

区分的な二次曲面近似に基づく 平面と曲面の抽出及び把持姿勢候補の生成

宇都 宗一郎^{*1}, 辻 徳生^{*1}, 原田 研介^{*2}, 倉爪 亮^{*1}, 長谷川 勉^{*3}

Grasp Postures Generation for Planes and Surfaces based on Quadric Surface Approximation of Objects

Soichiro UTO^{*1}, Tokuo TSUJI^{*1}, Kensuke HARADA^{*2}, Ryo KURAZUME^{*1} and
Tsutomu HASEGAWA^{*3}

^{*1} Department of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University
744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka 819-0395, Japan

^{*2} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
1-1-1 Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8568, Japan

^{*3} Kumamoto National College of Technology
2659-2 Suya, Koshi-shi, Kumamoto 861-1102, Japan

This paper presents a planning method to allow a robot to grasp objects in daily life. In previous methods, objects are approximated by primitive shapes and a planner generates candidates of grasp postures for a primitive. Since these methods don't consider grasping several primitives, generated grasp postures are limited. We develop techniques for generating candidates of grasp postures for a pair of primitives. The planner approximates objects by quadric surfaces. We select two surfaces, for example plane-plane, plane-ellipsoid and plane-cylinder. We perform several simulations to verify the effectiveness of our proposed method.

Key Words : Grasp, Force Closure

1. 緒 言

東北地方太平洋沖地震や原子力発電事故に伴い、ロボットによる作業が注目を浴びている。人間が侵入できない場所において、ロボットが障害物の除去や物の運搬などの作業を行うことが期待されている。また、高齢化の進行に伴い、ロボットによる生活支援に対しても注目が集まっている。これらのロボットは、物の持ち運びや受け渡しのスキルが必要不可欠となるため、ロボットによる把持技術が開発されている。ロボットが物体を持する際には、外力が加わっても把持を保てる安定した把持の位置、姿勢の選択を、自動的に行う必要がある。また、実世界には様々な形状の物品が存在しているため、物品それぞれの形状に応じた把持姿勢を生成する必要がある。

把持姿勢候補を効率よく生成する手法として、従来、物体のプリミティブ近似に基づく手法⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾が提案されている。プリミティブ毎に把持姿勢を生成すること

で、把持姿勢の探索範囲を限定することができる。従来、球や円柱、多面体などといった様々な形状がプリミティブ形状として用いられてきた。しかし、複雑な形状を近似対象とすると近似の精度が悪くなる場合があった。それに対し、我々は区分的な二次曲面及び平面による形状近似法⁽⁵⁾を提案した。この近似手法により複雑な形状が表現可能となり、新たに凹面に対する把持姿勢の生成を実現した。ただしこれらの手法は、プリミティブ単体に対してのみ把持姿勢候補を生成している。

我々は、より多くの適切な把持を生成するために、複数のプリミティブの組み合わせに対して把持姿勢候補を生成する。本予稿では、楕円体、楕円柱と平面の組み合わせに対する把持姿勢候補の生成手法について述べる。物体形状を二次曲面及び平面で近似し、楕円体-平面、楕円柱-平面、平面-平面の組み合わせを選択する。それぞれの組み合わせに対して把持姿勢の候補を生成する。従来のプリミティブ単体に対する把持と、提案手法を用いた把持の違いの例を図.1に示す。これらの把持姿勢候補の安定性を force closure に基づいて評価する。提案手法の有効性を、把持シミュレーションを行い確認する。

^{*1} 九州大学 (〒 819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)
uto@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp, {tsuji, kurazume}@ait.kyushu-u.ac.jp

^{*2} 産業技術総合研究所 (〒 305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1)
kensuke.harada@aist.go.jp

^{*3} 熊本高等専門学校 (〒 861-1102 熊本県合志市須屋 2659-2)
hasegawa@kumamoto-nct.ac.jp

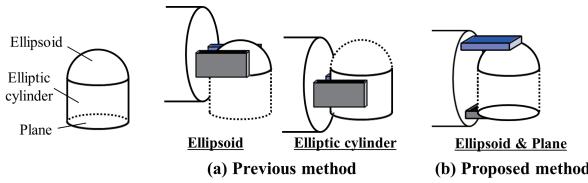


Fig. 1 Examples of difference between previous method and proposed method

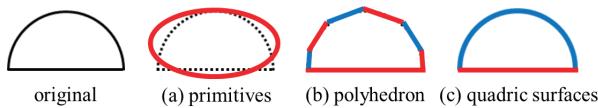


Fig. 2 Comparison approximation methods

2. 従来手法

ロボットによる把持を行う上で、物体形状をプリミティブの組み合わせで近似し、それぞれのプリミティブに対して把持姿勢を生成する手法⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾が従来提案されている。従来手法で用いられているプリミティブとは、点対象かつ閉じた単純形状のことを指す。Miller ら⁽¹⁾は、把持対象物を球、円柱、円錐、直方体で近似し、それらに対して把持姿勢候補を生成する手法を提案している。山野辺ら⁽²⁾は、これらのプリミティブに加え、内部に空洞がある管状のプリミティブを近似形状として用いている。Goldfeder ら⁽³⁾は、超二次楕円体をプリミティブとして用いており、超二次楕円体を構成するパラメータを変化させることで、滑らかな形状で表現する手法を提案している。しかし彼らの手法では、点対象かつ閉じた曲面を近似形状として用いているため、複雑な形状を表現すると図.2(a)のように近似精度が悪くなる。一方、原田ら⁽⁴⁾は、把持対象物を多面体で近似する手法を提案している。多面体の側面から平行な面の組み合わせを探査し、その平面の組み合わせに対する把持姿勢を生成している。この手法では、図.2(b)のように形状を概ね正確に表現できるが、平行な面を抽出できない場合がある。

従来の形状近似法では、複雑な形状が表現困難であることや、把持姿勢生成の対象がプリミティブ単体に制限されているという問題がある。したがって、より適切な把持姿勢が存在する場合においても、その把持姿勢を生成できない可能性がある。

そこで、まず近似精度の問題に対し、区分的な二次曲面及び平面で物体を近似する手法⁽⁵⁾を提案した。図.2(c)に示してあるように、複雑な物体においても局所的特徴を精度よく表現できる。この近似手法を用い、楕円体、楕円柱及び一葉双曲面単体に対して把持姿勢

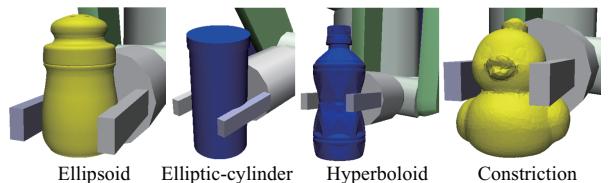


Fig. 3 Grasp posture using approximation by quadric surface

を生成した。また、複数の楕円体から生成されるくびれに対する把持姿勢を生成する手法⁽⁶⁾を提案し、プリミティブ単体の把持よりも安定した把持を実現できることを示した。これらの手法を用いることにより実現された把持姿勢を、図.3に示す。

本予稿では、さらに他の二次曲面及び平面の組み合わせに対する把持姿勢生成手法を提案する。区分的な二次曲面近似により、複雑な形状を表現できるため、新たな把持姿勢候補の生成が可能となる。具体的には、二次曲面の組み合わせから楕円体-平面、楕円柱-平面及び平面-平面の組み合わせを選択し、それらに対して把持姿勢を生成する。簡易モデルを用いて把持シミュレーションを行い、提案手法の有効性を確認する。

3. 把持対象物の二次曲面近似及び近似曲面分類

形状近似法として、二次曲面の組み合わせで把持対象物を近似する手法⁽⁵⁾を用いる。従来手法と比べ、把持対象物の局所特徴を表現することができる。その後、二次曲面の式を構成するパラメータを用い、二次曲面の形状を分類する。これらの手続きを以下で述べる。

把持対象物は、全周の形状がポリゴンメッシュで構成されており、メッシュを構成する点群、メッシュの連結関係は既知であるとする。各メッシュは1つのクラスタに属しているものとする。以下の手続きを繰り返し、二次曲面の組み合わせで近似を行う。

1. 全ての隣接クラスタの組み合わせを二次曲面で近似する。
2. 近似誤差が最も小さい隣接クラスタの組み合わせをマージし、1つのクラスタとして更新する。この手続きを繰り返す。
3. クラスタの組み合わせ全ての近似精度が、閾値を上回った時点で手続きを終了する。

近似誤差の閾値を変化させることで曲面の数が変化するため、近似の精度を変化させることが可能となる。二次曲面近似を行う手続きを示した図を図.4に示す。

二次曲面の標準形は以下の式で表わすことができる。

$$ax^2 + by^2 + cz^2 = 1 \quad (1)$$

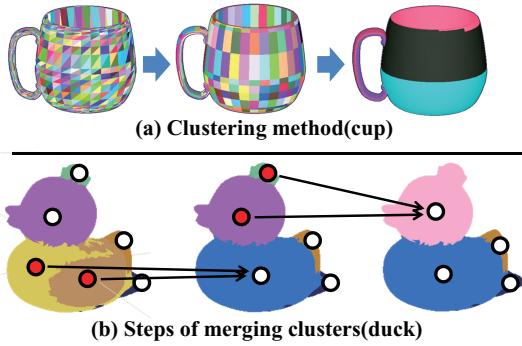


Fig. 4 Models used for simulation

Table 1 Classification of Quadric surfaces

Type	Condition
Ellipsoid	$a > 0, b > 0, c > 0$
	$a > 0, b > 0, c \approx 0$
Cylinder	$a > 0, b \approx 0, c > 0$
	$a \approx 0, b > 0, c > 0$

また、平面は以下の式で表す。

$$a'x + b'y + c'z = 1 \quad (2)$$

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判別可能である。判別条件を用いて、把持対象とする二次曲面の分類を行う。本予稿で把持計画に用いる楕円体及び楕円柱における係数 a, b, c の条件を表.1 に示す。

4. 把持姿勢候補の生成

把持機構として、二本指平行グリッパを用いる。グリッパ表面に柔軟な素材を付けることで、面接触での把持を実現する。

分類された二次曲面から、楕円体-平面、楕円柱-平面、平面-平面の組み合わせを全て選択する。以下で述べる手法を用いてそれらの組み合わせを選別する。選別された組み合わせに対し、把持姿勢を複数生成する。以下で、組み合わせの選別手法及び把持姿勢生成手法について、各組み合せごとに述べる。

4.1 楕円体-平面 選別の手続きを図.5 上段に示す。平面の法線ベクトル \mathbf{n}_p を導出する。楕円体上のある点 P における法線ベクトルを \mathbf{n}_e とする。 \mathbf{n}_e が \mathbf{n}_p と平行となるような楕円体上の点 p_e を導出する。 p_e から平面へ垂線を下ろし、楕円体で近似されたクラスターのメッシュと交わる点を導出する。楕円体に近似されたクラスターのメッシュとの交点が、 p_e から一定の距離内に存在すれば把持姿勢生成可能な組み合わせとなし、次の処理へ移行する。

把持姿勢生成の手続きを図.5 下段に示す。平面において、他領域との境界点群の重心を g_p とする。 g_p と、選別の際に導出した p_e を結ぶ直線を、グリッパの開閉軸とする。1つの直線につき、正負2つの方向が考えられるため、グリッパの開閉方向は2通りである。次に、直線の中点を導出する。ハンドのアプローチベクトルは、この中点を通るものとする。平面における他領域との境界点群を楕円で近似する。この楕円の長軸及び短軸をアプローチ軸とする。1つの軸につき、正負2つの方向が考えられるため、グリッパのアプローチ方向は4通りである。つまり、楕円体-平面の組み合わせには、合計8通りの把持姿勢を生成する。

4.2 楕円柱-平面 楕円柱-平面に対する組み合わせ選別手法は、楕円体-平面の場合と同様に行う。選別の手続きを図.6 上段に示す。

把持姿勢生成手法についても、楕円体-平面の場合と同様の処理を施す。図.6 下段に、グリッパの開閉軸、アプローチ軸の導出について示す。

4.3 平面-平面 選別の手続きを図.7 上段に示す。まず、平面同士が平行であるか判別を行う。平行であれば、平面の法線方向において、2枚の平面が重なる領域があるかの判定を行う。具体的には、片方の平面において、他の領域との境界点群の重心 g_{p1} を抽出する。もう片方の平面に対しても同様に g_{p2} を導出する。次に、重心 g_{p1}, g_{p2} 同士の中点 m_p を導出する。この m_p から、平面へ垂線を下ろし、平面で近似されたクラスターのメッシュと交わるか判別を行う。いずれの平面に対しても交点が存在すれば、平面の法線方向において重なる領域があると判定する。共通の領域が確認された場合、把持姿勢を生成する。交点の片方でもメッシュ上に存在しない場合は、重なる領域が存在しない、もしくは小さいため、把持姿勢候補を生成する対象から除外される。

把持姿勢生成の手続きを図.7 下段に示す。 g_{p1}, g_{p2} を結ぶ直線をグリッパの開閉軸とする。1つの直線につき、正負2つの方向が考えられるため、グリッパの開閉方向は2通りである。次に、 m_p を通るように、ハンドのアプローチベクトルを定める。それぞれの平面において、境界点群を楕円で近似する。この楕円の長軸及び短軸をアプローチ軸とする。2つの平面において同様の処理を施し、楕円体-平面、楕円柱-平面の組み合わせの倍の、4軸のアプローチ軸を導出する。1つの軸につき、正負2つの方向が考えられるため、グリッパのアプローチ方向は8通りである。つまり、平面-平面の組み合わせには、合計16通りの把持姿勢を生成する。

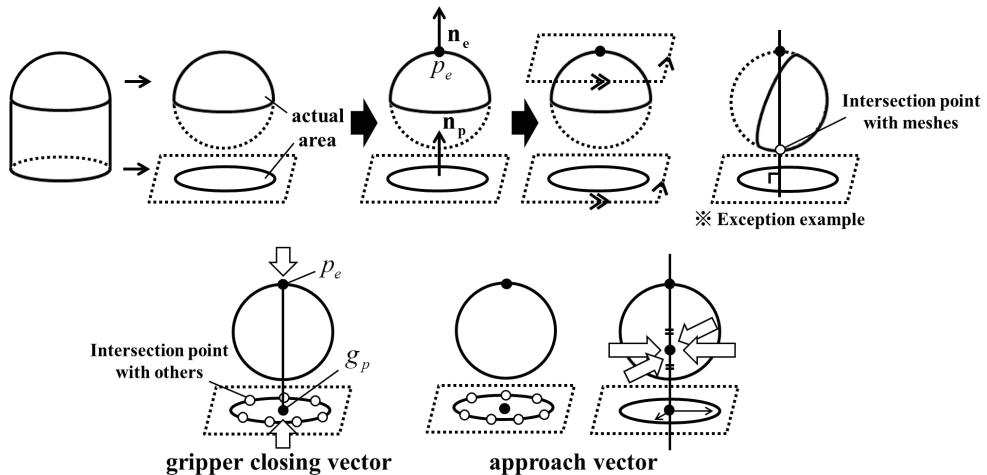


Fig. 5 Selecting combinations for Ellipsoid-Plane

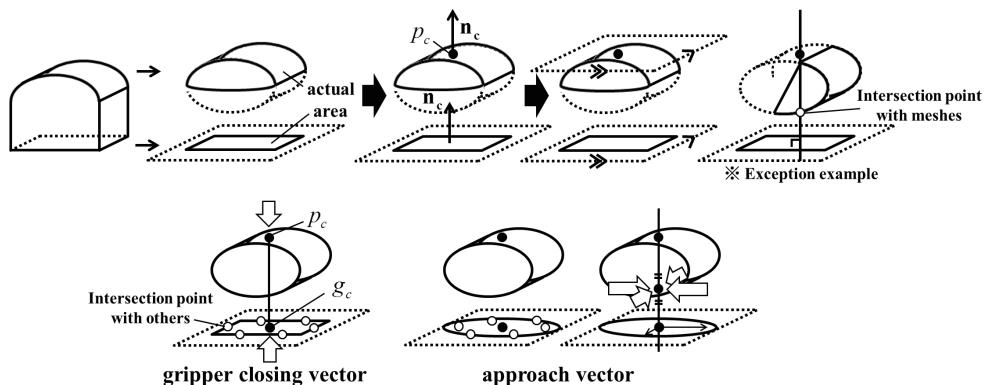


Fig. 6 Selecting combinations for Cylinder-Plane

5. 安定性評価

4章で生成された把持姿勢に対して、安定性の評価を行う。安定性評価の高い把持姿勢をいくつか選択し、実現可能な把持姿勢を最終的な出力結果とする。

把持の安定性評価を行う手法として、force closure⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾を用いた手法が多く提案されている。例えば、Ferrari ら⁽¹⁰⁾は、force closureに基づいた点接触における把持安定性評価手法を提案している。Ciocarlie ら⁽¹¹⁾は、Ferrari らの手法を面接触把持における安定性評価手法へと拡張した。接触面法線方向周りの静止摩擦トルクを考慮することで、点接触における評価から面接触における評価への拡張が可能となる。Ciocarlie らの手法に基づき、我々は二本指平行グリッパを用いた面接触における把持安定性評価の一般化を行った⁽¹²⁾。Winkler 弾性基礎⁽¹³⁾を用いて応力の分布を放物面で近似することで、様々な応力分布を数式で表現している。この数式を Ciocarlie らの手法と組み合わせることで、彼らの手法を接触

応力分布に応じた安定性評価へと拡張した。さらに、応力分布を4つのカテゴリに分類することで、二本指平行グリッパを用いた様々な形状に対する把持安定性を一般的に評価することが可能となった。

本予稿では、この安定性評価手法を用いて評価を行う。この手法を用いるにあたり、把持対象物によって変化する応力分布を、回転放物面、放物線柱面、双極放物面及び直方体のどれかに分類する必要がある。本予稿で我々が把持対象として扱う楕円体、楕円柱及び平面に対する応力分布を、表.2に示す通りにそれぞれ分類する。グリッパと接触する二次曲面が楕円体の場合、応力分布として回転放物面を、楕円柱の場合放物線柱面を、平面の場合直方体を用いる。また、具体的な応力分布を図.8に示す。

4章で生成した把持姿勢全てに対して安定性の評価を行い、評価の程度を評価値で判断する。この評価値は、0～1の範囲で示される。「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」

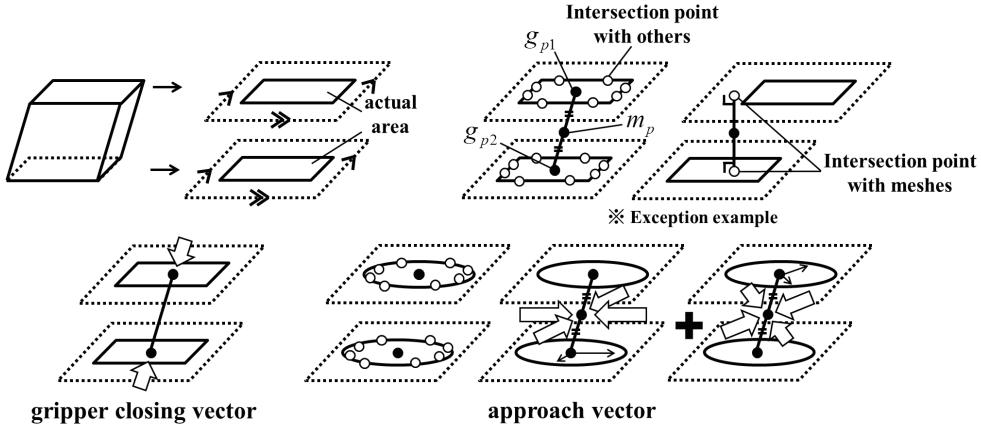


Fig. 7 Selecting combinations for Plane-Plane

Table 2 Classification of stress distribution

Grasped quadric surface	Stress distribution
Ellipsoid	Paraboloid of revolution
Cylinder	Parabolic Cylinder
Plane	Rectangular parallelepiped

Ellipsoid	Cylinder	Plane

Paraboloid of revolution	Parabolic cylinder	Rectangular parallelepiped

Fig. 8 Classification of stress distribution

である場合、安定した把持を行うことができない。

6. シミュレーション

提案手法を用いて、いくつか把持シミュレーションを行った。把持対象物として、物体形状として楕円体部、楕円柱部、平面部を持つような、3つの簡易的なモデルを作製した。それらのモデルを図.9に示す。図.9上段はメッシュモデルを、図.9下段はクラスタ毎にカラーリングされたモデルを示している。これらの物体に対し、楕円体や楕円柱といったプリミティブ単体のみに対する把持姿勢生成手法では、適切な把持姿勢の生成が困難である。しかし、楕円体-平面、楕円柱-平面、平面-平面を挟む把持を生成することで、適切な把持姿勢を生成することが可能である。把持姿勢の一例、安定性評価値を図.10に示す。この評価値は、Ferrari

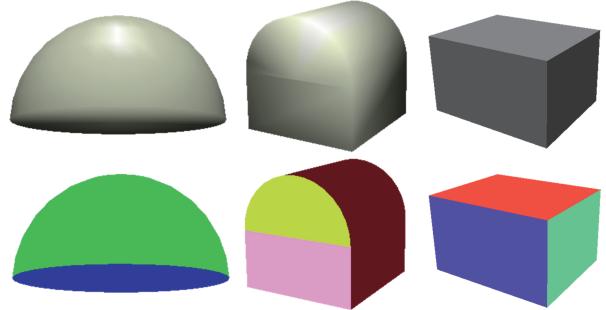


Fig. 9 Models used in simulation

Table 3 PC specification

CPU	Intel(R) Core(TM) i7-2600 3.4GHz
Memory	4.00GB
OS	Linux Ubuntu v12.04

らの force closure の指標と同一であるが、この指標を接觸面法線まわりのトルクを例として分析する。把持位置を結ぶ線分が、物体の重心からどの程度ずれた位置を把持しても、安定把持を保っていられるかという値を示す。例えば、把持対象物の重量が 100[g]、評価値が 0.0098 の場合、重心から 1[cm] 離れた位置までなら、安定した把持を行うことができる。

我々がシミュレーションに用いた PC のスペックを表.3 に示す。8 通りもしくは 16 通りの把持姿勢を生成し、全ての把持姿勢の安定性評価を行うと、楕円体-平面、楕円柱-平面、平面-平面いづれかの組み合わせ 1 つに対し、5 秒以内で実行された。オンラインで高速に把持を計画する事が可能である。

7. 結 言

本予稿では、複数の曲面に対する把持姿勢候補の生成手法を提案した。新たに二次曲面と平面による形状

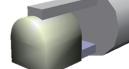
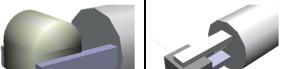
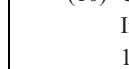
Target	Ellipsoid-Plane	Cylinder-Plane	Cylinder-Plane
Grasp posture			
Value of evaluation	0.0413	0.0541	0.0691
Target	Plane-Plane	Plane-Plane	Plane-Plane
Grasp posture			
Value of evaluation	0.0749	0.0646	0.0712

Fig. 10 Result of grasp planning

近似を用いることで、物体の複雑な形状を表現することが可能となった。楕円体、楕円柱と平面の組み合わせに対する把持姿勢を生成することで、新たな把持姿勢生成手法を示した。把持シミュレーションを用いて、実際に生成された把持姿勢を示し、それらの把持姿勢の安定性を評価した。この結果から、本手法の有効性を確認した。

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) Andrew T.Miller, Steffen Knoop, Henrik I.Christensen and Peter K.Allen, "Automatic Grasp Planning Using Shape Primitives", IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, pp.1824-1829, 2003.
- (2) 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.
- (3) Corey Goldfeder, Peter K. Allen, Claire Lackner, and Raphael Pelossof: "Grasp Planning via Decomposition Trees", IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp.4679-4684, 2007.
- (4) K. Harada, T. Tsuji, K. Nagata, N. Yamanobe, K. Maruyama, A. Nakamura, and Y. Kawai: "Grasp Planning for Parallel Grippers with Flexibility on its Grasping Surface", IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, pp.1540-1546, 2011.
- (5) 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.
- (6) 宇都 宗一郎, 辻 徳生, 原田 研介, 田原 健二, 長谷川 勉, 倉爪 亮: “区分的な二次曲面近似に基づく把持姿勢候補の生成”, 第18回ロボティックシンポジア講演予稿集, pp.225-230, 2013.
- (7) F. Reuleaux: "The kinematics of machinery", Macmillan New York, 1897.
- (8) M.S. Ohwovoriole: "An extension of screw theory and its application to the automation of industrial assemblies", Ph.D.dissertation, Department of Mechanical Engineering, 1980.
- (9) J.K. Salisbury and B. Roth: "Kinematics and force analysis of articulated hands", ASME J Mech Trans Automat Des, vol.105, pp33-41, 1982
- (10) C.Ferrari, and J.Canny: "Planning Optimal Grasps", IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, pp.2290-2295, 1992.
- (11) Matei Ciocarlie, Claire Lackner, and Peter Allen: "Soft Finger Model with Adaptive Contact Geometry for Grasping and Manipulation Tasks", Joint Eurohaptics Conf. and IEEE Symp. on Haptic Interfaces, 2007.
- (12) 宇都 宗一郎, 辻 徳生, 原田 研介, 倉爪 亮, 長谷川 勉: “応力分布の放物面近似に基づく把持安定性の評価”, 日本ロボット学会学術講演会, 3G1-7, 2013.
- (13) Winkler elastic foundation: <http://www.me.ust.hk/~meqpsun/Notes/CHAPTER4.pdf>