一点支持回転体並進移動ロボット

Point sustained spinning and locomotive robot

○学 小川 修平 (東京大) 正 篠田 裕之 (東京大)

Shuhei OGAWA, Tokyo University, ogawa@alab.t.u-tokyo.ac.jp
Hiroyuki SHINODA, Tokyo University

Abstract: Precession is a motion when the rotation axis of a rotating body(e.g. spinning top) is out of perpendicular, the rotation axis describe a circle like trajectory. In this paper, we control the motion of a spinning top using precession principle. For the first approach, we add torque to a magnet-attached spinning top by actuating electromagnets. In this way, we can both retain top's spin and move the top. Secondly, we equip a motor and a gimbal to a spinning top. In the computer simulation, we confirm we can control the motion of a top by actuating and de-actuating the motor.

Key Words: Robot, Locomotion, Spinning Top, Precession

1. はじめに

1.1 背景

近年、歩行型・車輪型・生物模倣型など、色々な移動ロボットが提案されている。しかし、どんな条件下でも地上を移動できるようなロボットは無い。このため、様々な状況を想定し、様々な移動機構を持った多様なロボットが開発されている。特に、物が多く置かれた机の上や散らかった部屋の床のような、障害物のある平面上を、障害物を避けて移動するには、接地面積の小さい一点支持型の移動ロボットが必要であると考えられる。

1.2 一点支持ロボット

一点支持ロボット、すなわち一本足ロボットの研究は、二足歩行や惑星探査ロボットの基礎研究として多く行われており[1]、中には一点接地モデルで考案されたものもある。これらの多くは跳躍動作によって移動を実現した物であるが、跳躍動作は不安定であり、着地時の衝撃・負荷が大きい。

また、一点接地での移動機構が実現された例として玉乗りロボットも発表されている。[2] これは球上にロボット本体を搭載することによって移動を実現しているため、スリムな足元の構造を実現することは困難である。

1.3 本論文の目的

以上の考察に基づき、本論文では、独楽の原理を利用した、足元がスリムな一点支持の移動ロボットの製作について検討を行う。具体的には、2章では外部磁場を利用することで、磁石が搭載された独楽の運動を制御することを試みた。そして3章では、独楽内部に姿勢制御ジャイロのような機構を持たせることで独楽の歳差運動を制御できることをシミュレーションで確認した。

2. 外部磁場を利用した独楽の制御

2.1 先行研究

「磁力独楽」や「永久独楽」などと呼ばれている独楽の玩具が古くからある。この玩具では、凹面上で磁石の取り付けられた独楽を回転させ、独楽が中心を横切る時に電磁石で独楽にトルクを与えると独楽が回転し続ける。主に電磁石と磁場検出用コイルとトランジスタ及び電源からなる単純な駆動回路で実現されている。このシステムでは、独楽を凹面上でランダムに運動させながら回転させ続けることが出来るが、平面上のある一点で回転させ続けること及び独楽の並進運動を制御することは不可能である。

2.2 回転持続実験

前節の先行研究に基づき、磁石が搭載された独楽を定点で回転させ続けるために制作した装置を Fig. 1 に示す。独楽は直径 60mm のアクリル円板であり、2つの磁石が中心から 20mm の位置に対向して取り付けられている。台座に取り付けられた2つの電磁石は、直径 0.4mm のポリウレタン銅線 10m を鉄製六角ボルトに巻きつけて自作した。また、台座中央には直径 8mm 程度の浅い溝が付けてあり、ここで独楽を回転させる。

Fig. 1 Top spun by electromagnets

電磁石を DC16V 電源を用いて、周期 50ms、duty 比 50% でパルス駆動し、台座中心で独楽を回したところ、独楽は回転を保ち続け、実験は成功した。

2.3 並進運動実験

電磁石 8 個を用いて、独楽に直線的な移動をさせることを目標として制作した、2*4 の電磁石アレイによるシステムを Fig. 2 に示す。

Fig. 2 Top moved by electromagnets

前節と同様に、斜め方向に対向する一対の電磁石をパルス駆動することによって、独楽を回転させ続けられることが確認された。また、横方向対抗する電磁石を駆動すると、独楽が電磁石から受ける斥力に偏りが生じるため、深さ 0.5mm の溝を彫ったアクリル板上を溝に沿って移動することを確認した。ただし、斥力を受けることで独楽の回転がぶれたり、独楽移動に失敗して独楽が倒れてしまうことが多かった。

2.4 結果

本実験により、磁石を搭載した独楽を定点で回転させ続けることに成功した。また、独楽を直線的に移動させられることも確認したが、この成功率は低かった。これは、独楽の歳差運動の動特性を考慮していなかったことが原因と考えられる。今後は、独楽の動特性に合わせた独楽の移動軌跡を設計し、最適な電磁石の駆動法を探ることで、台座に溝が無くても並進移動を実現できるようにすることを目標とする。

3. 内部ジャイロを使用した独楽の制御

3.1 先行研究

ハイテクゴマ（大日向社）は、摩擦で失われる回転運動のエネルギーを、振動モータで供給することにより回転し続けることができる。つまり、振動モータを回転させるカウンタートルクによって、安定化ジャイロのように、独楽全体の回転を保つことができるものと思われる。

このことを確かめるために、DC モータに負荷を取り付け、独楽の軸上に配置したところ、モータの回転と逆方向に独楽全体が回転し続けることが確認できた。

2.2 内部ジャイロによる並進

前節でも述べたように、独楽の内部に取り付けた負荷をモータによって回転させると、角運動量保存則に従って独楽本体は負荷と逆向きの角加速度を得る。

ここで、独楽の軸が鉛直方向から傾き、独楽が歳差運動をしているときを考える。独楽の軸は円を描くように振れ回っているが、一定の範囲内を移動するにすぎない。ここで、軸対称な独楽の質量を M 、独楽の軸先から重心までの距離を x 、回転軸周りの角速度を ω 、回転軸周りの慣性モーメントを I とすると、歳差運動の角速度 ϕ は独楽の回転軸の傾き θ （振れ回りの角度）によらず、式(1)のように表されることがわかっている。[3]

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{Mgx}{I\omega} \quad (1)$$

よって、独楽の内部ジャイロによってこの ω を変化させることができ、歳差運動が描く円の大きさを制御することが可能であることがわかる。

3.2 シミュレーション

独楽の軸上に取り付けられたモータ及び負荷を制御することで、歳差運動する独楽の並進運動を制御できることを確認するために、ODE(Open Dynamics Engine)を用いてシミュレーションを行った。このシミュレーションモデルは Fig. 3 に示すように単純な構造である。

このシミュレーションにおいて、独楽には初期回転速度を与えた上でトルクを加え、歳差運動をさせている。独楽が歳差運動している最中に、独楽に取り付けられたモータを回転させたときの独楽の重心の移動を確かめる。

Fig. 3 Simulation model

3.3 結果

独楽が歳差運動している最中に、独楽に取り付けられたモータを独楽の自転方向とは同じ方向に回転させた時の独楽の重心の移動及び、独楽の自転方向と同じ方向に回転させたときの独楽の x, y 平面上の重心の移動及び内部負荷の回転角速度を Fig. 4 に示す。この結果より、内部負荷の回転角速度の変化に伴って、歳差運動によって周期的に変化していた独楽の重心位置が大きく変化していることが分かった。

Fig. 4 Simulation result

また、本節の最後に独楽の回転軸の傾きの制御について考える。一般的な軸先と重心が一致していないような独楽が傾いているとする。この独楽が直立するか直立状態を経ず倒れるかは独楽の運動エネルギー、すなわち回転角速度によって決定されることがわかっている。[4] このことを用いれば、独楽の内部ジャイロを制御することで、独楽が歳差運動している状態から安定状態すなわち直立状態に移行させることも可能であると考えられる。

4. まとめ

本論文では、独楽の原理を利用した 2 通りの方法で、一点支持ロボットの回転を保ちながら並進運動の制御を行う可能性を検証した。今後の目標は、本論文で提案した 2 通りの方法を洗練させた上でそれぞれ実装及び制作し、接地面積が小さく足元がスマートな移動ロボットを実現することである。

文 献

- [1] A.Sayyad., B.Seth and P.Seshu, "Single-legged hopping robotics research-A review," *Robotica*, vol.25, pp.587-613, 2007.
- [2] 熊谷正朗, 落合恭也, 今野範明, "平面上を移動可能な倒立振子の開発", 日本機械学会 Robomec08 予稿集, 講演番号 2P1-C11(CDROM), 2008.
- [3] 安井久一, "独楽はなぜ倒れないか", 共立出版, 1998.
- [4] E.G.Gallop., "On the rise of a spinning top," Cambridge Philosophical Society, 1903