

論文の内容の要旨

論文題目	二脚ロボットを用いた人のSplitbelt Treadmill歩容適応モデルの提案
学位申請者	音田裕史

近年、神経生理学における研究のツールとしてロボットを用いる試みがあり、その中で歩行に関する研究がいくつか行われている。二脚歩行に関しては、数十年にわたり人の歩行についての調査が数多くなされてきており、人のトレッドミル歩行における運動学、動力学、代謝研究などが数多く報告されている。本研究では、左右のベルトの速度が異なるsplitbelt型のトレッドミルでの歩行パターンの適応現象に注目する。そこでは健常者と小脳疾患患者のあいだに運動学的パターンに大きな相違が現れ、この現象の背後にあるメカニズムを解明することが課題となっている。

このような問題の研究においては、従来、筋骨格系モデルを用いたシミュレーションを行いその結果を人の歩行実験結果と比べることが行われてきた。このアプローチは簡便であるが、地面との摩擦や衝突・伸縮素材の影響などを完全にモデル化しシミュレーションに反映することは困難である。本研究では、二次元二脚歩行ロボット「鉄郎」を開発し、物理的な人の歩行モデルを構成することで、splitbelt上での歩行パターンの適応現象を検証する。

本論文では、最初に健常者と小脳疾患患者のsplitbelt treadmill歩行の実験結果を紹介する。次に、関節でのPD制御・脊髄における周期的な運動生成を規範とした倒立振り子に基づく軌道計画・脳幹における制御を規範とした遊脚着地角制御（ステッピングリフレックス）から成る従来のリミットサイクルを構成する制御手法について述べる。また、splitbelt treadmill上での自律的な適応歩行を実現させるために鉄郎に導入した、小脳における運動調節を規範とした支持脚腰関節におけるP-gain調節を提案する。最後に、鉄郎と人（健常者と小脳疾患患者）の歩行パターンを比較し、提案した制御モデルの正当性について議論を行う。測定された指標の比率と歩行パターンの高い類似性は、筆者の提案した仮説・モデルが正当であることを示唆していると考えられる。

人のsplitbelt treadmill歩行実験を行ったBastianらは、脊髄・脳幹・小脳・運動皮質を含んだ神経構造がさまざまな運動適応の制御を担っていると示唆している。しかしながら、どの神経構造がどのような種類の調節メカニズムによりどの適応機構に貢献しているかは明確に知られていないと言及した。そこで、筆者は、splitbelt treadmill上の二脚歩行に対する調節メカニズムを提案し、健常者や小脳疾患患者の歩容適応モデルを構成し、2次元二脚歩行ロボットを用い

て構成したモデルの正当性を検証した。ロボットの実験で得られたデータが人の実験で得られたデータに近いパターンを示したので、筆者の構成したモデルが二脚歩行における人の神経構造と類似している可能性を示している。

Bastianらは、以下の二つの調節機構が人のsplitbelt treadmill歩行において存在すると示唆している。

(a) 脊髄や脳幹における感覚的フィードバック適応機構(ストライド長やデュティ比を調節するintralimb coordinationに相当)。

(b) 小脳における予見的フィードフォワード適応機構(ステップ長や両脚支持期間比の差を調節するinterlimb coordinationに相当)。

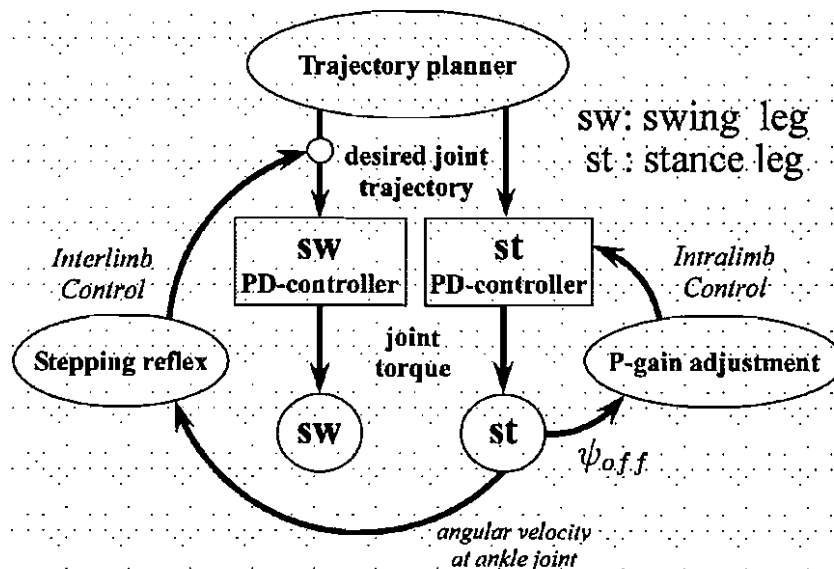


図1. 歩容適応モデル図

それに対して、筆者の提案したモデルにおける適応機構(図1参照)は、Bastianらが提案した調節機構と異なり以下のように要約される。

[a] デュティ比はおおむね運動学的拘束により受動的に調節される。

[b] ステッピングリフレックスはinterlimbコントロールであるにもかかわらず、intralimb index(ストライド長)を調節する(脳幹における感覚的フィードバック適応機構に相当)。

[c] Pゲイン調節はintralimbコントロールであるにもかかわらず、ステッピングリフレックス(interlimbコントロール)と組み合わせりinterlimb indexes(ステップ長と両脚支持期間比の差)を調節する(小脳における感覚的フィードバック適応機構に相当)。

本論文は神経生理学における知見を基に人のsplitbelt treadmill歩容適応モデルを構成し、2次元二脚歩行ロボット「鉄郎」を手段として用い、モデルの正当性を歩行実験により検証した。構成した歩容適応モデルとBastianらによって行われた健常者や小脳疾患患者における実験結果に比率とキネマティクスパターンにおいて高い類似性が見られた。これは、構成したモデルが正当であること的有力な根拠になっている。また、支持脚腰関節Pゲインがsplitbelt treadmill歩行における対称性を有する歩容適応の制御パラメータであることと、Pゲイン調節は小脳によるphysicな筋肉の剛性調節に相当することを示した。以上、本論文は人のsplitbelt treadmill歩行における歩容適応モデルを提案し、二脚ロボットを用いて構成した仮説とモデルの正当性を確認した。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 音田 裕史

審査委員主査 高瀬 國克

委員 田中 健次

委員 出澤 正徳

委員 阪口 豊

委員 明 愛国

第1章では、序論として、研究の背景、従来の二脚步行ロボット制御手法、関連する先行研究について紹介し、本研究の目的について述べている。すなわち本研究では、二脚ロボットを実際に開発し、人とロボットとのデータを比較検討することで、構成的に人のsplitbelt treadmill（ベルト分離型トレッドミル）上での歩容適応モデルを構築することが目的であることを述べている。最後に7章からなる本論文の構成について述べている。

第2章では、人のsplitbelt treadmill歩行の紹介と歩容適応モデルの提案を行っている。従来の生理学的研究により次の知見が得られている。歩行における2種類の神経制御が存在し、ひとつは、各脚独立にsplitbelt treadmillに素早く対応しストライド長やデューティ比を調整するintralimb coordinationであり、もうひとつはpost-adaptationステージにおける残効(aftereffect)を示すステップ長と両脚指示期間比の差を調整するinterlimb coordinationである。また、歩行における両肢間のリズムカルな運動が脊髄や脳幹に存在するリズム生成器(CPG)により発生する。以上のような知見に基づき、本研究では次の歩容適応モデルの提案を行っている。

- (1) CPGの機能を単純化した周期的関数による軌道生成
- (2) 脊髄における緊張性伸張反射のモデルとしてのPD制御
- (3) 前進速度と姿勢安定化のための脳幹におけるstepping reflex
- (4) 小脳における適応のモデルとしての支持脚腰関節のPゲインの調整

第3章では、二脚ロボット「鉄郎」について述べている。「鉄郎」は人のsplitbelt treadmill歩行の歩容適応モデルを構成しやすいこと、簡潔な制御手法でエネルギー効率の良い歩行ができることを目指して設計されていることを述べている。歩行は正中面(sagittal plane)に限定すること、各関節（各脚に3関節）はDCモータで駆動し、減速比を小さくすることで逆動性を持たせ、ナチュラルダイナミクスを利用した効率的な歩行を実現できることが特徴であるとしている。またセンサとして関節PD制御のためのエンコーダ、歩行の位相を調整するための足部スイッチ、不安定系を安定化するためのレイトジャイロを装備し、歩行制御を可能にしている。

第4章では、「鉄郎」のsplitbelt treadmill歩行の実現について述べている。具体的には、第2章で提案した歩容適応モデルを実装し歩行実験を行っている。各関節はPD制御され、関節角はエンコーダで検出されたものを用いている。目標値は倒立振り子モデルから生成した軌道データを使い、結果として、足首関節トルクをできるだけ抑え、重力を利用した、ナチュラルダイナミクスに近い歩行軌道を得たことを述べている。

tiedbelt treadmill (左右の速度が同一) 歩行の実験では、人の通常歩行のようなかかとで接地してつま先で離地し、膝が曲がらない運動が実現されたことを述べている。また、stepping reflex (支持脚足首関節角速度から遊脚踏出し角度へのフィードバック) により速度安定化と後ろから押すなどの外乱に対する頑健性が得られたことを示している。

splitbelt treadmill (左右の速度が異なる) 歩行の実験では、interlimb 制御として、支持脚腰関節においてPゲインの調節を行う制御を実装している。これにより、片方のベルトが速くなるadaptationステージにおいてもワールド座標系における胴体の位置がほぼ一定に保たれ、splitbelt treadmill上での歩行を継続できることを述べている。

次に、健常者のデータと「鉄郎」のデータを比較し、ストライド長とデューティ比が同じパターンとなることを示し、ステップ長と両脚支持期間比についても同じ値とパターンを示すことを述べている。

第5章では、考察として、従来のZMP規範型ロボットや竹馬型二足歩行ロボットに比べ、「鉄郎」の機構及び制御が人の歩行により類似していることを述べている。また提案した歩容適応モデルによる調節機能は、従来の定説を覆す次の特徴を持つことを述べている。

- (1) デューティ比は概ね運動学的拘束により受動的に調節される。
- (2) stepping reflexはinterlimbコントロールでありながら、intralimb index (ストライド長) を調節する。
- (3) Pゲイン調節はintralimbコントロールでありながら、stepping reflexと組み合わせinterlimb index (ステップ長と両脚支持期間比の差) を調節する。

第6章、第7章では、本研究で得られた結論・成果について述べ今後の課題を展望している。

本研究では、二脚ロボットを実際に開発し、人(健常者及び小脳疾患障害者)とロボットとのデータを比較検討することで、構成的に人のsplitbelt treadmill上での歩容適応モデルを構築した。人とロボットの実験を通して得た各指標の高い類似性はモデル構築時の仮説の正当性を示唆している。生理学的な裏づけは十分とは言えないが、今後の更なる機構解明のためのユニークな考え方を与えており、基礎研究としての役割を十分果たしている。

よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として十分な価値があるものと認める。