

対称回転子を用いた二足歩行ロボットの安定化への取り組み

Stabilizing a Biped Robot by Using a Symmetric Rotor

○ マイケル マイヤー (阪大) 正 浅田 稔 (阪大, 阪大FRC)
学 ロドリゴ ゲーハ (阪大) 正 荻野 正樹 (阪大)

N. Michael Mayer, Osaka University, 2-1, Yamadaoka, Suita, Osaka

Rodrigo da Silva Guerra, Osaka University

Masaki Ogino, Osaka University

Minoru Asada, Osaka University, HANDAI Frontier Research Center

We present here some concepts and simulations in which a dynamic walker is stabilized by using a fast heavy rotor, a gyro. The dynamics of a symmetric, fast rotating gyro is different from that of a non-rotating solid body, e.g. in the case of small disturbances it tends to keep the axes the same. This circumstance is used and tested in a passive dynamic walker. Results show that the rotor enhances the stability of the walking in the simulations.

Key Words: reaction wheel, inertia actuator, gyro actuator, gyro actuator with brakes

1 はじめに

近年ロボット自身の持つ力学的ダイナミクスを積極的に利用して二足歩行を実現する手法が注目されている。アクチュエーターを用いずに歩行を実現する受動歩行 [1] はその代表例であり、エネルギー効率のよい自然なダイナミクスを利用した歩行への端緒として注目されている [2, 3, 4]。これまで受動歩行に関わる研究では、運動を2次元サジタル平面に拘束した状態で解析され多くの成果を上げてきた。しかし、その状態ではピッチ軸周りの安定性については保証されるものの、ロール軸とヨー軸周りの安定化については評価できず、依然として2次元の歩行から3次元歩行を実現することは困難な問題となっている。

このような問題を解決するため、一つのパラメータの値によって、2次元歩行から3次元歩行へと連続的にダイナミクスを変化させることができれば有用である。本研究では、高速で回転する大きな質量を持つジャイロを使い運動を安定化する手法の提案を行う。ジャイロは人工衛星や砲撃、航法などで使われることが多い対称回転体である [7]。ロボティクス分野では車輪型ロボットで非対称の車輪によって駆動される Gyrover が有名である [6]。2足歩行においてもジャイロの適用例はあるが [8, 9]、これらの研究では回転子が運動方向に平行に配置されているのに対し、本研究では股関節に平行に配置した手法を提案する。

本論文ではまず受動歩行をジャイロを使って安定化する手法について述べる。さらに、ジャイロの回転速度を加速、減速することによってピッチ軸周りの運動も安定化できることを示し、ジャイロが慣性アクチュエータとして利用できることをシミュレーション実験によって示す。

最後にジャイロによる安定化を行うための装置の実現手法について議論する。

2 ジャイロを使った受動歩行の安定化

シミュレーション実験はオープンソースのダイナミクスシミュレータライブラリー Open Dynamics Engine (ODE) [10] で行った。坂の角度は 3.0 [deg] とした。ロボットは駆動力として質量の大きい一定速度で回転するジャイロのみを持つ。ロボットの各部の質量は上腿 0.07 [kg]、下腿 0.012 [kg]、腰部 0.011 [kg]、回転子 0.565 [kg] とし、回転子の回転速度は 175 [rad/sec] とした。膝関節は支持脚時に固定されるものとし、それ以外は摩擦のない回転関節として機能する。図4に受動歩行のシミュレーション実験の様子を示す。回転しないジャイロを持つロボットは1、2歩までしか歩行できなかったのに対して、回転するジャイロを持つロボットは5歩までの歩行が可能であった。

3 ピッチ軸周りの運動の安定化

ピッチ軸周りの運動の安定化のためには、ジャイロの回転中心は重心に近いことが望ましい。ピッチ軸周りのロボットの回転角度を α とすると、安定化を行うための制御式は

$$\ddot{\theta}_r = -A \sin(\alpha) + B\dot{\alpha} + C\rho(\dot{\theta}) \quad (1)$$

とかける。ここで、 $\dot{\theta}_r$ はジャイロのモーターに与える回転速度である。A, B, C はロボットの大きさ、重量、姿勢に依存する定数である。

この制御式はリアクションホイールの特性を利用している。PD 制御と同様に、ロボットと回転子の慣性テンソルが既知であれば、解析的に制御式のパラメータを求めることができる。慣性テンソルはPD制御での P に、B はオーバーシュートを抑制する D の項に相当する。

パラメータ C と関数 $\rho(\cdot)$ を適切に設計することによって、回転子の速度をある範囲内に保つことができる。 $\rho(\cdot)$ の関数型は均衡点の安定性に依存する。均衡点が不安定

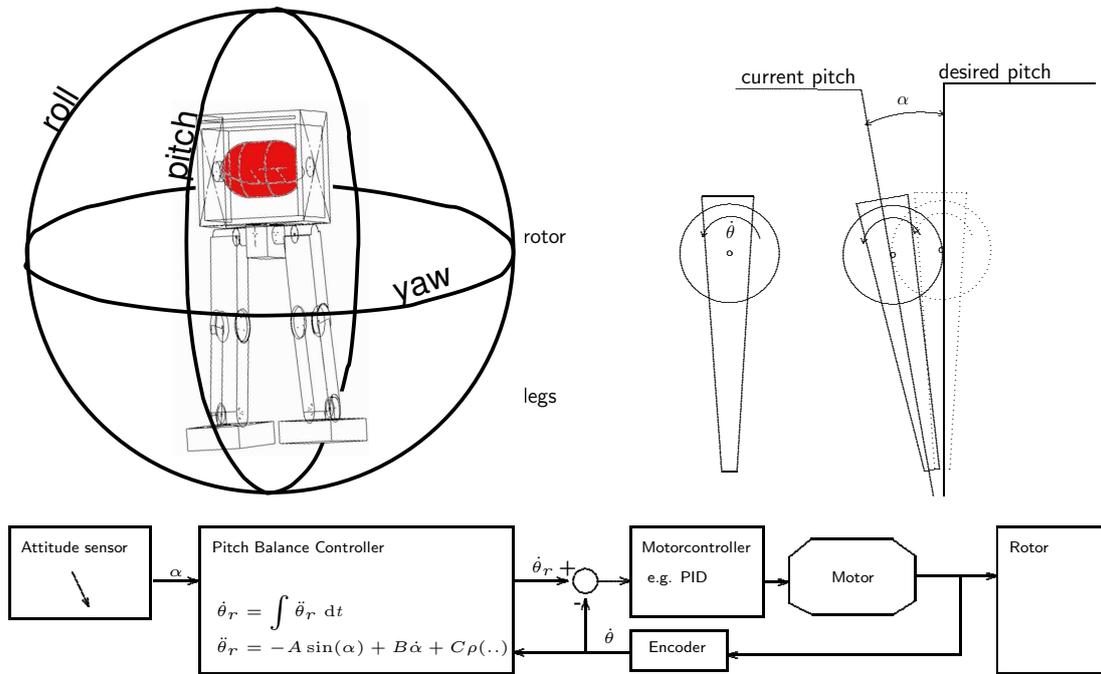


Fig.1 Above left: Scheme for the proposed actuator in a biped robot. The rotor is marked bold. The rotor's axis is parallel to the hip. Above right: Schematic view from the left side of the robot. The pitch angle is α and the speed of the rotor $\dot{\theta}$. The positive values mean both the velocity and the pitch angle have the same direction. Below: Feedback loop for pitch balancing: The controller uses information about the attitude of the robot and the encoder values from the rotor as input, giving α as the output (e.g. gyroscope and gravity sensor combination). The parameters A, B, C have to be adapted to the properties of the robot.

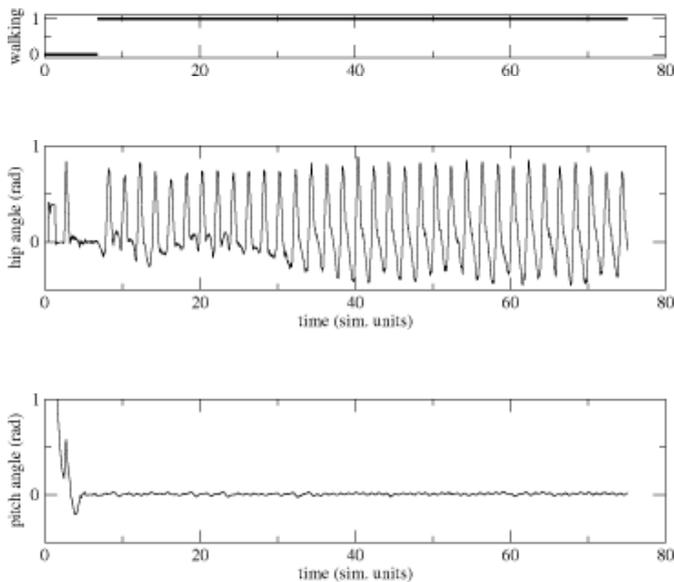


Fig.2 Motion patterns of walking in the actuated biped robot. On top: the state of the waling behavior. Middle: Motion pattern of the left hip. The motion pattern is not entirely regular. Below: The state of the pitch value (α). A small oscillation is to see.

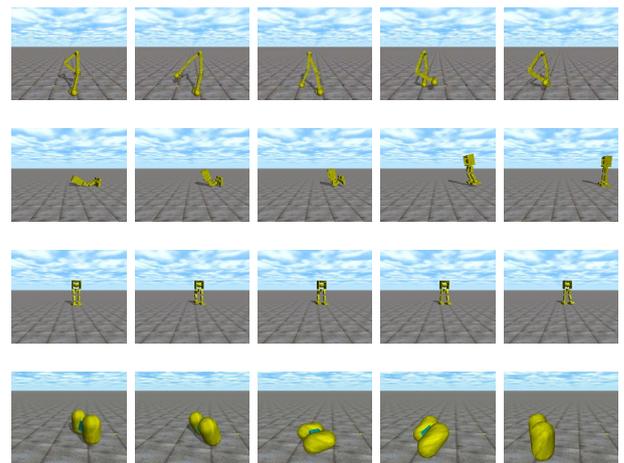


Fig.3 Simulation results for three variant types of robots: First row shows a non-actuated passive dynamic biped walker (PDW) that is stabilized with a gyro that roates with constant speed (open loop control). Second row shows an actuated biped robot with 3 degrees of freedom per leg and an acutated gyro (close loop control). The third row shows the same robot walking using an open loop control for the legs. Fourth row shows an robot the only consists of a trunc. This robot can move just by using the acceleration and deceleration of an internal reaction wheel.

である場合には、関数型は以下のように設定する。

$$\rho(\dot{\theta}) = H(\dot{\theta} - \dot{\theta}_{opt}) \quad (2)$$

ここで、 $H(x)$ は以下のような区分的に線形な関数である。

$$H(x) = \begin{cases} -H_{lim} & \text{if } x < -H_{lim}, \\ x & \text{if } |x| < H_{lim}, \\ H_{lim} & \text{if } x > H_{lim} \end{cases} \quad (3)$$

この制御式によって、回転子の速度が小さい場合には均衡点を前に、回転子の速度が大きすぎる場合には均衡点を後ろにするようになる。均衡点が安定である場合には、上記の式を逆の関係にして、

$$\rho(\dot{\theta}) = -H(\dot{\theta} - \dot{\theta}_{opt}) \quad (4)$$

のようにする。このとき、パラメータ C , H_{lim} はバランス保持と干渉しない程度に小さく、しかし回転子の速度を許容範囲内に制限して $\dot{\theta}_{opt}$ に収束するように大きくする必要がある。

4 ジャイロを用いた二足歩行の安定化

ピッチ軸周りの安定化について、提案手法を片足3自由度の二足歩行ロボットモデルに適用して検証を行った。立ち上がり、歩行、ジャンプのそれぞれについて、以下のパラメータを用いてシミュレーション実験をおこなった。

Body width	1.0 [m]	rotor radius	0.25 [m]
Body height	1.3 [m]	foot length	0.80 [m]
Body depth	0.6 [m]	foot height	0.20 [m]
upper leg length	0.5 [m]	foot width	0.50 [m]
lower leg length	0.6 [m]	Dist. betw. legs	0.35 [m]

歩行においては、歩幅にはばらつき (最大 0.4 [m]) が見られたものの、長時間安定して歩行を続けることができた。しかし、回転子の速度が許容量を超える場合があり、その度に回転子の速度を適切な値に落ち着かせるためにロボットを立ち止ませる必要があった。図3のグラフに示すように、ピッチ軸周りの角度 (α) の変動によって歩行は不安定になっている。これは、ピッチ軸周りの制御器が準最適なものになるように定数 A の値を決めたためである。実験では、より A を大きくすることによって制御を厳密にするよりも、弱い制御の方が、よりよい歩行を実現することが示された。ジャンプではロボットの姿勢をロボットが空中にあるときに制御可能であることが示された。

シミュレーション実験でのモーター特性は、現在入手できるモーター特性を超えるものであるが、これについてはより制御を工夫することにより、あるいは、ブレーキのメカニズムを考えることによって実現可能となる可能性がある。

5 考察と結果

本研究ではリアクションホイール/ジャイロを駆動力として二足歩行を安定化する手法の提案を行い、シミュ

レーション実験による検証を行った。ロボットの安定化を行う手法として (a) 回転子をジャイロとして使用し、ヨー軸、ロール軸周りの運動の安定化を行う方法と (b) 回転子をジャイロとリアクションホイールのどちらにも使用する方法を考えた。(a) の手法を受動歩行モデルによって検証し、(b) の手法を駆動力を持ち片足に3自由度を持つモデルにおいて検証した。ロボットの安定化を行う制御アルゴリズムを行ったが、それに含まれる3つの定数はロボットの力学特性によって決定されるべきものである。これらのパラメータの最適化を行うことによって、過渡応答とエネルギー消費を最適化可能である。

本論文では、提案手法が二足歩行ロボットの安定化に有用である可能性を示したが、その実現のためには極めて高い性能のエレクトロニクス、モーター、機構が必要である。起き上がりのような運動にはもちろんのこと、姿勢の維持についても高いトルクが求められる。

シミュレーション実験によれば、Sony の Qurio と同サイズのロボットでは、本研究で述べたような動作を行うためには 5-10 [Nm] のトルクが必要であることが見積もられた。問題は、必要なトルクが回転子の加速によって出力されるために、モーターが非常に広範囲の回転速度において、そのようなトルクを出力する必要があるということである。同時に回転子はジャイロとしても機能し、ヨー軸とロール軸周りの運動についても安定化する必要がある。回転子の速度が高いほどこの効果は大きくなり、その影響についても考慮する必要がある。

この問題に対する一つの解決策は、回転子にブレーキ機構を実装することである。ブレーキ機構によってもたらされる負の加速により、上で述べたような広範囲の回転速度における高いトルク出力を得ることができる。この機構については現在 NEDO プロジェクトにおいて実装を計画しており、ジャンプなどの素早い運動を行うロボットを製作することを目指している。シミュレーション実験によれば、4000 [rpm] の回転速度において 20 [Nm] のトルク出力が得られると見積もられており、回転子/ブレーキ機構システムによって十分なトルクが出力可能である。

Acknowledgment

This work was supported by the NEDO program for the Aichi Expo 2005. We thank Mrs. Helena Selbach-revising the English of this work. N.M.M. thanks Sven Behnke for his support and fruitful discussions in the summer of 2004, Ferenc Farkas for his competent advice and Ziton Hsu for her patience and help.

参考文献

- [1] T. McGeer. Passive Dynamic Walking. International Journal of Robotics Research 9:2 62-82 (1993)
- [2] SH. Collins, M. Wisse, a. Ruina, A Three-Dimensional Passive-Dynamic Walking Robot With Two Knees and Legs, The International Journal of Robotics Research Vol. 20, No. 7, July 2001,

pp. 607-615

- [3] M. Garcia (1999) PhD Thesis. Cornell University (1999)
- [4] NM. Mayer, JM. Herrmann, AA. F.-Nassiraei, M. Browne and T. Christaller, An Assymmetric 2-D Passive Dynamic Walker, Proceedings of the AROB (Oita), 2004
- [5] Stabilizing dynamic walking with physical tricks N. Mayer, AA. F.-Nassiraei, F. Farkas, Z. Hsu and T. Christaller, Intl. Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR), 2004
- [6] E. Ferreira, S. Tsai, C. Paredis, and H. Brown Control of the Gyrover: a single-wheel gyroscopically stabilized robot *Advanced Robotics*, Vol. 14, No. 6, June, 2000, pp. 459 - 475.
- [7] JA. Christian et al., Development of a Variable Inertia Reaction Wheel System for Spacecraft Attitude Control WR, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit 16 - 19 August 2004, Providence, Rhode Island
- [8] H. Hirakoso, (Japanese title) *Proc. of Robomec (Vol.A)* pp 552-555 (1996) (in Japanese)
- [9] AD. Kuo, Stabilizing the Lateral Motion in Passive Dynamic Walking, *Intl. J. Rob. Res.*, 18:9 p 917-930 (1999)
- [10] R. Smith et al., The Open dynamics engine, open source library for simulating rigid body dynamics, <http://ode.org/>