

Title	非線形力学系モデルを用いた歩行の動的安定性に関する研究
Author(s)	山崎, 大河
Citation	
Issue Date	
Text Version	none
URL	http://hdl.handle.net/11094/44367
DOI	
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/repo/ouka/all/>

氏 名	山崎 大 河
博士の専攻分野の名称	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	第 1 7 9 1 4 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 15 年 3 月 25 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第 4 条第 1 項該当 基礎工学研究科システム人間系専攻
学 位 論 文 名	非線形力学系モデルを用いた歩行の動的安定性に関する研究
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 佐藤 俊輔 (副査) 教 授 若林 克三 教 授 宮崎 文夫 教 授 田中 正夫 助教授 野村 泰伸

論 文 内 容 の 要 旨

歩行は律動的な運動で、外的摂動により一過性に運動が乱されても、転倒しない限り元の軌道に復帰する。これは歩行運動が動的安定性をもつことを意味する。このような摂動に対する過渡的運動応答に際して歩行リズムの位相がリセットすることが知られている、本論文では、歩行リズムのリセットと歩行の動的安定性の関係を力学系の視点から明らかにすることを試みた。この目的を達成するために、脊髄に存在すると考えられているリズム生成回路 (central pattern generator : CPG) を含む生体の周期運動制御系の簡略化モデルと二足歩行運動の動力学的な性質をより詳細に考慮した二足歩行モデルのダイナミクスを詳細に解析した。これらのモデルは非線形連立常微分方程式で記述される力学系で、定常歩行はそれらの力学系の安定リミットサイクルとしてモデル化される。定常歩行中の筋・骨格系に加えられる摂動は、力学系の状態点をリミットサイクルから引き離し、リミットサイクルの吸引領域の内または外に移す。そこで各モデルのリミットサイクルの吸引領域を詳細に解析した。その結果、CPG のリズム制御 (位相リセット) が果たしうる次の機能的な役割を明らかにした。(機能 1) 摂動に対する適切な量の位相リセットは、リミットサイクルの吸引領域外にある状態点を吸引領域内に引き戻す。(機能 2) 摂動に対する適切な量の位相リセットは摂動後の状態点の収束時間 (状態点がリミットサイクルに戻るのに必要な整定時間) を短縮する。また生理学実験では、通常外乱に対する歩行運動リズムの変化は位相反応曲線 (phase resetting curve : PRC) を用いて解析されるので、本論文でも PRC の枠組みでの解析を行った。特に二足歩行モデルに対しては、前述の機能 1 を実現するための適切な位相リセットを求め、実験的に計測されたヒトの PRC と比較し、両者が共通の特徴をもつことを示した。これは位相リセットがヒトの二足歩行運動の動的安定性を向上させる役割を果たすことを意味する。以上の結果に基づき、生体の中枢神経系が適切な位相リセットを実現するメカニズムに関する計算論的な議論を行った。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

ヒトは歩いていて躓いても転ばない。これは歩行が動的安定性をもつからである。摂動に対して安定な歩行を保つための過渡的な運動応答は“stumbling reaction”と呼ばれこのとき歩行リズムの位相がリセットされる。

本論文は歩行運動の動的安定性に対するこの位相リセットの機能的役割を力学系的な視点から明らかにすることを目指すものである。このために二重振子からなる周期運動制御系モデル（以下簡略化モデル）と、ヒトの詳細な筋・骨格系を考慮したモデル（以下二足歩行モデル）を扱う。簡略化モデルでは脊髄に存在すると考えられているリズム生成回路（CPG）が想定され、CPG リズムにもとづいて周期的目標軌道が生成される。この軌道から関節トルクが制御論的に計算され、筋・骨格系としての二重振子に加えられ、目標とする運動が実現される。二足歩行モデルでは、筋・骨格系と床との相互作用が考慮され、歩行中における各関節のキネマティクスは、ヒトの定常歩行データで拘束される。これらのモデルは共通の形式をもつ非線形力学系として記述される。ヒトの定常歩行をこの力学系モデルの安定なリミットサイクルに対応させると、歩行中の筋・骨格系に加えられる摂動は、力学系の状態点をリミットサイクルの吸引領域の内または外に移すことに相当する。摂動に対するモデルの応答は、リミットサイクルの吸引領域の構造に依存する。第2章では、簡略化モデルのリミットサイクルの吸引領域を詳細に解析した。その結果、CPGの適切な位相リセットは(1)リミットサイクルの吸引領域外にある状態点を吸引領域内に引き戻す、(2)摂動後の状態点の収束時間（状態点がリミットサイクルにもどるのに必要な整定時間）を短縮する、ということを明らかにした。リズムに関する生理学実験では、摂動に対する応答の詳細を明らかにするために、しばしば位相遷移曲線（PTC）が求められる。簡略化モデルでも、リミットサイクルへの吸引領域と摂動後の状態点の収束時間をシミュレーションからもとめ、与えられた摂動に対して(1)(2)の意味で最適な位相リセット量が存在することを示した。種々の位相における最適な位相リセット量から作成した PTC を最適な PTC と呼んだ。第3章では、二足歩行モデルを用い、位相リセットと歩行の動的安定性の関係をしらべ、位相リセットがなければ転倒するような摂動に対しても、適切な量の位相リセットによってモデルはそれを回避できることを示した。これはヒトの二足歩行においても位相リセットが歩行の動的安定性を向上させる役割を果たすことを示唆する。さらに、モデルから予測される最適な PTC と、実験的に計測されたヒトの歩行に関する PTC を比較し、両者が共通の特徴をもつことを示した。第4章では、本研究の結果と生理学や生体の運動制御、ロボティクスなどの分野で得られている知見との関連を議論した。また、生体の中枢神経系が適切な位相リセットを実現するメカニズムに関する計算論的な議論を行った。以上のように本論文は歩行運動の動的安定性に関する計算論から、歩行の運動生理学やロボティクスなどの分野に寄与するもので、博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。