



時間反転動作と後ろ向き歩行に関する予備的検討

Preliminary Study on Time Reverse Motion and Backward Walking

秋元源希¹⁾、佐々木智也^{2),3)}、大伏仙泰³⁾、稲見昌彦³⁾

Genki AKIMOTO, Tomoya SASAKI, Noriyasu OBUSHI, and Masahiko INAMI

1) 東京大学 大学院 情報理工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, minamoto.2010@star.rcast.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京理科大学 先進工学部 (〒 125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1)

3) 東京大学 先端科学技術研究センター (〒 153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1)

概要: 身体運動を再学習する際には特定の身体部位への意識の顕在化が重要である。本研究では身体動作の時間反転に着目し、この身体意識の変容を探索的に検証した。具体的には、前向き歩行・後ろ向き歩行・逆再生を意識した歩行を比較し、定量データや主観的感觉を比較した。結果として、各条件間で歩行速度や関節角度に異なる特徴が現れた。また、特に逆再生を意識した歩行では被験者の多くが難しさを感じ、手肘や足底の動きに対する意識が顕著に高まった。これにより、時間反転された動作は身体意識の顕在化や運動理解を促す手段であることが示唆された。本研究は、身体の時間反転性と人間の運動主体感や内部モデルに対する学術的な探索価値を見出すとともに、運動学習における新たなアプローチとして時間反転された動作を提案するものである。

キーワード: 身体性認知、行動・認知、計測・認識

1. はじめに

人間が日常的に行う多くの身体動作は、ほとんど注意を向けることなく遂行されている。例えば歩行においては、我々は各関節の運動や筋肉間の協調を逐意識せずに移動することができる。このとき注意の対象となるのは身体ではなく外界である [1]。

身体の運動制御は手続き記憶として蓄積されており、通常は意識化されない形で呼び出され遂行されている。一方で、ある条件下では普段意識されない身体部位や運動構造が顕在化する。例えば、運動の際の姿勢の改善を試みるときや、長く使っていなかった筋肉を動かしたとき、あるいは新たな運動課題に取り組むとき、身体の一部の運動制御に対して強い注意が要求される [2]。こうした身体意識の顕在化は、運動学習やリハビリテーション等において重要な役割を果たす。なぜなら運動の細部を意識化することは、無意識的に実行されていた動作の修正や知覚的な再構成を可能にするからである。実際、運動技能の向上や癖の修正においては、速度を遅くして練習したり [3]、運動をイメージしたり [4] する方法が広く用いられてきた。しかし、これらの多くは視覚的な情報や速度変化に着目した手法であり、時間的な流れに反しない動作は依然として注意の対象とされない可能性がある。

そこで本研究では、こうした身体意識の顕在化を促す新たな手法として、逆再生と時間反転動作に着目する。本研究において時間反転動作とは、文字通りある身体動作を時間的に反転した動作を意味する。動作の映像を逆再生した

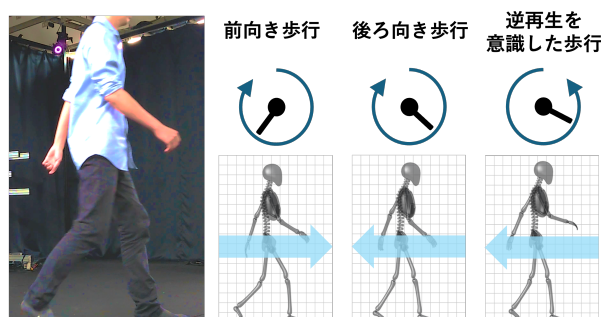


図 1: 本研究で対象とする歩行運動

際の見た目を再現して運動することは、機械的には単純な変換であるにもかかわらず、その運動が実行される機会は少ない。このように元の動作との関連性がありながらもどこか奇妙に感じられる動作は Twin Peaks [5] などの映像作品で演出としても利用されてきた。

本研究では、身体動作の時間反転のどこか奇妙さを科学的に検証するため、日常における典型的な動作の一例として後ろ向き歩行を取り上げる。歩行はほとんどの人にとって馴染み深く、運動の自動化が高度に進んでいる。また後ろ向き歩行に関しても先行研究が一定程度存在する。特に通常の前向き歩行とは異なる筋活動や逆向きの運動制御を必要とするため筋力トレーニングや下肢のリハビリテーションの分野で注目されている [6]。このように定量データを比較した先行例が多く、評価も理論的に可能であると考え、今回選定した。後ろ向き歩行は後退するという目的の動

作とも、前向き歩行の逆再生とも捉えることができる。しかし、運動学的には後ろ向き歩行は前向き歩行の単なる逆再生とは一致しない。実際、空間軌道としては後ろ向き歩行が前向き歩行の単純な時間反転に高い類似性を示すものの、筋活動や関節トルクのパターンは完全な逆転にはならず、特定筋の活動増大や相位ズレが観察されることが定量的に示されている [7]。

以上の議論を踏まえ、本研究では、逆再生を意識させた歩行を実行することで身体意識や行動がどのように変容するのかを探索的に明らかにすることを目的とする。具体的には、前向き歩行 (FW)、後ろ向き歩行 (BW)、および逆再生を意識させた歩行 (RW) の 3 条件を比較し (図 1)、それぞれの歩行解析を通じて、時間反転動作における主観的な身体感覚や歩行データの変化を検証する。

2. 実験手法

逆再生の意識が歩行データや主観的な感覚に与える影響を検証するため、本研究では以下の 3 条件において直線路を歩行する予備的実験を行った。

- 前向き歩行 (FW)
- 後ろ向き歩行 (BW)
- 逆再生を意識した歩行 (RW)

実施する順序は各被験者で異なるように割り当てた。どの条件においても被験者は靴を履いていない状態で、6m の直線路を同じ方向に移動するように歩行した。各条件ごとに 2 回練習を行った後、3 回計測を実施した。全ての試行において、被験者には自分のペースで自然な姿勢で歩くように指示した。特に、逆再生を意識した歩行については、被験者に正確な意味を伝えるため、実施前に「前向き歩行の動画を逆再生すると後ろ向きに歩いているように見えるが、そのときの動きにできるだけ一致するように歩いてください。」と明確に指示した。

関節角度の計測にはマーカーレスモーションキャプチャ Captury¹を用いた。解析には Unity を用い、関節角度や位置の時系列を取得した。実験中の被験者の歩行の様子は録画し、その情報から歩行速度とストライド (歩幅の 2 倍) を算出した。全試行終了後にアンケートに回答し、各条件で感じた難しさを 7 段階のリッカート尺度で評価した。最後にインタビューを行い、歩行中に意識した身体部位や実験に対する所感について回答を得た。また、被験者の行った逆再生を意識した歩行が実際に逆再生に一致しそうかを実験直後に予想してもらった。そして後日、実験中に被験者自身が行った FW の録画と RW の録画の逆再生を比較提示して実際にそれらが一致しているかを自己評価してもらった。どちらも 7 段階のリッカート尺度で評価した。

3. 結果

今回の予備的実験には、歩行機能に問題のない健常な日本人成人男性 6 名 (年齢 24.0 ± 1.7 歳、身長 169.3 ± 5.9 cm)

¹<https://captury.com/>

が参加した。以下では、得られた結果についてそれぞれ詳細を記述する。

3.1 歩行解析データ

歩行速度について、FW よりも BW、BW よりも RW が遅くなる傾向が見られた (図 2)。また、ストライドについて、RW では BW と同程度であり FW よりも小さくなる傾向が見られた (図 3)。ただし、一部の被験者では BW よりも RW の方が大きいという結果も得られた。

また、図 4 に、ある一人の被験者における歩行サイクルの関節角度のデータを示す。この被験者を含むどの被験者にも共通して、関節角度の変化パターンに違いが見られた。ただし、特に RW において個々の違いは被験者ごとにパターンが異なっていた。例えば図 4 では、膝の関節角度が最大となる位相は FW では 80 % であるが、BW では 70 % 程度である。また、FW と BW では肘と膝の関節角度は単峰性が見られるが、RW ではそれが一定となる期間が見られる。

3.2 被験者による評価

各条件で被験者が感じた歩行運動の難しさについて、FW よりも BW、BW よりも RW の方が難しいという結果が得られた (図 5-a)。また、被験者自身の自己評価による FW と RW の逆再生の一致度は、主観予想による評価・録画視聴による評価いずれの場合も低いという結果になった (図 5-b)。

3.3 インタビューで得られた結果

まず、歩行中に意識した身体部位についての質問で得られたコメントについて述べる。被験者 6 名中 4 名がインタビュー内で手腕の動きに言及した。うち 2 名は RW の実験中に意識し、もう 2 名は FW と RW の逆再生の一致度についての主観評価の際に意識できなかったことに言及した。一方、BW の際に手腕を意識した被験者はいなかった。手腕の動き以外にも、RW の際に 5 名が足部を意識した。足部の中で踵やつま先を含む足底を意識した被験者は 3 名であった。特に、3 名の被験者が RW において足底の接地の順序を意識した。また、大腿以下全体を意識した被験者は 3 名であった。BW の際にも足部を意識した被験者が 4 名いたが、その意図として挙げられたのは転倒や後方への不安であった。実際、BW の際に体幹で身体のバランスを意識した被験者が 2 名いた。

また、RW の際にイメージしたことについての質問では、5 名が普段意識していないことによるイメージの難しさを訴えた。具体的な点として、自身の歩行の癖を時間反転で再現しづらいことや、普段日常で意識しない歩行時の姿勢を改めて考える必要性に言及する被験者が多かった。また、ある被験者は RW の際に動きについて多く思考したことで体感速度が遅くなったことを訴えた。

図 5-b で一致度を評価したときの判断理由を質問した際、主観的な予想による評価で特に目立った回答は、自分の逆再生の完成度に対する理解不足や自信のなさであった。一方、後日録画視聴による評価では、4 名が手腕の動きについて不一致を訴えた。その他、実験に関する所感として得られた特徴的なコメントとして、RW における手足の位相の

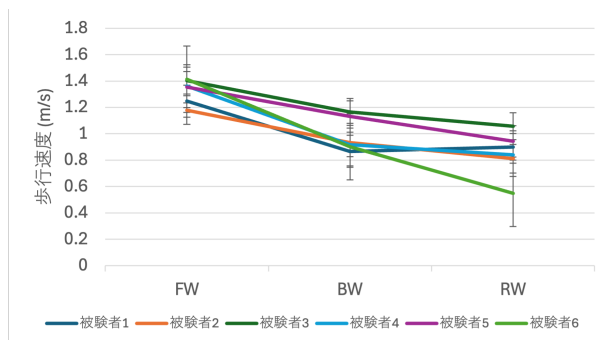


図 2: 歩行速度の各条件の比較

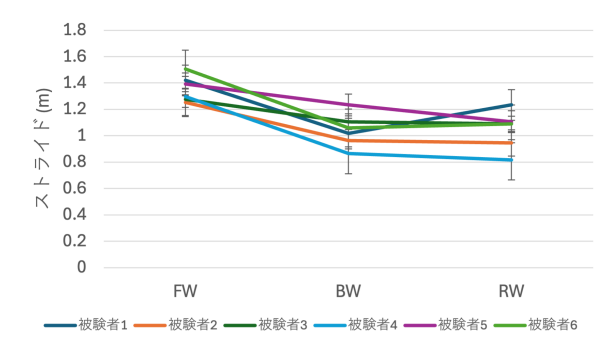


図 3: ストライドの各条件の比較

ずれや力を加える方向のずれなどが挙げられた。特に、RWにおける、手と足が同時に前へ出てしまうことへの違和感や不思議さが挙げられた。

4. 考察

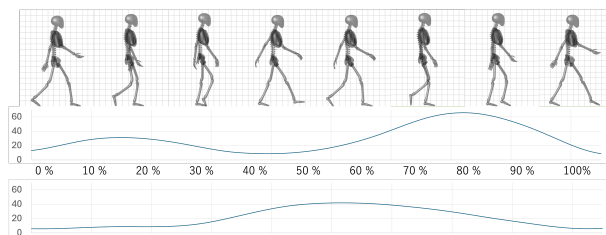
4.1 歩行運動への示唆

被験者に全体的に見られた傾向として、膝や肘の関節角度の時系列パターンではFWの時系列パターンの時間反転とは異なる特徴が現れた。このことから、人間は後ろ向き歩行を実行する際には前向き歩行の時間反転動作とは捉えておらず、あえて前向き歩行の逆再生を意識するとBWとRWの違いが膝と肘の関節角度や足底の接地順序の意識の形で顕著に現れることが示唆される。

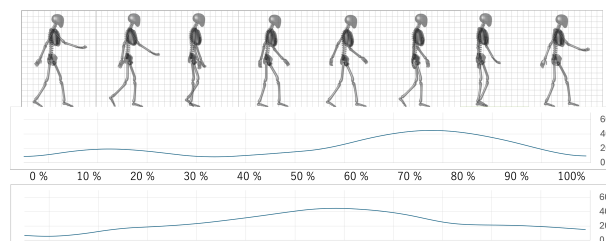
また、インタビュー結果から、本研究で調査対象とした歩行運動に関して特有の示唆を大きく二つ得ることができる。まず歩行中の手腕の運動である。従来歩行解析の研究では手腕の動きに着目されることは少なかったが、人間が歩行運動を全身動作として捉える際には足以外に手腕との協調を重視している点が示唆される。もう一つは足底の接地と蹴り出しである。踵から接地することや、今回の結果からは得られなかったがつま先で蹴り出すことへの意識は、歩行の姿勢を改善する上で重要であるとされており [8]、行動変容の観点での本研究の応用が示唆される。

4.2 身体意識の顕在化

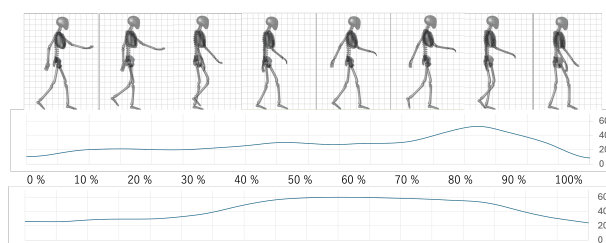
本研究で明らかになった重要な点の一つは、時間反転動作が人間にとって普段意識することの少ない動作の捉え直しに有効である可能性である。今回の実験におけるRWでは、被験者に対して前向き歩行の逆再生を頭の中でイメー



(a)FWのスナップショット(上段)、膝(中段)と肘(下段)の関節角度。

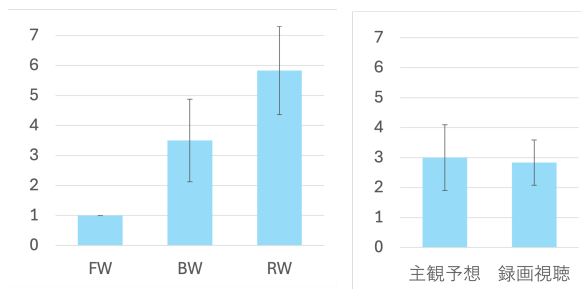


(b) BWの時間反転のスナップショット(上段)、膝(中段)と肘(下段)の関節角度。時間軸が反転されている点に留意。



(c) RWの時間反転のスナップショット(上段)、膝(中段)と肘(下段)の関節角度。時間軸が反転されていることに留意。

図 4: ある被験者の各条件下での歩行の様子と関節角度の時系列。横軸は歩行サイクルにおける位相を表す。各条件間で時間軸は正規化した。縦軸は関節角度を表し、単位は度。



(a) 各条件の難易度。1 が最も易しく、7 が最も難しい状態と定義した。

(b) FWとRWの一致度。1 が全く一致していない、7 が完全に一致している状態と定義した。

図 5: 被験者自身によるリッカート尺度評価

ジさせた。しかし、図 5-a で示されるように歩行動作の時間反転をイメージすることは比較的困難であるという結果が得られた。また、本来時間反転は数学的には時間の符号を反転するだけの単純な操作であり、機械的には単位時間あたりに行われる動作の量が変わらない。それにも関わらず、人間にとっての主観的な難易度は時間反転動作において大きく上昇した。これらは、普段意識できていない動作を認識するための身体動作の単純な変換として時間反転の動作が有効である可能性を示唆する。例えば我々は一般に

歩行中に各身体部位の動きを意識しないが、逆再生を意識して運動することでその意識が促され、運動に対する理解が深まることが示唆される。

さらに、この結果から身体運動の内部モデルの限界に対する示唆が得られる。我々が運動をイメージする際には、その動作に対する内部モデルを用いるが、本研究で得られた結果は、この内部モデルの不完全性が逆再生のイメージの不完全性の形で顕在化する可能性を示すものである。我々の内部モデルは外界の物理法則に依存しており [9]、時間反転動作において要求される身体の物理的特性に反するような動きが、その不完全性の主な要因となると考えられる。

4.3 意図と実際の不一致

本研究ではまた、逆再生を意識したにも関わらず逆再生であると自己評価できるほどの運動を必ずしも実現できない可能性が窺える。これは、図 4 のように、RW における膝や肘の関節角度の運動パターンが FW のその時間反転と一致していないことや、図 5-b に見られるような被験者による実験後の自己評価の低さから示唆される。

他方で、後ろ向き歩行の映像を逆再生したものは前向き歩行と同じ方向に進む映像となるが、それが逆再生であることは人間は簡単には見抜けないことが知られている [10]。この先行研究に鑑みると、今回の結果は、人間が逆再生と感ずる要因が身体動作としての自然さ以外にも存在する可能性を示唆する。例えば、被験者による主観的な評価の低さから、自分が行った逆再生の動作に対する運動主体感が低いことが考えられる。自分が逆再生に一致するように意図して行った動きを実際に逆再生させると、論理的には、自分が順再生の動作を意図して行ったそのままの動きと同様の運動主体感を感じるはずである。しかし、本研究はこの二種類の感覚が異なることを示している。

このように、人間が逆再生を意識して動作する際に一致させようとする動作の特徴と、逆再生を見分けようとする際に手掛かりとする動作の特徴について、また、身体運動の時間反転性と運動主体感の関係を今後調査する必要がある。

5. 結論と今後の展望

本研究では、前向き歩行・後ろ向き歩行・逆再生を意識した歩行の比較解析を通して、身体の時間反転性や運動の内部モデルに対する探索的調査を行った。本研究で行った予備の実験の結果から、逆再生を意識した歩行が歩行動作の新たな理解を促進する可能性が示唆された。また、動作の時間軸を反転させただけで、普段意識していない身体動作の特徴をイメージするのが困難になったり想起されなかったりする点は、人間の身体性や運動学習に関して重要な示唆を与える。

今後は重心移動など、歩行時のデータのより詳細な分析や筋電図による筋活動の比較を行う他、歩行以外の動作における時間反転動作の解析も行い、上記の点を検証し、運

動学習・制御や身体性認知との関係性を明らかにする。

謝辞 本研究は、JST ムーンショット型研究開発事業 JP-MJMS2292 の支援を受けたものである。また、櫻田国治先生には実験の実施にあたってモーションキャプチャシステムについて詳細にご教示いただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] Maurice Merleau-Ponty. *Phenomenology of Perception*. Routledge, New York, 1945.
- [2] Nicholas Bernstein. The coordination and regulation of movements. (*No Title*), 1967.
- [3] Shinichi Furuya, Ayumi Nakamura, and Noriko Nagata. Transfer of piano practice in fast performance of skilled finger movements. *BMC neuroscience*, Vol. 14, No. 1, p. 133, 2013.
- [4] Nadia Allami, Yves Paulignan, Andrea Brovelli, and Driss Boussaoud. Visuo-motor learning with combination of different rates of motor imagery and physical practice. *Experimental Brain Research*, Vol. 184, No. 1, pp. 105–113, 2008.
- [5] David Lynch and Mark Frost. Twin peaks, 1990.
- [6] E Terblanche, C Page, J Kroff, and RE Venter. The effect of backward locomotion training on the body composition and cardiorespiratory fitness of young women. *International journal of sports medicine*, Vol. 26, No. 03, pp. 214–219, 2005.
- [7] David A. Winter, Nancy Pluck, and Jaynie F. Yang. Backward walking: A simple reversal of forward walking? *Journal of Motor Behavior*, Vol. 21, No. 3, p. 291–305, September 1989.
- [8] Shirin Aali, Farhad Rezazadeh, Georgian Badicu, and Wilhelm Robert Grosz. Effect of heel-first strike gait on knee and ankle mechanics. *Medicina*, Vol. 57, No. 7, p. 657, 2021.
- [9] Charalambos Papaxanthis, Marco Schieppati, Rodolphe Gentili, and Thierry Pozzo. Imagined and actual arm movements have similar durations when performed under different conditions of direction and mass. *Experimental brain research*, Vol. 143, No. 4, pp. 447–452, 2002.
- [10] Paolo Viviani, Francesca Figliozzi, Giovanna Cristina Campione, and Francesco Lacquaniti. Detecting temporal reversals in human locomotion. *Experimental brain research*, Vol. 214, No. 1, pp. 93–103, 2011.