



# Analysis and Evaluation of Human Motions Based on Musculoskeletal Model Incorporating Redundant Muscles and Muscle Fatigue Property

Nishida, Isamu

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2012-03-25

(Date of Publication)

2012-11-20

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲5496

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005496>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名	西田 勇		
論文 題目	Analysis and Evaluation of Human Motions Based on Musculoskeletal Model Incorporating Redundant Muscles and Muscle Fatigue Property 冗長筋群と筋肉疲労を考慮した筋骨格モデルによる人体動作の解析と評価		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	白 瀬 敬 一
	副 査	教 授	横 小 路 泰 義
	副 査	教 授	羅 志 偉
	副 査		
	副 査		

## 要 旨

近年、コンピュータの発展とともに、人間の身体機能をコンピュータ上にモデル化して動作解析や運動評価を行うコンピュータヒューマンモデルの開発が活発に行われている。動作解析や運動評価の結果は、福祉工学においてはリハビリテーションの効率向上、健康工学においては日常生活動作における力学的身体負荷の評価、スポーツ工学においては競技パフォーマンスの向上、さらに生産工学においては作業現場における作業性の向上や製品の使いやすさの評価などに利用され、幅広い分野で大きく貢献している。現在利用されているコンピュータヒューマンモデルでは、剛体リンクモデルを中心に作業者の体格や姿勢から力学的に計算できる関節力・関節モーメントを解析することができる。また、筋肉の働きを考慮した筋骨格モデルでは筋力を推定することができるが、筋力推定の際に筋力の自乗和を最小とする最適化が用いられており、人間特有の筋肉であり身体の制御機能に大きく関与している拮抗筋や二関節筋の働きを忠実に考慮することができない。さらに、疲労の大小を定量的に評価する機能は未だに開発されておらず、コンピュータヒューマンモデルそのものが発展途上にある。

本論文ではこうした問題を解決するために、身体の制御機能に大きく関与している拮抗筋および二関節筋の働きを忠実に考慮できる筋骨格モデルを開発して、モーションキャプチャ（撮影したビデオから人体の動きを計測）した動作軌跡から、動作中に筋肉が発揮する筋力の推定手法を提案するとともに、実験を行って推定結果を検証している。また、生理学の観点から明らかになりつつある筋肉の疲労と筋力の関係をモデル化し、運動の変化に応じて疲労の大小を定量的に評価することができる手法を提案するなど、革新的なコンピュータヒューマンモデルを開発している。

第1章では、近年開発されているコンピュータヒューマンモデルの調査を行い、従来のモデルで実施可能な評価、及び従来のモデルでは実現不足の機能や問題点を整理して検討している。本論文では従来のモデルでは実現不足の機能として、筋の働きや筋の疲労に着目し、それらの特性を表現できるコンピュータヒューマンモデルを構築することを着想している。

第2章では、従来から3次元動作解析に用いられている全身の剛体リンクモデルを取り上げ、モーションキャプチャした動作軌跡から各関節に作用する関節力および関節モーメントを推定する手法を述べている。これまで、身体に加わる未知の外力がない動作や一箇所のみから外力が加わるような閉ループの動作解析が一般的に行われており、歩行動作のような両足が同時に地面に接地するような閉ループの動作解析は困難とされていた。そこで、歩行動作において身体の各関節の位置座標データのみを用いて床反力を推定する方法を提案し、フォースプレートで床反力を測定せずに動作解析することに成功している。提案手法の妥当性を検証するために歩行実験を行い、フォースプレートで計測される床反力と提案手法によって推定される床反力との比較を行い、提案手法の有効性を検証している。

氏名	西田 勇		
<p>第3章では、拮抗筋や二関節筋の機能を忠実に考慮することのできる下肢の筋骨格モデルを提案し、モーションキャプチャした動作軌跡から下肢に存在する各筋肉の筋力を推定する手法を提案している。また、2次元動作の例として垂直跳び動作を、3次元動作の例としてジョギング動作を取り上げ、それぞれの動作において提案手法を適応して解析を行っている。さらに、提案した手法の妥当性を検証するため、それぞれの動作において、下肢の各筋肉に取り付けた表面筋電計で計測される筋電位と提案手法によって推定された筋力から求められる筋活動レベルとの比較を行い、提案手法の有効性を検証している。</p> <p>第4章では、拮抗筋や二関節筋の機能を忠実に考慮することのできる上肢および下肢の筋骨格モデルを提案し、荷役作業動作時における上肢および下肢に存在する各筋肉の筋力を推定する手法を提案している。また、これまでの研究では明らかにされていなかった、筋肉にかかる負荷を考慮した上で人体にとってどのような動作が最適であるかといった問題、あるいは具体的な作業動作に対して良し悪しの評価を行う問題に適用するため、コンピュータシミュレーションにより荷役作業動作において種々の動作パターンを模擬的に創成し、人体の上肢および下肢の筋肉の筋力を評価基準として、荷役作業動作の良し悪しを評価している。</p> <p>第5章では、生理学の観点から明らかになりつつある筋肉の疲労と筋力の関係をモデル化した筋肉の疲労モデルを提案し、出力パターンの異なる筋力を発揮した場合における、疲労や回復の進展状況を推定する手法を提案している。ここでは、任意の出力を発揮し続ける場合の疲労進展の評価や、休憩を挟んで任意の出力を発揮し続ける場合の疲労回復の程度を予測している。提案手法の妥当性を検証するための疲労実験を行い、任意の出力を発揮し続けることのできる時間、及び休憩を挟んで任意の出力を繰り返し発揮できる回数を計測して、これらの実験結果と提案手法による推定結果との比較を行うことで、提案手法の有効性を示している。</p> <p>第6章は本論文の結論で、本論文で提案した筋骨格モデルや筋肉の疲労モデル、ならびに解析手法や推定手法が、より高度なコンピュータヒューマンモデルの実現に貢献するものであることを纏めるとともに、今後の研究展望を示している。</p> <p>以上のように本研究では、従来の筋骨格モデルでは考慮されていなかった拮抗筋および二関節筋の機能を考慮した筋力推定手法や、身体負荷の変化に応じて疲労の大小を定量的に評価することができる筋肉の疲労モデルを提案するとともに、それらの有効性を実験で検証するなど、革新的なコンピュータヒューマンモデルの実現に貢献できることを示している。</p> <p>よって学位申請者の 西田 勇 は、博士(工学)の学位を得る資格があるものと認める。</p>			

## 論文内容の要旨

氏 名 西田 勇専 攻 機械工学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

### Analysis and Evaluation of Human Motions Based on

### Musculoskeletal Model Incorporating Redundant

### Muscles and Muscle Fatigue Property

### (和文) 冗長筋群と筋肉疲労を考慮した筋骨格モデルに

### よる人体動作の解析と評価

指導教員 白瀬 敬一 教授

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

近年、コンピュータの発展につれて、人間の身体機能をコンピュータ上にモデル化して運動評価を行うコンピュータヒューマンモデルの開発が活発に行われている。これらは福祉工学においてはリハビリテーションの効率向上、健康工学においては日常生活動作における力学的負担の評価、スポーツ工学においてはパフォーマンスの向上、さらには生産工学においては作業現場における作業性の向上や製品の使いやすさの評価など、幅広い分野に大きく貢献するものである。現在利用されているコンピュータヒューマンモデルでは、人間の動作中の身体の各関節位置、身体に作用する外力などを計測し、逆運動力学を用いて各関節に作用する関節力や関節モーメント、さらには筋力の推定を可能にしている。ただし、筋力推定には筋力の自乗和を最小とする最適化が用いられており、人間特有の筋肉であり身体の制御機能に大きく関与している拮抗筋や二関節筋の働きは考慮されていない。また、疲労の大きさを定量的に評価する機能は未だに提供されていない。このようにコンピュータヒューマンモデルそのものが発展途上であることが指摘できる。

本論文では、こうした問題を解決するために身体の制御機能に大きく関与している拮抗筋および二関節筋の働きを考慮できる筋骨格モデルを開発して、モーションキャプチャ (ビデオから人体の動きを計測する) した動作の解析から、動作中に筋肉が発揮する筋力の推定手法を提案している。また、生理学の観点から明らかになりつつある筋肉の疲労の関係をモデル化し、運動の変化に応じて疲労の大きさを定量的に評価することができる手法を提案することで、革新的なコンピュータヒューマンモデルを開発している。

第1章では、近年開発されているコンピュータヒューマンモデルの調査を行い、従来のモデルで行うことのできる評価および従来のモデルでは不足している機能や問題点を整理して検討している。本論文では従来のモデルでは不足している筋の機能や筋の疲労に着目し、それらの特性を表現できるコンピュータヒューマンモデルを構築することを着想した。

第2章では、従来から3次元動作解析に用いられている全身の剛体リンクモデルを取り上げ、モーションキャプチャした動作から各関節に作用する関節力および関節モーメントの推定手法を述べている。また、従来では身体に加わる外力がない動作や一箇所のみから身体に外力が加わるような開ループの動作の解析が行われており、歩行動作のような両足が同時に地面に接地しているような閉ループの動作の解析は困難とされていた。そこで、ここでは歩行動作においてフォースプレートを用いず、身体の各関節の位置座標データのみを用いて床反力を推定する手法を提案した。提案した手法の妥当性を検証するため歩行動作の実験を行い、フォースプレートより計測される床反力と提案手法によって推定される床反力との比較を行うことで、提案手法が有効

であることがわかった。

第3章では、大腿部に存在する筋肉における拮抗筋や二関節筋の機能を考慮することのできる筋骨格モデルを参考に、下腿部に存在する筋肉についても評価を行うことのできるように拡張した筋骨格モデルを提案することで、モーションキャプチャした動作から下肢に存在する各筋肉の筋力を推定する手法を提案している。また、2次元動作の例として垂直跳び動作を、3次元動作の例としてジョギング動作を取り上げ、それぞれの動作において提案手法を適応して解析を行っている。さらに、提案した手法の妥当性を検証するため、それぞれの動作において、下肢の各筋肉に取り付けた表面筋電計の結果と提案手法によって推定される筋力から求められる筋活動レベルとの比較を行うことで、提案手法が有効であることがわかった。このように、運動をつかさどっている筋肉の影響を考慮することで、スポーツ工学におけるパフォーマンスの向上に大きく貢献できると考えられる。

第4章では、拮抗筋や二関節筋の機能を考慮することのできる上肢および下肢の筋骨格モデルを用いることで、荷役作業動作時における上肢および下肢に存在する各筋肉の筋力を推定する手法を提案している。また、これまでの研究では明らかにされていなかった、筋肉にかかる負荷を考慮した上で人体にとってどのような動作が最適であるかといった問題、あるいは具体的な動作に対して良し悪しの評価を行う問題を解決するため、コンピュータシミュレーションにより荷役作業動作において種々の動作パターンを模擬的に創成し、人体の上肢および下肢に存在する筋肉の筋力を評価基準として、荷役作業動作を評価している。これによって、従来の評価では剛体リンクモデルを用いることによる各関節に作用する関節モーメントの評価が行われてきたが、筋肉にかかる負荷を考慮することによって、筋挫傷などといった作業時の怪我を軽減できると考えられる。

第5章では、生理学の観点から明らかになりつつある筋肉の疲労と筋力の関係をモデル化した筋肉の疲労モデルを提案し、パターンの異なる出力を発揮した場合における疲労や回復の進展を評価することのできる手法を提案している。ここでは、任意の出力を発揮する場合の疲労の進展の評価や、休憩を挟んだ場合の疲労回復の程度を予測する手法を提案している。提案手法の妥当性を検証するため、任意の出力を発揮し続けることのできる時間および休憩を挟んで任意の出力を繰り返し発揮できる回数において、提案手法による推定結果と実験による計測結果との比較を行うことで、提案手法が有効であることがわかった。このように疲労の影響を考慮することで、疲労の無視できない長時間の動作や繰り返し動作の評価が可能となる。つまり、運動時の各筋の筋力および疲労の評価が可能になることで、生産現場における人が安全で快適に作業を行うことのできる作業動作や作業環境の提案が可能になると考えられる。

第6章は本論文の結論で、ここまで提案した評価手法がより高度な評価を行うことのできるコンピュータヒューマンモデルの開発に貢献するものであることを纏めるとともに、今後の研究展望を示している。

以上のように本研究では、従来のモデルでは考慮されていなかった拮抗筋および二関節筋の機能を考慮した筋力推定手法を提案するとともに、運動の変化に応じて疲労の大小を定量的に評価することができる手法を提案し、それらの手法を検証することで、革新的なコンピュータヒューマンモデルの開発に貢献できることを示している。