



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	視空間認知障害のためのhead mounted display (HMD)を利用した定量的評価方法の開発
Author(s)	杉原, 俊一
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12189号
Issue Date	2016-03-24
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k12189
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/61713
Type	doctoral thesis
File Information	Shunichi_Sugihara.pdf



博士論文

視空間認知障害のための

head mounted display (HMD)を利用した定量的評価方法の開発

北海道大学大学院情報科学研究科
生命人間情報科学専攻人間情報工学研究室
杉原俊一

2016 年 3 月

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景.....	1
1.1.1 脳血管障害による視空間認知障害の問題	1
1.1.2 視空間認知障害について	1
1.2 研究目的	5
1.3 研究概要	5
1.4 論文構成	7
第2章 視空間認知障害患者の評価に対する従来研究	8
2.1 視野障害 (visual field defects : VFD) のリハビリテーション	8
2.1.1 VFD における従来の検査方法	8
2.1.2 VFD に対する従来の訓練方法	9
2.2 半側空間無視 (unilateral spatial neglect : USN) のリハビリテーション	10
2.2.1 USN における従来の検査方法	10
2.2.2 USN に対する従来の訓練方法	12
2.3 HMD の医療への応用について	17
2.3.1 医療用両眼視型 HMD システム	17
2.3.2 単眼視型 HMD の医療応用	18
2.4 解決すべき研究課題	20
2.5 2章のまとめ	21
第3章 Head Mounted Display (HMD) を利用した新たな評価システムの開発	23
3.1 HMD による新たな評価システムについて.....	23
3.1.1 座標系理論.....	23
3.1.2 システム環境	24
3.1.3 システム構造	25
3.2 新たな検査方法.....	30
3.2.1 HMD を用いた多様な視覚呈示による机上検査	30
3.2.2 眼球運動分析	30
3.2.3 健常者による新たに考案した HMD システムの検証.....	37
3.3 3章のまとめ	43
第4章 視空間認知障害の定量的評価に対する有用性の検討	44
4.1 VFD 患者の視空間認知評価	44
4.1.1 実験方法.....	44
4.1.2 結果・考察.....	46
4.2 USN 患者の視空間認知評価	50

4.2.1	実験方法	50
4.2.2	結果.....	52
4.2.3	考察.....	55
4.3	VFD と USN 患者の視空間認知特性の検討	57
4.3.1	実験方法	57
4.3.2	結果.....	58
4.3.3	考察.....	67
4.4	4 章のまとめ	69
第 5 章	HMD を利用した定量的評価に基づく訓練方法の提案	70
5.1	VFD 患者のための新たな訓練方法の提案	71
5.1.1	HMD による新たな視覚探索課題	71
5.1.2	HMD を利用しない視覚探索課題	72
5.1.3	考察.....	74
5.2	USN 患者のための新たな訓練方法の提案	75
5.2.1	方法.....	75
5.2.2	考察.....	76
5.3	5 章のまとめ	77
第 6 章	結論	78
6.1	総括	78
6.2	今後の展望	80
参考文献		81
謝辞.....		91

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 脳血管障害による視空間認知障害の問題

視空間認知障害の代表的なものとしては、USN (unilateral spatial neglect : USN) と視野障害 (visual field defects : VFD) が知られている。しかし、それらの違い等については、未知の点も多い。

USN に伴う空間認知障害者は日常生活動作 (activities of daily living : ADL) 場面で左側の人や物体に衝突する、車椅子の左側にあるブレーキ操作を忘れて転倒する等、リハビリテーションにより運動機能が改善しても介護者の見守りが必要になることが多く、障害者の自立支援の妨げとなる。USN の発症率は報告により異なるが、急性期から慢性期に至る右半球脳血管障害患者の 12% ～100% の広い範囲で見られ、左半球脳血管障害患者では頻度が低く慢性期まで残ることは少ない[1]。

厚生労働省は 2004 年に実施された高次脳機能障害者発生者数調査をもとに、全国の高次脳機能障害者数をおよそ 30 万人と推定している。その後 2008 年に東京都で実施された調査によれば、高次脳機能障害の原因疾患は 81.6%が脳血管障害で、USN は 10%となっており、およそ 2 万 5 千人の USN 患者が障害を有していることになる[2]。一方、VFD は、脳血管障害患者の約 40%に認められ、その 50～60%で自然回復が生じると言われている[3]。

1.1.2 視空間認知障害について

VFD の主な障害部位としては、外側膝状体および側頭葉[4]、後頭葉の病変[5]などがあげられ、視野の半分が見えない同名性半盲を生じることが報告されている(図1)。VFD 患者は、中心視野に残存する視野領域を中心に視覚情報を得ようとする。そのため、健側視野で対象物を捉えるための眼球運動や、患側視野方向に頭部を回旋させて情報を得る代償が生じる。

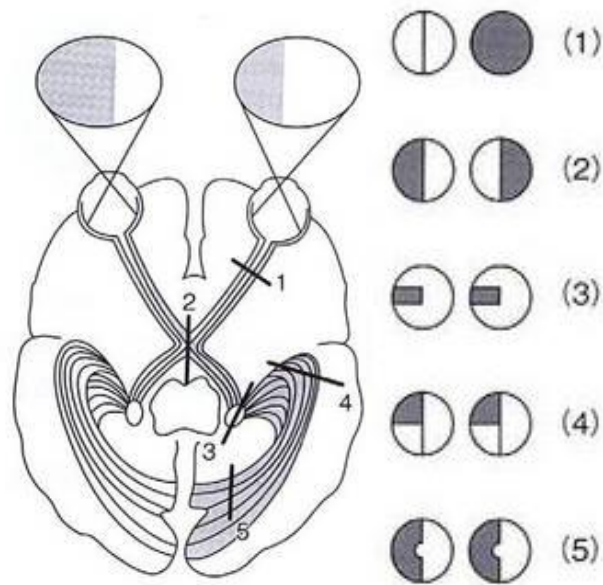


図 1：視覚伝導路とその損傷の結果

USN は、損傷大脳半球と反対側の刺激に気がついたり、反応したり、その方向に向いたりすることが障害されている病態である（図 2）。図 2 の左の患者は、頭部を左に回旋することが出来ず、図 2 右の患者は平行棒に気づかず、左の身体を衝突させている。



図 2 Unilateral Spatial Neglect (USN)

USN は、左半球損傷患者 はわずか 8%であるのに比べ、右半球損傷患者の 42%が USN を呈していた報告している[6]。様々な障害説はあるが、注意障害説が有力なものとなっている（表 1）。Kinsbourne の説によると、右脳は左右空間を、左脳は右空間を主に監視していると考えられている。そのため、左脳損傷の場合は残っている右脳が左右両側を監視するために無視は生じないが、右脳損傷の場合は左脳が残るため右空間しか監視できず、左 USN が生じると説明している（図 3）。Corbetta らは[7]、標的刺激が現れたときにどれだけ素早く反応できるかを見る、標的刺激検出課題を実施した。この課題を実施した右半球損傷による左 USN 患者は、右半球の背側頭頂葉（特に、頭頂間溝-上頭頂小葉）の活動は急性期では認められなかった。しかし、左半球の背側頭頂葉の活動は急性期でも慢性期でも強く認められ、右側空間への注意の偏位は、左側の上頭頂小葉の活動と正の相関を示すと述べている。つまり、USN における右側空間への注意の偏位は、相対的に過活動となっている左半球への抑制メカニズムによって引き起こされ、右脳半球は左右両方の視野の処理を支配するものの、左脳半球は覚醒の調節と右視野への注意に責任があるためと考えられる[8][9]。

表 1 : USN の障害説

説明仮説	
1 注意障害説 (Kinsbourne 1987, Weintraubら 1989)	右脳は左右に注意を向けるが、左脳は右へ注意を向けるため、右脳損傷で左への注意が低下する左半分には注意が向かない
2 表象障害説 (Bisiachら 1978)	意識の中で、外空間、自己の身体に関する表象が認識されない。脳内で左半分のイメージがない
3 方向性運動減少説 (Heilmanら 1993)	知っているけど左へ手が動こうとしない
4 眼球運動障害説	左側への眼球のサッケードの立ち上がりが不良で、左右同時に刺激されると右へ引かれる
5 amorphosynthesis説	頭頂葉損傷で複数の感覚を空間処理できない
6 一側性記憶障害説	左半側空間に提示された刺激を忘れてしまう

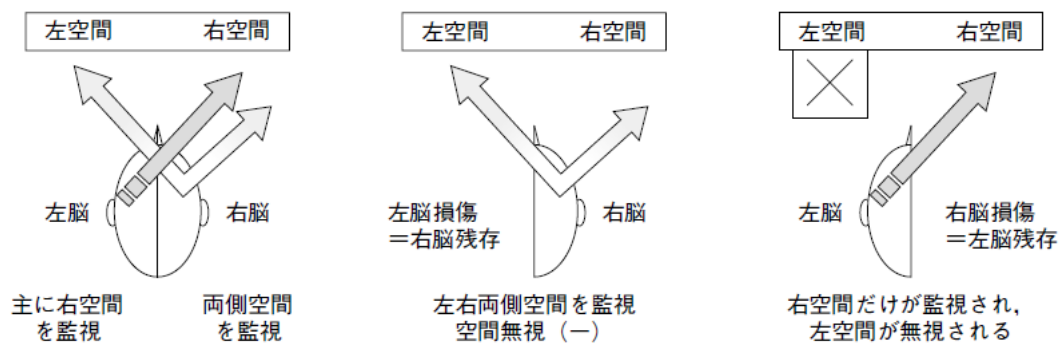
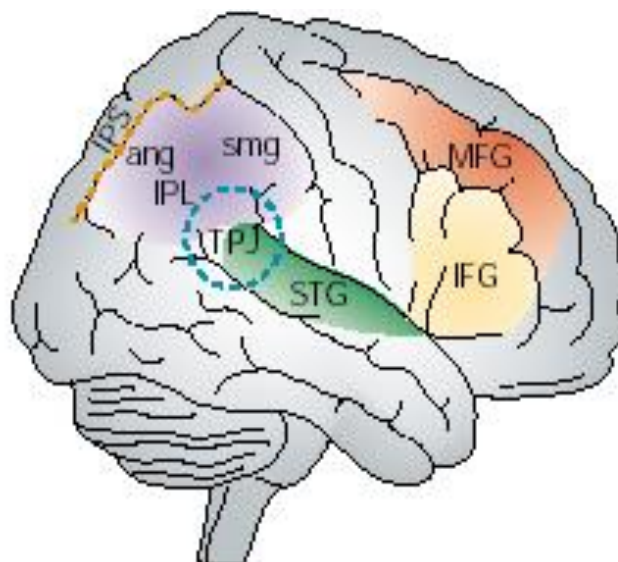


図 3 : Kinsbourne の注意障害説

USN の生じやすい責任病巣は多岐に渡り (図 4)、右側頭の上側頭回—頭頂葉—側頭葉、頭頂葉接合部または、下頭頂小葉を中心とする病巣とされているが、前頭葉にほぼ限局した病巣や後大脳動脈領域の梗塞、前脈絡叢動脈領域の梗塞でも生じる[10][11][12][13]。よって異なる病巣の影響により USN は様々な症状を呈するため、USN の検出には複数の評価を行う必要がある[14][15][16]。



IPS: 頭頂間溝、IPL: 下頭頂小葉 (Ang: 角回、smg: 縁上回)
 IFG: 下前頭回、MFG: 中前頭回
 TPJ: (側頭葉、頭頂葉接合部)、STG: 上側頭回

図 4 : USN の主な責任病巣

1.2 研究目的

現在、視空間認知障害は、症例によっては USN と VFD を合併している例もあり、両者の鑑別が困難な場合がある。また、日常生活動作に近い環境での眼球運動の病態については明らかになっていない。そこで本研究では、VFD や USN 患者に対し、head mounted display (HMD) を使用した多様な視覚情報呈示装置による定量的評価方法の開発を行う。この装置により、通常の机上検査では明らかにすることが出来ない VFD や USN 症状を見出し、眼球・頭部運動の同時計測の定量的評価により、眼球運動特性を明らかにする。更に ADL で生じる無視症状を軽減するため、HMD を利用した新しい訓練方法を提言することである。

1.3 研究概要

視空間認知には、複数の座標系が関与していると考えられており、本研究では HMD を使用した多様な視覚情報呈示による視空間認知評価及びビデオ動作分析装置による眼球・頭部運動の同時計測を可能にする検査システムを新たに開発した。

健常者により開発した本システムの特性を評価し安全性を確認した後、VFD 患者と USN 患者 1 例に対し眼球運動の解析を通じ評価方法を確立した。VFD は視野障害側の偏位を認め、USN 患者は HMD 装着により非無視空間に偏位しており、通常の検査では認められなかった無視症状を HMD の装着により検出することが可能となった。この研究により、VFD 患者と USN 患者における眼球運動の病態評価に対する開発システムの有用性を確認した。

更に数例の USN 患者と VFD 患者に対し、眼球運動を定量的に評価し、空間認知障害の特性を明らかにすることを目的として、比較検討を行った。その結果、上記の症例検討と同様に、VFD 患者が視野障害側に偏位し、USN 患者は非無視空間に偏位していた。このことより、本 HMD システムでは、USN 患者と VFD を視空間認知の特徴を鑑別できると考えられた。また、VFD と USN 眼球運動の角速度は、VFD と USN とともに非障害方向の眼

球運動速度が速くなっており不均衡を認め、視覚情報の呈示により VFD 患者と USN 患者の眼球運動角速度に明確な違いを確認した。眼球運動・頭部運動の同期分析の結果、VFD 患者では、眼球運動と同じ方向の頭部運動を認めるのに対し、USN 患者では非無視方向に回旋を認めた。

HMD を用いて多様な視覚情報呈示する新たな実用的方法を開発し、視空間認知障害の客観的評価について検証した。また臨床においてその有用性を実証するとともに、頭部及び眼球運動の分析より、VFD 患者及び USN 患者の視空間認知障害の違いの一端を明らかにした。

1.4 論文構成

本論文は 6 章からなり、以下に各章の概要を述べる。

第 1 章では、研究の背景、研究目的、研究概要について述べる。

第 2 章では、視野障害のリハビリテーションにおける従来の検査方法と訓練内容、USN の従来の検査方法と訓練内容について述べ、解決すべき研究課題を明確にする。

第 3 章では、HMD を利用した座標系理論による物体中心座標のシステム環境について説明し、HMD の多様な視覚呈示による机上検査と眼球・頭部運動の同時計測による定量的評価法の開発について述べる。

第 4 章では、前章で述べた評価システムにより視野障害患者と USN 患者に検査を実施し、多様な視覚呈示による眼球運動の定量的評価の有用性について検討する。

第 5 章では、HMD を利用した定量的評価の結果より、新しい訓練方法の提案を行う。

最後に、第 6 章において、本研究の成果について要約し、論文全体のまとめとする。

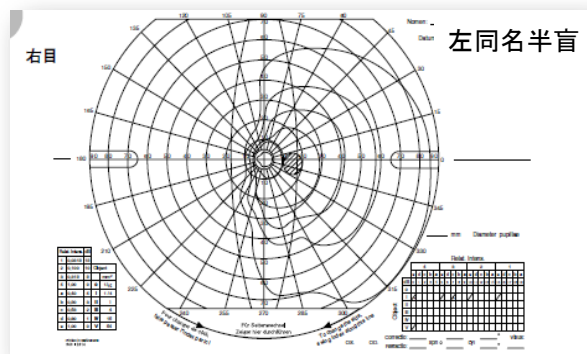
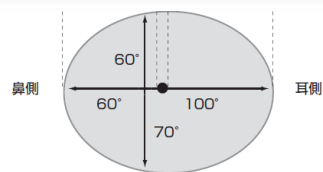
第2章 視空間認知障害患者の評価に対する従来研究

2.1 視野障害（visual field defects : VFD）のリハビリテーション

2.1.1 VFDにおける従来の検査方法

視野は眼球を動かさずに見える範囲であり、片目をふさいで正面の目標を注視した場合、健常眼であれば上方は上眼瞼で遮られるため正面より約 50 度上方まで見える。内側では約 60 度までしか見えないが、外側では 90 度以上も見え、下方は 60 度が限界である。両眼視では上下が約 60 度、両側方が約 90 度以上あり、目を動かさなくても広範囲が見えることになる[17]。残存する視野を計測する場合はゴールドマン動的視野計が用いられ(図5)、中心視野内のわずかな変化を捉えるには自動視野計が用いられる。このような計測機器は主に眼科にしかなく、脳血管障害患者等が検査を受ける際には病態が安定した後に受診するのが一般的であり、詳細な評価には期間を要する。

現在、脳血管障害患者等の視野の評価方法としては、頭部を固定した状態で教示された標的を探し探索範囲を計測する対座法や、幾何学図形を探索させ探索時間と正當数を求める方法などがある[18][19]。また、VFD 患者の正確な病態の把握には、頭部運動による代償動作の評価も重要なため、日常生活動作のように、制限を受けない頭部の運動状態や教示範囲の変更等が必要である。しかし、このような標的や図形等を呈示した場合の眼球運動の計測方法や解析については、ほとんど報告されていない。



視野：視線を固定した状態での見える範囲



ゴールドマン視野計

図 5：視野計

2.1.2 VFD に対する従来の訓練方法

近年、視野障害に対するリハビリテーションの有効性が報告されている[20]。特に、眼球運動による代償法の有効性を示す報告も多く、正確な情報を得るために視覚対象物を中心視野で捉える傾向がある[21]。Kerkhoff らは[22]、複数の同名性半盲患者に対し、視覚探索で素早く眼球を動かす系統的代償戦略（ストラテジー）課題を施行し、有効性を報告している。本邦では、境らが Kerkhoff らの方法を、用具を簡略化、施行時間を短縮して、障害視野へ素早く眼球を動かす衝動性眼球運動課題、2 種の幾何学図形を可能な限り速く触る探索課題を高度の視野狭窄のある症例に施行し、良好な結果を報告している[23]。

衝動性眼球運動は、視線位置を横方向、縦方向、斜め方向に変える際に生じる 400～800deg/s の非常に高速な眼球運動であり、最大速度は 1000 deg/s 程度になることもある。

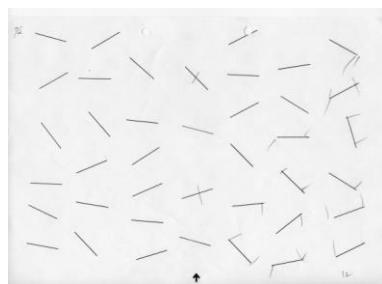
指標の速度が遅いときは、随従運動で視標を遅れなく追跡するが、視標の速度が速くなると、随従運動で追えなくなり、視標に対して遅れていく。衝動性眼球運動はそのような時にも生じ、跳ぶような速い動きを行い、遅れを取り戻す運動を行う。

2.2 半側空間無視（unilateral spatial neglect :USN ）のリハビリテーション

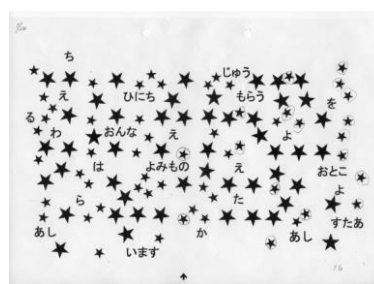
2.2.1 USN における従来の検査方法

USN 患者に対する評価を実施する意義としては1) USN を見出す、2) USN の重症度を明らかにし、治療プログラムを作成し、治療効果を判定する、3) USN による病棟生活や、在宅生活における日常生活の問題をより具体的に明らかにし、患者の治療、指導・環境調整に役立てることにある。

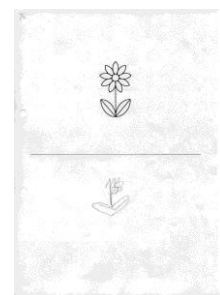
USN の伝統的検査法には、抹消試験模写、描画試験、線分二等分試験がある（図6）。これらについて日常生活場面を模した検査を含み標準化したのが行動性無視検査（Behavioural inattention test : BIT）（表2）である[24]。また、ADL の USN 症状の評価として、表3の Catherine Bergego Scale（CBS）がある。生活場面の10種類の行動をセラピスト等が観察で評価するもので、机上検査で USN が認められなかった症例が CBS で ADL 場面での USN を認めており[25]、USN 患者の ADL 評価として有用と考えられている。



線分抹消試験



星印抹消試験



模写試験

図6：BIT 検査

表 2 : BIT の検査内容

通常検査	最高点	Cut off点	行動検査	最高点	Cut off点
線分抹消試験	36	34	写真課題	9	6
文字抹消試験	40	34	電話課題	9	7
星印抹消試験	54	51	メニュー課題	9	8
模写試験	4	3	音読課題	9	8
線分二等分試験	9	7	時計課題	9	7
描画試験	3	2	硬貨課題	9	8
			書写課題	9	8
			地図課題	9	8
			トランプ課題	9	8
合計	146	131	合計	81	68

表 3 : Catherine Bergego Scale (CBS) の日本語訳

1. 整髪または髭剃りのとき左側を忘れる
2. 左の袖やスリッパの装着するのが難しい
3. 皿の左側の食べ物を食べ忘れる
4. 食事の後、口の左側を拭くのを忘れる
5. 左を向くのに困難さを感じる
6. 左半身を忘れる
7. 左側からの音や左側にいる人に注意することが困難である
8. 左側にいる人や物(ドアや家具)にぶつかる(歩行・車椅子駆動時)
9. よく行く場所やリハビリ室で左に曲がるのが困難である
10. 部屋や風呂場で左側にある所有物を見つけるのが困難である

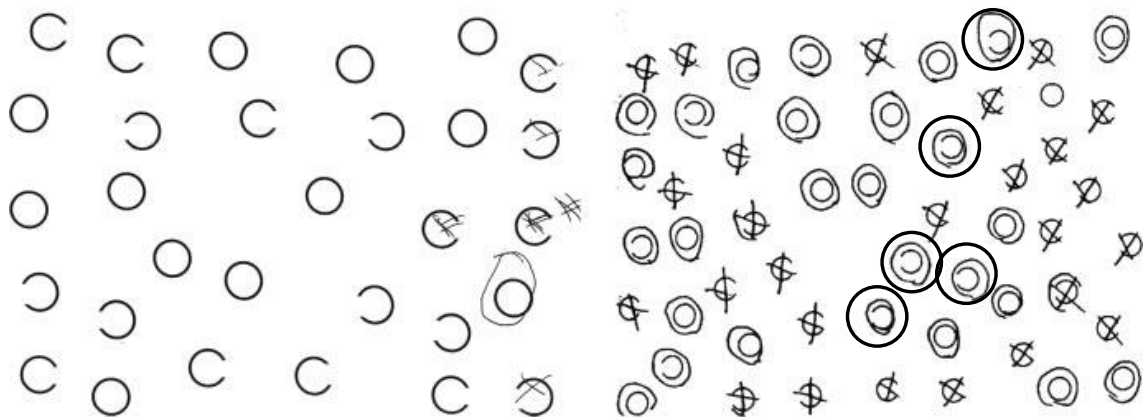
各項目0～3点で評価(0～30点)

- 0: 無視なし
- 1: 軽度の無視(常に右の空間から先に探索し、左の空間に移るのはゆっくりで、躊躇しながらである。時々左側を見落とす)
- 2: 中等度の無視(はっきりとした、恒常的な左側の見落としや左側への衝突が認められる)
- 3: 重度の無視(左側をまったく探索できない)

現在、USN 患者に対する代表的な評価としては机上検査を用いる。しかし、机上検査で無視症状を認めなくても、日常生活場面での行動観察において出現する症例もあり、視覚

情報を中心に紙面を用いた検査と、行動観察のような視覚以外の体性感覚情報を中心とした USN 状況の評価も必要となる。そのため、USN の評価としては机上検査と行動観察を実施することが多い。

USN は様々な症状を呈し複数の評価を実施するため、いくつかのサブタイプに分類されることが多い。その一つとして USN の視空間認知には、複数の座標系が関与していると考えられており、身体を中心に対象物の方向を位置づける身体中心座標と身体以外の対象物、または参照枠を中心に位置づける物体中心座標に大別される。Hillis は MRI を用いた研究から、自己中心の基準のズレが関与する無視と物体中心の無視による病巣部位の違いを明らかにした[26][27]。また、Ota 等による自分中心の無視と物体中心の無視を分類した机上検査の症例報告もあるが（図 7）、USN は複雑な症状を呈するためうまく当てはまるケースは少ないと述べている[28]。



左は隙間が空いている円を見つける課題において、観察者の左側の円のすべてを無視しており自己中心的な無視を示している。観察者の右側にある円では左に隙間がある円を無視していない。
右は、他者中心の無視を示している。観察者の右側にある円の左の隙間に気づかず○（隙間がない）を付けている。

図 7：自分中心無視（左）と物体中心無視

2.2.2 USN に対する従来の訓練方法

現在、USN のリハビリテーションにおけるシステムティックレビューにおいて、視覚探

索トレーニング (VST)、体幹回旋 (TR)、反復頸部筋振動刺激 (NMV)、イメージトレーニングを適用した mental imagery training、ビデオフィードバックのトレーニングとプリズムアダプテーション (Prism adaptation : PA) は左無視患者のリハビリテーションを進めることができると指摘している (図 8) [29]。

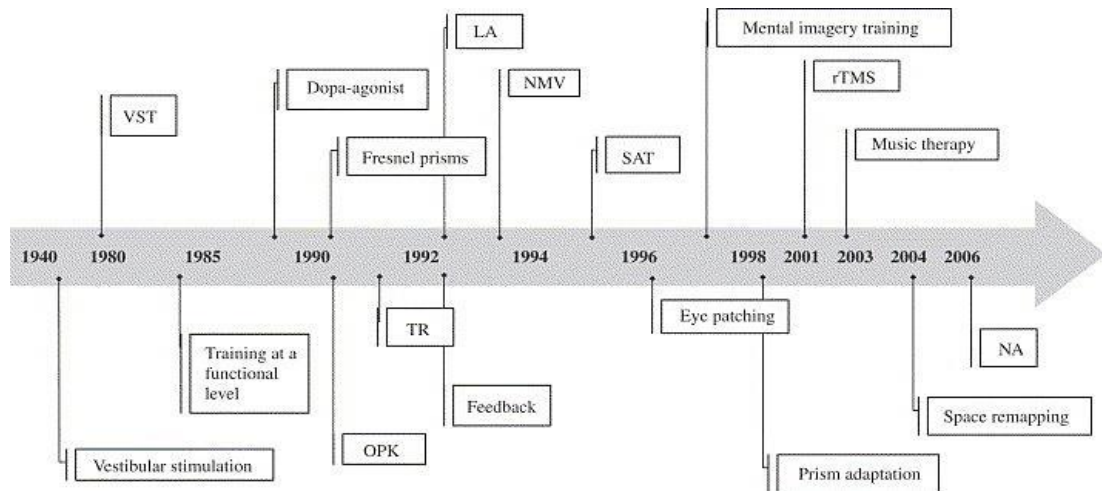


図 8 : USN 患者の現在の介入とその効果に関する系統的レビュー

近年、経頭蓋磁気刺激を反復して与える反復経頭蓋磁気刺激 (repetitive transcranial magnetic stimulation : rTMS) や経頭蓋的に弱い直流電気刺激を与える経頭蓋直流電気刺激 (transcranial direct current stimulation : tDCS) などの報告もあるが[30][31][32]、長期の機能的な改善が得られることができるかどうかについてはわかっていない。

USN に対するリハビリテーションアプローチを大きく分けると、無視側への注意を促し行動変容させる「トップダウンアプローチ」と末梢からの刺激を与え、高次の中枢への作用を期待する「ボトムアップアプローチ」に分類される[33][34]。

トップダウンアプローチには、自ら声を出すことで聴覚的なフィードバックにより注意を保持する方法 (sustained alerting training) や視覚探索課題 (visual scanning) などが試みられている (図 9)。これらの方法では患者自身が無視症状に気づき、能動的に注意を向ける必要があるため、自らの無視に気づかない USN 患者では難しい場合が多い。一方、

ボトムアップアプローチには、脳損傷側に温水を注入するか、非損傷側に冷水を注入するかによって、無視の側に向かう緩徐相の眼振を起こさせるカロリック刺激、無視側の電気刺激や深部感覚刺激、背景が無視側へ動くような動画を見せて視線が無視側へ動かす視運動刺激、無視方向の体幹の回旋、半視視野または片眼の遮蔽等が実施されている。これらボトムアップアプローチによる方法は、患者が無視に気づいていない場合でも可能であるという利点がある（図 9）。



図 9 : USN に対する主なリハビリテーション

最近の USN に対するアプローチとしてボトムアップアプローチを応用した PA 療法がある。これは、プリズム眼鏡によって視野全体を右側に移動させ、前方にある標的を指し示す課題を繰り返す方法である[35]。はじめはプリズムにより右方向に手が偏位してしまい、正確に位置を指し示すことは難しいが (error)、リーチ動作等繰り返しながら視覚順応の再編成を促し、プリズム順応後に眼鏡を外すと実際より左側に指差しをするようになる (after effect)。この様な視覚順応の再編成を通じて、USN 症状の改善を目指す（図 10）。

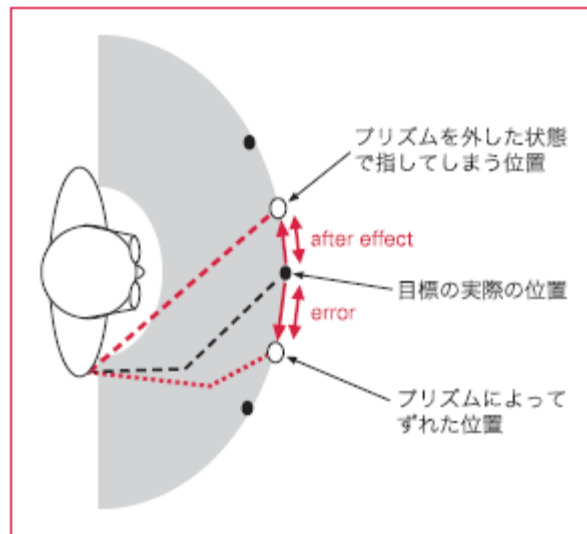


図 10：プリズムメガネによる視覚順応の再編成

PA 療法による USN 症状の改善は、線分二等分や線分抹消など視覚—運動課題だけでなく、読字など運動と関わりない課題でも認められることが報告されている[36][37]。しかし、机上の検査などでは改善が認められるが、ADL の改善を示した研究はほとんどない[38]。

また近年、PA 療法以外のボトムアップアプローチとして、視運動刺激を活用した滑動性眼球運動トレーニングが有効と報告されており[39][40][41]、Kerkhoff 等はベースラインと比較し、線分二等分の右方向の偏位や、線分抹消と読書課題の左の見落としが減少したと述べている[42]。滑動性眼球運動は、一定の速度の範囲内（～ 60 deg/s）でゆっくりと運動する視覚対象を追視するときに生じる運動である。滑動性眼球運動を維持するには、注意の集中が必要と報告されており[43]、右側から左側にゆっくりと移動する指標を見ながら行うことで、右側に偏った注意が移動すると考えられている。

USN は半側の空間を無視する症状であるが、空間の概念は広く、物体の 3 次元的構造、物体の 3 次元的位置、さらにそれらの 3 次元的運動や自己の空間的位置等、その内容は多岐にわたる。3 次元の視覚情報処理で重要な段階としては、両眼視差、運動視差、絵画的手がかり（テクスチャ・陰影・遠近法・遮蔽）等の種々の奥行き手がかりの推定である。

それぞれ独立に奥行き の推定が行われた後、それらが頭頂連合野で統合されることによって3次元 的レイアウトの表象が構築されると考えられている[44]。

近年バーチャルリアリティ（Virtual Reality：VR）の目覚しい技術的发展により、使用者の用途に応じて多様な視覚情報の呈示に加え、3次元の世界を与えることが可能となった。VRは現実の世界において、VFDやUSN患者が横断歩道を渡る等の危険な環境（図11）をVRでシミュレーションすることが可能になることから[45]、USNの評価とリハビリテーションの効果的なツールとして期待されている[46]。図11はUSN患者のAvatarが横断歩道を渡る課題で、Virtual carのスピードや視野の範囲により難易度の調整が可能である。最近の研究ではHMDを使用した評価方法も見られるが[47][48][49][50]、眼球・頭部・体幹運動の解析を加えた報告はない。

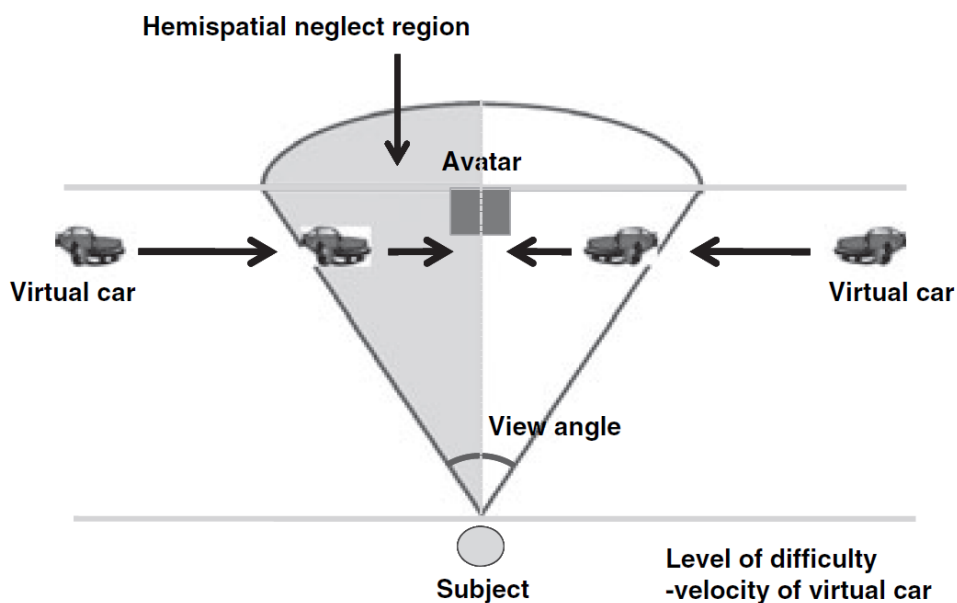


図 11：三次元仮想横断歩道プログラムの模式図。

2.3 HMD の医療への応用について

HMD は表示装置（ディスプレイ）の一種で、両眼に覆いかぶせるように装着して大画面や立体画像などを教示するディスプレイの総称で、多くはゴーグルの形状をしている。使用方法としては、HMD を頭部（head）に乘せ（mount）、左右の目で別々なディスプレイを見ることになる。HMD には大きく分けて 2 つの用途があり、ひとつは物理的空間を必要とせずに超大画面の映像体験ができるディスプレイとしての用途であり、もうひとつは視覚効果による 3 次元空間の教示となる。

現在、我が国の医療現場においても使用されており、視点の移動を最小限にし、様々な画像情報を呈示し作業を安全に効率よく行うためのものである。

2.3.1 医療用両眼視型 HMD システム

内視鏡からの映像を表示する医療用に特化して新たに開発・デザインされた HMD システムで、長時間の手術における医師の負担軽減のために開発された。従来の腹腔鏡手術では、医師は外付けのモニター画面を見ながら施術を行っていたが、この HMD を装着することで、3 次元の内視鏡映像が目の前のディスプレイに表示され、外付けのモニターの画面位置に束縛されることなく、自由な姿勢で手術が行える（図 12）。没入感の高い 3 次元の映像が得られるだけでなく、視線を動かすだけで術野を俯瞰視でき、必要な情報を把握できるため、スムーズに手技を行える。



図 12：腹腔鏡手術医療用 HMD システム

2.3.2 単眼視型 HMD の医療応用

両手で処置・作業をしつつ、視線の移動を最小限としてあらゆる画面情報を参照する場合での単眼視型の活用も期待されている（図 13）。図 14 は、透析治療における穿刺の際、わずかな視線移動だけで超音波エコー画像と穿刺部位を確認できる。そのため、血管中央部に正確に穿刺しやすいと言われ、施術部位と映像情報を同一視野に捉えることが可能となっている。



図 13：単眼シースルー型 HMD



図 14：超音波検査装置の画像を見ながら穿刺

2.4 解決すべき研究課題

VFD 患者は、網膜中心座標において、中心視野に残存する領域を中心に視覚情報を得ようとする。そのため、健側視野で対象物を捉えるための眼球運動や、患側視野方向に頭部を回旋させて情報を得る代償が生じる。しかし、現在の評価方法は、頭部を固定した状態で呈示された標的を探し探索範囲を計測するゴールドマン視野検査や、机上の幾何学図形を探索させ、探索時間と正当数を求める視空間認知評価が使用されている。

VFD 患者は ADL において、残存する視野領域で対象物を探索するため、病前と異なる眼球や頭部、体幹運動が出現する。そのため、各個人に最適なりハビリテーションの提供のためには、頭部運動を妨げない環境下での評価方法が有用と考えられる。しかし、残存視野を考慮した視覚情報を呈示による眼球運動や頭部運動の評価方法は、ほとんど報告されていない。

USN 患者が空間を認識する方法には、自己身体を中心とする座標系と、物体を中心とする座標系が存在すると考えられている。つまり USN は、自己の体幹や頭部、網膜を中心とする自己中心的な半側空間を無視するタイプと、自己身体位置との関係ではなく外部空間にある対象物そのものを中心としてその対象物の半側空間を無視するタイプに分類することができる[51]。

これらの報告から、USN は異なる視覚情報入力の影響により様々な症状を呈する可能性が考えられる。したがって、USN の正確な把握や解析のためには、異なる座標系の複数評価を組み合わせた検討を行う必要がある。また、これまでの定量的な評価は机上検査が中心であり、網膜座標に視対象の位置の変更や縮小等の視覚情報を呈示することで USN 症状に応じた眼球や頭部運動の評価が期待できる。しかし、そのような多様な視覚情報呈示による眼球運動の定量的評価については行われていない。

研究課題 1

現在、視空間認知障害について、日常生活動作に近い環境での眼球運動の病態については明らかになっていない。そこで本研究では、VFD や USN 患者に対し、HMD を使用した多様な視覚情報呈示装置を新たに開発する。また、これにより、通常の机上検査では明らかにすることが出来ない視空間認知症状を見出し、ビデオ動作分析装置による眼球・頭部運動の同時計測による定量的評価により、眼球運動特性を明らかにする。

研究課題 2

HMD システムによる多様な視覚情報呈示方法により、VFD と USN 患者の眼球運動や頭部運動の特性を考慮した視空間認知改善に向けた訓練を提案する。

2.5 2 章のまとめ

VFD と USN 患者の評価とリハビリテーションに対する従来研究、および本研究の意義を確認した。視空間認知は、網膜を中心とした眼球中心座標、身体を中心に対象物の方向を位置づける身体中心座標、及び身体以外の対象物、または参照枠を中心に位置づける物体中心座標に大別される。しかし、このような座標系理論に基づく検査機器はなく、病態の正確な把握には複数の評価が必要で、全ての評価を終えるためには時間もかかることから、多くの労力と患者の負担の軽減が必要である。

現在、VFD や USN 患者を鑑別する評価する機器はなく、視空間認知の定量的な評価は机上検査が中心であり、頭部や体幹運動を妨げない ADL に近い環境での定量的な評価は難しい。

これに対し、新たに開発する本システムは、HMD の利用により座標系を考慮した課題の呈示と、頭部や体幹運動を拘束しない環境下で眼球・頭部運動の同時計測を可能にする。また、多様な視覚情報の呈示をした場合の眼球運動を定量的に評価することで、空間認知障

害の特性を明らかとなる。よって、本研究の HMD を利用した検査に基づき、新たな訓練内容を提案できる可能性が考えられる。

第3章 Head Mounted Display (HMD) を利用した新たな評価システムの開発

3.1 HMD による新たな評価システムについて

3.1.1 座標系理論

外部空間を認識するための入力には、自己身体を中心とする座標系と、物体を中心とする座標系が存在すると考えられている（図 15）。自己身体を中心とする座標系の特徴は、観察者が移動することによって座標系上の空間的対象の方向や位置が変化することである。自己身体とは、眼球、頭部、体幹等の複数の稼働部分で構成されており、基準とした上記の身体部分によって空間対象の位置や方向が異なって座標化される。すなわち、USN については、自己の体幹や頭部、網膜を中心として、その半側空間を無視する自己中心的な半側空間を無視するタイプと、自己身体位置との関係ではなく外部空間にある対象物そのものを中心として、その対象物の半側空間を無視するタイプに分類することができる [52][53][54][55]。

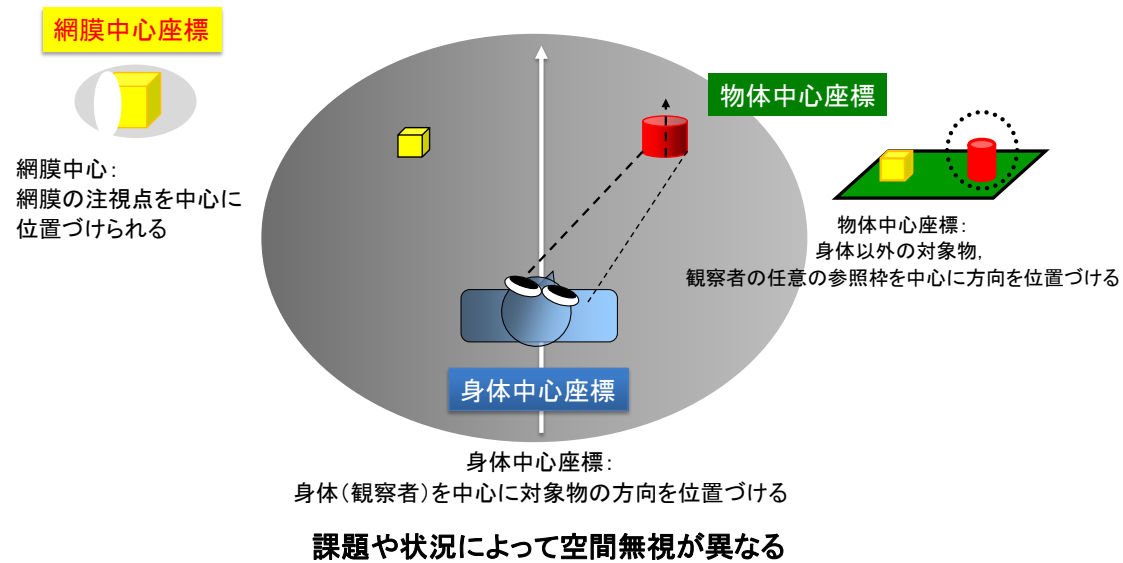


図 15：座標系理論に基づく視空間認知の検討

MRI の灌流強調画像の結果、物体中心無視の患者は上側頭回に低灌流が見られ、自己中心の無視患者では、角回を中心に下前頭回と縁上回に低灌流を認めると報告している。J.Kenzie 等は BIT の 6 つのサブテストと損傷部位との関係について調べ、自己中心と物体中心無視の関連について検討している。その結果、身体中心無視は、紙面上の星や線分、文字を抹消するテスト結果と前頭葉と頭頂葉の損傷部位と関連し、物体中心無視では線分二等分や描画テストの結果と側頭葉と頭頂葉の損傷部位と関連していたと述べている[56]。よって身体中心や物体中心座標系による USN の影響を検討するには、上記全ての机上検査を実施する必要がある。

3.1.2 システム環境

そこで本研究では、このような座標系理論を踏まえ、HMD に評価用紙を投影するシステムを構築した。このシステムは、多様な視覚情報を呈示する装置と眼球運動に加え、頭部・体幹運動の同時計測を可能とする環境である（図 16）。HMD により机上の評価用紙以外の

視覚情報を制限し、CCD カメラを上方に固定することにより頭部を動かしても映像が変わらない物体中心座標に近い環境とした。眼球運動による視覚探索が求められる環境である。

3.1.3 システム構造

本システムは、視覚情報呈示と眼球・頭部・体幹運動の同時計測の 2 つのシステムからなる。視覚情報呈示システムは、机上の上方に固定した 2 つの小型 CCD カメラと CCD カメラで撮影された評価用紙の画像処理や制御を行うためのコントロールユニット本体、処理された映像を被験者に投影するための HMD となっている。2 つの CCD カメラから撮像された 2 入力の左右両眼用の映像を、それぞれ HMD の左右両眼用の 2 つの表示装置に出力する。これにより両眼視差を作り出すことで両眼立体視が可能となる。

HMD 内表示装置の映像は、制御装置により画像サイズを縮小および、移動させる機能を有している。

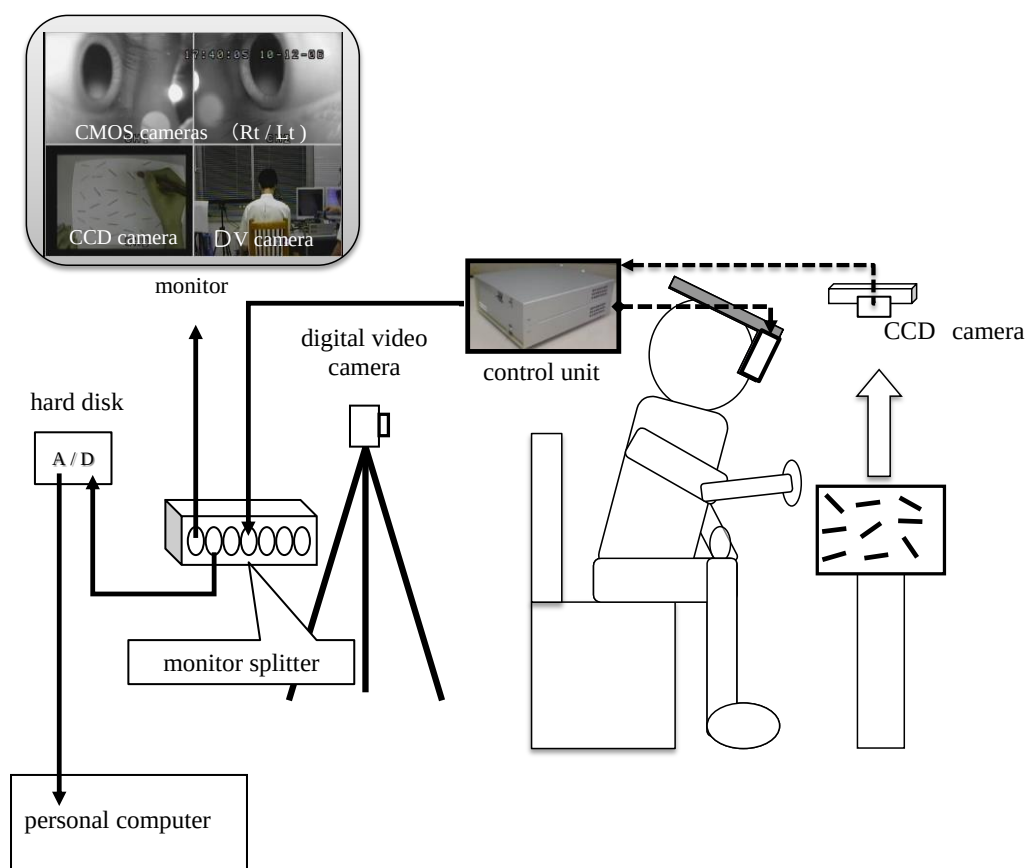


図 16：システム環境

(a) 視覚情報呈示（画像処理）

様々な視覚情報呈示のための画像処理は、CCD カメラにより撮像された評価用紙の画像に対して、以下の縮小表示機能を使用し、視野障害領域や無視側空間内に評価用紙を呈示する条件に加え、注意喚起情報表示機能では評価用紙の映像に注意喚起の矢印を合成することで視空間認知障害側の注意喚起を促す。

縮小表示機能では、以下の条件の視覚情報呈示を実施する（図 17）。

- 1) 縮小なし条件：CCD カメラで撮影した評価用紙を投影した条件
- 2) 中央縮小条件：評価用紙の映像を画面中央方向に 80%縮小
- 3) 右縮小条件：画面の右端方向に縮小なし条件の映像を 80%に縮小
- 4) 左縮小条件：画面の左端方向に縮小なし条件の映像を 80%に縮小

注意喚起情報表示機能では、縮小無し条件の映像に画面右端から左方向へ移動する矢印を重ねる機能を使用し、無視領域への注意喚起として動的刺激条件を実施する（図 17）。

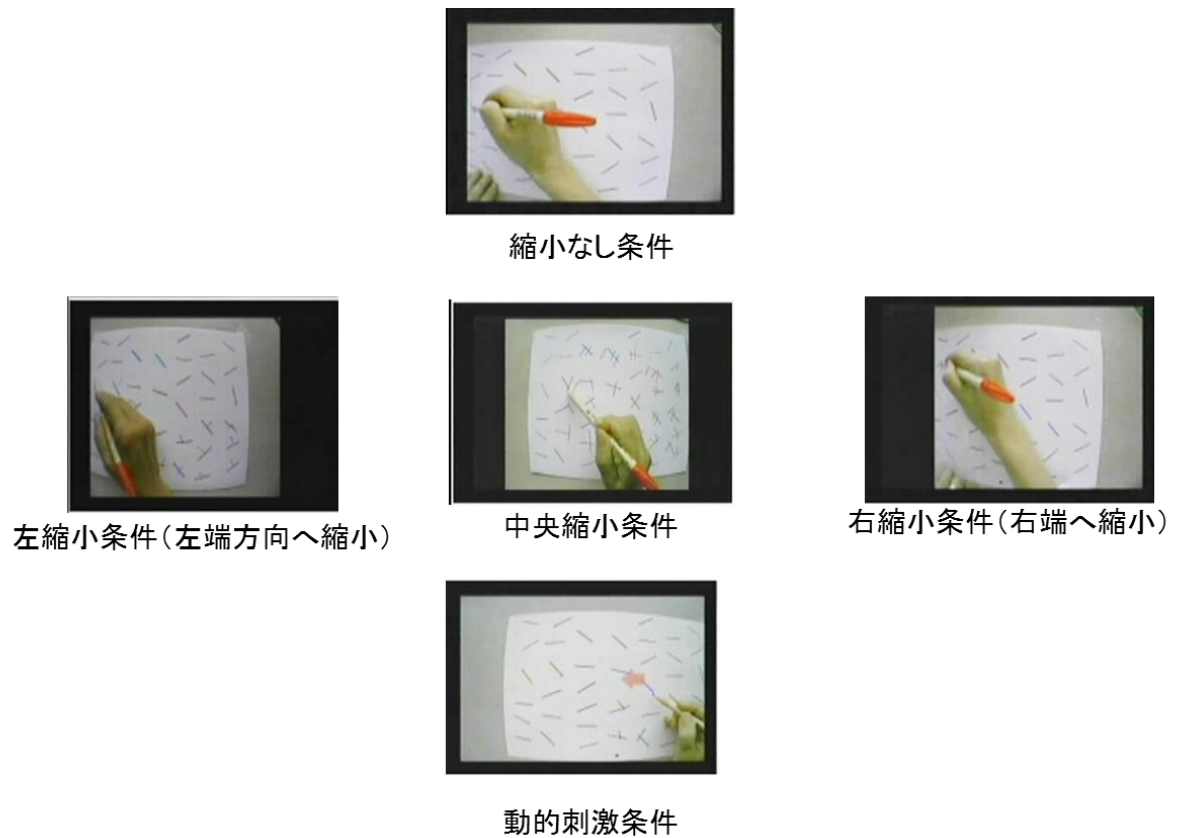


図 17：視覚情報呈示

(b) 眼球運動・頭部運動・体幹運動の同時計測

眼球運動を計測するために、HMD 内に超極小サイズ CMOS カメラ (MO-S788-4F) を設置した。本装置の CMOS カメラはビデオシステム NTSC、水平同期周波数 15.734kHz、垂直同期周波数 60Hz、最低照度 0.05Lux となっており、モノクロであるが CMOS カメラの中では高感度となる。有効画素数は 25 万画素 (510×492 Pixels)、サイズは 8.0×8.0mm(W×H)である (図 18)。ユニット内の CMOS カメラは、右眼球がモニター中央に映るように検査者が手動で調整する。また、HMD 装着時はユニット内が暗視野になるため、超小型赤外線ライトを照射し撮影した。

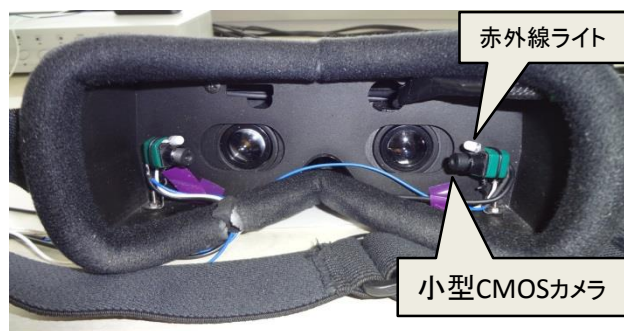


図 18 : HMD ユニット内部

体幹・頭部の運動についてはデジタルビデオカメラ用いて背面より撮影し、机上検査中の映像と眼球運動についてもモニター分割器を利用して同期入力し、4 分割画面として出力した映像 (図 19) を HDD に保存するシステムである。

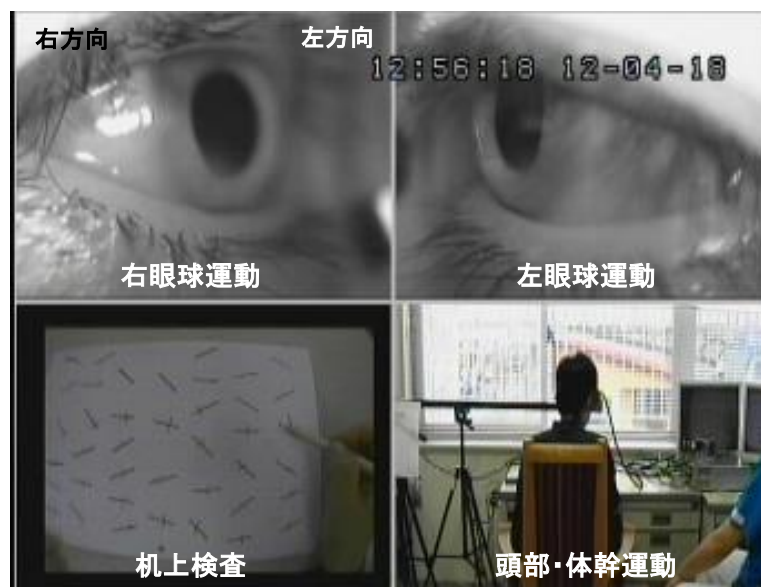


図 19：4 分割画面出力映像

3.2 新たな検査方法

3.2.1 HMD を用いた多様な視覚呈示による机上検査

被験者は椅座位を基本測定肢位とする。身体正中位に検査用紙を配置し、HMD を装着しない条件で線分抹消試験の評価を行う。次に、HMD ユニットを装着し、液晶画面の中央に評価用紙が写る状態をモニターで確認後、縮小なし条件、中央縮小条件、右縮小条件、左縮小条件、注意喚起条件の検査を行う。

3.2.2 眼球運動分析

(a) 眼球運動解析

撮影した眼球運動は、動作解析ソフト Frame-DIAS IV を用いて解析した。解析では、画像の2値化処理により得られた楕円状瞳孔位置より（図 20）、サンプリング周波数 20Hz で眼球中心位置（X1、Y1）を座標化（pixel）し、以下の式により眼球運動角度を換算し求め、眼球運動角速度を算出した。眼球運動の観察・記録は開眼で行われるが、瞬目により観察・記録が阻害された際のデータは未使用とした。

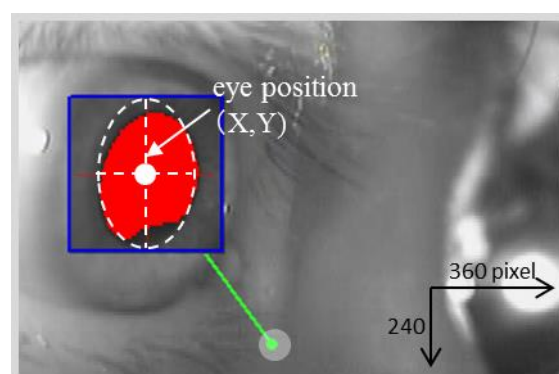


図 20：眼球中心の位置（X1、Y1）

(b) 眼球運動角度換算式

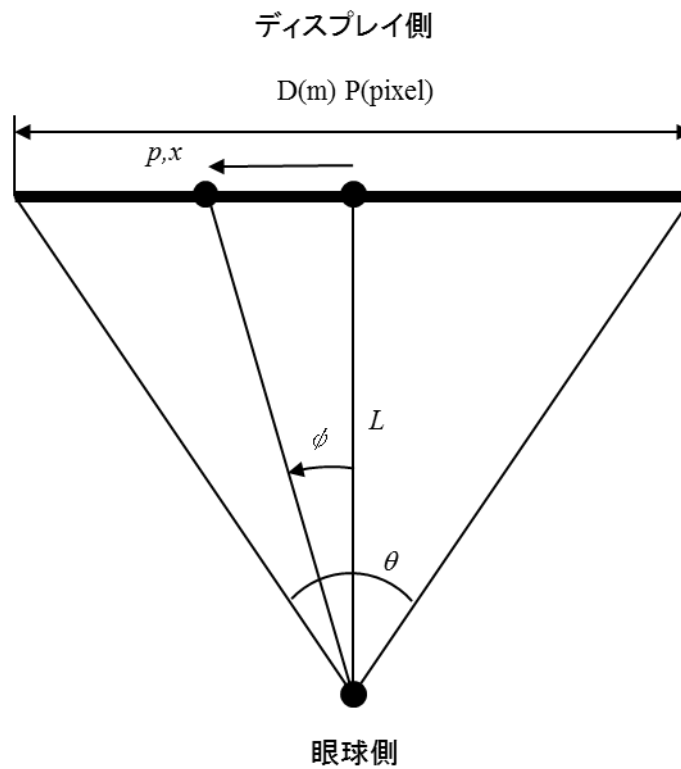


図 21 : 角度換算シェーマ

カメラから撮影面までの距離を $L(m)$ 、撮影された画面の最大幅を $D(m)$ 、ビデオ画像の最大幅 $P(pixel)$ 、画角を $\theta(deg)$ 、画面中心から点までの距離を $x(m)$ 、 $p(pixel)$ 、画面中心から点までの角度を ϕ とする (図 21)。

このとき、距離 L と最大幅 D 、画角 θ は次式の関係となる。

$$\frac{D}{2L} = \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

同様に、点の位置 x と画面中心から点までの角度 ϕ は次式の関係となる。

$$\frac{x}{L} = \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2)$$

式(1)(2)より、点の角度 ϕ は位置 x から、次式で算出される。

$$\phi = 2\tan^{-1}\left(\frac{2x}{D}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) \quad (3)$$

一方、点の位置 x と画面上の点の位置 p 、ビデオ画像の最大幅 P は次式の関係となる。

$$x = \frac{D}{P} p \quad (4)$$

式(4)を式(3)に代入すれば、点の角度 ϕ は次式で求められる。

$$\phi = 2\tan^{-1}\left(\frac{2p}{P}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) \quad (5)$$

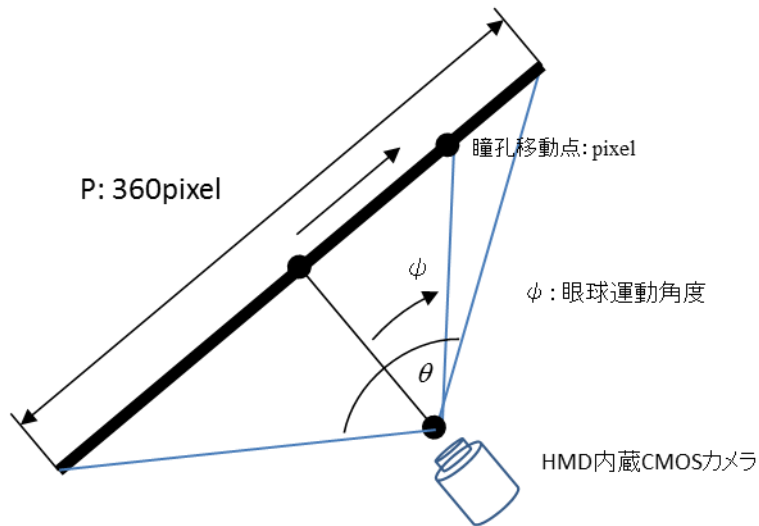


図 22 : HMD 内 COMS カメラ眼球運動角度計測イメージ (水平面 : X 方向)

本機器の計測条件より以下の数値を入力し（図 22）、換算式を求める。

HMD 内蔵 CCD カメラ画角（ θ ）：65.4 度

ビデオ画像の最大幅 P(pixel)：360pixel

画面幅	P	360	pixel
画角	θ	65.4	deg
		1.141	rad
$\tan(\theta/2)$	$\tan(\theta/2)$	0.642	

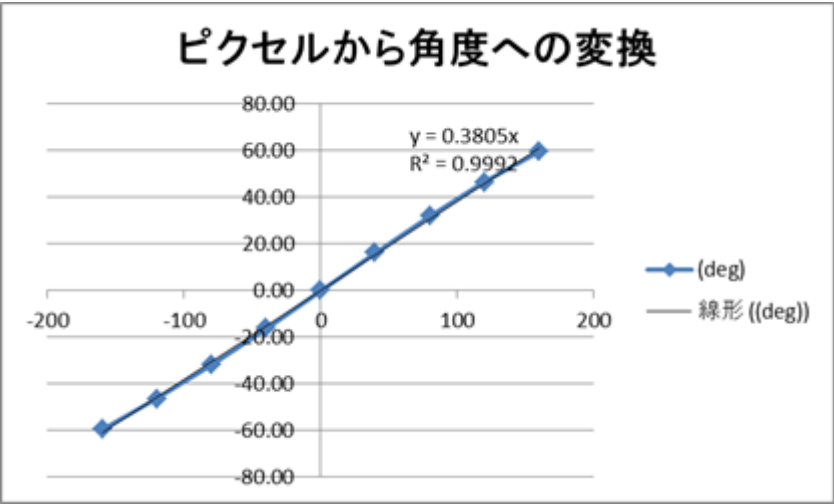


図 23：眼球運動角度換算

上記の Pixel から眼球運動角度換算より次式（6）が成立する（図 23）。

$$Y=0.385x \text{ (Y: deg x: pixel)} \quad (6)$$

サンプリング周波数 20Hz で求めた眼球角度より、0.05 秒毎の眼球角度変位（ Δ deg）から眼球運動角速度を算出した（図 24）。

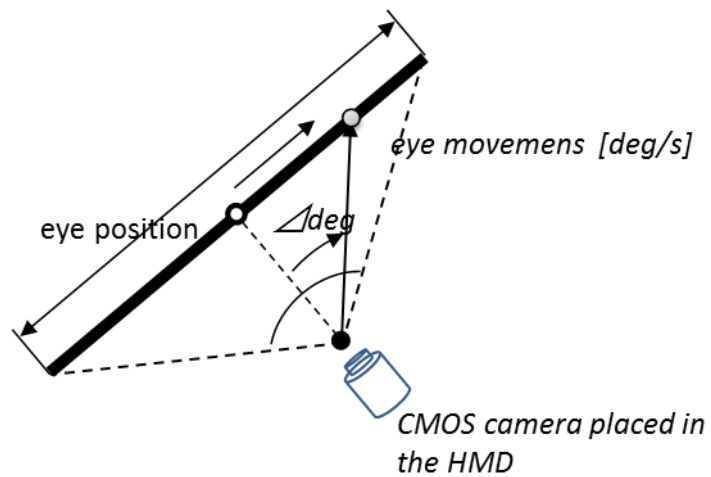


図 24：眼球運動角速度

また、4 分割画面のモニターを見ながらユニット内の CMOS カメラで方眼用紙を撮影した結果、画像の両端で歪みを確認した（図 25）。また、被験者によっては、上眼瞼やまつ毛が下垂した場合等で瞳孔が隠れる際には、二値化処理に難渋する場合は生じた。更に、HMD の装着において CMOS カメラと眼球が接近すると画面内に眼球が大きく投影されるため、二値化処理の自動認識が困難となり、瞳孔が認識されない場合は生じた。

そこで本研究では、HMD を装着する際にはまつ毛の方向を修正し、CMOS カメラの角度を調整し、装着することとした。

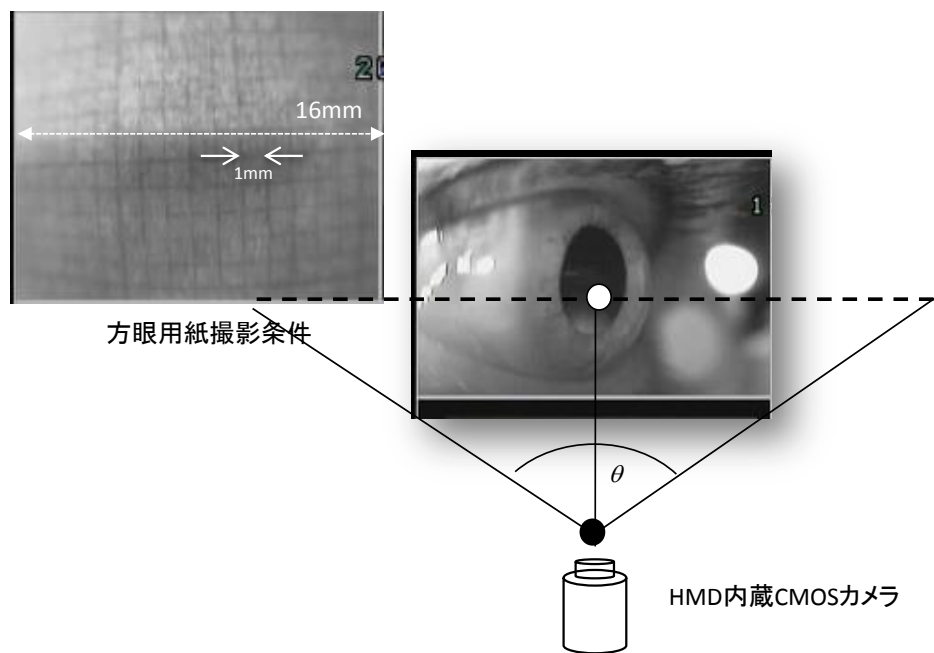


図 25 : HMD 内 CMOS カメラ眼球運動角度計測イメージ

(c) 眼球偏位

眼球偏位は、評価用紙の中央を注視した際の眼球位置を基準点とし、水平方向の眼球運動角度 1 度毎のヒストグラムより、課題実施中の眼球位置分布を求め（図 26）、左右紙面の眼球比率を算出した。

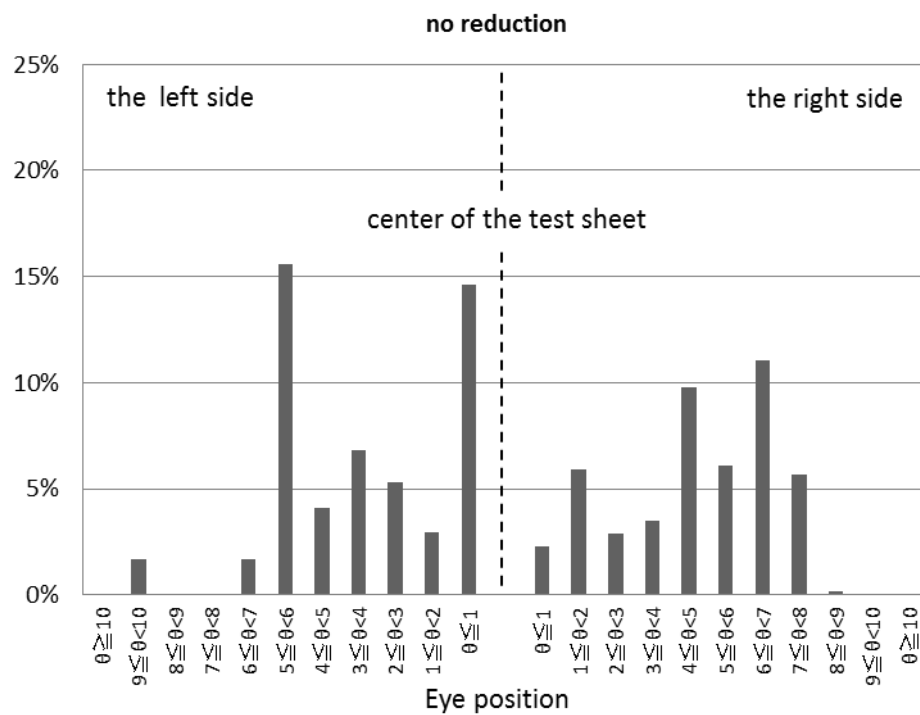
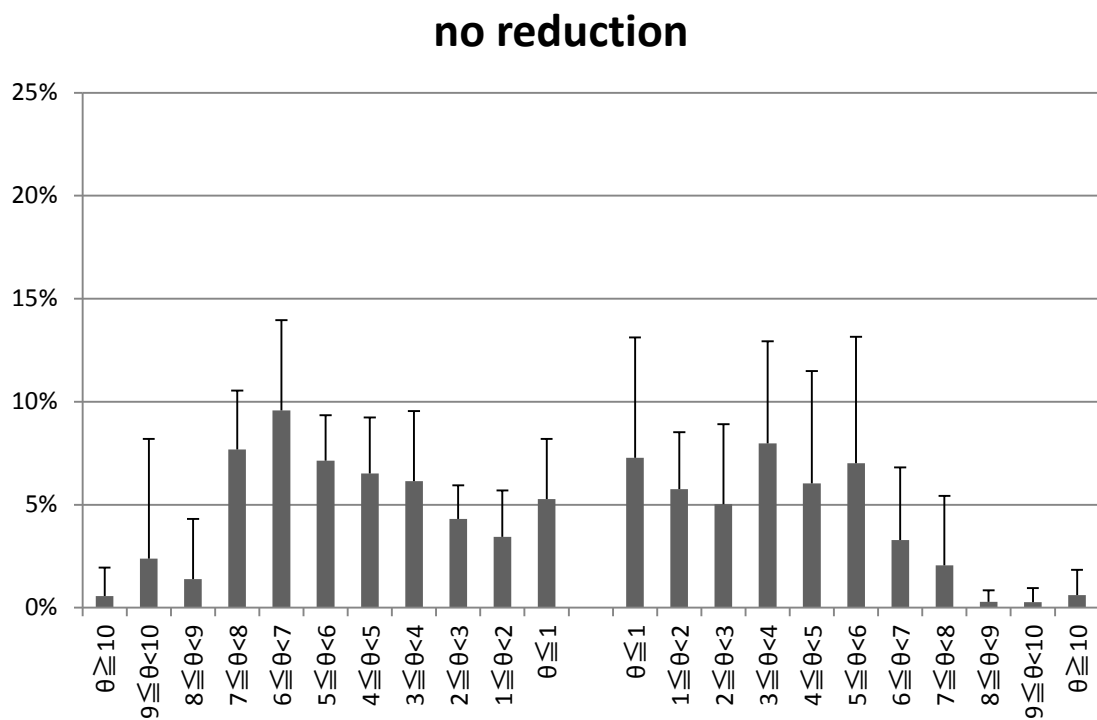


図 26：縮小無し条件の眼球位置分布（健常者代表例）

3.2.3 健常者による新たに考案した HMD システムの検証

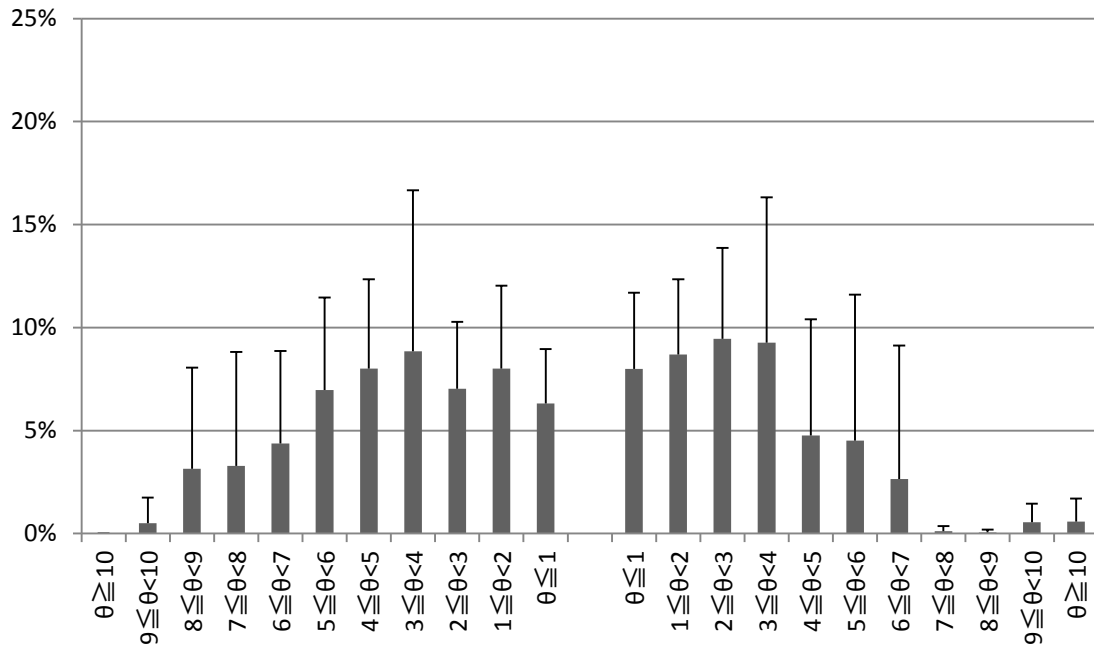
健常成人 5 例（右利き、利き目は右側）に対し、HMD システムによる視覚情報呈示による眼球運動の解析を行い、眼球位置分布（図 27）、眼球運動偏位（図 28）と左右紙面を抹消中の眼球運動角速度（図 29）を求めた。

(a) 眼球位置分布



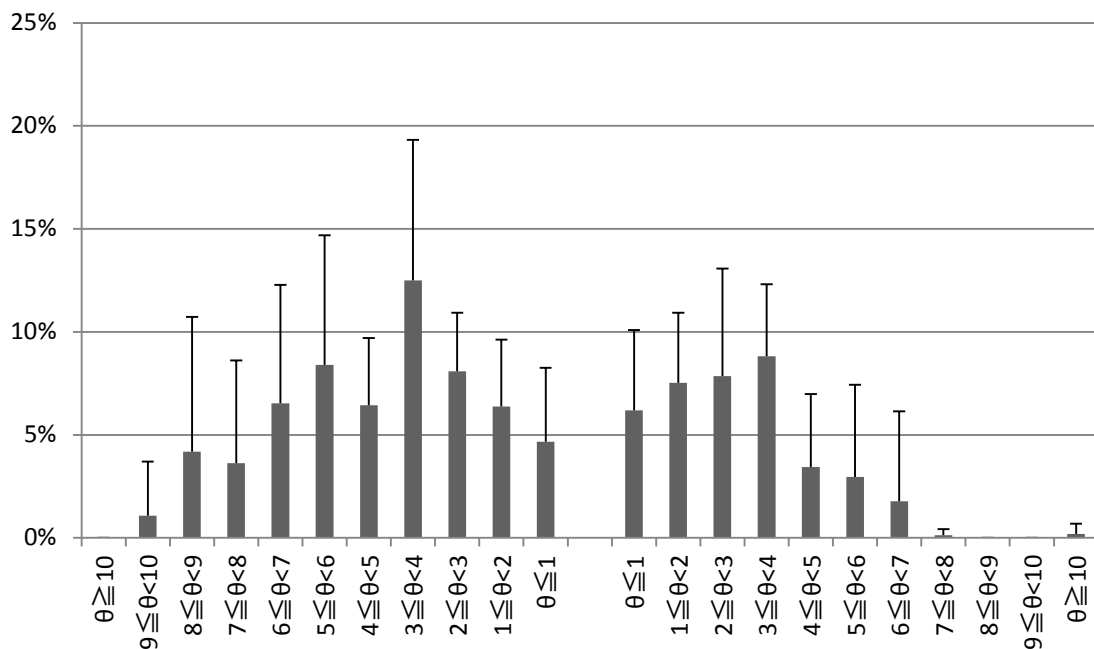
縮小なし条件の眼球位置分布（健常人）

center reduction



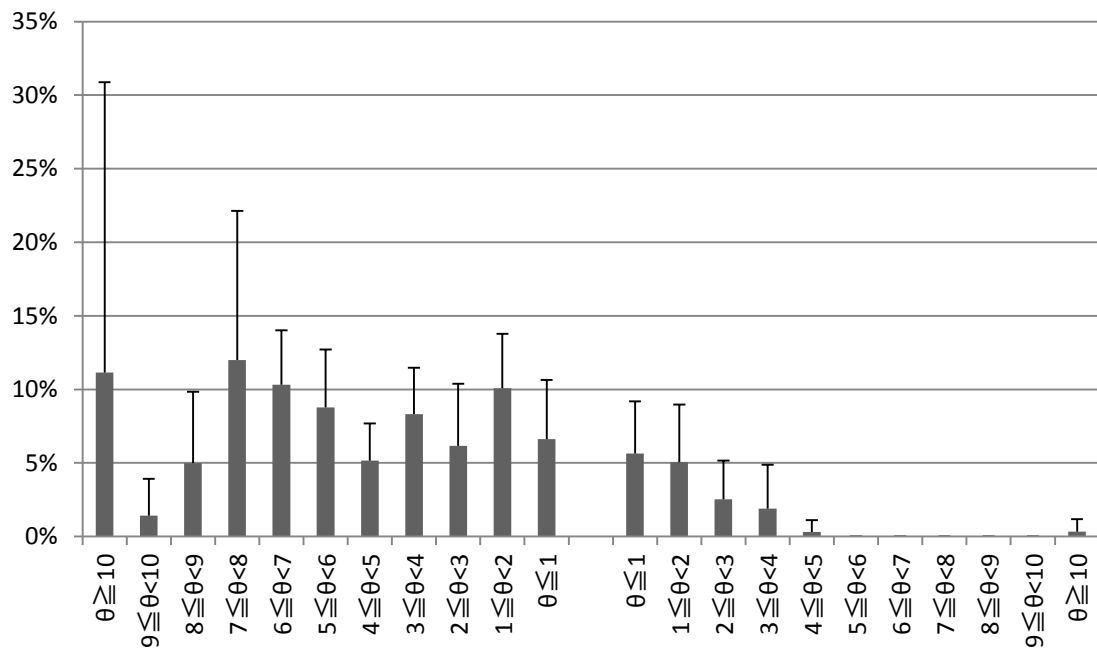
中央縮小条件の眼球位置分布（健常人）

rt reduction



右縮小条件の眼球位置分布（健常人）

It reduction



左縮小条件の眼球位置分布（健常人）

図 27：眼球位置分布

眼球運動位置分布（図 27）より、眼球位置は左縮小条件を除き、左右方向 10 度以内であった。先行研究より、眼球運動で 15 度以上の範囲を見る場合には頭部が動き、数十度周辺に視線を移動する場合は、まず頭部が動き、その後眼球を動かし、対象を視野中心に捉えると報告されている[57]。本研究で用いた課題は、左縮小条件を除き、眼球位置分布が左右方向 10 度以内であったことより、通常では頭部運動を必要としない課題と考えられる。左縮小条件については、左方向の運動角が 10 度以上示す分布が平均で 10%であった。本システムでは机上の評価用紙を上方から左右 2 つの CCD カメラで撮影しており、被験者全員の利き目が右側であったため、紙面を撮影している左右 2 入力の CCD カメラの内、右側の映像を参照した可能性が考えられた。そのため、2 入力の場合に比べ右方向に見える評価用紙を注視するため、左縮小条件の場合、左方向に眼球を移動する必要性が生じたと考えられた。

上記の理由より、左方向の眼球運動角が 10 度以上にも分布したと推測される。以上より、視覚情報呈示の際には、利き目を考慮した呈示が必要と考えられた。

(b) 眼球運動偏位

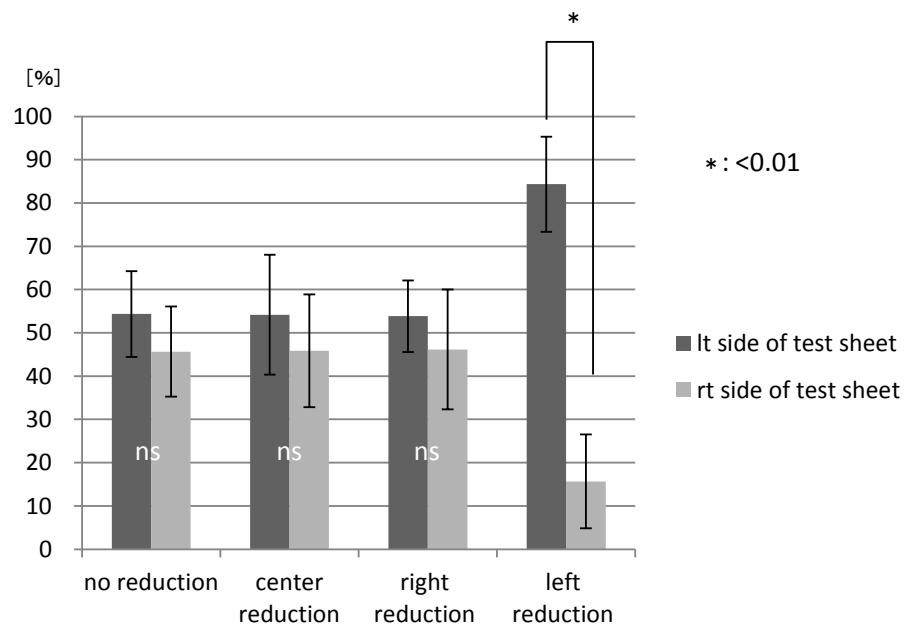
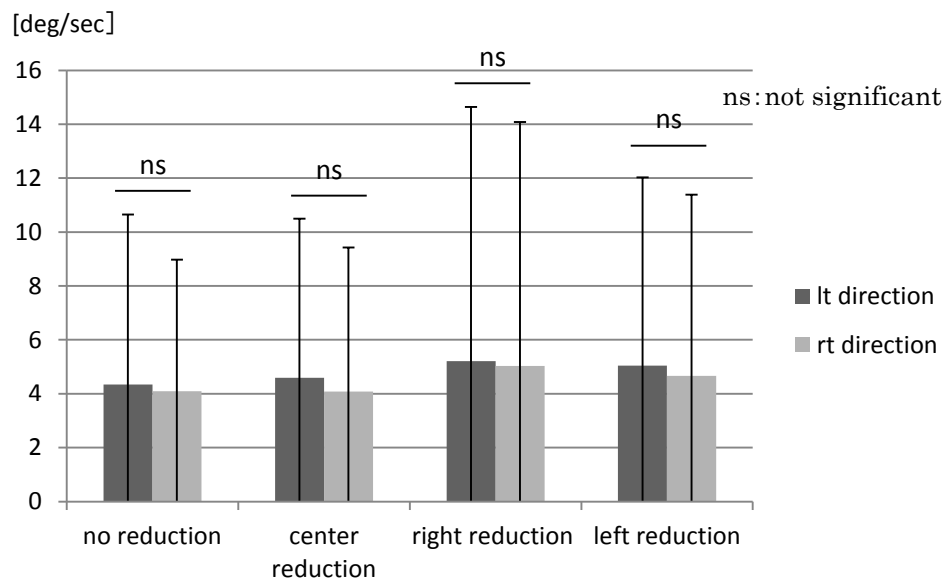


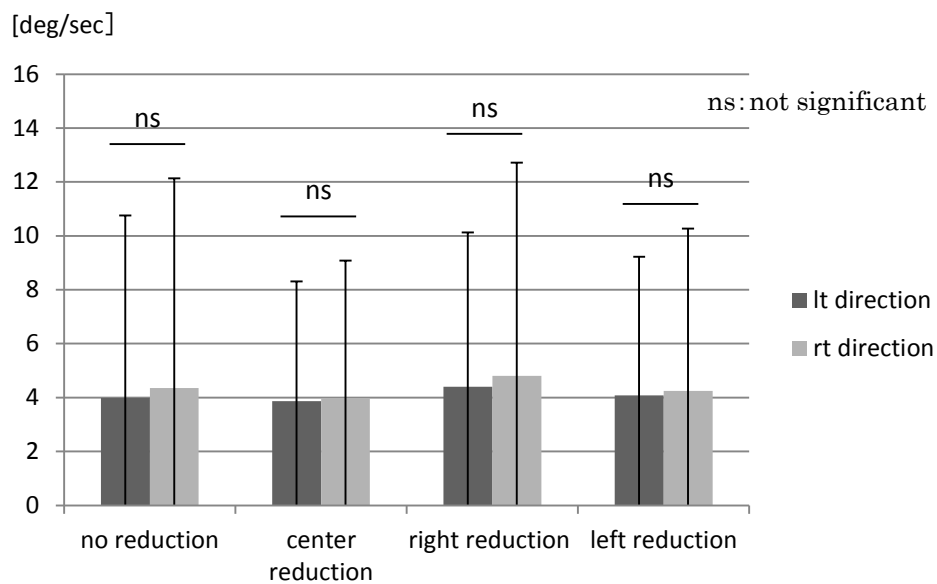
図 28：眼球運動偏位

縮小なし条件、中央縮小条件、右縮小条件で左側の眼球位置の割合が大となる傾向を示すが有意差は認めなかった。しかし、左縮小条件では左側位置の割合が大となり有意差を認めた（図 28）。

(c) 眼球運動角速度



眼球運動角速度（左紙面）



眼球運動角速度（右紙面）

図 29：左右紙面眼球運動角速度

眼球運動角速度は左右紙面において、左紙面では左方向が、右紙面では右方向の速度が速くなる傾向を示したが、左右方向の眼球運動角速度に差を認めなかった。また、健常者の

場合、左右紙面において、視覚情報呈示の条件による差を認めなかった（図 29）。

(d) 眼球・頭部・体幹運動分析

本研究の眼球位置分布は（a）の結果より、健常人では頭部運動が生じない課題と推測され[57]、本研究の眼球・頭部・体幹運動分析では、左紙面の抹消時にペン先に追従して僅かに体幹が左回旋し、頭部の回旋を認めなかった（図 30）。水平方向 360 度視野で、視覚探索課題時の頭部と眼球運動の関係を検討した報告では、頭部が胸部に対して左側（右側）を向いている時は、眼球位置の平均は頭部方向に対して左（右）に偏り、頭部が胸部に対して正面を向いている時には、頭部に対して正面に集中する傾向があると述べている[58]。以上より、本装置の眼球・頭部運動の同時計測により、眼球・頭部・体幹の病的な運動特性を明らかにすることが期待できる。

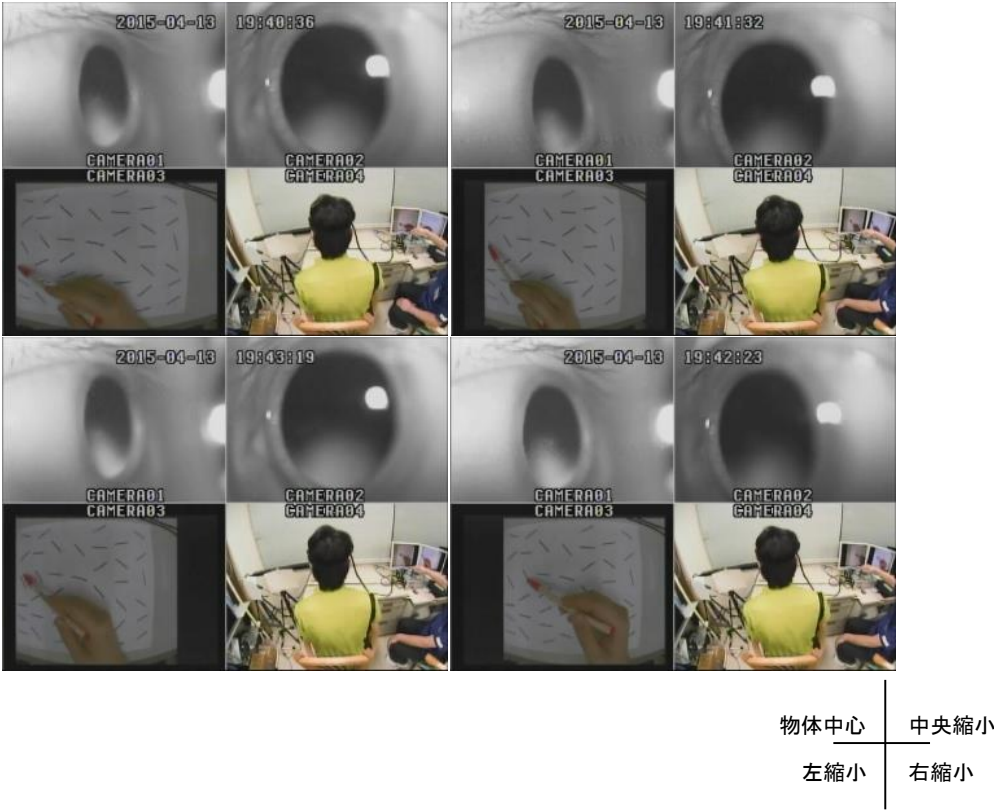


図 30：健常人線分抹消試験時の紙面抹消

3.3 3章のまとめ

座標系理論による新たな評価システムについて、健常者による眼球運動の評価検討を通して検査システムの特性を調べ、評価方法を確立した。

正常者の眼球位置は左縮小条件を除き左右方向 10 度以内で、机上検査中の眼球運動偏位は有意差を認めなかった。しかし、左縮小条件については、2 入力で評価用紙を撮影しているため、被験者の利き目の影響を受ける可能性が示唆された。また、健常者では眼球運動角速度は左右方向において有意差を認めず、視覚情報呈示の条件による影響を認めないことが確認された。

先行研究より、健常人では眼球・頭部・体幹運動が協調的に働くことから、本装置の眼球・頭部運動の同時計測の分析により、VFD や USN の眼球・頭部・体幹の病的な運動特性を評価できる可能となる。

第4章 視空間認知障害の定量的評価に対する有用性の検討

4.1 VFD 患者の視空間認知評価

本節では第3章で開発した HMD を利用した新たな評価システムを用い、実際の VFD 患者 1 例に使用した結果について述べる。

4.1.1 実験方法

(a) 対象

対象は、本研究の説明に対し同意を得た 43 歳女性である。身辺動作は自立しているが、左視野に高度の視野障害が認められ、ゴールドマン視野計で右上 1/4 の一部を残すのみであった（図 31）。CBS により ADL 上の問題点を抽出した結果、左側の物を探せない等の視野障害による影響を認めた（図 32）。

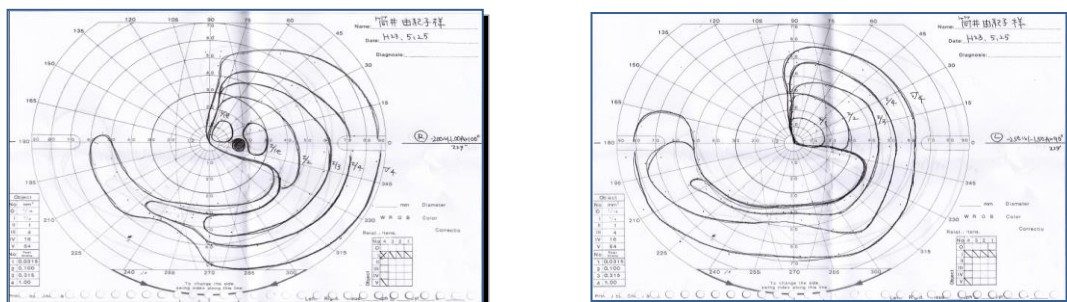
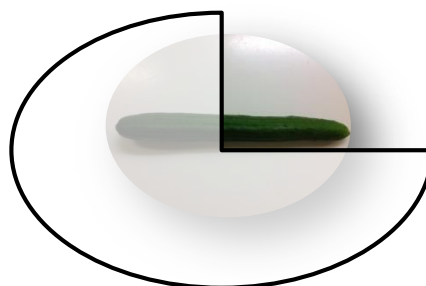


図 31：視野評価



残存視野が右上1/4しかないので、
きゅうりを半分に切ることが難しい

図 32：VFD 患者の視空間認知障害イメージ

表 3 : VFD 症例 CBS スコア

項 目	スコア
1. 整髪または髭剃りのとき左側を忘れる	0
2. 左の袖やスリッパの装着するのが難しい	0
3. 皿の左側の食べ物を食べ忘れる	0
4. 食事の後、口の左側を拭くのを忘れる	0
5. 左を向くのに困難さを感じる	2
6. 左半身を忘れる	0
7. 左側からの音や左側にいる人に注意をすることが困難である	1
8. 左側にいる人や物(ドアや家具)にぶつかる(歩行・車椅子駆動時)	1
9. よく行く場所やリハビリ室で左に曲がるのが困難である	2
10. 部屋や風呂場で左側にある所有物を見つけるのが困難である	2
	8

各項目0～3点で評価(0～30点)

0: 無視なし

1: 軽度の無視(常に右の空間から先に探索し、左の空間に移るのはゆっくりで、躊躇しながらである。時々左側を見落とす)

2: 中等度の無視(はっきりとした、恒常的な左側の見落としや左側への衝突が認められる)

3: 重度の無視(左側をまったく探索できない)

(b) 手順

被験者は椅座位を基本測定肢位とした。まず HMD を装着しない状況で、通常評価として線分抹消試験を実施する。次に、検者によりモニター中央に右眼球が映るように、HMD ユニット内の COMS カメラを調整した後、被験者に HMD を装着し計測を開始した。検者が指示した評価用紙の中央を 10 秒注視させ、眼球偏位を分析する際の基準点として眼球映像を記録した。VFD 患者に行う HMD による評価は次の 3 とおりの条件を実施した。1) HMD を装着し、上方に固定した 2 つの小型 CCD カメラで机上検査用紙を写す縮小なし条件、2) 画面の右端方向に 80%に縮小した右縮小条件、3) 画面の左端方向に 80%に縮小した左縮小条件で、この順に実施した。

(c) 分析項目

視空間認知評価としては、線分抹消試験の中央列 4 本を除いて紙面を左 (lt side) と右 (rt side) に 2 分割し、左右それぞれの紙面で抹消した線分の正答率を求め、各条件に対して行い比較検討した。眼球運動解析は、第 3 章の方法を用い、評価用紙の中央を注視した眼球

位置を基準点とし、眼球位置の左右比率を求めた。また、左右紙面抹消時の眼球運動角速度を算出し、左右方向の眼球運動角速度の比較を行った。なお、計測した眼球運動角速度には、急速眼球運動も含まれているため、先行研究より 100 (deg/s) 以上の数値は除外した[59]。

4.1.2 結果・考察

(a) 視空間認知評価

線分末梢試験の成績を図 33 に示す。HMD 装着により大きな成績の低下は見られなかったが、検査用紙映像の縮小により、成績の低下を認めた。この結果は、開発システムが患者の視覚入力に大きな影響を与えており、障害の著しい方向に注意が偏位した結果、対側の見落としが多くなったことを示している。

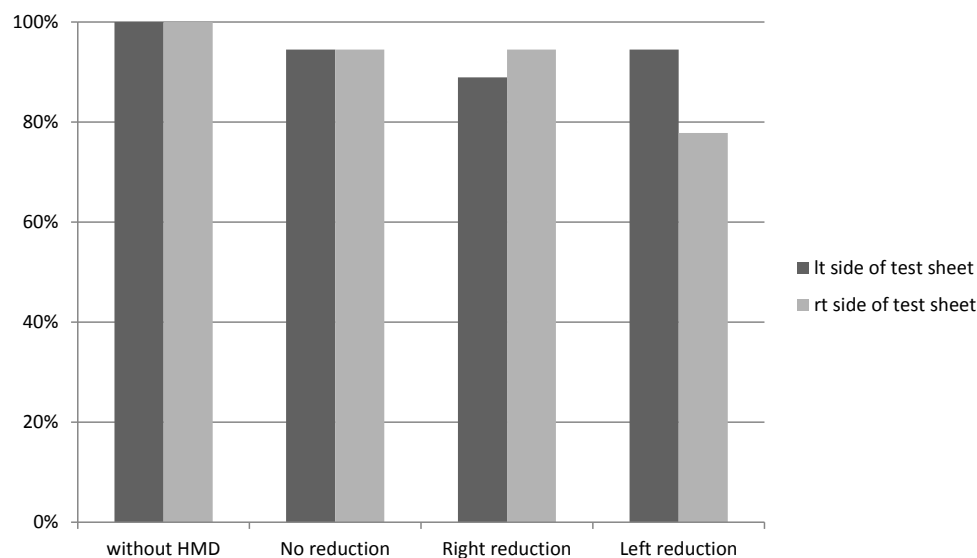


図 33：線分抹消試験の正答率

(b) 眼球運動偏位

計測した眼球位置の左右比率を図 34 に示す。眼球位置の比率は、縮小なし条件では左紙面で多く、右縮小条件では右紙面、左縮小条件では左紙面で比率が多かった。この原因に

については、次のように考えられる。縮小なし条件では、視野障害が重度な左紙面に注意が向き、左位置の割合が多い。右縮小で右位置の割合が増加、左縮小で左位置の割合の増加は、縮小した方向に注意が向いていることを示している。このように、本システムによる多様な視覚情報呈示により、視野障害の多面的な解析が可能となった。

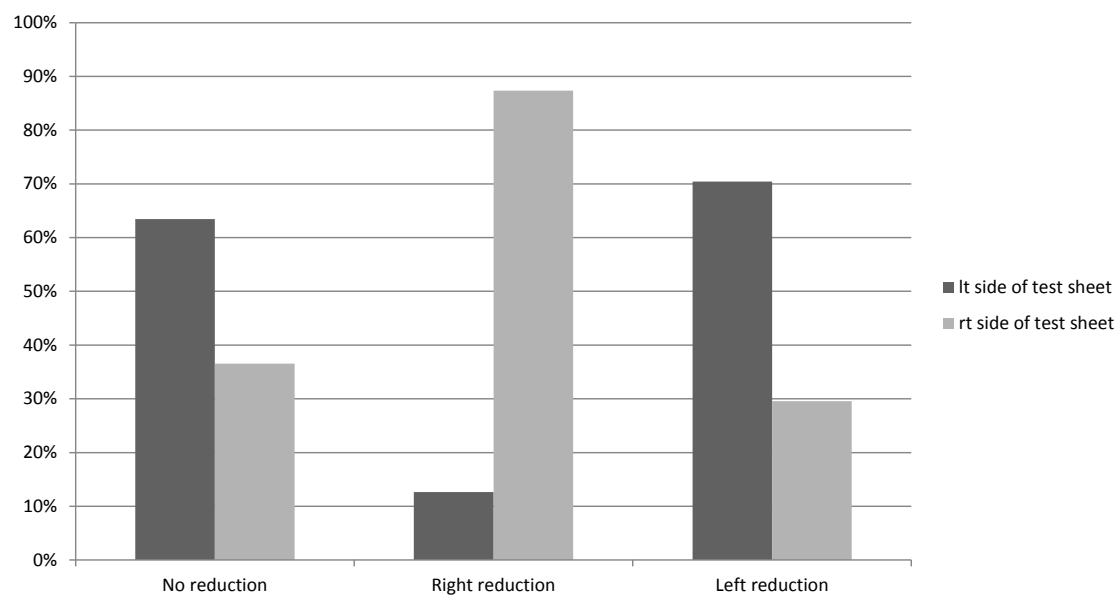


図 34：眼球運動偏位

(c) 眼球運動角速度

眼球運動の角速度の計測結果を図 35 に示す。検査用紙映像の縮小により、残存視野側では角速度が増加し、左縮小条件では障害視野方向の角速度が有意に減少した。これは、縮小により、残存視野では視線を速く動かしてそれに対処しようとするのに対し、障害視野では素早く視覚探索する眼球運動が困難になるためと考えられる。

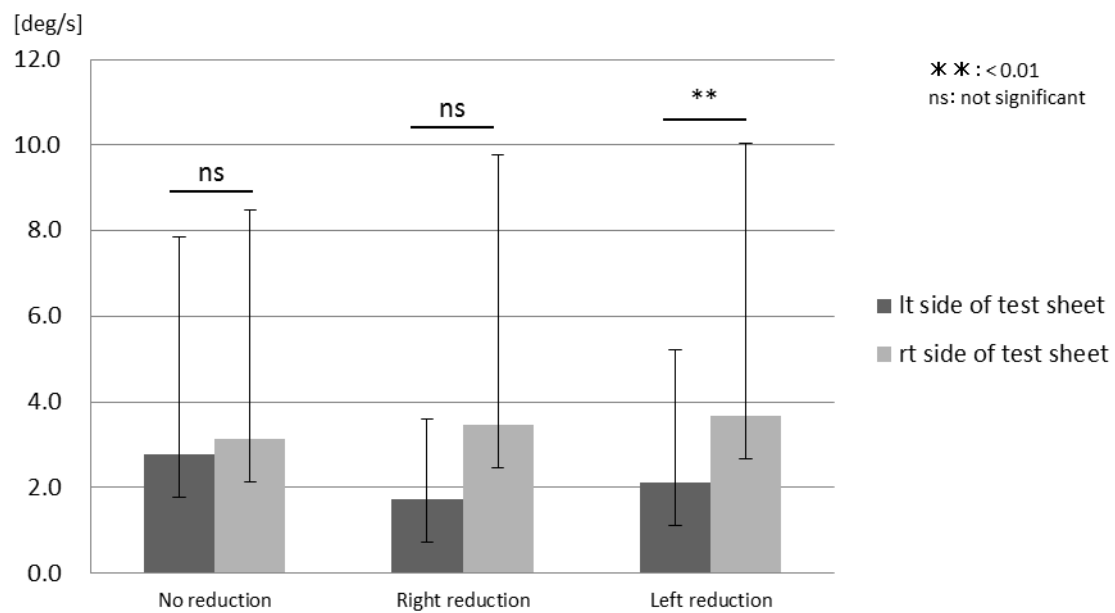


図 35 : 眼球運動角速度

(d) 頭部・体幹運動分析

眼球運動の計測と同時に頭部・体幹運動を評価した。その結果、本症例では眼球運動に伴う頭部運動は認められなかった。しかし、左縮小条件で体幹が左側方向に偏位しており、体幹の代償を認めた（図 36）。これにより、今回の検査において、本症例の VFD 患者は、体幹の運動で代償していることが確かめられ、本システムを用いて、眼球の代償運動を評価できることが示された。



no reduction



condition of left reduction

condition of right reduction

図 36 : 動作分析

4.2 USN 患者の視空間認知評価

4.2.1 実験方法

(a) 対象

患者は、MRI により右中大脳動脈に梗塞を認めた 63 歳の女性である（図 37）。運動麻痺は認めないものの、移動場面で見守りが必要で、MMSE (Mini Mental State Examination) は 28/30 点、BIT では通常検査 118 点（カットオフ：131 点）であった[7]。CBS により ADL 上の問題点を抽出した結果[8]、左側の物を探せない、人や物に衝突する等認め、左 USN を呈していた（表 4）。

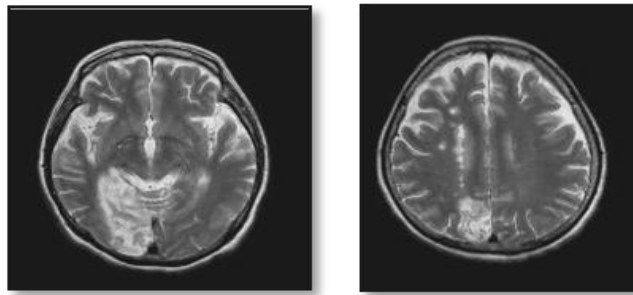


図 37 : MRI (T2 強調画像)

表 4 : USN 症例 CBS スコア

項 目	スコア
1. 整髪または髭剃りのとき左側を忘れる	0
2. 左の袖やスリッパの装着するのが難しい	0
3. 皿の左側の食べ物を食べ忘れる	0
4. 食事の後、口の左側を拭くのを忘れる	0
5. 左を向くのに困難さを感じる	2
6. 左半身を忘れる	0
7. 左側からの音や左側にいる人に注意することが困難である	1
8. 左側にいる人や物(ドアや家具)にぶつかる(歩行・車椅子駆動時)	1
9. よく行く場所やリハビリ室で左に曲がるのが困難である	2
10. 部屋や風呂場で左側にある所有物を見つけるのが困難である	2
	8
各項目0～3点で評価(0～30点)	
0: 無視なし	
1: 軽度の無視	
2: 中等度の無視	
3: 重度の無視(左側をまったく探索できない)	

(b) 手順

4.1 と同様に被験者は椅座位を基本測定肢位とした。まず HMD を装着しない状況で、通常評価として線分抹消試験を実施する。はじめに、検者により右眼球がモニター中央に映るように、HMD ユニット内の COMS カメラを調整した後、被験者に HMD を装着し計測を開始した。次に、検者が指示した評価用紙の中央を 10 秒注視させ、眼球偏位を分析する際の基準点として眼球映像を記録した。USN 患者に行う HMD の評価は次の 4 通りの条件とした。1) 上方に固定した 2 つの小型 CCD カメラで机上検査用紙を写す縮小なし条件、2) 評価用紙の映像を画面中央方向に 80%縮小した中央縮小条件、3) 画面の右端方向に 80%に縮小した右縮小条件、4) 無視領域への注意喚起として、縮小無し条件の映像に右側から左側に移動する矢印を重ねる動的刺激条件、この順に実施した。

(c) 分析項目

分析項目は、4.1.1 と同様とした。

4.2.2 結果

(a) 視空間認知評価

線分末梢試験の成績を図 38 に示す。左紙面については通常検査で 67%、HMD 装着した縮小なし条件で 39%であったが、検査用紙映像の中央縮小で 50%となり、右縮小により 78%と改善し、動的刺激条件においても成績の向上を認めた。

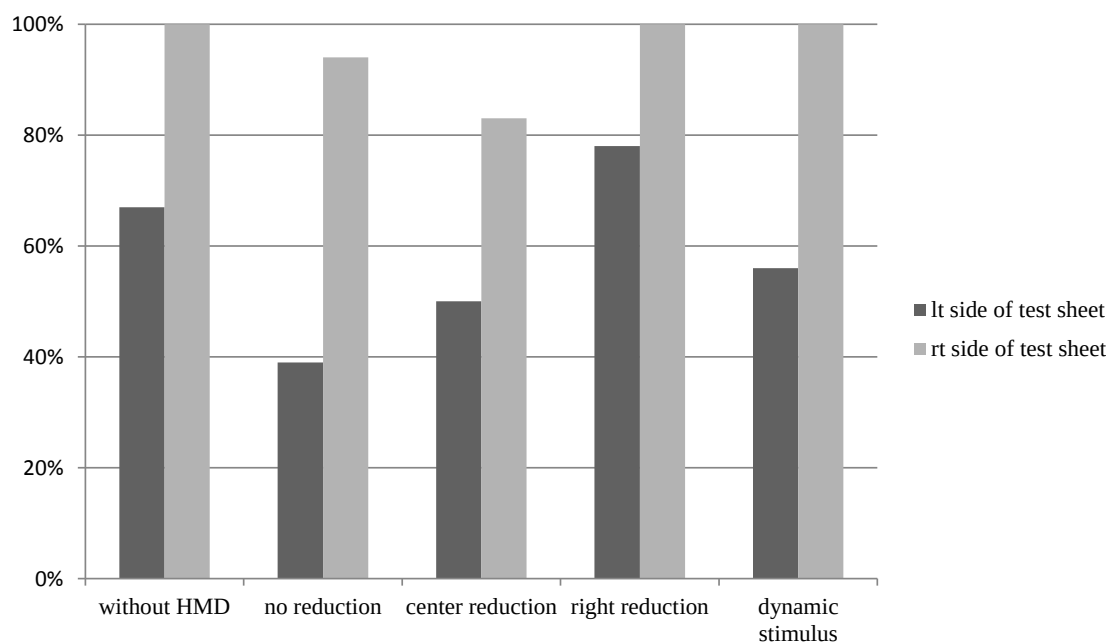


図 38：線分抹消試験の正答率

(b) 眼球運動偏位

眼球位置の比率は、縮小なし条件では眼球位置が右に偏位していたが、中央縮小条件で 12%、右縮小条件で 22%、動的刺激条件 35%の順で左紙面の比率が増大した。（図 39）。

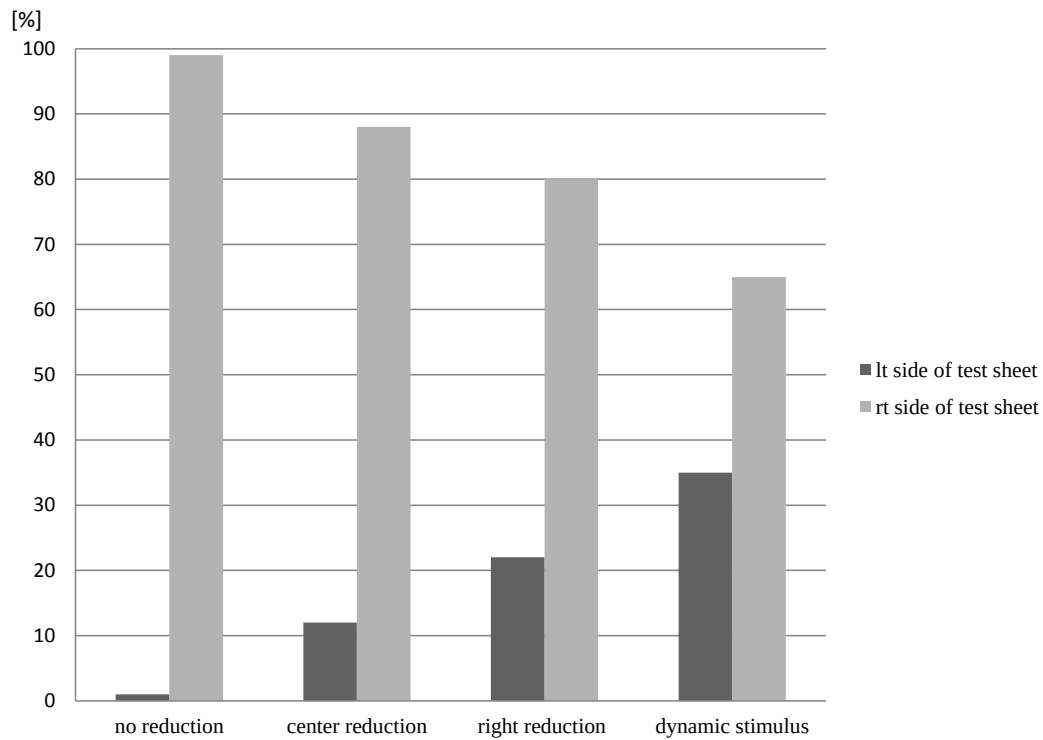


図 39：線分抹消試験中の眼球運動偏位

(c) 眼球運動角速度

眼球運動の角速度の計測結果を図 40 に示す。左紙面の縮小なし条件では、眼球運動の位置が右に偏位しており計測はできなかったが、中央縮小条件が最も速く、左紙面では無視方向が速くなる傾向を示した。右紙面では無視方向の眼球運動角速度が遅く、全ての条件で有意差を認めた。

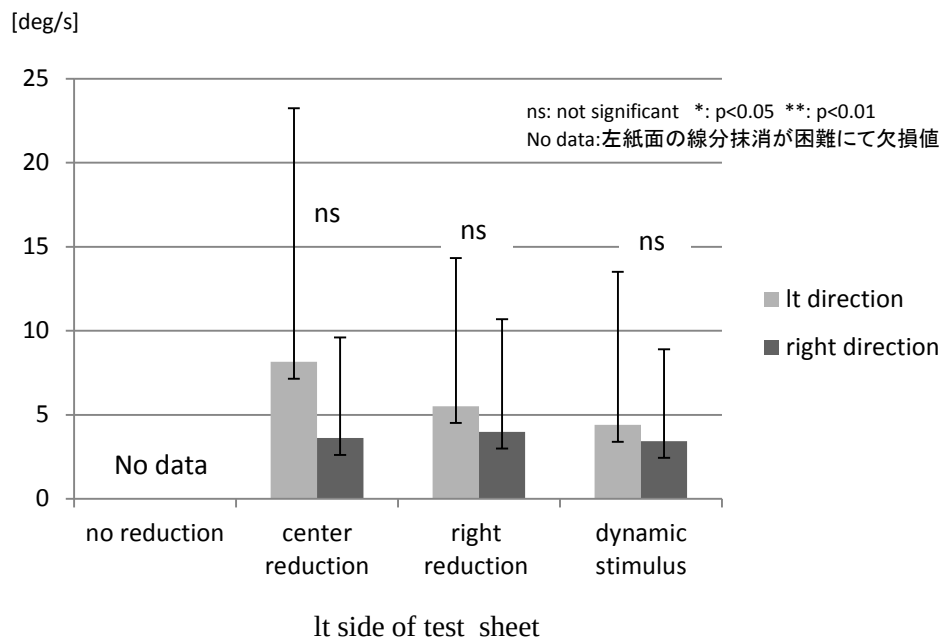
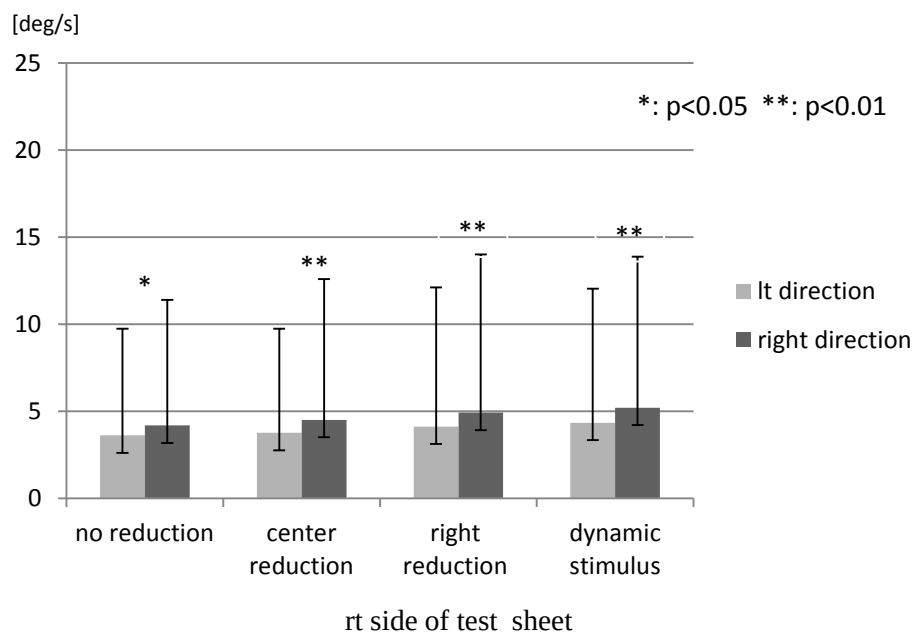


図 40：線分抹消試験中の眼球運動角速度

(d) 頭部・体幹運動分析

眼球位置や眼球運動の計測と同時に頭部運動の計測をした結果、本症例では縮小なし条件と比較し、中央縮小と右縮小条件では左側方向の頭部運動を認めた（図 41）。図 39 より

眼球運動は右方向に偏位しており、眼球と頭部運動の方向に解離を認めた。

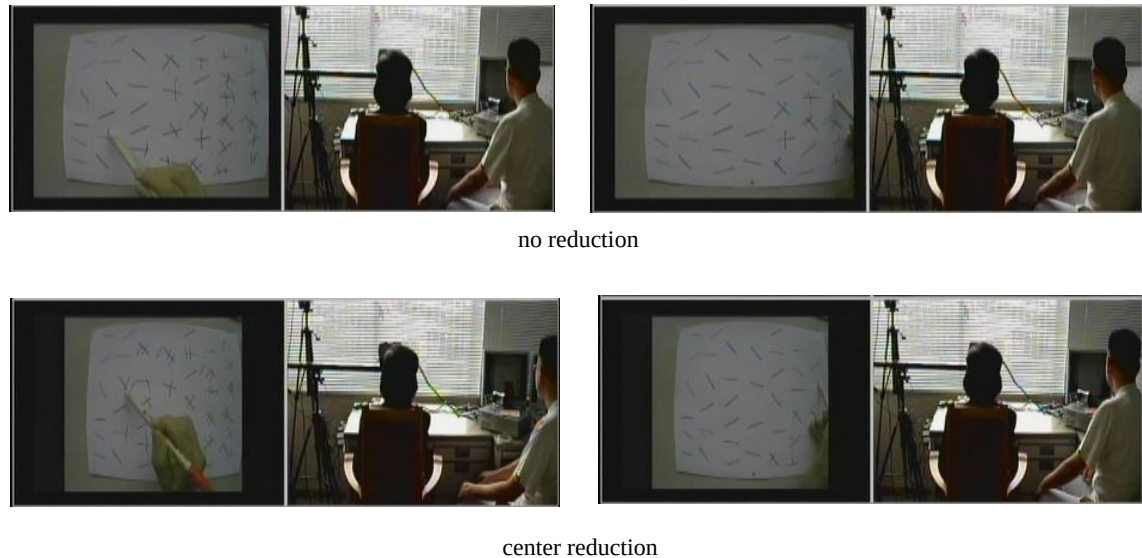


図 41：動作分析

4.2.3 考察

線分抹消試験の結果、左紙面については HMD を装着した縮小なし条件と比較し、中央に縮小した条件で抹消率が改善した。右縮小により更に改善し、動的刺激条件で中央縮小条件と同程度の正答率となった。この結果は、視覚情報呈示が患者の視覚探索に影響を与え、無視空間に注意が移動した結果、左側紙面の見落としが減少したことを示している。

眼球位置の比率は、縮小なし条件では右紙面で多く、中央縮小条件、右縮小条件、動的刺激条件の順で、左紙面の比率が増大した。この結果は、HMD により周囲の影響を除外したことより左紙面に注意が向かなくなり、右位置の割合が多くなったと考えられる。

Niemeier は線分の探索にフレームを設けるとその中で左に向きにくく、右に向きやすい注意の勾配が強くなると述べ[55]、HMD 内の液晶ディスプレイのフレームにより、注意が右方向に偏位した可能性が考えられる。また中央縮小、右縮小で左位置の割合が増加したことは、無視領域を除外して液晶ディスプレイの領域に評価用紙を呈示した結果、左紙面の

線分の抹消が容易になり、ペン先に追従して注視点が左側に移動し、眼球運動の偏位が改善したと推測される。更に、動的刺激条件により左位置の割合が増加したことは、縮小なし条件の視覚情報呈示においても、無視方向に移動する矢印の刺激が左方向に注意を向けることに作用したと考えられ、Mattingley らの視運動刺激 (optokinetic stimulation) の結果と同様であった[60]。このように、本システムによる多様な視覚情報呈示により、左 USN の多面的な解析が可能となった。

眼球運動角速度については、右紙面では無視方向の眼球運動角速度が遅く、左紙面では無視方向が速くなる傾向を示した。これは、右紙面では眼球位置の割合が多く、右方向に注意が向きやすくなり、左紙面については USN により左方向の注意の持続が困難で、素早い、眼球運動になっていると考えられる。このような視空間注意の偏りは反応時間の研究結果と類似しており、右視野の刺激に対する反応は健常者の反応時間よりも速くなると述べられている[61]。また、左視野の反応時間は周辺視野で遅く、中心視野の近くでは速くなると報告され[62]、本研究の中央縮小や右縮小条件における左紙面は、HMD 内ディスプレイの中心に近い位置となっていることから、右紙面より眼球運動角速度が速くなった可能性も考えられる。

眼球運動と頭部運動の動作分析の結果、本症例では縮小なし条件と比較し、中央縮小と右縮小条件では左側方向の頭部運動を認めていた。これより、眼球運動と頭部運動が解離していることが確かめられ、姿勢や動作が拘束されない本システムは、様々な視覚情報呈示の結果生じる眼球運動と頭部運動を評価できることが示された。

4.3 VFD と USN 患者の視空間認知特性の検討

4.3.1 実験方法

(a) 対象

対象は、USN 患者 4 例と VFD 患者 4 例の計 8 例である（表 5）。USN 患者は、MRI(Magnetic Resonance Imaging)により右半球損傷が確認され、CBS の項目で無視症状を認めた者である。CBS については、ADL における USN 症状の評価法としての妥当性と信頼性が報告されている。なお、車椅子・椅子座位保持が不能、視力低下、MMSE20 点以下の著しい認知症の患者は対象外とした。

表 5：対象

patient	sex	age	Aetiology	Lesion location	VFD	Days since onset	MMSE	CBS
VFD1	M	60	Tumour	parieto-occipital	yes	353d	28	7
VFD2	F	43	Infarction	occipital,cerebellum	yes	286d	30	3
VFD3	M	36	Infarction	occipital	yes	75d	30	3
VFD4	M	54	Infarction	putamen	yes	13y	30	7
USN1	F	26	Hemorrhage	temporo-parietal	no	164d	25	8
USN2	M	79	Infarction	fronto-parietal	no	86d	27	9
USN3	M	78	Hemorrhage	putamen	no	37d	21	8
USN4	M	58	Infarction	front-parietal	no	35d	27	8

VFD : visual field defects
USN : unilateral spatial neglect
y : year
d : days

(b) 方法

4.1 と同様に被験者は椅座位を基本測定肢位とした。まず HMD を装着しない状況で、通常評価として線分抹消試験を実施した。次に、検者により右眼球がモニター中央に映るように、HMD ユニット内の COMS カメラを調整した後、被験者に HMD を装着し計測を開始した。検者が指示した評価用紙の中央を注視させ、検査中の眼球映像を記録した。HMD を装着した状態で線分抹消試験を行う際の条件は、VFD 患者及び USN 患者には次の 4 条件を実施した。1) 上方に固定した 2 つの小型 CCD カメラで机上検査用紙を写す縮小なし

条件、2) 評価用紙の映像を画面中央方向に 80%縮小した中央縮小条件、3) 画面の右端方向に 80%に縮小した右縮小条件、4) 画面の左端方向に 80%に縮小した左縮小条件、この順に実施した。

(c) 分析項目

分析項目は、4.1.1 と同様とし、左右紙面抹消時の各々について、眼球の左右方向における視覚呈示条件の違いと、各条件における左右方向の眼球運動角速度の差について分散分析を行い、Bonferroni による多重比較を行った。

4.3.2 結果

(a) 視空間認知評価

VFD 患者については、左右紙面において全ての条件で正答率の低下を認めなかった (図 42)。

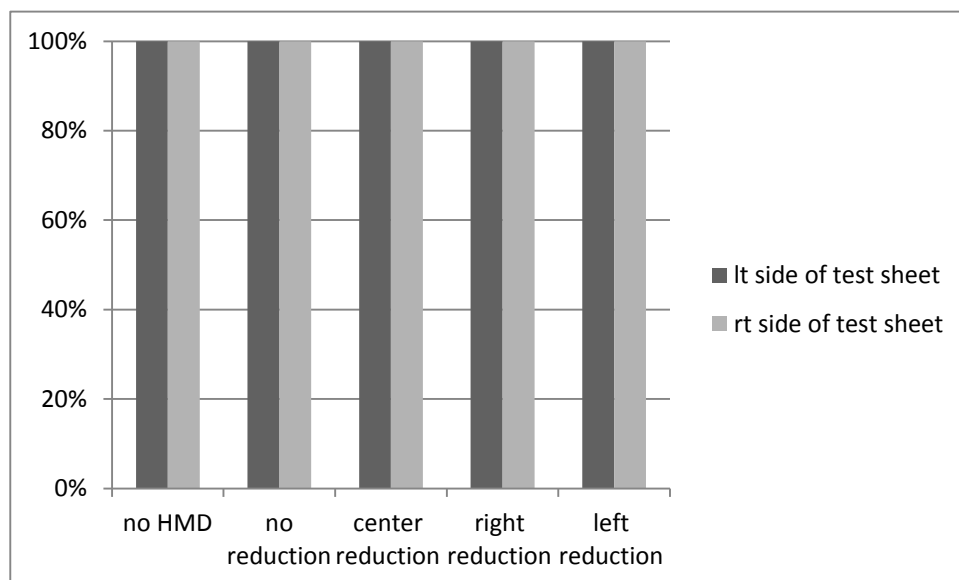


図 42 : VFD 患者の線分抹消の正答率

USN 患者については、左紙面において通常検査で正答率は 100%であり、HMD 装着の縮小なし条件で 40%、検査用紙映像の中央縮小、右縮小で 42%、左縮小で 38%と減少した。右紙面においては、通常検査で 98%、縮小なし条件、中央縮小条件で 63%、右縮小で 59%、左縮小で 61%に減少し（図 43）、HMD 装着により左紙面の正答率が有意に低下した（図 44）。

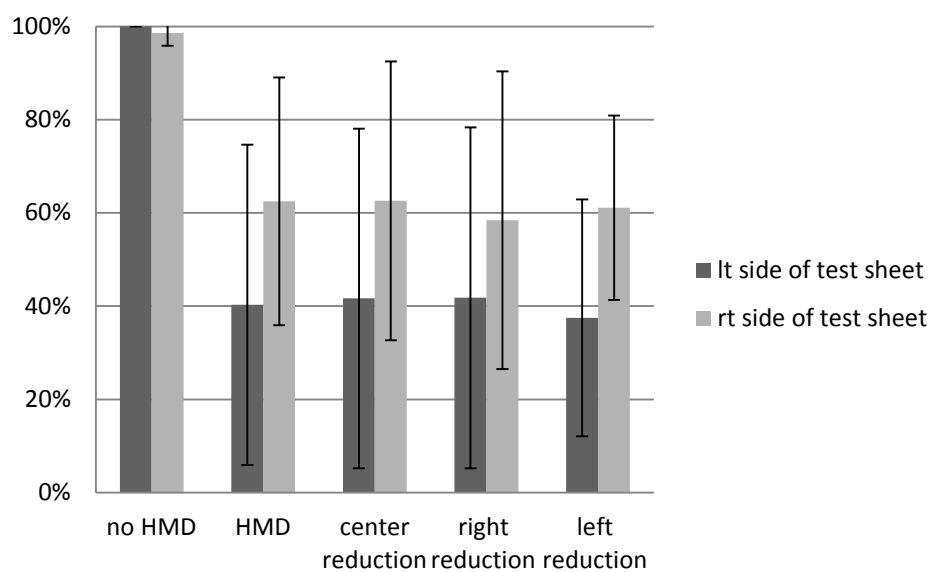


図 43 : USN 患者の線分抹消試験の正答率

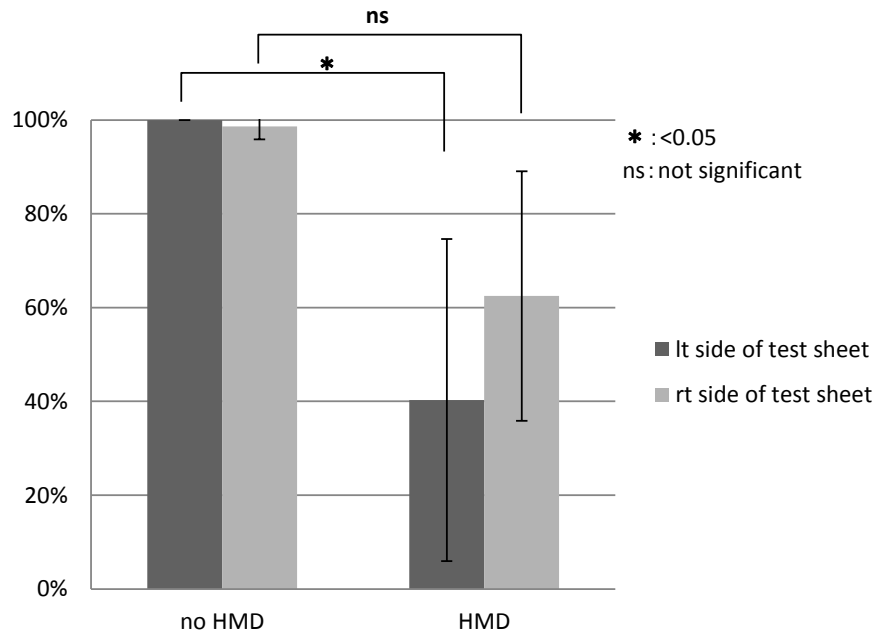


図 44 : USN 患者の HMD の装着有無における正答率の違い

(b) 眼球運動偏位

VFD 患者の眼球位置の左右比率は、縮小なし、中央縮小と左縮小各条件で左紙面の比率が多く、左縮小条件で偏位が大きかった。右縮小条件では右紙面の比率が多かった(図 45)。

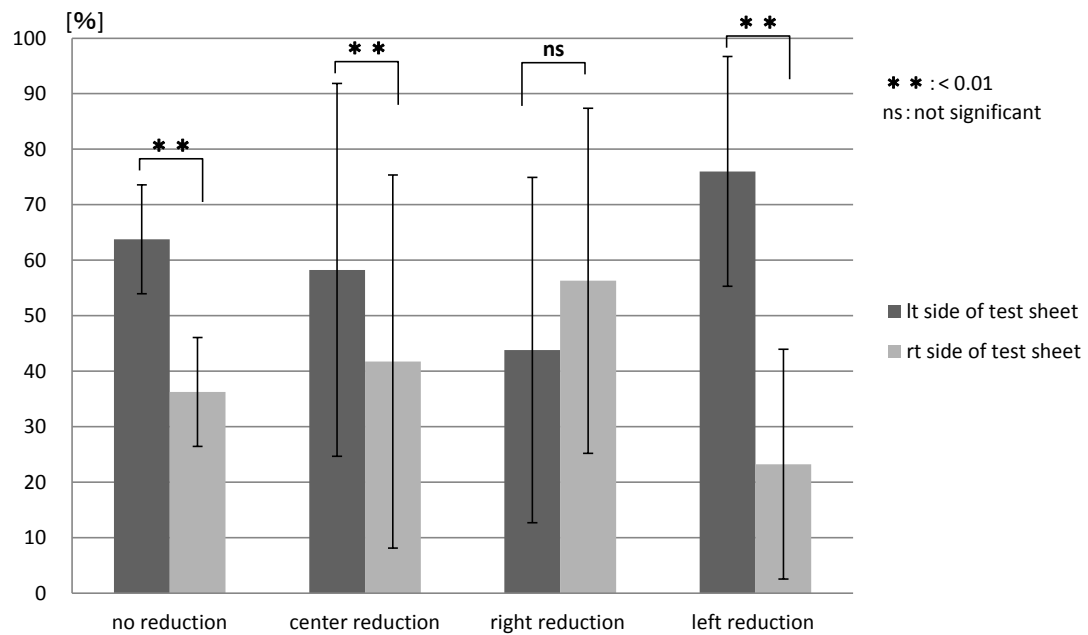


図 45 : VFD 患者の眼球運動の偏位

USN 患者の眼球位置の比率は、全ての条件で眼球位置が右に偏位した。とくに、中央縮小と右縮小条件で右の偏位が大きくなり、左縮小条件は縮小なし条件と同様であった（図 46）。

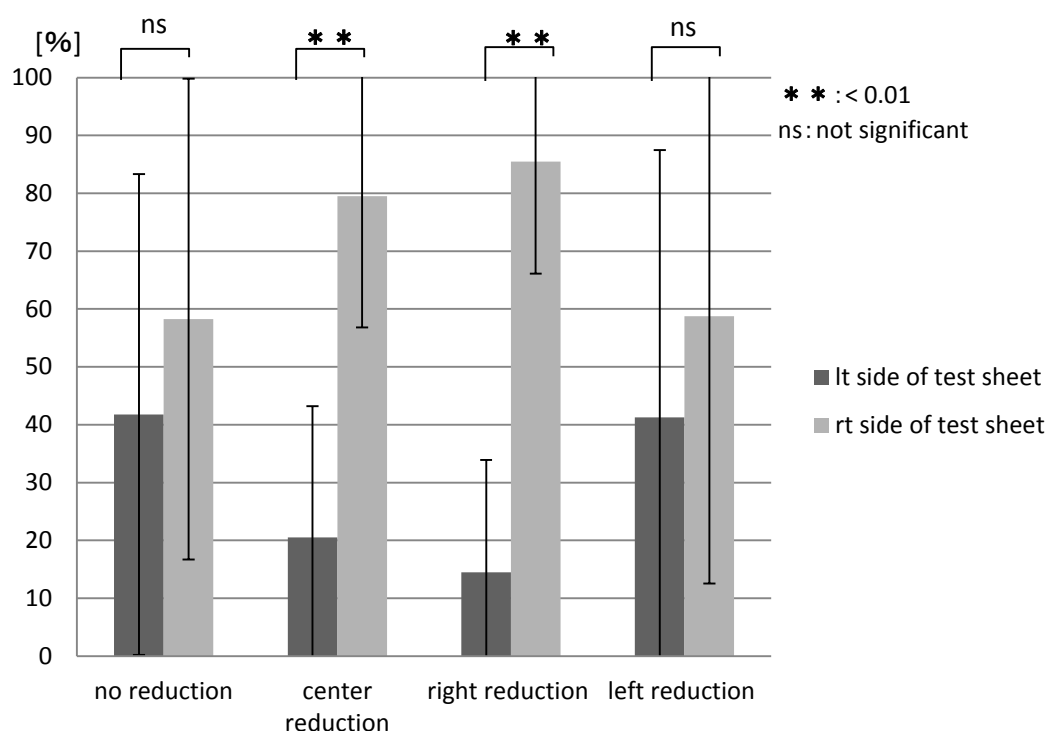


図 46 : USN 患者の眼球運動の偏位

(c) 眼球運動角速度

VFD 及び USN 患者の眼球運動角速度は、左右方向で有意差を認めなかった（図 47、48）。しかし、左右紙面に区分した分析では、VFD 及び USN 患者は、右紙面で右方向の眼球運動角速度が速かった。また、左紙面では VFD 患者の右縮小条件を除き、VFD も USN 患者も左右方向の眼球運動速度に有意差を認めなかった。（表 6）。また、VFD と USN 患者の比較では、左縮小条件で USN 患者の速度が速く（図 49）、さらに、左縮小条件の左右紙面を比較すると、右紙面の線分抹消中で有意差を認め、ペン先が右紙面にある時は、USN 患者の眼球速度が速くなることが確認された（図 50、51）。

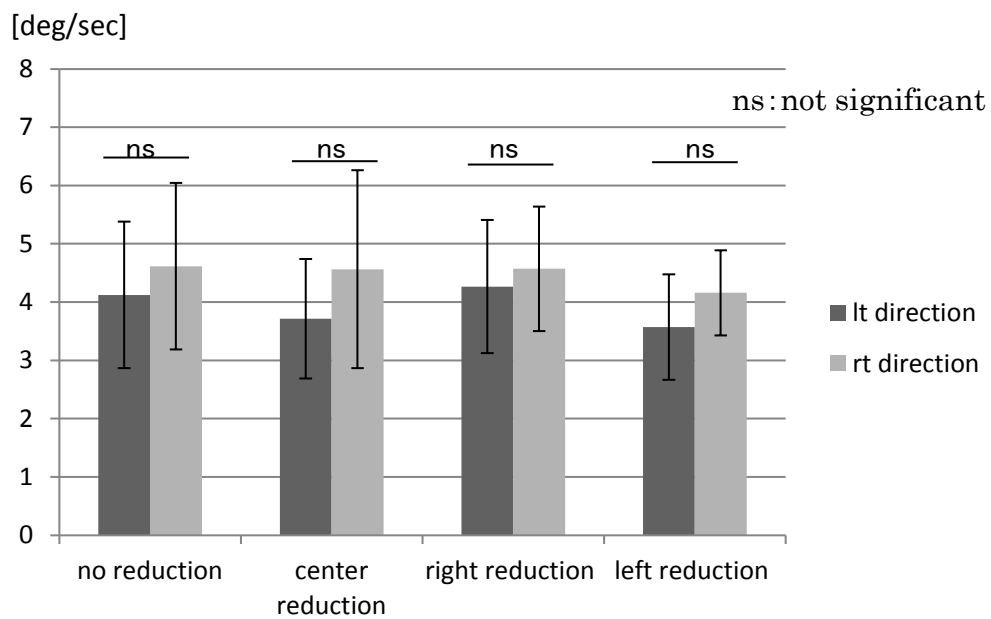


図 47 : VFD 患者の左右方向の眼球運動角速度

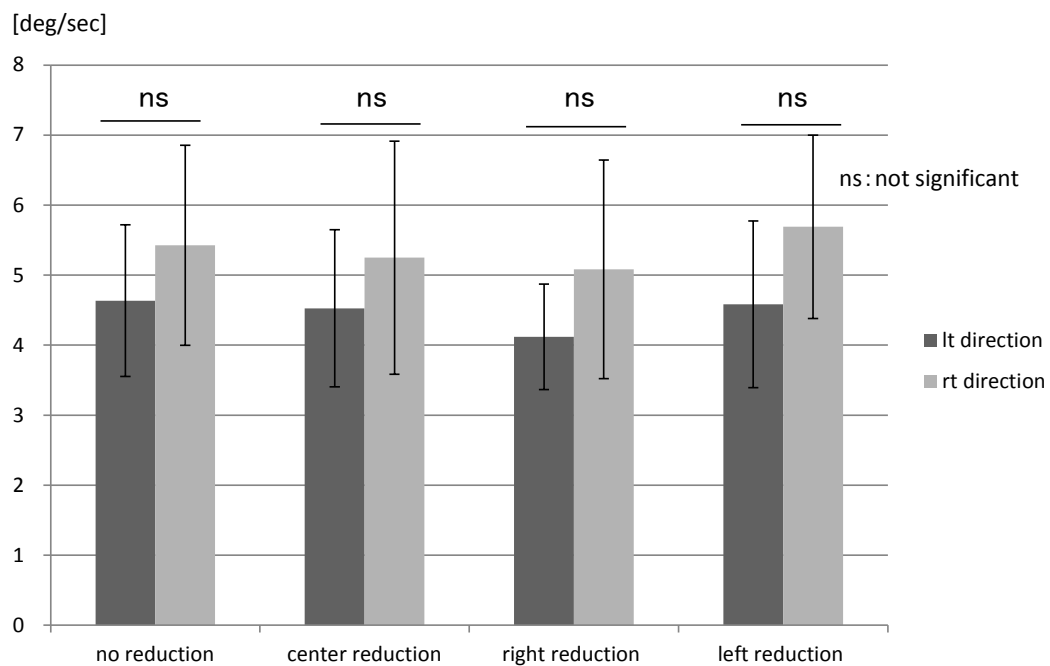


図 48 : USN 患者の左右方向の眼球運動角速度

表6. VFDとUSN患者の左右紙面における左右方向の眼球運動角速度

		Direction of eye movement over the left sheet (deg/s)		Direction of eye movement over the right sheet (deg/s)	
		left (SD)	right (SD)	left (SD)	right (SD)
VFD	no reduction	3.9(6.0)	4.1(7.2)	4.4(6.4)	5.2(8.0)
	center reduction	3.5(5.1)	3.8(5.7)	3.9(4.8)	5.3(6.6)
	right reduction	4.2(7.4)	3.9(6.5)	4.3(6.3)	5.2(8.5)
	left reduction	3.4(5.2)	3.9(5.9)	3.8(5.2)	4.5(7.1)
USN	no reduction	5.1(7.7)	4.6(7.0)	4.1(7.1)	6.1(10.6)
	center reduction	4.7(5.2)	4.1(6.3)	4.6(7.5)	6.3(10.1)
	right reduction	3.5(5.5)	3.6(5.4)	4.5(7.1)	5.9(9.4)
	left reduction	5.5(7.4)	5.3(7.1)	4.1(6.6)	5.7(9.5)

***p<0.01 *p<0.05

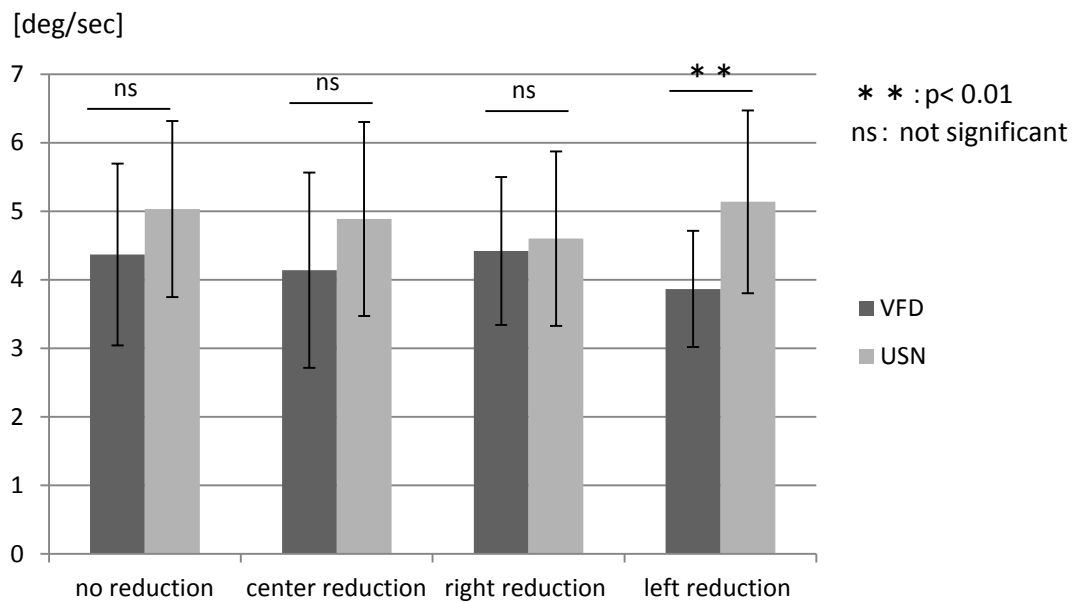


図 49 : 視覚情報呈示による VFD と USN 患者の両紙面における眼球運動角速度の比較

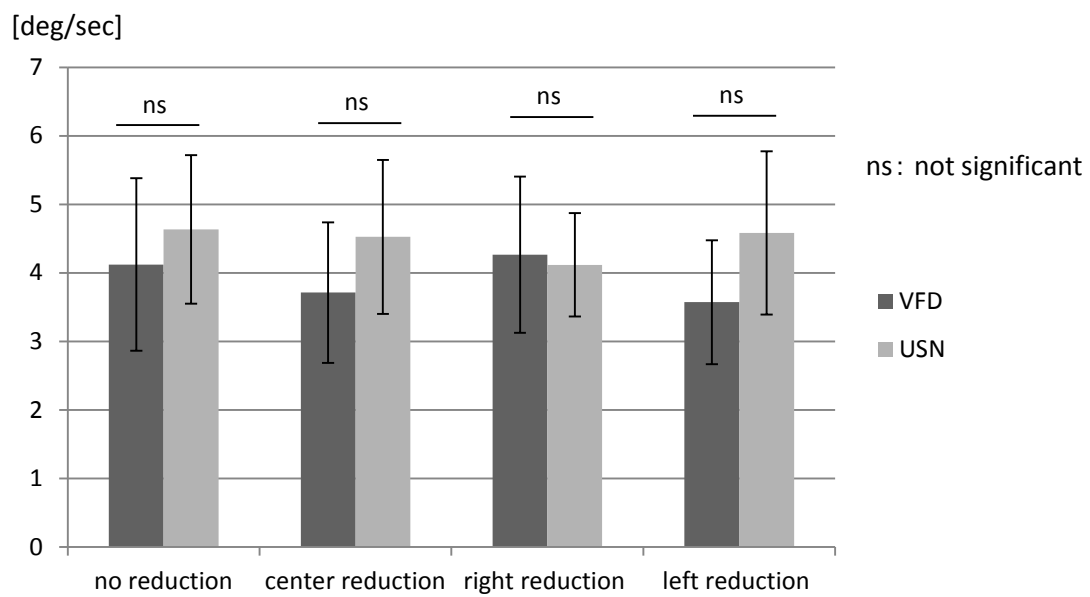


図 50 : 左紙面の視覚情報呈示による VFD と USN 患者の眼球運動角速度の比較

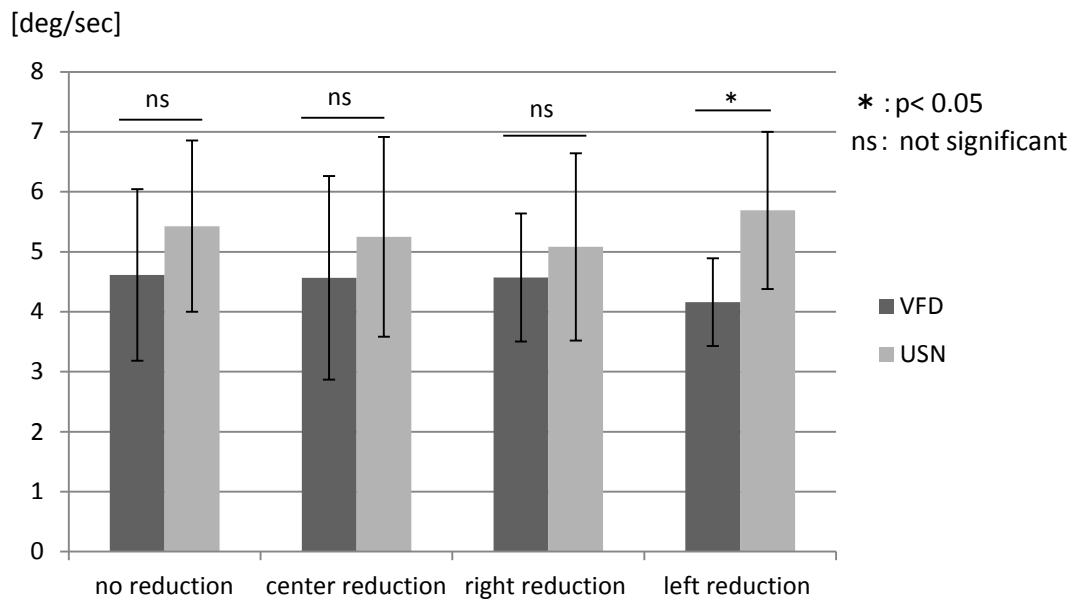


図 51：右紙面の視覚情報呈示による VFD と USN 患者の眼球運動角速度の比較

(d) 眼球・頭部・体幹運動分析

VFD1、2 患者では、頭部が左方向に回旋する傾向を示し、とくに VFD2 の患者は体幹を左側に偏位させていた。また、VFD3、4 では頭部と体幹の運動を認めなかった。USN 患者では、USN1 は、左方向に回旋する傾向を示し、USN2 は VFD 患者とは逆に、眼球運動と共に頭部は右回旋する傾向を認めた。USN3 では、眼球運動は右方向を示したが、頭部や体幹の運動を観察しなかった。USN4 患者の頭部と体幹運動は眼球運動と関連を認めなかった（表 7）。

表7: VFDとUSN患者の眼球・頭部・体幹の動作分析

	head and trunk movement				eye movement			
	no reduction	center reduction	right reduction	left reduction	no reduction	center reduction	right reduction	left reduction
VFD1	←	←	←	←	←	←	←	←
VFD2	←	←	=	←	←	←	←	←
VFD3	=	=	=	=	←	←	←	←
VFD4	=	=	=	←	←	←	←	←
USN1	←	←	←	←	←	←	←	←
USN2	→	→	→	→	→	→	→	→
USN3	=	=	=	=	→	→	→	→
USN4	=	=	→	→	→	→	→	→

Right (→) and left (←) arrows indicate directions of head rotation and eye movement.
VFD2 patient showed trunk shift and no head rotation.
Equal sign (=) indicates no change in movement.
VFD: left visual field defect, USN: unilateral spatial neglect.

4.3.3 考察

線分抹消試験の結果、VFD 患者の線分抹消率は、HMD によるどの視野条件変化でも影響を受けなかった。一方 USN 患者では、HMD 装着により左紙面の正答率が低下した。本検査の USN 患者は、CBS の結果より日常生活場面で左側方向の無視を呈しており、Tanaka 等[50][63][64]の報告同様に、通常の机上検査では明らかにできない USN 症状を、この多様指標の HMD システムにより判別出来たと考えられる。また、VFD と USN 患者の右紙面（非障害側）で正答率が低下した。この結果は、被検者は全員右利きであるため、右側から抹消課題を実施することより、HMD 内モニターに映る自身の手で右紙面の線分を隠していることに気づけなかったと考えられる。

Reinhart らは、文字や単語で左半分の見落としが生じる単語認知の研究で、無視方向に徒手的に頭部を回旋させるとテキストの左側の見落としは減少したものの、単語の左側の見落としには効果がなかったと述べている[65]。また Niemeier らは、USN 患者において線分の探索にフレームを設けるとその中で左に向きにくく、非無視側に向きやすい注意の勾配が強くなると報告している[66]。上記の先行研究より、HMD に投影された評価用紙を見ることより、注意の範囲が規定され、注意が非無視方向に偏位した可能性が考えられる。

左紙面（障害側）の正答率は、縮小なし条件と比較し、中央縮小と右縮小条件で増加し、左縮小条件で正答率が低下した。この結果は、縮小なし条件と比較し、中央縮小、右縮小条件は左紙面が画面の非無視側に移動するためと考えられ、反対に左縮小条件における正答率の低下は、左紙面が無視方向に移動することによると推測される。

VFD 患者の眼球位置の比率は、縮小なし、中央縮小と左縮小条件では左紙面（視野障害側）で多く、右縮小条件のみ右紙面（非視野障害側）の比率が多かった。この原因として、左縮小条件では視野障害側に評価用紙が多く呈示されるため、視覚探索として眼球運動の代償が多くなり、視野障害側の比率が増加したと推測される。また、右縮小条件では非視野障害側に評価用紙の呈示が多くなるため、右側の比率が増加したと考えられる。一方 USN

患者では、全ての条件で眼球位置が非無視方向に偏位し、中央縮小と右縮小条件では非無視側の偏位が増大し、左縮小条件では非無視側の偏位は減少した。Karnath ら[67]は、対象物が見えない暗闇の環境で USN 患者の眼球運動を計測した結果、視覚探索は病巣と同側に偏位すると報告している。また、VFD 患者と USN 患者の線分二等分試験における視覚探索の検討では、VFD 患者は視野障害側のある左端まで視線を動かして二等分するのに対し、USN 患者では左端を探索することではなく、右側に偏った位置で二等分をすると報告している[68]。今回の結果においても、VFD 患者は左側（視野障害側）に、USN 患者は右側（非無視側）に眼球位置が偏位していた（図 45、46）。これは、上方に固定したカメラで撮影した画像を HMD に投影する本システムは、頭部を動かしても画像位置が変化しない物体中心座標に近い環境になってことから、USN を検出出来たと考えられる。

眼球運動角速度の VFD と USN の比較では、左縮小条件で無視方向に視覚情報を呈示した際、USN 患者の眼球速度は、非無視空間の右紙面で VFD 患者より速度が速くなる可能性が示唆された。このような視空間注意の非無視空間への偏りは、反応時間の研究結果と類似しており、非無視側の刺激に対する反応は、健常者の反応時間よりも速くなると述べられている[62]。また、USN 患者が注意を向ける方向に対し、手がかりの刺激が反対側を示した場合の反応時間は、数百 ms 以上遅延すると言われている[69]。本研究では、左方向の縮小条件により非無視方向の眼球偏位が改善しており（図 46）、非無視方向から段階的に視覚情報の呈示位置を調整することで、無視方向の眼球運動を喚起できる可能性が示唆された。以上より、本システムの視覚情報呈示の有用性を確認した。

眼球運動と頭部運動の動作分析の結果、VFD 患者は左縮小条件で、視野障害方向へ頭部を回旋させる傾向を示した。VFD 患者は、左縮小条件の左方向で速度の低下を認めており、頭部や体幹の代償が増大したと考えられる。VFD2 患者については、残存視野が少なく、そのため、体幹が損傷視野方向へ偏位したと考えられた。急性期 USN 患者では、眼球が右に偏位することが多く、障害が重度な場合は頭部にも運動の偏位が生じると報告されている

[70][71]。本研究の USN2 患者は、重度の USN を認め、頭部の右回旋の傾向を示しており、HMD による視覚情報呈示は、頭部運動にも影響を及ぼす環境条件であると推測される。しかし、USN 1 では左方向の眼球運動と同様に、全ての条件で頭部の左回旋運動が生じていた。このように、右方向に偏奇しやすい環境下においても、慢性期においては、左側方向へ能動的に注意を移動させることが可能になることが示唆された。以上より、様々な視覚情報呈示により、頭部や体幹の運動を拘束しない日常生活動作に近い環境で評価することの重要性および有用性が示された。

4.4 4 章のまとめ

開発した HMD を用いた多様な視覚情報呈示と眼球運動および頭部運動の同時計測システムを使用し検査を実施した。実験的検証を通し、VFD 及び USN 患者における頭部及び眼球における代償運動の評価など、本システムの有効性および有用性が実証された。またこれを用い、頭部及び眼球運動の分析より、VFD 及び USN 患者の視空間認知障害の違いの一端を明らかにした。

第5章 HMD を利用した定量的評価に基づく訓練方法の提案

第4章では視野障害 (VFD : Visual Field Defects) 及び半側空間無視 (USN : Unilateral Spatial Neglect) 患者の眼球運動を定量的に評価し、各々の視空間認知の特徴を鑑別した。

VFD と USN 患者の眼球運動偏位の結果から、視空間認知の戦略は異なっており (図 52)、VFD 患者では左側 (障害側)、USN 患者は右側 (非障害側) の偏位を認めた。更に、左紙面 (障害側) と右紙面 (非障害側) に区分し分析した結果、視覚情報呈示と眼球運動の関係性を認めた。

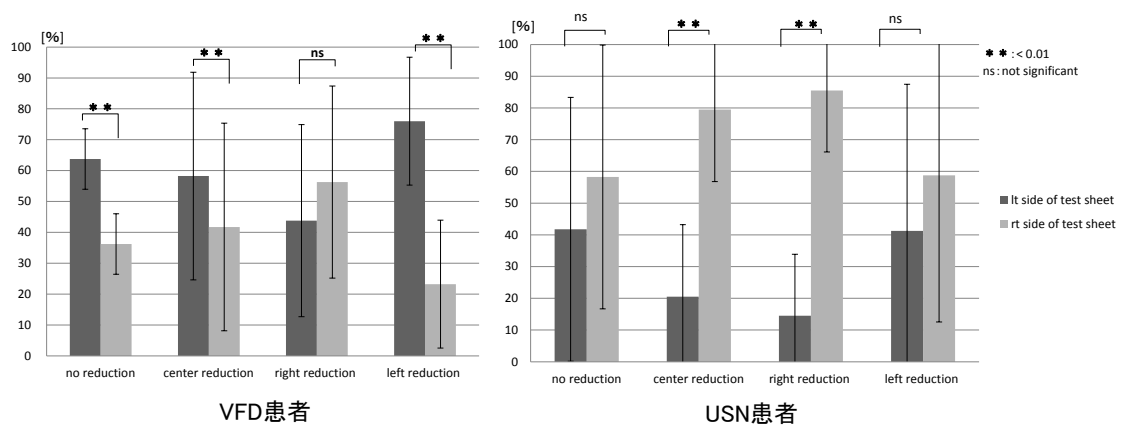


図 52 : VFD と USN 患者の眼球運動偏位の比較

第2章では、最近の VFD と USN 患者のリハビリテーションにおいて、障害側方向に眼球を動かす訓練が有効と述べた。VFD 患者では衝動性眼球運動による視野障害側の視覚探索[22]、USN では滑動性眼球運動による無視方向の眼球運動が報告されている[42]。本研究の HMD を利用した評価より、VFD と USN 患者は画面の縮小方向に移動することが確認されており (図 52)、第5章では、HMD の視覚情報呈示による VFD と USN 患者に対する眼球運動課題を提案する (図 53)。

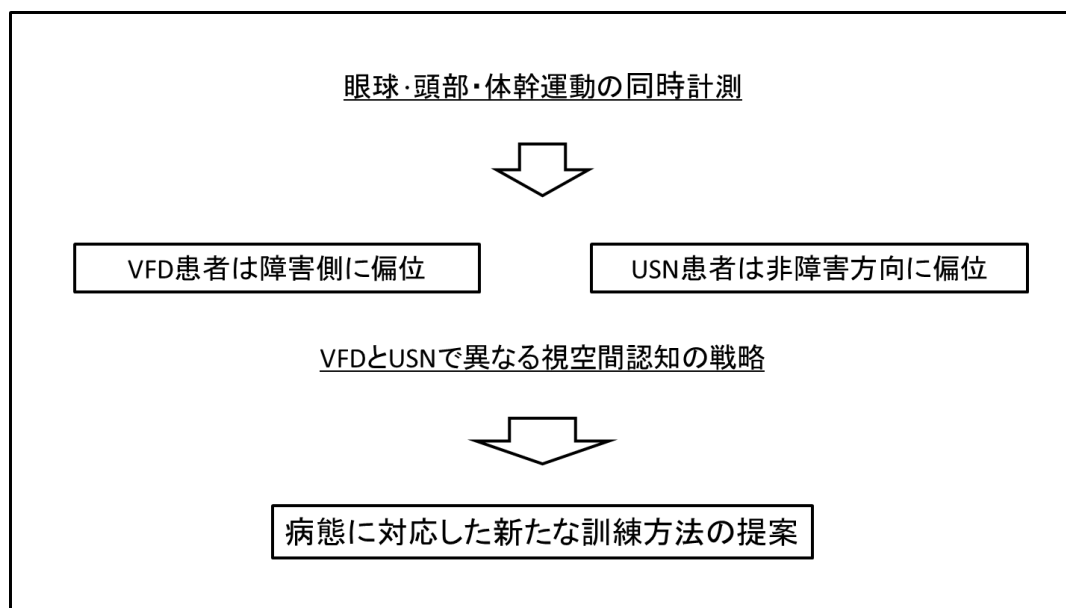


図 53 : HMD を利用した定量的評価による眼球運動訓練

5.1 VFD 患者のための新たな訓練方法の提案

5.1.1 HMD による新たな視覚探索課題

HMD を利用した VFD 患者評価より、眼球運動に加え、体幹を視野障害側に偏位させる症例も存在した (図 54)。ADL では、状況に応じて左右方向に注意を払う必要があり、非視野方向にも眼球を動かす。本システムの視覚情報呈示により、縮小方向に眼球が偏移することが確認されており (図 52)、縮小条件により眼球位置の割合を変化させ、非視野障害側から視野障害方向へ眼球運動を喚起できると考えられる。以上より、視覚情報を視野障害側と反対側へ縮小させた位置から新たな視覚探索の戦略を用い、視野障害方向の対象を探索する課題を提案する。



縮小なし条件



左縮小条件

図 54 : VFD 患者の代償運動

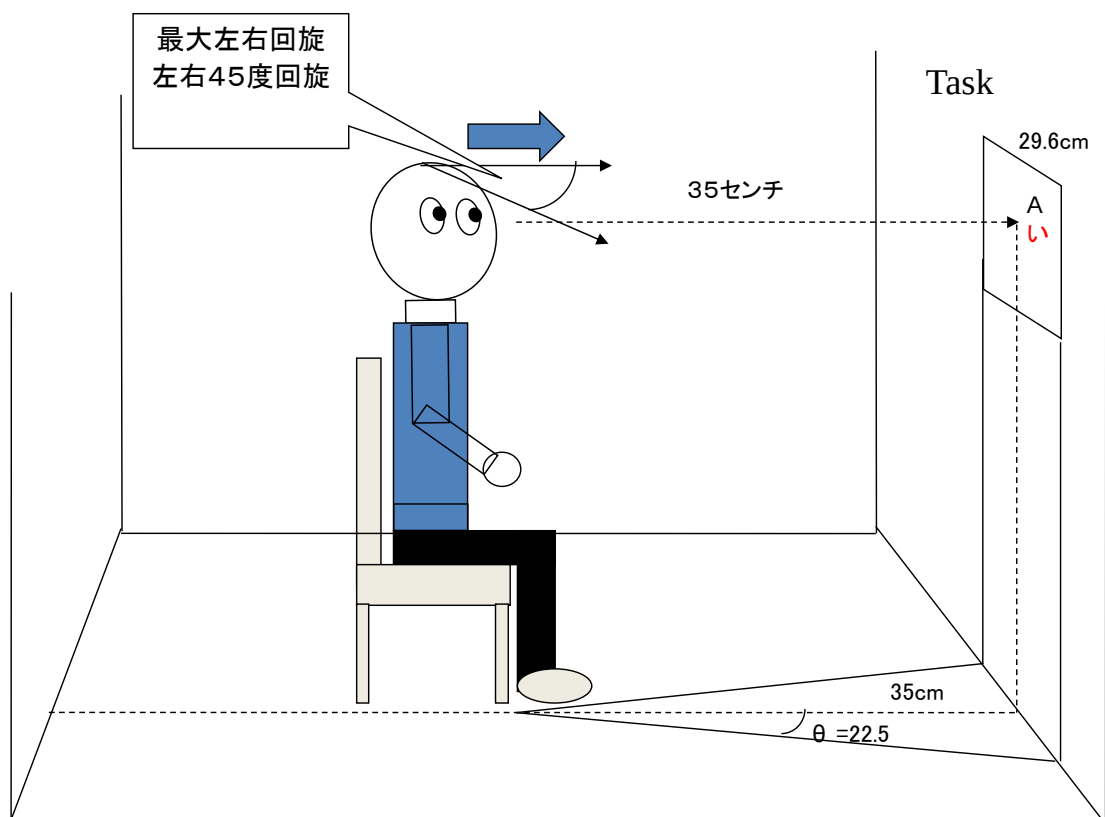
5.1.2 HMD を利用しない視覚探索課題

眼球・頭部・体幹運動分析の結果を踏まえ、非視野障害側へ頭部を回旋させた位置から新たな視覚探索の戦略を用い、視野障害方向の対象を素早く視覚探索する課題を提案する。

(a) 文字探索課題

被験者の検査肢位は、課題用紙（210×297mm）が添付された壁より 35 センチ離れた椅子座位とし、体幹はその位置を保持する。本システムの眼球運動偏位の結果と眼球・頭部・体幹の同期計測の分析を踏まえ、頭部を非視野障害方向に回旋させた 2 条件（右回旋 45 度、右最大回旋、または左回旋 45 度、左最大回旋）で課題を実施する（図 55）。被験者に

は眼球運動のみでターゲットとなる文字を探索するよう指示し、認知した文字を記録用紙に記載するように求める。課題用紙の左右紙面には、3列の文字が配列されており（ひらがな列、英字列、数字列）、各列には7個の文字がランダムに配置され（21×左右、合計 42文字）、2条件で合計 84 回の衝動性眼球運動を実施することとなる。（図 56）。



本実験では被験者と課題の距離は35センチ（視野角45度と設定）

図 55：文字探索課題環境

た	F	2		ひ	K	13
は	C	7		み	I	8
か	B	3		き	M	10
さ	E	4		い	N	12
ま	D	5		し	J	9
あ	G	1		ち	H	11
な	A	6		に	K	14

図 56：文字探索運動課題（例）

5.1.3 考察

VFD 患者の線分抹消試験中の視覚探索では、視野障害側の眼球運動が偏位していた。歩行等の移動場面においては、視野障害側のみならず、非視野障害側にも注意を向ける必要がある。第 4 章の VFD 患者のように頭部を視野障害方向に向ける戦略を用いた場合、反対側からの視覚情報を得ることは不十分となるため、常時、眼球や頭部を視野障害方向に留めてことは、ADL 場面で適当な戦略とは言えない。以上より、視野障害方向とは対側の眼球運動を行い、このような新たな視覚探索の戦略を得ることが有用と考えられる。本研究の結果、視覚情報の呈示方向に眼球が偏位することを確認しており、呈示情報を視野障害側から非視野障害方向へ移動し、非視野障害方向の眼球運動を喚起させる新たなリハビリテーションを考案した。

更に先行研究において、健常人の眼球位置の平均は頭部方向に偏る傾向があると報告されており[72]、頭部を非視野障害方向に回旋させた位置で、非視野障害方向に偏移しやすい条件を設定し、対象を見る眼球運動を提案した。新たな視覚探索戦略に加え、素早く眼球を動かす衝動性眼球運動が視空間認知の改善に関与すると言われており[73]、上記の眼球運動訓練において素早くターゲットの文字を探索することで視空間認知の改善が期待できると考えられる。衝動性眼球運動は 60 から 100deg/sec とされているが[59]、HMD 装着による視覚情報呈示の課題では、眼球運動は困難なため（図 29）、HMD システムを用いない自主訓練として、頭部・体幹運動を考慮した衝動性眼球運動課題を提案した。

5.2 USN 患者のための新たな訓練方法の提案

HMD を利用した無視方向への滑動性眼球運動トレーニング

HMD を利用した評価より、右方向に眼球が偏位した場合においても、視覚情報呈示により左方向の眼球運動を喚起できることを確認した。また、視覚情報呈示による VFD と USN 患者の眼球運動を比較した結果、USN 患者の眼球運動が左方向に縮小した条件で速いことが確認された（図 51）。USN 患者は左縮小条件においても右方向に眼球が偏移していることから、VFD 患者に比べ速い速度で左側に眼球を動かしている可能性が推測される。先行研究より、視空間の認知にはゆっくりと無視側へ動かすような視運動刺激が有効であることから、視覚情報の呈示位置を考慮しながら注意喚起表示機能を併用し、視線を無視側へ動かす視運動刺激を付加した滑動性眼球運動が有効と考えられる。

5.2.1 方法

右紙面が無視方向の眼球運動速度が増大する条件で、線分抹消課題を行う。課題中はペン先を注視しながら右側から左側方向へ線分抹消を行うため、右側から左側方向に向かう

滑動性眼球運動に近い課題となる。そこで、USN 患者では注意喚起表示機能を利用し（図 57）、視線を無視側へ動かす視運動刺激を付加した眼球運動課題を行う。

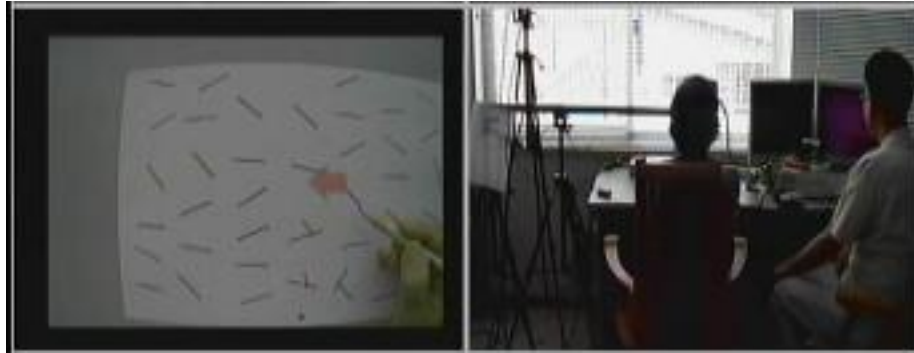


図 57：注意喚起表示機能

5.2.2 考察

USN 患者は空間における右端が基準となり左側を無視しており、右の基準から左側へ注意を移動することがより難しいと報告されている[66][74]。第 4 章より、開発したこのシステムは、USN 患者において右側へ注意が偏位しやすい環境条件であると確認された。しかし、右紙面において左方向の眼球運動角速度が増大する結果が得られたことから、USN 改善に向けた滑動性眼球運動トレーニングとして期待できる。

USN 患者に対する眼球運動トレーニングの先行研究としては、滑動性眼球運動によるトレーニングが報告されている[75]。脳卒中発症後、約 1 ヶ月を経過して実施されたランダム化比較試験の研究によると、衝動性眼球運動を用いた訓練よりも滑動性眼球運動訓練で有意な改善がみられ、2 週間後のフォローアップでも滑動性眼球運動訓練のグループで改善が継続して認められたと述べている[39]。

VFD 患者に用いた衝動性眼球運動は、患者自身が無視症状に気づき、能動的に注意を向けることが可能であったが、USN 患者では自らの無視に気づかない場合、実施が困難となる可能性が高い。一方、滑動性眼球運動訓練は、ゆっくりと右から左へ滑らかに追跡する

ように眼球を動かし、動く視標を網膜の中心窩で捉え注視する運動であるため、右紙面の患者が気づいている領域から開始出来るという利点がある。本システムにおける眼球運動角速度は概ね 10deg/sec 以内となっており、滑動性眼球運動に近い運動課題と考えられ、HMD 利用による眼球運動トレーニングとして応用可能と思われる。

USN に対する有効なリハビリテーションとして、第 2 章で末梢からの刺激を与えることによって高次の中枢への作用を期待するボトムアップ手法による代表的なアプローチを述べた[33]。近年、ボトムアップによる手法の一つとして視運動刺激がランダム化比較試験の研究により効果があると報告され、2 ヶ月間効果が継続したと述べられている[42]。視運動刺激は、背景にある画面が無視方向に動き、視線を無視側へ動かすように考えられた刺激で[76]、本システムの注意喚起情報表示機能に類似する。よって、HMD を装着した滑動性眼球運動訓練に画面の右側から左方向へ矢印を動かす動的刺激を付加することで、新たな訓練方法が実現できると思われる。

5.3 5 章のまとめ

本システムによる VFD と USN 患者の新たな評価結果より、先行研究を参照した眼球運動トレーニングを提案した。VFD 患者は HMD を利用した視覚情報呈示による眼球運動偏位の評価より、課題実施の眼球や頭部位置を考慮した衝動性眼球運動訓練を考案した。また、USN については、VFD 同様に視覚情報呈示に条件に加え、HMD を使用した注意喚起を付加した滑動性眼球運動訓練を提案した。

第6章 結論

6.1 総括

視野障害（VFD）と半側空間無視（USN）はリハビリテーションの阻害因子となり、自立支援や社会復帰の大きな妨げとなっている。VFD と USN は、症状的には類似点も多いが、その原因は異なるため、適切な治療のためには、それらの判別と症状の客観的評価が不可欠である。近年、有効となる訓練内容の報告も増えているが、効果判定には様々な評価が必要で、視空間認知障害を評価するには時間を要する。そこで本研究では VFD や USN による視空間認知障害を明らかにするための新たな手法を考案し、その手法を実現する装置を開発した。

1. head mounted display (HMD)を利用した定量的評価方法の開発

視空間認知の入力には、自己身体を中心とする座標系（枠組み）と、物体を中心とする座標系（枠組み）が存在すると考えられている。VFD 患者は身体中心座標の一部である網膜中心座標の投影に欠損が生じた障害であり、頭部が動くことにより限られた網膜中心座標に映る像も変化するため、他の身体中心座標系の影響も受ける。また、身体中心座標は、観察者が移動することによって座標系上の空間的対象の方向や位置が変化するため、従来の視空間認知障害のための評価には多岐にわたる評価が必要であった。更に、USN はこれらの座標系全てに関与する障害と考えられ、様々な訓練方法が検討されているが有効となる方法が存在しない。よって、その評価にあたっては、身体中心座標と物体中心座標など異なる視空間を柔軟に構成し得る検査システムが必要であった。

そこで本研究では、head mounted display (HMD)を使用し、被験者頭部の動きを妨げず、網膜上に多様な視覚情報の呈示を実現し、投影する映像を外部に固定した CCD カメラから入力することで物体中心座標系による新たな手法を考案した。さらに、HMD 内 CMOS カメラによる瞳孔映像の画像処理により眼球運動の評価を可能とし、頭部や体幹運動を同時

に分析するシステムを開発することができた。

2. HMD を利用した新たな評価システムによる定量的評価の有用性

VFD と USN 患者に対する本システムによる眼球運動の評価により、VFD は視野障害側への偏位を認め、USN 患者は非無視側へ偏位する傾向を判別した。また、ADL で無視症状を認める USN 患者において、机上検査で認めなかった無視症状が本システムにより検出されたことを確認した。更に、VFD 患者と USN 患者の空間認知障害の特性を明らかにするため、眼球運動速度を評価した結果、一般的な眼球運動の角速度解析では、VFD と USN ともに非障害方向の眼球運動速度が速くなっており不均衡を認めた。そのため、左紙面（障害側）と右紙面（非障害側）を抹消中の眼球運動角速度を分析した結果、VFD 患者と USN 患者の眼球運動角速度に明確な違いを確認した。以上より、VFD と USN 患者の眼球運動の定量的評価には、左紙面（障害側）と右紙面（非障害側）に区分し、多様な視覚情報呈示による眼球運動の評価を行う必要が考えられた。さらに、眼球・頭部運動の同時計測では、VFD と USN では眼球と頭部の回旋傾向が異なる症例が確認され、本手法の有効性が示唆された。

本システムでは、HMD を利用した物体中心座標による多様な視覚情報呈示により、通常の机上検査では明らかにすることが出来ない症状の検出や、VFD と USN 患者の眼球・頭部・体幹の有機的な運動特性を明らかにすることができた。

3. HMD を利用した評価システムに基づく VFD と USN 患者に対する眼球運動訓練

本システムによる VFD と USN 患者の視空間認知評価の知見より、先行研究を踏まえて眼球運動トレーニングを提案した。VFD 患者は視野障害側の眼球運動偏位より視野障害に気付いており、能動的に注意を向けることが可能であるため、障害側への注意を促し行動変容させる「トップダウンアプローチ」が有効と考えられた。一方、USN 患者は無視症状に

気付いていない場合が多く、外部からの視覚や聴覚、体性感覚等による刺激を与え無視空間の注意喚起を促す「ボトムアップアプローチ」による訓練課題を提案した。

トップダウンアプローチには、衝動性眼球運動を用いて対象を探索する視覚探索課題が行われており、本システムによる眼球・頭部の位置を参照し、眼球や頭部位置を考慮した訓練を考案した。一方、ボトムアップアプローチには、電気刺激や深部感覚刺激、背景が無視側へ動くような動画を見せて視線を無視側へ動かす視運動刺激、無視方向の体幹の回旋、半視野または片眼の遮蔽等が実施されている。また、USN については、視標を網膜の中心窩で捉え注視を続ける滑動性眼球運動の報告が多く見られており、本システムの視運動刺激に近い注意喚起を付加した滑動性眼球運動訓練を提案した。

以上本論文では、複数の評価や検査者の主観に基づく定性的評価が中心であった視空間認知障害の評価に対し、新技術を導入し、新たな客観的定量評価手法を提案するとともに、それを実現するシステムの開発研究について述べた。

6.2 今後の展望

USN は奥行きのある 3 次元の様々な ADL 場面で生じる問題であり、身体に近い部位で無視を認めなくても、距離の離れた場所で無視を認める場合もあるため、自己身体に近い空間や手の届く空間、遠位の空間に分類した評価が求められる。

本研究では机上検査の 2 次元的评价にとどまっているため、今後は、多様な視覚情報呈示（縮小、移動、注意喚起）の 3 次元動的検査（リーチ動作、移動等）による USN の発現について検証する必要がある。

3 次元の視覚情報呈示については、2 入力 of 両眼視差により立体視を実現しているため、矢状面も加えた水平面と前額面による詳細な分析に向けて、ビデオ分析とジャイロセンサによる頭部・体幹運動解析システムの構築が必要と考えられる。

参考文献

- [1] A. Bowen, K. McKenna, and R. C. Tallis, “Reasons for Variability in the Reported Rate of Occurrence of Unilateral Spatial Neglect After Stroke,” *Stroke*, vol. 30, no. 6, pp. 1196–1202, Jun. 1999.
- [2] 渡邊 修, “東京都における高次脳機能障害者総数の推計,” *Jpn J Rehabil Med*, vol. 46, no. 2, pp. 118–125, 2009.
- [3] X. Zhang, S. Kedar, M. J. Lynn, N. J. Newman, and V. Biousse, “Natural history of homonymous hemianopia.,” *Neurology*, vol. 66, no. 6, pp. 901–5, Mar. 2006.
- [4] K. Shibata, Y. Nishimura, H. Kondo, K. Otuka, and M. Iwata, “Isolated homonymous hemianopsia due to lateral posterior choroidal artery region infarction: a case report.,” *Clin. Neurol. Neurosurg.*, vol. 111, no. 8, pp. 713–6, Oct. 2009.
- [5] X. Zhang, S. Kedar, M. J. Lynn, N. J. Newman, and V. Biousse, “Homonymous hemianopia in stroke.,” *J. Neuroophthalmol.*, vol. 26, no. 3, pp. 180–183, 2006.
- [6] P. M. Pedersen, H. S. Jørgensen, H. Nakayama, H. O. Raaschou, and T. S. Olsen, “Hemineglect in acute stroke--incidence and prognostic implications. The Copenhagen Stroke Study.,” *Am. J. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 76, no. 2, pp. 122–7, Jan. .
- [7] M. Corbetta, M. J. Kincade, C. Lewis, A. Z. Snyder, and A. Sapir, “Neural basis and recovery of spatial attention deficits in spatial neglect.,” *Nat. Neurosci.*, vol. 8, no. 11, pp. 1603–10, Nov. 2005.
- [8] T. E. Feinberg, L. D. Haber, and C. B. Stacy, “Ipsilateral Extinction in the Hemineglect Syndrome,” *Arch. Neurol.*, vol. 47, no. 7, pp. 802–804, Jul. 1990.
- [9] M. M. Mesulam, “Spatial attention and neglect: parietal, frontal and cingulate contributions to the mental representation and attentional targeting of salient

- extrapersonal events.,” *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.*, vol. 354, no. 1387, pp. 1325–46, Jul. 1999.
- [10] H. O. Karnath, “Spatial orientation and the representation of space with parietal lobe lesions.,” *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.*, vol. 352, no. 1360, pp. 1411–9, Oct. 1997.
- [11] D. J. Mort, P. Malhotra, S. K. Mannan, C. Rorden, A. Pambakian, C. Kennard, and M. Husain, “The anatomy of visual neglect.,” *Brain*, vol. 126, no. Pt 9, pp. 1986–97, Sep. 2003.
- [12] H.-O. Karnath and C. Rorden, “The anatomy of spatial neglect.,” *Neuropsychologia*, vol. 50, no. 6, pp. 1010–7, May 2012.
- [13] V. Verdon, S. Schwartz, K.-O. Lovblad, C.-A. Hauert, and P. Vuilleumier, “Neuroanatomy of hemispatial neglect and its functional components: a study using voxel-based lesion-symptom mapping.,” *Brain*, vol. 133, no. Pt 3, pp. 880–94, Mar. 2010.
- [14] L. Robertson, M. Lamb, and R. Knight, “Effects of lesions of temporal-parietal junction on perceptual and attentional processing in humans,” *J. Neurosci.*, vol. 8, no. 10, pp. 3757–3769, Oct. 1988.
- [15] R. TEGNÉR and M. LEVANDER, “THROUGH A LOOKING GLASS. A NEW TECHNIQUE TO DEMONSTRATE DIRECTIONAL HYPOKINESIA IN UNILATERAL NEGLECT,” *Brain*, vol. 114, no. 4, pp. 1943–1951, Aug. 1991.
- [16] D. L. Na, J. C. Adair, D. J. G. Williamson, R. L. Schwartz, B. Haws, and K. M. Heilman, “Dissociation of sensory-attentional from motor-intentional neglect,” *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, vol. 64, no. 3, pp. 331–338, Mar. 1998.
- [17] 李 俊哉, “視野障害の評価,” 総合リハ, vol. 29, no. 9, pp. 823–829, 2001.

- [18] K. Hirayama, S. Sakai, R. Yamawaki, Y. Kondo, T. Suzuki, C. Fujimoto, A. Yamadori, and E. Mori, *Visual search training for a case of homonymous field defect with multiple visual dysfunctions*, vol. 56, no. 5. 2004, pp. 403–413.
- [19] S. K. Mannan, A. L. M. Pambakian, and C. Kennard, “Compensatory strategies following visual search training in patients with homonymous hemianopia: an eye movement study.,” *J. Neurol.*, vol. 257, no. 11, pp. 1812–21, Nov. 2010.
- [20] S. George, A. Hayes, C. Chen, and M. Crotty, “The effect of static scanning and mobility training on mobility in people with hemianopia after stroke: A randomized controlled trial comparing standardized versus non-standardized treatment protocols.,” *BMC Neurol.*, vol. 11, p. 87, Jan. 2011.
- [21] W. H. Zangemeister and L. Stark, “Active head rotations and eye-head coordination.,” *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, vol. 374, pp. 540–59, Jan. 1981.
- [22] G. Kerkhoff, U. Münssinger, and E. K. Meier, “Neurovisual rehabilitation in cerebral blindness.,” *Arch. Neurol.*, vol. 51, no. 5, pp. 474–81, May 1994.
- [23] 境 信哉, 平山和美, 山脇理恵・他, “著しい大脳性視野狭窄例に対する 神経視覚リハビリテーションの経験,” *総合リハ*, vol. 31, no. 1, pp. 63–71, 2003.
- [24] P. W. Halligan, J. Cockburn, and B. A. Wilson, “The behavioural assessment of visual neglect,” *Neuropsychol. Rehabil.*, vol. 1, no. 1, pp. 5–32, Jan. 1991.
- [25] P. Azouvi, S. Olivier, G. de Montety, C. Samuel, A. Louis-Dreyfus, and L. Tesio, “Behavioral assessment of unilateral neglect: study of the psychometric properties of the Catherine Bergego Scale.,” *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 84, no. 1, pp. 51–7, Jan. 2003.
- [26] A. E. Hillis, M. Newhart, J. Heidler, P. B. Barker, E. H. Herskovits, and M. Degaonkar, “Anatomy of spatial attention: insights from perfusion imaging and

- hemispatial neglect in acute stroke.,” *J. Neurosci.*, vol. 25, no. 12, pp. 3161–7, Mar. 2005.
- [27] A. E. Hillis, “Rehabilitation of unilateral spatial neglect: new insights from magnetic resonance perfusion imaging.,” *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 87, no. 12 Suppl 2, pp. S43–9, Dec. 2006.
- [28] H. Ota, T. Fujii, K. Suzuki, R. Fukatsu, and A. Yamadori, “Dissociation of body-centered and stimulus-centered representations in unilateral neglect.,” *Neurology*, vol. 57, no. 11, pp. 2064–9, Dec. 2001.
- [29] J. Luaute, P. Halligan, G. Rode, Y. Rossetti, and D. Boisson, “Visuo-spatial neglect: a systematic review of current interventions and their effectiveness.,” *Neurosci. Biobehav. Rev.*, vol. 30, no. 7, pp. 961–82, Jan. 2006.
- [30] F. Brighina, E. Bisiach, M. Oliveri, A. Piazza, V. La Bua, O. Daniele, and B. Fierro, “1 Hz repetitive transcranial magnetic stimulation of the unaffected hemisphere ameliorates contralesional visuospatial neglect in humans,” *Neurosci. Lett.*, vol. 336, no. 2, pp. 131–133, Jan. 2003.
- [31] H.-K. Cha, S.-G. Ji, M.-K. Kim, and J.-S. Chang, “Effect of Transcranial Direct Current Stimulation of Function in Patients with Stroke,” *J. Phys. Ther. Sci.*, vol. 26, no. 3, pp. 363–365, 2014.
- [32] D.-H. Bang and S.-Y. Bong, “Effect of combination of transcranial direct current stimulation and feedback training on visuospatial neglect in patients with subacute stroke: a pilot randomized controlled trial,” *J. Phys. Ther. Sci.*, vol. 27, no. 9, pp. 2759–2761, 2015.
- [33] G. Rode, L. Pisella, Y. Rossetti, A. Farnè, and D. Boisson, “Bottom-up transfer of sensory-motor plasticity to recovery of spatial cognition: visuomotor adaptation and

- spatial neglect.,” *Prog. Brain Res.*, vol. 142, pp. 273–87, Jan. 2003.
- [34] F. Frassinetti, V. Angeli, F. Meneghello, S. Avanzi, and E. Làdavas, “Long-lasting amelioration of visuospatial neglect by prism adaptation.,” *Brain*, vol. 125, no. Pt 3, pp. 608–23, Mar. 2002.
 - [35] Y. Rossetti, G. Rode, L. Pisella, A. Farné, L. Li, D. Boisson, and M. T. Perenin, “Prism adaptation to a rightward optical deviation rehabilitates left hemispatial neglect.,” *Nature*, vol. 395, no. 6698, pp. 166–9, 1998.
 - [36] G. Rode, Y. Rossetti, and D. Boisson, “Prism adaptation improves representational neglect,” *Neuropsychologia*, vol. 39, no. 11, pp. 1250–1254, 2001.
 - [37] A. Farne, Y. Rossetti, S. Toniolo, and E. Ladavas, “Ameliorating neglect with prism adaptation: visuo-manual and visuo-verbal measures,” *Neuropsychologia*, vol. 40, no. 7, pp. 718–729, 2002.
 - [38] M. Rousseaux, T. Bernati, A. Saj, and O. Kozlowski, “Ineffectiveness of prism adaptation on spatial neglect signs,” *Stroke*, vol. 37, pp. 542–543, 2006.
 - [39] G. Kerkhoff, L. Bucher, M. Brasse, E. Leonhart, M. Holzgraefe, V. Völzke, I. Keller, and S. Reinhart, “Smooth Pursuit ‘Bedside’ Training Reduces Disability and Unawareness During the Activities of Daily Living in Neglect: A Randomized Controlled Trial.,” *Neurorehabil. Neural Repair*, vol. 28, no. 6, pp. 554–563, Jan. 2014.
 - [40] L. P. Lisa, A. Jugheters, and E. Kerckhofs, “The effectiveness of different treatment modalities for the rehabilitation of unilateral neglect in stroke patients: A systematic review,” *NeuroRehabilitation*, vol. 33, pp. 611–620, 2013.
 - [41] D. Hill, R. O. Coats, A. Halstead, and M. R. Burke, “A Systematic Research Review Assessing the Effectiveness of Pursuit Interventions in Spatial Neglect Following

- Stroke,” *Transl. Stroke Res.*, 2015.
- [42] G. Kerkhoff, I. Keller, F. Artinger, H. Hildebrandt, C. Marquardt, S. Reinhart, and W. Ziegler, “Recovery from auditory and visual neglect after optokinetic stimulation with pursuit eye movements--transient modulation and enduring treatment effects.,” *Neuropsychologia*, vol. 50, no. 6, pp. 1164–77, May 2012.
- [43] L. P. Lovejoy, G. A. Fowler, and R. J. Krauzlis, “Spatial allocation of attention during smooth pursuit eye movements.,” *Vision Res.*, vol. 49, no. 10, pp. 1275–85, Jun. 2009.
- [44] 筒井健一郎, “頭頂連合における三次元的視覚野知のメカニズム,” *実験医学*, vol. 24, no. 15, pp. 2317–2325, 2006.
- [45] D. Y. Kim, J. Ku, W. H. Chang, T. H. Park, J. Y. Lim, K. Han, I. Y. Kim, and S. I. Kim, “Assessment of post-stroke extrapersonal neglect using a three-dimensional immersive virtual street crossing program.,” *Acta Neurol. Scand.*, vol. 121, no. 3, pp. 171–7, 2010.
- [46] E. Pedroli, S. Serino, P. Cipresso, F. Pallavicini, and G. Riva, “Assessment and rehabilitation of neglect using virtual reality: a systematic review,” *Front. Behav. Neurosci.*, vol. 9, no. August, pp. 1–15, 2015.
- [47] V. Gupta, B. A. Knott, S. Kodgi, and C. E. Lathan, “Using the ‘VREye’ System for the Assessment of Unilateral Visual Neglect: Two Case Reports,” *Presence Teleoperators Virtual Environ.*, vol. 9, no. 3, pp. 268–286, 2000.
- [48] R. L. Myers and T. a. Bierig, “Virtual Reality and Left Hemineglect: A Technology for Assessment and Therapy,” *CyberPsychology Behav.*, vol. 3, no. 3, pp. 465–468, 2000.
- [49] K. Kim, J. Kim, J. Ku, D. Y. Kim, W. H. Chang, D. I. Shin, J. H. Lee, I. Y. Kim, and S. I. Kim, “A virtual reality assessment and training system for unilateral neglect.,” *Cyberpsychol. Behav.*, vol. 7, no. 6, pp. 742–9, 2004.

- [50] T. Tanaka, T. Ifukube, S. Sugihara, and T. Izumi, "A case study of new assessment and training of unilateral spatial neglect in stroke patients: effect of visual image transformation and visual stimulation by using a Head Mounted Display system (HMD).," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 7, p. 20, Jan. 2010.
- [51] H.-O. Karnath, A. Mandler, and S. Clavagnier, "Object-based Neglect Varies with Egocentric Position.," *J. Cogn. Neurosci.*, vol. 23, pp. 2983–2993, 2011.
- [52] J. T. Kleinman, M. Newhart, C. Davis, J. Heidler-Gary, R. F. Gottesman, and A. E. Hillis, "Right hemispatial neglect: frequency and characterization following acute left hemisphere stroke.," *Brain Cogn.*, vol. 64, no. 1, pp. 50–9, Jun. 2007.
- [53] A. E. Hillis and A. Caramazza, "Deficit to stimulus-centered, letter shape representations in a case of 'unilateral neglect,'" *Neuropsychologia*, vol. 29, no. 12, pp. 1223–1240, Dec. 1991.
- [54] N. Beschin, R. Cubelli, S. Della Sala, and L. Spinazzola, "Left of what? The role of egocentric coordinates in neglect.," *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, vol. 63, no. 4, pp. 483–9, Oct. 1997.
- [55] M. Niemeier and H.-O. Karnath, "Simulating and testing visual exploration in spatial neglect based on a new model for cortical coordinate transformation," *Experimental Brain Research*, vol. 145, no. 4, pp. 512–519, Aug-2002.
- [56] J. M. Kenzie, K. A. Girgulis, J. A. Semrau, S. E. Findlater, J. A. Desai, and S. P. Dukelow, "Lesion Sites Associated with Allocentric and Egocentric Visuospatial Neglect in Acute Stroke.," *Brain Connect.*, vol. 5, no. 7, pp. 413–22, Sep. 2015.
- [57] A. Doshi and M. M. Trivedi, "Head and eye gaze dynamics during visual attention shifts in complex environments.," *J. Vis.*, vol. 12, no. 2, p. 9, Jan. 2012.
- [58] Y. Fang, R. Nakashima, K. Matsumiya, R. Tokunaga, I. Kuriki, and S. Shioiri, "Eye

- position distribution depends on head orientation,” *F1000Research*, vol. 3, May 2012.
- [59] C. H. Meyer, A. G. Lasker, and D. A. Robinson, “The upper limit of human smooth pursuit velocity,” *Vision Res.*, vol. 25, no. 4, pp. 561–563, 1985.
 - [60] J. B. Mattingley, J. L. Bradshaw, and J. a Bradshaw, “Horizontal visual motion modulates focal attention in left unilateral spatial neglect.,” *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry*, vol. 57, no. 10. pp. 1228–35, Oct-1994.
 - [61] E. Natale, L. Posteraro, M. Prior, and C. a Marzi, “What kind of visual spatial attention is impaired in neglect?,” *Neuropsychologia*, vol. 43, no. 7. pp. 1072–85, Jan-2005.
 - [62] E. Natale, C. a Marzi, E. Bricolo, L. Johannsen, and H.-O. Karnath, “Abnormally speeded saccades to ipsilesional targets in patients with spatial neglect.,” *Neuropsychologia*, vol. 45, no. 2, pp. 263–72, Jan. 2007.
 - [63] S. Sugihara, T. Miyasaka, and T. Tanaka, “A study of assessment of unilateral spatial neglect using a system for motion analysis of eyes and a head-neck,” *2009 IEEE/SICE Int. Symp. Syst. Integr.*, pp. 67–70, Nov. 2009.
 - [64] S. Sugihara, T. Tanaka, T. Miyasaka, T. Izumi, and K. Shimizu, “Assessment of visual space recognition in patients with visual field defects using head mounted display (HMD) system: Case study with severe visual field defect,” in *2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2013, pp. 6929–6932.
 - [65] S. Reinhart, I. Keller, and G. Kerkhoff, “Effects of head rotation on space- and word-based reading errors in spatial neglect,” *Neuropsychologia*, vol. 48, no. 13, pp. 3706–3714, 2010.
 - [66] M. Niemeier and H. O. Karnath, “Stimulus-driven and voluntary saccades are coded

- in different coordinate systems.,” *Curr. Biol.*, vol. 13, no. 7, pp. 585–589, 2003.
- [67] H. O. Karnath, M. Fetter, and J. Dichgans, “Ocular exploration of space as a function of neck proprioceptive and vestibular input—observations in normal subjects and patients with spatial neglect after parietal lesions.,” *Exp. Brain Res.*, vol. 109, no. 2, pp. 333–42, May 1996.
- [68] J. Barton, “Ocular search during line bisection. The effects of hemi-neglect and hemianopia,” *Brain*, vol. 121, no. 6, pp. 1117–1131, Jun. 1998.
- [69] B. J. He, A. Z. Snyder, J. L. Vincent, A. Epstein, G. L. Shulman, and M. Corbetta, “Breakdown of Functional Connectivity in Frontoparietal Networks Underlies Behavioral Deficits in Spatial Neglect,” *Neuron*, vol. 53, no. 6, pp. 905–918, Mar. 2007.
- [70] M. Fruhmann-Berger and H.-O. Karnath, “Spontaneous eye and head position in patients with spatial neglect.,” *J. Neurol.*, vol. 252, no. 10, pp. 1194–200, Oct. 2005.
- [71] E. Becker and H.-O. Karnath, “Neuroimaging of eye position reveals spatial neglect.,” *Brain*, vol. 133, no. Pt 3, pp. 909–14, Mar. 2010.
- [72] Y. Fang, M. Emoto, R. Nakashima, K. Matsumiya, I. Kuriki, and S. Shioiri, “Eye-Position Distribution Depending on Head Orientation when Observing Movies on Ultrahigh-Definition,” *ITE Trans. Media Technol. Appl.*, vol. 3, no. 2, pp. 149–154, 2015.
- [73] G. Kerkhoff, “Neurovisual rehabilitation: recent developments and future directions,” *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, vol. 68, no. 6, pp. 691–706, Jun. 2000.
- [74] J. Barton, “Ocular search during line bisection. The effects of hemi-neglect and hemianopia,” *Brain*, vol. 121, no. 6, pp. 1117–1131, Jun. 1998.
- [75] D. Hill, R. O. Coats, A. Halstead, and M. R. Burke, “A Systematic Research Review

- Assessing the Effectiveness of Pursuit Interventions in Spatial Neglect Following Stroke.,” *Transl. Stroke Res.*, vol. 6, no. 6, pp. 410–20, Dec. 2015.
- [76] H. O. Karnath, “Optokinetic stimulation influences the disturbed perception of body orientation in spatial neglect.,” *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, vol. 60, no. 2, pp. 217–20, Feb. 1996.

謝辞

本研究は、著者が理学療法士として視空間認知障害のリハビリテーションに従事し、その不思議さに魅了され、北海道大学大学院情報科学研究科生命人間情報科学専攻に在学した2010年から約5年間に渡る研究結果である。

本研究の遂行にあたり、医療分野の著者を研究室に迎え入れて頂き、医学と工学の融合において、異なる視点とその重要性について丁寧に御指導頂いた北海道大学大学院情報科学研究科、清水孝一教授に深く感謝申し上げます。

また、本論文をまとめるにあたり、札幌医科大学保健医療学研究科前期博士課程から長年に渡り親身ご指導頂きました、東京大学高齢社会総合研究機構、田中敏明特任教授に深く感謝致します。そして、本システムの制作にお手伝い頂きました北海道科学大学保健医療学部、宮坂智哉教授、折に触れご助言頂きました東海大学基盤工学部、泉 隆教授、北海道立総合研究機構工業試験場、中島 康主査にも感謝致します。

さらに、研究を進めるにあたり事務手続等で時間を割いて頂きました、浪田 健博士研究員（現京都大学大学院医学研究科）、北海道大学大学院情報科学研究科、加藤裕次助教には大変お世話になりました。

最後に、これまでの研究において被験者として協力して頂きました、全ての視空間認知障害の患者、家族の皆様に感謝申し上げます。