

準静的な力制約を考慮する CBiRRT を用いた 双腕ロボットによる箱の持ち上げ作業の実現

羽鳥裕樹 加藤龍一 佐藤大祐 金宮好和 (東京都市大学)

1. 緒言

近年, マニピュレータの手先位置姿勢に関する制約を含めた経路計画法が実現され [1], Srinivasa, Kuffner により提案された Constrained Bi-directional Rapidly-exploring Random Tree (CBiRRT) [2][3] では, 環境内の拘束座標系により設定される拘束多様体を基に, 単腕マニピュレータ, ヒューマノイドロボットによる拘束を伴う作業動作が多数実現されている.

本研究では, この CBiRRT を拡張利用し, 複数のエフェクタ・環境・対象物間に対して同時に位置・姿勢の制約を実現し, 双腕ロボットにより完全に対象物を把持・操作するだけでなく, 対象物を操りながら物体搬送が可能な動作を生成する. また, 準静的条件下での対象物を基準とした力・モーメントの拘束条件を算出し, 作業中にロボット手先へ加わる力の制約条件として付加することで, 手先・環境・対象物に加わる内力・外力を考慮した動作生成を目標とする.

本稿では, この力制約を考慮した経路および動作生成手法の基本部分を構築するため, 双腕ロボットによって机上に置かれた箱を持ち上げる動作を例にとり, 準静的条件下での手先と対象物間の力・モーメントのつりあい状態から力の制約条件を導出し, CBiRRT を利用した経路計画から箱の持ち上げ動作を生成する. 生成された動作データを実験機に適用し, 実際の作業動作実験の結果から本手法の有効性や課題点を検証する.

2. CBiRRT を用いた経路計画

CBiRRT は, RRT をロボットの経路計画へ適用するために提案された手法である. RRT は LaValle によって提案された高速な経路計画アルゴリズム [4] であり, 初期状態および終了状態を設定し, コンフィギュレーション空間においてロボットの運動を考えることから, 多次元空間においても高速な経路計画を実現する.

2.1 手先位置・姿勢に関する制約

CBiRRT では, 拘束多様体を用いてロボット手先の位置・姿勢を制御する. 我々は, 双腕ロボットの協調動作を生成するため, 片腕に拘束座標系を設定し, もう一方の手先座標系をその座標系に拘束することで, 複数のエフェクタに対応できるようアルゴリズムを拡張した. 双腕ロボットの作業動作はマスタスレーブ形式で扱い, 拘束座標系はマスタ側の手先, もしくは手先に把持した物体に設定される. 以下ではロボット手先・対象物・環境間の位置・姿勢制約を定義する.

座標系 a から座標系 b への同次変換行列を a_bH とする. a_bH は 3×3 の回転行列 a_bR および 3×1 の並進ベクトル ${}^a_b d$ を持つ. 基準座標系から手先座標系への同次変換行列を 0_wH , 拘束座標系への同次変換行列を 0_cH

とする. ただし, 0_cH は作業に応じて任意に設定する. 位置・姿勢の制約条件はこれら二つの座標系間の差として定義され, その最大値および最小値を $c_{i\max}$, $c_{i\min}$ とすると, 制約条件 C は次式で表される.

$$C = \begin{bmatrix} c_{x\min} & c_{y\min} & c_{z\min} & c_{\psi\min} & c_{\theta\min} & c_{\phi\min} \\ c_{x\max} & c_{y\max} & c_{z\max} & c_{\psi\max} & c_{\theta\max} & c_{\phi\max} \end{bmatrix}^T$$

ここで, i は位置 x, y, z と姿勢角 ϕ, θ, ψ を表し, 上 3 行が位置, 下 3 行が姿勢角の最大値・最小値を示す. 姿勢角には Z-Y-X Euler 角を用いた. この表現方法は制約が直感的に分かること, 拘束座標系からの距離を短時間で計算できることなどが大きな利点である.

また, 拘束座標系から手先座標系までの変位 Δx は, 変位ベクトル ${}^c d$ と c_wH より

$$\Delta x_i = \begin{cases} c_{d_i} - c_{i\max} & (c_{d_i} > c_{i\max}) \\ c_{d_i} - c_{i\min} & (c_{d_i} < c_{i\min}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

と表されるため, その距離は $\|\Delta x\|$ となる. この距離が拘束座標系からの位置・姿勢の誤差許容値 ϵ 以下であれば, 手先座標系は位置・姿勢の制約条件を満たす. もし制約条件を満たさない場合は, この距離をヤコビの擬似逆行列 (冗長性を有する場合) により, 角度誤差としてコンフィギュレーション空間に射影し, RRT で求められた関節角度値を位置・姿勢の制約条件を満たすように修正し, 演算処理を続ける.

2.2 手先に加わる力に関する制約

本節では, 前述してきた複数のエフェクタ・環境・対象物間に対し同時に位置・姿勢の制約を実現する経路計画方法に, 準静的条件下での対象物を基準とした力・モーメントの拘束条件を算出し, 作業中にロボット手先へ加わる力の制約条件を追加することについて述べる. 作業において, ロボット手先に加わる力は非常に重要な要素であり, 特に, 単腕の可搬重量を超える重量物を扱うなど, 双腕の利点を活かすためには欠かせない. 本稿では, 以下に示す仮定条件下において, ロボットの両手先・環境・対象物間における力のつりあいを考慮した力制約を導入する [5].

1. 対象物の運動は準静的動作 (静的つりあい状態の連続動作) とし, 系のダイナミクスを考慮しない.
2. 対象物は剛体と近似し, その形状, 重心, 質量は既知とする.
3. 手先・環境・対象物との接触状態は既知であり, 摩擦および把持時のすべりは微小とする.

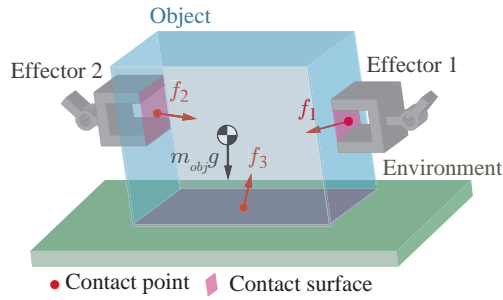


図1 複数のエフェクタと環境による物体支持の概念図

対象物を把持、搬送する際は、図1のように複数のエフェクタと環境に対象物が支えられる状態を考慮しなければならない。点接触により対象物を支持する場合の力・モーメントのつりあいは、

$$\sum_{j=1}^n \mathbf{f}_j + m_{obj}\mathbf{g} = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n \mathbf{f}_j^T \mathbf{p}_j + m_{obj}\mathbf{g}^T \mathbf{p}_g = 0 \quad (2)$$

と表せる。ここで、 \mathbf{f}_j は各接触点における力、 m_{obj} は対象物の質量、 \mathbf{g} は重力加速度、 \mathbf{p}_j は接触点までの位置ベクトル、 \mathbf{p}_g は重心までの位置ベクトルである。ただし、接触点数や条件により不良設定問題となること、また接触状態は点接触だけではないことから、実際は適切な関係式を付加し、解を求めなければならない。

各接触点における許容力 FC は次式で定義され、すべての接触力の値が同時に許容範囲内にあることが力制約条件となる。

$$\mathbf{FC} = \begin{bmatrix} f_{c1_{min}} & f_{c2_{min}} & \cdots & f_{cn_{min}} \\ f_{c1_{max}} & f_{c2_{max}} & \cdots & f_{cn_{max}} \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

このようにロボットの性能や環境条件などから見積もられる力制約条件を経路計画に付加することで、力制約を考慮した動作を生成する。

2.3 本研究で利用するアルゴリズム

本手法で利用するアルゴリズムを Algorithm 1 に示す。CBiRRT を拡張したものであり、エフェクタ拘束を扱うまでは同様である。その後、CBiRRT ではコンフィギュレーション空間において、初期および終了状態から探索木を伸ばす双方向探索を行う。各サンプリングに対し制約が満たされる間は枝を伸ばし続け、各状態における位置・姿勢の拘束を扱う。我々は、2.1 で述べたように、双腕ロボットの協調動作を生成するため、複数のエフェクタに対応可能なようにアルゴリズムを拡張した。Algorithm 1 に示す MultiConstraintConfig が各繰り返しにおいて拘束条件を満たす状態を考慮し、経路を生成する。また、MultiConstraintConfig は CheckForceConstraint を用いて力制約条件を判定し、必要に応じて制御可能なエフェクタを移動する。

本手法では、CBiRRT とは異なり以前のノード状態により、エフェクタを動かす順番とその拘束条件が変わる可能性がある。SelectManipulatedEffector はあらか

Algorithm 1 : MultiConstraintConfig(n_s^{old}, n_s)

```

1:  $n_s.forceState \leftarrow \text{CheckForceConstraint}(\text{ALL},$ 
    $n_s.q, m_{obj}, \mathbf{FC})$ 
2: while ManipulatableEffectorRemaining() do
3:    $ee \leftarrow \text{SelectManipulatedEffector}();$ 
4:    $\{C, {}^a_b\mathbf{H}, eeCoord\}$ 
    $\leftarrow \text{GetConstraintFrame}(ee, n_s);$ 
5:    $n_s.q \leftarrow \text{ProjectConfig}(n_s^{old}.q, n_s.q, C, {}^a_b\mathbf{H},$ 
    $eeCoord)$ 
6:   if not ( $n_s.q \neq \text{NULL}$  and
    $\text{CheckOtherConstraint}(ee, nn)$ ) then
7:     return NULL
8:   end if
9:    $n_s.forceState$ 
    $\leftarrow \text{CheckForceConstraint}(ee, n_s.q, m_{obj}, \mathbf{FC})$ 
10: end while
11: if  $n_s.forceState$  then
12:   return  $n_s.q$ 
13: else
14:   return NULL
15: end if

```

じめ決められた優先順位に基づき、過去の状態を判断し動かすエフェクタを決定する。この際、動かす順番は変化してもすべてのエフェクタの拘束条件は満たすようにする。GetConstraintFrame は過去および現在の対象物の状態より、動かすエフェクタの拘束される座標、その拘束条件、さらにエフェクタに存在する座標系から動かす座標系を選択して返す。エフェクタが ProjectConfig によって動かされた後は、CheckOtherConstraint で関節変数の限界値などの基本拘束条件が確認され、制約条件が満たされない場合は関数が終了し、その状態は選択されない。このように MultiConstraintConfig は制御可能なエフェクタが存在する限り続き、すべてのエフェクタが拘束条件を満たす場合に新しい状態を返す。

3. 双腕を用いた箱の持ち上げ動作実験

拡張した CBiRRT アルゴリズムを用い、双腕による机上に置かれた箱の持ち上げ動作を生成する。また、生成された動作データを実験機に適用し、実際の作業動作実験の結果から本手法の有用性や課題点を検証する。

3.1 実験条件

我々は三菱重工業株式会社製 7 自由度アーム PA-10 を双腕ロボットに用いる。各アーム先端には、ニッタ株式会社製の 6 軸力覚センサ IFS-67M25A 50-I 40 を備え、さらにシュンク・ジャパン株式会社製ミューグリッパ RH707 および、我々が設計製作した 9 自由度 3 指のロボットハンドを備えている。本ハンドは高剛性の板であるアタッチメントを取り付け可能であり、重量物の把持に用いる。本実験ではアタッチメントを右腕のエフェクタとして扱う。

図2に双腕ロボットシステムの座標系を示す。 Σ_0 は

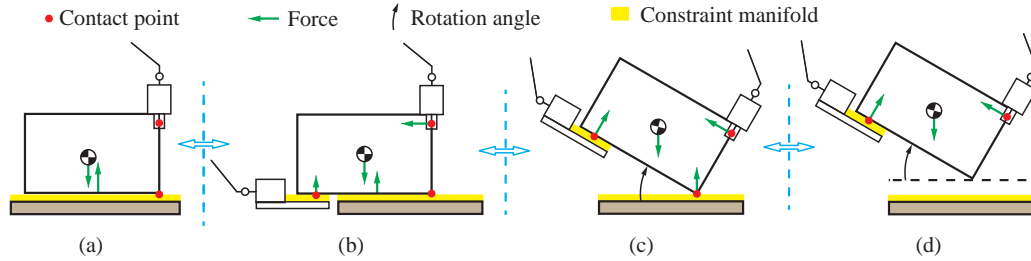


図3 対象物の把持状態の遷移図：(a) Phase I 対象物を左腕により把持 (b) Phase II 左腕により把持した状態で机上を搬送，対象物と右腕が接触 (c) Phase III 双腕と机上による把持 (d) Phase IV 双腕による把持

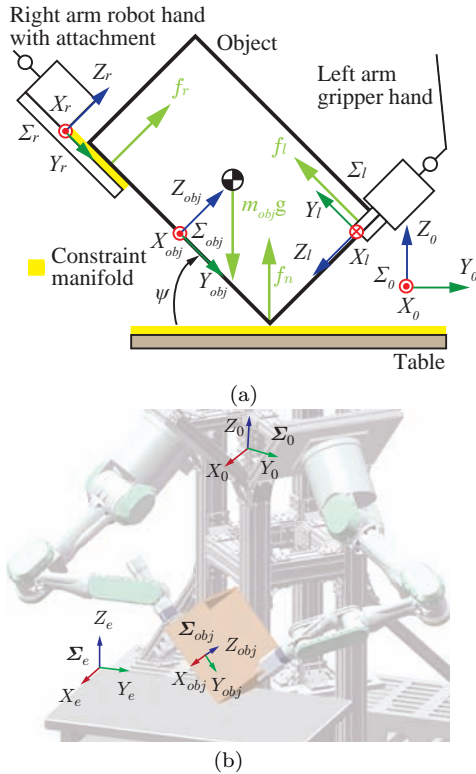


図2 対処物を把持した双腕ロボットの座標系：(a) Y_{obj} - Z_{obj} 座標平面 (b) 全体図

基準座標系， $\Sigma_{l,r}$ は各腕の手先座標系， Σ_e は環境座標系， Σ_{obj} は対象物座標系である．本実験では図2に示す，上部を開けた直方体の箱を対象物とする．そして，左腕に取り付けられたグリッパで対象物の縁を把持することで，把持点のすべりを無視し，相対誤差は無いと仮定する．

また，本実験では双腕による対象物体の把持を検証するため，各エンドエフェクタの可搬重量を超えた対象物の把持を行う．そのため，対象物の転がし操作の戦略を参考し，位置・姿勢制約の領域を図2(a)に示す拘束多様体を設定した[5][6]．

対象物の把持状態の遷移を図3に示す．本実験では図3(a)を初期状態，図3(d)を終了状態($Z_e = 0.2$ mの位置，基準座標系からみた $\psi_e = 45$ deg)として設定する．ただし，今回設定した初期から終了状態までの経路生成を数回行った結果から，経路生成時間の短縮と制約の有用性確認のため，経路の中間点となる状態

を設定し，その状態を経由させた．中間状態は図3(b)と(c)を設定し，図3(a)と(b)，(b)と(c)，(c)と(d)が経路としてつながるように，各状態をそれぞれ初期状態と終了状態として複数設定し，経路生成を行った．

3.1.1 位置・姿勢制約

作業を実現するために各エフェクタ・対象物・環境間の位置・姿勢制約を設定する．以下に制約内容を示す．

$${}^e_{obj}C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -2\pi & 0 & -2\pi \\ \text{length}_{\text{table}} & \text{width}_{\text{table}} & 0 & 2\pi & 0 & 2\pi \end{bmatrix}^T$$

$${}^r_{obj}C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\pi \\ \text{length}_r & \text{width}_r & 0 & 0 & 0 & 2\pi \end{bmatrix}^T$$

$${}^0_{obj}C = \begin{bmatrix} -\infty & -\infty & -\infty & -2\pi & 0 & -2\pi \\ \infty & \infty & \infty & 2\pi & 0 & 2\pi \end{bmatrix}^T$$

${}^e_{obj}C$ では，環境となる机上で対象物が Y_{obj} 回りに回転しないように設定した．これはグリッパ把持点で相対誤差が生じ，回転するのを防ぐためである． ${}^r_{obj}C$ では，アタッチメントにより対象物の底面を面で支えるように設定した．これは内モーメントの発生を防ぐためである． ${}^0_{obj}C$ では，対象物が環境からの制約範囲から離れた際に， Y_{obj} 回りに回転しないように設定した．これは ${}^e_{obj}C$ と同様に，グリッパ把持点で相対誤差が生じないようにするためである．上記の制約条件は図3の状態により，適応される制約が切り替わるように設定している．具体的には，対象物が机上に接触している際は ${}^e_{obj}C$ で制約を行い，接触していない際は ${}^0_{obj}C$ で制約を行っている．また， ϵ は経験則から位置 1 mm，姿勢 0.5 deg と設定した．

3.1.2 力制約

図2(a)のモデルと式(1)(2)より力のつりあいは，

$$\mathbf{f}_l + \mathbf{f}_r + \mathbf{f}_n + m_{obj}\mathbf{g} = \mathbf{0} \quad (4)$$

$$\mathbf{f}_l^T \mathbf{p}_l + \mathbf{f}_r^T \mathbf{p}_r + \mathbf{f}_n^T \mathbf{p}_n + m_{obj}\mathbf{g}^T \mathbf{p}_g = 0 \quad (5)$$

となる．ただし，添字の l は左腕， r は右腕， n は環境を示している．また，図3(d)では環境からの力が0となる．以上の式から算出し，設定した力制約と比較し，把持可能な状態が判断する．

本実験では各手先の可搬重量を超えないように力制約を設定する．対象物の質量は 3.0 kg (29.4 N) とし，許容力はグリッパ先端の可搬重量 3.47 kg (34.0 N)，ア

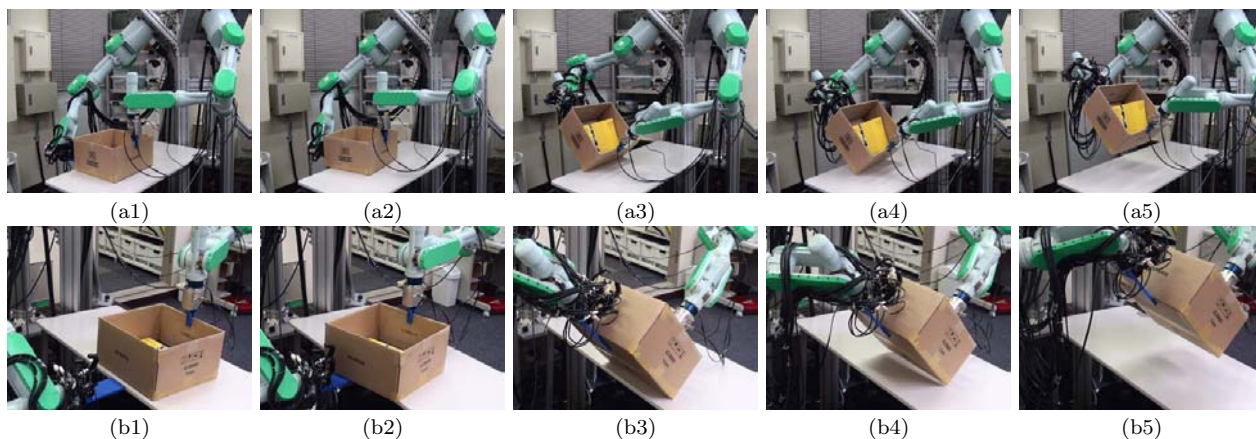


図4 対象物搬送動作の実機実験 (a1)-(a5) 全体図, (b1)-(b5) 遷移部の拡大図

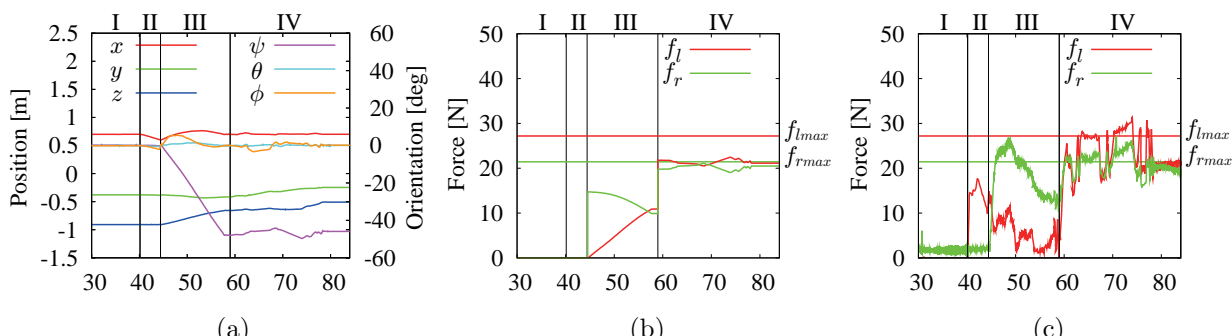


図5 実験結果: (a) 基準座系からみた対象物座標系の位置・姿勢 (b) 両手先に加わる力の目標値 (c) 両手先に加わる力の実測値

タッチメントの可搬重量 2.74 kg (26.8 N) の 80 % を設定した。したがって、それぞれ $|f_{cl*}| = 27.2 \text{ N}$, $|f_{cr*}| = 21.4 \text{ N}$ とした。本実験では双腕による対象物体の把持を狙っているため、単腕では持ち上げることのできない質量の対象物を設定している。

3.2 実験結果

実験機による対象物把持実験の様子を図4, 基準座系からみた対象物座標系の位置と姿勢を図5 (a), 各手先に加わる力の目標値を図5 (b), 力覚センサより得られた各手先に加わる力の実測値を図5 (c) に示す。ただし、図中の水平線は各手先に与えた力制約の値を示している。また、各図の上部数値は図3の Phase を示す。

図4, 図5 (a) より、位置・姿勢の制約範囲の中で動作し、目標位置・姿勢まで搬送していることがわかる。また、図5 (b) では、Phase II から III, III から IV に遷移する際に、力の目標値が急激に変化していることがわかる。これは把持状態が変化し、接触点の個数が変化していることから生じている。このグラフより、手先に加わる力の目標値が各手先の力制約の値を超えることなく、経路生成ができていていることがわかる。

しかし、図5 (c) より手先に加わる力の実測値が各手先の力制約の値を超えていることがわかる。ただし、経路の最終的な位置・姿勢である 80 s 付近では目的値と同じ値が発生している。このことから、動作時にモデル誤差の影響により、対象物と両手先間で予期できない内力・内モーメントが発生したと考えられる。また、Phase I から II への遷移では左手先の目標値が 0 に

対して、実測値では 15 N 程度の力が生じていることがわかる。これは、対象物を机上面で滑らせて搬送していることから生じており、今回の仮定条件では摩擦を考慮せずに行ったためである。

4. 結言

本稿では、双腕ロボットによって机上に置かれた箱を持ち上げる動作実験を行った。実験結果より、力制約を超えない経路は生成されたが、実験の際にはモデル誤差より設定した力制約を超えた力が検出された。

参考文献

- [1] M. Stilman, "Global manipulation planning in robot joint space with task constraints," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 3, pp. 576–584, June, 2010.
- [2] D. Berenson, S. Srinivasa, D. Ferguson, J. J. Kuffner, "Manipulation planning on constraint manifolds," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Kobe, Japan, May, 2009, pp. 625–632.
- [3] D. Berenson, S. Srinivasa, J. Kuffner, "Task space regions a framework for pose-constrained manipulation planning," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 00, no. 000, March, 2011, pp. 1–26.
- [4] S. M. LaValle and J. J. Kuffner, "Rapidly exploring random trees: progress and prospects," in *Proc. WAFR*, pp. 293–308, 2000.
- [5] 沢崎, 井上: "多指ハンドによる物体の転がし操作", 日本ロボット学会誌, vol. 9, no. 5, pp. 560–571, 1991.
- [6] 相山, 稲葉, 井上: "グラスプレス・マニピュレーションの研究: 操作形態の分類とピボット操作の実現", 日本ロボット学会誌, vol. 14, no. 1, pp. 114–121, 1996.