

ヒューマノイドロボットにおける 歩行運動システムの研究

Study of a Walking Movement System in a Humanoid Robot

鈴木 真ノ介、高久 裕貴*

Shin-nosuke SUZUKI, Hiroki TAKAKU

1. はじめに

ヒューマノイドロボット（以下、ヒューマノイド）とは、人間の生体構造を模倣したロボットであり、人間と同じ環境で人間同様の動作を期待されている。本研究では、その基本的な移動方法である歩行運動（2足歩行）に注目する。

2脚による移動のうち、常にどちらかの足が接地しているものが歩行である。このうち、重心投影点が支持多角形（足裏指示領域が形成する凸包）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期間のあるものを“動歩行”と呼ぶ。人間は、身長に対し足部が非常に小さいため、日常的に動歩行を行っている。

一般的に、ヒューマノイドにおける歩行運動の実現では、そのモデルを近似化しその運動を拘束することで解析的に、もしくは数値的に実用的な歩行パターン（ヒューマノイドを歩行させるために必要な各関節角度データ）を生成する手法を用いている(1)。歩行パターンを生成する際には、ヒューマノイドの足裏と床面との接地を保つためにZMP (Zero Moment Point) の概念が用いられている。ZMPとは、重力と慣性力によって発生するモーメントの合計が床反力によりゼロとなる床面上の点として定義される。ZMPが、支持多角形の内部に存在する限り足裏の接地が維持される。

本研究では、ヒューマノイドにおける安定した“動歩行”の実現を目指している。そのため、まず、ヒューマノイドに関する基礎知識の理解を目的とし、前述の一般的な歩行パターン生成手法により動作実験を行った。そして、その結

果を踏まえ、人間の運動学を参考にした新たな歩行運動システムを提案し、その歩行運動システムによるヒューマノイドのソフトウェアおよびハードウェア開発を行った。

2. 歩行パターン生成手法による動作実験

本研究では、ヒューマノイドを粗視化することで線形倒立伸子として扱う手法により、歩行パターンの導出を行った。本手法は、まず理想的な重心と足の接地位置を導出し、そこから逆運動学により全身の各関節角度を導出している。今回はC言語を用いて、重心の高さ、歩行周期、歩幅、歩隔を指定することで歩行パターンとして時間変化に伴う重心の位置と速度を求め、各関節角度を導出するプログラムを作成した。そして、その結果をヒューマノイドのプロセッサに入力し実験を行った。ハードウェアには、ヒューマノイドとして基本的な構成を満たし、比較的安価なKHR-1（㈱近藤科学）に、実験しやすいよう改良を加え使用した（図1、表1）。

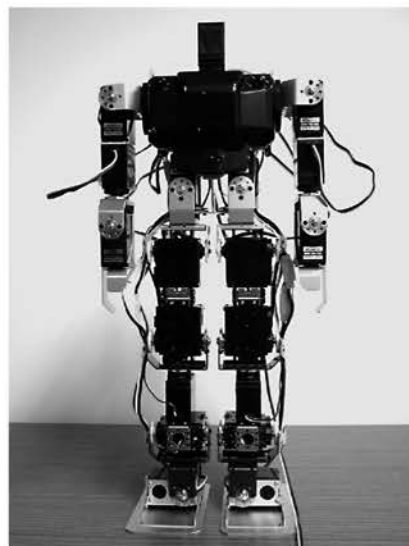


図1 KHR-1の外観

*2007年度電子システム工学専攻卒業

表1 KHR-1の主な仕様

身長	400 [mm]
重量	1.6 [kg]
間接自由度	23 (頭 1, 2 腕×4, 2 脚×7)
サーボモータ	KRS-784ICS, KRS-2350ICS
バッテリー	6.0V-1100mAh(Ni-MH)

実験の結果、ソフトウェアハードウェア間における重心位置やモータの回転速度などの誤差により、プログラムの指示通りに動作せず動歩行ができなかった。動歩行を安定させるためには、センサからのフィードバックによる安定化制御が必要となるが、安定化制御により足の接地位置や重心位置が変化してしまった場合、歩行パターンを導出しなおす必要がある。そこで、本研究では人間の運動学を参考にしてフィードバックから動歩行を実現する手法を提案する。

3. 人間の運動学を参考にした手法

人間には、立位から身体を傾斜させて、やがて立位を保持できなくなると、片足を踏み出すことで新しい支持基盤を確立し、転倒を防ごうとする反射運動（跳び直り反応）が見られる(2)。この反射運動をヒューマノイドにおいて実現させ、踏みだす足を交互に替えることを反復すれば、動歩行が実現可能と考えられる。

ヒューマノイドにおける跳び直り反応の実現方法を図2に示す。まず、ヒューマノイドを粗視化し、倒立伸子として扱う。立位を保持できない状態（図2-(b)）において、重心が傾斜している方向に片足を踏み出すことで転倒を防ぐことができる（図2-(c)）。このとき、踏み出す足の長さを支持脚以下にすれば、力学的エネルギー保存則より立位（図2-(d)）に復帰できる。

具体的な歩行運動システムの概要を図3に示す。本手法は、立位のバランスを保つ立位保持制御と、バランスを崩した際に片足を踏み出す踏出し制御に分割できる。さらに立位保持制御は、接地面を維持するための床反力制御、バランスを保つための上体姿勢制御に分別できる。

本手法では、センサからのフィードバックを基にしているため歩行安定化制御を必要とせず、計算量も軽減できる。また、細かいパラメータを指定する必要がないため、直観的に制御する

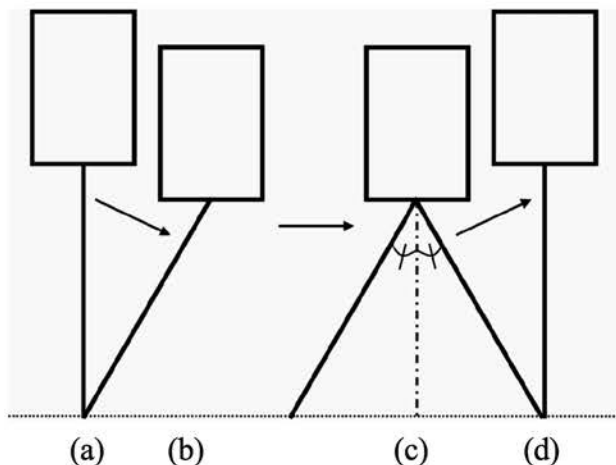


図2 ロボットにおける跳び直り反応

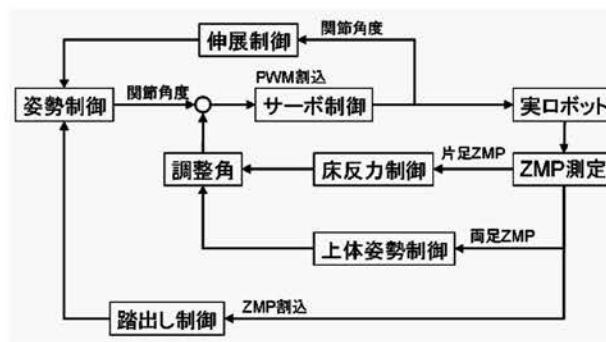


図3 歩行運動システムの概要

ことも可能となることが期待される。

4. ハードウェアの製作

本手法では、上肢を傾斜させるため腰部の自由度が必要であるが、KHR-1には存在せず、構造上追加することも困難である。そのため、腰部の自由度を有するヒューマノイド（KISH.TT；図4、表2）を新たに製作した。なお、本研究ではシステムの簡略化のため腕部の動作を考慮していないため、腕部は製作せず省略した。

また、これまでのヒューマノイド制御基盤は、簡易プログラムによる開発しかできないもので本手法の実現には不適切であったため、C言語による開発と浮動小数点計算の可能なSEMB1200A（㈱シマフジ電機）に変更した。

さらに、ZMPの取得を行うために足裏に2足×4個の圧力センサを配置した。そして、その値をSEMB1200Aに入力するためにはAD変換が必要となるため、SEMB1200A専用のアナログボード（SEMB1200A-AB02）から3次元モーションセンサを外したものを使用した。このアナ

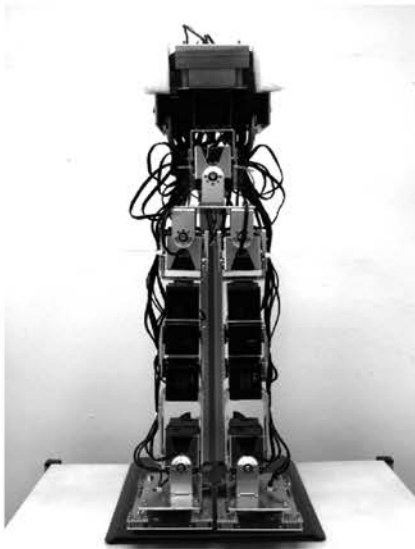


図4 KISH.TTの外観

表2 KISH.TTの主な仕様

身長	400 [mm]
重量	2.0 [kg]
間接自由度	21 (2腕×2, 腰3, 2脚×7)
サーボモータ	KRS-4014S, KRS-4024S
センサ	圧力センサ (2足×4)
バッテリー	10.8V-800mAh(Ni-MH), 6.0V-1100mAh(Ni-MH)

ログボードではアナログ入力が7chしかないため、同ボードを2枚カスケード接続して使用した。

5. ソフトウェアの開発

5-1. サーボモータの制御

ヒューマノイドを動作させるためには、サーボモータの制御が必要である。SEMB1200Aではソフトウェアのサポートがないため、このような基本的なプログラムは全てユーザが作成する必要がある。

SEMB1200Aにおいてサーボモータは、PWMによりパルスを送信することで制御される。このとき、パルスの送信はタイマ割り込みによって行われるため、パルス送信のタイミングに合わせて送信するパルスのバッファを書き換えることで、PWMユニットがパルスを発生させるタイミングでCPUへの外部割り込みを発生させ、リアルタイム制御が可能となる。

運動学を参考にした本手法で重要な踏出し制御では、スムーズな動作を実現するためにあらかじめ複数回分のパルスを設定しておく必要がある。そのため、データ構造にキュー構造を用いた。また、パルス発生周期がサーボ動作時間よりも早いため、次パルスの発生をサーボ動作時間分待機するプログラムと、それに伴う割り込み処理のプログラムを開発した。また、ロボットの状態を把握するためにサーボモータの現在の角度を取得するプログラムを開発した。

また、これらのサーボ制御プログラムは、動作角や動作速度の異なる2種のサーボモータを使用するため、その影響を受けないように開発した。

5-2. センサ値の取得

使用する圧力センサの値は、アナログボードからCSI (Clocked Serial Interface) 通信によって取得することができる。CSI通信はSEMB1200AのCSIユニットによって実現され、アナログボード用の通信コマンドも用意されている。通信を行うときは、指定されたレジスタにコマンドを入力すればよい。

アナログボードからのデータは、全てのセンサの値が34バイトの配列で受信される。そのため、各センサの値を取り出す処理等、アナログボードとの通信処理を行うプログラムを開発した。また、適切な通信間隔を得るためタイマ割り込みにより待機を行うプログラムを開発した。

5-3. ZMPの測定

床反力制御や上体姿勢制御、踏出し制御にはZMPの情報を基にして制御を行う。そのため、ZMPの算出を行うプログラムを開発した。ZMPは圧力センサの値から足裏の接地判定を行い、片足だけのZMPと両足におけるZMPを算出する。

5-4. 床反力制御

ヒューマノイドの足裏と床面との接地を保つための制御である。その方法は、まず片足のZMPを取得し、理想状態でのZMPとの誤差を算出する。そして、誤差を打ち消すよう足首の自由度を一定速度で動作させ足裏の接地面を維持させる。この制御は他の姿勢制御と並行して行う必要があるため、他の制御で算出された角度

データに付加する。

以降は開発まで至らなかったが、提案したヒューマノイドの歩行運動システムに必要なソフトウェアである。

5-5. 上体姿勢制御

倒れそうな方向と反対に上体を傾け重心を移動させ転倒を防ぐ制御である。この制御は、ZMPのデータから転倒方向を判断する機能と、上体を傾ける機能が必要となる。

5-6. 伸展制御

上体姿勢制御を行った際、腰部が曲がった状態でバランスが維持されることが考えられる。そのため、踏み出し制御がしやすいよう、直立状態に戻す制御が必要となる。この制御は、ヒューマノイドの姿勢を取得する機能と、直立状態へと伸展を行う機能が必要となる。

5-7. 傾斜角制御

踏み出し制御を行うために、踏み出す方向へバランスを崩す制御である。上体を傾斜させ重心を指定方向へ移動させる機能が必要となる。

5-8. 踏出し制御

転倒方向を判断し、片脚を踏み出すことで転倒を防ごうとする制御である。この制御は、転倒方向を判断する機能と、片脚を踏み出す機能が必要となる。

6. まとめ

本研究ではヒューマノイドの動歩行実現を目指し、まず、一般的な歩行パターンに基づく手法にて取り組んだが、ソフト・ハード間の誤差により歩行できず、安定化させるためにはフィードバック制御が必要であった。しかし、安定化制御には計算量の増大が見込まれるため、それを軽減する手法として、人間の運動学を参考にした新たな歩行運動システムを提案した。

本研究では主に、提案したシステムを実現させるためのハードウェア製作と、システムの基礎処理を行うソフトウェア開発に取り組み、システムの基礎開発を終了した。

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) 中村、齋藤、長崎：「基礎運動学(第6版)」、医歯薬出版、2003。

「受理年月日 2008年9月26日」