

# 障害者自立支援機器等開発促進事業

## 分担報告書

### 女性用大腿義足の開発

慶應義塾大学 山中デザイン研究室 山中俊治、辻勇樹、檜垣万里子

早川裕彦

開発要旨：右大腿切断の女性を対象とした女性用日常義足の開発。パーソナルファブリケーションという近年の工業生産手法の変化を受け、従来の日常義足製作における要件を再検討し、コンセプトモデルの設計を通じたビジョン提示を行う。

#### A. 開発目的

今回の右大腿切断の女性を対象とした女性用日常義足の開発では、従来の日常義足の基本構造、製作工程を再検討し、「見せる骨格義足」の可能性を提案することを目的とした。

これまで日常義足は、多種多様な切断者個別の問題、年齢、性別、脚の長さなどに対応するため、各パーツの規格化が行われてきた。また、健康保険が適応されないことから、安価に提供するため、生産性を追求することも大きな目的とされてきた。しかし、汎用的に設計されたパーツ群は使用者の身体的特性に完全に適合することはできない。特に接続部に用いられるアルミパイプ等のジョイントパーツは見た目に武骨で機械的な印象を見る人に与え、義足使用者が義足を見せること見られることに対する心理的障壁となっている可能性が考えられる。そのため、現状の日常義足は規格化されたパーツによって構成された骨格構造と呼ばれる義足の基本構造を、軟質発泡素材を用いて成形された本来の脚の形状に似せて成形された外装で覆い隠している。

このような背景から、本開発では日常義足の基本構造と、その製作工程を再検討を行い、規格化されたパーツを使用者の身体形状に適した設計を試みる。また、実際に大腿切断の女性を対象としたコンセプトモデルの製作を行うことにより、「見せる骨

格義足」という日常義足の未来像を具体的な形で提示することを目的とする。

以下に今回の開発における詳細な背景を記述する。

#### A-1 外装の機能と問題点

従来の日常用義足は複数の金属パーツから成る骨格義足を、軟質発泡素材を人間の脚の形に似せて成形した外装によって覆い隠されていた。外装の機能として大きく二点があげられる。一つは衣服を着た際の違和感の無いシルエットを作ること。二つ目は膝関節が可動する際、衣服が挟まり、破けるのを防ぐことである。

義足使用者の日常生活にとって非常に重要な役割を担っている外装であるが、一方でいくつかの問題も抱えている。膝関節との干渉により摩耗し、発泡素材の破片が関節の隙間に入り込み機能障害をもたらす問題や、夏場にソケットからしみ出した汗と破片が混合することにより異臭を放つといった衛生面での問題が報告されている。また、軟質発泡素材は経年変化をきたしやすい素材であることから、洗うこともできず、日々の生活の中で劣化しやすいことも大きな問題である。

#### A-2 調整機構の規格化と外観上の問題点

日常用義足では年齢、性別、脚の長さ、

切断原因、筋力など、多種多様な切断者個別の問題に対処するための調整機構の開発が大きなテーマであった。調整が必要な要素は大別すると以下の4つの機能に分けられる。

- 1:切断者の身体形状の差異に対応するための「長さ調節」
- 2:義足に適切な荷重を行うための「角度調整」
- 3:歩行動作の細かな違いに応じて選択が必要な「パーツの組み合わせ」
- 4:体重や活動度の違いに対応するための「強度調整」

この4つの課題に対処するために用いられている手法として「モジュラー構造」と「ピラミッドジョイント」があげられる。各パーツの規格化を図ることによって、1ではアルミパイプによる長さ調節が可能にしている。また、2に対しては全方位8°の角度調整が可能なボールジョイント、ピラミッドジョイントを用いることで対処している。3・4ではジョイントシステムの規格化が為され、膝継手、足部を個々人の歩行特性や活動度に合わせて選択し、組み合わせることが可能になっている。

これらの調整機構は、これまでの長い義足開発の歴史から求められた生産性、機能性への答えとして十分に要件を満たしている。しかし、それらの画一化した形状は義足の武骨で機械的な印象を形成する要因となっていることが考えられる。これを前述したいくつかの問題を抱える外装によって覆い隠すことは、必ずしも最良の解答とは言いがたい。

#### A-3 規格パーツの製作工程と近年の生産技術の変化

義足の規格パーツの製作には主にCNC (Computer Numerical Control) と呼ばれるコンピュータによる数値データ入力による加工法が用いられている。大衆に向けた工

業製品の場合は大規模なライン生産システムを組み上げ、型を用いて大量生産することにより生産性を高め、コストを下げている。しかし、義足の場合はユーザーの絶対数がそう多くはないため、このようなライン生産は逆に高価なものになってしまう。戦争がないこと、医療、交通の基盤が整っていることを理由に、世界的に見ても切断者数の少ない日本では、特に大量生産型の手法は適さない。そのため、現在でもCNCマシンを用いた単一生産が中心である。

近年、生産技術は大きな転換期を迎えており、コンピュータ上で作成した3次元データをそのまま出力する加工機械が多く流通し、一般化している。CAM (Computer aided manufacturing) コンピュータ支援製造と呼ばれるこのシステムの発展の先には加工機械の小型化、それに伴う低価格化、また操作の簡易化が存在し、三次元加工機や3Dプリンタ、光造型などの自由に三次元形状を出力する機械が小さな工房でも導入可能となってきている。少し先の未来には、これらの加工機械が並ぶ工房が各町に存在し、自分たちの生活に必要な物を最適な形で製作できる環境が当たり前になるという考えも存在する。「ほぼ何でも自分で作る」という考えを表すパーソナルファブ리케이션という言葉が、このような小規模の生産手法を表す言葉として、研究領域ではあるが徐々に浸透してきつつある。

今回の使用者の身体形状に適した設計で用いられる単一生産手法は、現在の日本における義足の生産方法と大差ない。パーソナルファブ리케이션という今後の生産手法の変化を鑑みても、コスト面などの現状の問題点は解決の余地があると考えられる。本開発はその一端として、個人に対応した義足製作手法のビジョンを提示するものである。

これら3つの大きな背景を元に本研究は「見せる骨格義足」というコンセプトを掲げ、今後の義足製作の変化を考慮した個人

に適応する義足のビジョンを具体的な形（非実動モデル）にし提示することを目指す。

#### B. 開発する支援機器の想定ユーザ

対象とするユーザは20代後半の右大腿切断の女性である。義足を見せること見られることに対する思いが最も強い層のユーザを対象とした。使用者はこれまで著名な義肢装具士である白井二美男氏（鉄道弘済会）によって製作された、コスメティック義足と呼ばれる美しい外装の使用している。義足を見せることに対する意識が強く、外観に対して繊細な価値判断を下せることから、本開発の指標であるという尺度に対し、最も有益な意見が得られると考え義肢装具士との相談のもと選定した。

#### C. 試作した機器またはシステム



今回の開発では女性用大腿義足を製作を行った。ここでは現状の日常義足の規格パーツに対してのデザインアプローチと想定した関節部の機能について解説を行う。

#### C-1 ソケットと膝継手の一体化



ソケットは膝関節を組み込んだ一体形状とした。実際に身体と接続される内ソケットとソケットと膝継手の接続、ソケット部の外装という二つの機能を持つ外ソケットの2パーツに大きく分かれる。従来の日常義足ではソケットは義肢装具士により製作され、膝関節等の規格パーツはメーカーにより別々に設計が行われている。そのため、一つの義足でありながら両者の形状一貫性は存在しなかった。今回の女性用大腿義足では膝継手をソケット内部に組み込むことで、義肢装具士が従来の外装のように膝関節の形状を個人に対して製作することを可能にした。

メーカーの技術者は直接使用者本人の身体形状を確認して規格パーツを設計することはできない。今回のように、使用者と対話しながら製作が可能な義肢装具士の造形範囲を広げることにより、ユーザーの身体形状に対する高い適合が可能となると考える。



用者の健側の形状をトレースし、左右の足で形状一貫性が保たれるよう設計を行った

機能面では可動部との干渉による衣服の破れ防止という、従来の外装にあたる機能が骨格義足自体に存在する。これはソケットと膝継手を一体化したことにより滑らかな接続が実現したことによる影響が非常に大きい。また、骨格義足自身に外装の機能を組み込むことにより、軟質発泡素材を用いた外装の問題点としてあげられた関節可動時の外装の摩耗、これによる膝関節の機能障害および衛生面の問題は解消されている。



C-3 足関節の必要性

### C-2 下腿部の身体的形状



下腿部の設計では、これまでのアルミパイプとピラミッドジョイントによる画一化された接続部を排し、健側の形状に対応したパーツ設計を行った。また、衣服の上からのシルエットを作るという日常生活に必要な機能を実現するため、前後方向に羽のような曲面パーツを配した。この曲面パーツは三次元モデリングソフトを用いて、使



今回の設計では足関節の必要性を提示する。足関節が固定された従来の義足では、本来の人間の脚から一つ自由度を奪われたかたちとなり、杖のような使い方が求められる。世界的にはいくつかセンサ内蔵型の高性能な足部が開発されているが大型で高価である。今回のモデルでは今後の開発によって足関節の機能向上、小型化が進むことを想定した設計とした。また、日常生活では多様な靴の高さに対応し、足部の角度が変化することが求められる。特に女性ではハイヒール等、大きな角度変化を必要と

する関節が必要である。現状でもこのような機能を有した足部が広く使われており、この角度調節機能は女性の日常生活に欠かせないものであると判断し、機能として組み込むことを想定した。

このように、これまで規格化されたパーツと外装によって分化されていた機能を分解し、骨格義足に統合することにより、日常生活の問題を踏まえた上で、よりよい身体との適合が実現できる可能性を示すことができたと考える。

#### D. 開発方法

開発の流れは使用者の心理面に配慮しながら、担当の義肢装具士と相談し慎重に進めた。今回、女性用の義足に対し外観形状に着目した設計を行うにあたり、発表を通して多くの人目に触れることなど、心理的に負担となる可能性も考えられる。そのため慎重に製作を進める必要があった。また、制作過程での採寸など、使用者の負担となりかねない作業も必要である。実際に使用者とのコミュニケーションを通して、問題が起こらないよう十分に配慮を行った。

設計に関しては、まず使用者の義足の寸法を測定し、数値から3次元モデリングソフトRhincerosを用い3次元データ化した。写真を元に前面と側面の二方向から健側の身体形状をトレースし、全体形状の設計を検討した。加工業者との相談のもと表面処理など詳細な仕様を検討し、最終完成品として製作された。

#### E. モニター評価

現状、モニター評価は実施されておらず、3月末にユーザと義肢装具士を交えて、その効果と今後の可能性について議論を行う予定である。

#### F. 開発で得られた成果

健側との形状一致方法やソケットなど複雑な三次元形状のデータ化の手法等を思案して、実験的に規格パーツの設計を行ったのが今回の開発である。このような手法は今後も検討の余地があり、次の開発に生かすことが重要であるが、非常に有益な成果の一つと考えている。問題として挙げた部分は今後、いくつかの試作を行う中で、成熟させていければと考えている。

現状の生産方法を短い期間で転換することは難しいかもしれない。しかし、現状の義足の問題点と社会的背景を考慮した今回のような提案によって、個別設計の動きが広く行われる可能性がある。開発を通して義足使用者や義肢装具士、エンジニア、理学療法士、デザイナーなど多くの関係者が、成熟しきったかと思われている日常義足開発に新たな価値と可能性を認識できたことも一つの大きな成果であると考えている。

#### G. 予定してできなかったこと

今回の開発では予定してできなかったこととしては、前述したように実際の使用者に装着してもらってのモニター評価である。開発期間が予定を大きく超過したこともあり、3月末に予定されている。本報告書への記載ができなかったため、後日何らかの形で報告を行えればと考えている。

#### H. 結論

これまでの生産性を追求した開発の結果、義足は細かく機能分化されている。しかし、今回の開発を通して、今日の生産方式の大きな変化が開発の転換期となり、義足が機能統合を行うとともに身体に近づいていく可能性を具体的なイメージとして確認できた。モニター評価の報告ができなかったことが非常に残念ではあるが、今後、何らかの形で、報告を行えればと考えている。

今回のような実用可能性を見据えたビジョ

ン提示は義足の世界ではそう多くはない。概ね、実用化は考えられておらずスポーツメーカーなどが実験的に行っているものがほとんどである。今後、実際の制作過程の中に個別生産のシステムをどのように適応させていくかが問われるところだと認識している。義肢装具士、エンジニア、理学療法士などの関係者とともに検討していければと考えている。

今回、製作を行ったコンセプトモデルを使用し、展示会やメディア等を通して今回の成果とを広く伝え、多くの評価を集め、実用化への参考とできればと思う。

## 障害者自立支援機器等開発促進事業

### 分担報告書

#### 慣性センサを用いたスポーツ競技用義足の性能評価

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科 仰木裕嗣

開発要旨：本事業において開発を進めるスポーツ競技用義足の定量的な性能評価のため、慶應義塾大学仰木研究室グループは加速度センサ、ジャイロセンサを用いた義足の運動計測と解析を担当した。研究協力者である下肢切断者を被験者として、競技用義足の膝下に装着した3軸加速度・ジャイロセンサによって疾走中の下腿挙動を計測した。装着されたセンサによって、着地、離地の判別、ならびに膝関節最大伸展時に生じる「ターミナルインパクト」と呼ばれる膝関節への過大な衝撃加速度の計測を達成した。膝関節を中心とする屈曲伸展の回転にたいして接線方向の下腿加速度の最大値は、約5Gから20Gの間にあり、非常に大きい事が確認された。ターミナルインパクトは、義足使用者が走行する際にその加速度がある種の恐怖感を抱かせるため、減衰させることが機構的に求められているが、どの程度の減衰が達成できたのかを確認する方法がこれまでになかった。したがって慣性センサを用いることで義足の運動解析、および義足の機構調整に対する知見が得られたと言える。

#### A. 開発目的

我々のグループの研究目的は、本研究課題の主たるテーマであるスポーツ競技用義足の開発において、試作した義足の運動評価を行う事であった。これまでのスポーツ競技用の義足については、高速度カメラを用いた映像解析やフォースプレートを用いた地面反力の定量的な評価が報告されているが、疾走する走者の義足そのものがどのような挙動を示すのかについては、詳細な報告がなされたことがない。特に義足と人体との接合部分であるソケットの適合性や、継ぎ手の粘弾性性能の評価は、広範囲を撮影する映像解析では明らかにすることは出来ない。また特に遊脚相において、義足が長軸まわりに回転したり、股関節の内外転する様子は側方からの撮影によっては明らかにすることが出来ないために、これまで困難であった。

そこで我々のグループでは、走者の身体もしくは義足に装着し、運動座標系における加速度、角速度を計測するための慣性センサ装

置を開発し、これを用いて義足走者および健常者の走行時の下肢運動を計測することとした。

#### B. 開発する支援機器の想定ユーザ

我々のグループでは、支援機器そのものを開発するわけではなく、開発された競技用義足の運動計測、および運動解析が担当である。したがって、ここで想定されるユーザはスポーツ競技用義足の装着者が第一義的である。くわえて、義足の運動を評価するにあたって、比較対象として健常者の計測データも取得することにした。

#### C. 開発体制

我々グループが担当した慣性センサの開発では、基本的な試作システムについては、慶應義塾大学仰木研究室に所属する学部生、堀内智浩（研究時 環境情報学部4年）が担当した。フィールド実験については、仰木研究室所属、政策・メディア研究科修士課程山

崎奈々子, 環境情報学部 1 年江藤元彦が協力した. 試作計測装置による実験結果をふまえて, 商用製品の試作品を担当したのは, (株) ロジカルプロダクト社 (<http://www.lp-d.co.jp/>) である. フィールド実験は, 本研究プロジェクトの研究分担者でもある, (財) 鉄道弘済会義肢装具サポートセンター, 臼井二美男氏の主催する, 義足ランナークラブ「ヘルスエンジェルス」に所属する選手である.

#### D. 試作した機器またはシステム

スポーツ競技用義足の評価において, 物理量の計測をもって定量評価を下すうえで, 幾つか重要な点があることをあらかじめ述べておきたい.

第一に, 疾走動作を対象にする場合には運動自体が高速であり, 且つ着地局面 (立脚期) や下肢のスイング動作の切り替えなどの詳細な観察は十分速いサンプリング周波数でなければならない. 山本らによれば, 短距離疾走用途の CFRP 製の板バネを用いた床反力測定によれば, 接地時間は約 0.12 秒である (山本ら, 2011). したがって, この局面内に生じている現象を捉えるには, 数百 Hz から 1kHz 程度の計測サンプリングが必要である.

次に我々の目的とする運動計測は従来高速度カメラでは観察出来なかった, 大腿・下腿の挙動である. 疾走する走者の側面より撮影する二次元映像解析法, あるいは複数カメラを用いて撮影する三次元映像解析法のいずれを用いても, 走者の走行一周を画角内に収める場合には, 5m 程度の画角を必要とし, これに対して注目したい下肢の挙動, 特に三次元映像解析の場合には下肢長軸まわりの回転運動についての粒度が粗すぎるために空間解像度が非常に悪くなる致命的な欠点を有している. そこで我々は走者の下肢, あるいは義足そのものに慣性センサを装着して挙動を直接計測する. 先行して行った予備実験においては, 下肢の加速度は着地衝撃で 50G を上回ることが予想され, また着地時において義足の接地地点で長軸周りの内

外旋動作も観察されるなど, 加速度, 角速度ともに高域まで計測しなければならないことが示唆された.

東によれば, 健常者が疾走による着地時の垂直成分の加速度は 10G である (東ら, 2003). 義足は身体軟部組織と比較すればより剛体に近い, 着地時の加速度は 10G を超えると考えられた. また, 同様に東によれば, 角速度もその最大値は, 300 deg/sec を超えているため 300 deg/sec 以上を計測できるセンサを使用する. 山本らの報告でも大腿義足走者において, 膝屈曲角速度は最大で 1000deg/s, 膝伸展角速度は最大で 1500deg/s を超えた値が報告されている. したがって, 我々は, 加速度センサ, ジャイロセンサの計測許容範囲をそれぞれ, 最大 120G, 6000deg/s と十分に余裕をもつことにした.

以上のコンセプトをもとにして計測装置を試作した. 以下では, 研究室内で試作した一号機, および (株) ロジカルプロダクト社製の計測器の 2 つのスペックを記述する.

#### D.1 仰木研究室試作センサ装置

制御用マイクロコントローラーには, MXP LPC1768 を搭載したマイクロコントローラーボードである, mbed を用いた. mbed の基本的性能は URL (<http://mbed.org/nxp/lpc1768/technical-reference/>) を参照のこと. LPC1768 をプロセッサとしてもつ, mbed に計測用のアナログ出力加速度センサ (ADXL193), およびデジタル出力 (I2C) のジャイロセンサ (ITG-3200) を接続し, サンプリング周波数 1kHz で計測を行った.

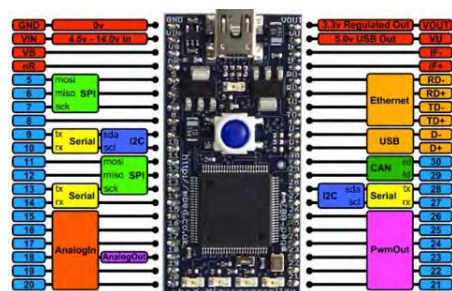


図 1:mbed の概要図