

ヒューマノイドロボット基本ハードウェアの開発

- 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 光井 輝彰 西村 太志

千原 健司 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 Teruaki MITSUI Futoshi NISHIMURA
Kenji CHIHARA Tomoyuki TANAKA

あらまし わが国において世界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は、産業用ロボットとは異なり、「人がロボットに合わせるのではなく、ロボットが人に合わせる」といった新たな機能が必要となる。この機能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。本プロジェクトでは、ロボットが人の生活環境で各種の支援を行うためのプラットフォームの開発を目指し、人とロボットがインタラクションを行うことにより、人とロボットの親和性を向上させる技術等について検討する。本報では、このプロジェクトにおける研究用ロボットプラットフォームの開発（本年度は、ロボットの基本ハードウェアを開発）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

現在、わが国において世界に例を見ない高齢化が進行する中で、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。現在、この分野の福祉機器は、介護者支援を目的に開発されているものが多い^[1]が、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。

このような分野に使用するロボットには、産業用ロボットとは異なり、「人がロボットに合わせるのではなく、ロボットが人に合わせる」といった新たな機能が必要となる。この機能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。これを実現するアプローチとしては、ロボットと人が相互にリアクションすることにより親和性を向上させる手法（インタラクションに基づく手法）とロボットに柔軟な素材を使用したり、機械的な安全機構を装着したりするハードウェア的な手法が考えられる。これらの手法に関して、これまで幾つかの取組がなされている。前者に関して、(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)の「日常活動型ロボットプロジェクト」^[2]では、人とインタラクションを行うロボビー(Robovie)を開発した。ロボビーにおいては、人への問いかけを行うなどのイン

タラクション動作が実現されている。日本電気(株)(NEC)は、家庭用の情報端末としての移動ロボットPapero^[3]を開発した。Paperoにおいては、主に音声を用いたインタラクションが実現されている。しかし、これらの研究において、人とロボットの間に十分な親和性が実現されているとは言い難い。ロボビーにおいては、個人を識別し、それに合わせた動作を生成するまでには至っていない。Paperoにおいては、個人を識別したインタラクションは実現されているが、ハンド等は装着されておらず、動きを伴ったリアクションは、ロボットの移動のみに留まっている。後者に関しては、マニピュレータ表面に粘弾性被膜を付加し、緊急停止と組み合わせることにより衝突安全を実現する試み^[4]や機械的なインピーダンスを組み込んだ関節の開発^[5]などがあるが、実用には至っておらず、人に対して十分な親和性が実現されているとは言い難い。

以上を踏まえ、本研究プロジェクトでは、人とロボットの親和性を向上させるため、次に示す研究課題に取り組む。

- 1) インタラクションに基づく親和性向上に関する研究
画像情報に基づいて人を識別し、その意図に応じたリアクション（ロボットの動作を含む）を行う技術を開発する。ロボットが、各個人に対応したリアクションを返すことにより、従来手法に比べ、ロボットへの親近感が向上することが期待できる。

本課題における具体的な内容としては、研究用ロボットプラットフォームの開発、人物認識、リアクションの行動生成アルゴリズム等がある。

2) 柔軟な素材を用いたアクチュエータの開発

小型の積層静電アクチュエータを新たに開発する。これにより、ハードウェア的にソフトなアクチュエータの民生用ロボットへの適用可能性を検討する。

本報では、インタラクションに基づく親和性向上に関する研究における研究用ロボットプラットフォームの開発(本年度は、ロボットの基本ハードウェアを開発)について報告する。(他の課題については、別報にて報告する。)

2. 開発するロボットの仕様

本研究では、人とのインタラクションを行うための研究用プラットフォームとして、小型のヒューマノイドロボットを開発する。その仕様を次に示す。

- 1) 関節自由度 30自由度(図1)
- 2) 機能
 - ・画像認識
 - ・音声認識
 - ・音声合成
- 3) その他
 - ・身長 80cm程度
 - ・体重 15kg以内
 - ・電源 バッテリーと外部電源の併用

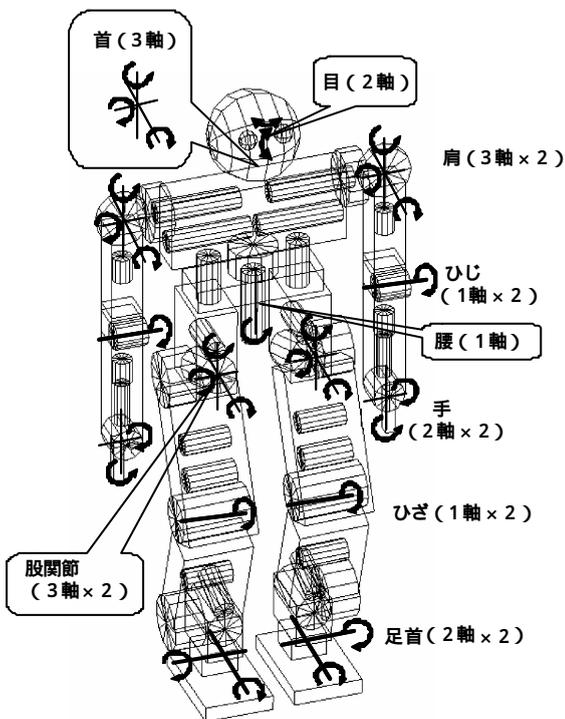


図1 ロボットの関節自由度

3. 制御ハードウェアの設計

3.1 システム構成

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、音声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、これらに関して独立のコントローラで処理することとした(図2)。以下に各コントローラの構成と処理内容を示す。

(1) アプリケーションコントローラ

アプリケーションコントローラは、人とのインタラクションを行うための行動計画を行う。具体的な処理内容としては、人物認識、音声認識、音声合成、行動パターンの生成を行う。この結果(行動パターンデータ)を、下位の運動制御コントローラに送る。

アプリケーションコントローラのハードウェア構成を図2に示す。この構成においては、比較的処理の重い人物認識と音声処理を別モジュールにして、負荷を分散させている。

(2) 運動制御コントローラ

運動制御コントローラは、あらかじめ登録した行動パターンに従って、各関節の移動量を計算し、その結果(関節移動量)をモータコントローラに送る。また、モータコントローラから実際の関節の原点からの移動量を受け取る。このデータと各種のセンサ(ロードセル(足裏),

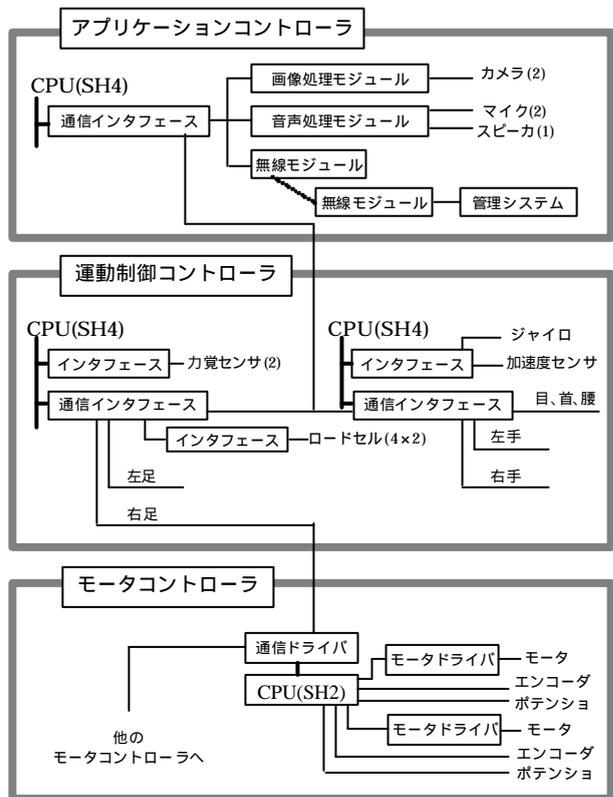


図2 コントローラのシステム構成

力覚センサ(足首),ジャイロ,加速度センサ)の値から,歩行の安定化制御を行い,その結果をモータコントローラへ送信する関節移動量に反映させる.

(3) モータコントローラ

モータコントローラは,運動制御コントローラから関節移動量を受け取り,モータを制御するとともに,現在の原点からの関節移動量を運動制御コントローラに送る.

3.2 体内LAN

本システムは,モータコントローラをヒューマノイドロボットの各部に分散させて配置している.歩行の安定化を図るためには,運動制御コントローラからモータコントローラをミリ秒のオーダーで制御する必要がある.このため,体内LANは,次に示す要件を満たす必要がある.

- 1) 高速(1Mbps以上)に通信ができる.
- 2) CPUに大きな負荷をかけない.
- 3) 配線が容易である.(小型のコネクタでも対応可能)
- 4) 小型のワンチップマイコンでも容易に実現できる.
- 5) ノイズの影響を受けにくい.
- 6) マルチキャストな通信が可能である.

本研究では,これらの要件を満たし,実装が容易であることから,RS-485を体内LANとして使用することとする.また,CPUへの負荷を最小にするため,アプリケーションコントローラと運動制御コントローラに関しては,FIFO機能のあるドライバICを使用する.

4. 歩行制御アルゴリズム

2足歩行ロボットにおいては,動力的な安定規範としてZMP(Zero Moment Point)^[6]が一般に用いられている.このZMPは,Vukobratovicによって提案されたパラメータで,全身運動にともなって発生する慣性力と重力の合力が路面に作用する点(回転中心)である.このZMPが路面に接しているロボットの足裏の内部(境界を除く)にあれば,ロボットに働くモーメントを打ち消す反力が足裏と路面の間に働き,ロボットは転倒しない.本研究においてもこのZMP規範に基づいて歩行アルゴリズムを構築する.

本研究では,歩行アルゴリズムをZMP規範を満たす歩容を生成する問題と外乱等に対して歩行の安定化を図る問題に分けて検討する.

4.1 歩容の生成

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.例えば,山口,高西ら^[7]は,安定なZMP軌道をあらかじめ与えて,その軌道を効率的にFFTを用いて安定な軌道へ収束させる手法を提案した.西脇ら^[8]は,ZMP導出式を線形・非干渉化して高速に安定な軌道へ収束させる手法を提案した.梶田^[9]は,線形倒立振子モードを規範とする歩容生成手法を提案した.この手法は,歩容が方程式で表現されているため,リア

ルタイムに歩容を変更することができるという特徴がある.この他,遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた生成方法^[10],CPG(Central Pattern Generator)に基づいて生成する手法^[11]等が提案されている.また,これらの手法の多くは,ロボットを側面および正面から見た2次元平面に投影した運動(Sagittal Plane, Lateral Plane: 図3)に分解し,互いの運動の干渉は無視できると仮定し,それぞれ平面に対して歩容を定義している^[14].

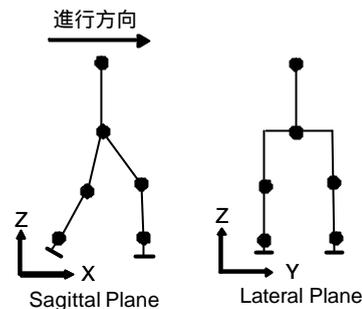


図3 Sagittal PlaneとLateral Plane

本研究では,問題を簡単化するため,歩容をSagittal Plane, Lateral Planeに分離して定めることとする.また,具体的な歩容は,倒立振子の倒れ込みの自由運動を基本としているため,エネルギー消費量が小さくなることが期待でき,リアルタイムに歩容を生成することが可能であるといった理由により,梶田が提案した手法^[9]に基づいて歩容を生成することとする.但し,この文献には,Sagittal Planeの運動については記述されているが,Lateral Planeの運動は陽には記述されていない.このため,本研究においては,Lateral Planeの運動を倒立振子の運動に基づいて定義する.

また,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(図4).ここで,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
- 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,遊脚に

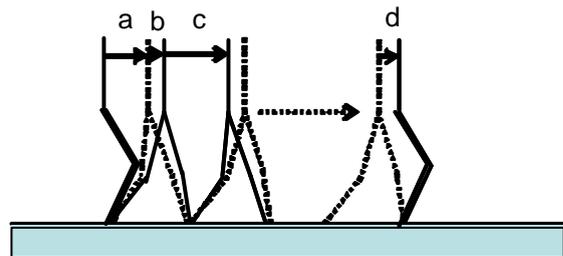


図4 4つの基本フェーズ

表 1 歩容に関する設定パラメータ

歩容パラメータ	
一歩あたりの片足支持期の時間	T_s
一歩あたりの両足支持期の時間	T_w
一歩の歩幅	X_s
両足支持期における腰の X 軸方向の移動量	X_w
重心の Y 軸方向の最大移動量	Y_s
両足支持期開始時の Y 軸方向の重心位置	Y_w
遊脚の運動における足底の床からの最大高	h
腰の足首からの高さ	k
物理パラメータ	
重心の足首からの高さ	Z_c
股関節と重心の間の Y 軸方向の距離	c
腰から重心までの Z 軸方向の距離	d
足首から膝までの長さ	L_1
膝から股までの長さ	L_2

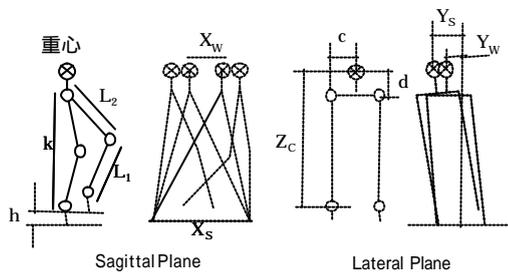


図 5 歩容に関する設定パラメータ

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を容易に求めることができる．本研究において、歩行パターンの定義に用いたパラメータを表 1 および図 5 に示す．

4. 1. 1 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、水平面の歩行に関して、腰の高さを定数として設定するため、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の腰の軌跡は、

$$x = X_I \cdot \cosh\left(\frac{t}{T_C}\right) + T_C V_I \cdot \sinh\left(\frac{t}{T_C}\right)$$

となる．ここで、 $T_C = \sqrt{Z_c/g}$ 、 X_I 、 V_I 、 g は、初期位置、初期速度、重力加速度である．

次に、片足支持期における歩容パラメータから初速度 V_{0x} を求めると

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

となる．ここで、 $X' = (X_s - X_w)/2$ である．

本研究では、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 (両足支持期) 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パターンから外れた腰の運動を補正するために設定している．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．これらより、各フェーズにおける腰の運動は次のようになる．

フェーズ a

$$x = \left(\frac{V_{0x} T_s - 2X'}{T_s^3} \right) t^3 + \left(\frac{3X' - V_{0x} T_s}{T_s^2} \right) t^2$$

フェーズ b

$$x = \left(\frac{12P_{EX} - 12P_{SX} - (6V_{EX} + 6V_{SX})T_w - (A_{SX} - A_{EX})T_w^2}{2T_w^5} \right) t^5 + \left(\frac{30P_{SX} - 30P_{EX} + (14V_{EX} + 16V_{SX})T_w + (3A_{SX} - 2A_{EX})T_w^2}{2T_w^4} \right) t^4 + \left(\frac{20P_{EX} - 20P_{SX} - (8V_{EX} + 12V_{SX})T_w - (3A_{SX} - A_{EX})T_w^2}{2T_w^3} \right) t^3 + \frac{A_{SX}}{2} t^2 + V_{SX} t + P_{SX}$$

ここで、 P_{SX} 、 V_{SX} 、 A_{SX} は前フェーズ終了時の、位置、速度、加速度であり、 P_{EX} 、 V_{EX} 、 A_{EX} は次フェーズの初期値となる位置、速度、加速度で、

$$P_{EX} = (X_s + X_w)/2, V_{EX} = V_{0x}, A_{EX} = \begin{cases} -X'/T_C^2 & : \text{次のフェーズが c} \\ 2\{(3X' - 2V_{0x}T_s)/T_s\} & : \text{次のフェーズが d} \end{cases}$$

となる．

フェーズ c

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

フェーズ d

$$x = \left(\frac{V_{0x} T_s - 2X'}{T_s^3} \right) t^3 + \left(\frac{3X' - 2V_{0x} T_s}{T_s^2} \right) t^2 + V_{0x} t - X'$$

次に遊脚の運動について検討する．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 次関数で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．ここでの運動は、腰を原点とし、進行方向を +x、鉛直下向きを +z として記述する．

フェーズ a

$$x = -\frac{2V_{0x}}{T_s^3} t^4 + \left(\frac{3V_{0x}}{T_s^2} - \frac{X_s + X_w}{T_s^3} \right) t^3 + \left(\frac{3(X_s + X_w)}{2T_s^2} - \frac{V_{0x}}{T_s} \right) t^2$$

$$z = -\frac{16h}{T_s^4} t^4 + \frac{32h}{T_s^3} t^3 - \frac{16h}{T_s^2} t^2 + k$$

フェーズb

両脚支持期に関しては、腰の位置を原点としているため、腰が動く分だけ逆方向に足先が動いているとみなせる。よって、

$$x = \frac{X_S + X_W}{2} - (X_b - P_{SX})$$

$$z = k$$

ここで X_b はフェーズbの腰の軌跡 x である。

フェーズc

$$x = -\frac{2(X_S + X_W + V_{0x}T_S)}{T_S^3}t^3 + \frac{3(X_S + X_W + V_{0x}T_S)}{T_S^2}t^2 - V_{0x}t - \frac{X_S + X_W}{2}$$

$$z = -\frac{16h}{T_S^4}t^4 + \frac{32h}{T_S^3}t^3 - \frac{16h}{T_S^2}t^2 + k$$

フェーズd

$$x = \frac{2V_{0x}}{T_S^3}t^4 - \left(\frac{X_S + X_W + 5V_{0x}T_S}{T_S^3}\right)t^3 + \left(\frac{3X_S + 3X_W + 8V_{0x}T_S}{2T_S^2}\right)t^2 - V_{0x}t - \left(\frac{X_S + X_W}{2}\right)$$

$$z = -\frac{16h}{T_S^4}t^4 + \frac{32h}{T_S^3}t^3 - \frac{16h}{T_S^2}t^2 + k$$

4. 1. 2 Lateral Planeでの運動

Lateral Plane に関する運動の記述は、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方程式から重心の軌道関数を計算する。その後、幾何学的に足首と股の関節角を計算する。

図6に倒立振子のモデルを表す。重心に質点 m が集中していると仮定した長さ Z_C の倒立振子の根元関節に一定のトルク \mathbf{q} が働く場合の運動方程式は、

$$mZ_C^2\ddot{\mathbf{q}} - mgZ_C \cdot \sin \mathbf{q} = \mathbf{t}$$

この運動方程式の一般解は、 \mathbf{q} が十分小さいとすると、

$$\mathbf{q} = A \cdot \exp(\mathbf{a} \cdot t) + B \cdot \exp(-\mathbf{a} \cdot t) + C$$

となる。ここで、 $\mathbf{a} = \sqrt{g/Z_C}$ で A, B, C は未知数である。また

$w = \sin^{-1}(Y_W/Z_C)$ 、 $s = \sin^{-1}(Y_S/Z_C)$ として、これら

の間を往復運動するように未知数 A, B, C を定めると

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

となる。ここで、 $b = \exp\{\mathbf{a} \cdot (T_S/2)\}$ である。

本研究では、フェーズa, dに関しては、フェーズbと境界が速度までなめらかにつながるように5次関数として歩容を与える。フェーズbは、歩行安定化制御等に

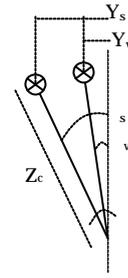


図6 倒立振子のモデル

より目標パターンから外れた腰の運動を補正するために5次関数として歩容を与える。これらより、各フェーズにおける腰の運動は次のようになる。

フェーズa

$$y = \left(\frac{-24Y_W - 4V_{0y}T_S}{T_S^5}\right)t^5 + \left(\frac{16Y_S + 52Y_W + 8V_{0y}T_S}{T_S^4}\right)t^4 + \left(\frac{-32Y_S - 34Y_W - 5V_{0y}T_S}{T_S^3}\right)t^3 + \left(\frac{16Y_S + 7Y_W + V_{0y}T_S}{T_S^2}\right)t^2$$

ここで、 V_{0y} は、フェーズcにおける初速度で、

$$V_{0y} = Z_C(A \cdot \mathbf{a} - B \cdot \mathbf{a})$$

となる。

フェーズb

$$y = \left(\frac{12P_{EY} - 12P_{SY} - (6V_{EY} + 6V_{SY})T_W - (A_{SY} - A_{EY})T_W^2}{2T_W^5}\right)t^5 + \left(\frac{30P_{SY} - 30P_{EY} + (14V_{EY} + 16V_{SY})T_W + (3A_{SY} - 2A_{EY})T_W^2}{2T_W^4}\right)t^4 + \left(\frac{20P_{EY} - 20P_{SY} - (8V_{EY} + 12V_{SY})T_W - (3A_{SY} - A_{EY})T_W^2}{2T_W^3}\right)t^3 + \frac{A_{SY}}{2}t^2 + V_{SY}t + P_{SY}$$

ここで、 P_{SY}, V_{SY}, A_{SY} は前フェーズ終了時の、位置、速度、加速度であり、 P_{EY}, V_{EY}, A_{EY} は次フェーズの初期値となる位置、速度、加速度で、

$$P_{EY} = -Y_W, V_{EY} = -V_{0y},$$

$$A_{EY} = \begin{cases} Z_C(A \cdot \mathbf{a}^2 + B \cdot \mathbf{a}^2) & \text{: 次のフェーズが c} \\ 2\left\{\frac{16Y_S - 23Y_W - 6V_{0y}T_S}{T_S^2}\right\} & \text{: 次のフェーズが d} \end{cases}$$

となる。

フェーズc

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

フェーズd

$$y = \left(\frac{24Y_W + 4V_{0y}T_S}{T_S^5}\right)t^5 + \left(\frac{16Y_S - 68Y_W - 12V_{0y}T_S}{T_S^4}\right)t^4 + \left(\frac{-32Y_S + 66Y_W + 13V_{0y}T_S}{T_S^3}\right)t^3 + \left(\frac{16Y_S - 23Y_W - 6V_{0y}T_S}{T_S^2}\right)t^2 + V_{0y}t + Y_W$$

4.1.3 歩行シミュレーション

前節で定めた歩容に関してロボットがどのような挙動を示すかをシミュレーションにより検証した。このシミュレーションには、機構解析ソフトウェアDADSを使用した。シミュレーションに使用したパラメータは表2のとおりである。X_s, X_w, Y_s, Y_wに幅があるのは、歩行中に歩幅等を変更しているためである。

表2 シミュレーションに使用したパラメータ

Ts	1.2	sec	Zc	0.59	m
Tw	0.4	sec	c	0.07	m
Xs	0.05 ~ 0.1	m	d	0.1	m
Xw	0.019 ~ 0.038	m	L1	0.15	m
Ys	0.029 ~ 0.035	m	L2	0.15	m
Yw	0.017 ~ 0.02	m			
h	0.025	m			
k	0.28	m			

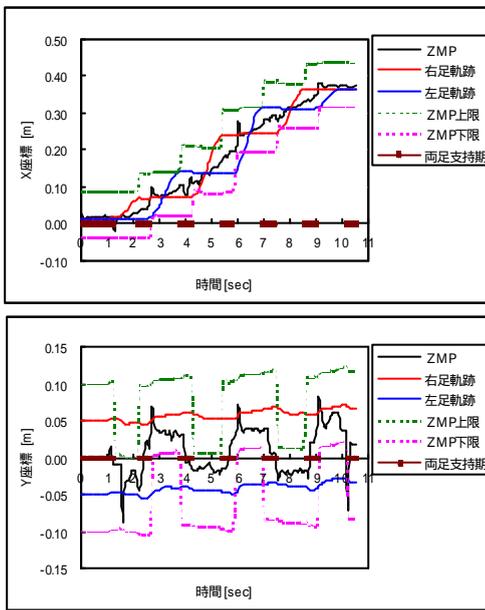


図7 シミュレーション結果

図7にシミュレーション結果を示す。図7に示すグラフにおいて、どの状態においてもZMPは足裏の領域（グラフにおいて、ZMP上限、下限を示す破線に挟まれた領域）に存在することが確認でき、設定した歩容の妥当性を確認した。

4.2 歩行の安定化

外乱等に対する歩行安定化問題は、指標とするZMPの測定とそれを用いたフィードバック制御の2つの課題に大別できる。本研究では、これらについて検討した。

4.2.1 ZMPの測定

ZMPの測定に関しては、足裏センサを用いた手法^[12]と力覚センサを用いた手法^[13]がこれまでに提案されている。これらの測定法は原理的には等価であるが、ロボットの振動（サーボ振動を含む）等の外乱の影響でどちらの手法が有利であるかは簡単に見極めることは困難であるため、両者を併用することとする。以下にこれらの測定に関する原理を示す。

足裏センサ（ロードセル）によるZMP測定

図8に示すようにロードセル（A～D）の中心が足底に装着されているとすると、片足支持期のZMPは、次式により求まる。

$$p_x = \frac{(f_A + f_B)\mathbf{a} + (f_C + f_D)\mathbf{b}}{f_A + f_B + f_C + f_D}$$

$$p_y = \frac{(f_A + f_C)\mathbf{g} + (f_B + f_D)\mathbf{d}}{f_A + f_B + f_C + f_D}$$

ここで、 f_A, f_B, f_C, f_D はロードセルが検出した力である。

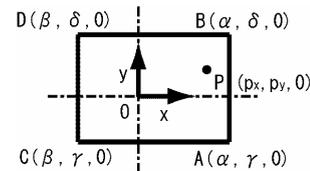


図8 ロードセルによる測定

力覚センサによるZMP測定

図9に示すように、足底座標系の原点は足首中心を通る足底平面に垂直な直線と足底平面が交わる点とする。図中の記号Sは6軸力覚センサおよびその位置 (s_x, s_y, s_z) 、Aはセンサより下の構造物（質量m）の重心位置 (a_x, a_y, a_z) を表す。このとき、ZMPは次式により求まる。

$$p_x = \frac{-s_z F_x - M_y - m g a_x}{F_z - m g}$$

$$p_y = \frac{-s_z F_y + M_x - m g a_y}{F_z - m g}$$

ここで、 F_x, F_y, F_z, M_x, M_y は、力覚センサで検出した力とモーメントで、 g は、重力加速度である。

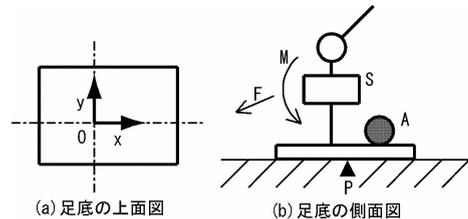


図9 6軸力センサによるZMP測定

4.2.2 歩行安定化のためのフィードバック制御

外乱等に対する歩行安定化制御に関しては、いくつかの手法が提案されている。平井ら^[15]は、上肢に回転運動を与えることによりZMP補正を行う手法を提案した。長坂ら^[12]は、腰の位置に補正を加える体幹位置コンプライアンス制御を提案した。Qiang Huangら^[16]は、足首の回転移動量を調整してZMP補正をする手法を提案した。

本研究では、上肢の運動は人に対するリアクションに使用することを計画しているため、上肢の姿勢に影響を与えない体幹位置コンプライアンス制御(図10)に基づいたフィードバック制御を使用する。このフィードバック制御においては、Qiang Huang らに従って、足裏にフィードバック制御を行わない不感領域(転倒に対する安全領域)を設定し、ZMPがこの領域から外れた距離に関してPD補償器により補正量を決定する。この補正量は、次式により決定する。

$$K \left[f(\text{margin}, ZMP) + D \frac{df(\text{margin}, ZMP)}{dt} \right]$$

ここで、K、Dはそれぞれ比例動作、微分動作に関する係数であり、

$$f(\text{margin}, ZMP) = \begin{cases} |\text{margin} - ZMP| & , \text{if } \text{margin} < |ZMP| \\ 0 & , \text{if } \text{margin} > |ZMP| \end{cases}$$

である。

具体的なプログラムの実装に関しては、ZMPの値が離散的にしか得られないため、微分値は現在から直前の過去10個のデータの変化を3次の最小自乗法で近似し、これを微分した値を使用することとする。また補正量が大きすぎるとその位置に移動できない(逆運動学が解けない)ので、補正量には限界値を設定する。

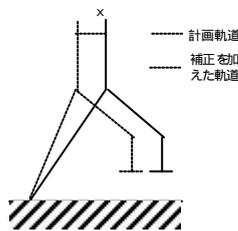


図10 体幹位置コンプライアンス

5. 歩行制御ソフトウェア

4章で記述した歩行アルゴリズムに従って、歩行制御ソフトウェアを試作した。各コントローラに対して試作したソフトウェアの概要を以下に示す。

運動制御コントローラ

運動制御コントローラにおける歩行制御ソフトウェアは次に示す3つのタスクからなる。尚、OSには、μITRONを使用した。

・コマンド解析タスク

アプリケーションコントローラからの(歩行)コマンドを解析し、それを4.1で述べた歩行パターンに分解して、動作コマンドバッファに登録する。

・ZMP測定タスク

力覚センサ等に基づきZMPを計測し、それに基づいて歩行安定化に関する補正量を計算し、それを歩行制御タスクに送信する。

・歩行制御タスク

動作コマンドバッファの歩行パターン、ZMP測定タスクから受け取った補正データ、各関節の現在値を基に、各関節へ指令値を作成し、それを各軸のモータコントローラへ送信する。また、モータコントローラから現在値を受信する。

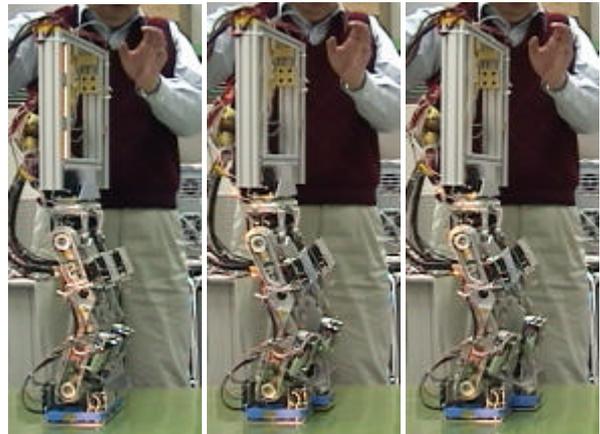
モータ制御コントローラ

運動制御コントローラから受信した移動量の目標値に基づいて、モータを制御するとともに、現在の位置データを運動制御コントローラに送信する。

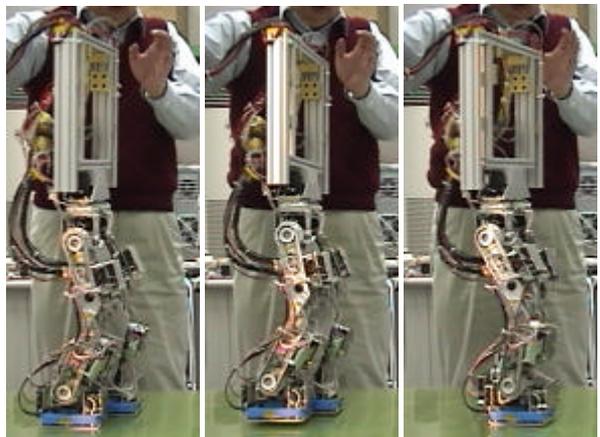
6. 歩行実験

先行的に試作した下肢の機構を使用し、4.1で示した歩容に基づいて、歩行実験を行った。使用した歩容パラメータを表3に示す。尚、本実験では、歩行の安定化制御は、行わなかった。

図11に歩行実験結果の一例を示す。この結果において、各フェーズ間の移行がスムーズに行われ、歩行が実現されている。しかし、図11(f)に見られるようにヨー軸のモーメントの影響で、ロボットの移動方向が少し変化している。これを改良することに関しては、足底の素材を検討したり、モーメントを打ち消す補正を加えたりすることが考えられる。図12に歩行中の片足支持



(a)初期状態 (b)フェーズa (c)フェーズbの開始



(d)フェーズcの開始 (e)フェーズc (f)フェーズbの開始

図11 歩行実験

表3 実験パラメータ

Ts	1.2	sec	Zc	0.59	m
Tw	0.4	sec	c	0.07	m
Xs	0.05	m	d	0.1	m
Xw	0.019	m	L1	0.15	m
Ys	0.0525	m	L2	0.15	m
Yw	0.03	m			
h	0.005	m			
k	0.28	m			

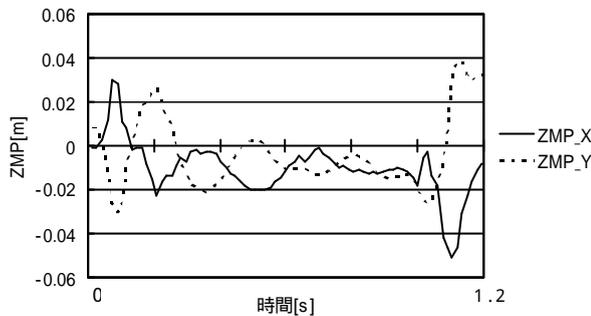


図1.2 歩行中の片足支持期におけるZMP

期（フェーズc）のZMPの変化の一例を示す．足底の範囲は，X座標に関して-0.049～0.068，Y座標に関して，-0.038～0.038である．一部，測定により求めたZMPの位置が，足底の範囲を外れそうになっているところがあるものの，おおむね足底にある．今後，歩行安定化制御を加えることにより，ZMPが安定して足底の範囲に維持されることが期待できる．

7. まとめ

本研究では，インタラクションに基づく親和性向上に関する研究における研究用ロボットプラットフォームの基本ハードウェアと歩行のための基本ソフトウェアを開発した．開発したロボットハードウェアは，30の自由度（下肢：12，上肢：18）があり，歩行の他にいろいろなアクションを生成することが可能である．歩行に関しては，線形倒立振り子モデルに基づき歩容を生成するソフトウェアを開発し，その有効性を歩行実験により検証した．今後の課題としては，上肢の制御ソフトウェア，アプリケーションレベルのソフトウェアの開発および下肢の歩行制御ソフトウェアの改良があり，次年度以降，これらの課題に取り組む．

文献

[1] 国際福祉機器展「M³」, <http://www.hcr.or.jp/>
 [2] 株式会社国際電気通信基礎技術研究所,
 [3] “日常活動型ロボットプロジェクト”,
<http://www.mic.atr.co.jp/~michita/everyday/>
 [4] 日本電気株式会社, “パーソナルロボット「Papero」”,
<http://www.incx.nec.co.jp/robot/>

[5] 山田, 吹田, 今井, 池田, 杉本 “痛覚耐性値に基づく安全な人間の接触検出および停止機能を有するロボットシステム”, 日本機械学会論文集C編, vol.63,no.614,pp3552-3557,1997
 [6] 森田, 鈴木, 川崎, 菅野, “人間共存ロボットマニピュレータの衝突安全設計と制御” 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.1, pp.102-109,1998
 [7] Vukobratovic M.et al, IEEE Transactions on Bio-Mechanical Engineering, Vol.BME-17,pp.25-36, 1970
 [8] 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
 [9] 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的高速生成”, 第18回ロボット学会学術講演会予稿集, pp.721-722, 2000
 [10] 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
 [11] 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
 [12] 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
 [13] 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
 [14] 李清華, 高西淳夫, 加藤一郎, “6軸力センサを用いた2足歩行ロボットのZMP測定システムの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.6, pp.828-833, 1992
 [15] 李清華, 高西淳夫, 加藤一郎, “上体を有する2足歩行ロボットの学習制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.7, pp.1011-1019, 1993
 [16] Kazuo Hirai, Masato Hirose, Yuji Haikawa, Toru Takenaka, “The Development of Honda Humanoid Robot”, Proc. of IEEE international Conference on Robotics & Automation, pp.1321-1326, 1998
 [17] Qiang Huang, Yoshihiko Nakamura, and Tetsunari Inamura, “Humanoids Walk with Feedforward Dynamic Pattern and Feedback Sensory Reflection”, Proc. of IEEE international Conference on Robotics & Automation, pp.4220-4225. 2001