

Direct Linear Transformation 法を利用した車椅子移動時の 非接触視点位置検出法の検討

(第2報, 2次元多重解像度解析を利用した検出法の改良)

Direct Linear Transformation Technique for Non-Contact Eye-Gazing Point Detection (2nd Report, Improving the Detecting Technique via Two Dimensional Multi Resolution Analysis)

尾田 雅文(正会員), 磯村 恒(正会員)*, 関口 行雄(正会員)*, 原 利昭(非会員)**

Masafumi ODA, Tsuneshi ISOMURA*, Yukio SEKIGUCHI*, Toshiaki HARA**

Abstract

The Purpose of this study is to detect eye-gazing points during driving a wheelchair through the image sequence analysis of video frames. The performances can be measured without restrictions of specific devices such as any accessories and sensors, which were put on a body. Images obtained with two video cameras allow the algorithm with two-dimensional multi resolution analysis through wavelet analysis to extract boundaries of right and left irises. Their three-dimensional positions and directions were estimated through direct linear transformation (DLT) technique. The eye-gazing point was evaluated through the relationship between the vertical vector of iris and line-of-sight. Consequently, Some preliminary results were presented to illustrate the detecting error of eye-gazing point.

Key Words

Physically Handicapped people, Image Processing, Multi Resolution Analysis, Direct Linear Transformation Method, Line-of-Sight

1. 緒言

近年, 下肢障害者が移動支援機器を利用し, 一般社会へ参加・適応する機会が増加している。しかしながら, 医学および職業リハビリテーション期間において, 移動時におけるハンディキャップを如何に効率良く克服し, 転倒や交通事故に対応すべきか等, 未だ解決すべき問題が存在する。

人は, 一般に移動時における情報入力の多くを視覚系に依存していることから, 車椅子移動時における眼球運動の計測およびその評価結果は, 事故防止策を確立する上で極めて重要な指標になると考

えられる。眼球運動や視線の計測・評価に関する研究は, これまでに多数の報告例があり, 例えば接触型の視線入力装置を用いた例¹⁾や EOG(Electro-oculogram)を用いた例²⁾等が上げられる。しかしながら, 前者においては, 計測を意識することによる違和感等の心理的影響や移動行動への拘束等の物理的な影響により, 通常の眼球運動と異なる結果を得る可能性が指摘されている³⁾。一方, 後者においては皮膚と電極間の分極電位や筋電図への雑音の混入等に対して, 十分注意を払う必要がある。

このような眼球運動計測手法に, 画像処理手法を適用した例^{4,5)}が報告されており, 例えば山口等⁴⁾は近赤外光画像にテンプレートマッチングの手法を適用して, 自動車運転時のドライバーのまばたきや視線方向を検出可能なシステムを提案している。しかしながら, これら画像処理を利用する視線検出手法は, 検出精度の面で解決すべき問題が存在する。

そこで, 本研究では車椅子移動時に関わる問題を解決するための基礎的研究^{6,7)}の一環として, Direct Linear Transformation(DLT)法⁸⁾を利用した非接触視点位置検出システム⁶⁾に対し, ウェーブレット変換による2次元多重解像度解析⁹⁾(2-Dimensional Multi Resolution Analysis;以下,「2D-MRA」と記す。)を適用することにより, 虹彩位置検出精度に関する改良を試みた。その結果, 本システ

2000年12月14日受理

2001年12月20日最終原稿受理

近畿職業能力開発大学校 生産機械システム技術科, 〒596-0103 大阪府岸和田市稲葉町 1778

*職業能力開発総合大学校 福祉工学科, 〒229-1196 神奈川県相模原市橋本台 4-1-1

**新潟大学 工学部, 〒950-2181 新潟県新潟市五十嵐 2 の町 8050

Department of Product Engineering, Kinki Polytechnic College, 1778 Inaba-cho, Kishiwada-City, Ohsaka, 596-0103 Japan.

*Department of Rehabilitation Engineering, The Polytechnic University, 4-1-1 Hashimotodai, Sagamihara-City, Kanagawa, 229-1196 Japan.

**Faculty of Engineering, Niigata University, 8050, Ikarashi 2-nocho, Niigata-City, Niigata, 950-2181 Japan.

ムを利用した画像上の特徴点、視線および視点位置の検出精度に関する知見を得たので報告する。

2. 視点位置検出アルゴリズム

図 1 は視線検出の手順を示している。本システムは、得られた画像を 2D-MRA し、虹彩輪郭の楕円近似および DLT 法による 3 次元再構築などの技法を適用し、視点および視線の検出を行う。以下にその詳細を記す。

2.1 2次元多重解像度解析

顔画像は NTSC 規格の動画で得られることから、1フレームの画像中に互いに 1/60sec の時間差を有する2フィールドの画像情報が存在する。よって、ビデオキャプチャボードを介してパーソナルコンピュータに入力し、これを分離した静止画像に次式に示す Daubechies 関数をマザーウェーブレットに考慮した 2D-MRA を施す。

$$\varphi(x) = \sum_k q_k \phi(2x - k) \quad \dots(1)$$

ここで、マザーウェーブレット $\varphi(x)$ は差分フィルターに、スケーリング関数 $\phi(x)$ は平滑フィルターにそれぞれ相当する。2D-MRA の適用に際し、画像の輝度信号 $f(x)$ のフーリエ変換結果を考慮し、式(2)に示す数列 $c_{0,k}$ を決定する。さらに、式(3)および式(4)を適用し、画像データの低周波成分および高周波成分を漸近的に分解する。

$$f(x) = \sum_k c_{0,k} \phi(x - k) \quad \dots(2)$$

$$c_{j-1,k} = \sum_l a_{l-2k} c_{j,l} \quad (j \leq 0) \quad \dots(3)$$

$$d_{j-1,k} = \sum_l b_{l-2k} c_{j,l} \quad (j \leq 0) \quad \dots(4)$$

ここで、j-1の絶対値は分解過程の繰り返し回数である。 $c_{j-1,k}$ はスケーリング係数を、 $d_{j-1,k}$ はスケーリング係数に基づき導出されるウェーブレット展開係数をそれぞれ示しており、後者よりマザーウェーブレットと信号の相関を得ることができる。なお、式中の数列 a_k b_k q_k は次式⁹⁾を考慮して決定する。

$$a_k = \frac{1}{2} p_k, \quad b_k = \frac{1}{2} q_k, \quad p_k = \sqrt{2} h_k, \quad q_k = (-1)^k p_{l-k}$$

$$h_k = \{0.026670057901, 0.188176800078, \dots\} \quad \dots(5)$$

本解析手法を適用して、実際に画像処理を行った例を図 2 に示す。一般に室内照明のもとで得られる同図中(a)に示す眼球画像を 2 値化処理した場合、虹彩右側部において睫毛の影等が原因で照度の分布が不均一になることから、最適なるしきい値を決定することが困難であるとともに、例えば同図中(b)の虹彩輪郭左側上部のように正確に抽出することは容易ではない。同様に、FFT を利用したハイパスフィルタ処理を用いた場合においても、同図中(c)に示す虹彩右側上部のように輪郭を適確に抽出することは困難な場合が生ずる。一方、同図中(d)および(e)は、元画像の横方向および縦方向の輝度信号に基づきそれぞれ MRA を行い、式(4)に示す分解過程を経て得られた数列 $d_{1,k}$ の値を輝度値に変換して得た画像である。図に示すように 2D-MRA を施した場合、他の手法に比べ鮮明に虹彩輪郭を検出することが可能である。

ウェーブレット展開係数 $d_{j-1,k}$ は、j=0 であるときの近似精度が最も

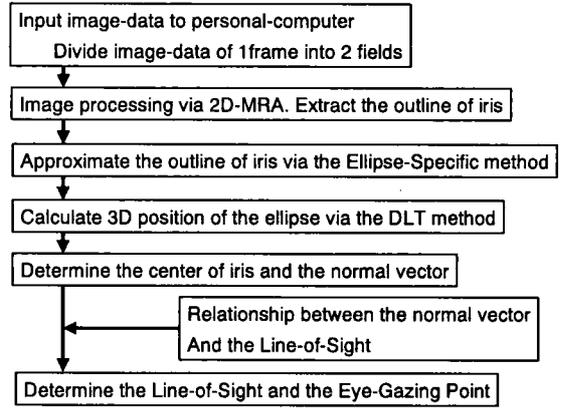


Fig.1 Flow Chart for Detecting The Line-of-Sight

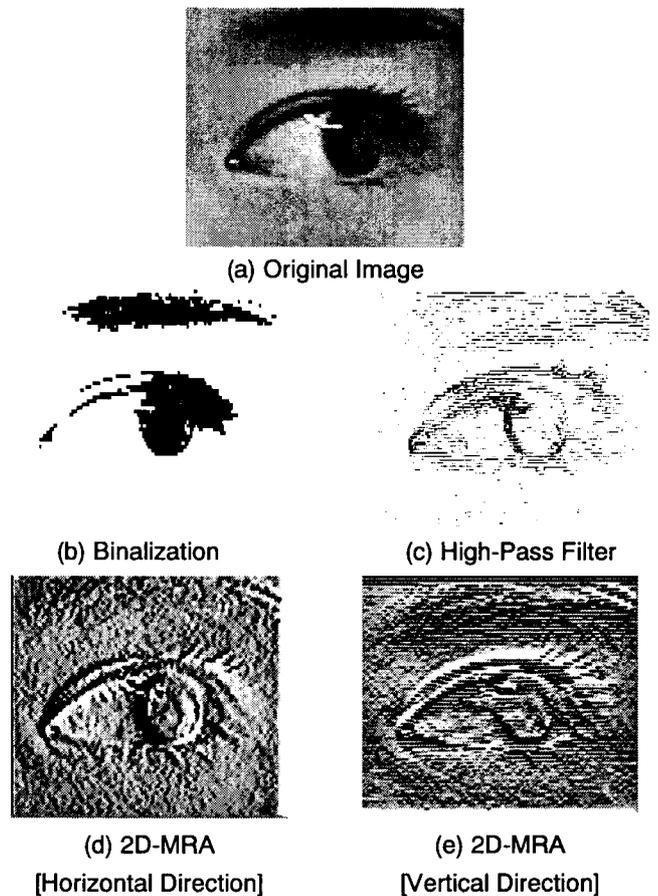


Fig.2 Comparison of Image Processes

良好であることを考慮し、図 3 に眼球画像の A-A 線上に存在するピクセルの輝度値と、これに MRA を行って得られる同位置に相当する数列 $d_{1,k}$ の値を画像左端からのピクセル数 U に対応させて表示している。図中の●は画像の各ピクセルにおける輝度値を示しており、L で示す眼瞼端部ならびに M-N 間で示す虹彩部においては、他の領域に比べ小さい値を示している。よって、2 値化処理やハイパスフィルタ処理による輪郭線の抽出は可能なものと予測された。しかしながら、実際には虹彩輪郭左上部においては睫毛の陰などの影響により、M 部近傍に比べ N 部近傍における輝度値の変化量が小さくかつ不

規則であることから、2 値化処理における最適なしきい値やハイパスフィルタ処理において抽出する周波数の最適値を決定することが困難であった。一方、実線で示す $d_{1,k}$ の値は、抽出すべき特徴点であ

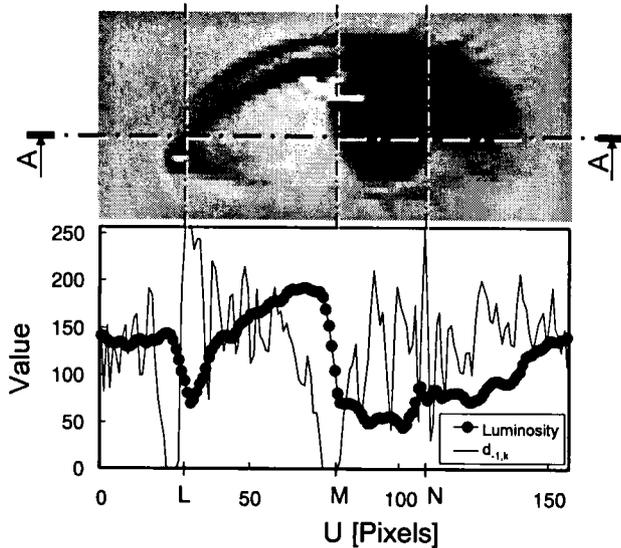


Fig.3 Luminosity of Image of Iris and $d_{1,k}$

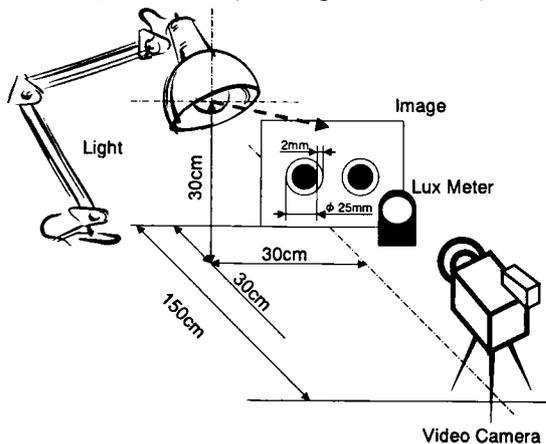


Fig.4 Experimental Setup

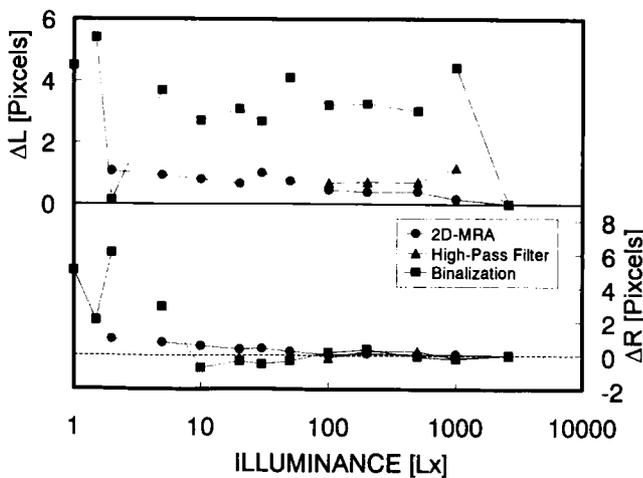


Fig.5 Relationship with Detecting Error and Illuminance

るL部, M部およびN部において、画像の輝度値の増減に応じて、最小値0あるいは最大値255をそれぞれ示すことから、他の手法に比べ特徴点の検出が正確かつ容易になるものと考えられる。

2.2 輪郭抽出精度の検討

2D-MRA によって画像上の特徴点の検出精度が、照明条件の影響を如何に受けるかを明らかにするために、図4に示す様に虹彩を模した図形をビデオカメラで撮影し、得られた画像を解析した。なお、白地に対し直径25mmの黒色中実円と、その周りに幅2mmの中実円を中間色で描画した図形を左右に2箇所配置し、中間色図形と黒色図形の境界部を検出対象とした。照明は同図中に示すように、上方から図の上端中央部を中心に照らしている。同図中に示す照度計による計測値が1Lxから2600Lxの範囲になるよう照明の電源電圧を設定し、このとき得られた画像に2値化処理、ハイパスフィルタ処理および2D-MRAをそれぞれ適用し、さらに検出された黒色図形の輪郭線を円近似して、その中心位置および半径を計測した。各照度における図形の検出誤差を、2600Lxと各照度において得られた図形中心の距離 ΔL 、および2600Lxと各照度において得られた図形半径の差 ΔR に基づき評価した。

図5は図形の検出誤差と照度の関係を示している。横軸は照度で、縦軸は中心位置の検出誤差 ΔL および半径の検出誤差 ΔR をそれぞれ示している。2値化処理は他の手法に比べ、小さい照度においても図形を検出することが可能であるものの、特に視点位置の決定に大きく影響を及ぼすと考えられる中心位置の検出誤差 ΔL は比較的大きな値を示す。これは、照明が図の上端部を中心に照らしており、図の白色領域において輝度値は一定とはならないことから、適切なしきい値の設定が困難であったためと考えられる。一方、ハイパスフィルタ処理と2D-MRAを利用した場合の検出誤差は、それぞれ極めて小さいものの、前者において50Lx以下の照度では、図形の輪郭線を抽出することが困難であるのに対し、後者は2Lx以上で検出可能であった。2D-MRAを利用する手法は、しきい値に関する最適化問題が存在しない等の理由により、照明の条件等による影響が小さいという特徴を有していると考えられ、本研究における虹彩輪郭線の抽出に適用した。

2.3 視点位置の検出

本研究ではDLT法を適用し、虹彩輪郭線を含む平面の3次元空間上における位置および方向を求める。図6に示す3次元空間での物体の座標値(X,Y,Z)と、これを撮影することによって得られる像のカメラ座標系上の2次元座標値(U,V)の関係は、次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 - C_1U & A_2 - C_2U & A_3 - C_3U & A_4 \\ B_1 - C_1V & B_2 - C_2V & B_3 - C_3V & B_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots(6)$$

よって、任意の位置に設置した2台以上のカメラから得られた測定対象点のカメラ座標値(U,V)を本式に適用し、連立方程式を解くことで実空間座標値(X,Y,Z)を求めることが可能である。そのためには、 A_1 から C_3 の11個の定数が既知である必要があるが、これは最少6個の互いに同一平面上にない標識点の実空間座標値(X,Y,Z)と、これらを撮影して得られる像のカメラ座標値(U,V)を考慮し、連立方程式を解くことで、それぞれのカメラについて決定することができる。

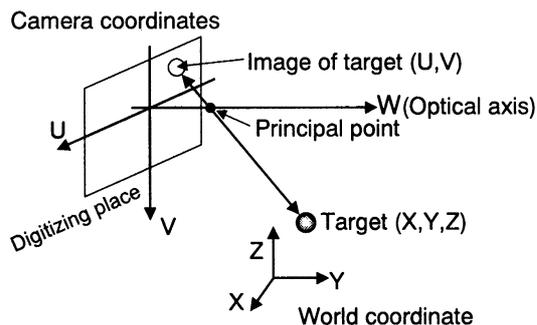


Fig.6 Direct Linear Transformation Method

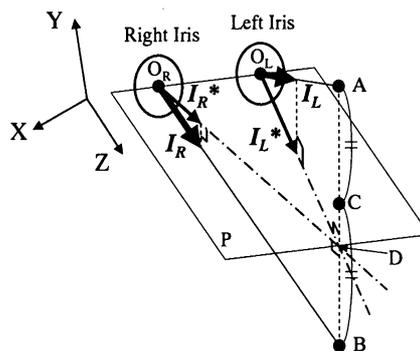


Fig.7 Geometry of Eye-Gazing-Point

一般に、ビデオカメラで得られた画像はレンズ収差の影響で歪みを生ずる。本研究では、ビデオカメラの望遠機能を利用することで、その歪み量を 0.23%以内としている。また、システム較正時における指標点数を 9 点とするとともに、これを画像中に出来る限り均一に分布するように配置した。すべての標識点を考慮して前述の 11 個の定数を求めることは、飽和条件連立方程式を解く問題に帰着する。よって、本研究では最小 2 乗法を適用して定数を決定した。

DLT 法を適用して左右虹彩輪郭線の 3 次元位置を決定するためには、当然のことながら複数のカメラで得られる画像上の抽出点が、実空間における同一点である必要がある。よって、Pilu 等¹⁰⁾による手法を適用して 2D-MRA 像に基づく抽出点を楕円に近似するとともに、虹彩輪郭と眼瞼の交点を基準点として考慮した上で DLT 法を適用し、虹彩輪郭の 3 次元位置を求めた。その結果に基づき、左右の虹彩輪郭線を含む空間平面の法線ベクトル(以下、「法線ベクトル」と記す。)ならびに虹彩の中心座標をそれぞれ決定した。虹彩中心位置から注視点までのベクトル、すなわち視線と法線ベクトルは必ずしも一致するわけではなく、また両者の関係は個人差を有する。しかしながら、予め両者の関係が得られれば、法線ベクトルより視線を推定することが可能である。さらに、虹彩中心位置を考慮することで左右視線の交点より、視点の 3 次元位置を視対象の設置位置や形状などを考慮することなしに決定できる。しかしながら、実際の測定では視線検出に誤差が生ずることから、得られた視線がねじれの位置に配置され、交点が得られない場合が生ずる。よって、図 7 に示すように左右の虹彩中心 O_R, O_L を含み、かつ実空間座標系 Z 軸方向に平行な平面 P に、左右の視線 I_R, I_L を投影したベクトル I_R^*, I_L^* の交点 D を求め、これに基づき左右視線上の点 A および B を決定する。さらに、これらの中点 C を視点位置としてその 3 次元位置を決定した。

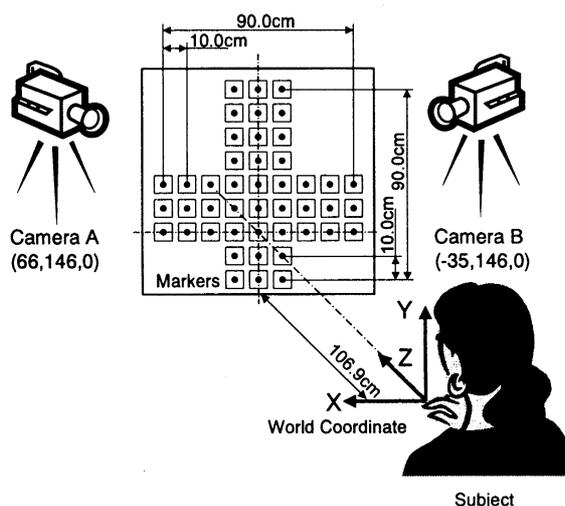


Fig.8 Experimental Setup

3. 較正実験

法線ベクトルと視線の関係を明らかにするためにに行った較正実験の手順を以下に示す。図 8 中の座標軸は、システム較正時における標識点の設置位置に基づく実空間座標系を示している。なお、標識点の設置位置は、被験者の顔の位置にほぼ等しい。被験者は裸眼視力 0.8 以上の健常者 2 名とし、実空間座標系上の座標値が既知のマーカを順に注視すること、ならびに顔の向きを出来る限り Z 軸方向に維持することを指示し、視野角を約 10 度に設定した 2 台のビデオカメラで注視動作時の顔画像を撮影した。なお、得られた顔画像は、面積比で 1 フレーム中の約 7 割程度を占める。同図中のカメラの下

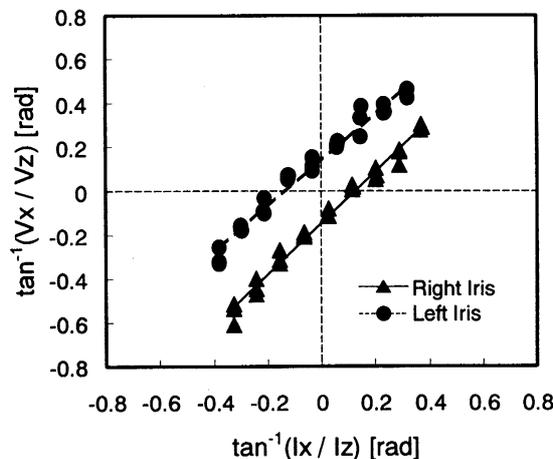


Fig.9 Results of Calibration (Horizontal Direction)

方に記述している数値は、カメラの設置位置の実空間座標値であり、センチメートル単位で示している。ここで、照明は一般的な天井からの屋内照明を用いており、顔付近の照度は 500Lx である。なお、本システムの瞳付近の 3 次元位置測定誤差は、実空間座標系 X, Y および Z 方向でそれぞれ 0.03mm の範囲内である。得られた画像を解析し、左右虹彩の法線ベクトルをそれぞれ求めるとともに、虹彩中心とマーカを結ぶベクトルとして得た視線との関係を明らかにした。

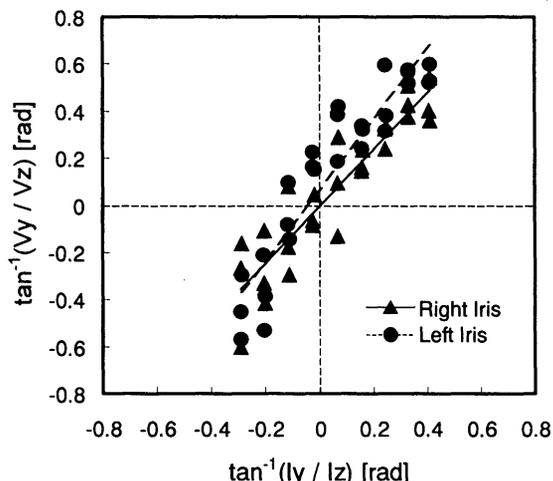


Fig.10 Results of Calibration (Vertical Direction)

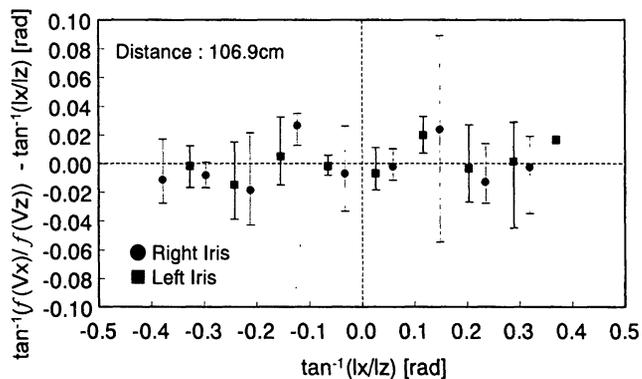
図9および図10は、較正実験により得られた法線ベクトルと視線の関係を示している。図9は両者の水平方向成分について得られた結果であり、横軸はZ軸方向に対する視線の水平方向の傾き角を、縦軸は法線ベクトルの傾き角をそれぞれ示している。図より両者の関係は、左右の瞳でそれぞれ異なる特性を示すものの、視線が左右20度の範囲内において、ほぼ線形で得られることがわかる。一方、図10に示すように上下方向成分における両者の関係においては、水平方向の結果に比べ、測定値にばらつきが大きい。これは、虹彩輪郭の上下端が眼瞼に隠されることから、楕円の上下方向の近似精度が低下することに起因すると考えられる。しかしながら、本実験の測定範囲である上方30度から下方10度の範囲内において、両者の関係はほぼ線形で得られており、視線検出において画像解析結果に本結果を考慮して、視線を決定する。

4. 視線検出精度の評価

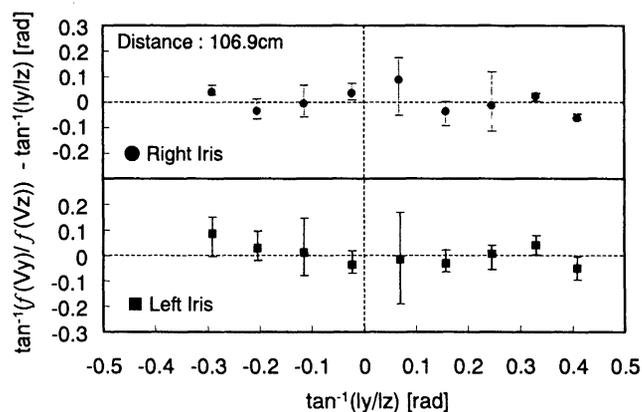
図8に示す較正実験と同様な測定システムを用いて、視線検出精度の評価を行った。予め較正実験を行い法線ベクトルと視線の関係を明らかにした健常者2名を被験者とした。被験者に対し、3次元位置が既知のマーカを順に注視することを指示し、その際の顔画像を2台のビデオカメラで撮影した。実験は、顔の方向の変化による視線検出精度への影響もあわせて評価するために、106.7cm前方のマーカへの注視動作において

- (1)顔の方向をできる限りZ軸方向に維持し、眼球の回転移動で注視した場合
 - (2)眼球移動をできる限り行わず、顔の方向を変えて注視した場合
- について、それぞれ視線を検出した。なお、(2)の実験における視線検出においても、(1)の場合と同様に図9および図10に示す眼球回転移動で注視した場合の法線ベクトルと視線の関係を考慮している。さらに、マーカと被験者間の距離を20cmから106.7cmまで変化した場合の視点位置も同様に評価し、それぞれの視点距離における視点位置検出精度を明らかにした。

図11は、顔の方向を出来る限りZ軸方向に維持した場合における視線検出精度の評価結果を示している。図の横軸は、注視対象マー



(a) Horizontal Direction



(b) Vertical Direction

Fig.11 Comparison between Actual Line-of-Sight and Detected Results (Ophthalmic Removal Case)

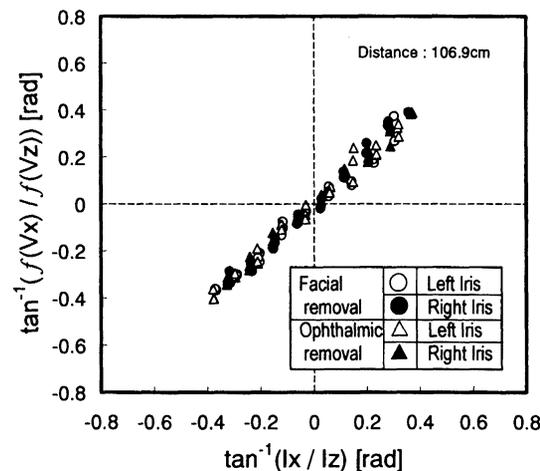


Fig.12 Comparison between Actual Line-of-Sight and Detected Results (Horizontal Direction)

カと虹彩中心を結ぶベクトル(l_x, l_y, l_z)のZ軸に対する傾き角を、縦軸は本システムを利用して得られた視線の誤差を水平方向および上下方向についてそれぞれ示しており、後者は法線ベクトル(V_x, V_y, V_z)に較正実験結果を考慮して得られた視線($f(V_x), f(V_y), f(V_z)$)と法線ベクトルのZ軸に対する傾き角の差より求めた。本測定の範囲である左右20度、上方30度から下方10度の範囲内において、視

線の傾き角と測定値のばらつきで、相関は極めて小さい。なお、視線検出誤差は水平方向においては 0.27 度程度である。一方、上下方向については、虹彩上下端の輪郭線検出が困難である等の理由により、0.89 度程度と前者に比べ大きい。図 12 は、水平方向の視線検出結果を眼球移動の場合と顔移動の場合で比較しており、横軸はベクトル (I_x, I_y, I_z) の Z 軸に対する傾き角を、縦軸は本システムを利用して得られた視線の Z 軸に対する傾き角を示している。両者の検出誤差は、本研究の測定範囲ではほぼ同程度であり、前者においては 0.27 度程度、後者においても 0.32 度程度である。図 13 はマーカと被験者間の距離と視点位置検出精度の関係を示している。図の横軸は被験者からマーカまでの距離を、縦軸は検出された視点の 3 次元位置の検出誤差を、X, Y および Z 軸方向についてそれぞれ示している。なお、計測された誤差の平均値を●で示すとともに、その範囲も併せて表示している。全ての方向において、マーカと被験者の距離が大きくなるに応じて検出誤差も増加しており、特に Z 軸方向についてはその傾向が著しい。本システムは、左右の視線方向に基づいて視点位置を検出していることから、被験者からの距離が大きくなるに従い、僅かな視線の検出誤差が視点位置の測定精度に大きく影響する。しかしながら、視線上にガラス等の光を透過する物質が存在する場合において、透過物質とその背景の間に検出誤差以上の距離が存在すれば、注視対象が両者のうち何れであるかを判断することが可能である特長を有する。なお、同図は静止画像に基づく結果を示しており、これらの検出誤差には、固視微動などの影響が含まれていることから、検出された視線の時間に対する移動平均を考慮することで、検出誤差を減少することが可能であると思われる。

これらのことから、車椅子移動時において、遠方に存在する車などの危険因子と歩道と車道間の段差など近傍に存在する障害物が同時に存在する条件下で、本システムを利用して視点位置が如何に移動するかを明らかにすることが可能であると思われる。

5. 結 言

車椅子移動時に関わる問題を解決するための基礎的研究の一環として、DLT 法を利用した非接触視点位置検出システムに対し、2D-MRA を適用し、虹彩位置検出精度の改良を試みた。なお、本システムを機器制御のためのマン・マシンインタフェースとして用いるには、処理時間の点で現状では十分なものではないものの、測定デバイスを装着する等の制約条件がないことを生かして、車椅子移動時における視点位置検出を行い、適切な視点位置移動を提示する他、人間の生理的な特性評価など、様々な方面で応用が考えられる。

本システムを利用した画像上の特徴点、視線および視点位置検出に関する検討・考察を行った結果、以下に示す知見を得た。

- (1) 2D-MRA による画像処理手法は、2 値化処理のようにきい値に関する最適化問題が存在しない。また、ハイパスフィルタ処理に比べ、比較的小さい照度でも特徴点の検出が可能であることから、照明の条件等による影響が小さいという特徴を有している。
- (2) 2D-MRA を適用して眼球画像の輪郭線を抽出した結果に基づき、視線方向および視点位置が検出可能である。また、その検出誤差は水平方向においては 0.27 度程度、上下方向においては 0.89 度程度である。

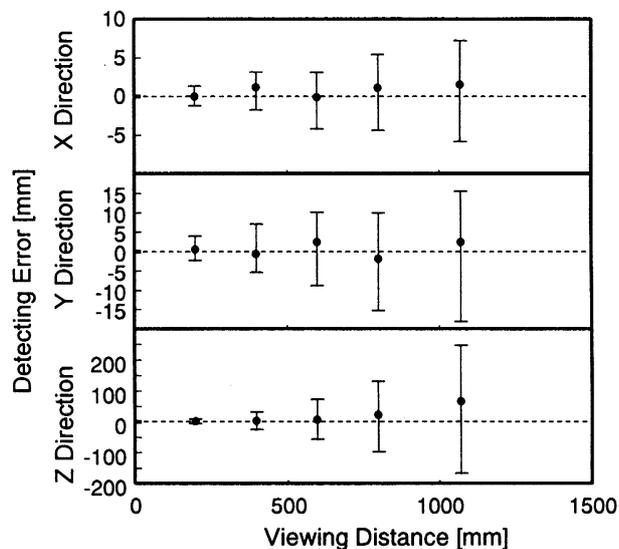


Fig.13 Detecting Error of Eye Gazing Point

参考文献

- (1) Hughes P. K. and Cole B. L., The effect of attention demand on eye movement behavior when driving.: Gail A.G., et al. (eds.), Vision in Vehicles II, Elsevier Science Publishers B.V., 1998: North-Holland, 221-230.
- (2) 黒木康之, 麻生勤, 運転中のドライバー注視線測定の一方法. 自動車技術 1977; 31(7): 625-629.
- (3) 大門樹, 茂木一秀, 川嶋広尚, 動画像処理によるドライバーの視線自動検出. 人間工学 1995; 31(1): 39-50.
- (4) 山口昌広, 伊藤丈裕, 杉山和彦, 山本新, 近赤外線画像によるドライバ状態監視システム, 第 6 回画像センシングシンポジウム講演論文集 2000; 6: 63-68.
- (5) Y. Matsumoto, A. Zelinsky, An Algorithm for Real-time Stereo Vision Implementation of Head Pose and Gaze Direction Measurement. IEEE International Conference on Face and Gesture Recognition 2000; 4: 499-505.
- (6) 尾田雅文, 真田希, 関口行雄, 原利昭, Direct Linear Transformation 法を利用した車椅子移動時の非接触視点位置検出法の検討. LS 学会誌 1999; 11(3): 80-85
- (7) 尾田雅文, 真田希, 関口行雄, 磯村恒, 原利昭, 2 次元多重解像度解析法を利用した非接触視点位置検出法の検討. 機論 C 編 2000; 66(650): 3406-3412.
- (8) 植木一範, 高野剛, 長崎浩爾, 山本仁, 原利昭, 機講論 1995; 95-26: 253-254.
- (9) 中野宏毅, 山本鎮男, 吉田靖夫, ウェーブレットによる信号処理と画像処理, 初版.東京: 共立出版, 1999.
- (10) M.Pilu, A.Fitzgibbon, R.Fisher, Ellipse-specific Direct least-square Fitting, IEEE International Conference on Image Processing 1996; 3: 599-602.