

視線インタフェースから視線コミュニケーションへ
－ 視線のある環境を目指して －

大野 健彦

日本電信電話株式会社
NTT コミュニケーション科学基礎研究所 メディア情報研究部
〒 243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1

E-mail: takehiko@brl.ntt.co.jp

人の視線を測定する技術の発展と共に，その利用方法も眼球運動の研究から，視線インタフェースへと広がりつつある．本稿では視線測定装置を視線インタフェースに利用する場合に要求される条件を述べ，これまでに提案されてきた視線測定法がどのように要求を満たしてきたかを紹介する．次に視線インタフェースの具体例をコマンド型インタフェースと非コマンド型インタフェースの2種類に大別して紹介し，最後に視線インタフェースの将来形として，視線コミュニケーションに向けた研究について紹介する．

From Gaze Interface to Gaze Communication
－ Toward Realization of Gaze Ubiquitous Environment －

Takehiko Ohno

NTT Communication Science Laboratories, NTT Corporation
3-1 Morinosato Wakamiya, Atsugi, Kanagawa, 243-0198 JAPAN

E-mail: takehiko@brl.ntt.co.jp

The improvement of gaze tracking system enables us to expand its research area from measurement of eye movements to gaze interface field. In this paper, the requirements of gaze tracking system for gaze interface device are described at first, and then technologies that satisfied them are presented. Next, the researches of gaze interface are shown within two categories, command-based interface and noncommand-based interface. Finally, the challenge of gaze communication between man and computer is described.

1 はじめに

コンピュータを使っているとき、目で見えているものをわざわざマウスで選択するのは面倒だと思わないだろうか。またテレビのチャンネルを変えようとリモコンを探しても見つからず、遂にテレビの上に発見して何のためのリモコンだろうとつぶやいたことはないだろうか。こんなとき目ですぐに操作できたら便利そうだし。さらには気の利かないコンピュータを使っているときなど、視線からこちらの気配を感じて、少しは気を配ってくれればどんなにありがたいことだろう。

視線を利用してコンピュータを操作する、いわゆる視線インタフェースに関する研究は視線測定技術の進歩と共に進んできた。これまでコンピュータを使うには作業に特化した作業知識が必須であり、熟練者にとっては極めて簡単な操作でも非熟練者には使いこなすのに苦労するが多かった。視線を利用した新しいインタフェースは、このような問題を解決する可能性を持つ。そして将来は視線を利用して簡単にコンピュータや家電機器を操作する時代が来るであろう。また視線で機器を操作するだけでなく、人と人とのコミュニケーションにおいておこなわれているのと同様、相手の意図を視線から理解する時代も来ると考えられる。

視線インタフェースの実現においては、視線測定技術が非常に重要な役割を果たす。そこで本稿ではまず視線インタフェースを支える視線測定技術を概観する。次にこれまでおこなわれてきた視線インタフェースに関する研究を紹介する。さらに人とコンピュータとのやりとりを一方向から双方向に拡張した、視線コミュニケーションを目指す取り組みを紹介し、今後の展望について述べる。

2 視線測定背景

視線を測定する試みは19世紀後半から始まり、1世紀以上を経てその技術は大きく進化した[9, 18]。当初の視線記録方法とはコンタクトレンズに装着したペンで紙に直接動きを記録するものであり、被験者への負担は極めて大きかった。また、測定した結果をリアルタイムで利用するという事は全く不可能であった。現在では、コンピュータの前に座ればすぐに視線を測定することが可能となりつつある。

視線測定は、まず心理学者らによる視覚特性の研究に利用されてきた。視覚特性の研究においてまず重視される点は、十分なサンプリング速度(100 ~ 1000Hz)である。そのためビデオ信号を利用するのではなく、電気信号や、光を利用する場合も光電素子を利用する

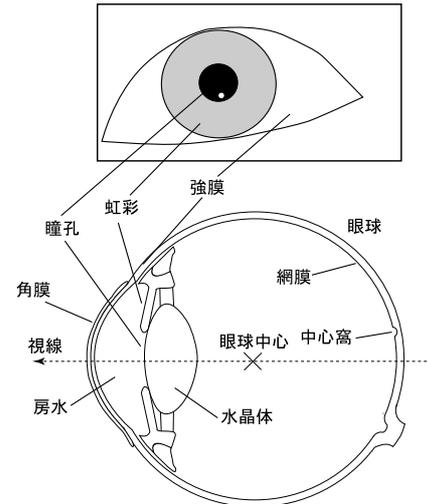


図 1: 人の眼球．正面図および側面図．

ことが一般的であった。

その後、眼球運動を測定する目的が、視覚特性を調べるだけでなく、より高次の人の認知的作業を観察する手段として広がってきた。そしてサンプリング速度がやや低くても構わないので被験者への負担が少なく、見ている箇所が正確にわかる方法が求められるようになると、ビデオカメラを利用して眼球を撮影し、画像処理によって視線を算出する方法が一般的に利用されるようになった。その結果、視線をリアルタイムかつ高い精度で測定できるようになり、視線測定の用途は一層拡大しつつある。

現在、眼球運動の研究において利用される代表的な測定法は、

- 角膜および強膜の境界を検出する方法(強膜トラッカー法)
- 角膜表面での反射光を検出する方法(角膜反射法)
- 眼球の電位差を測定する方法(EOG法)。
- サーチコイルを内蔵したコンタクトレンズを装着する方法(サーチコイル法)。

などがある[9]。

3 ビデオカメラを用いた視線測定技術

人の眼球は図1に示す構造をしている。一般に視線は瞳孔中心と眼球中心を結んだ延長上か、角膜を球の一部であると見なして角膜曲率中心と瞳孔中心を結んだ延長であると仮定する。実際に人がものを見るときにもっとも詳細に見えるのは瞳孔中心と中心窩の延長方向である。

さて、視線測定装置を視線インタフェースとして利



図 2: 可視光線による眼球撮影像。虹彩が観察される。

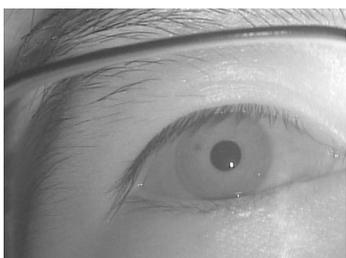


図 3: 近赤外線による眼球撮影像。虹彩に加えて瞳孔およびその内部にプルキニエ像が観察される。図 2 と同一人物の眼球を撮影。

用する場合、ユーザへの負担が少ないことが必要条件である。そのためユーザに特別な装置を装着するのではなく、非接触で外界からの観測が可能で、ビデオカメラを利用する方法が一般的である。

ビデオカメラで撮影した眼球像の例として、図 2 に可視光線による撮影像を、図 3 に近赤外線による撮影像を示す。外部から眼球を撮影すると、角膜を光が通過するため、虹彩および瞳孔が観察される。瞳孔は光の透過率が高いが、眼球内部での光の反射が少ないため、外界からは暗く見える。虹彩は茶、緑、青などに見えるが、日本人の場合は虹彩が茶色の場合が多いため、虹彩と瞳孔の区別は容易ではない。一方、角膜の周囲に分布する強膜は白色であるため、虹彩と強膜の識別は容易である。

近赤外線で瞳孔を撮影すると、虹彩は明るく映るので、瞳孔と虹彩の分離が容易となる。また、近赤外光として点光源を利用した場合には、角膜表面での反射像(第 1 プルキニエ像、以下プルキニエ像と略す)が鮮明に見られる。

3.1 視線の主な測定法

視線を測定するには、これらの画像から必要な情報を求める必要がある。主な視線の測定方法は以下の通りである。

角膜反射法 近赤外線を利用し、瞳孔中心およびプルキニエ像の位置を利用する。角膜および眼球は、曲率の異なるふたつの球が連結した形状であると近似できる。そして眼球が回転すると瞳孔中心とプルキニエ像の相対位置関係が変化するので、変位から視線方向を算出する。市販の視線測定装置で一般的に利用される視線測定法である。

目に対する虹彩位置の利用 可視光線で眼球を撮影し、目に対する虹彩の偏りから視線方向を推定する(例えば [5])。まず顔の方向を計測後、同時に得られた眼球画像からおおまかな視線方向を推定するのに適している。

瞳孔および虹彩形状の利用 瞳孔および虹彩を正面から撮影すると真円であるのに対し、斜め方向から撮影すると楕円となる。そこで楕円の扁平率から眼球の中心を算出することで視線方向を推定する(瞳孔の扁平を利用した視線測定法については [10, 22] などがある)。

これらを組み合わせた視線測定法も提案されているが、視線測定において利用される情報は、基本的には瞳孔、虹彩、プルキニエ像の位置および形状である。

3.2 視線インタフェースに求められる条件

視線測定装置を視線インタフェースとして利用する場合には、様々な条件が課せられる。重要な条件は以下の通りである。

1. 十分な測定精度。
2. 環境の変化に強い測定法。
3. 個人キャリブレーションの簡素化、撤廃。
4. 頭部の自由な移動。
5. 十分なサンプリングレート。

以下、各項目について具体的に述べる。

十分な測定精度 アイカメラを利用する場合、必ずついてまわるのが測定精度の問題である。例えば、70cm の距離から解像度 1280×1024 の 18.1 インチディスプレイを見ている条件を考えた場合、有効表示範囲は 358mm×289mm となる (EIZO FlexScal L675 の場合)。この時、人の視野角 1 度は画面上では 24.4mm、87 ピクセル程度となる。同様に、視野角 0.5 度の場合は 43.7 ピクセルとなる。通常画面上に並んでいるアイコンは 32 ピクセル四方であり、これは視野角 0.37 度となる。視線で画面上の物体を操作しようと思った場合、この程度の精度が必要となる。

アイコンの操作など細かい操作はマウスにまかせて、視線はもっとおおざっぱな操作に利用すれば良いという主張もある。しかしながら視線を利用して人が

見ている対象物を同定しようとする限り、常に高い精度が要求されることにはかわりはない。

測定精度を向上させるためには、なるべく焦点距離の長いレンズを利用して眼球を撮影し、高解像度で画像処理をおこなうことが重要となる。また、瞳孔中心を求めるとき、多数の瞳孔輪郭から楕円近似をおこなうなど、サブピクセルオーダによる位置決定も精度向上に大きな効果をおよぼす。

精度を向上させる試みとして、プルキニエ像に加えて瞳孔ではなく虹彩を利用する方法もある [21]。瞳孔は外界の明るさに応じて大きさが変動するが、虹彩は大きさの変動がなく、また瞳孔にくらべて直径が大きいため安定した位置検出に有利である。ただし虹彩の境界部分はぼやけているためにはっきりと輪郭位置を決定できないという問題がある。

環境の変化に強い測定法 視線インタフェースを利用する場面は、常に一定の場所であるとは限らない。視線測定では画像処理によって瞳孔および虹彩の領域を検出する際に自然光の影響を受けやすい。特に眼鏡を装着しているユーザでは、眼鏡表面での反射光が発生し、画像処理の妨げとなる。そこで環境の変化に頑強な視線測定法が求められる。

Morimoto らの Blue Eyes [12] は、頑強な瞳孔位置検出を利用した視線測定システムで、LED をカメラのレンズ近傍および周辺に配置し、交互に点滅する。その結果、レンズ近傍の LED を点灯した場合には網膜での反射光によって瞳孔が明るくなり (明瞳孔)、レンズ周辺の LED を点灯した場合には強膜および虹彩に対して瞳孔が暗くなる (暗瞳孔)。そこで両画像の差分から瞳孔位置を測定し、角膜反射法によって視線を求めている。なお明瞳孔と暗瞳孔を併用した瞳孔の検出法は、海老澤が提案した手法 [2] に基づいている。

松本らのシステムはステレオカメラで撮影した顔の各部をテンプレートマッチングによって求め、顔の位置および方向を推定する。さらに目付近の画像から虹彩位置の偏りを求め、おおまかな視線方向を算出している [11]。高い測定精度を得ることは難しいが、顔の向きをロバストに測定できるため、自動車運転時など、通常の視線測定が困難な環境でも視線測定に成功している。

個人キャリブレーションの簡素化および撤廃 視線測定では様々な要因によって誤差が発生することが考えられる。そこで視線測定前にユーザが複数のマーカを順次注視し、測定された誤差成分に基づき視線測定の補正をおこなうのが一般的である。マーカを見る作



図 4: 視線測定装置 FreeGaze。カメラ部の下に近赤外線発光部がある。

業を個人キャリブレーションとよび、5点から20点程度のマーカを利用するケースが多い。個人キャリブレーションでは、ユーザがマーカを正確に見ているということが前提となるが、実際には簡単ではなく、習熟を要する作業である。そのため、個人キャリブレーションをおこなわずに視線測定が可能であることが望ましい。

Shih らは一組のカメラおよび光源から視線の含まれる平面を一意に定められることを利用し、複数カメラおよび複数光源から視線を算出する方法を提案している [19]。Shih は原理的に個人キャリブレーションをおこなうことなく高精度に視線測定が可能であることをコンピュータシミュレーションによって示している。しかしながら、例えば視線と中心窩のずれについては考慮されておらず、本手法によって本当に個人キャリブレーションが不要であるかは不明である。

竹上らは瞳孔輪郭の扁平率から瞳孔の回転中心を求める手法において、眼球中心を固定した状態であちこちを見ることで眼球形状に関するキャリブレーションをおこなう方法を提案している [22]。この手法はキャリブレーション時に眼球中心が固定していることが前提であり、実際の眼球運動においては必ずしも回転中心は一意ではないため、高い精度でのキャリブレーションは困難である。しかしながらマーカを注視する必要はないため、マーカの注視が困難な状況でも利用可能であるという特徴を持つ。

筆者らは個人キャリブレーションの手間を最小限にするために、角膜反射法において角膜表面で発生する屈折の影響で瞳孔位置がずれることに注目し、屈折補正をおこないながら視線測定をおこなうアイカメラ FreeGaze を開発した [17]。ずれの発生要因を極力解消することで、個人キャリブレーションによって注視するマーカの数はずが2点で十分となった。また個人



図 5: 視線測定装置 EMR-NC. ディスプレイ左右のカメラで三角枠を追尾し, ディスプレイ下部のカメラで眼球を撮影する.

キャリブレーションによって得られたパラメータは再利用可能であるため, 同一の利用者が使う場合は 2 度目から個人キャリブレーションは不要となる. 現在精度評価を進めているが, 最良の場合で視野角 0.2 度程度の視線測定が可能である. 図 4 に FreeGaze の筐体図を示す.

頭部の自由な移動 頭部を固定した状態で長時間作業を続けるのは極めて困難である. しかしながら高い精度で視線を測定するためには, ビデオカメラによって眼球位置を拡大して撮影する必要がある. そのため高精度かつ頭部の移動が可能な視線測定システムでは眼球位置を何らかの方法で追尾する必要がある. 市販の視線測定装置には, カメラの画像から瞳孔が外れなかった場合にカメラを回転させ, 瞳孔の追尾をおこなう機構が内蔵された製品があるが, 大きく顔が動くと追尾できなくなり, 視線の測定が中断してしまうという問題がある. そこで別途用意したマーカ等を利用して顔の追尾をおこなうシステムが開発された.

伴野らは頭部を自由に測定できる視線測定装置の実現を目指し, 3 点のマーカを眼鏡に装着して 3 点のマーカおよび瞳孔位置をステレオカメラ計測で求め, この位置情報から顔の向きと視線を測定するアルゴリズムを提案した [1].

筆者のグループでは NAC と共同で, 頭部を移動しても視線を測定できるシステムを開発した (図 5). 伴野らと同様, 3 点のマーカが装着された眼鏡を着用し, ステレオカメラによって頭部位置を測定する. さらにディスプレイ下部のミラーで頭部をリアルタイムにトラッキングすることで, 視線測定中にユーザの顔が動いても視線測定が可能な実用システムを実現した [27].

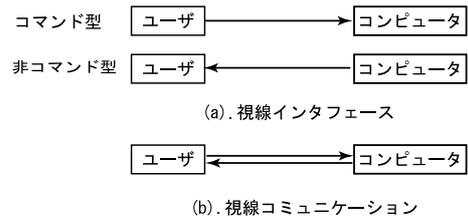


図 6: 視線インタフェースおよび視線コミュニケーションにおける意図伝達の方向性.

視線測定には角膜反射法を用いている. EMR-NC は頭部の自由な移動が可能であるため, 1 時間以上連続して利用しても疲労の殆んど発生しない視線測定環境を実現している.

十分なサンプリングレート ビデオカメラを利用した視線測定法は他の測定法に比べてサンプリングレートが低い. 例えば NTSC を利用して視線を測定した場合, サンプリングレートは 30Hz であり, Even frame と Odd frame を利用しても 60Hz にとどまる (ただし測定精度が低下する). この程度のサンプリングレートでは, 眼球運動の測定においては不十分である. ただし視線移動における潜時は少なくとも 100ms 程度あるので, 30Hz のサンプリングでも, 視線が動いているか, あるいはとまっているの測定は可能であり, 視線インタフェースに利用する上では十分であろう.

現在のところ, これらの 5 条件をすべて満たした視線測定技術は登場していない. これらをすべて満たすシステムが登場した時, 視線測定技術は視線インタフェースを実現する上で十分な完成度を持つに至ったと言えるであろう.

4 視線インタフェース

次に視線測定技術によって可能となった視線インタフェースについて概観する. Nielsen はインタフェースをコマンド型インタフェースと非コマンド型インタフェースの 2 種類に分類した [13]. 視線インタフェースもこの 2 種類に分けて考えることができる (図 6(a)).

コマンド型インタフェースとは, ユーザが視線を利用して意図したコマンドを選択する方式のインタフェースである. ユーザが普段マウスでおこなっているアイコンやメニューの選択はコマンド型インタフェースに分類される. 一方, 非コマンド型インタフェースとは, ユーザが直接コマンドを選択するのではなく, コンピュータが人を観察し, 人の意図を理解して動作す

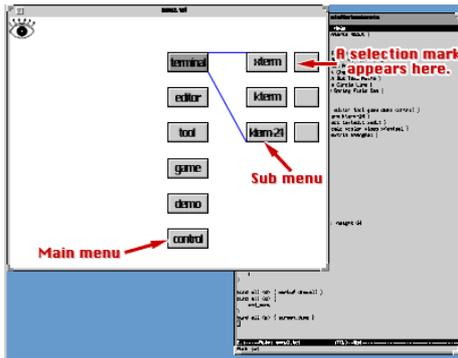


図 7: Quick Glance Selection Method . メニューの横に選択領域が別に設けられている .

るインタフェースである .

4.1 コマンド型インタフェース

視線を利用したコマンド型インタフェースとしては、画面上に配置された特定のオブジェクト (アイコン、メニューなど) を選択するというものが一般的である . 視線をコマンド型インタフェースとして利用する場合、重要な問題の一つにどのように選択を決定するかという点がある . 見たものが片端から選択されると、操作は極めて困難になる . この問題を、見たものをすべて金に変えてしまったフリギア国の Midas 王にちなんで "Midas Touch Problem" と呼ぶ .

選択法の観点から考えると、コマンド型インタフェースはさらに以下の 2 種類に分類できる .

視線単独型インタフェース まず、視線のみを利用してコンピュータを操作する方法が考えられる . このようなインタフェースを本稿では視線単独型インタフェースと呼ぶ . 視線単独型インタフェースでは、選択の決定も視線でおこなう必要があり、"Midas Touch Problem" が重要な問題となる . この問題を回避するため、一般に選択をおこなう時は一定時間以上メニューやアイコンを見続けるという方法が用いられる .

視線単独型インタフェースの例として、Jacob の研究が挙げられる . Jacob は視線を利用したメニュー選択システムや、画面の上下を見ると自動スクロールするシステムを実現した [6, 7] . 彼のシステムではメニュー選択に一定時間の凝視が必要である .

選択までに一定時間を要するという事を利用して、ユーザに視覚フィードバックを与えることも可能である . Hansen はボタンを注視すると徐々に目が閉じる "EyeCon" を提案した [4] . 目を閉じる前にユーザが誤選択に気づけば、他の箇所を見ることで選択を取

りやめることが可能となる .

しかしながら、一定時間を注視する作業はユーザへの負担が大きい . 一定箇所を注視するためには、眼球運動を司る筋肉 (外眼筋) の緊張を持続させる必要がある . そのため疲労を引き起こす可能性があり、日常的に利用する選択方法としては有効性に疑問がある .

筆者は選択領域と情報提示領域を明示的に区別し、選択領域を見た時には直ちに選択がおこなわれるメニュー選択法 Quick Glance Selection Method を提案した [14] . その結果、メニューを凝視することなく、眼球運動の高速性を活かしてただちに選択できるシステムが実現された . 図 7 にメニューの画面イメージを示す .

視線併用型インタフェース もう一つは視線を他の入力デバイスと組み合わせる手法である . 他の入力デバイスを利用できるため、選択の決定には他の入力デバイスを利用できる .

視線を他の入力デバイスと併用するもっとも効果的な方法はマウスとの併用であろう . マウスによってアイコンなどを選択する場合、必ず視線でターゲットの位置を確認する . また、視線によって細かい点を正確にポインティングするのは困難である . そこでユーザがマウスを動かし始めたときに、ユーザの注視位置にマウスカーソルをジャンプさせ、実際のポインティングはユーザがマウスでおこなう方法が提案されている [26, 28] .

またマルチウィンドウ環境において、ウィンドウの切り替えに視線 (顔の方向) を利用する方法も提案されている [8] . この手法では、顔の方向で対象とするウィンドウを選択し、操作の決定には特定のボタンを利用する .

視線併用型インタフェースでは操作を決定するための「マジックボタン」を用意することで、誤選択を大幅に減少させることが可能である . ただしマジックボタンの利用は従来の入力デバイスが持つ制約条件から逃れられないことになり、使いやすさの向上につながるかどうかは慎重な検討が必要であろう .

4.2 非コマンド型インタフェース

非コマンド型インタフェースに視線を利用した例は、主に視線から人の関心を抽出して利用するものであった .

Starker らは画面上に表示された複数のオブジェクトについて、ユーザの視線からどのオブジェクトに注目しているかを検出する手法を提案した [20] . そして注

目しているオブジェクトに関連するナレーションが流れるシステムを試作した。

視線を利用すると、人が注目している対象を検出できる。そこで筆者は人がオンライン文書を見ている時の視線から、人が注目している領域の履歴を抽出し、付加情報として文書と共に記録、再利用するアプローチを提案した [16]。記録した履歴 (EyePrint) は、文書上に淡いトレースとして表示され、ユーザは自分が注目した領域を知ることができる。また注目した領域に対して、キーワード検索、領域抽出などが可能である。

ユーザの興味や関心を視線から抽出する手法は、マーケティングやユーザビリティ評価において利用されている。視線インタフェースの分野でも今後様々な実現例が登場するであろう。

また、筆者らは非コマンド型インタフェースの可能性を調べるため、画面上に表示されたオブジェクトの状態を知りたいとき、顔を近づけると見ているオブジェクトの内部状態が可視化されるシステム WHERE [25]、マルチウインドウシステムにおいて他のウインドウに目を向けると切り替わるウインドウマネージャ Ewm [15] などの試作をおこない、動作の確認をおこなった。これらのインタフェースは実際に使ってみるまでは操作感が予想できず、実装して確認することが重要であった。今後は操作感を予測、評価するユーザビリティに関する研究も必要となる。

5 視線コミュニケーション

最後に視線インタフェースの将来形として、視線を利用したコミュニケーション研究の取り組みについて紹介する。

インタフェースの将来を考えると、人からコンピュータへ一方的に意図を伝達するだけでなく、今後は人がコンピュータへ意図を伝達すると同時に、コンピュータも人の意図を理解する、双方向のやりとりへ発展するであろう (図 6(b))。

コンピュータとの音声対話において視線を利用した例として、知野らによる Gaze To Talk [23, 24] がある。この研究では人の視線やディスプレイ前にいる/いないという情報をエージェントと人とのコミュニケーションの確立、維持などに利用している。そして人がエージェントの方向を注視した時にのみエージェントが応答することで、通常は人の作業を妨げることなく、必要なときにのみ動作するエージェントが実現されている。

この方向性を発展させると、視線を介在した双方向

のコミュニケーションに到達する。人と人のコミュニケーションにおいて視線が重要な役割を果たしているのは言うまでもない。コンピュータとのやりとりにおいても視線情報は有用な手掛かりとなるはずである。

筆者のグループでは、コンピュータと人との間で、視線を通したコミュニケーションを実現する研究を立ち上げつつある。深山らは擬人化エージェントが視線で人に印象を伝達できることを確認した [3]。この研究では、まず会話時において人が様々な視線を演技し、その視線を記録したデータから同様の視線を生成するための視線生成モデルを考案し、エージェントに実装した。エージェントから受ける印象に関する評価実験をおこなったところ、

- 視線パターンの違いにより、人は異なった印象を受ける。
- エージェントの種類が異なっても、受ける印象の種類には再現性がある。

という結果が得られた。今後は、様々な場面におけるユーザの視線を測定して、例えばユーザの興味が薄れてきたら相手の注意を引く、話を熱心に聞いていたらさらに話を盛り上げるなどということを実現させるために研究を継続している。

6 まとめと今後の展望

本稿では視線インタフェースを支える視線測定技術とそれを利用した様々な試みについて紹介した。

視線測定技術の発展 視線測定技術は今後どのように発展していくであろうか。まず考えられるのは頭部拘束条件の軽減である。カメラで眼球を撮影する以上、カメラの撮影範囲に顔が位置する必要があるが、顔のトラッキング技術などと組み合わせることで、ユーザに何も装着しないで高精度に視線を測定する技術が間もなく登場するであろう。

また、現在は大半の視線測定装置で NTSC カメラを利用しており、解像度の制限が精度に大きな影響を与えている。今後、より高解像度のカメラが登場し、コンピュータの処理速度もさらに向上すれば、解像度の制限が低減するであろう。その時は精度の向上と、人の位置に関する制約の緩和が期待される。近い将来、コンピュータに向かっている場面だけでなく、より自由な環境における視線測定が実現するであろう。

視線インタフェースはどこに向かうか 視線インタフェースは簡単かつ安定した視線測定が困難であったこともあり、日常的に利用されるには至っていない。今後もマウスを駆逐することはあり得ないだろう。し

かしながら特定の作業知識を必要とせずすぐに使えるインタフェースとして受け入れられいくのではないかと考える。

非コマンド型インタフェースや視線コミュニケーションはまだ黎明期である。これまで対人コミュニケーションなどの分野において視線の役割に関する研究はいろいろとおこなわれてきており、今後はこれらの知見を活用した新しい形態のコミュニケーションが実現されると期待している。

謝辞 視線インタフェースに関する一連の研究をサポートして頂く NTT コミュニケーション科学基礎研究所の石井健一郎所長、メディア情報研究部の萩田紀博部長、およびいつも貴重なコメントを頂く環境理解研究グループの皆様へ感謝します。

参考文献

- [1] 伴野明, 岸野文郎: 顔と瞳孔の3次元計測に基づく注視点検出アルゴリズム, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J75-D-II, No. 5, pp. 861-872 (1992).
- [2] Ebisawa, Y.: Improved Video-Based Eye-Gaze Detection Method, *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, Vol. 47, No. 4, pp. 948-955 (1998).
- [3] 深山篤, 澤木美奈子, 村瀬洋, 萩田紀博: ユーザとのコミュニケーションにおける擬人化エージェントの視線移動制御, 信学技報 HIP2000-47, Vol. 100, No. 613, pp. 9-14 (2000).
- [4] Hansen, J. P., Anderson, A. W. and Roed, P.: Eye-Gaze Control of Multimedia Systems, *Symbiosis of Human and Artifact* (Anzai, Y., Ogawa, K. and Mori, H.(eds.)), Vol. 20A, Elsevier Science, pp. 37-42 (1995).
- [5] Heinzmann, J. and Zelinsky, A.: 3-D Facial Pose and Gaze Point Estimation using a Robust Real-Time Tracking Paradigm, *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (1998).
- [6] Jacob, R. J. K., Leggett, J. J., Myers, B. A. and R.Pausch: Interaction Styles and Input/output Devices, *Behaviour and Information Technology*, Vol. 12, pp. 69-79 (1993).
- [7] Jacob, R. J. K.: What You Look At Is What You Get: Eye Movement-Based Interaction Techniques, *Proceedings of CHI'90*, ACM Press, pp. 11-18 (1990).
- [8] 北島光太郎, 佐藤洋一, 小池英樹: ウィンドウインタフェースシステムにおける頭部位置・姿勢の有効な利用法, インタラクシオン2001論文集, pp. 195-204 (2001).
- [9] 古賀一男: 眼球運動実験 ミニ・ハンドブック, 労働科学研究所出版部 (1998).
- [10] 松田圭司, 永見武司: 共通 VideoAPI 対応視線位置計測システムの開発, 第15回生体生理工学シンポジウム (2000).
- [11] 松本吉央, Zelinsky, A., 小笠原司: ステレオビジョンを用いた顔・視線計測システムの開発, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2000), pp. II-217-II-222 (2000).
- [12] Morimoto, C. and Flickner, M.: Real-Time Multiple Face Detection Using Active Illumination, *Fourth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, pp. 8-13 (2000).
- [13] Nielsen, J.: Noncommand User Interfaces, *Communications of the ACM*, Vol. 36, No. 4, pp. 83-99 (1993).
- [14] 大野健彦: 視線を用いた高速なメニュー選択作業, 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 2, pp. 602-612 (1999).
- [15] 大野健彦: 視線を利用したウィンドウ操作環境, 信学技報 HIP99-29, pp. 17-24 (1999).
- [16] 大野健彦: IMPACT: 視線情報の再利用に基づくブラウジング支援法, インタラクティブシステムとソフトウェア WISS 2000 (暦本純一(編)), 近代科学社, pp. 137-146 (2000).
- [17] 大野健彦, 武川直樹, 吉川厚: 眼球形状モデルに基づく視線測定システム - 視線入力デバイスの実現に向けて -, 情処研報 2001-HI-93, Vol. 2001, No. 38, pp. 47-54 (2001).
- [18] 苧阪良二, 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).
- [19] Shih, S.-W., Wu, Y.-T. and Liu, J.: A Calibration-Free Gaze Tracking Technique, *Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition (ICPR'00)* (2000).
- [20] Starker, I. and Bolt, R. A.: A Gaze-Responsive Self-Disclosing Display, *Proceedings of CHI'90*, ACM Press, pp. 3-9 (1990).
- [21] 竹上健, 後藤敏行: 角膜反射像と虹彩輪郭情報を併用した視線検出法, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J82-D-I, No. 10, pp. 1295-1303 (1999).
- [22] 竹上健, 後藤敏行, 大山玄: 視線方向検出におけるセルフキャリブレーションに関する研究, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J84-D-II, No. 8, pp. 1580-1588 (2001).
- [23] 知野哲郎, 福井和広, 鈴木薫: 非言語メッセージ利用インタフェース “Gaze To Talk” システム, 信学技報 HIP98-26, pp. 31-38 (1998).
- [24] 知野哲郎, 福井和広, 山口修, 鈴木薫, 田中克己: Gaze To Talk: メタコミュニケーション能力を持つ非言語メッセージ利用インタフェース, インタラクシオン'98論文集, pp. 169-176 (1998).
- [25] 大和正武, 大野健彦: 視線を利用したアプリケーションの内部可視化インタフェース, 信学技報 HIP2000-12, Vol. 100, No. 138, pp. 37-46 (2000).
- [26] 大和正武, 門田暁人, 高田義広, 松本健一, 鳥居宏次: 一般的なGUIに適した視線・マウス併用型ターゲット選択方式, 情報処理学会論文誌, Vol. 42, No. 6, pp. 1320-1329 (2001).
- [27] 吉川厚, 大野健彦: 視線を読む - ユーザにやさしい視線測定環境 -, *NTT R & D*, Vol. 48, No. 4, pp. 399-408 (1999).
- [28] Zhai, S., Morimoto, C. and Ihde, S.: Manual and Gaze Input Cascaded (MAGIC) Pointing, *Proceedings of CHI'99*, pp. 246-253 (1999).