可変構造型移動ロボットの制御に関する研究* (第6報, 制御アーム-車輪型モデルの形状が未知の曲面上の走行)

平 林 友 一^{*1}, 山 藤 和 男^{*2}

Study on the Control of the Variable-Structure-Type Locomotive Robot (6th Report, Inclination Angle Estimation and Driving Control of the Controlling Arm-Wheel-Type Mobile Robot on Sloped Terrain)

Tomokazu HIRABAYASHI and Kazuo YAMAFUJI

In the previous studies, we investigated the motion and postural control methods together with the walking form of the inverted pendulum-type robot composed of a body, parallel bicycle wheels and double controlling arms. Postural stability and high-speed driving of the robot were respectively achieved in the first and fifth report. The control principle and stability conditions were made clear analytically and experimentally in the third report. However, detection of the inclination angle of the robot with respect to the ground still remains a serious problem of this robot because of the use of a contacting rod elongated from the rotary encoder mounted on the body. Therefore, it is assumed to be difficult to drive the robot on sloped terrain. In order to overcome this difficulty, we developed a new method for body inclination angle estimation and succeeded in driving the robot on slopes with shapes and inclinations unknown to the robot by estimating the true angle. In this paper, theoretical fundamentals of this method are discussed and justification for its use is provided by the experimental results.

Key Words: Robotics, Mobile Robot, Postural Stability, Inclination Sensor, Estimation of Inclination Angle, Driving Control, Sloped Terrain

1. 緒 論

制御を加えない状態では元来, 不安定な物体に制御を加えて姿勢を安定化することにより, 転倒を防止することができれば, その応用範囲は広い。

一例として, 重心位置が高い不安定な移動機構に姿勢安定化制御を行なうことで転倒を防止することができれば運搬能力, 狭路走行能力などに優れた移動機構が構成できる。これらの理由から, 筆者は不安定物体の姿勢安定化の重要性を認識し, その研究対象として車輪付き倒立振り子型移動機構の姿勢安定化制御を中心に研究を行ってきた。

さらに, 本研究では車輪, 制御アームおよび脚をロボット本体と組み合わせることにより, 可変構造型移動ロボットを構成し, 代表的な3つの移動形態に対応するモデルについて研究^{(1) - (5)}を行った。

第1報⁽¹⁾では, 制御アームを用いて, 姿勢のバランスをとりながら車輪で移動する制御アーム-車輪型平行二輪車により, 姿勢安定化および走行を実現した。その際に開発した姿勢安定化制御法を合成重心フー

ドバック(以降, FBと略記)制御と呼ぶ。第3報⁽³⁾では, 提案した姿勢安定化制御法に関して理論的解析を行い, 制御系の安定性を検討するとともに制御系設計の指針を示した。第4報⁽⁴⁾では, 開発した姿勢安定化制御法を本体に2脚を取り付けた脚式移動機構に適用することにより, 起立および座り動作, さらに跳躍による移動を実現した。さらに, 第5報⁽⁵⁾においては, 高速移動時に発生する慣性力を考慮した補償制御則を提案し, 合成重心FB制御だけでは不可能であった高加速減速での走行を実現した。

しかし, これまでに行った実験の中で, ロボットの本体角度の検出方法が依然として大きな課題として残されていた。すなわち, 今までは角度センサから伸びて地面と接触した接触子により地面とロボット本体の相対角度を測定し, これを本体角度としていた。この方法では, 移動面が曲面の場合には走行面の傾斜角度の分だけ, 本体角度に偏差が発生するという問題があった。このため, 接触子を用いた本体角度検出法を用いては曲面上の走行は不可能であると考えられていた。

この問題に対して, 本体に取り付けたレートジャイロを内界センサとしてピッチ方向(ロボットの進行方向)の角速度を測定し, オブザーバを用いて非接触で本体角度を推定することに成功した例⁽⁶⁾が報告されている。

* 原稿受付 平成4年9月1日。

^{*1} 正員, セイコーエプソン(株) (〒394 岡谷市大栄町3-3-5)。

^{*2} 正員, 電気通信大学 (〒182 調布市調布ヶ丘1-5-1)。

この方法は非接触式であるため、接触棒を用いる本体角度検出法の問題点を克服している。この場合にはレートジャイロの精度が問題となり、センサ出力のドリフトが移動距離のオフセットとして現われるなどの新たな問題点が生じる。

本報では、従来の接触棒による走行面に対する相対角度の検出法を用いているにも拘わらず、姿勢安定化制御法の特性を利用することにより、本体角度の偏差を自動的に補正し、形状が未知の曲面上を走行することが可能な本体角度補正法を開発したので報告する。

さらに、ここで提案する本体角度補正アルゴリズムがレートジャイロ等を用いた内界センサの誤差を補償する方法としても有効であることもあわせて示す。

2. 実験装置

図1に制御アーム-車輪型モデル実機の概要を示す。これは車軸に対して平行な二輪で本体を支え、本体上部の両側面に姿勢バランスをとるための制御アームを備えた二重倒立振子型移動ロボットである。図2にロボットの各パラメータの定義を示す。

制御系について述べると、16ビットパーソナルコンピュータ(CPU:i80286+80287)をコントローラとして使用し、トルク指令をD/Aコンバータを介してサーボアンプに入力し、DCサーボモータを駆動する。制御プログラムはC言語で記述し、制御のためのサンプリング時間は演算時間を考慮して3.0msに設定した。

3. ロボットのモデル化と運動方程式

制御アーム-車輪型移動ロボットを図3に示す二重倒立振子としてモデル化した。これより導出した運動方程式を次式に示す。

図1 制御アーム-車輪型モデル実機の概要

$$\begin{aligned} \text{[本体]} \quad & I_{11} \ddot{\theta}_0 + I_{22} \ddot{\theta}_2 - 2 I_{12} \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_2 \\ & - I_{12} \dot{\theta}_2^2 + G_0 + C_0 \dot{\theta}_0 + f_0 = 0 \quad \dots\dots(1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{[アーム]} \quad & I_{22} \ddot{\theta}_0 + J_2 \ddot{\theta}_2 + I_{12} \dot{\theta}_0^2 \\ & + G_2 + C_2 \dot{\theta}_2 + f_2 = U_2 \quad \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

ここに、

$$I_{11} = J_1 + J_2 + m_2 L_1^2 + 2 m_2 L_1 e_2 \cos \theta_2$$

$$I_{12} = m_2 L_1 e_2 \sin \theta_2$$

$$I_{22} = J_2 + m_2 L_1 e_2 \cos \theta_2$$

$$G_0 = g[m_1 e_1 \cos \theta_0 + m_2 \{L_1 \cos \theta_0 + e_2 \cos(\theta_0 + \theta_2)\}]$$

$$G_2 = m_2 g e_2 \cos(\theta_0 + \theta_2)$$

J_1 : 本体の接地点まわりの慣性モーメント

J_2 : 制御アームの回転軸まわりの慣性モーメント

C_0 : 接地面における粘性トルク係数

C_2 : 制御アーム軸の粘性トルク係数

f_0 : 接地面の固体摩擦トルク

f_2 : 制御アーム軸の固体摩擦トルク

U_2 : 制御アーム入力トルク

図2 ロボットパラメータの定義

図3 二重倒立振子としてのモデル化

4. 姿勢安定化のための制御則

制御アームによる二重倒立振り子型移動物体の姿勢安定化制御法として、第3報⁽³⁾で提案した一般化合成重心FB制御法を適用する。本制御法の基本的な考え方は、系全体の合成された重心位置がつねに物体（ロボット）と地面との接触点の鉛直上方に位置するように制御動作を行って、系のバランスをとることである。そうして系の安定な姿勢が崩れた場合には、接地点に対して本体が倒れ込む方向とは反対側に系の重心位置を移動して、接地点まわりに重力による復元トルクを発生させて姿勢を回復する。この制御則を次に示す。

[一般化合成重心FB制御法]

$$U_2 = U_{pgc} + U_{gc} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、

$$U_{pgc} = -K_{pg}(X_{gc} - X_{off}) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$U_{gc} = m_2 e_2 g \cos(\theta_0 + \theta_2) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$X_{off} = -K_{pw}(\theta_{or} - \theta_0) \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\begin{aligned} X_{gc} &= X_g - G_e \\ &= [m_1 e_1 \cos \theta_0 + m_2 \{e_2 \cos(\theta_0 + \theta_2) \\ &\quad + L_1 \cos \theta_0\}] / (m_1 + m_2) \\ &\quad - R_w(\pi/2 - \theta_0) \quad \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

K_{pg} : 合成重心比例FBゲイン

K_{pw} : 合成重心移動比例FBゲイン

θ_{or} : 本体傾き角の目標値

G_e : 車輪半径補正項

X_g : 水平面射影合成重心位置座標

X_{gc} : 補正された水平面射影合成重心位置座標

X_{off} : 合成重心位置目標値

5. 本体傾斜角度の補正方法

本研究で提案した姿勢安定化制御法の安定性についてはすでに第3報で検討した。その結果、安定性に影響を与えるパラメータは、機械体の物理的な定数とフィードバックゲイン K_{pg} 、 K_{pw} であり、フィードバックゲインの設定により制御系の応答を変化させることが可能であることを明らかにした。

系の安定性を高めるようにフィードバックゲイン K_{pg} 、 K_{pw} を適切に設定することにより、ある程度のパラメータ変動が存在しても起立姿勢を保つことが可能であることは実験により確認されている^{(1),(3)}。図4に走行面を初期値から0.037rad(2.12°)傾斜させて、走行面との相対角度の測定値である θ_0 に誤差をもたせた場合の θ_2 と X_g の応答を示す。コントローラで計算された合成重心位置 X_g は接地点に対してオフセットをもつものの、起立姿勢は保たれていることがわかる。

そこで、本体傾斜角度の検出誤差 $\Delta\theta_0$ を制御情報か

図4 走行面を傾斜させたときの応答

ら逐次推測して本体角度 θ_0 を補正し、 θ_0 の検出誤差を姿勢安定化制御の許容範囲内に収めることができれば、形状が未知の曲面上の走行が可能ではないかと推定される。

図4の応答結果から、本体角度検出誤差である $\Delta\theta_0$ が存在すれば合成重心位置 X_g が零とはならず偏差が発生することに注目する。この偏差の大きさを示す X_g と $\Delta\theta_0$ の間の因果関係を明らかにすることができれば、 X_g を観測することにより $\Delta\theta_0$ を推定することが可能となるであろう。次に、本体角度の検出誤差 $\Delta\theta_0$ と合成重心位置 X_g の関係を導く。

ここで本体検出角度 θ_{0d} 、本体検出角度の誤差 $\Delta\theta_0$ および真の本体角度 θ_{0t} の相互関係を次式で定義する。

$$\theta_{0t} = \theta_{0d} + \Delta\theta_0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

このとき、式(7)の θ_0 に θ_{0t} を代入して真の重心位置 X_{gt} を求める。

$$\begin{aligned} X_{gt} &= [m_1 e_1 \cos \theta_{0t} + m_2 \{e_2 \cos(\theta_{0t} + \theta_2) \\ &\quad + L_1 \cos \theta_{0t}\}] / (m_1 + m_2) \\ &\quad - R_w(\pi/2 - \theta_{0t}) \quad \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

ロボットが姿勢のバランスを保つための条件として、接地点上に系の合成重心位置があることが必要である。これは、真の重心位置 X_{gt} が零となることに等しい。この関係より、

$$X_{gt} = 0 \quad \dots\dots\dots(10)$$

式(9),(10)より、次式を得る。

$$\begin{aligned} &\{m_1 e_1 \cos \theta_{0t} + m_2 [e_2 \cos(\theta_{0t} + \theta_2) \\ &\quad + L_1 \cos \theta_{0t}]\} / (m_1 + m_2) \\ &\quad - R_w(\pi/2 - \theta_{0t}) = 0 \quad \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

ここで解析の簡単化のため、姿勢制御の本体目標角度 θ_{or} を $\pi/2$ radに固定する。

θ_{or} を $\pi/2$ radに設定すると、制御則(3)の姿勢制御の働きにより、制御則内での本体角度は $\pi/2$ radに保つように姿勢が制御される。このとき、真の本体角度は $(\pi/2 + \Delta\theta_0)$ radとなるので、

$$\theta_{0t} = \pi/2 + \Delta\theta_0 \quad \dots\dots\dots(12)$$

この場合、系の重心位置が接地点上にあるための条件は、式(12)を式(11)に代入することにより、

$$\begin{aligned} \theta_2 = & \sin^{-1} \{ [(m_1 + m_2) R_w \Delta \theta_0 \\ & - (m_1 e_1 + m_2 L_1) \sin \Delta \theta_0] / m_2 e_2 \} \\ & - \Delta \theta_0 \quad \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

本体検出角度に $\Delta \theta_0$ の誤差が存在し、かつ系の重心が接地点上に存在するとき、制御ループ内で計算される合成重心位置 X_g を求めるため、式(12)、(13)を式(7)に代入する。すなわち、

$$X_g = [m_2 e_2 / (m_1 + m_2)] \sin \theta_2 \quad \dots\dots (14)$$

ここで、 θ_2 を与える式(13)において、 $\Delta \theta_0$ を微小量として $\sin \Delta \theta_0 \approx \Delta \theta_0$ と近似すると、

$$\begin{aligned} X_g = & \{ (m_1 e_1 + m_2 L_1 + m_2 e_2) / (m_1 + m_2) \\ & - R_w \} \Delta \theta_0 \quad \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

式(15)は、本体検出角度に誤差 $\Delta \theta_0$ が存在する場合、 X_g には $\Delta \theta_0$ に比例した偏差を生ずることを意味している。

図5に式(14)で計算される X_g と $\Delta \theta_0$ との関係を示す。図から、 $\Delta \theta_0$ が $\pi/50$ rad の場合には、 X_g に約12 mmの偏差が発生することがわかる。通常、系の重心位置は1mm以下の精度で制御されるため、数mmの偏差が生じた場合には十分検出することが可能である。このため、式(14)、(15)の関係を使って $\Delta \theta_0$ を推定することは、検出精度の面からも可能である。

以上の解析により、制御ループ内で計算される合成重心位置 X_g の偏差をつねに監視することにより、検出誤差 $\Delta \theta_0$ を推定して本体角度 θ_0 を補正することができる。

また、 $\Delta \theta_0$ がセンサのオフセット等による誤差でも、同様なアルゴリズムを使って $\Delta \theta_0$ を推定して θ_0 を補正することが可能であり、内界センサの誤差補償法としても、ここに提案するアルゴリズムは有効である。

6. 本体傾斜角度補正法

ロボットが起立姿勢を保持しているとき、系の重心位置は振動的に小刻みに変動している。このため、重心位置に生ずる偏差を検出するには重心位置のフィルタリング処理が必要となる。この方法として、

図5 X_g と $\Delta \theta_0$ の関係

- (1) ローパスフィルタを用いた信号処理
 - (2) 一定時間内の測定値の平均値をとる方法
- 等が考えられる。

本報では、信号処理の簡単化と高速化のために、(2)の時間平均値を用いる方法を採用した。 X_g の平均値を計算する場合、平均をとる時間間隔をどれだけにすることが重要である。すなわち、平均する時間を長くすれば微小振動にもとづく変動は減少するが、時間遅れが大きくなる。

本報では、定常状態における合成重心位置の振動周期が約0.8秒であることから、その2倍に近い1.5秒間の平均値、 X_{gav} を計算して合成重心位置の偏差を観測した。

$$X_{gav} = (\sum_{N=n-500}^n X_g[N]) / 500 \quad \dots\dots\dots (16)$$

式(16)で計算される X_{gav} は、本体角度の検出値に誤差が存在しなければ零に保たれる。 X_{gav} に偏差が存在すると、式(14)または式(15)の関係から本体検出角度の誤差 $\Delta \theta_0$ を計算することが可能である。

しかし、この値を使って本体角度を一度に補正すると、姿勢安定化制御系が不安定になる可能性がある。その理由は式(16)で求めた合成重心の平均値には遅れがあることと、周期的な振動成分が含まれているためである。

そこで、この問題を解決するために、 X_{gav} の大きさにより θ_0 を微小量ずつ補正していく方法を採用した。次に、各サンプリング時間ごとに θ_0 を補正するアルゴリズムを示す。

[本体角度補正アルゴリズム]

$\theta_{orv}[k-1]$ を1つ前のサンプリング時間における本体角度として現時点の本体角度 $\theta_{orv}[k]$ を次式で補正する。

$$\begin{aligned} \text{if } X_{gav} > 1.0e-4 \text{ then } \theta_{orv}[k] &= \theta_0[k-1] - \theta_{ml} \\ \text{else if } X_{gav} < -1.0e-4 \\ \text{then } \theta_{orv}[k] &= \theta_{orv}[k-1] + \theta_{ml} \quad \dots\dots (17) \end{aligned}$$

ここで、 $\theta_{0ml} = 2.0e-4$ rad と設定した。

図6 走行面形状

7. 実験結果

前章で提案した本体角度補正アルゴリズムの妥当性を検証するため、図6に示す曲面上をロボットに走行させる実験を行った。この曲面は、両端の直線と滑らかにつながる2つの正弦曲線より構成され、斜面の中央部で最大傾斜角度30度をもっている。以下にその実験結果を示す。

7.1 曲面上走行 図7に登坂の実験結果を示す。車輪回転角速度は $\dot{\theta}_1 = 0.13 \text{ rad/s}$ と設定した。このときの走行速度は4.9mm/sとなる。まず同図(a)において、本体検出角度 θ_0 と、この θ_0 を使って計算した合成重心位置 X_g の変化に注目する。図から、 θ_0 と X_g は正弦関数で構成された走行面の傾斜角度に比例して変化していることがわかる。これは走行面の曲率が変化しても真の本体角度は垂直に保たれながら走行していることを示し、前章で提案した本体検出角度補正が有効に機能していることを示している。

図7(b)には、本体角度補正アルゴリズムを用いて推

定した $\Delta\theta_0$ を使い、 θ_0 および X_g を補正して得られた θ_{0rv} と X_{grv} の変化を示している。この図から θ_{0rv} は $\pi/2 \text{ rad}$ 、 X_{grv} は零付近につねに保たれている。このように、推定によって得られる補正された本体角度 θ_{0rv} と合成重心位置 X_{grv} の信頼性は高く、この情報を使えば形状が未知の斜面上であっても安定な姿勢制御が実現できることがわかる。

図7(c)には $\Delta\theta_0$ と X_g の関係を示す。この図から、

図8 検出データによる走行面形状の再生

図7 ロボットの登坂実験結果

図9 学習による降坂実験結果

図10 ロボットの斜面上走行の様子

$\Delta \theta_0$ と X_{gv} は比例関係にあり、これは式(15)で示した関係を裏付けている。図7(d)にはスケールを拡大して記録した X_{gv} の変化を示す。推定した合成重心の位置は1 mm以内の変動となっており、高精度の重心位置制御が行われていることを示している。

このように、本体角度補正アルゴリズムを適用することにより、真の本体角度 θ_0 を推定することができる。したがって、推定した $\Delta \theta_0$ と車輪回転角度 θ_1 を使えば、実際に走行した曲面の形状を再生することが可能である。図8にロボットの走行中に記録した情報をもとに再生した走行面形状を示す。数値積分の累積誤差による高さのオフセットは認められるが、正弦関数で構成された走行面形状が再生されていることがわかる。

7・2 学習走行 本報で提案した本体角度補正アルゴリズムの信頼性を確認するため、登坂時に推定した走行面形状の情報を使って、ロボットが同一斜面を降りる実験を行なった。この実験結果を図9に示す。

図9(a)に補正を加えた各状態量の変化、同図(b)、(c)に車輪、制御アームへの制御入力 U_1 および U_2 の変化、(d)に補正された合成重心位置 X_{gv} の変化を示す。降坂では改めて本体角度を推定する必要がないため、登坂時の2倍の速度で走行させたにも拘らず、安定な走行が実現されており、登坂時に推定された本体角度の信頼性を確認した。

図10には、ロボットの斜面上走行の様子を連続撮影した写真を示す。

8. 結 論

倒立振り子型移動ロボットで重大な問題であった本体角度の検出法に関して、ロボットと走行面との相対角度と、合成重心位置の変化を用いて本体角度を補正する方法を提案し、実験を行って以下の結果を得た。

(1) ロボットが斜面等を走行する場合には、ロボットの合成重心位置の接地点からの偏差 X_g と、本体検出角度の誤差 $\Delta \theta_0$ との間には比例関係が存在する。

(2) (1)の結果を利用すれば、合成重心位置 X_g をつねに監視することにより、本体検出角度の誤差 $\Delta \theta_0$ を推定して、本報で提案したアルゴリズムを用いて本体角度 θ_0 を補正することができる。

(3) 姿勢安定化制御のために開発した合成重心FB制御法の特長を利用した本体角度補正法により、実時間で未知の走行面形状を推定して走行するとともに、一度走行した曲面形状を学習した結果を利用し、次回から角度の推定を行うことなく走行することができた。

(4) ここで提案した本体角度補正法は、内界センサを用いる場合の誤差補正法としても有効である。

実験装置の製作に関して、コマツ 研究本部 産業機械開発研究室 主任研究員 吉瀬 裕氏に多大なるご援助をいただいた。ここに心から謝意を表わす。

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, 56-523, C(1990), 721.
- (2) 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), 機論, 56-529, C (1990), 2454.
- (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3報, 制御アーム-車輪型モデルの姿勢安定化の力学的解析), 機論, 57-539, C (1991), 2313.
- (4) 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4報, 制御アーム-脚型モデルの姿勢変化と跳躍移動), 機論, 58-545, C (1992), 193.
- (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5報, 制御アーム-車輪型モデルによる高速度走行のための慣性力補償), 機論, 58-552, C (1992), 2501.
- (6) 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制御, 日本ロボット学会誌, 8-5 (1990), 541.