2 リンクアクロバットロボットの離れ技に関する研究*

(コバチ実現のための初期・終端条件の導出)

越本 振一郎^{*1}, 山 浦 弘^{*2}, 服 部 邦 雄^{*3}

Study of Acrobatics of 2-link Acrobat Robot (The Initial and Final Conditions for Kovacs)

Shinichiro KOSHIMOTO^{*4}, Hiroshi YAMAURA and Kunio HATTORI

^{*4} Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

In this paper, a realization of acrobatics of a 2-link acrobat robot is discussed. Kovacs is chosen as an example of acrobatics of the horizontal bar performance. Our aerial posture control method that has been proposed in the previous study enables us to focus on the initial and final posture conditions of the acrobatics. Based on the equations of motion and the law of conservation of angular momentum, a way to derive the optimum initial and final posture conditions is developed. A simulation result demonstrates the validity of the proposed method.

Key Words: Horizontal Bar Robot, Acrobatics, Angular Momentum, Nonlinear System

1. 結 論

近年, 宇宙ロボットやヒューマノイドロボット等の様々なロボットに人間が訓練により獲得するような巧みな運動や作業をさせることが試みられている. 例えば, ブラキエーション (枝渡り) 運動の制御⁽¹⁾, 水中・空中に浮遊するロボットの姿勢制御⁽²⁾⁻⁽¹⁸⁾ 車輪ロボット⁽¹⁹⁾, 円盤⁽²⁰⁾⁽²¹⁾や球⁽²²⁾⁽²³⁾の平面位置と姿勢の制御などが盛んに研究されている. これらの制御対象は非線形系であり, 一般化座標の数よりも制御可能な入力の数が少ない劣駆動系であると共に, ノンホロノミックな拘束を持っていることから, 非線形制御理論の適応対象としても注目されている.

ここで, 浮遊ロボットの姿勢制御に注目すると, 浮遊ロボットの挙動は初期角運動量が零か否かによって大きく異なるため, その姿勢制御法も大きく2つに分類できる. すなわち, 初期角運動量が零の運動に対しては可変拘束制御⁽⁴⁾や滑らかな時不変フィードバック制御⁽⁵⁾などの手法が提案されている. また多くのアク

ロバット演技を含む初期角運動量が非零の運動に対しては, 軌道計画に基づく手法, 最短時間制御手法⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾, Chained Form への変換と時間軸状態制御⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾や, 様々なフィードバック制御を用いた手法⁽¹¹⁾⁻⁽¹⁸⁾などが提案されている. 筆者らは, 前報⁽¹⁷⁾で非零の初期角運動量を有する2リンク劣駆動浮遊ロボットの姿勢制御法として, 時変ゲインを有する逐次安定化 BackStepping 法を提案し, 合理的な大きさのトルク入力で姿勢制御が可能となることを示した.

これまで提案されてきた浮遊ロボットの姿勢制御法を用いれば, エアリアルスキー競技⁽²⁾, 高飛び込み競技⁽³⁾, 鉄棒の降り技⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁸⁾等のアクロバット演技が可能となるが, 鉄棒から離れた後, 空中演技を経て再び鉄棒を掴む演技 (以下, 離れ技) を行うためには, 実現性を考慮した離れ技の初期・終端条件を明確にする必要がある.

そこで本研究では2リンクのアクロバットロボットを対象に離れ技の一種であるコバチ (後方2回宙返り) を例にとり, 鉄棒競技における離れ技を実現し易い初期・終端条件の導出法を明らかにすることを目的とする. すなわち, まず, 浮遊時のロボットの運動方程式および角運動量保存則から, 終端においてロボットの手先が鉄棒を把持可能な初期条件, 終端条件および制御時間を明らかにする. さらに終端における手先の速度を評価関数に選択し, コバチが最も成功し易い

* 原稿受付 2005 年 2 月 14 日.

^{*1} 学生員, 東京工業大学大学院理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1).

^{*2} 正員, 東京工業大学大学院理工学研究科.

^{*3} 准員, トヨタ自動車 (株) (〒471-8572 豊田市トヨタ町 1).

E-mail: cosimoto@stu.mech.titech.ac.jp

初期・終端条件の選択方法について示す。最後に、導出した初期・終端条件と前報⁽¹⁷⁾で提案した姿勢制御則を用いて計算機シミュレーションを行い、提案する手法の有効性を示す。

2. 鉄棒ロボットのモデル

図1は胴体と脚部から構成される2リンクの浮遊ロボットの解析モデルである。 m_i, I_i, L_i, L_{gi} ($i = 1, 2$) はそれぞれ第*i*リンクの質量、慣性モーメント、リンクの長さ、リンクの端からリンクの重心までの距離である。また、 θ, ψ はそれぞれ、水平方向に対して反時計回りに測った胴体の絶対角と胴体と脚部の相対角である。また、制御入力は関節に働くトルク入力 u である。このとき、運動方程式は

$$\begin{cases} (N_1 + E \cos \psi) \ddot{\theta} + (E \cos \psi) \ddot{\psi} - (E \sin \psi) \dot{\theta}^2 \\ - (E \sin \psi) \dot{\psi}^2 - (2E \sin \psi) \dot{\theta} \dot{\psi} = -u \\ (N_2 + E \cos \psi) \ddot{\theta} + N_2 \ddot{\psi} + (E \sin \psi) \dot{\theta}^2 = u \end{cases} \quad (1)$$

であり、初期角運動量を P_0 とすれば角運動量保存則の式は

$$-(N_1 + N_2 + 2E \cos \psi) \dot{\theta} - (N_2 + E \cos \psi) \dot{\psi} = P_0 \quad (2)$$

と表される。ここで、 N_1, N_2, E は

$$N_1 = I_1 + \frac{m_1 m_2 L_{g1}^2}{m_1 + m_2}, \quad N_2 = I_2 + \frac{m_1 m_2 (L_2 - L_{g2})^2}{m_1 + m_2}$$

$$E = \frac{m_1 m_2 L_{g1} (L_2 - L_{g2})}{m_1 + m_2}$$

である。また、 $N_1 + N_2 > 2E$ が成り立っている。

Fig. 1 Analytical model of a 2-link horizontal bar robot

3. 初期条件と終端条件の範囲

離れ技を実現するには、飛び出し時において初期条件が同じであっても、再び鉄棒を掴む終端状態はある程度の幅を持って選択することができる。本節では離れ技の運動を決定する初期条件を与えたときに取り得る終端条件の幅を導出する。

3.1 初期条件

図2はロボットが離れ技を行うために鉄棒から飛び出す時の状態と、飛び出した後のロボット全体の重心の軌跡を示している。ロボットの浮遊時における外力は重力のみであるため、軌跡は放物線を描く。ここで、本研究では図2における θ_0, ψ_0, h, w の四つを離れ技の初期条件として与える。 h (< 0) は重心の放物線軌道の最高点、 w は放物線の中心線の x 座標であり、初期姿勢角 θ_0, ψ_0 とあわせて重心の放物線軌道を決定することができる。

Fig. 2 Initial conditions and parabolic trajectory

3.2 飛び出し時の状態

本節では終端条件を求める際に必要となる、飛び出し時の重心の初期位置と初期速度、および各リンクの初期角速度を求める。

まず、ロボットが鉄棒から離れる瞬間の重心の位置 x_{g0}, y_{g0} は、初期姿勢角 θ_0, ψ_0 を用いて幾何学的関係から

$$x_{g0} = -\frac{m_2}{m_1 + m_2} \{ (L_2 - L_{g2}) \cos(\theta_0 + \psi_0) + L_{g1} \cos \theta_0 \} - (L_1 - L_{g1}) \cos \theta_0 \quad (3)$$

$$y_{g0} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \{ (L_2 - L_{g2}) \sin(\theta_0 + \psi_0) + L_{g1} \sin \theta_0 \} + (L_1 - L_{g1}) \sin \theta_0 \quad (4)$$

と表される。この時、重心の x 方向、 y 方向の速度 $\dot{x}_{g0}, \dot{y}_{g0}$ は、重心の放物線パラメータ h と w を用いて

$$\dot{x}_{g0} = -\sqrt{\frac{g}{2(y_{g0} - h)}} (x_{g0} - w) \quad (5)$$

$$\dot{y}_{g0} = -\sqrt{2g(y_{g0} - h)} \quad (6)$$

と書ける。以上の計算から重心の座標 x_g, y_g の時間に関する式が得られる。

$$x_g(t) = \dot{x}_{g0} t + x_{g0} \quad (7)$$

$$y_g(t) = \frac{1}{2} g t^2 + \dot{y}_{g0} t + y_{g0} \quad (8)$$

次に、ロボットの飛出し時の初期角速度 $\dot{\theta}(0), \dot{\psi}(0)$ を求める。式 (3),(4) を微分して整理すると

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta}_0 \\ \dot{\psi}_0 \end{pmatrix} = (m_1 + m_2) \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \dot{x}_{g0} \\ \dot{y}_{g0} \end{pmatrix} \quad (9)$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} A_{11} &= m_1(L_1 - L_{g1}) \sin \theta_0 + m_2 L_1 \sin \theta_0 \\ &\quad + m_2(L_2 - L_{g2}) \sin(\theta_0 + \psi_0) \\ A_{12} &= m_2(L_2 - L_{g2}) \sin(\theta_0 + \psi_0) \\ A_{21} &= m_1(L_1 - L_{g1}) \cos \theta_0 + m_2 L_1 \cos \theta_0 \\ &\quad + m_2(L_2 - L_{g2}) \cos(\theta_0 + \psi_0) \\ A_{22} &= m_2(L_2 - L_{g2}) \cos(\theta_0 + \psi_0) \end{aligned}$$

である。

3.3 鉄棒を掴む時間 T に関する拘束 本節ではロボットがコバチを成功させて再び鉄棒を掴むことができる時間 (以下終端時間 T とする) についての条件を導出する。

3.3.1 終端時間 T における幾何学的拘束 ここではロボットが幾何学的に鉄棒を掴むことができる条件を考える。まず鉄棒を掴もうとするときのロボットと鉄棒の位置関係を考察し、次にそれを基に終端時間 T の条件を導く。

すなわちまず、重心の放物線軌道が与えられているとき、軌道と原点 (鉄棒の位置) の最短距離 L_{min} はニュートン・ラプソン法 (以下 NR 法) などにより求めることができる。

次にロボットの重心から手先までの距離の最大値と最小値を求める。最大値を L_{gmax} 、最小値を L_{gmin} とすると、 L_{gmax} はロボットが伸びきったとき ($\psi = 0$)、 L_{gmin} はロボットが折りたたんでいるとき ($\psi = \pi$) に対応しており、以下ようになる。

$$\begin{cases} L_{gmax} = \frac{m_1(L_1 - L_{g1}) + m_2(L_1 + L_2 - L_{g2})}{m_1 + m_2} \\ L_{gmin} = \frac{m_1(L_1 - L_{g1}) + m_2(L_1 - L_2 + L_{g2})}{m_1 + m_2} \end{cases} \quad (10)$$

ここまでで求めた $L_{min}, L_{gmax}, L_{gmin}$ の三つの値の大小関係によって、終端状態は3つの場合に分けて考える必要がある。

$$\begin{aligned} \text{Case(a)} \quad & L_{gmin} \leq L_{min} \leq L_{gmax} \\ \text{Case(b)} \quad & L_{min} < L_{gmin} \\ \text{Case(c)} \quad & L_{min} > L_{gmax} \end{aligned} \quad (11)$$

図3は3つの場合の放物線軌道を示したもので、図中の斜線部分はロボットが鉄棒を掴むことができる範囲を示している。図から分かるように、Case(a)ではコバチができる範囲は連続した一つの範囲として得られ、

Case(b)では二つの範囲が得られる。そして、Case(c)ではロボットは鉄棒を掴むことは不可能であり、コバチを実現することはできない。

Case(a)からCase(c)のどれに該当するかは初期条件によって決まる。ここでは $\theta_0 = 3.05[\text{rad}]$ 、 $h = 2L_{gmax}$ とした場合の、 ψ_0, w と Case(a)~(c) との関係の一例を図4に示した。図の右上の領域は、重心軌道が鉄棒を越えない場合であり、ロボットが鉄棒を掴んだとしてもコバチが成功したとはいえない。

— catchable area

Fig. 3 Geometrical catchable area

Fig. 4 Relation between Case(a)~(c) and ψ_0, w ($L_{gmin}/L_{gmax} = 0.5$)

次にCase(a), (b)において、ロボットが鉄棒を掴むことができる x_g の範囲を求める。ロボットが下りてくる際に放物線が原点を中心とする半径 L_{gmax} の円と交わる時の x 座標を x_{g1}, x_{g2} とし、半径 L_{gmin} の円と交わる時の x 座標を x_{g3}, x_{g4} とする。それぞれの位置関係は図3に示すように、 $x_{g1} > x_{g2}, x_{g3} > x_{g4}$ である。 $x_{g1} \sim x_{g4}$ はNR法などを使って求めることができる。以上からCase(a)でロボットが鉄棒を掴むことができる x 座標上の範囲は $x_{g1} > x > x_{g2}$ 、Case(b)での範囲は $x_{g1} > x > x_{g3}, x_{g4} > x > x_{g2}$ となる。

ロボットが鉄棒を掴める x 座標を求めたことで、終

端時間 T に関する拘束条件を求めることができる。拘束条件を、

$$\text{Case(a)} \quad T_{gmin} \leq T \leq T_{gmax} \quad (12)$$

$$\text{Case(b)} \quad \begin{cases} T_{gmin1} \leq T \leq T_{gmax1} \\ T_{gmin2} \leq T \leq T_{gmax2} \end{cases} \quad (13)$$

とすると、Case(a) において T_{gmin}, T_{gmax} は、

$$\begin{cases} T_{gmin} = \frac{x_{g1} - x_{g0}}{\dot{x}_{g0}} \\ T_{gmax} = \frac{x_{g2} - x_{g0}}{\dot{x}_{g0}} \end{cases} \quad (14)$$

であり、Case(b) では、

$$\begin{cases} T_{gmin1} = T_{gmin} \\ T_{gmax1} = \frac{x_{g3} - x_{g0}}{\dot{x}_{g0}} \\ T_{gmin2} = \frac{x_{g4} - x_{g0}}{\dot{x}_{g0}} \\ T_{gmax2} = T_{gmax} \end{cases} \quad (15)$$

となる。以上の終端時間 T に関する拘束について、図4におけるA-A線上的関係を図5に、B-B線上的関係を図6に示す。二つの図から、Case(a)と(b)の境界のとき最も長い時間幾何学的に鉄棒を掴めることがわかる。

Fig. 5 A-A

Fig. 6 B-B

3.3.2 終端時間 T における二つの終端姿勢

ここでは前節で示した終端における幾何学的な拘束を満たす終端時間 T において、ロボットの姿勢に二つの対称的な終端状態があることを示し、その時の各リンクの姿勢角 θ_T, ψ_T を求める。まず、終端時間 T における重心の座標 x_{gT}, y_{gT} と θ_T, ψ_T の関係式を求めるが、このときの幾何学的条件は鉄棒を掴んでいるという点で飛び出し時と同じであるため、式(3),(4)と同じ形となる。

$$\begin{aligned} x_{gT} &= -\frac{m_2}{m_1 + m_2} \{ (L_2 - L_{g2}) \cos(\theta_T + \psi_T) + L_{g1} \cos \theta_T \} - (L_1 - L_{g1}) \cos \theta_T \\ y_{gT} &= \frac{m_2}{m_1 + m_2} \{ (L_2 - L_{g2}) \sin(\theta_T + \psi_T) + L_{g1} \sin \theta_T \} + (L_1 - L_{g1}) \sin \theta_T \end{aligned} \quad (16)$$

上の式から $(\theta_T + \psi_T)$ を消去して整理すると

$$\sin(\theta_T + \delta) = \frac{X^2 + Y^2 + Z^2 - m_2^2(L_2 - L_{g2})^2}{2Z\sqrt{X^2 + Y^2}} \quad (17)$$

となる。簡単のために以下の置換と三角関数の合成を用いた。

$$X = (m_1 + m_2)x_{gT}$$

$$Y = (m_1 + m_2)y_{gT}$$

$$Z = m_1(L_1 - L_{g1}) + m_2L_1$$

$$\delta = \tan^{-1} \left(-\frac{y_{gT}}{x_{gT}} \right)$$

次に式(17)から θ_T を求める。コバチは2回後方に宙返りをした後再び鉄棒を掴む技なので、 θ_T の範囲は幾何学的に

$$3\frac{1}{2}\pi < \theta_T < 4\frac{1}{2}\pi \quad (18)$$

であり、関数 $\sin^{-1}$ の特性から、この範囲で θ_T は特殊な場合を除いて二つ得られる。特殊な場合とは式(17)の右辺の解が ± 1 となる場合か、二つの終端姿勢の片方だけが式(18)の範囲を外れてしまう場合である。

次に、求めた θ_T を式(16)に代入して整理することで $(\theta_T + \psi_T)$ を求め、ここから ψ_T を求める。

$$\psi_T = (\theta_T + \psi_T) - \theta_T + 2\pi i \quad (i = 0, 1, 2, \dots) \quad (19)$$

式(19)から、二通りの θ_T についてそれぞれ ψ_T が得られる。この二つの終端姿勢を図7に示した。反時計回りを正として $\psi_T > 0$ である方を Type(i)、 $\psi_T < 0$ である方を Type(ii) と呼ぶことにする。

Type(i),(ii) はロボット全体の重心周りに対称形をとり、それぞれの ψ_T は正負の符号が異なるのみで、その大きさは同じとなる。

Fig. 7 Two types of final posture

3.3.3 終端時間 T の運動学的拘束⁽¹⁴⁾

ロボット全体の姿勢角を考えるため、以下の座標変換を行う。 θ_r, ψ_r をそれぞれ θ と ψ に関する目標姿勢角として、座標変換を

$$\phi(t) = \theta(t) - \theta_r + \int_{\psi_r}^{\psi(t)} \frac{N_2 + E \cos \lambda}{N_1 + N_2 + 2E \cos \lambda} d\lambda \quad (20)$$

とすれば、角運動量保存則式(2)から

$$\dot{\phi}(t) = \frac{-P_0}{N_1 + N_2 + 2E \cos \psi(t)} \quad (21)$$

となる。上で定義した $\dot{\phi}$ はロボット全体の重心周りの角速度を表すものであり、 $-1 \leq \cos \psi(t) \leq 1$ であることから、上の式は

$$\frac{-P_0}{N_1 + N_2 + 2E} \leq \dot{\phi}(t) \leq \frac{-P_0}{N_1 + N_2 - 2E} \quad (22)$$

となる。式 (22) を $0 < t < T$ まで積分して整理すると、回転運動に関する終端時間 T の拘束が得られる。

$$\frac{N_1 + N_2 - 2E}{P_0} \phi(0) \leq T \leq \frac{N_1 + N_2 + 2E}{P_0} \phi(0) \quad (23)$$

式 (23) の拘束の上限では、ロボットができるだけ遅く回転しないといけなため、空中では伸びきった状態となる。また、拘束の下限ではロボットが早く回転しなければならないために、空中で折りたたんだ状態となる。この拘束を超えてしまった場合、目標の終端姿勢にたどり着けずコバチを成功させることはできない。

前節で求めた二つの終端姿勢についてそれぞれ運動学的な拘束を求め、3.3.1 で求めた幾何学的な拘束と合わせることで最終的に終端時間 T に関する拘束が求められる。

4. 最適な初期・終端条件の導出

本節ではコバチを成功させるための最適な初期・終端条件を求める。まず、そのために必要な評価関数を提案し運動の特徴について考察した上で最適な初期・終端条件を選択する。ここで2リンクの鉄棒ロボットの物理パラメータを表1のように設定した。

Table 1 Parameters of a two-link Acrobot

	Body ($i = 1$)	Leg ($i = 2$)
m_i [kg]	2.76	1.94
I_i [kgm ²]	7.50×10^{-3}	2.15×10^{-2}
L_i [m]	1.50×10^{-1}	3.75×10^{-1}
L_{gi} [m]	2.80×10^{-2}	25.8×10^{-2}

4.1 評価関数 ロボットの手先の速度が零に近いほど、空中で鉄棒を掴むことが容易であると考え、手先の速度を終端状態の評価関数とした。手先の速度は、(終端時間 T における重心の速度) + (回転による速度) で考えられ、その x 方向成分と y 方向成分 V_x, V_y は下のように与えられる。

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x}_{g0} \\ \dot{y}_{g0} + gT \end{pmatrix} + \dot{\phi}(T) \begin{pmatrix} y_g(T) \\ x_g(T) \end{pmatrix} \quad (24)$$

以上から評価関数 V を以下のように定義する。

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (25)$$

4.2 コバチの運動の特徴について

4.2.1 Case(a) と Case(b) の比較 ロボットが鉄棒を掴むときの評価関数が $V \leq 0.1$ [m/s] または $V \leq 1.0$ [m/s] となる重心の位置の範囲を図8に示した。この図から、 V の値が小さい時には重心の位置が水平近傍に限定されていることが分かる。これは、重心の落下速度の y 方向成分が x 方向成分よりも遥かに大きく、これを回転により相殺するためには回転による手先速度の y 方向成分を増やさねばならないからであると考えられる。また、重心が鉄棒を下回ってしまうと、回転による x 方向速度と重心の x 方向速度が相殺しないため、重心の角度の範囲は鉄棒よりも上に広がっている。

ここまでの考察は、3.3.1 節で示した Case(a) と Case(b) において、評価関数 V が小さくなるのは専ら Case(a) であることを示している。

Fig. 8 Acceptable final position of center of gravity

4.2.2 二つの終端姿勢の比較 3.3.2 節において対称な終端状態 Type(i) と Type(ii) を紹介したが、この二つの状態の評価関数 V は同値である。これは、

- 二つの対称な状態は重心周りの慣性モーメントが等しいため、回転角速度および回転による手先の速度が一致する
- 二つの状態では重心の落下速度が一致する

以上の二つの理由から評価関数である手先の速度 V が等しくなるためである。このため二つの終端姿勢については、3.3.3 節で挙げた運動学的拘束の関係について考察し、どちらがより多くの時間コバチを成功できるかという観点で比較を行う。

まず、式 (20) から終端での目標姿勢角 θ_r, ψ_r の違いによって Type(i) と Type(ii) のロボット全体の姿勢角 $\phi(0)$ が異なってくる事が分かる。Type(ii) と比べて同じ時間内に余計に回転しなければならないため、Type(i) の方が $\phi(0)$ の値が大きくなる。式 (23) から、この $\phi(0)$ の違いは終端時間 T の運動学的拘束

に影響することが分かる。二つの終端状態での運動学的拘束の値の違いを図9に示した。右の図の初期条件は $\{\theta(0) = 3.05, \psi(0) = 1.6, h = -0.37, w = -0.02\}$ 、左の図では $\{\theta(0) = 3.05, \psi(0) = 1.3, h = -0.37, w = 0.035\}$ とし、共に前節の考察から Case(a) のものを選択した。図の横軸は終端時間であり、幾何学的拘束に制限されない範囲のみを図示している。

図中の一点鎖線は Type(i) の運動学的拘束の上限値と下限値を表し、太い実線は Type(ii) の運動学的拘束の上限値と下限値を表す。また、図中の T_{max-p} は運動学的拘束の上限を、 T_{min-p} は下限を指している。細い実線は終端時間を示していて、これが運動学的拘束内にあれば、すなわち $T_{min-p} < T < T_{max-p}$ ならばコバチが成功可能である。図から終端時間が拘束に当てはまる長さを考慮すると、Type(i) の方がより多くの時間でコバチを成功できることが分かる。

以上から Type(i) の方が一般にコバチを成功させやすいと考えることができ、以下の考察では Type(i) のみを考察することにする。

Fig. 9 Relation between T and Type(i),(ii)

4.2.3 評価関数と放物線軌道の関係 図10に、Type(i) の場合で評価関数 V が $0.1[m/s]$ 以下で鉄棒を掴みうる $\psi(0)$ と w の点をプロットした。ただし、 $\theta(0) = 3.05[rad]$ で固定値とした。図10から放物線の高さ h が大きくなるに従って領域が徐々に左に移動していることが見て取れる。左に移動していくと図4で示したように Case(c) に入ってしまう、コバチを成功させることができないために領域が狭くなっている。また、放物線の高さを小さくしてコバチが成功する領域を右に移していっても、Case(b) になってしまう、4.2.1 節の考察から V が小さな値で成功することは難しい。以下では放物線高さが高くなるにつれて領域が左に移動していく理由について考える。

図11に重心の落下速度の x 方向成分・ y 方向成分 (それぞれ $\dot{x}_gT, \dot{y}_gT$ とする)、回転による速度の x 方向成分・ y 方向成分 (それぞれ V_{x-rot}, V_{y-rot} とする) の関係を示した。ただし評価関数 V が放物線高さによらず小さな値をとれるように、終端でのロボット

Fig. 10 The area of $V < 0.1m/s$ (Type(i))

Fig. 11 Falling velocity and rotational velocity

全体の重心高さを原点近傍で一定とし、初期条件を $\theta_0 = 3.05, \psi_0 = 1.6$ に対して $h = -0.30$ および -0.37 とした場合を示している。図から $h = -0.37$ の時は $w = -0.02$ 近傍で、 $h = -0.30$ の時は $w = -0.005$ の近傍で $\dot{x}_gT$ と V_{x-rot} および $\dot{y}_gT$ と V_{y-rot} がそれぞれ打ち消しあい、手先の速度が零に近づいていることが分かる。

図では回転による手先速度の y 方向成分 V_{y-rot} は w が小さくなるほど大きくなっている。これは回転による手先速度は (重心まわりの角速度) $\times$ (重心と原点との距離) であるが、 w が減少することによって重心と原点の距離が拡大するためである。一方で V_{x-rot} は w が小さくなるにつれて僅かに減少しているが、これは鉄棒を掴む時の角度に影響されていると考えられる。

次に、 $h = -0.30, h = -0.37$ の二つの場合を比較する。放物線高さが低くなることで落下速度 $\dot{y}_gT$ は減少し、また終端時間 T が小さくなるために、同じ w において $\dot{x}_gT$ が増加している。一方で初期角運動量は放物線高さによって大きく変化しないため、回転によ

る手先速度は大きく変化しない。以上の各速度成分の特徴から、放物線高さが低くなるにつれて評価関数 V が小さい条件が w が正の方向にずれていくことが分かる。

4.3 最適な初期終端条件の選択 ここでは 4.1 節で求めた評価関数 V を使って、最適な初期・終端条件を求める。最適な初期条件とは、適当な値 ε を与えたときに終端状態において「評価関数 $V < \varepsilon$ となる時間幅が最も広い」条件とした。また、終端条件は上記の初期条件で算出された「評価関数 $V < \varepsilon$ となる時間幅の内、中央の時刻に対応する終端条件」を選択する。

4.3.1 θ_0 の選択 まず、初期条件の一つである θ_0 [rad] について考える。図 12 に $h = 0.35$ で固定した場合の、 θ_0 とロボットの手先速度が 0.1[m/s], 0.3[m/s] 以下で鉄棒を掴むことができる時間との関係を示した。この図から $\theta_0 = 3.05$ [rad] の時、ロボットが鉄棒を掴みうる時間をもっとも広いと判断した。

Fig. 12 The optimal value of θ_0

4.3.2 h の選択 θ_0 の場合と同様に、図 13 に $\theta_0 = 3.05$ [rad] として固定した場合の評価関数 V と鉄棒を掴みうる時間との関係を示した。この図から、 $h = -0.33$ [m] 近辺が最も多くの時間でコバチを成功させることができると言える。しかし空中におけるロボットの脚部と鉄棒との接触を考慮する場合、離れ技の初期終端条件を考えるだけでは十分でなく、空中での運動を考慮しなければならない。このため、シミュレーションを用いてロボットの空中姿勢を確認し、 $h = -0.37$ とした。また、図 10(c) から、 $h = -0.37$ であれば多少初期値がずれても V を小さくするように制御可能であることが分かる。

Fig. 13 The optimal value of h

4.3.3 w, ψ_0 の選択 最後に、 ψ_0, w について決定する。図 10(c) で示した範囲の内、もっとも鉄棒を掴むことのできる時間幅が広い点を探し、これを ψ_0, w の最適な初期値とする。ここでは $\psi_0 = 1.82$ [rad], $w = -0.025$ [m] を選択した。

$\varepsilon = 0.1$ [m/s] とすると、以上の考察から求めた最適な初期条件から、ロボットが $V < 0.1$ [m/s] で鉄棒を掴める時間は飛び出してから 0.519 秒後から 0.524 秒後の 5ms である。このことから終端条件はロボットが飛び出してから 0.522 秒後に鉄棒を掴んだ時のものとした。この時、評価関数である手先の速度は $V = 1.12 \times 10^{-2}$ [m/s] であり、十分容易に鉄棒を掴むことができると考えられる。

4.4 シミュレーション結果 4.3 節で選択した最適な初期・終端条件と、筆者らの提案する空中姿勢制御⁽¹⁷⁾を用いて姿勢角、相対角、入力トルクの時刻歴応答を求めた。図 14 にロボットの空中姿勢変化を示す。また、図 15 より、小さな入力でコバチが実現できることが分かる。

Fig. 14 Stick Diagrams with optimal conditions

Fig. 15 Time responses of θ , ψ , and u

5. 結 言

本論文では離れ技の初期・終端での幾何学的拘束条件と角運動量の保存則を考慮することで、最適な初期・終端条件を導けることを示し、手先速度を評価関数として初期・終端条件を選択した。また、様々なコバチの運動学上の特徴を明らかにした。最後に、筆者らがすでに提案している制御法を使用することで、選択した初期・終端条件によってコバチが実現できることを示した。

文 献

- (1) Y.H.Chang, John E.Bertram, and Andy Ruina, A dynamic force and moment analysis system for brachiation, J.of Experimental Biology, Vol.200, (1997), 3013-3020
- (2) 城倉, 福島, 吉田, ひねり宙返りを行うエアリアルスキーロボットの開発, 日本ロボット学会誌, (2003), 172-177
- (3) L.S. Crawford and S.Sastry, Biological Motor Control Approaches for a Planar Diver, Proc. of IEEE Int. Conf. D & C, (1995), 3881-3886
- (4) 池田, 南澤, 美田, "浮遊機械のノンホロノミック可変拘束制御の提案と収束性の検討", 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.6, (2000), 847-855
- (5) ランジャン・ムカジー, 掃部, 泉田, 平面ロボットの滑らかな時不変フィードバック制御, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.3, (1998), 399-406
- (6) 滝田, 松田, 鉄棒ロボットによる宙返りの実現(実験による検証), 日本機械学会論文集(C編), 66巻, 648号, (2000), 223-231
- (7) J.M.Godhavn, A.Balluchi, L.S.Crawford and S.Sastry, Steering of a class of nonholonomic systems with drift terms, Automatica, Vol.35, (1999), 837-847
- (8) T.Mita, S.Hyon and T.Nam, Analytical time optimal control solution for two-link planar acrobat with initial angular momentum, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.17, No.3, (2001), 361-366
- (9) Fumitosi Matsuno, Junji Tsurusaki, Chained form transformation algorithm for a class of 3-states and 2-inputs nonholonomic systems and attitude control of a space robot, IEEE Conf.on Decision Control, (1999), 2126-2131
- (10) 三平, 本田, 古賀, 初期角運動量を有する劣駆動飛遊系の姿勢制御, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.4, (2001), 461-467
- (11) 掃部, 吉田, 三次元フリーフライングロボットの姿勢制御 第一報: 非ホロノミック最小自由度系の可制御性とその姿勢制御計画への応用, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.3, (2003), 273-281
- (12) 掃部, 吉田, 三次元フリーフライングロボットの姿勢制御 第二報: 滑らかな時不変状態フィードバック則による安定化戦略, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.3, (2003), 293-301
- (13) 掃部, 吉田, 三次元フリーフライングロボットの姿勢制御 第三報: 初期運動量を有するシステムのフィードバック制御, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.5, (2003), 535-545
- (14) Xin XIN, Tsutomu MITA, Masahiro KANEDA, The Posture Control of a 2-link Free Flying Acrobat with Initial Angular Momentum, Proc. of the 41st IEEE CDC, (2002), 2068-2073
- (15) 服部, 山浦, 小野, 鉄棒ロボットの下り技の姿勢制御(トルク入力への導出), 日本機械学会関東支部第9期総会講演会講演論文集, (2003), 291-292
- (16) K Hattori, H Yamaura and K Ono, Torque-based aerial posture control of a two-link acrobat robot, Proc. of IMEC Journal of Systems and Control Engineering, Vol.218, No.7, (2004), 595-601
- (17) 服部, 山浦, 小野, 浮遊ロボットの姿勢制御(トルク入力への導出と時変ゲインによる最大トルクの低減), 日本機械学会論文集(C編) Vol.70, No.691, (2004), 782-789.
- (18) 服部, 山浦, 角速度入力による3リンク劣駆動浮遊ロボットの姿勢制御, 日本機械学会論文集(C編), Vol.70, No.700, (2004), 131-138
- (19) 三平, 非ホロノミック系のフィードバック制御, 計測と制御, Vol.36, No.6, (1997), 396-403
- (20) Y.Yavin, Stabilization and control of the motion of a rolling disk by using two rotors fixed along its axis, Computer methods in applied mechanics and engineering, (1999), 107-122
- (21) Chunlei Rui, N.Harris McClamroch, Stabilization and Asymptotic Path Tracking of a Rolling Disk, IEEE Conference on Decision and Control, (1995), 4294-4299
- (22) 水野, 三平, 古賀, 石川, 転がりを用いた球体の姿勢制御, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.1, (1998), 118-123
- (23) Antonio Bicchi, Raffaele Sorrentino, Dexterous Manipulation Through Rolling, IEEE International Conference on Robotics and Automation, (1995), 452-457