

区分的な二次曲面近似に基づく把持姿勢候補の生成

○宇都 宗一郎^{*1}, 辻 徳生^{*1}, 原田 研介^{*2}, 田原 健二^{*1}, 長谷川 勉^{*1}, 倉爪 亮^{*1}Grasp Postures Generation based on Quadric Surface
Approximation of ObjectsSoichiro Uto^{*1}, Toku Tsuji^{*1}, Kensuke Harada^{*2}, Kenji Tahara^{*1},
Tsutomu Hasegawa^{*1} and Ryo Kurazume^{*1}^{*1} Kyushu University^{*2} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

We present a planning technique for grasping an arbitrary object with constricted shapes in daily life. Grasping the constricted part is more stable than the sharp part. Firstly, the object is approximated by the combination of several quadric surfaces. Then, the planner selects hyperbolic surfaces and two adjacent ellipsoids as constricted parts automatically, and generates a proper posture for grasping constricted parts. We conducted numerical simulations and verified the effectiveness of our proposed method.

Key Words : Grasping 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、ロボットが様々な対象物を把持できる必要がある。各物体ごとに、外乱が加わっても物体を取り落さないような指先の位置、姿勢を、その可動範囲内でロボットは計画しなければならない。これらの条件を満たす把持位置、姿勢を、無数に存在する把持位置、姿勢から探索すると多大な時間を要する。この問題に対し、把持対象物体を単純形状の組み合わせで近似し、把持姿勢を計画する手法が従来提案されている。単純形状ごとにあらかじめ把持位置、姿勢候補を生成しておくことで、条件を満たす把持を高速に計画することが可能となる。この単純形状として、球や円柱のような凸面形状が従来用いられている。しかし、人間は、より安定すると考えて物体のくびれ領域を把持する場面は少なくない。このくびれを表現するような凹面の形状近似手法や、くびれに対する把持計画はこれまで提案されていない。

そこで我々は、二次曲面の組み合わせで物体を近似する手法⁽¹⁾を提案した。この手法では、凸面形状に加えて凹面形状の表現も可能となる。また、把持姿勢の候補を生成する手法として、凸面である楕円体及び楕円柱単体に対して、把持姿勢を生成する手法⁽²⁾を提案

した。これらの二次曲面に加えて、一葉双曲面や、2つ以上の楕円体の組み合わせから得られるくびれに対する把持姿勢を生成する手法を提案する。くびれ領域に対する把持が、凸面を把持するよりも安定することを、Force Closure に基づく安定性評価指標を用いて示す。さらに、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。

2. 従 来 手 法

山野辺らは球や円柱、円錐、直方体などの単純形状に加えて、内部に空洞がある管状の単純形状を把持計画で用いる手法⁽⁴⁾を提案している。しかしこの手法はユーザーが手で単純形状を割り当てる必要がある。また原田らは、物体を複数の平面で近似する手法⁽³⁾を提案しているが、この手法では滑らかな形状を把持に適した形に分割できるとは限らない。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⁽⁵⁾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単純形状を用いるため、凹面を表現することはできない。これらの形状近似法に対して、我々は把持対象物を二次曲面で近似した後、楕円体及び楕円柱を選択して把持する手法⁽²⁾を提案した。自動的な形状近似に加えて開いた曲面の表現も行うことが可能であり、これまでに楕円体及び楕円柱単体に対して把持が可能であることを示した。楕円体や楕円柱の

^{*1} 九州大学^{*2} 産業技術総合研究所



Fig. 1 Quadric approximation of a cup

Table 1 Classification of Quadric surfaces

曲面の名称	条件
楕円体	$A > 0, B > 0, C > 0$
楕円柱	$A > 0, B > 0, C \simeq 0$
	$A > 0, B \simeq 0, C > 0$
	$A \simeq 0, B > 0, C > 0$
一葉双曲面	$A > 0, B > 0, C < 0$
	$A > 0, B < 0, C > 0$
	$A < 0, B > 0, C > 0$

ような凸面に加え、一葉双曲面のような凹面も把持できる手法を提案する。

3. 把持対象物の二次曲面近似及び選択

把持対象物はポリゴンメッシュにより形状が与えられているとする。この把持対象物を二次曲面の組み合わせで近似する。それらの二次曲面の集合の中で我々が提案した楕円体と楕円柱、一葉双曲面を選択し、単体、もしくは2つ以上の二次曲面に対して把持姿勢候補を複数定める。

二次曲面近似を行う手続きを以下で述べ、例を図1に示す。

1. 各ポリゴンが1つの要素を持つポリゴン集合に属するとする。
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。

生成された二次曲面から楕円体、楕円柱及び一葉双曲面を選択する。二次曲面の標準形は以下の式で表わすことができる。

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

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、楕円柱面及び一葉双曲面における係数 A, B, C の条件を表1に示す。

4. 把持姿勢候補の生成

把持姿勢候補を数パターン決め、その候補全てに対して5章で述べる手法で安定性を評価し、より安定した把持位置、姿勢を選別する。ただし、把持姿勢を選

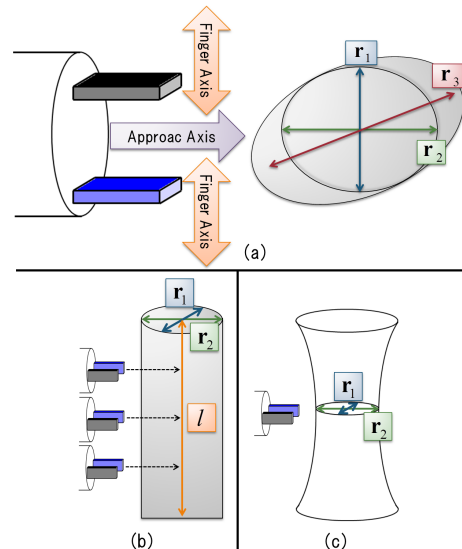


Fig. 2 Postures of grasping an ellipsoid

別する際、以下に挙げるような場合は実現不可能な把持、もしくは明らかに不安定な把持として、選別対象から除外する。

- 把持対象二次曲面以外の領域と指とが干渉している場合
- 物体の曲率が一定のしきい値よりも大きく凸である場合

また、把持機構として2本指平行グリップを用いる。

提案手法で把持対象となる「くびれ」とは、ある方向の軸に対し、近傍領域と比べ細くなっている箇所のことを指す。以下で、従来我々が提案した楕円体や楕円柱に対する把持姿勢候補生成手法について述べ、さらにくびれ領域に対する把持姿勢候補の生成手法について述べる。

4.1 楕円体

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軸のうち図2(a)のように1軸をアームのアプローチ方向、残りの2軸のうち1軸をグリップの開閉方向として選択する。アプローチ方向は3軸の正、負方向で合わせて6通り設定する。また、グリップの開閉方向はアプローチ軸周りに90度刻みの回転で4通り設定し、楕円体に関しては合計 6×4 で24通りの把持姿勢を与える。

4.2 楕円柱

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章に示した楕円柱と決定される条件を満たす二次曲面を選択する。選択された楕円柱について、

平面部分の楕円の2軸を求め、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プの開閉方向とする。アプローチ方向は2軸の正、負方向で合わせて4通り設定する。また、グリップの開閉方向はアプローチ軸周りに180度刻みの回転で2通り設定する。さらに図2(b)のように、把持位置として楕円柱の中部、上部、下部の3つを設定する。上部、下部の定義は、楕円柱の上下面の境界間の長さを l とするとき、上部は中部より $+l/4$ だけ移動させた位置、下部は中部より $-l/4$ だけ移動させた位置とする。つまり、楕円柱に関しては合計 $4 \times 2 \times 3$ で24通りの把持姿勢を与える。

4.3 一葉双曲面の把持姿勢

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章に示した一葉双曲面と決定される条件を満たす二次曲面を選択する。選択された一葉双曲面について、最も細くなっている部分を把持する。その部分の断面積が最小となる楕円断面の2軸を求め、それぞれを r_1, r_2 とする。楕円柱の場合と同じく、合計 4×2 で8通りの把持姿勢を与える。具体的な例として、 r_2 軸方向からアプローチ、 r_1 軸方向にグリップを開閉する場合の把持位置を図2(c)に示す。

4.4 2つ以上の二次曲面

二次曲面単体の把持だけでなく、複数の二次曲面に対する把持についても把持姿勢を生成する。具体的には、隣接する二次曲面の交線にくびれを生成する場合に、グリップがくびれを挟みこむような把持姿勢を生成する。

二次曲面を平面で切断した際の交線が楕円であれば、楕円の軸を利用し、アプローチ方向、指の開閉方向を容易に決定することができる。そこで我々は、楕円体と平面の交線は必ず楕円になることに着目した。把持物体を近似した複数の二次曲面から楕円体のみを抽出し、楕円体の組み合わせから生成されるくびれを対象に把持を計画する。抽出される楕円体が複数あり、楕円体同士が接触している場合に対し、以下で説明するくびれ把持の処理を施す。楕円体同士以外の二次曲面でもくびれが生成される場合も考えられるが、本手法では把持対象としない。

把持姿勢生成までのプロセスは以下の(1)~(3)から構成される。それぞれに対し以下で詳しく述べる。ただし、2つのポリゴン集合が共有する境界を平面で近似し、それを以下では共通切断面と呼ぶ。

- (1) 共通切断面の導出
- (2) くびれ判定
- (3) 把持姿勢の生成

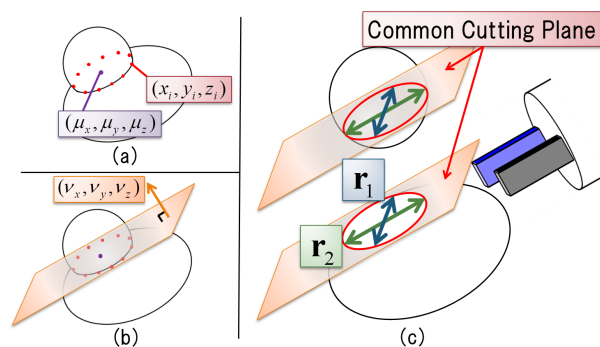


Fig. 3 Common cutting plane

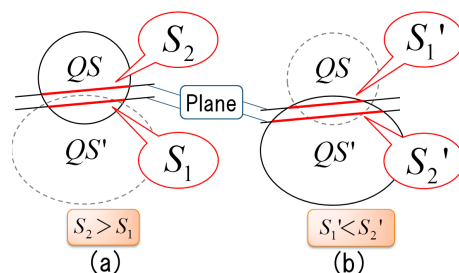


Fig. 4 Distinguish of a constriction

(1) 共通切断面の導出 共通切断面の導出手法を図3を用いて述べる。楕円体同士のポリゴン集合の境界を求め、その境界点を平面で近似する(図3(a), (b))。 $i(=1, \dots, n)$ 番目の境界点の座標を (x_i, y_i, z_i) とする。ただし平面近似が粗くならないために、境界点であるサンプル数 i がしきい値よりも少ない場合は把持姿勢生成のプロセスから除外する。この境界点位置の共分散行列 $R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ の一番小さい固有値に対する固有ベクトル $\mathbf{v}(v_x, v_y, v_z)$ を平面の法線ベクトルと定める。また、境界点すべてにおける平均座標を $\boldsymbol{\mu}(\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ とすると共通切断面の式は以下ようになる。

$$v_x x + v_y y + v_z z = w \quad \text{ただし } w = \mathbf{v}^T \boldsymbol{\mu} \quad (2)$$

式(2)と楕円体の式(1)の2式から楕円平面の式を導出する。

(2) くびれ判定 判定手法を図4を用いて述べる。図4は二次元で表現しているが、楕円は楕円体、直線は共通切断面を示している。境界を生成する楕円体が2つの場合を述べる。片方の楕円体 QuadricSurface(QS) について、楕円体の式(1)と共通切断面の式(2)から導出した楕円平面の面積を S_1 とする。共通切断面の法線方向かつ隣接した楕円体とは逆方向に、共通切断面を任意の量だけ移動する。このときの、共通切断面とQSから生成される楕円平面の面積を S_2 とする。ここで S_1, S_2 の関係が図4(a)に示すように $S_2 > S_1$ となつ

ていた場合に、次のステップに進む。図 4(b) のように、もう片方の楕円体 QuadricSurface'(QS') についても楕円平面を導出し、面積を S'_1 とする。共通切断面の法線方向かつ QS とは逆方向に、共通切断面を任意の量だけ移動させ、生成される楕円平面の面積を S'_2 とする。 S'_1, S'_2 の関係が $S'_1 < S'_2$ であれば、2つの楕円体 QS と QS' はくびれを生成していると言える。境界を生成している楕円体が2つの場合を述べたが、 $k(>2)$ 個の楕円体が境界を生成していた場合、 k 個のうち2つを選び、すべての境界に対して合計 kC_2 通りのくびれ判定を行う。

(3) 把持姿勢の生成 くびれを生成していると判別された楕円体と共通楕円面との交線である楕円の2軸を導出し、それぞれを r_1, r_2 とする。楕円柱の把持と同じように、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。つまり1つのくびれに対して合計 4×2 で8通りの把持姿勢を与える。さらに、 kC_2 通りのくびれ判定の内くびれを生成していると判定された楕円平面の数を g とし、合計 $8 \times g$ 通りの把持姿勢候補を生成する。

5. 把持安定性の評価法

本手法では、グリッパ表面が柔軟であり面接触すると仮定する。また、凹面と平面との接触が生じるため、それに対応する把持の安定性評価指標が必要となる。これに対し、面接触における把持安定性の評価手法として、把持対象物が凸面形状の場合は提案されてきた。以下では、ForceClosure の基づく従来の安定性評価法について述べ、凹面形状に対する把持安定性評価について述べる。

5.1 Force Closure に基づく評価法

Ferrari らは、ForceClosure に基づいた安定性評価法⁽⁶⁾を提案している。彼らの安定性の評価は点接触の場合に限定しているのに対し、Ciocarlie らは、面接触における ForceClosure に基づいた安定性評価法⁽⁷⁾へ拡張している。具体的には、凸の指と凸の物体が面接触した際に生じる摩擦条件式を Ferrari らの手法へと導入することで、面接触における安定性の評価を実現している。以下で、その面接触における摩擦条件式について述べる。

Ciocarlie らの手法では、凸面と凸面との接触面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。

$$f_{tan}^2 + \frac{\tau_n^2}{e_n^2} \leq \mu^2 P^2 \quad (3)$$

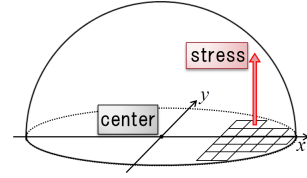


Fig. 5 Contact stress distribution

ここで f_{tan} は対象物に加わる接平面方向の接触力、 P は指が物体にかかる荷重、 μ は摩擦係数、 τ_n は面接触により発生するトルクをそれぞれ示している。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 (4) のようにして示す。

$$e_n = \frac{\max(\tau_n)}{\max(f_{tan})} \quad (4)$$

5.2 最大静止摩擦トルク算出及び接触状態導出

式 (4) 中の e_n の導出に用いる最大静止摩擦トルク $\max(\tau_n)$ の算出法について述べる。グリッパが物体に及ぼす接触力分布の模式図を図 5 に示す。

接触面を微小領域に分割する。その微小領域に発生する静止摩擦モーメント $\Delta\tau(x,y)$ は以下の式で求められる。

$$\Delta\tau(x,y) = \sqrt{x^2 + y^2} \mu p(x,y)$$

この $p(x,y)$ は、微小領域に発生している単位面積あたりの応力の値である。 $\Delta\tau(x,y)$ を接触面で面積分することで、以下のように $\max(\tau_n)$ を算出できる。

$$\max(\tau_n) = \iint_D \Delta\tau(x,y) dx dy \quad (5)$$

応力分布 $p(x,y)$ は把持対象によって変化する。式 (5) は、中心からの距離が遠い領域で応力が大きい程、 $\Delta\tau(x,y)$ の値も大きくなることを示している。したがって、凹面と平面が接触した場合、最大静止摩擦トルク $\max(\tau_n)$ は大きくなる。我々が用いた $p(x,y)$ の式を式 (6)～式 (9) に示す。また、楕円体、楕円柱、凹面を把持した際の接触面を図 6 に示す。

$$\text{楕円体: } P_{max} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \quad (6)$$

$$\text{楕円柱: } P_{max} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{l}\right)^2} \quad (7)$$

$$\text{一葉双曲面 } (P_{min} > 0): P_{max} - P_{min} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{L}\right)^2} \quad (8)$$

$$\text{一葉双曲面 } (P_{min} < 0): P_{max} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{x+L}{2L}\right)^2}\right) \quad (9)$$

ただし、 P_{max} は応力の最大値、 P_{min} はくびれにおける応力の最大値を示す。式 (6) は、楕円体を把持する際の応力分布式を表し、変数 a, b には、図 6(a) の楕円

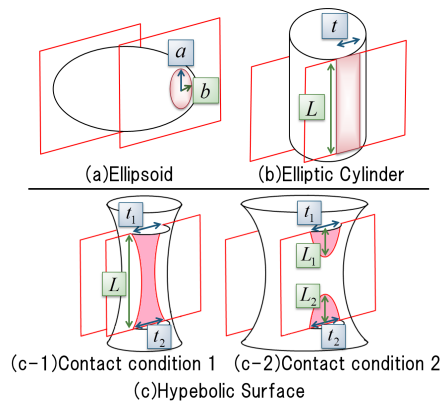


Fig. 6 Contact area

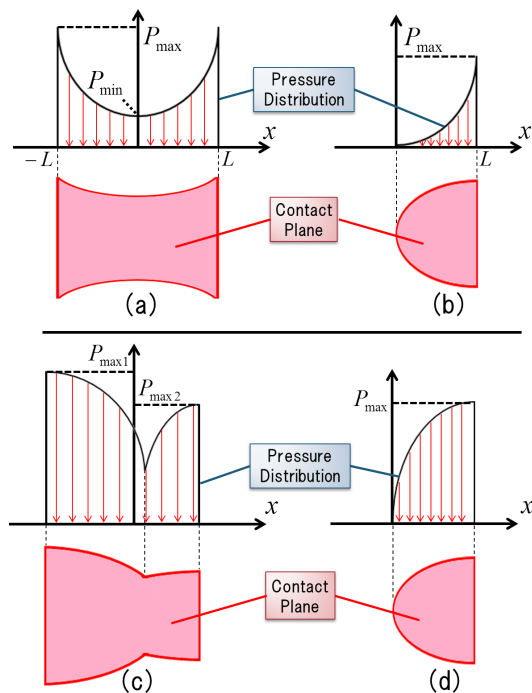


Fig. 7 Stress distribution

形接触面の長径, 短径の値を用いる. 式 (7) は, 楕円柱を把持する際の応力分布式を表し, 図 6(b) に示すように, 長方形接触面の楕円柱母線に平行な辺の長さ L , その辺に垂直な接触面上の辺の長さ t を用いる. 図 6 から分かるように, 一葉双曲面のような凹面を把持する場合は, 把持対象物の曲率やグリッパで挟む力によって接触面が変化する. また, その接触面の相違により図 7(a),(b) のように応力分布が異なる. 以降では, 図 6(c-1) のように接触領域が 1 つにつながっている場合を接触状態 1, 図 6(c-2) のように接触領域が分かれている接触を接触状態 2 と呼ぶ. 式 (8) は, 接触状態 1 の応力分布を表す式を示している. t_1, t_2 は必ずしも同値ではないため, 2 つの値の平均値を t として用い

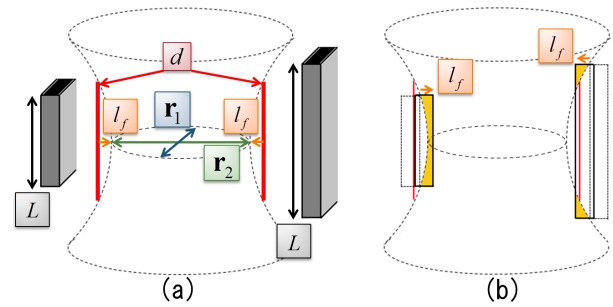


Fig. 8 Distinguish of contact condition



Fig. 9 Approximation models

る. 式 (9) は, 接触状態 2 の応力分布を表す式を示している.

一葉双曲面や複数の楕円体から成るくびれの把持は, 楕円体や楕円柱面を把持する場合と異なり, グリッパで挟む力や一葉双曲面の曲率によって接触面が異なる. 接触状態を判別する手法を図 8 を用いて述べる. 図 8 では r_2 を挟むような把持姿勢を示している. ここでは, グリッパが物体に接触した位置から r_2 の方向に l_f だけ, 物体にグリッパがめり込む把持を計画する. r_2 の方向に l_f だけ一葉双曲面の表面から離れた点を通り, グリッパの先端の面及び把持対象物と接する面に平行な直線を引く. その直線と一葉双曲面の交点同士の距離を d , 図 8 に示すグリッパの幅を L とする. グリッパと物体の接触状態と d, L の関係は以下のようになる.

1. $d > L \rightarrow$ 接触状態 1
2. $d < L \rightarrow$ 接触状態 2

図 8(b) で, それぞれグリッパの幅 L の違いによる接触状態の違いを示す.

複数の楕円体から生成されるくびれを把持する場合も, 曲率, グリッパで挟む力によって図 7(c),(d) のように圧力分布が異なる. そこで, 楕円体と同様の式 (6) を, 積分区間を設定し用いる.

6. シミュレーション

シミュレーションはアヒルのモデルと, 形状の異なる 2 種類のペットボトルのモデルを用いて行った. ペットボトルの 1 つは側面が楕円柱形状であり, もう 1 つは側面が一葉双曲面形状である. それぞれモデルを二次曲面の組み合わせで近似した図を図 9 に示す. 本シ

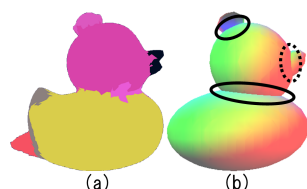


Fig. 10 Example of distinguishing constriction

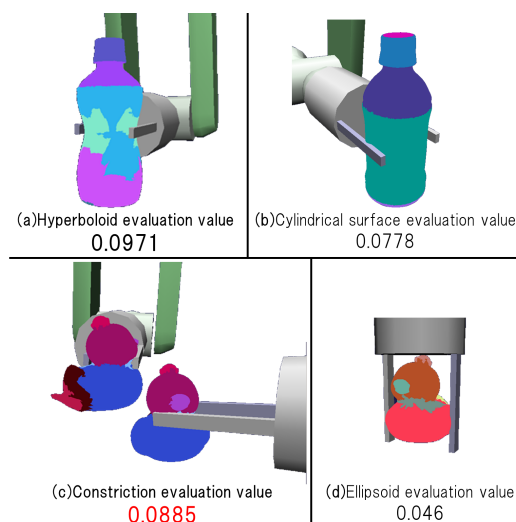


Fig. 11 Simulation

ミュレーションでは、グリッパが把持対象物に接触した位置から、さらに2mmめり込むような把持を計画している。

くびれの判別結果を図10に示す。図10(a)はモデルをポリゴン集合で表示し、図10(b)は近似曲面の一部を表示している。実線で囲まれた楕円体同士の境界はくびれと判定され、点線で囲まれた楕円体同士の境界はくびれが生成されていないと判定された。このことから、4章で述べたくびれの定義にしたがった判別ができている事が確認できる。

一葉双曲面の把持に関して、側面がくびれたペットボトルに対して把持計画を行った。一葉双曲面のみに対して把持姿勢の探索を行い、最も安定とされた把持姿勢の例と、そのときの定性評価値を図11(a)に示す。また、楕円柱を把持する手法を用いて、くびれの無いペットボトルに対して行った把持のシミュレーション結果と安定性評価値を図11(b)に示す。ただし、ここで使用する安定性評価値とは、Ferrariらの手法⁽⁶⁾やCiocarlieらの手法⁽⁷⁾でも用いられている評価値を使用する。具体的には、評価値は0～1の範囲で示され、「1」であるとき、接触力と同等の外力が任意方向に作用しても、安定した把持ができている状態のことを指す。一方、評価値が「0」である場合、安定した把持

を行うことができず、把持が破綻していることを指す。

くびれの把持に関して、アヒルのモデルを使用した。複数の楕円体から生成される複数のくびれに対して、把持姿勢の探索を行った。その結果、アヒルの顔の楕円体と体の楕円体から生じるくびれを把持するのが最も安定であると判定された。その把持姿勢と、安定性評価値を図11(c)に示す。併せて、我々が提案した物体を楕円体で近似し把持する手法⁽²⁾を用いた把持姿勢、安定性評価値を図11(d)に示す。楕円体単体の把持よりも、くびれを挟みこむ把持の方が安定していることが確認できる。

7. お わ り に

本研究では把持対象物を複数の二次曲面で近似し、複数の楕円体から生成されるくびれと一葉双曲面のくびれを把持する手法を提案した。二次曲面の組み合わせで近似することで、凸面形状に加えて凹面形状の表現が可能となった。また、くびれに対する把持姿勢を生成することで、より安定した把持を実現した。その有効性をシミュレーションによって確認した。

謝辞 本研究はJSPS 科研費24700194の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- (1) 辻 徳生, 原田 研介, 山野辺 夏樹, 永田 和之, 中村 晃, 長谷川 勉: “把持計画のための対象物二次曲面近似のグラフ表現” 日本ロボット学会学術講演会, 3E1-7, 2011
- (2) 宇都 宗一郎, 辻 徳生, 原田 研介, 倉爪 亮, 長谷川 勉: “区分的な楕円体及び楕円柱面近似に基づく把持計画”, ロボティクスメカトロニクス講演予稿集, No.12-3, 2012.
- (3) 原田 研介, 辻 徳生, 永田 和之, 山野辺 夏樹, 中村 晃, 河井 良浩: “把持面に柔軟性を有するパラレルグリッパの把持計画”, 日本ロボット学会誌, 2010.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) C.Ferrari, and J.Canny: “Planning Optimal Grasps”, IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, pp.2290-2295, 1992.
- (7) 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.