

画像・点群におけるロバスト回転照合に関する研究と 実産業応用

学位論文内容の要旨

画像や特徴点群などにおけるロバスト照合技術はロボットビジョンや検査技術における位置推定や角度推定など広く活用されており、現在その応用範囲は拡大している。これらの照合技術はパターン認識や画像理解などを基本とする技術であり、実際の環境における不良条件である、姿勢や照明条件の変化、遮蔽や付加ノイズなどに対するロバストな照合技術の開発が期待されている。また実産業界においては、半導体や HDD、フラッシュメモリなどの微細化・高密度化が急速に進んでおり、それを検査する外観検査装置の欠陥検出感度も高くなっている。そのため大量の欠陥を含むパターン同士の照合を行う必要があり、高速・高精度に処理するための安定で効率的な照合および解析手法の開発が求められている。

本研究では画像と点群の二つの対象における照合アルゴリズムの提案を行う。それぞれ回転角度の推定を行う事ができ、不良条件や例外値に対するロバスト性を持つ。

一つ目は、方向符号差分ヒストグラム (OCDH) に基づく回転不変画像照合法で、画素近傍の明度勾配から得られる方向符号に基づく特徴量を利用しており、ハイライトや陰影などの明度変動に対して強いロバスト性を持ち、高速に回転角度の推定を行う事ができる手法である。従来の回転画像照合法ではハフ変換やモーメントなどの特徴量が利用されているが、計算コストや照合精度などに問題点があった。これらの問題を解決する方法として方向符号に基づいた画像照合法 (OCM) が開発された。方向符号は明度の勾配方向を量子化した符号であり、照明変動に対しロバストな性質を持つ。さらに、方向符号のヒストグラムをシフト照合することにより回転角度推定が行えるが、詳細な回転角度の検出を行うためには、方向符号数を増加させなければならず、より高精度な照合を行おうとすると計算コストが増加する問題点がある。本論文で提案する OCDH は、方向符号、方向符号差分、円環、ヒストグラムの四つの要素から成り立っており、明度変動などに対してロバスト性を持つ方向符号を、回転不変性を得るために利用している点が特徴的である。OCDH による候補位置の絞り込みの後に、OCM により詳細な照合を行うことにより、高速かつロバストな回転不変照合を実現している。さらに、方向符号エントロピーにより最適な円環を選択して照合を行う事で、さらなる高速化・高精度化が実現できた。

二つ目は、局所一貫性による点群の回転照合法 (LCPD) で、照合指標のない光学・磁気ディスクメディアのような回転媒体における新しいロバスト回転照合アルゴリズムを提案する。ディスクメ

ディアの欠陥解析・分類を行う場合、ノッチなどにより回転位置合わせの可能な半導体ウェハの場合と異なり、欠陥解析を行う前段階の課題として、回転角度の合わせ込み方向に対して回転位置合わせを行う必要がある。更に実生産ラインにおいては、高度化する検査要請に対応するため、異なる種類のセンサや装置、異なる環境や設定状態にある同種のセンサにより得られる欠陥データ点群どうしの照合を行わなければならない場合がある。そのような場合には、検査装置ごとに得られる欠陥点群に、分布状態の偏りや相違が存在したり、スクラッチやパーティクルと言った欠陥種の分類を行っている場合には、その分類誤りが存在したりする。点群の照合法として、従来 ICP アルゴリズムに代表される距離に基づく照合法が提案されているが、同一の欠陥でも異なる位置に観測されるような不良条件に対しては評価原理を見直す必要がある。本論文で提案する LCPD は、個々の点データまわりの局所的範囲における他点群データとの分布の一貫性を評価しており、局所評価量の累積を点群全体の評価値として、この最小評価値を実現する回転角度を推定している。提案手法は、真の対応点を持たない非重複点や総点数や、点の位置関係が一致しない例外値が発生している点群に対して大きなロバスト性を有している。さらに、LCPD に欠陥種を導入する事により、異欠陥種による誤対応が軽減され、収束状態での欠陥対応付け精度が向上するだけでなく、非収束状態における極小解の軽減も可能となる。

本論文では画像と点群の照合法ごとにアルゴリズムの提案を行い、それぞれの手法について、不良条件に対するロバスト性などについて述べる。さらに、実データを基にした照合実験により、照合精度や照合コストなどの性能に関して確認する。

第 1 章では、本研究の背景と目的について述べる。ここでは本研究で対象とする画像や点群について述べ、従来の画像照合法と点群照合法に関して問題点や課題を示すことにより、本研究の目的を明確にする。

第 2 章では、画像照合法である、方向符号差分ヒストグラム (OCDH) について述べる。ここでは方向符号、方向符号差分の定義と円環計算、ヒストグラムについて述べ、それらによる回転不変特徴量の導出を行う。OCDH を基にした高速な候補位置の推定法と、その候補位置に対する高精度な照合の二つの処理からなる照合システムの提案と、方向符号エントロピーに基づく最適円環の導出法の提案について述べる。

第 3 章では、不良条件下で撮影された画像によるロバスト性の検証と計算速度の検証について、従来手法との比較を交えて実験を行う。

第 4 章では、点群照合法である、局所一貫性による点群の回転照合法 (LCPD) と、LCPD の改善手法である、欠陥種を考慮に入れた LCPD(color LCPD) について述べる。さらに、欠陥種の導入と欠陥種ごとの優先順位付け、欠陥種誤分類に対するロバスト性について述べる。また、提案手法の例外値に対するロバスト性について、点群データの分類に基づく定性的な考察を行っている。

第 5 章では、提案手法が例外値データの含有に対して、高いロバスト性を有し、しかも良好な収束性能を実現していることを、従来手法との比較とともに、シミュレーション、および実データを用いた実験によって示す。さらに本手法の実用化へ向けての応用を含めた考察を述べる。

第 6 章では、本論文の結論について述べる。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	金 子 俊 一
副 査	教 授	小笠原 悟 司
副 査	教 授	金 井 理
副 査	准教授	田 中 孝 之

学 位 論 文 題 名

画像・点群におけるロバスト回転照合に関する研究と 実産業応用

ロバスト照合技術はロボットビジョンやFAなどの分野で広く活用されており、現在その応用範囲は拡大している。実際の環境における不良条件である、姿勢や照明条件の変化、遮蔽や付加ノイズなどに対するロバストな照合技術の開発が期待されている。また、実産業界においては、半導体やHDD、フラッシュメモリなどの微細化・高密度化が急速に進んでおり、それを検査する外観検査装置の欠陥検出感度も高くなっている。そのため大量の欠陥を含むパタン同士の照合を行う必要があり、高速・高精度に処理するための安定で効率的な照合および解析手法の開発が求められている。

本研究ではこの主旨に従って、画像と点群の二つの対象における照合アルゴリズムの提案を行っている。それぞれ回転角度の推定を行う事ができ、不良条件や例外値に対するロバスト性を持っている。

一つ目は、方向符号差分ヒストグラム (OCDH) に基づく回転不変画像照合法で、画素近傍の明度勾配から得られる方向符号に基づく特徴量を利用しており、ハイライトや陰影などの明度変動に対して強いロバスト性を持ち、高速に回転角度の推定を行う事ができる手法である。従来ハフ変換やヒストグラムを利用した照合法があるが、計算コストや照合精度などに問題点があった。これらの問題を解決する方法として、方向符号に基づく照合法が開発された。この手法は、方向符号のヒストグラムをシフト照合することにより回転角度推定が行えるが、詳細な角度推定を行うためには、方向符号数を増加させなければならず、計算コストが増加する問題点がある。

本論文で提案されている OCDH は、方向符号、方向符号差分、円環、ヒストグラムの四つの要素から成り立っており、明度変動などに対してロバスト性を持つ方向符号を、回転不変性を得るために利用している点が特徴的である。OCDH による候補位置の絞り込みを行うとともに、方向符号エントロピーにより最適な円環を選択して照合を行う事で、さらなる高速化・高精度化を実現している。

二つ目は、局所一貫性による点群の回転照合法 (LCPD) で、HDD や DVD のような回転媒体における新しいロバスト回転照合アルゴリズムを提案している。ディスクメディアの欠陥解析・分類を行う場合、欠陥解析を行う前段階の課題として回転位置合わせを行う必要がある。更に高度化する検

査要請に対応するため、異なる種類のセンサや装置、異なる環境にあるセンサから得られた欠陥点群どうしの照合を行わなければならない場合がある。検査装置ごとに得られる欠陥点群に、分布状態の偏りや相違が存在したり、欠陥種の分類誤りが存在したりする。点群の照合法として、従来 ICP アルゴリズムに代表される距離に基づく照合法が提案されているが、同一の欠陥でも異なる位置に観測されるような不良条件に対しては評価原理を見直す必要がある。提案する LCPD は、個々の欠陥点まわりの局所的範囲における分布の一貫性を評価しており、局所評価量の累積を点群全体の評価値として、この最小評価値を実現する回転角度を推定している。提案手法は、総点数や点の位置関係が一致しない、例外値が発生している点群に対して大きなロバスト性を有している。さらに、欠陥種を考慮に入れた LCPD (color LCPD) は異欠陥種による誤対応が軽減され、収束状態での欠陥対応付け精度が向上するだけでなく、非収束状態における極小解の軽減も可能となる。

本論文の第 2,3 章では、画像照合法である, OCDH について述べており, OCDH を基にした高速な候補位置の推定法と、その候補位置に対する高精度な照合の二つの処理からなる照合システムの提案と、方向符号エントロピーに基づく最適円環の導出法の提案について述べている。様々な不良条件が加わっている画像に対して、高速かつロバストな回転不変照合を実現しており、実環境において効果を発揮する照合技術である。

第 4,5 章では、点群照合法である, LCPD と color LCPD について述べており、欠陥種の導入と欠陥種ごとの優先順位付け、欠陥種誤分類に対するロバスト性について述べている。また、提案手法の例外値に対するロバスト性について、点群データの分類に基づく定性的な考察を行っている。例外値を多く含む点群に対しても精度の良好な照合を実現しており、HDD 欠陥点群の照合に対して特に効果的である。

これら二つの手法ともに、目的である実産業応用が可能な技術である事が確認できる。

以上を要するに、著者は、実産業を対象としたロバスト照合技術の分野において新しく二つの照合技術の提案しており、検証実験により有用性を確認するものであり、パターン認識や画像照合などの分野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。