

バーチャルリアリティの運動失調症検査への応用

An application of the Virtual Reality to Neurological Test of Ataxia

○那須川慎介*, 吉澤 誠*, 阿部健一*, 山家智之**, 仁田新一**, 阿部康二***

○Shinsuke Nasukawa*, Makoto Yoshizawa*, Ken-ichi Abe*,
Tomoyuki Yambe**, Shin-ichi Nitta**, Koji Abe***

*東北大学 大学院 工学研究科, **東北大学 加齢医学研究所, ***東北大学 医学部 神経内科

* Graduate School of Engineering, Tohoku University, **Institute of Development, Aging and Cancer, Tohoku University, ***School of Medicine, Tohoku University

キーワード : バーチャルリアリティ (virtual reality), 神経学的検査 (neurological test), 運動失調症 (ataxia), 運動機能障害 (motor functional disorder), 検査システム (examination system)

連絡先 : 〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉東北大学 大学院 工学研究科 電気・通信工学専攻 阿部研究室
那須川慎介, Tel.: (022)217-7074, Fax.: (022)263-9290, E-mail: nasu@abe.acsi.tohoku.ac.jp

1. はじめに

脳機能障害者に対する従来の臨床神経学的検査は、患者に対する問診中に手軽に実行できることが要求され、ほとんどの検査はさしたる検査器具を必要とせずに行うことができる。例えば運動失調症の検査としては鼻指鼻試験などがある¹⁾。しかし、このような検査方法では、検査結果は定性的な表現とならざるを得ず、定量的・統計的な記録および解析を十分行うことが困難であった^{3,4)}。

一方、人工現実感 (virtual reality; VR) は、人間に主として3次元視覚情報を与えながらその身体運動を3次元的に計測することを前提としている²⁾。このため、VRを臨床神経学的検査に応用することによって、検査結果の定量的・統計的・客観的な取扱いができるようになる可能性がある。

そこで本研究では、運動失調症検査をVR環境で実現するための基礎的なシステムを構成し、仮想的3次元空間内における手による物体追従試験を行った。まず、被験者への映像の呈示方法としてヘッドマウントディスプレイを用いる方法と液晶シャッター眼鏡を用いる方法との比較を行った。次に、健常者の運動特性を脊髄小脳変性症のそれと比較し本システムの有効性と限界、今後の改良点について検討した。

2. 方法

2.1 VRを用いた運動機能検査システム

2.1.1 システムの構成

VRを利用した鼻指鼻試験は、3次元手動制御系における追従動作(トラッキング)の特殊な場合

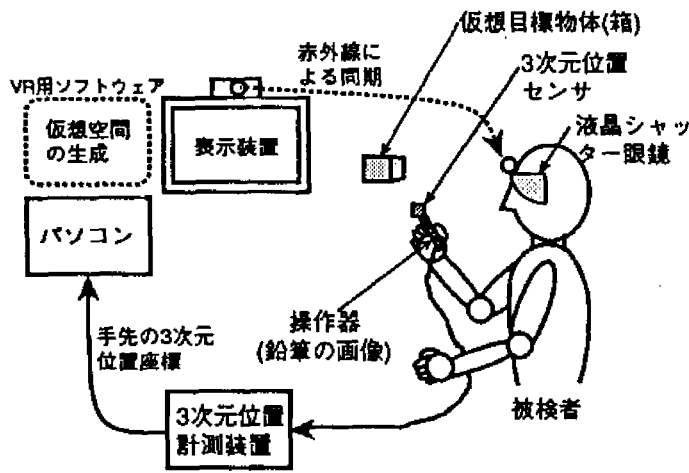


Fig. 1 3D-manual tracking system(3D-MTS) using LCD flicker glasses.

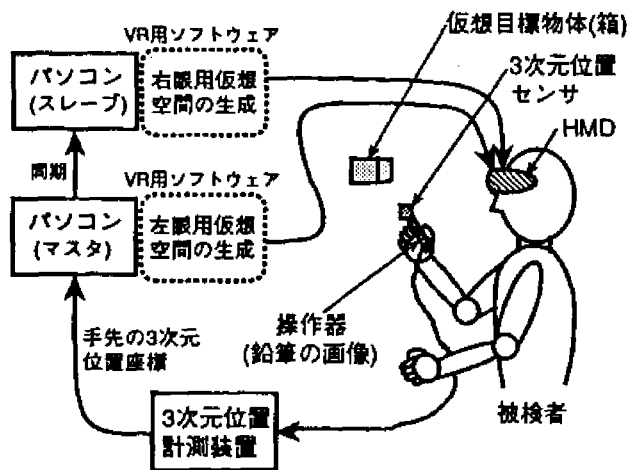


Fig. 2 3D-manual tracking system(3D-MTS) using HMD.

である。以下、これを3次元上肢トラッキング・システム (3D-manual tracking system; 3D-MTS) と呼ぶ。

Fig. 1, 2に示されるように、3D-MTSは、

- 1) パソコン (Gateway2000 製 P5-166; DOS/V マシン Pentium 166MHz) 2 台
- 2) VR用ソフトウェア (Superscape 製 VRT4)
- 3) HMD(オリンパス光学工業製メディアマスク; 水平視野角 60 度, 画素数 50 万)
- 4) 液晶シャッター眼鏡 (StereoGraphics 製 CrystalEyes-PC)
- 5) 3次元位置計測装置 (Polhemus 製 FASTRAK)

から成る。Fig. 2においてパソコンを2台使用するの、立体視を行うための両眼視差を持つ左右の映像を、VR用ソフトウェアによりそれぞれのマシンで独立に生成するためである。このとき、スレーブ側のパソコンはイーサネット経由でマスター側に同期している。

被検者は、HMDあるいは液晶シャッター眼鏡を装着し、操作器を握って椅子に座る。操作器はプラスチック製のペンであり、その先端には3次元位置計測装置のセンサ・ヘッドが取り付けられている。被検者は、人差し指を伸ばし、その指先がセンサ・ヘッドに来るように他の指でペンを握る。

3次元位置計測装置は、人差し指の指先の3次元座標をパソコンに送る。

2.1.2 機能

被検者にはFig. 3のような画面が立体的に見える。この画面には、3方の壁と空を背景として、宙に浮いたひとつの立方体の箱 (仮想空間において1辺5cm) とひとつの鉛筆 (仮想空間において長さ15cm) が描かれている。立体感が増すようにするため、箱は毎秒0.3回の速さで鉛直軸の廻りを回転している。仮想物体である鉛筆は、その先端が操作器を握った手の人差し指の先端に対応する。操作器を動かすことにより、鉛筆を3次元的に、すなわち並進方向3自由度・回転方向3自由度で動かすことができる。

この状況で被検者は、基本的に、箱を目標物体とし鉛筆を追従物体とする追従作業 (トラッキング) を行う。

目標物体 (箱) は、追従物体が目標物体に到達したとき、被検者の眼前30cmのところにある横30cm、高さ20cm、奥行き20cmの直方体の中のどこかに、一様確率で出現する。このとき、鉛筆の先端が目標の箱に触れると、箱は即座に別のランダムな場所に出現するよう見える。

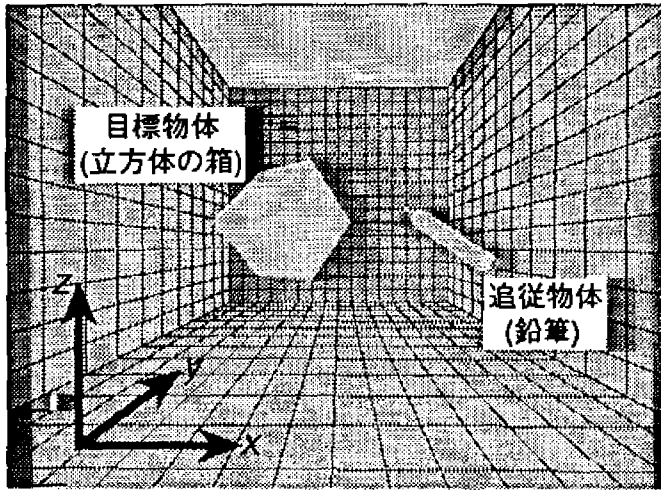


Fig. 3 Constitution of virtual space. A subject moves a manipulator in the real space, and tracks a target (box) with a follower (pencil) in the virtual space.

2.2 実験

実験は次に挙げる2種類を行った。

- 1) 指追従検査 (finger tracking test) 追従物体 (鉛筆) で連続的に目標物体 (箱) を追従する。
- 2) 鼻-箱-鼻検査 (nose-box-nose test) 操作器を自分の鼻先に触れた状態から出発し、次に追従物体 (鉛筆) で目標物体 (箱) に触れた後、操作器を自分の鼻先に戻す。以降、鼻-箱-鼻の順に追従を繰り返す。

検査時間はどちらも1分間とした。

被検者として健康な学生6名(22~24才)と、東北大学医学部附属病院神経内科で脊髄小脳変性症と診断された患者4名(22~59才)を用いた。すべて、利き手である右手で操作器を操作した。

3次元位置座標計測装置から得られるデータは、ソフトウェアの特性上時間割込みがかけられず、不等間隔でサンプリングされてしまう。そこで本研究では、これをスプライン補間した後、改めて50msの等間隔でサンプリングした時系列を解析対象とした。

取得したデータは、目標物体の位置ベクトル $r(t) = [r_x(t), r_y(t), r_z(t)]^T$ と追従物体のそれ $c(t) = [c_x(t), c_y(t), c_z(t)]^T$ である。

2.3 解析方法

指追従検査の解析には規格化した2乗平均誤差 (normalized mean square error; *NMSE*) を各座標毎に用いた。 $i = x, y, z$ に対して $\bar{r}_i(t)$ を $r_i(t)$ の平均値としたとき、*NMSE* は次式で表される。

$$NMSE_i = \frac{\sqrt{\int_{10}^{60} \{r_i(t) - c_i(t)\}^2 dt}}{\sqrt{\int_{10}^{60} \{r_i(t) - \bar{r}_i(t)\}^2 dt}} \quad (1)$$

鼻-箱-鼻検査において、追従物体を目標物体に戻す動作には視覚的なフィードバックが働く。これに対し、操作手を鼻先へ戻す行為は、肩・腕・手に分布する自己受容器からのフィードバック情報と、中枢に形成されると思われる身体の3次元的なモデルに基づく位置情報にのみ依存し、視覚的にはオープン・ループとなっている。そこで、鼻-箱-鼻の全部で N 回の試行中の第 k 回の1往復に含まれる閉ループ区間の長さを C_k 、開ループ区間の長さを O_k として、開ループと閉ループの時間比の平均値 (OC比; r_{oc}) を、 y 成分の極小値を基準として次のように求めた。

$$r_{oc} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{C_k}{O_k} \right) \quad (2)$$

3. 結果

Fig. 4, Fig. 5は、それぞれ3次元映像呈示装置としてHMDを用いた場合の指追従検査と鼻-箱-鼻検査の一例を示したものである。ともに健常者を対象としている。図は目標物体の位置ベクトル $r(t)$ (破線) と追従物体の位置ベクトル $c(t)$ (実線) の各要素の時系列を示している。Fig. 6, Fig. 7は、同様に液晶シャッター眼鏡を用いた場合の一

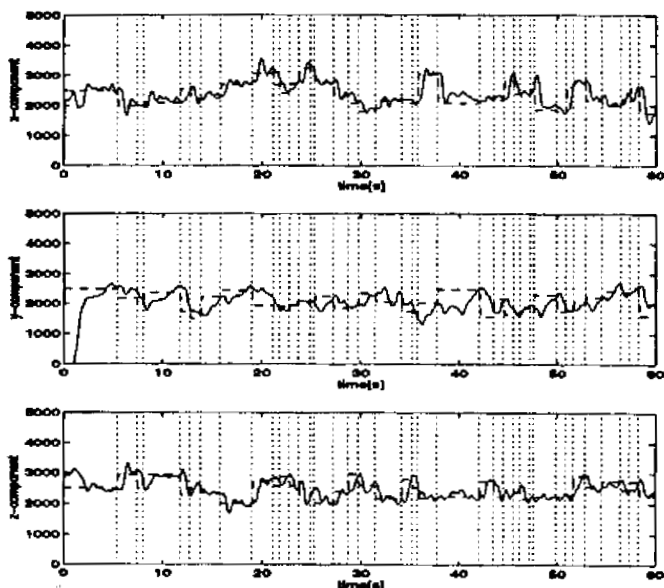


Fig. 4 A result of finger tracking test using HMD (normal test subject, H.I.).

例を示したものである。Fig. 8はHMDおよび液晶シャッター眼鏡を用いた場合のNMSEを示している。Fig. 9は同じく r_{oc} である。NMSEにおいては顕著な差異は見られないが、 r_{oc} はHMDを用いた場合の方が小さくなっている。

Fig. 10およびFig. 11は、患者を対象とした指追従検査と鼻-箱-鼻検査の一例を示したものである。ともに3次元映像呈示装置としてHMDを用いている。健常者の追従動作に比べて、患者の追従動作のぎこちなさがよくわかる。Fig. 12はNMSEを示している。上下、左右に比べて奥行き方向の誤差が大きいことがわかる。Fig. 11を見ると、頻繁に振戦が生じていることがわかる。また、鼻先へ戻る時の動作にもぎこちなさが顕著に見られる。Fig. 13は健常者と患者の r_{oc} を示したものである。

4. 考察

指追従検査の結果であるFig. 4, Fig. 10を見ると、振動的成分の存在が $c_v(t)$ に目立ち、奥行き方向に関する探索動作を行っていることがわかる。これは、仮想空間での立体視が実空間よりも不自然で奥行きの認識が完全にはできていないことを示している。このため、実空間ではうまく行く追

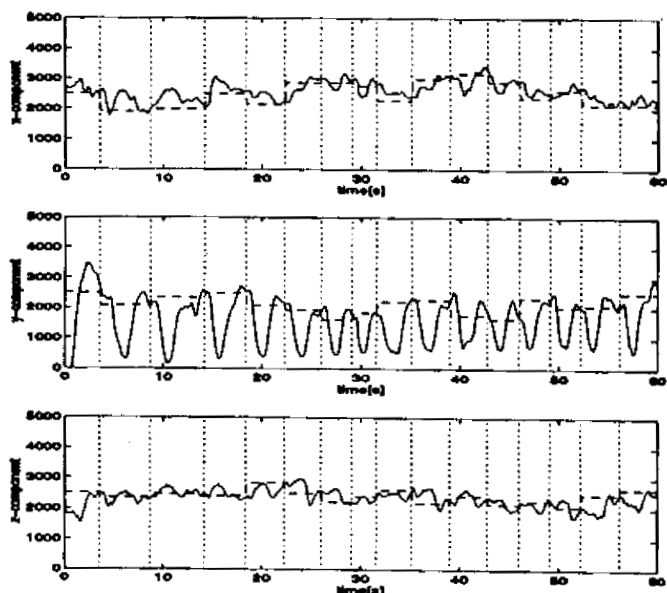


Fig. 5 A result of nose-box-nose test using HMD(normal test subject, H.I.).

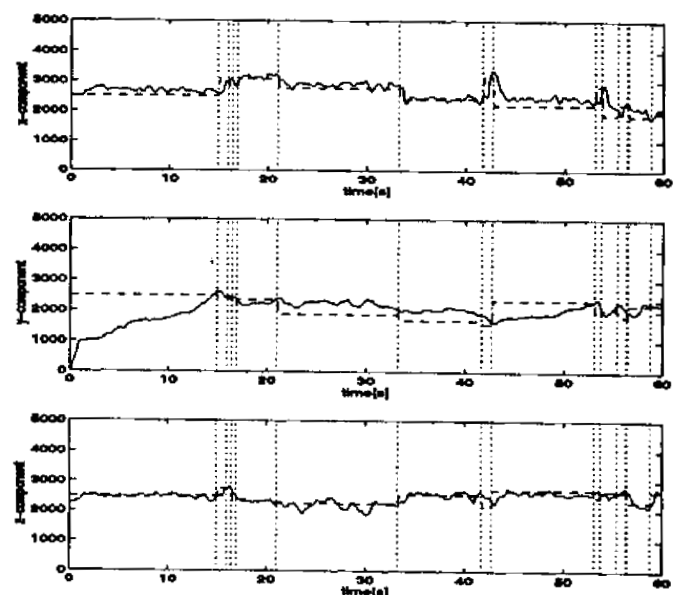


Fig. 6 A result of finger tracking test using LCD flicker glasses (normal test subject, H.I.).

従動作が、仮想空間では行いにくくなっているものと思われる。

3次元映像呈示装置としてHMDを用いた場合と液晶シャッター眼鏡を用いた場合を比較したFig. 8, Fig. 9を見ると、上肢を大きく前後に動かす必要のある鼻-箱-鼻試験の結果に大きな差が現れた。このことは奥行き知覚に関してHMDの方が有利であることを示している。これは今回使用した液晶シャッターシステムの視野角が小さいことと、外部視界を遮断していないことが原因であると思われる。人間は奥行きを認識するのに両眼

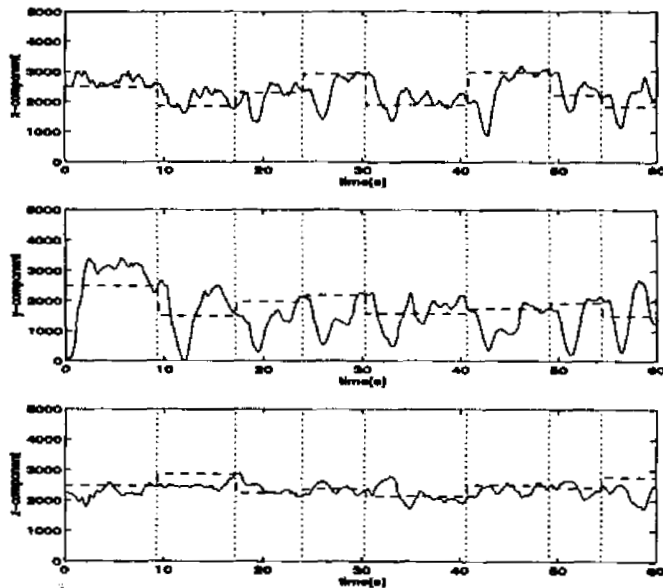


Fig. 7 A result of nose-box-nose test using LCD flicker glasses (normal test subject, H.I.).

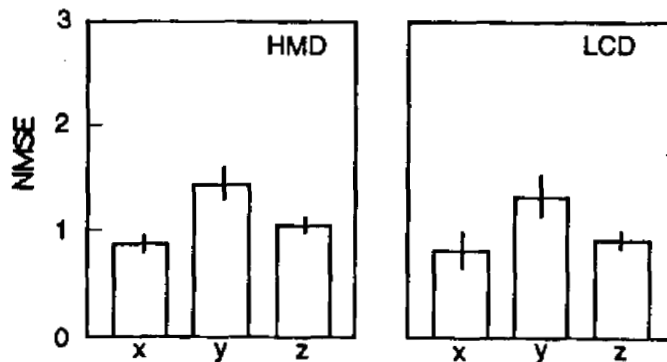


Fig. 8 NMSE(normalized mean square error).

視差だけを手がかりにしているわけではない。例えば水晶体の調節、両眼の輻輳、肌理の勾配も手がかりとしている。そのため仮想空間と実空間が混在するようなシステムではこれらの矛盾が影響して仮想物体の実在感が薄れてしまうということが考えられる。実際に今回の実験において、液晶シャッター眼鏡を用いた場合に限り立体視を行うことができない被験者がいた。これらの問題は暗室を用意し大画面のディスプレイを用いることで解決される可能性がある。しかし、それではHMDよりも手軽に利用できるという利点を失うことになってしまい、望ましいことではない。

Fig. 12を見ると NMSEの y 成分が x 成分、z 成分に比べて大きい。これは前述したように仮想空間内での奥行き知覚の問題であると思われる。

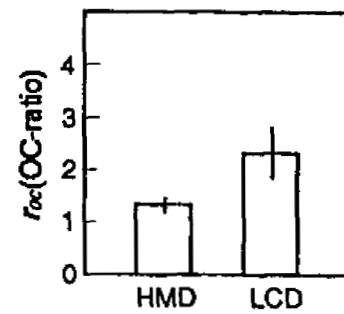


Fig. 9 Ratio of closed-loop period to open-loop period(OC-ratio).

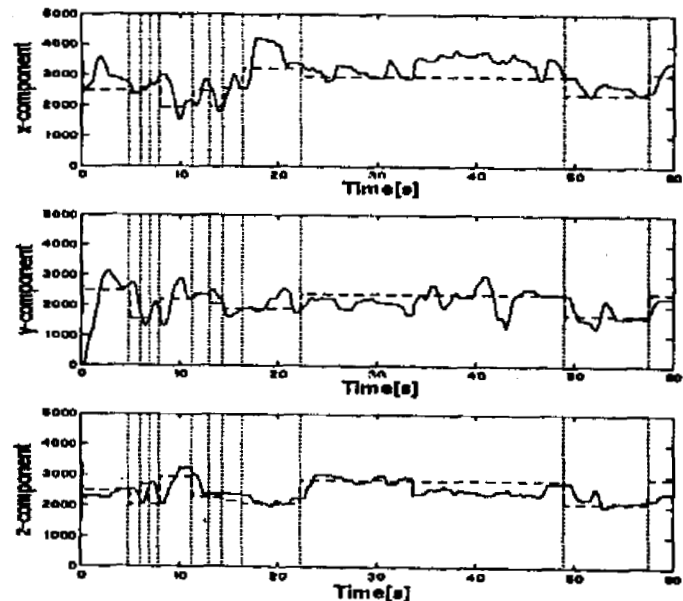


Fig. 10 A result of finger tracking test (patient, T.K.).

ただし患者によっては、奥行きよりも上下や左右方向の追従誤差の大きい場合も生じた。これは患者の運動制御機能が極端に低下していることに関連がある可能性がある。

Fig. 13を見ると、健常者、患者とも r_{oc} は 1 より大きく、開ループ制御より閉ループ制御が難しいことがわかる。脊髄小脳変性症患者には、健常者のように目標位置に手先をスムーズに近づけることができないという dysmetria と呼ばれる症状や、目標値に近づくと震えが顕著になる企図振戦と呼ばれる症状がある。仮に、視覚的に閉ループの場合に dysmetria や企図振戦が現れ、主として自己受容器の情報に依存する鼻先への手先の移動時に現れなければ、OC比 r_{oc} は大きな値となる可能性がある。このように、 r_{oc} を求めることで運動

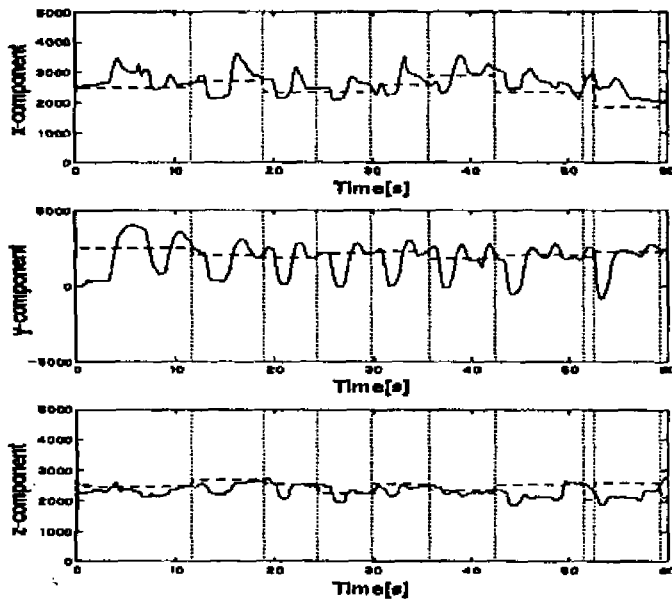


Fig. 11 A result of nose-box-nose test (patient, T.K.).

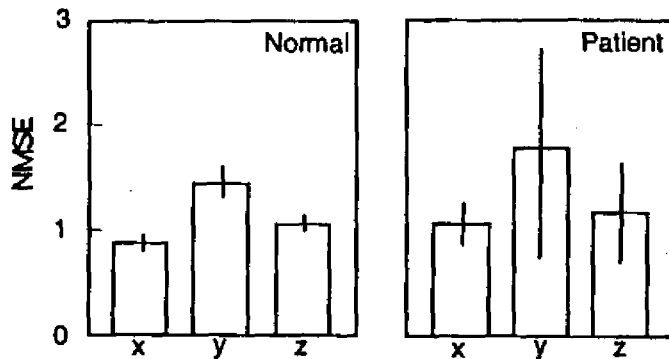


Fig. 12 NMSE(normalized mean square error).

失調症に対するより詳しい分析ができる可能性がある。

このような検査をアクチュエーター等を用いて実空間のみで行うことも考えられる。確かに指-鼻-指試験のようなものを再現し、記録・解析を行うことは可能である。しかし、VRは仮想的空間を自由に構成することができるので、視覚・前庭感覚・体性感覚などに関し、互いに矛盾するような感覚情報を人為的に作り出して人間に与えることができる。例えば視覚情報の左右方向が反転した状態、視覚と触覚の矛盾した状態などを人間に呈示することが容易にできる。このため、従来にはなかった脳機能障害と異種感覚情報の統合機能^{5,6)}などのような脳の高次機能の関係を、これまでより詳細に検討することができる可能性を有する。

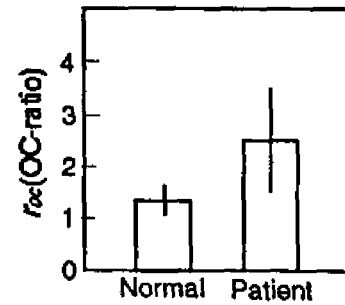


Fig. 13 Ratio of closed-loop period to open-loop period(OC-ratio).

5. おわりに

本研究では、VRを用いて運動失調症検査を行うための基礎的なシステムを構成し、本システムの有効性と限界について検討した。その結果、仮想空間内の立体感が実空間に比べて乏しいなどの欠点はあるものの、従来の臨床神経学的検査である鼻指鼻試験等をVR環境において定量的に実現できることが明らかとなった。今後は、より多くの数の被検者を対象とした結果に基づき、本システムの改良をさらに図る必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 松本 啓:神経疾患の臨床診断. 金剛出版, 東京 (1980).
- 2) 廣瀬通孝: バーチャルリアリティ. オーム社, 東京 (1995).
- 3) Kondraske G. V., Potvin A. R., Tourtellotte W. and Syndulko K.: A computer-based system for automated quantitation of neurologic function. IEEE Trans. Biomed. Eng., BME-31, no.5, pp.401-414 (1984).
- 4) 中村政俊 他: 視標追跡運動機能のニューラルネットワークによる病態別特徴の解析, 医用電子と生体工学, vol.31, no.3, pp.245-253 (1993).
- 5) 大山正, 今井省吾, 和気典二(編):新編 感覚・知覚心理学ハンドブック, 1338-1345, 誠信書房(1994).
- 6) 乾 敏郎(編):認知心理学1 知覚と運動, 103-116, 東京大学出版会(1995).