

令和 2 年 4 月 27 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01802

研究課題名(和文) 直接教示による作業スキルを実現するマクロ・マイクロ型組立ロボットシステム

研究課題名(英文) Macro/micro-type assembly robot system that can acquire human skills through direct teaching

研究代表者

横小路 泰義 (Yokokohji, Yasuyoshi)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：30202394

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：直接教示可能なマクロ・マイクロ型組立ロボットシステムのマイクロ部をパラレル機構により設計・製作した。設計に際しては手先の等価慣性の等方性を考慮し、教示時の操作性を確保した。様々な部品形状に対応可能なチャック型平行スティック三指ハンドを設計・試作し、様々な形状の部品に対して適切な指配置を導出できる幾何的手法も開発した。4指平行スティックハンドと6軸垂直多関節型ロボットの組み合わせで、ギヤユニットの治具レス組み立てが可能であることを確認した。精密な嵌め合いを含む組立作業の正確なシミュレーションが可能かを検証し、実機実験と同じクリアランス条件下で同じ挙動となるパラメータ設定を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

直接教示可能なマクロ・マイクロ型組立ロボットの設計試作を通し、変種変量生産用ロボットシステムの方向性を示した。定式化したパラレル機構の手先等価慣性の評価法は、人が操作する他のパラレル機構にも適用できる。様々な部品形状への指配置が可能で1自由度チャック型平行スティック三指ハンドは、製造現場での適用範囲の拡大が期待できる。4指平行スティックハンドによる精密な嵌め合いを含む製品の治具レス組み立てでは、ハンドの高い汎用性を示すと同時に産業用ロボット特有の組立スキルの有用性を確認できた。精密な嵌め合いを含む組立作業のシミュレーションの検証結果は、将来の組立作業でのデジタルツインの実現可能性を示唆した。

研究成果の概要(英文)：We designed and prototyped a parallel mechanism as the micro part of the macro/micro-type assembly robot system that can acquire human skills through direct teaching. When designing, the operability during teaching was secured by considering the isotropy of the equivalent inertia of the end-point. We also designed and prototyped a chuck-type parallel stick three-fingered hand that can handle various parts shapes, together with a geometrical method that can derive an appropriate finger placement for parts of various shapes. It was confirmed that jig-less assembly of the gear unit was possible by combining a 4-finger parallel stick hand and a 6-axis vertically articulated industrial robot. We verified whether accurate simulation of assembly work including precise fitting was possible, and found the parameter settings that give the same behavior under the same clearance conditions as the actual assembly experiment.

研究分野：ロボット工学

キーワード：組立ロボット スキル移植 直接教示 変種変量生産 はめ合い作業 汎用ハンド 組立シミュレーション

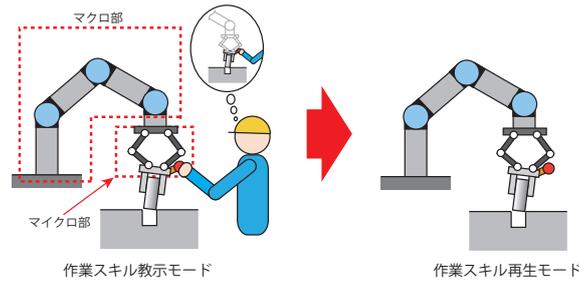


図 1: マクロ・マイクロ型ロボットによる組立作業の教示再生

1 研究開始当初の背景

製造分野では現状のロボット技術で可能な自動化は一通りやり尽くし、特に組立作業の自動化に関しては壁に直面している。従来の高い繰り返し精度を誇る位置制御ベースのロボットで組み立て作業を実現するには、治具により毎回同じ位置に部品を固定し、微妙な位置合わせを現物合わせをするために、膨大な時間を使ってティーチングをしなければならない。また異なる形状の部品を扱う場合には、専用ハンドを多数用意し都度切り替える“千手観音方式”が取られることが多い。このようなアプローチでは昨今求められている変種変量生産には対応できず、汎用ハンドによる、治具レス・ティーチングレス（もしくは最小限のティーチング）な新たな組立ロボットシステムの開発が望まれている。

2 研究の目的

本研究の目的は、組立作業の中でも最も基本的な作業である「はめ合い作業」に着目し、汎用ハンドにより、治具レスで、最小限のティーチングにより、変種変量生産のための組立ロボットシステム実現のための方法論を確立することである。具体的には、図1に示すようなマクロ・マイクロ構造を持つロボットを用いることで、自然な直接教示により人が持つ暗黙知的作業スキルをノミナルな軌道と接触状態遷移毎のダンピングパラメータとして抽出し、同じマクロ・マイクロ構造のロボットによって作業スキルを再生することで、最小限のティーチングと治具レスでの「はめ合い作業」を実現する。また平行スティック指汎用ハンドにより、様々な3次元形状の物体を多少の位置誤差があってもロボアストにかつ安定に把持を実現する。以上の組み合わせによって、変種変量生産のための組立ロボットシステムの実現を目指す。

3 研究の方法

本研究では、組立作業の中でももっとも基本的な作業である「はめ合い作業」に着目し、汎用ハンドにより、治具レスかつ最小限のティーチングで変種変量生産のための組立ロボットシステムを実現するための方法論の確立を目指すものであり、具体的な項目は以下のとおりである。

1. 平行スティック指汎用ハンドによる多様な部品形状への対応（汎用ハンド）
2. マクロ・マイクロ構造を持つロボットを用いた人間による直接教示とスキル抽出（最小限のティーチング）
3. マクロ・マイクロ構造を持つロボットによる、治具レスはめ合い作業の実現（治具レス）
4. 組立作業の物理シミュレータの開発（組立作業のデジタルツイン）

4 研究成果

4.1 平行スティック指汎用ハンドによる多様な部品形状への対応

4.1.1 チャック型平行スティック三指ハンドによる対象部品への指配置問題

筆者らはこれまで各指が独立に動く平行スティック型の汎用ハンドについて研究しており、本研究課題でも4.3ではそのような各指独立駆動の平行スティック型汎用ハンドを使用するが、各指独立駆動となるためコスト高となったりコンパクトなハンド機構の設計が難しくなったりする課題もある。これまで製造現場ではチャック型ハンド、す

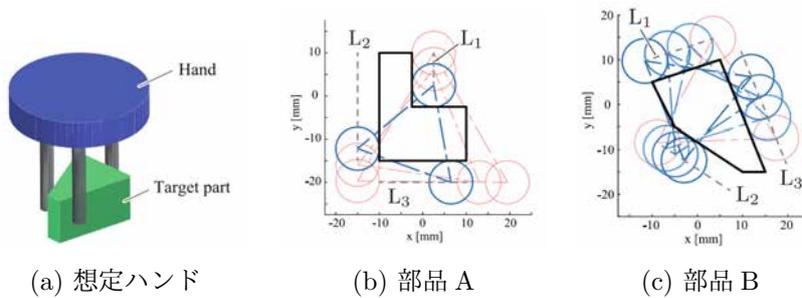


図 2: チャック型平行スティック三指ハンドによる対象部品への指配置問題

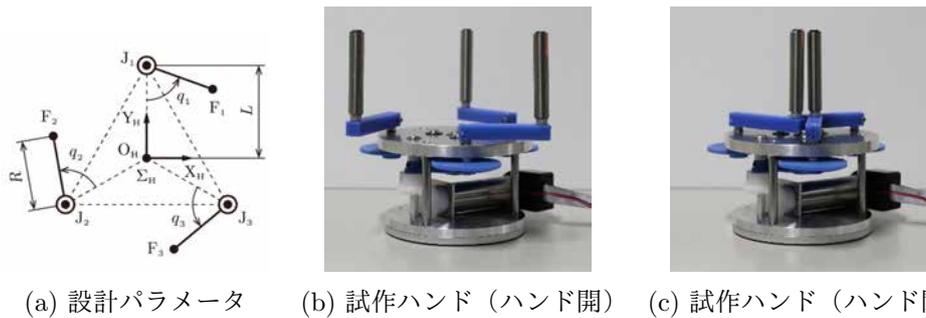


図 3: 設計パラメータと試作した平行スティック三指ハンド

なわち 1 自由度で複数の爪（通常 3 つ）が同時に開閉するものが広く用いられている．ただしこのチャック型ハンドは、円柱状の部品などの把持の用途に限られており、任意形状の部品の把持には用いることができないとされていた．

そこで、ここでは 3 指構成のチャック型平行スティックハンド、すなわち 1 自由度で 3 本の指が同時に開閉するような機構を想定し、円柱形状以外の任意の形状の部品を把持するための指配置問題を幾何学的に解くことを試みた [3][5]¹．想定するチャック型ハンドは、図 2(a) に示すように、3 指が二等辺三角形に配置されその外心円の中心に向かって直線的に閉じるような機構である．このように 3 指が二等辺三角形（等配置の正三角形を含む）に配置されているという制約を加えることで、幾何的に指配置問題を解くことができる．図 2(b), (c) は提案する手法で 2 種類の部品に対して正三角形の指機構による指配置問題を解いた結果である．詳しくは文献 [3][5] を参照されたい．

4.1.2 3 次元はめ合い作業用の平行スティック三指ハンドの設計

4.1.1 節で想定した直動機構を持つチャック型平行スティック三指ハンドは機構の特性上コンパクト化が難しい問題があったが、図 3(a) の示すような正三角形配置の回転式チャック型平行スティック三指ハンドでも同様に幾何学的に指配置問題が解けることが分かったので、回転式ハンドを設計開発することとした．

様々な形状や大きさの部品を把持できる汎用性を担保するために、経産省と NEDO が主催するロボット競演会ワールドロボットサミットのプレ大会 (WRS2018) の製品組立チャレンジで使用されたベルトドライブユニットの組立が可能かをハンドのモックアップを実際に作成して検証し確認した．次に、想定する対象部品が把持できる条件下でアクチュエータのトルクが最小化できるような最適化問題を考え、図 3(a) に示す各パラメータを決定した [9]．図 3(b), (c) に実際に試作したハンドの外観を示す．

4.2 マクロ・マイクロ構造を持つロボットを用いた人間による直接教示とスキル抽出

4.2.1 マクロ・マイクロロボットの構築

まず図 4 に示すような 2 次元平面内で動作する簡易的なマクロ・マイクロロボットを構成し、バグはめ作業の教示再生実験を行った．その結果、マイクロ部の動作範囲に不十分な方向があり、また操作性に異方性があり直感的な教示が難しいことが判明した．操作性に異方性があるのは、パラレル機構の手先での等価慣性に異方性があるか

¹引用文献番号は、5．主な発表論文等での掲載順とする．

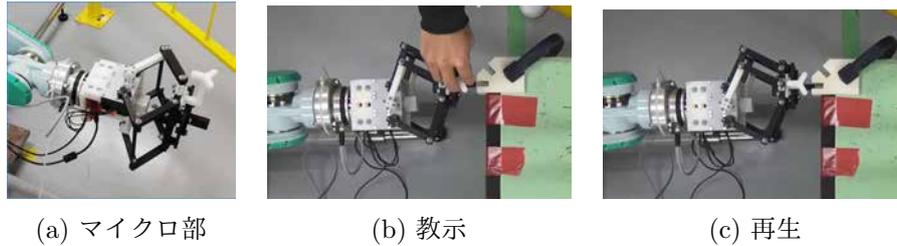


図 4: 2次元平面動作可能なマイクロ部を持つマクロ・マイクロロボットとはめ合い作業の教示再生実験

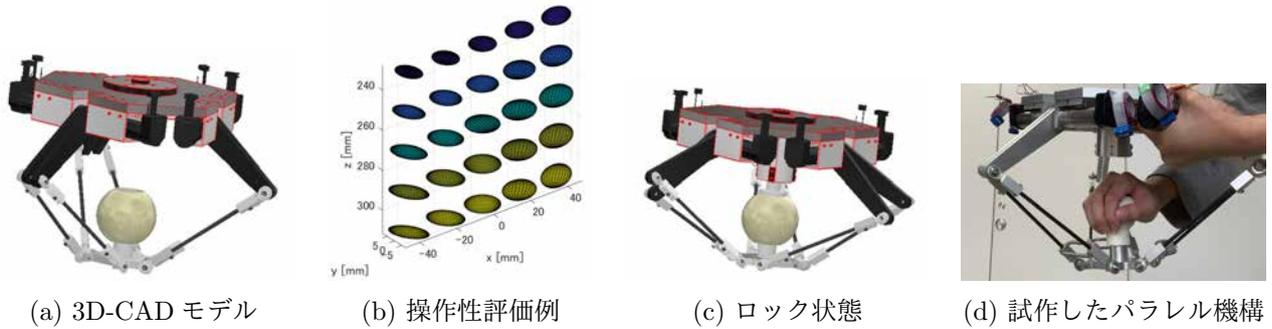


図 5: 2次元平面動作可能なマイクロ部を持つマクロ・マイクロロボットとはめ合い作業の教示再生実験

らであると考え、3次元の動作が可能な6自由度平行機構の設計を進める前に、平行機構の手先等価慣性を導出するための定式化を行った [6].

以上の準備のもと、手先の等価慣性がなるべく等方的となり、かつ必要な動作範囲が確保できるような6自由度平行機構の設計を行った。図5(a)に設計した平行機構の3次元CADを示し、図5(b)に設計した平行機構の手先の等価的な逆慣性特性を楕円体表示したものを示す。設計した平行機構は図5(c)に示すように必要に応じてマイクロ部の動きをロックすることができるようにした。図5(d)に、実際に試作したマイクロ機構を示す。マイクロロボットの製作に関する詳細は文献 [6][10] を参照されたい。

4.2.2 直接教示からのスキル抽出と再生

2次元平面内の動作に限定したマイクロ機構を用いたマクロ・マイクロロボットについては、図4に示すように、ベグはめの簡単な教示再生実験は行ったものの、6自由度平行機構の製作が遅れたため、マクロ・マイクロロボットによる3次元組立作業の代わりに、現有の折り紙ロボットを用いて直接教示からのスキル抽出と再生を行った。

対象とした作業は、図6(a)に示すような谷折り作業であり、10回の教示動作に図6(b)に示すようにRozoら²の手法を適用してばらつきのある教示軌道をモデル化し、ばらつき程度を考慮したモデルの離散軌道との重み付き誤差が最小となる連続軌道を求め、これをノミナル軌道とした。得られたノミナル軌道は、個別の教示軌道を単純に再生する場合よりも、どの折り紙に対しても統計的に優位に精度よく折り紙を折ることができ、異なる折り紙に対

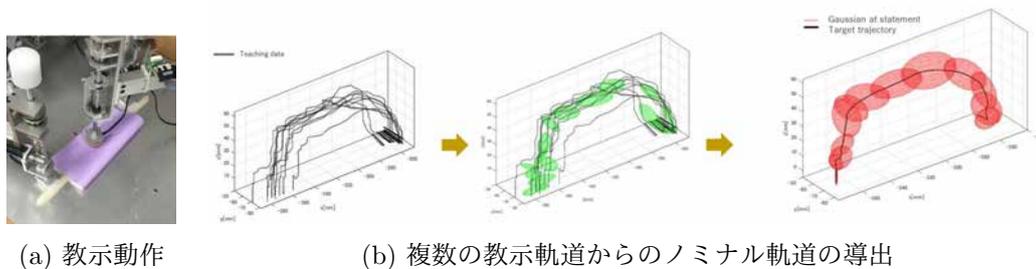


図 6: 折り紙作業における教示軌道からの作業スキルの抽出

²L. Rozo, J. Silverio, S. Calinon, and D.G. Caldwell, "Learning Controllers for Reactive and Proactive Behaviors in Human-Robot Collaboration", *Frontiers in Robotics and AI*, Vol.3, pp.1-11, 2016.

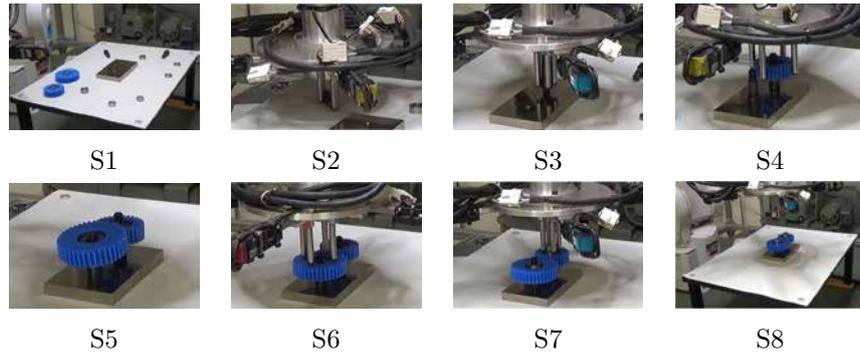
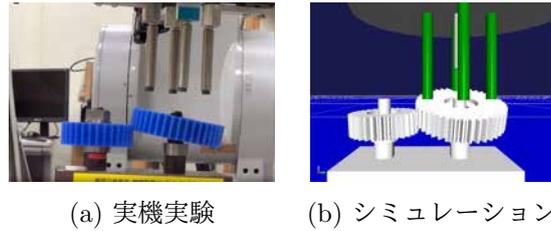


図 7: ギヤユニットの治具レス組立



(a) 実機実験 (b) シミュレーション

図 8: ギヤのはめ合いのシミュレーション

しても無理のないノミナル軌道が得られたことになり、この手法は、組立作業においても適用可能であると考えられる。詳しくは文献 [8] を参照されたい。

4.3 マクロ・マイクロ構造を持つロボットによる、治具レスはめ合い作業の実現

6 自由度平行機構のマイクロロボット及びその先に取り付ける回転式チャック型平行スティック三指ハンドの製作が当初予定より遅れたため、現有の 4 指平行スティックハンドと 6 軸垂直多関節型産業用ロボットを組み合わせ、WRS の製品組立チャレンジ・トライアル競技で使用したギヤユニットの治具レス組立を試みた。この際、治具レスで作業スペースに置かれた部品には、初期位置誤差が存在するため、4 指平行スティックハンドを適切に閉じてこの初期位置誤差を吸収するセルフアライメントを行った [4][7]。実験システムにはビジョンセンサを導入し、作業エリア内であればどの位置と向きに部品を置いてもしっかり部品を把持することができるようになっているが、ビジョンセンサには数ミリメートルの計測誤差があるので、4 指平行スティックハンドによるセルフアライメントが必要である。図 7 に、この手法で実際にギヤユニットを組み立てた様子を示す。

本実験からは 4 指平行スティックハンドの汎用性が確認できた上、ギヤのはめ合い作業など繰り返し精度の高いロボット独自の作業スキル (図 7 の (S4) や (S6)) が存在していることが分かったことは重要な知見であった。

4.4 組立作業の物理シミュレータの開発

実世界の現象をシミュレーションで再現する試みを最近では「デジタルツイン」と呼ばれたりもするが、精密な嵌め合いを含む組立作業の正確なシミュレーションが可能となれば、事前計画やエラーリカバリなどがシミュレーションベースで可能となる。そこで本研究では、ギヤユニットの組み立ての一連の作業の中から、精密な嵌め合い作業となるギヤのシャフトへの挿入作業に注目し、シミュレーションで実機実験と同じような挙動を再現できるかを検証した。

まず産総研が開発した動力学シミュレータである AIST Simulator (Choreonoid に標準付属) では部品同士の食い込みが大きく実機での挙動の再現性は低かったため、Algorix Simulation AB 社 (スウェーデン) で開発された AGX Dynamics を使用することにした。またシミュレーションで用いる部品のモデルは、stl ではシミュレーションの挙動が不安定になる現象が発生したため、obj 形式に変更したところ解決した。stl 形式では頂点データの丸め誤差が影響したものと思われる。最後に AGX Dynamics と obj 形式との組み合わせでシミュレーションを行った際に実機実験と同じ結果となる条件を検討し、必要最低限の解像度の設定を見出した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tetsuyou Watanabe, Kimitoshi Yamazaki, and Yasuyoshi Yokokohji	4. 巻 31
2. 論文標題 Survey of Robotic Manipulation Studies Intending Practical Applications in Real Environments -- Object Recognition, Soft Robot Hand, Challenge Program and Benchmarking-	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1114/1132
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1080/01691864.2017.1365010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 横小路 泰義, 横井 一仁	4. 巻 56
2. 論文標題 World Robot Summit 製品組立チャレンジ	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 798/804
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.11499/sicejl.56.798	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 福西 聖也, 土橋 宏規, 横小路 泰義
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福田 崇人, 土橋 宏規, 横小路 泰義
2. 発表標題 平行スティック四指汎用ハンドを搭載した単一アームによるギヤユニットの治具レス組立
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroki Dobashi, Masaya Fukunishi, and Yasuyoshi Yokokohji
2. 発表標題 Geometrical Solution of Finger Arrangement Problem Onto Target Part Toward Design of Chuck-Type Hand with Three Parallel Stick Fingers
3. 学会等名 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋本 佳典, 永野 光, 田崎 勇一, 横小路 泰義
2. 発表標題 組立作業の直接教示と再生に適したマクロ・マイクロ型ロボットの機構設計
3. 学会等名 第20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
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田 崇人, 土橋 宏規, 田崎 勇一, 永野 光, 横小路 泰義
2. 発表標題 ビジョンセンサを併用した平行スティック四指汎用ハンドによるギヤユニットの治具レス組立
3. 学会等名 第20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
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 倉光 祐之介, 永野 光, 田崎 勇一, 横小路 泰義
2. 発表標題 直接教示動作の統計的性質に基づいたロボットへの柔軟物体操作スキルの移植
3. 学会等名 第20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
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Dobashi, Masaya Fukunishi, Masaya Minani, and Yasuyoshi Yokokohji
2. 発表標題 Minimization of Actuator's Driving Force of Chuck-type Hand with Three Parallel Stick Fingers through Grasp Optimization
3. 学会等名 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 橋本 佳典, 永野 光, 田崎 勇一, 横小路 泰義
2. 発表標題 組立作業の直接教示と再生に適したマクロ・マイクロ型ロボット用パラレル機構の設計
3. 学会等名 第64回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI ' 20)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田崎 勇一 (Tazaki Yuichi) (10547433)	神戸大学・工学研究科・准教授 (14501)	
研究分担者	土橋 宏規 (Dobashi Hiroki) (50634490)	和歌山大学・システム工学部・講師 (14701)	