原著論文

ファジィルールを用いたヒト歩行のモデル化及び 2脚モデルによるシミュレーション†

相馬 隆郎*

本論文ではヒトが行っている二足歩行の制御技術について考察を行う。具体的には言葉によって表現できる歩行制御則を考察の対象とする。例えば「高速歩行時は、遊脚を着地させる位置を前方にずらして歩幅を大きくする」、「身体の重心が支持脚より前にきたときに支持脚の膝を伸ばすことで加速を行う」といった制御則に着目し、これらの制御則をファジィルールとして記述することにより、二足歩行の制御モデルを構築する。また本論文では倒立振り子モデルを用いてヒト歩行の解析を行う。このモデルでは支持脚の伸長力、遊脚の着地位置、脚の切り替え条件を適切に決定すれば安定した歩行が実現できる。上に述べたような制御則をもとに13種類のルールテーブルを定義し、これらを用いることで歩行速度制御、進行方向制御及び重心高さ制御が可能となることを示す。またODE(Open Dynamics Engine)を用いたシミュレーションにより、提案モデルの有効性を検証する。

キーワード：二足歩行制御、二足歩行ロボット、ヒューマノイドロボット、ファジィ制御、速度制御

1. はじめに

近年のコンピュータ技術の進展に伴って、ロボットの実用化が急速に進んでいる。ヒューマノイドロボットの分野では、Hondaの開発したAsimoや産業技術総合研究所のHRPなど、サービス分野、土木建設分野等様々な場所で活躍が期待されるロボットが登場している[1][2]。これらのロボットを含め現在実用化されているロボットの多くはコンピュータの計算能力を最大限に活用し、オンラインで歩行パターンを生成・更新することにより安定した歩行を実現している。

一方、ヒトの歩行原理の解明や二足歩行ロボットへの応用を目的とした研究も数多く行われている。その代表例としては1990年にMcGeer[3]により示された受動歩行が挙げられる。ここでは人と同じように膝関節を有する脚ロボットが、アクチュエーターや制御機構を用いずに重力場を利用して緩斜面を下り降りることが可能であり、その際人間と同じような自然な歩容が生成されることを、シミュレーション及び実験により示している。その後、受動歩行の原理を平坦地における歩行に応用する研究や、脚関節に配置されたアクチュエーターのトルクを一時的に利用し安定的に受動

歩行を継続させる「準受動歩行」と呼ばれる歩行法へと発展している[4][5]。

受動歩行以外の手法としては、生物の持つ周期的な生体電気信号をモデル化し、その信号に基づいて歩行を行う手法も提案されている。これはCPG(Central Pattern Generator)と呼ばれる非線形振動子から発生する信号に従って脚を動作させることで歩容が生成されるとする考え方である。これを用いて多賀ら[6]は、脚の各関節のアクチュエーターに接続された複数個のCPGをネットワーク接続することによって、外乱に対して頑健な二足歩行が行えることをシミュレーションにより示した。その後より詳細なモデルを用いたシミュレーション等が行われている[7]。また宮腰ら[8]は実ヒューマノイドへの適用に向け、3次元空間内での足踏み運動を安定化させるための最小限の神経振動子制御系の構成を提案している。

以上を大別すると、ロボットの歩行制御を目的として開発された歩行パターンに基づく手法と、受動歩行、CPGなどヒトの歩行をモデルとし、その原理解明を主目的とする手法に分類できる。本論文では、受動歩行やCPGと同様にヒト歩行原理を解明することを主目的とし、さらに二足歩行ロボットへの適応も踏まえて考察を行う。

ヒトは二足歩行のエキスパートであり、歩行制御を行っているということをほとんど意識せずに易々と歩くことができる。しかし実際にどのように歩行制御を行っているかという問いに答えるのは困難である。たとえば前述の歩行パターン生成・更新を行うタイプの

† A Model of Bipedal Walking Using Fuzzy Rules and its Application to Biped Models
Takao SOMA

* 首都大学東京 理工学研究科 電気電子工学専攻
Department of Electrical and Electronic Engineering Graduate
School of Science and Engineering Tokyo Metropolitan University

歩行法は運動方程式を数値的に解くことにより歩行時の動作を決定しており、ヒトの歩行制御法とは質的に異なるものといえる。また受動歩行についてはヒト歩行をモデルとしたものであるが、脚の骨格構造のみを考察対象としており、脚の筋力やそれを制御する神経系は対象から除外されている。そのためヒト歩行でいえば脱力状態で歩いている際などの安定化の仕組みを説明することはできるが、運動時などに行う、より積極的な歩行（例えば急な加速・停止・方向転換）を説明するには不十分である。またCPGについては、ヒトを含む動物の歩行制御に実際に用いられているという生理学的な研究結果もあり、シミュレーションやロボット実機においてもCPGによる歩行が実現できることが示されている。しかし受動歩行と同様にその歩行安定性に限りがあり、積極的な歩行を含めたヒト歩行の全体を説明するまでには至っていない。

そこで本研究では上記の手法とは異なり、「平易な言葉を用いてヒトの歩行制御の仕組みを説明する」というアプローチを行う。具体的には「脚を交互に前に出す」、「後足で地面をけることによって上体を前に押し出す」といった単純な制御則の集まりとして歩行原理の説明を試みる。複雑な数式や理論を用いず平易な言葉で説明できれば、我々が行っている歩行の仕組みを理解する上で特に有用であると考えられる。しかし上述のような単純な制御則を直接二足歩行ロボットに適用しても安定した歩行は実現できないため、従来このようなアプローチでヒトの歩行を説明することは困難と考えられてきた。

本論文ではこの問題を解決するため、ファジィ集合を用いた空間的な制御領域分割の概念を新たに提案する。これを用いることにより上述のような単純な制御則の集まりであっても安定した歩行が実現可能になることを示す。

さらに本稿では新たに目標Sagittal面及び目標Lateral面の概念を導入することにより、歩行時の進行方向の変更に関して、直進時と同様の制御則で方向転換が可能となることを示す。

提案した制御則の妥当性、有効性の評価には構成論的アプローチを用いる。構成論的アプローチとは、対象システムの原理を解明するために仮説に基づいたモデルを構築し、計算機シミュレーションや模擬システム上で動作させ、その動作結果と現実の現象を比較することにより提案モデルの検証を行い、対象システムに対する理解を深める手法である。これは従来のアプローチでは解明が困難な対象に対し、実際に作って動かすことにより事象の奥に潜む因果関係に迫ろうとするアプローチであり、例えば進化計算や認知発達ロボ

ティクスなど、人や動物がもつ複雑な知能システムの原理を解明する際などに多く用いられている[9]。本研究では提案するモデルの検証のために、ファジィ制御を用いたシミュレーションを行う。

ファジィ制御とはヒトの持つ曖昧さを数学的に取り扱うファジィ集合論に基づく制御手法で、車両の運転やプラント制御など人間が知識や経験に基づいて行っている制御則を抽出し、自動化するのに適した手法である。その一例として自動車の自動運転にファジィ制御を適用する手順について考えてみる。まず始めに自らの運転を振り返ってどのような制御則を用いて運転しているかについて考察し、ファジィルールとしての規則の抽出を行う。具体的には「車の速度が速く、車間距離が短ければブレーキを強く踏む」、「進路変更角度が大きければ、ハンドルを大きく切る」等のルールを考える。次に抽出されたファジィルールに用いられている曖昧さを含む量、例えば「速度が速い」、「強く踏む」、「大きく切る」といった量をファジィ集合で定義し、そのメンバーシップ関数を決定する。最後にこれらのルールを用いて推論を行うためのファジィ制御器を構築する。以上の手順により自動車の自動運転が実現できる。本論文では二足歩行に対して上記と同様の手順でファジィ制御器を構成し、シミュレーションによる検証を行う。

また本論文で提案する手法の特徴として、歩行性能向上を目的としたモデルの拡張が容易に行える点が挙げられる。これはファジィ制御を用いることによる有用性の一つである。本稿ではヒト歩行のモデルとして倒立振り子モデルを用いているが、さらに実際のヒトに近いモデルとするために足首や上体及び腰関節、腕等を追加し、足裏の踏ん張りや上体の倒れこみ、捻り、腕の振りによるバランス制御等を付加することが可能である。その際ファジィ制御の枠組みを用いているため、自らの歩行経験に基づく知見を参考にして容易に制御則を導出できる。本稿ではその一例として、足首トルクの導入による低速歩行時の安定性向上について第4章で述べる。

次にファジィ制御の二足歩行ロボットへの工学的応用事例について述べる。ファジィ制御を二足歩行に適用した研究はいくつか報告されているが、受動歩行やCPGに関する研究と比較するとその件数は極めて少ない。

Kawajiら[10]は予め計算された歩行パターンに基づいて歩行を行う際、Sagittal, Lateral両平面におけるロボット上体の傾斜角を入力としてファジィ推論を行い、軌道のずれを修正するために必要となる各関節角の補正値を求める手法を提案している。またHyeon

[11]はファジィ推論を用いて、歩行中の腰位置及び遊脚足先位置を入力として最適なZMP軌道を求める手法を提案している。これにより歩行時におけるロボット上体の前後方向の揺動を軽減できることがシミュレーションにより示されている。Bebekら[12]は体幹中心からの相対位置として与えられた足先位置の歩行パターンを用いて歩行する場合を考え、安定した歩行ができるよう足先の目標軌道を前後方向にずらして適用する際のオフセット値を、ニューロファジィシステムを用いた学習により求める手法を提案している。

以上の研究は既存の歩行理論をベースとしてファジィ理論の適応を行ったものである。これに対し本論文では二足歩行制御の主要部分に対してファジィ制御を適用し、歩行理論の構築を行う。

本稿では歩行に関する基本的な規則として13種類の制御則を採用する。提案する個々の制御則は、我々の歩行経験からみて妥当と思われる簡単なものを採用しており、また力学的観点から見てもごく単純なものである。実際のヒトの歩行戦略はより複雑である可能性が高いが、ここではヒトの歩行における本質的な要素を明確化し、安定歩行に必要とされる最低限のルールは何かという観点から、複雑な規則は省略するかまたは単純化して採用する方針をとる。

本論文の構成は以下になっている。第2章では提案する歩行制御に関して支持脚の伸長力の計算方法、遊脚の着地位置の計算方法、支持脚と遊脚の切替えのタイミングについて倒立振子モデルを用いて説明する。第3章では動力学計算エンジンODE(Open Dynamics Engine)を用いて2脚モデルによるシミュレーションを行った結果について報告する。第4章ではモデルを拡張し、足首トルクの導入について検討する。最後に第5章においてまとめと今後の課題について述べる。

2. 歩行制御則

本稿では与えられた進行方向、速度、重心高さに追従するよう歩行制御を行うことを考える。歩行のモデルとして伸縮可能な脚を持つ倒立振子モデルを用いる。倒立振子の質点の質量を m 、脚の質量を0とし、また支持脚の接地点回りのトルクも0とする。遊脚の軌道については考えず、遊脚の着地は完全非弾性衝突とし着地と同時に脚の切替えが行われるものとする。

このような倒立振子モデルは梶田等[14]を始めとする多くの研究に利用されている。膝関節を有し、分散した質量をもつような厳密な2脚モデルを採用することも可能だが、文献[13]には倒立振子モデルを用いた場合と厳密なモデルを用いた場合の歩行を比較して

も、ZMPの位置にほとんど差異がないことが示されている。またこのようなシンプルなモデルを用いることで歩行制御に対して考慮すべき要素が少なくなり、歩行制御の本質的な部分を把握しやすくなるという効果が期待できる。

倒立振子モデルを用いた歩行においては、1)支持脚を伸ばす力(以下「伸長力」と呼ぶ)、2)遊脚の着地位置、3)遊脚と支持脚を切替えるタイミングの3つをうまく定義することにより、安定した歩行が実現できる。以下では歩行制御の基本となる運動制御面の設定等について述べた後、上記3要素の決定方法について順に述べる。

2.1 歩行運動に対する制御面の設定

ヒト歩行の解析やロボットの歩行制御において、その運動をSagittal面とLateral面に分離して歩行パターンの生成や解析、制御を行う手法がしばしば用いられる。その際ヒトの進行方向(体幹の向き)に沿ってSagittal面が設定され、Lateral面はSagittal面に直交する方向にとられる。これは歩行に伴う運動を2つの成分、すなわち進行方向に向かう直進運動と支持脚の切替えによって生じる横方向の揺動運動に分解するためである。

ただし一定方向への直線的な運動を対象とする場合はこのような制御面設定でよいが、方向転換を伴って移動する場合には不都合を生じる。例えば方向転換を行う際には、横方向の揺動運動と、進行方向に向かう直進運動とが重なりあうためSagittal、Lateral両平面に運動を分離して考察することができず軌道の計画、解析、制御が複雑になる。そこでこの問題を回避するため本稿では図1に示すように、目標速度ベクトルを含む鉛直面に仮想的なSagittal面を設定し、これと直交する方向に仮想的なLateral面をとる。(以後両平面

図1 ロボットの進行方向と目標Sagittal面

を「目標Sagittal面」, 「目標Lateral面」とよぶ。)これにより歩行に伴う運動を両平面に分離して考えることができ解析, 制御が容易になる。ただし目標速度ベクトルが0のときは制御面を設定できないので, その場合は上体を向かせたい方向に沿って目標Sagittal面を設定する。

また本論文では支持脚接地点を原点とし, 目標Sagittal面上の目標進行方向に x 軸, 目標Lateral面上に y 軸, 鉛直上向きに z 軸をとったローカル座標系を用いて議論を行う。また歩行中の重心位置の x, y, z 成分を p_{Gx}, p_{Gy}, p_{Gz} , 重心速度の各成分を v_x, v_y, v_z , 目標進行方向(x 軸方向)への目標速度を v_x^{ref} , 目標重心高さを p_{Gz}^{ref} とする。また目標進行方向の速度誤差 e_x 及び重心高さの位置誤差 e_z を次式で定める。

$$e_x = v_x^{ref} - v_x \quad (1)$$

$$e_z = p_{Gz}^{ref} - p_{Gz} \quad (2)$$

2.2 支持脚の伸長力の制御

ヒトの歩行においては膝の曲げ伸ばしや足首による地面の蹴り等を利用して加減速を行っている。文献[13]に示されているように, 倒立振子モデルではこの力を支持脚の伸長力 $F(\geq 0)$ により表現する。本節ではこの伸長力に関して, ヒトが歩行時に用いていると思われる制御則の抽出を行い, それらをファジィルールにより表現する。

まず支持脚伸長力の担う役割は次の4つに分類することができる。

1. 目標進行方向に重心を加速する。
2. 目標進行方向と逆向きに減速する。
3. 歩行時の上体の横揺れ(揺動運動)を制御する。
4. 重心の高さを制御する。

以上の役割に踏まえた上で支持脚伸長力の加減の仕方について, 以下に示す歩行中の特徴的な状態を例にとり考察を行う。

状態1. 歩行時において, 重心の位置が支持脚接地点の真上にある場合 : このとき伸長力を加減することにより, 重心の高さ制御が行える。ただしこのとき加減速, 揺動制御は行えない。

状態2. 重心位置が目標Sagittal面上かつ支持脚接地点の前方にある場合 : 伸長力を加減することにより主に加速制御が行える。また状態1に比べて効率は劣るが重心高さ制御を行うことも可能である。ただし揺動制御は行えない。また減速したい場合は伸長力を負にする必要があるが, 脚が地面に固定されていないため伸長力を負にすると脚が地面から浮き上がることになる。従って減速制御も行えない。

状態3. 重心位置が目標Sagittal面上かつ支持脚接地点の後方にある場合 : 伸長力を加減することにより主に減速制御が行える。また状態2と同様に重心高さ制御が可能である。ただし状態2と同様に揺動, 加速制御は行えない。

状態4. 重心位置が目標Lateral面上かつ支持脚接地点の横斜め上方にある場合 : 伸長力を加減することにより主に揺動制御が行える。また状態2と同様に重心高さ制御が可能である。ただし加減速制御は行えない。

以上の考察から, 重心が支持脚接地点に対してどの位置にあるかに応じて制御目的を切替える必要があると推測される。

また上記の状態は全て目標Sagittal面, 目標Lateral面を基準として考察を行っている。直進歩行時にはSagittal面(体幹が向いている方向)と目標Sagittal面(目標とする進行方向)は一致しているが, 進路変更時には, 変更指示が行われた時点で目標Sagittal面は瞬時に不連続に切り替わり, Sagittal面との間に方向的なずれが生じる。この際, 体の方向(現在の進行方向)がどこを向いているかとは無関係に, 目標とする方向のみを基準として制御を行うようにしている。これにより直進時, 進路変更時を区別することなく同一の制御則を適用することが可能となる。

またここでは特徴的なケースとして重心が z 軸上, $x-z$ 平面上, $y-z$ 平面上にある場合について考えたが, 重心がそれ以外の位置にある場合は上記の状態がそれぞれの割合で重なり合った状況にあると考えられる。そこで支持脚接地点を原点とする空間を前述の制御目的に対応する4つの領域「加速領域」, 「減速領域」, 「揺動制御領域」, 「重心高さ制御領域」に分割し, 各々をファジィ集合 A_{x+}, A_{x-}, A_y, A_z で定義する。制御領域の概念図を図2に示す。ただし図2では説明のため各領域に対する明確な境界を記述しているが, 実際には各領域どうしが重なり合っているものとする。具体的には空間上のある一点が各領域に属する度合い(帰属度)をメンバーシップ関数 $\mu(\theta)$ により定義する。一例としてある点 p が加速領域に属する度合いは, 点 p と x 軸とのなす角を θ_x とすると図3に示すようなメンバーシップ関数 $\mu_{x+}(\theta_x)$ で定義することができる。この関数は $\theta_x=0$ のとき脚の伸長力が全て加速のために使われるという意味において加速領域への帰属度は1とし, $\theta_x \geq \pi/2$ のとき伸長力は加速に全く影響を及ぼさないという意味でその帰属度は0とする。また $0 \leq \theta_x \leq \pi/2$ の範囲においては, 「温度が高い」や「速度が速い」などの一般的なファジィ集合で用いられるようななだらかな曲線となっている。

図2 制御領域(概念図)

図3 メンバシップ関数(加速制御領域)

同様に減速領域、揺動制御領域、重心高さ制御領域に対し、各々 $\mu_x(\theta_x)$, $\mu_y(\theta_y)$, $\mu_z(\theta_z)$ で定義する。

以上の制御領域を用いて状態1における歩行制御則をRule Dに、状態2における制御則をRule Aに、状態3における制御則をRule Bに、状態4における制御則をRule Cとして記述する。(注：状態1とRule Dを対応付けるのは順番が前後することになるが、説明の都合上このような対応付けとなっていることに注意されたい。)

Rule A-1. 重心が加速制御領域にあり、進行方向の速度誤差 e_x が正(負)であれば、加速のための伸長力 f_{x+} を大きく(小さく)する。

Rule A-2. 重心が加速制御領域になれば、加速のための伸長力 f_{x+} をゼロにする。

Rule B-1. 重心が減速制御領域にあり、進行方向の速度誤差 e_x が負(正)であれば、減速のための伸長力 f_{x-} を大きく(小さく)する。

Rule B-2. 重心が減速制御領域になれば、減速のための伸長力 f_{x-} をゼロにする。

Rule C-1. 重心が揺動制御領域にあり、横方向の速度 v_y が正(負)であれば、揺動制御のための伸長力 f_y を小さく(大きく)する。

Rule C-2. 重心が揺動制御領域になれば、揺動制御のための伸長力 f_y をゼロにする。

Rule D-1. 重心が高さ制御領域にあり、高さの位置

誤差 e_z が正(負)であれば、高さ制御のための伸長力 f_z を大きく(小さく)する。

Rule D-2. 重心が高さ制御領域にあり、 z 軸方向の速度 v_z が正(負)であれば、高さ制御のための伸長力 f_z を小さく(大きく)する。

Rule D-3. 重心が高さ制御領域になれば、高さ制御のための伸長力 f_z をゼロにする。

Rule C-1については右脚支持期における制御則を示した。左脚支持期においては正負を逆にした制御則を用いる。また横方向の揺動に関して厳密な制御を行うためには、支持脚接地点からみた重心位置(重心の倒れ具合)に応じて横方向の目標速度を求め、それに対する速度誤差にもとに伸長力を決定すべきである。しかし本稿においては第1章で述べたように制御則の単純化のために、Rule C-1に示すようなより大まかな制御則を用いることとする。この制御則は横方向に大きな外力が加わったケース等においては、姿勢回復のために有効に機能することが期待される。

上述のRule A-1, 2に対し、各値の大きさを考慮に入れファジィルールとして記述すると以下になる。

- IF θ_x is A_{x+} and e_x is PB THEN f_{x+} is PB
- IF θ_x is A_{x+} and e_x is PS THEN f_{x+} is PS
- IF θ_x is A_{x+} and e_x is ZO THEN f_{x+} is ZO
- IF θ_x is A_{x+} and e_x is NS THEN f_{x+} is NS
- IF θ_x is A_{x+} and e_x is NB THEN f_{x+} is NB
- IF θ_x is $\overline{A_{x+}}$ THEN f_{x+} is ZO

ここでPBはPositive Big, PSはPositive Small, ZOはZero, NSはNegative Small, NBはNegative Bigを表すファジィ集合とする。また $\overline{A_{x+}}$ は A_{x+} の補集合とする。これらのルールテーブルを表1に示す。以下同様にRule B-1～C-2に対してファジィルールを導くことができ、これらのルールテーブルを表2, 3に示す。

Rule D-1, 2については誤差 e_z と速度 v_z の組み合わせに対して f_z が決定されるため、以下のようなファジィルールを考える。

- IF θ_z is A_z and e_z is PB and v_z is PB THEN f_z is NM
- IF θ_z is A_z and e_z is PB and v_z is PS THEN f_z is NS
- IF θ_z is A_z and e_z is PB and v_z is ZO THEN f_z is PS
- IF θ_z is A_z and e_z is PB and v_z is NB THEN f_z is PM
- IF θ_z is $\overline{A_z}$ THEN f_z is ZO

ただし f_z についてはPM (Positive Medium), NM (Negative Medium) を含めた5段階のファジィ集合を用いた。上記ファジィルールに対するルールテーブルを表4に示す。

表1 Rule A (f_{x+})

		e_x				
		NB	NS	ZO	PS	PB
θ_x	A_{x+}	NB	NS	ZO	PS	PB
	$\overline{A_{x+}}$	ZO				

表2 Rule B (f_{x-})

		e_x				
		NB	NS	ZO	PS	PB
θ_x	A_{x-}	PB	PS	ZO	NS	NB
	$\overline{A_{x-}}$	ZO				

表3 Rule C (f_y)

		v_y				
		NB	NS	ZO	PS	PB
θ_y	A_y	PB	PS	ZO	NS	NB
	$\overline{A_y}$	ZO				

表4 Rule D (f_z)

θ_z is A_z		e_z				
		NB	NS	ZO	PS	PB
v_z	NB	PM	PM	PM	PM	PB
	NS	PS	PS	PS	PM	PM
	ZO	NS	NS	ZO	PS	PS
	PS	NM	NM	NS	NS	NS
	PB	NB	NM	NM	NM	NM

次に高さ制御に関する上述の制御則に基づき制御を行った結果定常偏差が残った場合に供え、推論結果から得られる伸長力に対し適当な補正量を加えることで偏差をより小さくすることを考える。以下に補正量の増減に関する規則を示す。

Rule E-1. 重心が高さ制御領域にあり、高さの位置誤差 e_z が正(負)であれば、補正量の増分 df_z を正(負)とする。

Rule E-2. 重心が高さ制御領域になければ、補正量の増分 df_z をゼロとする。

これらに基づくルールテーブルを表5に示す。この推論から得られる値 df_z をもとに、 k 回目の制御周期における補正量 $\Delta f_z^{(k)}$ は次式で決定される。

$$\Delta f_z^{(k)} = \Delta f_z^{(k-1)} + df_z \quad (3)$$

これはPID制御におけるI制御に相当するものである。歩行に限らずヒトが行う制御においては、自らの持つ制御則に従って制御を行った結果誤差が残ってしまった場合「さらにもう少し力を入れる」といったよう

表5 Rule E (df_z)

		e_z				
		NB	NS	ZO	PS	PB
θ_z	A_z	NB	NS	ZO	PS	PB
	$\overline{A_z}$	ZO				

な調整を行っており、上記はこの種の微調整を表すものである。

支持脚の伸長力は、Rule A～Eに対して各々独立にファジィ推論を行った結果を加算することにより求める。ファジィ推論についてはMamdani[15]による推論法をはじめ多くの手法が提案されている[16][17]。本稿ではWangら[16]の推論法を用い、推論結果の非ファジィ化には重心法を用いる。

また本稿では重心高さを一定に保って移動するタイプの歩行を基本とする。そのため推論により得られた伸長力の他に線形倒立振り子[14]に用いられる力 $mg/\cos\theta_z$ を加算する。この力はヒト歩行においては、上体を水平移動させる際に必要な力として経験的に体得されているものと解釈する。以上のもと最終的な伸長力を次式により決定する。

$$F = f_{x+} + f_{x-} + f_y + f_z + \Delta f_z^{(k)} + mg/\cos\theta_z \quad (4)$$

ただし上式で $F < 0$ となる場合は、脚接地点が地面から離れることになるので伸長力を0とする。

2.3 遊脚の着地目標位置の算出

遊脚の着地目標については重心の x - y 平面への投影点 (p_{Gx} , p_{Gy}) を基準とし、その値にファジィ推論の結果を加算して求める。前節と同様にヒトの歩行を参考にし、目標Sagittal面方向に対する着地目標の決定方法について考察を行う。

まず加減速の規則について考える。歩行中の特徴的な状態として定常速度で歩行している場合を考える。このとき定常状態であることを考慮すると、脚切替時における遊脚着地位置と重心との間の距離は毎回同じになっていると考えられる。また歩行中、重心が支持脚接地点より後方にある期間は支持脚伸長力によって重心は減速され、逆に前方にある期間は伸長力によって加速されるという加減速のサイクルが繰り返行われている。

このような状況下において一歩毎の平均歩行速度を減速したい場合、遊脚着地位置を通常よりも前方にずらすという手段が考えられる。こうすると脚切替直後の姿勢は通常より後傾した形になり、支持脚伸長力による減速期間(重心が支持脚より後方にある期間)が長

くなる。そのため減速効果がより強く働き、結果的に一歩毎の平均速度が低下する。

また逆に加速したい場合は遊脚着地位置をより手前にずらし、脚切換え後の減速期間を短くすることで歩行速度を上昇させることができる。

次に定速歩行時における遊脚着地位置と重心の地面への射影点との距離について考える。ヒトの自然な歩行では、歩く速度が上昇するとともに歩幅が大きくなる傾向がある。勿論、どのような速度に対しても歩幅を一定として歩くことも可能であるが、この場合速度の上昇に伴って歩行周期が短くなり、遊脚を着地目標位置に移動する際に必要となる股関節pitch軸のトルクが増大する。これを避けるため歩行速度の上昇に伴って自然と歩幅が増大するものと考えられる。

以上の考察をもとに x 軸方向に対する着地目標に関する規則として、以下のものを用いる。

Rule F. 速度誤差 e_x が正(負)であれば、進行方向に対して後方(前方)に着地目標位置をずらす。(このずれ幅を u_{e_x} とする)

Rule G. 速度 v_x が正であれば、進行方向に対して前方に着地目標位置をずらす。(ずれ幅を u_{v_x} とする)

Rule H. 速度誤差 e_x が正(負)であれば、着地目標位置に関する補正量の増分 du を負(正)とする。

Rule Hは前節のRule Eと同様に速度誤差に対する補正量を導入したものである。 k 回目の制御周期における補正量 $\Delta u^{(k)}$ は次式で表される。

$$\Delta u^{(k)} = \Delta u^{(k-1)} + du \quad (5)$$

以上に基づくルールテーブルを表6～8に示す。

表6 Rule F (u_{e_x})

	e_x				
	NB	NS	ZO	PS	PB
u_{e_x}	PB	PS	ZO	NS	NB

表7 Rule G (u_{v_x})

	v_x				
	NB	NS	ZO	PS	PB
u_{v_x}	-	-	ZO	PS	PB

表8 Rule H (du)

	e_y				
	NB	NS	ZO	PS	PB
du	PB	PS	ZO	NS	NB

表9 Rule I (u_{v_y})

	v_y				
	NB	NS	ZO	PS	PB
u_{v_y}	PB	PS	ZO	NS	NB

次に y 軸方向の着地目標位置に関しても、 x 軸の場合と同様の考察をもとに以下の規則が導かれる。

Rule I. 速度 v_y が正(負)であるならば、正(負)方向に着地目標位置をずらす。(ずれ幅を u_{v_y} とする)

この規則はヒトの歩行において、横方向の揺れが大きい場合はより速くに足を着こうとする性質を表わしている。これに基づくルールテーブルを表9に示す。

以上の規則を用いてファジィ推論を行い、着地目標位置(p_x , p_y)を次式により算出する。

$$p_x = p_{G_x} + u_{e_x} + u_{v_x} + \Delta u^{(k)} \quad (6)$$

$$p_y = p_{G_y} + w + u_{v_y} \quad (7)$$

ここで w は横方向の揺動運動を生成するための脚幅を表す定数とする。ただし遊脚の左右に応じて w の符号を逆にする(左脚が遊脚のときは正、右足が遊脚のときは負とする)。

2.4 支持脚と遊脚の切換えタイミング

本節では支持脚と遊脚の切換えタイミングについて考察する。基本的には、歩行中の上体の倒れ込みによって重心位置の x 座標がある値 s_x を越えるか、または y 座標がある値 s_y を超えたときに脚の切換えを行うこととする。ヒト歩行においてはこれらの値は、前節の着地位置の決定と同じく現在の速度、速度誤差に応じて適切に調整されているものと考えられる。

以下ではまず脚切換えの境界線(s_x)の決定方法について考察する。前節と同様、定速で歩行している場合を考えると、このときの境界線は支持脚接地点に対して毎回一定の位置を保っていると仮定できる。このような状況下で一歩毎の平均速度を加速したい場合、境界線を通常よりも前方にずらすことが考えられる。これにより前傾姿勢となる時間が長くなり、支持脚伸長力による加速が多く行われるため一歩毎の平均速度が上昇する。また逆に減速したい場合は境界線をより手前にずらし、加速期間を短くすることで歩行速度を減少させることができる。また一歩毎の平均速度と切替え境界線の関係性についても前節同様の規則を考察することができる。これらの考察より次の規則が導かれる。

Rule J. 速度誤差 e_x が正(負)であれば, 切換え位置を進行方向に向かって前方(後方)にずらす。(このずれ幅を s_{e_x} とする)

Rule K. 速度 v_x が正であれば, 切換え位置を進行方向に向かって前方にずらす。(このずれ幅を s_{v_x} とする)

また揺動方向の周期運動の制御については, 「 y 軸方向の速度が増大した場合に脚の切替えを早めに行う」という以下の規則が考えられる。

Rule L. 横方向速度 v_y が正であるならば, 切換え位置を進行方向に向かって後方にずらす。(このずれ幅を s_{v_y} とする)

ただしRule Lは右脚支持期の場合を示した。左脚支持期は前件部の「正」を「負」とする。

以上のルールテーブルを表10～12に示す。

Rule J, K, Lに対して各々独立にファジィ推論を行った結果を加算して s_x を求める。ただし目標速度が0付近に設定され, かつ速度誤差も微小であった場合, $s_x \approx 0$ となり脚の切替えが頻発することになる。これを避けるため実際の制御では微小な定数 s_c を付加し,

$$s_x = s_{e_x} + s_{v_x} + s_{v_y} + s_c \quad (8)$$

とする。また y 軸方向の脚切替えの境界線 (s_y) に関しては, 歩行に伴う横方向の定常的な振動を制御することが主な目的であるため, 前節と同様簡単化のために s_y を適当な定数とする。

以上の準備のもと脚切換えを行うための具体的な条件を示す。

表10 Rule J (s_{e_x})

	e_x				
	NB	NS	ZO	PS	PB
s_{e_x}	NB	NS	ZO	PS	PB

表11 Rule K (s_{v_x})

	v_x				
	NB	NS	ZO	PS	PB
s_{v_x}	-	-	ZO	PS	PB

表12 Rule L (s_{v_y})

	v_y				
	NB	NS	ZO	PS	PB
s_{v_y}	-	-	ZO	PS	PB

条件1. $p_{Gx} \geq s_x$

条件2. $v_y > 0$ and $p_{Gy} \geq s_y$ (右脚支持期, s_y : 定数 (>0))
 $v_y < 0$ and $p_{Gy} \leq -s_y$ (左脚支持期)

条件3. $p_{Gx} < -s_c$ and $v_x < 0$

条件4. $p_{Gy} < 0$ (右脚支持期), $p_{Gy} > 0$ (左脚支持期)

条件1, 2は進行方向及び横方向に関する定常状態における切替え条件を示したものである。条件3は重心が支持脚より後方にあり, かつ後方に移動してしまった際の切替え条件である。これは前方からの外力等により, 上体が後方に押し戻された場合など特殊なケースを想定している。条件4は, 条件3と同様に横からの外力や急激な進路変更によって重心の y 座標が両脚の外側に出てしまった場合などを想定したものである。また上記以外に条件5として重心が原点真上付近で静止しかけた場合などを考慮し, 前回の切替えが行われてから一定時間以上経過した場合は脚の切替えを行うこととする。

3. 2脚モデルによるシミュレーション

本章では, 前章で導出したファジィルールを2脚モデルに適用してその有効性を検証する。図4に2脚モデルの概観及び関節配置を示す。関節L_J3及びR_J3は直動アクチュエーターとし, それ以外の関節は角度計測機能をもつサーボモータとする。2脚モデルの全高は48[cm], 重量は1.4[kg], その内上体の重量は0.72[kg], 片脚の重量は0.34[kg]とした。また足底の四隅に接地センサを有し, 足裏の接地状態を観測できるものとする。足首のモーターは遊脚期に足裏を水平に保つために用いられる。遊脚着地の際には, 足裏4隅に配置したセンサの何れかが接地を観測すると足首のモーターのトルクを0にし, 足裏全体が接地するようにする。その後支持脚期中, 足首のトルクを0に保つことにより倒立振り子モデルとの整合性を図る。足部の大きさは x 軸方向に長さ130[mm], y 軸方向に幅84[mm]である。支持脚足首のトルクは0とするため原

図4 二足歩行ロボット概観及び関節構成

理的には足部の大きさは歩行の安定性に影響を与えないが、実際には足部を小さくすると外力負荷時等において足を挫く状況が生じてしまう。そのためこのような少し大きめの足部を用いてシミュレーションを行った。

2脚モデルでは倒立振子モデルと違い、脚部に質量が存在する。そのため遊脚の振り動作によって、ロボットの重心速度に大きな影響を与えることがあり、歩行の不安定化の招く。ここではこの問題を軽減させるため、重心の代わりにロボットの上体の中心位置を用いて制御を行った。また伸長力の計算においても脚質量をもつ2脚モデルと倒立振子モデルとの差異を補正するため、(4)式の第5成分 $mg/\cos\theta_z$ を定数 α 倍し $\alpha mg/\cos\theta_z$ として計算を行った(本シミュレーションでは $\alpha=0.6$ とした)。

制御領域の分割に関して、各領域に対するファジィ集合は以下のメンバーシップ関数により定義されるものを用いた。

$$\mu_{x+}(\theta) = \begin{cases} 1 & (0 \leq \theta < \pi/4) \\ 2 - (4/\pi)\theta & (\pi/4 \leq \theta < \pi/2) \\ 0 & (\pi/2 \leq \theta) \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{x-}(\theta) = \begin{cases} 0 & (0 \leq \theta < \pi/2) \\ (4/\pi)\theta - 2 & (\pi/2 \leq \theta < 3\pi/4) \\ 1 & (3\pi/4 \leq \theta) \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_y(\theta) = \begin{cases} \mu_{x+}(\theta) & (\text{右脚支持期}) \\ \mu_{x-}(\theta) & (\text{左脚支持期}) \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu_z(\theta) = \begin{cases} 1 - (4/(5\pi))\theta & (0 \leq \theta < \pi/4) \\ 1.6 - (16/(5\pi))\theta & (\pi/4 \leq \theta < \pi/2) \end{cases} \quad (12)$$

また上記以外のファジィ集合は、三角形型を用いた。各ファジィ集合のメンバーシップ関数の頂点の位置を表13, 14に示す。これらの値は試行錯誤的に求めた。また各メンバーシップ関数は、それに隣接するファジィ集合の頂点の位置において0となる。また伸長力、着地目標等の計算過程においては適当な値でサチュレーションを行った。

シミュレーションには動力学計算エンジンODE(Open Dynamics Engine) Ver.7.0を用いた。シミュレーションステップは10[ms]としている。遊脚の着地時の跳ね返りは考慮せず反発係数を0に設定し、また脚と地面との間の滑りは起きないものとした。また遊脚の軌道については、着地目標位置を常に追従させることを基本とした。ただし脚切替え直後においては次の着地

表13 シミュレーションで用いたメンバーシップ関数

	NB	NS	ZO	PS	PB
Velocity error (e_x) [m/s]	-4.0	2.0	0	2.0	4.0
Velocity (v_x) [m/s]	-4.0	-2.0	0	2.0	4.0
Velocity (v_y) [m/s]	-2.0	-1.0	0	1.0	2.0
Velocity (v_z) [m/s]	-1.0	-0.5	0	0.5	1.0
Position error (e_z) [m]	-4.0	-2.0	0	2.0	4.0
Extend force for acceleration (f_{x+}) [N]	-200	-100	0	100	200
Extend force for deceleration (f_{x-}) [N]	-160	-80	0	80	160
Extend force for oscillation (f_y) [N]	-20	-10	0	10	20
Adjustment for offset (df_z) [N]	-0.3	-0.15	0	0.15	0.3
Landing point(u_{e_x}) [m]	-0.16	-0.08	0	0.08	0.16
Landing point(u_{v_x}) [m]	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2
Adjustment for offset (du) [m]	-0.006	-0.003	0	0.003	0.006
Landing point (u_y) [m]	-0.44	-0.22	0	0.22	0.44
Metric for support-leg-exchange (s_{e_x}) [m]	-0.34	-0.17	0	0.17	0.34
Metric for support-leg-exchange (s_{v_x}) [m]	-	-	0	0.13	0.26
Metric for support-leg-exchange (s_{v_y}) [m]	-	-	0	0.16	0.32

表14 シミュレーションで用いたメンバーシップ関数

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
Extend force for height control (f_z) [N]	-21	-14	-7	0	7	14	21

目標が支持脚と交差する位置になるため、脚の交差をさけるよう股関節のroll軸モーターの可動域に制限を加えた。また支持脚の股関節に配置されたモーター(L_J1, J2, またはR_J1, J2)は歩行中常に上体を垂直に保つよう制御されている。具体的には支持脚足首関節(L_J4, J5またはR_J4, J5)で計測された角度に對し符号を逆にして股関節(L_J1, J2, またはR_J1, J2)の角度指令値とした。また脚の切替えに関しては前章で述べた切替え条件が成立した際、膝の直動アクチュエーターを用いて足部が地面に接地するまで脚長を伸ばすことにより脚の切替えを行っている。

3.1 速度・高さ制御, 進路変更

まず速度制御を行った結果を示す。図5～7は目標速度をそれぞれ0.3[m/s], 0.5[m/s], 0.7[m/s]としてシミュレーションを行った結果である。3つとも歩行開始後オーバーシュートしているが、3秒程経過した後目標速度付近を中心とする周期的な歩行に推移し

図5 速度制御結果：0.3m/s

図8 速度制御結果(一步毎の平均値)

図6 速度制御結果：0.5m/s

図7 速度制御結果：0.7m/s

ている。定常状態において波形が滑らかではないが、これは遊脚の足振り動作の反動によるものである。

各歩行速度に対する歩幅は0.3[m/s]のとき77[mm]程度、0.5[m/s]のとき108[mm]程度、0.7[m/s]のとき134[mm]程度となった。なお地面から股関節pitch軸(L_J2, R_J2)までの高さは291[mm]程度である。

次に図8に一步毎の平均速度を示す。着地位置に速度誤差に関する補正量を導入している効果により、複数の目標値に対していずれも定常偏差の少ない速度制御が実現できている。

次に進路変更を行った結果を図9に示す。進路変更は2.1節で述べたように目標進行方向に沿って目標Sagittal面を設定し、直進時と同様に2.2～2.4節の制御

図9 進路変更

を行うことにより実現される。ただしこのままでは実際のSagittal面(2脚モデルの向いている方向)と目標Sagittal面(2脚モデルの進行方向)がずれたままになってしまうので、股関節のyaw軸モーターを用いて2脚モデルの向きを変更する。具体的には図9のように左折したい場合、右脚支持期において左股関節のyaw軸モーターを進路変更角度だけ回転させ、左足着地後、左脚支持期の間に角度変更したモーターを0度に戻す操作を行った。また図9(d)は左足接地毎に20度ずつ9回連続して進路変更を行ったものである。全てのケースにおいて進路変更後安定状態に復帰することが確認された。

次に重心高さ追従制御について述べる。ここでは重心高さの変更に対して歩行を安定させるため、2.3節に述べた方法により求めた着地位置に対し、以下の補正を行った。

ロボットの基本状態における重心高さを h_0 、現在の重心高さを h_c とし、2.3節の(6)式、(7)式で求めた着

図10 ロボット上体の高さ制御(Snapshot)

図11 ロボット上体の高さ制御

 図12 速度制御結果(α 変更時)

 図13 重心高さ(α 変更時)

地目標に対して h_c/h_o 倍したものを修正後の着地目標位置とする。これは重心高さが変わっても歩容が一定になるように補正を行うものである。

本シミュレーションでは $0.5[\text{m/s}]$ での歩行中に、

ロボット上体の目標高さを $43[\text{cm}] \sim 53[\text{cm}]$ の間で4歩ごとに $2[\text{cm}]$ ずつ増加及び減少させた。歩行時のスナップショットを図10に示す(図中ロボットは右から左に移動)、その際の upper body 高さのグラフを図11に示す。前述の速度制御と同様に支持脚の伸長力制御に補正量 Δf_z を導入しているため偏差の少ない追従が行えている。

また提案手法のロバスト性を検証するため(4)式の第6項を変更した場合のシミュレーションを行った。(4)式の第6項は重心を水平に移動させるために経験的に体得されたものと前章において仮定したが、ここではヒトの歩行制御における非厳密性を考慮に入れ、 α の値を変化させた場合($\alpha = 0.2 \sim 1.2$ の間で0.2間隔)や第6項を定数 αmg ($\alpha = 0.6$)とおいた場合の結果を図12, 13に示す。ここで定数 αmg はロボットが直立した状態で静止している際に、自重を支えるために必要な力を表している。図12から、速度制御に関して上記いずれのケースにおいても大きな差異が生じていないことが読み取れる。また高さ制御においては $\alpha = 0.6$ を中心として、それ以下の値では歩行開始直後の上体の沈み込みがみられ、0.6以上ではオーバーシュートが大きくなる様子が図13から確認できる。ただしいずれの場合においてもその後安定歩行に推移できている。また第6項を定数 $0.6 mg$ とおいた場合について、 $0.6 mg / \cos \theta_z$ との比較においてはほとんど差異を生じなかった。

3.2 外力に対する安定性の評価

本節では歩行中に外力を付加した場合のシミュレーション結果について述べる。付加する外力は前後・左右両方向の成分をもつようにロボットの右斜め後方(x - y 平面において -120° の方向)から、 $2[\text{N}]$ の力を1.5秒間連続的に加えた。そのときの様子を図14に示す。また外力付加時の前後を含めた5秒間におけるロボット上体の移動軌跡を図15に実線で示す。また目標進行方向への速度 v_x を図16に実線示す。図15より、外力が付加されている間ロボットの歩行軌道が y 軸正方向にずれるが、その後安定な直進歩行に復帰できて

図14 外力付加時の歩容(0.5m/s)

図15 ロボット上体の軌跡

図16 進行方向速度(外力付加時)

いることがわかる。また図14より、外力負荷時において歩幅が特に大きくなっている。これは斜め方向から外力を負荷したために進行方向と横方向の両方向において速度が増大し、その結果Rule F, G, H, I, Kという多数の規則によって着地位置を遠くにとるような推論結果が得られたためである。

文献[8]では、歩行中に外力が加わった際のシミュレーションに関し、位相図を用いて安定性の評価を行っている。本節でもこれと同様に位相図を用いて外力に対する安定性を評価する。

左脚の股関節roll軸のジョイント(L_J1)の角度及び角速度を位相図(図17(a), (b))に示す。歩行中は上体を垂直に保つよう制御していることから、股関節

(a)L_J1(0~4.5[sec])

(b)L_J1(4.5~100[sec])

(c)L_J2(0~4.5[sec])

(d)L_J2(4.5~100[sec])

図17 ジョイントL_J1, L_J2の位相図

roll軸の角度は上体の横揺れの程度を表すものとなっている。図17(a)は外力の影響を含む0~4.5秒までの状態を、図17(b)はそれ以降(4.5~100秒)の状態を示している。これより外力付加終了後、安定した状態に回復できていることが分かる。

また左脚股関節pitch軸のジョイント(L_J2)の角度及び角速度を位相図に示す(図17(c), (d))。これは歩行中の脚部の前後方向の往復運動の様子を表すものである。先程と同様外力付加終了後、安定した状態に回復できている。

また外力付加時に加減速・揺動制御が正常に機能しているか確認するために、支持脚伸長力の各成分(式(4)の第1~3項)を図18, 19に示す。外力による影響を打ち消すように伸長力 f_{x+} , f_{x-} , f_y が有効に機能している様子が確認できる。

次に支持脚伸長力制御の効果を確認するために、式(4)の第1~3項を0とおいて

$$F = f_z + \Delta f_z^{(k)} + mg / \cos \theta_z \quad (13)$$

とし、加減速制御及び揺動制御をOFFにした場合について外力付加のシミュレーションを行った。外力の条件は前述のケースと同様である。その際の移動軌跡と速度を図15及び図16中に点線で示す。図15より、揺動制御をOFFにした場合に比べONにした方が、歩行進路のずれ幅が抑えられていることがわかる。また図16では加減速制御をONにすることにより、外力が加わった際の速度誤差をより小さく抑えられていることが確認できる。

図18 加減速のための伸長力 f_{x+} , f_{x-}

図19 揺動制御のための伸長力 f_y

4. モデルの拡張－足首トルクの導入－

前章までに歩行の本質的な要素と思われる制御則に対する考察を行った。本章ではさらにモデルの拡張を行うことにより制御性能の改善を試みる。具体的には、前章までの倒立振子モデルに足首関節によるトルクを導入する。ここでは特に速度制御に有効である足首pitch軸(L_J4, R_J4)のトルクについて考察する。

歩行速度が低速である場合、遊脚着地位置の僅かなずれが歩行に多大な影響を及ぼす。前章のシミュレーションにおいても目標速度0.1[m/s]以下の低速歩行においては酔歩状態になり、速度追従に失敗した(図20参照)。これはヒトの歩行制御の場合を考えると、竹馬や高下駄(一本歯下駄)に乗った状態での、その場足踏みや低速歩行が難しいことから推測できる。

本節では足首トルクに関する制御則として以下のものを考える。

Rule M. 速度誤差 e_x が負であれば、足部に対して正のトルク t_x を加える。

ここで「足部」とは足の踝以下の部分をさすものとする。この制御則は現在の速度が目標速度を超えている

表15 Rule M (t_x)

	e_x				
	NB	NS	ZO	PS	PB
t_x	PB	PS	ZO	-	-

表16 シミュレーションで用いたメンバーシップ関数

	NB	NS	ZO	PS	PB
torque (t_x) [N·m]	-	-	0	2.3	4.6

図20 速度制御結果(一步毎の平均値)

図21 足首トルク t_x

場合、足部の爪先側を地面に押し付けることにより速度を減少させようとするものである。これに各値の大きさを考慮に入れたルールテーブルを表15に、ファジィ集合のメンバーシップ関数を表16に示す。またヒトの足首関節が足部の中心より後方(踵より)にあることを考慮し、逆向き(踵側で地面を押し付ける方向)のトルクを利用する制御則は用いないこととした。

上記の制御則を追加して速度追従を行ったシミュレーション結果を図20に示す。目標速度0.1[m/s]の低速歩行においても、足首トルクを用いることにより速度追従が実現できている。また図21に目標速度0.1[m/s]の際の足首トルクと速度のグラフを示す。速度が0.1[m/s]を超えると足首のトルクが働き減速されている様子が分かる。

5. まとめ

本論文ではファジィルールを用いてヒトの歩行制御のモデル化を行った。また2脚モデルによるシミュレーションを行いその妥当性、有効性について検証した。

本手法では加減速制御に関して、伸長力制御や着地位置制御、脚切替えタイミング制御、さらに補助的に足首トルク制御の4種類の仕組みによって多重に独立した制御が行われている。この冗長性により、外力安定性のシミュレーションで示したように、何れかの制御が使えない状況にあったとしても残りの制御を用いることで安定した歩行を継続できるという利点がある。

本手法の問題点を述べるならば、実際のヒトの歩行がもつ多様性、柔軟性を完全には再現できていない点が挙げられる。例えば本手法では遊脚着地位置を予め指定することはできないが、ヒトの歩行では着地位置を事前に指定しても歩行が可能である。この点において実際のヒトの歩行はより多くの制御則を用いているものと考えられる。また細かな点について述べると、支持脚伸長力の制御則に関しても二足歩行の特性をうまく考慮できていないという問題がある。例えば二足歩行においては定常歩行時であっても各瞬間の重心速度は振動を繰り返しているが、提案した制御則では目標とする平均速度と各瞬間における重心速度との誤差をもとに制御を行うため、得られた推論結果からは本来 unnecessary な加減速の指示が行われることになる。これを回避するためには定常歩行時においては伸長力制御を OFF にするような、より高次の階層的な制御を導入する必要があると思われる。

今後の課題としては、上の問題点を克服するような階層的なファジィ制御を構築することや、提案手法の安定性に関する理論的検証、及び実機による検証等が挙げられる。また提案手法では重心高さ及び遊脚着地位置の制御に関して I 制御に相当する制御則を用いており、このゲインを大きくしすぎると振動や発散が起こる。今回のシミュレーションでは試行錯誤的にゲインを調整したが、これらに関する理論的な考察を行うことも今後の課題である。また今回考察の対象としなかった上体によるバランス制御等に対してファジィルール化を行い、よりヒトの歩行に近い制御則に改良していくことも課題として挙げられる。

参考文献

[1] K.Hirai, M.Hirose, Y.Haikawa and T.Takenaka: "The Development of Honda Humanoid Robot," Proc. of the 1998 ICRA, 1321/1326 (1998)

[2] 金子, 原田, 金広, 木村, 宮森, 赤地: "ヒューマノイドロボット HRP-3 の開発", 日本ロボット学会誌, Vol.26, No.6, 658/666 (2008)

[3] T.McGeer: "Passive Dynamic Walking," International Journal of Robotics Research, Vol.9, No.2, pp.62-82, 1990.

[4] 大須賀, 杉本, 杉江: "遅延フィードバック制御に基づく準受動的歩行の安定化制御", 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.2, pp.193-199, 2004.

[5] 杉本, 大須賀, 杉江: "連続型遅延フィードバック制御に基づく脚ロボットの準受動的歩行安定化制御", 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.4, pp.435-442, 2005.

[6] G.Tagar, Y.Yamaguchi, and H.Shimizu: "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment," Biologica Cybernetics, No.65, pp.147-159, 1991.

[7] K.Hase and N.Yamazaki: "Computer Simulation Study of Human Locomotion with a Three-Dimensional Entire-Body Neuro-Musculo-Skeletal Model," JMSE International Journal, Series C, Vol.45, No.4, pp.1040-1072, 2002.

[8] 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.

[9] 浅田: "認知発達ロボティクスによるパラダイムシフトは可能か?", 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.4, pp.375-379, 2010.

[10] S.Kawaji, N.Matsunaga and M.Arao: "Hierarchical Control of Biped Locomotion Robot using Fuzzy Inferences," 3rd International Workshop on Advanced Motion Control (UC Berkeley), pp.421-430, 1993.

[11] J. H. Park: "Fuzzy-logic zero-moment-point trajectory generation for reduced trunk motions of biped robots," Fuzzy Sets and Systems, Vol.134, pp.189-203, 2003.

[12] O.Bebek and K.Erbatur: "A Fuzzy System for Gait Adaptation of Biped Walking Robots," CCA2003 IEEE Conference on Control Applications, Vol.1, pp.669-673, 2003.

[13] 梶田編著: "ヒューマノイドロボット", オーム社, 2005.

[14] 梶田, 谷: "凹凸路面における動的2足歩行の制御について", 計測自動制御学会論文集, Vol.27, No.2, pp.177-184, 1991.

[15] E. H. Mamdani: "Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant," Proc. of IEE, Vol.121, No.12, pp.1585-1588, 1974.

[16] L.X.Wang and J.M.Mendel: "Generating Fuzzy Rules by learning from Examples," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol.7, No.1, pp.1-13, 1975.

[17] T.Takagi and M.Sugeno: "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol.SMC-15, No.1, pp.116-132, 1985.

(2011年4月3日 受付)
(2012年2月29日 採録)

[問い合わせ先]

〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1

首都大学東京 理工学研究科 電気電子工学専攻

相馬 隆郎

TEL : 042-677-1111

E-mail : souma@tmu.ac.jp

著 者 紹 介

そう ま たか お
相馬 隆郎 [正会員]

1998年早稲田大学大学院博士課程期間満了退学。博士(工学)。1997年より早稲田大学理工学部助手, 2000年より東京都立短期大学講師, 2006年より首都大学東京大学院理工学研究科電気電子工学専攻准教授, 現在に至る。2足歩行制御, 精度保証付き数値計算の研究に従事。日本ロボット学会, 計測自動制御学会, 電子情報通信学会等各会員。

A Model of Bipedal Walking Using Fuzzy Rules and its Application to Biped Models

by

Takao SOMA

Abstract :

This paper discuss bipedal walking control based on human skills. Concretely, we focus on walking control described in words, for instance, “we shift our contact point with the ground further forward when we walk faster.” or “We accelerate the body by extending the knee joint of supporting leg after the body’s COG (center of gravity) passes over the supporting leg.” Replacing these rules by fuzzy rules, a model for bipedal walking control is proposed. In this paper, I analyze walking control by a inverted pendulum model. Using this model, well defined rules on extend force of the supporting leg, the landing point of the swing leg, and conditions for leg-support-exchange allow stable walking. The proposed system enables walking velocity control, walking direction control and height control of COG by using 13 rule tables concerned with above-mentioned conditions. Through computer simulations using ODE (Open Dynamics Engine), validity of proposed model is confirmed.

Keywords : Biped Walking Control, Biped Robot, Humanoid, Fuzzy Control, Velocity Control

Contact Address : **Takao SOMA**

Department of Electrical and Electronic Engineering Graduate School of Science and Engineering Tokyo Metropolitan University

1-1, Minami-Osawa, Hachioji, Tokyo, 192-0397, JAPAN

TEL : 042-677-1111

E-mail : souma@tmu.ac.jp