

小型電子端末を用いた読書時の眼球運動と頭部運動の解析

新川 達矢^{*1}, 山田 和平^{*2}, 山田 光穂^{*3}

Analysis of Eye Movement and Head Movement when Reading E-books by Mobile Reading Device

by

Tatsuya SHINKAWA^{*1}, Kazuhei YAMADA^{*2} and Mitsuho YAMADA^{*3}

(received on September 28, 2012 & accepted on February 7, 2013)

Abstract

So far, research of eye movement when reading has been done while fixing a head movement. However, we usually read books or some texts. etc. with a head free condition. Therefore, we analyzed the eye movement and the head movement paying attention to the line feed operation when reading a cell phone novel with fixing a head or with the head free.

Keywords: eye movements, saccade, head and eye coordination, reading, electronic medium

キーワード: 眼球運動、サカード、読書、頭部運動、電子端末

1. まえがき

近年、携帯電話やノートパソコンをはじめ、スマートフォンやタブレット型端末など、手軽にどこへでも持ち運びができる携帯型端末が急激に普及してきている。従来の携帯型端末と比べ高性能化が著しく、通信技術の発達により大容量のデータ通信が可能であるため、様々なコンテンツが利用でき、電子端末で文章を読む機会も増加している。しかし、電子端末は種類が多く、操作方法や表示方法が多種多様であるため、小型電子端末毎に合わせた視認性や見やすさの向上が重要となる。

そこで我々は、ケータイ小説を読書している際の視線の動きから小型電子端末の画面に適したコンテンツの表示方法を検討している¹⁾。この研究では、ケータイ小説を模した画面を小型パソコン上に表示し、頭部を固定した条件で、文章改行の際の眼球の跳躍運動（サカード）と親指を使用したスクロールの比率を分析している。しかし、実際にケータイ小説を用いた読書時、頭部運動は自由で拘束されていない。頭部運動は眼球運動に比べ視線の2倍寄与すると言われており²⁾、頭部が自由な状態で読書時の視線の動きを分析することが必要である³⁾。そこで本研究では、頭部を固定しない自由な状態における頭部運動を含めた視線分析の実験データと頭部が固定された条件データと比較し、電子端末を用いた読書の際に人が頭部をどのように使用して読んでいるのかを調査した。

^{*1} 工学研究科情報理工学専攻 修士課程

^{*2} 現・東洋熱工業株式会社

^{*3} 情報通信学部情報メディア学科 教授

^{*1} Graduate School of Engineering, Tokai University

^{*2} Present, TONETS CORPORATION

^{*3} Information and Telecommunication Engineering, Professor

2. ケータイ小説を用いた視線解析

従来の頭部を固定した条件の眼球運動測定について記述する。小型電子端末に表示した文字情報の最適な表示方法の検討のため、携帯電話を用いた読書、いわゆる、ケータイ小説を用いた読書時の視線の解析し、読書時に起こる眼球の跳躍運動の生起頻度や注視位置、黙読時間の観点から分析を行った¹⁾。

ケータイ小説とは、携帯電話を用いた文章の執筆や閲覧を行う電子書籍である。従来の紙媒体による書籍と異なり、電子書籍を携帯電話などの電子端末を用いて閲覧している。そのため、小型の画面サイズによる文字数の制約を受け、従来の書籍で使用されている文法作法に則らない特徴がある。また、ケータイ小説に限らず、電子書籍を用いた読書では文章の改行を眼球のサカードで行える他に指での操作による画面スクロールにて行うことが可能である。

Table 2.1 Experimental conditions

文字サイズ	大(14x14pixel)	中(10x10pixel)	小(8x8pixel)
1行の行幅	3deg	5deg	7deg
行間	変更なし	全行詰め	1行詰め

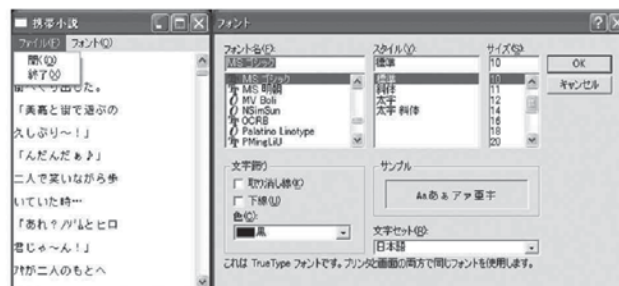


Fig.2.1 Developed software to edit Ke-tai novel

ここで、本論文の元となった先行研究¹⁾について紹介する。実験で用いた条件として、ケータイ小説書籍「恋空」を使用し、小型ノートパソコン上にソフトウェアにて携帯電話画面を模した 3.1 型(240×320pix)を表示し実験を行った。これは、実験に応じた任意の表示サイズの変更やフォントやサイズなどの文字表示パラメータの変更が可能である。表示は Fig1.1 左のようになっている。

表示パラメータの設定として、文字のサイズ・1 行の幅・行間を Table2.1 のように設定した。変更無しはケータイ小説の配信形式で、1 行～3 行詰めが混在し、行間は広く見た目も広い。

行幅と文字の大きさを変更し、1 行の文字数という観点から跳躍運動の頻度を分析した結果、Fig.2.2 に示す様に、全行詰めと、1 行詰めでは 1 行 6 文字以上で跳躍運動による改行頻度が 100% 前後となり、ほぼ跳躍運動で改行することが分かっている¹⁾。一方、行間の広い配信形式では、跳躍運動による改行頻度が 100% 前後となるのは、8 文字からで、スクロール操作による改行がより併用される傾向となった¹⁾。

平均黙読時間の観点では、Fig.2.3 に示す様に、スクロールによる改行が跳躍運動による改行より多いと、平均黙読時間は比較的長くなっている。しかし、跳躍運動の頻度が 50% を超えると、1 行の文字数が 5 文字以上のとき、スクロール操作を併用した改行でも黙読時間は変わらない結果となっている。また、行幅が狭いと、3～5 字と言われている一つの注視点の有効視野内³⁾に表示されている文字情報が入り、サッカードがほとんど起きず、一点の注視点に目が止まったまま指によるスクロールによる改行するという行動が見られサッカード頻度は減少する。このように、小型携帯型端末を用いた読書の眼球運動による視線の解析を行い、フォントの様々な設定や電子書籍特有の操作を分析して最適なレイアウトを検討している。しかし、我々の実際の日常生活において、携帯端末を用いての読書は頭部が固定されず自由な状態である。

人の本来の視線とは、眼球運動に頭部の動きや体の動きを加えたものが最も自然な状態の視線となる。次の項目にて、頭部運動と眼球運動の重要性について記述する。

3. 頭部運動と眼球運動の関係

視線に占める頭部運動の比率から分担比(head share)というものがある⁴⁾。この分担比の測定から、跳躍運動を用いて眼球運動だけで指標をとらえられるのはせいぜい 15° であり⁵⁾、視線移動量が 20° を超えると 80% 近く頭の動きで見ている^{6),7)}と言われている。そして、頭の動きに制約を加えない自由視において、頭部運動は眼球運動のほぼ 2 倍視線の動きに寄与している²⁾とされている。

以上のことから、大画面を見るときには眼球運動だけでは不十分であり、頭部運動を組み合わせた視線の動きが必要である。そこで、臨場感を測る、再現するという点に注目して頭部運動に注目した実

験が行われ、提示画角が 20° を超えると主観的座標軸の物理的座標軸への誘導効果が生じ始め、80° ～ 100° 以上で飽和状態になることが示されている⁸⁾。このように、視線とは眼球運動と頭部の動きの組み合わせであるため、頭部を固定しない自然な状態で実験を行うことが必要となる。本稿は、頭部を固定しない自然な状態で、眼球のサッカード、頭部運動、端末操作のスクロールによる改行に注目し実験を行う。

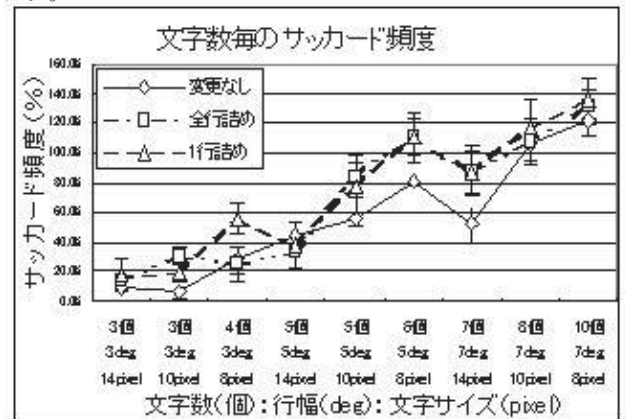


Fig.2.2 Saccade frequency to each number of characters

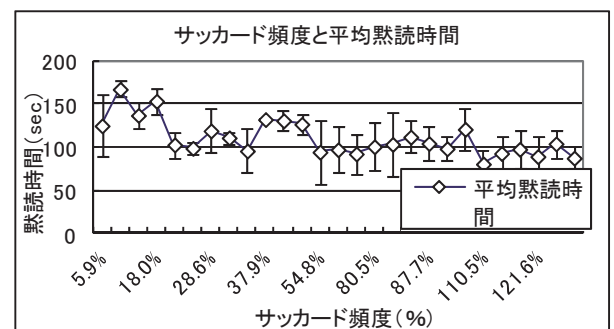


Fig.2.3 Saccade frequency to mean silent-reading time

4. 頭部運動と眼球運動の解析

4.1 実験環境

実験に用いる電子書籍は横書きの文章を使用する。横書きの文章では、改行の為に頭部運動の垂直方向の動きはほとんど生じなかった。そのため、改行時の頭部運動の水平方向の動きに注目した。また、サッカードによる改行を垂直方向と水平方向の眼球運動から測定した。同時に指で画面をスクロール操作することで表示面を移動させる垂直方向の動きの分析を行い、指運動による改行とした。以上の様に、サッカード、頭部運動、スクロールによる改行をどのように使用し読書しているのかを解析を行った。

4.1.1 実験ソフトウェア

実験は、頭部を固定した条件でのケータイ小説読書実験で使ったソフトウェアと同一のものを使用した。実際に携帯電話を使用しケータイ小説読書時の眼球運動測定を行うことが望ましい。しかし、携

携帯電話では種類毎に表示解像度や表示文字数が異なり、これらのパラメータを任意に変更できるソフトウェアを機種ごとに開発するのは困難である。そこで、パソコンのディスプレイ上に携帯電話で多く普及している 3.1 型 QVGA(解像度 240x320pix)の表示範囲内で文字サイズ・フォント・フォント色変更・文字スクロールが可能な携帯コンテンツ提示用のソフトウェアを開発し、SONY 製 VGN-TX92PS ノート PC(白ピーク輝度値 14.3 cd/m² 背景輝度値 0.56 cd/m²)を用いて被験者に提示した。Fig.2.1 左は本ソフトウェアのウィンドウである。フォント項目を選択することで、実験に応じた文字サイズ、フォントの変更、フォント色の変更、行間や行幅等が可能である。

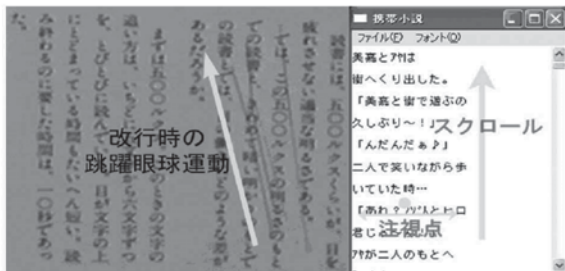


Fig. 4. 1 The difference between a line feed of books and that of a cell phone novel

実際の読書では、Fig.4.1 左のように、次の行への改行は眼球の跳躍運動を用いて行うが、携帯小説では次の行への改行はサッカードだけでなく画面スクロールを用いて行うことが出来る。そのため、本ソフトウェアでは、キーボードを用いてスクロール操作が可能となっており、実験時、被験者は自由にサッカードとスクロールによる改行を組み合わせ、本人が読みやすいと思う様式で読書を行う。

4.1.2 実験構成

サッカードの測定は、強膜反射方式を用いた竹井機器工業(株)製の眼球運動測定装置(T.K.K.2930a)を使用した。眼球運動測定用のゴーグルを着用し、頭部の移動量を測定する為の日立金属(株)製ワイヤレス 3 軸加速度センサ(RF-H48C-0)を被験者頭頂部に設置する。頭部を顎台で固定した後、被験者の視野と装着したゴーグル上にある視野カメラからの映像が正確に一致するように撮影方向を調整する。校正では被験者正面のノート PC 上に提示した「中心指標」と「上下左右(視角 10 度)の指標が 1m 先に設置した校正ボード(T.K.K.2940m)の「中心指標」と「上下左右」(視角 10 度)の指標と一致する位置に設置し、ゴーグルに装着した視野カメラの中心をノート PC 上の指標の「中心」に合わせ校正を行った。その後、頭部の固定を外して実験を行った。実験構成図を Fig.4.2 に示す。

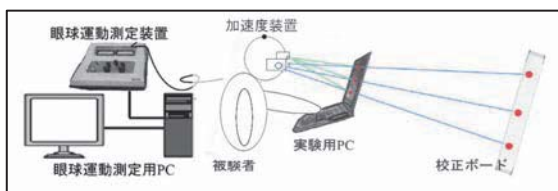


Fig.4.2 Experimental set-up

4.1.3 頭部固定と頭部自由の比較

頭部を固定したケータイ小説読書実験では、小型の電子端末にて黙読している際の視線の動きを測定、解析することで、誰にでも文字情報の閲覧がしやすく、電子端末に適したコンテンツの提示法を検討した。本研究では、頭部を固定しない自由な状態で実験を行うことで、これまでの頭部を固定した条件と比較し、頭部とサッカードをどのように使用しているかを分析する。



Fig.4.3

The upper section: The difference in the line spacing
The lower section: The difference of the line width

Table 2.1 Experimental parameters

1 行の行幅	3deg	5deg	7deg
行間	全行詰め	一行詰め	変更なし

4.1.4 実験条件

これまでの先行研究の結果を参考として、ケータイ小説特有の読み方が示された条件、文字サイズを 10×10 pixels. 視距離を携帯電話使用時の 3 人の平均視距離の 35cm に統一した条件での実験を行った。被験者は 22 歳から 23 歳の矯正視力 1.0 以上の男子大学生 4 名で行った。実験に使用したコンテンツは、頭部を固定した条件で行ったものと同様のケータイ小説「恋空」を使用した⁹⁾。表示パラメータは文字サイズ、行幅、行間をパラメータとして、頭部を固定した条件で行った実験の結果¹⁾から、ケータイ小説特有の読み方が示された 1 行の行幅と行間の 2 要因とした(Table 2.1)。被験者には 1 行の行幅と行間、9 種類全ての組み合わせ(1 種類約 1000 文字)のそれぞれ異なる文章を黙読してもらった。変更無し条件は、前述した実験と同じく、ケータイ小説の配信形式で、

1行～3行詰めが混在し、行間は広く見た目も広い。

4.2 実験結果

黙読時間、頭部運動、サッカード、頭部運動を含めた視線の4項目に解析を行った。表示した文章の行数を理論的に必要な改行数として分母に用い、Fig.4.7, Fig.4.8, Fig.4.9では、頭部運動、サッカードの生起確率を求めた。例として、眼球運動のサッカードが100%となる場合、行数とサッカードによる改行が一致したことを示す。また、生起確率が100%を超えてしまう結果が得られたが、行末から行頭へと改行する際、被験者が文章の行頭部分を見失い何度も同じ場所を読み返すといった動作が見られたため、1行の改行に複数のサッカードを行ったと考えカウントしたためである。頭部運動についても頭部に装着した加速度センサが改行時に閾値を超えた回数で算出しているため、サッカードと同じ基準で、閾値を超えた頭部運動の回数として算出した。また、各項目の結果について分散分析・多重比較による検定を行った。

4.2.1 黙読時間

文章の読み始めから読み終わるまでの黙読時間において、頭部を固定した条件と頭部を固定しない自由な条件間に差があるかを調べた結果、頭部を固定した条件と固定しない条件の間にあまり変化は見られなかった(Fig.4.4)。分散分析を行った結果、頭部運動を固定した条件と頭部を固定しない自由な条件間に有意差は見られなかったが、頭部の条件に関係なく各行幅に対しては有意差が見られた($F(2, 45)=9.56$, $p<0.05$)。

Tukeyの多重比較では、3degと5deg間、3degと7deg間で有意差がみられた。

以上のことから、1行の行幅が3degの条件は、他の条件と比べて黙読時間が増加していることを示している。

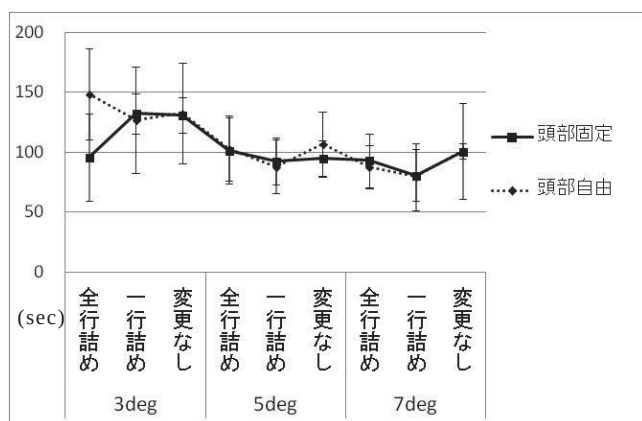


Fig.4.4 Comparison of silent-reading time to the line widths

4.2.2 頭部運動による改行

頭部運動による改行がどのように変化するかを調べた。まず、頭部運動の変化を示したグラフを例示する(Fig.4.5)。このグラフで水平の負の方向が被験者から見た左側、水平の正の方向が右側となり、垂直の負の方向が被験者から見た下側、垂直の正の方

向が上側である。頭部運動を取得する際に加速度センサはノイズ成分が大きいので、閾値を設定しノイズを取り除いた。閾値は、加速度センサを机の上に固定した状態で動作させ、そのときに生じる加速度値をノイズとし、その水平方向と垂直方向の標準偏差とした。読書中の文章の改行箇所において、この閾値を超えたとき、改行を行うための意図的な頭部運動が行われたと判断し、これを水平方向もしくは垂直方向の頭部運動による改行と定めた。

閾値は水平方向で+0.05~-0.07、垂直方向で+0.06~-0.08の範囲をノイズ成分とした。

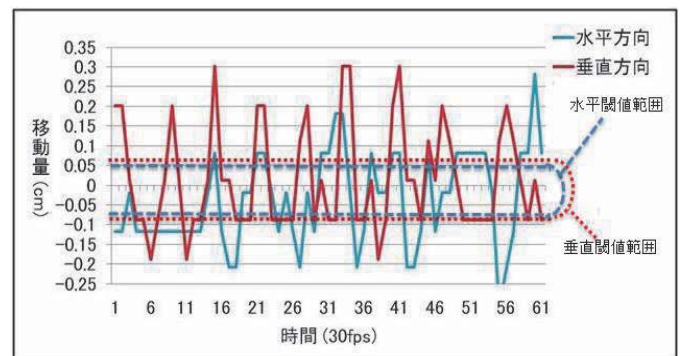


Fig.4.5 Example of Head movement during reading

仮説として、Fig.4.6に示すように、水平方向の視線移動には右方向の頭部運動と右方向のサッカード（いずれも Fig.4.5 上方向）が併用され、改行方向には下方の頭部運動と左方向の大きなサッカード（いずれも Fig.4.5 下方向）が組み合わされて読み進めると考えていた。しかし、実際のところ、改行ごとに頭部が下方に動き続けていたのでは、どんどん頭部が下に向くこととなり、適宜、上方の頭部運動が生じて、姿勢の補正が行われる。したがって、仮説で考えた動きだけではなく、Fig.4.5に示すように頭部運動と眼球運動は複雑な動きを呈している。

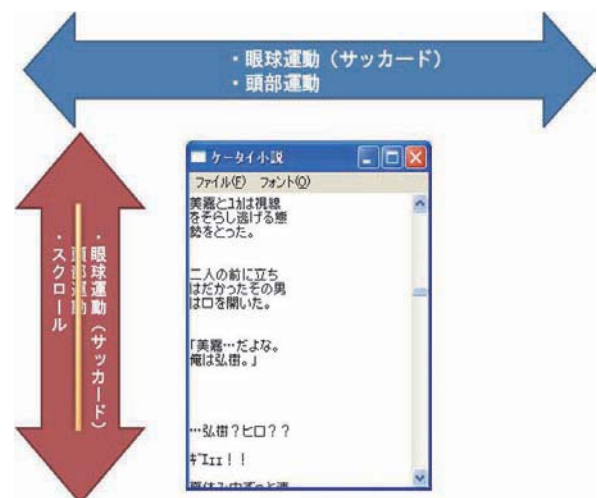


Fig.4.6 The hypothesis of the line feed way when combining head movement with eye and finger movements

すなわち垂直方向の頭部運動には、姿勢を元に戻すための逆方向の動きを伴う。また垂直方向の改行は、今回スクロールにより改行も許容したため、指によっても行われ、頭部運動、サッカードが生じない場合もある。

そこで、ここでは、頭部運動とサッカードだけの関係をより明確に表すデータとして、頭部運動による水平方向の改行割合を求め Fig.4.7 に示す。頭部運動による改行を行数で除算し生起確率を求めたものが縦軸となる。

全体的には1行の行幅が大きくなるにつれて頭部運動による改行が増加する傾向となった。また、1行の行幅が大きくなるにつれて改行を主にサッカードを用いる被験者と、サッカードだけでなく頭部運動を併用する被験者に二分され、個人差も大きくなる傾向となった。分散分析の結果、有意差は得られなかった。

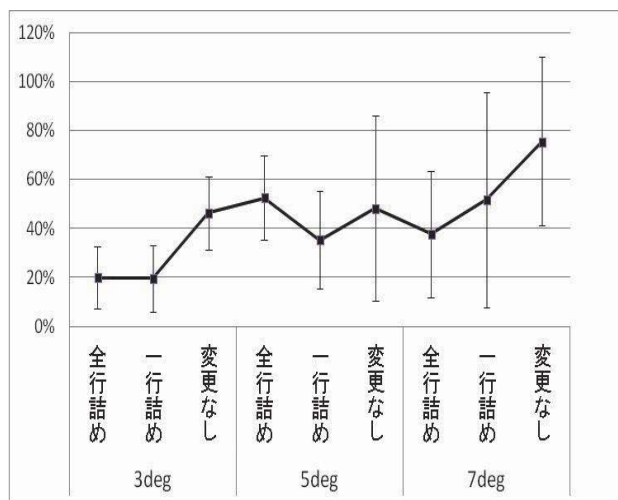


Fig.4.7 The rate of the line feed by head movement when the line widths were changed

4.2.3 眼球運動による改行

次にサッカードに着目し、頭部運動を固定していた条件と頭部を固定しない自由な条件間で差があるのかを調べた (Fig.4.8)。その結果、頭部を固定した条件と比べて、頭部を固定しない自由な条件ではサッカードによる改行が大幅に減少した。

分散分析の結果、頭部運動と1行の行幅条件において、主効果がみられたことから、行幅が増加しても、頭部運動が自由な時はサッカードが増加しないことを示している。また、頭部運動と1行の行幅間 ($F(2, 35) = 4.95, p < 0.05$) において、交互作用がみられた。Tukey の多重比較では、3deg と 5deg 間、3deg と 7deg 間で有意差がみられた。以上のことから、頭部を固定した条件と頭部を固定しない条件間でサッカードによる改行の割合に大きな差があることが示された。

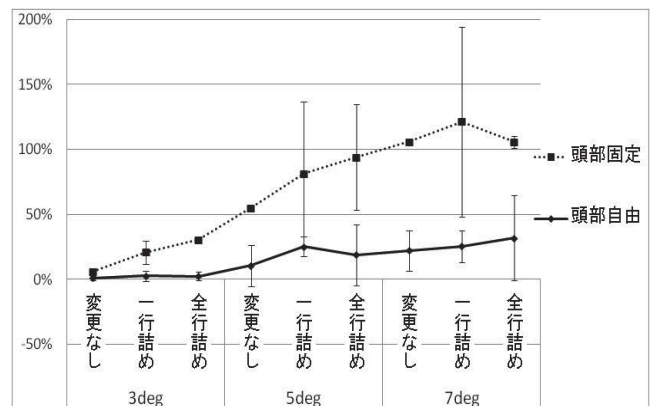


Fig.4.8 The comparison of the saccade frequency when the line widths were changed

4.2.4 頭部運動を含めた視線

頭部運動による改行が見られたことから、頭部を固定しない自由な条件における頭部運動による改行とサッカードによる改行を足し合わせ、頭部運動を含めた視線とし、頭部を固定した条件におけるサッカードによる改行手段と比較した。Fig.4.9 の折れ線グラフは頭部を固定した状態のサッカードのみによる改行が行われた生起確率 (頭部固定条件の改行時のサッカード数/文章の行数) となり、棒グラフは頭部を固定しない条件で行った頭部運動による改行 (改行の際、閾値を超えた頭部運動/行数) とサッカード (改行時のサッカード回数/行数) による改行を足し合わせた生起確率となる。その結果、頭部を固定した条件におけるサッカードによる改行数 (Fig.4.9 折れ線) と頭部を固定しない自由な条件における頭部運動を含めた視線による改行の割合 (同図棒グラフ) が似た傾向を示した。

分散分析の結果、頭部の条件に関係なく1行詰めにに対して有意差がみられた ($F(2, 35) = 14.25, p < 0.05$)。

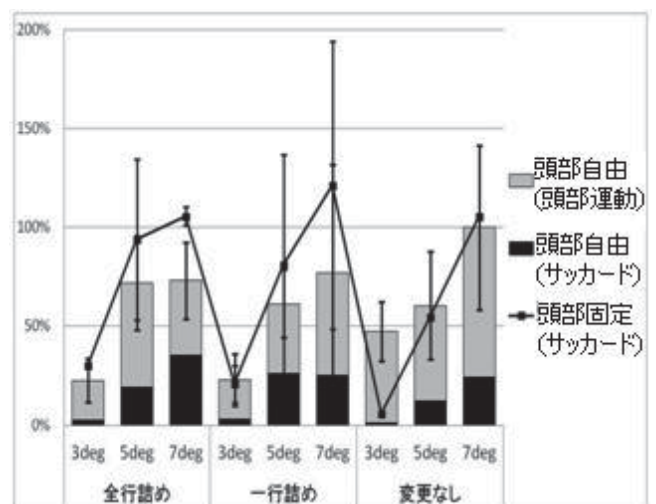


Fig.4.9 The comparison of the number of the line feeds when fixing the head and making head movement free to the change of a line width

Tukey の多重比較では、頭部を固定した条件と頭部を固定しない自由な条件間に関係なく行幅 3deg と 5deg 間、3deg と 7deg 間で有意差がみられた。

Fig.4.9 の 3deg 棒グラフに注目すると、どの条件でもサッカードによる改行の割合が少ない。そして、多重比較の結果 3deg と 5deg、3deg と 7deg 間に有意差があることから、1 行の行幅が 3deg の条件では、サッカードによる改行の割合が減少することが示された。

これは、3deg の条件では、行幅が狭すぎるため表示されている文字が有効視野内に入ってしまう、サッカードと頭部運動による改行が少なくなり、指によるスクロールが多用されたことが言える。また逆に、5deg、7deg では、サッカードと頭部運動の改行が増える結果となった。

以上のことから、3deg では指によるスクロールが多用され、5deg、7deg ではサッカードと頭部運動による改行が多くなる事が示された。

4.3 考察

Fig.4.9 の行幅 (3deg) において、サッカードによる改行が少ない結果となったが、4.2.1 黙読時間の結果で、行幅 3deg 条件では黙読時間が長くなってしまいうことについて、表示文字数が極端に短すぎると表示されている文字が有効視野内に入り、サッカードより指による改行が中心となり、黙読時間が延長したと考えられる。

同時に、5deg、7deg と行幅が増えていくにつれサッカードと頭部運動による改行が増え、黙読時間が短縮した。サッカードと頭部運動を併用しての改行か、どちらかを使用して改行を行うかに関しては、Fig.4.8 から分かるように、二分化され個人差が強い傾向が伺えた。

また、4.2.3 眼球運動による改行で、頭部を固定していた条件に対し頭部を固定しない自由な条件では、サッカードが大幅に減少した理由は、サッカードで行っていた改行を頭部運動によって改行したためだと考えられる。

そして、頭部を固定しない自由な条件において、1 行の行幅が大きくなるにつれてサッカードによる改行が若干増加する傾向となった理由としては、行幅が大きくなるにつれ頭部運動より早いサッカードによる改行に移行したためだと考えられる。

4.4 頭部運動と眼球運動の解析まとめ

頭部を固定しない自由な条件において、黙読中の改行手段を調べ、水平方向成分について、サッカードによる改行と頭部運動による改行との併用の傾向を調べた。垂直方向に関しては、スクロールで改行を行った場合もある。スクロールと垂直方向の頭部運動、サッカードの関係について、より詳細に調べていく必要があると考えている。

5. 本研究のまとめ

高精細の液晶や有機 EL が普及し、スマートフォンやタブレット型端末などの小さな画面でより多くの情報を表示できるようになってきた。見る側の立場から、視覚情報だけでなく、頭部や指の操作も加わり、従来の紙書籍に比べて読書スタイルは大幅に変わってきている。

頭部運動と眼球運動の解析では、ケータイ小説読書の実験で示唆された 1 行の行幅と行間の 2 つの要因をパラメータとして、頭部を固定しない自由な条件で頭部運動を含めた視線分析を行なった。その結果、水平方向の頭部運動と水平方向のサッカードとの改行の併用が示された。また、頭部運動の改行がサッカードによる改行に大きな影響を与えるという新たな知見が示された。

垂直方向についてはスクロール操作との関連を含めた解析が必要である。

スクロール操作を含む解析では、より自然な状態における実験が必要であると考え、現在は頭部を固定しただけではなく、電子端末も固定しない条件での研究を行っている。より効果的な表示法を提案するために、頭部が自由で、手や指の動作がある様々な条件に対して、人がどのような見方をしているのか明らかにしていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 山田和平,萩原秀樹,恵良悠一,山田光穂: ケータイ小説黙読時における眼球運動特性の解析, 東海大学情報通信学部紀要, Vol.3, No.2, 2020, PP.19-24
- 2) Biguer B., Prablance C.& Jeannerod, M . 1984 The contribution of eye, head and arm movements during reaching at a single visual target. Experimental Brain Research, 46, 301-304
- 3) 荻阪良二, 中溝幸夫, 古賀一男編; ” 眼球運動の実験心理学”, 名古屋大学出版会(1993)
- 4) 山田光穂: 2 次元平面上の視標を注視させたときの頭部運動と眼球運動の協調関係の分析, 信学会誌, J75-D-II 5, 971-981(1992)
- 5) Bahill, A.T., Adler, D.& Starl, L.: Most naturally occurring human saccades have magnitudes of 15 deg or less. Investigation of Ophthalmology, 14, 468-469, 1975
- 6) Gresty, M.A. Coordination of head and eye movements to fixate continuous and intermittent targets, Vision Research, 14, 395-403, 1979
- 7) Barns, G.R. Vestibulo-ocular function during coordinated head and eye movements to acquire visual targets, Journal of physiology, 287, 121, 147, 1979
- 8) 畑田豊彦, 坂田晴夫, 日下秀夫, 画面サイズによる方向感覚誘導効果, テレビジョン学会誌, 33, 4349, 1979
- 9) 美嘉: 美嘉のホームページ, 小説「恋空」; http://ip.tosp.co.jp/BK/TosBS100.asp?I=hidamari_book