日本機械学会論文集（C 編）
79 巻 804 号（2013-8）

原著論文 No. 2012-JCR-0447

軌道アトラクタに基づいた動的姿勢制御と力学系次元拡張*

岡田 昌史[*1]，渡辺 将旭[*1]，長谷川 将臣[*2]

Dynamic Position Control and Dimensional Extension of Dynamics Based on Orbit Attractor

Masafumi OKADA[*1], Masaaki WATANABE and Masaomi HASEGAWA

[*1] Dept. of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

For dynamic control of a robot, a torque/force control will be necessary because the robot model is represented by a dynamic equation. A torque/force control requires a torque/force sensor or a current sensor (for DC servo motor) for feedback loop, however, they occupy large volume and weight or have low precision and time delay. Therefore, the robot system sometimes has a local position control in the motor drivers from the safety point of view. In this paper, we propose a design method of position-based dynamic control using an autonomous control method based on an orbit attractor, which is realized by a simple deformation of the conventional algorithm. In addition, for the orbit attractor control, it is necessary that an orbit of the state variable is not crossing in the state space. When the orbit is very close, vector field of the orbit attractor along the orbit can not be defined correctly. A dimensional expansion of dynamics is also proposed to design a controller. These methods are evaluated by experiments using a two-dimensional biped robot.

Key Words : Attractor Design, Dynamic Position Control, Dimensional Extension, Two-Dimensional Biped Robot

1. は じ め に

ロボットの運動は環境との動的な相互作用で決まる．そのため，ロボットを安定化するためには動特性に基づいたコントローラの設計が必要であり，これは力あるいはトルク (以下トルクと記述する) 制御を必要とする．しかし，正確なトルク制御を行うためにはトルクセンサを必要とし，その体積，重量，低い精度からロボットに搭載することは望ましくない．そこで，一般には各関節をローカルなフィードバックを用いて位置制御し，これに力学的に実現可能な目標姿勢を与えて運動を生成させる方法が用いられてきた．ロボットの一部が環境に固定されている場合，コントローラを設計すること，実現可能な目標姿勢を得ることは容易であるが，固定されていないものや非ホロノミック系の場合には容易ではない．梶田ら(1)は歩行ロボットを倒立振子によりモデル化し歩行パターンを獲得した．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た．Kuffner ら(3)は経路計画について転倒しないように運動パターンを獲得した．小椋ら(5)は ZMP に基づいてヒューマノイドロボットのひざ関節を伸展させた歩行パターンを獲得した．杉原ら(4)は重心ヤコビアンに基づいて力学的に実現可能な目標姿勢をオンラインで設計する方法を提案した．また，森本ら(6)は強化学習を用いて起き上がり動作の運動パターンを獲得し，長谷川ら(7)は遺伝的アルゴリズムにより歩行ロボットの運動パターンを学習した．これらの方法によって得られた目標姿勢を用いることで，(1) 関節の可動範囲の制約を容易に設定できる，(2) モータドライバによる分散制御が容易に実現でき，制御系の信頼性を向上させられる，(3) H ブリッジを利用した PWM 制御によって電圧を制御することで実装が容易になる，といった利点がある一方で，フィードバック系には遅れがあり求めた目標姿勢を実現することは難しい．実現のためにハ

* 原稿受付　2012 年 6 月 21 日
*1 正員，東京工業大学 大学院理工学研究科 機械物理工学専攻
（〒152-8552　東京都目黒区大岡山 2-12-1）
*2 東京工業大学 大学院理工学研究科 機械制御システム専攻
E-mail: okada@mep.titech.ac.jp

©2013 The Japan Society of Mechanical Engineers

イゲインフィードバックが仮定されるケースが見られるが，これはフィードバック系のロバスト安定化を著しく低下させる．大賀ら[8]はトルクセンサを用いずにトルク制御を行う方法を提案しているが，動力学モデルから推定したトルクが目標となるトルクに収束するよう制御を行なうため，非ホロノミックな対象への応用は難しい．

一方，我々はこれまでに軌道アトラクタに基づいた制御系の構成法を提案してきた[9]．この方法はロボットとコントローラが自律系を構成することで，外部からの目標値を必要とせずに動的な運動を安定なリミットサイクルとして実現する制御系を構成するものであり，与えた所望の運動を実現する．そこで本論文では，これまでに提案した自律制御系設計法を関節にローカルな位置フィードバックを有するロボットの制御へ応用し歩行ロボットの運動を実現する．これは動的な姿勢制御を実現する制御法であり，その制御系が電圧制御をベースとしている場合，すなわち，直接にトルク制御が困難な場合にも応用が可能であることを示す．一方，軌道アトラクタに基づいた制御系では実現すべき運動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．しかし，歩行などのように 1 つの運動の中で類似した姿勢を持つ場合にはその仮定が満たされにくく，交点は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成されにくい．そこで，ロボットの動的姿勢制御をこのような場合に対応させるために，力学系の次元を拡張させ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，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．最後に，これらの提案手法を関節に角度ローカルフィードバック制御系を持つ平面脚ロボットの歩行運動の制御に応用し，動的姿勢制御と次元拡張の有効性を示す．

2. 軌道アトラクタに基づいた動的姿勢制御系の設計

2·1 軌道アトラクタに基づいた自律制御系の設計法

参考文献[9]では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方法が提案されている. まず，この手法について簡単に示す. 離散時間のロボットの運動方程式を

$$\boldsymbol{x}[k+1] = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}[k]) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}[k])\boldsymbol{u}[k] \tag{1}$$

とする．このとき，$\boldsymbol{x}$ が状態空間における N 個の点から構成されるある閉軌道

$$\Xi = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_1 & \boldsymbol{\xi}_2 & \cdots & \boldsymbol{\xi}_N \end{bmatrix} \quad (\boldsymbol{\xi}_{N+1} = \boldsymbol{\xi}_1) \tag{2}$$

に引き込まれるようにコントローラ

$$\boldsymbol{u}[k] = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}[k]) \tag{3}$$

を設計する．Ξ が実現可能，すなわち，Ξ を実現する入力列が存在するときこの運動を実現する $\boldsymbol{h}$ が存在し，これは $\boldsymbol{x}$ 空間内に Ξ へ収束する場を定義し，これを関数近似することで得られる．これにより，Ξ は閉ループ系における軌道アトラクタになる．また，運動が軌道アトラクタとして現れるため，運動は環境とのインタラクションによってその軌道，周期が変化するという特徴を持つ．設計法の詳細は参考文献[9]に詳しい．式 (3) は $\boldsymbol{x}$ の非線形関数であり，非線形状態フィードバックの形を持つ．

2·2 関節ローカルフィードバックを持つ動的姿勢制御

式 (3) はロボットの運動方程式に基づいて設計するため，関節トルクを定めるコントローラである．これを関節に角度ローカルフィードバックを有する制御系を対象とした形式に変形する．ロボットの運動方程式 (1) に次式の関節の角度ローカルフィードバック則が構成されている場合を考える．

$$\boldsymbol{u}[k] = K_1\boldsymbol{r}[k] - K_2\boldsymbol{x}[k] \tag{4}$$

ここで，K_1，K_2 はフィードバックゲイン，$\boldsymbol{r}$ は目標値を表す．例えば，状態変数が関節角度 θ，関節角速度 $\dot{\theta}$ を用いて

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \theta & \dot{\theta} \end{bmatrix}^T \tag{5}$$

©2013 The Japan Society of Mechanical Engineers

で表され，ローカルフィードバック則が θ への目標値 θ^{ref}，比例ゲイン K_p，微分ゲイン K_d を用いて

$$\boldsymbol{u} = K_p(\theta^{ref} - \theta) - K_d\dot{\theta} \tag{6}$$

の PD 制御である場合，これは

$$\boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} K_p & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{r} - \begin{bmatrix} K_p & K_d \end{bmatrix} \boldsymbol{x}, \quad \boldsymbol{r} = \begin{bmatrix} \theta^{ref} & 0 \end{bmatrix}^T \tag{7}$$

となり式 (4) の構造を持つ．また，モータへの印加電圧 E が

$$E = K_p(\theta^{ref} - \theta) - K_d\dot{\theta} \tag{8}$$

の PD 制御則を持つ場合には，モータの回路方程式

$$E = iR + L\frac{di}{dt} + K_a\dot{\theta} \tag{9}$$

と連立させて，

$$\boldsymbol{u} = K_a i = \begin{bmatrix} \frac{K_aK_p}{R} & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{r} - \begin{bmatrix} \frac{K_aK_p}{R} & \frac{K_a(K_d + K_a)}{R} \end{bmatrix} \boldsymbol{x} \tag{10}$$

となり，式 (4) で表される．ただし，R はモータの端子間抵抗，K_a はモータのトルク定数 (=逆起電力定数) であり，L はモータのインダクタンスであるが十分小さいとして無視した．

式 (4) を式 (1) に代入すると，

$$\boldsymbol{x}[k+1] = \{\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}[k]) - \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}[k])K_2\boldsymbol{x}[k]\} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}[k])K_1\boldsymbol{r}[k] \tag{11}$$

が得られ，これは右辺第一項が $\boldsymbol{x}$ の関数，第二項が $\boldsymbol{x}$ の関数と入力 $\boldsymbol{r}$ の積で表された形式であり，

$$\boldsymbol{x}[k+1] = \boldsymbol{F}(\boldsymbol{x}[k]) + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{x}[k])\boldsymbol{r}[k] \tag{12}$$

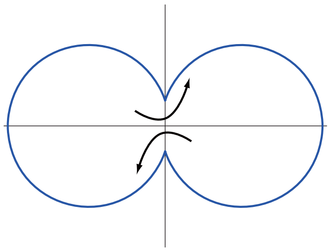
と書き直されることから，式 (1) と同様の構造を持つ．そこで，式 (2) の Ξ を用いて，従来の方法と同様に

$$\boldsymbol{r}[k] = \widehat{\boldsymbol{h}}(\boldsymbol{x}[k]) \tag{13}$$

で表されるコントローラが設計できる．この方法は，ロボットの運動方程式とローカルフィードバック則をあわせた力学系ととらえることで動的な位置制御が行えることが特徴であるため，動的姿勢制御であると言える．

3. 状態変数が近接する運動のための力学系次元拡張

2 章の方法は場に基づいた設計法であることから，Ξ が状態空間の中で交点を持たないことが必要である．また，交点を持たなくても図 1(a) のように Ξ 上の点が近接する場合，$\boldsymbol{x}$ のわずかな変化に対して，場が大きく変化しなければならず，これを関数近似することが難しくなる．また，座標変換によって一般化座標を変えても，ロボットの姿勢が近ければ近接する軌道間の物理的な距離は近く，状態変数は容易に近接する軌道へ移動してしまい所望


(a) Closed curved line with close points

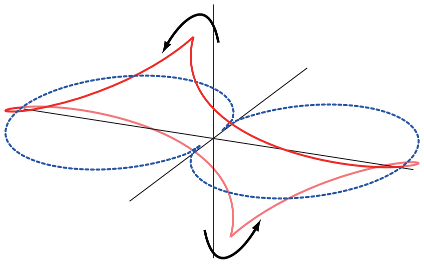

(b) Dimensional extension of the state space

Fig. 1　An orbit with near points in the state space

©2013 The Japan Society of Mechanical Engineers

の運動を実現しない．そこで本章では，力学系の次元を拡張させ拡張空間で$\widehat{\Xi}$を定義し，図 1(b) のように近い点を通らないようにする．拡張する次元の状態変数$\boldsymbol{x}_e$を用いて，状態変数を

$$\widehat{\boldsymbol{x}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}^T & \boldsymbol{x}_e^T \end{bmatrix}^T \tag{14}$$

と拡張する．さらに，式 (12) を

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{x}[k+1] \\ \boldsymbol{x}_e[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{F}(\boldsymbol{x}[k]) \\ \boldsymbol{x}_e[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{G}(\boldsymbol{x}[k]) & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{r}[k] \\ \boldsymbol{r}_e[k] \end{bmatrix} \tag{15}$$

と拡張する．ここで，Iは単位行列，$\boldsymbol{r}_e$は拡張された入力である．$\boldsymbol{x}_e$についても所望の軌道Φを定め，式 (2) を

$$\widehat{\Xi} = \begin{bmatrix} \Xi \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_1 & \boldsymbol{\xi}_2 & \cdots & \boldsymbol{\xi}_N \\ \boldsymbol{\phi}_1 & \boldsymbol{\phi}_2 & \cdots & \boldsymbol{\phi}_N \end{bmatrix} \tag{16}$$

と拡張する．式 (15) における$\begin{bmatrix} \boldsymbol{r}[k]^T & \boldsymbol{r}_e[k]^T \end{bmatrix}^T$を新たな入力とみなすことで，従来と同様のアルゴリズムにより，

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{r}[k] \\ \boldsymbol{r}_e[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \widehat{\boldsymbol{h}}(\widehat{\boldsymbol{x}}[k]) \\ \widehat{\boldsymbol{h}}_e(\widehat{\boldsymbol{x}}[k]) \end{bmatrix} \tag{17}$$

を設計する．この結果，自律運動制御系のコントローラは

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}_e[k+1] = \boldsymbol{x}_e + \widehat{\boldsymbol{h}}_e(\boldsymbol{x}_e[k], \boldsymbol{x}[k]) \\ \boldsymbol{r}[k] = \widehat{\boldsymbol{h}}(\widehat{\boldsymbol{x}}[k]) \end{cases} \tag{18}$$

で表され，$\boldsymbol{x}$を入力，$\boldsymbol{r}$を出力とし，$\boldsymbol{x}_e$を内部状態とする力学系となる．

内部状態の軌道Φの選び方について考察する．ΦはΞ軌道上にある近接点の距離を大きくするために用いる変数であり，軌道の近づき度合いd

$$d_{ij} = \|\boldsymbol{\xi}_i - \boldsymbol{\xi}_j\| \quad (i \neq j) \tag{19}$$

が小さい点において，拡張した軌道の近づき度合い$\widehat{d}$

$$\widehat{d}_{ij} = \left\| \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_i \\ \boldsymbol{\phi}_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_j \\ \boldsymbol{\phi}_j \end{bmatrix} \right\| \quad (i \neq j) \tag{20}$$

が十分大きくなることが望ましい．また，式 (17) は$\widehat{\boldsymbol{x}}$に基づいた関数近似によって求めるため，$\boldsymbol{x}$と$\boldsymbol{x}_e$は独立，すなわち，ΞとΦは独立でなくてはならない．さらに，$\boldsymbol{x}_e$は式 (18) のように力学系で表されるのでΦは微分可能である必要がある．これらの条件を満たすように，Φを選ぶ．

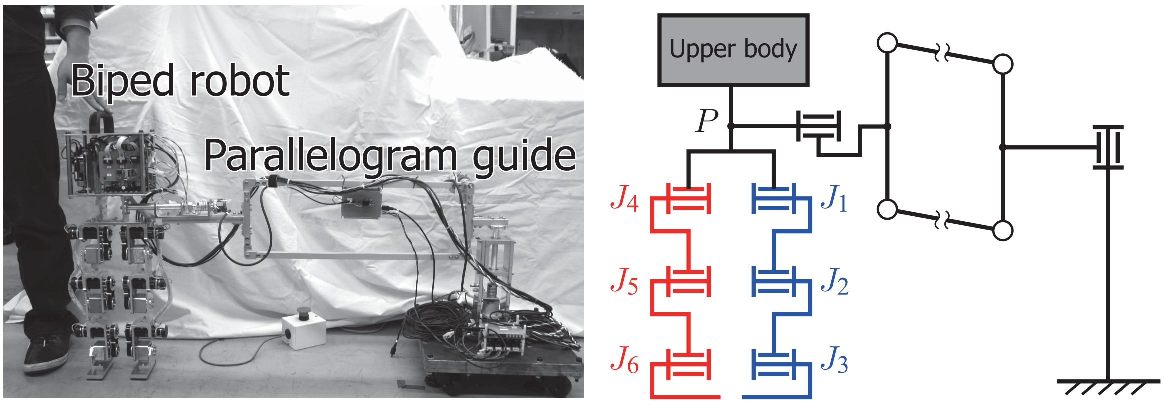
コントローラの内部状態を設計する同様の方法として，神経振動子を用いたもの[(10)~(14)]がある．これは内部状態が独自のリズムを刻み，これに合わせてロボットの全身運動を生成する，さらに，環境からのフィードバックによって内部状態のリズムが適宜変化するものであるが，振動子のダイナミクスは先に与えるため設計 (制御則と振動子の関連づけ) が難しい．これに対し，本論文の手法では$\boldsymbol{x}_e$は一定のリズムを刻むものではなく，$\boldsymbol{x}$の影響を強く受けて軌道，周期を変化させる．これより，本手法は振動子のダイナミクスを含めてコントローラとして設計するものである．また，これまでの方法ではコントローラが式 (3) の非線形状態フィードバックの形で得られていたのに対し，次元を拡張することでコントローラが内部状態を持った力学系となることに相当する．

4. 平面脚ロボットの動的姿勢制御

4·1 平面脚ロボット

提案した動的姿勢制御系と力学系の次元拡張を検証するために，図 2(a) の平面脚ロボットを用いる．このロボットの運動は平行四辺形のガイドによって平面に拘束されている．関節の配置を図 2(b) に示す．左脚の腰，ひざ，足首 (図中のJ_1，J_2，J_3)，右足の腰，ひざ，足首 (図中のJ_4，J_5，J_6) は合計 6 つの能動関節である．また，ガイド

©2013 The Japan Society of Mechanical Engineers



(a) Two dimensional biped robot (b) Joint configuration

Fig. 2 Two-dimensional biped robot and its joint configuration

は 3 つの自由度を持ちロボットの胴体は平面内で 3 自由度を持つ．ガイドの回転角は 17bit のアブソリュートエンコーダで計測され，胴体の位置・姿勢へと変換される．胴体にはモータドライバを配置し，高さは約 0.64m，ガイドを取り付けた平面脚ロボットの重さは約 8kg である．搭載したモータドライバにはモータのエンコーダ情報に基づいて SH2 マイコンによるローカル位置フィードバックが構成されている．サンプリングタイムは 5ms であり，モータドライバと制御用 PC は CU-net[(15)] によって接続されている．また，制御用 PC でモータドライバへの目標値の計算を行いこれをドライバに与える．

図 3 のようにロボットの力学モデルを求めた．τ_i $(i = L1, L2, L3, R1, R2, R3)$ は関節トルク，$\theta_i (i = 0, 1, 2, 3, 4)$ は鉛

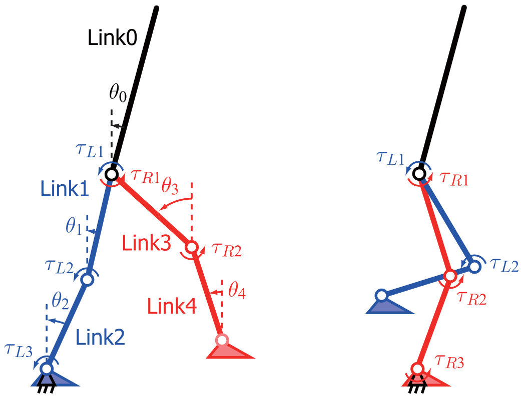


Fig. 3 Dynamical model of the biped robot

直面から見た各リンクの絶対関節角度を表す．ただし，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．遊脚は足裏が常に地面と平行になるように制御されていることを仮定する．また，左足接地の場合には左足首トルク τ_{L3} を発生させることができ，右足接地の場合には右足足首トルク τ_{R3} を発生させることができるとする．θ_i とその角速度 $\dot{\theta}_i$ を用いて状態変数を

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}^T & \dot{\boldsymbol{\theta}}^T \end{bmatrix}^T \tag{21}$$

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_0 & \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 \end{bmatrix}^T \tag{22}$$

とすれば，力学モデルが得られ状態変数は連続的な値をとる．運動方程式における入力は各関節に与えるトルク

$$\boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} \tau_{L1} & \tau_{L2} & \tau_{L3} & \tau_{R1} & \tau_{R2} & \tau_{R3} \end{bmatrix}^T \tag{23}$$

であるが，各関節への目標値 θ^{ref} と比例ゲイン K_p，微分ゲイン K_d を用いて

$$\boldsymbol{u} = K_p(\boldsymbol{\theta}^{ref} - \boldsymbol{\theta}) - K_d\dot{\boldsymbol{\theta}} \tag{24}$$

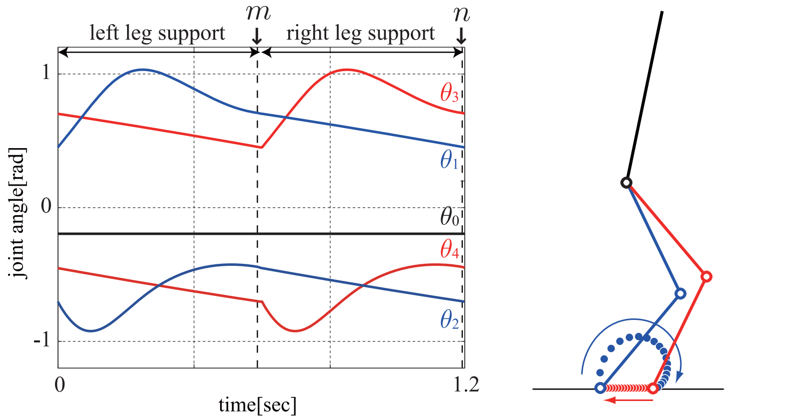
©2013 The Japan Society of Mechanical Engineers

のように PD 制御されている．ただし，遊脚の足首のトルクは運動に関係なく足裏が地面と平行になるように別途目標角度を与える．このように，モータドライバはローカルな角度フィードバック制御系を持つが電子回路の特性や減速器の粘性摩擦を含めた多くの物理パラメータを含むため，K_p，K_d はひとつの関節のステップ応答に基づいて実測した．

本来，歩行ロボットは非ホロノミック系であるが，ここでは足裏が地面と接触していることを仮定してホロノミック系としてモデル化した．また，歩行中に ZMP (Zero moment point) が足裏接地多角形内に存在することを保証しておらず，歩行の安定性は保証されない．しかし，後の実験で示すように，歩行は静歩行に近いこと，各リンクの角度はガイドから求められた胴体の絶対角に基づいて求めていること，足裏は比較的大きいことから運動中の ZMP は足裏接地多角形の内部に存在することを仮定する．

4·2　歩行パターンの設計

歩行パターンを得るために，一定歩幅と上体の移動速度を与え重心が足裏の領域に入るように姿勢を求めることで，図 4 に示すような静歩行パターンを設計し，これを Ξ とした．上体の角度 θ_0 は一定値であり，遊脚の軌道は足首の位置を鉛直方向に 3 次関数，水平方向にを 5 次停留関数で与えた．ただし，(a) は 1 周期分の関節角度，



(a) Refernce motion pattern　(b) Motion of the robot

Fig. 4　Reference motion pattern for walking

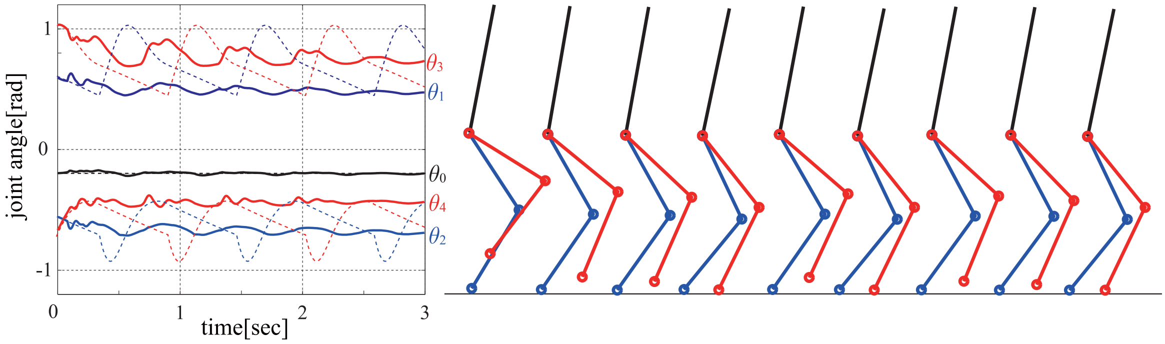
(b) は両足接地の時点から半周期分 (右足支持期) の左足首の軌跡を 30ms 毎に表したものである．遊脚が接地するときに地面から衝撃力を受けることを避けるために，遊脚の移動速度を接地時は小さく設定し両足支持期間を短くするために遊脚の離地時の移動速度を大きくしている．

4·3　軌道アトラクタによる歩行制御のための次元拡張

まず，問題を明確化するために 4·2 節で設計した Ξ を用いて，式 (13) のコントローラを設計した．得られた $\boldsymbol{r}$ を用いて $\boldsymbol{\theta}^{ref} = \boldsymbol{r}$ とし，式 (24) から $\boldsymbol{u}$ を求めて，ロボットの歩行シミュレーションを行った結果を図 5 に示す．(a) はシミュレーション中の各関節角の時間変化を表し，(b) は 0 秒から 2 秒までのロボットの姿勢を表す．右脚が地面に接地した後に左脚が地面から離れず，両足接地の状態で運動が静止する．この原因を見るために，1 周期分の軌道上の点間の近づき度合いを評価した．式 (19) より求めた d_{ij} の大きさを図 6 に表す．対角線上は同じ状態 $(i = j)$ のノルムを計算しているため零となるが，d の最大値が $d_{\max} = 7.65$ であるのに対して $i = m$，$j = n$ のときに極小値 $d_{mn} = 0.52$ をとる (図に赤で記載)．ただし，m と n は図 4 における矢印で示した時刻であり，そのときの平面脚ロボットの姿勢は図 7 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，脚の移動速度が小さいため，状態空間内では 2 つの姿勢が近くなる．そのため，式 (13) のコントローラでは m，n の姿勢で静止してしまう．

そこで，提案手法により力学系を 2 次元拡張する．Φ としては Ξ に独立であること，微分可能であることを満

©2013 The Japan Society of Mechanical Engineers



(a) Joint angle data

(b) Robot motion

Fig. 5 Simulation of the biped walking with a dynamic position control

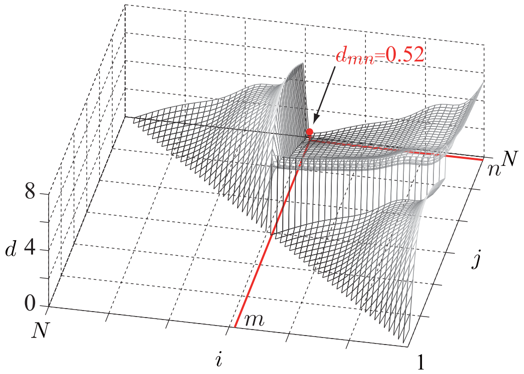


Fig. 6 d_{ij} with respect to Ξ

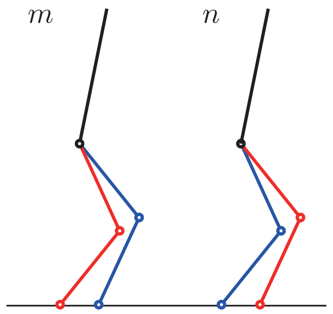


Fig. 7 Robot similar position in $i = m$ and $j = n$

たす簡単な関数として，次のような位相の異なる三角関数を用いるものとし，

$$\Phi = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\phi}_1 & \boldsymbol{\phi}_2 & \cdots & \boldsymbol{\phi}_N \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\phi}_k = \begin{bmatrix} \phi_k^1 \\ \phi_k^2 \end{bmatrix} \tag{25}$$

$$\phi_k^\ell = \sin\left(\frac{2\pi k}{N} + \psi^\ell\right) \quad (\ell = 1, 2) \tag{26}$$

位相 ψ^1，ψ^2 は d_{ij} が小さい点，特に i と j が離れた点において式 (20) の $\hat{d}_{ij}$ が大きくなるように以下の評価関数を最大化するように求めた．

$$J_d = \sum_{i,j,(i \neq j)} \left(\sum_{\ell} |i-j| \frac{\left\| \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_i \\ \boldsymbol{\phi}_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_j \\ \boldsymbol{\phi}_j \end{bmatrix} \right\|}{\left\| \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_i \\ \phi_i^\ell \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_j \\ \phi_j^\ell \end{bmatrix} \right\|} \right) \tag{27}$$

その結果，Φ として図 8 に表されるような軌道が得られた．図 9 に $\hat{\Xi}$ 軌道上の 2 つの点の間の $\hat{d}_{ij}$ を計算した結果を示す．$\hat{d}$ の最大値が 7.65 から 8.5 へ増加したの対し，極小値が 0.52 から 1.87 へと大きく増加した (図に赤で記載)．これより，Ξ よりも近接しない $\hat{\Xi}$ になったと考えられる．

$\hat{\Xi}$ を用いて設計されたコントローラから $\boldsymbol{r}$ を得て，これを用いて $\boldsymbol{\theta}^{ref} = \boldsymbol{r}$ とし，式 (24) から $\boldsymbol{u}$ を求めて，シミュレーションを行ったところ，ロボットは途中で停止することなく歩行運動を生成した．このときのロボットの関節角の時間変化を図 10 に示す．(a) はシミュレーション中の各関節角の時間変化を表し，(b) は 0 秒から 2 秒までのロボットの姿勢を表す．図 5 と比較して，拡張次元を利用することでロボットは停止せずに運動を続けられることが分かる．なお，ロボットの歩行周期が一定となっていないが，これはロボットの運動が環境との相互作用によって変化するという，軌道アトラクタに基づいた制御系の特徴を表すものである．

©2013 The Japan Society of Mechanical Engineers

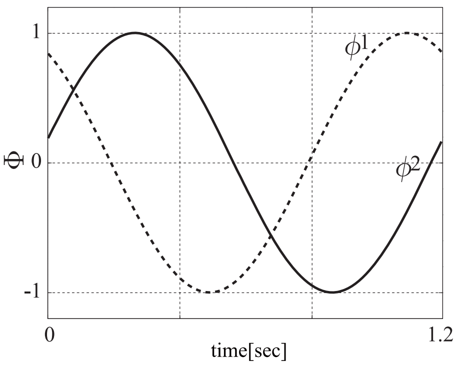


Fig. 8 Φ in the extended dimension

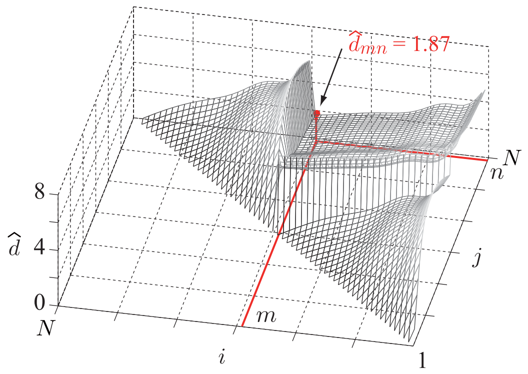
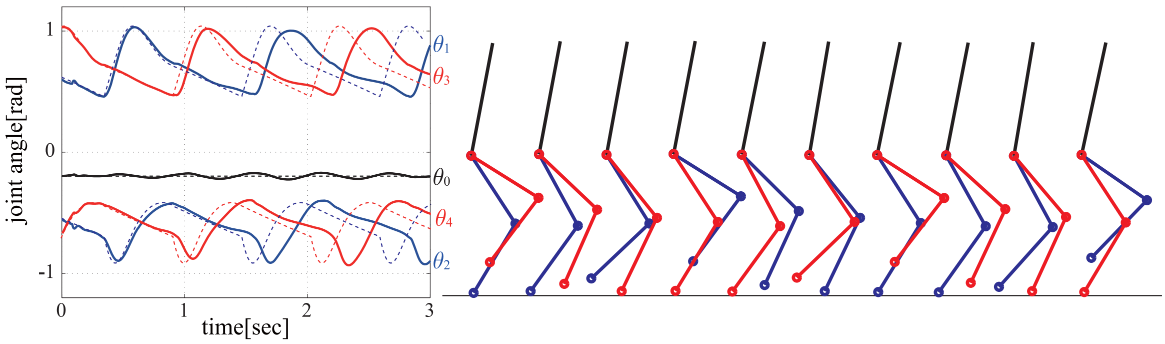


Fig. 9 $\hat{d}$ of $\hat{\Xi}$

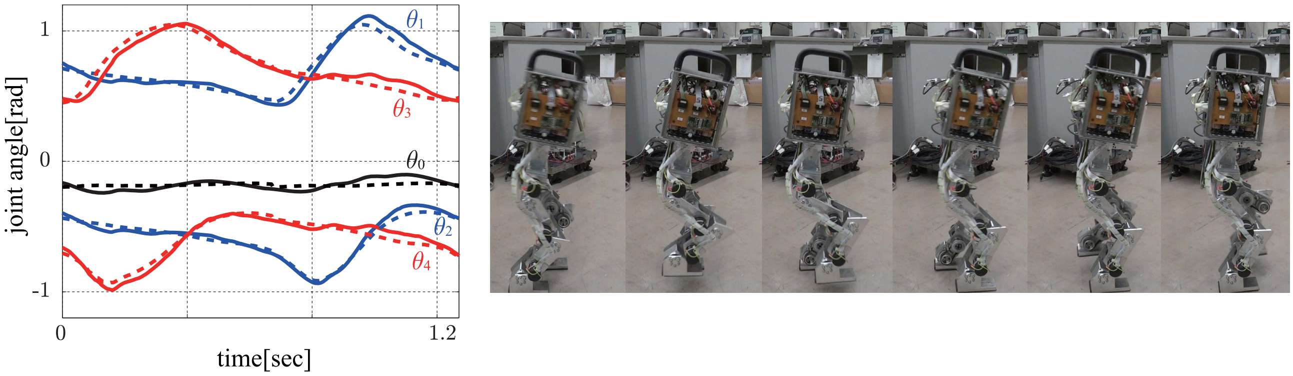


(a) Joint angle data (b) Robot motion

Fig. 10 Simulation result of walking

4·4 ロボットの動的姿勢制御

設計したコントローラを用いてロボットの歩行実験を行った．この結果を図 11 に示す．(a) の実線は関節角度 $\boldsymbol{\theta}$，破線は $\boldsymbol{\theta}^{ref}$ を絶対角に変換した値であり，(b) は実験中のロボットの 1 周期分の連続写真である．ただし，$\boldsymbol{\theta}$



(a) Joint angle data (b) Robot motion

Fig. 11 Walking motion by using the dynamic position control and dimensional extension

はガイドのエンコーダから得られる値をもとに θ_0 を求め，さらに，ロボットの関節角度から得られる $\theta_1 \sim \theta_4$ を用いている．そのため，支持脚の足裏接地の仮定が満たされない場合にこれを検出可能である．この結果から，実験においても途中で静止せず安定した自律運動が実現できていることが理解できる．また，(a) の結果から $\boldsymbol{\theta}^{ref}$ は $\boldsymbol{\theta}$ と比較して先行して進むことが分かる．これはフィードバック系の遅れを考慮して，目標姿勢が先行することを意味している．さらに，歩行の周期は一定ではなく，拡張次元 $\boldsymbol{x}_e$ の動きも図 12 のように一定周期ではなくなる．これは地面の凹凸などにより，安定な運動を継続するために歩行のサイクルを自律的に変化しているためで

©2013 The Japan Society of Mechanical Engineers

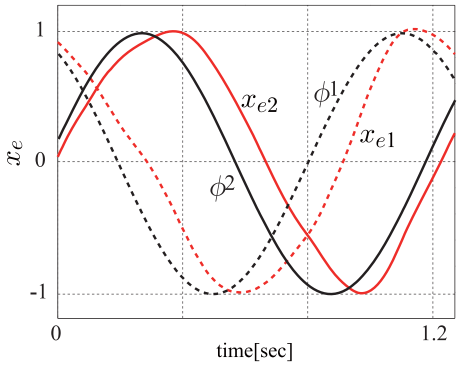


Fig. 12 Motion of the extended dimension in the experiment

あると考えられ，$\boldsymbol{x}_e$ を単に時間で動く内部状態ではなく，式 (18) のように $\boldsymbol{x}$ を含む $\hat{\boldsymbol{x}}$ の関数としているためであり，自律制御系の特徴を有している．

また，本論文では 2 次元の拡張次元を用いた．これは 1 次元の次元拡張では実験においてロボットが途中で停止してしまい，歩行運動を継続することができなかったためである．モデルでは関節の静止摩擦や着地の衝撃が考慮されておらずその影響と考えられるが，拡張次元を三角関数に限らず，適切に選ぶことができれば 1 次元の次元拡張でも自律運動制御系を設計することが可能であると考えられる．

5. お わ り に

本論文では，ロボットの動的姿勢制御と力学系の次元拡張によって自律制御系を設計する方法を提案し，その有効性をロボットの歩行運動によって示した．得られた結果を以下に示す．

1. これまでに提案してきた軌道アトラクタに基づく自律制御系の簡単な変形により，従来のトルクを生成するコントローラから目標値を生成し動的な位置制御を行う自律制御系の設計方法を提案した．
2. 実現すべき運動の軌道が状態空間内で近接する場合に対して自律制御系を設計するために，力学系の次元を拡張する方法を提案した．また，拡張次元の関数を決定するひとつの方法を示した．
3. 平面脚ロボットのシミュレーションを用いて，従来法の問題点を明らかにした．
4. 提案した方法を平面脚ロボットの制御実験に適用し，ロボットが自律的に歩行運動を続けられることから提案手法の有効性を示した．

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」，特別研究員奨励費 (23·10040) の支援を受けた．

文 献

(1) 梶田秀司, 谷和男, “線形倒立振子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 (1995), pp.1705–1714.

(2) Yamane K. and Nakamura Y., “Dynamics Filter - Concept and Implementation of Online Motion Generator for Human Figures -”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* (2003), Vol.19, No.3 pp.421–432.

(3) Kuffner J., Nishiwaki K., Kagami S., Inaba M. and Inoue H., “Motion Planning for Humanoid Robots Under Obstacle and Dynamic Balance Constraints”, *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA’01)* (2001), pp.692–698.

(4) 杉原知道, 中村仁彦, “非駆動自由度の陰表現を含んだ重心ヤコビアンによる脚型ロボットの全身協調反力操作”, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.2 (2006), pp.222–231.

(5) 小椋優, 林憲王, 高西淳夫, “2 足ヒューマノイドロボットの膝関節伸展型歩行パターン生成アルゴリズム”, 日本機械学會論文集 C 編, Vol.70, No.700 (2004), pp.3509–3515.

©2013 The Japan Society of Mechanical Engineers

(6) 森本淳, 銅谷賢治, "強化学習を用いた高次元連続状態空間における系列運動学習 : 起き上がり運動の獲得", 電子情報通信学会論文誌 D-II, 情報・システム, II-パターン処理, Vol.82, No.11 (1999), pp.2118–2131.

(7) 長谷川泰久, 荒川丈昌, 福田敏男, "階層形進化アルゴリズムを用いた二足歩行ロボットの歩行動作獲得", 日本機械学會論文集 C 編, Vol.66, No.645 (2000), pp.1605–1612.

(8) 大賀淳一郎, 西原泰宣, 大明準治, "産業用ロボットアームの動力学モデルに基づいたセンサレス力制御", 東芝レビュー, Vol.66, No.5 (2011), pp.38–41.

(9) 岡田昌史, 村上健治, "軌道アトラクタを用いたロボットの同調運動制御によるコミュニケーション原理の表現", 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.4 (2007), pp.545–553.

(10) 片山修, 北村新三, "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 (1998), pp.830–835.

(11) 木村浩, 秋山征一, 桜間一彰, "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 (1998), pp.1138–1145.

(12) 宮腰清一, 多賀厳太郎, 國吉康夫, 長久保晶彦, "神経振動子を用いた三次元 2 足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 (2000), pp.87–93.

(13) 琴坂信哉, Schaal S., "神経振動子を用いたロボットのリズミックな運動生成", 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1 (2001), pp.116–123.

(14) 松原崇充, 森本淳, 中西淳, 佐藤雅昭, 銅谷賢治, "方策こう配法を用いた動的行動則の獲得 : 2 足歩行運動への適用", 電子情報通信学会論文誌 D-II, 情報・システム, II-パターン処理, Vol.88, No.1 (2005), pp.53–65.

(15) 株式会社ステップテクニカ, "CUnet "N:N" の次世代オープンフィールドネットワーク", CUnet - 株式会社ステップテクニカ, http://www.steptechnica.com /cunet/index.html（参照日 2013 年 8 月 9 日).

 ©2013 The Japan Society of Mechanical Engineers