



テレプレゼンスのための Leaning 型ロコモーションと歩行感覚提示の検討

A Study on Leaning-based Locomotion and Walking Like Sensation for Telepresence

島田匠悟¹⁾, 小島優希也¹⁾, 西内信之¹⁾, 池井 寧²⁾, ヤェム ヴィボル³⁾

Shogo SHIMADA, Yukiya OJIMA, Nobuyuki NISHIUCHI, Yasushi IKEI, and Vibol YEM

1) 東京都立大学大学院 システムデザイン研究科 情報科学域 (〒 191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6, {shimada-shogo, ojima-yukiya}@ed.tmu.ac.jp, nnishiuc@tmu.ac.jp)

2) 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, ikei@vr.u-tokyo.ac.jp)

3) 筑波大学大学院 システム情報系 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, yem@iit.tsukuba.ac.jp)

概要: 本研究では, 遠隔実環境下での没入型テレプレゼンスロボットを用いたロコモーション手法として, 身体の傾斜を利用した Leaning 型と従来の Joystick 型について, 複数の観点から予備的な比較検証を行った. 実験の結果から, Leaning 型ロコモーションは Joystick 型と同等の操作性を維持しつつ, 快適性や集中度を向上させ, Cybersickness を低減させる可能性を示した. さらに, ロコモーションと同時に歩行感覚を提示することは, テレプレゼンス体験の全体的評価 (機能性, 容易さ, 快適性等) を向上させるための一助となることが示唆された.

キーワード: テレプレゼンス, ロコモーション, 歩行感覚

1. はじめに

我々が日常生活で自然に行っているロコモーションは, 近年のバーチャルリアリティ (VR) アプリケーションやテレプレゼンス技術を利用したシステムにも取り入れられ, 一般的な VR 体験の一部となっている. Joystick 型のコントローラを使用したロコモーション手法は, その直感的な操作性と容易な実装性から, 多くの VR システムで広く採用されている. しかし, この手法はしばしば Cybersickness (CS) を引き起こす. CS の発生機序はいまだ完全には明らかにされていないが, 前庭感覚と視覚情報の不一致が原因と考えられている [1]. Joystick 型のロコモーションでは, ユーザの身体は静止したまま視覚的な移動情報が提示されるため, この不一致が顕著になり, 結果として CS を引き起こす可能性が高まると考えられる. ユーザが一度 CS を経験すると, ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を再装着する際の精神的な障壁となる可能性があり, VR の普及にとって深刻な問題である. したがって, ロコモーションの操作性や快適性を向上させ, CS の抑制策を探ることは, VR およびテレプレゼンス技術の発展と普及に対し重要な貢献を果たす可能性がある.

いくつかの先行研究では, VR 空間において, 上半身の傾斜を利用した Leaning 型のロコモーション [2, 3] や身体への振動および運動 [4, 5] を活用することで, CS の抑制やユーザビリティを向上させる効果を示されてきた. 本研究では, これらの先行研究を踏まえ, テレプレゼンスシステ

ムにおいても従来の Joystick 型手法や歩行感覚を提示しない状況と比較して, Leaning 型手法が同様の効果を発揮するという仮説を立てた.

この仮説を検証するために, 遠隔実環境に存在しユーザが没入するテレプレゼンスロボットのロコモーションタスクにおいて, Leaning 型手法を用いた. さらに, 歩行感覚を提示することで, 前庭感覚と視覚情報の不一致を低減することを目的として, モーションシートとペダルインタフェースを用いた受動型身体フィードバックを導入した. これらの手法の組み合わせによる没入型テレプレゼンス体験の効果を検証し, それぞれの手法の有効性を明らかにすることが, 本研究の目的である. この目的を達成するために, 8 名の参加者を対象に参加者内計画で多角的な観点から比較評価を行った.

2. システム概要

図 1 は, 本研究で使用したテレプレゼンスシステムの概略構成である.

2.1 テレプレゼンスロボット

本研究で使用したテレプレゼンスロボットは, 4K 解像度の 360 度カメラ (THETA Z1, Ricoh) を搭載しており, 操作者は HMD (Meta Quest2) を通じて, ロボットと同じ視点で遠隔地の実環境を視認することが可能である.

2.2 ロコモーション手法

操作者は, Leaning 型および Joystick 型という二つの手法を用いてロボットのロコモーションを制御した. Leaning

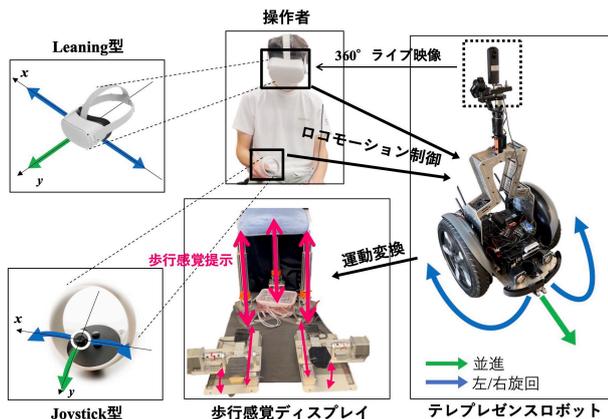


図 1: テレプレゼンスシステムの概略構成図

型では HMD の前方及び横方向の移動距離に基づいてロボットを操作し、Joystick 型では従来のコントローラを用いて操作を行った。

2.2.1 Leaning 型

Leaning 型のロボット制御では、HMD の 2 次元位置（原点からの変化量）をそれぞれロボットの旋回速度と並進速度に線形に対応させた。すなわち、

- HMD の x 軸正方向が頭部右方向、 y 軸正方向が頭部前方方向。
- HMD の位置: x, y (mm). 原点はコントローラのボタンをトリガーとすることで設定。
- ロボットのヨー軸周りの旋回速度: ω_{lx} (deg/s)
- ロボットの前方並進速度: v_{ly} (mm/s)

とするとき、次式で制御した。

$$\omega_{lx} = \frac{45x}{150} \quad (1)$$

ただし $\max |\omega_{lx}| = 45$ (deg/s)

$$v_{ly} = \frac{400y}{150} \quad (2)$$

ただし $y > 0$, $\max v_{ly} = 400$ (mm/s)

2.2.2 Joystick 型

Joystick 型の制御は、Joystick 傾倒量をそれぞれロボットの旋回速度と並進速度に線形に対応させた。すなわち、

- Joystick の右傾倒方向が x 軸の正、前傾倒が y 軸の正。
- Joystick の入力量: (J_x, J_y) 。
- ロボットのヨー軸周りの旋回速度: ω_{jx} (deg/s)
- ロボットの前方並進速度: v_{jy} (mm/s)

とするとき、次式で制御した。

$$\omega_{jx} = 45J_x \quad (3)$$

ただし、 $|J_x| \leq 1.0$ 。

$$v_{jy} = 400J_y \quad (4)$$

ただし $J_y > 0$ 。

2.3 歩行感覚提示

モーションシートと両足のペダルインターフェースから構成される歩行感覚ディスプレイを使用した [6]。モーションシートは、3 自由度 (3-DOF) で構成されており、シートを支える 3 つのリニアアクチュエータの長さを調整することで、リフト、ピッチ、ロールの 3 軸で前庭感覚刺激を生成する。また、下肢の固有感覚を提供するための 2 つのペダルインターフェースは、足の上下往復および前後往復の各 2-DOF で構成されている。

3. 実験

本実験では、テレプレゼンスにおけるロコモーションタスクを比較検証した。このために、身体の傾斜に基づく Leaning 型と Joystick 型の手法を用いて、さらに歩行感覚提示を併用し、それらの評価を行った。

実験参加者は 22 歳から 28 歳までの男性 7 名および女性 1 名の計 8 名で、全員が大学生または大学院生であった。なお、本実験は事前に東京都立大学大学院の研究倫理委員会の承認を得て実施された（承認番号：H22-041）。

3.1 実験条件

実験は参加者内計画で行い、ロコモーション手法の二種類と、歩行感覚提示の有無の組み合わせに従って 4 条件を設定した（表 1）。これら 4 条件は参加者間でカウンターバランスを取る順序で提示した。

各条件下で、参加者は約 10 m² の範囲内でテレプレゼンスロボットを 3 分間、可能な限り長い距離移動させるように指示した。

3.2 評価項目

各条件の体験後、実験参加者は以下のユーザビリティ (Q1, Q2)、快適性 (Q3, Q4)、集中度 (Q5)、感覚体験 (Q6)、全体的評価 (Q7) のカテゴリに分類される主観評価質問紙に回答した。これらの質問項目は全て 0 から 10 までの Likert 尺度で評価され、高い値がより肯定的な評価であること示す。また、CS の程度を評価するために、Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) の合計スコア [7] を使用した。

Q1. ロボットの操作は容易であったか？ [0: 全く容易でない - 10: 非常に容易である]

Q2. 本インターフェースに慣れるまでどのくらいの時間を要したか？ [0: 全く慣れない - 10: すぐに慣れる]

Q3. 本インターフェースは快適であったか？ [0: 全く快適でない - 10: 非常に快適である]

表 1: 本研究で設けた四つの実験条件

[ロコモーション] \ [歩行感覚提示]	あり	なし
Joystick 型	条件 1	条件 2
Leaning 型	条件 3	条件 4

- Q4. 本インターフェースをより長時間使用できると感じるか？ [0: 全くそう思わない - 10: 非常にそう思う]
- Q5. タスクに集中するのは容易であったか？ [0: 全く容易でない - 10: 非常に容易である]
- Q6. どのくらい頻繁にバクシオンを感じたか？ [0: 全く感じない - 10: 常に感じる]
- Q7. 本インターフェースの全体的な評価は？ (機能性, 容易さ, 快適性等) [0: 非常に悪い - 10: 非常に良い]

4. 実験結果

図2は、全参加者が回答した主観評価の結果をまとめたものである。

Mauchly の球面性検定により、全ての評価項目の結果に対して球面性の違反はないことが確認された。そのため、ロコモーション手法 (Joystick 型, Leaning 型) と歩行感覚提示 (あり, なし) の二つの要因を考慮し、参加者内の二元配置分散分析を行った (有意水準 $\alpha=0.05$)。

その結果、ユーザビリティの評価項目である Q1, Q2 については、いずれも主効果および交互作用に有意性を示さなかった。

快適性の評価項目である Q3, Q4 については、ロコモーション手法の主効果のみ有意性を示した (Q3: $F(1,7) = 8.077, p = 0.025$; Q4: $F(1,7) = 6.818, p = 0.034$)。いずれも Leaning 型の平均値 (Q3: 5.500; Q4: 5.625) が Joystick 型の平均値 (Q3: 3.625; Q4: 3.750) より有意に大きいことが示された。

集中度の評価項目である Q5 についても同様に、ロコモーション手法の主効果のみ有意性を示した ($F(1,7) = 6.376, p = 0.039$)。Leaning 型の平均値 (7.000) が Joystick 型の平均値 (6.062) より有意に大きいことが示された。

感覚体験 (バクシオン) の評価項目である Q6 では、主効果および交互作用に有意性を示さなかった。

全体的評価である Q7 では、両要因の主効果に有意性を示した (ロコモーション手法: $F(1,7) = 7.146, p = 0.031$; 歩行感覚提示: $F(1,7) = 10.205, p = 0.015$)。ロコモーション手法では、Leaning 型の平均値 (6.438) が Joystick 型の平均値 (4.688) より有意に大きいことが示された。歩行感覚提示については、提示ありの平均値 (6.250) が提示なしの平均値 (4.875) より有意に大きいことが示された。

SSQ の合計スコアについては、主効果と交互作用に有意性は見られなかった。

本研究における参加者数は 8 名と限定的であり、一部の評価項目においては統計的な有意性が確認できなかった。しかしながら、参加者数を更に増加させることにより、統計的有意性を示さなかった評価項目についても有意な結果が得られる可能性があると考えられる。

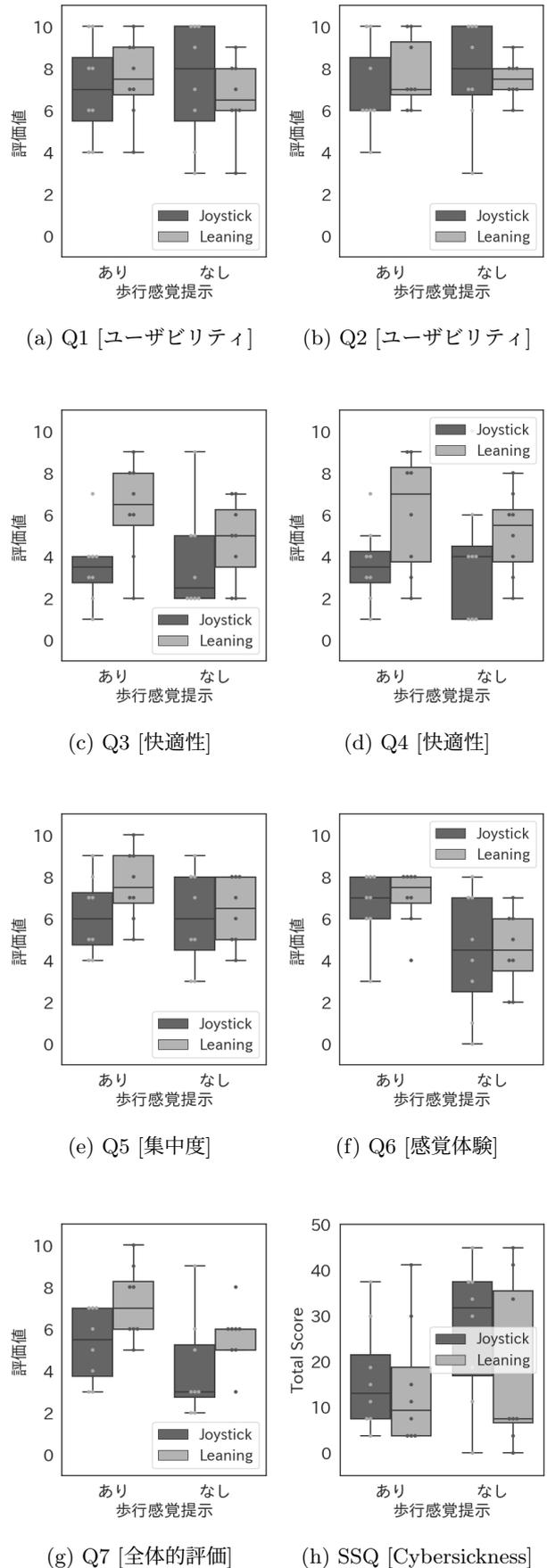


図 2: 主観評価の結果

5. 考察

5.1 ユーザビリティ

ユーザビリティ評価の項目である Q1 および Q2 の結果から、参加者がロコモーション手法に関係なくテレプレゼンスロボットを同等の操作性で制御できることが示された。

本研究では、並進と旋回のみを対象としており、この結果はタスクの自由度の低さに起因している可能性が考えられる。より高い自由度を持つ操作（例えば、ロコモーション中の腕や手を使ったインタラクション）の場合、Leaning 型手法は操作者に腕や手をロボットの制御に用いる自由を提供するため、より適切な選択となる可能性がある。この点についての詳細な検証は、今後の研究の対象とする予定である。

5.2 快適性および集中度

快適性の評価項目 Q3, Q4 および集中度の評価項目 Q5 の結果では、Leaning 型手法の有意性を示しており、参加者は Joystick 型を使用した場合よりも長時間ロボットを操作できると予測し、より快適で集中しやすいと評価した。注意を必要としたり、長時間を要するタスクには、Leaning 型ロコモーションが適している可能性が考えられる。

5.3 全体的評価

全体的な評価項目である Q6 の結果では、相互作用は見られなかったものの、両要因の主効果について有意性を示した。この結果から、ロコモーションについて、Leaning 型手法と歩行感覚を提示することは、全体的評価という観点からも有効であることが示された。

5.4 Cybersickness

Cybersickness の評価に使用した SSQ の合計スコアにおいては、いずれの要因についても主効果や交互作用について統計的な有意性を示さなかった。しかし、平均値に基づく比較では、Leaning 型の手法の条件と、歩行感覚提示が「あり」の条件で、より低いスコアを得た。

この結果は、Leaning 型の手法と身体のフィードバックを組み合わせることで Cybersickness を軽減させ、テレプレゼンス体験の質を向上させる可能性を示唆している。一般的に下肢関節が屈曲すると体幹角度が前傾するという歩行時の現象を考慮に入れると、Joystick 型と比較して、Leaning 型は実際の歩行時の上半身の状況に近いと考えられ、本研究で観察された結果に繋がったと推察できる。

6. むすび

本研究では、遠隔実環境に存在しユーザが没入するテレプレゼンスロボットのロコモーション体験のために、身体の傾斜を利用した Leaning 型ロコモーションと、歩行感覚提示の有用性を検証した。

実験の結果、Leaning 型は、従来の Joystick 型を利用した手法と同等のユーザビリティを示し、快適性や集中度の向上に寄与し、CS を低減させる可能性を示した。加えて、ロボットのロコモーションと同時に身体フィードバックとして歩行感覚を提示することで、全体的な評価（機能的、容

易さ、快適性等）の向上に寄与することが示された。

今後の発展として、現在のテレプレゼンスロボットに二本のロボットアームを取り付け、Leaning 型ロコモーションと歩行感覚提示の併用に加えて、ハンドトラッキングの技術を利用し、遠隔作業における効率性を検証する予定である。

謝辞 本研究は、総務省 SCOPE #191603003, #19189681 JSPS 科研費 18H04118, 21K19785 および東京都立大学 local-5G プロジェクトの支援により実施された。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] Joseph J. LaViola. A discussion of cybersickness in virtual environments. *SIGCHI Bull.*, 32(1):47–56, Jan 2000.
- [2] Alexandra Kitson, Abraham M. Hashemian, Ekaterina R. Stepanova, Ernst Kruijff, and Bernhard E. Riecke. Comparing leaning-based motion cueing interfaces for virtual reality locomotion. In *2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pages 73–82, 2017.
- [3] Thinh Nguyen-Vo, Bernhard E. Riecke, Wolfgang Stuerzlinger, Duc-Minh Pham, and Ernst Kruijff. Naviboard and navichair: Limited translation combined with full rotation for efficient virtual locomotion. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(1):165–177, 2021.
- [4] Yuki Sawada, Yoshihiro Itaguchi, Masami Hayashi, Kosuke Aigo, Takuya Miyagi, Masayuki Miki, Tetsuya Kimura, and Makoto Miyazaki. Effects of synchronised engine sound and vibration presentation on visually induced motion sickness. *Scientific Reports*, 10(1), 2020.
- [5] Yem Vibol, Morita Tsubasa, Amemiya Tomohiro, Kitazaki Michiteru, and Ikei Yasushi. Feedback of rotational sensation experienced by body for immersive telepresence. SIGGRAPH '21, New York, NY, USA, 2021.
- [6] Unno Minori, Yamaoka Ken, Yem Vibol, Amemiya Tomohiro, Kitazaki Michiteru, and Ikei Yasushi. Novel motion display for virtual walking. In *Human Interface and the Management of Information. Information-Rich and Intelligent Environments*, pages 482–492, 2021.
- [7] Robert S. Kennedy, Norman E. Lane, Kevin S. Berbaum, and Michael G. Lienthal. Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3):203–220, 1993.