

修士論文

視野障害下での読み特性にもとづく電子リーダーの 設計

公立はこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科
情報アーキテクチャ領域

小橋 元春

指導教員 川嶋 稔夫

提出日 2022年1月13日

Master's Thesis

Design of an Electronic Reader Based on Reading Characteristics under Visual Field Impairment

by

Motoharu Kohashi

Graduate School of Systems Information Science, Future University Hakodate
Media Architecture Field

Supervisor: Toshio Kawashima

Submitted on January 13, 2022

Abstract—

In this paper, we aim to develop an e-reader that is easy to read for people with visual field disorder by investigating the reading characteristics of visual field disorder.

Visual field disorder is a general term for symptoms that cause partial loss of the visual field. Severe visual field impairment makes it difficult to recognize the environment and interferes with daily life. In particular, visual field defects can greatly reduce the ability to read.

Reading is performed by repeated eye movements such as pausing and saccades. Sighted people can smoothly perform stopping and saccades while utilizing their peripheral vision. However, when peripheral vision is lost due to visual field impairment, it becomes difficult to determine the stopping position and reading speed is greatly reduced.

Therefore, this study aims to develop an e-reader that is easy to read for people with visual field impairment, and to support their reading. Since the layout of the text in the e-reader can be changed flexibly, there is a possibility that the reading speed can be improved by changing the layout appropriately according to the symptoms of visual field disorder. We developed a VR-based reading simulator for visual field disorders and investigated the characteristics of reading in visual field disorders, and found that an increase in the number of pauses during reading was the cause of the decrease in reading speed in visual field disorders. Therefore, the development of an e-reader with an inter-sentence line break layout may reduce the number of pauses during reading and improve the reading speed of visual field disorder.

Keywords: Visual Field Impairment, Reading, VR

概要：

本論文では、視野障害者であっても読みやすい電子リーダーの開発を目指す。

視野障害とは、視野の部分的な欠損を引き起こす症状の総称である。重度な視野障害は環境の認識を困難とし、日常生活に支障をきたす。特に、視野障害は「読み」の能力を大きく低下させる。

読みは、停留とサックードといった眼球運動の繰り返しによって行われる。晴眼者は、周辺視を活用しながらスムーズに停留とサックードを行うことができる。しかし、視野障害により周辺視が失われると、停留位置の決定が困難となり、読みの速度が大きく低下してしまう。

そこで、本研究では、視野障害であっても読みやすい電子リーダーを開発することにより、読みの支援を行う。電子リーダーは文章レイアウトを柔軟に変更できるため、視野障害の症状に合わせて適切にレイアウトを変更することで、読み速度を改善できる可能性がある。VRを用いた視野障害シミュレーターを開発し、視野障害の読みの特徴を調査したところ、読み速度低下の原因は、読み動作の停留回数の増加であることが判明した。

そのため、文節間改行レイアウトを用いた電子リーダーを開発することで、読み動作の停留回数を低減することにした。VR 視野障害シミュレーターを用いて、開発した電子リーダーの効果を調査したところ、視野狭窄条件での読み速度を改善できる可能性があることがわかった。

キーワード： 視野障害, 読み, VR

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	目的	2
第 2 章	関連研究	4
2.1	従来の読みの研究	4
2.2	視野障害シミュレーターを用いた研究	5
2.3	電子リーダーを用いた視野障害者の読書支援	6
第 3 章	VR 視野障害シミュレーター	8
3.1	シミュレーターを用いる意義	8
3.2	視野障害シミュレーションの実装	9
第 4 章	視野障害の読み特性調査	15
4.1	求心性視野狭窄の読み特性	15
4.2	様々な視野障害の読み特性	32
第 5 章	電子リーダーの開発	35
5.1	電子リーダー設計方針	35
第 6 章	結論	39
	参考文献	43

第 1 章

序論

視野障害は、読みの能力を大きく低下させることが知られている。しかし、全盲者を対象とした読書支援を扱った研究に対し、視野障害者のような弱視者の支援を目的とした研究は少ない。本研究では、視野障害者を対象として、電子リーダーを用いた読書支援を目指す。

1.1 背景

視野障害とは、視野の部分的な欠損を引き起こす症状の総称である。視野障害によって欠けた視野は脳が自動的に映像を補完してしまうため、視野障害が発生していることに気付かないこともある。重度な視野障害は環境の正しい認識を困難とし、日常生活に支障をきたす。例えば、車の運転が困難となるだけでなく [1]、徒歩での移動にも危険を伴う場合があることが報告されている [2]。

特に、視野障害は「読み」の能力を大きく低下させることが知られている。読みは、一点を注視する「停留」と、停留の間に行われる「サッカード」といった二つの眼球運動の繰り返しによって行われる。図 1.1 は晴眼者の読書時の視線の動きであり、停留を青い円、サッカードを赤い線で示している。停留では、中心視によって停留位置の文字情報を読み取るとともに、周辺視野を用いて次の停留位置の決定を行う [3]。そのため、スムーズに停留とサッカードを繰り返しながら文章を読むことができる。

しかし、視野障害の影響により、周辺視野が失われる場合がある。例えば、視野障害の症状の一つである求心性視野狭窄の場合は、中心視の狭い範囲を残し、周辺視野が完全に失われる (図 1.2)。周辺視野の情報が得られないと、停留位置のスムーズな決定が困難となるため、たとえ中心視に十分な視力があっても、読み速度が大きく低下してしまう。「読み」の能力は、日常生活や仕事において必要不可欠な能力である [4]。そのため、重度の視野障害者の生活の質の向上のためには、読み能力の改善が重要である。しかし、全盲者を対象として、視覚以外を用いる読書支援を行った研究に比べ、視野障害者のような弱視者を対象として、残された視覚を有効活用するような支援を目的とした研究は少ない。

するような人間ではなかったのであります。
 と、どう男は、悪いことをしたために、捕らえられて牢屋へいれ
 られてしまいました。いままで、自由に、大空の下を歩いていたも
 のを狭苦しい牢屋の中で送らなければならなかったのです。

図 1.1 読書中の眼球運動のイメージ。

ーヴォのす
 底に冷たさを
 しい森で飾ら
 いぎらぎらひ

図 1.2 求心性視野狭窄による視野欠損のイメージ。

1.2 目的

本研究では、媒体として電子リーダーを用いた視野障害者の読書支援を行う。電子リー
 ダーは柔軟性が高く、文章レイアウトを自由に変更することができる。また、Web ブラウザ
 やスマートフォン、タブレットなど、様々な端末から利用できるように、特殊な装置を利用せ
 ずとも読書支援を受けることができる。そのため、視野障害の症状に合わせて電子リーダ
 ーの文章レイアウトを適切に変更することで、視野障害者の読み能力を改善できるのではな
 いかと考えた。本研究では、視野障害が読み能力を低下させる原因を調査し、その原因を改善
 するような電子リーダーの設計を行った。

第 2 章では、従来の「読み」に関する研究の事例と、それらの課題を紹介し、本研究の位
 置づけを明らかにする。また、電子リーダーを扱った研究をもとに、電子リーダーを用いた
 視野障害の読書支援の可能性について検討する。

第 3 章では、本研究で開発した VR 視野障害シミュレーターの実装方法についての詳細を
 説明する。また、視野障害を対象とした読みの研究において、視野障害シミュレーターを用
 いる意義について説明する。

第 4 章では、視野障害の読み特性調査に関する実験について述べる。本研究では、視野障
 害シミュレーターを用いた晴眼者を被験者とし、視野障害が読み速度を低下させる原因を調
 査した。電子リーダーの表示方式や視野障害の症状などを変更し、複数回にわたって行った
 実験から、視野障害の読みの特性について説明する。また、晴眼者だけでなく、実際の視野
 障害者の方に協力していただき、実験を行った。晴眼者の結果と視野障害者の結果を比較す

ることで、本研究で開発した視野障害シミュレーターの有効性を確認する。

第5章では、電子リーダーの設計について説明する。第4章で調査した視野障害の読み特性をもとに、どのような電子リーダーならば視野障害であっても読みやすいのかを検討する。

第 2 章

関連研究

本章では、人間の読みのメカニズムについて、過去の研究の事例を参考にしながら紹介する。また、視野障害の読み特性調査に関する過去の研究や、それらの課題、および電子リーダーを用いた読書支援の事例について説明し、本研究の位置付けを明らかにする。

2.1 従来の読みの研究

「読み」は、眼球運動や文章の意味の理解といった、複雑な過程によって行われる。神部は、読書時の眼球運動の特性をもとに、読みの過程を調査しようとした [3]。人間の眼球運動は、1 点を注視した後、すばやく眼を動かし、また別の 1 点を注視するというような動きとなる。このとき、1 点を注視する動きを「停留」、素早い眼の動きを「サッカード」と呼ぶ。

停留は、1 点を長時間注視する眼球運動である。一般的な停留の時間は 250~300ms であり、文字の読み取りや文章の理解、次の停留位置の決定は、この間に行われる。人間の視野は、中心視と周辺視に分かれており、視野中央の約 3°の中心視より外側になると、文字の認識は難しくなる [5]。そのため、停留の際には、中心視で文字情報を読み取り、周辺視で次の停留位置の決定を行う。

サッカードは、停留と停留の間に行われる、素早い眼球運動である。サッカード中は、サッカード抑制と呼ばれる状態になっており、視野の情報は遮断され、文字を読み取ることはできない [6]。そのため、読書中の眼球運動は、停留とサッカードを交互に行いながら右方向へ文章を読み進め、行末まで読み終えたのち素早く行頭まで眼を戻す、というような運動の繰り返しとなる。なお、一時的に左方向に戻って前の文章を読み直す動きは regression（逆行）、行末から行頭へと眼を戻す動きは return sweep（行替え）とも呼ばれる。

上述の読みの特性は、視覚障害などの病気を持たない、晴眼者の特性である。視野障害によって周辺視が失われていると、停留時に次の停留位置の決定が困難となる。そのため、視覚障害者の読み特性は、晴眼者と大きく異なる可能性がある。

そこで、視覚障害者を対象として、晴眼者との読み特性の違いを調査する研究も行われている。村田らは、アイトラッカーを用いて、網膜色素変性症患者（以下 RP 者とする）の読

書中の眼球運動を分析した [7]. 網膜色素変性症は、網膜に異常をきたし、夜盲や視野狭窄、輪状暗点などの様々な症状を引き起こす病気である。実験の結果、晴眼者に対し、RP 者の停留時間は長く、サッカード距離は短くなっていた。

しかし、実際の視野障害者を被験者とする場合には、複数の課題が発生する。そのうち 1 つは、視野障害の症状の個人差が大きい点である。例えば、村田らの研究においては、被験者 11 名のうち、輪状暗点の症状が 5 名、求心性視野狭窄の症状が 4 名、それらに分類できない症状が 2 名であり、被験者間で症状が大きく異なっていた。そのため、視野障害の症状を確認する必要がある従来の研究においては、眼科での診断結果を用いる、ゴールドマン視野計やハンフリー視野計により視野を測定するなどが行われていた [8]。しかし、視野の測定には時間がかかるほか、専門家による診断が必要な場合もある。また、被験者ごとに症状が異なるため、実験結果の分析が難しい。

もう 1 つは、実験自体の実施が難しい点である。視野障害が日常生活に支障をきたすほど重症である場合、移動に不便を伴う。そのため、被験者が移動可能な位置にあり、かつ安全な実験場所を確保する必要がある。これらの理由から、実際の視野障害者を被験者として、有効な研究を行うのは非常に難しい。

2.2 視野障害シミュレーターを用いた研究

2.1 節では、実際の視野障害者を被験者とした研究の事例や、課題について説明した。視野障害シミュレーターを用いて晴眼者を被験者とする場合は、2.1 節で説明したような課題を解決できる。本節では、視野障害シミュレーターを用いた研究の事例について説明する。

晴眼者を被験者とした従来の研究においては、ディスプレイ上に視野障害の見え方を再現するものがある。例えば、ある文章の読んでいる位置の中心付近のみを正常に表示し、周辺の文字を意味のない記号 (X など) に置き換えたものや (図 2.1 左) [9]、アイトラッカーを用いて眼球運動を測定し、読んでいる位置の周辺を全て白く塗りつぶすことで求心性視野狭窄の見え方を再現したものがある (図 2.1 右) [10]。しかし、ディスプレイに視野障害を再現する場合、周辺視の情報を完全に遮断することができない。たとえば、文字を置き換える場合は置き換えた後の記号が見え、周辺視を白く塗りつぶす場合は、ディスプレイの枠や、ディスプレイ外の情報を遮断することができない。そのため、文字以外の周辺視情報を用いて停留位置の決定を行える可能性があり、実際の視野障害の読み特性とは異なる。

また、光学的な視野障害シミュレーター (図 2.2) を用いて実験を行った研究がある。そのようなシミュレーターを用いた事例としては、小林らのものがある [11]。光学的視野障害シミュレーターは、先端に小さな開口部があるコーン状のマスクを装着することで、求心性視野狭窄の見え方を再現する。また、マスクを取り替えることによって、視野狭窄の残存視野の大きさを自由に変更することもできる。

しかし、上記の実験で用いられていたシミュレーターは、頭部の動きには連動するものの、眼球運動には連動しないという欠点がある。実際の視野障害の場合は、眼を動かすと、その

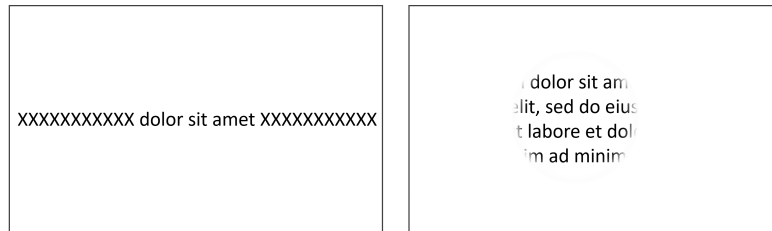


図 2.1 周辺視の文字を置き換えた事例（左）と，周辺視を白く塗りつぶした事例（右）のイメージ。



図 2.2 高田巳之助商店製 シミュレーションレンズの写真（左）および，着用時の見え方のイメージ（右）。

動きに連動して視野も移動する。そのため，従来の視野障害シミュレーターは，実際の視野障害とは条件が異なってしまう。また，頭部に装着するという特性上，シミュレーターを装着すると外部から眼球運動を測定することができないため，得られるデータが限られてしまう。

近年，アイトラッカーを内蔵した VR ヘッドセットが一般化され，入手が容易になった。Jones らは，そのような VR ヘッドセットを用いて，装着者の眼球運動をリアルタイムで反映するような視野障害シミュレーターを開発した [12]。眼球運動を測定し，視線をもとに視野の状況を変化させられるため，実際の視野障害に近い条件でのシミュレーションが可能である。

そこで，本研究では VR を用いた視野障害シミュレーターの開発と，それを用いた視野障害の読み特性調査を行う。アイトラッカー内蔵の VR ヘッドセットはまだ新しく，シミュレーターを用いた読みの研究はあまり行われていない。本研究では，シミュレーターを用いた晴眼者の実験と，実際の視野障害者の実験を行い，VR 視野障害シミュレーターを用いた読みの研究の有用性を検討する。

2.3 電子リーダーを用いた視野障害者の読書支援

電子リーダーは，文字サイズや文字色，背景色，文章レイアウトなどを柔軟に変更できる。そのような電子リーダーの柔軟性を利用し，晴眼者や視野障害者の読書支援を行った研究は多い。

小林らは、晴眼者を対象として、文章レイアウトを変更することにより日本語文章の読み速度を向上させようとした [13]。この研究においては、行ごとに文章の開始位置を右にずらす階段インデント、文節ごとに行頭から行末にかけて表示位置をわずかに下にずらす階段状ベースライン、および行ごとに背景色を変更するストライプ型背景色などのレイアウトが用いられている。その結果、読み速度を落とすことなく行長を短くできることが報告されている。

視覚障害者の読書支援を対象としたものとしては、Legge の事例がある [14]。Legge は、文字サイズと文字色、背景色などの電子リーダーのパラメーターが弱視者の読みに与える影響を調査した。その結果、文字サイズを大きくすること、および背景と文字のコントラストの差が高くなるように色を変更することで、弱視者の読み速度をある程度改善できる可能性があることがわかった。

本研究では、視覚障害の中でも、特に視野障害を対象としている。そのため、上述したような対策では読み速度を改善できない可能性がある。例えば求心性視野狭窄の場合、文字サイズを大きくすると視野内の文字数が減少し、かえって読み速度が低下することがある [8]。そこで、本研究では、視野障害の読みの特徴を調査することで、視野障害であっても読みやすい電子リーダーの設計方針を検討する。

第3章

VR 視野障害シミュレーター

本研究では、VR を用いた視野障害シミュレーターを開発し、それを用いて視野障害の読み特性調査を行う。本章では、視野障害シミュレーターを用いる意義や、VR 視野障害シミュレーションの実装方法について説明する。

3.1 シミュレーターを用いる意義

第2章で述べたように、実際の視野障害者を被験者として実験を行うには課題が多い。たとえば、図 3.1 のように開発、実験、分析・評価を繰り返して電子リーダーを開発する場合、実験のプロセスにおいて複数の課題が発生する。

視野障害シミュレーターを用いると、実験の課題を「晴眼者の被験者の確保」の1つに減らすことができる。それにより、実験プロセスにかかる時間が短くなるため、効率的な電子リーダーの開発が可能となる。

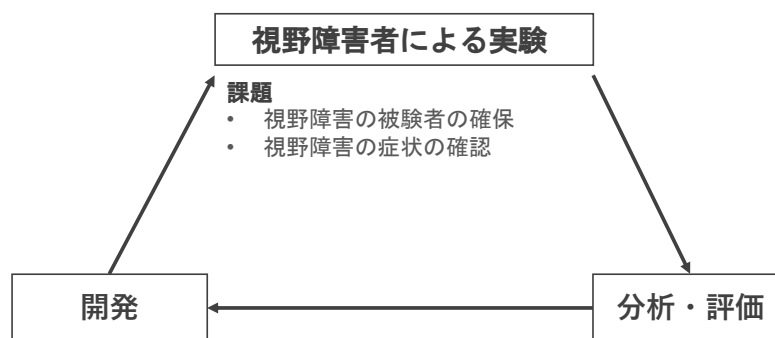


図 3.1 電子リーダーの開発プロセスの模式図。

3.2 視野障害シミュレーションの実装

本研究では、視線検出機能付きの VR ヘッドセットである HTC ViveProEye と、3D ゲーム開発エンジンである Unity を用いて視野障害シミュレーターを開発した。ViveProEye は Tobii 社製のアイトラッカーを内蔵しており、Unity を使用した状態ではおよそ 90Hz で視線の記録が可能である。VR 視野障害シミュレーターは、文章を表示する仮想電子リーダーと、視野障害の見え方を再現する視野制限マスクから構成される。本節では、それぞれの実装、および実験時のデータ記録方法について述べる。

3.2.1 仮想電子リーダー

文章を表示する電子リーダーは、VR 空間内に仮想的に表示される (図 3.2)。表示される文章の行長、文字サイズ、および、被験者と電子リーダーの距離は、実験開始時に指定するものとした。電子リーダーの表示位置は、実験開始時の被験者の位置および頭部の向きから決定され、被験者の顔から設定した距離だけ離れた正面方向に配置される。電子リーダーの文字サイズ S は視角 ($^{\circ}$) で指定するものとし、以下の計算式を用いて決定した。

$$S = d \times \tan\left(r \times \frac{\pi}{360}\right) \times 2 \quad (3.1)$$

このうち、 d は被験者と電子リーダーとの距離 (m) であり、 r は文字の視角サイズ ($^{\circ}$) である (図 3.4)。

電子リーダーに表示する文章は、小説家・児童文学作家である小川未明の作品から、約 500 文字程度を抜き出したものとした。文章内に難解な漢字が使用されており、被験者が漢字を読めなかった場合、視線が長時間停留してしまい、実験結果に影響を及ぼす可能性がある。そのため、文章を抜き出す際に、一部の難解な漢字 (畠など) は簡単な漢字 (畑など) に置き換えた。また、文章の末尾には、文章が終わったことが分かりやすくなるように、記号の「●」を追加した。

3.2.2 視野制限マスク

本研究で開発した VR 視野障害シミュレーターは、電子リーダーの上に視野制限マスク画像を合成することによって、視野障害の見え方を再現している (図 3.3)。視野制限マスクは、開口部、半透過部、遮蔽部から構成される。遮蔽部は完全に文章を遮蔽するため、シミュレーターの使用者は開口部からのみ文章を読むことができる。半透過部は、開口部から遮蔽部にかけて透過率が漸減する。第 1 章で述べたように、視野障害により欠けた視野は脳が自動的に補完してしまうため、視野が欠けていることに気付かない場合もある。そのため、開口部と遮蔽部の境界が分かりにくくなるように半透過部を設置することで、視野障害の見え



図 3.2 実際の VR 視野障害シミュレーターの映像。左は晴眼条件で、右は視野狭窄条件の画面を表示している。

方に近づけた。

視野制限マスクは、開口部を中心として、シミュレーター使用者の視線に追従して移動する（図 3.4）。具体的には、視線と仮想電子リーダーの交点を計算し、そこから被験者側に 5cm ずらした位置に開口部の中心が配置されるように移動する。視線は、ViveProEye 用のアイトラッキング SDK である SRanipal を用いて、左右の眼で個別に検出した。眼球運動を左右で個別に記録することにより、データのブレを軽減し、より正確な眼球運動の検出が可能である。そのため、視野制限マスクは 2 つ配置し、左右の眼それぞれに対応するようにした。利き目側のマスク画像は、利き目の視線に追従して移動する。利き目の反対側のマスク画像は視線の動きには追従せず、利き目側のマスクの動きに追従する。このとき、ヘッドセットの瞳孔間距離を取得し、利き目と逆側にマスクを移動させることによって、視差を軽減した。

開口部の直径の視角サイズは実験開始時に決定する。被験者が電子リーダーに顔を近づけた場合も常に設定した視角サイズになるように、直径のサイズは毎フレーム (3.1) 式を用いて更新した。このときの d は、仮想空間内におけるヘッドセットと電子リーダーの距離とした。

3.2.3 実験データの記録

本研究では、3.2.2 節で述べたように、視線検出精度を高めるために、左右の眼で個別に眼球運動を検出する。図 3.5 は、両目から検出した読書時の視線データと、片目ずつ検出した視線データである。両目の動きは完全に同期しているわけではなく、左右の眼が異なる動き

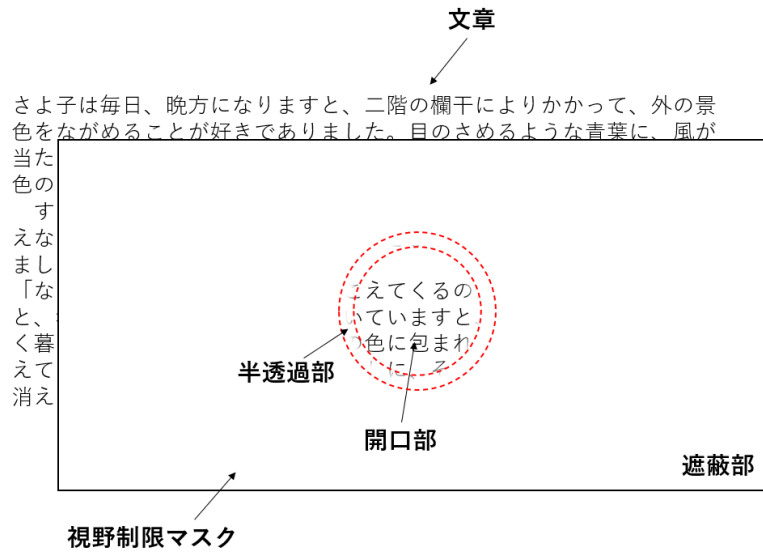


図 3.3 視野障害シミュレーションのイメージ。

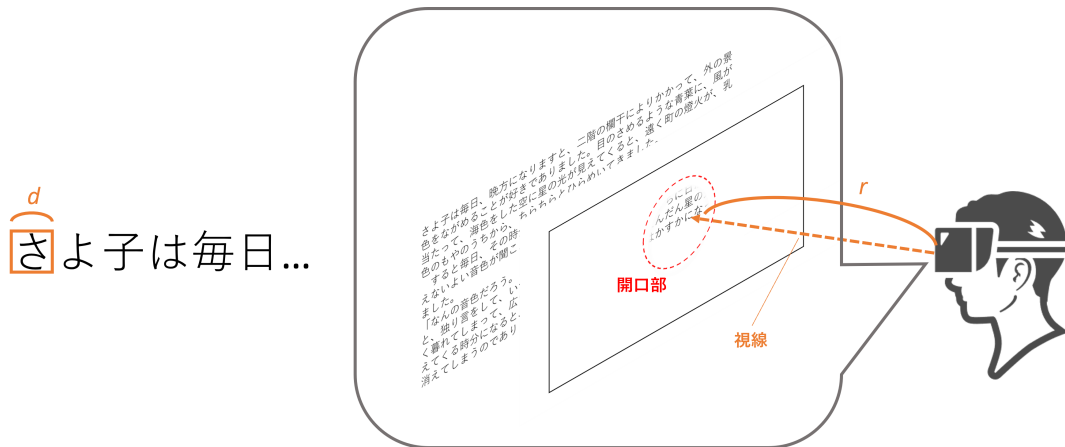


図 3.4 視野障害シミュレーションへの視線の反映方法. 式 3.1 の d および r を示している。

をしている間は視線の検出精度が低くなることがある。図 3.5 では、特にサッカードの直後に視線の検出精度が落ちていることがわかる。それに対し、片目ずつ検出した視線は検出精度が高く、より正確に眼球運動を分析できる。そのため、本研究では眼球運動を個別に取得し、利き目のデータのみを分析対象とした。

本研究では、頭部運動と眼球運動を区別する。具体的には、図 3.6 のように、頭部と眼球の運動をそれぞれ個別に記録し、それらを組み合わせて視線運動を計算する。まず、VR ヘッドセットのトラッキング情報を用いて、ワールド座標系における頭部の向きを取得する。次に、頭部の正面方向を基準とした頭部座標系において、アイトラッキングによって得られた眼球の向きを取得する。最後に、頭部の向きと眼球の向きを組み合わせ、ワールド座標系における視線の向きを決定する。

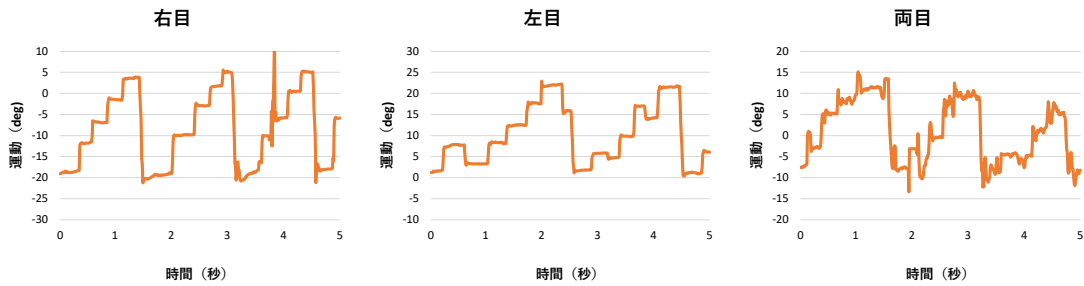


図 3.5 片目ずつ検出したデータと、両目を合わせて検出したデータの比較.

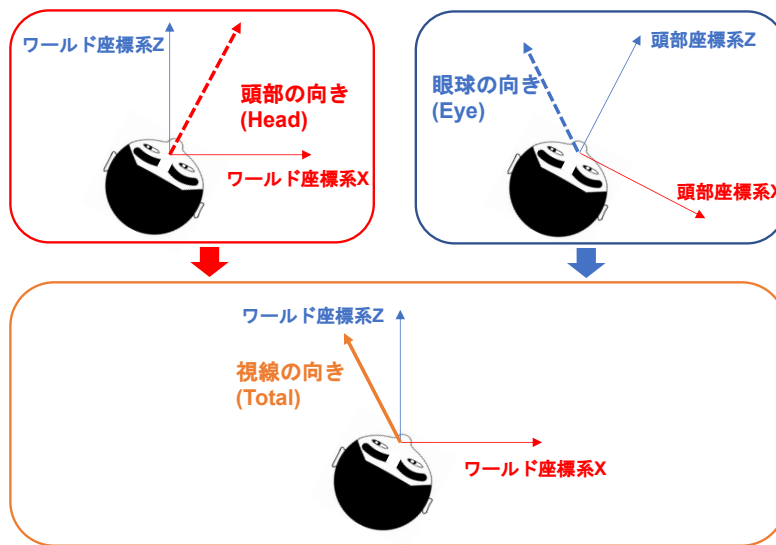


図 3.6 頭部・眼球・視線の記録方法.

従来の読みの研究は、アイトラッカーを用いて視線の動きのみを分析したものが多く、頭部運動と眼球運動の違いについて注目したものは少なかった。しかし、実際の視野障害者を被験者とした研究において、視野障害者は頭部を動かしながら文章を読んでいたこと、およびシミュレーターを使用した晴眼者も同様に頭部の運動が発生することが報告されている [11]。そのため、読書時の頭部運動は、視野障害者の読みの特徴であると考えられる。そこで、本研究では、上述のように視線の動きを頭部と眼球の動きに分類することにした。頭部と眼球の運動の違いについて注目することで、従来の研究では得られなかった新たな知見が得られると考えている。

分析対象のデータは、頭部・眼球・視線の動きのデータと、電子リーダー上の視線の移動軌跡の2つとした。頭部・眼球・視線の動きは、頭部運動の有無の確認や、停留回数・停留時間の計算に使用され、図 3.7 のように数値で表示される。このデータを基に折れ線グラフ (図 3.8) を作成し、そこから手動で停留回数や停留時間を求めた。グラフの詳細については、第 4 章で説明する。

Design of an E-Reader Based on Reading Characteristics 3. VR 視野障害シミュレーター

LineLengt	30 X :				0 Y :		0.25	FontSize :	0.0044	FilePath(L:\C:\Users\Dominant\RIGHT
Head X	Head Y	Eye X	Eye Y	Head+Eye	Head+Eye	Distance				
-0.13922	-0.08503	-0.05019	0.186646	-0.19291	0.101286	0.30006				
-0.13919	-0.08503	-0.05103	0.185106	-0.19368	0.09972	0.3001				
-0.13906	-0.08515	-0.05103	0.185106	-0.1936	0.099582	0.300137				
-0.13884	-0.08503	-0.05055	0.184161	-0.1929	0.098758	0.300062				
-0.13867	-0.08506	-0.05022	0.184388	-0.1924	0.098968	0.300089				
-0.13847	-0.08513	-0.05022	0.184388	-0.1922	0.098899	0.300156				
-0.13819	-0.0851	-0.0502	0.184832	-0.19188	0.099387	0.300131				
-0.13803	-0.08514	-0.05034	0.182848	-0.19183	0.097336	0.300137				
-0.13778	-0.08521	-0.05019	0.182084	-0.19141	0.096503	0.30006				
-0.13755	-0.08503	-0.05019	0.182084	-0.19117	0.096689	0.300057				
-0.13708	-0.0851	-0.05187	0.182391	-0.19237	0.096889	0.300051				
-0.137	-0.08512	-0.0513	0.182282	-0.19175	0.096766	0.300121				
-0.13679	-0.08515	-0.0513	0.182282	-0.19152	0.096745	0.300163				
-0.1363	-0.08511	-0.05104	0.18335	-0.19076	0.097882	0.300075				
-0.13587	-0.08537	-0.05083	0.184282	-0.19008	0.098588	0.300073				
-0.13536	-0.08545	-0.05083	0.184282	-0.18961	0.098502	0.299951				
-0.13478	-0.0853	-0.05121	0.183719	-0.18939	0.098073	0.299906				
-0.13404	-0.08519	-0.0515	0.183748	-0.18893	0.098211	0.29979				
-0.13339	-0.08536	-0.0518	0.183839	-0.18862	0.098122	0.299743				
-0.13217	-0.08533	-0.0518	0.183839	-0.18746	0.098134	0.299656				
-0.13085	-0.08522	-0.05315	0.183931	-0.18756	0.098283	0.299545				
-0.12893	-0.08507	-0.01788	0.194703	-0.15107	0.110071	0.299414				
-0.12721	-0.08489	-0.00966	0.184602	-0.14119	0.100206	0.299224				
-0.12531	-0.08493	-0.00966	0.184602	-0.13936	0.100168	0.299101				
-0.12317	-0.08498	-0.00905	0.182468	-0.13669	0.097966	0.298987				

図 3.7 実験で記録される数値データ。頭部や眼球の動きのほか、利き目や文字サイズ、使用した呈示文章などが記録されている。

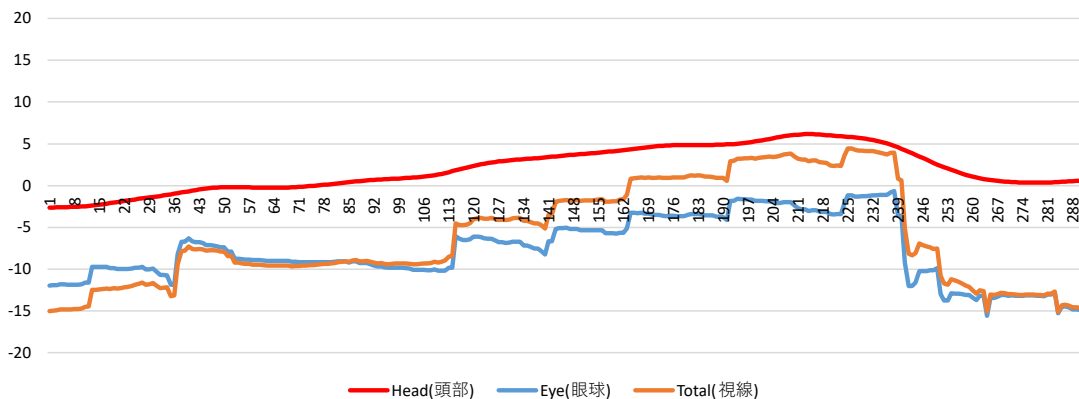


図 3.8 数値データをもとに作成したグラフ。縦軸が運動の角度、横軸がタイムスタンプを表している。Head は頭部運動、Eye は眼球運動、Total は視線運動を表している。

視線の移動軌跡は、被験者の大まかな視線の動きの把握に使用される。視線の軌跡は、図 3.9 のように、停留点を青い円とし、サッカードを赤い線とした状態で表示される。停留点とサッカードは、視線データの移動距離をもとに自動的に区別した。具体的には、視線が 0.05 秒以上動いていない場合を停留とみなし、それ以外の運動はすべてサッカードとした。停留点の円の大きさは、停留時間を表している。

なお、本研究では、読書中の視線の動きを、役割をもとに 2 つの動作に分類した (図 3.10)。そのうち、行頭から行末まで右方向に読み進める動作が読み動作である。また、読み動作の最中に発生する、一時的に左方向に眼を動かし、前の文を読み直す際の動き (regression)

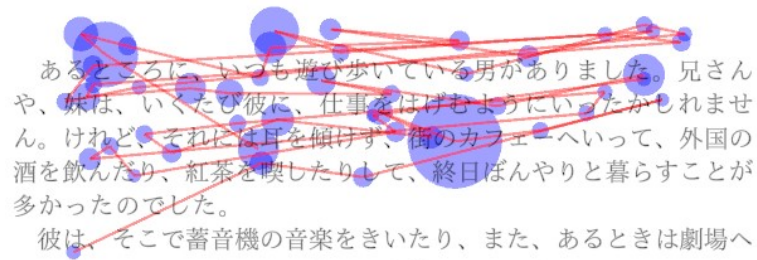


図 3.9 電子リーダー上の視線の移動軌跡.

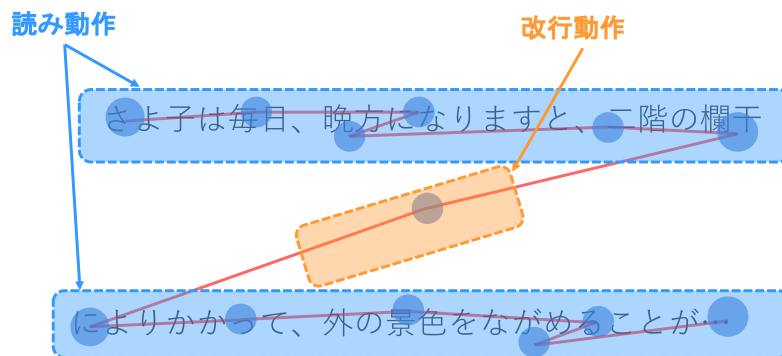


図 3.10 読書中の視線の動きの分類方法.

も読み動作に含まれる。行末から次の行の行頭へと左方向へ視線を動かす動作，すなわち return sweep は改行動作と呼ぶことにした。なお，改行動作の停留は，行末と行頭を除いた中間の停留のみを指す。例えば，行末から行頭まで一度のサッカードで視線を動かしていた場合は，改行動作の停留回数は 0 回となる。

第 4 章

視野障害の読み特性調査

4.1 求心性視野狭窄の読み特性

本研究では、求心性視野狭窄を対象に、視野障害が読みに与える影響を調査するための実験を行った。本節では、視野障害シミュレーターを用いて晴眼者を被験者とした実験について説明する。

4.1.1 行長と読み特性の関係

目的

本実験では、試作した VR 視野障害シミュレーターが実際の視野障害の特性をどの程度再現できているかを確認した。具体的には、第 2 章で述べた小林らの先行研究の結果 [11] と、開発したシミュレーターを使用した際の結果を比較し、実際の視野障害者の結果と類似している点があるか確認した。

手法

呈示文章には、第 3 章で述べたように、小川未明の作品から 500 文字程度を抜き出したものを使用した。電子リーダーの文字サイズは、先行研究と同じ 4.4mm に固定した。被験者の頭部と電子リーダー間の距離は、30cm または 60cm とした。行長は、5, 10, 20, 30 文字の 4 種類の間で変化させた。

被験者は、晴眼者の学生 4 名 (A1~A4) とした。このうち、被験者 A1, A2 の 2 名および、被験者 A3 の 1 回目の実験においては、視野制限マスクの開口部の直径が視角 5° で、電子リーダーとの距離が 30cm の条件で実験を行った。被験者 A3 の 2 回目の実験、および被験者 A4 においては、開口部の直径が視角 10°、電子リーダーとの距離が 60cm の条件で実験を行った。

被験者には、VR ヘッドセットを装着した状態で文章を黙読してもらい、その際の頭部、眼球、視線の動きをそれぞれ記録した。その後、行長や視野制限マスクの有無などの条件を

変化させた後、別の呈示文章を使用して実験を行った。

小林らの実験との比較

比較対象として、実際の求心性視野狭窄の被験者を対象に実験を行った、小林らの事例を選んだ [11]。小林らの論文では、電子リーダーには Apple 社製 iPad を使用しており、文字サイズは 4.4mm、行長は 5 文字から 30 文字の間で設定されている。晴眼者を含め、被験者は 23 名であったが、そのうち求心性視野狭窄の被験者は 2 名 (P1, P2) であり、どちらも残存視野は約 10° であった。

晴眼者の被験者は、電子リーダーとの距離は約 30~40cm 程度であったが、全員頭部を動かさずに読んでいた。求心性視野狭窄の被験者 P1 は中心視力が十分に残っており、電子リーダーとの距離を約 60cm 程度まで離して文章を読んでいた。その際、行長の条件に関わらず、読書時に頭部の運動は発生していなかった。それに対し、被験者 P2 は電子リーダーとの距離は約 30cm 程度であった。その際、行長が 11 文字以上の条件においては、読書時に頭部を左右に動かしていた。

本研究では、電子リーダーとの距離が 30cm、60cm の 2 条件において、行長を変化させた際の頭部運動を調査した。開発したシミュレーターが実際の求心性視野狭窄に近い条件を再現できている場合、電子リーダーとの距離が 30cm のとき、行長が長いと頭部運動が発生し、行長が短くなると頭部運動が発生しなくなると考えられる。同様に、電子リーダーとの距離が 60cm の場合は、行長の長さに関わらず、頭部運動は発生しないと思われる。なお、比較対象の論文では頭部運動に伴う読み速度の低下について触れられているが、本実験においては読み速度は分析しなかった。

結果と考察

図 4.1 は、電子リーダーとの距離が 30cm の条件で実験を行った、被験者 A2 の頭部・眼球・視線運動の結果から、5 秒間のデータを抜き出したものである。図中の赤い線が頭部運動 (Head)、青い線が眼球運動 (Eye)、オレンジの線が視線運動 (Total) を表している。縦軸は横方向への運動の大きさ ($^\circ$) を表しており、右方向への運動を正、左方向への運動を負として表した。横軸は時間を表しており、軸の数字は経過した秒数を表している。

晴眼条件では、グラフ内の赤い線が水平であることから、頭部運動が発生していないことがわかる。また、視野狭窄のシミュレーション下で、行長が 20 文字以下の条件においても、同様に頭部運動が発生していなかった。それに対して、視野狭窄かつ行長 30 文字の条件においては、グラフ内の赤い線が傾いていることから、頭部運動が発生していることがわかる。これらの結果から、比較対象の論文において、電子リーダーとの距離が 30cm の状態で読んでいた求心性視野狭窄者の結果と同様に、行長が長い場合において頭部運動が発生していることがわかる。ただし、比較対象においては行長 20 文字の場合でも頭部運動が発生していたのに対し、本実験では行長 20 文字では頭部運動が発生していなかった。

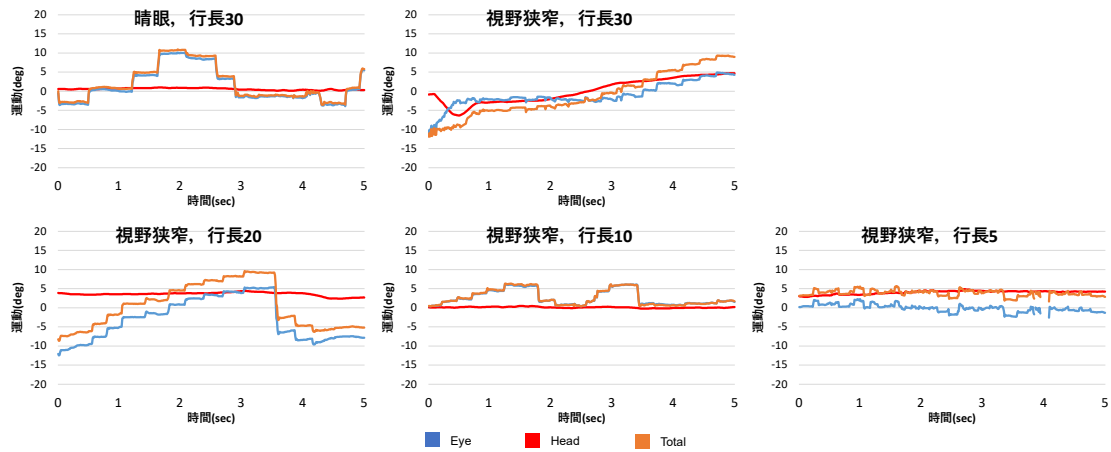


図 4.1 被験者 A2 の頭部・眼球・視線の運動.

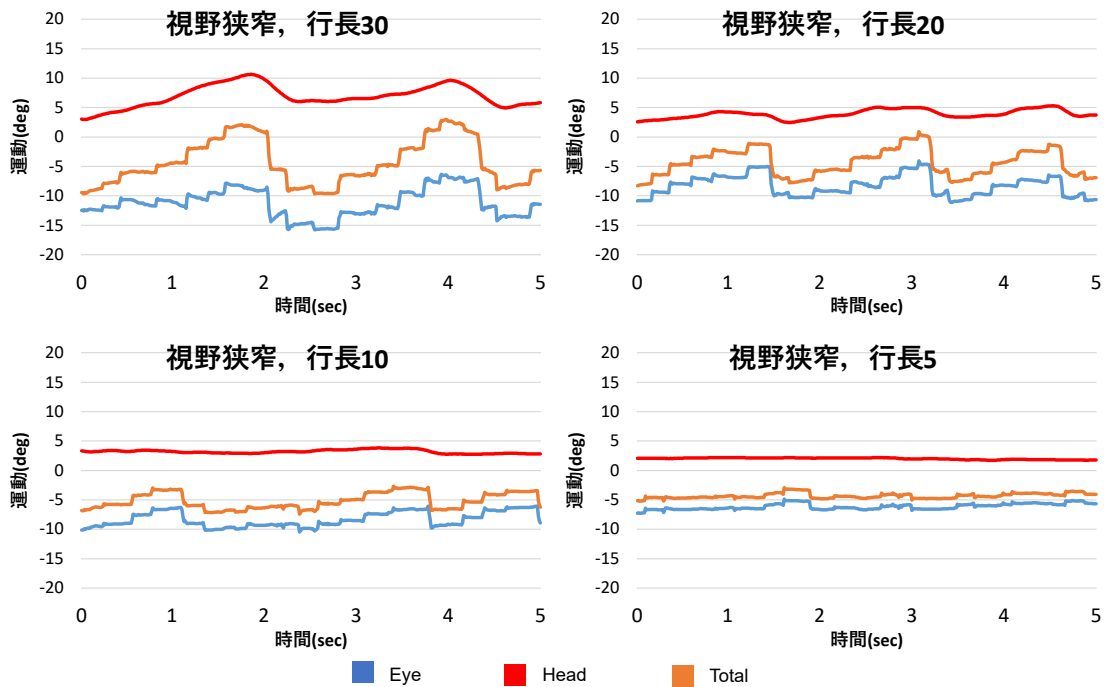


図 4.2 被験者 A4 の頭部・眼球・視線の運動.

図 4.2 は、電子リーダーとの距離が 60cm の状態で実験を行った、被験者 A4 の結果である。被験者 A4 の実験においては晴眼条件での実験を行わなかったため、視野狭窄条件での実験結果のみを表示している。これらのグラフを見ると、行長が 30 文字および 20 文字において、頭部運動が発生していた。比較対象においては、電子リーダーとの距離を 60cm まで離して読んでいた求心性視野狭窄の被験者は行長にかかわらず頭部運動が発生していなかった。

まとめ

本実験では、先行研究を参考にして、電子リーダーの行長を変化させながら、被験者と電子リーダーとの距離が 30cm の場合と、60cm の場合それぞれにおける読み特性を調査した。

電子リーダーとの距離が 30cm の場合、先行研究の結果と同じく、行長が長い場合において、読書時に頭部運動が発生していた。ただし、先行研究では行長 20 文字の場合でも頭部運動が発生していたのに対し、本実験では行長 30 文字では頭部運動が発生するものの、行長 20 文字では発生していなかった。

電子リーダーとの距離が 60cm の場合、先行研究では行長が長くとも頭部運動が発生していなかったが、本実験では行長が 20 文字以上の場合において頭部運動が発生していた。

ただし、この実験においては、視野狭窄条件での読書の練習を行わなかったため、視野狭窄における読みに慣れていなかったと考えられる。そのため、視野狭窄条件に慣れた状態では見られないような読み特性が現れている可能性がある。そこで、視野狭窄に慣れた条件での読み特性を記録するため、電子リーダーの条件を一定にした状態で、より試行数を増やした実験を行うことにした。

4.1.2 視野狭窄条件への慣れと読み特性

目的

4.1.1 節の実験では、視野狭窄シミュレーション下での読み実験の回数が少なかった。そのため、実際の求心性視野狭窄者とは異なり、視野狭窄の見え方に慣れていない条件の結果となっていた可能性が高い。そこで、本実験では、行長や電子リーダーとの距離などの条件を固定し、視野狭窄条件への「慣れ」による読み特性の変化を調査することにした。

手法

呈示文章には、小川未明の作品から 500 文字程度を抜き出したものを新たに用意した。被験者と電子リーダーとの距離は 30cm、文字サイズは 4.4mm、行長は 30 文字で固定した。視野障害マスクの開口部の直径は、視角 10° で固定とした。

被験者は、晴眼者の学生 3 名 (B1~B3) とした。

被験者には、VR ヘッドセットを装着し、呈示文章を黙読してもらい、頭部、眼球、視線の動きをそれぞれ記録した。このとき、視野障害マスクを表示しない晴眼条件と、視野障害マスクを使用する視野狭窄条件の 2 条件で実験を行った。各条件に慣れた条件での読み特性を記録するために、晴眼条件での実験は 3 回程度、視野狭窄条件での実験は 8 回程度行った。その後、視野狭窄条件の試行回数による視線の動きや、停留点、停留時間などの変化を分析した。

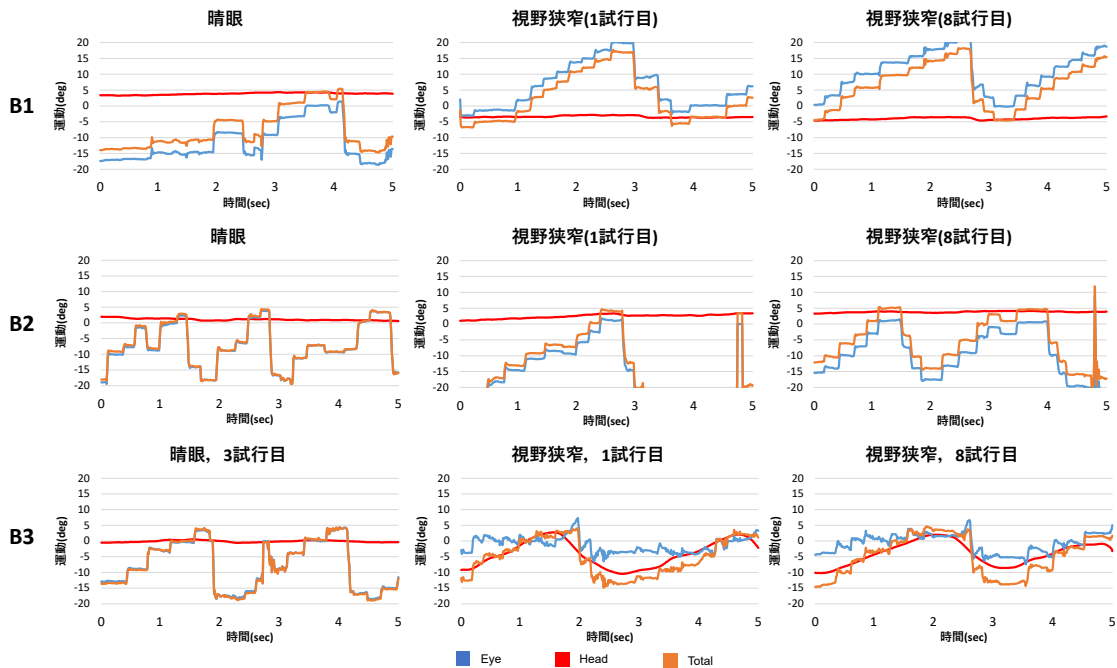


図 4.3 各被験者の頭部・眼球・視線の運動。

慣れによる頭部運動の変化

図 4.3 は、晴眼条件、視野狭窄条件それぞれにおける各被験者の頭部・眼球・視線運動の結果から、5 秒間のデータを抜き出したものである。晴眼条件は 3 試行目、視野狭窄条件は 1 試行目と 8 試行目の結果を表示している。晴眼条件では、全ての被験者は頭部を動かしていなかった。視野狭窄条件では、被験者 B1 と B2 の 2 名は頭部を動かさずに文章を読んでおり、被験者 B3 のみ頭部を動かしながら文章を読んでいた。なお、頭部運動の発生と、視野狭窄条件での実験の試行回数には関係がなく、頭部を動かしていた被験者は、実験初期から常に頭部を動かし続けていた。

慣れによる読み動作停留時間の変化

図 4.4 は、被験者 B1 の読み動作停留時間のヒストグラムである。縦軸は頻度を表しており、横軸は停留時間の長さを表している。停留は、行頭の停留、行末の停留、およびその他(中間)の停留の 3 つに分けた(図 4.5)。また、実験条件および試行回数から、晴眼条件の結果(3 件)、視野狭窄前半の結果(4 件)、視野狭窄後半の結果(4 件)の 3 つに分類して分析を行った。

読み動作の中間停留回数は、晴眼条件と視野狭窄条件で変わらず、約 0.25 秒程度の停留時間が最も多かった。それに対し、結果のばらつきは大きいものの、行末の停留時間のグラフを見ると、晴眼条件や視野狭窄後半条件に比べ、視野狭窄前半条件の結果の停留時間が増

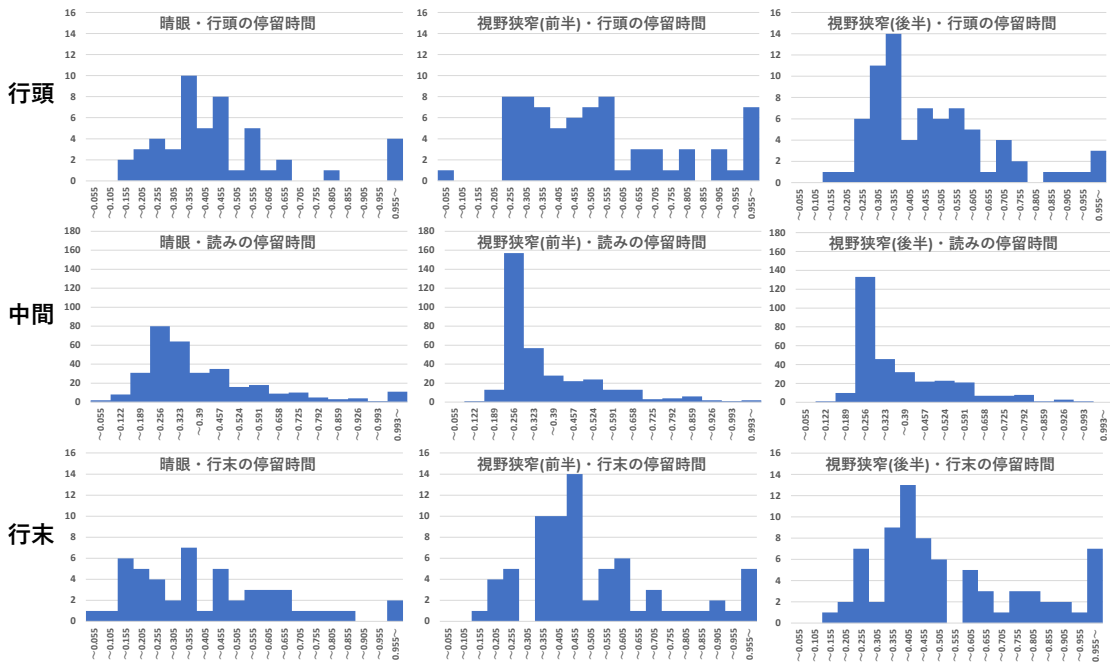


図 4.4 被験者 B1 の読み動作の停留時間.

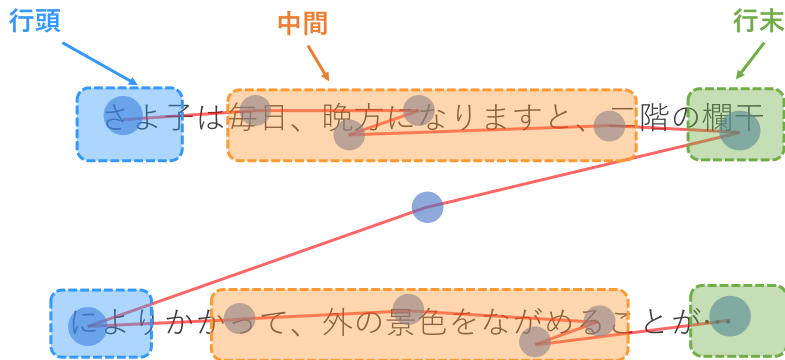


図 4.5 読み動作の停留の分類方法.

加している傾向があった。マン・ホイットニーの U 検定を用いて結果を比較すると、晴眼条件と視野狭窄前半条件、および晴眼条件と視野狭窄後半条件において、行末の停留時間に有意差が見られた（それぞれ $P = 0.025 < 5\%$, $P = 0.007 < 1\%$ ）。行頭や中間の停留時間については、晴眼条件と視野狭窄条件や、実験の試行回数における有意差は見られなかった。このことから、視野狭窄により行末の停留時間が増加した可能性があることがわかった。なお、視野狭窄前半条件と視野狭窄後半条件を比較しても有意差は見られなかった ($P = 0.74 > 5\%$)。そのため、視野狭窄への慣れにより行末の停留時間が変化するかは分からなかった。

まとめ

本実験では、視野狭窄条件での実験の試行回数を増やし、視野狭窄に慣れることによる読み特性の変化を調査しようとした。

頭部運動について分析したところ、被験者 3 名のうち 1 名のみ頭部運動が発生していた。実験の試行回数による頭部運動の変化はなく、頭部運動が発生していた被験者は、1 試行目から既に頭部を動かしていた。反対に、頭部運動が発生しなかった被験者は、最後の試行であっても頭部は動いていなかった。

読書中の停留は、停留の位置から行頭、中間、行末の 3 つに分けて、それぞれの停留時間を分析した。その結果、行頭と中間の停留時間は、実験の試行回数による変化はなかった。行末の停留時間については、晴眼条件より視野狭窄条件の方が増加する傾向があることはわかったものの、実験の試行回数による変化はなかった。

そのため、視野狭窄条件での読みの試行回数はあまり多くなくとも、ある程度視野狭窄に慣れた状態での結果を記録できるのではないかと考えた。そこで、今後の実験では最初に視野狭窄での読み練習を数回程度行うに留め、電子リーダーのパラメーターを変更した際の読み特性の変化を調べることにした。

4.1.3 文字サイズと読み特性の関係

目的

4.1.2 節の実験で、視野狭窄条件での読みは、回数を重ねてもあまり変化しないことがわかった。そこで、本実験では、電子リーダーの文字サイズを変化させることで、頭部運動の発生原因、および頭部運動が読みに与える影響を調査することにした。

手法

呈示文章には、小川未明の作品から、これまでの実験で使用されていないものを新たに用意した。被験者と電子リーダーとの距離は 30cm、行長は 30 文字で固定した。視野障害マスクの開口部の直径は、視角 10° で固定とした。また、全試行において視野障害マスクを表示する条件でのみ実験を行った。

被験者は、晴眼者の学生 5 名 (C1~C5) とした。

本実験では、被験者 C1, C2, C3 の 3 名を対象として、電子リーダーの文字サイズを変化させることで、頭部運動が発生する条件を調査した。初めは文字サイズを視角 0.8° とし、頭部運動が発生していた場合はそこから文字サイズを 0.1° ずつ小さくし、頭部運動が発生しなくなる条件を調べた。反対に、頭部運動が発生していなかった場合は文字サイズを 0.1° ずつ大きくし、頭部運動が発生するようになる条件を調べた。その後、頭部運動が発生する文字サイズにおいて、頭部固定台を使用し、頭部運動を抑制した状態での読み特性を記録した。分析対象のデータは、頭部、眼球、視線の動きとした。また、電子リーダー上の視線の軌跡

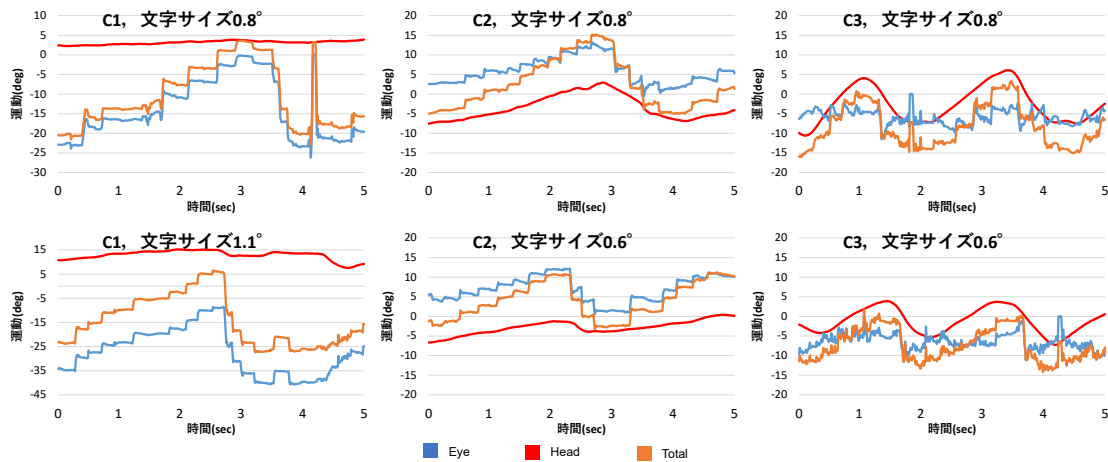


図 4.6 被験者 C1～C3 の頭部・眼球・視線の運動。

から、停留位置、停留回数および停留時間を算出し、分析に利用した。

頭部運動の発生

図 4.6 は、文字サイズを変化させる条件で実験した、被験者 C1, C2, C3 の結果の頭部運動のグラフである。初期条件である文字サイズ 0.8° では、被験者 C2 と C3 の 2 名が頭部を動かしながら文章を読んでいた。文字サイズ 0.8° では頭部運動が発生していなかった被験者 C1 は、文字サイズを 1.1° まで拡大すると、わずかではあるが頭部運動が発生するようになった。初期条件で頭部運動が発生していた被験者は、文字サイズを 0.6° まで小さくしても一部頭部運動が発生していた。文字サイズを 0.5° 以下まで小さくすると文字が読めなくなってしまうため、首振り動作が発生しなくなる閾値が分からなかった。

頭部運動の有無による読み特性の変化

上記の実験結果をもとに、被験者 C1 は首振り動作が発生する文字サイズ 1.1° 条件、被験者 C2 と C3 は文字サイズ 0.8° の条件において、頭部固定台を使用して頭部運動を制限した状態での実験を行った。

図 4.7 は、被験者 C1, C2, C3 の視野狭窄条件における読み動作と改行動作の停留回数のヒストグラムである。頭部固定台を使用していない条件を通常、頭部固定台を使用した条件を台として表示している。各被験者の通常条件と台条件の結果を比較しても、被験者 C3 以外の結果には大きな変化は見られない。マン・ホイットニーの U 検定を用いて結果を比較すると、被験者 C1 および C2 については、読み動作と改行動作の停留回数は、2 条件間で有意差がみられなかった（被験者 C1 においてはそれぞれ $P = 0.77 > 5\%$, $P = 0.86 > 5\%$, 被験者 C2 においてはそれぞれ $P = 0.18 > 5\%$, $P = 0.24 > 5\%$ ）。被験者 C3 については、通常条件に対し、台を使用して頭部運動を抑制した条件のほうが、有意に停留回数が少なかった（読み動作は $P = 0.0008 < 1\%$, 改行動作は $P = 0.02 < 5\%$ ）。

図 4.8 は、被験者 C1, C2, C3 の視野狭窄条件における読み動作停留時間のヒストグラムである。こちらにも、頭部固定台を使用していない条件を通常、台を使用して頭部運動を抑制した条件を台として表示している。各被験者の結果を見ると、被験者 C3 のみ明らかに台条件の停留時間が増加しているが、他は大きな違いはない。U 検定を用いて結果を比較したところ、被験者 C1 については有意差はなかった ($P = 0.47 > 5\%$) もの、被験者 C2 と C3 は通常条件と台条件の間に有意差が見られた (それぞれ $P = 0.00 < 1\%$, $P = 0.00 > 5\%$)。このことから、被験者 C2 は頭部運動が抑制されたことで停留時間が減少し、被験者 C3 は頭部運動の抑制によって停留時間が増加したといえる。この 2 名の被験者は、どちらも文字サイズが 0.8° の時から頭部運動が発生していたという共通点はあるものの、頭部運動の抑制による変化が異なっていたため、最終的な頭部運動が読みに与える影響はわからなかった。

ただし、被験者 C3 の台条件において停留時間や停留回数が増加したのは、アイトラッキングの精度が原因の可能性がある。被験者 C3 は実験時に眼鏡を使用していたためか、アイトラッカーの精度があまり高くなかった。特に、頭部運動が発生する通常条件において眼球運動の測定精度が低かったため、本来停留である部分が、データのブレによりサッカードとして扱われていた可能性がある。頭部固定台を使用して頭部運動を制限したところ、アイトラッカーの精度が向上したため、正常に停留として分類されるようになったことで、停留時間や停留回数に有意差が生じたと考えられる。

実験の試行回数による変化

図 4.9 は、文字サイズを変化させない条件で実験を行った、被験者 C4 および C5 の結果の頭部運動のグラフである。晴眼条件の結果と、視野狭窄条件の最初の試行の結果、最後の試行の結果をそれぞれ表示している。

晴眼条件では、4.1.1 節や 4.1.2 節の実験結果と同じく、頭部運動が発生していなかった。視野狭窄条件では、頭部運動の幅に差はあるものの、被験者 C4, C5 ともに頭部運動が発生していた。このことから、4.1.2 節と同じく、視野狭窄に対する慣れによる影響は実験結果に大きな影響は与えないと考えられる。

まとめ

本実験では、文字サイズを変化させることによる読み特性の違いを調査しようとした。

文字サイズが 0.8° の時に頭部運動が発生していなかった被験者は、文字サイズを 1.1° まで大きくしたところ、頭部運動が発生するようになった。反対に、文字サイズが 0.8° の時から頭部運動が発生していた被験者は、文字サイズを小さくしても頭部運動が無くなることはなかった。

また、頭部運動が発生する条件において、頭部固定台を使用し、頭部運動を抑制することによって、頭部運動が読みに与える影響を調査しようとした。その結果、読み動作や改行動作の停留回数、および停留時間については、通常の条件と、頭部固定台を使用した条件の間

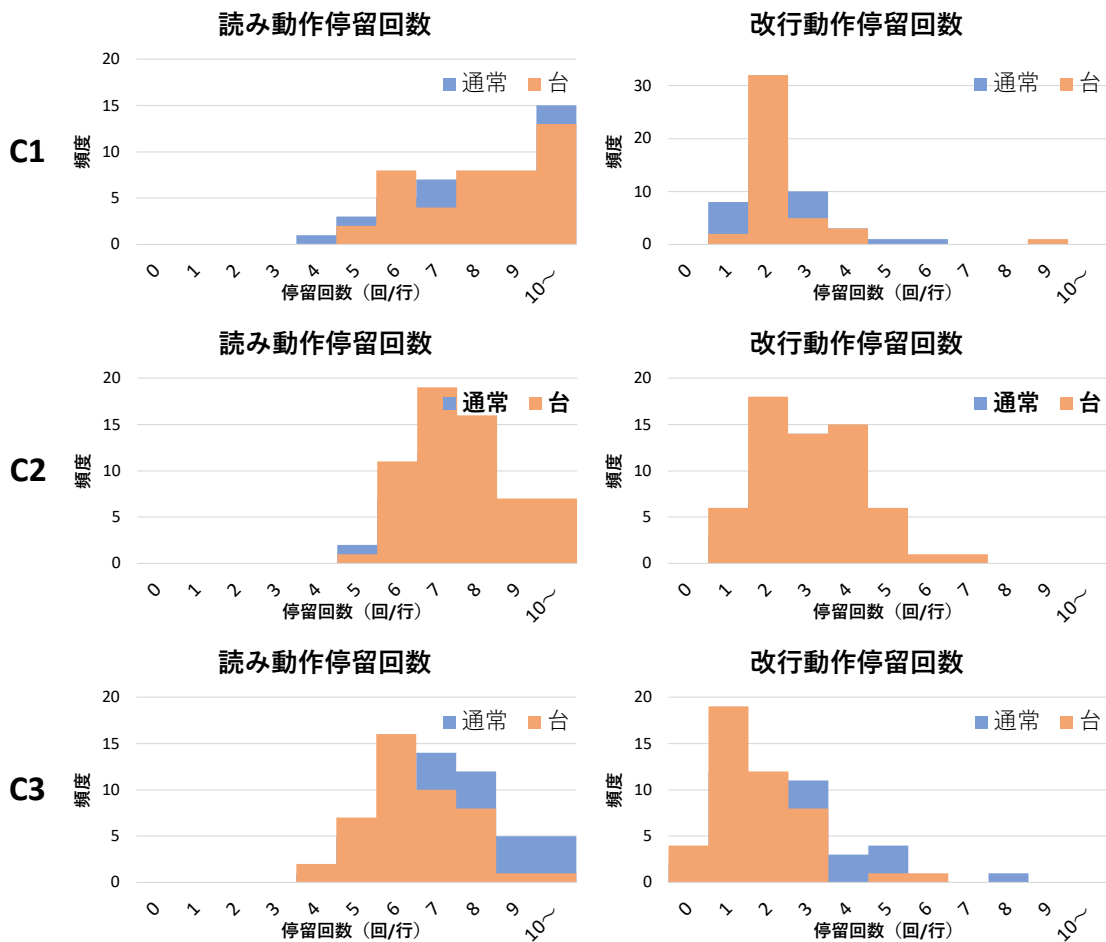


図 4.7 被験者 C1~C3 の読み動作，改行動作の停留回数。

で変化がなかった。そのため，頭部運動が読みにどのような影響を与えるのかはわからなかった。

4.1.4 残存視野の大きさと読み特性

目的

4.1.3 節までの実験では，視野障害マスクの開口部のサイズを主に視角 10° に固定した条件で実験を行っていた。だが，視野狭窄の症状が重度な場合，残存視野が 5° 程度まで狭くなることもある。そこで，本実験では，視野障害マスクの開口部のサイズを変化させたとき，すなわち視野狭窄の残存視野の大きさが変化したときの，読み特性の変化を調査する。

手法

呈示文章には，小川未明の作品から，これまでの実験で使用されていないものを新たに用意した。被験者と電子リーダーとの距離は 30cm，行長は 30 文字で固定とし，文字サイズは

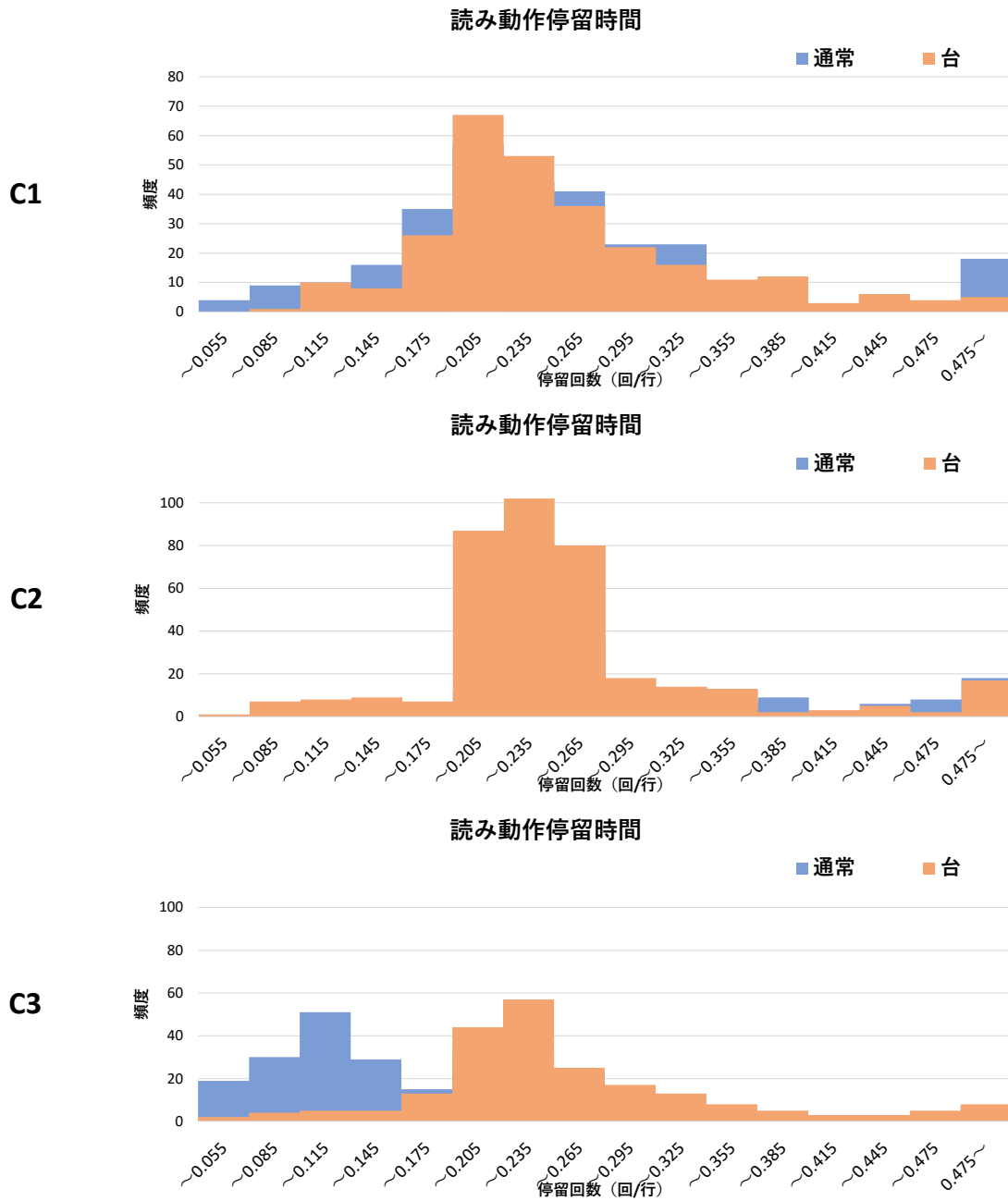


図 4.8 被験者 C1~C3 の読み動作の停留時間.

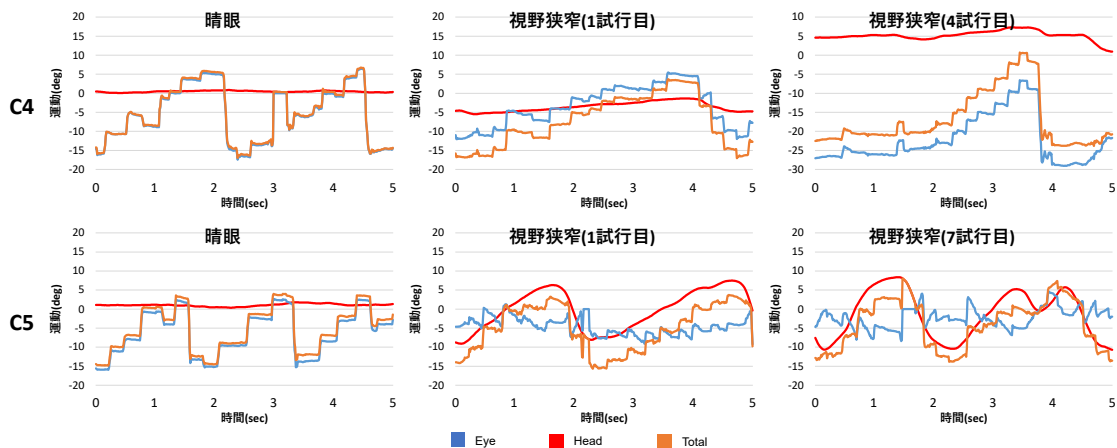


図 4.9 被験者 C4 と C5 の頭部・眼球・視線の運動。

視角 0.84° とした。

被験者は、晴眼者の学生 4 名 (D1~D4) とした。

本実験では、視野障害マスクの開口部のサイズを、 $10^\circ \cdot 5^\circ \cdot 3^\circ$ の 3 段階で変化させた。被験者が文章を読み終えた後、開口部のサイズを変化させ、呈示文章を変更して再度実験を行った。それにより、視野狭窄の残存視野の大きさが変化した際に、読み特性がどのように変化するかを調査した。分析対象のデータは、被験者の読書時の頭部・眼球・視線運動のデータとし、そのデータをもとに停留時間や停留回数を算出した。

残存視野と頭部運動の関係

図 4.10 は、残存視野の大きさが 5° の条件における、各被験者の頭部運動のグラフである。これらのグラフを見ると、赤い線が傾いていることから、全ての被験者が読書時に頭部を動かしていたことがわかる。それに対し、図 4.11 は、残存視野の大きさが 10° の条件における、各被験者の結果である。こちらのグラフでは、被験者 D3 を除き、頭部運動の線がほぼ水平に近い形となっている。このことから、頭部運動が発生していない、もしくは頭部運動の幅がかなり狭いことがわかる。

図 4.12 は、晴眼条件、および視野狭窄かつ各残存視野の条件における被験者 D2 の頭部運動のグラフである。晴眼条件と、視野狭窄かつ残存視野 10° の条件においては、頭部運動が発生していなかった。視野狭窄かつ残存視野 5° および残存視野 3° の条件においては、頭部運動が発生している。また、頭部運動の幅と眼球運動の幅に注目すると、残存視野 5° 条件ではある程度眼球が動いていることがわかる。それに対し、残存視野 3° 条件になると、眼球運動の幅が狭くなり、グラフ内の線がほぼ水平に近くなっている。このことから、残存視野が狭くなるにつれて、眼球運動の幅も狭くなると考えられる。

これらの結果より、読書時の頭部運動の発生原因は、残存視野の大きさが原因であると考えた。ほとんどの被験者は、視野狭窄条件であっても、晴眼条件と同じように頭部を動かさ

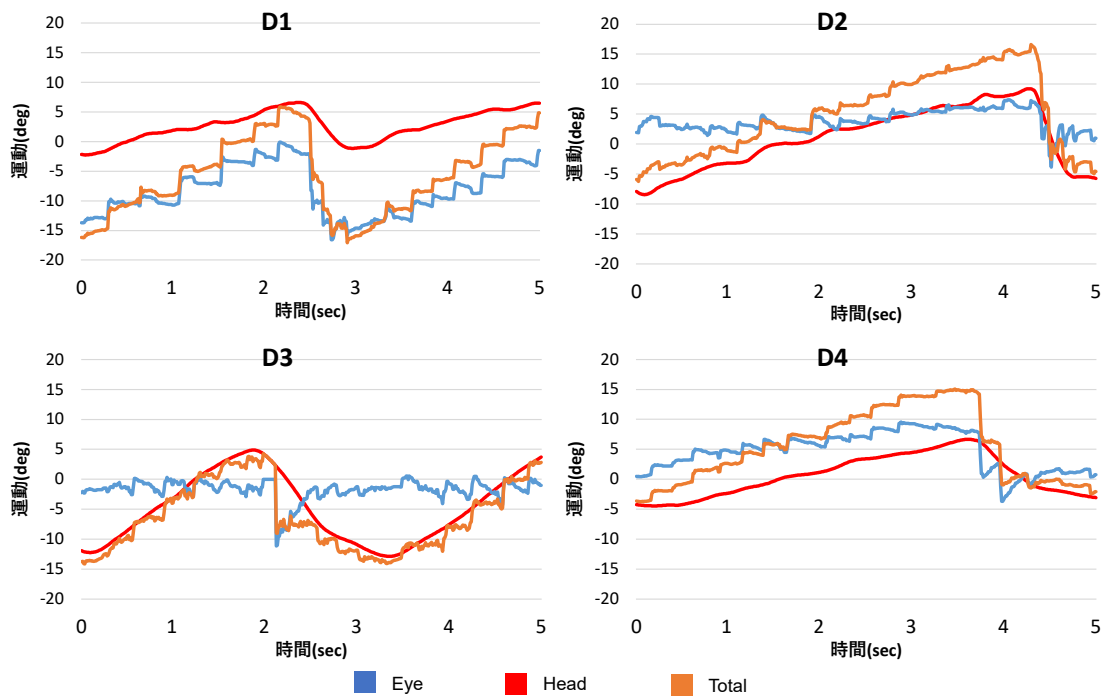


図 4.10 視野狭窄かつ残存視野が 5° の条件における，各被験者の頭部・眼球・視線の運動。

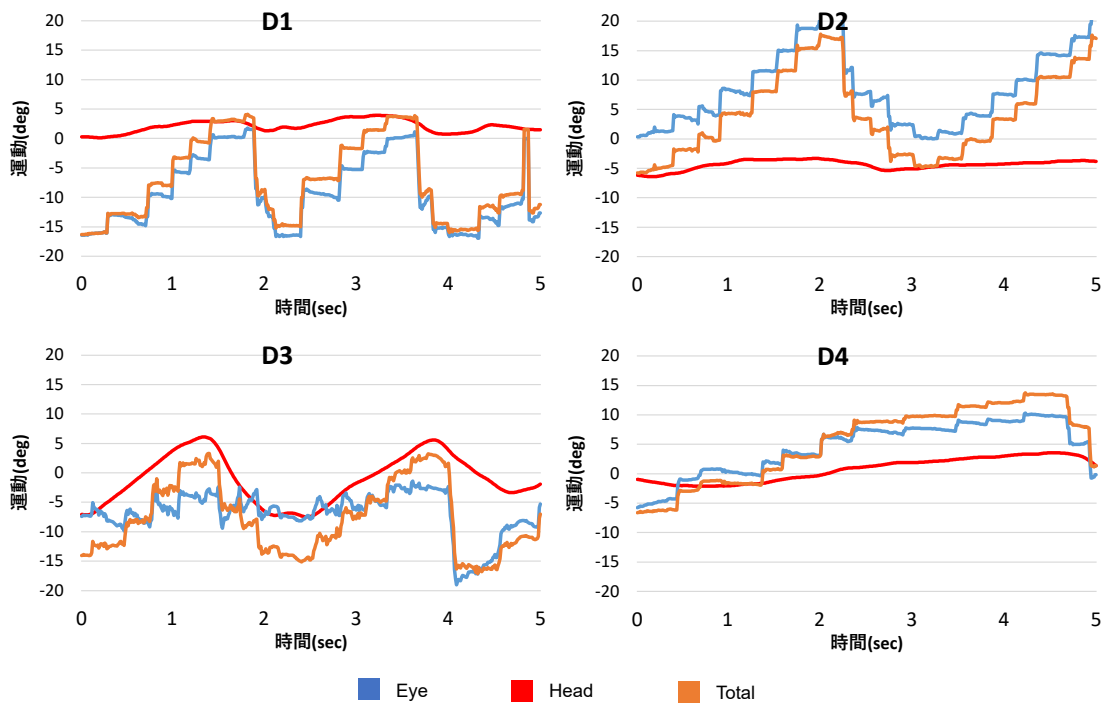


図 4.11 視野狭窄かつ残存視野が 10° の条件における，各被験者の頭部・眼球・視線の運動。

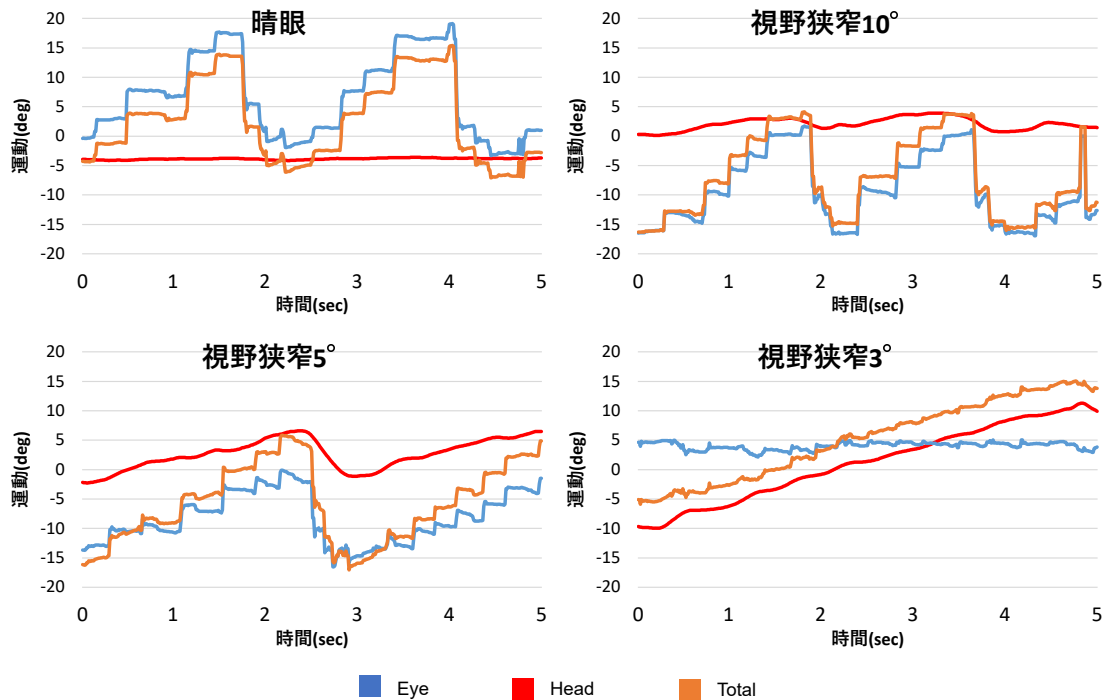


図 4.12 被験者 D2 の各条件における頭部・眼球・視線の運動。

ず、眼球の動きだけで文章を読もうとする。しかし、残存視野が狭くなるにつれ眼球運動の幅が狭くなるため、それを頭部運動によって補っているのだと考えられる。

残存視野と読み動作の変化

図 4.13 は、各被験者の 1 行分の読み動作における平均停留回数のグラフである。読み動作の停留回数は、行頭と行末の停留を含む右方向へ読み進める際の停留の回数とし、左方向に読み戻す際の停留は回数に含めなかった横軸は被験者を表しており、縦軸は停留回数を表示している。また、被験者 1 人につき、晴眼条件の結果（晴眼と表示）と、視野狭窄かつ残存視野 3 条件（それぞれ 10°、5°、3° と表示）の計 4 つの結果を表示している。

図 4.13 を見ると、晴眼条件での読み動作停留回数はおおよそ 5 回～8 回程度となっていた。視野狭窄かつ残存視野 10° 条件では停留回数がわずかに増加している、晴眼条件の停留回数とあまり変わらず、多くとも 10 回程度であった。しかし、残存視野が 5° まで狭くなると、1 行につき停留回数が 8 回～12 回程度となっており、晴眼条件よりも停留回数が大きく増加している。残存視野 3° 条件では、停留回数が少なくとも 10 回以上となっており、残存視野 5° 条件と比較しても大きく増加していた。

U 検定を用いて晴眼条件と視野狭窄の残存視野 10° 条件の読み動作停留回数を比較したところ、有意差が見られたことから、視野狭窄条件では読み動作の停留回数が増加するといえる ($P = 0.005 < 1\%$)。また、視野狭窄条件のうち、残存視野 10° 条件と残存視野 5° 条件

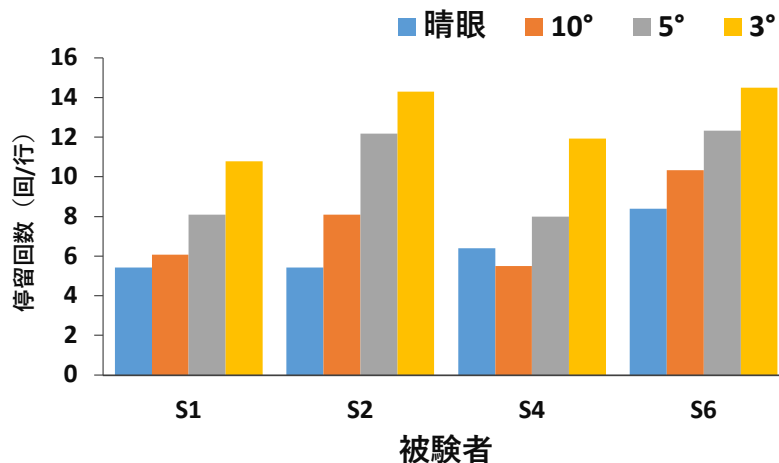


図 4.13 各残存視野条件における読み動作の平均停留回数.

間、および残存視野 5° 条件と残存視野 3° 条件間を比較すると、どちらも有意差が見られた (それぞれ $P = 0.00 < 1\%$, $P = 0.00 < 1\%$). これらの結果から、読み動作の停留回数は視野狭窄の残存視野が狭くなるにつれ、段々と増加していくということがわかった。

図 4.14 は、各被験者の読み動作の平均停留時間のグラフである。被験者 D1 や D3 の停留時間は視野が狭くなるにつれて増加しているように見えるものの、他の被験者の結果においては、視野の狭さと停留時間に関係が見られない。各条件における全被験者の停留時間の平均を計算すると、晴眼条件は約 0.26 秒、視野狭窄の残存視野 10° 条件では 0.27 秒、残存視野 5° では 0.28 秒、残存視野 3° では 0.29 秒であった。

U 検定を用いて、晴眼条件と視野狭窄の各残存視野条件の結果を比較したところ、残存視野 10° との間、および残存視野 5° との間には有意差が無く (それぞれ $P = 0.36 > 5\%$, $P = 0.11 > 5\%$), 残存視野 3° との間には有意差があった ($P = 0.008 < 1\%$). また、視野狭窄の各残存視野条件の間で結果を比較すると、10° と 5° の間には有意差が無く ($P = 0.22 > 5\%$), 5° と 3° の間には有意差が見られた ($P = 0.04 < 5\%$). このことから、残存視野が 3° まで狭くなると停留時間が増加するものの、残存視野が 5° より広い場合においては、停留時間の増加は考慮する必要がないと考えた。

残存視野と改行動作の変化

図 4.15 は、各被験者の 1 回分の改行動作における平均停留回数のグラフである。改行動作の停留回数は、読み動作の行末と行頭の停留を除いた、中間の停留の回数とした。晴眼条件での停留回数は非常に少なく、多くとも約 1 回程度となっていた。しかし、視野狭窄条件になると、残存視野が最も広い 10° 条件であっても停留回数が 2 回程度であり、大きく増加していた。さらに、被験者 D1 は残存視野 5° 条件で停留回数が約 3 回程度まで増加しているが、他の被験者は残存視野 10° と 5° 条件での差は大きくなかった。なお、残存視野 5° 条件と残存視野 10° 条件の間には停留回数の差は見られない。

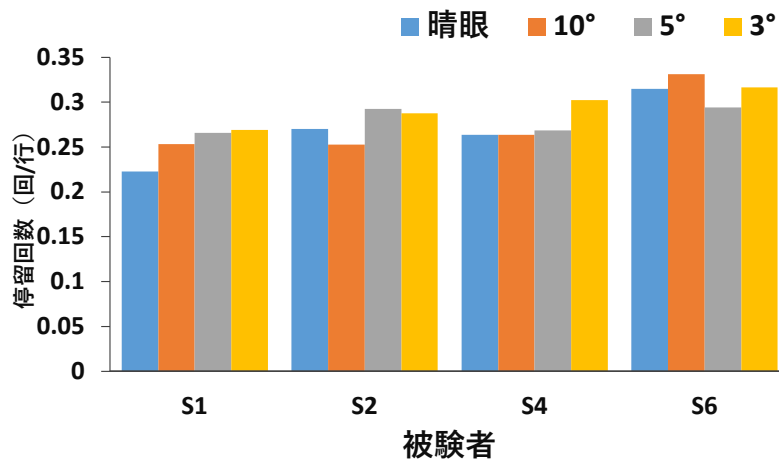


図 4.14 各残存視野条件における読み動作の平均停留時間.

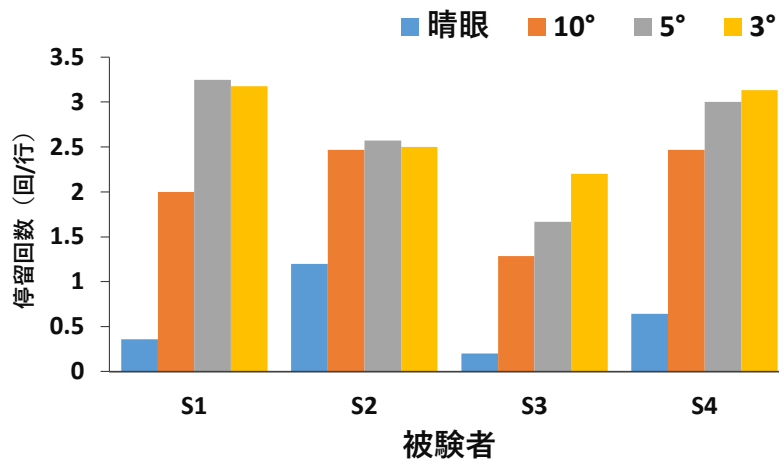


図 4.15 各残存視野条件における改行動作の平均停留回数.

U 検定を用いて晴眼条件と視野狭窄かつ残存視野 10° 条件の結果を比較したところ、有意差が見られた ($P = 0.00 < 1\%$)。また、視野狭窄条件の中では、残存視野 10° 条件と残存視野 5° 条件の間には有意差が見られたものの、残存視野 5° 条件と残存視野 3° 条件の間には有意差が無かった (それぞれ $P = 0.00 < 1\%$, $P = 0.56 > 5\%$)。このことから、視野狭窄により改行動作の停留回数は大きく増加し、残存視野が狭くなると停留回数が増加する傾向があることがわかった。ただし、読み動作とは異なり、残存視野が 5° より狭くなっても改行動作の停留回数には影響はない。

残存視野と読み速度の変化

図 4.16 は、各被験者の読み速度の変化のグラフである。読み速度は、1 分間に読める文字数として表している。図を見ると、被験者 D3 を除き、晴眼条件よりも視野狭窄条件の方が読み速度が遅く、さらに残存視野が狭くなるにつれて読み速度も低下している。このこと

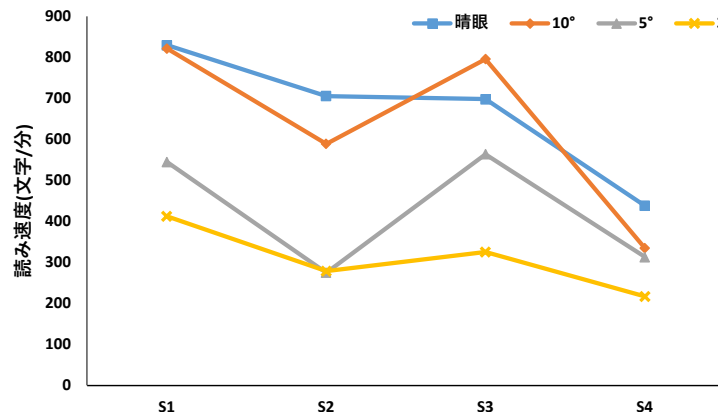


図 4.16 各残存視野条件における読み速度.

から、視野狭窄条件かつ残存視野が狭くなるにつれて、読み速度も段々と低下すると考えられる。

求心性視野狭窄の読み特性

これまでの実験結果から、求心性視野狭窄により読み速度が低下する原因は、読み動作と改行動作の停留回数が増加であると考えた。読み動作の停留時間は、残存視野が3°まで狭くなると増加するものの、その他の条件ではほとんど差がないため、読み速度には関係がないと考えている。読み動作の停留回数は残存視野が狭くなるにつれて増加するため、図 4.16 のように、読み速度も残存視野が狭いほど遅くなっている。

読み速度低下の原因を停留回数が増加であると考えると、被験者 D3 のみ視野狭窄の残存視野 10° 条件が最も読み速度が高かった原因を予想できる。図 4.13 を見ると、被験者 D3 の読み動作の停留回数は、晴眼条件よりも視野狭窄の残存視野 10° 条件の方が少ないことがわかる。そのため、読み速度においても晴眼条件よりも視野狭窄の残存視野 10° 条件のほうが速くなったのではないかと考えている。また、このことをふまえると、改行動作よりも、読み動作の停留回数のほうが読み速度に大きく関係している可能性があると考えられる。

まとめ

本実験では、残存視野の大きさを変化させたときの、読み特性の変化を調査しようとした。

読み動作の停留回数については、残存視野が狭くなるにつれて、停留回数も段々と増加する傾向があるということがわかった。読み動作の停留時間については、残存視野が狭くなることによる違いは見られなかった。

改行動作の停留回数については、視野狭窄条件において急激に増加する傾向があるものの、残存視野の大きさによる影響はあまりないことがわかった。

読み速度については、残存視野が狭くなるにつれて、段々と低下していく傾向があること

がわかった。

頭部運動については、残存視野が 5° より狭くなると、全ての被験者に発生するようになった。

これらの結果をもとに、視野狭窄が読み速度を低下させる原因は、読み動作と改行動作の停留回数の増加であると考えた。

4.2 様々な視野障害の読み特性

本研究では、函館視力障害センターの協力のもと、実際の視野障害者の方を被験者として、読み特性の調査を行った。本節では、VRヘッドセットを使用した状態における、実際の視野障害者の方を対象とした実験について説明する。

4.2.1 実際の視野障害者の読み特性調査

目的

4.1節の実験では、視野障害シミュレーターを用いて晴眼者を被験者としていたため、実際の視野障害者の結果とは異なる可能性がある。そこで、本実験では、実際の視野障害者の方に協力してもらい、読み特性を記録した。シミュレーターを使用した結果と、実際の視野障害者の結果を比較することで、シミュレーター使用時の結果の妥当性を検討する。

具体的には、VR視野障害シミュレーターを装着した状態で、視野制限マスクを表示せずに実験を行うことで、4.1節の実験と同じ条件における頭部運動を記録した。

手法

呈示文章は、小川未明の作品から500文字程度を抜き出したものとした。実験開始時の被験者と電子リーダーとの距離は30cm、行長は30文字で固定とした。なお、実験中に電子リーダーに顔を近づけて読むことは可能であるため、実験結果における電子リーダーの距離は被験者によって異なる。文字サイズは、被験者の視力に合わせて拡大した。また、4.1節の実験では背景色が白、文字色が黒の条件であったが、本実験では、背景色を黒、文字色を白に設定した条件で実験を行った。

被験者は、実際の視野障害者の方5名とした(P1~P5)。視野障害の症状は、被験者P1~P3の3名は求心性視野狭窄であり、P4とP5の2名はその他の症状である。また、被験者P1の残存視野は、およそ 10° であった。

被験者には、VRヘッドセットを装着した状態で文章を読んでもらい、その際の頭部運動などの読み特性を記録した。このとき、視野制限マスクは表示しなかった。実験は4回行い、最初の2試行は練習とし、後半の2回を分析対象とした。

頭部運動の発生

図 4.17 は、各被験者の頭部、眼球、視線運動から、約 1 行分のデータを抜き出したものである。図中の赤い線が頭部運動 (Head)、青い線が眼球運動 (Eye)、オレンジの線が視線運動 (Total) を表している。縦軸は横方向への運動の大きさ (°) を表しており、右方向への運動を正、左方向への運動を負として表した。横軸は時間を表しており、軸の数字は経過した秒数を表している。なお、被験者 P1 以外は、キャリブレーションが出来ず、眼球運動が測定できなかったため、頭部運動のみを表示している。

図 4.17 を見ると、全ての被験者に頭部運動が発生していることがわかる。シミュレーターを使用した晴眼者の実験結果においても、残存視野が一定より狭くなると、全被験者に頭部運動が発生していた。被験者 P1 の結果を見ると、読み動作においては頭部が右に動いており、改行動作において頭部を急速に左に動かしている。また、被験者 P2 から P5 の 4 名においても、頭部の動きの傾きから、同様に読み動作と改行動作の頭部運動の速度が異なっていると考えられる。この動きは、4.1 節の実験における、視野障害シミュレーション下での晴眼者の実験結果と似た傾向となっている。そのため、本研究で開発した視野障害シミュレーターは、実際の視野障害に近い条件を再現できている可能性がある。

視野障害シミュレーターの有用性

上記の実験結果において述べたように、今回の実験では、被験者 5 名のうち 4 名は眼球運動を測定できなかった。その原因は、視野障害により視野が欠けたため、キャリブレーションが出来なかったためだと思われる。また、キャリブレーションが出来ない問題は、片眼視力などの影響により、一部の晴眼の被験者においても発生していた。

このことから、視野障害の条件における眼球運動を記録するためには、視野障害シミュレーターを用いて、晴眼者を被験者とすることが有効である。晴眼者を被験者とする場合、眼球運動を高精度に取得できるため、有効な実験結果の分析が可能となる。そのため、視野障害の読み特性を調査する研究においては、視野障害シミュレーターが有用であると考えられる。

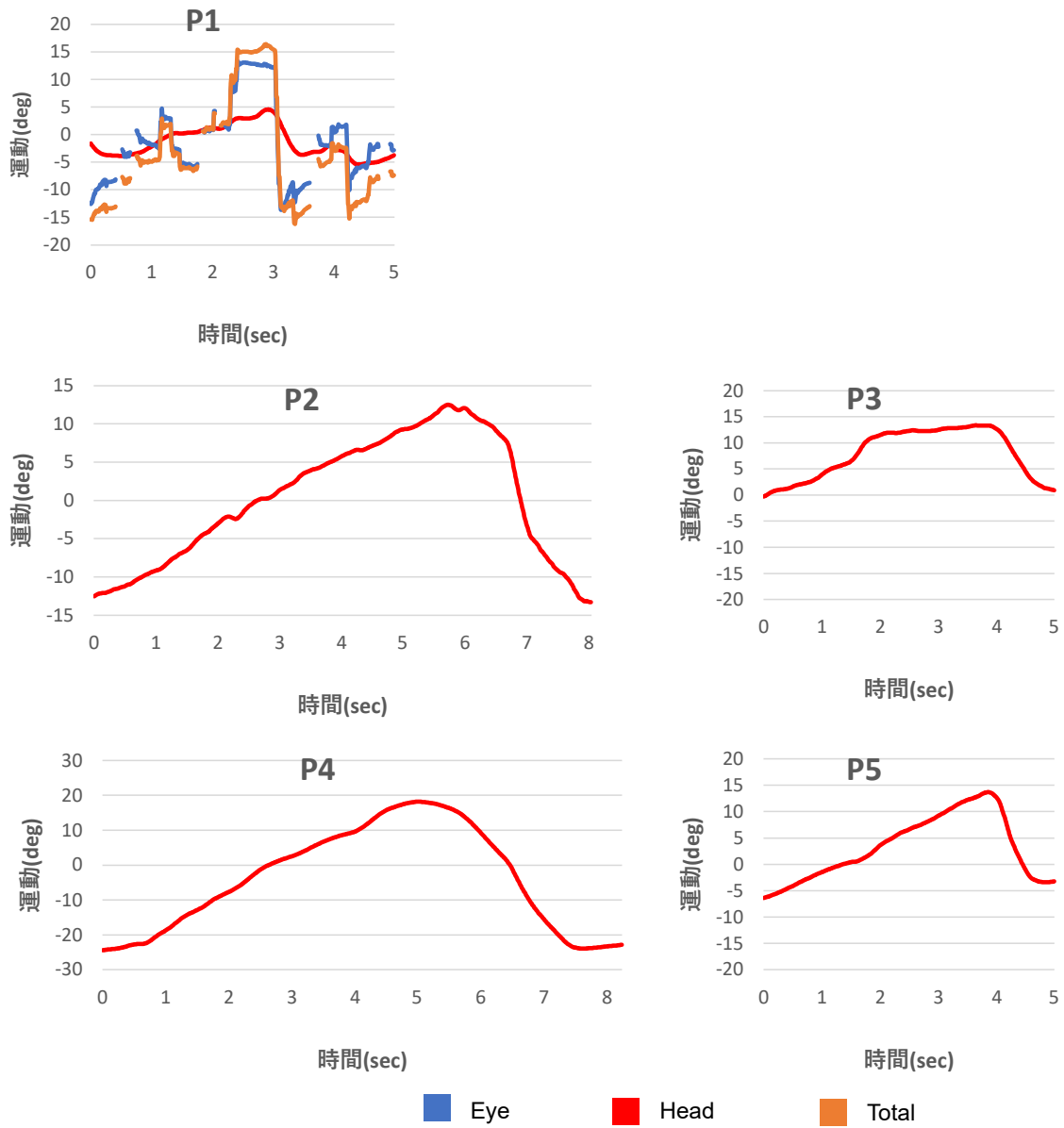


図 4.17 各被験者の頭部・眼球・視線の運動.

第5章

電子リーダーの開発

5.1 電子リーダー設計方針

5.1.1 読み速度低下の原因

第4章の実験では、求心性視野狭窄が読み速度を低下させる原因を調査した。その結果、読み速度の低下は、読み動作と改行動作の停留回数の増加が原因である、ということがわかった。特に、読み動作の停留回数は残存視野が狭くなるほど増加する、ということも明らかとなった。そこで、本研究では、読み動作と改行動作の停留回数を削減できるような電子リーダーを開発することを決定した。読み動作に対しての支援は、残存視野の大きさに合わせて適切に支援を行うこととする。改行動作の停留回数については、読み動作ほど残存視野の影響を受けないため、残存視野に合わせて支援方法を変える必要はないと考えている。

反対に、読み動作の停留時間は、読み速度にさほど影響を与えないことがわかった。そのため、停留時間を短縮するような工夫は、本研究では行わない。なお、視野狭窄条件では、読書時に頭部の運動が発生することが明らかとなったが、現時点では頭部運動が読みに与える影響はわかっていない。しかし、小林らの研究においては、頭部運動が読み速度低下の原因であると報告されている [11]。そのため、本研究では、読み動作と改行動作の停留回数を低減するとともに、頭部運動を抑制することにした。

5.1.2 文章レイアウトによる読書支援

本研究では、文節間改行レイアウトを用いることで、読み動作と改行動作の停留回数の低減を目指す。文節間改行レイアウトは、図 5.1 のように、1 文節ごとに改行しながら文章を表示するレイアウトである。従来の一定文字数ごとに改行を行う固定長改行レイアウトの場合、1 文節が 2 行にわたって表示される場合がある。その場合、1 回の停留で読むべき文節を 2 回の停留で読む必要があるため、読み速度の低下を引き起こす場合がある [15]。また、第4章の実験において、視野狭窄条件では改行動作の停留回数が増加することがわかっているため、1 文節が 2 行に分かれている場合、読み戻りが発生した際に、読み速度が大きく低下

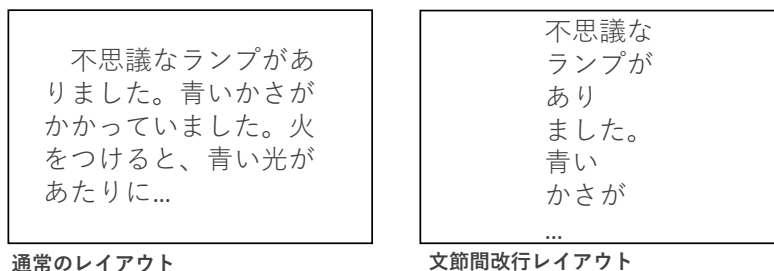


図 5.1 通常の固定長改行レイアウト（左）と文節間改行レイアウト（右）のイメージ。

してしまう可能性がある。

文節間改行レイアウトを用いると、文節の途中で改行がはさまれることが無くなるため、上記の問題を解決できる。晴眼者に対しての実験において、文節間改行レイアウトは、固定長改行レイアウトと同じ程度の読み速度を、より短い行長で実現できることがわかっている [15]。行長が短くなると、行末と行頭の幅が狭くなり、改行動作時の視線移動の距離が短くなるため、改行動作の停留回数を低減できる可能性がある。また、4.1 節の実験では、行長が短くなると、視野狭窄の読みの特徴である頭部運動が発生しなくなるということがわかっている。そのため、文節間改行レイアウトを用いると、読み速度を落とす原因となるような視野狭窄の読みの特徴を低減できると考えている。

視野狭窄の場合、読み動作の停留回数が増加するため、読み速度が低下してしまう。そこで、文節間改行レイアウトを用いて行長を短くすることで、1 行における停留回数を 1 回まで削減できるため、読み動作の停留回数を低減し、読み速度が改善するのではないかと考えている。なお、晴眼者の読みにおいては、行長が長いほうが読み速度が速くなる傾向がある [16]。そのため、残存視野が広い場合は、1 行の文節数を増やすことにより、読み速度を速くできるのではないかと考えている。

5.1.3 文節間改行レイアウトの実装

文節間改行レイアウトを用いる場合、呈示文章を文節ごとに分割したのち、CSV ファイルとして保存して使用した。文章の品詞分解には、Konisimple Tools (https://tool.konisimple.net/text/hinshi_keitaiso : 2021/12/21 アクセス) を用いた。品詞分解の後、単語を自立語と付属語に分類し、1 文節につき自立語が 1 つだけになるように分割することで、文節を自動的に区別した。その後、6 文字を超える長さの文節があった場合は、一文節につき最大 5 文字程度となるように手動で分割した。

視野障害シミュレーターにおいては、CSV ファイルを読み込み、仮想電子リーダーに文章を表示する (図 5.2)。その際、初めに行長を指定することで、1 行に表示される文節数を設定できるようにした。例えば、行長を 10 文字に設定した場合は、5 文字以下の文節が 2 つ続く場合、1 行に 2 文節が表示される。この行長を残存視野の大きさに合わせて最適化するこ

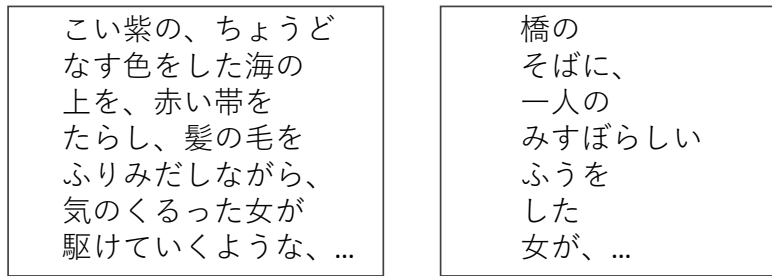


図 5.2 VR 視野障害シミュレーターで表示した文節間改行レイアウト。左が行長 10 文字で、右が行長 5 文字の場合の文字レイアウトを表している。

t

とで、どのような視野の広さであっても読み速度が改善できるのではないかと考えた。

5.1.4 電子リーダーの有効性調査

手法

本実験では、開発した電子リーダーが視野狭窄の読み速度をどの程度改善できているかを調査した。実験には、第 4 章でも用いていた VR 視野障害シミュレーターを使用した。被験者は、4.1.4 節の実験に参加した被験者 S2 の 1 名とした。呈示文章には、小川未明の作品から 500 文字程度を抜き出したものを使用した。被験者と電子リーダーの距離は 30cm、行長は 6 文字、文字サイズは 0.8°とした。残存視野の大きさは、視角 5°とした。行長は視角 4.8°のため、1 行が視野内に収まるようになっている。

被験者には、自分でスクロール操作を行いながら文節間改行レイアウトによって表示された呈示文章を黙読してもらい、その際の頭部、眼球、視線の運動を記録した。その後、4.1.4 節における、行長 30 文字の文章を読む際の残存視野 5°条件の結果と比較することで、文節間改行レイアウトによる読み特性の変化を調査した。

結果

図 5.3 は、文節間改行レイアウトを用いた行長 6 文字条件と、4.1.4 節の行長 30 文字条件の結果の比較である。読書中の頭部、眼球、視線の運動から、およそ 5 秒間のデータを抜き出した。

行長 30 文字の条件では読み速度が 275 文字/分であったのに対して、文節間改行レイアウトを用いた行長 6 文字の条件での読み速度は 527 文字/分であった。このことから、文節間改行レイアウトを用いることで、読み速度を改善できる可能性があることがわかった。

行長 30 文字条件では頭部運動が発生していたが、文節間改行レイアウトを用いて行長を短くすると、頭部運動が発生しなくなった。また、横方向への視線運動もほとんど発生していないことから、一点を注視したまま、スクロール操作のみで文章を読んでいたことがわか

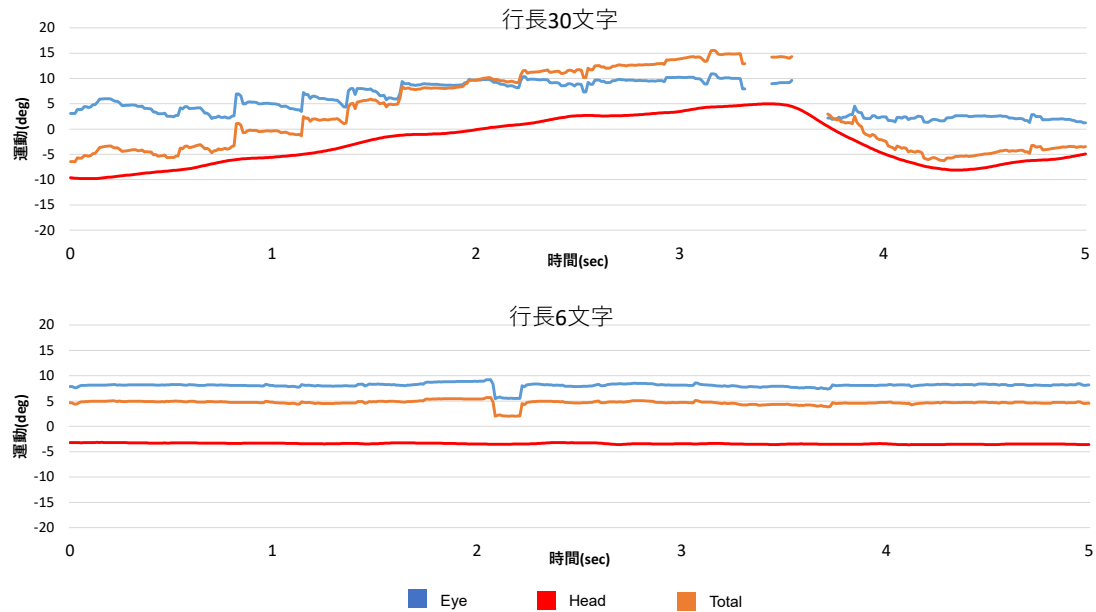


図 5.3 各条件における頭部・眼球・視線の運動。

る。そのため、停留回数は1行につき1回であると考えられる。行長30文字の場合、1行の停留回数はおおよそ12回であり、1回の停留で約2.5文字を読んでいることになる。文節間改行レイアウトを用いた場合、1回の停留で約6文字を読めているため、読み動作の停留回数を低減できている可能性がある。また、横方向への視線運動が発生していないことから、改行動作の停留回数も低減できていると思われる。

第6章

結論

本論文では、視野障害であっても読みやすい電子リーダーの開発を目的とした。具体的には、VRとアイトラッカーを用いた視野障害シミュレーターを開発し、晴眼者を被験者として視野障害が読みの速度を落とす原因を調査することで、電子リーダーの開発方針を決定した。

第3章では、VR視野障害シミュレーターの実装を行った。本研究では、VR空間内に表示した仮想電子リーダーの上に視野制限マスクを合成することにより、視野障害の見え方を再現した。シミュレーター使用者の視線に追従するように視野制限マスクを移動させることで、実際の視野障害に近い条件でのシミュレーションを行うことができる。

第4章では、求心性視野狭窄の読み特性調査を目的として、シミュレーターを用いて晴眼者を被験者とした実験と、実際の視野障害者の方を被験者とした実験を行った。電子リーダーの行長や文字サイズ、視野狭窄の残存視野の大きさなどを変化させながら繰り返し実験を行ったところ、視野狭窄が読み速度を低下させる原因は、停留回数の増加であることがわかった。読書時の視線の動きを、文章を読むための読み動作と、次の行を読み始める前に行われる改行動作に分割すると、読み動作の停留回数は、視野狭窄が狭くなるにつれて増加することがわかった。また、改行動作の停留回数は残存視野の大きさに関わらず、視野狭窄条件になると大きく増加することがわかった。停留回数のほか、視野狭窄において発生する読書時の頭部運動の発生原因も明らかとなった。頭部運動の発生原因は残存視野の狭さが原因であり、本研究では残存視野が視角 5° 以下となると頭部運動が発生した。頭部運動に注目しながら、シミュレーターを用いた晴眼者の実験結果と、実際の視野障害者の実験結果を比較したところ、頭部運動の方向が切り替わるタイミングが共通していた。シミュレーターの結果と視野障害者の結果が一部共通していたことから、本研究で開発したシミュレーターを用いた実験は、実際の視野障害者を被験者とした実験に近い条件を再現できている可能性があるといえる。

第5章では、第4章で得られた求心性視野狭窄の読み特性をもとに、視野狭窄であっても読みやすい電子リーダーの文章レイアウトを検討した。視野狭窄の読み速度低下の原因は停留回数の増加であることから、読書時の停留回数を低減するための文章レイアウトとして、文節間改行レイアウトを用いることを決定した。文節間改行レイアウトを用いて、視野狭窄

の残存視野の大きさに対して適切なパラメーター設定を行うことで、読み動作の停留を1行につき1回まで減らすことができる可能性がある。また、行長を短くできるため、改行動作の停留回数の低減や、頭部運動の抑制も期待できる。視野障害シミュレーターを用いて、文節間改行レイアウトを用いた電子リーダーの効果を調査したところ、読み動作と改行動作の停留回数を低減し、頭部運動を抑制することで、読み速度を改善できる可能性があることがわかった。

謝辞

本論文の執筆にあたり，多くの方々にご協力頂きました。

主指導教員である川嶋稔夫教授と，大日本印刷株式会社の小林潤平氏には，多くのご指導を頂きました。心から感謝申し上げます。本研究のために実験にご協力いただいた，国立障害者リハビリテーションセンター自立支援局函館視力障害センター 館田美保氏，阿部博昭氏に心から感謝いたします。最後に，実験に協力していただいた函館市在住の視覚障害者の方々と，学生達に心から感謝します。

発表・採録実績

発表等

- [1] 小橋, 川嶋, 小林: VR を用いた視野障害シミュレーションと電子リーダー設計への応用, ヒューマンインタフェースサイバーコロキウム, pp.308-312, 2020.
- [2] 小橋, 川嶋, 小林: VR を用いた視野狭窄シミュレータの開発と読書中の眼球運動分析, 信学技報, Vol.120, No.336, pp.27-32, 2021.
- [3] 小橋, 川嶋, 小林: 視野狭窄シミュレーターを用いた読書時の読み特徴分析, ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, DA-2, 9-14, 2021.
- [4] 小橋, 川嶋, 小林: 求心性視野狭窄の残存視野が読み挙動にもたらす影響の分析, 電子情報通信学会 HCG シンポジウム, 2021.

参考文献

- [1] Wood, Joanne M. et. al.: Hemianopic and Quadrantanopic Field Loss, Eye and Head Movements, and Driving, *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, Vol.52, No.3, pp.1220–25, 2011.
- [2] 柳原, 齊藤: 個人属性と室内空間の環境条件がロービジョン者の歩行に与える影響の分析, *土木学会論文集 d3 (土木計画学)*, Vol.67, No.5, pp.,67_I_1139-67_I_1147, 2011.
- [3] 神部: 読みの眼球運動と読みの過程, *国立国語研究所報告*, Vol.85, No.7, pp.29-66, 1986.
- [4] 五十嵐, 香川, 他: 弱視者の読みと事務的職業, *障害者職業総合センター調査研究報告書*, 1993.
- [5] 吉田: 図形知覚における中心視と周辺視の役割, *人間工学*, Vol.18, No.3, pp.155–64, 1982.
- [6] 水科, 内川: 全視野刺激によるサッカー時の変位検出, *Vision*, Vol.12, No.4, pp.173–82, 2000.
- [7] 村田憲章, 宮本ふう子, 他: 視線解析装置を用いた網膜色素変性患者の読書評価, *日本視能訓練士協会誌*, Vol.46, pp.245-256, 2017.
- [8] Legge, Gary, Denis, Mary: Psychophysics of Reading—II. Low Vision, *Vision Research*, Vol.25, No.2, pp.253–265, 1985.
- [9] Mcconkie, Zola, Wolverton, Burns: Eye movement contingent display control in studying reading, *Behavior Research Methods & Instrumentation*, No.10, pp.154-166, 1978.
- [10] 川嶋, 米谷, 小林: 視線応答型ディスプレイによる視野狭窄の動的シミュレーション, *人工知能学会全国大会論文集, JSAI2016*, 1E32-1E32, 2016.
- [11] 小林, 川嶋: 狭窄視野における読み速度の行長依存性, *情報処理学会全国大会講演論文集*, Vol.82, No.2, pp.241-242, 2020.
- [12] Jones, Ometto: Degraded Reality: Using VR/AR to simulate visual impairments, *2018 IEEE Workshop on Augmented and Virtual Realities for Good (VAR4Good)*, pp.1-4, 2018.

- [13] 小林, 新堀, 川嶋 : 文節単位の文字配置と隔行単位の背景着色がもたらす日本語電子リーダーの可読性向上, 第 79 回全国大会講演論文集, Vol.2017, No.1, pp.19-20, 2017.
- [14] Legge: Reading Digital with Low Vision, Visible language, Vol.50, No.2, pp.102-125, 2016.
- [15] 小林, 関口, 新堀, 川嶋 : 文節単位を考慮した文字配置の工夫がもたらす日本語電子リーダーの可読性向上, 人工知能学会論文誌, Vol.32, No.2, pp.A-AI30_1-24, 2017.
- [16] 小林, 関口, 新堀, 川嶋 : 日本語リーダーにおける読み速度と眼球運動の行長依存性に基づく最適行長の検討, 電子情報通信学会和文誌, Vol.J99-D , No.1, pp.23-34, 2016.

目次

1.1	読書中の眼球運動のイメージ.	2
1.2	求心性視野狭窄による視野欠損のイメージ.	2
2.1	周辺視の文字を置き換えた事例（左）と，周辺視を白く塗りつぶした事例（右）のイメージ.	6
2.2	高田巳之助商店製 シミュレーションレンズの写真（左）および，着用時の見え方のイメージ（右）.	6
3.1	電子リーダーの開発プロセスの模式図.	8
3.2	実際の VR 視野障害シミュレーターの映像. 左は晴眼条件で，右は視野狭窄条件の画面を表示している.	10
3.3	視野障害シミュレーションのイメージ.	11
3.4	視野障害シミュレーションへの視線の反映方法. 式 3.1 の d および r を示している.	11
3.5	片目ずつ検出したデータと，両目を合わせて検出したデータの比較.	12
3.6	頭部・眼球・視線の記録方法.	12
3.7	実験で記録される数値データ. 頭部や眼球の動きのほか，利き目や文字サイズ，使用した呈示文章などが記録されている.	13
3.8	数値データをもとに作成したグラフ. 縦軸が運動の角度，横軸がタイムスタンプを表している. Head は頭部運動，Eye は眼球運動，Total は視線運動を表している.	13
3.9	電子リーダー上の視線の移動軌跡.	14
3.10	読書中の視線の動きの分類方法.	14
4.1	被験者 A2 の頭部・眼球・視線の運動.	17
4.2	被験者 A4 の頭部・眼球・視線の運動.	17
4.3	各被験者の頭部・眼球・視線の運動.	19
4.4	被験者 B1 の読み動作の停留時間.	20
4.5	読み動作の停留の分類方法.	20

4.6	被験者 C1～C3 の頭部・眼球・視線の運動.	22
4.7	被験者 C1～C3 の読み動作, 改行動作の停留回数.	24
4.8	被験者 C1～C3 の読み動作の停留時間.	25
4.9	被験者 C4 と C5 の頭部・眼球・視線の運動.	26
4.10	視野狭窄かつ残存視野が 5° の条件における, 各被験者の頭部・眼球・視線 の運動.	27
4.11	視野狭窄かつ残存視野が 10° の条件における, 各被験者の頭部・眼球・視線 の運動.	27
4.12	被験者 D2 の各条件における頭部・眼球・視線の運動.	28
4.13	各残存視野条件における読み動作の平均停留回数.	29
4.14	各残存視野条件における読み動作の平均停留時間.	30
4.15	各残存視野条件における改行動作の平均停留回数.	30
4.16	各残存視野条件における読み速度.	31
4.17	各被験者の頭部・眼球・視線の運動.	34
5.1	通常の固定長改行レイアウト (左) と文節間改行レイアウト (右) のイメー ジ.	36
5.2	VR 視野障害シミュレーターで表示した文節間改行レイアウト. 左が行長 10 文字で, 右が行長 5 文字の場合の文字レイアウトを表している.	37
5.3	各条件における頭部・眼球・視線の運動.	38