ として用いた。システム行列 \mathbf{A} は自動ステージ (OSMS26-300 (XY) および OSMS20-85 (Z)、シグマ光機製) を用いて、鉄含有量が 500 μg の MNP サンプルを 10 mm/s の速度で x - y 平面上を走査させて、実験的に取得した。 x - y 平面のサンプリング分解能は 5 mm × 5 mm とした。MNP サンプルと励起コイルとの距離は 30 mm に設定し、励磁電流振幅 I_k を 1 秒ごとに変化させて \mathbf{v}_k の値を測定した。

逆問題を解くためのソフトウェアは MATLAB R2019a (Mathworks 社) を用いて開発し、シングル CPU (Intel Core i7-10700, 8 コア, ベース周波数 2.90 GHz) と 16 GB のメインメモリを搭載した Windows PC (Windows 10 Pro) で実行した。また、CVX (MATLAB Software for Disciplined Convex Programming)^[11] を用いた NNLS 法の計算には 1 つのコアを使用したが、Parallel Computing Toolbox を用いた sLORETA 法の計算には 8 つのコアすべてを使用した。

2.3 MNP サンプル

MNP サンプルには Resovist (富士フィルム RI フィルマ) を使用し、150 μL あたりの鉄含有量が所望の量になるように円柱状容器に入れ、グリセロールで希釈して半固相化したものをサンプルとして用いた。各サンプルの寸法は $\phi 6 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ であった。

2.4 性能評価

NNLS 法、sLORETA 法、NNLS 法と sLORETA 法を組み合わせた手法について、推定精度と計算時間について評価を行った。MNP サンプルは鉄含有量が 500 μg のものと 300 μg の 2 つを用いて、それぞれ $(x, y, z) = (25, -25, -30 \text{ mm})$ と $(x, y, z) = (-25, 25, -30 \text{ mm})$ の位置に配置し推定を行った。NNLS 法と sLORETA

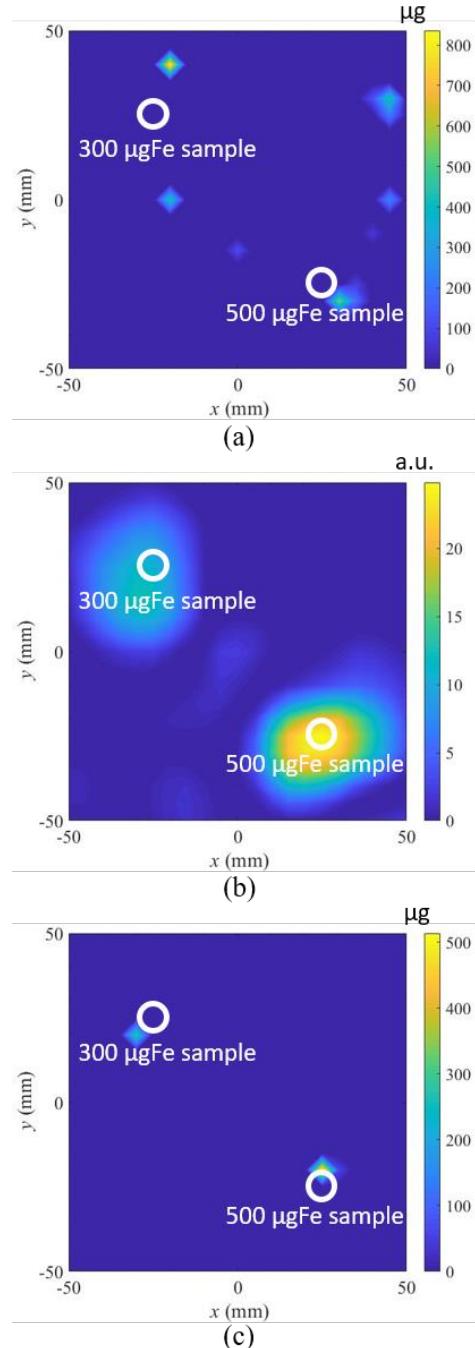


Fig. 2. Reconstructed map applying (a) NNLS, (b) sLORETA, and (c) sLORETA + NNLS methods when the 500- μg Fe and 300- μg Fe MNP samples were set at $(x, y, z) = (25, -25, -30 \text{ mm})$ and $(x, y, z) = (-25, 25, -30 \text{ mm})$. The color bar represents the value of (a) and (c) $c(\mathbf{r})$ in units of μg of Fe and (b) $(\hat{P}(\mathbf{r}, t))$, indicating the power. The white circle in the figure represents the actual sample position in each case.

法を組み合わせた手法では sLORETA 法によって得られたパワーマップによって MNP サンプルのおおよその位置を推定し、閾値を設け、その閾値を超える場所のみを用いて NNLS 法を適用することで位置と量を推定した。本稿では、sLORETA 法によって求められたパワーマップから次の領域を選択する。

$$\Omega_{\text{sub}} = \left\{ \mathbf{r} \mid \langle \hat{P}(\mathbf{r}, t) \rangle > \frac{\max(\langle \hat{P}(\mathbf{r}, t) \rangle)}{2} \right\}, \quad (10)$$

式(10)の領域 Ω_{sub} において NNLS 法を適用した。

3. 結果

NNLS 法、sLORETA 法、NNLS 法と sLORETA 法を組み合わせた手法を、それぞれ適用した結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2(a) から NNLS 法では計測雑音による影響によりサンプルの存在しない場所にサンプルがあると推定されるというアーチファクトが生じていた。Fig. 2(b) から 2 つのサンプルのおおよその位置は推定できているが信号の広がりが見られた。Fig. 2(c) から 2 つの手法を組み合わせると 500 μgFe のサンプルの推定位置が $(x, y, z) = (25, -20, -30 \text{ mm})$ 、300 μgFe のサンプルの推定位置が $(x, y, z) = (-30, 20, -30 \text{ mm})$ で推定誤差が各サンプルにおいて各軸 5 mm 以内でアーチファクトの検出もなく推定されていた。計算時間は NNLS 法のみの時で約 10 秒、sLORETA 法のみで約 0.3 秒、組み合わせ手法において約 2 秒であった。このことから従来の方法に比べて計算時間は約 1/5 に短縮されていることが分かった。

4. 結論

MNT の逆問題解析に空間フィルタ法である sLORETA 法と NNLS 法を組み合わせた方法を適用した。その結果、深さ 30 mm において鉄含有量が 500 μg と 300 μg のサンプルを、アーチファクトを検出することなく正確な位置で推定でき、計算時間も約 1/5 に短縮することに成功した。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP21H01342) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Q. A. Pankhurst, N. K. T. Thanh, S. K. Jones, and J. Dobson, "Progress in applications of magnetic nanoparticles in biomedicine," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 42, No. 22, 2009, Art. No. 224001.
- [2] T. Knopp and T. M. Buzug, *Magnetic Particle Imaging - An Introduction to Imaging Principles and Scanner Instrumentation*. Berlin, Germany: Springer-Verlag 2012.
- [3] B. Gleich and J. Weizenecker, "Tomographic imaging using the nonlinear response of magnetic particles," *Nature*, Vol. 435, No. 7046, pp. 1214-1217, 2005.
- [4] S. Sammet, "Magnetic resonance safety," *Abdom. Radiol.*, Vol. 41, No. 3, pp. 444-451, 2016.
- [5] T. Sasayama, T. Yoshida, and K. Enpuku, "Two-dimensional magnetic nanoparticle imaging using multiple magnetic sensors based on amplitude modulation," *J. Magn. Magn. Matter.*, Vol. 505, 2020, Art. no. 166765.
- [6] T. Sasayama, N. Okamura, and T. Yoshida, "Sensitivity improvement of magnetic nanoparticle imaging by compensation with digital-to-analog converter," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 57, No. 2, 2021, Art. no. 5300605.
- [7] K. Sekihara and S. S. Nagarajan, "Adaptive Spatial Filters for Electromagnetic Brain Imaging," New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2008.
- [8] R. D. Pascual-Marqui, "Standardized low resolution brain electromagnetic tomography (sLORETA): technical details," *Methods and Findings in Experimental and Clinical Pharmacology*, Vol. 24, pp. 5-12, 2002.
- [9] T. Sasayama, Y. Gotoh, and K. Enpuku, "Application of minimum variance beamformer for estimation of tip position of a nasogastric tube," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 50, No. 11, 2014, Art. No. 5101404.
- [10] A. L. Elrefai, T. Yoshida, and K. Enpuku, "Effect of viscosity on harmonics signals of magnetic nanoparticles for thermometry application," *J. Magn. Magn. Matter.*, Vol. 491, 2019, Art. no. 165480.
- [11] CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming Version 2.2, January 2020, Build 1148. Accessed: October 5, 2021. [Online]. Available: <http://cvxr.com/cvx/>.

FA 調整型離散時間ガウシャンプロセスモデルによる多段先予測とモデル予測制御

鹿児島大学 ○登友也 八野知博

Multistep ahead prediction and model predictive control by discrete-time Gaussian process models adjusted by FA

Tomoya Nobori and Tomohiro Hachino, Kagoshima University

Abstract: This paper presents a multistep ahead prediction and model predictive control using the Gaussian process models. Since the Gaussian process models can give information on the predicted value and its reliability, it is possible to obtain a predictor including information on the uncertainty of the model. Based on the multiple Gaussian process predictors, model predictive control is accomplished, where the input signal is optimized so that the error between the predicted future output and the reference signal becomes small. Firefly Algorithm is applied to both construction of predictors and model predictive control. Simulation results for an electric power system are shown to illustrate the effectiveness of the proposed method.

1 はじめに

一般に、モデル予測制御の性能は、未来の出力を予測するモデルの精度に大きく依存する。本稿では、ホタルアルゴリズム(FA)^[1]調整型のガウシャンプロセス(GP)モデルによる多段先予測器構築とモデル予測制御法を提案する。GPモデルは予測値とその信頼性の情報を与えることが可能であるため、モデルの不確かさの情報を含めた予測器を得ることができる。予測器構築ならびにモデル予測制御における最適化にはFAを適用する。電力系統に対するシミュレーション実験により、提案法の有効性を確認する。

2 対象システム

次の電力系統^[2]を制御対象とする。

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{M} \frac{d^2\delta}{dt^2} + \tilde{D}(\delta) \frac{d\delta}{dt} + P_e(\delta) = P_{in} \\ P_e(\delta) = E_I^2 Y_{11} \cos \theta_{11} + E_I \tilde{V} Y_{12} \cos(\theta_{12} - \delta) \\ E_I + T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{fd} \\ E_I = E'_q + (X_d - X'_d) I_d(\delta) \\ I_d(\delta) = -E_I Y_{11} \sin \theta_{11} - \tilde{V} Y_{12} \sin(\theta_{12} - \delta) \\ \tilde{D}(\delta) = \tilde{V}^2 \left\{ \frac{T''_{d0}(X'_d - X''_d)}{(X'_d + X_e)^2} \sin^2 \delta + \frac{T''_{q0}(X_q - X''_q)}{(X_q + X_e)^2} \cos^2 \delta \right\} \end{array} \right. \quad (1)$$

ここで、 δ ：発電機相差角、 P_{in} ：機械的入力、 $P_e(\delta)$ ：電気的出力、 \tilde{M} ：発電機慣性定数、 $\tilde{D}(\delta)$ ：制動係数、 E_I ：内部誘起電圧、 \tilde{V} ：基準点電圧、 $Y_{11} \angle \theta_{11}$ 、 $Y_{12} \angle \theta_{12}$ ：機間アドミタンス、 E'_q ：過渡リアクタンス背後電圧、 E_{fd} ：界磁電圧、 T'_{d0} ：直軸過渡時定数、 T''_{d0} ：直軸短絡初期過渡時定数、 T''_{q0} ：横軸短絡初期過渡時定数、 $I_d(\delta)$ ：直軸電流、 X_d ：直軸同期リアクタンス、 X'_d ：直軸過渡リアクタンス、 X''_d ：直軸初期過渡リアクタンス、 X_q ：横軸同期リアクタンス、 X''_q ：横軸初期過渡リアクタンス、 X_e ：外部リアクタンスである。入力 $u(k) = E_{fd}(kT_s) - \hat{E}_{fd}$ と出力 $y(k) = \delta(kT_s) - \hat{\delta}_0$ が入手可能とする。 \hat{E}_{fd} と $\hat{\delta}_0$ はそれぞれ定常状態における界磁電圧と相差角、 T_s はサンプリング周期である。

3 GP モデルによる多段先予測

本稿では、各段先の複数個の予測器で多段先予測を行う直接型の手法を採用する。GP 事前分布による j 段先予測モデル ($j = 1, \dots, M$) は

$$\mathbf{y}_j \sim N(\mathbf{m}_j(\mathbf{X}), \mathbf{K}_j(\mathbf{X}, \mathbf{X})) \quad (2)$$

のように導出できる。ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_j &= [y(k_s + j), \dots, y(k_s + j + N - 1)]^T \\ \mathbf{X} &= [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N]^T \\ &= [\mathbf{x}(k_s), \mathbf{x}(k_s + 1), \dots, \mathbf{x}(k_s + N - 1)]^T \quad (3) \\ \mathbf{x}(k) &= [y(k), y(k - 1), \dots, y(k - L_y + 1), \\ &\quad u(k), u(k - 1), \dots, u(k - L_u + 1)]^T \end{aligned}$$

である。ここで平均関数ベクトルは

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_j(\mathbf{X}) &= [m_j(\mathbf{x}_1), m_j(\mathbf{x}_2), \dots, m_j(\mathbf{x}_N)]^T \\ &= \tilde{\mathbf{X}} \boldsymbol{\theta}_{mj} \\ \tilde{\mathbf{X}} &= [\mathbf{X}, \mathbf{e}] \quad \mathbf{e} = [1, 1, \dots, 1]^T \\ \boldsymbol{\theta}_{mj} &= [\theta_{mj0}, \theta_{mj1}, \dots, \theta_{mj(L_y+L_u)}]^T \end{aligned} \quad (4)$$

とし、共分散行列は

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_j(\mathbf{X}, \mathbf{X}) &= \Sigma_j(\mathbf{X}, \mathbf{X}) + \sigma_j^2 \mathbf{I}_N \\ \Sigma_j(\mathbf{X}, \mathbf{X}) &= \begin{bmatrix} s_j(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_1) & \dots & s_j(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_j(\mathbf{x}_N, \mathbf{x}_1) & \dots & s_j(\mathbf{x}_N, \mathbf{x}_N) \end{bmatrix} \quad (5) \\ s_j(\mathbf{x}_p, \mathbf{x}_q) &= \rho_j^2 \exp \left(-\frac{\|\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_q\|^2}{2\ell_j^2} \right) \end{aligned}$$

とする。

共分散関数のハイパーパラメータ $\boldsymbol{h}_j = [\rho_j, \ell_j, \sigma_j]^T$ と平均関数の重みベクトル $\boldsymbol{\theta}_{mj}$ は FA と最小二乗法との組合せにより決定する。

新たなモデル入力

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_* &= \mathbf{x}_*(k_0) \\ &= [y_*(k_0), y_*(k_0 - 1), \dots, y_*(k_0 - L_y + 1), \\ &\quad u_*(k_0), u_*(k_0 - 1), \dots, u_*(k_0 - L_u + 1)]^T \quad (6) \end{aligned}$$

に対する出力 $y_*(k_0 + j)$ の事後分布は

$$y_*(k_0 + j) | \mathbf{X}, \mathbf{y}_j, \mathbf{x}_* \sim N(\hat{y}_*(k_0 + j), \hat{\sigma}_*^2(k_0 + j)) \quad (7)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \hat{y}_*(k_0 + j) &= m_j(\mathbf{x}_*) + \Sigma_j(\mathbf{x}_*, \mathbf{X}) \mathbf{K}_j^{-1} (\mathbf{y}_j - \mathbf{m}_j(\mathbf{X})) \\ \hat{\sigma}_*^2(k_0 + j) &= s_j(\mathbf{x}_*, \mathbf{x}_*) \end{aligned} \quad (8)$$

$$- \Sigma_j(\mathbf{x}_*, \mathbf{X}) \mathbf{K}_j^{-1} \Sigma_j(\mathbf{X}, \mathbf{x}_*) + \sigma_{j[best]}^2$$

である。ここで $\hat{y}_*(k_0 + j)$ が j 段先の予測値であり、 $\hat{\sigma}_*^2(k_0 + j)$ はその信頼性の情報として用いられる。

4 モデル予測制御

本稿では、次のモデル予測制御問題を考える。

$$\min_{u_*(k_0)} \sum_{j=1}^M (y_{ref}(k_0 + j) - \hat{y}_*(k_0 + j))^2 \quad (9)$$

subject to

$$|u_*(k_0)| \leq U_{max} \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^M \hat{\sigma}_*^2(k_0 + j) \leq S_{max} \quad (11)$$

ここで、 $y_{ref}(k)$ は参照軌道、 U_{max} は入力信号に対する制約、 S_{max} は出力予測値の不確かさに対する制約である。(11) 式の制約条件は、出力予測値に大きな不確かさを生ずる入力は最適化の対象から除外することを意味している。予測区間は $[k_0+1, k_0+M]$ 、制御入力区間は $[k_0, k_0]$ である。

提案法である FA を用いた制御アルゴリズムは以下の通りである。

step 1: 時間ステップの初期化

現在の時間ステップを $k = k_0$ とする。

step 2: FA の初期化

入力信号 $u_*(k_0)$ のための Q 匹のホタル (解候補) から成る初期候補集団を、(10) 式の制約を考慮してランダムに発生させる。繰り返しカウンター $l = 0$ とする。

step 3: 状態ベクトルの構成

状態ベクトル \mathbf{x}_* の候補を構成する。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{*[i]} &= \mathbf{x}_{*[i]}(k_0) \\ &= [y_*(k_0), y_*(k_0 - 1), \dots, y_*(k_0 - L_y + 1), \quad (12) \\ &\quad u_{*[i]}(k_0)]^T \quad (i = 1, 2, \dots, Q) \end{aligned}$$

step 4: 出力値の予測

(8) 式に基づき予測区間上の未来の出力値の候補 $\hat{y}_{*[i]}(k_0 + j)$ とその分散 $\hat{\sigma}_{*[i]}^2(k_0 + j)$ を予測する。

step 5: 評価値計算

未来の出力値の候補と参照軌道との差である (13) 式の値を求める。

$$J_{[i]} = \sum_{j=1}^M (y_{ref}(k_0 + j) - \hat{y}_{*[i]}(k_0 + j))^2 \quad (13)$$

ここで参照軌道は、指令値 $y_t(k_0)$ に対して

$$y_{ref}(k_0 + j) = (y_t(k_0) - y(k_0))(1 - \exp(-\eta j)) + y(k_0) \quad (14)$$

とする。 $\sum_{j=1}^M \hat{\sigma}_{*[i]}^2(k_0 + j) > S_{max}$ の場合は、評価値 $J_{[i]}$ に大きな値を割り当て、最適化の対象から除外する。

step 6: ホタルの移動

step 7: FA の繰り返し

繰り返し回数が l_{max} 未満の場合は $l = l + 1$ とし、step 3 に戻る。

step 8: 最適入力の決定

最小の評価値を有するホタル (解候補) を、最適な入力信号 $u_{*[best]}(k_0)$ とする。

step 9: 出力計測

$u_{*[best]}(k_0)$ を対象システムに入力し、次ステップの出力 $y_*(k_0 + 1)$ を求める。

step 10: 時間ステップのスライド

$k_0 = k_0 + 1$ とし、step 2 に戻る。

5 シミュレーション

(1) 式において系統係数を $\tilde{M} = 0.016095$ 、 $T'_{d0} = 5.09907$ 、 $\tilde{V} = 1.0$ 、 $P_{in} = 1.2$ 、 $X_d = 0.875$ 、 $X'_d = 0.422$ 、 $Y_{11} = 1.04276$ 、 $Y_{12} = 1.03084$ 、 $\theta_{11} = -1.56495$ 、 $\theta_{12} = 1.56189$ 、 $X_e = 1.15$ 、 $X''_d = 0.238$ 、 $X_q = 0.6$ 、 $X''_q = 0.3$ 、 $T''_{d0} = 0.0299$ 、 $T''_{q0} = 0.02616$ 、定常状態運転値を $\hat{E}_I = 1.52243$ 、 $\hat{\delta}_0 = 48.57$ 、 $\hat{\delta}_0 = 0$ 、 $\hat{E}_{fd} = 1.52243$ とした電力系統を制御対象とする。評価関数の制約条件は $U_{max} = 25$ 、 $S_{max} = 0.001$ とした。予測モデルの次数を $L_y = 3$ 、 $L_u = 1$ 、指令値を 0.7 ($0 \leq k < 150$)、1.0 ($150 \leq k < 300$)、0.8 ($300 \leq k \leq 500$) と区分一定に変えており、参照軌道のパラメータを $\eta = 0.1$ とした。図 1 に出力 $y_*(k)$ の時間応答を示す。区分一定な指令値に対して出力がよく追従していることが確認できる。

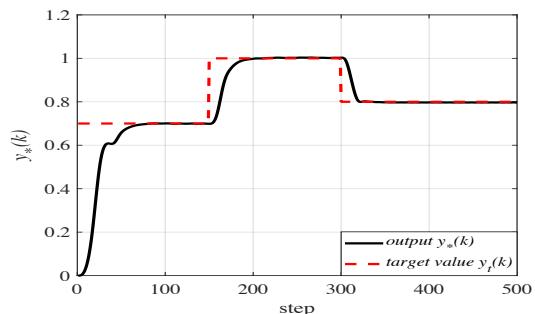


図 1: 出力 $y_*(k)$ の時間応答

参考文献

- [1] X. S. Yang, Firefly Algorithms for Multimodal Optimization, Lecture Note in Computer Sciences, Vol.5792, pp.169-178 (2009)
- [2] H. Takata, An Automatic Choosing Control for Nonlinear Systems, Proc. 35th IEEE CDC, pp.3453-3458 (1996)

k-means クラスタリングに基づく連続時間非線形システムのガウシャンプロセス同定

鹿児島大学 ○西山和宏 八野知博

Gaussian process identification based on k-means clustering
for continuous-time nonlinear systems

Kazuhiro Nishiyama and Tomohiro Hachino, Kagoshima University

Abstract: This paper deals with Gaussian process (GP) identification based on k-means clustering for continuous-time nonlinear systems. The GP prior model is trained by maximizing the log marginal likelihood of the identification data. For this training, the linear least-squares method combined with genetic algorithm is utilized. To reduce the computational burden, the training data is selected by using k-means clustering. Then the system parameters and the nonlinear function are estimated, and the confidence measure of the estimated nonlinear function is evaluated. Numerical experiments are performed to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

1はじめに

一般に、実システムは非線形性を有する場合がほとんどである。このようなシステムのモデリングを行うには、精度良い同定法の開発が必要である。そこで本稿では、ガウシャンプロセス (GP) モデルを用いた同定法を提案する。GP モデルにおける平均関数と共分散関数のパラメータは、それぞれ一括処理最小二乗 (LS) 法と遺伝的アルゴリズム (GA) によって推定する。また、モデル推定の計算量を削減するため、同定用入出力データの選定に k-means クラスタリングを導入する。電力系統を例とした同定ミュレーション実験により、提案法の有効性を確認した。

2問題設定

次の入出力連続時間非線形システムを同定対象とする。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq n_1, n_2, \dots, n_\alpha}}^n a_i p^{n-i} x(t) = f(z(t)) + \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq m_1, m_2, \dots, m_\beta}}^m b_j p^{m-j} u(t) \\ (a_0 = 1, n \geq m) \\ z(t) = [p^{n-n_1} x(t), p^{n-n_2} x(t), \dots, p^{n-n_\alpha} x(t), \\ p^{m-m_1} u(t), p^{m-m_2} u(t), \dots, p^{m-m_\beta} u(t)]^\top \\ y(t) = x(t) + e(t) \end{array} \right. \quad (1)$$

ここで、 $u(t)$ および $x(t)$ はそれぞれ入出力信号を表し、 $y(t)$ は観測雑音 $e(t)$ に乱された出力を表す。 $f(\cdot)$ は未知非線形関数、 p は微分演算子である。 $n, n_i (i = 1, 2, \dots, \alpha), m, m_j (j = 1, 2, \dots, \beta)$ は既知とする。入出力データから線形項に含まれるパラメータ $\{a_i\}, \{b_j\}$ 、及び未知非線形関数 $f(\cdot)$ との信頼性を同定する。

3 k-means クラスタリングに基づく GP モデル

(1) 式を変形し、両辺フィルタリングを施すと、

$$\left\{ \begin{array}{l} p^n y^f(t) = f(w^f(t)) - \sum_{i=1}^n a_i p^{n-i} y^f(t) \\ + \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq m_1, m_2, \dots, m_\beta}}^m b_j p^{m-j} u^f(t) + \varepsilon^f(t) \\ w^f(t) = [p^{n-n_1} y^f(t), p^{n-n_2} y^f(t), \dots, p^{n-n_\alpha} y^f(t), \\ p^{m-m_1} u^f(t), p^{m-m_2} u^f(t), \dots, p^{m-m_\beta} u^f(t)]^\top \end{array} \right. \quad (2)$$

となる。ここで、 $y^f(t)$ と $u^f(t)$ はフィルタリングされた信号を表し、 $\varepsilon^f(t)$ は平均零、分散 σ_n^2 の正規性雑音と仮定する。

本稿では、次のように k-means クラスタリング法を適用して、 M 個のベクトル $w^f(t_i) (i = 1, 2, \dots, M)$ から $N (< M)$ 個の部分データ $w^f[j] (j = 1, 2, \dots, N)$ を得る。
step 1 : 繰返しカウンター $l = 0$ とし、 M 個のデータセット $w^f(t_i) (i = 1, 2, \dots, M)$ のうち $N (< M)$ 個をクラスタの中心 (セントロイド) $c^0[j] (j = 1, 2, \dots, N)$ としてランダムに選ぶ。

step 2 : M 個のデータセットと各セントロイド $c^l[j]$ との距離を計算し、最も距離が近いセントロイドのクラスタにデータセットを振り分ける。

step 3 : 各クラスタに属するデータの重心をそのクラスタの新たなセントロイド $c^{l+1}[j]$ とする。

step 4 : $c^{l+1}[j] = c^l[j]$ ならば、各セントロイド $c^{l+1}[j]$ に最も近い N 個のデータを同定に使用する部分データ：
 $w^f[j] = [p^{n-n_1} y^f[j], p^{n-n_2} y^f[j], \dots, p^{n-n_\alpha} y^f[j],$
 $p^{m-m_1} u^f[j], p^{m-m_2} u^f[j], \dots, p^{m-m_\beta} u^f[j]]^\top \quad (3)$
 $(j = 1, 2, \dots, N)$

とし、クラスタリングを終了する。そうでなければ $l = l + 1$ とし、step 2 へ戻る。

以上から得られる N 個の部分データに基づき、(2) 式の非線形部を GP モデル表現すると、同定モデルは次のようにになる。

$$y \sim \mathcal{N}(m(w) + G\theta_l, K(w, w)) \quad (4)$$

ただし、

$$\left\{ \begin{array}{l} y = [p^n y^f[1], p^n y^f[2], \dots, p^n y^f[N]]^\top \\ w = [w^f[1], w^f[2], \dots, w^f[N]] \\ G = [g[1], g[2], \dots, g[N]]^\top \\ g[\ell] = [-p^{n-1} y^f[\ell], \dots, -p^{n-i} y^f[\ell], \dots, -y^f[\ell], \\ p^m u^f[\ell], \dots, p^{m-j} u^f[\ell], \dots, u^f[\ell]]^\top \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\theta}_l = [a_1, \dots, a_i, \dots, a_n, b_0, \dots, b_j, \dots, b_m]^T$$

$$(i \neq n_1, n_2, \dots, n_\alpha, j \neq m_1, m_2, \dots, m_\beta)$$

である。平均関数ベクトル $\mathbf{m}(\mathbf{w})$ は、

$$\begin{aligned}\mathbf{m}(\mathbf{w}) &= \mathbf{w}^T \boldsymbol{\theta}_m \\ \boldsymbol{\theta}_m &= [\theta_{n_1}, \theta_{n_2}, \dots, \theta_{n_\alpha}, \theta_{m_1}, \theta_{m_2}, \dots, \theta_{m_\beta}]^T\end{aligned}\quad (6)$$

とし、共分散行列 $\mathbf{K}(\mathbf{w}, \mathbf{w})$ は、

$$\mathbf{K}(\mathbf{w}, \mathbf{w}) = \Sigma(\mathbf{w}, \mathbf{w}) + \sigma_n^2 \mathbf{I}_N \quad (7)$$

とする。また、共分散関数として (8) 式のガウシヤンカーネルを用いる。

$$\begin{aligned}s(\mathbf{w}^f(t_p), \mathbf{w}^f(t_q)) \\ = \sigma_y^2 \exp\left(-\frac{\|\mathbf{w}^f(t_p) - \mathbf{w}^f(t_q)\|^2}{2\ell^2}\right)\end{aligned}\quad (8)$$

4 同定

同定用入出力データに対する対数周辺尤度 J :

$$J = -\frac{1}{2} \log |\mathbf{K}| - \frac{1}{2} (\mathbf{y} - \mathbf{Z}\boldsymbol{\theta}_{ml})^T \mathbf{K}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{Z}\boldsymbol{\theta}_{ml}) - \frac{N}{2} \log(2\pi) \quad (9)$$

の最大化により、ハイパーオラメータ $\boldsymbol{\theta}_c = [\sigma_y, \ell, \sigma_n]$ を含む未知オラメータ $\boldsymbol{\theta} = [\boldsymbol{\theta}_m^T, \boldsymbol{\theta}_l^T, \boldsymbol{\theta}_c^T]^T$ を LS 法と GA で推定する。ここで、 $\mathbf{Z} = [\mathbf{w}^T : \mathbf{G}], \boldsymbol{\theta}_{ml} = [\boldsymbol{\theta}_m^T, \boldsymbol{\theta}_l^T]^T$ である。

新入力 $\mathbf{w}_*(t)$ と対応する関数値 $f(\mathbf{w}_*(t))$ の事後分布は

$$f(\mathbf{w}_*(t)) | \mathbf{w}, \mathbf{G}, \mathbf{y}, \mathbf{w}_*(t) \sim \mathcal{N}(\hat{f}(\mathbf{w}_*(t)), \hat{\sigma}_*^2(t)) \quad (10)$$

$$\begin{cases} \hat{f}(\mathbf{w}_*(t)) = \mathbf{m}(\mathbf{w}_*(t)) \\ \quad + \Sigma(\mathbf{w}_*(t), \mathbf{w}) \mathbf{K}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{m}(\mathbf{w}) - \mathbf{G}\boldsymbol{\theta}_l) \\ \hat{\sigma}_*^2(t) = s(\mathbf{w}_*(t), \mathbf{w}_*(t)) \\ \quad - \Sigma(\mathbf{w}_*(t), \mathbf{w}) \mathbf{K}^{-1} \Sigma(\mathbf{w}, \mathbf{w}_*(t)) \end{cases} \quad (11)$$

となる^[1]。 $\hat{f}(\mathbf{w}_*(t))$ は推定非線形関数、 $\hat{\sigma}_*^2(t)$ は推定非線形関数の信頼性の尺度として用いられる。

5 シミュレーション実験

次の電力系統を同定対象とする。

$$\begin{cases} \ddot{x}(t) + a\dot{x}(t) = f(\mathbf{z}(t)) \\ f(\mathbf{z}(t)) = -\frac{P_e}{\tilde{M}} + \frac{P_{in}}{\tilde{M}} \\ \quad = -\frac{P_{em}}{\tilde{M}} (1 + u(t)) \sin x(t) + \frac{P_{in}}{\tilde{M}} \\ \mathbf{z}(t) = [x(t), u(t)]^T \\ y(t) = x(t) + e(t) \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 $x(t) = \delta(t)$: 相差角、 $u(t) = \Delta E_{fd}(t)$: 界磁電圧の増分、 \tilde{M} : 慣性係数、 \tilde{D} : 減衰係数、 P_e : 発電機出力、 P_{in} : タービン出力、 P_{em} : 最大電気出力で、各オラメータは $\tilde{M} = 0.06$, $\tilde{D} = 0.18$, $P_{em} = 1.1$, $P_{in} = 0.8$, $a = \tilde{D}/\tilde{M} = 3.0$ である。観測雑音 $e(t)$ は NS 比約 1.5% となる正規性白色雑音、サンプリング周期は $T = 0.01[\text{s}]$ とした。全入出力データ数は $M = 1000$ 、クラスタ数は $N = 100$ として k-means クラスタリングを適用した。k-means クラスタリングを適用せず、 $M = 1000$ 個の同定用入出力データで同定を行う従来法の結果と比較した。

表 1 に線形項オラメータ a の推定値を示す。提案法は従来法と同程度の精度であることが確認できる。図 1 と図 2 にそれぞれ、提案法と従来法における真の非線形関数 $f(\mathbf{z}(t))$ 、推定非線形関数 $\hat{f}(\mathbf{z}(t))$ 、真の非線形関数と推定非線形関数の絶対値誤差、95.5% 信頼領域を示す。これらの図より、提案法の方が非線形関数を正確に推定できていることがわかる。また、表 2 に同定に要した計算時間を示す。提案法は従来法に比べて大きく計算時間を短縮できていることがわかる。(Intel(R) Core(TM) i7-6700U CPU @ 3.40GHz 使用)

表 1: 線形項オラメータ a の推定値

a	提案法	従来法
3.00	3.01	3.00

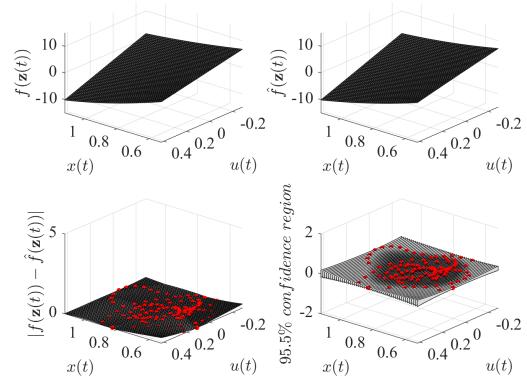


図 1: 非線形関数の推定結果（提案法、k-means 法適用）

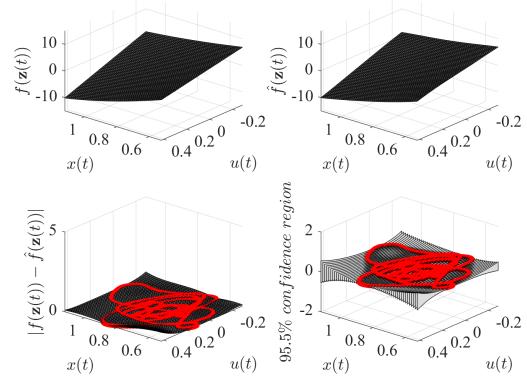


図 2: 非線形関数の推定結果（従来法、k-means 法不適用）

表 2: 計算時間

提案法	従来法
435[s]	6.8[s]

参考文献

1. T. Hachino and H. Takata: Identification of Continuous-time Nonlinear Systems by Using a Gaussian Process Model, IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Eng., Vol.3, No.6, pp.620-628 (2008)

ガウシアンプロセスモデルによる離散時間 Hammerstein システムの二段階同定

鹿児島大学 ○田中和樹 八野知博

Two-stage identification of discrete-time Hammerstein systems
by Gaussian process model

Kazuki Tanaka and Tomohiro Hachino, Kagoshima University

Abstract: This paper deals with a two-stage identification method for discrete-time Hammerstein systems using Gaussian process (GP) model. The nonlinear static part of the target system is represented by the GP. The estimation of the nonlinear static part and that of the linear dynamic part are separated. Since the estimation of the nonlinear static part requires only a small amount of data, the computational burden can be reduced without significantly deteriorating the accuracy of identification. Simulation results are shown to illustrate the effectiveness of the proposed method.

1 はじめに

Hammerstein システムは非線形静的部と線形動的部が直列に接続されたブロック指向モデルであり、広範な非線形システムを表現できるモデルである。我々はガウシアンプロセス (GP) モデルに基づく Hammerstein システムの一括同定法を提案した^[1]。この同定法は非線形静的部と線形動的部の推定が互いに干渉し複雑であった。そこで、本稿では、非線形静的部と線形動的部の推定が分離された二段階同定法を提案する。提案法では少數のデータで非線形静的部の推定が行えるため、同定精度を大きく損なうことなく計算負担を低減できる。シミュレーション実験により、本同定法の有効性を確認した。

2 問題設定

次の Hammerstein モデルで表される離散時間非線形システムを同定対象とする。

$$\begin{cases} A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})f(u(k-1)) + \varepsilon(k) \\ A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \cdots + a_nq^{-n} \\ B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \cdots + b_rq^{-r} \end{cases} \quad (1)$$

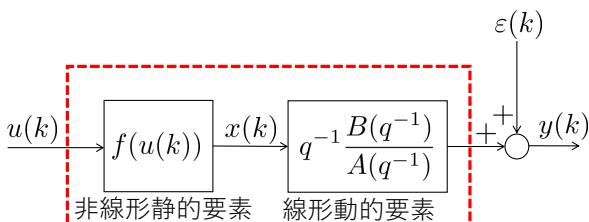


Fig. 1 Hammerstein system

ここで、 $u(k)$ ：入力信号、 $y(k)$ ：出力信号、 $x(k)$ ：中間信号、 $\varepsilon(k)$ ：平均 0、分散 σ_n^2 の正規性白色雑音、 q^{-1} ：遅延演算子、 $f(\cdot)$ ：未知の非線形関数である。また、 n 、 r はそれぞれ $A(q^{-1})$ 、 $B(q^{-1})$ の次数で既知とする。本稿では、入出力データから線形動的要素のシステムパラメータ $\{a_i\}, \{b_j\}$ と未知の非線形関数 $f(\cdot)$ 及びその信頼性を推定する。

3 二段階同定法

まず第一段階同定では複数個の一定値入力に対する出力の定常値に基づき非線形静的部を推定する。次に、第二段階同定では一組のランダム入力に対する出力を計測し、第一段階同定で決定された非線形静的部による推定中間信号と出力データから線形最小二乗法で線形動的部を推定する。

3.1 第一段階同定

複数個の一定値入力に対する出力の定常値を得れば、中間信号と出力信号は定数倍の関係となることを用いて、非線形静的部のみ推定する。

N 個の一定値入力から成る入力ベクトル：

$$\mathbf{u} = [\bar{u}[1], \bar{u}[2], \dots, \bar{u}[N]]^T \quad (2)$$

に対し、出力の定常値から成る出力ベクトルを

$$\mathbf{y} = [\bar{y}[1], \bar{y}[2], \dots, \bar{y}[N]]^T \quad (3)$$

とする。このとき、対象システムの非線形静的部は GP により次のように記述できる。

$$\mathbf{y} \sim \mathcal{N}(\mathbf{m}(\mathbf{u}), \mathbf{K}(\mathbf{u}, \mathbf{u})) \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{m}(\mathbf{u})$ は平均関数ベクトルであり、パラメータを α, β とする入力の線形結合で表現する。 $\mathbf{K}(\mathbf{u}, \mathbf{u}) = \Sigma(\mathbf{u}, \mathbf{u}) + \sigma_n^2 \mathbf{I}_N$ は共分散行列であり、共分散関数：

$$\Sigma_{pq} = s(\bar{u}[p], \bar{u}[q]) = \sigma_y^2 \exp\left(\frac{-|\bar{u}[p] - \bar{u}[q]|^2}{2l^2}\right) \quad (5)$$

から構成する。

平均関数に含まれるパラメータ α, β 及び共分散関数のハイパーパラメータ $\theta_a = [\sigma_y, l, \sigma_n]^T$ は負の対数周辺尤度：

$$J = \frac{1}{2} \log |\mathbf{K}| + \frac{1}{2} (\mathbf{y} - \mathbf{m}(\mathbf{u}))^T \mathbf{K}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{m}(\mathbf{u})) + \frac{N}{2} \log(2\pi) \quad (6)$$

を評価とし、最小二乗法とカッコウ探索^[2]の組み合わせにより決定する。

新たな入力データを $\mathbf{u}_* = [u_*(1), u_*(2), \dots, u_*(N_*)]^T$ とすると、GP モデルの事後分布より対象システムの非線形関数は

$$\hat{f}(u_*(k)) = m(u_*(k)) + \Sigma(u_*(k), \mathbf{u}) \mathbf{K}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{m}(\mathbf{u})) \quad (7)$$

と推定される。また、その予測共分散関数は

$$\begin{aligned} \hat{s}(u_*(p), u_*(q)) &= s(u_*(p), u_*(q)) \\ &\quad - \Sigma(u_*(p), \mathbf{u}) \mathbf{K}^{-1} \Sigma(\mathbf{u}, u_*(q)) \end{aligned} \quad (8)$$

となり、推定非線形関数の信頼性の尺度として用いられる。

3.2 第二段階同定

一組のランダム入力に対する出力を計測し、(7) 式より推定される推定中間信号 \hat{x} と出力データから線形最小二乗法で線形動的部を推定する。

M 個の入出力データと推定中間信号 \hat{x} を

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\mathbf{u}} = [u(k_s+1), u(k_s+2), \dots, u(k_s+M)]^T \\ \tilde{\mathbf{y}} = [y(k_s+1), y(k_s+2), \dots, y(k_s+M)]^T \\ \hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}(k_s+1), \hat{x}(k_s+2), \dots, \hat{x}(k_s+M)]^T \end{array} \right. \quad (9)$$

とすると、線形動的部パラメータ θ_b は、最小二乗法により、次の (10) 式で得られる。

$$\theta_b = (\mathbf{Z}^T \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^T \tilde{\mathbf{y}} \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_b = [a_1, \dots, a_n, b_0, \dots, b_r]^T \\ \mathbf{Z} = \left[\begin{array}{cccc} -y(k_s+1-1) & \cdots & -y(k_s+M-1) \\ -y(k_s+1-2) & \cdots & -y(k_s+M-2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -y(k_s+1-n) & \cdots & -y(k_s+M-n) \\ \hat{x}(k_s+1-1) & \cdots & \hat{x}(k_s+M-1) \\ \hat{x}(k_s+1-2) & \cdots & \hat{x}(k_s+M-2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \hat{x}(k_s+1-r-1) & \cdots & \hat{x}(k_s+M-r-1) \end{array} \right] \end{array} \right.$$

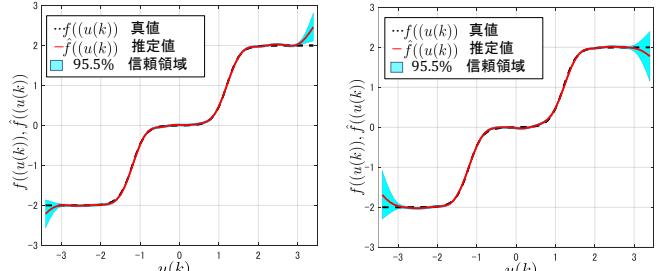
4 数値シミュレーション

次の Hammerstein システムを同定対象とする。

$$\left\{ \begin{array}{l} A(q^{-1}) = 1 + 0.8q^{-1} + 0.6q^{-2} \\ B(q^{-1}) = 0.4 + 0.2q^{-1} \\ f(u(k)) = -2 \left\{ \frac{1}{1+\exp(6(u(k)+1.2))} \right. \\ \quad \left. + \frac{1}{1+\exp(6(u(k)-1.2))} - 1 \right\} \end{array} \right. \quad (11)$$

なお、雑音 $\varepsilon(k)$ の分散 $\sigma_n^2 = 0.036$ と設定した (NS 比は約 5%)。第一段階同定において、入力信号 $\bar{u}[i]$ は $-3 \sim 3$ まで 0.2 刻み ($i = 1 \sim N, N = 31$) の一定値、出力信号 $\bar{y}[i]$ は観測雑音を考慮して十分時間が経過した最後の 20 個のデータの平均値とした。また、第二段階同定における入出力データ数は $M = 1000$ とした。

Fig. 2, Table 1, Fig. 3 にそれぞれ二段階同定法（提案法）と一括同定法（従来法）の推定非線形関数、推定された線形動的部パラメータ、推定されたモデルの出力を示す。二段階同定法と一括同定法の同定に要した計算時間はそれぞれ 2.9[s]、1932.1[s] であった (Intel(R) Core(TM) i5-6200U CPU @ 2.30GHz 使用)。

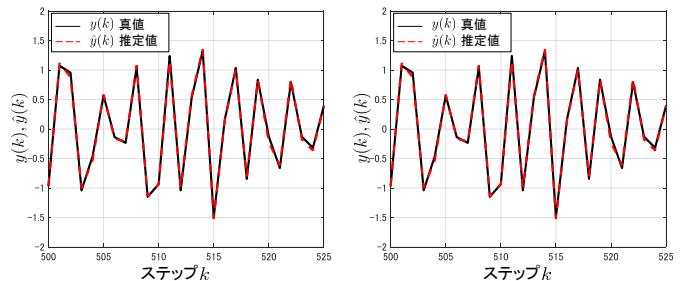


(a) Two-stage identification method (proposed) (b) One-stage identification method (conventional)

Fig. 2 Estimated nonlinear function

Table 1 Estimated parameters of the linear dynamic part

	\hat{a}_1	\hat{a}_2	\hat{b}_0	\hat{b}_1
真値	0.8	0.6	0.4	0.2
二段階同定法(提案法)	0.801	0.601	0.400	0.199
一括同定法(従来法)	0.798	0.600	0.400	0.198



(a) Two-stage identification method (proposed) (b) One-stage identification method (conventional)

Fig. 3 True output and output by the estimated model

5 あとがき

本稿では、ガウシャンプロセスモデルを用いた離散時間 Hammerstein システムの二段階同定法を提案した。二段階同定法を用いることで同定精度を大きく損なうことなく計算時間を大幅に短縮できる事を確認した。より高次なシステムでの精度検証が今後の課題である。

参考文献

- [1] T. Hachino and H. Takata, Identification of Discrete-Time Hammerstein Systems Using Gaussian Process Model, Journal of Signal Processing, Vol.14, No.2, pp.129-137, 2010.
- [2] X.-S. Yang and S. Deb, Cuckoo Search via Lévy Flights, Proc. of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, pp.210-214, 2009.

フォーメーション変更を伴う協調搬送のロバストな把持隊形の構成

熊本大学 ○村田 一陽, 宮崎 健太, 松永 信智

Construction of Robust Grasping Formation in Cooperative Transport with Formation Change

Kazuhi MURATA, Kenta MIYAZAKI, Nobutomo MATSUNAGA

Kumamoto University

Abstract: Recently, the flexible transport system which uses coordinated transport robots will be focused in many applications. In a previous research, the coordinated transportation theory had been proposed and applied in many studies, but the application to complex tasks had not been evaluated yet. For the coordinated transportation, robots switch grasping and releasing of the object are required when the formation is changed. Then robots cannot handle the object properly if the contact points between robots and the object have misalignment. We proposed a cooperative transport system which can transport object regardless of the contact points by applying an appropriate force to the object according to the positional relationship between the robots. In this paper, the robustness of the transport system is evaluated by the transport experiments.

1 はじめに

近年、複数の自律移動ロボットを用いた協調搬送の実用化が試みられている。協調搬送の利点は、ロボットが故障した場合に作業全体に与える影響が小さいこと、ロボットの構造がシンプルとなるためシステムのトータルコストやメンテナンスの両面で優れていること、1台のロボットでは実現不可能な複雑なタスクを効率よく実現できることが挙げられる¹⁾。

複数のロボットはタスクに応じて一定のフォーメーションを形成し、協調搬送を行う。協調搬送の先行研究として、複数の移動ロボットによる大型の搬送物の搬送において、移動ロボットが障害物との衝突を回避するための把持位置の変更動作を実時間で行う手法が提案されている²⁾。また、非ホロノミック移動ロボットでの分散協調搬送や³⁾、凹凸路面を複数の移動ロボットで搬送する協調搬送制御⁴⁾、受動的コンプライアンス機構を有するロボットを用いた、搬送物の目標軌道に沿った押し搬送作業の研究も行われている⁵⁾。人やロボットが行き来する複雑

である。この際、Fig.1に示すように搬送物とロボットの接触位置にズレがあると適切なハンドリングができない。

本研究では、搬送物と各ロボットの幾何学的な位置関係にあわせて各ロボットが搬送物に適切な力を加えることで搬送物を把持し、各ロボットの接触位置によらずに搬送可能な協調搬送システムを提案する。なお、搬送物とロボットの間のすべりを抑制するため、ソフトアクチュエータである真空吸引器（サクションカップ）を利用する。本手法の有効性は、実際のダンボールを用いた協調搬送実験により検証する。

2 協調搬送システムの構成

2.1 搬送ロボット

Fig.2(a)に搬送ロボット（NexusRobot, Vstone）を示す。3つのオムニホイールをモーターで独立に駆動させることで全方向移動可能である。同図(b)に天板を外した写真を示す。ロボットにはタイヤとモーター、エンコーダ、Arduino 328 と Arduino mega、慣性計測装置（以下IMU）、RaspberryPi4 が搭載されている。また、ロボット前面にひずみゲージとサクションカップが取り付けられている。サクションカップと真空機構を使って搬送物を吸着し、円板で把持する力をひずみゲージにより計測する。

Fig.3左図に搬送物を吸引した様子を示す。サクションカップは同図右のように柔らかいベローズ構造となっている。吸引時の圧力は0.55気圧以下である。水平方向の力に対して38Nまで外れることなく把持でき、サクションカップと搬送物の間における摩擦錐の角度は $\tan^{-1}(38/32) = 57$ 度である。

2.2 全方位カメラによるロボットの検出

ロボットと搬送物の位置検出に天井カメラを使うと様々な移動制約が発生するため、本実験では全方位カメラ⁷⁾を用いる。全方位カメラとは360度の検出範囲を持つ視覚センサであり、カメラ上部に取り付けられた双曲面ミ

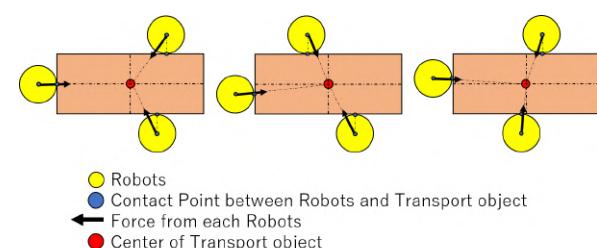


Fig.1: Force from robots on different contact points

な環境での協調搬送を考えた場合、搬送時のフォーメーションを変更することで柔軟に対応できると考られるが、経路に応じてフォーメーション変更を行う協調搬送は実用化には至っていない⁶⁾。フォーメーション変更に際しては、搬送時は搬送物に適切な力を加え把持し、フォーメーション変更時は搬送物の速やかな把持と解放が必要

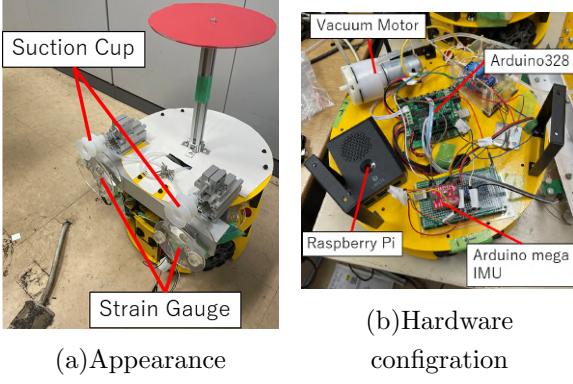


Fig.2: Cooperative transport robot

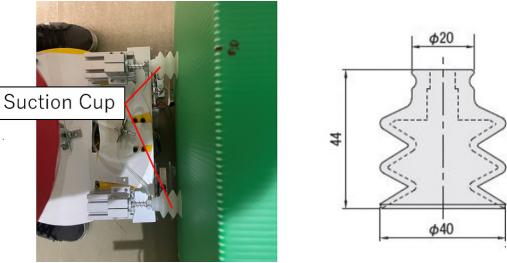


Fig.3: Grasping of transport object using suctioncup

ラーに周囲の風景を反射させることで上向きに取り付けられたカメラにより映像を撮影する。なお、同センサでは搬送物と各ロボットの相対的な位置座標を計測する点に注意する。Fig.4は同カメラの光学図であり、画像上への写像点 $p(x, y)$ から、空間内の任意の点 $P(X, Y, Z)$ へ変換する⁸⁾。

搬送物の中心に全方位カメラを取り付けることで、各ロボットを色検出し空間上の座標に変換する。Zは原点とロボットの高さの差であり、定数であるためロボット i ($i = 1, 2, 3$) の極座標 (r_i, θ_i) が求まる。Fig.5に全方位カメラを取り付けた搬送物と、カメラにより検出した様子を示す。なお、搬送物にはIMUが取り付けられており、搬送時の姿勢角を計測する。

3 口バストな搬送物把持

安全な搬送のためには複数台のロボットで搬送物を挟み込み、搬送物を把持した状態で搬送する必要がある。把持の際には各ロボットが搬送物に加える力、モーメントが平衡状態にあり、搬送物とロボットの間にすべりが発生しない必要がある。サクションカップは柔軟な構造を有しており、搬送物を吸引することすべりを抑制する。

Fig.6左図、式(1), (2)に示すように3台のロボットで構成される三角形内に搬送物の中心がある仮定と、各ロボットが搬送物に与える力 F_i が摩擦錐の内側にある仮定から、次式が成立する。

$$o'_{1X} + o'_{2X} > 0 \quad (1)$$

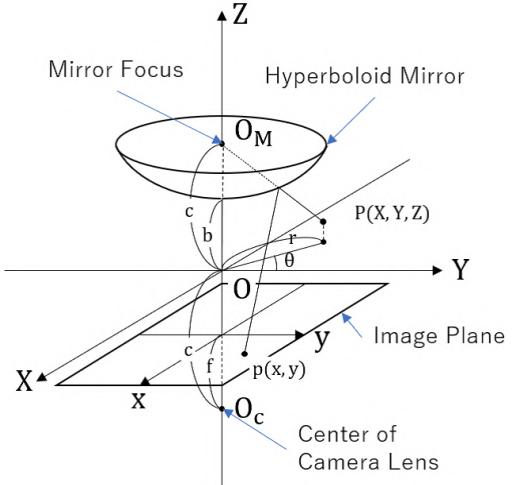


Fig.4: Relationship between hyperboloids and planes

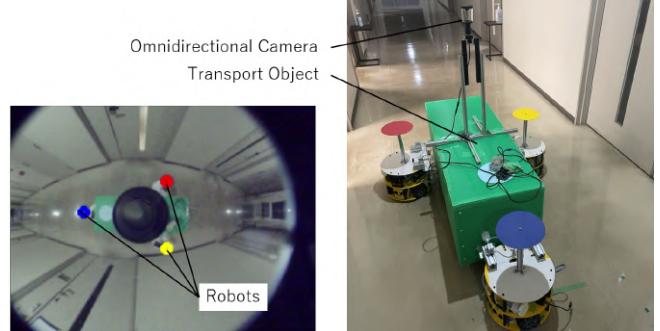


Fig.5: Omnidirectional camera

$$\cos^{-1} \frac{o_i o'_i}{|F_i|} < 57^\circ \quad (2)$$

ただし、ロボット i の中心は o_i 、搬送物との接触位置は o'_i である。

ロボット i は o_i から搬送物の中心に向かって力を加えることで搬送物にモーメントを加えずに把持できる。ロボット1が搬送物に加える力 F_1 について Y' 方向で搬送物を挟み込む力 $F_{1Y'}$ を $F_{1Y'} = f$ (f :定数) [N] とするとき、 $F_{1X'}$ は以下のように表される。

$$F_{1X'} = f \tan \theta_1 \quad (3)$$

このとき、搬送物の内力は以下の力のつり合いの式を満たす必要がある。

$$F_{1X'} = -F_{2X'} - F_{3X'} = f \tan \theta \quad (4)$$

$$F_{1Y'} = -F_{2Y'} - F_{3Y'} = f \quad (5)$$

ロボット i が搬送物に加える力 $|F_i|$ は、搬送物静止時には f を用いて以下のように表される。なお、 θ_i は搬送物と各ロボットがなす角である。

$$|F_i| = \frac{f}{\cos \theta_i} \quad (6)$$

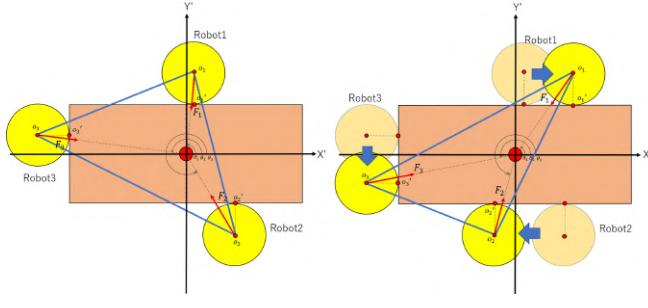


Fig.6: Force applied to the transported object at each contact points

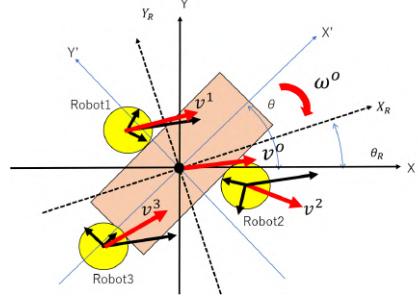


Fig.7: Schematic diagram of transportation

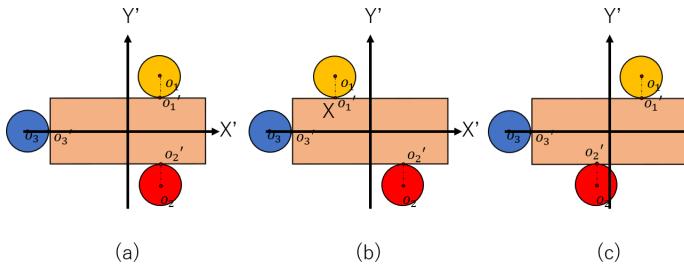


Fig.8: Transport at different contact points

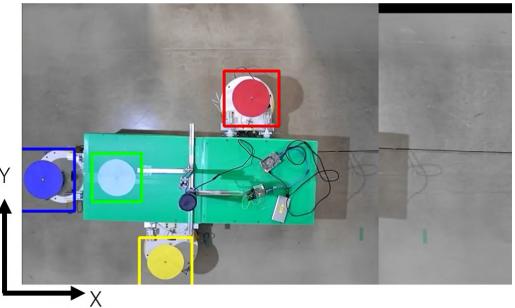


Fig.9: Experimental system from the ceiling camera

$$|F_2| = \frac{\sin(\theta_2 + \theta_3)}{\sin(\theta_2 - \theta_3)} \frac{f}{\cos \theta_1} \quad (7)$$

$$|F_3| = \frac{\sin(\theta_3 + \theta_1)}{\sin(\theta_2 - \theta_3)} \frac{f}{\cos \theta_1} \quad (8)$$

Fig.6 右図のように各ロボットの接触位置にズレがあった場合には、 $\theta_1 \sim \theta_3$ を計測することで適切な $F_1 \sim F_3$ が求まる。

搬送物を移動させる際は、目標速度をジョイスティックで操作する。ロボットは搬送物の中心に向かって力を加えながら、搬送物を目標速度 v^o 、目標姿勢角度 θ_r で搬送する。搬送物の座標系を (X', Y') 、世界座標系を (X, Y) 、搬送物の中心を原点に搬送物の傾きを θ としたとき、搬送物の目標速度ベクトルを (v_x^o, v_y^o) 、目標角速度を $\omega^o = K(\theta_r - \theta)$ (K : 比例ゲイン) とすると、ロボット i の速度指令値 (v_x^i, v_y^i) は次式となる。 M はロボットの質量、 T は制御周期である。

$$\begin{bmatrix} v_x^i \\ v_y^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_X^o \\ v_Y^o \end{bmatrix} + R(-\theta) \times \left[\left(\frac{1}{M} \int_t^{t+T} F_i dt + r_i \omega^o \right) \begin{pmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{pmatrix} \right] \quad (9)$$

4 協調搬送実験

4.1 実験環境

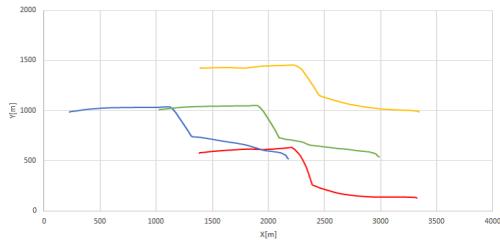
Fig.8 の (a), (b), (c) に示すレイアウトでロボットと搬送物の協調搬送実験を行う。搬送物の原点を O とするとき、(a) は青のロボットが $X' < 0, Y' = 0$ の位置に接触しており、黄、赤のロボットが $X' > 0$ から挟み込むように接している。(b) は黄ロボットが $X' < 0$ 、赤ロボットが $X' > 0$ 、(c) は黄ロボットが $X' > 0$ 、赤ロボットが $X' < 0$ から挟み込むように接している。

搬送物としてキャスタを取り付けた段ボール (L1160×W430×H500mm, 9.2kg) を使用する。Fig.9 は天井カメラからの画像であり、各ロボットおよび搬送物の重心を検出し移動軌跡の計測に使用する。実験では、オペレーターがジョイスティックにより搬送物の目標速度を指示する。搬送物を X 軸正の方向に搬送し、Y 軸正方向に搬送、再度 X 軸正の方向に搬送を行う。

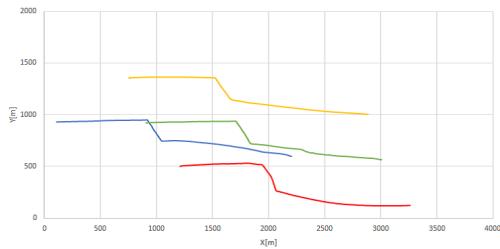
4.2 実験結果

搬送時の各ロボットおよび搬送物の移動軌跡を示す。Fig.10 に (a), (b), (c) における搬送物の移動軌跡を示す。図中の赤線、青線、黄色が各ロボットの軌跡であり、緑線が搬送物の軌跡である。

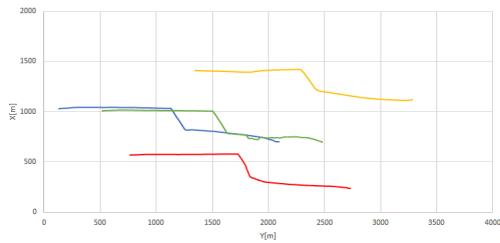
いずれの図においても移動軌跡が平行であるため、搬送物との接觸位置が異なっていても搬送できていることが分かる。また、Fig.11 に (a), (b), (c) における搬送物の姿勢角を示す。搬送の際に、ロボットの動特性の違い



(a) Position of formation(a) in Fig.8

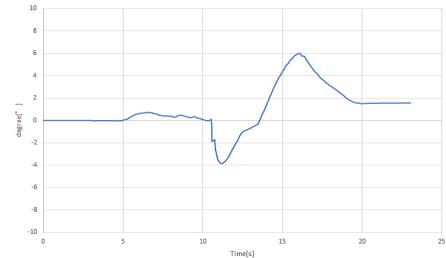


(b)Position of formation(b) in Fig.8

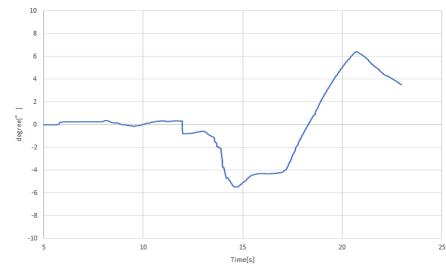


(c)Position of formation(c) in Fig.8

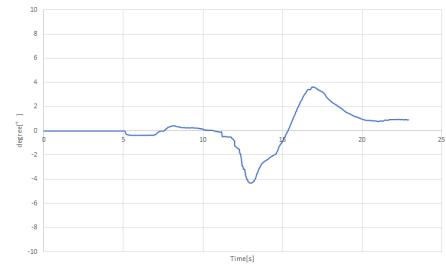
Fig.10: Movement trajectory of transported object



(a)Angle of formation(a) in Fig.8



(b)Angle of formation(b) in Fig.8



(c)Angle of formation(c) in Fig.8

Fig.11: Angle of transported object

により姿勢角に微少なずれが生じたが、姿勢角のズレは最大で6度程度であり一定の角度を保ちながら搬送できていることが分かる。

5 おわりに

フォーメーション変更を伴う協調搬送において、サクションカップを使った3台の全方向移動ロボットを用いて、搬送物との接触位置にズレがあった際にも搬送可能な協調搬送システムを設計した。本実験では搬送物の移動はオペレータが操作したが、異なる接触位置でも安定して搬送することができた。

今後の課題は、重量物の搬送の検証やロボットのばらつきの補正、フォーメーション変更時の搬送物への接触方法について検討する予定である。

参考文献

- 1) 鈴木ほか, 群移動ロボットによる協調搬送速度および軌道追従制御, 自動制御連合講演会, Vol.53, No.10, pp.757–762, 2010.
- 2) 宮田ほか, 車輪型移動ロボット群による持ち替え協調搬送の実現, 日本機械学会論文集(C編), Vol.65, No.631, pp.106–113, 1999.

- 3) 小菅ほか, 2台の非ホロノミック移動ロボットによる分散協調搬送, Vol.65, No.634, pp.2379–2385, 1999.
- 4) 大隅ほか, 3台の移動ロボットによる物体の協調搬送制御, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.6, pp.744–752, 2001.
- 5) 小島ほか, 受動的コンプライアンス機構を有する3台の移動ロボットを用いた直方体形物体の押し搬送, 日本機械学会論文集(C編), Vol.70, No.692, pp.106–113, 2004.
- 6) 宮崎ほか, 複数の全方向移動ロボットを用いた動的フォーメーション制御による搬送作業, 第38回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 2019.
- 7) 全方位センサ・全方位カメラ製品,
https://www.vstone.co.jp/products/sensor_camera/index.html
(参照日 2021/10/08)
- 8) 山澤ほか, 移動ロボットのナビゲーションのための全方位視覚センサ HyperOmni Vision の提案, 電子情報通信学会論文誌 D Vol.J79-D2 No.5 pp.698–707

人混みにおける移動ロボットの最適な走行位置の探索アルゴリズム

○山本 郁生, 松永 信智 (熊本大)

An Algorithm for Finding Optimal Traveling Position of a Mobile Robot in Crowded Environment

○ Ikuo YAMAMOTO, Nobutomo MATSUNAGA (Kumamoto University)

Abstract: Generally, many mobile robots have been developed, and they are required to act autonomously in crowded spaces where many pedestrians pass by. In order for robots to act in crowded spaces, it is necessary to avoid collisions with people. One method to achieve this is to reduce the number of avoidance maneuvers by following pedestrians heading in the direction of the destination. However, in the conventional method, depending on the movement of the pedestrian, the frequent switching of the tracking target may cause unexpected movements. In this paper, we propose a new method for mobile robot navigation using a mobile group consisting of multiple pedestrians as a tracking target.

1 はじめに

近年多くの移動ロボットが開発されており、博物館や空港などの施設で用いられる案内ロボットや、ホテルなどで用いられる運搬ロボットなどの導入が進められている。このようなロボットは、人混み等の歩行者が多く行きかう空間で用いられ、その環境下で自律的に行動することが求められている。

人混みでロボットが行動するためには、歩行者との衝突を避ける必要がある。人混みを歩行者を回避しながら進む場合、回避を行うあまりロボットがほとんど動けない状況に陥ってしまうことがある。この問題の解決手法の一つとして特定の人追従を行う方法があるが、混雑する場合にはターゲットを見失う場合も多い。

歩行者は混雑している状況において、他者との衝突を避けるために同じ方向に向かう歩行者の後ろを歩く。その結果、歩行者の流れが発生することが知られている。歩行者の流れに乗ることによって、ロボットは歩行者を回避を減らし効率的な移動が期待できる。先行研究では人追従を利用したナビゲーションのシミュレーションが行われている。例えば文献¹⁾では、歩行者が混雑した環境下において、目的地方向へ向かう歩行者を追従しながら追従対象を適切に切り替える手法が提案されている。その論文では、人追従を行わない場合に比べて、目的地まで効率的に到達可能なことが示されているが、混雑環境では、歩行者の動きやオクルージョンによって頻繁に追従対象の切り替えが起こり、予期しない動きをしてしまう可能性がある。

本研究では、歩行者の動作のクラスタリングによって追従対象となる複数の歩行者を選択し安全に追従する新たな手法を提案する。歩行者は動作方向と速度によって分類され、同方向に移動する複数の歩行者から成るクラスタを選定する。複数の歩行者の動作方向・速度からロボットの追従位置を求める。シミュレーションでは歩行者の流れを想定し、追従実験を行う。一人の歩行者が目的地方向とは別の方向へ進み始めた場合でも、その歩行者は追従対象となるクラスタから外れることになるが、複数の歩行者を追従するため安定した走行が期待できる。

2 システム構成

本研究で用いる実験車両の様子を Fig.1 に示す。車両として Whill model CR(以下 Whill) を用いる²⁾。Whill は電動車椅子であり、シリアル通信を用いて PC から制御することができる。前輪にオムニホイールを搭載しており前後の動きに加え、その場で後輪を中心に旋回することができる。

Whill に搭載するセンサーとしてトラッキングカメラ Intel Realsense T265 (以下 T265) と RGB-D カメラ Intel Realsense D455(以下 D455) を用いる。T265 は、2 つの魚眼レンズカメラと IMU を備えており、内部で高度に最適化された Visual SLAM を行うことにより、Whill の移動量と姿勢を推定する。D455 は深度センサー、RGB セ

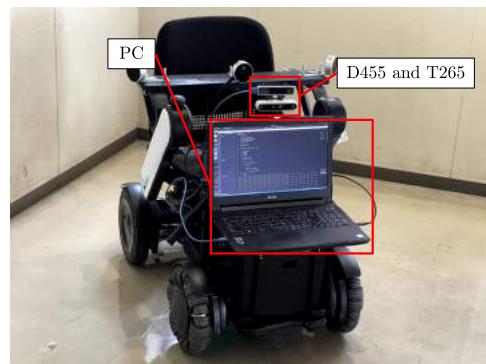


Fig.1: Whill model CR

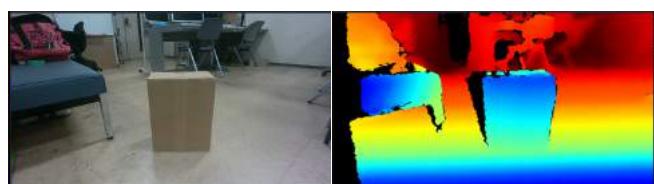


Fig.2: Color image and depth image

ンサー、IR 投射器を搭載しており、最大 20m までの深度情報を取得することができる。Fig.2 は取得した画像で左はカラー画像、右は深度画像である。

3 人認識システム

人混みで自律的に行動するためには、歩行者の位置を認識しなければならない。また追従対象の選択においては、目的地方向へ向かう歩行者を選択するために歩行者の進行方向を把握する必要がある。そこで、RGB-D カメラを用いた人認識システムを構築した。

RGB-D カメラで歩行者の位置を把握するためには、画像から歩行者の姿を検出する必要がある。画像からの人検出には YOLOv3⁴⁾ を用いた。YOLOv3 は画像から物体を検出し分類を行うための機械学習モデルで、GPU を用いることでリアルタイムで物体検出を行うことができる。YOLOv3 は 80 カテゴリの物体を検出分類できるため歩行者を画像から検出することができる。検出の様子を Fig.3 に示す。図において、紫の枠が検出された人を囲んだ矩形であり、矩形の位置と大きさを取得することができる。

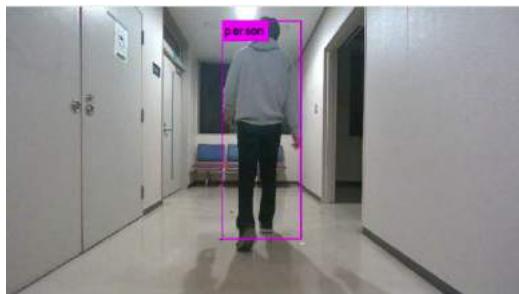


Fig.3: Human detection by YOLOv3

YOLOv3 の検出結果をもとに、以下の手順でまず歩行者の位置を取得する。

1. 矩形の中心を求め画像中の歩行者の位置とする。
2. カメラの内部パラメータを取得し、カメラから実際の歩行者の位置への方向ベクトルを求める。
3. 深度画像から歩行者までの距離を取得する。
4. 方向ベクトルと深度画像から取得した距離から、カメラから歩行者への位置ベクトルが得られる。
5. カメラからの歩行者への位置ベクトルを Whill からの位置ベクトルに変換する。

得られた位置ベクトルは Whill の正面方向 x 、左右方向 y 、高さ方向 z の 3 次元のベクトルである。その計測の概念図を Fig.4 に示す。

次に、歩行者の進行方向を取得する。得られた歩行者の位置と 1 ステップ前の歩行者の位置を比較して、どこに移動したかを調べる。その様子を Fig.5 に示す。

オレンジ色の円は現在の歩行者の位置、青色の円は 1 ステップ前の歩行者の位置である。現在の位置と 1 ステップ前の位置を比較して、現在の位置から最も近い 1 ステップ

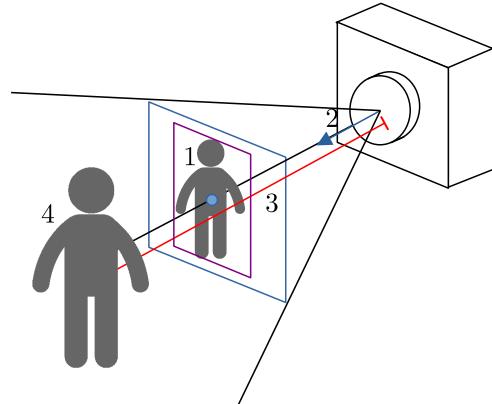


Fig.4: Measuring the position of a person

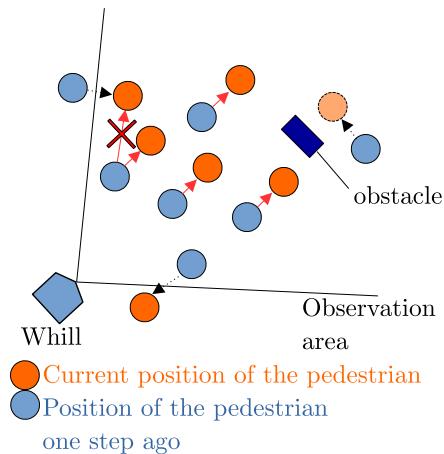


Fig.5: Pedestrian Tracking

前の歩行者を探索し、その歩行者の位置から現在の位置に移動したものと考える。移動方向は、赤色の矢印となる。Fig.5 左側のように観測範囲外から新しい歩行者が現れた場合等に、移動した位置が複数考えられる場合、より移動距離が短いものを選択する。また障害物に遮られた場合や観測範囲外に移動して見失った場合はその場に留まっているものとして扱う。

4 走行位置探索

得られた歩行者の位置と進行方向から、その集団における Whill の最適な走行位置を以下の手順で探索する。

1. Whill から目的地までの仮経路を設定する。
2. K-menas 法を用いて歩行者を分類する。

K-means 法とは非階層型クラスタリングアルゴリズムで、特微量をもとに互いに似た性質を持つクラスタをつくるアルゴリズムである。K-means 法によるクラスタリングには、歩行者の次のような特徴量を用いる (Fig.6)。

- l_p :人の位置から経路までの最短距離
- θ_1 :進行方向と経路を横切る方向との差

- θ_2 :進行方向と Whill に向かう方向との差
- θ_3 :進行方向と経路の方向との差

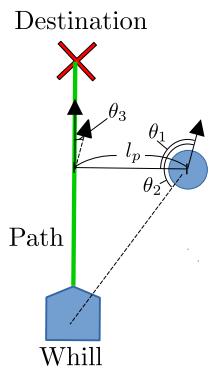


Fig.6: Pedestrian features for K-means

このような特徴量を用いて歩行者の行動を4つにクラスタリングする。4つのクラスタはそれぞれ、(a)追従対象となるクラスタ、(b)Whillに向かってくるクラスタ、(c)経路を横切るようなクラスタ、(d)ロボットから遠ざかる回避などを考慮しなくてもよいクラスタとなる。

3. クラスタリングされた歩行者から追従対象のクラスタ(a)を選択する。

選択するための基準として各クラスタの θ_3 の平均を求める。 θ_3 は人の進行方向と経路の方向との差であり、平均が最も小さいクラスタを目的地方向へ向かうクラスタとして追従対象に選択する。

4. 選択したクラスタの歩行者の位置から重心を求める。その後 Whill に最も近い歩行者から、Whill と重心を結ぶ直線に垂線を下ろし、その交点を目標点とする(Fig.7)。

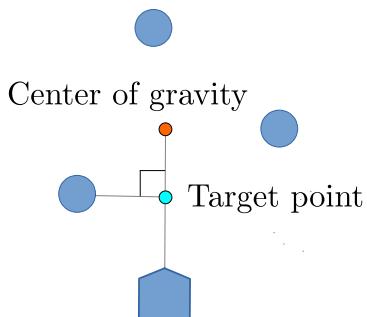


Fig.7: Setting target point

5. 目標点を追従するように走行する。

追従には地点追従法を用いる³⁾。地点追従法は目標点の位置を目標姿勢角で通過するためにロボットが取るべき舵角を決定する。また目標点との距離を一定に保ちながら走行する。

5 走行シミュレーション

走行位置探索アルゴリズムに従って走行をするシミュレーションを行う。走行環境は、Fig.8に示すように幅6m、長さ10mの通路で、左右で交通流ができる。

通路の左右にはそれぞれ脇道が存在している。この通路に横方向に1m、縦方向に1.5mの間隔を空け歩行者を配置する。右側の歩行者は通路下側に向かって進行し、左側の歩行者は通路上側に向かって進行する。また一部の歩行者は脇道にそれる、壁際で停止するといった動きをとる。Whillは通路下側からスタートして歩行者の流れに乗りながら通路上側を目指す。歩行者の速度は0.5m/sとする。

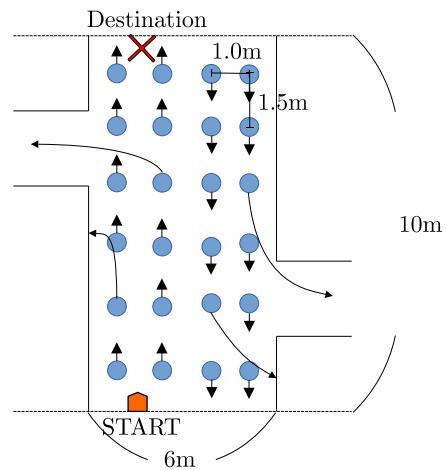


Fig.8: Simulation of pathway

次に想定する Whill と歩行者の関係を Fig.9 に示す。 (x_r, y_r) は Whill の位置、 θ_r は姿勢、 v_r 、 ω_r はそれぞれ速度、角速度である。

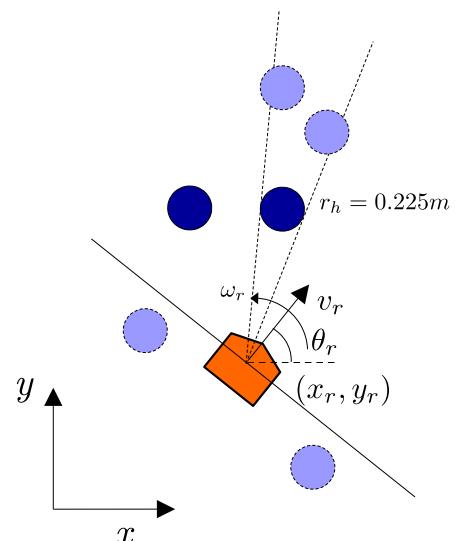


Fig.9: WHILL movement and observation

Whill は速度と角速度を指定することで制御を行う。時刻 t における (x_r^t, y_r^t) , 姿勢を θ_r^t , シミュレーションの実行周期を Δt として 1 時刻後の時刻 $t+1$ における Whill の位置 (x_r^{t+1}, y_r^{t+1}) と姿勢 θ_r^{t+1} を以下のように表す。

$$\begin{bmatrix} x_r^{t+1} \\ y_r^{t+1} \\ \theta_r^{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r^t \\ y_r^t \\ \theta_r^t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_r \Delta t \cos \theta_r \\ v_r \Delta t \sin \theta_r \\ \omega_r \Delta t \end{bmatrix} \quad (1)$$

Whill の観測範囲は前方 180° である。歩行者は半径 0.225m の円柱として模擬する。歩行者は Whill の観測範囲外に出てしまったり、他の歩行者によって遮られたりした場合は観測されない。

シミュレーション中のある時刻での様子を Fig.10 に示す。観測された人は矢印で表されており、4つのクラスタにクラスタリングされている。赤い矢印のクラスタが追従対象として選択されており、その重心と最も近い歩行者の位置から目標点を設定している。シミュレーションでは Whill は常に 2 人から 4 人の目的地方向に向かう歩行者を追従対象として追従しながら走行した。

Fig.11 に Whill の走行軌跡、設定した経路、歩行者の移動軌跡を示す。左側がスタート、右側が目的地になっており、Whill の経路を見るとスタートから目的地に向かう上側の流れに沿うように目的地に向かって走行していることが分かる。

Fig.12 に走行中の Whill の速度を示す、 0.4m/s から 0.6m/s の間で加減速を繰り返しており、歩行者の速度である 0.5m/s に合わせて走行出来ていることが分かる。

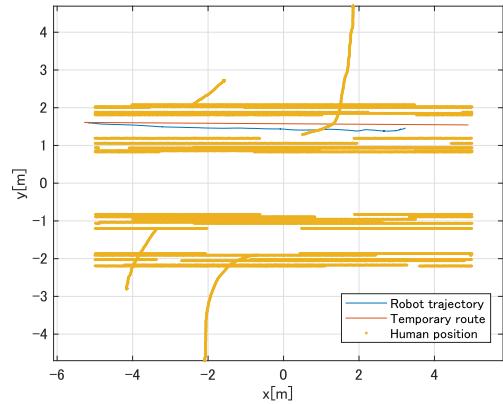


Fig.11: Target path and trajectory of Whill

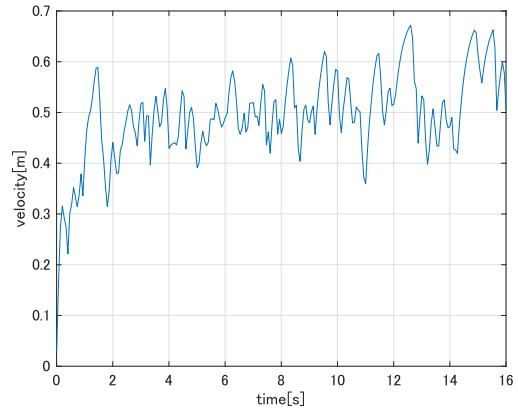


Fig.12: Velocity of Whill

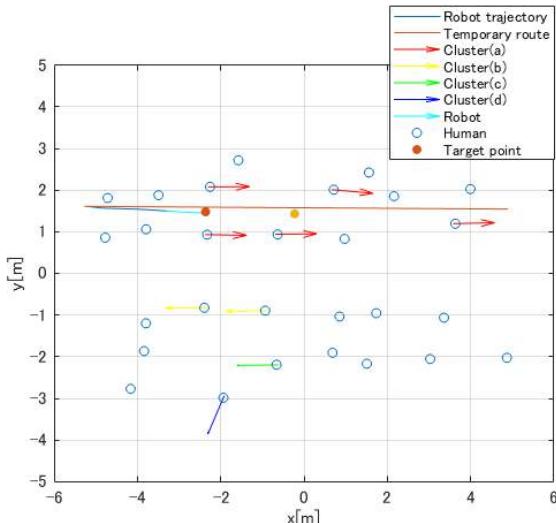


Fig.10: Simulation cropping

6 おわりに

本研究では Whill で移動を行う際に歩行者の流れに乗りながら走行するために、周囲の歩行者を K-means 法を用いてクラスタリングを行い、目的地に向かうクラスタを選択して追従を行う手法を提案した。また、シミュレーションから歩行者の流れに沿うように目的地に向かって走行可能なことが確認できた。

今後は、周囲の歩行者から距離を取るように走行位置を調整する機能や実機への実装を行っていく。

参考文献

- [1] 山口ほか, "人追従を利用した移動ロボットのナビゲーション" 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会公演論文集, pp.647-648, 2012
- [2] WHILL ホームページ, <https://whill.jp/>
- [3] 松永信智, 岡島寛, "MR を使った福祉車両の運転支援システム" システム/制御/情報, Vol.65, No.9, pp.364-369, 2021
- [4] Joseph Redmon, Ali Farhadi, "YOLOv3:An Incremental Improvement", arXiv1804.02767, 2018

**畑の畝間の雑草を除草する
クローラ型移動ロボット試作機の製作と検証実験**

崇城大学 ○井立 晃太郎 平 雄一郎

Experimental analysis of a test bed for developing
a tracked vehicle weeding in furrows of an agricultural field

Kotaro Idate and Yuichiro Taira, Sojo University

Abstract: This paper deals with the development of an agricultural weeding robot. The removal of weeds is an essential process for agricultural tasks. A weeding method based on pesticides (e.g., a herbicide) is frequently introduced. However, it is unsuitable for organic agricultures. In this case, a farmer manually weeds, and hence this task is quite laborious. To overcome this problem, the authors have developed a tracked vehicle for weeding in furrows of an agricultural field. In this report, we introduce its test bed, and demonstrate the results of its experimental analysis.

1. はじめに

近年、我が国の農業では農業従事者の高齢化ならびに後継者不足の問題が深刻になっている。そこで各種農作業において、ロボット技術ならびに情報通信技術（ICT）を利用するすることが大いに期待されている¹⁾。ロボット工学分野においては、農作業を支援・代替するロボットは農業ロボットと呼ばれている²⁾。

農業が主幹産業の一つである熊本県においても、上記と同様の問題を抱えている。例えば、熊本県菊池市では「菊池水田ごぼう」というブランド農作物が栽培されている。このごぼうの品質を維持するためには、水田ごぼう畑における雑草の除草作業が必要不可欠である。これに対し、菊池地域農業協同組合（JA菊池）では安全・安心な農業を目指しており、除草剤などの農薬を用いる除草方法は推奨されていない。そのため、作業者の手作業による除草作業が主流である。さらに寒冷時期の栽培では、トンネルと呼ばれる小型ビニールハウスを設置し、人がトンネルに屈んで入り、除草作業を実施している。しかしながら、寸法が幅1200mm・高さ750mm・長さ100m程度であるトンネル内の作業は大変過酷である。そこで、雑草除草ロボットの開発が大いに期待されている。

本稿では、小型ビニールハウス被覆された水田ごぼう畑における雑草除草ロボットを開発するために製作した試作機を紹介するとともに、その実験解析結果の一例を示す。

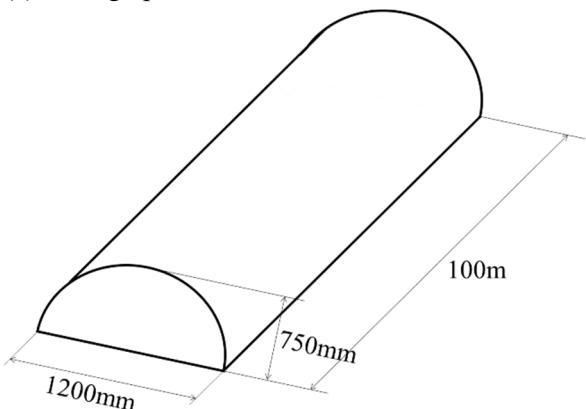
2. 雜草除草ロボットに要求される条件

本研究で開発を目指す雑草除草ロボットに要求される設計条件を以下に示す。なおこれらの条件は、JA菊池ゴボウ部会に所属する生産者へのアンケート調査結果や、生産者との意見交換会における意見・要望をもとに設定された。また、作業環境である水田ごぼう畑の外観をFig. 1に示す。

- 1) 除草場所がビニール被覆されており、外部からの視認性が低いことから、動作方法としては、車載カメラを用いた遠隔操縦方式あるいは自動走行制御方式を目指す。
- 2) 除草場所がビニール被覆されており、電波の送受信が不安定になる可能性があることから、GPSなどの衛星測位システムをロボットの自己位置推定に用いない。
- 3) 安全・安心な農業という点を考慮し、ガソリンエンジンを使用しない。
- 4) 畦の斜面にも雑草は生育するが、当面は雑草が繁茂する畝間の雑草のみに注目する。
- 5) 雜草を根元から除草してもよいが、光合成の抑制のみが実現されればよく、雑草の葉



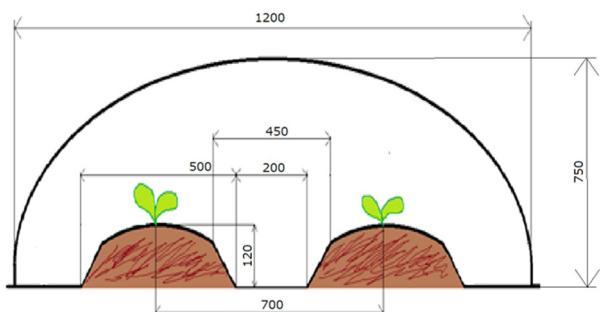
(a) Photograph of a burdock field



(b) Dimensions of a greenhouse



(c) Photograph of the inside of a greenhouse



(d) Cross section diagram of a greenhouse [mm]

Fig. 1 Small greenhouses in the burdock field

のみの切断でもよい。なお、除草された葉は回収する必要はない。

- 6) 雑草のみを除草し、ごぼうの葉を傷つけてはいけない。
- 7) 水田ごぼう畠の柔軟な土壌の路面を走行できる移動機構を用いる。なお、畠の斜面も柔軟であり、崩れやすいことを考慮する。
- 8) トンネル1棟の走行時間は、15~30 minとする。なお平均速度としては、0.2~0.4 km/hに相当する。
- 9) 持ち運びできるように、ロボットの重量を30 kg以下に抑える。
- 10) 價格としては、数十万円程度（目標：20~30万円）を想定する。

3. 試作機体の特徴

前節の条件をもとに、ロボット開発の問題点を抽出するため、試作機を作製した。その試作機の外観をFig. 2に示す。そして、その仕様をTable 1にまとめる。さらに、その機体の特徴を以下にまとめる。

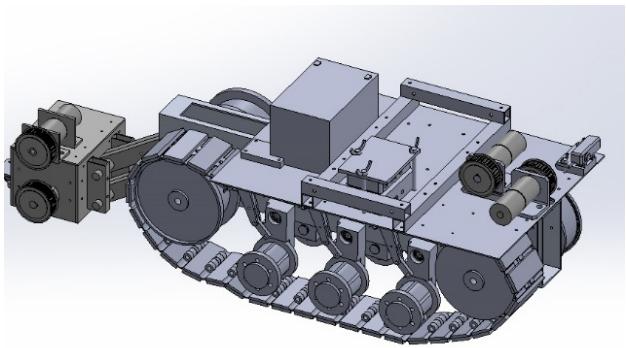
- 1) 水田ごぼう畠のような不整地における走行では、大きな路面外乱がしばしば発生するため、自動走行が不可能な状態に陥る可能性がある。そこで本試作機では、まずは車載カメラを用いた遠隔操縦方式を採用した。また、柔軟な土壌路面を走行できるように、スラットトップチェーンとゴムシートを用いたクローラ（履帯）式移動機構を採用した。
- 2) 畠の斜面に機体が乗り上げないように履帯（クローラベルト）の接地面積を抑えた。
- 3) 水田ごぼう畠には、直径50 mm程度の石や土塊が含まれており、路面外乱として作用する。これらの影響を低減するため、オイルダンパーを用いたサスペンション機構を搭載した。
- 4) 硬い雑草も刈り取ることができるよう、ナイロンカッタではなく金属の板を回転させる除草機構を採用した。

4. 直進性能評価実験

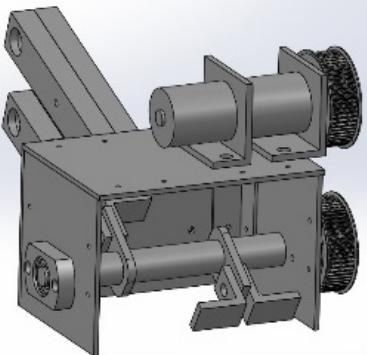
本研究では、Fig. 2に示す機体の基本性能を評価するための実験解析を行った。本稿では、その一例として、機体の直進性能に関する実験結果を示すとともに、その結果をもとに性能を評価する。

4.1 実験方法

走行実験場所は、崇城大学建物内の廊下（ビニル床）である。実験手順を以下にまとめる。



(a) 3D design model (overall view)



(b) 3D design model (weeding mechanism)



(c) Photograph of the main body

Fig. 2 Test bed for developing weeding robot

- 1) クローラベルト（履帯）の張りが適切な状態であるかを確認する。
- 2) 開始地点に機体を置き、コントローラの実験用走行ボタンを押し、走行実験を開始する。
- 3) 走行開始後、理想的な直線軌道の 5 m 地点と 10 m 地点の到達時間 [s] と、そのときの位置誤差（機体位置と直線軌道の距離）[mm] を計測する。区間到達時間に関しては、ストップ

Table 1 Main specifications (WR: Weeding robot; SW: Size and weight; T: Tracks; AM: Actuators and motor drivers; P: Power supply; MC: Main controller; OE: Other elements; WM: Weeding mechanism)

SW	Body size: W 330 mm × L 630 mm × H 314 mm; Mowing mechanism's size: W 194 mm × L 180 mm × H 154 mm; Weight: 25 kg
T	Sprockets' diameters: 130 mm; Idlers' diameters: 143 mm; Belts' materials: low-friction POM (acetal); Grousers' materials: rubber
WR AM	DC motor(TUKASA ELECTRIC CO.,LTD. TG-85R-SU-85.3-KA; Supply voltage: DC 12V; Torque constant: 980N·m/A; Gear ratio: 85.3); Motor drivers (Pololu Dual VNH5019 Motor Driver Shield for Arduino; operating voltage: 5.5-24 V; Continuous output current per channel: 12 A; Maximum PWM frequency: 20 kHz)
P	Main Battery(PE12V12; Nominal voltage: 12 V; Rated capacity: 12.0 Ah; Weight: 4.4 kg)
MC	Raspberry Pi 3 Model B+(CPU:Cortex-A53(ARMv8) 64 bit.1.4 GHz)
OE	Arduino Mega 2560(Microcontroller: ATmega2560; Operating Voltage: 5 V; Flash Memory: 256 KB)
WM AM	DC motor(TUKASA ELECTRIC CO.,LTD. TG-85B-SU-85.3-KA; Supply voltage: DC 12 V; Torque constant: 784N·m/A; Gear ratio: 85.3); Motor drivers (Pololu VNH5019 Motor Driver Carrier; operating voltage: 5.5-24 V; Continuous output current per channel: 12 A; Maximum PWM frequency: 20 kHz)

ウォッチを用いる。位置誤差については、各地点にメジャを設置した状態で機体を真上から撮影し、走行実験後に画像データから誤差を算出する。

- 4) 機体が 10 m 走行した後、ロボットを停止させる。

なお、同一条件のもとで、上記手順の実験を 10 回実施した。また本実験の主目的は、直進性能の評価であることから、遠隔操縦や自動制御せず、左右のモータそれぞれに一定電圧を印加した。

4.2 実験結果と考察

雑草除草ロボットの実験結果を Table 2・3 に、5・10 m 地点の位置誤差（本体位置と直線軌道の距離）のグラフを Fig. 3 にそれぞれ示す。なお、データにバラツキを生じさせる不確かさが正規分布に従うと仮定し、不確かさを標準偏差で表現した。また Table 2において、理想的な直線軌道から左側にずれた場合の誤差を正とした（右側の場合には、負の誤差）。

実験結果に対する考察を述べる。まず Fig. 3 より、機体の進行方向が左側に偏っていることがわかる。

Table 2 Experimental data

	Point [m]	Arrival time at the point [s]	Position error [mm]
1	5	6.53	204
	10	6.33	1288
2	5	6.61	196
	10	6.55	1175
3	5	6.55	444
	10	6.54	1436
4	5	6.65	248
	10	6.56	1128
5	5	6.76	224
	10	6.63	1063
6	5	6.81	311
	10	6.98	1412
7	5	6.65	407
	10	6.70	1525
8	5	6.73	341
	10	6.68	1493
9	5	6.73	329
	10	6.71	1257
10	5	6.98	222
	10	6.73	1266

Table 3 Performance evaluation data

Point [m]	5	10
Average time taken to reach the point [s]	6.70	6.64
Average velocity [km/h]	2.69	2.71
Mean position error [mm]	292.6	1304.3
Standard deviation [mm]	87.48	157.50

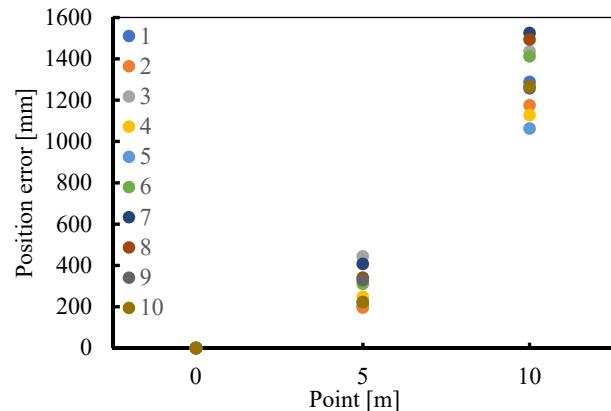


Fig3 Graph of experimental data

かる。さらに Table 3 より、標準偏差が大きいことが確認される。本実験では、機体の基本性能を評価するため、閉ループ系を構築しなかった。そのため、これらは左右駆動輪のモータの個体差の影響が原因であると考えられる。その一方で、Fig. 3 より、機体は同様な軌道で走行していることがわかる。このことから、機体自体の走行の再現性は高いと評価される。

5. おわりに

本稿では、畠の畝間の雑草を除草するクローラ型移動ロボットの試作機の製作および直進性能評価実験を行なった。本実験結果より、直進性能に関しては、モータの個体差に依存することがわかった。この結果を踏まえ、作業者による遠隔操縦制御入力と、内界センサを用いた自動走行制御入力を組み合わせた協調走行制御系を構築する予定である。なお、現地走行実験ならびに除草機構の性能に関しては、口頭発表の際に示す予定である。

最後に本研究の遂行にあたり、多大なご協力を賜った熊本県菊池市経済部農政課の富田純司氏ならびに菊池地域農業協同組合の山口博司氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 飯田訓久：農業ロボットとICT技術，システム/制御/情報，Vol. 59, No. 6, pp. 215-220 (2015)
- 2) 近藤直・門田充司・野口伸：農業ロボット（I）－基礎と理論－，コロナ社（2004）

カメラを用いたマルチコプターの編隊飛行について

北九州市立大学 ○外本賢暉 岡田伸廣

九州大学 外本伸治

Formation flight architecture for multi-rotor vehicles by using onboard cameras

Masaki Hokamoto and Nobuhiro Okada, The university of Kitakyushu

Shinji Hokamoto, Kyushu university

Abstract: This paper discusses how to make formation flight for multi-rotor vehicles by utilizing onboard cameras instead of signals from GNSS (Global Navigation Satellite System). The camera-based formation flight is applicable even in GNSS-denied circumstances, and besides it does not require a sophisticated command station/vehicle to control the motion of all vehicles. This paper explains how to get relative directions and distances of other vehicles in vicinity from an onboard camera, and its effectiveness is verified in simple experiments.

1. 研究背景と目的

近年、複数ローターを持つマルチコプターを用いたミッションが多く検討されている。複数ローターを持つマルチコプターは、シングルローターを持つヘリコプターや固定翼により飛行する飛行機と違い、単純な機構で制御も簡単である。さらにホバリングすることが容易で、空中での写真や動画の撮影に有用である。また東京オリンピックで注目されたものの一つに小型無人航空機（UAV: Unmanned Air Vehicle）によるフォーメーションフライトがある。近年、多くの大学や企業においてこのフォーメーションフライトに関する研究が行われている。フォーメーションフライトは、エンターテインメント以外にも将来的に上空からのステレオ視を用いた地上観測や、UAV 一台では運べない物体を複数台のUAV を用いることで可能にする大型重量物輸送への期待もある。

従来のフォーメーションフライトでは、GNSS (Global Navigation Satellite System)を用いた手法が使われている。この手法は、三機もしくは四機の人工衛星から信号を受け取ることで三次元的な位置情報を得ることができる。しかし、周囲がビルや山などで囲まれている地域では、人工衛星からの信号が

一時的に得られなくなり、フォーメーションに必須の位置の推定精度が低下する。

本研究では、GNSS に頼らずカメラを用いてフォーメーションフライトを実現させることを目標としている。カメラによるフォーメーションフライトでは UAV に取り付けたカメラの画像から相互位置推定を行うため、屋内のような人工衛星からの位置信号を習得できない状況下においても飛行可能となる。

GNSS を用いたフォーメーションフライトの一例として 2020 年のサンクトペテルブルクで行われたドローンショーで用いられた Geoscan 社の Geoscan Salute ドローンがある。このショーでは、約 2000 台の UAV を用いて翼の長さが 600m の鳩を作り上げるといった高精度の位置制御が行われている。このシステムでは、GPS 信号から全機の位置を高精度に推定しているが、地上にはそれぞれの UAV の位置情報を一元的に集め、GPS 間の相対誤差を吸収するための司令塔としてのシステムを必要とした。さらに、すべての UAV と司令塔との間での通信システムも必要である。そのため、システム全体は大掛かりとなり、またシステム全体が移動するような状況下では使用できない。

これに対して、本研究で提案するカメラによる手法では、それぞれの UAV に搭載されたカメラを用いて、近傍の UAV の相対方向と距離を搭載コンピューターが求める。そのため、全機のフォーメーションフライトを集中的にコントロールする司令塔は不要となる。さらに、UAV 間の通信を使わずにフォーメーションを目指す。その結果、小型 UAV を用いた小規模なフォーメーションが実現可能になれば、フォーメーションフライトを利用したミッションの範囲が格段に広くなる。

ロボット間の相互通信を用いることなくフォーメーションの実現を目指した研究として、花田らの文献[1]がある。この研究では、各ロボットが近くにいるロボットの相対位置情報を得て、2 台のロボットと間で正三角形のフォーメーションをつくるように移動する。それぞれは独自にかつ同時に移動するが、それでも全体として正三角形のフォーメーションが形成されることを、解析的に示している。論文では 2 次元面内を移動するロボットのフォーメーションを扱っているが、本研究ではこれを用いて、UAV による三次元のフォーメーションについて検討する。近くにいる UAV の相対位置情報は、UAV に搭載したカメラから得る。そのため、位置の推定にはカメラ特性（画角、ピクセル数）が関係してくる。また、カメラによる手法では近距離では高い精度で位置推定を行うことができる一方で、距離が遠くなると位置情報の推定精度が悪くなる。また、フォーメーションを組む UAV が画像面から外れた場合にはそれを修正する機能も必要となる。

2. 単眼カメラによる距離推定

ここでは、前節で述べた UAV 間の位置推定に関するカメラの画角と画素数についての関係式を示す。UAV にカメラとコンピューターを搭載するため、全重量を可能な限り軽くし、計算量も低減する必要がある。そのため、単眼カメラを用いて簡単な処理によってそれぞれの UAV 間の位置情報を推定する。単眼カメラの映像は 2 次元であるた

め、距離情報は予め大きさのわかっている UAV の画像中での大きさから推定する。

そのためには、画像内の一画素が距離に応じてどれくらいの幅に対応しているのかを考える必要がある。画像内における UAV の認識は、機体の色と背景から画素単位で境目を抽出し、内側を機体と判定する。さらに、UAV の大きさが既知であることから逆算して、UAV との相対距離を推測する。一画素に対応する幅を考える場合、画像面が平面であると仮定すると、画像面中の画素の位置が影響する。

そこで幾何学的な関係を単純化するために、以下の三つが成り立つと仮定する。

1. 単眼ピンホールカメラとする
2. 画像周辺の歪みは無視できるものとする
3. 画素面が等間隔で格子状となっている

このとき、カメラの画素数を P 、カメラの焦点から他の UAV までの距離を r 、カメラの画角を θ とすると、距離 r に対しての鉛直方向の一画素あたりの幅を a とすると

$$a = \frac{2r \times \tan \frac{\theta}{2}}{P} \quad \dots (1)$$

で表すことができる。他の UAV がカメラ画像中で中心付近に映る場合、距離 r に対しての鉛直方向の一画素あたりの幅は式(1)の a と等しくなる（図 1）。

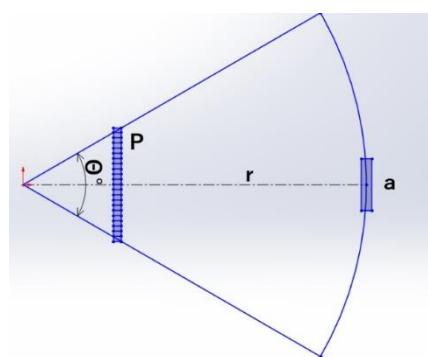


図 1: 画像中央付近にある物体

一方、他の UAV が画像中心から θ' だけ移動させた画素に映る場合、一画素あたりの幅 a' は

$$a' = \frac{a}{\cos \theta'} = \frac{2r \tan \frac{\theta}{2}}{P \cos \theta'} \left(\theta' \leq \frac{\theta}{2} \right) \dots (2)$$

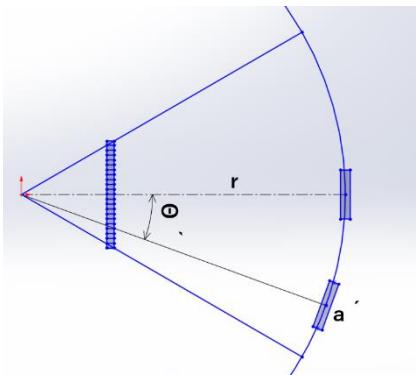


図 2: 画像中央から外れた方向にある物体

となる(図 2). ここで, $0 \leq \cos \theta' \leq 1$ であり $a' \leq a$ となり, これは一画素あたりに映る幅が画像中心よりも画像の端に行くにつれ小さくなることを意味する. つまり, 一画素あたりの幅が小さくなるということは, 例えば中心では 10 画素で映っていた UAV が, 端の方では 10 画素より多い画素で映ることになる.

中心付近と端付近でどれだけの画素数の差ができるのかで画像内における位置に応じて大きさに補正を考える. 式(2)において, θ' を 30° とすると, a' は a の約 1.15 倍となる. これを実際のカメラのパラメータについて考える. カメラとして, 1080p で画角 78° のものを例にする. このとき, 撮影物体が中心にある時と, 中心から約 30° ずらした位置にある時のピクセル数は, 中心の時より約 1.1 倍となる. このことは, 画像中心と端で約 1 割の画素数のずれが生じ, 距離の推定においても補正をかける必要があることを示す. また, このような補正の考え方には, 水平方向と垂直方向の区別なく, 両方に考える必要がある.

3. 検証

ここでは, 前節で述べた諸元を持つカメラを用いて位置補正をするプログラムを作成し, そのプログラムを用いて 3 つの仮定の妥当性を実験的に検証する. 簡単のために, 水平面内での 3 台の UAV による三角形のフォーメーションを想定する. 本来は UAV を用いるべきであるが, UAV の

向きや姿勢によって, カメラ画像中で UAV が見える大きさに差が生じることを避けるために, まずはどの方向からみても同じ大きさである球を用いる.

実験時の画像の一例を図 3 に示す. 正三角形フォーメーションが作れるか確かめるために画像中の垂直方向に画像中心から左右 30° の位置に二本の線と水平方向に一本の線を引いている. これらの線の交点に球の中心が重なるようにするにはカメラ自身 (UAV) がどの方向にどれだけ移動すればよいか計算を行う. 角度が 0° と 30° のときの測定距離は, 表 1 のようになった. なお, 距離の単位は mm である.

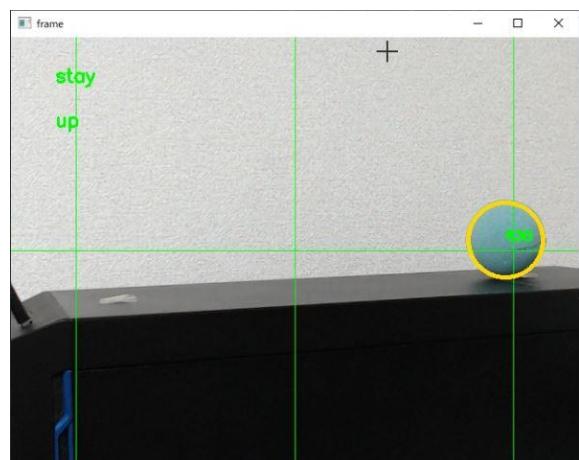


図 3: 球までの距離推定

表 1: 距離の検証データ

距離	0° のとき	30° のとき
600	597	609
700	702	705
800	806	792
900	885	875
1000	1020	981
1200	1178	1170

表から角度が画像中心から 0° と 30° のときは, そこまで大きな差は生じなかった. しかし, 距離が 600mm のときと 1200mm のときでは, 測定

に数倍の誤差が生じている。これは、距離が遠くなるほど画像中に見える測定対象の大きさが小さくなるためである。このことからさらに距離が延びるほど、実際の距離と測定距離に誤差が生じてしまう。

4. 終わりに

GPS 信号や UAV 間通信を必要としない小規模なフォーメーションフライトについて検討した。その実現のために、単眼カメラを用いた相対的な距離と方向を取得する方法を示し、その有効性を簡単な実験で検証した。

参考文献

- [1] 花田, 李, 丁, 群ロボットの未知環境に適応した分散的移動手法, 計測自動制御学会論文集
Vol. 44, No. 1, 96/105 (2008)

床面カメラを用いた屋外移動車の自己位置推定

久留米工業大学 ○佐伯 透・千田 陽介

Self-Positioning of an Outdoor Mobile Vehicle Using a Floor Camera

Toru SAIKI, Yosuke SENTA, Kurume Institute of Technology

Abstract: The Intelligent Mobility Laboratory of the Kurume Institute of Technology is investigating and developing smart mobility, a type of wheelchair robot. Though the wheelchair robot uses AI cameras to estimate its position, the robot may lose the position for some reason. Therefore we decided to set up a second self-position estimation function using GPS and cameras. The time between GPS acquisition is used for self-positioning estimation by dead reckoning using the floor camera. The indoor run was successful in self-position estimation, but the outdoor run was unsuccessful because the shadow of the camera gets captured in the camera image.

1 はじめに

久留米工業大学プランディング事業ではスマートモビリティ（車椅子ロボット）の研究が行われている¹⁾。このモビリティはAIカメラを用いて自身で自己位置を推定している。しかし、何らかのきっかけで自己位置を見失ってしまう可能性を否定できない。そこで環境カメラやGPSを用いて第二の自己位置推定機能が望まれていた。GPSを用いた位置計測のみでは1秒毎にしか位置情報を取得できず、また誤差が数mあるなど問題が多い。そこでGPSが情報を取得する間の時間を床面に向かたカメラ画像からデッドレコニングを行えないか検討した。

2 研究の概要

当研究は最終的に車椅子ロボットに適応するものである。しかし、実験で車椅子ロボット実機を用いるのは取り回しが良くない。そこで予備実験を手軽に行えるようFig.1のような小型移動ロボットで実験を行っている²⁾。Fig.2はGPS情報のみを用いてスタートからA,Bを経由してゴールまでロボットを走行させた軌跡である。Fig.2を見て分かるように軌跡は蛇行している。GPSの



Fig.2: ロボットの走行軌跡
(Google Earth を用いてプロット)

データは1秒に1回しか取得できず制御が遅れてしまうためである。そこでFig.3のようにGPSで現在位置を取得した後、床面画像を光学式マウスの様に解析しデッドレコニングで現在位置を更新しGPS情報を取得すると現在位置を修正する仕組みを考えた。デッドレコニングにはある程度の誤差が伴うが、定期的に真値(GPS値)に修正させるので大きくずれることはない。カメラ画像を用いて移動ロボットを自律走行させる研究は様々なものがある^{3,4)}。これらは事前に走行したコースを自律して走行するもので今回の研究の場合、事前に走行するコースが定まっていない状態で自己位置を推定しながら走行する必要がある。



Fig.1: 移動ロボット

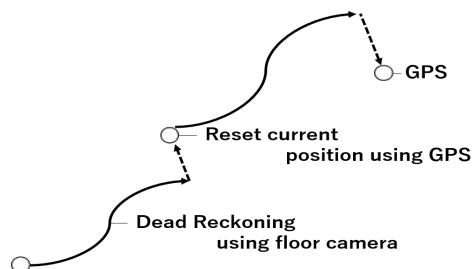


Fig.3: デッドレコニングの概要

3 実験方法とアルゴリズム

前章で述べたように当研究の最終目標は GPS が情報を取得する間隔の間を自己位置推定することである。しかし、初めから Fig.3 のようなシステムを組み上げると問題の切り分けが難しくなる。そこで、まずカメラによるデッドレコニング単体の手法を確立することにした。Fig.4 のようにノートパソコンと Web カメラを台車に設置し床面の動きを撮影、得た動画を画像処理し、実際の軌跡と比較することでデッドレコニングのアルゴリズムを検討する。動画前フレームと現フレームで特徴点マッチングした座標を使用し台車の移動量 $\mathbf{X} = (x, y)^T$ 、ヨー軸回りの回転量 ϕ を求め、それを積分することでロボットの現在位置を更新する。特徴点マッチングは OpenCV の AKAZE を用いて行った。 \mathbf{X}, ϕ の推定にあたり画像上から得られた全特徴点の座標を使用すると処理に時間がかかるので類似度が高い上位 10 の座標を使うようにした。

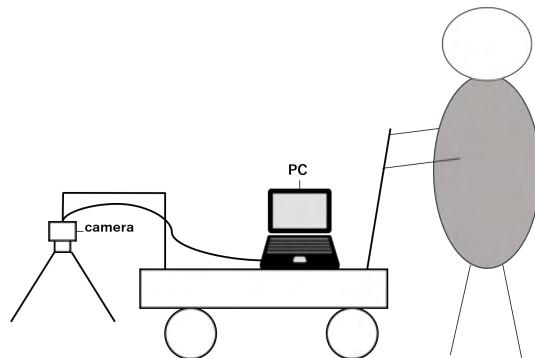


Fig.4: 台車にカメラを設置

4 実験結果

4.1 屋内での走行

Fig.5 は Fig.6(左) のような廊下を真っ直ぐ 20m ほど約 30 秒かけて走行し、同図(右)の様な画像を取得後そこから台車の推定座標の軌跡をプロットしたものである。ここで初期位置は座標 $(0, 0)^T$ 、カメラは進行方向に対して斜めに取り付けている。そのため x, y ともに正の方向、斜めに移動するのが正しい。軸の単位は pixel になっているがこれはカメラの解像度や焦点距離、カメラの設置高さ等から単位 (m) に変換できる。この図に示す A 点付近など時折逆戻りしている箇所があるが、おおよそ X 軸、Y 軸ともに増加しまっすぐ進んでることが分かる。

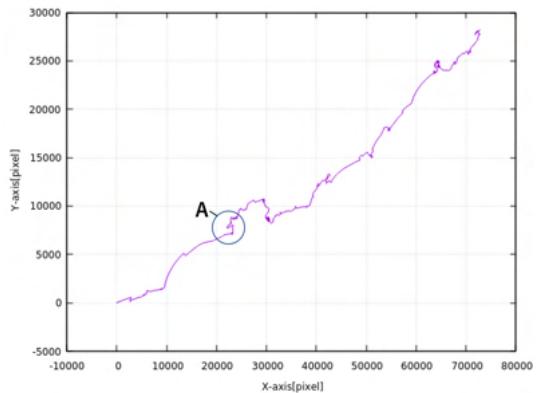


Fig.5: 屋内での走行軌跡



Fig.6: 屋内での走行画像

4.2 屋外での走行

引き続き、屋外で実験を行った結果を Fig.7 に示す。屋内に比べ逆戻りが頻発し軌跡が真っ直ぐになっていない。この原因は Fig.8 のようにカメラの影が写り込んでしまい、そこが特徴点と検出されるためである。そこで Fig.9 の様に影のある辺りをマスクして特徴点抽出し、軌跡の算出を行った結果を Fig.10 に示す。Fig.7 と比較すると逆戻りの頻度が減り、途中までは X が減少するが最終的には X 軸、Y 軸ともに増加するような軌跡となった。

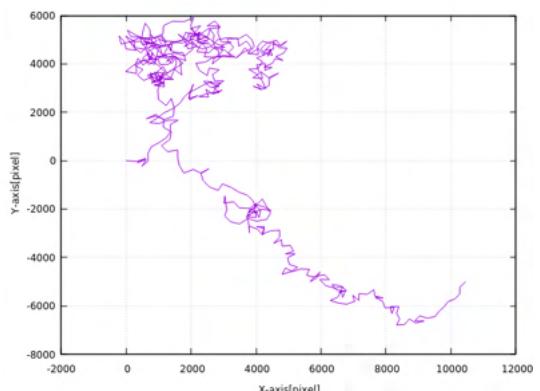


Fig.7: 屋外での走行軌跡

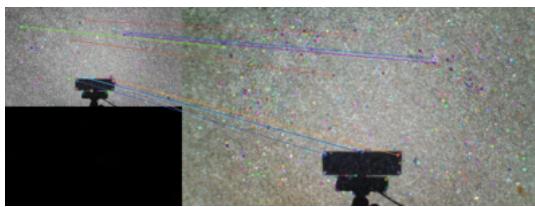


Fig.8: 影が写り込んでいる状況



Fig.9: マスクした様子

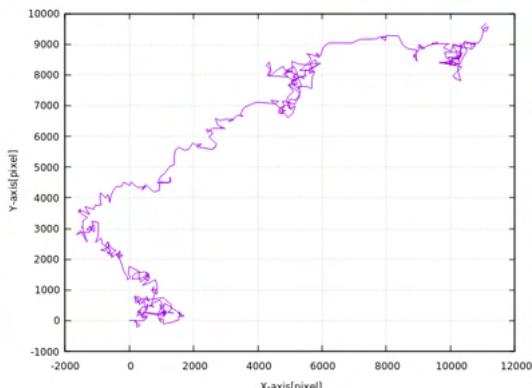


Fig.10: マスク後の屋外での走行軌跡

5 アルゴリズムの検証

Fig.7, 11 の様な結果よりそもそも特徴点マッチングがうまく行っていない懸念があったので、Fig.11 のような室内環境画像をカメラで捉えゆっくりパンし検証した。各画像の物体の特長点同士を上手くマッチングできており正しくアルゴリズムは構築できているように思える。Fig.12 は Fig.11 の移動量を計算し軌跡をプロットしたものである。X 軸、Y 軸ともに増加しパンの軌跡をプロットできている。

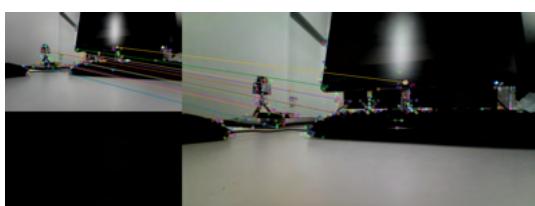


Fig.11: 室内での特徴点検出

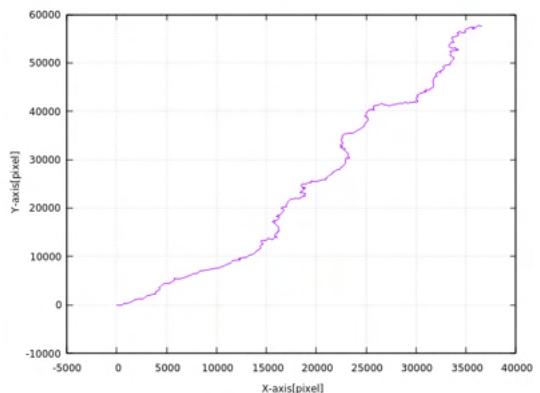


Fig.12: パンした画像での軌跡

6 おわりに

屋内で台車にカメラを取り付け画像を解析することで自己位置を求めることができた。しかし Fig.7 を見て分かるように屋外では自己位置が正確に求められない。これはカメラの画像内に影が写り込んでしまい、影を含めて自己位置推定の計算を行っているためである。カメラの影が写り込んでいる部分をマスクしプロットすると Fig.9 のように逆戻りの頻度が減り想定する軌跡に近い軌跡がプロットされる。影が写り込んでしまう問題を解決するためには傘のような物で全体を覆い意図しない影が入り込むのを防ぐことで解決できるのではないかと考える。最終的には GPS が情報を取得する間の時間を画像処理で補完し自己位置推定をすることでスマートモビリティが自己位置を失う問題を解決したい。本研究は令和3年度私立大学ブランディング事業の助成を受けたものです。

文 献

- 1) 東, 服部ほか, “対話型 AI 自動運転車いすを核とした福祉インテリジェントモビリティサービスの開発”, 久留米工業大学研究報告 No.43, pp.2-12, 2020
- 2) 佐伯, “GPS による屋外ロボットの走行ナビゲーション”, 久留米工業大学情報卒業研究 2021 %
- 3) I. Nagai and K. Watanabe, “Path tracking by a mobile robot equipped with only a downward facing camera”, 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.6053-6058, 2015
- 4) A. Ohya, Y. Miyazaki and S. Yuta, “Autonomous navigation of mobile robot based on teaching and playback using trinocular vision”, IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No.37243), pp.398-403, 2001

グラフ理論を用いた障害物回避経路の探索とパーソナルモビリティによる実験

鈴鹿真世¹ 永原正章²

¹ 北九州市立大学

1 研究背景と目的

超高齢化社会を迎えた日本において、移動のためのモビリティは重要な研究課題であり、歩行が困難な人たちの移動をサポートするモビリティの自動運転化が期待されている[1]。近距離を一人で移動するパーソナルモビリティは特に注目され、盛んに研究されている[2]。本研究では、指定された目的地まで自動でパーソナルモビリティを走行させる自動運転システムについて考察する。

パーソナルモビリティの自動運転においては、指定された目的地まで最短距離で移動するだけでなく、検知した障害物を安全かつスムーズに回避する経路計画アルゴリズムも要求される。パーソナルモビリティの経路計画では、パーソナルモビリティの形状や動的モデルを考慮し、初期姿勢から目標姿勢までの動作の手順を探索する必要がある。したがって、LiDARなどから得られた周辺環境の地図情報と自己位置推定で得られた現在の位置と姿勢にもとづいて目的地までの走行経路を適応的に計画する[3, 4]。

従来研究[5]では、空間を離散化した上で、グラフ理論におけるダイクストラ法により最短経路を求め、Pure Pursuitアルゴリズムにより連続的な経路を求める手法が提案され、シミュレーションによって有効性が検証されている。連続的な経路を生成することで、ロボットを正確に移動することが可能になる。なぜなら、離散的な経路から算出される角速度は、蛇行や不安定なステアリング制御の原因になるからである[6]。本研究では、この手法をパーソナルモビリティの実機に実装し、実環境で動作させることにより、アルゴリズムの有効性および問題点を明らかにする。

2 問題設定

本研究では、パーソナルモビリティとして電動車椅子を用い、その経路計画として以下の問題を考える。2次元のワールド座標内にスタート位置、障害物の位置、およびゴール位置が与えられ、電動車椅子がスタート位置から障害物をスムーズに回避して最短経路で移動し、

ゴール位置まで到達させる。

3 数学的準備

本研究では最短経路探索のダイクストラ法と Pure Pursuit アルゴリズムを用いて連続的な経路を生成する。ここでは、それぞれの手法について説明を行う。

3.1 ダイクストラ法

ダイクストラ法はグラフ理論[7]における2点間の最短経路を求めるアルゴリズムである。スタートの頂点に近い頂点から辺を決定し、徐々にゴールの頂点までの最短経路を求めていく。ダイクストラ法により得られる経路は離散的であり、パーソナルモビリティを動作させるためには、このままでは利用できない。よって、得られた離散的な経路を連続的な経路に変換することが必要である。

3.2 Pure Pursuit アルゴリズム

Pure Pursuit アルゴリズムは、生成された経路に対して、前方にある一定距離先の点を目標点とし、その点に到達するように旋回制御を行うアルゴリズムである。Pure Pursuit アルゴリズムにより、グラフ上で与えられた経路上の離散的な目標点から、ロボットが実際に移動する連続的な経路を生成することができる[6]。

4 パーソナルモビリティによる実験

4.1 ROS での実装

ロボット開発プラットフォーム Robot Operating System(ROS) の move_base と呼ばれる自律走行を行うノードを用いて最短経路を生成し、座標変換ライブラリ tf によって Pure Pursuit アルゴリズムを電動車椅子に実装した。ここで、ROSにおけるノードとはROS内で実行可能な1つのプログラムのことである[8]。また、電動車椅子の足置き場の中心に2Dレーザースキャナを置いて自律走行を行った。

4.2 パーソナルモビリティによる実験

提案手法を電動車椅子に実装してスタートからゴールまで移動させた。Fig. 1 の緑色の経路が電動車椅子の走行軌跡を表し、赤色の経路がダイクストラ法で生成された軌跡である。また、move_base にはダイクストラ法が実装されている [9]。この move_base を用いた時、複数の経路が生成された。そこで、複数の経路の平均をとって 1 つの経路に変換した。なお、変換した 1 つの経路が Fig. 1 の緑色の経路を指す。この時に複数の経路が生成されたのはトピックと呼ばれるノード間でやり取りを行うデータが送信されるたびに追加されているからである。送信されているデータは経路の座標値である。つまり、常に同じ座標値が送信されていないため複数の経路が生成されているように可視化された。また、Fig. 1 より生成された軌跡間には誤差が生じていることが分かる。これは Simultaneous Localization and Mapping(SLAM) による自己位置推定の誤差だと考えられる。SLAM とは地図構築と自己位置推定を同時に使う技術である。加えて、ロボットの位置を推定する有力な方法の 1 つにオドメトリがある。オドメトリは、与えられた初期位置から微小変位を積分して現在位置を求める。しかし、オドメトリは移動量を加算していく積分計算なので、移動量に含まれている誤差も加算されていく問題がある。[4]。したがって、オドメトリによる推定位置は電動車椅子が走行するにつれてずれていくため、Fig. 1 のように誤差が生じたと考えられる。

5 おわりに

本論文では、ダイクストラ法と Pure Pursuit 法を組み合わせた最短経路探索法を電動車椅子に実装し、実環境で実験を行った。本実験では地図上に静的な物体が予め登録されているため、未登録な障害物や動的な障害物に対する回避は考慮されていない。そこで、地図上に未登録な障害物や動的な障害物にも対応した滑らかで連続的な経路を生成することが今後の課題として挙げられる。

参考文献

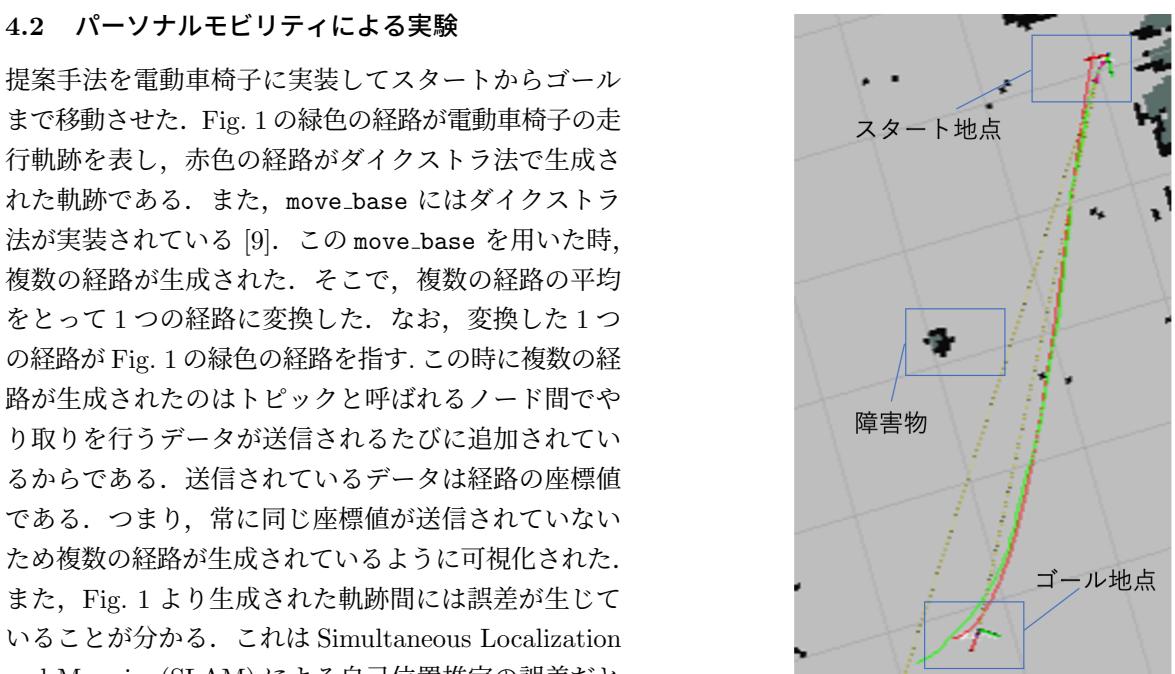


Fig 1: 実際の走行軌跡

- [3] 藤本, 守屋, 中山, 車輪移動ロボットの経路探索の高速化のためのマップリンク法, 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 8, pp. 630–641, 2015.
- [4] 友納, SLAM 入門, オーム社, 2018.
- [5] 楠田, 永原, 藤本, グラフ理論を用いた自動運転における障害物回避経路の探索, 第 7 回制御部門マルチシンポジウム予稿集, 2020.
- [6] H. Ohta et al.: Pure pursuit revisited: Field testing of autonomous vehicles in urban areas, *2016 IEEE 4th International Conference on Cyber-Physical System, Networks, and Applications (CPSNA)*, 2016.
- [7] 林, 永原, マルチエージェントシステムの制御, 代数的グラフ理論, システム/制御/情報, Vol.57, No.7, 2013.
- [8] 表, 倉爪, 鄭, ROS ロボットプログラミングバイブル, オーム社, 2018.
- [9] Y. Ajmera and A. Javed, Shared autonomy in web-based human robot interaction, *Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference*, pp. 696–702, 2020.

伸縮式アームをもつ路面走行型打音検査ロボットの開発
水口 健史・北條 翔馬・竹本 和馬・李 根浩（宮崎大学）

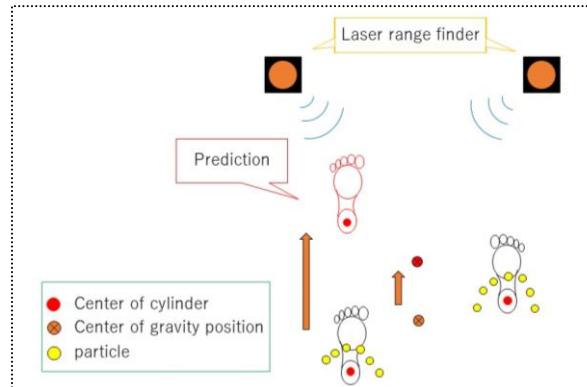
橋梁やトンネルの点検補修の需要は年々高まりを見せている。飛行ロボットや壁面走行ロボットによる検査の研究は広く取り組まれているが、これらは主に橋梁への対応を目指したものである。そこでトンネルにおける打音検査の効率化・省力化を目標として、本研究では伸縮式アームをもつ路面走行型打音検査ロボットの開発を行う。ロボットは4輪の車体、ハンマー及びマイクを搭載した打音ユニット、ユニットを並進させる伸縮式アームにより構成されており、トンネル内を自走して打音ユニットを壁面に押し付けることで打音検査の実施が可能である。



粒子フィルタを用いた歩行意図の推定と予測

福留 隆寛 李 根浩 砥上 真久 (宮崎大学)

近年の高齢社会に伴い、ロボット技術を搭載した下肢動作支援機器が多く開発されている。それらの多くはカメラや、センサを人体に取り付けることで下肢動作の認識を行うものが多い。そこで本研究では、測域センサのみを使用し、粒子フィルタを用いた歩行動作における歩行意図の推定とその予測を行う。測域センサのみを用いて人間のおおよその重心の位置を算出し、その重心の位置の変化に粒子フィルタをかけることで、歩行動作の意図推定と予測を可能にする。非接触であり、プライバシー保護可能な歩行意図の認識を狙う。



羽ばたき機構における翅の位置による飛行姿勢への影響の調査
岡部 光汰・則竹 遥・相澤 綾一・李 根浩 (宮崎大学)

近年、生物の動作を模倣した羽ばたき機構に関する研究が盛んである。それらは模倣した生物の種類、翅の枚数や翅の構成によって分けられる。それに対して、翅の位置や飛行姿勢、機体のバランスは注目したものが少ない。そこで昆虫の翅の位置に着目し、昆虫の翅の位置による違いが飛行姿勢への影響を与えていたのではないか検証するために翅の位置を可変な羽ばたき機構を提案する。本稿では、モーターの回転運動を往復運動に変換する羽ばたき動作機構による羽ばたき動作と翅の位置が可変な試作機を紹介する。また、試作機を用いて動作実験を行うことで有効性を示す。

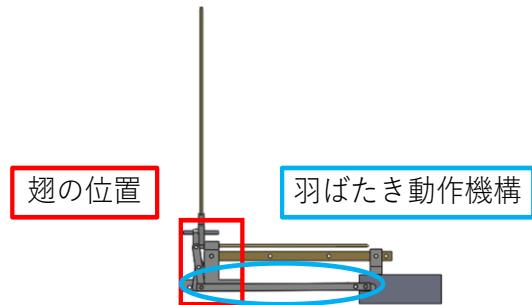
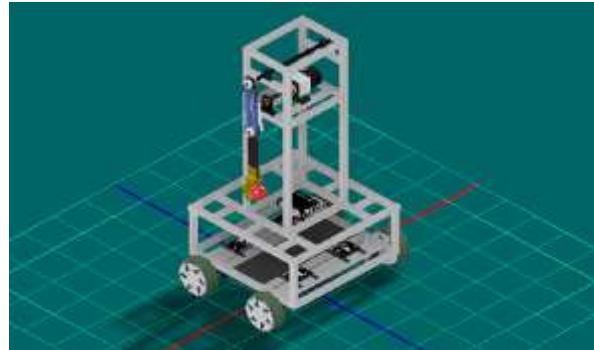


図 1 提案するメカニズム

任意の場所へ投球可能な投球ロボットの開発
砥上 真久 李 根浩 福留 隆寛 (宮崎大学)

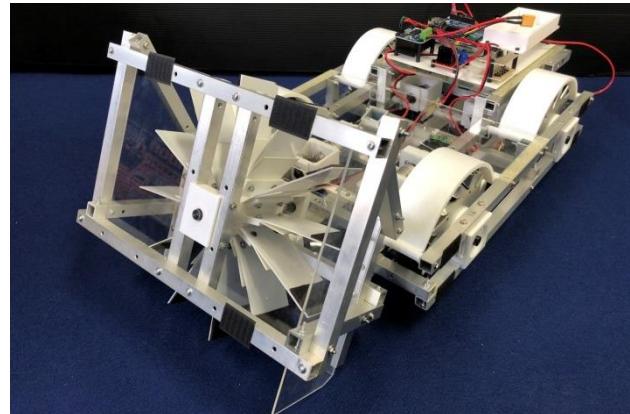
ボッチャは重度の機能障害者のために考案された球技であり、ルールの汎用性の高さから障害者から健常者まで幅広くゲームに参加することができる。しかしながら現在、ボッチャでは障害の程度によってクラス分けされているため、障害者と健常者が一緒にゲームに参加することは難しい。

そこで、本研究では参加者の身体的なハンデを補うことを目的とした投球ロボットを提案する。本ロボットは任意の場所へ投球することが可能であり、今後は様々なインターフェースの導入を想定している。本研究により、より様々な人間が一緒にボッチャを楽しめることが期待される。



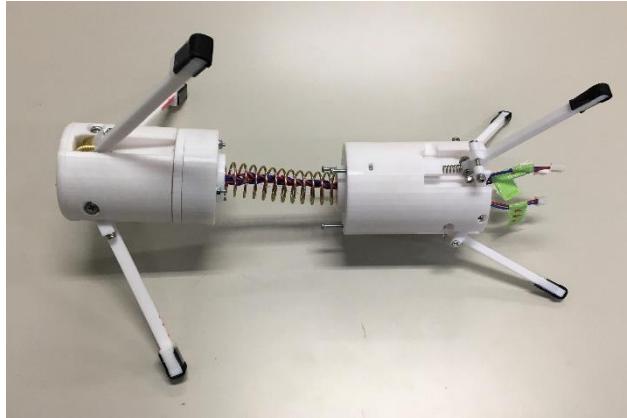
ボッチャ競技の支援を目的としたボール回収ロボットの開発
竹本和馬・李根浩・横山大輝（宮崎大学）

近年、障がい者スポーツが盛んに行われている。その中でボッチャなどの球技は多くの種目が存在している。しかしながら問題点として、使用後のボール回収作業による身体的負担や練習効率の低下が挙げられる。この問題への支援方法としてボール回収機器が存在するが、ボッチャで使用されるボールのような特殊なボールの回収は困難である。本研究ではボッチャ競技の支援を目的としたボール回収ロボットの開発を提案する。ボッチャボールを回収するために回転運動を利用した回収機構を開発し、移動ロボットに搭載する事で練習等でのボールの回収作業への支援を行う。



適応性の向上を目的とした管内探査ロボットにおける移動モデルの提案
横山大輝（宮崎大学）李根浩（宮崎大学）竹本和馬（宮崎大学）

配管は我々の身の回りを取り囲むように天井や壁に設置してある。しかし疲労が蓄積している管は、潜在的な問題により突然破裂することがある。当然、事故防止のために点検が行われている。その手法の一つに管内探査ロボットというものがある。実用化され市販もされているが、限定的な環境の中でしか使用できないことが多い。そこで本研究では、ロボットが環境に対して最も作用すると考えられる移動メカニズムに注目し、「適応性の向上」を目的とした移動メカニズムの開発を行った。そして、開発したメカニズムの有効性を検証し、一定の有効性を確認した。

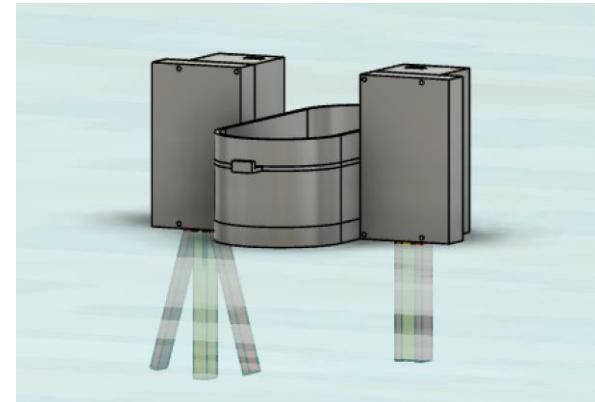


水上移動ロボットの旋回制御手法の提案

春日井 稔樹, Pwint Phoo Wai, 井上 哲平, 李 根浩 (宮崎大学)

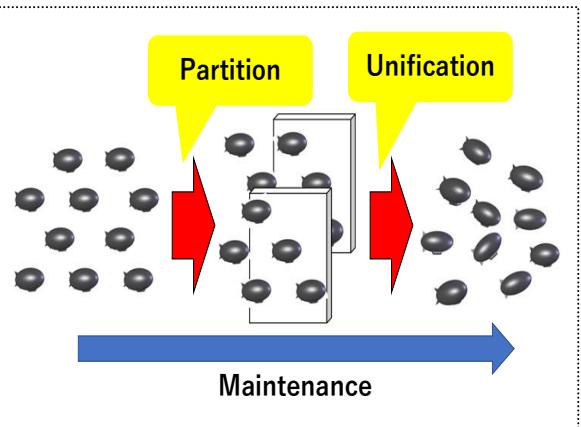
現在の水上移動機構は、騒音問題や接触事故による水生生物を傷つける恐れがあるため、フィンや遊泳脚を用いた生物模倣の推進機構が開発されている。しかしながら、これらの機構は旋回といった細かな動きを実現することが困難であるといった課題が挙げられる。

そこで、旋回といった細かな推進を可能にする新たなモデルの提案とそれに基づく制御手法を提案する。具体的にはアヒルの蹼を模倣し、水を搔く際の表面積を変化させながら遊泳する。本研究により移動の自由度が向上し、生物模倣による推進機構と制御手法に貢献することが期待される。



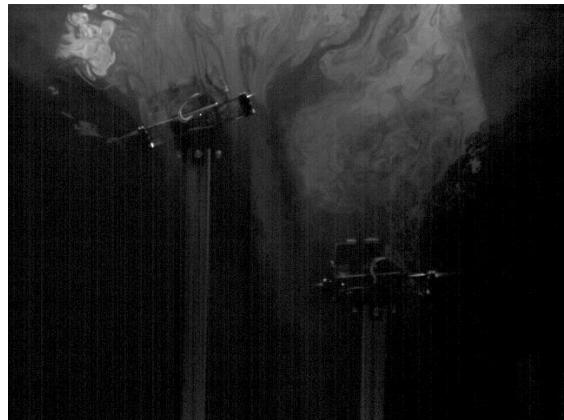
ロボット群における分散的移動制御手法 緒方孝起・李根浩（宮崎大学）

本研究はロボット群が3次元空間内を自律的に移動する制御手法を提案する。ロボット群は、お互いに一定の距離を保ちながら、目的地に向かって環境条件に応じるように複数のチームに分割し、または1つに再統合し移動することができる。この適応的な群れの動きは、限られたセンシング範囲内での特定のロボットを選択と、そのロボットとの幾何学的な局所相互作用することで移動可能にしている。各ロボットは、個人を識別するIDやリーダーといった事前情報などを用いておらず、さらに互いに直接通信することができないと仮定している。本研究では、障害物が存在する環境下でシミュレーションを行い提案アルゴリズムの有効性を検証した。



複数クアッドコプター近接飛行時の乱流に基づく相互干渉分析を目的とする PIV 計測
○上村凌雅, 坂口聰範, 越智亮太, 山本薰 (九州大学)

本研究では、クアッドコプター近接飛行時に生じる乱流による相互干渉を分析することを目的とする。具体的には、二機のクアッドコプターに対して PIV(Particle Image Velocimetry)計測を用いて機体間の気流の可視化および流れ場解析を行う。実験では、各機体の相対位置と機体角度を変えることにより、並進、および群からの合流・離脱を再現する。本解析結果はより高精度でロバストなクアッドコプターチーム飛行の実現に寄与することが期待される。



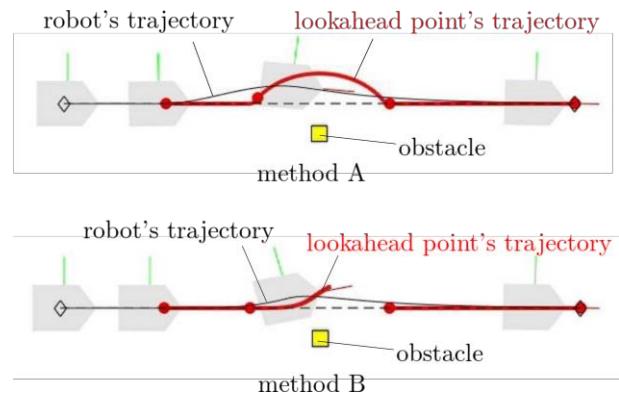
アクションカメラを用いたマーカ識別による移動ロボットの自律移動制御 下田 稔志（佐賀大学）

本研究ではマーカを識別することによって自律移動を行うロボットの制御システムを開発した。ロボットは内部カメラで撮影した画像からマーカを識別し、ロボットとの距離を測定することで自己位置推定を行い、マーカによって設定された経路を自律走行する。本手法ではGPSが受信できない環境下での自己位置推定、自律走行が可能である。また、内部カメラに画像安定化機能を有するアクションカメラを用いることで悪路走行時の車体の振動に起因する画像処理の乱れを低減し、安定した距離測定が可能である。さらにマーカにパイロンを用いることで経路設定を容易に行うことができる。本研究での提案手法の有効性を実機による実験で示す。



Pure pursuit 法を用いた移動ロボットにおける滑らかな障害物回避手法の提案
○築城大知, 坂口聰範, 越智亮太, 山本薰 (九州大学)

本研究では、Pure pursuit 法を用いて経路追従を行う移動ロボットの障害物回避問題について考える。人工ポテンシャル法などの従来手法では、障害物からロボットに斥力が直接働くため、ロボットの動きが急激に変化してしまう問題がある。したがって、本研究では、障害物を検出した際、ロボットが追いかける「前方注視点」を移動させることで、滑らかな障害物回避を実現する方法を 2 つ提案する。また、シミュレーションにより、提案手法がロボットの角加速度を抑制することを示した。



逐次 LMI 化法の CAD 実装

朱 九霖 (九州工業大学)

双線形行列不等式(BMI)制約問題は制御系設計において重要な問題である。一方で、BMI 制約問題は数値的な求解が困難であることが知られている。BMI 制約問題を解く方法として、BMI 制約を逐次的に線形行列不等式(LMI)制約に近似する逐次 LMI 化法が提案されている。逐次 LMI 化法は多くの制御系設計問題に適用することができるが、それぞれの設計問題ごとに設計者が実装する必要があり、開発時間や信頼性が問題として挙げられる。

本研究では、MATLAB で利用可能な逐次 LMI 化法の支援プログラムの開発を行なった。発表では、逐次 LMI 化法の紹介および支援プログラムのデモを行う。

・解きたい設計問題の BMI(例 : H_∞ 制約)

$$\begin{bmatrix} \text{He}\{P(A + B_2KC_2)\} & * & * \\ (B_1 + B_2KD_{21})^T P & -\gamma I & * \\ C_1 + D_{12}KC_2 & D_{11} + D_{12}KD_{21} & -\gamma I \end{bmatrix} \prec O$$

↓ 自動で変換する支援プログラム

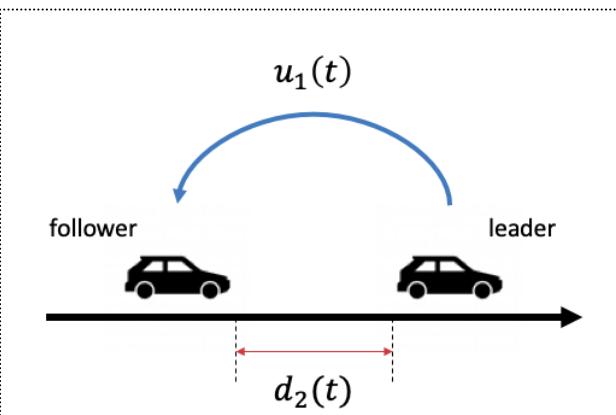
・拡大LMI(逐次LMI化法)

$$\text{He} \left\{ \begin{array}{c|c|c|c} (\hat{P} + \Delta P)A + QC_2 & (\hat{P} + \Delta P)B_1 + QD_{21} & O & \Delta PB_2 \\ \hline O & -\frac{\gamma}{2}I & O & O \\ \hline C_1 + D_{12}(\hat{K} + \Delta K) & D_{11} & -\frac{\gamma}{2}I & O \\ \hline G\Delta KC_2 & G\Delta KD_{21} & O & -G \end{array} \right\} \prec O$$

$Q = \hat{P}B_2\hat{K} + \Delta PB_2\hat{K} + \hat{P}B_2\Delta K$

協調型車間維持支援システムに対するウォーターマーキング信号によるリプレイ攻撃検出
○大澤 豊, 松下真也, 上野尚平, 末光治雄, 松尾孝美(大分大学)

本研究は、自動車の追従走行の発展形とされるCACCの性能の検証を行うこと、いくつかのリプレイ攻撃手法を使用し、それら攻撃の検出方法の提案を目的としている。CACCとは図に示すように車両間通信を行い、円滑な追従走行を可能とする。リプレイ攻撃は、delay型、内部モデル型、開ループ型の3種類を使用し、車両間通信に攻撃を行う。攻撃検出方法はウォーターマーキング信号を使用し、遅れ時間の推定値を攻撃による遅れと見なし、攻撃検出を試みる。攻撃を受けたCACCの動作状況と攻撃検出の有無についてシミュレーションにて検証し、その結果を報告する。

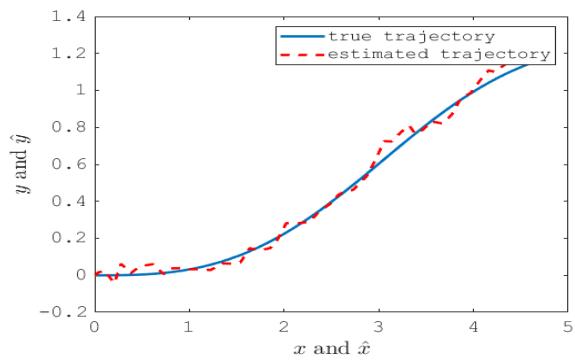


適応オブザーバを用いた移動ロボットのオドメトリ較正

○白鞘 真彦, 松下 真也, 上野 尚平, 松尾 孝美 (大分大学)

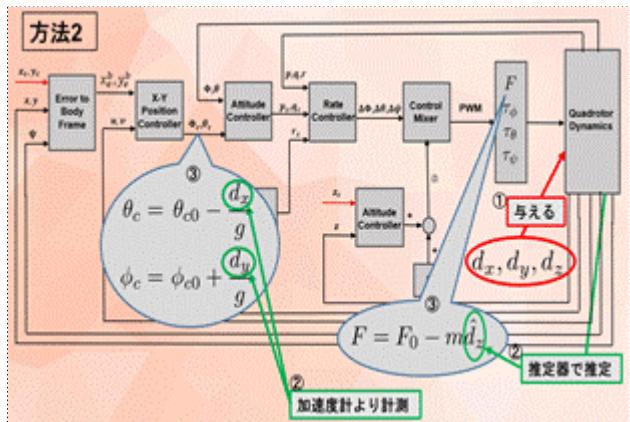
レーザーレンジスキャナをセンサとして、ランドマークを設定し、提案する適応オブザーバを用いて、車輪パラメータ推定を行う方法を提案する。

初めに、運動学モデルと観測モデルについてまとめ、ここで、2種類の観測モデルを示し、正接の不連続性から移動ロボットの直交座標を観測値として用いることを説明する。ついで、線形化モデルからオブザーバゲインを用いて、非線形の運動学推定式に適用した自己位置推定性能を検証する。さらに、ZMP ロボカー1/10 の実機モデルのレーザーレンジスキャナを装着し、検出するプログラムを作成し、その性能を確かめる。



併進外乱のあるクアッドロータの位置制御
 ○竹下菜々子, 佐藤大和, 上野尚平, 松尾孝美 (大分大学)

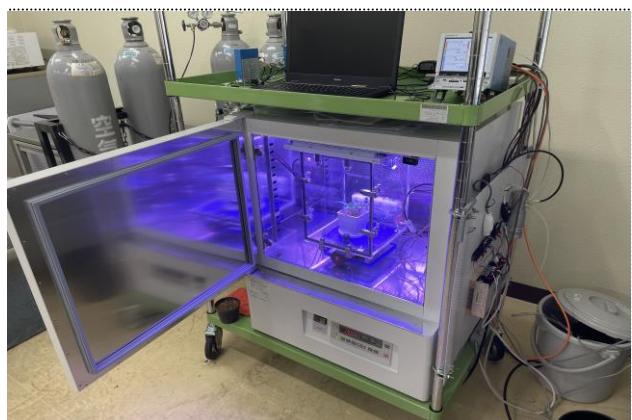
クアッドロータは3軸の並進運動と3軸の回転運動の6自由度をもつが、4つのロータがアクチュエータ入力になる劣駆動系である。このため並進および回転運動に6つの外乱が入る状況では、4つのプロペラの回転によるスラスト、ローリングトルク、ピッチングトルク、ヨーイングトルクを使って補償するしかない。本報告ではこのような劣駆動系に適用できる2種類の外乱補償方法を提案した。2つの補償方法のうち、特に方法2を実装することで、4つのプロペラでの入力で6自由度の外乱補償を行うことが期待できることをシミュレーションと実験により示した。



実験データを用いた CAM 植物の信号分離

○田中俊介, 小西忠司, 末光治雄, 上野尚平, 松尾孝美 (大分大学)

CAM 植物とよばれるサボテンやパイナップルなどの植物は乾燥環境に適応した光合成機構を備えるため、これらの制御法の確立により砂漠の緑化や食料生産の最大化、二酸化炭素削減効果、植物工場の実現などが期待されている。本研究では CAM 植物制御に必要な植物の外気からの CO₂取り込み量に関して、その信号分離問題と精密な計測のための植物実験装置を構築し、CO₂取り込み量のデータを取得した。植物全体の CO₂取り込み量は各細胞の時間遅れの和と仮定し、以前提案した適応微分推定器を用いた最適化器を適用し、実験データの信号分離を行った。



ワイヤレス給電制御システムの相互インダクタンス推定と最大効率制御
 ○宮崎 恭寛, 上野 尚平, 松尾 孝美 (大分大学)

本報告では、磁界共振方式ワイヤレス給電システムの1次側電圧を位相シフト制御によりインバータ制御することにより、最大効率を達成することを目的とする。2種類の等価回路（SS方式ワイヤレス給電回路およびAC/DCコンバータを近似した等価回路に対して、オブザーバを構成し、相互インダクタンスおよび2次側電流電圧を推定する。推定した2次側電流電圧および相互インダクタンスを用いて伝送効率をリアルタイムに算出する。さらに、我々が以前提案した適応微分推定器を用いたリアルタイム最適化器を用いて、最大効率制御を行うことを提案する。

