

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

## 主論文の要旨

論文題目 局所特徴量を用いた物体の姿勢推定の高精度化に関する研究

氏名 小堀 訓成

## 論文内容の要旨

本論文は、生活支援ロボットの自律的な行動に必要な“姿勢推定”に関する研究成果をまとめたものである。生活支援ロボットに課す汎用的なタスクとして“物取り”を想定し、そのための基礎研究として、姿勢推定を軸に (i) ロボットの姿勢推定、及び、(ii) ロボットが把持動作を行う物体の姿勢推定に関する研究成果をまとめる。

本研究の目的は、ロボットの姿勢推定とロボットが把持動作を行う物体の姿勢推定の双方の“姿勢推定”の高精度化を画像処理技術により解決することである。ロボットの姿勢推定では、ジャイロセンサを用いた手法が一般的である。この方法は安定して姿勢を推定することができるものの、センサ誤差の問題があり、長時間にわたって精度良く推定することができないという問題がある。また、把持対象物体の姿勢推定では、マーカを用いる方法が実用的であり、対象物の姿勢を容易に推定することができる。これは、作業対象に直接マーカを貼付することで物体の検出・認識と姿勢推定を行う手法である。しかし、マーカはカメラに対して比較的見えやすい向きと距離に置く必要があり、物体が様々な姿勢で置かれた場合などは検出・認識が難しいという問題がある。

本研究ではこのような問題を解決するために、画像間の幾何学的な対応づけが正確にできる局所特徴量の技術に着目し、従来手法に局所特徴量を活用する方法を提案する。具体的には、局所特徴量の中でも向きに対してロバストな対応が取れる SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) を利用し、(a) ジャイロセンサと SIFT を活用したロボットの姿勢推定、(b) SIFT を活用したマーカによる把持対象物体の姿勢推定、の研究開発をおこなった。

本論文は、6つの章から構成される。

第1章は序論であり、本論論文の研究背景と目的、各章の位置付けを述べた。

第2章では、本研究で用いた局所特徴量記述子である SIFT について説明した。さらに、カメラ視点の変動に対する頑健性を事前評価した。特徴点照合において、約 30 deg. 程度までの視点移動には十分に対応できることが分かり、応用するにあたり十分な性能であると判断した。

第3章では、ジャイロセンサと SIFT を活用したロボットの姿勢推定について説明した。

局所特徴量をロボットの姿勢推定に活用する方法として、MEMS 型の振動型ジャイロセンサ

と単眼カメラを組み合わせたシステムを提案した。提案手法の特徴は、ジャイロセンサの問題点、局所特徴量を利用する上での問題点、各々を相補的に組み合わせることで解決するものである。ジャイロセンサを用いた姿勢推定では、温度などの影響によりドリフト誤差が発生するため、時間経過に対して姿勢推定精度が低下する問題がある。一方、カメラを用いた姿勢推定手法では、ドリフト誤差が発生しない反面、特徴点を得られない場合があるため継続的な姿勢推定は難しい。提案手法は、SIFTによる画像フレーム間の対応づけから求めた姿勢変化量を参照値として、拡張 Kalman フィルタでジャイロセンサの積算誤差を除去することでロボットの高精度な姿勢推定を行うものである。画像処理により姿勢が正しく得られない場合があるため、画像処理で求める姿勢推定に判定基準を設定し自己診断を行うことで、画像処理で推定した姿勢が精度の良い場合のみ、拡張 Kalman フィルタを断片的に実施する。これにより、実環境で、特徴点が取れないような場合や特徴点が誤対応した場合においても、システム全体としては安定した精度で姿勢推定を継続することが可能となる。また、拡張 Kalman フィルタを実施しない場合は、前回時点で推定した誤差量（各ロール・ピッチ・ヨー軸のオフセットとバイアス誤差）を次の時刻にそのまま引き継ぐ方式を採用する。これは、温度特性がある低周波成分の誤差を拡張 Kalman フィルタで、高周波成分の誤差をローパスフィルタで除去する設計である。また、画像処理においてもジャイロセンサから得られる情報を活用することで、高精度化を図る。基礎行列を求める際の Levenberg-Marquard 法の初期値に、ジャイロセンサから求めた姿勢を利用することで、精度良く基礎行列を求めることができる。さらに、SIFT を用いた特徴点対応において、ジャイロセンサから求めた姿勢を利用することで、次フレームにおける特徴点の位置をある程度推定することで、誤対応除去を行う。実験では、局所特徴量が抽出できない場合があったが、変化量が大きいヨー方向の姿勢は FOG 相当の精度を確認することができた。一方、ロール・ピッチ方向の姿勢精度は、ジャイロセンサのみを用いる方法や局所特徴量のみを用いる方法と比較して改善を確認した。

第 4 章では、SIFT を活用したマーカによる把持対象物体の姿勢推定について、マーカの検出方法を提案した。これは、SIFT に検出されやすいパターンをマーカに用いることで、マーカを検出しやすくするものである。SIFT が、回転や拡大・縮小、ボケに頑健である性質から、その特徴をマーカに活用した。具体的には、マーカの検出パターンとして円形の輝度の窪み（ドット）を用い、SIFT でそのドットを検出する。ボケやマーカの傾けた配置に対しても容易にマーカを検出することができる。またマーカ候補を絞り込むための判別フィルタも適用した。判別フィルタは、キーポイント周辺のエッジ強度が強い箇所を候補とした。提案するマーカは、ボケや雑然とした背景環境下でも、従来の ARToolKit マーカと比較して、高精度で検出できることを示した。また、円形の輝度の凸凹であれば、マーカの傾きが 60 deg.あってもキーポイント検出ができることを確認した。従来の ARToolKit マーカのように、カメラからの見えやすい位置にマーカを配置する必要がなくなり、把持対象物体とカメラ間の自由度がより向上した。雑然とした環境下でもマーカ認識ができ、ARToolKit マーカが 52.7%の F 値に対して、提案するマーカは、92.1%と性能を大幅に向上させることに成功した。

第 5 章では、SIFT を活用したマーカによる把持対象物体の姿勢推定について、マーカの認識方法を提案した。データの符号化をドットのみ（ドットの配置と大きさ）で表現できるようにし、マーカ検出領域とデータ領域を同じドットのみで表現することで、遠方からも認識しやすいように改良を施した。具体的には、従来手法のランダムドットマーカを改良した。ランダムドットマーカは、マーカの特徴量をドットから構成される 3 角形の面積比として表現し、Locally Likely Arrangement Hashing という方法で高速に検索する。この方法に対して、ドットの検出に Spectral-SIFT を活用し、さらにドットのスケールを推定することで、的確にマー

カを構成するドットのみ抽出すること方法とドットのスケールによってデータを符号化する方法を提案した。Spectral-SIFTを用いることで、カメラからマーカまでが任意の距離であってもキーポイントの検出とデータの認識できるようになった。マーカの大きさが1 m程度の距離から2.5 cm四方で、F値88%（誤差5 mm, 5 deg.以下の条件で評価）で認識できる。提案するマーカは、マーカの大きさを小さくすることができ、容易に物体に貼付することができた。第6章では、本論文を総括し、今後の課題と展望について述べた。