

## ヒトの歩行シミュレーションにおける運動指令

### The motor command in a simulation for human locomotion.

平松 誠治<sup>†</sup>, 辻 信也<sup>††</sup>, 加藤 啓路<sup>††</sup>, 加藤 厚生<sup>†</sup>

Seiji HIRAMATSU<sup>†</sup>, Shinya TSUJI<sup>††</sup>, Hiromichi KATO<sup>††</sup>, Atsuo KATO<sup>†</sup>

**Abstract:** In this study, we describe about motor commands to a model of human locomotion. One approach is physical calculation with measurement of position and posture. The other one is simulation with neural rhythm generator. We calculate joint torques for human locomotion by these methods and compare these results.

#### 1. はじめに

外見から観測されるヒトの身体運動の多くは、筋と骨とを使った筋骨格系の運動である。こうした、筋骨格系の運動は、ヒトが作業を遂行する上で重要な役割を果たしている。

様々な筋骨格運動が研究の対象になっている<sup>1)~6)</sup>。中でも、二足歩行は日常生活で頻繁に行われるが、それがいかんにして実現されているかは未だに明白にされていない部分が多い。一方で、ロボットの分野では、様々なヒューマノイド・ロボットが発表され話題を集めている<sup>7)</sup>。これらのロボットは、巧みに二足歩行を実現しており、今後更にヒトに近い歩行を実現する方向に向かうと考えられる。ロボットがヒトの二足歩行により近い歩行を実現するためには、歩行を詳細に理解することが求められる。

運動を解析した研究は、コンピュータによるシミュレーションに基づくものと、実測に基づくものと大別される。シミュレーション的に運動を再現する場合、このシミュレーションシステムは、実際に運動を実現する身体と、身体と相互作用する環境と、身体に運動指令を出す制御部で構成される。

一般にシミュレーションモデルで扱われる運動は、簡単のため一自由度の関節まわりの主動筋と拮抗筋のつりあいとして表現されることが多い。ところが、ヒトには二つ

の関節にまたがって存在する二関節筋や、三自由度までの関節が存在するために、実際の運動では一つの関節を動かすのに多数の筋が動員される。このため、特定の運動において一つ一つの筋の働きを、力学的手法で一意に決定することは困難である。そこで、個々の制御信号を与えたとき再現される運動から筋の働きを知ろうとする、このとき歩行運動の周期性から、制御信号として神経振動子<sup>3)~6)</sup>を用いることが合理的である。

本稿で我々は、簡略化されたヒトの力学的身体モデルにおいて静的つりあいから推定した関節トルクと、神経振動子を用いた歩行モデルからシミュレーションで得た関節トルクの比較を行った。

#### 2. 関節トルクの推定

歩行運動における関節駆動力は、筋が発生する力の総和によって与えられる。このとき、個々の筋が発生する筋力を得ることが困難であることから、本稿ではヒトの歩行運動の実測値から推定した関節トルクと神経振動子によって生成される関節トルクを比較した。

##### 2・1 実測に基づく歩行時のトルク推定

推定に用いた身体モデルの力学パラメータは、身長170cm、体重65kgの男性を想定して決めた。体重に対するセグメントの質量比およびセグメントにおける重心位置はWlodzimirz<sup>8)</sup>による。

モデルとする歩行運動は、三次元運動計測・測定装置

<sup>†</sup> 愛知工業大学 電気電子工学専攻 (豊田市)

<sup>††</sup> 愛知工業大学 電子工学科 (豊田市)

Vicon140 を用い位置情報を記録した。位置の測定箇所は、肩峰、大転子、大腿骨外顆、脛骨外顆、足関節外果、踵点、足尖点とし、直線上を歩行する様子を記録した。得られた三次元データは、矢状面に投影した二次元データへ変換し、このときの姿勢から関節トルクを推定した。なお、この関節トルクは、簡単のために、歩行中の瞬間における静的な姿勢保持トルクで近似した。

## 2・2 シミュレーションに基づくトルク推定

歩行モデルは、Taga の二次元モデルを利用した<sup>34)</sup>。このモデルは、図 1 に示すような筋骨格系を表す身体モデルと、歩行の指令を生成する神経振動子と、床面を表す環境とで構成される。

図 2 は、シミュレーションに用いた身体モデルである。身体モデルは、上体を HAT (頭部、上肢と胴部) と骨盤の 2 セグメントで、両下肢を大腿、下腿と足部の 6 セグメントで構成し、全体を合計 8 つのセグメントで構成する。各セグメントの位置と姿勢は、図中に示すように定義する。

図 3 は、駆動力を発生する筋の配置図である。下肢三関節に付随する筋は、ヒトの構造と同じく二関節筋を含んだ構造を採用している。

神経振動子は、その活動状態によって各筋の活動率を制御する。各関節には屈曲と伸展を支配する一対の神経振動子が存在し合計 14 個の神経振動子で構成される。

## 3. 結果と考察

実際の歩行から得られた推定関節トルクとシミュレーションにより生成された関節トルクを図 4 にしめす。図の横軸は、歩行周期を右足踵接地のときを 0% とし次の右足踵接地時点を 100% とした相対的な時間経過を表し、縦軸は関節トルクを表す。また、関節トルクは、伸展方向と屈曲方向 (足関節は、底屈方向と背屈方向) とで分けて表している。

実測における立脚相 (足が接地している状態) は 60% で、神経振動子を用いたシミュレーションではおよそ 55% であった。時間的には、シミュレーションの方が立脚相が短かった。

発生したトルクを股関節 (図 4(a), (b)) から見ていく。伸展トルクについて、実測からの推定トルクは立脚相時に大きなトルクが働いているのに対して、シミュレーションで

は遊脚相後期から立脚相前期にかけてトルクが発生している。屈曲トルクはこれとは逆の位相であった。

膝関節について (図 4(c), (d))、推定トルクは股関節のそれと類似した形状と大きさをしている。これに対してシミュレーションでは、伸展トルクにおいて類似した形状が見られたものの、大きさが半分程度で、また遊脚相後期にトルクが発生するところは股関節と異なっていた。

足関節について (図 4(c), (d))、推定トルクは底屈側について股関節の伸展トルクに類似した形状と大きさをしてしたが、背屈側については、踵接地の前後の僅かな時間に小さなトルクが働くに留まった。シミュレーションでは踵接地時および立脚相中期から遊脚相前期にかけて大きな底屈トルクを発生しているが、推定値に見られるような股関節・膝関節との類似性は見られなかった。

関節トルクが発生している期間の歩行周期に対する傾向として、シミュレーション値が推定値に比べておよそ 25% の位相遅れつまり 90 度の位相遅れがあるように見受けられた。また、推定値では各関節トルクの形状が非常に類似していた。この原因は、静的に力学計算を行っているためと推察される。動的に計算しているシミュレーションに比べ、力学計算のとき加速が考慮されないことが位相遅れを生じた原因の一つと考えられる。

## 4. まとめ

歩行における下肢の関節トルクを、三次元位置計測器を用いた測定値に基づいた静力学的計算と、神経振動子を用いた歩行シミュレーションの二つの方法で推定し、結果の比較を行った。

静力学的な推定関節トルクは、全般的に神経振動子を用いた生成した関節トルクに比べて位相の遅れが見られ、その原因に静力学的に計算していることから慣性成分がトルク計算に含まれていないことが原因の一つであると推察した。

今回の運動から運動指令をするにはまだ不十分であったものの、運動に基づいた力学計算によってトルクを推定する方法と神経振動子を用いたシミュレーションから運動指令を推定する方法を併用することで個々の筋に対する運動指令が推定されることが期待される。

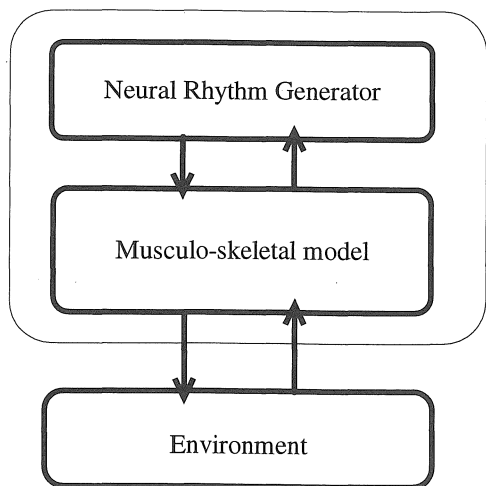


図1 歩行モデル

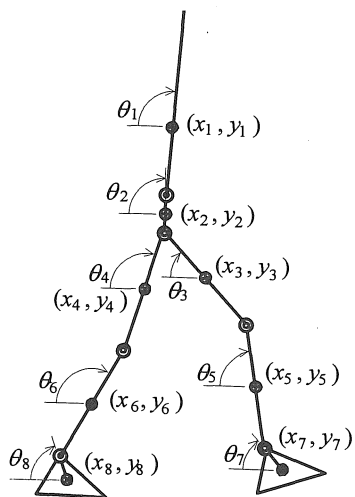


図2 身体モデル

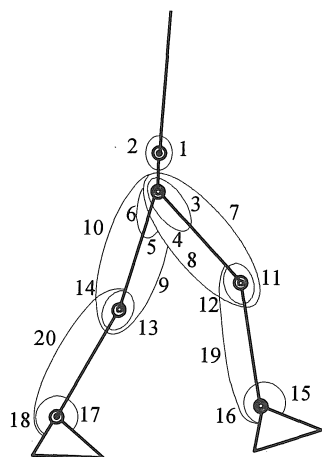


図3 筋の配置図

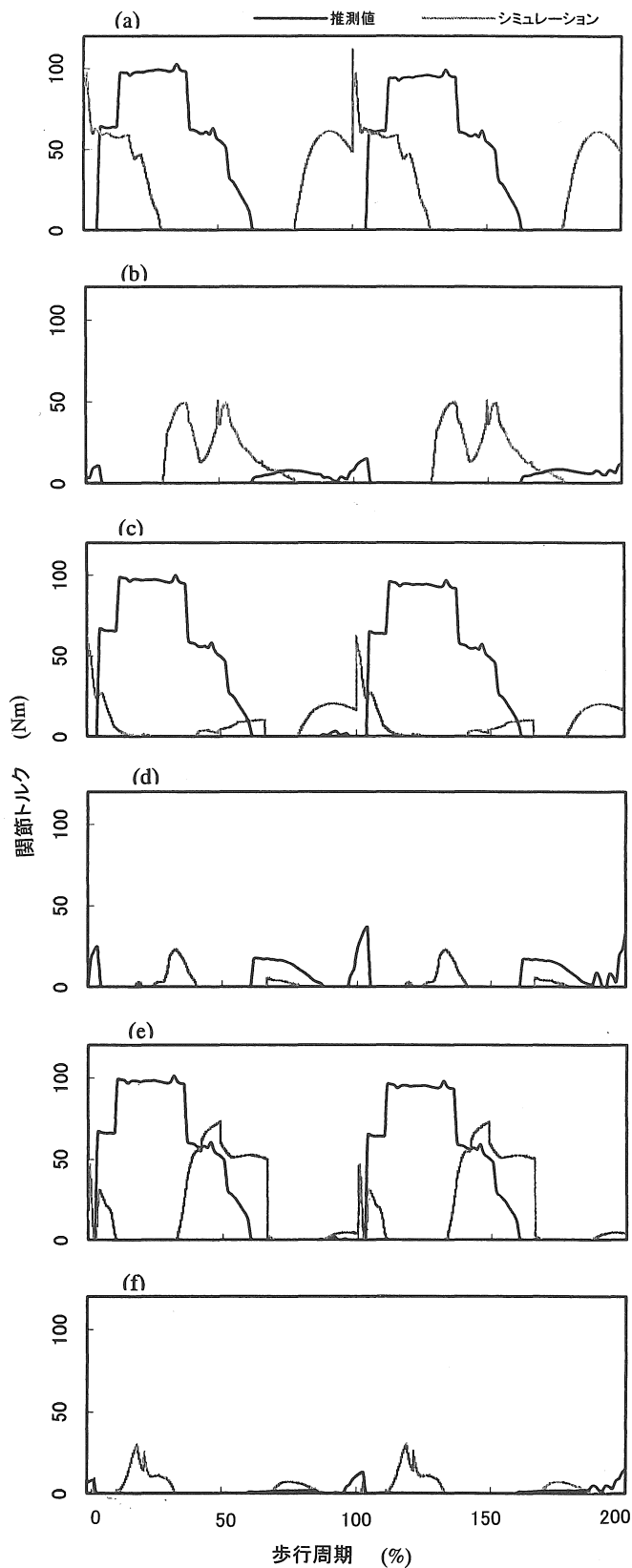


図4 関節トルク変化 (a)股関節伸展、(b)股関節屈曲、(c)膝関節伸展、(d)膝関節屈曲、(e)足関節底屈、(f)足関節背屈

## 参考文献

- 1) 山崎信寿: 2 足歩行の総合解析モデルとシミュレーション、バイオメカニズム 3、 pp.261 - 269、東京大学出版会、(1975)。
- 2) 山崎信寿: ヒトの体系と歩行運動、バイオメカニズム 7、pp.287 - 294、東京大学出版会、(1984)
- 3) Taga, G. Yamauchi, Y., & Shimizu, H. : Self - organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment、 *Biol. Cybern.*、 65、 pp.147 - 159、 (1991)
- 4) Taga, G. : A model of the neuro - musculo - skeletal system for human locomotion.
- 5) 荻原道直、山崎信寿: 実歩行計測データからの歩行神経回路網の推定、バイオメカニズム学会編、バイオメカニズム 15 東京大学出版会: pp.175-185
- 6) 長谷和徳、西口純也、山崎信寿: 3次元筋骨格系と階層的神経系を有する 2 足歩行モデル、バイオメカニズム学会編 バイオメカニズム 15 東京大学出版会: pp. 187-197
- 7) 平井和雄: 2 足歩行ロボット開発への挑戦、電子情報通信学会誌、 82 (1)、 pp.2 - 6、 (1999)
- 8) Wlodzimierz S. Erdman : Geometric and Inertial data of the trunk in adult males、 *J Biomechanics*、 Vol.30, No.7, pp.679-688, 1997

(受理 平成13年 3 月19日)