

	とみたのぞみ
氏名	富田 望
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成16年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）電気通信工学専攻
学位論文題目	大脳基底核-脳幹系のモデル化による二足歩行運動の 創発的リアルタイム制御
指導教官	東北大学教授 矢野 雅文
論文審査委員	主査 東北大学教授 矢野 雅文 東北大学教授 吉澤 誠 東北大学教授 阿部 健一

論文内容要旨

近年では制御，被制御系のソフト・ハードの進歩もあり，二足歩行自体を行わせることはそう難しいことではない。ZMP法を含む従来の制御方法では，ある時間内において環境・制御系が時不変であることを前提としてモデリングを行い，その時間内における制御の安定性を議論する。そのため，時々刻々変化する環境下（無限定環境下）では環境や制御系をリアルタイムにモデリングすることができないために，歩行を実現することは困難を極める。このような従来の制御に対し，多賀らは受動歩行モデル (McGeer 1990) を基に，非線形振動子からなる CPG と筋骨格系，環境を一つの非線形システムとして表した歩行モデルを設計した (1991)。このモデルは3つの系の動的特性とそれら要素の相互作用からなる Global Entrainment を最大の特徴とする。このモデルは受動歩行モデルが持つ安定領域よりも遙かに広い安定領域を有しており，ある程度の外乱や不整地に対しても安定した歩行パターンを発生させる。しかしながらこの原理に基づく歩行モデル (Taga 1991:1995:1997, Miyakoshi 2000, Hase 2000, Kimura 2001) は運動のリズムや筋トルク情報を，CPG 波形の位相と振幅を用いてほぼ一意に決定する。そのために，発現する運動パターンの自由度は低く，また，運動開始時などの過渡状態にパターンが出にくいという欠点も持ちあわせており無限定環境下に適応できるとはいいがたい。

このような研究背景を基に，無限定環境へ適応するとはリアルタイム制御を行うことである，との立場から本論文では自律分散制御における拘束条件生成・充足パラダイムを提唱する。ヒトの歩行を運動制御問題として捉えたとき，ヒトの体は制御系としての神経系と被制御系としての骨格系としてモデル化することができる。神経系，骨格系ともに多要素多自由度であり多くの冗長性を有することから，ある歩行目的を実現するための制御の方法や歩行パターンは無数に存在する。このことは歩行が不良設定問題となる事を示している。不良設定問題を良設定化するためには拘束条件が必要であるが，時々刻々変化する無限定環境下で歩行を実現するためには，環境の変化に応じた拘束条件を制御系自身がリアルタイムに生成し，且つ，系を構成する要素それぞれが，生成された拘束条件を充足するような情報をリアルタイムに生成しなければならない。このようなパラダイムを拘束条件生成・充足パラダイムと呼ぶ。

移動の実現のためには，バランス・姿勢を維持しながら身体内部要素の不良設定性を解決することで最低限歩行自体を実現しなければならない。歩行を実現するための不良設定性，様々な環境に合わせた様々な歩行パターンを実現するために必要な拘束条件の生成方法を明らかにすることで無限定環境下にリアルタイムに適応し，移動を実現できる歩行運動制御システムを構築することが本研究の目的である。本研究に当たっては，歩行における不良設定性と制御との関連を明確にするた

めにバランス・姿勢維持問題が最もシビアである二足歩行を取り扱う。

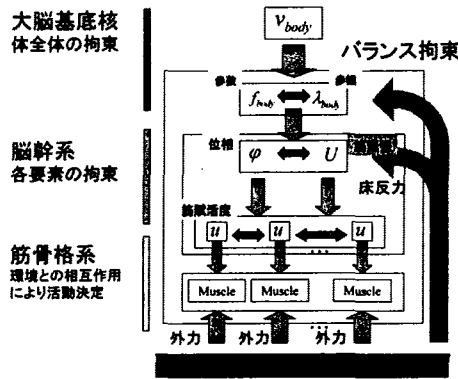


図 1: 拘束条件の階層性

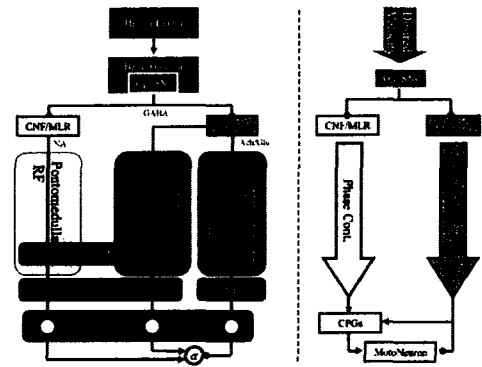


図 2: 大脳基底核-脳幹系の構造とそのモデル化

本論文では Takakusaki らの除脳ネコの生理実験から、脳幹、中脳から脊髄に至る運動制御系 (Basal ganglia, GPi/SNr, CNF/MLR, PPN, CPG) のうち、CNF/MLR から脊髄-CPG にいたる経路を『位相制御系』、PPN から脊髄-MotoNeuron に至る経路を『筋緊張制御系』と捉え、自動的随意運動制御系としてモデル化を行った (図 2)。しかしながらこれだけでは大脳基底核、脳幹系の各階層での制御情報決定に必要な拘束条件は不足している。これを解消するために、環境からリアルタイムに取得でき、なおかつ身体全体の状態を端的に示すことのできる**バランス情報と床反力情報**を高次の制御系に掛かるリアルタイムな拘束条件とする。

本研究でモデル化した、高次中枢を含む『大脳基底核-脳幹アミン系神経系』のモデルは以下のように振る舞う。

高次中枢は外界から情報を受け、目標速度を制御情報として大脳基底核に送る。目標速度だけでは歩行周期や歩幅など具体的な制御量は決まらない。目標速度という曖昧な制御情報は、大脳基底核内でバランス情報により充足され、歩行周期と歩幅が決定する。これらの情報に各脚からの床反力情報が付加され、脳幹アミン神経系内にて位相情報と筋緊張情報に分解される。CPG-MotoNeuron ネットワークは実時間で得られる情報 (各筋肉のエネルギー効率/負荷/収縮速度、前庭情報、床反力) から各筋肉の筋収縮レベルを自律分散的に実時間で決定する。CPG は筋活動位相情報のみを生成し、筋賦活度の生成は MotoNeuron で行われる。CPG は二階の常微分方程式により表される KYS 非線形振動子で構成される神経回路網である。相互抑制性の hard-wired な結合を持ち、互いの位相関係をずらす働きを持つことで多様なパターンを発生させることが出来る。運動筋や姿勢維持筋の筋活動情報、体全体のバランス情報を用いて各 CPG Unit が要素間の協調、競合関係をリアルタイムに決定する。これにより運動における要素間の局所的な不良設定性が良設定化され、その状況に即した様々な運動パターンが CPG によりリアルタイムに発現する。

シミュレーション結果を図 5 に示す。モデルに対し目標速度を与えるだけで歩行を実現し、完全直立状態から数歩で定常歩行へ移行しているのがわかる (図 5A)。モデルに対し、脛部への外乱を加えてもリアルタイムに歩行を維持していること (図 5B: 100N-200ms, C: 30N-4sec) が確認できた。

目標速度下での歩行速度、歩行周期、歩幅のデータを元に歩行周期-歩幅の関係をプロットした (図 6)。グラフ内の破線は同じ速度での歩行をあらわす。グラフ中心部の等高線は歩行運動における代謝エネルギーのマップである。その等高線上の直線はヒトの Natural Walk を示す。本モデルの歩行はヒトの Natural Walk と同様に比例関係が現れた。本モデルの制御則には歩幅や歩行周期をあらかじめ与えることはしておらず、歩行することで自己言及的に決定する。このことは歩幅-歩行周期の不良設定性を解決しながら運動を行っていることを示す。

本研究の結果から、大脳基底核-脳幹系の運動制御の役割としてつぎのように意味づけられる。

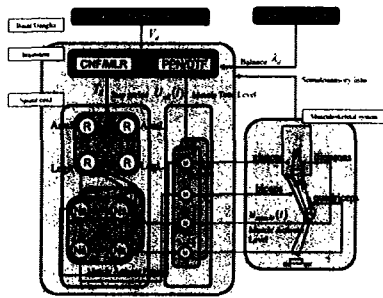


図 3: モデルの全体図



図 4: Snapshot of step motion

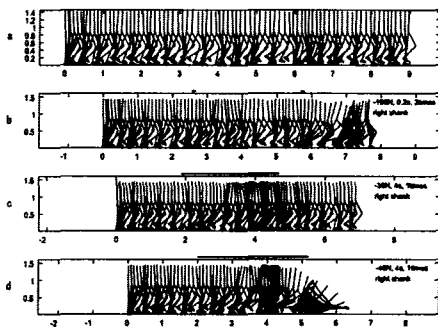


図 5: 外乱を与えたときのスティック図

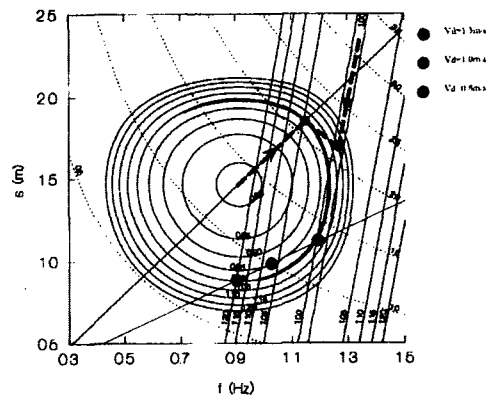


図 6: Natural Walk

- 大脳基底核の役割は、制御目的にあわせてシステム全体の運動状態を決定するための上位拘束生成機構である。速度拘束は運動の目的であり、静的な上位拘束である。バランス拘束は、歩行を実際に行うことでリアルタイムに生成される上位拘束である。
- PPN の役割は、環境との相互作用により身体レベルでの適切な力制御をリアルタイムに行うための拘束条件生成充足機構である。筋緊張拘束により下位レベルの筋肉の振る舞いが決定し、適切な身体性の獲得を実現できる。
- CPG の役割は、身体を構成する要素間の適切な相互作用をリアルタイムに決定するための拘束条件生成機構である。CPG が生成する位相拘束により身体全体に対する時間的拘束条件が課せられたことになる。

本研究では大脳基底核-脳幹系のモデル化による歩行モデルを提案した。本研究での二足歩行モデルの制御方法は今までのものとはかなり異なったものである。最大の特徴は、拘束条件を自立生成・充足することで無限定環境にリアルタイムに対応する自己言及的特性を持ったシステムの構築をH指したことである。無限定環境下にリアルタイムに対応するための拘束条件を充足する場として、生理学的知見から位相系と筋緊張系の2パスをモデル化した。位相制御系、筋緊張制御系それぞれで環境との相互作用と拘束条件を通して情報がリアルタイムに作られること、力制御を大脳基

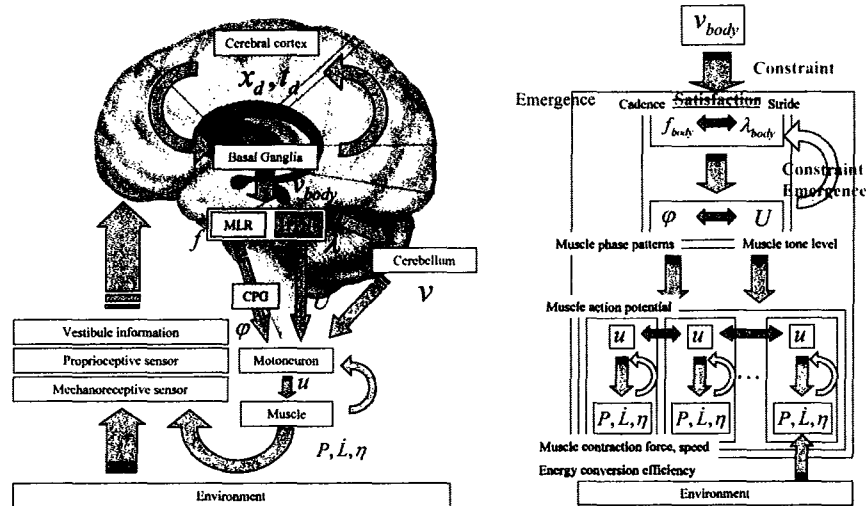


図 7: 運動制御系の階層性と拘束条件の階層性

底核-脳幹レベル, 脊髄レベル, 筋肉レベルにわたって積極的に行うモデルを実現した. 身体全体の筋緊張レベルを PPN で適応的に調節することによって, バランスや姿勢維持を調節できること, 歩行パターンに影響を及ぼすことが確認された.

リズムと筋緊張情報を分けて制御することにより, 運動の自由度が増し, 外部負荷に対する適応性が高くなることも確認された. 床反力情報を騙し, 筋緊張制御を狂わせることにより歩行が維持できることも確認されている. これらの結果は大脳基底核疾患患者にたいする運動障害の再現モデルとして, 生理学・臨床学への問題提起になると考えられる.

提案した歩行モデルは目標速度を与えるだけで歩行を実現し, 完全直立状態から数歩で定常歩行へ移行した. これは制御拘束をかけることによる2つの状態間のシームレスな移行を実現したといえる結果であり本研究の新しい点であるといえる. 外乱に対してもリアルタイムに対応してバランスを維持した. 脛部への定常的な付加を与えると, 目標速度を維持しつつその状況に応じたパターンをリアルタイムで生成して歩行を維持した. これらの結果は生成されたパターンが無限定環境へ適応したことを意味する. 筋緊張最適化によりバランス制御が実現できたことは, 力制御による身体性の獲得を意味するものである.

速度・バランス拘束による各歩行パラメータの自己充足により Natural Gait の発現も確認されたが, 本モデルにおいて発現した Natural Gait はヒトのそれとは異なり, エネルギー最適状態を取ることはなかった. これはそもそもモデルに対してエネルギー最適となるような拘束条件を与えていないためであり, 今後の課題である.

これらの研究結果は随意運動に対しても拡張可能である. 筋骨格系の情報をリアルタイムに獲得しながら拘束条件を生成し, そこから制御情報を生成すれば, 任意の目的位置と目的速度を満たすような動作(階段昇降, 飛び石歩行など)を実現することが可能となる.

論文審査結果の要旨

複雑な実環境と調和する自律ロボットを実現することはロボティクスの重要な課題である。現存するロボットはあらかじめ限定した環境でのみ制御が可能である。しかし、実環境は予測不可能的に変化するという意味で本質的に無限定であり、無限定環境における制御方法はいまだ明らかになっていない。与えられた目的を達成することは逆問題であり、逆問題は一般的には不良設定問題となる。不良設定問題は限定された環境であれば、良設定になるための拘束条件をシステムの外から与えることで解くことが出来るが、実環境のように予測不可能的に変化する場合は良設定になるための拘束条件をシステムの外からリアルタイムで与えることは原理的に出来ない。したがって、このような不良設定問題を解くにはシステム自身が環境変化に応じて自律的に適切な拘束条件を生成し、それを自律的に充足することが必要となる。著者は無限定環境にリアルタイムで対応できる動物の運動制御を参考にして、動物の脳基底核-脳幹系を含む運動システムをモデル化することで、二足歩行ロボットを創発的に制御する方法を提案してシミュレーションを行い、その有効性を検証した。本論文はこれらの成果をとりまとめたもので、全編5章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、ZMP（床反力作用点中心）法を含む従来の制御方法の限界を指摘し、実環境にリアルタイムで適応した多様な歩行パターンを生成するための必要条件を挙げ、従来法に代わって拘束条件を自律的に生成し、自律的に充足する新しい制御方法を提案している。これは興味のある提案である。

第3章では、実環境に適応する二足歩行システムのモデル化を行っている。このモデルは、1) 脳基底核-脳幹系は上位の拘束条件である要求歩行速度から運動周期とバランス維持の筋緊張レベルをフィードフォワード的に決定し、これらの情報は下位の中枢パターン発生器と運動神経系に対する拘束条件になり、2) 中枢パターン発生器と運動神経系は、これらの拘束条件と筋骨格系を通じて得られた環境情報が調和するように、統合的かつリアルタイムで制御する、というシステム構成になっている。個々の筋活動位相情報と筋緊張制御情報を二つのルートで統合的に生成するために多様な歩行パターンを生成することが可能になっており、注目に値する制御方法である。

第4章では、提案モデルの有効性をシミュレーションによって検証している。本二足歩行モデルは様々に変化する外部環境下でも、人間のように適切な歩行パターンを自律的に生成することを示している。これは本モデルの特長である階層的に拘束条件を生成し、充足する方法論の有効性を示しており、重要な結果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、予測不可能な状況変化に柔軟に適応する二足歩行ロボットシステムの新しい制御方法を考案し、その有効性を検証したもので、ロボット工学、システム制御工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。