

環境適応機能を有する歩行ロボットの構成論

土屋 和雄*・青井 伸也†・船戸 徹郎†

1. はじめに

ヒトや動物は、時々刻々変動する環境の中を、その変動に合わせた適応的な運動を行っている。ヒトや動物の環境適応運動に対して、従来、二つの生成機構が考えられている。一つは、中枢神経系の指令によって生成される随意運動であり、他方は、身体が環境と相互作用することによって誘発される反射動作である[19]。Bernsteinは、記憶されている運動プログラムの中で、環境に適した運動が中枢神経系によって指令され、発現されると考えた。しかしそれと同時に、中枢神経系からのフィードフォワード指令だけでは複雑に変化する環境の中で適応的な運動を行うことはできないことも指摘し、中枢神経系は、与えられたタスクに対して環境からの外乱を実時間で修正できる柔軟な運動指令を生成していることを示唆した。一方、Sherringtonは、脊髓反射を中心とした数多くの研究を行い、反射はフィードバック機構に基づく脊髓の統合反応であることを明らかにするとともに、反射に含まれる神経生理学的なパラメータを中枢神経系が調整することで、環境に適応的な運動が発現されると考えた。GelfandとTsetlinは、これらの環境適応運動の二つの生成機構を統合する階層型のモデル（構造ユニット）を提案している。このモデルでは、中枢神経系からの制御指令は運動要素に対して拘束条件として働き、運動要素はこの拘束条件のもとで他の要素および環境との相互作用が最小となるように組織化されていく。タスクに依存して組織化された運動要素の運動は、シナジーとよばれている[9]。

近年、生理学における実験的研究の進展とともに神経筋骨格モデルに基づくシミュレーション研究によって、シナジーをはじめとするヒトや動物の運動制御機構に関する要素概念の実体論的な解明とともに、それらを統合した運動制御システムのシステム論的な理解が進んでいる。本解説では、歩行を対象として、適応的な運動制御機構をシステム論的な側面から解説を行うとともに、それらの知見に基づいた環境適応機能をもつロボットの構成論について述べる。

2. 歩行におけるシナジー

歩行において、運動要素のタスクに依存した組織的な運動であるシナジーは、骨格系の運動あるいは筋活動において観測され、それぞれ運動学シナジー (kinematic synergy), 筋シナジー (muscle synergy) とよばれている[18]。これらのシナジーは、多点運動計測技術や多点筋電計測技術とともに、高次元時系列解析法の進歩によって、その時空間構造が同定され、その知見をもとに歩行の制御機構の検討が進められている。

2.1 運動学シナジー

歩行中の関節の運動をモーションキャプチャで計測し、全身7関節の角度の時系列を並べると、各関節が独立に動くのではなく、一定の関係を保ちながら変化しているように見える（第1図A）。この関節間の相対関係を調べるために、各関節の時系列を列ベクトルとする次のような行列 $R(\theta, t)$ を構成する。

$$R(\theta, t) = \begin{matrix} \text{time} \downarrow \\ \begin{matrix} \text{foot} & \text{shank} & \cdots \\ \theta_1(t_1) & \theta_2(t_1) & \\ \theta_1(t_2) & \theta_2(t_2) & \cdots \\ \vdots & \vdots & \end{matrix} \end{matrix} \quad (1)$$

この七つの関節の時系列データ $R(\theta, t)$ に特異値分解を施すと、得られる特異値の値から $R(\theta, t)$ の時空間構造は直交する二つの空間パターン $z_1(\theta)$, $z_2(\theta)$ と時間パターン $\lambda_1 v_1(t)$, $\lambda_2 v_2(t)$ でほとんど表現できることがわかる。

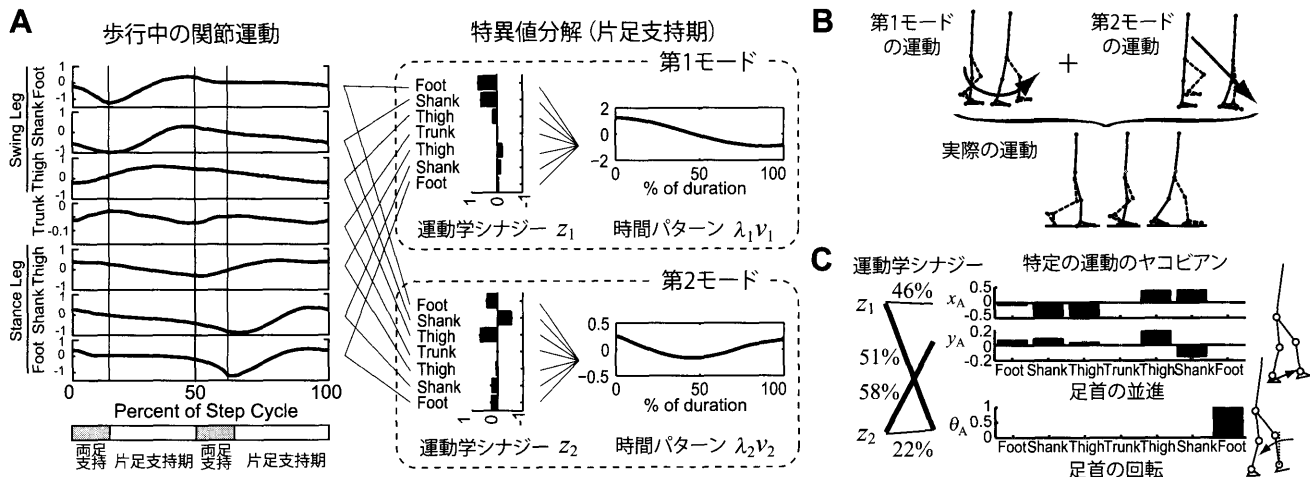
$$R(\theta, t) \simeq R_0(\theta) + \sum_{i=1}^2 \lambda_i v_i(t) \cdot z_i^T(\theta) \quad (2)$$

ここで $R_0(\theta)$ は $R(\theta, t)$ の時間平均であり、 λ_i は特異値、 $v_i(t)$, $z_i(\theta)$ ($i=1,2$) はそれぞれ $R(\theta, t)$ の左特異ベクトル、右特異ベクトルとして得られる。このとき、空間パターン $z_i(\theta)$ は運動中に持続的に見られる関節の活動パターン（動かし方）であり、運動学シナジーとよばれる。歩行運動はシナジー $z_1(\theta)$, $z_2(\theta)$ をそれぞれ決まったタイミング、つまり時間パターン $\lambda_1 v_1(t)$, $\lambda_2 v_2(t)$ で駆動するように構成される[22]。シナジーのようなモジュール構造が存在することは、冗長性をもつ全身運動の制御に本質的意味をもつことが予想され、これまで広く注目

* 同志社大学 理工学部

† 京都大学 大学院 工学研究科

Key Words: legged robot, adaptability, synergy, neuromusculoskeletal model, phase resetting.



第1図 運動学シナジー. A: 歩行中の関節運動には関節間に協調性の高い動かし方が2種類存在し、全体の運動はその2種類の運動の和として表現される。これら2種類の運動は時不変な関節間の活動パターン（運動学シナジー）が特定の時間パターンで励起することで構成されている。各関節角度はTrunk: 体幹, Thigh: 大腿, Shank: 下腿, Foot: 足の仰角として定義されている。B: 片足支持期の運動を構成する2種類の動きを記述すると、それぞれ遊脚を回転、伸縮するような動きになる。C: 運動学シナジーを特定の動きのヤコビアンと比較することで、シナジーによる動きを定量的に評価できる。

を集めている[18]。

歩行における運動学シナジー z_i と時間パターン $\lambda_i v_i$ の間に性質の違いがあるのかを調べるために、われわれは歩行環境の異なるさまざまな条件下でシナジーを導出し、得られた運動学シナジーと時間パターンをそれぞれの環境ごとに比較した。とくに、異なる歩行速度や傾斜角において得られた結果を比較すると、運動学シナジーには違いが見られたが、時間パターンには統計的な違いが見られなかった[7]。つまり、運動学シナジーと時間パターンの間には異なる性質が存在し、このことから、それぞれが異なる要因に基づいて生成されている可能性があることが示唆される。

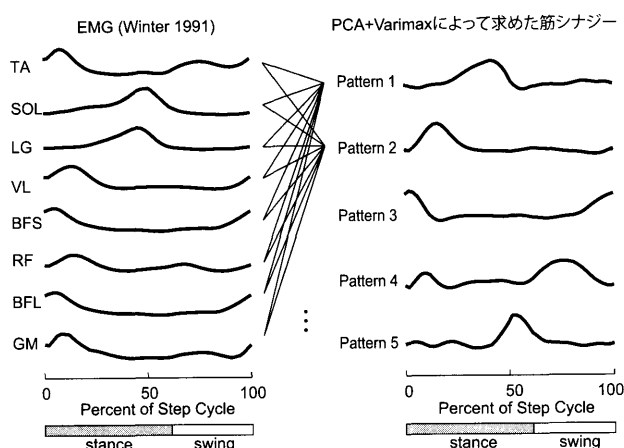
ただ一方で、同じ環境下で得られた二つの運動学シナジーおよび時間パターンは、一般的に被験者が変わっても大きな違いは見られなかった。それでは、この二つのシナジーがどのような意味をもっているのか？ また何を基準としてこのようなシナジーのパターンが生成されているのか？ という疑問が生じる。一般的に、特異値分解などシナジーを抽出する統計的手法では、解析過程においてパターンの意味を考慮しない。したがってその意味を考えるためには、得られたパターンの性質を調べる必要がある。そこで、 z_1, z_2 で構成される二つの運動 $\lambda_1 v_1 \cdot z_1^T, \lambda_2 v_2 \cdot z_2^T$ をそれぞれ第1モード、第2モードとし、各モードの片足支持期における運動を記述すると、第1図Bのように、第1モードでは遊脚を前に振り出すような動き、第2モードでは遊脚を振り下ろすような動きが見られた。Ivanenkoら[11]は、歩行中の下肢3関節の角度履歴から求めた各モードのパターンを、歩行中の実際の足の動きと比較することで、足の伸縮と回転に応じてシナジーが生成されていることを示している。われ

われはこれまでに、歩行中のさまざまな情報量（動き）のヤコビアンと運動学シナジーを比較することで、それぞれのモードがどのような情報量から構成されるのかを定量的に評価する方法を提案している（第1図C）[8]。その結果、片足支持期では遊脚の並進移動と回転で第1モードの9割以上、第2モードの8割以上が表され、残りの運動は重心の並進移動で表されることが示された。また両足支持期では、左右の足の回転と重心の並進移動で9割の運動が構成されることが示された。

2.2 筋シナジー

シナジーは関節角のような運動学データだけでなく、筋電図 (Electromyogram: EMG) に統計的処理を施すことで、筋肉の活性パターンの間の関係としても得ることができる。第2図は、Winter[23] が計測した8個の筋活動に主成分分析および Varimax 回転を施して得られた筋シナジーのパターンを示しており、表示している五つのパターンで8個の筋活動の9割以上が表される。Ivanenkoら[14]は歩行中の25個の筋の活動が第2図と同様の五つのパターンで表せることを示しており、さらに歩行中のボールの蹴り出しや障害物をまたぐような歩行に付随する動作でも同様の五つのパターンが見られ、それぞれの運動に応じて新たに六つ目のタイミングを表すパターンが現れると主張している[13]。

d'Avellaら[5]は、より一般的に全身運動がいくつかの筋シナジーから構成されているのかを調べるために、カエルの筋活動を長期間にわたって記録し、自然な活動中のジャンプ、水泳、歩行の筋シナジーを抽出した。その結果、いずれの運動にも共通した三つのシナジーと各活動ごとに異なる一つか二つのシナジーによって運動が構



第2図 筋シナジー. EMGに対して主成分分析およびVarimax回転を施すと、8個の筋肉の活動が五つのパターンで表現される。用いたEMGは文献[23]から抜粋。

成されることを示している。

EMGは神経制御系で与えられた運動指令が筋を通して直接運動を駆動する情報を計測したものであり、筋活動にシナジーが見受けられることは、ヒトや動物が運動出力に際してモジュール構造を用いて運動を生成していることを示唆している。また運動学シナジーに関して同様に、その存在が神経制御系においてどのような意味を持つのかについて議論が行われており、たとえばLacquanitiら[17]は関節運動のロバスト性から、運動学情報をもとに制御が行われており、その結果として運動学シナジーが作られていると主張している。また、運動学シナジーに応じた情報がネコの上行性伝導路で観察されており、このことは運動学シナジーがタスク生成へ作用する可能性を支持している[20]。このように、筋シナジーと運動学シナジーは、ヒトや動物の神経制御系に強く関与しており、シナジーを調べることは神経制御系の解明に有効であると考えられる。

3. 歩行のシステム研究

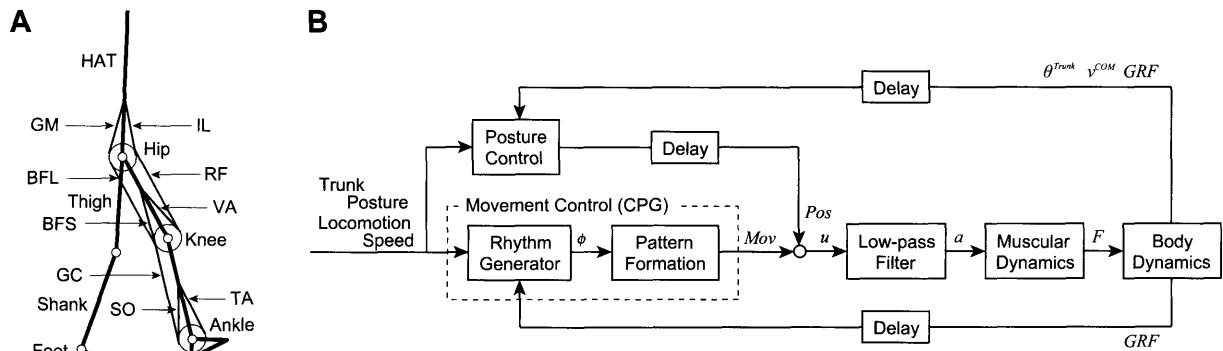
最近の神経生理学研究は、中枢神経系はタスクに依存して組織化された運動学シナジーあるいは筋シナジーを通して筋の時間的・空間的な活性を制御していることを明らかにしている。しかし一方で、中枢神経系からの運動指令は筋の時間的・空間的な活性を一義的に決めるものではなく、実際に活性化されて実行される筋シナジーは、中枢神経系からの拘束のもとで身体と環境の相互作用の中で組織化されると考えられている。神経系モデルと筋骨格モデルを結合した神経筋骨格モデルを用いたシミュレーション研究、およびハードウェアモデルを用いたロボット研究は、これらの制御機構の解明に対する有効な手段として期待されている。

3.1 ヒトの歩行の動力学シミュレーション

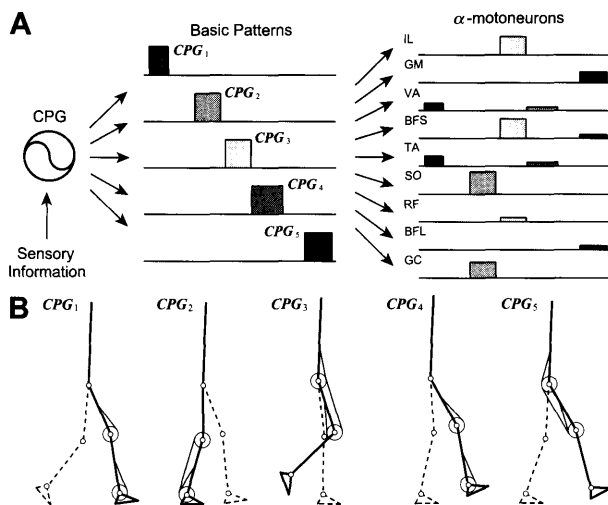
ヒトや動物のように多様な環境のもとで適応的な歩行を実現するためには、脳神経系における運動指令の適切な時空間パターンの生成と、感覚情報に基づく状況に応じた調整が重要となるはずである。本節では、これまでに概説したような筋シナジーに着目した運動指令の時空間パターンの生成と、神経生理学的にその作用が示唆されている位相リセットを用いた運動指令の時間パターンの調整に着目してヒトの2脚歩行の数値モデルを構築し、動力学シミュレーションを通して、適応的な歩行生成に寄与する神経制御系の機能的な役割を明らかにすることを目的とした研究について概説する[1]。

第3図は、ヒトの筋骨格モデルと神経制御モデルを示している。骨格は、頭部・上肢を含んだ体幹1節と、それぞれ大腿・下腿・足の3節からなる左右両脚の合計7節から構成される2次元直鎖型剛体リンク系としてモデル化し、筋は歩行の生成に主要な筋を片脚に9筋用いて、受動的な粘弾性要素や、収縮要素における張力-長さ、張力-速度関係に依存する力学特性をモデル化している。神経制御モデルにおいて運動ニューロンに投射される運動指令が決定され、対応する筋の収縮要素の発生する筋張力が決まり、環境を通して歩行が生成される。この神経制御モデルにおける運動指令の生成は、1) 筋シナジーに基づくフィードフォワード (FF) 的運動指令の生成、2) 接地感覚情報に基づく位相リセットによるFF的運動指令のタイミング調整、3) 神経伝達遅れも考慮した体性感覚情報に基づく姿勢制御によるフィードバック的運動指令の生成の三つの要素から構成される。ここではとくに、1), 2) について概説する。

神経生理学的研究から、脊髄に存在する Central Pattern Generator (CPG) が重要な役割をもつことが知られている[10]。CPGについてはまだ不明な部分も多いが、近年、リズム発生部 (Rhythm Generator: RG) とパターン形成部 (Pattern Formation: PF) からなる2層構造をもつことが示唆されており[3,21], RGは歩行の基本となるリズムを生成し、PFはこのリズム情報をもとに運動指令の時空間パターンを形成する。すなわち、リズムの生成と具体的な運動パターンの生成が、それぞれ独立した情報処理系で行われる。また2.2で概説したように、歩行中の筋活動は五つのパターンの組合せでほとんど表現されることが示唆されており、CPGは接地などのイベントに応じてこのようなパターンを生成し[12], RGにおいて感覚情報に基づいて生成するパターンの位相をシフトしてリズムをリセットする (位相リセット) ことが示唆されている[21]。そこで、CPGのRGのモデルとして各脚の運動に対応する位相振動子を用いて基本となるリズムを生成し、PFのモデルとして、Joら[15]のモデルを参考に五つのパターンを矩形波でモデル化し、それらの組合せによりそれぞれの筋の基本的な活動パターンを構成した (第4図)。そして、接地情報に基



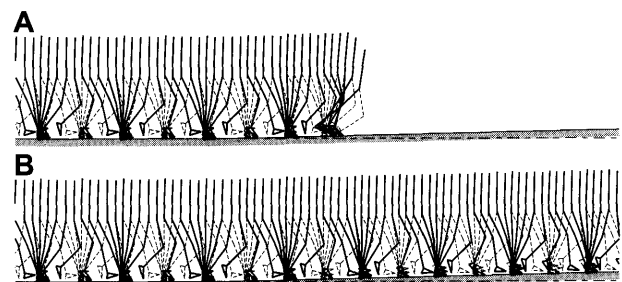
第3図 ヒトの筋骨格モデル (A) と神経制御モデル (B)



第4図 CPGの生成する五つのパターン（矩形波）(A) と活性化される筋 (B)

づいて矩形波の生成タイミングを調整することで、位相リセットをモデル化した。

この神経筋骨格モデルに基づいて動力学シミュレーションを行った結果、転倒することなく安定な歩行が生成された。そこで、感覚情報に基づいて周期的な運動指令の位相をシフトし、リズムをリセットする働きをもつ位相リセットが、適応的な歩行生成においてどのように寄与するのかを調べるために、さまざまな外乱や環境変化を与え、位相リセットを用いる場合と用いない場合とを比較した。その結果、位相リセットを用いる方が概して転倒することなく歩行を持続することができ、ロバストな歩行生成に大きく寄与することが示唆された（第5図）。位相リセットは、接地イベントに応じて運動指令の時間パターンを調整するため、外乱や環境変化の影響でイベントのタイミングが変化しても、そのイベントに合わせて運動指令の生成タイミングを調整することができる。この位相リセットによって、状況に応じてさまざまなリズムや位相履歴を実現することができ、力学的に整合性のとれた運動指令の生成が可能となり、適応的な歩行生成に寄与すると考えられる。

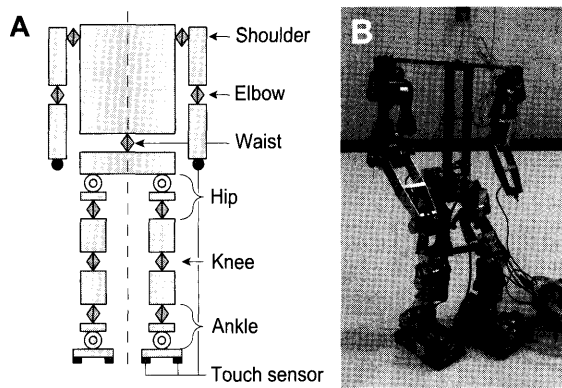


第5図 平地から上り斜面への環境変化における歩行の様子 (A：位相リセットなし，B：位相リセットあり)

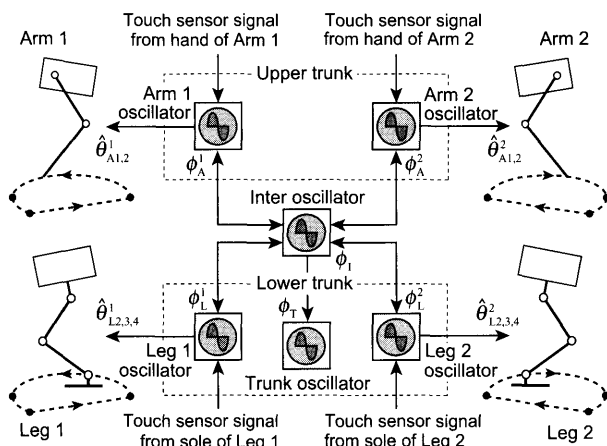
3.2 2脚ロボットの歩行制御

前節までに見たように、シナジーに基づく運動指令の時空間パターンの生成と位相リセットに基づく時間パターンの調整は、適応的な歩行生成に重要な寄与を与えることが予想される。本節では、これらの知見に基づいて歩行ロボットの制御を行った研究について概説する [2]。この研究では、2脚ロボットの4脚歩行から2脚歩行への遷移を対象としている。つまり、ある安定な歩容から異なる歩容へと、転倒することなくいかに安定に状態を遷移させるかという問題である。一般的に2脚ロボットは多くの自由度をもつため、遷移においてこのような冗長自由度問題をいかに解決するかという点と、この遷移では大きな姿勢の変化を伴い身体を支持する肢数の減少により安定性が大きく変化するため、いかに転倒を回避して状態を遷移させるかという点が重要となる。このような問題に対して、運動学シナジーに基づく適切な運動学パターンの生成と、位相リセットに基づく適応的な歩行生成に着目している。

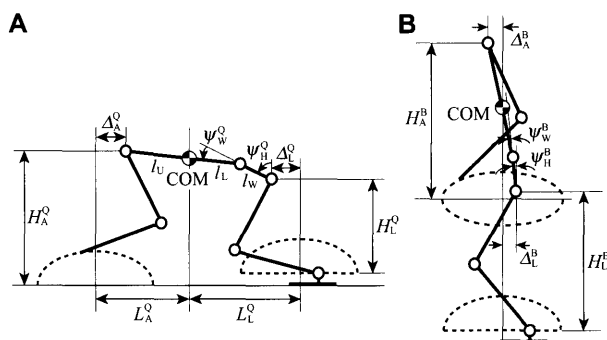
対象とする2脚ロボットは、上部と下部リンクから構成される胴体と、2リンクから構成される腕、5リンクから構成される脚をもつ（第6図）。それぞれのリンクは1回転自由度をもつ関節で結合され、関節の回転方向は図の通りである。2脚ロボットの運動生成のため、それぞれの四肢に独立に振動子を配置してリズムを生成し、それら振動子の位相に基づいて各関節の運動を生成する。その際、腕先と足首は、遊脚時には胴体に対して楕円軌道を描き、支持脚時には接地したところから直線軌道を描くように設定されている（第7図）。4脚歩行と2脚



第6図 2脚ロボット (A:概念図, B:ロボット)



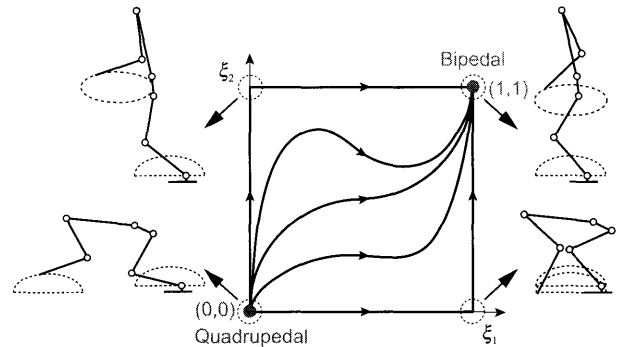
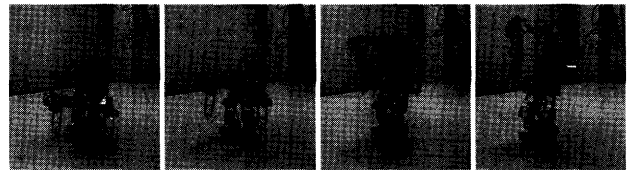
第7図 四肢に配置した振動子と振動子の位相に基づく運動学パターンの生成



第8図 4脚歩行(A)と2脚歩行(B)の全身運動学パターン

歩行は、胴体に対する腕先、足首の軌道の位置 Δ_A , Δ_L , H_A , H_L と、胴体の姿勢角 ψ_H , ψ_W を適切に選ぶことで決定される (第8図)。

これらを用いて安定な4脚歩行、2脚歩行が実現されるのであれば、先ほどのパラメータ Δ_A , Δ_L , H_A , H_L , ψ_H , ψ_W を4脚のものから2脚のものへ変化させることで運動学的に遷移は実現される。しかしながら、このような多くのパラメータをどのように変化させるかが問題となる。ヒトの立脚時の周期的な全身運動において、運動学シナジーとして質量中心の位置と体幹の姿勢を適切に制御するような二つの関節間の協調構造が存在することが知られている [6]。2脚ロボットの4脚から2脚への

第9図 二つの変数 ξ_1 , ξ_2 を用いて設計した運動学パターン

第10図 2脚ロボットの4脚から2脚への歩容遷移実験

歩容遷移においても、これら二つの要素を適切に考慮したうえでロボットの運動を生成することが重要であると考えられる。そこで、四肢と質量中心の位置関係と胴体の傾きを制御する二つの変数 ξ_1 , ξ_2 を導入し、先ほどのパラメータ Δ_A , Δ_L , H_A , H_L , ψ_H , ψ_W をこの二つの変数で記述することで歩容遷移時の運動学パターンを生成した (第9図)。さらに、遷移時の転倒回避を目的として、前節で概説したような接地情報に基づく位相リセットをモデル化することで、周期的な運動指令の時間パターンを状況に応じて調整させた。

設計した制御系に基づいて歩行実験を行ったところ、安定な4脚歩行、2脚歩行が生成され、4脚から2脚への歩容遷移も安定かつスムーズに実現された (第10図)。この実験に関しても、位相リセットを用いない場合には安定な遷移を実現することは難しく、転倒しやすい傾向が見受けられ、位相リセットに基づく運動指令の時間パターンの調整が力学的に大きく寄与することが示された。

4. おわりに

歩行は、中枢神経系の指令のもとで、個々の筋繊維の活性化のうえに組織化される筋活動パターン、筋シナジーによって実行される。筋シナジーは歩行の行われる環境に応じて生成され、その結果、環境適応的な歩行が実現される。要素の個別的運動の上に形成される組織化された運動パターンを介して環境適応機能が実現される事例は、生体のさまざまな階層で普遍的に見られる現象である。たとえば蛋白質のような生体分子は、その立体構造に対して高い特異性をもった反応相手と結合し、一定の機能を実現する。生体分子のとりうる立体構造にはいくつかの異なる準安定構造が存在するが、生体分子はその置かれた環境に応じた準安定構造へ遷移し、その準安定構造に対して高い特異性をもった反応相手と結合し

て、環境に適応した機能を実現する。川出 [16] は、生体分子が所属する上位の階層が生体分子に拘束を加えて、反応の多義性をもつ生体分子を環境に適応した反応に進ませることを生体分子の記号作用とよび、生体分子は「外界を記号化することによって内面化し、外界と一体化して生活する」と簡潔にまとめている。

歩行を含むヒトや動物の全身運動では、中枢神経系の指令のもとで、たとえば、筋繊維の活性化レベルにおいては、その置かれた環境に対応した筋シナジーが形成され、活性化することで環境に適応した運動が実現される。すなわち、「生物は、運動学シナジー、筋シナジーなどを介して、外界を記号化することによって内面化し、外界と一体化して運動を行う」。このような枠組みのもとで、神経動力学モデルを用いた生物の環境適応運動の研究が現在注目され、精力的に研究が始められている [4]。今後の発展に期待したい。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費補助金学術創成研究 (19GS0208) および JST, CREST の補助により行われた。

(2010 年 7 月 13 日受付)

参 考 文 献

- [1] S. Aoi, N. Ogiwara, T. Funato, Y. Sugimoto and K. Tsuchiya: Evaluating functional roles of phase resetting in generation of adaptive human bipedal walking with a physiologically based model of the spinal pattern generator; *Biol. Cybern.*, Vol. 102, No. 5, pp. 373–387 (2010)
- [2] S. Aoi, Y. Egi, A. Ichikawa and K. Tsuchiya: Experimental verification of gait transition from quadrupedal to bipedal locomotion of an oscillator-driven biped robot; *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots Syst.*, pp. 1115–1120 (2008)
- [3] R. E. Burke, A. M. Degtyarenko and E. S. Simon: Patterns of locomotor drive to motoneurons and last-order interneurons: Clues to the structure of the CPG; *J. Neurophysiol.*, Vol. 86, pp. 447–462 (2001)
- [4] H. J. Chiel, L. H. Ting, Ö. Ekeberg and M. J. Z. Hartmann: The brain in its body: motor control and sensing in a biomechanical context; *J. Neurosci.*, Vol. 29, No. 41, pp. 12807–12814 (2009)
- [5] A. d'Avella and E. Bizzi: Shared and specific muscle synergies in natural motor behaviors; *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol. 102, No. 8, pp. 3076–3081 (2005)
- [6] S. M. S. F. Freitas, M. Duarte and M. L. Latash: Two kinematic synergies in voluntary whole-body movements during standing; *J. Neurophysiol.*, Vol. 95, pp. 636–645 (2006)
- [7] T. Funato, S. Aoi, H. Oshima and K. Tsuchiya: Variant and invariant patterns embedded in human locomotion through whole body kinematic coordination; *Exp. Brain Res.*, Vol. 205, No. 4, pp. 497–511 (2010)
- [8] 船戸, 青井, 土屋: ヒトの歩行における全身の関節間協調動作の定量的評価; 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 8, pp. 996–1003 (2010)
- [9] I. M. Gelfand and M. L. Latash: On the problem of adequate language in movement science; *Motor Control*, Vol. 2, pp. 306–313 (1998)
- [10] S. Grillner and S. Rossignol: On the initiation of the swing phase of locomotion in chronic spinal cats; *Brain Res.*, Vol. 146, pp. 269–277 (1978)
- [11] Y. P. Ivanenko, G. Cappellini, N. Dominici, R. E. Poppele and F. Lacquaniti: Modular control of limb movements during human locomotion; *J. Neurosci.*, Vol. 27, No. 41, pp. 111490–11161 (2007)
- [12] Y. P. Ivanenko, R. E. Poppele and F. Lacquaniti: Motor control programs and walking; *Neuroscientist*, Vol. 12, No. 4, pp. 339–348 (2006)
- [13] Y. P. Ivanenko, G. Cappellini, N. Dominici, R. E. Poppele and F. Lacquaniti: Coordination of locomotion with voluntary movements in human; *J. Neurosci.*, Vol. 25, No. 31, pp. 7238–7253 (2005)
- [14] Y. P. Ivanenko, R. E. Poppele and F. Lacquaniti: Five basic muscle activation patterns account for muscle activity during human locomotion; *J. Physiol.*, Vol. 556, No. 1, pp. 267–282 (2004)
- [15] S. Jo and S. G. Massaquoi: A model of cerebrocerebellospinal interaction in the sagittal control of human walking; *Biol. Cybern.*, Vol. 96, No. 3, pp. 279–307 (2007)
- [16] 川出: 生物記号論, 京都大学学術出版会 (2006)
- [17] F. Lacquaniti, R. Grasso and M. Zago: Motor patterns in walking; *News Physiol. Sci.*, Vol. 14, No. 4, pp. 168–174 (1999)
- [18] M. L. Latash: *Synergy*, Oxford University Press (2008)
- [19] M. L. Latash: Evolution of motor control: from reflexes and motor programs to the equilibrium-point hypothesis; *J. Hum. Kinet.*, Vol. 19, No. 19, pp. 3–24 (2008)
- [20] R. E. Poppele, G. Bosco and A. M. Rankin: Independent representations of limb axis length and orientation in spinocerebellar response components; *J. Neurophysiol.*, Vol. 87, pp. 409–422 (2002)
- [21] I. A. Rybak, N. A. Shevtsova, M. Lafreniere-Roula and D. A. McCrea: Modelling spinal circuitry involved in locomotor pattern generation: insights from deletions during fictive locomotion; *J. Physiol.*, Vol. 577, No. 2, pp. 617–639 (2006)
- [22] L. H. Ting: Dimensional reduction in sensorimotor systems: a framework for understanding muscle coordination of posture; *Prog. Brain Res.*, Vol. 165, pp. 299–321 (2007)
- [23] D. A. Winter: *The Biomechanics and Motor Control*

of Human Gait: Normal, Elderly and Pathological,
Waterloo Biomechanics Press (1991)

著者略歴

つちや かずお
土屋 和雄 (正会員)



1968年京都大学大学院航空工学専攻修士課程修了。1968年三菱電機(株)中央研究所勤務, 1990年大阪大学工学部電子制御機械工学科教授, 1995年京都大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻教授, 2007年京都大学名誉教授。2008年同志社大学理工学部エネルギー機械工学科教授となり, 現在に至る。宇宙工学, 非線形システム論の研究に従事。工学博士。計測自動制御学会, 日本航空宇宙学会などの会員。

あお い しんや
青井 伸也 (正会員)



2006年3月京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年4月より京都大学大学院工学研究科COE助手, 2007年4月より京都大学大学院工学研究科助教となり, 現在に至る。生体の運動生成や制御, 脚歩行ロボットの運動制御に関する研究に従事。博士(工学)。IEEE, 計測自動制御学会, 日本ロボット学会などの会員。

ふな と てつろう
船戸 徹郎



2008年東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。同年京都大学大学院工学研究科研究員となり, 現在に至る。運動生理学実験を基礎とする制御系の研究に従事。博士(工学)。日本ロボット学会, 計測自動制御学会, IEEEの会員。