

視覚と歩行感覚提示装置を組み合わせた歩行リハビリテーションシステム

Gait Rehabilitation System Using Visual and Locomotion Interface

○矢野博明（筑波大学） 田中直樹（筑波記念病院/筑波大学） 宮崎亮（筑波大学）

斉藤秀之（筑波記念病院） 岩田洋夫（筑波大学）

Hiroaki YANO, University of Tsukuba

Naoki TANAKA, Tsukuba Memorial Hospital/University of Tsukuba

Ryo MIYAZAKI, University of Tsukuba

Hideyuki SAITOU, Tsukuba Memorial Hospital

Hiroo IWATA, University of Tsukuba

Key Words: Gait Rehabilitation, Locomotion Interface, Immersive Projection Display

1. はじめに

老化や長期の寝たきり状態による筋力の低下、脳卒中・脳梗塞等の救命率の上昇により歩行のリハビリテーションを必要とする人が年々増えてきている。日本では歩行練習をサポートする理学療法士の数は急増しているものの1人職場の数が多く⁽¹⁾。またアメリカでは施設での練習以外に個人契約で練習する理学療法士も多く⁽²⁾、施設において質の高い練習を受けるには理学療法士の数が不足している⁽³⁾。結果としてある程度の機能回復で急性期の歩行練習を終え、その後機能回復曲線が横ばいになったプラトーと呼ばれる状態で維持期の練習を続ける人も少なくない。

これに対して、トレッドミルやロボットを使って歩行練習をサポートする手法の開発が進んでいる。これらは、理学療法士には肉体労働を減らしよりきめ細やかなサポートをする余裕を与え、患者には運動量を増加させることで、より高いレベルでの回復を目指した練習装置と言える。著者らは、バーチャルリアリティ技術の一つである歩行感覚提示装置(以下 LI)を用いて、患者の足をマニピュレータで直接動かすことで練習を効率的に行うシステムを開発し、様々な患者に適用することでその有効性を示してきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかし、これら方法では、長時間に及ぶ練習を常に一箇所に留まって続けるため、やる気の低下や精神的ストレスの原因となる。

本稿では辛くなりがちなりハビリテーションを少しでも楽しくするために、歩行リハビリテーション時に歩行運動によって本来生じるはずの視野の変化を人工的に提示する視覚ディスプレイを取り入れた手法を提案する。空間的に移動しなくても、自身の歩行動作に応じて映像を変化させ、あたかも歩行して進んでいるような感覚を提示することで、運動に対する結果が直感的に把握しやすくなる。また、練習者が病気等の発症以前の日常的な歩行を、自身の足の運びとともに視覚的にも想起しやすくなる点でもモチベーション向上につながると考えられる。さらに、現実の歩行では、正面だけでなく周辺の見えの変化や、側面、斜め後ろなどから人などが近づいてくることによる周辺視野の変化など、周辺視野からの情報も重要となる。

そこで、周辺視野への映像提示も可能な球面型没入ディスプレイを開発し、歩行感覚提示装置と組み合わせた歩行リハビリテーションシステムを開発した。評価実験として、光トポグラフィを用いてユーザの脳活動を計測し、システムの有効性および周辺視野への映像提示の効果を検証した。

2. システム構成

2-1 設計指針

本研究ではシステム構築に当たって、運動提示系とそれに伴う周辺視野も含めた映像提示に分けて考えた。

運動提示系としては、トレッドミルのようなベルト駆動方式、Lokomat⁽⁶⁾のようなエグソスケルトン方式が考えられる。ベルト駆動方式は歩行スタイルを自由に選べるメリットがあるが、足に対する拘束がほとんど無く、体を後ろに引き戻すベルト上で体の位置を一定に維持しながら歩行しなくてはならず、ある程度の歩行スキルが必要となる。一方のエグソスケルトン方式は、体の関節に沿ってアクチュエータを配置するため正確に同じ動作を繰り返すことが出来るが、脱着が煩雑で、各関節を拘束するため歩行スタイルの個人差への対応が必要となる。そこで、本研究では、繰り返し歩行動作を行いつつ、脱着を容易にし、適度に身体を拘束する方式として、足を前後上下の2自由度のマニピュレータによって動かす方式を採用した。人間の関節の可動域は決まっているため足のみを動かし、脚や腰その他の全身の関節の動きはユーザの意志にゆだねる。これにより、適度な拘束と運動量の両立を果たした。

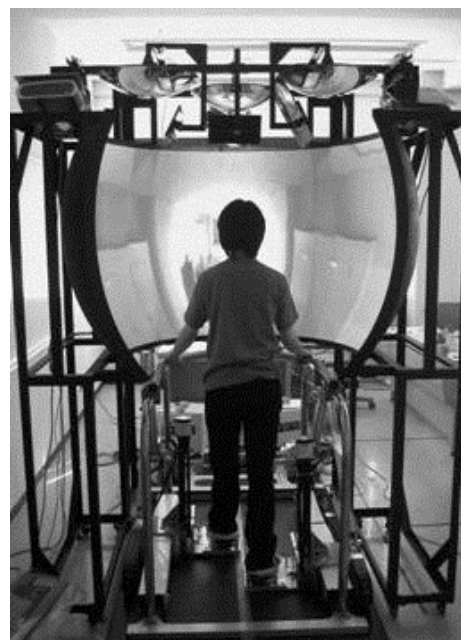


Fig. 1 Overview of the system

映像提示方式としては、大型平面ディスプレイを用いる方法、これらを複数組み合わせるユーザの全周囲を覆う没入型ディスプレイ、頭部に小型ディスプレイを搭載し常に画面が目の前に存在するヘッドマウントディスプレイ（以下 HMD）方式が考えられる。歩行運動による移動に伴う映像の変化を提示し、かつ単調さを少なくするには、映像空間に入り込んだ感覚が大きい方が良い。映像空間における没入度は視野角の大きさに依存する⁽⁶⁾。そのため出来るだけ大きな視野角を確保する必要がある。さらに我々は日常生活において、前方の視野の情報だけでなく、周辺視野からの情報も用いて外界認識している。本研究の対象である歩行練習でも、前方だけでなく左右の周辺もカバーすることが望ましいと言える。一方で運動提示機構の上で歩行動作をするため、慣れないうちは足元を確認しようとすることも多い。HMD 方式は、小型ディスプレイによって視野がふさがれてしまい、足元を見ることは困難である。

これらを考慮して本研究では、周辺視野へも情報提示が行える没入型ディスプレイを用いることとした。しかしながら、既存の平面ディスプレイを組み合わせた没入型ディスプレイは、正しい視点位置に基づいて描画されないため、ディスプレイとディスプレイの間のつなぎ目で、直線などが不連続に折れ曲がって見える。また、平面ディスプレイはユーザとディスプレイまでの距離が視線方向によって大きく変わるため、周囲のあちこちに視線を移すことを長時間行うと調節系の視覚疲労が起りやすいと考えられる。そこで、本研究では球面状のディスプレイによりユーザの周辺視野までの広い視野角を持つ映像提示を行うこととした。

2-2 プロトタイプシステム構成

本研究で作成したシステムの外観とその概念図を Fig.1、Fig.2 にそれぞれ示す。各構成要素の詳細については後述するが、一般的な病院、家屋での利用を想定して、全体として床面積 2m×2m、高さ 2.5m の空間に収まる大きさとした。電源は通常の AC100V 電源を用いるシステムとしたことで、一般家庭においても容易に利用可能である。

まず、ユーザがその場にいながら大空間を歩いた感覚を提示する装置として、片足 2 自由度、両足で合計 4 自由度の部分面型 LI の GaitMaster4(以下 GM4)を開発した(Fig.3)。

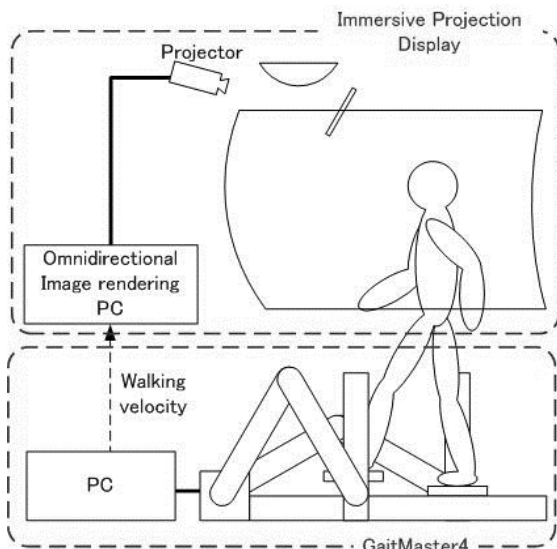


Fig.2. System configuration

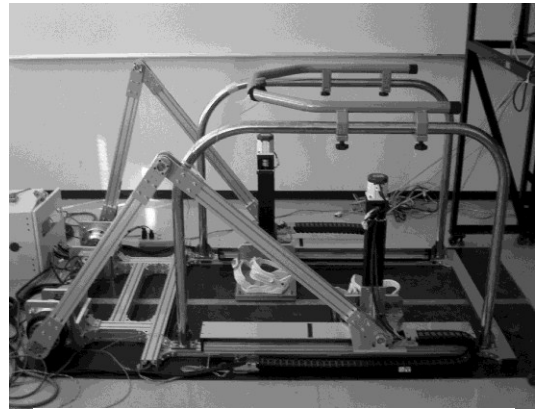


Fig.3. Overall view of the GaitMaster4

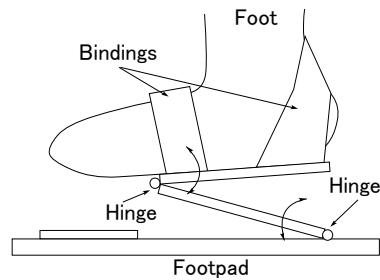


Fig.4. Configuration of footpad of the GaitMaster4

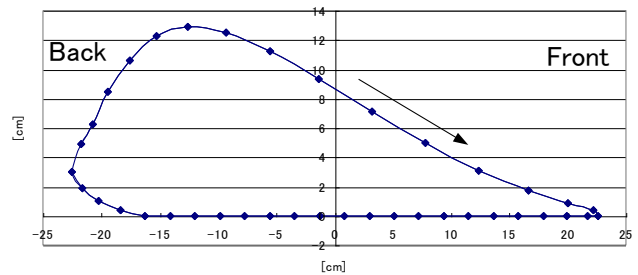


Fig.5. Example of trajectory of a footpad of the GaitMaster4

この装置はスライダリンク機構を介してユーザの足を前後に移動させる。一般的な歩行速度である 1.0 m/s の歩行速度を実現させるアクチュエータとして市販の 100V 電源駆動の直動アクチュエータでは、要求仕様(最大速度 2.0 m/s, 最大出力 800N)を満たすことが出来なかったため、この機構を採用した。機構の先端には上下動するリニアアクチュエータが取り付けられており、ユーザはこのアクチュエータの先端に取り付けられた 30cm 四方の床板(フットパッド)に足を載せて、あらかじめ計測した健常者の足の軌跡(Fig.5)に沿って足を動かされることで、歩行感覚を体験する。なお、前述のように人間の関節の可動範囲は決まっており、足のみを動かすことでも、足や腰その他全身の動きはある程度拘束される。また、足首関節の固定はつま先及び踵を自由に動かせるように固定した(Fig.4)ことで、足関節の背屈、底屈についてもユーザが自由に行える。GaitMaster4 の最大荷重(ユーザの体重)は約 80kgf、提示可能な最大歩行速度は 1.0m/sec である。

続いて、本研究で用いた球面没入型ディスプレイの外観を Fig.6 に示す。なるべく大きな視野角を確保しつつ、GaitMaster4 と同時に使用するという要求を満たすため、直径 160cm、水平面角 270 度、仰角 30 度、俯角 45 度のサイズとした。

また、球面没入ディスプレイは少数のプロジェクタによ

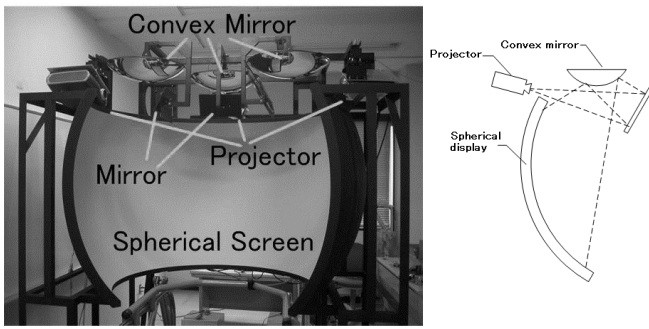


Fig.6. Overall view of the spherical immersive projection display

って広い範囲に映像を投影するため、一般的に解像度が低い。そこでこのディスプレイでは、高解像度を実現するために、SXGA+ (解像度 1400×1050) のプロジェクタと平面鏡および凸面鏡のユニット(Fig.6 右)を3ユニット分使用し、それぞれが映像を水平面角 90 度の範囲を映し出すよう設計した。各ユニットにおいてプロジェクタから投影された映像は一度平面鏡で反射されたのち、凸面鏡を介して球面型スクリーンの内面に投影される。凸面鏡で光線を拡散させる事により、凹面形状であるスクリーンのほぼ全面に映像を投影する。また、それぞれのユニットが左右及び前方のスクリーンの3方向へ映像を投影する構造にすることによりユーザの頭上にスペースを空けることができ、吊り下げ式の免荷装置をつけたユーザでも利用可能とした。

ところで通常のプロジェクタの映像をそのまま球面スクリーンに投影すると、投影された映像は歪む。本研究ではスクリーン上に歪みのない映像を表示するために、OpenGLのテクスチャマッピング技法によりもとの映像を歪ませた。また、投影時にスクリーン領域および映像のつなぎ目を目立たなくするように各プロジェクタの投影光をブレンディングした。実際の有効画素数は約 160 万画素である。提示する映像は実写映像とした。映像撮影には全天周カメラ (Point Gray Research 社 LadyBug2) を用い、映像データを HDD に JPEG 圧縮形式で保存し、リハビリテーションの際に球面ディスプレイ上で再生した。なお、映像の更新レートはソースとなる映像のサイズや計算機などのシステム構成に依存するが、本研究で用いた公園の映像では平均 12fps であった。

3. 視覚提示による効果

3-1 実験方法

本研究で構築したシステムを用いて、歩行運動時の視覚提示の効果の評価する実験を行った。実験では、被験者の反応を客観的かつ定量的に求める方法として、被験者の脳活動を計測する光トポグラフィ (以下 NIRS) を用いた。

実験では、水平視野角 270° の映像の提示による影響を評価するため

- タスク 1. 映像を提示するが、歩行は行わない
- タスク 2. 映像を提示せず、歩行運動のみ
- タスク 3. 映像を提示し、かつ歩行運動を行う

この3条件において脳の活動状況を比較した。

提示する映像には、屋外で撮影した全方位映像 (コンテンツは近隣の公園の周回散歩道の映像。分岐無し) を使用した。計測用 NIRS には島津製作所製近赤外光イメージング装置 OMM-3300/18 を用いた。計測データはプローブ同士の中間位置の計 45ch 分である。NIRS のセンサのチャンネル数は脳の全体を一度にカバーするには不足しているた

め、実験をおこなう前に脳のどの部分の活動を測定するかをあらかじめ選別する必要があった。脳の機能分布としては多くの研究がなされており、脳の機能分布が存在することがわかっている。このうち、前頭前野とよばれる領域は、物事の認知・判断や決定などを司り、複雑な思考をするほど活発に活動し、リラックス時には安静状態になるといわれている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。没入型ディスプレイと組み合わせることで歩行練習中にストレスが少なくなり結果としてリラックスできると考え、前頭前野に対応する額から頭の上にかけての領域をカバーするように測定した。実験の進め方は、安静状態(15秒)→タスク実施(30秒)→安静状態(15秒)を1セットとし前述の3種類のタスクそれぞれについて5試行、合計15セットランダムな順番に行った。本来なら15から20分のリハビリテーションプログラムの間すべてを計測することが望ましいが、プローブを長時間つけているだけでもストレスになるため、トレッドミルを用いたリハビリテーションの評価で用いられている条件⁽¹⁰⁾と同じ時間での計測とした。被験者は、20才代の健常者7名、50-60才代の麻痺患者3名である。歩行速度は快適に歩行できる速度とし、被験者の年齢にあわせた正常歩幅で、理学療法士の監督の下、本人の体調を考慮しつつ快適に歩行できる歩行周期を口頭で確認して設定した。

3-2 結果および考察

各タスク毎の5試行のoxy-Hbデータの加算平均データ(59点の移動平均を3回繰り返して平滑化)を比較検討した。全体の賦活量は、タスク2>タスク3>タスク1の順に少なくなり、タスク1はほぼ安静状態と同じ結果となった。各タスク条件下でのタスク中の濃度変化の平均値について、特に活動の違いが大きかった前額部の23ch分のタスク実施期間のデータを用いて最小有意差法によって検定したところ、健常者1名を除いて全種のタスク間において有意水準1%以下の差となり、有意差があった。映像の有無で平均値の低い方式を人数別にまとめた表をFig.7に示す。片麻痺患者については映像有りが全被験者で平均値が低くなった。すなわち患者にとって映像提示を行った方がよりリラックスして訓練を行えたと言え、より快適な練習環境を提供していたと言える。一方、健常者については、映像の有無により、どちらがリラックスしているかはほぼ均等に分かれた。原因としては身体能力が十分高いため歩行感覚提示装置の提示歩行がほとんど負担にならなかったことや、日常的に体験している歩行との違い(例えば映像の解像度など)に注意が向いたことなどが考えられる。

次に周辺視野への画像提示の影響を調べるために、映像を前方水平90度のみ提示した場合と、左右及び前方の水平270度に映像を提示した場合の前額部の23ch分のタスク実施期間のデータを用いて最小有意差法によって平均値の検定を行った。被験者は健常者7名、麻痺患者3名である。

周辺視野の有無についてoxy-Hbの平均値の低い方式の

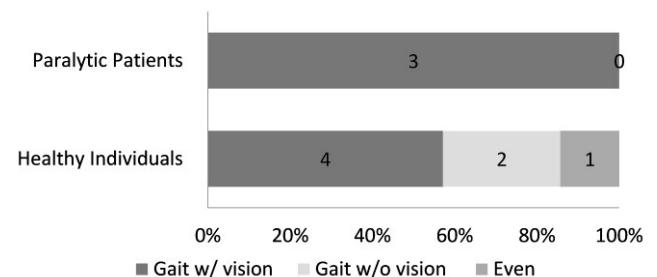


Fig.7 Effect of visual feedback when walking on the system.

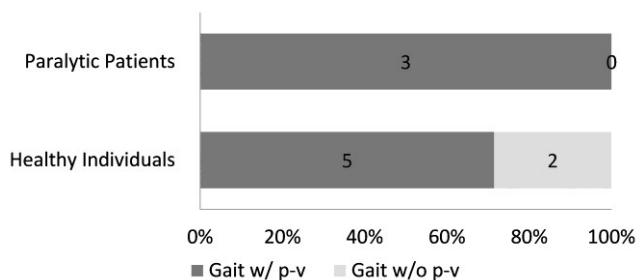


Fig.8 Effect of visual feedback to Peripheral vision

人数の割合を Fig.8 に示す。前述の実験同様、麻痺患者については周辺視野が提示された場合に平均値が低く、よりリラックス出来ていたと言える。健常者については約7割が広視野映像の方がリラックスできていた。これは、実際の歩行と同じように周辺視野も歩行動作に同期して動いた方がより現実に近い状態となり、映像空間への没入感が高まって感じられたことが原因と考えられる。なお、事前に測定したデータでは歩行運動を司る1次運動野などの活動には映像の有無による有意差はなく、球面没入型ディスプレイの有用性を表す結果と言える。

4. 考察

本研究では、周辺視野も含めて映像を提示するシステムと歩行訓練装置を組み合わせた統合システムを開発した。20分間同じ場所で歩行運動を続けることは、何らかの刺激がないと健常者であってもモチベーションの維持が難しい。本システムは歩行運動に応じた運動視差、近くの物体の見えなかった側面が見えるようになる、あるいは、遠方のものが歩行動作に応じて徐々に近づいてくる様子が再現され、自分の歩行動作の結果を直感的に把握出来る。また、様々な風景を見る楽しみも相まってモチベーションの向上につながると言える。

なお、周辺視野映像提示による視覚誘導性自己運動感覚誘発による転倒の報告は本研究ではなかった。これは、歩行運動したときのみ映像が更新されるため視覚と体性感覚に矛盾が起こらなかったためである。安全のため、急な速度変化が起こらないように歩行開始および停止の際には徐々に速度を変化させたが、システム実用化の際には誤動作による不用意な自己運動感覚が惹起され転倒するリスクに対する対策を十分行う必要がある。



Fig.9 Interactive gait rehabilitation system

5. まとめ

本研究では、歩行リハビリテーションのために、歩行感覚提示装置による体性感覚刺激に加えて、周辺視野も含めた視覚情報を提示することで臨場感の高い練習環境を提供するシステムを構築した。本システムの評価実験としてNIRSによる脳の前頭前野活動の変化を計測し、周辺視野を含めた映像提示によるリラックス効果があることを確認し、システムの有効性を検証した。

本研究では、実写映像を用いて平地歩行練習を行う環境を構築したが、実際の歩行においては、坂道や階段などの凹凸があったり、静止物体だけでなく人や車など動く物体が存在する。このような状況で歩行する場合は、自らの意思で歩行速度を調節出来る方が望ましい。現在、球面ディスプレイにおいて、CGを使って様々なイベントを表示し、それに応じて歩行速度を調節できるように、フットパッドに圧力センサを取り付けて装置上でのユーザの体重移動を計測し、その動きに合わせて歩行速度が変わるシステムの構築を進めている (Fig.9)。このようなシステムによって、より実際に近い歩行環境を提供するとともに、楽しみながら行うリハビリを目指したシステム開発を進める予定である。

参考文献

- (1) 日本理学療法士協会資料 <http://www.soc.nii.ac.jp/jpta/02-association/data1004.html>
- (2) Bureau of Labor Statistics, Physical Therapists, Occupational Outlook Handbook, 2010-11 Edition
- (3) 日本理学療法士協会, 理学療法白書 2005, pp.177-184, 2005
- (4) Hiroaki Yano, Kaori Kasai, Hideyuki Saitoh and Hiroo Iwata: "Development of a gait rehabilitation system using a locomotion interface", Journal of Visualization and Computer Animation, Volume 14, pp.243-252, 2003
- (5) Hiroaki Yano, Yousuke Nakajima, Yuki Mizuta, Hideyuki Saitoh, Hiroo Iwata: "Evaluation of Gait Rehabilitation with a Locomotion Interface Using NIRS", Proceedings of Virtual Rehabilitation 2007, p.85, 2007
- (6) S. Jezernik, G. Colombo, M. Morari, Automatic gait-pattern adaptation algorithms for rehabilitation with a 4-DOF robotic orthosis, Robotics and Automation, Volume 20, Issue 3, pp.574-582, 2004
- (7) Masaki Emoto, Kenichiro Masaoka, Masayuki Sugawara and Fumio Okano, Viewing angle effects from wide field video projection images on the human equilibrium, Displays, Volume 26, Issue 1, Pages 9-14(2005)
- (8) Matsunami and Naitou: Undou to Nou, Saiensu-sha Co., Ltd. Publishers, pp100-102(2000)
- (9) PARK, Tsunetsugu, et.al: Physiological Effects of Bathing in the Forest Atmosphere (1): using Salivary Cortisol and Cerebral Activity (TRS) as an Indicator, Journal of physiological anthropology and applied human science, 24(2), p.188, 2005
- (10) I. Miyai, et. al., Longitudinal Optical Imaging Study for Locomotor Recovery After Stroke, Stroke, 24, pp.2866-2870, 2003