

## 研究内容

### 不連続位相変化をする非線形振動子を用いた歩行制御 (土屋グループ)

#### (1) 実施の内容

脚歩行ロボットは回転ジョイントで結合された多数のリンクから構成される機械システムである。脚歩行ロボットの歩行運動は、多自由度機械システムのリズム運動であり、脚歩行ロボットの歩行制御は、多自由度機械システムのリズム運動の制御である。二脚歩行ロボットは歩行中に静的に不安定な姿勢をとる場合がある。この種の歩行は動的歩行と呼ばれる。本研究では、二脚歩行ロボットの歩行制御を扱うが、特に動的歩行の歩行制御を行なう。多自由度機械システムの運動制御に対して、モデルベース制御法に基づいた制御系が開発されている [1]。この制御系は運動計画系と運動制御系から構成されている。運動計画系では機械システムの基準運動が生成され、運動制御系ではその基準運動を実現するように各自由度が制御される。モデルベース制御法に基づいて脚歩行ロボットの歩行制御系を次のように構成することができる。運動制御系は歩行ロボットの安定で周期的な基準歩行運動に対応した各回転ジョイントの基準回転角をエンコードした周期時間関数系から構成される。一方、運動制御系は各回転ジョイントの基準回転角を指令値として、各回転ジョイントに取り付けられたモータを制御する局所フィードバック制御系から構成される。この制御系は外乱に対してロバストでなく、また環境の動的変化に対して適応できない。これらの弱点を克服する方法として次の2つの方法がある。一つは運動制御系を修正する方法である。即ち、ジャイロセンサー信号、足先に取り付けられた接地センサー信号など外界センサー信号を用いて各ジョイント回転角のフィードバック制御系の指令値を修正する。他方は、運動計画系を修正する方法である。即ち、運動計画系をある力学系で構成する [2], [3]。その力学系の状態を用いて歩行ロボットの基準歩行運動、各回転ジョイントの基準回転角をエンコードする。この力学系に外界センサー信号を入力し、力学系の状態を環境の動的変化に対応して変化させる。その結果、環境の動的変化に対応した基準歩行運動、基準回転角が生成される。我々は後者の方法を用いて二脚歩行ロボットの歩行制御系を開発してきた [4], [5]。即ち、運動計画系を運動生成系と軌道生成系から構成する。運動計画系はリミットサイクルを持つ非線形振動子から構成する。各非線形振動子は相互作用項とともに、足先に取り付けられた接地センサー信号からの入力項を持つ。その結果、各非線形振動子は環境の動的変化に対応した状態変化をする。一方、軌道生成系は各回転ジョイントの基準回転角に対応する非線形振動子の位相角の関数として表現する関数系で構成される。本研究において我々は非線形振動子を用いた二脚歩行ロボットの歩行制御系を開発した。そしてその有効性を数値シミュレーションおよびハードウェア実験により検証した。

力学モデル

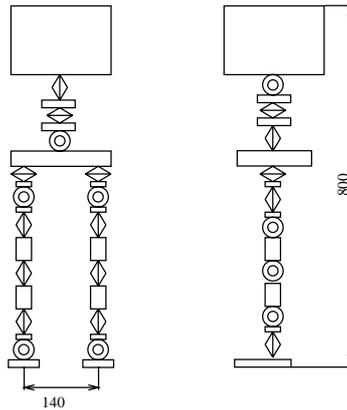


図 1: 二脚歩行ロボットのモデル (1)

図 1, 2 に示すような 2 種類の二脚歩行ロボットを考える．図 1 のロボットは 4 つのリンクを持つ胴体と 6 本のリンクから構成される 1 対の脚から構成される．一方，図 2 のロボットは，胴体と，4 本のリンクから構成される 1 対の腕，6 本のリンクから構成される 2 本の脚から構成されている．

図 1 のモデルにおいて，各リンクは 1 自由度回転ジョイントにより結合されている．左右の脚にそれぞれ，脚 1，脚 2 と番号を付ける．本体のジョイントおよびリンクに上から順にジョイント 1，2，3，およびリンク 1，2，3 と番号を付ける．同様に脚のジョイントおよびリンクに胴体側から足先に向かってジョイント 1，2，…，リンク 1，2，… と番号を付ける．

図 2 のモデルにおいて各リンクは 1 自由度の回転ジョイントによりお互いに結合されている．上記と同様に，脚および腕に番号を付ける．

図 1 のモデルと図 2 のモデルは共に脚の自由度配置は同じであり，6 自由度を有する．図 1 のモデルは，胴体に roll, yaw pitch 軸それぞれに対応した自由度を有しており，胴体の姿勢運動を脚の運動とは独立に制御することが可能となっている．これに対して，図 2 のモデルは，胴体に自由度を持っていないため，胴体の姿勢運動の制御と脚の運動とは独立に制御を行なうことができない．すなわち，脚の運動は胴体の姿勢運動と運動学的に連成するため，歩容と胴体の姿勢運動の双方を独立に指定することができない．このロボットの胴体の姿勢の制御は，脚の関節の自由度を制御することにより実現される．

#### 歩行制御

提案する制御系の構成を図 3 に示す．この制御系は運動計画系と運動制御系から構成される．運動計画系は，運動生成系と軌道生成系から構成されている．運動生成系は非線形振動子系で構成されており，非線形振動子系は振動子間の相互作用と足先に備え付けられた接地センサーからのフィードバック信号によりその振動位相を調整する．軌道生成系は振動子の位相に対応した各ジョイント角の基準運動をエンコードする．得られた各ジョイント角の基準運動は，運動制御系に指令値として

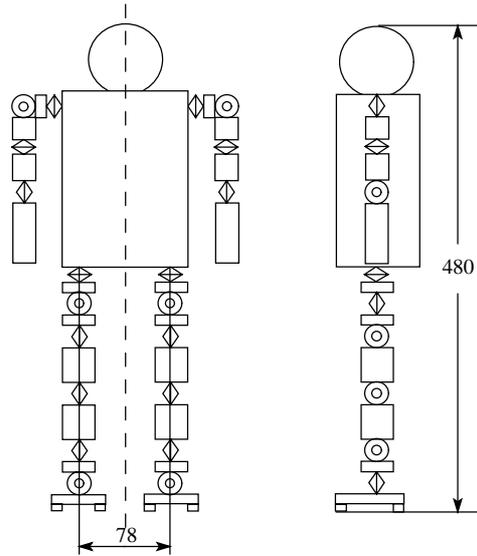


図 2: ヒューマノイド型歩行ロボットのモデル (2)

与えられる．運動制御系のモータ制御系は軌道計画系で生成された目標軌道を実現するように全てのジョイントモータを制御する．

二脚歩行ロボットの運動を 2 本の脚，2 本の腕の先端の運動および本体の姿勢運動で指定する．運動生成系は 2 種類の振動子系で構成される ( 図 4 ) ．一つは脚の運動に対応した運動振動子であり，他方は振動子間の結合を行なう中間振動子である．二脚歩行ロボットに対して，その脚，腕，胴体の運動に対応した 5 個の運動振動子と 1 個の中間振動子によりネットワークを構成する．歩行運動を指定する運動の基準運動は対応する運動振動子の位相を用いて表現する．二脚歩行ロボットに対して，各脚の先端の基準運動は次のように与えられる．脚の先端の運動に対し，2 個の基準軌道を与える．一つは遊脚相の基準軌道であり，他方は支持脚相の基準軌道である ( 図 5 ) ．脚  $i$  の本体から見た先端の位置に対して，代表点を 2 点  $r_{AEP}^{(i)}$ , anterior extreme position (AEP) and  $r_{PEP}^{(i)}$ , posterior extreme position (PEP) を定義する．遊脚相における基準軌道  $\eta_{Sw}^{(i)}$  は AEP, PEP を含む閉曲線である．一方，支持脚相における基準軌道  $\eta_{Sw}^{(i)}$  は AEP, PEP を含む直線である．これらの 2 つの基準軌道は AEP, PEP で切り替えられる．即ち，AEP で遊脚相の基準軌道から支持脚相の基準軌道に切り替えられ，PEP で支持脚相の基準軌道から遊脚相の基準軌道に切り替えられる．さらに，腕の先端の基準軌道，本体の基準姿勢運動は対応する運動振動子の位相の閉曲線で与えられる．軌道生成系において，逆運動学を用いてこれらの基準運動から各関節の回転角が求められる．これらの関節回転角は各関節のモータ制御系の指令値として運動制御系に送られる．二脚歩行ロボットに対しては，胴体の姿勢の基準運動は次のように与えられる．まず，胴体の基準姿勢運動は，中間振動子の位相の関数として調和関数を用いて表現する．胴体の pitch 軸回りの基準姿勢運動においては，姿勢運動の振幅，中間振動子との位相差および胴体の前傾角あるいは後退角のバイアス量が設計パラメータとなる．一方，胴体の roll 軸および yaw 軸回りの

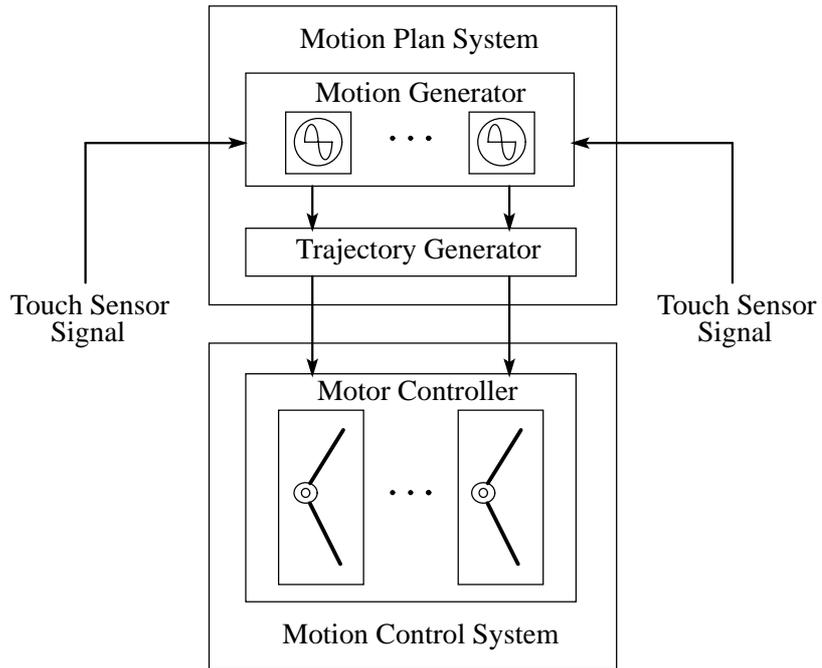


图 3: 步行制御系構成

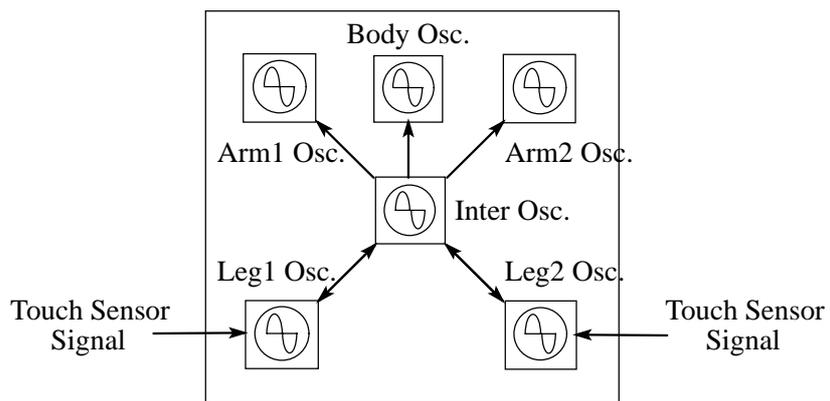


图 4: 運動生成系

基準姿勢運動は、姿勢運動の振幅および中間振動子との位相差が設計パラメータとなる。

Trajectory in swinging phase    Trajectory in supporting phase

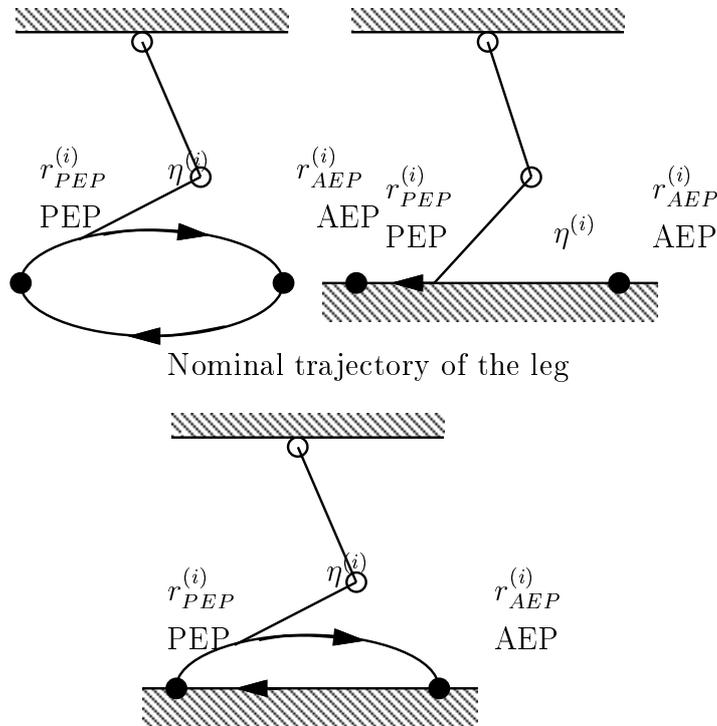


図 5: 脚先の軌道

運動生成系の振動子のダイナミクスは次のように設計される．振動子のダイナミクスは位相ダイナミクスで与えられる [6] ．

$$\dot{\phi}^{(i)} = \omega + g^{(i)} \quad (1)$$

ここで、 $\phi^{(i)}$  は振動子  $i$  の位相、 $\omega$  は振動子の角速度、 $g^{(i)}$  は他の振動子や環境からの影響項である．各振動子はそれぞれお互いに相互作用をする ( 図 4 ) ．二脚歩行ロボットにおいては、脚の運動に対応する振動子はそれぞれ中間振動子を双方向の相互作用を持つ．腕の運動、本体の姿勢運動に対する運動振動子は中間振動子の影響を受ける．これらの相互作用は振動子間に固有の位相関係を形成する．その結果、二脚歩行ロボットは固有の歩行パターンを形成する．

一方、脚の運動に対応する振動子はそれぞれ対応する脚の足先に取り付けられた接地センサー信号の入力を受ける．即ち、接地センサー信号が入力した瞬間に位相は基準軌道における AEP での値にジャンプする．それとともに基準軌道が遊脚相の軌道から支持脚相の軌道に切り替えられる．これは、接地センサー信号によって、振動子は環境変化に対応して位相を調整することを意味する．その結果、振動子間の位相関係は環境変化に対応して変化する．これに伴い、軌道生成系から運動生成系

に送られる指令値も変化する．その結果，二脚歩行ロボットは環境変化に適応した歩行パターンを形成する．

## 数値シミュレーション

提案する制御系の有効性，特に環境変動に対する歩行運動の適応性を検証するため，数値シミュレーションを行なった．数値シミュレーションに用いた二脚歩行ロボットのモデルは，図 2 のモデル ( H O A P - 1 ) である．全関節の基準軌道は，二脚歩行ロボットがある固定された環境で安定に歩行することができるように決定した．提案する制御系の効果を比較検証するため，位相調整機構を持たないモデルベース制御系による運動もシミュレーションを行なった．環境変化として，基準歩幅を変化させることで基準歩行速度を変化させた．結果を図 6 に示す．この図は歩行周期，即ちここでは左足が接地する毎の時間間隔を表している．この図から，提案する制御系では歩行周期を変化させることにより広い歩行速度領域で安定な歩行を実現できていることが判る．この結果から，提案する制御系において，接地センサー信号によって歩行速度に対応して振動子の位相が調整されることにより，振動子間の位相関係は歩行速度に対応して変化し，これに伴い，軌道生成系から運動生成系に送られる指令値も変化する．その結果，二脚歩行ロボットは歩行速度の変化に適応した歩行パターンが形成されることが検証された．

## ハードウェア実験

提案する制御系の性能を評価するため，2 種類のハードウェアモデルを用いてハードウェア実験を行なった．一つは，富士通オートメーション製の H O A P - 1 と呼ばれる小型ヒューマノイドロボットであり，もう一つは我々が開発した二脚歩行ロボットである．

### ● H O A P - 1 の構成

図 7 はヒューマノイド型の二脚歩行ロボットの実験装置の写真である．実験装置の仕様は以下の通りである．ホスト PC の C P U は Celeron 1GHz であり，使用した OS はリアルタイム Linux である．ホストコンピュータとロボットは USB にて通信する．ホストコンピュータは制御プログラムの開発，実行および実験データの解析に用いた．制御プログラムはホスト PC 上で動作する．ロボットには，インテリジェントモータドライバが搭載されており，ホスト PC からの関節角度指令を受け取り各関節モータを駆動する．各関節角はポテンショメータにより検出され，ホスト PC に送られる．ロボットの足先に取り付けられた接地センサー ( 反力センサー ) の信号は，A/D コンバータを介して検出され，ホスト PC へフィードバックされる．

### ● H O A P - 1 を用いた実験

小型ヒューマノイドロボット・H O A P - 1 を用いて，歩行中に基準歩幅を次第に変化させることにより歩行速度を変化させていった場合の歩行実験を行なった．結果を図 8 に示す．この図は中間振動子の振動周期の時間履歴を表している．

この図から，提案する制御系を搭載した二脚歩行ロボットは環境変化に対応して

その歩行周期を調整することにより安定な歩行を実現していることが判る。この結果において、歩幅が増加するに従い歩行周期が調整されていく様子は、数値シミュレーションと定性的に合致しており定量的にもほぼ一致している。

#### ●開発したハードウェアモデルの構成

図9は開発した二脚歩行ロボットのハードウェア実験装置の写真である。図10はハードウェア実験装置のブロック構成を表す。実験装置の仕様は以下の通りである。ホストPCおよびロボットに搭載したコントローラのCPUはそれぞれPentium III 1GHzとPentium III 850MHzであり、使用したOSはリアルタイムLinuxである。ホストコンピュータと搭載コントローラは100BASE-TX規格のイーサネットにて通信する。ホストコンピュータは制御プログラムの開発および実験データの解析・モニタに用いた。制御プログラムは搭載コントローラ上で動作する。コントローラは光学エンコーダ用カウンタを介してロボットのジョイント角を検出する。モータへの指令値はコントローラからモータドライバへ与えられる。ロボットの足先に取り付けられた接地センサー（反力センサー）の信号は、ADコンバータを介してコントローラへフィードバックされる（ハードウェア仕様の詳細は付録を参照のこと）

#### ●開発したハードウェアモデルでの実験

図11はロボットの平地での定常歩行運動中の歩行周期を表わす。図11(a), (b)はそれぞれデューティ比 $\hat{\beta} = 0.70$  (5.36 [cm/sec]) ,  $\hat{\beta} = 0.50$  (12.5 [cm/sec]) の場合であり歩行速度に関して2倍以上の相違がある場合を選んである。図中の破線は、その基準デューティ比における基準歩行周期を示している。この図から、提案する制御系を搭載した二脚歩行ロボットが2倍以上の異なる歩行速度に対しても、歩行周期を適切に調整することにより安定な歩行を実現していることが判る。

図12は平地での定常歩行運動中の左脚足先に働く地面からの反力の時間履歴を表す。この図から、提案する制御系を搭載したロボットは、足先の着地の瞬間において遊脚相から支持脚相への切り替えを環境に応じて適切に行なうことにより大きな衝撃力もバウンドも起こすことなく安定な歩行を実現していることが判る。

開発したハードウェアモデルの仕様

#### 機構

開発した二脚ロボットは、脚に6自由度、胴体に3自由度を持つ。各関節は、モジュール構造とし、各アクチュエータモジュールを構造材で結合することによりロボット全体の構造を作っている。最上部胴体（胸部）には、コントローラ、モータドライバ、D/Aコンバータボードなど電子回路一式が格納されている。また、各関節の可動範囲を以下に示す。

関節名	可動範囲 ([deg])
胴体 pitch 方向	± 20
胴体 yaw 方向	± 30
胴体 roll 方向	± 20
脚部第 1 関節 ( yaw )	± 45
脚部第 2 関節 ( roll )	± 30
脚部第 3 関節 ( pitch )	前 60 後 60
脚部第 4 関節 ( pitch )	前 0 後 120
脚部第 5 関節 ( pitch )	前 60 後 60
脚部第 6 関節 ( roll )	± 30

### アクチュエータモジュール

各アクチュエータモジュールは、モータとハーモニックギア、光学式エンコーダから構成され、モータの駆動力は、ベルトドライブによりギアに伝達される構造とした。各構成要素を以下の表にまとめた。

要素	規格	型番	メーカー
モータ	定格 18 [W]	NC-256401	千葉精密製
ギア	ギア比 110:1	FB-14-110-2-R	ハーモニックドライブシステムズ製
エンコーダ	500 [P/R]	OME-500-2MCA	日本電産ネミコン製

### 外界センサ

外界センサとしては、各脚の裏に接地を検出するための反力センサが搭載された。反力センサとして、共和電業製の小型ロードセル( 型番：LM-20KA，定格測定荷重 200[N] ) を各足裏に 4 個ずつ配置した。

### D / A コンバータボード

今回開発したロボットの自由度が多いため、コントローラからモータドライバへモータのトルクコマンドを送る D / A コンバータボードは、コンパクトでありかつ多チャンネルであることが要求されたため、我々自身で開発を行なった。開発した D / A コンバータボードの仕様を以下の表に示す。

項目	内容
ボードサイズ	80 [mm] × 100 [mm]
チャンネル数	8 [CH/ボード]
分解能	12 bit
レンジ	0 ~ 10 [V], -5 ~ 5 [V] チャンネル毎に選択可能
使用 IC	アナログデバイセス製 AD7247AAR
インターフェース	PC104 バスサブセット

### カウンタボード

今回開発したロボットの自由度が多いため、関節のアクチュエータモジュールに搭載された光学式エンコーダからのパルスをカウントし、各関節の回転角をコントローラに送るカウンタボードは、D/Aコンバータボードと同様にコンパクトでありかつ多チャンネルであることが要求されたため、我々自身で開発を行なった。開発したカウンタボードの仕様を以下の表に示す。

項目	内容
ボードサイズ	80 [mm] × 100 [mm]
チャンネル数	8 [CH/ボード]
レンジ	24 bit
使用IC	コスモテックス製 PCC130
インターフェース	PC104 バスサブセット

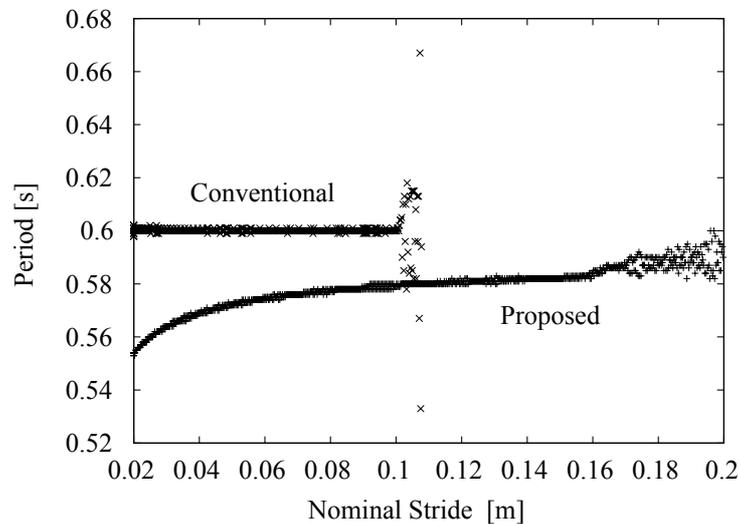


図 6: 歩行周期

## (2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

本研究では、二脚歩行ロボットの歩行制御、特に動的歩行の歩行制御系の開発を行なった。脚歩行ロボットの動的歩行の制御に対して、従来よりモデルベース制御法に基づいた制御系が開発されてきた。この制御系は運動計画系と運動制御系から構成されている。運動計画系では機械システムの基準運動が生成され、運動制御系ではその基準運動を実現するように各自由度が制御される。この制御系は外乱に対してロバストでなく、また環境の動的変化に対して適応できない。これらの弱点を克服する方法として運動計画系をある力学系で構成する方法が考えられる。その力学系の状態を用いて歩行ロボットの基準歩行運動、各回転ジョイントの基準回転角をエンコードする。この力学系に外界センサー信号を入力し、力学系の状態を環



図 7: ヒューマノイド型歩行ロボット, HOAP-1 (富士通オートメーション製)

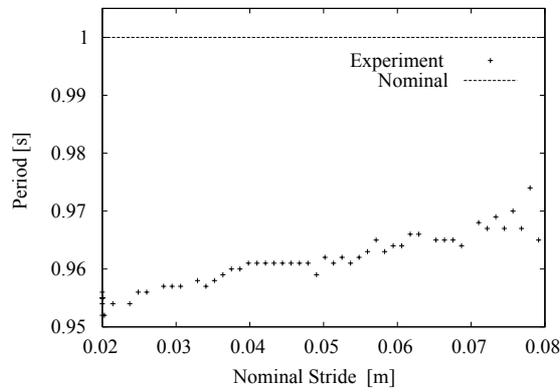


図 8: 歩行周期

境の動的変化に対応して変化させる．その結果，環境の動的変化に対応した基準歩行運動，基準回転角が生成される．我々はこの方法を用いて二脚歩行ロボットの歩行制御系を開発してきた．即ち，運動計画系を運動生成系と軌道生成系から構成する．運動計画系はリミットサイクルを持つ非線形振動子から構成する．各非線形振動子は相互作用項とともに，足先に取り付けられた接地センサー信号からの入力項を持つ．その結果，各非線形振動子は環境の動的変化に対応した状態変化をする．一方，軌道生成系は各回転ジョイントの基準回転角を対応する非線形振動子の位相角の関数として表現する関数系で構成される．本研究において我々は非線形振動子を用いた二脚歩行ロボットの歩行制御系を開発した．そしてその有効性を数値シミュレーションおよびハードウェア実験により検証した．

## 参考文献

- [1] An C.H., Atkeson C.G., and Hollerbach J.M. : Model-based control of a robot manipulator, MIT Press, 1988

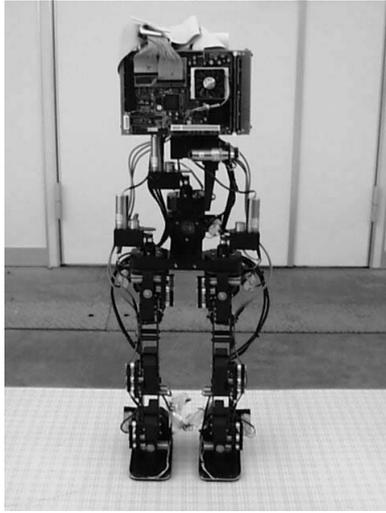


図 9: 二脚歩行ロボットのハードウェア実験装置概観

- [2] Ijspeert A.J., Nakanishi J. and Schaal S. : Trajectory Formation for Imitation with Nonlinear Dynamical Systems, Proc. IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems (IROS 2001), pp.752–757, 2001
- [3] Ijspeert A.J., Nakanishi J. and Schaal S. : Learning Rhythmic Movements by Demonstration using Nonlinear Oscillators, Proc. IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems (IROS 2002), pp.958–963, 2002
- [4] Tsujita K., Tsuchiya K. and Onat A. : Adaptive Gait Pattern Control of a Quadruped Locomotion Robot, Proc. IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems (IROS 2001), pp.2318–2325, 2001
- [5] Tsuchiya K. Aoi S. and Tsujita K. : Locomotion Control of a Biped Locomotion Robot using Nonlinear Oscillators, Presented at IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003), 2003
- [6] Kuramoto Y. : Chemical Oscillations, Wave and Turbulence, Springer, Berlin, 1984

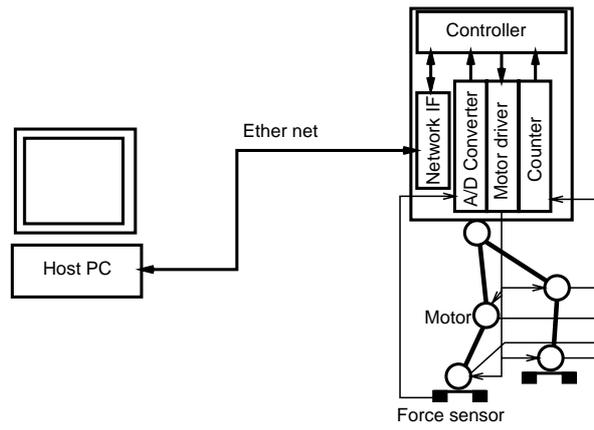
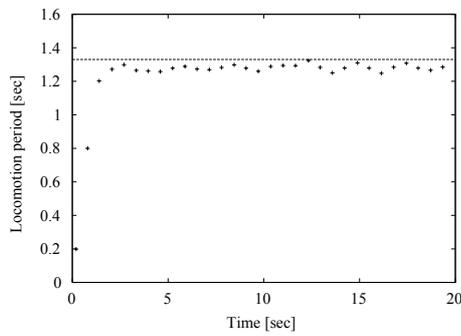
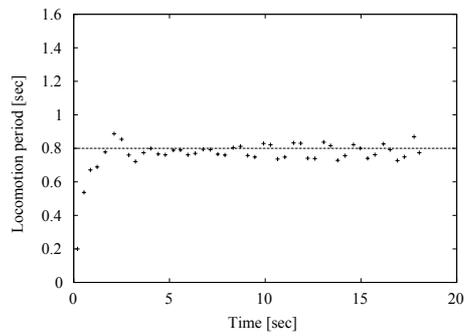


図 10: ハードウェア構成

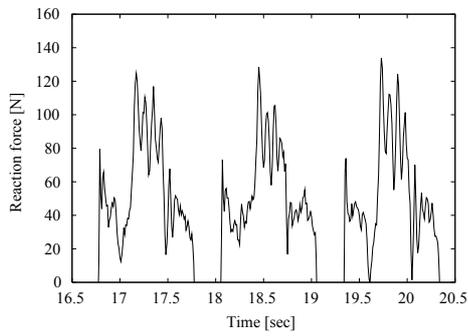


(a)  $\beta = 0.70$

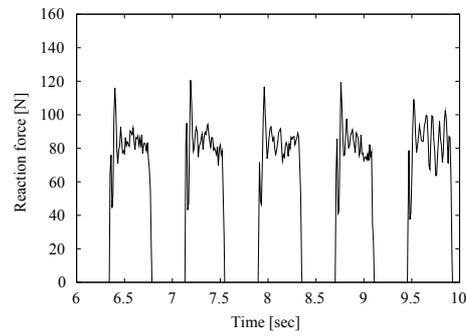


(b)  $\beta = 0.50$

図 11: 歩行周期



(a)  $\beta = 0.70$



(b)  $\beta = 0.50$

図 12: 床から足先への反力