複数のパッシブ型移動ロボットと人間との協調による単一物体の搬送

平 田 泰 久*・小 嶋 洋 介*・小 菅 一 弘*

Transportation of an Object by Multiple Passive Mobile Robots in Cooperation with a Human

Yasuhisa HIRATA*, Yosuke OJIMA* and Kazuhiro KOSUGE*

In this paper, we propose a motion control algorithm of multiple passive mobile robots for handling a large object in cooperation with a human. The passive mobile robot called “O-PRP (Omni-directional type Passive Robot Porter)” has passive dynamics with respect to an applied force and its motion is controlled based on the servo brakes. In the proposed algorithm, each O-PRP is controlled as if it has an apparent dynamics, and the motion characteristics of the object supported by the multiple O-PRPs is changed for improving the maneuverability. The proposed algorithm is applied to two O-PRPs, and experimental results illustrate its validity.

Key Words: multiple passive mobile robots, object handling, human-robots cooperation

1. はじめに

近年、ロボット技術の発展に伴い、各家庭、オフィス、病院などの生活環境内へのロボットの導入が期待されている。しかしながら、ロボットを生活環境内で実用化するにはいまださまざまな課題が残されている。その中でも利用者の安全の確保は、解決されなければならない重要な課題である。従来の多くのロボットは、サーボモータを使用し、高性能かつ操作性の良いロボットシステムを実現している。しかし、これらのロボットシステムは、誤作動した際に人や周りの環境に対して危害を加える恐れがある。また、サーボモータやサーボアンプ、減速機、センサ、制御装置、バッテリーなどが搭載されることから、システムが複雑化、重量増となる傾向がある。

これに対し、安全性の観点から Goswami ら¹⁾は、サーボモータを用いずにシステムに加わる外力に基づいて受動的に動作するパッシブロボティクスと呼ばれる概念を提案している。これは、スプリングやダンパなどの機械要素から構成されるマニピュレータの手先の運動を制御するために、機械要素の剛性や粘性を変化させることにより手先に加えられる力に対する運動特性を変化させ、結果的にその運動を制御するものである。このようなシステムは、誤作動を起こしてもサーボモータを駆動力として用いるロボットに比べて安全であり、人間の生活環境内で用いるロボットとして期待できる。

また、Peshkin ら²⁾は、パッシブロボティクスの概念に基

づいて Cobot と呼ばれる非駆動型の物体搬送システムを開発し、Wesson ら³⁾や MacNamara ら⁴⁾は非駆動型の歩行支援システムを開発した。これらの研究では、ステアリング用の車輪にサーボモータを取り付け、環境情報に基づいてそのステアリング角度を制御することでシステムの進行方向を制御し、ナビゲーション機能を実現する。

筆者らも、これまでにパッシブロボティクスの概念に基づいてモータを一切使うことなく、サーボブレーキのみを用いてロボットの運動制御を実現する人間機械協調型パッシブシステムを開発し、パッシブ型歩行支援機 RT Walker⁵⁾を提案してきた。さらに、人間と協調して物体搬送を実現するパッシブ型物体搬送ロボット O-PRP (Omni-directional type Passive Robot Porter)⁶⁾や C-PRP (Caster type Passive Robot Porter)⁷⁾を開発してきた。RT Walker や PRP の特徴は、Cobot²⁾とは異なりサーボモータを一切使わず、サーボブレーキのみを用いて、ナビゲーション機能だけでなく、速度制御や重力補償制御、操作特性可変制御などを実現している点である。

RT Walker や PRP を含め従来のパッシブロボットシステムの研究では、単一のロボットのための運動制御手法の構築を行ってきた。しかし、大型物体や複雑形状の物体の搬送作業を実現することを考えると、従来のサーボモータを使ったロボットにおける研究と同様に Fig.1 に示すような複数の移動ロボットを協調させることが有効となる^{8),9)}。複数ロボットが協調することで、1 台のロボットの負担を軽減することができるため、ロボットの小型化が可能となり、また、物体の形状や大きさに応じて柔軟にロボットの配置を決定することも可能となる。また、ブレーキ制御に基づいて運動を制御する O-PRP などのパッシブロボットにおいては、2 章以降

* 東北大学大学院工学研究科 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

* Department of Bioengineering and Robotics, Tohoku University, 6-6-01 Aoba, Aramaki, Sendai
(Received October 27, 2011)

(Revised September 24, 2012)

Fig. 1 Handling an object by multiple passive mobile robots in cooperation with a human

で説明するようにロボットの運動制御に制限が生じるが、複数台のロボットが協調することで、あるロボットに発生した制御入力制限を他のロボットが補うことも可能となる。

そこで本研究では、ブレーキ制御された複数台の移動ロボットを用いてどのような協調運動が実現できるかを検証する最初の取り組みとして、物体の操作特性を変化させる手法を提案する。複数の移動ロボットのブレーキ制御に基づき物体の操作特性を変化させることが可能となれば、安全性を維持しながら、さまざまな作業環境や目的、搬送者の特性に適応し、高い操作性を有する搬送システムの実現が期待できる。本論文では、はじめに全方向移動型物体搬送ロボット O-PRP を紹介し、基本的な運動制御アルゴリズムについて述べる。つぎに、複数の O-PRP により把持された搬送物体の操作特性可変制御系を説明する。そして、提案する手法を 2 台の O-PRP に適用し搬送実験を行なうことで、その有効性を確認する。

2. パッシブ型物体搬送ロボット O-PRP

2.1 複数の O-PRP を用いた大型物体搬送

一人の人間が大型搬送物体のハンドリングを行なう場合、特に搬送物体の姿勢を適切に変化させることは難しいことが知られている^{10), 11)}。たとえば、重量物を搭載しているストレッチャーやキャスタ付きの長机などがよい例である。そこで、本研究ではパッシブ型物体搬送ロボット O-PRP を複数台用いることで大型物体の姿勢制御を実現し、人間が容易に大型物体の搬送を実現する手法を提案する。

はじめに、パッシブロボティクスに基づいて開発した O-PRP (Omni-directional type Passive Robot Porter) を Fig. 2 に示す。O-PRP は、3 つの全方向移動車輪を用いることによって、全方向移動可能な機構を実現している。3 つの全方向移動車輪は、それぞれサーボブレーキ (MR Brake) と直結されており、各車軸に対して $2\pi/3$ rad の間隔で配置されている。また、各車輪にはオドメトリのためのエンコーダが取り付けられており、搬送物体を把持する点にはフリージョイントを設けており、搬送物体とロボットの相対姿勢は自由に变化する。この相対姿勢の角度はフリージョイント部に取り付けられたエンコーダを用いて計測する。

Fig. 2 Omni-directional type passive mobile robot

O-PRP は、人間が O-PRP に加える力/モーメントに基づいて動作するが、O-PRP の運動を制御するために人間の操作力が大きくなることは、負担の増大の観点から現実的ではない。すなわち、人間が O-PRP に加える力はできるだけ小さくしつつ、車輪のブレーキ力を用いてさまざまな機能を実現することが求められる。そこで本研究では、搬送物体の把持点に設置されたフリージョイントを用いることで、搬送物体と O-PRP の相対姿勢は制御しないものとし、搬送物体の位置のみを制御する制御系を設計した¹²⁾。これにより、1 台の O-PRP が物体を搬送する場合には、搬送物体の姿勢制御のためにブレーキ力を用いるの必要がなくなり、結果として人間の操作力が減少する。

本研究では上記で紹介した O-PRP を複数台用いることによって、搬送物体の並進方向の運動特性を変化させることで物体の操作性を向上させることはもちろんのこと、姿勢に関する操作特性も制御することを考える。いま、搬送物体に設定されたある代表点の運動を制御しようとした場合、その代表点からある程度離れた場所に O-PRP を配置することで、各 O-PRP が発生するブレーキ力が小さくても、搬送物体の代表点にはブレーキモーメントが発生できる。本研究ではこの関係を利用することで、大型搬送物体の姿勢制御を実現することを考える。

2.2 O-PRP の基本運動制御アルゴリズム

本節ではサーボモータで制御されるロボットとブレーキを用いて制御される O-PRP の違いについて説明し、そのブレーキ制御型ロボット特有の運動制御アルゴリズムを説明する。サーボモータを用いたシステムでは、任意の電流値を与えることでそれに応じた駆動トルクを発生させることが可能であり、さまざまな機能を実現するための目標力を容易に実現する。しかし、サーボブレーキを使用したシステムでは、(1) 式に示すように人間の操作力によって発生する車輪の回転角速度の逆方向のみにしかトルクを発生させることができない。

$$\tau_{wi} \dot{\phi}_{wi} \leq 0 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

ここで、 τ_{wi} は i 番目の車輪に発生するブレーキトルク、 $\dot{\phi}_{wi}$

は i 番目の車輪の回転速度である．そのため，O-PRP の運動制御を行なうためには各車輪のブレーキトルクと車輪の回転速度の関係を考慮しなければならない．

ここで，(1) 式を満たすブレーキトルクの集合 $\tau_w = [\tau_{w1}, \tau_{w2}, \tau_{w3}]$ を U と定義する．

$$U = \{\tau_{w1}e_1 + \tau_{w2}e_2 + \tau_{w3}e_3 | \tau_{wi}\dot{\phi}_{wi} \leq 0, |\tau_{wi}| \leq \tau_{max}\} \quad (2)$$

ただし，

$$\begin{bmatrix} e_1 & e_2 & e_3 \end{bmatrix} = \text{diag}(1, 1, 1) \quad (3)$$

さらに，O-PRP の把持点まわりに発生可能なブレーキ力 rF_w は，O-PRP の車輪と把持点間の関係を表わすヤコビ行列 J によって (4) 式で求めることができる．

$${}^rF_w = (J^T)^{-1} \tau_w \quad (4)$$

このとき，O-PRP の発生可能なブレーキ力 rF_w は集合 $A(U)$ として次式のように定義することができる．

$$A(U) = \{\tau_{w1}v_1 + \tau_{w2}v_2 + \tau_{w3}v_3 | \tau_{wi} \in U\} \quad (5)$$

ただし，

$$\begin{bmatrix} v_1 & v_2 & v_3 \end{bmatrix} = (J^T)^{-1} \begin{bmatrix} e_1 & e_2 & e_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

O-PRP にさまざまな機能を実現するために制御則を設計するが，その制御則から算出される目標力 rF_d をどのように発生させるか考える．サーボモータを用いたシステムと異なり，ブレーキ制御においてはこの目標力 rF_d が必ずしもブレーキ発生可能領域 $A(U)$ に含まれるとは限らない．ここでは，O-PRP の運動を制御するための目標力 rF_d がブレーキ発生可能領域 $A(U)$ に含まれない場合において，どのように目標力 rF_d を実現するかについてその概念を説明する⁶⁾．

人間が O-PRP に加える力を操作力 rF_h として定義する．ただし，本研究では，O-PRP に力センサは取り付けられていないものとし，力の方向は O-PRP の並進運動方向と仮定し，今後の議論はこの仮定に基づいて行なう．このとき O-PRP は操作力 rF_h とブレーキ力 rF_w の合力で運動を生成する．ある機能を実現するための目標力 rF_d がブレーキ発生可能領域 $A(U)$ に含まれていれば，単に ${}^rF_w = {}^rF_d$ としてブレーキ力を発生させればよいが，目標力 rF_d がブレーキ発生可能領域 $A(U)$ に含まれていない場合は，人間の操作力の一部を利用して目標力 rF_d を実現する．

いま，操作力 rF_h を，(7) 式に示すように O-PRP が並進するために必要な力 rF_t と目標力を実現するために必要な補助力 rF_a とに分けて考える．

$${}^rF_h = {}^rF_t + {}^rF_a \quad (7)$$

このとき，O-PRP にある機能を実現するための力を O-PRP の並進力 rF_t と目標力 rF_d の合力として定義すると，O-PRP が発生すべきブレーキ力 rF_w は，Fig.3 に示すように，ブ

Fig. 3 Control of O-PRP based on feasible region

レーキ発生可能領域 $A(U)$ 内において次式で求めることができる．

$${}^rF_w = {}^rF_d - {}^rF_a \quad (8)$$

すなわち，目標力 rF_d は人間の補助力 rF_a とブレーキ力 rF_w によって実現される．ここで，人間の補助力 rF_a をできるだけ小さくするようにブレーキ力 rF_w を決定することで⁶⁾，人間の負担を減少させながら目的の機能を実現することができる．Fig.3 のような場合では，ブレーキ発生可能領域 $A(U)$ の境界にブレーキ力 rF_w を発生させることで，補助力 rF_a が最も小さくなる．ただし，ブレーキ発生可能領域 $A(U)$ は各車輪の回転角速度の正負によって変化する．そのため，実際の制御においては車輪の運動状態に基づき実時間でブレーキ発生可能領域を計算し，適切なブレーキ力 rF_w を計算する必要がある．

本論文では，今後，上記の方法を用いることで目的のブレーキ力が発生できるという仮定のもとで議論を行なう．

3. 協調運動制御アルゴリズム

本章では各 O-PRP の操作特性を変化させることによって，複数の O-PRP によって把持された搬送物体の操作特性を変化させる操作特性可変制御系について述べる．はじめに 1 台の O-PRP の運動制御系を説明し，その制御系を複数台の O-PRP を用いたシステムに拡張する．

3.1 1 台の O-PRP の操作特性可変制御

本節では，まず 1 台の O-PRP の操作特性可変制御系について述べる．はじめに，Fig.4 に示すような座標系を定義する． ${}^w\Sigma$ は絶対座標系であり， ${}^r\Sigma$ はロボット座標系である． ${}^r\Sigma$ は O-PRP が物体を把持する点にその原点をもち，O-PRP の姿勢変化にともない回転する．いま，O-PRP がある運動を生成し，位置ベクトル $\Delta q = [\Delta x \ \Delta y]^T$ だけ並進移動したとすると，O-PRP の速度および加速度は，位置ベクトル Δq を時間微分することにより ${}^r\dot{q} = [{}^r\dot{x} \ {}^r\dot{y}]^T$ ， ${}^r\ddot{q} = [{}^r\ddot{x} \ {}^r\ddot{y}]^T$ と表わすことができる．

また，O-PRP はフリージョイントを介して搬送物体を把持しているため，搬送物体の姿勢と O-PRP の姿勢はフリージョイントの回転に基づいて変化する．そこで，搬送物体の把持点に原点をもち，搬送物体とともに回転する搬送物体座標系 ${}^{ob}\Sigma$ を定義する．すなわち，搬送物体座標系の原点は

Fig. 4 Coordinate systems of single O-PRP

ロボット座標系の原点と一致し、O-PRP と搬送物体の相対姿勢角度は θ_f で表わされるものとする。ここで、今後の議論を簡単にするために、O-PRP の速度・加速度ベクトルを搬送物体座標系に座標変換する。フリージョイントに取り付けられたエンコーダで計測される O-PRP と搬送物体の相対姿勢変化 θ_f から求められる回転行列 $R(\theta_f)$ を用いて、搬送物体座標系において O-PRP の把持点の速度および加速度は、 ${}^{ob}\dot{\mathbf{q}} = R(\theta_f){}^r\dot{\mathbf{q}}$, ${}^{ob}\ddot{\mathbf{q}} = R(\theta_f){}^r\ddot{\mathbf{q}}$ で求められる。ここで、それぞれを ${}^{ob}\dot{\mathbf{q}} = [{}^{ob}\dot{x} \ {}^{ob}\dot{y}]^T$, ${}^{ob}\ddot{\mathbf{q}} = [{}^{ob}\ddot{x} \ {}^{ob}\ddot{y}]^T$ と表わすものとする。また、O-PRP が並進運動を行なうために人間がロボットに加える力を搬送物体座標系 ${}^{ob}\Sigma$ において ${}^{ob}\mathbf{F}_t = [{}^{ob}f_{tx} \ {}^{ob}f_{ty}]^T$, 搬送物体の操作性を変化させるための目標力を ${}^{ob}\mathbf{F}_d = [{}^{ob}f_{dx} \ {}^{ob}f_{dy}]^T$ とすると、搬送物体を把持した O-PRP の運動方程式は搬送物体座標系で次式のように表わすことができる。

$${}^{ob}\mathbf{M}{}^{ob}\ddot{\mathbf{q}} + {}^{ob}\mathbf{D}{}^{ob}\dot{\mathbf{q}} = {}^{ob}\mathbf{F}_t + {}^{ob}\mathbf{F}_d \quad (9)$$

ここで、 ${}^{ob}\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ は O-PRP と搬送物体の慣性行列、 ${}^{ob}\mathbf{D} \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ は O-PRP の粘性行列である。

いま、搬送物体の操作性を表わすパラメータ ${}^{ob}\mathbf{M}$, ${}^{ob}\mathbf{D}$ を変化させることができれば、搬送する環境や作業目的に応じた操作性を実現することができる。そこで、次式に示すような搬送物体のみかけの運動特性を考える。

$${}^{ob}\mathbf{M}_d{}^{ob}\ddot{\mathbf{q}} + {}^{ob}\mathbf{D}_d{}^{ob}\dot{\mathbf{q}} = {}^{ob}\mathbf{F}_t \quad (10)$$

ここで、 ${}^{ob}\mathbf{M}_d \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ はみかけの慣性行列、 ${}^{ob}\mathbf{D}_d \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ はみかけの粘性行列であり、これらの値を適切に指定することにより O-PRP にさまざまな操作性を実現することが可能となる。

上記のような搬送物体の操作性を実現するために必要な目標力 ${}^{ob}\mathbf{F}_d$ は (9) 式と (10) 式から次式のように求まる。

$${}^{ob}\mathbf{F}_d = -({}^{ob}\mathbf{M}_d - {}^{ob}\mathbf{M}){}^{ob}\ddot{\mathbf{q}} - ({}^{ob}\mathbf{D}_d - {}^{ob}\mathbf{D}){}^{ob}\dot{\mathbf{q}} \quad (11)$$

O-PRP のみかけの慣性行列 ${}^{ob}\mathbf{M}_d$ およびみかけの粘性行

Fig. 5 Relationship between O-PRP and representative point of object

列 ${}^{ob}\mathbf{D}_d$ を指定することにより目標力 ${}^{ob}\mathbf{F}_d$ を導出する。そして、 ${}^{ob}\mathbf{F}_d$ を搬送物体と O-PRP の相対姿勢変化を表わす回転行列 $R(\theta_f)$ を用いて座標変換し、O-PRP が生成すべき目標力 ${}^r\mathbf{F}_d$ を導出するとともに、前節で説明した手法に基づきブレーキ力を決定することで、O-PRP の操作特性を (1) 式のブレーキ制御条件を満たす範囲内で変化させることが可能となる。

3.2 複数台のロボットを用いた搬送物体の操作性可変制御

本節では、前節で提案した 1 台の操作性可変制御を拡張し、複数台の O-PRP で把持された搬送物体の操作性を変化させる制御手法について考える。はじめに、Fig.5 に示すように k 番目の O-PRP に把持されている搬送物体の運動を表現するために搬送物体座標系 ${}^{ob}\Sigma_k$ を定義する。また、複数の O-PRP に把持されている搬送物体に代表点を設定しその運動を表わす座標系 ${}^{re}\Sigma$ を定義する。なお、搬送物体を把持しているすべての O-PRP の搬送物体座標系と代表点座標系 ${}^{re}\Sigma$ は常に平行の関係にあるものとする。前節で示した手法を用いることにより k 番目の O-PRP は (10) 式で表わされる運動特性をもつことが可能であり、(10) 式を k 番目の O-PRP を表わす添え字 k を用いて次式のように書き換える。

$${}^{ob}\mathbf{M}_{dk}{}^{ob}\ddot{\mathbf{q}}_k + {}^{ob}\mathbf{D}_{dk}{}^{ob}\dot{\mathbf{q}}_k = {}^{ob}\mathbf{F}_{tk} \quad (12)$$

つぎに、 n 台の O-PRP それぞれが (12) 式で表わされるように制御されたとき、結果として表現される搬送物体の代表点の運動特性を導出する。前述のとおり、各 O-PRP の搬送物体座標系と代表点座標系は常に平行の関係となり、姿勢変化が生じないため、代表点座標系 ${}^{re}\Sigma$ の回転角速度 ${}^{re}\dot{\theta}$, 回転角加速度 ${}^{re}\ddot{\theta}$ は、物体座標系 ${}^{ob}\Sigma_k$ の回転角速度 ${}^{ob}\dot{\theta}_k$, 回転角加速度 ${}^{ob}\ddot{\theta}_k$ とそれぞれ等しくなり、次式で表わされる。

$${}^{re}\dot{\theta} = {}^{ob}\dot{\theta}_k, \quad {}^{re}\ddot{\theta} = {}^{ob}\ddot{\theta}_k \quad (13)$$

ここで、各 O-PRP の搬送物体座標系の回転角速度 ${}^{ob}\dot{\theta}_k$, 回転角加速度 ${}^{ob}\ddot{\theta}_k$ は、車輪に取り付けられたエンコーダから求められる O-PRP の回転角速度 ${}^r\dot{\theta}_k$, 回転角加速度 ${}^r\ddot{\theta}_k$ および搬送物体の把持点 (フリージョイント部) に取り付けられ

たエンコーダから求められる搬送物体と O-PRP の相対姿勢変化速度・加速度を用いて計算することができる。

さらに、代表点と k 番目の O-PRP 間の速度と加速度の関係はそれぞれ (14) 式, (15) 式で表わされる。

$${}^{re}\dot{\mathbf{q}} = {}^{ob}\dot{\mathbf{q}}_k + {}^{ob}\dot{\theta}_k \mathbf{P}_k^T \quad (14)$$

$${}^{re}\ddot{\mathbf{q}} = {}^{ob}\ddot{\mathbf{q}}_k + {}^{ob}\ddot{\theta}_k \mathbf{P}_k^T \quad (15)$$

ここで、 ${}^{re}\dot{\mathbf{q}}$, ${}^{re}\ddot{\mathbf{q}}$ はそれぞれ搬送物体の代表点の速度, 加速度である。また、 k 番目の O-PRP から搬送物体の代表点に設定した座標系までの並進ベクトル $\mathbf{r}_k = [r_{xk}, r_{yk}]^T$ により $\mathbf{P}_k$ を (16) 式のように定義する。

$$\mathbf{P}_k = \begin{bmatrix} -r_{yk} & r_{xk} \end{bmatrix} \quad (16)$$

これらの関係から、(12) 式の運動特性をもつように制御されている n 台の O-PRP によって把持された搬送物体の代表点のみかけの運動方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \sum {}^{ob}\mathbf{M}_{dk} & \sum -{}^{ob}\mathbf{M}_{dk}\mathbf{P}_k^T \\ \sum -\mathbf{P}_k {}^{ob}\mathbf{M}_{dk} & \sum \mathbf{P}_k {}^{ob}\mathbf{M}_{dk}\mathbf{P}_k^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{re}\ddot{\mathbf{q}} \\ {}^{re}\ddot{\theta} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \sum {}^{ob}\mathbf{D}_{dk} & \sum -{}^{ob}\mathbf{D}_{dk}\mathbf{P}_k^T \\ \sum -\mathbf{P}_k {}^{ob}\mathbf{D}_{dk} & \sum \mathbf{P}_k {}^{ob}\mathbf{D}_{dk}\mathbf{P}_k^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{re}\dot{\mathbf{q}} \\ {}^{re}\dot{\theta} \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} {}^{re}\mathbf{F}_t \\ {}^{re}N_t \end{bmatrix} \quad (17) \end{aligned}$$

ここで、 ${}^{re}\mathbf{F}_t$, ${}^{re}N_t$ は、人間が物体を介して各 O-PRP に加える並進力を搬送物体の代表点まわりに座標変換することによって得られる力とモーメントであり、それぞれ (18) 式, (19) 式で表わされる。

$${}^{re}\mathbf{F}_t = \sum_{k=1}^n {}^{re}\mathbf{F}_{tk} = \sum_{k=1}^n {}^{ob}\mathbf{F}_{tk} \quad (18)$$

$${}^{re}N_t = \sum_{k=1}^n {}^{re}N_{tk} = \sum_{k=1}^n (-\mathbf{r}_k \times {}^{ob}\mathbf{F}_{tk}) \quad (19)$$

(17) 式から、搬送物体の代表点の操作特性は非常に複雑であることがわかる。そこで、搬送物体の代表点の位置を (20) 式, (21) 式に示す幾何学的な条件に基づいて指定することを考える。

$$\sum_{k=1}^n {}^{ob}\mathbf{M}_{dk}\mathbf{P}_k'^T = \mathbf{0} \quad (20)$$

$$\sum_{k=1}^n {}^{ob}\mathbf{D}_{dk}\mathbf{P}_k'^T = \mathbf{0} \quad (21)$$

ただし、 $\mathbf{P}_k' = [r_{yk} \ r_{xk}]^T$ である。(20) 式, (21) 式は O-PRP によって囲まれた範囲に代表点を指定し、各 O-PRP の慣性と粘性係数を適切に変化させた場合に成り立つ条件である。すなわち、3 台の O-PRP で搬送物体を搬送する場合には、Fig.6 に示すように 3 台の O-PRP で囲まれる範囲内に搬送物体の代表点を指定することができ、2 台の O-PRP で物体を搬送する際は、2 台の O-PRP が結ぶ線分に物体の代表点を指定できることを示す。

いま、物体の重心が O-PRP で囲まれた範囲内にあり、その

Fig. 6 Geometrics constraints among multiple robots and representative point

重心位置に搬送物体の代表点を指定すると、搬送物体の代表点の運動方程式は次式となり、その運動特性は単純化される。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \sum {}^{ob}\mathbf{M}_{dk} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \sum \mathbf{P}_k {}^{ob}\mathbf{M}_{dk}\mathbf{P}_k^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{re}\ddot{\mathbf{q}} \\ {}^{re}\ddot{\theta} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \sum {}^{ob}\mathbf{D}_{dk} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \sum \mathbf{P}_k {}^{ob}\mathbf{D}_{dk}\mathbf{P}_k^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{re}\dot{\mathbf{q}} \\ {}^{re}\dot{\theta} \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} {}^{re}\mathbf{F}_t \\ {}^{re}N_t \end{bmatrix} \quad (22) \end{aligned}$$

搬送物体の運動が単純化し、みかけの運動特性が指定できることから、たとえば進行方向には軽く動き、進行方向と垂直な方向や回転方向に関しては動きにくいといった異方性を有する操作特性が実現可能となり、作業内容に応じて操作性を変化させることができる。ただし、搬送物体の代表点と各 O-PRP 間の距離が長くなると、回転に関する慣性行列、粘性行列が大きくなり人間の加える力だけでは回転しにくい操作特性となる。この問題を解決するために、次節では、各 O-PRP それぞれの操作特性を変化させることによって、結果的に搬送物体の代表点の位置を変化させその姿勢を制御することを考える。

3.3 代表点位置の変化による搬送物体の姿勢制御

人間が一人で大型搬送物体を操る場合、その姿勢を適切に変化させることは難しい。これは、姿勢を変化させるためのモーメントを正確に物体に加えることが困難であるからである。本節では、搬送物体の姿勢を制御することにより障害物回避を行ないながら物体の搬送を実現するという作業を例として取り上げ、前節で提案した搬送物体の操作特性を変化させる運動制御系を拡張した姿勢制御手法を提案する。障害物回避という機能のみに注目すると、たとえばポテンシャルフィールドを利用した障害物回避手法など多くの研究が行なわれているが、本節では、環境に対して厳密に物体の搬送姿勢角度を制御するのではなく、各 O-PRP の並進方向の運動特性を変化させることで結果として搬送物体の姿勢までも変化させることができることを示すことを目的としており、この姿勢制御は障害物回避に限らず、長尺物や大型物体の操り

Fig. 7 Two robots coordination for collision avoidance

を容易にすると考える。

いま、人間がある搬送物体の重心に並進力を加えて搬送を行っていると仮定すると、搬送物体の代表点の位置を重心位置から変化させることによって、重心に加えられた並進力に対する搬送物体の運動特性は (17) 式, (20) 式より次式で表わされる。

$$\sum {}^{ob}M_k {}^{re}\ddot{\mathbf{q}} + \sum {}^{ob}D_k {}^{re}\dot{\mathbf{q}} - \sum {}^{ob}D_k \mathbf{P}_k^T {}^{re}\dot{\boldsymbol{\theta}} = {}^{re}\mathbf{F}_t \quad (23)$$

これは、人間が重心に加える並進力のみで搬送物体の代表点に回転速度が生成されていることを示している。すなわち、人間は搬送物体にモーメントを加えることなく並進力のみで搬送物体の姿勢制御が実現できる。たとえば、各 O-PRP がレーザレンジファインダや超音波センサを用いて O-PRP と障害物間の距離を計測できるものとし、2 台の O-PRP を用いて物体を搬送することを考える。このとき、(20) 式, (21) 式で表わされる幾何学的条件を満たすことで Fig.7 に示すように代表点の位置は、O-PRP 間を結ぶ線分の任意の場所に指定可能である。人間が搬送物体の重心（本節では搬送物体の中心と仮定）に力を加え、片方の O-PRP の進行方向に障害物がある場合、その O-PRP の進行方向の粘性抵抗を大きくすることで、Fig.7 に示すように搬送物体の代表点の位置を障害物に近い O-PRP のほうに移動させることができる。結果と

して、搬送物体は加えられた力によって回転し、障害物を回避する。また、もう 1 台の O-PRP が障害物を認知した場合も、同様に粘性抵抗を変化させることでもう一方の O-PRP のほうへ代表点が移動し、Fig.7 で示すように障害物との衝突を避けることができる。

この手法を用いることにより比較的単純な環境では、2 台の O-PRP が互いに通信することなく単にシステムに加えられる並進力のみによって姿勢制御が可能となり、障害物回避はもちろん作業内容に適応した姿勢制御などにも応用が可能である。複雑な環境での利用や多くの O-PRP を用いて搬送作業を行なう場合には、環境情報や各 O-PRP の情報を共有し、適切な動作計画を行なうことが有効であると考えられるが、これは今後の課題とする。

4. 物体搬送実験

本章では、2 台の O-PRP を用いた物体の搬送実験により、提案した操作特性可変制御系の有効性を確認する。ただし、O-PRP に搭載されているエンコーダの性能上加速度の計測は困難であるため、本研究ではみかけの粘性行列 ${}^{ob}D_d$ のみを変化させる。したがって、各 O-PRP の目標力 ${}^{ob}\mathbf{F}_d$ を求める (11) 式を次式のように修正する。

$${}^{ob}\mathbf{F}_d = -({}^{ob}D_d - {}^{ob}D) {}^{ob}\dot{\mathbf{q}} \quad (24)$$

このときの搬送物体の代表点を重心としたときの運動方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \sum {}^{ob}M_k & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \sum \mathbf{P}_k {}^{ob}M_k \mathbf{P}_k^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{re}\ddot{\mathbf{q}} \\ {}^{re}\ddot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \sum {}^{ob}D_{dk} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \sum \mathbf{P}_k {}^{ob}D_{dk} \mathbf{P}_k^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{re}\dot{\mathbf{q}} \\ {}^{re}\dot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} {}^{re}\mathbf{F}_t \\ {}^{re}N_t \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (25)$$

また、搬送物体の重心位置を代表点として指定しない場合は、粘性係数を適切に指定することによって、O-PRP によって囲まれた範囲内における代表点の運動特性を次式のように設定することができる。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \sum {}^{ob}M_k & \sum -{}^{ob}M_k \mathbf{P}_k^T \\ \sum -\mathbf{P}_k {}^{ob}M_k & \sum \mathbf{P}_k {}^{ob}M_k \mathbf{P}_k^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{re}\ddot{\mathbf{q}} \\ {}^{re}\ddot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \sum {}^{ob}D_{dk} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \sum \mathbf{P}_k {}^{ob}D_{dk} \mathbf{P}_k^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{re}\dot{\mathbf{q}} \\ {}^{re}\dot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} {}^{re}\mathbf{F}_t \\ {}^{re}N_t \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (26)$$

これは、O-PRP が加速している場合は搬送物体の代表点回りの運動特性は複雑となるが、一定の速度で搬送を行なっている場合には運動特性が単純化する。この単純化された搬送物体の代表点の運動特性に関して特に粘性係数を調整することによって、ある方向への運動を拘束するような異方性を有

するダンピング特性が実現でき、また、搬送物体の代表点を環境や作業内容に応じて移動させることによってその姿勢を変化させることも可能となる。以下ではこれらの操作特性が実現できるかを検証する物体搬送実験を行なう。

4.1 異方性を有する操作特性の実現

本実験では、みかけの粘性行列 ${}^{ob}D_{dk}$ を変化させることにより、搬送物体の操作特性を変化させることが可能であることを示す。ここでは、Fig.8(a) に示すように2台のO-PRPに搬送物体座標系を設定し、各O-PRPが1m離れた状態で搬送物体を把持させた。2台のO-PRPの粘性抵抗を ${}^{ob}d_{dx} = 10 \text{ Ns/m}$, ${}^{ob}d_{dy} = 2000 \text{ Ns/m}$ と指定し、搬送物体の代表点は2台のO-PRPが結ぶ線分の中点(重心)に指定した。このように、各O-PRPの粘性抵抗を指定することにより、搬送物体の代表点回りの粘性抵抗は ${}^{re}d_{dx} = 20 \text{ Ns/m}$, ${}^{re}d_{dy} = 4000 \text{ Ns/m}$, ${}^{re}d_{\theta} = 5 \text{ Ns/rad}$ となる。つまり、搬送物体の ${}^{re}x$ 方向には簡単に動くが、 ${}^{re}y$ 方向には動き難い、また ${}^{re}\theta$ に対して回転しやすい異方性を有する操作特性が実現できる。

本実験では、はじめに、作業者は粘性抵抗を低く設定した ${}^{re}x$ 方向に力を加えることで物体搬送を開始する。その後、作業者は搬送物体の代表点から離れたO-PRP1の近くに力を加えることでその姿勢を変化させ、最終的に ${}^{re}x$ 方向に力を加える続けることで絶対座標系の y 方向に物体の搬送を行なう。また、搬送物体に実現された異方性の特性を検証するために、搬送途中で意図的に搬送方向に対して垂直な方向、すなわち大きな粘性抵抗を設定した ${}^{re}y$ 方向に外力を加え、その挙動を確認する。

実験結果として、Fig.8(b) に絶対座標系における2台のO-PRPの質量中心がたどった経路および搬送作業途中の搬送物体の姿勢変化を示す。ただし、これらの結果は各O-PRPに搭載されたエンコーダの情報をもとに計算しており、移動ロボットでは避けることのできない車輪と路面との間のすべりのために、搬送距離が長くなるほどO-PRP間の相対位置関係に誤差が見られることに注意されたい。また、Fig.8(c) に2台のO-PRPの絶対座標系における x 方向、 y 方向の時間に対する軌道を示す。そのほか、Fig.8(d), Fig.8(e) では2台のO-PRPの質量中心に取り付けられた力センサを用い、絶対座標系で表わす各O-PRPに加わる力情報を示す。ただし、力センサはO-PRPの制御には使用せず、実験の検証のために用いた。

Fig.8(c), (d), (e) より、約7sから x 方向に加えられた力によって物体の搬送が行なわれていることがわかる。また、Fig.8(d), (e) より、約17sと約25sで y 方向に約 $\pm 50 \text{ N}$ の外力が加えられたにもかかわらず、Fig.8(b), (c) で示すように2台のO-PRPはほとんど運動を生成していない。一方、人間が搬送物体の代表点から離れたO-PRP1の近くに力を加えることで搬送物体はその姿勢を変化させ、その後、 y 方向に搬送することが可能となった。この実験を通して、搬送物体の代表点回りに指定した異方性の運動特性が実現される

ことが示された。

4.2 代表点の位置変化に基づく搬送物体の姿勢制御実験

本実験では、Fig.7 に示すように2台のO-PRPによって把持された搬送物体の中心(重心)に紐を取り付け人間はその

Fig. 8 Experimental results for variable motion characteristic of object

Fig. 9 Experimental results for collision avoidance

紐を引っ張ることで搬送物体に力を加え、障害物のある環境での搬送実験を行なった。紐を用いて物体に力を加えるため、人間は搬送物体に特定のモーメントを加えることはできない。この実験では、前節の実験と同様に (Fig.8(a)), 各 O-PRP に搬送物体座標系を設定し、環境の変化に基づいてその x 軸方向のみかけの粘性係数を変化させた。障害物の場所はあらかじめ O-PRP に与え、O-PRP が障害物に近づいたとき障害物側の O-PRP のみかけの粘性抵抗を ${}^{ob}d_{dx} = 50 \text{ Ns/m}$, ${}^{ob}d_{dy} = 10 \text{ Ns/m}$ から ${}^{ob}d_{dx} = 250 \text{ Ns/m}$, ${}^{ob}d_{dy} = 10 \text{ Ns/m}$ へと変えることで代表点の位置を変化させた。なお、上記の粘性抵抗は、環境情報や作業内容に基づいて搬送物体の姿勢をどのように制御すべきかを検討したうえで、その目標姿勢を実現するために適切な値を決定する必要があるが、その決定手法の詳細な検討に関しては今後の課題とし、今回は実験的に決めた値を用いた。

実験結果を Fig.9, Fig.10 に示す。Fig.9(a) に各 O-PRP

Fig. 10 Experiment of collision avoidance

の位置の時間変化を、Fig.9(b) に搬送物体の姿勢変化をそれぞれ示す。また、Fig.9(c) に各 O-PRP の質量中心がたどった経路および物体の姿勢変化を示す。Fig.9 と Fig.10 から、提案した手法によって、物体の姿勢が変化し障害物回避が実現できていることがわかる。

5. おわりに

本論文では、パッシブロボティクス概念に基づいて開発された O-PRP (Omni-directional type Passive Robot Porter) を紹介し、O-PRP の特徴とその基本となる運動制御アルゴリズムについて述べた。また、複数の O-PRP と人間との協調により大型物体搬送を実現する手法として搬送物体の操作特性を変化させる手法やその拡張による姿勢制御手法を提案した。提案した制御系を 2 台の O-PRP に適用し、物体の搬送実験を行ない、その有効性を確認した。

今後は、作業内容や環境情報に基づいて、どのように搬送物体の代表点の位置や粘性抵抗を変化させるかについて議論を行なっていくとともに、正確に目標姿勢を制御する手法の構築も行なう。また、ブレーキ制御に基づくパッシブロボットの運動制御制限に関して考察し、複数台のパッシブロボットの運動制御制限を適切に協調させることで、あるパッシブロボットにおいて不足した制御入力をほかのパッシブロボットが補償する手法についても検討を行なっていく。

現時点では 1 台の O-PRP は比較的大型であるが、最終的には家具などに取り付けられているキャスタ程度の大きさを想定し、ブレーキ制御されていない状態では非常に軽く動くようなハードウェアを設計することを目指す。これにより、パッシブロボットが複数台になることによる人間の操作力の増大はそれほど大きな問題とはならず、むしろ、各パッシブロボットが発生する小さなブレーキ力の合力で、搬送物体の速度や姿勢の制御を行なうことが期待できる。

参考文献

- 1) A. Goswami, M.A. Peshkin and J.E. Colgate: Passive Robotics: An Exploration of Mechanical Computation, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 279/284 (1990)
- 2) M.A. Peshkin, J. Colgate, W. Wannasuphprasit, C.A.

Moore, R.B. Gillette and P. Akella: Cbot Architecture, IEEE Transactions on Robotics and Automation, **17**-4, 377/390 (2001)

- 3) G. Wasson, J. Gunderson, S. Graves and R. Felder: An Assistive Robotic Agent for Pedestrian Mobility, Proceedings of International Conference on Autonomous Agents, 169/173 (2001)
- 4) S. MacNamara and G. Lacey: A Smart Walker for the Frail Visually Impaired, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1354/1359 (2000)
- 5) Y. Hirata, A. Hara and K. Kosuge: Motion Control of Passive Intelligent Walker Using Servo Brakes, IEEE Transactions on Robotics, **23**-5, 981/990 (2007)
- 6) Y. Hirata, Z.D. Wang, K. Fukaya and K. Kosuge: Transporting an Object by a Passive Mobile Robot with Servo Brakes in Cooperation with a Human, Advanced Robotics, **23**-4, 387/404 (2009)
- 7) M. Saida, Y. Hirata and K. Kosuge: Motion Control of Passive Mobile Robot Consisting of Casters with Servo Brakes, Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 42/48 (2009)
- 8) Y. Hirata and K. Kosuge: Distributed Robot Helpers Handling a Single Object in Cooperation with a Human, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 458/463 (2000)
- 9) O. Khatib, K. Yokoi, K. Chang, D. Ruspini, R. Holmberg and A. Casal: Coordination and Decentralized Cooperation of Multiple Mobile Manipulators, Journal of Robotic Systems, **13**-11, 755/764 (1996)
- 10) H. Arai, T. Takubo, Y. Hayashibara and K. Tanie: Human-Robot Cooperative Manipulation Using a Virtual Nonholonomic Constraint, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 4064/4070 (2000)
- 11) Y. Hirata, T. Takagi, K. Kosuge, H. Asama, H. Kaetsu and K. Kawabata: Manipulation of a Large Object by Multiple DR Helpers in Cooperation with a Human, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 126/131 (2001)
- 12) Y. Hirata, H. Song, Z.D. Wang and K. Kosuge: Control of Passive Object Handling Robot with Free Joint for Reducing Human Assistive Force, Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1154/1159 (2007)

小 嶋 洋 介

1984 年生。2007 年茨城大学工学部システム工学科（現：知能システム工学科）卒業。同年東北大学大学院工学研究科バイオロボティクス専攻博士課程前期入学，2008 年より（株）本田技術研究所勤務，現在に至る。在学中はパッシブ型物体搬送ロボットに関する研究に従事。

小 菅 一 弘（正会員・フェロー）

1955 年生。78 年東京工業大学工学部制御工学科卒業。80 年東京工業大学理工学研究科制御工学専攻修士課程修了。同年日本電装（株）（現（株）デンソー）入社。82 年東京工業大学工学部制御工学科助手。90 年名古屋大学工学部助教授。95 年東北大学工学部機械知能工学科教授。97 年より東北大学大学院工学研究科教授（大学院重点化による配置換），現在に至る。工学博士。ロボット，メカトロニクス，マン・マシンシステム，知能機械などの研究に従事。IEEE Robotics and Automation Society President (2010～2011)，2002 年および 2005 年日本機械学会賞（論文），2005 年日本ロボット学会論文賞，2004 年，2006 年ファナック FA 財団論文賞など受賞。IEEE フェロー，日本機械学会フェロー，日本ロボット学会フェロー。

[著 者 紹 介]

平 田 泰 久（正会員）

1975 年生。98 年東北大学工学部機械知能工学科卒業。2000 年同大学大学院工学研究科機械知能工学専攻修了。同年同大学大学院工学研究科助手。2002～2006 年科学技術振興機構さきがけ研究 21 “相互作用と賢さ” 領域研究員（兼任），2006 年より東北大学大学院工学研究科助教授，2007 年同大学准教授，現在に至る。博士（工学）。複数ロボットの協調，人間協調型ロボット，移動支援システムなどの研究に従事。2001 年日本ロボット学会研究奨励賞，2005 年日本機械学会賞（論文），2005 年日本ロボット学会論文賞，2006 年ファナック FA ロボット財団論文賞など受賞。IEEE，日本機械学会，日本ロボット学会の会員。