

下野 智史

競技用義足ブレードのパーソナライゼーション
– パラスポーツと共に創るレガシーとは？ –

計測と制御 2020 年 59 巻 10 号 p.752-755

要旨

パラスポーツでは、各選手の個性に応じた用具が求められる。本報では、パラアスリートの義足ブレード開発を通じたパーソナライゼーション技術とそのプロジェクトについて紹介する。パラアスリートと培った本技術を、歩行困難を抱える全ての方々に届けることで、超高齢社会における課題を解決する‘レガシー’とすることを目指している。

- ・掲載後1年未満につき著者最終稿をこちらに公開します。
- ・著作権は公益社団法人計測自動制御学会に帰属します。

Satoshi Shimono

“Personalization of blade prosthesis for sports
– what are the legacies created through experience in para sports? –“

Vol 59(10), 752-755(2020), Journal of the Society of Instrument and Control Engineers

Abstract

Athletes of para sports need tools which satisfy their personal requirements. This paper introduces the project in which a blade prosthesis for a para athlete was developed and personalization technology was advanced. Our goal is to establish a part of legacies which will help every person with a walking difficulty by applying the technology and knowledge of the project. With all sincerity, we desire to provide solutions to walking problems in the super-aging society.

(Available in Japanese only.)

競技用義足ブレードのパーソナライゼーション — パラスポーツと共に創るレガシーとは？ —

下野智史*

*株式会社地球快適化インスティテュートフューチャーデザイン室

東京都千代田区丸の内1-1-1 パレスビル

* Future Design Division, The KAITEKI Institute, Inc., Palace Building, 1-1-1

Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan

1. はじめに

オリンピックのレガシー、と聞いて皆さんはどのようなことを思い浮かべられるだろうか？1964年のオリンピック東京大会においては、交通インフラがその代表例であろう。2021年では、新国立競技場もレガシーの一つとなるかもしれない。それでは、パラリンピックにおいてはどうか？我々は、パラリンピックもオリンピックと同様、あるいはそれ以上に社会へ大きな影響を与えるレガシーを創出できるのではと考えている。

2020年現在、日本が超高齢社会を迎えてからすでに13年が経過し、65歳以上の高齢者は30%に達しようとしており⁽¹⁾、その半数以上が歩行に何らかの問題を抱えているとされている⁽²⁾。歩行問題は、本人のQOL低下のみならず様々な疾患の原因となるとも言われており、関連医療費の増大は財政面にも大きな負担を強いるものと言われ、将来の大きな社会課題と認識されている。

それでは、本来はより歩行が困難な下肢切断者や脳性麻痺患者らはどうであろうか。彼らのなかには歩行困難どころか、東京2020を舞台に、パラアスリートとして走る・跳ぶといったことを競う人々が存在する。近い将来、パラリンピックの記録がオリンピックを上回るのではないかとすら言われている⁽³⁾。これには用具の進歩が大きく寄与していると考えられている。つまり今まさに、人間が本来持つ機能を超え、さらに拡張された能力を獲得する時代の黎明期にあると言える。

我々は東京2020に向けて、義足のパラアスリートのパフォーマンスを最大化する板バネ足部(義足ブレード)のパーソナライゼーション技術(個人の身体・動作特性を考慮して用具を設計する技術)を構築し、その技術を高齢の歩行困難な方々へと応用することを目指している。その技術こそが、パラリンピックのレガシーの1つとなるものと考えており、最終的には企業の事業活動を通じて持続的に社会へ貢献できるものと信じている。

なお、本活動は2016年に発足した図1に示すメンバーで構成されたチームKAITEKIが中心となって実施している。本報では主に、義足ブレードのパーソナライゼーション技術とその成果について報告する。

2. パーソナライゼーション技術

2.1 技術概要

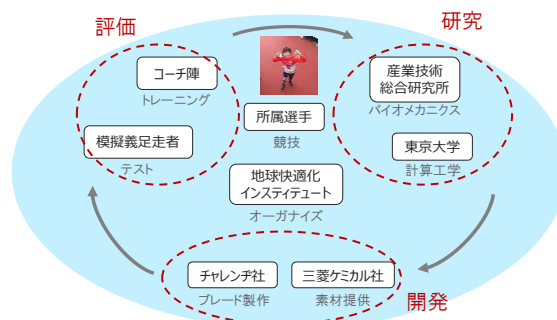


図1 チーム KAITEKI

それぞれのメンバーの得意分野に応じて、研究・開発・評価の役割を担う。

一般的に、パーソナライズするためには最適化計算技術を用いる。製品のシミュレーションモデルを構築し、その特性を少しずつ変化させながらシミュレーションを繰り返す。パフォーマンスが最大となる特性を探す技術である⁽⁴⁾。これを義足ブレードに当てはめて考えてみる。義足ブレードは人間が使う用具であるがぜひ次の場面を想定して頂きたい。皆さんが非常に重いフライパンで料理をしているとする。このときの動きは、通常のフライパンを使う時と比較してどうであろうか。恐らく、ほとんどの方が、重いフライパンをなんとか振り上げようと、全身の動きに変化が生じるものと思われる。義足によるランニングも、本質的にはこれと全く同じ現象が起こる。

すなわち、「人間は用具の特性が変わると無意識下で動作を変える」のである⁽⁵⁾。この特性を踏まえ、以下の4つのステップで義足ブレードのパーソナライゼーションを目指すこととした。

Step1 | トライアルブレードの設計と製作

Step2 | 義足ランニングにおける3次元動作計測

Step3 | 応答曲面法による動作の予測

Step4 | デジタルアスリートの構築

2.2 Step1 | トライアルブレードの設計と製作

上述の通り，人間は用具が変わると無意識のうちに動作までも変化させる．特に，義足ランニングの場合は義足の性能に応じて健足（義足を装着していない非切断側）の動作が顕著に変化する．この動作変化は人によって異なり，どのように変化させるかをあらかじめ予測することはできない．そのため，多くの異なる義足ブレードでのランニング動作の計測を必要とする．しかし，義足ブレードを多数製作しその動作を計測することは，被験者の負担や費用を考えると現実的には難しい．そこで，実験計画法を用いて代表的なトライアルブレードを設計・製作し，それらを着用した際の動作変化から全体の傾向を掴むこととした．

実験計画法とは，最小限の実験回数で最大限の効果を得るための手法である．これにより必要最小限の義足ブレード製作に留めることができる．実験計画法では，効率的な実験を行うためのフォーマットが予め決められており，設計に必要なパラメータ数に応じてどのフォーマットを使うかを選ぶ．義足ブレードの重要な設計変数（要因）として，剛性・高さ・つま先長さ・かかと長さの4つがある．最適な義足ブレードを設計するにはそれぞれの要因について最低3つのレベル（水準）が必要である．この場合，L9型直行表と呼ばれるフォーマットが当てはまる⁶⁾．表1に本直行表を義足ブレードに適用したものを示す．これら9種のトライアルブレードを実際に製作した．

ブレードNo.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
剛性	1	1	1	2	2	2	3	3	3
高さ	2	1	3	1	3	2	3	1	2
つま先長さ	3	1	2	3	1	2	3	2	1
かかと長さ	3	1	2	2	3	1	1	3	2

表1 実験計画法によるトライアルブレード性能

例えば，硬さが1のブレードは硬く，3は柔らかい性質を示す．同様に，高さは1が硬く，つま先長さは1が長く，かかと長さも1が長い．それぞれの最小値，最大値は市販品の義足ブレードの性能を十分にカバーする範囲に設定した．

2.3 Step2 | 義足ランニングにおける3次元動作計測

上記9種のトライアルブレードをチーム KAITEKI でサポートする選手に装着してもらい，産総研のモーションキャプチャシステムを用いて選手のランニング動作を計測した（図2）．モーションキャプチャシステムでは，複数の赤外線カメラにより身体に貼り付けたマーカーの三次元位置座標を検出し，全身の細やかな動作を捉えることができる．9種のトライアルブレードによる計測は選手の体力を考慮し，1日3種を3セット行うこととし

た．また，普段と異なる義足ブレードを装着する場合は慣れのための時間が必要であり，事前に2週間のトレーニング期間を設けた．このときの計測精度が後の解析に大きな影響を及ぼすため，精度の良い3次元動作計測はパーソナライゼーションの要となる．



図2 モーションキャプチャの様子

VICON MX system（Oxford Metrics社製）にて計測した．カメラは20台，サンプリングレートは200fpsであった．選手の負荷，義足ブレードへの慣れを考慮し，約2カ月間かけて行った（産業技術総合研究所提供）．

2.4 Step3 | 応答曲面法による動作の予測

以上の9種のトライアルブレードでのランニング動作データから，応答曲面法を用いることで9種以外の任意の義足ブレードでのランニング動作データを予測する．応答曲面法とは，ある目的関数を設計変数の関数で表現する手法である⁷⁾．ここでは，選手の9種のランニング動作データ $f_1(t) \sim f_9(t)$ を義足性能 $w_{1-9}, x_{1-9}, y_{1-9}, z_{1-9}$ の二次の多項式で式(1)のように表現する．すると， $a_1(t) \sim a_9(t)$ は選手に特有の動作変化の‘クセ’を表すこととなる．なお， w, x, y, z などの義足ブレード設計変数は炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の設計自由度を活かし，それぞれ独立となるように構成している．

$$\begin{Bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ \vdots \\ f_9(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & w_1 & x_1 & y_1 & z_1 & w_1^2 & x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 \\ 1 & w_2 & x_2 & y_2 & z_2 & w_2^2 & x_2^2 & y_2^2 & z_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & w_9 & x_9 & y_9 & z_9 & w_9^2 & x_9^2 & y_9^2 & z_9^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \\ \vdots \\ a_9(t) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式(1)は9つの連立方程式を示し， $f_1(t) \sim f_9(t)$ 及び w, x, y, z は既知， $a_1(t) \sim a_9(t)$ は未知数である．方程式が9つ，未知数も9つのため，単純な連立方程式の問題として $a_1(t) \sim a_9(t)$ を求めることができる．一旦 $a_1(t) \sim a_9(t)$ が求めれば，式(2)より任意の性能 w_i, x_i, y_i, z_i を持つ義足ブレードを装着した際の選手のランニング動作データ $f_i(t)$ を算出できる仕組みである．

$$f_i(t) = a_1(t) + a_2(t)w_i + a_3(t)x_i + a_4(t)y_i + a_5(t)z_i + a_6(t)w_i^2 + a_7(t)x_i^2 + a_8(t)y_i^2 + a_9(t)z_i^2 \quad (2)$$

2.5 Step4 | デジタルアスリートの構築

得られたランニング動作データから、マルチボディダイナミクスを用いた逆力学解析により各関節の発揮トルクを算出する⁽⁸⁾。発揮トルクを入力値として、選手のランニング動作の解析モデルを構築した。また、義足ブレードは6つのパートに分けて表現した。本報では前述のとおり、図3に示す身体と義足を含む解析モデルを‘デジタルアスリート’と呼ぶこととする。義足ブレードの性能に応じてランニング動作データが対応付けられており、義足ブレードが変わるとランニング動作データも自動的に変更される。

このようにデジタルアスリートは、選手の無意識下にある動作変化のクセまでも忠実に再現する。しかも、選手の疲労や危険を心配することなく、何度でも走行を試すことができる。このデジタルアスリートによる走行シミュレーションの反復が、選手のパフォーマンスを最大化する義足ブレード性能の追及を可能にする。

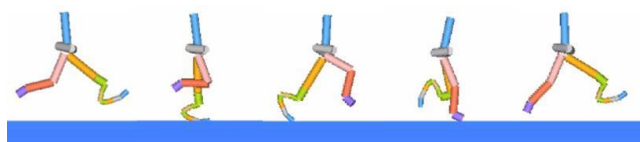


図3 デジタルアスリート

義足ブレードの違いによる選手の無意識下での動作変化の癖までも再現するためのシミュレーションモデルを構築した(東京大学提供)。

3. 結果

3.1 デジタルアスリートによる解析結果

選手に最適な義足ブレードを特定するため、最低限必要となる81種の義足ブレードにてデジタルアスリートが‘試走’した。図4に、それぞれの義足ブレードでの進行方向速度を100m走のタイムに換算した結果を示す。本結果は、従来品よりも約0.7秒の記録向上を狙うことができる可能性を示すものである。

3.2 選手による検証結果

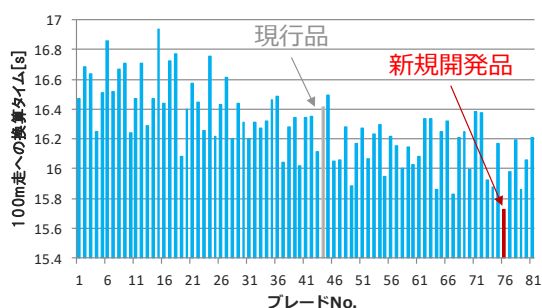


図4 デジタルアスリートでの試走結果

疲労や危険のないデジタルアスリートが、81種類の異なる義足ブレードで走った際の100m走への換算タイムを算出した(計測地点22m付近の速度から換算)。

次に、計算により導き出された最速の義足ブレードを制作し、実際に選手に履いてもらうことで、そのパフォーマンスを計測した。その結果従来品よりも約0.6m/sの速度向上が見られた。この数値は、100mに換算すると約0.15sの記録向上に相当する。デジタルアスリートでの理論値には及ばないものの、100m走の記録としては大きな改善と見ることができる。

3.3 各種競技会での結果

本ブレードを実際に選手に着用してもらい、いくつかの競技会にて本ブレードの検証を行った。2019年7月、本ブレードのデビュー戦となった関東パラ陸上競技選手権大会は、雨が降る中に行われた。決してベストコンディションと言えない状況ではなかったものの、選手は自己ベストを0.14s上回るタイムで100mを走りきった。残念ながらこの日は追い風参考のため公式記録とはならなかったが、続く日本パラ陸上競技選手権大会でも、自身の記録を0.12s上回るタイムで走りきり、公式記録として自己ベスト更新を果たすことができた。この記録は、当時の女子100走(T63クラス)の世界ランキング6位の好記録でもある。

次に出場した11月にドバイで行われた世界パラ陸上選手権大会は、東京2020の日本代表内定を決める選考大会(内定基準;本大会での4位以内入賞)でもあった。強豪選手も揃いプレッシャーのかかる中、女子走り幅跳び(T63クラス)において自己ベストを2度にわたって更新した。その結果、見事4位入賞を果たし、東京2020の切符を手にした(図5)。なお、本手法で開発した義足ブレードは100m走用であり、ここでは従来の義足ブレードを使用したことを付記しておく。

このときのチームの喜びは筆舌に尽くしがたい。本報

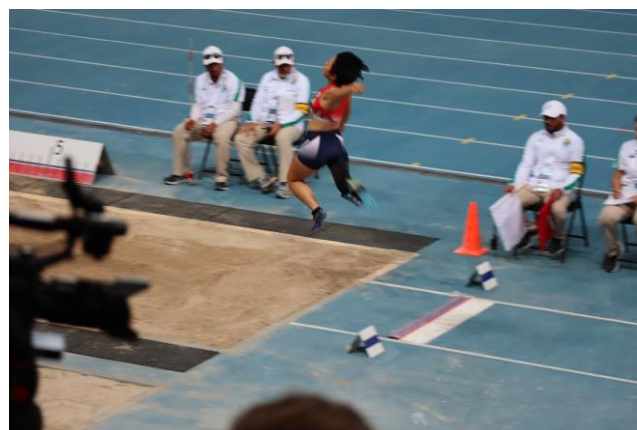


図5 世界パラ陸上選手権大会での様子

女子走り幅跳び(T63)クラス決勝、我々のサポートする選手が4位入賞を果たし、東京2020の日本代表に内定した。

では技術的な手法を詳細に説明してきた。しかし、2016年のチーム発足以降、概ね月に1度の頻度で定期的に打合せを行い、その間多くの紆余曲折があった。様々な立場のメンバーが集まるチームでの試行錯誤や衝突、ここには書ききれない困難な課題があった。そのような4年間を乗り越えた末の東京2020の日本代表内定であった。もちろん、代表を勝ち取ることができたのは選手の不断の努力によるものであるが、チームとしても選手と同様の精神で挑んできた。我々のサポートが少しでも今回の結果に貢献できているのであれば、感無量である。

COVID-19により東京2020の開催は延期が決定したが、ドバイで手にした日本代表の座は来年もそのまま維持される。本原稿執筆段階では、2021年にパラリンピックが開催できるかどうか予断を許さない状況にあるが、アスリートとサポートメンバーが意を一つにして得られた本取り組みの手法と技術が、今後のパラスポーツの発展とその後のレガシーに寄与するものと信じている。

5. パラリンピック・レガシーについて

現在、チームKAITEKIでは開催延期を前向きに捉え、選手のさらなるパフォーマンスアップのために走り幅跳び用義足ブレード開発などの新たなアプローチを試みている。そして本活動で得られたパーソナライゼーション技術を高齢者の歩行アシスト用具、あるいはサービスへと展開する研究を進めている。それには、個人の特性や症状に応じたパーソナライゼーション技術がキーとなる。現状、その領域における様々なプロフェッショナルの方々が、その卓越した経験に基づきこの機能を果たしているが、今後の高齢者人口の爆発的増加を鑑みると、その絶対数が不足すると予測される。歩行アシストへの応用は検討を始めた段階であり、いくつかの新たな要素技術が必要になる見込みである。それには、プロフェッショナルの知見が欠かせないものとなろう。すなわち、彼らの経験とトップパラアスリートのサポートを通じて得られた知見の融合が必要となると考えている。そしてゆくゆくは、義足や歩行アシスト用具のユーザーだけでなく、現在懸命にこの課題に取り組まれているプロフェッショナルの方々が、より多くのユーザーや患者と向き合う時間を増やすための技術としていきたい。

高齢化における課題先進国とされる日本には、その課題を解決するための糸口が多数ある。さらに、東京2020のような世界的なスポーツイベントでは技術の発達が加速される。このニーズとシーズが交錯するチャンスを最大限活用し、我々の取り組みが東京パラリンピックのレガシーの一つとして、社会に貢献することを目指している。それをやがて世界のスタンダードとなるような大きな潮流としていくことが、課題先進国である日本の役割

ではないだろうか。

謝辞

産業技術総合研究所人工知能研究センターの保原浩明主任研究員、東京大学大学院工学系研究科の鈴木克幸教授、同博士課程学生の Cem Guzelbulut 氏は、本研究活動の中心としてこの取り組みをリードして頂いている。ここに最大限の感謝の意を表す。また、義足の評価には選手だけでなく模擬義足走者兼理学療法士として、医療法人社団大和会日下病院の堀田貴弘氏、伊藤大知氏、加藤詩生氏に参加頂いている。3氏には研究面だけでなく、チーム運営面でも多大なる協力を頂いた。改めて、感謝申し上げたい。さらには、選手を指導して頂いているコーチ陣、実際に義足制作に当たってくださった三菱ケミカル株式会社、株式会社チャレンジの方々に、この場を借りて厚く御礼申し上げたい。最後に、チームKAITEKIの所属選手であり、見事に我々の期待に応えてくれた東京2020女子走り幅跳び(T63クラス)、日本代表の前川楓選手に惜しみない拍手を送りたい。

(2020年x月xx日受付)

参考文献

- 1) 内閣府、高齢化白書(2019)
- 2) 内閣府、高齢者の日常生活に関する意識調査(2014)
- 3) Hiroaki Hobara, Yoshiyuki Kobayashi, Thijs A Helder, Masaaki Mochimaru. "The fastest sprinter in 2068 has an artificial limb?" *Prosthetics and Orthotics International* 39 (6), 519-520, (2015)
- 4) Suzuki, Katsuyuki, and Noboru Kikuchi. "A homogenization method for shape and topology optimization." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 93 (1991)
- 5) 下野智史, 児玉齋, 鈴木克幸. "シャフトの性能差によるスイング動作変化を考慮したゴルフクラブの最適設計." *日本機械学会論文集* 82.843 (2016)
- 6) 田口玄一, 横山巽子, 実験計画法(1987)
- 7) 山田秀, 吉野睦, 立林和夫, 棟近雅彦, パラメータ設計・応答曲面法・ロバスト最適化入門(2012)
- 8) 日本機械学会編, マルチボディダイナミクス(2006)

[著者紹介]

下野 智史



2006年広島大学大学院教育学研究科(現総合科学研究科)修士課程修了,工学博士。三菱ケミカル株式会社にて、ゴルフシャフトの最適設計に関する研究に携わった後、地球快速化インスティテュート(同社グループ内のシンクタンク兼研究組織)にて本プロジェクトに従事。