

ヒューマノイドを利用したヒト足部機能解明と靴の衝撃吸収性評価

Clarification of Human Foot Function and Evaluation of Shock Absorption Properties of Shoes

Using Biped Humanoid Robot

○ 橋本健二（早稲田大）      本橋弘光（早稲田大）      吉村勇希（早稲田大）  
林憲玉（神奈川大）      高西淳夫（早稲田大）

Kenji HASHIMOTO, Waseda University  
Hiromitsu MOTOHASHI, Waseda University  
Yuki YOSHIMURA, Waseda University  
Hun-Ok LIM, Kanagawa University  
Atsuo TAKANISHI, Waseda University

**Abstract:** We aim to clarify the human foot function such as elasticity of the foot arch and the foot skin and evaluate shock absorption properties of shoes by utilizing robotics technology. We have developed a shoes-wearable foot mechanism which mimics human's foot arch structure and the characteristics of the foot skin. Through walking experiments using a biped humanoid robot WABIAN-2R mounted on the shoes developed, we confirmed that the landing impact reduced thanks to mechanical characteristics of human foot.

**Key Words:** Humanoid, Human Foot Function, Foot Mechanism

1. はじめに

ヒト足部は、解剖学的には26個の骨（種子骨を除く）が多数の靭帯で結合されており、ヒト足部の特徴であるアーチを形成する。足部アーチ構造の存在理由については、諸説存在するが、その効果を定量的に示した研究例は少ない。そこで細田らの研究[1]と同様に、ロボット技術を活用し、ヒト足部の機能解明を目指すことが本研究の長期的目標である。

これまでに、演者らはヒト足部の機能解明を目指し、内側縦アーチや皮膚の機械的特性を模擬した足部機構を開発してきた[2, 3]。また、人体運動を模擬可能な2足ヒューマノイドロボット WABIAN-2R[4]も開発しており、ヒト歩行の特徴である床反力のダブルピークを観測している。

本研究では、これまでに開発した足部機構を WABIAN-2R に装着した歩行実験を通して、ヒト足部の機械的特性や靴の着用が歩行に与える影響を検証することを目的とする。

2. ヒト足部の機械的特性を模擬した足部機構

ヒト足部の特徴として、歩行中に内側縦アーチの高さ変化に伴いアーチの柔軟性が変化することがある。このアーチ構造を回転ばね・ダンパ系でモデル化し、図1のように2リンク剛体モデルで近似すると、アーチ軸周りの回転弾性係数  $k$  Nm/rad は歩行中の4相で異なる数値を示す(表1)[5]。なお、第I相は立脚相（踵接地）、第II相は立脚相（足底接地）、第III相は立脚相（踵離地）、第IV相は遊脚相である。

これまでに、表1中で特に有意と考えられる第II相、第III相の回転弾性係数を目標値とし、アーチ構造の機械的特性を模擬した人間形足部機構を開発してきた。歩行中のアーチ高さの変化と、それに伴うアーチの柔軟性変化（第II相のみ）を模擬した足部機構(1)を開発した(図2)[2]。第II相での回転弾性係数を満足する軟素材として、ポリウレタン（ショア硬さ A30, 厚さ 10 mm）を使用し、足底腱膜の巻き上げによるアーチ角度上昇については、ステンレス

ワイヤを利用することで実現した。

また、アーチの柔軟性変化（第II相、第III相）と足裏の皮膚の機械的特性を模擬し、着靴が可能な足部機構(2)も開発している(図3)[3]。アーチ構造を回転ばね・ダンパ系でモデル化し、ヒト足部の皮膚を圧縮方向とせん断方向に弾性をもつ弾性体としてモデル化した。第II相と第III相におけるアーチの柔軟性模擬は、高さの異なる2種類のばねを並列に用いることで実現した。足底の皮膚の機械的特性に関しては、厚み 8mm の人肌ゲル（超軟質ウレタン造形用樹脂）を用いて模擬した。さらに、靴が歩行に与える影響を調査できるように、靴が履ける形状になっている。

Table 1 Arch elasticity at each phase [5]

	I	II	III	IV
Elasticity $k$ Nm/rad	19	386	488	-19

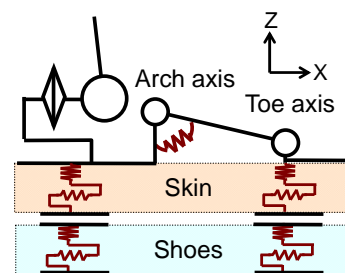


Fig. 1 Modeling of human foot

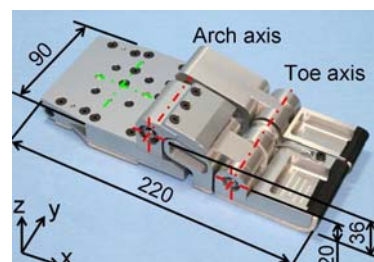


Fig. 2 Human-like foot mechanism (1)

3. 足部アーチの機械的特性が歩行に与える影響の評価

開発した足部機構を用いてアーチの機械的特性が歩行に与える影響を評価した。足部機構(1)においてアーチを固定した場合と可動させた場合、足部機構(2)においてアーチが可動する場合の3条件において歩行実験を行った。ヒトを被験者とする場合、アーチを固定することは難しく、ロボット技術を利用する意義がある。各条件での足部機構を2足ヒューマノイドロボット WABIAN-2R に装着し、歩行周期 1.0s/step、歩幅 350mm/step にて踵接地・爪先離地歩行させた。歩行実験の様子を図4に、1歩行周期における垂直床反力の大きさを図5に示す。

第I相から第II相に移行する際の足底接地時の着地衝撃に注目すると、アーチを固定していたときよりも可動していたときのほうが小さいということが分かり、内側縦アーチの柔軟性により足底接地時の床反力が緩和できていることが確認できた。また、第II相後半の床反力に注目すると、アーチ固定時よりも可動時のほうが床反力のピーク値が大きく、力強く蹴り出されていることが確認できる。足底腱膜の巻き上げによるアーチ角度上昇やアーチの柔軟性による効果だと考えられる。

4. 皮膚の機械的特性や着靴が歩行に与える影響の評価

足部の皮膚の機械的特性や着靴が歩行に与える影響を評価した。足部機構(2)において、足底に何も貼付しない場合 (Born)、皮膚の機械的特性を模擬した場合 (Skin)、さらに着靴した場合 (Skin+Shoes) の3条件において、それぞれ2足ヒューマノイドロボット WABIAN-2R に装着し、足踏み動作による比較実験を行った。なお、足踏み動作の歩行周期は 0.7s/step である。

足踏み動作時の床反力の時間変化を図6に示すが、Born → Skin → Skin+Shoes の順に小さくなっており、着地衝撃が緩和できていることが分かる。実際に着地衝撃音も測定したところ、70.3dB → 62.3dB → 60.4dB の順に小さくなっていった。また、床反力をスペクトル解析した結果、皮膚や靴が着地衝撃の高周波成分の減衰に寄与していることが分かった。ただし、靴のみでの着地衝撃吸収度は小さく、衝撃吸収性という点からのみ考えると、靴の着用は必須ではないと考える。

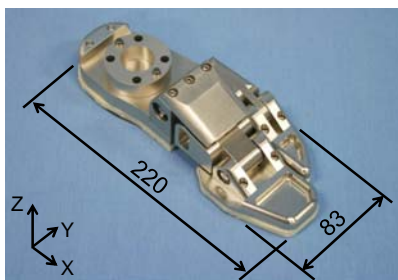


Fig. 3 Human-like foot mechanism (2)

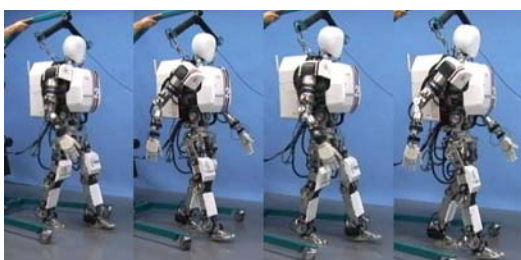


Fig. 4 Walking experiment with human-like foot mechanism

5. まとめ

本研究では、ヒト足部の機能解明と靴の衝撃吸収性評価を目指し、ヒト足部の機械的特性を模擬した足部機構を2足ヒューマノイドロボットに装着し、その歩行実験を通して評価した。評価実験の結果、足部アーチの柔軟性が足底接地時の着地衝撃緩和に寄与し、アーチの柔軟性とアーチの高さ変化が爪先で地面を蹴り出す際のスプリング効果に寄与していることが分かった。また、足裏の皮膚や靴の機械的特性が着地衝撃吸収に効果があるが、靴を着用することによる衝撃吸収度は大きくないことが分かった。

今後は歩行運動だけでなく走行運動時のヒト足部や靴の機械的特性が走行運動に与える影響を評価したい。

謝辞

本研究は早稲田大学理工学研究所および早稲田大学ヒューマノイド研究所、早稲田大学次世代ロボット研究機構の下で実施された。本研究の一部はJSPS科研費 25220005、25709019の支援を受けた。

参考文献

- (1) 細田耕, 萩原直道, ヒト足部筋骨格形態に内在する歩行安定化機構, 第31回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3P1-01, 2013.
- (2) 橋本健二 他, 2足ヒューマノイドロボットを用いた人間の足部アーチ構造の機能解明, 第15回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 94-99, 2010.
- (3) 橋本健二 他, ヒト足部の機械的特性を模擬した着靴可能な足部機構の開発, 第32回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1M3-05, 2014.
- (4) 小椋優 他, 爪先受動関節を持つヒューマノイドロボットによる踵接地・爪先離地歩行, 第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3H14, 2006.
- (5) 高嶋孝倫 他, 単純化された足部モデルによる足アーチの粘弾性解析, 機論[C], 60-685, pp. 2397-2402, 2002.

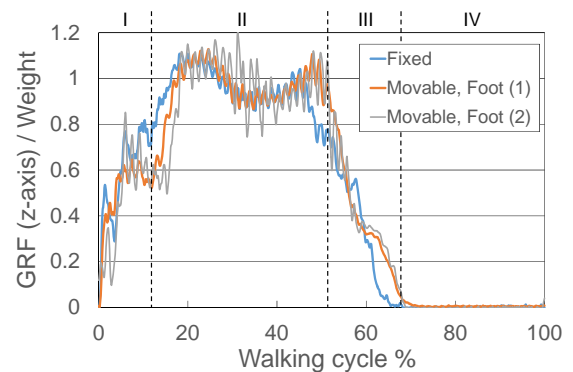


Fig. 5 Vertical ground reaction force in a gait cycle

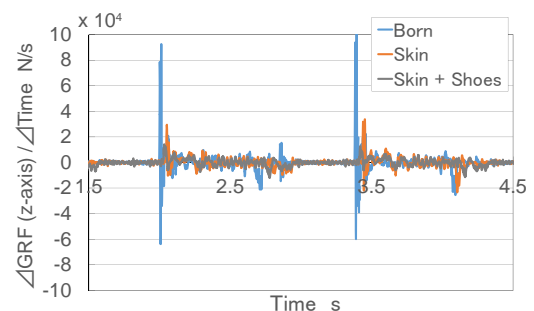


Fig. 6 Foot landing impact