基礎論文

TVRSJ Vol.6 No.2 pp.79-88, 2001

サッケードを利用した新しい情報提示手法の提案

渡邊 淳司*1　前田 太郎*2　舘 暲*1

The Study of Saccade-based Display

Junji WATANABE *1　Taro MAEDA *2　Susumu TACHI *1

Abstract – We propose a new method to display information based on the saccadic eye movement. Using this method, we can make small-size devices. The device based on this method can be a very simple one composed of two blinking light points and around a vertical blinking light array. This method uses the saccadic eye movement for displaying information, so its viewer can be limited to people who are actively looking for it. Considering these features, this method is suitable for wearable and ubiquitous computing.

Keywords : Wearable, Ubiquitous, Saccade, Eye movement, Display, Interface

1. はじめに

ウェアラブルコンピューティングにおける情報提示デバイスは、近年そのデバイス自体を小型化する方向へ進んでいるが、一方で、情報提示のためのリソースとして人間自身の身体運動を利用することも可能であり [1] [2] [3]、その可能性に着目し、その手法の有効性を探るのが本研究の目的である。

本研究においては、人間自身の身体運動をリソースとした視覚情報提示手法のひとつとして、人間の眼球運動、特にサッケードを利用した情報提示手法を提案する。この手法の原理は、光点がある一定以上の速さで移動すると、残像によりその軌跡が連続した線に知覚される [4] [5] が、逆に、光点は動かず眼球が一定以上の速さで運動することによっても、同様の残像効果によって線が知覚される [6] ということを利用したものである。

本手法の特徴は、大きく分けて2つ挙げられる。まず第1に、光点2つと光点列1列だけで、デバイスの無い空間にも情報提示が可能であるという点。本手法をウェアラブル情報提示デバイスに利用すれば、デバイスの小型化が可能である。また、ディスプレイとして利用した場合は、空中など投影面の無い空間に情報提示することも可能となる。第2として、本手法は人間の眼球運動を利用しているので、眼球運動を起こした人のみ情報を見ることが可能であり、情報提示の選択性があるという点である。

*1: 東京大学大学院 工学系研究科
*2: 東京大学大学院 情報学環
*1: Graduate School of Engineering, the University of Tokyo
*2: Interfaculty Initiative in Information Studies, Graduate School of the University of Tokyo

2. 眼球運動を利用した情報提示手法の原理

図1左に示すように、光点をある一定以上の速さで移動させると、残像によりその軌跡が連続した線に知覚される。逆に、図1右のように光点は動かず、眼球が一定以上の速さで運動することによっても同様の残像効果によって線が知覚される。

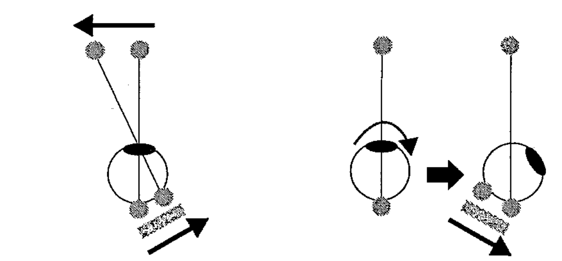


図1 残像による線の知覚
Fig. 1 Perception of a line by afterimage

次に、図2左に示すように光点列を一定以上の速さで移動させ、移動している最中に光点列の発光パターンを時間変化させると、文字、記号等の2次元情報を提示することが可能である。この原理はテレビの走査線や、光点列を周期的に移動させることによって情報を提示する図3、4のようなデバイスに応用されている。そこで、上記2つの現象を考え合わせると、光点列ではなく眼球を動かし、眼球運動が起こっている最中に光点列の発光パターンを時間変化させることによっても、図2右のように文字、記号等の2次元情報を提示することが可能であることがわかる。本研究ではこの考え方を基本的な情報提示原理として、この原理に基づいた情報提示手法の可能性を探る。

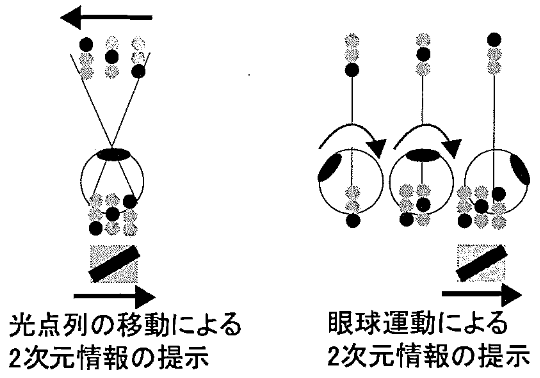


図2　2次元情報の提示
Fig. 2　Display of 2 dimentional image

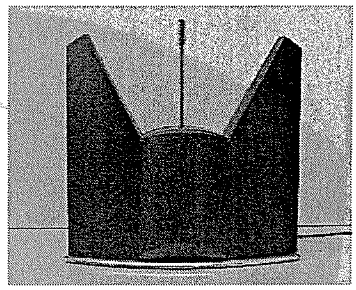


図3　光点列の移動による情報提示デバイス（光点列の移動前）
International Signature Machines 社 Fantazein
Fig. 3　Device based on moving light array

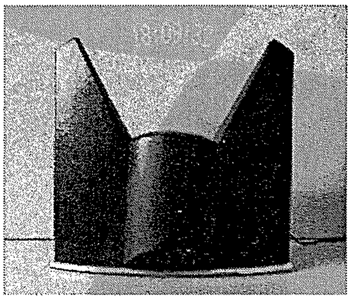


図4　光点列の移動による情報提示デバイス（光点列の移動中）
Fig. 4　Device based on moving light array

3.　本情報提示手法を使ったデバイスの概要

眼球運動を利用して情報提示を行うためには、情報を提示する側で眼球運動を誘発し、そのタイミングに合わせて光点列を明滅させ、情報を提示する。また、眼球運動によって残像を起こすには、高速な眼球運動が必要であるので、追跡眼球運動の高速運動成分であるサッケード (運動速度 300〜500 度/秒) [7] を誘発する。実際には、図5左にあるように、まず、注視点を光らせ注視点に視線を向けさせる。次に、注視点を消すとともに視標を光らせる。そうすることにより、視線を注視点から視標に移らせ、サッケードを誘発する。そのサッケードの間に光点列を明滅させて図5右のように情報を提示する。図6は実際に本研究のために試作したデバイスである。(ただし、中央のLED列で使用したのは中央の1列のみである。) 光点の明滅制御には PIC16F84 を用いた。

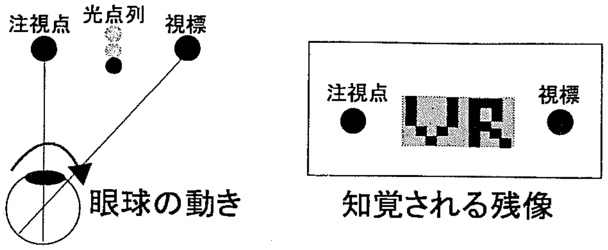


図5　実装の概要
Fig. 5　Outline of this method

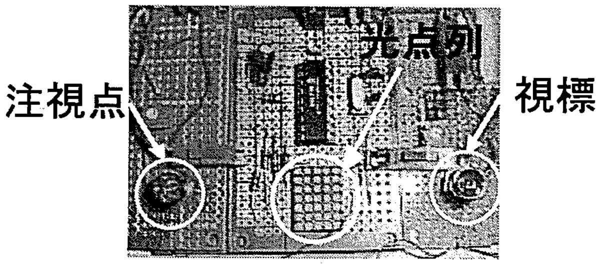


図6　試作デバイス
Fig. 6　Prototype device

図7に注視点・視標の光るタイミングと眼球の動きを表したタイムチャートを示す。太い実線部分が注視点・視標の光っている時間帯を表し、点線が眼球の動きを表す。はじめに、注視点が光り、眼球は注視点の方向を向く。次に注視点が消え、視標が光る。この時、眼球は視標が光った瞬間に視標に対して動き始めるのではなく、ある一定の時間 (潜時) 経ってから動き始める。眼球が動き始め、その運動速度がある一定の速度を超えている間 (図7における矢印の間) に、光点列の明滅パターンを時間変化させ情報の提示を行う。

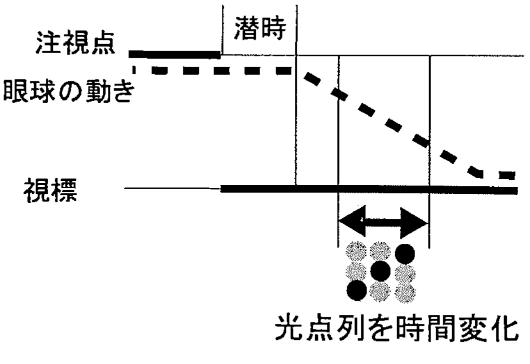


図7　注視点・視標の発光タイミングと眼球の動きのタイムチャート
Fig. 7　Timechart of light timing and eye-movement

4. 安定した情報提示のための条件

本手法では眼球運動を誘発し、その眼球運動の最中に光点列を光らせて情報提示を行うが、安定した情報提示を行うためには光点列を光らせるタイミングが重要となる。つまり、安定した情報提示には、サッケードにかかる時間を一定と考えると、視標が光ってから眼球が動き出すまでの時間、潜時が安定していることが必要となる。本研究では、潜時安定のための条件として注視点・視標の光るタイミング、注視点・視標の明るさの2点に着目し、安定した情報提示のための条件を求めた。

4.1 注視点・視標の光るタイミング

本手法では注視点・視標を順番に光らせることによりサッケードを誘発しているが、サッケードには潜時、最高速度、ゲインなどその特性が異なるいくつかの種類が存在し、注視点・視標を光らせるタイミングによって誘発されるサッケードの種類が異なることが知られている [9] [10]。つまり、安定した情報提示のためには、潜時が時間的に安定しているサッケードを誘発するような、注視点・視標の発光タイミングを特定することが重要となる。主なサッケードの種類と、それを誘発する代表的な注視点・視標の発光タイミングを図8に示す。

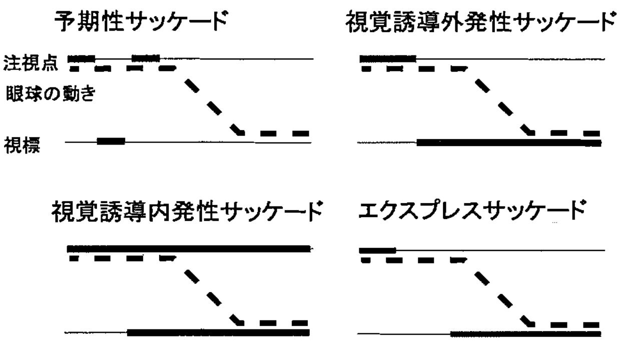


図8 サッケードの種類と代表的な誘発刺激
Fig. 8 Variety of saccades and trigger stimuli

主なサッケードとして、視標の現れる位置をあらかじめ予測して起こされた予期性サッケード (図8左上)、注視点と視標が両方光っている状態から意識的に起こされた視覚誘導内発性サッケード (図8左下)、注視点が消えるとともに視標が光り、それに誘導される視覚誘導外発性サッケード (図8右上)、注視点が消えた後ある一定時間経ってから視標が光るエクスプレスサッケード (図8右下) がある [11] [12]。予期性サッケードは視標の現れる位置をあらかじめ予測しているので潜時 (この場合は注視点が消えてからの時間) が 20ms〜80ms と短くばらついている。視覚誘導内発性サッケードは潜時 150ms〜200ms 程度、視覚誘導外発性サッケードは潜時 150ms〜200ms 程度で視覚誘導内発性サッケードと同程度であるが、視覚誘導内発性サッケードより最高速度が速く、ゲインが大きい。エクスプレスサッケードは潜時 100ms 前後で上記2つのサッケードより潜時が短い。この中でもっとも潜時が時間的に安定しているのは図8右下のエクスプレスサッケードであることが知られている [13] [14]。特に注視点が消えてから視標が光るまでの間隔が 200ms の条件で最も潜時が安定している [15] [16] ので、本手法では注視点・視標の光るタイミングを、注視点が消えてから視標が光るまでの間隔を 200ms としてエクスプレスサッケードを誘発することとした。また、エクスプレスサッケードは反復することによって潜時がより安定する [17] ことも知られている。

4.2 注視点・視標の明るさ

安定した情報提示のために、注視点・視標の発光タイミングを注視点が消えてから視標が光るまで 200ms とし、潜時が安定したエクスプレスサッケードを誘発することとしたが、実際、その発光タイミングに設定したとしても、100%エクスプレスサッケードが誘発されるわけではなく、注視点の明るさ、大きさ等によりその頻度は異なる [18] [19]。そこで、注視点・視標の明るさとエクスプレスサッケードの誘発頻度の関係を調べる実験を行った。注視点、視標の明るさをそれぞれ変化させ、どの程度の頻度でエクスプレスサッケードが誘発されるか実験を行った。

4.2.1 実験条件

実験条件の概要を図9に示す。実験は明るさ 0.1lx の LED 以外光源の無い暗室の中で行い、被験者は注視点から 45cm の位置に片方の目の眼球が位置するように腰掛け、その片方の目でサッケードを起こさせた。予備実験においては、右目と左目で、サッケードを起こす目による情報提示能力の差は見られず、また、サッケードの方向についても鼻側から外側、外側から鼻側へと変化させたが、情報提示能力に差は見られなかったので、本実験では右目で鼻側から外側へ向けてサッケードを起こさせることとした。

注視点と視標の間の距離は 8cm、視野角では 10 度とした。これは、日常みられるサッケードは視野角 10 度程度が多い [7] ことによる。情報提示用に3行1列の光点列を注視点と視標のちょうど真中に配置した。注視点、視標、光点列にはそれぞれ赤色 LED(ピーク波長 660nm) を使った。注視点、視標の大きさは視野角 1.3 度、明るさについては、明るい ($0.8cd/m^2$)、中間 ($0.3cd/m^2$)、暗い ($0.1cd/m^2$) の3段階で注視点・視標それぞれ変化させ、計9通りの明るさの組み合わせで実験を行った。光点列の1つ1つの光点の大きさは視野角 0.25 度、明るさは $14cd/m^2$ とした。

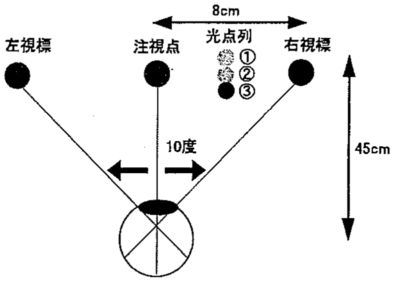


図 9 実験条件の概要
Fig. 9 Outline of experimental condition

4.2.2 実験方法

実験における、注視点・視標の光るタイミングのタイムチャートを図 10 に示す。注視点が光り (図 10 上)、被験者は注視点に視線を向ける。次に注視点が消え、200ms 経った後に左右どちらかの視標がランダムに光る (図 10 中央)。左右ランダムとしたのは、反復実験によって予期サッケードが起こるのを防ぐためである。次に注視点と右視標の間に配置した 3 行 1 列の光点列において右視標が光り始めた後、40ms〜100ms の間①の光点を点灯、100ms〜160ms の間②の光点を点灯、160ms〜220ms の間③の光点を点灯させる。これは①の位置に線の残像が知覚されたら、潜時 40ms〜100ms の予期性サッケードが起こったということ、②の位置に見えたら潜時 100ms〜160ms のエクスプレスサッケード、③の位置に見えたら潜時 160ms〜220ms の視覚誘導性のレギュラーサッケードが起きたということである。知覚される線の位置と誘発されたサッケードの種類の関係を図 11 に示す。実験は、それぞれの明るさの組み合わせで 50 回の試行を行った。

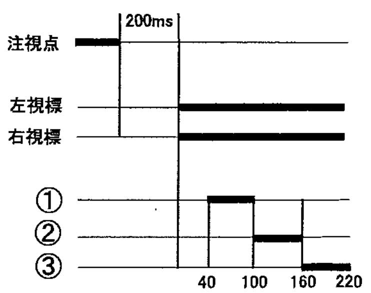


図 10 明るさ実験のタイムチャート
Fig. 10 Timechart of experiment

4.2.3 実験結果

実験から得られたデータは、被験者間での差はほとんどなく同様の傾向を示したので、被験者のうちの 1 人の実験結果を図 12 に示す。図の縦方向が注視点の明るさの変化、図の横方向が視標の明るさの変化である。9 つのグラフを 3 つずつ、縦方向に見ると、注視点が暗いほうがエクスプレスサッケードが高い頻度で誘発されていることがわかる。これは注視点が明るすぎると、注視点が消えること自体が予期性のサッケードを誘発しているのではないかと考えられる [14]。また、グラフを横方向に見ると、視標の明るさの変動によってエクスプレスサッケードの発生頻度に違いは現れていないことがわかる。

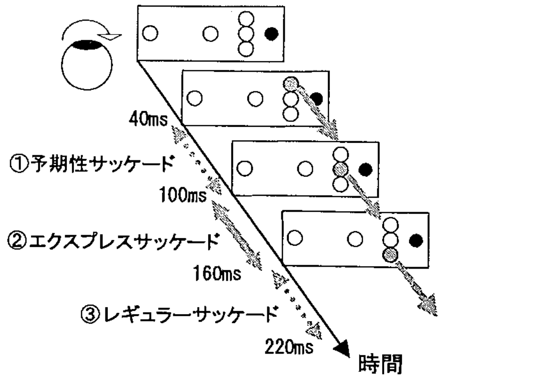


図 11 線の位置とサッケードの種類の関係
Fig. 11 Relation between position of lines and type of saccades

この実験から考えると、注視点が明るすぎた場合、その消灯が予期性サッケードを誘発してしまうので、注視点はある程度暗くしたほうがエクスプレスサッケードを多く誘発するということがわかった。また、視標については、明るさの変化によってエクスプレスサッケードの誘発頻度に変化は見られなかった。

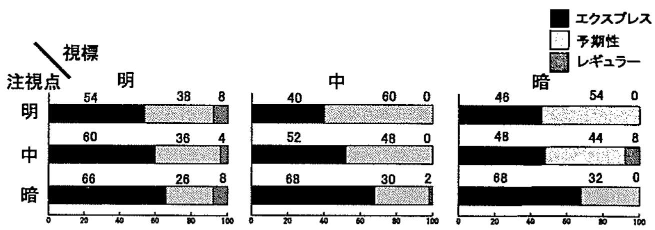


図 12 明るさと誘発頻度の関係の実験結果
Fig. 12 Result of experiment

5. 本手法の情報提示能力

情報提示に本手法を利用した場合、どの程度の情報量を 1 回のサッケードで提示できるか、本手法の情報提示能力について調べる実験を行った。ここで情報提示能力というのは、本手法を使用した場合、空間において何ピクセル分の情報量を 1 度に提示できるかということであり、具体的には図 13 に示すように、横方向に表示可能なピクセル数 X は、サッケード中において情報提示に利用可能な時間を T、空間における 1 ピクセルを提示するための最小提示時間を t_m とすると、$X = T/t_m$ によって計算可能である。サッケード中における情報提示に利用可能な時間 T は既知なので ([8] 及び本論文 6 章の表 3 参照)、最小提示時間 t_m を実験により決定した。

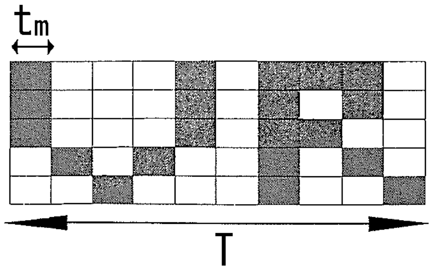


図 13　横方向に表示可能なピクセル数 X の算出
Fig. 13　Caluculation of pixels

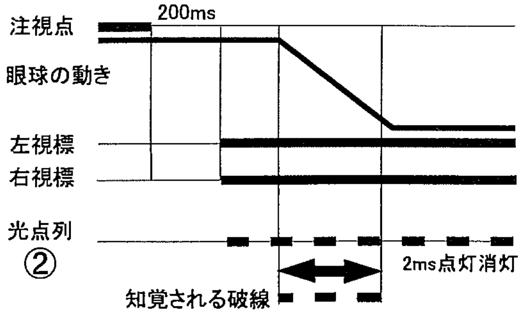


図 14　解像度実験のタイムチャート
Fig. 14　Timechart of experiment

5.1　実験条件

実験は、明るさの実験と同じ暗室の中で行い、LED も同様のものを使用した。被験者、注視点、視標の位置関係は図 9 と同じだが、被験者・注視点間の距離を 92cm、注視点・視標間の距離を 16cm とした。注視点から視標までの視野角は 10 度である。注視点、視標の明るさは注視点が 0.1cd/m^2、視標が 0.8cd/m^2 とした。光点列は図 9 における中央②番の光点だけ使用した。光点列の横幅は 1mm と 0.5mm、視野角にして 0.0625 度、0.03125 度の 2 通りを用意した。

5.2　実験方法

本実験における注視点、視標、光点列の光るタイミングのタイムチャートを図 14 に示す。まず、注視点が光り (図 14 上)、被験者は注視点に視線を向ける。次に注視点が消え、200ms 経った後に左右どちらかの視標がランダムに光る。そして、注視点から視標に向かってサッケードが起きている最中に、図 14 の光点列中央②番の光点がある特定の時間間隔で点滅する。そうすると、図 14 下の矢印のように破線が知覚される。そこで、光点列が点滅する間隔を徐々に小さくしていくと、だんだん破線の間隔が小さくなり、最終的には直線が知覚されるようになる。この破線と直線の境界となる時間間隔が情報提示の最小単位時間と考えることができるので、光点の点滅する間隔をどの程度まで小さくしたら直線が知覚されるかを決定した。具体的には、2ms 点灯、2ms 消灯というパターンから開始し、0.1ms 単位で消灯時間を減少させていき、いつ直線と知覚されるか上下法 [7] によりその境界を特定した。ただし、光点列の横幅は視野角にして 0.0625 度、0.03125 度の 2 通り用意し、被験者についても視力 0.6 程度、視力 1.0 程度の 2 グループで実験を行い、それぞれの組み合わせ、4 通りの条件で実験を行った。

5.3　実験結果

上下法によって特定された直線と破線との境界は、光点列の横幅、視力によって異なった。破線が知覚され得る最小の消灯時間を表 1 に示す。第 2 行は光点列の横幅を 0.0625 度とした時の結果で、視力 0.6 程度の被験者は消灯時間が 0.4ms まで破線を知覚し、視力 1.0 程度の被験者は消灯時間が 0.3ms まで破線を知覚した。第 3 行は光点列の横幅を 0.03125 度とした時の結果で、視力 0.6 程度の被験者は消灯時間が 0.3ms まで破線を知覚し、視力 1.0 程度の被験者は消灯時間が 0.2ms まで破線を知覚した。

表 1　破線が知覚され得る最小消灯時間を調べた実験結果
Table 1　Result of experiment

	視力 0.6 程度	視力 1.0 程度
横幅 0.0625 度	0.4ms	0.3ms
横幅 0.03125 度	0.3ms	0.2ms

光点列の横幅が小さく、視力がよくなる程少ない消灯時間でも破線が知覚された。視野角 10 度のサッケードを起こした場合、およそ 20ms 程度が情報提示に利用できる [8] ので、横方向に表示可能なピクセル数 X は、光点列の横幅 0.03125 度・視力 1.0 程度の場合で X = 20(ms)/0.2(ms/ピクセル)= 100 ピクセル、光点列の横幅 0.0625 度・視力 0.6 程度の場合で X = 20(ms)/0.4(ms/ピクセル)= 50 ピクセル程度となる。縦方向に表示可能なピクセル数については、光点列を何行配置するかによって調節が可能であるが、本研究においては最大 7 行の光点列で情報提示を行ったが、十分提示可能であった。本情報提示手法をディスプレイと考えると、本実験を行った設定では、縦 7 ピクセル、横 50〜100 ピクセル程度の情報提示能力を持ったディスプレイと考えられる。

5.4　情報提示能力の物理的限界

次に本実験において、どのような時に破線が知覚されなくなるか、その物理的条件について考察する。図 15 左に示すように、光点列の横幅を A(度)、消灯時間を t_m(秒)、消灯している間の眼球運動の速度を V(度/秒) とすると、光点列は消灯している間に網膜上を $V \times t_m$ 移動する。その時、大きさ $d = V \times t_m - A$ の隙間が物理的に存在するが、その隙間が視認されると破線が知覚される。この隙間は、破線の線が存在する部分に比べて小さく、この隙間が視認できるか調べ

るということは、ランドルト環によって計測されている最小可読閾の視力[7]を求めているの同等と考えられ、その視力を具体的に求めると表2にのようになる。表2の第1行は消灯時間 t_m、第2行は消灯時間のうちに光点列が網膜上を移動する視野角 α であり、この値は、視野角10度のサッケードにおいて情報提示に使用できる視野角は約5度なので、サッケード中の情報提示可能な時間を T とすると、$\alpha = 5$ 度 $\times t_m/T$ によって求められる。第3行は物理的に存在する隙間 d であり、α から光点列の横幅 A(0.0625度) を引いた値である。第4行は隙間 d を視認できる視力である。この視力以上ないと、隙間を視認することはできない。第5行、第6行は異なる光点列の横幅 (0.03125度) で隙間、視力を求めたものである。また、第3行、第5行で値が負になっているのは、図15右のように $d = V \times t_m - A < 0$ となり隙間が物理的に存在しなくなった状態であり、この時破線は知覚され得ない。

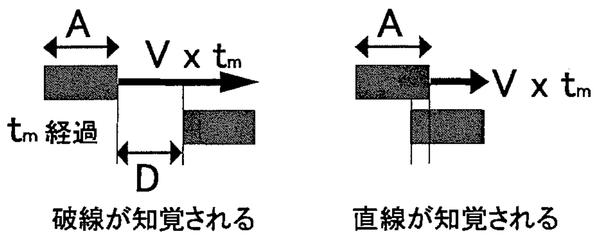


図15 破線が知覚される場合
Fig. 15 Perception of a broken line

表2 消灯時間と破線を知覚できる視力の関係
Table 2 Relation between lights-out time and eyesight

消灯時間	0.5ms	0.4ms	0.3ms	0.2ms	0.1ms
視野角 (度)	0.125	0.1	0.075	0.05	0.025
隙間 (度)	0.188	0.0625	0.0375	-0.0125	-0.0375
視力	0.27	0.44	1.33		
隙間 (度)	0.219	0.0938	0.0688	0.0188	-0.00625
視力	0.18	0.24	0.38	0.89	

表2の消灯時間と視力の関係に着目すると、光点列の横幅が0.0625度の時 (第3行、第4行)、視力が0.6程度だと消灯時間が0.4msまで隙間が物理的に視認可能であり、視力が1.0程度だと消灯時間が0.4msもしくは0.3msまで隙間が物理的に視認可能である。光点列の横幅が0.03125度の時 (第5行、第6行)、視力が0.6だと消灯時間が0.3msまで隙間が物理的に視認可能であり、視力が1.0程度だと消灯時間が0.2msまで隙間が物理的に視認可能である。これは、表1の実験結果とよく合致しており、本手法の情報提示能力を考える場合には、物理的制約が支配的であることがわかった。また、視力はサッケード中、低下するという報告がある[20]が、残像の視認については、あまり低下は見られないようである。

本実験においては、光点列の横幅を2通り用意して実験を行ったが、理論的には、光点列の横幅を2本の直線のずれを見分けることのできる最小のずれ (副尺視力) の大きさ2"(0.00056度) [7] とし、視認できる最小の隙間の大きさを、人間の視力限界、視力2.0の場合まで、消灯時間を短くすることが可能である。視力2.0の人間が視認できる最小の隙間は d =0.00833度であり、$d = 5$ 度 $\times t_m/T - A$ の関係式 (視野角10度のサッケード) に、情報提示に利用できる時間 T =20ms、光点列の横幅 $A = 0.00056$、を代入して t_m を求めると、$t_m = 0.0356$ms となり、その時、横方向に表示可能なピクセル数 $X = T/t_m$ =562ピクセルとなる。つまり理論的には、10度のサッケード1回でVGA(横方向640ピクセル) の解像度を持ったディスプレイの9割程度の2次元情報を提示可能であるということがわかった。しかし、より多くの人に情報を提示するためには、被提示者の視力は0.6程度に設定すべきであるため、表示可能なピクセル数は上記の計算より少なくなる。次に、視力0.6で同様の計算を行うと、副尺視力も変化して、光点列の横幅 $A = 0.00185$ 度となり、$t_m = 0.119$ms と計算される。この時、横方向に表示可能なピクセル数 X =168ピクセルとなる。この、より汎用的な条件設定では、VGAの1/4程度の2次元情報を提示可能であり、英数字を提示した場合には、英数字1文字の横幅を5ピクセルとすると、30文字程度が提示可能である。

ただし、英数字などの文字を提示する場合には、多くの情報を物理的に提示できたとしても、1度の残像で認識できる文字の数は限られており[21]、それに関する限界も考慮する必要がある。

6. 具体的設計論

本手法を用いて実際に情報提示を行う場合、どのように各パラメータ (光点列の光るタイミング、サッケードの大きさ、注視点・視標間の距離等) を決定すればよいか、これまでの議論に基づいて設計の指針を示す。

6.1 設計指針

まず、サッケード中の眼球運動の速度と経過時間の関係を考えると図16のグラフのようになる。このグラフは縦軸に眼球の運動速度、横軸に経過時間を取り、サッケードが起こり始めてから、サッケードが終わるまでを示したものである。サッケードが起こり始めた時間を $t = 0$ とした。グラフにあるように、サッケードが起こり始めてから眼球の運動速度は上昇し、あるピークを迎え、減少し始め、サッケード終了とともに0になる。本手法によって情報提示を行うには、眼球運

動によって残像が起こらなければいけないので、眼球の運動速度がある一定速度 (図 16 のグラフ縦軸 V_0) を超えている間のみ、情報提示が可能となる。サッケードが起きてから初めて情報提示可能な眼球速度になる時間を t_1 とし、眼球速度がピークを迎え、情報提示が不可能になる時間を t_2 とする。情報提示に使用できる時間 $T = t_2 - t_1$ である。この時、空間における 1 ピクセルを提示するための最小単位時間を t_m とすると、横方向に表示可能なピクセル数 X は $X = T/t_m$ によって決定される。

以上の議論を逆に辿ると、本情報提示手法を利用して情報提示を行う場合、提示したい情報のピクセル数 X が決定すれば、その情報を提示するために必要な時間 T が決定し、その時のサッケードの大きさ θ も決定する。また、図 16 にあるように、注視点・視標間の距離 D は注視点・被情報提示者間距離 L とサッケードの大きさ θ を使って $D = L \times tan\theta$ と表される。

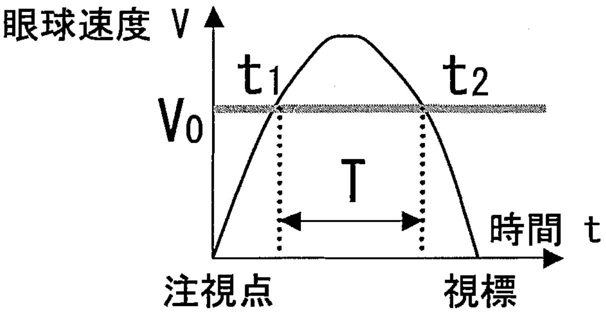


図 16　眼球速度と時間の関係
Fig. 16　Relation between eyemovement velocity and time

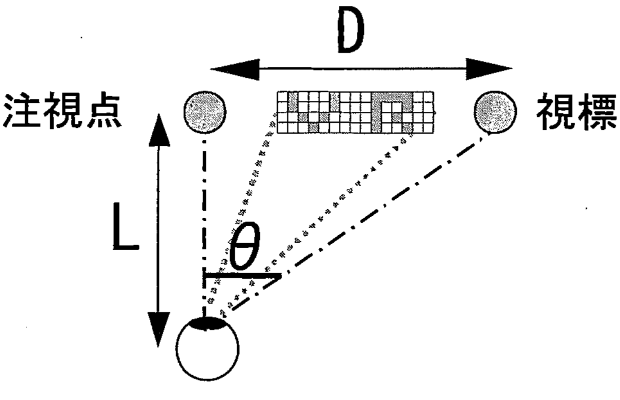


図 17　位置関係の決定
Fig. 17　Position of elements

6.2　設計例: 15 文字表示ディスプレイ

具体的な設計例として、1m 手前から視力 0.6 程度の人に対して、15 文字の英数字を提示することを考える。1 文字の横方向を 5 ピクセルと考えると、表示に必要な横方向のピクセル数 $X = 15$(文字) $\times$ 5(ピクセル/文字) = 75 ピクセルなので、1 ピクセル提示するための最小単位時間 t_m を 0.4ms とすると、情報提示のために必要な時間 $T = 75$(ピクセル) $\times$ 0.4(ms/ピクセル)= 30ms となる。ただし、t_m =0.4ms という値は、前章の実験において、被験者の視力が 0.6 程度、光点列の横幅が 0.0625 度の時の値である。次に、情報提示に利用できる時間が 30ms 以上となるサッケードの視野角 θ を決定するが、予備実験においてサッケードの大きさと情報提示に利用可能な時間の関係を調べた対応表を表 3 示す。表によると、情報提示に利用できる時間が 30ms 以上となるサッケードの視野角 θ は 20 度の場合である。サッケードの視野角 θ が決定されれば、注視点・視標の位置関係も決定される。眼球と注視点の距離 L が 1m の時、注視点と視標の距離 $D = L \times tan\theta$ =36cm となる。具体的構成イメージ図を図 18 左に示す。また、その時の注視点、視標、光点列の光るタイミングチャートを図 18 右に示す。はじめに、注視点が点灯し、視線を注視点に向けさせる。次に、注視点が消灯してから、200ms 経過後に視標を点灯させ、潜時が 100ms 程度で安定しているエクスプレスサッケードを誘発させる。眼球は 100ms 程度の潜時の後、視標に向かってサッケードを開始する。視野角 20 度のサッケードは約 80ms [7] であり、サッケード中に情報提示が可能な時間は約 30ms である。その情報提示可能な 30ms の間に、0.4ms ずつ光点列を端から文字をスキャンするパターンで点灯させ、文字を提示する (図 18 右の矢印の間)。ただしこの図 18 の場合、眼球が右に動いているので、文字を右からスキャンする形で光点列を点灯させる。

表 3　サッケードの大きさと提示時間の関係
Table 3　Relation between angle of saccades and time for display

サッケード	情報提示時間
5 度	10〜15ms
10 度	15〜20ms
15 度	20〜25ms
20 度	25〜30ms

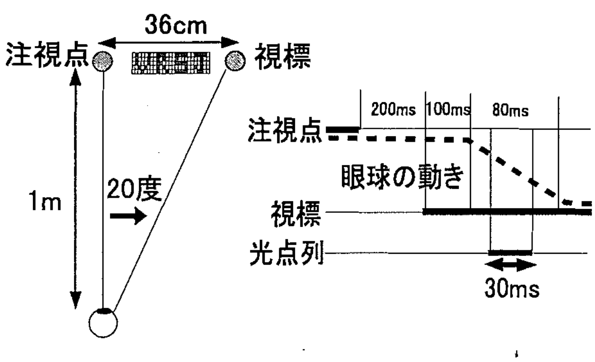


図 18　具体的設計例
Fig. 18　Sample of system design

6.3　今後の展望

本章の具体的設計例において、1ピクセルを提示するための最小単位時間、情報提示に利用可能なサッケードの大きさの値は、4章、5章の実験と同じく、暗室で測定した値を用いた。しかし、本手法を屋外など、実験を行った環境と異なる環境で使用する場合には、その環境に合った値を使用して設計を行わなければならない。

特にその環境の照度や表示用LEDの輝度が変化すると、人間の目の残像特性は大きく変化することが知られている[4]。一般的に、照度が大きくなると残像は起こりにくくなり[22]、本論文で使用した実験環境において情報提示を行った場合も、照度が大きくなるにつれて情報提示能力は低下し、照度が約50lxを超えたあたりから情報提示が困難となった。50lxという明るさは、住宅全般平均照度が約70lx[23]なので、日常生活する上でやや暗い程度の明るさである。また、表示用LEDの輝度については、一般的にLEDの輝度が大きいほうが残像が起こりやすい[22]。従って、本手法を屋外で使用する場合には夕方から夜にかけて、屋内で使用する場合にはやや暗い室内において、明るいLEDを使用して情報提示を行ったほうが効果的であると考えられる。ただし、実験を進めていく中で、光源がLEDしかない暗室の状態より、多少、光が差し込んでいる状態のほうが情報が見やすいと報告する被験者も存在し、本手法の情報提示能力は、照度や輝度の他にも、背景に対するLEDのコントラスト、LEDにどれくらい注意が向けられているかなどの要素が関係しているようである。

今後は照度、輝度と情報提示能力の関係とともに、背景とLEDのコントラストについてや、LEDに対する注意と情報提示能力との関係などについても着目し、より効果的な情報提示ができる条件を明らかにしていきたい。

7.　まとめ

本研究ではエクスプレスサッケードという高速で時間的に安定した眼球運動に着目することにより、簡便で汎用的な情報提示手法の提案を行った。この情報提示手法を使用した場合、1度のサッケードで提示可能な情報量は、VGAディスプレイの1/4程度、英数字にして30文字程度であることがわかった。また、本手法を使用して安定した情報提示を行うための条件として、注視点・視標の光るタイミング、注視点・視標の光る明るさの2点に着目し、それぞれ安定した情報提示のための条件を特定した。次いで、本手法を使って情報提示を行う場合、どのように提示系を設計すればよいのか設計の指針を示した。

本手法の特徴を生かした応用例として、いくつかの方向性が考えられる。まず第1として、本手法は光点2つと光点列が1列あれば情報提示が可能であるので、本手法を使用したデバイスは小型化が期待でき、図19に示すようにウェアラブル情報提示デバイスに応用可能である。ウェアラブルデバイスに実装する場合、眼球運動を簡単に測定可能であれば[24]、それにあわせて確実に情報提示が可能となる。第2として、本手法はデバイスの無い空間にも情報提示することが可能なので、図20のように、普段生活している街中でも光点を両端の建物に、光点列を片方の光点の近くに配置することによって空中に情報を提示することも可能である。ただし、前章でも議論したように、屋外で本手法を使用する場合は、夕方から夜にかけてなど、やや暗い環境において使用したほうが、より効果的な情報提示が可能となる。第3としては、光点や光点列は、コンピュータの電源等すでに何らかの装置に組み込まれているので、本手法を利用すると、それらすでにあるリソースを、例えば図21のように組み合わせることによって情報提示することも可能となる。そして第4に、本手法は人間の眼球運動を利用しているので、眼球運動を起こした人のみ情報を見ることが可能であり、情報提示の選択性がある。この特徴を考えると、多くの情報を選択的に提示することが必要となるユビキタスコンピューティング等への応用も考えられる。本手法を使って伝えられる情報量は1度に英単語数語程度であるが、ユビキタスコンピューティングにおいて個々のユニットの状態を提示することは十分可能である。今後、ますます多くの情報が発信される中で、情報の全てを垂れ流すのではなく、情報を見たい人にのみ、情報を提示するということが重要となり、本手法の特徴が活かされると考えられる。

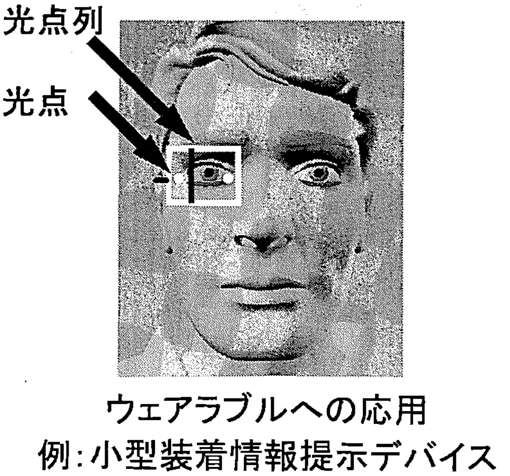


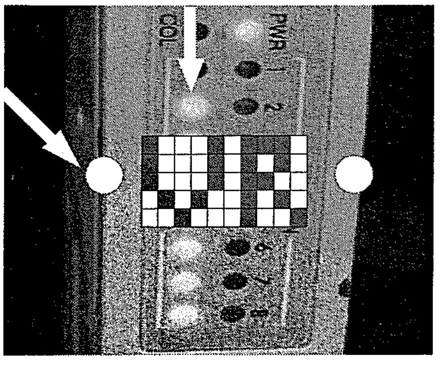
図19　本手法の応用例1
Fig. 19　Application of this method 1

デバイスのない空間に情報提示
例：道の両側に光点・光点列を配置

図 20 本手法の応用例 2
Fig. 20 Application of this method 2

光点列

光点



既存リソースの利用
例：ハブのランプを利用したもの

図 21 本手法の応用例 3
Fig. 21 Application of this method 3

参考文献

[1] 前田太郎: パラサイトヒューマンによる人間機能の研究, 日本バーチャルリアリティ学会第 4 回大会論文集, pp. 425-426 (1999)

[2] 野村宜邦, 前田太郎: 爪センサーを用いた指先における接触検出の研究-パラサイトヒューマンの研究 第 2 報-, 日本バーチャルリアリティ学会第 5 回大会論文集, pp. 395-396 (2000)

[3] 財津義貴, 稲見昌彦, 前田太郎, 舘 暲: 腱反射を利用した新たな運動方向提示装置の提案-パラサイトヒューマンの研究 第 3 報-, 日本バーチャルリアリティ学会第 5 回大会論文集, pp. 397-398 (2000)

[4] 原島博: "画像情報圧縮", オーム社 (1991)

[5] 松田隆生: "視知覚", 培風館 (1995)

[6] 安藤新樹: 点滅光を利用した衝動性眼球運動速度の測定装置, 神経眼科, Vol. 11, No. 3, pp. 318-325 (1994)

[7] 大山正, 今井省吾, 和気典二: "新編 感覚・知覚 心理学ハンドブック", 誠信書房 (1993)

[8] 苧阪良二, 中溝幸夫, 古賀一男: "眼球運動の実験心理学", 名古屋大学出版会 (1993)

[9] 稲垣達也, 大森賢哉, 高橋良文, 海老澤嘉伸, 南谷晴之: 意識的サッケードと視覚誘発サッケードの特性解析, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J74-D-II, No. 1, pp. 79-86 (1991)

[10] 青木美奈, 藤田昌彦: 走査サッカードと記憶誘導性サッカードの適応の転移について, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J82-D-II, No. 1, pp. 91-99 (1999)

[11] B.Fischer,H.Weber: Express saccades and visual attention, Behavioral and Brain Sciences, Vol. 16, pp. 553-610 (1993)

[12] M.G.Wenban-Smith,J.M.Findlay: Express saccades:is there a separate population in humans ?, Exp. and Brain Res., Vol. 87, pp. 218-222 (1991)

[13] 海老澤嘉伸, 杉浦光洋: 注視点サイズが視覚依存性反射的サッカードに与える影響, 映像情報メディア学会誌, Vol. 52, No. 11, pp. 1738-1743 (1998)

[14] R.P.Kalesnykas,P.E.Hallet: The differentiation of visually guided and anticipatory saccades in gap and overlap paradigms, Exp. and Brain Res., Vol. 68, pp. 115-121 (1987)

[15] D.Braun,B.G.Breitmeyer: Relationship between directed visual attention and saccadic reaction times, Exp. and Brain Res., Vol. 73, pp. 546-552 (1988)

[16] 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)

[17] B.Fischer,E.Ramsperger: Human express saccades : effects of randomization and daily practice, Exp. and Brain Res., Vol. 64, pp. 569-578 (1986)

[18] 杉浦光洋, 海老澤嘉伸: 注視点と視標の有無による意識的サッカードの動特性変動と視覚依存性反射的サッカードとの比較, 映像情報メディア学会誌, Vol. 51, No. 8, pp. 1326-1333 (1997)

[19] 海老澤嘉伸, 杉浦光洋: 視標と注視点条件の視覚依存性意識的サッカード特性への影響, 映像情報メディア学会誌, Vol. 52, No. 11, pp. 1730-1737 (1998)

[20] 田崎京二, 小川哲朗: "新生理科学体系 9 感覚の生理学", 医学書院 (1989)

[21] 乾敏郎: "認知心理学 1 知覚と運動", 東京大学出版会 (1995)

[22] 日本視覚学会 編: "視覚情報処理ハンドブック", 朝倉書店 (2000)

[23] 小原二郎, 加藤力, 安藤正雄 : "インテリアの計画と設計", 彰国出版 (2000)

[24] 伴野明, 岸野文郎, 小林幸雄 : 瞳孔抽出と頭部の動きを許容する視線検出装置の試作, 電子情報通信学会論文誌 Vol. J76-D-II, No. 3, pp. 636-646 (1993)

(2001 年 1 月 30 日 受付)