可変構造型移動ロボットの制御アーム・脚型
における姿勢変化と跳躍動作*金井宏樹^{*1}, 山藤和男^{*2}Posture Change and Jumping Motion of the Controlling
Arm-Leg-Type Mobile Robot

Hiroki KANAI and Kazuo YAMAFUJI

This paper reports the control methods and experimental results on the postural change and jumping motion of the arm-leg-type locomotive robot which has a twin leg, an upper structure on its driving axis and double controlling arms suspended from the upper body. In order to stabilize and change the posture of the robot, the feedback control method based on the compound gravity center among the body, the arms and the legs was applied. The compound gravity center was also controlled according to the inclination of the postural angle. Furthermore, we have successfully achieved a jumping motion by sequentially controlling the orbit of motion of the legs. Switching between the torque control and the PID control methods is useful in jumping motion of the robot.

Key Words: Locomotive Robot, Variable Structure, Stability,
Computer Control, Postural and Jumping Control

1. 緒言

今日、車輪や脚などを持った移動ロボットの研究が盛んに行われているが、それらは限られた環境でしか適用できないものが多い。さまざまな環境に適した移動ロボットを実現するためには、ロボットの構造を可変とすることは有効な手段の一つである。本研究では環境や移動条件に適した構造および移動形態をとることによりさまざまな状況に対応することのできる移動ロボットの実現を目的としている。

本報では、これまでに報告した可変構造型移動ロボットのうち、制御アーム・車輪型^{(1)・(2)}、脚・脚型⁽³⁾に引きつづき、制御アーム、脚、本体からなる3リンク構造をもつ制御アーム・脚型移動ロボットにおける姿勢変化と跳躍動作の制御法について提案するとともに、それを用いて実験を行った結果について報告する。

跳躍動作に関しては、いくつかの重要な研究^{(4)・(5)}が行われているが、これらの多くは脚の伸縮を利用して跳躍を行う構造となっている。これは、空気圧シリンダやソレノイド・スプリングを用いれば跳躍方向に効率よくパワーを利用することができるためと思われる。本研究では、アクチュエータとしては、車輪、脚ともに制御性の高いDCサーボモータを用いている。これまで、DCサーボモータのみを用いて跳躍動作を

行わせた例は見当たらないが、本研究により脚の回転による蹴りだしを利用した跳躍動作が可能なることを確かめた。

2. 実験装置

(1) 機構：製作したロボット実機を図1に示す。本ロボットは、主として脚、本体および制御アームからなる。本体には、アクチュエータとして2個のDCサーボモータが内蔵されており、二段減速機構(減速比:1/10)を介して脚、制御アームをそれぞれ同軸で駆動することができる。

脚の代わりに車輪を取り付けた場合は、制御アーム・車輪型^{(1)・(2)}となり、車輪による移動が可能である。また、本体の前後軸に脚を取り付けた場合には、脚・脚型⁽³⁾となり4脚移動が可能となる。

(2) センサ：各リンクの角度検出のため、DCサーボモータ軸に直結した光学式ロータリーエンコーダを用いている。また、脚と地面とがなす角度を検出するため、磁気エンコーダを用いた。これは図1に示したように、磁気エンコーダから接地棒を延ばし地面と接触させて角度を検出し、演算により脚と地面の角度を求めている。

(3) 制御システム：コントローラとして16ビット・パソコン(数値演算プロセッサ付き)を用いた。各軸のモータはソフトウェア(C言語とアセンブラにより記述)によって駆動および制御される。

サンプリング時間ごとにエンコーダで検出された角

* 平成2年3月30日 第67期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成2年7月23日。

^{*1} 学生員、電気通信大学大学院 (〒182 調布市調布ヶ丘1-5-1)。

^{*2} 正員、電気通信大学。

度情報をパソコンに入力し、制御則を演算しトルクの形で与えられた制御出力に応じて各軸を駆動する。

(4) 動作の概略: 本ロボットは、本来不安定な倒立振子型の系であるため、起立した状態でロボットに動作を行わせるためには、まず安定な起立を実現する必要がある。姿勢の安定化は制御アームを用いて系全体の合成重心位置を制御することにより実現する。姿勢安定化が実現できた後、脚アクチュエータを駆動することにより、脚を使ってさまざまな姿勢変化を行う。これによりロボットを起立制御するとともに姿勢を任意に変化させたり、跳躍を行わせたりする。

3. ロボットのモデル化

実験機を図2に示すように、3リンクの倒立振子としてモデル化する。

[主要記号]

m_0, m_1, m_2 : リンク0, 1および2の質量

L_0, L_1, L_2 : リンク0, 1および2の長さ

θ_0, θ_{0r} : 地面と脚との角度(姿勢角)と指令値

θ_1, θ_{1r} : 脚と本体との角度(Leg角)と指令値

θ_2, θ_{2r} : 本体とアームとの角度(アーム角)と指令値

e_0 : 脚先端部の曲率中心からリンク0の重心位置までの長さ

e_1 : 脚の回転軸からリンク1の重心位置までの長さ

e_2 : 制御アーム回転軸からリンク2の重心位置までの長さ

G_0, G_1, G_2 : 脚, 本体, 制御アームの重力項

U_1, U_2 : 脚, 制御アームへの入力

Xg, Yg : 脚先端部の曲率中心を原点としたときの系全体の合成重心位置座標

4. 姿勢制御

ロボットが転倒することなく、安定に起立することができるためには、系の合成重心位置のX座標が脚の接地点を通る鉛直線上にあることが必要である。

一方、ロボットの姿勢は姿勢角、LEG角およびアーム角を指定することにより一意に決定される。したがって、ロボットに任意の姿勢を取らせる場合は、安定起立に必要な『合成重心位置条件式』と姿勢を決定する『姿勢決定条件式』の2条件式に対して、姿勢角、LEG角およびアーム角のいずれかを指定することにより指令値を決定する。

姿勢制御を行う場合は、LEG角とアーム角は、モータにより直接制御する。これに対し姿勢角は、制御アームを用いて合成重心位置を制御することにより制御を行う。

図1 製作したロボット実機

図2 三重倒立振子によるモデル化

4. 1 姿勢指令発生法

ロボットの姿勢指令を決定するための2条件式を以下に示す。

[合成重心位置条件式]

$$\text{系の合成重心X座標} = 0 \quad (1)$$

[姿勢決定条件式]

姿勢決定条件式として、次の3つの場合を考える。

①地面に対するアーム角指定の場合

$$\theta_0 + \theta_1 + \theta_2 = \frac{3}{2} \pi \quad (2.1)$$

②地面に対する本体角指定の場合

$$\theta_0 + \theta_1 = \frac{\pi}{2} \quad (2.2)$$

③地面に対するLEG角指定の場合

$$\theta_0 = \frac{\pi}{2} \quad (2.3)$$

ここでは①の場合について考える。式(1)および式(2.1)より、姿勢角 θ_0 、アーム角 θ_2 は以下のようになり、LEG角 θ_1 を指定することで、ロボットの姿勢は決定される。

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left(\frac{B + C \cos \theta_1}{C \sin \theta_1} \right) \quad (3)$$

$$B = m_0 e_0 + m_1 L_0 + m_2 L_0, \quad C = m_1 e_1 + m_2 L_1$$

$$\theta_2 = \frac{3}{2} \pi - \theta_0 - \theta_1 \quad (4)$$

式(3), 式(4)にしたがい, θ_1 をサンプリング時間ごとに変化させることにより, ロボットの姿勢を変化させることが可能となる。

4. 2 姿勢の安定化制御

初期外乱等のない理想的な状態においては, モデル化した系の合成重心位置 X 座標が, つねに図2の接地点 (O点と呼ぶ) 上に保たれていれば, そのまま安定な姿勢を保つことができる。しかし, 姿勢変化時や大きな外乱または衝撃などが加わる場合には, O点に対する合成重心位置 (X_g, Y_g) の変化が大きくなり, X_g をO点上に保つことは困難となり, 安定な姿勢を維持できない。これは以下に示す重力によるO点回りの転倒トルク T_g が生じるからである (転倒トルクは反時計回りを正とする)。

$$T_g = L_g (-M g \cos \theta_g) \quad (5)$$

$$L_g = \sqrt{X_g^2 + Y_g^2}, \quad \theta_g = \tan^{-1} (Y_g / X_g)$$

図3 トルク T_g , T_{gr} の方向

図4 脚先端部の曲率半径

図5. 1 姿勢変化の実験結果

図5. 2 直立姿勢安定化制御結果

図5. 3 直立姿勢から L_g 角の変化

図5. 4 直立姿勢回復トルク T_{gr} の変化

図5. 5 制御入力 U_1 , U_2 の変化

$\theta g \equiv \pi/2$ において、 θg の変化量が無視できるほど小さいとき ($d\theta g \equiv 0$) には、 $Xg \equiv 0$ 、 $Yg \equiv \text{一定}$ として、 $Tg = 0$ と見なすことができるので、 $Xg = 0$ になるように制御を行えば姿勢の保持が可能となる。

しかし、 $d\theta g \neq 0$ の場合は Tg を無視できないので、 $Xg = 0$ の制御のみでは姿勢を保つことはできない。この場合、 Tg とは逆向きの回転トルク Tgr (姿勢復元トルク)が必要である。本報では Tgr の発生法として、脚先端部の曲率半径を利用した姿勢復元トルク発生法を用いる。これは姿勢が変化し姿勢角 θ_0 に偏差 $d\theta_0$ が生じた場合(図3)、脚先端部の曲率半径 R を利用して合成重心指令値 Xgr を式(6)により変化させ、 Xg のみをサーボ制御することにより Tgr を発生させ、姿勢を制御するものである。

$$Xgr = -R \sin(d\theta_0) \quad (6)$$

これにより、 Xgr は姿勢を崩す方向とは逆の方向に移され姿勢復元トルクの働きで姿勢が制御される。同様の研究に、制御アームで合成重心位置と姿勢角とともにPID制御するものがあるがこの場合には急激な姿勢の変化時には制御アームの発振を起こしやすい。

本制御法の場合、制御アームでは Xg のみのPID制御を行うため、大きな外乱などが発生した場合でも姿勢の安定化が可能である。5章で述べる跳躍動作を実現できたのはこれによるところが大きい。

[制御則]

脚は姿勢変化制御に、アームは姿勢安定化制御に用いそれぞれ θ_1 、 Xg のPID制御を行う。各モータへの制御入力 U_1 、 U_2 は以下の通りである。

$$U_1 = Kp_1(d\theta_1) + Kv_1\dot{\theta}_1 + Ki_1\Sigma(d\theta_1) \quad (7)$$

$$U_2 = Kp_g(dXg) + Kv_g\dot{Xg} + Ki_g\Sigma(dXg) \quad (8)$$

Kp_1 , Kv_1 , Ki_1 : Leg角FBゲイン

Kp_g , Kv_g , Ki_g : XgFBゲイン

ここで、 $d\theta_0 \equiv 0$ 、 $Kv_g = Ki_g = 0$ とすると式(8)の制御入力 U_2 は以下のように変形される。

$$U_2 = -Kp_g(Xg - (-R) \cdot (d\theta_0))$$

これは、参考文献(6)の式(3)において $Kpw = R = 0.03$ とした場合に等しく、同文献で行った制御則

の定量的な検討結果が本制御則にも適用できるものと考ええる。

4.3 実験結果

図5に $\theta_0 + \theta_1 + \theta_2 = 3/2\pi$ とし θ_1 を $\pi/3$ 変化させた時の実験結果を示す。これより、 Xg は0付近を推移し、また姿勢角 θ_0 、Leg角 θ_1 は追従性の良いことがわかる。

図5.2、5.3では各グラフの振幅が同位相となり、姿勢角の偏差の生じる方向すなわち本体が倒れる方向に対してアームが逆方向に動かされ Xg が移動することにより姿勢が保たれていることがわかる。

図5.4では姿勢角偏差による Xgr と Xg の制御結果とそれにもともなう姿勢復元トルク Tgr の解析結果を示す。

5. 跳躍動作

5.1 跳躍軌道

4章で述べた姿勢安定化法を用いて、姿勢を制御しながら跳躍動作を行う。すなわち、制御アームは合成重心位置 Xg に関するPID制御を行い、脚は以下の順序でシーケンス制御を行う。

- ①姿勢変化：直立状態から蹴り出し姿勢($\theta_1 = -\pi/3$)への姿勢変化
- ②PID制御からトルク制御への切換え
- ③蹴り出し動作：Leg目標角を $\theta_1 = -\pi/6$ とし、トルク制御を行う(図7のAの場合)。
- ④Leg引上げ動作：Leg目標角を $\theta_1 = -\pi/3$ としトルク制御を行う(図7のBの場合)。
- ⑤着地動作：着地動作とそれにもともなう衝撃の吸収を行う(図7のCの場合)。
- ⑥姿勢安定化：姿勢安定化のために、Leg角 θ_1 によるトルク微調整制御を行う。
- ⑦トルク制御からPID制御への切換え
- ⑧姿勢補正：跳躍動作により生じた姿勢角度の偏差を補正する。
- ⑨姿勢変化：直立姿勢への姿勢変化。

①～②は跳躍を始めるための準備動作であり、③～⑤の順序動作により跳躍が行われる。跳躍動作のスティック線図を図6に示す。

図6 跳躍動作シーケンスのスティック線図

5. 2 跳躍動作制御

跳躍動作時(③～⑤)は脚の角度変化と出力トルク変化が大きいためPID制御では発振を起こしてしまう。このため脚駆動用アクチュエータの制御をPID制御からトルク制御に切換えて跳躍動作を行い、着地後姿勢が安定した後に、再びPID制御に切換えている。具体的には次のようにして切換えを行う。

(a) PID制御からトルク制御への切換え

PID制御による姿勢安定状態における出力トルク値を姿勢保持トルクとしてトルク制御出力トルクの初期値として切り替えを行う。

(b) トルク制御からPID制御への切換え

出力トルク U_1 に対するトルク制御出力トルクとPID制御出力トルクとの割合を徐々に変えることにより切換えを行う。これは、トルク分配係数 C_p 、 C_t を0～1の間で変化させることにより実現している。切換え後のPID制御時の目標角は、跳躍後のトルク微調整制御により安定化された姿勢の角度とする。したがって、ロボットはそのままの姿勢を保持しながら、トルク制御からPID制御への切換えが行われる。

以下に跳躍動作制御での制御則を示す。

[制御則]

$$U_1 = C_p U_p + C_t U_t \quad (9)$$

$$U_2 = K_p g(dXg) + K_v g(\dot{X}g) + K_i g(\Sigma(dXg)) \quad (10)$$

U_p , U_t : PID制御とトルク制御の出力トルク

C_p , C_t : トルク分配係数 ($0 \leq C_p$, $C_t \leq 1$)

つぎに、トルク制御時のトルク指令について蹴り出し動作制御、Leg引き上げ動作制御、着地動作制御およびトルク微調整制御の各場合にわけて述べる。

[蹴り出し動作制御]

蹴り出し動作(③)におけるトルク指令は、姿勢保持トルクに加えて、あらかじめ与えた蹴り出し最大トルクを最大値とするsin軌道を与える。これにより脚は発振を起こすことなく駆動され、ロボットは鉛直上向きの加速度を得ることができる。

$$U_t = U_f + K_t (\sin \text{軌道})$$

U_f : 姿勢保持トルク

K_t : 蹴り出し最大トルク

[Leg引き上げ動作制御]

Leg引き上げ動作(④)におけるトルク指令は、あらかじめ与えた引き上げ最大トルクを最大値とするsin軌道により与える。これにより、脚は地面から空中へと引き上げられ跳躍が実現される。

$$U_t = P_t (\sin \text{軌道})$$

P_t : 引き上げ最大トルク

図7 跳躍時の脚の動作軌道図

[着地動作制御]

着地時(⑤)には、ロボットが蹴り出し動作の後、自由落下により落ちてくるのを待ち着地するのではなく、脚で地面を蹴り積極的に着地を行う。この場合、脚には跳躍動作開始時の姿勢保持トルクに加え着地衝撃吸収トルクを与える。着地衝撃吸収トルクは、着地動作開始時には着地による衝撃に耐えられる大きなトルクとし、着地後は再び地面を蹴り出さないような小さなトルクとする。これは、着地衝撃吸収トルク係数 L_k を1～0へと変化させることで実現する。

$$U_t = U_f + L_k U_1$$

U_f , U_1 : 姿勢保持トルクと着地衝撃吸収トルク

L_k : 着地衝撃吸収トルク係数 ($0 \leq L_k \leq 1$)

[トルク微調整制御]

着地後姿勢を安定化するためには、Leg角が一定であることが必要である。トルク制御での定置制御を実現するためにトルク微調整制御を行った。これは、脚には跳躍動作開始時の姿勢保持トルクを与え、さらにLeg角 θ_1 の変化に応じて微小量のトルクを加減することによりLeg角の定置制御を行うものである。

すでに述べたように、跳躍動作時においても姿勢の安定化は4. 姿勢制御で述べた姿勢安定化法を用いて行う。ただし、脚をトルク制御する場合には、 θ_{1r} は指定されないため θ_{0r} は決定されない。従って、 $d\theta_0$ を計算することはできない。

そこで、実際の θ_1 を式(3)に適用することにより計算される姿勢角を θ_{0r} として安定化制御を行う。

5. 3 実験結果

図8に跳躍動作の実験結果を示す。跳躍時における急激な姿勢変化は大きな外乱として、制御アームによる姿勢安定化制御で吸収することにより、安定な跳躍動作を実現している。

また、着地後の脚動作はトルクの微調整制御を行い、 θ_1 の変化量に応じて U_1 を変化させることにより、 U_1 の定置制御を実現しており、これにより着地後 2 秒以内で姿勢が安定していることがわかる（図中の①、②などは脚の動作を示す）。

6. 結 言

可変構造型移動ロボットの形態である制御アーム・脚型モデルに関して、各種姿勢変化と跳躍動作を実現するための制御法を提案するとともに、それらを適用して実験を行い、次の結果を得た。

- (1) 姿勢角指令値と実験値の偏差に応じて計算される合成重心位置の X 座標を指令値として用いるサーボ制御を制御アームのみで行うことにより、直立姿勢安定化と任意の姿勢への移行を可能にし、安定な姿勢変化を実現した。
- (2) 三重倒立振り子型構造をもつ不安定な系であるロボットを制御アームを用いて姿勢安定化制御しつつ、脚駆動用アクチュエータをトルク制御することにより跳躍および着地に成功した。この跳躍動作を繰り返すことにより、跳躍による連続移動が可能となる。
- (3) 姿勢安定化のため提案した本制御法は、跳躍などの急激な姿勢変化を行う時にも適用でき、その動作の安定性もきわめて高いことを確認した。

参 考 文 献

- (1) 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），機論 C 編，56-523 (1990)，721。
- (2) K. Yamafuji, T. Hirabayashi and T. Naruse: Postural and Driving Control of the Controlling Arm-wheel-Type Parallel Bicycle, Proceedings of the 5th Intern. Symposium on Industrial Robot (1989), 227。
- (3) 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 2 報，脚・脚型モデルの移動動作と制御），ibid., 56-529 (1990)，2454。
- (4) 松岡清利，反復跳躍運動の機械モデル，バイオメカニズム 5，東京大学出版会 (1979)，251。
- (5) Marc H. Raibert, Legged Robots That Balance, Chapter 3, The MIT Press (1988)。
- (6) 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 3 報，制御アーム・車輪モデルの姿勢安定化の力学的解析），機論 C 編，投稿中。（概要は，平成 2 年度山梨地方講演会にて講演，講演論文集 79-80。）

図 8. 1 跳躍動作の実験結果

図 8. 2 跳躍動作（図 8. 1 の拡大図）

図 8. 3 U_1 , θ_1 の変化

図 8. 4 着地後の安定化制御

図 8. 5 制御入力 U_1 , U_2 の変化