

小型ヒューマノイドロボットの歩行手法と制御

Walking Style and Control of a Small-Sized Humanoid Robot

加藤壮*, 大久保重範*, 及川一美*, 高橋達也*

So Kato*, Shigenori Okubo*, Kazumi Oikawa*, Tatuya Takahashi*

*山形大学

*Yamagata University

キーワード： 二足歩行ロボット (biped locomotion robot), 歩行手法(walking style), 特異姿勢 (singular configuration)

連絡先： 〒992-8510 山形県米沢市城南4-3-16 山形大学 工学部 機械システム工学専攻 大久保研究室
大久保重範, Tel.: (0238)26-324, E-mail: sokubo@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

人間の形を模した機械であるヒューマノイドロボットは, 人間や人間の生活する環境に対する親和性が高いと考えられる. その為, エンターテイメント分野や人間の補助に対し, ヒューマノイドロボットの有用性が考えられ, 現在数多く研究, 開発が行われている.

しかしヒューマノイドロボットは二足という機構上, 安定した歩行を行わせるのは難しく, 様々な要因から, 人間に近い見た目の動作を行わせることも困難となっている. ヒューマノイドロボットの最大の特徴は, 人間に近い機械であるという点であり, そのことから動作の様子も人間に近くなければ, ヒューマノイドロボットの価値は大きく下がってしまうと言える.

そこで本研究では, 腰の動きと背の曲がり, また人間には存在しないロボット独自の機構により, 人間に近い動作の実現を図ることとした.

今回はそのロボットの機構面を中心に説明する.

2. 研究目的

人間は歩行中にほとんど膝を伸ばしており, 膝を曲げるのは脚を前に振り出す時のみである³⁾. しかし現在, 多くのヒューマノイドロボットは膝を曲げた姿勢で歩行を行っており, ロボット特有の違和感を人間に感じさせてしまう原因の一つとなっている. 歩行は人間の基本動作の一つでもあることから, 人間に近い見た目の動作として, まずは膝を伸ばした歩行をヒューマノイドロボットに行わせることとした.

3. 膝伸ばし歩行の問題解決手法

膝伸ばし歩行の問題点は大きく分けると二つあり, 逆運動学による動作時の特異姿勢による問題¹⁾と, 脚を伸ばした状態で前後左右に振り出した時の接地の問題である.

Fig.1に示すように, 人間はつま先及び腰を傾けることで擬似的に左右の脚の長さを変え³⁾, それに

よって安定した歩行を行う。しかし大多数のヒューマノイドロボットにはそれに該当する機構が無いため、膝を伸ばしたまま歩行を行うと接地することが出来ない。その結果として、安定して接地しながら歩行するには、常に膝を曲げている必要があった。

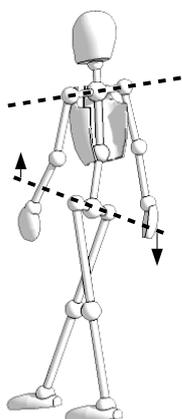


Fig. 1 Walking Style of Human

これらの問題を解決する方法として、冗長自由度を取り入れる方法が考えられる²⁾。これにより特異姿勢を回避したり、可動範囲が増えることによって無理なく接地が出来ると期待できる。しかし、動きや外観が人型から大きく外れることは好ましくない。そこで、歩行動作に既存の股関節の自由度を利用し、人間のように腰を傾ける運動を歩行動作に追加する。ただしその場合、上半身全体が斜めに傾くこととなるため、それを正す必要がある。人間はその動作を背骨を曲げることにより行っている。そこで擬似的に背骨の曲がり再現するため、ロール軸の背の自由度を追加することとした。

人間はこの動作に加え、つま先により擬似的に脚の伸縮を行う。ロボットにも人間同様のつま先の機構を設けようとした場合、末端部の重量増加や強度、またこの動作はつま先立ちすることが前提となるため、支持多角形の面積の減少に伴う制御の複雑化と言った点が心配される。

そこで膝関節に同軸方向の自由度を一つ追加し、見た目上違和感が感じられないように考慮して設置することとした。この膝の2自由度の動作により、つま先が行っていた脚の伸縮や蹴りと言った動作を行わせる。

4. 開発機体

以上の考えを基に、研究で使用する実機を開発した。この実機は山形県長井市の西置賜工業会所属ロボットチーム(ナガレンジャー)の協力を得て、ナガレグレーとして開発している。ナガレグレーの外観とリンクをFig.2に、基本スペックをTable 1に示す。

Table 1 Basic Specification

Degree of freedom	24
Height [mm]	430
Width [mm]	210
Depth [mm]	100
Weight [kg]	2.4
Voltage [V]	7.4

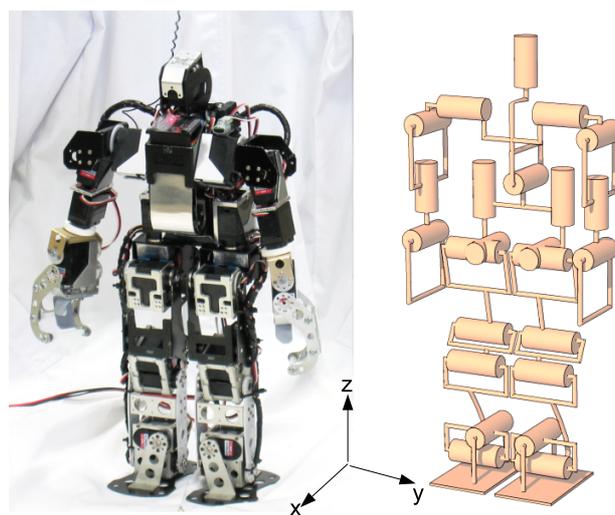


Fig. 2 Appearance and Link Structure of the Nagare-gray

5. 特異姿勢の回避

特異姿勢の代表的な例として、関節が完全に伸びきっている状態が挙げられる¹⁾。本研究で行おうとしている膝を伸ばした歩行はこの状態が含まれており、それが逆運動学を用いている大多数のロボットが膝を伸ばせない理由となっている。

ナガレグレーはFig.2に示したように、見た目上は脚は伸びているものの、リンクを見ると冗長自由度によって一直線に伸びきってはいないことが分かる。また、Fig.2の状態でも脱力しても直立できるバランスで設計しているため、この姿勢時にモータに掛かる負荷は0となっている。つまり、外観及び力学的に、脚を伸ばしきった状態とほぼ同様の状態となっており、ナガレグレーはこの状態を直立姿勢としている。

特異姿勢とはヤコビアン¹⁾の逆行列が求められない状態である。関節の根元より順に1からNまでの番号が振られているとし、第Nリンクにはロボットの手や足が接続されているものとする、ヤコビアン J は以下のように表すことができる¹⁾²⁾。なお、リンクの位置・姿勢 (p, R) は計算済みとする。

$$J \equiv \begin{bmatrix} {}^W a_1 \times (p_N - p_1) & \dots & {}^W a_{N-1} \times (p_N - p_{N-1}) & 0 \\ {}^W a_1 & \dots & {}^W a_{N-1} & {}^W a_N \end{bmatrix}$$

ここで p は絶対位置、 ${}^W a$ は関節軸ベクトルをワールド座標系で表したものであり、次のようにして算出する。

$${}^W a_n = R_n a_n$$

R_n : ローカル座標系回転行列

a_n : 関節軸ベクトル

直進歩行を行わせる場合股関節ヨー軸は必要ないので、簡略化のため股関節ロール軸を根元とすると、Fig.2の姿勢時のヤコビアンは次のようになる。

$$J_1 \equiv \begin{bmatrix} 0 & (p_{6z} - p_{2z}) \cos(\phi_1) & (p_{6z} - p_{3z}) \cos(\phi_1) \\ p_{6z} - p_{1z} & 0 & (p_{6x} - p_{3x}) \sin(\phi_1) \\ 0 & 0 & (p_{6x} - p_{3x}) \cos(\phi_1) \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi_1) & \cos(\phi_1) \\ 0 & \sin(\phi_1) & \sin(\phi_1) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} (p_{6z} - p_{4z}) \cos(\phi_1) & (p_{6z} - p_{5z}) \cos(\phi_1) \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \cos(\phi_1) & \cos(\phi_1) \\ \sin(\phi_1) & \sin(\phi_1) \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) & \\ \sin(\phi_1) \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) & \\ -\cos(\phi_1) \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) & \end{bmatrix}$$

これより、冗長自由度を追加したことで、見た目上直立であっても特異姿勢ではないことが分かる。しかし当然ながら、実際に全ての脚の関節を一直線に、つまり各関節の角度を0とした場合は特異姿勢となる。これをヤコビアンで表すと次のようになり、Z方向には脚を全く動かさなくなっていることが分かる。

$$J'_1 \equiv \begin{bmatrix} 0 & p_{6z} - p_{2z} & p_{6z} - p_{3z} & p_{6z} - p_{4z} & p_{6z} - p_{5z} & 0 \\ p_{6z} - p_{1z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

これを回避するため、関節の根元を、支持脚側(非動作側)の脚部股関節ロール軸とする。そうするとヤコビアンは次のようになった。

$$J_2 \equiv \begin{bmatrix} 0 & 0 & (p_{7z} - p_{3z}) \cos(\phi_1 + \phi_2) \\ p_{7z} - p_{1z} & p_{7z} - p_{2z} & 0 \\ p_{7y} - p_{1y} & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\phi_1 + \phi_2) \\ 0 & 0 & \sin(\phi_1 + \phi_2) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} (p_{7z} - p_{4z}) \cos(\phi_1 + \phi_2) & (p_{7z} - p_{5z}) \cos(\phi_1 + \phi_2) \\ (p_{7x} - p_{4x}) \cos(\phi_1 + \phi_2) & 0 \\ (p_{7x} - p_{4x}) \cos(\phi_1 + \phi_2) & 0 \\ 0 & 0 \\ \cos(\phi_1 + \phi_2) & \cos(\phi_1 + \phi_2) \\ \sin(\phi_1 + \phi_2) & \sin(\phi_1 + \phi_2) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} (p_{7z} - p_{6z}) \cos(\phi_1 + \phi_2) & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\ \cos(\phi_1 + \phi_2) & \sin(\phi_1 + \phi_2) \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\ \sin(\phi_1 + \phi_2) & -\cos(\phi_1 + \phi_2) \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \end{bmatrix}$$

これより脚の関節を一直線に伸ばしていても、予め支持脚側股関節のロール軸を回転させておけば、特異姿勢を回避できることが分かる。よって初めは遊脚側股関節のロール軸を関節の根元として逆運動学の計算を行い、特異姿勢となりそうな場合は支持脚側股関節のロール軸を関節の根元と切り替えるなどすれば、特異姿勢を回避して脚を伸ばしたまま歩行を行える。

6. 足の接地

一般的なヒューマノイドロボットの機構では、脚を真っ直ぐに伸ばした状態で脚を振り出しても、Fig.3に示したように足裏を接地させることが出来ない。ナガレグレーではこの問題点を解決するため、膝の関節と腰の傾きを用いる。

膝関節の動きをFig.4に示す。ナガレグレーの場合、このように動かすことで脚の長さを6[mm]延長でき、足裏長さの約半分の歩幅であれば、腰を傾けなくとも接地が可能である。また股腰の傾きも用いれば、より広い範囲に接地可能となる。

これらの動作により、Fig.3の足裏と地面間の距離を0にする(Fig.5)。

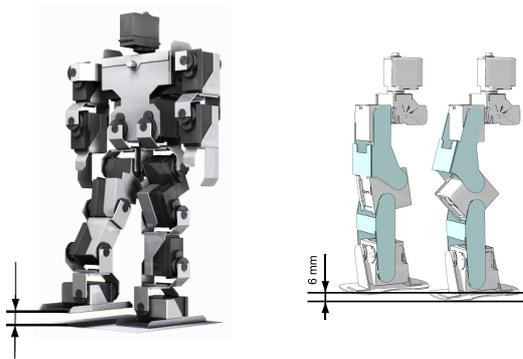


Fig. 3 Un-grounding

Fig. 4 Link Mechanism of the Foot



Fig. 5 Grounding

7. システム概要

Fig.6にナガレグレーのシステム概略図を示す。モーターには近藤科学製のロボット用サーボモーター(KRS 2346ICS, KRS 2350ICS)を使用し、同じく近藤科学製のロボットコントロールボード(RCB-3)

によりモーターを駆動している。またRCB-3はアナログ入力ポートを3ch搭載しており、入力値をサーボモーターの角度に反映させることが可能となっている。これを利用して姿勢制御や、半自立的な動作を実現するため、新たに指令ボードを開発し、搭載した。指令ボードにはSH/Tinyシリーズのマイクロコンピュータである、SH7125を搭載している(Fig.7)。センサには2軸加速度センサ(RAS-2)1基(X-Y方向)、ジャイロセンサ(KRG-3)2基(ロール軸,ピッチ軸方向)を用い、姿勢制御を行っている。

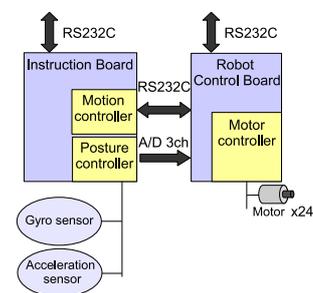


Fig. 6 System

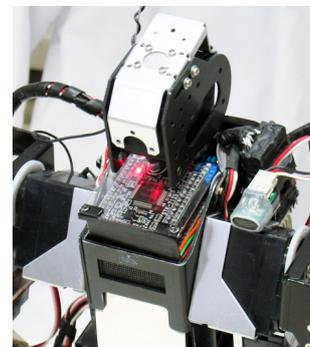


Fig. 7 Instruction Board

8. 歩行実験

今回はフレーム強度や機体、指令ボードの動作確認のため、逆運動学などは使わずに直接に間接角度とスピードを指定して歩行動作を行わせた。歩行の様子をFig.8に示す。

歩行の連続写真から分かるように、多くのヒューマノイドロボットに見られる中腰姿勢ではなく、脚

を伸ばして歩いていることが分かる．現在のところ1[m]あたり2.8秒で歩行可能であり，また脚の可動範囲が広いため，Fig.9に示すような脚を交差させた隘路歩行も可能である．

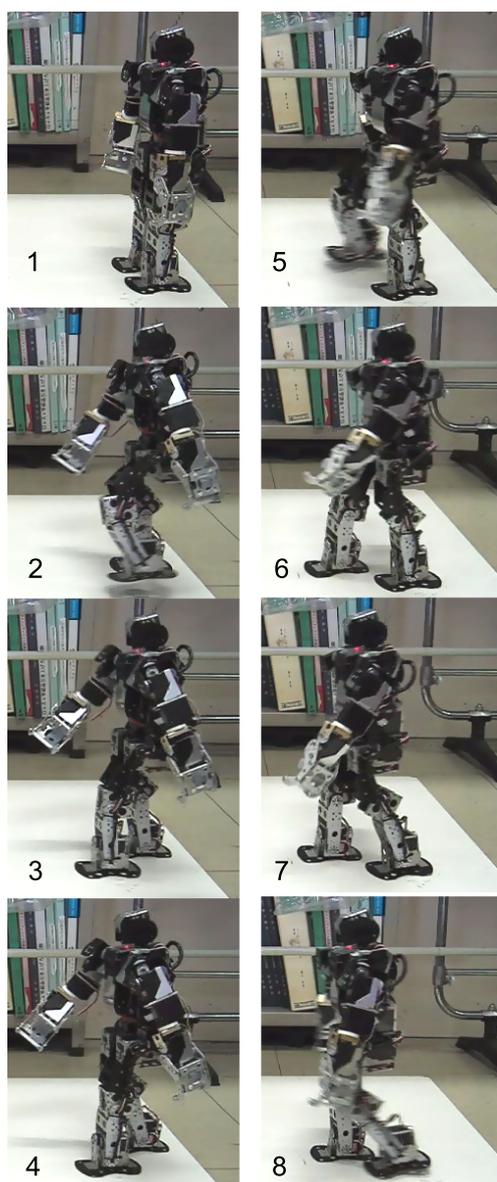


Fig. 8 Walk



Fig. 9 Narrow-Path Walk

9. おわりに

本研究はヒューマノイドロボットの動作の見た目を，より人間に近いものとするのが目的である．そこで今回は歩行動作を行わせる点に目的を絞り，ロボットに対して人間が普段行っている腰の動作に加え，ロボット特有の機構を持たせることで，膝を伸ばした人間に近い歩行が可能であることが確認できた．

現在ロボットの動きは実機を動かしながら作っているが，今後はロボットをモデル化し，アプリケーション上による動作のシミュレートを取り入れる必要がある．それにより自然な見た目の動作を実現するための，動きの加減速や運動のオーバーラップ²⁾などを効率良く取り入れ，実機に実行させることが課題の一つである．また，その動作を安定して実行させるため，現在使用している古典制御ではない，新しい制御手法を取り入れていく必要もある．

参考文献

- 1) 梶田秀司: ヒューマノイドロボット, オーム社(2005)
- 2) 米田 完, 坪内孝司, 大隅 久: はじめてのロボット創造設計, 株式会社 講談社(2001)
- 3) 飯島貴志: CGデザイナーのための「人体のしくみ」, 株式会社 ワークスコーポレーション(2003)