構造的に不安定な移動ロボットの協調行動による物体の運搬*

城間直司^{*1}, 松本 治^{*2}, 谷 和男^{*3}Cooperative Behavior of a Mechanically Unstable Mobile Robot
for Object Transportation

Naoji SHIROMA, Osamu MATSUMOTO and Kazuo TANI

Cooperative transportation of an object by two or more mobile robots requires each robot to exert an appropriate force to support and move the object, to move along the object, and to maintain the robot's attitude stably. Studies of cooperative transportation by multiple robots so far have scarcely considered the stability of the robot's attitude influenced by the force from the object. To take part in cooperative transportation, a mechanically unstable robot, such as a wheeled inverted pendulum, needs to control the force and follow the object as standing stably against the force in an integrated manner. We call this a cooperative behavior. To realize this behavior of a wheeled inverted pendulum, we built a control system to estimate the external force and maintain standing and to exert a specified force. Experiments were conducted of cooperative transportation between a human and the robot.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Moving Robot, Observer, Cooperative Transportation, Wheeled Inverted Pendulum, Force Control, Cooperative Behavior, Stable Standing

1. はじめに

重量物, 長尺物, 柔軟物などのように, 一台のロボットでは運搬が困難な物体でも, 複数台のロボットを協調させることにより運搬することが可能となる. 一つの物体を複数のロボットに担わせる協調運搬では, それぞれのロボットの可搬重量は小さくてもよく, またロボットの大きさも小さくてもよい. 複数台のロボットによる協調運搬において最低限満たさなければならない条件は, 搬送物を落としたり壊したりしないこと, ロボット自体が協調運搬時に搬送物から受ける反力に対して安定に自己姿勢を確保できること, の二つである. これらの条件を満たすために必要なロボットの機能は, 搬送物に適切な力を加える機能, 搬送物の動きにうまく

追従して移動する機能, 搬送物からの反力に対して自己姿勢の安定を確保する機能, の三つである. つまり, これら三つの機能を常に総合的に満足するロボットの行動 (behavior) が協調運搬のための必要条件である. この行動を本論文では, 協調行動と呼ぶ.

協調行動の機能のうち, 最後の自己姿勢の安定の確保は, 四輪ロボットのように外力に対して構造的に安定余裕が大きい場合はあまり問題にならないが, 二足歩行ロボットや車輪型倒立振子のように構造的に不安定で制御によって自己姿勢の安定を保つロボットでは自己姿勢調整などによって転倒を防がなければならない. 従来の複数台のロボットによる協調運搬の研究^{(1) - (6)}では, 協調運搬によって搬送物とロボットの間に発生する内力について考慮しているが, ロボット自身構造的に安定であるため搬送物から受ける力によって自身の安定性が脅かされず, 自己姿勢安定については考える必要がなかった.

本研究では, 構造的に不安定なロボットによる協調運搬について考える. この場合, ロボットは搬送物から受ける反力によって自己姿勢の安定が強く影響され, 自己姿勢の安定を確保しつつ協調運搬を行わねばなら

* 原稿受付 1998年3月23日.

*¹ 筑波大学大学院(☎ 305-8573 つくば市天王台1-1-1).*² 正員, 工業技術院機械技術研究所(☎ 305-8564 つくば市並木1-2).*³ 正員, 岐阜大学工学部(☎ 501-1193 岐阜市柳井1-1).

Fig. 1 The structure of the wheeled inverted pendulum.

ない。構造的に不安定なロボットの例として車輪型倒立振子を取り上げる。これまでに、倒立振子の安定倒立制御に対するいくつかの研究^{(7) - (12)}がなされているが、倒立振子が受ける外力を考慮した研究はほとんど行われていない。車輪型倒立振子は、四輪ロボットに比して対地投影面積が小さい利点がある。また、構造的に不安定なロボットによる協調運搬の研究は、人間による協調運搬の行動の解明につながることも期待できる。

本論文では、協調運搬時に搬送物から受ける力の情報をもとに、先に述べた協調行動の実現を目指す。この協調行動の実現のためには、まず、車輪型倒立振子の外力に対する安定な倒立が必要である。そこで、車輪型倒立振子に加わる外力の情報を得るために、新たにセンサを付加せずに、オブザーバにより外力を状態量の一つとみなして推定する方法、さらに、推定した外力をもとに車輪型倒立振子を外力に対して安定に直立させる位置制御手法を提案する。次に、協調運搬には物体に適切な力を加えることが必要であり、車輪型倒立振子が搬送物に加える力を制御するための車輪型倒立振子による力制御手法を提案する。提案した手法を用いて実験を行った結果、車輪型倒立振子に加わる外力の推定が行え、車輪型倒立振子が外力に対し安定倒立可能であること、さらに、車輪型倒立振子が指定量の力を出力できることが確認でき、本手法の有効性が示された。そして、構築した力制御系により人間を主導とした車輪型倒立振子と人間による物体の協調運搬を行った。

2. 車輪型倒立振子のモデル化

車輪型倒立振子は、倒立振子の支点で回転中心でもある車軸を車輪によって前後に移動させることにより振子を安定に直立させるもので、走行を行うことも可能である。本研究で用いる車輪型倒立振子の構造を図1に示す。この車輪型倒立振子⁽¹⁰⁾は、車体傾斜角度を得

Fig. 2 The concept of cooperative transportation by two wheeled inverted pendulums.

Fig. 3 The model of the wheeled inverted pendulum.

るのにポテンショメータなどの外部との相対的な角度を計測するセンサを持たない。アクチュエータとしてDCサーボモータを一つ車体下部に持ち、その駆動力は減速比1:7の一段減速歯車を介して車軸に伝えられる。そして、車軸に二つの車輪が付いている同軸二輪車であるため、ステアリング機能はなく、その運動は2次元平面内に限られる。センサとして、車体上部に車体傾斜角速度を測定するレートジャイロ、モータ軸にモータの回転角度を測定するロータリエンコーダを持つ。このモータの回転角度は車体と車輪の相対角度に対応する。

図2は、二台の車輪型倒立振子が一つの物体を挟んで協調運搬を行うときの概念図である。車輪型倒立振子は、協調運搬時にはそれに必要な力を搬送物に及ぼす。それは見方を変えると、車輪型倒立振子は、協調運搬時に搬送物から搬送物に及ぼす力と同じ大きさの力を受け、その力に対して安定に倒立しなければならない。そこで、車輪型倒立振子に外力が加わった場合のモデルを考察する。外力は車輪型倒立振子上の任意の個所に働くと考えられるが、本稿では、簡単のために外力は車軸位置に加わると仮定する(図3)。外力の水平成分 F_e のみが運動方程式に現れる。このモデルにおいて、車体、車輪ともに回転の方向は時計回りを正とし、車体傾斜角度は車体が鉛直上方を向いているときを零度とする。

Table 1 Parameters of the experimental system.

m_1	:	1.0043	[kg]
m_2	:	0.1736	[kg]
J_1	:	2.1564×10^{-2}	[kg m ²]
J_2	:	4.70×10^{-5}	[kg m ²]
l	:	0.188	[m]
r	:	0.03	[m]
f_r	:	2.0×10^{-4}	[Nm/(rad/s)]
J_m	:	1.862×10^{-6}	[kg m ²]
K_t	:	3.43×10^{-2}	[Nm/A]
n	:	7	

そのときの運動方程式は、次式のようにになる。

$$(m_1 l^2 + J_1 + n^2 J_m) \ddot{\theta}_1 + (m_1 r l \cos \theta_1 - n^2 J_m) \ddot{\theta}_2 + f_r (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) - m_1 g l \sin \theta_1 = -n K_t u \quad (1)$$

$$(m_1 r l \cos \theta_1 - n^2 J_m) \ddot{\theta}_1 + ((m_1 + m_2) r^2 + J_2 + n^2 J_m) \ddot{\theta}_2 - f_r (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) - m_1 r l \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1^2 = n K_t u + F_e r \quad (2)$$

ここで、 m_1, m_2, J_1, J_2 はそれぞれ車体、車輪の質量、慣性モーメントを表す。 θ_1 は車体傾斜角度、 θ_2 は車輪回転角度、 l は車軸と車体重心との距離、 r は車輪半径、 f_r は駆動システムの粘性抵抗係数、 J_m はモータ電機子の慣性モーメント、 K_t はモータのトルク定数、 n はギアの減速比、 F_e は車輪型倒立振子に加わる外力、 u はモータ電流、 g は重力加速度を表す。各パラメータ値を表 1 に示す。

3. 制御手法

3.1 外力に対する安定倒立制御 車輪型倒立振子に外力が働く場合、その外力に対して安定倒立可能な制御系を構築する必要がある。車輪型倒立振子の未知凹凸路面走行制御⁽¹⁰⁾を応用して、加わる外力を一つの状態量とみなしてオブザーバにより推定し、その推定外力を用いて外力に対して安定倒立可能な制御系の構築を行う。また、未知の状態量である車体傾斜角度 θ_1 も同様に、誤差の生じ易い車体傾斜角速度の積分として得るのではなく、オブザーバにより推定する⁽¹⁰⁾。

3.1.1 オブザーバによる外力推定 車輪型倒立振子が、ほぼ直立姿勢を保つ場合、車体傾斜角度 θ_1 、車体傾斜角速度 $\dot{\theta}_1$ は、零近傍の値しかとらないため、その平衡点まわりで、 $\dot{\theta}_1^2 = 0$ 、 $\sin \theta_1 = \theta_1$ 、 $\cos \theta_1 = 1$ とみなせ、式 (1)、(2) を平衡点近傍で線形化して次の運動

方程式が得られる。

$$(m_1 l^2 + J_1 + n^2 J_m) \ddot{\theta}_1 + (m_1 r l - n^2 J_m) \ddot{\theta}_2 + f_r (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) - m_1 g l \theta_1 = -n K_t u \quad (3)$$

$$(m_1 r l - n^2 J_m) \ddot{\theta}_1 + ((m_1 + m_2) r^2 + J_2 + n^2 J_m) \ddot{\theta}_2 - f_r (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) = n K_t u + F_e r \quad (4)$$

車輪型倒立振子に加わる外力 F_e を外乱とみなし、それを状態量の一つとしてシステムの中に取り入れてオブザーバにより未知外力 F_e を推定することを考える。加わる外力のダイナミクスを

$$\dot{F}_e = 0 \quad (5)$$

と仮定すると、車輪型倒立振子は 5 次のシステムとして、その状態方程式、出力方程式は式 (3)、(4) より次のように表せる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u \quad (6)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (7)$$

ただし、

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ F_e \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ a_1 & 0 & a_3 & -a_3 & a_5 \\ a_2 & 0 & a_4 & -a_4 & a_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_1 \\ b_2 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} q_2 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$a_1 = m_1 g l a_{22} / \Delta$$

$$a_2 = -m_1 g l a_{12} / \Delta$$

$$a_3 = -(a_{22} + a_{12}) f_r / \Delta$$

$$a_4 = (a_{11} + a_{12}) f_r / \Delta$$

$$a_5 = -a_{12} r / \Delta$$

$$a_6 = a_{11} r / \Delta$$

$$b_1 = -n K_t (a_{12} + a_{22}) / \Delta$$

$$b_2 = n K_t (a_{11} + a_{12}) / \Delta$$

$$\Delta = a_{11} a_{22} - a_{12}^2$$

$$a_{11} = m_1 l^2 + J_1 + n^2 J_m$$

$$a_{12} = m_1 r l - n^2 J_m$$

$$a_{22} = (m_1 + m_2) r^2 + J_2 + n^2 J_m$$

Fig. 4 Balance of moment about the contact point.

ここで、出力の q_2 , $\dot{q}_2$ は車体と車輪との相対回転角度および角速度, q_1 は車体傾斜角速度である. q_2 , $\dot{q}_1$ はセンサにより得られ, $\dot{q}_2$ は q_2 の差分として算出される. このシステム (C, A) は可観測である. よって, オブザーバの構成が可能であり, 未知の状態量である外力 F_e 及び車体傾斜角度 θ_1 のオブザーバによる推定が可能である. 式 (5) は, 外力 F_e が常に一定またはステップ状に変化することを表しているが, 外力が連続的に変化する場合でもオブザーバのサンプリング時間が十分短ければ外力の変化をステップ状に近似していることになりうまく推定が行える^{(10) (13)}. 車輪型倒立振子に与える操作入力と, その操作入力のときの車輪型倒立振子の出力とをオブザーバに入力することにより, 車輪型倒立振子の全ての状態を推定する. これを式で表すと次のようになる.

$$\dot{x}^* = (A - KC)x^* + Ky + bu \quad (8)$$

ただし,

$$x^* = [\theta_1^* \quad \theta_2^* \quad \dot{\theta}_1^* \quad \dot{\theta}_2^* \quad F_e^*]^T$$

$\theta_1^* \sim F_e^*$ は, オブザーバによって推定された状態変数である. そして, オブザーバのフィードバックゲインマトリクス K によって $A - KC$ の極を任意に指定することができ, それにより推定値の真の状態量に対する追従性を変えることが可能である. オブザーバは, 未知状態である外力 F_e 及び車体傾斜角度 θ_1 だけでなく, 全ての状態の推定を行うシステムの次数とオブザーバの次数が等しい同次元オブザーバである. センサにより測定された状態ではなくオブザーバによって推定された状態を用いて状態フィードバック制御を行い, 車輪型倒立振子の安定倒立及び走行制御を行う.

3.1.2 外力補償による安定倒立制御 平衡状態の車輪型倒立振子は, 車体傾斜角速度 $\dot{\theta}_1$, 車体傾斜角加速

度 $\ddot{\theta}_1$, 車輪回転角速度 $\dot{\theta}_2$, 車輪回転角加速度 $\ddot{\theta}_2$ が零になるので, 運動方程式 (1), (2) は, 次のようになる.

$$m_1 g l \sin \theta_{1b} = n K_t u_{off} \quad (9)$$

$$F_e r = -n K_t u_{off} \quad (10)$$

u_{off} は平衡状態保持電流, θ_{1b} は平衡状態での車輪型倒立振子の車体傾斜角度である. 外力が働かない場合には, 平衡状態で車体は鉛直方向に倒立する. つまり, $\theta_{1b} = 0$ となる. 外力が働く場合は, 平衡状態で車体は鉛直方向から θ_{1b} だけ傾いた方向で倒立する. この平衡状態での車体傾斜角度 θ_{1b} と加わる外力 F_e との関係は, 式 (9), (10) より次のようになる.

$$m_1 g l \sin \theta_{1b} = -F_e r \quad (11)$$

図 4 に示すように, 式 (11) の車輪型倒立振子の車軸位置に加わる外力と車体傾斜角度との関係は, 車輪型倒立振子は接地点まわりの外力によるモーメントと車体重量によるモーメントが釣り合うように車体を傾斜することを意味している. また, 式 (9), (10) より次式が得られる.

$$\begin{aligned} T_{off} &= n K_t u_{off} \\ &= m_1 g l \sin \theta_{1b} \\ &= -F_e r \end{aligned} \quad (12)$$

T_{off} は平衡状態保持トルクである. つまり, 外力が加わることによって車体は傾き, 傾くことによって車軸まわりにトルクが生じる. そのトルクを保持するための電流は式 (12) の関係より次のように得られる.

$$u_{off} = -\frac{F_e r}{n K_t} \quad (13)$$

外力が加わった場合, 平衡状態の傾き θ_{1b} 付近で安定倒立させるためにはこの傾きを保持するための電流 u_{off} を補償しなければならない. 実際の制御では, u_{off} は推定された外力 F_e^* を式 (13) に代入することによって得られる. そこで, 外力が働いた場合の制御系は, 外力が働かない場合の制御系に, 外力が加わることによって傾いた車体傾斜を保持するための補償電流 u_{off} をフィードフォワード項として加えたものとなる. そのときの制御則は次のようになる.

$$u = f \begin{bmatrix} \theta_{1b}^* - \theta_1^* \\ \theta_{ref} - \theta_2^* \\ -\dot{\theta}_1^* \\ \omega_{ref} - \dot{\theta}_2^* \end{bmatrix} + u_{off}^* \quad (14)$$

ただし,

$$\begin{aligned}\theta_{1b}^* &= -\frac{r}{m_1 g l} F_c^* \\ u_{off}^* &= -\frac{r}{n K_t} F_c^* \\ \mathbf{f} &= \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & f_3 & f_4 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

ここで, θ_{ref} は車輪目標回転角度, ω_{ref} は車輪目標回転角速度, $\mathbf{f}$ は外力が働かない場合の状態 F_c を除いた4次のシステムを安定化する状態フィードバックゲインベクトルである. また, 式 (14) を書き直すと次のようになる.

$$u = \mathbf{f} \begin{bmatrix} -\theta_1^* \\ \theta_{ref} - \theta_2^* \\ -\dot{\theta}_1^* \\ \omega_{ref} - \dot{\theta}_2^* \end{bmatrix} - \left(\frac{f_1}{m_1 g l} + \frac{1}{n K_t} \right) r F_c^* \quad (15)$$

ここで,

$$f_5 = \left(\frac{f_1}{m_1 g l} + \frac{1}{n K_t} \right) r \quad (16)$$

とすると制御則は,

$$u = \mathbf{f}'(\mathbf{x}_{ref} - \mathbf{x}^*) \quad (17)$$

ただし,

$$\begin{aligned}\mathbf{f}' &= \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & f_3 & f_4 & f_5 \end{bmatrix} \\ \mathbf{x}_{ref} &= \begin{bmatrix} 0 & \theta_{ref} & 0 & \omega_{ref} & 0 \end{bmatrix}^T\end{aligned}$$

と表せる.

外力が加わることによって, 車輪型倒立振子の車体は傾斜するが, これは車輪型倒立振子が自己の姿勢を変化させることによって外力を補償しているものであり, この制御により協調運搬時に搬送物から受ける力に対して自己姿勢の安定を確保する動作を行うことが可能である.

3.2 搬送物に加える力の制御 3.1.2 で構築した外力に対して車輪型倒立振子の安定倒立を図る制御系は, 位置制御系である. ところが, 図 2 からわかるように車輪型倒立振子が物体を挟んで保持する協調運搬では, 車輪型倒立振子はある程度の力を常に搬送物に加え続けなければならない. この力の量を力目標値として指定する. そこで, 車輪型倒立振子に指定量の力を出力させるための力制御系を構築する. 外力の加えられる位置と同様, 車輪型倒立振子が搬送物に対して力を加える位置も, 簡単のため車軸位置と仮定する. また, ここでは, 車輪型倒立振子に力を加える搬送物が正

のコンプライアンスをもつことを前提とする. つまり, 車輪型倒立振子が外力に逆らって進めばその力は増加し, 外力に従って進めばその力は減少すると想定する. 車輪型倒立振子は搬送物に加える力の反力を搬送物から受けており, 反力が力目標値より小さければ倒立振子は搬送物の方向に進み, 反力が力目標値より大きければ搬送物とは逆の方向に進むように制御系を構築する. 車輪型倒立振子に加えられる外力とそれに相当するモータトルクを発生するモータ電流値との間には平衡状態では式 (13) の関係がある. 力目標値 F_{cmd} とそれに対応するモータトルクを発生する電流目標値 u_{cmd} は式 (13) より,

$$u_{cmd} = -\frac{F_{cmd} r}{n K_t} \quad (18)$$

となる. この電流目標値 u_{cmd} と車輪型倒立振子への出力電流値 u が一致するように車輪型倒立振子に与える目標車輪回転角度を変えることにより, 指定量の力を出力することが可能となる. つまり, まず力目標値をそれに対応するモータトルクを発生する電流目標値に直し, そして, 車輪型倒立振子の出力電流をその電流目標値になるように車輪型倒立振子の位置目標値を変えることにより力制御を行う. このとき車輪型倒立振子に与える力制御のための目標車輪回転角度 θ_{cmd} は, 次式のように現在電流値 u と電流目標値 u_{cmd} の差にゲイン G を掛けたものの積分として与えられる.

$$\theta_{cmd} = \int G(u_{cmd} - u) dt \quad (19)$$

この力制御のための目標車輪回転角度を加えた新しい目標ベクトル $\mathbf{x}_{ref}'$ は, 次のようになる.

$$\mathbf{x}_{ref}' = \begin{bmatrix} 0 & \theta_{ref} + \theta_{cmd} & 0 & \omega_{ref} & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

このときの制御則は,

$$u = \mathbf{f}'(\mathbf{x}_{ref}' - \mathbf{x}^*) \quad (21)$$

である. また, 式 (21) を変形すると次のようになる.

$$\begin{aligned}u &= \mathbf{f}'(\mathbf{x}_{ref} - \mathbf{x}^*) + f_2 \theta_{cmd} \\ &= \mathbf{f}'(\mathbf{x}_{ref} - \mathbf{x}^*) + f_2 \int G(u_{cmd} - u) dt\end{aligned} \quad (22)$$

式 (22) を見ると, 力制御のための制御系は, 外力に対し車輪型倒立振子の安定倒立を行う位置制御系に, 現在の電流値と目標電流値の差にゲインを掛けたものの積分を加えたものとなっている. ゲイン G の値は, 車輪型倒立振子が追従できる速度の範囲内で実験的に求めた. また, この力制御系においてゲイン G を零にすること

Fig. 5 Feedback block diagram.

により、外力に対し安定倒立を行う位置制御系になる。すなわち、力制御系は外力に対し安定倒立を行う位置制御系を内包することがわかる。この制御系によって、車輪型倒立振子は搬送物の動きに追従することができ、また、指定量の力を加えることが可能となる。つまり、力に対して適切な動作を行える協調行動が実現できる。

4. 実験

4.1 実験の諸条件 実験で用いた車輪型倒立振子(図1)の各パラメータの値は表1に示すとおりである。アクチュエータは、定格出力11WのDCサーボモータである。制御コントローラには、80386CPU、20MHzのパーソナルコンピュータを使用した。実験は、前章で述べた連続系の制御則を単純に離散化してコンピュータによるデジタル制御により行った。制御のサンプリングタイムは、コンピュータでの計算時間の関係から2[ms]とした。また、車輪型倒立振子の状態フィードバックゲインベクトル f 及びオブザーバのフィードバックゲインマトリクスは、極配置法をもとにして実験的に試行錯誤で求めた。また、車輪型倒立振子にはクーロン摩擦やモータの不感帯などの非線形な要素があるため、それらの補償を行い、また、ディザ信号として、周期4[ms]、振幅244[mV]の矩形周期信号を出力電流に加えた。図5は、非線形補償を加えたフィードバック制御ブロック図である。以下の実験は、非線形補償を加えて行った。

4.2 外力推定及び外力補償による安定倒立制御 式(17)の位置フィードバック制御系により、車輪型倒立振子に加わる外力の推定及び推定した外力を用いた車輪型倒立振子の安定倒立制御を行った。図6(a)のように車輪型倒立振子の車軸位置に滑車を介してワイヤによりおもりを釣り下げることにより、おもりの重量によって静的に一定外力が車輪型倒立振子の車軸位置に

(a) Experimental method

(b) Experimental result

Fig. 6 Estimation of the external force.

加わるようにする。更に人間がワイヤを引いたり、あるいは弛めたりすることにより加わる外力を時間によって変化させる。ワイヤには力センサが取り付けられており、ワイヤの張力が測定できる。図6(b)はその実験結果である。グラフ中の点線は測定したワイヤの張力、実線はオブザーバにより推定した外力、破線はおもりの重量(1.065[N])を表している。約0~6, 13~20, 33~36秒までの間はおもりによる一定外力、約6~13秒までの間は人間がおもりを持ち上げることにより外力が零の場合、約20~33秒までの間は人間が加える力とおもりによる外力が加わる場合である。外力が一定な部分を見ると外力の推定値は多少振れてはいるが、ほぼ加わる外力の推定が行えていることがわかる。また、外力が変化した場合でもその変化に追従してうまく推定が行えている。この外力の推定値の振れは実際の車

Fig. 7 Exertion of command force.

輪型倒立振子にはギアのバックラッシュや非線形摩擦などのモデル化が困難なものが存在することによるものだと考えられる。そして、推定外力を用いた倒立制御により車輪型倒立振子が外力に対して安定に倒立することが確認できた。

4.3 指定量の力の出力 式 (21) の力制御のためのフィードバック制御系を用いて、車輪型倒立振子による指定量の力の出力実験を行った。図 7 (a) のように糸の一端を固定し、もう一端を車輪型倒立振子の車軸位置につなぐ。よって、車輪型倒立振子は糸を引く力と同じ力を車軸位置に受けることになる。指定量の力を最初は零にし、そして、約 8 秒おきにステップ状に徐々に変化させて実験を行った。図 7 (b) はその実験結果である。グラフ中の実線はオブザーバにより推定した外力、破線は指定量の力である。オブザーバによる外力の推定値は振動している。先の実験より、推定外力はほぼ正確に加わる外力と一致することが確認されており、この推定外力の振動は実際に車輪型倒立振子に加わる外力が振動していることを表している。この外力の振動は、車輪型倒立振子が変位振動すること起因する。指定量の力が大きくなるほどその振動は激しくなっており、その原因として、加わる外力が大きくなるにしたがい車軸と車体との摩擦も大きくなるためだと考えられる。しかし、外力推定値の振動の平均値でみればその値は指定量の力とほぼ一致している。よって、構築した制御

Table 2 Time change of the external force.

0	~	8 [s]	: $F_e = 0$
8	~	16 [s]	: $F_e = F_{cmd}$
16	~	24 [s]	: $F_e > F_{cmd}$
24	~	32 [s]	: $F_e = F_{cmd}$
32	~	40 [s]	: $F_e < F_{cmd}$
40	~	48 [s]	: $F_e > F_{cmd}$
48	~	56 [s]	: $F_e = 0$

Fig. 8 Cooperative transportation with a human.

系で車輪型倒立振子による指定量の力の出力が可能であることが確認できた。

4.4 人間との協調運搬 人間の手と車輪型倒立振子の間に物体を挟んで車輪型倒立振子に指定量の力を出力させることにより人間との物体の協調運搬を行った。移動に関しては人間が主導する。すなわち、人間が手を止めたり、ゆっくりと車輪型倒立振子に向かって、あるいは遠ざかるように動かしたりすることで、車輪型倒立振子を動かし、車輪型倒立振子と人間との協調運搬を行う。そのときの搬送物を介して車輪型倒立振子に加える人間の手の動きによる外力は、約 8 秒ごとに表 2 のように変化させる。車輪型倒立振子の指定量の力は一定 (0.785[N]) とした。図 8 はそのときの実験結果である。図 8 の上のグラフ中の実線は車輪回転角度、破線は力目標値より導き出した車輪目標回転角度である。図 8 の下のグラフ中の実線はオブザーバにより推定した外力、破線は指定量の力である。車輪型倒立振子は人間の手との間に物体を挟んで手の動きに追従して動き、低速度の範囲ではあるが物体を落とすことはなかった。

Fig.9 The wheeled inverted pendulum transporting an object with a human cooperatively.

図 8 より、人間が加える力が車輪型倒立振子の指定量の力より大きいと車輪型倒立振子は手が押す方向に移動していき、逆に手の押す力の方が指定量の力より小さいと車輪型倒立振子は手を押して進んでいくことがわかる。また、車輪型倒立振子の指定量の力と手の力とが等しいとその場で釣り合って倒立する。従って、構築した制御系により車輪型倒立振子は、加わる外力と指定量の力の偏差に従って指定量の力を出力しようと移動し、その動きによって人間との物体の協調運搬が行えることが確認できた（図 9）。

5. まとめ

本研究では、搬送物から受ける外力によって自身の安定が影響される場合でも協調運搬が可能な移動ロボットの制御手法について検討した。そのような協調運搬の場合、ロボットは、自己姿勢の安定を確保しつつ、協調運搬を行わなければならない。そこで、その実現のためにロボットの協調行動として、外力に対して自己姿勢の安定を保つ機能、搬送物に適切な力を加える機能、搬送物の動きに追従して移動する機能という 3 つの機能が必要であることを指摘した。構造的に不安定なロボットの例として車輪型倒立振子を取り上げ、前記 3 機能を総合的に実現する制御系として、車輪型倒立振子に加わる外力を推定し、そして、その推定外力を用いて車輪型倒立振子の安定倒立を行う位置制御系及び車輪型倒立振子による指定量の力の出力を行う力制御系を構築した。車輪型倒立振子では、指定力に対応して車体を傾けその姿勢で倒立安定を図ることによって力を出力する。この点が構造的に安定な四輪ロボットなどと異なる。実験の結果、倒立振子に加わる外力の推定

が精度良く行え、外力に対して制御により安定に倒立することが確認できた。そして、車輪型倒立振子による指定量の力の出力も可能であることが確認でき、今回構築した制御系が有効に働くことがわかった。また、この制御系を用いて人間を主導とした人間との物体の協調運搬実験を行った。実験の結果、低速度の範囲ではあるが車輪型倒立振子と人間との協調運搬が行え、今回構築した制御系で車輪型倒立振子の協調行動による物体の運搬が実現できた。

参考文献

- (1) 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**, pp.263-270, 1996.
- (2) 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**, pp.886-893, 1995.
- (3) 大隅久, 寺沢正俊, 外山陽彦, 野尻尚: “複数の移動ロボットによる協調搬送システムの凹凸路面走行時におけるフィードバック制御手法,” ロボティクス・メカトロニクス講演会'97 講演論文集, vol. B, pp. 1111 1112, 1997.
- (4) 篠島賢治, 原文雄, 安井祐司, 有竹俊之: “2 移動ロボットの相互協調アルゴリズムの実験的検証,” 第 12 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.359-360, 1994.
- (5) 梶谷誠, 瀬田賢治, 金森哉吏, 益田正: “2 台の移動ロボットによる長尺物の運搬,” 第 10 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.557-560, 1992.
- (6) 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**, pp.87-95, 1998.
- (7) 林節八, 嘉納秀明, 増淵正美: “倒立振子の姿勢制御—質量の横方向移動による安定化—,” 計測自動制御学会論文集, **13-5**, pp.425-432, 1977.
- (8) 梶原宏之, 小菅一弘, 古田勝久: “傾斜されたレール上の二重倒立振子の位置制御,” 計測自動制御学会論文集, **15-7**, pp.873-879, 1979.
- (9) 山藤和男, 河村隆: “同軸二輪車の姿勢および走行制御に関する研究,” 日本機械学会論文集 (C 編), **54-501**, pp.1114-1121, 1988.
- (10) 松本治, 梶田秀司, 谷和男: “移動ロボットの内界センサのみによる姿勢検出とその制御,” 日本ロボット学会誌, **8-5**, pp.541-550, 1990.
- (11) 城間直司, 松本治, 谷和男: “車輪型倒立振子による力制御,” 日本機械学会第 73 期通常総会講演会講演論文集 (IV), pp.496-497, 1996.
- (12) N. Shiroma, O. Matsumoto, S. Kajita and K. Tani: “Cooperative Behavior of a Wheeled Inverted Pendulum for Object Transportation,” *IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pp.396-401, 1996.
- (13) 大石潔, 中尾真人, 宮崎信雄, 玉置研二, 大西公平, 宮地邦夫: “高いスチフネスを持つ直流サーボ制御系の設計法,” 電気学会論文誌 C, **107-3**, pp.292-298, 1987.