

令和元年6月3日現在

機関番号：14701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K21485

研究課題名（和文）汎用ハンドによる組立作業の実現性向上のためのアライメント戦略と把持形態の総合計画

研究課題名（英文）Total Planning of Alignment Strategy and Grasping Configuration For Improving Feasibility of Assembly Tasks by Versatile Robotic Hand

研究代表者

土橋 宏規 (Dobashi, Hiroki)

和歌山大学・システム工学部・講師

研究者番号：50634490

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、製造業における汎用ロボットハンドによる組立作業の実現性の向上を目指し、ハンドによる部品のアライメント（整列）操作と把持形態を総合的に計画する手法の構築に向けた要素技術の構築を行った。

具体的には、作業台上に供給された部品をアライメントする際に、ハンドの指が押し当てられた部品がぐらつくかどうかを判定するとともに、ぐらつきにくさを定量的に評価する手法を構築した。この手法の有用性と妥当性は、数値例の解析と実機実験により確認できた。さらに、自由度の低い汎用ハンドの例として、すべての指が連動して動くチャック型ハンドを想定し、把持形態の計画に必要な部品表面への指の配置計画法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、製造業における実際のニーズを意識しながら、目的の作業を実現させるための必要最小限のロボットハンドの機構と、その操作戦略について探究するという方針をとっており、これは従来の多くの汎用ロボットハンドの研究とは異なる、本研究の一つの特色となっている。また、本研究の成果は、製造業での組立作業の自動化において課題となっている従来のロボットシステムの汎用性の低さを改善するために必要となるものであり、構築した要素技術を汎用ロボットハンドの機構の設計、ならびにハンドの操作戦略の計画に活用することで、組立作業用ロボットシステムの汎用性が向上し、製造業のさらなる活性化に寄与できると期待している。

研究成果の概要（英文）：In this research, elemental technology toward total planning of alignment strategy of target parts and grasping configuration was constructed, aiming at improving the feasibility of assembly tasks by a versatile robotic hand in the manufacturing domain.

Specifically, a method to judge if a part is wobbled by the fingers of a hand during alignment operation of the part supplied on the workbench, and to evaluate how hard it is for the part to be wobbled quantitatively was constructed. The utility and validity of this method were verified with analysis of numerical examples and experiments. Moreover, a chuck-type robotic hand, in which the movement of all the fingers is coupled, was targeted as an example of a versatile robotic hand with low degree of freedom, and a planning method of finger arrangement onto the parts necessary for planning of grasping configuration was established.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ロボットハンド マニピュレーション ぐらつき アライメント 指配置計画 操作戦略 組立作業 製造業

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

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行うためには、個々の部品を組付けに必要な精度で把持する必要がある。現状では、専用の供給機や人の手作業によって個々の部品を事前に整列させ、それ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が、部品形状の種類が増えた場合にはコストが増大する。この方法をとらない場合には、部品の初期位置・姿勢の不確実性が初期誤差として生じる。これに対処する方法として、視覚センサで部品の位置・姿勢を認識して把持することが考えられるが、視覚センサのみで組付け精度を実現するのは困難である。

こうした背景から、多形状の部品を事前整列なしでも組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

本研究では、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・姿勢の誤差(以下、初期誤差)ならびに把持した部品に組付け時に加わり得る外力・外モーメントの大きさの範囲から、すべての部品に対して初期誤差を確実に吸収して正確な把持を行うための汎用ハンドのアライメント戦略と、組付け時に加わる外力・外モーメントに抗して確実に組立作業を遂行するための把持形態とを、合わせて計画するための手法を確立することを目指す。

上記の手法の確立に必要な要素技術として、本研究では特にアライメント操作中の部品のぐらつき判定とぐらつきにくさの定量的評価手法、ならびに低自由度の汎用ハンドの把持形態の計画に際して必要となる部品表面への指の配置計画の方法を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 汎用ハンドの機構と把持形態の想定

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。先行研究では'form closure' を利用した把持形態を想定し、多形状部品の把持を実現する汎用ハンドとして図1に示すようなものを提案している。このハンドは平行な複数本の剛体のスティック状の指を有し、各指は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く。ただし、'form closure' により拘束できるのは指の長手方向の並進以外の運動であるため、この並進については指と部品との間に働く摩擦力によって拘束する。

本研究では、先行研究と同様に上記のような機構を持つ汎用ハンドと把持形態を採用する。



図1 平行スティック指汎用ハンド

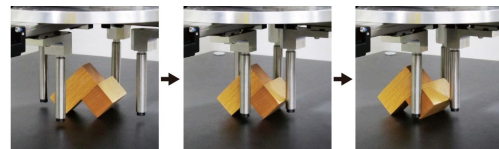


図2 対象部品のアライメント

(2) アライメント操作中の部品のぐらつき判定とぐらつきにくさの評価の方法の検討

先行研究では、上記(1)で述べた汎用ハンドの機構を用いて部品の初期誤差を吸収するための手法として、図2に示すようにハンドの指を目的の把持形態へ向けて閉じていく過程で、指を部品に押し当ててその位置・姿勢を矯正するアライメント操作を提案している。ただし、この手法は操作中に部品が作業台上で揺れたり転倒したりしないことが前提となっているが、図3に示すように、部品の姿勢やハンドの指と部品との接触位置によってはこの前提が崩れ、アライメント操作が失敗してしまう可能性がある。

本研究ではそうした失敗の可能性を排除するため、指と部品が接触する際に生じ得る部品の運動と部品に働き得る力とモーメントに基づき、部品がぐらつき得るかどうかを判定するとともに、ぐらつきにくさを定量的に評価する方法を検討する。ただし、本研究では部品が初期状態にある姿勢から作業台面に対して少しでも傾くことを、「ぐらつき」と定義する。

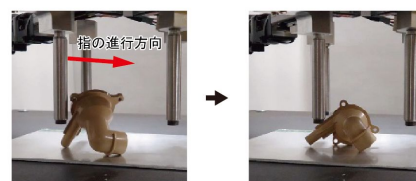


図3 ぐらつきによるアライメントの失敗

(3) ぐらつき判定とぐらつきにくさの評価の方法の有用性と妥当性の検証

例題部品を対象として、先の(2)で述べた方法を用いて実際に部品のぐらつき判定とぐらつきにくさの評価を行い、この方法の有用性を検証する。さらに、実際に汎用ハンドの試作機と例題部品の実物を用いた実験を行い、この方法による判定/評価結果が実環境においても妥当であるかどうかを検証する。

(4) 低自由度ハンド機構の把持形態計画のための部品表面への指配置計画手法の検討

先行研究では、先の(1)で述べたような機構を持つ汎用ハンドとして個々の指が独立して動く

もの（例えば、4本の指を持つ4自由度のハンド）を想定し、把持形態の計画はそうした独立性を前提として行っている。すなわち、部品表面上にハンドの指を配置する際には、ある程度任意の配置を候補とすることができる。一方、扱う部品群の形状などによってはハンドの個々の指が必ずしも独立して動く必要はなく、すべての指が連動して動く1自由度のハンドでも目的の作業が実現できる場合がある。このような低自由度のハンドは、その重量や体積、コストなどの面から自由度の高いハンドよりも望ましい。しかし、低自由度のハンドでは上述のような機構の制約上、実現可能な把持形態が大きく限定されるため、先行研究で提案した把持形態の計画手法をそのまま適用することができない。低自由度ハンドの有用性から、こうしたハンドにも適用できる把持形態の計画手法の構築が必要となる。

これに向けて、本研究では最も自由度が小さい1自由度のハンドを対象として、把持形態の計画の際に必要な部品表面への指配置計画の手法を検討する。

4. 研究成果

(1) アライメント操作中の部品のぐらつき判定とぐらつきにくさの評価の手法の構築

アライメント操作中、部品は作業台面、ならびにハンドの指と複数点で接触するが、部品がぐらつくかどうかを判定する際には、そうした接触の下で部品に生じ得る運動の集合（以下、許容運動集合）を考慮する必要がある。本研究の予備的成果では、部品のぐらつきにくさを定量的に評価する一手法を提案していたが、この手法では許容運動集合が考慮されておらず、場合によっては指が部品にめり込むような状況を許容してしまい、その結果、ぐらつきにくさの評価結果が適切でない場合が生じるという問題があった。また、同手法では部品がぐらつく際に指と部品とが一点で接触している場合しか想定しておらず、複数点で接触した状態でぐらつくような場合の評価を行うことができなかった。本研究では、これらの問題を解決すべく、以下に述べるような部品のぐらつき判定とぐらつきにくさの評価を行うための手法を構築した。

この手法では、はじめに部品の許容運動集合を求める。許容運動集合は、部品の並進速度と回転角速度を変数とした上で、部品と作業台面、ならびにハンドの指との個々の接触点において、部品が作業台面、または指にめり込まないという条件を線形不等式で表現し、これをすべての接触点について連立して解くことにより、求めることができる。

次に、求めた許容運動集合の中に、ぐらつきに相当する運動が含まれるかを調べる。ここで、ぐらつきに相当する運動とは、部品の回転角速度の成分のうち、作業台面に平行な軸回りのものが非零となるようなものを指す。このような運動が許容運動集合に含まれなければ、部品はぐらつかないとして判定を終了する。この場合には、幾何的にぐらつきが生じ得ない状況であるため、ぐらつきにくさの評価値は形式的に無限大であるとする。一方、ぐらつきに相当する運動が許容運動集合に含まれる場合には、指が部品との接触点において部品に加える力（以下、指先力）を求める。なお、指先力の算出には、先行研究で提案した解析手法を用いる。

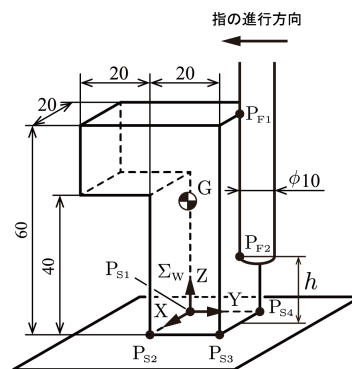
続いて、求めた指先力によって、ぐらつきに相当する運動が生じたとした場合に部品に働くモーメントを求め、その大きさと部品に働く重力によるモーメントの大きさを比較する。前者が大きい場合には部品はぐらつき、そうでなければ部品はぐらつかないとして判定を終了する。ぐらつきにくさは、重力によるモーメントの大きさを指先力によるモーメントの大きさで除したもので評価する。この評価値が1未満であれば部品はぐらつき、そうでないならばぐらつかないと言える。また、この評価値が大きいほど、部品はぐらつきにくいと言える。

上記の手法によって、部品の許容運動集合を考慮した上で、多点接触を伴う場合でも部品のぐらつき判定とぐらつきにくさの評価を行えるようになった。ただし、接触点数が多い場合には、指先力が一意に求まらず、したがって指先力によるモーメントも一意には求めることができない。こうした場合にも適用可能な手法を構築するとともに、ぐらつきが生じないようなアライメント戦略を計画する手法を構築し、さらにそれを把持形態の計画と統合することは、今後の課題である。

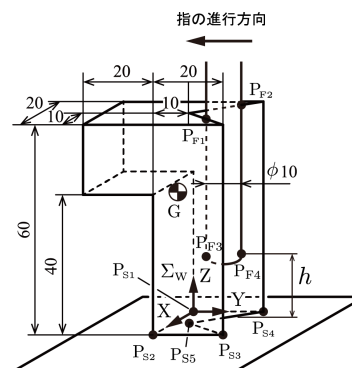
(2) ぐらつき判定とぐらつきにくさの評価の手法の有用性と妥当性の検証

上記(1)の提案手法の有用性と、提案手法による判定/評価結果の実環境における妥当性を検証するため、例題部品を対象とした数値例の解析と実験を行った。

数値例の解析では、図4(a)に示すようなL字型の部品と、同図(b)に示すようなL字型の部品に切欠きを施した部品を対象とし、図中に示すように、いずれの場合もアライメント操作中に1本の指が部品に押し当てられている状況を



(a) L字型部品



(b) 切欠きL字型部品

図4 例題

表 1 数値例の解析結果

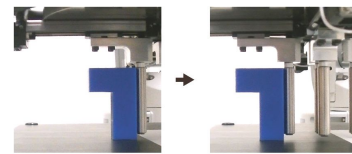
| 指の底面の高さ h [mm] | 図 4(a)の部品 | | 図 4(b)の部品 | |
|------------------|-----------|------|-----------|------|
| | 5 | 20 | 4 | 20 |
| ぐらつき判定の結果 | ぐらつかない | ぐらつく | ぐらつかない | ぐらつく |
| ぐらつきにくさの評価値 | 2.0 | 0.50 | 1.2 | 0.23 |

想定した。図 4(a)の部品については、作業台面からの指の底面の高さ h が 5mm と 20mm である場合の二通りを、また、同図(b)の部品については 4mm と 20mm である場合の二通りを、それぞれ解析した。解析結果を表 1 に示す。

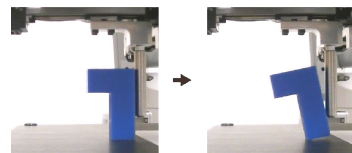
表 1 からわかるように、ぐらつき判定の結果は直感と整合するものとなり、また、部品のぐらつきにくさを定量的に評価することができた。なお、指の底面の高さが 20mm のとき、図 4(a)の場合では指と部品とが図中の点 P_{F2} のみで接触しながらぐらつき、一方、同図(b)の場合では図中の点 P_{F3} と P_{F4} の二点で接触しながらぐらつくことに注意されたい。

上記(1)で述べた予備的成果の手法では、許容運動集合を考慮しないことに起因して、図 4(a)の場合において指の高さに依らず部品がぐらつく判定されてしまうが、本研究で提案した手法ではそうした誤判定は生じず、ぐらつきを適切に判定/評価することができた。また、予備的成果の手法では扱えなかった多点接触を伴うぐらつきも、提案手法により判定/評価することができた。以上のように、例題を対象とした数値例の解析によって、提案手法の有用性が確認された。

一方、実験では図 4(a)の場合を対象として、図 1 に示した汎用ハンドの試作機と部品の実物とを用いて部品がぐらつくかどうかを確認した。図 5 に実験の様子を示す。図 5(a)、(b)は、それぞれ図 4(a)において指の底面の高さが 5mm と 20mm の場合に対応している。図からわかるように、図 5(a)の場合には部品はぐらつかず、作業台上を安定して移動したが、同図(b)の場合には部品がぐらつき、最終的には転倒した。これらの結果は先に示した数値例の解析結果と整合しており、提案手法による判定/評価結果が実環境においても妥当であることが確認された。ただし、図 4(b)に対応する実機実験は未完了であるため、多点接触を伴うぐらつきの判定/評価結果の妥当性については新たに実験を行い、検証する必要がある。



(a) 指高さ 5mm の場合



(b) 指高さ 20mm の場合

図 5 実機実験

(3) 低自由度ハンド機構の把持形態計画のための部品表面への指配置計画手法の構築

先の 3 節の(4)で述べたように、指が運動して動く低自由度のハンドでは、機構の制約上、部品表面上に配置できる各指の位置の組合せが限られるため、実現可能な把持形態が大きく限定される。本研究では、最も自由度が小さい 1 自由度のハンドとして実際の製造現場でもよく使用されているチャック型の 3 指ハンドをとりあげ、把持形態の計画に先立って行う必要のある、部品表面への指の配置計画を行うための手法を確立した。この手法の概要を以下に述べる。

本研究では、チャック型ハンドの機構として図 6 に示すようなものを想定する。ただし、ハンドの指はスティック状で、その直径と長さはすべての指について等しいとする。この機構では、3 本の指の中心軸の位置 V_1 、 V_2 、 V_3 が、常に頂角の大きさが θ であるような二等辺三角形を形成するように運動して動くため、部品を把持する際にもその制約を満たすような位置に指を配置しなければならない。

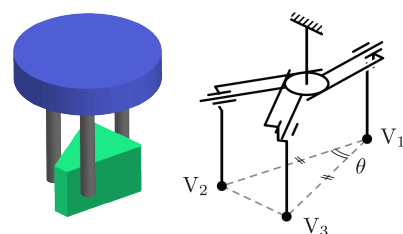


図 6 チャック型ハンド

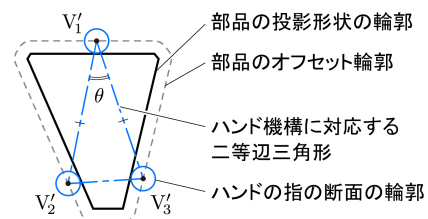


図 7 指配置計画問題

部品の形状が多面体で表現されているものとする、部品表面上に指を配置する問題は、図 7 に示すように部品の投影形状を指の半径分オフセットした輪郭上へ、ハンドの機構に対応する先述の二等辺三角形と相似な三角形の頂点 V_1' 、 V_2' 、 V_3' を配置する問題に帰着される。オフセット輪郭は複数の線分と円弧で構成されるが、本研究ではこのうち線分の部分のみに二等辺三角形の頂点を配置することとする。このような条件下では、オフセット輪郭を構成するある三つの線分上にハンドの機構に対応する二等辺三角形の三つの頂点 V_1' 、 V_2' 、 V_3' を配置する部分問題を考え、これを任意の三つの線分の組合せについて解けばよいこととなる。

この部分問題の解法として、本研究では図 8 に示すように、一つの線分上の任意の位置にハンド機構に対応する二等辺三角形の一つの頂点 Q_1 を配置したとき、ある手順に則って幾何的に残り二つの頂点 Q_4 、 Q_5 の位置を導出する方法を見出した。この方法は、与えられた三つの平行な直線上に正三角形の三つの頂点を配置するという、幾何学の古典的問題に対する解法に着想を得たものである。なお、最初に定めた頂点に対して残り二つの頂点の位置の組合せが無制限に存在するという特殊な場合もあるが、本研究ではそうした場合も含めて、指配置計画問題の解を求める方法を確立した。

図 9 に、提案手法により求めた指配置を例示する。これらの例では、上述の二等辺三角形の頂角の大きさが 60° と 30° に相当するようなハンドの機構を想定し、投影形状が L 字型と凸五角形型であるような部品を対象としている。いずれの場合にも、提案手法による指配置計画が可能であることが確認された。

なお、指配置問題を解く他の方法として、例えばオフセット輪郭を細分化してサンプル点を取り、ハンドの機構に対応する二等辺三角形（厳密には、その二等辺三角形に近い三角形）を形成するような指の位置の組合せを探索によって求めることが考えられるが、探索にかかる計算コストや機構の制約条件を厳密に満たす解を得ることが困難であるという問題がある。提案手法は幾何的な解法であるため、そうした探索は不要であり、なおかつ制約条件を厳密に満たす解を求めることができ、効率的で有用な手法であると言える。

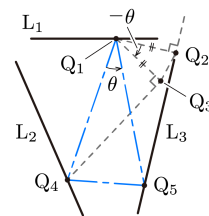
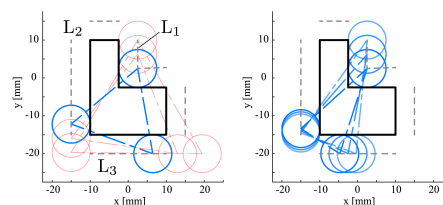
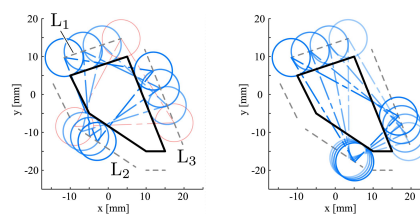


図 8 指配置計画問題の幾何的解法



(a) L字型部品の場合



(b) 凸五角形型部品の場合

図 9 指配置計画の例

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 3 件)

Hiroki Dobashi, Masaya Fukunishi, Yasuyoshi Yokokohji, Geometrical Solution of Finger Arrangement Problem onto Target Part toward Design of Chuck-type Hand with Three Parallel Stick Fingers, The 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2019), 2019

山本 憂斗、土橋 宏規、スティック指による押し操作における許容運動を考慮した三次元形状部品のぐらつき判定法、第 19 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 (SI2018)、2018

福西 聖也、土橋 宏規、横小路 泰義、チャック型平行スティック三指ハンドの機構設計のための対象部品表面への指配置問題とその幾何的解法、第 36 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2018)、2018

〔その他〕

受賞

第 19 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優秀講演賞、2019 年

報道関連情報

TBS テレビ、2019 年 1 月 6 日、未来の起源 (第 300 回)
日経産業新聞、2018 年 8 月 17 日、「簡単構造のロボハンド」

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名：横小路 泰義

ローマ字氏名：(YOKOKOHJI, yasuyoshi)

研究協力者氏名：福西 聖也

ローマ字氏名：(FUKUNISHI, masaya)

研究協力者氏名：山本 憂斗

ローマ字氏名：(YAMAMOTO, yuto)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。