



力検出と腱振動刺激を用いた VR 歩行インタフェース

田中叡^{1,2)}, 梶本裕之¹⁾

1) 電気通信大学 情報理工学研究所 (〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {tanaka, kajimoto}@kaji-lab.jp)

2) 日本学術振興会

概要: バーチャルリアリティ (VR) における歩行インタフェースとしては、実際に VR 空間と同じ距離を歩くもの、錯覚により実際より大きな距離を歩行する感覚を与えるもの、トレッドミルなどの機械的手段によるもの、ジョイスティックなどの入力によるものが考えられるが、どれも感覚の自然さやコスト、安全性の問題を抱えている。そこで本研究では、装置の上に立ったユーザーが脚で発揮した力を検出してアバタの脚を動作させると同時に、腱振動刺激による運動錯覚を用いて膝が動く感覚を提示するシステムを提案する。

キーワード: 歩行, 移動感覚, 自己受容感覚, 運動錯覚

1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) 体験の実装において、シミュレートされた 3次元空間 (VR 空間) を移動するインタフェースは重要な構成要素である。しかし、限られた物理的空間の中で VR 空間を無限に移動することは直接的には不可能であるため、現在に至るまで様々な移動インタフェースが提案されている。

VR 空間を移動するためのインタフェースとしては、乗り物を使わない歩行に限ると大きく分けて 4 種類の方式が考えられる (表 1)。1 つ目は、VR 空間内での移動と同じ距離を実際に移動し、実際のユーザーの位置をそのままアバタに反映する方式である。この方式は移動感覚の自然さという面では唯一無二といえるが、VR 空間と同じ大きさの空間が実際に必要となり、さらにユーザーの転倒や衝突といった安全上のリスクも抱えている。2 つ目は Redirected walking [1] と呼ばれる、ユーザーが気付かないように VR 空間を操作することで、実際とは異なる移動感覚を錯覚させる方式である。この方式は必要な空間を大きく削減できるものの、依然として実際の移動を伴うためある程度の空間が必要となり、転倒や衝突のリスクも残っている。3 つ目は全方向トレッドミル [2] のような機械的手段を用いて、ユーザーが足を動かしてもその場に留まるようにする方式である。これは必要な空間を極めて小さくできるものの、大掛かりかつ複雑な装置を必要とする上、感覚的にもある程度の違和感が生じ、さらに装置の故障や誤動作による事故のリスクを伴う。4 つ目は、ジョイスティックの操作など実際の歩行とは異なる動作を用いて、間接的にアバタを移動させる方式である。この方法は広い空間も大掛かりな装置も不要であるものの、歩行感覚としては最も不自然であり、場合によっては VR 酔いを引き起こすこともある。

このように VR における移動インタフェースには様々な方式が考えられるものの、どれも一長一短の現状がある。それに対して本研究では、広い空間も大きな装置も必要とせ

表 1: VR 移動インタフェースの定性的比較

	方式	自然さ	コスト	安全性
(1)	実際に移動する	最高	高	低
(2)	Redirected walking	高	中	低
(3)	トレッドミル等	中	中	中
(4)	ジョイスティック等	低	最低	最高
	提案手法の目標	中	低	高

ず、高い安全性を確保しながら、ある程度自然な歩行感覚が得られる歩行インタフェースを実現することを目的として、力センサによる入力と、腱振動刺激による運動錯覚 [3] を組み合わせた手法を提案する。

2. 関連研究

歩行そのものとは異なる動きを用いて VR 空間を移動するインタフェース (前述の 4 番目の方式) では、基本的には自然な歩行感覚が得られるとは言い難い。しかし、その場に留まったまま自然な歩行動作の一部 (足踏み [4] や頭部動揺 [5] など) を行うことで VR 空間内を移動する手法も提案されており、これらはコストや安全性の長所を維持しながら、ある程度自然な歩行感覚を実現している。しかし、このような手法を用いる場合、ユーザーは意識的にその場から動かないようにする必要がある。

歩行ではない一般の運動に着目すると、ユーザーが意識的に運動を制限せずとも運動を狭い範囲に留められるインタフェースが提案されている [6], [7]。これらは腱振動刺激による運動錯覚 [3] と呼ばれる、腱に 100Hz 程度の振動を与えることで身体が運動している感覚のみが生起する現象を利用している。この現象は歩行感覚の提示にも応用されており、Leonardis ら [8] は膝関節への振動刺激による脚部の運動錯覚を映像やモーションプラットフォームによる前庭

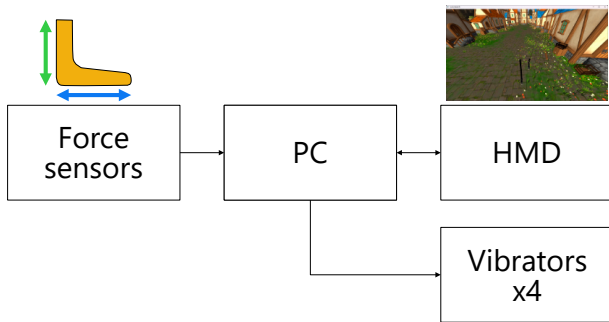


図 1: 使用するシステムの構成



図 2: 力検出装置の構造

感覚刺激と組み合わせて、安静状態のユーザーに歩行感覚を提示する手法を提案している。しかし、筆者らの知る限りでは、ユーザーによる能動的、随意的な歩行の感覚を運動錯覚によって増強した例は存在しない。

3. 提案手法

本研究で提案する手法は、力検出による操作を行うと同時に腱振動刺激による運動錯覚を提示するという筆者らが先行研究 [7] で提案した手法を、脚部の歩行運動に応用したものであり、図 1 に示すシステムを用いる。本手法ではユーザーは図 2 に示す力検出装置の上に立ち、歩行するように脚に力を入れる。装置には 2 個のロードセル（力センサ）が搭載されており、右足が前後および上下方向に発揮する力を検出する。ここではユーザーの両足が常に装置に接触していると仮定しているため、左足の発揮する力は作用・反作用の法則より、右足の力を反転させたものとして推定される。検出された力は増幅回路および A/D 変換回路を通して PC に入力され、それに基づいてアバタの脚を動作させ、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）を通して表示する。それと同時に、膝関節付近に装着した片足 2 台、計 4 台の振動子（Vp408、アクーヴ・ラボ）により、膝の屈曲・伸展を運動錯覚として提示する。

4. 今後の展望

本稿の執筆時点では、提案手法は初歩的なプロトタイプシステムが開発された段階にとどまっており、本手法の有用性すなわち実際に自然な歩行感覚が得られるかを評価することはできていない。また第 2 節にて既存手法の問題点としてユーザーが意識的にその場を動かないようにする必要

がある旨を挙げたが、本手法においても現時点ではまだ足が装置に固定されておらず、ユーザーは装置から足が離れないよう意識する必要がある。そのため、今後は足の固定や操作・刺激方法の最適化を行った後、被験者実験により歩行感覚の自然さに関する評価を行う必要がある。

5. おわりに

本稿では、VR 空間を自然に歩行可能なインタフェースを、限られた空間と小さな装置を用いて安全に実現することを目的として、腱振動刺激による運動錯覚を用いた新たな手法を提案した。提案手法はユーザーの脚が発揮する前後・上下方向の力を検出してアバタの脚を動作させるとともに、膝関節の運動感覚を腱振動刺激によって提示するものであった。しかし、現時点では初歩的なシステムを試作したのみであり、感覚の自然さを検証するには至らず、多くの改善点も残った。そのため、今後は手法の改善および評価実験が求められる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP21J22873 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] F. Steinicke, G. Bruder, J. Jerald, H. Frenz, and M. Lappe, "Analyses of human sensitivity to redirected walking," in *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology*, ser. VRST '08, Bordeaux, France: Association for Computing Machinery, Oct. 2008, pp. 149–156.
- [2] H. Iwata, "Walking about virtual environments on an infinite floor," in *Proceedings IEEE Virtual Reality (Cat. No. 99CB36316)*, Mar. 1999, pp. 286–293.
- [3] G. M. Goodwin, D. I. McCloskey, and P. B. Matthews, "The contribution of muscle afferents to kinaesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralysing joint afferents," *Brain*, vol. 95, no. 4, pp. 705–748, 1972.
- [4] J. D. Wendt, M. C. Whitton, and F. P. Brooks, "GUD WIP: Gait-Understanding-Driven Walking-In-Place," in *2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR)*, Mar. 2010, pp. 51–58.
- [5] M. Usuh, K. Arthur, M. C. Whitton, *et al.*, "Walking > walking-in-place > flying, in virtual environments," in *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ser. SIGGRAPH '99, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., Jul. 1999, pp. 359–364.

- [6] D. Hagimori, N. Isoyama, S. Yoshimoto, N. Sakata, and K. Kiyokawa, “Combining tendon vibration and visual stimulation enhances kinesthetic illusions,” in *2019 International Conference on Cyberworlds (CW)*, IEEE, Oct. 2019, pp. 128–134.
- [7] S. Tanaka, K. Ushiyama, A. Takahashi, and H. Kajimoto, “Movement-free virtual reality interface using kinesthetic illusion induced by tendon vibration,” in *Haptics: Science, Technology, Applications*, ser. Lecture notes in computer science, vol. 12272 LNCS, Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 316–324.
- [8] D. Leonardis, A. Frisoli, M. Barsotti, M. Carrozzino, and M. Bergamasco, “Multisensory feedback can enhance embodiment within an enriched virtual walking scenario,” *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 23, no. 3, pp. 253–266, Oct. 2014.