

## 複数ロボットを用いた車両搬送システム iCART\* (第2報, 分散協調搬送アルゴリズム)

遠藤 央<sup>\*1</sup>, 小菅 一弘<sup>\*2</sup>, 廣瀬 健治<sup>\*3</sup>  
平田 泰久<sup>\*4</sup>, 菅原 雄介<sup>\*4</sup>  
鈴木 公基<sup>\*5</sup>, 神林 隆<sup>\*5</sup>

### A Car Transportation System Using Multiple Coordinated Robots : iCART (2nd Report, A Distributed Coordination Control Algorithm)

Mitsuru ENDO<sup>\*6</sup>, Kazuhiro KOSUGE, Kenji HIROSE,  
Yasuhisa HIRATA, Yusuke SUGAHARA,  
Koki SUZUKI and Takashi KANBAYASHI

<sup>\*6</sup> Department of Mechanical Engineering, Nihon University,  
1 Nakagawara, Tokusada, Tamura-machi, Koriyama-shi, Fukushima, 963-8642 Japan

We proposed a novel car transportation system termed as iCART (intelligent Cooperative Autonomous Robot Transporters). This system transports cars using two mobile robots that move in coordination. In this paper, a leader-follower type decentralized motion control algorithm considering the effect of rolling friction at the contact of the end-effector with the ground is proposed. The consideration of the rolling friction effect is needed, because an end-effector of the robot is grounded for supporting weight of a car. The proposed algorithm was applied to the experimental system, and experiments were done. Experimental results illustrate the validity of the proposed algorithms.

**Key Words:** Car Transportation System, Multiple Robot Coordination, Distributed Control

#### 1. はじめに

日本の国土面積は2007年度の国土交通省の調べによると377,835[km<sup>2</sup>]であるが, その面積の7割が山岳や森林, 河川, 湖畔であり, 居住可能面積は112,343[km<sup>2</sup>]と限定される。また同年度の調査では, 人口は127,767,944[人]である。居住可能面積から算出した人口密度は1052.95[人/km<sup>2</sup>]となり, 都市国家等を除外すると世界第1位となる。

一方, 国民の2人に1人が自動車を所有しており, 2007年度に登録されていた車両数は79,306,033[台]にのぼる。前述したように国土面積が極めて限られているため, これらの車両を駐車する場所の確保が困難になる。特に人口過密で地価が高い都市部においては, これは深刻な問題に成り得る。

このため, 限られた土地を有効に利用し, 駐車スペースを確保する必要がある。そのために, 車を縦方

向に積み上げることにより車両1台分の面積に複数台の車両を駐車し, 効率の良い駐車を実現する, タワー・パーキングやエレベータ・パーキング等の様々な機械式駐車場が開発され, 広く用いられてきた。しかしながら, 機械式駐車場は入庫及び出庫のために使用できる空間や駐車スペースが狭いため, 運転手に高度な運転技術を要求する。これにより, 初心者や高齢者だけでなく, 運転を得意としない運転手には忌避される傾向がある。このため, 機械式駐車場より土地の利用効率が低い立体駐車場やコインパーキングなどのほうが普及しているのが現状である。

これに対して著者らは, 複数分散協調ロボットを用いた車両搬送システム iCART (intelligent Cooperative Autonomous Robot Transporters) を提案している<sup>(1)(2)</sup>。このシステムは図1に示すように, 2台のロボットにより自律的に車両の搬送を行うものである。具体的にはセンサにより車両位置を測定し, ロボットが車両の左右まで自動的に移動, 車両を把持し, 協調して搬送を行う。車両を複数台のロボットにより搬送することにより, 搬送に必要な力や物体を支持する力を複数台で分散することができるため, 比較的小型なロボットにより, 搬送や操りができるという利点がある<sup>(5)-(14)</sup>。

\* 原稿受付 2009年6月15日。

<sup>\*1</sup> 正員, 日本大学工学部(☎963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1)。

<sup>\*2</sup> 正員, フェロー, 東北大学大学院工学研究科(☎980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01)。

<sup>\*3</sup> 東北大学大学院工学研究科。

<sup>\*4</sup> 正員, 東北大学大学院工学研究科。

<sup>\*5</sup> IHI 運搬機械(株)(☎104-0044 東京都中央区明石町6-4-ニチレイ明石町ビル)。

E-mail: m\_endo@mech.ce.nihon-u.ac.jp

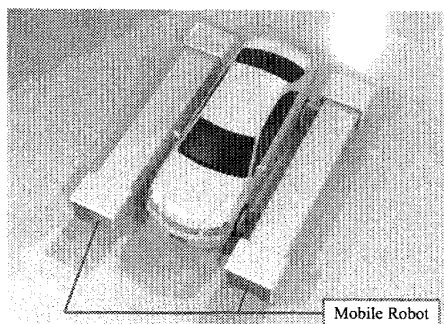


Fig. 1 Concept of the Car Transportation System

本システムを用いることで機械式駐車場での入出庫を代行できる。また、車両を自由自在に操れるため、バレーパーキングやレッカー移動、狭所での駐車、工場やフェリー内等での車両の移動など様々な場所への応用が可能である。

前報<sup>(2)</sup>では車両を搬送する上で問題となる車両の特徴(重さ、大きさ、種類の多様性およびボディの脆弱さ)を考慮したロボットのメカニズムについて述べた。本稿では、Kosugeらの手法<sup>(3)</sup>を応用し、実際に本システムにより車両の協調搬送を実現する手法について述べる。

## 2. 車両搬送ロボット<sup>(2)</sup>

図2に提案したロボットの全体図を示す。ロボット2台での車両の協調搬送を実現するために、各ロボットは移動ベース、リフターおよび連結部と呼ばれる3つのモジュールから構成される。

移動ベースは特殊な車輪を用いずに全方向移動を実現する。このために操舵角度と車輪の回転角度が制御可能なキャスタ機構を2つ装備する。キャスタ機構は可搬重量を上げるために操舵軸と車輪の接地点にオフセットを持たない機構とする。これにより、ロボットが非ホロノミックな機構となるが、全方向移動機構が実現される<sup>(4)</sup>。

リフターは車両に傷をつけずに搬送する事を実現するエンドエフェクタである。図2のようにロボットは4本のリフトバーと呼ばれる棒を装備している。これのうちの2本を用いて、車両の車輪1輪を前後方向から挟む込むことにより持ち上げる。ロボットは車輪のみに接触し、車体には接触せずに搬送するため、車両に傷をつけずに搬送することを実現する。

このリフトバーの両端には従動輪が装備されており、リフトバーに加わる重量をその従動輪により支持する。この機構により、リフトバーのみで車両の重量を支持することができる。これによりロボットの機構を小型

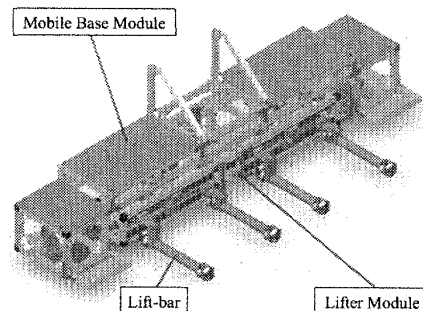


Fig. 2 Robot of the Car Transportation System iCART

に設計することが可能となるが、搬送中に従動輪の転がり摩擦が発生する。

移動ベースとリフターを連結するモジュールが連結部である。これは3本のリンクから構成され、移動ベースとリフターをつなぎ、パラレルリンク機構を形成する。このパラレルリンク機構の自由度配置より、地面のうねり等に適応する機構を実現する。また、パラレルリンク機構であることを利用し、各リンクに1軸の力センサを装備することにより平面3軸の力センサを実現する。

## 3. 2台のロボットによる車両の協調搬送制御

複数ロボットの協調搬送アルゴリズムは様々なものが提案されている<sup>(5)-(14)</sup>。それらは搬送物体を把持して持ち上げ、物体から伝わる相互作用力に基づいて協調搬送する手法<sup>(3)(7)-(10)etc</sup>と、地面に置いてある物体を複数台のロボットにより協調して押すことにより搬送する手法<sup>(6)(11)-(13)etc</sup>の2つに分類できる<sup>(6)</sup>。

車両を搬送する場合、車両の重量が大きいため持ち上げることが困難であり、また協調搬送に失敗した際に落下させて破損させる可能性がある。そのため、車両を持ち上げて協調搬送を行う手法の適用は望ましくない。一方、地面に置いた物体を協調して押すことにより搬送する手法を用いる場合、車両のタイヤの接地面における摩擦力が大きいため、このままでは運動を発生させるのは不可能である。

本研究で提案するシステムは、ロボットのリフターの上に車両を乗せて搬送する。この際、車両は地面から持ち上げられ、リフトバーと車両のタイヤの接触面の摩擦力によりロボットと固定される。一方、見方を変えると、車両を持ち上げている2台のロボットそれぞれのリフターと車両を搬送物体とみなすことが出来る。この場合、前章で述べたようにリフターは小型なロボットにより車両の重量を支持するために接地しているため搬送物体全体が地面に置かれていると見なせ

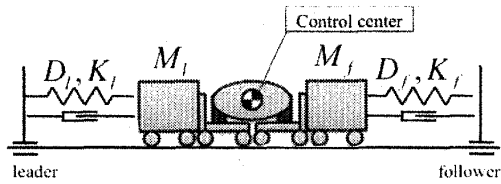


Fig. 3 Impedance Characteristic

る。すなわち、地面においてある搬送物体を移動ベースが押す／引くことにより搬送するシステムであると言える。以上より、提案するシステムは前述した従来の2種類の協調搬送システムの特徴を併せ持つシステムである。

本稿では、このシステムに Kosuge らによる手法<sup>(3)</sup>を拡張して適用する。本システムはリフトバーが常に接地するという特徴を持つ。このため、搬送中に転がり摩擦を発生する。リフトバーの上には車両が乗るため、この転がり摩擦は大きく、無視できない。ゆえに、本論文では Kosuge らによる手法<sup>(3)</sup>をこの転がり摩擦を考慮したものに拡張して用いる。この際、Kosuge らによる手法<sup>(3)</sup>はホロノミックなメカニズムを対象としているが、本研究で提案するロボットは非ホロノミックな運動拘束を持つため、車輪の操舵角度が瞬時に目標角度に追従するという仮定をする。

実際には2台のロボットがそれぞれリーダーおよびフォロワとして制御される。車両の搬送軌道をリーダーのみに与え、リーダーはその軌道を目標軌道として運動する。また、フォロワはリーダーに与えられた目標軌道を、内部モデルの運動誤差に基づいて推定する。推定した軌道をフォロワの目標軌道として制御することにより協調搬送を実現する。

#### 4. 各ロボットの制御

リーダーに与えられた搬送軌道とフォロワが推定した軌道の誤差によって搬送中に発生する、運動の微少なずれを調整するために、リーダーとフォロワは制御点まわりにそれぞれ式(1)、(2)に示すインピーダンス特性を持つ内部モデルに基づいて制御される。この際、図3に示すように、リーダー、フォロワ共に制御点は搬送される車両の中心にあるとする。

$$M\Delta\ddot{x}_l + D\Delta\dot{x}_l + K\Delta x_l = f_l \quad (1)$$

$$M\Delta\ddot{x}_f + D\Delta\dot{x}_f + K\Delta x_f = f_f \quad (2)$$

ここに  $M \in R^{3 \times 3}$  は慣性行列、 $D \in R^{3 \times 3}$  は粘性行列、 $K \in R^{3 \times 3}$  は剛性行列を表す。また、 $f \in R^3$  は制御点における力／モーメントであり、添え字  $l, f$  はそれぞれ

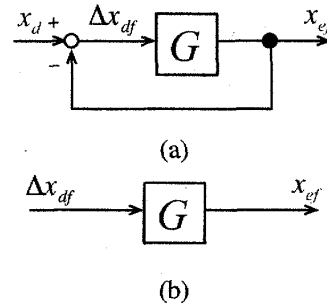


Fig. 4 Estimator

れリーダー、フォロワの変数であることを表している。 $\Delta x_l, \Delta x_f$  は運動誤差であり、次式のように表される。

$$\Delta x_l = x - x_d \quad (3)$$

$$\Delta x_f = x - x_{ef} \quad (4)$$

ここに  $x \in R^3$  は制御点の実際の軌道、 $x_d \in R^3$  はリーダーに与えられる制御点の目標軌道、 $x_{ef} \in R^3$  はフォロワにより推定される制御点の推定軌道を表す。フォロワは  $x_{ef}$  を目標軌道として制御される。

#### 5. 協調搬送アルゴリズム

**5.1 軌道の推定** 協調搬送を実現するためにリーダーとフォロワの目標軌道の差、すなわち軌道誤差が0になるように運動すればよい。ここに軌道誤差を  $\Delta x_{df} \in R^3$  とすると次式のように表すことができる。

$$\Delta x_{df} = x_d - x_{ef} \quad (5)$$

フォロワはこの軌道誤差  $\Delta x_{df}$  が漸近的に0になるように目標軌道  $x_{ef}$  を生成する。実際には図4(a)に示すように、伝達関数  $G$  を用いてフィードバック系を構成し、伝達関数  $G$  を適切に設定することにより、推定誤差  $\Delta x_{df}$  を0に収束させるようにフォロワの目標軌道  $x_{ef}$  を生成することが可能になる。

ここで、定常状態で位置と速度の推定誤差が無くなるように伝達関数  $G$  は次のように設計する。

$$G = \frac{as+b}{s^2} I \quad (6)$$

ここに  $a \in R$ 、 $b \in R$  は共に伝達関数のゲインであり、 $I \in R^{3 \times 3}$  は単位行列である。

図4(a)に示す、入力リーダーの目標軌道  $x_d$  で出力がフォロワの目標軌道  $x_{ef}$  であるフィードバック系全体の伝達関数を  $H$  とすると、次のように表せる。

$$H = \frac{as+b}{s^2+as+b} I \quad (7)$$

このフィードバック系の安定性を保証するため  $a > 0$ 、 $b > 0$  とすると、リーダーに与えられる目標軌道  $x_d$  がラ

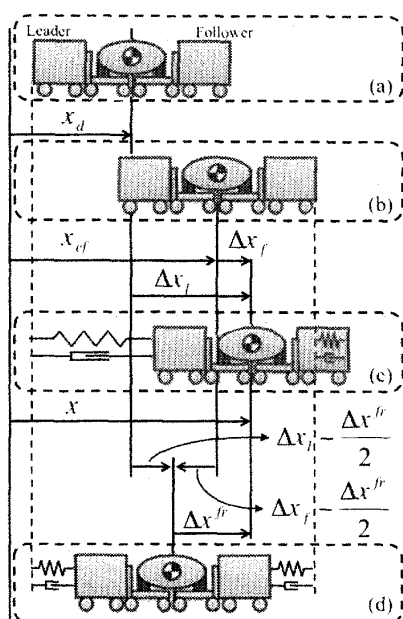


Fig. 5 Relation of Each Trajectory

ンブ状の場合、すなわち  $\ddot{x}_d = 0$  の場合には

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_{ef} = x_d \quad (8)$$

となり、フォロワの目標軌道  $x_{ef}$  がリーダーの目標軌道  $x_d$  に収束することがわかる。なお、周波数特性は a, b により調整できる。

これにより軌道誤差  $\Delta x_{df}$  が 0 に収束するようなフォロワの軌道を生成することが可能となる。しかしながら式 (5) はリーダーにのみ与えられる搬送軌道  $x_d$  を含んでいるため、フォロワは軌道誤差  $\Delta x_{df}$  を算出できない。ゆえに、本研究ではリーダーに与えられる搬送軌道  $x_d$  を用いずに軌道誤差  $\Delta x_{df}$  を算出し、図 4(b) に示すブロック線図に基づいてフォロワの目標軌道を生成する手法を提案する。図 4(b) は (a) の伝達関数  $G$  の前後のブロック線図を抜き出したものである。

**5.2 フォロワによる軌道誤差の算出** フォロワはリーダーとの軌道誤差  $\Delta x_{df}$  を、力の釣り合い、図 5 に示す幾何学的位置関係から算出する。図 5 の (a) はリーダーの目標軌道から算出される位置、(b) はフォロワの目標軌道から算出される位置、(c) は実際のシステムの位置、(d) は転がり摩擦が加わらない場合の位置をそれぞれ表す。

はじめに力の釣り合いについて考える。システムの加減速が穏やかに行われると仮定すると、搬送物体の慣性力は無視できるため、リーダー、フォロワに加わる力には次の関係が存在する。

$$f_l + f_f = f^{fr} \quad (9)$$

ここで、 $f^{fr} \in R^3$  はシステムに搬送中に加わる転がり摩擦の総和である。

次に、転がり摩擦による各ロボットのモデルへの影響を考える。転がり摩擦  $f^{fr}$  による制御点の軌道誤差を  $\Delta x^{fr} \in R^3$  とし、リーダー、フォロワそれぞれへ加わる転がり摩擦  $f_l^{fr} \in R^3, f_f^{fr} \in R^3$  による運動誤差を  $\Delta x_l^{fr} \in R^3, \Delta x_f^{fr} \in R^3$  とすると、リーダー、フォロワそれぞれの制御点が車両の中心で一致しているという前提から、関係は次式のようになる。

$$\Delta x^{fr} = \Delta x_l^{fr} + \Delta x_f^{fr} \quad (10)$$

式 (1), (2) より転がり摩擦  $f_l^{fr}, f_f^{fr}$  およびそれらによる変位  $\Delta x_l^{fr}, \Delta x_f^{fr}$  を引くことにより、転がり摩擦の影響を取り除いたインピーダンス特性の式が求められる。

$$M(\Delta \ddot{x}_l - \Delta \ddot{x}_l^{fr}) + D(\Delta \dot{x}_l - \Delta \dot{x}_l^{fr}) + K(\Delta x_l - \Delta x_l^{fr}) = f_l - f_l^{fr} \quad (11)$$

$$M(\Delta \ddot{x}_f - \Delta \ddot{x}_f^{fr}) + D(\Delta \dot{x}_f - \Delta \dot{x}_f^{fr}) + K(\Delta x_f - \Delta x_f^{fr}) = f_f - f_f^{fr} \quad (12)$$

式 (9), (10), (11), (12) より次式が求まる。

$$M(\Delta \ddot{x}_l + \Delta \ddot{x}_f - \Delta \ddot{x}^{fr}) + D(\Delta \dot{x}_l + \Delta \dot{x}_f - \Delta \dot{x}^{fr}) + K(\Delta x_l + \Delta x_f - \Delta x^{fr}) = 0 \quad (13)$$

$M, D, K$  の正定性である場合、十分に時間が経過した後には次式が成り立つ。

$$\Delta x_l + \Delta x_f - \Delta x^{fr} = 0 \quad (14)$$

リーダーとフォロワの軌道誤差  $\Delta x_{df}$  とそれぞれの運動誤差  $\Delta x_l, \Delta x_f$  の関係は、式 (3), (4), (5) を解くことにより次のように求まる。

$$\Delta x_{df} = \Delta x_f - \Delta x_l \quad (15)$$

式 (14), (15) より次の関係が求まる。

$$\Delta x_{df} = 2\Delta x_f + \Delta x^{fr} \quad (16)$$

この式を用いることにより、フォロワの運動誤差  $\Delta x_f$  と転がり摩擦によるシステムの運動誤差  $\Delta x^{fr}$  のみにより軌道誤差  $\Delta x_{df}$  を算出できる。すなわち、式 (5) のようにリーダーの目標軌道  $x_d$  を用いずに算出できる。

**5.3 転がり摩擦の影響  $\Delta x^{fr}$  の算出** 次に、式 (16) に含まれる転がり摩擦により発生するシステムの運動誤差  $\Delta x^{fr}$  を算出する。リーダーの目標軌道とフォロワの目標軌道の関係は図 4(a) より求められる式 (7) にし

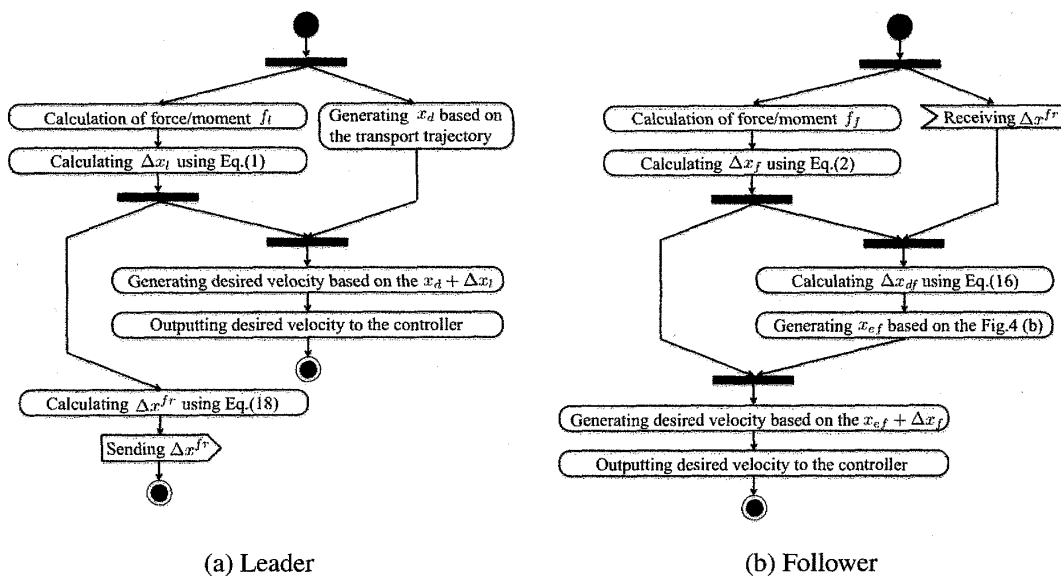


Fig. 6 Process for Generating Movement of Robots

めず伝達関数  $H$  より, ラプラス空間において次のようになる.

$$X_{ef} = \frac{as+b}{s^2+as+b} X_d \quad (17)$$

ここに  $X_d \in R^3$ ,  $X_{ef} \in R^3$  はそれぞれラプラス空間におけるリーダ, フォロワの目標軌道である. 式 (3), (4), (14), (17) より転がり摩擦により発生する変位  $\Delta x^{fr}$  はラプラス空間において次式のように求まる.

$$\Delta X^{fr} = 2X - \frac{s^2+2as+2b}{s^2+as+b} X_d \quad (18)$$

ここに  $\Delta X^{fr} \in R^3$  はラプラス空間における転がり摩擦により発生する変位であり,  $X \in R^3$  はラプラス空間における制御点の実際の軌道である. これより摩擦による運動誤差  $\Delta x^{fr}$  を算出できる.

しかしながら, 式 (18) はリーダのみに与えられる目標軌道  $X_d$  を含んでいる. すなわち, フォロワは摩擦による運動誤差  $\Delta X^{ex}$  を算出できない. そこで式 (18) に基づきリーダが転がり摩擦の影響  $\Delta X^{ex}$  を算出し, ネットワークを通じてフォロワに伝達する.

この方法を用いると  $\Delta x^{fr}$  の更新周期は通信周期に依存するが,  $\Delta x^{fr}$  は転がり摩擦の2階積分の次元であるため高周波数で変化することはない. 加えて, 転がり摩擦の方向は速度ベクトルと反対の向きで, その大きさは一定であると考えられる. 前述したように軌道は加減速が緩やかであると仮定しているため, 転がり摩擦の変化も緩やかであるといえる. ゆえに, リーダからフォロワへの  $\Delta x^{fr}$  のブロードキャストは低周波数でも制御に与える影響は小さいと考えられる.

実際にリーダ/フォロワのコントローラに出力される速度情報を生成するまでの手順を, 図6にアクティ

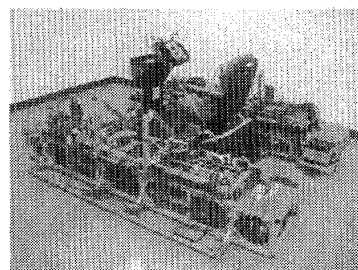


Fig. 7 Experimental System

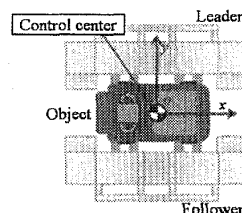


Fig. 8 Coordinate System for Experiments

ビティ図を用いて表す.

## 6. 実験

提案するシステムおよび協調搬送アルゴリズムの有効性を示すため, 車両の協調搬送実験を行った. 実験は摩擦を考慮しない場合と摩擦を考慮する場合の2通りを行った. 実験には第1報で提案したロボット (2300 × 1000 × 700 [mm]) により, スズキ株式会社製タウンカート TC-1A (1100 × 600 × 1090 [mm], 86[kg]) を搬送する. 制御系の実現にはリアルタイム OS である QNX を制御周波数 1000[Hz] で用いた. 実験システムの外観を図7に示す.

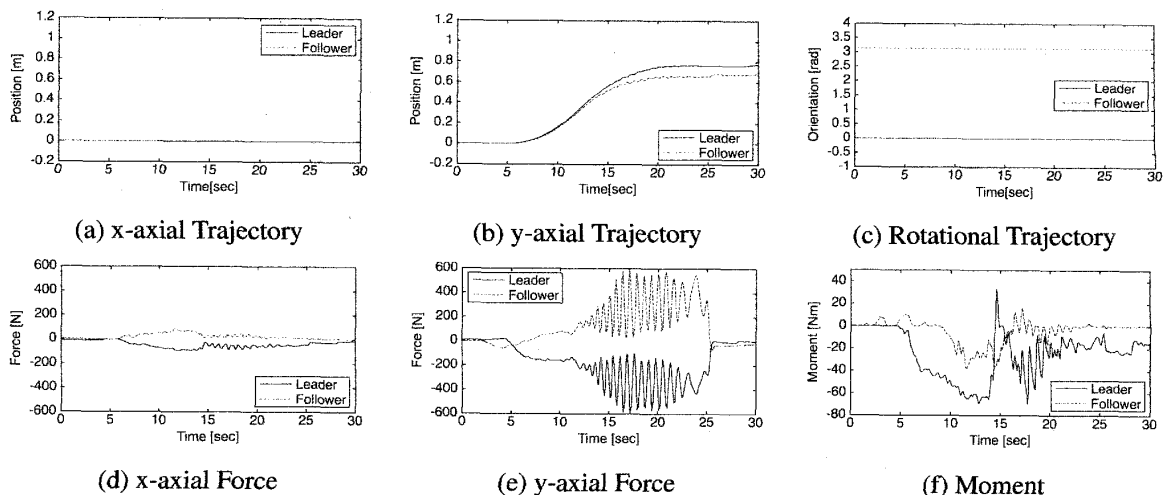


Fig. 9 Results of Experiment Excluding the Effect of the Friction

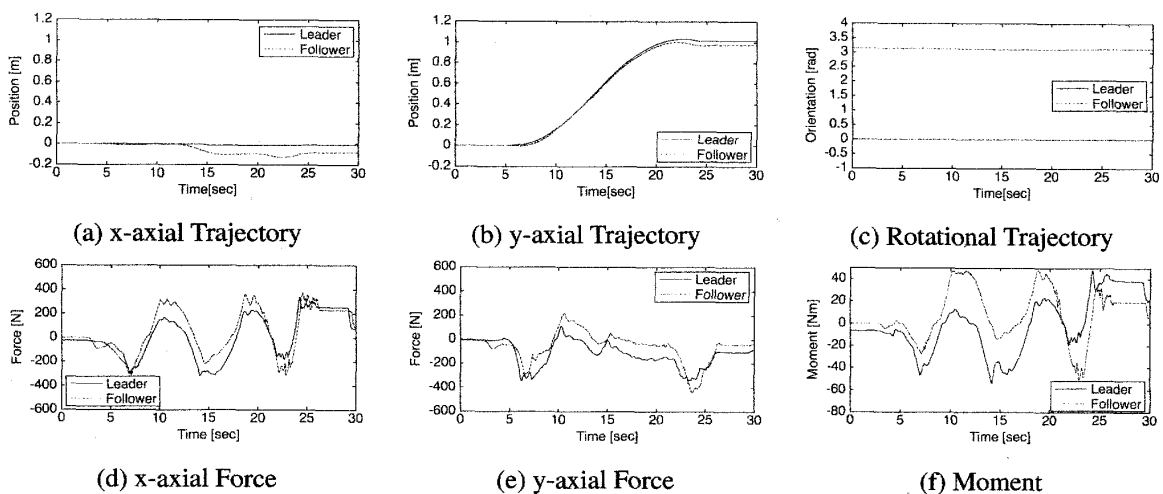


Fig. 10 Results of Experiment Including the Effect of the Friction

実験では、リーダーに図8に示す座標系のy軸方向に1[m]を20[sec]で移動する軌道を与える。軌道は5次関数で生成する。フォロワは前章で提案した制御則を用いてリーダーの運動を推定し、リーダーと協調して車両を搬送する。

**6.1 実験1：転がり摩擦を考慮しない場合** 始めに転がり摩擦の影響を考慮しない状況で実験を行った。フォロワが摩擦の影響を考慮しない状況を実現するために、式(16)において摩擦により発生する変位 $\Delta x^{fr}$ が常に0であるとし、軌道の推定を行う。すなわち、フォロワは運動誤差 $\Delta x_f$ にのみ基づいて軌道を生成する。実際に搬送を行った結果を図9に示す。グラフの実線がリーダーの結果であり、破線がフォロワの結果である。

軌道の結果よりわかるように、フォロワはリーダーがy軸方向に動いていることを推定して協調して搬送し

ているが、(b)から運動後到達する位置は目標軌道の1[m]にリーダー、フォロワ共に到達していないことがわかる。これはシステムの進行方向逆方向に転がり摩擦が加わるためである。加えて軌道の推定誤差も時間が進むに従って増加していることがわかる。これはフォロワが転がり摩擦の影響を考慮せずに軌道の推定を行っているため、モデル化誤差が推定誤差となって現れているためと考えられる。

一方、力/モーメントの結果からわかるように、リーダーとフォロワの並進力が正負が逆転したグラフになっていることがわかる。これはリーダーのみが転がり摩擦に対抗する搬送力で駆動し、フォロワには内力の情報のみが伝わるからである。また(d)よりわかるように、搬送している方向には細かい振動が発生していることが見て取れる。

**6.2 実験2：転がり摩擦を考慮した場合** 次に転がり摩擦の影響を考慮した手法を用いて、実験を行った。リーダーとフォロワは QNX 独自のネットワーク Qnet 内の通信で用いられる、QNX メッセージングという通信プロトコルを用いて 50[Hz] で通信する。

実際に搬送を行った結果を図 10 に示す。それぞれのグラフが表す情報は図 9 と同様である。

軌道の結果よりわかるように、フォロワはリーダーの運動を推定して、協調して搬送していることがわかる。(a) よりわかるように x 軸方向には推定誤差が発生しているが、(b) より y 軸方向の軌道は目標軌道のとおり最終的に 1[m] に達し、かつリーダーとフォロワ間の軌道の推定誤差も小さくなっている。これは転がり摩擦を考慮することにより、その影響を抑制しているからである。

一方、力/モーメントのグラフからは、リーダーとフォロワは y に関して必要な搬送力をリーダーとフォロワで分配し、搬送していることがわかる。リーダー、フォロワのグラフに見られる差は内力の影響であると考えられる。また (d),(f) には低周波数の振動が見られる。これは、低周波でリーダーから送られてくる情報が更新されるたびに、不連続にフォロワの参照値が変わるため、システムが比較的不安定になっているからだと考えられる。しかしながら、(b) よりわかるように搬送には支障は生じていない。提案した手法を用いて、安定な協調搬送が実現できているのがわかる。

## 7. おわりに

本稿では、著者らが開発した車両搬送システム iCART の搬送中に発生する転がり摩擦を考慮した、リーダー・フォロワ型の分散協調搬送アルゴリズムを提案した。このアルゴリズムではリーダーは搬送軌道を与えられ、フォロワはリーダーとの相互作用力に基づき、リーダーに与えられた軌道を推定する。また、提案した分散協調搬送アルゴリズムを実際のロボットに適用し行った実験の結果を示した。実験の結果より、転がり摩擦を考慮した分散協調搬送アルゴリズムの有効性を示した。

次報では、ロボットが車両を搬送するために車両の左右に移動する為の軌道や搬送軌道を生成する軌道生成アルゴリズムに関して述べる。このアルゴリズムを用いることにより、環境や車両への接触やロボット同士の間衝突が起きない軌道を生成できる。

## 文 献

(1) Endo, M., Hirose, K., Sugahara, Y., Hirata, Y., Kosuge, K., Suzuki, K., Oomoto, M., Kanbayashi, T., A Motion

Control Algorithm based on the Caster-like Motion for a Car Transportation System -iCART-, *Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2009-05).

- (2) Endo, M., Hirose, K., Hirata, Y., Kosuge, K., Sugahara, Y., Suzuki, K., Shinozuka, H., Arai, H., Akune, K. and Kanbayashi, T., A Car Transportation System Using Multiple Robots iCART (1st Report: The Design and the Control Algorithm of Robots), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.75, No.755(2009).
- (3) Kosuge, K. and Oosumi, T., Decentralized Control of Multiple Robots Handling an Object, *Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol.1(1996-11), pp.318-323.
- (4) Ichikawa, M., Wheel arrangements for Wheeled Vehicle, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.13-1(1995-2), pp.107-112.
- (5) Nakano, E., Ozaki, S., Ishida, T. and Kato, I., Cooperative Control of the Anthropomorphic Manipulator "MELARM", *Proceedings of 4th International Symposium on Industrial Robots*, (1974-11), pp.251-260.
- (6) Wang, Z.D., Hirata, Y. and Kosuge, K., Dynamic Object Closure by Multiple Mobile Robots and Random Caging Formation Testing *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol.1(2006-10), pp.3675-3681.
- (7) Uchiyama, M. and Dauchez, D., Symmetric Kinematic Formulation and Non-Master/Slave Coordinated Control of Two Arm Robots, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.7-1(1993-2), pp.19-29.
- (8) Craig, J.J. and Raibert, M.H., A Systematic Method of Hybrid Position/Force of a Manipulator, *Proceedings of the 3rd IEEE International Computer Software and Applications Conference*, (1979-11), pp.446-451.
- (9) Sugar, T. and Kumar, V., Multiple Cooperating Mobile Manipulators, *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol.2(1999-5), pp.1538-1543.
- (10) Stilwell, D.J. and Bay, J.S., Toward the Development of a Material Transport System using Swarms of Ant-like Robots, *Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol.1(1993-5), pp.766-771.
- (11) Parker, L.E., ALLIANCE: An Architecture for Fault Tolerant Multirobot Cooperation, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.14-2(1998-4), pp.220-240.
- (12) Donald, B.R., Jennings, J. and Rus, D., Analyzing Teams of Cooperating Mobile Robots, *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol.3(1994-5), pp.1896-1903.
- (13) Pereira, G.A.S., Kumar, V., Spletzer, R., Taylor, C.J. and Campos, F.R., Cooperative Transport of Planar Objects by Multiple Mobile Robots Using Object Closure, *Proceedings of the 8th International Symposium on Experimental Robotics*, Vol.1(2002), pp.275-284.
- (14) Arai, T. and Ota, J., Motion Planning of Multiple Mobile Robots Using Virtual Impedance, *Journal of the Robotics Society of Japan*, No.11-7(1993-10), pp.107-114.