1516 受動車輪型移動機構を用いた二足ロボットの倒立に関する研究

Study on handstand of two-legged robot with passive wheel

○学 新谷和也 (高知工科大学院) 正 井上喜雄 (高知工科大学) 正 芝田京子 (高知工科大学)
学 上田雄介 (高知工科大学院) 学 瀬川靖彦 (高知工科大学)

Akihiro KIMURA, Kochi Univ. of Technology, Tosayamada-cho, Kami-shi, Kochi 782-8502, Japan
Yoshio INOUE, Kochi Univ. of Technology, Kyoko SHIBATA, Kochi Univ. of Technology
Yusuke UEDA, Kochi Univ. of Technology, Yasuhiko SEGAWA, Kochi Univ. of Technology

Key word : Biped robot, passive wheel, inertia rotor, handstand

1. 緒言

現在さまざまな環境下で活躍するロボットが多く開発されてきており、そのロボットによる移動方法として脚による移動や車輪による移動があげられるが、なかでも脚歩行は段差や不整地など様々な地形に対応した移動が可能であり、不整地における移動は車輪による移動に比べ効率が良い。しかし、障害の無い水平面上における移動性能においては車輪走行に優位性があると知られている。そこでその両方の利点を生かすために不整地では脚歩行、整地では車輪走行と使い分けるハイブリットな移動手法を持つロボットが研究されている。この方法としてモーターを持たない受動車輪を用いて車輪走行を実現する方法が研究されているが⁽¹⁾、その多くは多脚であり二足のロボットはあまり研究されていない。

本研究では、環境に合わせて受動車輪による車輪走行と二足歩行を使い分け移動を行う二足のロボットの開発を目指してきた。本論文ではこのロボットの車輪走行時における倒立および自立走行の検討とシミュレーションについて報告する。

2. 受動車輪型移動機構

本研究で使用した2足ロボットの概略図を図1(a)に示す。このように人の足の動作で用いられる股の開閉と足のひねり機構のみで移動する。

(a) Schematic diagram (b) Movement image of Robot
Fig. 1 Biped robot

図1(b)のように、(1)から(5)へと動かすことで、ロボットは図下向きの速度を得る。逆に、(5)から(1)へと足を動かすことで、図上向きの速度を得る。また、片足を(1)から(5)、もう一方を(5)から(1)へと動かすことで左右の脚が逆向きの速度を得てその場で回転する。片足の車輪のみ(1)から(5)または(5)から(1)と動かすことで、車輪を動かさ

ない足を軸足とした回転を行う。

3. 受動車輪による推進

図2のように、車輪が $-L(t)$ 方向に動く時、車輪には、車輪回転の接線方向に F_n 、法線方向に F_t が発生する。本体速度を V とする時、 F_t 、 F_n は次の式で表される。

$$F_t = -\text{sgn}(V \times \cos \theta(t) + \dot{L}(t) \times \sin \theta(t)) \times \mu_t \times W / 2 \quad (1)$$

$$F_n = -\text{sgn}(V \times \sin \theta(t) - \dot{L}(t) \times \cos \theta(t)) \times \mu_n \times W / 2 \quad (2)$$

ここで、 W はロボットの重量である。 $\dot{L}(t)$ は、時刻 t における股の開閉速度を表している。 μ_t は、車輪回転方向のころがりの動摩擦係数であり、 μ_n は、車輪回転軸の法線方向への動摩擦係数である。また、 sgn は括弧内の符号を監視する関数であり、マイナスであれば-1、プラスであれば1を返す。本体速度 V と、 F_n 、 F_t の y 成分を合成し本体質量 M で割ったものが加速度となり、移動が可能となる。

Fig. 2 Relation of power

4. 推進条件と推進効率

受動車輪による推進力は F_t 、 F_n 、 θ によってきまる。その推進力 F_y の式は以下になる。

$$F_y = F_n \times \sin \theta(t) - F_t \times \cos \theta(t) \quad (3)$$

このように推進力を大きくするには F_n をなるべく大きく F_t をなるべく小さくすればいいことが分かる。先の式(1)(2)とあわせて考えると、力の上限は摩擦係数と車体荷重によって決まるため車輪回転方向摩擦係数 μ_t をなるべく小さく、車輪回転接線方向摩擦 μ_n をなるべく大きくすることで推進力の上限を大きくすることができる。なお、推進可能となる条件は(1)(2)(3)式より

$$|\tan \theta(t)| \geq \mu_t / \mu_n \quad (4)$$

また、 x 方向の力は

$$F_x = F_n \times \cos \theta(t) + F_t \times \sin \theta(t) \quad (5)$$

となり、図1(b)のようにもう一方の足を左右対称に動かす

ことで相殺し, y 方向推進力だけを取り出すことが出来る.

5. 受動車輪による倒立

まずロボットを簡単なモデルで考えると図 3(a) のような台車型倒立振子のモデルで表わす事ができる. この場合台車に与える力 F がこのロボットの移動推進力および制御入力となるが, 先の式 (3) よりこの系の運動方程式は以下のようになる.

$$(M + m)\ddot{x}_0 + ml(\ddot{\alpha} \cos \alpha - \dot{\alpha}^2 \sin \alpha) = Fy \quad (6)$$

$$\frac{4}{3}ml^2\ddot{\alpha} + ml\ddot{x}_0 - mgl\alpha = 0 \quad (7)$$

ここで M は車体質量, m は振り質量, l は振り長さ, α は振り傾き角度である. このような運動系の静止時の安定化については足先の車輪角度 θ を固定する事で可能であるとシミュレーションにおいて示されている⁽²⁾. しかし, 車体が運動する場合, 先の 2 章で述べたように足先の車輪と股の開閉を周期的に行い移動するため, θ が振動的に変化する. 足先車輪を振動的に変化させる場合, 式 (4) より必ず推進力を得る事が出来ない場所が存在する. そのため制御入力 Fy がなくなり, 制御が不安定になる. このため, この系の運動時は足先以外の制御入力が必要であると考え.

(a) No rotor (b) Add rotor

Fig. 3 Cart-pendulum system

6. 慣性ロータによる制御

ここでその制御入力の一つとして慣性ロータによるトルク入力を考える. この慣性ロータは図 3 (b) のように取り付ける. この運動系についてシミュレーションを行なった. その結果, 振子は安定し, ロータの回転角速度も収束したためこのまま自立走行可能であると考えられる (図 4).

Fig. 4 Inertia rotor system

このように慣性ロータを用いる事で簡単なモデルでの自立走行は可能であると言えるが, このモデルは図 1 (b) に見られるような走行時における脚の開閉にともなう胴体部の上下動を考えていない. この胴体部の上下動作は式

(1) (2) の W が変わることによって推進力が変化する, 重心が移動するため制御トルクや重量による影響が変化する, 胴体の上下動による慣性力が閉脚時には傾きを増大する方向に開脚時には傾きを抑制する方向に作用する (図 5) などの影響を及ぼすと考えられる.

Fig. 5 Inertial force

Fig. 6 Simulation model

つぎに実際の 2 足ロボットの形をモデルとしたシミュレーションを行なった (図 6). 慣性ロータのトルク値を胴体の傾き角度, 角速度, ロータの回転角速度をフィードバックすることによって制御し, 自立走行を行なった. その一例を図 7 に示す. このシミュレーション結果より, 脚の開脚時に傾きやロータの角速度が大きく変化している事が見て取れる. このため, 開閉動作をフィードバック制御に組み込めばより安定した自立走行が可能であると考えられる. 今回の一例では慣性ロータの角速度は $\pm 2000 \text{ deg/s}$ の範囲をとるが, これは慣性ロータの形状や重量の調整, 開閉動作のフィードバックで小さくする事が可能であると考え.

Fig. 7 Self-sustained movement

7. 結言

片足一輪両足 2 輪の受動車輪を用いた 2 足ロボットにおける, 倒立および自立走行について検討した. それにより受動車輪の推進力による制御の問題性, 慣性ロータによる制御の可能性, 自立走行時の制御における脚の開閉動作に対する考慮の必要性を確認する事ができた.

今後の課題として, 脚の開閉動作をフィードバックに加え, 慣性ロータの形状や重量を調整する事で安定した自立走行を行なう事を目指す.

文献

- (1) 広瀬茂男・竹内裕喜: ローラーウォーカ: 新しい脚車輪ハイブリッド移動体の提案, 機論, 62 巻, 599 号, C 編, pp242-248, 1996
- (2) 上田雄介・新谷・井上・芝田: 受動車輪を用いた 2 足ロボットの研究, 日本機械学会中国四国学生会第 37 回学生会卒業研究発表講演会講演前刷集, pp.271, 2008