

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21H03760
研究課題名（和文）トッパスリート用義足のデジタル製作プロセスによる個人最適化と普及モデルへの展開

研究課題名（英文）The development of digitally manufactured, individually optimised prosthetic legs for top athletes and the diffusion model for this innovative approach

研究代表者
山中 俊治（YAMANAKA, Shunji）
東京大学・生産技術研究所・特任教授

研究者番号：60528917
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：AM（Additive Manufacturing：3Dプリンティング）製陸上競技用義足の競技会への実戦投入と、より多くの人に機能的で美しい義足を提供できるようにするための設計・製作手法の一般化を目指す。すでに、実走行可能なモデルの製作は完了しているが、開発したAM製の義足ソケットは、その構造から、板バネの取り付け角度や成長に伴うソケット内面の変化など、現場での細かな調整には対応できていない。そこで、競技レベルが異なるアスリートたちへの義足の提供と長期の使用を通して、競技用義足ソケットに求められる即応性、個人最適化の要件を明らかにし、それらに対応可能な設計手法と設計支援システムを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

AM製陸上競技用義足ソケットにおいては、その性能と個人最適化、細かな修正に対する即応性と体制の構築などに関してそれを実現している例はない。また、義肢装具含め、AM技術を用いたマス・カスタマイズ製品が一般に普及しているともまだ言えず、そのため、本研究の遂行は、アスリートに機能的で美しい義足を提供することによるパフォーマンスの向上やスポーツを志す多くの切断者のサポートに繋がるだけでなく、自分の身体や好みにフィットした製品を、多くの人々が容易に手に入れられる社会を実現するためのデザイン手法の発展に貢献できると考える。

研究成果の概要（英文）：The aim of the project is to introduce running-specific prostheses made by AM (Additive Manufacturing: 3D printing) into competitions and to generalize the design and manufacturing method to enable more people to have functional and beautiful prosthetic legs. Although we have already completed the fabrication of a model that can be used in actual running competitions, the prosthetic leg socket made of AM that we developed, due to its structure, does not support detailed adjustments in the field, such as the angle of attachment of leaf springs and changes in the inner surface of the socket as the athlete grows. Therefore, through the provision and long-term use of prosthetic legs by athletes at different levels of competition, we clarified the requirements for immediate adaptability and individual optimization of running-specific prostheses sockets, and developed a design method and design support system that can accommodate these requirements.

研究分野：デザインエンジニアリング

キーワード：陸上競技用義足 個人最適化 Additive manufacturing 設計自動化

1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは協力研究者らと共に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。その成果として、陸上競技用義足ソケット、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、2013年にはパラリンピック日本代表の高桑早生選手が実競技で使用している。しかし、上記成果の義足ソケットは、義肢装具士が製作した義足ソケットをウレタンフォームでカバーしたのち、削って形状を整えたものであり、安定的な品質を実現した汎用的な設計手法では無く、構造的な合理性にも課題があった。そこで、2014年からはハンドメイドが主流であった義足ソケットの設計製作方法をデジタル化し、AM (Additive Manufacturing) 製陸上競技義足の開発に取り組んできた。すでに、実走行可能なモデルの製作は完了しており、強度、剛性、軽量性においては従来工法で製作された義足よりも高性能なものになっている。また、従来工法の義足ソケットでは設計が困難であった、質量や重心位置などをアスリートの嗜好に合わせることも可能となっている。

しかし、開発したAM製の義足ソケットは、その構造から、板バネの取り付け位置や角度(アライメント)の現場での調整には対応できていない。また、断端形状は、時期や身体の成長、むくみなどで変化するため、必要に応じてソケット内面を修正する必要がある。従来は義肢装具士らの手作業によりその場で修正されてきたが、現状のAMはそのような即応性に欠ける。ソケット設計の効率化を目的とした研究やCADシステムの開発も行われているが、義足のアライメントや質量、美観やスタイリングなど個人最適化を幅広く反映するための手法は確立されておらず、デザイナーがユーザーそれぞれに対して美観・機能を備えたソケットの設計を行う必要があるため、属人性が高く時間的コストの大きいプロセスとなっている。

2. 研究の目的

本研究では、AM製陸上競技用義足の競技会への実戦投入と、より多くの人に義足を提供できるようにするための設計・製作手法の一般化を目指す。そのために、競技レベルが異なるアスリートたちへの義足の提供と長期の使用を通して、競技用義足ソケットに求められる即応性、個人最適化の要件を明らかにし、それらに対応可能な設計手法と設計製作支援システムを構築する。

3. 研究の方法

(1) 即応性に関するデザイン手法の検討

競技歴20年以上の選手1名と、1~2年程度の選手2名を対象にAM製の義足を提供し、試走や練習での使用の中で、義足のアライメントなどに関するニーズを把握し、調整機構やアライメントの設定手法、設計データの簡易な修正方法などの検討をおこなう。また、ソケットのフィット感の変化への対応について、担当義肢装具士の指示の元、ソケット内面(もしくは、断端やその石膏モデル)のデータ修正をおこなう。修正結果を義足ソケットの完成データに即時反映できるように、ソフトウェアの改良や設計プロセスを明確化する。

(2) 設計自動化手法の開発

美観と機能性を両立した義足のパーソナライゼーションを支援できるようなモデリングツールを開発する。具体的には以下の通りである。

- ・デザイナーのモデリング、スタイリングにおける冗長な作業を自動化。
- ・質量評価用義足を用いた走行結果をもとにした目標質量の反映。
- ・デザイナーが経験的・直感的に行なっているスタイリングから美観に関わる要素を抽出し、パラメトリックな調整によって美観のコントロールが可能なシステムを設計・開発。
- ・開発したシステムを統合し、GUIを実装してユーザーテストを行い、設計プロセスにおける時間的コストや美観の観点から評価する。

(3) 競技会での使用と検証

競技歴の短い選手1名を対象にAM製の義足を新規に制作する。ソケットの重さが調整可能な評価用義足を用いて選手の好みの重さを計測後、(2)で開発したデザインシステムを用いて本義足を制作する。選手による練習や競技会でのAM製義足の使用を通じて成果を検証し、フィードバックを得る。

4. 研究成果

(1) 即応性に関するデザイン手法の検討

アライメント（義足ソケットと板バネの取り付け角度）を簡易的に調整可能するために、ソケットと板バネの間に挟むスペーサーと、板バネ長さを調整できるようにソケットを結合するボルト穴を長穴に加工した板バネを用意・製作した。既にアライメントが決まっている競技歴の長いトップアスリート 1 名の場合は、参考とした従来工法の義足のアライメントを元に AM 製の義足を製作したことで、アライメントの微調整は不要であった。アライメントが決まっていない競技歴の短いアスリート 2 名においては、試走段階で頻りにアライメントを調整する必要があることを確認した。その際、スペーサーと長穴を空けた板バネでアライメントの調整は問題なくおこなえたため、アライメントの現場での調整に関してはスペーサーでおこない、アライメントがある程度固まった段階で、本ソケットの設計に反映させる方法が有効かと考えられる。

ソケットのフィット感の変化への対応については、切断してから日が浅い義足使用者や競技歴の短いアスリートにおいては断端が細くなる傾向があり、該当する 1 名においては、AM 製ソケットの使用後半年程度でソケットの不適合が確認された。簡易的には、従来工法での調整と同様にソケット内面にパッド等を貼り付けることで対応し、大きく内面を修正する場合は、ソケット設計 CAD の Fit-Designer (ELYSIUM 社) を用いて陽性モデル（ソケット内面形状）を修正し、AM 製ソケットの内面データと置き換えることで、比較的容易に対応できることを確認した。

(2) 設計自動化手法の開発

① AM 義足の設計プロセス

現状の AM 義足の設計は図 1 のようなプロセスでおこなわれている。まずメッシュデータ (Mesh) として読み込んだ陽性モデルを CAD 上で扱えるサーフェスデータ (Srf) に変換する。その後、ソケットの上端形状であるリムライン、ソケットの内面形状 (InnerSrf)、外面形状 (OuterSrf) をモデリングし、板バネとの接続部をモデリングすることでソケット全体が完成する。

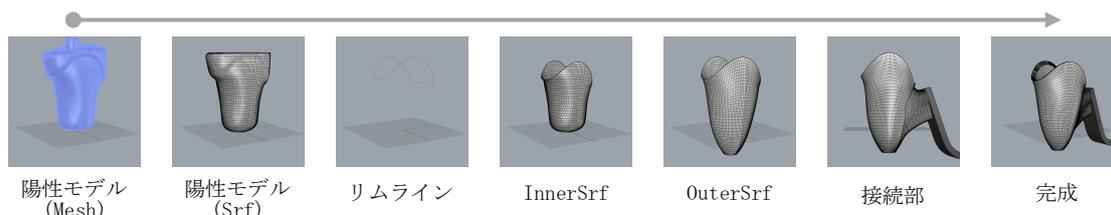


図 1 義足ソケットのモデリングプロセス

② ソケットの設計要件の抽出

ソケットのモデリング工程は、制約の中でスタイリングデザインを行う必要があるために、作業の手戻りが生じることが多く、そのたびに時間を浪費する可能性がある。また、スタイリングの調整はデザイナーが感覚的におこなっており、デザイナーが何をコントロールしているかを明瞭にする必要があった。

ソケットの設計における構造的要件としては、膝蓋骨の下部において体重を支えられるような面があること、膝関節の可動域を狭めないために膝裏が切り欠かれた構造をしていること、強度上必要な厚さを有していることなどがあげられる。機能的な要件としては、使用者の好みに応じたソケットの質量があげられる。美観に関する要素としては、義足設計経験があるデザイナーへのヒアリングから、曲面の曲率分布が偏っていないこと、ソケット外面を構成する曲線が陽性モデル（ソケット内面形状）に沿いながらも滑らかであること、また、スタイリングを決める要素として、ソケットを正面・側面から見た時の輪郭の対称性 (Symmetry) と曲面の曲率変化の度合い (Sharpness) があることを抽出した。

③ デザインシステム的设计

ソケットの設計要件をもとに、陽性モデル (mesh) の読み込みと板バネの配置から、InnerSrf、OuterSrf、接続部を自動生成するデザインシステムを制作した。なお、OuterSrf を構成する輪廓線をパラメトリックに調節することで、スタイリングや質量を調整できるようにしている。スタイリング調整に関わるパラメータとしては、Symmetry、Sharpnessなどを定義した。CAD ソフトは Rhinoceros (Robert McNeel & Associates) を使用し、システム的设计・実装には Rhinoceros のプラグインである Grasshopper を利用した。図 2 は制作したデザインシステムの GUI 全体図である。①はモデル形状調整用の GUI (GUI Modeling)、②はモデル質量や厚さ分析用の GUI (GUI Analysis)、③は生成されたモデルが表示される CAD ウィンドウ (Rhinoceros) である。

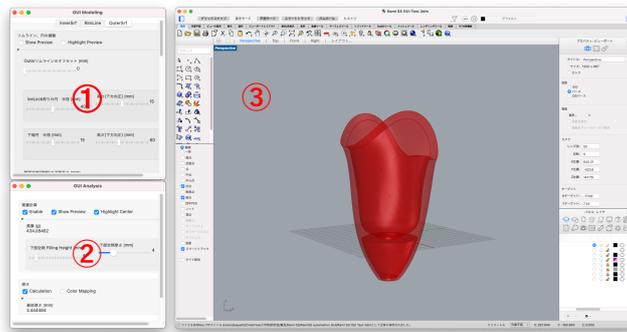


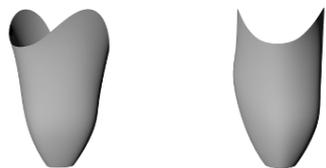
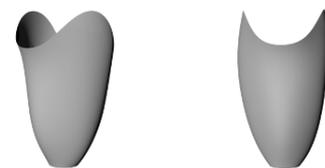
図2 デザインシステムのGUI

④ ユーザーテスト

義足ソケットのモデリング経験があるデザイナーを対象として、開発したデザインシステムのユーザーテストを実施した。実際のソケット設計を想定した数値条件(目標質量 $380 \pm 10\text{g}$ 、ソケット最低厚さ 3mm 以上)の下、与えられたパーツを利用して外面形状のモデリングを行うものとした。なお、ユーザーテストに時間制限は設けず、モデルが数値条件を満たし、モデルのスタイリングが整っているとデザイナーが判断した時点で終了とした。対照実験として、開発したシステムを用いない、従来のCADのみでのモデリングもおこなった。

ユーザーテストの結果を表1に示す。デザインシステムを用いた方が、CADのみでのモデリングに比べて約40%の時間で設計が可能であり、曲面の修正や質量の調整に要する時間が削減されたと考えられる。また、制作されたソケットのスタイリングに違いは見られるものの、デザインシステムを用いたモデルも滑らかな曲面であることがわかる。実験後のインタビューとして、システムを利用したモデリングでは、短時間で複数のモデルを作ることができるため、生成した複数のモデルを比較し、スタイリングの傾向を見ながら形状検討を行うことができたことや、Symmetry、Sharpnessといったパラメータによってスタイリングの印象を変えられることがデザイナーのおこなう調整に近いなど、スタイリング調整や美観に関しても一定の評価が得られた。

表1 ユーザーテスト結果 (所要時間と制作されたモデル)

CADのみ	デザインシステム
約 3h50m	約 1h30m
	

(3) 競技会での使用と検証

開発したデザインシステムを利用したAM製陸上競技用義足「Rami Se」を制作した(図3)。ソケット質量は重さが調整可能な評価用義足を用いた走行テストの結果を踏まえており、設計の基本部分にデザインシステムを利用することで従来よりも短時間で選手に義足を提供することが可能であった。本義足は、2022年の全国障害者スポーツ大会のほか国内大会で利用された。ユーザーは、本義足を使用して走行記録を伸ばし、走行感の向上を示す意見も得られた。また、1年以上の使用においても破損等の大きな問題はなく実用上問題がないことが確認された。

また、2022年11月に東京大学生産技術研究所で開催された「未来の原画」展、2024年3月には、21_21 DESIGN SIGHTで開催された「未来のかけら：科学とデザインの実験室」にて本義足を展示し、研究成果を広く一般に公開した。



図3 Rami Se

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関