

学位論文題名

次世代ロボットセル生産のための3次元センシングに関する研究 (Study on 3-D Sensing for Next Generation Robotic Cell Production Systems)

学位論文内容の要旨

近年のものづくりは多品種大量生産から変種変量生産へ移行しており生産現場では変種変量に適したセル生産方式が台頭し始めている。セル生産は狭いスペース（セル）の中で一つの製品を一人の人間が組み立て完遂する方式である。製品の生産量や切り替えタイミングが一定でなくても、一つ一つのセルの作業を適宜調整することで柔軟に変動に対応できる。課題は自動化である。一人一人の作業が複雑で多岐に渡るため、作業者の熟練度に応じて品質のムラが大きくなりやすい。一方で変動に対応するためには未熟な短期作業者を多く雇う必要がある。近年の日本の少子化問題も絡み、生産現場ではセル生産方式の自動化が必須の様相を呈している。セル生産方式の自動化を阻害する要因は、多品種のバラ積み供給部品の整列や、配線作業など、従来自動機の範疇で扱われなかった複雑な作業が混在していることにある。また機種切り替えに迅速に対応するためにはシステムの立ち上げ作業は簡単にできなくてはならない。さらに作業は狭いセル環境スペース内で実現しなくてはならない。したがって高難度作業（多品種ばら積み部品の整列、配線）を狭いスペースで容易な立ち上げで自動化することが目標となる。高難度作業における物体は状態が未知である。これを操作するためには3次元センサによる奥行きを含む3次元情報から物体の位置姿勢を認識することが有効である。セル生産ロボット向けの3次元センシングシステムの構築を目指す。このシステムの機能を計測（3次元データの取得）、認識（取得データから位置姿勢の計算）、動作（計算結果をロボットの動きに変換）の3つに分類しそれぞれの技術課題を検討する。

第2章では計測における問題と解決策を扱う。生産現場向けの計測では精度が重視される。さらに多品種に対応するために部品性状によらず安定した計測方式が望まれる。空間コード化法は数mmサイズの部品を操作するのに一般的に使われる方法である。視野が狭いという課題がある。そこでロボットの動きを使った計測方法において安定して精度が出やすいモーションステレオを、空間コード化法に使うカメラをロボットに搭載することで実現する。このときロボットの非同期な運動の中で安定して高精度な距離復元ができなくてはならない。この計測における問題の解決策として、同期取得した2枚の撮影の間を移動する際に得られる多数の非同期連続画像よりモーションステレオの計測性能を改善する方法を提案する。

第3章では認識における問題と解決策を扱う。物体の位置姿勢を認識する技術はコンピュータビジョンにおいて長年研究開発が進められてきた。精度が必要な生産現場では物体のモデルをセンサデータにマッチングするモデルベースの物体認識が発展した。処理を高精度・高速に実現するため物体のモデルをどのように持つか（例えば3次元CADモデル、アピアランス、単一か複数か、情報量削減のためにデータ群の基底のみを抽出して保存しておくなど）、物体のモデルとセンサデータをどのようにマッチングするか（例えばアピアランスで絞り込んで2次元画像照合を行う、点群データどうし間の誤差が最小になる位置姿

勢の最適化をおこなうなど）といった観点から研究事例が報告されている。セル生産における多品

種対応を迅速に実現するには、このモデルをいかに簡単に用意できるかが問題になる。この問題に対して物体のモデルレスで物体の把持位置を計算でき、多品種に強い高速ビンピッキング手法を提案する。またセル生産では配線自動化のための柔軟物の位置姿勢認識も重要な問題である。対象が姿勢の定まりづらいケーブルなどの場合、いかにモデルをシンプルにして実時間計算できるものにするか(例えば精度を重視せず、荒いベクトルの集合体としてケーブルをモデル化する)が問題として扱われている。我々はコネクタ付ケーブルを対象とし、剛体部(コネクタ)と柔軟部(ケーブル)の認識に問題を分類した。柔軟部の粗い姿勢推定のための特徴点抽出と曲線補間によるモデル化と、剛体部が簡単で高精度な姿勢推定のための立方体組み合わせによるモデルベース姿勢推定方式を提案する。

第4章では動作における問題と解決策を扱う。認識結果を動作に変換するためには、3次元センサとロボット間(ハンドアイ)のキャリブレーションがとれていなくてはならない。これには位置関係が既知の複数特徴を持つボードを使う手法や、動きながら未知環境を計測する方法が提案されている。生産現場では用意しやすい単一マーク、すくない観測数による教示時間の削減が求められる。また多くの提案が非線形最適化問題の解決に帰着しているが局所解に陥りやすい方法、その原因が分かりにくい方法は生産現場でトラブルが発生したときに対処しづらい。そこで単一マークの複数回観測を線形問題として解ける最小の観測数で実現するハンドアイキャリブレーションの方法を提案する。

第5章では提案技術を統合する3次元センシングシステムの概要を説明する。コネクタ付ケーブルを含む製品(産業用ブレーカ)を自動組み立てするセル生産ロボットシステムを、空間コード化方式、モーションステレオ方式、高速ビンピッキング、コネクタ付ケーブル認識、ハンドアイキャリブレーションを含む3次元センシングシステムで実現した。

第6章では計測・認識・動作の各要素技術提案の基本性能を評価実験と、全体の実証システムによる製品組み立て性能評価実験をおこなった結果を示す。製品組み立て実験において、配線作業を含む製品組み立てを人と同等速度、作業成功率94.3パーセントで実現することを確認した。

第7章では各要素の基本性能評価により得られた知見から今後の研究開発に繋がる有益なものをまとめた。

第8章ではまとめと今後の課題を示す。

本論文の貢献をまとめる。1) 非同期連続画像応用手法を提案し一般的なモーションステレオの計測性能を大幅に高めた(従来手法との比較で94パーセントのノイズ除去)。2) 物体モデルレスで物体を掴む独創的な認識アルゴリズムを提案、13種類の対象物をパラメタ変更無しの平均成功率91パーセントで把持した。3) コネクタ付ケーブルの高速認識手法を提案。0.45secの認識処理時間でケーブルを把持した。4) 単一マークを5回観測すればハンドアイキャリブレーションが実現する方式を提案しハンドアイのキャリブレーションに作業者が使う時間をおよそ30パーセント短縮した。5) 要素技術を統合するセル生産ロボットシステムを構築し、配線作業を含む製品組み立てを人と同等速度、作業成功率94.3パーセントで実現した。6) 以上の要素技術と統合システムの構築により、従来人でしかなしえなかった作業を含むセル生産のロボット化を実現した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 金 子 俊 一
副 査 教 授 小野里 雅 彦
副 査 准教授 田 中 孝 之

学 位 論 文 題 名

次世代ロボットセル生産のための3次元センシングに関する研究

(Study on 3-D Sensing for Next Generation Robotic Cell Production Systems)

本論文においては、第1章の研究背景・目的に続いて、第2章では計測における問題と解決策を扱っている。ロボットの既定の動きを使った計測方法において安定して精度が出やすいモーションステレオを、空間コード化法に使うカメラをロボットに搭載することを提案した。さらに、同期取得した2枚の撮影の間を移動する際に得られる多数の非同期連続画像よりモーションステレオの計測性能を改善する方法を提案した。第3章では多品種への対応問題に対して物体のモデルなしで物体の把持位置を計算でき、多品種に強い高速ビンピッキング手法を提案している。対象が姿勢の定まりづらいケーブルなどの場合、いかにモデルをシンプルにして実時間計算できるものにするか(例えば精度を重視せず、荒いベクトルの集合体としてケーブルをモデル化する)が問題として扱われている。コネクタ付ケーブルを対象とし、剛体部(コネクタ)と柔軟部(ケーブル)の認識に問題を分類している。柔軟部の粗い姿勢推定のための特徴点抽出と曲線補間によるモデル化と、剛体部な簡単で高精度な姿勢推定のための立方体組み合わせによるモデルベース姿勢推定方式を提案した。第4章では単一マークの複数回観測を線形問題として解ける最小の観測数で実現するハンドアイキャリブレーションの方法を提案した。第5章では空間コード化方式、モーションステレオ方式、高速ビンピッキング、コネクタ付ケーブル認識、ハンドアイキャリブレーションを含む3次元センシングシステムについて述べ、第6章で実実験による検証を行っている。本論文の技術貢献をまとめると、1) 非同期連続画像応用手法を提案し一般的なモーションステレオの計測性能を大幅に高めた(従来手法との比較で94パーセントのノイズ除去)。2) 物体モデルレスで物体を掴む独創的な認識アルゴリズムを提案、13種類の対象物をパラメタ変更無しの平均成功率91パーセントで把持した。3) コネクタ付ケーブルの高速認識手法を提案。0.45secの認識処理時間でケーブルを把持した。4) 単一マークを5回観測すればハンドアイキャリブレーションが実現する方式を提案しハンドアイのキャリブレーションに作業者が使う時間をおよそ30パーセント短縮した。5) 要素技術を統合するセル生産ロボットシステムを構築し、配線作業を含む製品組み立てを人と同等速度、作業成功率94.3パーセントで実現したことが挙げられる。

以上、堂前幸康氏提出の学位論文に述べられている主要技術は、次世代ロボット生産セルを実現するための基本的要請の一つである柔軟物体を対象として、モーションステレオに基づく高精度・安定な計測手法の構築に関するものである。論文においては、十分な研究調査・考察に基づく論理的検討によって、有効性の高い手法を提案している。論文審査委員会はこの学位請求内容が技術的価値を有し学術的価値についても学位付与に十分であると判断し、同氏が博士(情報科学)の授与に値するものであることを認める。