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

竹 村 裕* 上 田 淳* 松 本 吉 央* 小笠原 司*

Three Dimensional Adaptive Walking of Quadruped Robot Using Sideways Sway Motion and Posture Reflex via Neural Oscillators

Hiroshi Takemura*, Jun Ueda*, Yoshio Matsumoto* and Tsukasa Ogasawara*

Legged locomotion has attracted many researchers' attention because it is very challenging to realize artificial systems which can generate the motion of legged animals with many degrees of freedom. Animals show marvellous autonomous adaptation abilities. It is well known that the motions of animals are controlled by internal nervous systems. In this paper, we propose a method to generate a three-dimensional locomotion based on structuring a simple model with neural oscillators, which generates locomotive patterns and sideways sway motion. The validity of the proposed method is verified using an autonomous quadruped robot.

Key Words: Dynamic Walk, Quadruped Robot, Rhythm Generation, Reflex, Sideways Sway Motion

1. は じ め に

近年ロボットの移動手段として脚式移動の実用化に対する要望が高まっている。脚式ロボットは冗長自由度を持った非線形システムであることから制御理論検証対象としても大きな魅力をもっており、これまでも様々な視点から研究がなされている。1脚[1]、2脚[2]~[4]、4脚ロボット[5][6]を用いた不整地走行・動歩行もある程度実現している。これら従来の脚式ロボットの多くは、ロボットと環境との厳密なモデルを構築し、これを解析した結果を用いてロボットの関節軌道を生成し、歩行や走行を実現している。しかし、ロボットが高速にしかも様々な環境を移動する場合には、モデル構築と解析を行って軌道を生成し制御するような方法は、非効率かつ適応性に乏しいものと考えられる。

これに対し、多くの生物の運動はその体内に張り巡らされた神経系により制御されていることは広く知られた事実であり、数多くの研究も行われてきた。それらの研究が進むにつれ、生体内部には神経振動子と呼ばれるリズム形成機構がありこれが生物の周期的な活動(呼吸・移動運動など)に深くかかわっていることが明らかになってきた[7]~[10]。動物の歩行運動は、脊髄にあるリズム形成機構で作られた歩行リズムにより筋骨格系が駆動される。そして、脳幹・脊髄への感覚フィードバックに対する基本反射系の応答により、筋活動の切り替えや歩行パター

ンの変化が行われ、実環境下でも規則的な歩行リズムを基にした歩行運動が実現されている。

このような生物学、神経心理学等で得られた知見に基づいて、ロボットの歩容を生成しようとする研究が多く行われている。多賀[11]は、神経振動子の持つ引き込み特性を利用し、下肢の動的物理モデルを用いてシミュレーションを行い、矢状面の二次元2足歩行に関する動的制御系を提案した。木村ら[12]はCPG(Central Pattern Generator)と伸展・屈曲反射機構の組み合わせによる4足ロボットの不整地動歩行を実現した。また多脚ロボットに関しては、脚の適切な機械的コンプライアンスを使用した不整地での高速移動を実現した研究もある[13][14]。

歩行運動が矢状面内の運動と前頭面内の運動との協調運動であることから、安定した歩行運動の実現には矢状面内の運動と協調を保つように前頭面内の運動を制御することが必要である。上述の研究は、二次元の運動であったり、矢状面に比べて前頭面内の自由度が少ないものが多く、運動に用いることができる総トルクが小さい。このため、前頭面内の運動は外乱の影響を受けやすく、矢状面の運動から前頭面内の運動への干渉を無視することはできない。そこで、本稿では神経振動子経由の左右揺動運動を用いて、矢状面内の運動との協調を保つように前頭面内の運動を生成する三次元的な歩行生成手法を提案する。また、神経振動子経由の姿勢反射の導入による斜面適応歩容を提案し、実機モデルにより本提案手法の有効性を検証する。

原稿受付 2003年5月23日

*奈良先端科学技術大学院大学

*Nara Institute of Science and Technology

2. リズムベース型歩行制御

2.1 神経振動子モデル

神経回路によるリズム生成を説明するモデルとして種々のものが提案されている [15]~[18]。本稿では、個々のニューロンのモデルとしては、その数学的扱いが他のモデルに比べて比較的容易であり、相互に抑制する神経回路において振動を発生する条件等が詳しく解析されている松岡 [19] により提案されたモデルを採用する。このモデルは、多賀 [11] により 2 足歩行の筋骨格モデルと接続することで、路面変化や外力に対してロバスタな歩行を生成できることをシミュレーションにより示され、木村ら [12] により 4 足歩行ロボットの制御に用いられ、整地・不整地動作歩行を実現しその有効性が確認されているモデルと同様のものである。

このニューロンモデルを Fig. 1 に示すように複数組み合わせ、神経振動子モデルを構築する。一つの神経振動子は式 (1)~(3) のように非線形一階連立微分方程式で表される。このモデルは、二つのニューロンが互いに抑制し合う組により構成されている。ロボットの一つの関節は、それぞれの拮抗ニューロンの内部状態に比例する速度により駆動される。各神経振動子には各センサ情報をフィードバック入力として用いる。このとき、神経振動子と筋骨格系は相互に引き込まれ、同じ周期と位相で振動を始める。

$$\tau \dot{U}_{\{e,f\}i} = -U_{\{e,f\}i} + \sum_{j=1}^4 C_{ij} y_{\{e,f\}j} + C_{fe} y_{\{f,e\}i} - A V_{\{e,f\}i} + u_i + F_{\{e,f\}i} \quad (1)$$

$$\tau \dot{V}_{\{e,f\}i} = -V_{\{e,f\}i} + y_{\{e,f\}i} \quad (2)$$

$$y_{\{e,f\}i} = \max(U_{\{e,f\}i}, 0) \quad (3)$$

ここで、添字 i は各神経振動子、 $\{e, f\}$ はそれぞれ伸筋ニューロン、屈筋ニューロンを表す。 U, V はニューロンの内部状態、 y はニューロンの出力を表す。 u は視覚や聴覚などの上位中枢からの外部入力、 F は関節角度等のフィードバック入力を意味する。 A は疲労係数であり、 τ は歩行周期等に関係する時係数を表す。 C_{fe} は拮抗ニューロン間の結合係数、 C_{ij} は結合されている他のニューロン間の結合係数である。結果として関節を駆動するモータへの出力は、

$$g_i = \alpha(U_{ei} - U_{fi}) \quad (4)$$

となる。 α は各ニューロンからの出力を、関節を駆動するモータ

Fig. 1 Neural oscillator

タ速度に変換するための係数である。本稿においては u は一定値である。

2.2 神経振動子結合モデルによる歩行パターンの生成

本稿では、各脚の第一関節を駆動する神経振動子を相互結合して 4 個の神経振動子（右前足：RF、右後足：RR、左前足：LF、左後足：LR と名づける）からなるネットワークを構築する (Fig. 2)。このとき、複数の神経振動子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る。各神経振動子間の結合係数は以下の式により与える。本稿では符号のみを考慮し結合係数の大きさは考慮しない。なお、ロボットの各脚のモデルとして Fig. 2 のリンクモデルを想定している。

$$C_{ij} = \begin{cases} +1 & : \text{Excitatory Connection} \\ 0 & : \text{No Connection} \\ -1 & : \text{Inhibitory Connection} \end{cases} \quad (5)$$

本モデルでは結合係数の組み合わせを変えることにより walk 歩容、trot 歩容、pace 歩容、bounce 歩容など様々な歩行パターンを実現することが可能である。本稿では、trot 歩容を使用するために結合係数 C_{ij} に式 (6) の値を用いる。

$$\begin{aligned} C_{RF1f} &= C_{LFrf} = C_{RFrr} = C_{RRrf} = -1 \\ C_{LF1r} &= C_{LRLf} = C_{RRlr} = C_{LRRr} = -1 \end{aligned} \quad (6)$$

フィードバック入力について考えると、生物において重要なフィードバック運動の一つに反射がある。感覚受容器が刺激されると、その影響が効果器に現れる。この現象が意識とは直接関係ない場合を反射 (reflex) という。姿勢および運動には様々な反射が関与しており、歩行に関して代表的な反射の一つに伸張反射がある。伸張反射とは筋肉を引き伸ばすとその筋肉がもとの長さに戻ろうと収縮する反射である。また反射には、受容器の順応の速さにより相動性と緊張性がある [20]。Grillner ら [21]、多賀 [11]、木村ら [12] による神経振動子への関節角度フィードバックは緊張性伸張反射に相当するという知見に基づき、本稿でも式 (7) に示す関節角度フィードバック入力がすべての実験において採用されている。ここで、 θ_p は、第一関節角度を意味する。

Fig. 2 Neural oscillator network

$$\mathbf{F}_i = \begin{pmatrix} F_{ei} \\ F_{fi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \max(\theta_{pi}, 0) \\ \max(-\theta_{pi}, 0) \end{pmatrix} \quad (7)$$

各脚すべての関節を神経振動子により制御することも可能であるが、神経振動子の個数が増加するとそれに伴い決定しなくてはならないパラメータ数も増加してしまう。そこで本稿では、第二関節を第一関節に連動して駆動する従属関節とすることにより、神経振動子の増加を抑え脚先軌道計算の簡略化を図ることとする。具体的には式 (8) に従い、各脚先の接地センサの情報に基に第一関節の関節速度の微分値 ($\dot{\theta}_{pi}$) を第二関節の指令値 ($\dot{\theta}_{si}$, θ_{si}) として用いる。 k は [s/rad] の次元を持つゲインである。

$$\begin{cases} \dot{\theta}_{si} = k \frac{d\dot{\theta}_{pi}}{dt} & (\dot{\theta}_{pi} \geq 0) : \text{swing motion} \\ \theta_{si} = 0 & (\dot{\theta}_{pi} < 0) : \text{support motion} \end{cases} \quad (8)$$

これは、第一関節が復帰動作を行う間に脚の上下動作を行うためである。一般的に速度の微分値を速度として用いることはおかしく思われるが、第一関節の動きは周期運動であるため速度の微分値を利用することにより位相差をずらすことが可能である。これにより、復帰動作時に脚の上下動作、支持動作時に必要なトルクを出力する協応的運動と脚先軌道計算の簡略化を行うことが可能になる。第三関節については、後述する左右揺動運動の実現に用いる。

2.3 左右揺動運動

2.2 節で示したモデルを用いて歩行パターンの生成を行うのであるが、この手法のみでは矢状面の運動のみ考慮しており前頭面内の動的安定性を考慮していないことになる。転倒しないことが目的であればこれだけで十分歩行は可能であるが、実機での三次元的に安定した動歩行を実現することは困難である。trot 歩容を行う場合に動的安定性に関する回転運動が起こりうるのは支持対角線回りだけであり、この軸周りの回転のみ考慮すればよい。動的に安定した歩行を行うために前頭面内の運動として左右揺動運動を導入する。これは、左右方向のみの加速度を調整することで、ZMP 軌道を支持脚対角線上に常に保つように胴体を左右方向に揺動する補償軌道を生成し、支持対角線回りの回転運動を抑える手法である。広瀬ら [22] は、動力学を考慮した複雑な計算を行うことにより左右揺動軌道を生成し、静止状態から連続的に推進速度の切り替えを可能にする歩容生成手法を提案している。本稿では神経振動子を用いることにより複雑は軌道計算は行わず左右揺動運動を実現する手法を提案する。

前頭面内の運動を制御するために新たに神経振動子 (SSM : Sideways Sway Motion と名づける) を加え (Fig. 2), 左右揺動運動に必要な左右方向の加減速パターンを生成する。この神経振動子は、基本的には Fig. 1 のモデルとほぼ同じだが、関節角度フィードバック入力代わりに式 (9) に示すように胴体の左右方向の加速度 (a_x) をフィードバック入力とする。

$$\mathbf{F}_{ssm} = \begin{pmatrix} F_{ssme} \\ F_{ssmf} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \max(a_x, 0) \\ \max(-a_x, 0) \end{pmatrix} \quad (9)$$

左右揺動運動は左右方向の加速度のみを調整して行うために、左

右方向の加速度は周期的に変化する。この周期的な値を神経振動子にフィードバックすることにより SSM と左右揺動運動を同期させる。SSM と前述のリズム形成機構との結合係数 (Fig. 2) を次式のように定める。

$$C_{LFssm}, C_{RRssm} \gg C_{RFssm}, C_{LRssm} \quad (10)$$

これは、左右の揺動を矢状面の運動といかに同期させるかにより変化してくる。本稿では、支持脚対角線上に ZMP 軌道を保つように揺動させるために上式のように定めた。抑制結合により結合されているために、歩行速度が上がると左右揺動運動は小さくなり、逆に歩行速度が下がると大きくなる。SSM からの出力を各脚の第三関節の制御指令として用いることにより、実際に左右方向の加減速を行い、左右揺動運動を実現する。その結果、歩行パターンによる矢状面内の運動と左右揺動運動による前頭面内の運動とを協調させることができ、三次元的歩行を生成することができる。

2.4 姿勢反射の導入

脚式ロボットが傾斜面を歩行するときは、脚式ロボット特有の地面への適応性を発揮して、胴体を水平に保ったまま移動することができる。しかし傾斜面が急になると脚の可動範囲などのために胴体を傾斜させなければ歩行できなくなる。そのような傾斜面を胴体を傾斜させて歩行するときには、胴体の重心の垂直投影点が斜面下方にシフトして支持脚多角形から外れて不安定になり、平地で用いていた歩容がそのままでは使えなくなる。この問題を回避するための単純な方法は Fig. 3 に示すように胴体を水平にせず斜面上方にシフトすることである。

そこで、斜面への適応のために神経振動子経由の緊張性迷路反射を導入する。この緊張性迷路反射は、姿勢反射の一種で、頭部の位置やその変化による重力の方向の変動を前庭器官により感知し、延髄の前庭角を経て前庭脊髄路として脊髄へ下降し、四肢、体幹の筋の緊張を変化させる反射であり、頭部が上向きになると、伸筋のトーンが増し、逆に頭部が下向きになると屈筋のトーンが高くなる [20]。この反射を本稿に応用するために、神経振動子へのフィードバック入力として新たに次式を加える (Fig. 2)。

$$\mathbf{F}_{ulr} = \begin{pmatrix} F_{ulre} \\ F_{ulrf} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \max\left(\tan^{-1}\left(\frac{h \tan \phi}{l}\right), 0\right) \\ \max\left(-\tan^{-1}\left(\frac{h \tan \phi}{l}\right), 0\right) \end{pmatrix} \quad (11)$$

h は斜面からの重心までの距離、 l は第一リンク+第二リンクの長さ、 ϕ は矢状面内の胴体の傾きを表す。本稿では、歩行ロボットに頭部がないために、胴体の傾きを使用した。式 (1) に定常入力を加えると単純には加えた大きさ分だけニューロンの出力が大きくなることは知られている [19]。式 (9) のように傾き角度により伸筋ニューロン、屈筋ニューロンのどちらかにフィードバック入力を加えると加えられてニューロンの出力が大きくなり、結果として出力 g_i は入力された値の大きさ分だけシフトする。式 (9) は、胴体の傾き角度から第一関節角度の変化量を計算しフィードバック入力として使用している。結果として出力は胴体の傾き角度を修正するだけ第一関節角度をシフトす

Fig. 3 Vestibulo-spinal reflex

Fig. 4 Quadruped robot

る値になる。この値は、胴体の傾き角度に影響されるため傾き角度が一定であれば一定のシフト量になる。この反射により歩行ロボットの胴体が傾くと、傾いた方向に胴体をシフトし姿勢を保持しようとする。これにより、神経振動子の結合や内部パラメータの調整など行うことなく、フィードバック入力 (F_{ldr}) を加えることのみで斜面での安定した歩行が生成できる。

3. 歩行実験

3.1 システム構成

本稿で提案したアルゴリズムを検証するために、実機モデル TITAN-VIII [23] (Fig. 4) を用いて歩行実験を行った。脚式ロボットは 3 自由度の脚を 4 本、計 12 自由度を有する。PC (CPU: Pentium III 450 MHz, OS: RT-Linux, I/O ボード: RIF-01) とモータドライバを胴体上部、バッテリーを腹部に搭載し、無線 LAN を使用することにより自律型歩行ロボットに改良した。すべての計算は搭載した PC により行われ、完結している。また、各脚の裏には FSR による接地センサ、胴体中心には傾斜センサ、3 軸ジャイロセンサを取り付けている。なお、本実験で用いた神経振動子パラメータは、数学的・物理的条件を基にシミュレーションと経験を基に決定した。

3.2 整地動歩行実験結果

まず、平坦な路面での動歩行実験を行った。そのときの様子を Fig. 5 に示す。また、そのときの右前脚、右後脚の第一関節の角度、接地の状態、センサより得た胴体の左右方向の加速度を Fig. 6 に示す。

まず、Fig. 6(a) の各脚の第一関節の角度の結果を見ると、安定して振動しリミットサイクルを形成していることが分かる。その上、右前脚と右後脚とは逆位相になっており、代表的な四脚歩行動物の動的歩行の一つである trot 歩容時の歩行パターンを形成していることが分かる。また、Fig. 6(b) の接地状態から、支持脚相と遊脚相の遷移がスムーズに行われており、デューティ比がほぼ 0.5 になっていることが分かる。Fig. 6(a) と Fig. 6(b) を比較してみると第一関節の動きに連動して支持脚相から遊脚相への移行が行われていることが分かる。2.2 節で第二関節を第一関節の従属関節として簡略化して制御することにしたが、この結果より有効に機能していることが分かる。また、Fig. 6(c) に示す胴体の左右方向の加速度も、脚の動きと同期して振動しており、左右揺動運動も第一関節の動きに連動して実現されていることが分かる。なお、このときの歩行は歩行周期約 1.5 [s]、歩幅約 0.16 [m]、歩行速度約 0.24 [m/s] の動的歩行であった。

神経振動子 SSM を付加して実現した左右揺動運動の有効性を検証するために SSM を用いた場合と用いない場合のそれぞれの右後脚の接地状況を Fig. 7 に示す。SSM を用いない場合

Fig. 5 Snapshots of the dynamic walking on the regular terrain

(a) Prime joint angles

(b) States of the contact sensors

(c) Acceleration in the body's sideways sway

Fig. 6 Results of the dynamic walking on the regular terrain

には遊脚相中に接地センサの値が ON になることが多々あり、脚を引きずることがあることを示している。このため支持脚相と遊脚相の移行がスムーズに行われず不安定な状態が続く歩行が行われている。それに比べ、SSM を用いた場合には支持脚相と遊脚相の遷移が的確に行われており遊脚相中に脚が接地することはほとんどない。このことから明らかに SSM を用いた場合のほうがより安定した歩行を実現しており、SSM は歩行の安定性を向上させるのに有効であることが確認できる。

3.3 不整地動歩行実験

次に、斜面での動歩行実験を行った。斜面は多少湾曲してお

Fig. 7 States of contact sensor of the right-rear-leg with/without SSM

Fig. 8 Snapshots of walking up a slope

り傾斜角度は一定ではなく、斜度を調整できる斜面を作成して用いた。脚式ロボットはあらかじめ路面の情報は保持しておらず、歩行時のセンサ情報を基に歩行パターンを修正する。なお、実験に用いた神経振動子パラメータは整地歩行実験で用いたものと同様の値を使用した。

姿勢反射の有効性を検証するために姿勢反射を用いた場合と用いない場合での比較実験を行った。姿勢反射を用いないで斜面での歩行を行った場合には、約6度以上の斜面では歩行時に不安定な状態が続き、多くの滑りが発生し安定した歩行の実現はできず斜面を登りきることはできなかった。一方、Fig. 8に示すように、姿勢反射を用いた場合は最大斜度10度程度の斜面歩行を実現した。

そのときの胴体の傾き角度、右前脚、右後脚の第一関節の角度、接地の状態、センサより得た胴体の左右方向の加速度をFig. 9に示す。

まず、Fig. 9(a)の胴体の傾き角度と各脚の第一関節角度の結果を見ると、斜面を歩行するにつれて第一関節の角度がマイナス方向へシフトしていることが分かる。これは、姿勢反射の影響により斜面の傾きに対して姿勢を保持しようとし胴体を前方へ遷移させているためである。斜度10度の場合に式(11)により実機モデルの値（リンク長： $l = 200$ [mm]、斜面からの重心までの距離： $h = 246$ [mm]）を用いてフィードバック入力の値を計算すると約12度となる。グラフから第一関節角度のシフト量は最大で約13度で計算結果とはほぼ同値となっており、姿勢

(a) The body's tilt angle and prime joint angles

(b) States of the contact sensors

(c) Acceleration in the body's sideways sway

Fig. 9 Results of walking up a slope

反射によるフィードバック入力が有効に作用していることが分かる。また、Fig. 9(b)の接地状態から、整地歩行実験同様に支持脚相と遊脚相の遷移がスムーズに行われており、Fig. 9(a)とFig. 9(b)を比較してみると第一関節の動きに連動して支持脚相から遊脚相への移行が行われていることが分かる。姿勢反射を導入することにより平坦な路面同様に安定した歩行を実現している。

次にFig. 9(c)に示す胴体の左右方向の加速度も、脚の動きと同期して振動しており、斜面でも左右揺動運動が実現されていることが分かる。ただ、斜面の頂上付近で左右方向の加速度のパターンにずれが生じている。これは支持脚に大きなすべりが発生したため、神経振動子の出力に対して計画外の動きが生じ、左右揺動運動に必要な加速度を生成することができなかったためである。しかし、次の周期にはこの不規則なすべりに対しての引き込み現象が起これ、滑らかな加速度の生成に成功している。このことは、本提案手法が多少の外乱であればロボストに対処できることを示唆している。

4. おわりに

本稿では、複数の神経振動子を相互に結合したリズム形成機構を中心とした神経振動子結合モデルを用い、各センサからのフィードバック入力を利用した反射運動による矢状面内の周期的な歩行パターンの生成と前頭面内の左右揺動運動との協調を行う三次元的な歩行生成手法を提案した。また、第二関節を第一関節の従属関節とすることにより脚先軌道計画の簡略化を行っ

た。実機モデルに本提案手法を適応し動歩行を実現することにより本手法の有効性を確認した。左右揺動運動の有無による比較実験により、SSMを追加した神経振動子結合モデルを用いることで歩行時の安定性の向上させることができ、SSMが有効に作用することを確認した。整地動歩行実験で用いた各種パラメータを変化させることなく斜面での動歩行を実現することにより、姿勢反射の有効性を確認した。なお、今回の実験は前後方向の傾斜面のみで行ったが、左右方向の傾斜面への応用は容易である。ただし、凹凸がある路面へのそのままで応用は困難である。本手法は、従来の歩行ロボットの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、リズム発生機構と環境との相互作用の結果として、動的な適応が自律的に生成される。これらの実験を通して、比較的簡単な計算と少数のパラメータの操作のみで、柔軟性とロバスト性を兼ね備えた整地・不整地動歩行を実現できたことは、神経振動子結合の潜在的な適応能力を示唆している。

本稿では、神経振動子の各種パラメータは、単純な力学モデルの計算結果を参考に経験的に決定したが、適切なパラメータを見つけ出すのは大変な作業である。今後、自律的な適応を目指していくには、これらのパラメータは学習などの何らかの手法を用いて決定すべきである。その上、神経振動子はある程度の外乱は引き込み特性により吸収することが可能であるが、それ以外の場合に対応するためには、パラメータの変更や神経振動子の結合を切り替えをいかに行うかが重要になる。視覚センサ等を使用することにより下位の歩行制御だけではなく、上位中枢からの随意的な運動指令や姿勢制御などに対応するシステムの構築が今後の課題である。

参考文献

- [1] J.K. Hodgins and M.H. Raibert: "Adjusting Step Length for Rough Terrain Locomotion," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.7, no.3, pp.289-298, 1991.
- [2] 梶田, 谷: "実時間路面形状計測に基づく動的2足歩行の制御", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.7, pp.1062-1069, 1996.
- [3] 山口, 木下, 高西, 加藤: "路面形状に偏差のある環境に対する適応能力を持つ2足歩行ロボットの開発", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.4, pp.546-559, 1996.
- [4] C.M. Chew, J. Pratt and G. Pratt: "Blind Walking of a Planar Bipedal Robot on Sloped Terrain," Proc. of ICRA99, pp.381-386, 1999.
- [5] 米田, 飯山, 広瀬: "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.
- [6] M. Buehler et al.: "Scout: A Simple Quadruped that Walks, Climbs and Runs," Proc. of ICRA98, pp.1707-1712, 1998.
- [7] G.S. Stent, W.B.Jr. Kristan, W.D. Friesen, C.A.A. Ort, M. Poon and R.L. Carabrese: "Neuronal Generation of the Leech Swimming Movement," Science, vol.200, pp.1348-1357, 1978.
- [8] J.T. Bachanam and S. Grillner: "Newly Identified Glutamate Interneurons and Their Role in Locomotion in Lamprey Spinal Cord," Science, vol.236, pp.312-314, 1987.
- [9] 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.
- [10] 佐藤: "運動プログラムと行動出力", 脳・神経と行動, pp.159-178, 岩波書店, 1996.
- [11] G. Taga: "A model of the Neuro-musculo-skeletal System for Human Locomotion II. —Real-time Adaptability under Various Constraints," Biological Cybernetics, vol.73, pp.113-121, 1995.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 銅谷, 吉澤: "神経回路網における運動パターンの記憶", 電子情報通信学会技術研究報告, MBE vol.87, no.141, pp.293-300, 1987.
- [16] K. Tsutsumi and H. Matsumoto: "Ring Neural Network que a Generator of Rhythmic Oscillation with Period Control Mechanism," Biol. Cybern. vol.51, pp.181-194, 1984.
- [17] J.S. Bay and H. Hemami: "Modeling of a Neural Pattern Generator with Coupled Nonlinear Oscillators," IEEE Trans. on Biomedical Engineering, BME, vol.34, no.4, pp.297-306, 1987.
- [18] H. Yuasa and M. Ito: "Coordination of Many Oscillators and Generation of Locomotory Patterns," Biol. Cybern. vol.63, pp.177-184, 1990.
- [19] K. Matsuoka: "Sustained Oscillations Generated by Logical," Cybernetics, Biological Cybernetics, vol.52, pp.367-376, 1985.
- [20] 医学大辞典, p.1067, 南山堂, 1998.
- [21] 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.
- [22] 広瀬, 米田: "4足歩行機械の静動融合歩容とその連続軌道生成", 日本ロボット学会誌, vol.9, no.3, pp.267-275, 1991.
- [23] 広瀬, 有川: "研究用プラットフォームとしての普及型歩行ロボット TITAN-VIIIの開発", 日本ロボット学会誌, vol.17, no.8, pp.1191-1197, 1999.

竹村 裕 (Hiroshi Takemura)

1976年8月4日生。2001年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。2003年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科研究員となり現在に至る。脚式移動ロボットの研究, 生体計測研究に従事。工学博士。(日本ロボット学会正会員)

上田 淳 (Jun Ueda)

1971年6月11日生。1996年京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了。1996～2000年三菱電機株式会社先端技術総合研究所勤務。2002年京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了。同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手となり現在に至る。マニピュレータ, ロボットハンドの研究に従事。工学博士。日本機械学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)

松本吉央 (Yoshio Matsumoto)

1970 年 8 月 21 日生。1998 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。同年オーストラリア国立大学研究員。1999 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。2001 年同助教授となり現在に至る。ロボットビジョンおよびヒューマンインタフェースの研究に従事。工学博士。電子

情報通信学会会員。

(日本ロボット学会正会員)

小笠原司 (Tsukasa Ogasawara)

1955 年 10 月 16 日生。1983 年東京大学大学院工学研究科情報工学専門課程博士課程修了。同年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所入所。1993～1994 年ドイツ、カールスルーエ大学客員研究員。1998 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授となり現在に至る。知能ロボットの研究に従

事。工学博士。計測自動制御学会、情報処理学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)