モータ温度を考慮したヒューマノイドロボットの 歩行制御に関する検討

— 第2報：歩行パターンとモータ温度の関係 —

Study on Walking Control of a Humanoid Robot Considering Motor Temperatures — 2nd Report: Relationship between Walking Patterns and Motor Temperatures —

○学 福田大輝（千葉工大），南方英明（千葉工大），入江清（千葉工大），
坂本元（はじめ研究所），正 林原靖男（千葉工大）

Taiki FUKUDA, Hideaki MINAKATA, Kiyoshi IRIE,
Yasuo HAYASHIBARA, Chiba Institute of Technology, yasuo.hayashibara@it-chiba.ac.jp
Hajime Sakamoto, Hajime Research Institute

We are studying walking control of a humanoid robot in consideration of motor temperatures. In the RoboCup, it is serious problem that humanoid robot can not walk fast and stable for 20 minutes. Because the autonomous robot with control circuit is relatively heavy, the servo motors may tend to get overheat and shutdown to prevent damage. The objective of this study is to maximize the walking speed while keeping the temperatures of the servomotors below the maximum permissible one. The robot estimates the motor temperatures, and then it modifies the walking pattern. In this paper, we investigate the relationship between the power consumption of the motor and the walking pattern by simulation. And, we verify its validity using the real robot.

Key Words: Humanoid Robot, Walking Pattern, Motor Temperature, RoboCup

1. 緒言

本研究では従来から，モータの温度を予測して，歩行パターンを動的に変化させることで，長時間安定して歩行できるヒューマノイドロボットの制御手法を提案してきた[1]．ヒューマノイドロボットは，しばしばモータの過熱によって作業が継続できなくなることがあり，これが長時間の運用を難しくしている．本研究が参加するロボカップサッカーヒューマノイドにおいても，モータの過熱は大きな問題であり，図1のように試合の途中でモータが強制停止して，倒れこむロボットをよく見かける．このような問題に対して，モータの温度上昇を予測して挙動を変更することにより，過熱を回避する研究がいくつかなされている[2]～[5]．本研究でも，ロボカップ用ヒューマノイドを対象として，このような問題を回避する手法を検討してきた．本研究の目的は，ロボカップサッカーにおいて，高速な移動を行いつつも，歩行パターンを動的に変化させることで，モータの制限温度を超えることなく，試合を継続的に行うことを可能とする手法を構築することにある．また，そこで得られた知見を一般的なヒューマノイドロボットに応用することで，継続的に作業可能なシステムを提案することにある．前報では，サーボモータの負荷トルクに対する温度変化のモデル化，シミュレータを用いた歩行時のモータの温度推定，実機を用いた検証などを行った．

提案するシステムを構築するためには，さらに歩行パターンとモータの温度変化の関係を求めることが必要となる．そのため，本稿では，シミュレータを用いた実験により歩行パターンと消費電力の関係を求める．さらに，実機を用いた実験により，シミュレータで得られた関係の妥当性を検証する．

2. 提案する手法

図2に提案するシステムを示す．入力には歩行に関する要求であり，出力は各サーボの目標角度となる．ここで，ロボカップにおける歩行に関する要求としては，例えば試合時間10分間の内，何分間歩行を行う予定があるか，全速力で歩行する必要があるか，相手との衝突に備えて腰を下げる必要があるかなどが挙げられる．これに対して，歩行プランナはロボ

Fig.1 The Robot Fell down by Motor Overheat in RoboCup

ットの状態を踏まえながら，できるだけ要求を満たすような歩行パラメータを探索する．候補となるパラメータは温度推定データベースに送られ，データベースは推定温度をプランナに戻す．この値を参照しながら，プランナは最適なパラメータを選択する．選択されたパラメータは歩行パターン生成器に送られ，サーボモータの目標角度の生成に用いられる．

Fig.2 Proposed Method

3. ロボットの歩行パターン

本研究で用いるロボットは，線形倒立振子モデルに基づいて，歩行パターンを生成している．このとき，ロボットのラテラル面における横方向の足先位置 y の軌道(m)は以下のように表される[6]．

$$y(t) = C_1 \exp\left(\sqrt{\frac{g}{H}}t\right) + C_2 \exp\left(-\sqrt{\frac{g}{H}}t\right) + r$$
$$C_1 = C_2 = -\frac{r}{\exp\left(\sqrt{\frac{g}{H}}\frac{T}{4}\right) + \exp\left(-\sqrt{\frac{g}{H}}\frac{T}{4}\right)} \quad (1)$$

ただし、 t は時間(s)、 g は重力加速度(m/s²)、 H は重心の高さ(m)、 T は歩行周期(s)、 $2r$ はロボットの足先間距離(m)である。
また、上下方向の足先位置 z の軌道(m)は、足上げ時は式(2)、足下げ時は式(3)のように表される[7]。

$$z_{up}(t) = 1 - \frac{\arcsin\left(1 - \frac{t}{T/4}\right)}{\frac{\pi}{2}} \quad (2)$$

$$z_{dw}(t) = \frac{\arcsin\left(\frac{t}{T/4}\right)}{\frac{\pi}{2}} \quad (3)$$

図 3 に生成される歩行パターンの一例を示す。本実験では式(1)～(2)の各パラメータを変更することにより、歩行パターンを変更してロボットの目標軌道として与える。

Fig.3 Walking Pattern

4. 実験に用いるヒューマノイドロボット

本稿では、シミュレーション及び実機を用いた実験により、歩行パターンとモータの温度変化の関係を求める。対象とするのは、CIT Brains が開発したヒューマノイドロボット Accelite である。図 4 に外観と関節軸の位置を示す。また、主な仕様を表 1 に示す。

Fig.4 Humanoid Robot Accelite

Table 1 Specification of the Humanoid Robot

Weight	3.6 kg (Include Battery)
Height	595 mm
Walking Speed	0.4 m/s (Maximum)
CPU	Main: COMMELL LP170C (Intel Atom D525, 1.8GHz)
OS	Linux (Ubuntu12.04)
Servo Motor	RS405CB x 17
Camera	Shikino High-Tech KBRC-M05VU-HPB1027 (120deg, 640x480)
Battery	Hyperion HP-LG325-5000-3S (11.1V, 5000mAh) 25C x 1

5. モータの温度推定

本ロボットでは、全ての関節において、双葉電子工業製 RS405CB を使用している。表 2 に、サーボモータの仕様を示す。前報[1]では、このサーボモータの負荷と温度変化の関係を求めた。図 5 に熱回路のモデルを、式(4)に温度変化の式を示す。

Table 2 Specification of RS405CB

Max. Torque	48.0 kg [kgf・cm]
Max. Speed	0.22[sec/60°]
Weight	67[g]
Power Voltage	11.1[V]
Range of Movement	300[deg]
Communication	RS485 Half-duplex/PWM

Fig.5 The Model of the Thermal Circuit

$$I = \tau / K_t + \alpha \omega$$
$$T = E(I - 0.3)R \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)\right) + T_a \quad (4)$$

P : モータで消費される電力	$E(I - 0.3)$ [W]
R : 熱抵抗	21 [deg/W]
C : 熱容量	20 [J/W]
K_t : トルク定数	5.2 [Nm/A]
T_a : 室温	[deg]
α : 角速度 ω に対する電流	0.031 [A/(rad/sec)]
T : 温度	[deg]
t : 時間	[sec]

6. シミュレータを用いた温度推定

6.1 シミュレータによる温度推定に関して

まずは、シミュレータを用いて、歩行パターンに対するサーボモータの温度変化を求める。この関係は実機を用いても求めることができるが、計測するパラメータの組合せが多くなると、再現性の問題、計測に要する時間などから、計測が困難となる。そのため、本稿では、まずはシミュレータを用

いて温度変化を求めた後、代表的なパラメータにおいて実機における値を求め、それを比較することで、シミュレーションの妥当性を評価する。

6.2 動力学シミュレータ

本研究では、COPPELIA ROBOTICS 社製のロボット用シミュレータ V-REP を使用する。このシミュレータを用いて、歩行時の関節のトルクと角速度から、式(4)に基づき消費電力を推定する。図 6 に、シミュレータを実行した時の様子を示す。

Fig.6 Robot Simulator

6.3 歩行パターンとモータ温度の関係

歩行パターンがモータの温度にどのように影響するかを調べるため、歩行パラメータを変更したときの、消費電力をシミュレーションによって求めた。なお、本稿では、足踏み時の歩行を計測対象とする。変更する歩行のパラメータは、図 7 に示すように、以下の 3 つである。それぞれ以下に示すような分解能で計算を行い、計 1331 点のデータを収集した。

- 1) 重心の高さ H 範囲: 0.26~0.30m, 分解能: 0.004m
- 2) 足上げ高さ F 範囲: 0.15~0.35m, 分解能: 0.02m
- 3) 歩行周期 T 範囲: 0.40~0.80s, 分解能: 0.02s

ここで、パラメータの範囲を設定するときに、基準とした値を表 3 に示す。この値は、本ロボットが最も安定して歩行するパラメータの一つである。この値から、安定して歩行ができる範囲をパラメータとして選択した。消費電力を計算した結果を図 8~10 に示す。結果は、重心位置の高さが、最も消費電力に影響することを示している。逆に、周期と足上げ高さの変化の影響は比較的小さいことも示している。ここで、他と異なり周期は単調に値が増減していない。そのため、実際の運用においては、より多くの点を計測することが求められるパラメータであることが推測される。

Fig.7 Locomotion variables

Table 3 Default Parameters of the Experiment

Height of Center of Gravity (H in Eq. 1)	0.28m
Distance between Feet ($2r$ in Eq.1)	0.10m
Peak Height of Swing Foot	0.025m
Walking Cycle (T in Eq.1)	0.64s

Fig.8 Power Consumption
(Height of COG and Walking Cycle)

Fig.9 Power Consumption
(Height of COG and Peak Height of Swing Foot)

Fig.10 Power Consumption
(Peak Height of Swing Foot and Walking Cycle)

7. 実機実験を用いた温度推定の検証

次に、シミュレーションによる温度推定の妥当性を検証するため、実機を用いた検証を行った。実験では、シミュレーションと同様に歩行パラメータを変更して、その場足踏みを行った。温度の計測に関しては、サーボモータに内蔵されている温度センサを使用した。比較するのは、歩行を開始してから 8 分後の温度である。ロボカップのハーフが 10 分であるため、当初は 10 分後の温度で比較する予定であったが、モータの制限温度である 105 度を超えて歩行を継続できなくなったため、停止前の時間である 8 分とした。エアコンにより室温を 25 度に管理した。この条件の下で、温度を計測した結果を図 11 に示す。図は、シミュレーションにより得られた推定

温度と実測された右足，左足の温度を示している．左から，足首ロール軸，足首ピッチ軸，膝ピッチ軸，股ロール軸を示している．なお，本ロボットはピッチ軸に平行リンクを使用しており，上記ピッチ軸を動作させると他の関節も同期して動くようになっている．

結果的に，推定値と計測値は同様の傾向となっており，多くの場合±10 度以内の差となっている．シミュレーションの結果はほぼ妥当だと考えられるが，図 11(b)の足首ピッチなど 20 度を超える差が生じている関節もある．この温度差がどのような要因で生じたかの検討は，今後の課題となる．ただし，実際のシステムを考えると，本システムはロボットの状態を監視して，歩行パラメータのリプランニングを定期的に行う予定であるため，それほど大きな影響はないとも考えられる．

さらに，各パラメータでの温度を比較すると，重心位置を下げた時にピッチ軸のモータが過熱する様子が見られる．重心を下げると，外力による転倒が起きにくくなるため，このトレードオフを踏まえて歩行プランナはプランを生成することが求められる．なお，本実験では，足踏みのみを対象としているが，今後は様々な歩行に関して，同様の解析を行っていく予定である．

(a) $H = 280$, $F = 0.030$, $T = 0.64$ (Default Parameter)

(b) $H = 260$ (Height of COG: Low)

(c) $H = 300$ (Height of COG: High)

(d) $F = 0.020$ (Peak Height of Swing Foot: Low)

(e) $F = 0.035$ (Peak Height of Swing Foot: High)

(f) $T = 0.50$ (Walking Cycle: Short)

(g) $T = 0.68$ (Walking Cycle: Long)

Fig.11 Comparison between the Estimated Temperature and the Actual Temperature

8. 結論

本稿では，ヒューマノイドロボットで問題となるサーボモータの過熱に対して，それを回避する手法の提案と，システムを構築するために必要となる歩行パラメータとモータの温度の関係を求めた．シミュレータを用いて，歩行パラメータと消費電力の関係を計算した後，実機を用いてその妥当性を検証した．

文献

- [1] 福田大輝，林原靖男：“モータ温度を考慮したヒューマノイドロボットの歩行制御に関する検討 第1報 ヒューマノイドロボットのサーボモータの温度の推定”，日本ロボット学会学術講演会予稿集，vol 31， 1C3-09， 2013.
- [2] 浦田順一，水内郁夫，稲葉雅幸：“ヒューマノイド大出力化のための温度制御に基づくモータ駆動システム”，日本ロボット学会学術講演会予稿集，vol 25， 3H31， 2007.
- [3] Filipe M. Silva, J. A. Tenreiro Machado: “Energy Analysis During Biped Walking”, IEEE International Conference on Robotics & Automation, vol. 1, pp59-64, 1999.
- [4] 熊谷伊織，野沢峻一，垣内洋平，岡田慧，稲葉雅幸：“ヒューマノイドロボットの多点環境接触行動時における関節温度に基づく環境適応動作の実現”，日本ロボット学会学術講演会予稿集，vol 31， 1C2-07， 2013.
- [5] Salomon Trujillo, Mark Cutkosky : “Thermally constrained motor operation for a climbing robot”, IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 2362-2367, 2009.
- [6] 米田完，坪内孝司，大隅久：“はじめてのロボット創造設計 第2版”，講談社，2013.
- [7] 坂本元：“ヒューマノイドロボットの实用化に向けた二足歩行技術の開発”，関西学院大学大学院理工学研究科博士論文，2010.