



バーチャル・リアリティを活用した トレッドミルの開発と応用*

加藤健治

1. はじめに —トレッドミルを活用した歩行研究における視覚的フローの重要性

これまで、トレッドミルを活用した歩行に関するバイオメカニクス研究の発展によって、長時間の歩行中における詳細な時空間的特徴や運動学的パラメータの定量的評価が可能になった。しかしながら、トレッドミル上で得られた歩行研究に関する重要な知見が、トレッドミルを離れて平地歩行したときに、しばしば汎化できないことが指摘され始めている¹⁾²⁾。その平地とトレッドミル間における歩行特性の乖離として、これまで主に二つの要因が挙げられてきた。第一に、トレッドミルという限られた物理的空間の中で、予め験者が設定した固定速度での“束縛された”条件下において歩行評価している点である³⁾。第二に、トレッドミル上においては、歩行中に周辺風景との連動が無い場合、自身の運動のための視覚情報、すなわち“視覚的フロー”を獲得できない点である⁴⁾⁵⁾。

特に、後者で挙げた視覚的フローについては、障害物の回避や、岩場等の不規則な歩行面での歩幅調整をはじめとする様々な歩行場面において用いられるとともに⁶⁾、歩行の開始時・終了時・歩行中における知覚-運動連関を通じたフィードフォワード制御やフィードバック制御にとって

も必須な情報である⁷⁾。したがって、トレッドミル歩行時における視覚的フローの獲得は、トレッドミル歩行研究で得られた知見を平地歩行へ汎化するためにも、重要な課題として認識されつつある。これらの問題を解決するために、近年では、バーチャル・リアリティ (Virtual Reality: VR) を活用したトレッドミルシステムの開発が積極的に取り組まれてきた。

本稿では、バーチャル環境を活用したトレッドミル装置の代表例として、近年開発された Computer-Assisted Rehabilitation Environment (CAREN), Gait Real-time Analysis Interactive Lab (GRAIL) (Motek Medical 社, アムステルダム, オランダ) を紹介し、それらの機器の概要や性能について述べるとともに、VRを用いた視覚的フローがトレッドミル歩行へ及ぼす影響について考察したい。最後に、今後の展望として、CAREN や GRAIL をはじめとするバーチャル環境を付与したトレッドミルを活用したリハビリテーション法の可能性について議論したい。

2. バーチャル環境を付与したトレッドミル歩行評価・訓練システムの開発

上述で提示した通り、従来のトレッドミル研究においては、固定速度下での実験環境と、歩行中の視覚的フローの欠如が、平地歩行に対する乖離の要因として大きな課題となっていた。これらの問題を解決するため、近年では、VRを介してスクリーンに投影した人工風景を歩行速度と連動させることによって、歩行中の視覚的フローを取得できるトレッドミルシステム (図1) が開発された⁸⁾。

また、トレッドミル内に設置したモーションキャプチャを用いて被験者の位置をフィードバックし、自身のトレッドミル位置に応じてベルト速

* Development and Application of Treadmill with a Virtual Reality

国立研究開発法人 国立長寿医療研究センター
健康長寿支援ロボットセンター
ロボット臨床評価研究室

(〒474-8511 愛知県大府市森岡町 7-430)

Kenji Kato, Ph.D.: Laboratory for Clinical Evaluation with Robotics, Center of Assistive Robotics and Rehabilitation for Longevity and Good Health, National Center for Geriatrics and Gerontology

E-mail: kk0724@ncgg.go.jp

度をリアルタイムで調整できる“速度自動調整 (Self-paced: SP) モード”の機能も開発された⁹⁾。このSPモードは、トレッドミルの移動量に応じて速度が変化し（つまり、被験者が前方に移動するほどベルト速度が増加し、後方へ移動するほどベルト速度が減少する）、歩行中に自分自身でベルト位置を調整しながら、快適な速度を探索することが可能である。

したがって、SPモードの環境下でVRを付加することによって、自身で制御した歩行速度に連動して視覚的フローを獲得することができるため、従来のトレッドミルと比較して、より自然で平地歩行に近い歩行特性がトレッドミル環境下で得られる可能性がある。

これらの機能を備えた代表的なトレッドミルとして、現状で二つのシステムが開発および市販されており、各々、Computer-Assisted Rehabilitation Environment (CAREN)、Gait Real-time Analysis Interactive Lab (GRAIL) という名前が付けられている。CARENとGRAILは、現状で研究と臨床の双方を目的として使用されており、開発後まだ数年という短い期間であるが、これまで、新たなリハビリテーション法としての応用¹⁰⁾や、各患者の回復過程に重要な知見を与えてくれる歩行研究¹¹⁾として発展できる可能性が示唆されてきた。

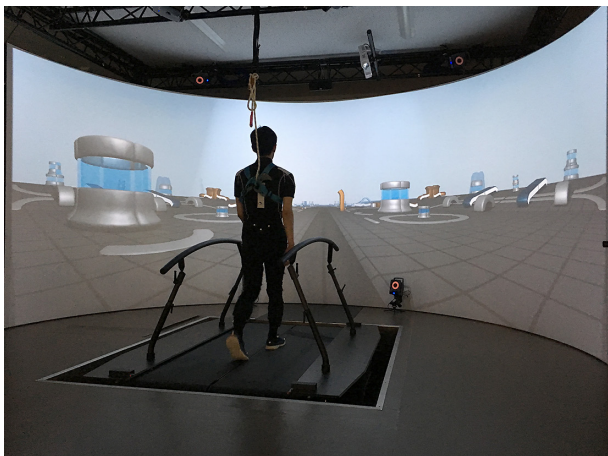


図1. Gait Real-time Analysis Interactive Lab (GRAIL)
(Motek Medical 社, アムステルダム, オランダ)

3. CAREN, GRAIL の特徴とアプリケーション例

ここでは、バーチャル環境を備えたトレッドミルシステムとしてCARENとGRAILを例に挙げ、システムの特徴や実現できるアプリケーションの種類について述べる。CARENとGRAILは、1)

モーション・キャプチャー、2) 6DoF モーションプラットフォーム、3) トレッドミル、4) 視野角が約180°の没入型バーチャル環境が投影されるスクリーン、の大きめに分けて4つの技術要素が統合して構成されている。これらの技術要素の統合によって、自身の歩行速度を調整できる状態 (SPモード) において、歩行面を操作したり (例：傾斜、交差斜面、凸凹面、側方外乱等)、それに併せてバーチャル環境を連動することができ (例：橋、山道、突然の横風等)、これまで実現できなかった歩行面に対する評価や、その他、歩行研究における多くの疑問に対してアプローチできるようになった。

CARENやGRAILが持つ特徴として重要な点は、それらが持つ個々の技術要素 (モーションキャプチャ、モーションプラットフォーム、トレッドミル、バーチャル環境等) に新規性があるわけではない。むしろ、これらの技術をすべて一つの連動したシステムとして統合したという点において画期的であり、それによって新たな歩行評価・訓練法に展開できる可能性が示唆されている。ここでは、当センターで有するGRAIL環境下で組み込まれているアプリケーションのいくつかを紹介する。

●平地歩行 (図2A)

平地に真っ直ぐに伸びた一本の道路が投影される。SPモードでも対応可能である。また、D-Flowで計算された股関節・膝関節・足関節の角度、歩行速度、重心位置、足圧中心位置等の基本的な歩行パラメータが、リアルタイム (約数10 ms 以内の遅延) でVRを介してスクリーンに表示できるため、訓練中の患者へのフィードバックとしても有効活用できる。

●凸凹面を有する森道 (図2B)

森の中で一本の真っ直ぐな道が投影され、凸凹面における歩行計測が可能である。凸凹の傾斜レベルを5段階に調整することができ、各患者に適した難易度を設定できる。さらに、両手に追加してマーカーを装着することで、歩行中に遠方から向かってくる蝶を手で払うという認知課題を付与することができる。

●緩やかな傾斜面を有するロープ橋 (図2C)

高所における岩場に繋がれたロープの橋を想定した風景が投影される。橋の下りから上り、または、上りから下りの緩やかな勾配が存在する状態

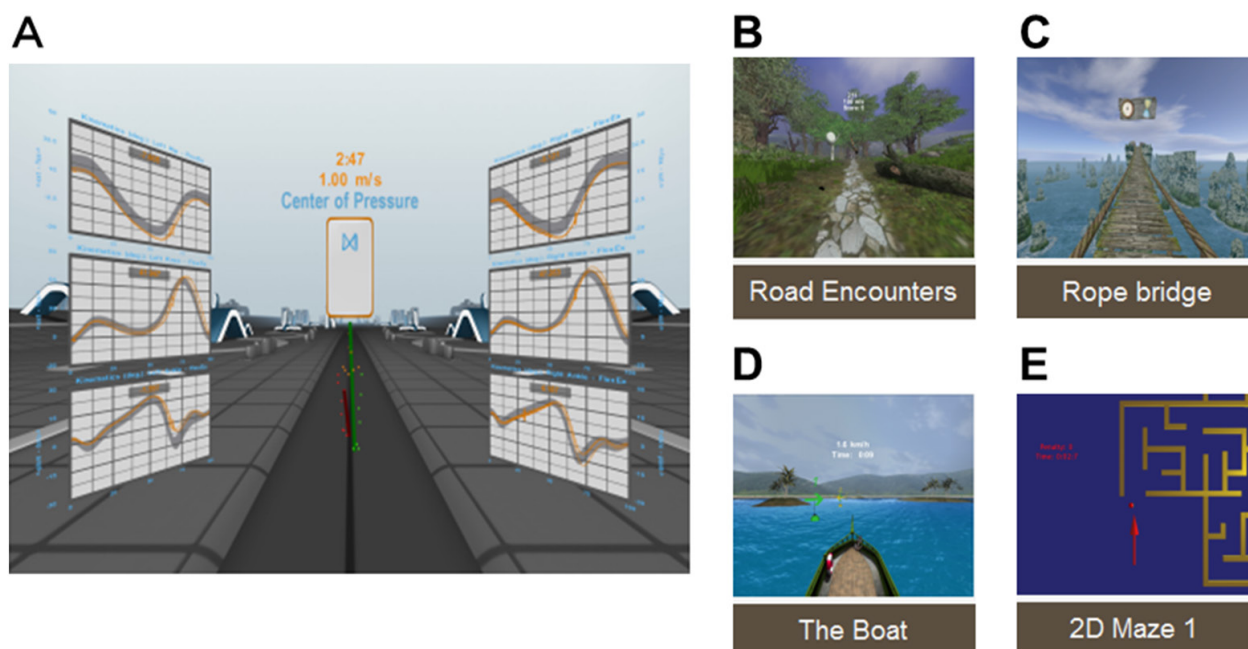


図2. Gait Real-time Analysis Interactive Lab (GRAIL) 環境下で実現できるアプリケーション例

(A: 平地歩行, B: 凸凹面を有する森道, C: 緩やかな傾斜面を有するロープ橋, D: ボート, E: 迷路)

で歩行評価が可能である。橋の傾斜レベルを5段階に調整することができ、各患者に適した難易度を設定できる。また、前方から向かってくる鳥を避ける認知課題を付与することもできる。さらに、ロープ橋での歩行中に横風を想定した外乱を付与することができるので、傾斜歩行中の側方外乱に対する反応についても調べることができる。

●ボート (図2D)

重心位置や体幹位置の操作することで自身が海上で漕ぐボートの方向を制御し、予め決められた標的(コース)を目印にしながらゴールまで正確に走る課題である。ゴールまで到達した時間が記録される。この課題においても、コースの指標となる標的間の距離やボートの速度といったパラメータを調整することができ、各患者に応じて難易度を調整することができる。さらに、ゴールまでの時間が結果として残るため、ゲーム感覚で楽しみながら、没入度や努力度を高める狙いがある。

●迷路 (図2E)

重心位置や体幹位置を制御することで、スクリーン上で示された2Dの迷路をゴールまで移動する課題である。壁に衝突した回数やゴールに辿り着くまでの時間が記録される。この迷路では、ゴールまでのあらゆる移動方向への軌道修正を通じて、自身の重心移動を支持基底面内へ促すこと

を訓練できる。

以上の紹介例をはじめとして、GRAILで実現できるアプリケーションだけでも30を超える。また、D-Flowを用いてプラットフォームやモーションセンサー等、個別のシステムを統合してプログラミングすることもできる。したがって、Motek Medical社から提供されているアプリケーションを使用するだけでなく、これらのアプリケーションをカスタマイズしたり、自分自身で開発するケースも珍しくない。オタワ大学の研究グループでは、政府が提供しているオタワ市街地の3Dマップを用いて、CAREN上のVRスクリーンに投影することを試みている。CAREN上で“自分の知っている”場所を探索しながら歩くことで、既知の生活範囲内の歩行ルートや歩行面に対する評価が実験環境下において実現できるのは画期的といえよう。また、CARENでは、前後成分と側方成分の両方に傾斜をつけることが可能なので、岩場を模擬した歩行面や、バスや電車に乗っている最中の急な加速・減速を想定した場面を模擬することもできる。以上より、CARENやGRAILをはじめとするVR環境を活用したトレッドミルシステムの利点について下記に集約した。

1. 部屋サイズの3Dバーチャル環境を用いて、日常生活を模擬した場面(院内の廊下、障害物の

回避、道路、バス・電車の中等）における歩行評価が可能であること

2. 日常生活ではあまり経験しない困難な歩行場面（例：山道、丘、岩場などの傾斜のある歩行面）においても、ハーネスを装着しながら“安全に”評価することで、自身の歩行能力の限界点を探索できること
3. 1や2の歩行場面を、何度も繰り返し評価が可能で、訓練用として使用することができること
4. ゲームの手法を応用して没入感・努力レベルを高めることで、楽しみながら訓練できる要素を持っていること
5. 各患者の病態、症状、モチベーションに応じて、医療スタッフがそれに適した場面や難易度を選択し患者に提供できること

4. GRAIL を用いたバーチャル環境を付与したことによる歩行特性の変化

2と3で述べた通り、CARENやGRAILを用いて、自身で調整した歩行速度に連動した視覚フローを得ることで、より自然で平地歩行に近い歩行特性を生み出せる可能性がある。しかしながら、それらの影響については、まだ詳しく調べられていないのが現状である。当センターでは、2017年にGRAILを導入し、これまでVRを介した視覚的フローが歩行に与える効果についての実証を行ってきた。当センターでは、健常若年者を対象とし、SPモード歩行においてVRの付加による歩行特性の違いを、歩行速度、歩幅、歩隔の変動という観点から検証してきたので、その結果の一部を紹介する^{12) 13)}。

対象は、健常若年者23名とし、各対象者は、10m平地歩行を2回実施した後に、両側下肢の上前腸骨棘、上後腸骨棘、大腿骨外側上顆、外果、第5中足骨骨頭、第1趾末節骨等を含む計25マーカを貼付して、歩行速度、歩幅、歩隔を算出した。GRAILがもつSPモードについて説明し、GRAIL上での快適歩行を1回練習した後に、VRの有無条件での歩行を2回ランダムに実施した。VRありの条件下では、視野が約180度に設定されたスクリーンを用いて道路と周辺風景を投影した。歩行時間は90秒とし、30歩行サイクル以降を歩行速度の定常状態と定義し、各対象者における30-60歩行サイクルを、歩行速度、歩幅、歩隔の解析区間と設定した。

その結果、30-60歩行サイクルの定常歩行時において、VRの有無による平均歩行速度の相違は

認められなかった。しかしながら、興味深いことに、各被験者における定常歩行中の歩行速度の変動係数を算出し、VRの有無によるそれらの差を求めたところ、VR有りの条件下では、VR無しの条件下と比較して、歩行速度の変動係数が有意に減少することがわかった。さらに、定常歩行時における歩幅と歩隔の平均値とその変動係数を求めたところ、それらの平均値はVRによる影響がなかったものの、歩幅の変動係数は、VR有りの条件下の方がVR無しの条件下と比較して、有意に減少することが分かった。これらの結果により、SP歩行中にVRを付与することによって、歩行速度と歩幅のばらつきが減少することが示唆された。

これまで、歩幅や歩行速度の変動は、転倒リスク¹⁴⁾や病態¹⁵⁾に関連したり、加齢に伴う歩行の安定性¹⁶⁾と深く関わるということが報告されてきた。以上の先行研究から推測すると、本研究で得られた結果についても、VRを介した視覚的フローを獲得しながら歩行することで、歩行速度や歩幅の安定性を高めたと解釈するのは妥当かもしれない。したがって、VRを活用した歩行中の視覚的フローの獲得は、これまで指摘されてきた、トレッドミルと平地歩行の乖離^{4) 17)}を減少できる可能性を示唆している。

5. バーチャル環境を活用したトレッドミル訓練法の応用

最後に、これまで述べてきたVR環境を活用したトレッドミルの開発や特徴に関する知見を基に、それらを用いた転倒リスクを軽減する訓練法としての応用例について詳細するとともに、VR環境を活用したトレッドミル研究の展望について議論したい。

近年、CARENやGRAILをはじめとする没入型のVR環境ではなく、視野角が比較的狭い非没入型のVR環境においても、高齢者における転倒リスクを減少する訓練法として有用であるという先行研究が報告されている¹⁸⁾。この研究では、イスラエル、ベルギー、イタリア、オランダ、イギリスの5か国において、研究実施前6か月間に少なくとも2回以上の転倒歴を有する高齢者（60-90歳）を対象として、6週間のVRを付与してトレッドミル歩行訓練を実施した群（N = 154）と、VRを付与せずにトレッドミル歩行訓練を実施した群（N = 148）にランダムに割り当てて施行している。両群は、6週間の訓練期間に、一日当たり45分間の訓練を週3回実施し、VRを用いたトレッド

ミル訓練では、VRを介した視覚・聴覚情報を用いて、障害物を避ける課題や歩幅の調整が必要な歩行課題を行う。

興味深いのは、トレッドミルにVRを付与した訓練群と、トレッドミルのみの訓練群の両群において、訓練後で有意に転倒率が減少しているものの、その転倒率の減少率や転倒に関する歩行パラメータ（歩行速度・歩幅の変動等）の改善率は、VRを付与したトレッドミル訓練群の方が、トレッドミルのみの訓練群と比較して有意に高かったという結果である。したがって、これまでの知見の通り、トレッドミルを用いるのみであっても転倒リスクを軽減できるものの^{19) 20)}、VRを付与することで、新しく“知覚—運動連関”を要求するような認知運動課題（注意、運動企図、反応選別等を含む）を訓練できる可能性を示唆している。以上より、VRを活用したトレッドミル訓練を通じて、トレッドミルのみでは実現できなかった、無意識的に障害物を避けたり、歩幅の調整をするといった認知運動戦略を学習できることは、VRを活用することの大きな利点であると考ええる。

しかしながら、前述のVRを活用したトレッドミル訓練に関する大規模調査は、没入型ではない比較的視野角が狭いVRを用いた研究であった。これまでの先行研究では、非没入型のVRを用いたトレッドミル歩行だと、被験者によっては逆に歩幅や歩隔の変動が増加し、より“注意深い”戦略を取るという先行研究も報告されていることから²¹⁾、今後は、CARENやGRAILをはじめとする没入型VRを用いた評価・訓練法への展開が期待される。

近年においても、大腿切断者や下腿切断者を対象とする訓練^{22) 23)}や、外傷性脳損傷後のリハビリテーションとしての有用性も報告されているが²⁴⁾、いずれもまだケーススタディに留まっており、今後はよりシステマティックで大規模な効果検証が望まれる。また、VRを用いた視覚フローを獲得することで、視覚情報を通じた知覚—運動の連関がどのように形成されているのか、それらの脳神経歩行メカニズムや運動制御機構についても共に調べていく必要があると考ええる。

【文 献】

- 1) Ochoa J, Sternad D, et al.: Treadmill vs. overground walking: different response to physical interaction. *J Neurophysiol.* 2017; 118: 2089-2102.
- 2) Puh U, Baer GD: A comparison of treadmill walking and overground walking in independently ambulant stroke patients: a pilot study. *Disabil Rehabil.* 2009; 31: 202-210.
- 3) Malatesta D, Canepa M, et al.: The effect of treadmill and overground walking on preferred walking speed and gait kinematics in healthy, physically active older adults. *Eur J Appl Physiol.* 2017; 117: 1833-1843.
- 4) Lee SJ, Hidler J: Biomechanics of overground vs. treadmill walking in healthy individuals. *J Appl Physiol.* 2008; 104: 747-755.
- 5) Riley PO, Paolini G, et al.: A kinematic and kinetic comparison of overground and treadmill walking in healthy subjects. *Gait Posture.* 2007; 26: 17-24.
- 6) Prokop T, Schubert M, et al.: Visual influence on human locomotion. Modulation to changes in optic flow. *Exp Brain Res.* 1997; 114: 63-70.
- 7) Mohler BJ, Thompson WB, et al.: Visual flow influences gait transition speed and preferred walking speed. *Exp Brain Res.* 2007; 181: 221-228.
- 8) Sloat LH, van der Krogt MM, et al.: Effects of adding a virtual reality environment to different modes of treadmill walking. *Gait Posture.* 2014; 39: 939-945.
- 9) Sloat LH, van der Krogt, MM et al.: Self-paced versus fixed speed treadmill walking. *Gait Posture.* 2014; 39: 478-484.
- 10) Darter BJ, Wilken JM: Gait training with virtual realitybased real-time feedback: Improving gait performance following transfemoral amputation. *Phys Ther.* 2011; 91: 1385-1394.
- 11) Rábago CA, Wilken JM: Application of a mild traumatic brain injury rehabilitation program in a virtual reality environment: A case study. *J Neurol Phys Ther.* 2011; 35: 185-93.
- 12) 加藤健治, 相本啓太・他: 自動速度調整トレッドミルにバーチャル・リアリティを付与することへの歩行特性の影響 — 歩幅の変動からみた考察 —. 第39回臨床歩行分析研究会定例会. 2017.
- 13) 相本啓太, 加藤健治・他: 自動速度調整トレッドミルと平地における快適歩行速度の比較. 第39回臨床歩行分析研究会定例会. 2017.
- 14) Hausdorff JM: Gait dynamics, fractals and falls: finding meaning in the stride-to-stride fluctuations of human walking. *Hum Mov Sci.*

- 2007; 26: 555-589.
- 15) Krebs DE, Goldvasser D, et al.: Is base of support greater in unsteady gait? *Phys Ther.* 2002; 82: 138-147.
- 16) van Kooten D, Hettinga F, et al.: Are there associations with age and sex in walking stability in healthy older adults? *Gait Posture.* 2017; 60: 65-70.
- 17) Hollman JH, Brey RH, et al.: Does walking in a virtual environment induce unstable gait? An examination of vertical ground reaction forces. *Gait Posture.* 2007; 26: 289-294.
- 18) Mirelman A, Rochester L, et al.: Addition of a non-immersive virtual reality component to treadmill training to reduce fall risk in older adults (V-TIME) : a randomised controlled trial. *Lancet.* 2016; 388: 1170-1182.
- 19) Gillespie LD, Gillespie WJ, et al.: Interventions for preventing falls in elderly people. *Cochrane Database Syst Rev.* 2003; CD000340.
- 20) Shen X, Wong-Yu IS, et al.: Effects of exercise on falls, balance, and gait ability in Parkinson's disease: a meta-analysis. *Neurorehabil Neural Repair.* 2015; 30: 512-527.
- 21) Hollman JH, Brey RH, et al.: Spatiotemporal gait deviations in a virtual reality environment. *Gait Posture.* 2006; 23: 441-444.
- 22) Russell Esposito E, Choi HS, et al.: Can real-time visual feedback during gait retraining reduce metabolic demand for individuals with transtibial amputation? *Plos One.* 2017; 12 (2) : e0171786.
- 23) Sheehan RC, Rábago CA, et al.: Use of perturbation-based gait training in a virtual environment to address mediolateral instability in an individual with unilateral transfemoral amputation. *Phys Ther.* 2016; 96: 1896-1904.
- 24) Rábago CA, Wilken JM: Application of a mild traumatic brain injury rehabilitation program in a virtual environment: a case study. *J Neurol Phys Ther.* 2011; 35: 185-193.