

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：20103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560299

研究課題名(和文) 2足歩行機構のパッシブな安定性を実現する足底形状の理論解明と人・ロボットへの応用

研究課題名(英文) Theoretical analysis of sole shape that stabilizes passive dynamic biped and its application to human and robot walk

研究代表者

三上 貞芳 (Mikami, Sadayoshi)

公立はこだて未来大学・システム情報科学部・教授

研究者番号：50229655

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：船舶やおきあがりこぼしなどは、外乱に対して底形状により発生する復元力により自然に安定する性質を有している。本研究ではこの原理を2足歩行ロボットに応用し、歩行安定化を足底形状によって実現させることを目指した。成果として、つま先が適切な角度で地面に接するような靴形状が、歩行の安定を確保することを理論的に明らかにできた。これにより、外部動力を用いずに2足歩行ロボットの歩行の安定を改善する新しい手法が明らかになり、その成果を用いて人の歩行を安定化させる靴底形状を開発することができた。

研究成果の概要(英文)：This research is aiming at realizing stable walk for biped robots by providing specialized sole shape. The idea is similar to the mechanism of natural stability induced by shape of bottoms which are seen in boats or tumble dolls. By theoretical analysis, we showed that a sole shape with a toe having a certain angle contributes to the stabilization. By this idea, we designed a sole shape of shoes that stabilizes human walk on uneven surfaces.

研究分野：知能機械学

キーワード：受動歩行 歩行ロボット 靴

1. 研究開始当初の背景

人間の歩行にみられるように、倒立振り子の連続と同様な歩行の原理で、原理的には坂道ではモータ等駆動装置を必要としないような、受動歩行という2足歩行ロボットの歩行実現方式が知られている。

受動歩行はエネルギー効率の点で優れた歩行方法だが、与えられた機構に対して、歩行が継続できる条件が極めて狭いため、実応用に向けた安定性向上技術の必要性が指摘されていた。

これに対して、機構の持つダイナミクスが、路面との相互作用で、継続する歩行として引き込みを生じるような条件や分岐現象などについての研究が進み、股関節の角度を抑制することで、歩行ダイナミクスの引き込み域を大幅に向上させることが知られてきた。

一方で、研究代表者と分担者は、いままで着目されていない、2足歩行機構の足裏の形に着目し、足底で転倒傾向を制約することで歩行が安定化することを実験的に見出していた(図1)。この方法は股関節の抑制による安定化に比較して装着の容易さなどで優位な点を有する。しかし当初は実験的な確認にとどまっており、安定化の理論的な検証や、与えられた機構や環境に対して、どのような足裏形状が望ましいかという設計論は明らかになっていなかった。

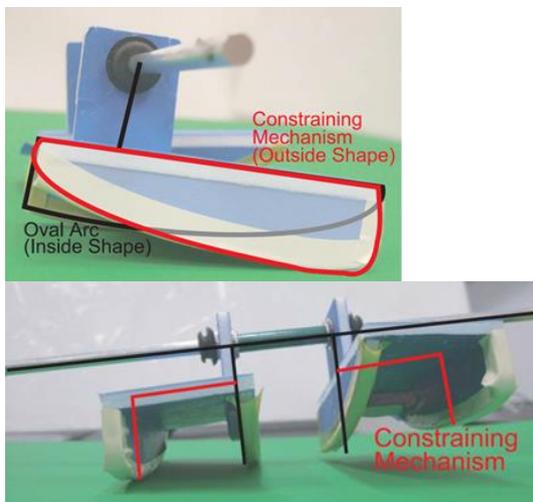


図1. 抑制足形状.

また、受動歩行ロボットの歩行安定化を靴底で実現することは、人間の歩行の安定化を促進するような人用の靴を実現することにもつながると期待できる。そのためには上記の抑制足底形状の設計方法を明らかにする必要がある。また筋肉・骨格へ不自然な力が生じないことを明らかにしなければならない。

2. 研究の目的

- (1) [理論構築] 与えられた直立型の2足歩

行機構に対して、より転倒しそうな姿勢に近づいた際に、それを妨げるような反力を足底から発生するような、足底の設計理論を明らかにする。これにより、モータ等による制御とは別の、形から得られる復元力、という2足歩行機構の歩行安定改善の手法と設計論を明らかにする。

- (2) [応用技術] 人の歩行・および不安定な場所での直立において、より転倒に近づく不安定状況に近づいた際に、それを抑制する反力を発生する靴底の設計理論と具体的な靴の形状設計例を明らかにする。

3. 研究の方法

- (1) 安定化を実現する足底形状の設計理論導出を行う。具体的には、① 足底形状により歩行が安定化される仕組みの理論解明、② 足底を考慮した数値シミュレーションの構築、③ 数値シミュレーション結果を整理することで、与えられた斜度に対する適切な足底形状の設計則の導出を行う。

- (2) 安定化足底形状の原理を用いた、人に利用できる靴の具体形の設計を行う。具体的には、① 復元力を発生する靴の試作(樹脂部材利用)、② これを装着した人の歩行(特に歩行直立に負担がかかる業務従事者や高齢者)にかかわる脚部負荷の軽減具合と(筋電計利用)、不自然な負担の有無の調査を行う。

4. 研究成果

- (1) [理論面での成果] 足底に、ある特定の角度に近づいた際に床面に触れて反力を形成するような延長部(抑制足形状)を設ける。これは、延長部が無限長の理想状態であれば、支持脚の足首を、特定の角度以上には傾かないように固定する効果と等価であることがわかる。着地時に足首角度を過剰に増加しないように固定することは、股関節を特定の値以上に増加しないように固定することと等価である。したがって、股関節の抑制により両足支持期歩行の初期値を強制的にリセットするという安定化の理論(引用文献1)と、この抑制足による足首角抑制は等価であることが明らかになった。これが理想条件での安定化効果の理論根拠となる(図2)。

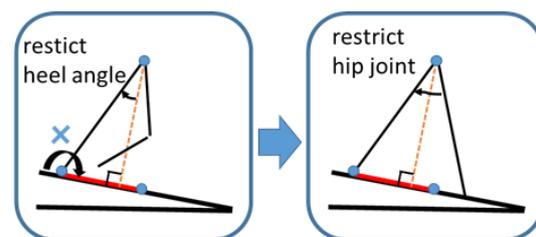


図2. 足首角抑制と股角度抑制の等価性.

加えて、股関節の角度抑制の場合は、歩幅が急激に広がり、股関節が早い時期に制限され、ひざが折れ曲がる状態のまま上体が倒れこむ場合に、着地姿勢が初期状態に回復しない状況がありえる(図3)。しかし足首抑制ではそのようなことは起きえず、股関節に比べるとより安定性を確保できる対象姿勢が大きいことがわかった。

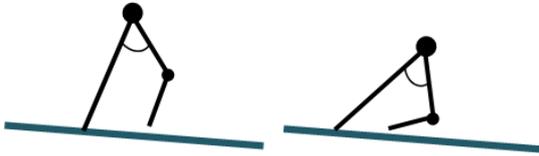


図3. 股関節抑制で転倒する場合.

一方で、現実には足底は有限長であり、足首角度を完全に固定することはできない。有限長足底の場合は、図4に示すように、支持脚が着地してから、回転を継続し、足先が着地し、足先を中心に回転するという3段階の現象がみられる。これは支点が、かかとからつま先部非連続的に変更されることを意味する。そこで図5に示すように2次元受動歩行のスティックモデルを拡張し、つま先部への支点変更を導入したモデルを考え、この運動方程式を導出した。

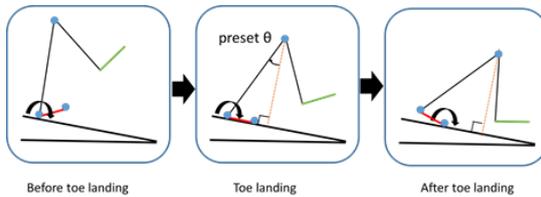


図4. 有限長足底での支持脚の挙動.

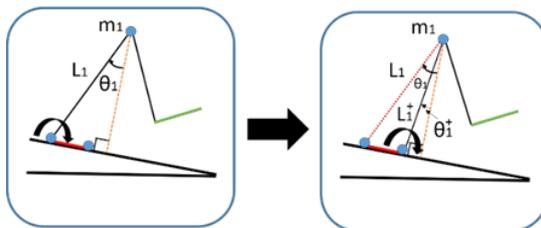


図5. 足先長を考慮したスティックモデル.

このモデルでは、つま先への支点変更が行われる前後における、支持脚の角速度の変化を導出することが必要となる。これは角運動量保存則から以下のように求められることがわかった。

$$\dot{\theta}_1^+ = \frac{L_1^2 + L_1 L_1^+}{L_1^2 + L_1^{+2}} \dot{\theta}_1$$

導出したモデルの数値シミュレーションを行い、一歩行周期の後に、遊脚の初期角度・角速度がどの程度ずれたかを、エラー率として調べた。結果を図6に示す。

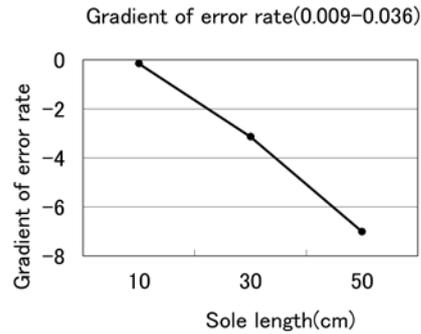


図6. 足底の長さに対する歩行姿勢の変化率.

図は歩行させる傾斜面の角度を増加させていった場合に、エラー率がどのように変化するかを示したもので、図より、足底長が長ければ長いほど、安定化の効果が表れていることがわかった。

続いて、傾斜面に対する適切な足底長の設計規則を見出すため、図5のモデルを簡略化し、足底長を、支持脚と床との間に働くばね要素に置き換えてシミュレーションを行った。

図7は、X軸にばね要素のばね強さ(抑制係数)を、Y軸に歩行させる斜面の斜度を取り、Z軸にエラー率の逆数をとったものである。図から、傾斜角度と抑制係数にはほぼ線形な関係がみられることがわかる。よって、与えられた歩行傾斜角度に対して適切な足裏形状は、床面と足首の間に歩行傾斜角度に比例するばね力を発揮するような足長である、と結論付けることができた。ただしばね力と足先長の関係の導出が今後の課題として残されている。

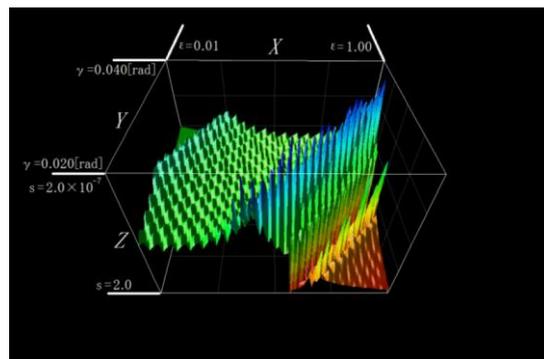


図7. 抑制係数および斜度と歩行安定性の関係.

(2) [応用面での成果] 上記の理論成果をもとに、人の歩行・および不安定な場所での直立において、転倒に近づく不安定状況に近づく際に、それを抑制する靴の設計を明らかにした。

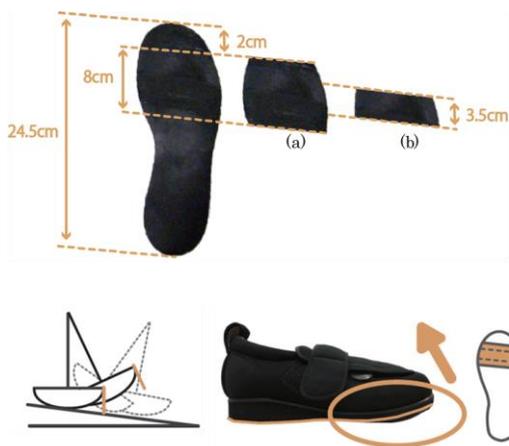


図 8. 抑制の考え方を靴に適用した設計.

具体的には、図 8 に示すように、厚さ 1mm の薄板ゴムの積層により連続的な隆起を持たせる方法を見出した。これは中敷きへの傾斜を導入する場合に比較して、安定歩行時には負担をかけない点で優位であるといえる。

試作した靴底形状によりトレッドミル上での歩行実験を行い、筋電計測により主として歩行安定をつかさどる筋肉への負担軽減効果を見出すことができた。具体的には、歩行の際につまずきを防いだり、バランスを崩した際に転倒しないように踏ん張る役割を担う、前脛骨筋、第三腓骨筋、腓腹筋内側頭、短腓骨筋の 4 つの筋に関する筋電を測定することで検証を行った。取り付け位置を図 9 に示す。



図 9. 歩行実験における筋電測定箇所.

健康的な被験者に、靴を履いてもらい、傾斜 (4[deg]) を 10 秒間下る実験等、複数の歩行条件下で、抑制足形状の原理に基づく靴

底を利用した場合と、通常の靴底のみの場合について積分筋電位を測定し比較を行った。結果として、抑制有の靴底を利用した場合は、通常の靴底を利用した場合に比較して、これら制御にかかわる筋活動度がいずれも低く抑えられることがわかった。したがって、抑制形状の靴底は、人の歩行を楽にする効果が得られるものとわかった。

ただし抑制のための突起部の存在により足指の屈曲が十分に働かず、足の剛性が維持されない問題点が明らかになった。より直接的に足首角を制限する構造を明らかにすることが課題として残されている。

<引用文献>

- ① 池俣吉人, 佐野明人, and 藤本英雄, “平衡点の大域的安定化原理に基づくロバストな受動歩行,” 日本ロボット学会誌, vol. 26, no. 2, pp. 178-183, 2008.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 福島俊彦, 兵頭和幸, 川西通裕, 成清辰生, “受動歩行機の足裏形状最適化による歩行安定化,” 計測自動制御学会論文集, vol. 50, no. 1, pp. 51-57, 2014. (査読有)
- ② 力石直也, 菅原学, 大御堂尊, 兵頭和幸, 三上貞芳, “抑制足形状による 2 足受動歩行ロボットの歩行安定化原理を応用した歩行安定化促進靴,” バイオメカニズム学会誌, vol. 37, no. 1, pp. 66-69, 2013. (査読有)
- ③ 兵頭和幸, 寄義昭, 成清辰生, 川西通裕, “中学校での受動歩行コンテストを用いた技術教育,” 計測自動制御学会 中部支部 教育工学研究委員会 教育工学論文集, vol. 35, pp. 25-27, 2012. (査読有)

[学会発表] (計 2 3 件)

- ① 川村元太郎, “抑制足形状を用いた揺動による平地二足歩行の実現,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2015/5/18, みやこめっせ (京都府・京都市)
- ② 兵頭和幸, “抑制足形状を用いた受動歩行における足先抑制長の効果,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2015/5/18, みやこめっせ (京都府・京都市)
- ③ T. Omido, “Limiting Stance Leg Heel Angle by Sole Shape to Achieve Stable Passive Dynamic Walk,” 13th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2014/12/10, Singapore(Singapore)
- ④ 大御堂尊, “抑制足形状による受動歩行ロボットの安定性の解析,” in 第 14 回計測自動制御学会システムインテグラー

ション部門講演会, 2013/12/18, 神戸国際会議場 (兵庫県・神戸市)

- ⑤ 兵頭和幸, “受動歩行における加速度センサを用いた運動分析,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, 2013/5/24, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市)
- ⑥ 福島俊彦, “受動歩行機の足形状最適化による歩行安定化,” in 第 13 回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, 2012/12/18, 福岡国際会議場 (福岡県・福岡市)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 車両用支持具

発明者: 三上貞芳, 高橋信行, 鈴木昭二

権利者: 公立ほこだて未来大学

種類: 特許

番号: 特願 2014-062227

出願年月日: 2014/3/25

国内外の別: 国内

[その他]

S. Mikami, N. Rikiishi, M. Sugawara, K. Hyodo, “The longest walk by a passive walking robot.” Guinness World Records, 2013/4.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三上 貞芳 (MIKAMI, Sadayoshi)

公立ほこだて未来大学・システム情報科学部・教授

研究者番号: 50229655

(2) 研究分担者

兵頭 和幸 (HYODO, Kazuyuki)

福岡工業大学・情報工学部・助教

研究者番号: 90550517