

二台一組の薄型ロボットを用いた無人車両搬送システム

Unmanned Vehicle Transportation System Using Pair of Thin Robots

近 藤 修 平¹

Shuhei KONDO

鹿 野 直 人²

Naoto SHIKANO

益 田 晃 次¹

Koji MASUDA

室 園 智 紀¹

Tomoki MUROZONO

要 旨

人に代わってクルマの搬送をおこなう無人車両搬送システムを考案した。幅広い車種や、自動運転機能が搭載されていない車両にも適用できるように、車両の搬送にはクルマ本体の性能に制約を受けない車両搬送ロボットを用いることとした。また、屋内や都市部の狭小スペースでも車両を搬送するため、二台一組のロボットが車両の下を自在に移動し、対象車両のタイヤを同時に持ち上げ、協調しながら全方向へ自由自在に搬送をおこなう方式とした。システムの実現可能性を検証することを目的とし、車両搬送ロボットの試作機開発をおこなった。開発した試作機を用いて、狭小スペースにおける動作検証実験をおこない、所望の搬送動作が実現できていることを確認した。

ABSTRACT

An unmanned vehicle system that transports cars in place of humans was devised. To enable application to a wide range of vehicle types including those without automated driving functions, vehicle transportation robots that are not constrained by car body performance are used for vehicle transportation. Additionally, in order to transport vehicles even in limited indoor and urban spaces, the system employs a pair of robots that move freely underneath the target vehicle, lift up the tires of the vehicle at the same time, and cooperate to achieve free omni-directional transportation. A prototype of the vehicle transportation robot was developed to verify system feasibility. Operation verification experiments were conducted using the developed prototype in a limited space, and confirmed realization of the desired transport operation.

1. はじめに

Honda は 2030 年ビジョンにおいて、「すべての人に、『生活の可能性が広がる喜び』を提供する」というステートメントを掲げている⁽¹⁾。クルマは、生活の可能性を広げ、移動のニーズを簡単かつ迅速に満たす便利なツールである。しかし、クルマの利用には、駐車や給油、充電など、移動には直接関係のない様々な手間が存在する。

特に、駐車に対して苦手意識や不安を感じるドライバーは多く、その割合は全ドライバーの約 3 割に上る⁽²⁾。また、初心者ドライバーの過半数が駐車場や車庫での運転に危険を感じている⁽³⁾。このように、駐車という行為がクルマでの移動に対する心理的障壁となっている。日本における全交通事故のうち、駐車場内における事故の割合は約 3 割を占め⁽⁴⁾、駐車に対する苦手意識や不安は交通事故の

実態にも表れている。

駐車を肩代わりしてくれるサービスとして、欧米ではパーレーキング (VP) が広く普及している。VP は、自身が運転してきたクルマのキーを係の人 (Valet) に預けると、代わりにクルマの駐車 (Parking) をおこない、外出時には出入口までクルマを届けてくれるサービスである。VP はドライバーにとって便利なサービスである反面、人が駐車をおこなうことに変わりはなく、高級レストランやホテルなど限られた環境でしか運用されていない。

人がおこなう駐車を直接的に支援する手段としては、駐車枠付近での使用を前提としたパーキングアシスト機能搭載車両が既に製品化されており、ドライバーの心理的負担低減や駐車場内事故の削減に寄与している⁽⁵⁾。

近年、自動運転と VP を組み合わせた自動パーレーキング (AVP) にも注目が集まっている。AVP とは、あらか

¹ 本田技研工業株式会社

E-mail: shuhei_kondo@jp.honda

² デザインセンター

じめ予約した自動バレーパーキング対応駐車場へ行き、駐車場の中でも隣接施設などへのアクセスが便利な位置で降車し、ユーザがスマートフォンなどの端末を使って自動駐車のリクエストをすると、ドライバーが立ち会うことなく、無人で自動的に駐車してくれるサービスである⁽⁶⁾。AVPに関しては、現在、技術開発が盛んにおこなわれているが、AVPで要求されるレベル4程度の自動運転車が世の中に普及するまでには数十年を要するという報告もある⁽⁷⁾。

この課題に対して、空港の駐車場など主に大規模な屋外駐車場を使用することを目的とした大型の車両搬送ロボットが実用レベルで運用され始めている⁽⁸⁾。ロボットを用いることで、必要な機能やインフラを全て設備側に持たせることができ、自動運転機能が搭載されていない車両でも自動駐車が可能となる。

一方、駐車が容易ではなく、駐車可能台数の少ない屋内や都市部の狭小スペースでの運用を想定したシステムはまだ実用化されていない。その要因としては、ロボットの小型化や緻密な制御が容易ではないことなどが挙げられる。そこで筆者らは、狭小スペースにおいても運用可能な無人車両搬送システムを考案した。

本稿では、システムのコンセプトに加え、システムの実現可能性を検証することを目的として、その中心的役割を担う車両搬送ロボットの試作機開発と、試作機を用いた車両モデルの搬送動作検証実験について述べる。

開発した車両搬送ロボットの試作機を Fig. 1 に示す。



Fig. 1 Prototype of robot

2. 開発のねらい

狭小スペースでも運用可能な AVP を想定した無人車両搬送システムの適用例を Fig. 2 に示す。

ドライバーは広い乗降スペースで車両を乗り捨てることのできる。ドライバーの降車後は、ロボットがクルマの車種やサイズ、位置を自動で認識し、二台一組で協調しながら無人の車両を駐車エリアまで搬送する。駐車エリアでは、人が乗り降りするスペースが不要なため、管理サーバからの指令によって高密度な配置をおこなうことができる。出庫の際は、ドライバーのオーダーに合わせ、車両を乗降スペースまで搬送する。この一連の動作により、駐車に関わる手間やストレスの削減、駐車効率や安全性の向上を図る。

このようなサービスを実現し、人々により快適なカーラ

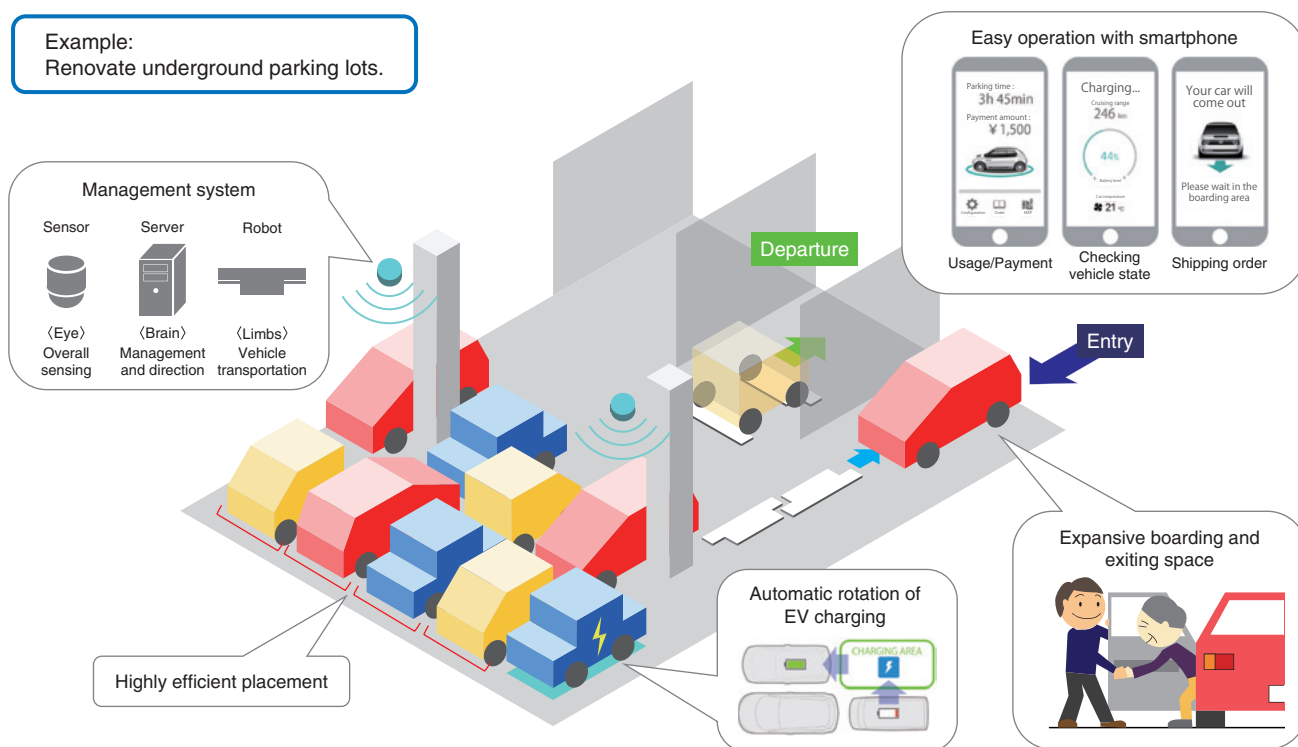


Fig. 2 Image of AVP operation using robots

イフを提供するため、考案した無人車両搬送システムにおいては、以下の二点を開発のねらいとした。

- (1) 狭小スペースで運用可能なこと
- (2) 多様な車種に適用可能なこと

3. 車両搬送システムのコンセプト

3.1. 基本コンセプト

ロボットを用いた車両搬送動作の概念図を Fig. 3 に示す。一台のロボットで搬送をおこなう場合、ロボットそのものが大きくなってしまい、狭小スペースでの運用が容易ではない。そこで、二台一組のロボットが車両の下を自在に移動し、対象車両のタイヤを同時に持ち上げ、協調しながら全方向へ自由自在に搬送をおこなう方式とした。

3.2. 狭小スペースでの運用

車両搬送時は、Fig. 3 に示すように、車両の下にロボットが収まることで元の車両のサイズを保ち、単体動作時は、Fig. 4 に示すように、車両下のスペースや、狭いデッドスペースを活用した移動や保管をおこなうことで省スペース化を図る。また、クルマは一般的に前輪を操舵することで方向転換をおこなうが、ステアリングの切り角には限界があるため、移動先によっては複数回切り返しをおこなう必要があり、狭小スペースにおける移動には不向きである。そこで、ロボット側に全方向移動機構を搭載し、真横移動やその場旋回などの動作を可能とすることで、狭小スペースにおいてクルマの移動性能に依存しない自由度の高い動作をおこなう。

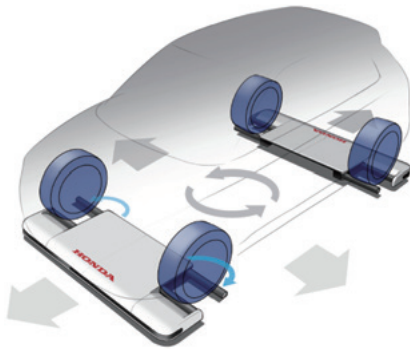


Fig. 3 Concept scheme of transportation by robots

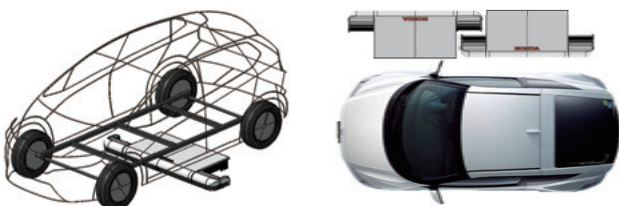


Fig. 4 Efficient use of space

3.3. 多様な車種への適用

本ロボットは、一般的な軽自動車から大型車への対応を想定している。幅広い種類の車両を搬送するためには、車種やサイズの違いに柔軟に対応できるシステムが必要である。本節では、多様な車種への適用を可能とするための車両の昇降方式と各設計要件について述べる。

3.3.1. 昇降方式

車両の昇降は、Fig. 5 に示すように、ロボットに搭載している二本のアームでおこなう。二台のロボットが車両の下に進入後、左右それぞれのタイヤに対し、回転アームを水平面で180度回転させ、固定アームと挟み込むことで車両を持ち上げる。この際、Fig. 6 に示すように、アームの外周部がフリーに回転し、タイヤとの接触摩擦を低減する構造としている。

また、計測や動作に誤差があった場合でも、Fig. 7 に示すように、タイヤに先当たりするアームによってロボット本体に回転力が生じ、車軸と平行な位置にアライメントされることで、安定した昇降をおこなうことができる。

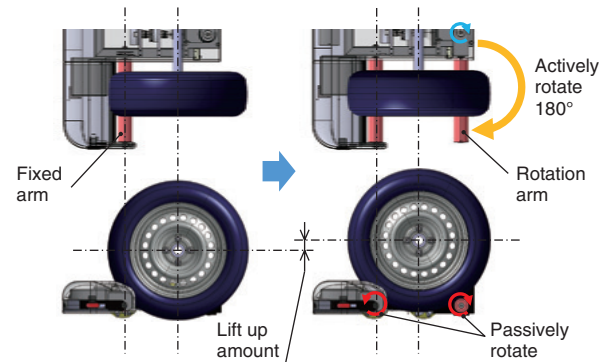


Fig. 5 Sequence of lift up motion

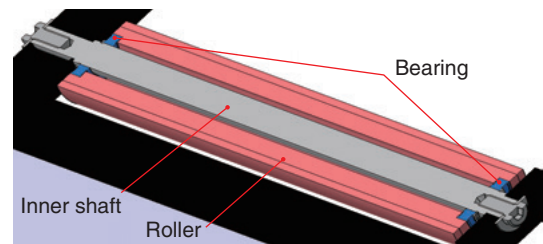


Fig. 6 Sectional view of arm



Fig. 7 Self-alignment motion

3.3.2. 設計要件

本項では、日本の道路運送車両法や保安基準を参考に、多様な車種へ適用するためにロボットに求められる各要件と、要件に対する考え方について述べる。

トレッド幅に関して、明確な保安基準は定められていないが、全幅に関しては、軽自動車で 1480 mm 以下、5ナンバー車で 1700 mm 以下、3ナンバー車で 2500 mm 以下と道路運送車両法により定められており、タイヤ幅を含めた外寸はこの数値以下でなければならない。本ロボットでは、Fig. 8(a) に示すように、タイヤの搭載位置に、全対象車種の最小タイヤ内寸、最大タイヤ外寸に対応できるようなマージンを持たせることで、車種ごとの違いに対応する方式とした。

最低地上高に関しては、保安基準において空車状態で 90 mm 以上と定められているが、一般的な車両の最低地上高は 140 mm 前後のことが多い。ロボットの厚みを 120 mm 以下に収めることができれば、日本車における対象車種の 9 割程度をカバーできる。

ホイールベースに関して、明確な保安基準は定められていないが、全長に関しては、軽自動車で 3400 mm 以下、5ナンバー車で 4700 mm 以下、3ナンバー車で 12000 mm 以下と道路運送車両法により規格が定められており、ホイールベースがこの値を上回ることはいない。本ロボットでは、Fig. 8(b) に示すように、二台のロボット間距離をホイールベースに合わせ、任意の位置に制御することで、どんな全長の車両であっても理論上は搬送可能である。

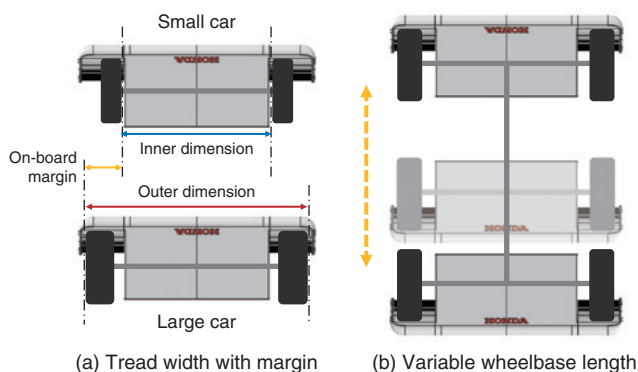


Fig. 8 Supports any size

4. 試作機開発

4.1. 検証項目

狭小スペースにおいて、車両モデルの搬送動作を検証するための試作機を開発した。検証項目を以下に示す。

- (1) アーム回転機構による、安定したタイヤの昇降動作
- (2) ロボット二台間のリアルタイム通信による、動作タイミングの同期と車両の協調搬送

- (3) その場旋回や真横移動などの全方向移動による、狭小スペースでの運用

4.2. 車両モデル

検証に使用する搬送用の車両モデルを Fig. 9 に示す。本モデルは、軽自動車と大型車の中間サイズに位置する普通車の中で、広く普及している FIT (2013 年モデル) をベースに製作した。アルミ製のベースフレームに、搬送中のロボットの動作が把握しやすいよう、ボディの外形をかたどった真鍮製のワイヤーフレームと実車用のタイヤを組み合わせることで構成されている。モデルの外形は全長 4000 mm × 全幅 1700 mm × 全高 1500 mm、最低地上高は 210 mm、重量は約 200 kg である。

4.3. 機構設計

本試作機は、3 章で定めた要件をベースとしているが、Fig. 9 の車両モデルを用いて 4.1. 節で提示した検証項目を確認する上で必要十分なスペックとした。試作機のハードウェアを Fig. 10 に、諸元を Table 1 に示す。

4.3.1. 移動機構

車輪にはメカナムホイール⁽⁹⁾を採用した。外観を Fig. 11 に示す。メカナムホイールは、四輪をそれぞれ独立で制御することにより、全方位への自由自在な移動が可能である。車輪の回転方向による本体の移動方向を表す図を Fig. 12 に示す。近年では研究領域に留まらず、重量物搬送用の無人搬送車にも利用され始めている⁽¹⁰⁾。メカナムホイールにより、クルマでは実現が容易ではない真横移

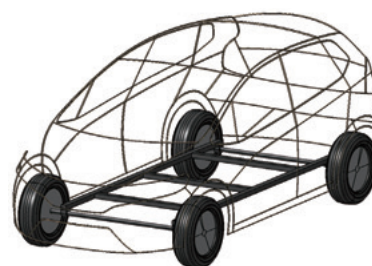


Fig. 9 Wire frame model for experiment

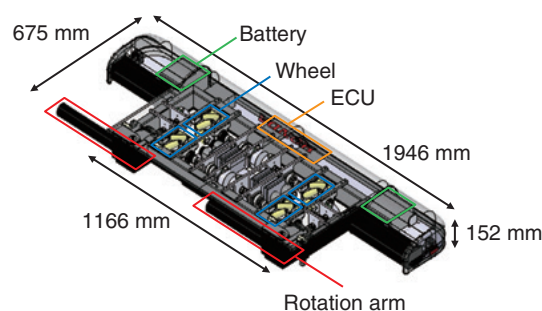


Fig. 10 Appearance of robot prototype hardware

Table 1 Specifications

Weight [kg]		80 / 1 unit
Forward speed [m/s]		Max. 1.9
Withstand load [kg]		800 / 2 units
Actuator		Wheel x 4, Arm x 2
Motor	Type	Brushless DC motor
	Performance [W]	260
Battery	Type	Li-Fe
	Capacity	24 V x 36 Ah
CPU		Renesas RX62G
Control period [ms]		10

動やその場旋回といった動作をおこなうことで、切り返しに必要なスペースの削減と、高密度な搬送を図る。

4.3.2. アーム機構

アームの駆動機構にはベベルギアボックスを採用しており、モータトルクの増幅と、回転軸を 90 度異なる方向へ伝達する役割を担う。また、185/55R16 のタイヤサイズで、昇降量がタイヤ下端から路面までの距離で 30 mm となるよう固定アームと回転アーム間の距離を設定した。

4.4. 制御設計

本節では、車両搬送動作の実現に必要な、ロボット単体

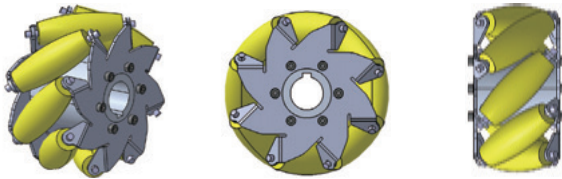


Fig. 11 Appearance of mecanum wheel hardware

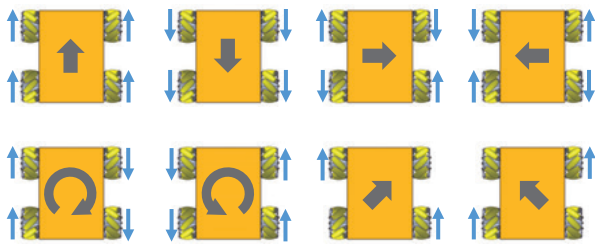


Fig. 12 Moving direction by mecanum wheel

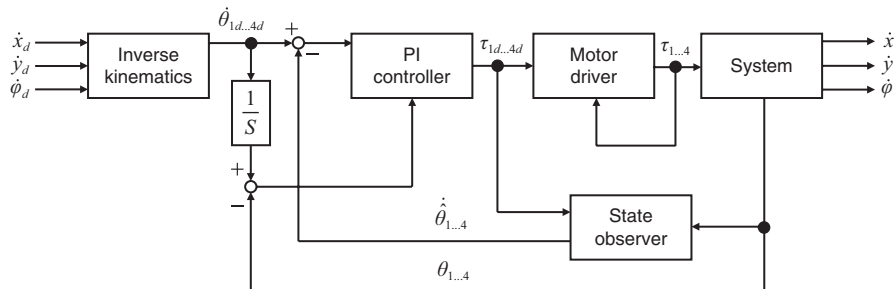


Fig. 14 Block diagram of control system

の運動制御と、ロボット二台間の同期制御について述べる。

4.4.1. 運動制御

ロボットの運動学モデルを Fig. 13 に示す。ここで、 ϕ は絶対座標系 Σ_w から見たロボット本体の回転角度、 x, y はロボット座標系 Σ_{RB} の原点位置、 v_1 から v_4 はそれぞれの車輪の接線速度である。ロボットの逆運動学を式 (1) に示す。目標とする速度 $\dot{x}, \dot{y}, \dot{\phi}$ を与え、行列演算をおこなうことにより v_1 から v_4 が導出される。

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & W+L \\ 1 & 1 & -(W+L) \\ -1 & 1 & -(W+L) \\ 1 & 1 & W+L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (1)$$

また、式 (2) を用いて車輪の接線速度 v を角速度 $\dot{\theta}$ に変換している。ここで、 r は車輪の半径である。

$$\dot{\theta} = \frac{v}{r} \quad (2)$$

制御システムのブロック線図を Fig. 14 に示す。ロボットの速度 $\dot{x}, \dot{y}, \dot{\phi}$ を制御量、車輪のモータトルク $\tau_{1..4}$ を操作量とし、位置の累積誤差低減のため PI 制御を適用した。 $\dot{x}_d, \dot{y}_d, \dot{\phi}_d$ に任意の目標速度を与えることで、その速度に追従するよう制御をおこなう。なお、車輪の回転角はエンコーダを用いて計測し、角速度は状態オブザーバを用いて推定した値を用いた。

4.4.2. 同期制御

独立した二台のロボットを用いて車両を搬送するためには、ロボットが協調して動作することが求められる。本システムでは、一台のロボットを親機、もう片方を子機と

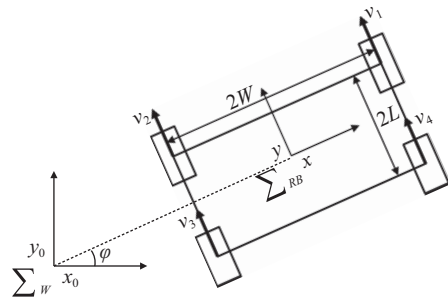


Fig. 13 Kinematic model of robot

して定義し、互いの作動状況が無線通信によって確認しながら車両搬送動作をおこなう。具体的には、Fig. 15に示すように、車両搬送時の動作タスクを複数のステップに分割し、各ステップの開始前に現在のステップにおける状況や故障状態の相互確認をおこない、次のステップの開始タイミングを同期することで協調搬送をおこなう。本システムでは、有限状態機械を用いて動作のモデル化をおこなった⁽¹¹⁾。なお、各ステップの遷移は以下の(1)から(3)の全ての条件を満たす場合に発生する。

- (1) 現在ステップにおけるタスクが完了したとき
- (2) 二台のロボットがそれぞれ同じ状態にいるとき
- (3) 一方のロボットから現在ステップのタスク完了コマンドを受信したとき

何らかの要因で作動不能または通信が途絶した場合は、フェールセーフとして互いに動作を停止する仕様とした。

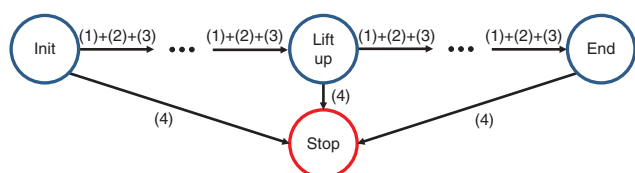


Fig. 15 Example of state flow diagram

5. 動作検証実験

開発した試作機を用いて、車両モデルの昇降動作と車両搬送動作の検証実験をおこなった。本章では各実験の実施内容と結果について述べる。

5.1. 車両昇降動作

本実験では、4.1. 節(1)で示した通り、基本的な昇降動作に加え、ロボット単体移動時に制御誤差があった場合の昇降動作の検証をおこなった。昇降動作の実験の様子をFig. 16に示す。ロボットが車両の下に進入後〔図中(1)〕、2本のアームを水平面で180度回転させ〔図中(2)と(3)〕、タイヤを挟み込み、車両を持ち上げることで、ねらい通り30 mmの昇降動作が実現できた〔図中(4)〕。また、Fig. 17に示すように、進入時に片側120 mm程度誤差が生じて、アームの回転力によってロボットの姿勢がアライメントされ、安定した昇降動作が実現できた。

5.2. 車両搬送動作

5.2.1. 動作計画

本実験では、4.3 m × 7 m という、クルマの操舵だけでは駐車容易ではない屋内の狭小スペースにおいて、縦列駐車を想定した動作をおこなった。Fig. 18にロボットの動

作順序と経路を示す。図中(1)に示すように、車両モデルが一台分収まるターゲットグリッドに対し、車両モデルが4 m離れた位置に90度回転した状態で配置されており、ロボットは車両モデルから真横に2 m離れた位置で動作を開始する。なお、ロボットの移動軌道にはPTP制御⁽¹²⁾を適用した。ロボットが通る経路点をあらかじめ設定し(図中緑点)、設定した複数の各経路点間を、五次多項式⁽¹³⁾を用いて補間している。

5.2.2. 実験結果

搬送動作の実験の様子をFig. 19に示す。

図中(2)と(3)より、二台のロボットが同期しながら真横移動と後進移動を組み合わせ、それぞれ車両の下に進入できていることがわかった。

図中(4)より、車両モデルのタイヤとロボットの固定

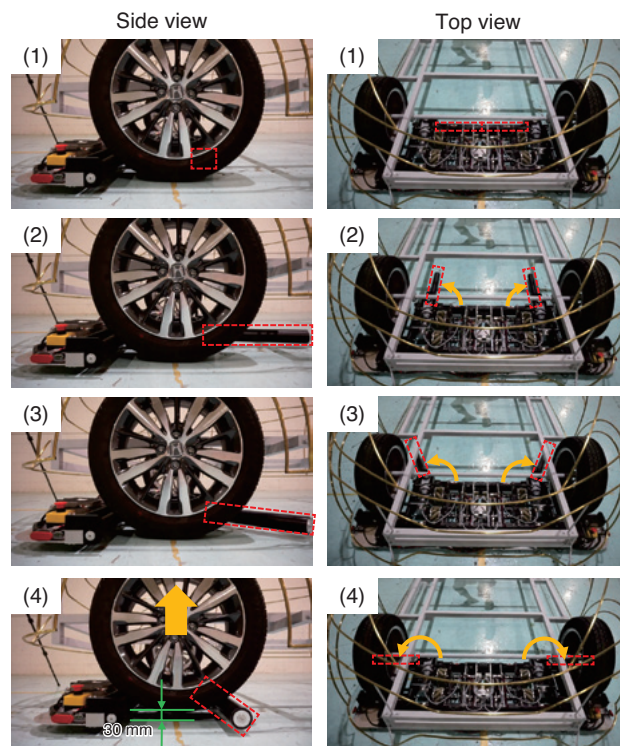


Fig. 16 Lift up motion by prototype

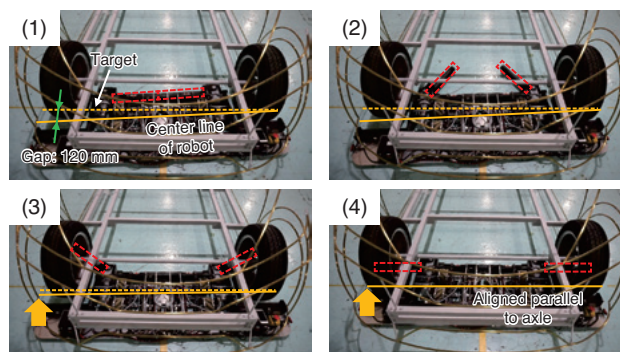


Fig. 17 Self-alignment motion by prototype

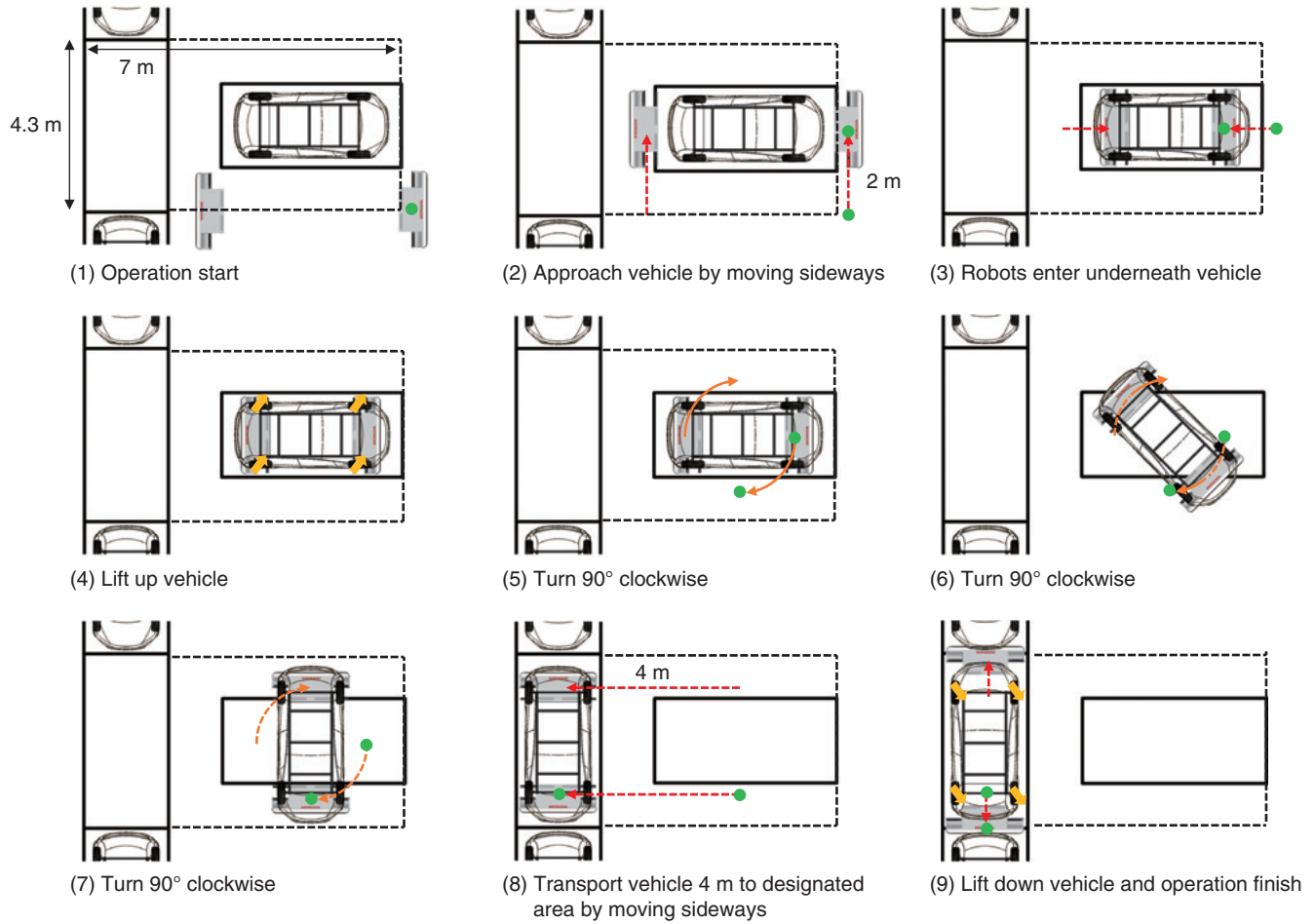


Fig. 18 Motion planning for experiments

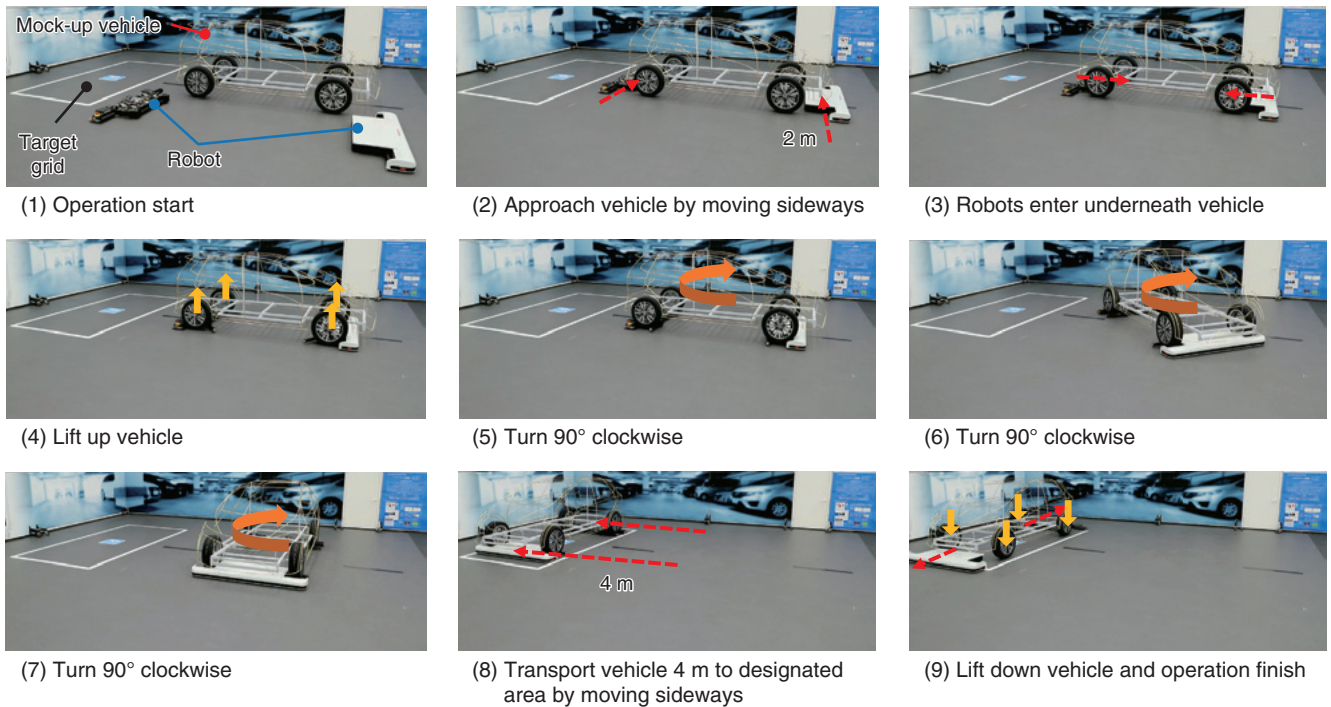


Fig. 19 Cooperative transportation by prototype

アームの接触を検知後、同期しながら回転アームを 180 度回転させることで、車両モデルの水平状態を保ちつつ昇降できていることがわかった。

図中 (5) から (7) にかけて、二台のロボットが車両を協調搬送しながら円軌道を描くことで、車両モデルの 90 度その場旋回が実現できていることがわかった。

図中 (8) より、車両の回転角度 90 度を保ちながら、真横移動で車両を協調搬送し、ターゲットグリッド内に正確に縦列駐車できていることがわかった。

以上より、ロボットを用いた車両の協調搬送動作と、全方向移動動作が実現できていることを確認した。これにより、車両の切り返しや、切り返しに必要なスペースを削減し、狭小スペースにおける車両の効率的な搬送が可能であることが検証できた。

6. まとめ

無人車両搬送システムのコンセプトを提示し、システムの中心的役割を担う車両搬送ロボットの考案と、動作原理検証のための試作機開発をおこなった。試作機を用いた動作検証実験によって以下の機能の有効性を確認し、「狭小スペースで運用可能なシステム」というコンセプトの妥当性を示した。

- (1) 二台一組の薄型ロボットによる、協調した車両昇降及び搬送動作
- (2) その場旋回や真横移動などの全方向移動動作による、狭小スペースでの車両搬送動作

参考文献

- (1) <https://www.honda.co.jp/sustainability/report/pdf/2019/Honda-SR-2019-jp-016.pdf>, 2021/2/16
- (2) <https://www.park24.co.jp/news/2021/02/20210209-1.html>, 2021/2/16
- (3) https://from.sonysonpo.co.jp/topics/pr/2012/07/20120710_1.html, 2021/2/16
- (4) <https://www.sonpo.or.jp/report/publish/bousai/ctuevu00000053xr-att/parking.pdf>, 2021/2/16
- (5) <https://www.honda.co.jp/tech/auto/hondasmart-parking/>, 2021/2/16
- (6) 一般財団法人日本自動車研究所:平成 28 年度スマートモビリティシステム研究開発・実証事業:自動パーキングの実証及び高度な自動走行システムの実現に必要な研究開発成果報告書, p. 5-6, (2017)
- (7) 富士キメラ総研:2020 自動運転・AI カー市場の将来展望, 300 p., (2020)
- (8) <https://stanley-robotics.com/>, 2021/2/16
- (9) DE2354404A1, A (1974)
- (10) <https://www.kuka.com/en-us/products/mobility/mobile-platforms/kuka-omnimove>, 2021/2/16
- (11) 岡留剛:第 2 章, 有限状態オートマトン, 例解図説オートマトンと形式言語入門, 森北出版株式会社, p. 19-59, (2015)
- (12) 有本卓:ロボット制御系の設計, 日本ロボット学会誌, 4 巻 4 号, p. 401-409, (1986)
- (13) 川崎晴久:第 7 章, ロボットの位置/軌道制御, ロボット工学の基礎, 森北出版株式会社, p. 110-111, (2012)

■ 著 者 ■



近 藤 修 平



益 田 晃 次



鹿 野 直 人



室 園 智 紀