

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870957

研究課題名(和文)多形状部品の初期誤差にロバストな組立作業用汎用ハンドの機構と把持戦略の最適設計

研究課題名(英文)Optimum Design of Mechanism and Grasping Strategy of Universal Robotic Hand with Robustness to Initial Pose Errors of Various Shaped Parts for Assembly Tasks

研究代表者

土橋 宏規 (Dobashi, Hiroki)

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号：50634490

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、多形状の部品からなる製品の組立作業を実現するための汎用的なロボットハンド(以下、汎用ハンド)の最適な機構と把持戦略を設計・計画するためのアルゴリズムの構築を目的として、必要となる要素技術の確立を行った。具体的には、汎用ハンドの機構と把持戦略を総合的に評価するための評価方法の提案と、機構ならびに把持戦略の最適性の定義づけを行い、これらの有用性を簡単な例題を用いて示した。また、三次元形状部品を対象とした把持の最適化手法を提案し、実際の工業製品の部品を対象とした数値例を用いて、提案手法の妥当性を示した。さらに、実機での提案手法の検証用に、汎用ハンドシステムを開発した。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to construct an algorithm to design an optimum mechanism and plan grasping strategy of a universal robotic hand for an assembly task of a product consisting of variously shaped parts. Toward this objective, a method to evaluate a mechanism and grasping strategy of a universal robotic hand synthetically was proposed, and the optimality of these was defined. The utility of the proposed method was shown with a simple example. Also, the method to optimize grasping of 3-D parts was proposed, and its validity was shown with numerical examples. In addition, a universal robotic hand system was developed for conducting experiments to validate the proposed methods in the real environment.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ロボットハンド 組立作業 把持 評価指標 最適化 実験システム

1. 研究開始当初の背景

製造業においてロボットが多形状の部品からなる製品の組立作業を実現するためには、個々の部品を組み付けに必要な精度で把持する必要がある。このため、現状では専用の供給機や人の手作業によって各部品を事前整列させ、それらを各部品形状に特化した複数の専用グリッパを用いてロボットが把持している。しかし、この方法では部品形状の種類が増えた場合にコストが増大する。

こうした背景から、様々な形状の部品を事前整列なしでも組み付けに必要な精度で正確に把持できるような、汎用的なロボットハンド（以下、汎用ハンド）の機構と把持戦略が求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ある与えられた製品を構成する複数の部品の形状と、作業台上に置かれた個々の部品について想定される初期位置・姿勢に関する誤差（以下、初期誤差）の範囲から、すべての部品に対して、そのような誤差を外界センサに依らずに吸収して正確な把持を確実に達成し、組み付け作業を遂行することができるような、汎用ロボットハンドの最適な機構ならびに把持戦略を導出するためのアルゴリズムを構築することである。これに向けて、本研究では、そのようなアルゴリズムの構築に必要な要素技術を確立する。

3. 研究の方法

(1) 汎用ハンドの機構の想定

対象部品を目的の位置・姿勢で正確に把持するための手段として、'form closure' と呼ばれる幾何的な拘束方法がある。本研究ではこの方法を採用した上で、多形状部品に対して 'form closure' を実現し得る汎用ハンドの機構として、図1に示すようなスティック状の平行な複数本の指を有するものを想定する。また、これらの指は、汎用ハンドのベース部に対して、指の断面に平行な方向にのみ動けるものとする。図2は、このような汎用ハンドの把持戦略によって、対象部品の初期誤差を吸収する様子を示している。

(2) 汎用ハンドの機構と把持戦略の総合的評価方法と最適性の検討

過去の研究成果では、対象部品の初期誤差に対する把持戦略のロバスト性を評価指標として、ある与えられた汎用ハンドの機構の下での把持戦略を計画する方法について探究してきた。しかし、組立作業を遂行するためには、そうした初期誤差に対するロバスト性だけでなく、部品の組み付け時などに加わる外力に対する把持形態のロバスト性についても評価する必要がある。また、本研究では最終的に把持戦略とともに汎用ハンドの機構も最適化することを目指しており、機構の最適性を考慮することも必要である。

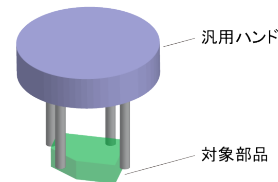


図1 想定する汎用ハンドのイメージ

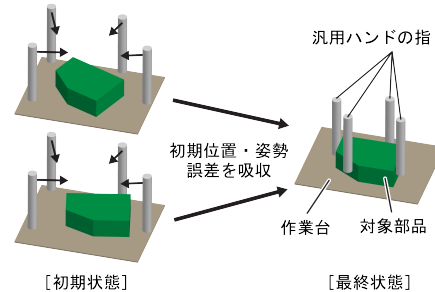


図2 把持戦略による初期誤差の吸収

以上の観点から、汎用ハンドの機構と把持戦略の優劣を総合的に評価するための方法と、どのような条件を満たす機構と把持戦略を最適と位置づけるのかについて、検討を行う。ただし、対象部品は二次元部品とする。

(3) 総合的評価方法の有用性の検証

上記の(1)で述べた評価方法と最適性の定義に基づいて、汎用ハンドの最適な機構と把持戦略を見出すことができるかどうか、シミュレーションにより検証する。

(4) 三次元部品の把持のロバスト性解析と把持の最適化手法の提案

上述の(2)の評価方法では、汎用ハンドの機構と把持戦略の総合的な評価方法に主眼を置いているため、対象部品を二次元の部品としている。しかし、実際の部品は三次元のものであり、評価方法を実部品に適用するためには、想定する汎用ハンドの機構による対象部品の三次元的な把持のロバスト性を解析する必要がある。また、最適な汎用ハンドの機構と把持戦略を求める際に想定する必要がある、対象部品の把持点の位置については、現状では試行錯誤的に与えることとしているが、予め最適な把持点位置がわかれば、汎用ハンドの機構と把持戦略の最適化を効率よく行える可能性がある。

そこで、先行研究で提案されている三次元物体を対象とした把持の最適化手法を本研究課題の問題設定に合わせて拡張し、三次元部品の把持のロバスト性解析と把持の最適化手法の提案を行う。

(5) 汎用ハンドシステムの設計と製作

提案手法に基づいて設計・計画した汎用ハンドの機構と把持戦略の妥当性を検証するための実験装置として、汎用ハンドシステムの設計と製作を行う。なお、汎用ハンド本体については、実験に応じて機構を複数通りに

変更し得るため、機構の変更が比較的容易に行えるような、再利用性の高いものとする。

4. 研究成果

(1) 汎用ハンドの機構と把持戦略の総合的評価方法の提案と最適性の定義

本研究では、汎用ハンドの機構と把持戦略の優劣を総合的に、かつ定量的に評価するための方法を提案した。評価方法の手順を以下に詳しく述べる。

提案した評価方法では、まず個々の部品に対してある汎用ハンドの機構と把持戦略を想定し、組み付け作業時などに把持した部品に加わる外力に対する把持形態のロバスト性、部品の初期位置・姿勢に含まれる誤差に対するアライメントのロバスト性、汎用ハンド機構の大きさ、の三つの項目に関する評価指標の値を求める。続いて、それぞれの評価指標の値の積を個々の部品に対する汎用ハンドの機構と把持戦略の評価値とする。そして、最終的にすべての部品についてこれらの評価値の積の相乗平均をとることで、すべての部品に対する汎用ハンドの機構と把持戦略の総合的な評価値を求める。なお、ここで言うアライメントとは、把持戦略によって対象部品の初期誤差を吸収する操作を意味する。

上記 ~ の三つの評価指標のそれぞれについて、図 3~5 に示す概念図を用いて詳しく述べる。

把持形態のロバスト性

図 3 に示すように、外力に対する把持のロバスト性については、指先力によって対象部品に加えることのできる力の集合を表す領域の最大内接球を考え、その半径を評価指標とする。この値が大きいくほど、部品に加わる任意方向の外力に対して把持のロバスト性が高いと言える。

アライメントのロバスト性

図 4 に示すように、初期誤差に対するアライメントのロバスト性については、許容可能な誤差を含む対象部品の初期位置・姿勢の集合を表す領域の最大内接球を考え、その半径を評価指標とする。この値が大きいくほど、部品の初期位置・姿勢に含まれる誤差に対してアライメントのロバスト性が高いと言える。

汎用ハンドの機構の大きさ

図 5 に示すように、汎用ハンドの機構の大きさについては、ハンドを指の長手方向から見た際に指の中心位置が機構的に形成し得る最大の凸包（凸多角形）を考え、その面積の逆数の二乗根を評価指標とする。この値が大きいくほど、ハンドの大きさが小さいと言える。

以上より、総合的な評価値が大きいくほど、汎用ハンドの機構と把持戦略が良いもので

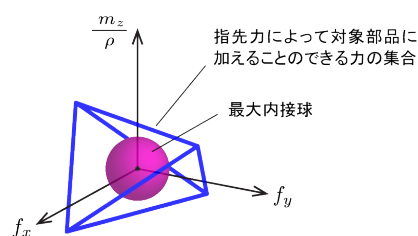


図 3 外力に対する把持のロバスト性の評価

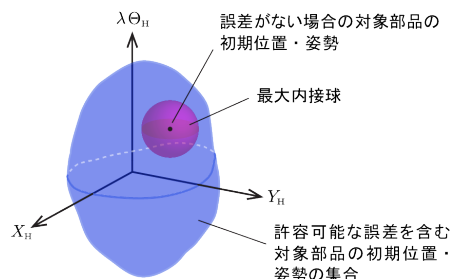


図 4 初期誤差に対するアライメントのロバスト性の評価

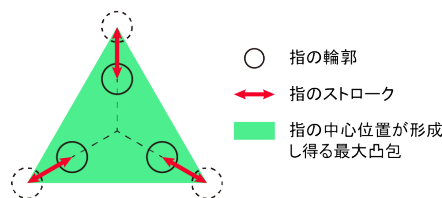


図 5 汎用ハンドの機構の大きさの評価

あると言える。本研究では、汎用ハンドの機構と把持戦略の候補ごとの総合的な評価値を比較した際に、評価値が最大となるものを最適であると定義した。

(2) シミュレーションによる総合的評価方法の有用性の検証

上記(1)で提案した総合的評価方法の有用性を検証するため、簡単な例題を用いて汎用ハンドの機構と把持戦略の評価を行った。

はじめに、例題の問題設定について述べる。対象部品は、二次元の円形部品と長方形部品の二種類とした。汎用ハンドの機構としては、図 6 に示すように四本の指を有しており、指 1・3 が同期、指 2・4 が同期し、また、指 1・3 と指 2・4 とが独立に駆動されるような二自由度の直動関節を有する機構を想定した。ただし、機構のバリエーションとして、指 1・3 の可動方向と指 2・4 の可動方向との成す角について二通りのもの（機構 1, 2 と呼ぶ）を想定した。一方、把持点の位置については、'form closure' を実現するものとして図 7 に示すようなものを想定した。アライメント時の各指の動きについては、把持点位置から一定距離だけ外側に移動した位置を初期位置として、そこからハンド中心に向かって一定速度で動くものとした。ただし、動作戦略のバリエーションとして、当該距離が小さいものと大きいものの二通り（動作戦略 a, b

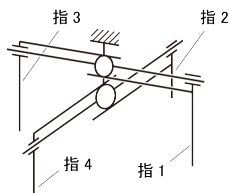


図6 例題における汎用ハンドの機構

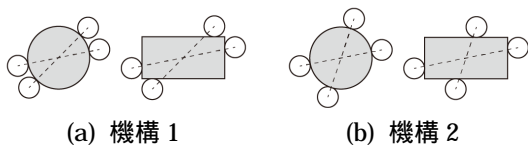


図7 各機構での対象部品の把持点位置

と呼ぶ)を想定した。したがって、機構と動作戦略の組合せとしては、計四通りの場合をシミュレーションにおける評価対象とした。

次に、シミュレーションの結果について述べる。図8~10は、上述の四通りの個々の場合における把持のロバスト性、アライメントのロバスト性、機構の大きさのそれぞれの評価結果を示している。ただし、図の表題にある「1a」などは、機構1と動作戦略aの組合せを意味している。なお、機構の大きさの評価については、実現できるストロークの大小も機構の大きさに関係するため、動作戦略a, bで区別して評価した。これらの評価結果を用いて個々の場合における総合的な評価値を求めたところ、それらの大小関係は「2b > 2a > 1b > 1a」となった。なお、ハンドの大きさのみの評価では2bの場合が最も評価が低くなったが、一方で把持のロバスト性とアライメントのロバスト性の評価はいずれも2bの場合が最も高く、提案手法ではこれらを総合的に評価するため、2bの場合が最も良いと判断されるという結果となった。

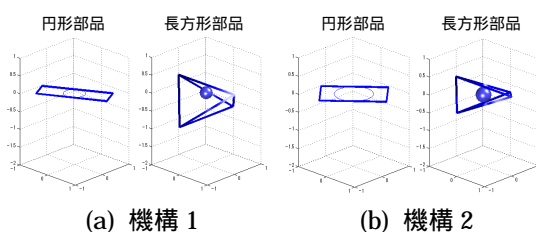
以上より、用いた例題は非常に単純なものではあるが、提案した総合的評価方法の有効性が示されたと言える。

(3) 三次元部品の把持のロバスト性解析と把持の最適化手法の提案

上述の(2)で示した例題では、簡単のため対象部品を二次元の部品としていたが、実部品は三次元のものであり、上述の(1)の評価方法を実部品に適用するためには、想定する汎用ハンドの機構による対象部品の三次元的な把持を解析する必要がある。また、対象部品の把持点の位置は、試行錯誤に依らずに決定できることが望ましい。

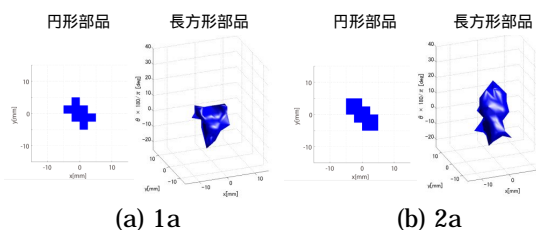
そこで、本研究では、ある与えられた汎用ハンドの機構によって、単一の三次元部品を把持して組み付け作業を行う際、部品に加わり得る任意の外力にロバストに抗して確実に組み付け作業を遂行することができるような、最適な把持点の位置を導出する手法を提案した。

この手法の具体的な手順を以下に述べる。

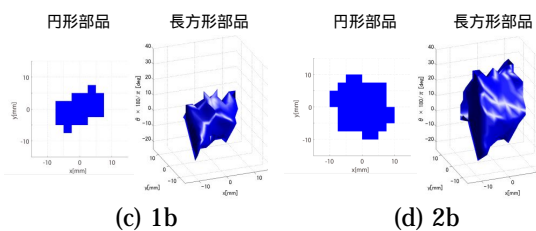


(a) 機構1 (b) 機構2

図8 把持のロバスト性の評価



(a) 1a (b) 2a



(c) 1b (d) 2b

図9 アライメントのロバスト性の評価

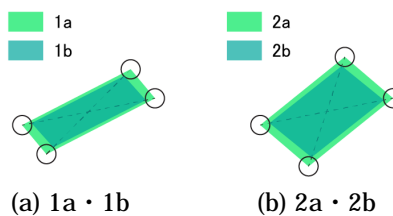


図10 機構の大きさの評価

はじめに、与えられた汎用ハンドの機構で実現可能な、対象部品の把持点の組合せの候補を求める。次いで、個々の把持点の組合せの候補に対して、部品に加わり得る任意の外力に抗して部品を把持するために必要となる指先力の大きさの最大値を求める。最後に、すべての把持点の組合せの候補の中から、この最大値が最小となるものを選択し、最適な把持点の組合せとする。なお、把持のロバスト性の指標としては、最適な把持点の組合せにおける必要指先力の最大値を用いることとする。

上記の一連の手順は、基本的には先行研究で提案されている最適化手法の手順と同じであるが、本研究では、研究課題の問題設定に合わせて最適化手法の拡張を行っている。具体的には、先行研究における手法では考慮されていなかった、ハンドの指の摩擦の異方性と、ハンドの指と把持した対象部品との間に働き得る摩擦力の方向に関する制約とを考慮できるようにしている。これら二つの点のそれぞれについて、以下に詳しく述べる。

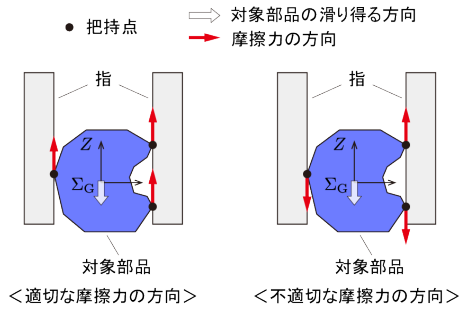


図 11 指と部品との間に働き得る摩擦力の方向

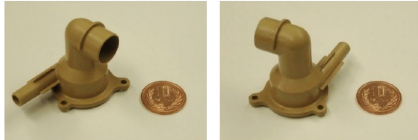


図 12 実際の工業製品の部品

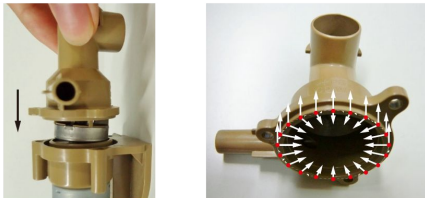


図 13 想定した組付け作業と部品に加わり得る外力

ハンドの指の摩擦の異方性

本研究では、指と対象部品との間に働く摩擦力の異方性を仮定している。すなわち、指の断面と平行な方向の摩擦力は無視できるくらい十分小さく、一方、指の長手方向の摩擦力は部品を把持して持ち上げることができる程度のものであるとしている。本研究で提案した手法では、このような摩擦の異方性を、把持のロバスト性解析における指先力の定式化において陽に導入している。

摩擦力の方向に関する制約

関連研究で指摘されているように、対象部品の滑り得る方向に制約がある場合には、摩擦力の発生し得る方向にも制約がある。例えば、図 11 に示すような方向に対象部品が滑り得るとすると、ハンドの指と対象部品との間に働き得る摩擦力の方向として、図 11 の左側に示すような摩擦力の方向の組合せはあっても、右側に示すような組合せはあり得ない。本研究で提案した手法では、このような摩擦力の方向に関する制約条件も把持のロバスト性解析において陽に導入している。

以上のような点について拡張を行った提案手法の有用性を検証するため、図 12 に示すような実際の工業製品の部品（電気ポットのポンプに使用されている部品）について、図 13 に示すような組付け作業ならびに部品に加わり得る外力を想定し、これを図 14 に示すような機構の汎用ハンドによって把

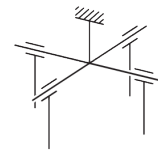


図 14 数値例における汎用ハンドの機構

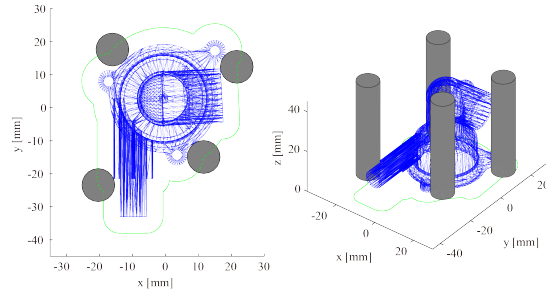


図 15 最適な把持点の導出例

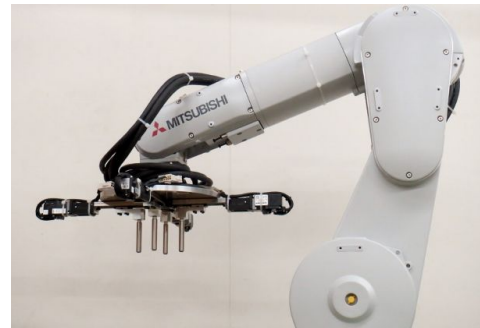


図 16 ロボットアームに取付けた汎用ハンド



図 17 汎用ハンドの制御装置

持・組付けを行うとした数値例を用いて、把持の最適化を行った。図 15 に、導出された最適な把持点の例を示す。

この手法により、三次元部品の把持のロバスト性解析と、最適な把持点を試行錯誤に依らずに導出することができるようになった。

(4) 汎用ハンドシステムの構築

提案手法の実環境における妥当性を検証するための実機実験に向けて、汎用ハンドならびに制御装置の設計・製作を行い、汎用ハンドシステムを構築した。図 16 に、ロボットアーム（三菱電機、RV-7FL-D）に取付けた状態の汎用ハンドを、また、この汎用ハンドの制御装置を図 17 に示す。

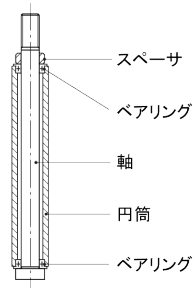


図 18 汎用ハンドの指の構造

汎用ハンドは四本のスティック状の指を有している。個々の指はアタッチメントを介してボールねじに取付けられており、そのボールねじはサーボモータ（三菱電機、HC-AQ0135D）により駆動される。なお、本研究では、先の(3)の で述べたように、指と対象部品との間に働く摩擦力の異方性を仮定しており、指の断面と平行な方向の摩擦力は無視できるくらい十分小さく、一方、指の長手方向の摩擦力は部品を把持して持ち上げることができる程度のものであるとしている。前者については、指と対象部品との間の滑りを積極的に利用してスムーズなアライメントを実現するためのものであり、実際の汎用ハンドでは、これと等価とみなせる構造として、図 18 に示すように、ベアリングを用いて対象部品と接触する円筒部分がその中心軸まわりに受動的に回転できるようにしている。

なお、上述のように汎用ハンドの個々の指の駆動系はユニット化されているため、機構の変更が比較的容易な、再利用性の高いものとなっている。これらの実験装置を用いた実験の実施は、今後の課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

土橋 宏規、神岡 渉、深尾 隆則、横小路 泰義、野田 哲男、長野 陽、永谷 達也、組立作業のための平行スティック指汎用ハンドによる三次元形状部品の把持の最適化、システム制御情報学会論文誌、査読有、Vol.28、No.6、pp.258-266、2015
DOI : 10.5687/iscie.28.258

[学会発表](計1件)

土橋 宏規、神岡 渉、横小路 泰義、野田 哲男、長野 陽、永谷 達也、アライメントと把持のロバスト性に基づく組立作業用汎用ハンドの機構と把持戦略の総合的評価、第14回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2013)、2013年12月18日、神戸国際会議場(兵庫県)

[その他](計1件)

受賞等

2016年度システム制御情報学会学会賞論文賞(2016年5月26日)

6. 研究組織

(1)研究代表者

土橋 宏規(DOBASHI, Hiroki)

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号：50634490

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし