

瞳孔反応を用いた一点注視型画面分割インターフェース の提案とその妥当性に関する基礎実験

小川 正流, 田野 俊一, 岩田 満, 橋山 智訓

電気通信大学大学院 情報システム学研究科

コンピュータ技術の進歩により、今後様々な人が様々な状況でコンピュータを操作することが考えられる。そのため、コンピュータを操作する上での様々な状況を想定した入力インターフェースを考える必要がある。本論文では利用可能な入力メディアが制限されてしまい、限定された情報量しか伝達できないような低ビットレートでの入力に着目した。その中でも、最も低速な1ビット入力においても利用可能なユーザインターフェースについて検討し、注視するだけで入力可能な一点注視型画面分割インターフェースを考案した。さらに、入力メディアとして注視領域に対する瞳孔反応の利用可能性を示し実験により検証した。

Proposal of Recursive Divide, Gaze and Select Method Using Pupil Activity and basic experiment of the validity

Masaru Ogawa, Shun'ichi Tano, Mitsuru Iwata, Tomonori Hashiyama

Graduate School of Information Systems, The University of Electro-Communications

The rapid development of information technology will enable us to operate the computer in various situations. We have designed and evaluated the new interface style for various situations. In this paper, we analyze the 1-bit input interface as the extreme case of the slow input rate. At first, we categorize the interface methods for the 1-bit input and analyze their efficiency. We show that the recursive divide and select method is most effective and the best performance is given at the e (Napier's number)-division. Then we propose the combination of the pupil reaction to the gazed region and the recursive divide and select method. The feasibility is demonstrated by the informal experiment.

1. はじめに

近年、コンピュータの技術が進歩し身近になつたことで、様々な人がその恩恵を受けている。また、コンピュータの小型化やネットワーク技術の進歩により、今後コンピュータがあらゆる場所に設置され、様々な状況においてコンピュータを操作することが考えられる。

そのような場合、コンピュータを使用する上での様々な状況を想定した入力インターフェースや入力メディアを考える必要がある。例えば、他の

作業をしながらコンピュータを操作したい場合や、体に障害を持ち、体を自由に動かすことができない場合など様々な状況が考えられる。

しかし、現在の入力メディアは一般的に自由度の最も高い手、特に指が動くことを暗黙の仮定としたインターフェースで設計されている。そのため、体の一部のみしか動かすことができないような状況、即ち、利用可能な入力メディアが制限されてしまい、限定された情報量しか伝達できないような低ビットレートでの入力を強いられる状況においてコンピュータを操作することが困難で

ある。したがって、そのような制限された状況下においても利用可能なインターフェースや入力メディアを考える必要がある[10]。

本研究では体の一部のみしか動かすことができない制限された状況下においても入力可能なインターフェースの実現を目指し研究を進めている。本論文では上記の問題解決において基本課題であると考えられる低ビットレートでの入力に着目した。

本論文の構成は以下の通りである。まず、2章で従来研究と問題点について分析し、本研究の目的を明らかにする。3章では最も低速な1ビット入力で利用可能なユーザインターフェースについて述べ、それらを定量的に評価する。4章で制限された状況下における入力メディアの1つとして瞳孔利用の可能性について説明する。5章では文字入力インターフェースへの応用と評価を行い、6章でまとめる。

2. 従来研究と本研究の目的

2.1. 従来研究と問題点

制限された状況下という点から手以外の入力メディアを用いたハンズフリー入力に関する従来研究について調査した。また、低ビット入力で利用可能なユーザインターフェースに関する従来研究も調査した。

ハンズフリー入力に関する研究[1~5]

顔の筋肉の瞬間的な動きを捉え入力として用いている研究[1]や、脳波を計測し入力として用いる研究[2]などが行われている。

視線に関しては視線でカーソルを制御し、選択は注視を用い、GUIを操作する研究[3]や視線の動きをスイッチとして利用した研究[4]、視線の動きを符号化しその組み合わせで文字入力をを行う研究[5]など数多くの研究が行われている。

低ビットレートで利用可能なユーザインターフェースに関する研究[6~8]

重度障害者のための1スイッチで文字入力を可能とした研究[6,7]や、画面を9分割し、選択するオブジェクトの領域を限定していく研究[8]などが行われている。

従来研究の問題点

文献[1]での顔の表情を入力として用いることは制限された環境下での1つの入力手法と考えられるが、普段使い慣れていないため筋肉を動かすため、ユーザに負担がかかる。

文献[2]では脳波波形処理が現状ではまだ不完全のため誤認識が多く、入力としてはふさわしくない。また、文献[3~5]で用いられている視線検出装置は高価であり、またキャリブレーション等が複雑であるため現状においては入力として問題が多い。文献[4]に関しては視線の動きをスイッチとして用いるため、視線を動かすタイミングを計る必要があり、ユーザに負担がかかる。文献[5]では入力の際、視線の動きの組み合わせを記憶する必要があり、特別な訓練を必要とする。

文献[6]では選択できる項目が多くなるにつれ、ユーザは目的のオブジェクトを選択するために何回もスイッチを押す必要があり、操作にかかる時間やストレスが大きい。文献[7]ではモールスコードを記憶する必要があり、特別な訓練を必要とする。文献[8]では多少改善されてしまっているが領域を選択した後、その領域がズームされるためユーザは再び選択したいオブジェクトを探索する必要性があり、操作にかかる時間やストレスが大きいという問題に陥る。

以上のように、入力メディアとしてもまだ数多くの問題があり、また低ビットレートに対応したユーザインターフェースの研究は行われているが、その効率性に関する定量的な評価に基づいた方式とはなっていない。

2.2. 本研究の目的

従来研究の問題点を考慮し、以下の条件を満たす入力インターフェースの実現を目指して研究を進めている。

- 制限された状況下においても利用可能な入力メディアの検討
- 低ビットレートにおいて効率的に入力可能なインターフェースの検討

本論文では利用可能な入力メディアが制限され、限定された情報量しか伝達できないような状況において必要と考えられる低ビットレート入

力について着目した。その中でも、1ビット入力という極度に制限された状況下においても利用可能な入力方法について検討する。

次章では1ビット入力で利用可能なユーザインターフェースについて述べ、その効率性に関して定量的に評価する。4章では入力メディアの1つとして瞳孔径を用いた入力方法について述べる。

3. 1ビット入力で利用可能なユーザインターフェース

3.1. 候補提示・選択による1ビット入力UI

1ビットでの入力を考慮した場合、入力がスイッチのオン・オフに限定されてしまう。そのため、マウスのように直接的に選択したいオブジェクトを指すことができない。したがって入力の基本は候補をユーザに提示し、その候補に対しユーザが yes または no で順々に答えていく方法に限られてしまう。そこで考えるべき問題は、画面上の数あるオブジェクトの中からどのように候補を提示し、選択するかについてである。以下に考えられる3つの提示方法を示す。

1次元：1つ1つ順々に候補が提示され、ユーザは選択したいオブジェクトが提示されたときスイッチを押す。図1に動作例を示す。

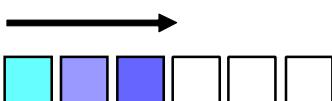


図1 1次元による提示方法

2次元：まず始めに縦の列を左から右に順々に提示し、提示された列に選択したいオブジェクトが含まれていたときユーザはスイッチを押す。するとその選択した列に含まれるオブジェクトが上から下へ1つ1つ提示される。図2に動作例を示す。

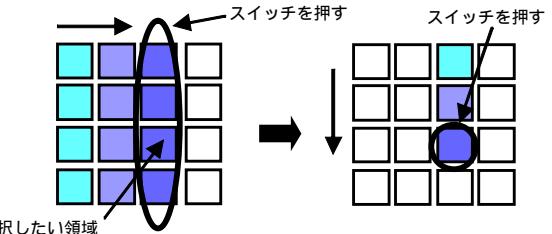


図2 2次元による提示方法

階層的：オブジェクトをグループごとに分類し、ユーザが選択したいグループが提示されたとき、スイッチを押す。すると、選択されたグループが再びサブグループに分類され、順々に提示される。このような手順を階層的に繰り返し、最終的に1つのオブジェクトを選択する。図3に動作例を示す。

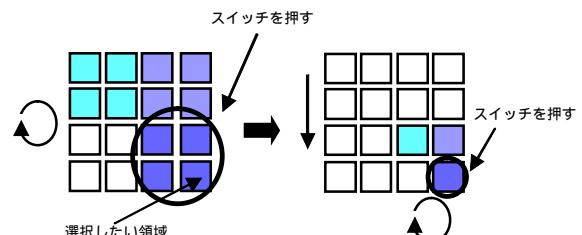


図3 階層的な提示方法

表1に各提示方法における平均選択時間を示す。ここで N は選択する候補総数、 k は階層的な提示方法におけるグループの数であり、候補は1秒ごとに提示されるものとする。

表1 各提示方法における平均選択時間

提示・選択方法	平均選択時間(秒)
1次元	$N/2$
2次元	\sqrt{N}
階層的	$k/2 \times \log_k N$

表1から階層的な選択が効率的であることが確認できるため、本稿では階層的な選択方法を基本とした一点注視型画面分割インターフェースを考案した。

3.2. 一点注視型画面分割インターフェース

3.2.1. ユーザインターフェース

画面領域を分割し、周期的に各領域を順々に光らせる。ユーザの選択したいオブジェクトを含んだ領域が光ったとき、ユーザはスイッチを押す。するとその選択された領域が再帰的に分割される。この手順を繰り返すことにより、画面領域を選択したいオブジェクトに対し限定していく。選択可能なオブジェクトが1つしかない領域が選ばれると、そのオブジェクトが選択されたことになる。図4に4分割したときの基本動作例を示す。

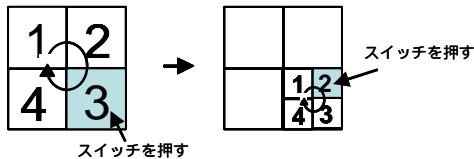


図4 4分割における基本動作例

3.2.2. 利点

ユーザは選択したいオブジェクトが光ったとき、スイッチを押すだけで最終的に選択したいオブジェクトを選択すること可能である。即ち、選択したいオブジェクトだけを注視し続け、それが光ったかどうかを確認するだけでよく、より直感的で自然なインターフェースであると考えられる。階層的に選択しているため効率的であり、また操作に特別な訓練を必要としない。

3.2.3. 最適画面分割数

階層的提示方法では表1より分割数 k に応じて入力時間が変化する。そのため、最適な画面分割数を求める必要がある。図5に各画面分割数における平均選択時間を示す。最短時間となる分割数は選択候補総数 N に独立であり、その最適値は $e=2.718$ であった。このことより、最適分割数は e (ネピア数) であることが分かる。

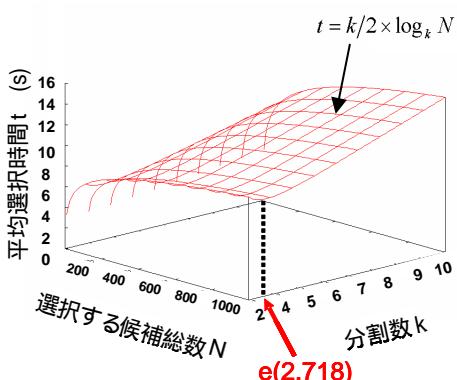


図5 各分割数における平均選択時間

4. 1 ピット入力手法：瞳孔利用の可能性

上記の画面分割インターフェースにおいて入力をスイッチで行うことを考えた場合、ユーザは選択したいオブジェクトを含んだ領域が光るたびにタイミングを計りスイッチを押す必要性がある。そのため、ユーザにかかるストレスが大きくなってしまう。

ユーザは選択したいオブジェクトを常に『注視』しており、瞳孔の対光反応が強化されているのではないかと考えた。即ち明るさの変化に対する瞳孔径の変化を利用することにより、スイッチによる入力が省ける可能性があり、実験により検証した。

4.1. 基本原理

基本原理は各分割領域を周期的に光らせ、ユーザが注視している領域が光ったときに瞳孔が周辺領域に比べ著しく収縮することである。その他の注視領域外、つまり周辺領域の光の刺激に対し瞳孔が影響されなければよい。

そこで、最初に基本原理が利用可能かどうかについて検証する実験を行った。次に、瞳孔に影響を及ぼすと考えられる光らせる面積、明るさ、時間を変えてどのような条件、環境下において利用可能かについて検証した。

4.2 実験1 (基本原理実験)

4.2.1 目的

実験1における目的は実際に上記に示した基本原理が利用可能かどうかについて検証することである。

分割数は領域として最も分割しやすい4分割で実験を行った。画面全体を4分割し、各領域を周期的(左上 右上 右下 左下)に光らせたときににおける瞳孔径を調査した。光らせる面積、明るさ、発光時間の最適値が未知であるため、本実験では暫定的に光らせる面積をディスプレイに対し $1/4$ とし、明るさはユーザにとって負担にならない、また後ろの背景が適度に見える透過率 60% (透過率 100% : 白、透過率 0% : 黒) で行

った。各領域での発光時間は 1000ms とした。

4.2.2 実験設備・環境

瞳孔径はアイマークレコーダ (nacEMR-8) で検出し、サンプリングレートは 60Hz である。ディスプレイの大きさは 17 インチであり、解像度は 1280×1024 、パネルの照度は $250(\text{cd}/\text{m}^2)$ である。部屋の明るさは約 30lux であり、本が読める程度の明るさである。実験設備を図 6 に示す。



図 6 実験設備・環境

4.2.3 実験手順

被験者はディスプレイから約 60 cm 離れた位置に座る。画面全体を占める視野角は 25.0 度である。被験者に注視するターゲット (注視点) を教えるために画面上には非常に小さな白い長方形が表示されている。次に周期的に各分割領域が順々に光り始める。被験者にはターゲット (注視点) を注視し続けてもらう。その間の瞳孔径のデータを PC に取り込んだ。

4.2.4 実験結果

光らせる面積はディスプレイの面積に対し $1/4$ (1 つの領域が占める視野角は 12.8 度) 発光時間は 1000ms、透明ウインドウの透過率は約 60% (透過率 100% : 白、透過率 0% : 黒) のときにおける瞳孔径と時間の関係を図 7 に示す。

図 7 から注視領域 (左上) が光ったときにのみ瞳孔が急激に収縮していることが確認できる。周辺領域に関しても瞳孔の収縮反応が多少見られるが注視領域が光ったときに比べ非常に小さい。このことから、注視領域と周辺領域との識別が可能で基本原理が利用できる可能性があることが確認された。

また、文献 [9] より瞳孔は瞬間的な光の刺激に対し 200 ~ 300ms 遅れて反応することが知られている。図 7 のグラフからも注視領域が光った瞬間から瞳孔は 300ms 程度遅れて収縮し始めていることが確認された。

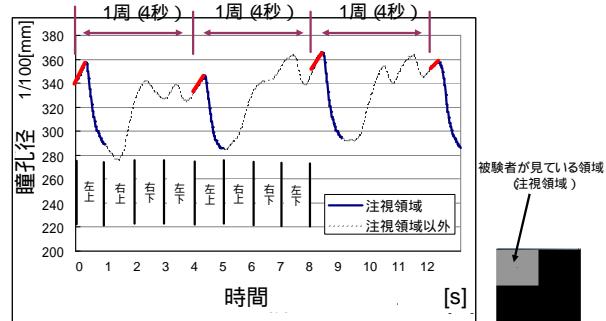


図 7 基本原理実験
(光らせる面積 $1/4$ 、発光時間 1000ms、透過率 60%)

4.3 実験 2 (環境実験)

4.3.1 目的

実験 1 で基本原理が利用可能であることが確認できた。次にどのような状況または環境下において瞳孔の対光反応が利用可能かについて調査した。それぞれ、瞳孔に影響を及ぼすと考えられる光らせる面積、明るさ、発光時間の変化に対して瞳孔径がどのように変化するのかについて調査した。

4.3.2 実験結果

(1) 光らせる面積の大きさの影響

ディスプレイに対し光らせる面積を $1/16$ (視野角 6.4 度) $1/64$ (視野角 3.2 度) $1/256$ (視野角 1.6 度) と徐々に小さくしていったときの瞳孔径と時間との関係をそれぞれ図 8 ~ 10 に示す。

図 8 から注視領域が光ったときの瞳孔は周辺領域が光ったときに比べ著しく収縮していることが確認できる。そのため、注視領域と周辺領域との識別が可能であり、光らせる面積 $1/16$ においても瞳孔の対光反応を利用して注視領域を特定することができると考えられる。

図 9 から注視領域が光ったときの瞳孔は図 7、8 に比べ収縮率は小さいが周辺領域に比べ収縮していることが確認できる。このことから光らせる面積 $1/64$ においても瞳孔から注視領域を特定することができると考えられる。

図 10 では注視領域が光ったときの瞳孔は周辺領域に比べてあまり変化していない。そのため、周辺領域と注視領域との識別が困難である。よって、光らせる面積 1/256、発光時間 1000ms、透過率 60% の環境下では瞳孔から注視領域を特定することは困難であると考えられる。

以上のことより光らせる面積を小さくすればするほど注視領域が光ったときの瞳孔の収縮反応は小さくなり、周辺領域との識別ができないため注視領域を特定することが困難になると考えられる。

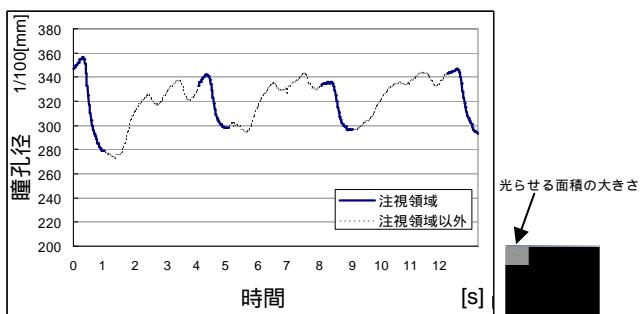


図 8 光らせる面積 1/16, 発光時間 1000ms, 透過率 60%

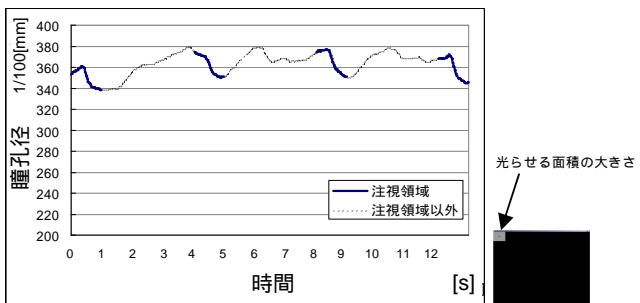


図 9 光らせる面積 1/64, 発光時間 1000ms, 透過率 60%

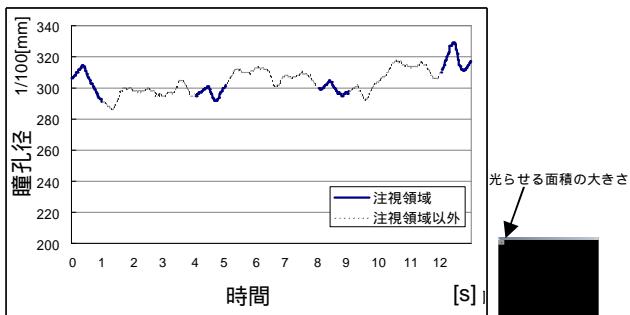


図 10 光らせる面積 1/256, 発光時間 1000ms, 透過率 60%

(2)光らせる明るさの影響

図 10 の環境（光らせる面積 1/256、発光時間 1000ms、透過率 60%）では注視領域を特定するこ

とが困難であった。そこで、光らせる明るさを強くすることにより 1/256 の面積を光らせたときにおいても注視領域を特定できるのではないかと考え、明るさ（透過率）を徐々に上げて実験を行った。

図 11～12 に徐々に透過率を上げた（透過率 80%, 100%（完全な白））ときの結果を示す。光らせる面積はディスプレイに対し 1/256、発光時間は 1000ms である。

図 11、12 から注視領域が光ったときの瞳孔は周辺領域に比べ著しく収縮していることが確認できる。これより、明るさを強くすればするほど注視領域に対する瞳孔の収縮反応は周辺領域に比べて著しく収縮し、周辺領域と注視領域の識別が可能であることが考えられる。

このことから、光らせる面積が小さくなるにつれ、明度を上げることにより小さな領域に対しても注視領域が特定できると考えられる。

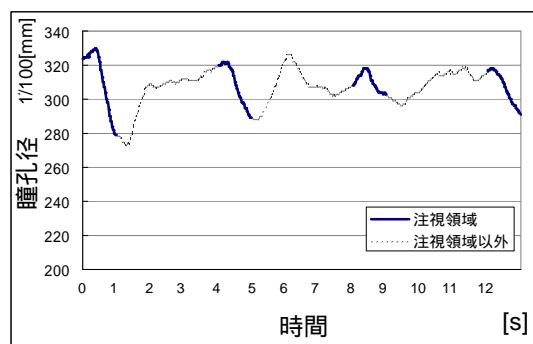


図 11 光らせる面積 1/256, 発光時間 1000ms, 透過率 80%

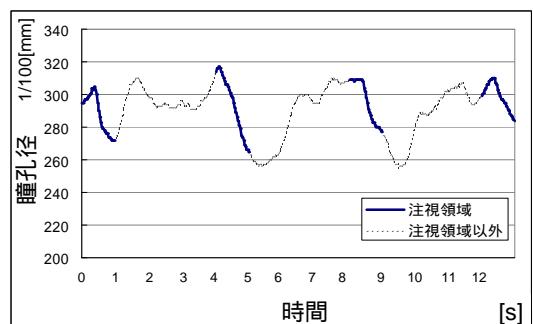


図 12 光らせる面積 1/256, 発光時間 1000ms, 透過率 100%

(3)発光時間の影響

次に光らせる時間を変化させたときの瞳孔径と時間の関係を図 13～15 に示す。光らせる面積

はディスプレイに対し 1/4 とし、透過率は 60% である。グラフから発光時間 800ms と 600ms では注視領域に対し瞳孔が急激に収縮しているが、発光時間 400ms では注視領域が光ったとき瞳孔は収縮していない。しかし、瞳孔は瞬間的な光の刺激に対し 200 ~ 300ms 程度遅れて反応するため、その遅れを補正することにより図 15 に示すように 400ms でも利用可能であると考えられる。

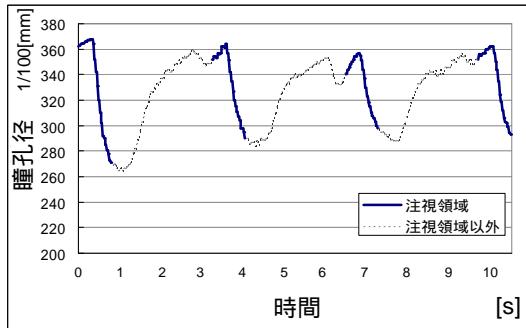


図 13 光らせる面積 1/4, 発光時間 800ms, 透過率 60%

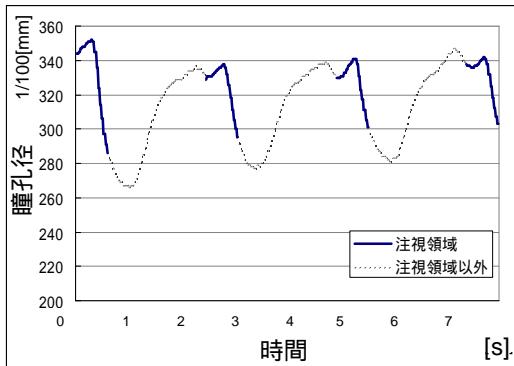


図 14 光らせる面積 1/4, 発光時間 600ms, 透過率 60%

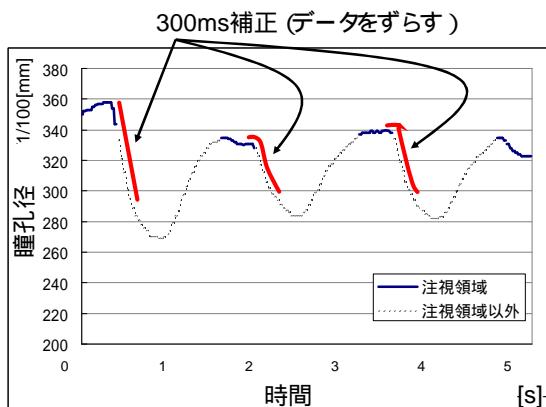


図 15 光らせる面積 1/4, 発光時間 400ms, 透過率 60%

4.4 まとめ

以上の実験から、『瞳孔反応は、凝視・注視し

ている領域のみの明るさに依存している。さらに、注視点領域は極めて微小である。つまり、瞳孔は注視している微小な領域の明暗に反応するが、その注視点の近傍の領域の明暗には反応しない』という、従来の常識と大きく異なる性質が得られた。

1/256 まで分割した場合、隣り合った 2.1×1.6 cm の領域が順々に 1 つずつ光ることになり、このような微小領域でも、注視している領域が光っているときのみ瞳孔が縮む。この場合の 1 つの領域に対する視野角は 1.6 度に過ぎない。

この特性を活用すれば、瞳孔反応を計測することにより、1.6 度の分解能で注視点を知ることが可能となる。

5. 文字入力インターフェースへの応用と評価

上記の実験により 1 点注視型画面分割インターフェースに瞳孔の対光反応が利用可能であることを示した。そこで、瞳孔径による一点注視型画面分割インターフェースを用いて文字入力システムを試作した。

画面全体を 8×8 のマトリックスの領域に分割し、各領域には文字(平仮名、数字)を表示する。一点注視型面分割インターフェースを用いて階層的に被験者の注視している領域を瞳孔の対光反応を基に特定する。図 16 に示すように被験者は選択したい文字を注視するだけで希望の文字を入力することができる。

現在、評価を進めている段階であり、定量的な評価結果は得られていないが予備実験における被験者のアンケートでは「見つめるだけ」「キャリブレーションなし」という簡単な入力方式に高い評価が得られている。本方式が有望であることを示唆している。

入力精度に関しては様々な環境下での実験が必要であり、最終的なデータは得られていないが、1/64 の大きさの領域全てを対象に、すなわち、64 個の領域を対象にランダムに入力させる実験を行った結果、入力精度が 90.0%、90.0% のデータが得られている。この認識率は、背景、遅延時間、発光パネル、認識アルゴリズムを最良化して

いない状態での値であるので、今後、最良化することにより認識率を 100%近くに上げることが可能であると考えている。

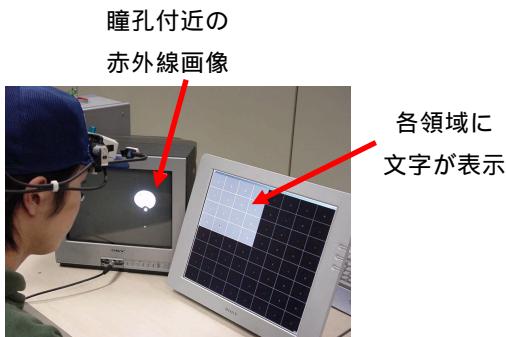


図 16 実験の様子
b. まくの

本研究では制限された状況下での入力を実現する上で必要と考えられる低ビットレートでの入力について着目し、その中でも、最も低速な 1 ビット入力においても利用可能なユーザインターフェースについて検討した

まず、1 スイッチで入力可能な一点注視型画面分割インターフェースを考案した。画面領域を分割し、階層的に画面領域を選択したいオブジェクトに対して狭め、選択する入力手法であり、ユーザは選択しようとしているオブジェクトが光ったかどうかを確認するだけでよく、自然なインターフェースといえる。また、最適な画面分割数が e (ニア数)であることを示した。

次に入力メディアとして瞳孔利用の可能性を検証する実験を行った。実験結果から瞳孔反応は、凝視・注視している微小領域のみの明るさに依存し、注視点の近傍の領域の明暗には反応しないという性質が得られた。光らせる面積が小さくなるほど瞳孔の収縮反応が小さくなるため、面積に応じて明度を変えることにより、微小領域においても注視点を特定することが可能であることを示した。また、発光時間に関しては短い場合でも 300ms 程度補正することにより利用可能であると考えられる。

今後は統制された環境での実験を行い、光らせる面積、発光時間、明るさなどを調節して最適な環境を求め、評価実験を行う。さらに、一点注視

型画面分割インターフェースにおいて領域をどのように光らせるか、またどのように画面を分割するかについても検討し、最適なユーザインターフェースを考案していく。

参考文献

- [1] 檜山他：ウェアラブルコンピューティングのためのハンズフリー入力インターフェースの研究、電子情報通信学会技術報告 MVE 2001-13, pp. 61-64, (2001)
- [2] 山田：脳波キー ボードの入力速度向上手法と評価、電子情報通信学会論文誌, Vol.J79A, No.2, pp.329-336, (1996)
- [3] 坂他：ガイド領域を用いた視線文字入力インターフェースの提案、電子情報通信学会論文誌 D 2, Vol.J84-D-2, No.5, pp.799-804, (2001)
- [4] Kate at al : Eye-Switch Controlled Communication Aids, in Proceeding of the 12th International Conference on Medical & Biological Engineering, (1979)
- [5] Isokoski at al : Text Input Methods for Eye Trackers Using Off-Screen Targets, in Proceeding of the Eye Tracking Research & Applications Symposium, pp.15-21, (2000)
- [6] 富山他：重度障害者のための新しい入力法の開発 コミュニケータへの応用、第 6 回ヒューマン・インターフェース・シンポジウム論文集, pp. 211-216, (1990)
- [7] 田中他：重度障害者のための 1 ボタン自然言語入力システム、電子情報通信学会技術報告, 福祉情報工学研究会, pp.43-47, (2004)
- [8] 片岡他 : PartNavi - 画面分割によるオブジェクト選択インターフェース、インターラクション 2003 論文集, pp.61-62, (2003)
- [9] 日本視覚学会編：視覚情報処理ハンドブック, 朝倉書店, (2000)
- [10] 小川他 : 一点注視型画面分割インターフェースとウェアラブルコンピュータへの応用、ヒューマン・インターフェース・シンポジウム論文集, pp.1141-1144, (2004)