ステッピングモータ駆動平行 2 輪車の反力制御と物体の協調搬送*

平 岡 延 章^{*1}, 則 次 俊 郎^{*2}Reaction Force Control and Cooperative Transportation
by a Parallel Biwheel Vehicle Driven with a Stepping Motor

Nobuaki HIRAOKA and Toshiro NORITSUGU

Reaction force control of a parallel biwheel vehicle (PBV), which is driven with two stepping motors in an open loop mode, is described on purpose to hold and/or to transport objects with it. The PBV is an inverted pendulum type unstable vehicle, hence its posture has been regulated by a discrete time sliding mode controller. The reaction force is generated by contacting and leaning the PBV toward objects and the magnitude of the reaction force is controlled with a fuzzy logic controller. Nonlinear control output of the fuzzy logic controller is suitable for achieving a quick and calm force response at the same time. For a square wave force reference up to 1N, the reaction force of the PBV can quickly follow the reference signal without remarkable overshoot and the PBV can keep steady reaction force. The control performance is discussed in detail and is compared with that of PI force control. As an application, cooperative object support and transportation with PBVs are also demonstrated.

Key Words: Motion Control, Moving Robot, Digital Control, Stepping Motor, Reaction Force Control, Inverted Pendulum, Fuzzy Control, Cooperative Transportation, Parallel Biwheel Vehicle

1. 緒 言

不安定な機械システムの運動を巧みに制御し動的に安定かつ定常な運動状態を実現することは、知的興味をそそる研究テーマの一つである。例えば, Raibert et al.⁽¹⁾⁻⁽²⁾ は, 空気圧シリンダにより駆動する 1 本足跳躍ロボットの動的安定化と跳躍歩行について論じた。彼らの 1 本足ロボットは, 脚の本体に対する角度と跳躍力を制御することにより動的に安定な姿勢を維持し, 跳躍による歩行を実現した。車輪型倒立振子, 倒立振子型可変構造ロボットならびに倒立振子型脚ロボットを用いて山藤ら⁽³⁾⁻⁽⁵⁾ は, 姿勢の安定化, 倒立歩行, 跳躍, 縄跳びなど興味深い研究結果を報告している。

しかしながら不安定な機械システムを扱うこれら多くの研究では, 機械システムの運動の安定性とロボаст性に興味を中心があり, 不安定機械を用いて外界に働きかけようという試みはほとんどない。近年, Shiroma et al.⁽⁶⁾ は, 車輪型倒立振子を用いて外力を発生させ, その大きさの推定と制御を試みた。ステップ状の目標値を用いた力制御ならびに車輪型倒立振子

と人との協調による物体の搬送に関する実験結果を見る限り, 制御性能は必ずしも良好ではない。また, この研究では外力の作用点は常に車軸の高さに一致しており, 車軸位置に作用する外力と車体姿勢との直接的な相互作用はないように見受けられる。

この論文で議論する平行 2 輪車に用いたステッピングモータは, 駆動パルスに対応して 1 ステップずつ正確にモータ軸を回転させることができるディジタルアクチュエータであり, 減速機構なしに大きなトルクで低速回転, 微速回転, 間欠回転が可能な優れた特徴を持つ。しかし, 軸トルクを任意に制御することが容易でないため, 倒立振子や二足歩行ロボットなど動的機械システムを駆動するために用いられることはほとんどなく, 動的運動制御とは無縁のものと見なされてきた。

前報⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾で, 著者らはステップレートを操作量とすることにより, ステッピングモータを動的運動制御系のアクチュエータとして応用できることを示し, 倒立振子型平行 2 輪車を制御対象として, その制御性能を報告した。ステッピングモータ駆動平行 2 輪車は, 離散時間スライディングモード制御器を用いて姿勢を制御することにより, 安定で外乱に対してロボастな倒立姿勢を持続できる⁽⁷⁾。さらに, 車体傾斜角の零点

* 原稿受付 1998 年 9 月 16 日。

*¹ 正員, 高松工業高等専門学校(〒761-8058 高松市勅使町 355)。*² 正員, 岡山大学工学部(〒700 8530 岡山市津島中 3 1 1)。
E-mail: hiraoka@takamatsu-nct.ac.jp

オフセットをPID制御器を用いて調節することにより、倒立状態での走行と速度の制御ができ⁽⁸⁾、斜面や凹凸面での走行も可能である⁽⁹⁾。

本報では、不安定機械システムの一つである平行2輪車を用い、外界への働きかけについて議論する。はじめに、平行2輪車の構造と姿勢制御系の構成について概観し、平行2輪車を物体に接触させ反力を生成する方法と反力の制御法を提案する。車体傾斜角にオフセットを与えて物体にもたれかかることにより反力を発生させるメカニズムとファジィ制御器を用いた反力の制御法を述べ、反力制御実験の結果を示し考察を加える。応用例として図1のイメージ図に示すような複数の平行2輪車による物体の協調搬送を取り上げ、反力制御を行なった平行2輪車による物体の協調搬送実験の結果を示す。

Fig. 1 Conceptual illustration of object transportation with PBVs.

2. 平行2輪車の機構と姿勢の制御

ステッピングモータ駆動平行2輪車は、図2に示すように倒立振子(車体)の下端を車輪で支える構造を持つ(高さ580 mm, 車輪半径30 mm, 車輪間隔150 mm, 重量2.4 kg)。車軸と同軸の位置に取り付けたポテンシオメータと路面接触子により車体の傾斜角を計測する。等価振子長を長くするため車体上部にステッピングモータを取り付け、歯付きベルトにより車輪を回転させる。

車体重心付近に物体との接触を目的としたバンパを付加する。図3にバンパを支える力計測部の模試図を示す。2本のコイルばねにより、バンパを支持する2本の滑り棒に加わる外力を受け止める。バンパ中央に取り付けた浮遊棒に沿って糸を張り、ポテンシオメータ軸に取り付けたプーリーを一巻きしたのち浮遊棒の両端に固定する。バンパが押されると浮遊棒とともに糸が移動してプーリーが回転し、バンパの変位はポテンシオメータにより電圧変化に変換される。外力の大きさは、バンパ変位量とばね定数から得る。なお、滑り棒の摺動にともなう摩擦やポテンシオメータの軸受摩擦は十分小さく、摩擦力がバンパに働く外力の測定に及ぼす影響は無視してよい。

Fig. 2 Structure of the parallel bi-wheel vehicle.

Fig. 3 Schematic illustration of the force sensor.

平行2輪車の運動モデルを図4のように表し、車体傾斜角 θ_p 、車体傾斜角速度 $\dot{\theta}_p$ 、車輪回転角速度 $\dot{\theta}_w$ を状態変数 $\mathbf{x}$ 、ステッピングモータのステップレートを操作量 u とする3次系を構成する。

Fig. 4 Control model of the PBV.

$$\mathbf{x}(t) = [\dot{\theta}_p(t) \quad \theta_p(t) \quad \dot{\theta}_w(t)]^T \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}_c \mathbf{x}(t) + \mathbf{b}_c u(t) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & a_{13} \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (2) \end{aligned}$$

$$a_{12} = m_p g L [(m_p + m_w) R_w^2 + J_w] / d$$

$$a_{13} = \mu m_p R_w^3 L / d$$

$$\begin{aligned}
a_{32} &= -m_p^2 g R_w L^2 / d \\
a_{33} &= -\mu R_w^2 (m_p L^2 + J_p) / d \\
b_2 &= -\alpha \\
d &= m_p m_w L^2 R_w^2 + (m_p L^2 + J_p) J_w \\
&\quad + (m_p + m_w) R_w^2 J_p
\end{aligned}$$

ここで, m_p は車体の質量, m_w は車輪の質量 (2 輪の合計), J_p は車体の車体重心周りの慣性モーメント, J_w は車輪の車軸周りの慣性モーメント (2 輪の合計), μ は車輪と路面の間の粘性摩擦係数, α はモータのステップ角と車輪回転角の比, g は重力加速度である.

サンプリング間隔を 10 ms として離散化し, 次の離散時間系の遷移行列 A , 駆動行列 b を得る.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0.816 & 0.00637 \\ 0 & 0.953 & 0.00967 \\ 0 & -9.20 & 0.919 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$b = [-2.78 \times 10^{-5} \quad -6.63 \times 10^{-5} \quad 3.14 \times 10^{-4}]^T \quad (4)$$

このモデルに離散時間スライディングモード制御則⁽¹¹⁾を適用し, 適切な切換面と切換ゲインを設定すると滑り面に沿った運動が実現でき, 荷重外乱や外力の作用に対してロバストな姿勢制御系が得られる⁽⁷⁾. 操作量 u は, 等価制御入力 u_e と切換制御入力 u_d の和で表され,

$$\begin{aligned}
u(k) &= u_e(k) + u_d(k) \\
&= (K_e + K_d) x(k)
\end{aligned} \quad (5)$$

となる. ここで, $K_e, K_d = [K_1, K_2, K_3]$ は, それぞれ等価制御ゲイン, 切換制御ゲインであり, 切換面の法線ベクトル s を用いてそれぞれ次式のように表される.

$$K_e = -(sb)^{-1} s (A - I) \quad (6)$$

$$K_d = \begin{cases} \kappa_i; & \text{for } (sb) \sigma(k) x_i(k) < -\delta_i \\ 0; & \text{for } -\delta_i \leq (sb) \sigma(k) x_i(k) \leq \delta_i \\ -\kappa_i; & \text{for } (sb) \sigma(k) x_i(k) > \delta_i \end{cases} \quad (7)$$

ただし,

$$\sigma(k) = s x(k) \quad (8)$$

$$\delta_i = \sum_{j=1}^3 |x_i(k)| |x_j(k)| \kappa_i (sb)^2 / 2 \quad (9)$$

$$0 < \kappa_i < |2 / (sb \sum_{j=1}^3 |t_{1j}|)| \quad (10)$$

である. なお, t_{ij} は, 状態方程式を正準系に変換する変換行列の要素である.

3. 反力制御

3・1 反力の生成 先に平行2輪車の車体傾斜角の零点にオフセットを加えて車体を傾けることにより, 平行2輪車をオフセット方向に走行させ, オフセット量を調節して走行速度の制御が可能であることを報告した⁽⁸⁾. ここでは, 零点オフセットによる車体の傾斜を利用して平行2輪車を物体にもたせかけ反力を生成することを考える.

離散時間スライディングモード制御器 (SMC) により倒立平衡点で釣り合いを保っている平行2輪車の車体傾斜角 θ_p の零点にオフセット θ_{po} を加えると, 図5(a)に示すように車体傾斜角 $\theta_p = 0$ の方向が真の鉛直から外れる. 切換関数 $\sigma(x) = sx \neq 0$ となるため, スライディングモード姿勢制御器は, $\sigma(x)$ の値が0となるよう状態を調節する. その結果, 平行2輪車の姿勢は図5(b)のように真の鉛直方向からオフセットの分だけずれた $\theta_p = 0$ の状態に向かう. したがって, 平行2輪車の真の鉛直からの傾斜角 $\Theta_p (\equiv \theta_{po} - \theta_p)$, 状態変数 x , 切換関数 $\sigma(x)$ は, 車体姿勢に対応して図中に記した値となる.

Fig. 5 Effect of zero-point offset applied to the inclination angle of the body.

図5(b)の姿勢で, システムの状態は状態空間の原点に戻り安定となる. ここで, 車体が物体に接触していれば, 車体は物体にもたれかかる形となり重力の θ_p 方向の分力 $f_{g\theta} = m_p g \sin \theta_p$ により, 物体を押す力 $f_{g\theta}$ が発生する.

$$\begin{aligned}
f_{g\theta} &= m_p g \sin \Theta_p \\
&= m_p g \sin \theta_{po} \\
&\simeq m_p g \theta_{po}; \quad \text{for } \theta_{po} \simeq 0
\end{aligned} \quad (11)$$

以上の考察から, 車体傾斜角にオフセット θ_{po} を与えることにより, オフセットを与えた方向へ車体を傾斜させると, オフセットに比例した力 $f_{g\theta}$ が生じ, 同じ大きさの反力が得られる. そこで, 車体傾斜角のオフセット量を適切に操作することにより反力制御系の構成が可能となる.

平行 2 輪車が物体から

The diagram illustrates the control architecture for the first joint of a two-link robot arm. It features several interconnected blocks and signal paths:

- Feedforward Path:** The desired joint position $\hat{\theta}_p$ is fed into a block labeled g_{ff} . The output of g_{ff} is summed with the output of the fuzzy inference system ($\Delta\theta_{pof}$) to produce the reference position θ_{pov} .
- Control Loop:** The reference position θ_{pov} is fed into a PID controller. The output of the PID controller is summed with the output of the Kalman filter ($\dot{\theta}_p$) to produce the control signal u .
- Actuator and Sensor:** The control signal u is fed into a block labeled PBV , which represents the actuator. The output of PBV is the joint position θ_p . The joint position θ_p is fed back to the Kalman filter and the fuzzy inference system.
- Adaptive Control:** The joint position θ_p is also fed into a block labeled SMC (Sliding Mode Control). The output of SMC is summed with the output of the Kalman filter ($\dot{\theta}_p$) to produce the control signal u .
- Fuzzy Inference System:** The joint position θ_p is fed into a block labeled $Fuzzy$. The output of the fuzzy inference system is summed with the output of g_{ff} to produce the reference position θ_{pov} .
- Other Signals:** The joint position θ_p is also fed into a block labeled Z^{-1} , which is used to calculate the error signal e_f . The error signal e_f is fed into the fuzzy inference system and the Kalman filter.

Table 1 Fuzzy control rules.

		NB	NS	e_f ZE	PS	PB
Δe_f	NB			NM		
	NS	NB		NS	ZE	PB
	ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
	PS	NB	ZE	PS		
	PB			PM		

4. 反力制御実験

スライディングモード姿勢

4・2 反力制御実験 実験条件(a)に対する反力の制御結果を図10に示す。振幅 0.25 N, 0.5 N, 1 N の方形波状の反力指令値に対し、反力はオーバーシュートなく指令値に追従し、定常偏差なく指令値に整定している。定常部分での反力の変動は、図から指令値 f_r の大きさによらず ± 0.05 N 以下である。指令値の立ち上がり、立ち下がり部分での過渡応答は、おおむね直線的な反力応答となっている。

NII-Electronic Library Service

Fig. 9 Schematic illustration of experimental condition.

Fig. 10 Result of force control against rigid object.

正規化された入力範囲 (± 1) を容易に超え、ファジィ力制御ブロックの出力 $\Delta\theta_{pof}$ が飽和するためである。このとき、車体傾斜角の零点オフセット θ_{po} は、反力制御器の出力部分に置かれた累算機のため時間とともに直線的に増加(減少)する。結果として、反力は式(11)に従い時間とともに直線的に変化することになる。反力制御器のこのような出力特性は、平行2輪車に穏かな姿勢変化をもたらす点から好ましい特性であり、図に示した全時刻にわたり平行2輪車の車体姿勢は安定でその挙動は穏かである。時刻32~35s付近に見られるスパイク状の応答は、バンパが物体から離れる際、倒立姿勢を維持するための車輪回転により生じる物体との小衝突によるものである。

図11は、実験条件(b)に対する反力制御の結果である。振幅0.25 N, 0.5 N, 1 Nの方形波状の反力指令値に対し、反力はオーバーシュートなく指令値に追従し、定常偏差なく指令値に整定している。定常部分での反力の変動のピーク値は、指令値 f_r の大きさにかかわらず ± 0.05 N 程度であるが、変動の平均振幅は実験条件(a)より小さくなっている。弾性体に対しても指令値の立ち上がり(立ち下がり)部分で、反力は直線的に増加(減少)する応答を示す。なお、物体がコンプライアントであるため、バンパが物体から離れる

際に小衝突により生じる干渉力は実験条件(a)より小さい。

Fig. 11 Result of force control against compliant object.

図12は、異なるステップ幅で増減するステップ状の指令値を連続して与えたときの反力の軌跡である(実験条件(b))。反力は、指令値の増減やステップ幅にかかわらずオーバーシュート(アンダーシュート)なく指令値に整定している。定常状態での反力の変動は、先の実験と同様に指令値の大小によらず ± 0.05 N 程度である。指令値変化時の過渡応答は直線的であり、ステップ幅や増減に関係なくほぼ同じ勾配を示している。これはファジィ反力制御器の飽和特性を反映したもので、平行2輪車の挙動は実験区間を通じて安定かつ穏かである。

Fig. 12 Result of force control with multi level reference.

4・3 PI制御との比較 制御性能の比較のためファジィ反力制御器の代わりに、 θ_{pof} を出力するPI反力制御器を構成し、反力の制御を試みた。図10, 11と同一の指令値に対して、図13に示す反力応答が得られた(実験条件(b))。PI反力制御器の比例ゲインと積分時定数の値は、ステップ応答波形にオーバーシュートの生じない範囲で指令値への整定時間が最小となるように調整した。

図13の応答は、先のファジィ反力制御器が示す直線的な過渡応答と異なり、PI制御に典型的な指数関数

型の過渡応答を示している。式(11)から推測できるように、平行2輪車の車体は過渡応答の初期部分で大きな角速度で傾くため、車体姿勢の動揺が大きい。反力応答の過渡特性を改善するため比例ゲインを増大させると車体姿勢の変動がさらに大きくなり、反力応答にオーバーシュートを生じる。

整定時間は指令値の大きさに依存せずほぼ10 sで、いずれの指令値でもファジィ制御より長い。定常状態での反力変動のピーク幅は、 ± 0.05 N とファジィ反力制御の場合と大差ないが、反力はこの振幅で持続的に変動しており変動の平均振幅はファジィ反力制御に比べて明らかに大きい。

例えば、後述する物体の保持や搬送では車体姿勢の動揺が小さく穏かであることが重要であり、図13のような過渡応答特性を持つPI反力制御は、平行2輪車の反力制御法として適切でない。

Fig. 13 Result of force control with PI force controller against compliant object.

4・4 反力制御に関する考察 4・2節の結果から、平行2輪車はファジィ反力制御器を用いて定常的な反力を発生することができ、剛体に対しても弾性体に対しても、ほぼ同様に安定な反力が得られる。平行2輪車は車輪を常に前後に回転させてその倒立姿勢を保つ必要があるため、発生する反力の微小な変動は避けられない。接触相手が剛体の場合、位置の拘束が強いいため反力変動の平均振幅が幾分大きくなる。

ファジィ反力制御器の持つ二つの特徴、

- (i) 反力偏差が大きな領域で出力が飽和する特性
- (ii) 指令値付近で小さくなる非線形ゲイン特性

が、反力制御時の平行2輪車の車体姿勢の変動抑制に大きく寄与している。すなわち、飽和特性(i)により力偏差の大きな領域でも反力制御器の出力が必要以上に増大せず車体傾斜角の変化が穏かとなる。また、(ii)の特性は、指令値付近での力変動に対して過剰な応答を予防する効果がある。

PI制御では、出力に飽和がないため力偏差の大きな領域で過大な制御出力が生じ姿勢制御部への大きな外乱となる。また、ゲインが偏差によらず一定であるため、指令値付近での力振動にも敏感である。

上記の(i), (ii)のような特性はファジィ制御を用いると、ファジィルールの形で容易に記述・実現できる。ここで提案した車体傾斜角の零点オフセットを操作量とするファジィ反力制御法は、実験結果から姿勢制御部に及ぼす影響が小さく、平行2輪車の反力制御に適している。

本論文で議論している反力は、アクチュエータを用いて能動的に発生させるものではなく、不安定な機械システムの姿勢を故意に平衡点から傾けることにより受動的に生じせしめたものである。この反力の生成過程は、平行2輪車のような力学的に不安定な機械システムに固有なものであり、本来システムの弱点である不安定性を巧みに利用したものである。

5. 物体の協調搬送

前章で議論した平行2輪車のファジィ反力制御の一つの応用例として、反力制御を行なった2台の平行2輪車による物体の保持と搬送を試みる(図14)。

Fig. 14 Ball transportation with two PBVs.

2台の平行2輪車は、同一の構造・寸法で、同一の制御プログラムを実装した2台のコントローラ(パソコン)により、それぞれ独立に制御される。2台のコントローラ間には1対の通信線があり、制御プログラムの実行を開始するタイミングの同期を取るために用いる。以下の実験では、制御期間中に相互の情報(姿

勢、角速度、反力など)を通信により交換することは行っていない。なお、搬送実験に用いた物体は、直径約 20 cm、質量約 65 g の柔らかい玩具ボールである。

一方の平行2輪車の動きは、保持物体を介して他方の反力を変動させる外乱として作用する。片側の平行2輪車の運動により反力に偏差が発生すると、その平行2輪車の反力が指令値に近づくように制御されるだけでなく、同時にもう一方の平行2輪車の反力にも外乱による偏差が生じ反力の調整が行なわれる。この作用のため、物体を保持する2台の平行2輪車の間隔は、双方の平行2輪車の押し力が釣り合うよう自動調整される。

5・1 同一指令値を用いた物体の保持と搬送

図15に搬送実験時の反力と車輪回転速度の軌跡を示す。図中の記号「L-PBV」は左側の平行2輪車の、「R-PBV」は右側の平行2輪車のデータであることを表す。

2台の平行2輪車を対向させ、時刻5～35sの間全く同一の方形波状の反力指令($f_r = 0.8$ N)を与え、2台の平行2輪車のバンパでボールを押し図14のように空中に保持する。この状態で、さらに車輪回転速度指令 $\dot{\theta}_{wr}$ を与え、左右への等速走行を行なう(時刻15～20sの間は $\dot{\theta}_{wr} = 4$ rad/s(車速 0.12 m/s)、時刻25～30sの間は $\dot{\theta}_{wr} = -4$ rad/s)。なお、図の速度は右向きを正としているため、R-PVBに与える指令値そのものは正負の符号が逆となる(以下の実験においても同様)。走行後、時刻37s付近で反力がなくなると、ボールはバンパから滑り落ち、2台の平行2輪車は互いに力を及ぼし合うことなく独立した倒立状態に戻る。

Fig. 15 Trace of reaction force and wheel velocity during round trip transportation with PBVs under same references.

図15の反力の軌跡から2台の平行2輪車の反力は指令値近傍で安定しており、搬送前、搬送中、搬送後のいずれの場面でもボールは一定の反力で安定に保持されている。速度指令変化時に表れる反力の変動は、平行2輪車の加減速にともなう車体の動揺が外乱として作用するために生じるものであるが、変動幅は保持力に比べて十分小さく、物体の保持状態が不安定となることはない。一方、車輪回転速度の軌跡より、平行2輪車の車輪回転速度は指令値に沿って変化しており、良好な定速走行が実現されている。

以上の実験結果より、図6のブロック線図に従って、反力制御出力 θ_{pof} と速度制御出力 θ_{pov} を加算して車体傾斜角の零点オフセット θ_{po} を生成することにより、倒立平衡状態を維持しつつ反力と速度の同時制御が可能である。さらに、この制御系を2組用いることにより、物体を介して双方の反力に働く外乱を媒介とする自律分散型協調搬送系を構築できる。すなわち、同一指令値により独立に運動する2台の平行2輪車は力外乱を仲介として相互の間隔を保つことにより物体を安定に保持し、相互に協調して物体を搬送する系を構成している。

5・2 反力を媒介とした物体の搬送

2台の平行2輪車的一方のみに速度指令を与えて、リーダー・フォロワ型の協調搬送を試みた結果を図16に示す。5・1節と同様に時刻5～35sの間、2台の平行2輪車に同一の反力指令($f_r = 0.8$ N)を与え、2台の平行2輪車のバンパでボールを押し空中に保持する。この状態で、左側の平行2輪車にのみ走行指令を与え、左右への等速走行を行なう(時刻15～20sの間は $\dot{\theta}_{wr} = 4$ rad/s、時刻25～30sの間は $\dot{\theta}_{wr} = -4$ rad/s)。走行後、時刻37s付近で反力がなくなると、ボールはバンパから滑り落ち、2台の平行2輪車は互いに力を及ぼし合うことなく個々に独立した倒立状態に戻る。

この実験で2台の平行2輪車に与えた速度指令値は、一方には走行を促し、他方にはその場に留まることを指令するもので、物体を保持した状態で厳密に実現することは不可能な相矛盾した指令となっている。したがって、ボールを保持したまま制御偏差なくこの指令値を満足する運動は存在しない。

車輪回転速度の軌跡から、左側の平行2輪車にのみ速度指令を与えたにもかかわらず、左側平行2輪車の走行に対応して右側平行2輪車の車輪も回転していることが分かる。この現象は、左側平行2輪車の走行にともなってボールが押されることにより右側平行2輪車の受ける反力が増加するため、右側平行2輪車は反力を減じようとして後退することにより起こる。すなわち、左側平行2輪車に与えた走行情報がボールを介

6. 結 言

ステッピングモータ駆動平行2輪車により外力を発生させる手法を述べ、2台の平行2輪車を用いた物体の保持と搬送について論じた。離散時間スライディングモード制御器を用いて姿勢安定化した平行2輪車の車体傾斜角零点にオフセットを加え、車体を傾斜させて物体にもたれかかることにより反力を生成することを提案し、ファジィ制御器により車体姿勢の安定性に影響を与えることなく反力の制御ができることを示した。ファジィ反力制御の結果、ステップ状の反力指令に対して車体傾斜速度を一定とした過渡応答が得られ、反力は時間とともに直線的に変化する。この応答は車体姿勢の急激な変化をともなわないため、反力制御時の平行2輪車の挙動は至って穏やかである。

2台の平行2輪車を対向させ、反力制御により平行2輪車間に物体を保持し、さらに速度指令を与えることにより自律分散型の協調搬送が可能となる。両者に同一の速度指令を与える場合、反力、速度ともに指令値に沿った応答が得られる。一方のみに速度指令を与える場合、速度指令を与えた方の平行2輪車の走行情報が反力を介して他方に伝達され、リーダー・フォロア型の協調搬送が行われる。この場合、指令値に厳密に沿った運動は実現不可能であるため、反力および速度に定常偏差を生じる。

以上の結果から、反力を制御することにより、不安定な機械システムが外界との相互作用を保ちながら協調的に制御できることが示された。ここでは、2個のステッピングモータに同一の駆動パルスを与えたが、左右輪を独立に駆動することにより2次元面上での協調搬送系への拡張が可能であると思われる。

参 考 文 献

- (1) M.H.Raibert et al., CMU-RI-81-9, Robotics Institute, Carnegie-Mellon University, (1981).
- (2) M.H.Raibert, *Legged Robots That Balance*, (1986), MIT Press.
- (3) 山藤和男, 馮青, 精密工学会誌, **53** (1987) 1622-1625.
- (4) 山藤和男, 馮青, 精密工学会誌, **54** (1988) 1759-1763.
- (5) 山藤和男, ロボットA to Z, (1995), オーム社.
- (6) N.Shiroma, O.Matsumoto, S.Kajita, and K.Tani, Proc. 9th IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robotics Systems, (1996), 396-401.
- (7) 平岡延章, 則次俊郎, 機論, **62**-601, C(1996), 3580-3587.
- (8) 平岡延章, 則次俊郎, 機論, **63**-613, C(1997), 3207-3214.
- (9) 平岡延章, 則次俊郎, ロボティクス・メカトロニクス講演会'97, **A**, (1997), 173-174.
- (10) N.Hiraoka, and T.Noritsugu, Proc. 3rd Int. Conf. Advanced Mechatronics, (1998), 698-703.
- (11) K.Furuta, Systems & Control Lett., **14** (1990), 145-152.

Fig. 16 Trace of reaction force and wheel velocity during round trip transportation with PBVs under leader-follower mode.

して右側平行2輪車の反力制御器に外乱の一つとして伝達され、結果的に外乱を媒介としたリーダー・フォロワ系が構成される。左に移動する際(時刻25~30 s)には、反力に対する外乱の符号が逆になるため、同様のメカニズムにより反力が指令値を下回っている。

定量的に見積ると走行にともなう反力の偏差は平均レベルで指令値の $\pm 20\%$ 、走行速度は指令値の 50% である。このような反力と速度の定常偏差は、与えられた指令値の持つ矛盾を補償するために生じるものであり、制御性能の不良に起因するものではない。

また、速度指令が一方の平行2輪車にのみ与えられ反力を經由して平行2輪車の協調走行運動を実現しているため、反力制御器と速度制御器がボールのコンプライアンスを通して干渉し反力の軌跡に振動的振舞いが見られる。ここでは、左側平行2輪車に速度指令を与えた場合の実験結果のみを示したが、右側平行2輪車にのみ速度指令を与えた場合にも、同様の実験結果が得られる。

以上の2つの保持・搬送実験の結果より、図6に示された姿勢、反力、速度の3つの制御器は互いに協調して動作し、それぞれの制御指令に従って平行2輪車の運動を制御している。さらに、2台の平行2輪車による物体搬送において、双方のコントローラは一方の運動が他方に外乱の一つとして作用しても不安定となることなく、相互に協調して目的のタスクを実現することができた。ここで提案したファジィ反力制御系は、先に報告した姿勢制御系、速度制御系の動作に悪影響を及ぼさず、平行2輪車の反力制御に適している。