

四足ロボットの生物規範型不整地適応動歩行

— 神経 - 機械カップリング系構成法の提案と ピッチ運動・CPG・ロール運動間相互引き込みの評価 —

福岡泰宏* 木村浩*

Biologically Inspired Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped on Irregular Terrain
– Proposal of the design of coupled neuro-mechanical system and
evaluation of the mutual entrainment among pitching motion, CPG and rolling motion –

Yasuhiro Fukuoka* and Hiroshi Kimura*

We have been trying to induce a quadruped robot to walk with medium walking speed on irregular terrain based on biological concepts. In this paper, we define adaptive walking based on biological concepts as "coupled-dynamics-based motion generation", in which a neural system and a mechanical system are coupled and generate motion by interacting with the environment emergently and adaptively. 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. Especially, we propose that the rolling motion should be input to CPGs in order to synchronize the pitching and rolling motions. PD-controller at joints as the stretch reflex constructs the virtual spring-damper system as the visco-elasticity model of a muscle. The desired angle and P-gain of each joint in the virtual spring-damper system is switched based on the phase signal of the CPG. CPGs, the motion of the virtual spring-damper system of each leg and the rolling motion of the body are mutually entrained through the rolling motion feedback to CPGs, and can generate adaptive walking on irregular terrain. The mutually entrained system closely couples the representative indices such as walking speed, gaits, stability and energy consumption. We report our experimental results of dynamic walking on terrains of medium degrees of irregularity in order to verify the effectiveness of the designed neuro-mechanical system.

Key Words: Quadruped Robot, 3D Dynamic Walking on Irregular Terrain, Central Pattern Generator (CPG), Reflexes, Responses, Entrainment between Pitching Motion and Rolling Motion

1. はじめに

これまでに多くの脚式ロボットの研究が行われてきた。一脚[1], 二脚[2]~[4], 四脚ロボット[5][6]を用いた不整地走行・動歩行もある程度は実現されており, あらかじめ路面などの環境情報が完全に分かっているならば, それに対応できる歩行制御プログラムを用意することは可能である。しかし, 非常に多様な不整地を自律適応的に高速移動可能な脚式ロボットの研究は近年いくつかのグループにより始まったばかりである。その成果の一例として, 脚の適切な機械的コンプライアンスを利用して不整地を高速に移動可能な六足ロボットの研究が挙げられる[7][8]。我々の研究の目的は, 六足ロボットよりも不安定な哺乳類型の四足歩行ロボットを用いて, 不整地上での自律的な高速移動を実現すること

にある。

より一般に, 従来のロボット工学における問題点は外乱, および予測していない事象に対する自律的適応に乏しいことである。このような従来型システムの限界を背景にして, 複数の構成要素と環境との力学的相互作用により自己組織的にパターンを変化させる創発システムの概念が注目されている[9][10]。我々は, 多賀[11]~[13]によって提案された「環境を外乱とみなすのではなく, 環境と身体との間の相互作用によって創発的に生み出される運動が歩行である」との定義の元に, 不整地上で非常に柔軟かつロバストな動物の歩行に関する生物学や神経生理学分野での知見を参考にして, 新たな機構と制御手法の開発をめざす。

著者らが目標とするシステムの概念図を Fig. 1-(a) に示す。そこでは, 機械システムと神経システムはそれぞれ独自の非線形ダイナミクスを持っており, これら二つの系がカップリングされて構成される動的システムは環境との相互作用を通して適応的な運動を創発的に生成する。一方, 従来のロボティクスの手法

原稿受付 200X年X月X日

*電気通信大学

* Univ. of Electro-Communications

においてもインピーダンス制御のように制御系が機械システムとカップリングして新たな動的システムを構成することがある (Fig. 1-(b)) が、制御系が適応できる外乱や不整地の程度は小さいために、環境と機械システム - 制御系の作るダイナミクスを考慮して、動的システムの外にある運動計画部に運動の生成とセンサ情報に基づく適応をアルゴリズムとして記述する必要があった。従って、歩行環境が多様化するにともなってシステムが爆発的に複雑になり、プログラミング能力やコストの点で実質的に多様な不整地への適応が不可能になることが予測される。これに対して、カップリングされた力学系は常に自身のダイナミクスに従い、変化する環境に自律的に対応可能であり、また、神経系の内部パラメータを操作することにより別の状態に移行することが可能である。従って、ロボット自身や環境のモデル化、自律的な運動計画、計画された運動と実際の運動との矛盾といった従来のロボティクスにおける困難な問題を避けることが可能である。

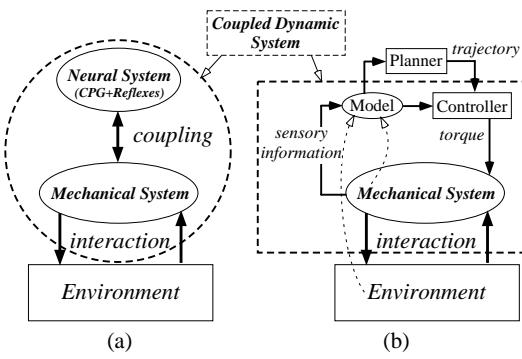


Fig. 1 Illustration of motion generation by a neural system: (a) and an impedance control system: (b).

一般に動物の高速移動においては力学エネルギーが支配的であるのでバネ - ダンパ系でモデル化される筋骨格系での自己安定性が重要であり、中速移動では神経システムによる調節が支配的であることが指摘されている [14]。歩行に関する神経システムについては、動物の歩行は主に「パターン発生器 (Central Pattern Generator: CPG)」と末梢からの感覚などによって発生する「反射」の組み合わせにより生成されていること、これら CPG や反射の機構は主に脊髄に存在し脳幹・小脳・大脳など上位中枢からの調節を受けていることは、事実として広く受け入れられている [15] [16]。生物学、神経生理学等で得られたこのような知見に基づいて、自律的・創発的な歩行を実現しようとする試みはこれまでに数多くなってきた。特に CPG を用いた動歩行についてはシミュレーション [11] [12] [17] [18] や実機 [19] ~ [27] を用いた研究が行われてきたが、筆者らの研究以外に不整地での自律適応の実現例は少ない。

筆者らはこれまでに、ピッチ面内に拘束された二次元四足歩行ロボット "Patrush" において CPG と CPG 経由の反射により神経系と機構とのカップリング (Fig. 1-(a)) を構成し、中程度の不整地での動歩行を実現した [23]。本稿では、ピッチ・ロール・ヨーの三平面内で運動可能な三次元四足歩行ロボット「鉄犬」を用いて行った自律不整地適応のための神経系と機構とのカップリングの構成法と実験の結果について述べる。具体的には、

神経系を大きく「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」に分ける。後者は、脚の位相によって可変な剛性と中立点を持つ仮想バネ - ダンパ系として、各関節での PD 制御器により構成される。CPG 出力による仮想バネ - ダンパ系の切り替えと CPG への関節角フィードバックにより、CPG とピッチ運動は相互に引き込まれ整地歩行実現程度の能力をもつ。不整地適応は仮想バネ - ダンパ系を固定して、主にセンサ入力による CPG 出力位相、すなわち脚位相の調節のみで行われる[†]。特に、CPG へ胴体のロール運動をフィードバックすることにより、ピッチ運動とロール運動は CPG を通して相互に引き込まれ、全体として不整地に適応するように歩容 (脚間位相差) が自律的に調節される。さらに、ピッチ運動・ロール運動という機械的な振動と CPG という神経系の振動がすべて引き込みにより強く関連づけられたために、歩行速度・歩容遷移・不整地適応・安定性・エネルギー消費といった歩行の代表的な問題は相互に強い関係を持つことになる。本稿では、これらの関係を実験データをもとにして評価し、不整地での安定性やエネルギー消費の点で優れた歩行を生成する神経系のパラメータ値の決定方法を示している。

なお、CPG による脚間位相差制御の研究として土屋ら [22] は、デューティ比を変えた時に自律的にエネルギー消費の少ない歩容に遷移させる CPG モデルを提案し、四足ロボットによる整地動歩行実験を成功させている。また、ピッチ面内運動とロール面内運動の関係を扱った研究として佐野ら [28] は、四足ロボットのロール面内運動周期の調節を脚の伸縮を利用して行い、整地において安定したペース歩容を実現している。木村ら [29] は、従来手法を用いた場合の整地四足動歩行における歩行速度・歩容遷移・安定性・エネルギー消費の関係について解析している。

2. 3 次元四足ロボット「鉄犬」

鉄犬の各脚は、ピッチ軸まわりに回転する腰、膝、足首関節と、腰関節ピッチ軸より下部がヨー軸まわりに回転する腰関節を持つ (Fig. 2)。足首関節は受動関節で、通常 Fig. 3-B の状態にあるように輪ゴム (バネ定数 32.2[N/m]) でとめてある。また、リンク接觸間にウレタンゲルを挿入しており、足が地面に接地すると、このウレタンゲルが弾性変形して衝撃を吸収すると共にその変化分を足首関節のポテンショメータにより検出することで足の接地を判別する。また、歩行中段差などに足先が接触した時、受動的に足首関節が回転する (Fig. 3-A) ことによって段差へのつまずきを回避する。結果として、足首関節の角度: ζ により脚の三つの状態、支持脚相 ($\zeta < 3$ [deg])、遊脚相 ($\zeta \simeq 10$ [deg])、障害物へのつまずき相 ($\zeta > 20$ [deg]) を検出することができる。足首以外の関節は DC モータにより駆動される。脚の長さは立脚静止時で 20 [cm]、総質量は 3.1 [kg]、一本の脚と膝下リンクの質量はそれぞれ 0.5 [kg]、0.06 [kg] と軽量化されている。センサとしてエンコーダ、ポテンショメータ、ピッチ - ロール軸まわりの 2 軸レイトイジャイロ、および 2 軸傾斜センサを搭載している。

Patrush [23] における実験でわかった機構的な問題点は、腰関

[†] 機構的に実現された屈曲 / 伸展反射と、胴体ピッチ角度により伸張反射を調節する前庭脊髄反射という例外はある。

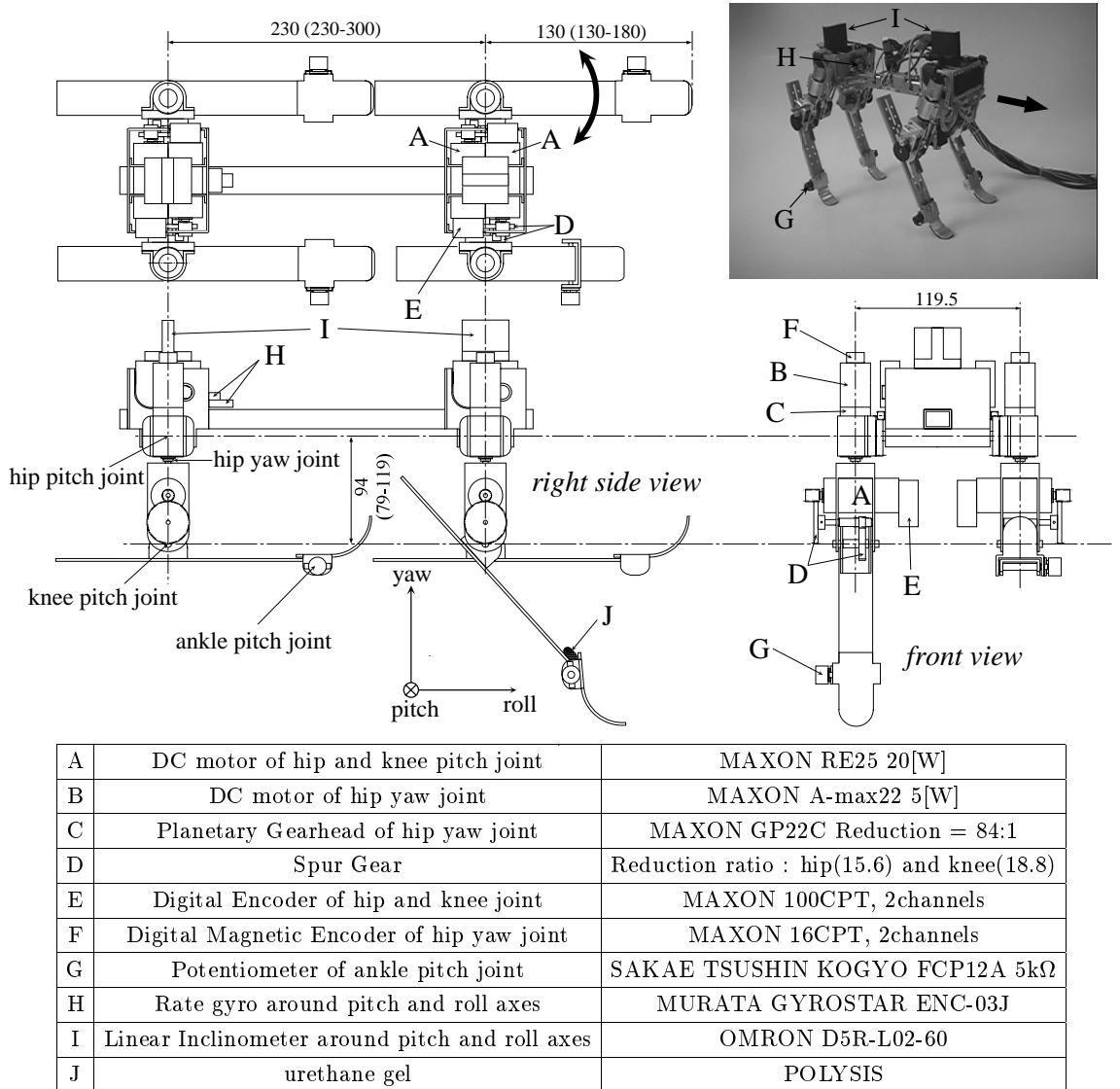


Fig. 2 Draft, photo and specification of Tekken

節ピッチ軸まわりの慣性モーメントが約 $20.9[\text{gm}^2]$ と大きかったため、遊脚時の脚の振りだしが素早く行えなかつたことである。鉄犬ではそれを約 $1.4[\text{gm}^2]$ と非常に小さくすることで、脚の振り出しの遅れにより転倒することが少なくなった。また、Patrush は支持脚時、人間のように膝関節をまっすぐ伸ばした状態で接地していたために、その状態が特異点になり、路面を十分にグリップしないまま腰関節トルクを出力して滑りを生じることがあり、また、接地時に受ける衝撃が大きいため、ロール軸まわりの揺動を誘発していた。そこで、鉄犬では支持脚期においても膝関節を曲げた状態 (Table 1) にすることで滑りを防止し、また、接地時の衝撃を膝関節で吸収することによって胴体のロール揺動を減らし、三次元歩行を可能としている。

3. ピッチ運動の生成と制御

Patrush [23] では、多賀 [11] [12] が二足歩行のシミュレーションに用いたモデルを用いて、神経系である CPG の出力信号を関節トルクとして、ピッチ軸まわりの腰関節に直接出力していた。

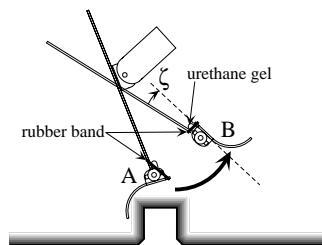


Fig. 3 Passive ankle joint with the spring-and-lock mechanism

この場合、機構から CPG へのセンサフィードバック信号によって関節トルクはある程度調節されるものの、やはり CPG 独自の支配力が強く、下位とのインタラクションが十分に図れていないため歩行状態の変化に適応できず、過剰トルクにより滑りを発生するなどの望ましくない歩行を行なうことがあった。そこで、鉄犬では、生物の伸張反射を参考にし、下位レベルでの仮想バネ・ダンパ系によるローカルな PD 制御により関節トルクを生成することで、環境と機構との力学的相互関係をより密なものとしている。

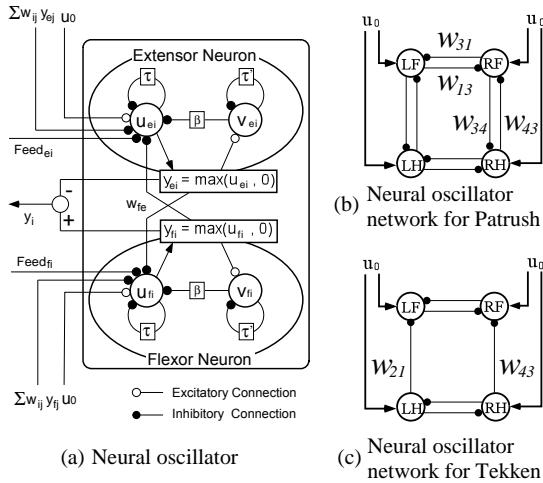


Fig. 4 Neural oscillator as a model of a CPG. The suffix $i, j = 1, 2, 3, 4$ corresponds to LF, LH, RF, RH. L, R, F and H means the left, right, fore and hind leg, respectively.

一方で、CPG は脚相による仮想バネ・ダンパ系の切替指令のみを出力するが、Patrush 同様に各種センサ情報を CPG にフィードバックしているため、様々な歩行状態において適応的な歩行リズムを自律的に生成することが出来る。

以下本稿では、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。

3.1 歩行リズム生成

鉄犬では CPG のモデルとして Patrush と同様に、松岡 [30] により提唱され、多賀が二足歩行のシミュレーションに用いた神経振動子モデルを用いる (Fig. 4)。神経振動子は相互抑制された 2 つのニューロン (伸筋ニューロン、屈筋ニューロン) で構成されており (Fig. 4-(a))、式 (1) の非線形一階連立微分方程式で表される。鉄犬ではこの神経振動子を各脚に一つ備える。

$$\begin{aligned} \tau \dot{u}_{\{e,f\}i} &= -u_{\{e,f\}i} + w_{fe} y_{\{f,e\}i} - \beta v_{\{e,f\}i} \\ &+ u_0 + Feed_{\{e,f\}i} + \sum_{j=1}^n w_{ij} y_{\{e,f\}j} \\ y_{\{e,f\}i} &= \max(u_{\{e,f\}i}, 0) \\ \tau' \dot{v}_{\{e,f\}i} &= -v_{\{e,f\}i} + y_{\{e,f\}i} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、添字: e は伸筋ニューロン、 f は屈筋ニューロン、 i は i 番めの脚を表し、変数: $u_{\{e,f\}i}$, $v_{\{e,f\}i}$ はニューロン内の状態、 $y_{\{e,f\}i}$ はニューロンの出力、 $Feed_{\{e,f\}i}$ はセンサ入力に関する項であり、定数: u_0 は上位からの駆動入力、 β はニューロンの疲労係数、 τ , τ' は $u_{\{e,f\}i}$, $v_{\{e,f\}i}$ の時定数、 w_{fe} は拮抗ニューロン間の結合係数、 w_{ij} は脚 j の神経振動子のニューロン出力 $y_{\{e,f\}j}$ が脚 i の神経振動子のニューロンに入力される時の結合係数を表している。

Fig. 4において CPG の出力は y_i であり、

$$y_i = -y_{ei} + y_{fi} \quad (2)$$

y_i が正のときは屈筋ニューロンの活性を負のときは伸筋ニューロンの活性をそれぞれ意味する。CPG への基本的なセンサ入力として次式で表される「伸張反応」と呼ばれる関節角フィードバックを用いる。

$Feed_{e \cdot tsr} = k_{tsr}(\theta - \theta_0), \quad Feed_{f \cdot tsr} = -Feed_{e \cdot tsr} \quad (3)$

$$Feed_{\{e,f\}} = Feed_{\{e,f\} \cdot tsr} \quad (4)$$

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 は立脚静止時の原点、 k_{tsr} はゲインであり、単独の CPG の場合は添字 i を省略している。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的な運動に引き込まれる。

各脚の CPG を結合することにより CPG ネットワーク (Fig. 4-(b),(c)) を構成すると、各脚の CPG は相互に引き込まれ歩容を生成する。Patrush では Fig. 4-(b) のように対称的な結合を用いてトロット歩容を生成したが、鉄犬では前後について非対称な結合を用い結合係数 $w_{21} (= w_{43})$ を変えることによりトロットからウォークを経てベースまでの歩容を生成する。トロット歩容では対角の脚が、ベース歩容では左右について同側の脚が位相差ゼロで同期して動く。

3.2 仮想バネ - ダンパ系

生物の筋肉・腱はバネ・ダンパ系として働き、中高速の歩行・走行の安定化やエネルギー効率の向上に大きな役割を果たす。筋肉の見かけの粘弾性は、筋肉固有の粘弾性と伸張反射などのフィードバック系の粘弾性の総和として現れる [31]。また、伸張反射による筋剛性は筋張力にほぼ比例し、ネコの歩行中において支持脚相で高く、遊脚相で低いことが知られている [31] [32]。また、Full ら [14] [33] は、SLIP(Spring Loaded Inverted Pendulum) と preflex の概念でセンサ情報を必要としない機械的な(筋肉・腱固有の)粘弾性の重要性を指摘し、その概念は高速で高い不整地踏破性を持つ六足ロボットの開発に適用されている [7] [8]。我々は、SLIP の概念を参考にしつつも神経により調節される中速不整地歩行の実現を目指して、伸張反射により発生し、支持脚 / 遊脚相で変化する筋肉の剛性モデルを採用する。

鉄犬においては、遊脚振り上げ (A)、遊脚振り出し (B)、支持脚復帰 (C) の各運動を生成するために、歩行中の各関節は Fig. 5 に破線で示されるような三つの状態 (A, B, C) の目標角度に PD 制御される。各状態への切替え条件は、

$A \rightarrow B$: 腰関節が状態 A の目標角度に達した

$B \rightarrow C$: CPG の伸筋ニューロンが活性 ($y_i \leq 0$) になった

$C \rightarrow A$: CPG の屈筋ニューロンが活性 ($y_i > 0$) になった

である。

それぞれの状態での各関節の目標角度(バネの中立点)と P ゲイン(バネの剛性)を Table 1 に表す。ここで、 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 (Fig. 6)。 θ_{stance} は歩行速度を調節するための変数、body pitch angle、および body roll angle はそれぞれピッチ軸、およびロール軸まわりの胴体の傾き (Fig. 7 に回転方向を示す)、 $\theta_{C \rightarrow A}$ は $y_i > 0$ になった瞬間の腰関節(ピッチ軸)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(ピッチ軸)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 1 中の定数バ

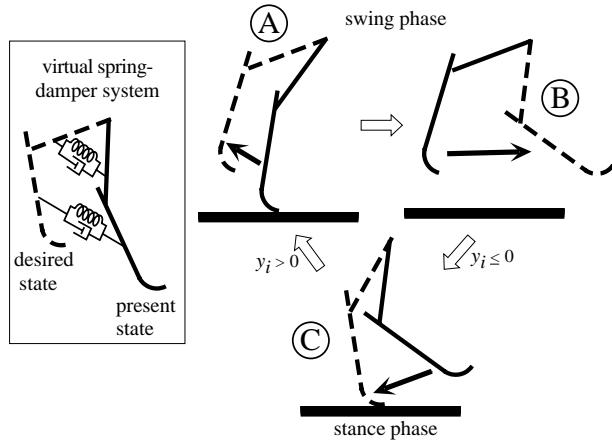


Fig. 5 State transition in the virtual spring-damper system. The desired joint angles in each state are shown by the broken lines.

Table 1 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. 5)

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	$\theta_{stance} +$ 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

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、以下の実験で使用された $G_1 \sim G_8$ 値が付録 A. の Table 2 に示されている。そこでは、ネコでの観測結果と同様に腰・膝関節(ピッチ軸)について支持脚相(C)のPゲイン(G_5, G_7)は遊脚相(B)のPゲイン(G_3, G_6)よりも大きくなっている。D制御(ダンピング)に関してはすべて、目標角速度は 0 [rad/s]、角速度ゲインは 0.03 [Nm·s/rad] と設定する。

鉄犬の関節には高い backdrivability があることにより、結果としてこのような PD 制御系は機構と組み合わせて比較的剛性の低い仮想バネ・ダンパー系(バネの剛性と中立点が可変)を構成する。このようなコンプライアンスのある脚関節は、不整地での受動的な適応性を向上させる。

3.3 CPG-脚ピッチ運動間の引き込み

鉄犬におけるピッチ運動制御の概略が Fig. 6 の spinal cord 部以下に示されている。関節トルクは脊髄 α モータニューロンでの伸張反射に相当する PD 制御系により決定される。3.2節で述べたように、PD 制御系の目標角度と P ゲインは CPG 出力 y_i の位相に基づいて切り替えられる。このような仮想バネ・ダンパー系の切り替えと式(4)における CPG への腰関節角フィードバックの結果として、CPG と脚のピッチ運動は相互に引き込まれ、鉄犬は $w_{\{21,43\}}$ の値に応じた歩容で平地を歩行することが

可能となる[25]。しかし、不整地適応のためにはセンサ情報に基づく調節機構を導入する必要がある[23]。

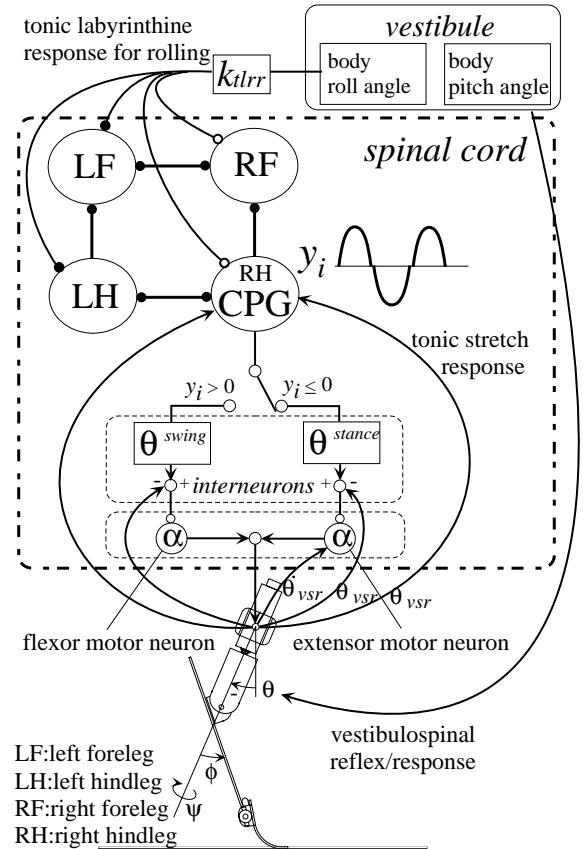


Fig. 6 Control diagram for Tekken. PD-control at the yaw hip and knee pitch joints are eliminated in this figure.

3.4 反射と反応

神経生理学においては、CPG とセンサ入力の関係について「感覚性のフィードバックが CPG を修飾し、CPG の位相情報が反射の調節を行う」こと[16][34]が知られている。この見に基づき Patrush[23]においては CPG 経由の反射として、緊張性伸張反射、前庭脊髄反射、屈曲/伸展反射などが導入された。

関節トルクを発生する反射に関して鉄犬においては、伸張反射が筋粘弾性を与える仮想バネ・ダンパー系として、関節での PD 制御によりすでに導入されている。また、ピッチ軸まわりの胴体の傾きに対して支持脚の腰関節トルクを調節する前庭脊髄反射は、Table 1 における body pitch angle の支持脚相の腰関節目標角度 θ_{stance} への加算としてすでに導入されている。Patush では力センサにより遊脚時のつまずきを検出し、屈曲または伸展反射を起動していたが、短い周期での高速歩行時には、つまずき検出の遅れと脚の大きな慣性のために屈曲反射が遅れて転倒する問題があった。そこで鉄犬では、遊脚期の前半では足先での衝突が、後半では足底での衝突が一般に生じることを利用して、屈曲/伸展反射を Fig. 3 の「バネ・ロック機構を持つ足首受動機構」に置き換える。

式(1)において、CPG へのフィードバック項 $Feed_{\{e,f\}}$ に

種々のセンサ情報を入れ CPG と機構の間に引き込みを発生させることにより、CPG 出力 y_i の位相が調節され、様々な歩行状況に適応した歩行リズムが生成される (Fig. 6)。CPG の位相を調節する反応に関して鉄犬においては、伸張反応が CPG への腰関節角フィードバック : 式 (3),(4) としてすでに導入されている。ピッチ軸まわりの胴体の傾きに対する前庭脊髄反応として、以下の実験すべてにおいて、式 (3),(4) の代わりに次式を用いる。

$$\begin{aligned}\theta_{vsr} &= \theta - (\text{body pitch angle}) \\ Feed_{e \cdot tsr \cdot vsr} &= k_{tsr}(\theta_{vsr} - \theta_0) \\ Feed_{f \cdot tsr \cdot vsr} &= -Feed_{e \cdot tsr \cdot vsr}\end{aligned}\quad (5)$$

$$Feed_{\{e,f\}} = Feed_{\{e,f\} \cdot tsr \cdot vsr} \quad (6)$$

この前庭脊髄反応の効果によって、Patrush の場合と同様に登坂時や段差に乗り上げた時、重力負荷による支持脚の運動の遅れに対応して CPG の位相が支持脚相を延長させるよう自律的に調節され、安定な不整地歩行が実現される。

4. ピッチ - ロール運動の引き込み

4.1 ロール運動・緊張性迷路反応の導入

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。ロール面内運動とピッチ面内運動間の位相差は歩行運動において外乱として働く。3章で導入した CPG はロール運動に対する直接的なフィードバックを持たないので、二つの運動間の位相差を補正するのは困難である。

従って、ここでは、緊張性迷路反応 (tonic labyrinthine response) の定義[†]に基づき、歩行中のロール面内胴体傾斜角度 body roll angle を検出し、式 (7) を CPG のフィードバック項 (式 (8)) に入れることにより (Fig. 6, 左上部)、ピッチ運動とロール運動を同期させる。以後、本稿では式 (7) をロール運動・緊張性迷路反応と呼ぶ。

$$\begin{aligned}Feed_{e \cdot tlrr} &= \delta(\text{leg}) k_{tlrr} \times (\text{body roll angle}) \\ Feed_{f \cdot tlrr} &= -Feed_{e \cdot tlrr}\end{aligned}\quad (7)$$

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

$$\begin{aligned}Feed_e &= Feed_{e \cdot tsr \cdot vsr} + Feed_{e \cdot tlrr} \\ Feed_f &= Feed_{f \cdot tsr \cdot vsr} + Feed_{f \cdot tlrr}\end{aligned}\quad (8)$$

ロール運動・緊張性迷路反応を導入することによって、Fig. 7 のような不整地歩行時において次のような効果が現れる。トロット歩容で歩行中に右前脚が障害物に乗り上げ体が左に傾いた時、式 (7) において (body roll angle) < 0 である。ここで、左後脚では支持脚相なので CPG の伸筋ニューロンが活動中であり、 $\delta(\text{leg}) = -1$ であるので $Feed_{e \cdot tlrr} > 0$ となり、式 (8) により伸筋ニューロンに正のフィードバックが入力されるのでその活動は興奮させられ (Fig. 7 の E+)、その支持脚期間は延長せら

[†]頭部が左右および前後に傾いたとき、傾いた側の肢が伸展し、反対側の肢が屈曲する [35]

れる。逆に、左前脚については遊脚相なので CPG の屈筋ニューロンが活動中であり、屈筋ニューロンに負のフィードバックが入力されるのでその活動は抑制され (Fig. 7 の F-)、その遊脚期間は短縮させられる。結果として、左側脚では過度の重力負荷を支えるため、後脚の支持脚期が延長 (E+) され、前脚の遊脚期が短縮 (F-) されることで、胴体を長く支持する。逆に右側脚では前脚の支持脚期が短縮 (E-) され、後脚の遊脚期が延長 (F+) される。ここで 3.2節で述べたように支持脚の腰・膝関節剛性は遊脚に比べて高いことも関与して、左に傾いた体を戻す効果が働く。さらに、右後脚の遊脚期の延長 (F+) は、次の支持脚相のための確実な着地に貢献する。

このように、ロール運動・緊張性迷路反応を用いピッチ運動の左右脚間位相差を調節することにより、過剰な胴体ロール運動とロール運動位相の変化を抑制し、不整地での適応性を向上させることが出来る。その有効性は 6章の実験結果に示されている。

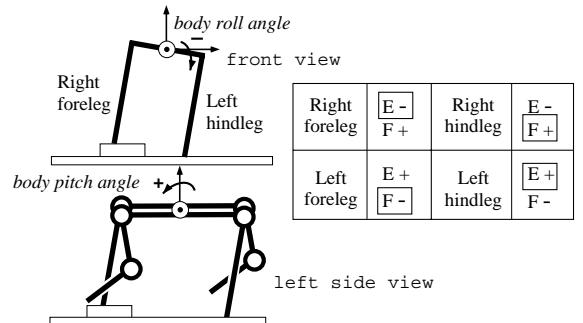


Fig. 7 A tonic labyrinthine response for rolling. E or F means the extensor or flexor neuron of a CPG, respectively. '+' or '-' means the inner state of the neuron is increased or decreased by $Feed_{\{e,f\} \cdot tlrr}$, respectively.

4.2 広域安定余裕を用いたロール運動・緊張性迷路反応の有効性の検証

本研究では、支持脚、遊脚に関わらず重心の鉛直投影点から各足先の鉛直投影点を頂点とする多角形の辺までの最短距離を広域安定余裕 (wide stability margin) とし、安定判別の指標とする (Fig. 8)。ここで広域安定余裕は運動計画ではなく運動評価に用いられるので、簡単のために慣性力などを無視している。Fig. 8において、遊脚である足がその直後に路面に接地すると仮定すれば、その時の広域安定余裕は従来からある安定余裕 [36] と同義になるため、広域安定余裕の確保は歩行のための十分条件となる。

式 (1) の CPG 時定数 τ と式 (7) の k_{tlrr} の値の組み合わせを変えながら、2[m] の距離を停止状態から 0.5[m/s] の速度で 3 回整地歩行させた時の広域安定余裕の最小値の平均を Fig. 9 に示す。ここで、縦軸の広域安定余裕値は胴体幅 $w = 119.5[\text{mm}]$ によって正規化されている。また、 τ の値に対応する歩行周期も横軸に表示されている。Fig. 9において、短周期歩行 (歩行周期約 0.4[s] 以下, $\tau < 0.03$) では、 $k_{tlrr} = 0$ すなわちロール運動・緊張性迷路反応なしでも高い広域安定余裕が得られている。これは、短周期歩行時は、ロール面内における支持脚の接地点まわりの角運動量変化が小さくなり、その結果、搖動振幅が小さい

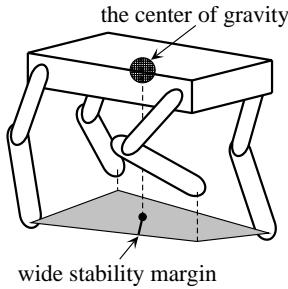


Fig. 8 The definition of the wide stability margin

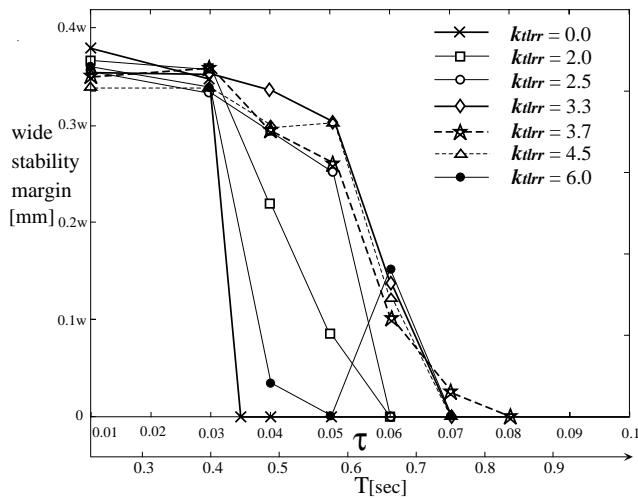


Fig. 9 Wide stability margin measured in experiments ($\theta_{stance} = 0.8$)

ロール運動とピッチ運動との同期をとる必要がなくなるからである。しかし、逆に支持脚の接地点まわりの角運動量変化が大きくなる中・長周期歩行(歩行周期約0.4[s]以上, $\tau > 0.03$)においては、 $k_{tlrr} = 0$ ではピッチ・ロール運動間の同期がとれず、転倒してしまう。よって、本稿では $\tau < 0.05$ において広域安定余裕 $> 0.3w$ [mm] の歩行が行える $k_{tlrr} = 3.3$ を最適値として以下のすべての実験において適用する。

5. 整地歩行の性能評価

5.1 変数と定数

θ_{stance} , τ , $w_{21}(=w_{43})$ が歩行速度、歩行周期、歩容をそれぞれ変化させるための変数である。例えば τ のみを小さくすると、歩行周期が短くなるが、Fig. 5において状態(B)の期間が短くなるので歩幅が短くなり、結果として歩行速度はほぼ一定で保たれる。しかし、一般には、これら変数は互いに影響し合い、また、床面との相互作用の結果として実際の運動は生じるので、これら変数と歩行指標(歩行速度、歩行周期、歩幅、デューティ比、歩容)の関係を一対一で規定することは困難である。

θ_{stance} , τ 以外の仮想バネ・ダンバ系を含む神経系のパラメータは、以下の実験で路面(整地、不整地)に関係なく一定であり、実験的に決められた値が Table 1 と付録 A. の Table 2 に示されている。また、P ゲイン: $G_1 \sim G_8$ のロバスト性が 5.4 節において評価されている。

5.2 歩行速度変更時の自律歩容遷移

5.1 節でも述べたように、鉄犬ではピッチ運動とロール運動が CPG と相互に引き込んでいるために、歩行速度・歩行周期・歩容は強く相互依存している。 $|\theta_{stance}|$ を増加させると、支持脚は Fig. 5 の状態(C)において強く後ろに引っ張られて速く動くので、CPG の伸筋ニューロン活動期間は関節角フィードバック式(3)の影響で短くなる。結果として支持脚期間が短くなるので、歩行周期とデューティ比が減少して、歩行速度が増加する。

Fig. 10 は、 $k_{tlrr} = 3.3$, $\tau = 0.04$, $w_{21,43} = -0.57$ において、歩き始めてから 3.5 [s] 後に θ_{stance} を -0.7 から -0.8 に変更することによって、歩行速度を 0.3 [m/s] から 0.5 [m/s] に上げた整地歩行実験結果を表している。Fig. 10 の下図は、各脚の足首関節角度 ζ (Fig. 3) を表したもので、2 章で述べたように、これによって脚相(支持脚、遊脚、つまずき)を判別することができる。Fig. 10 の下図より、低速時にはウォーク歩容が現れていることがわかる。これは、歩行周期が長くなることによってロール胴体運動が大きくなり、ロール運動・緊張性迷路反応の影響を強く受けた結果によるものである。4.1 節での Fig. 7 の説明と同様に、ロール面内において胴体が傾き、重力負荷が大きくかかった体側面では、ロール運動・緊張性迷路反応によって支持脚相が延長・遊脚相は短縮され、対側では逆に遊脚相が延長・支持脚相は短縮される。すなわち、胴体傾斜角が大きくなるほど左右各側面がそれぞれ同位相に引きつけられることになり (Fig. 10, 下図)、その結果がウォークとなっている。ウォークではデューティ比が 0.75 になると、常時 3 脚支持による安定した歩行を行うため、歩行周期 0.64 [s] 程度による長周期での歩行が可能となっている。このような長周期歩行はエネルギー効率の改善にも貢献する(5.3 節)。一方、4 [s] 後には歩行周期が 0.48 [s] 程度になりロール胴体運動が小さくなっている (Fig. 10, 上図)。従って、ロール運動・緊張性迷路反応の影響が低下し、CPG ネットワークの結合係数 $w_{21,43}$ により規定される拘束が優先され、歩容はトロットに遷移した。

現在までに、ウォーク歩容 ($\tau = 0.06, \theta_{stance} = -0.65, w_{21,43} = -0.57$) の最小速度 0.2 [m/s] と、トロット歩容 ($\tau = 0.03, \theta_{stance} = -0.85, w_{21,43} = -0.57$) の最大速度 1.0 [m/s] の整地定常歩行が実現されている。

5.3 エネルギ消費

$k_{tlrr} = 3.3$ において、 τ を変更して Fig. 9 と同様の実験を行った時に、モータで発生するジュール熱損失から計算した消費エネルギーを Fig. 11 に示す。これによると、低速 (0.05~0.2 [m/s]) では、 τ が大きい歩行、つまり周期が長い歩行の方がエネルギー消費が少ないことがわかる。しかし、安定性に関しては τ が小さい歩行が望ましい (Fig. 9)。従って、 τ の決定に際して、安定性とエネルギー消費はトレードオフの関係にある。本稿では実験する不整地のレベルに合わせ、特に指定しない場合はすべて $\tau = 0.04$ を用いている。6.4 節では、安定性とエネルギー消費のトレードオフを考慮した τ 決定法の一例を示す。

5.4 PD 制御パラメータと歩行安定性の関係

PD 制御に用いられる P ゲイン (Table 1) のロバスト性に関して広域安定余裕の点から考察する。Table 1 の G_1 から G_8 のパラメータを一つだけ広範囲に変更し、2 [m] の距離を停止状態か

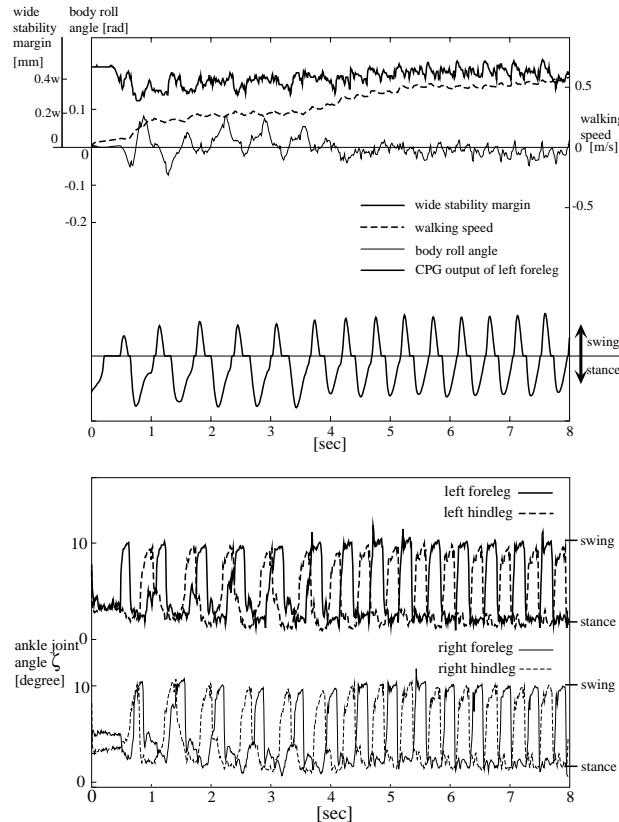


Fig. 10 The result of the experiment of changing walking speed with constant $\tau (=0.04)$ and $w_{\{21,43\}} (=0.6)$. θ_{stance} was changed from -0.7 [rad] to -0.8 [rad] at $t = 3.5$ [s]. We can see especially in the first half that CPG output and rolling motion of the body were mutually entrained.

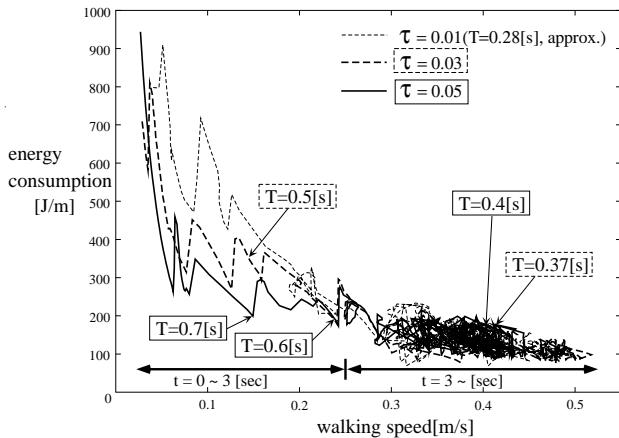


Fig. 11 The relation between the walking speed and the energy consumption in walking with three different values of τ . θ_{stance} was changed at 3 [s] in the same way as in Fig. 10. The cyclic period of walking, T at several instants are also shown for each value of τ .

ら 0.5 [m/s] の速度で 3 回整地歩行させた時の広域安定余裕の最小値の平均を Fig. 12 に示す。100[%] 時の $G_1 \sim G_8$ が本稿の他の実験で使用されたパラメータ値 (付録 A:Table 2) である。Fig. 12 より、他の実験で使用された PD 制御のパラメータは安

定性の点で大体適切な値であること、腰、および膝関節 (ピッチ軸) の支持脚相での P ゲイン (G_5, G_7) と腰関節 (ヨー軸) の P ゲイン (G_8) 以外のパラメータについては広い範囲において高い広域安定余裕が得られていることがわかる。また、 G_5, G_7, G_8 は不整地適応性に大きな影響を与えるパラメータであるので、下限に注意しながら設定する必要がある。

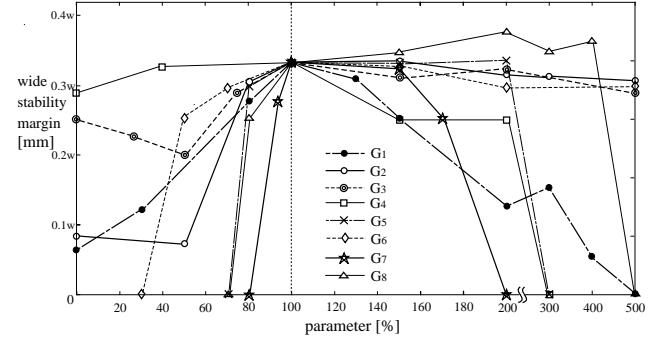


Fig. 12 Wide stability margin measured in changing gain parameters of PD-controller in Table 1 ($k_{tlrr} = 3.3$, $\tau = 0.04$, $\theta_{stance} = 0.8$)

6. CPG の位相調節と反射による不整地適応

4. 1節で述べたように、ピッチ、ロール平面間の振動位相差は不整地歩行時には顕著に生じるので、ロール運動・緊張性迷路反応は必須となる。ここでは、式 (7) のロール運動・緊張性迷路反応を導入した場合 ($k_{tlrr} = 3.3$) としない場合 ($k_{tlrr} = 0$) において不整地歩行実験を行い、ロール運動・緊張性迷路反応の不整地歩行への有効性について検証する。ここで提示された結果は數回試行された実験結果のうちの一つで、典型例である。

6.1 ロール運動・緊張性迷路反応を適用しない段差乗り越え
式 (7) において $k_{tlrr} = 0$ の時、高さ 2 [cm]、奥行き 4 [cm] の段差乗り越え歩行実験を行った結果を Fig. 13 に示す。

鉄犬は、歩行開始から 5.2 [s] に右前脚が段差に乗り上げて (A)、即座に左に大きく傾いた (B)。この後、左後脚が遊脚に移行した (C) ために、左前脚一本で胴体を水平に戻そうとするが、失敗している。その後も安定な歩行状態への収束を試みるが、ピッチ面内運動に対するフィードバックしか適用していないために適切な CPG 位相の調節が出来ず、左右、前後に大きく揺動しながら歩行をつづけ (E)、 10 [s] で転倒した。

6.2 ロール運動・緊張性迷路反応を適用した段差乗り越え
式 (7) において $k_{tlrr} = 3.3$ の時、6.1節と同様の不整地歩行実験を行った結果を Fig. 14 に示す。

5 [s] に左後脚のつまずき転倒回避 (A) 後、段差上に左後脚が乗り上げ、左前方に傾きながら (B)、左後脚が段差上から路面に滑り落ちた。左に大きく傾いている時 (B)、4.1節の Fig. 7 の説明で述べたロール運動・緊張性迷路反応の効果によって、左後脚の支持脚期間が延長され (C)、左前脚の遊脚期間が短縮されており (D)、逆に右後脚の遊脚期間が延長されている (E)。結果として 5.4 [s] には胴体の左への傾きは小さくなり、 6 [s] ではほぼ元に戻っている。5.2節で述べたように胴体のロール面内傾きが大きい間はロール運動・緊張性迷路反応の影響でウォーク

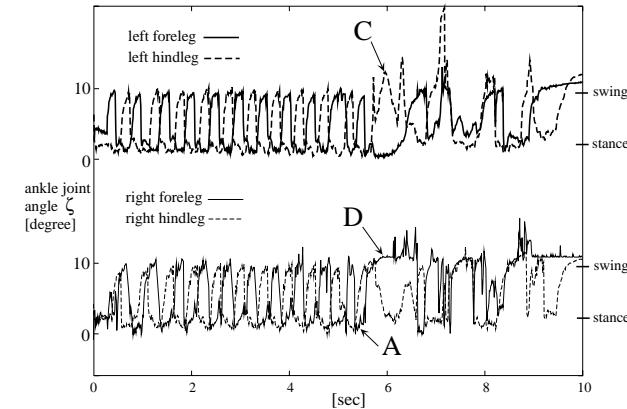
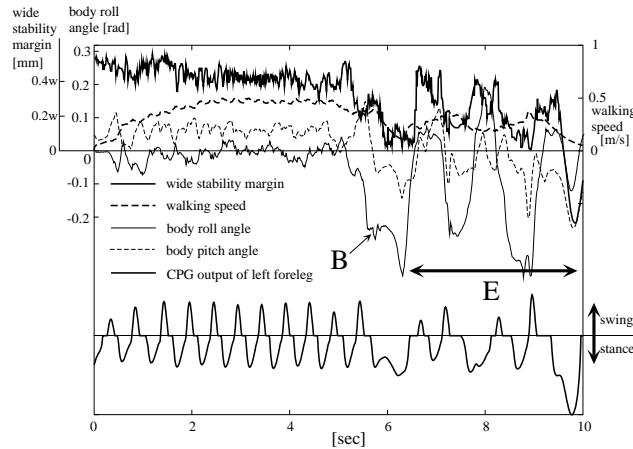


Fig. 13 An experiment of walking over a step 2 [cm] in height without a tonic labyrinthine response ($k_{tlrr} = 0$, $\tau = 0.04$, $\theta_{stance} = -0.8$). The right foreleg landed on the obstacle at (A) and lost contact with the obstacle afterward at (D), since the body was inclined to left too much at (B).

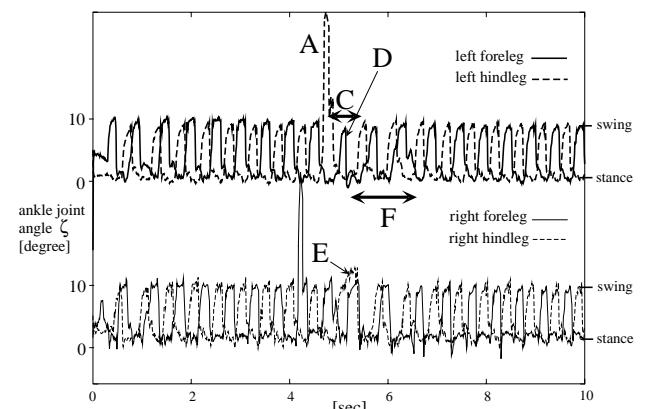
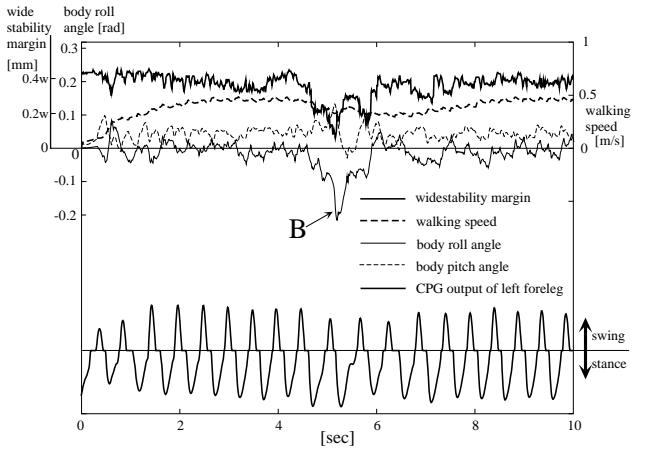


Fig. 14 An experiment of walking over a step 2 [cm] in height with a tonic labyrinthine response ($k_{tlrr} = 3.3$, $\tau = 0.04$, $\theta_{stance} = -0.8$)

歩容が現れている(F)が、6.8 [s]で再びトロット歩容に戻っている。上記の実験により、ロール運動・緊張性迷路反応によるCPGの位相調節は、不整地歩行において非常に有効であることが示された。

6.3 より高度な不整地への適応

3.4節と4.1節で述べたCPGの位相調節(反応)と反射の効果により、鉄犬ではあらかじめ予測されていない不整地に対する自律適応が可能となっている。

Fig. 15にその不整地歩行中の画像を示す。(a)高さ4[cm]、奥行き8[cm]の障害物へのつまずきや乗り上げ後の転倒回避、(b)進行方向10°の坂の昇降、(c)高さ2[cm]の障害物や6°の坂を不連続に複数個置いた不整地踏破、(d)横方向に5°と3°の傾斜を持つ坂がある不整地踏破などが、仮想バネ・ダンパ系を含む神経系のパラメータを固定した状態で歩容の自律的な調整によって実現されている。

6.4 安定性とエネルギー消費のトレードオフを考慮した歩行周期決定法

5.3節では、 τ を決定する際に安定性とエネルギー消費はトレードオフの関係にあると述べた。そこで、整地歩行時など安定性

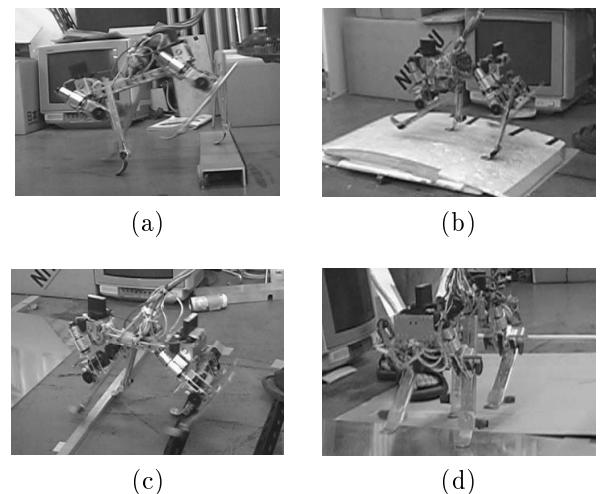


Fig. 15 Snapshots of walking over irregular terrains

の高い時すなわち広域安定余裕の大きい時は周期を長く(τ を大きく)して低エネルギー消費を確保し、不整地歩行時など広域安定余裕の小さい時は周期を短く(τ を小さく)して安定性を優先することを考える。ここでは、歩行中に計測された広域安定余裕によって逐次 τ を変化させる式(9)を導入して、Fig. 16のような

一部不整地のある路面上で実験を行った。

$$\tau = 0.12(\text{wide stability margin})/w \quad (9)$$

ここで、鉄犬の横幅を $w=119.5[\text{mm}]$ として正規化を行い、広域安定余裕 = $0.3w$ で $\tau(=0.036)$ が得られるように係数を設定している。

Fig. 17 と Fig. 18 はそれぞれ、 τ を短周期で固定 ($\tau = 0.005$) にした場合と、式 (9) で可変にした場合の歩行中の安定性とエネルギー消費を示したものである。Fig. 17において、Fig. 16 の不整地部分を踏破している時間は固定 τ 時、8~9.5 [sec]、可変 τ 時、7~9.3 [sec] である。Fig. 17において、固定 τ に対して広域安定余裕の最小値は $0.25w$ 程度であり、 $\tau(=0.005)$ が非常に小さいので安定な歩行が得られていることがわかる。一方、式 (9) による可変 τ に対して、不整地歩行中に時刻 9.3 [s] で広域安定余裕が $0.18w$ と小さくなっている。しかし、その瞬間、式 (9) によって τ を小さく ($=0.02$) して短周期歩行にしているため転倒することなく、2 秒間程度で広域安定余裕は $0.4w$ 程度に復帰していることがわかる。 τ を長周期で固定 ($\tau = 0.05$) にした場合、Fig. 16 の不整地での歩行は不安定になった。

Fig. 18 の歩行速度 $0.3[\text{m/s}]$ あたりで、固定 τ に対するエネルギー消費は、可変 τ に対するエネルギー消費よりも大きくなっている。ここで、Fig. 18 の領域 B でのエネルギー消費は瞬間的な不整地適応のために消費されるエネルギーであるため、その時間積分は大きくはならない。結果として、両者とも 13 [s] で Fig. 16 を踏破したが、エネルギー消費の積分値は固定 $\tau(=0.005)$ に対して $1020[\text{J}]$ 、式 (9) による可変 τ に対して $650[\text{J}]$ となった。すなわち、式 (9) を用いて τ を可変にすることにより、エネルギー消費が小さく、かつ安定性も確保した歩行を実現することが出来た。

将来的には、視覚などの上位器官によって歩行路面の不整地度を前もって計測し、安定性とエネルギー消費の優先度を判定しながら適切な τ を決定するなどの処理が望まれる。

7. おわりに

本稿で提案された生物規範型歩行では、CPG・センサ入力・反射・歩行機械間の関係のみが簡潔に定義され、運動は神経系と機械系がカップリングされた力学系と環境との相互作用により創発的に生成される。ここで、適切な適応が生成されるためには神経系と機械系を注意深く設計する必要がある。本稿では動物の歩行についての生物学や神経生理学の知見を参考にして、CPG・反応・伸張反射やその他の反射からなる神経系の構造を新たに提案した。さらに屈曲反射 / 伸展反射の機械的実現として、受動バネ - ロック機構を持つくるぶし関節を導入した。仮想バネ - ダンパ系は、鉄犬が軽量な脚と関節での高い backdrivability を持つことにより有効となった。

本稿の目的は、自律適応を発生可能な機構と神経系の設計手法を明らかにすることであった。結論として、動歩行特有の問題を考慮した上で、CPG (Central Pattern Generator) と呼ばれるリズム発生器、センサ入力による CPG 位相の調節、剛性と中立点可変の仮想バネ - ダンパ系という構成要素間の協調が本質的に重要であり、ピッチ運動 - CPG - ロール運動という三者間の相互引き込みの結果、歩行速度・歩容遷移・不整地適応・安定性・工

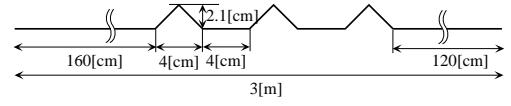


Fig. 16 Irregular terrain used for Fig. 17 and Fig. 18.

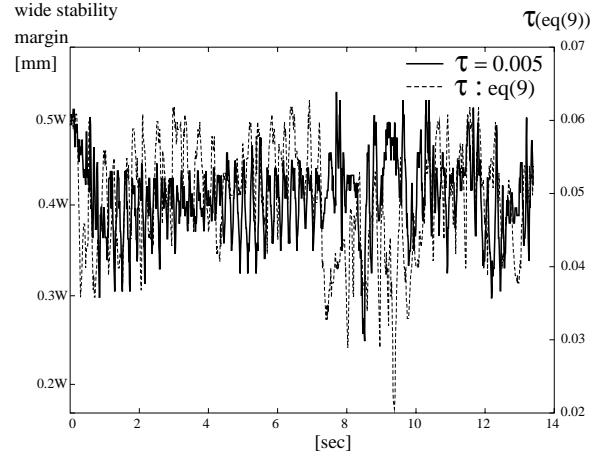


Fig. 17 Wide stability margin while walking over terrain shown in Fig. 16 ($\theta_{stance} = -0.7$). The cyclic period of walking corresponding to the constant value $\tau(=0.005)$ is approx. 0.25 [s]. The cyclic period of walking corresponding to the various value of τ (0.02~0.065) is approx. 0.32~0.7 [s].

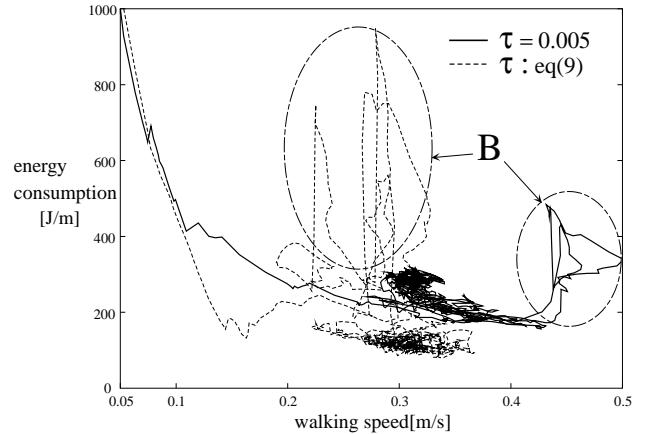


Fig. 18 Energy consumption while walking over terrain shown in Fig. 16 with the constant value of $\tau(=0.005)$ and the various value of τ calculated using Eq.(9). The dominant walking speeds in both walking are almost equal (approx. 0.3 [m/s]).

エネルギー消費といった歩行の代表的な問題が非常に少数のパラメータで規定・評価できることを本稿は示すことができた。これは、視覚を用いた適応・学習、神経系パラメータと機構の関係の安定性とエネルギー消費の観点からの解析、仮想バネ - ダンパ系を機構で実現することによるエネルギー消費の改善、といった将来の課題に明るい指針を示している。

謝辞 本研究は東電記念科学技術財団の研究助成を受けて行われ、東京精機株式会社には鉄犬製作を委託しました。また、

Dr.Cohen には生物学、および神経生理学における貴重な助言、所見を頂きました。ここに関係各位への感謝の意を表します。

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.Cheow, 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] M.Buehler et al: "Scout: A simple quadruped that walks, climbs and runs", *Proc. of ICRA98*, pp. 1707-1712, 1998.
- [7] 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.
- [8] J.G. Cham, J. Karpick, J.E. Clark, and M.R. Cutkosky: "Stride Period Adaptation for a Biomimetic Running Hexapod", *Proc. of ISRR2001*, pp.77-87, 2001.
- [9] 特集: "ロボティクスにおける創発と進化", 日本ロボット学会誌, vol.15, no.5, pp.1-41, 1997.
- [10] 特集: "創発システム研究の新たな展開", 計測と制御, vol.38, no.10, pp.591-604, 1999.
- [11] G. Taga, Y. Yamaguchi, and H. Shimizu: "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators", *Biolog. Cybern.*, vol.65, pp.147-159, 1991.
- [12] G. Taga: "A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion II. - real-time adaptability under various constraints", *Biolog. Cybern.*, vol.73, pp.113-121, 1995.
- [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] R.J. Full, and D.E Koditschek: "Templates and anchors: neuromechanical hypotheses of legged locomotion on land", *J. of Experimental Biology*, vol.202, pp.3325-3332, 1999.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 宮脇, 多賀, 國吉, 長久保: "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.1, pp.87-93, 2000.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] W. Ilg, J. Albiez, H. Jede, K. Berns, and R. Dillmann: "Adaptive periodic movement control for the four legged walking machine BISAM", *Proc. of ICRA99*, pp. 2354-2359, 1999.
- [21] M.A. Lewis, R. Etienne-Cummings, A.H. Cohen, and M. Hartmann: "Toward biomimetic control using a custom aVLSI CPG chips", *Proc. of ICRA2000*, pp. 1289-1295, 2000.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] H. Kimura, Y. Fukuoka, Y. Hada, K. Takase: "3D adaptive dynamic walking of a quadruped robot by using neural system model", *Proc. of CLAWAR2001*, pp.97-104, 2001.
- [26] 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.
- [27] H. Kimura, Y. Fukuoka, Y. Hada, K. Takase: "Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain using a neural system model", *Proc. of ISRR2001*, pp.88-97, 2001.
- [28] 佐野, 古莊, 尾閑: "離散時間モデルを用いた歩行周期制御に基づく4足ロボットのベース歩行", 日本ロボット学会誌, vol.9, no.7, pp.865-876, 1991.
- [29] 木村, 下山, 三浦: "四足動歩行ロボットの力学的解析", 日本ロボット学会誌, vol.6, no.5, pp.367-379, 1988.
- [30] K. Matsuoka: "Mechanisms of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators", *Biolog. Cybern.*, vol.56, pp.345-353, 1987.
- [31] 赤澤: "運動制御と筋特性", 計測と制御, vol.33, no.4, pp.304-309, 1994.
- [32] K. Akazawa, J.W. Aldridge, J.D. Steeves, and R.B. Stein: "Modulation of stretch reflexes during locomotion in the mesencephalic cat", *J. of Physiol.*, vol.329, pp.553-567, 1982.
- [33] R.J. Full: "Biological inspiration: lessons from many-legged locomotors", *Robotics Research* 9, J.M. Hollerbach and D.E.Koditschek Eds, Springer London. pp.337-341, 2000.
- [34] A.H. Cohen and D.L. Boothe: "Sensorimotor Interactions During Locomotion: Principles Derived from Biological Systems", *Autonomous Robotics*, vol.7, no.3, pp.239-245, 1999.
- [35] 南山堂・医学大辞典 18 版, 南山堂, p.1211, 1998.
- [36] R.B. McGhee and A.A. Frank: "On the stability properties of quadruped creeping gaits", *Math. Biosci.* vol.3, pp.331-351, 1968.

付録 A. Values of the parameters used in experiments

Table 2 Parameters used in experiments

parameters	value	parameters	value
u_0	1.0	θ_0 [rad]	-0.87
τ'	0.6	G_1 [Nm/rad]	7.0
β	3.0	G_2 [Nms/rad]	0.5
w_{fe}	-2.0	G_3 [Nm/rad]	0.4
$w_{\{13,31,24,42\}}$	-2.0	G_4 [Nms/rad]	1.4
$w_{\{12,34\}}$	0	G_5 [Nm/rad]	2.0
$w_{\{21,43\}}$	-0.57	G_6 [Nm/rad]	1.0
k_{tsr} [1/rad]	3.0	G_7 [Nm/rad]	2.6
k_{tlrr} [1/rad]	3.3	G_8 [Nm/rad]	1.0

福岡 泰宏 (Yasuhiro Fukuoka)

1974年1月12日生。1996年愛媛大学工学部電気電子工学科卒業。2000年電気通信大学情報システム学研究科博士前期課程修了。現在、博士後期課程在学中。博士前期課程より生物規範型四足歩行ロボット制御の研究に従事。第17回日本ロボット学会研究奨励賞受賞。(日本ロボット学会学生会員)

木村 浩 (Hiroshi Kimura)

1961年2月5日生。1983年東京大学工学部機械工

学科卒業。1988年東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻博士課程修了。工学博士。東北大学工学部助手、電気通信大学講師を経て、現在、電気通信大学情報システム学研究科助教授。1995年-1996年カーネギーメロン大学客員研究員。歩行ロボット、知能ロボットの研究に従事。1989年度日本ロボット学会論文賞受賞。日本機械学会等の会員。
(日本ロボット学会正会員)