

# 人間型ロボットに対するインタラクションシステム 小型実モデルと数値モデルの運動

## An Interaction System for a Humanoid Robot – Motion of Physical and Numerical Models for a Small-Sized Robot –

多羅尾進, 佐藤智, 小岩俊彦

Susumu Tarao, Satoru Sato, Toshihiko Koiwa

一関工業高等専門学校

Ichinoseki National College of Technology

キーワード: 小型ヒューマノイドロボット (small-sized humanoid robot), インタラクション (interaction), マンマシンインタフェース (man-machine interface), 動力学 (dynamics), 組み込みシステム (embedded system)

連絡先: 〒021-8511 岩手県一関市萩荘字高梨 一関工業高等専門学校 制御情報工学科  
多羅尾進, Tel.: (0191)24-4754, Fax.: (0191)24-2146, E-mail: tarao@ichinoseki.ac.jp

### 1. はじめに

多自由度の運動機構を備えた人間型ロボットは, その自由度が反映した多様な動作を呈示する可能性を持つ. さらに, 人間型ロボットは, 地面に固定されたベースを持たず, 二足歩行等によってロボット自身が自由に移動を行うロコモーション能力を備えている. このように複雑な運動機能を有する人間型ロボットに対して, 人間とロボット間のインタラクティブな関係を構築し, 人間が意図する運動を的確に見通し良くロボットに指示することができれば, ロボットの複雑な機構を駆使した難度の高い運動の生成が容易に実現できる.

このような観点から, 我々は, 人間と人間型ロボット間のインタラクション手法のひとつとして, 直感的かつ単純な操作によって, 人間が, ロボットの行動に介入する手法を提案している<sup>1)</sup>. これ

は, 人間型ロボットの実機本体(実モデル), および人間型ロボットの動力学計算を実時間で処理するリアルタイムモーションミュレーション(数値モデル)をシステムの核とし, 人間が, 押す, 引く, ひねるといった単純な操作によって, 直感的かつ柔軟にロボットの動特性を考慮した自然な行動介入を実現することを目指すものである. 本稿では, このシステムの基本要素となる小型実モデルと数値モデルについて述べ, それらの運動の予備実験について報告する.

### 2. インタラクションシステム

人体の数分の1程度のスモールサイズ人間型ロボットは, 必要最小限に絞り込まれたコンパクトなボディに対して, その制御に関わるハードウェアおよびソフトウェアを効率良く実装することが

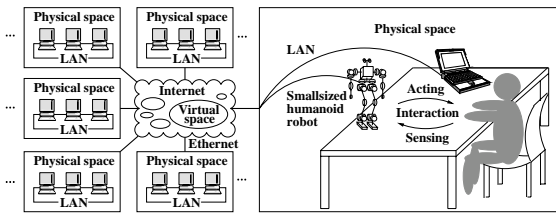


Fig. 1 Concept of the interaction system.

必要となる．ここで，計算負荷の大きい部分に対しては，外部に用意したコンピュータを用いて対応する手法が現実的となっている．さらに，外部のコンピュータと結合されたコンピュータネットワークをより積極的に活用したシステムの提案も行われている．これらを踏まえ，本稿で取り扱うインタラクションシステムは，コンピュータネットワークとして，日常的に広く利用されつつあるインターネット上の仮想的な空間に用意された有効な資源を利用しながら，物理的な運動を伴って，人間とロボットあるいはこれに相当するものとのインタラクションを効果的に成立させることを目的としたものである．この概念をFig. 1 に示す．

山根らは，運動学的なアプローチによって，人間型ロボットの動作を直感的かつ柔軟に指示できるピン/ドラッグインタフェースを用いた手法を提案している<sup>2)</sup>．また，小倉らは，小型のロボット実機を介して姿勢を操作する手法を提案している<sup>3)</sup>．これらに対して本手法は，動力学計算に基づく数値モデルと実モデルとを結合した動力的なアプローチによって，ユーザの操作負荷を軽減すべく，単純かつ直感的な操作で，人間型ロボットへの動特性を考慮した高度な動作介入を狙う．

### 3. 実モデルとその運動

#### 3.1 実モデルの機構

実モデルは，机上で人間を模倣した様々な運動を呈示できること，容易に製作できること等を考

慮して，設計を行った．この組み立て図を Fig. 2 に示す．脚部分には，片脚 5 自由度 × 2 の全 10 自由度を持つように，近藤科学(株)製ラジコン用サーボモータ PDS-2144FET を 10 個配置し，腕部分には，片腕 3 自由度 × 2 の全 6 自由度を持つように，双葉電子工業(株)製ラジコン用サーボモータ S3101 を 6 個配置した．また脚部の足底には，ニッタ(株)製 FrexiForce SSB-T A201-25 を触覚センサとして片脚 4 × 2 の計 8 個配置し，胴体部にマイクロストーン(株)製 3 軸加速度センサ MA3-04Ac を 1 個，(株)村田製作所製 1 軸角速度センサ ENC-03J を 3 個配置した．なお，全質量は，1.8 [kg] であり，

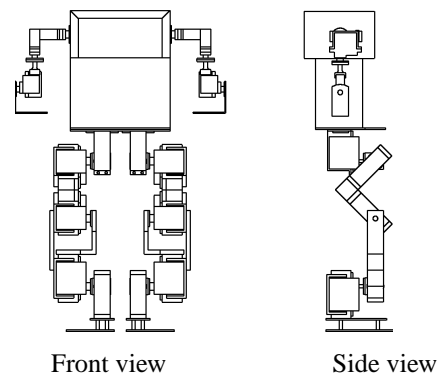


Fig. 2 Assembly drawing of the robot.

また，直立時の全高さは，0.4 [m] である．

#### 3.2 実モデルの制御システム

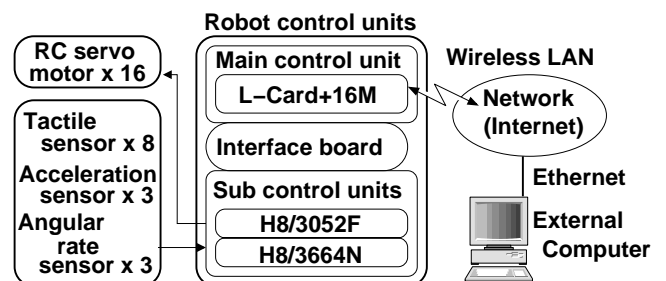


Fig. 3 Network-based control system.

実モデルの制御システムは，数値モデルとの通

信, およびロボット内部システムの統括等, 上位レベルの処理を行う主制御ユニットと, 各アクチュエータ, センサに直結され, これらに密接した下位レベルの処理を行う副制御ユニットからなる.

主制御ユニットには, レーザーファイブ(株)製の L-Card+16M を用いる. これは, 外部のコンピュータとネットワークで結合され, かつ上位レベルの処理を行う小型の Linux サーバである.

一方, 副制御ユニットは, 主制御ユニット内の運動情報に対応して全モータを制御し, 加えて, 各種センサ情報を主制御ユニットに送信する役割を担う. これを考慮し, 副制御ユニットには, I/O ポート, A/D 変換器等が多く用意されたマイクロコントローラである(株)秋月電子通商製マイコンボード AKI-H8/3052F および AKI-H8/3664N を併用する. 主制御ユニットと副制御ユニットは, 自製の平行インタフェースボード<sup>1)</sup>を介して接続する. これらの概要を Fig. 3 に示す. リアルタイム性が要求される副制御ユニットに対しては,  $\mu$ ITRON4.0 仕様に準拠した HOS-V4 を利用している.

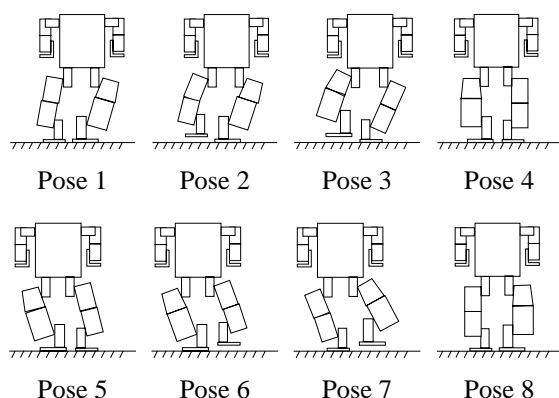


Fig. 4 An example of pivotal poses in a walking cycle

### 3.3 実モデルの運動呈示

本節では, 先に述べた実モデルの予備実験として, 歩行運動の実験を行なう. ここで取り扱う歩行は, 慣性力/トルクの本体への影響を十分小さ

くするように注意して, 静的に安定な状態を維持しながら移動する動作に基づく. その歩行パターンにおいては, ロボットの床面との接触部分(支持脚足裏)で作られる支持多角形(支持脚領域)内にロボット重心の床面への垂直投影点が存在することが要求される. このような二足歩行を周期的な運動として実現する場合, 例えば, 両脚支持(I) 左脚支持 両脚支持(II) 右脚支持等のフェーズで構成されるひとつの周期を繰り返し実行することが考えられる. これら4つのフェーズを基にして, 歩行の1周期で実行される運動を Fig. 4 に示すように8分割したポーズ1~8を決める.

これらのポーズは, 事前に外部コンピュータ上の角度指定用 GUI を用いて, 実際に実モデルを動作させながら決定し, 各関節角度データとして用意する. それら各ポーズに対応した各関節角度データから, 次のポーズに移行するための適当な所要時間を与え, 直線補間を施して結合することで, 全体の歩行パターンを生成する. なお, 各モータ内部では, 関節角の位置制御が行われる.

以上の手順で実際に歩行パターンを作成し, これに従う歩行運動の実験を行う. 本実験では, 共通のポーズに対し, 所要時間を二通り与え, 1周期 6.4 [s] の歩行と 3.2 [s] の歩行との2パターンを作成した. 歩幅は, 両方とも 0.09[m] で共通である. 歩行運動の実験の様子を Fig. 5 に示す.

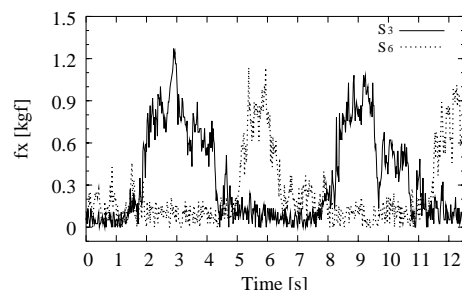


Fig. 6 Normal force on feet (the walking cycle is 6.4 [s]).

参考のため, これら二通りの歩行運動を実行し

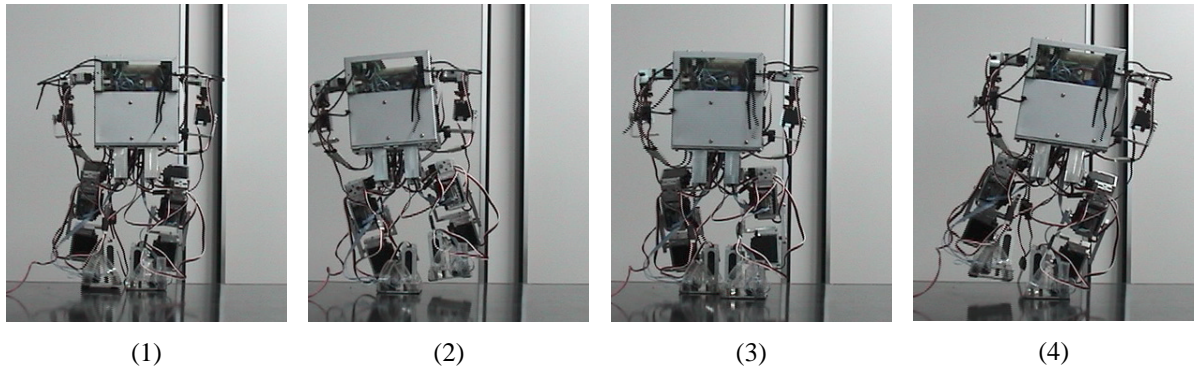


Fig. 5 An experiment of bipedal walking.

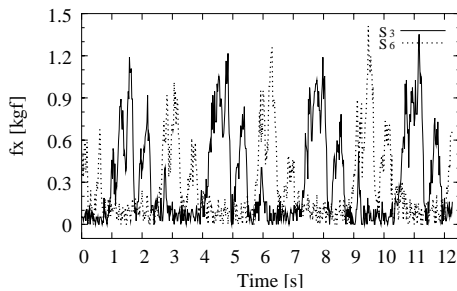


Fig. 7 Normal force on foets (the walking cycle is 3.2 [s]).

た際に、足裏の触覚センサによって測定された床反力のデータを Fig. 6, 7 に示す。前者は、1 周期 6.4 [s] の歩行時のもの、後者は、1 周期 3.2 [s] の歩行時のものである。また、各図の S3, S6 は、Fig. 8 に従ったセンサの位置を示すものである。Fig. 6, 7 より、各歩行周期に対応して、床反力が、支持脚の足裏に生じていることが分かる。

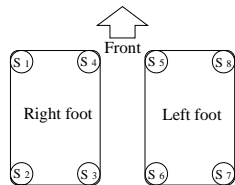


Fig. 8 Arrangement of tactile sensors.

## 4. 数値モデルの運動

本章では、数値モデルの運動呈示に関連する順運動学と順動力学について述べる。4.4節で行う運

動呈示においては、転倒を回避するため、ロボットベースボディの位置、姿勢は、ある適当な点に対する拘束が設けられる(4.2節参照)。なお、ここで示す数値モデルは、汎用性を考慮し、実モデルの自由度数より多い20 自由度(両脚 12 自由度、両腕 8 自由度)となっている。

### 4.1 順運動学

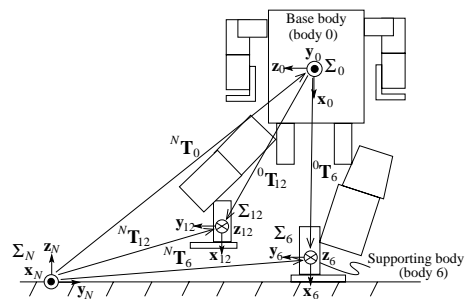


Fig. 9 Coordinate systems and homogeneous transformations for the robot

ロボットの支持脚に応じて、Fig. 9 に示す同次変換行列  ${}^N T_0$ ,  ${}^N T_6$ ,  ${}^N T_{12}$  を以下の手順で使い分けることによって、ロボットの絶対的な位置、姿勢を算出する。支持脚の接地足ボディ  $k$  (左脚支持:  $k = 6$ , 右脚支持:  $k = 12$ ) の慣性座標系  $\Sigma_N$  における位置  ${}^N p_k$  および姿勢に対応した回転行列  ${}^N R_k$  が与えられた場合、これらを要素に持つ同次変換行列  ${}^N T_k$  は次式で得られる。

$${}^N T_k = \begin{bmatrix} {}^N R_k & {}^N p_k \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

このとき，ベースボディの  $\Sigma_N$  における位置  ${}^N p_0$  および姿勢に対応した回転行列  ${}^N R_0$  は， ${}^N T_0$  各成分から決定できる．

$${}^N T_0 = {}^N T_k {}^0 T_k^{-1} \quad (2)$$

ただし，

$${}^N T_0 = \begin{bmatrix} {}^N R_0 & {}^N p_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

である． ${}^0 T_k$  は，ベースボディと任意ボディ  $k$  との関係を示す同次変換行列であり，その逆行列  ${}^0 T_k^{-1}$  は，各関節角度を与えることにより，求めることができる．また，支持脚の切り替えに備え，支持脚ではない方の足ボディ  $l$  (左脚支持： $l = 12$ , 右脚支持： $l = 6$ ) について  ${}^N T_l$  を求めておく．

$${}^N T_l = {}^N T_0 {}^0 T_l \quad (4)$$

${}^0 T_l$  は，各関節角度を与えることにより，求めることができる．なお，ここで取り扱っている移動運動は，床面に対して，必ず接触しているボディが存在する静的な運動である．例えば，このような運動として，静的な二足歩行を取り扱う場合において，ある脚による片脚支持の状態から別の脚による片脚支持の状態に移行する際には，必ず両脚支持の状態を経て遷移する．支持脚が二つ存在する両脚支持では，適当などちらか一方の脚を支持脚と決め，その接地足ボディを基準として，上述した処理を適用する．基準とする接地足を切り替える際には，式 (4) の  ${}^N T_l$  を式 (1) の  ${}^N T_k$  に適用して処理を進める．

## 4.2 順動力学

人間型ロボットに対応した，多体系の数値モデルを以下の運動方程式 (5) で表す．

$$M\dot{u} + f = 0 \quad (5)$$

式 (5) に基づく順動力学計算を高速に行うため， $O(n)$  の Rosenthal の手法<sup>4), 5)</sup> を用いる．式 (5)

において，第 1 項，第 2 項は，それぞれ慣性項，非線形項であり， $u$  はシステムの状態変数として用いられる一般化速度である．一般化速度には多体系の基準となるベースボディの重心速度，角速度および多体系に含まれる関節の相対角速度を選ぶ．運動シミュレーションは，式 (5) に従う  $\dot{u}$  を順動力学計算によって求め，かつ，設定した刻み時間で数値積分を実行して，次ステップの各多体系のベースボディ重心位置と姿勢，および各関節角を求めることを繰り返す処理に相当する．

床面とロボット支持脚の足底との間には，ばね，減衰特性を設定し，これに対応した床反力が生じるようにした．また，運動シミュレーション実行時に，数値モデルに対してインタラクティブな操作が行えるように，すなわち，シミュレーション内での時間経過と，実際の時間経過が，ほぼ一致して操作時の違和感のないように積分の刻み時間を試行錯誤的に決めた．安定した数値積分を行うには刻み時間を極力短くすることが望ましい．

さらにここでは，転倒を防止するため，ベースボディ重心の位置，姿勢と任意の指定された点との間にもばね，減衰特性を設定し，これに対応した拘束力がベースボディに生じるようにした．

## 4.3 CGの呈示とGUI

数値モデルは，コンピュータグラフィックスを介して可視化する．CG モデルの構築は，SGI 社が開発した Open Inventor を利用する．CG モデルの表示例を Fig. 10 (1) に示す．運動シミュレーションと同期して，CG モデルを介したロボットの運動を呈示するために Open Inventor のタイマセンサ機能を用いる．これは，ユーザの指定した時間周期毎に CG の描画を更新することができる機能である．さらに CG モデルを介して，運動シミュレーションの数値モデルを操作できる仕組みを用意した．これは，マウスドラッグによってベースボディの拘

束位置の指定を行うものである。ユーザのマウス操作を CG に反映させるためには、Open Inventor のドラッグ機能を利用している。マウス操作を行うウィンドウの例を Fig. 10 (2) に示す。マウスのドラッグに追従したボールの上下の動きがベースの拘束位置の変化に反映するように割り当てている。

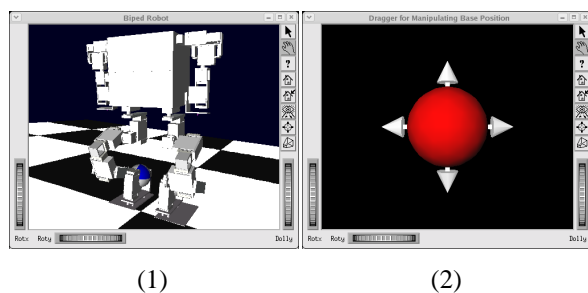


Fig. 10 CG model and GUI.

#### 4.4 数値モデルの運動呈示

CPU (Xeon 2.4 [GHz]) を二つ搭載した PC (OS: Linux) 上で順動力学計算, CG 表示, GUI 等の各プロセスを起動し, 歩行運動および GUI に対応した簡単な運動の二つについてその動作実験を行った。動作例をそれぞれ, Fig. 11, 12 に示す。ここで, 積分の時間刻みは, 0.4 [ms] とした。

歩行運動では, 3.3 節で用いたものと同様の歩行パターンに従い, 制御周期毎に各関節角度の目標値を与える。この時, 各フェーズの支持脚足底が床面に完全に接地していると想定し, 4.1 節で述べた順動力学計算によって, 算出したベースボディの位置, 姿勢をベースボディ重心の拘束(4.2 節参照)に利用した。GUI に対応した簡単な運動は, 4.3 節で述べたマウスドラッグによってベースボディの拘束位置の指定を行っている。

## 5. おわりに

人間と人間型ロボット間のインタラクション手法のひとつとして, 直感的かつ単純な操作によ

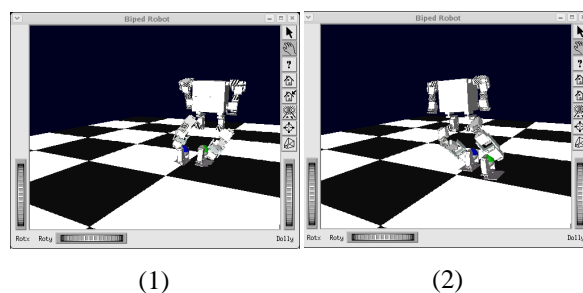


Fig. 11 Bipedal walking through numerical model.

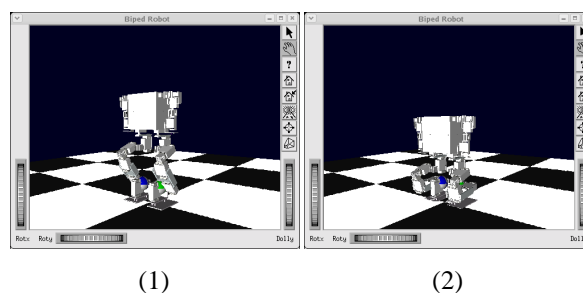


Fig. 12 GUI operation.

て, 人間が, ロボットの行動に介入するインタラクション手法について述べた。これを実現するシステムの基本部分となる人間型ロボットの小型実モデル, および数値モデルを構築し, それぞれの運動について予備実験を行った。今後は, 本インタラクションシステムの充実化を図り, 実モデルと数値モデルが密接に連携した多様な動作への介入, インタラクティブな運動パターンの生成等の機能を拡張する計画である。

## 参考文献

- 1) 多羅尾進, 橋本将樹: 人間型ロボットに対するインタラクションシステム 小型実モデルの設計・製作, 計測自動制御学会東北支部第209回研究集会資料, 資料番号 209-5 (2003)
- 2) 山根克, 中村仁彦: ヒューマンフィギュアの全身運動生成のための協応構造化インタフェース, 日本ロボット学会誌, 20-3, 335/343 (2002)
- 3) 小倉崇, 岡田慧, 稲葉雅幸, 井上博允: 37自由度小型ヒューマノイド Tot を用いた等身大ヒューマノイドの姿勢操作インタフェース, 第21回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2A21 (2003)
- 4) Rosenthal D. E.: An Order  $n$  Formulation for Robotic Systems, *J. Astronautical Sciences*, 38-4, 511/529 (1990)
- 5) 黄潤權, 近野敦, 小笠原克久, 猪平栄一, 内山勝: ヒューマノイドロボット高速動力学シミュレータの開発, 日本ロボット学会誌, 23-1, 113/123 (2005)