

令和 2 年 5 月 26 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15H03052

研究課題名(和文) 計算機シミュレーションを援用した義足の適合・設計技術確立のための基礎的研究

研究課題名(英文) Research on prosthesis design and fitting support system based on numerical simulation

研究代表者

内藤 尚(Naito, Hisashi)

金沢大学・フロンティア工学系・准教授

研究者番号：40392203

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、義足の適合や設計を支援するシステムの構築を目指し、システムに必要な基盤的技術の開発を行った。主な研究成果は次の3点である。(1) MRI装置および荷重計付き超音波エコー画像装置を用いることで、利用者の断端部組織の3次元立体形状と同時に各組織の弾性分布を推定する手法を開発した。(2) 神経・筋骨格モデルを用いて任意の義足を着用した状態の歩行のシミュレーションし、歩行を評価することができるシステムを構築した。(3) 実際の義足利用者の断端およびソケットを基にした有限要素解析の結果、適合している大腿義足ソケット着用時の断端の応力分布の典型的なパターンを予測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、下肢切断者の方が用いる義足に対して、これまでよりも身体の状態に合うように調整や製作を行うための方法を確立するための基礎的な研究です。義足などをよりよく身体に合わせるには義足の着用状態についてできるだけ詳細に観察や計測を行い、評価することが必要不可欠ですが、実際には臨床の現場でたくさんの種類の物理量を直接計測することは困難です。そこで本研究では、身体や義足を数学モデルで表し、義足の着用状態について計算機シミュレーションを行うことで直接観察や計測が難しい量を推定し、様々な側面から評価できる手法の確立を目指しており、本課題では計測技術とシミュレーションの開発と評価指標の検討を行いました。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we aimed to construct a system to support the fitting and design of prosthetic legs, and developed the fundamental technologies necessary for the system. The three main research results are as follows. (1) We developed a method for estimating the three-dimensional shape of the patient's tissues of stump and the elastic distribution of each tissue simultaneously by using an MRI device and a US echo imaging system. (2) We developed a calculation system using neuro-musculo-skeletal model which is able to simulate the gait of an arbitrary prosthetic leg and evaluate the gait. (3) Based on finite element analysis of an actual prosthetic leg user's stump and socket, we predicted the typical pattern of stress distribution at the stump of the fitted above knee prosthetic socket wearing standing position.

研究分野：福祉・リハビリテーション工学

キーワード：義肢装具 適合 評価 計算機シミュレーション 福祉用具 支援機器

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

義足は、脚の機能の一部を代償することで下肢切断者の歩行を支援する代表的な福祉用具であり、多くの利用者にとって無くてはならない機器である。一般にこのような支援機器を使用する場合、障害者の身体特性には個人毎のばらつきが大きいことから、機器の種々の特性を個人毎に調整する必要があり、この調整を適合と呼ぶ。義足には、身体と機器とを直接接続するソケット部の形状・接触摩擦特性、各部品の取り付け位置・角度関係（アライメント）、質量や重心位置といった慣性特性、関節の受動的な抵抗特性、足部と地面間の粘弾性・接触摩擦特性などの多岐にわたる性能を決める要素が存在し、義足の製作・調整においては、それらの要素を個人の身体特性及び生活環境に適合させる必要がある。

義足の適合性には、ソケットの快適性、様々な活動時における運動機能・関節負担・疲労度など種々の異なる因子が関与している。最終的にはそれらを総合して適切な適合性を満たした機器を処方する必要がある。そのため、現状の臨床現場における適合には、医師や義肢装具士、理学療法士など分野の異なる専門家からなるリハビリテーションチームが携わっている。そこでは、異なる観点を総合した適合性評価が行なわれていると言えるが、実際には各専門家の経験に基づく主観的評価によって適合性が判定されており、客観性や再現性の低さが課題とされている。根拠に基づくリハビリテーションを実現する上で、客観的で合理的な指標に基づいて適合性を評価することが求められている。

客観的で合理的な評価においては、定量的な計測データが必須であるが、身体内部やソケット内部においては、測ることができる測定量や計測点数などが制限される。また、そのような制限に加えて、義足の適合・設計では多岐にわたる設計パラメータや調整要素と身体運動が連成して義足・身体システムに影響を及ぼすことから、製作や調整をした際に起こる結果を前もって予測することは困難である。一般に、このような計測が難しいシステムにおける内部状態の推定や種々の設定条件下におけるシステムのふるまいの予測には、妥当な計算モデルに基づく数値シミュレーションが有効であり様々な分野で応用されつつある。義足適合・設計の現場においても、義足と利用者身体との間の詳細な相互作用を定量的に予測する数値シミュレーション技術が、義足の適合性を客観的かつ合理的に評価するための必須の技術になることが予想される。

2. 研究の目的

本研究の最終目的は、計算機シミュレーションを援用した義足の適合・設計技術の基盤を確立することである。具体的には、①義足の適合性を評価するために必要な測定量を計るシステムの開発、②客観的で合理的な義足適合性の評価指標の確立、および③確立した評価指標を評価関数として個人ごとの身体特性に応じた適合性の高い義足の設計パラメータを提示する義足適合・設計支援システムの構築を行う。研究代表者がこれまでに開発してきた身体運動シミュレーション技術を基に、義足着用者において直接計ることが難しい断端部の応力分布などの負荷を限られた計測情報から推定する技術と義足の特性や個人ごとの身体特性に依存する身体運動を定量的に予測する技術を開発し、それらを義足の適合性評価の支援ツールとして応用することで上記の目的を達成する。

3. 研究の方法

研究課題の目的を達成するため、次の方法で研究を遂行する。

① 利用者と義足の各種特性を計測する手法の確立

義足のソケットおよび利用者の断端部の特性として、構成要素（特に断端の場合は筋、骨格、脂肪など）とそれらの形状・粘弾性特性、さらに、利用者の身体特性、義足の機械的特性を取得する計測手法を確立する。

② 義足着用者モデルを用いた解析システムの構築

ソケットと断端を計測した特性を反映させられる有限要素モデルで表し、それを剛体リンクからなる義足・筋骨格モデルと接続することで、義足着用者の身体モデルを作成する。モデルを運用するシステムは、計測データを入力することで、直接計測できない測定量を推定する逆動力学シミュレーションと歩行および着座、立ち上がりなどの基本動作を予測することができる順動力学シミュレーションの両方を利用できるよう構築する。

③ 良好な適合事例に対するデータ取得・解析及び評価指標の提案

良好な適合が得られていると言える義足利用者を対象に計測と解析を実施する。ここでは、特に、断端部とソケット間の動的な相互作用の結果、運動時に断端部においていつ、どこで、どのように、体重に対応する荷重が支えられ、義足を懸垂して操作されているか、ということに着目する。データを標準的適合状態として取得し、それを基に良好な適合性に対する指針を得る。

④ 計算機を援用した適合・設計支援システムの構築と検証

作成したモデルを利用し、種々の義足設計案を評価することのできるシミュレーションシステムを作成し、良好な適合性を持つ義足設計解の候補を導き出す支援システムを構築する。

4. 研究成果

本研究課題では、義足の適合を支援するシステムの構築を目指し、システムに必要な基盤的技術の開発を行った。具体的な研究実績は下記の3点でまとめられる。

(1) 利用者と義足の各種特性の計測手法

大腿義足着用者の立位状態および臥位状態の義足ソケット着用時および未着用時の切断単のMRI 撮像を行い、形状データを取得した。その結果、ソケット着用時の断端において、臥位状態に比べて立位状態では後側部で軟部組織の厚みが特に小さくなり、撮影を立位状態と臥位状態で行うことで断端の形状が大きく変わることが確認された。また、MRI 装置および荷重計付き超音波エコー画像装置を用いることで、利用者の断端部組織の3次元立体形状を取得し、また荷重値と断層画像を基に有限要素解析による逆問題を解くことで、各組織の弾性率を推定する手法を開発した。ただし、有限要素モデルを作成する際の各要素を切り分ける画像処理の閾値に依存して組織毎の境界に大きなバラつきを生じ、自動化するためには適切な閾値の設定が課題となることを明らかにした。

(2) 義足着用者モデルを用いた義足着用時の解析システムとそれを用いた評価指標の検討

股義足使用者の歩行シミュレーションを行い、身体負担について消費エネルギーに着目して検討を行った。その結果、股関節で消費されているエネルギーが健常歩行に比べて著しく大きいことが分かった。それは特に立脚期初期に顕著であり、その際にはハムストリングスと大腿直筋が同時収縮しており、比較的大きな筋であるハムストリングスで股関節伸展モーメントを発生しつつ、膝の屈曲を防ぐために大腿直筋が顕著に大きな筋活動をしていることが分かった。

また、ソケット・断端系の有限要素モデルを作成し、断端の変形・応力分布の有限要素解析を行った。実際の断端および経験豊富な義肢装具士によって適合されたソケットの形状および粘弾性特性を基にしてモデルを作成し、立位時を想定した荷重条件下の断端の変形・応力分布を計算により求めた。その結果、図1のように断端先端の前端および後端部に応力の高い部分が表れ、骨直下の応力を緩和している様子が観察された。また、ソケットは側面方向に比べて前後方向に断端を圧縮するように製作されており、このことが先の応力分布の結果に表れていることが示唆され、ソケットのデザイン指針の一つであると考えられる。

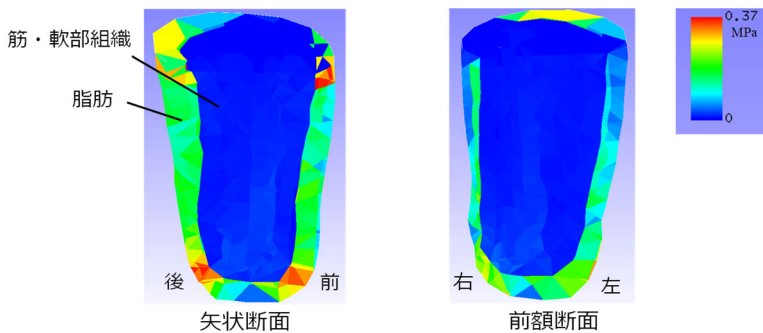


図1 Mises応力(筋・軟部組織, 脂肪の断面)

(3) 計算機を援用した適合・設計支援システムの構築

神経・筋骨格構造をもつ歩行シミュレーションモデルを用いて義足の適合・設計支援ソフトウェアを整備した。特にこれまで対応できていなかった一般的な義足の膝継手のシミュレーションを行うために閉リンク機構をもつ多リンク構造の運動解析を取り扱うことができるシミュレーションソフトウェア(図2)を作成した。それを用いて閉リンク機構をもつ膝継手の屈伸時の運動シミュレーションを行い、膝継手の非線形な受動抵抗特性を予測することができた。これによって歩行シミュレーションを基に着用者の特性を考慮した膝継手の種々の受動抵抗特性についての評価を予測することができる。

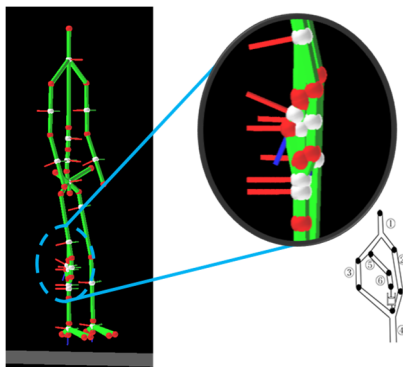


図2 閉リンク構造膝継手着用モデル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計31件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takayuki Maruyama, Takashi Nakamura, Mitsumoto Atsuko, Masato Maeno, Tosiaki Miyati, Naoki Ohno, Hisashi Naito, Yoshiko Tobimatsu
2. 発表標題 Shape measurement of the transfemoral residual limb on standing magnetic resonance imaging: A preliminary study with a single subject
3. 学会等名 ISPO 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内藤尚
2. 発表標題 歩行の神経筋骨格モデルと支援機器開発への展開
3. 学会等名 2019年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩切悠河, 内藤尚, 田中志信
2. 発表標題 9軸センサを用いた身体運動計測のための軸合わせ補正アルゴリズム
3. 学会等名 LIFE2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内藤尚, 谷本 龍馬, 大崎謙悟, 田中 志信
2. 発表標題 順動力学シミュレーションを用いた義足膝継手の機能が歩行運動に与える影響の検討
3. 学会等名 日本機械学会2019 年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横野拓也, 田中怜弥, 内藤尚, 田中志信
2. 発表標題 立位MR画像を用いたヒト足部骨格の荷重による位置姿勢変化の計測
3. 学会等名 R1年度日本生体医工学会北陸支部
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平野靖治, 内藤尚, 田中志信
2. 発表標題 徒手ROM訓練支援システム用模擬脚のためのサーボモータによる関節受動抵抗の再現
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越学生会 第49回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山西豊, 内藤尚, 田中志信
2. 発表標題 三次元有限要素解析に基づく義足ソケットの適合性評価に関する研究
3. 学会等名 LIFE2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内藤尚
2. 発表標題 歩行の神経筋骨格モデルと支援機器開発への展開
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関根広大, 内藤尚, 田中志信
2. 発表標題 ウェアラブル慣性・地磁気センサによる身体姿勢計測のための局所座標補正アルゴリズム
3. 学会等名 第29回バイオフロンティア講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内藤尚, 谷本龍馬, 大崎謙悟, 田中志信
2. 発表標題 義足歩行シミュレーションを用いた大腿義足膝継手の機能評価
3. 学会等名 第34回日本義肢装具学会学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内藤尚, 谷本龍馬, 大崎謙悟, 田中志信
2. 発表標題 順動力学歩行シミュレーションモデルを用いた大腿義足膝継手機能の評価
3. 学会等名 第31回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hisashi Naito
2. 発表標題 Simulation and evaluation of prosthetic walking based on neuro-musculo-skeletal model
3. 学会等名 第31回バイオエンジニアリング講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山西豊, 内藤尚, 田中志信
2. 発表標題 義足ソケット-断端間の三次元有限要素解析に関する研究
3. 学会等名 日本生体医工学会平成30年度北陸支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内藤尚, 関根広大, 岩切悠河, 田中志信
2. 発表標題 ウェアラブル磁気・慣性センサを用いた身体運動計測におけるキャリブレーション手法の検討
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第56期講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内藤尚, 谷本龍馬, 野川雅道, 田中志信
2. 発表標題 閉リンク機構を持つ義足膝継手を用いた大腿義足の運動解析
3. 学会等名 日本機械学会第30回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 内藤尚
2. 発表標題 計算運動バイオメカニクスと医療福祉分野への応用
3. 学会等名 日本実験力学会特別講演会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 南蒼一郎, 田中亜実, 内藤尚, 田中志信, 野川雅道
2. 発表標題 運動時の心機能変化メカニズム解明を目指した統合モデルの構築 -運動時における冠血流と心拍動の動態シミュレーション-
3. 学会等名 日本生体医工学会平成29年度北陸支部大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 関根広大, 内藤尚, 野川雅道, 田中志信
2. 発表標題 9軸センサを利用した身体姿勢推定アルゴリズムの精度検証
3. 学会等名 スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 内藤尚
2. 発表標題 Computer-Aided Rehabilitation Engineering 基盤技術構築に向けた取り組み
3. 学会等名 スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 南蒼一郎, 内藤尚, 野川雅道, 田中志信
2. 発表標題 運動時の心機能変化メカニズム解明を目指した運動器系・循環系統合モデルの構築 -冠循環のモデル化と心拍動時の循環シミュレーション-
3. 学会等名 日本機械学会 第28回バイオフィロントニア講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 林恭平, 内藤尚, 野川雅道, 田中志信
2. 発表標題 ヒト足部の立位荷重/抜重時の詳細骨格構造の挙動解析
3. 学会等名 日本機械学会 第28回バイオフィロントニア講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 内藤尚, 谷本龍馬, 野川雅道, 田中志信
2. 発表標題 数値シミュレーションを用いた義足膝継手機能評価の検討
3. 学会等名 第33回日本義肢装具学会学術大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 楠本岳士, 内藤尚, 野川雅道, 田中志信
2. 発表標題 義足慣性パラメータ推定システムの測定誤差が推定精度に与える影響の検討
3. 学会等名 LIFE2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hisashi Naito, Ryoma Tanimoto, Masamichi Nogawa, Shinobu Tanaka
2. 発表標題 Evaluation framework of prosthetic knee joint performance using dynamical simulation
3. 学会等名 XXVI Congress of the International Society of Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Naito, K. Hase, M. Tanaka
2. 発表標題 Computational Analysis for Energy Consumption Rate of Hip Disarticulation Prosthetic Walking
3. 学会等名 The 8th Asian Conference on Multibody Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 内藤尚
2. 発表標題 動力学シミュレーションを用いた義足膝継手の動力学的特性評価法の検討 - 閉リンク機構に対応したモデルの導入 -
3. 学会等名 第37回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 大島遥平, 内藤尚, 田中志信, 野川雅道
2. 発表標題 超音波画像を用いた運動器系軟部組織の弾性分布の取得手法の開発
3. 学会等名 平成28年度日本生体医工学会北陸支部大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 内藤尚, 大崎謙悟
2. 発表標題 運動シミュレーションを用いた閉リンク構造をもつ義足膝継手の評価手法の検討
3. 学会等名 第29回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大見泰介, 内藤尚, 野川雅道, 田中志信
2. 発表標題 9軸センサ情報から姿勢を推定するカルマンフィルタを用いたアルゴリズムの提案とその精度検証
3. 学会等名 平成27年度日本生体医工学会北陸支部大会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 永濱敏樹, 内藤尚, 大野直樹, 宮地利明, 田中正夫
2. 発表標題 立脚期における後足部の運動が足関節モーメントに与える影響に関する計算解析
3. 学会等名 日本機械学会第28回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 永濱敏樹, 内藤尚, 大野直樹, 宮地利明, 田中正夫
2. 発表標題 立脚期における足関節モーメント発生機序の数値シミュレーションによる考察
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第91期定時総会講演会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	中村 隆 (Nakamura Takashi) (40415360)	国立障害者リハビリテーションセンター(研究所)・研究所 義肢装具技術研究部・義肢装具士長 (82404)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	田中 志信 (Tanaka Shinobu) (40242218)	金沢大学・フロンティア工学系・教授 (13301)	