

報告書

平成 29 年度 被介護者の機能性着衣システムに基づいた多自由度移動ロボット
による介添動作支援機器の開発 補助事業

平成 31 年 3 月

慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科

村上俊之

JKA-2017M-138

はじめに

高齢化社会に向けて、自立生活を支えるためのパワーアシスト機器の開発が強く望まれている。特に、小型で取り扱いが容易な機器の開発に多大な関心が寄せられている。現状でも装着型のパワーアシスト機器として様々な用途に応用可能な機器が開発されているが、操作性や安全性に関しては未だ十分であるとは言い難く、残念ながら装脱着が容易で長時間利用の可能な機器システムは見られない。そのため、一般家庭において独居高齢者が独自に利用している例は見られず、固定された突っ張り棒の設置等により歩行の支援を行う程度に留まっている。本研究課題で実現を目指す介添動作着衣システムとそれに基づいた多自由度マニピュレータによるパワーアシスト制御は、利用者の利用負担を極力減らすことが可能と考えられ、虚弱高齢者（特に大きな障害ではなく、体力の低下等で移動が困難となっている高齢者）に対する支援に多大に貢献でき、健康寿命の引き上げにもつながる産業・社会的なインパクトも期待できるものである。

近年、簡易型の歩行補助機や高機能な杖の開発も試みられており、それらは利用者の安心感をもたらす上で非常に重要な役割を担っているが、その用途には限界があり日常生活動作 ADL を網羅した支援を行うことは難しい。また、歩行動作時においても歩行時の転倒を回避する動作支援を行うことはできない。本研究課題で目指している多自由度移動ロボットによる介添えシステムでは、人の動作支援を行うにあたって移動ロボットが把持する適切な把持箇所を人の動作モデルから定め、またその把持位置を被介護者の着衣に埋め込み、同時に把持位置と人の動作が連動する機構を着衣に埋め込むことによって、被介護者の装脱着負担を軽減できる動作支援システムとする。具体的な支援動作としては、パーキンソン病に起因する手の震え防止支援、また歩行不安定時の転倒防止支援、歩行時の脚引き上げ動作支援制を想定し、人との相互作用を考慮した移動マニピュレータの制御アルゴリズムの構築も行う。人の動作状態については、着衣に加速度センサを埋め込むことによって同時に計測しつつ、移動ロボットによる介添動作にフィードバックされる。研究課題では人の動作モデルの構築によってセンサ個数の最適化も行い、被介護者の負担を極力減らすための着衣システムの検討も行う。本研究課題では最終的に狙いとするところは、一般家庭で活用可能な移動ロボットシステムの新たな概念の創出にある。

本研究課題で得られた結果について下記の項目ごとにまとめる。

1. 歩行時の受動動作を考慮したエネルギー回収の一実現法
2. 足底の力学学に着目した負荷変動に対する歩行解析
3. IMU を用いた身体の力学パラメータの一推定法
4. 歩行支援システムのため足圧評価法と膝装着型外骨格に対する提案
5. 振戻抑制のための周波数分解インピーダンス制御による動作支援
6. 外骨格ロボットハンドにおける把持支援制御の一構成法
7. 空気圧インターフェースによる人とロボット間のモーションransミッション

8. 機械的・電気的インピーダンス融合を考慮した移動ロボットシステムの運動制御
9. ばね機構を導入したロボットシステムにおける機械インピーダンスと仮想インピーダンスの融合制御
10. 柔軟土台を有するマニピュレータの振動抑制を考慮した力センサレスインピーダンス制御

参考文献

- [1] <http://www.honda.co.jp/walking-assist/about/>
- [2] R. Meier, N. Kelly, O. Almog, and P. Chiang, “A piezoelectric energy-harvesting shoe system for podiatric sensing”, Conf. Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. Annu. Conf., pp. 622-625, 2014.
- [3] Q. Li, V. Naing, J. A. Hoffer, D. J. Weber, A. D. Kuo, and J. M. Donelan, “Biomechanical energy harvesting: Apparatus and method”, Proc.- IEEE Int. Conf. Robot. Autom., vol. 48109, pp. 3672-3677, 2008.
- [4] <http://www.benesu-karashima.jp/health.html>
- [5] 鶴岡 百合子, 田村 義保, 柴崎 亮介, 「歩行の安定性と身体バランスに関する研究」
- [6] Corinna Ockenfeld et al., ”Fine Finger Motor Skill Training with Exoskeleton Robotic Hand in Chronic Stroke” IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, 2013
- [7] CJumpei Arata et al., ”Design and Characterization of a Lightweight and Fully Portable Remote Actuation System for Use With a Hand Exoskeleton” IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.1, No.2, July 2016
- [8] Satoshi Fukushima, Hiromu Sekiguchi, Yuki Saito, Wataru Iida, Takahiro Nozaki, Kouhei Ohnishi, “Artificial Replacement of Human Sensation Using Haptic Transplant Technology” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65, pp. 3985 - 3994, 2018
- [9] TOYOTA 「パートナーロボット」 http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/partner_robot/
- [10] <http://www.irt.i.u-tokyo.ac.jp/reform/081024/index.shtml>
- [11] <https://intouchhealth.com/medical-devices/>
- [12] <https://www.unisys.co.jp/solution/biz/robot/>

歩行時の受動動作を考慮したエネルギー回収の一実現法

An Approach to Energy Harvesting
Considering Passive Action during Walking

報告書

JKA-2017M-138

研究背景

身体補助機器の需要拡大

- 高齢化の発展とともに身体補助機器の需要の拡大



歩行補助器 [1]

図1：身体補助機器

身体補助機器の問題点

- バッテリーを用いて動力を確保するため電池切れが存在
- 人間の歩行から電力を回収し稼働期間を延長

報告書

JKA-2017M-138

従来研究と問題点

人間の歩行から電力を得る従来研究

- 足底の圧力変化から発電

歩行への影響が小さい。

発電量が小さい。 ($10 \mu J/Step$)

- 膝関節の運動から発電

過度の制動力により躊躇を生じる可能性

発電量が大きい。 (4.8W)

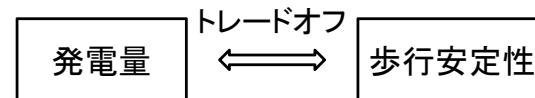


図4：発電量と歩行安定性の関係

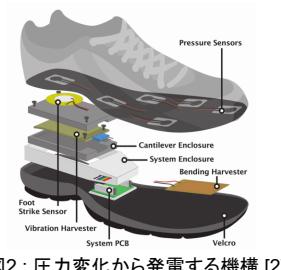


図2：圧力変化から発電する機構 [2]



図3：膝運動から発電する機構 [3]

→ **歩行安定性と発電量のバランスを考慮した設計が必要**

報告書

JKA-2017M-138

目的

下り坂歩行時のエネルギーを用いた発電および制動力の調整による歩行安定化の両立

歩行安定性の評価

受動歩行モデルによる歩行の安定性の評価

- 筋肉による駆動力ではなく重力により下り坂を歩行
- 二足歩行ロボットモデルに比べ、エネルギーと動きが人に近い。
- 感覚情報と筋力による制御がないため転倒しやすい。
- 転倒リスクの高いモデルとして用いる。

報告書

JKA-2017M-138

発電方法

- 下り坂歩行時の余剰エネルギーを用いて発電
 - 制動力により歩行の妨げにならないことが重要
- 回生により生じる制動力をチョッパ回路で逐次調整

提案手法

- 下り坂歩行時の余剰エネルギーを電力として回収
- 制動力をチョッパ回路で逐次調整することで歩行を安定化

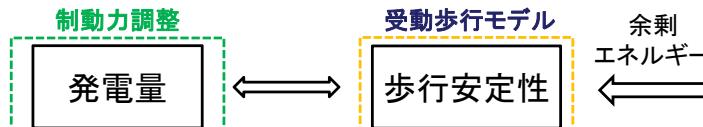


図5：提案手法の全体概要

報告書

JKA-2017M-138

受動歩行コンパスモデル

- モデルの運動方程式
 $M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \tau$ (1)

衝突方程式

- 遊脚と床の衝突は非弾性衝突を仮定
 - 角運動量保存則から(2)式を導出
- $$Q^+(\alpha)\theta^+ = Q^-(\alpha)\theta^- \quad (2)$$

力学的エネルギー E

$$E(\theta, \dot{\theta}) = \frac{1}{2}\dot{\theta}^T M(\theta)\dot{\theta} + P(\theta) \quad (3)$$

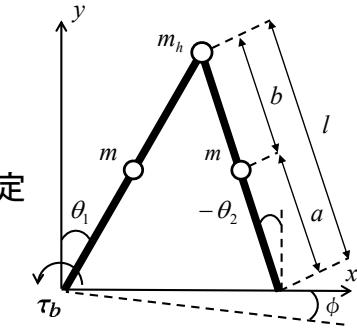


図6：受動歩行コンパスモデル

M : 慣性項	θ_1, θ_2 : 関節角度	<i>a</i> : 足先と脚部質点間の距離	α : 股関節角度
C : 遠心力・コリオリカ項	<i>l</i> : 脚部長さ	<i>b</i> : 腰部と脚部質点間の距離	θ^+ : インパクト直前の角度
G : 重力項	<i>m</i> : 脚部重量	ϕ : 坂の傾き	θ^- : インパクト直後の角度
P : 位置エネルギー	<i>m_h</i> : 腰部重量	τ_b : 制動トルク	Q : 衝突時切り替え行列

報告書

JKA-2017M-138

電気回路(発電出力回収用)

- 昇圧チョッパ回路で電流をduty比を用いて制御
- 昇圧を行うことで入力電圧が小さい場合でも充電可能
- 回路方程式

- スイッチON時

$$L \frac{di}{dt} + (R_{\text{mos}} + R_m + R_c)i = e \quad (4)$$

- スイッチOFF時

$$L \frac{di}{dt} + (R_b + R_m + R_c)i = e - E_b - E_D \quad (5)$$

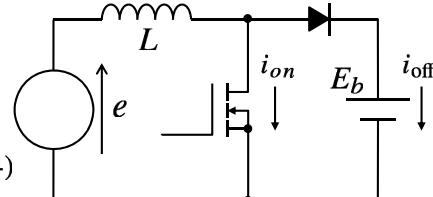


図7：発電出力回収用回路

L : インダクタンス R_{mos} : MOSFET ON抵抗 R_b : バッテリー内部抵抗 E_b : バッテリー電圧
 i : 回路電流 R_m : モータ抵抗 e : 逆起電力 E_D : ダイオード電圧降下

報告書

JKA-2017M-138

エネルギー追従制御

- 受動歩行モデルが安定して歩行を行うことができる力学的エネルギー量 E_{cmd} に追従するようにトルク量 τ_b を決定

$$\tau_b = \frac{\lambda(E_{\text{cmd}} - E)}{\dot{\theta}_1} \quad (6)$$

チョッパ回路のPI制御

- 回路に流入する電流をチョッパ回路のデューティー比を制御することで変化させ、目標トルク量 τ_b に追従

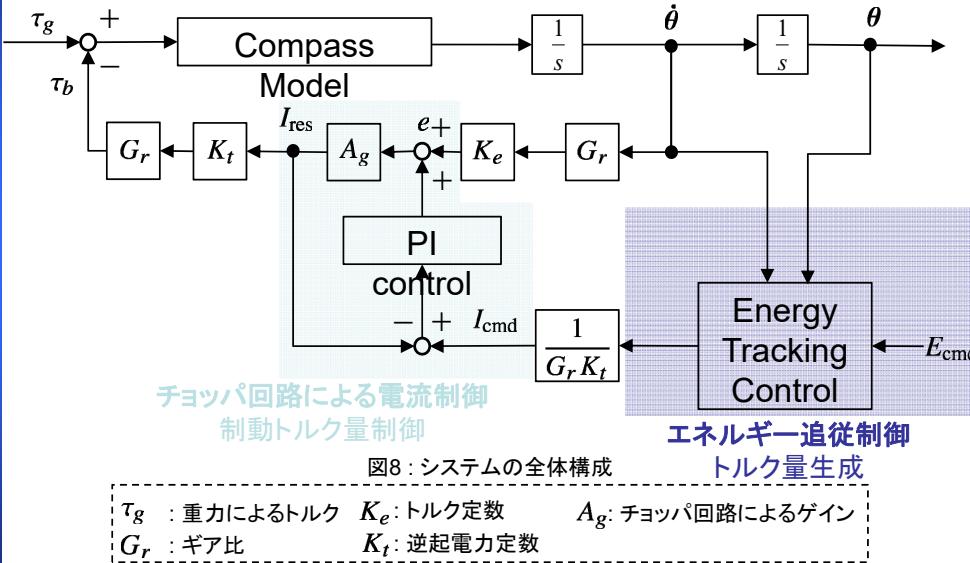
$$d = K_P(I_{\text{cmd}} - I_{\text{res}}) + K_I \int (I_{\text{cmd}} - I_{\text{res}}) dt \quad (7)$$

λ : フィードバックゲイン d : デューティー比 K_P : 比例ゲイン I_{res} : 電流応答値
 E_{cmd} : エネルギー指令値 K_I : 積分ゲイン I_{cmd} : 電流指令値

報告書

JKA-2017M-138

全体のブロック線図

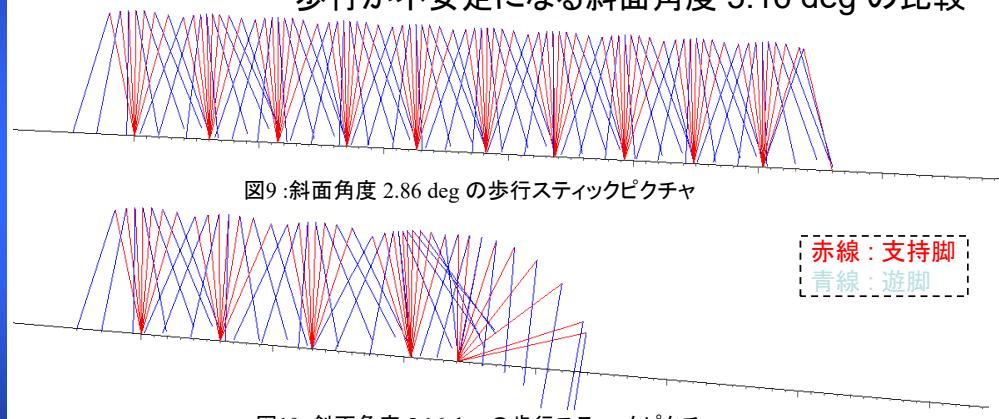


報告書

JKA-2017M-138

安定な歩行と不安定な歩行

- 歩行が安定である斜面角度 2.86 deg の場合と
歩行が不安定になる斜面角度 5.16 deg の比較

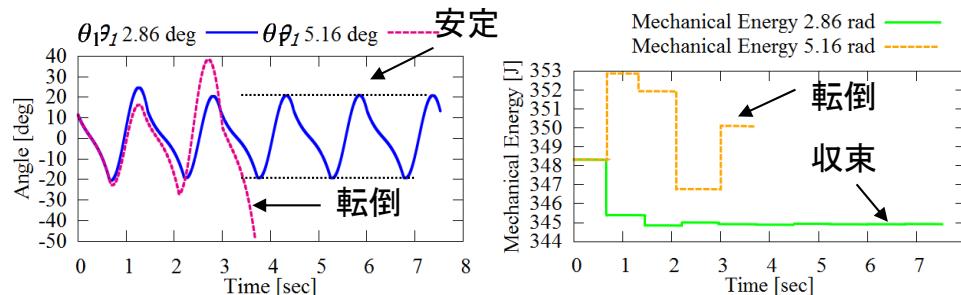


報告書

JKA-2017M-138

安定な歩行と不安定な歩行

- 安定歩行時と不安定歩行時の関節角度とエネルギー量の比較



- 不安定時には関節角度とエネルギーが発散

→ 制御によりエネルギーを歩行が安定する値の

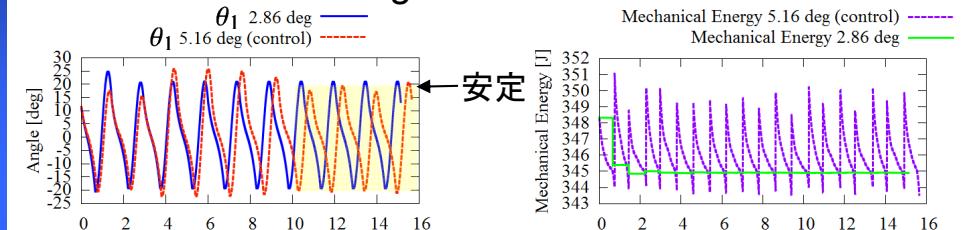
$E_{cmd} = 344.9$ J に近づけることで歩行を安定化

報告書

JKA-2017M-138

回生を加えた歩行モデル

- 斜面角度 5.16 deg で回生により制動力を発生



発電と回生による制動力を用いて受動歩行モデルの安定化を確認

報告書

JKA-2017M-138

報告書

回生を加えた歩行モデル

- 歩行時に回路に流入する電流

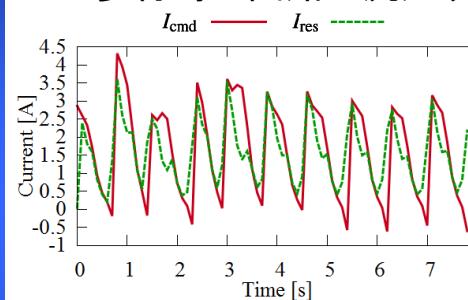


図16：回生時の電流参考値、電流応答値

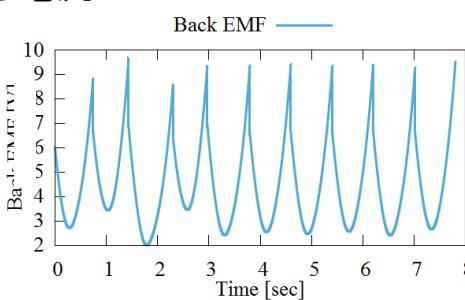


図17：回生時の逆起電力

- duty比の制御により指令電流量への追従が可能
- 制動力を可変にし、トルク指令値に追従させることができ
- 平均7.27 Wの電力を回生
- 歩行補助機器の駆動時間を6%向上させる。(下り坂が20%時)

報告書

JKA-2017M-138

目的

- 下り坂歩行時のエネルギーを用いた発電および制動力の調整による歩行安定化の両立

提案手法

- 下り坂歩行時の余剰エネルギーを電力として回収
- 制動力をチョッパ回路で逐次調整することで歩行を安定化

結果

- 発電と回生による制動力を用いて受動歩行モデルの安定化を確認

今後の課題

- シミュレーションの詳細化および実機システムの改善
- 実験による歩行安定性、筋力への影響の評価

報告書

JKA-2017M-138

足底の動力学に着目した 負荷変動に対する歩行解析

Gait Analysis Based on Foot Sole Dynamics
against Load Variation

報告書

JKA-2017M-138

1. 序論

研究背景

◆日常生活での歩行

- バッグ等による負荷を伴う。

➡ 歩行動作に影響

- ① 重心位置の変動
- ② 足への負担増加
- ③ 膝や股関節の歪み

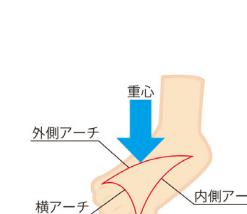


図1. 重心と足の関係

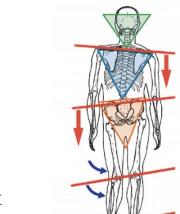


図2. 骨格の歪み

[4]「足から考える健康」<http://www.benesu-karashima.jp/health.html>

➡ 各関節のずれによる**体全体の歪み**が発生。

➡ 痛みの発症、体調不良

重り付加時の歩行改善

報告書

JKA-2017M-138

重り付加時の歩行動作解析の必要性

1. 序論

■ 本研究の位置づけ

従来
バッグによる負荷を伴う歩行
重りのモデルが複雑
➡ 解析結果の一般性が低い。

➡ バッグによる重みを分解



図3. 従来研究の負荷 [5]

本研究
身体各部に重りを付与した歩行
➡ 重りの影響を詳細に解析できる。



図4. 本研究の負荷

展望
適切な歩行支援
●歩行を表す身体各所の指標の実現
●歩行支援機器・手法の評価への応用

報告書

JKA-2017M-138

2. モデリング

■ 足と床の接地モデル

◆ 力積【過渡接地時】

● 動力学

$$I_{IMU} = mv_2 - mv_1 \dots \text{運動量変化} \quad (1)$$

$$I_{FOOT} = F\Delta t_f \dots \text{力} \times \text{微小時間} \quad (2)$$

● 運動学

$$v(t) = \int_0^{\Delta t_v} a(t - \Delta t_v + \tau) d\tau \quad (3)$$

● 条件

$$\text{踵接地時} : v_2 = 0, \Delta t_f = 0.02$$

$$\text{足先離地時} : v_1 = 0$$

$$I_{IMU} \approx I_{FOOT}$$

◆ COP (Center of Pressure) 【定常接地時】

$$x_{COP} = \frac{\sum F_i x_i}{\sum F_i} \quad (i = 1, 2, \dots, 130) \quad (4)$$

m	: 片足の質量	v	: 片足の速度
t	: 時間	v_1	: 衝突直前の速度
Δt_v	: 積分の微小時	v_2	: 衝突直後の速度
Δt_f	: 過渡接地時間	a	: 片足の加速度
		x_i	: カセンサの位置
		F_i	: カセンサの値
		$F = \sum F_i$: 片足の床反力
		I_{IMU}	: 力積(運動量変化)
		I_{FOOT}	: 力積(力)
		x_{COP}	: COPの位置

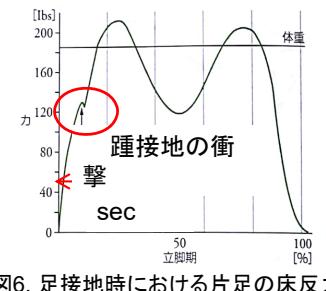


図6. 足接地時における片足の床反力

報告書

JKA-2017M-138

1. 序論

■ 研究目的

- ◆ 重みによる負荷が歩行に与える影響を詳細に解析

■ 提案解析手法

- ◆ 過渡接地時の力積を導出

- 歩行を表す新指標としての提案

- ◆ 定常接地時のCOP (Center of Pressure) の導出

- 垂足のCOPの移動軌跡を導出

過渡接地: 接地の始めと終わりの点
定常接地: 接地状態継続時
踵接地: 跟が接地した時
足先離地: 足先が離れた時

歩行周期ごとの分散を評価

歩行安定度の評価を実現

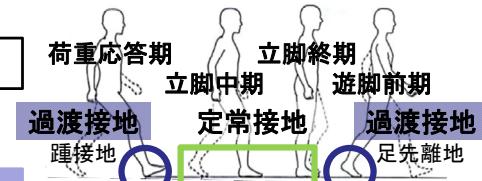


図5. 歩行フェーズでの位置付け

報告書

JKA-2017M-138

2. モデリング

■ 足と床の接地モデル

◆ 力積【過渡接地時】

● 動力学

$$I_{IMU} = mv_2 - mv_1 \dots \text{運動量変化} \quad (1)$$

$$I_{FOOT} = F\Delta t_f \dots \text{力} \times \text{微小時間} \quad (2)$$

● 運動学

$$v(t) = \int_0^{\Delta t_v} a(t - \Delta t_v + \tau) d\tau \quad (3)$$

● 条件

$$\text{踵接地時} : v_2 = 0, \Delta t_f = 0.02$$

$$\text{足先離地時} : v_1 = 0$$

$$I_{IMU} \approx I_{FOOT}$$

◆ COP (Center of Pressure) 【定常接地時】

$$x_{COP} = \frac{\sum F_i x_i}{\sum F_i} \quad (i = 1, 2, \dots, 130) \quad (4)$$

荷重あり側: 左足
荷重なし側: 右足

3. 実験

■ 実験内容

◆ 重り付加時の歩行動作を計測

- 5種類の実験条件: 重りなし, 1kg, 2kg, 3kg, 4kg

- 1分間歩行 (約80歩)

➡ 重りの負荷による影響を詳細に解析

加速度センサ
(左右の脛部)

ウェイトバンド
(左足首)

カセンサ
(左右の足底)

トレッドミル
(3.5km/h)

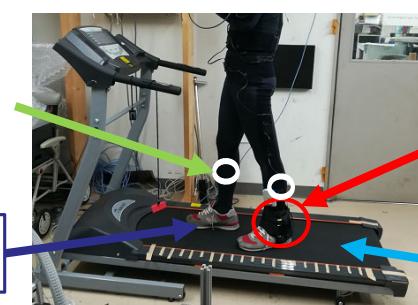


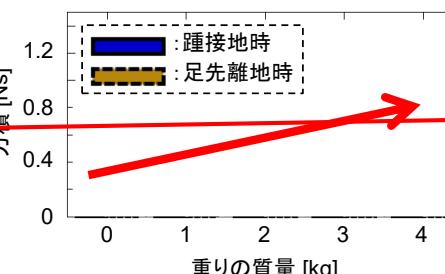
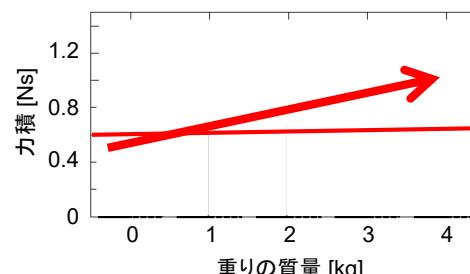
図7. 実験の様子

報告書

JKA-2017M-138

3. 実験

■ 解析結果 1: 力積 I_{IMU} 【過渡接地時】



- ◆ 踏接地時 … 重りに影響して増加
- ◆ 足先離地時…重りに依らず一定

足先が離れる時、地面を蹴って推進力を生成

→重りの負荷に関わらず一定の推進力を生成

報告書

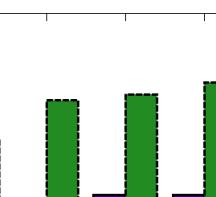
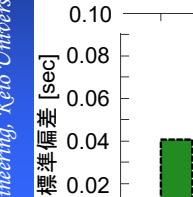
JKA-2017M-138

3. 実験

■ 解析結果 2: 過渡接地時間 Δt_f の標準偏差【過渡接地時】

3. 実験

■ 解析結果 2: 過渡接地時間 Δt_f の標準偏差【過渡接地時】



- ◆ 踏接地時 … 両足ともに標準偏差が小さい。
- ◆ 足先離地時…荷重あり側の標準偏差が大きい。

地面の蹴り出し

安定度の低下

立脚: 接地している脚
遊脚: 接地していない脚

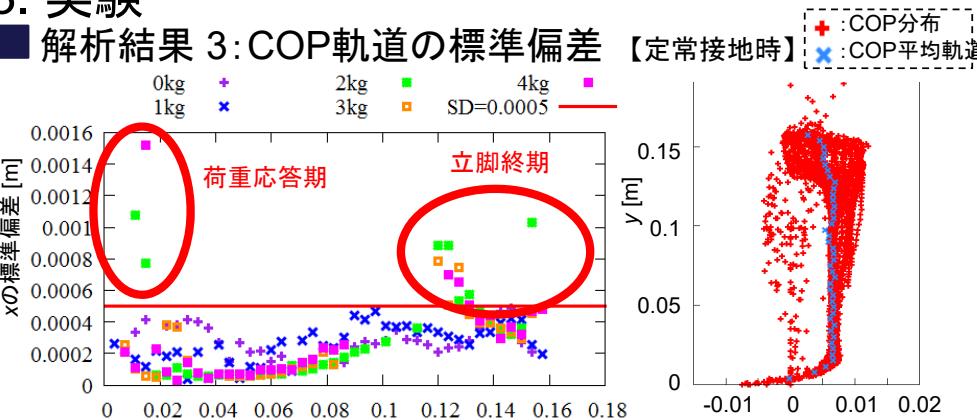
→立脚の重みにより、蹴り出しにおける安定度が低下

報告書

JKA-2017M-138

3. 実験

■ 解析結果 3: COP軌道の標準偏差【定常接地時】



- ◆ 荷重なし側… $y = 0.01, 0.14$ 付近が大きい。

→遊脚の重みに影響して、立脚の姿勢が分散する。

立脚: 接地している脚
遊脚: 接地していない脚

報告書

JKA-2017M-138

3. 実験

■ 解析結果のまとめ

表1. 解析結果のまとめ

立脚: 接地している脚
遊脚: 接地していない脚

解析結果	考察	まとめ
1	負荷に関わらず一定の推進力が生成	推進力=一定
2	立脚の重みにより 蹴り出しにおける周期性が低下	立脚の過渡的な安定度は 立脚の重みに依存
3	遊脚の重みに影響して、 立脚の姿勢がばらつく	立脚の定常的な安定度は 遊脚の重みに依存

- ◆ 推進力=一定

→アシストの必要性における評価への応用

- ◆ 過渡的な安定度 …ある一時的な点における安定度【過渡接地】

→転倒可能性の評価への応用

- ◆ 定常的な安定度 …任意の点における安定度【定常接地】

→歩行姿勢の安定度の評価への応用

報告書

JKA-2017M-138

4. 結論

■ 提案

- ◆ 足と床の接地モデルに基づいた、新たな評価指標を提案し、重みによる負荷が歩行に与える影響を解析。

■ 結果

- ◆ 重りの負荷に関わらず、推進力が一定に生成されたことを確認。
- ◆ 接地状態によって安定度に影響する脚が異なることを確認。
→ 重り付加時における歩行安定度の評価が達成された。

■ 今後の課題

- ◆ 重りを付与する身体部位の種類の多様化
- ◆ 複数被験者での実験
- ◆ 解析結果の応用方法の考案

報告書

JKA-2017M-138

IMUを用いた身体の力学パラメータの一推定法

An Estimation Method of Body Segment Inertial Parameters by IMUs

報告書

JKA-2017M-138

1. 序論

■ 研究背景

- ◆ 少子高齢化の進行
- 転倒に起因する寝たきりの高齢者が増加
- 介護者不足
→ 歩行支援やリハビリに関する研究が増加

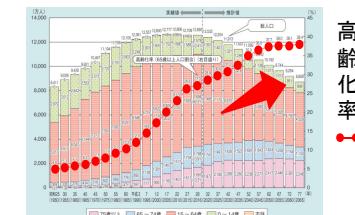


Fig.1: 高齢化率の推移^[1]

◆ 歩行支援やリハビリの研究

- 身体重心や関節トルクなどの指標が評価値として扱われる。

↓
人体の各部位の質量や質量中心、慣性テンソルを用いて計算される。

$$\text{力学パラメータ } \phi = [m_i \ MS_i \ I_i]^T$$

- 正確な力学パラメータの推定はモデル化誤差を減少させ、より正確な指標の推定につながる。

報告書

JKA-2017M-138

1. 序論

■ 従来手法

- ◆ 統計的な推定式
- 直接法：死体標本を用いて直接測定。
- 間接法：カメラ等機器を用いて身体の3Dモデルを作成、密度をかけて計算。
→ 身体的パラメータを代入するだけで推定でき、手軽である。
- 標本に偏りがあり、妥当性が低い。
人種、性別、年齢、体型など個々で差異が認められる。
- ◆ MRI、CTスキャン
- 身体内部の組織分布まで撮影し、組織それぞれの密度をかけて計算。
→ 正確性が高い、個々に応じて測定を行う
- 高コスト、測定時間が長い、研究室規模で扱えない

報告書

JKA-2017M-138

1. 序論

従来手法

- ◆ 光学的モーションキャプチャ
- 動作をモーションキャプチャして、その動作によって動いている部位の変位が外力の変化分であると仮定して推定をする。
- 比較的手軽である、個々に応じて測定を行う
- 複数のカメラ、6軸の力センサが必要でコストが高い

目的

- ◆ 安価なセンサによる個々に応じた正確な力学パラメータ推定の実現

提案手法

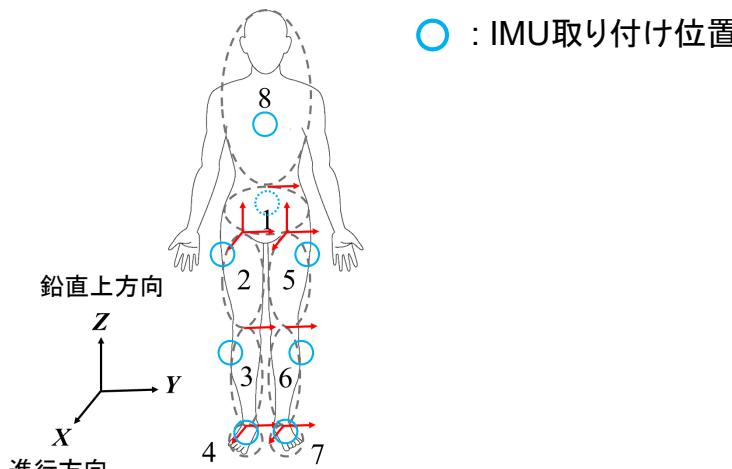
- ◆ 光学的モーションキャプチャ → IMUを用いたモーションキャプチャ
- ◆ 6軸の力センサ → 1軸の力センサ

報告書

JKA-2017M-138

2. モデリング

人体モデル

Fig.3: 人体モデル^[2]

JKA-2017M-138

1. 序論

提案手法

- ◆ IMU(Inertial Measurement Unit)を用いたモーションキャプチャ
加速度センサ、ジャイロセンサ、地磁気センサ
- 小型かつ軽量で安価
- センサ情報から運動学を解き、身体部位の位置を求める。
→ カルマンフィルタを用いて誤差軽減
- ◆ 1軸の力センサ
■ 6軸から1軸に減ることで安価になるが求められるパラメータ数が減少
→ ZMPを用いた推定モデルを構築することで減少したパラメータ数を補完
- ◆ ZMP(Zero Moment Point)
 - ・慣性モーメントと重力によるモーメントが打ち消し合い、ゼロになる接地面の点
 - ・圧力中心と同義

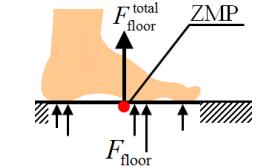
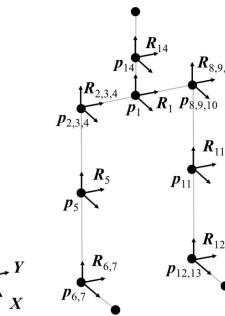
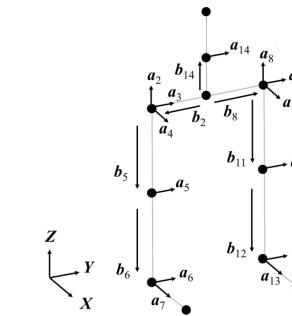


Fig.2: ZMP と圧力中心

JKA-2017M-138

2. モデリング

運動学

Fig.4: 回転行列 R とローカル座標系の原点 p Fig.5: 関節軸ベクトル a と相対位置ベクトル b

位置と姿勢

$$\mathbf{p}_j = \mathbf{p}_i + \mathbf{R}_i \mathbf{b}_j \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_j = \mathbf{R}_i e^{[a_j \times] q_j} \quad (2)$$

\mathbf{R}_i : 回転行列(ワールド座標系に一致)
 \mathbf{p}_i : ローカル座標系の原点(各関節に設定)
 \mathbf{a}_i : 関節軸ベクトル
 q_i : 関節角度
 \mathbf{b}_i : 相対位置ベクトル
 $e^{[a \times] q} = \mathbf{E} + [\mathbf{a} \times] \sin(q) + [\mathbf{a} \times]^2 (1 - \cos(q))$
 $[\times]$: ひずみ対称行列

報告書

JKA-2017M-138

3. 提案手法

提案手法の概要

◆ IMUによるモーションキャプチャと力センサによるZMP測定

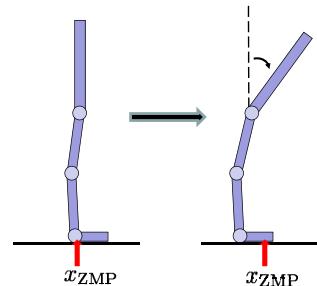


Fig.6: 提案手法の概要

動作によって動いている部位の変位がZMPの変化分であると仮定すると
力学パラメータのずれ=部位の変位-ZMPの変化

→ 部位の変位とZMPの変化分の差が力学パラメータのずれとして推定

報告書

JKA-2017M-138



3. 提案手法

推定モデル

↓ 式(5),(6)に式(7)を代入

$$x_{ZMP} \cdot Mg = \sum_i^n m_i \{ p_{xi}(\ddot{z}_{ci} + g) - p_{zi}\ddot{x}_{ci} \} + m_i s_{xi} \{ R_{i11}(\ddot{z}_{ci} + g) - R_{i31}\ddot{x}_{ci} \} + m_i s_{yi} \{ R_{i12}(\ddot{z}_{ci} + g) - R_{i32}\ddot{x}_{ci} \} + m_i s_{zi} \{ R_{i13}(\ddot{z}_{ci} + g) - R_{i33}\ddot{x}_{ci} \} - \sum_i^n (I_{ixy}\dot{\omega}_{ix} + I_{iyy}\dot{\omega}_{iy} + I_{izx}\dot{\omega}_{iz}) \quad (8)$$

$$y_{ZMP} \cdot Mg = \sum_i^n m_i \{ p_{yi}(\ddot{z}_{ci} + g) - p_{zi}\ddot{y}_{ci} \} + m_i s_{xi} \{ R_{i21}(\ddot{z}_{ci} + g) - R_{i31}\ddot{y}_{ci} \} + m_i s_{yi} \{ R_{i22}(\ddot{z}_{ci} + g) - R_{i32}\ddot{y}_{ci} \} + m_i s_{zi} \{ R_{i23}(\ddot{z}_{ci} + g) - R_{i33}\ddot{y}_{ci} \} + \sum_i^n (I_{ixx}\dot{\omega}_{ix} + I_{iyy}\dot{\omega}_{iy} + I_{izx}\dot{\omega}_{iz}) \quad (9)$$

↓ 力学パラメータ $\phi = [m_i \ MS_i \ I_i]^T$ で表すと

$$\mathbf{H}_B \phi_B = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{BX}(\ddot{x}_{ci}, \ddot{z}_{ci}, q_i, \dot{\omega}_i) \\ \mathbf{H}_{BY}(\ddot{y}_{ci}, \ddot{z}_{ci}, q_i, \dot{\omega}_i) \end{bmatrix} \phi_B = \begin{bmatrix} x_{ZMP} \\ y_{ZMP} \end{bmatrix} \cdot Mg \quad (10)$$

ϕ_B : 最小力学パラメータ

$$\mathbf{H}_{BX} = [\mathbf{H}_{BX1} \ \mathbf{H}_{BX2} \ \mathbf{H}_{BX3} \ \mathbf{H}_{BX4} \ \mathbf{H}_{BX5} \ \mathbf{H}_{BX6} \ \mathbf{H}_{BX7} \ \mathbf{H}_{BX8}]$$

$$\mathbf{H}_{BY} = [\mathbf{H}_{BY1} \ \mathbf{H}_{BY2} \ \mathbf{H}_{BY3} \ \mathbf{H}_{BY4} \ \mathbf{H}_{BY5} \ \mathbf{H}_{BY6} \ \mathbf{H}_{BY7} \ \mathbf{H}_{BY8}]$$

報告書

JKA-2017M-138

3. 提案手法

推定モデル

ZMP定義式

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_i^n m_i \{ x_{ci}(\ddot{z}_{ci} + g) - \ddot{x}_{ci}z_{ci} \} - \sum_i^n I_{iy}\dot{\omega}_i}{\sum_i^n m_i(\ddot{z}_{ci} + g)} \quad (3)$$

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_i^n m_i \{ y_{ci}(\ddot{z}_{ci} + g) - \ddot{y}_{ci}z_{ci} \} + \sum_i^n I_{ix}\dot{\omega}_i}{\sum_i^n m_i(\ddot{z}_{ci} + g)} \quad (4)$$

$$\downarrow \sum_i^n m_i(\ddot{z}_{ci} + g) = Mg \text{ と仮定 } (M: \text{全質量})$$

$$x_{ZMP} \cdot Mg = \sum_i^n m_i \{ x_{ci}(\ddot{z}_{ci} + g) - \ddot{x}_{ci}z_{ci} \} - \sum_i^n I_{iy}\dot{\omega}_i \quad (5)$$

$$y_{ZMP} \cdot Mg = \sum_i^n m_i \{ y_{ci}(\ddot{z}_{ci} + g) - \ddot{y}_{ci}z_{ci} \} + \sum_i^n I_{ix}\dot{\omega}_i \quad (6)$$

質量中心

$$\begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \\ z_{ci} \end{bmatrix} = \mathbf{p}_i + \mathbf{R}_i \mathbf{s}_i = \begin{bmatrix} p_{xi} \\ p_{yi} \\ p_{zi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{i11} & R_{i12} & R_{i13} \\ R_{i21} & R_{i22} & R_{i23} \\ R_{i31} & R_{i32} & R_{i33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{xi} \\ s_{yi} \\ s_{zi} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} p_{xi} \\ p_{yi} \\ p_{zi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{i11}s_{xi} + R_{i12}s_{yi} + R_{i13}s_{zi} \\ R_{i21}s_{xi} + R_{i22}s_{yi} + R_{i23}s_{zi} \\ R_{i31}s_{xi} + R_{i32}s_{yi} + R_{i33}s_{zi} \end{bmatrix} \quad (7)$$

\circ_{ci} : 中心位置 (O軸)
 g : 重力加速度
 m_i : 質量
 \mathbf{p}_{ci} : 質量中心ベクトル(ワールド座標系)
 \mathbf{s}_i : 質量中心ベクトル(リンク座標系)
 $\dot{\omega}_i$: 角速度ベクトル
 I_i : 慣性テンソル

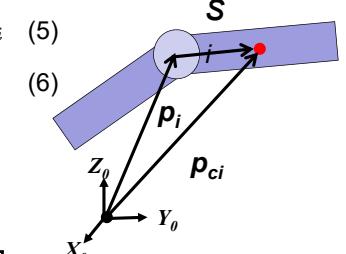


Fig.7: 質量中心位置
JKA-2017M-138

報告書

3. 提案手法

推定モデル

↓ 式(5),(6)に式(7)を代入

$$x_{ZMP} \cdot Mg = \sum_i^n m_i \{ p_{xi}(\ddot{z}_{ci} + g) - p_{zi}\ddot{x}_{ci} \} + m_i s_{xi} \{ R_{i11}(\ddot{z}_{ci} + g) - R_{i31}\ddot{x}_{ci} \} + m_i s_{yi} \{ R_{i12}(\ddot{z}_{ci} + g) - R_{i32}\ddot{x}_{ci} \} + m_i s_{zi} \{ R_{i13}(\ddot{z}_{ci} + g) - R_{i33}\ddot{x}_{ci} \} - \sum_i^n (I_{ixy}\dot{\omega}_{ix} + I_{iyy}\dot{\omega}_{iy} + I_{izx}\dot{\omega}_{iz}) \quad (8)$$

$$y_{ZMP} \cdot Mg = \sum_i^n m_i \{ p_{yi}(\ddot{z}_{ci} + g) - p_{zi}\ddot{y}_{ci} \} + m_i s_{xi} \{ R_{i21}(\ddot{z}_{ci} + g) - R_{i31}\ddot{y}_{ci} \} + m_i s_{yi} \{ R_{i22}(\ddot{z}_{ci} + g) - R_{i32}\ddot{y}_{ci} \} + m_i s_{zi} \{ R_{i23}(\ddot{z}_{ci} + g) - R_{i33}\ddot{y}_{ci} \} + \sum_i^n (I_{ixx}\dot{\omega}_{ix} + I_{iyy}\dot{\omega}_{iy} + I_{izx}\dot{\omega}_{iz}) \quad (9)$$

↓ 力学パラメータ $\phi = [m_i \ MS_i \ I_i]^T$ で表すと

$$\mathbf{H}_B \phi_B = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{BX}(\ddot{x}_{ci}, \ddot{z}_{ci}, q_i, \dot{\omega}_i) \\ \mathbf{H}_{BY}(\ddot{y}_{ci}, \ddot{z}_{ci}, q_i, \dot{\omega}_i) \end{bmatrix} \phi_B = \begin{bmatrix} x_{ZMP} \\ y_{ZMP} \end{bmatrix} \cdot Mg \quad (10)$$

ϕ_B : 最小力学パラメータ

$$\mathbf{H}_{BX} = [\mathbf{H}_{BX1} \ \mathbf{H}_{BX2} \ \mathbf{H}_{BX3} \ \mathbf{H}_{BX4} \ \mathbf{H}_{BX5} \ \mathbf{H}_{BX6} \ \mathbf{H}_{BX7} \ \mathbf{H}_{BX8}]$$

$$\mathbf{H}_{BY} = [\mathbf{H}_{BY1} \ \mathbf{H}_{BY2} \ \mathbf{H}_{BY3} \ \mathbf{H}_{BY4} \ \mathbf{H}_{BY5} \ \mathbf{H}_{BY6} \ \mathbf{H}_{BY7} \ \mathbf{H}_{BY8}]$$

報告書

JKA-2017M-138

3. 提案手法

推定モデル

↓ 力学パラメータを $\phi_B = \phi_{Bref} + \hat{\phi}_B$ と仮定
推定式の参照値 個人差

$$\begin{bmatrix} H_{BX}(\ddot{x}_{ci}, \ddot{z}_{ci}, q_i, \dot{\omega}_i) \\ H_{BY}(\ddot{y}_{ci}, \ddot{z}_{ci}, q_i, \dot{\omega}_i) \end{bmatrix} \hat{\phi}_B = \begin{bmatrix} x_{ZMP} \\ y_{ZMP} \end{bmatrix} \cdot Mg - \begin{bmatrix} H_{BX}(\ddot{x}_{ci}, \ddot{z}_{ci}, q_i, \dot{\omega}_i) \\ H_{BY}(\ddot{y}_{ci}, \ddot{z}_{ci}, q_i, \dot{\omega}_i) \end{bmatrix} \phi_{Bref} \quad (11)$$

↓ 計測データ $(\ddot{x}_{ci}, \ddot{y}_{ci}, \ddot{z}_{ci}, q_i, \dot{\omega}_i)$ +力センサのデータを代入

$$\begin{bmatrix} H_B(1) \\ \vdots \\ H_B(n) \end{bmatrix} \phi_B = \begin{bmatrix} ZMP(1) \\ \vdots \\ ZMP(n) \end{bmatrix} \cdot Mg - \begin{bmatrix} H_B(1) \\ \vdots \\ H_B(n)_i \end{bmatrix} \phi_{Bref} \quad (12)$$

→ ϕ_B について最小二乗法で解く。

ZMP定義式(力センサ)

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_i^n x_i f_i}{\sum_i^n f_i} \quad (14)$$

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_i^n y_i f_i}{\sum_i^n f_i} \quad (15)$$

x : 圧力センサ位置(x軸)
 y : 圧力センサ位置(y軸)
 f : 圧力センサ値

Fig.7: 質量中心位置
JKA-2017M-138

報告書

4. 実験

実験 力学パラメータ推定 直立重心移動動作

実験条件

- 直立時における重心移動を行う。

直立した状態で足幅を26cmに固定して、右回り、左回りに重心を1回ずつ移動させる。

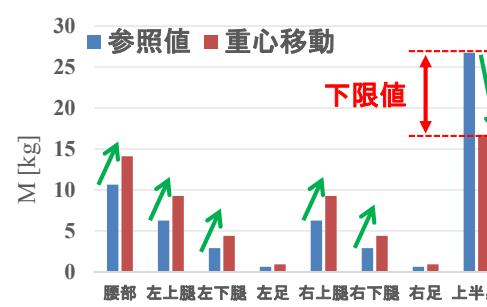


Fig.8: 質量 M のパラメータ推定

報告書

JKA-2017M-138

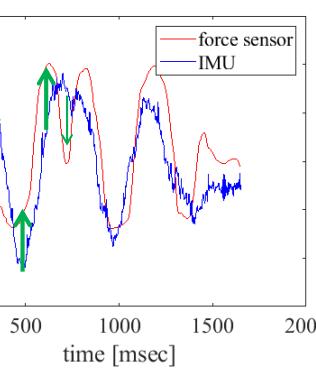


Fig.9: ZMP比較

報告書

JKA-2017M-138

4. 実験

実験 力学パラメータ推定 直立重心移動動作

ロール、ピッチ、ヨー角の腰部での変化におけるZMP変化

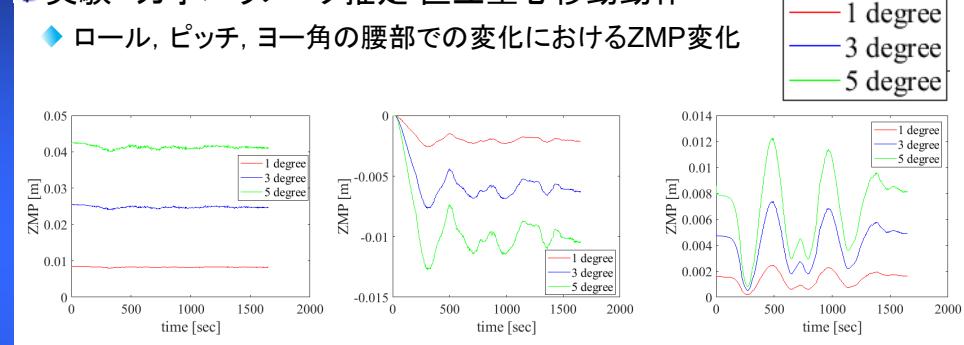


Fig.10: ZMP(y軸)のロール角による変化

Fig.11: ZMP(y軸)のピッチ角による変化

Fig.12: ZMP(y軸)のヨー角による変化

わずかな角度変化でZMPに大きな変動がみられる。

報告書

JKA-2017M-138

4. 実験

実験 力学パラメータ推定 直立重心移動動作

ZMP誤差を10分の1に設定し、再度力学パラメータ推定

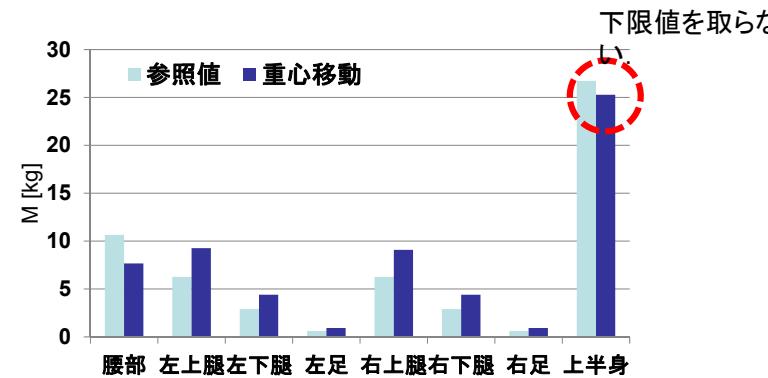


Fig.13: 質量 M のパラメータ推定(補正あり)

誤差の影響が少なければ、パラメータ推定は正常に動作する。

報告書

JKA-2017M-138

5. 結論

考察

- IMU による推定の精度は提案した推定モデルが必要とする精度に達していないかったと考えられるため、パラメータ推定において大きな誤差が生じた。
- ZMP 誤差を減少させた場合において、下限値をとらずに質量の推定が行われた。IMUによる推定精度が向上すれば、力学パラメータ推定は可能である。

結果

- 本実験ではパラメータ推定において大きな誤差が生じたが、IMUに乘る誤差を考慮したときに予想される範囲での誤差であった。

今後の課題

- IMUにおける推定精度の向上
- 予測される誤差を補償するアルゴリズム
- 身体的構造による制限をかける。

報告書

JKA-2017M-138

歩行支援システムのため足圧評価法 と膝装着型外骨格に対する提案

An Approach to Physical Ability Assessment
and Knee Exoskeleton
for Walking Support System

報告書

JKA-2017M-138

□ 介護予防と歩行機能の関係性

フレイル評価基準:

体重減少、倦怠感、活動量、握力、通常歩行速度(1m/sec)

歩行速度と健康寿命

1705名を対象とした研究では、0.88m/secを境界として死亡率に有意な差があった。

膝伸展筋力と自立歩行

膝伸展筋力が体重比0.4程度で病院内自立歩行が可能。

膝の筋力を補助する歩行支援ロボットが必要

報告書

JKA-2017M-138

2. イントロダクション

- 少子高齢化がもたらす社会的問題
 - ・少子高齢化に伴い、社会保障費が増加
 - ・高齢者の**介護予防**に強いニーズ

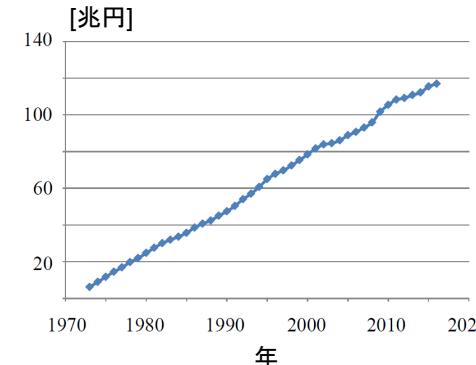


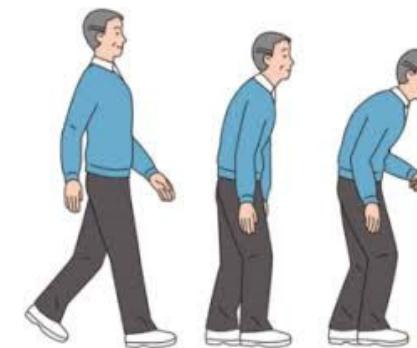
表1: 地域別の高齢者人口比較
(2030年)

報告書

JKA-2017M-138

□ 本研究における問い合わせ

対象者によって、歩き方はさまざま



それぞれの装着者に適した補助力を、どのように生成するか？

→”理想的”な補助力タイミングの決定法を提案する

報告書

JKA-2017M-138

3. モデリング

- 膝装着型歩行支援ロボットの制御系
いつどのタイミングで?

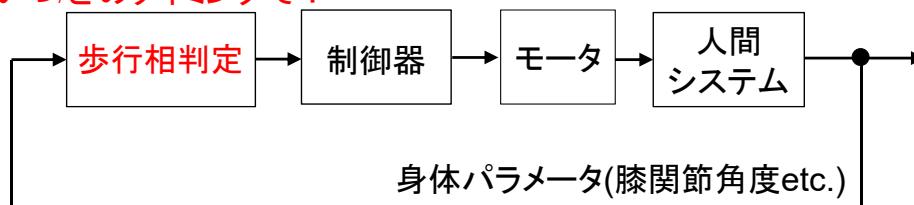


図2. 外骨格ロボットの制御系

□ 従来手法の問題点

- ・各研究者が補助力のタイミングを調整
- ・補助力のタイミング設計法は未研究

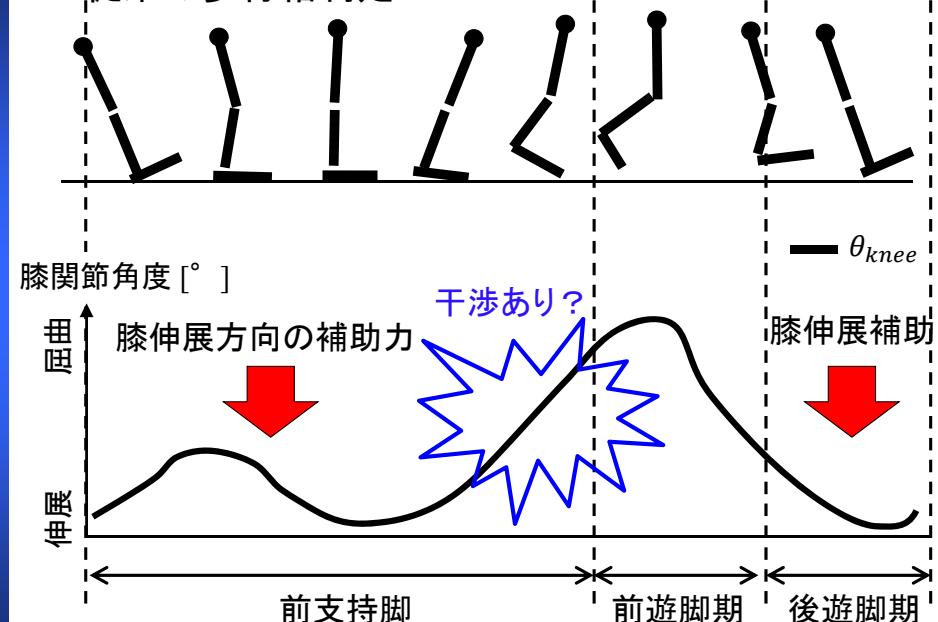
装着者の意図に合わせた補助力の生成

図3. 従来の膝装着型外骨格

報告書

JKA-2017M-138

□ 従来の歩行相判定



報告書

図4. 従来の歩行相判定のコンセプト

JKA-2017M-138

□ 従来手法のアルゴリズム

- ・膝関節角度 θ_{knee} , 角速度 $\dot{\theta}_{knee}$, 足裏圧力センサ F によって3つの歩行相に分類
- ・足裏が接地すると支持脚期, 離地すると前遊脚期, 膝関節が伸展すると後遊脚期

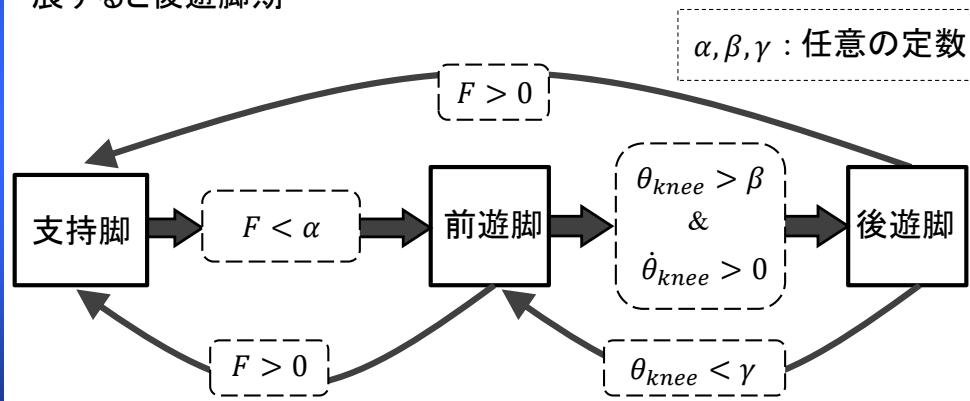


図5. 従来の歩行相判定アルゴリズム

報告書

JKA-2017M-138

□ 仮説検証実験【手順】

- ・一人の被験者が参加し, 膝装着型外骨格を装着する
- ・トレッドミル上を歩きながら膝装着型外骨格のスレーブを操作する



報告書

図6. 検証実験のセットアップ

JKA-2017M-138

□ 仮説検証実験【制御系】

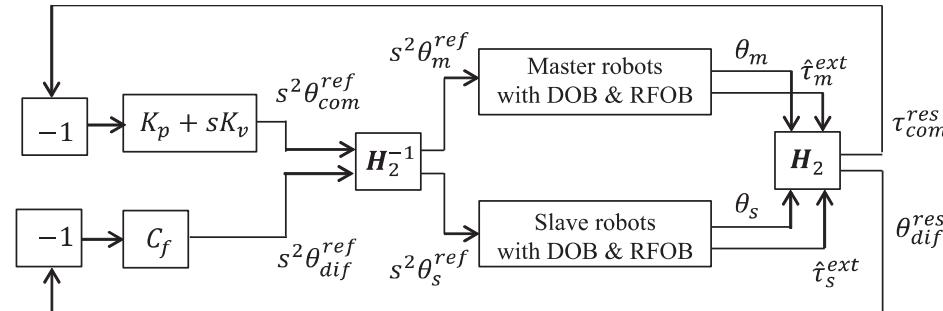
- ・バイラテラル制御によって補助力を調整

バイラテラル制御における制御目標

$$\begin{cases} \theta_m - \theta_s = 0 & (1) \\ \hat{\tau}_s^{ext} + \hat{\tau}_m^{ext} = 0 & (2) \end{cases}$$

$$s^2\theta_m^{ref} = C_p(\theta_s - \theta_m) - C_f(\hat{\tau}_m^{ext} + \hat{\tau}_s^{ext}) \quad (3)$$

$$s^2\theta_s^{ref} = -C_p(\theta_s - \theta_m) - C_f(\hat{\tau}_m^{ext} + \hat{\tau}_s^{ext}) \quad (4)$$



報告書

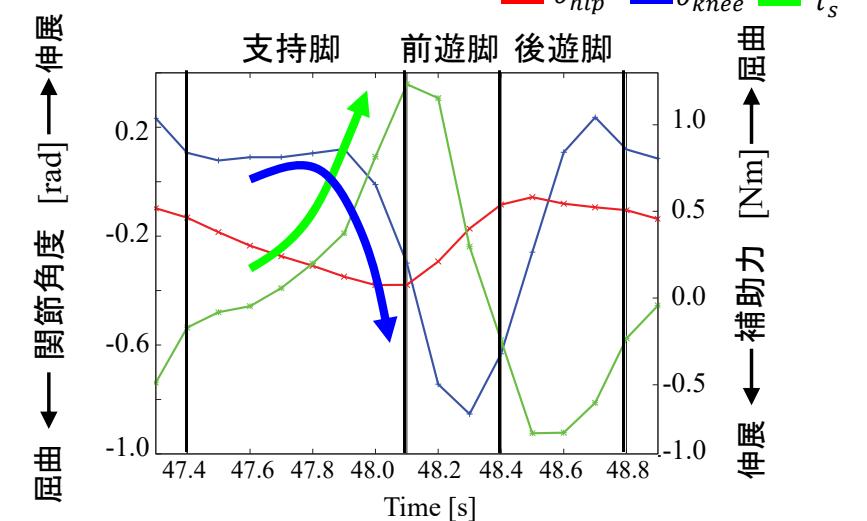
図7. バイラテラル制御のブロック線図

JKA-2017M-138

□ 仮説検証実験【結果】

- ・膝の補助力は支持脚期も変化している

→支持脚期後半に補助力は屈曲方向へかかっている

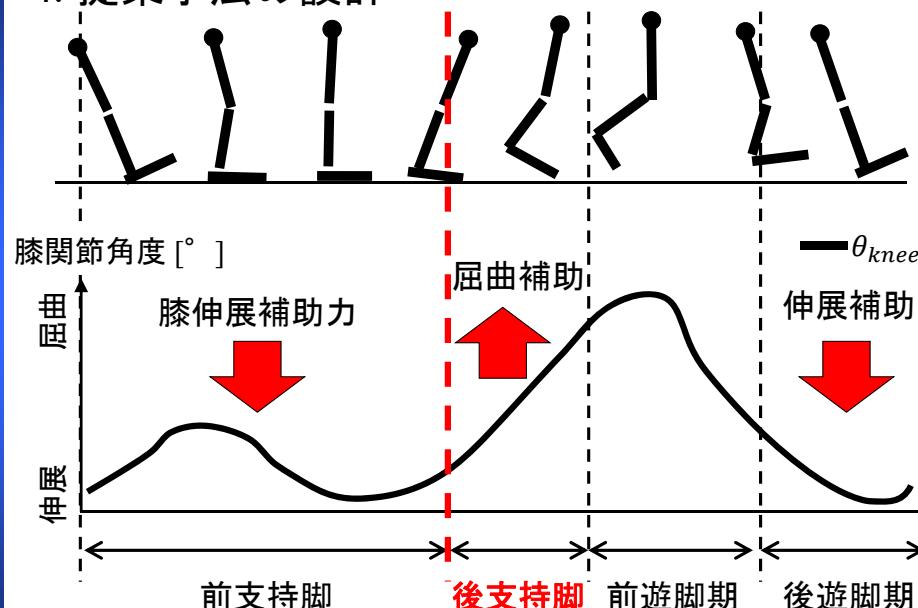


報告書

図8. 従来手法による歩行相判定結果と補助力

JKA-2017M-138

4. 提案手法の設計



報告書

図9. 提案する歩行相判定のコンセプト

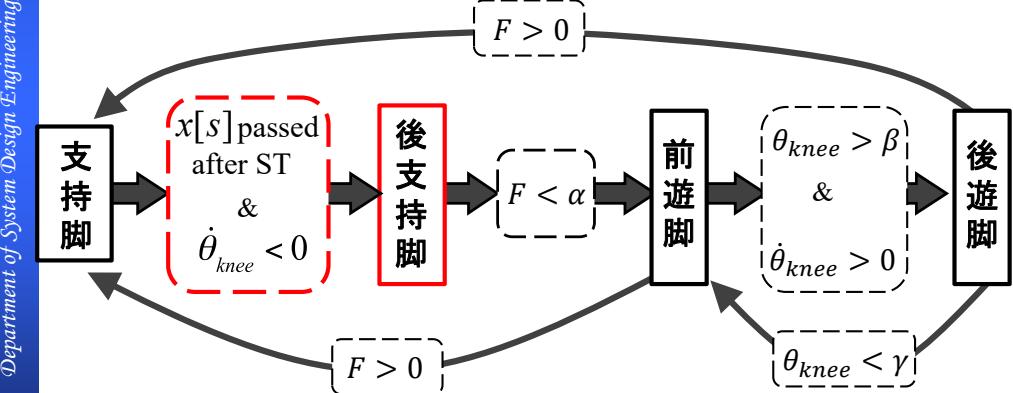
JKA-2017M-138

2017-2018 (50)

□ 提案手法のアルゴリズム

$x[s]$: Time threshold

- ・膝関節角度 θ_{knee} , 角速度 $\dot{\theta}_{knee}$, 足裏圧力センサ F によって4つの歩行相に分類
- ・足裏が接地すると支持脚期, 接地したまま膝関節が屈曲すると後支持脚期, 離地すると前遊脚期, 膝関節が伸展すると後遊脚期



報告書

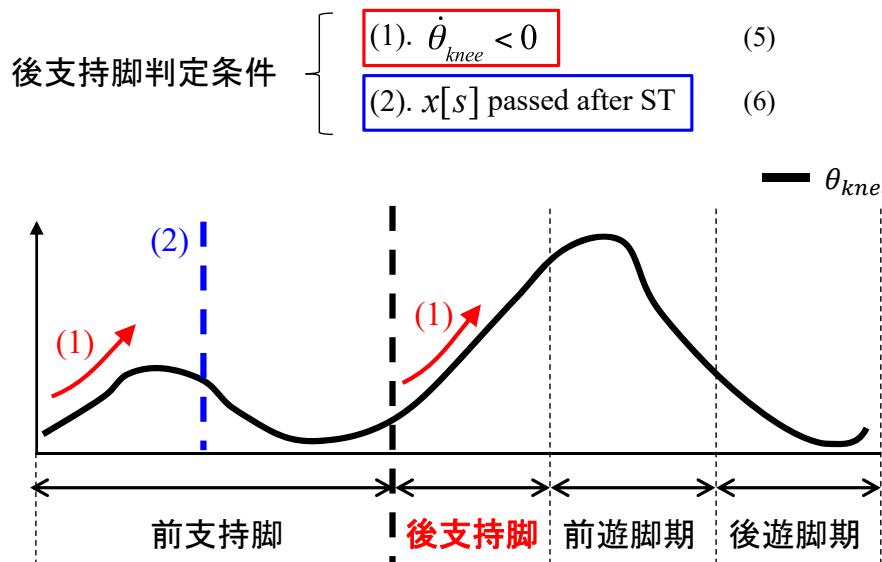
図10. 提案する歩行相判定アルゴリズム

JKA-2017M-138

2017-2018 (49)



□ 提案手法における新しい条件

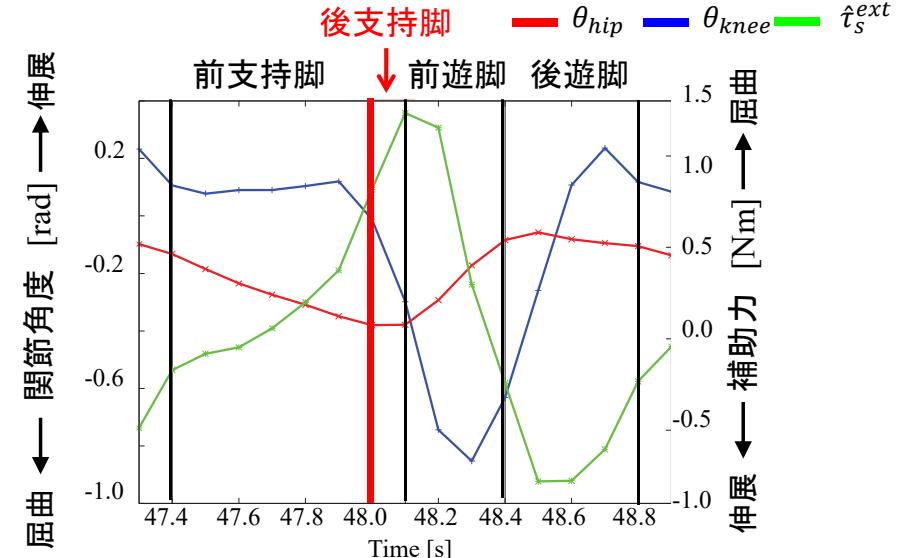


報告書

図11. 提案する歩行相判定アルゴリズムの条件の意味 JKA-2017M-138

□ 提案手法の検証【結果】

- ・前遊脚期より0.1秒ほど早く後支持脚期を判定できた



報告書

図12. 提案手法による歩行相判定結果と補助力 JKA-2017M-138



5. 実験

□ 実験【目的】

目的

- ・より人間の意図に合わせた膝装着型外骨格の制御系が、人間の動作に与える影響を検証すること

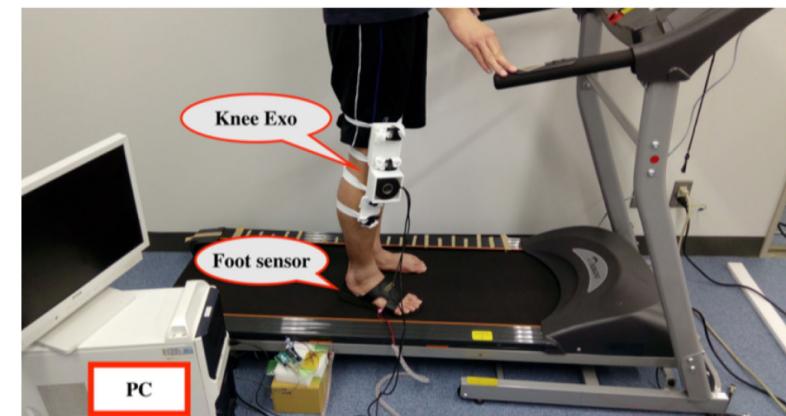
検証方法

- ・提案手法を制御系に用いた場合に、大腿四頭筋の筋電が従来手法よりも減少しているか確認する

報告書

□ 実験【手順】

- ・膝装着型外骨格を装着し、トレッドミル上を30秒間歩行する
- ・提案手法で実験した後に、従来手法に制御系を切り替える



報告書

図13. 実験のセットアップ

□ 実験【制御系】

表2. 各歩行相における補助力指令値

歩行相	従来手法 [Nm]	提案手法 [Nm]
前支持脚期	1.2	1.2
後支持脚期	1.2	-1.2
前遊脚期	-1.2	-1.2
後遊脚期	1.2	1.2

$$s^2 \theta_s^{ref} = C_f (\tau^{cmd} - \hat{\tau}_s^{ext}) \quad (7)$$

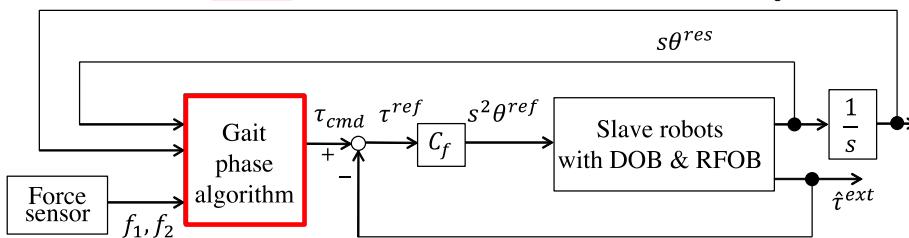


図14. 実験で用いた力制御系

報告書

JKA-2017M-138

□ 実験【結果:補助トルクの比較】

- 提案手法により、生成される補助トルクの形が大きく異なった

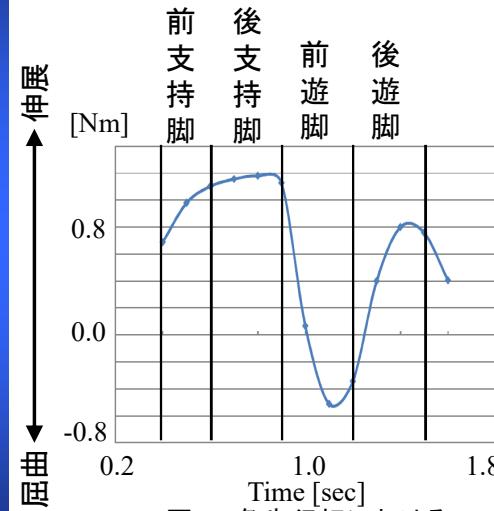


図15. 各歩行相における従来手法の補助力

報告書

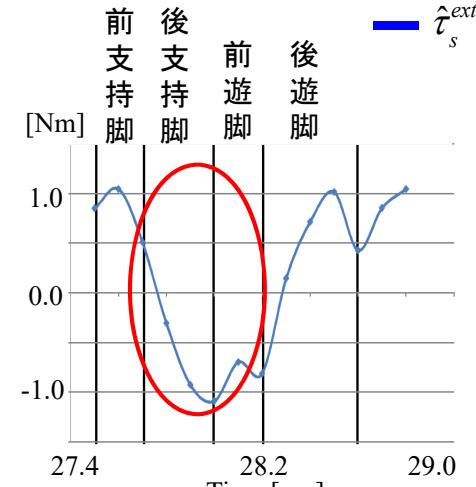


図16. 各歩行相における提案手法の補助力

□ 実験【結果:筋電の比較】

- 提案手法によって、後支持脚期の筋電が減少した
- 30秒間の平均値を比較すると、10%の減少が見られた。

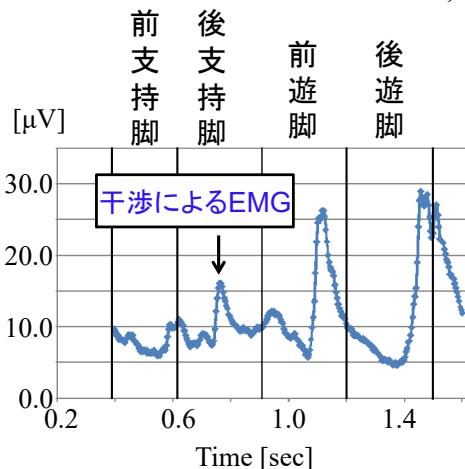


図17. 従来手法を用いた場合の大腿四頭筋の筋電(1歩)

報告書

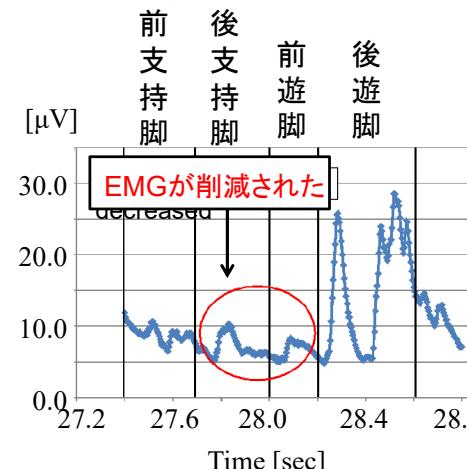
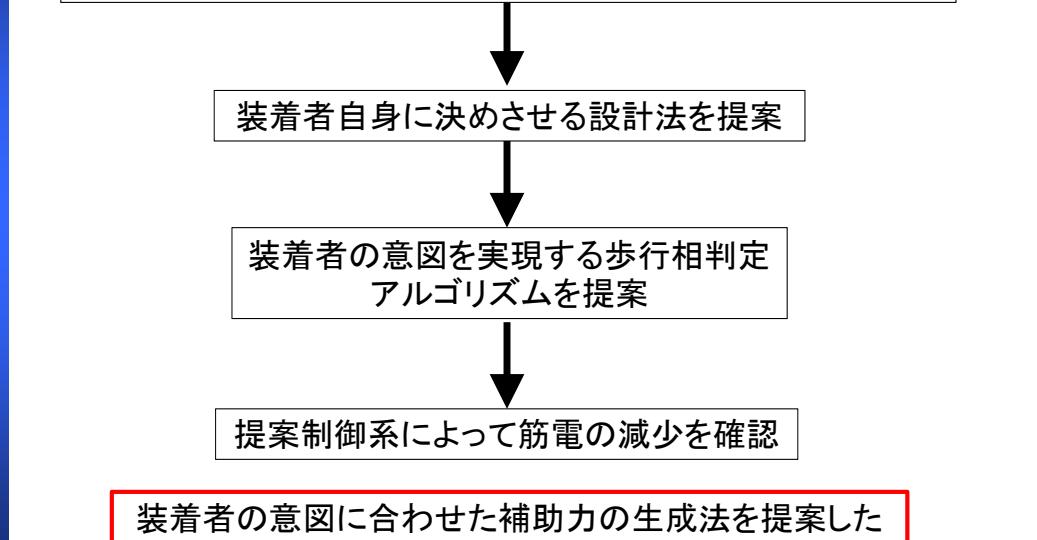


図18. 提案手法を用いた場合の大腿四頭筋の筋電(1歩)

JKA-2017M-138

6. 結論

それぞれの装着者に適した補助力を、どのように生成するか？



報告書

装着者の意図に合わせた補助力の生成法を提案した

振戻抑制のための周波数分解 インピーダンス制御による動作支援

Motion Support for Tremor Suppression
by Frequency Resolved Impedance Control

報告書

JKA-2017M-138

1. 序論

■ 研究背景

◆ 振戻患者に対する治療

意思とは無関係に生じる律動的な細かい振動運動

● 薬物治療

年齢や生活の仕方、病気の重さ、薬に対する反応などを考慮

→ 長期間の服用による副作用、効果低減

● 脳深部刺激療法(DBS)

脳の特定の部位に電極を挿入し症状を緩和、改善

→ 電極を直接頭に埋め込むことの侵襲性

→ 振動抑制機器の必要性



図2: DBSの構造

報告書

JKA-2017M-138

1. 序論

■ 研究背景

◆ パーキンソン病

- 手や足に震えが発生
- 震え以外の症状も存在
- 中年以降に発症

▼ 震えにより日常動作が困難

▼ 高齢化による患者数の増加

◆ 本態性振戻

- 手や頭に震えが発生
- 症状は震えのみ
- 中年以降に発症



図1: 震えによる日常動作への影響

報告書

JKA-2017M-138

1. 序論

■ 研究背景

◆ 振戻患者に対する治療

意思とは無関係に生じる律動的な細かい振動運動

● 薬物治療

年齢や生活の仕方、病気の重さ、薬に対する反応などを考慮

→ 長期間の服用による副作用、効果低減

● 脳深部刺激療法(DBS)

脳の特定の部位に電極を挿入し症状を緩和、改善

→ 電極を直接頭に埋め込むことの侵襲性

→ 振動抑制機器の必要性



図2: DBSの構造

報告書

JKA-2017M-138

1. 序論

■ 従来手法

◆ 手や腕の振動抑制ロボット

- 大半が装着型で大きい機構であり繊細な動作が困難

◆ 食事支援ロボット

- 動作に応じたエンドエフェクタの変更が必要
- 手指の振動抑制に注目した研究が少ない。

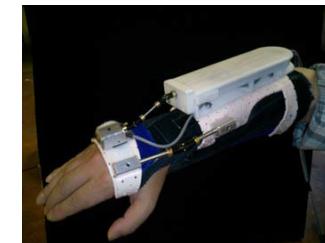


図3: 装着型ロボット
「Upper Limb Tremor Suppression in ADL via an Orthosis Incorporating a Controllable Double Viscous Beam Actuator」



図4: 食事支援ロボット MARo
「テクノフロント・超高齢社会が求める福祉ロボットの開発」
https://scienceportal.jst.go.jp/columns/technofront/20140206_01.html

報告書

JKA-2017M-138

1. 序論

■ 目的

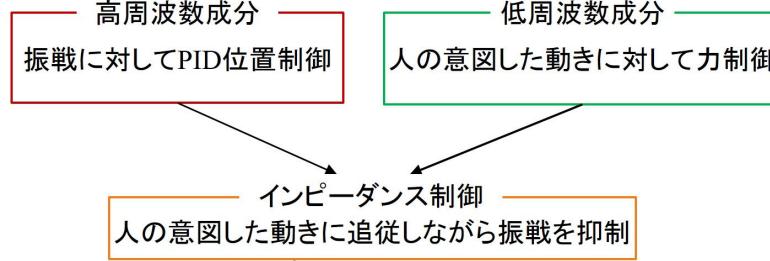
- ◆ 手指に対する振動抑制制御による動作支援

■ 提案手法

- ◆ 1リンクマニピュレータを用いた手指の振動抑制機器

● キーボードやスマートフォンなどの繊細な操作が可能

- ◆ 周波数分解に基づく振戦抑制制御



報告書

JKA-2017M-138

3. 制御系設計

■ 振戦抑制制御

- ◆ 振戦に対する位置制御

● θ^{res} をHPFに通して振戦成分を推定

$$s^2\theta_H^{res} = \frac{s}{s + \omega_c} s^2\theta^{res} \quad (2)$$

▼ カットオフ周波数を3Hzに設定

● 位置制御による角加速度参考値

$$s^2\theta_P^{ref} = K_p (\theta^{cmd} - \theta_H^{res}) + K_i \frac{1}{s} (\theta^{cmd} - \theta_H^{res}) + K_d s (\theta^{cmd} - \theta_H^{res}) - s^2\theta_H^{res} \quad (3)$$

→ 高周波数成分に位置制御を用いて振戦を抑制

θ^{res} : 角度応答値

θ^{ref} : 位置制御の角度参考値

ω_c : カットオフ周波数

s : ラプラス演算子

\bigcirc^{cmd} : 指令値

\bigcirc_H^{res} : 振戦成分の応答値

K_p : 比例ゲイン

K_i : 積分ゲイン

K_d : 微分ゲイン

JKA-2017M-138

2. モデリング

■ 手指の振戦抑制支援機器のモデル

- ◆ 動力学

$$T = M\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + G \quad (1)$$

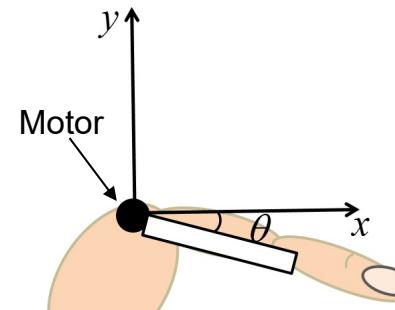


図6: 1リンクマニピュレータのモデル

T	: モータトルク
θ	: 関節の角度
M	: 惯性係数
D	: 粘性摩擦係数
G	: 重力項



図7: 提案機構の試作機

報告書

JKA-2017M-138

3. 制御系設計

■ 人の意図した動きに対する力制御

● θ^{res} をLPFに通して人の意図した動き成分を推定

▼ 反力推定オブザーバ(RTOB)のLPFを使用

▼ カットオフ周波数を3Hzに設定

$$\hat{T}_{reac} = \frac{g_{reac}}{s + g_{reac}} (I_a^{ref} K_{tn} - M_m s^2 \theta^{res} - T_{int} - T_{fric}) \quad (4)$$

● 力制御による角加速度参考値

$$s^2\theta_F^{ref} = -K_f \frac{\hat{T}_{reac}}{m_c} \quad (5)$$

→ 低周波数の人の意図した動きに追従

\hat{T}_{reac} : 推定反力トルク

g_{reac} : カットオフ周波数

K_{tn} : モータトルク定数

I_a^{ref} : モータ電流

M_m : モータ慣性

T_{int} : 内部干渉トルク

T_{fric} : 摩擦トルク

m_c : 仮想質量

θ_F^{ref} : 力制御による角度参考値

K_f : カゲイン

m_c : 仮想質量

報告書

JKA-2017M-138

報告書

JKA-2017M-138

6. 結論

■ 目的

- ◆ 手指に対する振動抑制制御による動作支援

■ 提案手法

- ◆ 1リンクマニピュレータを用いた手指の振動抑制機器
- ◆ 周波数分解に基づくPID制御による振戦抑制

■ 結果

- ◆ 実験により提案手法の有効性を確認

■ 今後の課題

- ◆ 個人に合わせたカットオフ周波数の変更による制御
- ◆ 実験環境の検討
- ◆ 手指と手の振戦抑制制御の併用による動作支援

報告書

JKA-2017M-138

外骨格ロボットハンドにおける 把持支援制御の一構成法

An Approach to Grasp Assist Control of
Robotic Hand Exoskeleton

報告書

JKA-2017M-138

I. 序論

□ 背景

- 少子高齢化の進行、介護者不足
 - 要介護の要因の約20%は脳卒中
 - ◆ 患者数は今後増加の予想
 - 脳卒中の後遺症：片麻痺、言語障害、寝たきり
 - ◆ 患者の70～80%が長期的な医療ケアを必要
 - ◆ 麻痺症状は手に現れやすく、4～9%の患者のみ完治
- 片麻痺は完治が難しく、多くの患者が後遺症に悩まされている



Fig.1: 手の麻痺・しびれ

I. 序論

□ 従来の外骨格ロボットハンド

- リンク機構、ケーブル機構による駆動
 - ◆ 省スペース、劣駆動といったメリットの一方、大きな力ロス
- EMG(筋電位)センサによる人の入力検出
 - ◆ 筋肉から信号を読み取れるが、不十分な精度



Fig.2: 香港理工大学開発の外骨格ハンド [6]

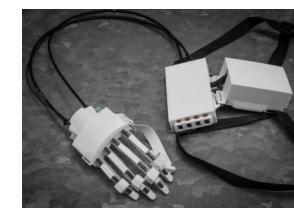


Fig.3: Arataによる外骨格ハンド [7]

➡ 人の意図を正確に読み取りアシストできる機器の必要性

報告書

JKA-2017M-138

報告書

JKA-2017M-138

I. 序論

□ 提案する外骨格ロボットハンド

- 人差し指/中指側: 指に装着する外骨格機構
- 親指側: 親指の代替としてロボット部のみの機構
環境反力をのみを測定可能
- 2基のロータリモータ: 高精度な位置・力制御
- IMU (慣性測定ユニット): ロボットハンドの姿勢角測定



Fig.5: CADモデル

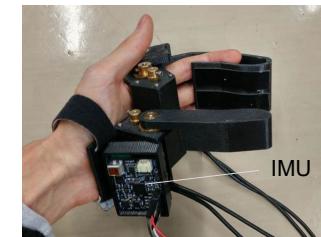


Fig.6: 実験機

報告書

JKA-2017M-138

I. 序論

□ 目的

- 操作者の入力に応じた把持支援制御

□ 提案手法

- 把持中の力のつり合いをもとに環境反力と人の入力を分離
- アシスト比に基づいたアシスト制御
 - 操作者がアシスト後の力を直感的に把握可能
- ロボットの姿勢角に応じた物体の重力補償
 - 質量推定フェーズの導入

把持の状態に応じて連続的かつ安定的な支援を実現

報告書

JKA-2017M-138

III. モデリング

□ 把持モデル

- 把持中の力のつり合い

$$F_l^{reac} \approx F_u^{reac} + F_{human}^{reac} \quad (1)$$

物体の重力の影響が小さい場合

- 環境反力

$$F_{env} = F_l^{reac} \quad (2)$$

- 人が加える力

$$F_{human}^{reac} = F_{env} - F_u^{reac} \quad (3)$$

- アシスト比

$$\alpha = \frac{F_{env}}{F_{human}^{reac}}$$

環境反力と人の入力の比

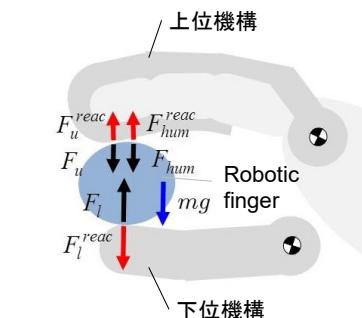


Fig.7: 把持動作において作用する力

報告書

JKA-2017M-138

III. モデリング

□ ロボットの姿勢角

- 把持物体の重力が与える影響

$$-mg \cos \theta_z$$

ロボットの傾き(z軸とZ軸がなす角)

ロボットの固有座標系: x-y-z座標系
ワールド座標系: X-Y-Z座標系

- クオータニオンからz-x-zオイラー角を導出

- θ_z は2つ目のx軸周りのオイラー角に一致

$$\theta_z = \arccos(q_w^2 - q_x^2 + q_y^2 - q_z^2) \quad (5)$$

クオータニオン: $q = [q_x \ q_y \ q_z \ q_w]$
 $z-x-z$ オイラー角の回転行列: $R_z(\phi)R_x(\theta)R_z(\psi)$

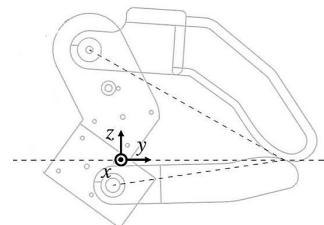


Fig.8: 外骨格ハンドの座標系

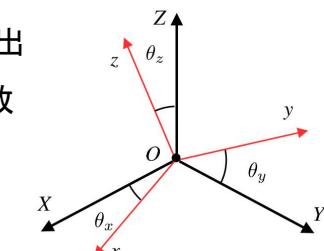


Fig.9: 外骨格ハンドとワールド座標系

報告書

JKA-2017M-138

IV. 動作計測

■ 開閉運動時の指の角度

- 親指、人差し指にIMUを関節回転軸と平行になるよう装着

指の開閉運動を行い角度推移を測定

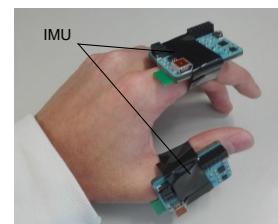
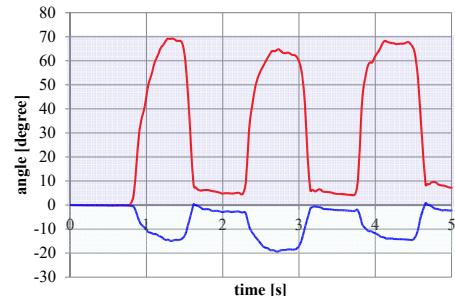


Fig.10: 関節角度測定方法

Fig.11: 人差し指と親指の関節角度の推移

→ 人差し指と親指の角度に1:0.22の比例関係を確認

報告書

JKA-2017M-138

V. 制御系設計

■ 物体の重力の影響が小さい場合

- 物体が軽い、重力がかかるない姿勢で操作
- アシスト比のみによる制御

■ 物体の重力の影響が大きい場合

- 物体の重力が加わるとアシスト比制御が正確に働くかない
- 可変アシスト比制御 + 重力補償制御

姿勢によってアシスト比を変動

+

質量推定により推定した値をもとに重力補償

報告書

JKA-2017M-138

IV. 動作計測

■ 物体を持った際の姿勢による把持力の推移

- 力センサを上位機構の内側に設置
- 上位機構の制御はOFFにして把持

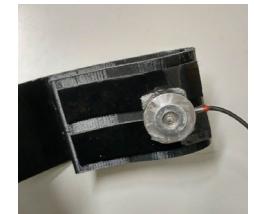


Fig.12: 力センサの設置

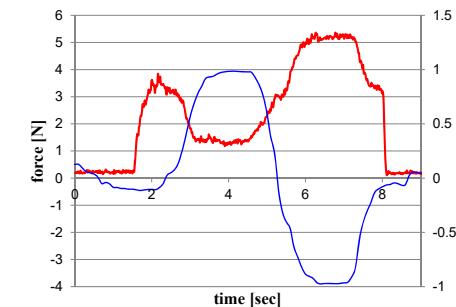


Fig.13: 力センサとIMUの測定値

$\cos\theta_z > 0$ において負荷軽減、 $\cos\theta_z < 0$ において負荷増加

報告書

JKA-2017M-138

V. 制御系設計

■ アシスト比制御

- 下位機構の制御
 - ◆ 角度比に基づいた位置制御

$$\theta_l^{cmd} = \beta \cdot \theta_u^{res}$$

$$\tau_l^{ref} = J_l^n \left\{ K_p(\theta_l^{cmd} - \theta_l^{res}) + K_v(\dot{\theta}_l^{cmd} - \dot{\theta}_l^{res}) \right\} \quad (7)$$

- 上位機構の制御

- ◆ アシスト比に基づいた力制御

$$\tau_u^{cmd} = \alpha \cdot \tau_{hum} - \tau_{env}$$

$$\tau_u^{ref} = K_f \cdot \tau_u^{cmd}$$

β	: 角度比
K_p	: 位置ゲイン
K_v	: 速度ゲイン
K_f	: 力ゲイン
α	: アシスト比

(6)

(7)

(8)

(9)

人の力がアシスト比倍されるような支援トルクを出力

→ 接触動作における、アシスト比に応じた把持支援制御

報告書

JKA-2017M-138

V. 制御系設計

■ アシスト比制御のブロック線図

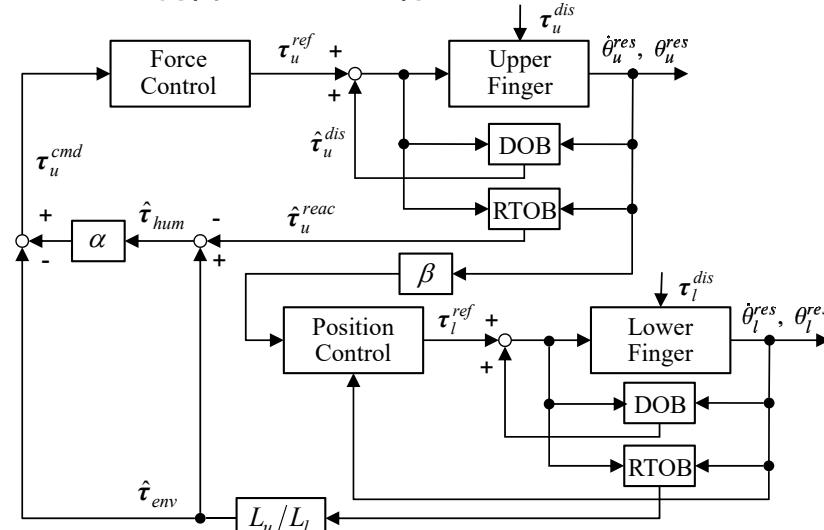


Fig.14: アシスト比制御のブロック線図

報告書

JKA-2017M-138

V. 制御系設計

■ 可変アシスト比制御 + 重力補償制御

- 可変アシスト比

$$\alpha = 1 + (\alpha^{cmd} - 1)|\sin \theta_z| \quad (10)$$

$$F^\alpha = \alpha \cdot F_{hum} - F_{env} \quad (11)$$

- 質量推定($-\pi/4 < \theta_z < \pi/4$ の場合のみ実行)

$$m_i^{tmp} = \frac{f_{env_i}}{g|\sin \theta_{z_i}|} \quad (12) \quad m^{est} = \sum_{i=0}^n m_i^{tmp} \quad (13)$$

- 重力補償

$$F^g = \begin{cases} m^{est} g |\cos \theta_z| & (\theta_z < -\pi/2, \pi/2 < \theta_z) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (14)$$

- 参照値生成

$$\tau_u^{ref} = K_f \cdot L_u (F^\alpha + F^g) \quad (15)$$

 β : Angle ratio K_v : Velocity gain K_p : Position gain K_p : Force gain

報告書

JKA-2017M-138

V. 制御系設計

■ アシスト比制御 + 重力補償のブロック線図

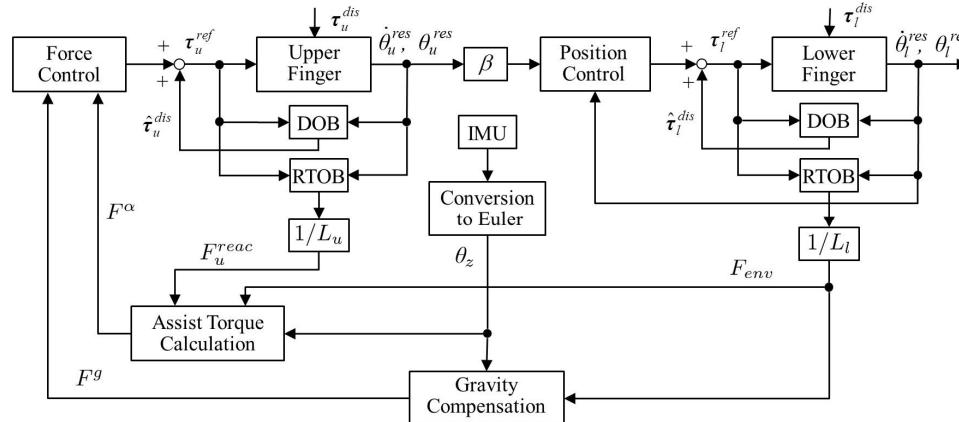


Fig.15: アシスト比制御 + 重力補償のブロック線図

報告書

JKA-2017M-138

VI. 実験

■ 実験1の方法

- アシスト比制御のみの場合の性能を検証
- 外骨格ロボットハンドを装着し、紙コップを掴む動作
- アシスト比は2.0と設定



Fig.16: 実験1の方法

報告書

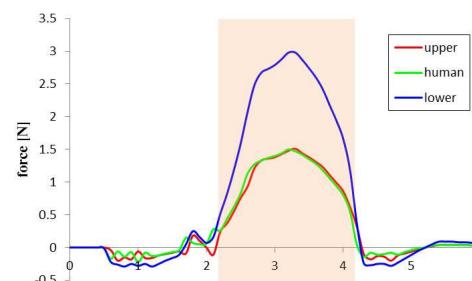
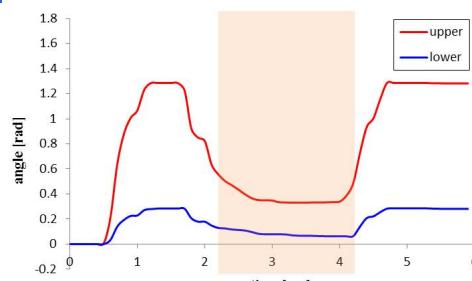
JKA-2017M-138



VI. 実験

□ 実験2の結果

- 角度、力の応答値を比較



上位モータが人と同じだけの力を出力し、力の合計が2倍に

報告書

JKA-2017M-138



VI. 実験

□ 実験2の方法

- 可変アシスト比制御+重力補償制御
- 質量330gのペットボトルを掴む動作
- 把持中ロボットの姿勢を変動させ、応答を検証



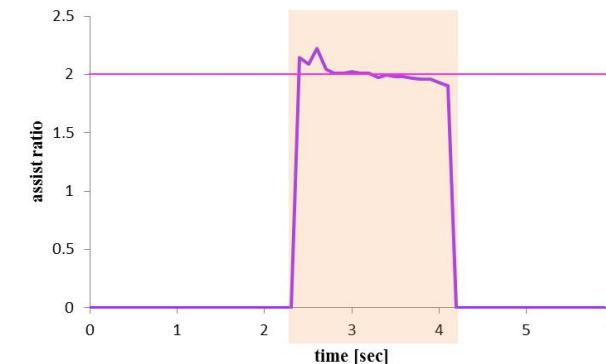
Fig.16: 実験2の方法

JKA-2017M-138

VI. 実験

□ 実験1の結果

- アシスト比応答値



接触動作の切り替わりでやや変動あるが、目標値2.0を達成

報告書

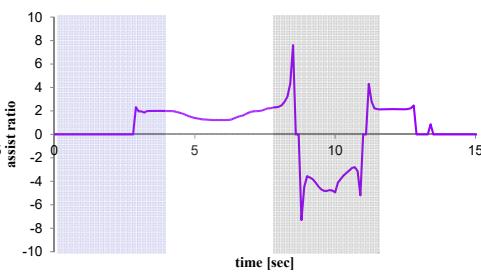
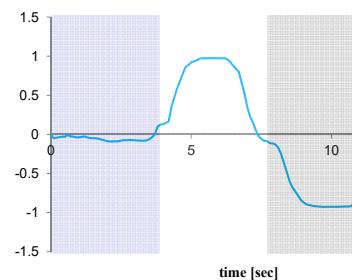
JKA-2017M-138



VI. 実験

□ 実験2の結果

- ロボットの姿勢とアシスト比応答値



アシスト比制御フェーズにおいてはアシスト比2.0を実現

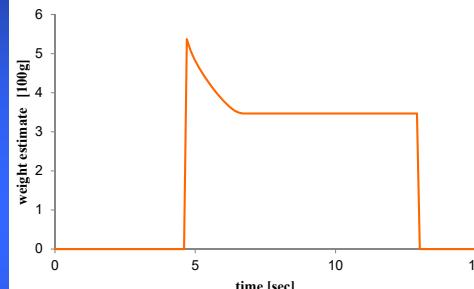
報告書

JKA-2017M-138

JKA-2017M-138

VII. 実験

実験2の結果

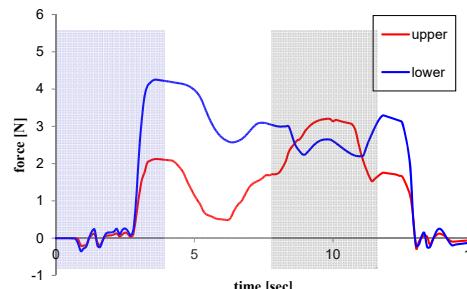


質量推定値は347gに収束

どんな姿勢においても連続的かつ安定的な支援を達成

報告書

2017-2018 (92)



質量推定フェーズでは上位機構の力減少し、重力がかかる際には重力補償が作用

JKA-2017M-138

空気圧インターフェースによる 人とロボット間のモーションransミッショn An Approach to Motion Transmission between Human and Robot by Air Pressure Interface

報告書

JKA-2017M-138

2017-2018 (93)

VII. 結論

目的

- 操作者の入力に基づいた把持支援制御

提案手法

- 把持中の力のつり合いに基づいた人の入力の推定
- アシスト比による把持支援制御
- ロボットの姿勢をもとにした把持物体の重力補償

結果

- アシスト比に応じた把持支援制御を実現
- どんな姿勢においても連続的かつ安定的な支援を達成

報告書

JKA-2017M-138

研究背景

◆ ロボット市場の拡大

- 遠隔操作や医療分野への応用が期待されている
 - ロボットの動作によっては力加減の調整が重要
 - 人とロボット間で相互情報伝達のできるインターフェースが必要

従来のインターフェースと問題点

◆ ハapticインターフェース

- マスターの装着箇所が限定的
- 使用場面に応じた機構の作り替えが困難



Fig.1: ハapticインターフェースの一例[8]

使用場面に依存しない汎用的な相互情報伝達インターフェースが必要

報告書

JKA-2017M-138

2017-2018 (95)

■ 空気圧を用いたインターフェース

- ◆ 空気圧を媒介に相互情報伝達
- ◆ 筋肉隆起による内部の圧力変動を用いる
 - 筋力とカフ内の圧力変化が比例することに着目

→ 様々な部位に装着可能
作り替えが不要
使用場面が幅広くなる

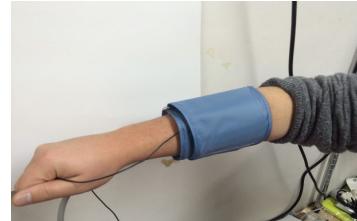


Fig. 2: 空気圧インターフェースとして用いるカフ

報告書

JKA-2017M-138

■ 提案

◆ 位置モードの概要

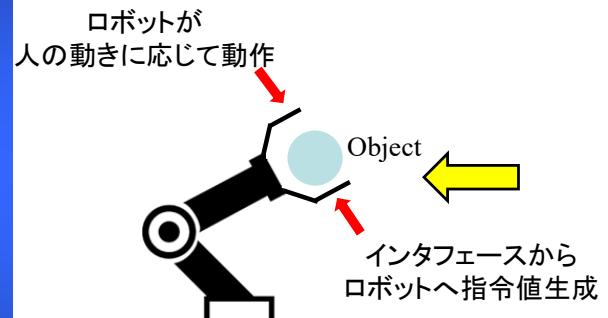


Fig. 3: 位置モードの概要図

報告書

JKA-2017M-138

■ 目的

- ◆ ロボットと操作者間の相互情報伝達を行う
空気圧を用いたインターフェースの実現

■ 提案

- 操作者の動きに合わせてロボットを操作

位置モード

- ロボットの物との接触力を操作者に認知させる

反力モード

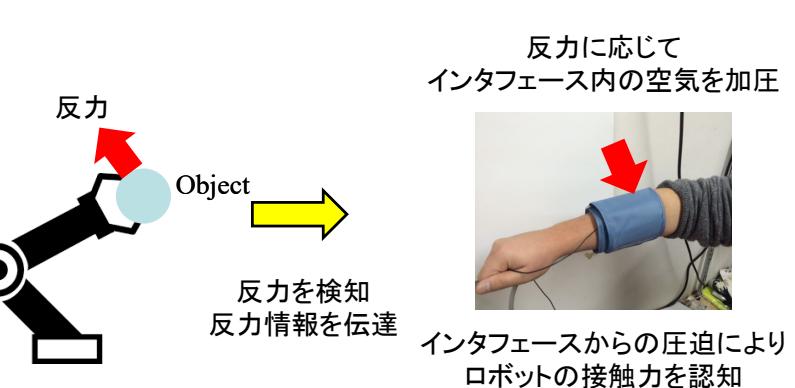
→ 位置モードと反力モードの切り替えを行う

報告書

JKA-2017M-138

■ 提案

◆ 反力モードの概要



反力に応じて
インターフェース内の空気を加圧
反力を検知
反力情報を伝達
インターフェースからの圧迫により
ロボットの接触力を認知

Fig. 4: 反力モードの概要図

報告書

JKA-2017M-138

■ 提案

◆ 位置モード

- 空気圧を一定に保った状態でロボットに指令値を生成

→

- インタフェースに加わる圧力外乱をオブザーバで推定
- 圧力外乱を基にロボットの角度指令値を生成

◆ 反応モード

- ロボットの接触力に応じて圧力指令値を生成

反作用トルク推定オブザーバで接触力を推定



推定値に応じてインターフェース内の圧力指令値を増加

報告書

JKA-2017M-138

■ エアポンプモータのモデリング

◆ 印加電圧と電流

$$E_p - K_e \dot{\theta}_p = R_p I_p + L_p \dot{I}_p \quad (1)$$

◆ モータのトルク

$$\tau = K_t I_p \quad (2)$$

E_p : 印加電圧

L_p : エアポンプモータのインダクタンス

R_p : エアポンプモータの抵抗

K_t : トルク定数

K_e : 逆起電力係数

$\dot{\theta}_p$: エアポンプモータの角速度

τ : トルク

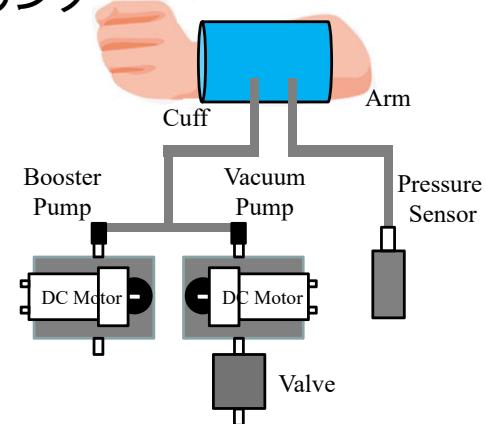


Fig. 5: 空気圧インターフェースの概要図

報告書

JKA-2017M-138

■ エアポンプモータのモデリング

◆ 角加速度

$$J_p \ddot{\theta}_p = \tau \quad (3)$$

◆ 単位時間における空気送り量

$$\dot{V}_p = \frac{V}{T} \quad (4)$$

◆ 空気の質量流量

$$G_p = \rho_{air} \dot{V}_p \quad (5)$$

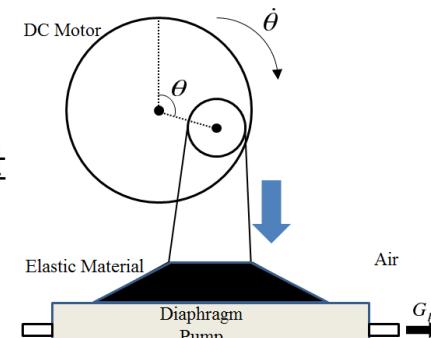


Fig. 6: モータとエアポンプの接続部

J_p : エアポンプモータの慣性

V : モータ1回転あたりの空気の送り量

ρ_{air} : 空気の密度

T : エアポンプモータの回転周期

報告書

JKA-2017M-138

■ カフのモデリング

◆ カフ内の気体の状態方程式

$$P_c V_c = w_c R \theta_c \quad (6)$$

◆ 気体の状態方程式の時間微分

$$\dot{P}_c = -\frac{P_c}{V_c} \dot{V}_c + \frac{R \theta_c}{V_c} G \quad (7)$$

■ 1リンクマニピュレータ

P_c : カフ内の圧力

R : 気体定数

V_c : カフの体積

θ_c : カフ内の空気の温度

w_c : カフ内の空気の重さ

G : カフへの空気の質量流量

報告書

JKA-2017M-138



■圧力オブザーバ

◆圧力外乱推定方法

- 圧力が一定に制御されている状態に外乱印加
→ エアポンプモータへの印加電圧から外乱を推定

◆印加電圧と圧力の関係式

- エアポンプモータに加わる反力が小さい
→ 印加電圧と角速度が比例
- 圧力外乱によるインターフェースの体積変化が小さい

報告書

JKA-2017M-138

■圧力オブザーバ

◆印加電圧と圧力の関係式

- 圧力変化とエアポンプモータの質量流量

$$\dot{P}_c = \frac{R\theta_c}{V_c} G_p \quad (8)$$

- 空気の質量流量とエアポンプモータの角速度

$$G_p = \frac{\rho_{air} V}{2\pi} \dot{\theta}_p \quad (9)$$

- 印加電圧と圧力変化

$$\dot{P}_c = aE_p + b \quad (10)$$

報告書

JKA-2017M-138



■圧力オブザーバ

◆圧力外乱の推定値

$$\hat{P}^{dis} = aE_p + b \quad (11)$$

→ 積分によって \hat{P}^{dis} を導出

■パラメータ同定試験

◆加圧試験・減圧試験

- 人の上腕に装着
- 数種類の一定電圧をエアポンプに印加し、圧力を測定
減圧試験では圧力が約10000Paの状態から減圧
- 各印加電圧において2000Pa~4000Pa間の傾きを導出
- エアポンプモータへの印加電圧と圧力変化の関係をプロット

報告書

JKA-2017M-138

■パラメータ同定試験結果

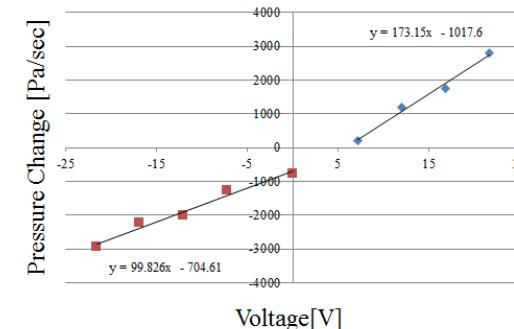


Fig. 7: 印加電圧と圧力変化

エアポンプへの印加電圧とインターフェース内の圧力の傾きが比例

Tab.1パラメータの同定試験結果

パラメータ	説明	値
a_+	加圧ポンプ駆動時のパラメータ a	173
a_-	減圧ポンプ駆動時のパラメータ a	100
b_+	加圧ポンプ駆動時のパラメータ b	-1018
b_-	減圧ポンプ駆動時のパラメータ b	-705

報告書

JKA-2017M-138

■ 空気圧制御

◆ 電圧参考値

$$E^{\text{ref}} = K_P(P^{\text{cmd}} - P^{\text{res}}) + K_V s(P^{\text{cmd}} - P^{\text{res}}) + K_I \frac{1}{s}(P^{\text{cmd}} - P^{\text{res}}) \quad (13)$$

◆ 壓力指令値

$$\begin{aligned} P^{\text{cmd}} &= P^{\text{const}} && (\text{position mode}) \\ P^{\text{cmd}} &= P^{\text{const}} + K_{tp} \hat{\tau}^{\text{reac}} && (\text{reaction force mode}) \end{aligned} \quad (14)$$

反力を応じた圧力指令値を生成

K_P : 比例ゲイン	P^{cmd} : 圧力指令値	K_{tp} : 反力を圧力に変換するゲイン
K_V : 微分ゲイン	P^{res} : 圧力応答値	
K_I : 積分ゲイン		$\hat{\tau}^{\text{reac}}$: 反力推定値

報告書

JKA-2017M-138

■ マニピュレータの制御

◆ インピーダンス制御

● 仮想インピーダンスモデル

$$J_i s^2 \theta_m^c + D_i s \theta_m^c + K_i \theta_m^c = \hat{\tau}^{\text{reac}} \quad (15)$$

● 加速度参考値

$$s^2 \theta^{\text{ref}} = -s^2 \theta_m^c + K_p(\theta_m^{\text{cmd}} - \theta_m^{\text{res}} - \theta_m^c) + K_v s(\theta_m^{\text{cmd}} - \theta_m^{\text{res}} - \theta_m^c) \quad (16)$$

● 角度指令値生成

$$\theta_m^{\text{cmd}} = K_{th} \hat{P}_{\text{dis}} \quad (17)$$

K_{th} : 圧力から角度に変換するゲイン

圧力外乱に応じた角度指令値を生成

報告書

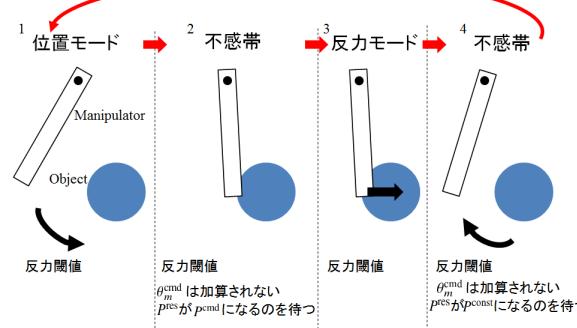
JKA-2017M-138

■ モードの切り替え

◆ 閾値設定

$$\begin{aligned} \hat{\tau}^{\text{reac}} < \tau_{\text{threshold}} & \text{(position mode)} \\ \hat{\tau}^{\text{reac}} \geq \tau_{\text{threshold}} & \text{(reaction force mode)} \end{aligned} \quad (18)$$

◆ 不感帯設定



報告書

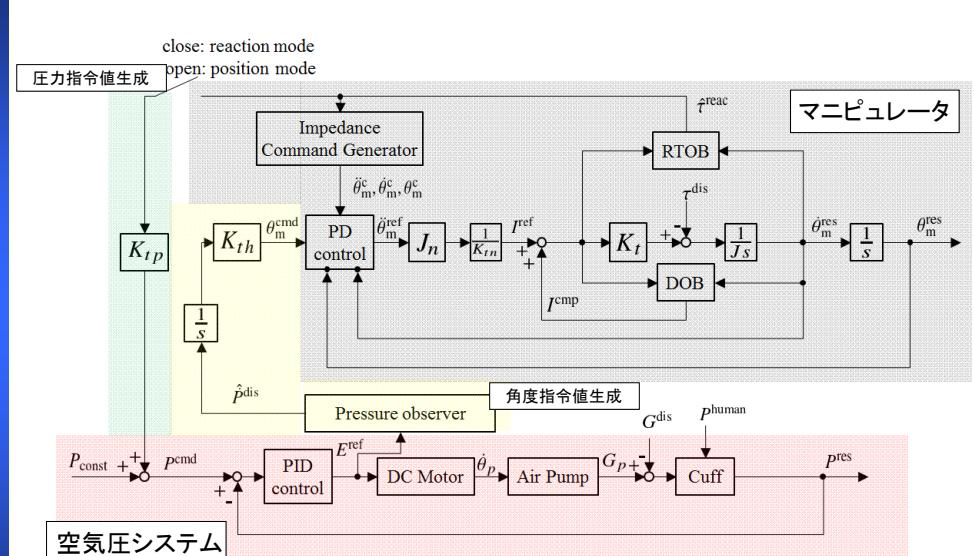
JKA-2017M-138

■ モードの切り替え

◆ 閾値設定

$$\begin{aligned} \hat{\tau}^{\text{reac}} < \tau_{\text{threshold}} & \text{(position mode)} \\ \hat{\tau}^{\text{reac}} \geq \tau_{\text{threshold}} & \text{(reaction force mode)} \end{aligned} \quad (18)$$

◆ 不感帯設定



報告書

JKA-2017M-138



概要

◆ 自作実験機による実験

- 被験者の上腕にインターフェースを装着
- インターフェース内部の圧力を測定
- マニピュレータの角度
- 被験者の肘の角度

◆ 実験内容

- 実験1:位置モードに関する実験
- 実験2:位置・力モードの切り替え実験

位置モードでの圧力指令値3000Pa
初期姿勢は腕を屈曲させず伸ばした状態
16秒後から角度指令値生成を開始

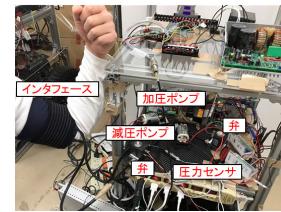


Fig. 10: 実験機(空気圧)

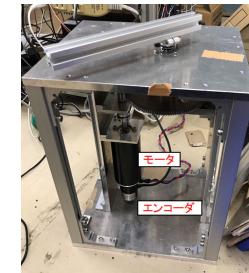


Fig. 11: 実験機(マニピュレータ)

報告書

JKA-2017M-138

実験1

◆ 実験内容

- 腕を屈曲させることでマニピュレータを操作
- 目標角度(90度)でマニピュレータを静止させ腕を初期姿勢に戻す

◆ 結果

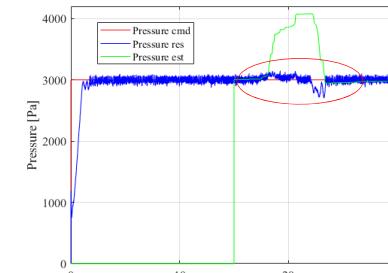


Fig. 12: 圧力応答値

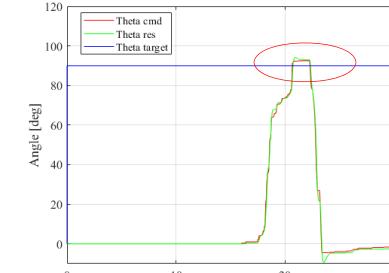


Fig. 13: 角度応答値

圧力を一定に保持

報告書

JKA-2017M-138



実験1

◆ 結果

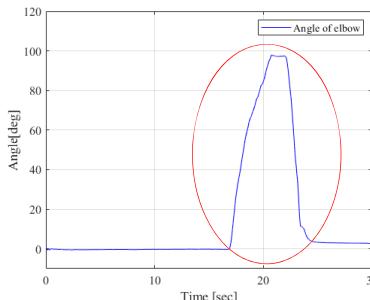


Fig. 14: 肘の角度

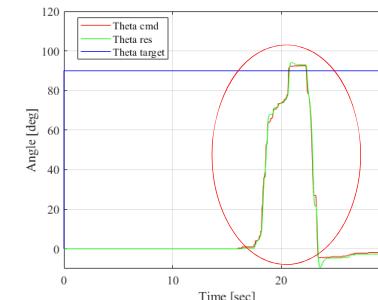


Fig. 13(再掲): 角度応答値

腕の屈曲に合わせてマニピュレータが動作
腕の静止と同時にマニピュレータが静止

報告書

JKA-2017M-138



実験2

◆ 実験内容

- 約90度付近に接触物を設置
- マニピュレータを操作し、接触物に押し当てて離す動作を2度行い、腕を初期姿勢に戻す

◆ 結果

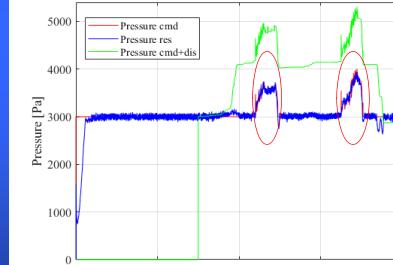


Fig. 15: 圧力応答値

位置モードにおいて圧力一定
反力モードにおいて圧力変動

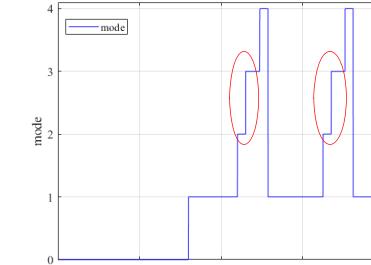


Fig. 16: モードの推移

1:位置
2:位置から反力の不感帯
3:反力モード
4:反力から位置も不感帯

報告書

JKA-2017M-138



■ 実験2

◆ 結果

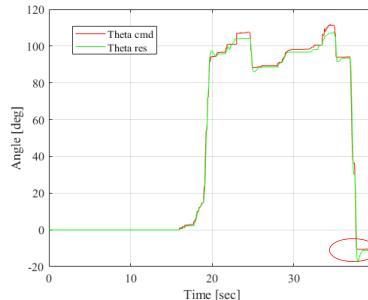


Fig. 17: 角度応答値

初期位置とのずれ

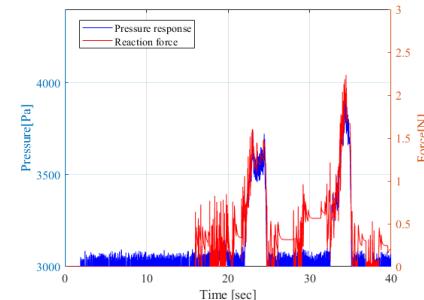


Fig. 18: 反力と圧力変化

反力とインターフェース内の圧力変化が比例

報告書

JKA-2017M-138



機械的・電気的インピーダンス融合を考慮した移動ロボットシステムの運動制御

Motion Control Considering Mechanical and Electrical Impedance Fusion in Mobile Robot Systems

報告書

JKA-2017M-138

■ 考察

- ◆ 実験1: 空気圧を一定に保ったまま人の動きに合わせてマニピュレータを操作
- ◆ 実験2: マニピュレータの反力に応じてインターフェース内の圧力を変化

■ 結果

- ◆ ロボットと操作者間の相互情報伝達を行う空気圧を用いたインターフェースの実現

■ 今後の課題

- ◆ 位置モードと反力モードの切り替えで不感帯を用いない
- ◆ 同定試験の簡易化

報告書

JKA-2017M-138



1.序論

研究背景

- ◆ 少子高齢化問題に伴う労働者・介護者の不足
 - 生活環境におけるロボットによる人支援が必要
 - ロボットに求められる人支援・タスクが多様化

生活環境下で人と共存する移動ロボットの需要が増加

◆ 移動ロボット

- 生活環境下では衝突の危険性が高い。



衝突対策が必要

● 接触前安全戦略

カメラやセンサによる衝突の予測および回避

→ 衝突の完全回避は不可能であるため、衝突を緩和する必要性がある。



Fig. 1: 生活支援ロボット [9]

TOYOTA「パートナーロボット」

http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/partner_robot/

報告書

JKA-2017M-138

1.序論

■ 従来研究と問題点

- ◆ 接触後安全戦略
 - 制御のみによる衝突緩和

衝突してから衝突緩和までに遅れが生じる。

→ 柔軟(バネ)機構による衝突緩和の実現が有効

■ 柔軟機構の特徴

- ◆ 衝突緩和の性能がバネに依存。
 - ➡ インピーダンス制御による衝突緩和の性能向上
- ◆ 柔軟機構の振動による作業精度の低下
 - ➡ 制振制御による土台の振動抑制

制御則が同時に成立しない

報告書

JKA-2017M-138

1.序論

■ 目的

- ◆ 柔軟機構とインピーダンス制御の組み合わせによる衝突した瞬間の安全性の向上
- ◆ 状況に応じた制振制御と衝突緩和の切替制御

■ 研究条件

- ◆ 旋回は考えない。(前後方向への移動のみ)
- ◆ 移動時の制振は考慮しない。
- ◆ 作業機構は考えず、移動機構に柔軟機構を導入する。

報告書

JKA-2017M-138

1.序論

■ 提案機構

- ◆ 進行方向への柔軟機構の導入



Fig.2:提案機構の全体

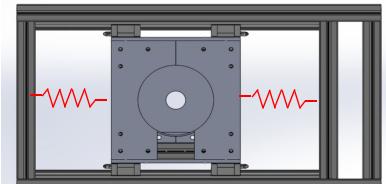


Fig.3:柔軟機構

2017-2018 (122)

1.序論

■ 提案手法

- ◆ 柔軟移動機構とインピーダンス制御の組み合わせによる衝突緩和
- ◆ 環境外乱の推定値に基づく切替制御

移動時

インピーダンス制御による衝突緩和

停止時(作業時)

環境外乱小: 共振比制御による制振制御

逆システムによる外乱抑制

環境外乱大: インピーダンス制御による衝突緩和

→ 作業精度の向上

→ 衝突時の安全性の向上

報告書

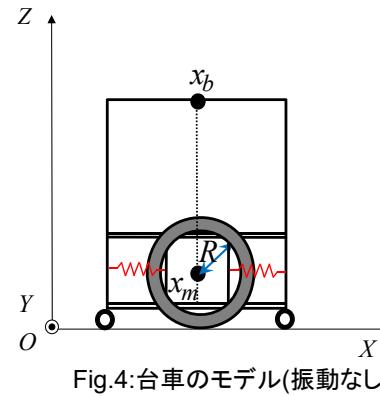
JKA-2017M-138

報告書

JKA-2017M-138

2. モデリング

柔軟移動ロボット



$$x_m - x_b = x_s \quad (1)$$

$$F^{reac} = -kx_s \quad (2)$$

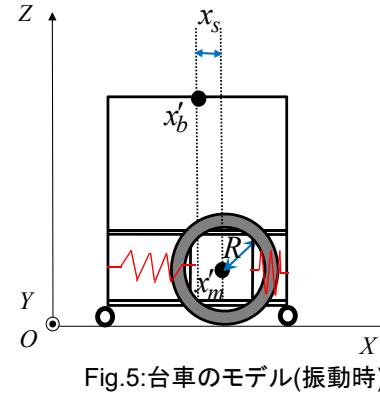


Fig.5: 台車のモデル(振動時)

k	: バネ定数	x_b	: 土台位置
R	: 駆動輪の半径	x_s	: バネ変位
x_m	: モータ位置	F^{reac}	: バネ反力

報告書

JKA-2017M-138

2. モデリング

ロボット位置の運動学

◆ 順運動学

$$\ddot{x}_m = R\ddot{\theta}_w \quad (3)$$

◆ 逆運動学

$$\ddot{\theta}_w = \frac{\ddot{x}_m}{R} \quad (4)$$

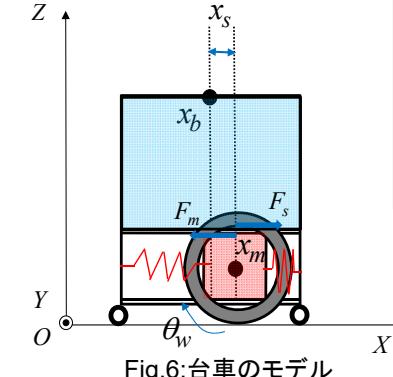


Fig.6: 台車のモデル

M_b	: 土台の重さ
M_m	: モータの重さ
F^{ext}	: 環境外乱
θ_w	: 車輪角度
F_m, F_s	: レール摩擦
τ^{ref}	: トルク参照値

動力学

$$\begin{bmatrix} M_m & 0 \\ 0 & M_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_m \\ \ddot{x}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ x_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\tau^{ref}}{R} - F_m \\ F^{ext} - F_s \end{bmatrix} \quad (5)$$

報告書

JKA-2017M-138

3. 制御系設計

衝突緩和

◆ インピーダンス制御

$$M_i s^2 x_i^{cmd} = -K_f \hat{F}^{ext} - K_i x_i^{cmd} - D_i s x_i^{cmd} \quad (6)$$

$$s^2 x^{ref} = (K_p + s K_v)(x_m^{cmd} - x_m^{res} - x_i^{cmd}) - s^2 x_i^{cmd} \quad (7)$$

振動抑制

◆ 共振比制御

● PD制御

$$s^2 x_m^{ref} = (K_p + s K_v)(x_m^{cmd} - x_m^{res}) \quad (8)$$

● バネ反力フィードバック

$$s^2 x_m^{ref} = s^2 x_m^{res} - K_r F_{reac} \quad (9)$$

\circ^{cmd}	: 指令値
\circ^{res}	: 応答値
\circ^{ref}	: 参照値
K_p	: 位置ゲイン
K_v	: 速度ゲイン
K_r	: バネ反力ゲイン
\circ_i	: インピーダンス
M_i	: 仮想慣性
K_i	: 仮想剛性
D_i	: 仮想粘性
K_f	: カゲイン

報告書

JKA-2017M-138

3. 制御系設計

負荷側外乱オブザーバ

◆ 土台の動力学

$$M_b \ddot{x}_b^{res} = k(x_m^{res} - x_b^{res}) + F^{ext} - F_s \quad (10)$$

◆ 負荷側外乱オブザーバ

$$\hat{F}^{ext} = \frac{g}{s+g} (M_b s^2 x_s^{res} - k(x_m^{res} - x_b^{res}) + F_s) \quad (11)$$

同定試験により得られるレール摩擦

◆ 切替制御

$$\begin{cases} -60 \text{ [N]} \leq \hat{F}^{ext} \leq 60 \text{ [N]} \\ -60 \text{ [N]} > \hat{F}^{ext}, 60 \text{ [N]} < \hat{F}^{ext} \end{cases} \rightarrow \begin{array}{l} \text{制振制御} \\ \text{衝突緩和} \end{array} \quad (12)$$

◆ 逆システムによる推定環境外乱の加速度変換

$$s^2 x_{F^{ext}}^{ref} = \frac{K_p + K_r k}{k} \hat{F}^{ext} \quad (13)$$

g	: カットオフ周波数
\hat{F}^{ext}	: 推定環境外乱

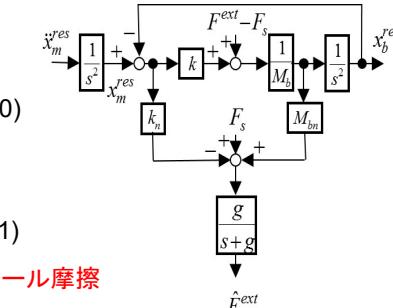


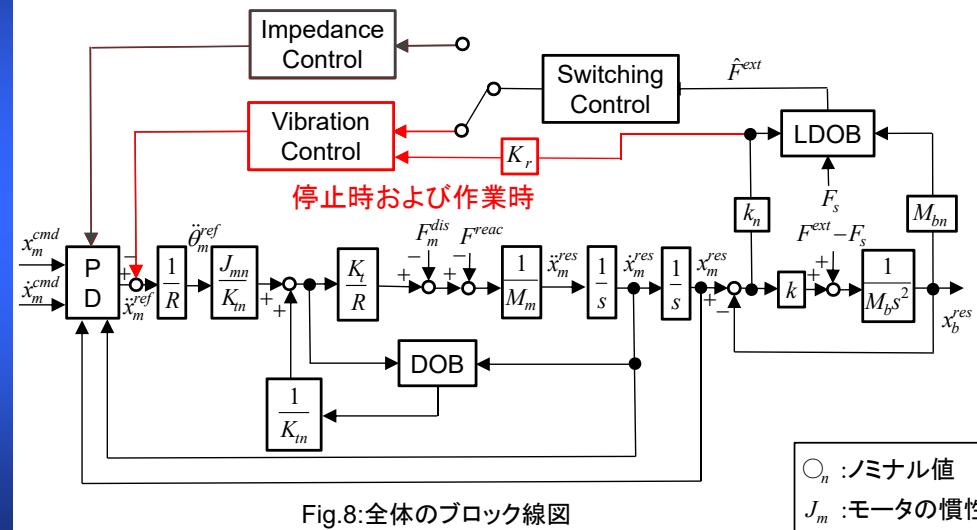
Fig.7:LDOBのブロック線図

報告書

JKA-2017M-138

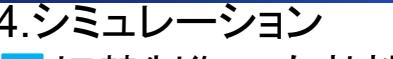
3.制御系設計

■ ブロック線図

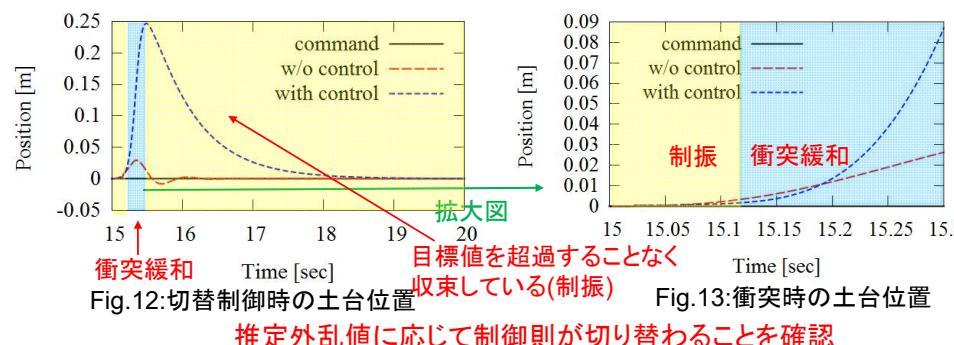


報告書

JKĀ-2017M-138



- ◆停止時に外乱が付加された場合の土台位置を確認
 - ◆比較対象:位置制御(切替制御なし)
 - ◆15秒時に外乱を0.3秒間付加



報告書

TKA-2017M-138

4. シミュレーション

柔軟機構の有無による衝突緩和の性能比較

- ◆ 移動時における壁との衝突時の反力を確認
 - ◆ 柔軟機構がないモデルによるインピーダンス制御と比較
→ カセンサを想定し、壁からの反力を入力値とする

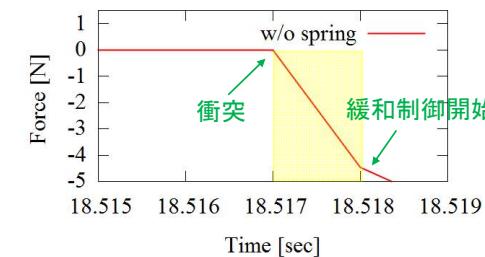


Fig.9:柔軟機構無し

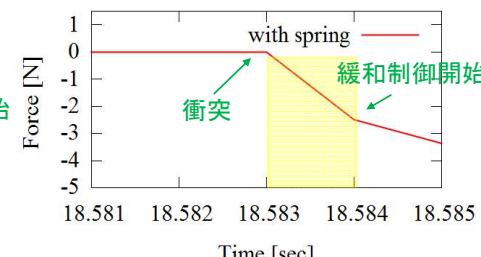


Fig.10:柔軟機構有

衝突後からインピーダンス制御が作用するまでに生じる衝撃力の減少を確認

報告書

JKA-2017M-138

5. 結論

提案手法

- ◆ 柔軟移動機構とインピーダンス制御の組み合わせによる衝突緩和
 - ◆ 環境外乱の推定値に基づく切替制御

結果

- ◆ 提案機構により衝突した瞬間の衝撃力の減少を確認
 - ◆ 推定外乱値に基づく制御則の切替を確認

今後の課題

- ◆ 切替制御の閾値設計の再検討
 - ◆ 実験の実施

報告書

TKA-2017M-138

ばね機構を導入したロボットシステムにおける機械インピーダンスと仮想インピーダンスの融合制御

A Fusion Control of Mechanical and Virtual Impedance in Robot Systems with Spring Mechanism

報告書

JKA-2017M-138

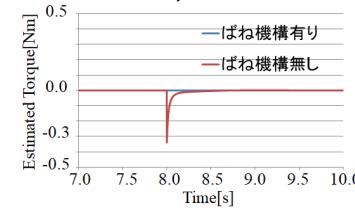


Fig.3. インパルス外乱に対するモータ推定トルクの変化

1. 序論

◆ 作業精度と安全性の実現

- 制御のみのアプローチ(ハイブリッド制御, インピーダンス制御)
衝撃に対して不安定になる可能性

衝撃緩和に対する限界

→ 制御手法を工夫するだけでは不十分.

- 制御+機構のアプローチ(機械ばねをシステムに導入)

インパルス外乱に対する安定性

機械的に低インピーダンスを実現可能

→ システムに機械ばねを導入する
安全面での有効性

報告書

JKA-2017M-138

1. 序論

◆ 研究背景

- 要介護者の増加, 労働者の不足

- ロボット技術の発展

→ 作業ロボットの生活環境への導入拡大

◆ 生活環境下における作業ロボット

- 人が存在する環境での運用

- 人との接触が発生

→ 作業精度と安全性を両立することが重要.

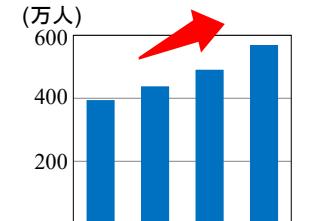


Fig.1. 要支援・要介護者数

報告書

JKA-2017M-138

1. 序論

◆ 機械ばねをシステムに導入する問題点

- 外乱応答が振動的になる.

- 指令値に対する定常偏差の存在

- 外乱応答が機械ばねの剛性に依存

→ 位置制御性能(作業精度)の低下

◆ 目的

- 振動抑制, 定常偏差の低減

- 外乱に対する位置変動の抑制

報告書

JKA-2017M-138



1. 序論

◆ 実験機器の概要

- 各関節にはばね機構を導入した2リンクマニピュレータ

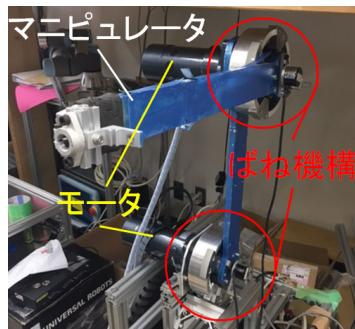


Fig.4. 実験機の全体図

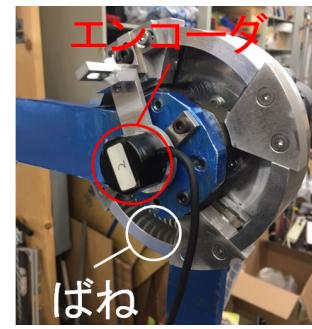


Fig.5. ばね機構の詳細

- 負荷側にモータとは別のエンコーダを取り付けており、ばね反力トルク、リンク角度を計測可能。

報告書

JKA-2017M-138



2. モデリング

◆ マニピュレータのモデル

- 運動学

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{bane} \\ \dot{z}_{bane} \end{bmatrix} = J[\dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2]^T \quad (1)$$

- 手先位置

$$\begin{bmatrix} x_{bane} \\ z_{bane} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

- ばね反力トルク

$$\tau_{bane} = \begin{bmatrix} \tau_{bane1} \\ \tau_{bane2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{m1}(q_1 - \theta_1) \\ K_{m2}(q_2 - \theta_2) \end{bmatrix} \quad (3)$$

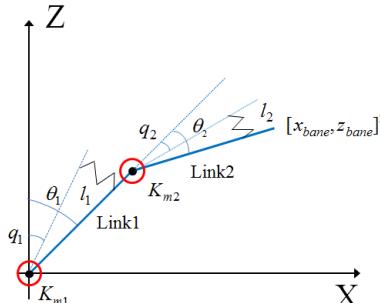


Fig.6. ばね機構を導入した2リンクマニピュレータモデル

$[x_{bane} \ z_{bane}]^T$: 手先位置	K_m	: ばね定数	J	: ヤコビ行列	\bigcirc_1	: 第1リンク
θ	: リンク角度	q	: モータ角度	l	: リンク長さ	\bigcirc_2	: 第2リンク

報告書

JKA-2017M-138

1. 序論

◆ 制御手法

- インピーダンス制御

制御インピーダンスの決定

- 振動抑制制御

共振比制御に基づく振動抑制

負荷側外乱フィードバックによる定常偏差の低減

- 指令値補償

負荷側応答角度に基づくモータ指令値の変更

➡ 外乱に対する位置変動の抑制

報告書

JKA-2017M-138



2. モデリング

◆ マニピュレータのモデル

- 動力学

$$\tau_{bane} = M(\theta)\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (4)$$

$$\tau_m - \tau_{bane} = J_m \ddot{q} \quad (5)$$

m_{l1}	: 第1リンク質量	m_{l2}	: 第2リンク質量
J_m	: モータ慣性	τ_m	: モータトルク
q	: モータ角度		

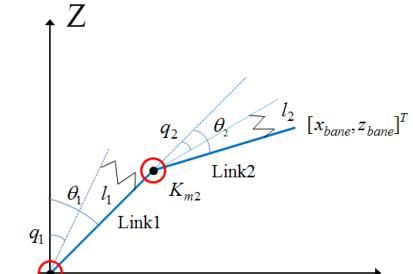


Fig.6. ばね機構を導入した2リンクマニピュレータモデル

$$\begin{aligned} G &= \begin{bmatrix} -(m_{l1} + m_{l2})gl_1 S(\theta_1) - m_{l2}gl_2 S(\theta_1 + \theta_2) \\ -m_{l2}gl_2 S(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \\ M &= \begin{bmatrix} l_1^2(m_{l1} + m_{l2}) + l_2^2m_{l2} + 2l_1l_2m_{l2}C(\theta_2) & l_2^2m_{l2} + l_1l_2m_{l2}C(\theta_2) \\ l_2^2m_{l2} + l_1l_2m_{l2}C(\theta_2) & l_2^2m_{l2} \end{bmatrix} \quad \tau_m = \begin{bmatrix} \tau_1^{ref} \\ \tau_2^{ref} \end{bmatrix} \quad q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} \quad J_m = \begin{bmatrix} J_{m1} \\ J_{m2} \end{bmatrix} \\ H &= \begin{bmatrix} -l_1l_2(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\dot{\theta}_2m_{l2}S(\theta_2) \\ l_1l_2\dot{\theta}_1^2m_{l2}S(\theta_2) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

報告書

JKA-2017M-138

3. 制御系設計

- ◆ インピーダンス制御
 - インピーダンスマodel

$$J_i \ddot{q}_m^c + D_i \dot{q}_m^c + K_i q_m^c = A_m^c \hat{\tau}^{reac} \quad (6)$$

- 加速度参考値

$$\begin{aligned} \ddot{q}^{ref} = & -\ddot{q}_m^c + K_P(q^{cmd} - q^{res} - q_m^c) \\ & + K_D(\dot{q}^{cmd} - \dot{q}^{res} - \dot{q}_m^c) \end{aligned} \quad (7)$$

K_i :仮想剛性 J_i :仮想慣性 K_P :位置ゲイン \bigcirc^c :インピーダンスマodel
 $\hat{\tau}^{reac}$:反力トルク D_i :仮想粘性 K_D :速度ゲイン A_m^c :フィードバックゲイン

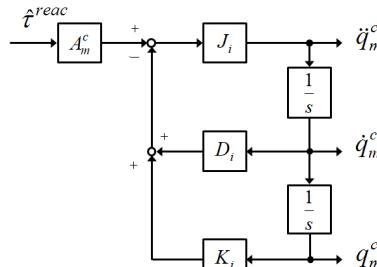


Fig.7. 反力から指令値への変換

報告書

JKA-2017M-138

3. 制御系設計

- ◆ 振動抑制制御

- 共振比制御

→ ばね反力トルク $K_r \tau_{bane}$ をフィードバックして振動抑制

$$\ddot{q}^{ref} = K_P(q^{cmd} - q^{res}) + K_D(\dot{q}^{cmd} - \dot{q}^{res}) - K_r \tau_{bane} \quad (8)$$

- 負荷側外乱フィードバック

$$\hat{\theta}^{dis} = \left(\frac{K_P + K_r K_m}{K_p K_m} \right) \hat{\tau}_{bane}^{dis} \quad (9)$$

負荷側RTOBで推定

負荷側の推定外乱に逆システムを通し
角度情報をモータに送り定常偏差を低減

$\hat{\tau}_{bane}^{dis}$:負荷側推定外乱
 $\hat{\theta}^{dis}$:外乱補償角度
 K_r :ゲイン

報告書

JKA-2017M-138

3. 制御系設計

- ◆ 指令値補償

- モータの指令値決定

$$q^{cmd} = \theta^{cmd} + A(\theta^{cmd} - \theta^{res}) \quad (10)$$

$$\dot{q}^{cmd} = -A\dot{\theta}^{res}$$

→ 外乱によるリンク変動の
逆方向にモータ指令値を変更

- 最終的な加速度参考値

$$\begin{aligned} \ddot{q}^{ref} = & -K_r \tau_{bane} - K_a \ddot{\theta} - \ddot{q}_m^c \\ & + K_P(q^{cmd} + \hat{\theta}^{dis} - q^{res} - q_m^c) \\ & + K_D(\dot{q}^{cmd} - \dot{q}^{res} - \dot{q}_m^c) \end{aligned} \quad (11)$$

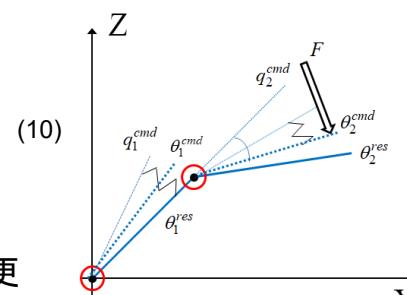


Fig.8. モータ指令値変更概念図

報告書

JKA-2017M-138

3. 制御系設計

- ◆ 全体のブロック線図

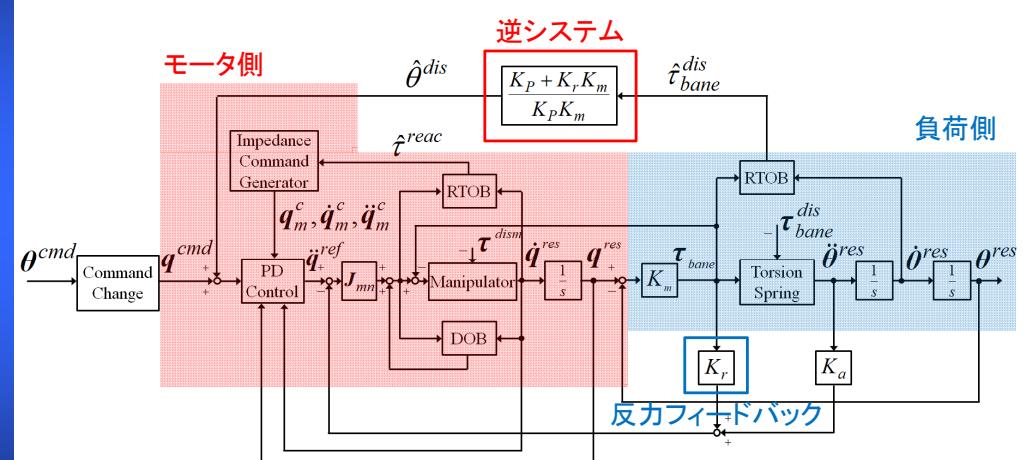


Fig.9. 制御系全体のブロック線図

報告書

JKA-2017M-138

4. 実験

◆ 実験の種類

- 実験開始時に姿勢変動を行う場合の外乱応答比較実験(実験1)
- 実験開始時に姿勢変動を行わない場合の外乱応答比較実験(実験2, 省略)
- 支援機器を用いた転倒防止実験(実験3, 省略)



Fig.10. 転倒防止実験状況

報告書

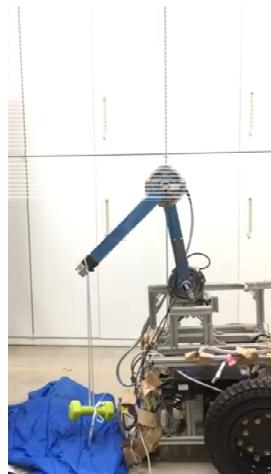
JKA-2017M-138



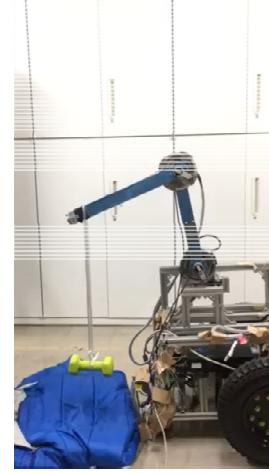
4. 実験

◆ 実験1動画

手法1



手法2



手法3



報告書

JKA-2017M-138

4. 実験

◆ 実験1(姿勢変動を行う場合)概要

- おもりによってステップ外乱を再現
- マニピュレータの手先位置応答(x, z 方向)を比較
インピーダンス制御のみ(手法1)
インピーダンス制御+振動抑制制御(手法2)
インピーダンス制御+振動抑制制御+指令値補償(手法3)



Fig.11. 制御開始時の姿勢



Fig.12. 実験開始時の姿勢



Fig.13. おもりの切断

報告書

JKA-2017M-138



4. 実験

◆ 実験1結果

● 手先位置の応答

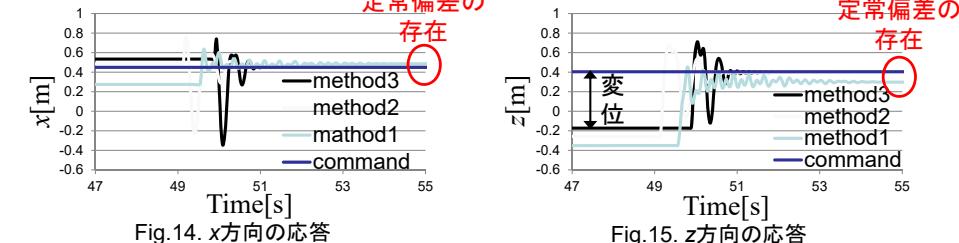


Fig.14. x方向の応答

Table1. 実験1結果まとめ

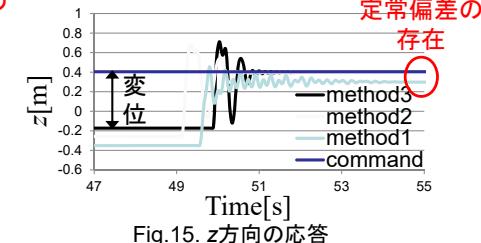


Fig.15. z方向の応答

	定常偏差[m]	整定時間[s]	おもりを吊るしている状態のz方向の変位[m]
手法1	x:0.037, z:-0.106	4.85	-0.352
手法2	x:0.004, z:-0.011	1.60	-0.259
手法3	x:0.001, z:-0.007	1.73	-0.172

報告書

JKA-2017M-138



5. 結論

◆ 目的

- 振動抑制, 定常偏差の低減
- 外乱に対する位置変動の抑制

◆ 制御手法

- インピーダンス制御に基づく制御インピーダンスの決定
- 共振比制御+負荷側外乱フィードバックによる振動, 定常偏差低減
- 指令値補償による外乱補償

◆ 結果

- 振動時間の抑制, 定常偏差の低減
- 外乱に対するロバスト性の向上

報告書

JKA-2017M-138



柔軟土台を有するマニピュレータの 振動抑制を考慮した 力センサレスインピーダンス制御

A Force Sensorless Impedance Control
Considering Vibration Suppression
for a Manipulator with Flexible Base

報告書

JKA-2017M-138

Appendix



報告書

JKA-2017M-138



1. 序論

■ 研究背景

- ◆ 少子高齢化問題
 - 労働者の不足
 - 生活空間で活動する人支援ロボットの需要が増加
- ◆ 生活空間で働くロボットの例
 - ロボットの作業空間に人や物が多く存在する.
 - 人とロボット間の衝突が懸念される.



Fig.1: Home assistant robot [10]



Fig.2: RP-VITA[11]



Fig.3: Siriusbot [12]

報告書

JKA-2017M-138

1. 序論

従来の安全戦略と問題点

◆ 衝突前安全戦略

- カメラや距離センサによる衝突検知と回避
→ 死角で検知ができない。

◆ 衝突後安全戦略

- アクティブコンプライアンス (ソフトウェア)
→ インピーダンス制御, コンプライアンス制御
- パッシブコンプライアンス (ハードウェア)
→ バネやダンパを利用した柔軟機構

Tab.1: 衝突後安全戦略の特徴

	アクティブコンプライアンス	パッシブコンプライアンス
インピーダンスパラメータの調整	容易	困難
擊力の緩和	不可能	可能

報告書

JKA-2017M-138

1. 序論

目的

- ◆ 撃力緩和と容易な剛性の可変設計を実現するロボットの構築

提案

◆ 柔軟土台を有するマニピュレータ

- 回転方向に歪む柔軟機構による撃力緩和
- インピーダンス制御によるロボット全体の剛性の容易な設計



Fig.4: 柔軟土台を有する3リンクマニピュレータ

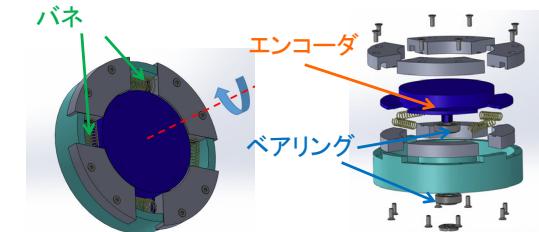


Fig.5: 柔軟土台

報告書

JKA-2017M-138

1. 序論

提案

◆ 推定反力補正法

- 反作用トルク推定オブザーバ (RTOB)
 - 推定反作用トルクは、全外乱トルクから摩擦トルクを差し引いて得る。
- チャタリングを防ぐため、RTOBの摩擦モデルに不感帯を持たせる。
 - 低速域で推定反作用トルクに誤差が生じる。
- 誤ったインピーダンス指令値を生成
 - 非接触時における、力センサレスインピーダンス制御の位置追従性が低下
- 柔軟土台の歪み量で環境との接触の有無を判定し、推定手先反力を補正する。
 - 位置追従性を向上させる。

$$\begin{aligned} \tau_{fric} &: \text{摩擦トルク} \\ \dot{\theta}_m &: \text{関節角速度} \end{aligned}$$

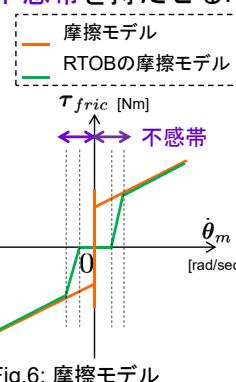


Fig.6: 摩擦モデル

JKA-2017M-138

1. 序論

提案

◆ ダイナミック特異点回避を考慮した振動抑制制御

- 柔軟土台のバネがマニピュレータの干渉慣性や外力で振動する。
 - 従来手法で、振動抑制制御を導入し解決を図った。
- しかし、ダイナミック特異点で、振動抑制の性能が悪化

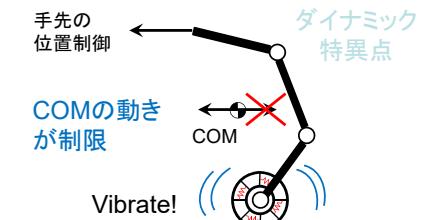
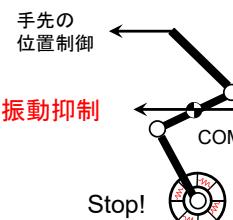


Fig.7: ダイナミック特異点の概念図

- 零空間にダイナミック特異点を回避する姿勢制御を導入する。
 - 振動抑制の性能を保持する。

報告書

JKA-2017M-138

2. モデリング

柔軟土台を有するマニピュレータのモデリング

◆ 関節及び作業空間ベクトル

$$\boldsymbol{\theta}_m = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T \quad (1)$$

$$\boldsymbol{q} = [\theta_b \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T \quad (2)$$

$$\boldsymbol{X}_e = [x_e \ y_e]^T \quad (3)$$

$$\boldsymbol{X} = [x \ y]^T \quad (4)$$

◆ 運動学

$$\dot{\boldsymbol{X}}_e = \boldsymbol{J}_b \dot{\boldsymbol{q}} \quad (5)$$

$$\dot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{J}_{aco} \dot{\boldsymbol{\theta}}_m \quad (6)$$

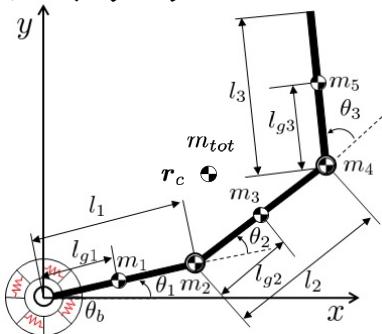


Fig.8: モデル

$\boldsymbol{J}_{aco}, \boldsymbol{J}_b$: ヤコビ行列
\boldsymbol{X}_e	: 手先位置ベクトル
\boldsymbol{X}	: バネの歪みを考慮しない手先位置ベクトル
\boldsymbol{r}_c	: 質量中心の位置
m_{tot}	: 合計質量

報告書

JKA-2017M-138

2017-2018 (156)

2017-2018 (156)

2. モデリング

柔軟土台を有するマニピュレータのモデリング

◆ マニピュレータの土台に対する干渉運動量

$$\boldsymbol{L}_m = \begin{bmatrix} L_t \\ L_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{tot} \dot{\boldsymbol{r}}_c \\ \boldsymbol{r}_c \times m_{tot} \dot{\boldsymbol{r}}_c + \sum_{j=1}^n (\boldsymbol{I}_j \boldsymbol{\omega}_j + \boldsymbol{r}_j \times m_j \dot{\boldsymbol{r}}_j) \end{bmatrix} \quad (9)$$

直線運動量
角運動量

→ 柔軟土台が回転機構なので、角運動量のみを考慮する。

◆ マニピュレータの動きで生じる土台負荷トルク

● 角運動量の時間微分

$$W_m = \frac{d\boldsymbol{L}_a}{dt} \quad (10)$$

$$W_m = -W_b = \boldsymbol{M}_{bm} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_m + \dot{\boldsymbol{M}}_{bm} \dot{\boldsymbol{\theta}}_m \quad (11)$$

$L_m = M_{bm} \dot{\boldsymbol{\theta}}_m$
\boldsymbol{r}_c : 質量中心位置
m_{tot} : 合計質量
\boldsymbol{I} : リンクの慣性モーメント
$\boldsymbol{\omega}$: 関節角速度
M_{bm} : 干渉慣性行列
W_m : 土台負荷トルク

報告書

JKA-2017M-138

2017-2018 (157)

2. モデリング

柔軟土台を有するマニピュレータのモデリング

◆ 全体の動力学

$$\boldsymbol{M} \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_b \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}}_m \end{bmatrix} + \boldsymbol{D} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}}_b \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_b \boldsymbol{\theta}_b \\ 0 \end{bmatrix} + \boldsymbol{c} = \begin{bmatrix} 0 \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} + \boldsymbol{\tau}_{ext} \quad (7)$$

◆ 柔軟土台の動力学

$$M_b \ddot{\boldsymbol{\theta}}_b + D_b \dot{\boldsymbol{\theta}}_b + K_b \boldsymbol{\theta}_b = W_b + \boldsymbol{\tau}_b^{ext} \quad (8)$$

$$\boxed{\begin{aligned} \boldsymbol{M} &= \begin{bmatrix} M_b & M_{bm} \\ M_{bm}^T & M_m \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{D} &= \begin{bmatrix} D_b & 0 \\ 0 & D_m \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{c} &= \begin{bmatrix} c_b \\ c_m \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\tau}_{ext} &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_b^{ext} \\ \boldsymbol{\tau}_m^{ext} \end{bmatrix} \end{aligned}}$$

報告書

JKA-2017M-138

2017-2018 (159)

2. モデリング

柔軟土台を有するマニピュレータのモデリング

◆ マニピュレータの土台に対する干渉運動量

3. 制御系設計

位置ベースインピーダンス制御

◆ マニピュレータの手先の位置と発揮する力の両方を制御

→ 環境に対して、柔軟な接触が可能

◆ 手先の推定反力を計算

$$\hat{\boldsymbol{F}}_{reac} = (\boldsymbol{J}_b^+)^T \hat{\boldsymbol{T}}_{reac} \quad (12)$$

$$\boxed{\hat{\boldsymbol{T}}_{reac} = \begin{bmatrix} \hat{\tau}_s \\ \hat{\tau}_{reac} \end{bmatrix}}$$

RTOB, LDOB (負荷側外乱オブザーバ) で推定

◆ 仮想インピーダンスマodel

$$\hat{\boldsymbol{F}}_{reac} = \underline{\boldsymbol{M}_{imp}} \ddot{\boldsymbol{x}}_{imp} + \underline{\boldsymbol{D}_{imp}} \dot{\boldsymbol{x}}_{imp} + \underline{\boldsymbol{K}_{imp}} \boldsymbol{x}_{imp} \quad (13)$$

◆ PD制御

$$\ddot{\boldsymbol{x}}^{ref} = \boldsymbol{K}_p (\boldsymbol{x}^{cmd} - \boldsymbol{x}^{res} - \boldsymbol{x}_{imp}) + \boldsymbol{K}_v (\dot{\boldsymbol{x}}^{cmd} - \dot{\boldsymbol{x}}^{res} - \dot{\boldsymbol{x}}_{imp}) - \ddot{\boldsymbol{x}}_{imp} \quad (14)$$

$\hat{\boldsymbol{F}}_{reac}$: 推定反作用トルク	\boldsymbol{D}_{imp} : 仮想粘性	\boldsymbol{x}_{imp} : インピーダンス指令値
$\hat{\boldsymbol{F}}_{reac}$: 推定反力	\boldsymbol{K}_{imp} : 仮想剛性	$\hat{\tau}_s$: 土台推定反作用トルク
\boldsymbol{M}_{imp} : 仮想慣性	\bigcirc^+ : 擬似逆行列	

報告書

JKA-2017M-138



3. 制御系設計

■ 推定反力補正法

- ◆ バネの歪み量で環境との接触の有無を判定する.

- 環境と接触

→ RTOB, LDOBから推定手先反力を計算する.

- 環境と非接触

→ 推定手先反力を0 N に補正する.

◆ 推定反力補正式

$$F_c = \begin{cases} \hat{F}_{reac} & (\text{if } |\theta_b| \geq |\theta_b^{th}|) \\ 0.0 & (\text{if } |\theta_b| < |\theta_b^{th}|) \end{cases} \quad (15)$$

F_c : 補正した推定反力
 θ_b^{th} : 土台歪み閾値

- 土台歪み閾値は、なるべく小さくしたいがバネの振動で発生する歪み量より大きく設計する.

→ 環境との接触の誤判定を防ぐため.

報告書

JKA-2017M-138

3. 制御系設計

■ ダイナミック特異点回避を考慮した振動抑制制御

◆ 振動抑制制御

- 土台の動力学と土台負荷トルクの関係

$$W_b = M_b \ddot{\theta}_b + D_b \dot{\theta}_b + K_b \theta_b = -M_{bm} \ddot{\theta}_m - \dot{M}_{bm} \dot{\theta}_m \quad (16)$$

- 振動抑制を達成する土台反作用トルク

$$W_b = M_b G_b \left(\dot{\theta}_b^{cmd} - \dot{\theta}_b \right) \quad (17)$$

土台速度が0になるようにフィードバック制御

- 式(16)と(17)の関係式

$$M_b G_b \dot{\theta}_b = M_{bm} \ddot{\theta}_m + \dot{M}_{bm} \dot{\theta}_m \quad (18)$$

- 振動抑制のモータ加速度参照値

$$\ddot{\theta}^{ref} = M_{bm}^+ \left(M_b G_b \dot{\theta}_b - \dot{M}_{bm} \dot{\theta}_m \right) \quad (19)$$

報告書

JKA-2017M-138



3. 制御系設計

■ ダイナミック特異点回避を考慮した振動抑制制御

◆ ダイナミック特異点回避の姿勢制御

- 手先加速度と土台負荷トルクの制御式

$$\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ W_m \end{bmatrix} = A \ddot{\theta}_m + \dot{A} \dot{\theta}_m \quad (20)$$

$$A = \begin{bmatrix} J_{aco} \\ M_{bm} \end{bmatrix}$$

→ A⁻¹が得られない時、手先加速度と土台負荷トルクを制御できない.
ダイナミック特異点

- 評価関数

$$V = \sqrt{\det AA^T} \quad (21)$$

行列式Aの絶対値

$$\xi = [\xi_1, \xi_2, \xi_3]$$

$$\xi_l = \frac{\partial V}{\partial \theta_l} \quad (l = 1, 2, 3) \quad (22)$$

→ 評価関数 V を大きくすると、ダイナミック特異点から遠ざかる。

報告書

JKA-2017M-138

3. 制御系設計

■ ダイナミック特異点回避を考慮した振動抑制制御

◆ 全体の制御システムにおける加速度参照値生成

- 環境と非接触時 (if $|\theta_b| < |\theta_b^{th}|$)

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}^{ref} &= J_{aco}^+ \left(\ddot{x}^{ref} - J_{aco} \dot{\theta}_m \right) \text{ 位置制御} \\ &+ (E - J_{aco}^+ J_{aco}) M_{bm}^+ \left(M_b G_b \dot{\theta}_b - \dot{M}_{bm} \dot{\theta}_m \right) \text{ 振動抑制制御} \\ &+ (E - J_{aco}^+ J_{aco}) (E - M_{bm}^+ M_{bm}) (k\xi - G_m \dot{\theta}_m) \end{aligned} \quad (23)$$

姿勢制御

- 環境と接触時 (if $|\theta_b| \geq |\theta_b^{th}|$)

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}^{ref} &= J_{aco}^+ \left(\ddot{x}^{ref} - J_{aco} \dot{\theta}_m \right) + (E - J_{aco}^+ J_{aco}) (k\xi - G_m \dot{\theta}_m) \quad (24) \\ &\text{インピーダンス制御} \quad \text{姿勢制御} \end{aligned}$$

θ_b^{th}	: 歪み閾値	k	: 姿勢ゲイン
G_m	: ダンピングゲイン	E	: 単位行列

報告書

JKA-2017M-138

3. 制御系設計

■ 全体の制御システム

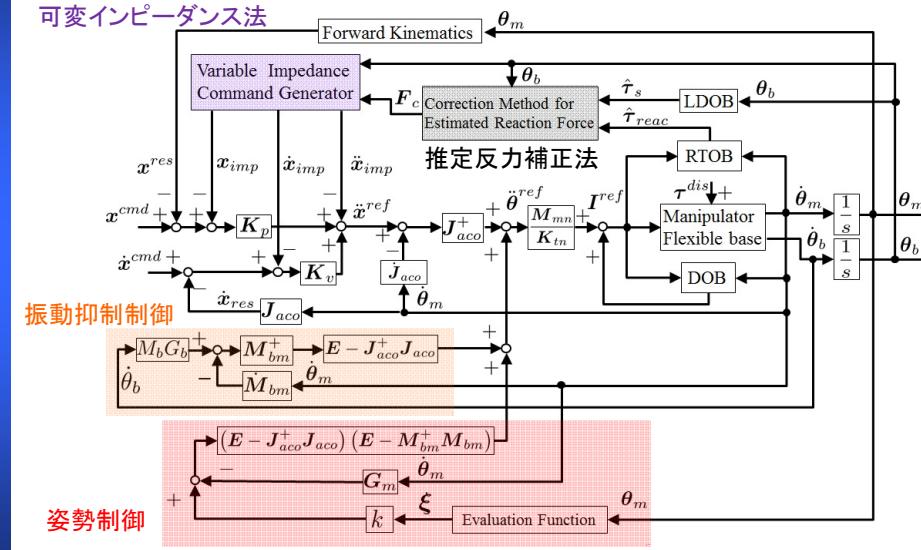


Fig.9: 非接触時の全体の制御システム

報告書

JKA-2017M-138

3. 制御系設計

■ 全体の制御システム

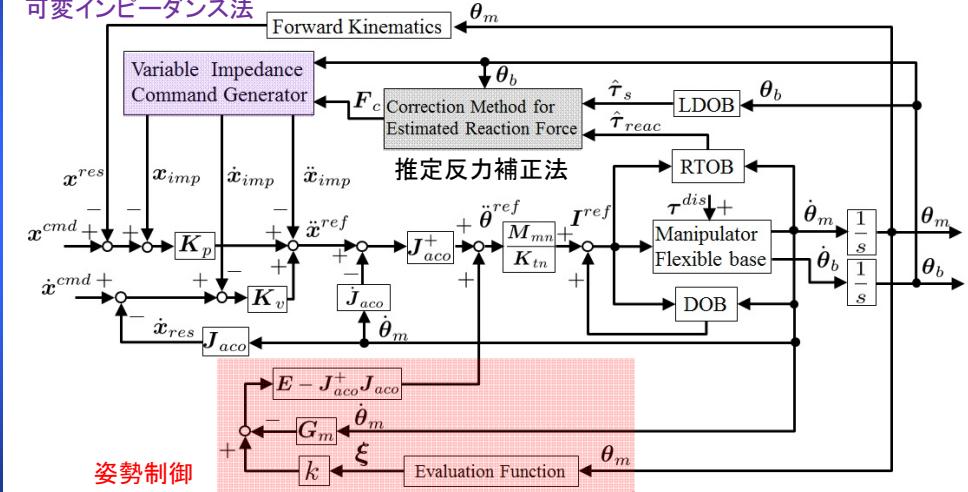


Fig.10: 接触時の全体の制御システム

報告書

JKA-2017M-138

4. 実験

■ 実験1: 柔軟土台の評価

◆ 実験内容

- 位置ベースインピーダンス制御でアルミプレートに衝突させる。
- 手先反力は力センサで取得
- 柔軟土台の有無で比較

◆ 実験結果

- 柔軟土台でハンチング現象を抑制

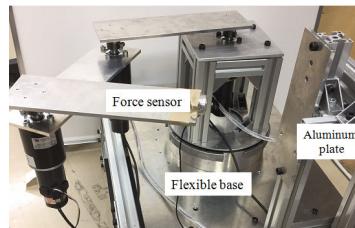


Fig.4'(再掲): 柔軟土台を有する3リンクマニピュレータ

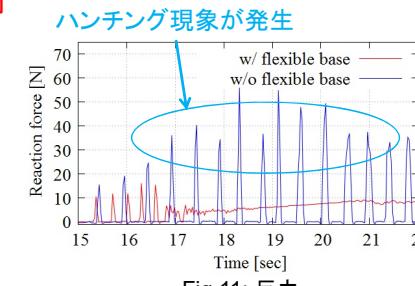


Fig.11: 反応力

JKA-2017M-138

4. 実験

■ 実験2: 推定反力補正法の評価

◆ 実験内容

- センサレス位置ベースインピーダンス制御
- 20.5 sec から 23.0 sec まで外力を印加
- 推定反力補正法の有無で比較

◆ 実験結果

- 非接触時で位置偏差の収束を確認

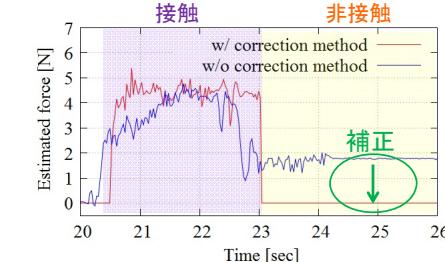


Fig.12: 推定手先反応力

報告書

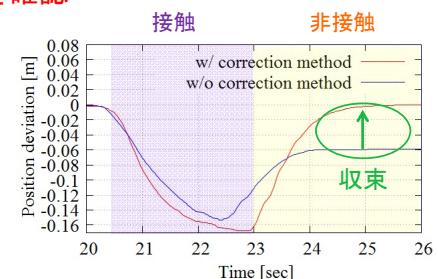


Fig.13: 位置偏差

JKA-2017M-138

4. 実験

実験3: ダイナミック特異点回避を考慮した振動抑制制御の評価

◆ 実験内容

- インピーダンスと振動抑制の統合制御
- 20.0, 30.0, 40.0 secで撃力を印加
- ダイナミック特異点回避の姿勢制御の有無で比較

◆ 実験結果

- 振動抑制性能を向上、評価関数を高く保持

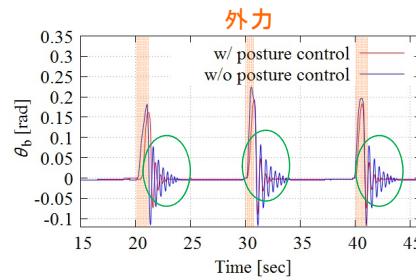


Fig.14:柔軟土台の歪み量

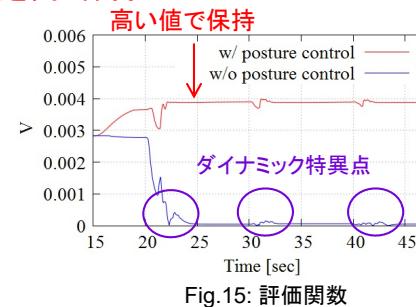


Fig.15: 評価関数

報告書

JKA-2017M-138

5. 結論

■ 考察

- ◆ 実験1: 柔軟土台による**撃力緩和**
- ◆ 実験2: 推定反力補正法による**位置追従性向上**
- ◆ 実験3: ダイナミック特異点回避の姿勢制御による**振動抑制性能の保持**

■ 結果

- ◆ 撃力緩和と容易な剛性の可変設計を実現するロボット及びその制御手法を構築し、実機実験によりその有効性を確認

■ 今後の課題

- ◆ 環境との接触時における推定反力の補正
- ◆ 柔軟土台を有するマニピュレータの手先インピーダンスの設計

報告書

JKA-2017M-138

学会等への発表

1. Y. Nakamura, T. Nozaki and T. Murakami, "Automated Deceleration System Considering Driving Resistance Based on Pedestrian's Forecast Position, IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, V3-1, 2018. (JKA謝辞あり)
2. 小笠原啓太, 村上俊之, “カルマンフィルタを用いたIMUによる歩行動作解析”, II-67, 平成29年電気学会産業応用部門大会, 2018.
3. H. Kimura, R. Mori and T. Murakami, "Analysis and Evaluation of Fall Prevention Assist Related with the Angle of Trunk", IEEE IECON2017, pp8255-8260, 2017.
4. K. Kamiyama and T. Murakami, "An Approach to Energy Harvesting Considering Passive Action during Walking", IEEE 12th France-Japan Congress on Mecatronics, pp271-276, 2018
5. K. Sekiya and T. Murakami, "Motion Control Considering Fusion of Mechanical and Virtual Impedance in Mobile Robot Systems", IEEE 12th France-Japan Congress on Mecatronics, pp361-366, 2018 (2018年9月発表済)
6. T. Ishikawa and T. Murakami, "Real-Time Foot Clearance and Environment Estimation based on Foot-Mounted Wearable Sensors", IEEE IECON2018, pp3304-3309, 2018. (JKA謝辞あり)
7. Y. Tawaki and T. Murakami, "Verification of the Knee Exoskeleton Controller using Novel Gait Phase Detection Method", IEEE IECON2018, pp5475-5480. (JKA謝辞あり)
8. K. Fukutoku, T. Nozaki and T. Murakami, "Measurement Method of Joint Moments for Limbs During Walking with Wearable Sensors", IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control and Optimization, pp1-2, 2019
9. T. Okano, K. Ohnishi and T. Murakami, "Variable Slave Force Gain for Oblique Coordinate Control Under the Presence of Time-delay", IEEE International Conference on Mechatronics, pp249-254, 2019
10. W. Lyu and T. Murakami, "Bilateral Control between Manipulators with Different Structure Considering Fluctuation of Equivalent Mass Matrix", IEEE International Conference on Mechatronics, pp370-375, 2019
11. X. Sun, T. Nozaki, T. Murakami and K. Ohnishi, "Multiple Motion Combined Grasping Point Estimation Method Based on Saved Motions and Depth Data in Motion Reproduction System", IEEE International Conference on Mechatronics, pp471-476, 2019

事業内容についての問い合わせ先
慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科 村上俊之研究室
〒223-8522
横浜市港北区日吉3-14-1
教授 村上俊之
E-mail: mura@sd.keio.ac.jp
URL: www.fha.sd.keio.ac.jp