

## 動力学による人型筋骨格ロボットの歩行に関する筋肉の変位と力の検討

### Dynamics Studies of Muscle Displacement and Force during Walking of a Musculoskeletal Humanoid Robot

○山崎健太郎<sup>1</sup>, 石濱拓実<sup>1</sup>, 後藤達巳<sup>1</sup>, 岡本莉奈<sup>2</sup>, 國分優剛<sup>2</sup>, 金子美泉<sup>3</sup>, 内木場文男<sup>3</sup>

\*Kentaro Yamazaki<sup>1</sup>, Takumi Ishihama<sup>1</sup>, Tatsumi Goto<sup>1</sup>, Rina Okamoto<sup>2</sup>, Yugo Kokubun<sup>2</sup>, Minami Kaneko<sup>3</sup>, Fumio Uchikoba<sup>3</sup>

Abstract: Conventional biped robots generate signals by CPU calculations and control joint angles with motors. Humans, on the other hand, use a neural network to generate signals and control the muscles involved in locomotion. In this process, the control load of locomotion is reduced by a cooperative structure of muscles called muscle synergy. The purpose of this study is to propose a structure that mimics the musculoskeletal structure for the human gait. In this paper, we report on our study of muscle displacement and force during walking based on kinetic analysis of a human musculoskeletal model.

#### 1. はじめに

少子高齢化や感染症対策による人手不足等の社会問題解決のために、2足歩行ロボットが期待されている。2足歩行ロボットは人間のような柔軟な動作が可能で、多様な環境に対応できることや、人間の代替として想定しやすいことから、開発対象として重要である。

従来の2足歩行ロボットの制御はCPUとソフトウェアプログラムにより、状況の判断や動作を数値計算で行う。運動生成はサーボモータによる関節駆動が主流である。そのため、多様な環境に対応するためには膨大な数値計算が必要となり、消費電力の大きい高性能なCPUが必要となる。

一方、実際の人間は脊髄の神経回路網によって運動信号を生成している。中でも脊髄に局在する中枢パターン生成器(CPG)により、上位中枢からの指令なしで基本的な運動パターンが生成されている。生成された運動パターンは運動ニューロンを介して神経パルスとして筋肉に伝達される。これにより筋肉が一次元一方向に収縮し、運動が生成される。この際、筋シナジーと呼ばれる筋の協調構造により制御負荷が軽減されると考えられている。

このように人間は神経回路網と筋シナジーにより省エネルギーな運動を生成している。そのため、人間の神経回路網や筋骨格構造を工学的に模倣することにより、省エネルギーな制御や運動生成が可能だと考えられる。

人間の神経回路網や筋を工学的に模倣した先行研究として、大阪大学の河上らは生体の神経回路をArduinoによって模倣し、空気圧人工筋肉の制御システムを開発した<sup>[1]</sup>。別の方法として、我々はアナログ電子回路により神経回路を模倣した数値計算によらない制御方法を提案している<sup>[2]</sup>。パラメータを回路定数として直

接組み込むため簡便性に欠けるが、電気信号を直接扱うためリアルタイムで数値計算によらない消費電力を抑えた制御が可能となる。また、運動生成としては形状記憶合金を用いた人工筋肉の作製を目指している。形状記憶合金は発生力が大きく、高伸縮構造構成が容易等の特徴を有する。しかし、形状記憶合金に見立てたアクチュエータによる歩行の解析が行われておらず、歩行運動に必要な変位と力が不明確である。

以上より、本研究では人型筋骨格ロボットの歩行用アクチュエータの機械的パラメータ同定のため、逆動力学解析により、筋肉の変位と筋肉に掛かる力を抽出する。また、抽出した値を用いて動力学解析を実行し、妥当性を検討する。

#### 2. 人型筋骨格モデルの構成

作製した人型筋骨格モデルの骨格と筋肉を Figure 1 に示す。モデル実験を行う上で等身大では大がかりとなるため、スケールを生体の1/2とした。重量は実際に3Dプリンターで出力した1/2スケールの骨格の重量を用いた。骨格には解剖学に基づいた形状を用いており、HAT(Head, Arm, Trunk)、骨盤、大腿、下腿、足の5つで構成している。それぞれの骨格を結合する関節は、仙腸関節、股関節、膝関節、足関節により構成した。生体には運動に関わる骨格筋が400以上とされており、そのすべてをモデル上で再現することは困難である。そのため、歩行動作に着目し最低限必要な筋肉により構成した。筋肉は腸腰筋(IL)、大殿筋(GM)、大腿直筋(RF)、中間広筋(VI)、外側広筋(VL)、内側広筋(VM)、大腿二頭筋長頭(BFLH)、大腿二頭筋短頭(BFSH)、前脛骨筋(TBA)、腓腹筋外側頭(LG)、腓腹筋内側頭(MG)、ヒラメ筋(SOL)により構成した。初期検討としてモデルの筋肉はシリンダーとして構成した。シリンダー内部にリ

1 : 日大理工・院(前)・精機 2 : 日大理工・学部・精機 3 : 日大理工・教員・精機

ニアアクチュエータを配置し、筋肉の一次元一方向に収縮する性質を再現している。また、筋肉は解剖学に基づいて起始と停止の位置に配置した。

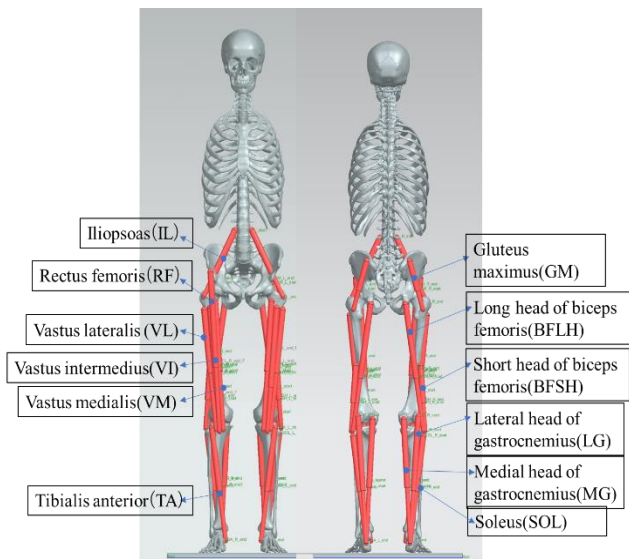


Figure 1. Musculoskeletal model and detail of muscles

### 3. 歩行シミュレーションの方法

2章で示した人型筋骨格モデルの筋肉の収縮変位と筋肉に掛かる力を算出するために動力学シミュレーションを実行した。シミュレーションソフトとしてSIMENSのsimcenter 3Dを用いた。歩行に関するシミュレーション手順を以下に示す。まず、歩行時の関節角度を各関節に入力し、歩行動作を生成する。関節角度で歩行動作を生成することで筋肉の変位が算出される。次に、この変位を各筋肉に導入することで逆動力学解析を行い、筋肉に掛かる力を算出した。初期検討として重心を固定し、床の影響を排除した状態で解析を実行した。生成した歩容の様子をFigure 2に示す。歩行1周期は0.96sとした。

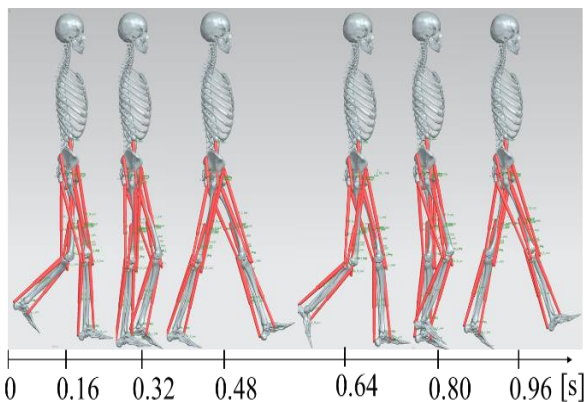


Figure 2. Walking motion of a human musculoskeletal model by forward dynamics analysis

### 4. 収縮力の検討

3章の歩行の逆動力学解析により、重心を固定した状態での収縮変位と筋肉に掛かる力を得た。算出した力には収縮方向だけでなく、伸張方向の力も含まれている。そのため伸長方向の成分を排除することで、筋肉が収縮している際に生じている力のみを抽出し収縮力とした。算出した収縮力が筋肉のパラメータとして妥当であるかを検討した。重心固定時において人型筋骨格モデルの各筋肉に収縮力を導入することで、歩行動作を再現させる。動力学解析を実行した結果、歩行動作が確認された。特に、股関節や膝関節より上部において通常の歩行と同様の動作が確認された。一方、重心を固定し床反力による影響が無い場合、膝関節より下部においては収縮力が小さく、通常よりも足の振り幅が小さい動作となった。また、歩行時には筋肉に加速度に対する力がかかることから、次の検討として重心に歩行時の加速度を与えた。それにより従来の歩行の条件に近い状態を再現する。動力学解析を実行した結果、重心固定時とほぼ同様に歩行動作が確認された。これらの検討により、算出した収縮力は膝関節上部における歩容の生成において妥当であると考えられる。

### 5. 結論

本研究では人型筋骨格モデルに逆動力学解析を実行することで、歩行時の筋肉の収縮変位及び掛かる力を取得した。また、取得したパラメータから動力学解析を行い歩容の生成を確認した。今後は床の設定や、人型筋骨格モデルの筋肉をより解剖学的に生体に近い構造として作成し、解析を行っていく。

### 6. 謝辞

本研究は JPS 科研費 JP22K04016、日本大学および NUROS の一部助成を受けたものである。

### 7. 参考文献

- [1] 河上貴彦, 進寛史, 山西賢, 池本周平, 細田耕: 「生体の神経回路を模した空気圧人工筋用制御システムの開発」, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, Vol.2016, pp.2p2, 2016
- [2] Kenji Takeda et al. : “The walking and running control of a human musculoskeletal model using a low-power consumption hardware central pattern generator model” International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol.19, Issue1, 2022