

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23300078

研究課題名(和文)対象物の柔軟性を考慮した組立作業計画

研究課題名(英文)Assembly Planning of Objects with Elasticity

研究代表者

原田 研介 (Harada, Kensuke)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・研究グループ長

研究者番号：50294533

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、セル生産をロボット化する場合に問題となる、部品の柔軟性を考慮した組立作業の問題を扱う。ロボットアームによりプラスチックの部品同士を嵌め合せる場合、片方の部品には柔軟性を有する爪(スナップジョイント)が取り付けられている場合があり、嵌め合せるためには、この爪を撓ませる必要がある。本研究では、爪を有する部品の嵌め合わせの問題に対して、物理シミュレータを構築し、組み立てシミュレーションに基づいて接触状態遷移グラフを構築する。また、組み立てのアクション系列を導出し、力制御の切り換えに基づく組み立て制御を実現する。また、組み立て状態の推定やエラー状態の推定を行う。

研究成果の概要(英文)：In this research, we consider the assembly problem of parts with elasticity. When a robot manipulator assemble two plastic parts, the snap joints are usually equipped with one of the parts. To assemble such parts, we have to consider the elastic deformation of the snap joints. For this assembly problem, we propose a method to construct the contact state transition graph based on the physical simulation of assembly. We also define the action states of assembly and propose a assembly controller realized by switching multiple force controllers. We furthermore propose a method for identifying the assembly state based on the force sensor information.

研究分野：ロボット工学

キーワード：産業用ロボット 組立作業 力制御

## 1. 研究開始当初の背景

多品種少量生産に対応した生産形態としてセル生産が注目されている。セル生産を用いると、製品毎に独立にラインを用意する必要がなく、多くの種類の製品をラインのレイアウトを変更することなしに生産することが可能である。その反面、セル生産は多くの種類の対象物を取り扱うため、ロボット化が困難な生産形態でもある。本研究においては、セル生産において人が行っている作業をロボットで代替する上で直面する問題を解決し、セル生産の自動化を目指す。

ここで、

## 2. 研究の目的

本研究では、セル生産をロボット化する場合に問題となる作業の一つである、対象物の柔軟性を考慮した組立作業の作業計画、動作計画、ならびに動作制御について研究開発を行う。例えば、ロボットアームによりプラスチックのケースを嵌め合わせる例を想定する。この時、片方のケースには柔軟性を有する爪が取り付けられている場合が多く、ケースを嵌め合わせるためには、この爪を撓ませる必要がある。また、爪の形状により、このケースは一旦組み付けると容易には取り外しが出来ないようにになっている。

ここで、爪の柔軟性を考慮しないと、ケースを嵌め合わせる動作計画は解を持たないため、ケースの嵌め合せの動作を計画するためには、爪の撓みを考慮することが必要である。また、実際に組立作業を実行する際にも、この爪の撓みを考慮する必要がある。

当該申請者は従来から組立作業計画の問題に重点的に取り組んできた。しかしながら、従来の組立作業の動作計画や動作制御問題において、このような柔軟性は十分に考慮されてこなかった。一方、柔軟物体のマニピュレーションに関する研究が行われているが、実際の組立作業に適用する研究はまだ少ないのが現状である。

## 3. 研究の方法

ロボットの組み立て作業用の物理シミュレータを OpenHRP を用いて構築し、このシミュレータより接触・変形を含む物体の挙動を取得する。このシミュレーションに基づいて、接触状態遷移グラフを構築する。

次に、爪(スナップジョイント)を有するプラスチック部品の嵌め合い問題に対して動作系列を導出し、この動作系列から、各区間に対応してロボットの手先に取り付けた力センサを利用し、組み立て作業中における力情報の解析を行うと同時に、力制御則を導出する。また、この力制御則を切り替えながらロボットによって組み立て作業を行う。有効性をシミュレーションで確認すると同時

に、実際のロボットを用いた実験を行う。



図1 スナップジョイントを有する部品の例

## 4. 研究成果

### (1) 複雑な形状の部品に対する接触状態遷移グラフ

複雑な形状を有する部品に対する組み立て作業を実現するために、接触状態遷移グラフを構成するための手法について述べる。曲面を有し、かつ細かい段差を有するような複雑な形状の部品に対して接触状態遷移グラフを構築するためには、部品の表面を領域に分割する必要性が生じる。そのために、本研究では部品のポリゴンモデルをクラスタリングする。ここで、複雑な形状を有する部品の組み立て作業においては、接触状態遷移グラフのノード数が増加することが想定される。そのために、本研究では予め組み立てが成功する物理シミュレーションを OpenHRP 上で手作業で作っておき、更に、その軌道を少し修正することで様々な状況に対応したシミュレーションを作る。そして、これらのシミュレーション結果を統合することで、接触状態遷移グラフを作成した。

提案する手法の有効性を確認するため、数値例による検証を行った。組み立てる部品として、カメラの筐体のモデルを用いた。この VRML モデルをクラスタリングした。次に、組立シミュレーションの結果より接触点の時系列を求め、これらが属するクラスタの情報により接触状態遷移グラフを描いた。これにより、接触状態の遷移を表現することが可能になった。

### (2) 力制御の切り換えに基づく部品組み立ての実現

本研究では、Cantilever 型のスナップジョイントを有するパーツの嵌め合いの問題を扱う。この問題に対して、Control Basis Approach と呼ばれる手法に基づいて力制御を切り替えることでスナップジョイントを

有するパーツの嵌め合いを行う。

この嵌め合いを実現する動作をピボットアプローチと呼ぶ。この手法では、まずパーツの片側が当たると、片側が当たった状態を維持しながらパーツを回転させる。さらに、パーツ同士を押し込むことで、最終的にスナップジョイントを有するパーツの嵌め合いを実現する。ここで、スナップジョイントが female part の嵌め合い面の両側に着いている場合を考え、具体的に以下のフェーズを仮定する。

Approach : female part に含まれるスナップジョイントの一つが male part に接触するまで female part を male part に近づける。

Rotation : female part に含まれるスナップジョイントの全てが male part と接触するまで female part を回転させる。同時に、先に接触した female part のスナップジョイントが male part と接触を維持するように、力制御を行う。

Alignment : female part の嵌め合い面が male part の嵌め合い面と平行になるまで、female part を更に回転させる。

Snap Insertion : female part の動きが無くなるまで、female part を力制御により male part に押し込む。

Mating : 嵌め合いの終了状態である。

提案する制御則の有効性を実験により示した。実験には双腕ロボット Hiro の先端に専用のグリッパを搭載したものをを用いた。実験に用いたスナップジョイントを有するパーツでは、female part の嵌め合い面の両側にスナップジョイントが取り付けられている。実験において、ロボットは female part を取り、male part に組み付ける。

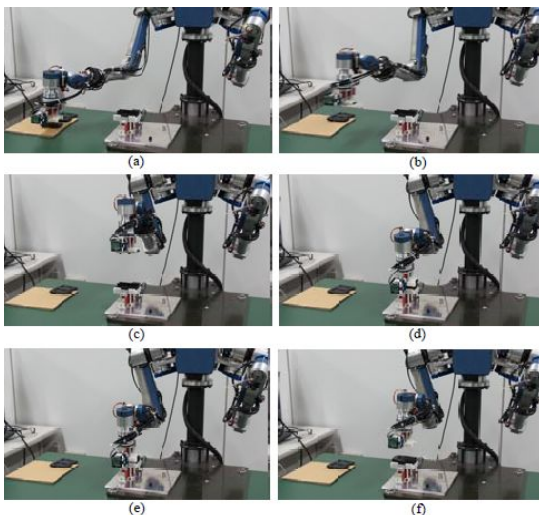


図2 力制御の切り替えによる嵌め合い作業

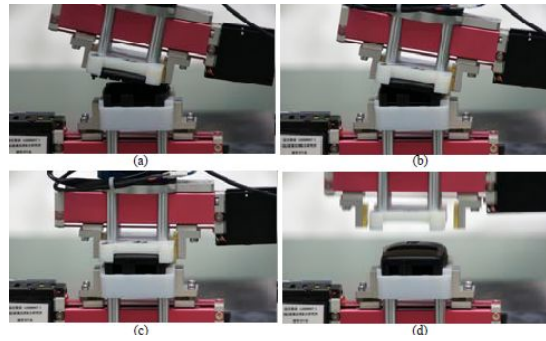


図3 嵌め合いの様子の拡大図

### (3) スナップジョイントを有する部品の組み付け時における、確率的状態推定

本研究においては、スナップジョイントを有するプラスチック部品の嵌め合いを力制御則を切り替えながら行う場合に、手首に取り付けられた6軸の力・モーメントセンサの情報から力制御のどの状態かを推定する確率的な手法を提案する。提案する手法 ( Relative-Change-Based Hierarchical Taxonomy (RCBHT) ) は、以下の五つのレイヤーから構成されている。

Primitives: 力センサの各軸の信号を直線近似可能な領域に区分し、その隣り合う領域毎に力信号の変化にラベリングする。

Motion Composite: Primitive Layer で付けられたラベルに対して、隣接する区間におけるラベルを比較する。

Low Level (LL) Behaviors: Motion Composites Layer の情報を基に、以下の五つの状態に分類する: Push, Pull, Contact, Align, Shift, Noise.

High Level (HL) Behaviors: LL behavior の分類結果を基に、組立作業の以下のどのフェーズにあるかを判定する: Approach, Rotation, Alignment, Snap Insertion, Mating.

Verification Layer: HL Behaviors Layer の結果を基に、組立が成功したか失敗したかの情報を出力する。

ここで、LL Behavior と HL Behavior の出力にはベイズフィルタを用いた。

本手法をスナップジョイントを有するプラスチック部品の嵌め合い問題に適用した。双腕ロボット Hiro の先端にグリッパを取り付けたモデルをシミュレーションソフトウェア OpenHRP 上で構築し、このグリッパに雄部品を固定した。そして、これを雌部品に嵌めるシミュレーションを行った。嵌めた際部品の位置にオフセットを加えながら繰り返しシミュレーションを行い、その都度力センサの信号を記録した。この信号を用いて提案する手法を学習した。その結果を新たなシミュレーションに適用し、組立の状態推定を行った。その結果、本手法が有効にはたらくことを確認した。

#### (4) スナップジョイントを有する部品の組み付けにおける、エラー状態の判定

本研究では、スナップジョイントを有する部品の嵌め合いの問題に対して、エラー状態からのリカバリを行うための第一ステップとしてエラー状態の推定を行う。本研究では力センサの信号の“文脈”を解析することで、エラー状態を推定する。ここで、本手法ではエラーが起こるか起こらないかを推定するだけではなく、どのような状態でエラーが起こっているかも同時に推定する。まず、予め通常の嵌め合いが成功する動作軌道から初期位置がずれた状態から動作をスタートさせることで、エラー状態を起こし、エラー状態を学習する。ここで、学習は接触空間において接触状態のマップを構築することで行われる。また、文脈化された確率的指標を用いて学習データのクラス分けを行う。提案する方法では、トータル 88%の確度でエラー状態の推定が行われる。ここで、初期姿勢が1方向のみにずれている場合と2方向同時にずれている場合に対して解析を行った結果、1方向のみにずれている場合は 75%-92%の確度でエラー状態が推定され、2方向同時にずれている場合には 61%-94%の確度でエラー状態が推定された。

#### 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)

(1) Juan Rojas, Kensuke Harada, Hiromu Onda, Natsuki Yamanobe, Eiichi Yoshida, Kazuyuki Nagata, and Yoshihiro Kawai, "Towards Snap Sensing," International Journal of Mechatronics and Automation, vol. 3, no. 2, pp. 69-93, 2013.

[学会発表](計12件)

(1) ラミレス・イクシエル, 原田研介, 吉田英二, "柔軟性を有するリング状部品の組み立て動作計画," 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門講演会, 2014.

(2) Juan Rojas, Kensuke Harada, Hiromu Onda, Natsuki Yamanobe, Eiichi Yoshida, and Kazuyuki Nagata, "Early Failure Characterization of Cantilever Snap Assemblies using the PA-RCBHT," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3370-3377, 2014.

(3) Weiqiang Luo, Juan Rojas, TianQiang Guan, and Kensuke Harada, and Kazuyuki Nagata, "Cantilever Snap Assembly Failure Detection using SVMs and the RCBHT,"

Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 384-389, 2014.

(4) Ixchel G. Ramirez-Aplizar, Kensuke Harada, and Eiichi Yoshida, "Motion Planning for Dual-arm Assembly of Ring-shaped Elastic Objects," Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 594-600, 2014.

(5) Juan Rojas, Kensuke Harada, Hiromu Onda, Natsuki Yamanobe, Eiichi Yoshida, and Kazuyuki Nagata, "Contextualized Early Failure Characterization of Cantilever Snap Assemblies," Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 380-387, 2014.

(6) Juan Rojas, TianQiang Guan, Weiqiang Luo, and Kensuke Harada, "Strategies, Controllers, and Coordination: Bi-Manual Snap Assembly Automation," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp.1266-1271, 2014.

(7) 原田研介, Juan Rojas, 音田弘, 山野辺夏樹, 吉田英一, 永田和之, 河井良浩二, "スナップジョイントを有するパーツの力制御の切り換えに基づく組み立て," 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, 2013.

(8) Juan Rojas, Kensuke Harada, Hiromu Onda, Natsuki Yamanobe, Eiichi Yoshida, Kazuyuki Nagata, and Yoshihiro Kawai, "A Relative-Change-Based Hierarchical Taxonomy for Cantilever-Snap Assembly Verification," Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Applications, 2012.

(9) Juan Rojas, Kensuke Harada, Hiromu Onda, Natsuki Yamanobe, Eiichi Yoshida, Kazuyuki Nagata, and Yoshihiro Kawai, "A Relative-Change-Based Hierarchical Taxonomy for Cantilever-Snap Assembly Verification," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 356-363, 2012.

(10) Juan Rojas, Kensuke Harada, Hiromu Onda, Natsuki Yamanobe, Eiichi Yoshida, Kazuyuki Nagata, and Yoshihiro Kawai, "Probabilistic State Verification for Snap Assemblies using the Relative-Change-Based Hierarchical Taxonomy," Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 96-103, 2012.

(11) Juan Rojas, Kensuke Harada, Hiromu Onda, Natsuki Yamanobe, Eiichi Yoshida, Kazuyuki Nagata, and Yoshihiro Kawai, "Gradient Calibration for the RCBHT Cantilever Snap Verification System," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp.

984-990, 2012.

(12) 原田研介, 音田弘, 山野辺夏樹, 吉田英一, 辻徳生, 永田和之, 河井良浩, ”複雑な形状の部品に対する接触状態遷移グラフ,” 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門講演会, 2011.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

原田 研介 (Kensuke Harada)  
産業技術総合研究所 研究グループ長  
研究者番号: 50294533

### (2) 研究分担者

音田 弘 (Hiromu Onda)  
産業技術総合研究所 主任研究員  
研究者番号: 40356746

### (3) 研究分担者

永田 和之 (Kazuyuki Nagata)  
産業技術総合研究所 主任研究員  
研究者番号: 10357634

### (4) 研究分担者

山野辺 夏樹 (Natsuki Yamanobe)  
産業技術総合研究所 主任研究員  
研究者番号: 90455436

### (5) 研究分担者

吉田 英一 (Eiichi Yoshida)  
産業技術総合研究所 副部門長  
研究者番号: 30358329

### (6) 連携研究者

( )

研究者番号: