解説

柔軟物も取り扱える生産用ロボットシステムの開発

Development of Production Robot Systems that can Handle Flexible Goods

鷲見 和彦* *三菱電機株式会社 先端技術総合研究所

Kazuhiko Sumi* *Advanced Technology Research and Development Center, Mitsubishi Electric Corp.

1. はじめに

近年、生産分野においては変種変量生産に対応するため、国内生産回帰とともにセル生産方式の導入が進められてきたが、国内における少子高齢化に伴う労働力の減少、近隣アジア諸国の人的資源を背景とした国際競争に打ち勝っていくためには自動化を進めていく必要がある[1]。1980年代以降、生産現場への産業用ロボットの本格的な導入が図られてきており、例えば組み立て分野においては従来の自動化ラインにおける機構・手法をロボットに移植する形で自動化が進められてきた[2]。しかし、コネクタ付ケーブルのような柔軟物は、その位置姿勢の不定性のために自動化が困難な対象であり、組立工程全般の自動化を進める上で大きな障害となってきた。このような背景の下、2006年度より開始された「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト」(I. 次世代産業用ロボット分野①柔軟物も取扱える生産用ロボットシステム)において、我々は柔軟物ハンドリングを実現するための要素技術開発と実証システム開発を実施してきた。以下、2章で技術的アプローチについて述べたあと、3章において各要素技術を紹介する。4章では、開発技術を適用した実証システムとその検証結果について紹介し、5章で今後の展望について述べる。

2. 技術課題アプローチとシステムコンセプト

2.1 電子機器組立分野における技術課題とアプローチ

電子機器組み立て分野はセル生産が用いられる代表的なものであり、サーボンプ、カーナビゲーションのような対象製品では、柔軟物であるコネクタ付ケーブルが多用されている。柔軟物の扱いが困難であることはすでに述べたが、同時に実行されることの多いコネクタ組み付け作業も、位置ずれの補正方法や挿入作業の成否の確認手法が確立されていないため、自動化が困難な対象である。また、ロボットによる自動化推進を妨げる要因として、プログラミング

が煩雑なために、簡単かつ短時間でロボットシステムを立ち上げることが容易ではないことや、コネクタ挿入ミスなどの作業エラーにより作業が停止した場合、生産性が落ちるという問題点も存在する。こうした議論を踏まえて設定された三つの課題に対し、本開発において我々が検討した技術的アプローチを以下に示す。これらの要素技術の詳細については3章において述べる。

- (1) 柔軟物を迅速かつ高精度・高信頼度でハンドリングできるマニピュレーション技術：作業エラーからの自動復旧技術，動作最適化技術
- (2) 柔軟物を知的にハンドリングするためのセンサ利用技術：三次元センシングシステム，組み付け制御技術
- (3) 短時間で簡便に作業を提示できる次世代教示機能：オフラインプログラミング

なお、名古屋大学大学院工学研究科福田研究室に作業エラーからの自動復旧技術の開発について、富山県立大学工学部松野研究室には動作最適化技術および作業エラーからの自動復旧技術の開発について、北海道大学大学院情報科学研究科金子研究室には三次元センシングシステムについてご協力をいただきながら開発を進めている。

2.2 開発システムの技術コンセプト

2.1節で述べた要素技術を統合するものとして、図1に示すサーボンプを対象とし、以下の技術コンセプトに基づく実証システムを構築・技術検証を行った。

- (a) エリア分割：部品供給，治具キitting，基板への

(a) サーボンプ

(b) コネクタ付きケーブル

図1 作業対象の例

原稿受付 2009年7月2日

キーワード：Robot, FA, Assembly, Vision, Sensor, Force, Control

*〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1

*Amagasaki-shi, Hyogo

- 組み付け、掃きだしのエリア分割による作業効率化
- (b) キッティング治具:三次元センシングによるコネクタ部の治具組み付けにより、基板組み付け時の作業効率を向上
- (c) 高信頼組み付け:力覚センシングによる微小位置誤差対応のための組み付け制御、作業エラー時の自動復旧実現
- これらについての詳細は4章において述べる。

3. 要素技術の開発

本章では、2.1節で述べた(1)、(2)、(3)の三つの課題に対して行った研究開発を紹介する。

3.1 柔軟物を迅速かつ高精度・高信頼度でハンドリングできるマニピュレーション技術

3.1.1 作業エラーからの自動復旧技術

柔軟物を組み付ける作業における典型的な作業エラーとしては、コネクタ挿入作業ミスが考えられる。そこで、FA機器で使用されているコネクタを対象に、コネクタ挿入作業エラーを自動で検知し、リトライ動作を行うことにより、コネクタ挿入作業エラー発生時にも不良品を組み立てることなく作業を継続できる自動復旧機能を開発した[3][4]。まず、コネクタ挿入作業における挿入変位と挿入力関係を図2に示すような線形モデルで表現し、モデルからのずれ具合によりエラーの有無と種類を判別する挿入エラー検知方式を開発した。また、挿入エラー時の自動復旧方式も開発し、検証対象であるFA機器に含まれるコネクタを対象に実証実験を行った。自動復旧方式はコネクタレセプタのカバーの有無により、2種類開発した。コネクタレセプタにカバーがついている場合は、図3に示すように、異常検出した位置から渦巻状にロボット先端を動作させて探索す

図2 挿入変位と挿入力の線形モデル化

図3 スパイラルサーチの探索軌道

るスパイラルサーチアルゴリズムを適用した。コネクタレセプタにカバーがなくピンがむき出しの場合にスパイラルサーチを適用するとピンを損傷する可能性もあるため、接触探索アルゴリズムを適用した。接触探索アルゴリズムは、コネクタの側面をピンの側面に軽く接触させてピンの位置を再計算するアルゴリズムとなっている。これらの開発により、高い確率でコネクタ挿入時のエラーの検知および作業の復旧が可能となった。

3.1.2 柔軟物体操作におけるマニピュレータ作業動作の最適化

柔軟物であるケーブルを高速で搬送する際にはケーブルが振動し、経路途中の周辺物に接触したり、停止時の振動が収まるのを待つために作業時間が長くなる等の問題がある。そこで、ケーブルの特性を考慮して振動抑制を行う軌道生成方式を開発した[5]。アルゴリズムは、移動終点付近で滑らかでケーブルの重心の移動量を抑制するような軌道を生成することを目的とし、関節空間におけるマニピュレータの1, 2, 3軸の経由点を操作量として、降下法を用いて最適なマニピュレータの軌道を生成した(図4)。最適化前と最適化後のケーブル先端の振動を比較すると、シミュレーションにおいて70%の減少効果があり(図5)、検証システムにおける実機実験において50%の減少効果があることが確認できた。

3.2 柔軟物を知的にハンドリングするためのセンサ利用技術

3.2.1 三次元センシングシステム

提案する計測システムでは、二つの計測技術を用いて、整理治具(キッティング治具)にケーブル付コネクタを組み付ける作業を対象としている(図6)。

[技術a] アクティブブレンジファインダ型三次元センシングロボット手先に取り付け可能な小型三次元センサ[6]を用い

図4 ケーブル重心の変化を抑制する軌道生成方法

図5 ケーブル先端の移動量

図6 3Dセンシングシステム

図7 ケーブル計測結果の例

て、コネクタが存在する狭視野範囲を高精度に計測。

[技術b] モーションステレオ型三次元センシング

ロボット手先の単眼カメラを用いたモーションステレオ [7] [8] により、ケーブル上の特徴点について広視野範囲で計測し、技術aの計測視点決定に利用。

前者の技術では、三次元距離情報と二次元の濃淡画像情報を同時取得可能であるというセンサの特長を用いて、二次元輪郭から初期候補を検出したあと、三次元情報への平面当てはめによる位置姿勢推定手法を開発した [9]。さらに、本プロジェクトにおいてはアクティブレンジファインダ自体についても小型化、計測レンジの拡大といった高性能化開発も行っているが、誌面の都合により詳細は割愛する。後者のモーションステレオ技術では、ケーブル上の印字部分などの既存特徴点に加え、レーザスリット光を用いて人工的な特徴点を付加した手法を開発した [7] [8]。ここで、単眼カメラを利用したモーションステレオのメリットとしては、ロボット移動中の画像間で特徴点を連続的に追跡しながらエラー排除基準に基づいて誤対応点を除去していくため、通常のステレオカメラでは得られない高い計測信頼性を実現できることに加え、単眼カメラであることにより、ロボット作業時における周囲構造物との干渉を避けやすいということが挙げられる。図7にケーブル計測結果とその結果を用いて推定されたコネクタ位置を示す。

3.2.2 組み付け制御技術

ケーブルなどの柔軟物の組み付けを行うには、ケーブル端部に取り付けられているコネクタを安定かつ、高速に組み付ける必要がある。また、FA 機器などの製品において

図8 作業レベルプログラミング画面

は同一の製品においても複数種類のコネクタが存在するなど多品種に対応することも求められる。そこで本開発では、コネクタ挿入作業を対象に、品種が変わった場合の立ち上げ時間短縮、ロボット動作時間短縮と位置ずれ時のコネクタなどの対象物保護に必要となる要素技術の開発を行った。具体的には、品種が変わった場合の動作パラメータ決定を容易にするための方式を開発し、実機で有効に作用することを確認した。また、力およびモーメントに基づいて位置ずれ時のコネクタ保護を実現する機能を開発するとともに、リアルタイムでパラメータを変更することで、ほぼ人と同等の時間でコネクタ挿入作業を実施できることを確認した。

3.3 短時間で簡便に作業を提示できる次世代教示機能

3.3.1 柔軟物組み付け作業レベルプログラム生成システムの開発

従来のオンライン教示方式では複雑な作業や複数のロボットシステム場合、教示位置が膨大となったり、ロボットの同期や干渉に注意を払う必要があり、大変な労力と時間を要する。本研究開発では、短時間で容易に2台のロボットによる組み立てシステムの構築が可能となる作業レベルプログラム生成システムを開発した。システムは、ワーク等の組み立て対象の三次元データ、属性から構成される部品データベース、それらを組み付ける作業動作のプログラムが蓄積された作業記述データベース、ユーザがシステムの作業の記述とプログラム生成やシミュレーションによる動作確認を行うプログラミング GUI から構成される。プログラムの作成は、コネクタ把持や挿入など、作業単位のプロックをフローチャートの様に並べることによって行う。本システム上で教示を行ったり、データベースの作業を利用することで教示の回数を削減することができる。また、シミュレーションによって動作の確認を行うことができるため、調整時間の大幅な短縮に役立つ。図8にプログラム作成および位置教示を行う作業レベルプログラミング画面を示す。

本システムを用いて、実証システムの一部工程のプログラムを作成し、その作成時間を評価した。本システムを用いて生成した場合は1日で作成、シミュレーションでの動作確認ができた。一方、本システムを使わずに基本検討、設計、プログラム作成した場合、約3日を要した。以上の結果から、本システムを用いることでプログラム作成時間を短縮できることを確認した。

図9 検証用システムの構成

4. 実証システムの開発

4.1 構成と動作の流れ

提案した柔軟物ハンドリングの要素技術をサーボアンプ組立に適用する検証用システムを構築し各要素技術検証を行った。検証用システムは、図9に示すように2台のロボットから構成され、1台はサーボアンプに組み付けるケーブルのキッティング作業を主として行い（キッティング側ロボット）、もう1台はサーボアンプへの部品組み付け作業を行う（組み付け側ロボット）。ロボットが行う作業工程はバラ置きされたケーブルの取り出しとキッティング治具へのセット、ケーブル組み付け、基板組み付け、カバー組み付けである。検証用システムにおける各ロボットの動作の流れとしては、まずキッティング側ロボットがバラ置きされたケーブルをセンサ認識して把持し、把持状態に応じて位置姿勢を計算してキッティング作業を行う。また、基板やカバーの組み付け時にはキッティング側ロボットが組み付け側ロボットと協調した組み付け動作を行い、組み付け作業を確実かつ効率的に進める。一方で、組み付け側ロボットは前記作業と同時並行してキッティングされたケーブルのコネクタ部分の高速組み付け作業およびネジ締め作業を行う。なお、コネクタ組み付け時には力覚センサを用いて挿入エラーを検知し自動的にエラーリカバリー動作を行える構成となっている。

4.2 検証結果

開発した柔軟物ハンドリング技術を適用した検証用システムを用いて、以下のような検証結果を得た。まず三次元センシングシステムについては、ケーブルおよびその両端のコネクタを三次元認識・把持することにより、平面上にバラ置きされた両端コネクタ付ケーブルをキッティング治具に自動で取り付けることができることを確認した。組み付け制御技術については、リアルタイムでパラメータを変更することにより、人と同等時間でのコネクタの高速組み

付けと位置ずれ時の安全な停止の両立できることを確認した。作業エラーからの自動復旧技術については、意図的にコネクタ挿入位置をずらした場合でも自動的にエラーを認識し、リトライ動作によりコネクタ挿入作業を実現し、作業を継続できることを確認した。検証システム全体評価については、一連の組み立て作業を行った結果、人間の作業時間のおよそ1.5倍程度であり、目標である人間と同等レベルに着実に近づいている。

5. おわりに

ケーブルなどの柔軟物ハンドリングを実現するために実施している要素技術と実証システムの開発について紹介した。現在は実証システムの作業時間の短縮や、作業安定性の向上などに取り組んでいる。また、現在組立対象としている製品だけでなく他の対象へも開発技術を容易に適用する事を可能にするために、技術の汎用化を念頭において開発を進めている。なお、本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術開発機構の「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト」からの委託を受けて実施しているものである。

参考文献

- [1] 日経ものづくり 2008年5月号, pp.54-59, 日経BP社, 2008.
- [2] IEレビュー 242号, vol.46, no.4, pp.6-12, 日本IE協会, 2005.
- [3] J. Huang, T. Fukuda and T. Matsuno: "Model-based Intelligent Fault Detection and Diagnosis for Mating Electric Connectors in Robotic Wiring Harness Assembly Systems," IEEE Trans on Mechatronics, vol.13, no.1, 2008.
- [4] J. Huang, P. Di, T. Fukuda and T. Matsuno: "Fault-tolerant Mating Process of Electric Connectors in Robotic Wiring Harness Assembly Systems," the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008.
- [5] J. Huang, P. Di, T. Fukuda and T. Matsuno: "Dynamic Modeling and Simulation of Manipulating Deformable Linear Objects," 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2008.
- [6] 川戸, 奥田, 北明: "直方体ブロックを用いたレンジファインダのワンショットキャリブレーション", 画像認識理解シンポジウム (MIRU2007), pp.666-671, 2007.
- [7] 堂前, 奥田, 高氏, 金子, 田中, 橋本: "方向符号テキスト解析を利用したひも状柔軟物の特徴追跡と構造復元", SSII2007, IN1-05, 2007.
- [8] 堂前, 奥田, 高氏, 木村, 金子, 田中: "細線形状を持つケーブルに対するロバストモーションステレオ", ビジョン技術の実利用ワークショップ, 2007.
- [9] 奥田, 堂前, 北明, 木村, 高氏, 鷺見, 金子: "産業用ロボットによる柔軟物ハンドリングのための3次元センシングシステム", SSII2009, IS1-20, 2009.

鷺見和彦 (Kazuhiko Sumi)

1984年京都大学大学院修士修了（電気電子工学専攻）、同年三菱電機株式会社生産技術研究所、現在先端技術総合研究所センサ情報システム技術部部長。その間1989～90年メリーランド大学客員研究員、2003～06年京都大学大学院情報学研究科研究員（COE）客員教授、電子情報通信学会・情報処理学会会員、工学博士。