

# ヒューマノイドロボット基本ハードウェアの開発 (第2報)

- 人とロボットが同居するためのロボット要素技術に関する研究 -

稲葉 昭夫 張 勤 光井 輝彰 千原 健司

小川 行宏 田中 等幸

## Development of biped locomotion legs and an upper limb ( )

Development of Basic Technologies for Coexistence of Human Being and Robots

Akio INABA Qin Zhang Teruaki MITSUI Kenji CHIHARA

Yukihiro OGAWA Tomoyuki TANAKA

あらまし わが国において世界的に例を見ない高齢化が進行する中で、労働人口の減少、障害者や寝たきり老人の増加、それに伴う介護者等の不足などから、福祉をはじめとする多くの分野において、各種の支援にロボットを利用することが強く期待されている。このような分野に使用するロボットに求められる基本コンセプトは、産業用ロボットとは異なり、「ロボットが人に合わせる」ということである。これを実現する要素技術の1つとして、本プロジェクトでは、ロボットが人に対してリアクションを返すことにより、人とロボットの親和性を向上させる技術について検討する。本報では、このプロジェクトで使用する研究用ロボットプラットフォームの開発(本年度は、ロボットの基本制御ソフトウェアを開発)について報告する。

キーワード ヒューマノイドロボット, 2足歩行, 人とロボットの共存

### 1. はじめに

世界的に例を見ない高齢化が進行する我が国において、高齢者支援ロボットや福祉関連ロボットは、今後、市場の拡大が期待できる民生用ロボットの有力な候補である。特に、超高齢化社会においては、高齢者の自立を支援するロボット技術に大きな期待が寄せられている。

この分野に使用するロボットに求められる基本コンセプトは、産業用ロボットとは異なり、「ロボットが人に合わせる」ということである。これを実現する要素技術の1つとして、人とロボットの親和性向上技術がある。この技術は、人のロボットに対する違和感や恐怖感を和らげるための技術である。本プロジェクトでは、ロボットが人に対してリアクションを返すことにより、人とロボットの親和性を向上させる技術について検討する。本報では、このプロジェクトで使用する研究用ロボットプラットフォームの開発について報告する。本年度は、昨年度試作したヒューマノイドロボットの機構を制御する基本ソフトウェアの開発を行った。具体的には、昨年度実施した歩行に関する基礎実験において開発した歩行アルゴリズムを改良(旋回動作等を付加)し、それをヒューマノイドロボットに搭載した。さらに、上肢に関して、腕と顔を制御するソフトウェアを開発した。

### 2. ハードウェア構成

本章では、昨年度試作したヒューマノイドロボット基本ハードウェアの概要を示す。

#### 2.1 機構系

本研究で開発したヒューマノイドロボットの機構系の概要は次のとおりである。人とロボットのインタラクションに関する研究のプラットフォームとして使用することを考慮し、上肢の自由度を多くしている。

- 1) 身長 約80cm
- 2) 体重 約15kg
- 3) 関節自由度 30自由度(図1)
- 4) 電源 バッテリーと外部電源の併用

#### 2.2 制御系

ヒューマノイドロボットは、非常に多くの関節を同時に制御するとともに画像処理や行動計画の生成等多くの情報を処理する必要がある。さらに、関節自由度が多いため、可能な限り配線量を少なくする必要がある。このため、処理内容のレベルを3つの階層(アプリケーション、運動制御、モータ制御)に分類し、独立のコントローラで処理することとした(図2)。また、各コントローラのCPUには、アプリケーションと運動制御に関して

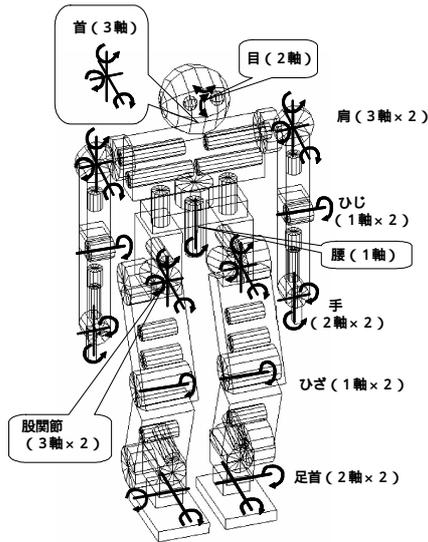


図1 ロボットの関節自由度

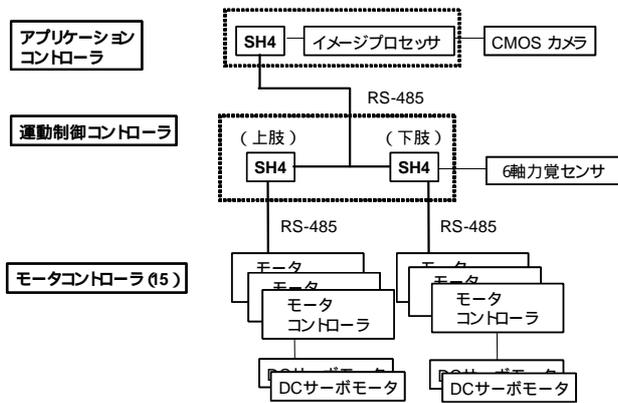


図2 制御ハードウェアの構成

は、SH4 ((株)日立製作所)を、モータに関してはSH2 ((株)日立製作所)を使用した。体内LANには、1Mbps以上の高速通信が可能で、マルチキャストな通信が可能であり、実装が容易である等の理由から、RS-485を使用した。

### 3. 制御アルゴリズム

#### 3.1 歩行アルゴリズム

歩容の生成に関してはこれまでいろいろな手法が提案されている<sup>[1]-[5]</sup>。これらの多くがオフラインであらかじめ歩容を生成する手法である。しかし、ロボットが環境に適應して歩行したり、人の行動に対して歩行を伴ったリアクションを返すためには、リアルタイムに歩容を生成する必要がある。本研究では問題を簡単にするため、歩容をSagittal Plane (XZ平面), Lateral Plane (YZ平面), XY平面に分離して検討する。各平面に関する歩容は、倒立振子の倒れ込みの運動を基本とし、各フェーズのパターンが滑らかにつながることを考慮して定めた。

具体的な歩容は、昨年度の予備実験に準じて、Sagittal Plane に関しては、線形倒立振子モード<sup>[4]</sup>の考えに基づいて、Lateral Plane に関しては、重心に質点が集中していると仮定した倒立振子の根元関節に一定のトルクが働く場合の運動として定める。また、XY平面の運動に関しては、支持脚における股関節のヨー軸周りのなめらかな回転運動として定める。

最初に、歩容を支持脚の状態により、次の4つの基本フェーズに分類する<sup>[7]</sup>(図3)。初期状態は、両足を揃え、腰が水平に運動できるようにするため両膝を曲げた状態とする。

- a. 初期状態から両足支持期になるまで
- b. 両足支持期
- c. 片足支持期
- d. 両足支持期から初期状態になるまで

ここで、両足支持期(フェーズb)は、理想的な線形倒立振子モードの歩容には存在しないが、歩行安定化制御等により目標軌道から外れた腰の運動を補正するために設定している。

各フェーズに対する具体的な歩容(歩行パターン)を、支持脚に関して、足首から見た腰の運動として記述し、遊脚に関しては、腰から見た足首の運動として記述する。このように各パターンに関する運動を定義することにより、具体的な各関節の回転移動量が容易に求まる。

#### Sagittal Plane の歩行パターン

最初に支持脚の腰の運動について検討する。線形倒立振子モードにおいて、床からの腰の高さは変化しないので、x座標における運動のみを定めればよい。線形倒立振子モードにおける片足支持期(フェーズc)の腰の軌跡は、

$$x = -X' \cosh\left(\frac{t}{T_C}\right) + T_C V_{0x} \sinh\left(\frac{t}{T_C}\right)$$

となる。ここで、

$Z_C$ : 足首から見た重心の高さ

$T_S$ : 片足支持期の時間

$$T_C = \sqrt{Z_C/g}$$

$g$ : 重力加速度

$X_S$ : 歩幅

$X_W$ : 両足支持期における重心のX軸方向の移動量

$$X' = (X_S - X_W)/2$$

$$V_{0x} = \left\{ X' + X' \cdot \cosh\left(\frac{T_S}{T_C}\right) \right\} / \left\{ T_C \cdot \sinh\left(\frac{T_S}{T_C}\right) \right\}$$

である。

フェーズa, dについては、各フェーズの最初と最後における位置と速度を満足させる3次関数として歩容を与える。フェーズbについては、位置と速度と加速度の補正を実現する最小次元の5次関数として歩容を与える。

遊脚の運動は着地時に足裏が地面に対し垂直/水平方

向に速度が0となるように4次関数で記述する．4次運動を定義した理由は，各フェーズの位置，速度を連続的に結合させるためである．

#### Lateral Planeでの歩行パターン

Lateral Plane に関する運動は，重心に質点が集中していると仮定した倒立振子の根元関節に一定のトルクが働く場合の運動とし，これに関する運動方程式から重心の軌道関数を計算する．これにより，支持脚に関する片足支持期（フェーズc）の腰の軌跡は，

$$y = Z_C \cdot \sin(A \cdot \exp(a \cdot t) + B \cdot \exp(-a \cdot t) + C)$$

となる．ここで，

$q_S$ : 倒立振子の最大振れ角

$q_W$ : 両足支持期へ移行時の倒立振子の振れ角

$$a = \sqrt{g/Z_C}, b = \exp\{a \cdot (T_S/2)\}$$

$$A = \frac{s-C}{2b}, B = \frac{s-C}{2b^{-1}}, C = \frac{q_S + b^2 q_S - 2b q_W}{(b-1)^2}$$

である．

フェーズ a, b, d に関しては，Sagittal Planeと同様にして定める．

また，遊脚の運動は，支持脚に平行になるように定める．

#### XY平面の運動

XY平面の運動は，片足支持期（フェーズc）における支持脚の股関節のヨー軸周りの運動として3次関数で次のように定義する．

$$q = 2 \cdot \frac{a-b}{T_S^3} \cdot t^3 - 3 \cdot \frac{a-b}{T_S^2} \cdot t^2 + a$$

ここで，

**a**: 片足支持期開始時の支持脚のヨー軸周りの回転移動量

**b**: 片足支持期終了時の支持脚のヨー軸周りの回転移動量

$T_S$ : 片足支持期の時間

である．

実際のロボットの歩容は，これらの各平面の運動を合成することにより得られる．例えば，直線歩行に関しては，Sagittal Plane とLateral Planeの運動を，旋回歩行に関しては，直線歩行の運動にXY平面の運動を合成すればよい．

### 3.2 上肢制御アルゴリズム

本研究においては，上肢は人に対するリアクションのジェスチャを表現するために使用する．このため，腕に関しては，指先の姿勢と軌跡を指令値として与える．顔に関しては，視覚によりとらえた方向を向くように制御する．また，試作したロボットの腕においては，手先の

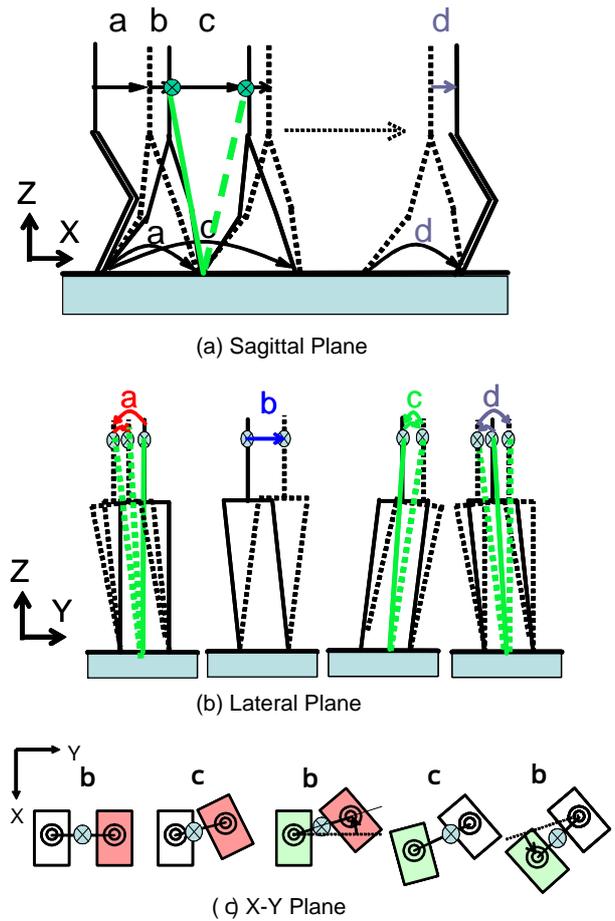


図3 歩行パターン

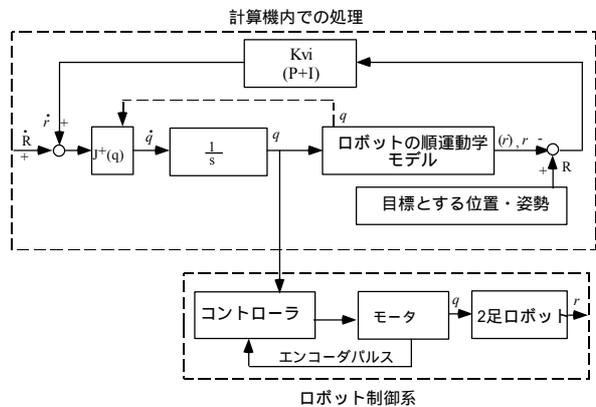


図4 制御のブロック線図

3自由度の回転軸が1点で交わらないため，解析的に逆運動学を解くことが困難であることや顔の制御に関しては，腰の自由度を含めると冗長になることを考慮して，図4に示すような制御系を用いて制御することとした．この制御系においては，目標とする位置・姿勢（ $R$ ）とそれらの移動速度（ $\dot{R}$ ）を指令値として与え，ロボットの順運動学モデルにより算出した現在の位置・姿勢（ $r$ ）との偏差に対して，比例成分と積分成分を速度指令値にフィードバックする．これにより得られた移動速度に逆ヤコビ行列を乗じて各関節の速度に変換し，それを積分

して目標の関節位置を求める．これを各モータコントローラに指令値として与える．本研究で用いた腕および顔の運動学モデルおよびヤコビ行列等を次に示す．

### 腕の運動学モデルとヤコビ行列

図5に本研究で各関節に対して設定した座標系を示す．本研究では，腰の中央に基準座標系  $B$  を設定し，目標値はこの座標系での値となる．この座標系における各関節の回転移動量と手先の座標の関係を表す同時変換行列

${}^B T_E^R, {}^B T_E^L$  (運動学モデル)は次式ようになる．ここで，R,Lは右手，左手の区別を表す．

$${}^B T_E^R = {}^B T_A^R {}^0 T_1^R {}^1 T_2^R {}^2 T_3^R {}^3 T_4^R {}^4 T_5^R {}^5 T_6^R {}^6 T_E^R$$

$${}^B T_E^L = {}^B T_{A'}^L {}^0 T_1^L {}^1 T_2^L {}^2 T_3^L {}^3 T_4^L {}^4 T_5^L {}^5 T_6^L {}^6 T_E^L$$

ここで，

$${}^B T_A^L = \begin{bmatrix} 0 & -\cos w & -\sin w & -L7 \sin w \\ 0 & -\sin w & \cos w & L7 \cos w \\ -1 & 0 & 0 & L8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^B T_{A'}^R = \begin{bmatrix} 0 & -\cos w & -\sin w & L7 \sin w \\ 0 & -\sin w & \cos w & -L7 \cos w \\ -1 & 0 & 0 & L8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0 T_1^R = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1 T_2^R = \begin{bmatrix} -\sin q_2 & -\cos q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & -L1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1 T_2^L = \begin{bmatrix} -\sin q_2 & -\cos q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & L1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2 T_3^R = \begin{bmatrix} -\sin q_3 & -\cos q_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -L2 \\ \cos q_3 & -\sin q_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3 T_4^R = \begin{bmatrix} \cos q_4 & -\sin q_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin q_4 & \cos q_4 & 0 & L3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4 T_5^R = \begin{bmatrix} \sin q_5 & \cos q_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L4 \\ \cos q_5 & -\sin q_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5 T_6^R = \begin{bmatrix} \cos q_6 & -\sin q_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin q_6 & -\cos q_6 & 0 & L5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^6 T_E^R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -L6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

である．

また，ヤコビ行列は次式により求まる．

$$J_v = [J_{v1}, J_{v2}, J_{v3}, J_{v4}, J_{v5}, J_{v6}]$$

$$J_{vi} = \begin{Bmatrix} {}^B z_i \times {}^B p_{E,i} \\ {}^B z_i \end{Bmatrix}$$

$${}^B z_i \equiv {}^B R_i \cdot e_z, \quad e_z = [0, 0, 1]^T$$

$$p_{E,j} = {}^B p_E - {}^B p_j$$

${}^B z_i$  : ベース (腰) から見た関節  $i$  の姿勢の  $z_i$  方向の成分，

${}^B p_j$  : ベースから見た関節  $i$  の位置

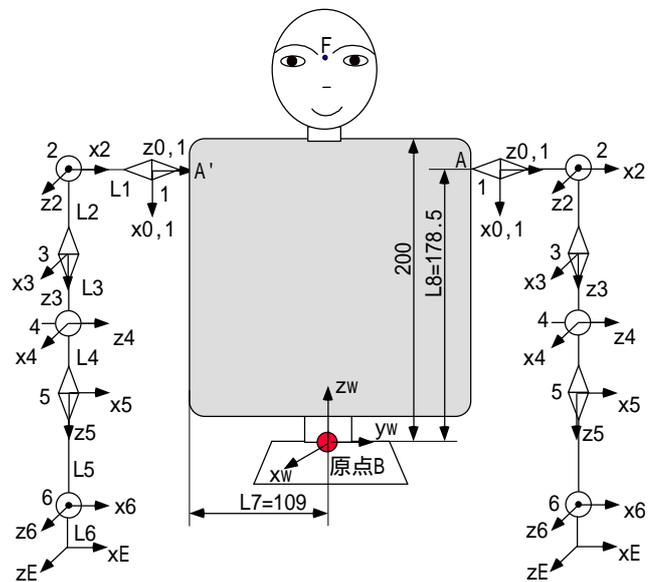


図5 腕の座標系

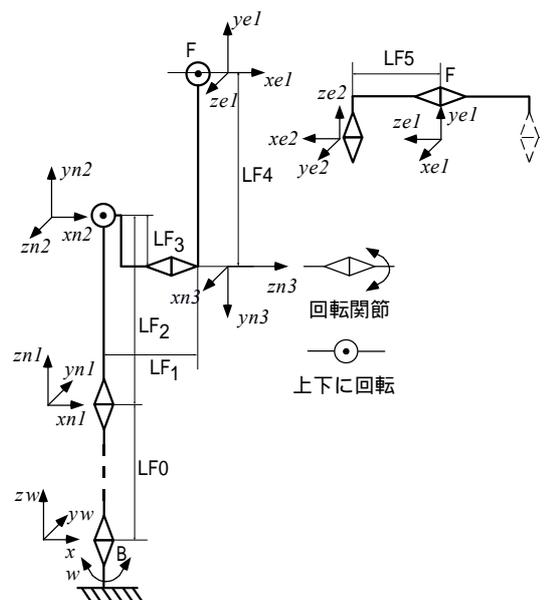


図6 顔の座標系

### 顔の運動学モデルとヤコビ行列

図6に本研究で各関節に対して設定した座標系を示す。本研究では、腰の中央に基準座標系  $B$  を設定し、目標値はこの座標系の値となる。この座標系における各関節の回転移動量と手先の座標の関係を表す同時変換行列  ${}^B T_F$  (運動学モデル) は次式ようになる。

$${}^B T_F = {}^B T_w \cdot {}^w T_{n1} \cdot {}^{n1} T_{n2} \cdot {}^{n2} T_{n3} \cdot {}^{n3} T_F$$

ここで、

$${}^B T_w = \begin{bmatrix} \cos q_w & -\sin q_w & 0 & 0 \\ \sin q_w & \cos q_w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^w T_{n1} = \begin{bmatrix} \cos q_{n1} & -\sin q_{n1} & 0 & 0 \\ \sin q_{n1} & \cos q_{n1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & LF0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{n1} T_{n2} = \begin{bmatrix} \cos q_{n2} & -\sin q_{n2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin q_{n2} & \cos q_{n2} & 0 & LF2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{n2} T_{n3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & LF1 \\ -\sin q_{n3} & -\cos q_{n3} & 0 & -LF3 \\ \cos q_{n3} & -\sin q_{n3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{n3} T_{e1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin q_{e1} & -\cos q_{e1} & 0 & -LF4 \\ \cos q_{e1} & -\sin q_{e1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{n3} T_F = {}^{n3} T_{e1} (q_{e1} = 0)$$

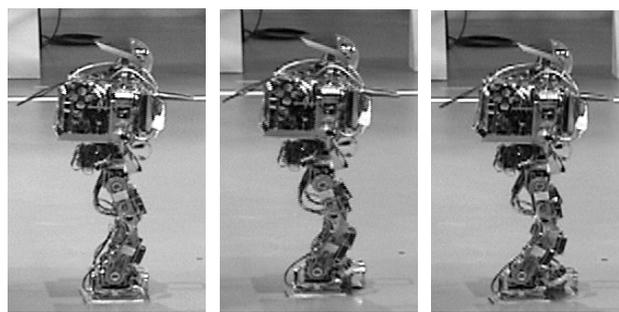
である。

また、顔の正面F点に関するヤコビ行列は、次式で与えられる。

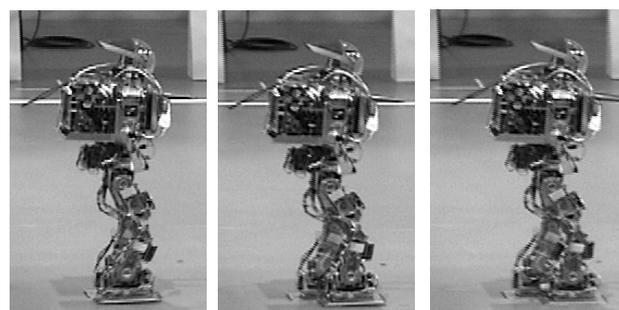
$$J_F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sin q_{n1} & \cos q_{n2} \cos q_{n1} \\ 0 & 0 & -\cos q_{n1} & \cos q_{n2} \sin q_{n1} \\ 1 & 1 & 0 & \sin q_{n2} \end{bmatrix}$$

## 4. 動作実験

3章で述べたアルゴリズムに基づいて、制御ソフトウェアを実装して動作実験を行った。図7, 8, 9にその動作実験の一例を示す。図7は直進歩行の動作である。図中の(a)~(c)は、初期状態から片足を半歩踏み出す動作であり、(c)~(f)は両足支持期から一步踏み出す動作である。図8は旋回歩行の動作例であり、図中の(a)~(c)は、支持脚の右足の股関節のヨー軸に回転運動を加えた旋回動作であり、(c)~(e)は、支持脚の左足の股関節のヨー軸に回転運動を加えた旋回動作である。この2つ旋回動作

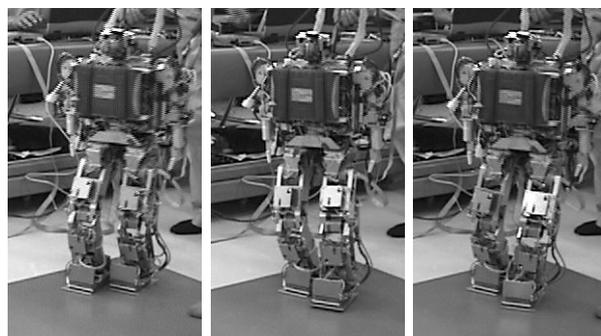


(a)初期状態 (b)  $\mathcal{F}_I - \lambda^* a$  (c)  $\mathcal{F}_I - \lambda^* b$

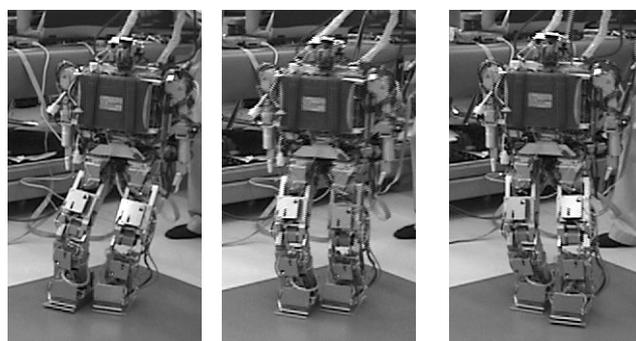


(d)  $\mathcal{F}_I - \lambda^* c$  (e)  $\mathcal{F}_I - \lambda^* c$  (f)  $\mathcal{F}_I - \lambda^* b$

図7 直進歩行



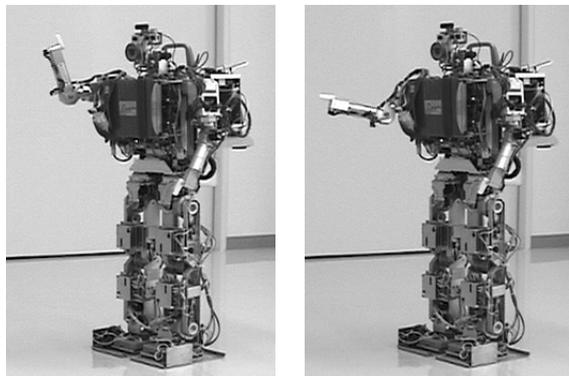
(a)  $\mathcal{F}_I - \lambda^* b$  (b)  $\mathcal{F}_I - \lambda^* c$  (c)  $\mathcal{F}_I - \lambda^* b$



(d)  $\mathcal{F}_I - \lambda^* c$  (e)  $\mathcal{F}_I - \lambda^* b$  (f)  $\mathcal{F}_I - \lambda^* c$

図8 旋回歩行

を一对として巡回動作を行う。(e)(f)は次の巡回動作である。図9は上肢のジェスチャの例で、図中の(a)は、あいさつのために手を挙げる動作であり、(b)は、目標物を指し示す動作である。いずれも設定したとおりに動作していることが確認できる。



(a) (b)  
図9 上肢のジェスチャ

## 5. まとめ

本年度の研究では、昨年度試作したヒューマノイドロボットの機構を制御するための基本ソフトウェアを開発し、その実証試験を行った。実証試験においては、歩行動作が可能であることと、上肢（腕、顔）に関して設定したとおりに動作することを確認した。

今後は、人とのインタラクション制御ソフトウェアを開発し、親和性向上手法の検討をしていく予定である。

## 文献

- [1] 山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎 “ 上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの開発 ”, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.4, pp.581-586, 1993
- [2] 西脇光一, 北川知伸, 杉原知道, 加賀美聡, 稲葉雅幸, 井上博允, “ ZMP導出の線形・非干渉化, 離散化によるヒューマノイドの動力学安定軌道の高速生成 ”, 第18回ロボット学会学術講演会予稿集, pp.721-722, 2000
- [3] 梶田秀司 “ 線形倒立振り子モードを規範とする動的2足歩行ロボットの実時間制御 ” 機械技術研究所報告, 第171号
- [4] 遠藤謙, 山崎文敬, 北野宏明, 前野隆司, “ 進化的計算法を用いた2足歩行ロボットの形態と歩行パターンの生成 ” 第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.519-520, 2001
- [5] Jiang Shan, Fumio Nagashima, “Biologically Inspired Spinal locomotion Controller for Humanoid Robot”, 第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.517-518, 2001
- [6] 稲葉, 光井, 西村, 千原, 田中 “ ヒューマノイドロボット基本ハードウェアの開発 ”, 岐阜県生産情報技術研究所報告No3, pp.1-8, 2002