日本機械学会論文集(C編)
69巻677号(2003-1)

論文 No. 02-0561

ロボット間の幾何学的関係を必要とせず物体の搬送を実現する複数移動ロボットの分散協調制御*

平田泰久*1, 小菅一弘*1, 浅間　一*2
嘉悦早人*2, 川端邦明*2

Desentralized Motion Control of Multiple Mobile Robots for Transporting an Object without Geometric Relations among Robots

Yasuhisa HIRATA*3, Kazuhiro KOSUGE, Hajime ASAMA,
Hayato KAETSU and Kuniaki KAWABATA

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

In this paper, we propose a decentralized motion control algorithm of multiple mobile robots for transporting a single object in coordination. In this algorithm, each robot is controlled as if it has a caster-like dynamics and transports a single object in coordination with other robots without using the geometric relations among robots. The proposed control algorithm is experimentally applied to multiple omni-directional mobile robots. Experimental results illustrate the validity of the proposed control algorithm.

Key Words: Robot, Moving Robot, Motion Control, Coordinated Motion Control, Decentralized Motion Control, Transportation

1. はじめに

人間は，複雑な作業を実現するために，自分の両手を器用に用いることができる．また，1人では困難な作業を実現するためには，他人の助けを借りる．このように人間は，器用さを要求されるような複雑な作業や重量物のハンドリングなどの様々な作業を，両手や他人との協調によって効率的に実現することができる．これは，複数のロボットによる協調作業においても同様であり，特に複数のロボットによる単一物体の協調操り問題に関しては，多くの研究が行われ，様々な制御系が提案されてきた(1)~(4)*etc.*.

このような制御系のほとんどは，物体の大きさや，各ロボットの把持点間の位置及び姿勢の幾何学的関係が既知であるという仮定に基づいて設計されている．この仮定は，複数のマニピュレータを1つの制御装置で集中制御し，さらに既知形状の物体を操る場合には大きな問題にはならないが，分散制御された複数の移動ロボットを協調的に用い，未知形状の物体を操る場合には現実的ではない．

マニピュレータの場合と異なり，通常，移動ロボットでは車輪などの滑りによるデッドレコニングの信頼性の低さが問題となる．したがって，複数の移動ロボットを協調的に用いる場合には，各ロボットにおいて避けられない車輪の滑りに対してロバストな制御系を設計しなければならない．また，未知形状物体を操る場合には，各ロボット間の位置や姿勢の幾何学的関係をどのように扱うかが問題となる．

小菅ら(5)は，各ロボットに搭載されたエンコーダの情報のみを用いることにより，各ロボットの把持点間の座標系を較正する手法を提案した．また，この手法を拡張することにより，各ロボット間の位置及び姿勢の幾何学的関係を求めるアルゴリズムを提案した(6)．このような手法と従来提案されている協調制御系を利用すれば，複数の移動ロボットによる物体の協調搬送を実現することができる．

しかし，人間同士による物体の協調搬送作業に注目すると，人間は必ずしも物体の大きさや他人と自分との把持点間の幾何学的関係を正確に把握しているわけではない．また，把持点での手の滑りや地面と足との

* 原稿受付　2002年5月7日.
*1 正員，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).
*2 正員，理化学研究所分散適応ロボティクス研究ユニット(〒351-0198 和光市広沢2-1).
E-mail: hirata@irs.mech.tohoku.ac.jp

NII-Electronic Library Service

間に滑りが生じたとしても，容易に搬送作業を継続することができる．そこで，本研究では，物体の大きさや各ロボットの把持点間の位置や姿勢の幾何学的関係を必要とせずに協調搬送を実現し，さらに物体の把持点や車輪の接地点で発生する滑り等に対してロバストとなるような分散協調制御系について考える．

以下，本論文では，著者らが文献(4)で提案した制御系を拡張することにより，ロボット間の幾何学的関係を必要とせずに単一物体の搬送を実現する制御系を提案する．これにより，屋外や家庭内などの一般的な環境において，小型の移動ロボットを複数台用いた未知形状物体のハンドリングを実現することができる．提案した制御系は，3台の全方向移動ロボットに適用し実験を行い，その有効性を示す．

2. 協　調　搬　送

従来，著者らは文献(4)において，リーダ・フォロワタイプの分散協調制御系を提案してきた．この制御系では，リーダと呼ばれる1台のロボットに目標軌道を与え，残りのフォロワと呼ばれるロボットはリーダの目標軌道を推定し，リーダと協調して物体の搬送を実現した．しかし，この制御系は，各ロボットが物体の代表点回りにコンプライアンス制御されることを前提としているため，各ロボットはあらかじめ物体の代表点の位置を知る必要があった．

本研究では，ロボット間の幾何学的関係を用いずに複数移動ロボットの協調制御を実現するために，図1に示すようなキャスタの運動に注目する．ここで，図1に示すようなキャスタが複数取り付けられた，椅子や机などの運動について考えよう．複数のキャスタが取り付けられた物体に何らかの方法で力が加わると，各キャスタは，物体に加わった力の方向に回転し，その方向に物体の運動が生成される．このとき，各キャスタの取付け位置は，物体の重量が安定して支えられている限り特に考慮する必要はない．

いま，各ロボットが搬送物体の重量を安定してサポートし，さらに，実際のキャスタの特性を満たすように運動を行うと仮定すると，その物体は，複数のキャスタによって支えられているのと同様であると考えることができる．このとき，キャスタの特性を持った移動ロボットに，実際のキャスタの特徴を利用して，協調制御系を設計することができれば，各ロボットは他のロボットの位置や姿勢の幾何学的情報を用いることなく，協調搬送が実現できると考えられる．

本論文では，文献(4)で提案したリーダ・フォロワタイプの分散協調制御系を拡張し，キャスタの運動特性

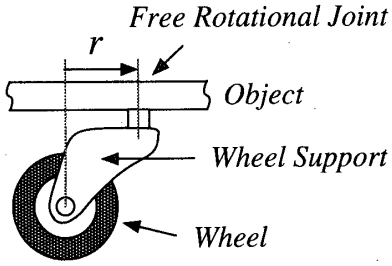


Fig. 1　Real Caster

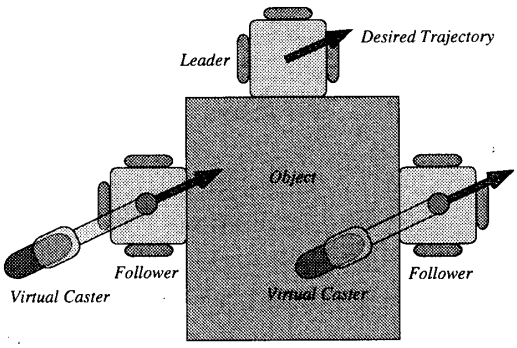


Fig. 2　Motion of Object

を利用することによって，各ロボット間の幾何学的関係を必要とせずに物体の協調搬送を実現する制御系について考える．いま，リーダはある運動特性を持つように制御し，目標軌道に基づいて運動を生成させ，フォロワにはキャスタの運動を模擬させる．このとき，リーダが目標軌道に基づき運動を開始すると，物体に力を加えることとなり，結果的にフォロワにはリーダの進行方向へ力が加えられる．

これより，フォロワに実現された仮想的なキャスタは，図2に示されるようにリーダによって加えられた力の方向に回転し，結果的に各ロボットによって把持された物体は，リーダの進行方向へ1自由度の運動を生成する．いま，その1自由度運動のみに注目し，フォロワがリーダの目標軌道を推定することができれば，各ロボットはお互いの位置や姿勢の幾何学的関係を用いることなく協調搬送が実現できる．

このような協調制御系を設計することにより，複数移動ロボットによる未知形状物体の搬送が可能となる．また，たとえ車輪の滑りなどにより，各ロボットに設定された座標系に相対誤差が生じたとしても，各ロボットに実現されたキャスタの車輪の角度は，キャスタの特性により自動的に目標の角度に修正され，ロボット間で通信などを用いて座標系の較正をする必要なく協調搬送を継続することができる．

NII-Electronic Library Service

3. 各ロボットの制御系

本章では，前章で示したような特性を有する複数の全方向移動ロボットを用いて協調搬送を実現するために，各ロボットに座標系を設定し，その座標系に基づく，リーダ及びフォロワの制御系を提案する．

3·1 座標系の設定　はじめに，図3に示すような座標系 ${}^{b}\Sigma$, ${}^{r}\Sigma_l$, ${}^{r}\Sigma_i$, ${}^{d}\Sigma_l$, ${}^{c}\Sigma_i$ を定義する．ただし，座標系の添え字 l,i はそれぞれリーダおよび i 番目のフォロワを表す．${}^{b}\Sigma$ はベース座標系であり，他の座標系の姿勢を記述する座標系である．${}^{r}\Sigma_l$, ${}^{r}\Sigma_i$ は，その原点がロボットに搭載された力覚センサの位置と一致し，ロボットに固定された座標系である．ベース座標系に対するロボット座標系の回転角度を ${}^{r}\theta_l$, ${}^{r}\theta_i$ と定義することにより，ロボットの姿勢を表す．

また，${}^{d}\Sigma_l$ はリーダの目標軌道の接線方向を常に x 軸とし，その原点がロボット座標系の原点と一致する目標軌道座標系である．リーダはこの座標系に目標軌道を指定し，ロボット座標系に目標姿勢を指定することにより，目的の運動を実現する．最後にフォロワにキャスタの運動特性を持たせるために，キャスタ座標系 ${}^{c}\Sigma_i$ を定義する．${}^{c}\Sigma_i$ は，その原点がロボット座標系の原点と一致し，原点回りに自由に回転することのできる座標系である．このとき，ベース座標系における，キャスタ座標系の回転角度を ${}^{c}\theta_i$ と定義する．

3·2 リーダの制御　本論文では，文献[4]の協調制御系を拡張することにより，物体の協調搬送を実現するため，リーダを物体の把持点回りにおいて，あるコンプライアンス特性を持つように制御する．ここでは，目標軌道座標系の x 軸が常に目標軌道の接線方向を向いていると仮定し，次式の特性を満たすようにリーダを制御する．

$$
\begin{aligned}
{}^{d}D_{xl}\,{}^{d}\Delta\dot{x}_l + {}^{d}K_{xl}\,{}^{d}\Delta x_l &= {}^{d}f_{xl} \qquad (1)\\
{}^{d}D_{yl}\,{}^{d}\Delta\dot{y}_l + {}^{d}K_{yl}\,{}^{d}\Delta y_l &= {}^{d}f_{yl} \qquad (2)
\end{aligned}
$$

ここで，${}^{d}D_{xl}$, ${}^{d}D_{yl} \in R$ は正の減衰係数を表し，${}^{d}K_{xl}$ ${}^{d}K_{yl} \in R$ は正の剛性係数を表す．また，${}^{d}f_{xl}$, ${}^{d}f_{yl} \in R$ はリーダの目標軌道座表系に働く力を表す．ここで，${}^{d}\Delta x_l$, ${}^{d}\Delta y_l \in R$ はリーダの運動誤差を表し，リーダの実際の軌道 ${}^{d}x_l$, ${}^{d}y_l \in R$ とリーダの目標軌道 ${}^{d}x_{dl}$, ${}^{d}y_{dl} \in R$ との差より以下のように計算される．

$$
\begin{aligned}
{}^{d}\Delta x_l &= {}^{d}x_l - {}^{d}x_{dl} \qquad (3)\\
{}^{d}\Delta y_l &= {}^{d}y_l - {}^{d}y_{dl} \qquad (4)
\end{aligned}
$$

また，リーダの回転に関しては，ロボット座標系において式 (1) と同様に次式の特性を満たすように制御する．

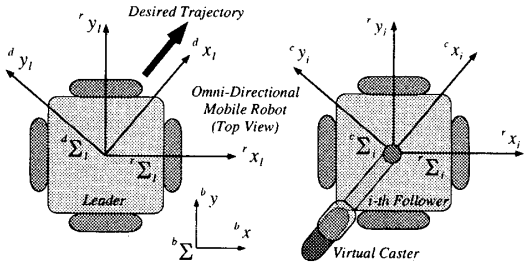


Fig. 3　Coordinate System

$$
{}^{r}D_{\theta l}\,{}^{r}\Delta\dot{\theta}_l + {}^{r}K_{\theta l}\,{}^{r}\Delta\theta_l = {}^{r}n_l \qquad (5)
$$

ここで，${}^{r}D_{\theta l} \in R$ は正の減衰係数を表し，${}^{r}K_{\theta l} \in R$ は正の剛性係数を表す．また，${}^{r}n_l \in R$ はリーダのロボット座標系に働くモーメントを表す．ここで，${}^{r}\Delta\theta_l \in R$ はリーダの姿勢に関する運動誤差を表し，リーダの実際の姿勢 ${}^{r}\theta_l \in R$ とリーダの目標姿勢 ${}^{r}\theta_{dl} \in R$ との差より以下のように計算される．

$$
{}^{r}\Delta\theta_l = {}^{r}\theta_l - {}^{r}\theta_{dl} \qquad (6)
$$

リーダの全方向移動を実現させる各車輪は，速度サーボアンプによって駆動され，指定された角速度に基づいて回転するものとすると，リーダは指令された目標軌道に基づいて運動を生成することができる．

3·3 フォロワの制御　次に，フォロワにキャスタの運動特性を持たせる制御系について考える．全方向移動ロボットにキャスタの運動特性を持たせる制御系は，文献[7]において著者らによって提案され，人間と複数の移動ロボットによる物体の協調ハンドリングに利用された．本論文では，文献[7]で提案した手法を拡張し，フォロワの軌道推定手法を構築することにより，複数の移動ロボットによる物体の協調搬送を実現する．

図1に示すように，キャスタは車輪とフリージョイント，そして，それらをつなぐオフセットを有した車輪サポートから構成される．このとき，キャスタの運動特性は，キャスタのフリージョイントに働く力/モーメントに基づいて3種類の運動によって特徴づけられる．1つは，キャスタの車輪の進行方向に加わる力に基づく並進運動であり，2つ目は，フリージョイント部にキャスタの車輪の進行方向と垂直な方向に働く力に基づく，車輪サポートの回転運動である．3つ目は，フリージョイント部に働くモーメントによる，フリージョイントのみの回転運動である．

本節では，はじめに，この3種類の運動を模擬するために文献[7]で提案された制御系について紹介する．

NII-Electronic Library Service

キャスタの進行方向に基づく並進運動は，キャスタ座標系の x 軸方向に働く力 ${}^{c}f_{xi}$ に基づいて，次式の特性を持つように制御することにより実現する．

$$ {}^{c}D_{xi}{}^{c}\dot{x}_i = {}^{c}f_{xi} \tag{7} $$

ここで，${}^{c}D_{xi} \in R$ は正の減衰係数を表し，${}^{c}\dot{x}_i \in R$ はキャスタ座標系における x 軸方向のロボットの実際の速度を表す．

次に，車輪サポートの運動を模擬するために，キャスタ座標系の y 軸方向に働く力 ${}^{c}f_{yi}$ に基づいて，次式によってキャスタ座標系の回転速度 ${}^{c}\dot{\theta}_i$ を求める．

$$ {}^{c}\dot{\theta}_i = \frac{1}{r_i\ {}^{c}D_{yi}}{}^{c}f_{yi} \tag{8} $$

ここで，${}^{c}D_{yi} \in R$ は正の減衰係数を表し，r_i は図1に示すような，キャスタのオフセットを表す．各フォロワを式 (8) で導出されたキャスタ座標系の回転速度 ${}^{c}\dot{\theta}_i$ に基づいて次式のように制御し，また，キャスタ座標系をその回転速度 ${}^{c}\dot{\theta}_i$ に基づいて回転させると，キャスタの車輪サポートの運動が実現できる．

$$ {}^{c}\dot{y}_i = r_i\ {}^{c}\dot{\theta}_i \tag{9} $$

ここで，${}^{c}\dot{y}_i \in R$ はキャスタ座標系における y 軸方向のロボットの実際の速度を表す．

各ロボットが物体をしっかり把持することにより物体の重量をサポートすると，ロボットと物体との間の幾何学的関係は変化しない．しかし，フォロワがキャスタのフリージョイントの特性を満たすためには，フォロワに働くモーメントに基づいて，フリージョイント回りの回転運動を実現しなければならない．そこで，各フォロワに働くモーメント ${}^{r}n_i$ によって，次式の特性を満たすように各フォロワを制御する．

$$ {}^{r}D_{\theta i}{}^{r}\dot{\theta}_i = {}^{r}n_i \tag{10} $$

ここで，${}^{r}D_{\theta i} \in R$ は正の減衰係数を表し，${}^{r}\dot{\theta}_i \in R$ はロボットの実際の回転速度を表す．ただし，このとき，各ロボットの ${}^{r}\theta_i$ と ${}^{c}\theta_i$ は独立であるものとする．

式 (7)〜式 (10) で示された制御系を用いることにより，各フォロワはキャスタの運動特性を持つ．これにより，フォロワは前節で示したように，物体を介してリーダによって加えられた力の方向にキャスタの進行方向を向けることができる．ここで，さらにフォロワがリーダの進行方向に対してその目標軌道を推定することができれば，各ロボットは他のロボットの位置や姿勢の幾何学的関係を用いることなく協調搬送が実現できる．

そこで，キャスタの進行方向のみに関しては，文献[4]で提案した制御系を利用し，フォロワがリーダの軌道を推定するために，式 (7) で示された制御系を次式のように変更する．

$$ {}^{c}D_{xi}{}^{c}\Delta\dot{x}_i + {}^{c}K_{xi}{}^{c}\Delta x_i = {}^{c}f_{xi} \tag{11} $$

ここで，${}^{c}K_{xi} \in R$ は正の剛性係数を表す．また，${}^{c}\Delta x_i \in R$ はフォロワの運動誤差を表し，フォロワのキャスタ座標系の x 軸における実際の軌道 ${}^{c}x_i \in R$ とフォロワがリーダの運動を推定した軌道 ${}^{c}x_{ei} \in R$ との差より以下のように計算される．

$$ {}^{c}\Delta x_i = {}^{c}x_i - {}^{c}x_{ei} \tag{12} $$

このとき，フォロワの全方向移動を実現させる各車輪が，速度サーボアンプによって駆動され，指定された角速度に基づいて回転するものと仮定すると，フォロワは，リーダによって加えられた力の方向に仮想的に実現されたキャスタを回転させ，次章で示す軌道推定手法を用いて推定された軌道に基づいて運動を生成する．

4. 分散協調制御系

本章では，はじめにリーダとキャスタの運動特性を有した複数のフォロワによって把持された物体の運動について考える．そして，その運動特性を利用して，フォロワがリーダの目標軌道を推定する手法を提案する．

4·1 物体の運動　本章では，リーダと n 台のフォロワによる単一物体の協調搬送を実現する制御系について考える．リーダが目標軌道に基づいて運動したとき，リーダは物体に対し，その目標軌道の方向に力を加える．フォロワに実現されたキャスタの車輪の進行方向が，その力の方向に基づいて，瞬間的に回転するものと仮定すると，キャスタの特性を持ったロボットによって把持された物体の運動は，そのキャスタの車輪の向きによって2種類の運動として分類することができる．

1つは図2に示されるように，各ロボットのキャスタの車輪の向きがすべて一致している場合である．この場合，各ロボットはキャスタの進行方向の向きに運動を生成するため，システム全体の運動はキャスタの進行方向への並進1自由度運動と見なすことができる．2つ目は，図4に示されるように，各ロボットに実現されたキャスタの進行方向に対する垂線がある一点で交わる場合である．この場合，各ロボットはキャスタの進行方向の向きに運動を生成し，かつ他のロボット

NII-Electronic Library Service

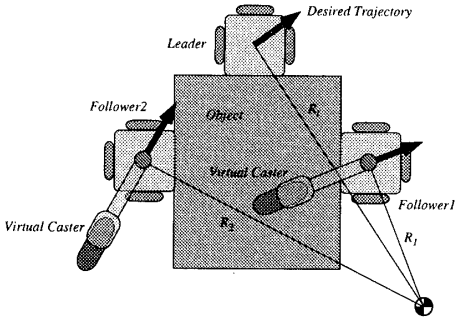


Fig. 4　Rotational Motion of Object

のキャスタの向きによって運動が拘束されるため，システム全体の運動はその点回りにおける回転1自由度運動と見なすことができる．

図2に示した運動は，図4における物体の回転中心が無限遠方にある場合と考えることができる．したがって，キャスタの特性を有した各フォロワによって把持された物体の運動は，図4で示した，ある点回りの回転1自由度運動として記述できる．そこで本論文では，この回転1自由度運動において，フォロワがリーダの目標軌道をどのように推定するかについて考える．

4·2　仮想リーダ　リーダと1台のフォロワによる協調搬送問題では，フォロワの運動はリーダの運動のみによって影響を及ぼされるため，フォロワは自分自身の情報を用いてリーダの運動を推定することができる[4]．しかし，フォロワの台数が1台より多くなると，i番目のフォロワ以外のすべてのロボットがi番目のフォロワの運動に影響を及ぼすので，i番目のフォロワはリーダに与えられた目標軌道を推定できなくなる．

そこで，図5に示すように，i番目のフォロワに対して，ロボットを2つのグループに分類する．第1のグループはi番目のフォロワそれ自身，第2のグループはリーダを含んだ残りのロボットである．本論文では，i番目のフォロワに対し，それ以外のロボットをi番目の仮想リーダと呼ぶことにする．すなわち，i番目の仮想リーダは，リーダとj番目のフォロワ$(j=1,\ldots,i-1,i+1,\ldots,n)$から成り，$i$番目のフォロワから見ると，1台のリーダのように振る舞うと考えられる．

本章では，この仮想リーダの考え方を用いて，i番目のフォロワがi番目の仮想リーダの目標軌道を推定する手法を提案する．ここで，フォロワは前章で示したように，リーダによって加えられた力の方向に仮想的に実現されたキャスタの車輪を瞬間的に回転すると仮定し，そのキャスタの車輪の進行方向のみに軌道推定を行うものとする．ただし，議論を簡単にするため

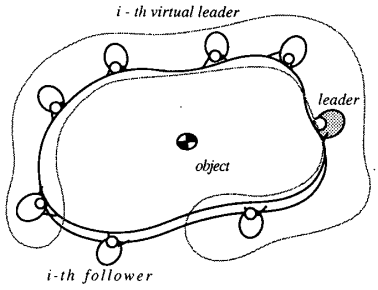


Fig. 5　Virtual Leader

に，リーダとi番目のフォロワは次式に示すような同一のパラメータを用いて制御されるものとする．

$$D = {}^{d}D_{xl} = {}^{r}D_{\theta l} = {}^{c}D_{xi} \tag{13}$$

$$K = {}^{d}K_{xl} = {}^{r}K_{\theta l} = {}^{c}K_{xi} \tag{14}$$

4·3　軌道推定 ($R_l \neq 0$ の場合)　はじめに，リーダの目標軌道が図4に示されるように，物体の回転中心回りに生成される，すなわち，リーダと回転中心との距離R_lが$R_l \neq 0$の場合について考えよう．いま，操る物体に外力が働かないと仮定すると，それぞれのロボットに働く力には次式のような関係が成り立つ．

$$R_l\,{}^{d}f_{xl} + \sum_{i=1}^{n} R_i\,{}^{c}f_{xi} = 0 \tag{15}$$

ここで，R_l, R_iは図4に示されるように，リーダおよび各フォロワと物体の回転中心との距離である．

このとき，式(1), (11), (15)より，次式のような関係が得られる．

$$D\left(R_l\,{}^{d}\Delta\dot{x}_l + \sum_{i=1}^{n} R_i\,{}^{c}\Delta\dot{x}_i\right) + K\left(R_l\,{}^{d}\Delta x_l + \sum_{i=1}^{n} R_i\,{}^{c}\Delta x_i\right) = 0 \tag{16}$$

式(16)より，$R_l\,{}^{d}\Delta x_l + \sum_{i=1}^{n} R_i\,{}^{c}\Delta x_i$の初期値が零でなくても，十分時間がたった状態では次式が成り立つことがわかる．

$$R_l\,{}^{d}\Delta x_l + \sum_{i=1}^{n} R_i\,{}^{c}\Delta x_i = 0 \tag{17}$$

ここで，仮想リーダの概念を適用すると，i番目の仮想リーダのダイナミクスは次のように導かれる．

$$D\left(R_l\,{}^{d}\Delta\dot{x}_l + \sum_{j=1(j\neq i)}^{n} R_j\,{}^{c}\Delta\dot{x}_j\right) + K\left(R_l\,{}^{d}\Delta x_l + \sum_{j=1(j\neq i)}^{n} R_j\,{}^{c}\Delta x_j\right) = R_l\,{}^{d}f_{xl} + \sum_{j=1(j\neq i)}^{n} R_j\,{}^{c}f_{xj} \tag{18}$$

NII-Electronic Library Service

ただし，

$$\sum_{j=1(j\neq i)}^{n} c_j = \sum_{j=1}^{i-1} c_j + \sum_{j=i+1}^{n} c_j \tag{19}$$

とする．このとき，i 番目の仮想リーダの運動誤差を ${}^d\Delta x_{li}$ とすると，次式のような関係が成り立つ．

$$R_{li}\ {}^d\Delta x_{li} = R_l\ {}^d\Delta x_l + \sum_{j=1(j\neq i)}^{n} R_j\ {}^c\Delta x_j \tag{20}$$

ただし，R_{li} は i 番目の仮想リーダと物体の回転中心との距離を表す．ここで，式 (17), (20) から，i 番目の仮想リーダと i 番目のフォロワの運動誤差の関係を求めると次式のようになる．

$$R_{li}\ {}^d\Delta x_{li} + R_i\ {}^c\Delta x_i = 0 \tag{21}$$

このとき，${}^d x_{dli}$ を i 番目の仮想リーダの目標軌道とすると，i 番目の仮想リーダの運動誤差と，i 番目のフォロワの運動誤差との関係は，次式のように表すことができる．

$${}^c\Delta x_i - \frac{R_i}{R_{li}}\ {}^d\Delta x_{li} = \frac{R_i}{R_{li}}\ {}^d x_{dli} - {}^c x_{ei} \tag{22}$$

ここで，式 (21), (22) より ${}^d\Delta x_{li}$ を消去すると，i 番目のフォロワの推定誤差 ${}^d\Delta x_{di}$ は次式のように表せる．

$$\begin{aligned} {}^d\Delta x_{di} &= \frac{R_i}{R_{li}}\ {}^d x_{dli} - {}^c x_{ei} \\ &= 2\,U_{xi}{}^c\Delta x_i \end{aligned} \tag{23}$$

ただし，U_{xi} は以下のようになる．

$$U_{xi} = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{R_i^2}{R_{li}^2}\right) \tag{24}$$

ここで，U_{xi} を計算すれば，式 (23) より導出される推定誤差を用いてフォロワは仮想リーダの目標軌道を推定することができる．しかし，i 番目のフォロワは，実際物体の回転中心までの距離 R_{li} ,R_i を知ることができない．そこで，推定誤差を以下のように置き換えることを考える．

$${}^d\Delta\tilde{x}_{di} = 2\ {}^c\Delta x_i \tag{25}$$

式 (23), (25) より，${}^d\Delta\tilde{x}_{di}$ は

$${}^d\Delta\tilde{x}_{di} = \frac{1}{U_{xi}}{}^d\Delta x_{di} \tag{26}$$

と表すことができる．この関係から推定器を構成すると図6(a) のようになり，それを等価変換すると図6(b) のようになる．ここで ${}^d\Delta\tilde{x}_{di}$ から ${}^c x_{ei}$ を推定するために，すべての U_{xi} に対し，図6が安定となるような伝達関数 G_i を次のように設計する．

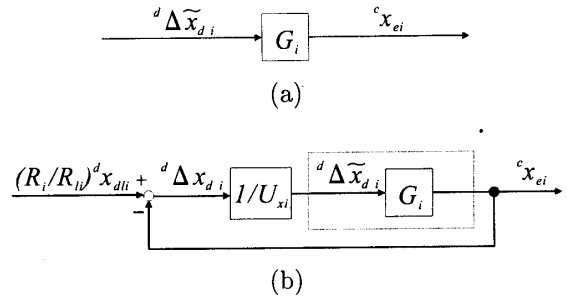


Fig. 6　Estimator

$$G_i = \frac{a_i s + b_i}{s^2} \tag{27}$$

このとき，U_{xi} は常に正となるので，推定パラメータが $a_i > 0$, $b_i > 0$ のとき，このフィードバックシステムの安定性が保証される．これにより，各フォロワはそれ自身の仮想リーダの目標軌道を推定することができ，結果的に，複数のロボットでの協調搬送が実現できる．

4·4　軌道推定 ($R_l = 0$ の場合)　本節では $R_l = 0$ すなわちリーダがロボット座標系の原点回りに回転する場合について考えよう．いま，操る物体に外力が働かないと仮定すると，それぞれのロボットに働く力/モーメントには次式のような関係が成り立つ．

$${}^r n_l + \sum_{i=1}^{n} R_i\ {}^c f_{xi} = 0 \tag{28}$$

このとき，前節と同様に i 番目の仮想リーダと i 番目のフォロワの運動誤差との関係を求めると次式のように表すことができる．

$${}^r\Delta\theta_{li} + R_i\ {}^c\Delta x_i = 0 \tag{29}$$

ここで，${}^r\theta_{dli}$ は i 番目の仮想リーダの目標姿勢とすると，i 番目の仮想リーダと i 番目のフォロワの運動誤差との関係は次式のように表すことができる．

$${}^c\Delta x_i - R_i\ {}^r\Delta\theta_{li} = R_i\ {}^r\theta_{dli} - {}^c x_{ei} \tag{30}$$

式 (29), (30) より ${}^r\Delta\theta_{li}$ を消去すると，i 番目のフォロワの推定誤差 ${}^d\Delta\theta_{di}$ は次式のように表せる．

$$\begin{aligned} {}^d\Delta\theta_{di} &= R_i\ {}^r\theta_{dli} - {}^c x_{ei} \\ &= 2\,U_{\theta i}{}^c\Delta x_i \end{aligned} \tag{31}$$

ただし，$U_{\theta i}$ は以下のようになる．

$$U_{\theta i} = \frac{1}{2}(1 + R_i^2) \tag{32}$$

NII-Electronic Library Service

前節と同様に $U_{\theta i}$ はフォロワ自身では計算することができないので，推定誤差を以下のように置き換える．

$$ {}^{d}\Delta\tilde{\theta}_{di} = 2\ {}^{c}\Delta x_i \tag{33}$$

式 (31), (33) より，${}^{d}\Delta\tilde{\theta}_{di}$ は

$$ {}^{d}\Delta\tilde{\theta}_{di} = \frac{1}{U_i}\,{}^{d}\Delta\theta_{di} \tag{34}$$

と表すことができるので，${}^{d}\Delta\tilde{\theta}_{di}$ から ${}^{c}x_{ei}$ を推定するために，すべての $U_{\theta i}$ に対し，前節と同様に伝達関数 G_i を設計すれば，フォロワは仮想リーダの目標軌道を推定することができる．

式 (25), (33) より，各フォロワはリーダの軌道に関わらず，仮想リーダの目標軌道を自分自身の運動誤差 $2\ {}^{c}\Delta x_i$ を用いて計算することができる．これにより，分散制御された複数の移動ロボットにより単一物体の協調搬送が実現できる．

4·5　適応キャスタアクション　前節で提案した軌道推定手法は，フォロワに実現された仮想的なキャスタが，リーダの進行方向に瞬間的に回転するものと仮定して設計されている．しかし，もしキャスタのオフセットが大きな場合，キャスタ座標系の回転速度は大きくなり，リーダによって加えられた力の方向にキャスタ座標系が瞬間的に回転しない場合がある．そこで，本論文では，この問題を解決するため，適応キャスタアクションと呼ばれる手法を提案する．

各フォロワのキャスタ座標系の回転速度は，キャスタに設定されたオフセットによって決定する．したがって，このオフセットを変化させることで，ロボットの運動特性を任意に変化させることができる．例えば，式 (8) におけるキャスタのオフセット r_i を小さくすれば，ある力がロボットに働いたときのキャスタ座標系の回転速度は大きくなり，その方向に瞬間的にキャスタ座標系を合わせることができる．

また，キャスタのオフセット r_i を大きくすればキャスタ座標系の回転速度は小さくなり，進行方向に垂直な力成分 ${}^{c}f_{yi}$ より生じるロボットの運動への影響を小さくすることができ，直進運動の安定性が増す．このように，様々な状況に応じてキャスタのオフセットを変化させることができれば，その状況に適した運動を実現することができる．本論文では，これを適応キャスタアクションと呼ぶことにする．

いま，リーダの目標軌道に基づいて，フォロワが目的の方向にキャスタ座標系を向けるために，適応キャスタアクションを用いることを考える．一例として，フォロワの進行方向の速度に基づいてキャスタ座標系のオフセットを変化させる．フォロワは進行方向への速度 ${}^{c}\dot{x}_i$ が小さいとき，すなわち搬送作業開始時においては，キャスタのオフセット r_i を小さくする．これにより，各フォロワのキャスタ座標系はリーダの進行方向に瞬間的に回転する．

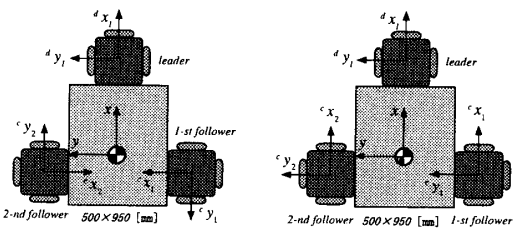
また，各ロボットの進行方向への速度 ${}^{c}\dot{x}_i$ が大きくなってくると，それに基づいてキャスタのオフセットを大きくする．これにより，各ロボットの進行方向以外の向きの力の影響を小さくすることができ，安定した協調搬送が実現できる．ただし，リーダに与えられる目標軌道は，搬送途中では連続的に変化するものとする．

5. 搬　送　実　験

提案した制御系を 3 台の全方向移動ロボットに適用することにより，単一物体の搬送実験を行った．実験に用いた全方向移動ロボットは，浅間ら[8]によって開発された ZEN と呼ばれる全方向移動ロボットを基に構成され，ボディフォースセンサと呼ばれる力覚センサ[9]を搭載している．実験ではリーダに図 7(a) に示す物体座標系の x 方向に，$1.5[m]$ を $20[sec]$ で動くという軌道を与えている．

この実験において，各フォロワのキャスタ座標系の初期角度は，図 7(a) に示されるように設定した．ここで，リーダに目標軌道が与えられ運動が開始されると，フォロワには図 7(a) に示される物体座標系の x 方向に力が働く．このとき，フォロワに実現されたキャスタは，適応キャスタアクションの手法を用いることによって，図 7(b) に示されるように，目標の向きに回転する．そして，その方向に対して各フォロワが提案した軌道推定法を用いることによって仮想リーダの目標軌道を推定し，搬送作業を実現する．

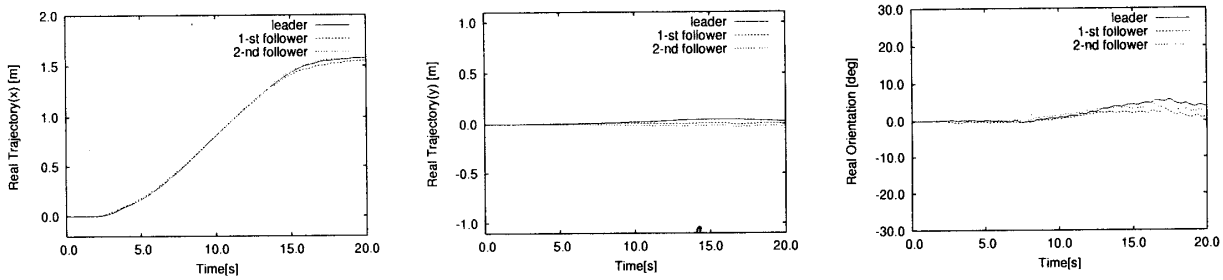
実験結果を図 8 に示す．これは，リーダおよび各フォロワの実際の軌道を表している．図 8 より，各ロボットの実際の軌道はほぼ一致しており，3 台のロボットにより姿勢を一定にし，かつ x 軸方向への搬送作業を実現していることがわかる．また，実験の一例を図 9 に示す．この実験では，前方にある障害物を避ける軌道をリーダに与えている．これらの結果より，各ロボットは単一物体をうまく搬送していることがわかる．



(a)　(b)

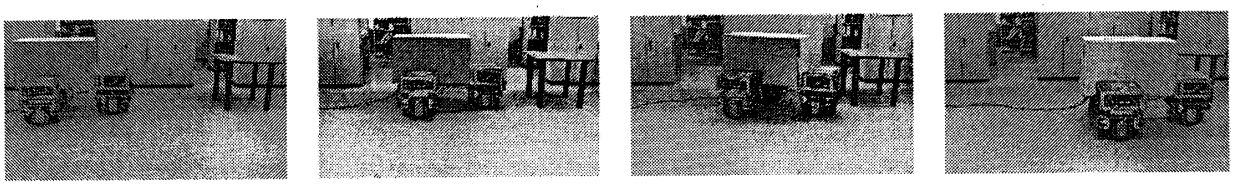
Fig. 7　Coordinate System

NII-Electronic Library Service



(a) Real Trajectory(x) [m] (b) Real Trajectory(y) [m] (c) Real Orientation [deg]

Fig. 8 Experimental Results



1 2 3 4

Fig. 9 Example of Transporting an Object by Multiple Mobile Robots

6. おわりに

本論文では，複数の移動ロボットを用いて単一物体の協調搬送を実現する分散協調制御系を提案した．提案した制御系を用いることにより，複数のロボットは，ロボット間の幾何学的関係を用いることなく物体のハンドリングを実現することができる．この制御系を3台の全方向移動ロボットに適用し，単一物体の搬送実験を行い，その有効性を示した．

尚，本研究の一部は平成13年度日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (A)(2)(12305028) の援助を受けて行われた．ここに感謝の意を表す．

References

(1) Y.F.Zheng, J.Y.S.Luh, "Optimal Load Distribution for Two Industrial Robots Handling a Single Object", *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.344-349, 1988.

(2) M.Uchiyama, "A Unified Approach to Load Sharing, Motion Decomposing and Force Sensing of Dual Arm Robots", *Robotic Research : The Fifth International Symposium*, pp. 225-232, 1990.

(3) M.Hashimoto, F.Oba, T.Eguchi, "Dynamic Object-Transportation Control Method by Multiple Mobile Robots", *Journal of the Robots Society of Japan*, Vol. 13, pp.886–893, 1995.

(4) 小菅一弘，大住智宏，千葉晋彦，"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, No.1, pp.87–95, 1998.

(5) 小菅一弘，関宏之，大住智宏，酒井勝，蟹谷清，"複数マニピュレータの分散協調制御における座標系の較正法"日本機械学会論文集 (C 編)，第64巻，第623号, pp.279–285, 1998.

(6) K.Kosuge, H.Seki, "Estimation of Position and Orientation of Multiple Robots Handling an Unknown Single Object in Coordination", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.984–989, 1999.

(7) Y.Hirata, K.Kosuge, H.Asama, H.Kaetsu, K.Kawabata, "Motion Control Of Distributed Robot Helpers Transporting A Single Object In Cooperation With A Human", *Experimental Robotics VII,LNCIS 271, Springer-Verlag*, pp.313–322, 2001.

(8) 淺間一，佐藤雅俊，嘉悦早人，尾崎功一，松元明弘，遠藤勲，"3自由度独立駆動型全方向移動ロボットの開発"，日本ロボット学会誌, Vo.14, No.2, pp.249-254, 1996.

(9) Y.Hirata, K.Kosuge, T.Oosumi, H.Asama, H.Kaetsu, K.Kawabata "Coordinated Transportation of a Single Object by Omni-Directional Mobile Robots with Body Force Sensor", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.12, No.3 pp.242–248 2000.

NII-Electronic Library Service