

区分的な楕円体及び楕円柱面近似に基づく把持計画

Grasp Planning based on Ellipsoidal and Cylindrical Approximation of grasped objects

○ 宇都 宗一郎* 正 辻 徳生* 正 原田 研介†
正 倉爪 亮* 正 長谷川 勉*

Souichiro UTO*, uto@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp

Tokuo TSUJI*, Kensuke HARADA†, Ryo KURAZUME*, Tsutomu HASEGAWA*

We present a grasp planning that approximates an object by combination of quadric surfaces. This approximation method can automatically represent various objects in daily life. The planner selects ellipsoid and elliptic cylinder surfaces, and generates grasp posture for each surface. Then we present a fast method of evaluating grasp stability for surface contact. This method approximates the friction cone as an ellipsoid so that it can calculate the resultant force/moment space quickly. We performed simulations and verified the effectiveness of our proposed method.

Key Words: Grasp planning, Quadric surface, Force Closure

1 はじめに

日常生活において物の持ち運びや受け渡しなどの作業を行うサービスロボットを実現するためには、それらの対象物を把持する必要がある。一言で物の把持と言っても、日常生活には様々な形状の物体が存在する。また同じ形状のコップであっても、例えば、床に置いてあるコップを持ちあげる場合や、飲み物が入っているコップを運ぶ場合など、状況に応じて実現可能な把持位置、姿勢が異なる。このように形状や状況によりロボットは把持位置や姿勢を適切に選択しなければならない。また、把持対象物に対する接触点と把持姿勢が決定されても、小さな外乱で崩れてしまうような把持では意味をなさない。すなわち、把持を計画する中で対象物を把持した後の安定性の評価を行うことが重要である。

本研究では、把持対象物を二次曲面の組み合わせで近似し、楕円体及び楕円柱面の把持姿勢候補を決定する手法と、面接触による高速な把持の安定性評価を行う手法の2つの手法を提案する。二次曲面の組み合わせで形状を近似することで、従来の形状近似法では表現できなかった開いた曲面や凹面といった形状も表現可能になる。従来の把持安定性評価法は多くの計算時間を要するという問題点があった。この問題に対し、面接触におけるレンチ空間を楕円体で近似することで、合レンチ空間を高速に計算する手法を提案する。この計算には接触面積が必要であるため、接触面積が解析的に算出可能な楕円体と楕円柱面を選択して安定把持を実現する。これらの提案手法の有効性を把持のシミュレーションにより確認する。シミュレーションには、グリップ表面が柔軟な素材であると仮定した2本指平行グリップをPA10に組み合わせたロボットハンドを使用する。

2 従来手法

これまでに任意形状の物体を把持するために、物体形状をプリミティブ形状で近似させ、その近似された物体形状を把持するという手法が提案されている。

例えば山野辺らは球や円柱、円錐、直方体などプリミティブ形状に加えて内部に空洞がある管状のプリミティブを用いる手法 [1] を提案している。しかしこの手法はユーザーが手動でプリミティブ形状を割り当てる必要がある。自動でかつ滑らかに形状を表現できる手法として、把持対象物を超二次曲面で近似する手法 [2] が Goldfeder らにより提案されている。しかし、彼らの提案した手法は閉じた凸曲面という限定されたプリミティブ形状を用いるため、開いた曲面を表現することはできない。

一方、把持安定性の評価を行う手法も数多く提案されている。例えば Ferrari らは点接触によって形成される全ての摩擦円錐を1つの合力空間へ統合し、原点から合力空間の境界までの距離を安定性の評価値とする手法 [3] を提案している。また、この手法を面接触に拡張した把持の安定性評価 [4] が Ciocarlie らにより提案されている。

3 把持計画

3.1 二次曲面近似と楕円体及び楕円柱面の選択

把持対象物を二次曲面の組み合わせで近似する手法を提案する。それらの二次曲面の集合の中で楕円体、楕円柱面を選択し、選択された楕円体、楕円柱面に対して把持姿勢候補を複数定める。

まず、二次曲面近似を行う過程の概要を以下で述べる。コップを二次曲面の組み合わせで近似する過程を Fig.1 に示す。

1. ポリゴンメッシュを生成し、それぞれのポリゴンの隣接関係を求める。
2. 隣接するポリゴン集合を二次曲面で近似した誤差が小さい順にマージする。この手続きを繰り返す。
3. 近似誤差がしきい値よりも大きくなった時点でマージを終了する。

次に、複数の二次曲面から楕円体及び楕円柱面の選択について述べる。二次曲面の標準形は以下の式で表わすことができる。

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 = 1 \quad (1)$$

*九州大学, Kyushu University

†産業技術総合研究所, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)



Fig.1 コップを二次曲面の組み合わせで近似

曲面の名称	条件
楕円体	$A > 0, B > 0, C > 0$
楕円柱面	$A > 0, B > 0, C \simeq 0$
	$A > 0, B \simeq 0, C > 0$
	$A \simeq 0, B > 0, C > 0$

Table 1 楕円体及び楕円柱面の条件

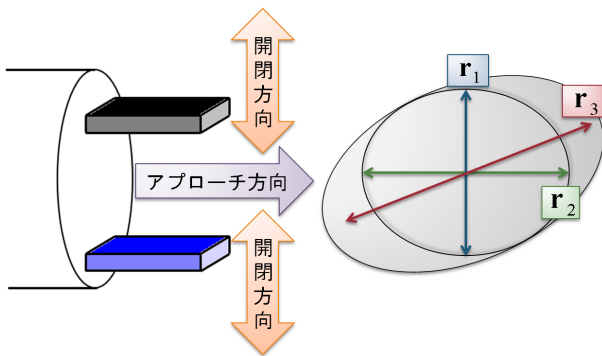


Fig.2 楕円体把持姿勢候補の例

式 (1) において、各係数 A, B, C の正負によって二次曲面の形状が決定される。本研究で把持計画に用いる楕円体及び楕円柱面における係数 A, B, C の条件を Table 1 に示す。

3.2 把持計画

本研究で用いる把持計画の概要を述べる。まず、楕円体及び楕円柱面各々について把持姿勢候補を数パターン決め、その候補全てにおいて把持安定性の評価を行う。その把持姿勢候補の中からもっとも安定していると評価された把持候補を、最終的な把持姿勢として決定する。把持安定性の評価の際に用いる手法については 3.3 で述べる。

楕円体の把持姿勢候補の決定手法について述べる。まず、二次曲面の組み合わせから式 (1) の係数 A, B, C がすべて正の二次曲面を選択する。選択された楕円体について 3 軸方向の径を求め、それぞれの軸を r_1, r_2, r_3 とする。この 3 軸のうち 1 軸をアームのアプローチ方向、残りの 2 軸のうち 1 軸をグリッパの開閉方向として選択する。例として、 r_2 軸方向からアプローチを行い、 r_1 軸方向にグリッパを開閉させる図を Fig. 2 に示す。ある方向からのアプローチに関して、4 通りのグリッパの開閉方向を考えることができる。 r_2 軸方向からアプローチを行う場合の具体的な例を以下に挙げる。

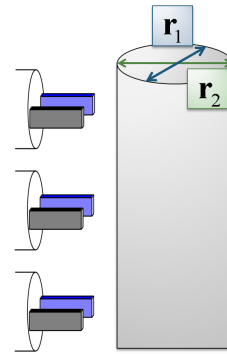


Fig.3 楕円柱面把持姿勢候補の例

1. r_1 軸方向にグリッパを開閉
2. 1. を r_2 軸周りに腕を 180° 回転させた状態で r_1 軸方向にグリッパを開閉
3. r_3 軸方向にグリッパを開閉
4. 3. を r_2 軸周りに腕を 180° 回転させた状態で r_3 軸方向にグリッパを開閉

また、アプローチする方向も 1 軸に関して 2 通り、更に 3 つの軸が存在するので、楕円体に関しては合計 $4 \times 2 \times 3$ で 24 通りの把持姿勢候補を与える。

楕円柱面の把持姿勢候補の決定手法について述べる。まず、二次曲面の組み合わせから式 (1) の係数 A, B, C に関して、3.1 に示した楕円柱面と決定される条件を満たす二次曲面を選択する。選択された楕円柱面について、平面部分の楕円の短径と長径を求め、それぞれを r_1, r_2 とする。この 2 軸のうち片方をアプローチ方向、残りのもう片方をグリッパの開閉方向とする。ある方向からのアプローチに関して、2 通りのグリッパの開閉方向を考えることができる。 r_2 軸方向からアプローチを行う場合の具体的な例を以下に挙げる。

1. r_1 軸方向にグリッパを開閉
2. 1. を r_2 軸周りに腕を 180° 回転させた状態で r_1 軸方向にグリッパを開閉

また、アプローチする方向も 1 軸に関して 2 通り、更に 2 つの軸が存在するので、楕円柱面に関しては合計 $2 \times 2 \times 2$ で 8 通りの把持姿勢候補を与える。さらに、把持位置を楕円柱面の上部、中部、下部のように 3 つの把持位置を与えることで、楕円柱面にも合計 24 通りの把持姿勢候補を与える。具体的な例として、 r_2 軸方向からアプローチ、 r_1 軸方向にグリッパを開閉する場合の 3 つの把持位置を図を Fig. 3 に示す。

楕円体、楕円柱面それぞれに 24 通りの把持姿勢候補の例を与えたが、以下に挙げるような把持姿勢は、実現不可な把持、もしくは明らかに不安定な把持として、以降で行う把持安定性の評価は行わない。

- 把持対象以外の二次曲面と指との干渉
- 物体の曲率が一定のしきい値よりも大きい

3.3 把持安定性の評価法

3.2 の把持計画で用いる把持安定性の評価法について述べる。これまで我々は摩擦円錐を楕円体へ近似することで合力空間を高速に計算する手法 [5] を提案した。しかし、この

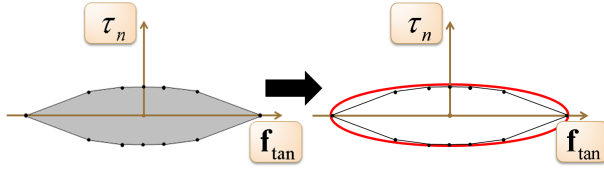


Fig.4 f_{tan} と τ_n の関係

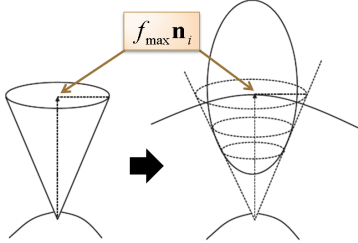


Fig.5 摩擦円錐を楕円体へ近似

我々の手法は、点接触を対象とし、面接触による把持には対応していない。一方、Ciocarlie らは接触面の法線周りのモーメントを考慮した安定性評価法を提案している。ただし、彼らの把持安定性評価法では、計算処理に多くの時間を要する。ここで、Ciocarlie らの手法において各指における接線方向の力とモーメントの空間が楕円体ということを利用する。摩擦円錐を近似した楕円体に、接触法線周りのモーメントを加えた楕円体に再構成し高速な把持の安定性評価を実現する。

Ciocarlie らの手法では、接触面の法線方向周りのモーメントを考慮した安定性評価を行っており、このとき接触面に発生する摩擦条件式は、次の式で表わすことができる。また、 f_{tan} と τ_n の関係を Fig.4 の左図に示す。

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

ここでの $f_{tan} \in \mathcal{R}^{3 \times 1}$ は対象物に加わる接平面方向の接触力であり、 $f_{nml} \in \mathcal{R}^{3 \times 1}$ は法線方向の接触力を、 f_{nml} の最大値 $\max(f_{nml}) = f_{max}$ 、 μ は摩擦係数を、 τ_n は面接触により発生するトルクを示している。また、 e_n は接平面方向の最大接触力とトルクの最大値との比率を示しており、式 (3) のようにして示す。

$$e_n = \frac{\max(\tau_n)}{\mu f_{max}} = \frac{8}{15} \sqrt{r_l r_s} \quad (3)$$

ここでの r_l, r_s は、接触面に生じる楕円体の長径、短径をそれぞれ示している。前述したが、Fig.4 の右図から分かるように、 f_{tan} と τ_n の関係を示す空間は楕円の形状をしている。このため、摩擦円錐を楕円体で近似する我々の手法への導入が容易である。

我々の提案した高速的に安定性の評価を行う手法に、式 (2) で示される条件式を導入する。まず、摩擦円錐を楕円体で近似した図を Fig.5 に示し、合力空間計算式の再構築について以下で述べる。対象物の $i (= 1, \dots, m)$ 番目の接触点 $p_i = (p_{ix} \ p_{iy} \ p_{iz})^T \in \mathcal{R}^{3 \times 1}$ に加わる接触力 $f_i \in \mathcal{R}^{6 \times 1}$ を考える。接触点に対する単位法線ベクトルを

$n_i = (n_{ix} \ n_{iy} \ n_{iz})^T \in \mathcal{R}^{3 \times 1}$ とし、互いに直交する単位接戦ベクトルを $t_{i1} \in \mathcal{R}^{3 \times 1}, t_{i2} \in \mathcal{R}^{3 \times 1}$ とする。このとき i 番目の楕円体における各軸の長さを $a = \mu f_{max}/\sqrt{2}$, $b = \mu f_{max}/\sqrt{2}$, $c = f_{max}/\sqrt{2}$ とし、中心を $f_{max} n_i$ としたときの楕円体は式 (4) のように表現される。

$$(f_i - c_i)^T U_i S_i U_i^T (f_i - c_i) \leq 1 \quad (4)$$

ただし、

$$c_i = (f_{max} n_{ix} \ f_{max} n_{iy} \ f_{max} n_{iz} \ 0 \ 0 \ 0)^T \in \mathcal{R}^{6 \times 1}$$

$$U_i = \left(\begin{array}{ccc|ccc} t_{i1} & t_{i2} & n_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t_{i1} & t_{i2} & n_i \end{array} \right) \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$$

$$S_i = \text{diag}[1/a^2 \ 1/b^2 \ 1/c^2 \ 0 \ 0 \ 1/e_n^2] \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$$

である。接触点が m 個あるとして式 (4) の和をとると、

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^m (f_i - c_i)^T U_i S_i U_i^T (f_i - c_i) \\ & = (F - C)^T T (F - C) \leq m \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、

$$F = (f_1^T \dots f_m^T)^T \in \mathcal{R}^{6m \times 1}$$

$$C = (c_1^T \dots c_m^T)^T \in \mathcal{R}^{6m \times 1}$$

$$T = \text{block diag}[U_1 S_1 U_1^T \dots U_m S_m U_m^T] \in \mathcal{R}^{6m \times 6m}$$

である。この式から合レンチが満たす式を導く。まず、各指の接触力と合レンチ w の関係は、以下のとおりである。

$$w - GC = G(F - C) \quad (6)$$

ここで、 G は各接触点に働く力とモーメントを、重心に働く力とモーメントに変換する式である。また、 γ は力に対するモーメントのスケール変換を表す。式 (5) と式 (6) より、次の関係式が導かれる。

$$(w - GC)^T (GT^{-1}G^T)^{-1} (w - GC) \leq m \quad (7)$$

このように、合レンチ w に対する不等式を導出できた。このように式 (7) は、式 (5) の十分条件ではないが、 w に関する式 (7) を調べるだけで、円錐から合力空間を導くよりも高速的に把持安定性を近似的に評価することができる。

4 シミュレーション

楕円体に関するシミュレーションはアヒルのモデルを、楕円柱面に関するシミュレーションは缶のモデルを用いて行った。それぞれの生モデルと二次曲面の組み合わせで近似した図を Fig.6 に示す。

楕円体の把持に関して、アヒルの胴体の楕円体に対して把持計画を行った。その6つの把持姿勢候補の例と、その把持に対応した評価値の値を Fig.7 に示す。評価値が”なし”になっている把持姿勢は 3.2 で述べた不適切な把持姿勢として評価を行っていない。



Fig.6 左：生モデル，右：近似後のモデル

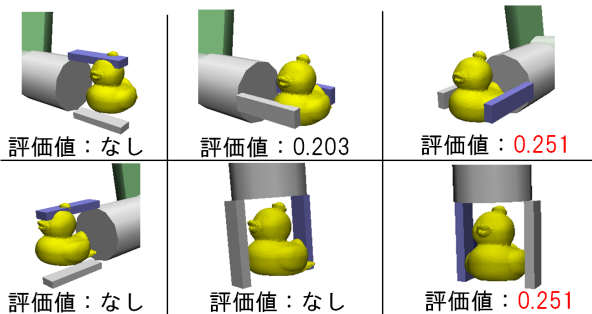


Fig.7 胴体楕円柱面の把持姿勢候補の例

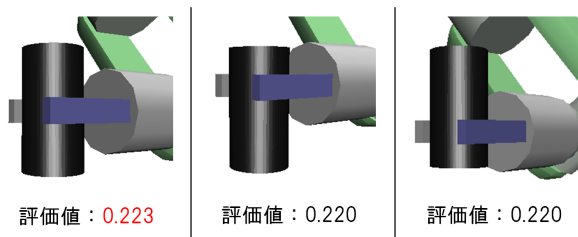


Fig.8 缶楕円柱面の把持姿勢候補の例

楕円柱面の把持に関して、缶に対して把持計画を行い、そのうち3つの把持姿勢候補の例と、その把持に対応した評価値の値を Fig.8 に示す。アヒルのモデルと比べ、楕円柱面1つの単純な形状で表現できたため、24通り全ての把持姿勢候補について安定性の評価を行うことができた。全ての評価を行っても数秒程度しかかからないため、大幅に評価を高速化できていると言える。

また Fig.7, Fig.8 に関して、評価値が赤字の把持姿勢は最も安定した把持姿勢として評価されたものである。

5 おわりに

本研究では2つの手法を提案した。まず、把持対象物を二次曲面の集合で近似し、近似された二次曲面から楕円体及び楕円柱面を選択し、それぞれに把持姿勢候補を決定する手法を提案した。はじめに二次曲面の組み合わせで近似することで、手動ではなく自動で近似することを可能にし、開いた

曲面や凹面の形状が表現可能となった。

また、面接触における把持安定性の評価を高速に行う手法を提案した。Ciocarlie らの面接触における把持安定性の評価手法に用いられる摩擦条件式を、我々の高速な合力空間の計算式へと導入することで、数パターンある把持姿勢候補から最も安定した姿勢を高速に導けることがシミュレーションによって確認できた。

3.2で把持対象以外の二次曲面と指との干渉する場合は把持姿勢候補から排除したが、実際の把持では、複数の二次曲面が組み合わさった複雑な形状の物体の把持を行う際に、グリッパが把持対象とは異なる二次曲面に接触する場合が考えられる。そこで、指が複数の二次曲面に接触しても安定性の評価を可能にする事が、今後の課題として挙げることができる。また、楕円体及び楕円柱面を選択し把持を行ったが、今後は一葉双曲面のような凹面の把持計画の試行が課題である。

文献

- [1] N. Yamanobe, and K. Nagata: "Grasp Planning for Everyday Objects Based on Primitive Shape Representation for Parallel Jaw Grippers", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, pp.1565-1570, 2010.
- [2] Corey Goldfeder, Peter K. Allen, Claire Lackner, and Raphael Pelosof: "Grasp Planning via Decomposition Trees", IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp.4679-4684, 2007.
- [3] C.Ferrari, and J.Canny: "Planning Optimal Grasps", IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, pp.2290-2295, 1992.
- [4] Matei Ciocarlie, Claire Lackner, and Peter Allen: "Soft Finger Model with Adaptive Contact Geometry for Grasping and Manipulation Tasks", Join Eurohaptics Conf, and IEEE Symp. on Haptic Interfaces, 2007.
- [5] 辻 徳生, 原田 研介, 金子 健二: "摩擦円錐の楕円体近似を用いた把持安定性の高速評価", 日本ロボット学会誌, Vol. 29, No. 3, pp.278-287, 2011.