

	よねざわ なおあき
氏 名	米澤直晃
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成25年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) バイオロボティクス専攻
学位論文題目	2台の一輪把持型移動ロボットを用いた車両の操り
指導教員	東北大学教授 小菅 一弘
論文審査委員	主査 東北大学教授 小菅 一弘 東北大学教授 内山 勝 東北大学教授 吉田 和哉 東北大学准教授 平田 泰久

論文内容要旨

本論文は、2台の一輪把持型移動ロボットにより車両の駆動輪を持ち上げることで車両を搬送するシステムのコンセプトと、車両搬送時の提案するシステムの制御手法についてまとめたものである。

近年、様々な場面での自動車の移動作業の自動化が望まれている。駐車を行う場合、壁や周囲の自動車との接触を回避しつつ、限られたスペースに自動車を誘導するために、一定水準の運転技術を必要とする。そのため駐車作業を自動車に自動的に行わせる技術の開発が行われている。また自動車工場の生産ラインから検査場へ作業者が一台一台運転、あるいは手押しによって移動しており、このような作業の自動化が望まれている。

そのため遠藤らは複数移動ロボットを用いた車両搬送システム iCART (intelligent Cooperative Autonomous Robot Transporters) を提案した。iCART は2台の移動ロボットにより構成される。この2台のロボットが車両の左右に寄り付き、各ロボットが車両の前後2輪を持ち上げることで、車両を持ち上げ、全方向への移動を可能にする。通常車両を1台のシステムにより搬送する場合は車両と同程度の大きさのシステムが必要になる。遠藤らは、2台のロボットによりシステムを構成するで、ロボットを比較的小型化し、車両の横幅の多様性への適応を可能にした。

また柏崎らはiCARTを発展させたシステム iCART II (type II) を提案した。iCART II は1つのタイヤを持ち上げる機構を有する全方向移動ロボット MRWheel (a Mobile Robot for a Wheel) により構成され、4輪自動車を搬送する場合は4台のロボットが1輪ずつ持ち上げるシステムである。一輪把持型移動ロボットを採用することにより、iCARTよりもロボットを小型化し、車両のホイールベースの多様性への適応を可能にした。

本論文では、これまでの複数の移動ロボットを用いた車両搬送システムよりも、よりコンパクトなシステムの構築を目的として、新たな車両搬送システムを提案する。レッカー移動が好例であるように、車両の構造上、パーキングブレーキを開放した状態ならば、一部の駆動輪を持ち上げるだけで、車両の移動が可能となる。このメカニズムに着目し、駆動輪把持型車両搬送システムを提案する。駆動輪把持型車両搬送システムは2台の一輪把

持型移動ロボット MRWheel によって構成される。前輪駆動車両を搬送する場合は、予めパーキングブレーキを開放した状態から、2 台のロボットが前輪を 1 輪ずつ持ち上げることにより車両を搬送する。すなわち提案するシステムでは、車両の受動的に回転するタイヤを可動支点として利用することにより、搬送のために持ち上げるべきタイヤの数を減らし、搬送に必要なロボットの台数の削減を図っている。本システムにより、iCART II と同様に iCART よりも小型なロボットを採用し、さらに iCART II よりも少数のロボットによる車両搬送の実現が期待できる。

提案するシステム特有の問題について述べる前に、従来の複数のロボットを用いた物体搬送システムに関する研究について述べる。複数のロボットを用いた物体搬送システムの研究は長く行われており、複数の双腕ロボットにより物体を持ち上げて搬送するシステムや複数の車両型移動ロボットに 1 つの物体を載せて搬送するシステム、異なるタイプのロボットにより地面に置かれた物体を押すことで搬送するシステムなど多くのシステムおよびそのための制御手法が提案されてきた。しかしながら従来の研究において搬送される物体は地面などの環境に対して拘束を受けずホロノミックな運動特性を持つことが前提となっていた。

提案するシステムの場合は、搬送される車両が接地するタイヤにより非ホロノミックな拘束を受ける。そのため非ホロノミック拘束を考慮して車両搬送システムを構築する必要がある。

そこで本論文では、従来の車両搬送システムよりもコンパクトな車両搬送システムの構築を目的とし、2 台の一輪把持型移動ロボットにより車両の駆動輪を持ち上げることにより車両を搬送するシステムのコンセプトと、車両の非ホロノミック拘束を考慮したシステムの制御手法について提案する。特に制御手法に関しては、非ホロノミックな車両を任意の位置へ搬送するための運動制御系の設計、非ホロノミック拘束を満たすロボットの軌道生成手法、運動制御のための車両とロボットの幾何学的パラメータの推定手法について提案する。

以上が本論文の第 1 章の内容である。以降、第 2 章から第 6 章までの各章の内容についてまとめる。

第 2 章では、第 1 章で提案した駆動輪把持型車両搬送システムについて、より詳細に説明するため、車両の搬送原理と一輪把持型移動ロボットのメカニズムをまとめた。まず車両の搬送原理について、前輪駆動車両と後輪駆動車両の非駆動輪の車輪はパーキングブレーキを開放した状態ならば自由に回転することから、駆動輪のみを持ち上げ、非駆動輪を可動支点として利用することで、車両を移動可能となることを説明した。さらに四輪駆動車両を含む特定の駆動方式の車両を搬送するために車両のブレーキ、変速機、ステアリング等が満たすべき条件をまとめた。特に 4 輪駆動車両は変速機をニュートラルにすることにより搬送可能になることを述べた。次に提案するシステムを構成する一輪把持型移動ロボット MRWheel の基本的なメカニズムについてまとめた。具体的には、移動機構、リフト機構、連結機構、センサ類の機能および制御方法についてまとめた。最後にこれらの要素を利用することで実現する、タイヤに対するロボットの把持位置の自動調心機能について紹介した。

第 3 章では、車両のホイールベースおよび車両とロボットとの位置関係が既知と仮定した場合の、車両搬送シ

システムの車両搬送制御手法の設計方法と新たに提案する軌道生成手法についてまとめた。まず本論文で提案する制御手法は、前輪駆動車両の搬送を対象としていることについて述べ、そのほかの駆動方式の車両に提案手法を適用する際の、車両の状態の条件をまとめた。続いて本システムを制御する上での基本となるシステムのモデル化について述べた。具体的には、車両の駆動輪の中点を車両座標系とし、その座標系に対して特殊な3輪車の運動学モデルを適用し、そのモデルに基づく制御手法により車両座標系の目標の運動を生成、そして車両座標系とロボット座標系との幾何関係に基づいて、車両座標系の目標の運動からロボット座標系の目標の運動を生成する。このモデルは、一般的な車両モデルが有する非ホロノミックなステアリング機構は持たず、車両座標系は全方向へ移動させることが可能である。そのため提案するモデルは運動の拘束条件が1つしか持たない。次にモデルに対する制御系の設計方法について述べた。ここで非ホロノミック拘束を満足する軌道の生成が問題となるが、まず現在の座標と最終的な目標座標から自動的に軌道が生成される PTP 制御系の設計方法について述べた。しかし PTP 制御系は現在の座標と目標座標のフィードバックにより目標速度を決定するため、目的地に近づくほど搬送速度が小さくなるため、搬送作業には適さない。そこで軌道追従制御系の設計方法と軌道生成法を提案した。軌道追従制御に関しては、金山らの対向2輪車のための軌道追従制御を参考とし、提案するモデルに適した新たな制御系を構築した。軌道生成法は、並進軌道を三角関数により構成される姿勢軌道に関するパラメトリックな関数で表すことにより、各軸の軌道を初期座標と目標座標を一階微分まで連続な1つの関数で記述する手法を提案した。そして予め車両のホイールベースおよび車両とロボットとの位置関係の情報をシステムに与えた実験により、どちらの手法を適用しても車両を目標の座標へ誘導可能なことを示した。

第4章では、車両のホイールベースが未知であり、車両とロボットとの位置関係が既知である場合における、ホイールベースの逐次推定手法と推定値に基づく車両搬送システムの運動制御手法について提案した。ホイールベースの値の取得方法として測域センサが挙げられるが、検出の難しさやノイズの理由から測域センサの利用は適切ではない。また既存の非ホロノミックシステムに対する寸法のパラメータの推定手法も提案されているが、本システムと一般的な非ホロノミックシステムの構造の違いから、そのまま適用することが難しい。提案するホイールベースの逐次推定手法では、まず力センサから車両の運動が拘束されるときに生じる拘束力を検出し、車両座標系周りにインピーダンス制御と適用することにより、拘束力に対してロボットを受動的に運動させる。提案手法は、その時のロボットの目標の運動と実際の運動の速度に関する偏差の情報を用いて、ホイールベースを推定し、リアルタイムで車両座標系の運動制御に適用するものであった。さらに提案する推定手法の収束性について述べた。提案する推定手法は、疑似的なホイールベースの推定誤差を用いることにより角速度が小さい時の運動のノイズに対してロバストな推定を可能としている。最後に搬送開始時に誤ったホイールベースの値を設定し、推定手法を適用しない場合と適用した場合の2つの実験を比較し、推定手法を適用した場合の方が車両の位置決め精度が改善されることを示した。またホイールベースの推定値の初期値にさまざまな値を適用し、どのよ

うな値を適用しても、実際のホイールベースの値の近傍に収束することを実験的に示し、提案するホイールベースの逐次推定法を用いた車両搬送制御の有効性を示した。

第5章では、車両のホイールベースと車両とロボットとの位置関係が未知である場合における、車両の大きさを含めた車両とロボットの幾何学的関係の逐次推定手法と推定値に基づく車両搬送システムの運動制御手法を提案する。提案する手法は第4章と同様に車両を搬送する際のロボットの速度情報をもとに位置関係に関する未知のパラメータを推定する。第4章とは異なり、ロボット同士の位置関係が未知であるため、そのような条件での2台のロボットの協調動作の実現が問題となり、これをロボット同士の位置関係が未知であっても適用可能なキャストの運動特性を用いた協調搬送制御を導入することで解決することを述べた。また本論文では、さらに車両の非ホロノミック拘束に対しても受動的に運動するように協調制御手法に修正を加えた。また第4章では1つのパラメータのみを推定したが、今回は複数のパラメータを推定する必要がある。そこで小菅らの拡張カルマンフィルタを用いた手法を応用し、複数のパラメータを同時に推定可能にした。本論文では移動ロボットの同士の位置関係に加え、車両の非ホロノミック拘束の拘束条件も推定可能にした。加えて、小菅らの方法では2つの物体の位置関係を導出するために双方の速度情報が必要であるのに対し、提案する推定手法は車両の速度情報を一切必要とせずに、車両とロボットの相対姿勢を推定できる。そして各種実験を通して、車両の大きさと車両とロボットの位置関係の推定手法の推定性能を確認し、最後に提案する位置関係推定手法により推定した値を逐次車両搬送制御に適用することによる効果を示す車両搬送のデモンストレーションを紹介した。

最後に第6章にて、本論文のまとめと今後の展望について述べた。

以上本論文では、2台の一輪把持型移動ロボットにより二輪駆動車両の駆動輪のみを持ち上げその車両を搬送するシステムを提案し、そして非ホロノミック拘束を受ける車両の軌道生成・運動制御と、車両搬送制御に必要な車両の大きさと車両とロボットとの幾何関係の取得を問題として、車両の大きさを含めた車両とロボットの位置関係の逐次推定手法と、非ホロノミック拘束を考慮した軌道生成手法および車両搬送制御手法を提案した。

論文審査結果の要旨

複数の移動ロボットを用いた車両搬送システムは、広い場所に車両を駐車するだけで車両を所定の場所に保管してくれる乗り捨て式機械式駐車場の実現、ホテルやレストランなどの車預かりサービスの自動化、工場などにおける完成車の移動の自動化など、多くの応用が期待されている。本研究では、より効率良い車両搬送を目ざし、2台の一輪把持型移動ロボットを用いた車両搬送システムを提案するもので、全編6章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。

第2章では、ホロノミックな全方向移動ベース、車輪を持ち上げることで車両を把持するリフター、リフターと全方向移動ベースを結合する連結部から構成されている一輪把持型移動ロボットを紹介するとともに、一輪把持型移動ロボット2台を用いた駆動輪把持型車両搬送システムを提案し、その原理と制御問題について考察している。これは、2台の一輪把持型移動ロボットによる車両搬送システムが、実現可能なことを示したもので、非常に重要な知見である。

第3章では、前章で議論した制御問題の定式化を行い、搬送物体が非ホロノミックな運動拘束を持つ制御問題となることを示すとともに、このような問題に対して従来から提案されているChained Systemを用いた制御系では軌道の収束性に問題があり、車輛搬送システムが構築できないことを示している。そこで、非ホロノミックな運動拘束条件を考慮した新しい軌道生成法と、生成した軌道に搬送車両を追従させる軌道追従制御系を提案し、実車両を用いて実験を行い、提案する制御系が本制御問題に対し有効であることを示している。これらは、有効かつ重要な成果である。

第4章では、搬送する車両のホイールベースの逐次推定法を用いた車輛搬送制御システムを提案し、実験によりその有効性を示している。提案する手法は、車両のホイールベースがわからなくても、車両の搬送が可能なことを示しており、提案するロボットの実用化に向けた重要な知見である。

第5章では、各ロボットと車両の幾何学的関係を、拡張カルマンフィルタを用いて推定する手法を提案すると共に、それを車両搬送制御システムに組み込み、実車両を用いた実験によって、その有効性を示している。これは提案するシステムの実用化に必要な、重要な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、2台の一輪把持型移動ロボットによる車両搬送システムを提案し、実車両を用いた実験を行い、その有効性を示したもので、バイオロボティクスおよび機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。