可変構造型平行二輪車の姿勢および走行制御 (第3報, 作業用アームの開発, 制御ならびに実験)

山 藤 和 男^{*1}, 越 山 篤^{*2}
三 沢 智 一^{*3}, 奥 田 紳 太 郎^{*4}

Postural and Driving Control of a Variable-Configuration-Type Parallel Bicycle (3rd Report, Development of a Working Arm, Control Methods and Experiments)

Kazuo YAMAFUJI, Atsushi KOSHIYAMA,
Tomoichi MISAWA and Shintaro OKUDA

The authors have investigated a parallel bicycle-type mobile robot which has a controlling arm and a working arm. In the previous papers, control methods for postural stabilization and several kinds of motion and experimental results for this vehicle were reported, in which basic movements including driving, standing up and falling down as well as use of working using the working arm were shown. However, the working capability was insufficient because the former working arm was constructed of only one link. In this study, a new type of vertical two-link working arm constituting of an overarm (first link), forearm (second link) and hand (gripper) was developed. A newly devised double-clutch mechanism is installed on the joint between the overarm and the forearm. It can be switched using wire actuators made of shape memory alloy (SMA). With the use of the clutch, rotation of the forearm and the hand is realized by switching the electric current provided for the wire actuators. Gripping motion of the hand is also attained by use of another SMA wire actuator. With the three kinds of wire actuator, we developed a lightweight working arm. This paper describes mechanisms of the working arm and motion control methods. Experimental results for motion using the working arm and postural stabilization of the robot by the controlling arm are also given. It is confirmed experimentally that the inverted pendulum-type mobile robot with the working arm developed in this study shows potential for use in the new autonomous land vehicle.

Key Words: Parallel Bicycle, Postural Stabilization, Controlling Arm, Working Arm, SMA Wire Actuator, Clutch Mechanism

1. 緒 言

最近, 作業腕と移動機構をもった自律作業移動ロボットに対する社会的ニーズが高まっている。このようなロボットには通常環境を移動して, 人間に代ってある程度高度な作業を行うことが求められている。そのためにはロボットは高度な知能と優れた感覚機能, 運動機能および作業機能を備え, 指示された作業を自律的に行うことが必要である。さらに, ロボットが環境や作業条件によって自らの移動形態と作業機能を変化させることができれば, これまで産業用ロボットが入り込めなかった分野にまでその用途は広がることになる。

このような自律作業用移動ロボットの形態として, 本報では垂直関節型の作業腕を搭載した可変構造型平行二輪車を提案する。

平行二輪車とは, 軸が同一軸線上にある一対の車輪をもち, その車輪によって上部構造体を支える形式の移動ロボットである。これは車輪付き倒立振り子であり,

制御を行わなければ自然の状態では直立することができない。しかし, これを移動ロボットのモジュールの一つと考え, 作業アーム, 制御アームなどを組み合わせることにより, 多くの有用なロボットの形態を実現することができる。操舵機能を備えた平行二輪車は, 四輪車などに比べて占有面積が小さく, 狭い場所を移動する場合や消費エネルギーの面でも有利である。

また, ある意味では二足歩行ロボットと対比することもでき, ロボットに数本の作業用の腕を取り付けたものは, 狭い場所での作業, 高所作業等さまざまな分野での活躍が期待される。これまで筆者らは平行二輪車に関して姿勢安定化, 走行制御ならびに操舵制御について一連の研究を行ってきた⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。

本研究では平行二輪車を基本モジュールとし, これに作業用アームと姿勢制御用アームを取り付けたものを可変構造化し, これによって実現される各種動作と移動形態を研究することを目的とする。第1報⁽⁶⁾ではヤジロベエ型姿勢制御アームによる姿勢安定化と単リンク型作業アームの振り上げ動作, さらに両アームと車輪の協調制御による横転状態からの起立に関する制御法と実験結果を報告した。第2報⁽⁷⁾ではトルク制御を基本とした自己学習によるトルク変化法の提案を行うとともに, これを応用した横転, 起立などの一

* 原稿受付 平成4年12月17日。

^{*1} 正員, 電気通信大学(〒182 調布市調布ヶ丘1-5-1)。

^{*2} 正員, ソニー(株)(〒141 東京都品川区6-7-35)。

^{*3} 正員, 日本電子機器(株)(〒372 伊勢崎市粕川町1671-1)。

^{*4} 学生員, 電気通信大学大学院。

図1 代表的な3種類の可変構造モデル

連の動作制御によるロボットの形態変化について、制御法と実験結果を報告した。本報では今まで単リンクで構成されていた作業用アームを改造し、肘関節とハンド関節の回転、ハンド開閉機構を付加した3リンク作業アームの開発ならびにロボットの姿勢を安定に保持しつつ、同アームを動作させる場合の制御法と実験結果について報告する。同ハンドの開発により、倒立振子型のロボットにはこれまで不向きとされていた複雑な作業が可能となり、本ロボットのより広い応用分野における活動が可能であることを示した。

2. 可変構造型平行二輪車の機構と動作の概要

本平行二輪車は基本部品を交換して組み合わせることにより、数種類の形態をとることができる。基本構造として、車輪、倒立振子型上部構造（以下、本体と呼ぶ）、作業アームと制御アームをもつ。

図1に本ロボットの代表的な3つのモデルを示す。同図(a)モデルは下出力軸の両端に車輪、上出力軸の片方に作業アーム、もう一方に制御アームを取り付けたもので、制御アームによって本体の姿勢を制御しつつ、作業アームにより各種作業を行うことができる。従来は単リンク式の作業アームを用いていたが、今回これを大幅に改良し、肘関節屈曲と肩回転動作が可能な2関節型アームと手首の回転と開閉動作が可能なハンドを開発した。本報では作業アームの動作を中心に本タイプのロボットの動作制御について報告する。

この他に上述タイプの二輪車を逆さにし、下出力軸の外端にそれぞれ車輪を取り付けて独立駆動することによりステアリング機能付き平行二輪車とした、制御アーム・独立2車輪モデル（図1(b)）、上下出力軸のそれぞれに車輪を取り付け、4輪あるいは3輪にして作業アームを2本までもつことができる4輪車モデル（図1(c)）などがある。

図2 作業アーム・制御アーム・車輪モデルの構成

3. 実験装置

3.1 ロボットの基本メカニズム

図1(a)に示した作業アーム・制御アーム・車輪モデルの構成を図2に示す。本機はアクチュエータとして、3個のDCサーボモータ（いずれも60W）をもち、総重量8.86 Kg、本体全長474mmである。本体下部のモータ①で車輪を駆動し、本体上部に搭載したモータ②で作業アームをモータ③で制御アームを駆動する。この場合、本体上部の各モータ出力側にはボール減速機とスパイラルベベルギアを取付け、全体として1/36で減速する。下部のモータはスパイラルベベルギアと平歯車を介して車軸を減速比1/15で駆動する。制御アームとして、先端に釣合い錘を取り付けた単リンク形のものを使用する。

3.2 開発した作業用アームの機構

図3に開発した作業アームの構成を示す。同図に示すごとく、作業アームは肩関節と肘関節をつなぐ第1リンク、肘関節とハンド関節をつなぐ第2リンクおよびハンドの3部分から構成されている。本ロボットは元来不安定な構造をもつ平行二輪車を本体としているので、これから突き出して動作する作業用アームは本体に対して転倒モーメントを作用させる。それゆえ、作業用アームは軽量でありかつ、操作性の良いものである必要がある。そのため、本アームにはアクチュエータとして1個の小形DCサーボモータと3本のワイヤ形状記憶合金（以下、SMAと略記）を用いた。DCサーボモータは作業アーム動作時の回転モーメントを低減するために腕本体基部に1個だけ配置している。DCサーボモータの出力トルクは肘関節部に設けられたSMAを切り換え駆動力とするクラッチ機構により、肘関節回転動作あるいはハンド回転動作のいずれかに切り換えて伝達される。肘関節部のクラッチ機

図3 作業アームの構成

図4 クラッチ部機構の詳細

構がなければモータトルクはハンドおよび肘関節へ適切に伝達されず、各関節は勝手に回転動作してしまう。

図4にクラッチ部の詳細を示す。第1リンクにはクラッチのアウトドラム（以下、Oドラム）、第2リンクにはインナードラム（以下、Iドラム）が組み込まれている。第2リンク外側には制動用シューが2個、一端を回転自由に取り付けられ、バイアスばねで両者をOドラムとIドラムに押しつけている。Oドラム側のシューをアウトブレーキ（Oブレーキ）、Iドラム側のそれをインナーブレーキ（Iブレーキ）と呼ぶことにする。両ブレーキの支点とは反対側の端面にそれぞれワイヤ状SMAがブレーキを上方に釣り上げる形で取り付けられている。

SMAとして、Ni-Ti系材料を選び、これをワイヤ状にしたものをクラッチ動作切り換え用アクチュエータとして使用している。SMAを使用する理由としては、クラッチ機構の軽量化とオンオフ通電による単純な制御でクラッチ切り換え動作が可能であるためである。SMAワイヤに通電する（加熱する）とワイヤには縮む方向の力が発生する。SMAに通電および通電停止を行い、この時のSMA温度変化にもとづいて発生する形状記憶効果（SME）による伸縮力をア

図5 ハンド部の構成

図6 ロボットのモデル化

クチュエータ駆動力として利用する。通電停止（冷却）時にはバイアスばねがSMAの伸びる方向に力を加えることにより、SMAの復元動作を補助している。

Iブレーキの中央部とOブレーキのSMA取り付け位置とは反対の端部にバイアスばねを挟み込む形で組み込んでおり、SMA非通電時にはOドラムとIドラムに両ブレーキは押さえつけられる状態になっている。

次に各動作について説明する。ハンド回転時は、IブレーキのSMAに通電、OブレーキのSMAの通電を停止する。これにより、第1リンクは第2リンクに固定されると同時に肘関節軸が両リンクに対し回転自由となり、モータからの伝達トルクはアーム回転運動として伝えられる。肘関節を回転させる時にはIブレーキのSMAへの通電を停止、OブレーキのSMAへ通電する。これにより両リンク間の拘束が解除され、肘関節軸が第2リンクに固定される。この結果モータの出力トルクは肘関節の回転動作として伝えられる。

ハンドの機構を図5に示す。ハンドの開閉はSMA

表1 システムパラメータ

$M_1 = 6.10 \text{ kg}$	$J_1 = 4.06 \times 10^{-2} \text{ kgm}^2$
$M_2 = 0.96 \text{ kg}$	$J_2 = 2.54 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$
$M_3 = 1.40 \text{ kg}$	$J_3 = 5.89 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$
$M_4 = 0.40 \text{ kg}$	$J_4 = 2.51 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$
$M_5 = 0.12 \text{ kg}$	$J_5 = 2.05 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$
$L_1 = 0.368 \text{ m}$	$L_{e1} = 0.193 \text{ m}$
$L_3 = 0.420 \text{ m}$	$L_{e3} = 0.340 \text{ m}$
$L_4 = 0.144 \text{ m}$	$L_{e4} = 0.078 \text{ m}$
$L_5 = 0.172 \text{ m}$	$L_{e5} = 0.057 \text{ m}$
$R = 0.070 \text{ m}$	
$C_{12} = 0.01 \text{ Nms}$	$f_{12} = 0.2 \text{ Nm}$
$C_3 = 0.15 \text{ Nms}$	$f_3 = 1.0 \text{ Nm}$
$C_4 = 0.13 \text{ Nms}$	$f_4 = 1.4 \text{ Nm}$
$C_5 = 2.0 \times 10^{-5} \text{ Nms}$	$f_5 = 4.0 \times 10^{-3} \text{ Nm}$

ワイヤをアクチュエータとして用い、ハンドに設置したブリーにより、ワイヤを適切な長さに調整し、物体の把持動作に必要なハンド開閉ストロークを得ている。SMAワイヤは加熱により、全長の3～5%のひずみを得られることが知られている。

3. 3 ロボットのモデル化とシステムパラメータ

作業アームを含めてロボット全体をモデル化する。図6にロボットのモデル図、表1にロボットのシステムパラメータの測定値を示す。ここに、 M ：各リンクの質量、 J ：各リンクの慣性モーメント、 L ：各リンクの長さ、 L_e ：各リンクの回転軸と重心間の距離、 R ：車輪半径、 C ：粘性摩擦トルク係数、 f ：固体摩擦トルク（添え字12：車輪-本体間、3：制御アーム-本体間、4：本体肩-作業アーム間、5：作業アーム-肘間）とし、その他の添え字は図6に準ずるものとする。

3. 4 各種センサと機構

3. 4. 1 モータ軸エンコーダ

モータ軸に直結されたエンコーダ（500パルス/rev）により、上下出力軸の回転角度を検出する。

3. 4. 2 本体傾き角センサ

車軸と回転軸とを一致させるように本体側面に取り付けたロータリ磁気エンコーダ（2048パルス/rev）により、本体の傾き角を検出する。エンコーダ軸の回転が、その軸から伸びてつねに地面に接する接触子により止められる一方、エンコーダハウジングは本体とともに回転するので地面に対する本体傾き角が検出さ

図7 制御システムの構成

れる。

3. 4. 3 作業アームの各回転角検出用センサ

肘およびハンドの回転角はそれぞれの出力軸およびこれと平行に配置されたロータリエンコーダ軸に取り付けられたブリー同士をベルトで連結し、それぞれのエンコーダがこれらの角度を検出する。

3. 5 制御システム

図7に制御システムの構成を示す。コントローラとして16ビットマイコン（数値演算プロセッサi80287付き）を用い、各出力軸はソフトウェアによるトルク制御で駆動する。制御プログラムはC言語と一部アセンブラで記述されている。各サンプリング時間ごとのセンサ情報にもとづき演算したトルク指令はD/Aコンバータを介しモータドライバに入力され、モータは電流に比例したトルクを発生し各軸を駆動する。

SMAワイヤの駆動は動作周波数1KHz、12ボルトのパルス通電により行い、これをマイコンのポート切り換えによるオンオフにより行う。

4. 制 御 則

4. 1 ロボット本体の姿勢制御

4. 1. 1 直立姿勢安定化制御

本ロボットの姿勢安定化法には、車輪を使って制御を行うものと制御アームによるものがある。作業アーム動作制御に対しては、制御アームのみを用いた姿勢安定化法を採用した。作業アームの動作は、ロボット本体の姿勢安定化が前提条件となるため、本制御にはより大きな頑強性が要求される。

制御アームに対する制御則を次に示す。

$$U_3 = U_{gx} + U_b + U_{3g} \quad (1)$$

U_{gx} : 合成重心フィードバック入力

$$U_{gx} = -K_{pg} \cdot G_x \quad (1a)$$

ここに,

K_{pg} : 合成重心位置比例フィードバックゲイン

G_x : 合成重心位置(次式)

$$G_x = \frac{M_1 A + M_2 B + M_3 C + M_4 D}{M_1 + M_2 + M_3 + M_4} \quad (1a')$$

$$A = L_{e1} \sin \theta_1$$

$$B = L_1 \sin \theta_1 - L_{e3} \sin(\theta_1 + \theta_3)$$

$$C = L_1 \sin \theta_1 - L_{e4} \sin(\theta_4 - \theta_1)$$

$$D = L_1 \sin \theta_1 - L_4 \sin(\theta_4 - h - \theta_1) \\ + L_{e5} \sin(\theta_4 - h - \theta_1 + \theta_5)$$

U_b : 本体傾き角フィードバック入力

$$U_b = -K_{pb}(\theta_{1r} - \theta_1) - K_{ib} \Sigma(\theta_{1r} - \theta_1) \quad (1b)$$

ここに,

θ_{1r} : 本体傾き角の指令値

K_{pb} : 本体傾き角比例フィードバックゲイン

K_{ib} : 本体傾き角積分フィードバックゲイン

U_{3g} : 重力補償入力

$$U_{3g} = M_3 g L_{e3} \cdot \sin(\theta_1 + \theta_3) \quad (1c)$$

4. 2 走行制御

前項において説明した姿勢安定化制御を行いつつ、ロボットを走行させる。これは車輪つき倒立振子の姿勢安定化法の一つである車輪を用いた方法^{(2)~(4)}とは異なり、姿勢安定化制御には制御アームのみを使用し、車輪は姿勢安定化とは独立に駆動できるので、位置決め動作が必要な場合には有利である。

以下に車輪に対する制御則を示す。

$$U_2 = K_{pw}(\theta_{2r} - \theta_2) + K_{iw} \Sigma(\theta_{2r} - \theta_2) \quad (2)$$

ここに,

θ_{2r} : 車輪回転角の指令値

K_{pw} : 車輪回転角比例フィードバックゲイン

K_{iw} : 車輪回転角積分フィードバックゲイン

4. 3 作業アーム動作制御

作業アームの動作には肩関節の回転、肘関節回転、手首関節の回転およびハンドの開閉の4動作がある。以下にそれぞれの制御に対する制御則を示す。

4. 3. 1 肩関節の回転制御

肩関節の回転に関する制御則を次式で与える。

$$U_4 = U_a + U_{4g} \quad (3)$$

U_a : 肩関節回転に対する指令入力

$$U_a = K_{pa}(\theta_{4r} - \theta_4) + K_{ia} \Sigma(\theta_{4r} - \theta_4) \quad (3a)$$

ここに,

θ_{4r} : 肩回転角の指令値

K_{pa} : 肩回転角比例フィードバックゲイン

K_{ia} : 肩回転角積分フィードバックゲイン

U_{4g} : 重力補償入力

$$U_{4g} = M_4 g L_{e4} \cdot \sin(\theta_4 - \theta_1) \\ + M_5 g \{ L_4 \cdot \sin(\theta_4 - h - \theta_1) \\ + L_{e5} \cdot \sin(\theta_4 - h - \theta_1 + \theta_5) \} \quad (3b)$$

4. 3. 2 肘関節の回転制御

次に、制御アームの肘関節回転動作に対するアクチュエータの制御則を示す。

$$U_5 = U_e + U_{5g} \quad (4)$$

U_e : 肘関節回転指令入力

$$U_e = K_{pe}(\theta_{5r} - \theta_5) + K_{ie} \Sigma(\theta_{5r} - \theta_5) \quad (4a)$$

ここに,

θ_{5r} : 肘回転角の指令値

K_{pe} : 肘回転角比例フィードバックゲイン

K_{ie} : 肘回転角積分フィードバックゲイン

U_{5g} : 重力補償入力

$$U_{5g} = M_5 g L_{e5} \cdot \sin(\theta_4 - h - \theta_1 + \theta_5) \quad (4b)$$

4. 3. 3 ハンド関節の回転制御

ハンド回転に対する制御則は次の通りとした。

$$U_6 = K_{ph}(\theta_{6r} - \theta_6) + K_{ih} \Sigma(\theta_{6r} - \theta_6) \quad (5)$$

ここに,

θ_{6r} : ハンド回転角の指令値

K_{ph} : ハンド回転角比例フィードバックゲイン

K_{ih} : ハンド回転角積分フィードバックゲイン

本制御は、アーム中心軸に関して垂直な方向の回転運動であるため、重力補償は行わない。

4. 3. 4 ハンド開閉制御

ハンドの開閉はハンドに設置したSMAアクチュエータへの通電切り換えにより行う。

4. 3. 5 各関節動作の切り換え制御

前述した各動作を機構の項で説明したクラッチ機構の動作と同期を取りつつシーケンス的に行うことにより、ロボットの作業アームの動作は実現される。

θ_{4r} , θ_{5r} および θ_{6r} などの回転角指令値は変形正弦曲線⁽⁸⁾に従って滑らかに変化させることとした。この時、制御アームによる姿勢安定化制御は作業アーム

図8 姿勢安定化制御実験結果

ムの動作とは独立した形で同時に行うものとする。

5. 実験結果

5.1 ロボット本体の姿勢安定化制御

作業アームを振り下ろした状態で制御アームのみを本体の直立姿勢安定化制御を行った。この時、車輪はサーボロックした状態となっている。図8に姿勢安定化制御時の本体傾き角 θ_1 、制御アーム回転角 θ_3 および合成重心位置偏差 G_x の時間的変化を示す。これより、制御アーム動作により、ロボットの姿勢が安定に保持されている様子がわかる。同制御により、本体は最大振幅 $5 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 以内、合成重心位置偏差は $5 \times 10^{-4} \text{ m}$ 以内であることがわかる。

5.2 走行制御

走行実験結果を図9に示す。図9(a)に車輪回転角 θ_2 の指令値 θ_{2r} に対する応答の時間的変化を示す。同図より、車輪は指令値に対してほぼ誤差なく追従している様子がわかる。同図(b)に車輪への出力トルク U_w の時間的変化、(c)にこれらを位置FB項 U_{pw} と位置偏差の積分FB項 U_{iw} とに分解したものを示す。積分項は車輪の回転速度が一定となるところではカットすることにした。(d)に本体姿勢傾き角 θ_1 、制御アーム回転角 θ_3 およびロボットの合成重心の車輪接地点からの偏差量 G_x の時間的変化を示す。

G_x がロボットの進行方向と同方向に偏差をもっているのは、制御アーム制御則が合成重心FB、本体傾き角FB、重力補償入力などから構成されていること、および本体傾き角の積分項の影響が大きいと考えられる。(e)に制御アームへの出力トルク U_3 の時間的変化、(f)に U_3 を重心位置偏差FB項 U_{pg} 、本体傾き角度偏差FB項 U_{pb} ならびにこれの積分項 U_{ib} と重力補償項 U_{sg} に要素分解したものを示す。これから

も本体傾き角偏差項およびその積分項の影響が大きいたことがわかる。

また、本ロボットシステムのエネルギー供給ならびにデータ送信用の配線コードの張力の影響がロボットの停止位置(図9(f)のA部)に現れている。すなわち、配線コードがあるため U_{pg} は完全には0にはならず、コードの張力による転倒トルクと釣り合っている。

5.3 作業アーム動作制御

直立姿勢安定化制御、作業アーム動作制御である肩関節回転制御、肘関節回転制御およびハンド関節回転制御の総合動作実験結果について報告する。

制御アームを用いて姿勢を安定化しつつ、各種動作を行わせた。以下に動作順序を示す。

- ①作業アーム肩関節をアーム振り上げる方向(+方向とする)に $+\pi/2 \text{ rad}$ 回転
- ②ハンドを $+\pi \text{ rad}$ 回転
- ③肘関節を $+\pi/3 \text{ rad}$ 回転
- ④ハンドを $-\pi \text{ rad}$ 回転(ハンドを元の状態に)
- ⑤肘関節を $-\pi/3 \text{ rad}$ 回転(肘関節を元の状態に)
- ⑥肩関節を $-\pi/2 \text{ rad}$ 回転(肩関節を元の状態に)

実験結果を図10に示す。図10(a)に作業アーム肩関節への回転指令角 θ_{4r} および回転角 θ_4 、肘関節の回転指令角 θ_{5r} および回転角 θ_5 ならびにハンドの回転指令角 θ_{6r} および回転角 θ_6 の時間的変化を示す。同図から変形正弦曲線と直線の組み合わせからなる指令曲線にそれぞれの関節の運動がよく追従している。また、SMAワイヤへの通電切り換えによりクラッチが作動し、肘関節回転動作とハンド回転動作を切り換えている様子がわかる。同図(b)に本体傾き角 θ_1 、制御アーム回転角 θ_3 および合成重心位置偏差 G_x の時間的変化を示す。大きな重心移動をともなう肩関節の回転動作により、合成重心が絶対値にして最大 7×10^{-4} 程度変化する。その場合、制御アームがこれらの外乱を吸収するように動作することにより、ロボットは姿勢を乱すことなく、作業アームの動作を実現している。同図(c)に制御アーム出力トルク U_3 、(d)に肘関節出力トルク U_5 、(e)にハンド関節動作時の出力トルク U_6 の時間的変化を示す。肘関節およびハンドの回転開始および停止時にトルクが一時的に大きくなるのは、角関節部の静止摩擦トルクおよびクラッチ切り換えによる摩擦の影響であると考えられる。

6. 結 言

本報では、2腕付き可変構造型平行二輪車に、新しく開発した肩、肘、ハンド回転およびハンド開閉機能

(a) θ_{2r} および θ_2 の時間的変化 (b) U_w の時間的変化 (c) U_{rw} および U_{lw} の時間的変化 (d) θ_1 , θ_3 および G_x の時間的変化 (e) U_3 の時間的変化 (f) U_{pa} , U_{pb} , U_{lb} および U_{3a} の時間的変化

図9 走行実験結果

をもつ作業用アームを取り付け、ロボットの姿勢安定化を行いつつ、走行制御と作業アームを動作させる方法およびこれらの実験結果を示した。以下に本研究で得られた結論を述べる。

- (1) SMAワイヤを駆動力として利用したクラッチ機構を開発し、これによりただ1個のモータを用いて肘関節回転とハンド回転の2動作を実現し、ロボット腕の軽量化を実現した。
- (2) SMAワイヤをアクチュエータとするロボットハンドを開発し、ハンド単体の確実な動作を確認した。
- (3) 本研究で開発した作業アーム付き平行二輪車型移動ロボットを用いて、ある位置から指定された位置まで移動し、作業アームを振り上げてワークをハンドリングする作業を行わせることに成功した。
- (4) 姿勢安定化、走行および作業アーム動作に関する制御則を示すとともに、これらの実験結果を示した。

以上により、元来、不安定な構造物である倒立振り子型平行二輪車に姿勢安定化制御を加えることにより、各種作業用ロボットとしての利用が可能であることを示した。

[謝辞] ロボットハンドの製作に関して(株)ユニシ

(a) θ_{4r} , θ_4 , θ_{5r} , θ_5 , θ_{6r}
および θ_6 の時間的変化

(e) U_6 の時間的変化

図 10 作業アーム動作実験結果

(b) θ_1 , θ_3 および G_x の時間的変化

(c) U_3 の時間的変化

(d) U_5 の時間的変化

アジェックス生産技術部 第一生産技術課長 高橋英
隆氏と古河電工(株)横浜研究所 研究部長 鈴木雄
一氏に多大なご援助をいただいたことを付記し謝意を
表します。

文 献

- (1) 山藤和男, 馮 青: 平行二輪車の姿勢制御に関する研究(第1報, 倒立振り子モデルによる非線形系の制御シミュレーション), 精密工学会誌, 53-10 (1987), 1622.
- (2) 山藤和男, 馮 青: 平行二輪車の姿勢制御に関する研究(第2報, 実験結果), *ibid.*, 54-9 (1988), 1756.
- (3) 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 (1988), 1114.
- (4) 山藤和男, 宮川 靖, 河村 隆, 平行二輪車の同調および操舵制御, *ibid.*, 55-513 (1989), 1229.
- (5) 平林友一, 山藤和男: 可変構造型移動ロボットの制御に関する研究(第1報, 制御アーム-車輪型モデルの姿勢安定化および走行制御), *ibid.*, 56-523 (1990), 721.
- (6) 山藤和男, 越山 篤: 可変構造型平行二輪車の姿勢および走行制御, *ibid.*, 58-527 (1990), 1818.
- (7) 越山 篤, 山藤和男: 可変構造型平行二輪車の姿勢および走行制御(第2報, トルク変化法による起立および横転制御), *ibid.*, 57-539 (1991), 2285.
- (8) 牧野 洋, 自動機械機構学, 日刊工業新聞社(1976).