フィードバック誤差学習に基づく適応学習形2自由度制御系 を用いた4足歩行ロボットの制御*

千葉 康徳^{*1}, 小山 角太郎^{*2}
野波 健蔵^{*3}, 内田 洋彰^{*4}

Control of Quadruped Locomotion Robot Using 2DOF Control System with Adaptive Learning Based on Feedback-Error and Learning

Yasunori CHIBA, Kakutaro KOYAMA,
Kenzo NONAMI and Hiroaki UCHIDA

Generally speaking, it is clear that the servo system for motion control, such as in a locomotion robot, needs feedforward control in addition to feedback control to improve the control performance in the transient tracking responses. This is called a two-degree-of-freedom (2DOF) control system. However, this control strategy is based on the mathematical model of the controlled object. On the other hand, a quadruped locomotion robot is a typical MIMO system and a strongly nonlinear system. Thus, it is very difficult to create an exact mathematical model for control system design. We believe that most research work on quadruped locomotion robots uses local feedback loops with PD control. We propose a new control strategy for a quadruped locomotion robot using the 2DOF control system with adaptive learning based on feedback-error and learning. This system consists of a feedback control system based on eight independent local PD feedbacks as a decentralized controller and the feedforward control system of the neural network with feedback-error and learning as the centralized controller. We have succeeded in conducting the actual locomotion test with very smooths and fast locomotion using this control strategy.

Key Words: Robotics, Quadruped Locomotion Robot, Neural Network, Feedback-Error and Learning, Two-Degree-of-Freedom Control System

1. 緒 論

歩行ロボットの研究は、第1に動物の歩行を人工的に作り出すという「ロボット工学の永遠の夢」への挑戦と、第2に人間の作業が困難な極限作業下で車輪形移動が難しい場合の有力な移動手段として、これまで多くの研究がなされている。歩行ロボットの研究の中で、特に4足歩行ロボットは、安定性・作業性・積載性の観点から実用化の可能性が高く、数多くの優れた研究がなされ^{(1)~(4)}、現在ではその高速移動性を生かした、ロボットやペースなどの動歩行の研究が中心となっている。

歩行ロボットの高速移動制御においては、過渡特性が問題となるが、これを改善する方法としてフィードフォワード制御が挙げられる。特に、歩行ロボットの定常歩行のように、生理学的に見た場合、熟練した運動に位置づけられるものに対しては、フィードフォワード制御が有効と考えられる。これは制御系設計法の立場からいえば、フィードフォワードを主体としたフ

ィードバックとの協調形2自由度制御系に相当する。しかし、従来研究が行われている歩行ロボットは、単にジョイント独立形フィードバックによって制御されているものがほとんどである⁽⁵⁾。この理由は、2自由度制御系の意義を十分に認めながらも、この2自由度制御系が不確かさのない線形モデルに基づくものであるため、現在の歩行ロボットに対しては正しいモデリングさえ難しい状態にあることから適用が困難であるという点にあると思われる。以上のことから、4足歩行ロボットの制御系設計法として、数学モデルに基づかない適応学習形2自由度制御系の構築が望ましい。この制御系を実現する有力な方法にニューラルネットワーク(以下N.N.と略す)がある。

N.N.は、その学習能力・非線形性等が注目を浴び、制御分野でも盛んに応用されるようになってきている。しかしながら、著者らの知るかぎり、4足歩行ロボットの運動制御にN.N.を直接用いた例は見当たらない。本研究では、川人らが提案したフィードバック誤差学習⁽⁶⁾に着目し、この手法を4足歩行ロボットの静歩行制御に適用した。これは、フィードバック誤差学習がオンライン学習であり、制御対象である4足歩行ロボットがおかれている環境やそれぞれの脚の個性に対し、適応的な学習により追従性改善のためのフィ

* 原稿受付 平成6年3月22日。

^{*1} 学生員, 千葉大学大学院 (〒263 千葉市稲毛区弥生町1-33)。

^{*2} 千葉大学大学院。

^{*3} 正員, 千葉大学工学部。

^{*4} 正員, 木更津工業高等専門学校 (〒292 木更津市清見台東2-11-1)。

ードフォワードコントローラが獲得できるからである。このことにより、先に述べた理想とする適応学習形2自由度制御系を実現している。

本論文では、フィードバック誤差学習による歩行学習を行うことにより関節目標軌道への追従性を大幅に改善し、本4足歩行ロボットにおいて従来のジョイント独立PD制御では達成できなかった円滑で速い静歩行の実現を示すと同時に、4足歩行ロボットの制御におけるN.N.の学習能力を基礎とする適応学習形2自由度制御系の有効性を示す。

2. 実験装置

2.1 ロボットの機構 図1に本研究で用いるロボットの全体図を示す。総重量は4.7 kgで、図2に示すように、脚にはリンク機構を採用している。1脚は2自由度をもち、ロボット全体で8自由度となる。モータ軸の回転はステンレス製のかさ歯車により水平方向の軸に伝達される。Motor 1がリンク機構によってThighを駆動し、Motor 2がThigh内部を通るタイミングベルトを介してShankを駆動する。このような

図1 4足歩行ロボット全体図

図2 1脚の概略図

機構を採用することにより、モータに対する慣性モーメントを低減し高重心を実現、脚の制御性能の向上を図っている。足首は2軸フリーのフレキシブルジョイントになっているが、現在はこれに緩衝材を詰めて拘束している。足の裏はウレタンとゴムの2層構造にした。ウレタンは着地時の衝撃を吸収し、さらにその変形により床との接触面積を大きくして摩擦を確保して推進力を得ることを目的に用いている。図3にロボットの関節番号と脚番号(I~IV)を示す。 h は床から脚の付け根までの高さである。

2.2 実験装置のシステム構成 図4に実験装置の構成を示す。コントローラはDSP上に構築し、ホストコンピュータにはPC-9801 DA2を用いた。ポテンシオメータで検出した値(-5.0~5.0 v)をA-D変換器を通してDSP内に取込む。コントローラの出力(-2.4~2.4 v)は、D-A変換器に送られ、パワーアンプで10倍に増幅されて各モータ(定格24 v)へ与えられる。

図3 歩行ロボットの脚番号

図4 実験装置のシステム構成

3. 歩行パターン

本研究で用いた歩行パターンを図5に示す。歩容は、歩行サイクルが約10.4 s、平均移動速度0.019 m/s、歩幅0.2 mの静歩行で、脚の付け根が一定の高さ $h=0.275$ mを維持すると仮定している。静歩行ではあるが、可能なかぎり高速に移動させるために、重心を低くし、歩幅を大きくした。このような歩行を実現する足先の動きを決めた後、1脚を2リンクマニピュレータと考え、逆運動学によって足先座標を関節角度に変換して関節目標軌道を生成している。図6に、床に固定した座標系から見た遊脚足先軌道を示す。後ろ足は、上げるときも下げるときも胴体は静止したままであるが、前足は、下げるときに胴体が前進するので図6(a)のような軌道を描く。

4. 適応学習形2自由度制御系

図1に示したように、本研究で使用するロボットは、

図5 目標歩行パターン

(a) 前足

(b) 後ろ足

図6 目標足先軌道

ポテンショメータが足先に近い位置に取付けてある。これは、ガタによる誤差を避けて、できるだけ実際の角度に近い値を検出するためであるが、モータ・ポテンショメータ間の機械系伝達関数の影響により、フィードバックゲインを高くすることができないという欠点がある。このため、目標値追従性が悪く、速い運動が実現できない。しかし、仮に、機械系伝達関数の影響がなく高ゲインにできたとしても、4足歩行ロボットのように各脚の動きにより常に外乱を生じる制御対象に対しては、フィードバックのみで外乱応答性と目標値追従性の両立を図ることは難しいと思われる。これは、目標値追従性を高めるために高ゲインにすると、外乱が入ったときに過大な制御入力を生じ、これによる脚の動きが再び外乱となるからである。そこで、本研究では、既存のジョイント独立PD制御に、フィードバック誤差学習を基礎とした集中制御形のN.N.コントローラを構築することによって2自由度制御系を実現し、目標値追従性の改善を図る。

フィードバック誤差学習は、理想的なフィードフォワードコントローラを学習によりN.N.に獲得することにより2自由度制御系を構成し、目標値追従性の向上を図る汎用的な手法である。図7にN.N.を重畳した制御系のブロック線図およびN.N.の構成を示す。図7の制御系を、ここでは適応学習形2自由度制御系と呼ぶことにする。ここで、適応学習と呼ぶのは、リアルタイム学習を行っているからである。図7にはフィードバックループが一つしか書かれていない

(a) 適応学習形2自由度制御系

(b) N.N.の構成

図7 制御系ブロック線図

が、実際には各関節に一つずつ、合計八つ存在する。ここではロボットをリンクの結合した一つのシステムとみなし、八つの関節に対して一つの N. N. を重畳した階層構造とする。川入らは、運動方程式に基づき、N. N. に目標軌道とその1階・2階微分の計3種類を入力しているが、本研究では最小限の目標情報で学習を行うという考えのもとに、N. N. への入力は、関節目標軌道 $\theta_{rk}(k=1, 2, \dots, 8)$ とその1階微分 $\dot{\theta}_{rk}(k=1, 2, \dots, 8)$ とする。制御入力は、N. N. の出力 $T_{Nk}(k=1, 2, \dots, 8)$ とフィードバックコントローラの出力 $T_{Fk}(k=1, 2, \dots, 8)$ の和となる。よって、入力層は16ユニット、出力層は8ユニットである。今回中間層は16ユニットとしている。入力層には線形関数を、中間層と出力層には式(1)で表されるシグモイド関数を用いる。

$$f(u) = \frac{2}{1 + \exp(-u)} - 1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

N. N. はフィードバック誤差学習則に従い、 T_{Fk} を誤差信号として学習を進めるが、このとき重み更新の式は誤差逆伝播法により次式となる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta v_{jk}(n) = v_{jk}(n+1) - v_{jk}(n) \\ \quad = -\varepsilon \delta_{2k} y_j + \alpha \Delta v_{jk}(n-1) \\ \Delta w_{ij}(n) = w_{ij}(n+1) - w_{ij}(n) \\ \quad = -\varepsilon \delta_{1j} x_i + \alpha \Delta w_{ij}(n-1) \\ \delta_{2k} = -\frac{1}{2} T_{Fk} (1 - T_{Nk}^2) \\ \delta_{1j} = \frac{1}{2} \left\{ \sum_k \delta_{2k} v_{jk} \right\} (1 - y_j^2) \end{array} \right. \quad (i=1, 2, \dots, 16; j=1, 2, \dots, 16; k=1, 2, \dots, 8) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

n : 学習回数

w_{ij} : 入力層・中間層間の重み

v_{jk} : 中間層・出力層間の重み

y_j : 中間層 j 番めのユニットの出力

x_i : 入力層 i 番めのユニットへの入力

α, ε : 0~1 の定数

である。

学習の最初から N. N. の出力 T_{Nk} が入ると外乱となり学習が良好に行われないので、N. N. の出力の初期値は零とする。これは、中間層・出力層間の重みの初期値をすべて零にすることで実現する。入力層・中間層間の重みはランダムに初期化する。学習は各サンプリングごとに行うこととし、学習終了後重みを固定して、PD 制御と N. N. の2自由度制御を行う。

5. 実験結果

5・1 ジョイント独立PD制御と適応学習形2自由度制御系の比較 学習は、約10.4s間の歩行サイクルについて、各サンプリングごとに1回の重み更新を行うこととする。今回、サンプリングタイムは5msとした。学習の初期段階では目標角度との誤差が大きく、倒れる可能性があるので、ロボットが転倒しない程度

(a) 学習前(PD制御のみ)

(b) 10 サイクル学習後

(c) 40 サイクル学習後

図8 関節軌道データ(脚IV)

に手を添えて学習を行う。また、学習は、1歩行サイクルずつ区切って行った。これは、最初から連続して数サイクル学習すると、前のサイクル中の誤差が後のサイクルの学習に影響を及ぼすからである。

図8に、脚IVについて、学習による関節目標軌道への追従性向上のようすを示した。学習前、つまりジョイント独立PD制御のみで歩行させた場合[図8(a)], ロボットは全体的につぶれぎみで、支持脚期間での遅れと、遊脚期間での遅れが非常に大きくなってい

る。図8(a)の約6.0s付近で θ_8 の目標軌道がとがっているのは、縦安定余裕を確保するために脚IVを伸ばすからであるが、これがまったく実現されていない。したがって、重心移動が十分に行われなため重心が後方に残り、後ろ足を満足に上げることすらできなかった。図8(a)の遊脚期間に高周波の振動がみられるのは、足を引きずったためである。このように、1歩行サイクルを通じて重心が後方に残るために、ジョイント独立PD制御のみでは歩行不可能であった。図8(b), (c)から、学習の進行に伴い関節は目標軌道に近づき、40サイクル学習後には、ほぼ目標軌道に追従していることがわかる。10サイクル学習後では、6.0s付近の鋭角部が徐々に実現されつつあり、このときすでに、右後ろ脚を引きずらずに前にふりだせるようになっている。学習は40サイクル行ったが、歩行の改善は20サイクル学習後にはほぼ達成され、以後手を添えなくても安定な歩行学習ができた。

図9に、図8に対応するPDコントローラの出力を、図10に、N.N.の出力を示す。これらはいずれも脚IV θ_8 に対する指令である。学習の進行に伴いPDコントローラの出力は減少し(図9)、その代わりにN.N.の出力が増大する(図10)ことがわかる。N.N.の出力には振動成分がみられるが、これは、PDコントローラ

(a) 学習前(PD制御のみ)

(b) 10 サイクル学習後

(c) 40 サイクル学習後

図9 θ_8 に対するフィードバックコントローラ出力 (脚IV)

(a) 10 サイクル学習後

(b) 40 サイクル学習後

図10 θ_8 に対する N.N. 出力(脚IV)

図 11 40 サイクル学習後の脚IIの関節軌道データ

の出力を N. N. の重み更新に用いているためと考えられる。図 10 に示した N. N. の出力は、不連続な変化をする部分が数箇所ある。6.0 s 付近では、脚IVが支持脚から遊脚へ切替わった瞬間に、N. N. の出力も切替わっている。その他の不連続な変化は、瞬間的に制動をかけたり、対角の左前脚を上げるために生ずるモーメントに抗して、姿勢を維持しようとしたりするためのものである。学習前のフィードバック信号からわかるように、このような瞬間的な切替は、PD コントローラには不可能なことである。軌道データをみると、脚を上げるときは目標軌道に対して誤差が残っている。しかし、このとき制御入力(PD コントローラの出力+N. N. の出力)は飽和しており、これ以上学習を重ねても改善はみられないと思われる。これは、「アクチュエータの限界を超えない軌道計画」の問題となる。

図 11 に、40 サイクル学習後の脚IIの関節軌道データを示す。脚IVと同様に、学習後は目標軌道にほぼ追従しており、脚によって学習の進行度にはほとんど差がない。学習過程では、すべての関節で生じた誤差を重み更新に用いる。したがって、全関節について目標軌道との誤差を減少させるように、平均的に学習が進行するものと思われる。

実験結果より、速度に不連続な変化がある歩行でも、N. N. はその変化に適応しながら、望ましいフィードフォワードコントローラを学習・獲得していることがわかる。上記の学習により、計画した歩容どおり、平均移動速度 0.019 m/s の静歩行が可能となった。

5.2 汎化能力を利用した歩行の高速化 N. N. は一度形成されると、似たような入力パターンが入ったときにも望ましい出力をすることができる。これは汎化能力と呼ばれるが、N. N. の汎化能力は未学習の軌道に対して、どの程度制御できるかで評価することができる。ここでは、足先の軌道を改良し、1 サイクル

(a) 関節軌道データ

(b) θ_8 に対する N. N. 出力

図 12 学習済みの N. N. を用いた、より速い歩行に対する 2 自由度制御の結果(脚IV)

8.1 s、平均移動速度が約 0.025 m/s の静歩行の制御を行った。

新しい歩行に対し、PD 制御と先に 40 サイクル学習済みの N. N. を用いて 2 自由度制御を行った場合の、脚IVの関節軌道データを図 12(a) に示す。また、このときの脚IV θ_8 に対する N. N. の出力を図 12(b) に示す。図 12(a) から、新しい歩行については未学習であるにもかかわらず、ほぼ目標軌道に追従していることがわかる。N. N. の出力も 5.1 節の結果と同様に、脚の速度に合わせて不連続な変化をみせる。5.1 節の軌道とは慣性など歩行条件が異なるために多少誤差が大きくなるが、これは、新しい歩行に対して追加学習を行えば減少すると思われる。これにより、1 サイクル 8.1 s、平均移動速度約 0.025 m/s の静歩行を実現した。

6. 結 論

本研究は、従来のジョイント独立 PD 制御に N. N. を付加した適応学習形 2 自由度制御系により、4 足歩行ロボットの静歩行の円滑化と高速化を実現した。結論を要約すると以下ようになる。

(1) 本研究で提案した適応学習形2自由度制御系とは、ジョイント独立PDフィードバック制御による分散制御と、フィードバック誤差学習を基本とするN.N.によるフィードフォワード制御の集中制御との階層構造をいう。この方式により、静歩行の高速化と円滑化を実現した。

(2) 特に、N.N.による学習制御は、モデリングの困難な4足歩行ロボットのような多変数形の大規模システムかつ非線形性の強い制御対象の制御に有効である。

(3) 歩行ロボットが高速化すればするほどフィードフォワード制御力の寄与率が高くなるため、一層、本研究で用いた適応学習形2自由度制御系の意義が向上する。

今後は、動歩行の実現を目指す。そのためには、足先センサや姿勢センサ等による姿勢制御と、動歩行

のような外乱の多い歩行に対しロバストなN.N.の適用法を見出すことが課題となる。

本研究を行うにあたり、数々のご助言をいただいた、元千葉大学大学院生〔現ソニー(株)〕の加藤 勲氏に深謝する。

文 献

- (1) 広瀬, 移動ロボットのダイナミクス, 機講論, No. 930-8 (1993), 1.
- (2) 古荘, 歩行ロボットの研究展開, 日本ロボット学会誌, 11-3(1993), 306.
- (3) 木村, 4足歩行ロボットの動歩行について, 日本ロボット学会誌, 11-3(1993), 372.
- (4) 滝田・背戸・長松, 四足歩行ロボットの準動的歩行, 機論, 54-499(1988), 638.
- (5) 加藤・千葉・野波, 四足歩行ロボットのジョイント独立PD制御, 機講論, No. 920-8(1992), 45.
- (6) 川人・宇野・鈴木, 随意運動における適応と学習II, 日本ロボット学会誌, 16-3(1988), 50.