2台の非ホロノミック移動ロボットによる分散協調搬送*

小 菅 一 弘^{*1}, 大 住 智 宏^{*2}
千 葉 晋 彦^{*2}, 佐 藤 学^{*2}Coordinated Transportation by Two Nonholonomic Mobile Robots
based on Decentralized ControlKazuhiro KOSUGE, Tomohiro OOSUMI,
Kunihiko CHIBA and Manabu SATOU

In this paper, we propose a decentralized control algorithm for transporting a single object by two nonholonomic mobile robots. We extend the leader-follower type control algorithm, which we proposed for the holonomic robots⁽¹⁰⁾, to the nonholonomic mobile robots by introducing the dual caster action. The proposed control algorithm is experimentally applied to two nonholonomic mobile robots, and the experimental results illustrate the validity of the extended control algorithm.

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

1. 諸 言

複数のロボットを協調させて用いれば、1台ではできないような作業が可能になる。重量物や巨大な物体の操りがその例である。このような協調作業をロボットに行わせようと、物体の操りに関して、さまざまな研究が行われてきた。これまで、複数のマニピュレータに関して、多くの制御方法^{(1)~(6)}が提案されてきたが、マニピュレータはホロノミックであるため、これらの方法は非ホロノミックなロボットには直接適用できない。複数の非ホロノミックな移動ロボットに対して、キャストの動きを模倣することによって搬送作業を実現する方法⁽⁷⁾、移動ロボットと物体の間に機械的コンプライアンスを設けることによって搬送作業を実現する方法⁽⁸⁾、移動ロボットの運動学、動力学に基づいた制御法⁽⁹⁾などが提案されている。

複数のロボットを制御する手法は、一般に、1台の制御装置ですべてのロボットを制御する集中制御とおのおののロボットをおのおの独立した制御系、制御装

置で制御する分散制御に分類される。しかし、複数の移動ロボットを用いて協調作業を行うことを考えると、おのおのの移動ロボットはおのおのの制御装置をもっているため、おのおのの移動ロボットは分散制御系で制御されることが前提となる。通常、分散制御系を用いて、ロボットを用いて協調作業を実現する場合、すべてのロボットに目標軌道を送信する必要があるが、ロボットの台数が増加するとともに、通信負荷が増加してしまう。

そこで、著者らは、より一般的な複数のロボットの協調制御を実現するため、リーダ・フォロワタイプの分散協調制御系^{(10)~(12)}を提案してきた。これらの分散協調制御系はすべての移動ロボットをコンプライアンス制御し、1台のロボット(リーダ)のみに物体の目標軌道を与え、残りのロボット(フォロワ)は操っている物体の運動を通して、リーダの運動をおのおの独立に推定し、協調して単一物体を搬送するものである。

しかし、この分散協調制御系は、全方向移動ロボットやマニピュレータのようなホロノミックな拘束条件をもつロボットを前提として設計されているため、非ホロノミックな拘束条件をもつロボットには、そのまま適用することはできない。そこで、本稿では、2台の非ホロノミックな拘束条件をもつ独立二輪駆動形移

* 原稿受付 1998年1月12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)。^{*2} 東北大学大学院。

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

動ロボットに、この分散協調制御系を拡張する。また、この拡張した分散協調制御系を、2台の独立二輪駆動形移動ロボットに適用し、単一物体の搬送実験を行い、拡張した分散協調制御系の有効性を示す。

2. ホロミックなロボットの制御系⁽¹⁰⁾

本章では、これまで提案した分散制御系⁽¹⁰⁾について簡単に説明し、3章で、この分散制御系を平面上で移動する非ホロミックな拘束条件を持つ移動ロボットに拡張することを考える。

文献⁽¹⁰⁾で提案した分散制御系はすべてのロボットをコンプライアンス制御し、目標軌道はリーダーのみに与え、フォロワは、リーダーに与えられた目標軌道を推定し、その推定された軌道に基づいて、それ自身を制御し、物体を搬送するものである。まず、図1に示すように、リーダーとフォロワは同一の座標系で、物体に固定された同一のコンプライアンスセンタ回りに、同一の特性をもつように、次式のように制御されているとする。

$$D\Delta\dot{x}_l + K\Delta x_l = f_l - f_l^{in} \quad (1)$$

$$D\Delta\dot{x}_1 + K\Delta x_1 = f_1 - f_1^{in} \quad (2)$$

ここで、添字 $l, 1$ はリーダー、およびフォロワを表す。 $D \in R$ は正の減衰係数、 $K \in R$ は正の剛性係数、 $f_l, f_1 \in R$ は各ロボットに働く力、 $f_l^{in}, f_1^{in} \in R$ は各ロボットが物体に加える内力の目標値、 $\Delta x_l, \Delta x_1 \in R$ は各ロボットに働く力によって各ロボットに生じる運動誤差である。

$x_d, x_{e1} \in R$ をリーダーとフォロワの目標軌道、 $x \in R$ をロボットの実際の軌道とする。ロボットが物体をしっかりとは保持しているとする、すべてのロボットの実際の軌道 x はコンプライアンスセンタの軌道と一致するので、 $\Delta x_l, \Delta x_1$ は、次式で表される。

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

$$\Delta x_1 = x - x_{e1} \quad (4)$$

このとき、搬送する物体に働く外力が無視できるとすると、式(3)、(4)から、リーダーとフォロワの運動誤差には次式のような関係が成り立つ。

$$\Delta x_l + \Delta x_1 = 0 \quad (5)$$

また、式(3)、(4)から x を消去すると、次式を得る。

Fig. 1 Compliance

$$\Delta x_l - \Delta x_1 = x_d - x_{e1} \quad (6)$$

フォロワが推定しているリーダーの目標軌道の推定誤差 Δx_{d1} を次のように定義する。

$$\Delta x_{d1} = x_d - x_{e1} \quad (7)$$

式(5)～(7)から、 Δx_{d1} は次のように計算することができる。

$$\Delta x_{d1} = 2\Delta x_l \quad (8)$$

フォロワは自分の運動誤差 Δx_1 を用いて、推定誤差 Δx_{d1} を計算することができる。

次に、 Δx_{d1} から x_{e1} を推定することを考える。図2のように、 Δx_{d1} から x_{e1} を推定する伝達関数を G_1 とする。図2(a)は、式(7)より、図2(b)のように等価変換することができる。フォロワは、 Δx_{d1} が零に収束するように x_{e1} を定めれば、 x_d を正確に推定することになる。本稿では、定常状態で位置誤差、速度誤差がなく、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、 G_1 を次のように設計する。

$$G_1 = \frac{a_1 s + b_1}{s^2} \quad (9)$$

このときの制御系を図3に示す。

3. 非ホロミックなロボットへの拡張

2章で述べた分散協調制御系は、マニピュレータや全方向移動ロボットのようなホロミックな拘束条件をもつロボットを前提として設計された。しかし、非ホロミックな拘束条件をもつロボットには、ホロノ

Fig. 2 Estimator

Fig. 3 Structure of system

ミックな拘束条件をもつロボットのように任意の方向に速度を生成できないため、2章で述べた制御系をそのまま適用することはできない。そこで、本章では、この分散協調制御系を非ホロノミックなロボットへ拡張することを考える。

3.1 独立二輪駆動形移動ロボット 本論文では、移動ロボットとして図4に示すような独立二輪駆動形移動ロボットを考える。移動ロボットの進行方向を x 、姿勢を θ とすると、座標系は図5に示すようになる。移動ロボットは各車輪を適当に動かすことによって、進行方向に $\dot{x}$ 、回転方向に $\dot{\theta}$ の速度を生成することができる。

3.2 システムの概要 2章の制御系は、搬送する物体を、ロボットがしっかりと把握しているとして設計した。しかし、非ホロノミックな移動ロボットの場合、複数のロボットが互いにしっかりと搬送する物体を把持すると、ロボットは平面上を自由に移動することができなくなる。そこで、本稿では、図4のように、非ホロノミックな独立二輪駆動形の移動ロボットへの適用を考え、フリージョイントを介して物体を把持することにする。また、フリージョイントの回転中心は、移動ロボットの左右の車輪の中心と一致するとする。

独立二輪駆動形移動ロボットは、すべての方向に対して速度を生成することができないためすべての方向に対して、式(1)、(2)のように、コンプライアンス制御をすることができない。そこで、2章で示した軌道推定アルゴリズムをロボットの進行方向に対して用いることを考える。前節の場合と同様に、リーダには、目標軌道を与え、フォロワは進行方向に対して軌道推

Fig. 4 Free joint

Fig. 5 Coordinate system

定を行う。フォロワの回転方向に対しては、Stillwellらが提案したキャストアクションの考えを用いる⁽⁷⁾。3.3節ではこのキャストアクションを拡張し、デュアルキャストアクションを提案する。

3.3 デュアルキャストアクション 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。本稿では、速度制御形アクチュエータによって駆動される独立二輪駆動形ロボットにこの考えを適用する。

図4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。そこで、実際のキャストは、図6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。

$$D_{cast} \dot{\theta}_1 = C_{off} (-f_{1x} \sin \theta_1 + f_{1y} \cos \theta_1) \quad \dots (10)$$

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(10)を満足するように角速度 $\dot{\theta}_1$ を生成する。ここで、 f_{1x} , f_{1y} は、ベース座標系 Σ_B から見たフォロワにかかる力、 θ_1 は、ベース座標系 Σ_B から見たフォロワの姿勢、 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6(b)に示すように $-f_{1x} \sin \theta_1 + f_{1y} \cos \theta_1 \geq 0$ 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6(c)に示すように $-f_{1x} \sin \theta_1 + f_{1y} \cos \theta_1 < 0$ である場合、フォロワは90°以上回転してしまう。このとき、フォロワの姿勢がリーダの姿勢に対して垂直となる特異な状態に陥ってしまい、リーダの運動する方向に対して、速度を生成できなくな

Fig. 6 Real caster action

Fig. 7 Dual caster action

る。

この動作を回避するため、図7のように2種類のキャストの特性をもつようにフォロワを制御する。フォロワに作用する力 $-f_{1x}\sin\theta_1 + f_{1y}\cos\theta_1$ の符号に対して、フォロワを次式のように制御する。

$$D_{cast}\dot{\theta}_1 = C(-f_{1x}\sin\theta_1 + f_{1y}\cos\theta_1) \quad (11)$$

ただし、 C は

$$C = \begin{cases} C_{off}, & \text{for } f_{1x}\cos\theta_1 + f_{1y}\sin\theta_1 \geq 0 \\ -C_{off}, & \text{for } f_{1x}\cos\theta_1 + f_{1y}\sin\theta_1 < 0 \end{cases} \quad (12)$$

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も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ロボットの姿勢を一致させることができる。

4. 姿勢誤差の影響

フォロワがデュアルキャストアクションを行うことによって、素早く、物体の進行方向とフォロワの進行方向を一致させることができると仮定すると、2台の非ホロミックなロボットによる単一物体の操り問題は、進行方向1自由度の問題に帰着することができ、2章の1自由度の軌道推定アルゴリズムを適用できる。しかし、実際には、デュアルキャストアクションを用いても、物体の進行方向とフォロワの進行方向は、必ずしも一致しない。そこで、本章では、この物体の進行方向とフォロワの通行方向の誤差が軌道推定に及ぼす影響について考える。

4.1 推定誤差 まず、独立二輪駆動形移動ロボットを用いた場合、フォロワの進行方向に対しての軌道推定誤差 $\Delta^1 x_{d1}$ がどのようにになるか計算する。リーダーとフォロワは進行方向に対して、図8(a)のように

Fig. 8 Compliance of each robots

コンプライアンス制御されているとすると、次式を得る。

$$D\Delta^1 \dot{x}_l + K\Delta^1 x_l = {}^l f_{lx} \quad (13)$$

$$D\Delta^1 \dot{x}_1 + K\Delta^1 x_1 = {}^1 f_{1x} \quad (14)$$

ただし、左上の添字 $l, 1$ はリーダーおよびフォロワの座標系の変数であることを表す。また、 ${}^l f_{lx}, {}^1 f_{1x}$ はリーダーおよびフォロワの進行方向に作用する力を表す。搬送する物体に外力が働かないと仮定すると、リーダーとフォロワはフリージョイントを介して、物体を把持しているので、

$${}^s f_{lx} + {}^s f_{1x} = 0 \quad (15)$$

が成り立つ。ただし、左上の添字 s は物体の座標系の変数であることを表す。

式(13)~(15)から、リーダーとフォロワの運動誤差には次式のような関係が成り立っている。

$$\frac{\Delta^l x_l}{\cos(\theta_l - \theta_s)} + \frac{\Delta^1 x_1}{\cos(\theta_1 - \theta_s)} = 0 \quad (16)$$

ただし、 $\theta_l, \theta_1, \theta_s$ はベース座標系 Σ_B から見たリーダー、フォロワ、および物体の姿勢を表す。ところで、フォロワの進行方向に対しての推定誤差 $\Delta^1 x_{d1}$ は式(6)と同様に、図8(b)から $\Delta^1 x_1, \Delta^l x_l$ を用いて次のように計算できる。

$$\Delta^1 x_{d1} = \Delta^1 x_1 - \Delta^l x_l \cos(\theta_l - \theta_1) \quad (17)$$

式(16)、(17)から、 $\Delta^l x_l$ を消去するとフォロワの進行方向に対しての推定誤差 $\Delta^1 x_{d1}$ を得る。

$$\Delta^1 x_{d1} = 2U_1 \Delta^1 x_1 \quad (18)$$

ただし、 U_1 は以下のように表される。

$$U_1 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\cos(\theta_l - \theta_1) \cos(\theta_l - \theta_s)}{\cos(\theta_1 - \theta_s)} \right) \quad (19)$$

4.2 推定誤差の影響 もし、 U_1 が計算できるならば、2 章と同様にして、伝達関数 G_l を用いて軌道推定が行える。しかし、フォロワは、実際、リーダーの姿勢 θ_l と物体の姿勢 θ_s を知ることができないため、フォロワの推定誤差 $\Delta^1 x_{d1}$ を計算することができない。そこで、式(18)のかわりに、推定誤差を

$$\Delta^1 \tilde{x}_{d1} = 2\Delta^1 x_{d1} \quad \dots\dots\dots (20)$$

として、推定器を構成することを考える。式(18)、(20)より、 $\Delta^1 \tilde{x}_{d1}$ は

$$\Delta^1 \tilde{x}_{d1} = \frac{1}{U_1} \Delta^1 x_{d1} \quad \dots\dots\dots (21)$$

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 9 のようになる。もし、すべての U_1 に対し、4.1 節と同様に図 9 が安定となるように G_l を選べば、図 9 を用いて軌道を推定することができる。すなわち、 $U_1 > 0$ かつ、推定器のパラメータ $a_1 > 0$ 、 $b_1 > 0$ ならば、システムの安定性は保証される。

フォロワがデュアルキャストアクションを行うことによって、 $-\pi/2 < \theta_l - \theta_s < \pi/2$ 、 $-\cos^{-1}(1/3) < \theta_l - \theta_s < \cos^{-1}(1/3)$ が成り立っているならば、図 10 に示すように、 $U_1 > 0$ が成り立つ。このとき、フォロワは進行方向に対して、式(18)の代わりに式(20)を用いて目標軌道を推定することができる。図 10 からわかるように、 $\theta_l - \theta_s$ と $\theta_1 - \theta_s$ が小さいときは U_1 は $U_1 \cong 1$ となり、1 自由度の場合と同様に、軌道推定を行うことができる。なお、本稿で提案するアルゴリズムでは、フォロワはフォロワ自身が推定したリーダーの目標軌道

Fig. 9 Estimator in case of nonholonomic robot

Fig. 10 Value of U_1 ($-\pi/2 < \theta_l - \theta_s < \pi/2$, $-\cos^{-1}(1/3) < \theta_1 - \theta_s < \cos^{-1}(1/3)$)

とフォロワ自身の実際の軌道との差を用いてリーダーの軌道を推定しているので、滑りが生じたとしても、その滑りによる誤差は軌道の推定で吸収されるため、フォロワは問題なくリーダーに追従する。

5. 実験

図 11 に示すような、力センサを搭載した独立二輪

Fig. 11 Experimental system

(a) Orientation with reference to the base frame

(b) Desired Trajectory along x axis

(c) Real Trajectory along x axis

(d) Force along x axis

(e) Force along y axis

Fig. 12 Experimental results

Fig. 13 Transportation by two nonholonomic robots

駆動形移動ロボットに、拡張した分散協調制御系を適用し、単一物体の搬送実験を行った。リーダとフォロワは、それぞれ独立した制御系、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把持した。リーダには目標軌道を与え、フォロワは式(11)で提案したデュアルキャストアクションを用い、物体の進行方向とフォロワの進行方向が一致するように制御するとともに、進行方向に対しては、図9に示した軌道推定器を用いて、リーダの進行方向の軌道を推定し制御した。なお、制御系の実現には VxWorks を用いた。

図12はリーダを $\theta_L = 30$ deg 一定として、1 m 前進させたときの実験結果である。ただし、図12(b)から(e)はリーダ座標系における値である。また、実線はリーダ、点線はフォロワを表す。さらに、搬送作業の一例を図13の連続写真で示す。図12(c)のデータにはフォロワとリーダの軌道に多少の誤差が見られるが、図12(b)ではフォロワはリーダの軌道をほぼ誤差なく推定し、図12(d)に見られるように定常状態では両方のロボットに働く力はほぼ零になっていることから、図12(c)に見られる誤差は、移動ロボットの駆動系の摩擦などの影響であると考えられる。なお、駆動系の摩擦などの影響でフォロワの軌道追従誤差が生じても、本実験に見られるように、ロボットに働く力は零となるように制御されるので物体搬送には影響しない。2台の独立二輪駆動形移動ロボットが協調して、単一物体を搬送していることがわかる。

6. 結 言

本稿では、今まで提案してきたリーダ・フォロワタイプの分散協調制御系を、非ホロノミックな拘束条件をもつ2台の独立二輪駆動形移動ロボットに適用できるように拡張し、実際に、単一物体の搬送実験を行い、その有効性を示した。今後、この拡張した分散協調制御系を複数の独立二輪駆動形移動ロボットに適用し、単一物体の搬送実験を行う予定である。

なお、本研究の一部は、平成8年度科学研究費補助金[重点領域研究(知能ロボット)課題番号08235203]の援助を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。

文 献

- (1) Nakano, E., Ozaki, S., Ishida, T. and Kato, I., Cooperative Control of the Anthropomorphic Manipulator "MELARM", *Proc. 4th Int. Symp., Industrial Robots*, (1974), 251-260, Tokyo.
- (2) 黒野繁, 一対の人工の手の協調制御, 機誌, 78-682 (1975), 804-810.
- (3) Zheng, Y. F. and Luh, J. Y. S., Optimal Load Distribution for Two Industrial Robots Handling a Single Object, *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1988), 344-349.
- (4) Uchiyama, M., A Unified Approach to Load Sharing, Motion Decomposing and Force Sensing of Dual Arm Robots, *Robotic Research: The Fifth Int. Symp.* (1990), 225-232, MIT Press.
- (5) Nakamura, Y., Nagai, K. and Yoshikawa, T., Mechanics of Cooperative Manipulation by Multiple Robotic Mechanism, *Proc. of 1987 Int. Conf. Robotics Autom.*, (1987), 991-998.

- (6) 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, 13-3, (1995), 404-410.
 - (7) Stilwell, D. J. and Bay, J. S., Toward the Development of a Material Transport System using Swarms of Ant-like Robots, *Proc. of 1993 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1993), 318-323.
 - (8) 太田順・武衛康彦・新井民夫・大隅久・陶山毅一, 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, 14-2 (1996), 263-270.
 - (9) 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, 13-6 (1995), 886-893.
 - (10) 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, 16-1 (1998), 87-95.
 - (11) 小菅一弘・関宏之・大住智宏・竹尾光治, 力情報に基づく複数マニピュレータの分散協調制御, 第 14 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1996), 1037-1038.
 - (12) Kosuge, K., Oosumi, T. and Chiba, K., Load Sharing of Decentralized-Control Multiple Mobile Robots Handling a Single Object, *Proc. of 1997 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1997), 3373-3378.
-