

軌道アトラクタを用いた自律制御のための力学系次元拡張と 平面脚ロボットへの応用

渡辺 将旭^{*1}, 岡田 昌史^{*1}

Dimensional extension of dynamical system for autonomous control based on orbit attractor and its application to control of a two-dimensional biped robot

Masaaki Watanabe^{*1} and Masafumi Okada^{*1}

^{*1} Dept. of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo TECH
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550, JAPAN

For dynamical robot motion control, a direct joint angle commanding controller is proposed based on orbit attractor of nonlinear dynamics instead of a torque oriented controller that yields torque command. For the attractor control, it is necessary that an orbit of state variable should not be crossing in the state space. When the orbit is very close, vector field of the attractor along the orbit can not be defined correctly. In this paper, we propose dimensional extension of dynamical system to design a controller and apply it to control of a two-dimensional biped robot.

Key Words : Dimensional extension, Attractor design, Biped robot

1. はじめに

一般に、ロボットの動的制御のためには運動方程式に基づいた制御系の設計が必要であるため、制御入力
はトルクまたは力 (以下合わせてトルクと記す) になる。しかし、

1. トルクを制御するためにはトルクセンサのフィードバックが必要であるが、精度や重量の問題からロボットに搭載することは望ましくない。
2. ロボットの安全性においてはロボットの破損や環境・人間への衝突などを防ぐために、関節に対する可動範囲の制限が必要である。

といった理由から、多くのロボットでは Fig.1 に表されるようなローカルな状態フィードバック系を有するモータドライバを関節の制御に使用されるケースが数多く見られている。ここで、 r は目標運動パターン、 x

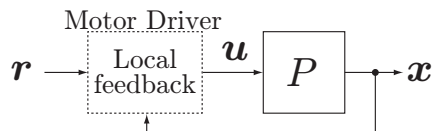


Fig. 1 Local feedback control system

は状態変数、 u は入力、 P は制御対象である。

このような制御系を有するロボットに対して動的制御を行うために、動力学に基づいた運動パターンを生成し、これを目標軌道としてローカルフィードバック系へ与えることが有用である。梶田ら⁽¹⁾は歩行ロボットの重心の動きを線形倒立振り子によりモデル化し、歩行パターンを獲得している。Yamane ら⁽²⁾はデータベース上の運動パターンをロボットのダイナミクスに合わせて軌道を変換し、運動方程式を満たす運動を獲得している。Kuffer ら⁽³⁾は動作の経路計画について、転倒しないように動力学を考慮した運動パターンを獲得している。しかし、これらの方法では動力学に基づいたロボットの運動パターンが得られるものの、フィードバック系の遅れから、所望の時刻に所望の角度が実現されるケースは少なく、厳密な動的制御は難しい。一方、長谷川ら⁽⁴⁾は軌道アトラクタに基づいてロボットの運動を実現したい軌道に引き込ませるように、動力学を考慮した目標値を非線形コントローラから生成する動的姿勢制御を提案した。しかし、この制御系ではロボットの運動は状態空間内で定義された場により得られるため、実現したい軌道が状態空間の中でひとつの軌道を描く必要があり、さらに、その軌道が交点を持たないことが必要とされる。特に後に示す歩行運動ではその仮定が満たされにくく、交点こそ持たないものの軌道が極めて近い点を通り、軌道アトラクタが生

^{*1} 東京工業大学大学院機械理工学専攻 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1) {watanabe@micro.mep.titech.ac.jp, okada@mep.titech.ac.jp}

成されにくい．軌道の近さは状態空間の基底（一般化座標）の選び方に依存するが，運動の物理的な距離が近い場合，すなわち，関節角度，角速度のわずかなずれで軌道上の他の点に移ってしまうような場合には，軌道アトラクタは生成されにくい．

そこで本研究では，ロボットの動的姿勢制御をこのようなケースに対応させるために，力学系の状態空間の次元を拡張させ，実現したい軌道が近い点を通らないように変形させる方法を提案する．これは，これまでの方法が非線形な状態フィードバックによって制御系を構成していたのに対し，非線形コントローラが内部状態を持ち力学系となることに相当する．そして最後に，提案手法を動的姿勢制御された平面脚ロボットの歩行運動の制御に応用し有効性を示す．

2. 軌道アトラクタに基づいた動的姿勢制御系の設計

参考文献⁽⁴⁾では，関節部の制御にモータドライバによる角度ローカルフィードバック制御系を有するロボットを対象とし，軌道アトラクタに基づいてロボットの運動を自律的に制御する動的姿勢制御が提案されている．動的姿勢制御はローカルフィードバックを含めた動力学に基づいて目標値を生成する方法である．本章ではこの手法について簡単に示す．

簡単のために線形・離散時間におけるロボットの運動方程式と，関節のローカルフィードバックが

$$\mathbf{x}[k+1] = A\mathbf{x}[k] + B\mathbf{u}[k] \quad (1)$$

$$\mathbf{u}[k] = K_1\mathbf{r}[k] - K_2\mathbf{x}[k] \quad (2)$$

のように，構成されているとする．ここで， \mathbf{x} はロボットの状態変数， \mathbf{u} はロボットへの入力， \mathbf{r} は目標値， K_1, K_2 はフィードバックゲインである．例えば，目標角度 $\theta^{ref} (= r)$ ，角度 θ ，角速度 $\dot{\theta}$ を用いた 1 軸の PD 制御入力 u は，

$$u = K_p(\theta^{ref} - \theta) - K_d\dot{\theta} \quad (3)$$

であり，これは

$$u = K_p\theta^{ref} - \begin{bmatrix} K_p & K_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (4)$$

のように式 (2) の形で表される．ここで， K_p, K_d はそれぞれ比例・微分ゲインである．式 (1) における入力 \mathbf{u} は一般にトルクであり，式 (3) はモータドライバが電流制御可能であることを仮定している．しかし，モータドライバを安価にするために電流センサを用いず，電圧 E を

$$E = K_p(\theta^{ref} - \theta) - K_d\dot{\theta} \quad (5)$$

とした電圧制御の場合でも，モータの回路方程式

$$E = iR + L\frac{di}{dt} + K_a\dot{\theta} \quad (6)$$

と連立させることで

$$u = K_a i = \frac{K_a K_p}{R}(\theta^{ref} - \theta) - \frac{K_a(K_d + K_a)}{R}\dot{\theta} \quad (7)$$

のように，式 (3) の形で表すことができる．ただし， i はモータに流れる電流， R はモータの内部抵抗， L はインダクタンス， K_a はモータのトルク定数（＝逆起電力定数）であり， L は十分小さいとして無視した．モータの制御で一般的によく使われている PWM を用いて，電圧制御と等価な制御を行なっている場合にも式 (7) により扱うことができる．

ここで，式 (1) へ式 (2) を代入すると，

$$\mathbf{x}[k+1] = (A - BK_2)\mathbf{x}[k] + BK_1\mathbf{r}[k] \quad (8)$$

となる． \mathbf{r} を入力とみなすことで従来法と同様のアルゴリズムにより， \mathbf{x} が実現したい軌道

$$\Xi = [\xi_1 \ \xi_2 \ \cdots \ \xi_N] \quad (\xi_{N+1} = \xi_1) \quad (9)$$

に引き込まれるよう，コントローラ

$$\mathbf{r}[k] = h(\mathbf{x}[k]) \quad (10)$$

を設計される．これは，関節に角度ローカルフィードバック則を持つ制御系のための目標姿勢を出力する非線形コントローラである．このとき，式 (1) と式 (2)，および式 (10) は自律系を構成する．ここで， P は制御対象のロボットである．式 (10) の非線形関数は \mathbf{x} の ℓ 次のべき多項式を用いて

$$\mathbf{r}[k] = \Theta\phi(\mathbf{x}[k]) \quad (11)$$

として設計する．ただし $\phi(\mathbf{x})$ は \mathbf{x} のべき乗を並べたベクトル， Θ は多項式の係数行列である．例えば $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T \in R^2$ ， $\ell = 2$ のとき ϕ は

$$\phi(\mathbf{x}) = [1 \ x_1 \ x_2 \ x_1^2 \ x_1x_2 \ x_2^2]^T \quad (12)$$

となる．このとき，多数の実現可能な $(\mathbf{x}[k], \mathbf{r}[k])$ ($k = 1, 2, \dots$) の組を用いて，以下の評価関数 J_Θ を最小化するように， Θ を設計する．

$$J_\Theta = \sum_k \|\mathbf{r}[k] - \Theta\phi(\mathbf{x}[k])\|^2 \quad (13)$$

これにより，式 (11) の非線形コントローラが得られる．

3. 状態変数軌道が近接する運動のための次元拡張

2章の方法は状態空間の場にもとづいているため、実現したい軌道 Ξ が状態空間の中で交点を持たないことが必要である。しかし、交点を持たなくても、Fig.2のように近接する ξ_i, ξ_j を持つ場合、式(10)の r は x のわずかな変化に対して激しく変化する必要があり、そのような関数を得ることは難しい。そこで、状態変数とは独立な変数を新たに定義して状態変数の次元を拡張し、運動方程式に拡張した状態変数の方程式を加える方法を提案する。

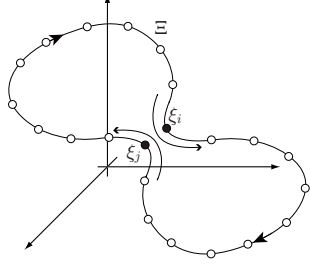


Fig. 2 An orbit with close point in state space

まず、拡張させる次元の状態変数を x_e 、入力を δ_e とし、状態変数と式(1)を

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x^T & x_e^T \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} x[k+1] \\ x_e[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - BK_2 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[k] \\ x_e[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} BK_1 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r[k] \\ \delta_e[k] \end{bmatrix} \quad (15)$$

と拡張する。ここで \bar{x} は拡張した状態変数である。さらに、 x_e に対しても実現したい軌道 Ξ_e を定め、式(9)を

$$\bar{\Xi} = \begin{bmatrix} \Xi^T & \Xi_e^T \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

$$\Xi_e = \begin{bmatrix} \xi_{e1} & \xi_{e2} & \cdots & \xi_{eN} \end{bmatrix} \quad (17)$$

と拡張し、式(15)における $\begin{bmatrix} r^T & \delta_e^T \end{bmatrix}^T$ を新たな入力とみなすことで、従来の軌道アトラクタを設計すると同様のアルゴリズムにより、式(11)の拡張系

$$\begin{bmatrix} r[k] \\ \delta_e[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Theta \\ \Theta_e \end{bmatrix} \phi \left(\begin{bmatrix} x[k] \\ x_e[k] \end{bmatrix} \right) \quad (18)$$

が得られる。この結果、最終的なコントローラは

$$\begin{cases} x_e[k+1] = x_e[k] + \Theta_e \phi \left(\begin{bmatrix} x[k] \\ x_e[k] \end{bmatrix} \right) \\ r[k] = \Theta \phi \left(\begin{bmatrix} x[k] \\ x_e[k] \end{bmatrix} \right) \end{cases} \quad (19)$$

で表され、入力を x 、出力を r とし、内部状態 x_e を持つ力学系となる。

x_e の意味は、 Ξ 上の近傍点間の距離を大きくするために用いた変数であり、軌道の近づき度合い d

$$d(i, j) = \|\xi_i - \xi_j\| \quad (i \neq j) \quad (20)$$

が小さい点において、拡張した軌道の近づき度合い \bar{d}

$$\bar{d}(i, j) = \left\| \begin{bmatrix} \xi_i^T & \xi_{ei}^T \end{bmatrix}^T - \begin{bmatrix} \xi_j^T & \xi_{ej}^T \end{bmatrix}^T \right\| \quad (21)$$

が十分大きくなるように選ばなければならない。また、コントローラが内部状態を持つ同様のコンセプトに、神経振動子を用いたロボット制御法^{(5)~(8)}などがあるが、 x_e は単に振動を刻むものではなく、 x の影響を受けて軌道・周期を変化させている。そのため、実現される運動が目標値による時間の拘束を持たない、外乱の影響による姿勢の変化に対して臨機応変に運動を変化させるといった軌道アトラクタに基づいた自律制御の利点を保持している。

4. 次元拡張を用いた平面脚ロボットの動的姿勢制御

4.1 平面脚ロボットの設計

3章の次元拡張を用いた動的姿勢制御系の有効性を検証するために、Fig.3の平面脚ロボットを用いる。このロボットは、各脚の

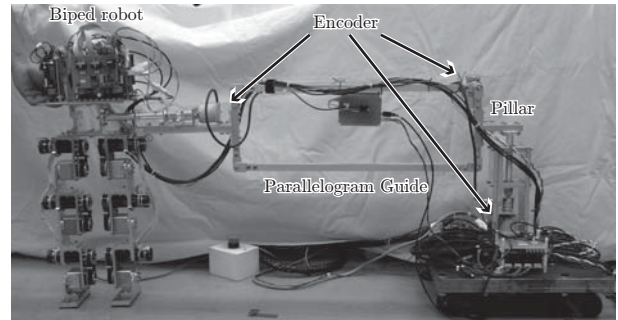


Fig. 3 Two-dimensional biped robot system

腰、ひざ、足首に合計6つのモータがあり、減速機を介して出力リンクを駆動する。また、支柱とロボットを平行四辺形をなすガイドによりつなくことで左右の動きを拘束し、ロボットは支柱を中心とした半径約100cmの円周上の平面を運動する。Fig.4の平面5リンクでモデル化する。ただし、問題を簡単にするためにこの歩行モデルでは足先の運動は考えず、地面と支持脚の足裏は常に平行かつ接地し、完全非弾性衝突を仮定することで足裏と地面との間ですべり、回転は生じないものとする。この支柱とガイドの回転部には合計3つのエンコーダを取り付け、運動中のロボットの絶対位置が計測できる。ロボットの上部にはモータドライバを配置し、全高は約0.6m、ガイドを取り付けたロボットの重さは約8kgである。モータドライバはモータのエンコーダの情報からマイコンによってロー

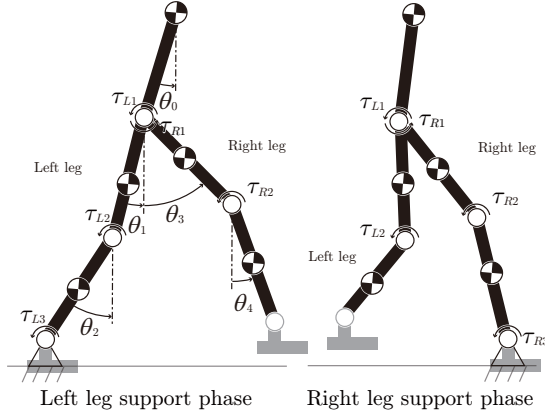


Fig. 4 Model of two-dimensional biped robot

カルな各軸位置フィードバック系を構成している．制御用PCの中でモータドライバへの目標値の計算を行い，モータドライバと制御用PCはCU-netを介して接続することで5ms毎に通信をしている．

また，各リンクの鉛直方向からの絶対角 $\theta_i (i = 0, 1, 2, 3, 4)$ と絶対角速度 $\dot{\theta}_i (i = 0, 1, 2, 3, 4)$ を定義することで，状態変数

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}^T & \dot{\boldsymbol{\theta}}^T \end{bmatrix}^T \in R^{10} \quad (22)$$

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_0 \ \dots \ \theta_4]^T, \quad \dot{\boldsymbol{\theta}} = [\dot{\theta}_0 \ \dots \ \dot{\theta}_4]^T \quad (23)$$

は連続的な値を取る．ただし，これらの値は足裏接地の仮定が満たされない場合でも，モータとガイドのエンコーダから求められる．入力は各関節に与えるトルク

$$\mathbf{u} = [\tau_{L1} \ \tau_{L2} \ \tau_{L3} \ \tau_{R1} \ \tau_{R2} \ \tau_{R3}]^T \in R^6 \quad (24)$$

である．各関節は，相対角に変換する行列 $Q \in R^{6 \times 5}$ を用いて，相対角度 θ_r と相対角速度 $\dot{\theta}_r$

$$\theta_r = Q\boldsymbol{\theta} \quad \dot{\theta}_r = Q\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (25)$$

に対して各関節への相対角度目標値 θ_r^{ref} を用いて

$$\mathbf{u} = K_p(\theta_r^{ref} - \theta_r) - K_d\dot{\theta}_r \quad (26)$$

のようにPD制御されている．このとき，Fig.4のモデルのように足先の運動は考えないという仮定のため，遊脚の足首のトルク (τ_{L3} もしくは τ_{R3}) は足裏が地面と平行になるように別途目標角度を与える．

4.2 ローカルフィードバックのパラメータの測定式(7)のように，ローカルなフィードバック系は多くの物理パラメータを含む．そこで， K_p ， K_d は実験値から測定する．モータのトルク τ は電流に比例することを利用すると，式(26)から関節目標値と電流は

$$\tau = K_a i = K_p(\theta^{ref} - \theta) + K_d \dot{\theta} \quad (27)$$

の関係がある．第1項は目標角に比例するトルクを出力することを利用し，関節を固定 ($\theta = \dot{\theta} = 0$) して傾き a のランプ目標値を θ^{ref} へを与えた．このとき， θ^{ref} に対する電流 i を計測し， K_a が既知であることを利用して多数の (θ^{ref}, i) の組から最小二乗法により K_p を求めた．次に， K_d を求めるために， θ^{ref} にステップ目標値を与えて $(\theta, \dot{\theta})$ を計測した．そして，先に同定した K_p と適当な K_d を与えて式(27)とモータの運動方程式からステップ目標値を与えた時の応答を求め，計測した $(\theta, \dot{\theta})$ の応答に対して最も適当な K_d を求めた．

4.3 歩行運動パターンの獲得 平面脚ロボットの歩行パターンを獲得するために，一定歩幅と重心の移動速度を与えて重心が足裏の接地領域に入るように姿勢を求めることで，Fig.5に示すような静歩行の関節角パターンを生成し，実現したい軌道 \mathbf{x} とした．こ

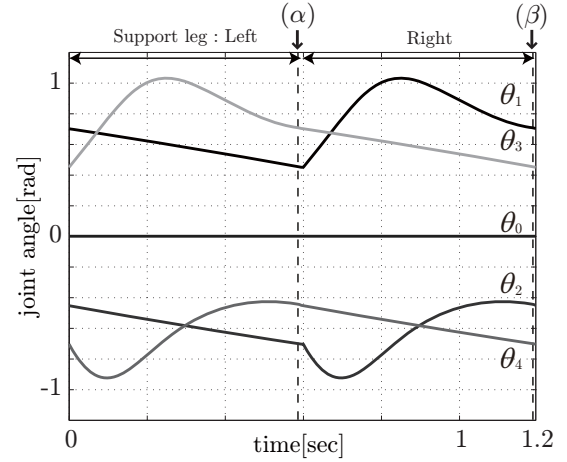


Fig. 5 Static walking pattern of joint angle for the biped robot

のとき，遊脚の軌道は足首の位置を鉛直方向には3次関数，水平方向の位置を5次停留関数で与えている．また，遊脚が接地するときに地面へ衝撃力が加わることを避けるために遊脚の移動速度を接地時は小さく設定し，両足支持期間を短くするために遊脚の離陸時の移動速度を大きくしている．Fig.5のパターンにおいて， $0 < t < 0.6$ は左脚支持期であるために左脚の θ_1, θ_2 は緩やかに変化し， $0.6 < t < 1.2$ では脚を持ち上げるために大きく変化している．

このパターンを平面脚ロボットのPD制御系の目標値として与え，実験を行ったところ安定化制御則は用いていないこと，また，ZMPが接地多角形内に存在することを保証していないなどの理由から，地面の凹凸や足裏と地面との反発によりロボットが大きく揺動し容易に転倒してしまった．その中の1周期分の各関

節角度を Fig.6 に示す．ただし、実線は関節角度、破線は PD 制御の目標関節角度である．上体の角度 θ_0 が大きく揺動し、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ が三と比べて変化量が大きくなり歩き続けることは難しかった．

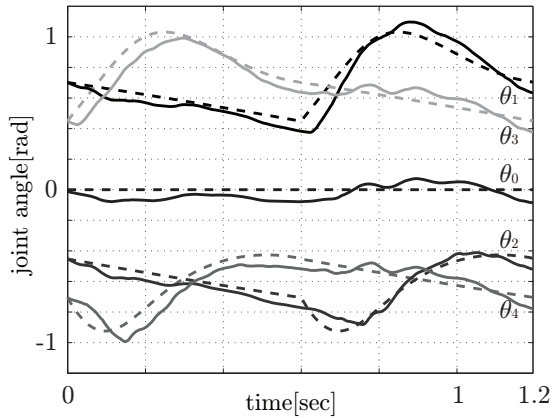


Fig. 6 Experimental result of walking motion by using PD-control

4.4 歩行運動のための次元拡張 前節で獲得した歩行のパターンについて1周期分の三軌道上の点間の近づく度合いを評価するために、式(20)を用いて計算した i, j に対する d の大きさを Fig.7 に表す．対

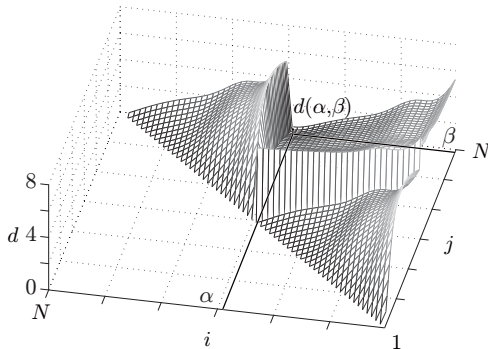


Fig. 7 Distance d of Ξ

角線上は同じ状態 ($i = j$) とのノルムを計算しているため零となるが、時刻 α と β のときの差が d の最大値 $d_{\max} = 7.65$ に対して約 $1/10$ の極小値 $d(\alpha, \beta) = 0.79$ となっている．ここで、時刻 α と β は Fig.5 における矢印で示した位置であり、そのときの平面脚口ポットの姿勢は Fig.8 に表されるような両足接地状態である．左右の足の位置が入れ替わっているが、状態空間で距離を評価した場合にはきわめて近いという結果が得られた．歩行パターンを作成するときには、遊脚が接地するときの衝突を避けるように移動速度を小さくしたために α, β の周りでは近い姿勢が広く存在する．そのため、従来法によるシミュレーションでは α や β で静止してしまう現象が見られ、 Ξ が軌道アトラクタと

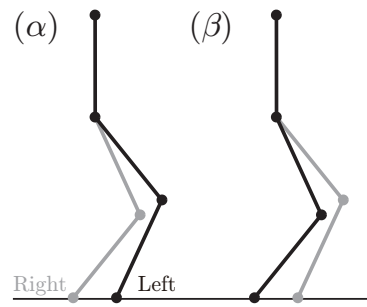


Fig. 8 Similar positions of walking motion

なる非線形コントローラが得られなかった．

そこで、状態空間の次元拡張を行った．拡張した状態変数は3章で述べたように式(20)(21)の $d \ll \bar{d}$ の条件のほか、連続かつ微分可能であること、 Ξ と独立であることなどが必要であるが、ここでは軌道アトラクタが設計可能となるまで、5つの位相の異なる三角関数を加えた．Fig.9 に計算した \bar{d} を i, j に対して示した結果を示す． d_e が 0.79 であるのに対し、 $\bar{d}(\alpha, \beta)$ が 3.3 へと上昇し、かつ最大値 \bar{d}_{\max} も 7.85 へ上昇しているため、 Ξ よりも近接しない軌道 $\bar{\Xi}$ を得ることができたと考えられる．また、今回は三角関数を用いた

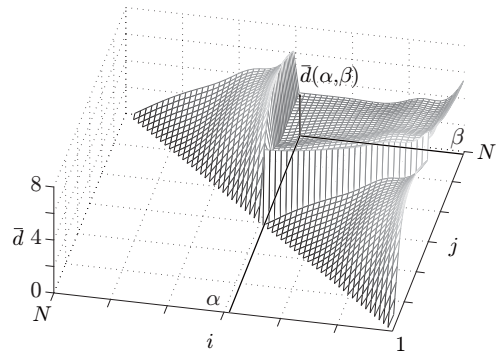


Fig. 9 Distance d of $\bar{\Xi}$

ために最低でも5次元の次元拡張が必要であったが、適当な軌道を $\bar{\Xi}_e$ として選択できればより少ない次元拡張で可能になると考えられる．

4.5 平面脚口ポットの制御 次元拡張を用いてロボットの相対角度目標値を生成する動的姿勢制御の非線形コントローラ式(19)を求めた．多項式の次数は $\ell = 3$ とした．得られたコントローラにより平面脚口ポットを制御した結果を Fig.10 に示す．ただし、Fig.10 は各関節角度のみについて示し、実線は関節角度、破線は動的姿勢制御により求めた目標関節角度である．Fig.11 は Fig.10 の各番号のときのロボットの様子を表現している．これらの結果から、Fig.6 と比べて関節角がなめらかに変化しており、特に胴体部の角

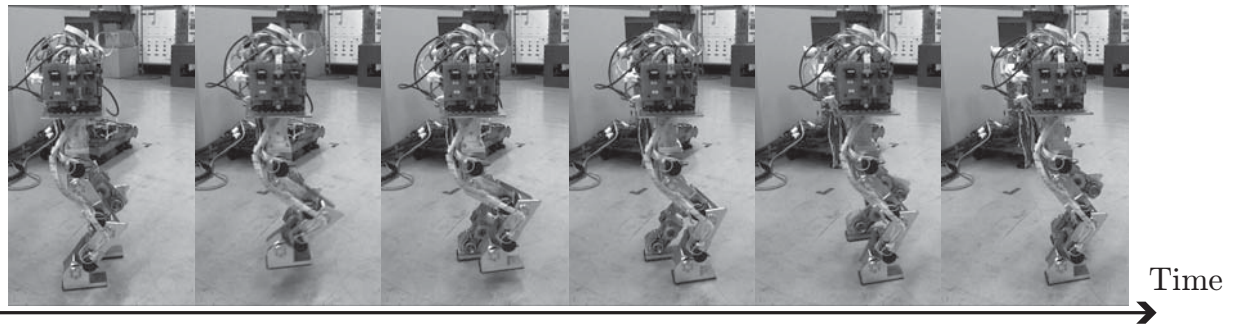


Fig. 11 Experiment of walk motion by using dynamic position control

度 θ_0 の揺動が減少しているため全体として安定した運動が実現できている。これは、提案手法がロボットのダイナミクスを考慮した安定化制御則であり、かつガイドのエンコーダにより各リンクの絶対角度を求めていることによるものである。これより、関節にモータドライバのローカルフィードバック則を持つ平面脚ロボットの自律制御のために、動的に目標値を与える制御が有効であると理解できる。また、従来法では軌道アトラクタをなす非線形コントローラを設計しにくい運動であっても、力学系の次元を拡張することで設計できることを示している。

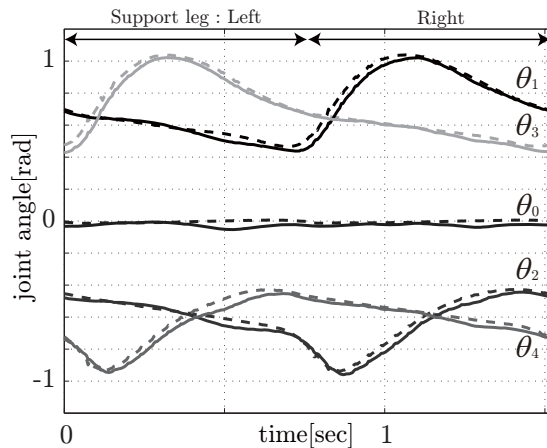


Fig. 10 Experimental result by using dynamic position control based on orbit attractor

5. おわりに

本研究では、近接する軌道が軌道アトラクタとなる動的姿勢制御系を設計するために、状態変数の次元を拡張する方法を提案した。得られた結果を以下に示す。

1. 状態変数とは独立の変数を定義して力学系を拡張することで、実現したい軌道が近接する運動における動的姿勢制御系を設計する方法を提案した。
2. 提案手法を平面脚ロボットの歩行制御に応用し、

地面の凹凸などで目標運動パターンを与える PD 制御では歩行を続けることが容易でない場合でも、運動を続けることができ有効性を示した。

謝 辞

本研究は、科学技術振興機構 CREST「パラサイトヒューマンネットによる五感情報通信と環境センシング・行動誘導」の支援を受けた。

参 考 文 献

- (1) 梶田, 谷, “線形倒立振りモードを規範とする凹凸路面上の動的 2 足歩行制御,” 計測自動制御学会論文集, vol. 31, no. 10, pp. 1705–1714, 1995.
- (2) K.Yamane and Y.Nakamura, “Dynamics filter - concept and implementation of online motion generator for human figures,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 19, no. 3, pp. 421–432, 2003.
- (3) J.Kuffner et al., “Motion planning for humanoid robots under obstacle and dynamic balance constraints,” in Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'01), 2001, pp. 692–698.
- (4) 長谷川, 岡田, “関節ローカルフィードバックを持つロボットの動的姿勢制御,” 第 28 回日本ロボット学会学術講演会講演概要集 (RSJ 28th), 2010, 1P3–6(CD-ROM).
- (5) 片山, 北村, “神経振動子を用いた 2 足歩行運動生成への記述関数法の適用,” 計測自動制御学会論文集, vol. 34, no. 7, pp. 830–835, 1998.
- (6) 木村, 秋山, 桜間, “神経振動子を用いた四足ロボットの不整地動歩行と整地走行,” 日本ロボット学会誌, vol. 16, no. 8, pp. 1138–1145, 1998.
- (7) 宮腰, 多賀, 國吉, 長久保, “神経振動子を用いた三次元 2 足踏みシミュレーション-ヒューマノイドの実世界内行動を目指して-,” 日本ロボット学会誌, vol. 18, no. 2, pp. 87–93, 2000.
- (8) 琴坂, Stefan, “神経振動子を用いたロボットのリズムミク運動生成,” 日本ロボット学会誌, vol. 19, no. 1, pp. 116–123, 2001.