

Gait analysis for design of a biped robot foot imitating human plantar arch

小川 祐介 (ベンチャー研究室) OGAWA Yusuke

The stability of biped robot is an open issue in particular when walking on an irregular ground, because the robot foot structure is too simple to compensate for ground asperities. In addition, robot's massive ankle joint designed for bearing load during walking makes walk control difficult. On the other hand, humans have a complex plantar arch that absorbs the shock of walking by changing its shape. This study aims at verifying the arch structure effect for biped robot and adding new viscoelastic joints to biped robot foot. The human joint torque and arch viscoelasticity are compared using motion capture data.

Key Words: Analysis, Biped robot, Plantar arch

1. 緒言

高齢化社会が進む日本で、ヒトの生活圏に適応した二足歩行ロボットの開発は急務である。しかし、既存のロボットは多少の段差で転倒し、ヒトと活動範囲をとにもするのは困難である。転倒の原因は、ロボットの足機構がヒトと比べて単純であり、路面の凹凸といった外乱を吸収できないことがあげられる。また、歩行時の負荷を受ける踝部は巨大になりがちで、制御性に問題がある。爪先関節を足部に付加して歩行をなめらかにする研究も行われているが、外乱に対しての効果は認められていない。

一方で、ヒトは複雑な足機構を有しており、路面状態によって形状を柔軟に変化させることができる。土踏まずにはアーチ構造と呼ばれる弓状の関節群が存在し、歩行の際にはアーチ構造が変形することによって地面との接触時に衝撃を和らげ、立脚時には推進を助ける効果があることがわかっている^[1]。

そこで本研究では、ヒトのアーチ構造を解析したデータを元に、二足歩行ロボットの従来の足裏に粘弾性のある関節を追加し、その効果の実証を目的とする。

2. アーチ構造の解析

2.1 ヒトの運動方程式

体のリンクの位置情報から、逆運動学の計算で関節角度を算出し、ヒトに働く外力から逆力学の計算で関節トルクを求める。同定に必要な最小力学パラメータを、左辺でまとめたヒトの運動方程式を式(1)に示す。

$$\begin{bmatrix} Y_{B1} \\ Y_{B2} \end{bmatrix} \phi_B = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} + \sum_{k=1}^{N_c} \begin{bmatrix} K_{k1} \\ K_{k2} \end{bmatrix} F_k \quad (1)$$

- Y_{B1}, Y_{B2} は ϕ_B にかかる係数行列で、各関節変位、速度、加速度の関数行列
- ϕ_B は全リンクの力学パラメータを並べたベクトル
- τ は関節トルク
- N_c はヒトと環境との接触点の総数
- K_{k1}, K_{k2} は接触点 k での外力を一般化力へ変換する行列で、点 k へのヤコビ行列の転置行列
- F_k は接触点 k に働く外力 (6 軸力)

式(1)の上段のみに注目すると、関節トルクが無視できる。そのため、リンクの位置情報と外力から最小二乗法を用いて、最小力学パラメータ ϕ_B を同定することができる^[2]。求めた ϕ_B から式(1)の下段を使って、関節トルクを求める。

2.2 粘弾性パラメータの導出

アーチ構造の粘弾性は解析から得られた関節トルクから、以下の式(2)、(3)のように粘弾性があるものと仮定して最小二乗法から求める。

式(2)は先行研究^[1]より、アーチ構造の粘弾性をばね・減衰器の並列モデルとして考えた場合の関節トルクの方程式で、式(3)は、Fig.1にあるHill筋モデル^[3]を参考にアーチ構造をFig.2のような三要素の粘弾性モデルとして考えた場合の方程式である。

$$\tau_{th}(\theta, \dot{\theta}) = k\theta + h\dot{\theta} + K_0 \quad (2)$$

$$\tau_{3e}(\theta, \dot{\theta}) = K\theta^2 + k\theta + h\dot{\theta} + K_0 \quad (3)$$

- τ_{th} は並列モデルでの関節トルクの理論値
- θ は関節角度で、 $\dot{\theta}$ は関節角速度
- k, h はそれぞれ関節の弾性、粘性係数
- K_0 は初期状態で関節にかかるトルク
- τ_{3e} は三要素モデルでの関節トルクの理論値
- K は θ の二乗項の比例定数

3. 実験

実際のヒトの動作を、全身に貼り付けたマーカから光学式モーションキャプチャで読み取る。同時に床反力計から接触点にかかる外力を計測する。

3.1 マーカセット

足部に貼付したマーカセットをFig.3に示した。全身に49個、うち22個は両足に配置した。先行研究^[1]から、アーチ構造に関連する関節を推定し、その関節間の動きが計測できるようにマーカを配置した。具体的には片足で、母指・小指の先端に1個ずつ、指節中足間関節・足根中足関節・楔舟関節・踝の両端に1個ずつ、踵に1個である。

3.2 アーチ拘束具

アーチ構造の効果を検証するために、アーチ構造を拘束するための器具を製作した。厚さ10mmの亚克力板を足型に切り取って防傷ゴムを裏面に貼り付け、ベルトとサポータで足に固定した。

3.3 歩行動作・路面状態

歩行動作は2種類の計測を行った。自然な歩きでの足の変化を観測するために、直線を往復しながら床反力計を通る動作である。

また、凹凸がある場合の歩行時の足の変化を観測するために、床反力計に凹凸を設けた状態でも測定を行った。Fig.3のように床反力計に、厚さ18mmの木製の板を貼り付けて、右脚でそれを踏みながら歩行した。

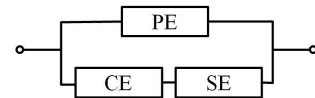
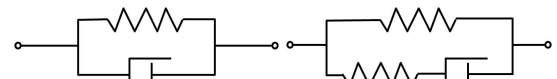


Fig.1 Hill muscle model



(a) parallel model (b) 3 element model

Fig.2 Arch viscoelastic models



Fig.3 Foot markers and asperity walk

4. 解析結果

4.1 脚関節のトルク比較

z 軸に対する関節トルクの解析結果を Fig.4 に示す。サイクルは、踵が地面についてから、爪先が離れるまでの時間を 100% としたものである。関節トルクの大きさも計測された最大トルクを 100% としている。

左右の両方どちらにおいても、凹凸あり・拘束ありでの関節トルクが、他の関節トルクとは異なる挙動を示しているのが分かる。凹凸あり・拘束ありの大きな特徴として、他の関節に比べて、変化が乏しいパターンと、変化の絶対量が大いパターンがある。左右で凹凸あり・拘束ありの条件と他の条件での関節トルクの大きさを比較すると、右脚の関節トルクは減少し、左足の関節トルクが増加している傾向であることがわかる。このことから、凸路面で、拘束具を装着すると、右脚をかばうように歩くため、左脚の負荷が大きくなったと考えられる。

Fig.5 は、条件のない歩行での各関節トルクを基準として、他の条件の関節トルクと差を取ったものの平均である。これからも、各脚関節において拘束あり・凹凸ありの場合が、他の条件に比べて変化が大きいことが分かる。特に左踝関節の z 軸に大きな負荷がかかっているのがわかる。

拘束具を装着しても凹凸がなければ、拘束具を装着していない場合とあまり変わらない結果となった。右足アーチ構造の拘束と、凹凸路面の組み合わせで、左脚の負荷が大きくなることから、アーチ構造が不整地に対して効果的に働いていると考えられる。

4.2 粘弾性パラメータ

Fig.6 は解析で得られた関節トルクと同定した粘弾性パラメータから再計算した関節トルクを示している。並列モデルでの再現よりも三要素モデルのほうが解析トルクに追従している。このことから、アーチ構造の粘弾性特性も、他の人体の受動関節同様^[3]、三要素モデルとして考えるのが適している。

また、粘弾性パラメータと標準偏差は Table 1. のようになった。

Table 1. Right Arch Z axis viscoelasticity (with asperity)

model	Parameter		Standard Deviation	
	parallel	3 element	parallel	3 element
K [Nm/rad ²]	-	-2.18×10^4	-	24
k [Nm/rad]	1.61×10^3	3.15×10^3	9	20
h [Nms/rad]	173	153	5	8
K_0 [Nm]	228	97	2	19

5. 結言

本研究では次のことを明らかにした。

1. ヒトの足部アーチ構造に着目して、骨格から足根中足関節がアーチ構造を代表する関節であると、その解析モデルを提案した。
2. 関節にかかるトルクを負荷としてアーチ構造の働きを評価し、アーチ構造を拘束して不整地での効果を示した。
3. アーチ構造を粘弾性特性を持った受動関節として、そのパラメータを同定し、並列モデルよりも三要素モデルが有効であることを示した。

今後の展開として、アーチ構造の粘弾性を再現した器具を開発し、ヒトやヒューマノイドロボットに装着し検証実験を行うことを考えている。

文献

- [1] 高嶋孝倫, 歩行中のヒト足部に着目した力学モデル解析とその応用に関する研究, 2003.
- [2] 鮎澤光, ベンチャー・ジェンチャン, 中村仁彦, ベースリンクの運動方程式を利用した脚型ロボットの最小力学パラメータの同定, 日本ロボット学会誌 Vol. 27 No. 9, pp.1066-1077, 2009.
- [3] Gentiane Venture, Katsu Yamane, Yoshihiko Nakamura, Tomotaka Yamamoto, Identification of Human Limb Viscoelasticity using Robotics Methods to Support the Diagnosis of Neuromuscular Diseases, The International Journal of Robotics Research Vol. 28, No. 10, pp. 1322-1333, October 2009.

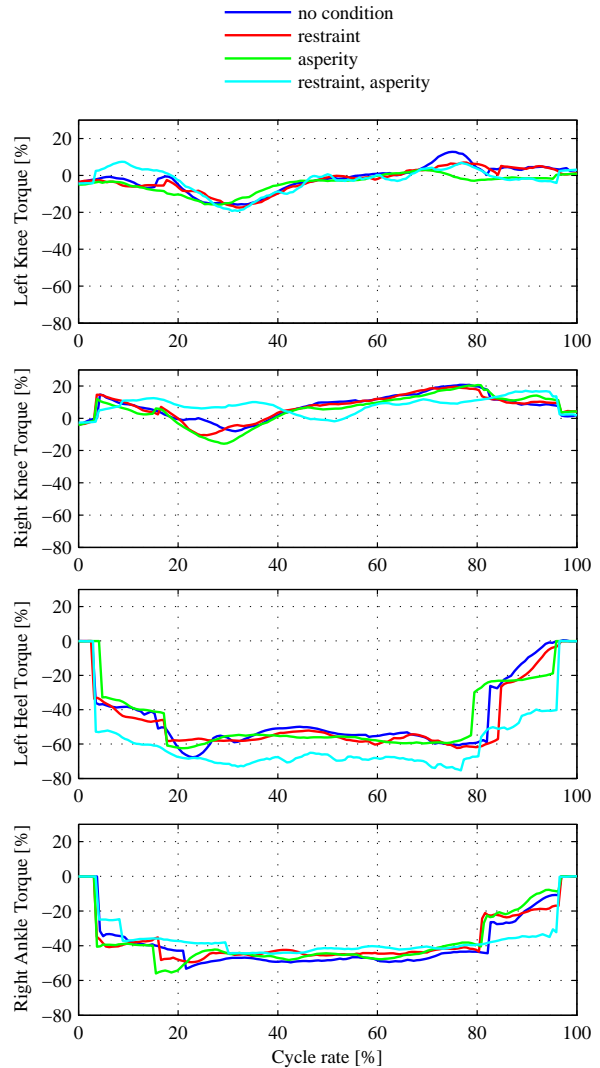


Fig.4 Leg Joint Torque Mz

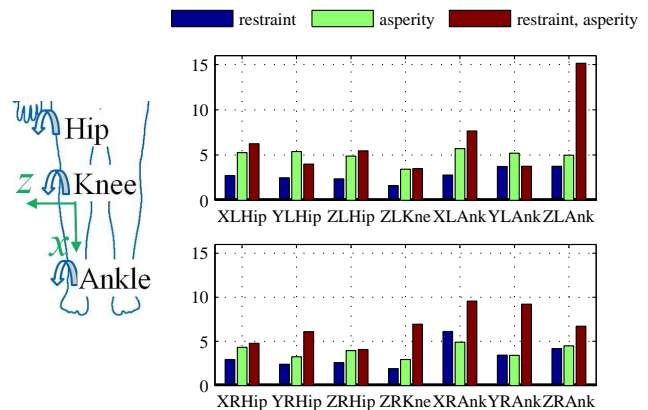


Fig.5 Joint axis and Arch viscoelasticity

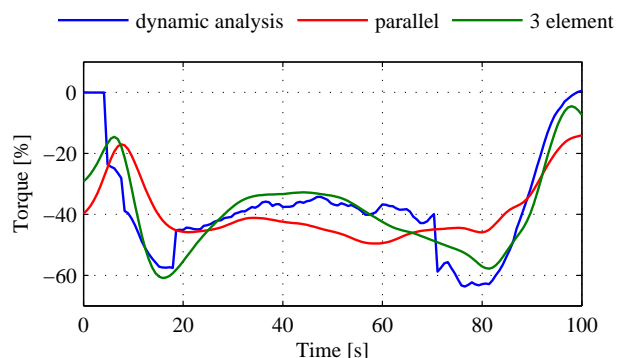


Fig.6 Arch viscoelasticity