把持のロバスト性解析に基づくケーシング拘束の定量的評価

牧 原 昂 志^{*1} 槇 田 諭^{*2}

Caging Quality Evaluation based on Analysis of Grasp Robustness

Koshi Makihara^{*1} and Satoshi Makita^{*2}

This paper presents a novel measurement method for caging quality based on static analysis of robotic grasping and manipulation. Caging is a geometrical constraint of objects in which those captured by surrounding robots are restricted to move in the bounded space. The object constraint with some margin is a promising tool to allow uncertainties appearing in object perception and robot control. Because of limitation of robot configuration, complete caging that the object never escape from is, however, not accomplished sometimes, and the target object is partially caged. As for such partial caging, the quality of geometrical constraint has not been sufficiently evaluated. In this paper, we propose an evaluation index of the quality based on the robustness of grasping and manipulation in order to deal with both caging and mechanical constraint simultaneously. Some numerical results are presented to validate our proposed procedure of evaluation.

Key Words: Caging, Grasping, Manipulation, Static Analysis, Robustness

1. は じ め に

ケーシングとは対象物に対してロボットで形成した囲い(ケーシング)の中に対象物を拘束し、その囲いから抜け出せないように運動を制限する手法である[1]。対象物の拘束のために物体の形状を含む幾何情報のみが必要で、位置制御ロボットによって物体を拘束できる利点があり、把持姿勢のための pre-shaping としての拘束としても有用である[2]。このとき、対象物の幾何情報の取得における不確かさや位置制御誤差などがある程度まで許容して物体拘束を成立させることができる点も有用である。また、ケーシング(囲い込み)が不完全な場合でも、対象物の運動が阻害されて、ロボットによる囲いから抜け出しにくくすることができる。これは partial cage [3] [4]、パーシャルなケーシングとよばれている。partial cage においては、重力等の力学的作用まで加味して対象物の抜け出しにくさを評価する energy-bounded caging [5] も提案されている。ケーシングによる幾何学的な拘束を考慮することは、把持、マニピュレーションの信頼性をさらに高める作用が期待できる。

本論文では、マニピュレーションの静力学に基づいて、ケーシング拘束の度合いを評価する手法を提案する。本手法では幾何学的条件のみを考慮するケーシングだけでなく、力学条件も加味するパーシャルなケーシングも合わせて扱うことができる。

なお、本論文におけるケーシング拘束という呼称は、完全なケーシングとパーシャルなケーシングの両方を含むものとする。

Makapuno らの partial cage の評価では、物体の周囲に配置されたロボットを障害物として、無限遠点へ到達するまでの経路計画問題を考えて、経路の探索時間を評価指標とした[3] [4]。したがってここでは幾何条件のみを考慮しており、力学的作用は議論されていない。一方で、確率的探索ではあるが、脱出経路が発見されなければ(実質的に)完全なケーシングであることも調べることができる。Mahler らの energy-bounded caging では対象物に対するパーシャルなケーシングの状態において重力等の外力が働いているとして、ロボットの囲い込みから脱出するために必要なエネルギー量を拘束の評価指標とした[5]。このとき、ロボットの囲いから脱出したかどうかを定義しておく必要がある。

筆者らは把持・マニピュレーションにおける接触力解析[6] [7]を用いて、パーシャルなケーシングを含むケーシングの幾何学的拘束の性能を評価する。力学解析に基づくためパーシャルなケーシングにおける力学的作用による抜け出しにくさを文献[5]同様に評価できる。このとき、文献[7]で定義されるマニピュレーションのロバスト性「外乱が加わっても対象物に対する把持・操作が乱されないときの外乱力の最大値」を、ケーシングにおける対象物の抜け出しにくさとする。そのため、Mahler ら[5]の解析のように、障害物を迂回するような脱出については考慮できない。本論文では一方向に対する平行移動、または回転運動、すなわち Euclidean motion [8]での運動しにくさを評価するものであることに留意されたい。

その一方で、力学拘束に基づく把持においても指配置による幾何学的拘束の効果を同時に評価することができるので、本論文で提案する評価値によって、力学的条件に基づいて幾何学的拘束を考慮した指配置計画を導出できる。簡単な例として、二

原稿受付 2019 年 2 月 15 日

^{*1}筑波大学大学院システム情報工学研究科

^{*2}福岡工業大学

^{*1}Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

^{*2}Fukuoka Institute of Technology

■ 本論文は新規性(要素分野)で評価されました。

■ 本論文は第 24 回ロボティクスシンポジアの同時投稿オプションで投稿されました。

Fig. 1 Grasping by three-fingered hand in 2D space

次元空間での y 方向への重力下の正方形物体の把握を考える (Fig. 1). 三指のロボットハンドを仮定し, Fig. 1 のような二通りの指配置パターンを与える. このとき把持のロバスト性を評価すると, Fig. 1 (b) の配置よりも Fig. 1 (a) の配置のほうが, ロバスト性の評価値がより高い. Fig. 1 (b) の例では, 最も外乱に弱い $-y$ 方向へは重力によって抜け出そうとする. 一方, Fig. 1 (a) の例では脱出可能な方向は $+y$ 方向には重力に逆らって抜け出すための外力が必要になる. すなわち, 物体が運動するために必要な外力力の大きさがロバスト性の評価値を決定する.

なお, いずれの場合においても指が配置される方向に対しては指から受ける接触力以上の外乱力を与えない限り, 把持が破たんすること, 対象物が抜け出すことはない. もし, ロボット指の関節トルクが無限大, すなわち位置制御指とすれば, この方向のロバスト性の評価値は無限大となる. このようにロバスト性の評価値を用いることで, ロボット指による幾何学的拘束を力学的拘束と同時に評価できると考える.

まとめると本論文では, これまで陽に評価されていなかった, 幾何学的拘束による運動しにくさと, 把持における力学的拘束による対象物の運動しにくさの両方を同時に評価する指標を提案する. これらは従来のマニピュレーションの力学解析におけるロバスト性評価に基づく新たな解釈であり, 従来の把持の解析に容易に適用可能である.

2. 力学モデル

本論文の力学モデルは横田らの力学解析モデル [7] に基づいて, 主要な式のみを抜粋して議論する. なお, 本論文で対象物とロボットは静止状態にあるものとし, 準静的な運動を含まない. また, 以下の定式化は三次元空間の物体把持の問題を扱うが, 二次元空間の問題においても同様に適用可能である.

2.1 仮定と記号の定義

本論文の解析において, 対象物, ロボットの指, 環境はすべて剛体であり, すべての接触は有限の摩擦あり点接触で近似できるものとする. このとき, 各接触点ではクーロン摩擦が発生し, 接触点における各摩擦円すいは凸多角すいで近似する. ケーシングにおいてロボット指は位置制御されるものとすることが多いが, 接触力解析において過大な内力の発生を引き起こすことがある. そこで本論文ではロボット指は解析における便宜上, ハイブリッド制御されるものとする. ここでいうハイブリッド制御とは直動関節と等価であり, ある一方向の押しつけ力のみを能動的に制御可能で, そのほかの方向の接触力は受動的に決定される. したがって, 各指の関節数 L_i はすべて 1 となる.

- N : 指の本数.
- M_i : i 番めの指における接触点数.
- $M := \sum_{i=1}^N M_i$: 接触点数.

- $L_i = 1$: i 番めの指の関節数.
- $L := \sum_{i=1}^N L_i = N$: 指の総関節数.
- P_{ik} : i 番めの指の k 番めの接触点. 接触点には根元から昇順に番号 k をつける.
- P_l : 全接触点の中の l 番めの接触点. $l = \sum_{n=1}^{i-1} L_n + k$ となるような通し番号をつける.
- $p_l \in \mathbb{R}^3$: 接触点 P_l の位置.
- $t_{l1}, t_{l2} \in \mathbb{R}^3$: 接触点 P_l における接平面を張る正規直交基底ベクトル.
- $n_l \in \mathbb{R}^3$: 接触点 P_l における対象物内向きの単位法線ベクトル.

また, 次の数学的表現を用いる.

- 対角行列またはブロック対角行列:

$$\text{diag}(A_1, \dots, A_n) := \begin{bmatrix} A_1 & & O \\ & \ddots & \\ O & & A_n \end{bmatrix}$$

- ベクトルどうしの不等号:

二つのベクトル $a := [a_1, \dots, a_n]^T, b := [b_1, \dots, b_n]^T$ を定義するとき, $a > b$ ならば, $a_i > b_i, (i = 1, \dots, n)$ である.

2.2 接触力

接触点 P_l で対象物に加わる接触力 $f_l \in \mathbb{R}^3$ は,

$$f_l = C_l k_l \quad (1)$$

ここで $C_l := [c_{l1}, \dots, c_{lr_l}] \in \mathbb{R}^{3 \times r_l}$ で, c_{lm} は接触点 P_l の摩擦円すいを凸多角すいで近似した m 番めの単位稜線ベクトルである. $k_l := [k_{l1}, \dots, k_{lr_l}]^T \in \mathbb{R}^{r_l}$ は接触力の大きさに対応したベクトルであり, $k_l \geq 0 = [0, \dots, 0]^T$ である.

指の接触点 P_{ik} における接触力 f_{ik} と i 番めの指の関節トルク τ_i の関係は次のように表される.

$$J_{ik}^T f_{ik} = \tau_i \quad (2)$$

$$\tau_i := [\tau_{i1}, \dots, \tau_{iL_i}]^T \in \mathbb{R}^{L_i} \quad (3)$$

ここで, $J_{ik} \in \mathbb{R}^{3 \times L_i}$ は接触点 P_{ik} に関するヤコビ行列, $\tau_{ij} \in \mathbb{R}^1$ は i 番めの指の j 番めの関節トルクである. 仮定よりすべての指はハイブリッド制御され, 関節数 1 の直動関節に等価であることから,

$$J_{ik} = m_i \in \mathbb{R}^3, \forall k \quad (4)$$

$$\tau_i = \tau_{i1} \quad (5)$$

となる. ここで, m_i は i 番めの指の関節運動の方向を表す単位ベクトルである. また, $\tau_{i1} = +\infty$ とすれば, 位置制御指とみなせる.

ここで, 以下の行列を定義する.

$$W := \begin{bmatrix} I_3 & \dots & I_3 \\ p_1 \times I_3 & \dots & p_M \times I_3 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 3M} \quad (6)$$

$$C := \text{diag}(C_1, \dots, C_M) \in \mathbb{R}^{3M \times r} \quad (7)$$

$$k := [k_1^T, \dots, k_M^T]^T \in \mathbb{R}^r \quad (8)$$

$$T := \text{diag}(T_1, \dots, T_M) \in \mathbb{R}^{3M \times 2M} \quad (9)$$

$$T_l := [t_{l1} \ t_{l2}] \in \mathbb{R}^{3 \times 2} \quad (10)$$

$$J := \text{diag}(J_1, \dots, J_N) \in \mathbb{R}^{3M \times L} \quad (11)$$

$$J_i := [J_{i1}^T, \dots, J_{iM_i}^T]^T \in \mathbb{R}^{3M_i \times L_i} \quad (12)$$

$$\mathbf{f} := [\mathbf{f}_1^T, \dots, \mathbf{f}_M^T]^T \in \mathbb{R}^{3M} \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\tau} := [\boldsymbol{\tau}_1^T, \dots, \boldsymbol{\tau}_N^T]^T \in \mathbb{R}^L \quad (14)$$

$\mathbf{I}_n$ は $n \times n$ の単位行列, $\mathbf{p}_l \times \mathbf{I}_3 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は $(\mathbf{p}_l \times \mathbf{I}_3)\mathbf{x} \equiv \mathbf{p}_l \times \mathbf{x}$ となる外積と等価な歪対称行列を表す.

以上の定義から, すべての接触力は,

$$\mathbf{f} = \mathbf{C}\mathbf{k} \quad (15)$$

と書ける. したがって, 摩擦力は,

$$\mathbf{T}^T \mathbf{f} = \mathbf{T}^T \mathbf{C}\mathbf{k} \in \mathbb{R}^{2M} \quad (16)$$

と書ける.

ここで, 静止摩擦力の制約条件 [7] を考慮すると, 発生可能な静止摩擦力の組み合わせは次の式を満たす必要がある.

$$\mathbf{S}\mathbf{T}^T \mathbf{C}\mathbf{k} \leq \mathbf{0} \quad (17)$$

$$\mathbf{T}^T (\mathbf{I}_{3M} - \mathbf{B}) \mathbf{C}\mathbf{k} = \mathbf{0}. \quad (18)$$

$\mathbf{S} := \text{diag}(s_{11}, s_{12}, s_{21}, s_{22}, \dots, s_{M1}, s_{M2}) \in \mathbb{R}^{2M \times 2M}$ は各接触点での静止摩擦力を発生させる微小変位 (せん断ひずみ) の方向の符号を表し, $s_{lm} = \{\pm 1, 0\}$ をとる. $\mathbf{B} := \text{diag}(b_1 \mathbf{I}_3, \dots, b_M \mathbf{I}_3) \in \mathbb{R}^{3M \times 3M}$ は接触点において微小変位が生じるかどうかを選択する行列で, 対象物全体の微小運動の結果として接触点 P_l で微小変位が起こる場合は $b_l = 1$, それ以外の場合は $b_l = 0$ をとる. したがって, $b_l = 0$ のとき必ず $s_{lm} = 0$ である. 式 (17) は接触点での微小変位の方向 (符号) と接触力の方向 (符号) が逆向きになることを表す. また, 式 (18) は微小変位の生じない接触点で静止摩擦力が生じないことを表す.

式 (17) の微小変位の組み合わせが発生可能なものであるかどうかは次の線形計画問題を解くことで判定できる.

$$\begin{aligned} & \text{maximize}_{\mathbf{q}, \mathbf{V}, \dot{\boldsymbol{\theta}}} \mathbf{1}^T \mathbf{q} \\ & \text{subject to} \begin{cases} \mathbf{B} \begin{bmatrix} \mathbf{W}^T & \mathbf{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ -\dot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} = \mathbf{T}\mathbf{S}\mathbf{q} \\ \mathbf{q} \geq \mathbf{1} \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

ここで, $\mathbf{1} = [1, \dots, 1]^T$ である. なお, 式 (19) を満たす $\mathbf{q}$ が存在するとき, 評価関数は無限大になる. このことから, 実際の制約条件は $\mathbf{q} \geq \mathbf{0}$ であるが, $\mathbf{q} \geq \mathbf{1}$ としても一般性を失わない.

接触力と関節トルクの関係は,

$$\mathbf{J}^T \mathbf{f} = \mathbf{J}^T \mathbf{C}\mathbf{k} = \boldsymbol{\tau} \quad (20)$$

と書ける.

対象物の静的なつりあいの式は, 重力などの対象物に加わる既知の外力および外モーメントを $\mathbf{Q}_{\text{known}} \in \mathbb{R}^6$, 未知の外力および外モーメントを $\mathbf{Q}_{\text{dist}} \in \mathbb{R}^6$ として, 次のように表す.

$$\mathbf{W}\mathbf{f} = \mathbf{W}\mathbf{C}\mathbf{k} = -(\mathbf{Q}_{\text{known}} + \mathbf{Q}_{\text{dist}}) \quad (21)$$

2.3 物体操作のロバスト性評価

物体操作のロバスト性の評価手法は Maeda ら [9] の提案した「操作中の対象物が未知の外乱力に対してどの程度まで耐えるこ

とができるか (操作を乱されないか) を定量的に評価する指標」を採用する. 本論文ではこれに操作のロバスト性の評価値 z を文献 [7] に基づいて, 以下の線形計画問題群から成るミニマックス問題から計算する.

$$z = \min_i z_i \quad (22)$$

$$z_i = \max_{\zeta, \mathbf{k}, \mathbf{B}, \mathbf{S}, \boldsymbol{\tau}} \zeta \quad (23)$$

$$\text{subject to} \begin{cases} \zeta (\mathbf{R}^{1/2})^{-1} \mathbf{l}_i + \mathbf{Q}_{\text{known}} + \mathbf{W}\mathbf{C}\mathbf{k} = \mathbf{0} \\ \mathbf{J}^T \mathbf{C}\mathbf{k} - \boldsymbol{\tau} = \mathbf{0} \\ \mathbf{T}^T (\mathbf{I}_{3M} - \mathbf{B}) \mathbf{C}\mathbf{k} = \mathbf{0} \\ \mathbf{S}\mathbf{T}^T \mathbf{C}\mathbf{k} \leq \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \leq \boldsymbol{\tau} \leq \boldsymbol{\tau}_{\max} \mathbf{1} \\ \mathbf{k} \geq \mathbf{0} \\ \zeta \geq 0 \end{cases}$$

ここで, $\boldsymbol{\tau}_{\max}$ は関節トルクの上限值を表す. $\mathbf{R}^{1/2} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ は行列 $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ を Cholesky 分解したものであり, $\mathbf{R}$ は力とモーメントの両方を同時に扱うためにスケーリングを行う正定値対称行列である. ここでは, 対象物の質量 M_0 と対象物の重心に対する慣性テンソル $\mathbf{J}_0 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ を用いて $\mathbf{R} := \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & M_0 \mathbf{J}_0^{-1} \end{bmatrix}$ と定義する. $\mathbf{l}_i \in \mathbb{R}^6$ は未知の外力・外モーメント $\mathbf{Q}_{\text{dist}}$ が働く方向を表す. 式 (23) ではある方向から対象物に働く外力・外モーメントが物体操作を乱さない範囲で取りうる最大値を求める. 想定される $\mathbf{Q}_{\text{dist}}$ は任意の方向を取りうるが, 非線形条件となるため, 有限数の $\mathbf{l}_i$ を考える. 式 (22) は物体操作が乱されやすい, 外力・外モーメントに最も弱い方向を求める.

2.4 操作のロバスト性に基づくケーシング拘束の評価

式 (22), (23) で計算される物体操作のロバスト性に基づいて, ケーシング拘束を評価する. ケーシングによって対象物を拘束するロボット指は多くの場合, 幾何学的な指配置のために位置制御されるものとみなされる. ただし, 本論文で採用する剛体の力学モデルに基づくロバスト性解析では, 例えば位置制御指でピンチング把持をする場合などに過大な内力を導くことがある. そのため, 本論文では便宜上, すべての指をハイブリッド制御として過大な内力の発生が算出されないようにした. 接触力解析の結果, force closure となる接触力の組が解として求まることはあるが, ケーシング拘束においては必ずしも force closure が成立するとは限らない.

ある把持状態において六次元空間の方向に外力・外モーメントが加わったときに, ロボット指からの接触力や, 重力などの既知の外力によってある程度までそれに耐えることができる. ロバスト性の上限値の外力・外モーメントが対象物に働いたとき, 対象物への力のつり合いは破綻し, 対象物は運動を始める. したがって, 本論文において物体操作のロバスト性は, その把握される対象物がある方向への程度, 運動しにくい, を表す指標である. このときの運動は瞬間的に見れば Euclidean motion であり, 単一の並進運動または単一の回転運動, およびそれらの複合運動に等価である. 例えば Fig. 1 (a) のような指配置のとき, ロボット指が存在する方向 (+x 方向など) への並進運動は指から受ける接触力よりも大きな外力を与えない限り運動することはない. したがって, 動かない剛体の環境と等価とみなせる位置制御指の場合には, 対象物がその方向へ運動するこ

とは不可能である．つまり，ロボット指の囲い込みによって幾何学的に拘束されていることは，その方向へのロバスト性が上限値に到達することで判定できる．

一方，対象物が脱出可能な方向については，重力など既知の外力や，ロボット指からの接触力を受けて対象物が運動しにくければ，相応のロバスト性が評価される．したがって，幾何学的な拘束が不完全な場合であっても，その方向への力学的作用による抜け出しにくさを定量的に評価できる．

3. 数値計算例

3.1 計算条件

本論文では二次元の把持について，把持のロバスト性の評価手法に基づいて，ケージング拘束の評価手法の有効性を議論する．前提条件として，以下のように各パラメータを設定する．

- 座標原点は対象物の重心とする．
- 対象物の質量は 1 とし ($M_0 = 1$)，質量分布は一様である．
- 静止摩擦係数は 0.3 とする．

本論文では二次元空間，すなわち三次元コンフィギュレーション空間での外力の代表的な方向を表すベクトルとして， $\mathbf{l}_i$ を次の 14 方向にとった．なお，ベクトル内の複合はすべての組み合わせをとる．

$$\mathbf{l}_i = \{[\pm 1, 0, 0]^T, [0, \pm 1, 0]^T, [0, 0, \pm 1]^T, \frac{1}{\sqrt{3}}[\pm 1, \pm 1, \pm 1]^T\}$$

既知の外力としての重力は $\mathbf{Q}_{\text{known}} = [0, -9.8, 0]^T$ ，関節トルクの上限値は $\tau_{\text{max}} = 40.0$ と設定する．

3.2 正方形物体のケージング把持

Fig. 1, 2 で与えられる正方形物体の把持のロバスト性を解析する．指の位置は Fig. 2 (e) で与えられた四つの接触点を基準とし， $p_1, \dots, p_4$ までの指配置を変化させる．各パラメータは以下のように設定する．

$$\mathbf{p}_1 = \begin{bmatrix} 0.0 \\ -1.0 \end{bmatrix}, \mathbf{p}_2 = \begin{bmatrix} -1.0 \\ 0.0 \end{bmatrix}, \mathbf{p}_3 = \begin{bmatrix} 0.0 \\ 1.0 \end{bmatrix}, \mathbf{p}_4 = \begin{bmatrix} 1.0 \\ 0.0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{N}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{N}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{N}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \mathbf{N}_4 = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{J}_1 = \mathbf{N}_1, \mathbf{J}_2 = \mathbf{N}_2, \mathbf{J}_3 = \mathbf{N}_3, \mathbf{J}_4 = \mathbf{N}_4$$

解析の結果で得られた指配置のロバスト性の最小値を Table 1 に示す．二指ハンドの把持では Fig. 2 (b) の評価値が高く，重力に対抗するように指配置をしていることが理由に挙げられる．三指ハンドでの把持の例では Fig. 1 (a) の評価値が最も高く，第 1 章終わりで述べたように，重力に対抗するようなロボット指からの接触力を発揮しやすい指配置・把持姿勢にすることで，ロバスト性をより高めることが結果から分かる．Fig. 2 (e) の場合がすべての配置の中で最も高いロバスト性を示すことは明らかである．この指配置は実質的には完全なケージングとなっているので，位置制御指であれば全方向の外力に対して無限大のロバスト性を発揮することができる．また，Fig. 1 (b) と Fig. 2 (a) では同一の評価値となっているが，幾何学的観点からでは，Fig. 1 (b) の場合がより抜け出しにくいといえる．そこで各方向に対するロバスト性の総和をとると，Fig. 1 (b) では 404.6，Fig. 2 (a) では 290.5 の結果となった．このことから，外力の各方向に対するロバスト性の総和をとることによっても評価が可能である．

なお， $\mathbf{l}_i$ の方向はより多くを設定して計算することで，さらに精緻な解析が可能であるが，ここでは上記のような特徴的な傾向を比較することに注目した．

Fig. 2 Grasping a square object

Table 1 Robustness of each grasp pattern

Position	robustness
Fig. 1 (a)	24.23
Fig. 1 (b)	10.17
Fig. 2 (a)	10.17
Fig. 2 (b)	12.99
Fig. 2 (c)	12.99
Fig. 2 (d)	12.99
Fig. 2 (e)	52.61

3.3 くびれ形状物体のケージング把持

二指平行グリッパによってくびれ形状物体を把持した場合 [10] (Fig. 3) を考え，ロバスト性解析の計算例を示す．ここで，平行グリッパと物体は二点で接触するものとする．各パラメータは以下のように設定する．

共通パラメータ

$$\tau_{\text{max}} = 40.0, \mathbf{J} = \begin{bmatrix} -0.5 & 0 \\ 0 & 0 \\ -0.5 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0.5 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0.5 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Fig. 3 (a) のパラメータ

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{11} = \mathbf{p}_1 &= \begin{bmatrix} 2.0 \\ 0.075 \end{bmatrix}, \mathbf{p}_{12} = \mathbf{p}_2 = \begin{bmatrix} -2.0 \\ -0.075 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{p}_{21} = \mathbf{p}_3 &= \begin{bmatrix} -2.0 \\ 0.075 \end{bmatrix}, \mathbf{p}_{22} = \mathbf{p}_4 = \begin{bmatrix} 2.0 \\ -0.075 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{T}_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

(a) Pinching parallel to the side (b) Pinching a neck-part
Fig. 3 Grasping an object like an hourglass

Fig. 4 Robustness against external wrench in each direction (a case of grasping the object like an hourglass). Arrows above the bars indicate each direction of external wrench

$$N_1 = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix}, N_2 = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix}, N_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, N_4 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Fig. 3 (b) のパラメータ

$$\begin{aligned} p_{11} = p_1 &= \begin{bmatrix} 1.038 \\ 0.075 \end{bmatrix}, p_{12} = p_2 = \begin{bmatrix} 1.038 \\ -0.075 \end{bmatrix}, \\ p_{21} = p_3 &= \begin{bmatrix} -1.038 \\ 0.075 \end{bmatrix}, p_{22} = p_4 = \begin{bmatrix} -1.038 \\ -0.075 \end{bmatrix}, \\ T_1 &= \begin{bmatrix} 1/\sqrt{5} \\ 2/\sqrt{5} \end{bmatrix}, T_2 = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{5} \\ -2/\sqrt{5} \end{bmatrix}, \\ T_3 &= \begin{bmatrix} -1/\sqrt{5} \\ 2/\sqrt{5} \end{bmatrix}, T_4 = \begin{bmatrix} -1/\sqrt{5} \\ -2/\sqrt{5} \end{bmatrix}, \\ N_1 &= \begin{bmatrix} -2/\sqrt{5} \\ 1/\sqrt{5} \end{bmatrix}, N_2 = \begin{bmatrix} -2/\sqrt{5} \\ -1/\sqrt{5} \end{bmatrix}, \\ N_3 &= \begin{bmatrix} 2/\sqrt{5} \\ 1/\sqrt{5} \end{bmatrix}, N_4 = \begin{bmatrix} 2/\sqrt{5} \\ -1/\sqrt{5} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

解析の結果, Fig. 3(a) でのロバスト性の最小値は 37.83 であり, Fig. 3(b) でのロバスト性の最小値は 58.23 であったことから, Fig. 3(b) の把持姿勢のほうがより堅い拘束であるといえる. 外力の方向ごとのロバスト性の評価値を Fig. 4 に示す. 外力の方向ごとに比較した場合においても多くのパターンで Fig. 3(b) のロバスト性がより高いことが分かった. この結果は二次曲面を持つ対象物を表面が柔軟なグリッパで把持した宇都ら[10]の結果と同様に, くびれ部分の把握をするほうが把持安定性が高いことを示している. 本論文では対象物およびロボットの表面の変形を伴わない剛体モデルで, 多点接触で近似する場合でも解析でき, そのため, 線形計画問題を適用できる.

3.4 T 型物体のケーシング把持

次に T 型物体を把握した例 (Fig. 5) で解析を行う. 接触点の一つの接触面あたり一点で近似する.

共通パラメータ

$$\tau_{\max} = 40.0, \quad J = \begin{bmatrix} -1.0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1.0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Fig. 5 (a) のパラメータ

$$p_{11} = p_1 = \begin{bmatrix} 1.0 \\ 0.075 \end{bmatrix}, p_{12} = p_2 = \begin{bmatrix} 1.075 \\ 0 \end{bmatrix},$$

(a) Pinching the upside-down (b) Pinching the T-shaped object

Fig. 5 Grasping a T-shaped object

Fig. 6 Robustness against external wrench in each direction (a case of grasping the T-shaped object). Arrows above the bars indicate each direction of external wrench

$$\begin{aligned} p_{21} = p_3 &= \begin{bmatrix} -1.0 \\ 0.075 \end{bmatrix}, p_{22} = p_4 = \begin{bmatrix} -1.075 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ T_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, T_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, T_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, T_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \\ N_1 &= \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix}, N_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}, N_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, N_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Fig. 5 (b) のパラメータ

$$\begin{aligned} p_{11} = p_1 &= \begin{bmatrix} -1.0 \\ -0.075 \end{bmatrix}, p_{12} = p_2 = \begin{bmatrix} 1.075 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ p_{21} = p_3 &= \begin{bmatrix} -1.0 \\ -0.075 \end{bmatrix}, p_{22} = p_4 = \begin{bmatrix} -1.075 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ T_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, T_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, T_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, T_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \\ N_1 &= \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix}, N_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, N_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, N_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

解析の結果, Fig. 5(a) でのロバスト性の最小値は 6.42 であり, Fig. 5(b) でのロバスト性の最小値は 15.08 であったことから, Fig. 5(b) のグリッパの配置がより堅い拘束であるといえる. また, 外力の方向ごとのロバスト性の違いを Fig. 6 に示す. ロバスト性の総和を取る際, Fig. 5(a) では $+y$ 方向 (l_3), Fig. 5(b) では $-y$ 方向 (l_4) に対するロバスト性が無限大を示しているのをこれを省いて計算する. Fig. 5(a) では 181.7, Fig. 5(b) では 402.4 となった.

4. 結果の考察

正方形物体とくびれ形状物体, T 型物体に対して接触点を与え, ロバスト性解析を行った. 正方形物体の把持では Table 1 の結果から, Fig. 1 (b) と Fig. 2 (a) は同一の評価値であった. 正方形物体の $+y$ 方向に指を配置するとその方向のロバスト性は向上するが, ロバスト性の最小値には影響しないため, この指配置の重要度は低いことが分かる. また, Fig. 2 (b) と Fig. 2 (c) を比較した場合においても同様の結果が得られたことから, Fig. 1 (a) の指配置のように重力に対抗できる接触力が発生できる $-y$ 方向に指を配置することの重要度が高いことが分かった.

くびれ形状物体の把持ではなくびれ部分を掴む例 (Fig. 3 (b)) が

ケーシングの拘束性能が高いことを示したが、これは文献 [10] [11] のくびれ部分の把持と同等であり、本論文の結果と同じく force closure に基づく安定性評価においても高い安定性を示している把握形態である。このことからくびれ部分の把持は力学的、幾何学的両方からの観点で拘束性能が高く、信頼性の高い把握形態であることがいえる。

T 型物体を把持した例では、物体と接触点の相対位置は変化していないが物体の姿勢による拘束性能の違いがみられた。Fig. 5 (b) の姿勢が拘束性能が高い把持姿勢といえることを示した。この理由として、既知の外力として $-y$ 方向の重力が働いており、これによって Fig. 5 (b) の姿勢では接触点が物体を受動的に拘束しているからである。このことから、重力を利用して物体を受動的に拘束できるような把持姿勢を考えることで、より高い評価値が獲得できると考える。

5. おわりに

本論文ではマニピュレーションの接触力解析およびロバスト性の評価指標を用いて、ケーシング把持の物体拘束性能を力学モデルを導入した解析によって評価した。ロボットによる囲い込みが不完全で、物体が抜け出す可能性のある幾何学的拘束では、重力やロボット指からの接触力などの力学条件により、物体拘束の性能が変わる。本論文では把持やマニピュレーションのロバスト性の評価指標を応用し、様々な把持姿勢において指配置が対象物の幾何学的拘束に与える効果を評価できることを示した。数値計算例においては三種類の対象物について、複数の把持姿勢のロバスト性を計算し、力学条件も考慮したケーシングの拘束性能を評価した。ここでは、位置制御指の把持による過大な内力の発生を考慮して便宜上、すべてのロボット指をハイブリッド制御するものとして扱った。この解析結果から、幾何学的拘束を考慮した把持が力学的にも拘束性能が高いこと、力学条件を考慮したパッシブなケーシングの拘束性能を定量的に評価できることを示した。

本手法は三次元空間の問題にも適用できる [12]。今後はより複雑な形状の物体やその把握形態について議論すること、ロボットによる把持計画などへ適用することが期待される。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP17H04669 の助成を受けた

ものです。

参考文献

- [1] E. Rimon and A. Blake: "Caging Planar Bodies by One-Parameter Two-Fingered Gripping Systems," The Int. J. of Robotics Research, vol.18, issue 3, pp.299–318, 1999.
- [2] S. Makita and W. Wan: "A survey of robotic caging and its applications," Advanced Robotics, vol.31, issue 19–20, pp.1071–1085, 2017.
- [3] T. Makapunyo, T. Phoka, P. Pipattanasomporn, N. Niparnan and A. Sudsang: "Measurement framework of partial cage quality," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, pp.1812–1816, 2012.
- [4] T. Makapunyo, T. Phoka, P. Pipattanasomporn, N. Niparnan and A. Sudsang: "Measurement framework of partial cage quality based on probabilistic motion planning," Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1574–1579, 2013.
- [5] J. Mahler, F.T. Pokorny, Z. McCarthy, A.F.v.d. Stappen, K. Goldberg: "Energy- bounded caging: formal definition and 2D energy lower bound algorithm based on weighted alpha shapes," IEEE Robotics and Automation Letter, vol.1, no.1, pp.508–515, 2016.
- [6] 小俣, 永田: "多指ハンドによるパワーグラスブの力学的特性", 日本ロボット学会誌, vol.13, no.4, pp.525–531, 1995.
- [7] 横田, 後藤, 前田: "ロボットマニピュレーションにおける接触力の準静力学的解析 — 定式化とそのグラスプレス・マニピュレーションのロバスト性評価への応用 —", 日本ロボット学会誌, vol.31, no.10, pp.1009–1018, 2013.
- [8] C. Mladenova: "Group theory in the problems of modeling and control of multi-body systems," J. of Geometry and Symmetry in Physics, vol.8, pp.17–121, 2006.
- [9] Y. Maeda and T. Arai: "A quantitative stability measure for grasplless manipulation," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2473–2478, 2002.
- [10] 宇都, 注, 原田, 田原, 長谷川, 倉爪: "区分的な二次曲面近似に基づく把持姿勢候補の生成", ロボティクス・シンポジウム予稿集, pp.225–230, 2013.
- [11] 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/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2447–2453, 2014.
- [12] S. Makita and K. Makihara: "Homogeneous Quantitative Measure of Caging Grasps with both Geometrical and Mechanical Constraints," The Int. Conf. on Control, Automation and Systems, pp.311–316, 2019.

牧原昂志 (Koshi Makihara)

2019 年筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻博士前期課程在学。マニピュレーションの研究に従事。(日本ロボット学会学生会員)

横田 諭 (Satoshi Makita)

2010 年横浜国立大学大学院工学府システム統合工学専攻博士課程後期修了。同年佐世保工業高等専門学校電子制御工学科助教, 2012 年同講師, 2019 年同准教授。2020 年福岡工業大学工学部知能機械工学科助教。マニピュレーション, 精密部品組立装置, 手指のバイオメカニクスの研究に従事。IEEE ICRA 2013 Best Manipulation Paper Award Finalist に選出, IEEE RAS Japan Chapter Young Award (IEEE/RSJ IROS 2008) を受賞。日本機械学会, 計測自動制御学会, 日本義肢装具学会, IEEE の会員。博士 (工学)。(日本ロボット学会正会員)