

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：20103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05903

研究課題名(和文)既存の2足歩行ロボットへの制御無干渉な外付け型歩行安定化の理論と機構に関する研究

研究課題名(英文) Stability enhancement method for an existing bipedal robot by an external stopper device that does not require coordination with the internal robot controller

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：さまざまな制御方で歩行制御される2足歩行ロボットに対して、ロボット本体の制御に介入せずに、その歩行安定性を改善する新たな方法を明らかにした。具体的にはロボット足部から張り出す位置に、床面との適切な高さでロックされた支持機構を用意し、立脚が過剰な倒れこみの場合のみに支点切り替え効果で角速度を減少させる。能動歩行を行う小型ヒューマノイドロボットでの実験、および人の靴への応用で有効性を確認できた。

研究成果の概要(英文)：A stability enhancing device for a humanoid robot is proposed which does not rely on the robot's internal controller. The device is a simple stopper attached on a shoe and having a certain height over floor, which is controlled its height by a motor and latched at the proper height. When a stance leg excessively inclines over a stable range, the stopper touches on the ground and the angular velocity is reduced by the effect of supporting point shift. By the experiments conducted on a small humanoid robot and human shoes, the stabilization effect was confirmed.

研究分野：知能機械学，機械工学，人工知能

キーワード：歩行ロボット 2足歩行 歩行制御 安定性 受動歩行 靴

1. 研究開始当初の背景

(1) 現在実用化されている多くの直立型2足能動歩行ロボットでは、床反力制御などの制御法により、脚のモータ、特に足首のモータによって、動歩行中に転倒が生じない方向に床からの力を制御することで、路面の乱れなどに適応した安定した動歩行を実現している。しかし、当初設計した歩行ロボットを、荒い不整路面や斜度の大きな変化が予想される環境へ導入する場合、当初の設計を超える出力を有するモータ、とくに足首部モータの変更や、制御パラメータの変更が必要となり、容易な利用は難しい。

(2) 申請者らは以前までの研究で、2足受動歩行について、その歩行安定性を確保する方法として、「足部へ適切な張り出し」を設ける「抑制足形状」を提案し原理と効果を検証した<引用文献①>。この手法は受動歩行を対象としているが、独自の歩行安定化制御を持つ2足能動歩行ロボットに対して、ロボットの制御とは独立した付加ハードウェアとして適用できる可能性がある。

(3) しかし、①歩行する路面に対して抑制の効果を調整できる外付け機構をどのように構成すべきか、および、②自身の歩行制御と抑制足の安定化効果の干渉はどのような結果をもたらすかについては、明らかにはなっていない。

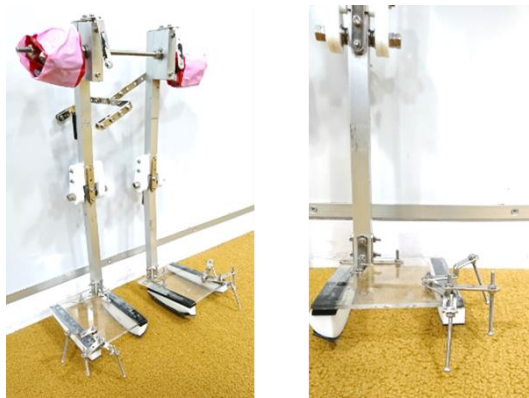


図1 2足受動歩行の安定化のための抑制足形状。

2. 研究の目的

(1) 既存の2足歩行ロボットの安定歩行を、ロボット本体の制御に介入せずに、足部の新たな外付け機構により補助する仕組みを明らかにする。

(2) ロボットが歩行する環境に合わせて、その機構をどのように調整すればよいかを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 一般の2足歩行ロボットの足首に外付けでき、指定した床面との角度で張り出し部に

より角度を機械的にロックできる機構の具体的設計を明らかにし、試作を行う。

(2) この外付け機構(ロック機構)を、平地で動歩行を行う小型ヒューマノイドロボットに装着し、徐々に斜度を変更させた斜面において歩行させ、ロック機構の床面からの張り出し高さや安定性の関係を明らかにする。

4. 研究成果

(1) [ロック機構の試作] 図2に示すように、靴底より矢状面から45度で、足底端面から離れた位置に、モータにより高さを調節できる支柱を設けた設計を考案した(ロック機構)。

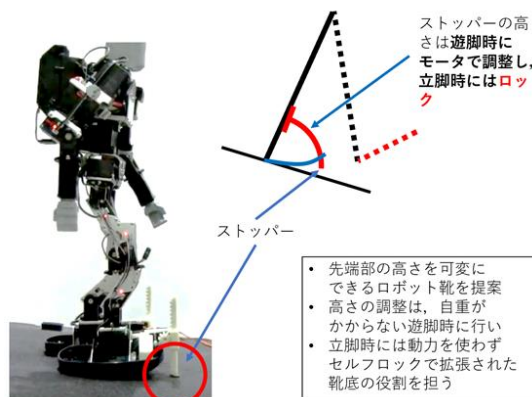


図2 2足歩行ロボットへのロック機構の装着。



図3 ロック機構の詳細(左方・前方)。

この機構は、遊脚時に支柱の床面からの高さをサーボモータにより調整する。サーボモータにはバックドライブビリティの低い高減速比のギアモータを利用することで、立脚時にはモータを作動させることなく、支柱が床面に接した場合に反力を発生させ、後述する「支点切り替えによる角速度減少」の効果で転倒を抑制する。

モータはロボット自重がかかっていない遊脚時のみに、支柱の高さを調整するであるため、エネルギー消費は床反力制御等に比べて著しく低いという特徴を有する。

(2) [支点切り替えによる転倒抑止の原理] 図4に示すように、支柱はロボットの立脚が規定の前傾角を超えて前傾した場合に初めて床と接触する。

これは従来の研究での抑制足形状による安定化の効果として知られているが、本研究では安定化の効果の理由が、「支点切り替え

による角速度の減少」であることを明らかにできた。

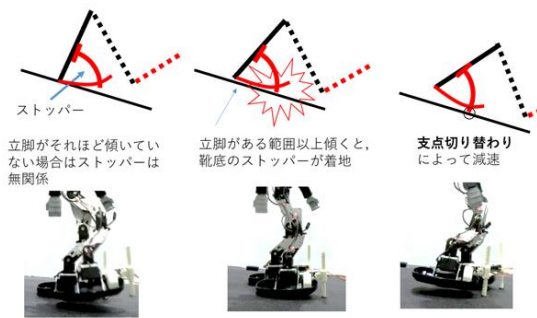


図4 規定角以上前傾した場合の支点切り替え。

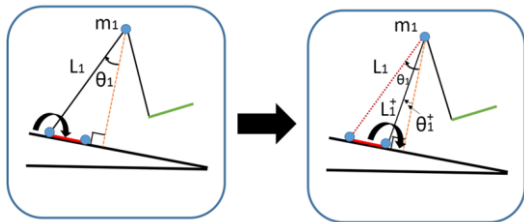


図5 支点切り替えによるリンク長の仮想変化。

通常歩行時には立脚の足裏が回転中心となるが、図5に示すように、支柱が接地した時点で回転中心は急激に全方向にジャンプする。これはリンク長(L_1)を(L_1')に減少させ、角運動量保存則から、立脚の角速度は減少する。この効果により、既定の傾き角以内では歩行を妨げないが、それ以上の傾き角で角速度を急激に減少させるブレーキ効果が得られ、常に過剰な傾きを抑制する効果が得られることが分かった。

(3) [能動2足歩行ロボットによる安定化の検証] 図2に示した能動2足歩行ロボット(KHR-3HV)を、平地で安定歩行できる歩容に設定したうえで、ロック機構を非装着の場合の挙動、およびロック機構を装着し、支柱の高さを様々に変えて歩行実験を行った(図6)。



図6 ロック機構を装着しない坂歩行(左)および装着した場合の歩行(右・支柱高さ30mm)(いずれも傾斜角7.5度)。

安定歩行の度合いについては、ロボット本体の重心近くに角速度センサを配置し、角速度のRMSにより評価した。また各斜度におい

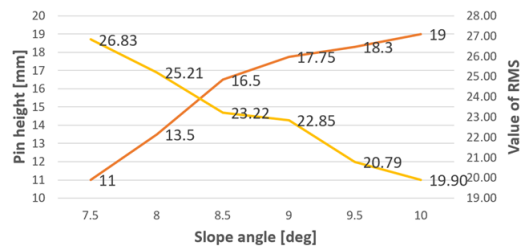


図7 歩行面の傾斜角と、最適支柱高さ、および角速度のRMS値のプロット。

て最も歩数を多く歩行できた際の支柱の高さを最適支柱高さとした。図7にこれらをプロットしたグラフを示す。

図7に示すように、最適支柱高さとは坂の斜度にはほぼ線形な関係がみられることが分かった。

また角速度のRMS値は支柱高さが増すのと連動して小さくなっていることがわかる。床面傾斜角が大きい場合、立脚の早い時点で床面と接触するように支柱高さが設定される。これにより立脚切り替えによる角速度減少効果が早い時期に生じ、小さな斜度の場合よりも小さい立脚周り角速度が維持されていることがわかる。

(4) [歩行面に応じたロック機構の支柱高さの設計則] 図7の実験結果から得られた、歩行面の斜度とロック機構の支柱高さの関係を図示すると、図8に示すように、各斜度において、支柱高さにより補正された歩行ロボットの姿勢が、ほぼ平地での歩行と同じ直立姿勢であることが分かった。

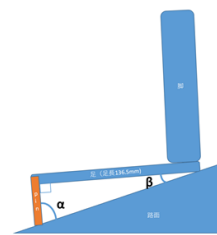


図8 歩行面の斜度に対して、ロック機構の支柱高さが歩行ロボットをほぼ直立の姿勢に保つ。

すなわち、斜面での歩行を安定化させる場合には、ロック機構の支柱高さを、鉛直姿勢となるように設定することが望ましいことが本研究で明らかになった。斜面の歩行の際には脚切り替わり時に新しい立脚が以前の立脚に対して沈み込む位置に来るため、足底を鉛直姿勢になるように補正しても平地歩行とは同一の歩行にはならない。しかし支点切り替えのブレーキ効果が最も適切に働くのは鉛直姿勢の場合であり、実験からも、たとえば鉛直より後ろに傾く姿勢まで支柱を高くした場合には抑制が過剰になり、数歩後に後方に転倒する状況も見られている。

(5) [人の歩行の安定化への応用] 2足歩行ロボットへの支点切り替えによる歩行安定化の仕組みを応用し、当初の研究目的からさらに発展させ、人の歩行を安定化する機構を明らかにした。

以前の我々の研究<引用文献①>では、抑制足形状を、人の履く靴の底に前額面方向および矢状面方向の底部周縁の突起として実現する方法を提案していた。しかしこれらは過剰倒れこみの際の立脚の支点切り替え位置の変化が極めて小さく、角速度低減の効果は小さい。そこでより大きな支点切り替えを生じさせるための仕組みとして、図9に示すように背屈を直接抑制するような器具を考案した。



図9 支点切り替えの原理による人の歩行安定化。

靴底と脚上部はふくらはぎ上部でラバーバンドで結合され、通常歩行時は自然長を保つように調整する。図9右に示すような過剰な前方向への倒れこみが生じた場合、ラバーバンドは背屈を強く抑制し、つま先側への立脚の急速な支点切り替えを促し、角速度を減少させる効果が期待できる。

これを確認するために、図10に示すように、本器具を装着した被験者にラバーバンドにより急激な前方への引っ張り力を与え、被験者の脚の姿勢制御にかかわる2つの筋（腓腹筋内側頭と短腓骨筋）の筋電を測定した。



図10 支持具装着被験者への前方引張り力付加実験。

	抑制なし	抑制あり
腓腹筋内側頭 (1回目)	2.1	0.9
腓腹筋内側頭 (2回目)	2.1	0.8
短腓骨筋 (1回目)	0.8	0.8
短腓骨筋 (2回目)	0.9	0.8

図11 代表的な被験者のピーク筋電トリム平均。

図11に典型的な被験者のピーク筋電トリム平均を示す。2回試行のいずれにおいても、姿勢回復に要する筋力が、器具装着の場合で低いことが示されている。5名の被験者に対する実験で、いずれも同様な傾向がみられており、提案する器具が前方へのつまずきや斜度の急激に変化する環境での作業（坂道での作業）での歩行の安定化に有用である可能性を示すことができた。

<引用文献>

- ① 三上貞芳, 兵頭和幸, 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, 2014年度科学研究費補助金報告書, 24560299, URL: <https://kaken.nii.ac.jp/report/KAKENHI-PROJECT-24560299/24560299seika/>

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① K. Chiba, A. Kakimi, N. Ogura, Y. Ishida, K. Yamamoto, and S. Mikami, “Robotic Finger Rehabilitation Support Device for Home Use,” International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 査読有, vol. 5, no. 4, pp. 288-294, Oct. 2016. DOI:10.18178/ijmerr.5.4.288-294

[学会発表] (計14件)

- ① S. Mikami and T. Fukuda, “Mechanical and Gait Design for Roll-Free Multiple Legged Robot Driven by Single Motor,” in IEEE Robotic Computing 2017, Taichung, Taiwan, 2017, pp. 143-147. DOI:10.1109/IRC.2017.42
- ② 川村元太郎, 兵頭和幸, 三上貞芳, “能動歩行機への抑制足形状適用による安定化-抑制量と歩行斜度に関する実験的考察-,” 第17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, 2016
- ③ 石原拓真, 三上貞芳, 川上健作, 濱克己, “足関節背屈角制限による歩行安定靴の開発-関節モーメント分析による評価-,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 2016
- ④ 川村元太郎, 兵頭和幸, 三上貞芳, “能動歩行機への抑制足形状の適用による歩行安定化,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 2016
- ⑤ K. Hyodo, Y. Iwaguchi, Y. Takamura, and S. Mikami, “Stability Effect for Passive Dynamic Walker by Stance Leg Heel Angle Constraint Using Foot Shape,” in The First International

Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (SWARM 2015), Kyoto, Japan, 2015, pp. 473-477 URL: <http://hdl.handle.net/10445/8462>

- ⑥ 石原拓真, 三上貞芳, 兵頭和幸, "足関節背屈角制限による歩行安定靴の開発," 日本機械学会スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2015, 2015
- ⑦ 岩口優也, 高村芳明, 兵頭和幸, 三上貞芳, "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
- ⑧ 兵頭和幸, "受動歩行における倒れ込み抑制の展開," 第 16 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, 2015

[その他]

研究紹介ホームページ

<http://www.trace-info.net/lab/2016/02/27/what-is-constraining-sole-shape/>

6. 研究組織

(1) 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

(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