

修士論文2021年度

FootGearPrinting

– 感覚の重み付けに着目した下肢装具のデザイン実践 –

FootGearPrinting

– A novel lower limb harness focused on sensory reweighting –

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

賀下 耀介

修士論文2021年度

FootGearPrinting

－感覚の重み付けに着目した下肢装具のデザイン実践－

論文要旨

フレイルとは、病気と健康のあいだにあたる状態であることを指し、高齢者の自立した生活において問題視されている。特に、Covid-19の感染拡大以降ステイホームを経て、高齢者に限らず多くの人がフレイル状態のような環境に身を置くことを経験し、それを共有した。

一方で、熱可塑性ポリウレタン(以下TPU)素材のような、柔軟な材料を用いた少量多品種のプロトタイピングが、3Dプリンタ技術の発展により自宅でも可能となった。

本研究では、加齢に伴って生じると考えられる姿勢制御の変容に対する解決策を探るため、感覚の重み付けに着目した装具のありうる未知のカタチを探索した。また、FFF(Fused filament fabrication)方式の3Dプリンタを使用し、実践を通して全てのパーツを1つのマテリアル(TPU)で完結する下肢装具の制作手法を提案する。

具体的には、1) フレキシブルな下腿前方への抵抗感覚情報の入力が可能な装具を制作し、2) 歩行や立ち座り動作のような基本動作から登山まで、身体への影響からモノの耐久性評価を通して制作一連の評価を行った。また、制作から実装までの過程で生まれたものをFootGearPrintingと名づけ、一連のプロセスを通じたありうる可能性を考察した。

キーワード

1. 3Dプリンタ
2. 下肢装具
3. フットウェア
4. デジタルファブリケーション
5. 感覚の重み付け
6. 移動補助具

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

賀下 耀介

Master's Thesis Academic Year 2021

FootGearPrinting

– A novel lower limb harness focused on sensory reweighting –

Summary

The term "frailty" refers to the state between illness and health, and is considered to be a problem in the independent living of the elderly. In particular, since the spread of Covid-19, many people, not only the elderly, have experienced a frail-like environment through the stay at home.

Alternativity, prototyping small quantities of various products using flexible materials such as thermoplastic polyurethane (TPU) has become possible at home with the development of 3D printing technology.

In this study, we explored a novel lower limb harness focused on the sensory weighting in order to provide a solution to the postural control changes that are thought to occur with aging. In addition, using a FFF (fused filament fabrication) 3D printer, we propose a production method of a lower limb harness in which all parts are made of one material (TPU) through practice.

Specifically, we 1) produced a flexible harness that can input resistance information to the front of the lower limb, and 2) The relationship between the harness and the body was evaluated through walking and standing, and the durability of the product was tested through trekking. We named the process from production to implementation "FootGearPrinting," and discussed the possibilities through the series of processes.

Key words

- 1. 3Dprinter
- 2. Lower limb harness
- 3. Footwear
- 4. Digital fabrication
- 5. Sensory reweighting
- 6. Mobility aid

Keio University

Graduate School of Media and Governance

Yosuke Gashita

目次

| | |
|---|----|
| 論文要旨 | |
| 和文 | 2 |
| 英文 | 3 |
| 目次 | 4 |
| 本論の構成 | 6 |
| 第一章 序論 | 7 |
| 1-1. はじめに | 7 |
| 1-2. FootGearPrintingとは | 8 |
| 1-3. リサーチクエスチョン | 8 |
| 移動において脚が使わざる環境を作るならば、それはどのような形式でありうるか？ | 9 |
| 感覚の重み付け | 9 |
| 抗重力活動と前脛骨筋 | 11 |
| 歩行補助具(mobility aid) の課題 | 12 |
| 履き続けることを前提としたときに、履き続けることが可能な装具のデザインとはどのような素材・カタチでありうるか？ | 13 |
| 装具としての靴 | 13 |
| 装具難民 | 14 |
| プラスチック装具の歴史的背景 | 14 |
| 装具のような履物を3Dプリンタによって作るとするならば、どのようなカタチをなしうるのか？ | 16 |
| デジタルファブリケーション | 16 |
| 3Dプリンタの特徴 | 16 |
| 1-4. 小括 | 16 |
| 第二章 先行研究・先行事例 | 17 |
| 2-1. 靴と3Dプリント | 17 |
| 2-1-1. Nike Flyprint | 17 |
| 2-1-2. Fused footwear | 18 |
| 2-1-3. Orphe-SFCソーシャルファブリケーション・ラボ | 19 |
| 2-1-4. MAGARIMONO | 19 |
| 2-1-5. Adidas Futurecraft.loop | 20 |

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| 2-2. Unpowered Exoskeleton | 20 |
| 2-3. AFO; Ankle Foot Orthosis(短下肢装具) | 21 |
| 2-3-2. FFF方式3Dプリンタ製のAFO① | 21 |
| 2-3-3. FFF方式による3Dプリント製のAFO② | 22 |
| 2-3-4. SLS方式によるAFO | 22 |
| 2-4. 小括 | 23 |
| 第三章 設計・制作 | 24 |
| 3-1. 活動に着目した際の狙い | 25 |
| 3-2. 使用した機材や道具 | 26 |
| 3-3. 基本的な制作手順 | 27 |
| 3-4. 制作プロセス | 28 |
| 3-5. 制作物の外観 | 32 |
| 3-6. 制作変遷の一覧 | 36 |
| 3-7. 小括 | 38 |
| 第四章 評価 | 39 |
| 4-1. 歩行 | 40 |
| 4-2. 登山 | 41 |
| 4-3. 立ち座り | 44 |
| 4-4. 姿勢 | 47 |
| 4-5. 小括 | 48 |
| 第五章 考察 | 49 |
| 第六章 結論 | 53 |
| 参考文献・引用文献・出典 | 57 |
| 謝辞 | 59 |
| 付録 | 60 |

本論の構成

本論は、以下の順に議論を進める。

本論の構成図は、以降の各章と考察の関連を図式している。

第一章 序論

第二章 先行研究・先行事例

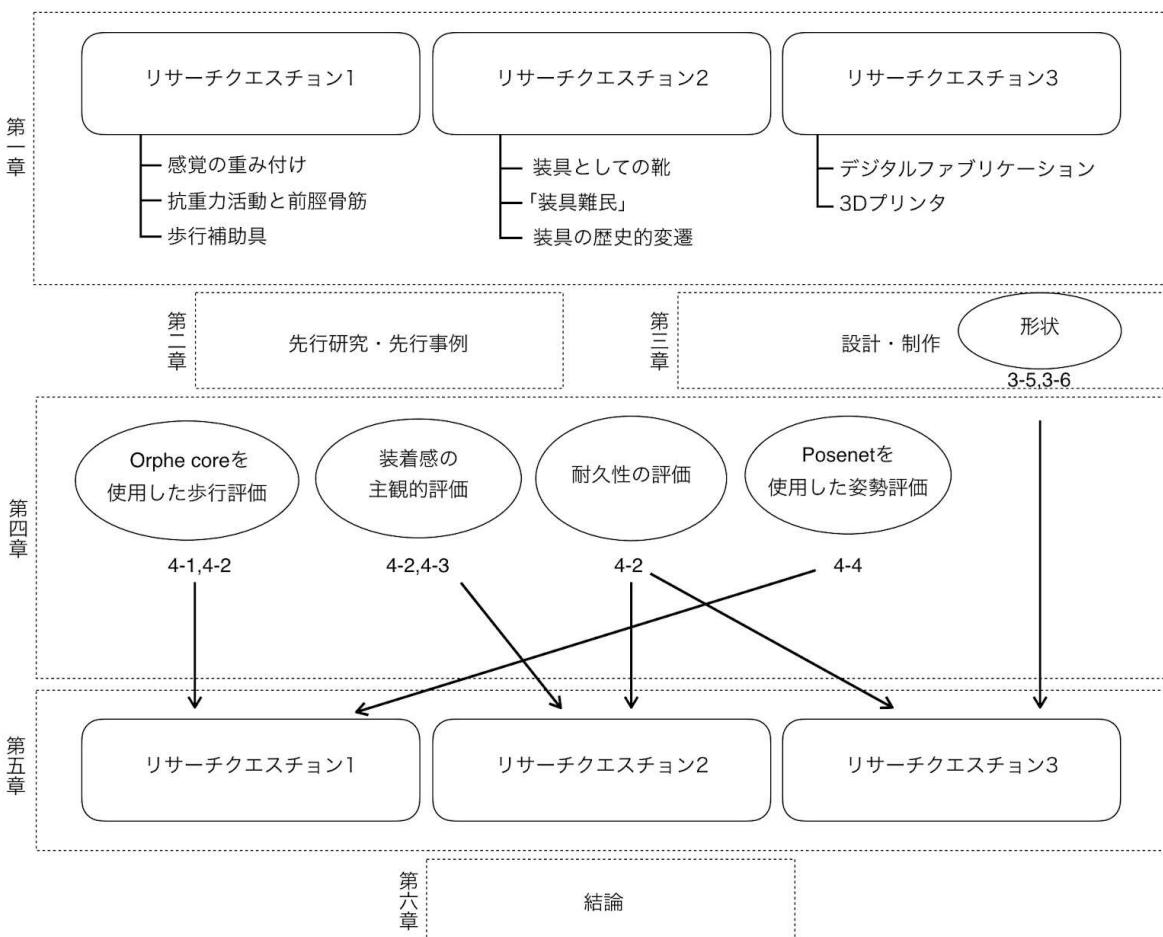
第三章 設計・制作

第四章 評価

第五章 考察

第六章 結論

本論の構成図



第一章 序論

この章では、主題のFootGearPrintingが何を示すか、また本研究のリサーチクエスチョンについて述べる。

1-1. はじめに

筆者が理学療法士(Physical Therapist;PT)としてリハビリテーションの現場で目にしたのは、人の可塑性の逞しさである。リハビリテーションという営みにおける理学療法士の役割には、環境調整と、反復による運動学習を通じた活動の再獲得が主な役割であると考える。身体周縁の環境調整においては、床上安静や荷重の可否などの対象の安静度に応じて、その環境にある道具を組み合わせて対処する。理学療法士の手も含め身体や周辺のあらゆる道具を利用して、ある運動を実行しようとした時のハードルを下げたり、恐怖感への馴化を促したりすることなどを通じて、医学的処置から元の生活へ再び参加することを目指すための橋渡し的な支援を行う。

ここで課題になる「歩く」とは、それまで当たり前で意識せずとも出来ていた「歩く」が出来ない状態から始まる。例えば、数メートル先のモノをとることやトイレで用を済ますことでさえ出来ない状態から、移動の復権は始まる。この当たり前だった「歩く」が困難になる原因として、心身機能・身体構造に関する問題点の上位に股関節伸展可動域制限と股関節中殿筋の筋力低下がしばしば挙がる。この問題点に介入することを試みたときに、病院に限らず普遍的な生活の中に介在し意識することなく股関節が伸びる機会は、歩くことのみである点に気づく。それ以外では、意図的にストレッチするなどしか方略がないのである。加えて、立ち座りや歩くことが無意識的に自然と出来るようになるためには、手や目を用いずに遂行できる環境があることが必要であり、そのような環境を提供していく過程で難渋する。

先述のように病院のなかでは道具を使って回復を促す機会がある。若年者から高齢者、疾患に限らず歩行器や車いす、杖のような移動補助具は、その環境にあれば即時かつ容易に使い比べられて、治療する側も共に使い方を体験し、実感できる。しかし、装具は対象疾病を限定した道具のためその比較の内に含まれない。現状、使う(患者)一作る(義肢装具士)一使わせる(理学療法士)は明確に分け隔てられており、使わせる側の理学療法士は、自分の身体において、更に言うと生活の中において装具を使う体験が不足していると感じた。

以上のような背景から、本研究では作ることと履くことを通じて、手や目に依存しない環境を作る先駆けとして、3Dプリンタを用いた下肢装具を試作することを試みた。

1-2. FootGearPrintingとは

FootGearPrintingとは筆者の造語である。3Dプリンタを用いて作り、履く過程で生まれたフットウェアを指す。

本研究では3Dプリンタによる出力から修正のプロセスを繰り返し、未知の装具のありうるカタチを探査した。また、制作の段階においてCovid-19以降の抵抗運動(※1)を行う機会が減少した生活様式の中、相対的に移動可能な範囲の拡張の必要性が生じ、筆者の活動機会を作り出す手段を探ることも射程に含めた。この射程は、生から死までの連続的な過程において、今の生活が長期にわたった場合、フレイル(※2)と呼ばれる状態が他人事ではなくなってきたためである。

※1 全ての運動は作用一反作用の法則に基づくことから、ヒトの行為もまた重力などなんらかの物理的抵抗に対して抗うことで成立することを強調するために抵抗運動という言葉を用いている。

※2 フレイル(Frailty)とは、「体の予備力が低下し、身体機能障害に陥りやすい状態¹」と定義されている。身体的・社会的・精神的など複数要素が関与していると同時に、可逆的な状態でもあるため脱フレイルは可能であると考えられている。

1-3. リサーチクエスチョン

今後加齢していく過程において、不確実にも起こり得る身体に関する現象と医療福祉の周縁にある道具の現状、理学療法士としての経験を含む問題提起から、3Dプリンタを用いて何を作るのかを、3つのリサーチクエスチョンを基に論じる。本研究のリサーチクエスチョンを以下に示す。次頁より各項目における背景を述べる。

リサーチクエスチョン1

移動において脚が使わざる環境を作るならば、それはどのような形式でありうるか？

リサーチクエスチョン2

履き続けることを前提としたときに、履き続けることが可能な装具のデザインとはどのような素材・カタチでありうるか？

リサーチクエスチョン3

装具を3Dプリンタによって作るとするならば、どのようなカタチをなしうるのか？

¹ Buchner, David M, and Edward H Wagner. "Preventing Frail Health." Clinics in geriatric medicine 8.1 (1992): 1–18.

リサーチクエスチョン1

移動において脚が使わざる環境を作るならば、それはどのような形式でありうるか？

「～ざる」という表現は北海道方言であり、うっかりそうなってしまうという意味合いを持つ中動態表現である。道具との関係性において手と足を対照的に捉えた際に、加齢とともに手や目が支配的になることについて述べる。

感覚の重み付け

感覚の重み付けとは、ヒトの立位姿勢制御は常に状況に応じて各感覚(視覚、前庭感覚、体性感覚)の再調整と重み付けを調整²しており、そのプロセスのことを示す(Fig.1)。

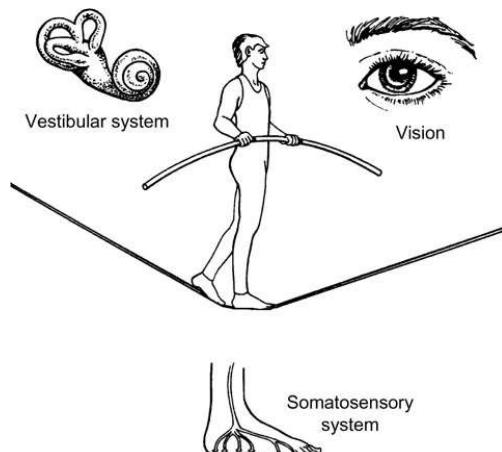


Fig.1 姿勢制御を担う主要な感覚器(Carterら 2001³)

姿勢制御研究において、生活に馴染みのある具体例としては①Light touch effectが挙げられる。1N未満触れる程度の感覚でも情報量が増えることで姿勢が安定する効果を指す。生活上の例としては、立った状態で靴を履く時に片手を軽く添えていると安定するなどといった効果である。次いで、②Textured insoleに関する研究で、凹凸のあるインソールを挿入することで感覚情報量が増加し、姿勢が安定することが示唆された研究結果が報告されている。



Fig.2 ①Light touch effect(左) と ②Textured insole(Hattonら 2019⁴)(右)

² 菅沼惇一、橋本宏二郎、高木 恵 et al: 恐怖環境が静止立位中の sensory reweighting に与える影響、第50回日本理学療法学術大会、2015. 東京。

³ Carter, Nick D, Pekka Kannus, and Karim Khan. "Exercise in the Prevention of Falls in Older People: A Systematic Literature Review Examining the Rationale and the Evidence." Sports Medicine 31.6 (2001): 427–438.

⁴ Hatton, Anna L et al. "Textured Shoe Insoles to Improve Balance Performance in Adults with Diabetic Peripheral Neuropathy: Study Protocol for a Randomised Controlled Trial." BMJ open 9.7 (2019): e026240–e026240.

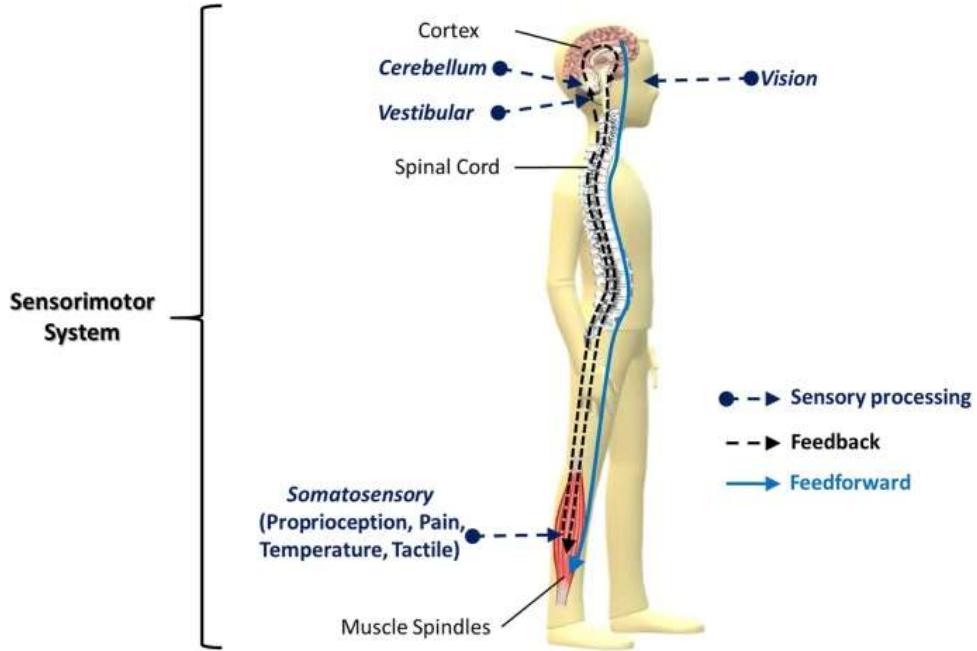


Fig.3 固有受容感覚は脊髄を介して大脳・小脳に及ぶ中枢神経システムに架橋する
(Linら 2019⁵)

固有受容感覚(Proprioception)とは、筋や靭帯、腱、関節包などに存在する受容器から入力される感覚を指し、第6感ともいわれている体性感覚の一部を指す。視覚や前庭感覚と比べて、体性感覚の興味深い特徴としては、感覚を通して脊髄反射による反応から、大脳皮質による随意的制御まで出力に際して広い制御可能性を有する点が挙げられる(Fig.3)。

例えば、歩きスマホやVRゴーグル装着下での運動などの課題が、足元を意識することなく遂行可能なものも、体性感覚の貢献が大きいといえる。

移動に関する問題の本質の多くは、下肢と重力の関係性のなかで生じる。難聴や視力低下といった症状などと同様に、加齢に応じた感覚受容器の変性は、足などから入力される感覚にも同様に起こることが明らかになっている。また、加齢とともに視力低下を自覚するにかかわらず、バランスの制御方法は視覚への重み付けが増えると考えられている(Fig.4)。

これらは定量的に計測しづらい要素であり、尚且つ、目や手による補完、二関節筋による粗大な運動などを用いることによって、代償して生活を続けることは可能であるため、診断が困難であると考える。また、後述する歩行補助具を用いたとしても転倒を回避できない理由のひとつであることも考えられる。

加えて、装具による固有受容感覚への重みづけに対応してどのようにヒトがふるまうのかに関心が沸くが、障害特性に対応することが目的化した道具に位置づけられているがゆえに、杖やシルバーカーなどのように全ての移動能力低下をもつ対象者が手軽に試すような道具ではないのが現状である。

他方で、自然界に住む鳥類や哺乳類は、骨格形状に差異はあるものの、その多くは同じパートを共有している。ヒトと同じく2足歩行を行う動物としては鳥が代表的な存在である。これらの自然界に生息する多くの動物はヒトより遥かに小さい脳のサイズでありながらも、注意を払いつつ足元に視界を奪われることなく移動している点において興味深い。

⁵ Lin, Iu-Shiuan et al. "Reweighting of the Sensory Inputs for Postural Control in Patients with Cervical Spondylopathic Myelopathy after Surgery." Journal of neuroengineering and rehabilitation 16.1 (2019): 96–96.

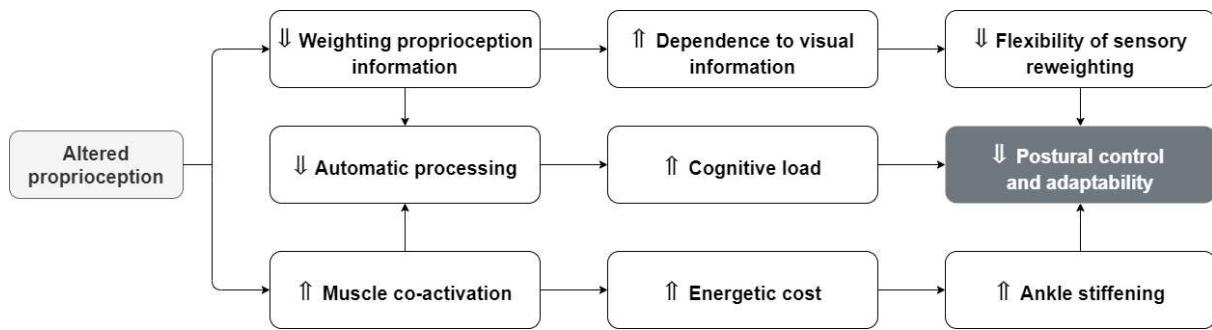


Fig.4 加齢による固有受容感覚からの入力情報の減少とそれに伴って生じるバランスに関する変化(Henryら 2019⁶をもとに改変)
[↑ : 増加, ↓ : 減少]

抗重力活動と前脛骨筋

前脛骨筋(Tibialis anterior;TA)とはヒトの脛に停止する筋であり、前脛骨筋の興味深い作用としては、荷重の衝撃を緩衝するブレーキ作用、踵から足の裏にかけて体重を前へ引きつけるアクセルの作用の対照的な2つの作用を有する点である。歩行に限らず重力と身体の関係で最も先行して活動する筋である(Fig. 5)。

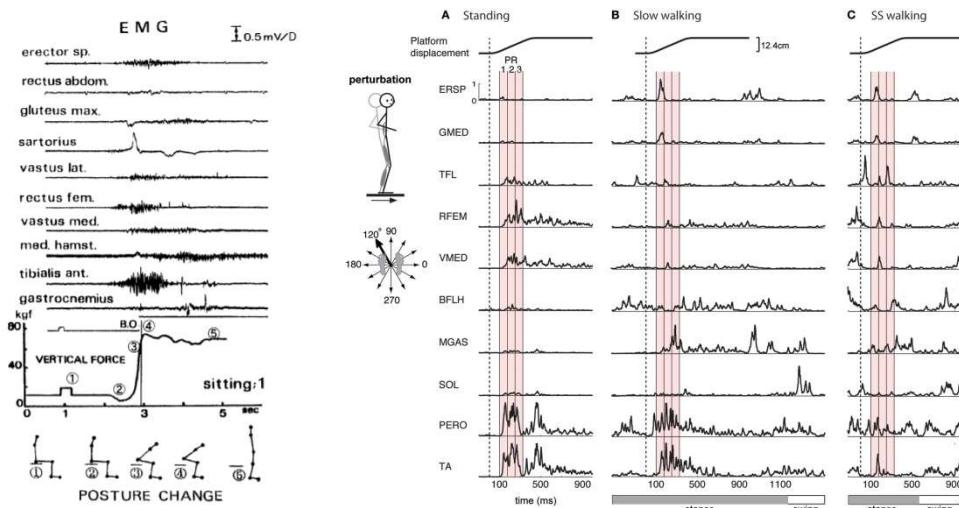


Fig.5 筋電図によって各活動で観察される筋活動
[左: 立ち上がり動作(Gotohら 2002⁷), 右: 静止立位と歩行(Chvatalら 2013⁸)]

加齢によって生じると考えられている姿勢制御戦略の身体変容のひとつに、Muscle co-activationという下肢の屈筋と伸筋が同時に緊張した状態に至り、ankle stiffnessとなることで、柔軟なバランス応答が難しくなることが考えられている(Fig.4の下部を参照)。

⁶ Henry, Mélanie, and Stéphane Baudry. "Age-Related Changes in Leg Proprioception: Implications for Postural Control." Journal of neurophysiology 122.2 (2019): 525–538.

⁷ GOTOH, Atsushi, Takeshi TAKADA, and Kenji SUEHIRO. "Standing-Up." Journal of Kansai physical therapy 2 (2002): 25–40.

⁸ Chvatal, Stacie A, and Lena H Ting. "Common Muscle Synergies for Balance and Walking." Frontiers in computational neuroscience 7 (2013): 48–48.

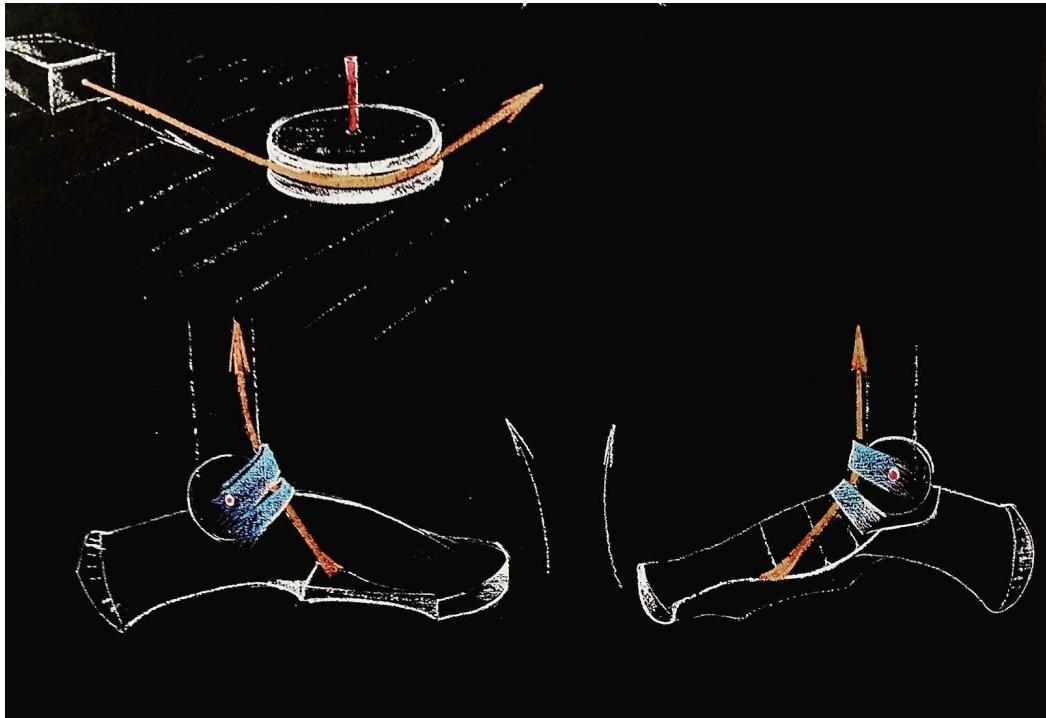


Fig.6 前脛骨筋(赤矢印)は伸筋支帯(青の部分)によって滑車の作用をしつつ、伸筋支帯への伸張刺激を提供する。(Sándor Dóró 2015⁹)

歩行補助具(mobility aid) の課題

歩行補助具とは移動を持続するために用いる、杖やシルバーカーなどを指す名称である。Silvia(2010)¹⁰ らは、地域在住の高齢者における転倒の危険因子を調査した結果、「転倒、めまい、パーキンソン病、転倒恐怖感、歩行障害、歩行補助具の使用、および抗てんかん薬の内服が、転倒のリスクファクターとして約2~3倍のオッズ比を示した」ことを報告している。現状の、手に依存して移動を補助するような歩行補助具をはじめとした道具の多くが、転倒を予防することに貢献していないことを示唆している。実際、臨床や介護の現場でも狭い居住空間で操作する際や、方向転換、両手が離れるタイミングなどにおいて、転倒危険性が高い状況が観察される。

高齢になってから使うことで要求される適応するための新たな身体運用がある。例えばシルバーカーは、足を運搬するために手を用いる道具であるといえる。両手が支持するために拘束することは4足歩行と近く、使用者は長年培ったダイアゴナルシーケンスからラテラルシーケンスへ適応し直さなければならないと考えられる(Fig.7)。また、手を用いることで安全にその時点では移動出来ていても、トイレでズボンを操作することやものを取ることなどの日常生活動作で、手が離れた状態でバランスを取ることは偶発的に生じて必然的に要求される。

これらの道具はリハビリテーションにおいて、段階的な二足歩行の再獲得をする過程において、あるいは、ある程度バランス能力がある人が重い荷物を持ち運ぶ目的では有用であるが、日常生活の中での安全や足の運搬目的で用いるのには利点が乏しい。

⁹ Sándor Dóró:Künstleranatomie: Menschliche Körper zeichnen,Haupt Verlag AG,2015,p322

¹⁰ Deandrea, Silvia et al. "Risk Factors for Falls in Community-Dwelling Older People: A Systematic Review and Meta-Analysis." Epidemiology (Cambridge, Mass.) 21.5 (2010): 658–668.

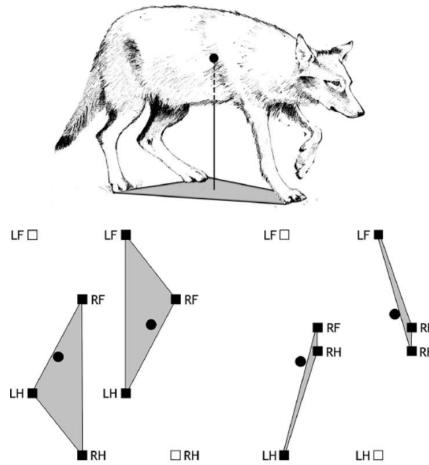


Fig.7 四足歩行動物にみられるラテラル・シークエンス(Matt Wilkinson 2019¹¹⁾

四足歩行の哺乳類の多くは、前脚から動き始め同側の後脚を前に出し進む。これをラテラルシークエンスと呼ぶ。対して、ヒトをはじめとした霊長類は脚が先行して動き始めるダイアゴナルシークエンスと呼ばれる歩行様式を行う。

リサーチクエスチョン2

履き続けることを前提としたときに、履き続けることが可能な装具のデザインとはどのような素材・カタチでありうるか？

本研究は主として筆者を対象にデザインを行う。理由として、1つは、筆者は過去に足首のサポーターを使用した経験があるが靴の中に履くことを習慣化できなかったこと。2つに、日本家屋における生活が内側と外側で履物を変更する構造である故に装着時に靴下と装具、靴を併せて3重に履く必要があること。3つ目に、介助なしで履くことができない方や装具を使わなくなったことで躊躇して骨折された方との出会いからである。そして、この問い合わせが理学療法士としてかかわる上で超克しなければならない課題である。

装具としての靴

人が生活上で使用している普遍的な装具の例として最も身近なものは靴ではないだろうか。靴は本来は足の保護を目的に作られていたが、今日ではファッションとして消費されている。日常に違和感なく馴染んでいる靴は装具のデザインとしての到達点なのではないかと考える。

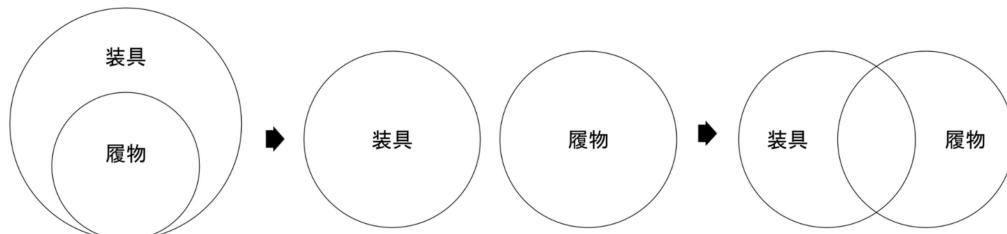


Fig.8 足を保護する具えであった履物→今日の区別化→本研究の位置づけ

¹¹ Wilkinson, Matt, 神奈川夏子. 脚・ひれ・翼はなぜ進化したのか：生き物の「動き」と「形」の40億年. 東京, 草思社, 2019,no.1375/6390(電子書籍).

装具難民

近年、脳卒中後遺症など麻痺による歩行障害が残存した対象者を中心に「装具難民」という言葉が医療・福祉界隈では問題視されている。要因は様々であるが、「対象者自身で購入すると高額」「作製後のサイズの調整が困難」「試用機会が少ない」「交換における仕組みが煩雑」「責任の所在(行政を含む複数のステークホルダーによって成立しているシステム的側面)の曖昧さ」などが挙げられる。

実際に、リハビリテーションの中で使うときも、ハンドリングと呼ばれる歩行介助などの補助的な側面で使用することはあるが、自立歩行を目的に使用することは少ないように思える。使用する当事者からも、「歩かされている」感じがするなどの声も多い。以上より、現状の装具は「理学療法のため」というカッコつきで使用されているのが現状であり、患者が自由意志に基づいて試行したり選択したりするようなプロセスは弱い。

装具を使い続けることと日常生活との連続性について、今一度検討すると、これらの装具は杖などと共に長期的な使用を見据えて処方される。そのため、一般に馴染みのある市販のソーターなどの一時に使用するものとは異なり、長い付き合いとなる側面がある。

原(2006)¹²が行った慢性期脳卒中患者を対象とした装具使用状況に関する調査では、屋外のみ使用している者が50%であり、「装着が手間」「履く必要性を感じない」といった意見が述べられている。

以上のことからも、西洋の生活様式の中で生まれた装具が、未だ日本の生活様式に即したデザインではない可能性と、靴の中に履くデザインの是非について再検討が必要である。

プラスチック装具の歴史的背景

Bernardらは1967年に、プラスチック素材を用いて作られた下肢装具の製作手法を発表した。プラスチックを用いた論文の中では、調査した中では最初の論文と思われる(Fig.9)。



Fig.9 Plastic short leg brace fabrication(Bernard 1967¹³)

¹² 原洋史. 自室内歩行における下肢装具使用状況の影響要因—慢性期脳卒中患者を対象とした検討. 理学療法研究・長野. 2006, no. 35, p. 24–26.

¹³ Bernard C. Simons, Robert H. Jebsen, Louis E. Wildman: Plastic short leg brace fabrication, orthotics and prosthetics 21.3,(1967):215-218

ポリオウイルスの流行や長寿命化に伴う脳卒中患者数の増加など社会的側面とプラスチック量産方法の普及により、プラスチック装具の開発およびリハビリテーションが急速に普及した。普及が進む中で歩行の計測技術も発展を遂げたことで、装具における固定の必要性は少なくなり、よりたわみやすくなるようにトリミングという加工や、踵がくりぬかれたようなデザイン(Fig.10)が用いられるようになった。歩き易くなった代わりに、物体としては脆くなり破断しやすくなるというトレードオフ関係が生じた。そこで、表面に凹凸をつけるようなコルゲーションの処理が行われるなど職人的技術が求められるようになった。これらの形状はシート状(平面)のプラスチック素材を立体的に加工する点で有用な手法である。



Fig.10 The TIRR Polypropylene Orthoses(Engen 1972¹⁴)

¹⁴Engen, Thorkild J: The TIRR Polypropylene Orthoses, *orthotics and prosthetics*, 26.4(1972):1-15.

リサーチクエスチョン3

装具のような履物を3Dプリンタによって作るとするならば、どのようなカタチをなしうるのか？

デジタルファブリケーション

近年、3Dプリンティングをはじめとしたデジタルファブリケーション技術によって、熱可塑性ポリウレタン素材(TPU)をはじめとした、靴のソールに採用されるような素材を用いて立体造形することが可能になった。各事例は第二章にて後述するが、フットウェア領域においての事例が増加している。一方で、医療用の装具に関しては既存の形状の複製を検討される報告や、それに加えてコンピューターショナルな意匠による軽量化や通気性を加えた報告が多くを占める。

3Dプリンタの特徴

本研究では、以下の利点に着目して3Dプリンタを用いたデザインを行う。

1) パラメトリックモデリングによる少量多品種生産

内部構造を変えることによるプロダクトの強度や重さ、パラメトリックモデリングによって子供からお年寄りまで適合することが期待できる。従来の金型生産では大幅なコストがかかるなどを、比較的低コストで実行できる。(例: 靴やインソール、ハーネスなど個別の身体的特徴に応じたプロダクト)

2) マテリアルの多様性と一元化

リサイクルプラスチックの活用や、リサイクル可能なプロダクトデザインができる。また、異なるマテリアルを試行することで物性の検討が可能である。

3) データによる共有

機材環境があれば国外にまで及んで、物理的なモノは移動せずにデータのみで共有し、造形することができる。本研究では、主にホームラボ(自宅)環境での制作となるため、限られた環境で制作できた場合にはどこでも出力できることが期待できる。

加えて、FFF方式(Fused Filament Fabrication)による制作はその他光造形方式などの3Dプリンタと比べてゴミや廃液として捨てられる量が少ないことが知られている。しかしながら、安定した形状を可能にするためには立体構造物として安定していて、また審美性からはツールパスを考慮することが条件であり、制約を理解しつつ制作する必要がある。

1-4. 小括

以上よりリサーチクエスチョンから装具のような履物を作ることを試みるが、TPU素材を用いて装具をつくること、履くことに関しては先行事例や取り組みがない。そこで次章で参考点となりうる先行事例について列挙する。

第二章 先行研究・先行事例

ここでは、フットウェアを含む、3Dプリンタや本研究で使用するTPU素材が用いられたプロダクトを中心に先行事例を概観する。本研究では短下肢装具の3Dプリンタによるリデザインを行うことから短下肢装具(Ankle foot orthosis;AFO)の研究領野の報告と3Dプリンタフットウェアの研究領野の報告を行う。[2-1.靴と3Dプリント]では、3Dプリンタによるフットウェアは通常のフットウェアと同等の品質が担保されつつあること、単一素材のため、通常のフットウェアに比べてリサイクル性が優れていることを報告する。次いで、本研究の抵抗の考え方を補強する先行研究として[2-2 Unpowered exoskeleton]を提示する。[2-3 AFO]については、既存のAFOの形状を3Dプリンタを用いて複製する研究報告を提示する。

2-1. 靴と3Dプリント

2-1-1. Nike Flyprint

NikeはTPU素材を3Dプリンタを用いてアッパー部分の制作を行ったNike Flyprintを発表している。陸上競技選手で世界最速の長距離ランナーのキプチヨゲ選手は2018年4月のロンドンマラソンで同モデルを使用して優勝している。意匠性とともに機能性も満たされている。

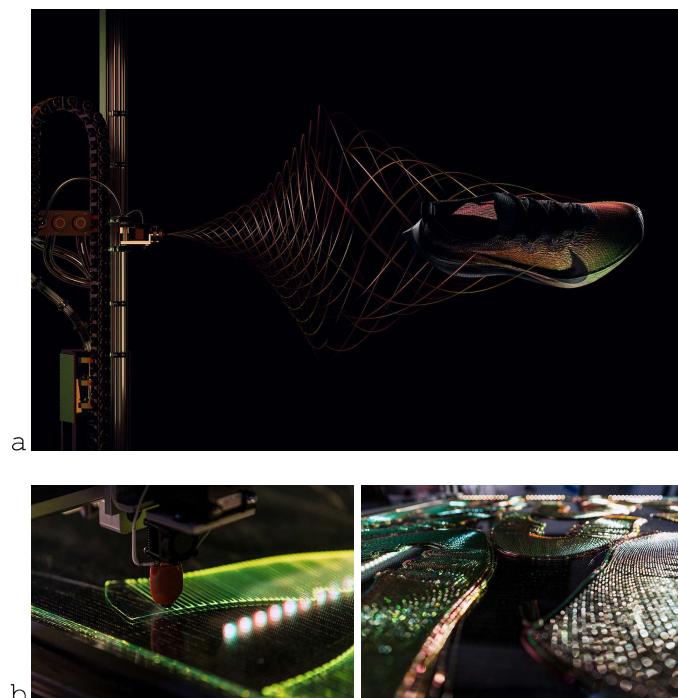


Fig.11 Nike Flyprint
a.Flyprintの全体像¹⁵ b.3Dプリントで製造されている様子¹⁶

¹⁵ Hypebeast.com 記事「3Dプリント技術を用いた新作ランニングシューズ Nike Zoom VaporFly Elite Flyprint が誕生」<https://hypebeast.com/jp/2018/4/nike-zoom-vaporfly-elite-flyprint-3d-printing>

¹⁶ Nike HP 「ナイキ フライプリントとは？」<https://nike.jp/nikebiz/news/2018/04/18/818/>

2-1-2. Fused footwear

Fused footwearでは、FFF方式で製造されたフットウェアを販売しており、ウェブ上でReturn 2 Recycleという履き終わったフットウェアを返品する場合、20%オフの価格で購入できるような取り組みがなされている。回収後のフットウェアは、新たなプロダクトへ転用することを試みている。



The screenshot shows the Fused footwear website's 'Return 2 Recycle' page. At the top, there is a navigation bar with links for Home, Shop, Return 2 Recycle (which is underlined), FAQ, About, and Contact. Below the navigation is a search bar and a shopping cart icon. The main content area features a heading 'Return 2 Recycle' and a paragraph explaining the program: 'FUSED footwear has a **Return 2 Recycle** program, where we **repurpose your old FUSED shoes** to produce **new printing material**. Shoes printed from this new material will be offered as special Recycled Editions.' A smaller text below states: 'In return for sending your old FUSED shoes back to us, we offer you a **20% price reduction** on any new pair that you'd like to buy. Once we have received your shoes, we will send you a **discount code** that can be used in our webshop.' To the right of this text is a small square icon containing a camera symbol. Below the text is a form with fields for Name, Email, Phone Number, and Message, followed by a 'Send' button.

Fig.12 Fused footwearで販売中のフットウェア(上)と同社のHP(下)¹⁷

¹⁷ Fused footwear HP <https://fusedfootwear.com>

2-1-3. Orphe-SFCソーシャルファブリケーション・ラボ

株式会社ORPHE(以下Orphe)と慶應義塾大学SFC研究所 ソーシャルファブリケーション・ラボの共同研究からは、災害時にも速やかに着脱が出来るような、材料押出法(以下ME方式)の3Dプリンタを用いたフットウェアが発表・報告されている。Orpheが開発している歩行や走行のセンシングが可能なセンサー“ORPHE CORE”を靴の中に入れることができる。



Fig.13 Orphe-SFCソーシャルファブリケーションラボの共同研究による
ME方式の防災用フットウェア¹⁸

2-1-4. MAGARIMONO

MAGARIMONOは完全受注制のフットウェアを製作・販売している。こちらはソールを光造形方式(以下SLA方式)、アッパーをFFF方式の3Dプリンタで製作されている。



Fig.14 MAGARIMONOはSLA方式とFFF方式の異なる3Dプリンタを用いて
フットウェアを製作している¹⁹

¹⁸ 株式会社ORPHE HP「慶應義塾大学SFCと共同開発した3Dプリンタ製フットウェアがフェーズフリーアワードでオーディエンス賞を受賞」<https://orphe.io/news/sfc-3dshoes-phasefree-award-winning>

¹⁹ Magarimono HP <https://magarimono.com/>

2-1-5. Adidas Futurecraft.loop

AdidasではTPU素材を使用し、接着剤を用いないデザインで100%リサイクル可能なフットウェアの製作を試みている。こちらは3Dプリンタが用いられているわけではないものの、従来の複数素材を用いた靴のデザインではリサイクルが難しい点を単一素材で解決しようという、昨今のSDGsに即した取組みである。



Fig.15 Adidas Futurecraft.loop²⁰

2-2. Unpowered Exoskeleton

Unpowered Exoskeletonとは、ロボットアシストなどのような電力源が必要なモーターなどは無く、バネの反発のみである。Collinsら(2015)は、健常成人を対象にして、歩行中のエネルギーコストを $7.26\pm2.6\%$ 減らすことを報告した²¹。歩行中の体重が乗ってから蹴り出す際のタイミングにおいて、バネの抵抗により効率よく歩行することが可能であることを示唆している。



Fig.16 Unpowered exoskeleton Collinsら(2015)²²

²⁰ Wired記事「A new adidas shoe uses just one material – and is fully recyclable」

<https://www.wired.co.uk/article/adidas-futurecraft-loop-running-shoe-recycle>

²¹ Collins, Steven H, M Bruce Wiggins, and Gregory S Sawicki. "Reducing the Energy Cost of Human Walking Using an Unpowered Exoskeleton." Nature (London) 522,7555 (2015): 212–215.

²² Gigamen記事「歩行時の効率を上げる電力不要な外骨格デバイスが開発される」

<http://www.gigamen.com/unpowered-exoskeleton-walking.html>

2-3. AFO; Ankle Foot Orthosis(短下肢装具)

AFOとは、足関節(Angle)から足の裏(Foot)にかけて装着する装具を指し、主な使用対象は足周辺に麻痺の後遺症を有するものである。ここでは、一章で提示した1960年代以降、どのようなAFOが開発されてきたかや、3Dプリンタが用いられている最近の研究報告で挙げられているAFOについて列挙する。

2-3-1. 市販のAFO

既製品のAFOを2点紹介する。これらはS～Lサイズで提供されている。

| Turbo med | Allard |
|---|--|
| <p>スノーモービル事故によって腓骨筋神経麻痺となった当事者がカナダで創業し、当事者研究を通して製作された装具である。従来の装具と異なり、靴の上から取り付けるようなデザインが特徴的である。</p>  | <p>スウェーデンが拠点の装具メーカー。カーボン製のAFOを製造している。</p>  |

Fig.17 Turbomedは靴の上に取り付ける仕様²³

Fig.18 主に靴の中に履く仕様で屋内使用は想定されていない²⁴

2-3-2. FFF方式3Dプリンタ製のAFO①

ポリプロピレン製AFOをFFF方式の3Dプリンタを用いて複製することを検証した先行研究である。

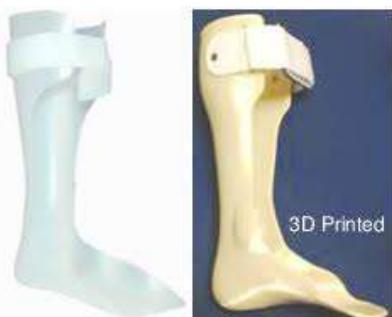


Fig.19 FFF方式によるAFO Jinら(2016)²⁵

²³ Turbomed社 <https://turbomedorthotics.com/>

²⁴ Allard社 <https://www.allardint.com/>

²⁵ Jin, Yuan, Yong He, and Albert Shih. "Process Planning for the Fuse Deposition Modeling of Ankle-Foot-Othoses." Procedia CIRP 42 (2016): 760–765.

2-3-3. FFF方式による3Dプリント製のAFO②

アメリカのノースカロライナ州にあるクリニックの製作事例である。2022年1月現在、実使用にされたことは公開されていないため、現段階ではプロトタイプと思われる。



Fig.20 3DプリントされたAFO²⁶

2-3-4. SLS方式によるAFO

SLS方式(Selective Laser Sintering; 粉末焼結積層造形)の3Dプリンタを使用して、カーボン製の既製品AFOを異なる材料を用いて複製することを主旨とした先行研究である。

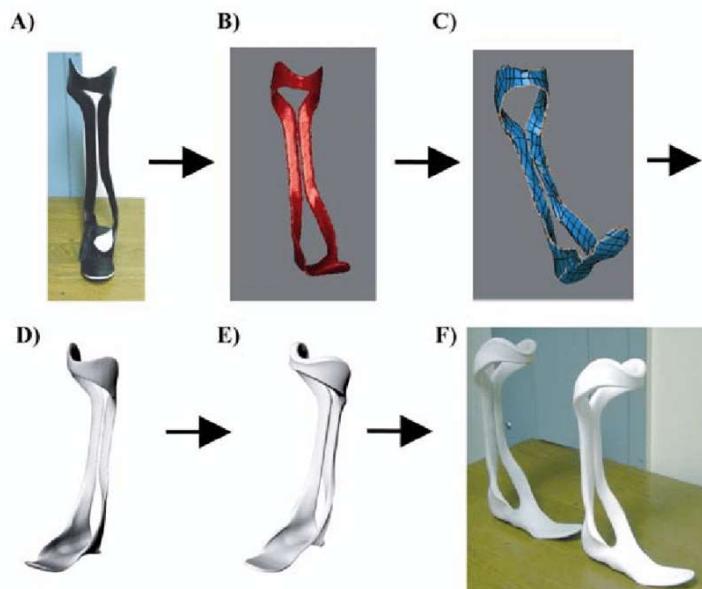


Fig.21 SLS方式によるAFO Faustiniら(2008)²⁷

²⁶ 米国クリニックが運営するブログ「3D Print Innovations」 <https://www.biotechnc.com/posts/3d-print-innovations/383>

²⁷ Faustini, Mario C et al. "Manufacture of Passive Dynamic Ankle-Foot Orthoses Using Selective Laser Sintering." IEEE transactions on biomedical engineering 55.2 (2008): 784–790.

2-4. 小括

以上、先行事例を概観したが、靴の領域においては、審美性や環境への配慮といった側面において3Dプリンタが活用されている。対して、短下肢装具の領域では既存のカタチを複製することに力点をおいており、実用に至った例は現時点では少ない印象である。

また、Unpowered exoskeletonという領域では、従来の短下肢装具がリジットな状態から次第にフレキシブルな性質を有するようになった流れに準じるように、バネを用いて健常成人でも歩行中のエネルギーコストを減らすことが可能になったのは興味深い。次章 [第三章方法] にて、先行事例にならいつつ本研究で制作したTPU素材を用いた下肢装具のデザイン手法について述べる。

第三章 設計・制作

この章では、コンセプトおよびデザインの狙いに言及した後に、使用機材・制作プロセスについて述べる。先行研究で提示したような複数のカテゴリの要素を抽出するような想定で、3DプリンタとTPU素材を用いて、制作することとした(Fig.22)。具体的には、Footwearのように履けて、Exoskeletonのバネのような作用を持ち、Orthosis(装具)にみられる材料の撓みを活用し、脛の前側への感覚入力を提供することを目指した。

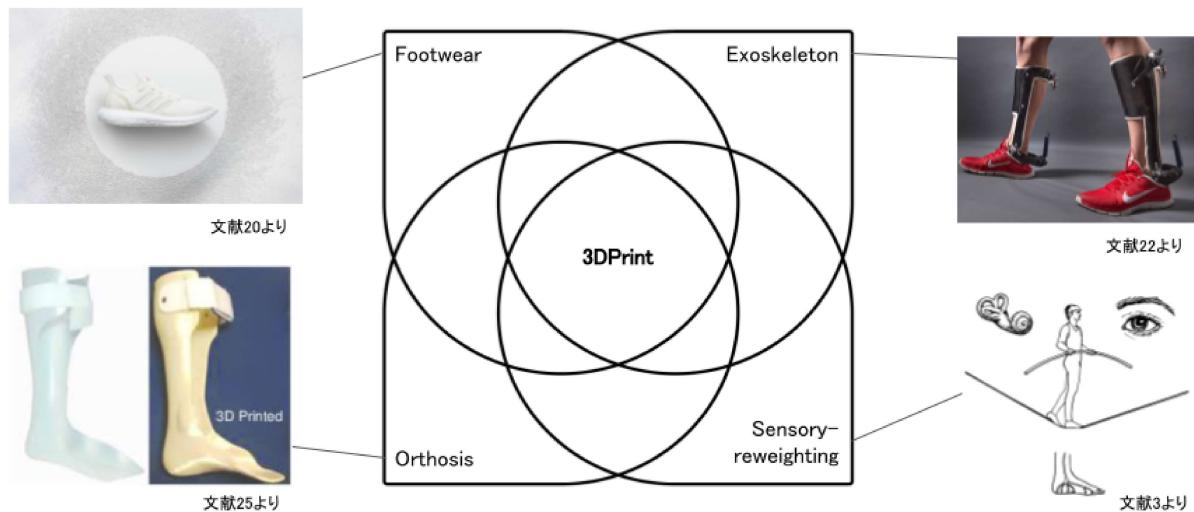


Fig.22 Concept
(図中の番号は各文献番号に対応している)

デザインプロセスの計画

1. 履きたい・履けるカタチの探索、表現
2. 装着感に納得できるデザインの探索
3. 複数サイズを出力一組立
4. 第3者に試してもらい安全面を確認する

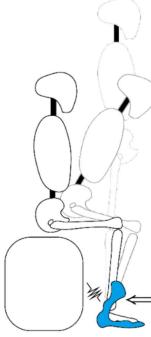
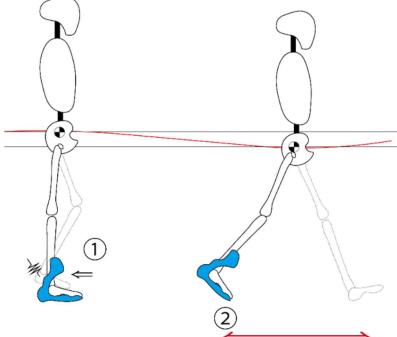
筆者は自分に適合したサイズを使用して様々な場面で履き、問題点を抽出する

5. 複数人に履いてもらい課題を抽出する
6. 履きたい・履けるカタチの表現を再度試作する

3-1. 活動に着目した際の狙い

以下に、制作を通して立位から立ち座り、歩行といった基本動作に対する感覚の狙いについて述べる。

表1. 動作に対する感覚の狙い

| | | |
|-------------------------|---|---|
| Rest standing 静止立位 |  | 立位時から抵抗感覚を下腿前方に提供することで、直立姿勢の状態の中で、質量中心がくるぶしの前方に位置する状態を提供する。 |
| Sit to Standing 立ち座り |  | 立ち上がり動作の前方へ推進する時に、抵抗を超えて前方へ加速するように、どこまで前へ行けるのかを直感的に感じられるような感覚を下腿前方に提示する。 反対に、座る時には下腿前方に体重を預けながら座るような感覚を提示する。 |
| Walking 歩行 |  | 歩行中の立脚中期～立脚後期(左図の状態①から②)にかけて片脚の支持性を提供する。 |

3-2. 使用した機材や道具

1. FFF方式の3Dプリンタ

Anycubic Chiron: 造形可能サイズ: 400×400×450mm

ダイレクトエクストルーダー方式ではないものの、TPUなどフレキシブルフィラメントが
出力可能な3Dプリンタであり、本研究で採用した。

Anycubic Mega-S: 造形可能サイズ: 210×210×205mm

Anycubic Chironと比べてサイズは小さいものの、同様にフレキシブルフィラメントの出力が
可能である。本研究のようなフットウェアをデザインするといった出力サイズの場合、スケール
が小さいと履いて試すことには適さないので主に小さいサンプルの試作やアッパーのテストや
出力パラメータの確認などで用いた。

2. フィラメント

Sain smart Flexible TPU

複数のTPU素材を使用した中で、比較的低コストでマテリアルの質感が変わらな
かったため採用した。

3. ソフトウェア

Rhinoceros Grasshopper



基本的なモデリングとサイズの調整に用いた。

Simplify3D



内部構造の設計と3Dプリンタで出力するためのG-Codeを生成する際に使用した。

4. その他(組立と後処理)

接着には以下の写真の道具を用いた。脛あての接着には左の2つを用い、アッパーの接着
には右の二つを用いた。いずれもAmazonなどで容易に入手可能なもので制作が可能である。
アイロン型の治具のハンドルはTPUで自作した(Fig.23)。



Fig.23 クリップ, ヒートガン, はんだごて, アイロン型の治具

3-3. 基本的な制作手順

①～③をコンピュータでのモデリング、④～⑥は手作業で組立を行い、④～⑥を通して①～③を修正することを繰り返し行った。以下 [3-4. 制作プロセス] の中で、①～⑤までの一連のプロセスについて述べる。

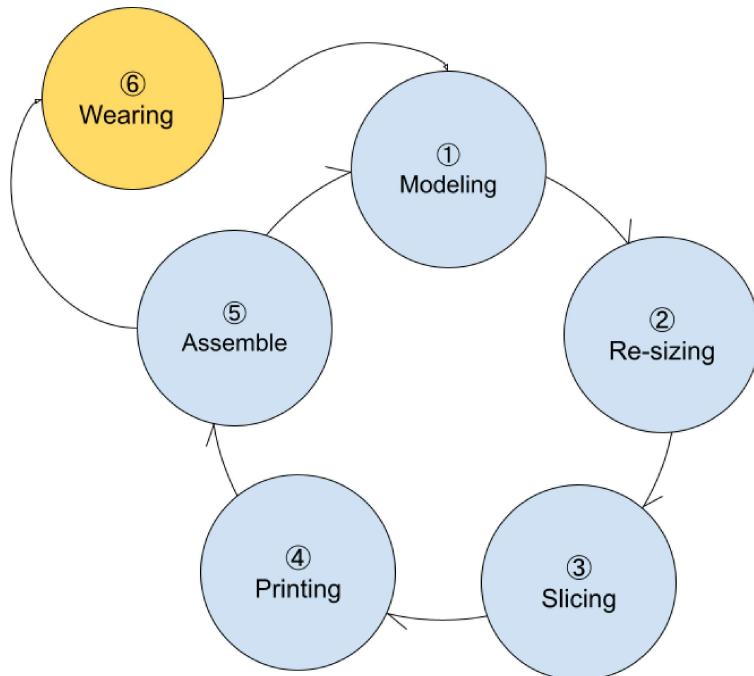


Fig.24 制作プロセス

3-4. 制作プロセス

a) Rhinoceros上でモデリング

筆者は普段25.5cmの靴を履くため、まずは自分が履けるサイズを探索することから始めた。本研究では支柱・ソールのモデリング自体はそれぞれに調整が必要であったため、分けて行ったが、立体的な形状をモデリングする点は共通している。また、アッパーはFFF方式で立体的な形状を作るとするとオーバーハング角の調整が難しく、平面形状で組み立てることを検討した。

b) 足型のインポート

ソール部分は足型のトレース用紙をPDFに変換してインポートすることで、ある程度サイズの調整が可能である。Fig.25では3Dスキャナで取り込んだ筆者のメッシュデータを採用している。3Dスキャナを用いるとより足の形状を把握しやすい。

c) Grasshopper上でサイズの調整

サイズ調整はXY平面にて簡易的に行った。つま先の捨て寸を考慮して+1.0~1.5cmのサイズ感が好ましい。number sliderを使用して、ソールのサイズと同期してアッパーも形状を変えることが出来るように設定した。

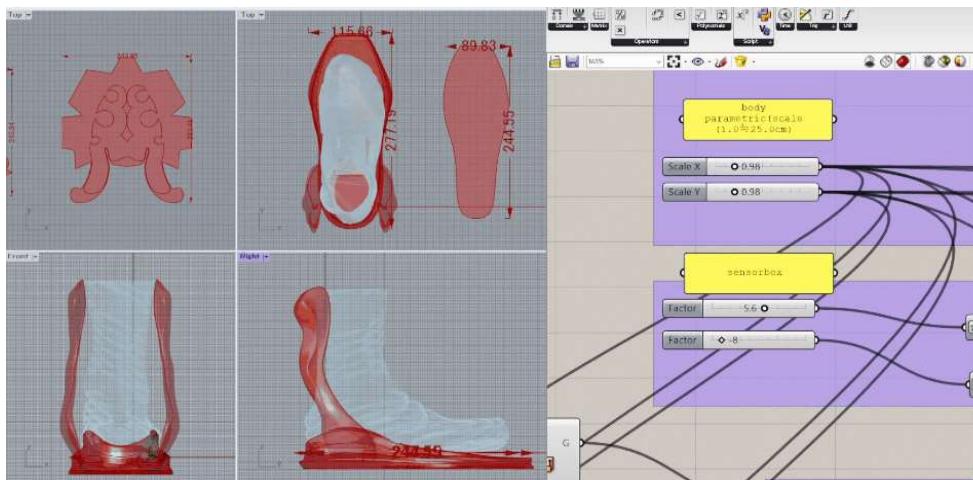


Fig.25 Rhinoceros上でモデリングしたオブジェクトをGrasshopperでサイズを調整する

d) スライサーによるG-Codeの生成

1層目と2層目(共に厚さは0.5mm)を異なる形状にブーリアン演算で組み合わせたのちに、STLデータでエクスポートする。その後スライサーソフトにインポートし、1層目と2層目でそれぞれパラメータを変更する。1層目のインフィルパターンはGridパターン100%に設定し、2層目は外周のみ8層/インフィル0%で出力することで、パスに沿ったテキスタイルを施すことができる(Fig.26)。

Gridパターンに設定した理由は、Honeycombパターンで組み立てて履いた際、早期に破れてしまったため、強度上の要件を満たすためには複数の角度からインフィルを設計する必要があったからである。この点はノズル径を小さいものに変更することでも解決しうるが、本研究では時間の都合上0.6mmノズルに絞った。

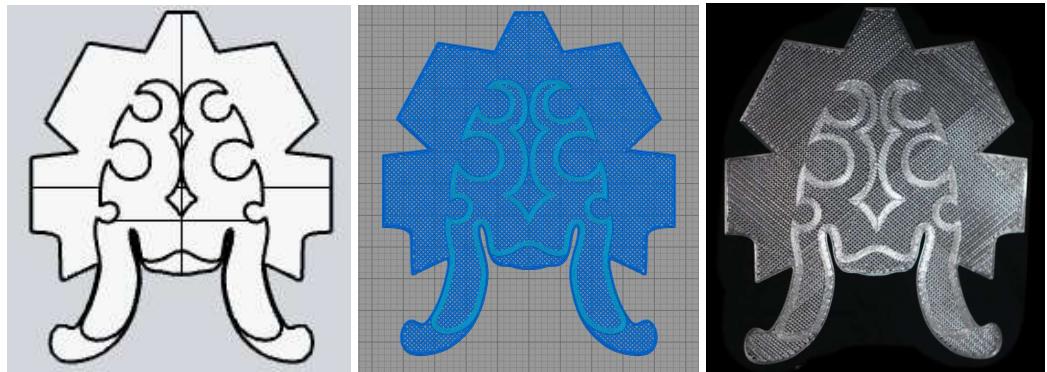


Fig.26 モデリング→スライサー→出力の例

e) 出力

出力に関する設定(表2)と出力にかかる時間(表3)出力されたモデル(Fig.27)を以下に示す.

表2. スライサー設定

| ノズル径 | 積層ピッチ | ヒートベッド温度 | ノズル温度 | プリントスピード |
|-------|--------|----------|-------|----------|
| 0.6mm | 0.55mm | 60°C | 210°C | 20mm/s |

表3. 片足分にかかる各パートの出力時間(25.5cm)

| パート | 出力時間 |
|-----------|---------|
| アッパー(前) | 1 時間19分 |
| アッパー(後) | 0 時間33分 |
| アウトソール+支柱 | 11時間20分 |
| 脛あて | 0 時間25分 |
| インソール | 0 時間31分 |



Fig.27 左上; アッパー(前), 右上; アッパー(後), 左下; アウトソール+支柱, 右下; 脣あて

f) 後処理

出力後にバリが残ることがある。バリはニッパーで取り除いても、細かい毛羽立ったところは装着時に不快感を誘発してしまっていたが、ヒートガンで熱しつつ、耐熱手袋をはめた指でなでるように溶かすことで綺麗に処理することができる。

g) 接着

それぞれのパーツを接着するために、はんだごてとヒートガンを用いて熱溶着を行った。接着の際は、安全上耐熱手袋をはめて行うのが好ましい。

g-1. アッパー×ソール

アッパーを取り付ける時は、300度に設定したはんだごてを押し当てて溶着する。アイロン型の治具を用いると、局所に圧をかけられるためより安定した溶着ができる。はんだごてに付着したフィラメントは炭化することがあるが、アイロン治具などで削ることである程度メンテナンスできる。



Fig.28 接着工程

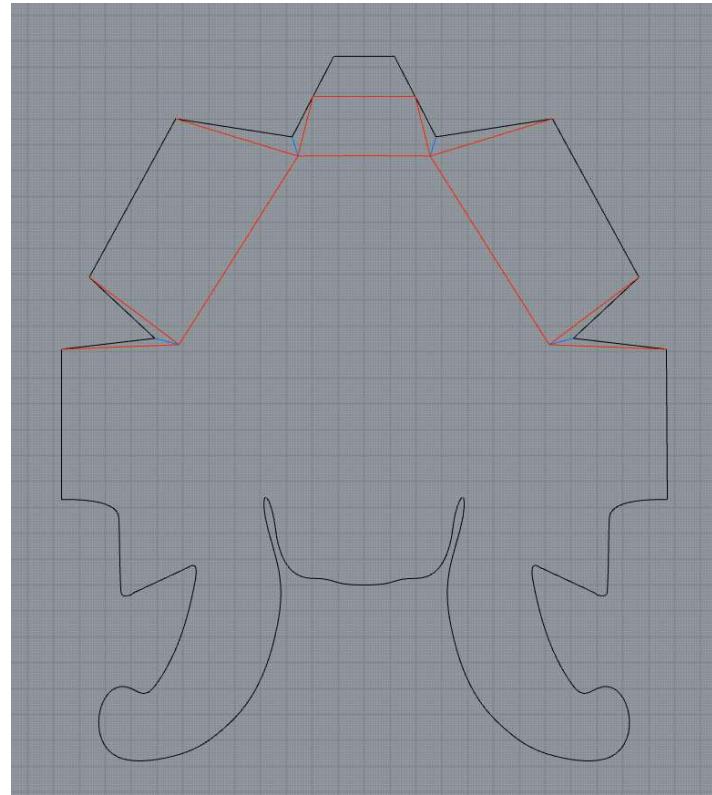


Fig.29 接着時の折り目(—: 山折り,—: 谷折り)

g-2. 支柱×脛あて

支柱の接着する面をヒートガンでよく熱したのちに、脛あてを貼り付ける。表面が溶けるのをよく確認してから貼り付けるのが良い。また、外周レイヤーは0.6mmノズルで1層分だと接着面が溶けすぎて穴が開くことがあったため、2層以上であることが好ましい。クリップなどで固定しておかないと接着できないため、固定することが重要である。ヒートガンの吹き出し口は広いものより細いものの方が調整がしやすい。

3-5. 制作物の外観



Fig.30 着用イメージ(外側)



Fig.31 着用イメージ(前方)



Fig.32 着用イメージ(内側)



Fig.33 着用イメージ(上方) 透明なフィラメントのアッパーに暗色系の靴下を
合わせることで施したテキスタイルが浮き出る様子

パラメトリックに全体の形状を調整することで、異なるサイズでの組立も可能である (Fig.34～38).



Fig.34 (左から) 23. 5cm/25. 5cm/27. 5cmの組立後イメージ



Fig.35 (左から) 23. 5cm/25. 5cm/27. 5cmの組立後イメージ



Fig.36 23.5cm



Fig.37 25.5cm



Fig.38 27.5cm

支柱はRhinoceros上でオン・オフ可能であり、スリッポン状のフットウェアも出力可能である(Fig.39)。また、必要に応じて使い慣れたインソールを後付けすることもできる。しかしながら、アッパー内部の体積が影響を受けるため、厚さのあるインソールなどを挿入する際は、場合によっては大きいサイズで制作をするなどの調整が必要である。

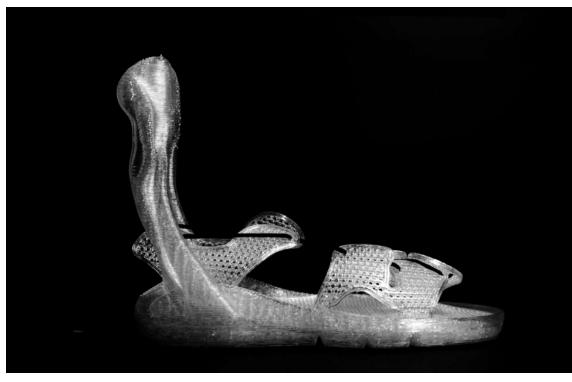


Fig.39 市販インソールを着用した支柱なしのモデル

3-6. 制作変遷の一覧

制作を進めていく中で履きたい・履けるカタチを求めて、アッパーの形状はサンダル型からスリッポン様式のアッパーデザインに変容した。v4およびv6は組立に時間がかかり、片足分のみしか制作できず、v5は両足分制作したが履きづらい上にアッパーが手で引っ張ると剥がれてしまっていた。そのため、実際に歩行出来たのはv3とv7のみであった。また、v3からv6までは簡易的に最低限の装着感を求めて設計したが、結果的には組立や装着に時間を要した(表4)。

表.4 制作物とその過程

| | | |
|----|---|---|
| v1 |  | <p>出力されたパート:1 習作として初めて出力したモデル。底が薄く、曲面的な形状であったため出力自体は失敗している。また、サポート材が多く用られておりニッパーで取ることに苦労した。この時は足に対して直角に支柱が立ちあがっており足に装着して直立した時には抵抗感はなかったが、歩くと弾むような感触が面白い印象を得られた。</p> |
| v2 |  | <p>出力されたパート:1 ソールを薄くして靴の中に履くことを試みた習作。脛あて部分はモデル上で制作していたが、微細な調整に難渋した。また、脛に沿うようにモデリングを行ったが、履いて歩くと脛当ての下側が脛に刺さり、痛みを伴った。このモデルを通じて、靴の中に履くことと脛あてを一体成型で作ることを諦めた。底から足を包み込むようなアッパーも試作したが接着は失敗した。</p> |
| v3 |  | <p>出力されたパート:4 脛あてにマジックテープを用い始めたモデル。また、アッパーを組み立てて簡易的に足に装着することを試みた。インフィルパターンによって出来た穴にゴム紐を通して固定することを試みたが、見栄えが悪く、納得がいかなかつた。この時接着剤を用いて接着したが、歩行後には剥がれていた。また支柱部分も折れてしまった。</p> |
| v4 |  | <p>出力されたパート:3 v3の支柱破損部分から、下から1/3あたりに曲げストレスが多いと仮定して強度の補強を行った。このモデルでは支柱の強度はある程度保たれそうであることが分かったが、装着感と接着に難渋した。このモデルではインソールとアッパーが一体になっており、接着はヒートガンを用いての習作であったが、インソールがドロドロ溶けてしまい、失敗に終わった。</p> |

| | | |
|----|--|--|
| v5 | | <p>出力されたパート:3 v4と組立方法は同じである。 アッパーに穴を開けて紐を通す仕組みを検討したが、糸引きなどで審美性に欠けていた。 v4まではソール部分がくぼんでふちがあったがソールを曲げたときに座屈が生じていたことから、このモデル以降、ふち無しとなった。 このモデルもv4同様インソールが溶けている。</p> |
| v6 | | <p>出力されたパート:9 紐の形状を平紐にして花びらのようなイメージでパートを細かく分けて接着することを試みた。結果としては履きづらく、痛みも伴った。 また、脛あてはマジックテープを組み合わせた装着を検討したが、これも不快感が生じ却下した。 v1~v6を通して、身の回りのモノと組み合わせることと簡易的な装着を諦め、v6習作以降はスリッポン形状に取り組むことにした。</p> |
| v7 | | <p>出力されたパート:5 v6から思い切って舵を切った。 完成までいくつか制作をしたが、はんだごてを使って接着が出来ることが分かってきた。</p> <p>最後の祈りを込めて、アイヌ民族の衣服「ルウンペ」などにみられる模様をアッパーにあしらった。</p> |

3-7. 小括

制作実践を振り返ると、100%スケールで造形可能な3Dプリンタの使用、v7のようなスリッポン形状にデザインの方向性を決めたことが、制作の中でのブレイクスルーだったように思われる。[第四章 評価]では、着用可能になった時点の(v3)と、本研究における最終段階(v7)を用いて行った、動作への関与や課題を探る評価について述べる。

第四章 評価

この章では、制作物を使うことを通した評価を記述する。
主に、[3-1. 活動に着目した際の狙い]で提示した3つの動作に関する評価と、
耐久性を検討した高尾山登山について述べる。

4-1. 歩行

下図に示しているのは散歩道(自宅から近所の公園)の往路と復路の際に、6軸加速度センサー(以下,ORPHE CORE[株式会社ORPHE])を使用して、靴と本研究での制作物を比較した。(以下,FootGearPrintingの略称にFGPを用いる。)この歩行評価では、支柱のある構造がストライド(歩幅)に影響しうるのかを検証することを試みた。

往路と復路で履き分けた際の歩行データ

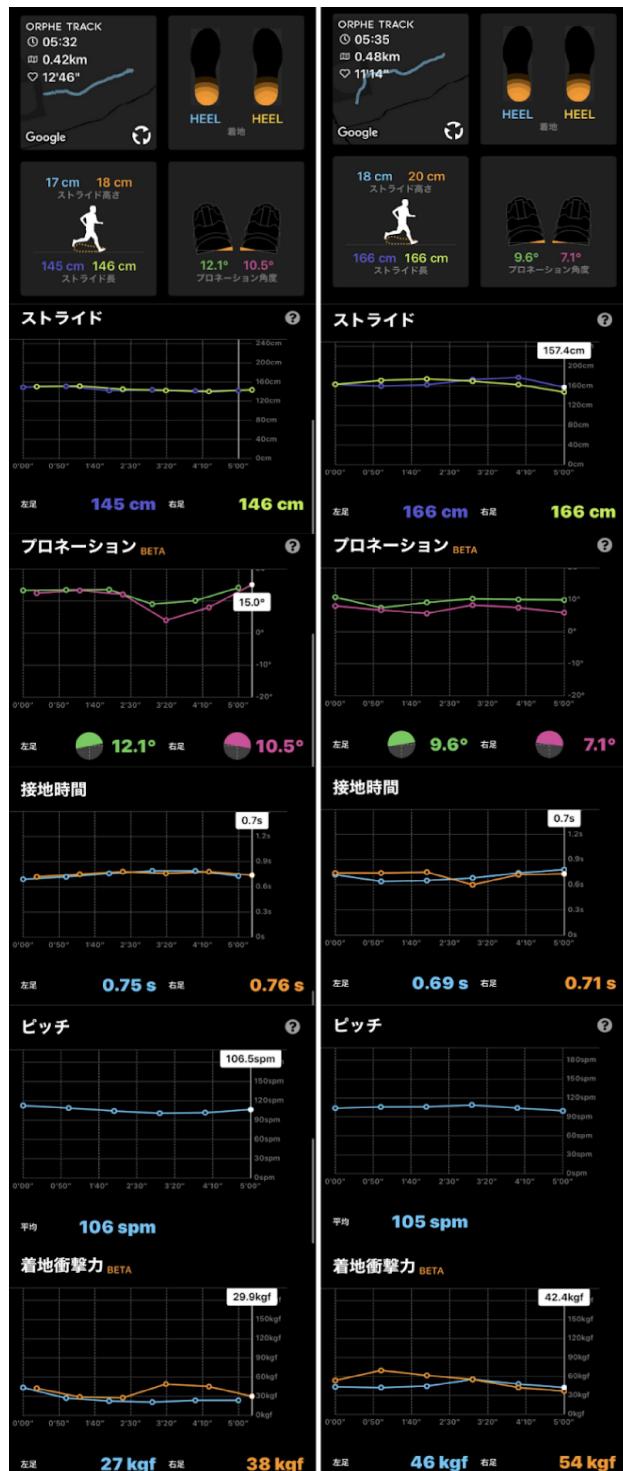


Fig.40 靴(左)とFGPv3(右)の歩行中に計測したセンシング結果

データ結果

歩行ペースは往路で $12'46''/\text{km}$ 、復路で $11'14''/\text{km}$ であった。靴よりもFGP(v3)でストライドの高さは左足で1cm、右足で2cm高く、ストライドの長さは両足ともに約20cm長かった。同様に、プロネーション角度は両足ともに約3°は小さく、片脚の接地時間は両足ともに約0.05秒短縮した。ピッチでは靴とFGP(v3)で大きな差は認められなかった。着地時の衝撃は靴よりもFGP(v3)で左足19kgf、右足16kgf増加した。

FGP(v3) 使用時の主観的評価

靴を使用した往路での疲労感や痛みはなかったが、復路では、歩きはじめから歩きにくさがあり、途中から足部の疲れおよび靴擦れが出来そうな痛みを感じた。終了時には呼吸性の疲労感があった。歩きにくさは、サイズがやや小さく窮屈であったこと、足裏が硬いこと、足先の冷たさ、支柱とアッパー部分が足部に強く当たっていたことにより感じていた。

また、なるべく意識しない歩行を試みたが、支柱部分の存在感が強いため意識してしまい、その結果大股で歩いているような実感があった。歩行後にFGP(v3)を確認すると支柱には亀裂が入り、アッパーは剥がれかけていた。

4-2. 登山

FGP(v7)は耐久性を確認することを主たる目的に、高尾山での実証実験を行った。ついで、歩行中のセンシングデータ及び、登山を通した課題の抽出を行った。



Fig.41 高尾山登山中の様子



Fig.42 高尾山の登頂時点



Fig.43 下山中の斜面を歩行している様子

高尾山登山中の歩行データ

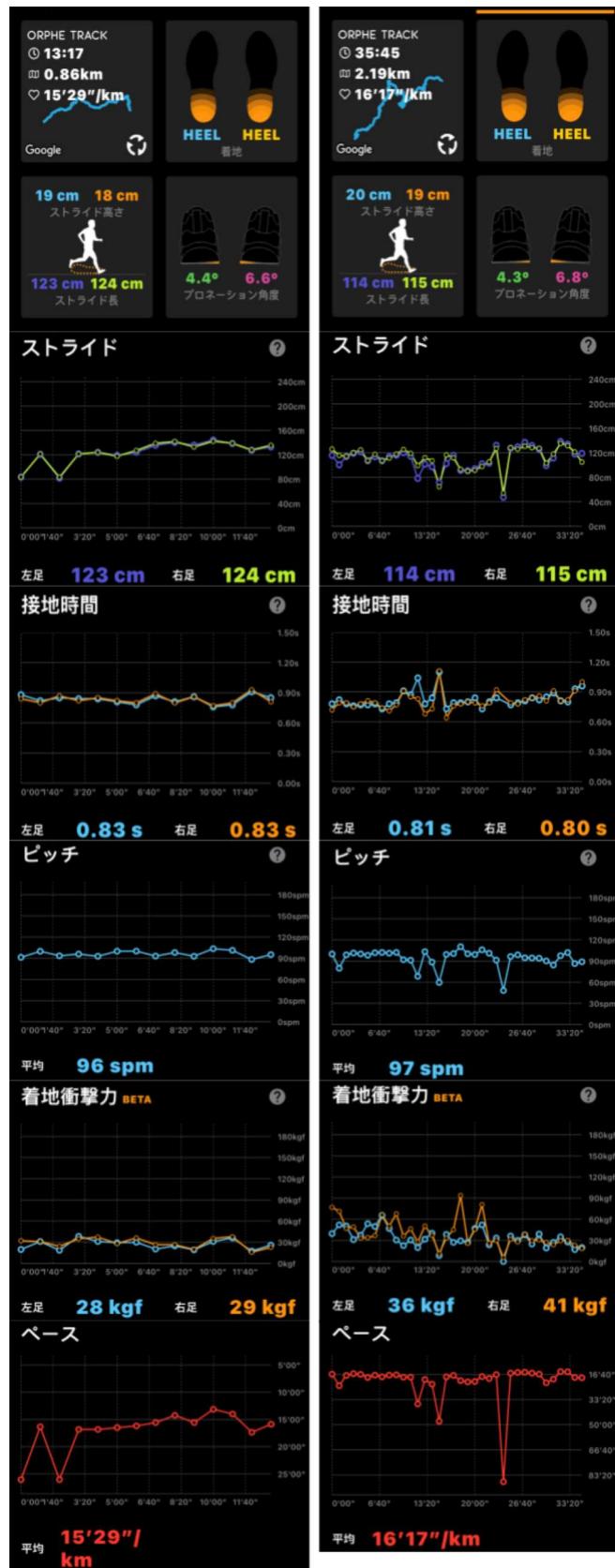


Fig.44 上り(左)と下り(右)の歩行中に計測したセンシング結果

データ結果

歩行ペースは上りで15'29"/km、下りで16'17"/kmであった。上りよりも下りでストライドの高さは両足ともに1cm高く、ストライドの長さは両足ともに約10cm短かった。プロネーション角度は大きな差は認められなかった。また、上りよりも下りで片脚の接地時間は左右ともに約0.02秒短縮した。ピッチでは上りと下りで大きな差は認められなかった。着地時の衝撃は上りより下りで両足ともに約10kgf増加した。

※計測時点の登山道環境の補足: 上りは舗装されたハイキングコースで下りはややぬかるんだ険しい道であった

FGP(v7)での登山の主観的評価

上りはほどほどの息切れはあるものの終始快適な印象であった。脛あてに程よく支えられている感覚があり、階段が上りやすかった。緩い斜面では脛あての支えの恩恵は少なかった。下りでは、滑りそうな不安が常にあり、登りよりも明らかに疲れる印象があった。

終盤では右膝に痛みが出現し、終了時には足の裏が疲れた印象があった。全体を通して足部に靴ずれ等の痛みはなく、FGP(v7)の破損もなかった。

その他

ORPHE COREでのセンシングデータは休憩中や通信接続が不安定な環境(登山中など)の計測は行えなかつたため、計測したその日の歩数をヘルスケアより集計した。

表5. iPhone app“ヘルスケア”にて集計した歩数

| 日時 | 2021/9/16 | 2021/9/24 | 2021/9/28 | 2021/10/14 | 2021/11/2 | |
|----|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| 歩数 | 4890 | 7486 | 6965 | 22216 | 6214 | 計47771(歩) |

総括

ORPHE COREを用いた歩行のセンシングは計測設定や環境設定、[4-1. 歩行][4-2. 登山]の評価と靴とFGP(v3), FGP(v7)の比較を以下にまとめると。

評価まとめ

FGP(v3)は身体の動きに関しては回旋要素(プロネーション角度)に対して貢献したが、圧縮ストレス(着地衝撃力)は増大する結果を示した。ストライドの増加によって、重心の下方移動量が増加したこと、位置エネルギーの増加に寄与し、着地時の衝撃力が増加したと考えられる。また蹴り出す際に支柱が制動に作用したことでストライドが増加したことに関与し得る。呼吸性の疲労感はこれらの結果によって伴つたのではないかと考える。

FGP(v7)の下りは滑ることを警戒して、足の接地時間を短縮しながら、下山していたことが考えられる。それと関連して、後ろ足が制動しながら下りることが出来なかつたため、着地衝撃力を緩衝できなかつたことが考えられる下りの途中に右膝に痛みが生じたのは、センシングの結果からも分かる通り着地衝撃力が高いために、関節内の圧縮ストレスに起因しているものだと考えられる。センシングを併せて行うことで、自らの身体運用を把握できた。

靴とFGP(v3), FGP(v7) の比較

FGP(v7) は靴やFGP(v3) と比較すると、歩行ペースは最も遅く、ストライドの高さに差は認めないものの、ストライドの長さが最も短かった。プロネーション角度は最も減少し、片脚の接地時間は最も増加した。ピッチは靴やFGP(v3) よりも僅かに低下した。着地時の衝撃は、靴とは同程度であり、FGP(v3) に比べて減少した。

FGP(v3) は強度が弱く歩きにくさが目立ったが、FGP(v7) は強度が保たれ、登山へ挑戦することができ最終的には約5万歩歩いても破損することはなかった。

主観的評価を併せてFGP(v3) と比べるとFGP(v7) はより快適な履き心地を達成できたといえる。また、靴に比べてより足首の安定に寄与し歩行が安定する可能性が示唆されたが、下山中の滑りやすさと硬さに起因する足の疲れを認めた。

4-3. 立ち座り

FGPが感覚の重み付けとして作用することによって、若年者でも比較的難しい運動課題も容易になるという仮説を検証するために、片足立ちによる5回立ち座りテスト(5STS)の評価を行った。

はじめに、予備的検討として1名の女性被験者(A氏)を対象に実験①を行った。後に、6名の被験者協力の元で裸足との比較を加えて、実験②を行った。また、実験②の協力中から協力後に裸足、履きなれた靴およびFGPを比較した上でのヒアリングをまとめた③。

4-3-1. 実験①

方法

下肢に重篤な既往のない健常成人女性1名(A氏)が、靴とFGP(v3) で左右交互に履き替えて5STSを行った。

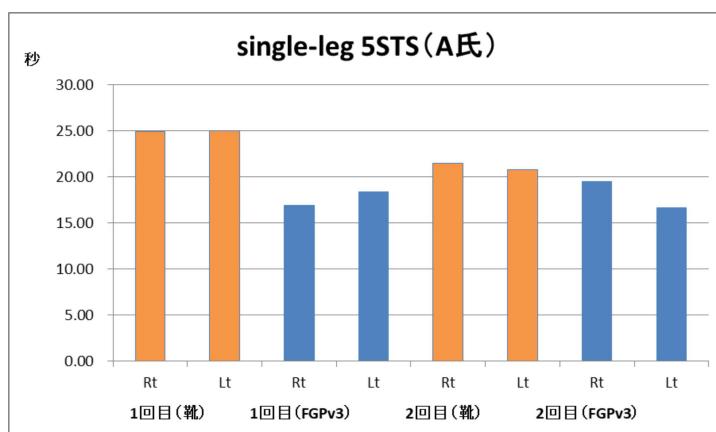


Fig.45 靴とFGP(v3)のA氏片脚5STSの結果

結果

1回目と2回目ともにFGPにおいて、靴よりも速い速度で遂行可能であった。

被験者A氏の感想

座る際に、脛がクッションのような作用があって座りやすい。次に立ち上がるまでの時間が短縮できるような感じがする。スムーズに履くのはやや難しく、立った時に踵が沈む感じがする。

4-3-2. 実験②

対象

下肢に重篤な既往のない健常成人6名×2脚
[男性:女性=3:3, 年齢(26.5±0.8歳), 身長(167.3±13.5)cm]

方法

被験者は40cm椅子からなるべく早く片脚で5回立ち座り(5STS)を反復する。その際の時間をストップウォッチで計測した。左右交互に裸足(=none)と履きなれた靴(=shoes), FGP(v7)の3群でランダムに2回実施した。さらに2回実施したうちの速いタイムを採用した [n=12, Type = 3]。

統計処理

Kruskal-Wallis検定(IBM SPSS Statistics 26)有意水準は5%未満とした。

結果

3群間における有意差は認められなかった($p=0.861, p < 0.05$)が中央値は左から順のタイムであった。また、FGP(v7)群で最もばらつきを認めた。

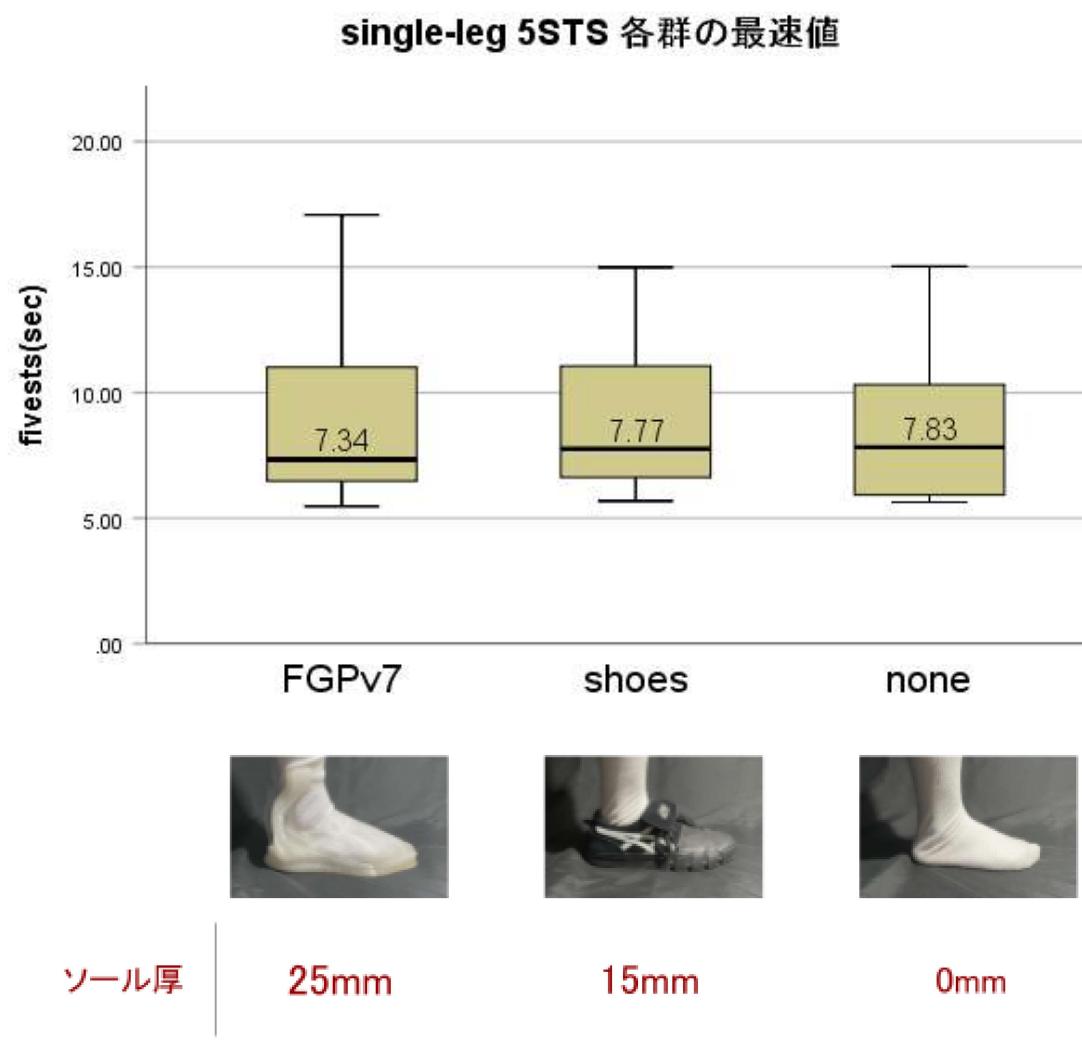


Fig.46 片脚5STSの結果とソールの厚さ比較

4-3-3. 6名の被験者へ使用後のヒアリング

FGPの底が滑りやすいことが課題として抽出出来たが、感覚への関与に関しては、使用後にも立ちやすくなるような感覚を抱く意見もあり、一定の感覚の重み付けのような可能性が示唆された。

表.6 6名が使用した後に聴取した回答と課題の抽出

| 履き心地 | 安定感 | 実用性 | 感覚への関与 |
|--------------------------------|---|---------|--------------------|
| 前向きな回答 履き心地は良い 踵が脱げなくてよい | 後ろに下がる時に感覚が増える感じがする | 屋外使用出来る | 履いた後に感覚が残る |
| | 脚のぐらつきが減るような感じがする | | 履いた後に裸足で立つと立ちやすくなる |
| | 足首が安定する | | 前から押される感覚がある |
| 課題 | <u>コンビニの床が滑る</u> <u>ヨガマットの上の方が、</u> <u>フローリングの時より立ちやすい</u> <u>寒い日は足が冷たい</u> <u>雨の日は履けない</u> | | |

結果

実験①では使用の有無に差はみられたものの、実験②の結果からは、仮説は棄却される結果となった。

省察

実験内容より座るときにドシンと早く座ることができてしまうために、急峻な着座動作がみられた。また、ソールの厚さを考慮しなかったことで足の接地面と椅子の座面距離が短くなり、運動の難しさはFGP>靴>裸足となることが想定された。この環境下で差は認められなかつたことから、支柱の存在が運動を阻害する可能性は低いことが考えられる。

4-4. 姿勢

静止立位時のFGP(v7)の装着あり・装着無しを姿勢の比較をPosenetを用いて行った。左右および前後の位置関係の比較がしやすいように肩と骨盤、足の中点からの垂線を赤線でガイド線を引いている。

筆者(Fig.47),A氏(Fig.48),B氏(Fig.49)の計3名の姿勢を以下に示す。

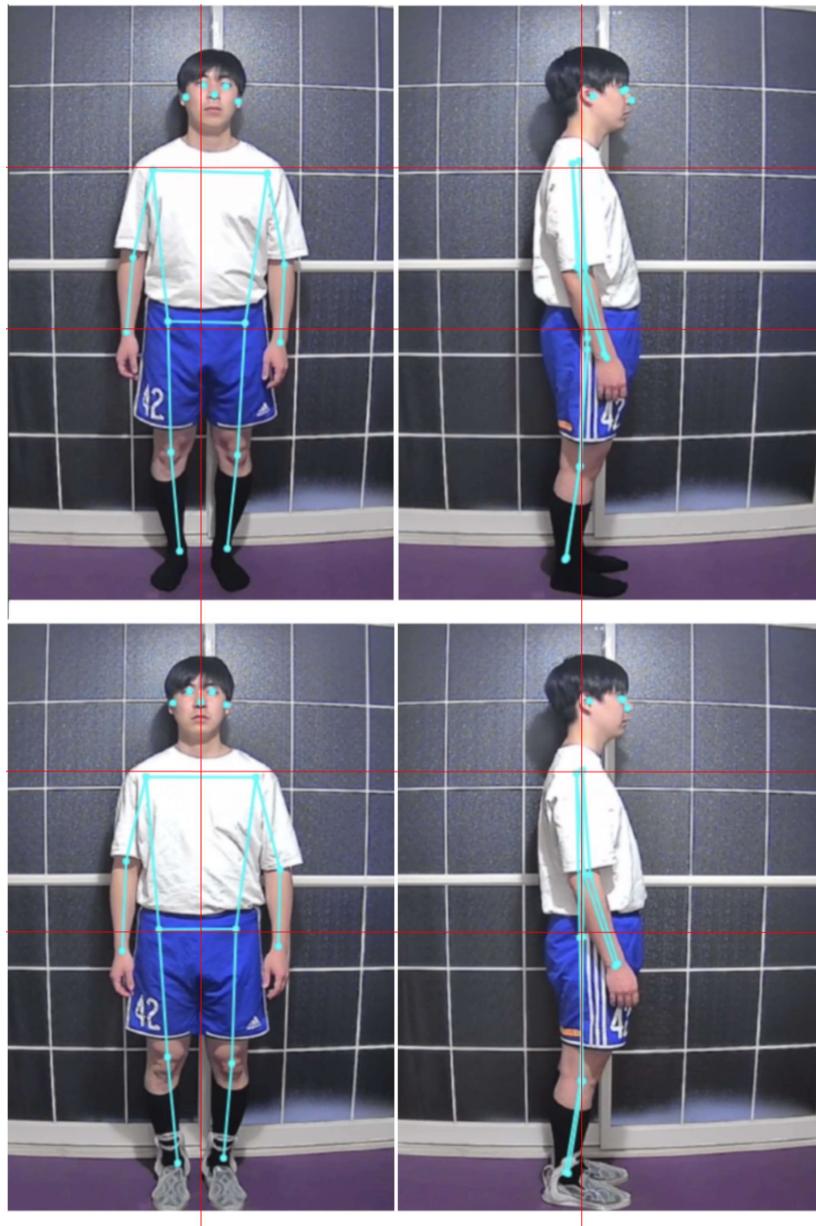


Fig.47 筆者; 装着なし(上) 装着あり(下)

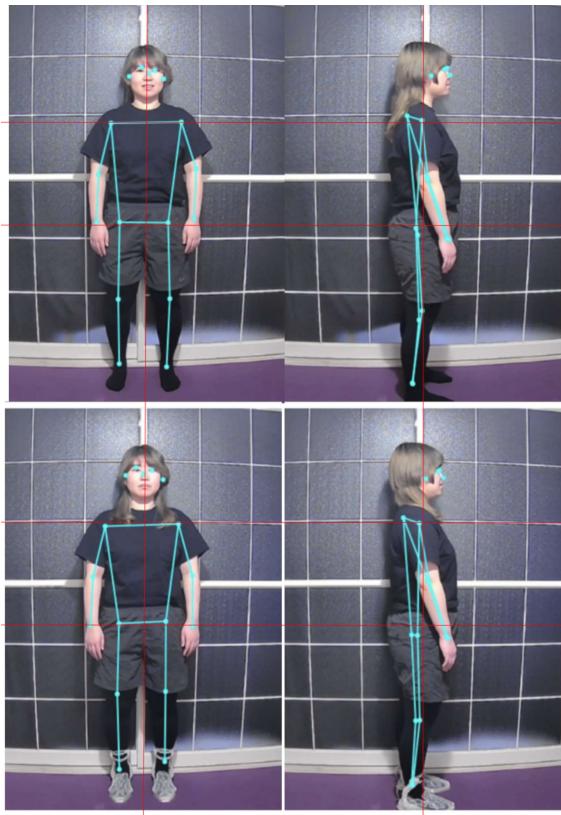


Fig.48 A氏; 装着なし(上) 装着あり(下)

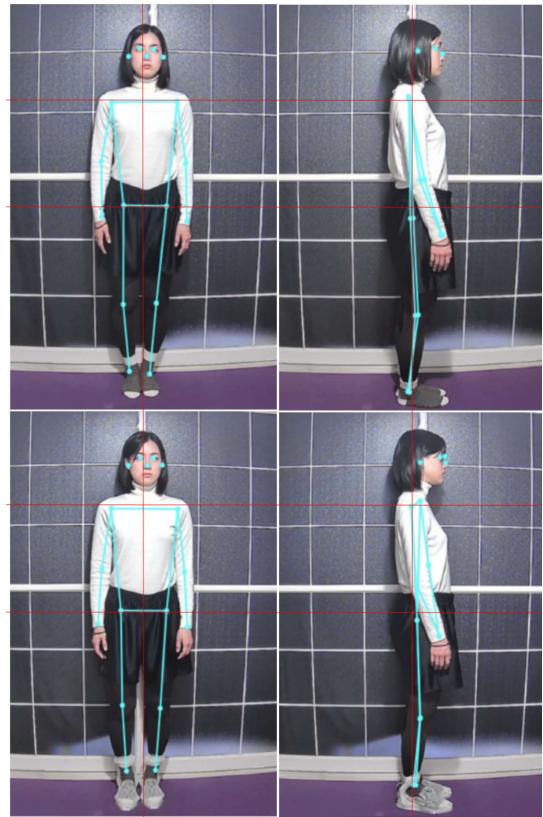


Fig.49 B氏; 装着なし(上) 装着あり(下)

結果

各被験者の肩と耳の位置関係は耳の点は装着ありで前後の距離が短くなっている。筆者とB氏はO脚(医学的には内反膝)の傾向が装着ありで減少している。

4-5. 小括

本章では評価を通して、人体との関係性だけではなく、登山を通じた本制作物の耐久性も同時に評価を行った。また、登山を試し、他者に履いてもらうことを通して、硬さおよび靴底の滑りやすさが課題として残った。

次章 [第五章 考察] の中で、一連の研究活動を振り返り考察を行う。

第五章 考察

この章では、三章 設計・制作、四章 評価の分析から、リサーチクエスチョンを参照しつつ考察を行う。

リサーチクエスチョン1

移動において脚が使わざる環境を作るならば、それはどのような形式でありうるか？

まずは、[4-4.姿勢]と直立姿勢の状態で重心移動を行う際の、側方・前方から観察したプロダクトの構造と身体との関係性について考察を述べ、次いで、[4-1.歩行]と[4-3.立ち座り]に関連した考察を述べる。

身体側方からの観察

身体の側方から姿勢を観察したときに、重心の位置はくるぶしのやや前方にある状態を標準とされている。また、前方に重心移動するとき、パッシブに後ろに戻ることは出来ない²⁸、²⁹つまり重心が母趾球に差し掛かるタイミングでつま先立ち(ふくらはぎの筋肉をアクティブに)しないと戻れない。以下に抵抗感覚とRest standing(直立て静止した立位姿勢)の関係について考察する。

a→c (Fig.50): 脛の部分の抵抗感覚がある時は、くるぶしより前、母指球よりもうしろに重心が留まっていることが装着すると感じると考えられる。

a→b (Fig.50): 脛の部分に抵抗感覚がなくなったときは踵に重心がきており、その場合はつま先を上げると立位姿勢を保つことができるという合図を提供すると考えられる。

つまり、感覚情報によって前後においては自分の重心位置が直感出来るのではないかと考える。

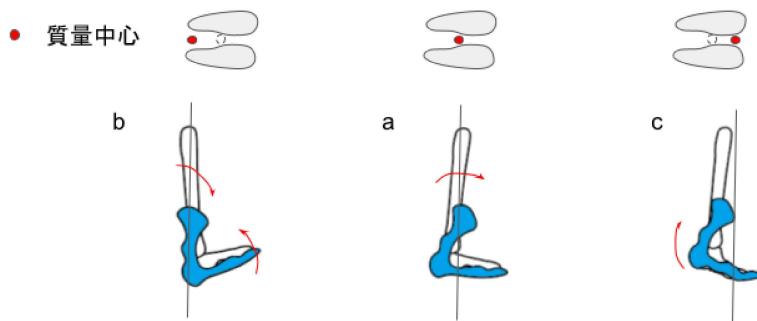


Fig.50 側面から見た抵抗感覚と立位姿勢での重心移動との関係

²⁸ Di Giulio, Irene et al. "The Proprioceptive and Agonist Roles of Gastrocnemius, Soleus and Tibialis Anterior Muscles in Maintaining Human Upright Posture." *The Journal of physiology* 587.10 (2009): 2399–2416.

²⁹ Loram, Ian D, and Martin Lakie. "Direct Measurement of Human Ankle Stiffness During Quiet Standing: The Intrinsic Mechanical Stiffness Is Insufficient for Stability." *The Journal of physiology* 545.3 (2002): 1041–1053.

身体前方からの観察

支柱があることで構造的に安定する。つまり捻挫を予防するような作用を有する。片足立ちの際は、足首の揺れを柱で支えられるため、安定した片足立ちが提供する可能性があると考える。

歩く速度との関係

[4-1.歩行]では計測環境が往復路で異なるが、結果からは歩幅が大きくなることで上下の重心移動が増加し、息切れが生じていたことが考えられる。これは筆者の運動不足によって適応出来ていないことや、意識してしまったがゆえに歩幅を大きくしたこともありうるため、断定は困難であるが、抵抗は速度に依存して身体への負荷強度が変わることがひとつ可能性としてありうるのではないかと考える。速い速度で歩行する場合は筋力強化的要素が強まり、遅い速度で歩行する際は、立脚期における安定を提供する作用が強まる可能性があると考えられる。

立ち座り動作に関して

実験結果から、有意差は認められなかったが、実験中に足を少し引いた状態から立ち上がる人と、地面に足裏を付けた状態から立ち上がる人の2つの傾向がみられた。本研究制作物は、前者の足を引いたパターンで立つことで、体重が足に乗ったときに支柱に支えられるため、立ちやすくなると考える。以上より、2つの傾向がみられたことから立ち座り動作においては、必ずしも直感的に操作できるとは限らないことが示唆された。

リサーチクエスチョン2

履き続けることを前提としたときに、履き続けることが可能な装具のデザインとはどのような素材・カタチでありうるか？

従来の短下肢装具だと靴の中に履く必要があったが、本研究での制作物は靴のように履くことができ、新しい装具の選択肢として提示できるのではないかと考えられる。

しかし、結果としては玄関に置いたとしても無目的的に本制作物を選択する機会は少なく、靴を選択する機会が多かった。また実使用に至る以前に安定した接着方法の習得、および痛みを感じることなく履けるデザインを完成させる必要があった。ただ、実際にその後、生活環境の中で使用することで、コンビニの床で滑る・長時間の登山では足裏が疲れるなど、屋外へ赴くことで、硬さ・滑りやすさなど詳細な課題が抽出され、実感できることができたともいえる。また、一人称的視点からは、それらは次の登山に向けた改良など、制作と身体活動の両輪を持続するための内的な動機付けになっていると考える。

今後、課題を解消すべき点としては、アッパーの通気性の調整、マテリアルやソールの形状によって滑りにくい状態の獲得、インソールのクッション性などが考えられる。

リサーチクエスチョン3

装具を3Dプリンタによって作るとするならばどのようなかたちをなしうるのか？

本研究の制作物は、TPU素材のみでかつフットウェアとして成立した装具としては初めての試みであるといえる。また、一般的に普及している既存の装具と比較すると、靴一靴下と合わせて3重に履くのとは異なり、靴として使用できる形式でもある。雨天や寒い日に対しては改良の余地を残したが、屋外、特にアスファルト環境での歩行には適応することは可能になったといえる。

本研究で提示した制作手法は、接着剤を用いずに、熱溶着・圧溶着のみで組み立てた。その結果、高尾山の登山にも耐える耐久性を有することを検証し、約50000歩ほど歩行しても破損しないことが実践で明らかになった。制作過程において接着剤を用いても1~2日程度で破損していたが、100%同一素材でもある程度の耐久性を担保出来たことは、プロダクトにおけるリサイクルの実現性においても一步近づけたのではないかと考えられる。

装着感に対しては「履き心地がよい」と一定の定評を得ることはできた。「踵が脱げにくい」点においては、3点を固定することによって足が浮いた時にもフィットしていたことが寄与したことが考えられる(Fig.51の赤線部)。

制作のプロセスにおいては、出力から組立を行って、はじめて装着感を確認できる経験から、フットウェアのプロトタイピングでは、小さいスケールで制作する意味は乏しかった。よって、なるべく早い段階から材料を絞って制作をすすめるのが好ましいと考える。

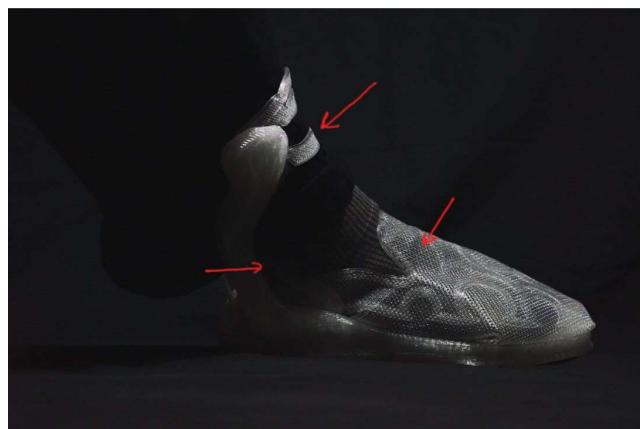


Fig.51 形状によって固定されることで踵が脱げずに装着できる

制作物の振り返り

制作物の変遷とその制作の過程で生じた課題を [第三章 設計・制作] の中それぞれ割り振ったv1~v7の番号に沿って、何を検証しカタチが変容したのかについて振り返る。



v1

v2

v3

v4

v5

v6

v7

Fig.52 制作物v1からv7の概観

表7は、v1～v7各制作にて生じた課題を整理したものである。
(—評価不可, ×出来なかった, △十分とは言えない, ○おおむね十分)

表7. 制作過程に生じた課題の整理

| | | v1 | v2 | v3 | v4 | v5 | v6 | v7 |
|---------|------------|----|----|----|----|----|----|----|
| 装着感 | 痛みがない | — | — | × | × | × | △ | ○ |
| | 適度な固定感 | — | — | △ | △ | ○ | ○ | ○ |
| | 脱ぎ履きしやすい | — | — | △ | △ | × | × | △ |
| | 適度な抵抗感 | — | — | △ | △ | △ | ○ | ○ |
| 出力—組立方法 | 安定して出力できる | × | × | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 接着できる | — | — | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 十分な接着強度である | — | — | × | × | × | △ | ○ |
| | 組立の効率がよい | — | — | × | × | × | × | ○ |
| 耐久性 | 支柱(折れない) | — | — | × | × | △ | ○ | ○ |
| | アッパー(壊れない) | — | — | × | × | × | △ | ○ |

制作の変遷において生じた課題

v2では、靴の内部に挿入も検討したが、材料が柔らかいため靴の中に足を入れた時につま先側が折れてしまった。このことから、既存の短下肢装具がある程度硬い材料であるために、靴の内部に履くことが出来るデザインになっていることを推察し、TPU素材などが底の部分に用いられなかつたことが示唆された。

組み立てにおいて、v3～v6まではゴム紐を用いて装着する試みであった。組み立てパーツが多く出力と組立の両方において時間がかかっていた。装着していると指先が冷たくなる、また指先側のアッパーが剥がれやすいなど、装着感と組立強度に課題を残していた。

v7は、v6までにみられた課題はクリアできたため、各サイズを揃えた評価や、耐久性を確認するために、高尾山に登頂することを試みる評価ができたとも考えられる。

また、「滑りやすさ」という課題に関して、アスファルト環境では気にならず、自宅内で歩く時はゆっくりで外で歩くときと比べて速い速度で歩行することはないため、むしろ足音の方が気になり、「滑りやすさ」を気にする機会は少なかったと考える。

第六章 結論

本研究の成果

本研究では、3Dプリンタを用いた新しい装具のデザインとその手法を提案した。また、一連の設計を自宅内で完結し、複数人数に提供可能なサイズ調整をモデリングソフト内で実行可能なものを実装/実現した。

評価を通して、感覚の重み付けを行うことでノンバーバルな姿勢修正の可能性を示し、FFF方式の3Dプリンタを用いたフットウェア設計における「硬さ」「滑りやすさ」という課題を提起した。本研究で制作したデータに対して、ことなる物性をもつマテリアルを用いることで、硬さの制御や個人の嗜好により適合していく営みへも発展しうる。また、一連の設計プロセスは接着剤を用いておらず、分解—再利用のプロセスへの転用可能性も示した。

今後の展望

(1) 高尾山のその先に向けて

足部の動搖を減らすことから、足首を安定させて不安定な環境に適応可能であることは期待できるが、本論ではソールの細部(滑りやすさの解決)までには改良に至らず、また両者の相性は足の柔軟な応答を時に妨げるため改良が必要と考える。ここは本研究の限界として、より大きな山に向けた準備としてソールのデザインをマテリアルから再考したい。Fig.53は2021年中に3Dプリンタで出力が出来なかつたが、エゾシカの足裏からインスピレーションを受けてソールのモデリングを行ったものである。

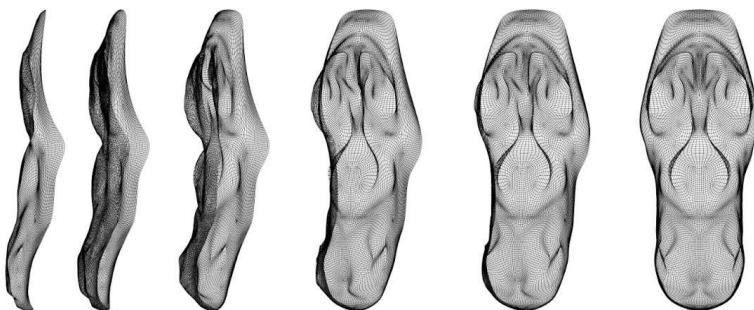


Fig.53 Gravitysketchでモデリングしたソール



Fig.54 友人つたいで提供されたエゾシカの足

(2) 臨床での活用

疾病に即すると、バランス能力低下・足部の感覚障害が生じることはしばしばある。例えば、糖尿病は微小な毛細血管の障害から神経障害をきたし、手袋靴下型の深部感覚の鈍麻に伴い、バランス能力低下が生じると考えられている。指先の感覚は元には戻らないが、脛を利用してすることで、感覚情報の頼りを増やす支援になる可能性はありうるだろう(この場合、足の傷口から感染一壞疽のリスクがあるためフィッティングは注意深くしなければならないだろうが)。

また、若年層においては、スポーツ障害でしばしば生じる反復性の内反捻挫にも靭帯に含む固有受容器の減少と靭帯の支持性低下から足関節不安定性をきたすことが考えられている。このような場合にも感覚情報から適当な運動を学習したいとき、反復運動の精度向上にも寄与し得るだろう(意識的にコントロールが難しい足関節不安定性に関する動搖を抑える)。

あるいは、高齢者・パーキンソン病などは健常者と比べて足首まわりでバランス取ることが難しくなり、踵側に体重をかけるなどはできなくなったり、タンデム肢位(下図)でのバランスが困難になることに関連して後ろ歩きが困難になる。これらの運動課題には、安定を提供してより容易なバランスをとる環境を提供可能と考える。

これらの予防的なバランス戦略の再学習は反復を通したものであり、冗長で退屈かつ不安定感は予測的にこわばるために、しばしば難しい。このような状態に至ったときに、足部に安定を供給することで、おのずから不安定な運動課題にチャレンジする機会を FootGearPrintingは提供可能かは今後の課題としたい。

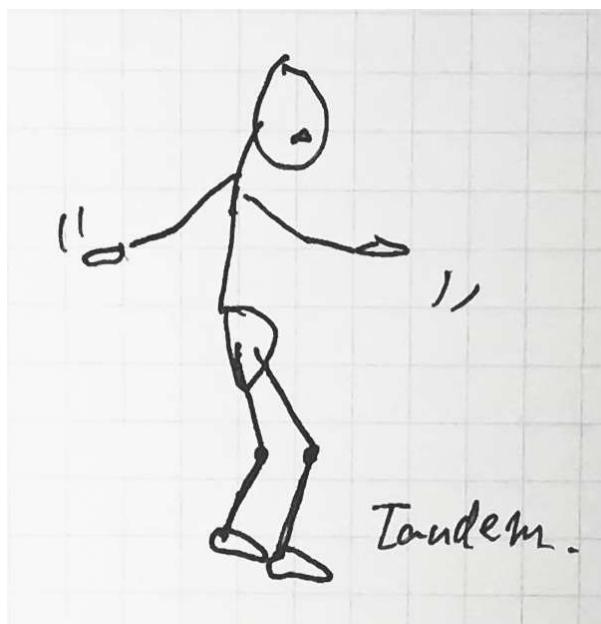


Fig.55 タンデム肢位（継足位）でのバランス練習

(3) 現代生活からのトランジションとしての“Gear”

高齢者に限らず、多くの人は皆ピンピンコロリを志向していると仮定して以下に述べる。社会は、今後も足を使う頻度が減るであろう。しかしながら、足とともに共生することはヒトにおいては半ば運命づけられており、その足の融通が効かなくなつて初めて存在の大きさに気づかれる。この後天的な気づきに対して、今日の医療では対処しきることができないと考える。また、うっかり生き延びて筆者が高齢者に属したとき、未来もまた少子高齢化であろう。

そこで、二次戦略として、FootGearPrintingを提案する。FootGearPrintingを通して繰り返しアップデートを図る中で、高尾山の頂点に触れた。これはやや誇張した解釈ではあるが、アウトドア“Gear”に近似したといえる。

加えて、負のサイクルを転回する新しい習慣(Re-habilitation)のモデルとしての、“Gear”を含み込めることができるのでないかと考える。

本研究の活動を通して、登山などの一連の運動は、骨格筋を動員し、血液を循環させ、呼吸から酸素を取り込む身体内部のGearを作動させたともいえる(下図内の循環におけるWassermann's gear)。よって、作る—履くをセットにした活動が日常の範囲内で普遍となつた時、モノを介して作業と歩行がセットとなることによる活動の意味が生まれるのではないか。一方で、接着剤を用いないことへの動機は、自宅に溢れかえる制作物への憂いからであった。マテリアルの再資源化に関しては本研究では実施できなかつたが、今後の展望として挙げたい。

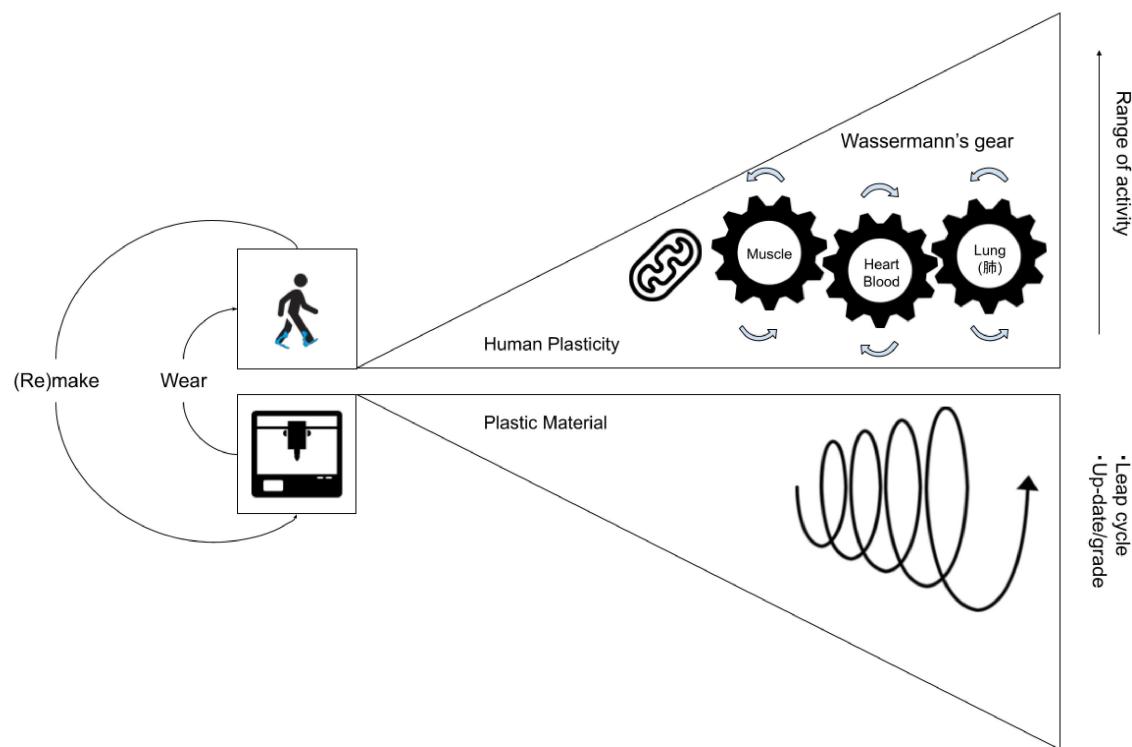


Fig.56 ヒト側からみたときのFoot“Gear”としての身体の循環/
デジタルファブリケーションの可能性としてみたときのマテリアルの循環

以上は、Cycle of frailtyにおける生活のなかにおいて、低活動(\downarrow Activity) やエネルギー消費量の減少(\downarrow Total energy expenditure) に対して、作ることを通して関与し得ることを示唆する。消費的に履くよりも、遊戯的に作りながら考えることで、運動の意味を見出すことができるかもしれない。ただし、これらは筆者の動機が強いだけの可能性があるため展望にとどめておきたい。

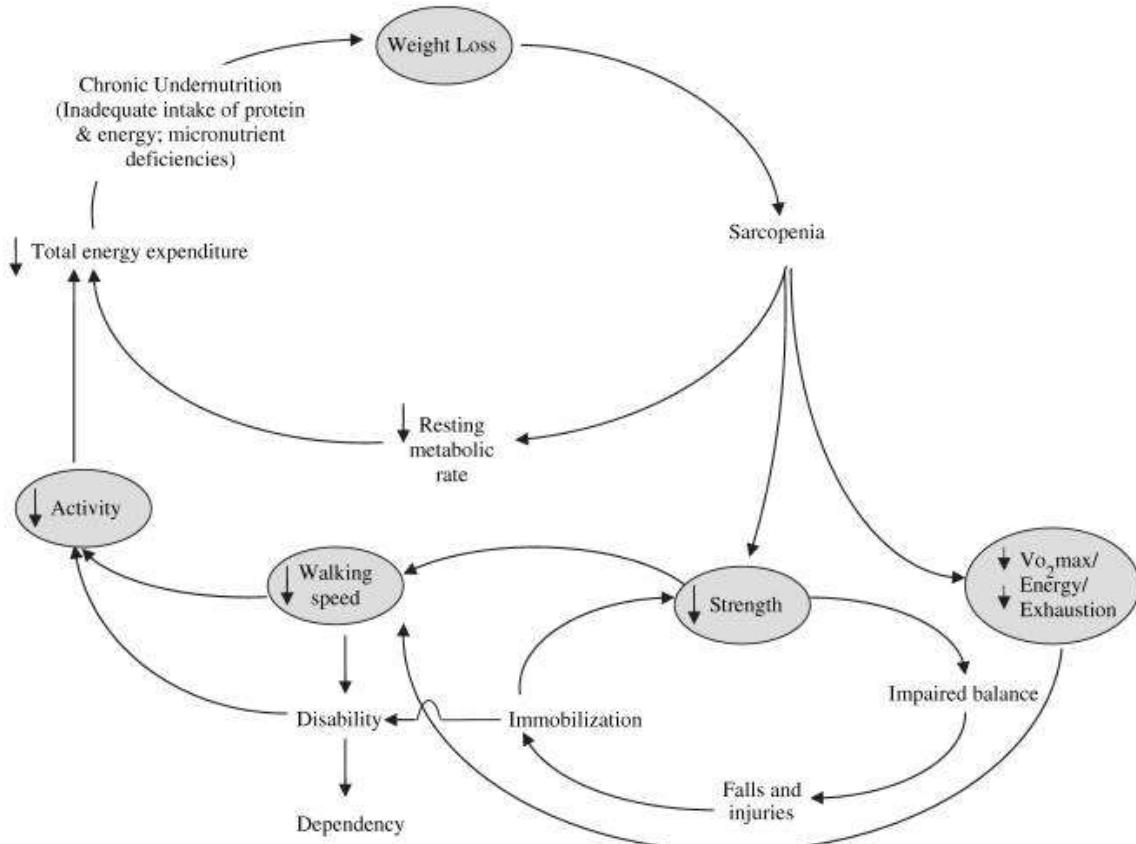


Fig.57 Cycle of frailty;フレイルサイクル Xueら(2008)³⁰

おわりに

本研究は3Dプリンタを用いたデザイン実践を通して下肢装具を制作することと、そのあらう可能性を探るものであり、本制作物による感覚の重み付けの作用が有効かは、重心動揺計や筋電図などを用いた詳細な検討が必要であり、自宅環境では限界があった。また、環境へ応答する設計にも課題を残したこともあり、引き続き改良を続けていきたい。

³⁰ Xue, Qian-Li et al. "Initial Manifestations of Frailty Criteria and the Development of Frailty Phenotype in the Women's Health and Aging Study II." The journals of gerontology. Series A, Biological sciences and medical sciences 63.9 (2008): 984–990.

参考文献・引用文献・出典

- 1 Buchner, David M, and Edward H Wagner. "Preventing Frail Health." Clinics in geriatric medicine 8.1 (1992): 1–18.
- 2 菅沼惇一, 橋本宏二郎, 高木 恵 et al: 恐怖環境が静止立位中の sensory reweighting に与える影響, 第 50 回日本理学療法学術大会. 2015. 東京.
- 3 Carter, Nick D, Pekka Kannus, and Karim Khan. "Exercise in the Prevention of Falls in Older People: A Systematic Literature Review Examining the Rationale and the Evidence." Sports Medicine 31.6 (2001): 427–438.
- 4 Hatton, Anna L et al. "Textured Shoe Insoles to Improve Balance Performance in Adults with Diabetic Peripheral Neuropathy: Study Protocol for a Randomised Controlled Trial." BMJ open 9.7 (2019): e026240–e026240.
- 5 Lin, Iu-Shiuan et al. "Reweighting of the Sensory Inputs for Postural Control in Patients with Cervical Spondylotic Myelopathy after Surgery." Journal of neuroengineering and rehabilitation 16.1 (2019): 96–96.
- 6 Henry, Mélanie, and Stéphane Baudry. "Age-Related Changes in Leg Proprioception: Implications for Postural Control." Journal of neurophysiology 122.2 (2019): 525–538.
- 7 GOTOH, Atsushi, Takeshi TAKADA, and Kenji SUEHIRO. "Standing-Up." Journal of Kansai physical therapy 2 (2002): 25–40.
- 8 Chvatal, Stacie A, and Lena H Ting. "Common Muscle Synergies for Balance and Walking." Frontiers in computational neuroscience 7 (2013): 48–48.
- 9 Sándor Dóró:Künstleranatomie: Menschliche Körper zeichnen,Haupt Verlag AG,(2015),p322
- 10 Deandrea, Silvia et al. "Risk Factors for Falls in Community-Dwelling Older People: A Systematic Review and Meta-Analysis." Epidemiology (Cambridge, Mass.) 21.5 (2010): 658–668.
- 11 Wilkinson, Matt, 神奈川夏子. 脚・ひれ・翼はなぜ進化したのか : 生き物の「動き」と「形」の40億年. 東京, 草思社, 2019,no. 1375/6390.
- 12 原洋史. 自宅内歩行における下肢装具使用状況の影響要因—慢性期脳卒中患者を対象とした検討. 理学療法研究・長野. 2006, no. 35, p. 24–26.
- 13 Bernard C. Simons, Robert H. Jebsen, Louis E. Wildman: Plastic short leg brace fabrication, orthotics and prosthetics 21.3,(1967):215-218
- 14 Engen, Thorkild J: The TIRR Polypropylene Orthoses, orthotics and prosthetics, 26.4(1972):1-15.
- 15 Hypebeast.com 「3Dプリント技術を用いた新作ランニングシューズ Nike Zoom VaporFly Elite Flyprint が誕生」(最終閲覧日 : 2022年1月13日)
<https://hypebeast.com/jp/2018/4/nike-zoom-vaporfly-elite-flyprint-3d-printing>
- 16 Nike HP 「ナイキ フライプリントとは?」(最終閲覧日 : 2022年1月13日)
<https://nike.jp/nikebiz/news/2018/04/18/818/>

- 17 Fused footwear HP(最終閲覧日：2022年1月13日)
<https://fusedfootwear.com>
- 18 株式会社ORPHE HP 「慶應義塾大学SFCと共同開発した3Dプリント製フットウェアがフェーズ フリーアワードでオーディエンス賞を受賞」(最終閲覧日：2022年1月13日)
<https://orphe.io/news/sfc-3dshoes-phasefree-award-winning>
- 19 Magarimono HP(最終閲覧日：2022年1月13日)
<https://magarimono.com/>
- 20 Wired記事 「A new adidas shoe uses just one material – and is fully recyclable」(最終閲覧日：2022年1月13日) <https://www.wired.co.uk/article/adidas-futurecraft-loop-running-shoe-recycle>
- 21 Collins, Steven H, M Bruce Wiggin, and Gregory S Sawicki. "Reducing the Energy Cost of Human Walking Using an Unpowered Exoskeleton." *Nature* (London) 522.7555 (2015): 212–215.
- 22 Gigamen記事 「歩行時の効率を上げる電力不要な外骨格デバイスが開発される」(最終閲覧日：2022年1月13日) <http://www.gigamen.com/unpowered-exoskeleton-walking.html>
- 23 Turbomed社 HP(最終閲覧日：2022年1月13日)
<https://turbomedorthotics.com/>
- 24 Allard社 HP(最終閲覧日：2022年1月13日)
<https://www.allardint.com/>
- 25 Jin, Yuan, Yong He, and Albert Shih. "Process Planning for the Fuse Deposition Modeling of Ankle-Foot-Othoses." *Procedia CIRP* 42 (2016): 760–765.
- 26 米国クリニックが運営するブログ 「3D Print Innovations」(最終閲覧日：2022年1月13日)
<https://www.biotechnc.com/posts/3d-print-innovations/383>
- 27 Faustini, Mario C et al. "Manufacture of Passive Dynamic Ankle-Foot Orthoses Using Selective Laser Sintering." *IEEE transactions on biomedical engineering* 55.2 (2008): 784–790.
- 28 Di Giulio, Irene et al. "The Proprioceptive and Agonist Roles of Gastrocnemius, Soleus and Tibialis Anterior Muscles in Maintaining Human Upright Posture." *The Journal of physiology* 587.10 (2009): 2399–2416.
- 29 Loram, Ian D, and Martin Lakie. "Direct Measurement of Human Ankle Stiffness During Quiet Standing: The Intrinsic Mechanical Stiffness Is Insufficient for Stability." *The Journal of physiology* 545.3 (2002): 1041–1053.
- 30 Xue, Qian-Li et al. "Initial Manifestations of Frailty Criteria and the Development of Frailty Phenotype in the Women's Health and Aging Study II." *The journals of gerontology. Series A, Biological sciences and medical sciences* 63.9 (2008): 984–990.

謝辞

田中浩也先生には、理学療法士一辺倒だった私に対し、浅学にもかかわらずデジタルファブリケーションを使うものづくりというまたとない機会をえていただきました。また、一連の研究活動を通して、分かりづらい専門用語に対する丁寧なご指摘と示唆に富むご指導をいただきました。心より感謝申し上げます。

加藤文俊先生、松川昌平先生には、副査の立場から多大なご助言をいただきました。より深く考えるきっかけにもなりました。心より感謝申し上げます。

増田恒夫先生、淺野さんには、NUでのものづくりのご支援をいただきました。短い間ながらも、おふたりの制作活動を間近で見ることができたことで、自力でホームラボの中で制作活動に當めたのは大きかったです。心より感謝申し上げます。

林園子さんにはメイカソンの活動へのお誘いから、グループワークを通して色々な方とのものづくりをする機会を提供していただきました。ありがとうございます。

大日方伸さん、田岡菜さんからは、ホームラボながらもデザインに熱中する姿勢を学び取れたような気がします。おふたりが議論していた直線と曲線のバランスという視点は私の表現にも影響を与えたように感じます。ありがとうございます。

青山新さんには、微生物と儀礼を組み合わせたデザイン、その背景にあるであろうSF小説には大変な刺激を受けました。研究を身近で見聞きしながら作品を鑑賞できることもまた、面白い体験になりました。ありがとうございます。

研究室同期の、荒井さん、黄さん、岡崎くん、酒井さんありがとうございます。荒井さんには入学時から丁寧な3Dプリントの取り扱い方法からものづくりに対する姿勢、議論する機会をいただき、多くの学びをいただきました。黄さんは同時期に入学してから、中華料理と一緒に食べに行くなど、私にとって心の支えになったと思っています。黄さんの感性や視点のその時々に新鮮な視点を感じました。ありがとうございます。岡崎くんとは、共同でジョイステイックをつくる研究や触感に関するディスカッション、足の勉強会の主催など、幅広くお世話になりました。深く感謝します。酒井さんは、芸人・音楽活動で忙しいところ、装具に関する洞察・アドバイスをいたいたことに感謝します。それぞれが異なるバックグラウンドではあったことも相まって、共に切磋琢磨する時間を共有できたことは、たいへん有意義でした。ありがとうございます。

友人の野中さん、石川さん、梅村さんには研究協力や理学療法に関する議論、心強い支援をいただきました。理学療法士から木こりに転身した野中さんの友人からいただいたエゾシカの脚は、インスピレーションの源泉となり、ヒトの筋配列や形状とは異なれど同じ骨・関節を共有していることを解剖を通して実感することが出来ました。皆様に深く感謝申し上げます。

家族には、背中を押してもらい挑戦する機会と金銭面のサポート、日々の連絡から老後生活に関する情報提供まで、多方面でお世話になりました。感謝します。

今まで、共に回復を目指した患者さん・利用者さんに心より感謝いたします。皆さまから頂いた意見や、経験から本研究のアイデアが生まれました。また、前職でこの案を提案したときに頂いた温かい言葉が私を支えてくれたように思います。

さいごに、校正やデザイン・研究協力・生活面のサポートにおいて、最もそばでサポートを続けてくれた妻の有希さんに感謝します。新しい環境に身を置く機会をいただきました。深甚の謝意を表します。

付録

電動車いすテニス用ジョイステイックデザインプロジェクト

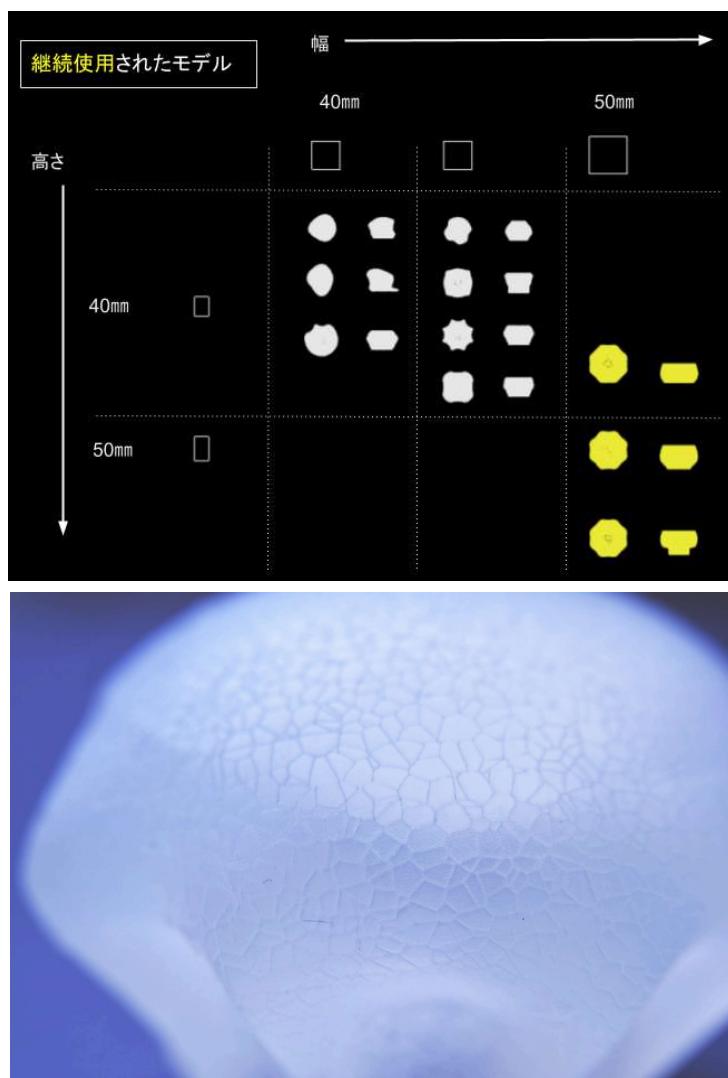
同研究室の林園子さん(博士課程在籍2021年度時点)が主宰するメイカソンへの参加をきっかけに始まったプロジェクトである。

当初「テニスプレー中に手が離れてしまう」課題を持っていた、日本で唯一プロとして活動されている電動車いすテニスプレーヤーの一宮さんに、電動車いすをコントロールするジョイステイックのデザインを行った。

本人の主観的にはテニスボール大の大きさが好ましいであろうという意見をもとに、異なるサイズ・対称-非対称な形状をFFF3Dプリンタを用いて制作し提供した。下図の黄線部で示した形状が継続的に実使用されたモデルにあたる。

ゲーム機のスティックなどと同様に電動車いすのコントロール操作には円形・対称的な構造が好まれる傾向が本プロジェクトにおいて示唆的であった。

月に数回にわたりテニスプレーを同行し、現場を観察した結果としては、2021年12月時点で手が離れることなくテニスプレーを継続しておこなうことは可能となっている。



その後、同研究室の岡崎太祐氏を中心とした、質感・審美性のプラスチックアップを行い、本人のアイコンカラーである赤色に着色したものを提供し、使い続けられるジョイスティックが完成した。下図は岡崎氏によるシボ加工を施した初期モデルである。

書籍協力

先に紹介した林園子さんらが出版した、「無料データをそのまま3Dプリント作業に出会える道具カタログ/事例集、2021、三輪書店」のデータ作成(一部)に協力した。



出典：https://www.amazon.co.jp/gp/product/4895907287/ref=dbs_a_def_rwt_bibl_vppi_i1
(最終閲覧日：2022年1月13日)

学会発表

国内学会での発表

2021年12月 日本地域・支援工学・教育合同理学療法学会学術大会 2021
(のうち、第10回日本支援工学理学療法学会にて演題発表を行った。)

賀下耀介,田中浩也:

3Dプリンタを用いた足部へのSensory reweightingに着目した短下肢装具のデザイン実践