

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：82636  
研究種目：基盤研究(B)（一般）  
研究期間：2020～2022  
課題番号：20H04097  
研究課題名（和文）無意識的な運動学習系を利用した歩容改善支援システムの開発：健康寿命延伸に向けて  
  
研究課題名（英文）Development of a gait modification system using an unconscious motor learning system: To extend healthy life expectancy  
  
研究代表者  
平島 雅也（Hirashima, Masaya）  
  
国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所脳情報通信融合研究センター・研究マネージャー  
  
研究者番号：20541949  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：手続記憶に分類される運動を言語で指導することは原理的に困難である。本研究では、運動誤差を解消しようとする無意識的かつロバストな脳機能に着目し、所望の動作とは反対方向の誤差を視覚的に与えることによって、所望の動作へと確実に誘導できる学習支援システムの構築を目指した。大自由度な歩行動作を対象に実験を行い、所望の歩行動作に誘導できること、日常の歩行動作に一部転移できる可能性を示した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

運動指導の現場では、ジェスチャーや言語を用いて指導することが多い。しかし、指導者が意図した通りに相手に伝わるとは限らず、常に不確実性の問題を抱えている。本研究では、言葉ではなく、脳に効果的に働きかける情報を提示することによって、運動指導を確実に実行できるシステムの構築を目指したものである。運動や知覚など、脳の機能は言語化できないものが多く、これらの機能を向上させるための効果的な情報伝達方法を考案・開発することによって、国民の健康寿命の延伸や生活の質の向上を図ることができる。

研究成果の概要（英文）：Instructing movements categorized as procedural memory through language is fundamentally challenging. This study focused on the unconscious and robust brain function that modifies movement based on movement errors and sought to develop a learning support system capable of reliably guiding toward desired movements by providing visual errors in the opposite direction of the desired movement. Experiments were conducted on high-degree-of-freedom gait movements, demonstrating the system's ability to guide toward the desired gait movement and suggesting that it may be partially transferable to gait movements in daily life.

研究分野：運動制御・学習

キーワード：運動学習 無意識 歩行 誤差 適応 モーションキャプチャ アバター VR

### 1. 研究開始当初の背景

運動指導の現場では、ジェスチャーや言語を用いて指導することが多い。しかし、指導者が意図した通りに相手に伝わるとは限らず、常に不確実性の問題を抱えている。どんな簡単な運動でも、筋肉や関節の動かし方を言語で語り尽くすことはできない。運動は言語化できない記憶(手続記憶)に分類されており、これが言語を介した運動指導・コミュニケーションの難しさの根底にある。また、運動制御・学習系の機能は、脳の無意識的なプロセスが関与していることが古くより知られているが、近年、そのプロセスは意識的プロセスの影響を受けず、ロバストに機能することがクローズアップされてきている。従来、このような無意識的な運動学習系の機能は主に自由度の少ない上肢到達運動を対象として行われてきたが、これらの知見が自由度の大きい全身運動にも適用しうるかについては十分な研究が行われていない。

社会情勢に目を向けると、超高齢社会に突入した日本では、ロコモティブシンドロームが大きな社会問題の一つとなっている。ロコモティブシンドロームとは、移動機能が低下した状態であり、この状態が進行すると要介護の危険性が出てくる。ロコモティブシンドロームの主要な要因の一つに変形性膝関節症がある。これは、加齢や肥満、運動時の繰り返しの負荷の蓄積によって関節が変形し、運動時だけでなく静止立位時にも痛みが生じうる疾患である。膝に負担のかからない歩行動作パターンをバイオメカニクスの観点から明らかにしようとする研究は盛んに行われているが、そこで明らかとなった動作パターンを如何に獲得するかについては十分な検討はなされていない。特に、無意識的な運動学習系の機能に焦点を当て、ロバストな運動学習支援システムを構築しようとする研究は見られない。

### 2. 研究の目的

本研究では、ロバストな運動指導法を確立するという健康・スポーツ分野の大目標に向け、無意識的な運動学習系に働きかける適応実験パラダイムが、大自由度運動にも適用しうるかについて、ヒトを対象とした行動実験により検討する。

具体的には、大自由度運動として歩行動作を対象とし、膝に負担のかからない歩行動作に誘導できるシステムの構築を目指す。一般的に、歩隔(左右足の横の間隔)が広い方が変形性膝関節症の原因である膝関節内側コンパートメントへの負荷が小さいため、広い歩隔を習得できるシステムを構築できれば、変形性膝関節症を予防するための方法として社会展開できる可能性もある。

### 3. 研究の方法

#### (1) 誤差提示システムの構築

脳は与えられた誤差を減らす方向に運動を修正する機能を有しており、無意識的かつロバストに機能することが知られている。これが、大自由度な歩行動作でも同じように機能するのであれば、誘導したい運動とは反対方向の誤差を与えることによって、望ましい運動へ誘導できるはずである。

本研究では、被験者に与える視覚フィードバックに任意の誤差を提示できるシステムの構築を行った(図1)。トレッドミル上を歩く被験者の動きを光学的モーションキャプチャで計測し、全身のマーカー位置から各骨の姿勢をインバースキネマティクス技術で推定し、その動きを被験者の正面に置かれた大型スクリーンにアバターの動きとしてリアルタイムに提示する。この時、アバターの動きには、実際の動きとは異なる関節角度を自由に設定できるため、このシステムを用いることで、任意の視覚誤差を被験者に与えることが可能となる。

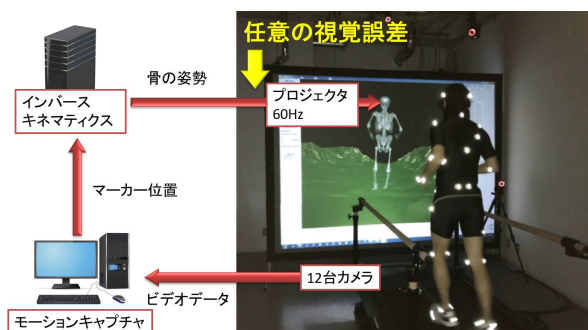


図1: 視覚誤差提示システム

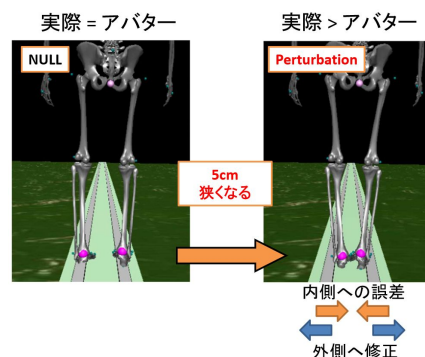


図2: 運動課題と誤差提示

#### (2) 実験方法

##### 運動課題と誤差提示

被験者にはスクリーンに提示されたアバターを操作して、アバターの足でレールを踏みなが

ら歩くよう教示する(図2左)。このように視覚的に捉えたターゲット位置を運動指令に変換するプロセスを含む歩行を Targeted walking と呼ぶ。予め計測した各被験者の通常の歩隔と同じ幅のルールを提示するため、被験者は歩隔を変更することなく本課題を遂行できる。踏んだ位置とルールのずれ(誤差)は、視覚的に得ることができるが、それに加えて、ルールを踏めた場合には心地よい音のフィードバックを返す。つまり、本課題では、誤差に基づく学習(error-based learning)と報酬に基づく学習(reward-based learning)の両方が関与する。

本課題に十分に慣れた後、アバターの動きに視覚誤差を提示する。具体的には、アバターの歩隔が、被験者の実際の歩隔よりも5cm狭くなるような誤差を5分間かけて徐々に与え(図2右)、この誤差に対して被験者の歩隔がどのように変化するかを観察した。

#### 文脈が運動記憶の想起に与える影響

一般に、運動記憶の想起は、それを学習した時と同じ文脈において最もよく想起される。本課題でいえば、視覚で捉えたターゲット位置の処理を含む Targeted walking の文脈で最もよく想起される。一方、日常的な自然歩行(Natural walking)では、ターゲット位置を目で確認することはほとんどなく、もしこのような視覚情報処理プロセスの有無が、運動記憶の文脈として作用するのであれば、Natural walking では運動記憶の想起が阻害されるはずである。これを検討するために、学習後のテストフェイズでは、アバターのフィードバックがない状態で Natural walking(Group1)または Targeted walking(Group2)を行わせ、想起量の違いを観察した(図3)。Natural walking 条件では、ターゲットとなるルールは提示せず、背景だけ投影した。

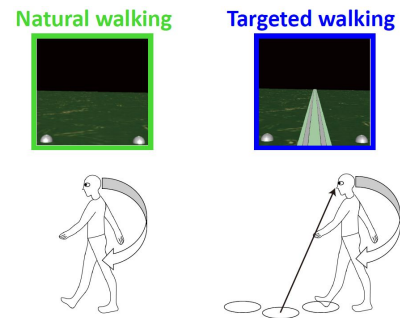


図3：テストフェイズにおける異なる文脈

#### 異なる学習機序の影響

誤差に基づく学習と報酬に基づく学習の違いが運動記憶の想起に与える影響を検討するために、Group2 では両機序が関与するのに対して、Group3 では報酬に基づく学習しかできない期間を設け、相対的に報酬に基づく学習の影響が大きくなるように設定した。学習後のテストフェイズでは Group2 と同様に Targeted walking を行わせ、Group2 と Group3 で想起量を比較した。

#### 自然歩行への転移

本研究で学習した歩行運動が、自然歩行時にどれだけ保持されるかを検討するために、テストフェイズ後に、5分間休憩した後に、再度トレッドミル上にあがり Natural walking 条件を実施してもらった(Washout フェイズ)。この時の歩隔が実験前に計測した通常の歩隔と異なるかどうか検討した。

## 4. 研究成果

### (1) 視覚誤差印加による歩容の誘導

歩隔に誤差を徐々に加えたところ、被験者の歩隔は与えられた誤差に応じて徐々に拡大し、最終的に約5cm拡大した。この結果は、一歩一歩で生じる誤差はわずかであるのにも関わらず、脳の誤差修正機能が、大自由度な歩行動作でも発揮されたことを示している。また、興味深いことに、実験後に行われたアンケートによって、被験者は誤差印加に気づいておらず、歩隔が5cm広がっていたことにも気づいていないことが明らかとなった。つまり、本結果は、脳の無意識的な誤差修正機能によって歩行動作を所望の方向へロバストに誘導できることを示している。

### (2) 文脈が運動記憶の想起に与える影響

学習時と同じ文脈(Targeted walking)でテストフェイズを行った Group2の方が、学習時と異なる文脈(Natural walking)でテストフェイズを行った Group1よりも想起量が大きかった。これは、視覚情報処理プロセスの有無が、運動記憶の文脈として作用することを示しており、視覚誤差提示によって得られた学習効果をそのまま日常的な自然歩行で発揮させることは難しいことを示している。

### (3) 異なる学習機序の影響

Group3ではGroup2に比べてテストフェイズにおける想起量が大きかったことから、学習機序の違いが運動記憶の想起に影響を与えることがわかった。

### (4) 自然歩行への転移

Washout フェイズにおける歩隔は、Group1では通常歩隔と差がなかったのに対して、Group2とGroup3では、通常歩隔より有意に大きくなっていることがわかった。この結果は、学習時と異なる自然歩行文脈への転移は限定的ではあるものの、学習時の文脈で想起を繰り返し行った場合(Group2とGroup3)には、日常の自然歩行に一部転移できる可能性があることを示している。

#### (5) 可搬性システムの開発

上記の結果は、トレッドミル上での学習・評価であり、日常の地面で行われる歩行動作への転移をより大きくするには、地面歩行を対象にした適応実験系の構築が必要と考えられる。そこで、本研究では、計測範囲制限の少ない慣性式モーションキャプチャで計測した歩行動作をリアルタイムにVRヘッドマウントディスプレイに映し出すシステムを開発し、広いフィールドで地面歩行を行いながら適応実験を実施できる実験系の構築も行った。慣性式モーションキャプチャでは、重心の絶対位置の計測にドリフトが生じる可能性があるため、ドリフトのない光学式モーションキャプチャを一部利用することで、最小限の制約のもとに地面歩行で実験できるよう整備を行った。

#### (6) 成果のインパクトと今後の展望

言語による運動指導に不確実性の問題がある中で、脳の無意識的な誤差修正機能を活用することによって、狙った方向に確実に動作を誘導できるシステムを構築した意義は非常に大きい。また、視覚誤差の印加によって獲得した運動記憶が、限定的ではあるものの自然歩行に転移する可能性があることを示した点も応用の観点で非常に大きな意義がある。地面歩行でのトレーニングや長期間にわたるトレーニングによってその効果をさらに高められる可能性もあり、これらの研究に取り組むことによって、体に負担の少ない歩き方の習得支援システムを社会実装のレベルまで高められる可能性がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>平島雅也                         | 4. 巻<br>353         |
| 2. 論文標題<br>サイバー空間の自分を作る・操る             | 5. 発行年<br>2023年     |
| 3. 雑誌名<br>電波技術協会報                      | 6. 最初と最後の頁<br>32-35 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし          | 査読の有無<br>無          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>山本健太、平島雅也                    | 4. 巻<br>72(7)         |
| 2. 論文標題<br>ヒトの運動適応能力を利用した歩行運動変容の試み     | 5. 発行年<br>2022年       |
| 3. 雑誌名<br>体育の科学                        | 6. 最初と最後の頁<br>475-478 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし          | 査読の有無<br>無            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 5件/うち国際学会 1件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Kenta Yamamoto, Tsuyoshi Ikegami, Masaya Hirashima    |
| 2. 発表標題<br>Visual error-induced motor memory in targeted walking |
| 3. 学会等名<br>Neural Control of Movement（国際学会）                      |
| 4. 発表年<br>2024年  |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>平島 雅也                  |
| 2. 発表標題<br>ヒトの運動機能向上支援システムの開発     |
| 3. 学会等名<br>2023年度応用脳科学アカデミー（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2023年                   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>平島 雅也                                    |
| 2. 発表標題<br>感覚運動制御系に働きかける非言語的な歩容改善支援システム             |
| 3. 学会等名<br>2021年度生理研研究会「スポーツからみる日常と非日常の神経生理学」(招待講演) |
| 4. 発表年<br>2022年                                     |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>平島 雅也                  |
| 2. 発表標題<br>次世代筋骨格モデルによる身体運動解析への応用 |
| 3. 学会等名<br>第30回埼玉県理学療法学会(招待講演)    |
| 4. 発表年<br>2022年                   |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>平島 雅也                  |
| 2. 発表標題<br>ヒトの運動機能向上支援システムの開発     |
| 3. 学会等名<br>2021年度応用脳科学アカデミー(招待講演) |
| 4. 発表年<br>2021年                   |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>山本 健太、池上 剛、平島 雅也        |
| 2. 発表標題<br>視覚運動処理を含む歩行の運動記憶形成メカニズム |
| 3. 学会等名<br>第15回MotorControl研究会     |
| 4. 発表年<br>2021年                    |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>平島雅也                             |
| 2. 発表標題<br>次世代健康・スポーツサービスの実現に向けた脳・身体科学的取り組み |
| 3. 学会等名<br>第14回Motor Control研究会（招待講演）       |
| 4. 発表年<br>2020年                             |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

|  |
|--|
| 所属機関における平島雅也のホームページ<br><a href="https://www2.nict.go.jp/bnc/hirashima/index.html">https://www2.nict.go.jp/bnc/hirashima/index.html</a> |
|--|

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                        | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)   | 備考 |
|-------|--|---|----|
| 研究協力者 | 山本 健太<br><br>(Yamamoto Kenta)                    |   |    |
| 研究協力者 | 福田 紀生<br><br>(Fukuda Norio)                      |   |    |
| 研究協力者 | 池上 剛<br><br>(Ikegami Tsuyoshi)<br><br>(20588660) | 国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所脳情報通信融合研究センター・主任研究員<br><br><br><br>(82636) |    |

6. 研究組織（つづき）

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                        | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                                | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究協力者 | 中本 浩揮<br><br>(Nakamoto Hiroki)<br><br>(10423732) | 鹿屋体育大学・スポーツ人文・応用社会科学系・准教授<br><br><br><br><br>(17702) |    |

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 |
|---------|---------|
|         |         |