

# ヒューマノイドロボット才華3の動歩行実験

## Experiments on Dynamic Walking of the Humanoid Robot Saika-3

○猪平栄一\*, 近野敦\*, 内山勝\*

○Eiichi Inohira\*, Atsushi Konno\*, Masaru Uchiyama\*

\*東北大学

\*Tohoku University

キーワード: ヒューマノイドロボット (humanoid robot), 二足歩行 (biped walking), 知能ロボット (intelligent robot), ゼロモーメントポイント (zero moment point)

連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 内山研究室  
猪平栄一, Tel.: (022)217-6973, Fax.: (022)217-6971, E-mail: inohira@space.mech.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

近年のロボットハードウェア技術の急速な進歩により、自立歩行可能なヒューマノイドロボットが実現可能なものとなりつつある<sup>1)</sup>。しかし、それまでのヒューマノイドロボットの重量は100 [kg]を超え、実験用プラットフォームや人間との共同作業への応用を考えると、より軽量のヒューマノイドロボットの実現が望まれていた。そこで筆者らは、バッテリー、コンピュータ等を搭載し、総重量が約50 [kg]の軽量自立全身型のヒューマノイドロボット才華3を開発してきた<sup>2,3)</sup>。

二足歩行ロボットの動歩行は、主に倒立振子モデルによる方法<sup>4,5)</sup>、ゼロモーメントポイント (ZMP)<sup>6)</sup>を補償する方法、およびその二つを組み合わせた方法<sup>1,7)</sup>がある。なかでもZMP制御と倒立振子制御を組み合わせた方法は、高い歩行安定性が得られている。

本論文では、開発したヒューマノイドロボット

才華3のハードウェア構成、ソフトウェア構成について論じ、才華3の動歩行へ向けての基礎的な実験結果を報告する。

### 2. ハードウェア構成

ヒューマノイドロボット才華3の概観をFig. 1に示す。才華3を支えているフレームは歩行器であり、安定な動歩行制御系を開発するまでに、歩行中の転倒を防止する目的で使用する。才華3は片腕に7自由度、片脚に6自由度、頭部に2自由度、ハンドに1自由度 (未実装) の合計30自由度を持つ。

全長は、足裏からビデオ送信機アンテナ先端まで1271 [mm]である。バッテリーを6個搭載した最大総重量は、およそ50 [kg]程度である。才華3のCADモデルをFig. 2に示す。現在、ハンドを除く部分の製作が終了している。

本章では、ヒューマノイドロボット才華3のハードウェアの詳細について述べる。

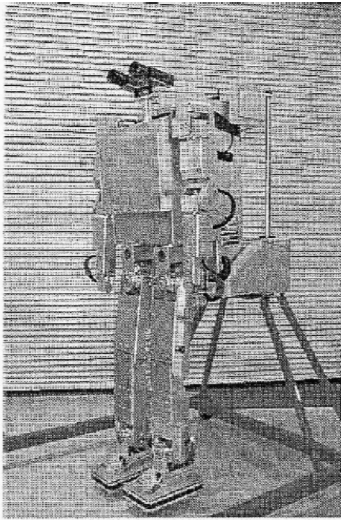


Fig. 1 A snapshot of Saika-3 placed in its walker

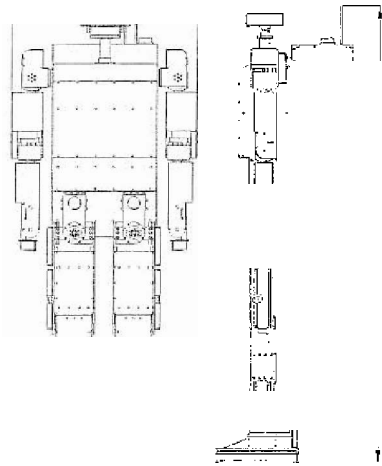


Fig. 2 CAD model of Saika-3.

## 2.1 搭載電子機器

胴体内部には、コンピュータ、ハードディスク、モータドライバ30台、6軸ジャイロ스코ープ、ビデオ送信機、フィールド多重化回路、バッテリー、DC/DC変換器、無線LANが搭載される。

コンピュータの進歩は近年めざましく、PC104やカードPC、日立のSHシリーズを用いたカードコンピュータなど小型で性能の良いコンピュータが安価で入手できるようになった。才轟3ではプログラムの開発のやりやすさ、開発ツールがそろっていること、様々な入力デバイスに対応できることなどの観点から、コンピュータにはIBM PC/AT互換機を、OSには広く普及しつつあるLinuxを実時間制御用に改造したRT-Linuxを採用する。また、PC104やカードPCはI/OカードやPCIカードを使う場合は結果的に体積がハーフサイズのPCよりも大きくなるとの判断から、ハーフサイズのPISAバス仕様シングルボードコンピュータとPISAバスのパッシブバックプレーンを使用する。

I/Oボードには、A/D変換機を16ch、D/A変換機を16ch、また16ch分のA相とB相のエンコーダ

パルス信号をカウント可能なユニバーサルパルスプロセッサを搭載した、富士通(株)製のRIF-01Aを2枚使用した。

12 [V]、4.5 [Ah]のバッテリーを2個直列につなぎ24 [V]の電源として用いる。したがって2個単位で増減が可能で、最大6個搭載できる。搭載エレクトロニクスの全体の消費電流は、+5 [V]が9.63 [A]、+12 [V]が2.64 [A]、-12 [V]が0.18 [A]である。バッテリーを最大数搭載し、平均消費電流20 [A]程度の運動をさせた場合、約45分間の駆動可能である。また、長時間の連続使用を可能とするため、外部電源からの電力供給のための端子も備えてある。

モータドライバは、岡崎産業(株)のTITECH DRIVER ver.2を30台使用した。またジャイロスコープとして日本航空電子工業(株)のJIMS-30Sを使用している。その他、無線LAN(どこでもLAN2400)、画像処理ボード(IP-5005BD)などを搭載している。

ハードウェアの全体構成をFig. 3に示す。

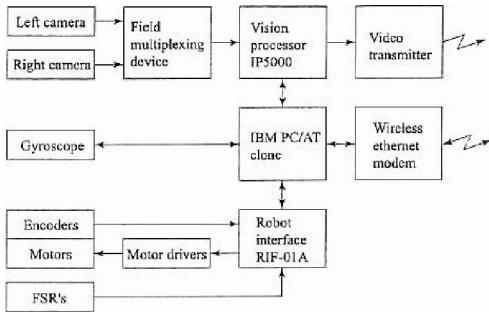


Fig. 3 Block diagram of control system.

## 2.2 足底構造

足底は、アルミニウム板、FSR、鉛ゴムシート、アルミニウム板、発泡スチロール、アルミニウム板、ソルボセイン、の7層構造となっている (Fig. 4(a)). 足裏にはZMPを計測するためにインターリンク (株) のFSR (Force Sensitive Resistor) を各脚につき12枚ずつ貼り付けてある (Fig. 4(b)).

## 2.3 ZMP計測

ゼロモーメントポイント (ZMP) <sup>6)</sup> のFSRによる測定原理をFig. 5に示す。  $p_i = [x_i, y_i]^T$  はFSRが貼り付けられた場所を表す。また、  $p_{ZMP} = [x_{ZMP}, y_{ZMP}]^T$  はZMPである。ZMPは  $p_i$  に作用する床反力  $f_i$  を測定することで、次式から求めることができる。

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i x_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i y_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (1)$$

## 3. ソフトウェアの構成と実装

### 3.1 オペレーティングシステム

才華3制御用OSにはRT-Linuxを採用し、カーネルにはLinux 2.2.17にRT-Linux V2.3のパッチを当てたものを使用している。

(a) Layers of the sole. (b) Allocation of the FSR.

Fig. 4 Structure of the sole.

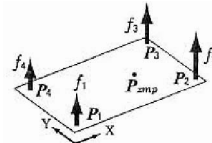


Fig. 5 Measurement of ZMP.

Table 1 Layers and functions of control software.

Layers	functions
User interface	Selection of motion pattern
Motion control	Planning of joint trajectories
Device control	Sensory data acquisition and joint servoing

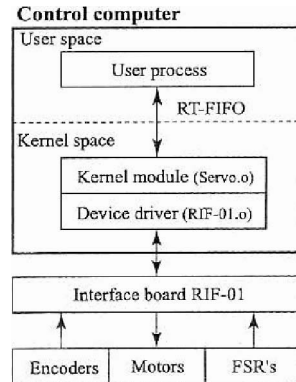


Fig. 6 Configuration of controlling software.

Fig. 6に、現在開発中の才華3の制御システムのブロック図を示す。RT-Linuxでは、実時間処理をカーネルモジュールとして記述し、カーネル空間において実行する。才華3では、現在以下の二

つのモジュールを用いている。

- RIF-01.o  
インターフェースボード RIF-01A に対して入出力を行う関数群を提供するデバイスドライバ
- Servo.o  
各関節のサーボ、ZMP の計算などの処理を一定周期ごとに実行するスレッドを生成するモジュール

これ以外の軌道計画等の処理は、ユーザプロセスで行っている。これは、効率的にソフトウェアを開発するためである。ユーザプロセスにバグがある場合、カーネル空間を壊さない限り、システムがハングアップすることはない。しかし、カーネルモジュールにバグがある場合、メモリ保護機能が働かないためシステムはハングアップしてしまう。多くの場合、このようなバグを追跡するための情報を得ることができない状態に陥るため、バグの修正には多くの時間を費やすことになる。つまり、可能な限り必要な処理をユーザプロセスとして実現していく方が、時間と労力を節約できる。

RT-Linux では、ユーザプロセスとカーネルモジュールが通信するために、RT-FIFO というキャラクタ型デバイスが用意されている。ユーザプロセスでは、RT-FIFO を介してコマンドを送信し、ロボットの動作を制御する (Fig. 6)。

ユーザプロセスは、コマンドを送信した後、カーネルモジュールはロボットの状態を返されるまで、データ受信待ちの状態になっている。これを利用してカーネルモジュールとユーザプロセスは同期をとっており、CPU の負荷が大きくなければ、軌道計画等の処理を一定周期ごとに行うことができる。

### 3.2 制御ソフトウェアの構成

才華 3 を操作するソフトウェアは、Table 1 に示す三つの階層からなる。

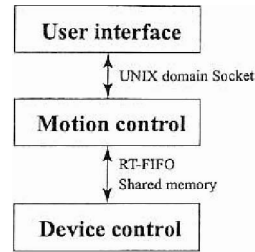


Fig. 7 Layers and communications.

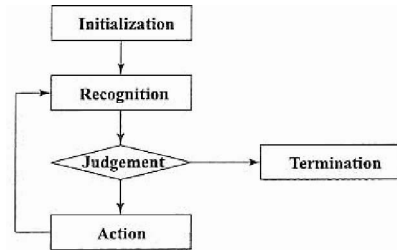


Fig. 8 Description of motion patterns.

最下層のデバイス制御層では、各関節のサーボを行うために、リアルタイム処理を行う必要がある。デバイス制御層のソフトウェアは、すべてカーネルモジュールとして実装する。

運動制御層とデバイス制御層の間のインターフェースには、RT-FIFO と共有メモリを用いている。RT-FIFO は、コマンドの送信と同期をとるために用いている (Fig. 7)。

ユーザインタフェース層と運動制御層には、UNIX ドメインソケットを用いている (Fig. 7)。現在はユーザインタフェースでは、UNIX のシェルのような CUI を使用している。

運動制御層とユーザインタフェース層のソフトウェアは、厳密にリアルタイム処理が行う必要ではないので Linux 上で実行する。

## 4. 行動パターンの記述

ヒューマノイドロボットの行動パターンの記述方法をあらかじめ統一しておく。才華 3 で用いる

行動パターンの記述モデルを Fig. 8 に示す。

行動パターンを追加するたびに、必要なファイルまでコンパイルしなくてもいいようにするために、実行中にオブジェクトファイルをロードしてリンクを行うダイナミックローディングという機能を用いる。

まず、実現したい行動パターンを上述の記述モデルに当てはめ、Fig. 8 の5つのブロックのそれぞれに対応する関数をプログラミングする。このとき、作成する関数の型を統一しておく。作成したソースファイルをコンパイルしてダイナミックライブラリを作成する。

このような手順で作成したダイナミックライブラリをロードすることによって、メインプログラムを再構築することなく、行動パターンを追加することが可能になっている。

メインプログラムでは、行動パターンを実現する Fig. 8 の5つの関数を順番で呼び出し実行することで、指定された行動を発現する。

## 5. 実験

動歩行のための基礎実験として足踏み動作と屈伸動作を行った。足踏み動作の様子を Fig. 10 (a) ~ (f) に、屈伸動作の様子を Fig. 9 (a) ~ (f) に示す。

まず、アクチュエータの性能を確認するために、屈伸動作実験を行った。動歩行を実現する上で、アクチュエータの出力トルクと回転数は極めて重要な要素である。そこで、Fig. 10 に示すような屈伸動作をスムーズに行うことができることを実験により確認した。

つぎに、動歩行を実現するための基礎となる足踏み動作実験を行った。動歩行を行うには、ある程度の速さで重心移動を行い、片方の足底上に重心が完全に乗る前に、もう片方の脚を上げ始める必要がある。しかし、荷重が加わっている状態で無理に脚を上げてしまえば、バランスを崩しその

方向に倒れてしまう。静的なバランスをとらずに足踏み動作を行えるかを確認するために、体幹を左右に振幅 40 [mm]、周波数 0.5 [Hz] で移動させる実験を行った。Fig. 9 に示すように、静的なバランスをとらなくても体幹の移動によって足踏み動作が実現できることを実験により確認した。

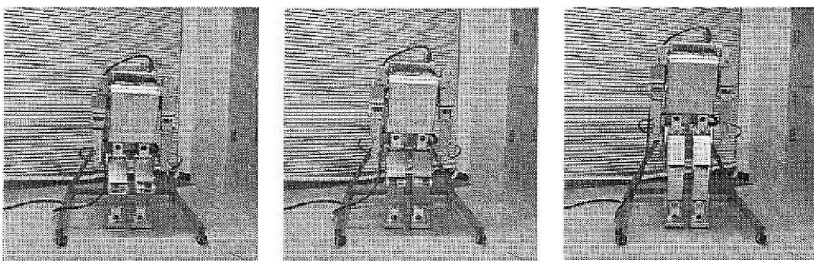
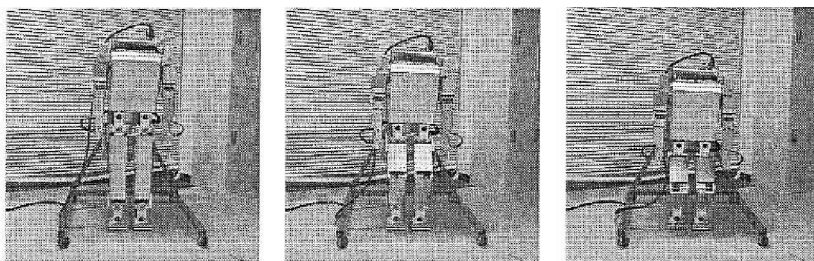
## 6. おわりに

開発した軽量ヒューマノイドロボット才華3の安定動歩行のための第一歩として、簡単な歩行基礎実験を行った。今回の基礎実験では脚のトルクは十分であり、バッテリー最大搭載時(6個で12 [kg])においても屈伸運動が可能であることが確認された。

理想ZMP軌道からジョイント軌道を求める解法、ZMPの補償制御の開発、ZMP回りでの倒立振り制御法の確立と、安定動歩行のためには開発しなければならない課題は多いが、一つ一つ問題を解決し、早急な安定動歩行の実現を目指す。

## 参考文献

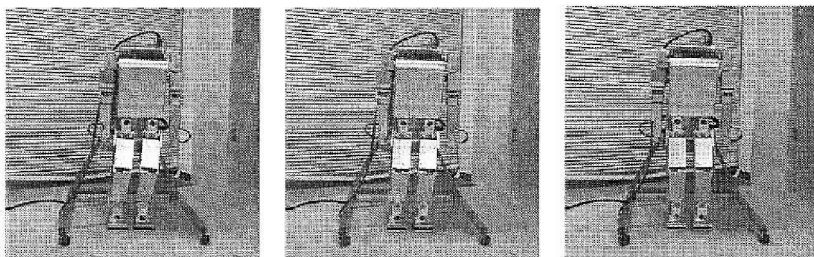
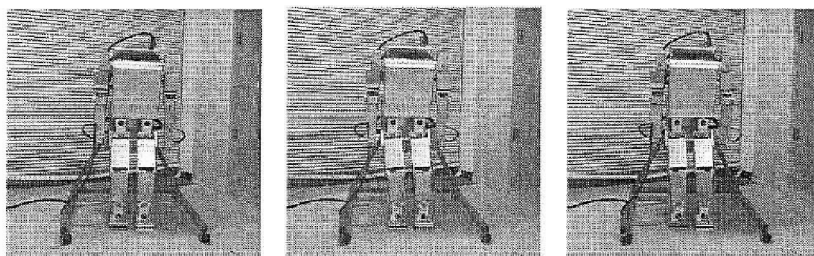
- 1) 広瀬真人, 竹中透, 五味洋, 小澤信明. 人間型ロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 7, pp. 983-985, 1997.
- 2) 近野敬, 白田聡, 古田友之, 加藤雅麗, 内山勝. ヒューマノイドロボット才華3の開発. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演論文集, pp. 2P1-79-123, 2000.
- 3) Atsushi Konno, Noriyoshi Kato, Satoshi Shirata, Tomoyuki Furuta, and Masaru Uchiyama. Development of a Light-Weight Biped Humanoid Robot. In *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1565-1570, 2000.
- 4) 古荘純次. 動的2足歩行ロボットの制御—その低次モデルおよび階層制御策—. 日本ロボット学会誌, Vol. 1, No. 3, pp. 182-190, 1983.
- 5) 梶田秀司, 谷和男. 線形倒立振子モードを規範とする凹凸路面上の動的2足歩行制御. 計測自動制御学会論文集, Vol. 31, No. 10, pp. 1705-1714, 1995.
- 6) プロプラトビッチ. 歩行ロボットと人間の足(加藤, 山下訳). 日刊工業新聞社, 1975.
- 7) 長坂憲一郎, 稲葉雅幸, 井上博允. 体幹位置コンプライアンス制御を用いた人間型ロボットの歩行安定化. 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1193-1194, 1999.



(d)

(e)

Fig. 9 Preliminary experiment of squatting.



(d)

(e)

Fig. 10 Preliminary experiment of stepping.