歩行ロボット用省エネシューズの考察と実験

正員 南方 英明* 正員 多田隈 進*

A Study of Energy Saving Shoes for Walking Robot

Hideaki Minakata*, Member, Susumu Tadakuma*, Member

In this paper, we propose flexible shoe system to apply passive walking manner to ordinary humanoid biped. In this system, 2DOF (FF & FB) control scheme is used and realize walking with less ankle torque. The effectiveness is confirmed by computer simulation and experimental result, so we call this system as “energy saving shoes”.

キーワード：歩行ロボット，受動歩行，シューズ，省エネ

Keywords: walking robot, passive walking, shoes, energy saving

1. まえがき

歩行の本質的理解やその省エネ性の観点から，受動歩行に関する研究に注目が集まっている⁽¹⁾。これらの成果を現実のヒューマノイド等に反映させることで歩行消費エネルギーの低減が見込まれる。本研究は一般的な受動歩行機械の足裏形状に着目し，等価な力学現象をシューズという形で得ようというものである。ロボット自体の改造を必要とせず，足底に板状のピッチ軸回転補助となる物体を貼り付け制御系に補償系を追加するものであり，歩き方等に大幅な変更を加えなくとも良い。本稿ではその効果（関節摩擦に伴うエネルギー損失の減少）について，二足ロボットのシミュレーションや実機実験での結果を交えて報告する。

2. 省エネシューズシステム

2.1 シューズ構造 図1にいわゆる受動歩行に用いられる円弧足裏構造および提案する省エネシューズとその試作品を示す。円弧足裏は歩行時の重心高さや速度の変動をおさえる働きがあり，これがエネルギーロスの少ない滑らかな歩行に寄与していると考えられる。省エネシューズは円弧足裏の起き上がろうとする力をバネで模擬するものである。導出については紙面の都合上割愛するが（文献(2)等を参照），ばね定数と円弧の曲率との等価条件を導くことも可能である。シューズを履いたロボットのコンパスウォークモデルを図2に示す。シューズを足首の先のリンク長ほぼ0のピッチ軸受動関節とモデル化する。本研究では歩行を重心の滑らかな前進と考えており，この仮定下において

図1 円弧足裏，省エネシューズの概形，試作品
Fig. 1. Arc-shape foot, energy saving shoes and prototype.

図2 シューズ付きロボットのモデル
Fig. 2. Robot model with shoes.

は本来足首関節が果たさなければならない矢状面運動のトルク入力やリンク変位の一部をシューズの変形に負担させることが可能である。なおシューズの変形が不適切な場合（例：バネが過度に柔らかく過負担となりエネルギー消費増）は，変形機構を固定してこれを回避すればよい。

2.2 制御構成 図3に省エネシューズを活用するための制御系の構成を示す（状態量 θ はすべて矢状面角度の変数ベクトルである）。ロボットはローカルな関節レベルでの位置制御が施されているものを想定している。シューズの変形（以下シューズ角度 shoes）により，ロボットの絶対空間座標での姿勢角は指令と一致しない。そのため，ロボッ

* 千葉工業大学工学部電気電子情報工学科
〒275-0016 習志野市津田沼 2-17-1
Dept. of Elebrical, Electronic and Computer Engineering,
Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology
2-17-1, Tsudanuma, Narashino 275-0016

トの姿勢指令及びシューズの特性から想定されるシューズの変形量をフィードフォワード (FF) 補償する。 K_F は FF 補償量の成分選択行列に相当し、通常は足首関節にすべての補償量を適用することで足首の負担を減らすことが可能

図3 シューズ制御系の構成

Fig. 3. Control system of shoe system.

図4 シューズ + ロボットのシミュレーション

Fig. 4. Simulation result of robot with shoes.

図5 シューズ付き歩行

Fig. 5. Walking experiment with shoes.

図6 歩行実験時のロボットへの供給電力 (2歩分)

Fig. 6. Power supply on walking experiment (for 2 steps).

である。また外界センサやシューズ内蔵センサ等でロボットの絶対姿勢角が測定できるならばシューズのパラメータ誤差や路面形状による変動を吸収するためのフィードバック (FB) が有効となる。 K_B は FB 補償量の成分選択行列であり PD ゲインによりダンピングを持たせることも可能である。これらはすべてロボットの位置指令に対する補償量として構成しており、関節サーボなどがブラックボックス化されている小型娯楽ロボット等でも適用可能である。

3. シミュレーションおよび実験

シューズの効果がもっとも現れやすいと思われる無質量脚 (コンパスウォーク) + シューズの構成にて (図2参照) シミュレーションをおこなった。質量やリンク長、関節摩擦などは実験機のパラメータを採用し、4 cm/s の前進歩行の支持脚相での挙動 (角度指令・実際の足首角度 ankle・シューズ角度 shoes・トルク波形) を図4に示す。なお、FF 系の推定機構およびシューズはバネダンパモデルであり関節サーボ (ゲインも両者共通である) は応答 50 ms である。(a) はシューズの固さを 20 倍に設定したものでほとんど変形しないためシューズを履いていないケースに近い。(b) は適切な弾性のシューズを履いたものであり、シューズの変形の寄与が大きく足首の変位量が大きく低減している。(c) に示すような足首トルクを積算することで足首消費エネルギーを検証すると上記の例では約 80% の改善が確認できる。ただし消費エネルギーは関節摩擦が支配的であり、摩擦 0 ではエネルギー削減効果はほぼ 0 となる。

また質量 2 kg、脚長 20 cm の小型人型ロボットを用い、4 cm/s の前進歩行にてシューズの効果を確認した。なお本ロボットには外界センサが無いため $K_B = 0$ として実験をおこなっている。消費エネルギーはロボット動力系への入力をモニタし、電圧 x 電流の積算で求めている。実験の様子を図5、そのモニタ波形の一例を図6に示す。3回の平均を比較することにより、約 8% のエネルギー消費低減が確認できた。(動画あり <http://202.17.20.25/~minakata/research/shoes/>)

4. あとがき

ロボット用省エネシューズを提案し、その効果を確認した。実際のロボットでは前顔面運動における足首の負担も大きいので、さらなる省エネを目指すには前顔面運動も考慮したシューズ設計が今後の課題といえる。

(平成 16 年 1 月 15 日受付, 平成 16 年 2 月 23 日再受付)

文 献

- (1) K. Ohsuka: "Legged Robot and Control scheme based on a Sense of passive Dynamic Walking", *JRSJ*, Vol.20, No.3 pp.233-236 (2002-3) (in Japanese)
大須賀公一: 「受動的歩行を規範とした歩行ロボットと制御」, 日本ロボット学誌, 20, 3, pp.233-236 (2002-3)
- (2) H. Minakata, R. Ito, and S. Tadakuma: "A Study of Energy-Saving Shoe System—Experimental Results and Discussions of Expansion to non-split Shoe System—", *Proc. of IEEJ*, No.3, pp.103-104 (2002) (in Japanese)
南方英明・伊藤 僚・多田隼進: 「歩行ロボットのための省エネ足裏機構の研究—実験及び非分割型への拡張に関する考察—」, 平 14 電気学会全大第 3 分冊, pp.103-104 (2002)