

ウェアラブル・サッカード検出を利用した 選択的視覚情報提示の研究

安藤 英由樹^{*1} 渡邊 淳司^{*2} 雨宮 智浩^{*1} 前田 太郎^{*1}

The study of Selective Visual Information Display using Wearable Saccade Detection Device

Hideyuki Ando^{*1} Junji Watanabe^{*2} Tomohiro Amemiya^{*1} and Taro Maeda^{*1}

Abstract: In recently proposed saccade-based information displays, the observer cannot see an afterimage without moving the eyes appropriately and therefore often cannot see the afterimage correctly. We propose a new display system based on a concise saccade detection technique and the perceptual features of eye movement. In addition, with a system consisting of a wearable sensor (saccade detector) and a ubiquitous display (saccade-based display), we propose an application where many viewers can be accommodated simultaneously (Several viewers can view an image simultaneously (timesharing) with one saccade-based display.) and independently (Several viewers can view different images with one saccade-based display.). In experiments, we compared character-recognition rates to confirm that the detection of the saccade improves the visibility of the saccade-based display. The results indicate that the recognition rate is clearly improved.

Key Words: Saccade-based Display, Ubiquitous Display, Wearable Saccade Detection Device, Character Recognition

1. はじめに

1.1 Saccade-based Display

これまでの2次元視覚情報提示手法において、1次元の光点列を物理的に高速移動させ、1次元光源によって2次元情報の提示を行う手法が存在している[1]。一方で、逆に、1列の光点列を固定し、サッカードと呼ばれる高速眼球運動中に光点列の点滅パターンを高速で時間変化させると、図1のように、光源の点滅パターンが眼球運動により網膜上で空間パターンに展開され、2次元イメージが知覚される[2]-[8]。この現象を利用した情報提示手法(Saccade-based Display)は、少ない空間、少ないエネルギーによって効率的に情報提示が実現可能であり、筆者らは眼球運動(サッカード)を情報提示のリソースとして利用することの可能性に着目し、その手法の有効性を探ってきた[9][10]。

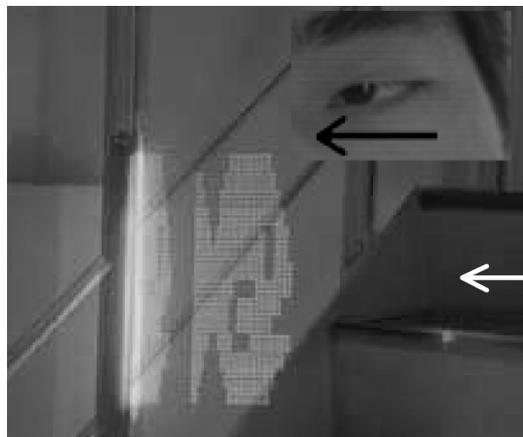


図1. サッカードディスプレイ
Fig1. The Saccade-based display

1.2 Saccade-based Displayにおける表示能力の向上

Saccade-based Display (以下、SD)は観察者の眼球運動と1列の光点列さえあれば、光点列付近の投影面の無い空間に2次元イメージが提示可能である。しかし、一方で、SDは観察者の眼球運動を利用しているため、「眼球運動と光源の発光タイミングが合わない」という問題点があった。

これまで、SDにおいてこの問題を解決するには以

*1 NTT コミュニケーション科学基礎研究所

*1 NTT Communication Science Laboratories

*2 東京大学情報理工学系研究科

*2 Graduate School of Information Science and Technology (IST),
The University of Tokyo

下の3つの手法が考えられてきた。本論文では、SDの表示能力を向上させる上で最も効果的な3番目の手法に着目し、ウェアラブルでサッカーを計測して情報提示を行う手法を実現した(この解決手法は、1.3章で述べるように、これまでにない選択的情報提示の可能性を示すものでもある)。以下、3つの解決手法について詳しく述べていく。

1. 光源を常に点滅させる
2. 視覚刺激によりサッカーを誘発する
3. サッカーを計測して、それに合わせて提示

1番目の解決手法は、観察者の眼球運動にかかわらず光源を連続的に点滅させる手法であり、観察者が眼球運動を起こせば、必ず網膜上に2次元像が描かれる。しかしながら、この手法は、観察者のサッカーのタイミングに応じて、表示される2次元像の順序が変化し、その向きも反転する可能性があり、SDの表示能力の飛躍的向上にはつながらない。例えば、“FROG”と表示するパターンで光源が点滅していたとしても、眼球運動のタイミングによって“ROGF”や“OGFR”のように知覚される場合がある。また、想定した方向と逆方向にサッカーを起こしたときには“DOFF”と知覚されてしまう。

2番目の解決手法は、SD以外に光点を点滅させるなどして、観察者のサッカーを情報提示側で誘発し、それに合わせて情報提示を行うものである。例えば、SDの両側に2つ光源(1つを固視点、もう1つを視標と呼ぶ)を配置する。はじめに固視点を点灯させ、観察者にそこを注視してもらい、次に固視点を消灯するとともに視標を点灯させる。そうすると、観察者のサッカーが反射的に誘発され、それに合わせてSD用光源を点滅させると、確実に情報提示を行うことが可能となる。ただし、この解決手法では、視標が点灯してからSD用光源の点滅が始まるまでの時間と、視標が点灯してからサッカーが開始されるまでの時間(潜時)を合わせる必要がある。一般にサッカーの潜時は200ms程度であるが、試行毎や個人により差がある。また、エクスプレスサッカー[11][12]と呼ばれる潜時が安定したサッカーを利用した手法も提案されているが[9]、それでもなお潜時を非常に安定させるためにはトレーニングを必要とし、また個人ごとに異なる潜時を計測し調整する必要がある。

3番目の解決手法は、サッカーを計測し、サッカー開始とともにSDの光源をリアルタイムで点滅させる手法である。この手法はサッカー検出が精度よく可能ならば、確実に2次元情報が提示可能であり、3つ解決手法の中で最も効果的な手法である。これまで、網膜の再帰反射を利用して遠隔からサッ

カードを検出する手法が検討されているが[13]、計測装置として高価な高速カメラが必要であることや、計測範囲が限られているという問題点があった。そこで本論文では、ウェアラブルかつ簡便にサッカーを検出するデバイスを提案し、SDによって確実に情報提示を行うシステムを提案する。

1.3 ウェアラブル・サッカー検出による新たな選択的情報提示手法の可能性

本論文で提案する手法は、観察者がウェアラブル・サッカー検出装置を装着し、観察者のサッカーを検出すると同時にSD用の光源を点滅させるものである。本手法の特徴として、1つのSD用光源で複数の観察者に選択的に情報提示を行うことが可能であるということが挙げられる。例えば図2のように、1つのSDを2人の観察者が見ているとして、時刻 t_1 においては観察者Aのサッカーを検出し、そのタイミングで2次元像をSDに表示する。このとき、観察者Aには2次元像が知覚されるが、観察者Bには1次元の像しか知覚されない。一方、時刻 t_2 では観察者Bのサッカーを検出し2次元像を提示する。このときには観察者Bだけが2次元像を知覚可能である。つまり、サッカー検出に合わせて情報提示を行うことで、1台のSDで複数の観察者に時分割で情報提示を行うことが可能である。

また、サッカー検出装置はそれぞれの観察者に装着されているので、「誰が」「いつ」サッカーを起こしたのか検出可能であり、それぞれの観察者に合わせて、異なる情報を提示可能となる。(「誰」という情報は遠隔からカメラ等でサッカー検出を行った場合には取得不可能な情報である)。また、一度サッカーの持続時間は50ms程度、サッカーの頻度は最も頻繁に行ってもおよそ300~400msに1回であるため、二人のサッカーの時間が重なる確率は数十回に一回程度であり、情報のクロストークは少ない。そして、各観察者の表示デバイスの占有時間も短いので、時分割に表示することで、複数人の観察者が同時に利用可能である。

このように、1台のSDと複数のウェアラブル・サッカー検出装置を組み合わせることによって、複数の観測者に、1台のSDで各々異なった情報を提示することが可能となる。また、1次元の光点列によって構成されるSDは、安価で設置面積も小さいことから偏在させること(ユビキタスの利用)も容易である。

本論文では、上記の選択的情報提示手法を実現するためのウェアラブル・サッカー検出装置を提案・実現し、さらに評価実験として本手法を利用した場合の文字の認識率を調べる実験を行った。

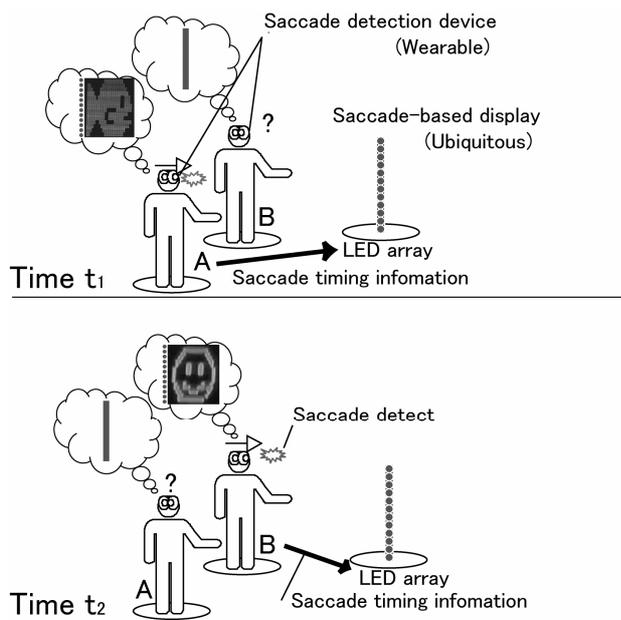


図2. サッカード検出を用いた Saccade-based Displayの利用イメージ

Fig.2 Saccade-based display with Saccade detection

2. EOG を利用したサッカード検出

2.1 サッカード検出に要求される性能

SD で情報を適切に表示するためには、観察者のサッカードタイミングに合わせて光点列を点滅させる必要がある。本節では、サッカード検出装置に要求される性能について論ずる。

サッカードは最高角速度約 700deg/sec, 持続時間約 50ms と高速で持続時間の短い眼球運動である[14]。そのため、SD に利用するには検出の時間遅延ができるだけ少ないことが望まれる。検出時間遅延が大きくなると、サッカード中の情報提示可能な時間帯が短くなり、情報表示領域が狭くなってしまう。サッカードの持続時間から考えると、少なくともサッカード開始から 10ms 程度以内に検出することが必要である[13]。このように、SD に利用するためのサッカード検出は、従来の眼球運動計測のような高い空間分解能は必要としない一方で、サッカードの有無を高い高時間解像度で検出することが重要となる。さらには、実際の使用状況を考えると、汎用性があり、ウェアラブル計測が可能という点が重要となる。

2.2 サッカード検出に利用する眼球運動計測手法

これまでの眼球運動計測で用いられている手法と その特徴を表 1 にまとめる。以下ではこのそれぞれについて概説し、本論文の目的にあった手法について議論を進める。(以下、節頭の番号は各眼球計測手

表1. 眼球運動計測手法の特徴

Table.1 The characteristic of eyeball movement measurement method

	(1) 画像解析 (カメラ)	(2) 強膜反射法	(3) サーチコイル法	(4) EOG 法
空間分解能	◎	×	◎	×
時間分解能	×	◎	◎	◎
コスト	×	○	×	○
装着性	◎	◎	×	○
その他	画像処理が必要	輝度外乱に弱い	着用時間の制限	電磁波ノイズに弱い

法の項目番号に対応する)

(1) カメラで眼球付近を撮像し、画像解析処理によって眼球の回転角度や視線方向を検出する手法である[13][15][16][17]。しかしながら、NTSC 規格標準程度のフレームレートは 60Hz であり、サッカード検出には不適切である。勿論、高速なカメラを利用する手法も検討されている[18]。しかしながら、高フレームレートとするためにはカメラの露光時間(蓄積時間)を短く設定する必要がある、さらにウェアラブルとするためにはレンズや受光素子の小型化が必須である。この状況下で十分な SN 比を得るためには人体に悪影響があると考えられる程強力な赤外光源を必要とするため現実的ではない。これらの理由から本論文の用途においてカメラの撮像動画を画像処理する手法は困難であると判断した。

(2) 眼球に弱い赤外線を照射し、光彩と白眼の光の反射比から眼球運動を検出する強膜反射法[13][19]が提案されている。この手法は時間解像度が高く、小型化も容易であるが、外乱光に弱く実験室外の環境での使用は困難である。

(3) コイルが埋設された特殊なコンタクトレンズを着用し、磁場の変化により眼球運動を計測するサーチコイル法[20][21]が提案されている。この手法は時間・空間双方の分解能が良好であるが、特殊なコンタクトレンズを着用するため、現実的には困難である。

(4) 電位差を持つ角膜と網膜が移動したときに発生する生体信号を利用した EOG (Electro OculoGram) 法が提案されている[21]。この手法は時間分解能が高く、センサは電極のみで軽量化が容易である。一方で、空間分解能は低く、また電磁波ノイズに弱いという問題を抱えている。

本論文の目的であるサッカード検出を実現するには、上記の各計測手法の特徴から考えると、EOG 法は高い時間解像度を持っており、電磁波ノイズに弱いという問題点についてもサッカードの時間特性のみを通過させるフィルタ処理を施すことで十分な S/N 比を持ったサッカードの情報の抽出が可能であ

ると期待できる．そのため，本論文では EOG 法を採用する．次節ではサッカード検出に特化した EOG 法について議論する．

2.3 EOG法によるサッカード検出装置

EOG 法においては，信号電極を両眼の目尻に 2 つ，不関電極を両眼間の鼻の部分に 1 つ装着し，眼球の移動を計測する．本手法において使用した電極（フクダ電子社製 CLEARODE TE-174RT）と電極の装着の様子を図 3 に示す．電極は 40mm 四方の粘着テープ（緑色部分）に 20mm 四方のゲル電極（透明なため波線で囲われている）が一体となったものである．また，信号の精度を高めるため，装着時には装着部分をアルコール含む脱脂綿で洗浄，脱脂した．

眼球の移動は電極から得られる信号を元に算出される．電極から得られる EOG 信号は眼球回転角度に応じた電圧値として計測されるが，1~10mV 程度と微弱であるため，サッカードが発生したタイミングを検出するためには信号の増幅とノイズ除去の処理が必要となる．

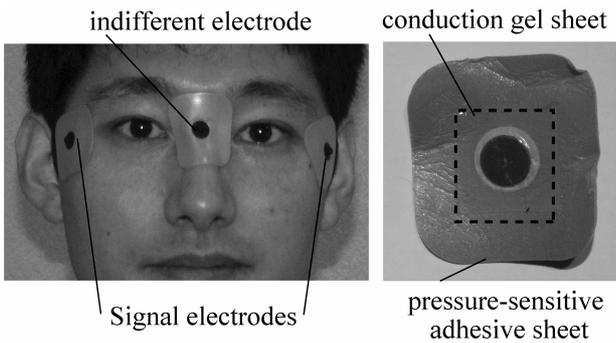


図3. 装着の様子 (左) と電極 (右)
Fig.3 The wear of the electrode and electrode

本手法で採用した信号処理過程のブロック図を図 4 に示す．2 つの信号電極と 1 つの不関電極からの信号(a)は計装増幅器(b)(増幅率約 40dB)によって増幅される．次に高周波のサッカードによる信号のみを取り出すため，サッカードに比べて低い周波数を持った信号をハイパスフィルタ(c)（カットオフ周波数 1Hz）によって除去し，信号の中に多く含まれる電力線からの電磁波ノイズをノッチフィルタ(d)（カットオフ周波数 50Hz）によって除去する．そして，マイコンの A/D 変換器にフルスケール（0.00~5.00V）に入力されるように増幅とオフセットの調整(e)を行う．マイコン(f)では入力された信号に微分処理を行い，微分結果が閾値を超えたときにサッカードが起きたと判別する．（このときの閾値は高いほど誤判別は少なくなるが，検出の遅延も増加するため，両者にはトレードオフが存在する）左から右に 20deg のサッカードを起こした場合について，本手法によって

実際に計測された信号の様子を図 5 に示す．計装増幅器の処理直後の波形（図の(a)）では，50Hz の雑音が信号に重なっているが，A/D 変換直前の波形（図の(b)）ではこの雑音がほとんど除去されている．

この計測及び以降の実験はシールドされていない鉄筋建築の中で行い，信号処理では誤判定を 10%以下になるように設定した．その際の遅延は約 5ms であった．また，本論文における実験は図 3 の電極を用いて行ったが，ウェアラブルな装着手法のために眼鏡と顔面皮膚が接触する箇所に電極を配置した図 6 の装置においても同等の計測が可能であることを確認した．図 6 の計測装置は従来の眼球運送計測手法に比べて，計測機器がもたらす外観への違和感が軽度であると考えられる．

3. サッカード検出による文字の認識率の向上

本章では，このサッカード検出装置を使用することによって，SD の視認性が向上することを，文字の認識率の評価実験によって示す．

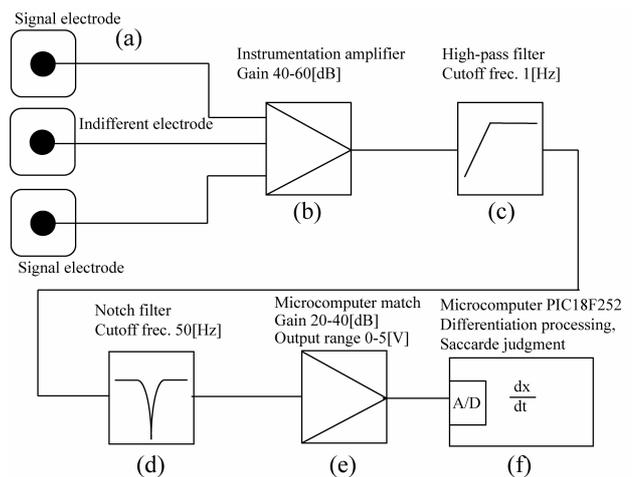


図4. 処理過程ブロック図
Fig.4 The processing circuit block

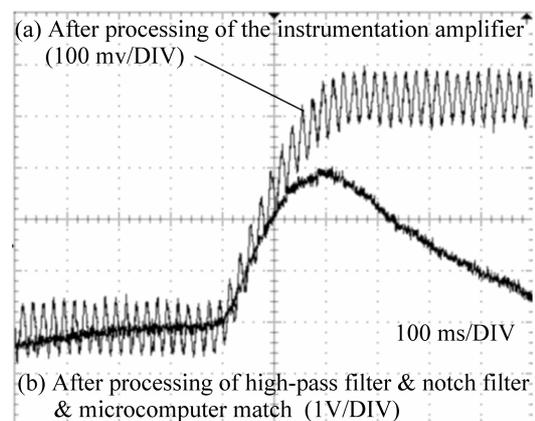


図5. 計測された波形
Fig.5 The snapshot of the signal measurement

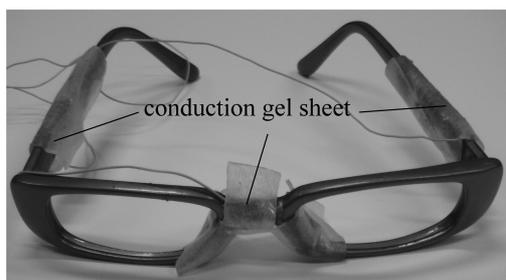


図6. 装着性を考慮した眼鏡型電極
Fig.6 Electrodes glasses

3.1 SD の情報提示形態と情報提示能力

1.2 節で述べたように、SD の提示形態として、「光源を常に点滅させる」手法、「視覚刺激によりサッカードを誘発する」手法、本論文で提案する「サッカードを計測して、それに合わせて提示する」手法があった。本節ではそれらの情報提示能力について比較検討する。



(a) Image continuously displayed



(b) Image displayed with timing match

図7. 常に光源が点滅している場合と一回だけの表示
(この写真は観察者の眼球のかわりにスローシャッターのカメラを動かして撮影したものである)

Fig.7 The images by continuously displayed method and saccade-detection method (This image was taken with the slow shutter camera)

SD の情報提示能力は、「繰り返されるサッカードに対してどの程度の確率で 2 次元情報を提示できるか」、「1 回のサッカードでどの程度の情報量が提示できるか」という 2 つの観点から考えることができる。

第 1 の観点について考えると、視覚刺激によりサッカードを誘発する手法では、サッカードと SD 光源の点灯タイミングが合致しない場合、物理的に網膜上に何も描かれないため、観察者は像を知覚する

ことが不可能である。文献[12]によると、潜時が安定しているエクスプレスサッカードの場合でも、2 度のサッカードの潜時が連続して $\pm 20\text{ms}$ の範囲となる確率は 50%程度であり、SD の情報提示能力が飛躍的に拡大するわけではない。そのため、確実に網膜上に 2 次元情報が描かれる「光源を常に点滅させる手法」、もしくは「サッカードを計測する手法」が、第一の観点から考えると望ましい。

次に、第二の観点、1 回のサッカードによって知覚される情報量について考える。光源を常に点滅させる手法では、図 7(a)のように 1 回のサッカード中であっても繰り返し文字が繰り返し表示される。一方、サッカード計測に合わせて提示する場合は、図 7(b)のように一度だけ表示される。また、SD による知覚像の持続時間は 100~150ms 程度と短いため[22]、図 7(a)のように一回のサッカード中に繰り返し文字が繰り返し表示されるよりも、図 7(b)のように一回だけの表示の方が、表示される文字数が少なく、文字が横に潰れることもないため文字を知覚しやすいと推測される。

次節では、光源を常に点灯させた場合に比べて、サッカードを計測した手法では SD の情報視認性が向上することを、文字の認識率の評価実験によって示す。

3.2 実験の装置と手順

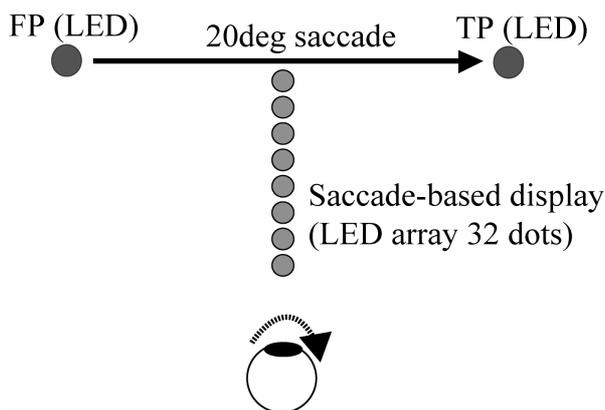
実験ではサッカード 1 回行ったときの文字の認識率を「光源を常に点滅させた条件」と「サッカードを計測した条件」で比較した。実験装置の配置を図 8(a)に示す。SD は顎台に固定された被験者正面 5m の位置に配置し (0deg)、固視点(FP)と視標(TP)はそれぞれ $\pm 10\text{deg}$ の位置に配置した。FP と TP は橙色 LED(直径 0.25deg, 輝度 16cd/m²)であり、SD は 16 個の緑色 LED からアレイ (各直径 0.1deg, 輝度 10cd/m²) である。実験は暗室で行った。

実験手順を図 8(b)に示す。光源を常に点滅させる条件 (図 8 (b) Exp.1) では、はじめに FP が点灯し被験者は FP を注視する。FP 消灯後 200ms に TP は 10ms だけ点灯する。このとき被験者は TP に向かってサッカードを行う。SD は FP が消灯する 20ms 前に文字を表示するパターンで点滅を始め、その後も点滅し続ける。SD の点滅は 1 pixel を 0.5ms で提示し、1 文字 18 pixel (文字間の空白含む) の 4 桁の数字を連続して提示した (36ms 周期で点滅し、図 7(a)のように知覚される)。TP 消灯後、500ms 後に SD は消灯する。被験者には TP 消灯後も、TP の点灯していた位置を見続けるように指示し、サッカード時に知覚された数字を全て回答してもらった。

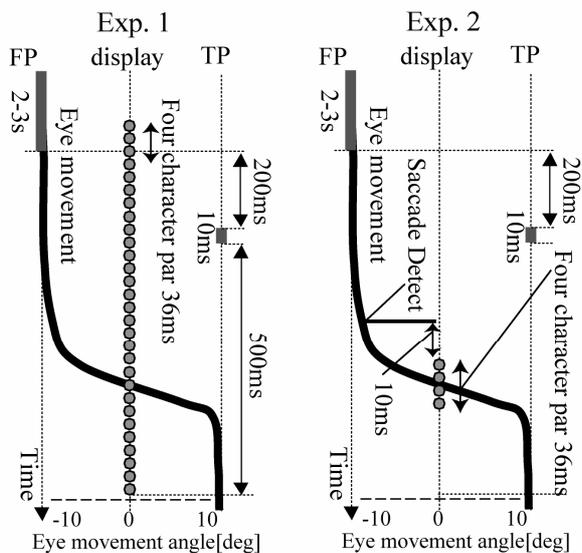
サッカードを計測する条件 (図 8 (b) Exp.2) では、

被験者のサッカードを計測しつつ、実験 1 と同様の指示を行った。SD の点滅タイミングはサッカードの開始を検出し、検出の 10ms 後に 1 周期 (36ms) だけ 4 文字の数字を提示する。被験者は実験 1 と同様に知覚された数字を全て回答した。

実験は両眼で行い、試行回数は各実験それぞれ 40 試行とした。被験者は男性 6 名、うち 4 名が矯正視力 1.0 以上、残り 2 名が 0.6 以上、1.0 以下の視力であった。



(a) Spatial arrangement



(b) Time charts

図8. 実験条件

Fig. 8 The experiment composition

3.3 実験結果

図 9 に全ての被験者の 40 試行における回答正解率を示す。上半分が実験 1 (常に光源が点灯していた条件) の回答正解率、下半分が実験 2 (サッカードを計測した条件) の回答正解率である。正解率は回答の順序を考慮に入れず、提示された数字のうち何文字

が回答された数字に含まれていたかで計算した。各帯グラフの左から 1 試行で 4 文字全てを正答した割合、3 文字正答、2 文字正答、1 文字正答、全て誤答であった割合である。常に光源が点灯していた条件において、4 文字全てを正答であった試行は最も成績の良かった被験者でも全体の 30%であった。一方、サッカードを計測した条件 (図 9 下半分) では、全ての被験者で約 6 割の割合で 4 文字全てを正答し、残りのほとんどの試行も 3 文字を正答していた。

この実験結果は、サッカードを検出し、そのタイミングに合わせて 1 回だけ情報提示を行う手法は、常に光源を点滅させる手法より、文字の認識率が向上することを示すものである。

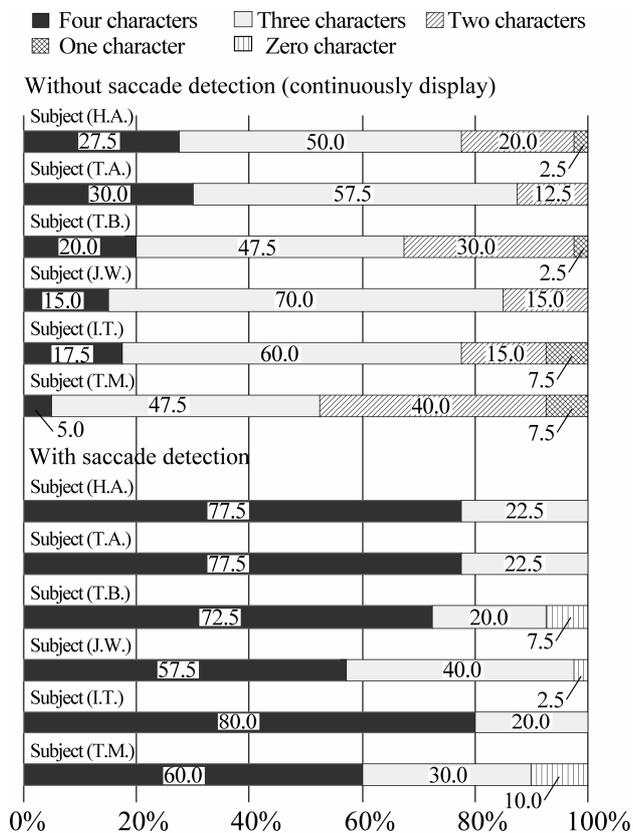


図9. サッカード検出の有無による認識率の比較
Fig.9 Comparison of recognition rates of character with/without saccade detection

3.4 考察

前節の実験結果は、正確に文字を認識するためには、サッカードと表示のタイミングを一致させることだけではなく、1 回だけ像を見せることも重要であることを示している。この理由は、SD によって知覚される像の持続時間が短いため[22]、被験者は一瞬で像の内容を理解しなければならないためだと考えられる。その根拠として、常に光源が点灯している場

合の被験者からの回答には「文字が見えたことは分かるが、その文字が何であったかは分からない」といった回答が多かった。つまり、像が見えることと、それを認識するというには違いがあり、短時間に知覚される文字数が多くても、それら全ての意味を認識することは容易ではない。また、多くの情報を提示するために、数回のサッカードに渡って同じ像を提示することも可能であるが、その際においても、安定して同じ像を提示するためにはサッカード検出が必要である。

また、サッカードに同期させて提示した場合の認識率について個人差が見られた。例えば、被験者 J.W., T.M. においては、他の被験者と比べて 3 文字しか認識できないことが多かった。この 2 人が誤認した数字は形状の近いもの（例えば、6 と 8, 8 と 0 など）が多く、また、この 2 人の視力は 1.0 以下であることから、この要因は視力によるものと考えられる。

サッカード検出精度に関して、被験者 T.B., J.W., T.M. では全く認識できなかった試行が数回見られたが、これは検出装置がサッカードの検出に失敗した可能性が高い。この要因として筋電位が混入したことが考えられる。例えば、EOG を計測している際に、強く歯を噛み締めた場合には、EOG 信号よりも大きな筋電位信号が混入して、サッカードの検出が困難になる。実験では顎台に顎を固定して実験を行ったが、実験中に歯を噛み締めてしまった可能性がある。そのため、使用状況によっては、筋電位などサッカード以外のノイズを分離する必要がある。

また、複数人で 1 つの SD を共有することについて考察する。サッカードの持続時間のみが SD の占有時間となることから、300ms に 1 回の頻度でサッカードを起こしたとしても、2 人の場合ワーストケースで 20% の確率で占有時間が重なり、どちらか見ることができない、3 人の場合 40% の確率で占有時間が重なる。しかし、実際に 300ms に 1 回の頻度はしきりに眼球を動かしている状態で普段あり得ない状態であり、数人程度の利用であれば十分実用範囲であると考えられる。これらのことから、複数のウェアラブル・サッカード検出装置を装着した観測者は、一台の SD によって同時（時分割）かつ、各々異なった情報を独立に利用可能であると考察される。

4. おわりに

本論文では、EOG 法によるサッカード検出を利用した選択的視覚情報提示システムの提案・実装を行った。提案するサッカード検出システムは、これまでの Saccade-based Display の表示能力を飛躍的に向上させるものであり、その効果を実験によって確認

した。そして、この結果によってウェアラブルなサッカード検出装置とユビキタスな SD の組み合わせによって、複数の観測者が 1 台の SD を同時（時分割）に独立して使用するという応用の可能性を示した。

参考文献

- [1] オーム社 編, “Ohm Mook 光シリーズ No.2 光ディスプレイ”, オーム社, 2002.
- [2] W.A. Hershberger: “Saccadic eye movements and the perception of visual direction”, *Perception & Psychophysics*, vol.41, No.1, pp.35-44, 1987.
- [3] W.A. Hershberger, J.S. Jordan: “Visual direction constancy: perceiving the visual direction of perisaccadic flashes”, In E. Chekaluk and K. R. Llewellyn (Eds.), *The role of eye movements in perceptual processes*, Amsterdam: Elsevier, pp.1-43, 1992.
- [4] 藤田 昌彦, 雨宮 明博, “眼球運動中のアイコニック・メモリの性質(1)”, *信学技報 NC2000-41*, pp.1-5, 2000.
- [5] H. Sogo, N. Osaka: “Perception of relation of stimuli locations successively flashed before saccade”, *Vision Research*, Vol.41, No.7, pp.935-942, 2001.
- [6] 渡邊 淳司, 前田 太郎, 館 暉, “サッカード前中後に渡って提示される連続点滅光点刺激の知覚と眼球運動との時間関係” *電子情報通信学会論文誌 D-II*, Vol.J86-D-II, No.9, pp.1350-1357, 2003.
- [7] Junji Watanabe, Atsushi Noritake, Taro Maeda, Susumu Tachi, Shin'ya Nishida “Perisaccadic Perception of Continuous Flickers” *Vision Research*, Vol. 45, No. 4, pp. 413-430, 2005.
- [8] 海老澤 嘉伸: “サッカードに伴う連続点滅刺激の見かけの刺激の発生理由の考察”, *映情学誌* Vol.59, No.7, pp. 1081-1087, 2005.
- [9] 渡邊 淳司, 前田 太郎, 館 暉, “サッカードを利用した新しい情報提示手法の提案” *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 6, No. 2, pp.79-87, 2001.
- [10] 渡邊 淳司, Maria Adriana Verdaasdonk, 田畑 哲稔, 安藤 英由樹, 前田 太郎, 館 暉, “MultiMedia Performance におけるインタラクティブ性と美”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.10, No.1, pp.3-9, 2005.
- [11] B. Fischer, E.Ramsperger “Human express saccades : extremely short reaction times of goal directed eye movements”, *Exp. and Brain Res.*, Vol. 57, pp. 191-195, 1984.
- [12] D.Braun, B.G.Breitmeier “Relationship between directed visual attention and saccadic reaction times”, *Exp. and Brain Res.*, Vol. 73, pp. 546-552, 1988.
- [13] 渡邊 淳司, 安藤 英由樹, 関口 大陸, 前田 太郎, 館 暉, “網膜再帰反射を利用した遠隔サッカード検出手法の研究”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 9, No.1, pp.105-113, 2004.
- [14] 日本視覚学会 編, “視覚情報処理ハンドブック”, 朝倉書店, 2000.
- [15] 松田圭司, 永見武司: 汎用視線位置計測システム, 第 12 回生体・生理工学シンポジウム論文集, PP. 173-176, 1997.
- [16] Y. Ebisawa. “Improved video-based eye-gaze detection method”, *IEEE Trans. On insirumeniaion and*

Measurement, 47:948-955, 1998.

- [17] Nac corp., "Eye Mark Recorder", <http://www.eyemark.jp/>
- [18] Bjorn W., Komuro T., Namiki A., Ishikawa M. "Development of High Speed Eye Tracking System Using the "Vision Chip" " Proc of 2005 JSME Conf. on Robotics and Mechatronics, 2005.
- [19] Cornsweet, T.N. "New technique for the measurement of small eye movements", Journal of the Optical Society of America, 48, pp.808-811, 1958.
- [20] Robinson, D.A. "A method of measuring eye movement using a scleral search coil in a magnetic field", IEEE trans. on Bio-Medical Electronics, 137-145, 1963.
- [21] Shackel, B. & Davis, J.R. "Note on mobile eye viewpoint recording", Journal of the Optical Society of America, 50, 763-768, 1960.
- [22] 渡邊 淳司, 坂本 憲久, 則武 厚, 前田 太郎, 舘 暲, "サッカーボール残像の視覚的持続時間の研究" 映像情報メディア学会, Vol. 58, No. 12, pp. 1808-1814, 2004.
(2005年7月27日受付)

[著者紹介]

安藤 英由樹 (正会員)



1998年 愛知工業大学大学院 工 電気電子工 修士課程修了. 1998年 同大学工学研究科 電気材料工博士課程. 1999年 理化学研究所 BMC JRA 配属. 2000年 JST 「協調と制御」領域グループメンバーとして東大情報学環研究員を経て現在 NTT コミュニケーション科学基礎研究所 リサーチアソシエイト. 生体工学, 人間の知覚特性に基づく (錯覚, 錯触を利用した) ヒューマンインタフェースなどの研究に従事. 2004年 SICE SI 部門 奨励賞, 2005年 日本機械学会ロボメック賞受賞, 博士 (情報理工学)
<http://www.star.t.u-tokyo.ac.jp/~hide/>

渡邊 淳司 (正会員)



2005年3月 東京大学大学院 情報理工学系研究科 博士課程修了 (情報理工学博士). 2005年11月より科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 個人型研究 (さきがけ) 研究員. 視覚における探索運動 (眼球運動やなぞり動作) 時の時空間知覚の変化とその情報提示・芸術表現への応用研究を行う. 日本バーチャルリアリティ学会論文賞受賞 (2001年), 同学会学術奨励賞受賞 (2002年), 電子情報通信学会 ヒューマンコミュニケーション賞受賞 (2003年), Ars Electronica "Next Idea" 入賞 (2004年), 日本視覚学会ベストプレゼンテーション賞受賞 (2005年).
<http://www.star.t.u-tokyo.ac.jp/~junji/>

雨宮 智浩 (正会員)



2002年 東京大学工学部機械情報工学科卒業, 2004年 同大学大学院情報理工学系研究科博士前期課程修了, 同年日本電信電話株式会社入社. 現在 NTT コミュニケーション科学基礎研究所にてウェアラブルインタフェース, 人間の知覚特性を利用した力触覚の錯覚現象の解明, 五感伝送に関する研究に従事. 2004年 日本VR学会学術奨励賞受賞.

前田 太郎 (正会員)



1987年 東大・工・計数工卒. 工博. 同年通産省工業技術院機械技術研究所. 1992年 東大先端科学技術研究センター助手, 1994年 同大大学院・工助手, 1997年 同大大学院・工講師, 2000年 同大大学院情報学環講師. 2002年 NTT コミュニケーション科学基礎研究所主幹研究員. 人間の知覚特性・神経回路のモデル化, テレインテラクションの研究に従事. 計測自動制御学会論文賞, 学術奨励賞, 日本ロボット学会技術賞受賞.