

自立型四脚ロボット「鉄犬 2」による屋外動歩行

電通大 福岡 泰宏 木村 浩 高瀬國克

Dynamic Walking in the Open Air of a Self-contained Quadruped Robot 'TEKKEN2'

Univ. of Electro-Communications

Yasuhiro FUKUOKA Hiroshi KIMURA Kunikatsu TAKASE

Abstract— We have been trying to induce a quadruped robot to walk with medium walking speed on outdoor irregular terrain based on biological concepts. We design the mechanical system and the neural system consisting of a central pattern generator(CPG), responses and reflexes. A CPG receives sensory input and changes the period of its own active phase as responses. In this paper, we show a newly developed quadruped robot "TEKKEN2" which's self-contained. TEKKEN2 is successful in walking in the open air with the transceiver. MPEG footage of these experiments can be seen at: <http://www.kimura.is.uec.ac.jp>.

Key Words: Quadruped, Central Pattern Generator, 3D Dynamic Walking in the open air, Self-contained

1. はじめに

不整地を動的に踏破する脚ロボットの開発はこれまでいくつか行われてきた^{1)~5)}。路面の形状がある程度限定されれば、それに基づいた歩行アルゴリズムを作成し動的に適應させることは可能である。しかし、実環境においては、摩擦や剛性の異なる路面、様々な方向への微妙な傾斜、不定型の段差、窪み、および踏むことによって移動する砂利や葉など予測困難な状況は無作為に存在する。そのような屋外における高速脚移動を実現した例としては6脚ロボット⁶⁾が挙げられるが、脚数4以下のロボットでは非常に困難である。

筆者らは、これまでに、生物を規範とした歩行生成・制御を行う四脚ロボット「鉄犬」を用いて、屋内に無作為に段差、坂などの不整地を設置した不測の不整地路面を作成し、そこでの自律動歩行、および整地走行を実現していた⁷⁾。しかし、鉄犬はPC、電源、モータドライバなどが外部設置であったため、屋外での実験を困難としていた。そこで、我々は、鉄犬とほぼ同様の機構を持つ完全自立型の四脚ロボット「鉄犬2」を新たに開発し、屋外での歩行実験を試みた。整地歩行、不整地適應などは鉄犬同様自律的に行われるが、より随意的な速度調節、旋回などは市販のラジコン用送信器によってオペレータが行う。前述したように、屋外には様々な不整地環境が存在するため、鉄犬に適用されていた制御のみでは適應に乏しい。よって、鉄犬2では新たな反射を導入することによる不整地適應度の増加を目指した。

鉄犬2に適用している歩行生成・制御手法の原型は鉄犬と同様の生物の歩行生成・制御手法を参考にしたものである。本稿ではこれを生物規範型制御手法と呼ぶ。近年、生物の脊髄に存在し、運動のリズムを生成する非線形振動子CPG(Central Pattern Generator)

^{8, 9)}の数式モデルを適用し、自律適應力の高い運動を実現させる試みは盛んである^{10, 11)}。特に、歩行分野での適用例は多く、多賀の2足歩行シミュレーション^{12, 13)}にはじまり、2脚^{14)~17)}、4脚^{18)~24)}などが存在する。しかし、不測の不整地における3次元動歩行を実現しているものは鉄犬、鉄犬2のみである。鉄犬2では、鉄犬同様に多賀が2足歩行のシミュレーションに用いた松岡のCPGモデル²⁵⁾を適用し、それに関節角度、胴体傾斜角度、および足接触情報による反射、反応¹⁾を加えたシンプルなモデルを構成している(Fig. 1)。

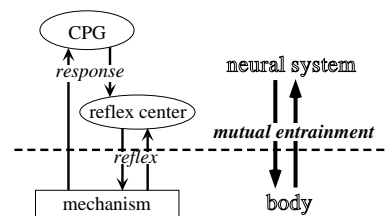


Fig.1 Illustration of motion generation by a biological system.

CPGを用いる主な要因としては、CPGが非線形振動子であることが挙げられる。非線形振動子は一般的に次のような特性をもつ。

- (1) 自身の固有周波数に近い外部振動を入力すると、周波数を変化させて外部振動に同調する。
- (2) 瞬間的な外乱を受けても過渡状態を経て元の振動に収束する。

(1)に関して、歩行は身体各部分に発生する振動が一つの周波数になった時もっともスムーズに行われると考

¹⁾本稿では、センサ情報に基づくトルク発生を「反射(reflex)」と呼び、センサ情報をCPGにフィードバックすることによるCPG位相の調節を「反応(response)」と呼ぶ。

えられる．その振動とは，たとえば，脚振り，ピッチおよびロール平面内における胴体の揺動，頭の揺動などである．歩行中，外乱によってずれたそれら複数の外部振動の周波数，および CPG 周波数の同調が CPG 経由の反応 (Fig. 1) を適用することによって比較的容易に実現可能であることは福岡ら^{7, 21)}によって実証されている．本稿では (1) を引き込み能力と呼称する．(2) に関して，例えば歩行中段差につまずいた時，屈曲反射²⁾によって転倒を回避する．その時，段差への接触，およびその回避動作によって一時的に CPG 波形が乱れるが，その後，数歩程度歩行しているうちに CPG 波形は自律的に安定状態に収束し，安定した歩行を行う．本稿では (2) を自己安定化能力と呼称する．自己安定化能力も引き込み能力と同様に，反応のための機構から CPG へのセンサフィードバックの設計 (Fig. 1)，およびそれに用いられるパラメータの設定を厳密に行うことで向上させることが可能になると考えられる．

従来の一般的な歩行ロボットの制御系は引き込み能力，および自己安定化能力のような性質を持っていないため，制御系が適応できる外乱の程度は小さかった．そのため，不整地など外乱の多い環境で歩行させるためには，あらゆる状況に適応するためのアルゴリズムを予め記述しておく必要があり，不整地環境が複雑化，多様化するにつれシステムが煩雑になることが予測される．特に無限定な不整地が存在する屋外における歩行は大変困難であると考えられる．しかし，生物規範型制御手法では，小さな外乱に対する適応は CPG の持つ自律適応能力に一任することができるため，つまずきによる転倒回避，傾斜面歩行時の左右脚筋張力調節など，大きな外乱や環境変化に対する適応を下位レベルにおける反射 (Fig. 1) として記述するのみでよい．後の微細な調節は CPG が自律的に行う．ただし，そのような CPG の能力を最大限に引き出すためには CPG- 機構間の綿密な設計 (反応) (Fig. 1) が必要不可欠となると考えられる．

上記の理由から CPG と反射を用いた生物の歩行制御系は不整地歩行において有効であると考え，生物規範型制御手法を新しく製作した自立型四脚ロボット「鉄犬 2」に搭載した結果，屋外歩行に成功したので本稿において紹介する．鉄犬 2 の歩行実験の映像は <http://www.kimura.is.uec.ac.jp> で公開しているので参考にして頂きたい．

2. 自立型四脚ロボット「鉄犬 2」

鉄犬 2 の関節構成は鉄犬と同様であるので参考文献⁷⁾を参照していただきたい．鉄犬 2 は全幅 14cm(+2cm)，全長 30cm(+6cm)，脚長

²⁾ 四肢の皮膚に刺激を加えると四肢の屈筋が収縮して，刺激から四肢を引っ込める反射²⁶⁾

27.5cm(+2.5cm) と鉄犬よりわずかに大型化し，駆動系をすべてロボットに搭載し自立化を実現している (Fig. 2)．また，鉄犬 2 では起立，始動，速度調節，旋回，停止，伏せなど意志の関わる操作は市販のラジコン用受信器を使ってオペレータが行う．駆動系の主な仕様を Table 1 に表す．センサは鉄犬と同様で，胴体の傾

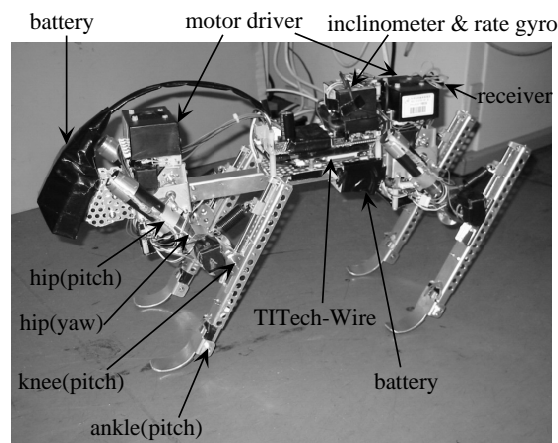


Fig.2 Tekken2

きを計測するレートジャイロと傾斜センサ，および各関節角度，速度検出と足の接触を判別するためのエンコーダを使用している．総重量は 4.3kg(鉄犬 + 1.2kg) である．また，鉄犬と同じ DC モータを用い，鉄犬同様バックドライバビリティを確保するために関節の減速比は小さく設定している．しかし，鉄犬に用いていたモータは最大連続トルクを大きく越えて使用していたため長時間の歩行に耐えられなかったため，鉄犬 2 では減速比を膝関節 27.8(鉄犬 + 9)，腰関節 20.0(鉄犬 + 4.4) と増加させ，長距離の歩行に耐えられるようにしている．

3. 生物規範型制御手法

鉄犬 2 に適用されている制御手法の原型は鉄犬と同様である⁷⁾．鉄犬 2 では，鉄犬に適用された CPG，反射，および反応に加え，屋外において，よりロバストに歩行できるように新たな反射を導入している．鉄犬は屋内に作成された段差，坂などの不整地歩行において高いロバスト性を発揮してきたが，そのほとんどはピッチ平面内でのみ変化する不整地であり，横に傾いた坂などロール平面内において変化する環境においてはそれほどロバストではないことを屋外における実験で認識した．従って，鉄犬 2 ではロール軸まわりの胴体傾斜に対して左右脚の筋弾性の調節を行う反射である緊張性迷路反射や，傾いた方向に足を振り出す踏み出し反射を新たに導入している．

ここでは，まず 3.1, 3.2 において，鉄犬にも適用されていた生物規範型制御手法の原型を簡単に紹介する (詳細は⁷⁾)．そして，鉄犬 2 において新たに導入された反射を 3.3.1., 3.3.2. で紹介する．

Table 1 Drive system for Tekken2.

robot controller	TITech-Wire ²⁷⁾	AMD(Elan SC520)133MHz , OS:RT-Linux PWM(40kHz), A/D converter, counter, RC decoder
motor driver IC	TA8429H (TOSHIBA)	output (I:1.5A[4.5A peak], V:22.2V)
battery	Lithium Polymer Batteries (Kokam)	Lipo1500H(11.1V1500mAh × 2) for DC motors, Lipo720H(11.1V720mAh × 2) for TITech-Wire and sensors
transceiver	MEGA TECH T3PDF (FUTABA)	digital proportional radio control system (3ch, 40MHz)

3.1 ピッチ運動の生成と制御

一脚の制御に関して、神経系は大きく「各脚の位相(支持脚 / 遊脚) 情報を与える CPG 部」と「筋粘弾性を与える伸張反射部」に分かれる (Fig. 1). 具体的には、次式 (1)³⁾ に表される CPG(神経振動子^{12, 13, 25)}) からの出力 y_i の正負によってそれぞれ支持脚相、遊脚相の判別を行い、Fig. 3の破線で表される3つの目標位置 A,B,C にローカルな PD 制御を行う。図中、太矢印が各目標位置 A,B,C の切替え条件となる。遊脚期間 A→B の切替え条件は「目標位置 A に脚が達した時」である。それぞれの状態での各関節の目標角度と P ゲインを Table 2 に表す。 θ , ϕ , ψ はそれぞれ、腰 (ピッチ軸), 膝 (ピッチ軸), 腰 (ヨー軸) 関節の角度を表す。各々のゼロ点, および方向は Fig. 3 を参照していただきたい (Fig. 3 は右脚であると仮定する)。body pitch angle はピッチ軸まわりの胴体傾斜を表す (前回転が正)。 $\theta_{C \rightarrow A}$ は $y_i > 0$ になった瞬間の腰 (ピッチ軸) 関節角度, v は鉄犬の計測された歩行速度を表す。
* では、腰関節から足先までの高さが一定であるような膝関節目標角度が on-line で計算される。関節目標角度については、Table 2 中の定数パラメータは実験的に決定された。P 制御のゲインについては、以降の実験で使用された $G_1 \sim G_8$ 値が付録 A. に示されている。それらの決定手法については⁷⁾ を参照して頂きたい。D 制御 (ダンピング) に関してはすべて、目標角速度は $0[\text{rad/s}]$, 角速度ゲインは $0.03[\text{Nm}\cdot\text{s/rad}]$ と設定する。鉄犬 2 では、鉄犬と比較して Table 2 のパラメータに若干の変更が見られるが、鉄犬同様、必ずしもそれが最適値であるとは限らない。しかし、伸張反射 (PD 制御) に用いられるパラメータは高いロバスト性を持つ⁷⁾ ため、実験的に決定することは比較的容易である。将来的にはエネルギー効率, および安定性が最良となるパラメータの選択が望まれる。

$$\tau \dot{u}_{\{e,f\}i} = -u_{\{e,f\}i} + w_{fe} y_{\{f,e\}i} - \beta v_{\{e,f\}i}$$

³⁾ 使用パラメータ値は付録 A. 参照。 τ は鉄犬同様に安定判別指標である広域安定余裕⁷⁾ から on-line に調節される。具体的には、不安定になるにつれ短周期になるように τ が自律的に調節される。

$$\begin{aligned} &+u_0 + \text{Feed}_{\{e,f\}i} + \sum_{j=1}^n w_{ij} y_{\{e,f\}j} \\ \tau \dot{v}_{\{e,f\}i} &= -v_{\{e,f\}i} + y_{\{e,f\}i} \\ y_{\{e,f\}i} &= \max(u_{\{e,f\}i}, 0) \\ y_i &= -y_{ei} + y_{fi} \end{aligned} \quad (1)$$

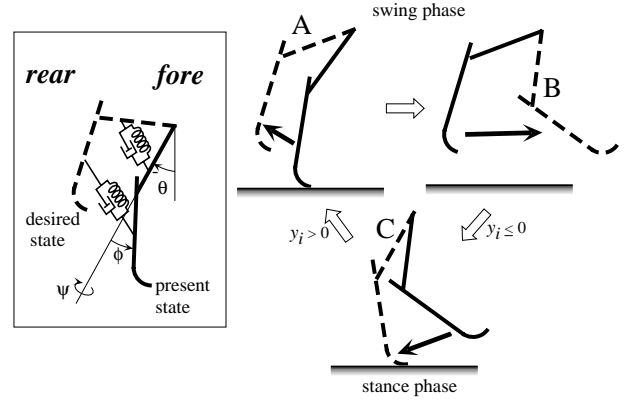


Fig.3 State transition in the virtual spring-damper system. The desired joint angles in each state are shown by the broken lines.

Table 2 Desired value of the joint angles and P-gains at the joints used by the PD-controller in each state of the virtual spring-damper system (Fig. 3)

	P control	
angle in state	desired value[rad]	P-gain[Nm/rad]
θ in A	$1.2\theta_{C \rightarrow A}$	G_1
θ in B	-0.17	$G_2 v + G_3$
θ in C	$-1.07 +$ body pitch angle	$-G_4 v + G_5$
ϕ in A & B	$*$	G_6
ϕ in C	0.61	G_7
ψ in all states	0	G_8

CPG 出力 y_i を直接関節への出力トルクとして適用しない理由は、次の 2 つである。

- CPG は比較的大きい時定数 τ , τ' をもっているため、瞬間的な運動を制御するのは困難である。
- 脚移動においては、支持脚期において重力に抗して体を支持する、遊脚期においてつまづかないように前方に脚を振り出す、といったある程度正確な幾何的制御は必要である。

また、CPG への基本的なセンサ入力として関節角から構成される次式 (3) を式 (1) にフィードバックする。単独の CPG の場合は添字 i を省略している。これにより出現する反応を「伸張反応」と呼ぶ。

$$Feed_{e,tsr} = k_{tsr}(\theta - \theta_0), \quad Feed_{f,tsr} = -Feed_{e,tsr} \quad (2)$$

$$Feed_{\{e,f\}} = Feed_{\{e,f\},tsr} \quad (3)$$

ここで θ は計測されたピッチ軸まわりの腰関節角度、 θ_0 は立脚静止時の腰関節角度である。 k_{tsr} はゲインであり、鉄犬と同じ値が鉄犬 2 にも用いられている (付録 A.)。このネガティブフィードバックにより、CPG はピッチ平面内における腰関節の周期運動に同調する。

また、歩容に関して、各脚の CPG を w_{ij} (式 (1)) を結合係数として結合することにより CPG ネットワークを構成すると、各脚の CPG は相互に同期し合い歩容を生成する。

3.2 緊張性迷路反応の導入によるピッチ-ロール運動の同調

鉄犬はロール軸まわりの関節を持っていないが、三次元動歩行においては二脚支持期において倒立振子相が現れ、結果としてロール運動が自然に発生する。1. で述べたように、歩行中、身体各部で発生する振動が一つの周波数になった時、スムーズな歩行が実現されと考えられる。したがって、ロール平面内運動とピッチ平面内運動の振動周波数が異なると、歩行は不安定に導かれる。この解決法として、3.1 で紹介したピッチ運動リズムを生成する CPG に胴体のロール揺動をフィードバックすれば、CPG は非線形振動子の特性から外部振動である胴体ロール揺動に同調する。

具体的には、緊張性迷路反応 (vestibulo spinal response) の定義⁴を参考にし、歩行中のロール平面内胴体傾斜角度 body roll angle (右傾斜が正) を検出し、伸張反応 (式 (2)) と共に式 (4) を CPG (式 (1)) にフィードバックする (式 (5))。結果として、CPG はピッチ平面内脚振動、およびロール平面内胴体振動に同調し、反対に、CPG によるリズム生成、および PD 制御により脚振動、およびロール平面内胴体振動は CPG の振動に同調する。このような神経系-身体間の相互引き込み (mutual entrainment) (Fig. 1) の作用によって全体の

運動は一つの周波数を持つ振動になり、スムーズな歩行を実現する。

以後、本稿では式 (4) の効果によって出現する反応をロール緊張性迷路反応と呼ぶ。鉄犬 2 に用いられた式 (4) のパラメータ k_{tlrr} の値 (付録 A.) は鉄犬 ($k_{tlrr} = 3.3$)⁷⁾ に比較して小さくなっている。これは、鉄犬 2 は駆動系をすべて胴体に搭載しているため重心が高く、支持脚期における足接地点まわりの慣性モーメントが大きくなっているためであると考えられる。鉄犬、鉄犬 2 はロール軸まわりに駆動するアクチュエータを持たないので、ロール平面内における揺動はロボットの持つ固有振動数に大きく影響を受ける。そのため、ロボットの慣性モーメントが変化した場合はロール緊張性迷路反射のパラメータ k_{tlrr} を適切に調節しなければならない。

$$Feed_{e,tlrr} = \delta(\text{leg}) k_{tlrr} \times (\text{body roll angle}) \quad (4)$$

$$Feed_{f,tlrr} = -Feed_{e,tlrr}$$

$$\delta(\text{leg}) = \begin{cases} 1, & \text{if leg is a right leg;} \\ -1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} Feed_e &= Feed_{e,tsr,vsr} + Feed_{e,tlrr} \\ Feed_f &= Feed_{f,tsr,vsr} + Feed_{f,tlrr} \end{aligned} \quad (5)$$

3.3 横方向の環境変化、および外乱に対する適応

非線形振動子である CPG の引き込み能力を考慮し、3.1, 3.2 のように制御系の設計を適切に行えば、神経系-身体間に相互引き込みの関係性ができるため (Fig. 1)、歩行中、四脚間位相差 (歩容) の調節を適切に行って、様々な環境変化に自律的に適応することが可能であるとえられる。そして、もう一つの自己安定化能力によって、瞬間的な外乱に対して頑健になっているため、鉄犬で実現されていたような不連続に段差や短い坂が並んだような不整地路面の踏破が鉄犬 2 においても可能であると考えられる。しかし、左に傾いた坂を歩き続けるような状況において実験を行ったところ、ロール緊張性迷路反応を導入しておけば Fig. 4(a) のような状態で左右脚の位相差を適切に保ちながら歩き続けるが、左右の重力負荷の差のため次第に坂なりに落ちていく傾向がみられた。また、右から摂動を加えた時、左に転倒する可能性が高かった。なぜなら、ロール平面内における、足先と重心の鉛直投影点間の最短距離を表す広域安定余裕⁷⁾ WSM (Fig. 4) が小さいからである。したがって、鉄犬 2 では、横に傾斜した坂でも広域安定余裕を大きく保って歩行できるように緊張性迷路反射 (3.3.1.)、および踏み出し反射 (3.3.2.) を新たに導入した。

3.3.1 緊張性迷路反射による膝関節筋弾性の調節

緊張性迷路反射 (vestibulo spinal reflex) により、傾いた方の脚の膝を伸展させるために膝の P ゲインを上

⁴ 頭部が左右および前後に傾いたとき、傾いた側の腿が伸展し、反対側の腿が屈曲する²⁸⁾

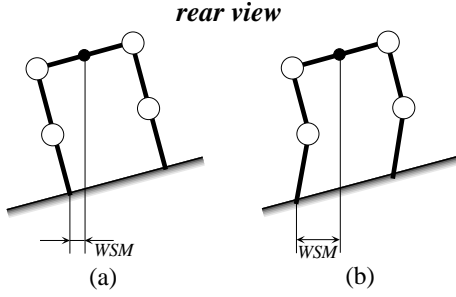


Fig.4 Walking on a slope. (a):Without vestibulo spinal reflex and stepping reflex. (b):With.

げ，対側脚の膝を屈曲させるために膝の P ゲインを下げる．そうすることで胴体は水平に近づく．具体的には，Table 2において， G_7 を次式 (6) の $P\text{-gain}_{\phi_{inC}}$ に変更する．

$$P\text{-gain}_{\phi_{inC}} = \delta(\text{leg}) k_{vsrf} \times (\text{body roll angle}) + G_7 \quad (6)$$

$$\delta(\text{leg}) = \begin{cases} 1, & \text{if leg is a right leg;} \\ -1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

3.3.2 踏み出し反射による脚の振り出し

また，踏み出し反射 (stepping reflex)⁵によって，Fig. 4(b) のように，傾いた方に足を振り出す．具体的には，Table 2において，腰 (ヨー軸) 関節 ψ の P 制御の目標値 ($0[\text{rad}]$) を次式 (7) の $P\text{-angle}_{\psi}$ に変更することによって実装される．

$$P\text{-angle}_{\psi} = \delta(\text{leg}) k_{sr} \times (\text{body roll angle}) \quad (7)$$

$$\delta(\text{leg}) = \begin{cases} 1, & \text{if leg is a right leg;} \\ -1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

4. 横方向に傾斜する坂での歩行実験

緊張性迷路反射 (3.3.1.)，および踏み出し反射 (3.3.2.) の有効性を検証するため，右に 4 度傾斜した坂を屋内に作成し，歩行実験を行った．Fig. 5はその時のロール平面内胴体傾斜 body roll angle，右後脚の腰 (ヨー軸) 関節角度 ψ ，および左後脚の腰 (ヨー軸) 関節角度 ψ を表す．2[sec] まで坂を歩行しており，2[sec] 移行は整地歩行である．坂を歩いている時，胴体は右に $0.05 \sim 0.14[\text{rad}]$ 程度傾斜しており，整地歩行時は $0[\text{rad}]$ 付近にある．坂歩行時，右後脚，および左後脚の ψ の極大値はそれぞれおよそ $0.04[\text{rad}]$ ，および $-0.04[\text{rad}]$

であり，整地歩行時は共におよそ $0[\text{rad}]$ となっている．極大値を計測する時が歩行中の遊脚期であるため，これが振り出しの角度を表す．つまり，右傾斜の坂を歩いている時，左右脚共に腰 (ヨー軸) 関節を $0.04[\text{rad}]$ 右側に振り出していることがわかる．

ここで，支持脚期に ψ が大きく凹になっているのは，P ゲイン (剛性) が小さいため，脚にかかる重力負荷によって腰 (ヨー軸) 関節が体の内側に曲がるからである．

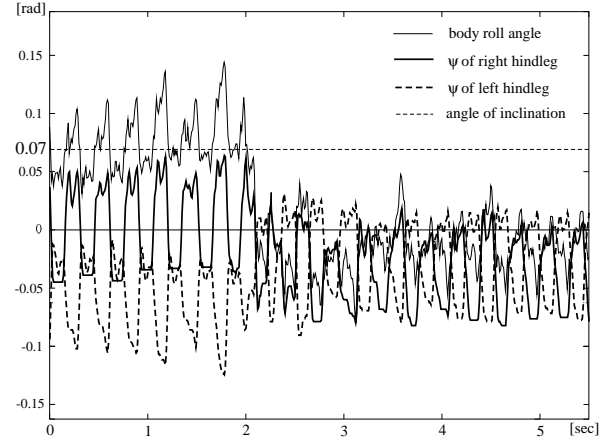


Fig.5 Walking on the terrain which lean 4 degree to the right.

5. 屋外歩行実験

屋外では，舗装路であっても $1 \sim 3$ 度程度の坂は随所に存在する．3.3を導入しない場合，鉄犬 2 は坂なりに次第に落ちていき進行方向が定まらなかったが，3.3を導入すると，横方向に傾斜する坂においても直進することが可能になり，また，大きい広域安定余裕を確保できているので，横方向の外乱に対してロバストであった．

Fig. 6は鉄犬 2 の屋外歩行時の写真である．舗装路はあるが，多方向への 2 度以内の傾斜，1cm 以内の不定型の段差，砂利などは随所に存在する不規則な環境である．送信器による旋回，速度変更を行いながら 30 m 程度の距離を踏破している．



Fig.6 Snapshots of walking in the open air.

6. おわりに

本研究では，これまでの鉄犬から減速比を上げた機構，および横方向の環境変化，および外乱に適應するた

⁵動物が前肢あるいは後肢で体を支えている時，横へ押すと 1 歩跳び直してバランスをとる²⁶⁾．文献では，踏み出し反応 (stepping reaction) と定義されている，本稿では踏み出し反射 (stepping reflex) と呼称する．

めの反射を新たに導入した生物規範型制御手法を適用し，なおかつ駆動系をすべてロボットに搭載した完全自立型の四脚ロボット鉄犬2を開発し，屋外歩行実験を試みた．鉄犬2は鉄犬よりペイロードが1.2kg増加したにもかかわらず，鉄犬とほぼ同様の機構で鉄犬よりロバストで，かつ長距離の歩行を屋外において実現した．

鉄犬では，4cmの段差乗り越え，10度の坂の昇降など，単発ではあるが各々高度な不整地への瞬発的な適応力を検証してきた．そこでは脚の可動範囲，アクチュエータの出力などハードの限界，および瞬間的な大きな外乱から安定状態に収束するための自己安定化能力の限界が個々の不整地の適応限界を表していたと考えられる．一方，鉄犬2では，個々の不整地レベルは低いが，連続に不整地路面が続く屋外舗装路において，連続する外乱に対する持続的な適応力を検証した．この限界は，上記のようなハードよりも，身体各部において複数存在する歩行のリズムを一定に保ち続ける引き込み能力の限界に大きく依存すると考えられる．

今後は瞬発・持続的適応力をより向上させ，高レベルの不整地が連続する未舗装路面における長期歩行実現を目指す．

謝辞

本研究は(株)AVICEの研究助成を受けて行われました．また，東京精機株式会社に鉄犬2製作を委託しました．ここに関係各位への感謝の意を表します．

A Values of the parameters used in experiments

parameters	value	parameters	value
u_0	1.0	$G_1[\text{Nm/rad}]$	7.0
τ'	0.6	$G_2[\text{Nms/rad}]$	0.6
β	3.0	$G_3[\text{Nm/rad}]$	0.6
w_{fe}	-2.0	$G_4[\text{Nms/rad}]$	1.0
$w_{\{13,31,24,42\}}$	-2.0	$G_5[\text{Nm/rad}]$	2.0
$w_{\{12,34\}}$	0	$G_6[\text{Nm/rad}]$	7.0
$w_{\{21,43\}}$	-0.57	$G_7[\text{Nm/rad}]$	2.6
$k_{tsr}[\text{1/rad}]$	3.0	$G_8[\text{Nm/rad}]$	2.0
$k_{tlrr}[\text{1/rad}]$	2.25	$k_{vsrf}[\text{Nm/rad}]$	3.0
$\theta_0[\text{rad}]$	-1.06	$k_{sr}[\text{Nm/rad}]$	0.5

参考文献

- 1) J.K. Hodgins and M.H. Raibert: "Adjusting Step Length for Rough Terrain Locomotion", IEEE trans. on Robotics and Automation, vol.7, no.3, pp.289-298, 1991.
- 2) 梶田，谷: "実時間路面形状計測に基づく動的2足歩行の制御", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.7, pp.1062-1069, 1996.

- 3) 山口，木下，高西，加藤: "路面形状に偏差のある環境に対する適応能力を持つ2足歩行ロボットの開発", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.4, pp.546-559, 1996.
- 4) C.M.Chew, J.Pratt and G.Pratt: "Blind Walking of a Planar Bipedal Robot on Sloped Terrain", Proc. of ICRA99, pp. 381-386, 1999.
- 5) 米田，飯山，広瀬: "四足歩行機械のスカイフックサスペンション制御", 日本ロボット学会誌, Vol. 12, no.7, pp.1066-1071, 1994.
- 6) U. Saranli, M. Buehler, and D.E. Koditschek: "RHex: a simple and highly mobile hexapod robot", Int. J. Robotics Research, vol.20, no.7, pp.616-631, 2001.
- 7) 福岡，木村，"四足ロボットの生物規範型不整地適応歩行 - 神経-機械カップリング系構成法の提案とビッチ運動・CPG・ロール運動間相互引き込みの評価 -"，日本ロボット学会誌，Vol.21, No.5, pp.569-580, 2003.
- 8) S. Grillner: "Control of locomotion in bipeds, tetrapods, and fish," In Handbook of Physiology, volume II, American Physiological Society, Bethesda, MD, pp.1179-1236, 1981.
- 9) 佐藤: "「脳・神経と行動」: 運動プログラムと行動出力", 岩波書店, pp.159-178, 1996.
- 10) 琴保，S.Schall, "神経振動子を用いたロボットのリズム的な運動生成"，日本ロボット学会誌，Vol.19, No.1, pp.116-123, 2001.
- 11) M.Williamson, "Designing Rhythmic Motions using Neural Oscillators", Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.494-500, 1999.
- 12) G.Tagu, Y.Yamaguchi and H.Shimizu, "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators", Biological Cybernetics, 65, pp.147-159, 1991.
- 13) 多賀: "歩行の創発"，日本ロボット学会誌，vol.15, no.5, pp.680-683, 1997.
- 14) 宮腰，多賀，國吉，長久保: "神経振動子を用いた三次元2足歩行シミュレーション - 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.1, pp.87-93, 2000.
- 15) 松浦，石村，和田: "2足ロボットの自己組織的運動生成"，第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.207-208, 2001.
- 16) 藤井，石黒，P.E.Hotz: "神経修飾機構を有するCPG回路モデルを用いた歩行生成"，計測自動制御学会論文集，vol.38, no.11, pp.981-989, 2002.
- 17) 富田，矢野: "拘束条件生成と拘束充足による二脚歩行のリアルタイム制御"，第15回自律分散システムシンポジウム，pp.27-32, 2003.
- 18) 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.
- 19) W. Ilg, J. Albiez, H. Jeede, K. Berns, and R. Dillmann: "Adaptive periodic movement control for the four legged walking machine BISAM", Proc. of ICRA99, pp. 2354-2359, 1999.
- 20) M.A. Lewis, R. Etienne-Cummings, A.H. Cohen, and M. Hartmann: "Toward biomorphic control using a custom aVLSI CPG chips", Proc. of ICRA2000, pp. 1289-1295, 2000.
- 21) 福岡，木村: "四足ロボットの生物規範型不整地適応歩行 - 体性感覚・前庭感覚による調節 -"，日本ロボット学会誌，vol.19, no.4, pp.510-517, 2001.
- 22) A.J. Ijspeert: "A connectionist central pattern generator for the aquatic and terrestrial gaits of a simulated salamander", Biolog. Cybern., vol.84, pp.331-348, 2001.
- 23) H. Takemura, Y. Matsumoto, and T. Ogasawara: "Dynamic walking of an autonomous quadruped robot based on rhythmic generation", Proc. of CLAWAR2001, pp.727-734, 2001.
- 24) 土屋，辻田: "Central Pattern Generator モデルに基づく4脚歩行ロボットの歩行制御"，日本ロボット学会誌，vol.20, no.3 pp.243-246, 2002.
- 25) K. Matsuoka: "Mechanisms of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators," Biolog. Cybern, vol.56, pp.345-353, 1987.
- 26) 中村，斉藤: 基礎運動学 第4版，医歯薬出版株式会社，p.111, 1976.
- 27) 福島，滝田，広瀬，中村: "知能ロボット用シリアルバス型制御システムの研究 - TITech Wire の開発 -"，第7回ロボティクスシンポジウム予稿集，pp.155-160, 2002.
- 28) 南山堂・医学大辞典 18版，南山堂，p.1211, 1998.