

氏名(本籍)	小野 圭一 (千葉県)
学位の種類	博士(情報科学)
学位記番号	情 第 16 号
学位授与年月日	平成 12 年 3 月 9 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
最終学歴	昭和 59 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻 博士課程前期 2 年の課程
学位論文題目	自律移動車用空間把握と誘導のアルゴリズムに関する研究
論文審査委員	(主査) 東北大学教授 西 関 隆 夫 東北大学教授 根 元 義 章 東北大学教授 阿 部 健 一 (工学研究科)

## 論文内容要旨

定型作業しか行なえない従来の産業用ロボットに対し、病院内搬送や警備等のための屋内移動ロボットのニーズが近年高まっている。また、車両運行の安全性や効率性を向上させるため、自律移動車に関する研究が盛んになってきている。これら移動ロボットや自律移動車に関する研究は、1960年代より人工知能(AI)研究の一例として始められたが、周囲の環境を観測し、環境のモデル(地図)を自動生成することが主題であり、AI的な興味としては面白いが、計算コストが高く、移動効率も悪いため、目的地へロボットを誘導する等の実応用には適していなかった。このため、1980年代より、移動ロボットや自律移動車の実環境における誘導に主眼を置いた研究が行われ始めた。

実環境において、移動ロボットや自律移動車を目的地へ安全かつ効率的に移動させるためには、周囲の状況を把握するための空間把握アルゴリズムと目的地へ接近させるための誘導アルゴリズムが必要である。屋外を走行する車等にも搭載できる空間把握アルゴリズムを実現するためには、広い範囲で障害物が検出できるとともに、歩行者や走行中の車等を移動障害物として切り出し、その進行方向や位置を予測することが重要である。対象物までの距離を広い範囲で獲得する手法としては、TVカメラを用いたステレオ視があるが、屋外等複雑なシーンでは画像間の対応付けが難しく、計算コストも高いため、密な距離マップを高速に作成することがこれまで困難であった。このため、屋外の高速度走行を前提とした自律移動

車には、レーザやミリ波等のアクティブレンジセンサが通常用いられてきたが、アクティブレンジセンサには、計測できる範囲が狭い、障害物の材質や面の角度によっては十分な反射波が得られないため障害物を見落す、他車両が照射したレーザやミリ波を誤検知する、自分の動きが未知な場合、検出された障害物が人間等の移動物体なのか、あるいは駐車車両等背景に含まれる静止物体なのか判断できない等といった欠点がある。TVカメラを用いた空間把握アルゴリズムが実現できれば、走行レーンを示す道路上の白線等も同時に認識できるため、目的地まで自律走行するシステムが単一のセンサで構築でき、コスト面で非常に有利である。

誘導アルゴリズムを実現するためには、自己の現在位置及び走行すべき方角を知る必要がある。走行環境全体の画像や形状を蓄積したデータ（地図）を予め作成しておき、走行中に獲得した画像や形状データと照合して環境内の現在位置を求める手法がこれまで提案されているが、屋外等広い環境では、走行環境全体のデータ（地図）の作成が困難であり、また、蓄積されるデータ量も大きいため、位置同定のための照合に時間がかかるといった問題点がある。

本論文は、広い空間での密な距離マップをTVカメラにより高速に作成するとともに、歩行者や走行中の車等の移動障害物を検出し、その進行方向や位置を予測する空間把握アルゴリズム、及び従来手法では扱えなかった屋外等の広い環境や人間等が多数存在する動的環境における誘導アルゴリズムを与え、車載カメラで撮影した画像による実験及び車輪型の移動ロボットを用いた実験により、有効性を実証した結果をまとめたものである。本論文は6章からなっており、各章は以下のように要約される。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、ステレオ視による移動可能空間検出アルゴリズムを与えている。屋外には樹木等複雑な形状の対象物が多数存在するため、ステレオ画像間の対応点探索に多大な計算コストが必要となる。従って、シーン全体の3次元形状を復元した後、障害物の存在しない領域を検出する手法は得策ではない。道路や屋内通路等の走行環境は、未舗装路等の例外を除き、平面の組み合わせで近似できる。また、歩行者、自転車、車等道路上に存在する大半の障害物は、道路面に接触した道路面と高さの異なる物体である。このため、ステレオ画像を道路平面上へ投影することにより、道路平面上に乗っている点か、道路平面とは高さが異なる点かを高速に判別する移動可能空間検出アルゴリズムを提案する。平面へステレオ画像を投影し、障害物を検出する手法は、これまでも提案されているが、真の道路平面と設定平面との間の誤差により発生する誤抽出領域を除去するための有効な手段がなかったため、走行中に車体が振動する自律移動車には適用できなかった。本章で提案するアルゴリズムは、設定平面上に投影したステレオ画像間の差分画像を、ステレオカメラの座標原点を中心

に放射状に走査することで、道路面上のペイント、汚れ、影等の周辺に発生する誤抽出領域を除去する。このため、車体が振動しても移動可能空間が安定に求まる。車載カメラで撮影した画像による実験で、本アルゴリズムの有効性を示している。

第3章では、ステレオ視による移動障害物位置検出アルゴリズムを与えている。本アルゴリズムは、歩行者や走行中の車等を移動障害物として切り出し、その進行方向や位置を予測する。オプティカルフローを用いて検出した画像中の移動障害物領域を、道路面上に投影することにより移動障害物の位置を算出している。フレーム間の追跡やステレオ画像間の対応探索が必要無いので、画像中で見え方やサイズが大きく変化する対象物や、形状が常に変形する非剛体に対しても、安定にその位置を求めることができる。このため、歩行者、自転車、車といった一般道路上に通常存在する移動障害物の位置検出に有効である。車載カメラで撮影した画像による実験で、本アルゴリズムの有効性を示している。

第4章では、手続き型地図による誘導アルゴリズムを与えている。本アルゴリズムは、位置確認に必要な情報を使い易い形で記述した地図を用いるため、屋外環境にも適用することができる。人間が目的地まで道を歩く場合を考えると、代表的な建物や看板等で自己位置を推定し、曲がるべき交差点等を識別して目的地へ近付いて行く。つまり、道沿いに存在するすべての建築物等を見ながら常に自分の位置を認識し、歩いている訳ではなく、ポイントとなる目標物を用いて要所要所（曲がり角や交差点等）で現在位置及び進むべき方向を確認する。そして、その間は障害物を避けながら舗道に沿って歩いたり、目標物に向かって歩いたりしていると考えられる。このため、目的地までの経路上に予めいくつかの目標物を設定しておき、TVカメラにより獲得した画像中でこれらの目標物を検出し、自己の現在位置と進むべき方向を求める手法が有効である。特に、高所にある看板や標識等を目標物として使用することが可能な道路環境、及び原子力発電所内部の通路や工場の専用レーン等のような人間の往来がほとんど無い静的環境においては、障害物による隠蔽で目標物を見失う可能性が少ないため、効率の良い移動が実現できる。本アルゴリズムは、位置確認に必要なデータ（地図）を簡便に作成する機能を有している。自律走行する前に、走行環境の簡単なレイアウトを記述した地図から、目的地までの走行経路を設定する。そして、交差点や曲がり角といった位置確認地点を定める。次いで、移動車や移動ロボットを位置確認地点まで遠隔操作で誘導し、ステレオ画像を収集する。このステレオ画像を人間が対話的に処理し、位置確認に用いる目標物の種類やその抽出手順等を記述した手続き型地図を作成する。位置確認地点でのステレオ画像が得られれば、位置確認のための処理手順を記述した手続き型地図が対話処理により簡単に作成できるため、地図の作成や走行経路の変更に伴う地図の変更が容易である。自律走行時は、各位置確認地点において手続き型地図に記述された処理手順に基づき目標物を検出する。そして、検出された目標物と移動車との間の位置関係をステレオ視に

より求め、走行経路上の自己位置を算出する。原子力発電所内の通路を模擬した環境において、車輪型移動ロボットによる誘導実験を行い、本アルゴリズムの有効性を示している。

第5章では、行動指向型誘導アルゴリズムを与えている。病院及びオフィス内等のような環境では、人間等の移動障害物及び椅子等といった可動物体が多数存在し、位置確認のために設定した目標物が隠されてしまう可能性が高い。このような動的環境では、経路に沿って目標物を順次検出し、自己位置を確認する手続き型地図による誘導アルゴリズムでは対処できない場合が生じる。このため、移動車の動きを障害物回避、徘徊、目標物探索・追跡等といったいくつかの行動に分類し、これらの行動を適宜切り替えることにより、目的地へ接近する行動指向型誘導アルゴリズムが提案されている。MITのBrooksが提案したアルゴリズムが代表的であるが、選択された行動の失敗から立ち直る部分が組み込まれていないため、デッドロックに陥る場合がある。例えば、隠蔽物により目標物探索・追跡が失敗した場合、障害物に衝突しないよう動き回る徘徊行動が選択されるが、同じ障害物と障害物の間を往復する等、同一経路を繰り返し動き回り、目的地へ到達できない可能性がある。本章では、行動選択の失敗から発生するデッドロック状態から効果的に復帰できる機能を有した行動指向型誘導アルゴリズムを提案する。デッドロック状態を検知し、抜け出すためのヒューリスティックとして、周囲の全ての障害物から最も離れた位置へ移動する自由空間探索行動、ドアの外といった開けた空間へ移動する開空間探索行動、及び障害物に沿って移動する沿障害物走行行動を新たに基本行動として付加した。目標物探索・追跡が失敗した場合、むやみに動き回るのではなく、できるだけ広い場所へ出る、ドアの外へ出る、壁に沿って動く等の行動を取ることで、デッドロックから効果的に抜け出すことができる。車輪型移動ロボットの誘導実験により、本アルゴリズムの有効性を示している。

第6章は結論であり、本研究の内容をまとめている。

## 論文審査の結果の要旨

自律移動車を目的地へ安全かつ効率的に移動させるためには、周囲の状況を把握するための空間把握アルゴリズムと目的地へ接近させるための誘導アルゴリズムが必要であるが、精度や適用できる環境等の点で満足できるアルゴリズムはこれまで提案されていない。このため、著者は、ステレオ画像を道路平面へ投影して得られる画像の特性を利用して、従来手法より高い精度で障害物を検出したり、歩行者や車のような移動体を検出する空間把握アルゴリズム、及び従来手法では扱えなかった屋外等の広い環境や人間等が多数存在する動的環境における誘導アルゴリズムについて研究してきた。本論文はその成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、自律移動車が移動可能な、障害物が存在しない道路上の領域をステレオ視により求めるアルゴリズムを与えている。歩行者や自転車や車等、道路上にある多くの障害物は道路面に接触しているが、それらの高さは道路面と異なるため、ステレオ画像を道路平面上へ投影して得られる画像間の差をとると障害物領域が強調される。この事実を利用して、画像中の障害物の領域を高速に検出し、しかも車体の振動等により誤って検出してしまう領域を減少させている。このアルゴリズムは、車体の振動に弱い従来の手法の欠点を克服しており、重要な成果である。

第3章では、ステレオ視により移動障害物の位置や進行方向を求めるアルゴリズムを与えている。オプティカルフローを用いて検出した画像中の移動障害物領域を、道路平面上に投影することにより移動障害物の位置を求めている。フレーム間の追跡やステレオ画像間の対応探索が必要ないので、歩行者や自動車のように画像中で形状や大きさが変化する移動障害物の位置も正確に検出できる。

第4章では、手続き型地図を新たに定式化するとともに、それを用いた誘導アルゴリズムを与えている。手続き型地図には、走行経路上で自己位置を同定する際に検出すべき目標物の種類やその検出手順のみを記述しておくので、走行環境全体の画像や形状データを用いる従来手法より記憶容量が大幅に削減でき、本アルゴリズムは屋外のような広い環境に適用することができる。

第5章では、人間のような移動障害物や椅子のように動かすことができる物体が多数存在する動的環境において、自律移動車を目的地へ向かって走行させることができる誘導アルゴリズムを与えている。このアルゴリズムでは、隠蔽物によりランドマークが検出できない場合、むやみに徘徊するのではなく、壁に沿って移動する、ドアの外へ移動する、できるだけ広い場所へ移動する等の行動を自律移動車に選択させることによりデッドロックから効果的に抜け出させている。このように本アルゴリズムはデッドロックから抜け出すための有効な手段を持たない従来アルゴリズムの欠点を克服しており、高く評価できる。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、自律移動車を目的地へ安全かつ効率的に移動させるための空間把握と誘導のアルゴリズムを与えたものであり、情報システム科学の発展に寄与する所が少なくない。

よって、本論文は博士(情報科学)の学位論文として合格と認める。