

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：32643

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06273

研究課題名(和文) 力学的アプローチによるヒト走行原理の解明および走行支援機の開発

研究課題名(英文) Elucidation of principle of human running by mechanical approach and development of running assist device

研究代表者

池俣 吉人 (IKEMATA, Yoshito)

帝京大学・理工学部・講師

研究者番号：70467356

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、まず一流アスリートの走行を解析することで、その特徴を明らかにした。その特徴に基づいた仮定を立てて、ヒト走行の数理モデルを構築した。次に、同モデルの解析から、ヒト走行における周期運動の生成及び安定化の原理を明らかにした。同原理は、「着地時の前脚の姿勢角度を一定にすることで、安定な平衡点が生成される」という簡単なものであった。さらに、数理モデルを解析することで、「着地時の前脚の姿勢角度を鉛直に近づけると、移動効率が向上する」という興味深い知見を得た。同知見を走行の実機簡易モデルの実験から実証した。最後に、先ほどの知見に基づいて走行支援機を開発し、心拍数から運動効率を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒト走行における周期運動の生成及び安定化の原理を解明したこと、ならびに走行の移動効率を上げる方法を見出したことは、学術的意義がある。原理解明の過程で導いた数理モデルは、様々な発展性があり、今後学術的に貢献するものだと考えられる。本研究で得られた知見は、革新的な走行ロボットの基盤技術を確認し、ヒトよりも効率かつ高速に走るロボットの実現に繋がるものと考えられる。また、工学的に応用することができれば、走行に関わる新規産業(走行アシスト具、スポーツシューズ、競技義足など)の創出の可能性もあり、社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：In this study, first, we clarified the characteristics of human running by analyzing running motions of athletes. A mathematical model of human running was constructed by assumptions based on the characteristics. Secondly, principles of generation and stabilization of periodic motion in human running are demonstrated by the analysis of the model. The principles are simple: a stable fixed point is generated by keeping the postural angle of the forelegs in grounding. Moreover, we obtained an interesting knowledge that "transfer efficiency can improve when the posture angle of the front leg in grounding is closer to vertical.". The knowledge was demonstrated by experiments of a simple model of running. Finally, we developed a running assist suit based on the knowledge of human running. And, the running assist suit was evaluated by transfer efficiency (heart rate).

研究分野：ロボット工学

キーワード：ロボティクス 走行 リミットサイクル 原理

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ヒューマノイドに代表される歩行・走行ロボットは、高精度なセンサ、高性能なアクチュエータ及び高度な制御からなる、最先端テクノロジーの結晶である。その要となっているのが、ZMP (Zero Moment Point) であり、転倒しないように歩かせたり、走らせたりするのに強力なツールである。しかしながら、ZMP 規範の制御方法では、高いエネルギー効率を実現することは困難であり、その歩行・走行は自然さに欠ける。一方、受動歩行は、T. McGeer によって 1990 年に提唱され、ロボットのもつダイナミクスと環境（ここでは、スロープ）との相互作用のみによって、理想とする自然な歩容を形成する。

海外（欧米）では、受動歩行に関する専門会議 Dynamic Walking が 2005 年から、最新の研究発表から入門講座などが企画され、活発な活動がなされている。また、コーネル大学（米国）やデルフト大学（オランダ）では、フルボディを有し、3 次元の 2 脚受動歩行あるいは受動歩行を規範とした能動歩行を実現させている。国内では、同じく 2005 年から計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会において、受動的歩行に関する OS が企画され、活発な議論を重ねてきた。2012 年から、「OS 受動歩行の新展開」が立ち上がり、工学的応用研究の重要性が説かれている。

これまで本研究では、受動歩行の重要原理を明らかにすることで、ロバストな受動歩行を実現させることに成功した。さて、ヒト歩行は、受動歩行に近いとよく言われる。ヒトは「受動歩行」のような力学現象を巧く利用して歩いており、その原理は複雑なものでなく、力学的観点から明快に説明できるものと考えられる。そこで本研究では、「受動歩行」から「ヒト歩行」へと研究を発展させて、ヒト歩行の主要原理である a) ヒト歩行の周期運動の生成と安定化、b) 脚運動、c) 2 脚安定化の原理を明らかにした。さらに、歩行原理に基づいた歩行支援機を開発した。

2. 研究の目的

第 1 章で述べたヒト歩行の周期運動の生成と安定化の原理、2 脚安定化の原理は、共通したのものとなっており、遊脚大腿部の姿勢角度を一定にすることで、安定な平衡点（歩行）が生成させるといったものであった。ここで興味深いことに、これは、受動歩行の研究を通して発見した平衡点の大域的安定化原理と同じものであった。ヒト歩行に関しても、ヒト歩行と同じく、その原理は簡単なものである可能性がある。そこで本研究では、受動歩行とヒト歩行で用いた解析手法を用いて、ヒト歩行の原理を明らかにすることを目的とした。さらに、解析で得られた知見を、ヒト歩行の実機簡易モデルで検証するとともに、ヒト歩行の支援機を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) ヒト歩行の原理

ヒト歩行に内在する力学的原理を理解するためには、解析モデルはできる限り簡単であることが望ましい。従来のヒト歩行モデルの多くは、ニュートンの第 2 法則に基づいたモデルがよく用いられている。ボルト選手の速度データを用いてフィッティングを行うと、モデルと測定値が高い精度で一致する。しかしながら、ヒト歩行運動を台車のような運動として取り扱っているため、各ステップにおける時間・ステップ長を求めることができない。また、空気抵抗がないトレッドミル上での歩行の場合、常に加速して速度は無限になってしまう。さらに、着地損失が考慮されておらず、力学的モデルとして妥当性に疑問が残る。そこで本研究では、着地を含む周期運動のモデルから解析を行うことにした。

まず、力学的モデルを構築する上で、モデルの仮定が必要となる。そこで、一流アスリートの歩行を解析して、その特徴を明らかにすることにした。Youtube 上で一流アスリートの歩行動画が公開されている。例えば、南メソジスト大学 Locomotor Performance Laboratory の Youtube チャンネル「LocomotorLabSMU」では、一流アスリートの歩行様子が多数掲載されている。本研究では、これらの動画から大腿部、下腿部および膝の角度を算出した。次に、ヒト歩行の特徴に基づいてモデルの仮定を立てて、数理モデルを構築した。同モデルから、歩行運動の生成ならびに安定化メカニズムについて解析した。最後に、数理モデルの解析から、より移動効率が高く、より高速に走るための力学条件を導いた。

(2) ヒト歩行の実機簡易モデルの開発

数理モデルから得られた知見を実験的に検証することは重要である。そのためには、安定な歩行現象を発現させる実機簡易モデルを開発しなければならない。歩行速度を利用した身体の起こし回転運動に基づいた歩行現象がある。「起こし回転型受動歩行」と呼ばれ、ダイナミクスな歩行であるが、現象として不安定であり、連続した歩行の実現は困難である。数値シミュレーションから、脚の本数に関わらず平衡点は不安定であることがわかっている。

起こし回転運動における空中期の運動(重心)は、ボールの投射運動とみなすことができる。スロープを下り降りることによって失ったポテンシャルエネルギーは運動エネルギーに変換されるが、水平方向の速さは変化せず、鉛直方向の速さだけが大きくなる。また、起こし回転バーの両端にトカゲ足形状の足を付けると、安定性が格段に向上する。離床時の足の動きをみると、水平方向に蹴り出している。

前述の考察および知見から，本研究では「リムレスホイール（リムなしの車輪）を水平方向におもりで牽引することで，安定した走行現象が発現できる」という仮説を立てて，実機簡易モデルを開発することにした．

(3) 走行支援機の開発

研究(1)および(2)で得られた知見から，ヒト走行の支援機を開発した．人が支援機を装着して，トレッドミル上で評価実験を行った．心拍計から運動効率を評価した．安全のため，手すりを掴んで走った．十分な準備運動（走行）を行った後，実験を行った．各実験の間には休憩時間（10または15分）を設けた．着地時の姿勢を計測するために，腰・膝・踝にマーカーを貼り付けた．マーカーの位置は，高速度カメラを用いて計測した．走行者は，健康男性2名で，走りやすい服装や靴で実験を行った．

4. 研究成果

(1) ヒト走行の原理

7名の一流アスリートの走行運動（速度：5.7～12[m/s]）における着地時の前脚の姿勢角度を解析した．図1(a)に，走行速度 V_x と着地時の姿勢角度の関係を示す．ただし， θ_1 は大腿部の角度， θ_2 は下腿部の角度である．図からわかるように，走行速度 V_x に関わらず，着地脚（前脚）の姿勢角度は，ほぼ一定であることがわかる．そこで，「前脚（着地脚）の姿勢が一定となるように着地する」という仮定をおいた（仮定1）．また，離床時の後脚の姿勢角度を解析すると，図1(b)のようになった．図からわかるように，走行速度 V_x に関わらず，後脚の姿勢角度はほぼ一定であることがわかる．また，この姿勢角度は，股関節の伸展稼働限界における後脚姿勢とほぼ一致していた．そこで，「離床時の後脚の姿勢角度は，股関節の伸展稼働限界によって決まり，その姿勢角度は一定である．」という仮定をおいた（仮定2）．

前述の二つの仮定に基づいて，数理モデルを構築すると以下のような式となった．

$$K_{n+1} = e(\theta)(K_n + \Delta U - D(K_n))$$

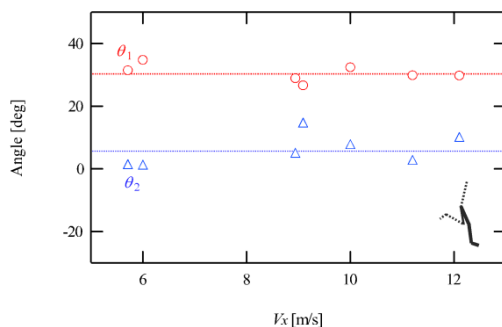
ただし， K は着地直後の運動エネルギー， e は着地損失係数， ΔU は供給エネルギー， D は空気抵抗， θ は着地時の姿勢角度である．この式は n 歩目と $n+1$ 歩目における着地直後の運動エネルギーの関係を示している．この式から各ステップの速度を導出することができる．仮定1から，姿勢角度 θ ならびに着地損失係数 e は定数として扱うことができる．また，仮定2ならびに，後脚の蹴り力は大きく変化しないものと仮定すると，供給エネルギー ΔU は定数として扱うことができる．この結果，数理モデルは非常にシンプルなものとなる．

世界陸上ベルリン大会男子100m決勝ウサイン・ボルト選手の世界新記録（9.58秒，追い風0.9m/s）のデータを用いて，提案モデルの検証を行った．図2に，各ステップ n における平均走行速度 \bar{v}_n を示す．ただし，赤線はボルト選手のデータ，青線は提案モデルである．図からわかるように，提案モデルの近似度は高く，妥当なモデルだと言える．

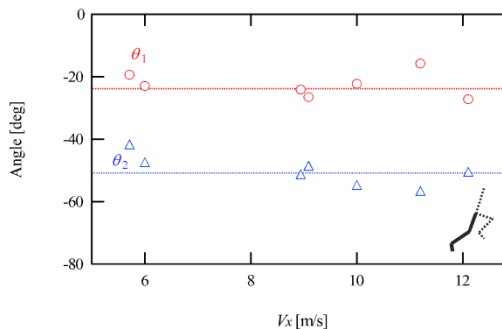
数理モデルの解析から，着地時の前脚の姿勢角度を一定に維持することで，安定な平衡点（安定な周期運動）が生成されることがわかった．ここで興味深いことに，その基本原理は，ヒト歩行と同じであった．さらに，モデルを解析してみると，着地時の前脚の姿勢角度を鉛直に近づけると，着地時の損失エネルギーが小さくなり，移動効率が向上することがわかった．なお，移動効率の向上に伴い，走行速度は大きくなる．

(2) ヒト走行の実機簡易モデルの開発

ヒト走行の実機簡易モデルは，リムレスホイールを用いた．実験装置の全体概要図を図3に示す．リムレスホイールの中心に，紐の先端を取り付け，紐の他端を床面に設置した牽引機の



(a) 着地時の前脚の姿勢角度



(b) 離床時の後脚の姿勢角度

図1 一流アスリートの走行解析

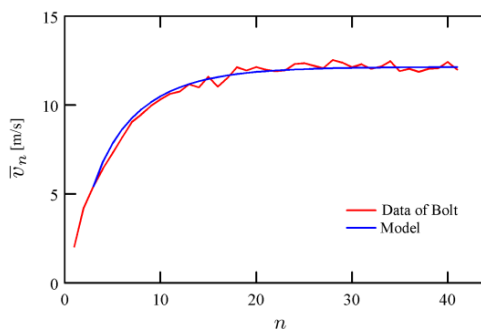


図2 数理モデルの検証

滑車に通し、おもりを取り付けた。実験のスペースの制約上、トレッドミルを用いた。トレッドミルの走行面は水平である。リムレスホイールの速度が大きくなると、着地衝突の衝撃によって左右に跳ね飛んで、トレッドミルから落下してしまう。そこで、リムレスホイールを左右からアクリルプレートで挟む2次元拘束機を導入した。同拘束機により、運動は二次元の矢状面 (Sagittal plane) 内に拘束される。

本研究で開発したリムレスホイールを図4に示す。8本の脚が等間隔で左右の中心本体に固定されている。全長は33[cm]、全質量は1.7[kg]である。左右の本体を連結する中心軸は、ステンレス棒を使用した。中心軸の真ん中に、溝を有するベアリングを取り付け、左右からセットカラーで挟んで固定した。この溝に紐を取り付けて、リムレスホイールを水平方向に牽引する。本体の左右側面それぞれに4つのボールキャスターを円周上に等間隔に取り付けた。これにより、滑らかな二次元平面運動を実現することができる。

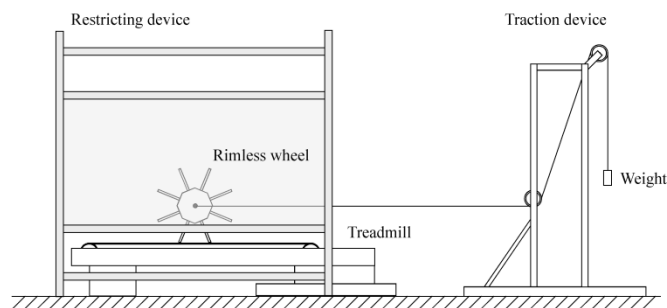


図3 実験装置の全体概要

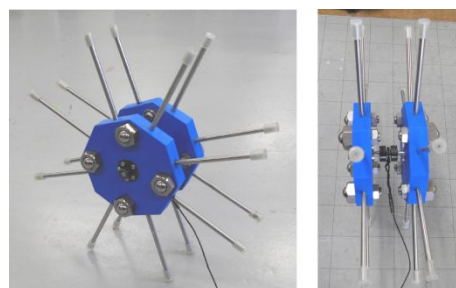


図4 ヒト走行の実機簡易モデル (リムレスホイール)

図5に、トレッドミル速度 v を変えたときの牽引おもりの質量 m の挙動を示す。ただし、トレッドミル速度は、定常状態のものである。図からわかるように、トレッドミル速度 v を上げると、時速4kmまでおもりの質量 m は増加する。足先が硬いため、着地時に少し跳ね返った後、前方に倒れる。ほんの僅かな空中期が存在するが、その運動の様子は歩行である。時速4.5kmあたりで、おもりの質量が少し下がっている。この原因は、歩行と走行の間のような運動となっているためと考えられる。時速5km以上になると走行運動となる。時速6.5kmまでは、安定な周期運動となっている。ここで興味深いことに、おもりの質量が大きく下がっている。おもりの質量の減少は、移動効率の向上を意味している。時速6kmのときのおもりの質量 m は、時速2.5kmのときのおもりの質量とほぼ同じとなっている。時速7kmになると、たまに1脚分空転することがある。速度は一定ではあるが、周期運動としては不安定である。時速7.5km以上になると、前方もしくは後方に転落してしまう。

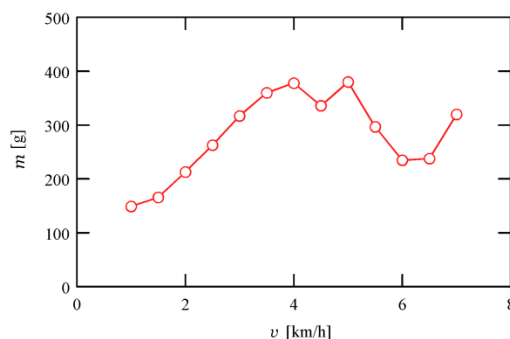


図5 トレッドミル速度 v と牽引用おもりの質量 m の関係

各トレッドミル速度 v に対して、30歩の着地時の姿勢角度 θ のデータからその平均値と標準偏差を算出した。図6に各トレッドミル速度 v における着地時の姿勢角度 θ を示す。図からわかるように、歩行のとき(時速4.5kmまで)は、リムレスホイールの構造上、着地時の姿勢角度はほぼ一定となる。走行(時速5km/h以上)になると、着地の姿勢角度 θ が歩行のときよりも小さくなっている。このことから、歩行のときよりも着地損失エネルギーが減少していることがわかる。

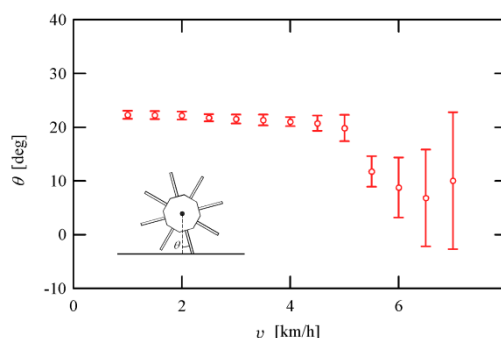


図6 トレッドミル速度 v と着地時の姿勢角度 θ の関係

以上の結果は、研究成果(1)の「着地時の姿勢角度を鉛直に近づけると、着地時の損失が小さくなり、移動効率が大きくなる」を実験的に示したことになる。なお、リムレスホイールの脚にバネを取り付けると、走行の安定性が格段に向上した。トレッドミルの限界速度(時速14.5km)まで安定した走行現象を発現させることができた。

(3) 走行支援機の開発

研究成果(1)および(2)から、移動効率の高い走行(あるいは、高速な走行)を実現させ

るには、着地脚（前脚）の姿勢角度を小さくすればよいことになる。この知見に基づいて、図7に示す走行支援機を試作した。支援機は、弾性体と腰固定具と膝固定具からなり、大腿部の背面に装着する。腰固定具ならびに膝固定具は、3Dプリンタで製作した。大腿部が前方に移動すると、弾性体が伸ばされる。これにより、支援機は弾性エネルギーを蓄える。そして、大腿部が振り戻るとき、支援機に蓄えられた弾性エネルギーが解放されて、遊脚の振り戻りをアシストするようになっている。

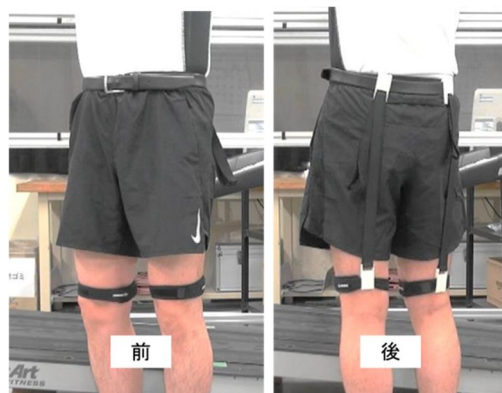
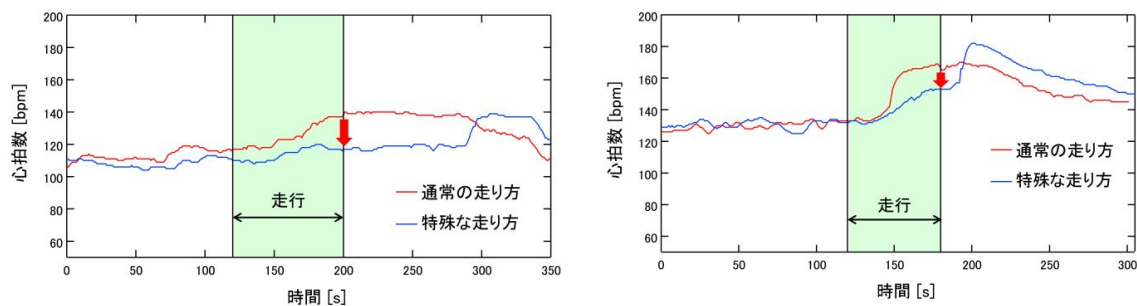


図7 走行支援機

人が支援機を装着して、トレッドミル上で評価実験を行った。運動効率を心拍計から評価すると、運動効率の向上が見られなかった。この原因を調べてみると、遊脚大腿部の前方振り出しを大きく阻害したためであった。そこで本研究では、支援機を用いずに、着地時の姿勢角度が小さくなるように、走り方を意識的に変えることにした（特殊な走り方）。図8に通常の走り方と特殊な走り方の心拍数を示す。図からわかるように、特殊な走り方の場合、通常の走り方よりも心拍数の上昇が緩やかになって、運動効率の向上が見られた。ただし、大腿部に大きな負担が掛かってしまい、走行後に心拍数の急激な上昇が見られた。

以上のように、いくつかの課題はあったが、本研究で得られた知見は、実際のヒト走行に有用であると考えられる。



(a) 走行者 A

(b) 走行者 B

図8 走行の評価実験

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 池俣吉人, 佐野明人
2. 発表標題 アスリートの走行における支持脚運動の解析
3. 学会等名 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池俣吉人, 佐野明人
2. 発表標題 2脚走行機とアスリートにおける走行の比較
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 '19
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池俣吉人, 大澤遼河, 笠原優, 佐野明人
2. 発表標題 牽引によるリムレスホイールの2D水平面走行に関する研究
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 '19
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池俣吉人, 佐野明人
2. 発表標題 アスリートの走行運動の基礎解析
3. 学会等名 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池俣吉人, 佐野 明人
2. 発表標題 ヒト走行の簡易モデルにおける平衡点とその安定性の解析
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ' 18
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池俣吉人, 佐野明人
2. 発表標題 空気抵抗を考慮したヒト走行の簡易モデルの構築
3. 学会等名 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会2017
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考