

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26282004

研究課題名(和文) 障害者スポーツのための義肢装具のデザイン及び設計製作手法の研究

研究課題名(英文) Research on Design and Manufacturing Methodology of Prosthetic Legs for Para-Sports

研究代表者

山中 俊治 (Yamanaka, Shunji)

東京大学・大学院情報学環・教授

研究者番号：60528917

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：義足アスリートの運動状態を計測し、既存の義足の動的な力学特性などを推定した。また義肢装具士によって手作業で作られた既存の義足の3次元計測を行った。計測した結果を基に競技に最適化し軽量性と審美性を兼ね備えた義足をデザインし、ドライカーボンの三次元成形を駆使した試作を行った。制作した義足を運動解析の結果を基に強度試験を行い、安全性が十分でない箇所を再設計・製作して試作、試験を繰り返し、競技での使用に耐えうる義足のデザイン開発を行った。一連のプロセスを通じて、3次元計測と3次元設計システムを用いた義足のデザイン手法を確立した。また、開発した義足および製作プロセスを国内外の展示にて発表した。

研究成果の概要(英文)：Authors analyzed dynamics of an athlete who use prosthetic leg, and estimated dynamic mechanical property of an existing prosthetic leg used by the athlete. Further, we measured 3-dimensional shape of the existing prosthetic leg manufactured by the prosthetist. Based on these measurement and estimation, we designed the prosthetic leg which has both lightness and beauty, optimized for the race. We developed a prototype using 3-dimensional manufacturing of dry-carbon. We tested its durability and redesigned about the part which is not safe enough, and improve its design with repeat of design and tests. Authors established the design process for prosthetic legs which use 3-dimensional measurement and 3-dimensional design system. Moreover, we exhibited the prototype and the process of this research in the exhibition held in Japan and overseas.

研究分野：デザインエンジニアリング

キーワード：デザイン 義足 バイオメカニクス

1. 研究開始当初の背景

(1) 義足デザインの現状

第1次大戦後の大量の切断者に対応すべく開発された、量産型接続部品と金属のパイプを用いたモジュールシステムが、現代の義肢装具製作の主流である。このシステムは、多様な切断状況に対応した安価な義足の供給を可能にしたが、一方で、組み上げられた義足の外観に美的配慮がなく、その無骨さがノーマリゼーション阻害の要因になっている。スポーツ用義足においても既存のモジュールの流用が主流であり、無骨な外観とともに、安全上の問題も指摘される。また、切断者の残存下肢と義足を接続するソケットは、義肢装具士の職人的な技能に依存しており、安定的に高品質なデザインを実現する方法は確立されていない。

(2) 義足スポーツについてのバイオメカニクス研究

近年は義足走行のエネルギー効率に関する論文が欧米の研究者を中心に数多く提出されている。その中でも保原らの研究は、義足走行のメカニズムだけでなく、練習方法などについても示唆的な結論を導いており、アスリートにとっても有用な研究であると言える。

(3) 本研究代表者及び共同研究者の過去の実績と残された課題

本研究の研究分担者らは2008年から「美しいスポーツ用義足プロジェクト」に取り組んできた。2009年、2010年には2年連続で義肢装具メーカー今仙技術研究所、鉄道弘済会とともに厚生労働省障害者自立支援プロジェクトに採択され、研究代表者個人としても、2年連続で三菱財団の助成金を獲得している。研究開始時までに下記の成果を収めている

- ・競技用板バネ、入門者用の膝継手、エアロダイナミックカバー、子供用のスポーツ義足などを開発し、障害者スポーツ振興に貢献した。
- ・パラリンピック日本代表の高桑早生選手のための陸上競技用義足を開発し、2013年には国内外の競技大会で実践投入された。
- ・広範なフィールドテストを行い、義足走行時の加速度、加重の測定と解析を行った。
- ・日本義肢装具学会やAH2011などで発表を行い、これらの開発を記録した書籍「カーボン・アスリート」（白水社）を出版。

マクロな視点で見ると、前述の成果は単発的な商品開発や事例解析に留まっており、体系的かつ汎用的な設計手法の確立には至っていない。この点が、開始時点での研究に残された課題である。

2. 研究の目的

本研究代表者らは2008年より、障害者スポーツのための「機能的で美しい競技用義足」を開発し、競技用膝継手や板バネを製品化に成功し、また、パラリンピック日本代表選手のための軽量かつ流麗な外表面のソケットを開発し、実戦でも使用されるまでに至った。本研究ではこれらの実績をふまえた上で、広く障害者に機能的で美しい義肢装具を供給するために、バイオメカニクスの基礎研究を行い、3D計測、パーソナルファブリケーションなどの先端技術を駆使しセミオートクチュールの設計開発手法を確立する。2016年のパラリンピックでの実践投入を目指し、2020年の東京パラリンピックまでにスポーツ用義肢の国産化に弾みを付けたい。

義肢装具はほとんどこれまでデザイナーが関与してこなかった分野である。特に義肢製作の現場では人体を模倣する事が外観上の第一目標とされており、機能的な合理性と人工物としての美しさを両立させるという近代デザインの観点は導入されてこなかった。義肢装具を美しくかつ機能的にデザインする事の意義は、使用者であるアスリートのパフォーマンスを向上させるばかりでなく、それによって演出される美しいアスリートの活躍が多くの人に鑑賞され、メディアを通じて周知される事により、障害者を自然に受け入れるための精神的、社会的な素地が生まれる事にある。

本研究において目指す具体的な成果は以下の通りである。

- 1) 超小型3軸加速度、3軸ジャイロセンサを用いて義足の運動解析を行い、義肢装具開発のための基礎知見を得る。
- 2) 三次元計測を使った断端形状の計測から3Dプリンティング型による三次元カーボン成形間での行程をシステム化し、軽量、高性能のスポーツ用義足を容易に製作できるプロセスを提案し、実践検証する。
- 3) 個人への最適化と、工数の少ない製作を両立させるセミオートクチュールのデザイン手法を確立し、今後拡大する身体親和性の高いパーソナルツールを安定的に供給する社会システムを構築する。

3. 研究の方法

ターゲットとなるアスリートを複数名選定し、それぞれの運動状態を三次元計測し、使用している既存の義肢の動的な力学特性などを推定する。この知見を元にそれぞれに最適化した義肢をデザインし、3Dプリンティングとドライカーボンの三次元成形を駆使して試作を行う。この試作機を用いてフィールドテストを行い計測、解析してフィードバックする。これらの実践を通じて設計開発手法を検証し、システム化、体系化を試みる。

本研究は、計測と解析→設計製作→フィールドテスト→計測と解析のループを回しながらそれぞれの手法の妥当性を検討し、最終的に統合してこのループ自体を義肢装具の開発手法として定着させる。

(1) 計測と解析：小型3軸加速度センサ、3軸ジャイロセンサによる精密計測と力学解析
仰木らが開発してきた高クロック数の無線の超小型3軸加速度センサおよび、3軸ジャイロセンサを装着する事により、健常者の足部よりも接地時間が短く、はるかに大きな加速度を発生する義足の挙動を精密計測し、設計に必要な知見を得る。

(2) 設計製作：3次元計測と3次元プリンタによるドライカーボン製義足の製作
従来は義肢装具士がソケットの内外面を製作してきたが、義肢装具士の繊細な調整技能を内面に生かしつつなめらかな外観を実現するためにドライカーボンの2重構造を取る。義肢装具士の技能による1次ソケットを3次元計測してデータ化し、3DCAD上で外観の造形を行う事により、ユーザーへのきめの細かいサービスを維持したままでデータによる一元的な美しい造形を可能にする。
この3次元データを用いて、3Dプリンタにより型を製作し、ドライカーボンを内外一体で成形する事によりカーボン型製作を効率化し、コストを抑える。

(3) フィールドテストと実践投入。
本研究の特色は、理論の構築を実験室だけで確かめるのではなく、フィールドテストを行い、実際のスポーツ大会に実践投入しつつ、最終的にはパラリンピックという場で検証し、あるいはその成果を世界に向けてアピールすることを目標とする点にある。試作機の開発を行った後フィールドテストを行い、テストの結果をフィードバックとして義肢、装具の機能と美的観点からの完成度を上げる。
また義肢装具を使用する障害者スポーツにおけるスポーツ工学状の理論的支柱を構築し、それぞれの事情に応じた個別最適化をシステムチックに行うセミオートクチュールのデザイン手法の一般化を試みる。

4. 研究成果

(1) モーションキャプチャによる運動の解析
義足のデザイン開発をはじめると同時に、走行時にかかる力や必要な強度を推定するため、モーションキャプチャによる運動の解析を行った。

下腿義足使用の義足アスリートの義足および下半身にマーカーを取り付け、トレッドミルを用いて測定を行った。計測時の走行速度は8km/h、モーションキャプチャのサンプリング周波数は250Hzであった。この実験によって走行時の義足の3次元的な軌跡を得ることが出来、また走行時の板バネのたわみ量も計測できた。

一方で、片足義足では左右の脚を同じスピードで動かすことが難しく、被験者もトレッドミルを普段使用しないため、走行速度が8km/hしか出せず、短距離の全力疾走時の力を推定するには不十分で、強度要件を決定するためには陸上競技用のトラックを疾走しての実験が必要なことが判明した。

(2) 板ばねのたわみ量の計測による荷重の推定

全力疾走時に義足にかかる力を推定するために、先の実験では走行速度が不十分だったため、陸上競技用のトラックで板ばねのたわみ量の計測を行った。屋外のトラックでは、赤外線カメラを用いるモーションキャプチャでの計測が難しいため、新たな実験方法を設計し、実施した。

使用している板ばねはCFRPの積層で作られており横方向の断面は一定のため、横方向から走行時の様子を高速撮影し、画像から板ばねのたわみ量を推定した。撮影は480fps、遠近感による歪みの影響を少なくするため望遠端で記録した。映像の分析から、着地した瞬間から板ばねが地面を離れるまで58フレーム(0.12秒)であり、先のモーションキャプチャ実験から板ばねが最もたわむのは地面についている時間の中央値であることが予測されたため、着地後29フレーム(0.06秒)時点での板ばねの形状を抽出し、非変形時の板ばねの形状と比較した結果、鉛直方向に約96mmたわんでいることがわかった。

選手が使用している板ばねはÖssur社による既成品で、本研究でも板ばねは開発せずこの製品を用いるが、力学的なデータは開示されていないため、たわみ量と荷重の関係も実験により推定した。荷重を推定するため、万能試験機を用いて板ばねを鉛直方向に圧縮し、ストロークと荷重の関係を計測した。圧縮速度による影響をみるために、5mm/min、50mm/min、100mm/minの3種類の速度で実験を行ったが、結果に速度による変化はなかったため、ばね定数が一定に求められ、この結果、上記走行実験で板ばねに加わった弾性力は約4.6kNであることがわかった。作用反作用の法則により、本研究の対象となるソケッ

ト部位に対しても、この大きさの荷重がかかっていると推定できた。

(3) 既存義足の形状計測および 3D データでの再構成

本研究では、義肢装具士が専門知識と経験によって作成した義足内部形状を活かしながら、3DCAD を用いてデザインを行い、再現・複製可能な製造方法を実現することを目的とするため、まず義肢装具士によって作られた義足を計測し、デジタルデータ化を行なった。

本研究では、3次元デジタル化と3次元CTスキヤンの2種類の方法で計測したデータを統合することで義足形状のデジタルデータを得た。それぞれの装置の計測精度は0.1mm程度であった。3次元デジタル化では対象物に縞状のパターンを照射し、カメラで対象物の表面形状を計測するものだが、義足の使用感に関わる内部形状はパターンをむらなく照射することが困難なため十分な計測は出来なかった。そのため、X線を用いるCTスキヤンによって断面形状を計測することで内面も含めた形状を計測し、デジタル化による計測データとソフトウェア上で組み合わせることで既存義足のデジタルデータを得た。デジタル化による計測データを並行して用いたのは、ソケットだけでなく板ばねとの接続、位置関係を計測し、コネクタ部品の設計に反映するためである。

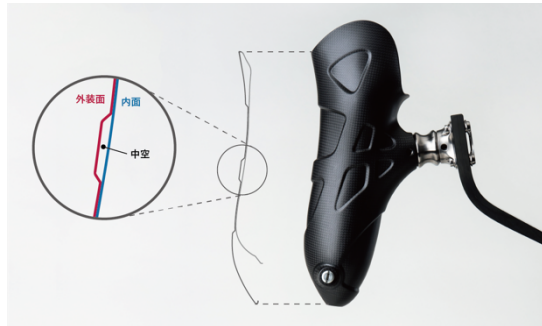
計測によって得られたデータは点群データを基にしたポリゴンデータだが、3DCADソフトウェアでデザインを行うためにはサーフェス（制御点により表現されるパラメトリックな曲面）データで表現されるのが望ましい。ポリゴンからサーフェスを半自動生成するソフトウェアを用いて、編集が容易になるようなるべく少ないサーフェスに再構成した。このプロセスでは、形状表現を単純化するため形状に微小な変化が生じる。普段使用している義足との平均半径誤差が0.25mmより大きくなると使用者が違和感を感じ、修正の必要が生じる、という先行研究があったため、誤差が0.25以下になるよう形状修正を行った。再構成したソケット内面形状を3Dプリンタにて出力したもので、被験者による試着を行なったところ、違和感なく装着できるという反応が得られた。

(4) 3次元データによるドライカーボン製義足ソケットの製作

3次元計測した内面データを基に、3次元CADを用いて義足のデザインおよび製作を行った。義肢装具士によって作られた内面形状は、選手が着用するうえで最適な形状であるが、断端形状がベースになっており、洗練された美観を有しているとは言い難く、痛々しい印象を与え得る形状になっている。研究代表者らによる既存研究では、義肢装具士が制作したソケットに対して、外側に樹脂を盛り付け、彫刻することでなめらかな外観形状を得てい

たが、本研究では、余計な重量物を付加せずになめらかな外観を実現する製造方法の検討を行った。

義肢装具士が義足を製作する際、CFRPに樹脂を染み込ませたプリプレグと呼ばれるシートを型に巻き付けることで強度を持ったソケットを成形する。本研究では、CFRPに型を張り込みオートクレーブで焼結することで、樹脂中の水分を飛ばして同強度ながら軽量な成形品が得られるドライカーボンと呼ばれる手法を用いた。ドライカーボン製作に関して高い技術を持つ株式会社RDSに協力を依頼し、設計および製作を進めた。これまでの研究ではソケットは中実で作成していたが、ドライカーボンの薄肉で高強度になる特性を活かすため、なめらかな外装面と内面形状の間を中空にしなが、外装面の一部を内部形状に沿わせ、中空箇所をリブとして機能させる機能的なデザインを考案した（図1）。



(図1：ソケット外観写真と構造図解)

研究開始当初はドライカーボン成形のための型を3Dプリンタで製作する計画であったが、現状造形精度が充分でないため、型は切削にて製作した。

研究期間内に義足ソケットの製作は2回行った。初期試作の強度試験においてソケット外装のCFRP材と、ソケットに内蔵されたチタン製アダプタの接着がわずかに剥離し、走行の際選手のパフォーマンスへの影響が懸念されたため、ソケットの外装面形状は変更せずに内部構成の再設計を行なった。

(5) ソケットの外観形状に合わせたコネクタ部品のデザイン

切断者が断端に装着するソケットと板ばねの間には調整のためのコネクタや機械的締結を行う部材などの金属部品が用いられる。被験者が使用している義足はピラミッドアダプタと呼ばれる球体ジョイントを用いた調整機構をソケットとの間に2ヶ所有しており、2つのピラミッドアダプタを備えたコネクタ部品と、コネクタと板ばねを締結するアダプタが用いられている。これらの部品は日常義足に用いられる既成部品を使用しており、新たにデザインしたソケットの流麗な印象を損なう外観であったため、これらの部品も再デザインを行なった。

ピラミッドアダプタは球体ジョイントを用い

て調整し、4本のセットスクリューによって締結を行うが、被験者が使用している義足ではソケットと板ばねの中間部のコネクタに2セット8つのセットスクリュー用の穴が空いており、機械的で無骨な印象になっていた。そこで、本研究ではアダプタのオスメスを入れ替えて設計し、ソケット側と板ばね側に調整用のネジ穴を設け、コネクタにはネジ穴をなくす設計を考案した。また、被験者の義足の板ばね側の金属部品がピラミッドアダプタで調整が出来ない板ばねのねじり方向の回転の調整機構を有していたため、この調整機構をコネクタ側にもたせる新たな設計手法を開発した。

また、コネクタに合わせ、板ばねに取り付けてコネクタとの締結を行うアダプタもなめらかな曲面をもった部品として新たにデザインを行った。この部品は4本のネジで板ばねに締結し、背面は従来ナットによって留めていたが、この4つのナットを置き換える形で、ソケットの流麗な曲面に調和のとれるチタン製のアダプタを新たに開発、デザインを行った(図2)。



(図2：新たに開発したアダプタ)

これらの金属部品は、汎用的に用いられるアダプタおよびネジの規格に合わせて作成しており、外観も有機的でなめらかな曲面を持ちながらシンプルな形状になっているため、本研究で作成したソケット以外にも使用することが可能である。

(6) 実験と再設計のフィードバックによる設計手法の検証

本研究では、3次元データおよびバイオメカニクス計測を用いた義足の試作→フィールドテスト→解析、検証を繰り返すことで設計手法の確立を目指した。

3次元デジタル化およびCTスキャナから既存義足の3次元データを取得→ドライカーボンによるソケットおよび金属アダプタの設計・製作→実験により推定した荷重を基にした強度試験、というプロセスを行なった時点で、強度試験の際(5)で新たに設計したコネクタ部品の強度が足りないことが判明し、構造の再検討およびコネクタ単体での強度試験実施の必要が生じた。被験者への試着を行い、外観に対する好意的なフィードバックは得られ、また内部形状の装着感および板ばねとの位置関係についても問題ない事が確認できたが、強度が不足しており走行試験を行うこと

は出来なかった。

研究開始当初の想定では被験者が着用して試走を行うフィールドテストを複数回実施することを想定していたが、全く新しい設計手法を用いて制作した義足で試走可能な強度を一度の試作で実現するのは困難であった。また、選手の試合や調整等のスケジュールとの兼ね合いでフィールドテストの実施が難しく、本研究内で十分なフィールドテストを複数回行い、パラリンピック等の実戦で義足を使用するには至らなかった。これら研究計画どおりに遂行できなかった点は、実際に選手が競技で用いる道具を開発するうえでは重要な点であり、今後の研究推進に活かしたい。

研究期間内に、コネクタ部品は初期試作→強度試験→剛性に不安があった部分の再設計を複数案作成→強度試験→フィールドテスト用モデルの作成、ソケット部分も、初期試作→強度試験→内部構造のリファイン→強度試験およびフィールドテスト用モデルの作成、まで至った。また、その間に並行して義肢装具士が従来の方法で制作した義足の破壊試験、他の研究者からの走行時の床反力データの提供を受けるなど、設計要件についても更新しながらフィードバックループを施行し、走行時の荷重に十分耐えられ、フィールドテスト可能なモデルの完成に至っており、本研究で試行した設計手法は有効だったといえる。

(7) 国内外の展示での研究成果の对外発表
本研究期間では競技会への実践投入は出来ず国際大会での成果発表には至らなかったが、製作した義足および研究のプロセスの一部を、展示会を通じて広く社会への講評を行った。2015年6月には研究代表者の所属する東京大学生産技術研究所内で展示「Designing Body 美しい義足をつくる」展を行い、本研究の成果や以前の研究、また並行して進めている義足に関する研究成果の発表を行い、約1500名の来場者が得られた。ドライカーボンで製作した本研究の一時試作はこの展示にて初披露を行なった。また、バイオメカニクス実験の第一弾として行なったモーションキャプチャ実験の結果を可視化する映像作品などの展示も併せて行なった。

2016年10月には、文化庁が主催し国立新美術館にて開催された「ここから」展の一部として「Designing Body 美しい義足をつくる」を再展示し、この展示には約5700人の来場者



が得られた。

(図3：Designing Body展)

また、2016年4月～9月にイタリアミラノ、トリエンナーレ美術館にて行われた「NEO PREISTORIA 100 Verbi：新・先史時代 100の動詞」展の一部として、本研究で製作した義足が展示され、海外に対しても最新義足デザインを示すことが出来た。

2018年からは、外務省が世界三都市に開設した日本の文化発信拠点 JAPAN HOUSE の巡回展として研究代表者が企画した展示が行われ、その中の一展示として本研究の成果およびプロセスが展示される。研究成果報告時点では一都市目のサンパウロの展示が開始して2週間程度であり、約25,000人の来場を得ており、今後引き続き発表を続ける予定である。



(図4：JAPAN HOUSE での成果および研究プロセスの展示)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：

番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.design-lab.iis.u-tokyo.ac.jp/exhibition/DesigningBody/works.html>

<https://www.youtube.com/watch?v=VDXmL2oJQRg&t=5s>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山中 俊治 (YAMANAKA, Shunji)
東京大学・大学院情報学環・教授
研究者番号：60528917

(2) 研究分担者

仰木 裕嗣 (OHGI, Yuji)
慶應義塾大学・政策・メディア研究科・教授
研究者番号：90317313

(3) 研究協力者

臼井 二美男 (USUI, Fumio)
鉄道弘済会義肢装具サポートセンター

高桑 早生 (TAKAKUWA, Saki)