応力分布の放物面近似に基づく把持安定性の評価

○宇都 宗一郎, 辻 徳生 (九州大学), 原田 研介 (産業技術総合研究所),
倉爪 亮 (九州大学), 長谷川 勉 (熊本高専)

1. はじめに

現在日本は超高齢社会であり，要介護者の増大が問題となっている．これに伴い，被介護者にサービスを提供するロボットの開発が行われている．サービスの一例として，物の持ち運びや受け渡しなどの作業が挙げられる．しかし，これらの作業を実現するためには，ロボットによる様々な物体の把持が必要不可欠である．ロボットによる把持計画として，把持対象物体を単純形状の組み合わせで近似し，把持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，適切な把持の取捨選択を高速実行できる．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 [1][2]．しかし日常生活において，凸領域だけでなく凹領域を持つ物品も存在する．したがって，凹領域の形状表現や，ロボットによる凹領域の把持を検討する．

我々は，これまでに二次曲面の組み合わせによる物体の近似手法 [3] を提案している．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．さらに，一葉双曲面のような凹面や，複数の楕円体から生成されるくびれに対する把持姿勢生成手法 [4] を提案した．本手法を用いることで，凹面に対する把持姿勢の生成が可能となるが，任意の表面形状曲率に対する十分な安定性解析は実現されていない．そこで本論文では，凸形状に加えて，凹形状やくびれを把持する際の一般的な安定性の評価式を求める．提案する一般化式を用いて，凸面および凹面領域の把持が安定性に与える影響を確認すると共に，その有効性を確認する．

2. 従来手法

従来，ロボットハンドによる把持安定性の評価には Force Closure が用いられてきた．本来，Force Closure は機構学に導入された概念であり，Nguyen ら [5] によってロボットハンドへの拡張が行われた．また，これまでに Nguyen らの手法をベースとした多くの手法が提案されている．例えば Ferrari ら [6] は，２種類の把持レンチ空間を定義し，Force Closure に基づく評価手法を提案している．また，Rimon ら [8] や舟橋ら [9] は，把持物体の曲率と安定性評価値の関連性について議論している．しかし，本手法は剛体の物体と指が点接触することを前提としており，物体と指とが面で接触する場合（面接触）については議論されていない．これに対し Ciocarlie ら [7] は，面接触における Force Closure に基づく安定性評価法を提案している．具体的には，凸の指と凸の物体が面接触した際に生じる接触面法線方向周りの摩擦条件式を Ferrari らの手法へ導入することで，面接触下での安定性の評価を実現している．

法線方向周りの摩擦条件式を導出する際，曲面同士が弾性接触する際に生じる応力モデルとして，Hertz の接触応力と Winkler 弾性基礎等が一般的に用いられる．Ciocarlie らは，この２つの応力モデルを用いて摩擦条件式を導出しているが，対象を凸領域把持の場合に限定している．

それに対し本論文では，面接触による凹領域の把持を実行する．また，凹領域接触を含む把持に対する安定性評価式の一般化を行い，その有効性を示す．

図 1 コップの二次曲面近似

3. 形状近似及び把持姿勢候補の生成

3.1 二次曲面近似

把持対象をプリミティブで近似する手法として，直方体や楕円柱で近似する手法 [1] や，凸の超二次楕円体で近似する手法 [2] などが提案されてきた．しかしこれらの手法は，近似形状として凸形状のプリミティブが用いられており，凹形状を滑らかに表現することは不可能である．そこで我々は，一葉双曲面をはじめとする凹面を含む二次曲面を組み合わせ，把持対象物を近似する手法 [3] を提案している．

把持対象物は，ポリゴンメッシュにより予めその形状が与えられているものとし，この把持対象物を二次曲面の組み合わせで近似する．対象物を構成する二次曲面の集合から，把持対象の曲面を選択し，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を生成する．
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．

近似誤差に対する閾値を変化させることで，近似曲面の数を変化させることができる．

二次曲面の標準形は以下の式で表わすことができる．

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 = 1 \tag{1}$$

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選択を行う．

3.2 把持姿勢候補の生成

これまで我々は，凸形状として楕円体や楕円柱に対して把持姿勢候補を生成する手法 [10] を提案した．ま

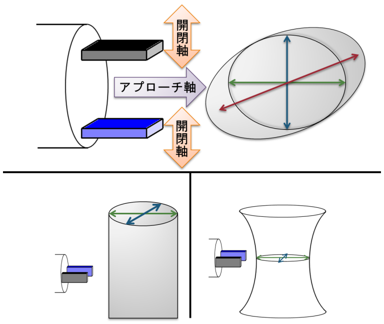


図 2 各二次曲面に対する把持姿勢

た，凹形状として複数の楕円体から生成されるくびれ領域や一葉双曲面に対して把持姿勢候補を生成する手法 [4] を提案した．**図 2** に示す通り，楕円体には 3 軸，楕円柱，くびれ領域には 2 軸の代表軸を決定する．この代表軸から 1 軸をグリッパのアプローチ軸，もう 1 軸をグリッパの開閉軸として定める．把持シミュレーションでは，これらの把持姿勢生成手法を用いる．

4. 安定性評価

把持機構として，二本指平行グリッパを使用する．また，グリッパ表面が柔軟であり面接触すると仮定する．面接触における把持安定性の評価手法として，把持対象物が凸形状の場合については，従来提案されてきた．しかし，把持対象物が凹形状の場合については，新たに把持安定性の評価を行う手法が必要となる．以下では，Force Closure に基づく従来の安定性評価手法について述べ，凹形状に対する把持安定性評価手法について述べる．

4.1 Force Closure 評価法

Ferrari ら [6] は，Force Closure に基づいた安定性評価法を提案している．彼らは剛体を把持対象としているため，評価対象が点接触による把持に限定されている．それに対し Ciocarlie ら [7] は，面接触における Force Closure に基づいた安定性評価法へ拡張している．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．

$$f_{tan}{}^2 + \frac{\tau_n{}^2}{e_n{}^2} \leq \mu^2 P^2 \tag{2}$$

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，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 (3) のようにして示す．

$$e_n = \frac{max(\tau_n)}{max(f_{tan})} \tag{3}$$

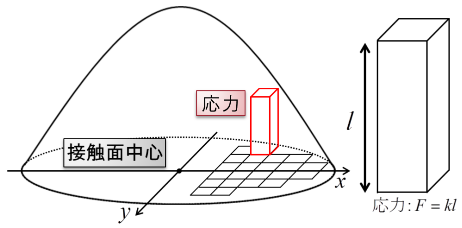


図 3 接触面に生じる応力分布モデル

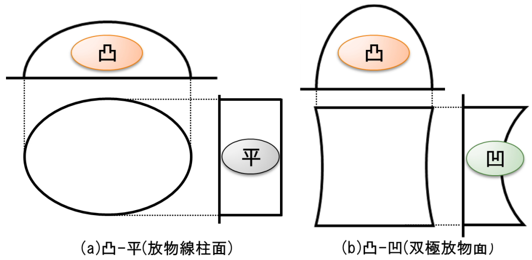


図 4 応力分布の凹凸平の組み合わせ

4.2 最大静止摩擦トルク算出及び接触状態導出

式 (3) 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．グリッパと物体の接触面に生じる応力分布モデルを**図 3** に示す．

微小領域に発生する静止摩擦モーメント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．

$$max(\tau_n) = \int\int_D \sqrt{x^2+y^2}\mu p(x,y)dxdy \tag{4}$$

$p(x,y)$ 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．この応力分布を示す $p(x,y)$ は把持対象によって変化する．式 (4) は，中心からの距離が遠い領域で応力が大きい程，$max(\tau_n)$ の値も大きくなることを示している．

4.3 応力分布及び応力モデル

我々は，この応力分布として Winkler 弾性基礎 [11] を用いる．Winkler 弾性基礎とは，弾性接触が生じる場合に，応力分布の式を二次式で近似した応力モデルである．このモデルの一般化を行い，様々な応力分布を以下に示すいずれかに分類する．

モデルの一般化について**図 4** を用いて述べる．図 4 は 3 次元上に存在する応力分布のモデルを，2 次元で表現した図となる．接触面以外の面は必ず凸面，凹面及び平面に分類できる．例えば図 4(a) は凸面と平面が組み合わさった放物線柱面，例えば図 4(b) は凸面と凹面が組み合わさった双極放物面となる．凹凸平の 3 種の中から 2 面を選択するので，8 通り考えられる．その中でも，以下では凸-凸，凸-平，凸-凹，平-平について述べる．残りの 4 通りは，上記 4 通りを用いることで表現が可能となる．応力の最大値を p_{max} としたときの応力分布及び応力モデルについて，**図 5** を用いて述べる．

4.3.1 回転放物面

凸-凸の組み合わせの場合，応力分布 $p(x,y)$ は式 (5) で表される．また，応力モデルは回転放物面となり図

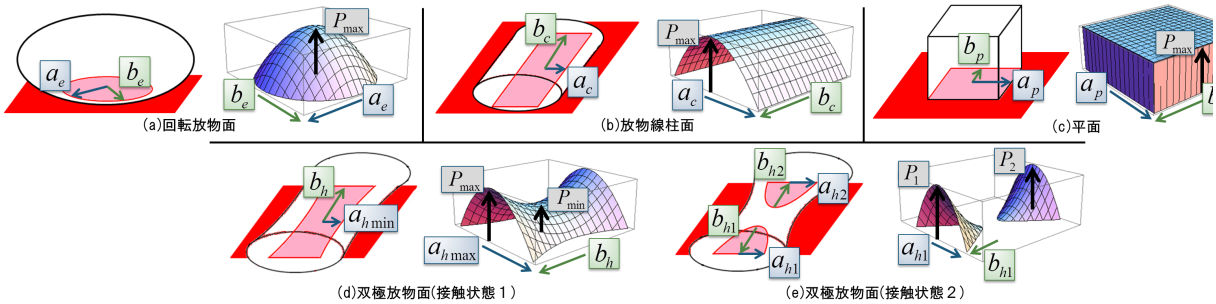


図 5Winkler 基礎弾性に基づく応力分布モデル

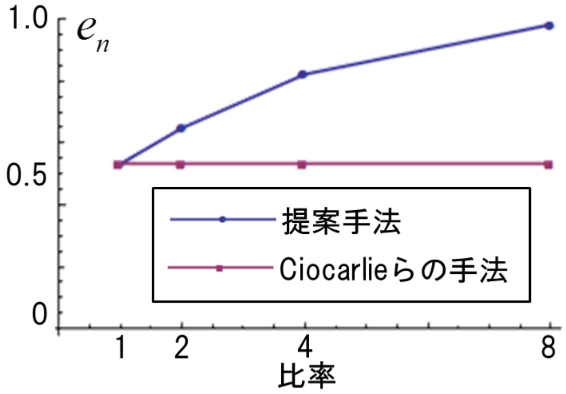


図 6Ciocarlie らの手法との比較

5(a) に示す．

$$p(x,y) = p_{max}\left(1-\left(\frac{x}{a_e}\right)^2-\left(\frac{y}{b_e}\right)^2\right) \tag{5}$$

ただし a_e, b_e は，楕円形接触面の長径，短径の値である．式 (5) から導出される e_n は式 (6) で表される．

$$e_n = \frac{16}{15}\frac{a_e}{\pi}E\left[\frac{\pi}{2}, 1-\left(\frac{b_e}{a_e}\right)^2\right] \tag{6}$$

一方，Ciocarlie らは e_n を以下の式を用いて導出している．

$$e_n = \frac{8}{15}\sqrt{a_e b_e}$$

しかし，彼らの式は，長径と短径がほぼ同じ値とみなし近似を行っている．我々が導出した式は，長径と短径に大きな差が生じた場合についても e_n が導出可能である．$a_e b_e$ を固定し，a_e と b_e の比率を変化させたときの e_n の値の違いを**図 6** に示す．

4.3.2 放物線柱面

凸-平の組み合わせの場合，応力分布 $p(x,y)$ は式 (7) で表される．また，応力モデルは放物線柱面となり図 5(b) に示す．

$$p(x,y) = p_{max}\left(1-\left(\frac{x}{a_c}\right)^2\right) \tag{7}$$

ただし，把持対象物である楕円柱の母線に垂直かつ長方形接触面の辺の長さを a_c，楕円柱の母線に平行かつ長方形接触面の辺の長さを b_c とする．式 (7) から導出される e_n は式 (8) で表される．

$$\begin{aligned} e_n = \frac{1}{80a_c^3 b_c}\Bigg(& a_c b_c(22a_c^2 - 3b_c^2)\sqrt{a_c^2+b_c^2} \\ & + 8a_c^2 \log\frac{b_c+\sqrt{a_c^2+b_c^2}}{a_c} \\ & + b_c^3(20a_c^2+3b_c^2)\log\frac{a_c+\sqrt{a_c^2+b_c^2}}{b_c}\Bigg) \end{aligned} \tag{8}$$

4.3.3 双極放物面

凸-凹の組み合わせの場合，把持対象物の曲率やグリッパの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 5(d)(e) のように，応力モデルが異なる．以降では，図 5(d) のように接触領域が 1 つに繋がっている場合を接触状態 1，図 5(e) のように接触領域が分かれている場合を接触状態 2 と呼ぶ．双極放物面の応力分布 $p(x,y)$ は式 (9) で表される．

$$p(x,y) = \frac{p_{\max}}{2}\left(1-\left(\frac{x}{a_h}\right)^2+\left(\frac{y}{b_h}\right)^2\right)+\delta \tag{9}$$

$$\begin{cases} \delta = 0 & (\text{接触状態 1}) \\ \delta > p_{min} & (\text{接触状態 2}) \end{cases}$$

ただし，$p_{\min}$ はくびれにおける応力の最大値を表す．δ は接触状態によって変化するパラメータである．また，把持対象物である一葉双曲面の母線に垂直かつ接触面上の辺の長さを a_h，一葉双曲面の母線に平行かつ接触面上の辺の長さを b_h とする．式 (9) から導出される e_n は，長行の式となるため，本論文では割愛する．

4.3.4 平面

平-平の組み合わせの場合，応力分布 $p(x,y)$ は式 (10) で表される．また，応力モデルを図 5(c) に示す．

$$p(x,y) = p_{max} \tag{10}$$

ただし，a_p, b_p は接触面の長辺，短辺をそれぞれ示している．式 (10) から導出される e_n は式 (11) で表される．

$$\begin{aligned} e_n = \frac{\sqrt{a_p^2+b_p^2}}{3} + \frac{a_p^2}{6b_p}\log\frac{b_p+\sqrt{a_p^2+b_p^2}}{a_p} \\ + \frac{b_p^2}{6a_p}\log\frac{a_p+\sqrt{a_p^2+b_p^2}}{b_p} \end{aligned} \tag{11}$$

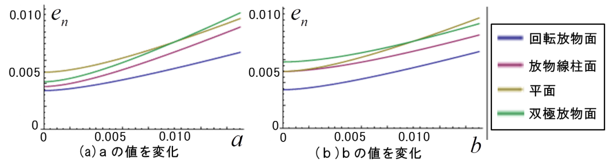


図 7 把持対象形状別の e_n

図 8 二次曲面で近似を行った把持対象物

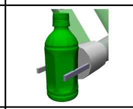
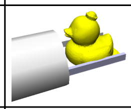
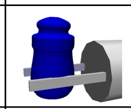
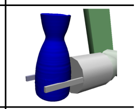
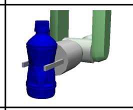
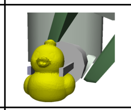
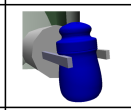
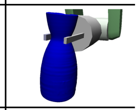
	ペットボトル	アヒル	調味料入れ	とっくり
応力分布分類	放物線柱面	回転放物面	回転放物面	回転放物面
凸領域				
接触面積[m^2]	0.00012	0.00255	0.000188	0.00214
評価値[N]	0.0207	0.0224	0.0157	0.0177
応力分布分類	双極放物面	双極放物面	双極放物面	双極放物面
凹領域				
接触面積[m^2]	0.00015	2.35, 2.2 ($\times 10^{-5}$)	0.000138	0.00013
評価値[N]	0.0310	0.0288	0.0288	0.0247

図 9 二次曲面で近似を行った把持対象物

5. シミュレーション結果

4.3 で導出した e_n について，a を 0.01 とし b を変化させた値，b を 0.01 とし a を変化させた値，それぞれの比較を行った．比較グラフを**図 7** に示す．回転放物面，放物線柱面，双極楕円面の順に e_n が大きくなっていることが分かる．双極放物面の切断面が凹面になっている方向の値を大きくすると，e_n の値が大きくなることが分かる．

4．で述べた評価手法を用いて，様々な物体の把持における安定性の評価を行った．ロボットハンドのモデルとして，6 自由度を持つ腕モデル PA10 の先端に，２本指平行グリッパを取り付けたモデルを使用している．把持対象物として，２種類のペットボトル，アヒル，調味料入れ，とっくりの５種類の物体モデルを用いた．それぞれのモデルを二次曲面近似した図を**図 8** に示す．本シ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 めり込む把持を計画している．

我々が提案した手法 [4][10] を用いて，把持姿勢を計画し，安定性の評価を行った結果を**図 9** に示す．ただし，ここで使用する安定性評価の値は，Ferrari ら [6] や Ciocarlie ら [7] の手法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．

ペットボトルに関して，片方のペットボトルは側面が楕円柱，もう片方のペットボトルの側面は一葉双曲面で近似された．またその他の物体モデルに関して，１つの物体モデルに対して，凸面および凹面の２種類の把持を行った．それぞれ最も安定した把持姿勢と評価値を示している．

6. おわりに

本研究では，生成された把持姿勢に対する安定性の評価式の一般化を行った．具体的には，応力分布を凹凸平の組み合わせで表現することで，面接触における法線方向周りのモーメントを考慮した安定性評価式を導出した．把持姿勢候補の生成手法 [4] と，本論文で一般化された評価式を用いることで，従来手法に比べ，より多くの安定な把持が実現できることを示した．また面接触において，凸面把持に比べ，凹面把持がより安定すること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] 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 Pelossof: “Grasp Planning via Decomposition Trees”, IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp.4679-4684, 2007.

[3] 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.

[4] 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”, ロボティックシンポジア予稿集, pp.225-230, 2013.

[5] V. Nguyen, ”Constructing force closure grasps”, Int J Robot Res, vol. 7, no. 3, pp.3-16, 1988.

[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.

[8] Elon Rimon and Joel W. Burdick Mobility of Bodies in Contact Part I: A 2nd-Order Mobility Index for Multiple-Finger Grasps

[9] Y. Funahashi, T. Yamada, M. Tate, and Y. Suzuki, Grasp Stability Analysis Considering the Curvatures at Contact Points, IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation, pp.3040-3046, 1996.

[10] 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”, ロボティックスメカトロニクス講演予稿集, No.12-3, 2012.

[11] Winkler elastic foundation: `http://www.me.ust.hk/~meqpsun/Notes/CHAPTER4.pdf`