ストッパー機構を有する二関節ホッピングロボットの動的解析*

小 島 宏 行^{*1}, Gustavo KATO^{*2}

Dynamic Analysis of Two-Link Hopping Robot with Stopper Mechanisms

Hiroyuki KOJIMA^{*3} and Gustavo KATO^{*} Department of Mechanical System Engineering, Gunma University,
1 5 1 Tenjincho, Kiryu shi, Gunma, 376-8515 Japan

In this paper, the dynamic behaviors of a two-link hopping robot with two stopper mechanisms are investigated theoretically. In the theoretical analysis, the dynamic behaviors of the two-link hopping robot with two stopper mechanisms are modeled by use of the four phases (phase-A, phase-B, phase-C, phase-D). At the moment when the first joint stops, the state of the system transfers from phase A to phase-B. Then, at the moment when the second joint stops, the state of the system transfers from phase B to phase-C. In phase-C, the two-link hopping robot moves in space, and at the moment when the two-link hopping robot lands, the state of the system transfers from phase-C to phase-D. Using the principle of the conservation of momentum and angular momentum, the initial states in the periods of phase-B and phase-C are derived, and the equations of motion of the two-link hopping robot in all phases are obtained. Furthermore, the numerical simulations have been carried out, and it is confirmed theoretically that the hopping and moving action can be performed successfully.

Key Words: Robot, Dynamics of Machinery, Modeling, Shock, Motion Control, Two-Link Hopping Robot, Stopper Mechanism, Hopping and Moving Action

1. 緒 言

自然界では、行動範囲が広く、高速移動ができる生物が存在し、これらの生物においては、移動中に宙に浮き揚がるような跳躍運動を行うことにより高速移動を実現している場合が少なくない。このような跳躍運動を工学的に実現し、移動ロボットの作業能力をより多機能化することを意図したホッピングロボットに関する研究が行われている⁽¹⁾。例えば、反復跳躍機構の基本的モデルについての反復跳躍運動の可制御性と安定性⁽²⁾、空圧アクチュエータとジャイロセンサを用いた一本足ホッピングロボットによるホッピング動作の実現⁽³⁾、空圧アクチュエータにより跳躍機能を実現するとともに、DCモータを用いて姿勢制御を行う型式の跳躍移動ロボット⁽⁴⁾、DCモータと歯車を用いてばねにポテンシャルエネルギーを蓄え、このエネルギーを瞬間的に開放することによる跳躍運動の実現⁽⁵⁾、跳躍ロボットの胴体部の最適ソフトランディングの定義に基づく胴体部の軌道制御

によるソフトソフトランディングの実現⁽⁶⁾などに関する研究が報告されている。

また、4面包囲型リニア直流モータと支持ばねを用いたホッピングロボットによる連続跳躍⁽⁷⁾および跳躍移動⁽⁸⁾を行った研究、小出力のアクチュエータを用いた跳躍運動の実現方法として、系の固有振動数を考慮し、ばね質量系を加振することにより、短時間で大きなエネルギーをばねに蓄える手法に基づく跳躍機械に関する研究⁽⁹⁾が行われている。さらに、神経振動子に基づく適応的周期加振力を用いたホッピングロボットに関する研究⁽¹⁰⁾、第2関節のみにDCモータを搭載した二リンクホッピングロボットを試作するとともに、第2リンクの回転運動を用いてホッピング動作を実現した研究⁽¹¹⁾が報告されている。

一方、ゴルフスイングロボットのハイパーダイナミックス動作において、永久磁石を用いたストッパー機構によって関節の運動範囲の制限を行うことにより、効率のよい加速を実現した研究⁽¹²⁾が行われている。人間の関節の運動範囲においても制限があることから、ストッパー機構を有する多関節ホッピングロボットによりホッピング動作を実現することは興味あることと言える。このような観点から、ストッパー機構を有する二関節ホッピングロボットに関する実験的な研究が行われており、ストッパー機

* 原稿受付 2004年8月9日。

^{*1} 正員、群馬大学工学部(〒376-8515 桐生市天神町1-5-1)。^{*2} 群馬大学大学院。

E-mail: kojima@me.gunma-u.ac.jp

構による撃力を効果的に用いた跳躍移動運動動作が実現し得ることを実験的に立証した研究⁽¹³⁾が報告されている。この研究においては、図 1 のような二関節ホッピングロボットの第 1 関節と第 2 関節を、ストッパー機構を用いて順次急停止させることによりホッピング動作を実現している。各関節には、ギヤボックス内蔵の DC モータが搭載されており、最大の撃力を発生させるために、許容最大電圧近傍の電圧で DC モータが駆動されている。また、ホッピング動作を実現させるためのストッパー機構の設定角度、関節角の初期値、および DC モータの印加電圧遅れ時間などのパラメータを試行錯誤的に見出している。実験結果より、二関節ホッピングロボットは、図 2 に示されているように、基礎リンク下左部接地状態 (A 相)、基礎リンク下左部接地状態 (B 相)、空中浮遊状態 (C 相)、基礎リンク下右部接地状態 (D 相) の順にホッピング動作を行うことが確かめられている。しかしながら、系の動的応答の理論的な解明については、未だ行われておらず、この種のホッピングロボットの設計指針を得るためには、系の動的挙動を理論的に明らかにすることが重要であるものと言える。

本研究は、既報の実験結果⁽¹³⁾に鑑み、ストッパー機構を有する二関節ホッピングロボットの動的挙動を、A 相、B 相、C 相及び D 相の四つの相に分けてモデル化している。ストッパー機構を有する二関節ホッピングロボットは、二つの関節と三つのリンクから構成されている。二つの関節には、直流モータ、減速歯車、ストッパー機構、ポテンシオメータが搭載されている。系の動的挙動の理論解析では、各リンクの運動量と角運動量の保存の法則を用いて、各相における系の初期状態を導出するとともに、各相における系の運動方程式を導いている。さらに、数値シミュレーションを行い、ストッパー機構を有する二関節ホッピングロボットの動的挙動の一端を調べている。

2. 系の動的挙動の理論解析

2. 1 系の座標モデル 図 1 は、ストッパー機構を有する二関節ホッピングロボットの座標モデルを示したものである。本研究では、既報の実験結果⁽¹³⁾に鑑み、系の動的挙動を、図 2 に示されているように、A 相、B 相、C 相及び D 相の四つの相に分けてモデル化する。この図は、 $t=t_A$ で第 1 関節の回転運動が急停止し、 $t=t_B$ で第 2 関節の回転運動が急停止するとともに、二関節ホッピングロボットが、空中浮遊運動を開始することを表わしている。その後、 $t=t_C$ で二関節

Fig.1 Schematic model of two-joint hopping robot

Fig.2 Dynamic behaviors of four phases

ホッピングロボットが着地し、 $t=t_D$ において全動作を終了することが示されている。

2. 2 A 相における系の運動方程式 A 相は、二関節ホッピングロボットの動作開始時から、第 1 関節の回転運動が急停止までの期間に対応している。A 相における系の運動方程式は、図 2 中の記号を用いると、次式のように書くことができる。

$$\begin{bmatrix} J_{A11} & J_{A12} \\ J_{A21} & J_{A22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{A1} \\ h_{A2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 v_1 \\ K_2 v_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに、

$$J_{A11} = N_1^2 J_{A1} + J_{c1} + J_{c2} + m_1 l_{c1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} C_2) \quad (2)$$

$$J_{A12} = J_{A21} = J_{c2} + m_2 (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} C_2) \quad (3)$$

$$J_{A22} = N_2^2 J_{A2} + J_{c2} + m_2 l_{c2}^2 \quad (4)$$

$$h_{A1} = -m_2 l_1 l_{c2} (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) S_2 + m_1 l_{c1} g C_1 + m_2 g (l_1 C_1 + l_{c2} C_{12}) + (c_{d1} + c_{K1}) \dot{\theta}_1 \quad (5)$$

$$h_{A2} = m_2 l_1 l_{c2} S_2 \dot{\theta}_1^2 + m_2 l_{c2} g C_{12} + (c_{d2} + c_{K2}) \dot{\theta}_2 \quad (6)$$

式(2)～(6)中の記号は次式のように定義されている。

$$K_1 = \frac{N_1 K_{T1}}{R_1}, \quad K_2 = \frac{N_2 K_{T2}}{R_2} \quad (7)$$

$$c_{K1} = \frac{N_1^2 K_{T1} K_{E1}}{R_1}, \quad c_{K2} = \frac{N_2^2 K_{T2} K_{E2}}{R_2} \quad (8)$$

$$C_1 = \cos \theta_1, \quad C_2 = \cos \theta_2, \quad S_2 = \sin \theta_2 \quad (9)$$

$$C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (10)$$

ここに、 θ_1, θ_2 は関節角、 m_1, m_2 は各リンクの質量、 l_1, l_2 は各リンクの長さ、 J_{c1}, J_{c2} は各リンクの重心回りの慣性モーメント、 l_{c1}, l_{c2} は各リンクの関節中心と重心位置の距離、 N_1, N_2 は減速機の減速比、 J_{A1}, J_{A2} は直流モータのロータの慣性モーメント、 K_{T1}, K_{T2} は直流モータのトルク定数、 K_{E1}, K_{E2} は逆起電力係数、 R_1, R_2 は電機子の抵抗、 c_{d1}, c_{d2} は各関節部の粘性減衰係数、 g は重力定数である。

2. 3 A 相から B 相への移行直後の系の状態

時間 $t = t_A$ の瞬間に第 1 関節の回転運動が急停止すると、系は A 相から B 相に移行し、基礎リンクと第 1 リンクは、一体化したリンク L - 01 として運動するが、第 2 関節は連続的に回転運動を継続する。一体化したリンク L - 01 は、図 2 中の基礎リンクの姿勢角 θ_o によって記述できる。

A 相から B 相へ移行直後のリンク L - 01 の回転角速度の値は、系の角運動量保存の法則⁽¹⁴⁾を用いて、以下のような手順で導くことができる。

第 1 関節が急停止する直前の系の角運動量は、次式のように書くことができる。

$$L(t_A - \varepsilon) = L_{1Am} + L_{2Am} \quad (11)$$

ここに、 ε は限りなく小さな正の実数であり、 L_{1Am}, L_{2Am} は次式のように定義されている。

$$L_{1Am} = (J_{c1} + N_1 J_{A1}) \dot{\theta}_{1A} + m_1 (x_{c1A} \dot{y}_{c1A} - y_{c1A} \dot{x}_{c1A}) \quad (12)$$

$$L_{2Am} = J_{c2} \dot{\theta}_{2A} + (J_{c2} + N_2 J_{A2}) \dot{\theta}_{2A} + m_2 (x_{c2A} \dot{y}_{c2A} - y_{c2A} \dot{x}_{c2A}) \quad (13)$$

$$\dot{\theta}_{1A} = \dot{\theta}_1(t_A - \varepsilon), \quad \dot{\theta}_{2A} = \dot{\theta}_2(t_A) \quad (14)$$

$$x_{c1A} = l_o + l_{c1} C_{1A}, \quad y_{c1A} = h + l_{c1} S_{1A} \quad (15)$$

$$x_{c2A} = l_o + l_1 C_{1A} + l_{c2} C_{12A} \quad (16)$$

$$y_{c2A} = h + l_1 S_{1A} + l_{c2} S_{12A} \quad (17)$$

$$\dot{x}_{c1A} = -l_{c1} S_{1A} \dot{\theta}_{1A}, \quad \dot{y}_{c1A} = l_{c1} C_{1A} \dot{\theta}_{1A} \quad (18)$$

$$\dot{x}_{c2A} = -(l_1 S_{1A} + l_{c2} S_{12A}) \dot{\theta}_{1A} - l_{c2} S_{12A} \dot{\theta}_{2A} \quad (19)$$

$$\dot{y}_{c2A} = (l_1 C_{1A} + l_{c2} C_{12A}) \dot{\theta}_{1A} + l_{c2} C_{12A} \dot{\theta}_{2A} \quad (20)$$

$$C_{1A} = \cos \theta_{1A}, \quad S_{1A} = \sin \theta_{1A} \quad (21)$$

$$C_{12A} = \cos(\theta_{1A} + \theta_{2A}) \quad (22)$$

$$S_{12A} = \sin(\theta_{1A} + \theta_{2A}) \quad (23)$$

$$\theta_{1A} = \theta_1(t_A), \quad \theta_{2A} = \theta_2(t_A) \quad (24)$$

また、第 1 関節の回転運動が急停止した直後の系の角運動量は、次式で記述できる。

$$L(t_A + \varepsilon) = \kappa_{AB1} \dot{\theta}_o(t_A + \varepsilon) + \kappa_{AB2} \quad (25)$$

ここに、

$$\kappa_{AB1} = J_{co} + J_{c1} + J_{c2} + m_o (l_o^2 + h_c^2) + \sum_{i=1}^2 (x_{ciA} \bar{y}_{ciA} - y_{ciA} \bar{x}_{ciA}) \quad (26)$$

$$\kappa_{AB2} = \{J_{c2} + N_2 J_{A2} + m_2 (x_{c2A} \bar{y}_{c2A} - y_{c2A} \bar{x}_{c2A})\} \dot{\theta}_{2A} \quad (27)$$

$$\bar{x}_{c1A} = -h - l_{c1} S_{1A}, \quad \bar{y}_{c1A} = l_o + l_{c1} C_{1A} \quad (28)$$

$$\bar{x}_{c2A} = -h - l_1 S_{1A} - l_{c2} S_{12A} \quad (29)$$

$$\bar{y}_{c2A} = l_o + l_1 C_{1A} + l_{c2} C_{12A} \quad (30)$$

$$\bar{\alpha}_{c2A} = -l_{c2} S_{12A}, \quad \bar{\beta}_{c2A} = l_{c2} C_{12A} \quad (31)$$

であり、 θ_o は基礎リンクの回転角、 m_o, J_{co} は基礎リンクの質量ならびに重心回りの慣性モーメント、 l_o, h, h_c は、図 1 中に示されているような基礎リンクの寸法である。

第 1 関節の回転運動が急停止する瞬間 ($t = t_A$) の前後の系の角運動量の式(11)と式(25)を等値すると、B 相に移行直後のリンク L - 01 の回転角速度の値 $\dot{\theta}_o(t_A + \varepsilon)$ は次式のように導かれる。

$$\dot{\theta}_o(t_A + \varepsilon) = \frac{L(t_A - \varepsilon) - \kappa_{AB2}}{\kappa_{AB1}} \quad (32)$$

2. 4 B 相における系の運動方程式

時間 $t = t_A$ の瞬間に第 1 関節の回転運動が急停止すると、基礎リンクと第 1 リンクは一体化し、系は A 相から B 相に移行する。B 相は、 $t = t_A$ の瞬間に第 1 関節が急停止した瞬間から、 $t = t_B$ の瞬間に第 2 関節が急停止する瞬間までの期間に対応し、一体化したリンク L - 01 は、基礎リンク下左部を中心とする回転運動を行なう。この B 相における系の運動方程式は、次式のように書くことができる。

$$\begin{bmatrix} J_{B11} & J_{B12} \\ J_{B21} & J_{B22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_o \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{B1} \\ h_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ K_2 v_2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

ここに、

$$J_{B11} = J_{co1} + J_{c2} + m_{o1} \eta_{B1} + m_2 \eta_{B2} + 2m_2 (l_1 l_{c2} C_2 + l_o l_{c2} C_{12} + h_1 l_{c2} S_{12}) \quad (34)$$

$$J_{B12} = J_{B21} = J_{c2} + m_2 l_{c2}^2 + m_2 (l_1 l_{c2} C_2 + l_o l_{c2} C_{12} + h_1 l_{c2} S_{12}) \quad (35)$$

$$J_{B22} = N_2^2 J_{A2} + J_{c2} + m_2 l_{c2}^2 \quad (36)$$

$$h_{B1} = m_2 \kappa_{B1} (2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) + \kappa_{B2} \quad (37)$$

$$h_{B2} = m_2 \kappa_{B1} \dot{\theta}_2^2 + m_2 g l_{c2} C_{o12} \quad (38)$$

であり、式中の記号は以下のように定義されている。

$$m_{o1} = m_o + m_1 \quad (39)$$

$$J_{co1} = J_{co} + J_{c1} + m_o p_{Bo}^T p_{Bo} + m_1 p_{B1}^T p_{B1} \quad (40)$$

$$p_{Bo} = r_{co} - r_{co1}, \quad p_{B1} = r_{c1} - r_{co1} \quad (41)$$

$$r_{co} = \begin{bmatrix} l_o C_o - h_c S_o \\ l_o S_o + h_c C_o \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$r_{c1} = \begin{bmatrix} l_o C_o - h_c S_o + l_{c1} C_{o1} \\ l_o S_o + h_c C_o + l_{c1} S_{o1} \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$r_{co1} = \frac{1}{m_{o1}} \begin{bmatrix} \xi_1 C_o - \xi_2 S_o + m_1 l_{c1} C_{o1} \\ \xi_1 S_o + \xi_2 C_o + m_1 l_{c1} S_{o1} \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$\kappa_{B1} = -l_1 l_{c2} S_2 - l_o l_{c2} S_{12} + h l_{c2} C_{12} \quad (45)$$

$$\kappa_{B2} = g(\xi_1 C_o - \xi_2 S_o + m_1 l_{c1} S_{o1}) \quad (46)$$

$$\eta_{B1} = \frac{\bar{\eta}_{B1}}{(m_o + m_1)^2} \quad (47)$$

$$\bar{\eta}_{B1} = \xi_1^2 + \xi_2^2 + m_1^2 l_{c1}^2 + 2m_1 l_{c1} (\xi_1 C_1 + \xi_2 S_1) \quad (48)$$

$$\eta_{B2} = m_2 (l_o^2 + h^2 + l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_o l_1 C_1 + 2h l_1 S_1) \quad (49)$$

$$\xi_1 = l_o(m_o + m_1), \quad \xi_2 = m_o h_c + m_1 h \quad (50)$$

$$C_o = \cos \theta_o, \quad S_o = \sin \theta_o, \quad S_1 = \sin \theta_1 \quad (51)$$

$$S_{o1} = \sin(\theta_o + \theta_1), \quad S_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (52)$$

$$C_{o12} = \cos(\theta_o + \theta_1 + \theta_2) \quad (53)$$

ただし、 $\theta_1 = \theta_{1A}$ である。

2. 5 B 相から C 相への移行直後の系の状態

時間 $t = t_B$ の瞬間に第 2 関節の回転運動が急停止すると、系は B 相から C 相に移行し、基礎リンク、第 1 リンク及び第 2 リンクは一体化したリンク L - 012 として、図 2 に示されているような空中浮遊運動を行なう。

B 相から C 相へ移行直後のリンク L - 012 の並進速度は、運動量保存の法則⁽¹⁴⁾を用いて、以下のような手順で導くことができる。

本研究で取り扱っている二関節ホッピングロボットは、鉛直面内で運動を行なっている。第 2 関節の回転運動が急停止する直前の系の鉛直面内 (x - y 平面) の運動量は、次式のように書くことができる。

$$P(t_B - \varepsilon) = \begin{bmatrix} m_o \dot{x}_{coB} + m_1 \dot{x}_{c1B} + m_o \dot{x}_{c2B} \\ m_o \dot{y}_{coB} + m_1 \dot{y}_{c1B} + m_o \dot{y}_{c2B} \end{bmatrix} \quad (54)$$

ここに、

$$\dot{x}_{coB} = -\dot{\theta}_{oB} (l_o S_{oB} + h_c C_{oB}) \quad (55)$$

$$\dot{y}_{coB} = \dot{\theta}_{oB} (l_o C_{oB} - h_c S_{oB}) \quad (56)$$

$$\dot{x}_{c1B} = -\dot{\theta}_{oB} (l_o S_{oB} + h C_{oB} + l_{c1} S_{o1B}) \quad (57)$$

$$\dot{y}_{c1B} = \dot{\theta}_{oB} (l_o C_{oB} + h S_{oB} - l_{c1} C_{o1B}) \quad (58)$$

$$\dot{x}_{c2B} = -(l_o S_{oB} + h C_{oB} + l_1 S_{o1B}) \dot{\theta}_{oB} - l_{c2} S_{o12B} (\dot{\theta}_{oB} + \dot{\theta}_{2B}) \quad (59)$$

$$\dot{y}_{c2B} = (l_o C_{oB} - h S_{oB} + l_1 C_{o1B}) \dot{\theta}_{oB} + l_{c2} C_{o12B} (\dot{\theta}_{oB} + \dot{\theta}_{2B}) \quad (60)$$

$$\dot{\theta}_{oB} = \dot{\theta}_o(t_B), \quad \dot{\theta}_{2B} = \dot{\theta}_2(t_B - \varepsilon) \quad (61)$$

$$C_{oB} = \cos(\theta_{oB}), \quad S_{oB} = \sin(\theta_{oB}) \quad (62)$$

$$C_{o1B} = \cos(\theta_{oB} + \theta_{1A}), \quad S_{o1B} = \sin(\theta_{oB} + \theta_{1A}) \quad (63)$$

$$C_{o12B} = \cos(\theta_{oB} + \theta_{1A} + \theta_{2B}) \quad (64)$$

$$S_{o12B} = \sin(\theta_{oB} + \theta_{1A} + \theta_{2B}) \quad (65)$$

$$\theta_{oB} = \theta_o(t_B), \quad \theta_{2B} = \theta_2(t_B) \quad (66)$$

第 2 関節の回転運動が急停止する直前の系の角運動量は、次式のように記述できる。

$$L(t_B - \varepsilon) = L_{oBm} + L_{1Bm} + L_{2Bm} \quad (67)$$

ここに、

$$L_{oBm} = J_{co} \dot{\theta}_{oB} + m_o (x_{coB} \dot{y}_{coB} - y_{coB} \dot{x}_{coB}) \quad (68)$$

$$L_{1Bm} = J_{c1} \dot{\theta}_{oB} + m_1 (x_{c1B} \dot{y}_{c1B} - y_{c1B} \dot{x}_{c1B}) \quad (69)$$

$$L_{2Bm} = J_{c2} (\dot{\theta}_{oB} + \dot{\theta}_{2B}) + m_2 (x_{c2B} \dot{y}_{c2B} - y_{c2B} \dot{x}_{c2B}) \quad (70)$$

$$x_{coB} = l_o C_{oB} - h_c S_{oB} \quad (71)$$

$$y_{coB} = l_o S_{oB} + h_c C_{oB} \quad (72)$$

$$x_{c1B} = l_o C_{oB} - h S_{oB} + l_{c1} C_{o1B} \quad (73)$$

$$y_{c1B} = l_o S_{oB} + h C_{oB} + l_{c1} S_{o1B} \quad (74)$$

$$x_{c2B} = l_o C_{oB} - h S_{oB} + l_{c1} C_{o1B} + l_{c2} C_{o12B} \quad (75)$$

$$y_{c2B} = l_o S_{oB} + h C_{oB} + l_{c1} S_{o1B} + l_{c2} S_{o12B} \quad (76)$$

また、第 2 関節の回転運動が急停止した直後の系の鉛直面内の運動量は、次式のように書くことができる。

$$P(t_B + \varepsilon) = m \begin{bmatrix} \dot{x}_c(t_B + \varepsilon) \\ \dot{y}_c(t_B + \varepsilon) \end{bmatrix} \quad (77)$$

ここに、

$$m = m_o + m_1 + m_2 \quad (78)$$

であり、 x_c, y_c はリンク L - 012 の重心位置の座標を表している。時間 $t = t_B$ における x_c, y_c の値 x_{cB}, y_{cB} は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} x_{cB} \\ y_{cB} \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} m_o x_{coB} + m_1 x_{c1B} + m_2 x_{c2B} \\ m_o y_{coB} + m_1 y_{c1B} + m_2 y_{c2B} \end{bmatrix} \quad (79)$$

上式を用いると、第 2 関節の回転運動が急停止した直後の系の角運動量は、次式のように記述できる。

$$L(t_B + \varepsilon) = J_{cB} \dot{\theta}_c(t_B + \varepsilon) + m \{ x_{cB} \dot{y}_c(t_B + \varepsilon) - y_{cB} \dot{x}_c(t_B + \varepsilon) \} \quad (80)$$

ここに、

$$J_{cB} = J_{co} + J_{c1} + J_{c2} + m_o p_{co}^T p_{co} + m_1 p_{c1}^T p_{c1} + m_2 p_{c2}^T p_{c2} \quad (81)$$

$$p_{c0} = \begin{bmatrix} x_{cB} - x_{c0B} \\ y_{cB} - y_{c0B} \end{bmatrix}, \quad p_{c1} = \begin{bmatrix} x_{cB} - x_{c1B} \\ y_{cB} - y_{c1B} \end{bmatrix} \quad (82)$$

$$p_{c2} = \begin{bmatrix} x_{cB} - x_{c2B} \\ y_{cB} - y_{c2B} \end{bmatrix} \quad (83)$$

第2関節の回転運動が急停止する瞬間($t = t_B$)の前後の系の運動量の式(54)と式(77)を等値すると、第2関節が急停止した直後のリンク L-012 の速度は次式のように導かれる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c(t_B + \varepsilon) \\ \dot{y}_c(t_B + \varepsilon) \end{bmatrix} = \frac{1}{m} P(t_B - \varepsilon) \quad (84)$$

また、第2関節の回転運動が急停止する瞬間($t = t_B$)の前後の系の角運動量の式(67)と式(80)を等値すると、第2関節の回転運動が急停止した直後のリンク L-012 の角速度は次式のように得られる。

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_c(t_B + \varepsilon) = & \frac{1}{J_{cB}} [L(t_B - \varepsilon) - m\{x_{cB}\dot{y}_c(t_B + \varepsilon) \\ & - y_{cB}\dot{x}_c(t_B + \varepsilon)\}] \end{aligned} \quad (85)$$

2. 6 C相及D相における系の運動

時間 $t = t_B$ の瞬間に第2関節の回転運動が急停止すると、系は B 相から C 相に移行する。C 相は、 $t = t_B$ の瞬間に第2関節の回転運動が急停止し、一体化したリンク L-012 が空中浮揚運動を開始し、基礎リンク下左部が着地する瞬間までの期間に対応する。C 相における系の運動は、一体化したリンク L-012 の重心座標(x_c, y_c)を用いると、次式で記述される。

$$x_c = x_{cB} + (t - t_B)\dot{x}_c(t_B + \varepsilon) \quad (86)$$

$$y_c = y_{cB} + (t - t_B)\dot{y}_c(t_B + \varepsilon) - \frac{1}{2}g(t - t_B)^2 \quad (87)$$

$$\theta_c = \theta_c(t_B) + (t - t_B)\dot{\theta}_c(t_B + \varepsilon) \quad (88)$$

図3に示されているように、一体化したリンク L-012 が空中浮揚運動中に、基礎リンク下右部が着地すると、系は C 相から D 相に移行する。二関節ホッピングロボットが、空中浮揚運動状態から着地状態に移行するときの衝突現象は複雑であるが、ここでは、完全非弾性衝突として取り扱うこととする。すなわち、着地の際、接地部は滑らずに、系は接地点回りの回転運動に移行し、着地時間は極めて小さいものとする。

一体化したリンク L-012 の基礎リンク下右部回りの慣性モーメントを J_{cR} 、重力による基礎リンク下右部回りのモーメントを $f(\theta_o)$ とおくと、D 相における系の運動方程式、次式のように書くことができる。

$$J_{cR}\ddot{\theta}_o - f(\theta_o) = 0 \quad (89)$$

3. 数値シミュレーション結果

数値シミュレーションで用いた系の諸元は、既報

Fig.3 Dynamic response (Case-1)

の実験⁽¹³⁾において試作した二関節ホッピングロボットと同一の値を用いてあり、 $l_o = 5.6$ cm, $h = 2.6$ cm, $h_c = 2.3$ cm, $h_o = 1.1$ cm, $l_{c1} = 9.0$ cm, $l_1 = 10.0$ cm, $l_{c2} = 19.8$ cm, $l_2 = 21.7$ cm, $m_o = 0.26$ kg, $m_1 = 0.26$ kg, $m_2 = 0.167$ kg, $J_{c0} = 3.6 \times 10^{-5}$ kgm², $J_{c1} = 7.7 \times 10^{-4}$ kgm², $J_{c2} = 6.8 \times 10^{-3}$ kgm², $J_{A1} = J_{A2} = 1.45 \times 10^{-5}$ kgm², $R_1 = R_2 = 27\Omega$, $K_{T1} = K_{T2} = 0.043$ Nm/A, $K_{E1} = K_{E2} = 0.043$ Vs/rad, $N_1 = 50$, $N_2 = 20$ のとおりである。

DC モータの制御電圧 v_1, v_2 は、既報の実験⁽¹³⁾と同様に遅れ時間を用いて次式のように設定している。

$$v_1 = v_{\max} u_s(t - T_{d1}) \quad (90)$$

$$v_2 = v_{\max} u_s(t - T_{d2}) \quad (91)$$

ここに、 $u_s(t)$ は単位ステップ関数、 $v_{\max}$ は最大電圧、 T_{d1} , T_{d2} は遅れ時間であり、 $v_{\max} = 24$ V としている。

図3は、ホッピング動作が実現し得る系のパラメータの一つの例を試行錯誤的に求めて行った数値シミュレーション結果の一例(case-1)示したも

Fig.4 Loci in phase-A (Case-1)

Fig.5 Loci in phase-B (Case-1)

のである．ここでは，DC モータ印加電圧の遅れ時間を $T_{d1} = 0$ ， $T_{d2} = 0.06$ s，関節部の減衰係数を $c_{d1} = 0.05$ Nms， $c_{d2} = 0.001$ Nms，関節角の初期値を $\theta_1(0) = 0$ ， $\theta_2(0) = 142^\circ$ ，ストッパー機構の設定角度を $\theta_{1s} = \theta_{1A} = 85^\circ$ ， $\theta_{2s} = \theta_{2B} = 0$ としている．図より， $t = t_A = 0.323$ s で第 1 関節の回転運動が急停止するとともに，基礎リンクと第 1 リンクは一体化し，系は A 相から B 相に移行している．一体化したリンク L - 01 は，撃力によって，基礎リンク下左部を中心とする回転運動を開始している．図 4 と図 5 は，A 相及び B 相における系の動的挙動の軌跡を示したものである．

次に，図 3 より， $t = t_B = 0.398$ s で第 2 リンクが急停止し，基礎リンク，第 1 リンク，第 2 リンクは一体化するとともに，系は B 相から C 相に移行し，一体化したリンク L - 012 は，空中浮遊運動を開始していることがわかる．また，一体化したリンク L - 012 の回転角速度は，撃力によって正の値から負の値に急変するとともに，一体化したリンク L - 012 は，左方に移動運動を開始している．図 6 は，C 相における系の空中浮遊運動の軌跡を示したものである．

さらに，図 3 より， $t = t_C = 0.484$ s で基礎リンク下右部が着地し，系は C 相から D 相に移行

Fig.6 Loci in phase-C (Case-1)

Fig.7 Loci phase-D (Case-1)

し，一体化したリンク L - 012 は，基礎リンク下右部を中心とする回転運動を開始している．系の運動は， $t = t_D = 0.914$ s で終了している．図 7 は，D 相に

Fig.8 Loci in all phases (Case-1)

おける系の回転運動の軌跡を示したものである。また図8は、系の動的挙動全体の軌跡を示したものである。

4. 実験結果⁽¹³⁾と数値シミュレーション結果との比較

図9は、既報の実験⁽¹³⁾における系の動的応答を示したものである。ここでは、ホッピング動作が実現可能な系のパラメータとして、 $T_{d1}=0.024\text{ s}$, $T_{d2}=0\text{ s}$, $\theta_1(0)=0$, $\theta_2(0)=155^\circ$, $\theta_{1s}=80^\circ$, $\theta_{2s}=0$ を試行錯誤的に求め実験を行っている。図10は、この実験における画像を示したものである。なお、関節部においては、ギヤボックスなどに起因する複雑な非線形摩擦力が生起しているものと思われる。

図11は、実験と同様、第1関節のDCモータの印加電圧に遅れ時間がある場合の数値シミュレーション結果の一例(case-2)を示したものであり、系のパラメータの値は、 $T_{d1}=0.06\text{ s}$, $T_{d2}=0\text{ s}$, $\theta_1(0)=0$, $\theta_2(0)=150^\circ$, $\theta_{1s}=85^\circ$, $\theta_{2s}=0$ としている。また、関節部の減衰係数を $c_{d1}=0.001\text{ Nms}$, $c_{d2}=0.068\text{ Nms}$ としている。図12は、空中浮遊運動の軌跡を示したものである。

実験結果と数値計算結果は、両方とも、ストッパー機構によって第1関節及び第2関節の回転運動が順次急停止することによって、系の状態がA相、B相、C相に遷移し、ホッピング動作が実現されているという点で定性的に同様の動的挙動を示しているが、ストッパー機構の設定角度、関節角の初期値、DCモータの印加電圧の遅れ時間、時間応答特性などにおいて差異が認められる。このことは、リンクの重心位置、重心回りの正確な値の測定が困難であることや、関節部のギヤボッ

 Fig.9 Previous experimental results of dynamic response⁽¹³⁾

 Fig. 10 Pictures of previous experimental results of dynamic response⁽¹³⁾

クスなどに因る複雑な非線形摩擦力特性や衝突現象等に起因しているものと考えられる。

5. 結 言

本研究は、ストッパー機構を有する二関節ホッピングロボットの動的挙動の理論解析を行なうとともに、数値シミュレーションを行ったものである。系の動的挙動の理論解析においては、系の動的挙動を、A相、B相、C相及びD相の四つの相に分けモデル化するとともに、ストッパー機構によって第1関節及び第2関節の回転運動が、順次急停止し、系がA相か

Fig.11 Dynamic response (Case-2)

ら B 相, および, B 相から C 相に移行する際の B 相および C 相の初期状態の式を, 系の運動量及び角運動量保存の法則を用いて導いている. また, 系の各相における運動方程式を求めている. さらに, 数値シミュレーションを行なったところ, ストッパー機構の設定角度, 関節角の初期値, DC モータの電圧印加遅れ時間などの系の適切パラメータを用いることにより, 系の動的挙動は, 既報の実験結果と同様, A 相, B 相, C 相, D 相の状態を遷移し, ストッパー機構を有する二関節ホッピングロボットの跳躍移動運動動作が良好に実現し得ることが理論的に解明され, 系の動的挙動の一端が明らかにされた.

文 献

- (1) 中野栄二, 大久保宏樹, 跳躍ロボット全般について, 日本ロボット学会誌, 11-3, (1993), 342-347.
- (2) 松岡清利, 跳躍・走行機構に関する基礎的研究, 機論 (第1部), 43-376, (1977), 4501-4509.
- (3) M. H. Raibert, H. B. Brown and M. Chepponis, Experiments in Balance with a 3D One-Legged Hopping Machine, The International Journal of Robotics, 3-2, (1984), 75-92.

Fig.12 Loci in phase-C (Case-2)

- (4) 山藤和男, 三矢喜之, 跳躍移動ロボットの開発と運動制御, 機論, 57-537, C (1991), 1616-1620.
- (5) 大久保宏樹, 中野栄二, ばねとアクチュエータによる跳躍機械の構成法, 日本ロボット学会誌, 10-7, (1992), 948-954.
- (6) 中野栄二, 大久保宏樹, 木村浩, 跳躍機械の着地制御, 日本ロボット学会誌, 9-2, (1991), 169-176.
- (7) 小島宏行, 村上岩範, 吉田新一郎, 関谷拓, ホッピングロボットののための4面包囲型リニア直流モータの開発と連続跳躍実験, 日本ロボット学会誌, 14-1, (1996), 91-95.
- (8) 小島宏行, 村上岩範, リニア直流モータを用いたホッピングロボットに関する研究 (ジャイロを用いた姿勢制御による跳躍移動運動制御), 日本 AEM 学会誌, 5-2, (1997), 30-36.
- (9) 大久保宏樹, 半田実, 中野栄二, 自己振動を利用した跳躍機械に関する研究 (小出力アクチュエータを用いた跳躍の実現), 日本ロボット学会誌, 16-5, (1998), 633-639.
- (10) M. D. Berkemeier and K. V. Desai, Control of Hopping Height in Legged Robots Using a Neural-Mechanical Approach, Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation, (1999), 1695-1701.
- (11) 林良太, 辻尾昇三, 腕の振込みを応用した振り子式跳躍機械, 日本ロボット学会誌, 19-4, (2001), 528-534.
- (12) 原田望, 明愛国, 下条誠, 梶谷誠, ゴルフスイングロボットに関する研究 (新しい手首関節の試作とスイング実験), 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '02 講演論文集, 1A1-C11, (2002), 1-2.
- (13) G. Kato, H. Kojima, M. Yoshida and Y. Wakabayashi, Study on Two-Link Hopping Robot with Stopper Mechanism, Proceedings of the 21st Annual Conference of the Robotics Society of Japan, 2G26, (2003), pp.1-4.
- (14) G. W. Housner and D. E. Hudson, Dynamics, D. Van Nostrand Company, (1959), pp.186-191.