

# レートジャイロの非積分型フィードバックによる ヒューマノイドロボットの体幹姿勢安定化

正 杉原知道 (東大) 正 中村仁彦 (東大)

## Trunk Stabilization of Humanoids via Non-Integrated Rate-Gyroscope Feedback

\*Tomomichi Sugihara and Yoshihiko Nakamura (Univ.of Tokyo)

**Abstract**— This paper presents a trunk attitude stabilization method which feeds back the output of rate-gyroscope sensor without estimating trunk attitude. It doesn't suffer from the estimation error amplified by numerical integration. It is confirmed by a simulation that the transient response of the trunk is improved.

**Key Words:** Humanoid robot, Trunk attitude stabilization, Rate-gyroscope sensor

### 1. はじめに

慣性系に固定されないヒューマノイドロボットの運動制御では、関節角度などの内部座標だけでなく、慣性系に対する状態量を計測することが重要である。体幹姿勢の計測には通常ジャイロセンサが用いられ、従来の安定化法の多くは、姿勢誤差の履歴を用いてフィードフォワード補償を行うもの [1]、ニューラルネットにより前庭機能を再現するもの [2] など、姿勢角が測定できることを前提としていた。ジャイロセンサからの姿勢角計算 [3][4] は数値積分を必要とし、速度が短期間で大きく変化するヒューマノイドロボットの運動では、ドリフトやノイズなどの誤差拡大が深刻な問題となる。

本稿では、レートジャイロの出力を、積分による姿勢角推定を陽に行わずにフィードバックループに組み込み、誤差拡大に煩わされることなく体幹姿勢の過渡応答性を向上させる制御方法を提案する。

### 2. ジャイロセンサのフィードバック制御

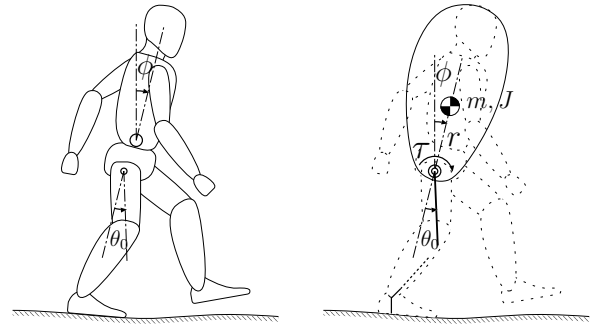
簡単のため、ヒューマノイドロボットの矢状面の運動のみ考え、Fig.1(a) のように支持脚で面接地していると仮定する。図中、 $\phi$  は上半身の慣性系鉛直軸からの傾斜角であり、支持脚関節角度の総和に一致する。

$$\phi = \sum_{i \in \mathcal{L}} \theta_i \quad (\mathcal{L} \text{ は支持脚関節インデックスの集合}) \quad (1)$$

ただし  $\phi$ ,  $\theta_i$  の回転方向は一致しているとした。また  $\theta_0$  は支持脚股関節角である。これを同図 (b) のような、支持脚股関節回りに単一剛体が運動するモデルで近似すると、上半身の運動方程式は次式で表される。

$$J\ddot{\phi} = mgr\phi + \tau \quad (2)$$

ただし  $m$ ,  $J$  は上半身質量および慣性モーメント、 $r$  は質量中心までの距離、 $\tau$  は股関節トルク、 $g$  は重力加速度である。ここで  $\tau$  は、股関節目標角度  ${}^d\theta_0$  に対し次の PD 補償により決定されるとする。



(a) Humanoid model (b) Approximated model

Fig.1 Humanoid trunk dynamics model

$$\tau = P({}^d\theta_0 - \theta_0) - D\dot{\theta}_0 \quad (3)$$

仮に  ${}^d\theta_i$  を直接  $\theta_i$  の指令値  ${}^c\theta_i$  で与えるならば、 ${}^c\phi (= \sum_{i \in \mathcal{L}} {}^c\theta_i)$  から  $\phi$  までの伝達関数は次式となる。

$$\frac{\phi}{{}^c\phi} = \frac{P}{Js^2 + Ds + P - mgr} \quad (4)$$

ただし  ${}^c\phi - \phi \simeq {}^c\theta_0 - \theta_0$ ,  $\dot{\phi} \simeq \dot{\theta}_0$  と近似した。次節に見るように、これは過渡応答において大きな行き過ぎ量を生じる。ヒューマノイドロボットにおいて、姿勢誤差を補償する復元力は地面からの反力に依るため、その最大値は接地状態によって制限される。したがって、十分な応答速さを持たせつつ行き過ぎ量を抑えることが必要になる。これは PD 制御のみでは実現が難しい。そこで  ${}^d\theta_0$  を、レートジャイロの出力  $\dot{\phi}$  を用いて次のように修正する。

$${}^d\dot{\theta}_0 = {}^c\dot{\theta}_0 + K_P({}^c\theta_0 - {}^d\theta_0) - K_D\dot{\phi} \quad (5)$$

ただし  $K_P$ ,  $K_D$  は定数である。また、股関節以外は  ${}^d\theta_i = {}^c\theta_i$  とする。式 (2)(3)(5) をまとめラプラス変換すると、次式を得る。

$$\frac{\phi}{{}^c\phi} = \frac{P(s + K_P)}{Js^3 + (JK_P + D)s^2 + As + (P - mgr)K_P} \quad (6)$$

$$A \equiv DK_P + P(K_D + 1) - mgr \quad (7)$$

これによる効果は、次節にて数値的に確認する。

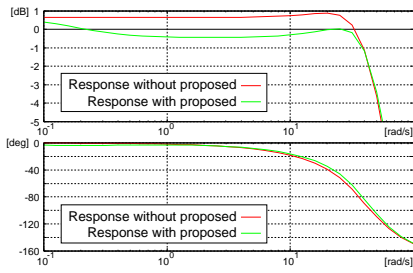


Fig.2 Bode diagram of  $\phi^c/\phi$

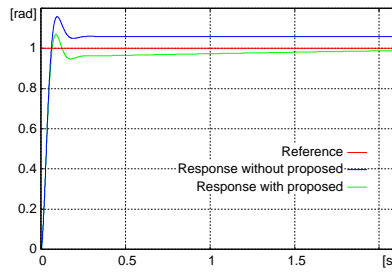


Fig.3 Indicial response of  $\phi$

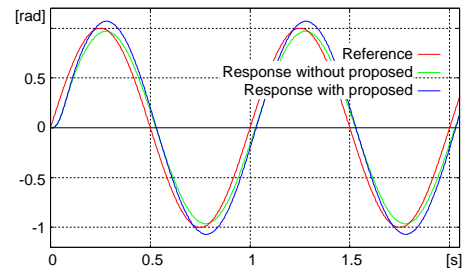


Fig.4 Sine wave response of  $\phi$

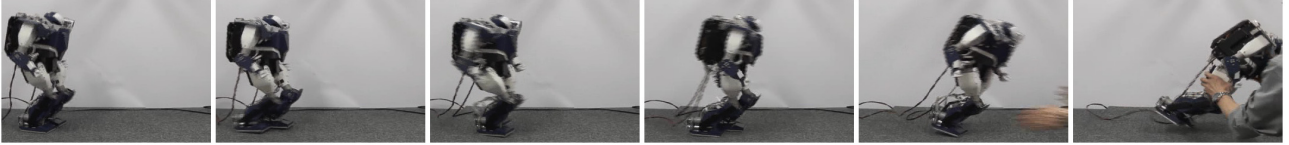


Fig.5 failure of 0.35[s/step] walk by UT- $\mu$  without the proposed feedback control

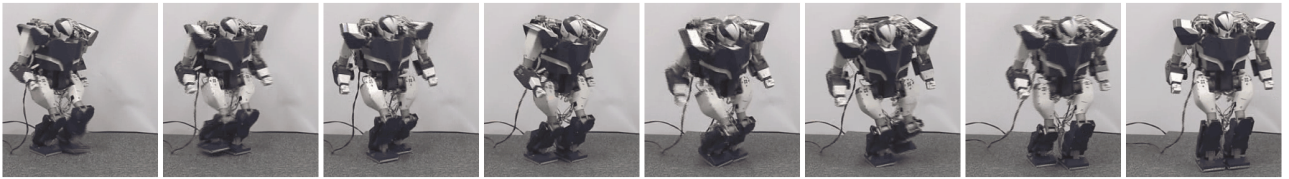


Fig.6 success of 0.35[s/step] walk by UT- $\mu$  with the proposed feedback control

### 3. シミュレーションによる効果検証

実際のロボットとして UT- $\mu$ 2[5] を想定し、各々のパラメータを  $m = 4.0$ ,  $r = 0.1$ ,  $J = 0.04$ ,  $D = 2.0$ ,  $P = 70.0$ ,  $K_P = 0.2$ ,  $K_D = 0.1$  とした。Fig.2 に、伝達関数 (4) および (7) の周波数応答を比較したボード線図を示す。提案する制御を行った場合、実際の動作周波数帯と考えられる  $0.1 \sim 10$  [rad/s] の範囲で、位相特性をほとんど変化させずにゲインを 0 [dB] 以下に抑えられていることが分かる。また Fig.3, Fig.4 はそれぞれ  $\phi^c = 1$ ,  $\phi^c = \sin 2\pi t$  としたときの応答を示したものである。前者については、提案方法によって行き過ぎ量は半分程度に、目標値からの偏差はほぼ 0 に減じられている。後者については、制御なしの場合と同程度の位相遅れがあるものの、行き過ぎ量が抑えられ過大な揺動を生じないことが分かる。

ところで最終値定理より、時刻  $t = \infty$  における収束値は両者ともに  $P/(P - mgr)$  である。したがって提案方法は、定常特性を向上させるものではないことに注意する必要がある。

### 4. UT- $\mu$ 2 による歩行実験

UT- $\mu$ 2 において提案方法をピッチ・ロール方向に適用し、 $8 \times 0.35$  [cm·s/歩]  $\times 6$  歩の歩行運動を行わせた。ジャイロセンサには CRS-03 (シリコンセンシングシステム社製) を使用した。Fig.5 が制御を適用しなかった場合の様子、Fig.6 が適用したときの様子である。前者は外乱を補償しきれずに 3 歩目で転倒してしまった

が、後者は転倒することなく運動を完遂できた。

### 5. おわりに

レートジャイロの出力を積分せず、すなわち姿勢角推定を陽には行わずにフィードバックループに組み込む制御方法を提案した。速度変化の大きいヒューマノイドロボットの運動においても、数値積分によるドリフトやノイズなどの誤差拡大に煩わされることなく、体幹姿勢の過渡応答性を向上できることをシミュレーションによって確認した。またこれを実際に適用し、UT- $\mu$ 2 において高速な歩行を実現した。

なお本研究は、科学研究費補助金基盤研究 (S) (課題番号: 15100002) の支援を受けた。

### 参考文献

- [1] 西脇光一, 加賀美聡, 國吉康夫, 稲葉雅幸, 井上博允. 姿勢角センサを用いた股関節部の変形補償量獲得による歩行動作の安定化. 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, pp. 1P1-E05, 2002.
- [2] 後藤英敏, 北村新三, 中本裕之, 呉松保男. 反射運動による 2 足歩行ロボットの歩行安定化. 第 20 回日本ロボット学会学術講演会, 2002.
- [3] Lekskulchai Pongsak, Masafumi Okada, Tetsuya Sino-hara, and Yoshihiko Nakamura. Attitude Estimation by Compensating Gravity Direction. 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2003.
- [4] 金子健二, 金広文男, 梶田秀司, 横井一仁, 藤原清司, 原田研介, 比留川博久. HRP-2 の歩行安定化制御. 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2003.
- [5] 杉原知道, 山本江, 中村仁彦. アニマトロニクス展開に向けた小型ヒューマノイドロボットの開発. 第 23 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2005.