

ゼロダイナミクスを利用した Acrobot の跳躍着地運動の制御

片岡泰之 中浦茂樹 三平満司 (東京工業大学)

Jumping and Landing Control for the Acrobot utilizing Zero Dynamics

*Yasuyuki Kataoka, Shigeki Nakaura, and Mitsuji Sampei
(Tokyo Institute of Technology)

Abstract– This paper proposes control strategy to realize jumping and landing motion for the Acrobot. The first link of the Acrobot is supposed as an upper body of human, and second link as a lower body. Note that this system is not only an underactuated but also a variable constraint system. The proposed control strategy for this nonlinear system is based on output zeroing control. First, the desired motion is divided into 5 phases. Then, output function is selected respectively based on intuition. Although the behavior of zero dynamics differs in each phase, simulation shows that desired motion is attained with utilizing zero dynamics. Finally, the experimental result shows that desired jumping motion was realized.

Key Words: nonlinear control, underactuated system, variable constraint, zero dynamics, Acrobot

1 はじめに

人間の歩行形態は動歩行と静歩行に分類される。静歩行は静力学的なつりあいを保つ歩行形式であるのに対し、動歩行は重心位置の変化による重力効果や慣性の効果を利用する、ある意味で不安定な歩行様式である。人間の走行は、動歩行に分類されるのに加えて宙に浮いている状態を含んでおり、跳躍着地運動の繰り返しであると解釈できる。このような背景から本論文では、跳躍着地制御問題に注目する。

跳躍着地制御問題は、特に Raibert らによる Leg Lab. が有名であり、実験的にも連続跳躍制御を実現している¹⁾。しかし、この跳躍系は直動アクチュエータで高さを、回転アクチュエータで姿勢を制御しており、制御問題としては比較的容易なシステムとなっている。

それに対し本論文では、制御対象として一つのアクチュエータしか持たない Acrobot に、非線形制御理論研究の観点から注目する。工学的観点からは、自重を低減させることによって跳躍に必要な最大トルクを抑えることができ、結果としてエネルギー消費を低減させる利点が挙げられる。

Acrobot の跳躍着地運動は、劣駆動であるだけでなく可変拘束な運動となるので制御問題は難しい。これに対し、Berkemeier の研究²⁾では Acrobot に振動的な運動をさせることによって跳躍が可能であることを示しているが、離陸の方向を制御できない等の問題点があった。

そこで本論文では、Acrobot の第一リンクを人間の下半身、第二リンクを上半身、アクチュエータによる入力を腰の回転と考え、人間の実際の跳躍着地運動から推察される直感的な出力関数に基づく、出力零化制御による制御戦略を提案する。そして、跳躍着地運動が実現可能であることをシミュレーションによって示す。最後に、跳躍運動に関しては実験検証も行い、理論の有効性を示す。跳躍時に用いる同様の制御方法は、人間型ロボットの走行研究⁴⁾の走行制御の根幹を成しており、実験検証は非常に興味深い。

本論文の構成は以下の通りである。第二節では、制御対象の運動方程式を導出するために、まず一連の跳躍着地運動をフェイズに分割する。また、可変拘束なシ

ステムに対して冗長な座標を導入することによってモデルを二つ導出し、跳躍着地運動のダイナミクスを定式化する。第三節では、跳躍着地運動を実現するための制御戦略を提案する。第二節で設定した各フェイズにおいて、近似や軌道計画を用いない出力零化制御を施すことによって、目標の制御を実現する。第四節では、シミュレーションによって制御戦略の有効性を示す。第五節では、提案する制御理論の有効性を確認するための実験環境及び検証結果を示す。最後に、第六節において結論を述べる。

2 制御対象及び運動方程式

制御対象として用いる Acrobot のモデルを Fig. 1 に、各物理パラメータを Table 1 に示す。

本節では、まず一連の跳躍着地運動を分割するフェイズを定義し、次にそのフェイズに応じた運動方程式を導出する。後に示すように、跳躍着地運動は拘束条件が変わる運動なので、2つのモデルを導出する必要がある。

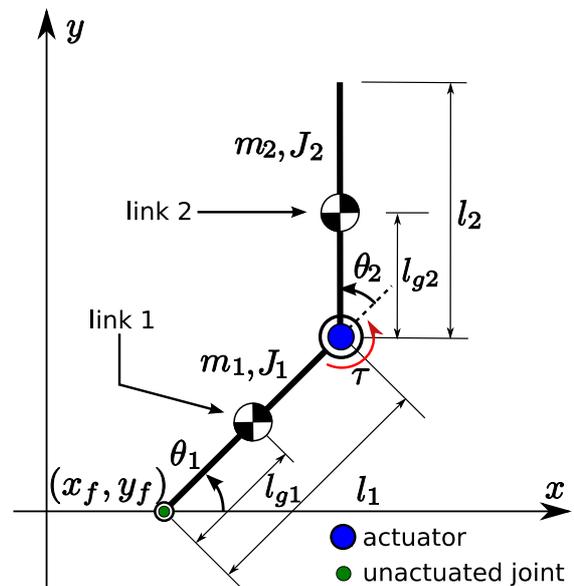


Fig. 1: 制御対象とパラメータ

Table 1: Acrobot のパラメータ

m_i	: 第 i リンクの質点の質量
J_i	: 第 i リンクの重心回りの慣性モーメント
l_{gi}	: 第 i リンクの根本から重心までの長さ
l_i	: 第 i リンクの長さ
(x_f, y_f)	: 第 i リンクの根本の座標
θ_1	: 第 1 リンクの地面からの偏角
θ_2	: 第 2 リンクの第 1 リンクとの相対角
τ	: 関節に加えるトルク
g	: 重力加速度

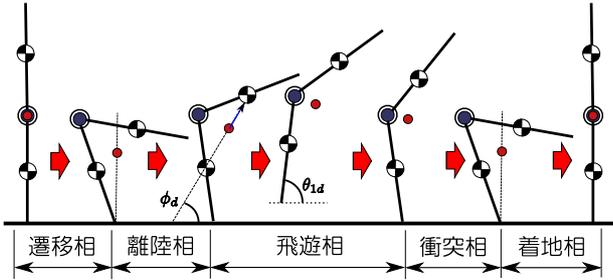


Fig. 2: 跳躍運動のフェイズの定義

2.1 フェイズの定義

Fig. 2 で示されるような一連の跳躍着地運動は可変拘束な運動であるので、制御という観点からみると Acrobot の跳躍着地運動を以下の 5 つのフェイズに分割する必要が考えられる。

1. 遷移相 Acrobot が直立した状態から離陸相の初期姿勢に状態を遷移させるフェイズ
2. 離陸相 安定な状態から宙に飛び立つフェイズ
3. 飛遊相 Acrobot が宙に浮いており、支持脚が地面に接地しないフェイズ
4. 衝突相 着地した瞬間の衝撃の影響により、速度が不連続になるフェイズ
5. 着地相 再び直立の姿勢に戻るフェイズ

遷移相、離陸相、着地相においては、Acrobot の足先位置で位置拘束を受けている。それに対し、飛遊相では足先位置を含めて慣性座標からの相対運動を考慮する必要があるため、モデルが切り替わることになる。そこで以下ではまず、この二種類のモデルのダイナミクスを導出する。次に衝突相におけるダイナミクスを定式化する。

2.2 遷移相、離陸相、着地相における運動方程式

Acrobot の足先が地面と接しているときは、足先位置で横滑りをすることがないと仮定する。このとき、一般化座標 $\theta = [\theta_1, \theta_2]^T$ を用い、オイラーラグランジの方法で運動方程式を導出する。

$$M_A(\theta)\ddot{\theta} + C_A(\theta, \dot{\theta}) + G_A(\theta) = F_A\tau \quad (1)$$

ただし、 $M_A(\theta) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, $C_A(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$, $G_A(\theta) \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$, $F_A \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$, $\tau \in \mathbb{R}$ は、それぞれ慣性行列、コリオリ・遠心力項、重力項、入力行列、入力

トルクを表す。Acrobot の足先が地面と接しているときのアファイン系を式 (2) と表記する。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = f_A(\theta, \dot{\theta}) + g_A(\theta)\tau \quad (2)$$

$$\begin{cases} f_A(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ -M_A(\theta)^{-1} (C_A(\theta, \dot{\theta}) + G_A(\theta)) \end{bmatrix} \\ g_A(\theta) = \begin{bmatrix} 0 \\ M_A(\theta)^{-1} F_A \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

式 (2) はベクトル場が可積分ではなく、相対次数 4 を達成する出力関数が存在しないので、厳密な線形化は不可能である。これは、フロベニウスの定理に基づいて証明できる。

2.3 飛遊相における運動方程式

Acrobot が宙に浮いている飛遊相では、重力以外の外力が働かないと仮定する。空中での跳躍運動では、足先位置における位置拘束が外れるため、足先座標を含めた一般化座標 $q_r = [x_f, y_f, \theta_1, \theta_2]^T$ を用いる。式 (1) と同様に運動方程式を導出する。

$$M_B(q_r)\ddot{q}_r + C_B(q_r, \dot{q}_r) + G_B(q_r) = F_B\tau \quad (4)$$

ただし、 $M_B(q_r) \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$, $C_B(q_r, \dot{q}_r) \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$, $G_B(q_r) \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$, $F_B \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$, $\tau \in \mathbb{R}$ とする。Acrobot が空中で運動している時のアファイン系を式 (5) と表記する。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_r \\ \dot{q}_r \end{bmatrix} = f_B(q_r, \dot{q}_r) + g_B(q_r)\tau \quad (5)$$

Acrobot が空中にあるときは、角運動量保存則の拘束を受ける。なぜなら、重力は重心の放物運動にのみ寄与し、重心回りのモーメントには寄与しないためである。数学的には、重心回りの Acrobot の角運動量の時間微分が循環座標系に一致することから証明できる⁹⁾。

2.4 拘束力の導出

本節では、Acrobot の足先が地面と接しているときの拘束力を陽に求め、離陸相から飛遊相へ切り替わる条件や、Acrobot が地面と接しているときに横滑りしない条件を定式化する。足先での位置拘束は、

$$N(q_r) = [x_f \quad y_f]^T = 0 \quad (6)$$

と表される。ここで、Acrobot と地面の間に発生する拘束力を $\lambda = [\lambda_x, \lambda_y]^T \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ とする。ただし、 λ_x , λ_y はそれぞれ拘束力の水平成分、鉛直成分を表す。Lagrange の未定乗数法を用いることによって、拘束力を陽に求める。式 (6) と等価なノンホロノミック拘束の式を含めると、Acrobot が地面と接しているときの、拘束力を陽に考慮した運動方程式は式 (7) で表される。

$$\begin{cases} M_B(\theta)\ddot{q}_r + C_B(\theta, \dot{\theta}) + G_B(\theta) = F_B\tau + J^T\lambda \\ J\dot{q}_r = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}\lambda &= -X(\theta)^{-1} \left\{ JM_B(\theta)^{-1} Y(\theta) + \dot{J} \dot{q}_r \right\} \\ X(\theta) &= JM_B(\theta)^{-1} J^T \\ Y(\theta) &= F_B \tau - C_B(\theta, \dot{\theta}) - G_B(\theta)\end{aligned}\quad (8)$$

この拘束力を用いて、以下の二つの条件を定式化出来る。

離陸相から飛遊相へ移行する瞬間は、ダランベールの定理より λ_y が減少して重力を越えた瞬間である。よって、Acrobot が離陸する瞬間は、

$$\lambda_y = 0 \quad (9)$$

と表される。

また、Acrobot が地面と接しているときに横滑りをしない条件も定式化できる。拘束力がフリクションコーンを逸脱しないことはクーロンの摩擦法則より、

$$|\lambda_x| \leq \mu \lambda_y \quad (10)$$

と表される。ただし μ は Acrobot の足先と地面との間の素材に依存する静止摩擦係数を表す。

2.5 衝突相における運動方程式

まず、Acrobot が地面に着地するときは、完全非弾性衝突を仮定する。Acrobot が地面に着地した瞬間、インパルス拘束(撃力)によって速度が不連続になる。着地前の速度と着地後の速度をそれぞれ q^- , q^+ とし、拘束インパルスを λ_I と表す。このとき式(8)を用いて拘束インパルスと拘束インパルスを受けた後の速度は、式(11)となる。

$$\begin{cases} \lambda_I = -X(q)^{-1} J(q) \dot{q}^- \\ \dot{q}^+ = \dot{q}^- + M_B(q)^{-1} J^T(q) \lambda_I \end{cases} \quad (11)$$

3 制御戦略

本節では、第2節で定義した各フェイズに対して制御則を定式化する。厳密な線形化が不可能な制御対象に対して、近似を用いずにフィードバック制御をする入出力線形化に基づく出力零化制御によって、目標の制御を達成する。

3.1 遷移相

遷移相での制御目標を以下のように設定する。

遷移相での制御目標

Acrobot を平衡多様体上でバランス安定化する

ここで Acrobot の平衡多様体とは、重心の x 成分が足先の x 成分に一致していて、かつ x 成分の速度が 0 の状態を意味する。

3.1.1 出力関数

遷移相では、Acrobot のバランス安定化をするために角運動量に注目した出力関数を用いる³⁾。

$$h_1 = L + a_1 p(\theta) \quad (12)$$

ここで L は θ_1 回りの Acrobot 全体の角運動量、 a_1 は制御則の調整パラメータ、 $p(\theta)$ は

$$L = h(q) \dot{p}(\theta) \quad (13)$$

で表されるパラメータである。 θ_1 回りの角運動量は、慣性行列の 1 行目の成分を用いて

$$L = M_{11}(\theta) \dot{\theta}_1 + M_{12}(\theta) \dot{\theta}_2$$

となる。さらに、 $h(q)$ は以下の形で表される。

$$h(q) = \alpha + \gamma + 2\beta \cos \theta_2 \quad (14)$$

α, β, γ は物理パラメータで表現される定数であり、

$$\begin{cases} \alpha = m_1 l_{g1}^2 + J_1 + m_2 l_1^2 \\ \beta = m_2 l_1 l_{g2} \\ \gamma = m_2 l_{g2}^2 + J_2 \end{cases}$$

である。 $p(\theta)$ は以下の形で表される。

$$p(\theta) = \theta_1 + \int_0^t \frac{\gamma + \beta \cos \theta_2}{\alpha + \gamma + 2\beta \cos \phi} d\theta_2 + c \quad (15)$$

$$= \theta_1 + \omega(\theta_2) \quad (16)$$

設計自由度を表している積分定数 c を設計することで、平衡多様体上の任意の安定な姿勢に制御することができる。例えば直立に安定化させたい時は、 $\theta_1 = 0, \theta_2 = \frac{\pi}{2}$ を式(16)に代入した際にその値が 0 になるように積分定数を設計すれば良い。姿勢を遷移させるためには、 θ_2 を三次関数の目標軌道に追従制御させればよい。

ここで、式(12)は次のような物理的な解釈ができる。出力関数に含まれる角運動量の項を零化することは、速度を止めることである。また、 θ_1 回りの角運動量の一回微分は重心の x 座標の定数倍に一致することが解析的に示される。つまり、重心の x 座標を足先の x 座標に制御するようにフィードバックされると解釈できる。

3.1.2 部分線形化

出力関数 h_1 は 3 次の相対次数を持つ。よって、入出力線形化のための部分線形化フィードバック入力は、Lie 微分を用いると式(17)となる。

$$\tau = -\frac{1}{L_{g_A} L_{f_A}^2 h_1} (L_{f_A}^3 h_1 - v) \quad (17)$$

このとき部分線形化されたサブシステムは、

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} h_1 \\ L_{f_A} h_1 \\ L_{f_A}^2 h_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ L_{f_A} h_1 \\ L_{f_A}^2 h_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v \quad (18)$$

と表される。 v を線形制御理論によって設計することで出力関数が零化する。

3.1.3 ゼロダイナミクス

出力零化の結果、不可観測な部分空間として一次元のゼロダイナミクスが残る。式(12)を変形すると、

$$\dot{p}(\theta) = -\frac{a_1}{h(q)} p(\theta) + \frac{h_1}{h(q)} \quad (19)$$

となる。故に出力を零化した時のゼロダイナミクスの微分方程式は

$$\dot{p}(\theta) = -\frac{a_1}{h(q)} p(\theta) \quad (20)$$

となる。ここで $h(q) > 0$ より、 $a_1 > 0$ となるように選べばゼロダイナミクスは原点に指数安定となり、全状態が収束するのでバランス安定化が達成される。

3.2 離陸相

離陸相では、跳躍運動を実現するための出力関数を人間の跳躍運動の観察に基づき、以下のように設定する。

離陸相での制御目標

1. Acrobot の重心が目標の速度方向を有する
2. 離陸時の角運動量を抑える

目標 1 は、重心を目標軌道に乗せる出力関数を零化することで達成する。この出力関数に対するゼロダイナミクスは不安定となり、発散する。結果、エネルギーを得て、跳躍が可能となる。目標 2 は、飛遊相における姿勢変化を抑えることを目的としている。目標 1 を満たす集合を数値解析で求め、その集合内で角運動量が小さい数値を選ぶことによって実現する。離陸相では特にフリクションコーンを逸脱しやすいので注意する。

3.2.1 出力関数の設定

離陸相における制御目標 1 を達成する出力関数を以下のように設定する。

$$h_2(\theta, d) = y_g(\theta) - \tan(\phi_d)(d + x_g(\theta)) \quad (21)$$

この出力関数の物理的意味を Fig. 3 に示す。ここで、 ϕ_d は接地点 O から x 軸方向へ $-d$ だけ離れたところから重心 (x_g, y_g) を見たときの仰角であり、離陸するときの重心の目標方向である。重心 (x_g, y_g) は、接地点 O を原点としたときの座標である。

3.2.2 部分線形化

出力関数を微分することにより、相対次数が 2 である入出力関係になることが分かる。よって、次のように出力関数を用いて、状態変数を厳密な線形化ができるサブシステム ($\xi \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$) とゼロダイナミクスのサブシステム ($\eta \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$) とに分けた新しい状態 z を定義する。このとき、微分同相な座標変換となるように η の選び方に注意する。

$$z = \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_2 \\ L_{f_A} h_2 \\ \theta_2 \\ M_{11}\dot{\theta}_1 + M_{12}\dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

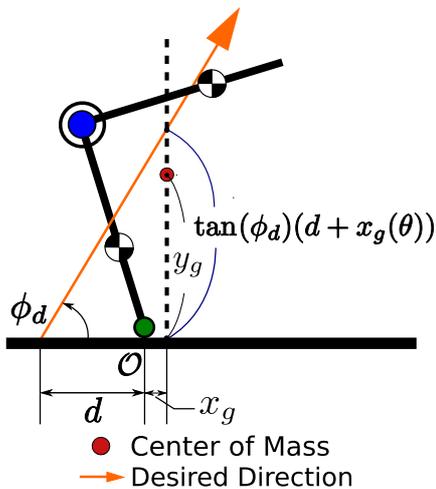


Fig. 3: 離陸相における出力関数の物理的意味

ここで、微分同相な座標変換は、ヤコビアン $\frac{\partial z}{\partial q}$ (ただし $q = [\theta_1, \theta_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2]^T$ とする) が正則であることで確認できる。この座標変換によって、システムを明示的に表記すると、

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_2 \\ L_{f_A} h_2 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} \dot{\xi}_1 \\ \dot{\xi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{f_A} h_2 \\ L_{f_A}^2 h_2 + L_{g_A} L_{f_A} h_2 \tau \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\dot{\eta} = \zeta \quad (25)$$

$$= \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 \\ -l_{g_2} m_2 (l_1 \cos \theta_1 - \cos(\theta_1 + \theta_2)) \end{bmatrix} \quad (26)$$

となる。出力零化入力を Lie 微分表記を用いて式 (27) とする。

$$\tau = -\frac{1}{L_{g_A} L_{f_A} h_2} (L_{f_A}^2 h_2 - v) \quad (27)$$

この入力を加えることにより、式 (28) に示すように、システムを部分線形化できる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v \quad (28)$$

v を線形制御理論によって設計することで出力関数が零化する。

3.2.3 ゼロダイナミクス

離陸相では、式 (26) で表される 2 次のゼロダイナミクスが残る。

離陸相における出力関数 h_2 は、平衡多様体上以外の点でダイナミクスは明らかに不安定となるので、ゼロダイナミクスの項 η も不安定となり発散する。ゼロダイナミクスを不安定化するような出力関数をあえて選ぶことによって、跳躍のためのエネルギーが得られる。

ゼロダイナミクスの挙動を陽に求めるには、新しい座標から元の座標へ戻す逆変換を求める必要がある。微分同相な写像が存在すればその逆変換も必ず存在することは保証されるが、式 (22) への座標変換では、陽に逆変換を求めることができない。

元のシステムの零点の解析をすることによって、ゼロダイナミクスの極を調べる方法や、平衡点回りの線形近似によって示す方法などがある。

3.3 飛遊相

飛遊相での制御目標を以下のように設定する。

飛遊相での制御目標

- 第一リンクの角度 θ_1 を目標の角度に制御する

飛遊相では、外力は重心位置に対する重力しか働かないので、初期角運動量が保存される。出力零化の結果として、飛遊相では 6 次のゼロダイナミクスが残り、Acrobot が空中にいるときは、姿勢を任意に制御することは難しい。

3.3.1 出力関数と部分線形化

飛遊相における制御目標 1 を達成する出力関数を以下のように設定する。

$$h_3(\theta_1) = \theta_{1d} - \theta_1 \quad (29)$$

出力関数を微分することにより，相対次数が2次であることが分かる．前節までと同様，部分線形化フィードバック入力は式(5)を用いて，

$$\tau = -\frac{1}{L_{g_B} L_{f_B} h_3} (L_{f_B}^2 h_3 - v) \quad (30)$$

となる．これにより，遷移相や離相陸と同様に部分線形化されたシステムが求まり，線形制御理論で出力関数が零化できる．

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} h_3 \\ L_{f_B} h_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_3 \\ L_{f_B} h_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v \quad (31)$$

3.4 衝突相

衝突相においては，式(11)で表される拘束インパルスを受ける．拘束インパルスの制御に関しては，撃力と等価なトルクをインパルス入力として加える方法がある．しかしながら実験的には，撃力を受ける瞬間を厳密に見積もることは観測誤差の影響で難しいので，制御は行わない．

3.5 着地相

着地相では，基本的には遷移相と同じ制御理論を用いる．遷移相で示した制御則は平衡多様体の近傍では安定化は可能である．しかしながらシミュレーションの結果からは，大域的には安定化が難しいことがわか

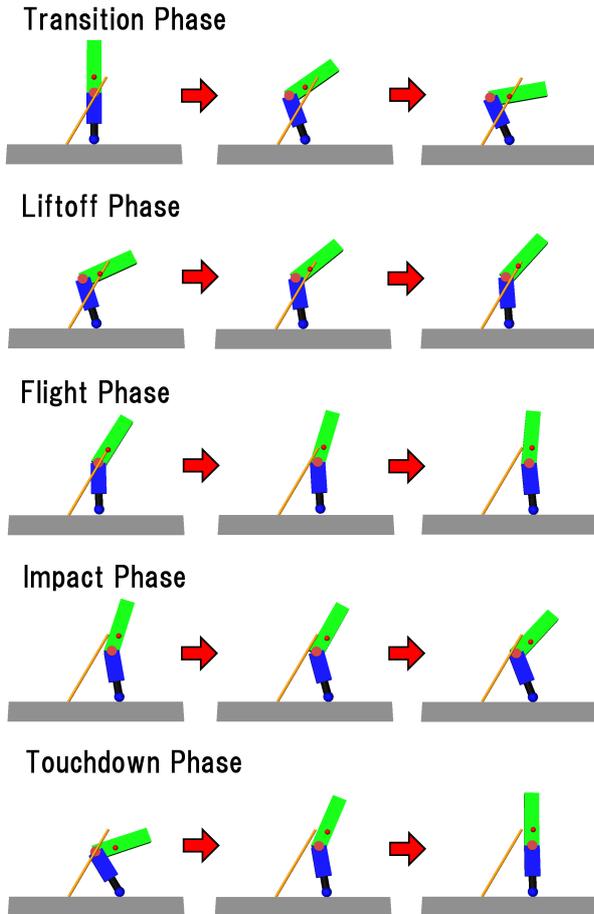


Fig. 4: 各フェイズの運動

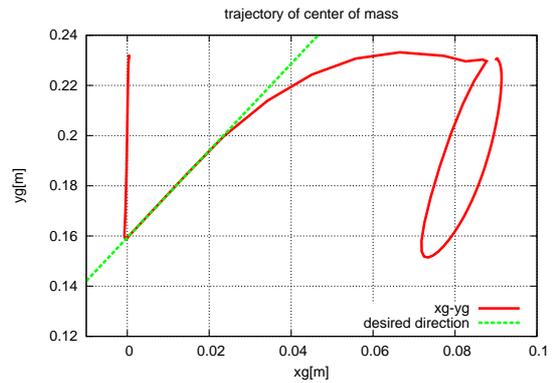


Fig. 5: 重心の軌道と目標離陸角度

る．よって着地相で安定化するためには，飛遊相での制御が鍵を握っていると考えられる．

4 シミュレーション

制御戦略の有効性を検証するために行ったシミュレーションの結果を Fig. 4 及び Fig. 5 に示す．シミュレーションに用いた物理パラメータは，Table 2 で示される実験パラメータと同じとして，コントローラを設計した．

シミュレーションの結果から，以下のことが確認できる．遷移相では出力関数が零化されると共にゼロダイナミクスが収束し，重心を Acrobot の足先の x 座標に保ちつつ，跳躍のための初期姿勢に遷移している．次に離陸相ではゼロダイナミクスが発散し足先の拘束が外れ，目標の角度方向に向かって空中へ離陸している．そして飛遊相では重心位置が放物運動を行い，最後に着地相において撃力の影響をフィードバック安定化し，初期姿勢に再び戻っている．

5 実験

本節では，実験によって理論の有効性を検証した結果を示す．本論文では，跳躍運動の核となる離陸相の制御実験の結果のみを示す．

5.1 実験環境

実験環境の外観図を Fig. 6 に示す．中央にある Acrobot の中心には，最大トルク 4.5[Nm] のハーモニックドライブモータが取り付けられている．第1リンク角 θ_1 をカメラで計測し， $\dot{\theta}_1$ を後退差分で算出する．第2リンク角 θ_2 は，モータに内蔵されているロータリーエンコーダによって計測し， $\dot{\theta}_2$ も同様に後退差分で算出する．

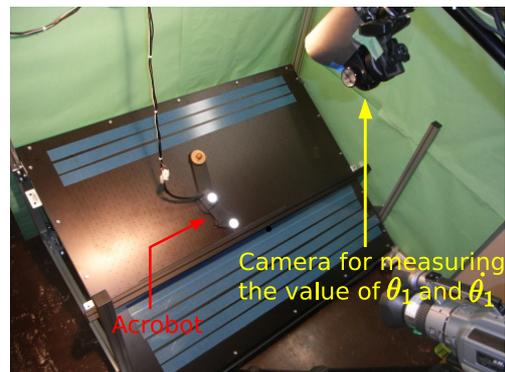


Fig. 6: 実験装置外観図



Fig. 7: エアテーブル外観図

Acrobot の運動は、Fig. 7 に示すような傾けたエアテーブルの面上で行う。これは、跳躍運動が二次元の運動であるということと、通常の重力場で跳躍するだけのトルクをモータが出力できないためである。エアテーブルの表面には、無数の穴が開けられており、送風機から送られる空気をその穴から噴出させる。これにより、テーブルの面に対して Acrobot を浮かせることができ、摩擦の影響をなくす。特に、安定化のような静止摩擦の影響を受けやすい制御については、Acrobot が完全に浮いていることが必要となる。

実際の制御実験においては、制御入力に加えて摩擦を補償する入力を加えて実験を行った。

5.2 実験結果及び考察

部分線形化フィードバックのコントローラを Table 3 で示す重みを用いて、最適制御によって設計した。式 (21) の出力関数が零化され、重心が目標角度方向へ向かうようにゼロダイナミクスが発散し、跳躍が実現されていることが確認できる。

離陸時の制御則はシミュレーション上においてもコントローラの設計が難しく、必ずしも跳躍を実現するわけではない。なぜなら、出力関数を零化するだけでは発散する方向を指定できないので、逆方向に発散して倒れてしまう場合や、目標の直線上で振動的になって発散してしまう場合があるからである。滑らかに跳躍する適切なコントローラを試行錯誤で設計する必要があった。

制御実験では、一連の流れでの跳躍着地運動は実現できていない。ここではその主な要因として考えられる三点を挙げる。一つ目は観測ノイズの影響である。離陸相での制御時間は約 0.10[s] なので、ローパスフィルタをかけると位相遅れが発生してしまう。速度を後退

Table 2: Acrobot と実験パラメータ

m_1	1.018[kg]	m_2	0.929[kg]
J_1	0.009[kgm ²]	J_2	0.007[kgm ²]
l_1	0.185[m]	l_2	0.250[m]
l_{g1}	0.142[m]	l_{g2}	0.145[m]
D	0.354[Nms/rad]	g	4.34[m/s ²]

$$x_0 = [0.0, 0.0, \theta_1, \text{s.t.}(x_g = 0.0), -105.0[\text{deg}]]^T$$

Table 3: 離陸相での制御パラメータ

Q_{liftoff}	diag{700,10}	d	0.093[m]
R_{liftoff}	1.0	ϕ_d	60.0[deg]

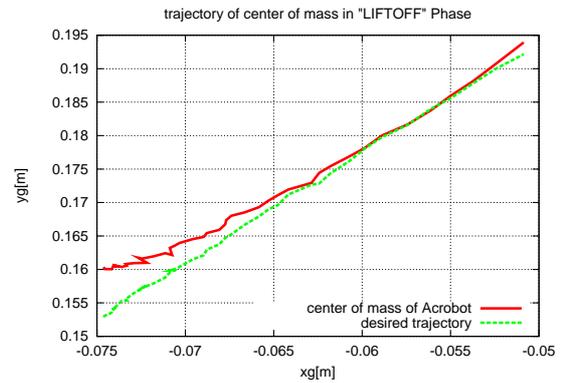


Fig. 8: 離陸相における重心の軌道

差分で算出しているの、観測ノイズの影響が大きく制御入力の演算に影響してしまうので、ローパスフィルタを適切に設計する必要がある。二つ目は、エアテーブルと Acrobot の間の摩擦の影響である。飛遊相での実験の結果では、重心がほぼ放物運動をしているので動摩擦の影響はほぼないといえる。しかし、Acrobot が静止している時は静止摩擦の影響を受けており、バランス安定化は難しい。実験機の改良が課題として挙げられる。三つ目は同定誤差であり、Acrobot とモータの物理特性を M 系列信号を加えた時の入力列と状態から同定したが、その誤差も寄与していると考えられる。

6 おわりに

本論文では、厳密な線形化が不可能な非線形システムに対して入出力線形化による出力零化制御に基づいた部分線形化フィードバックを行い、ゼロダイナミクスのふるまいを巧みに利用して Acrobot の跳躍着地運動が実現できることをシミュレーションで確認した。また、実験検証を行い提案した制御理論の有効性を確認した。

参考文献

- 1) M.H.Raibert. Legged robot that balance. MIT Press, 1986
- 2) M.D.Berkemeier and R.S. : Fearing Tracking fast trajectories of the underactuated acrobot ; IEEE Trans. on Robotics and Automation, pp.740-750 (1999)
- 3) M. Yamakita, and A. Utano : Automatic Control of Bicycles with a Balancer ; Proc. of the IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.1245-1250 (2005)
- 4) T.Shimizu, S.Nakaura, M.Sampeï : The Control of a Bipedal Running Robot based on Output Zeroing considered Rotation of the Ankle Joint ; 45th IEEE Conference on Decision and Control, pp.6456-6461 (2006)
- 5) K.Suseki, S.Nakaura, M.Sampeï : The Running Control of Humanoid Robot utilizing Q-learning and Output Zeroing ; 46th IEEE Conference on Decision and Control, pp.5131-5137 (2007)
- 6) M.Miyazaki, M.Sampeï, M.Koga, A.Takahashi : A Control of underactuated hopping gait systems : Acrobot example ; 39th IEEE Conference on Decision and Control, pp.4797-4802 (2000)
- 7) A.Isidori : Nonlinear Control Systems, 3rd Edition ; Springer-Verlag
- 8) Hassan K.Khalil : Nonlinear Systems Third Edition ; Pearson Education
- 9) 美多 勉 : 非線形制御入門 -劣駆動ロボットの技能制御論- ; 昭晃堂
- 10) 石島ら : 非線形システム論 ; 計測自動制御学会