

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K17796

研究課題名（和文）牽引力錯覚の機序解明のための生体情報工学研究

研究課題名（英文）Biological Engineering Study on the Mechanism Underlying Illusory Pulling Sensations

研究代表者

田辺 健（Tanabe, Takeshi）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員

研究者番号：60847557

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、感覚特性・運動特性のデータを活用した生体情報工学的アプローチによって牽引力錯覚の機序解明に迫る。感覚系からのアプローチとして、加齢によって皮膚感覚の感度が低下した高齢者を対象に、牽引力錯覚の特性を調査した(N=40)。運動系からのアプローチとして、能動的に運動している最中に牽引力錯覚を誘発することで、運動に与える影響を主観的・客観的に評価した(N=20)。また、牽引力錯覚を利用した運動支援技術の端的な応用例として、視覚障害者のための白杖操作技術の訓練支援システムを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、牽引力錯覚における性差を世界で初めて明らかにしており、機序解明に向けた新たな糸口を示すことができた。そのため、錯覚における性差という観点でアプローチすることで、より詳細に牽引力錯覚の機序を明らかにすることができる。また、能動的な運動中に牽引力錯覚を誘発することで、感覚と運動で矛盾が生じ、錯覚という感覚入力だけで運動を変化させることを示した。以上の機序解明に向けた基礎研究だけでなく、牽引力錯覚を利用した応用例として、視覚障害者支援の技術も開発しており、社会的に意義のある成果も創出した。

研究成果の概要（英文）：This study aims to elucidate the mechanism behind the illusory pulling sensation using a biological engineering approach that leverages sensory and motor data. From the sensory system perspective, the characteristics of the illusion were investigated in older participants with age-related tactile sensitivity decline (N=40). From the motor system perspective, the influence on wrist motion was evaluated by inducing the illusion during active motion (N=20). Additionally, as an application of motion-assistive technology utilizing illusions, a white cane training system for the visually impaired was developed.

研究分野：ハプティクス

キーワード：牽引力錯覚 ヒューマンインタフェース ハプティクス

## 1. 研究開始当初の背景

ヒトは感覚器を介して外界の情報を取得し、その情報に基づいて運動を行っている。一方で、感覚器で取得した情報と外界の情報が必ずしも一致しないことが知られており、感覚器と外界との間で矛盾が生じ、錯覚現象が生起する。錯覚現象が生起する機序を解き明かすことは、ヒトの情報処理の機能を解明する手掛かりとなる。また、錯覚現象によっては運動にまで影響を及ぼすものもあり、錯覚を巧みに制御することができれば、ヒトの運動や行動を支援する新たな技術を見出すことができる。

運動と密接した関係がある錯覚現象の一例として、牽引力錯覚が挙げられる。ヒトの感覚器は強い刺激には敏感に反応し、弱い刺激には反応しづらい特性を持つ。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、緩やかに変化する加速度を不鮮明に知覚することで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[1]。牽引力錯覚は小型の振動デバイスによる振動刺激だけで上肢が牽引されるような感覚を誘発することができる。さらに、個人差があるものの錯覚時には牽引されるような感覚に伴い上肢が動くような現象も生じる。以上をまとめると、非対称振動を提示することで偏りのある振動に対する感覚入力が中枢に伝達され、そこで何らかの情報処理が行われ、運動出力が生じるまでの一連のループが形成される。牽引力錯覚の機序を解き明かし、錯覚を柔軟に制御することができれば、モバイル機器やウェアラブル機器における新たな感覚情報提示技術や運動支援技術が実現できる。

しかしながら、牽引力錯覚が生起する機序は不明で、錯覚を誘発するための振動デバイスの普遍的な設計論が明らかにされていないという課題がある。先行研究では、振動刺激だけで牽引力を提示するデバイスの開発が目的とされていた。そのため、錯覚の機序はブラックボックスとして扱われ、錯覚が生起する条件を研究ごとに異なるデバイスで実験的に模索するアプローチが取られていた[2,3]。よって、先行研究で得られた知見はヒトの特性とデバイスの特性の切り分けができず、固有のデバイスに依存した局所的な解であった。牽引力錯覚を誘発するための振動デバイスの普遍化を実現するためには、ヒトの特性を理解し、錯覚の機序に基づいてデバイスを設計する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究は牽引力錯覚の機序を解明することを目的とし、錯覚時に感覚系や運動系で生じる情報処理の流れを明らかにする。

## 3. 研究の方法

感覚特性・運動特性のデータを活用した生体情報工学的アプローチによって牽引力錯覚の機序解明に迫る。従来の牽引力錯覚の機序の仮説として、指先に提示した非対称振動刺激によって生じる皮膚の変形を牽引力として検出している可能性が議論されてきた[2,3]。この議論に基づき、加齢によって皮膚感覚の感度が低下した高齢者では、牽引力錯覚が生起しづらいという仮説を立てた。そこで、感覚系からのアプローチとして、牽引力錯覚の加齢の影響を検証した(研究 1)。次に、牽引力錯覚に伴って生じる運動に着目した。これまで、牽引力錯覚によって手が動かされる感覚(受動的な運動の感覚)が生じることを内観報告的に確認している。一方で、牽引力錯覚を誘発するための非対称振動刺激には、特定の方向に手指を牽引する力は有しておらず、受動的な運動が生じることはない。そのため、牽引力錯覚中には、感覚と運動との間に矛盾が生じている可能性がある。そこで、運動系からのアプローチとしては、能動的に運動している最中に牽引力錯覚を誘発することで、運動に与える影響を主観的・客観的に評価した(研究 2)。また、牽引力錯覚を利用した運動支援技術の端的な応用例として、視覚障害者のための白杖操作技術の訓練支援システムを開発した(研究 3)。

## 4. 研究成果

### (1) 研究 1 | 牽引力錯覚における加齢の影響

牽引力錯覚における加齢の影響を明らかにするために、若年群(N=20)と高齢群(N=20)で、牽引力錯覚の方向弁別の正答率を比較した。また、加齢によって低下した皮膚感覚の影響を明らかにするために、振動刺激に対する閾値も計測した。

実験の結果、図 1 に示す通り、高齢男性においては、若年男性と同程度の高い正答率で牽引力錯覚が生起し、加齢の影響は小さかった( $p=0.93$ ,  $r=0.01$ )。それに対して、高齢女性の正答率は、若年女性に比べて有意に低く、加齢の影響が大きかった( $p<0.001$ ,  $r=0.67$ )。また、錯覚の正答率と振動刺激に対する閾値を用いて、ユークリッド距離を算出し、ウォード法によって、クラスタリングした結果、実験参加者が 4 つのクラスタに分類された(図 2)。加齢によって閾値が上昇した高齢者の錯覚の正答率は比較的高かったが(クラスタ 4)、錯覚が起きづらかった高齢女性の閾値は平均的だった(クラスタ 2)。以上の結果より、加齢によって皮膚感覚の感度が低下した場合、錯覚の正答率も低下するという仮説を支持することは難しく、性差が関係した別の重要な要因が牽引力錯覚に寄与している可能性が示唆された。本研究で明らかになった性差を調べることで、牽引力錯覚の機序をより詳細に明らかにすることができるため、今後も継続して、実験を実施する。

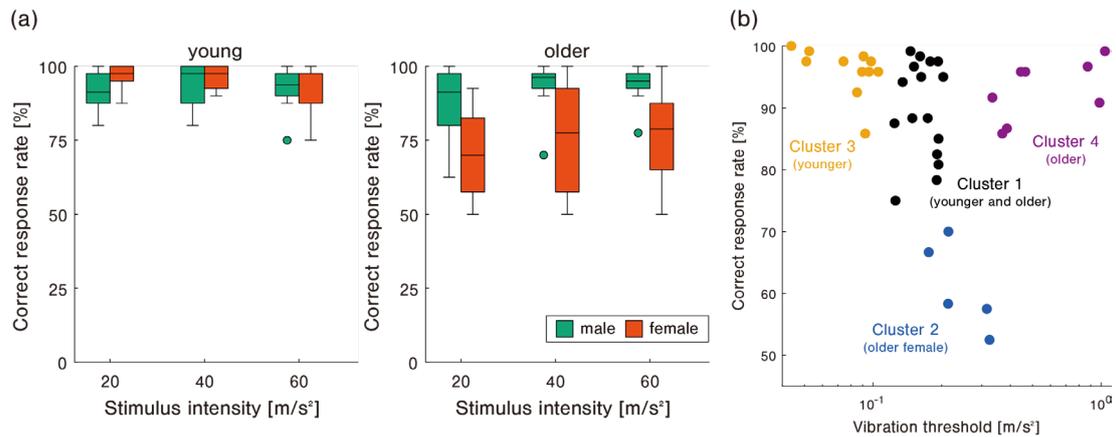


図1 牽引力錯覚における加齢の影響の実験結果 (a) 性別及び年齢群ごとの牽引力錯覚の方向弁別の正答率 (b) 正答率と振動刺激に対する閾値に基づくクラスタ分析

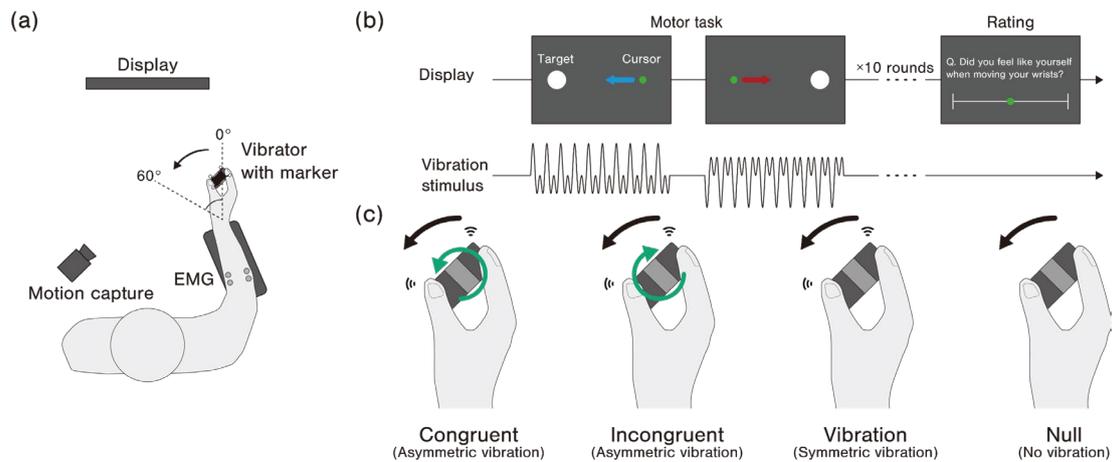


図2 実験セットアップ (a) 実験装置の配置 (b) 課題の流れ (c) 実験条件

## (2) 研究2 | 牽引力錯覚が運動に与える影響

手関節を能動的に屈曲・伸展させている際に、牽引力錯覚を誘発し、その時の運動に与える影響を評価した(N=20)。実験参加者には、振動デバイスを把持させ、屈曲・伸展の動作に合わせて移動するカーソルを目標点まで素早く移動させた。カーソルを目標点まで素早く移動させるように指示した(図2)。以上のタスクを連続して10回繰り返す、その時の行為主体感(手首を動かしたのは自分自身か振動デバイスによって手首が動かされたのか)をビジュアルアナログスケールによって、主観評定させた。また、その時の手関節の速度と主働筋の筋電位を計測した。実験条件としては、運動と牽引力錯覚の向きが同じ条件(Congruent)、逆向きの条件(Incongruent)に加えて、コントロールとして、牽引力錯覚が生じない振動刺激の条件(Vibration)、刺激がない条件(Null)の4条件であった。

図3に実験の結果を示す。行為主体感に関しては、Null条件の時は、自分自身で動かした感覚が強かったが、Congruent条件の時に、有意に低下した( $p<0.001$ ,  $r=0.75$ )。また、手関節の運動の速度を比較した結果、Congruent条件の最高速度が有意にNull条件よりも有意に速くなった( $p<0.01$ ,  $r=0.22$ )。動きを速めた要因を明らかにするために、主働筋の筋電位を比較した結果、実験条件の有意な主効果は認められなかったものの、効果量は低くはなかった( $p=0.01$ ,  $\eta^2=0.11$ )。また、最高速度と運動中の筋電位の平均値には正の相関があり( $r=0.38$ )、速度が速い条件の時のほうが強く筋電位が発生する傾向にあった。そのため、動きを速めた要因としては、実験参加者の筋発揮によるものであると考えられる。以上の結果をまとめると、運動に一致した方向に牽引力錯覚を誘発することで、自分自身の筋発揮で動きを速めているにも関わらず、手が振動デバイスによって動かされた感覚が生じる。つまり、仮説通りに、感覚と運動で矛盾が生じることが示された。

## (3) 研究3 | 白杖操作技術の訓練支援システムの開発

視覚障害者が利用する白杖において、基礎的かつ重要な操作技術であるタッチテクニックを牽引力錯覚によって教示する訓練支援システムを開発した。タッチテクニックとは、白杖を左右に振って路面を叩いて、2歩先の路面状況を確認する操作技術である。このとき、自分自身の正中線に対して肩幅よりやや広めの幅で左右均等に振ることで、これから自分が歩く路面が安全かどうかを確認できる。しかし、諸学者は、利き手側だけを広く振る傾向があるため、牽引力錯覚によって左右均等に振れるように誘導した。

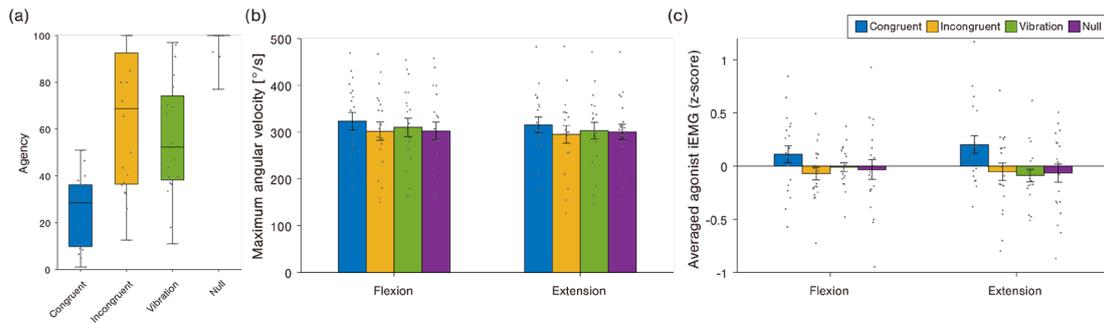


図3 牽引力錯覚が運動に与える影響の実験結果 (a) 行為主体感 (b) 手関節の運動速度 (c) 主働筋の iEMG

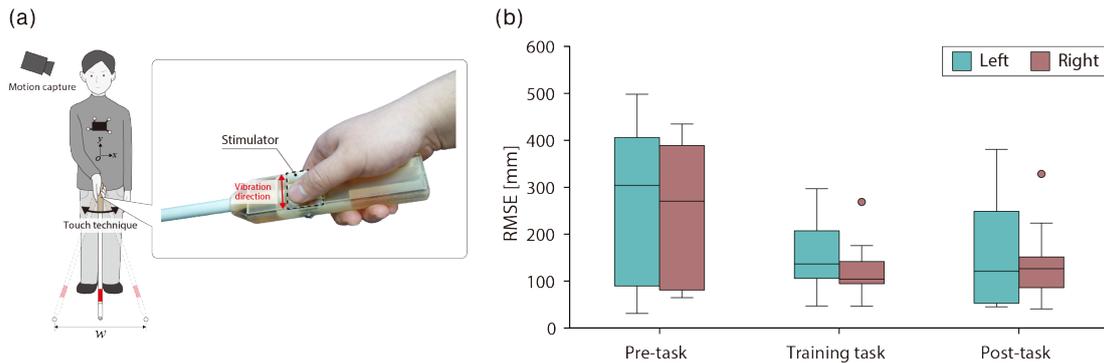


図4 白杖操作技術の訓練支援システム (a) システムの構成 (b) システムの使用前 (Pre-task), 使用中 (Training), 使用後 (Post-task) の目標幅との誤差

訓練支援システムでは、白杖の内部に振動デバイスを内蔵し、指先に非対称振動を提示することで牽引力錯覚を誘発した。また、モーションキャプチャによって白杖の先端の位置を計測し、先端が目標幅の内側の時、目標幅に向かって牽引力錯覚によって誘導した(図4(a))。

本システムのターゲットである中途視覚障害者を模したアイマスクを着用した晴眼者(N=10)を対象に、ユーザテストを行った。その結果、システムの使用前後で目標の振り幅の誤差が有意に低下した。また、白杖ユーザ(N=2)にも本システムを利用してもらい、定性的な評価を行った。その結果、自分自身の身体の幅を覚えるために有効であると言ったポジティブなコメントが得られたが、グリップが通常の白杖よりも太いため疲れやすいと言った課題も見つかった(図4(b))。

#### <引用文献>

- [1] T. Amemiya et al., "Lead-Me Interface for a Pulling Sensation from Hand-held Devices," *ACM Trans. Appl. Perception*, vol. 5, no. 3, pp. 15:1-15:17, 2008.
- [2] T. Amemiya et al., "Distinct pseudo-attraction force sensation by a thumb-sized vibrator that oscillates asymmetrically," *Haptics: Neuroscience, Devices, Modeling, and Appl.*, pp. 88-95, 2014.
- [3] H. Culbertson et al., "Modeling and Design of Asymmetric Vibrations to Induce Ungrounded Pulling Sensation Through Asymmetric Skin Displacement," In: *Proc. of Haptics Symp. 2016*, pp. 27-33, 2016.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tanabe Takeshi, Kaneko Hidekazu	4. 巻 32
2. 論文標題 Illusory Directional Sensation Induced by Asymmetric Vibrations Influences Sense of Agency and Velocity in Wrist Motions	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering	6. 最初と最後の頁 1749 ~ 1756
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNSRE.2024.3393434	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tanabe Takeshi, Fujimoto Yasuhiro, Nunokawa Kiyohiko, Doi Kouki, Ino Shuichi	4. 巻 11
2. 論文標題 White Cane-Type Holdable Device Using Illusory Pulling Cues for Orientation & Mobility Training	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 28706 ~ 28714
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2023.3259965	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tanabe Takeshi, Nunokawa Kiyohiko, Doi Kouki, Ino Shuichi	4. 巻 15
2. 論文標題 Contribution of Vibration, Tapping Sound, and Reaction Force to Hardness Perception During Indirect Tapping Using a White Cane	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TOH.2022.3155106	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tanabe Takeshi, Nunokawa Kiyohiko, Doi Kouki, Ino Shuichi	4. 巻 30
2. 論文標題 Training System for White Cane Technique Using Illusory Pulling Cues Induced by Asymmetric Vibrations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering	6. 最初と最後の頁 305 ~ 313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNSRE.2022.3148770	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Takeshi Tanabe
2. 発表標題 Pinchable Device with Drive Unit for Illusory Pulling Sensations
3. 学会等名 Euro Haptics 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田辺健、山本哲、山田亨、石井大典、河野豊
2. 発表標題 加齢の影響に基づく牽引力錯覚の機序の一考察
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会 ハプティクス研究委員会 第32回研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田辺健、布川清彦、土井幸輝、井野 秀一
2. 発表標題 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
3. 学会等名 HCGシンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田辺健、布川清彦、土井幸輝、井野 秀一
2. 発表標題 視覚障害者の白杖操作のための牽引力錯覚を利用した訓練システムの開発
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会 ハプティクス研究委員会 第28回研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田辺健、布川清彦、土井幸輝、井野 秀一
2. 発表標題 白杖を用いた間接的なタッピングによって発生する振動・打撃音・反力と硬さ知覚の関係
3. 学会等名 第26回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tanabe Takeshi、Nunokawa Kiyohiko、Doi Kouki、Ino Shuichi
2. 発表標題 Identification of Physical Factors Contributing to Hardness Perception of Objects During Indirect Tapping Using White Canes
3. 学会等名 IEEE World Haptics Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田辺健、布川清彦、土井幸輝、井野 秀一
2. 発表標題 Implement of the Training System for White Cane Technique using Haptic Illusion
3. 学会等名 第60回日本生体医工学会大会
4. 発表年 2021年

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------