

眼球運動に関する最近の研究動向 視覚情報処理機構の解明から痴呆症鑑別まで

魚森 謙也

松下電器産業 (株) 中央研究所 電子機器基礎研究所
〒570 大阪府守口市八雲中町3-1-1

1. はじめに

眼球運動の制御には、被写体の空間位置や速度に関する視覚系情報と、前庭迷路からの頭部運動情報が重要な役割を果たし¹⁾、脳内の様々な処理機構が絡んでいる。このことは、眼球運動により視覚刺激の物理的の性質に対応した反応を客観的に測定したり、視覚刺激に対する被験者の主観的な反応を測定できることを示すものである。このことを利用して、例えば、現行テレビジョン方式と比較して、ハイビジョン方式で提示された画像観賞時の眼球運動は細かな視線の動きと画面全体を走査する大きな視線の動きに反映されることが示されており²⁾、これはハイビジョン画像の高解像度と大画面の物理的効果が眼球運動に反映された結果であると考えられる。また、輻輳開散運動は、奥行き方向の注視点移動により生じ、立体視と非常に関連の深い眼球運動であり、両眼視差・網膜像のほけ

を主な手がかりとして発生するが、被験者の奥行き知覚も反映して発生するものとも考えることができる³⁾。この様に眼球運動は、脳内の視覚信号処理過程をとらえるプローブとして利用可能である。ここでは、眼球運動測定を用いた(株)ATR視聴覚機構研究所の研究について紹介する。

2. 立体画像に対する両眼眼球運動の測定

輻輳開散運動は、奥行き方向の視点移動時に発生し、立体視と非常に関係の深い眼球運動である。輻輳眼球運動を測定することにより、立体視成立過程について客観的に分析することが可能と考えられる。この様な観点から、被験者が2眼式時分割立体画像の両眼融合状態において、片方の視標のみ運動させ両眼眼球運動を測定する実験を行った³⁾。図1は実験装置である。パーソナルコンピュータに装着されたフ

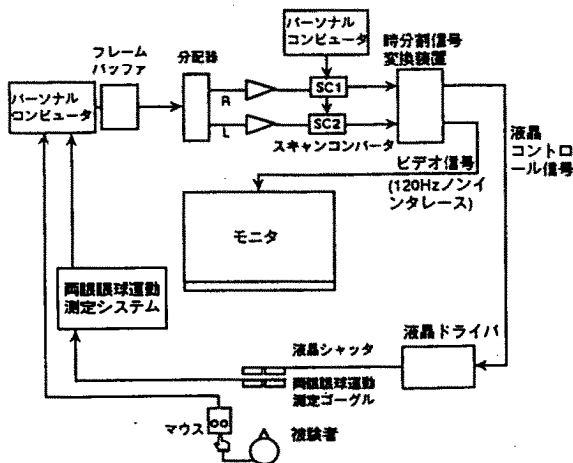


図1 時分割立体画像提示装置と両眼眼球運動測定装置³⁾

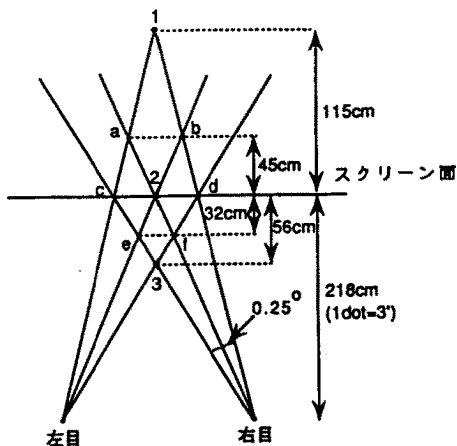


図2 刺激の提示装置³⁾

レームメモリにより刺激を生成し、これをスキャンコンバータを用いて120Hzノン・インタレース画像に変換、更に時分割立体画像信号に変換してモニタに提示する。被験者は時分割立体画像観賞用液晶シャット付き両眼眼球運動測定ゴーグルを装着し、観察する。眼球運動測定結果は実時間で同じパーソナルコンピュータに入力され、これにより刺激制御と眼球運動測定の同期をとる。刺激には白色垂直線を用い、被験者が両眼融合後、融合範囲内で片方の刺激

をランダムに移動させる。刺激の仮想提示位置を図2に、スクリーン手前に刺激が存在する場合の実験結果を図3に、スクリーン後方に存在する場合を図4に示す。輻輳開散運動の発生には個人差が見られたが、刺激移動後約2秒で刺激の運動による眼球運動は終了し、後は共同運動が表れた。図3のスクリーン手前の条件では運動する刺激を観察する眼球が先に反応し、その後もう一方の眼球が反対方向に反応し非対称な輻輳開散運動により輻輳角が変化した。図4のスクリーン後方の条件では、もう一方の眼球は同方向に反応し、非対称な共同運動となり、輻輳角の変化も小さい。被験者4人の結果から、図3のスクリーン手前の条件の方が輻輳開散運動の生起確率が高く、被験者の内観から、この場合には奥行き方向への運動知覚があった。この様に、輻輳開散運動生起と奥行き運動知覚には関係があり、眼球運動測定はステレオプシスの客観的測定法として利用可能である。

3. 頭部・眼球協調運動による視線制御

視線は主に頭部運動と眼球運動により制御さ

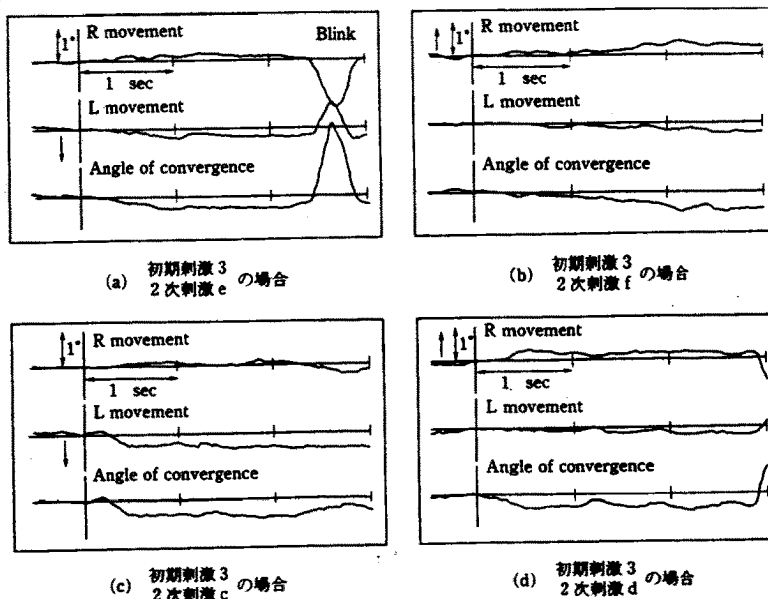


図3 両眼眼球運動の測定結果³⁾。スクリーン手前に刺激提示、矢印は移動した方の視標を示す。

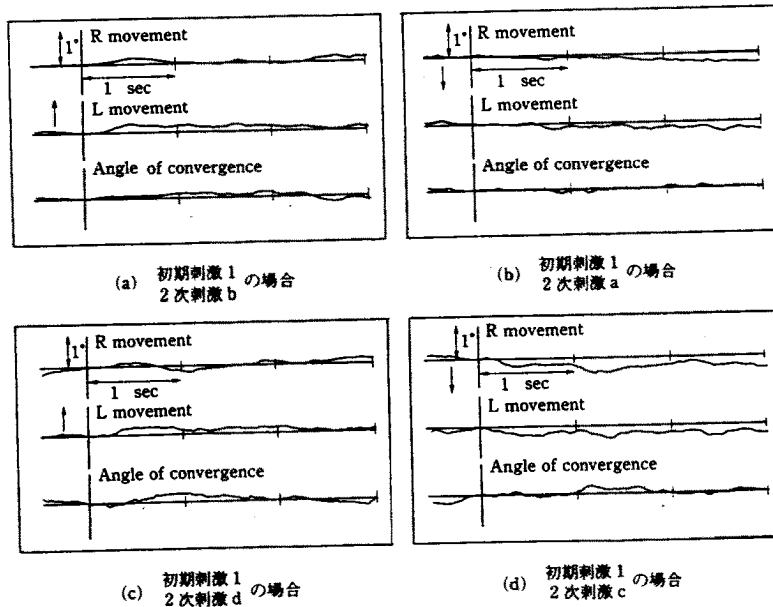


図4 両眼眼球運動の測定結果³⁾。スクリーン奥に刺激提示、矢印は移動した方の視標を示す。

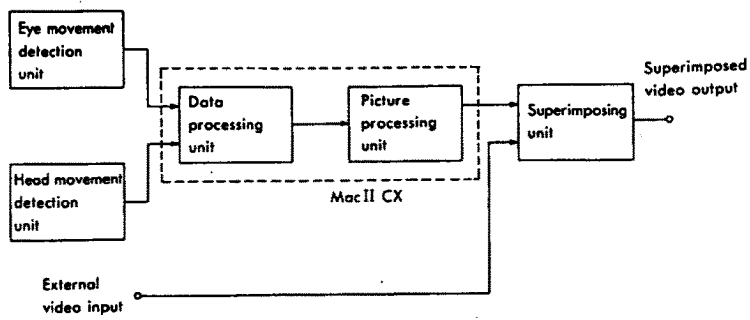


図5 頭部・眼球運動測定装置の構成⁴⁾

れる。人間は、注意を引く被写体に対しては、体を正面に向けて正視する傾向があり、このことは視線の制御に頭部運動も大きく関与することを示している。このことは、網膜座標系と身体座標系を統合して注目する被写体の位置を計算しなければならないことを意味する。図5は頭部運動と眼球運動を同時に測定できるシステムの構成図である⁴⁾。眼球運動は強膜反射法、頭部運動は磁気センサを用いて検出する。平進運動、回転運動等の6自由度の頭部運動を測定し、これを眼球運動座標系に変換し頭部・眼球運動を統合した総合的な視線方向をリアルタイムで測定できる。図6は水平方向に50°離れた視標に視線を移動させた時の測定例である⁵⁾。

まず最初に眼球が速く立ち上がり、頭部は比較的ゆっくりと動く。その後眼球は、頭部運動に対応した前庭動眼反射（頭部運動の補償動作）の動きに移り、頭部・眼球共停止している期間はないが、総合的な視線は約50°の移動で注視

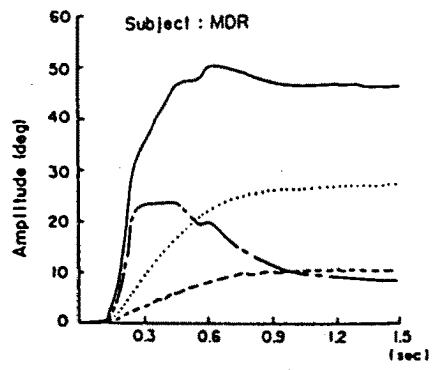


図6 頭部・眼球運動測定例⁵⁾

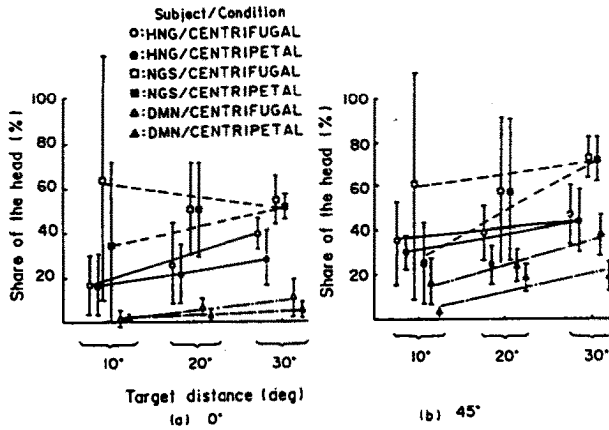


図7 分担比の測定例⁴⁾

点が生じている。ここで視線の動きに占める頭部運動の比率を分担比と定義する。これは視線移動における頭部運動と眼球運動の役割分担を評価するパラメータとなる。図7に水平右方向(0°), 斜め右方向(45°)に視標を提示した時の分担比の測定例を示す⁴⁾。分担比の傾向は個人毎に固有の傾向があることが知られているが、図7でもその傾向が伺える。また、視標までの角度が10°と比較して30°では、分担比の標準偏差が小さくなる傾向があるが、これは視線移動量が大きい時には分担比が一定に収束する傾向があることを示している。頭部運動と眼球運動はほぼ同時に立ち上がっていることから、大きな視線移動時には頭部運動と眼球運動は予めプログラムされていることが推測される。

4. 注視点マスキング法による視覚探索能力の研究

視覚情報の獲得は注視している間に行われ、サッカード中は抑制されることが知られてい

る。従って、人間の視覚探索行動は注視期間に視覚情報の獲得、処理、次に視線を向けるべき位置のプログラムを全て行い、その上で眼球を動かし、再び新しい注視点で新たな視覚情報を獲得するという過程の繰り返しであると考えられる。そこで、注視した時に視覚情報の提示時間や範囲を制限し、その時の眼球運動を分析することにより、注視点での視覚情報の獲得に必要な時間と1つの注視点で取り込むことのできる情報量や範囲等の関係を客観的に評価することができると考え、注視点近辺の刺激画像をマスキングし提示時間や範囲を制御できる注視時間制御提示装置を開発し、これを用いて図形探索実験を行った。実験システムを図8に示す⁶⁾。このシステムは、頭部運動・眼球運動を測定し、総合的な視線を検出する。そして求められた視線データから、リアルタイムで注視位置上にマスキング画像を挿入したり視野を制限することができる。この時、マスク画像の大きさや提示時間、マスク開始時間等を設定可能であ

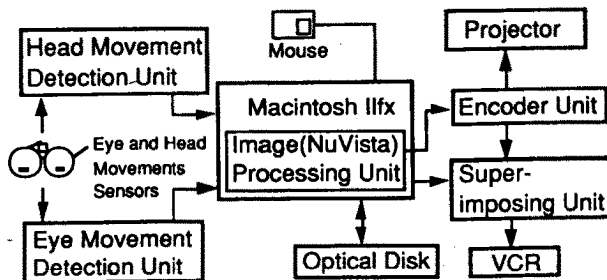


図8 注視点マスキング実験装置⁶⁾

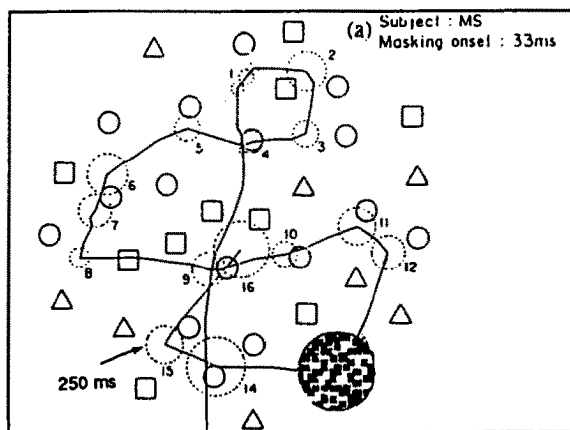


図9 視覚探索中の
眼球運動の軌跡⁶⁾

る。実験は被験者に○△□を散りばめた提示画像中から○の数を数えさせた。図9はマスクサイズ5.2°のマスク画像がある注視点に挿入された瞬間の画面上に視線の軌跡を重ね合わせたものである⁶⁾。マスク開始時間は33ms、破線で示した円の中心が注視点で、破線円の大きさが注視時間を示している。この時被験者は33msだけ視覚情報を観察でき、その後中心窩以上の大きさのマスク画像が提示されるが、ほぼ○近辺の位置を注視していることがわかる。しかし、○の数のカウンティング正答率は、マスク開始時間33msでは66msと比較して約10%低下した⁶⁾。このことは、○を探索し眼球運動をプログラムする処理は33msで可能であるが、○を認識し正確にカウントするためには33msでは視覚情報入力時間が不十分であることがわかる。この様

に、注視点マスクング法を用いることにより、図形情報や文字情報等、様々な視覚情報入力に対し、その処理過程を明らかにしていくことが可能になると期待される。

5. ハイビジョン画像に対する多人数眼球運動の同時測定

眼球運動は、様々な視覚入力に対する脳内の処理過程をとらえるプローブとして利用可能であるが、これまでの眼球運動測定装置は1名の被験者についてのみ測定が可能であり、細心の注意を払って多人数の測定結果を収集して統計的解析を行うという非効率的で時間のかかる手法が用いられてきた。この様な問題点を解決し、効率よく多くの被験者の眼球運動を解析するために、今回4人までの眼球運動を同時に測

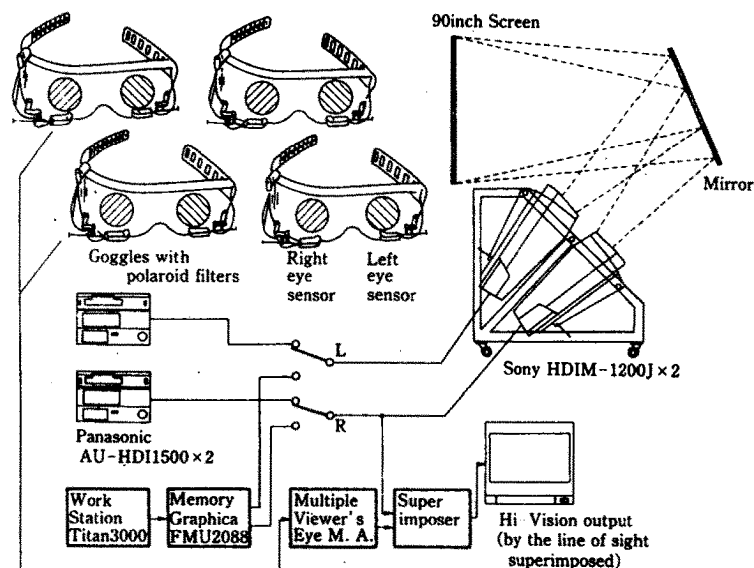


図10 多人数両眼眼球運動分析装置とハイビジョン立体提示部の構成⁷⁾

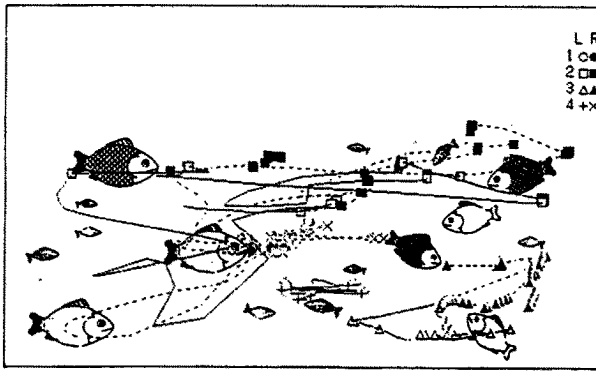


図11 水族館を撮影したハイビジョン画像観察中の4人の両眼眼球運動の測定例⁷⁾

定し全てのデータをリアルタイムで表示できるシステムを構築した。更に、本装置では画像提示装置として偏光方式のハイビジョン立体画像提示装置を採用し、2次元のみならず3次元画像観賞時の眼球運動についても解析可能である。図10に構成図を示す⁷⁾。立体画像はプロジェクタを2台スタックし、背面投射方式で90インチスクリーンに表示される。左右眼の分離には直線偏光フィルタを用いている。画像再生用には、ユニハイVTR 2台の同期再生または動画像メモリを用いる。画像メモリはワークステーションとパーソナルコンピュータにより制御される。ワークステーションは主に画像の生成、実験結果の解析に用い、パーソナルコンピュータはリアルタイム性の要求される視覚実験の制御に用いられる。実験中の眼球運動出力(校正後の信号)は、装置に内蔵されたカラー液晶ディスプレイ上にリアルタイムで表示されると共に、ハイビジョン・スーパーインポザーに出力され、被験者の観察しているハイビジョン画像上に合成表示される。図11はこの装置を用いて得られた2次元ハイビジョン画像(水族館)に対する視線の動きの一例である⁷⁾。この様に、単純な水族館の画像を例にとってみても、興味の対象は被験者毎に大きく異なる。更に、ハイビジョン画像では立体感が増加するために、2次元画像でも輻輳開散運動が生じることが示されている⁷⁾。

6. 痴呆症患者の眼球運動

アルツハイマー型痴呆(AD)の患者数は、

アメリカで約400万人、日本でも約100万人に上ると推定されている。ADでは比較的病初期から視覚認識障害、行為障害等の“道具機能”の障害とされる神経心理学的症状が出現する⁸⁾。また、MRI検査から、ADでは空間視に関係する頭頂葉の機能に障害が生じている可能性があると考えられる。このことを踏まえ、AD患者、健常者について、4つの検査(輻輳眼球運動、頭部・眼球協調運動、注視点マスキングによる視覚探索能力、固視微動ドリフト成分のフラクタル次元解析)を行った。これにより、AD患者においては、初期から輻輳開散運動が不安定になり水平サッカードの発生が増え、視線移動の際に頭部運動の分担比が小さくなる傾向があること、注視点マスキングにより視覚情報入力時間を制限すると健常者と比較して大幅に探索能力が減少、固視微動ドリフト成分のフラクタル次元が小さくなる傾向があることがわかりつつある⁹⁻¹²⁾。これらの現象は、AD患者における空間視機構の障害、対尺異常といわれる空間座標変換系の障害、認知障害、注視障害等が複合された結果であろう。現在、それぞれの検査項目について更に検討・実験が加えられている。

7. おわりに

眼球運動測定により、視覚情報処理過程を探る研究事例について、最近のATRの研究を紹介した。眼球運動測定のアプリケーションは広がりつつある。タクシー運転者やスポーツ選手等のプロの視線の動き等、洗練された行動を客

観的に評価する手法として、また、高臨場テレビの臨場感の測定や痴呆症の鑑別等、その波及範囲は広い。人間系の巧みな情報処理機構を手本にした、よいヒューマン・インタフェースを備えた新しい機器の開発の役に立っているが、今後の課題の一つである。

謝辞 本研究は、(株)ATR視聴覚機構研究所出向中に筆者及びその同僚が行ったものである。本報告をまとめるに当たり前視覚研究室山田光穂主任研究員(現NHK放送技術研究所)、吉松浩主任研究員(現(株)ソニー)、本郷仁志研究員(現三洋電機(株))に多大な御協力を頂きました。また、本研究を進めるにあたり、研究の機会を与えていただいた前(株)ATR視聴覚機構研究所(現NTT基礎研究所)主席研究員 淀川英司社長、前視覚研究室上野圭一室長(現NTTヒューマンインタフェース研究所主幹研究員)に深謝致します。また、研究を進めるにあたり、札幌医科大学神経精神科、藤井充先生、村上新治先生、深津亮助教授、高畑直彦教授に多大な御指導、御協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- 1) 入来正躬, 外山敬介: 生理学. 文光堂, 1986.
- 2) 山田光穂, 福田忠彦: 視線の動きを用いたテレビ画像の分析. テレビジョン学会誌, 40, 121-128, 1986.
- 3) 魚森謙也, 山田光穂: 時分割立体画像融合時の片眼運動刺激に対する両眼眼球運動の測定. テレビジョン学会誌, 46, 1025-1035, 1992.
- 4) 山田光穂: 二次元平面上の視標を注視させたときの頭部運動と眼球運動の協調関係. 電子情報通信学会論文誌, J75-D-II, 5, 971-981, 1992
- 5) 山田光穂: 頭部・眼球協調運動の年齢による変化の分析. 第8回ヒューマンインタフェース論文集, 495-502, 1992.
- 6) 本郷仁志, 山田光穂: 注視点マスキング法による視覚探索能力の解析. 第8回ヒューマンインタフェース論文集, 509-516, 1992.
- 7) 山田光穂, 魚森謙也, 本郷仁志: 多人数両眼眼球運動分析装置とこれを用いたハイビジョン立体画像の視線分析. テレビジョン学会誌, 47, 722-731, 1993.
- 8) 藤井 充, 深津 亮: アルツハイマー病の視覚情報処理過程の解析. 神経心理学, 7, 121-132, 1991.
- 9) K. Uomori, S. Murakami, M. Yamada, M. Fujii, H. Yoshimatsu, N. Nakano, H. Hongo, J. Miyazawa, K. Ueno, R. Fukatsu and N. Takahata: Analysis of gaze shift in depth in Alzheimer's disease patients. *IEICE Transaction on Information and Systems*, in press.
- 10) 山田光穂, 藤井 充, 本郷仁志, 村上新治, 魚森謙也, 宮沢仁朗, 吉松 浩, 中野倫仁, 深津 亮, 上野圭一, 高畑直彦: アルツハイマー病の頭部・眼球協調関係の分析. 電子情報通信学会春季大会, D-167, 1992.
- 11) 本郷仁志, 藤井 充, 山田光穂, 村上新治, 魚森謙也, 宮沢仁朗, 吉松 浩, 中野倫仁, 深津 亮, 上野圭一, 高畑直彦: アルツハイマー病の図形探索能力の分析. 電子情報通信学会春季大会, D-166, 1992.
- 12) 吉松 浩, 村上新治, 魚森謙也, 藤井 充, 宮沢仁朗, 山田光穂, 中野倫仁, 本郷仁志, 深津 亮, 上野圭一, 高畑直彦: アルツハイマー病患者両眼固視微動ドリフト成分のフラクタル次元解析. テレビジョン学会年次大会, 10-6, 1992.