

把持後の作業を考慮したロボットハンドの 把持形態選択システムの構築

○内田雄之 若山達大 磯邊柚香

江澤弘造 松山吉成（パナソニック）

1. はじめに

近年、労働人口の減少への対応や生産性の向上を目的として、ロボットの導入が進んでいる。また、新型コロナウイルスにより、人が密集できない状況や、人との接触を避ける状況が生まれており、ロボットによる人代替への期待が高まっている。中でも、多様な作業を可能とするために、複数の把持形態を実現可能なロボットハンドが多く開発されている[1-2]。また、ロボットハンドの把持計画手法も多く研究されている[3-4]が、その多くは最も滑りづらい把持位置を導出するもの[5]で、把持後の作業は考慮していない。しかし、ロボットの適用先は、工業部品の嵌合作業や、ドライバを用いたねじ締め作業、小売業の商品陳列の位置決め作業など、把持する対象物と把持後の対象作業が多様化している。そこで、把持後の作業にも着眼した把持計画手法が必要であると考えた。

本稿では、対象物と対象作業に応じた把持形態を選択することを目的として、複数の把持形態を実現可能なロボットハンドにおいて、把持形態を自動で選択するシステムを構築する。把持実験によって、提案手法の有効性を検証する。

2. 関連研究と課題

代表的な把持計画手法の一つとして、対象物を把持した際の安定性を求める手法[5]が挙げられる。この手法では、把持レンチ空間と呼ばれる接触力の合力・合モーメント空間を考え、指先が接触面上を滑り出す最小の外力・外モーメントを評価値として把持方法を決定する。把持安定性による把持計画手法は、シミュレータ[6]も豊富であり、実装が容易である。しかし、把持の安定性を求める従来の手法では、把持後の作業が困難な把持形態も選択されるという課題がある。

3. 提案手法

3.1 概要

従来手法では、把持の安定性を評価して把持計画を実行していた。しかし、把持のみではなく作業全体を考慮すると、把持後の作業の実現性も同時に評価する必要があると考えられる。

把持後の作業は多様であり、対象物と目的の作業に合わせて、位置決め精度や最大モーメント等の項目（以下、評価項目と呼ぶ）ごとに要求される値（以下、要求数値と呼ぶ）を満たす必要がある。

ハンドの特性や把持形態によって作業に対する性能は異なる。各把持形態におけるそれぞれの評価項目に対する性能（以下、性能値と呼ぶ）から、対象物や作業に適した把持形態を選択する必要がある。

そこで、把持後の作業を考慮した把持計画手法として、各評価項目の要求数値と把持形態ごとの性能値を取り入れた評価関数を設計する。各把持形態における評価値を計算することによって、目的の作業に合わせた把持形態の選択を行う手法を提案する。

3.2 評価項目

評価項目は作業を行う上で要求される項目のうち、実際に測定が可能なものを選定した。選定した評価項目とその説明を表1に示す。

3.3 評価関数の設計

対象物や把持後の作業に合わせた把持形態を選択するために、先述の評価項目を用いて評価関数を設計する。下記3点を設計要件とする。

要件1. 数学的手法を使用するために連続関数であること

要件2. 複数の作業に対応するため異なる評価項目に対しても同様の式で計算できること

要件3. 把持後の作業を達成するために、作業の要求数値を満たさない項目を有する把持形態の評価値が著しく悪化すること

本手法では、これらの要件を満たすために、式(1)に示す逆 Sigmoid 関数（Sigmoid 関数の乗数の正負

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{ax+b}} \quad (1)$$

表 1 評価項目と説明

評価項目	評価項目の説明
1.把持可能幅 [mm]	把持可能な対象物の最小・最大の幅
2.把持可能厚み [mm]	平面に置いた板治具の把持可能な最小厚み
3.サイクルタイム [s]	把持動作開始から終了までにかかる時間
4.把持動作空間 [mm ³]	把持動作に必要とする空間の体積
5.最大外力 [N]	対象物が滑り出さない最大の外力
6.最大モーメント [N・mm]	対象物が回転しない最大のモーメント
7.ハンドの機構的な遊び[mm]	対象物に微小な外力（3[N]）を加えた時の対象物の変位量
8.対象物の設置誤差[mm]	対象物を解放した際の目標の設置位置に対するずれ量

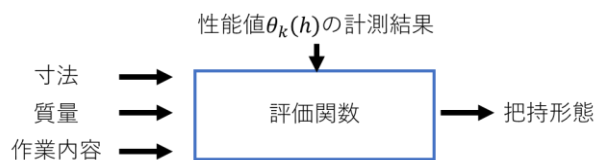


図 1 把持形態選択システム

を逆転させた関数)を用いる。

ここで、 e, a, b は定数である。

逆 Sigmoid 関数は要件 1 を満たす連続関数であり、0 以上 1 未満の値を取る特性がある。この関数を評価項目ごとに設定することで、要件 2 を満たすことが出来る。また、評価項目ごとの値が急激に増加するように定数項を設定し、評価項目の値を足し合わせれば要件 3 を満たせる。以上より、作業 w を行う時の把持形態 h における評価関数 $J(h, w)$ は以下の式 (2) となる。

$$J(h, w) = \sum_{k=\text{評価項目}} \frac{1}{1 + e^{\left(a_k \frac{\theta_k(h)}{\hat{\theta}_k(w)} - b_k\right)}} \quad (2)$$

ここで k は評価項目を示すインデックス、 a_k, b_k は評価項目ごとに設定する重み係数である。 $\hat{\theta}_k(w)$ は作業 w によって決定される各評価項目の要求数値である。例えば最大外力 ($k=5$) の要求数値 $\hat{\theta}_5(w)$ は、物を持ち上げる作業であれば対象物の質量、押し込んで圧入する作業であれば部品に必要な圧入力から決定される。 $\theta_k(h)$ は評価項目 k に対する把持形態 h の性能値である。ロボットハンドが実現可能な把持形態 h ごとに、この評価関数 $J(h, w)$ を用いて評価値を計算し、評価値が最小となる把持形態を求める。

3.4 把持形態選択システム

提案する把持形態選択システムを図 1 に示す。

本システムには、寸法、質量、作業内容が入力される。入力された対象物の寸法、質量、作業内容から要求数値を求める。事前の計測結果から、性能値を取得する。要求数値と、性能値を用いて、評価関数を計算する。各把持形態の評価値を算出、比較することで、把持後の作業に応じた把持形態を自動で選択する。

本章では対象物や対象作業に応じた把持形態を選択する手法を提案した。4 章では使用するロボットハンドと、その把持形態について述べる。5 章ではロボットハンドを用いて、評価関数で使用する各把持形態の性能値 $\theta_k(h)$ の計測実験を行う。6 章では形状や寸法、目的の作業が異なる対象物を実際に把持する実験を行い、本手法の有効性を確認する。

4. ロボットハンド

4.1 ロボットハンドの構成

本稿では、親指、示指、中指からなる 3 指のロボットハンドを使用する。使用するロボットハンドの

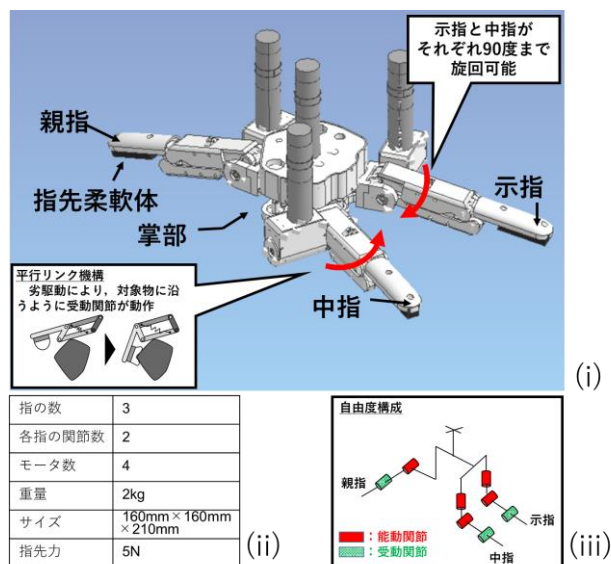


図 2 ロボットハンド

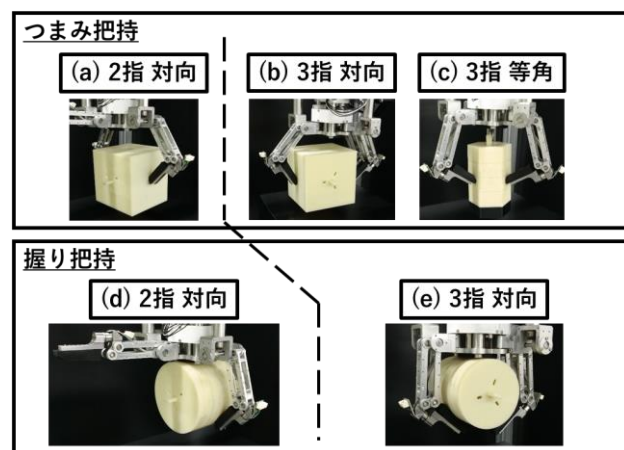


図 3 把持形態

構成を図 2(i)、ロボットハンドの仕様を図 2(ii)、ロボットハンドの自由度構成を図 2(iii)に示す。

各指が受動関節を有しており、第 1 関節は劣駆動を行う。また、示指と中指の旋回に 1 つのモーターを使用しており、それぞれを 90 度ずつ旋回させることで、示指と中指の 2 指ロボットハンドとしても使用することができる。各指先には、指先の摩擦係数を上げるために柔軟体を貼付している。

4.2 ロボットハンドの把持形態

このロボットハンドにおける主要な把持形態を図 3 に示す。把持形態は、一般的なロボットハンドと同様の「つまみ把持」と、劣駆動を利用して対象物を掌部に押し付ける「握り把持」に大きく分けられる。また、示指と中指の旋回が能動的に可能であることから、2 指と 3 指の把持形態が存在する。更に、つまみ把持は 3 指を等角にした状態で把持する等角つまみ把持があり、合計で 5 種類の把持形態(a)-(e)が可能である。

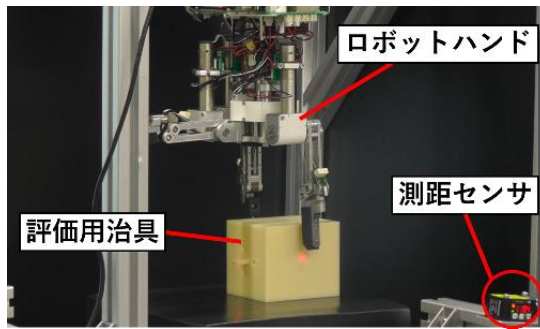


図 4 実験環境

表 2 評価用治具








	四角 治具	六角 治具	円治具	板治具
写真				
				
幅[mm]	(把持方向の幅)			18,36,54
厚み[mm]	36,54,72,90			1,2,3,5
質量 [g]	100			10

図 3 の各把持形態では写真左側に親指が表示されている。把持形態(a),(d)は親指を使用せず、示指と中指を対向させて把持を行う。把持形態(b),(e)では親指に対して示指と中指を対向させ、3本の指を使用する。把持形態(c)は3つの指の角度が等しくなるように示指と中指を旋回させて把持を行う。

5. 性能値 $\theta_k(h)$ の計測実験

提案手法で使用する評価関数(式(2))には、ロボットハンドが取り得る把持形態の性能値 $\theta_k(h)$ が含まれる。よって、本章では、4章で述べたロボットハンドに対して、把持形態ごとの性能値 $\theta_k(h)$ を取得する。ただし、実際に物体を把持し実測することで得られる性能値もあるため、把持実験を実施する。

5.1 実験環境

実験環境を図 4 に示す。本実験では、ロボットハンド、性能評価用の治具、および対象物位置測定用の測距センサを使用する。

5.2 評価用治具

実験では、把持形態(a)-(e)ごとに、表 2 に示す評価用治具を把持した際の性能値 $\theta_k(h)$ を計測する。四角、六角、円治具のサイズは、それぞれ 4 種類で、板治具は 12 種類である。把持形態(a),(b)の実験では四角治具、(c)では六角治具、(d),(e)では円治具を把持する。なお、つまみ把持(a)-(c)については、治具の平面を把持する。また、薄物の対象物を想定し板治具も使用する。板治具の性能値計測は、つまみ把持(a)-(c)でのみ行う。

表 3 各把持形態の性能値 $\theta_k(h)$ の値

評価項目	把持形態				
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
1.把持可能幅 [mm]	0～313	0～308	5～321	59～313	19～308
2.把持可能厚み [mm]	2	3	3	59	19
3.サイクルタイム [s]	2	2	2	2	2
4.把持動作空間 [mm ³]	3e+5	9e+5	2e+6	3e+5	9e+5
5.最大外力 [N]	11.9	11.7	11.6	17.3	26.1
6.最大モーメント [N・mm]	0.005	0.12	0.12	0.54	0.75
7.ハンドの機構的な遊び [mm]	2.8	1.4	2.1	0.4	0.2
8.対象物の設置誤差 [mm]	0.9	7.7	3.9	11.8	7.5

5.3 計測実験

本稿で使用するロボットハンドが取り得る把持形態(図 3 参照)ごとの性能を計測する。表 1 に示す各評価項目のうち、項目 1 と 4 は、ロボットハンドの機構データから計測する。項目 3 は本稿においては一定値とする。項目 2,5~8 に関しては、把持時の実測値から性能値を取得する必要がある。そこで、表 2 の板治具を用いて項目 2、その他の各治具を用いて項目 5~8 の性能を実測する。なお、項目 5~8 については、複数の方向から計測を行う。また、項目 7 と 8 の性能値は、測距センサを用いて計測する。

実験結果の一例を表 3 に示す。表中、評価項目 5~8 については各治具の幅が 72[mm]のときの実測値である。なお、項目 5 と 6 については、実測時の最小値を記載している。項目 7 と 8 では最大値を示す。

計測結果から、各把持形態の評価項目に対する性能について考察する。把持形態(a)は、把持可能幅や把持可能厚みが小さく、把持前後の設置誤差も少ない。ゆえに、小物や薄物の対象物を扱うことができ、精密作業に適している。(a)と同様に小物や薄物を把持可能な形態が(b)であるが、(a)よりも最大モーメントが大きい。よって、小さい部品の組立作業や対象物を押し付けながら動かすような作業向けの形態と考えられる。(c)は(a)よりも最大モーメントが大きく、(b)よりも把持後の設置誤差が小さい。この把持形態により、精密かつ外部からモーメントのかかる、嵌合作業等を行える。把持形態(d)は、2 指把持のため把持動作空間が小さいが、最大外力と最大モーメントが大きい。外力がかかる作業でも狭いスペースで実施可能な形態である。把持形態(e)では、最大モーメントと最大外力が全形態の中で最も大きい結果となった。重さのある対象物や力を必要とする作業に好適である。

また、把持形態(e)での実験において、直径 36, 54[mm]の治具では、最大モーメントが計測不可能となった。これは、把持形態(e)においては、本ロボットハンドの仕様により、一定の厚さより小さい対象物に対しては、回転方向が拘束されなくなるためだ

と考えられる。

6. システムを用いた実験

本章では，3 章で提案した把持形態選択システムと 5 章で計測した性能値を用いて，対象物情報と対象作業を考慮した把持形態が自動で選択されることを確認する。

6.1 評価関数を用いた把持実験

形状や寸法，目的の作業が異なる 3 つの対象物（CPU ファン，白板消し，アルミ缶）に対して，把持実験を行う。作業内容について，CPU ファンに関しては，パソコンの組立時に嵌め込むための押し付け作業を入力とする。白板消しについては，白板に力を加えながら清掃する押し付け作業を対象作業とする。アルミ缶は，2 つの作業を想定し，一方はキャップを開けるためのねじり作業。他方は，商品として陳列するための位置決め作業である。

各対象物に対して，把持実験を行った結果を表 4 に示す。各把持形態で評価関数 $J(h, w)$ を用いて評価値を計測した。算出された評価値が最小となる把持形態を用いて，把持が可能であることを確認した。

6.2 考察

CPU ファンを使った実験では，把持形態(b)が選択された。これは，厚みが 5.2[mm]の CPU ファンを把持可能な形態のうち，押し付け作業で要求される最大外力と最大モーメントの値が，(b)において最も大きいためだと考えられる。この結果から，要求数値が性能値を超える把持形態では，評価値が極端に大きくなり，その把持形態は選択されないことが分かった。また，白板消しの押し付け作業でも，把持形態(b)が選択された。使用したサイズの白板消しを把持可能な把持形態のうち，押し付け作業で要求される最大外力と最大モーメントが大きいのは(b)と(e)である。ただし，(e)では 44[mm]の白板消しに対しては，最大モーメントが小さくなるため(5.3 節参照)，形態(b)が選択されたと考える。以上の結果から，同一の作業内容に対して，対象物情報（寸法，質量）に応じて異なる評価値が得られることが分かった。

アルミ缶のねじり作業では，把持形態(e)が選択された。一方，同一のアルミ缶の精密陳列作業では，把持形態(a)が選択された。これは，アルミ缶のねじり作業では最大モーメントの大きさ，精密陳列作業では設置誤差が少なさが要求されるためである。この結果から，同一の対象物に対して，作業内容に応じた異なる把持形態が選択されることが分かった。

以上により，本システムで対象物，対象作業に応じた把持形態を自動で選択するシステムを構築できたことが確認できた。

7. まとめ

複数の把持形態を実現可能なロボットハンドにおいて，対象物と対象作業を考慮した把持形態を自動で選択する手法を提案した。本手法では把持を行

表 4 把持実験の結果

	対象物	CPU ファン	白板消し	アルミ缶	アルミ缶
入力	寸法[mm]	80×60× 5.2	51×104 ×44	Φ64.7× 132	Φ64.7× 132
	質量[g]	17.5	61.0	17.7	17.7
	対象作業	押し付け	押し付け	ねじり	精密 陳列
評価 関数 の 結 果	(a)の 評価値	8.3e-2	1.9e-1	2.0e-1	<u>1.0e-1</u>
	(b)の 評価値	<u>7.4e-3</u>	<u>9.7e-2</u>	8.2e-3	1.0
	(c)の 評価値	1.1e-2	1.2e-1	1.3e-2	1.3
	(d)の 評価値	1.0	1.1	1.6e-2	6.7e-1
	(e)の 評価値	1.0	1.0e-1	<u>5.1e-3</u>	8.8e-1
出力	選択 された 把持形態	(b) つまみ 3 指 対向把持	(b) つまみ 3 指 対向把持	(e) 握り 3 指 対向把持	(a) つまみ 2 指 対向把持
	把持結果				

った後の作業にも焦点を当て，複数の作業に対応するための評価項目を選定した。把持後の作業における評価項目の要求数値と，把持形態ごとの性能値をパラメータとした評価関数を設計した。様々な形状やサイズの評価用治具を用いて，把持形態ごとの性能値の計測実験を行った。システムを用いた実験を通して，入力した対象物情報や作業内容情報に応じて，把持形態が自動的に選択されることを確認した。

今後は実証実験を実施し，本手法により実作業が可能であることを確認する。また，より多様な作業に対応するために，評価項目の拡張を行う。

参 考 文 献

- [1] T. Okada : "Object-Handling System for Manual Industry," IEEE Transactions on Systems, vol. 9, no. 2, pp. 79-89, 1979.
- [2] 東森 充 他： “二重巡回機構を備えた 4 本指ロボットハンドの開発”，日本ロボット学会誌，vol. 24, no. 7, pp. 813-819, 2006
- [3] B. Mishra et al. : “On the existence and synthesis of multifinger positive grips,” Algorithmica (Special Issue: Robotics), vol.2, no.4, pp.541–558, 1987.
- [4] V. Nguyen : “Constructing force closure grasps,” Int J Robot Res, vol.7, no.3, pp.3–16, 1988.
- [5] 辻 徳生： “マニピュレーションのための把持安定性の評価”，日本ロボット学会誌，vol. 35, no. 1, pp. 40-43, 2017.
- [6] Miller et al. : "Graspit! A versatile simulator for robotic grasping," IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 11, no. 4, pp. 110-122, 2004.