

# マニピュレーションのための把持安定性の評価

Grasp Stability Evaluation for Manipulation

辻 徳 生\* \*金沢大学  
Tokuo Tsuji\* \*Kanazawa University

## 1. はじめに

手が物体を保持して静止しているとき、指の力と重力が物体に作用し、それらの力がつりあっている。手を動かした際は、重力方向の変化と慣性力に対抗するように、指の力を変化させれば物体を落とさずに把持できる。この指の力を変化させ物体をどれだけ安定して保持できるかという評価は、マニピュレーションの計画において重要である。本稿ではこの評価手法について解説する。

指が物体に作用する力は、法線応力と摩擦力に分解できる。これらの力の摩擦係数や粘弾性といった物理パラメータに近似モデルを与え把持の解析と評価を行う。初期の研究では、単純な剛体と剛体の点接触で固定の摩擦係数による静的な近似が用いられていた。しかし、ロボットハンドにおいて、柔軟な指先や受動関節など粘弾性を持つ要素が使用され、より動的なマニピュレーションに対応するため、把持安定性の評価手法は拡張されてきている。

本稿では、把持安定性評価の関連研究を筆者の研究成果を含めて紹介し、今後の展望を述べる。まず、静的なつりあいのモデルである force closure に基づく手法について解説し、動的安定性評価手法について解説する。最後に今後の展望と機械学習技術への期待について述べる。

## 2. Force closure

### 2.1 概要

物体を把持した際の把持の安定性の評価で一般的な手法として、form closure/force closure がある [1][2]。form closure は、摩擦を考慮しなくとも物体がハンドの各指によって固定可能な状態である。一方、force closure は、摩擦を考慮して安定性を評価する。この force closure は、任意の方向の外乱を法線応力と摩擦力によって打ち消すことができる状態のことを指す。点接触の場合、各指が滑らずに物体にかけることが可能な接触力の範囲として、摩擦円すい

を用いる。実装では、各指で発生可能な接触力のすべての組み合わせの和を計算して、対象物に発生可能な力・モーメントのなす空間を得る。この空間が合力・合モーメントの原点を内包していれば、あらゆる方向の外力に対し、対抗する力を指が作用可能であるため、把持を安定化可能である。

ここで、力とモーメントを並べた六次元のベクトルをレンチと呼ぶ。 $i$  番目の接触力を  $\mathbf{f}_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) とし、その接触位置を  $\mathbf{p}_i$  とする。 $\mathbf{f}_i$  によって物体に発生するスケールつきレンチ (力・モーメント)  $\mathbf{w}_i$  を以下の式のように定義する。

$$\mathbf{w}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_i \\ \gamma \mathbf{p}_i \times \mathbf{f}_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、 $\gamma$  は、力に対するモーメントのスケール変換を表し、軸に依存しないものとしてスカラーとし、 $\gamma > 0$  である。

接触力によるレンチの集合を力とモーメントを併せた把持レンチ空間 (GWS: grasp wrench space) と呼ぶ。把持レンチ空間  $W_{L_\infty}$  と  $W_{L_1}$  は以下のように表現される。

$$W_{L_\infty} = \{\oplus_{i=1}^m \mathbf{w}_i | \mathbf{w}_i \in W_i\} \quad (2)$$

$$W_{L_1} = \text{ConvexHull}(\{\cup_{i=1}^m \mathbf{w}_i | \mathbf{w}_i \in W_i\}) \quad (3)$$

ここで、 $\oplus$  は Minkowski 和であり、 $W_i$  は、 $i$  番目の接触点におけるレンチの集合である。 $W_{L_1} \subseteq W_{L_\infty}$  であり、 $W_{L_1}$  が原点を内包するとき  $W_{L_\infty}$  も原点を内包し、その把持は force closure である。

把持安定性の数値的な評価手法として、force closure に基づく Ferrari らの手法 [3] が広く利用されている。レンチ空間の原点と把持レンチ空間の境界との距離の最小値を評価値とする。この手法は、接触力の合力・合モーメント空間を考え、指先が接触面上を滑りだすために必要な最小の外力・外モーメントを評価値とする。

### 2.2 面接触における force closure 評価法

従来の点接触モデルによる評価手法では、接触点法線方向周りのモーメントを無視できるとみなし、2点で把持し

原稿受付 2016年11月21日

キーワード: Grasp Stability, Manipulation

\*〒920-1192 金沢市角間町

\*Kanazawa-shi, Ishikawa

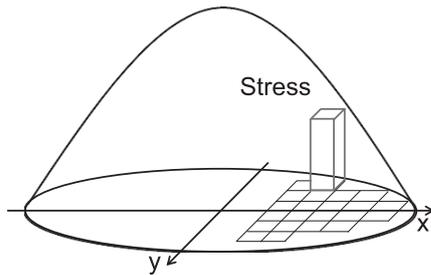


図1 接触面に生じる応力分布モデル

た場合は不安定であると必ず評価する。一方で、ハンドに柔軟素材を用いると接触面積が広くなり、その影響を無視できない。そこで、Ciocarlieら[4]はforce closureの摩擦条件にねじり摩擦を追加し、接触面の法線方向周りの摩擦モーメントを考慮した手法を提案した。接触面に発生する摩擦条件式は、次の式を用いる。

$$f_{tan}^2 + \frac{\tau_n^2}{e_n^2} \leq \mu^2 P^2 \quad (4)$$

ここで、 $f_{tan}$  は対象物に加わる接平面方向の接触力、 $P$  は指が物体にかける荷重、 $\mu$  は摩擦係数、 $\tau_n$  は面接触により発生するモーメントをそれぞれ示している。また、 $e_n$  は接平面方向の最大摩擦力と法線方向の最大モーメントの比率を示している。

摩擦モーメント  $\tau_n$  は、以下のように微小領域の摩擦力を積分して求まる (図1)。

$$\tau_n = \int \int_D \sqrt{x^2 + y^2} \mu p(x, y) dx dy \quad (5)$$

$p(x, y)$  は、点  $(x, y)$  において発生している単位面積あたりの応力であり、 $p(x, y)$  は接触している物体の形状によって変化する。

Ciocarlieらは、凸領域の接触における摩擦モーメントを求め、 $e_n$  を以下の式で近似した。

$$e_n = \frac{8}{15} \sqrt{a_r b_r} \quad (6)$$

ただし、 $a_r, b_r$  は、接触領域を楕円体で近似した際の長径、短径の値である。 $(a_r b_r)$  は接触面積に比例するため、計算結果は接触面積のみに依存する。

この近似では実際のモーメントよりも近似値が小さくなる場合がある。特にエッジと面での接触のように、接触領域が線状の場合、接触面積が小さいため  $e_n$  の計算結果は実際よりもかなり小さくなってしまふ。また、本来中心からの距離が遠くなるほど応力が大きい場合、 $\tau_n$  の値も大きくなるが、接触面積だけ考慮するとその傾向は反映されない。

### 2.3 応力分布に基づく摩擦モーメントの算出

筆者らは Ciocarlie らの手法を拡張し、様々な接触面形状に対し、応力の分布を考慮した安定性評価法について提

案した [5] [6]。その拡張についてここで解説する。応力分布を二次式で近似し、応力分布の凹凸や接触領域の形状で分類し、分類ごとに適用する積分後の式を選択し、安定性を評価する。

応力分布が凸で接触領域がだ円体で近似できる場合は、関孝和のだ円関数の近似式を導入した以下の式を用いる。

$$e_n = \frac{8}{15\pi} \sqrt{4(a_r - b_r)^2 + \pi^2 a_r b_r} \quad (7)$$

この式を用いると長径と短径の差がある場合に  $e_n$  の値が大きくなり、接触領域が線状の場合でもより正確な値を算出できる。

本手法では、応力分布が凹形状の場合に凸形状と比較して  $e_n$  が大きくなる。そこで、凹形状であるくびれ部分を把持すると安定把持が可能であることを、シミュレーションと実験で示し、導出式の有効性を確認した。

## 3. 動的安定性評価

### 3.1 概要

これまで force closure に関連する手法について述べたが、これらの手法では、静的なつりあい条件のみ考慮しているため、物体の運動エネルギーを持つ場合など動的な状況での安定性を評価できない。すなわち、アクチュエータをどのように制御すれば、安定して把持できるかについては、force closure では評価できない。

有本・田原 [7] [8] らは、転がりを含む劣駆動システムにおいて柔軟指先で関節の制御則を考慮した把持のダイナミクスの解析を行い、その受動性を示した。特定の制御入力例に対し、物体の運動エネルギーを0に収束できることを示し、動的安定性を示している。さらに、指先の位置関係を用いて、形状が未知の物体でも安定して操作可能であることを示している。一方で、滑りが発生する制約条件を与えてないため、形状や外力によっては安定把持できない場合があり得る。また、滑りが発生しない場合でも指先が転がり続けて関節の角度限界に達する可能性もある。

ポテンシャルエネルギーを用いた手法も提案されている。把握系のポテンシャルエネルギーの曲率により把持安定性を評価する手法 [9]~[11] がある。この手法は、把持物体の位置・姿勢変化に伴い把握系のポテンシャルエネルギーが増加するならば、安定な把持姿勢であると判定する。Yamadaら [9] は、指関節の剛性を接触点における3軸の直交ばねに置き換えて解析を行った。Cutkoskyら [10]、Maekawara [11] は、指関節の剛性を考慮して解析を行った。しかし、これらの評価手法は指先を剛体としており、耐えうる外乱の大きさについて、定量的な評価をしていない。

### 3.2 エネルギーベースの安定性評価手法

筆者らの提案した、運動エネルギーと指先の摩擦条件を考慮した把持安定性の定量的な評価手法 [12] を解説する。

柔軟指先の弾性ポテンシャルエネルギー・把持物体の重力ポテンシャルエネルギーを考慮し、指先が接触面上を滑りだすために必要な最小のエネルギーを評価値とする。すなわち、前節で述べた force closure に基づく従来手法は力・モーメントの観点から把持安定性を評価するのに対し、提案手法はエネルギーの観点から把持安定性を評価する。

柔軟指先を持つロボットハンドで物体を把持しているとき、把持物体は弾性体で支持されている。そのため、外乱により把持物体の位置・姿勢が変化しても、外乱が小さければ元の位置・姿勢に戻る。しかし、大きな外乱が加わった場合は指先が滑ってしまうため元の位置・姿勢に戻らず、把持が不安定になる可能性がある。このとき、どの程度の外乱までなら元の位置・姿勢に戻るかを評価値とする。

ここで、指関節が出力可能なトルクには上限値が存在し、上限値を超えるとアクチュエータが押し戻される。また、接平面方向の力が増大すると指先が変形し摩擦条件を上回ると滑りが発生する。したがって、物体の安定把持を実現するためには、指先の弾性および最大法線応力を考慮して把持安定性を評価する必要がある。

柔軟指先のモデルとして、線形ばねモデルを用いる。このモデルでは、指先が六つの線形ばねで構成される。接触点座標系  $\Sigma_i$  を考えたとき、接触点座標系  $\Sigma_i$  の  $x, y, z$  軸方向に線形直動ばねが配置され、 $\Sigma_i$  の  $x, y, z$  軸まわりに線形ねじりばねが配置される。ここで、各軸のばね定数を並べた対角行列を  $\mathbf{K}_{fi}$  とする。また、各軸のばねの変形量を並べたベクトルを  $\mathbf{d}_{fi}$  とする。直動ばねの変形量は指先変形量であり、ねじりばねの変形量は指先捻転角度である。

指先が弾性変形しているとき、指先が把持物体から受ける力  $\mathbf{f}_i$  およびモーメント  $\mathbf{m}_i$  は、それぞれ次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_i \\ \mathbf{m}_i \end{bmatrix} = \mathbf{K}_{fi} \mathbf{d}_{fi} \quad (8)$$

指先の弾性ポテンシャルエネルギー  $U_{fi}$  は次式で与えられる。

$$U_{fi} = \frac{1}{2} \mathbf{d}_{fi}^T \mathbf{K}_{fi} \mathbf{d}_{fi} \quad (9)$$

柔軟指先の弾性ポテンシャルエネルギーおよび把持物体の重力ポテンシャルエネルギーの和をとり、ポテンシャル場を構築する。ポテンシャル場は、物体の位置・姿勢を各軸にとる空間でのポテンシャルエネルギーを表すものとする。物体の位置・姿勢は6変数で表されるため、ポテンシャルエネルギーは6変数関数となる。ここで、ポテンシャル場のうち、どの指先も滑らない領域を“平衡領域”と呼ぶことにする。摩擦円すいで与えられるいずれかの指先が滑りだす物体の位置・姿勢が、平衡領域の境界となる。物体の

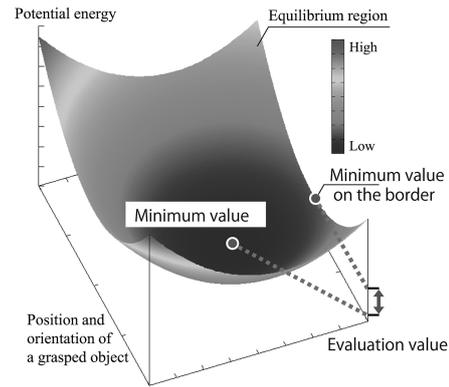


図2 ポテンシャル場と評価値

位置・姿勢が平衡領域内にあるとき、安定把持が保たれる。

平衡領域内の最小ポテンシャルエネルギーを  $\min\{U\}$  とする。物体の位置・姿勢はこの点に収束する。平衡領域の境界上の最小ポテンシャルエネルギーを  $\min\{U_i\}$  とする。ここで、次式のとおり、 $\min\{U\}$  と  $\min\{U_i\}$  の間の最小の差分値を  $\Delta U_{min}$  とする：

$$\Delta U_{min} = \min\{U_i\} - \min\{U\} \quad (10)$$

$\Delta U_{min}$  のエネルギーが物体に与えられたとき、物体の位置・姿勢が平衡領域の境界上に達して指先が滑りだす可能性がある。そこで、図2のように、 $\Delta U_{min}$  を把持安定性の評価値とする。平衡領域内の最小ポテンシャルエネルギーが境界上に存在するとき、評価値は0となる。この場合、物体にエネルギーを与えることなく指先が滑りだす。

提案手法はエネルギーの観点から把持安定性を評価するため、把持物体が運動エネルギーを有する場合も適用可能である。机に置かれた物体を把持して持ち上げる場合など、平衡点が変わり、物体が動きだすとともに運動エネルギーが発生する。また、ハンドにより物体を把持して運搬する場合、ハンドの移動により物体に慣性力がはたらき、運動エネルギーが発生する。

ハンドを基準とした物体の運動エネルギーを  $K$ 、把握系のポテンシャルエネルギーを  $U$  とする。次式が満たされる時、物体の位置・姿勢は平衡領域の境界上に達しないため、指先は滑らず、安定把持が保証される：

$$U + K < \min\{U\} + \Delta U_{min} . \quad (11)$$

有本らが示したように、適切に制御すれば、時間が経つにつれて、柔軟指先の粘性等により物体の運動エネルギーが消散し、物体は平衡点で静止する。

#### 4. 手法の適用範囲と今後の課題

把持対象物の形状が既知であり、把持点が決まれば、並進と回転の動きを止めることが可能かどうか、force closure

条件で明らかにできる。したがって、把持計画においては、force closureに基づく評価指標を利用できる。一方で、ハンドを実際に制御した際に、制御目標との差分によって指先が出力する力は異なり、力の出力可能な範囲のみに着目した force closure では制御の安定性を評価できない。例えば、限界まで内力を強くすれば、大きな摩擦力を物体に作用できるが、指が押し負けて落としてしまう可能性も大きくなるなど、内力の目標値によって安定性は大きく異なる。このように、制御目標などの条件を考慮する場合は、制御力や剛性を考慮した動的安定性評価指標を利用する必要がある。

今後の課題として、評価値の精度を高めるために、指先の変形時の剛性や摩擦係数の高精度化が必要になる。ここでは紹介しないが、指先の摩擦モデルの高精度化やモデル化の研究が行われている。また、未知の形状への対応や、環境と接触する作業などのマニピュレーションの評価指標への拡張も研究されている。

把持対象物の形状が未知の状態、把持と操りが可能なことを田原らの手法では示しているが、完全な未知形状では落とさないことを保証することは限りなく難しい。今後、形状を計測できるセンサや対象物のカテゴリを認識する技術を利用すれば大まかな形状を推定できるため、大まかな形状から誤差を許容して安定性を評価する手法の開発が必要である。

操りの定量的な手法のためには、転がり接触の状態変化をモデル化して評価値の算出が必要である。また作業時に環境から物体がかかる力を評価指標に組み込む必要がある。

## 5. おわりに

本稿では、把持の安定性評価指標として、force closure と動的安定性評価指標について述べた。今後は、マニピュレーションの応用によって、さらに物理モデルを拡張していく必要がある。

一方、機械学習技術の進展により、把持安定性の物理モデルを人が構築しなくても、把持姿勢の出力とその評価を同時に実行できる可能性がある。把持実験を繰り返して把持姿勢を学習し、実行時には画像等を入力として把持姿勢を自動出力する研究が行われている。今後、異なる物体形状やハンドの構造、複雑なマニピュレーションに対する汎化能力について検証が進んでいくと予測される。また、物理モデルに基づく安定性評価指標を教師データとして用いる、あるいは、従来型のマニピュレーション計画法を教師データとして用いるなど、物理モデルと機械学習を組み合わせ

わせた手法への展開も考えられる。

## 参考文献

- [1] B. Mishra, J.T. Schwartz and M. Sharir: "On the existence and synthesis of multifinger positive grips," *Algorithmica (Special Issue: Robotics)*, vol.2, no.4, pp.541–558, 1987.
- [2] V. Nguyen: "Constructing force closure grasps," *Int J Robot Res*, vol.7, no.3, pp.3–16, 1988.
- [3] C. Ferrari and J. Canny: "Planning optimal grasps," *IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation*, pp.2290–2295, 1992.
- [4] M. Ciocarlie, C. Lackner and P. Allen: "Soft Finger Model with Adaptive Contact Geometry for Grasping and Manipulation Tasks," *Join Eurohaptics Conf, and IEEE Symp. on Haptic Interfaces*, pp.219–224, 2007.
- [5] S. Uto, T. Tsuji, K. Harada, R. Kurazume and T. Hasegawa: "Grasp Planning using Quadric Surface Approximation for Parallel Gripper," *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp.1611–1616, 2013.
- [6] T. Tsuji, S. Uto, K. Harada, R. Kurazume, T. Hasegawa and K. Morooka: "Grasp Planning for Constricted Parts of Objects Approximated with Quadric Surfaces," *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.2447–2453, 2014.
- [7] S. Arimoto, K. Tahara, M. Yamaguchi, P.T.A. Nguyen and M.Y. Han: "Principles of superposition for controlling pinch motions by means of robot fingers with soft tips," *Robotica*, vol.19, no.1, pp.21–28, 2001.
- [8] K. Tahara, A. Suguru and Y. Morio: "Dynamic force/torque equilibrium for stable grasping by a triple robotic fingers system," *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE*, pp.2257–2263, 2009.
- [9] T. Yamada, T. Koishikura, Y. Mizuno, N. Miura and Y. Funahashi: "Stability Analysis of 3D Grasps by A Multifingered Hand," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.2466–2473, 2001.
- [10] M.R. Cutkosky and I. Kao: "Computing and Controlling the Compliance of a Robotic Hand," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol.5, no.2, pp.151–165, 1989.
- [11] H. Maekawa, K. Tanie and K. Komoriya: "Kinematics, Statics and Stiffness Effect of 3D Grasp by Multifingered Hand with Rolling Contact at the Fingertip," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.78–85, 1997.
- [12] T. Tsuji, K. Baba, K. Tahara, K. Harada, K. Morooka and R. Kurazume: "Grasp Stability Evaluation based on Energy Tolerance in Potential Field," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.2311–2316, 2015.



辻 徳生 (Tokuo Tsuji)

2005年九州大学大学院システム情報科学研究科博士後期課程修了。同年広島大学大学院工学研究科 COE 研究員。2008年産業技術総合研究所知能システム研究部門産総研特別研究員。2011年九州大学大学院システム情報科学研究科知能工学部門助教。2016年金沢大学理工研究域機械工学系准教授、現在に至る。多指ハンド、生活支援ロボット、画像処理の研究に従事。電子情報通信学会、日本機械学会各会員。博士(工学)。(日本ロボット学会正会員)