

2次元多重解像度解析を利用した 非接触視点位置検出法の検討

近畿職業能力開発大学校
千葉職業能力開発促進センター
北海道職業能力開発促進センター

尾 田 雅 文
鉄 谷 聖 和
首 藤 由 里 子

Non-Contact Eye-Gazing Point Detection Technique via 2-Dimensional Multi Resolution Analysis

Masafumi ODA, Kiyokazu TETSUTANI, Yuriko SHUTOH

要約 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ものの、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。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に、顔画像にウェーブレット変換による2次元多重解像度解析を適用して、虹彩輪郭を適確に検出し、これをDirect Linear Transformation法を利用して3次元座標再構築した結果に基づく、非接触な視点位置検出システムを構築した。その結果、本システムを利用した画像上の特徴点の検出精度、視線および視点位置検出に関する知見を得たので報告する。なお、本研究を遂行するために構築したシステムは、福祉機器評価に関連する領域のみならず画像処理の分野の他、パーソナルコンピュータ等を利用した計測・制御やIT分野に関連する職業能力開発への応用が期待される。

I 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、通常の眼球運動や視線移動特性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⁾⁻⁽¹⁰⁾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することにより、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とした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、検出精度の点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⁽¹¹⁾⁽¹²⁾の一環として、顔画像にウェーブレット変換による2次元多重解像度解析⁽¹³⁾(2-Dimensional Multi Resolution Analysis; 以下、「2D-MRA」と記す。)を適用し、適確に検出した虹彩輪郭の画像上の2次元座標データにDirect Linear Transformation (DLT)法⁽¹⁴⁾を適用して3次元再構築し、この結果に基づき視点位置を検出するシステムを構築した。その結果、本システムを利用した画像上の特徴点の検出精度、視線および視点位置検出に関する知見を得たので報告する。

II 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、2D-MRA、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。

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、これを分離した後に次式に示す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、式(2)に示す画像の輝度信号 $f(x)$ のフーリエ変換結果を考慮し、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・抽出する。

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

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

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

ここで、 $j-1$ の絶対値は分解過程の繰り返し回数を示す。なお、式中の数列 a_k, b_k, q_k は次式⁽¹³⁾を考慮して決定する。

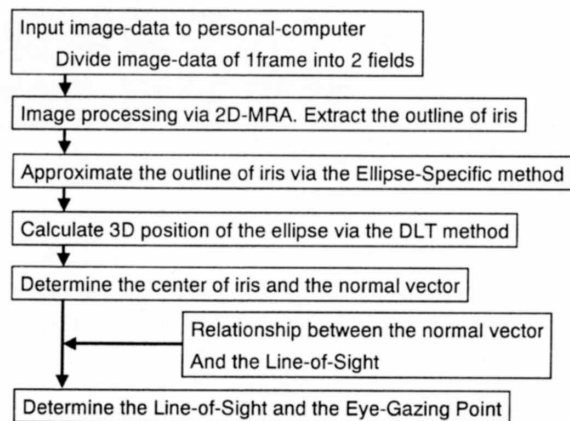


図1 視線検出のアルゴリズム

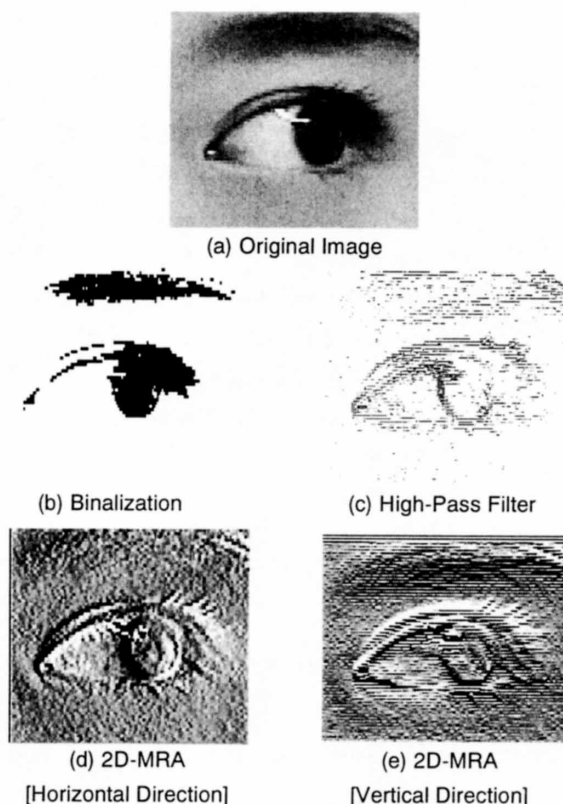


図2 各種画像処理の比較

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

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

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、同図中(b)に示すように眼球輪郭を正確に抽出することは容易ではない。同様に、同図中(c)に示すFFTを利用したハイパスフィルタ処理を用

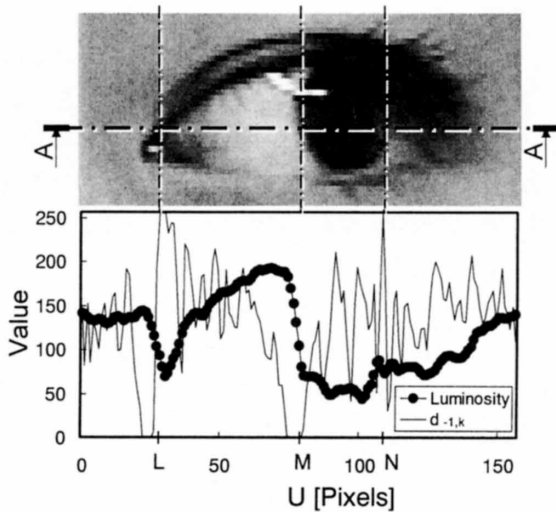
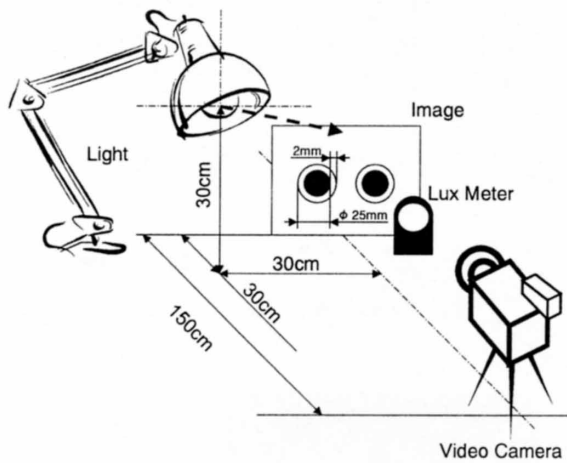
図3 眼球画像の照度と $d_{-1,k}$ の分布

図4 実験装置概略

いた場合においても、虹彩右側部の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、他の手法において検出が困難であった虹彩右側部の輪郭を鮮明に検出することが可能である。

図3は、眼球画像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 $d_{-1,k}$ の値の分布を、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●は元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。しかしながら、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いことから、2値化処理やハイパスフィルタ処理に

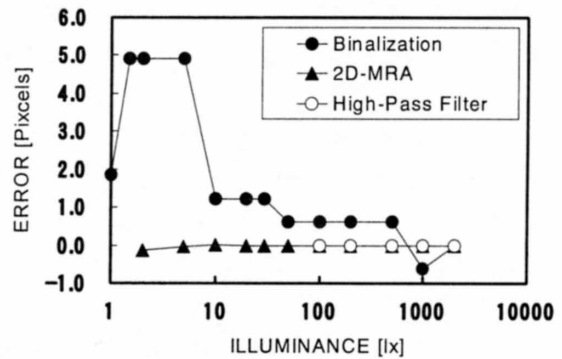


図5 各照度における検出誤差

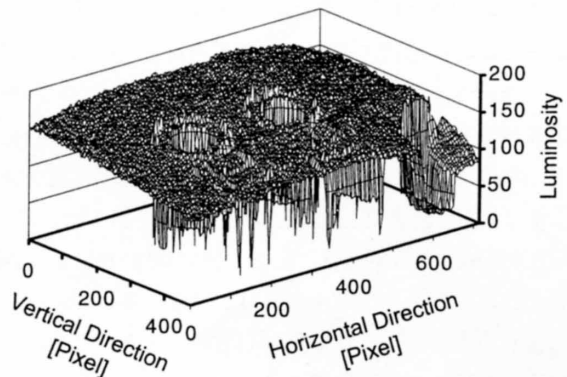


図6 2000 lxにおいて得られた画像の輝度分布

よる輪郭線の抽出が困難になるものと考えられる。一方、実線で示す $d_{-1,k}$ の値は、これらの抽出すべき特徴点である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 輪郭抽出精度の検討

2D-MRAによって得られる画像上の特徴点の検出精度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、中間色図形と白地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1 lxから2600 lx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を適用した3種類の変換画像に基づいて、黒色図形領域と判断される縦方向および横方向のピクセル数をそれぞれ計測した。なお、各照度で得られた画像

の2値化処理に際して、しきい値は黒色図形と判断されるピクセル数の和が各照度において、等しくなるようにそれぞれ設定した。

図5は図形の検出誤差と照度の関係を示している。横軸は照度を、縦軸は2600 lxにおける左右図形の縦および横方向のピクセル数の平均値を基準とした検出誤差をそれぞれ示している。なお、誤差の値が正であることは、図形を基準図形よりも大きく認識していることを示している。2値化処理を適用した場合の検出誤差は、他者に比べ大きい値を示す。これは、照明が図の上端部を中心に照らしていることから、図6に示すように図の白色領域において輝度値が、一定ではなかったことに起因するものと考えられる。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極めて小さいものの、前者においては50 lx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2 lx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。

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7に示すような3次元実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。

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

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。このためには、 A_1 から C_3 の11個の定数が既知であることが必要であるが、これらは最少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。

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ことから、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、システム校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、図8に示すようにPilu等⁽¹⁷⁾による手法を適用して2D-MRA像に基づく抽出

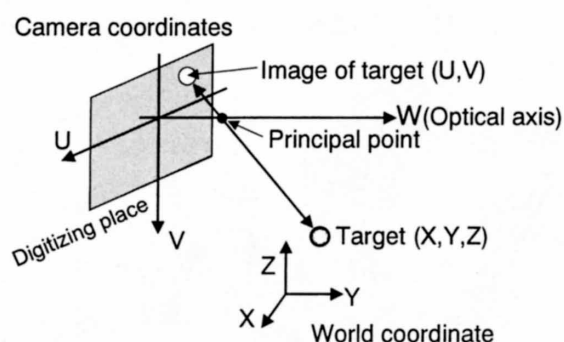


図7 Direct Linear Transformation 法

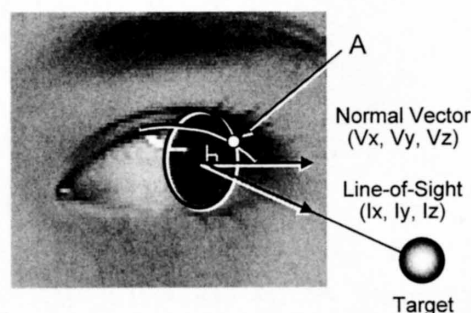


図8 視線と虹彩輪郭の法線ベクトル

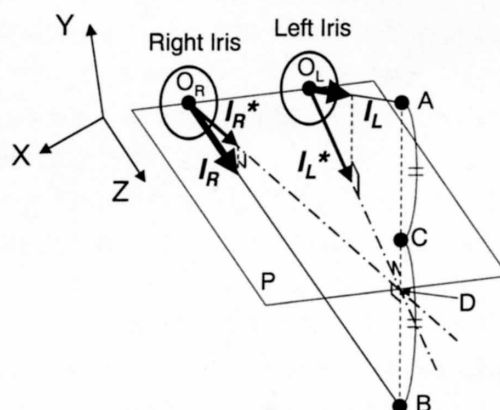


図9 視点位置のジオメトリ

点を楕円に近似するとともに、虹彩輪郭と眼瞼の交点A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、虹彩の中心座標ならびに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。）を左右それぞれ決定した。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同図に示すように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、左右の虹彩中心位置を考慮することで、左右視線の交点、すなわち視点の3次元位置を決定できる。ただし、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、交点を得られない場合が生ずる。よって、図9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。

Ⅲ 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、較正実験を行った。図10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ク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、注視動作時の顔画像を2台のビデオカメラで撮影した。同図中のカメラの下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500 lx程度である。なお、本システムで得られる3次元位置の測定誤差は、実空間座標系の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求めるとともに、視線との関係を明らかにした。

図11は較正実験より得られた水平方向における法線ベクトルと視線の関係を示している。横軸は視線のZ

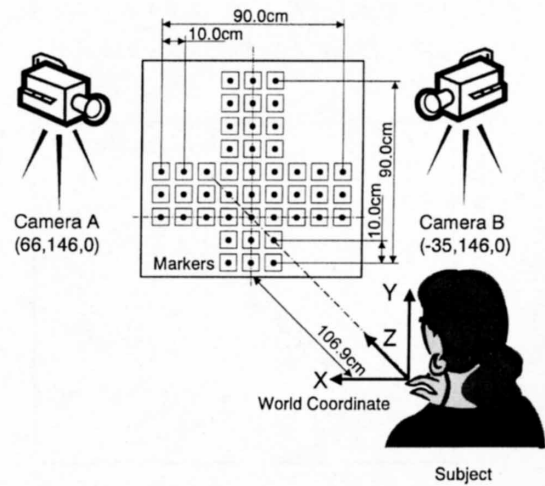


図10 較正実験装置概要

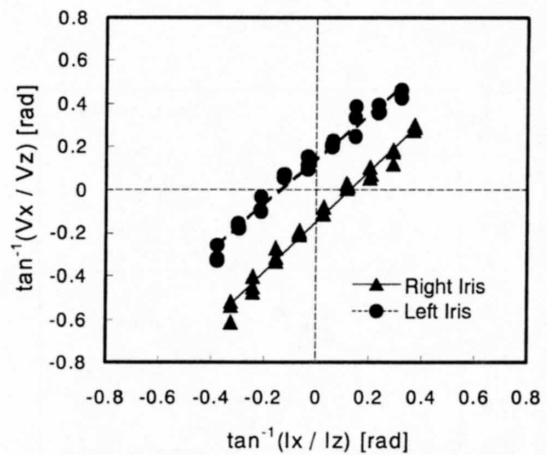


図11 較正実験結果（水平方向）

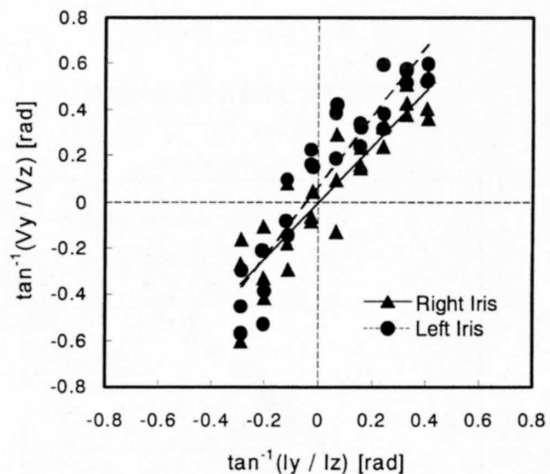
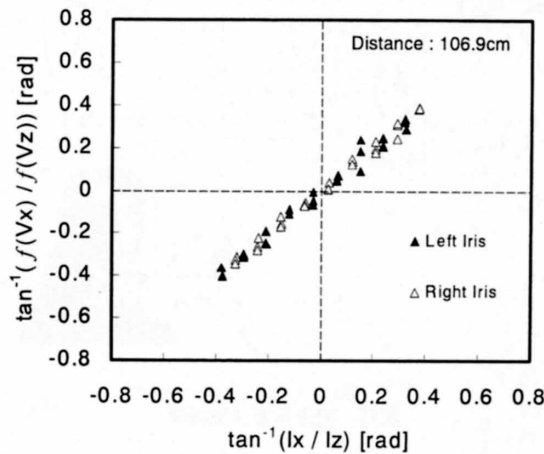


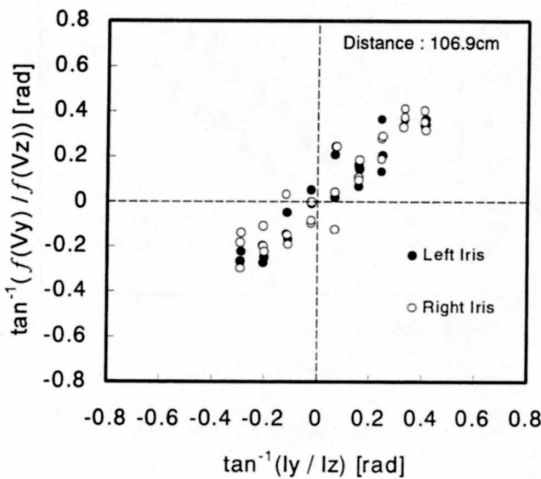
図12 較正実験結果（上下方向）

軸方向に対する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が得られるものの、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12に示すように上下方向における両者の関係においては、水平方向の結果に



(a)水平方向



(b)上下方向

図13 眼球回転移動の場合の視線検出精度

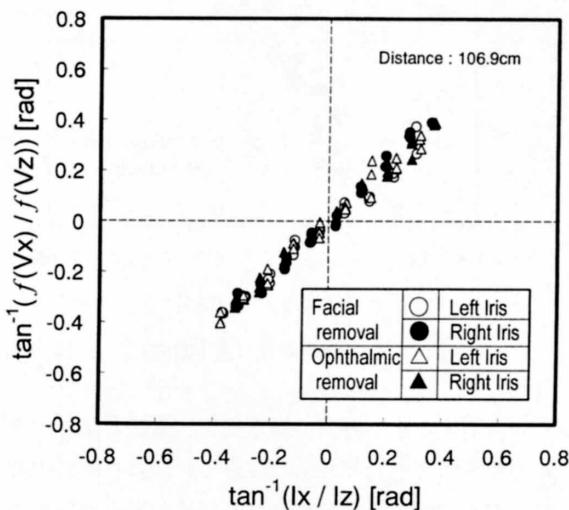


図14 眼球移動と顔移動における視線検出精度の比較

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、画像解析結果に本結果を考慮して、視線方向を決定する。

IV 視線検出精度の評価

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康者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11および図12に示す顔の方向をZ方向に維持した状態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まで変化させ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13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。同図中(a)および(b)の横軸は、注視対象マーカと虹彩中心を結ぶベクトル (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虹彩法線ベクトル (V_x, V_y, V_z) に、較正実験結果を考慮して得た視線 $(f(V_x), f(V_y), f(V_z))$ のZ軸に対する傾き角を、水平方向および上下方向についてそれぞれ示している。当然のことながら、プロットされた点はいずれも傾き1、切片0の線形関数に近い位置に存在する。また、本測定の範囲である視線の傾き角が左右20度、上方30度から下方10度の範囲内において、測定値のばらつきに偏りは小さい。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

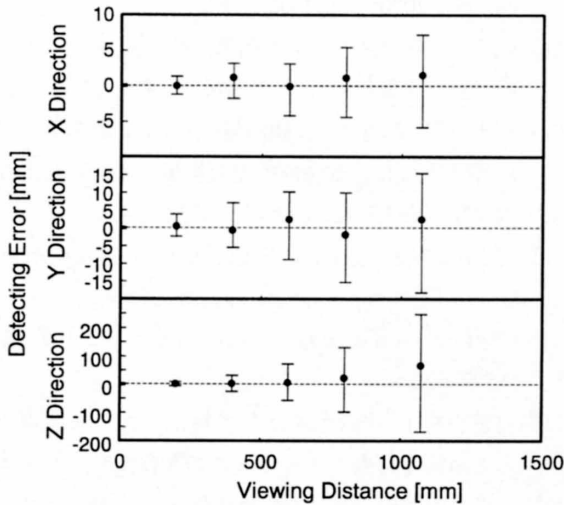


図15 視点距離と検出誤差の関係

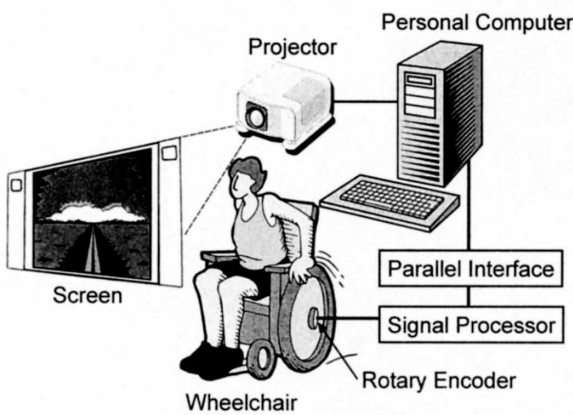


図16 車椅子移動シミュレータシステム

等の理由により、0.89度程度と前者に比べ大きい。図14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15は、被験者－マーカ間の距離と視点位置の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、実座標系に基づく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。これらの誤差には、固視微動やサッケードなどの影響が含まれていると考えられることから、検出された視線の時間に対する移動平均を考慮する等の手法を用いることで、

誤差を減少することが可能であると考えられる。また、より正確な視点距離を必要とする場合においては、注視対象物と被験者の距離を考慮して補正を行うことが可能であると思われる。

V 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、2D-MRAを適用して眼球画像から虹彩位置を適確に検出し、これをDLT法により3次元座標再構築する手法を利用することで、非接触に視点位置を検出可能なシステムを構築した。なお、本研究を遂行するために構築したシステムを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とは言えないものの、コンピュータの高速化や演算アルゴリズムの改良により、処理時間の問題は近い将来克服されるものと考えられる。よって、例えば電動車椅子の操作用インタフェースとして有効な手法になりうるものと期待される。一方、現状でも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装置のほか、人間の生理的な特性評価など、様々な方面への応用が考えられる。その一例として、図16に示す3次元動画が表示可能な車椅子移動シミュレータシステム⁽¹⁶⁾を製作するとともに、これを用いて障害物回避行動時における視点移動特性を調べるべく、鋭意、実験およびデータ解析を行っており、近いうちに発表したく検討中である。

本システムを利用した画像上の特徴点検出、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値化処理のようにし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画像上の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。なお、その検出誤差は本測定の範囲である左右20度、上方30度から下方10度の視線傾き角において、水平方向においては最大で0.27度程度、上下方向については、0.89度の範囲内である。

【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. (North-Holland), 1998年, P.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, Vol.31, No.7, 1977年, P.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, Vol.31, No.1, 1995年, P.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, Vol.6, 2000年, P.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, Vol.4, 2000年, P.499-505.
- (6) 谷島一嘉, 池田研二, 大島正光, 杉時夫, 自動車の運転と疲労, 自動車技術, Vol.25, No.10, 1971年, P.1076-1081.
- (7) 落合積, 石松隆和, 高見修, 松井稜治, 目の動きを利用した身体障害者用文字入力装置の試作, 機械学会論文集C編, Vol.63, No.609, 1997年, P.1546-1550.
- (8) 西内信之, 柴田碧, 高田一, 画像処理による非接触視線検出法の研究, 機械学会論文集C編, Vol.64, No.620, 1998年, P.1237-1243.
- (9) 天谷検字, 原裕二, 青木繁, 逆解析手法による3次元人体運動の再構成, 機械学会論文集C編, Vol. 63, No.608, 1997年, P.1167-1171.
- (10) 松田光正, 岩壺卓三, 伊吹竜大, 黒板昌弘, 水野清典, 柴沼均, 画像解析による大腿四頭筋の作用方向と大きさの同定, 機械学会論文集C編, Vol. 63, No.607, 1997年, P.875-880.
- (11) 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, Vol.11, No.3, 1999年, P.80-85
- (12) 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, 機械学会論文集C編, Vol. 66, No.650, 2000年, P.3406-3412.
- (13) 例えば, 芦野隆一, 山本鎮男, ウェーブレット解析-誕生・発展・応用, 共立出版, 1997年, P.51-62.
- (14) 植木一範, 高野剛, 長崎浩爾, 山本仁, 原利昭, 階段昇降時における恐怖感覚の解析, 機械学会講演論文集, No.95-26, 1995年, P.253-254.
- (15) M.Pilu, A.Fitzgibbon, R.Fisher, Ellipse-specific Direct least-square Fitting, IEEE International Conference on Image Processing, Vol.3, 1996年, P.599-602.
- (16) 首藤由里子, 非接触視点位置検出システムを適用した車椅子移動シミュレータの製作, ポリテックビジョン2001予稿集(総合制作・研究発表の部), 2001年, P.95-96.