

## 複数移動ロボットによる大型物体の協調ハンドリング\*

平田泰久\*<sup>1</sup>, 小菅一弘\*<sup>1</sup>, 浅間 一\*<sup>2</sup>  
嘉悦早人\*<sup>2</sup>, 川端邦明\*<sup>3</sup>Handling of a Large Object using Multiple Mobile Robots  
in CoordinationYasuhisa HIRATA\*<sup>4</sup>, Kazuhiro KOSUGE,  
Hajime ASAMA, Hayato KAETSU and Kuniaki KAWABATA\*<sup>1</sup> Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Tohoku University,  
01 Aoba-yama, Sendai, Miyagi, 980-8579 Japan

In this paper, we discuss an issue relating to the force/moment transformation for the handling of a large object by multiple mobile robots in coordination. We propose a control algorithm using geometrical constraints among the grasping points and the representative point of the object, which reduce the effect of sensor noise amplified by force/moment transformation. We extend this algorithm to the decentralized control algorithm of multiple robots handling an object in coordination. 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, Sensor, Handling, Large Object

## 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。このような、両手の協調や複数の人の協調は、器用さを要求される複雑な作業や重量物のハンドリングの実現に有効である。協調作業の利点は、ロボット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操り問題に関しては、多くの研究が行われてきた<sup>(1)~(7)etc.</sup>

複数のロボットによる協調を実現する制御系のほとんどは、操る物体に働く力/モーメントに基づいて、各ロボットの運動を制御することを前提としている。このとき、操る物体に代表点を設定し、その代表点回りに働く力/モーメントを考えると、各ロボットと物体の運動の定式化が容易になることがよく知られている<sup>(2)</sup>

このような制御系を実現するためには、物体の代表

点に働く力/モーメントを何らかの方法で計算しなければならない。通常、各ロボットは物体を把持する点に力センサを搭載し、その情報を座標変換することによって物体の代表点に働く力/モーメントを計算する。

しかし、この手法は、小さな物体を操る場合にはあまり問題にならないが、大きな物体を操る場合には、力センサと力/モーメントを変換する物体の代表点が離れてしまい、その座標変換による計算によって、力センサの情報に含まれるセンサノイズが増幅する。そのため、結果としてうまく物体を操ることができない場合がある<sup>(8)</sup>。

集中制御された複数のマニピュレータの協調を実現するために、小菅ら<sup>(8)</sup>は、センサノイズの増幅問題を解決する手法を提案した。これは、各マニピュレータをそれぞれ物体を把持する点回りで制御し、さらに、各マニピュレータをある幾何学的な関係を満たすように配置するというものである。これにより、センサノイズによって生じるマニピュレータの運動への影響を小さくすることができる。

そこで、本論文では、文献<sup>(8)</sup>で提案された手法を、分散制御された移動ロボットの協調問題に適用し、複数の移動ロボットによって大きな物体を操るための制御系を提案する。以下、まず、文献<sup>(7)</sup>で提案した複数

\* 原稿受付 2000年8月9日。

<sup>1</sup> 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)。<sup>2</sup> 正員, 理化学研究所生化学システム研究室(☎351-0198 和光市広沢2-1)。<sup>3</sup> 正員, 理化学研究所工学基礎研究部。

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

移動ロボットの協調制御系を用いた場合の力/モーメントの座標変換に関する問題点について考察する。そして、その問題点を解決するために、文献<sup>(8)</sup>で提案された手法を適用し、各ロボットをそれぞれ物体を把持する点回りで制御する手法を提案する。そして、その手法を単一物体搬送のためのリーダー・フォロワタイプによる分散協調制御系に拡張し、最後に複数の全方向移動ロボットを用い搬送実験を行い、提案する制御系の有効性を示す。

## 2. 大型物体の操り

2.1 従来の制御系 著者らは文献<sup>(7)</sup>で、複数の移動ロボットによる単一物体の協調搬送を実現するために、リーダー・フォロワタイプの分散協調制御系を提案した。この制御系では、物体に設定した代表点回りに、次式の特性を満たすように各ロボットを制御する。

$$\begin{bmatrix} f_{ok}^{ext} \\ n_{ok}^{ext} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{ok} & 0 \\ 0 & D_{\theta ok} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_{ok} \\ \Delta \dot{\theta}_{ok} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ok} & 0 \\ 0 & K_{\theta ok} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_{ok} \\ \Delta \theta_{ok} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $k = l, i$ であり、 $l, i$ はそれぞれリーダーおよび  $i$  番目のフォロワを表す。 $D_{ok} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 、 $D_{\theta ok} \in \mathbb{R}$ は粘性行列、 $K_{ok} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 、 $K_{\theta ok} \in \mathbb{R}$ は剛性行列である。 $\Delta x_{ok} \in \mathbb{R}^2$ 、 $\Delta \theta_{ok} \in \mathbb{R}$ はロボットの運動誤差を物体の代表点回りで表したものである。

また、 $f_{ok}^{ext} \in \mathbb{R}^2$ 、 $n_{ok}^{ext} \in \mathbb{R}$ は  $k$  番目のロボットに加わる力/モーメントを、物体の代表点回りで記述したものであり次式のように表すことができる。

$$f_{ok}^{ext} = f_k^{ext} \quad (2)$$

$$n_{ok}^{ext} = -{}^k r_{cc} \times f_k^{ext} + n_k^{ext} \quad (3)$$

ここで、 ${}^k r_{cc}$ は  $k$  番目のロボットが物体を把持する点から物体に設定された代表点までの並進ベクトルを表し、 ${}^k r_{cc} = [r_x \ r_y]^T$ と定義する。また、 $f_k^{ext}$ 、 $n_k^{ext}$ はロボットの把持点に加わる力/モーメントであり、通常、この値はロボットの把持点に取り付けられた力センサによって計測される。

式(3)によると、力/モーメントに関する物体の代表点とロボットの把持点の間には、その距離を表す  ${}^k r_{cc}$  との外積の項が含まれている。これは、小さな物体を操る場合には  ${}^k r_{cc}$  が小さくなり、あまり問題にならないが、大きな物体を操る場合には  ${}^k r_{cc}$  との外積項によって力センサによって計測された  $f_k^{ext}$  に含まれるセンサノイズが増幅されることになる。

式(1)で示されるように、従来の制御系によるロボットの運動は物体の代表点に働く力/モーメントによっ

て生成される。ここで、力センサに含まれるノイズが増幅され、その影響が無視できないとすると、ロボットの運動は振動的になると考えられる。

また、従来の制御系では、フォロワは自分自身の運動誤差を用いて、リーダーの運動を推定し単一物体の協調搬送を実現するが、自分自身の運動誤差がセンサノイズの影響を大きく受けると、正確にリーダーの運動を推定することができなくなり、結果として複数台の移動ロボットによってうまく物体を操ることができなくなる場合がある。

2.2 把持点回りの制御 前節の問題を解決するために、文献<sup>(8)</sup>では、各ロボットをある幾何学的関係を満たすように配置し、さらに、各ロボットを物体の把持する点回りに制御する手法を提案した。本論文では、この手法を分散制御された複数台の移動ロボットの協調制御問題に適用する。

各ロボットと物体の代表点との座標変換によるセンサノイズの増幅の問題を解決するために、本論文では、文献<sup>(8)</sup>と同様にして、各ロボットを、物体を把持する点回りにおいて次式の特性を満たすように制御する。

$$\begin{bmatrix} f_k^{ext} \\ n_k^{ext} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_k & 0 \\ 0 & D_{\theta k} - {}^k R D_k {}^k R^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_k \\ \Delta \dot{\theta}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_k & 0 \\ 0 & K_{\theta k} - {}^k R K_k {}^k R^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_k \\ \Delta \theta_k \end{bmatrix} \quad (4)$$

ただし、次式を満たすものとする。

$$D_{\theta k} - {}^k R D_k {}^k R^T > 0, \quad K_{\theta k} - {}^k R K_k {}^k R^T > 0 \quad (5)$$

ここで、 $D_k \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 、 $D_{\theta k} \in \mathbb{R}$ は粘性行列、 $K_k \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 、 $K_{\theta k} \in \mathbb{R}$ は剛性行列を表す。また、 ${}^k R$ はベクトル  ${}^k r_{cc}$  によって次式のように定義される。

$${}^k R = [-r_y \ r_x] \quad (6)$$

各ロボットと物体の代表点の間には、ある幾何学的な関係を満たすものとする。幾何学的関係とは、インピーダンスパラメータ  $D_k$ 、 $K_k$  が

$$D_k = d_k E, \quad K_k = k_k E \quad (7)$$

と表されるとき、 ${}^k r_{cc}$  と  $d_k$ 、 $k_k$  が次式のような条件を満たすというものである。

$$d_l {}^l r_{cc} + \sum_{i=1}^n d_i {}^i r_{cc} = 0 \quad (8)$$

$$k_l {}^l r_{cc} + \sum_{i=1}^n k_i {}^i r_{cc} = 0 \quad (9)$$

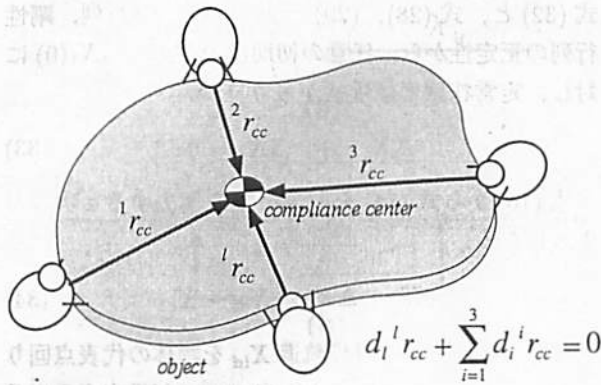


Fig. 1 Handling using four mobile robots

$$\alpha d_k = \beta k_k \quad (10)$$

ただし、 $d_k, k_k \in \mathbb{R}$ ,  $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ は正の実定数、 $E \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ は単位行列である。

この幾何学的関係の物理的な意味は、Fig.1に示すように、物体の代表点が $k$ 台のロボットによって構成されるシステムの重心にあるということである。ただし、式(8)、(9)によって示されるインピーダンスパラメータを選択することによって、任意に重心の位置を指定することができる。

式(4)、(8)、(9)を用いて各ロボットを制御し、さらに次章で示すような分散制御系が実現できると仮定すると、定常状態ではフォロワはリーダーの目標軌道を正確に推定することができるので、次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Delta x_{ok} \\ &= \Delta x_{ol} = \Delta x_{oi} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta \theta &= \Delta \theta_{ok} \\ &= \Delta \theta_{ol} = \Delta \theta_{oi} \end{aligned} \quad (12)$$

このとき、物体の代表点のみかけのインピーダンスは次式で与えられる。

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} \sum D_k & 0 \\ 0 & \sum D_{\theta k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ \Delta \dot{\theta} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \sum K_k & 0 \\ 0 & \sum K_{\theta k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum f_{ok}^{ext} \\ \sum n_{ok}^{ext} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

これにより、物体のみかけのインピーダンスを非干渉化された形で任意に指定することができる。

すなわち、式(8)、(9)に示されたような幾何学的関係を満たすように各ロボットを配置し、さらに式(4)の動特性を満たすように各ロボットをそれぞれ物体を把持する点回りで制御すると、大きな物体の操りにおけるセンサノイズの影響を低減することができる。ま

た、式(13)を用いることによって、物体のみかけのインピーダンスを指定する必要がある複雑な作業も実現することができる。

### 3. リーダ・フォロワタイプによる協調搬送

本章では、前章で提案した手法を、リーダー・フォロワタイプの分散協調制御系に拡張し、各ロボットを把持点回りで制御することで、大型物体の協調搬送を実現することを考える。

この制御系では、物体の運動軌跡はリーダーと呼ばれるロボットに与えられ、フォロワと呼ばれる残りの $n$ 台のロボットは、リーダーに与えられた物体の目標軌道を推定し、リーダーと協調して物体を操る。

#### 3.1 各ロボットの制御系

各ロボットはそれぞれ分散制御され、どの方向に対しても指令した速度で動くように速度制御されているものとする。また、ロボットを物体を把持する点回りに式(4)の動特性を満たすようにインピーダンス制御する。

リーダーに与えられる目標軌道 $(x_{ld}, \theta_{ld})$ を物体に設定された代表点回りに変換したものを $x_{dl} \in \mathbb{R}^2$ ,  $\theta_{dl} \in \mathbb{R}$ ,  $x \in \mathbb{R}^2$ ,  $\theta \in \mathbb{R}$ を物体の代表点の実際の軌道、フォロワが推定した目標軌道 $(x_{ie}, \theta_{ie})$ を物体の代表点回りに変換したものを $x_{ei} \in \mathbb{R}^2$ ,  $\theta_{ei} \in \mathbb{R}$ とする。

ロボットが物体をしっかり把持し、ロボットと物体の間に相対運動が生じないとすると、各ロボットの運動誤差と物体の代表点の運動誤差との関係は次式で表される。

$$\Delta x_l = \Delta x_{ol} - \Delta \theta_{ol} {}^l R^T, \quad \Delta \theta_l = \Delta \theta_{ol} \quad (14)$$

$$\Delta x_i = \Delta x_{oi} - \Delta \theta_{oi} {}^i R^T, \quad \Delta \theta_i = \Delta \theta_{oi} \quad (15)$$

ここで、 $\Delta x_{ol}$ ,  $\Delta \theta_{ol}$ ,  $\Delta x_{oi}$ ,  $\Delta \theta_{oi}$ は、それぞれ各ロボットから見た物体の代表点の位置、姿勢に関する運動誤差であり、次式のように表せる。

$$\Delta x_{ol} = x - x_{dl} \quad (16)$$

$$\Delta \theta_{ol} = \theta - \theta_{dl} \quad (17)$$

$$\Delta x_{oi} = x - x_{ei} \quad (18)$$

$$\Delta \theta_{oi} = \theta - \theta_{ei} \quad (19)$$

また、各パラメータを

$$D'_k = \begin{bmatrix} D_k & 0 \\ 0 & D_{\theta k} - {}^k R D_k {}^k R^T \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$K'_k = \begin{bmatrix} K_k & 0 \\ 0 & K_{\theta k} - {}^k R K_k {}^k R^T \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\Delta X_k = \begin{bmatrix} \Delta x_k \\ \Delta \theta_k \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$F_k^{ext} = \begin{bmatrix} f_k^{ext} \\ n_k^{ext} \end{bmatrix} \quad (23)$$

と定義し、各ロボットと物体の軌道をそれぞれ  $X_{ld} = (x_{ld}, \theta_{ld})^T$ ,  $X_{ie} = (x_{ie}, \theta_{ie})^T$ ,  $X_{dl} = (x_{dl}, \theta_{dl})^T$ ,  $X_{ei} = (x_{ei}, \theta_{ei})^T$ ,  $X = (x, \theta)^T$  と書き直すと、式(4)で表されたリーダーおよび  $i$  番目のフォロワの動特性は以下のように書き直すことができる。

$$D'_l \Delta \dot{X}_l + K'_l \Delta X_l = F_l^{ext} - F_l^{in} \quad (24)$$

$$D'_i \Delta \dot{X}_i + K'_i \Delta X_i = F_i^{ext} - F_i^{in} \quad (25)$$

ただし、 $F_l^{in} = (f_l^{in}, n_l^{in})^T$ ,  $F_i^{in} = (f_i^{in}, n_i^{in})^T$  はリーダーおよびフォロワによって物体に加えられる内力の目標値を表し、オペレータがこの値を指定することによって、各ロボットは物体に内力を働かせ、その物体を把持することができる。

**3.2 協調アルゴリズム** 本節では、リーダーとフォロワによって協調搬送を実現する制御系を考える。まず、フォロワが1台の場合について考え、フォロワがどのようにリーダーの目標軌道を推定するかを述べる。次に、その推定方法をフォロワが  $n$  台の場合に拡張し、複数の移動ロボットによる物体の協調ハンドリングを実現するアルゴリズムを提案する。

以下では、議論を簡単にするために、リーダーとフォロワは次式に示されるように、同一のインピーダンスパラメータを用いて制御されるものとする。

$$D_l = D_i, \quad D_{\theta l} = D_{\theta i} \quad (26)$$

$$K_l = K_i, \quad K_{\theta l} = K_{\theta i} \quad (27)$$

物体の代表点と各ロボットの把持点間の距離は、式(8), (9)で表される幾何学的な関係を満たすものとする。各ロボットのインピーダンスパラメータはすべて一致するので、次式のように  $D$ ,  $K$  を用いて表す。

$$D = D'_l = D'_i \quad (28)$$

$$K = K'_l = K'_i \quad (29)$$

**3.2.1 フォロワが1台の場合** はじめに、フォロワが1台の場合、すなわち式(25)において  $i=1$  のときを考える。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関係が成り立つ。

$$F_l^{ext} + F_l^{ext} = 0 \quad (30)$$

$$F_l^{in} + F_l^{in} = 0 \quad (31)$$

式(24)~(31)より、次式を得る。

$$D(\Delta \dot{X}_l + \Delta \dot{X}_1) + K(\Delta X_l + \Delta X_1) = 0 \quad (32)$$

式(32)と、式(28), (29)で表される粘性行列、剛性行列の正定性から、任意の初期値  $\Delta X_l(0), \Delta X_1(0)$  に対し、定常状態では次式が成り立つ。

$$\Delta X_l + \Delta X_1 = 0 \quad (33)$$

式(15)から式(14)を引き、 $X$  を消去すると次式のようになる。

$$\Delta X_1 - \Delta X_l = X_{dl} - X_{e1} \quad (34)$$

リーダーに与えられる目標軌道  $X_{ld}$  を物体の代表点回りに変換した軌道を  $X_{dl}$  とし、フォロワが推定する自身自身の目標軌道  $X_{le}$  を物体の代表点の軌道に変換した軌道を  $X_{e1}$  とすると、 $X_{dl}$  と  $X_{e1}$  の差  $\Delta X_{d1}$  は、

$$\begin{aligned} \Delta X_{d1} &= X_{dl} - X_{e1} \\ &= 2\Delta X_1 \end{aligned} \quad (35)$$

となり、フォロワは、それ自身で観測できる  $\Delta X_1$  に基づいて、 $\Delta X_{d1}$  を計算することができる。

次に、 $\Delta X_{d1}$  からフォロワの目標軌道  $X_{le}$  を推定するため、Fig.2(a)のような伝達関数  $G_1$  を考える。Fig.2(a)はFig.2(b)のように等価変換することができるので、フォロワは、 $\Delta X_{d1}$  が零に収束するように  $X_{le}$  を定めれば、リーダーの目標軌道  $X_{ld}$  を正確に推定することになる。

本論文では、定常状態で位置と速度の推定誤差がなく、フォロワの目標軌道をリーダーの目標軌道に追従させるため、文献<sup>(7)</sup>と同様に、 $G_1$  を次のように設計する。

$$G_1 = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & 0 \\ 0 & g_1 & 0 \\ 0 & 0 & g_1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

ただし

$$g_1 = \frac{a_1 s + b_1}{s^2} \quad (37)$$

このとき、Fig.2(b)より、入力から出力への伝達関数行列  $H_1$  は次のように表される。

$$\begin{aligned} H_1 &= G_1(I_3 + G_1)^{-1} \\ &= \frac{a_1 s + b_1}{s^2 + a_1 s + b_1} I_3 \end{aligned} \quad (38)$$

ここで、 $I_3$  は  $3 \times 3$  の単位行列である。このフィードバックシステムの安定性を保証するために、推定パラメータ  $a_1, b_1$  を  $a_1 > 0, b_1 > 0$  とすると、リーダーに与えられる目標軌道がランプ状、すなわち  $\ddot{X}_{dl} = 0$  のとき、

$$\lim_{t \rightarrow 0} X_{e1} = X_{dl} \quad (39)$$

となることがわかる。尚、推定器の周波数特性は  $a_1, b_1$  によって調整することができる。

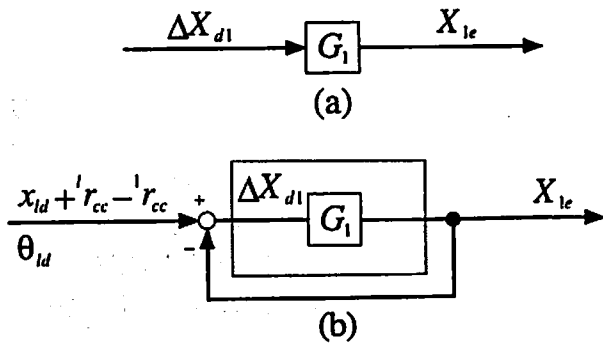


Fig. 2 Estimator

3.2.2 一般の場合 前節の結果をフォロワが  $n$  台の場合に拡張する。まず、前節と同様にして、リーダーの運動誤差とフォロワの運動誤差の関係を考える。操る物体に外力が働かないとすると、物体に加わる力/モーメントには次のような関係が成り立つ。

$$F_i^{ext} + \sum_{j=1}^n F_j^{ext} = 0 \quad (40)$$

$$F_i^{in} + \sum_{j=1}^n F_j^{in} = 0 \quad (41)$$

式(24), (25)と式(40), (41)から,  $\Delta X_i + \sum_{j=1}^n \Delta X_j$  の初期値が零でないとしても, 十分時間がたった状態では, どのような目標値がリーダーに与えられようとも, 次式が成り立つことがわかる。

$$\Delta X_i + \sum_{j=1}^n \Delta X_j = 0 \quad (42)$$

ただし, このとき, リーダと  $n$  台のフォロワによって式(8), (9)で表される幾何学的な関係が満たされているものとする。

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誤差  $\Delta X_i$  に影響を及ぼすので,  $i$  番目のフォロワはリーダーに与えられた目標軌道を推定できなくなる。そこで, Fig.3(a)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ー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  $i$  番目の仮想リーダーと呼ぶことにする。すなわち,  $i$  番目の仮想リーダーは, リーダと  $j$  番目のフォロワ ( $j = 1, \dots, i-1, i+1, \dots, n$ ) から成り, Fig.3(b)に示すように,  $i$  番目のフォロワから見ると, 1台のリーダーのように振る舞うと考えられる。

この仮想リーダーの考え方をうければ, フォロワが1台の場合の目標軌道の推定方法を用いて,  $i$  番目のフォ

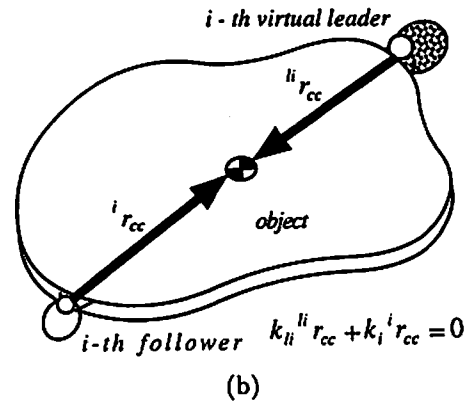
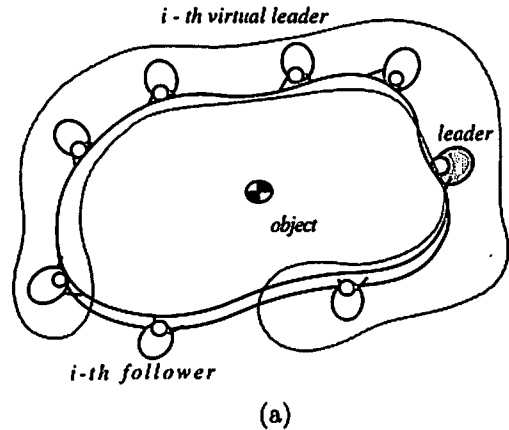


Fig. 3 Virtual leader

ロワは  $i$  番目の仮想リーダーの目標軌道を推定することができる。

$i$  番目の仮想リーダーの動特性は次のように導かれる。

$$\begin{aligned} D_{ii}(\Delta \dot{X}_i + \sum_{j=1(j \neq i)}^n \Delta \dot{X}_j) + K_{ii}(\Delta X_i + \sum_{j=1(j \neq i)}^n \Delta X_j) \\ = (F_i^{ext} + \sum_{j=1(j \neq i)}^n F_j^{ext}) - (F_i^{in} + \sum_{j=1(j \neq i)}^n F_j^{in}) \end{aligned} \quad (43)$$

ただし,

$$\sum_{j=1(j \neq i)}^n c_j = \sum_{j=1}^{i-1} c_j + \sum_{j=i+1}^n c_j \quad (44)$$

とする。  $i$  番目の仮想リーダーの運動誤差  $\Delta X_{ii}$  は次のように表される。

$$\Delta X_{ii} = \Delta X_i + \sum_{j=1(j \neq i)}^n \Delta X_j \quad (45)$$

式(42)から十分時間がたった後では, リーダに与えられた目標軌道に関わらず

$$\Delta X_{ii} + \Delta X_i = 0 \quad (46)$$

が成り立つ。また、 $i$  番目の仮想リーダーに働く力/モーメント  $F_{li}^{ext}$  と  $i$  番目の仮想リーダーによって物体に加えられる内力の目標値  $F_{li}^{in}$  は次式のように表される。

$$F_{li}^{ext} = F_l^{ext} + \sum_{j=1(j \neq i)}^n F_j^{ext} \quad (47)$$

$$F_{li}^{in} = F_l^{in} + \sum_{j=1(j \neq i)}^n F_j^{in} \quad (48)$$

式 (40), (41) から

$$F_{li}^{ext} + F_i^{ext} = 0 \quad (49)$$

$$F_{li}^{in} + F_i^{in} = 0 \quad (50)$$

が成り立ち、式 (45), (47), (48) から式 (43) は次式のように表すことができる。

$$D_{li} \Delta \dot{X}_{li} + K_{li} \Delta X_{li} = F_{li}^{ext} - F_{li}^{in} \quad (51)$$

$X_{dli} = (x_{dli}, \theta_{dli})^T$  を  $i$  番目の仮想リーダーの目標軌道を物体の代表点回りに変換したものとすると、 $i$  番目の仮想リーダーの運動誤差  $\Delta X_{li} = (\Delta x_{li}, \Delta \theta_{li})^T$  は次のように表される。

$$\Delta x_{li} = \Delta x_{oli} - \Delta \theta_{oli} {}^{li}R^T, \quad \Delta \theta_{li} = \Delta \theta_{oli} \quad (52)$$

ここで、 $\Delta x_{oli}$ ,  $\Delta \theta_{oli}$  は、 $i$  番目の仮想リーダーから見た物体の代表点の位置と姿勢に関する運動誤差であり、次式のように表される。

$$\Delta x_{oli} = x - x_{dli} \quad \Delta \theta_{oli} = \theta - \theta_{dli} \quad (53)$$

仮想リーダーの考え方をを用いると、式 (51), (52) は式 (24), (14) と同一の形をしているので、 $i$  番目のフォロワは、フォロワが 1 台の場合の目標軌道の推定方法を用いて、 $i$  番目の仮想リーダーの目標軌道を推定することができる。 $\Delta X_{di}$  を  $i$  番目の仮想リーダーの目標軌道と  $i$  番目のフォロワの目標軌道との差とすると、次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \Delta X_{di} &= X_{dli} - X_{ei} \\ &= 2\Delta X_i \end{aligned} \quad (54)$$

$i$  番目のフォロワは式 (54) を用い、自分自身の運動誤差  $\Delta X_i$  に基づいて  $\Delta X_{di}$  を計算することができる。 $i$  番目のフォロワはこの  $\Delta X_{di}$  と伝達関数行列  $G_i$  を用いて、 $i$  番目の仮想リーダーの目標軌道  $X_{dli}$  を推定することができる。ここで、伝達関数行列  $G_i$  はフォロワが 1 台の場合と同様に設計され、次式のように表される。

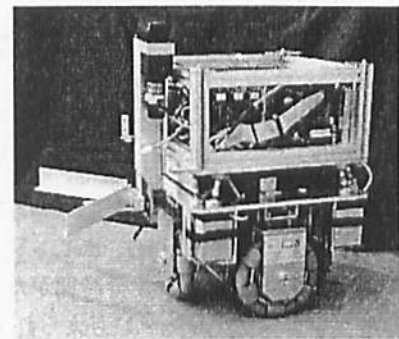
$$G_i = \frac{a_i s + b_i}{s^2} I_3 \quad (55)$$

尚、このシステムにおける安定性は文献<sup>(7)</sup>に示された方法と同様の方法で導くことができる。

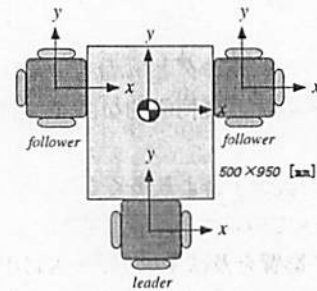
#### 4. 搬送実験

本章では、はじめに、提案したアルゴリズムの有効性を示すために、前章で提案した仮想リーダーの概念を用いて、Fig.4(a) 示す全方向移動ロボット 3 台を Fig.4(b) に示すように配置し、単一物体の搬送実験を行った。次に従来のアルゴリズム<sup>(7)</sup>と提案したアルゴリズムの比較を行うために、2 台の全方向移動ロボットを Fig.4(c) に示すように配置し、大型物体の搬送実験を行った。

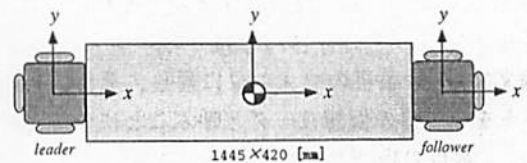
Fig.4(a) に示す全方向移動ロボットは理化学研究所によって開発された ZEN<sup>(9)</sup> を基に構成され、ボディフォースセンサ<sup>(10)</sup>、フォークリフト、制御装置、バッテリーを有し自律的に動作することができる。制御系の実現には VxWorks を用い、サンプリング周波数はどの実験も 1024 [Hz] で行った。



(a) Omni-directional mobile robot (ZEN)



(b) Experiment by three mobile robots



(c) Experiment by two mobile robots

Fig. 4 Experimental system

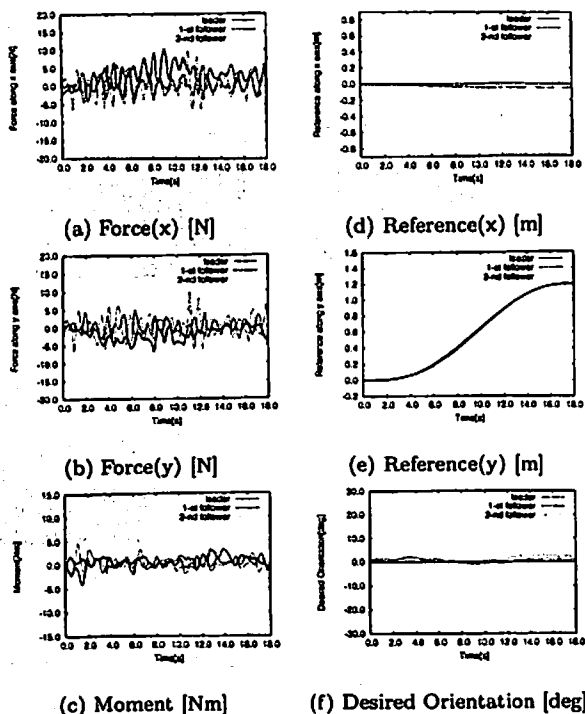


Fig. 5 Experimental results by three mobile robots

4.1 3台の全方向移動ロボットによる搬送実験  
 この実験では、仮想リーダの概念を用い、3台の全方向移動ロボットによる単一物体の搬送実験を行った。リーダには、0[m]から1.2[m]を18[sec]でx軸方向に移動するという軌道を与え、各フォロワは自分自身の仮想リーダの運動を推定し、他のロボットと協調して物体を搬送する。この結果をFig.5に示す。

また、実験の一例をFig.8に示す。Fig.8では、原点からx軸方向に1.2[m]移動させ、次にy軸方向に1.2[m]移動させ、その後、反時計回りに30[deg]回転させ、原点に戻すという軌道をリーダに与えたものである。Fig.5, 8より、単一物体の搬送がうまく行われているのがわかる。

4.2 大型物体の搬送実験 2台の全方向移動ロボットに従来のアルゴリズムと提案したアルゴリズムを適用し大型物体の搬送の比較実験を行った。実験では、リーダに原点からy軸方向へ1.2[m]移動するという軌道を与え、フォロワと協調して物体を搬送させた。

従来のアルゴリズムを用いたときの結果をFig.6に示す。Fig.6(c)より、各ロボットのモーメントには振動成分が含まれているのがわかる。そのため、Fig.6(d),(e),(f)に示すように、フォロワは正確にリーダの目標軌道を推定することができない。

提案したアルゴリズムを用いたときの結果をFig.7に示す。Fig.7(c)より、前節の実験で見られるような

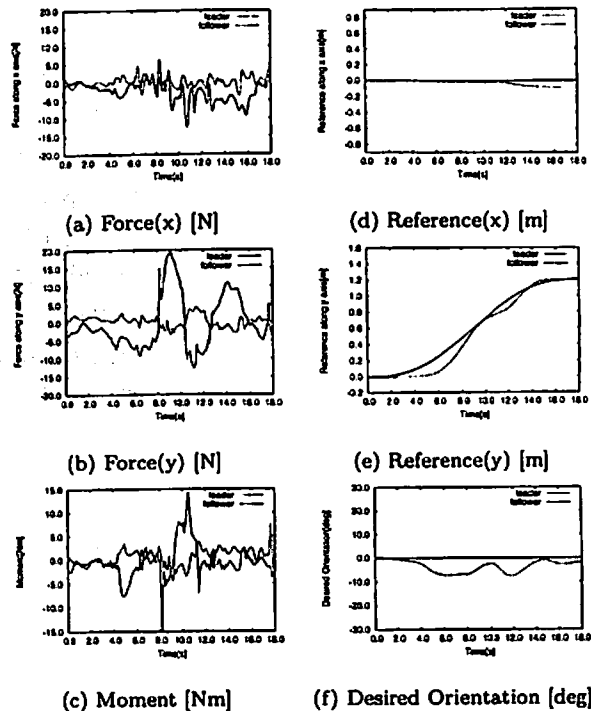


Fig. 6 Experimental results (conventional algorithm)

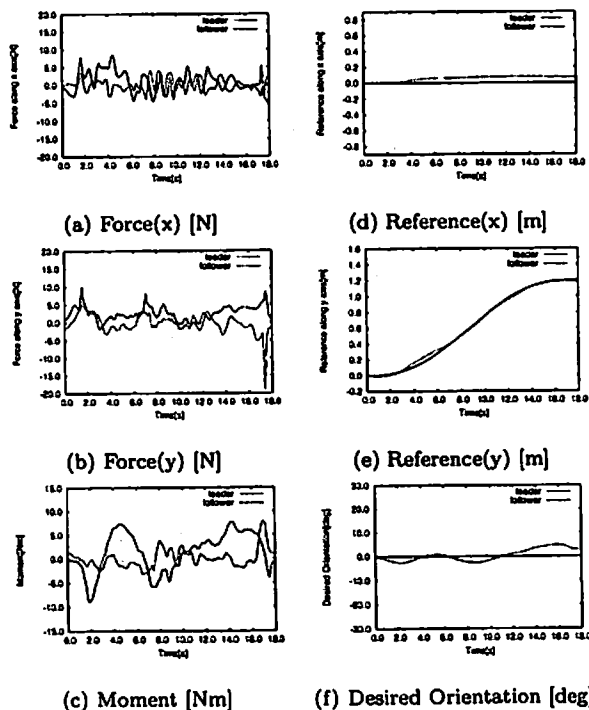


Fig. 7 Experimental results (proposed algorithm)

モーメントに含まれる振動成分は減少しているのがわかる。これより、Fig.7(d),(e),(f)に示すように、フォロワはほぼリーダの目標軌道を推定し、搬送作業がうまく行われているのがわかる。



## 5. 結 論

本論文では、複数の移動ロボットで大きな物体を協調して操るときに発生する、センサノイズの増幅という問題を示し、その問題を解決するため、物体の代表点と把持点の間に幾何学的な関係を適用し、各ロボットを把持点回りに制御する手法を提案した。提案した手法をリーダー・フォロワタイプの分散協調制御系に拡張し、複数自律移動ロボットによる単一物体の協調ハンドリングを実現するアルゴリズムを提案した。提案したアルゴリズムを複数の全方向移動ロボットに適用し、単一物体の協調搬送実験を行い、その有効性を示した。

尚、本研究の一部は、平成12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。

## 文 献

- (1) E. Nakano, S. Ozaki, T. Ishida, I. Kato, "Cooperational Control of the Anthropomorphic Manipulator "MELARM" ", *Proc. of 4th International Symposium on Industrial Robots*, pp.251-260, Tokyo, 1974.
- (2) 内山勝・ピエールドシェ, "両手ロボットの対称型運動学と非マスタスレーブ協調制御", *日本ロボット学会誌*, Vol.7, No.1, pp.19-29, 1989.
- (3) D. Williams, O. Khatib, "The Virtual Linkage: A Model for Internal Forces in Multi-Grasp Manipulation" *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.1025-1030, 1993.
- (4) R.G. Bonitz, T.C. Hsia, "Internal Force-Based Impedance Control for Cooperating Manipulators" *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.12, No.1, pp.78-89, 1996.
- (5) 小菅一弘・吉田英博・福田敏男・蟹谷清・酒井勝・針木和夫, "インピーダンス制御に基づく双腕マニピュレータの協調制御", *日本ロボット学会誌*, Vol.13, No.3, pp.404-410, 1995.
- (6) 橋本雅文, 大場史憲, 江口透, "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, pp.886-893, 1995.
- (7) 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.
- (8) K. Kosuge, S. Hashimoto, K. Takeo, "Coordinated Motion Control of Multiple Robots Manipulating a Large Object", *Proc. of 1997 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.208-213, 1997.
- (9) 浅間一, 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*, Vol.14, No.2, pp.249-254, 1996.
- (10) 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.

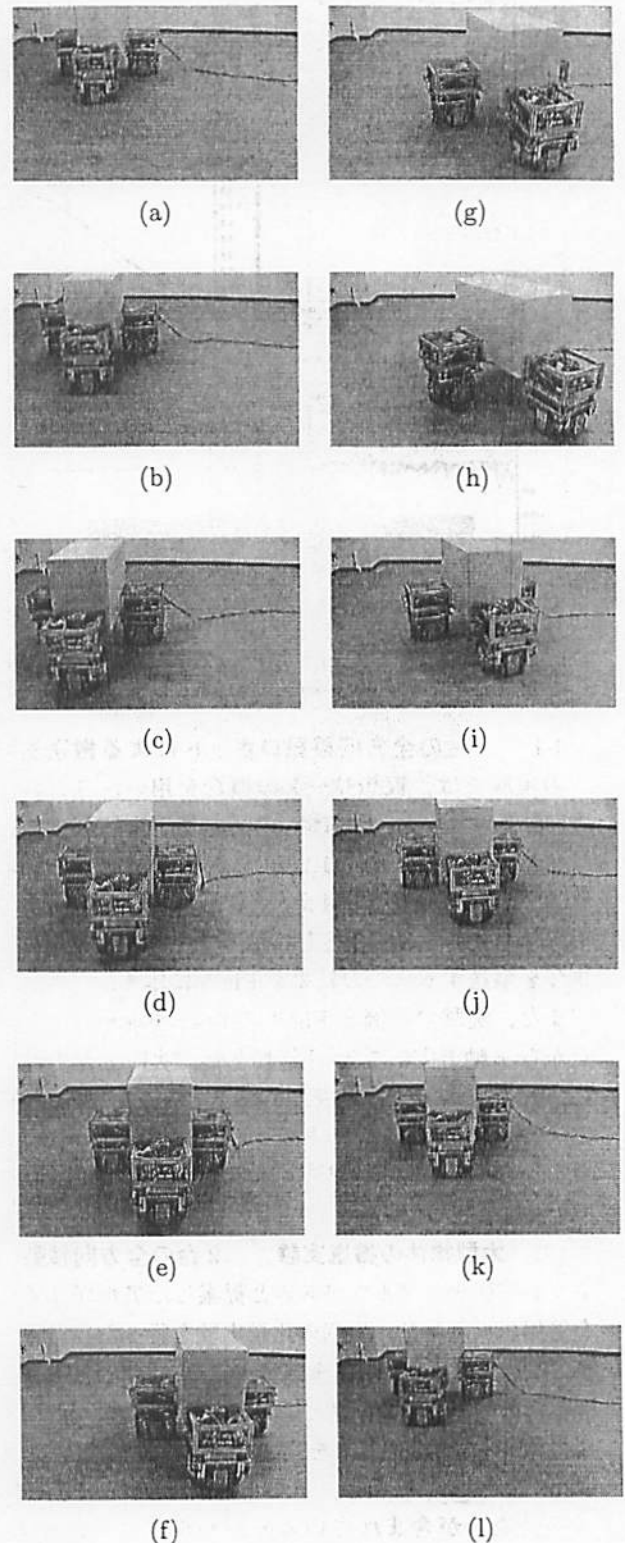


Fig. 8 Example of Experiments by three mobile robots