

令和元年6月7日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00783

研究課題名(和文) 着衣の影響を考慮した動作時の関節トルク推定と動作快適性評価への応用

研究課題名(英文) Estimation of joint torque considering clothing and application to evaluation of movability of clothing

研究代表者

堀場 洋輔 (HORIBA, Yosuke)

信州大学・学術研究院繊維学系・准教授

研究者番号：00345761

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究により得られた成果は、主に以下の3つである。(1)着衣の動作快適性と動作中の関節トルクに相関があることを明らかにした。つまり、着衣の動作快適性の指標として関節トルクが有効であることを明らかにした。(2)着衣から人体に加わる力を構造解析シミュレーションにより推定する方法を構築した。(3)着衣の変形計測(または構造解析シミュレーション)と筋骨格シミュレーションにより動作中の関節トルクや筋活動度を推定する方法を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

衣服の動作快適性に関する従来の研究においては、主に感性評価や筋電図計測などの生理計測が行われていたのに対し、本研究では筋骨格シミュレーションにより得られた関節トルクや筋活動を指標にして動作快適性を評価できる可能性があることを明らかにした。このことは、生体力学的観点から着衣の動作快適性を評価できることに加え、衣服を試作しなくても動作快適性の評価が行える可能性も示唆しており、被服設計の効率化などへの貢献が期待される。

研究成果の概要(英文)：Results of this study are as follows: (1) The mobility of clothing correlates with the joint torque. In other words, the joint torque may possibly be an effective index for the evaluation of movability of clothing. (2) A method is developed to estimate the force of clothing that acts on the human body using a structural analysis simulation. (3) A method is developed to estimate the joint torque and muscle activity while moving, via deformation measurements of clothing (or structural simulation) and muscle skeletal simulation.

研究分野：繊維工学、感性工学

キーワード：衣服 動作快適性 シミュレーション 筋活動 筋骨格シミュレーション 関節トルク

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

衣服の動きやすさ、すなわち動作快適性は、衣服内気候や風合いなどと並び、衣服の着心地を左右する重要な要因の1つである。近年では衣服の素材や型紙、縫製等に改良を加え、動作快適性を追求した製品がメーカー各社から販売されている[1]。しかしながら、衣料の特性やサイズについては仔細にわたり JIS 等で標準化されているのに対し、動作快適性については現在のところ標準化はもとより、定量化手法や評価尺度についても確立されていない。そのため各メーカーでは独自の基準を設け、動作快適性の設計・評価を行なっているのが現状である。

このような背景から、衣服の動作快適性の定量化を試みた研究がこれまでに幾つか報告されている。それらが大別すると、感性評価から得られた心理量を指標とした研究[2]、筋電位や関節角度・重心揺動などの生理量を指標とした研究[3]に分類される。これらの先行研究は衣服の動作快適性の定量化を試みた重要な研究として位置付けられるが、感性評価を用いた場合は身体への影響が不明瞭であること、生理計測（特に筋電位）の場合は動作と筋活動の関係が必ずしも明確ではなく、また正確な計測が容易ではないこと[4]、さらに何れの手法においても実際に衣服を着用して評価を行なう必要があることなどが問題点として挙げられる。

2. 研究の目的

以上の経緯から本研究課題では、(1)着衣の影響を考慮した関節トルクの推定方法を開発し、(2)動作時の関節トルクや筋活動の推定と着衣の動作快適性の感性評価を行ない、(3)関節トルクによる着衣の動作快適性の定量化および推奨値を定めることを目的とした。これらの目的を達成するために、本研究では次節で述べる3つのテーマについて研究を行なった。

3. 研究の方法

衣服の影響を考慮して関節トルクを推定するためには、身体各部の加速度や角加速度などの動作情報に加え、着衣から人体に加わる力を基に、逆動力学解析（筋骨格シミュレーション）を行なう必要がある。動作情報についてはモーションキャプチャを行なうことにより比較的容易に取得が可能であるが、衣服圧センサなど人体に加わる圧力を計測する方法は存在するものの、着衣から人体に加わる力を取得する方法については確立されていない。

そこで本研究では、衣服から人体に加わる力を取得するために、非接触3次元変位・歪み計測を利用する方法と、装着シミュレーションを利用する方法についてそれぞれ研究を行ない、着衣の影響を考慮した動作時の関節トルクの推定方法の確立と、それを用いた関節トルクと動作快適性の関係について明らかにすることを試みた。

(1) 非接触3次元変位・歪み計測と筋骨格シミュレータを用いた動作快適性の解析

実験試料として拘束力の異なる3種類の肘関節用サポーター（以下、拘束力の強い順に試料 A, B, C とする）を用い、腕を伸ばした状態から1秒間で90°屈曲する動作を実験動作とした。動作快適性については感性評価（一対比較法）を用いて評価させ、評価項目は、“伸びやすさ”、“拘束力の強さ”、“動かしやすさ”の3項目とした。一方、筋骨格シミュレーションを用いて実験動作時の関節トルクを推定するために、以下の手順で動作情報および着衣から人体に加わる力の取得を行なった。

① 筋骨格モデルの個人対応化

被験者の身体情報を再現するために、筋骨格モデルの個人対応化（身体寸法と慣性特性の変更）を行なった。なお、筋骨格モデルは筋骨格シミュレータ（NCSRR OpenSim）に収録されている上肢のモデルを使用した（図1）。

② 動作情報の取得

動作情報を取得するために、被験者に加速度センサを装着し、屈曲動作を計測した。得られた角速度データを積分することで屈曲角度を算出した。そして、屈曲角度の時系列データをシミュレータに読み込み、実験動作をモデル上で再現した。

③ 着衣から人体に加わる力の取得

動作中に着衣から人体に加わる力を取得するために、動作により生じる着衣の変形を非接触3次元変位・歪み計測装置（GOM社 ARAMIS）を用いて計測した（図2）。また、KES試験機（引張試験）によって試料の伸長特性を計測した。以上2つの計測結果を組み合わせることで、動作時に試料に発生した歪みを基に、着衣から人体に加わる力を推定した。そして、推定した力の大きさ・方向と力の発生する位置をシミュレータに定義することで着衣から人体に加わる力をモデル上で再現した。



図1 筋骨格モデル

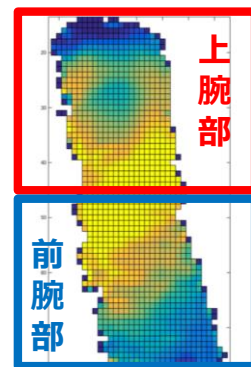


図2 歪み計測の例

(2) 装着シミュレーションと有限要素解析による着衣から人体に加わる力の推定

上記(1)で述べた方法により、着衣から人体に加わる力を計測により取得し、筋骨格シミュレーションを実行することは可能である。しかしながら、ゆとりの大きい衣服など、着衣の種類によっては人体との接触状態が不明瞭のため、歪み計測のみでは着衣から人体に加わる力を求めることは困難である。そこで、歪み計測とは別のアプローチとして、着衣シミュレーションを用いて人体と衣服の接触状態の解析を行ない、着衣から人体に加わる力を解析する方法について研究を行なった。解析の手順は以下の通りである。

① アパレル CAD による着衣形状の算出

まず、着衣形状を算出するために、アパレル CAD (デジタルファッション社 DressingSim Cloth) による着せ付けを行なった。手順としては、衣服の型紙・物性データを読み込み、縫目線を定義することで、着衣形状を算出した (図 3)。

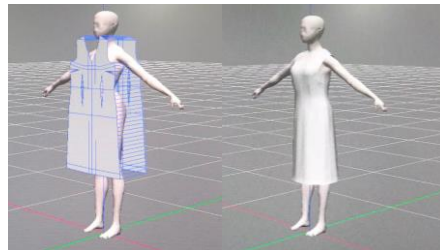


図 3 着衣形状の算出の例

② 有限要素解析による着衣と人体の接触問題の解析

着衣から人体に加わる力を推定するために、着衣と人体の接触問題を有限要素法により解析した。解析の初期条件としては、着衣形状と型紙形状から着せ付けにより生地に発生した収縮力を求め、それを初期応力とした。以上の解析を有限要素解析ソフト (LS-DYNA) を用いて実行し、着衣から人体に加わる力を推定した。

(3) 着衣シミュレーションと筋骨格シミュレータを用いた動作快適性の解析

上記(2)の方法を用い、上記(1)と同一の条件 (肘用サポーターを着用した状態における腕の屈曲動作) における関節トルクや筋活動を推定した。解析の手順を以下に示す。

① アパレル CAD による着衣形状の算出

被験者の寸法に合わせて、3DCG ソフトウェア (イーフロンティア社 Poser) により右腕の皮膚形状を作成した。作成した皮膚形状とサポーターの型紙をもとにアパレル CAD (デジタルファッション社 DressingSim Cloth) を用いてサポーターの着衣形状を算出した。

② 有限要素解析による着衣と人体の接触問題の解析

上記①で求めた着衣形状と、生地 of 物理特性を基に有限要素解析ソフト (LS-DYNA) を用いて解析を行ない、サポーターから人体に加わる力を求めた。

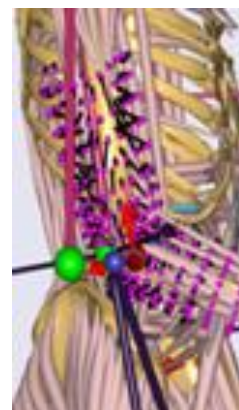


図 4 筋骨格シミュレーションの例

③ 筋骨格シミュレーション

モーションキャプチャにより計測した動作情報と、上記②で求めたサポーターから人体に加わる力を外力とし、筋骨格シミュレータ (AnyBody Technology 社 AnyBody) を用いて筋活動の推定を行なった (図 4)。

4. 研究成果

(1) 非接触 3 次元変位・歪み計測と筋骨格シミュレータを用いた動作快適性の解析

① 関節トルクと試料の拘束力の関係

各試料を着用した際に発揮された関節トルクの大小を明らかにするために、一元配置による分散分析を行なった。その結果、トルク最大値、平均値、最大値 (差分)、平均値 (差分) のいずれも、各試料間に有意差が確認され、拘束力の強い試料ほど、動作時に発揮される関節トルクが大きいことが確認された。

② 関節トルクと動作快適性の関係

各トルク値と動作快適性の関係を無相関検定によって調査した。その結果、関節トルクと動作快適性の評点の間には相関関係が見られ、特にトルク最大値 (差分)、トルク平均値 (差分) においては、“伸びやすさ”、“動かしやすさ”との間には強い負の相関関係が見られ、“拘束力の強さ”との間には強い正の相関関係が見られた (図 5)。

以上の結果より、歪み計測により得られた着衣から人体に加わる力を基に動作中の関節トルクを推定することは可能であり、また、動作快適性に関する感性評価と関節トルクの間には相関関係が確認されたことから、関節トルクが動作快適性の指標となる可能性が示唆された。ただし、この方法の課題としては、歪み計測がカメラを用いて行われているため、衣服の複雑な変形などを計測することが容易ではないことや、人体と衣服の接触状態が不明瞭なゆとりの大きい衣服などでは、着衣から人体に加わる力を正確に推定することは困難であり、そのため筋骨格シミュレーションにより得られる関節トルクの精度が十分でない可能性が考えられる。

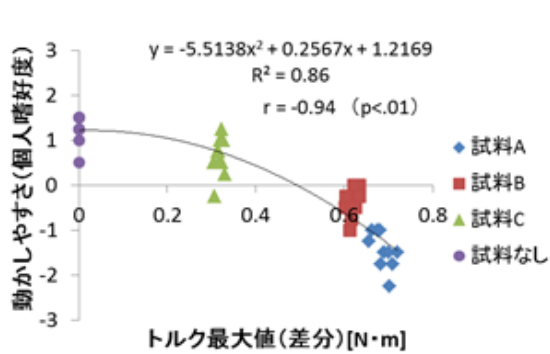


図 5 関節トルクと動作快適性の関係

(2) 着衣シミュレーションと有限要素解析による着衣から人体に加わる力の推定

提案手法の妥当性を検証するために、婦人用ボトム（以下、ボトム）を着用した際に、ボトムから人体に加わる力の推定を行なった。圧力とシミュレーション結果と実測値の相関係数を求めたところ、 $r = 0.7605$ となり、正の相関がみられた（図 6）。このことから、提案手法により着衣から人体に加わる力がある程度の精度で推定することが可能であり、また、歪み計測の課題であった衣服が複雑に変形している場合や、人体と衣服の接触状態が不明瞭な場合であっても、着衣から人体に加わる力を推定できることが示唆された。

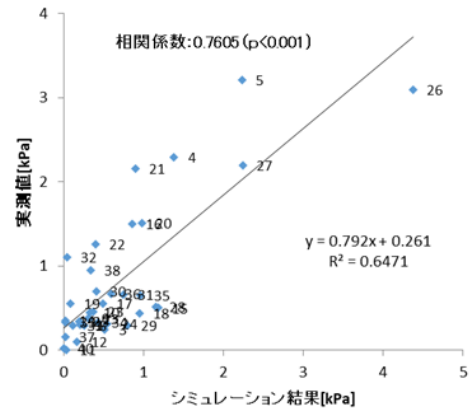


図 6 解析結果と実測値の比較

(3) 着衣シミュレーションと筋骨格シミュレータを用いた動作快適性の解析

上記の提案手法 (2) を用い、腕の屈曲動作における最大筋活動をサポーター着用の有無により比較した結果を図 7 に示す。図より、サポーターを着用した場合は、肘の屈曲角度が 20° 付近で筋活動が最大となることが確認できる。これはこの付近で屈曲動作の加速度のピークとなることに加え、肘の屈曲に伴いサポーターに発生した力が抵抗力として腕に働き、動作を阻害したため筋活動が大きくなったと考えられる。

以上のことから、着衣シミュレーションにより推定した着衣から人体に加わる力を用いて、動作中の筋活動や関節トルクなどを推定することは可能であり、歪み計測が困難な状況においては有効なアプローチと考えられる。また、この方法の利点として強調したい点は、衣服の試作を行わなくても、動作中の筋活動や関節トルクなどを推定できることであり、アパレル CAD で設計した型紙のデジタルデータを基に、設計段階で動作快適性のシミュレーションを行なうことも原理的には可能である。ただし、シミュレーションの精度については改善の余地は残されており、例えば今回推定したサポーターから人体に加わる力においては、腕の屈曲に伴う筋肉の隆起により腕の周囲長に変化が実際には見られるが、シミュレーションにおいては全く考慮されておらず、そのため実際には今回推定した値よりも大きな力がサポーターから人体に働くことが予想される。したがって、シミュレーションの高精度化が今後の課題として考えられる。

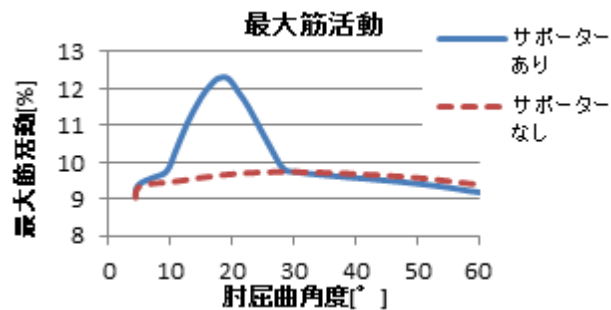


図 7 サポーターの有無による最大筋活動の比較

<引用文献>

- [1] K. Shibata et. Al., Kakou Gijutsu, 46, 28 (2011)
- [2] H. Kanai et. Al., Sen'i Gakkaishi, 63, 159 (2007)
- [3] M. Ishigaki et. Al., Kaseigaku Zasshi, 58, 569 (2007)
- [4] D. G. Robertson et. Al., "Research Methods in Biomechanics", (M. Ae trans.), Taishukan, Tokyo, p. 191 (2008)

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 3 件)

- ① 西山茉里, 堀場洋輔, 乾滋, 筋骨格シミュレータを用いた肘サポーター着用時の筋活動の推定, 日本繊維製品消費科学会 2019 年年次大会, 2019
- ② 天野匠, 堀場洋輔, 乾滋, 山田隆登, アパレル CAD と有限要素ソフトを組み合わせた簡便な衣服圧推定方法の提案, 日本繊維機械学会第 72 回年次大会, 2019
- ③ 堀場洋輔, 徳竹歩, 乾滋, 筋骨格シミュレータを用いた動作快適性の解析, 2017 年繊維学会年次大会, 2017