

バーチャルリアリティーを用いた下肢麻痺患者用 リハビリシステムの開発

Development of a Rehabilitation System for Patients with Leg Paralysis Based on Virtual Reality

○鈴木聡子*, 田中 明*, 半田康延**, 関 和則***, 吉澤 誠†

○Satoko Suzuki*, Akira Tanaka*, Yasunobu Handa**,
Kazunori Seki***, Makoto Yoshizawa†

*東北大学大学院工学研究科, **東北大学未来科学技術共同研究センター,
***東北大学医学系研究科, †東北大学情報シナジーセンター

*Graduate School of Engineering, Tohoku University,

**New Industry Creation Hatchery Center, Tohoku University,

***Graduate School of Medicine, Tohoku University,

†Information Synergy Center, Tohoku University

キーワード: バーチャルリアリティー (virtual reality), サイクリングチェア (cycling-chair),
片麻痺 (hemiplegia), リハビリテーション (rehabilitation)

連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉05 東北大学大学院工学研究科 電気・通信工学専攻 吉澤研究室
鈴木聡子, Tel.: (022)217-7130, E-mail: suzuki@yoshizawa.ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

脳卒中・脳外傷・脊髄損傷などによって下肢に麻痺が生じ、歩行が困難になった患者にとって車椅子は必要不可欠なものである。一般に利用されている車椅子は手動・電動のものが主であるが、最近になって足漕ぎ式の車椅子(サイクリングチェア)が開発・利用され始めている¹⁾²⁾。このサイクリングチェアは、両手の開放および下肢の廃用症候群(筋肉・関節・末梢循環の機能低下)の防止やFESによる麻痺下肢駆動などが可能になるという利点がある。その一方で、車椅子を漕ぐのに必要な筋力の不足や運動麻痺の影響による運転技能の

低下のために、サイクリングチェアの運転のためには多少のリハビリを必要とすることがある。しかし、患者による実機での練習は危険であるばかりでなく、介護者の負担や単調なリハビリの苦痛といった問題点が存在する。

これまで、リハビリテーションへのバーチャルリアリティー (virtual reality;以下VRと略称する)の応用例として、VR環境内での歩行訓練装置³⁾、麻痺足の足首まわりの訓練装置⁴⁾、ベッド上での下肢リハビリ装置⁵⁾、乗馬療法システム⁶⁾⁷⁾などが提案されており、いずれもVRを応用することで、安全かつ気軽に行えるばかりでなく、アミューズ

メント性を付加することによってリハビリ意欲の向上や達成感の付与が可能となっている。

そこで本研究では、特に片麻痺により歩行困難な患者が、サイクリングチェアにより自立移動が可能となることを目標とした仮想環境におけるリハビリテーションシステム（以下VRリハビリシステム）の開発を行なった。また、製作したシステムを用いて健常者および患者による評価試験を行い、本システムの有効性について検討した。



Fig. 2 サイクリングチェア

2. VRリハビリシステム

2.1 システムの概要

本システム全体の概観をFig.1に示し、サイクリングチェア部をFig.2に示す。リハビリ対象患者（片麻痺患者）は、スクリーンまたは大画面液晶ディスプレイに投影された高精細の立体視可能な仮想空間映像を見ながら、両足でペダルを漕ぎ、健常側の手でハンドルを操作して進行方向を決定する。ペダル部には、麻痺側の足のペダルからのずれと関節の不自然な屈曲を防止するために、麻痺側の足を固定するFig.3のような装具を装着することが可能である。リハビリ対象者による車椅子の操作中には、ペダルの回転数とハンドル角を計測し、

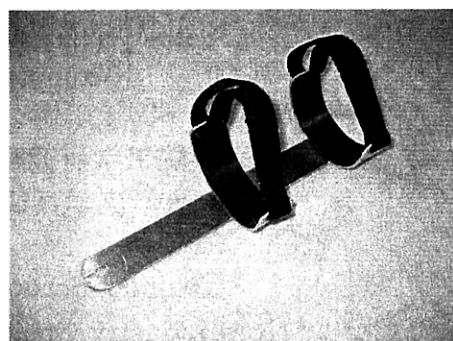


Fig. 3 麻痺側の足の不自然な屈曲を防ぐための装具

これらをVR用PC（Dell社製 Precision340）にフィードバックすることにより、この情報に連動した映像がリアルタイムに生成される。本研究では、運転中の前後の運動感の向上のため、偏光メガネによる立体視が可能な液晶ディスプレイ（SHARP製 AQUOS+有沢製作所製 マイクロボールシート）を採用した。

計測・制御情報の流れをFig.4に示す。ペダルとハンドルに取り付けられた2つのエンコーダからのパルスおよび駆動輪軸のトルクセンサ（KUBOTA製 非接触磁歪式トルクセンサ）からの電圧信号は、サイクリングチェア用マイコン（アルファプロジェクト製 AP-SH2F-0A）に送られ、シリアル信号に変換されてRS232CポートからVR用コンピュータに送られる。さらにマイコンではこれらの計測信号を基に負荷用モータ駆動用のPWM信号を生成し、モータを制御することで、患者に対してペダルへの負荷の提示もしくはアシストを行うことが

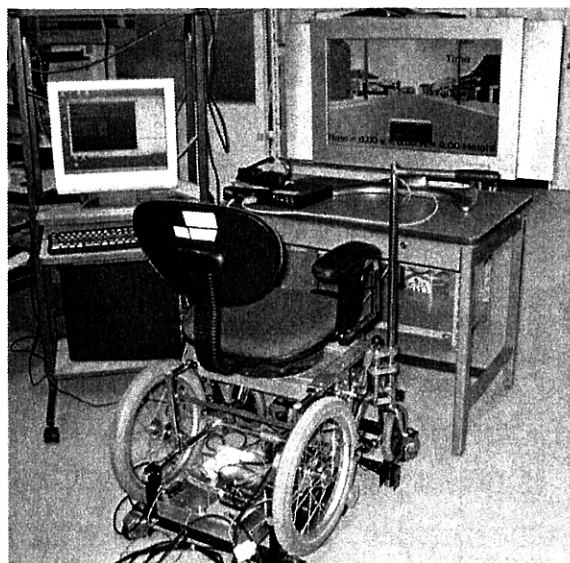


Fig. 1 システムの全容

可能である。また、得られたセンサ情報はVRコンピュータに格納され、その結果をもとに運動機能およびリハビリの程度を定量的に判断する。

なお、マイコンの情報の送受信周期は40msであり、VRコンピュータ上での画像更新、情報の記録・送信の周期は提示画像に依存する（約50-100ms）。

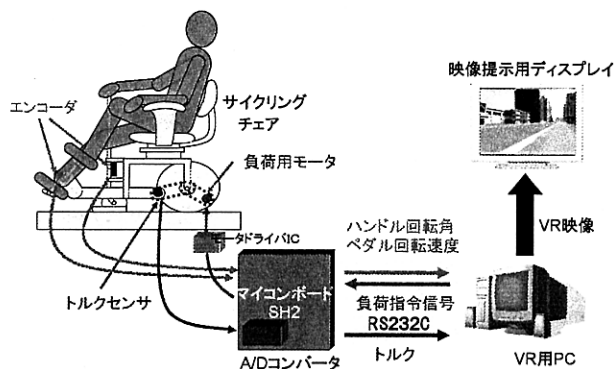


Fig. 4 VRリハビリシステムの構成

2.2 リハビリシナリオ

本システムにおいて患者が行なうリハビリ用シナリオとして、下肢の運動機能の評価を目的とする速度保持シナリオとリハビリの意欲を向上させることを目的としたレースシナリオおよびウォークスルーシナリオを作成した。すべてのシナリオはC言語（Microsoft社製Visual C/C++）とVR映像作成用のライブラリ（SENSE8社製 World Tool Kit）を利用して作成した。

2.2.1 速度保持シナリオ

本シナリオは目標速度を維持するように、すなわち、画面上のメータの針が目標値を保つように漕ぎ進むものである。Fig.5は提示映像である。目標速度はステップ状に変化する。計測されるペダル回転速度の時系列およびトルクから、左右の足の協調動作や麻痺の程度を評価する。

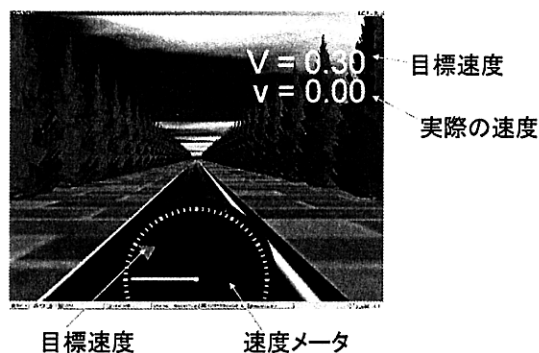


Fig. 5 運動機能評価シナリオの表示画面（速度保持シナリオ）

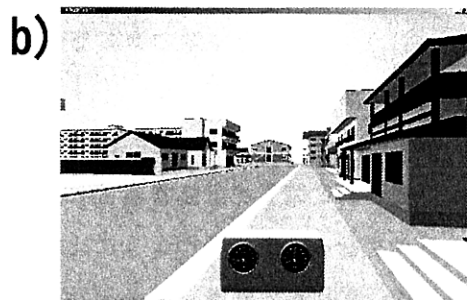


Fig. 6 リハビリの意欲向上のためのシナリオの表示画面（レースシナリオa)およびウォークスルーシナリオb)）

2.2.2 レースシナリオ

これは、周回コース上で他の車と競争を行うものである。Fig.6a)が提示映像である。速度、ハンドル回転角、順位およびタイムが表示される。コース中盤には坂道がある。カーレースの体験・他車との競争および前回の自分の走行データとの競争などによってリハビリの意欲向上を促す。

2.2.3 ウォークスルーシナリオ

これは、仮想的な町の中を走行するものである。Fig.6b)が提示映像である。全てのオブジェクトに当り判定機能があり、現実と同様に壁を通り抜けることは不可能である。また、車道には自動車が行き来し、仮想世界はある程度動きがあるものになっている。

3. 実験

3.1 実験方法

作成したシステムを用いて、健常者10名（男性8名女性2名，21～48歳）および下肢麻痺患者5名（男性4名女性1名，45～76歳）に対し速度保持シナリオを実施した。下肢麻痺患者の内訳は、軽度の麻痺患者2名（左足麻痺2名）・中度の麻痺患者2名（左足麻痺1名，右足麻痺1名）である。実験の様子をFig.7に示す。なお，中度の麻痺患者では目標速度の変化に追従できなかつたため，この場合にかぎり目標速度を一定にして実験を行なった。また，負荷用モータに関しては健常者・患者ともに走行時のトルクを一定値に保つように比例制御を行った。これにより患者の漕ぐ力が十分でない場合の走行のアシストを行なった。

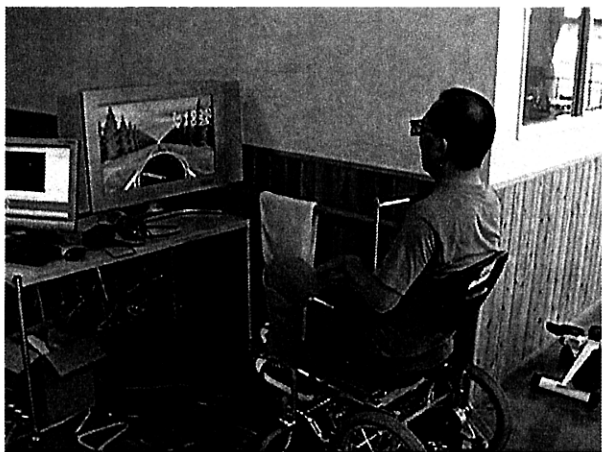


Fig. 7 患者による実験風景

3.2 結果

患者による評価試験を行った際，以下の場合においてペダルをスムーズに漕ぐことができないことが明らかとなった。

- ・ 予め装具をつけている患者に関しては漕いでいる最中にかかるとが車椅子下部にあたり，スムーズに漕ぐことが困難な場合がある
- ・ 患者によってはペダル位置が合わない
- ・ 麻痺側の足がペダルからずれる（固定具の使用によりある程度解決）

これらは，いずれも車椅子の構造上の問題点であり，今後車椅子の設計において改良する必要がある。また，評価試験により発覚したもう一つの問題点として

- ・ 筋力の弱い患者では特定のペダル角度の死点において回転方向にトルクがかからない

ということがあげられる。モータによってアシストを行なっているにもかかわらずこのような現象が起こったとは，作成したシステムに，実際のサイクリングチェアが本来持っている慣性が，負荷トルクとして表現されていなかったことが原因だと考えられる。この点も今後改善の必要がある。

このため，中度の患者に関してだけ，介護者の手で麻痺足側のペダルに若干の力をかけて回す補助を行なった。速度保持シナリオで得られた速度変化のグラフをFig.8に示す。a), b), c)はそれぞれ健常者，麻痺患者（軽度），麻痺患者（中度）の一例である。また，Fig.9は，目標速度と実測速度との誤差の二乗平均値の平方根 ε [m/s]を20～35秒の間で計算し，健常者，麻痺患者（軽度），麻痺患者（中度）の平均値を示したものである。さらに，ペダルの回転角とトルクの関係について健常者，麻痺患者（軽度），麻痺患者（中度）それぞれ1名で比較した結果をFig.10に示す。なおFig.10は目標速度約1km時のペダル5回転分のトルクを加算平均したものである。

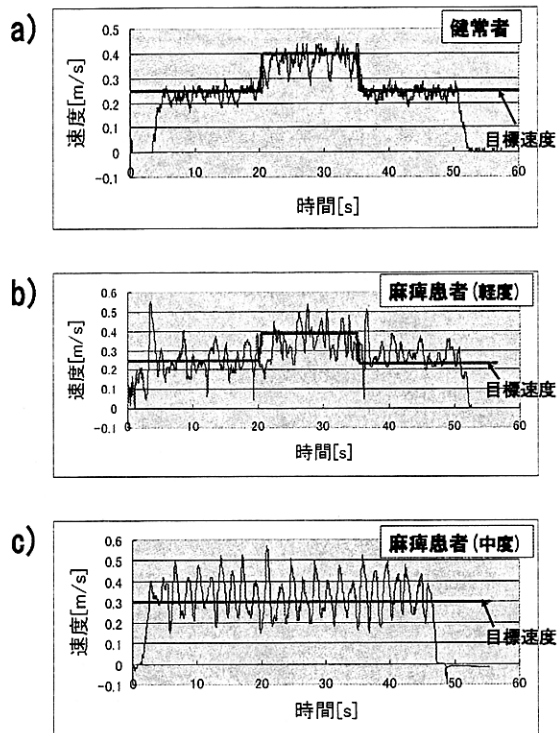


Fig. 8 速度保持シナリオ実行時の速度変化

3.3 考察

Fig.8より、目標値回りの速度の振動が健常者ではそれ程大きくないのに対し、麻痺の程度が増加するにつれて振動が増加していることがわかる。これは、片麻痺の患者が麻痺側でのトルク低下を補うために、健常側の足でより強い力で漕ごうとすることによる左右の足の漕ぐ力の差によって生じるものであり、麻痺の度合いと関連性があると思われる。

また、この目標値回りの速度の振動は、リハビリの効果によって経時的に小さくなっていくことが予想される。

このことは、Fig.10に示されたペダルの回転角に対するトルクの変化にも現れている。すなわち、健常者および軽度の患者ではトルクの変化が少ないが、中度の患者では健常足の位相で大きなトルクがかかっている。この偏りの原因は、患者においてスムーズな足漕ぎ動作ができないことにあると思われる。この偏りをより定量的に示すために、トル

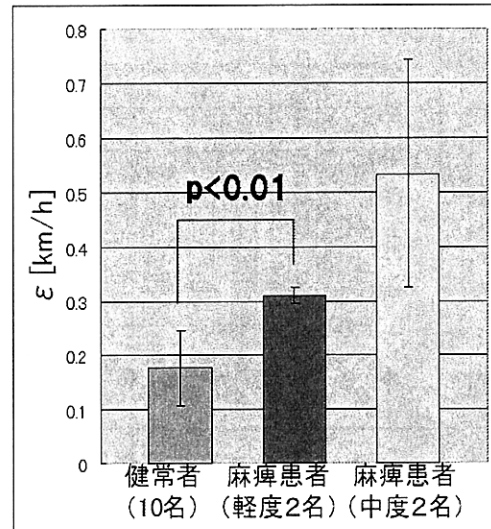


Fig. 9 目標速度と実測速度の平均二乗誤差の平方根 ϵ [m/s]

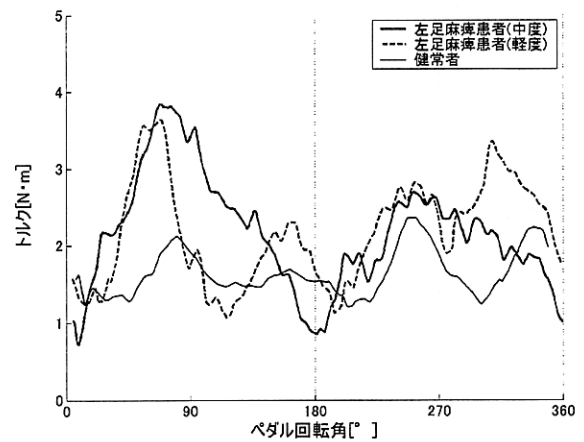


Fig. 10 速度保持シナリオ実行時のトルク変化

クの標準偏差(std)を数名で求めた。結果をFig.11に示す。患者がスムーズな足漕ぎ動作ができず、健常側と麻痺側のそれぞれの位相でのトルクの変化パターンが異なるときにはstdが増加することが予測される、実際の結果もそれを裏付けるように、麻痺患者のstdは健常者と比べて大きくなっていることが確認できる。

ただし、本実験系の場合、先に述べたように、慣性が負荷トルクとしてまだ表現されておらず、このような慣性が正しく表現された場合には、この偏りが却って減少する可能性がある。

また、Fig.9のように、目標速度と実測速度の間

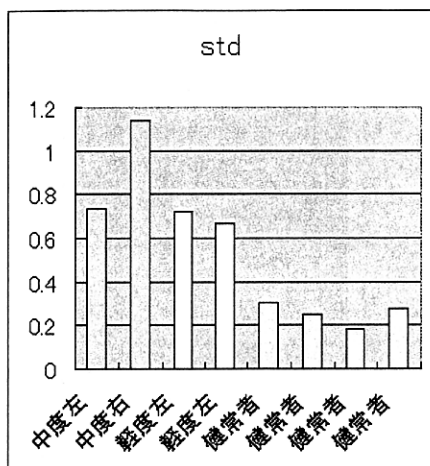


Fig. 11 トルクの標準偏差

の誤差 ϵ も、患者の分布は健康者の群から離れており、患者の重症度を反映している。

以上のように、本システムから得られる様々な指標を用いることにより、リハビリの程度あるいは下肢の機能回復の度合いが評価できると考えられる。

4. おわりに

本研究では、下肢麻痺患者用のVRリハビリシステムを構築し、健康者および患者による評価試験を行なった。その結果、本システムによって下肢のリハビリおよびリハビリ中の運動機能の評価が

可能であることが示唆された。今後は患者からのアンケートなどに基づいて、より患者の意欲を高めるようなリハビリシナリオの作成、およびより定量的な評価方法の開発を行なう必要があると考えられる。また、患者による本システムを用いた長期的リハビリにより、本システムの有効性・有用性を検証していく必要がある。

参考文献

- 1) 藤居徹, 関和則, 市江雅芳, 半田康延, 高橋隆行, 中野栄二: FESサイクリングチェアの開発, 第9回日本FES研究会学術集会.
- 2) 関和則, 佐藤元彦, 市江雅芳, 半田康延: 脳卒中片麻痺患者による足こぎ式車椅子の駆動と下肢筋電図, リハビリテーション・ケア合同研究大会札幌2003.
- 3) 藤江正克: バーチャルリアリティーを活用した歩行訓練機器, BME, 12-8, 29/37(1998)
- 4) Judith E. Deutsch, Jason Latonio, Grigore C. Burdea, Rares Boian : Post-stroke rehabilitation with the Rutgers Ankle System: A case study, Presence, 10-4, 416/430(2001)
- 5) 大須賀美恵子, 達野陽子, 下野太海, 平澤宏祐, 小山博史, 岡村仁: 病床の患者のメンタルケアをめざしたベッドサイドウェルネスシステムの開発, 日本バーチャルリアリティー学会論文誌, 3-4, pp 213/221(1998)
- 6) 関根修, 北野斉: 乗馬療法システム, 日本機械学会誌, 101-955,(1998)
- 7) 木島竜吾, 橋本幸治, 江依法, 青木隆明, 小鹿丈夫: 全体性を有する療法のためのVRカラクリ乗馬システムの構築とその効果検証, 日本バーチャルリアリティー学会論文誌, 6-3, pp 157/164(2001)