

視線から何がわかるか -視線測定に基づく高次認知処理の解明

大野 健彦

Eye movement analysis has been used for understanding human's higher cognitive processes over a century. It has the power to observe human's activities in detail without disturbing his/her behavior. This tutorial consists of eye movement analysis topics including the definition of gaze, sorts of eye movement detection methods, eye movement analysis methods, and then introduces cognitive researches that analyze eye movement for observing cognitive activities. Finally, gaze based interactive systems are described as the application of eye movement analysis.

Keywords: eye movement analysis (視線分析), eye movement detection method (視線測定法), higher cognitive process (高次認知処理), Human-Computer Interaction(ヒューマン・コンピュータ インタラクション)

1. はじめに

人を外界から観察することによって人の高次認知処理を解明する試みは、認知科学におけるもっとも重要な研究課題のひとつである。しかしながら、ただ外界から人の行動を観察するだけでは、認知処理を理解することは難しい。そこで、発話プロトコル分析 (Ericsson & Simon, 1984; 海保・原田, 1993), 反応時間の測定, アンケートや質問紙の利用など様々な分析手法が用いられてきた。視線測定もその一つである。その歴史は長く、19世紀末にはすでに文章を読む作業における視線測定が試みられている (古賀, 1998)。

人の高次認知処理は 100ms 以下の細かい時間単位でおこなわれる (Newell, 1990)。視線測定は、人が見ているものを 100ms 以下の細かい時間分解能で特定可能であるため、高次認知処理の観察に適している。また、人の高次認知処理を妨げない、非侵蝕な測定方法であるという優れた特徴を持つ。観察行為が認知処理におよぼす影響は、発話プロトコル等

の分析手法においてしばしば議論となるが、視線測定ではその影響は少ない。他の分析手法と組み合わせることも容易である。

このような優れた特徴を持つ視線測定であるが、視線測定装置が高価であること、安定した視線データの採集が困難であること、分析手法が確立しておらず、得られた視線データの分析には時間と手間を要することなどから、気軽に利用可能であるとは言い難かった。

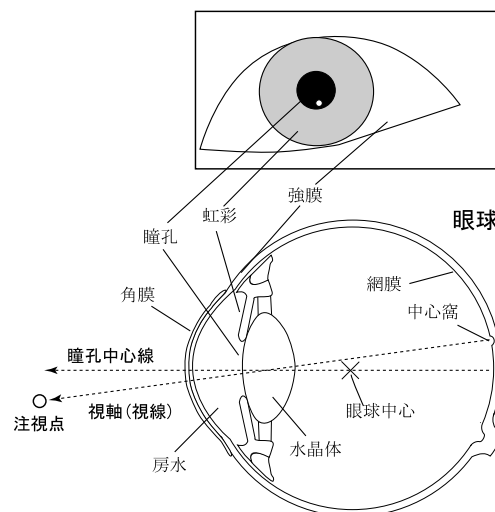


図1 眼球の構造

しかしながら、近年はコンピュータの処理速度および画像処理技術の向上に伴う、視線測定装置の価格低下や信頼性向上が進み、以前ほど扱いにくい道具ではなくなってきた。また、視線データを自動的に分析する手法に関する研究もおこなわれている。研究対象も、文章の読解、絵や風景の認識などの伝統的な研究課題にとどまらず、見ている対象が次々に変化していくリアルタイムゲーム、自動車の運転中や歩行中の視線など、これまで測定が難しいとされてきた分野にも拡大してきている。

本解説では、この古くて新しい分析手法について、視線の意味、視線から得られるデータの種類、視線測定法の種類、視線分析方法の紹介など、視線測定に関する話題について述べるとともに、視線測定法が利用された研究事例を

紹介する。

2. 視線の特徴

「視線測定」とは以下の2点に関してかなり曖昧な言葉である。

- 視線測定装置は何を測定しているのか。
- 得られたデータは人のどのような眼球運動に対応しているのか。

一般にはこれらを深く考えず、視線測定装置によって得られたデータが「視線」であると見なしている場合が多い。そこで、まずこの2点を整理する。

2.1 視線測定装置は何を測定しているのか

そもそも視線とは何であろうか。単純に考えると視線は目の向いた方向ということになるが、実際にはもう少し複雑である。眼球の構造図を図1に示す。

まず、ものを見るということについて考える。ものを見ているとき、外界からの入射光は角膜の表面、裏面および水晶体の表面、裏面で屈折し、網膜に到達する。一点を注視しているとき、対象からの光線は網膜において解像度の高い領域である中心窩に到達する。中心窩は視角5deg程度であり、その中でもっとも解像度の高い領域は視角1.2deg程度である(淀川・東倉・中根, 1998)。以降、注視している点を注視点あるいは視点と呼ぶ。

魚里は、眼球に関する様々な軸の定義を取り上げている(魚里, 2000)。その中から視線測定に関係する軸を以下に示す。

- 視軸 (visual axis) . 視線 (visual line) とも呼ぶ。注視点と中心窩を結ぶ線。眼をレンズで構成された光学系であると考えたとき、どの角度から入射した光線でも入射角と出射角が等しくなる、節点と呼ばれる点が存在する。視軸は、注視点、節点、中心窩を結んだ直線として定義される。厳密には注視点側から見た節点と、中心窩側から見た節点は一致しないが、そのずれは無視できる程度であるため、一本の直線として近似してよい。

- 注視軸 (fixation axis) . 目の回転中心と注視点を結ぶ線。眼球は剛体ではなく、また一点を中心として回転する構造にはなっていないため、回転中心を決定することはできない。従ってこの定義では軸を厳密に決定することはできない。

- 光軸 (optic axis) . 角膜および眼球の光学中心を結ぶ軸。一般に角膜と水晶体の光軸は傾いており同一軸上にはないため、厳密な光軸を定義することはできない。

- 瞳孔中心線 (pupillary axis) . 瞳孔中心を通り、角膜表面に垂直な線。点光源を眼球正面から照射し、角膜反射像(第一プルキニ工像、以下プルキニ工像と略する)が瞳孔中心と一致するように点光源の位置を調節し、瞳孔中心と点光源を結んだ線が瞳孔中心線に相当する。

視線測定では、図1における注視点を求める。中心窩お

よび節点の位置が観察可能であれば、視軸(視線)が定まり、その延長が最初に物体と交差した点として注視点を算出可能である。しかしながら、外界から中心窩および節点を測定することは困難であるため、この方法は現実的ではない。

多く用いられる手法は、瞳孔中心線に相当する軸をまず算出し、次に個人キャリブレーションと呼ぶ個人別の補正作業によって軸の補正をおこない、視線とするものである。測定段階で算出した軸が何であるかを厳密に定義せず、個人キャリブレーションによって視線を推定するシステムも見られる。このようなシステムは、頭部位置のわずかな変化等に対応関係の整合性が狂い、測定誤差が生じやすい。

本解説では特に断らない限り、視線とは視軸のことを指す。

2.2 眼球運動の種類

視線の方向は眼球運動および頭部運動によって変化する。本節では視線測定で得られた視線がどのような眼球運動に基づくものであるかを整理する。主な眼球運動には次の5種類が挙げられる(小松崎・篠田・丸尾, 1985; 古賀, 1998)。

(1) 衝動性眼球運動 (saccadic eye movement, saccade) . ものを見ようとして注視点を変えるときに発生する眼球運動。本解説ではサッケードと記す。サッケード中には、ほとんど外界を知覚することができないという現象(サッケード抑制)が知られている。人が知覚する情報は、大半がサッケードとサッケードの間に得られたものである。

(2) 滑動性眼球運動 (smooth pursuit eye movement) . ゆっくりと移動する物体を追尾するときに発生する滑らかな眼球運動。対象の移動速度が45deg/s程度までの場合しか追尾できず、それ以上速い場合にはサッケードが発生する。また、追尾対象の物体がない場合に、意識的に滑動性眼球運動をおこなうことはできない。

(3) 代償性眼球運動 (compensatory eye movement) . 頭部を回転したときに逆方向へ発生する眼球運動。頭部回転によって内耳半期管に加わった刺激に対して発生する前庭動眼反射である。なお、この運動は自分が頭を動かしたときのみ発生する。自分で頭を振ったときには風景が静止して見えるが、他人に頭を揺すられると風景が揺れて見えることで体感できる。

(4) 輻輳性眼球運動 (convergence eye movement) . 両目で物体を注視するとき、物体が前後に動くとき発生する眼球運動。物体が近づくと両眼は内側に回転し、遠ざかると外側に回転する。両眼の視線を同時に測定することで、輻輳性眼球運動の測定が可能である。

(5) 固視微動 (micro saccade) . 一点を注視中に発生する細かい眼球運動。固視微動は網膜上の視神経細胞を活性化する役割を果たしており、麻酔等で固視微動を抑制すると、視神経細胞が麻痺して眼が見えなくなることが知られている。

これらを厳密に分離して測定することはかなり難しい。しかしながら測定方法の違いによって、得られた視線に含まれる眼球運動の種類が異なることには留意する必要がある。

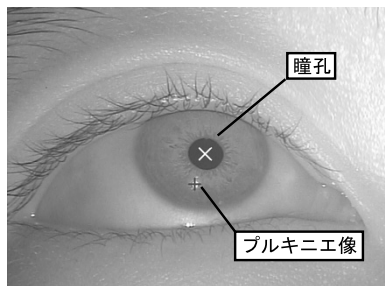


図2 瞳孔およびプルキニエ像

(古賀, 1998). 例えば, 視線測定時には頭部を固定する場合がある. この場合, 代償性眼球運動は抑制されることになる. また, 頭部装着型の視線測定装置では, 視線は眼球運動のみによって変化するが, 非接触型の視線測定装置(頭部に何も装着せず, 外部に設置したカメラから測定する方式)では, 視線は眼球運動および頭部運動によって変化する.

視線の分析においては, 視線が一点から離れた一点に移動する状態を「サッケード」と呼ぶのが一般的であるが, この場合のサッケードには衝動性眼球運動だけでなく, 他の眼球運動および頭部運動が混在していることも多い.

3. 視線測定技術

視線測定技術はコンピュータの性能向上に伴って著しく進歩してきた. 前述したとおり, すでに19世紀末には視線測定が試みられている. その先進性には驚かされるが, このころの測定法は角膜に石膏製のコンタクトレンズやマーカとなる紙片を直接装着するものであり, 人への負荷は極めて大きかったものと思われる. 視線測定技術の歴史については芋阪, 古賀らの文献に詳しい(芋阪・中溝・古賀, 1993; 古賀, 1998).

近年はコンピュータビジョンの分野において, 3次元空間における眼球位置や視線方向の推定に関する研究が精力的におこなわれている.

3.1 眼球運動の測定技術

現在, 一般的に用いられる視線測定法は以下の4種類に大別される.

角膜反射法: 眼球に近赤外線の点光源を照射し, 角膜表面における反射光(第一プルキニエ像, 以下プルキニエ像と略す. 角膜反射像とも呼ぶ)をカメラで撮影し, 視線を算出する(図2). 視線算出には, プルキニエ像に加えて瞳孔中心を利用する場合が多い. 本手法を利用した視線測定装置をアイカメラと呼ぶ場合もある. プルキニエ像の撮影にはCCD(Charge Coupled Device)内臓のNTSCカメラを利用することが多く, サンプリグレートは30Hzまたは60Hzである. 他の手法に比べて調整の手間が少なく, 測定精度も優れたものでは視角0.5度程度と高いため, もっとも一般的な視線測定法である. 国内, 海外の各社から製品が市販されている.

角膜反射法を用いた視線測定装置は頭部装着型と卓上型

(非接触型とも呼ぶ)の2種類がある.

頭部装着型は, 頭部にカメラ, 光源等を固定する形式の視線測定装置である. 頭部位置に制約を受けず, 自由に移動できるという利点がある. しかしながらユーザへの負担が大きく, また装置がずれやすいため短時間で測定精度が低下したり, まったく測定できなくなるという問題が発生しやすい. また, 見ている対象が何であるかを決定するには別途カメラで撮影した映像を分析する必要があるため, 分析に要する手間が極めて大きい.

一方, 卓上型では頭部に測定装置を装着する必要がないため, 視線測定中の負担が少ない. また, 測定装置とディスプレイ間の位置関係が固定であるため, 視線データからディスプレイ上のどの箇所を見ているのかを決定することが容易である. 一般にはカメラが固定されているため, 頭部の移動可能範囲は4-5cm四方程度と限定されるが, 頭部を自由に動かすことの可能な装置も登場している(吉川・大野, 1999).

強膜トラッカー法: 近赤外線を照射し, 強膜と角膜の境界をフォトディテクタで検出し, 視線方向を算出する. 測定精度は角膜反射法と同程度であり, またフォトディテクタはCCDより応答が速いため, 1000Hz程度までサンプリグレートを上向き可能である. ただし頭部に装置を装着する必要がある. 眼球運動の特性を測定するのに適している.

EOG法: Electro-oculography法の略. 皮膚表面電極によって眼球付近の電位変化を測定する手法である. 眼球の角膜側が正電位に, 網膜側が負電位に帯電している性質を利用しており, 眼球の回転によって発生する表面電位から眼球の回転角度を推定することで視線を推定する. 比較的的低価格で実現可能だが, 電極の設置位置などに関するノウハウが必要である. また, ノイズに弱い, ドリフトが発生しやすいなどの問題もある. サンプリグレートは100Hz程度である.

サーチコイル法: サーチコイルが埋め込まれたコンタクトレンズを装着するか, 角膜に直接サーチコイルを接着し, 周辺に設置したアンテナを利用して位置を測定する方法. 測定精度は高く, またサンプリグレートも強膜トラッカー法同様高い. しかしながらユーザへの負担がきわめて大きいため, 用途は眼球運動の精密な測定などに限定される.

斎田は角膜反射法, 強膜トラッカー法, EOG法のそれぞれについて, 移動する光点を目で追う作業を用いて, 視線測定精度の比較をおこなっている(斎田, 2000). 被験者が異なるため測定結果の単純な比較はできないものの, 同一の視線測定方式でも装置によって精度はかなり異なるという結果が得られている.

近年もっとも一般的に利用される手法は角膜反射法である. しかしながら, 視線測定中に測定精度が低下する場合があるなど, 現在の装置はまだまだ問題を抱えている. 高精度, ロバスト, かつ負担の少ない視線測定装置の登場が望まれるところである.

なお, 研究段階ではあるが, 視線測定の労力を軽減するた



図3 視線測定システム FreeGaze

めの研究も進められている。視線測定において手間がかかるのが、個人キャリブレーションと呼ばれる調整作業であり、画面上に表示された5から20点程度の点を順次注視する必要がある。そこで、キャリブレーションなしで視線測定をおこなうために、2組以上の光源とカメラのセットから視線を決定する理論的手法 (Shih, Wu, & Liu, 2000), 誤差の発生要因を眼球形状モデルで補正することにより、2点のキャリブレーションのみで測定可能なシステム *FreeGaze* (大野・武川・吉川, 2001; Ohno, Mukawa, & Yoshikawa, 2002) などが提案されている。図3に *FreeGaze* の筐体を示す。*FreeGaze* はキャリブレーション結果を保存することで、一度キャリブレーションを終えた人は次回からキャリブレーションをおこなうことなく利用可能であるという特徴を持つ。

現時点では、キャリブレーションが不要で高精度な視線測定装置は存在しない。眼球の複雑な形状を考えると、まったくキャリブレーションをおこなわずに高精度な視線測定を実現することはかなり難しいと思われるが、今後の視線測定技術の進展に期待したい¹⁾

4. 視線データから何がわかるか

視線測定装置で視線を測定すると、短時間で大量の視線データが得られる。しかし、視線データの分析方法は確立しておらず、分析に時間をかけた割に思うような結果が得られないことがある。

測定したデータの効率のかつ客観的な分析方法の確立は、視線測定研究における重要課題の一つである。本節では、まず視線測定で得られるデータの種類を整理し、次に主な分析方法を紹介する。

4.1 視線データの種類

視線は一回サッケードが発生すると、次のサッケードが発生するまでの間、一箇所に停留する。視線データの分析には、サッケードおよび視線の停留位置 (停留点と呼ぶ) に関する情報が用いられることが多い。

停留点には以下の2種類の情報が含まれる。

- 停留点座標
- 停留時間

停留点の定義法には様々なものがあるが、角速度が用いられることが多い。 n 番目および $n+1$ 番目の視線データについてその間の角速度を求め、一定値以下であれば停留状態、そうでなければサッケードであると定める。

眼球からディスプレイまでの距離が得られれば、角速度をディスプレイ上の移動距離に換算することも可能である。なお、得られたデータは閾値に大きく依存することに注意する必要がある。

同一の視線データでも定義法が異なると、停留点異なる場合がある。Salvucci は同一の視線データに対して5種類の定義法を適用し、定義法が異なると得られる停留点も異なることを示した (Salvucci & Goldberg, 2000)。

停留点に加えて、以下のデータが用いられることも多い。

- 瞬きの頻度
- 瞬きの間隔
- サッケード距離
- サッケード頻度
- 停留頻度
- 瞳孔径

瞬き、瞳孔径などのデータは視線測定装置によっては測定できない場合もあるが、注目の有無などの心理状態を推定する指標として有効である (田邊・杉山, 1998)。

4.2 停留点

2.2 節で述べたとおり、サッケードの間はほとんど視覚情報を得ることはできない。一方、視線が停留している間は注視点付近から視覚情報を取得して、認知処理に用いられる。そのため、停留点および停留時間は人の認知処理を理解する上で重要な手がかりとなる。

代表的な分析手法を以下に示す。

- (1) 統計的分析。一定時間に得られた停留点データを統計的に分析して、統計量の比較をおこなう。
- (2) 時系列分析。連続する複数個の停留点集合について、順序情報を利用した分析をおこなう。
- (3) 認知プロセスの推定。時系列的な停留点の変化から、認知処理過程のモデルを作成する。
- (4) 認知プロセスの自動解釈。一般に認知処理過程のモデル化は手作業によっておこなうが、パターン認識の手法を利用して自動的におこなう手法も提案されている。

以下にそれぞれの分析方法および分析例について具体的に述べる。

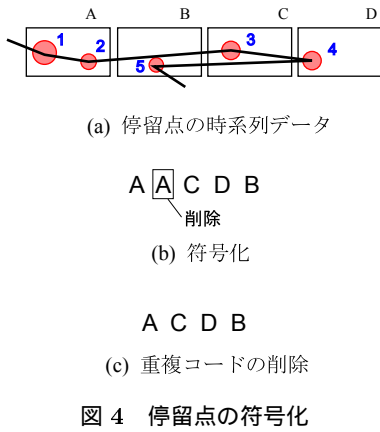
4.2.1 統計的分析

停留時間は、認知処理の種類や作業負荷の程度などの諸要因によって大きく変化する。そこで停留時間の分布を調べ、統計量を比較することで認知処理の推定をおこなう。

比較の単位としては、

- (1) 被験者群間の比較。

1) 海外製品が中心であるが、視線測定装置を網羅的に紹介した EMED (Eye Movement Equipment Database) と呼ばれるデータベースがある (<http://ibs.derby.ac.uk/emed/>)。



- (2) 同一被験者におけるセッション間の比較.
 - (3) 異なる作業間の比較.
- などがある.

なお、停留時間を示す統計量としてしばしば平均値が用いられるが、平均値の使用には注意が必要である。停留時間は一般には 100ms から 300ms 程度であるが、1000ms 以上になることがあるため、分布を示す統計量としては中央値 (median) を用いる方がよい。また、データ数が十分に多い場合には最頻値 (mode) を利用する場合もある (Velichkovsky, Dornhoefer, Pannasch, & Unema, 2000)。

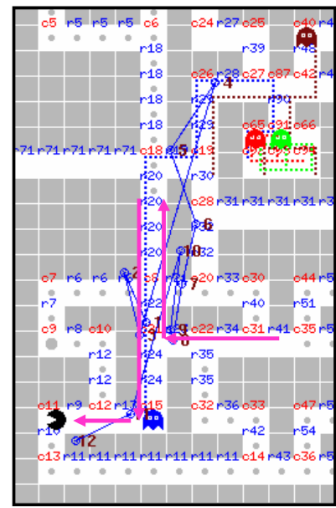
どのような統計量を用いるべきかは、例えば反応時間を測定する場合にも議論となる。一般にデータが正規分布となる場合、平均値、中央値 (median)、最頻値 (mode) は同一となるので、算出が容易な平均値を用いればよい。一方、平均から大きく外れたデータが含まれる場合、平均値はデータの傾向を適切に表さない場合があるため、中央値あるいは最頻値の利用を検討するべきである。

4.2.2 時系列分析

停留点の順序関係から認知処理の種類を分析する研究もおこなわれている。視線の停留位置は個人差および提示刺激に依存するばらつきが大きい。また、同じ人が同一刺激を複数回見た場合にも、異なった順序および位置に分布する場合がある。そのため、複雑な作業になるほど順序情報から作業の傾向を見出すことは困難である。

そこで、短時間の停留点集合に着目し、類似した視線移動の発生する回数および頻度を計測する手法がしばしば用いられる。このとき、停留点データをそのまま用いるのではなく、まず記号に符号化すると良い。図 4 にその方法を示す。まず、あらかじめ提示刺激を複数の領域に分割してラベルを付与し (図 4(a))、領域の注視順序をラベルの系列で表現する (図 4(b))。この後、連続している符号の削除をおこなう場合もある (図 4(c))。

Russo らは中古車の選択を題材とした視線測定実験をおこない、複数候補から 1 つを選択する選択課題における認知プロセスを調べた (Russo & Rosen, 1975)。この実験で Russo らは、2 台の車に対して視線が交互に停留するパター



(a) パックマン・ゴーストの移動履歴および停留点データ

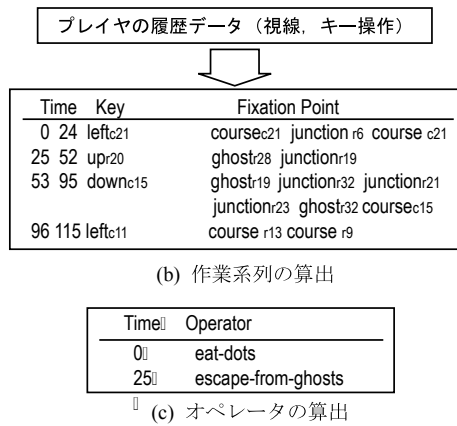


図 5 パックマンにおける認知プロセスの推定例

ンの発生頻度を調べた。交互に停留する視線の最小パターンは長さ 3 の停留 (X-Y-X のパターン) である。そこで、長さ 3 およびそれ以上 (X-Y-X-Y-...) の比較が全体の視線移動回数に占める割合を求め、全体の 73% が 2 候補間の比較であることを示した。この実験から、複数候補から 1 つを選択する作業は、主に 2 候補間の比較作業から構成されていると結論付けている。

4.2.3 認知プロセスの推定

これまでに紹介してきた分析法は、作業の傾向を知ることが可能であるが、作業の詳細まではわからない。そこで、作業の詳細を理解するために、視線の時系列情報を分析することが必要となる。このとき、時系列的な停留点の変化に加えて、他のデータ (例えばコンピュータの操作記録) を用いると、情報取得から作業に至る一連の認知処理の分析が可能となる。

例として図 5 に筆者がおこなった作業分析例を示す。この研究はパックマンを題材として、リアルタイムゲームにおける人の習熟過程について調べたものである (Ohno & Ogasawara, 1999)。この実験では視線、パックマン、ゴース

ストの動作、プレイヤーが押したキーの種類を記録した。そして迷路中の各通路にラベルを付加して、プレイヤーが、いつ、何を見たかを停留点から求めた(図 5(a))。次にプレイヤーが見た情報と、押したキーの種類を時系列順に記述した(図 5(b))。最後に、あらかじめパックマンのルールおよびプレイヤーの作業を観察して得られたオペレータを割り当てた(図 5(c))。その結果、プレイヤーの取得した情報と作業の対応関係が得られ、例えばなぜ初心者はすぐゴーストに捕まるのか(取得した通路情報が不適切、取得した通路情報に対応する操作が不適切)、熟練するとゴーストの情報を常に取得できるようになるのか(実際にはすべてのゴーストの情報を取得してはいなかった)などが明らかになった。このような知見はプレイヤーの内観報告や作業観察からは得にくく、視線測定の効果を示された例といえる。

この解析手法では、分析者の主観が入り込む余地がある。客観性を保つためには、あらかじめ解釈方法を厳密に定めておき、複数人が独立に解釈して結果を照合する必要がある。パックマンの例では、データの一部についてダブルチェックをおこなっている。

なお、本手法のように認知プロセスを詳細に調べる手法としては、Cardらの提案した GOMS モデルに基づく分析手法が参考になる(Card, Moran, & Newell, 1983; Gray, John, & Atwood, 1993; John, Vera, & Newell, 1994)。彼らの手法に視線データは含まれないものの、ユーザの作業履歴からオペレータを推定し、ユーザモデルを構築する手法が詳細に述べられている。

4.2.4 パターン認識を用いた認知プロセスの自動解釈

認知プロセスの推定は作業を詳細に理解するためには重要であるが、解釈に時間を要し、また解釈の一貫性を保つことが難しいという問題がある。そこで、視線データを自動的に解釈する方法があれば、その有用性はきわめて高い。

SalvucciらはHMM(Hidden Markov Model)を利用して、視線の解釈を自動的におこなう手法を提案した(Salvucci & Anderson, 1998, 2001)。手法はかなり複雑だが、有効な分析方法であるため、以下にその概略を示す。

まず、人の作業を正規文法(regular grammar)による書き換え規則集合で記述する(この規則をプロセスモデルと呼ぶ)。そして、視線データとプロセスモデルとの自動照合をおこなうことで、どのプロセスモデルを実行したかを推定する。

視線の解釈にあたっては、以下の3種類の情報を入力データとして与える。

- プロセスモデル。正規文法で表現された作業規則。
- 対象領域集合。人の視線が位置したときに、人が視覚情報を取得することの可能な領域。例えば矩形領域の集合として与える。
- 視線データ p_i ($i = 1 \cdots n$)。視線測定装置によって得られたデータ。 p_i は $\langle x, y \rangle$ の座標形式で表現される。視線データとプロセスモデルとの照合をおこなう手法と

して、Salvucciは以下の3種類を提案した。

(1) 対象追跡法(target tracing method)。まず停留点を視線データおよび対象領域集合から求める。次に得られた停留点系列を用いて、プロセスモデルとの照合をおこない、どのプロセスモデルが選択されたかを推定する。停留点系列と完全に一致するプロセスモデルが存在しない場合には、停留点系列とプロセスモデルとの距離を算出し(例えば一致するまでの書き換え回数)、距離が最短のプロセスモデルを選択する。対象追跡法は比較的少ない視線データについて有効であるが、停留点系列とプロセスモデルが必ずしも一致しない場合が多く、照合時に停留点情報が欠落してしまうこともある。

(2) 停留追跡法(fixation tracing method)。停留点の定義は対象追跡法と同一である。次に停留点からプロセスモデルの各状態へのマッピングを定義するHMMを用意する。プロセスモデル全体は、各状態へのマッピングを表現するHMMを組み合わせることで表現される。得られたHMMに停留点を与えることで、どのプロセスモデルが選択されたかを確率的に算出する。ここで用いられるHMMは、停留点の座標 $\langle x, y \rangle$ の2変数から構成される。

(3) 視線追跡法(point tracing method)。停留追跡法は、停留点の定義とプロセスモデルへのマッピングが分離されていた。視線追跡法では、視線データをそのままHMMへの入力情報として用いることで、停留点の定義時に視線情報が失われることを防いでいる。ここで用いられるHMMは停留追跡法と異なり、視線の停留状態を推定するために視線の移動速度 v を加え、 $\langle x, y, v \rangle$ の3変数から構成される。視線追跡法は停留追跡法に比べて分析効率低下するものの、視線データを直接利用しているため、視線情報の欠落が少ないという利点がある。

これら3種類の手法はいずれも、あらかじめ仮定した複数のプロセスモデルについて、いずれが実行されたかを視線データから推定する。特に停留追跡法および視線追跡法は推定結果が確率的に得られるため、誤推定の危険性が少ないという利点がある。Salvucciらは本手法を方程式を解く作業および文書読解作業における高次認知処理の推定、視線キーボードを用いた単語入力システムなどに適用し、有効に機能することを確認している(Salvucci & Anderson, 2001)。

なお、本手法はあらかじめ視覚情報の取得順序をプロセスモデルとして記述する必要がある。そのため取得順序を仮説として記述できない場合には利用できないという限界がある。

4.2.5 どの手法を用いるべきか?

ここで取り上げた4種類の手法を、(1) 時間分解能、(2) 分析の所要時間、(3) 分析の客観性の3点から整理した結果を表1に示す。

時間分解能とは、分析の最小時間単位である。統計的分析ではある程度まとまったデータを分析対象とするのに対

表 1 視線分析法の比較

	統計的分析	時系列分析	認知プロセスの推定	認知プロセスの自動解釈
時間分解能	-	++	+	+
分析の所要時間	++	-	--	+
分析の客観性	++	+	-	++

し、他の 3 種類では得られたデータの最小時間単位がそのまま分析の時間単位となり、100msec 以下の分析が可能である。100msec 以下の単位で進行する高次認知処理の過程を分析するには、この程度の時間分解能が必要である。

分析の所要時間は、統計的分析がもっとも短く、次に認知プロセスの自動解釈が短い(ただし分析までの前準備に要する手間は大きい)。任意の作業に対して簡単に認知プロセスの自動解釈をおこなう手法の確立が望まれるところである。

客観性については、前述の通り認知プロセスの推定において分析者の主観が入る余地がある。他の手法では、いったん分析法を定めれば、以降は自動的に分析可能である。

認知処理の詳細を理解するためには統計的分析だけでは不十分であるが、他の 3 種類の方法を用いる場合は、効率的かつ客観的な分析をおこなうために、時系列分析の手法をもちいるか、作業に適した自動解釈法を検討すべきである。

5. 視線と高次認知処理

本節では、視線測定の具体例として、これまでに題材となってきた高次認知処理について紹介し、各題材における分析方法について述べる。

5.1 文書読解

文書を読むと言うのは極めて日常的な行為であり、どのようにおこなっているかを意識することは少ない。しかしながら実際にはかなり複雑な高次認知処理である。また、文書に文字、単語等の単位で領域を設定することが容易であり、視線データと取得した情報の対応付けをおこないやすいという特徴を持つ。これまで多くの視線研究者が文書理解過程における認知処理の解明に取り組んできた。たとえばこれまでに一回の停留で得られる情報の種類 (Bradshaw, 1975)、単語における視線の停留位置 (McConkie, Kerr, Reddix, & Zola, 1988)、停留位置と停留時間の関係 (O'Regana & Lévy-Schoen, 1984; Vitu, McConkie, Kerr, & O'Regan, 2001) などが調べられている。文献 (Bradshaw, 1975; 苧阪他, 1993; Ygge & Lennerstrand, 1994; Underwood, 1998) に、主な研究がまとめられている。

視線測定研究で得られた知見に基づき構築した文書読解モデルも提案されている。代表的なものに Reichle らの E-Z Reader model がある (Reichle, Pollatsek, Fisher, & Rayner, 1998)。E-Z Reader model は状態遷移モデルの一種であり、精緻度の異なる 5 種類のモデルから構成される。もっともシンプルなモデル (E-Z Readers 1, 2) は単語上に視線が位置する合計時間および視線の停留確率を予測

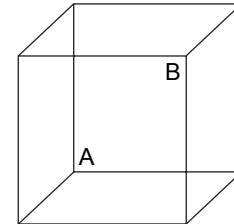


図 6 ネッカーキューブの例

する。より詳細なモデル (E-Z Readers 3-5) は、各単語における停留時間および停留点の個数も予測している。

5.2 絵画、風景の理解

絵画や風景を見るという行為も日常的である。しかしながら絵画や風景は文書読解と異なり、一意に領域を設定することが困難である場合が多く、視線データと取得した情報の対応付けが難しい。絵画を見る場面における視線の分析方法は、

- 視線から傾向を推測する。
- あらかじめ絵に領域を設定する。

の 2 種類に大別される。

視線から傾向を推測する先駆的な例として、Noton らの研究 (Noton & Stark, 1971) が挙げられる。Noton らは絵を見る人の視線には特定のパターンが現われることを視線測定実験によって見出し、このパターンをスキャンパスと呼んだ。彼らは線画を題材として、記憶段階と再認段階の 2 段階から構成された再認課題に関する実験をおこなった。その結果、記憶段階では一定の視線パターンが繰り返し現われることがあること、再認段階では最初の数回の視線移動において記憶段階と同一の視線パターンが発生することがあることを見出した。現在では、スキャンパスは特徴的な視線パターンという意味で広く使われる。

あらかじめ絵に領域を設定する手法の例として、Henderson らの周辺視とサッケードに関する研究があげられる (Henderson, Weekers Jr., & Hollingworth, 1999)。Henderson らは、絵画を見るとき視線移動に周辺視で得られる情報が大きく影響すると考え、周辺視で得られる情報の種類を調べた。具体的には絵画に配置された物体の再認課題および探索課題をおこない、絵が提示された直後に取得する情報の種類を、その後のサッケードで視線が停留する物体から推定した。実験結果から、絵が提示された直後のサッケードは、意味的情報よりは視覚的情報の影響を受けるといふ知見が得られている。

風景画ではなく、より抽象的な図形を利用した研究もおこなわれている。例えば Ellis らは、ネッカーキューブを題材とした研究をおこなっている (Ellis & Stark, 1978)。ネッカーキューブ (図 6) は注視し続けると像の凹凸が反転して見えることが知られており、認知処理の解明が研究課題となる。Ellis らは視線の分析結果から、像の反転を知覚したときの停留時間は他の停留時間より長くなる傾向にあり、その時の停留点は長い対角軸 (図 6 の AB) 付近に位置し、注視点付近の頂点は内側から外側に反転する傾向があるという知見を得た。実験結果に基づき、Ellis らは像の反転時にキューブの 3 次元反転像を新たに構築するために停留時間が長くなると推定している。この実験において、被験者が像の反転を知覚した瞬間の視線を得ることは難しい。そこで Ellis らは被験者が像の反転をスイッチの押下によって報告した時刻から逆算し、反転時の視線を決定するという手法を用いている。

視線測定によって人の絵画理解プロセスを調べるだけでなく、人が注目するであろう領域を自動的に推定する研究もおこなわれている (Privitera & Stark, 2000)。注目領域の検出は、画像圧縮、画像検索など様々な分野において重要な技術であり、様々な研究がおこなわれているが、Privitera らの研究は、人の視線との比較をおこなっている点で興味深い。

5.3 ゲーム

コンピュータゲームは人の高次認知処理を探る格好の題材であるが、具体的にどのような認知処理がおこなわれているのかを推定することは難しい。そこで視線測定に基づく認知処理の推定がおこなわれている。

5.3.1 思考ゲーム

まず高次認知処理の題材として挙げられるのは、将棋や囲碁に代表される思考ゲームである。これらのゲームではコンピュータで強いプログラムを作ることが難しいことから、人のおこなっている柔軟な処理の仕組みを調べて、得られた知見をプログラミングに活用しようという研究がおこなわれてきた (斉藤, 1995)。

視線測定がおこなわれた研究としては、詰め碁 (Yoshikawa, Kojima, & Shingaki, 1999) や将棋 (Ito, Matsubara, & Grimbergen, 2001) を題材としたものがある。いずれも熟達者と中級者の視線データを比較することで、視線パターンと指し手の能力の関係を調べている。

このような課題では、プレイヤーは画面上の様々な箇所を見るため、ゲーム中の視線を測定しただけでは有益な知見を得ることが難しい。そこで Yoshikawa らは、詰め碁の課題において時間圧をかけた状態での実験をおこない、問題を提示してから被験者が解答を選択するまでの時間を 4 秒以内とした (Yoshikawa et al., 1999)。また、Ito らの実験では、連続した 2 手および 10 手を記憶、再生する課題を用いた。このように課題を限定することで、熟練度の違いが

視線パターンに現れ、作業の違いを理解しやすくなる場合がある。

5.3.2 リアルタイムゲーム

リアルタイムゲームでは、ターゲットの位置が常に変化するため、短時間で必要な情報を選択的に取得することが重要となる。思考ゲームとは異なった側面の高次認知処理である。

リアルタイムゲームに関する認知研究の代表例として、スーパーマリオブラザーズ (John et al., 1994) やテトリス (Kirsh & Maglio, 1994) を題材とした研究が挙げられる。これらの研究は、情報取得からコントローラの操作に至る一連の認知処理に着目しているが、視線測定をおこなっていないため、どのように情報取得がおこなわれているかが明らかではない。処理の詳細を知るためには、作業履歴の記録に加えて視線測定が必要となる。

Ogasawara および Ohno はパックマンを題材として、初心者が熟達者に至る過程の観察をおこなった (Ogasawara & Ohno, 1999; Ohno & Ogasawara, 1999)。パックマンで高得点を得るためには、リアルタイムにゴーストおよびエサの位置を把握して、パックマンの経路を決定することが重要となる。しかしながら時間制約があるため、常にすべてのゴーストの位置を取得しながらプレイすることはできず、どの箇所の情報を取得すべきかを適切に決定する必要がある。我々はプレイヤーの視線を測定することで、習熟するにつれて情報取得戦略がどのように変化するかを調べた。データの分析は、統計的分析と認知プロセスの推定の 2 種類についておこなった。統計的分析ではセッション (数回分のプレイデータをまとめたもの) 別に、得点、パックマンとゴーストの距離関係などを求め (Ogasawara & Ohno, 1999)、作業の熟達に伴う戦略の変化を理解するのに有効であった。

一方、認知プロセスの推定では、4.2.3 節に述べたとおり、視線、プレイヤーの行動、パックマンおよびゴーストの位置データに基づき、プレイヤーの行動を時系列として記載した。さらに GOMS モデル (Card et al., 1983) に準拠したオペレータの割り当てをおこない、最終的に知覚/運動/認知オペレータの 3 種類からなるオペレータ系列を得た。このとき、知覚オペレータは被験者の視線から、運動オペレータは被験者のキーボード履歴から決定し、それらのオペレータから認知オペレータを決定した (Ohno & Ogasawara, 1999)。その結果、作業に習熟すると、パックマンの制御に必要な情報を効率よく取得する戦略を取るようになることが明らかになった。

5.4 日常生活におけるインタラクション

我々は日常生活において様々な場面で外界とのインタラクションをおこなっている。しかしながら、研究対象になっている場面は決して多くない。主な題材は自動車の運転中および歩行中の視線である。

自動車の運転時には、ハンドル等を操作しながらリアルタ

イムに適切な情報を取得する必要がある。そこで、運転技能と取得情報の関係 (Chapman & Underwood, 1998; Crundall, Underwood, & Chapman, 1998) や、ハンドルを切つてカーブを曲がる時に着目する位置 (Land & Lee, 1994) などが視線から調べられてきた。実験環境は、(1) ドライビング場面を見せる場面、(2) ドライビングシミュレータを利用する場面、(3) 被験者が実際に車を運転する場面の 3 種類が用いられている。実際に自動車を運転する場合は視線測定が難しく、また実験環境の統制が困難であるため、多くの研究は (1) および (2) を用いている。しかしながら、実験環境が実際の運転と大きく異なると、得られるデータも異なる可能性があるという問題を持つ。

歩行場面では自動車の運転と異なり、リアルタイムで情報を取得する必要性は少ない。一方、簡単に頭部や身体の方角を変えることが可能であり、情報取得における自由度は自動車の運転より高い。そこで歩行中の視線を測定する試みもおこなわれている。岡崎らは、人が環境から獲得した情報を利用して歩行する人の視線を観察することで、環境と歩行動作の関係を解明することを目指している。歩行をおこなう環境として地下鉄の駅 (鈴木・岡崎・徳永, 2001)、仮想空間中の駅 (鈴木・岡崎, 2002)、巨大迷路 (鈴木・須貝・岡崎, 2002) 等を取り上げ、環境の違いが注目対象や注視時間にどのように影響するかを調べている。

日常生活におけるインタラクションを題材としたユニークな研究例として、Land らの一連の研究がある。Land らは運動と視線の関係に関する研究をの題材として、紅茶を入れる場面 (Land, Mennie, & Rusted, 1999; Land & Hayhoe, 2001)、クリケットで球をバットで打つ場面 (Land & McLeod, 2000) などを取り上げ、視線測定をおこなっている。日常生活における何気ない動作の多くは、複雑な情報取得と認知処理の組み合わせから成り立っており、まさに研究課題はどこにでも存在すると言える。

5.5 社会的インタラクション

これまで取り上げてきた研究例は、人が何らかの作業において知覚情報を取得する過程を、視線測定によって調べたものである。視線にはこれ以外の役割も存在する。

Kendon は視線の機能を以下の 3 種類に分類した (Kendon, 1967)。

- 対象の知覚情報を取得する「監視機能」(monitoring function)。
- 意図や感情を相手に伝達する「表現機能」(expressive function)。
- 会話における発言権の授受を調整する「調整機能」(regulatory function)。

これまでに紹介した、視線による外界からの情報取得は、ここでの監視機能に相当する。

残る表現機能および調整機能は、人と人とがコミュニケーションをおこなう社会的インタラクションにおいて重要な役割を果たす。そこで、コミュニケーションにおける視線の

役割を調べる研究が数多くおこなわれてきた。ただし大半の研究は、観察者がコミュニケーション場面を観察して主観的に視線方向 (例えば視線の一致/不一致) を決定したものであり (Kendon, 1967)、視線測定装置による測定はおこなわれていない。その理由として、視線測定装置は頭部装着型のもが多く、装着すると自然なコミュニケーションが阻害されることが考えられる。しかしながら、近年、社会的インタラクションに関する研究が盛んであり、非接触型の測定装置も多く登場していることから、今後はこの分野でも視線測定が利用されていくものと思われる。

人は相手が人の場合だけでなく、擬人化エージェント等の人工物に対しても同様のふるまいをすることが知られている (Reeves & Nass, 1996)。視線についてもこれは成立する。深山らは、人と擬人化エージェントとの間で社会的インタラクションを成立させることを目指した研究を進めており、その一環として擬似的な対話場面における視線測定をおこなっている (深山・澤木・村瀬・萩田, 2000)。彼らは擬人化エージェントから受ける「信頼できる」「有能そうだ」「頼りない」などの印象を、擬人化エージェントの視線パターンによって制御可能であることを示した。この研究では、まず様々な視線パターンを人が演じ、その間の視線測定によって得られた視線データから擬人化エージェントが演じる視線パターンを生成した。また、過去の視線研究に基づく視線パターン生成モデルを提案し、視線生成のパラメータとユーザが受ける印象との対応関係を評価実験によって求めた (Fukayama, Ohno, Mukawa, Sawaki, & Hagita, 2002)。

擬人化エージェント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 (知野・福井・山口・鈴木・田中, 1998) 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角を注視した時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、必要なときのみ動作するエージェントを実現している。

深山らの研究は視線の表現機能を、知野らの研究は視線の調整機能を人工物とのインタラクションに拡張したものである。これらの分野は、人の認知処理の解明と、工学的応用の両側面が相補的に進歩していくことで、今後発展していくであろう。

5.6 HCI への応用

最後に、視線を利用した高次認知研究の応用として、視線を利用した Human-Computer Interaction (HCI) に関する研究を取り上げる。

視線測定技術の発展に伴い、1980 年代後半から視線を利用した HCI に利用する研究も盛んになってきた (Hutchinson, White Jr., Martin, Reichert, & Frey, 1989; Jacob, 1990)。HCI は、人がコンピュータに対して明示的にコマンドを与える「コマンド型」インタフェースと、コンピュー

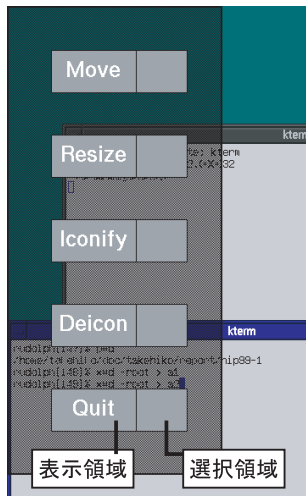


図 7 選択領域が分離されたメニュー

タが人を観察して意図を推定する「非コマンド型」インタフェースに分類できる (Nielsen, 1993) . 視線を利用したインタフェースも、この 2 種類に整理することができる .

5.6.1 コマンド型

人が視線を利用して明示的にコマンドを選択する形態のインタフェース . 視線で選択するメニューやアイコン、視線で入力するキーボードなどがその代表例である . 主なコマンド型インタフェースは文献 (Majaranta & Riih , 2002) にまとめられているので興味のある方は参照されたい .

メニューやアイコンを視線で操作することは、一見すると視線の効果的な利用法に思える . しかしながら視線に視覚情報の取得と選択の 2 種類の働きを持たせることになるため、どのようにして両者を区別するかが難しい問題となる . 例えば見るだけで選択されるメニューの場合、メニューに書いてある文字列を読むだけで選択されてしまうことになる . この問題は、触れたものが片端から金に変わってしまったギリシャ神話の Midas 王になぞらえて、”Midas Touch Problem” と呼ばれている . ”Midas Touch Problem” を回避する方法として、一定時間以上領域を見たときに初めて選択される手法 (Jacob, 1990; Jacob, Leggett, Myers, & Pausch, 1993; Hansen, Anderson, & Roed, 1995) , 選択に瞬きを利用する手法 (Shaw, Crisman, Loomsi, & Laszewski, 1990) , マウスやボタンなど他のデバイスを併用する手法 (Zhai, Morimoto, & Ihde, 1999; 北島・佐藤・小池, 2001) などがある .

メニューの横に選択領域を設置して (図 7) , 人がその領域を見たときのみ選択がおこなわれる手法も提案されている (大野, 1999) . この手法はメニューを見続ける必要がないため、高速な選択が可能となる . また、Salvucci は視線キーボードにおいて、4.2.4 節で述べた HMM による自動認識の手法を用い、視線パターンから入力した単語を推定する方法を提案している (Salvucci, 1999) . これらの手法は、サックードの高速性をインタフェースに活用した例である .

実際にどの入力手法が優れているかは、利用される場面、

利用頻度などによって異なってくるが、いずれも長所と欠点を持ち、決め手となる手法は存在していない .

5.6.2 非コマンド型

人がコマンドを選択するのではなく、コンピュータが視線から人の状態を推定して支援をおこなう形態のインタフェースである .

視線から比較的推定が容易な情報は、人の興味や関心である . Starker 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 (Starker & Bolt, 1990) . そして注目しているオブジェクトに対応するナレーションが流れるシステムを試作した .

大野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 (大野, 2000) . 記録した履歴は文書上の該当領域に文字の背景色として淡く表示されるため、過去に自分が注目していた領域を知ることが可能である .

これらのインタフェースは、視線から人の高次認知処理を推定して利用していると言えるレベルには到達していない . しかしながら、視線に基づき高次認知処理をリアルタイムで解明する研究が進めば、HCI への応用範囲も飛躍的に高まるであろう . 今後の発展が期待される .

6. 終りに

本解説では、視線測定に関する様々なトピックスを取り上げた . 視線測定装置が着実に進化して、データは簡単に得られるようになってきたのに対し、視線の分析、解釈はまだ多くを人手に頼っている . 効率的な分析方法に関する研究の重要性は高い . 今後、視線測定装置の普及に伴って分析方法も発展し、視線測定の対象分野がさらに拡大していくことを願っている .

謝辞

本解説をまとめるにあたり、閲読者である東京工業大学の中山実氏および東北大学の行場次朗氏より丁寧なコメントをいただきました . 多忙中、貴重なコメントをいただきましたお二人に深謝します . また、いつも研究に関する議論をしていただき、本解説にもコメントをいただいた、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環境理解研究グループの皆様へ感謝します .

文献

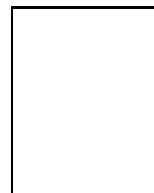
- Bradshaw, J. L. (1975). Three Interrelated Problems in Reading: A Review. *Memory & Cognition*, **3** (2), 123-134.
- Card, S. K., Moran, T. P., & Newell, A. (1983). *The Psychology of Human-Computer Interaction*. Lawrence Erlbaum Associates.

- Chapman, P. R. & Underwood, G. (1998). Visual Search of Dynamic Scenes: Event Types and the Role of Experience in Viewing Driving Situations. In G. Underwood (Ed.), *Eye Guidance in Reading and Scene Perception*, chap. 17, 369-393. Elsevier.
- Crundall, D. E., Underwood, G., & Chapman, P. R. (1998). How Much Do Novice Drivers See? The Effects of Demand on Visual Search Strategies in Novice and Experienced Drivers. In G. Underwood (Ed.), *Eye Guidance in Reading and Scene Perception*, chap. 18, 395-417. Elsevier.
- Ellis, S. R. & Stark, L. (1978). Eye Movements during the Viewing of Necker Cubes. *Perception*, **7**, 575-581.
- Ericsson, A. & Simon, H. A. (1984). *Protocol Analysis - Verbal Reports and Data*. MIT Press.
- 深山 篤・澤木 美奈子・村瀬 洋・萩田 紀博 (2000). 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』, 100 巻, 9-14.
- Fukayama, A., Ohno, T., Mukawa, N., Sawaki, A., & Hagita, N. (2002). Messages Embedded in Gaze of Interface Agents - Impression management with agent's gaze. *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI2002)*, 41-49.
- Gray, W. D., John, B. E., & Atwood, M. E. (1993). Project Ernestine: Validating a GOMS Analysis for Predicting and Explaining Real-World Tasks Performance. *Human-Computer Interaction*, **8**, 237-309.
- Hansen, J. P., Anderson, A. W., & Roed, P. (1995). Eye-Gaze Control of Multimedia Systems. In Y. Anzai, K. Ogawa, & H. Mori (Eds.), *Symbiosis of Human and Artifact*, Vol. 20A, 37-42. Elsevier Science.
- Henderson, J. M., Weekers Jr., P. A., & Hollingworth, A. (1999). The Effects of Semantic Consistency on Eye Movements During Complex Scene Viewing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **25** (1), 210-228.
- Hutchinson, T. E., White Jr., K. P., Martin, W. N., Reichert, K. C., & Frey, L. A. (1989). Human-Computer Interaction Using Eye-Gaze Input. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **19** (6).
- Ito, T., Matsubara, H., & Grimbergen, R. (2001). The Use of Memory and Causal Chunking in the Game of Shogi. *the 3rd International Conference on Cognitive Science (ICCS2001)*, 134-140.
- Jacob, R. J. K., Leggett, J. J., Myers, B. A., & Pausch, R. (1993). Interaction Styles and Input/output Devices. *Behaviour and Information Technology*, **12**, 69-79.
- Jacob, R. J. K. (1990). What You Look At Is What You Get: Eye Movement-Based Interaction Techniques. *Conference Proceedings on Human Factors in Computing Systems (CHI '90)*, 11-18. ACM Press.
- John, B. E., Vera, A. H., & Newell, A. (1994). Towards real-time GOMS: a model of expert behaviour in a highly interactive task. *Behaviour and Information Technology*, **13**, 255-267.
- 海保 博之・原田 悦子 (編) (1993). 『プロトコル分析入門 - 発話データから何を讀むか』. 新曜社.
- Kendon, A. (1967). Some Functions of Gaze-Direction in Social Interaction. *Acta Psychologica*, **26**, 22-63.
- Kirsh, D. & Maglio, P. (1994). On Distinguishing Epistemic from Pragmatic Action. *Cognitive Science*, **18**, 513-594.
- 北島 光太郎・佐藤 洋一・小池 英樹 (2001). ウイ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』, 195-204.
- 古賀 一男 (1998). 『眼球運動実験 ミニ・ハンドブック』. 労働科学研究所出版部.
- 小松崎 篤・篠田 義一・丸尾 敏夫 (1985). 『眼球運動の神経学』. 医学書院.
- Land, M. & Lee, D. (1994). Where we look when we steer. *Nature*, **369**, 742-744.
- Land, M. & McLeod, P. (2000). From eye movements to actions: how batsmen hit the ball. *Nature Neuroscience*, **3** (1340-1345).
- Land, M., Mennie, N., & Rusted, J. (1999). The roles of vision and eye movements in the control of activities of daily living. *Perception*, **28**, 1311-1328.
- Land, M. F. & Hayhoeb, M. (2001). In what ways do eye movements contribute to everyday activities?. *Vision Research*, **41** (25-26), 3559-3565.
- Majaranta, P. & Rähä, K. (2002). Twenty Years of Eye Typing: Systems and Design Issues. *Proceedings of Eye Tracking Research & Application (ETRA2002)*, 15-22.
- McConkie, G. W., Kerr, P. W., Reddix, M. D., & Zola, D. (1988). Eye Movement Control During Reading: I. The Location of Initial Eye Fixations on Words. *Vision Research*, **28** (10), 1107-1118.
- Newell, A. (1990). *Unified Theory of Cognition*. Harvard University Press.
- Nielsen, J. (1993). Noncommand User Interfaces. *Communications of the ACM*, **36** (4), 83-99.
- Noton, D. & Stark, L. (1971). Scanpaths in Eye Movements during Pattern Perception. *Science*, **171**, 308-311.
- Ogasawara, H. & Ohno, T. (1999). Expertise Process of Human Video-Game Players. *The 2nd International Conference on Cognitive Science and The 16th Annual Meeting of the Japanese Cognitive Science Society Joint Conference (ICCS/JCSS'99)*, 388-393.
- 大野 健彦 (1999). 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』, **40** (2), 602-612.
- 大野 健彦 (2000). IMPACT: 視線情報の再利用に基づくブラウザ支援法. 暦本純一 (編), 『インタラクティブシステムとソフトウェア WISS 2000』, 137-146. 近代科学社.
- 大野 健彦・武川 直樹・吉川 厚 (2001). 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』, 47-54.
- Ohno, T., Mukawa, N., & Yoshikawa, A. (2002). FreeGaze: A Gaze Tracking System for Everyday Gaze Interaction. *Proceedings of Eye Tracking Research & Application (ETRA2002)*, 125-132.
- Ohno, T. & Ogasawara, H. (1999). Information Acquisition Model of Highly Interactive Tasks. *The 2nd*

- International Conference on Cognitive Science and The 16th Annual Meeting of the Japanese Cognitive Science Society Joint Conference (ICCS/JCSS'99).*
- O'Regana, J. K. & Lévy-Schoen, A. (1984). Convenient Fixation Location Within Isolated Words of Different Length and Structure. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **10** (2), 250-257.
- 芦阪良二・中溝幸夫・古賀一男 (編) (1993). 『眼球運動の実験心理学』. 名古屋大学出版会.
- Privitera, C. M. & Stark, L. W. (2000). Algorithms for Defining Visual Regions-of-Interest: Comparison with Eye Fixations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **22** (9), 970-982.
- Reeves, B. & Nass, C. (1996). *The Media Equation: How People Treat Computers, Television, and New Media Like Real People and Places*. Cambridge University Press.
- Reichle, E. D., Pollatsek, A., Fisher, D. L., & Rayner, K. (1998). Toward a Model of Eye Movement Control in Reading. *Psychological Review*, **105** (1), 123-157.
- Russo, J. E. & Rosen, L. D. (1975). An Eye Fixation Analysis of Multialternative Choice. *Memory & Cognition*, **3** (3), 267-276.
- 齋田真也 (2000). 『視覚情報処理ハンドブック』, 9.1 章. 朝倉書店.
- Salvucci, D. D. (1999). Inferring Intent in Eye-Based Interfaces: Tracing Eye Movements with Process Models. *Proceedings of the CHI 99 Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM Press.
- Salvucci, D. D. & Anderson, J. R. (1998). Tracing Eye Movement Protocols with Cognitive Process Models. *Proceedings of the Twentieth Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, 923-928. Erlbaum.
- Salvucci, D. D. & Anderson, J. R. (2001). Automated Eye-Movement Protocol Analysis. *Human-Computer Interaction*, **16**, 39-86.
- Salvucci, D. D. & Goldberg, J. H. (2000). Identifying Fixations and Saccades in Eye-Tracking Protocols. *Proceedings of Eye Tracking Research & Applications Symposium*, 71-78. ACM Press.
- Shaw, R., Crisman, E., Loomis, A., & Laszewski, Z. (1990). The Eye Wink Control Interface: Using the Computer to Provide the Severely Disabled with Increased Flexibility and Comfort. *Third Annual IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems*, 105-111.
- Shih, S.-W., Wu, Y.-T., & Liu, J. (2000). A Calibration-Free Gaze Tracking Technique. *Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition*.
- Starker, I. & Bolt, R. A. (1990). A Gaze-Responsive Self-Disclosing Display. *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'90)*, 3-9. ACM Press.
- 鈴木利友・須貝成芳・岡崎甚幸 (2002). 迷路空間における移動方法と注視行動の関係に関する研究-能動的探索歩行と車椅子による受動的移動の比較を通して-. 『信学技報 HIP-2002』, **102** (44), 13-18.
- 鈴木利友・岡崎甚幸・徳永貴士 (2001). 地下鉄駅舎における探索歩行時の注視に関する研究. 『日本建築学会計画系論文集』, **543**, 163-170.
- 鈴木利友・岡崎甚幸 (2002). 地下鉄駅舎とその仮想現実空間における探索歩行時の注視と歩行行動の比較. 『日本建築学会計画系論文集』, **555**, 199-205.
- 田邊喜一・杉山誠 (1998). 視線位置と自発的瞬目に基づく注目対象の推測に関する研究. 『映像情報メディア学会誌』, **51** (10), 1761-1767.
- 知野哲郎・福井和広・山口修・鈴木薫・田中克己 (1998). 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』, 169-176.
- Underwood, G. (Ed.) (1998). *Eye Guidance in Reading and Scene Perception*. Elsevier.
- 魚里博 (2000). ヒトの目に特有な光学. *O plus E*, **22** (4), 418-430.
- Velichkovsky, B. M., Dornhoefer, S. M., Pannasch, S., & Unema, P. J. (2000). Visual Fixations and Level of Attentional Processing. *Proceedings of Eye Tracking Research & Application (ETRA2000)*, 79-85.
- Vitu, F., McConkie, G. W., Kerr, P., & O'Regan, J. K. (2001). Fixation Location Effects on Fixation Durations During Reading: An Inverted Optimal Viewing Position Effect. *Vision Research*, **41**, 3513-3533.
- Ygge, J. & Lennerstrand, G. (Eds.) (1994). *Eye Movements in Reading*. Elsevier.
- 淀川英司・東倉洋一・中根一成 (1998). 『視聴覚の認知科学』. 電子情報通信学会.
- Yoshikawa, A., Kojima, T., & Shingaki, N. (1999). Temporal Perception in Go. *Proceedings of International Conference on Cognitive Science (ICSS'99)*, 294-297.
- 吉川厚・大野健彦 (1999). 視線を読む -ユーザにやさしい視線測定環境-. *NTT R & D*, **48** (4), 399-408.
- Zhai, S., Morimoto, C., & Ihde, S. (1999). Manual and Gaze Input Cascaded (MAGIC) Pointing. *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'99)*, 246-253. ACM Press.
- 齊藤康己 (1995). コンピュータ囲碁研究. 『人工知能学会誌』, **10** (6), 28-38.

(19xx 年 xx 月 xx 日受付)

(19xx 年 xx 月 xx 日採録)



大野 健彦 (正会員)

昭和 44 年生 . 平成 6 年東京工業大学大学院理工学研究科情報科学専攻修士課程修了 . 同年日本電信電話 (株) 入社 . 現在 NTT コミュニケーション科学基礎研究所研究主任 . 視線インタフェース, 視線測定法, 視線に基づく認知モデルの構築, コミュニケーションの解明などの研究に従事 . ACM, 情報処理学会各会員 .