

## 単一物体を搬送する複数移動ロボットによる機能分散型 障害物回避システム\*

武田 宏樹<sup>\*1</sup>, 小菅 一弘<sup>\*2</sup>, 平田 泰久<sup>\*2</sup>

### Collision Avoidance System for Multiple Mobile Robots Transporting a Single Object in Coordination Based on Function Allocation Concept

Hiroki TAKEDA<sup>\*3</sup>, Kazuhiro KOSUGE and Yasuhisa HIRATA

<sup>\*3</sup> Tohoku University, Department of Machine Intelligence and Systems Engineering,  
01 Aoba-yama, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

The decentralized motion control architecture for multiple robots in coordination is a natural extension of human behaviors to robots. Decentralized motion control system for multiple mobile robots transporting a single object in coordination has been proposed and extended to nonholonomic tracked mobile robots driven by two actuators. Systems have an architecture of a leader-follower type, with which the resultant pose of the object is not uniquely determined. In this paper, we propose a new multiple robots system of the leader-followers type based on the function-allocation concept. To illustrate the concept, we developed a leader-follower robot system, in which the leader is in charge of the handling motion of the object and the followers avoid collisions to obstacles and handle the object in coordination with the leader. Experimental results will illustrate the validity of the proposed method.

**Key Words:** Robot, Moving Robot, Motion Control, Decentralized Control, Function-Allocation Concept

#### 1. 諸言

建設工事現場における大型物体の搬送作業等で、複数移動体の協調作業による効率化が期待されている<sup>(1)(2)</sup>。小菅らは、複数のロボットを用いた協調作業におけるロボットの制御方法として、リーダー・フォロワタイプの分散協調制御系を提案してきた<sup>(3)(4)</sup>。また、文献<sup>(5)</sup>では、この制御系を独立2輪駆動型移動ロボットへ適用できるように拡張し、クローラ駆動の移動ロボットを用いた実験により、その有効性を示した。

しかし実環境で作業を行う場合には、ロボットの作業空間は必ずしも理想的な状態であるとは限らず、障害物との衝突を回避することが必要になる場合がある。1台のロボットに対する障害物回避の方法としては、ポテンシャル場を用いる方法<sup>(6)</sup>や、ロボットの運動学的特性を考慮した障害物までの最短到達距離に基づき経路計画を行う方法<sup>(7)</sup>等、多数の方法が提案されている。しかし、複数のロボットの協調作業における

障害物回避問題では、全てのロボットと搬送物の経路を考慮する必要があり、それを実時間で生成することは容易ではない。

複数のロボットによる協調作業において、各ロボットが作業内容に応じて機能や役割を分担することができれば、効率の良いロボットの制御が可能になる。宮田らは、複数のロボットによる台車を用いた物体の協調ハンドリング問題において、機能分化の概念を導入した<sup>(8)</sup>。機能分化とは、状況に応じてロボットの機能を変化させ、環境に働きかける作業をも前提とすることにより、より複雑な物体搬送問題を扱おうとするものである。

本稿では、複数ロボットによる単一の作業において、作業に必要な機能を各ロボットに分散させる、機能分散型システムを提案する。本稿では、機能分散の一例として、複数ロボットによる単一物体の協調搬送問題を考え、各ロボットに機能を分散させることにより、障害物回避を行いながら物体を搬送する、機能分散型障害物回避システムを提案する。

以下本稿では、2台の独立2輪駆動型移動ロボットによる単一物体の協調搬送問題を考える。まず第2章

\* 原稿受付 2001年7月9日。

<sup>\*1</sup> 准員, 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01)。

<sup>\*2</sup> 正員, 東北大学大学院工学研究科。

E-mail: takeda@irs.mech.tohoku.ac.jp

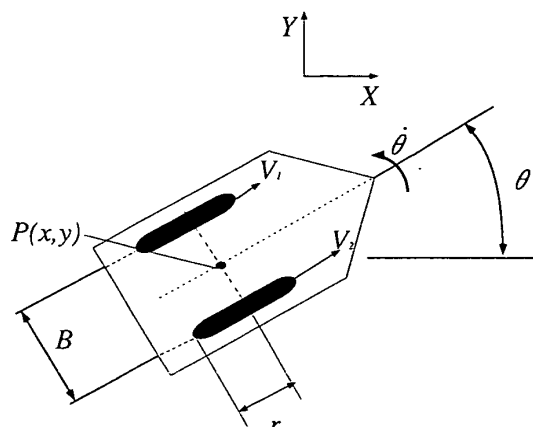


Fig. 1 2-wheel-drive type mobile robot

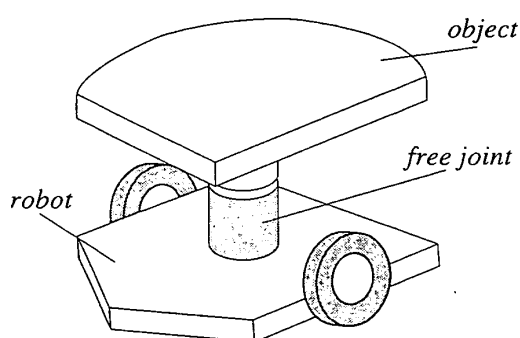


Fig. 2 Free joint

で、本稿で提案する制御系の基本となる、独立2輪駆動型移動ロボットによる分散協調制御系について説明する。第3章では、本稿における機能分散の考え方を述べ、第4章で、機能分散の考えを適用した障害物回避アルゴリズムを提案する。最後に第5章でクローラ型移動ロボットによる実験を行い、提案するシステムの有効性を説明する。

## 2. 独立2輪駆動型移動ロボットによる物体の協調搬送

複数台のロボットによる協調搬送作業において、全てのロボットを1台の制御装置で集中的に制御することは、制御装置の能力によって作業内容やロボットの台数が制限されるため、効率的であるとはいえない。小菅らは物体の搬送形式として、リーダー・フォロワタイプの分散協調搬送法を提案し、ホロノミックな移動ロボットに対して適用した<sup>(4)</sup>。

この制御系では、物体を搬送するロボットが2台の場合、物体の軌道はリーダーと呼ばれるロボットのみを与えられ、フォロワと呼ばれるロボットは、リーダーの動きを推定し、リーダーと協調して物体の協調搬送を実現するものである。本章では、非ホロノミックな拘束条件を持つ移動ロボットの運動学<sup>(9)</sup>について簡単に

説明し、文献(4)の制御系がこのような移動ロボットの場合にも拡張できることを説明する。

図1に示すような独立2輪駆動型移動ロボットについて考えよう。以下において、移動ロボットの代表点を  $P$  とし、その絶対座標系における位置ベクトルを  $P(x, y)$ 、移動ロボットの姿勢を  $\theta$  とする。ここで移動ロボットの車輪は、

- (1) 横滑りしない
- (2) 進行方向には純転がり運動であり、滑りがない
- (3) ただし、垂直軸回りには自由に回転できると仮定すると、図1の移動ロボットの運動学は、次のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\cos \theta}{2} & \frac{\cos \theta}{2} \\ \frac{\sin \theta}{2} & \frac{\sin \theta}{2} \\ -\frac{1}{B} & \frac{1}{B} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $V_1, V_2$  は左右の各車輪によって生成される速度、 $B$  は左右の車輪の幅である。この運動学は、本稿で実験に用いるクローラ型移動ロボットにもそのまま適用することができる。

独立2輪駆動型移動ロボットの場合、ホロノミックな拘束条件を持つロボットとは異なり、ロボットは進行方向に対して垂直な成分の速度を生成できない。そこで、各ロボットは物体を図2に示すようなフリージョイントを介して把持するものとし、ロボットの回転運動が自由に行えるようにする。

図3に示すように、各ロボットはその進行方向に対してコンプライアンス特性を持つよう、制御する。すなわち各ロボットはその進行方向に対して、以下のような特性を持つものとする。

$$D_l \Delta^l \dot{x}_l + K_l \Delta^l x_l = {}^l f_{lx} \quad (2)$$

$$D_1 \Delta^1 \dot{x}_1 + K_1 \Delta^1 x_1 = {}^1 f_{1x} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta^l x_l, \Delta^1 x_1$  はそれぞれリーダー、フォロワの運動誤差であり、 $D_l, D_1$  は各ロボットの正の粘性係数、 $K_l, K_1$  は各ロボットの正の剛性係数である。また、 ${}^l f_{lx}, {}^1 f_{1x}$  は各ロボットの進行方向に作用する力である。本稿では、 $D_l = D_1 = D, K_l = K_1 = K$  とする。フォロワはこの方向に対して文献(4)の方法を用いて軌道推定を行い、リーダーと協調し、物体を搬送する。フォロワの回転運動に対しては、デュアルキャストアクション<sup>1)</sup>を適用し、フォロワがキャストの運動を模擬するようにフォロワを制御する。これより、非ホロノミックな特性をもつ独立2輪駆動型移動ロボットを用いたリーダー・フォロワ型分散協調制御系による単一物体の協調搬送が実現できる。

<sup>1)</sup> 付録参照

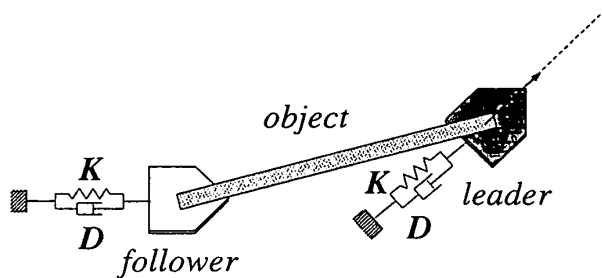


Fig. 3 Compliance

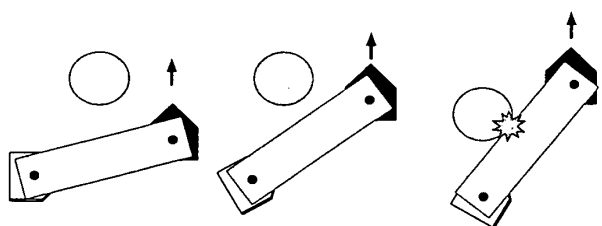


Fig. 4 Collision with obstacle

### 3. 機能の分散

実際の搬送作業では、障害物の回避や障害物との衝突を考慮する必要がある。特に大型物体の搬送においては、図4のように、リーダー本体が障害物に衝突しないような経路を選んでも、搬送物体が障害物に衝突する可能性がある。全てのロボットが障害物等の情報を共有し、障害物の回避行動をとることができれば、このような問題を解決できるが、障害物情報を共有することはあまり現実的ではないし、非ホロノミックなロボットの場合、運動に拘束条件が課されるため、実時間でそのような障害物回避を行うことは困難である。

そこで本稿では、各ロボットが役割分担を行い、リーダーが搬送経路を設計し、フォロワが搬送物体の姿勢を制御することによって、単一物体の協調搬送を行うことを考える。本稿では、この役割分担を機能分散と呼ぶことにする。

### 4. 障害物回避アルゴリズム

4.1 機能分散に基づく障害物の回避 文献(5)の方法では、リーダーは目標軌道上を進行し、フォロワにはリーダーへの追従をさせてきた。この制御系によって障害物回避を行う場合、リーダーはフォロワの特性を考慮し、かつ搬送物体が安全に通過できる経路を見つけ出す必要がある。このような経路を実時間で求めることは容易ではない。

本稿ではリーダーの搬送経路が与えられたものとして、フォロワの姿勢を制御することにより実時間で障害物回避を実現する問題について考える。以下本稿では障害物回避の実現にあたり、図5のように、リーダーは与えられた目標軌道に従って物体の位置を制御し、

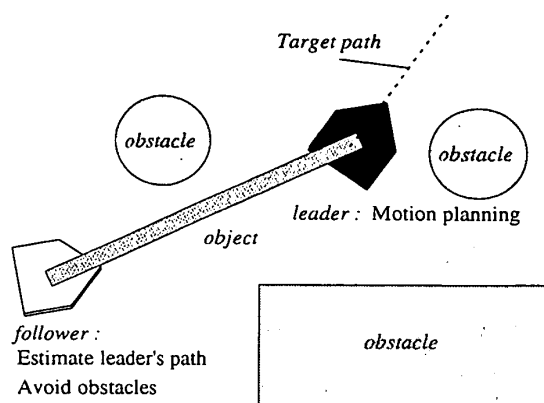


Fig. 5 Obstacle avoidance considering the functions distributed among robots

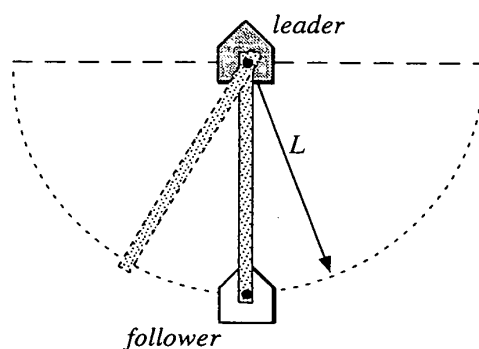


Fig. 6 Follower's motion constraints

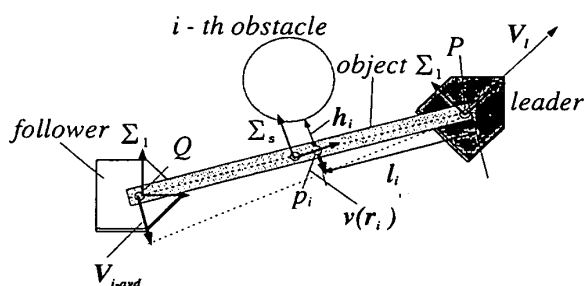


Fig. 7 Velocity  $V_{avd}$

フォロワはリーダーに追従しつつ、搬送物体の姿勢を制御することにより障害物を回避する、機能分散型障害物回避アルゴリズムを提案する。

4.2 幾何学的拘束条件 図6に示すように、2台のロボットが間隔  $L$  で搬送物体をフリージョイントを介して把持しているとする、フォロワがリーダーの後方にいるものとした場合、リーダーの位置に対して搬送物体のとりことのできる姿勢は、リーダーの把持点を中心とした半径  $L$  の半円上の領域内となる。従って搬送物体の障害物回避は、この領域内で行わなければならない。また、フォロワの運動が可能な位置は、図6から、リーダーがフリージョイントを介して把持している点を中心とした半径  $L$  の円周上である。以上のことから、フォロワが行う障害物の回避行動は、上記の拘

束条件に基づいて生成されなければならない。

**4.3 障害物回避アルゴリズム** 本稿では、リーダーの搬送経路は、あらかじめ与えられていると仮定する。そしてリーダーは、与えられた経路を通って目標位置に到達できるものとし、その間リーダーが障害物に接触、衝突することはないとする。また、各ロボットは同一平面上を移動するものとする。また、フォロワは障害物の位置および搬送物体の姿勢を認識しているとし、障害物は全て固定されているものとする。

図7に示すように、提案するアルゴリズムでは、フォロワは搬送物体と障害物 $i$ との距離が最短になる搬送物体上の点 $p_i$ の位置と、その距離 $h_i \in R$ を逐次計算することにより、搬送物体の回避行動を生成する。搬送物体の進行方向に対して垂直なベクトル $r_i \in R^3$ は、

$$r_i = h_i y_o \quad (4)$$

と表される。 $r_i$ を用いることにより、点 $p_i$ における搬送物体の回避速度 $v(r_i) \in R^3$ を次のように定義する。

$$v(r_i) = \frac{k}{|r_i|^2} r_i \quad (5)$$

ただし、 $y_o \in R$ は、物体座標系の $y$ 軸方向の単位ベクトルであり、 $k$ は定数である。ここで、搬送物体の姿勢を制御するのはフォロワであるから、点 $p_i$ における搬送物体の回避速度 $v(r_i)$ を、フォロワがフリージョイントを介して搬送物体を把持している点 $Q$ における回避速度に変換する必要がある。そこで、リーダーがフリージョイントを介して搬送物体を把持している点 $P$ から点 $p_i$ までの距離を $l_i \in R$ とすると、点 $Q$ における障害物 $i$ に対する搬送物体の回避速度 $V_{i-avd} \in R^3$ は次のように表される。

$$V_{i-avd} = v(r_i) \cdot \frac{L}{l_i} \quad (6)$$

ここで、 $L \in R$ は搬送物体の長さである。障害物が複数ある場合には、フォロワはすべての障害物に対して上記の計算を行い、回避速度はそれらの和を用いる。

$$V_{avd} = \sum_{i=1}^n V_{i-avd} \quad (7)$$

しかし、フォロワは非ホロノミックな拘束を持っているため、 $V_{avd}$ の向きに速度を生成できない。そこで、本稿では以下のようにして回避行動を生成することを考える。図8のように搬送物体の進行方向の速度成分と、 $V_{avd}$ との合成ベクトルを $V_{favd} \in R^3$ とする。また、 $\theta_{Vf} \in R$ を搬送物体とフォロワの姿勢差、 $\theta_{Vfavd} \in R$ を、フォロワの目標姿勢とすると、

$$(V_{favd})^2 = (V_f \cos \theta_{Vf})^2 + (V_{avd})^2 \quad (8)$$

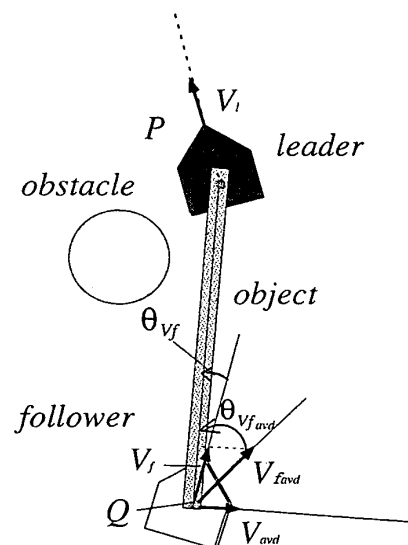
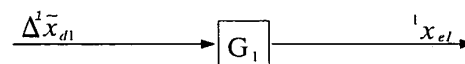
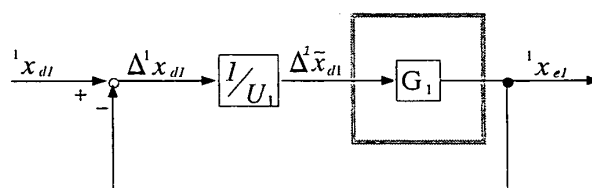


Fig. 8 Relationship of rate vectors



(a)



(b)

Fig. 9 Estimator

より、

$$\theta_{Vfavd} = \tan^{-1} \frac{|V_{avd}|}{|V_f \cos \theta_{Vf}|} \quad (9)$$

と求めることができる。次に、フォロワの姿勢が式(9)で求めた姿勢角となるようにデュアルキャストアクション<sup>1)</sup>の手法を拡張することを考える。すなわちフォロワに作用する力 $F \in R^3$ の大きさに基づき次式のように $\theta_{Vfavd}$ 方向の力成分 $\tilde{f}_{1x} \in R^3$ とその垂直成分 $\tilde{f}_{1y} \in R^3$ を求める。

$$\tilde{f}_{1x} = |F| \cos(\theta_{Vf} - \theta_{Vfavd}) \quad (10)$$

$$\tilde{f}_{1y} = |F| \sin(\theta_{Vf} - \theta_{Vfavd}) \quad (11)$$

$$\dot{\theta}_1 = \frac{C}{D_{cast}} \tilde{f}_{1y} \cdot \text{sgn}(\tilde{f}_{1x}) \quad (12)$$

ただし、 $C$ は

$$C = \begin{cases} C_{off}, & \text{for } \tilde{f}_{1x} \geq 0 \\ -C_{off}, & \text{for } \tilde{f}_{1x} < 0 \end{cases} \quad (13)$$

ここで、 $D_{cast} \in R$ はキャストの特性を表す係数であり、 $C \in R$ はキャストのオフセットである。

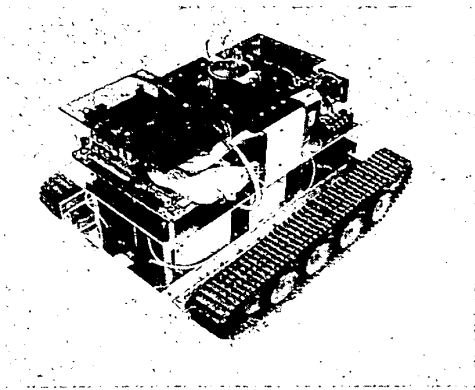


Fig. 10 Experiment systems(tracked mobile robots)

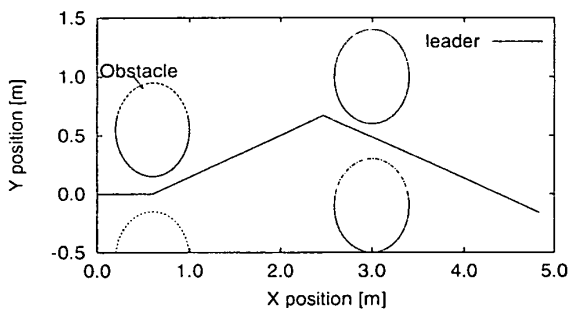


Fig. 11 Leader's destinate trajectory

このようにしてフォロワは式(12)で求めた角速度  $\dot{\theta}_1$  を用いることによって障害物回避が実現できる。

4.4 フォロワの姿勢誤差による追従運動への影響

前節では、フォロワが搬送物体の姿勢を制御することによって障害物を回避することを述べた。しかし、フォロワが回避行動をとっている限り、フォロワと搬送物体との姿勢角は一致しない。本節では、フォロワと搬送物体の姿勢に差が生じた場合のリーダーへの追従性について考察を行う。

フォロワの軌道推定誤差を  $\Delta^1 x_{d1}$  とすると、 $\Delta^1 x_{d1}$  は自らの運動誤差  $\Delta^1 x_1$  およびリーダー、フォロワ、搬送物体の姿勢角  $\theta_l, \theta_f, \theta_s$  を用いて、次のように表される<sup>(5)</sup>。

$$\Delta^1 x_{d1} = 2U_1 \Delta^1 x_1 \quad (14)$$

$$U_1 = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\cos(\theta_l - \theta_f) \cos(\theta_l - \theta_s)}{\cos(\theta_f - \theta_s)} \right) \quad (15)$$

しかし、フォロワは  $\theta_f$  を求めることができないので、推定誤差を

$$\Delta^1 \tilde{x}_{d1} = \frac{\Delta^1 x_{d1}}{U_1} = 2\Delta^1 x_1 \quad (16)$$

で置き換えて推定器を構成する(図9(a))。このとき推定器は等価的に、図9(b)となる。この推定器が安定になるには、 $U_1$  が正となれば良い<sup>(5)</sup>。このとき式(15)から、

$$-\frac{\pi}{2} < \theta_l - \theta_s < \frac{\pi}{2} \quad (17)$$

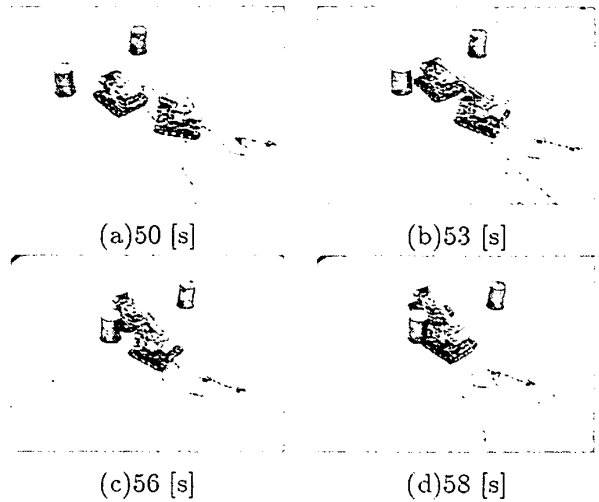


Fig. 12 Transportation(conventional method)

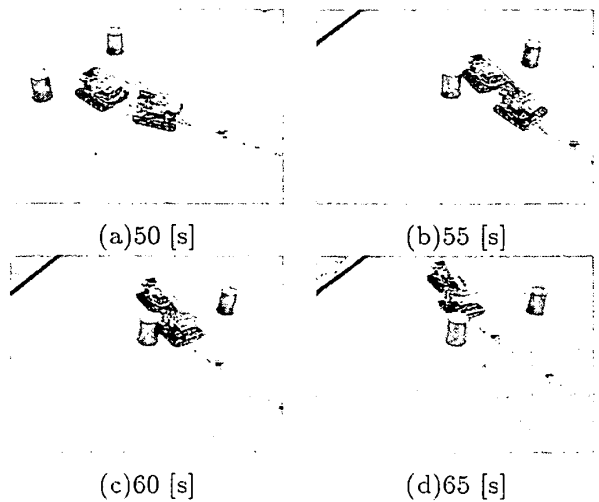


Fig. 13 Transportation(propose method)

$$-\cos^{-1}\left(\frac{1}{3}\right) < \theta_l - \theta_s < \cos^{-1}\left(\frac{1}{3}\right) \quad (18)$$

を得る。よってフォロワと物体の姿勢の差が、式(18)を満たしている限り、フォロワは回避行動をとっても、リーダーの軌道を推定することができる。

5. 実験

図10に示すような、力センサを搭載した2台のクローラ型移動ロボットに、前章で提案した障害物回避のアルゴリズムを適用し、単一物体の搬送実験を行った。リーダーとフォロワは、それぞれ独立した制御装置で制御され、自由に回転できるフリージョイントを介して物体を保持している。また、各ロボットはアクチュエータに取り付けられたエンコーダによって現在位置を推定している。本実験では、カメラ等のビジョンセンサを利用できなかったため、障害物の位置があらかじめ与えられているとし、フォロワはこの情報により、搬送物体から障害物までの最短距離を求めた。

実験では  $L = 0.6[m]$  としてリーダーの目標軌道を図

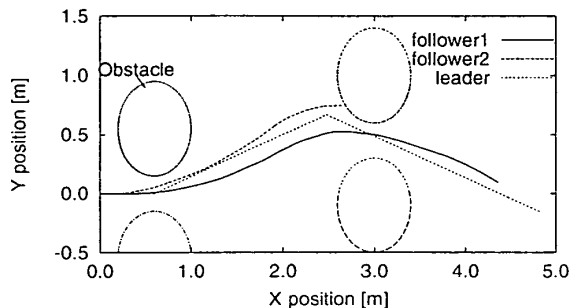


Fig. 14 Real trajectory of leader and follower

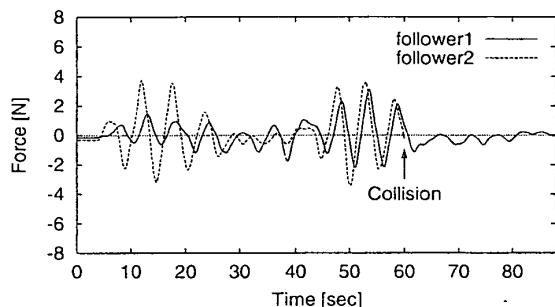


Fig. 15 The force applied to the robot along motion direction

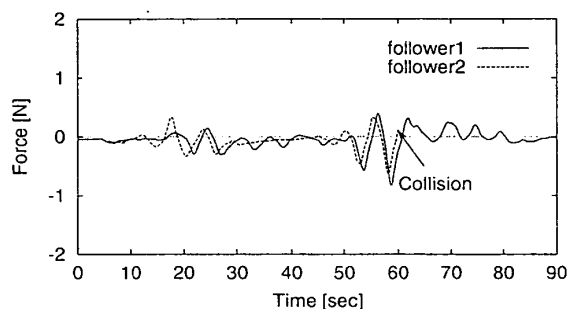


Fig. 16 The force applied to the robot perpendicular to the robots' motion direction

11のように与えた。その結果を図12~16に示す。図12は、文献(5)で提案した方法を適用した場合、図13は、本稿で提案したアルゴリズムを適用した場合の実験の様子を示している。また、図14~16の follower1 は本稿で提案した方法を適用したフォロワの軌道を、また follower2 は文献(5)で提案した方法を適用した場合のフォロワの軌道を示している。

図14から、follower2は障害物に接触するのに対して、follower1は、障害物を十分に回避していることがわかる。図15、16はそれぞれ、物体からフォロワの進行方向および進行方向に対して垂直な向きに働く力を示している。これらの図から、物体に加わる力は十分に小さく、本稿で提案する方法を適用したフォロワは、障害物回避と協調搬送を同時に実現している。

## 6. 結言

本稿では、2台の独立2輪駆動型移動ロボットによる単一物体の搬送作業を想定し、機能分散の考えを適用した障害物回避アルゴリズムを提案した。また、実験により、提案したアルゴリズムの有効性を示した。今後は不整地環境における車輪と接地面との接地状態の変化や、ロボット間での負荷分散を考慮した協調作業について扱っていく予定である。

## 文 献

- (1) 橋本, 大場, 江口: “複数の移動ロボットによる動的搬送制御法”, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.6, (1995), pp886-893
- (2) 太田, 武衛, 新井, 大隅, 陶山: “2台の移動ロボットの協調による搬送制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.2, (1996), pp263-270
- (3) K. Kosuge, T. Oosumi: “Decentralized Control of Multiple Robots Handling an Object”, Proc. of 1996 IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, (1996), pp.318-323
- (4) 小菅, 大住, 千葉: “単一物体を操る複数移動ロボットの分散協調制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.16, (1998), pp87-95.
- (5) 小菅, 大住, 千葉: “分散制御された2台の非ホロノミックな移動ロボットによる単一物体の協調搬送”, 第2回ロボティクスシンポジウム予稿集, (1997), pp233-238
- (6) 長谷川 勉: “障害物回避”, 人工知能学会誌, Vol5, No.6, (1990), pp731-736
- (7) Marilena Vendittelli, Jean-Paul Laumond: “Obstacle Distance for Car-Like Robots”, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, Vol.15, No.4, (1999), pp678-691
- (8) 宮田, 太田, 今西, 相山, 新井: “機能分化を伴う協調搬送計画”, 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1998), pp111-112
- (9) 高野: “車輪移動のABC”, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.3, (1995), pp355-360
- (10) Daniel J. Stilwell, John S. Bay: “Toward the Development of a Material-Transport System using Swarms of Ant-like Robots”, Proc. of 1993 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.1, (1993), pp766-771

## 付録 デュアルキャストアクション

D.J. Stillwellらは、ロボットがキャストと同等の動きをするようにロボットのアクチュエータ出力を制御するキャストアクションを提案した<sup>(10)</sup>。本稿では、速度制御型アクチュエータによって駆動される独立2輪駆動型移動ロボットにこの考えを適用し、それを拡張したデュアルキャストアクション<sup>(5)</sup>について説明する。

図2のように、移動ロボットの左右の車輪の中心で、フリージョイントを介して物体を把持し、ソフトウェアで、キャストの動きを実現させることを考える。実際のキャストは、図17のように車軸と物体を把持する点との間に、オフセット  $C_{off}$  が存在している。このオフセットによって、キャストは力の作用する方向に向くことができる。フォロワが実際のキャストの動きを模擬するようフォロワの角速度を次式のように制御する。

$$D_{cast}\dot{\theta}_1 = C_{off}f_{1y}sgn(f_{1x}) \quad (19)$$

すなわち、フォロワはキャストの動きを実現するために、式(19)のように角速度  $\dot{\theta}_1$  を生成する。ここで、 $f_{1x}$ ,  $f_{1y}$  は、フォロワの進行方向および進行方向に対して垂直な向きに作用する力、 $D_{cast}$  は、キャストの特性を表すパラメータで、 $D_{cast}$ ,  $C_{off}$  は正の定数である。

図17(b)に示すように  $f_{1x} \geq 0$  であれば、フォロワは最小の動きで運動の方向を合わせることができる。しかし、図17(c)に示すように  $f_{1x} < 0$  である場合、フォロワは90度以上回転してしまう。このとき、フォロワの姿勢がリーダーの姿勢に対して垂直となる特異な状態に陥ってしまい、リーダーの運動する方向に対して、速度を生成できなくなる。この動作を回避するため、図18(b),(c)のように2種類のキャストの特性を持つ

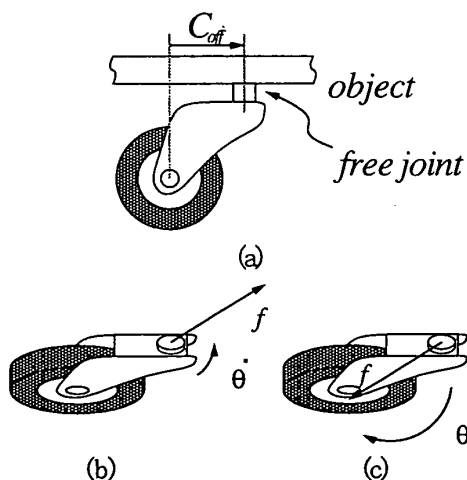


Fig. 17 Real caster action

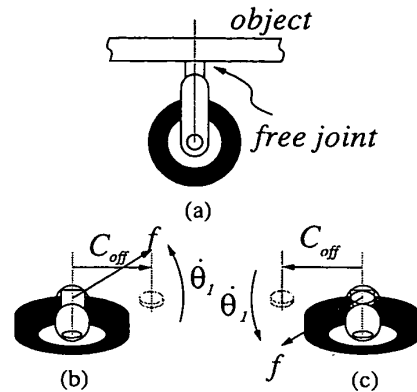


Fig. 18 Dual caster action

ようにフォロワを制御する。すなわち  $f_{1x}$  の符号に対して、フォロワを次式のように制御する。

$$D_{cast}\dot{\theta}_1 = C f_{1y}sgn(f_{1x}) \quad (20)$$

ただし、 $C$  は

$$C = \begin{cases} C_{off}, & \text{for } f_{1x} \geq 0 \\ -C_{off}, & \text{for } f_{1x} < 0 \end{cases} \quad (21)$$

である。このように、フォロワは2種類のキャストの特性を持つように制御される。このフォロワの動きをデュアルキャストアクションと呼ぶ。このようにデュアルキャストアクションを用いると、特異な状態に陥ることなく、ロボットに作用する力の方向にその姿勢を一致させることができる。