

内部スティフネスを用いた包み込み把握の安定化

Stabilization of enveloping grasp using internal stiffness

仲村瞭* , 三村宣治*

Ryo Nakamura* , Nobuharu Mimura*

*新潟大学大学院 自然科学研究科

*Graduate School of Science and Technology, Niigata University

キーワード： ロボットハンド (robot hand), 包み込み把握 (enveloping grasp),
内部スティフネス (internal stiffness),

連絡先： 〒 950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050 番地
新潟大学大学院 自然科学研究科 電気情報工学専攻 三村研究室
三村宣治, Tel.:(025)262-7476, E-mail: mimura@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

現在, 双腕で多指ハンドを備えたロボットの研究・開発が広く行われている. 従来の産業用ロボットなどに比べ, 高い自由度を持っているため, 製品の組み立てや搬送など様々な場面での活躍が期待されている. こういった作業の中で, 対象物を掴んで移動させる場合には, より強固に対象物を把握することが求められている. 物体を把握する際に, ハンド指先だけでなく各リンクも接触させることで, より強固に物体を把握でき, このような把握を包み込み把握と呼ぶ.

これまで, 包み込み把握の研究は, 把握のロバスト性に注目したパワーグラスプを中心に行われてきた. 中村ら¹⁾はパワーグラスプのロバスト性を評価するため, 物体に仮想的な運動方向を与え, 接触点での滑り速度とその際の限界外力から仮想仕事率を計算することを提案した. 全ての運動方向について仮想仕事率が正であれば, 把握を破り物体を動かすためにある限界外

力が必要となり, それ以下の外力に対しては把握を維持できる. また, 張ら²⁾は, 限界外力を求める際に摩擦円錐を凸錐で近似し, 物体の全ての運動方向について計算せずに, 限界外力空間を求めることを提案した.

これらの研究では, 各接触点で摩擦制約条件が満たされることを前提にしており, 接触点で滑りが発生することは考慮されていない. しかし, 接触力・接触位置に誤差がある場合, 限界外力よりも小さい外力で滑りが発生し, 把握が崩れる可能性がある. そこで本研究では, 滑りの発生を考慮し, 滑りが生じた際に把握を安定化させる手法を検討する. 滑りを抑制するため内部スティフネスを導入し, 内部スティフネスによって滑りを抑制する方向へ力を発生できることを明らかにする. そして, シミュレーションを行い, 一定の条件下において, 内部スティフネスの効果により限界外力が広がることを確認する.

2. 基礎式

2.1 把握モデル

対象とする問題を簡単化するため，以下の仮定が満たされている場合を考える．

- 1) 3リンクで2次元物体を把握し，各リンクに1つの接触点がある．
- 2) 対象物は剛体とし，接触点でリンクと摩擦あり点接触をする．
- 3) 全ての接触点は1直線上に並ばない．
- 4) 接触点で微小な滑りを許す．

ハンドと対象物に加わる力の関係を図1に示す．

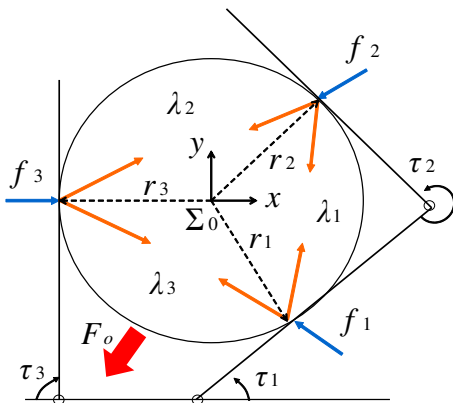


Fig. 1 接触力と外力の関係

対象物の重心に物体座標系 Σ_0 を設置し， Σ_0 に加わる外力 $F_o = [F_x \ F_y \ F_w]^T$ と接触力 $f = [f_1^T \ f_2^T \ f_3^T]^T$ が釣り合い状態にある場合，以下の式が成り立つ．

$$F_o = Wf \quad (1)$$

ここで， W は把握行列である．

式(1)を接触力について解くと，

$$f = W^+ F_o + N\lambda \quad (2)$$

ここで，

$$\lambda = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3]^T \quad (3)$$

$$N = \begin{bmatrix} e_1 & 0 & -e_3 \\ -e_1 & e_2 & 0 \\ 0 & -e_2 & e_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$e_i = \frac{r_{i+1} - r_i}{\|r_{i+1} - r_i\|}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

W^+ は W の疑似逆行列， λ は接触点間の内力， N は W の零空間を表す行列， r_i は Σ_0 から各接触点へのベクトル， e_i は内力方向を表すベクトルであり， $i > 3$ の場合に $i = 1$ とする．

2.2 内部スティフネス

Salisbury ら³⁾ は，ハンド先端に設定したスティフネスと物体のスティフネスを関連づけ，その中で内部スティフネスを導入している．スティフネスを設定した場合，外力変化 ΔF_o ，内力変化 $\Delta \lambda$ と，物体変位 ΔX ，接触点間変位 $\Delta \eta$ には以下の関係が成り立つ．

$$\Delta F_o = K \Delta X \quad (6)$$

$$\Delta \lambda = k \Delta \eta \quad (7)$$

ここで， K は外部スティフネス， k は内部スティフネスである．外部スティフネスは物体変位に対して力を発生するが，内部スティフネスは接触点間の変位に対して力を発生する．内部スティフネスを設定することで，滑りが生じた際，接触点間の変位に応じて力を発生でき，一定の条件下では滑りを抑制できると考える．

3. 限界外力計算

3.1 スティフネス無しの場合

接触点において，接触力ベクトルが摩擦円錐内に存在すれば滑りは発生しない．図2に摩擦円錐と接触力の関係を示す．

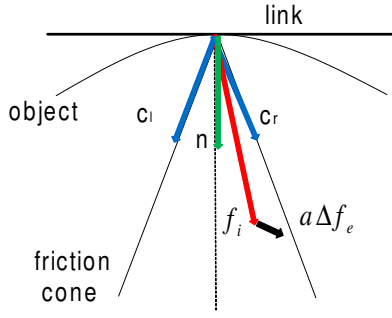


Fig. 2 接触点での摩擦円錐

接触点の内向き単位法線ベクトルを n_i , 静摩擦係数を μ_i とすると, 摩擦境界ベクトル c_{li}, c_{ri} は

$$c_{li} = n_i - \mu_i \text{rot}90(n_i) \quad (8)$$

$$c_{ri} = n_i + \mu_i \text{rot}90(n_i) \quad (9)$$

ここで, $\text{rot}90(x)$ は x を反時計回りに 90° 回転させるベクトルである. 接触力ベクトルがどちらか一方の摩擦境界ベクトルと交差した際, 滑りが生じる.

外力変化 $\Delta F_0 = a e_F$ が起きた場合を考える. ここで, $a > 0, \|e_F\| = 1$. 接触力変化 Δf_e は

$$\Delta f_e = a W^+ e_F \quad (10)$$

となる. この際, 接触力ベクトル $f_i + \Delta f_{ei}$ が摩擦境界ベクトルと交差しなければ, 滑りは発生しない. よって, 接触力ベクトルと摩擦境界ベクトルの関係から

$$\text{sgn}\{\Delta f_{ei}^T (\text{rot}90 f_i)\} (f_i + a \Delta f_{ei})^T (\text{rot}90 c_i) \leq 0 \quad (11)$$

ここで, c_i は交差する可能性のある摩擦境界ベクトルである. 式 (11) から各接触点で滑りが生じない外力変化の大きさは

$$a_i = -\frac{f_i^T (\text{rot}90 c_i)}{\Delta f_{ei}^T (\text{rot}90 c_i)} \quad (12)$$

となる. 最終的に, 物体に加わる外力変化の大きさが, $\min(a_1, a_2, a_3)$ より小さければ, 各接触点で滑りは生じない.

3.2 内部スティフネスを設定した場合

外力変化によって, 1つの接触点で滑りが発生したとする. この際, 内部スティフネスにより内力変化が発生する. 図3に接触力変化を示す. 接触力変化は $f_i + a \Delta f_{ei} + \Delta \lambda_i$ となる. 外力

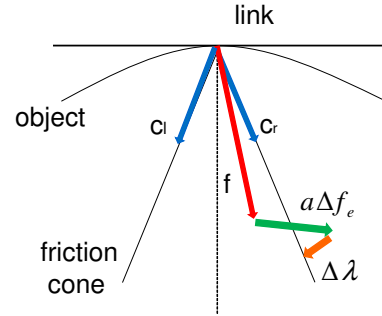


Fig. 3 内力による接触力変化

変化により接触力変化ベクトルが摩擦境界を越え, これにより滑りが発生, 内力変化 $\Delta \lambda_i$ が起こる. この変化ベクトルが摩擦円錐内部に存在すれば, 滑りを抑制し把握を安定化できる. ここで, 1番目の接触点で滑りが発生したと仮定する. 滑り方向ベクトルを n_{s1} , 滑り量を $s_1 \geq 0$ とすると内力変化は

$$\Delta \lambda_1 = s_1 \{k_1 (e_1^T n_{s1}) e_1 - k_3 (e_3^T n_{s1}) e_3\} \quad (13)$$

となる. 内部スティフネス k_1, k_3 を設計することで, 接触力変化ベクトルを摩擦円錐内部に移動できる. この際, 他の接触点で摩擦制約が満たされていれば, 1番目の接触点において, ある有限の量だけ滑りが発生し, その後把握を再び安定化できる.

4. シミュレーション

4.1 初期条件

2次元の半径1の円に対し限界外力を計算し, 内部スティフネスの効果を検証する. 図4にシミュレーションで用いる把握形態を示す. 初期

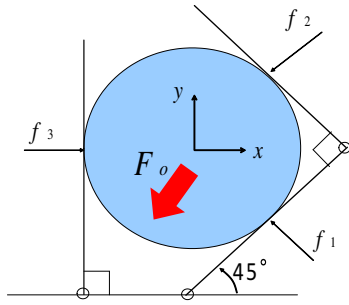


Fig. 4 ロボットハンド把握形態

外力はゼロとし，各接触点での静摩擦係数は0.3とする．接触力 $f = [f_1^T \ f_2^T \ f_3^T]^T$ は

$$f_1 = \begin{bmatrix} -1/2 \\ 1/2 \end{bmatrix}, f_2 = \begin{bmatrix} -1/2 \\ -1/2 \end{bmatrix}, f_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

とし，把握行列は

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

である．ここで，評価の簡単化のため，外力は並進成分のみを持つとし， $F_0 = [F_x \ F_y \ 0]^T$ を次式で正規化する

$$F_x = \cos \theta, F_y = \sin \theta \quad (16)$$

このとき， θ を $0 \leq \theta < 2\pi$ の範囲で $\pi/180$ ずつ変化させ，対応する限界外力を計算する．内部スティフネスを設定しない場合，関節トルクは一定とし，静摩擦力によって外力変化に耐えることができる領域を求める．

4.2 シミュレーション結果

内部スティフネス無しの限界外力領域を図5に，内部スティフネスを設定した場合の限界外力領域を図6に示す．ここでは，関節が発生できるトルクの範囲を考慮せずにシミュレーションを行った．

図5では，外力変化が多角形の内側の領域に存在すれば，滑りが生じず把握が安定となる．

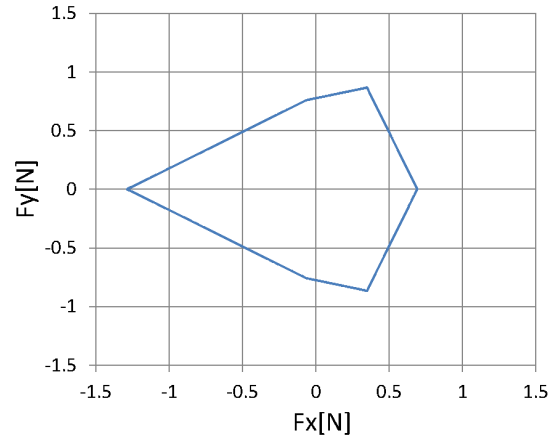


Fig. 5 限界外力領域 (内部スティフネスなし)

$f_{1,2}$ と比べ f_3 のノルムが大きいため，このような形となっている．図6では，外力変化が多角形の内側に加え，内部スティフネスによって生じる色付けした領域内に存在しても，把握が安定となる．外力変化により接触点で滑りが発生した場合，滑り量に比例して内力が変化する．そのため，接触点が物体から離れる方向以外ならば，内部スティフネスを設計することで，把握を安定化できる．

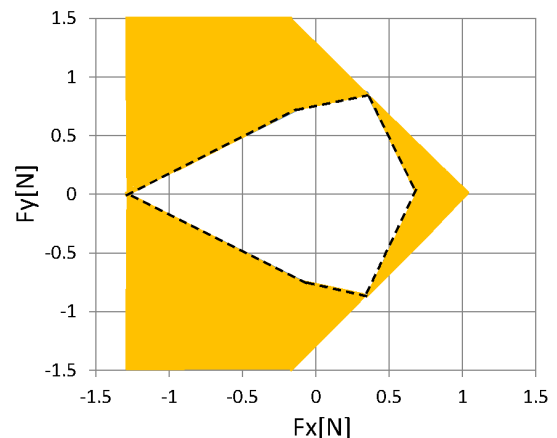


Fig. 6 限界外力領域 (内部スティフネスあり)

ここで，図6は，関節トルクの制限が無いと仮定した場合の安定領域である．実際には関節トルクに制限が存在するため，図6で示される安定領域よりも狭い領域でのみ安定となる．

5. おわりに

接触点で摩擦制約が破られ、微小な滑りが発生する状況を想定し解析を行った．内部ステイフネスを設計することで、微小な滑りが発生した場合に、滑りを抑制する方向に力を発生できることを示した．そして、シミュレーションを行い、内部ステイフネスによって限界外力が広がる可能性があることを示した．今後の課題として、関節トルクの制約を考慮した解析、より厳密な発生内力の定式化、把握形態による影響の解析が挙げられる．

参考文献

- 1) 中村 仁彦, 張 曉毅, 吉本 堅一: パワーグラスとそのロバスト性の評価法, 日本ロボット学会誌, 13-6, 866/874 (1995)
- 2) 張 曉毅, 中村 仁彦, 吉本 堅一: 不完全な接触を持つ把持の力学的多面凸解析, 日本ロボット学会誌, 14-1, 105/113 (1996)
- 3) M T. Mason, J.K Salisbury, Jr. : Robot Hands and the Mechanics of Manipulation, 59/63, MIT Press(1985)