

学 位 論 文 題 名

多重解像度解析に基づく空間推論に関する研究

学位論文内容の要旨

コンピュータビジョンの応用分野は、ベルトコンベアや物体の掴み上げや、航空写真からの特定の建物の検出など、限定された環境で限定された物体の認識がほとんどである。今後21世紀にむけてより高度な推論を行える知能ロボットが要求されることになるであろう。しかし、より一般的な環境を理解する知能ロボットを考えると、構成要素は平面や直線の他に不定形の自由曲線、曲面を含んでいるため、従来研究が行われてきた画像の構造化に基づくアプローチだけでは環境理解は困難であり、視覚の高度化をめざした空間推論のための形状記述方式を考える必要がある。一般的な環境理解のための形状記述に必要な性質には、次のようなものがある。1. 雑音の影響を受けにくい。2. 記述に要する容量が小さく体系的で、パターンの探索を効率的に行える構造であること。3. 形状の移動回転拡大に対して不変であること。4. 形状の粗いレベル細かいレベルの両方の照合が可能なこと。

従来の認識手法で用いられに形状記述パラメータは雑音や隠ぺいの影響を受け易く、大量の形状データを記述するのにも十分ではなかった。これは従来の記述方式が階層構造を取り扱うのに適さなかったためである。D. Marr は形状をいろいろに尺度をかえてみることの重要性について述べている。A. Witkin は図形の形状を巨視的にあるいは微視的に分析することの重要性について述べている。また、W. Richards らは形状を記号化して解析する手法を提案したが、図形を単一の記号列で解析することは上述の(1)(4)の点で問題がある。

特に本研究では、複数の形状に対しても効率的に対応できる解像度に応じた照合を念頭にいれているため、特徴点の位置による照合ではなく、木の要素の並びと変化のみで階層的に照合できる簡潔で記号化された木構造が必要になる。さらにその木構造はマッチングに適したデータベースを作り易い構造であることが要求される。この立場から、輪郭線および3次元自由曲面を scale-space を用いて階層的に記号化して記述し、形状を木構造で表現する手法を提案している。

2章では形状の階層構造をえるために重要な道具 scale-space の性質とその証明について述べている。

3章では輪郭線形状を階層的に記述する手法を述べている。具体的には、対象となる輪郭線を角度表現になおし、角度波形に各種の σ をもつ低減フィルタをかける。フィルタリングされた各角度波形を codon 記述子にいったん変換する。codon 記述子は、曲線を図が左、地が右になる向きに追跡し、曲率の極小点をもとに分割したものである。しかし、codon 記述子はスケールスペースに基づく記述に適したものではない。そこで、codon 記述子をスケールスペースに適した曲率要素（記号列）に変換している。各尺度に対して得られた記号列は形状をおおまかな構造から細部の特徴へ分析するために適しており、尺度方向の記号列の変化規則を求めることにより効率的に木を形成している。

同様に4章では3次元自由曲面を階層的記号列に変換している。まず3次元形状を階層的に取り扱うために、scale-spaceの手法を3次元に拡張している。

3次元離散点群に対するフィルタリングの問題に対して、ガウスフィルタを畳み込みする操作の代わりに拡散方程式を差分方程式で近似することにより、等価な処理を実現している。本手法はフィルタリングの過程でおこる非単調性を例外的に扱うことで、階層構造を抽出できることを明らかにしている。階層構造の抽出のための特徴量としては、観測方向に不変な微分幾何学的特徴量であるガウシアン曲率と平均曲率のゼロ交差輪郭を用いる。本手法では、安定して領域階層を追跡するために2段階に形状を記述する。まず基本的な記述は、原データから安定して記述を与えるために、局所的なスケール変化により引き起こされる輪郭のトポロジカルな変化（輪郭の生成と連結関係の変化）のみから生成し、その後、記述の比較時の高速化と安定性のために輪郭の生成と連結関係の変化を記述したネットワーク構造に領域の個数と分布の変化を加える。さらに照合を効率的にするため、複数の領域をひとまとまりにとらえネットワーク記述を木に変換している。複数の形状から得られた記述の共通部分を重複させて記述することによって効率的にデータベース木が構成でき、効果的なマッチングが行えることを明らかにしている。データの記述に用いた木構造は対象の巨視的・微視的・形状を階層的に表現しているため、パターン照合だけでなく、カテゴリー化や部分形状の照合にも適している。

しかし、多重解像度記述はある程度物体の見え方を吸収するが、反面類似した形状を認識の初期段階で大きく区別してしまう可能性がある。これは多重解像度のアプローチが、射影（投影）空間と3次元空間の関係について考慮していないためにおこる。そこで、あらたに視線方向による物体の見え方の定性的変化と形状の不連続な特異点の関係について、見え方と多重解像度解析という2つのパラダイムを備え、一般的環境における形状認識の問題にアプローチしている。

5章では、多視点から捉えたシルエット画像を元に、見え方の遷移関係をネットワークで階層

的に記述する手法を述べている。実際には、多視点から捉えたシルエット画像を抽出し、輪郭波形に数種の σ を持つフィルタを畳み込む。視線の移動に伴う記号列の変化を多重解像度で解析し、各 σ を階層的に取り扱うために、形状要素の並びが等しい要素を同一のアスペクトに分類し、視点半球面を分類している。しかし、一般に σ をもとに分割された視点空間は一度に多くの分割を作ってしまう階層的探索には適さない。そのため、視点空間を階層的に取り扱うために、 σ をもとに分割された視点空間を形状の曲率の1次微分、2次微分の数（形状階層レベル）を一定においた視点空間に変換する。この形状階層レベルが等しく、隣合う視点で異なる要素に分割する境界線をもとに視点空間を分割し、遷移関係をネットワークに記述し、階層的にアスペクトグラフを生成している。特に投影された形状が視点の移動にともない不連続に変化するカस्प点が現れる変化を多重解像度で解析し、限られた視点と解像度から信頼性の高いアスペクトグラフを自動生成することが可能になる。

同様に6章では3次元自由曲面对して、同様のアプローチを適応している。本記述は、視点空間を階層的に分割しているため coarse - to - fine 戦略に基づく形状の位置姿勢の探索および、動画像における物体追跡に適している。

7章では、本論文の総括を行うとともに、残された課題について述べている。本研究は、形状のパターンマッチングや動画像追跡のみならず、一般的環境理解のためのコンピュータビジョンにおける内部表現として有望である。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	青 木 由 直
副 査	教 授	伊 達 惇
副 査	教 授	佐 藤 義 治
副 査	教 授	大 内 東
副 査	助教授	川 嶋 稔 夫

本論文は、計算機視覚の分野における複雑な物体形状の効果的な表現方式として多重解像度解析に基づく階層表現を取りあげ、これに基づく物体の識別・認識のためのアルゴリズムを提案するとともに、物体の観測方向による見え方の変化の仕方を統一的に表現するための手法について

議論を行ったものである。

本論文は以下に示す7章から構成されている。

1章では、序論で本論文の研究が行われるに至った背景を述べ、全体の概要と構成を示している。

2章では、本論文の数理的背景となる多重解像度解析の scale-space の基本原理と、Gauss 関数を核とした場合の scale-space 座標におけるゼロ交差輪郭の性質、特徴について説明している。

3章では scale-space を用いて輪郭線形状を階層的に記号化し形状を解析する手法を提案している。ここではまず、対象となる形状を輪郭線に変換し、これを輪郭の接線角の偏角関数、すなわち角度波形になおし、角度波形に各種の帯域幅（スケール）をもつ低減フィルタを畳み込んだのち、部分形状を曲率の変化によって符号化した codon 記述子列に変換する。codon 記述子がスケール変化によって要素の分裂を起こす様子を木構造として表現することで、記号化された形状の階層的に表現が得られる。この表現を用いて、物体形状の照合、図形の一般化等が可能であることを実験によって明らかにしている。また、安定に階層構造を得るための方策として、木構造の分岐規則に基づく木の生成手法を提案している。

4章では3次元自由曲面を階層的に記号化し記述する手法を、3章の手法の拡張によって実現している。基本的な差異はフィルタリングの手法と、部分形状の符号化手法の違いである。低減フィルタリングは距離画像に対する拡散方程式で行っている。フィルタリング後の投影距離画像から曲率のゼロ交差輪郭を検出し、ガウシアン曲率と平均曲率で分類することで符号化を行う。具体的には局所的なスケール変化により引き起こされるガウシアン曲率と平均曲率のゼロ交差輪郭の生成と連結関係の変化を記録し、領域の個数と分布の変化の記述を加えている。さらに照合の効率化のため、複数の領域をグループ化した木構造も作成する。グループ化して得た木構造は対象の巨視的形状から微視的形状までを階層的に表現しているため、パターン照合だけでなく、カテゴリー化や部分形状の照合にも適していることを実験例から明らかにしている。

またこの章では多重解像度の手法の欠点として、形状の微少な差異がしばしば木の上部構造の差異となって現れることを指摘している。これは多重解像度のアプローチが、射影（投影）空間と3次元空間の関係について考慮していないために起こっている。これを解決するには、視線方向による物体の見え方の定性的変化と形状の不連続な特異点の関係について、見え方と多重解像度解析という視点から解析する必要があることを強調し、続く4、5章でこれらの問題を扱っている。

5章では多視点から捉えたシルエット画像を統合し、見え方の遷移関係をネットワークで階層的に記述する手法（階層的アスペクトグラフ）を提案している。ここでは多視点から観測したシルエットの角度波形に複数のスケールを持つ低域フィルタを畳み込み、視線の移動に伴う多重解像度空間での符号列の変化を形状要素の並びが等しい要素を同一のアスペクトに分類することで、視点半球面を階層的に領域分割し、1) 解像度の移動に伴い視点半球面のアスペクトが変化する階層的イベントと、2) 視点の移動に伴い投影画像に曲率の不連続点（カスプ点）が現れる変化、の2つを検出解析することで、限られた視点と解像度から信頼性の高いアスペクトグラフを自動生成することが可能であることを示している。そしてここで提案したアスペクトグラフの手法が知能ロボットなどにおける観測場所などを伴う場合にきわめて有効であることを示している。

6章では5章と同様の考え方に基づいて、多視点から捉えた距離画像についてのアスペクトグラフ作成アルゴリズムを提案するとともに、視点変化と遮蔽輪郭の生成消滅の一般的な性質について明らかにし、安定な3次元形状認識の実現方法について議論を行っている。

7章では本論文の総括を行うとともに、将来の展望および残された課題について述べている。

これを要するに、本論文は計算機視覚における形状記述と空間推論のあり方について多重解像度解析の立場から独自の階層的手法を提案するとともに、視点移動にともなう表現の変化を階層的アスペクトグラフに構成するという試みを行ったもので、その結果得られた数々の新知見は情報工学、応用計算機工学に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。