一つの駆動関節により連結した棒状2リンクの移動制御*

竹 田 年 延^{*1}, 油 田 信 一^{*2}

Control of a Connected Two-link Mobility by One Joint Actuator

Toshinobu TAKEI^{*3} and Shin'ichi YUTA^{*3} School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba,
1-1-1 Ten'noudai, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8573 Japan

A target of our research is a connected two-pole-link mechanism with one controllable joint. The one link is long and the another one is short. The long link is jointed to the center of the short link with an actuated joint. We call the long link upper-body, and the short one lower-body. In initial condition, upper-body stands vertically and lower-body lies on the ground. This mechanism is expected to be able to move by swinging its upper body and rolling its lower-body, from that initial posture. In this paper, we propose some control laws and algorithms, for the model of this under-actuated mechanism, and give means for application to a actual experimental machine. And, we show results of the moving motions in experiments by actual machine.

Key Words: Two-link-one-motor Robot, Dynamical Locomotion, Control of a Under-actuated Mechanism, Simulator for Actual Machine, Experiment in Actual Machine

1. ま え が き

二つの棒状のリンクよりなり、大きいリンクの端が小さいリンクの中心に繋がっている、そのジョイントにトルクを与える事のできるメカニズムを考える。小さいリンクを下体と呼び、大きいリンクを上体と呼ぶ。これらのリンクに重力下で地面と垂直な面で運動をさせる。初期状態では下体は地面に横たわっており、上体は垂直な姿勢で起きているとする。これらの2リンク間のジョイントを操作して、上体をほぼ垂直に保ったまま、下体を一端を支点に地面から起き上がらせ回転させた後、再び地面に着地させる。この動作には、不連続なシステムの変化が含まれており、また、その実現には劣駆動システムの制御が必要である⁽¹⁾。

本稿では、この制御対象について解析し、モデル化されたシステム上で目標の動作を実現する為の制御則を提案する。さらに、その制御則を実機へ実装する際の対応について述べ、実際に作製した実機上で行った実験結果について報告する。

2. 問 題 設 定

2.1 制御対象とするメカニズム 本研究で対象とするのは、二つの大小の棒状リンクと一つのアク

チュエータから構成されてる2リンク1モータ機構である。大きいリンク(上体)の一端が小さいリンク(下体)の中心に連結し、そのジョイントにはモータと減速機が取り付けられている。下体は地面に接しているが固定されてはいない。下体の両端は先を丸くしておき、下体が回転するとそれに伴い支点が移動する。メカニズムのモデルを図1に示す。

Fig. 1 A model of the considered robot

2.2 目標とする動作 このメカニズムに、上体を振る事で図2(a)~(f)に示す下体に垂直面内の起き上がりや回転の運動を行わせ、傾斜の無い平らな面で1次元の移動を実現する。

- (1) 静止している初期姿勢(図2(a))から上体を等速で倒し込む(図2(b)).
- (2) 上体が傾いて、静的に不安定に近い姿勢になったところで、上体を逆の方向へ振る。それにより、上体を起こす反作用で、下体を端点を接地させな

* 原稿受付 2006年5月29日。

^{*1} 筑波大学システム情報工学研究科(〒305-8573 つくば市天王台1-1-1)。^{*2} 正員、筑波大学機能工学系。

E-mail: takei@roboken.esys.tsukuba.ac.jp

Fig. 2 Proposed motion of the two link mechanism

がら地面から起き上がらせる (図 2(c)).

(3) 適切なトルクをジョイントに与える事により、下体を起こし回転させて、上体と下体が交差した後 (図 2(d)), 下体を再び地面に横たえさせる (図 2(e)). 下体の着地に当たっては角速度を十分に減速しソフトな着地を行なわせる。この間、上体には直立に近い姿勢を維持させる。

(4) 下体が着地した後、上体を再び垂直にし、静止させる (図 2(f)).

3. 目標動作の解析

図 2 の (a)(b)(f) は下体が横たわっていて、上体のみが運動する状態である。(c)(d)(e) は下体が一点で接地し上体と下体が共に運動している状態である。これらの動作を解析する為、各々の状態について運動方程式を求める。ここで地面と下体の間の角度を θ_1 とし上体と下体間の角度を θ_2 とする。

3.1 下体が横たわっている時の方程式 下体が地面に横たわっていて上体の 1 リンクのみ運動は

$$\tau = (I_2 + m_2 (rl_{g2} \sin \theta_2 + l_{g2}^2 + l_{g1} l_{g2} \cos \theta_2)) \ddot{\theta}_1 + (I_2 + I_r G_p^2 + m_2 l_{g2}^2) \ddot{\theta}_2 + m_2 l_{g2} g \cos \theta_2 \quad (1)$$

で記述される。ここで、各パラメータを表 1 に示す。

3.2 下体が一点で支えられている時の方程式 下体が端点支持の時は、二重振子にモデル化される。下体の両端は半径 r の円弧形状を持つので、下体の回転

Table 1 Parameters used in equation of motion

r	The radius of end of the lower link
l_{g1}	The half length between centers of two wheels
l_{g2}	The length from joint to gravity center of upper body
m_1	weight of lower body
m_2	weight of upper body
I_1	lower body moment of inertia
I_2	upper body moment of inertia
I_r	motor rotor moment of inertia
G_p	gear ratio

Fig. 3 A math model for the mechanism

に伴いその角度 θ_1 が変化すると接地点も $r\theta_1$ だけ移動する。この倒立振子モデルについてオイラ・ラグランジェ方程式により運動方程式

$$0 = \alpha_{11} \ddot{\theta}_1 + \alpha_{12} \ddot{\theta}_2 + h_1 (\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \theta_1, \theta_2) \quad (2)$$

$$\tau = \alpha_{21} \ddot{\theta}_1 + \alpha_{22} \ddot{\theta}_2 + h_2 (\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \theta_1, \theta_2) \quad (3)$$

が求まる。ここで、

$$\begin{aligned} \alpha_{11} &= I_1 + I_2 + m_1 (r^2 + 2rl_{g1} \sin \theta_1 + l_{g1}^2) \\ &\quad + m_2 (r^2 + 2rl_{g2} \sin (\theta_1 + \theta_2) + rl_1 \sin \theta_1 \\ &\quad + l_{g1}^2 + l_{g2}^2 + 2l_{g1} l_{g2} \cos \theta_2) \\ \alpha_{12} &= I_2 + m_2 (rl_{g2} \sin (\theta_1 + \theta_2) + l_{g1} l_{g2} \cos \theta_2 + l_{g2}^2) \\ h_1 &= m_1 g l_{g1} \cos \theta_1 \\ &\quad + m_2 g (l_{g1} \cos \theta_1 + l_{g2} \cos (\theta_1 + \theta_2)) \\ &\quad + (r \cos (\theta_1 + \theta_2) - l_{g1} \sin \theta_2) m_2 l_{g2} (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \\ &\quad + r \left(m_1 l_{g1} \cos \theta_1 \right. \\ &\quad \left. + m_2 (l_{g1} \cos \theta_1 + l_{g2} \cos (\theta_1 + \theta_2)) \right) \dot{\theta}_1^2 \end{aligned}$$

$$\alpha_{21} = I_2 + m_2 (rl_{g2} \sin (\theta_1 + \theta_2) + l_{g2}^2 + l_{g1} l_{g2} \cos \theta_2)$$

$$\alpha_{22} = I_2 + I_r G_p^2 + m_2 l_{g2}^2$$

$$h_2 = m_2 l_{g2} g \cos (\theta_1 + \theta_2) + l_{g1} l_{g2} m_2 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2$$

であり、 τ はジョイントに作用するトルクである。これらの式の中の各パラメータ物理量を表 1 に示す。

3.3 下体が横たわっている状態から一点支持状態へ移る条件 下体が横たわっている時、上体の姿勢と角速度、さらに、与えるトルクによっては下体が回転して起き上がり、一点支持の状態へと遷移する。

2リンクの運動方程式(2)(3)を、下体の角加速度 $\ddot{\theta}_1$ について解くと

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{1}{D}(-h_1\alpha_{22} - \alpha_{12}(\tau - h_2)); \quad (4)$$

$$D = \alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha_{12}\alpha_{21}$$

を得る。この式に下体が横たわっている(すなわち $\theta_1 = 0, \dot{\theta}_1 = 0$)として、上体のみの運動方程式(1)から求まる $\ddot{\theta}_2$ と θ_2 を代入して得た、下体の角加速度が

$$\ddot{\theta}_1 > 0 \quad (5)$$

となる時、 θ_1 が正の値となり、下体が地面に横たわっている姿勢から、左回りに起き上がり一点支持状態へと遷移する。一方、右回りに起き上がる条件は、下体が横たわっている条件を($\theta_1 = 0 + \pi, \dot{\theta}_1 = 0$)として計算した下体の角加速度が $\ddot{\theta}_1 < 0$ となる時である。

3.4 一点支持状態からの着地 一点支持の状態において θ_1 が増加して $\theta_1 = \pi$ となるのが着地である。下体の着地時に、下体の速度が大きいと、下体に大きな着地衝撃が加わり、機体には跳ねが生じる。従って、着地の直前には、下体の角速度を十分に減速しておく必要がある。着地する下体の角速度が十分に小さく、跳ね返りがないとすれば、着地瞬間に θ_1 は $\theta_1 = \pi, \dot{\theta}_1 = 0$ に固定され、運動方程式は(2)(3)式から(1)式へ遷移する。

4. 制御方法の提案

このメカニズムのジョイントのモータトルクを適切に制御する事により、節2.2で示した目標動作を行わせる。ここでは、そのための制御の方法を提案する。

4.1 概要

1. 下体が横たわっている状態：上体が垂直に立っている初期姿勢から、上体を等角速度制御して踏切条件まで前へ傾ける。この間上体は一定速度で回転させる。これを実現する制御則を制御モード1と呼ぶ。
2. 一点支持状態への踏み切り：上体が前方に倒れ、自然に一点支持状態となる姿勢に近づいたところに踏切条件を定める。この姿勢で、次の倒立振子状態の制御則を適用すると、ジョイントには上体を振り上げるトルクが与えられるので、自動的に踏み切る事になり、一点支持状態に遷移する。なお、この踏切条件は次の一点支持状態の初期条件

となるので、劣駆動倒立振子の制御パラメータと合わせて決定する必要がある。

3. 一点支持の状態：システムを式(2)(3)で表される非線形な劣駆動である倒立二重振子として制御し、上体の姿勢維持と下体の回転を行わせ、踏切条件の状態から着地状態へ移行させる。この非線形システムに対し、 $\theta_1 - \pi$ 間の関係を部分線形化し、下体のPD制御を行って⁽²⁾下体の姿勢を角度 π に変化させる。ここで、制御ゲインは、下体が軟着陸を行い、かつ、踏切条件と合わせて、着地時の上体の姿勢と速度が、その後の安定を維持できる範囲に入るように決定する。機体が一点支持状態の間の制御を制御モード2と呼ぶ。
4. 着地時の衝撃緩和：制御モード2では、 $\theta_1 = \pi$ となる着地時に、同時に下体の地面に対する角速度 $\dot{\theta}_1$ がほぼ0となるように制御する。しかし、着地時には若干の速度が残り、着地直前で θ_1 は完全に0ではない。そこで、着地時に $\dot{\theta}_1$ が突然0となる事のショックを上体を受ける影響を軽減する為、着地の瞬間にはジョイントの摩擦補償のみを行って上体がフリーに動く状態とし、それにより上体を受ける衝撃を軽減する。
5. 下体が横たわった状態：上体をPD制御し、垂直な姿勢で静止させる。下体が地面に付いた後で上体の姿勢を垂直にする制御則をモード3と呼ぶ。

4.2 制御モード2 制御モード2は劣駆動なメカニズムの制御である。ここでは、下体の部分線形化⁽²⁾の手法を適用し、下体のみをフィードバック制御する。いま、ジョイントに加えるトルクを

$$\tau = \frac{-\alpha_{22}h_1 + \alpha_{12}h_2}{\alpha_{12}} + \left(\alpha_{21} - \frac{\alpha_{11}\alpha_{22}}{\alpha_{12}} \right) u \quad (6)$$

で与えるとすると、式(2)(3)より

$$\ddot{\theta}_1 = u \quad (7)$$

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{-h_1 - \alpha_{11}u}{\alpha_{12}} \quad (8)$$

となり、 θ_1 の動きは線形二次の方程式を満たす。ここで、下体を水平な状態 $\theta_1 = 0$ から端点を支点にして起こし回転させ再び地面に軟着地($\theta_1 = \pi$)させる為、 u を θ_1 のPD制御で与えることとし

$$u = -k_p(\theta_1 - \pi) - k_v\dot{\theta}_1 \quad (k_v > 0, k_p > 0) \quad (9)$$

とすると $\ddot{\theta}_1$ は

$$\ddot{\theta}_1 = -k_p(\theta_1 - \pi) - k_v\dot{\theta}_1 \quad (10)$$

なる式で与えられる運動をする。モード2へと遷移した時間を0とし、下体が回転後、再び地面に着く時間

を T とする。着地時の条件は

$$|\dot{\theta}_1(T)| < V_{min}$$

である。ここで、 V_{min} は着地時の下体の許容速度である。

この制御では、この条件と、さらに、着地時まで上体が上を向いた姿勢を維持し、着地後に安定して静止できる範囲に入っているように、フィードバックパラメータ k_p と k_v が選ばれる必要がある。

Fig. 4 θ_1 $\dot{\theta}_1$ θ_2 $\dot{\theta}_2$ of simulation results in model1 and mode2

4.3 制御モード2に於ける適切な制御パラメータと踏切条件の探索 上述したモード2の制御では下体はフィードバック制御されているが、上体は式(6)で与えられるトルクを式(3)に与えて、式(2)と式(3)を $\ddot{\theta}_2$ 及び $\dot{\theta}_2$ について解いた

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{-h_1 - \alpha_{11}(k_p(\theta_1 - \pi) - k_v\dot{\theta}_1)}{\alpha_{12}} \quad (11)$$

$$\dot{\theta}_2 = \int_0^T \ddot{\theta}_2 dt + \dot{\theta}_2(0), \quad \theta_2 = \int_0^T \dot{\theta}_2 dt + \theta_2(0) \quad (12)$$

に従った運動を行う。ここで、上体の部分線形化フィードバック制御のゲイン k_p と k_v 、及び、この制御の初期条件である、制御モード1から制御モード2への踏切条件 $\dot{\theta}_2(0)$ と $\theta_2(0)$ を注意深く調整し、下体が着地する時間 T において、 $\dot{\theta}_2(T)$ と $\theta_2(T)$ が適切な範囲に入るように定める。ここで決定された、 $\dot{\theta}_2(0)$ が制御モード1において上体を傾倒させる際目標角速度となる。

これらの4つのパラメータは解析的に定める事はできないので、シミュレーションによる探索を行う。探索により求めた適切なフィードバックゲインと踏み切り条件を用いて制御した時の、上体と下体の角度及び角速度の一例を図4に示す。この例では着地時に、下体の角速度は十分減速され、上体はほぼ直立で角速度が小さくなっている。

Fig. 5 tarjectories of converge at $(\pi/2, 0)$ with a limit of lower body lying on the ground in a graph of θ_2 and $\dot{\theta}_2$ on mode3

4.4 制御モード3 上体の角度 θ_2 に対し垂直な姿勢を目標値として与え、フィードバック制御を行う。ジョイントに与えるトルクは

$$\tau = -k_q \left(\theta_2 + \frac{\pi}{2} \right) - k_r \dot{\theta}_2, \quad (k_q > 0, k_r > 0) \quad (13)$$

である。着地時の、上体の傾き $\theta_2(T)$ や角速度 $\dot{\theta}_2(T)$ が大きいとフィードバック制御により垂直状態に静止させる間に、下体が再び浮き上がったり、また、さらにそれより機体が転倒する可能性がある。上体の式(13)による制御中に下体が再び浮いてしまう姿勢及び角速度の条件は式(4)と式(13)から計算できる。

その条件を満たす範囲の一例を $\theta_2 - \dot{\theta}_2$ 位相面上に示したのが図5の太い線で囲まれた部分Bである。一方、フィードバックゲイン k_q k_r を定めると、位相面上のある点を初期位置として上体にPD制御を行った時に垂直に静止するまでの軌跡は式(1)と式(13)より求められ、この例では、図5中のCで与えられる。範囲Bの中からはみ出ない軌跡Cが、下体が浮かずに上体が垂直に静止する軌跡である。

この条件より、着地時の姿勢と角速度を始点として、それが垂直に静止するまでの軌跡が、範囲Bからはみ出ないPD制御ゲイン k_q と k_r を決定する。

5. 実機への対応

5.1 詳細なシミュレータによるパラメータ決定 実際のシステムには、モデルにはない要素を含み、モデルとずれが生じる。しかし、その影響はそれ程大きくないと仮定できる。とくに、上で提案した方法は、基本的にフィードバック制御によっているので多少の変動は吸収して制御が実現されると期待される。しかし、モード2の劣駆動系の制御の部分には、オープンループの要素が含まれているので、これに対しては適

Fig. 6 Mechanical model of two link mechanism without touching ground

Fig. 7 Mechanical model of two link mechanism when touching ground

切な考慮が必要である。

そこで、原則として、上に提案した制御法を適用し、モード2の制御におけるパラメータ(k_p, k_v)とモード1からモード2へ遷移する踏切条件を実機にあうように適切に定めることによって制御を行う事にする。すなわち、これらのパラメータの探索において、十分に詳細なシミュレーションを行って、適切なパラメータを決定する事とする。

なお、実機のジョイント間に存在している摩擦は、実測により摩擦トルクを求めて、各制御則で算出したトルクからその分を加えたトルクを制御の段階でジョイントに与える事とする。

実機を対象とする時、上記のモデルとの差異の比較的大きな要素は次に述べる項目である。ここでは、それらに対応するシミュレーションの方針を示す。

5.2 運動方程式の拡張 制御法の提案では、下体は常に地面に寝ているかあるいは一点で支持されているとした。しかし、実機には、着地時にはバウンドがあり上体と下体が共に、宙に浮く間が生じる。従って、シミュレーションの為のモデルは、下体が寝て地面に接している状態と一点接地の状態、そして下体のどの点も地面に触れず宙に浮いている状態とその間の遷移がシミュレートできなければならない。

これらの3つの状態を連続してシミュレーションをする為には、床に対して固定点を持たない重力場の浮遊2リンクの運動方程式に、各状態での拘束条件によって働く力と衝突で発生する力を追加し足し合わせ

る⁽⁴⁾事でシミュレーションを行う。また、下体リンクと地面との着地衝突としてシミュレーションする必要がある。地面と下体の間の弾性を局所的バネ・ダンパ系として取り扱う。

5.2.1 宙に浮いている時 2つのリンクが宙に浮いている時、重心回りの各リンクの並進と回転に関する運動方程式は

$$I_1 \ddot{\theta}_1 = -\tau \quad (14)$$

$$I_2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) = \tau + P_{12} \times F \quad (15)$$

$$m_1 \ddot{P}_1 = -F - \begin{bmatrix} 0 \\ m_1 g \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$m_2 \ddot{P}_2 = F - \begin{bmatrix} 0 \\ m_2 g \end{bmatrix} \quad (17)$$

で与えられる。ここで、上の式で用いられているパラメータとジョイント間に働く力は

$$P_1 = \begin{bmatrix} x_{g1} \\ y_{g1} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$P_{12} = l_{g2} \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$P_2 = P_1 + P_{12} \quad (20)$$

$$F = \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right) \ddot{P}_{12} \quad (21)$$

である。

5.2.2 バネ・ダンパを持つ一点接地時の運動方程式 地面とリンクの衝突時の運動は、接触点に垂直軸にはバネ・ダンパモデル(図7)に基づいて計算される反発力、及び、水平軸には滑べらずに転がる拘束力 F_1 を、与えてシミュレーションを行うのが良い。この時、並進及び回転の運動方程式(22)~(25)となる。

$$I_1 \ddot{\theta}_1 = -\tau + p_1 \times F \quad (22)$$

$$I_2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) = \tau + p_{12} \times F_2 \quad (23)$$

$$m_1 \ddot{P}_1 = F_1 - F_2 - \begin{bmatrix} 0 \\ m_1 g \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$m_1 \ddot{P}_2 = F_2 - \begin{bmatrix} 0 \\ m_2 g \end{bmatrix} \quad (25)$$

ここで、各パラメータ及びジョイントと接地点に働く力は

$$p_1 = l_{g1} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$p_{12} = l_{g2} \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$P_0 = \begin{bmatrix} -r\theta_1 \\ r + y_0(t) \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$P_1 = P_0 + l_{g1} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$P_2 = P_1 + l_{g2} \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (30)$$

である。\$y_0\$ は

$$\begin{aligned} (m_1 + m_2)\ddot{y}_0 &= -k_{cs}(y(0) - y_0) - k_{cd}\dot{y}_0 \\ &\quad - (m_1 + m_2)g - m_1 \frac{d^2}{dt^2}(l_{g1} \sin \theta_1) \\ &\quad - m_2 \frac{d^2}{dt^2}(l_{g1} \sin \theta_1 + (l_{g1} \sin \theta_1 + l_{g2} \sin(\theta_1 + \theta_2))) \end{aligned} \quad (31)$$

を解いた結果求まる。

5.3 バックラッシュ、時間とデータの標準化と量子化、アクチュエータの制御方式の取り扱い ジョイント部の主にモータの減速機内部の歯車の噛み合いの遊びに由来するバックラッシュは、メカニズムをモータ側と負荷側に分け、モータ慣性系と負荷慣性系の二慣性系としてモデル化できる。⁽³⁾

実機の制御システムでは、計算機によりセンサデータを読み、アクチュエータを制御する為、計算機への入力と出力に単純な制御周期の時間サンプリングや計算による時間遅れ、デジタル量子化が存在する。そこで、これらを含んだシミュレータを作成し、シミュレーションを行う。

6. 実ロボットによる検証実験

上に提案した制御法の有効性を検証する為、実験用の2リンクロボットを構成して実験を行った。

6.1 実験システムの構成

6.1.1 機体のメカニズム 一次元の動作を行う2リンク1ジョイントのメカニズムのロボットを製作した。本機の外見写真を(図8)に示す。上体は長さ24cmの一本のリンクにより構成され、その下端にジョイント軸がある。下体は、軸の両側に固定された平行な二つの棒状のリンク(長さ約10cm)よりなり、それぞれのリンクの両端には、地面の多少の凹凸や着地衝撃を吸収する為の回転しないスポンジタイヤを取り付けた。この構造により、各軸は、正面から見ると常に水平に保たれており、側面から見ると下体は二個のタイヤで地面と接している。上体に取り付けたモータのトルクはベルトによってジョイントに作用し側面方向の運動が発生する。

6.1.2 駆動系と制御系および姿勢センサ 上体と下体の間のジョイントの駆動には Maxon 社製の DC モータ [24V, 20W] と同社製のギヤヘッド [減速比 84:1] を用いた。上体の地面に対する角度は、上体に取り付けた振動ジャイロの計測値を積分する事により測定

Fig. 8 The fabricated mechanism for experiment

し、下体と上体の間の角度は、モータに付いているエンコーダにより計測する。また、下体と地面の角度はこれらの二つのセンサデータの差として算出する。

コントローラには筆者らの研究室で開発された12ビットのADコンバータとロータリエンコーダ用パルスカウンタ及びPWMジェネレータを有するシングルボードコントローラを用いた。モータの出力トルクの制御はフィードフォワード計算に基づいて0から255までの256段階に量子化されたPWM比を与える事により、モータ電流を制御して実現する。その制御周期とセンサデータのサンプリング周期は5ミリ秒とした。

6.2 物理パラメータの測定とシミュレータの作成

6.2.1 モデル化とパラメータ測定 製作したロボットの物理モデル図6の剛体の浮遊2リンクと図7の下体にバネ・ダンパをもつモデルのパラメータの測定を行った。下体は、車輪の幅を持つ先の丸くなった剛体リンク、上体は柱状の剛体リンクとしてモデル化し、それぞれの重心位置と慣性モーメント及び長さとし、重さを計測及び計算により求めた。下体と地面の接触部分は、下体が跳ね返る距離が実機と同等な弾性を持つバネ係数とダンパ係数(図7)を与えた。これらモデル化に用いられた各々のパラメータ値を表2に示す。

ジョイント軸の回転に伴う摩擦トルクは、ジョイント角速度 $\dot{\theta}_2$ の関数として実測した結果を7次の関数に近似してモデル化した。ギヤヘッドの仕様よりシミュレーションにおけるバックラッシュの大きさは1[deg]

Table 2 Parameter Values used in equation of motion

Symbol	Numerical value	unit
r	5.4/2	cm
l_{g1}	3.5	cm
l_{g2}	15.5	cm
m_1	292	g
m_2	977	g
I_1	5045.78	gcm^2
I_2	69097.11	gcm^2
I_r	10.4	gcm^2
G_p	84:1	
kcs	35000000	$\frac{g}{sec^2}$
kcd	108500	$\frac{g}{sec}$

とした。

6.2.2 電子系のシミュレーション 実機では5msec 間隔の制御ループにより、センサデータの観測及び制御出力の計算を行う。従って、シミュレータでも、計算機からの出力と入力とは5msec 間隔で行い、その間は、出力は保持してシミュレーションした。アクチュエータは、量子化したPWM 比を与えてアクチュエータに流れる電流とトルクのシミュレーションを行った。ただし、計算機への入力から処理、そして出力は時間遅れが0とし、また、モータのエンコーダについては、十分な分解能があるので、連続として扱った。

6.3 シミュレータによる制御パラメータの決定と結果 構築した詳細なシミュレータを用いて、劣駆動メカニズムを制御する為の適切なパラメータ、モード1から2へと遷移する踏み切り条件である上体の角度と角速度、および、モード2の二つの制御パラメータ、の計四つの探索を行った。シミュレーションの結果、一般にモード1からモード2に遷移する時の機体の姿勢や角速度が、一步の移動の正否に大きく敏感に影響するが、ゲインの小さな差異が動作や着地姿勢に大きくは影響しない踏切条件も存在する事が分かった。そこで、そのような踏切条件を採用して制御系を構成した。シミュレータによる探索の結果、得た踏切条件のパラメータは $[\dot{\theta}_2 = 30 \quad \theta_2 = 106.5 \quad K_p = 29 \quad K_v = 9]$ である。このパラメータを用いた時のモード1の詳細なシミュレーション結果を図9に示し、制御モード2と制御モード3の詳細なシミュレーション結果の一例を図10に示す。詳細なシミュレーションの結果の図10には、制御系の設計で対象としていないバックラッシュやタイヤのスポンジによる振動の影響が高周波の小さな振幅で現れている。しかし、その動きは踏み切ってからの劣駆動倒立振子の運動全体には大きな影響を及ぼしておらず、特に制御系の設計には考慮しなくても問題ないと考えられた。

6.4 実機実験の結果と考察 シミュレーションで得られたパラメータを用いて制御系を構成し、実機に実装した。しかし、それだけでは実機に安定した一步の動作を行わせることはできなかった。そこで、さらに実機上で実験を行いながら若干のパラメータを探索をして僅かな調整を行った。その結果、実機の制御用のパラメータを $[\dot{\theta}_2 = 25 \quad \theta_2 = 105 \quad K_p = 29 \quad K_v = 9]$ とすることにより一步の動作が実現された。実機実験の結果の一例を図12に示し、図13にその時のスナップショットを表示する。シミュレーション結果と実機の振るまいは、移動の周期やPWM 値、上体と下体の角度と角速度が殆ど同じである事が分かる。ただし、現段階では実機がシミュレータとほぼ同じに振るまい、一步移動後に安定に完全に止まる事ができるのは繰り返し行なった実験のうち30%程度に留まっている。これは、サンプル周期を5m 秒とした事に等による実験毎に僅かに異なるモード2の初期位置の変動、制御器やバッテリーとロボットを繋ぐコードの影響等が理由と考えられる。制御周期を短くし、電源やコントローラを搭載した外部とのケーブル接続のない実機、及び適切な機体パラメータを持つ実機を作る事で、現在よりも確実な動作が実現可能と考える。

結論として詳細なシミュレータを用いた探索を行った上での、実機を用いたパラメータ探索は、ごく少数回の実験により実現されており、本稿で提案した制御則とアルゴリズム、及びシミュレータを用いた実機の制御パラメータの探索手段が有効である事が示されたと考えている。

7. ま と め

本稿では、単純な2リンク1ジョイント(アクチュエータ)機構である劣駆動システムに、一步の移動動作を実行させるための制御の方法を提案した。

このメカニズムを一步移動させる為には、図2に示すとおり、上体を倒し込み、適切なタイミングで上体を逆向きに振り下体を引き上げる。次に、上体が起き上がった姿勢を維持したまま下体を回転させ、下体を再び地面に着地させて、上体と下体共に静止する。

この動作を、下体が横たわっている状態で上体の1リンクを傾ける制御をするモード1、下体が一点接地になる倒立振子状態で、上体を振り上げて下体を引き上げ、上体を垂直に維持しながら下体を回転させる制御をするモード2、下体が回転後に再び横たわった状態で、上体を垂直に静止させる制御をするモード3に分けて、順次、制御することにより目標動作を実現する方法を示した。制御モードを切り替える適切な条件

Fig. 9 A resultant motion of the model1 in simulation

Fig. 10 A simulation result of Mode-2 and Mode-3

Fig. 11 A experimental result of the Mode-1 in real machine

Fig. 12 A experimental result of Mode-2 and Mode-3 in real machine

Fig. 13 The snapshots of an experiment of the successful motion by the real machine.(Number shows the time (second) after starting motion.)

と制御パラメータは、制御入力を含めた力学モデルのシミュレーションを繰り返す事によって決定する。

提案した制御手法の有効性を検証する為、機構を有する実機を製作した。実機と同じ振る舞いをする詳細なシミュレータを制作し、制御で用いるパラメータを決定した。実機実験の結果、四分の一の成功率ではあるが、このメカニズムを有する実機に一步を移動させる事ができ、提案した制御方法が有効である事が示された。もちろん、この種のメカニズムの制御可能性や容易さは対象とするシステム（機体）の形状や大きさ等のボディパラメータに大きく依存する。本研究では、このようなメカニズムの制御の一例を実機で実現する事を目的として若干の試行錯誤に基づいて定めた機体を例として検討を加えた。制御が容易となる適切なパラメータの選択法については現在引き続いて研究中である。

文 献

- (1) Takei, Toshinobu, Yuta, Shin'ichi., An underactuated two-link-one-motor robot with dynamic mobility, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005)* pp.3510-3515.
- (2) Mark W, Spong., The swing up control problem for the acrobot, *IEEE Control Systems Magazine*, Vol.15, No.2, (1995), pp.49-55.
- (3) Umida Eijirou., Control & Analysis of Torsional Vibration with Backlash, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.13, No.8, pp.1073-1077, 1995 (in Japanese)
- (4) Yoonkwon.Hwang, et al., Development of High Speed Dynamics Simulator for Humanoid Robots, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.23, No.1, pp.113-123, 2005 (in Japanese)