

氏名	かしわ ぎき こう し 柏 崎 耕 志
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	複数の一輪把持型移動ロボットを用いた車両搬送システム iCART II
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

日本の国土面積は約 37.8 万[km<sup>2</sup>]と非常に狭い上, 山林も多く, 人が生活するために利用できる土地も非常に狭い. さらに, 平成 21 年度の国土交通省の集計結果によると, 我が国の可住地面積は約 12.2 万[km<sup>2</sup>]であり, 国土面積の 3 割程度にしか満たない. この日本の国土面積に占める可住地面積の割合の低さは, 世界の国々と比較しても顕著である. その一方で, 自動車保有台数の増加に伴い, 駐車場の数が年々増加しているという現状もある. このように日本では, 駐車場が増え続けている一方, 国土面積が狭い上, 駐車場として利用できる土地の割合も少ないため, 土地の利用方法が問題となっている. 特に, 人口過密で地価の高い都市部においては, 深刻な問題である.

この問題を解決しようと, 我が国では, タワーパーキングやエレベータパーキングに代表されるような狭い土地に多くの車を収容することのできる機械式駐車場が開発され, 普及してきた. この機械式駐車場は, 通常, パレットと呼ばれるプレートの上に車を停め, 駐車場内の装置によりパレットごと車両を移動させ, 車両の出し入れを行う仕組みとなっている. 一般的にこのパレットは, 駐車効率を上げるために自動車と同程度の大きさとなっている. さらに, 機械式駐車場の多くは, 狭い土地を最大限に利用する構造となっており, 入出庫のために利用できるスペースが非常に狭い. これらの理由から, 機械式駐車場を利用するドライバーにはある程度の運転技術が必要とされるため, 運転技術の未熟な初心者や高齢者等のドライバーにとっては, 利用が困難な場合がある.

機械式駐車場の利用をより容易にする方法を考えると, 近年盛んに研究開発され一部の車種において実用化もされている駐車支援システムや自動駐車システムがある. しかし, 車載の外界センサやアクチュエータを用いて車両を自動走行させるこの方法に対して, 駐車場に設置したロボットを用いて車両を搬送する方法を考えると, 自動車に持たせた機能を利用するのではなく, 機械式駐車場と言う環境に対してロボット技術を適用するため, 新旧, 車種, 形状を問わず, 様々な車両を移動させられるという利点がある. さらに, すべての車輪を持ち上げ車両を搬送する場合には, 車両の非ホロミックな運動拘束の影響を受けずに操ることが可能となるため, 狭い

スペースでも自由自在に車両を搬送することができる。

これらのことを踏まえ、従来研究では、機械式駐車場での入出庫の自動化を目的として、2台の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。この iCART は、環境に設置したセンサにより得られる停車車両の位置情報に基づき2台の移動ロボットがその両側面に接近し、右と左の車輪2輪を持ち上げ、協調して車両を搬送するシステムである。また、2台の移動ロボットによりすべての車輪を持ち上げることによって、車両の非ホロノミックな運動拘束の影響を受けることなく、自由自在に搬送することができる。しかしながら、iCART で用いられるロボットは、その構造上、搬送車両のホイールベース長分の大きさが必要となるため、小型化が容易ではなかった。

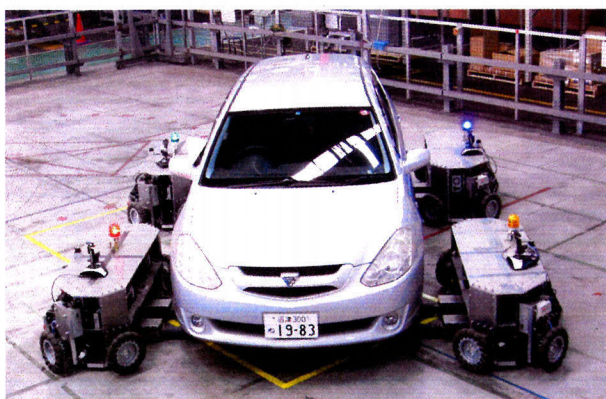


Fig. 1. iCART II.

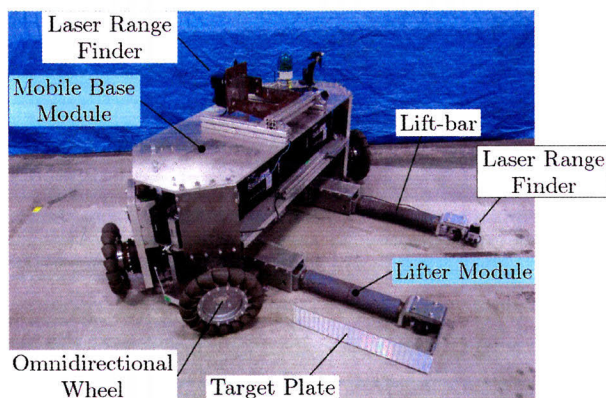


Fig. 2. MRWheel.

そこで、本研究では、機械式駐車場での入出庫を自動化することを目的として、より小型なロボットを用いた車両搬送システム iCART II (intelligent Cooperative Autonomous Robot Transporters - type II) を提案する。本論文は、以下のように、6章から構成されている。

第1章では、研究背景について説明し、機械式駐車場で用いられる車両搬送ロボットの小型化の必要性について述べる。そして、より小型な車両搬送ロボットを開発することを目的とし、それを実現するための新たな車両搬送システム iCART II を提案する。この車両搬送システム iCART II は、基本的には4台のロボットで1台の車両を搬送するシステムであるため、4台のロボットは搬送車両に大きな負荷を加えることなく、協調して運動する必要がある。そこで、複数ロボットによる物体の協調搬送と車両の自動走行に関する関連研究を紹介し、提案する車両搬送システムによる車両の移動方法の位置付けを示す。

第2章では、第1章で提案した車両搬送システム iCART II のコンセプトについて説明し、それを実現するための一輪把持型移動ロボット MRWheel (Mobile Robot for a Wheel) を提案する。まず、iCART II のコンセプトと諸元を示し、iCART II の機械式駐車場以外での応用例についても説明する。そして、MRWheel を構成する3つのモジュール (リフター、移動ベース、連結部) のメカニズムについて説明する。リフターモジュールは、2

本のリフトバーと呼ばれる長いローラを有し、それらの距離を変更することにより、1つの車輪を持ち上げ支持することができるような機構から構成されており、車両のボディを傷付けることなく車輪を持ち上げる機能と車両の全重量を支持する機能を持つ。また、移動ベースモジュールは全方向移動車輪を4つ用いた全方向移動機構であり、タイヤを支持するリフターに車両搬送のための力を加える機能を持つ。そして、連結部はリフターと移動ベースを連結するモジュールであり、1軸の引張圧縮方向の力を計測可能なロードセルを内蔵する3つのリンクにより構成され、リフターと移動ベースとの間に生じる力/モーメントを計測する機能を持つ。最後に、把持している車輪からリフターに作用する力に対してインピーダンス特性を持つよう移動ベースを制御することにより、タイヤに大きな負荷を加えることなく、ホイールベース方向のタイヤの中心位置を移動ベースの運動により割り出し、タイヤを持ち上げ支持するための手法を提案し、実験によりその有効性を確認する。

第3章では、複数の移動ロボットによる車両の協調搬送を実現するための車両座標系制御型の協調搬送アルゴリズムを提案する。今回開発したMRWheelのような車輪型移動ロボットでは、車両搬送時に、車輪のスリップなどにより、オドメトリを用いて算出したロボットの位置/姿勢と実空間におけるロボットの位置/姿勢との間に大きな誤差（運動誤差）が生じるため、すべてのロボットに目標の搬送軌道を与え制御したとしても、車両に大きな力を加えてしまう場合や、車両を落下させてしまう場合が懸念される。そこで第3章では、その運動誤差の影響を低減するために、従来のリーダー・フォロワ型の分散協調制御を拡張し、各ロボットに働く相互作用力（内力）に基づく運動誤差推定手法を提案する。まず、過大な力を加えることなく車両を搬送するために、すべての車輪の幾何学的な重心位置に設定した代表点（車両座標系の原点）回りに仮想的なインピーダンス特性を持つようリーダーとフォロワを制御する手法について述べる。そして、「リフターと搬送車両からなる系」に摩擦力などの外力が働かないものと仮定して、フォロワが1台の場合の運動誤差推定手法について説明し、その結果を仮想リーダーの概念を用いてフォロワがn台の場合に拡張する。さらに、「リフターと搬送車両からなる系」に作用する摩擦力などの外力を補償するための“モデルに基づく外力補償手法”と“フォロワ間通信を用いた外力補償手法”を提案する。最後に、4台のMRWheelを用いて実車両の搬送実験を行い、第3章で提案する車両座標系制御型の協調搬送アルゴリズムとモデルに基づく外力補償手法、フォロワ間通信を用いた外力補償手法の有効性を確認する。

第3章で提案した車両座標系制御型の協調搬送アルゴリズムでは、それぞれのロボットの制御点が搬送車両に設定した代表点に定義されているため、力情報の測定位置（把持点）と制御点の間にオフセットが存在する。この把持点と制御点間のモーメントの座標変換によって生じるセンサノイズの増幅により、回転のインピーダンスパラメータを小さくすることができなかつたため、フォロワにわずかな運動誤差が生じた場合でも、リーダーが大きなモーメントを負担することになっていた。そこで、第4章では、その力センサのノイズの増幅による影響を低減するために、従来提案された各把持点まわりにロボットを制御するリーダー・フォロワ型の協調搬送アルゴリズムを拡張し、車両搬送のための把持座標系制御型の協調搬送アルゴリズムを提案する。つまり、第4章で提案

する協調搬送アルゴリズムでは、それぞれのロボットの制御点は各ロボットの把持点に定義される。さらに、第3章と同様にして、把持座標系制御型の協調搬送アルゴリズムのための、「リフターと搬送車両からなる系」に作用する外力の“モデルに基づく補償手法”と“フォロワ間通信を用いた補償手法”を構築する。最後に、それぞれの外力補償手法を適用した場合の実車両の搬送実験を行い、第4章で提案する把持座標系制御型の協調搬送アルゴリズムの有効性を確認する。

第5章では、まず、iCART II を用いて機械式駐車場での入庫を自動化するために必要な要素技術について説明する。1つ目の技術は、環境に設置したセンサにより、停車スペース内の任意の位置に停車された車両の位置姿勢を測定する技術である。2つ目の技術は、各ロボットのリフトバーの先端に搭載するレーザレンジファインダを用いた停車車両への接近のためのフォーメーション制御技術である。3つ目の技術は、車両の両側面に接近した状態から、そのレーザレンジファインダを用いて自身が把持すべきタイヤを判別し、ロボットとタイヤ間の位置関係を算出する技術である。これにより、自身が把持すべきタイヤに対する自身の位置を補正し、タイヤの両脇にリフトバーを挿入することが可能となる。4つ目の技術は、車両を持ち上げた状態で、そのレーザレンジファインダを用いてロボット間の位置関係を測定する技術である。この技術により、大きさが未知の車両でも搬送することが可能となる。そして、これらの要素技術と第4章で提案した車両の協調搬送アルゴリズムを統合することにより、機械式駐車場への入庫を模擬した実験を行い、iCART II のコンセプトを実証する。

最後に、第6章において、本論文の結論と今後の展望について述べる。

# 論文審査結果の要旨

我が国では、多くの機械式駐車場が用いられている。機械式駐車場は、駐車効率が低い反面、利用するにはある程度の運転スキルが必要である。近年、高齢者ドライバーの増加に伴い、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が望まれている。そこで本論文は、機械式駐車場等における車両の移動ならびに定置を目的とし、各車輪を把持する4台の小型移動ロボットによる車両搬送システム iCART II (intelligent Cooperative Autonomous Robot Transporters II) 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、4台の一輪把持型移動ロボット MRWheel (Mobile Robot for a Wheel)が協調して車両搬送を実現する iCART II を提案するとともに、その機構について説明している。提案するシステムは、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とともに、サスペンションならびに力覚センサの機能を有する連結部から構成されている。提案するシステムは、4台の移動ロボットを用いることによって、車両搬送に必要な機能がコンパクトに実現できることを示したもので、非常に重要な成果である。

第3章では、新しいリーダー・フォロワタイプの分散協調制御アルゴリズムを提案し、実験によって、4台の移動ロボットによる車両搬送が実現できることを示している。本制御アルゴリズムは、車両搬送中に、搬送システムに作用する摩擦や慣性力の影響を低減することによって、4台の移動ロボットによる車両の協調搬送を実現したもので、有効かつ重要な成果である。

第4章では、車両の把持点回りに、各ロボットの制御系を構成することによって、力情報に含まれるノイズの影響を低減できることを示すとともに、実験によって、その有効性を示している。これは、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、提案する iCART II を用いて、機械式駐車における車両の入庫システムを構築し、実車両を用いた実験を行い、提案するシステムが機械式駐車場に適用可能なことを示したものである。これは提案するシステムの実用化に向けた重要な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、4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、4台の移動ロボットと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。