4足ロボットの生物規範型不整地適応動歩行

—体性感覚・前庭感覚による調節—

福岡 泰宏* 木村 浩*

Biologically Inspired Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Irregular Terrain

—Adjustment based on somatic sensation and vestibular sensation—

Yasuhiro Fukuoka* and Hiroshi Kimura*

We are trying to induce a quadruped robot to walk dynamically on irregular terrain by using a nervous system model. In this paper, we integrate several reflexes such as stretch reflex, vestibulospinal reflex, and extensor and flexor reflex into CPG (Central Pattern Generator). We try to realize adaptive walking up and down a slope of 12 degrees, walking over an obstacle 3 [cm] in height, and walking on terrain undulation consisting of bumps 3 [cm] in height with fixed parameters of CPG and reflexes. The success in walking on such irregular terrain in spite of stumbling and landing on obstacles shows that the biologically inspired control proposed in this study has an ability of autonomous adaptation to unknown irregular terrain.

Key Words: Dynamic Walking on Irregular Terrain, Quadruped Robot, Central Pattern Generator, Reflexes

1. はじめに

これまでに、数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]~[4], 4脚ロボット [5] [6] を用いた不整地動歩行・走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すべてに適応可能な歩行制御プログラムを用意することは一般に困難であり、自律的な適応が重要となる。しかし、自律的な適応に基づく不整地動歩行の実現は、これまで非常に困難な問題とされてきた。

これに対して、実世界で自律的な適応を見せる多くの動物の運動はその体内に張り巡らされた神経系によって制御されており、そのメカニズムを解明するために数多くの研究が行われてきた。そして、神経生理学などの実験の結果、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 [7] [8]。生物学、神経生理学などで得られた知見に基づいて、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されてきた。そして、CPG は 4 足歩行の歩容を自律的に生成する機能を持つこと [9] [10], CPG の出力を関節トルクと考え、筋骨格モデルと相互に接続することで軌道計画を行う必要がなく路面変化や外力に対する適応性を直接得ることができること [11]~[13] などがシミュレーションにより示されている。生物規範型制御を用いたロボットの動歩行の実現例は少なく [14]~[16], 特に不整地動歩行については CPG と伸展・屈曲反射機構による筆者らの研究のみである [15]。しかし、そこで実現された不整地歩行は非常に簡単なものであり、うねりがあるような路面や不連続な路面での適応的歩行などは今後の課題となっていた。

そこで、本稿では、中程度の不整地における適応的動歩行を実現するために、CPG を経由した脊髄反射機構を導入し、これが不整地適応動歩行を実現する上で有効であることを 4 足歩行ロボットを用いた実験により示す。次に、実験によって得られた結果から生物規範型制御の利点について考察する。

本研究で用いる生物規範型歩行生成・制御系は、不整地適応動歩行を実現するために採用されたものであり、そこでは、従来の歩行ロボット研究で常識とされた軌道計画ベースでの適応は存在せず[†], リズム発生器と反射というトルクを出力する系と床面との相互作用の結果として、不整地への動的な適応が自律的に生成される。

原稿受付 2000 年 4 月 19 日

*電気通信大学情報システム学研究科

*University of Electro-Communications

[†]伸張反射のための原点や重力方向は存在するが、これらは一定である

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

2. 生物規範型歩行制御

2.1 4足動物の歩行生成・制御系

4足動物における歩行生成・制御系を Fig. 1 に示す。ここで、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。除脳ネコ [17] [18] 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、歩行は中脳以下の比較的低レベル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。猫などの高等動物の 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 [17] ~ [20]、また、CPG の数理モデルがいくつか提案されている。そして、神経生理学の実験やシミュレーションにより、CPG はパターンを生成・変更する能力を持つことや [9]、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能力が示されている [11] [12]。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。CPG は脳幹 (brain stem) 経路の上位からの入力信号により駆動されている。

筋紡錘 (muscle spindle) とゴルジ器官は筋の伸張と張力をそれぞれ検出する。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 (stretch reflex)」と呼ばれ、筋に剛性を与える。もう一つの重要な脊髄反射の「屈曲反射 (flexor reflex)」は接触感覚に基づいて、遊脚の屈筋を収縮させる [21]。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。

前庭 (vestibule) は頭部の角加速度や角速度を検出する。直

A	DC motor of hip joint	SANYO DENKI Output power 23[W] R402
B	DC motor of knee joint	SANYO DENKI Output power 23[W] R402
C	Optical encoder	HEWLETT-PACKARD HEDS-5500 A14
D	6 axes force sensor	BL AUTOTEC・MINI SENSOR
E	Rate gyro around pitch axis	MURATA ENV-05A-C
	Spur gear	Gear reduction ratio of hip and knee joints 1/40

Fig. 2 Patrush

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 運動ニューロン経路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」と呼ばれている [21]。

視覚に基づく歩行制御の機構は明らかではないが、Drew ら [22] は大脳運動野経路で 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、CPG 入力への調節による段差乗り越えなどの実験を行っている [23] 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。

2.2 4足ロボット (Patrush)

上で述べた生物の歩行生成・制御系を適用するために、4足ロボット Patrush を用いる。その簡単な構造図を Fig. 2 に示す。各脚はピッチ平面内で回転する 3 関節で構成され、上から腰、膝、足首関節と呼ばれている。腰と膝関節には DC モータ (A, B) と光学式エンコーダ (C) が組み込まれており、足首関節は受動関節となっている。反射機構のためのセンサとして、膝リンクには 6 軸力センサ (D) が、胴体には角速度センサ (E) が取り付けられている。各脚の構造は同じで、腰膝関節間リンク 560 [g]、膝下リンク 420 [g]、全重量 5,200 [g] である。遊脚の障害物への衝突時や凸部への着地時の関節での受動的なコンプライアンスは不整地歩行を実現するために重要である。このために、比較的低減速比 (40) を平衡車により構成し、バックドライバビリティを確保している。また、このロボットはピッチ

Fig. 3 (a) Virtual extensor and flexor muscle on a quadruped robot (b) Origin and direction of angles and direction of torque

軸まわりの関節しか持っていないので、2本の棒によりロールおよびヨー平面内の運動は拘束されている。

本研究では、4足歩行ロボットに **Fig. 3** (a) のように仮想の伸筋と屈筋を定義し、また、実験グラフの前後脚の各変数の零点と方向を **Fig. 3** (b) のように定義する。また、各脚に、左前脚 (LF)、右前脚 (RF)、左後脚 (LH)、右後脚 (RH) と記号をつけ、LFSは左前脚・腰関節を表し、 x は joint angle, f_x , f_z はそれぞれ x , z 方向力センサ値とし、LFS. x , LF. f_x のように用いる。

2.3 CPG を用いた整地歩行

ここでは、CPG のモデルとして、松岡 [24] により提案され多賀ら [11] により 2 足歩行ロボットに適用された神経振動子を用いる。このモデルでは、一つの神経振動子は次式のように、非線形一階連立微分方程式で表される二つのニューロンが互いに抑制し合う組より構成され、ロボットの一つの関節において、それぞれのニューロンが内部状態に比例するトルクにより伸筋と屈筋を駆動する (**Fig. 4** (a))。

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

$$\max(0, x) = \begin{cases} x & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases}$$

ここで、添字: e は伸筋, f は屈筋, $\{e, f\}$ は伸筋または屈筋, i は i 番目の神経振動子を表し、変数: u_i はニューロンの内部状態, v_i はニューロン内の疲労状態, y_i はニューロンの出力, u_{0i} は上位からの駆動入力, Feed_i は関節角などのフィードバック信号を意味し、定数: β はニューロンの疲労状態の内部状態への影響を表す係数, τ , τ' は u_i と v_i の時定数, w_{fe} は拮抗ニューロン同士の結合係数, w_{ij} は接続されている他のニューロンとの間の結合係数を意味する。

結果として、関節を駆動するモータに出力される joint torque (**Fig. 3** (b)) は

$$Cpg_Tr = -p_e y_e + p_f y_f \quad (2)$$

となる。 p_e, p_f は各ニューロンからの出力指令 y_e, y_f を筋張

Fig. 4 Neural oscillator as a model of a CPG

力に変換するための係数である。 $Cpg_Tr < 0$ は伸筋活動期, $Cpg_Tr > 0$ は屈筋活動期を意味する。また、本稿の実験において u_{0i} は一定である。

Feed_i について考えると、生物において重要なフィードバックの一つに、伸張反射がある。伸張反射は伸ばされた筋肉をもとの長さ (静止長) に戻すための反射 [25] で、静止長の位置は基本的には直立方向、すなわち、 $\theta = 0$ である (ただし、**Fig. 3** (b) で $\theta = (\text{joint angle}) + \pi/2$ [rad])。生理学的知見によると、筋肉と脊髄間で発生する伸張反射には、筋が伸張されている間持続して起こる「緊張性伸張反射 (tonic stretch reflex)」と、筋伸張の初期だけに出現する「相動性伸張反射 (phasic stretch reflex)」の二種類がある [26]。前者を CPG と筋肉間で起こる反射と仮定すると、Grillner [27] らの知見に基づいて多賀 [11] [12] の 2 足歩行シミュレーションのモデルで導入された CPG への関節角度フィードバックは緊張性伸張反射に相当し、本研究でも次式がすべての実験において採用されている。

$$\text{Feed}_{e,tsr} = k_{tsr} \theta, \quad \text{Feed}_{f,tsr} = -k_{tsr} \theta \quad (3)$$

各脚の腰関節を駆動する CPG を相互結合して 4 個の CPG からなるネットワークを構成するとき (**Fig. 4** (b))、これら CPG は相互に引き込まれ、同一周期と固定位相差で振動を始め、4 足歩行ロボットのトロット歩容を生成することができる [15]。

以下、本研究の実験では、CPG による制御は腰関節に対してのみ行い、膝関節については、支持脚時は Cpg_Tr によらず 0.07 [rad] と一定の目標角度を設定し、遊脚時は次式のように腰関節の Cpg_Tr に対してある目標角度を設定し、

$$\text{desired angle} = 1.7 Cpg_Tr + 0.26 \text{ [rad]} \quad (4)$$

それぞれの目標角度に対して PD 制御をする。CPG へのフィードバック信号として関節角度のみを用いて ($\text{Feed}_e = \text{Feed}_{e,tsr}$, $\text{Feed}_f = \text{Feed}_{f,tsr}$) 平地歩行実験を行い、CPG と緊張性伸張反射により安定に歩行できることを確認した [15]。このとき Patrush は、左右脚間歩幅約 25 [cm], 周期約 0.8 [sec], 速度約 0.6 [m/sec] で歩く。

Fig. 5 Relation between CPG and reflexes (a) model proposed by Taga (b) model involving vestibulospinal reflex (c) model involving reflexes via CPG

2.4 CPG を用いた不整地適応歩行

2.3 では、関節角フィードバックを持つ CPG を用い、整地歩行が容易に実現されたことを述べた。本研究では、生物規範型制御に基づく不整地歩行実現の次の段階として、より不整地度の高い路面での適応的な動歩行の実現を目指し、センサ情報に基づく CPG や反射の調整の方法について議論する。

多賀 [11] [12] が 2 足での平地・坂歩行シミュレーションのために提案し、2.3 でも用いられた制御モデルでは、CPG へ入るセンサ情報は、伸張反射のための角度・角速度情報と、それらを遊脚・支持脚で切り替える体性感覚のみであった (Fig. 5 (a))。しかし、不整地歩行のためには、支持脚負荷や接触などの体性感覚・前庭感覚に基づく CPG の調節や反射の調整が重要であることはよく知られている [18]~[20]。まず、3 では、前庭脊髄反射の有効性を実験により検証する (Fig. 5 (b))。

また、神経生理学においては、CPG と脊髄反射の関係について「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 [8] [19] [20] が知られている。この知見に基づき、本稿では、すべてのセンサ情報を CPG にフィードバックし、これを CPG 経由の脊髄反射と定義する (Fig. 5 (c))。結果として、時定数を持つ CPG を経由するために反応は遅くなるが、脊髄反射トルクの発生と同時に、センサ情報により CPG 全体の位相を調節することが可能となる。

3. 前庭脊髄反射による障害物乗り越え

生物において、伸張反射によって収縮される筋肉の多くは抗重力筋であり [28]、伸張反射は重力に抗して体を支えるという役割を持つ。つまり、重力方向が筋肉の静止長であり、その位置に伸張反射をしていると考えられる。整地歩行では $\theta = 0$ が静止長であったが、不整地歩行では重力方向の $\theta_{vsr} = 0$ (Fig. 3 (b)) を静止長と定義し、その位置に次で表される緊張性伸張反射を行う。

$$\theta_{vsr} = (\text{joint angle}) + \pi/2 - (\text{body angle}) \quad [\text{rad}] \quad (5)$$

$$Feed_{\{e,f\} \cdot tsr \cdot vsr} = \pm k_{tsr} \theta_{vsr}$$

式 (5) では body angle を角速度センサによって検出し、緊張性伸張反射のゼロ点を重力方向とすることで前庭脊髄反射を実現している (Fig. 5 (b))。

Fig. 5 (a) のモデルにより高さ 3 [cm] 幅 6 [cm] の障害物を乗り越える歩行実験を行ったが、前脚が障害物に乗り上げたとき、重力方向を検出できていないため、後方に転倒した。一方、Fig. 5 (b) のモデルでは、障害物に乗り上げたときも重力方向を静止長とした緊張性伸張反射を行い、障害物を乗り越えることに成功した。

4. CPG 経由の脊髄反射による不整地適応

ここでは、CPG 経由の脊髄反射として、腱での負荷に対する反応、接触による伸展・屈曲を説明するが、それぞれ従来からある腱反射、伸展反射、屈曲反射などの定義と混乱しやすいので、腱反応、伸展反応、屈曲反応と呼ぶ。

4.1 腱反応による坂の昇降

Pearson [29] は脚接地時に足根関節 (ankle) 筋にかかる負荷を腱器官が検出すると、CPG の伸筋ニューロンに興奮性の信号が入ること指摘している。これを本稿では腱反応 (tendon response) と定義する。すなわち、腱反応は、支持脚時地面から受ける抗力に対して推進力が妨げられないように、CPG の伸筋ニューロンに興奮性接続して推進力を補うという働きを持つ。本研究においては Patrush には足根関節筋が存在しないので、足根関節同様に歩行中推進に大きく関与する腰関節において、関節筋負荷を検出する。また、実験的に、本研究で用いた膝下に取り付けた力覚センサでは腰関節の関節筋張力を厳密に検出するのは困難であるために、支持脚接地によって腰関節角速度が大きく減速したときにかぎり、負荷がかかり伸筋が伸ばされたと仮定して関節筋負荷の代用とした。具体的には、式 (6) で表される末梢からのフィードバック経路 $Feed_{e \cdot tr}$ を式 (7) のように CPG の伸筋ニューロンに興奮性に結合する。

$$Feed_{e \cdot tr} = \begin{cases} k_{tr}(\dot{\theta}_{vsr} + 1) & (-1 \leq \dot{\theta}_{vsr}) \\ 0 & (\dot{\theta}_{vsr} < -1) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Feed_e &= Feed_{e \cdot tsr \cdot vsr} + Feed_{e \cdot tr} \\ Feed_f &= Feed_{f \cdot tsr \cdot vsr} \end{aligned} \quad (7)$$

この手法により 12 度の坂の昇降実験を行い成功したときのデータを Fig. 6 に示す。ここで、腱反応は CPG 伸筋活動期 ($Cpg_Tr < 0$) で凸部分 (A) として現れている。このように CPG 出力トルクの振幅が増加されることで坂を登るための推

Fig. 6 Walking up a slope of 12 degrees using tendon response

進力を得ると同時に、CPGの持つ特性により位相も調節され、支持脚相と遊脚相が適切な期間交互に繰り返され、足踏みなどの不安定した歩行が実現されていることが分かる。

4.2 伸展反応および屈曲反応によるつまずき後の転倒回避

猫の歩行中、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ことが知られている[19][20]。

- (a) 伸筋活動中にある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進展する。
- (b) 屈筋活動中にある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。

(a)を伸展反応、(b)を屈曲反応と呼び、この切替えはCPGからの筋活動指令によって行われるものとする[20]。

具体的には、(a)の伸展反応(extensor response)の場合、伸筋活動中($Cpg.Tr < 0$)につまずいたとき($f_x > 1.5$ [kgf])、式(8)で表す $Feed_{e.er}$ をCPGの伸筋ニューロンに興奮性に接続する。

$$Feed_{e.er} = \begin{cases} k_{er}\theta_{vsr} & (0 \leq \theta_{vsr}) \\ 0 & (\theta_{vsr} < 0) \end{cases} \quad (8)$$

すなわち、式(5)と(8)より、重力線より脚が前方にあるときつまずくと、 $Feed_e = (k_{vsr} + k_{er})\theta_{vsr}$ とすることにより緊張性伸張反応を強化していることになる。

(b)の屈曲反応(flexor response)場合、屈筋活動中($Cpg.Tr > 0$)につまずいたとき($f_x > 1.5$ [kgf])、つまずいた瞬間の時刻を $t = 0$ [sec]として0.12 [sec]の間、式(9)で表す $Feed_{f.fr}$ をCPGの屈筋ニューロンに興奮性に結合する。

$$Feed_{f.fr} = (k_{fr}/0.12)(0.12 - t) \quad (9)$$

ここで定数 k_{fr} と0.12 [sec]は、Fig. 7 Aのようにピーク値で3 [Nm]の屈曲トルクが0.2 [sec]期間CPG出力から得られるように実験的に求める。

以上より、つまずき後の転倒回避のためにCPGにフィードバックされる信号は次式となる。

$$\begin{aligned} Feed_e &= Feed_{e.tsr-vs} + Feed_{e.tr} + Feed_{e.er} \\ Feed_f &= Feed_{f.tsr-vs} + Feed_{f.fr} \end{aligned} \quad (10)$$

Fig. 7 Avoidance of falling down after stumble by using flexor response

式(10)に $Feed_{e.tr}$ が含まれているのは、つまずいた後に他の脚が障害物の上に乗り上げたとき、腱反応の推進効果で後ろに転倒することなく歩行を行うためであり、式(7)からそのまま導入してある。

Fig. 7は、高さ3 [cm]の障害物につまずいた後、屈曲反応によって転倒を回避したときのグラフである。Fig. 7では、1.9 [sec]付近で左前脚がつまずいてLFS.Cpg.Trが急に大きくなり(A)遊脚期が長くなっている一方、右前脚は支持脚期を延長して(B)体を支えている。すなわち、となり合う脚のCPGが互いに抑制結合されている(Fig. 4(b))のために、左前脚がつまずいてCPGの屈筋ニューロンが強く興奮したとき、右前脚のCPGにおいて屈筋ニューロンが強く抑制され、右前脚が左前脚と同時に遊脚になることを防ぐことができた。

4.3 より高度な不整地への適応

式(1)、(10)の制御において(Fig. 8)、種々のパラメータを一定のまま、坂、障害物、うねりが続くより高度な不整地上の動歩行を実現することにより、本研究で提案する生物規範型制御があらかじめ予想されていない不整地に対して強い適応性を持つことを示す。

ここで、Fig. 6やFig. 7より分かるように、定常振動をしているCPGに外乱として各種のフィードバックが入力されたときCPGの出力波形は乱れるが、歩行の一周期の過渡状態を経て元の安定した定常振動に戻っている。これはCPGの自己安定化能力である。そこで、前後脚のいずれかが常に不整地部にあり、CPGネットワークが再び安定状態に戻る前の過渡期に再度外乱が入るように、不整地部の間隔を歩行の一周期移動分より短いFig. 9のような不整地を設定した。

不整地 Fig. 9(a)上を歩行したときの結果をFig. 10とFig. 11に示す。Fig. 10においては、1 [sec]過ぎから登坂を開始し腱反応がCPGに影響を与え、3 [sec]過ぎに登坂中に右後脚がつまずき、屈曲反応によりRHS.Cpg.Trが急増して転倒回避をしていることが分かる。さらに、屈曲反応後、Fig. 10 Aにおいて、伸筋トルクが大きく増加し、かつ、伸筋期間が長くなっているのは、遊脚時に過度の屈曲を起こした脚が、次の支持脚時に緊張性伸張反応および腱反応によって強く支えているこ

な適応的な相の切り替えを行い不整地適応を実現することも可能と考えられる。しかし、相がどの程度遅れるかは運動をするまで分からないことから、前もって軌道を生成することは困難であるため、軌道の位相の調節を運動の各瞬間ごとに行う必要があり、結局は本研究で提案したような生物規範型運動生成・制御機能と同様なことを複雑に行うことになる。

また、本研究の実験を通して得られた結果を力学に基づく制御による歩行実験[30]の結果と比較すると、生物規範型制御の利点として以下をあげることができる。

- (a) 本研究の実験で示されたように、CPGは「筋骨格系との相互引き込み」、「自己安定化」、「センサ・フィードバックに対する周期・位相の自律調整」、「自動補間」の能力を持つ。CPGのこのような能力が、坂、障害物、うねりがあるような不整地の適応動歩行の実現を非常に容易なものにした。
- (b) 従来の歩行ロボットは軌道計画、およびそれに従う関節制御というように二つの異なる問題を考慮する必要があったために、システム全体の最適化、適応、学習を困難なものとしていた。しかし、生物規範型制御は軌道計画が存在せず、トルクを出力するCPGと反射からなる単一系が、歩行の生成・制御のために用いられており、システムが単純なものとなっている。例えば、従来の方法[30]における数千行の運動計画・制御プログラムが本手法においてはわずか五百行程度に短縮され、動歩行の軌道生成や制御に関する要素がすべてCPGや反射のパラメータに凝縮された。これらの利点は、さらに将来のより高度な不整地での自律適応的な歩行への可能性を示している。
- (c) において、ロボットの持つダイナミクスはCPGや反射のパラメータに組み込まれている。CPGのパラメータはロボットに適した歩行周期などを参考にしてシミュレーションと実験により決められ、反射のパラメータは実験により決定された。一般的なニューラルネットワークの学習問題とは異なり、本研究での神経モデルのパラメータは時定数や反射の係数など、物理的な意味がはっきりしているので、手動での調整はそれほど困難ではなかった。ただし、筋骨格系に適した神経系の自動設計は今後の重要な課題である。

6. お わ り に

動的で非常に柔軟な歩行を行う動物の神経系を参考にして、「リズム発生機構(CPG)」にセンサ情報に基づく伸張反射、前庭脊髄反射、腱・伸張・屈曲反応などの「反射機構」を組み込み、種々のパラメータを一定のまま4足ロボットによる、12度程度の坂、高さ3[cm]程度の障害物、うねりが続く中程度の不整地上の動歩行を実現した。この実験により、本研究で提案する生物規範型制御があらかじめ予想されていない不整地に対して自律的な適応性を持つことが示された。いくつかの実験映像がWWW上(<http://www.kimura.is.uec.ac.jp>)で公開されている。

多賀のシミュレーション・モデル[11][12]では、CPGへ入るセンサ情報は、伸張反射のための角度・角速度情報と、それらを遊脚・支持脚で切り替える体性感覚のみであった。それに対

して本研究では、CPGへ入るセンサ情報として、腱反応のための支持脚負荷情報や伸張と屈曲のための興奮性信号を発生する接触情報などの体性感覚情報、重力方向を知るための前庭感覚情報を追加し、より高度な不整地での適応動歩行をロボットにより実現した。

小脳モデルに基づく運動の調節[8]、視覚情報に基づくCPGへの指令入力の学習的生成手法、ロール・ヨー面運動の制御などが今後の課題となっている。

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] J. Pratt and G. Pratt.: "Intuitive Control of a Planar Bipedal Walking Robot," Proc. of ICRA98, 1998.
- [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] 伊藤: "歩行運動とリズム生成", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.3, pp.320-325, 1993.
- [8] 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.
- [9] J.J. Collins and I.N. Stewart: "Coupled nonlinear oscillators and the symmetries of animal gaits," J. of Nonlinear Science, 3, pp.349-392, 1993.
- [10] A.J. Ijspeert, J. Hallman and D. Willshaw: "From lampreys to salamanders: evolving neural controllers for swimming and walking," Proc. of SAB98, pp.390-399, 1998.
- [11] G. Taga, Y. Yamaguchi and H. Shimizu: "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators," Biological Cybernetics, 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," Biological Cybernetics, 73, pp.113-121, 1995.
- [13] 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.
- [14] 秋山, 木村: "神経振動子を用いた四足動歩行—ベース, トロットの實現—", 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.227-228, 1995.
- [15] 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.
- [16] W. Ilg, et al.: "Adaptive periodic movement control for the four legged walking machine BISAM," Proc. of ICRA99, pp.2354-2359, 1999.
- [17] M.L. Shik and G.N. Orlovsky: "Neurophysiology of Locomotor Automatism," Physiol. Review, 56, pp.465-501, 1976.
- [18] S. Grillner: "Control of locomotion in bipeds, tetrapods and fish," In Handbook of Physiology, volume II, American Physiol. Society, Bethesda, MD, pp.1179-1236, 1981.
- [19] H. Forssberg, S. Grillner and S. Rossignol: "Phasic gain control of reflexes from the dorsum of the paw during spinal locomotion," Brain Res., 132, pp.121-139, 1977.
- [20] A.H. Cohen and D.L. Boothe: "Sensorimotor Interactions Dur-

- ing Locomotion: Principles Derived from Biological Systems," Autonomous Robotics, vol.7, no.3, pp.239-245, 1999.
- [21] 真島, 猪飼: 生体の運動機構とその制御. 第4章, 杏林書院, 1972.
- [22] T. Drew et al.: "Role of the motor cortex in the control of visually triggered gait modifications," Can. J. Physiol. Pharmacol., 74, pp.426-442, 1996.
- [23] H. Kimura, Y. Fukuoka and H. Nakamura: "Biologically Inspired Adaptive Dynamic Walking of the Quadruped on Irregular Terrain," Robotics Research 9, J.M. Hollerbach and D.E. Koditschek Eds, Springer London, pp.329-336, 2000.
- [24] K. Matsuoka: "Mechanisms of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators," Biological Cybernetics, 56, pp.345-353, 1987.
- [25] 赤澤: "運動制御と筋特性", 計測と制御, vol.33, no.4, pp.304-309, 1994.
- [26] 南山堂: 医学大辞典, p.1067, 1998.
- [27] 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, 118, pp.229-239, 1983.
- [28] 中尾: ステッドマン医学大辞典第4版, p.1095, メジカルビュー社, 1997.
- [29] K. Pearson et al.: "Corrective responses to loss of ground support during walking II, comparison of intact and chronic spinal cats," J. of Neurophys., 71, pp.611-622, 1994.
- [30] 木村, 下山, 三浦, "四足歩行ロボットの力学的解析", 日本ロボット学会誌, vol.6, no.4, pp.367-379, 1988.

付録 A. 本研究で用いられたパラメータの値

Table 1 Parameters used in experiments

parameters	value	parameters	value
u_{0i}	8.5	p_f, p_e (Nm)	0.075, 0.12
τ	0.05	k_{tsr} (1/rad)	8.0
τ'	0.6	k_{tr} (s/rad)	5.8
β	1.5	k_{er} (1/rad)	5.0
w_{fe}	-2.0	k_{fr}	50.0
w_{ij}	± 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。(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)