

学生実験のための小型2足歩行ロボットと歩行シミュレータの開発

古野 誠治, 小橋 優司¹

Development of Small Biped Robot and Motion Simulator for Student Experiment

Seiji FURUNO and Yuji KOHASHI

Abstract

This paper presents development of a biped robot for the student experiment. In order to use on student experiment, the biped robot is comparatively small size and it has only the leg which has six DOF. The frames of the robot are designed by CAD software and those strength are calculated in consideration of its durability. The robot has two walking mode that are the static walking and the dynamic walking. And a walking motion simulator which has a walking motion viewer, a system stability criterion simulator and a function to convert motion data to motor commands is developed. The simulation result is presented.

Key word: Humanoid Robot, Motion Simulator, Stability Criterion, ZMP

1. 緒言

ヒューマノイドロボットとは、人間のような形をしたロボットのことである。多くの人は、ロボットといえばヒューマノイドロボットを連想するのではないだろうか。このヒューマノイドロボットの特徴のひとつとして、人間の環境と使う道具がそのまま使えることが挙げられる。現在の人間社会の環境や道具は、人間の大きさは形態に合わせて作られているため、非人間型のロボットを導入するよりも、ロボットの大きさや形態を人間に合わせてしまえば、環境インフラや道具形態の変更を必要とせず経済的である [1]。

このような特徴から、近年、ヒューマノイドに関する研究開発が盛んに行われており、特に開発においては研究用から家庭用まで多くのものが開発されている。例えば、本田技研の ASIMO、人間協調・共存型ロボットシステム研究開発プロジェクトの HRP、小型のものでは、ソニーの QRIO、富士通の HOAP など数多くのヒューマノイドロボットが開発され実用化に向けた研究もなされている。

これらヒューマノイドロボットは、機構、モータ制御回路、歩行制御、プログラミングなど複合的な技術の集まりであるため、研究だけでなく学生実験として導入できれば非常に有用である。また、ヒューマノイドロボットのもつ「擬人的」な特徴が、単なる機械実験に興味を持たせる効果も考えられる。しかしながら、前述したロボットは非常に高価なため容易に学生実験に導入することは困難である。最近では、小型で安価なヒューマノイドロボットが開発されているが、拡張性が乏しいため実験には導入しにくい。

そこで本研究では、学生実験導入を目的とした小型2足歩行ロボットの開発を行う。また、歩行モーションを視覚的に確認でき、安定歩行の判別を行う機能と、その結果をモータ指令値に変換する機能を持つ歩行シミュレータの開発も同時に行う。

本論文は以下の構成をとる。第2章でヒューマノイドロ

ボットの駆動部、制御部、関節配置、フレーム設計について、第3章でロボットの歩行シミュレータのための順運動学の導出と静歩行・動歩行の安定判別法について、第4章で学生実験導入などについて述べる。

2. 小型2足歩行ロボットの開発

本研究で開発するヒューマノイドロボットは、学生実験に導入でき、かつ研究にも利用できるものを想定しているため、比較的小型で高性能なものとする。なお、実験や研究ではロボットの歩行実験や安定歩行制御法などを行うことを目的としているので、本研究では、まず歩行の主な脚部の開発を行う。

2.1 駆動部

2足歩行ロボットの駆動部に用いるモータは、小型で大きなトルクが発生できるものが望ましい。そこで、ROBOTIS社の Dynamixel DX-117 を用いることにした。このモータは小型ながらも、減速機、ポテンショメータ、モータドライバが一体化されており、電源と信号線を接続するだけでモータを駆動することができる。さらに、回転角度、回転角速度、駆動中の負荷の大きさなどがフィードバック可能である。また、複数のモータが接続できるため、それぞれのモータを同期して駆動させることも可能である。Table 1 にモータの主な仕様を示す。ロボットの設計は、このモータ性能を考慮して行った。

2.2 制御部

前節で挙げたモータは、シリアルインターフェースを介して指令を送信することで駆動できる。このシリアル通信規格は RS-485 と呼ばれるもので、1つの通信ソースから同時に多数のモータをつなぐことが可能である [2]。ここでは、その RS-485 I/F を制御するために、マイコン、通信 I/F、バッテリー電圧監視機能などを搭載した小型マイコ

¹ 北九州工業高等専門学校 専攻科 制御工学専攻

Table 1	Dynamixel DX-117
Holding torque	28.0 ~ 37.0 [kgf-cm]
Reduction ratio	1 / 192
Speed	0.126 ~ 0.167 [sec/60°]
Operating angle	300°
Voltage	12 ~ 16 [V]
Weight	66 [g]

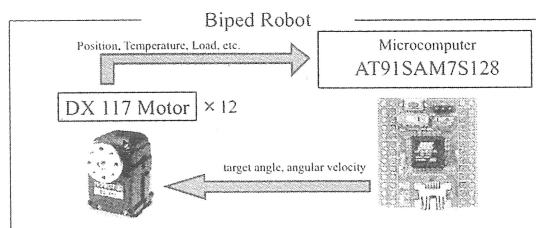


Fig.1 Control system on biped robot

ンボード (AT91SAM7S128:BestTechnology 社) を用いる。マイコンから目標関節角度、回転角速度を複数のモータに同時に送信し、モータから現在の関節角度、負荷の大きさなどをフィードバックし制御を行う。Fig.1 に制御部の概要を示す。

2.3 試作機の開発

これまでに開発したロボットの関節配置図と CAD 図面を Fig.2 に示す。2 足歩行を実現するために人間の脚を参考に、腰部に 3 個、膝部に 1 個、足首部に 2 個の合計 6 個のモータ関節を配置した。人間の自由度よりひとつ少ない 6 自由度であるが、6 自由度あれば任意の位置・姿勢へ到達できる。モータの電源と信号線はロボットの動作を妨げないように配線し、フレーム材には軽量化を考慮して厚さ 1.0[mm] のアルミ板を用いている。ロボットの高さは 300[mm]、幅 190[mm]、奥行き 140[mm] と比較的小型なものとなった。

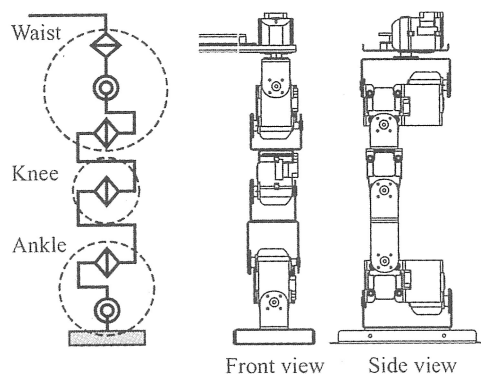


Fig.2 Link-model of the biped robot

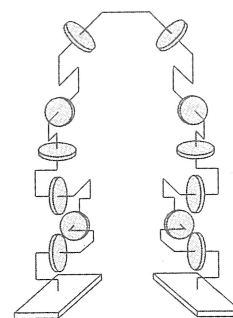


Fig.3 Link-model of the new biped robot

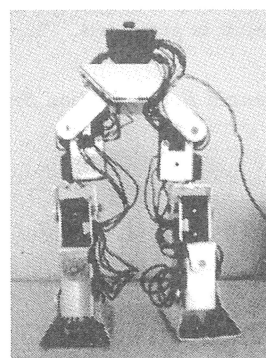


Fig.4 Overview of the biped robot

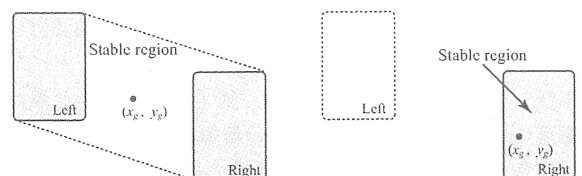
この 2 足歩行ロボットを用いて歩行動作実験を行ったが、フレームの強度不足によるたわみが発生し、同じく開発した歩行シミュレータの結果と誤差が生じてしまった。また、動作時の脚部の干渉、可動範囲の狭さなどの問題もみられた。そこで、それら強度や運動性を考慮して、新規に小型 2 足歩行ロボットの設計開発を行うことにした。

2.3 フレーム強度と運動性の向上

まず、関節配置を Fig.3 のように変更した。股関節に相当する関節を従来のものより 45° 傾けて取り付けることで脚部の可動範囲が広くなり運動性を向上させることができる。さらに、次章で述べる順運動学を求める際にできるだけ計算を簡単にするために、股関節の 3 軸が 1 点に、足首の 2 軸が 1 点に交わるように設計を行った。また、フレーム強度を向上させるために、アルミ板の厚さを 1.0[mm] から 1.5[mm] に変更した。さらに、強度計算ソフトウェアを使用してフレームの変形ができるだけ小さくなるようにした。Fig.4 に新規に製作した 2 足歩行ロボットを示す。ロボットの高さは 275[mm]、幅 205[mm]、奥行き 90[mm] となっている。また、足裏が大きければ容易に安定歩行を実現できるが、本ロボットでは 90[mm]×60[mm] としている。

3. 歩行シミュレータの開発

2 足歩行ロボットを動作させるためには、目的の姿勢に



(a) Stable region : Both legs on the field (b) Stable region : Right legs on the field

Fig.6 Stable region by support polygon

Fig.5 Relation between i -th link and j -th link

なるようにマイコンからモータへ指令値を送信すればよい。しかし、ロボットは多関節・多リンク機構のため関節回転角度と姿勢との関係が複雑なため、一連の歩行動作データを作成することは非常に困難である。また、さらに、歩行動作を行わせるためには同時に複数のモータに指令値を送らなければならないため、データ作成の煩雑さなども考えられる。そして最も重要なことは、安定な2足歩行を実現することである。そこで本章では、2足歩行ロボットを動かすための歩行シミュレータの開発について述べる。

3.1 2足歩行ロボットの順運動学と描画システム

まず、ロボットの関節角が与えられたときに、注目するリンクの位置と姿勢を求める順運動学を導出する。この計算は、ロボットの重心位置の計算、グラフィック表示、リンク同士の干渉判定などに必要である。なお、各リンクの位置と姿勢を表すためのローカル座標系の原点は関節の回転軸上に設定してあるが、2.3節で述べたように、股関節3軸および足首関節2軸が1点で交わっているため、それらの交点を原点に設定した[1]。ここで、Fig.5に示すように、親リンクからみた第 j リンクの回転軸ベクトルを a_j 、原点位置を b_j 、関節位置を q_j とすると、第 j リンクの位置 p_j 、姿勢 R_j は次式で与えられる。

$$p_j = p_i + R_i b_j \quad (1)$$

$$R_j = R_i e^{\hat{a}_j q_j} \quad (2)$$

ただし、 $e^{\hat{a}\theta}$ はRodriguesの式で、回転軸 a まわりに θ [rad]だけ回転する回転行列を与えている。

$$e^{\hat{a}\theta} = E + \hat{a} \sin \theta + \hat{a}^2 (1 - \cos \theta) \quad (3)$$

本シミュレータは、この順運動学式を用いてロボットの姿勢を計算し、それを画面に描画する。これにより、実機を動かすことなく与えた関節角から歩行動作に必要なロボットの位置・姿勢を確認することができ、さらにリンク同士の接触判定も行える。

3.2 安定歩行判定

2足歩行では、重心投影点が地面と接地している足裏面を結んだ領域(支持多角形)を外れることのないものを静歩行、重心投影点が支持多角形を外れることがあるものを動歩行と呼ぶ。本研究で開発する2足歩行ロボットには、この静歩行と動歩行の2種類の歩行を行わせる。静歩行は比較的容易に実現できるが、動歩行は倒れこむ力を利用しながら行う歩行で、不安定な状態を制御することは非常に困難である。そこで、あらかじめ作成した歩行パターンが安定して歩行できるものかを歩行シミュレータで判定する。

3.2.1 静歩行

静歩行は、重心投影点 (x_g, y_g) が常に支持多角形(以下、安定領域)の内部にある歩行のことである。両足が接地している場合の安定領域はFig.6(a)に示すように両足裏を結ぶ領域になるが、片足のみ接地している場合の安定領域はFig.6(b)に示すように足裏面となる。

そこで、まず重心投影点を計算する。各リンクの重心座標を (x_i, y_i) 、質量を m_i 、全質量を m_a 、リンク数を n とすると重心投影点は次式で与えられる。

$$x_g = \sum_{i=1}^n m_i x_i / m_a \quad (4)$$

$$y_g = \sum_{i=1}^n m_i y_i / m_a \quad (5)$$

式(6)、式(7)をあらかじめ作成した歩行パターンに対して計算し、それが安定領域内にあるかどうかを調べることによって安定判別を行う。もし安定領域外にある場合は、歩行パターンを修正し再計算することで安定性歩行を実現する。

3.2.2 動歩行

動歩行は、倒れこむ力を利用しながら行う歩行のことで、人間が日常で行っている歩行である。動歩行は静歩行と異なり、速度、加速度、慣性力の影響を受けるため前節で述べた重心を用いた安定判別ができない。そこで、動歩行の安定判別法としてZMP安定規範を用いることにする。ZMPとはZero Moment Pointの略で、足裏内に分布する力のある一点に置き換えたときの点のことをいう。ここで、ZMPは前節で述べた支持多角形内に常に存在するが、ZMPが境界近くに存在するとほんのわずかな外乱によって転倒の危険性が増大してしまう。したがって、安定な動歩行のた

めには接触領域の端からあるマージンを確保した範囲内に ZMP が位置することが望ましい [3].

歩行シミュレータでは、式 (6)、式 (7) より求めた重心投影点 (x_g, y_g) を用いて ZMP の近似計算を行う。まず、歩行パターン (ここでは、関節回転角と回転角速度) を必要データ数だけ作成し重心投影点 (x_g^i, y_g^i) を求める。次に、 i 番目と $i+1$ 番目の時間と重心投影点から重心速度 (\dot{x}_g, \dot{y}_g) と加速度 (\ddot{x}_g, \ddot{y}_g) を計算する。そして ZMP を次式より計算する。

$$x_{zmp} = \frac{m_a x_g g - m_a \ddot{x}_g z_g}{m_a g} \quad (6)$$

$$y_{zmp} = \frac{m_a y_g g - m_a \ddot{y}_g z_g}{m_a g} \quad (7)$$

ただし、 g は重力加速度、 m_a は全質量、 z_g は重心高さである。なお、 z_g は計算を簡単にするために固定値とした。以上の計算を歩行シミュレータで行い、不安定と判別された場合は歩行パターンを安定歩行になるように修正する。しかし、実際は足裏などに取り付けた力センサなどを用いて床反力から ZMP を計測することが望ましいが、本研究では学生実験用を目的としているので簡略化した計算式を用いた。

3.3 モータ指令値生成

それぞれの歩行が安定と判定されたら、歩行パターンに基づいてモータを駆動させることで歩行動作を実現する。そのためには、歩行パターンをモータ指令値に変換しマイコンから出力しなければならない。そこで、歩行シミュレータに歩行パターンをマイコンから出力するモータ指令値に変換する機能を持たせた。

Fig.7 に歩行シミュレータの全体図と 2 足歩行ロボットとの関係図を、Fig.8 に静歩行の安定歩行解析で計算したロボットのモーションを示す。

4. おわりに

本論文では、学生実験用の小型 2 足歩行ロボットと歩行シミュレータの開発についての報告を行った。2 足歩行ロボットは下半身だけであるが、試作機の製作を経てより運動性と耐久性に優れたものを作成することができた。これは、学生実験として、またヒューマノイドロボットの基礎研究として十分であると考えている。また、歩行パターン生成のための歩行シミュレータを開発した。これにより、視覚的にモーションを確認でき、安定した歩行パターンの生成が可能である。

参考文献

- [1] 梶田, "ヒューマノイドロボット", オーム社, (2005)
- [2] 米田, 坪内, 大隈, "これならできるロボット創造設計", 講談社サイエンティフィク, (2001)

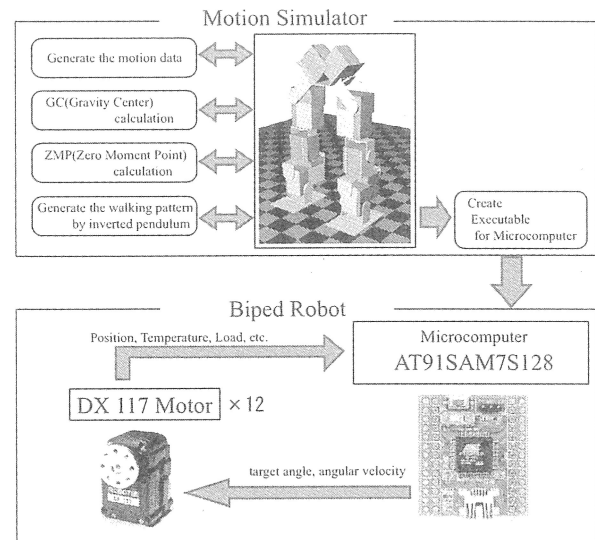


Fig.7 System configurations of the motion simulator

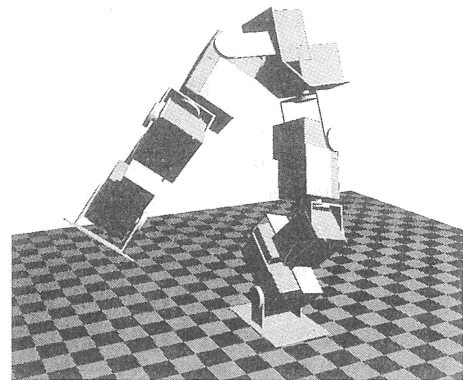


Fig.8 A motion calculated by the forward kinematics

- [3] 梶田, "ゼロモーメントポイント (ZMP) と歩行制御", 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.3, (2002), pp.229-232

(2007年10月12日 受理)