

学 位 論 文 題 名

画像情報の効率的利用による  
高速・高精度な位置決め技術に関する研究

学位論文内容の要旨

従来、FA 分野における生産プロセスの合理化を目的として、画像認識技術を利用した自動化が進められてきた。これらの技術は検査技術と位置決め技術の2つに大別されるが、特に位置決め技術は部品の搬送、組立工程だけでなく検査工程においても共通的に使われる重要な技術である。また、FA 分野以外においても、対象物体の連続追跡、カメラのブレ補正など、位置決め技術をベースとした様々な応用が図られている。

画像を用いた位置決め技術としては、これまで主に2次元平面内の位置姿勢認識技術が広く実用化されてきている。2次元の場合、平行2自由度、回転1自由度の計3自由度の探索が基本となる。2次元画像センサは組込型装置における処理形態が多く、計算能力の低い組込用マイコンや簡素なハードウェア構成でも3自由度の探索を高速処理できる性能が必要とされる。また、同時に高精度な位置決め性能や隠蔽、汚れ、照明変化といった外乱要素に対するロバスト性能も要求されることも多い。

一方、近年では立体的な対象物体を扱う事例が増えてきている。こうした対象物体では、3次元空間内での位置姿勢認識が必要であり、平行3自由度、回転3自由度の計6自由度の探索が必要となる。この際、2次元平面内の探索に比べて探索自由度が倍増することに加え、3次元情報自体のデータ量が多いため、計算量は劇的に増加する。そのため、最新のパーソナルコンピュータを用いても実用的な処理時間を実現するのは容易でなく、高速な計算手法を実現することが非常に重要である。また、3次元においても高精度な位置決め性能が要求される場合も多い。

本論文は、このような2次元、3次元の位置姿勢認識技術において、高速・高精度・ロバスト性の各要求を高い次元で実現するための画像認識技術に関する研究成果をまとめたものである。本論文においては、高速・高精度・ロバスト性の各要求は単純なトレードオフの関係にあるのではなく、位置決めに用いる画像情報の効率的な利用により、これらの要求を同時に成立させることが可能であるとの考えが基本となっている。すなわち、従来位置決めに用いられてきた画像情報は大半が冗長なものであり、位置決めに必要な不可欠な情報を効率的に利用することにより、各要求を同時に満たすことができるであろうとの考えに基づいている。以下、本論文の構成について述べる。

第1章では、従来の画像照手法を概観するとともに関連する画像照手法について述べ、そこで問題となっている課題を示すことで、本研究の位置付けと目的を明確にする。

第2章では、物体の輪郭部分の情報のみを3値表現に圧縮することで高速演算を可能とした3値輪郭表現を用いた位置決め手法において、検査用途に適用する場合の課題について述べ、これを解決する3値・濃淡ハイブリッド照手法について提案する。この手法は

3 値輪郭テンプレートマッチングを用いた高速な位置/回転補正を行った後、濃淡正規化相関処理による検証を行う事で、検査対象画像の高速な位置/回転補正とパターン同一性判定を可能としたものであり、特性の異なる2種類の照手法を効果的に組み合わせることにより、高速性と高い信頼性を両立したものである。また、高速化を図るために検査領域の一部のみを初期位置決め用テンプレートとして自動選択する手法についても提案しており、選択結果の妥当性の評価についても考察する。最後に、高速処理と高い判定機能が求められる製本乱丁検査装置に適用した事例について述べ、提案手法の有効性を示す。

第3章では、多重解像度画像を用いた段階的サーチの各階層での計算点数を減らすことで高速化を図った階層分散テンプレートマッチングにおいて、高速性、高精度、ロバスト性の3つの指標を高次元で実現することを目的として提案するロバストテンプレートマッチング手法について述べる。この手法では、テンプレート全体領域中において、特徴部分に自動的に設定された部分テンプレート群のみの計算処理を行うことで高速処理性能を実現している。さらに、対象物体が剛体変位する場合の位置姿勢パラメータ推定問題を定式化し、各部分テンプレートの検出位置を利用して、最適な推定を行う。この際、位置誤差の大きなものをロバスト推定手法である LMedS 推定を用いて排除し、局所的な変動の影響を排除する事でパラメータ推定に矛盾なく適合する部分テンプレートの情報のみを効果的に利用している。これにより、高精度と外乱に対するロバスト性も実現している。また、提案手法をベースにした応用技術として、カメラのブレ補正を行った事例についても述べ、提案手法の有効性を示す。

第4章では、3次元データの照合に広く用いられる ICP(Iterative Closest Point) 手法のロバスト性を改善した M-ICP 手法において課題であった高速化を実現する手法について述べる。提案する HM-ICP(Hierarchical M-ICP) 手法は、M-ICP 手法をベースに多重解像度による階層化処理とデータ参照領域の選択処理を導入した高速・高精度な3次元照合処理手法である。提案手法では、多重解像度処理の初期段階である低解像度データ照合においては全データ点を用いた照合による概略位置合わせを実行する。また、終盤の処理である高解像度データ照合では、近傍領域間での照合となることを利用し、参照領域として選択された部分領域のデータのみを用い、全体の処理点数を大幅に削減している。これにより、高速化を図りながら高精度を両立している。参照領域選択処理では、物体表面の法線方向分布の解析に基づいた特徴選択アルゴリズムについて述べている。また、レーザ加工機で用いられる機械プレス部品の計測データを用いた評価を行い、提案手法の有効性を示す。

第5章は、結論として本研究において得られた成果をまとめる。

# 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 教 授 山 下 裕

副 査 教 授 北 裕 幸

## 学 位 論 文 題 名

### 画像情報の効率的利用による

### 高速・高精度な位置決め技術に関する研究

従来、FA (Factory Automation) 分野における生産プロセスの合理化を目的として、画像認識技術を利用した自動化が進められてきた。これらの画像認識技術は検査技術と位置決め技術の2つに大別されるが、特に位置決め技術は部品の搬送、組立工程だけでなく検査工程においても共通的に使われる重要な技術である。

画像を用いた位置決め技術としては、これまで主に2次元平面内の位置姿勢認識技術が広く実用化されてきており、実用的には計算能力の低い組込用マイコンや簡素なハードウェア構成を用いた処理形態が普及している。そのため、これらの処理プロセッサ構成でも並進+回転の3自由度の位置姿勢探索を高速処理できる性能が必要とされる。また、同時に高精度な位置決め性能や隠蔽、汚れ、照明変化といった外乱要素に対するロバスト性能が要求されることも多い。一方、近年では立体的な対象物体を扱う事例が増えてきており、並進3自由度、回転3自由度の計6自由度の位置姿勢探索が必要となる。このため、計算量は2次元平面内での画像処理と比較して大幅に増加するため、最新のコンピュータを用いても実用的な処理時間を実現するのは容易でなく、高速な計算手法と精度要求を両立させながら実現することが重要である。

本論文では、このような2次元、3次元の位置姿勢認識技術において、高速・高精度・ロバスト性の各要求を高い次元で実現するための画像認識技術に関する研究成果をまとめている。本論文においては、高速・高精度・ロバスト性の各要求は単純なトレードオフの関係にあるのではなく、位置決めに必要な不可欠な画像情報を効率的に利用することにより、これらの要求を同時に成立させることが可能であるとの考えに基づいている。

本論文では、まず特性の異なる2種類の照合手法を効果的に組み合わせることにより、高速性と高い信頼性を両立する手法として、3値・濃淡ハイブリッド照合手法について提案している。この手法は物体の輪郭部分の情報のみを3値表現に圧縮することで高速演算を可能とした3値輪郭テンプレートマッチング手法を用いた高速な位置/回転補正を行った後、濃淡正規化相関処理による検証を行うものである。また、本手法では、高速化を図るために検査領域の一部のみを初期位置決め用テンプレートとして自動選択する手法に

についても提案しており、選択結果の妥当性について確認している。さらに、高速処理と高い判定機能が求められる製本乱丁検査装置に適用した事例において、高い実用性能を持つことを確認している。

また、本論文では、高速処理性能に優れた手法である階層分散テンプレートマッチング手法をベースとして、高精度化、ロバスト化を図ったロバストテンプレートマッチング手法について提案している。この手法では、ソフトウェア処理のみを用いた2次元画像による位置姿勢認識技術において、高速性、高精度、ロバスト性の3つの指標を高次元で実現することを目的としている。提案手法では、テンプレート全体領域中において、特徴部分に自動的に設定された部分テンプレート群のみの計算処理を行うことで高速処理性能を実現している。さらに、対象物体が剛体変位する場合の位置姿勢パラメータ推定問題を定式化し、各部分テンプレートの検出位置を利用して、ロバスト推定手法を用いて最適な推定を行っている。実画像を用いた評価を通じて提案手法の有効性を確認するとともに、応用技術として、カメラのブレ補正を行った事例においてもその有効性を確認している。

さらに本論文にて提案している HM-ICP (Hierarchical M-ICP) 手法は、3次元データの照合手法である ICP (Iterative Closest Points) 手法をロバスト化した照合手法である M-ICP 手法をベースに、多重解像度による階層化処理とデータ参照領域の選択処理を導入した高速・高精度な3次元照合処理手法である。提案手法では、多重解像度処理の初期段階である低解像度データ照合においては全データ点を用いた照合による概略位置合わせを行い、終盤の処理である高解像度データ照合では、近傍領域間での照合となることを利用し、参照領域として選択された部分領域のデータのみを用い、全体の処理点数を大幅に削減している。これにより、高速化を図りながら高精度を両立している。また、参照領域選択処理では物体表面の法線方向分布の解析に基づいた特徴選択アルゴリズムについて提案している。さらに実計測データを用いた評価を行い、提案手法の有効性を確認している。

これを要するに、著者は、産業分野で用いられる2次元、3次元の画像計測技術分野において、新しく効果的な独自の手法を提案し、実データによりその有効性を確認したものであり、画像計測工学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(情報科学)の学位を授与される資格あるものと認める。