仮想的に再現された人工眼視覚のもとでの読書能力の定量的評価

非会員 寺 澤 靖 雄 (名古屋大学)

正 員 八 木 透 (名古屋大学、理化学研究所)

Quantitative Evaluation of Reading Ability with Simulated Prosthetic Vision

Yasuo Terasawa, Non-member (Nagoya University), Tohru Yagi, Member (Nagoya University, The Institute of Physical and Chemical Research)

Visual prostheses are devices to recover visual sense by means of electrical stimulation to the visual nervous system. Although the ultimate goal is to restore excellent human visual function, presently it is aimed to realize the minimal visual function in order to carry out specific tasks in our daily lives. The purpose of this study is to determine specifications of the visual prosthesis which can realize the above function. In this study we have developed a simulator which enables us to experience prosthetic vision using real-time image processing. Here we selected “reading” as one of the most typical tasks in our daily lives, and quantitatively estimated reading ability with the simulated prosthetic vision. We used the MNREAD, a commonly-used reading ability test. As a result, it was observed that the range from 4 to 8 was appropriate as a gray level. In addition, it was suggested that the size of a pixel affected the reading performance, though it was less influential than the gray level.

キーワード：人工眼、読書視力、MNREAD、シミュレーション

Keywords: visual prosthesis, reading ability, MNREAD, simulation

1. はじめに

近年のめざましい医療技術の進歩にもかかわらず、「失明」に対して有効な治療法はいまだ存在しない。失明は単なる視覚機能の喪失にとどまらない。これは患者の精神生活および社会生活に重大な影響を及ぼす疾患であり、治療法の確立が切実に求められている。先進国では糖尿病患者の増加に伴い、糖尿病性の網膜症による失明患者が着実に増加している⁽¹⁾⁽²⁾。したがって失明治療法の開発は社会的にも重要な課題である。そこで、網膜あるいは視神経といった疾病部位の機能を人工物で代替させる「人工眼」の研究が国内外で進められている。一般に人工眼は、体外あるいは体内の撮像素子、及び体内に埋め込まれた神経刺激用の電極アレイから構成される。撮像素子を通じて取得された外界の視覚情報は電気信号に変換され、刺激用電極アレイを経て脳へ伝えられる。視覚系神経のどの部位を刺激するかにより、人工眼は網膜下刺激型⁽³⁾⁽⁴⁾、網膜上刺激型⁽⁵⁾⁽⁶⁾、視神経刺激型⁽⁷⁾、ハイブリッド型⁽⁸⁾、脳刺激型⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾に大別され、精力的に研究が進められている。人間の精緻な視覚機能を完全に代替することが人工眼研究の最終目標である。しかし当面の人工眼では、以下に述べる理由から、おそらく「電光掲示板」のように暗い背景と多数の光点によっ

て視覚情報が再現されるものと思われる。

ここでは、網膜下に電極アレイを置いて双極細胞または網膜神経節細胞を刺激するタイプの人工眼を例にとり説明する(図1)。網膜に接した個々の刺激電極に通電すると、電極の近傍領域に電界が形成される。もし電界強度が細胞の刺激閾を超えていれば、その電極近傍に存在する多数の細胞を同時に興奮させることができる。したがって1つの電極で刺激することは、視野内に1画素分の視覚情報を提示することと等価であり、電光掲示板でいえば1つの光点を点灯することに相当する。この領域のことを「ピクセル」と定義する。また刺激パルスが届かない場所、例えば電極間距離が十分に大きいときの、二つの電極にはさまれた領域に位置する細胞(図1)は興奮することがない。これは患者の視野内には何も知覚されない暗い領域が存在することを意味する。これを以後「グリッド」と呼ぶ。すなわち人工眼で再現される視覚はピクセルとグリッドで構成されると考えられる。また、ヒトの網膜や視神経あるいは視覚皮質などの視覚系神経に対する電気刺激が「暗闇に光点が明滅する知覚」を生みだすことが報告されている^{(11)~(13)}。この実験で、電極が1つの時は1つの光点を、電極が複数の時は複数の光点を被験者は感じることができた。これらの実験からも、人工眼視覚がピクセルとグリッドから構成さ

図 1 網膜下に移植された電極からの電気刺激の模式図

Fig. 1. Schematic view of electrical stimulation by electrodes implanted in sub-retinal space

れることが示唆される。このように人工眼で実現される視覚は正常な視覚とは大きく異なるため、これが有用となり得るかどうかを知ることは人工眼開発に不可欠である。そこで人工眼による視覚をシミュレートして被験者に提示し、被験者の反応を心理物理学的に測定する研究がいくつか試みられている。

例えば、多数の穴の空いたフィルタを被験者の目の前に置き、小さな穴を通して見る視覚情報だけから、提示される情報を被験者がどの程度理解できるのかを測定する実験が試みられている^{(14)~(16)}。ここで、フィルタの穴は前述のピクセルに相当する。この実験から、単位視角あたりの穴の数、すなわちピクセル密度⁽¹⁴⁾が視力や読書能力に大きく影響することが明らかになった。この手法では、穴の内部の明るさを一様に被験者に知覚させるために、フィルタの穴の大きさが固定されている。そのため穴の大きさを変化させた場合、すなわちピクセルの大きさを変化させた場合を調べることができない。また穴以外の視覚情報は完全に失われてしまうという問題がある。一方で、画像処理を用いた人工眼視覚のシミュレーションが近年試みられている^{(17)~(19)}。画像処理を用いる利点は、ピクセルサイズなど様々なパラメータを自由に変化させることができることである。これらのシミュレーションでは、人の顔写真などの静止画像がピクセルの集合に変換されて被験者へ提示される。当面の人工眼で実現できる視野角は5度程度と狭いため、実験では、被験者は提示画像の一部しか見ることができない。そこで他の部分が見えるように被験者が注視の方向を変えることができる工夫がされている。しかし実際に人間が人工眼を装着したとき、身体や顔の動きに伴って人工眼に付随する撮像素子が揺れることや、周囲の明るさが変化することは避けられない。これは、同じものを注視し続けようとしても画像はつねに変動することを意味する。従来の画像処理を用いたシミュレーションではこの点が考慮されていない。

そこで本研究では、被験者の動きに応じて変動する画像を実時間で処理し、フェイスマウンテッドディスプレイを介して被験者へ提示した。このようにして、パラメータ変更の自由度、および被験者の動きの反映を両立したシミュ

レーションを試みた。

ところで、人工眼に最も必要とされる機能とはどのようなものであろうか。例えば、後天的に視力を喪失した視覚障害者の社会適応訓練は、「コミュニケーション」「移動」および「日常生活動作」の3つに大別される^{(20) (21)}。この3つを円滑に行える視覚機能が、人工眼に求められる機能であると考えられる。今回は「コミュニケーション」において最も重要な能力の一つである「読書」に着目した。そして人工眼シミュレータにより仮想的に再現された人工眼視覚のもとでの読書能力を、後述する MNREAD を用いて測定した。その結果をもとに、読書を支障なく実行するために必要な人工眼の機能について考察した。

2. 方 法

〈2・1〉 人工眼シミュレータ 人工眼シミュレータは、ピンホールレンズを有した CMOS カメラ、画像処理装置、及びフェイスマウンテッドディスプレイからなる (図 2)。ここでカメラの画角は $56^{\circ} \times 48^{\circ}$ であり、画素数は 510×492 画素である。画像処理装置には LinX 社の Fusion-U を用いた。またフェイスマウンテッドディスプレイはオリンパス社製 Eye-Treck FMD-700 を使用した。これを以後 FMD と略す。FMD の画角は $30^{\circ} \times 23^{\circ}$ であった。

カメラで撮像された濃淡画像は NTSC 信号にて画像処理装置へ送信される。画像処理装置は、ピクセルとグリッドから成る画像を入力画像から実時間生成する。生成された画像はリフレッシュレート 60Hz の RGB 信号として FMD へ送られ、被験者の両眼へ左右同一の画像が提示される。なお CMOS カメラは FMD に固定されており、FMD に表示される画像は被験者の頭部や体の動きに対応して動く。

画像処理装置では以下の処理が行われる (図 3)。まず撮像された入力画像を $n \times n$ の小領域に分割する。たとえば図 3 では 2×3 の小領域に分割している。それぞれの領域において濃淡値の平均を求め、これと同じ濃淡値をもつ正方形、すなわちピクセルを出力画像の対応部分である図 3 の A'・F' に描き込む。このピクセル一つ一つの大きさを決めるのが、ピクセルを囲む黒い枠、すなわちグリッドである。ここでピクセルの大きさを「ピクセル/グリッド比 (P/G 比)」と定義する。P/G 比は、分割した小領域、たとえば図 3 の $P + G$ を 1 辺とする正方形に占めるピクセル辺 P の割合 $P / (P + G)$ として計算される。ピクセルの大きさは、1つの刺激電極への通電によって同時に興奮する神経細胞の数に対応し、この細胞数は電極上の電荷密度と電極の面積、すなわち電荷量に大きく依存すると考えられる。この意味で、P/G 比は人工眼の「電気刺激で注入される電荷量」に対応する。

またピクセルの濃淡値の階調数を「グレーレベル」と定義する。例えば白黒の 2 値画像であればグレーレベルは 2 である。2 値化、あるいはグレーレベルが 3 以上の「多値化」における閾値は、画素値の最大値、すなわち 255 をグレーレベルで割ることで決定される。ここで、ヒトの網膜

図2 カメラを装着したフェイスマウンテッドディスプレイ

Fig. 2. A face mounted display with a camera

図3 画像処理の概要

Fig. 3. Image processing

への電気刺激実験において、刺激パルスの周波数が変化すると被験者の知覚する光点の明るさが変化することが報告されている⁽¹¹⁾。このことから、グレーレベルは「人工眼使用者が異なる明るさとして知覚できる刺激周波数の段階数」に対応すると考えられる。このように P/G 比とグレーレベルは、人工眼の機能の特徴付ける重要なパラメータであり、適切な値を求めることが人工眼開発に不可欠である。図4に画像処理前の画像(a)、および処理後の例(b)-(e)を示す。左側の(b)と(d)はグレーレベルを変化させた場合、右側の(c)と(e)はP/G比を変化させた場合にそれぞれ対応する。

後述する MNREAD を用いた測定では、被験者へ提示される文字サイズが変化するため、前述のピクセル密度⁽¹⁴⁾を変化させることと同等の効果が得られると考えられる。そこで入力画像を 48×48 ピクセルに分割し、分割数を固定して測定を行った。なお提示画像全体の張る視野角は $23^\circ \times 23^\circ$ である。従って隣接するピクセル同士の中心間距離、すなわち図3の $(P + G)$ は 0.48° に固定されている。

〈2・2〉 MNREAD を用いた読書能力の測定 本研究で使用した読書能力の測定方法は、ロービジョンの患者および晴眼者の読書能力を客観的に評価するために開発された「MNREAD」⁽²²⁾⁽²⁴⁾ に準じた。ここでロービジョンとは、WHO の定義によると「両眼の矯正視力 0.05 以上 0.3 未満の状態」であるが、一般には「視力または視野が健常者と比べ低下しているが残存視力が利用できる可能性のある状態」を意味する。

MNREAD を用いた測定により、読書能力について以下の3つの指標を得ることができる。

- (1) 読書視力 (RA): 速度にかかわらず、可読な最小の文字サイズ

図4 被験者に提示される画像の例

Fig. 4. Image samples shown to subjects

- (2) 臨界文字サイズ (CPS): 最大速度で読むことができる最小の文字サイズ
- (3) 最大読書速度 (MRS): CPS より大きな文字を読むときの最も速い読書速度

以下に測定の手順を説明する。被験者は、液晶ディスプレイに表示された文字列を可能な限り速く音読し、終了次第ボタンを押すよう指示されている。ここで液晶ディスプレイについては、シャープ社製 MN-830-H23 を用いた。以後 LCD と略す。実験者は音読に要した時間、および誤って読まれた単語数を記録する。試行毎に、前回より $0.1 \log \text{MAR}$ だけ小さな文字が LCD に表示される。ここで MAR とは Minimum Angular Resolution の略で、 $\log \text{MAR} = -\log(\text{小数視力})$ の関係が成立する。そして被験者が全く読めない文字サイズになるまで測定を繰り返す。この際、測定の繰り返しにより被験者が文章を覚えてしまうことを避けるために、64 種類の文章をランダムな順番で提示した。この測定を人工眼シミュレータを装着した状態、および非装着状態の両方で行った。なお被験者の母国語は日本語であるが、提示される英語文字列の難易度が被験者の理解力を上まわらないよう留意した。被験者は4名の晴眼者で年齢は24~27歳である。メガネ等の矯正具を普段利用している者については、矯正具を装着した状態で測定を行った。また被験者の頭部を顎乗せ台で固定することで、カメラと LCD の距離を測定中つねに一定に保ちつつ、被験者が頭部を回転させてカメラの方向を変えることができるよう配慮した。

ところで LCD 画面に小さな文字を表示する場合、CRT

にくらべて品質が劣化したように見えることがある。しかし今回の実験では、画像処理の段階で文字の細かな部分の情報が失われてしまうことから、LCDを用いても問題がないと考え実験を行った。

なお、通常 CRT に表示された画像をカメラで撮影すると縞模様が観察されたり画面がちらついたりすることがある。これはカメラのシャッタースピードが CRT の走査周波数に同期していないことに起因する。一方、LCD の場合、CRT のような走査は行われていないのでカメラで LCD 画面を撮影しても縞模様は観察されないが、バックライトの点滅周波数の影響でちらつきが観察されることがある。今回 LCD 画面をカメラで撮影して FMD 上で観察したところ、たしかにわずかなちらつきが生じた。ここで試しにカメラを本来使用すべき位置から光軸まわりに 90 度回転させて、LCD の再描画と撮像素子の画素読み出し方向を直交させた。するとちらつきが消滅したので、この位置でカメラを使用することにした。なおこの場合、撮像される画像も 90° 回転したものになってしまうため、画像処理の段階で画像を -90° 回転する処理を行った。

3. 結果および考察

〈3・1〉 P/G 比 図 5 は、グレーレベルをそれぞれ 2、4、8、32、128 に固定したときの、被験者 4 名の読書能力と P/G 比の関係を示した実験結果である。3 つのグラフはそれぞれ RA (図 5-a)、CPS (図 5-b)、MRS (図 5-c) に対応する。どのグラフも、縦軸の上方向がより良い成績を表している。また個人差を表すエラーバーが重なり見にくくなることを避けるため、各グレーレベルのデータを 2% ずつ横にずらして図示してある。RA、CPS、MRS のいずれについても、P/G 比が向上するにつれて成績も向上していることがわかる。これは、1 文字あたりのピクセルの数、すなわちピクセル密度が同じであっても、ピクセルの大きさによって成績が変化することを意味する。

その理由としてまず第一に、P/G 比が増加することで個々のピクセルを検出しやすくなり、成績が向上したことが考えられる。P/G 比の大小は個々のピクセルの大小、すなわちピクセル 1 個の張る視角の大小そのものにほかならない。視角が大きければ、ピクセルの光量も増加し、視認性が上がる。従って、大きなピクセルの集合で構成される画像は、小さなピクセルからなる画像より見やすくなると考えられる。第二に、P/G 比の増加が画像全体の低周波成分の認識を容易にしたと考えられる。Harmon の「Lincoln」⁽²⁵⁾ で知られるように、モザイク画像から低周波成分だけを選択的に抽出して作成した画像は、もとのモザイク画像よりも認識が容易である。P/G 比を変化させることは画像の空間周波数特性を変化させることと等しく、P/G 比が高い画像ほど低周波成分が多く含まれている。したがって P/G 比が高い画像ほど低周波成分の抽出が容易となり、それが読書能力の差として現れたと考えられる。第三に、P/G 比の増加によってピクセルの「群化」が容易となった可能性

図 5 P/G 比と読書能力の関係

Fig. 5. Relationship between the Pixel/Grid ratio and the reading ability

がある。ゲシュタルト心理学における近接要因、あるいは Watt が提案した群化のモデル⁽²⁶⁾では、小さな点の集合より大きな点の集合のほうが群化が起こりやすいことが示されている。群化現象の詳細な機構はいまだ解明されていないが、P/G 比が低い場合の成績が低かった原因として、群化の影響が示唆される。

Cha らはピクセル密度の増加と視力の向上が線形関係にあると主張した⁽¹⁴⁾。しかし今回の実験では、ピクセル密度を一定に保ってピクセルを大きくするだけでも読書視力が非線形に向上することが示唆された。すなわち、視力の向上にはピクセル密度だけでなく P/G 比が関係していると考えられる。

〈3・2〉 グレーレベル 図 6 は、図 5 と同じ実験データを、横軸をグレーレベルとして図示したものである。図中の 4 本の線はそれぞれ P/G 比が 10%、40%、70%、100% の場合に対応する。図 5 と同様、縦軸の上方向が良い成績を表すよう図示されている。同じグレーレベルをもつデータ

図6 グレーレベルと読書能力の関係
Fig. 6. Relationship between the gray level and the reading ability

点については、片対数表示であるため横に0.1倍ずつずらして図示してある。同図より、グレーレベルが増加するにつれて成績が向上していることがわかるが、その増加の度合いは図5よりも顕著である。例えば図5と図6のRAのグラフを比較してみる。前者における5本の横線が互いに離れているのに対し、後者では4本の横線が比較的近接している。つまりRAやCPSなど成績は、P/G比の変化に対して比較的ゆるやかに変化している。一方グレーレベルの変化は成績に大きく影響し、特に低いグレーレベル(2~4)においてこの傾向が顕著である。これらのことから、読書視力に与えるグレーレベルの影響はP/G比の変化による影響より大きいといえる。

なお図6-aにおいて、グレーレベルの増加に対してRAが非線形に増加するが、これには「図と地の認識」が関係していると思われる。一般に、対象物がピクセル密度に対して大きければ、または対象物の大きさに対してピクセル密度が十分に高ければ、図と地の区別は容易である。しか

表1 シミュレータ非装着時の被験者4名の矯正視力と読書能力

Table 1. Corrected eyesight and mean reading ability for 4 subjects without simulator

被験者名	小数視力 (左)	小数視力 (右)	RA (logMAR)	CPS (logMAR)	MRS (word/min)
Y.I	1.2	1.2	-0.17	0.1	94.1
H.K	1.2	1.5	-0.15	0.1	117.6
Y.T	0.6	0.2	0.01	0.2	84.5
S.S	0.6	0.7	-0.23	0.0	117.5

し今回用いた文字画像のように、地に対して図が小さい画像では、グレーレベルが低いと図と地の境界部分において図の情報が欠落してしまう場合がある。図4(b)の“y”の右半分はその例である。これはグレーレベルをわずかに大きくするだけで改善される(図4(d))。ところがさらにグレーレベルを増加させても、文字輪郭部分の明るさがより明確にわかるようになるだけで、文字情報の場合、認識には大きく影響しない。これが成績向上の非線形性の理由と考えられる。

〈3・3〉 シミュレータ非装着時との比較 今回の実験において最も良い成績が得られるのは、グレーレベル128、P/G比100%のときであるが、このときRAの平均は1.17である。この値をシミュレータを装着していない場合の測定結果(表1)と比較すると、約1.1 logMARの差がある。これは文字の大きさでは13倍程度の違いに相当する。一方、MRSについての同様の比較では、非装着時のおよそ60%の読書速度が達成できている。

これは、単純に画像を13倍拡大すれば非装着時の読書視力が得られる、ということの意味するものではない。仮にそのような拡大を行ったとすると、視野の大きさは変化しないため、文字から文字、あるいは行間の注視点移動が困難になり、読書能力は低下すると考えられる。またこの拡大率は、文字を読むのには適していても、他の日常動作には必ずしも適していない。このため実際の人工眼では、読書や歩行などの場面に応じて画面の拡大率やグレーレベル、P/G比を適切に変更できるような調節機能が必要となると考えられる。

4. まとめ

人工眼を仮想体験できるシミュレータを開発し、これを用いて読書能力の定量評価を行った。実験の結果、グレーレベルは4~8段階程度が適切であり、また最高で正常視力時の約60%の読書速度が達成できることが明らかになった。グレーレベルが4段階未満では十分な視覚機能が得られず、逆に8段階より大きな段階数を用いても視覚機能の向上は見られないことが判明した。一方、P/G比はピクセルの大きさを決めるパラメータであり、電極の大きさと与える電気刺激の電荷量と関係が深い。今回の実験においてはP/G比も読書能力に影響を与えるが、その影響は小さいことが明らかとなった。これより、P/G比が低くても、

すなわち電気刺激における電荷量が知覚閾をわずかに上回る程度であっても、有用な視覚機能を実現できると考えられる。もし電荷量を低く押さえることができれば、神経系への電気刺激の安全性向上、あるいは電極アレイ上の消費電力や発熱量の低減が可能になると考えられる。今後は人工眼シミュレータを用いて、手による対象物操作、および歩行についての検討を行い、人工眼の視覚でどの程度の社会生活を送ることができるかを明らかにしていく。

謝 辞

本研究に際し、視覚障害者のリハビリテーションや教育について貴重な助言を下された名古屋市総合リハビリテーションセンターの坂本隆司先生ならびに名古屋盲学校の松原静也先生に深く感謝する。また MNREAD-J のプロトタイプ版を快く提供して下さった東京女子大学の小田浩一先生、MNREAD 文例集の利用を快諾して下さった Plattsburg 大学の S. Mansfield 博士に心より感謝する。本研究の遂行に際しては、名古屋大学先端技術共同研究センターに協力していただいた。ここに記して感謝する。また本研究は、文部省科学研究費、テルモ科学技術振興財団、旭硝子財団、愛知県科学技術交流財団の援助を受けて行われた。

(平成 13 年 6 月 7 日受付, 同 14 年 1 月 4 日再受付)

文 献

- (1) 丸尾敏夫 編: 眼科診療プラクティス 23 眼科保険診療ガイド (1996) 文光堂.
- (2) 生活習慣病予防研究会 編: 2001 年版 生活習慣病のしおり (2001) 社会保険出版社.
- (3) A. Stett, W. Barth, S. Weiss, H. Haemmerle, E. Zrenner: Electrical multisite stimulation of the isolated chicken retina, *Vision Res.*, Vol.40, pp.1785-1795 (2000).
- (4) A. Y. Chow, V. Y. Chow: Subretinal electrical stimulation of the rabbit retina, *Neurosci. lett.*, Vol.255, pp.13-16 (1997).
- (5) M. S. Humayun, E. de Juan Jr., G. Dagnelie, R. Greenberg, R. H. Prost, D. H. Phillips: Visual perception elicited by electrical stimulation of retina in blind humans, *Arch. Ophthalmol.*, Vol.114, pp.40-46 (1996).
- (6) T. Stieglitz, H. Beutel, R. Keller, C. Blau, J. Meyer: Development of flexible stimulation devices for a retina implant system, *Proc. of 1997 IEEE Int. Conf. IEEE/EMBS*, Vol.2, pp.2307-2310 (1997).
- (7) C. Veraart, C. Raftopoulos, J. T. Mortimer, J. Delbeke, D. Pins, G. Michaux, A. Vanlierde, S. Parrini, M. Wanet-Defalque: Visual sensations produced by optic nerve stimulation using an implanted self-sizing spiral cuff electrode, *Brain Res.*, Vol.813, pp.181-186 (1998).
- (8) T. Yagi, H. Kanda, M. Watanabe, Y. Uchikawa: Effect of electrode configuration and pulse parameters in visual prosthesis, *Invest. Ophthalm. & Vis. Sci.*, Vol.41, No.4, pp.S102 (2000).
- (9) R. A. Normann, E. M. Maynard, P. J. Rousche, D. J. Warren: A neural interface for a cortical vision prosthesis, *Vis. Res.*, Vol.39, pp.2577-2587 (1999).
- (10) W. H. Dobelle: Artificial vision for the blind by connecting a television camera to the visual cortex, *ASAIO Journal*, Vol. 46, pp.3-9 (2000).
- (11) M. S. Humayun, E. de Juan Jr., J. D. Weiland, G. Dagnelie, S. Katona, R. Greengerg, S. Suzuki: Pattern electrical stimulation of the human retina, *Vis. Res.*, Vol.39, pp.2569-2576 (1999).
- (12) J. D. Weiland, M. S. Humayun, G. Dagnelie, E. de Juan Jr., R. J. Greenberg, N. T. Iliff: Understanding the origin

of visual percepts elicited by electrical stimulation of the human retina, *Grafe's Arch. Clin. Exp. Ophthalmol.*, Vol.237, pp.1007-1013 (1999).

- (13) W. H. Dobelle, M. G. Mladejovsky: Phosphenes produced by electrical stimulation of human occipital cortex, and their application to the development of a prosthesis for the blind, *J. Physiol.*, Vol.243, pp.553-576 (1974).
- (14) K. Cha, K. Horch & R. A. Normann: Simulation of a phosphene-based visual field: visual acuity in a pixelized vision system, *Annals of Biomed. Eng.*, Vol.20, No.4, pp.439-449 (1992).
- (15) K. Cha, K. W. Horch & R. A. Normann: Mobility performance with a pixelized vision system, *Vis. Res.*, Vol. 23, No. 7, pp.1367-1372 (1992).
- (16) K. Cha, K. W. Horch, R. A. Normann & D. K. Boman: Reading speed with a pixelized vision system, *J. of the Opt. Soc. Of Am. A*, Vol.9, No.5, pp.673-677 (1992).
- (17) R. W. Thompson, D. Barnett, M. Humayun, G. Dagnelie: Reading speed and facial recognition using simulated prosthetic vision, *Invest. Ophthalm. & Vis. Sci.*, Vol.41, No.4, pp.S860 (2000).
- (18) G. Dagnelie, J. Hayes, W. Zhang, D. Piyathaisere, J. Weiland, M. Humayun: Simple daily living activities using simulated prosthetic vision, *Invest. Ophthalm. & Vis. Sci.*, Vol.42, No.4, pp.S942 (2001).
- (19) J. R. Sommerhalder, M. Bagnoud, A. B. Safran, M. Pelizzone: Reading of 4-letter words in a stabilized area of the visual field: Effects of pixelization and eccentricity, *Invest. Ophthalm. & Vis. Sci.*, Vol.41, No.4, pp.S436 (2000).
- (20) 柴田裕一: 視覚障害者の社会適応訓練 (1996) 日本ライトハウス.
- (21) 高柳泰世: 見えない人、見えにくい人のリハビリテーション (1996) 名古屋大学出版会.
- (22) 小田浩一, J. S. Mansfield & G. E. Leege: ロービジョンエイドを処方するための新しい読書検査法 MNREAD-J, 第 7 回視覚障害リハビリテーション研究会発表論文集, pp.157-160 (1998).
- (23) G. E. Leege, D. G. Pelli, G. S. Rubin, M. M. Schleske: Psychophysics of reading I. Normal vision, *Vision Res.*, Vol.25, pp.239-252 (1985).
- (24) G. E. Leege, J. A. Ross, A. Luebker & J. M. LaMay: Psychophysics of reading VII. The Minnesota Low-Vision Reading Test, *Optometry and Vis. Sci.*, Vol.66, pp.843-853 (1989).
- (25) L. D. Harmann & B. Julesz: Masking in visual recognition: Effects of two-dimensional filtered noise, *Science*, Vol.180, pp.1194-1197 (1973).
- (26) R. J. Watt: Visual processing: computational, psychophysical and cognitive research (1988) Lawrence Erlbaum Associates.

寺 澤 靖 雄 (非会員) 1973 年 8 月 22 日生まれ。98 年東北大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻博士前期課程修了。2000 年 4 月より名古屋大学工学研究科計算理工学専攻博士課程後期課程在学中。医用生体工学、心理物理学に関する研究に従事。IEEE、ARVO 会員。

八 木 透 (正員) 1967 年 3 月 30 日生まれ。96 年名古屋大学工学研究科博士課程修了。同年理化学研究所研究員を経て、98 年名古屋大学工学研究科助手、2000 年から理化学研究所フロンティア研究員を兼任、現在に至る。医用生体工学に関する研究に従事 (工学博士)。電気学会、IEEE、ARVO、SFN、日本神経科学学会会員。