学術・技術論文

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 末消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

*University of Electro-Communications

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

^{*}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. 生物規範型步行制御

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) 経由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



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」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,CPG 入力 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 足口ボット (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 イアンスは不整地動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)を平歯車により構成し、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, fx, fz はそれぞれ x, z 方向力センサ値とし, LFS.x, LF.fx のように 用いる.

2.3 CPG を用いた整地動歩行

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)).

$$\tau \dot{u}_{\{e,f\}i} = -u_{\{e,f\}i} + w_{fe}y_{\{f,e\}i} - \beta v_{\{e,f\}i} + u_{0i} + Feed_{\{e,f\}i} + \sum_{j=1}^{n} w_{ij}y_j$$

$$y_{\{e,f\}i} = \max(0, u_{\{e,f\}i}) \qquad (1)$$

$$\tau' \dot{v}_{\{e,f\}i} = -v_{\{e,f\}i} + y_{\{e,f\}i} + y_{\{e,f\}i} + y_{\{e,f\}i}$$

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

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

$$Cpg_Tr = -p_e y_e + p_f y_f \tag{2}$$

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 $\theta = (\text{joint angle}) + \pi/2 [\text{rad}])$. 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.

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

desired angle =
$$1.7Cpg_Tr + 0.26$$
 [rad] (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($Feed_e = Feed_{e\cdot tsr}$, $Feed_f = Feed_{f \cdot tsr}$) 平地動歩行実験を行い, 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動歩行

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.

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.

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

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

$$Feed_e = Feed_{e \cdot tsr \cdot vsr} + Feed_{e \cdot tr}$$

$$Feed_f = Feed_{f \cdot tsr \cdot vsr}$$
(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 のない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とものする [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 $Feed_{e\cdot er}$ を CPG の伸筋ニューロンに興奮性に接続する.

$$Feed_{e \cdot er} = \begin{cases} k_{er} \theta_{vsr} & (0 \le \theta_{vsr}) \\ 0 & (\theta_{vsr} < 0) \end{cases}$$
(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 $Feed_{f\cdot fr}$ を CPG の屈筋ニューロンに興奮性に結合する.

$$Feed_{f,fr} = (k_{fr}/0.12)(0.12 - t)$$
 (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.

$$Feed_e = Feed_{e \cdot tsr \cdot vsr} + Feed_{e \cdot tr} + Feed_{e \cdot er} (10)$$

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



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

式(10)に Feede.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))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.10A 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





Fig. 9 Terrain of medium degree of irregularity



Fig. 10 Walking up and down a slope of 12 degrees and over an obstacle 3cm in height

とと CPG が適応的に位相の調節を行ったことをそれぞれ意味 する.このように CPG へのフィードバック信号の強化は CPG の自律適応能力の促進にもつながる.また,下りを歩行した後, 5 [sec] 過ぎに障害物をまたぎ越えている.このときは障害物の 上に乗り上げず,多少前に傾いた状態(B)で前脚,後脚とも に障害物につまずいたが,屈曲反応で無事またぎ越えた.



Fig. 11 Photos of walking up and down a slope: (a) and walking over an obstacle: (b)



Fig. 12 Walking on terrain undulations



Fig. 13 Photos of walking on terrain undulation

不整地 Fig.9(b) 上を歩行したときの結果を Fig.12 と Fig.13 に示す.Fig.12 において、脚が凸につまずいたり(A, B),凸に乗り上げたり(C, D)しながら、かつ胴体もピッチ 平面内で揺動しながら安定な歩行が持続していることが分かる. このように、CPG 経由の脊髄反射によって、瞬間的な不整地 適応のためのトルク付加だけでなく、CPG の位相を CPG の 引き込み能力により適切に自律調整できるということが示され た.さらに、式(1),(10)の制御において CPG 経由の複数の 反射・反応が互いに悪影響を及ぼすことなく両立していること、 および、種々のパラメータを一定のままより高度な不整地上の 動歩行を実現できたことにより、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する強い適応性 を持つことが、実験により確認された.

5.考察

本研究において歩行の核となる CPG を用いるのではなく,従 来の歩行ロボットの軌道と運動方程式に基づくフィードバック・ フィードフォワード・トルクを用いた制御 [30] において,同様

515

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.

(b) 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・伸展・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な不 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展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

- 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―ペース,トロットの 実現―",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.



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)

- [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.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	$p_f, p_e \ (\mathrm{Nm})$	0.075, 0.12
au	0.05	k_{tsr} (1/rad)	8.0
au'	0.6	k_{tr} (s/rad)	5.8
eta	1.5	k_{er} (1/rad)	5.0
w_{fe}	-2.0	k _{fr}	50.0
w_{ii}	± 1.0		



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)

517