

[研究助成 (A)]

視覚障害者の白杖操作のためのセルフ訓練デバイスの開発

Development of the White Cane-Type Holdable Device using Illusory Pulling Cues for Orientation & Mobility Training

2221020



研究代表者

産業技術総合研究所
情報・人間工学領域

研究員 田 辺 健

[研究の目的]

白杖は視覚障害者が単独で移動する際に最も広く利用される道具の一つであり、日本で視覚障害者が歩行する際は携帯が義務付けられている。白杖の役割は「情報の収集」、「安全性の確保」、「視覚障害者のシンボル」が挙げられる(芝田, 2010)。特に、情報の収集や安全性の確保を行うためには、適切な白杖の操作が求められ、操作の習得には歩行訓練士による指導が必要である。また、近年の日本国内では視覚障害者が駅のホームから転落する事故が多発している。これらの事故を受けて、日本歩行訓練士会は視覚障害者に対して適切な白杖操作の訓練を受講するように提言した(日本歩行訓練士会, 2020)。このことからわかるように、視覚障害者が自立して移動するには白杖操作技術の取得が必要不可欠である。一方で、国内の視覚障害者の数は約 30 万人であるのに対して、現役の歩行訓練士は 500 名程度である(芝田, 2012)。さらに、全国の盲学校約 70 校のうち、歩行訓練士が在籍するのはわずか 33 校である。そのため、歩行訓練士が慢性的に不足している。これの問題を解決するためには、視覚障害者が自立して訓練ができる環境を構築する必要がある。そこで本研究では、視覚障害者の白杖操作技術の早期習得と歩行訓練士の負担軽減を目的に、視覚障害者が白杖の訓練を在宅でも実施できる

セルフ訓練デバイスを開発した。

[研究の内容, 成果]

デバイスの設計要件

白杖には適切な振り方があり、通常の歩行訓練では、歩行訓練士の手引きによって適切な操作方法が教示される。そのため、セルフ訓練デバイスでは、歩行訓練士の手引きを模したフィードバックが求められる。そこで、研究代表者がこれまで研究してきた牽引力錯覚に着目した(Tanabe et al., 2018)。牽引力錯覚は次の原理で生じる触覚の錯覚現象である。刺激の物理的な大きさとヒトの感覚の大きさは非線形な関係であることが知られている。そのため、ヒトは急激に変化する加速度と緩やかに変化する加速度が交互に繰り返される非対称な振動を指先に提示されたとき、非対称振動を一方向に牽引されるような力として錯覚する。また、研究代表者は牽引力錯覚を使って上肢動作を誘導できることを明らかにしており(Tanabe et al., 2020)、この知見を応用することで白杖の適切な操作を教示できると考えられる。そこで、本研究では、歩行訓練士の手引きを模したフィードバックを牽引力錯覚によって再現するために、以下の要件を満たす白杖型デバイスを開発した。

要件 1 バッテリ駆動かつ PC やタブレットなどの情報端末からデバイスを制御でき

- ること
- 要件 2 バッテリーや振動アクチュエータを内蔵しても振り心地が通常の白杖と変わらないこと
- 要件 3 一般的な白杖の把持状態で牽引力錯覚を誘発できること

無線駆動型振動アクチュエータ制御モジュール (要件 1 に対応)

本デバイスでは、視覚障害者が単独で利用することが想定されているため、複雑な配線で構成されるデバイスは使用することは視覚障害者にとって困難である。また、利便性を高めるために、PC やタブレットなどの情報端末だけで、デバイスを制御できる必要がある。一方で、牽引力錯覚を誘発するには振動アクチュエータによって非対称振動刺激の生成が必要である。そこで、無線駆動型の振動アクチュエータ制御モジュールを開発した (図 1)。

本デバイスでは、ボイスコイル型振動アクチュエータ (639897, Foster Electric Co., Ltd.) が使用された。ボイスコイル型振動アクチュエータは音響スピーカとハードウェア構成が同じであるため、オーディオ信号によって制御することができる。そこで、Bluetooth オーディオモジュール (BM64SPKS1MC2, Microchip Technology Inc.) を用いて、振動アクチュエータの制御信号を生成した。本モジュールでは、PC やタブレットなどの情報端末に対して、Bluetooth のヘッドホンとして認識されることができるため、比較的多様な情報端末と接続可能である。制御信号は、事前に MATLAB R2020b (MathWorks Inc.) を用いて wav 形式で作成され、Bluetooth のコーデックス方式の一つである SBC (Sub Band Codec) によって、オーディオモジュールに送信した。受信した信号はオーディオモジュールからアナログ信号として出力され、D 級アンプ (PAM8403DR, Diodes Incorporated) で増幅した後に振動アクチュエータに入力した。電源には、リチウム

イオンポリマーバッテリー (DTP502535, Data Power Technology Ltd.) が使用された。以上の回路をプリント基板に表面実装した。

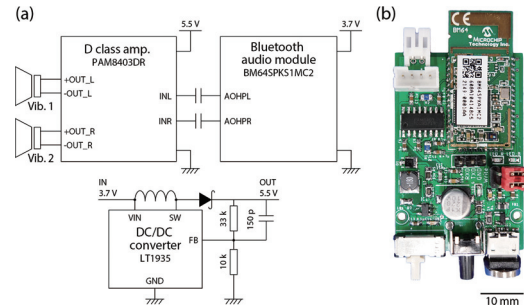


図 1 無線駆動型振動アクチュエータ制御モジュール
(a) 回路図 (b) 外観

無線通信の精度を検証するために、情報端末から振動アクチュエータの駆動指令から実際に振動が出力されるまでの遅延時間を計測した。その結果、 139 ± 25 (SD) ms の遅延が確認された (図 2)。

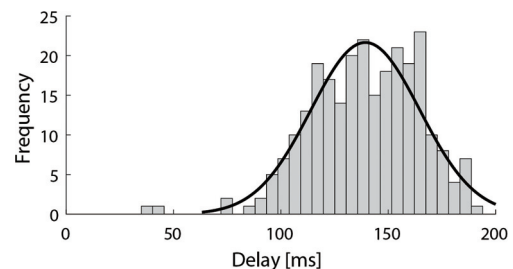


図 2 振動遅延のヒストグラム

慣性モーメントが通常の白杖と同程度の白杖型デバイス (要件 2 に対応)

本デバイスで習得した白杖の操作を一般的な白杖で再現できなければならない。そのためには、本デバイスと一般的な白杖の振り心地が大きく異ならないことが重要である。特に、白杖のような棒状の物体の先端位置の知覚には、物体の慣性モーメントが支配的であること報告されている (Salomon et al., 1988)。よって、少なくとも本デバイスと一般的な白杖の慣性モーメントが大きく異ならないことが求められる。そこで、この要件に基づき白杖型デバイスを実装した。白杖の慣性モーメント I は

$$I = mgl \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \quad (1)$$

となり、 m は白杖の重量、 g は重力加速度、 l は白杖の末端から重心位置までの長さ、 T は白杖の末端を固定し、剛体振り子のように自由振動させた際の周期であり、これらのパラメータから慣性モーメントを求めることができる。式(1)が示すように白杖全体の重量が増大することで慣性モーメントが大きくなることから、白杖型デバイスに振動アクチュエータや制御モジュールを内蔵することで、通常の白杖より慣性モーメントが増大することが予想される。一方で、慣性モーメントは重心位置にも比例することから、末端からの重心位置までの長さを短くすることで、重量が増大しても、慣性モーメントを小さくできると考えられる。

以上の指針に基づき、白杖型デバイスを実装した(図3)。本デバイスは、3Dプリンタで作製されたアクリル製のグリップにカーボン製の市販の白杖(Segawa Cane, SEGAWA, LTD)のシャフトが取り付けられた。重心位置を末端に近づけるために、バッテリーや制御モジュール等の重量が大きいものをグリップの末端に配置した。シャフトを含む白杖型デバイスの全体の長さは1200 mmで、重量は318 gであった。

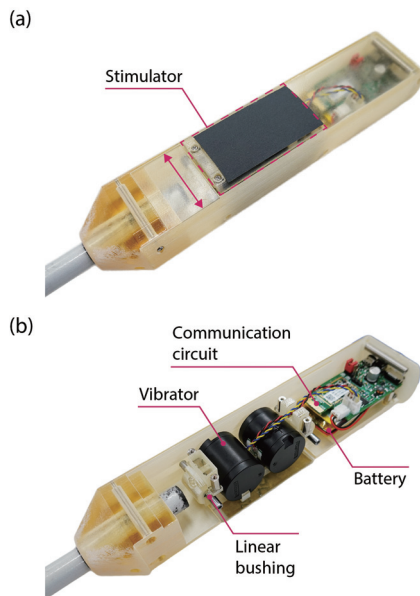


図3 開発した白杖デバイス (a) 外観 (b) 内部構成

実装した白杖型デバイスの慣性モーメントを評価するために、市販の同じ長さの白杖3種類(カーボン製、アルミ製、グラファイト製)と慣性モーメントを比較した(表1)。その結果、重量は市販品に比べて本デバイスが最も重かったが、慣性モーメントはカーボン製に次いで2番目に小さい値となった。そのため、要件2を満たす白杖型デバイスを実装することができた。

表1 開発したデバイスと市販品の慣性特性

白杖の種類	重量 m [g]	重心位置 l [mm]	慣性モーメント I [kg · m ²]
デバイス	318	235	0.053
カーボン製	138	417	0.047
アルミ製	244	458	0.082
グラファイト製	203	424	0.070

標準握りに対応した振動機構(要件3に対応)

白杖の操作方法の中で、基本的かつ最も重要なものとして、タッチテクニック(白杖を左右均等に振り、2歩先の路面を叩いて状態を確認する操作)がある。タッチテクニックの際の白杖の把持方法としては、示指を白杖の先端に向かって真っ直ぐ伸ばす方法が用いられ、この把持方法は標準握り(Index finger grasp)と呼ばれる。そのため、白杖型デバイスでは、標準握りの状態で牽引力錯覚を誘発する必要がある。一方で、牽引力錯覚は非対称に振動する物体を拇指と示指でつまむように把持し、指腹に対して接線方向に振動を提示することで誘発される(Tanabe et al., 2018)。標準握りでは、示指が先端に向かって伸びているため、拇指と示指でグリップをつまむ状態にすることは困難である。また、牽引力錯覚を誘発するには、把持した物体を比較的大きい加速度で振動させる必要があり(Tanabe et al., 2020)、白杖のグリップ全体を振動させると高出力の加速度を確保できない。以上の牽引力錯覚が生起する条件を踏まえて、白杖型デバイスでは図4及び以下の設計指針に基づいて、振動機構を実装した。

・高出力の加速度を確保するためにグリップ全

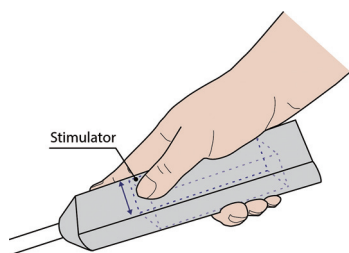


図4 標準握りと振動機構の設計コンセプト

体ではなく、グリップ内にスライドする刺激子（図4の青線）を設けて、刺激子のみを振動させる。

- ・刺激子を拇指と示指の代わりに中指・薬指を用いて挟む状態にする。

図3(a)の赤線の範囲が刺激子であり、刺激子の内部に振動アクチュエータを配置した。また、刺激子だけをスライドさせるために、リニアプッシュ（LM4MUU, THK Co., Ltd.）とシャフト（PSSFUW4-34-M2-N2, MISUMI Inc.）を用いた。また、ばね（C116, Accurate Inc.）を用いて刺激子の位置を中立させた。

開発したデバイスを用いて牽引力錯覚を誘発するための非対称振動刺激を生成した。非対称振動刺激は研究代表者のこれまでの研究で明らかにした非対称振動刺激の基本モデルを用いた（Tanabe et al., 2022）。その結果、目標の波形とおおむね一致する加速度プロファイルが観測された（図5）。

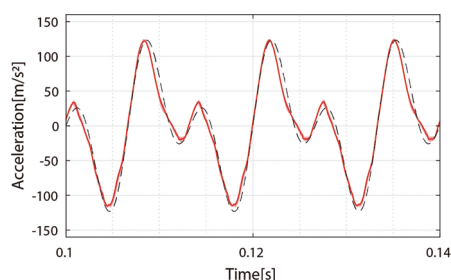


図5 生成した非対称振動刺激の典型例（実線：計測値、破線：目標値）

次に、開発したデバイスを用いて、牽引力錯覚を誘発できることを検証した（図6）。本デバイスの対象者は、現在日常的に白杖を利用している視覚障害者ではなく、将来的な中途視覚

障害者である。そこで、本デバイスの対象者を想定し、アイマスを着用した晴眼者10名（女性3名、22-30歳）が本実験に参加した。実験では、ランダムに左右方向の牽引力を提示した際に、実験参加者は牽引されたと感じた方向を右または左の強制二択で回答した。そして、正答率によって、錯覚が生起していることを評価した。把持方法の条件としては、標準握りに加えて、別の把持方法として包丁握り（Thumb grasp）が用いられた。

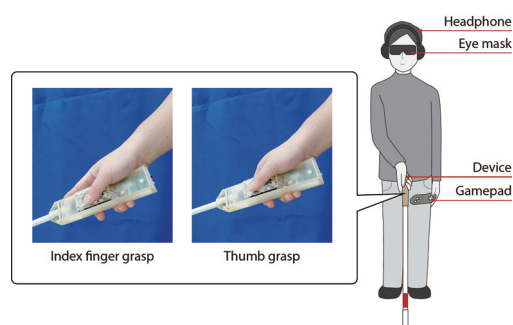


図6 実験環境

実験結果を図7に示す。本実験は、強制二択で方向を回答されているため、偶然に正答する確率であるチャンスレベルは50%である。そこで、各把持方法ごとの正答率とチャンスレベルを比較した。その結果、両把持方法において、チャンスレベルより有意に高い正答率であることが示された（標準握り： $p < 0.01$, $r = 0.85$, 包丁握り： $p < 0.01$, $r = 0.89$ ）。よって、一般的な白杖の把持方法の状態で牽引力錯覚を誘発でき

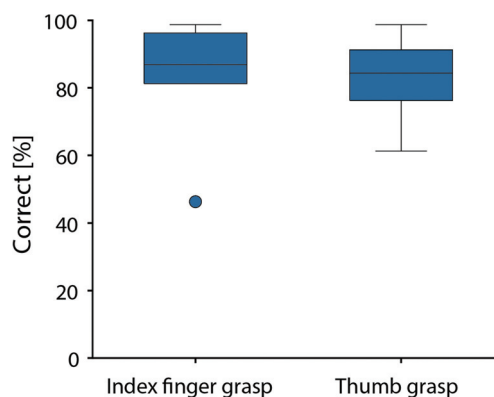


図7 把持方法ごとの方向弁別の正答率

ることが示され、要件3を満たすデバイスを実装することができた。

[成果の発表、論文など]

- [1] Takeshi Tanabe, Yasuhiro Fujimoto, Kiyohiko Nunokawa, Kouki Doi, and Shuichi Ino, "White Cane-Type Holdable Device using Illusory Pulling Cues for Orientation & Mobility Training," *IEEE*

Access, vol. 11, pp. 28706–28714, 2023.

- [2] 田辺 健, 布川清彦, 土井幸輝, 井野秀一, "白杖の訓練のための牽引力錯覚を利用した無線駆動型デバイスの試作," *HCG シンポジウム 2022*, B-6-3, 2022.
- [3] 田辺 健, 電気学会, 優秀論文発表賞 A, 2023.
- [4] 田辺 健, 布川清彦, 土井幸輝, 井野秀一, *HCG シンポジウム*, 優秀インタラクティブ発表賞, 2022.