

博士論文概要

論文題目

複雑な環境下における自律移動体の
視覚誘導方式に関する研究

Design of Visual Navigation Method for an
Autonomous Mobile System in Complicated
Environment

申請者

氏名

瀧口

純一

専攻・研究指導
(課程内のみ)

2004 年 2 月

近年，産業構造変化に伴う合理化の推進（特に，危険業務，3K業務の代行），高齢化社会に伴う医療・介護者の不足などに伴い，移動機能を持つ自動化システムのニーズは多様な場面において高まっている．現在，工場に導入されているAGV等の移動システムは，導入の際に誘導物設置工事や走行経路の確保など，既存のインフラの大幅変更が必要となる．一方で，環境を理解し移動することができる昨今の視覚付き知能移動ロボットの研究では，研究室やオフィスなどの屋内環境や，人間の作業領域から隔離された工場内の専用走行路などの比較的単純な環境を対象としていた．しかしながら今後自動化の望まれる環境は，建設現場や病院内のように時々刻々と周囲環境が変わり，かつ人間と機械が混在する複雑な環境下であるため，自ら目的地までの経路を探索し，走行することができる自律移動システムが宿望されている．

このような状況下本研究では，外界の画像センシングと認識によるナビゲーション手法に関する種々の検討を行い，環境の複雑性，環境の変化率，ランドマーク設置性の観点で，それぞれ特徴を有する3種類の視覚誘導方式について以下のように提案を行う．

- 1) 第3章：標識認識による位置標定と標識誘導方式
- 2) 第4章：ODVによる自己位置標定と地図ベース誘導
- 3) 第5章：全周立体視による高精度な距離画像生成
- 4) 第6章：全周立体視による自己位置標定
- 5) 第7章：地図獲得と交差点基準誘導方式

第3章では，第1の視覚誘導方式として，標識を用いた屋外の複雑な背景下における画像によるランドマーク探索，認識，誘導を実現するための手法について論じる．第4章から第6章では，第2の視覚誘導方式としてODV（Onmidirectional Vision）を用いた全周視覚センサの提案と，その全周ステレオ視，及びランドマークを用いた誘導方式を提案する．第7章では，より人間のナビゲーションに近い方式として，交差点を規準とした経路情報に基づく交差点認識誘導方式を提案する．以下，各章における研究内容についてその概要を述べる．

第3章では，環境の複雑性とその変化が最も頻繁なアプリケーション（例；建設現場での資材搬送）に適した標識認識ナビゲーション手法を提案している．本方式の特徴は，経路の経過点と次の動作指示を全て標識側に持たせ，これを自律的に探索，追尾，認識を行うことで経路変更等の動作変更が容易にできる点である．本システムは実フィールドでの運用評価により，有効性を明らかにすることができた．尚，本章で開発した1）近赤外線カメラによるランドマーク探索／追尾／認識アルゴリズム及び，2）太陽光外乱下での背景抑圧，領域分割アルゴリズムは，後述のODVセンサ開発の基盤技術に位置づけられるものである．

第4章のODVによる自己位置標定と地図ベース誘導では，第3章におけるジンバルに搭載されたカメラやレーザ測距センサの代わりに，全周囲の環境を一度に把握できる2枚の反射鏡を持つODVにより，既存の紙地図と環境に置かれたマーカから自己位

置と目標位置を認識し、高精度の自律走行を行うシステムを提案している。本方式は、従来のカメラを回転台に載せて三角測量の原理で自己位置を推定する方式に比較すると、1) 全周映像を1枚の画像で撮像できるためリアルタイム性が高く、高速で移動しても、逆に超低速で移動していても精度劣化が無いこと、2) ランドマークの数を増やすことで精度向上が図れること、3) 可動部が無く、小型化が図れること、などの特徴を持っている。また、他の1枚鏡の全周撮像センサと比較しても1) 2枚の反射鏡の形状を工夫し、超広角系の収差を光学的に打ち消していること、2) 全視野において光路長を同じになるように光学系を設計し、CCD素子面での結像面をフラットにして解像度を上げたこと、3) 2回反射させることで像の反転が無いこと、4) 様々な写像方式で設計できること、等が特徴として挙げられる。本提案の自己位置推定方式は、環境内に設けられた3個以上のランドマークから相対的な位置と方位角をリアルタイムで算出し、紙地図上のランドマーク位置情報との比較により、絶対位置と方位を推定するものである。この自己位置標定アルゴリズム検証のため、誤差モデルの算出を行い、Cramer-Raoの下界により理論的な性能限界を明らかにした。また性能評価試験により、推定精度がほぼ理論値に近いことを示し、本光学系設計とそのチューニング、及び自己位置標定アルゴリズムの妥当性を明らかにした。更に屋外走行試験の結果、従来のデッドレコニング方式に比較して、走行経路の精度に明らかな差異が見られ、本提案方式の有効性を明らかにできた。

第5、6章では、人工物のランドマークの代わりに環境中に存在する幾何的特徴に富む物体をランドマークとして認識することで、ランドマークレスによる自己位置標定手法について述べている。第5章では、非人工物マーカ認識用センサとしてODVを上下に2個設置したODSV(Omnidirectional Stereo Vision)と、その高精度な距離画像生成アルゴリズムを提案している。本センサは前述の光学的な特徴を有する他、距離画像生成アルゴリズムとして、1) ドーナツ型の映像を短冊状に展開する際のエッジ情報と輝度情報を用いた画像分解能保持手法により、展開時の画像分解能劣化が少ない、2) 勾配ベクタの2倍回転成分に着目した倍角投影法により、信頼度の高い特徴画像が抽出可能、3) 特徴点に対するエピポーラ拘束の算出により、光学的アライメント誤差を補正可能、4) 双方向マッチングにより、ロバスト性の高い対応点探索が可能、5) 最小自乗法による相関値の2次関数近似により、サブピクセルレベルのマッチングが可能、6) 双方向拡張補正により、孤立点除去と不連続点の連結ができ、距離画像の最適化が可能なこと、などの特徴を持っている。最後に本提案のシステムにより屋外で取得した複雑な背景を持つ画像に対して、視差画像生成とVRMLによる3次元復元を行ない、画像全域に渡り近いものから遠いものまで良好なマッチングができていることを確認し、距離推定精度試験において、約1/3のサブピクセルレベルのマッチングに成功していること、また近距離域においては、数[cm]レベルの距離精度を有していることを検証することができた。

第6章では、第5章で詳述したODSVによる距離画像を用いて、環境にある既存の

物体を基準としたランドマークレス自己位置標定方式を提案した．具体的には運用環境中の電柱等の”柱”を，１）エッジの幅，２）エッジの地面に対する直交度，３）エッジの距離の一様性，４）エッジの縦横比という幾何的特徴量により，背景から認識できることを示した．次にこの”柱”までの方位角と距離を用いた自己位置標定アルゴリズムと誤差モデルを導出し，Cramer-rao の下界と距離・方位角誤差により，その標定性能を明らかにした．

そして最後に第 7 章では，ランドマークも運用環境の地図も持たず，ユーザが入力した交差点基準の簡便な経路情報に基づき運用環境内を自律移動し，その最中に未知環境の地図を獲得し，経路を探索しつつ自律誘導を行う人間のナビゲーションに近い方法を提案する．本方式は，特に病院内の介護支援のようなランドマークの設置が困難で，かつ環境の変化が激しいアプリケーションに適している．本方式の特徴は，１）ランドマークも運用環境の地図が無くてもナビゲーションが可能，２）簡単な手書き地図に相当する交差点を規準とした経路指示により走行が可能，３）移動体に搭載されたセンサから得られた情報を，移動体内部で再構築し，周囲環境の情報を内部に保持することで，経路計画，障害物回避といった移動体の行動生成や，人間から与えられる移動目標地点の理解などに対して有効に作用すること，４）走行経路がノードとアークで構成されたグラフとして抽出が可能であり，二次処理が容易なこと，などの特徴を有している．この手法によれば，運用環境の情報を事前に全く持たない状況下で，ユーザからの行動命令のみによって，移動体を目標地点まで誘導が可能であり，幅広い利用が期待できる．本アルゴリズムを実装した移動プラットフォームでの走行試験では，移動体が運用環境の地図を獲得しつつ経路を探索し，交差点候補の探索・認識を行ない，指示どおりの目標経路を走行することで，提案方式の有効性を明らかにした．

以上の研究を通じて得られた成果を総括すると，複雑な環境下における移動体の視覚誘導を実現するためには，a) 全方位の視覚情報（形状特徴，距離等）のリアルタイム取得，b) 環境における相対的な自己位置・姿勢情報の取得，c) 動的な動作環境中における目標経路の実時間探索／認識の 3 つの条件を満たしている必要があることが明らかになった．本研究では，移動経路と動作指示を兼ね備える“標識”とその探索・認識装置を特徴とする第 1 の視覚誘導方式と，実時間で全方位の情報を取得できる ODV を特徴とする第 2 の視覚誘導方式，そしてリアルタイム環境地図生成と交差点認識を特徴とする第 3 の視覚誘導方式の考案を通して，移動体の知能化研究への視覚誘導技術の応用可能性を探ることができた．さらに以上で得られた成果は，いずれも自律移動システムの研究において，従来にない新たな局面を展開するもので，自律移動システムの実現に向けてひとつの方向性を示唆することができたと考える．