

4足ロボットの生物規範型不整地適応動歩行

—自立型「鉄犬2」による屋外歩行の実現—

福岡泰宏^{*1} 木村 浩^{*2}

Biologically Inspired Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped on Irregular Terrain
—Realization of Walking in Outdoor Environment using a Self-contained Robot: “Tekken2”—

Yasuhiro Fukuoka^{*1} and Hiroshi Kimura^{*2}

We describe efforts to induce a quadruped robot to walk with medium walking speed on irregular terrain based on biological concepts. We so far reported our experimental results of dynamic walking on terrains of medium degrees of irregularity with a planar quadruped robot “Patrush” and a three-dimensional quadruped robot “Tekken1”. What we discussed and experimentally examined in those studies was how to design sensorimotor coordination system for adaptive dynamic walking. In this paper, we make the definition of biologically inspired control and summarize how to construct the neural system while introducing the nervous system of animals, relating studies on computational neuroscience and robotics, and our former studies using Patrush and Tekken1. We propose the necessary conditions for stable dynamic walking on irregular terrain in general, and design the mechanical system and the neural system by comparing biological concepts with those necessary conditions described in physical terms. PD-controller at joints constructs the virtual spring-damper system as the visco-elasticity model of a muscle. The neural system model consists of a CPG (central pattern generator), reflexes and responses. We add several new reflexes and responses in order to satisfy the necessary conditions for stable dynamic walking in outdoor environment. We validate the effectiveness of the proposed neural system model control by making a self-contained quadruped robots called “Tekken2” walk on natural ground. Consequently, we successfully propose the method to integrate CPGs and sensory feedback for adaptive dynamic walking of a quadruped.

Key Words: Quadruped Robot, Dynamic Walking, Irregular Terrain, Central Pattern Generator (CPG), Reflex, Response, Entrainment, Autonomous Adaptation, Emergence, Natural Ground

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。1脚[1], 2脚[2]~[6], 4脚ロボット[7]を用いた不整地歩行・動歩行もある程度は実現されている。しかし、これらの研究の多くは「段差の高さのみ未知」、「坂の傾きのみ未知」など、部分的に未知ではあるがほぼ定型な不整地の踏破を対象としており、このような不整地においては、それに対応できる歩行アルゴリズムを作成し動的に適応させることは可能である。しかし、自然環境のように非定型的で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6脚ロボッ

トの研究が挙げられる[8][9]。筆者らの現在の研究目的は、6脚ロボットよりも不安定な哺乳類型の4脚ロボットを用い、路面についてより少ない情報で（例えば、視覚情報にできるだけ頼らずに）非定型的な不整地上での自律的な高速移動を実現することにある。

脚ロボットを含め、従来のロボット工学における問題点の一つは、外乱、および不測の事象に対する自律適応に乏しいことである。近年、熱流体系や生物でのパターン生成を非平衡開放系、すなわち複雑系の振る舞いととらえる研究の進展に影響されて、ロボットの自律適応を「力学特性を持つ要素」と「要素間の力学的相互作用」という非線形力学システムの中での創発として実現する考えは、歩行運動制御の分野[10]~[14]だけでなく、認知と行動生成[15]~[18]や情報処理[19]の分野でも繰り返し述べられている。

一方、歩行に関与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

原稿受付 2006年3月15日

*¹茨城大学工学部知能システム工学科

*²電気通信大学大学院情報システム学研究科

¹Ibaraki University

²Univ. of Electro-Communications

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[20]～[22]。多賀ら[11][23][24]は「環境を外乱とみなすのではなく、環境と身体との力学的相互作用によって創発的に生み出されるのが歩行である」と定義し、CPGと反射からなる神経モデルを用いたピッチ面内での2足歩行をシミュレーションによって実現した。同様な神経モデルを用いたシミュレーション[25]～[29]や実機[30]～[36]による歩行運動生成の従来研究が数多く存在するが、不整地自律適応を明確な目的とし実機により実現した例は筆者らのこれまでの研究[37]～[39]以外には数は少ない。

筆者らは[37]において、ピッチ面内でのみ運動可能な4脚ロボット「Patrush」を用いCPGと反射の組み合わせで簡単な不整地歩行を実現したがCPGとセンサフィードバックの統合についての考察は不十分であった。一方、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」と[21][40]が知られているが、その詳細なメカニズムは明らかになっていない。そこで、[38]においては、多賀らの神経モデルを拡張する形でCPG経由の反射（反応）を提案し、Patrushを用いて坂・段差・うねりのある路面での自律適応歩行を実現したが、比較的大きな時定数を持つCPGを経由する反応ではしばしば応答に遅れが生じ転倒するなどの問題点が指摘された。このような問題点を解決するために筆者らは[39]において、連続的、および瞬間的な外乱の両方に適応可能なCPGとセンサフィードバックの統合法を提案し、ピッチ・ロール・ヨー面内で運動可能な「鉄犬1」を用いて屋内での坂・段差などのある路面での自律適応歩行を実現した。さらに、筆者らは[41]において完全自立型「鉄犬2」を用いた屋外歩行について簡単に報告している。

本論文では、最初に脚式移動生成・制御の枠組について述べ、神経生理学などの知見を紹介しながら生物規範型制御を定義する。次に筆者らが行った4脚ロボットの不整地自律適応研究の成果、特に、「CPGを中心とする中枢システムとセンサフィードバックの統合法」について述べる。さらに、屋外非定型環境での歩行を実現するために鉄犬2に新たに導入されたセンサフィードバックの説明とその有効性の検証について詳細に述べる。

2. 脚式移動と不整地適応

従来の脚式移動研究について概観し、3章において提案する生物規範型制御を位置づけるために、まず最初に脚式移動生成・制御の枠組について述べ、次に脚式移動安定化に貢献する個々の制御を三つの手法に分類する。次に機構や神経システムの設計のもとなる、不整地適応のための必要条件について述べる。

2.1 脚式移動生成・制御の枠組

筆者らはバイオメカニクス[42]、神経生理学[20]、ロボット工学の知見を参考にして、Table 1に示すように脚式移動生成・制御をゼロ・モーメント・ポイント（ZMP）を指標とする手法

とリミットサイクルを構成する手法に大別し、移動速度に応じて適切な生成・制御手法を用いることを提案している[13][43]。ここで、ZMPは重力や慣性力などの合力の床面への投影点であり、ZMPがfootの作る多角形内に維持されるように体幹や脚を制御する手法の有効性が2脚ロボットなどの姿勢制御や低速歩行で示されている[3][5][6]。しかし、各ステップサイクルで大きな質量を持つ上体をアクチュエータにより加減速する必要があるので、エネルギー効率の観点から中高速の移動には適さないと考えられる。

一方、リミットサイクルを構成する手法は、倒立振子モードやバネ・質量系などのナチュラルダイナミクスを利用して、エネルギー効率においては優れているが、歩行・走行周期に上限が存在する[44]。また、動物の高速走行においてはバネーダンパン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、中速移動では神経系による調節が支配的であることが指摘されている[42]。この知見に基づき、本稿で提案するCPGと反射という神経系で構成される生物規範型制御は中速歩行を対象にした制御手法であるとする。

2.2 脚式移動安定化の手法

JindrichとFull[45]は脚式移動の安定化のために以下の[a]、[b]が一般に利用可能であると述べており、本稿ではさらに[c]を追加する。

[a] 各ステップサイクル内での関節トルクの調節

[b] 遊脚相から支持脚相に遷移した瞬間の脚初期状態の調節

[c] 脚相（遊脚相・支持脚相）の切り替えタイミングの調節

数多くある脚式移動の安定化に貢献する制御（調節）は、これら3種に分類される。例えば、ZMPを指標とした制御[3][5][6]を含む従来の安定化制御の多く[2][4][7]は手法[a]に属する。手法[b]は、遊脚接地角度の調節†[46]～[49]や、支持脚・遊脚間の脚剛性の切り替え[23][24][39][44][47]を含む。また、一定の遊脚接地角度を保つことによって走行速度や跳躍高さを陽に計測することなく安定化できることが指摘されおり、そのような機構による自己安定化[8][9][42][50][51]も手法[b]に属すると考えられる。

手法[c]の例としては、筆者らはセンサ情報によるCPGの出力位相の調節として反応を用いている[37]～[39]。また、6脚[9]と4脚[51]の不整地走行の安定化において、接地センサにより計測される支持脚期間による次のステップサイクルでの脚相の調節が提案されている。

もちろん、これら三つの手法は完全に独立しているわけではない。通常、これらの安定化手法は組み合わせて用いられる。例えば5.4.2項で述べるように、手法[c]は手法[b]に属する支持脚・遊脚間の脚剛性の切り替えがある場合より効果的に働く。2.1節において大別した脚式移動制御のそれぞれにおいて、主に用いられる安定化手法をTable 1に示す††。

2.3 不整地適応のための必要条件

筆者らは、不測の不整地においても動歩行の安定なリミットサイクルを構成するための「必要条件」†††として以下を提案している[13][43]。

(a) 安定な歩行が可能な周期の上限よりも歩行周期が十分に短いこと

†3章ではstepping reflexと呼ばれる。

††ただし、Raibert[47]は走行制御において手法[a]も用いた。

†††これらの条件のうち満たされないものがあると、歩行は不安定になり最悪の場合転倒する。

Table 1 Legged locomotion generation and control schemes. Methods for stabilization are described in Section 2.2

	ZMP based	Limit Cycle based	
		by Neural System (CPG and reflexes)	by Mechanism (spring and damper)
good for control of posture and low-speed walking	medium-speed walking	high-speed running	
main controller	upper neural system acquired by learning	lower neural system (at spinal cord, brain stem, etc.)	musculoskeletal system through self stabilization
mainly used methods for stabilization	[a], [b]	[a], [b], [c]	[b], [c]

- (b) 遊脚期の前半に遊脚の振り出しが阻害されないこと
- (c) 遊脚期の後半に遊脚が確実に着地すること
- (d) 遊脚が支持脚になった瞬間、もしくは支持脚が遊脚になる瞬間に支持脚接地点回りの角速度はピッチ軸、ロール軸回りにおいてそれ一定に保たれること
- (e) 脊体のロール運動と脚のピッチ運動間の位相差が不整地での外乱に関わらず一定に保たれること
- (f) 不整地から受ける外乱にもかかわらず、脚間の位相差が適切に保たれること

不整地自律適応歩行の実現には、これらの必要条件を満足するような機構、および神経システムを設計することが重要であると考えられる。

5章以降の神経システムに導入される反射は2.2節で述べた手法 [a], [b] のいずれかに属し、反応は手法 [c] に属する。そして個々の反射と反応は、ここで述べた必要条件 (b)～(e) のいくつかが満たされることに貢献する。また本研究では、CPGとして時定数や基準周期などで歩行周期をおおまかに指定することが可能な非線形振動子を用いることで、必要条件 (a) を満たす。必要条件 (f) は CPG の相互抑制ネットワーク上で自律的に満たされる。

3. 生物規範型制御

脚式ロボットの研究は程度の違いはあっても何かしら生物を参考している。その中で本章では、本研究における生物規範型制御の定義とその特徴について述べる。また、生物学や神経生理学などでは、生物の歩行生成・適応に関して非常に多くの知見が得られているが、それらをすべてロボットに実装することは困難である。本章では、関連する知見を紹介しながら、本研究で実装した、もしくは、実装しなかった理由を説明する。

3.1 4足動物の歩行制御系

4足動物における簡略化した歩行制御系を Fig. 1 に示す。CPG とセンサフィードバックの詳細については3.3節で述べる。より詳細な記述については文献 [17] [18] [20]～[22] [29] [52] [53]などを参照していただきたい。

関節は屈筋と伸筋により駆動され、各筋肉は脊髄にある α 運動ニューロンからの指令を受ける。筋紡錘とゴルジ器官は筋の伸張と張力をそれぞれ検出する。これら筋感覚などの深部感覚、および接触感覚を体性感覚 (somatic sensation) という。支持脚の伸筋が伸ばされたとき、 α 運動ニューロンは筋紡錘からの信号に基づいて収縮させるための信号を出力する。このフィードバックは代表的な脊髄反射の一つである「伸張反射」と呼ば

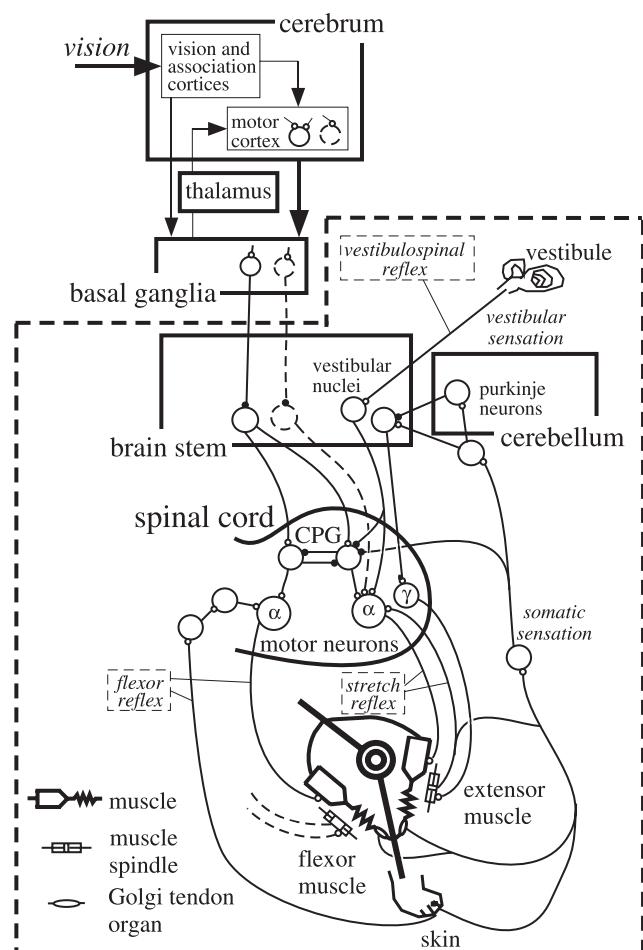


Fig. 1 Simplified nervous system for adaptive control of legged locomotion in animals

れ、筋に剛性を与える。筋紡錘の感度は γ 運動ニューロンにより調節され、 γ 運動ニューロンには前庭核経由で小脳から下降する信号が入っているので、伸張反射の活動レベルは接触や力などの体性感覚に基づいて調整される。もう一つの重要な脊髄反射の「屈曲反射」は接触感覚に基づいて、遊脚の屈筋を収縮させる。

前庭 (vestibule) は頭部の角加速度や角速度を検出する。直立時や歩行時の姿勢の安定性は、前庭感覚に基づき前庭核と α 運動ニューロン経由で脚の筋を駆動することにより保たれる。この安定化は、脳幹反射の一つである「前庭脊髄反射 (vestibulospinal reflex)」と呼ばれている。

除脳ネコ [17] [20] [52] を用いた研究によると、脊椎動物の歩行リズムを生成する CPG は脊髄中に存在し、歩行は脳幹（中脳）以下の比較的下位の神経系において自律的に生成されていることが明らかになっている。ネコなどの高等動物の CPG がどのような神経回路から構成されているかは明らかではないが、CPG の特性は生物学や神経生理学において活発に調べられており、CPG はセンサ入力なしでもリズムを生成すること、CPG は周期的なセンサ入力に簡単に引き込まれることなどが知られている [17] [40] [54]。また、CPG の数理モデルが数多く提案されており、CPG はパターンを生成・変更する能力を持つこと [55]～[57] や、パラメータの変更や外界の変化に対して適応的に安定なリミットサイクルを構成すること [23] [24] がシミュレーションなどで示されている。Fig. 1 の CPG において、相互に抑制された二つのニューロンの出力は屈筋と伸筋の各 α 運動ニューロンに伝えられ、関節の周期的な運動を発生させる。

脳幹には電気刺激等により歩行を誘発する部位（歩行誘発野）がいくつか存在し、脳幹網様体のニューロンを介して脊髄の CPG を駆動していると考えられている [17] [21] [22]。大脳基底核は運動の発現や筋緊張の調節に重要な働きをしている [29]。Grillner らは歩行プログラムの選択に関して、大脳基底核が状況に応じた行動選択（selection）の指令を脱抑制の形で脳幹部に送り、脳幹部の歩行誘発野が歩行プログラムの起動（initiation）を複数の CPG を連続的あるいは並列的に組み合わせる形で行い、脊髄で CPG がセンサフィードバックによる調節とあわせて歩行パターンを生成（pattern generation）するという階層構造を指摘している [18]。

視覚に基づく歩行制御機構の詳細は明らかではないが、Drew ら [58] は大脳運動野経由で CPG への指令を調節するモデルを提案している。筆者らは Drew のモデルを参考にして、視覚による CPG と反射の調節による段差乗り越えなどの実験を行っている [59] が、本稿では Fig. 1 の点線で囲まれた体性感覚、前庭感覚のみの調節を扱う。

3.2 生物規範型制御の定義と特徴

除脳ネコを用いた研究で明らかになったように、生物ではある特定の上位中枢が筋張力の時空間パターンをすべて規定しているのではなく、脳幹・小脳・脊髄にある神経系のネットワークと筋骨格系の結合の中で自律分散的に歩行の生成・適応が行われている。多賀 [23] [24] はこのような知見をもとに、歩行を非線形力学システムの中でのパターンの創発ととらえ、それぞれ独自の非線形ダイナミクスを持つ神経系と機械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可能なことを示した [11] (Fig. 2)。ここで、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適応可能であり、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遷移させることが可能である。したがって、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。このように、生物規範型制御とは、神経モデル・筋肉モデル・骨格モデルの各要素の性質と各要素間の関係のみを記述して、環境との相互作用のなかで創発的に運動の生

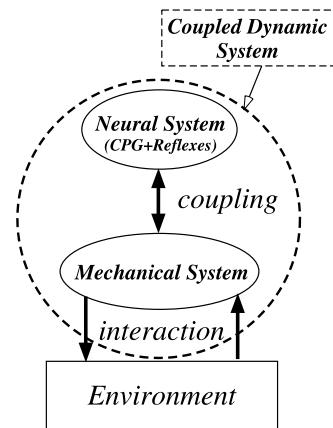


Fig. 2 Emergence of motion

成・適応を目指すものである [10]～[14]。

生物規範型制御の例として近年、矢野ら [29] は高草木ら [18] の神経生理学での知見を参考にして、神経生理学データにできるだけ沿うような大脳基底核・脳幹・脊髄の神経モデルと筋肉モデルを用いて 2 足歩行のシミュレーションを行い、筋緊張の亢進や抑制により基底核疾患とよく似た歩行が現れることを示している。神経生理学や解剖学のデータに忠実なモデルを用いた歩行シミュレーションは他にも行われている [26] [60]～[62]。

一方、生物規範型制御を用いてロボットの適応歩行を実現する研究においては、生物と同様な筋骨格系を実現することが特にアクチュエータ特性や自由度数において現時点では非常に困難であるため、神経生理学などのデータを解釈してより簡略化したモデルを用い、生物規範型制御の有効性を実証することを目指している [30]～[39] [63]。

3.3 CPG を用いた歩行生成・制御

CPG の具体的なモデルとして（非線形）振動子を考えるグループ [23]～[39] と非振動子を考えるグループ [60] [63] がある。振動子はセンサ入力なしでも振動が可能であり、非振動子はセンサ入力があって初めてパターンを生成でき、それぞれヤツメウナギ [20] やナナフシ [60] などを用いた神経生理学・神経行動学の知見をその根拠としている。Cruse [64] は振動子は時定数や固有周期の形で世界モデルを内包しているために汎用的でないと批判しているが、筆者ら [43] は機構の動特性がそれらの形で振動子にエンコードされている [12] からこそ動歩行などが可能であると反論している。本研究では、2.3 節の必要条件 (a) を満たすために CPG のモデルとして非線形振動子を考える。

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 [21] [40] が知られている。本節では、CPG とセンサフィードバックや反射との関係についての従来研究について述べる。

3.3.1 CPG 出力の意味と運動生成法

生物において CPG の出力する情報がどのような物理量をコーディングしているのかはよく分かっていない。多賀 [23] [24] は CPG 出力はトルクであるとしてより直接的に筋骨格系と結び付く運動生成系を提案しており、これに沿った研究が数

多くある[25][28][37][38]。これに対して、CPG出力は関節角度であるとしてPD制御系により運動生成を行う研究もある[30][32]～[34]。一方、CPG出力Φは位相であるとし周期的な関節目標軌道 $\Theta(\Phi)$ を与えPD制御系により運動生成を行う研究[27][31][35][36]や、Φ等から筋活動度を決定し筋モデルから関節トルクを求める研究[26][29]もある。筆者らはCPG出力は脚相(遊脚相/支持脚相)であるとし、CPG出力相によりPD制御系を切り替えることにより運動を生成する手法を提案している[39]。

CPGを歩行ロボット制御に用いる場合これらのうちどれが適切であるかは、以下で述べるセンサフィードバックとの関係やロボットにおける実装[†]の問題もあり、簡単に決める事はできない。3.3.4項で述べるように筆者らは不整地歩行を実現するために、多賀のトルク出力モデルにセンサフィードバックを追加したモデルと、脚相出力モデルに反応と反射を組み合わせたモデルを提案し、比較検討している。

3.3.2 CPGへのセンサフィードバック

CPGはセンサ情報を入力されることにより初めて機構や外界に適した運動パターンを生成することができる[21][40]。それではどのようなセンサ情報が必要であろうか。

Hiebertら[65]はネコの歩行において脚運動の前後到達点(AEP, PEP, anterior or posterior extreme position)や接地情報が脚運動の位相にリセットをかけていることを示しており、土屋らはこれらのセンサ情報によりCPG位相をリセットすることで4脚ロボット[31]や2脚ロボット[35]の適応的な歩容生成を行っている。また、6足歩行においても同様なセンサ情報が用いられている[60][63]。さらに、Yamasakiら[27]は、2足歩行においてつまずいたときにCPG位相をリセットすることにより転倒を回避できることをシミュレーションにより示している。

一方、Anderssonら[54]はネコのCPGへは関節角度がフィードバックされ相互引き込みが発生することを指摘しており[17][40]、多賀ら[23][24]を含めた多くの研究に影響を与えている。また、多賀[24]や筆者[38][39]らは胴体姿勢(前庭覚情報)をCPGにフィードバックしている。

本研究では歩容生成よりも不整地適応を中心に考え、関節角度、胴体姿勢をCPGにフィードバックし、簡略化のためAEP、PEP、および接地情報によるCPG位相のリセットは用いない。

3.3.3 CPGと反射の相互作用

神経生理学においては、脊髄反射は運動の状態により切り替えられていることがよく知られている[40]。例えばネコの歩行中、足裏に刺激を加えると、その脚の伸筋と屈筋のどちらが活動しているかによって次のように反応が異なる[17][40][66]。

- (A) 伸筋活動中の脚に刺激を加えると、転倒しないようにその脚はより強く伸展する。
- (B) 屈筋活動中の脚に刺激を加えると、その刺激から逃避するように脚を屈曲させる。

[†] 例えば、駆動部の減速比が高く摩擦が大きい場合はCPG出力をトルクとして運動生成系を実装することは困難である。

^{††} CPG出力がトルクの場合は反応はトルク調節となり、CPG出力が脚相の場合は反応は脚相調節となる。

(A)を伸展反射(extensor reflex)、(B)を屈曲反射(flexor reflex)と呼び、この切り替えはCPGからの筋活動指令によって行われると考えられる[40]。

一方、反射によって生じた運動は3.3.2項で述べたセンサフィードバックによりCPGに影響を与える。このようなCPGと反射に相互関係があることは神経生理学ではよく知られていたが、具体的なメカニズムはネコの神経系は非常に複雑であるため不明であった。そこで筆者らは、次項以降で述べるように、CPGと反射間の相互関係のメカニズムについていくつかの仮説を立て、Patrushや鉄犬1、2という4脚ロボットを用いて不整地歩行を実現することにより仮説の検証を行った。

3.3.4 CPGと反射・反応

以下本稿では、CPGを経由しないセンサフィードバックによるトルク発生を「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出力の調節を「反応(response)」と呼ぶ^{††}。

筆者らはPatrushを用いた研究[38]において、CPG出力をトルクとする多賀のモデルを拡張して、関節角度・角速度、胴体ピッチ傾きなどをCPGにフィードバックし、緊張性伸張反応、前庭脊髄反応、腱反応、伸展反応、屈曲反応を導入した(Fig. 3(a))。また、腱反応、伸展反応、屈曲反応はCPGの位相情報(CPG出力の正負)により切り替えられている。これは不整地適応のためのセンサフィードバックをトルクを出力するCPG経由の反応としてすべて実現したもので、CPGとセンサフィードバックの統合という点でシンプルな構成となっていたが、以下に挙げる問題点が指摘された[39]。

- 適用したCPGは比較的大きい時定数を持つため、不整地適応のための時定数の小さい瞬間的な動作をCPG経由のフィードバックによる関節トルク出力(反応)で実現することは困難であり、その対応の遅れによる遊脚の振り出し遅れや、タイミングがずれて過剰な支持脚トルクで滑りを発生することなどがしばしば見られた。
- CPG出力の位相情報と振幅情報の両方を用いているため、しばしば反応のパラメータ調節が微妙となり、試行錯誤のための実験回数が多くなった。

一方、鉄犬1を用いた研究[39]では、CPG出力を脚相(phase of a leg)とし、トルクは簡単な筋モデルに相当する下位のPD制御系で発生させ、脚相によりPD制御系を切り替えることによ

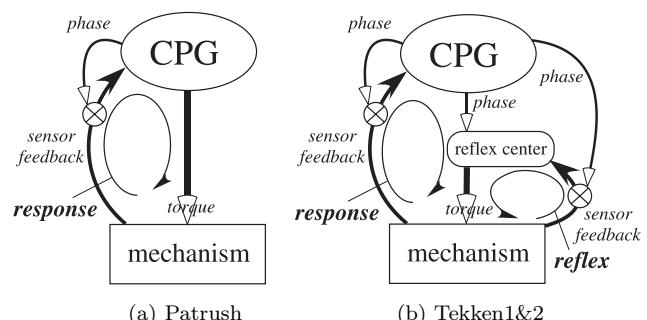


Fig. 3 Relation between CPG and sensor feedback in Patrush and Tekken1&2. Sensor feedback to CPG and reflex center is switched by the CPG output phase

Table 2 Reflexes and responses employed on Patrush, Tekken1 and Tekken2

	sensed value or event	activated on	necessary conditions	Patrush	Tekken1	Tekken2
stretch reflex/response	hip joint angle around pitch axis	sp&sw	(d)	S	F&S	F&S
vestibulospinal reflex/response	body pitch angle	sp	(d)	S	F&S	F&S
tendon reflex/response	angular velocity of hip joint	sp	(d)	S	F	F
extensor response	collision with obstacle	sw	(c)	S		
flexor reflex/response	collision with obstacle	sw	(b)	S		F
stepping reflex	forward speed	sw	(d)		F	F
tonic labyrinthine response	body roll angle	sp&sw	(c),(d),(e)		S	S
sideway stepping reflex	body roll angle	sw	(d)			F
re-stepping reflex/response	loss of ground contact	sw	(c),(d)			F&S
crossed flexion reflex	ground contact of a contralateral leg	sw	(b)			F

The sp, sw, F and S mean the supporting leg, swinging leg, reflex and response, respectively.

The corresponding necessary conditions are described in Section 2.3

より運動を生成する手法を用いた。さらに、瞬間的なトルクの調節のためにPD制御系のパラメータをセンサ情報で調節する「反射」を導入し、半周期から数周期におよぶ脚相の切り替えタイミングの調節のためにCPG出力（脚相）をセンサ情報で調節する「反応」を導入した（Fig.3(b)）。また、反射や反応はCPG出力相により切り替えられている。この手法は、反射と反応という二つの異なるセンサフィードバックを用いているため、CPGとセンサフィードバックの統合という点でシンプルではない[†]が、Patriushで指摘された上記の問題点を解決する効果的な手法であることが実験的に分かった。

Table 2に、Patriushと鉄犬1、2で用いられた反射と反応の一覧を、それらを起動する刺激となるセンサ情報や事象、それらが起動される脚相、および関連する必要条件とともに示す。これらの反射と反応は、2.3節で述べた安定な不整地歩行のための必要条件（b）～（e）が満たされるように、不整地歩行実験を繰り返しながら注意深く選ばれたものである。鉄犬1、2で用いられた反射と反応の詳細については5章以降で説明する。

4. 鉄犬1、2の機構と安定性指標

4.1 鉄犬1、2の機械設計

神経システムと機械システムの間に適切な相互作用を持たせるためには、ロボットの機構は優れた力学特性を持つように設計されなければならない。加えて、不整地適応、エネルギー効率、最大移動速度において良いパフォーマンスを得るためにも機械設計が重要となる。筆者らは以下を考慮して鉄犬1、2を設計した。

- (1) 素早く動作するために、高出力アクチュエータと小慣性モーメントの脚を持つこと
- (2) 低減速比により関節の高いバックドライブリティと受動的なコンプライアンスを確保すること
- (3) 路面や障害物への接触時の衝撃力を軽減させるため、つま先に近いリンクの質量を小さくすること
- (4) 路面形状が足底へ及ぼす影響を小さくするため、足底の接地部面積を小さくすること

[†]ある適応のために反射と反応のどちらか一方を用いるべきか、もしくは両方を用いるべきかが不明確となる。

2.3節の必要条件との関連でいうと、上記（1）は条件（a）、（b）、（3）は条件（b）、（c）、（2）、（4）は条件（c）が成立することをそれぞれ助ける。

鉄犬1と鉄犬2の関節構成、アクチュエータやセンサの配置は同様であるので、代表して鉄犬2の画像を**Fig.4(a)**に示す。鉄犬1、2の各脚は同じ構造をしており、それぞれピッチ軸まわりに回転する腰、膝、足首関節と、ピッチ軸膝関節以下がヨー軸まわりに回転する腰関節を持つ（**Fig.4(b)**）。鉄犬1（総重量：3.1 [kg]）は非自立型であった。鉄犬2（総重量：4.3 [kg]）はコントローラ、モータドライバ、電源などをすべて搭載した完全自立型にするためにわずかに大型化している（脚長：250 [mm]、前後脚間距離：300 [mm]、左右脚間距離：135 [mm]）。

Patriushでは力センサにより遊脚時のつまずきを検出し、屈曲反応を起動していたが、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応が遅れて転倒する問題があった。そこで鉄犬1、2では、**Fig.4(c)**の「バネロック機構を持つ足首受動機構」を導入して、屈曲反射以前に機械的に段差へのつまずきを回避する。ここで、足首関節は受動関節で、通常**Fig.4(c)**：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。リンク接触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ともにその変化分を足首関節角度センサ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とき、受動的に足首関節が回転する（**Fig.4(c)**：A）ことで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（ $\zeta \leq -10$ [deg]）、遊脚相（ -10 [deg] < $\zeta \leq 5$ [deg]）、障害物へのつまずき（ 5 [deg] < ζ ）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。

4.2 広域安定余裕の定義

本研究では、支持脚、遊脚にかか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: WSM）とし、安定判別の指標とする（**Fig.5**）。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.5**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、そのときの広域安定余裕は従来からあ

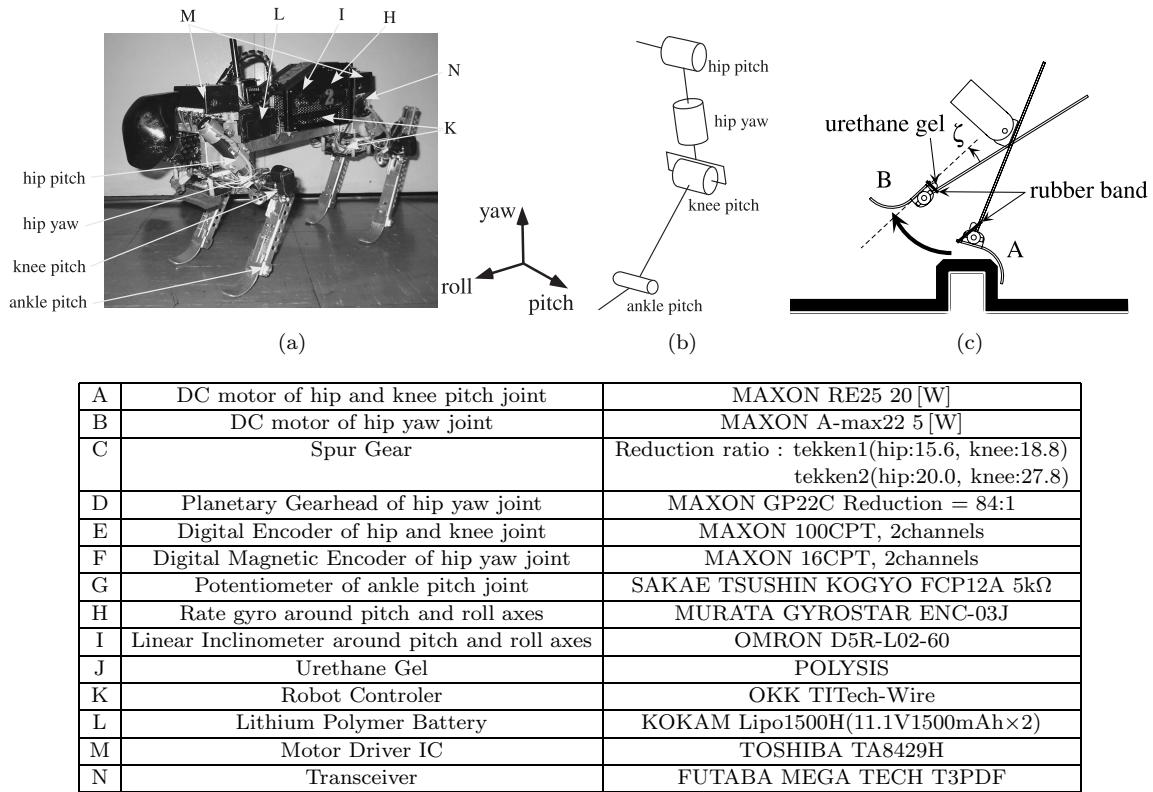


Fig. 4 Photo of Tekken2:(a), Joint configuration of Tekken1&2:(b), Passive ankle joint with the spring-and-lock mechanism of Tekken1&2:(c), and the specification of Tekken1 (A~J) and Tekken2 (A~N)

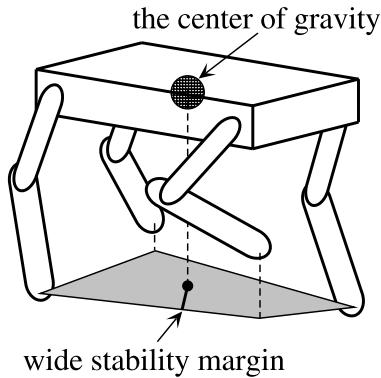


Fig. 5 The definition of the wide stability margin

る安定余裕と同義になるため、広域安定余裕の確保 (WSM>0) は安定な歩行のための十分条件となる。歩行中の広域安定余裕 WSM は、計測される胴体傾斜角度や関節角度を用いて計算される。

5. 鉄犬 1 の神経システムと屋内不整地歩行実験

鉄犬 2 では、本章で述べる鉄犬 1 に用いられた神経システム [39] に、次章で述べる屋外歩行のための反射と反応を追加した (Fig. 6 の破線)。

なお、本稿で後に紹介する実験において用いられた CPG, CPG ネットワーク、反射・反応などに適用したパラメータに関しては、鉄犬 1, 2 に使用された値が付録 A の Table 4, 5 に

それぞれ示されている。

5.1 リズム生成器

鉄犬 1, 2 では CPG のモデルとして Patrush と同様に、松岡 [67] により提唱され、多賀ら [23] [24] が 2 足歩行のシミュレーションに用いた神経振動子を用いる (Fig. 7)。神経振動子は相互抑制された二つのニューロン (伸筋ニューロン、屈筋ニューロン) で構成されており、式 (1) の非線形一階連立微分方程式で表される。鉄犬 1, 2 ではこの神経振動子を各脚に一つ備える。

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

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、 $\text{Feed}_{\{e,f\}i}$ 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 i の神経振動子のニューロン出力 $y_{\{e,f\}i}$ が脚 j の神経振動子のニューロンに入力されるときの結合係数を表している。

Fig. 7 において CPG の出力は y_i であり、

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

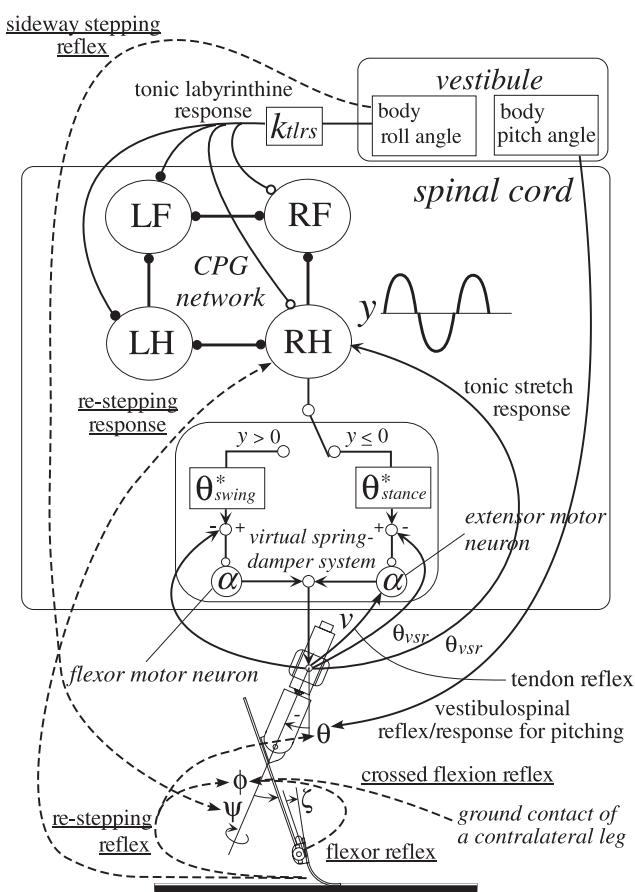


Fig. 6 Control diagram for Tekken1&2. The broken lines show reflexes and responses newly employed in Tekken2. PD-control at the hip yaw and knee pitch joints are eliminated in this figure

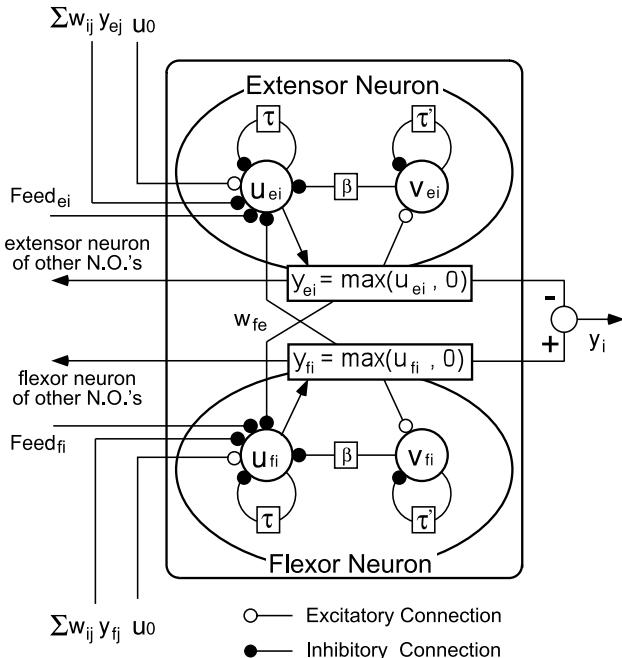


Fig. 7 Neural oscillator as a model of a CPG

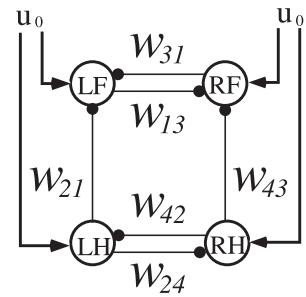


Fig. 8 CPG network for Tekken1&2. The suffix $i, j = 1, 2, 3, 4$ corresponds to LF, LH, RF, RH. L, R, F and H means the left, right, fore and hind leg, respectively

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。以下本稿で個別の CPG を対象としている場合は添字 i を省略している。

筆者ら [39] [44] は歩行の安定性とエネルギー効率はトレードオフの関係にあると指摘している。歩行周期を短くすれば安定性は高くなるが、短周期で遊脚の加減速を行うためエネルギー効率は低くなる。鉄犬 1, 2 では歩行周期を主に決める式 (1) の神経振動子の時定数 τ を、歩行中に計測される広域安定余裕 WSM を用いて式 (3) のように設定する。

$$\tau = 0.12 \text{ WSM/w} \quad (3)$$

ここで、w は鉄犬 1, 2 の胴体幅である。また、式中 0.12 は実験的に決定された値である。

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て 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 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 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 (stretch response)」と呼ばれる関節角フィードバックを用いる。

$$Feed_{e \cdot tsr} = k_{tsr}(\theta - \theta_0), \quad Feed_{f \cdot tsr} = -Feed_{e \cdot tsr} \quad (4)$$

$$Feed_{\{e,f\}} = Feed_{\{e,f\} \cdot tsr} \quad (5)$$

ここで θ は計測されたピッチ軸腰関節角度、 θ_0 は立脚静止時の原点、 k_{tsr} はゲインである。このネガティブフィードバックにより、CPG はピッチ軸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. 8) 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。鉄犬 1, 2 では、この結合により対角の脚が位相差ゼロで同期して動くトロット歩容が平地歩行時の歩容として出現する。ただし、不整地歩行時はロール運動・緊張性迷路反応 (5.4.2 項) の効果によって、歩容は姿勢に応じて適切に調節されることになる。

5.2 トルク生成器

生物の筋肉・腱はバネ・ダンバ系として働き、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 (stretch reflex) などのフィードバック系の粘弾性の総和として現れる。

また、伸張反射による筋剛性は筋張力にはほぼ比例し、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[53]。鉄犬1, 2においては、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PD制御系により実現する。

鉄犬1, 2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.9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。各状態への切り替え条件は以下である。

$A \rightarrow B$: 腰関節が状態Aの目標角度に達したとき
 $B \rightarrow C$: CPGの伸筋ニューロンが活性($y \leq 0$)になったとき
 $C \rightarrow A$: CPGの屈筋ニューロンが活性($y > 0$)になったとき

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 3に表す。ここで、 θ , ϕ , ψ はそれぞれ、ピッチ軸腰、ピッチ軸膝、ヨー軸腰関節の角度を表す(Fig.9)。body pitch angleはピッチ軸まわりの胴体の傾き、 $\theta_{C \rightarrow A}$ は $y > 0$ になった瞬間の θ である。 v は鉄犬1, 2の歩行速度を表し、支持脚関節角速度と胴体角速度から算出される。 ϕ_{sw}^* では、鉄犬1, 2共に、ピッチ腰関節から足先までの高さが一定の値になるような膝関節角度 ϕ の目標値がon-lineで計算される。

Table 3中の他のパラメータに関しては、鉄犬1, 2に使用された値が付録AのTable 4, 5にそれぞれ示されている。鉄犬2の遊脚の膝関節Pゲイン G_6 の値が鉄犬1の G_6 と比較して7

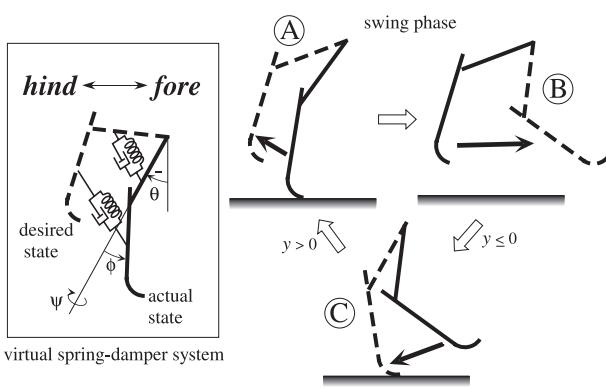


Fig. 9 Virtual spring-damper system

Table 3 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. 9)

P control		
angle in state	desired value[rad]	P-gain
θ in A	$1.2\theta_{C \rightarrow A}$	G_1
θ in B	θ_{sw}^*	$G_2 v + G_3$
θ in C	$\theta_{st}^* +$ body pitch angle	$-G_4 v + G_5$
ϕ in A & B	ϕ_{sw}^*	G_6
ϕ in C	ϕ_{st}^*	G_7
ψ in all states	ψ^*	G_8

倍になっているが、これは6章で鉄犬2に新たに導入される屈曲反射において、遊脚期の下腿リンクの振り上げをより速く行うために設定された値である。また、鉄犬1, 2共に G_5 を調節することによって歩行速度調節が可能である。Table 4, 5の G_5 最大値に対して鉄犬1, 2はそれぞれ約1.0[m/s], 1.2[m/s]の最高速度で平地歩行する。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1, 2の関節には高いバックドライブリティがあるので、結果としてこのようなPD制御系は機構と組み合わさせて比較的剛性の低い「仮想バネ・ダンパ系(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。

5.3 CPGとピッチ面内脚運動間の引き込み

鉄犬1, 2におけるピッチ面内運動制御の概略がFig.6のspinal cord部に示されている。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。5.2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 に基づいて切り替えられる。このような仮想バネ-ダンパ系の切り替えと式(5)におけるCPGへのピッチ軸腰関節角フィードバックの結果として、CPGと脚のピッチ面内運動は相互に引き込まれ、鉄犬1, 2はトロット歩容で平地を歩行することが可能となる[39]。

5.4 姿勢制御

神經生理学において、「頭部が左右および前後に傾いたときには、傾いた側(downward-inclined)の肢が伸展し、反対側(upward-inclined)の肢が屈曲する」こと(Fig.10)が知られている[68]。鉄犬1, 2においてはこれを前庭感覺によるピッチ面内・ロール面内の胴体姿勢制御として、反射と反応を導入した。

5.4.1 ピッチ面内運動と前庭脊髄反射・反応

ピッチ軸まわりの胴体の傾きに対して支持脚のピッチ軸腰関

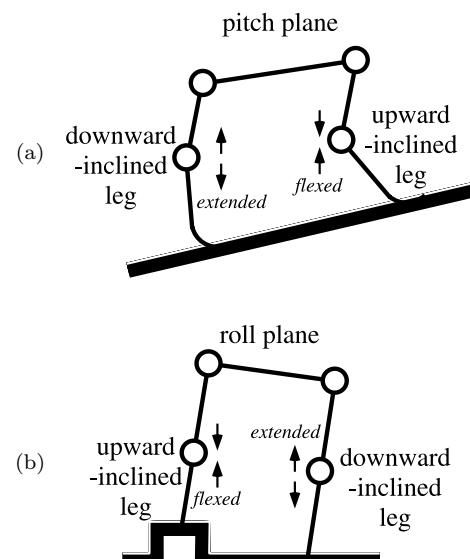


Fig. 10 Downward-inclined and upward-inclined legs

節トルクを調節する前庭脊髄反射は、Table 3 における body pitch angle の支持脚相のピッチ軸腰関節目標角度 θ_{st}^* への加算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 (4), (5) の代わりに次式を用いる。

$$\theta_{vsr} = \theta - (\text{body pitch angle})$$

$$Feed_{e \cdot tsr \cdot vsr} = k_{tsr}(\theta_{vsr} - \theta_0) \quad (6)$$

$$Feed_{f \cdot tsr \cdot vsr} = -Feed_{e \cdot tsr \cdot vsr}$$

$$Feed_{\{e,f\}} = Feed_{\{e,f\} \cdot tsr \cdot vsr} \quad (7)$$

この前庭脊髄反応の効果によって、Patrusch の場合と同様に登坂時や段差に乗り上げたとき、重力負荷による支持脚の運動の遅れに対応して CPG の伸筋ニューロン活動期が延長され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。

5.4.2 ロール面内運動と緊張性迷路反応

鉄犬 1, 2 はロール軸まわりの関節を持っていないが、三次元歩行においては 2 脚支持期において倒立振子相が現れ、結果としてロール面内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の変化は歩行運動において外乱として働く。5.1 節で導入した CPG はロール面内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。したがって、歩行中のロール軸まわりの胴体の傾き (body roll angle) を検出し、式 (8) を CPG のフィードバック項 (式 (9)) に入れることにより (Fig. 6, 上部)、ピッチ面内運動とロール面内運動を同期させる。以後、本稿では式 (8) をロール運動・緊張性迷路反応 (tonic labyrinthine response) と呼ぶ。

$$Feed_{e \cdot tlrr} = \delta(\text{leg}) k_{tlrr} \times (\text{body roll angle}) \quad (8)$$

$$Feed_{f \cdot tlrr} = -Feed_{e \cdot tlrr}$$

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

$$Feed_e = Feed_{e \cdot tsr \cdot vsr} + Feed_{e \cdot tlrr} \quad (9)$$

$$Feed_f = Feed_{f \cdot tsr \cdot vsr} + Feed_{f \cdot tlrr}$$

ロール運動・緊張性迷路反応を導入することによって、Fig. 11 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とき、式 (8) 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 (9) 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. 11 の E+), その支持脚期間は延長させられる。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. 11 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

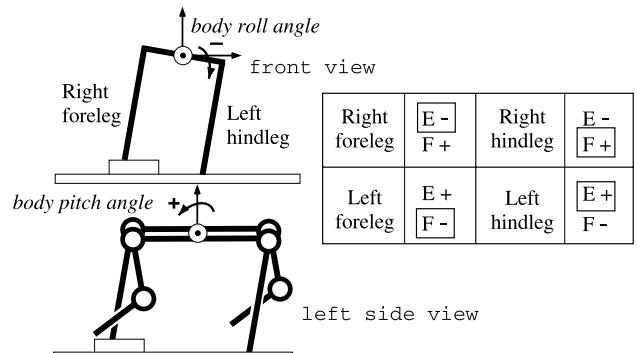


Fig. 11 A tonic labyrinthine response for rolling. E or F means the extensor or flexor neuron of a CPG, respectively. '+' or '-' means the inner state of the neuron is increased or decreased by $Feed_{\{e,f\} \cdot tlrr}$, respectively

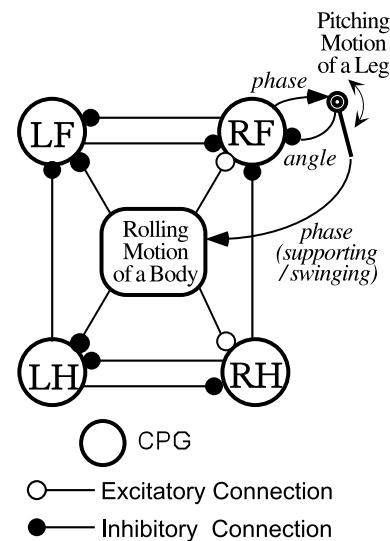


Fig. 12 Relationship among the CPGs, the pitching motion of a leg, and the rolling motion of the body in walking with a tonic labyrinthine response for rolling

期が延長 (F+) される。ここで 5.2 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面内運動の左右脚間位相差を調節することにより、過度な胴体ロール運動とロール面内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できる。筆者らの前報 [39] において、その有効性や k_{tlrr} と WSM の関係についての実験結果が示されている。さらに、ロール面内運動-CPG-ピッチ面内運動という三者間の相互引き込みの結果、一つの力学系が構成されて (Fig. 12)、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が非常に少数のパラメータで規定・評価できることが示されている。

5.5 屋内不整地歩行実験

ここまで導入された運動生成・制御手法によって、鉄犬 1 は屋内に無作為に設置された様々な不整地への適応が可能となっ

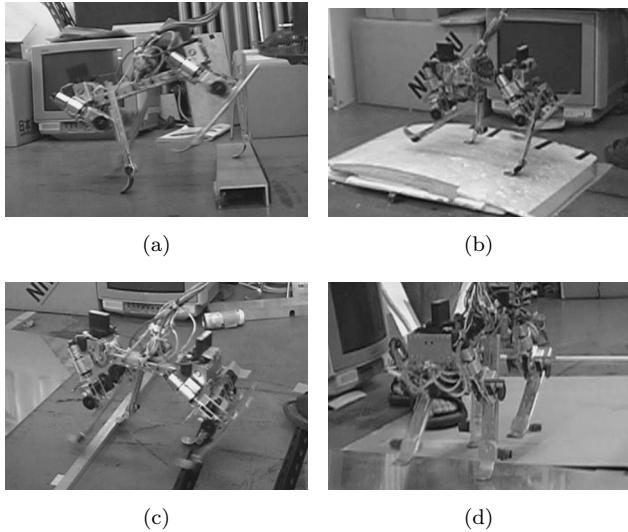


Fig. 13 Snapshots of walking of Tekken1 on irregular terrains

ている。Fig. 13 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) ピッチ面内で 10 [deg] 傾斜した坂の昇降, (c) 高さ 2 [cm] の障害物やピッチ面内で 6 [deg] 傾斜した坂を不連続に複数個置いた不整地踏破, (d) ロール面内で 5 [deg], および 3 [deg] 傾斜した坂がある不整地踏破などが実現されている。

6. 鉄犬 2 の神経システムと屋外不整地歩行実験

5 章で述べた神経システムを用いて鉄犬 1 に屋外歩行を行わせたところ, 舗装路の踏破ですら困難なことが分かった。これは, Fig. 13 において踏破された屋内不整地はなお定型的であり, 非定型的な屋外不整地, すなわち, 連続して続く小さな凸凹や多方向への傾斜がある路面, さらに, 小石・軟らかい土・草・落葉がある路面では, 2.3 節で述べた安定な不整地歩行のための必要条件 (b)~(e) が満たされるように, 鉄犬 1 の神経システムにさらなる反射や反応を導入する必要があることを意味していた。

本章では, 鉄犬 2 に新たに導入された, 屈曲反射 (6.1 節), 横踏み出し反射 (6.2 節), 再踏み出し反射・反応 (6.3 節), 交差性屈曲反射 (6.4 節) について述べる。それぞれの反射・反応の有効性については鉄犬 2 を用いた屋内不整地での実験により評価し, すべてを組み合わせて屋外自然環境で行った実験結果 (6.5 節) により鉄犬 2 の神経システム全体の有効性を検証する。

6.1 屈曲反射

鉄犬 1, 2 はピッチ軸回りの受動足首関節を持ち, 障害物に足先がつまずいたとき, 足首受動関節が回転して転倒を回避することができた (Fig. 4 (c))。しかし, 屋外では足首受動関節が回転した (Fig. 4 (c) : A) 後, 足先のクリアランスが小さい場合には路面の微妙な凹凸・小石・路面の高摩擦のために足首受動関節が初期状態 (Fig. 4 (c) : B) に戻らず, 2.3 節の必要条件 (b) が満たされないことがあった。そこで, 遊脚の膝関節に式 (10) で表される屈曲反射 (flexor reflex) を新たに導入した。

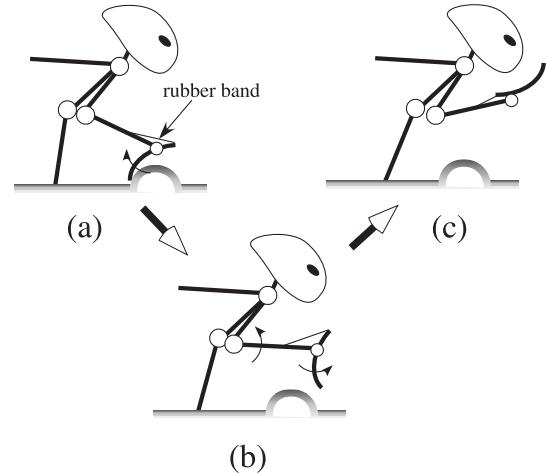


Fig. 14 A flexor reflex activated on stumbling

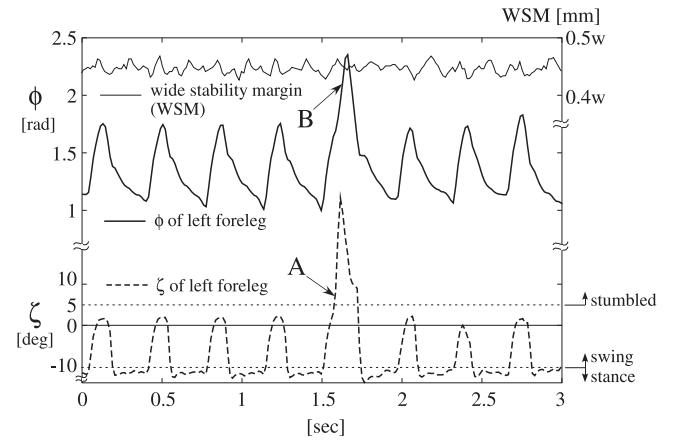


Fig. 15 An experiment of walking over a step 2 [cm] in height with a flexor reflex

$$\phi_{fr}^* = \phi_{stmb} + 0.7 \text{ [rad]} \quad (5.0 \text{ [deg]} < \zeta) \quad (10)$$

ここで ϕ_{stmb} はつまずきが検出されたとき ($5 \text{ [deg]} < \zeta$, Fig. 14(a)) の膝関節角度であり, ϕ_{fr}^* は Table 3 の ϕ_{sw}^* に代わる PD 制御の目標値である。 ϕ_{fr}^* により膝を上方に屈曲させ (Fig. 14 (b)), 足先のクリアランスが十分確保されて足首関節がゴムバンドによって初期状態にもどったとき ($-10 \text{ [deg]} < \zeta \leq 5 \text{ [deg]}$, Fig. 14 (c)), 再び ϕ_{sw}^* を目標値とした PD 制御を行う。屈曲反射は 2.3 節の必要条件 (b) の成立を助ける。

高さ 2 [cm] の段差に足先がつまずいたときの実験結果を Fig. 15 に示す。図中 (A) において, 段差へのつまずきが検出されたとき ($5 \text{ [deg]} < \zeta$), 式 (10) の屈曲反射の効果によって膝関節角度 ϕ が大きくなり, 膝関節は屈曲している (B)。また, 段差につまずいたにもかかわらず, 広域安定余裕 WSM[†] は高く保たれていることが分かる。

6.2 横踏み出し反射

遊脚の横方向接地角度の調節はロール面内運動の安定化に効果的であることが知られている [46] [49]。本稿ではこれを「横踏み出し反射 (sideway stepping reflex)」と呼ぶ。横踏み出し反射は 2.3 節の必要条件 (d) の成立を助ける。

[†] WSM は鉄犬 2 の胴体の幅 ($w=135 \text{ [mm]}$) で正規化されている。

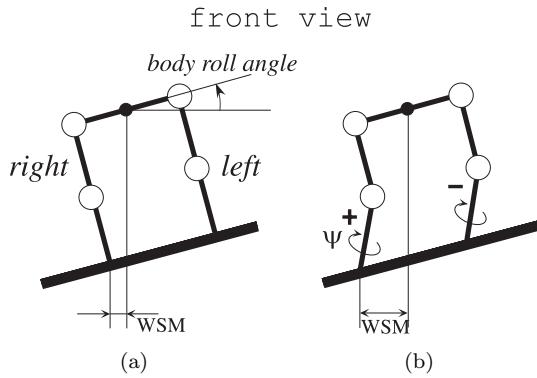


Fig. 16 Walking on a sideway inclined slope. (a):without a sideway stepping reflex, (b):with it

横踏み出し反射は左右脚のどちらかに過度に重力負荷がかかって歩行するような時に特に有効になる。例えば、Fig. 16 に示すような右に傾いた坂を歩き続けるような状況において 5 章で述べた神経システムを用いて実験を行ったところ、5.4.2 節で述べたロール運動・緊張性迷路反応の効果によって左右の脚位相差が適切に調節され、Fig. 16 (a) のように大きく傾いた姿勢で歩行することはできるが、左右脚へかかる重力負荷の差のため次第に坂なりに落ちていく傾向が見られた。また、このような体勢で左から摂動が加わったとき、広域安定余裕 (Fig. 16 の WSM) が小さいために右に転倒する可能性が高かった。

一方、鉄犬 2 では横踏み出し反射を導入し、Fig. 16 (b) のように WSM を大きく保つようにしている。ここで鉄犬 2 はロール軸回りの関節を持たないので、Table 3 のヨー軸腰関節目標角度 ψ^* を式 (11) の ψ_{stpr}^* に変更することで横踏み出し反射を実現している。

$$\psi_{stpr}^* = \delta(\text{leg}) k_{stpr} \times (\text{body roll angle}) \quad (11)$$

Fig. 17 は右に 4 [deg] (約 0.07 [rad]) 傾斜した坂を屋内に作成し、歩行実験を行ったときの実験結果である。2.5~7 [s] に坂を歩行しており、他は平地を歩いている。坂を歩いているとき、胴体は右に 0.05~0.2 [rad] 程度傾斜しており (A)，平地歩行時はほぼ 0 [rad] である (B, C)。坂歩行時、右前脚、および左前脚の ψ の極大値はそれぞれおよそ 0.1 [rad] (D), および -0.1 [rad] (E) であり、平地歩行時は共におよそ 0 [rad] となっている。極大値を計測するときが歩行中の遊脚期であり、これが横踏み出し反射によって振り出された ψ の角度を表す。つまり、右傾斜の坂を歩いているとき、左右脚共にヨー軸腰関節を 0.1 [rad] 程度右側に振り出していることが分かる。結果として、鉄犬 2 は右に傾いた坂上を横踏み出し反射の効果により、WSM をあまり減少させることなくほぼ直進歩行することができた。

6.3 再踏み出し反射・反応

溝をまたぐ場合や段差を下りる場合には、遊脚から支持脚となる接地情報が通常のタイミングでは得られないことがある。ネコではこのような場合、遊脚を再度前方に振り出す適応が観察される [69]。筆者らは同様な適応 (Fig. 18 (b)) を「再踏み

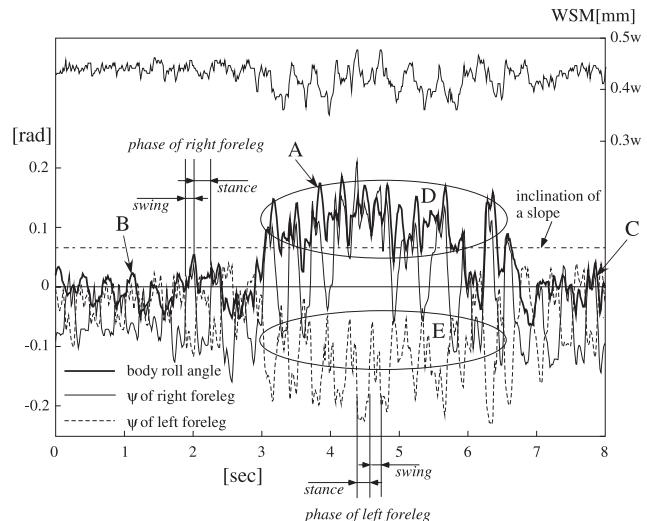


Fig. 17 An experiment of walking on a right-inclined slope of 4 [deg] (approx. 0.07 [rad]) with a sideway stepping reflex

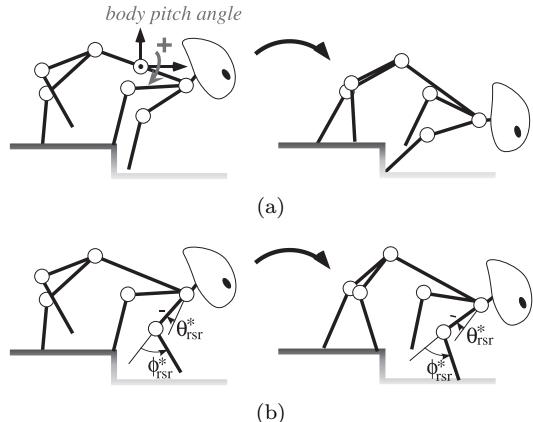


Fig. 18 Walking down a step without re-stepping reflex/response: (a) and with them: (b)

出し反射・反応 (re-stepping reflex/response)」として鉄犬 2 の神経システムに組み込み、高い段差を下りるときに 2.3 節の必要条件 (c), (d) の成立を助けるようにした。

最初に、通常の平地歩行時に遊脚が接地する瞬間のピッチ軸腰・膝関節角度の参照値 θ_{rsr}^* , ϕ_{rsr}^* を以下のように定義する[†]。

$$\theta_{rsr}^* = -0.8 + (\text{body pitch angle}) \quad \phi_{rsr}^* = 1.25[\text{rad}] \quad (12)$$

次に、ある脚の CPG 出力が伸筋ニューロン活動期 ($y \leq 0$) になり、かつ、ピッチ軸腰・膝関節角度が上記の参照値に達した ($\theta \leq \theta_{rsr}^*$ かつ $\phi \leq \phi_{rsr}^*$) にもかかわらず、その脚の接地が検出されないとき ($-10 [\text{deg}] < \zeta \leq 5 [\text{deg}]$) に再踏み出し反射・反応を起動する。再踏み出し反射として、その脚のピッチ軸腰・膝関節角度を通常の支持脚時目標角度 (Table 3) ではなく、目標角度 θ_{rsr}^* , ϕ_{rsr}^* にそれぞれ PD 制御する。再踏み出し反射として、その脚の CPG の支持脚相出力期間 (伸筋ニューロン活

[†]正確には移動速度やその時々の状況によって変化するのでこれは目安に過ぎない。

動期)を延長する[†]ためにCPGの伸筋ニューロンの外部入力を次式の u_{rsr}^* に増加する。

$$u_{rsr}^* = u_0 \times 2 \quad (13)$$

高さ7[cm]の段差下りの屋内実験結果として、再踏み出し反射・反応を導入しない場合をFig.19に、導入した場合をFig.20に示す。Fig.19では、時刻1.1[s]当たり(A)で右前脚のCPG出力が伸筋ニューロン活動期($y \leq 0$)になり仮想バネ-ダンパ系が支持脚相に移行したにもかかわらず、足が地面に接触せず(B)、膝が通常より伸展した状態(C)になっている。結果として、右前脚はより後方に着地し(D)、1.5[s]前後にWSM<0となって鉄犬2は転倒した(Fig.18(a))。

一方Fig.20では、時刻1.05[s]当たり(A)で上で述べた再踏み出し反射・反応を起動する条件が右前脚について満たされ(B)、右前脚のピッチ軸腰・膝関節角度は目標角度 $\theta_{rsr}^*(C)$ 、 $\phi_{rsr}^*(D)$ にそれぞれPD制御されている。そして再踏み出し反射により

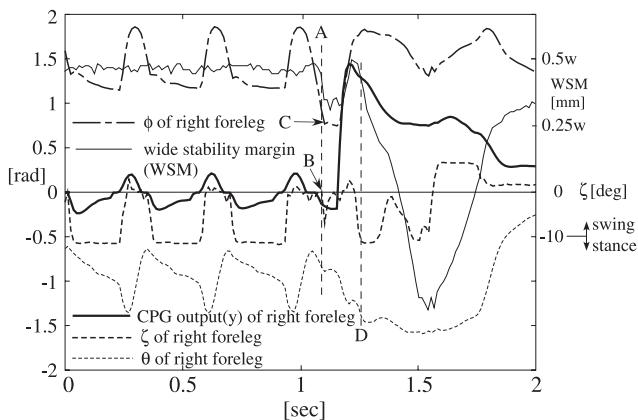


Fig.19 An experiment of walking down a step 7 [cm] in height without re-stepping reflex/response

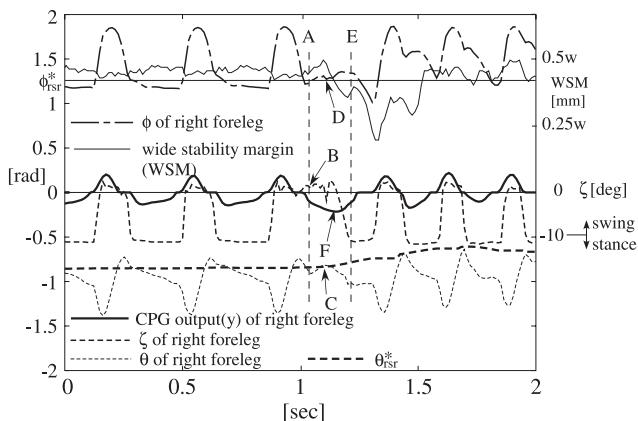


Fig.20 An experiment of walking down a step 7 [cm] in height with re-stepping reflex/response

[†]筆者らの前報[41]では、式(1)でのCPGの内部状態 $u_{e,f}$ を操作してCPGを強制的に屈筋ニューロン活動期にリセットして遊脚相出力期間を延長していたが、対側の脚のCPG出力が支持脚相になるなどの問題点があったために、再踏み出し反射と組み合わせて支持脚期を延長することとした。

^{††}Table 3では h_{sw}^* は一定値(-155 [mm])であった。

右前脚は足先を前方に保ったまま着地し(E)、また、再踏み出し反応によりCPGの伸筋ニューロン活動期が延長されている(F)ことが分かる。結果として、段差下りで失われる位置エネルギーの分だけ増加した前進速度は抑制され、鉄犬2は転倒を回避(WSM>0.2w)することができた(Fig.18(b))。

6.4 交差性屈曲反射

鉄犬2を用いた屋外不整地実験では、歩行中にバランスを崩し、Fig.21(a)の右前脚のように支持脚に過度に重力負荷がかからることによって腰関節位置が低くなり、次の遊脚の振り出しが困難になることがしばしば観察された。このような場合は地面につまずかないように通常時より遊脚の足先を高く上げる必要がある。本稿ではこれを交差性屈曲反射(crossed flexion reflex)と呼び、歩行中は常に対側支持脚の状態によって遊脚の足を上げる高さ(屈曲状態)を調節する(Fig.21(b))ものとする。交差性屈曲反射は2.3節の必要条件(b)の成立を助ける。

Fig.21(a)において、脚が遊脚から支持脚に移行した瞬間にピッチ軸腰関節を基準とした足先の高さ $h_{sw \rightarrow st}$ が計測される。次に対側遊脚において、式(14)で決まる足先の目標高さ h_{sw}^* (Fig.21(b))が、膝関節目標角度 ϕ_{sw}^* のon-line計算に用いられる^{††}。

$$h_{sw}^* = h_{sw \rightarrow st} + 39 \text{ [mm]} \quad (14)$$

交差性屈曲反射の効果を検証するため、6.3節と同様に高さ7[cm]の段差下り実験を行った結果をFig.22に示す。6.3節では再踏み出し反射・反応のみで成功した例を示しているが、Fig.18(b)右図の状態後、遊脚を振り出せずに転倒する場合も

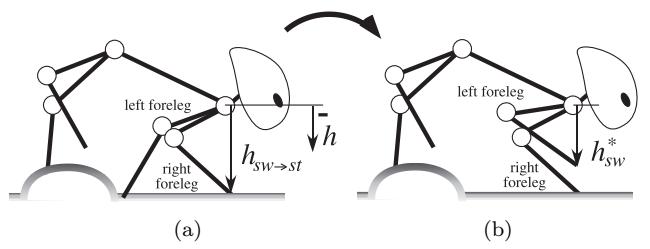


Fig.21 A crossed flexion reflex

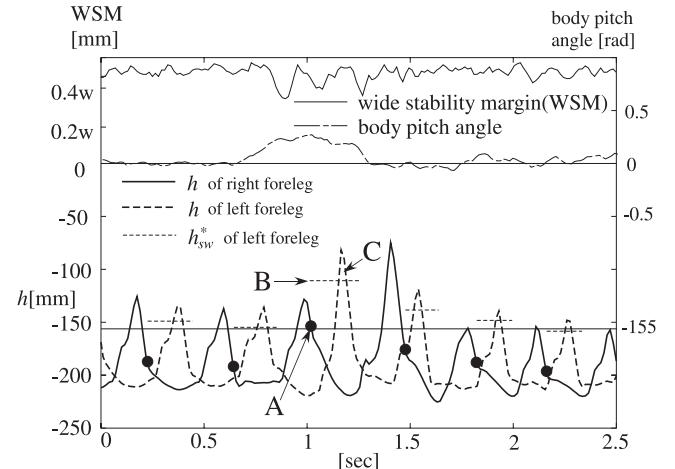


Fig.22 An experiment of walking down a step 7 [cm] in height with a crossed flexion reflex

あった。Fig. 22 では、段差を下りたときに右前脚に大きな重力負荷がかかって、左前脚の振り出しが困難になった時の交差性屈曲反射による適応が示されている。図中の●は右前脚が遊脚から支持脚に移行した瞬間の足先高さ $h_{sw \rightarrow st}$ を表す。そのうち点 A は段差から下りた直後のもので、通常の遊脚足先目標高さ -155 [mm] より深く屈曲している。したがって、対側の左前脚が通常の遊脚足先目標高さを用いた場合、次の遊脚期で足先が路面につまずく可能性が高い。しかし、式 (14) の h_{sw}^* (B) を用いることにより、十分なクリアランスを確保しながら遊脚を振り出すことができた (C)。その後、同様に遊脚足先目標高さを調節しながら、転倒することなく歩行を継続していることが WSM の値により確認できる。

6.5 鉄犬 2 による屋外歩行

鉄犬 1 の神経システムに本章で新たに導入された反射・反応 (Fig. 6, Table 2) を追加して、鉄犬 2 による自然路面上の歩行実験を数多く行った。Fig. 23 にその画像例を示す。

ピッチ面内で最大 14 [deg]、ロール面内で最大 6 [deg] の傾斜があり、直径最大 3 [cm] の小石や落葉が散乱し、高低差最大 4 [cm] の凹凸などから構成される土の路面を歩行したときの結果を Fig. 24 に示す。時刻 0 [s] に歩行を開始し、平均速度 0.7 [m/s]、最大速度 1 [m/s] 程度で歩行をしている。時刻 $3 \sim 12$ [s] で、ピッチ面内で平均 10 [deg] の坂を登っている。また、ロール軸面内でも路面が右に平均 5 [deg] 程度傾斜しているため、時刻 $6 \sim 12$ [s] でロール軸胴体角度が正に偏っているが、ロール運動

・緊張性迷路反応と横踏み出し反射の効果により転倒することなく歩行している。図中 (A) 期間では、胴体が右に大きく傾き、ピッチ軸まわりに振幅 0.2 [rad] 程度の揺動が起き WSM が低下している ($0.2W \sim 0.3W$)。この間、左前脚において接地の不検出 (B) により再踏み出し反射 (C) が起動され、つまずき (D) により屈曲反射 (E) が起動されている。再踏み出し反射は (F), (G), (H) でも、屈曲反射は (I) でも起動されている。さらに、左前脚において交差性屈曲反射が (K), (L), (M) で起動され、遊脚時の足先のクリアランスを大きくとることにより、つまずきを回避している。しかし、(J) においては交差性屈曲反射にもかかわらず左前脚は障害物等につまずき、屈曲反射が起動されている。すなわち、不整地上で屈曲反射は交差性屈曲反射を補完し、鉄犬 2 の転倒を防いでいる。結果として、



Fig. 23 Photos of walking of Tekken2 on natural ground. The cable is just to prevent Tekken2 from damage in case of emergency, and usually slack. The average walking speed was approx. 0.7 [m/s]

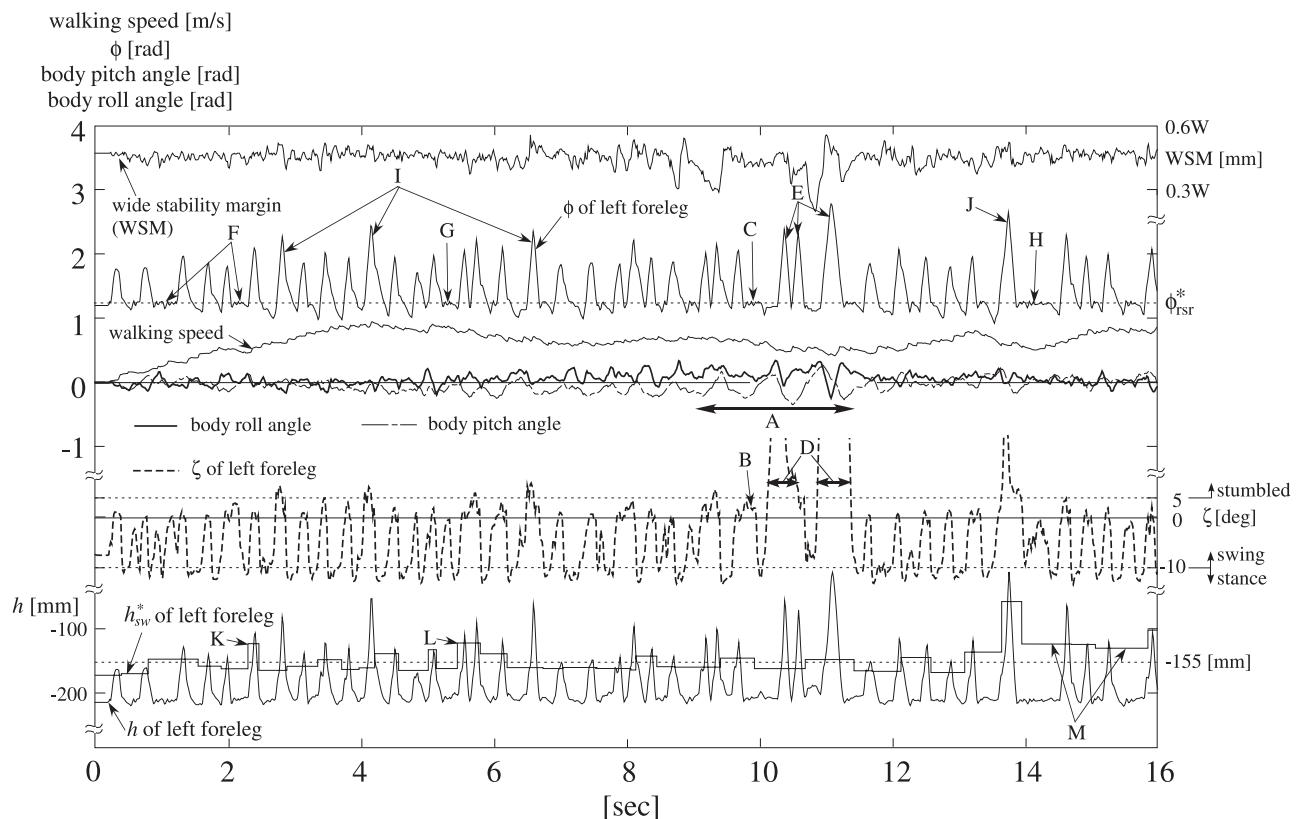


Fig. 24 An experiment of walking on natural ground

本章で新たに導入された反射・反応は鉄犬2が自然路面歩行で転倒することを防ぐために有効に働いていることが分かる。

7. 考察：神経システムのパラメータについて

Table 4, 5に示された鉄犬1, 2の神経システム (CPG, CPG ネットワーク, 仮想バネ-ダンパ系, 反射・反応) のパラメータは実験的に決定された。ただし, 歩行速度を調整するパラメータ G_5 を除いて, すべての実験においてこれらのパラメータ値は不整地路面に關係なく一定であった。

鉄犬2では鉄犬1と比べて寸法 (約1.2倍) および重量 (約1.4倍) が若干異なるため, 仮想バネ-ダンパ系の幾何学的なパラメータとPゲインのいくつかを変更する必要があった。しかし, CPG, CPG ネットワークのパラメータや伸張反応のゲイン k_{tsr} は同一であり, 本研究で用いた神経システムにおいて CPG (神経振動子) のパラメータはそれほど過敏ではないことが示された。

仮想バネ-ダンパ系のPゲインのロバスト性については文献[39]において実験的な検討がなされ, ピッチ軸腰・膝関節の支持脚相でのPゲイン (G_5, G_7) とヨー軸腰関節のPゲイン (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ことが指摘されている。また, ロール運動・緊張性迷路反応のゲイン k_{tlrr} については, 広域安定余裕 WSMとの関係で適切な値が実験的に求まることが文献[39]において示されている。その他の反射・反応のゲインのロバスト性や機構のダイナミクスとの関係については, 今後の課題となっている。

8. おわりに

本稿では, 生物の歩行制御系を参考にして神経モデル・筋肉モデル・骨格モデルを構成し適応的な歩行を生成する手法を生物規範型制御と定義した。そして, 下位の神経・筋肉モデルとしてリズム生成器 (CPG) とトルク生成器 (仮想バネ-ダンパ系) を用いる手法を提案し, 不整地においても安定な動歩行を保つための必要条件を満たすように反応と反射というセンサフィードバックをそれぞれリズム生成器とトルク生成器に組み込んだ。CPGへのセンサフィードバックにより CPGは外部周期運動に引き込まれ, 機構や外界に適した運動パターンを生成することができる。また, センサ入力により起動される反射によって生じた運動はこのセンサフィードバックにより CPGに影響を与える。一方, 反射は CPG出力相により切り替えられる。このような CPGと反射の相互作用は重要であり, 従来のフィードフォワード・フィードバック制御と比較して, 生物規範型制御が簡単なシステムから構成されるにもかかわらず自律適応を可能としている理由の一つとなっている。

本稿で提案された生物規範型動歩行では, 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。このような生物規範型制御の考えに沿って適応的運動生成の原理を探りロボットにおいて実現していく

試みは, より上位の中枢の機能を取り込み今後さらに発展していくと考えられる[14][18][70]。

筆者らは, 将来のサービスロボットのプラットフォームとなることを目指してレーザレンジセンサを用いてナビゲーションを行う鉄犬3, 4[71]を試験的に開発している。また, 最近 Boston-Dynamics社は, エンジンや油圧アクチュエータを搭載した自立型4脚ロボット“BigDog”を開発し, 屋外自然環境での動歩行を実現している[72][†]。鉄犬シリーズや BigDogによる屋外動歩行の実現は, 4脚ロボット開発技術が実用レベルに近づいていることを示している。

謝 辞 本研究の一部は東電記念科学技術財団, (株) アヴィス, カシオ科学振興財団, 科研費・基盤(C):課題番号15500104, 船井情報科学振興財団, 科研費・特定領域研究「移動知」:領域番号454の研究助成を受けて行われ, (株) 東京精機にはPatrushの一部, 鉄犬1, 2の製作を委託しました。また, Cohen教授(メリーランド大学)と高草木助教授(旭川医大)には神経生理学における貴重な助言, 所見をいただきました。計測自動制御学会・移動知研究会での議論は本論文をまとめた貴重な機会となりました。ここに関係各位への感謝の意を表します。

参考文献

- [1] J. Hodgins and M. 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 IEEE ICRA99, pp.381-386, 1999.
- [5] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: "The development of Honda humanoid robot," Proc. of IEEE ICRA98, pp.1321-1326, 1998.
- [6] K. Yokoi, F. Kanehiro, K. Kaneko, S. Kajita, K. Fujiwara and H. Hirukawa: "Experimental study of humanoid robot HRP-1S," Int. J. of Robotics Res., vol.23, no.4, pp.351-362, 2004.
- [7] 米田, 飯山, 広瀬: “4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.
- [8] U. Saranli, M. Buehler and D. Koditschek: "RHex: a simple and highly mobile hexapod robot," Int. J. of Robotics Research, vol.20, no.7, pp.616-631, 2001.
- [9] J. Cham, K. Karpick and M. Cutkosky: "Stride period adaptation of a biomimetic running hexapod," Int. J. of Robotics Research, vol.23, no.2, pp.141-153, 2004.
- [10] 矢野: “生物的自律分散システムの設計原理”, 日本ロボット学会誌, vol.10, no.4, pp.468-473, 1992.
- [11] 多賀: “歩行の創発”, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.5, pp.680-683, 1997.
- [12] 木村: “生物規範型歩行ロボット制御—筋骨格系と神経系のカップリング”, 計測と制御, vol.40, no.6, pp.441-447, 2001.
- [13] 木村: “生物を規範とした脚式ロボットの不整地適応”, 計測と制御, vol.42, no.9, pp.705-711, 2003.
- [14] 土屋: “脳・身体・環境の生み出す知能”, 計測と制御, vol.44, no.9, p.579, 2005.
- [15] 中村: “非線形力学系として結合されたロボットの情報処理と制御—運動の制御理論から知能の制御理論へ”, 計測と制御, vol.40, no.6, pp.426-432, 2001.
- [16] 國吉: “ロボットの知能—創発実体主義の挑戦”, 計測と制御, vol.42,

[†]筆者らが知る限り技術的詳細はまだ公表されていない。

- no.6, pp.497–503, 2003.
- [17] 伊藤：身体知システム論. 共立出版, 2005.
- [18] 高草木, 淳間：“移動知：行動からの知能理解—構成論的観点と生物学的観点から”, 計測と制御, vol.44, no.9, pp.580–589, 2005.
- [19] 土屋：“複雑系の構成原理”, 計測と制御, vol.38, no.10, pp.605–611, 1999.
- [20] 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.
- [21] 佐藤：「脳・神経と行動」：運動プログラムと行動出力. pp.159–178, 岩波書店, 1996.
- [22] 松波, 内藤：「運動と脳」：脳幹・脊髄. pp.149–168, サイエンス社, 2000.
- [23] G. Taga, Y. Yamaguchi and H. Shimizu: “Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators,” *Biolog. Cybern.*, vol.65, pp.147–159, 1991.
- [24] 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.
- [25] 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.1, pp.87–93, 2000.
- [26] 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.
- [27] T. Yamasaki, T. Nomura and S. Sato: “Phase reset and dynamic stability during human gait,” *BioSystems*, vol.71, pp.221–232, 2003.
- [28] 藤井, 石黒, P.E. Hotz: “多型的な CPG 回路モデルによる 2 脚ロボットの実時間行動遷移”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.4, pp.478–484, 2004.
- [29] 矢野, 富田：“実環境における 2 足歩行の創発的リアルタイム制御”, 日本ロボット学会誌, vol.23, no.1, pp.11–16, 2005.
- [30] K. Berns, W. Ilg, M. Deck, J. Albiez and R. Dillmann: “Mechanical Construction and Computer Architecture of the Four Legged Walking Machine BISAM,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol.4, no.1, pp.32–38, 1999.
- [31] 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.
- [32] M.A. Lewis, R. Etienne-Cummings, M.J. Hartmann, Z.R. Xu and A.H. Cohen: “An in silico central pattern generator: silicon oscillator, coupling, entrainment and physical computation,” *Biol. Cybern.*, vol.88, pp.137–151, 2003.
- [33] 松浦, 石村, 和田：“神経系の引き込みによる 2 足ロボットの歩行運動生成”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.3, pp.336–342, 2004.
- [34] 竹村, 上田, 松本, 小笠原：“神経振動子経由の左右揺動運動・姿勢反射を用いた 4 脚ロボットの三次元適応歩行”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.4, pp.528–534, 2004.
- [35] S. Aoi and K. Tsuchiya: “Locomotion control of a biped robot using nonlinear oscillators,” *Autonomous Robots*, vol.19, no.3, pp.219–232, 2005.
- [36] G. Endo, J. Morimoto, J. Nakanishi and G. Cheng: “An Empirical Exploration of a Neural Oscillator for Biped Locomotion Control,” *Proc. of IEEE ICRA2004*, pp.3036–3042, 2004.
- [37] 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歩行と整地歩行”, 日本ロボット学会誌, vol.16, no.8, pp.1138–1145, 1998.
- [38] 福岡, 木村：“4 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.
- [39] 福岡, 木村：“4 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ピッチ運動・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.
- [40] 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.
- [41] H. Kimura and Y. Fukuoka: “Biologically inspired adaptive dynamic walking in outdoor environment using a self-contained quadruped robot: Tekken2,” *Proc. of IEEE/RSJ IROS2004*, pp.986–991, 2004.
- [42] R. Full and D. Koditschek: “Templates and anchors: neuromechanical hypotheses of legged locomotion on land,” *J. of Experimental Biology*, vol.202, pp.3325–3332, 1999.
- [43] Y. Fukuoka, H. Kimura, H. and A.H. Cohen: “Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Irregular Terrain based on Biological Concepts,” *Int. J. of Robotics Research*, vol.22, no.3–4, pp.187–202, 2003.
- [44] 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.
- [45] D. Jindrich and R. Full: “Dynamic stabilization of rapid hexapedal locomotion,” *J. of Exp. Biol.*, vol.205, pp.2803–2823, 2002.
- [46] H. Miura and I. Shimoyama: “Dynamical walk of biped locomotion,” *Int. J. of Robotics Research*, vol.3, no.2, pp.60–74, 1984.
- [47] M. Raibert: *Legged robots that balance*. The MIT Press, 1986.
- [48] M. Townsend: “Biped gait stabilization via foot placement,” *J. of Biomechanics*, vol.18, pp.21–38, 1985.
- [49] C. Bauby and A. Kuo: “Active control of lateral balance in human walking,” *J. of Biomechanics*, vol.33, pp.1433–1440, 2000.
- [50] A. Seyfarth, H. Geyer, M. Gunther and R. Blickhan: “A movement criterion for running,” *J. of Biomechanics*, vol.35, pp.649–655, 2002.
- [51] Z.G. Zhang, H. Kimura and Y. Fukuoka: “Autonomously Generating Efficient Running of a Quadruped Robot Using Delayed Feedback Control,” *Advanced Robotics*, vol.20, no.6, pp.607–629, 2006.
- [52] G. Orlovsky, T. Deliagina and S. Grillner: “Neural control of locomotion,” New York: Oxford Univ. Presspart 3, pp.155–246, 1999.
- [53] 赤澤：「生体情報工学」：運動の機構と神経制御. pp.92–103, 東京電機大学出版局, 2001.
- [54] O. Andersson and S. Grillner: “Peripheral control of the cat’s step cycle. II Entrainment of the central pattern generators for locomotion by sinusoidal hip movements during fictive locomotion,” *Acta. Physiol. Scand.*, vol.118, pp.229–239, 1983.
- [55] H. Yuasa and M. Ito: “Coordination of Many Oscillators and Generation of Locomotory Patterns,” *Biol. Cybern.*, vol.63, pp.177–184, 1990.
- [56] J.J. Collins and I.N. Stewart: “Coupled nonlinear oscillators and the symmetries of animal gaits,” *J. of Nonlinear Science*, vol.3, pp.349–392, 1993.
- [57] 伊藤(聰), 湯浅, 羅, 伊藤(正), 柳原：“環境の変化に適応する四足歩行ロボットシステム”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.4, pp.595–603, 1999.
- [58] T. Drew et al.: “Role of the motor cortex in the control of visually triggered gait modifications,” *Can. J. Physiol. Pharmacol.*, vol.74, pp.426–442, 1996.
- [59] Y. Fukuoka, T. Mimura, N. Yasuda and H. Kimura: “Integration of Multi Sensors for Adaptive Walking of a Quadruped Robot,” *Proc. of IEEE MFI03*, pp.21–26, 2003.
- [60] J. Dean, T. Kindermann, J. Schmitz, M. Schumm and H. Cruse: “Control of Walking in the Stick Insect: From Behavior and Physiology to Modeling,” *Autonomous Robots*, vol.7, no.3, pp.271–288, 1999.
- [61] A. Prochazka and S. Yakovenko: ‘Locomotor control: from spring-like reactions of muscles to neural prediction,’ In: *The Somatosensory System: Deciphering The Brain’s Own Body Image*. R. Nelson (eds), CRC Press, 2001.
- [62] 萩原, 杉本, 青井, 土屋：“身体筋骨格構造に内在する移動知”, 第 18 回自律分散システム・シンポジウム予稿集, pp.207–210, 2006.
- [63] K.S. Espenschied, R.D. Quinn, R.D. Beer and H.J. Chiel: “Bi-

- ologically based distributed control and local reflexes improve rough terrain locomotion in a hexapod robot," *Robotics and Autonomous Systems*, vol.18, pp.59–64, 1996.
- [64] H. Cruse: "The functional sense of central oscillations in walking," *Biol. Cybern.*, vol.86, pp.271–280, 2002.
- [65] G. Hiebert, P. Whelan, A. Prochazka and K. Pearson: "Contribution of hind limb flexor muscle afferents to the timing of phase transitions in the cat step cycle," *J. of Neurophys.*, vol.75, pp.1126–1137, 1996.
- [66] H. Forssberg, S. Grillner and S. Rossignol: "Phasic gain control of reflexes from the dorsum of the paw during spinal locomotion," *Brain Res.*, vol.132, pp.121–139, 1977.
- [67] K. Matsuoka: "Mechanisms of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators," *Biolog. Cybern.*, vol.56, pp.345–353, 1987.
- [68] 南山堂医学大辞典 18 版. p.1211, 南山堂, 1998.
- [69] G. Hiebert, M. Gorassini, W. Jiang, A. Prochazka and K. Pearson: "Corrective responses to loss of ground support during walking II, comparison of intact and chronic spinal cats," *J. of Neurophys.*, vol.71, pp.611–622, 1994.
- [70] H. Kimura, K. Tsuchiya, A. Ishiguro and H. Witte (eds): *Adaptive Motion of Animals and Machines*. Springer-Verlag, 2005.
- [71] H. Kimura, Y. Fukuoka and H. Katabuti: "Mechanical Design of a Quadruped "Tekken3 & 4" and Navigation System Using Laser Range Sensor," *Proc. of ISR2005*, TU3H6, 2005.
- [72] Boston Dynamics: "BigDog project," <http://www.bdi.com/content/sec.php?section=BigDog>, 2005.

付録 A. Values of the parameters used in experiments

Table 4 Values of the parameters used in experiments with Tekken1

parameters	value	parameters	value
u_0	1.0	θ_{st}^* [rad]	-0.8
τ'	0.6	ϕ_{st}^* [rad]	0.61
β	3.0	ψ^* [rad]	0
w_{fe}	-2.0	G_1 [Nm/rad]	7.0
$w_{\{13,31,24,42\}}$	-2.0	G_2 [Nms/rad]	0.5
$w_{\{12,34\}}$	0	G_3 [Nm/rad]	0.4
$w_{\{21,43\}}$	-0.57	G_4 [Nms/rad]	1.4
θ_0 [rad]	-0.87	G_5 [Nm/rad]	1.3~2.6
k_{tsr} [1/rad]	3.0	G_6 [Nm/rad]	1.0
k_{tlrr} [1/rad]	3.3	G_7 [Nm/rad]	2.6
θ_{sw}^* [rad]	-0.17	G_8 [Nm/rad]	1.0

Table 5 Values of the parameters used in experiments with Tekken2

parameters	value	parameters	value
u_0	1.0	θ_{st}^* [rad]	-1.0
τ'	0.6	ϕ_{st}^* [rad]	0.61
β	3.0	ψ^* [rad]	0
w_{fe}	-2.0	G_1 [Nm/rad]	7.0
$w_{\{13,31,24,42\}}$	-2.0	G_2 [Nms/rad]	0.6
$w_{\{12,34\}}$	0	G_3 [Nm/rad]	0.6
$w_{\{21,43\}}$	-0.57	G_4 [Nms/rad]	1.0
θ_0 [rad]	-1.06	G_5 [Nm/rad]	1.5~3.0
k_{tsr} [1/rad]	3.0	G_6 [Nm/rad]	7.0
k_{tlrr} [1/rad]	2.25	G_7 [Nm/rad]	2.6
k_{stpr}	0.9	G_8 [Nm/rad]	2.0
θ_{sw}^* [rad]	-0.17		



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。2003 年電気通信大学情報システム学研究科博士後期課程を単位修得の上退学。電気通信大学 SVBL 非常勤研究員を経て、2006 年より茨城大学工学部知能システム工学科講師。博士 (工学)。生物規範型 4 脚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、第 17 回日本ロボット学会論文賞、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2003 ベストプレゼンテーション表彰、SAB2004 Best Technical Paper Award を受賞。日本機械学会等の会員。
(日本ロボット学会正会員)



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。1995~1996 年カーネギーメロン大学客員研究員。脚ロボット、知能ロボットの研究に従事。第 3、17 回日本ロボット学会論文賞、2003 年度船井情報科学振興賞、SAB2004 Best Technical Paper Award を受賞。日本機械学会、計測自動制御学会、IEEE 等の会員。
(日本ロボット学会正会員)