トランポリン運動ロボットの制御 - 宙返り実現のための研究 -

MOTION CONTROL OF A TRAMPOLINE GYMNAST ROBOT -Research for performing somersault-

○上野 真路(法政大院)

正 高島 俊(法政大)

Masamichi UENO, Hosei univ.

Suguru TAKASHIMA, Hosei univ.

Abstract : The purpose of this research is to develop a trampoline gymnast robot which can do some maneuvers such as straight bounce and somersault performance. We already made study about straight bounce for the trampoline robot system constructed. In this report, some simulation analyses are made for realizing somersault by manipulating the angular momentum at take-off instance and controlling the moment of inertia of the robot in the air. The relation between angular momentum and the moment of inertia of the robot is studied, and the availability of somersault is examined.

Key words : Trampoline robot, Gymnast robot, Somersault

1. はじめに

本研究はトランポリン運動を対象として、人間がトランポリンを行っている際の跳躍や着地時の制御動作を解析し、トランポリンのような弾性体上での安定かつ長時間の連続的な跳躍運動が可能なロボットの実現、及びトランポリン上で宙返りなどの自由で高度な跳躍や着地運動が可能なアミューズメント性を持った跳躍ロボットの実現を目的としている。

過去の研究では、現在製作されている 3 リンクロボットに対して、ロボットがより安定した跳躍をするためにさまざまな制御方法が提案されてきた。また、姿勢を安定させるためには足首が有効であると考え、足首を付加した 4 リンクロボットの剛体 4 リンクのモデルに対してのシミュレーションを行い、その有効性が検討されてきた。

このように過去の研究では、弾性体上での安定かつ長時間の連続的な跳躍運動が可能なロボットの実現に向けての研究が行われてきた。しかし、宙返りなどの自由で高度な跳躍や着地運動が可能なアミューズメント性を持った跳躍ロボットの実現に向けての研究はまだ行われていない。そこで、本研究では、トランポリンロボットの研究のもうひとつの目的である宙返りについての研究を行い、剛体 4 リンクモデルに対する宙返りのシミュレーションを作成し、その制御方法を検討して行こうと考えている。

2. トランポリン運動ロボットとベッドのモデル化

2.1 トランポリン運動ロボットのモデル化

ロボットのモデルは以下の 3 つの仮定のもとにモデル化し、そのモデルを Fig.1 に、そのパラメータを Table.1 に示す。

- (1) 跳躍ロボットは 4 リンクからなり各リンクは人間の上体、大腿、下腿、足首部分に相当する。
- (2) 各リンクは回転関節で結合されている。
- (3) モデルの運動は 2 次元平面内に拘束されている。

このモデルの状態は第 1 リンクの絶対重心位置 (x, y) と第 1 リンク絶対角 θ_1 及び関節角 $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ で表され自由度は 6 である。

Table.1 Parameter of model of the gymnast robot

	Parameter
Total length[m]	0.785
Total mass[kg]	11.34
Moment of inertia when the model was made to stand upright [kg-m ²]	1.19

Fig.1 Four-link model of the gymnast robot

2.2 トランポリンベッドのモデル

足首を取り付けるにあたり、人間のつま先とかかとに相当する部分にトランポリンベッドからの反力が加わる場合を想定したモデルを構築した。そのモデルを Fig.2 に示す。

l : Frame length l : Loose spring length
 b : Bed length K : Stiffness C : Damping
 (x_f, y_f) : Foot position x_{td} : Touchdown position

Fig.2 Trampoline mat model

3. 宙返り実現のための方法

トランポリンの反力は、跳躍ロボットの着地した位置と足先の位置によって大きく変化する。そのため跳躍ロボットに発生する角運動量は跳躍ロボットとトランポリンの相対的な位置と姿勢に大きく影響されることが過去の研究により証明されている。そこで、本研究では空中においてはトランポリンベッドが跳躍ロボットに与えた角運動量が保存されることに着目し、角運動量がある定数で与えられるのならば、空中で跳躍ロボットの慣性モーメントを変化させることで跳躍ロボットを宙返りさせることが可能なのではないかと考え、その方法について検討していくことにした。

4. 簡略化した跳躍ロボットのモデル

前節で考えた宙返り実現の方法を検討するにあたり、4 リン

クモデルではその制御が難しくなると考え、新たに簡単な跳躍ロボットのモデルを作成した。そのモデルを Fig.3 に、モデルのパラメータを Table.2 に示す。

Table.2 Parameter of Simplified model of the gymnast robot

Mass[kg]	11.34
Length[m]	0.64
Moment of inertia [kg-m ²]	1.19

本研究では慣性モーメントと角運動量の関係を検証するため慣性モーメントと質量を Fig.1 に示したモデルと統一した。又、モデルは慣性モーメントが変化する幅が大きく取れるのではないかと考えリンク機構ではなく 2 つの質量を持つ物体を直動アクチュエータでつないだ構造にした。

Fig.3 のような 2 つの重さ m の物体が回転軸から r はなれたところで軸の周りを回転しているとき、慣性モーメント I は

$$I = 2mr^2 \quad (1)$$

で与えられる。また、剛体の重心周りの角運動量を L 、慣性モーメントを I 、角速度を $\dot{\theta}$ としたとき角運動量は

$$L = I\dot{\theta} \quad (2)$$

となる。このモデルの合成重心周りの角運動量を L とすると (1) 式、(2) 式より

$$I = 2mr^2 = \frac{L}{\dot{\theta}} \Leftrightarrow r = \sqrt{\frac{L}{2m\dot{\theta}}} \quad (3)$$

となり、トランポリン反力から得た角運動量で跳躍ロボットが宙返りをする事ができる慣性モーメントが生じるための 2 つの質量を持つ物体間の距離 r を得ることができる。

Fig.3 Simplified model of the gymnast robot

5. 宙返りのシミュレーション

4 で述べた跳躍ロボットのモデルを使い、簡易的に二次元での力学シミュレーションを行える MSC Software 社の Interactive Physics 2000(以下 IP)を使用した。シミュレーションでは、0.4sec で一回転するように $\dot{\theta} = 2\pi/0.4$ (rad/s) の角速度を与えた。

5.1 直動アクチュエータの制御

直動アクチュエータは(3)式で求めた物体と合成重心との距離 r を目標値 r_0 とし、これまでの研究で落下・着地・踏切・飛行と4つの期間に分かれていた跳躍サイクルを落下・着地・踏切期間と飛行期間の 2 つに分け、それぞれの期間について直動アクチュエータが出す力を PD 制御を用いて制御している。以下にその制御側を示す。

落下・着地・踏切期間:

$$F = kp \times (0.32 - r) + kd \times (0 - \dot{r})$$

飛行期間:

$$F = kp \times (r_0 - r) + kd \times (0 - \dot{r})$$

5.2 シミュレーションの結果

Fig.4 にはIPによるシミュレーションを、Fig.5 に慣性モーメントの時間変化のグラフを示す。今回行ったシミュレーションの結果では考案した方法で宙返りを実現させることができた。しかし、跳躍ロボットが回転をしているときの慣性モーメントの最小値が $0.07(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$ とかなり小さい値になっている。

の結果では考案した方法で宙返りを実現させることができた。しかし、跳躍ロボットが回転をしているときの慣性モーメントの最小値が $0.07(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$ とかなり小さい値になっている。

Fig.4 Simulation result of somersault

Fig.5 Change of moment of inertia during somersault

6. 終わりに

本研究では、空中では角運動量が保存されることに着目し、角運動量がある定数で与えられるのなら、空中で跳躍ロボットの慣性モーメントを変化させることで宙返りが可能なのではないかと考えこの方法について検討した。シミュレーションではこの方法で宙返りができることが確認できた。しかし、シミュレーション結果からトランポリン反力から跳躍ロボットが得た角運動量で回転するために必要な慣性モーメントが $0.07(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$ と小さい値であることがわかった。しかし現在のロボットのモデルではこの慣性モーメントの実現は不可能である。人間が行うトランポリン運動を見ると人間はトランポリンからそれほど多くの角運動量を得ていないように見える。又、伸身での宙返りのように慣性モーメントが大きくても宙返りを可能にしている。そこには跳躍した時の最高到達点の高さが関係しているのではないかとと思われる。今回は 0.4sec で一回転させるという条件下でシミュレーションを行ったが、今後は実現可能な慣性モーメントで宙返りをさせるために体操ロボットの跳躍高さを考慮に入れて研究を進めていく必要があるように思われる。

7. 参考文献

- [1] 中川 憲治 著, "工科のための一般力学", 森北出版, 1977
- [2] 海野貴之, 高島俊, "トランポリン運動ロボットの制御—コンピュータ・シミュレーションと実験—", 第 2 回ロボティクスシンポジウム予稿集, 1997