

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
Direct Linear Transformation Technique
for Non-Contact Eye-Gazing Point Detection

尾田 雅文(正会員)*, 真田 希(非会員)*, 関口 行雄(正会員)*, 原 利昭(非会員)**

Masafumi ODA*, Nozomi SANADA*, 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 three video cameras allow the algorithm to extract four feature points on a face and irises. Their three-dimensional positions were estimated through direct linear transformation (DLT) technique with magnification of a facial image through wavelet analysis. The direction of a face was estimated via three-dimensional positions of the former, and it defined the facial coordinate. On the other hand, the eye-gazing point was evaluated through three-dimensional positions of the latter. Consequently, Some preliminary results were presented to illustrate the difference in variations with the eye-gazing point between driving a wheelchair and walking.

Key words

Image Processing, Human Ergonomics, Human Interface, Line-of-Sight, Physically Handicapped People, Direction of Face

1.緒言

近年、車椅子等の移乗支援装置を利用することにより、肢体障害者が一般社会へ参加・適応する機会が増加している。これに従い、車椅子移動時に転倒や交通事故に遭遇する頻度も増加傾向にあり、その防止策が望まれている。そのためには、移動時の運動学的・運動力学的さらには人間工学的特徴を明らかにして、その特徴を基に個人に適した防止策をシステムとして確立する必要がある。

1999年 4月 1日受付

1999年 5月 27日受理

*職業能力開発総合大学校福祉工学科

神奈川県相模原市橋本台 4-1-1(〒229-1196)

**新潟大学工学部機械システム工学科

新潟県新潟市五十嵐 2 の町 8050(〒950-1181)

*Department of Rehabilitation Engineering,

The Polytechnic University of Japan,

4-1-1 Hashimotodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-1196,

Japan

**Faculty of Engineering, Niigata University,

8050, 2-nocho Igarashi, Niigata 950-1181, Japan

一般に、人は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・評価は、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。近年行われている眼球運動の計測・評価は、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⁾等が報告されている。前者においては注視方向の検出精度は高いものの、被験者の頭部および顔部に入力装置を装着することから、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、通常的眼球運動と異なる結果を得る可能性が指摘されている。一方、EOGを利用した計測においては、前者のような動作の拘束を要因とした計測値への影響は小さいと考えられるものの、微弱な信号を取り扱うことから、眼球運動計測の際に皮膚と電極間の分極電位や筋電図等への雑音の混入に対して、十分注意を払う必要がある。

このような眼球運動計測を、自動車運転時のドライバーの覚醒度合いや居眠り運転等を検出するための指標として利用する研究³⁾が行われており、これらの中には、画像処理を適用した計測例⁴⁾が報告されている。車椅子移動時における眼球運動の非接触計測を行う上で、このような画像解析手法⁴⁻⁶⁾を用いた計測は有効であると考えられるものの、これまでの研究例の多くは頭部の

移動量が比較的小さい場合を対象としており、運動時や移動時を対象とした研究例は比較的小さいようである。

そこで、本研究では車椅子移動時の運動学および人間工学的特性を評価する研究の一環^{9,10)}として、視点位置の移動特性に着目し、ステレオ画像解析手法を利用した非接触の視点位置測定手法を提案するとともに、検出システムを構築した。本システムは、予め明らかにした瞳中心位置と視線の向きを考慮し、これらと顔の向きおよび位置の検出結果に基づき、視点位置を検出する手法を利用する。座標値が既知のマーカを注視した際の顔画像をもとに、本システムを適用して視点位置を検出した。さらに、障害物の回避行動を含む車椅子移動時および歩行時の視点位置検出に、本システムを適用することで両者の比較を行った。これらの結果に基づき、視点位置検出精度ならびに信頼性等、実用性に関して検討・考察した。

2.三次元座標の測定

ビデオカメラで得られた顔画像を基に、その特徴点の画面上の座標値を求め、得られた座標値より Direct Linear Transformation (DLT)法^{11,12)}を利用して3次元座標の測定を行う。Fig.1に示す実空間での3次元座標値(X,Y,Z)とカメラ座標系での2次元座標値(U,V)の関係は、次式で与えられる。

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

なお、A₁からC₃の11個の未知定数は、互いに同一平面上にない6個以上の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カメラ座標値(U,V)を考慮し、得られた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。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それぞれの画像上における任意の測定対象点のカメラ座標値を式(1)に適用し連立方程式を解くことで、実空間座標値を求めることができる。

視点位置の検出は、顔の向きおよび左右視線の向きを顔上の特徴点の座標値に基づきそれぞれ検出し、両者の検出結果を考慮して行う。顔の向きの変化や移動等の影響により、検出すべき顔上の特徴点が死角に入り、得られた画像上でこれらを検出できなくなることを避けるためには、ビデオカメラを適切な位置に配置して撮影する必要がある。しかしながら、実際の撮影においては、2台のカメラでこれらの問題を解決することは困難であることから、本研究では3台のビデオカメラを用いた。得られた画像データはビデオキャプチャボードを介して、640X480 pixelsの解像度および30 frames/secのフレームレートでパーソナルコンピュータに入力し、顔上の特徴点の座標を求めた。なお、測定精度を考慮し、出来るだけレンズ収差の影響の小さい画像を用いるとともに、システムの較正時における標識点を10点から13点配置した。また、前述のように3台のビデオカメラを用いたことから、カメラ定数の決定および実空間座標を算出する際に、未知定数以上の連立方程式が得られる。よって、最小二乗法を適用することで得ら

れた全ての方程式を考慮し、未知定数を決定した。

3.視点検出方法

視点の検出の手順は、Fig.2に示すように以下の2つに大別される。すなわち、1つめは顔の向きおよび位置を検出するもので、2つめが視線の向きを検出するものである。これらの検出結果に基づき視点位置を求める。以下に、その詳細を示す。

3-1 顔の向きおよび位置の検出

視点位置を検出する際、計測を意識することによる心理的違和感や移動動作への物理的拘束などにより、通常の眼球運動と異なる結果が得られることが懸念される。よって、できるだけ平常時と同じ環境を整えるために、センサやマーカなどの装備を被験者が装着しない状態で計測を行うことが望ましい。一方、表情の変化は顔表面の形状変化を伴うことから、測定精度を考慮すると、顔上の計測点は出来る限り表情の変化の影響を受けない位置に設定する必要がある。そこで、本研究では予め種々の表情における顔表面上の任意点の移動量を計測し、その結果に基づきFig.3に示すように左右両目頭(E_L,E_R)と鼻孔中心(N_L,N_R)を顔の特徴点として用い、これらに基づく3次元直角直行座標系(以下、「顔座標系」と記す。)を構築した。すなわち、左右両鼻孔位置の中間点N_cを座標系原点O_fとし、X_f軸は左右両目頭を結ぶベクトルE_fと平行に、Y_f軸は原点O_fと左右両目頭の中間点E_cを通過するように配置した。さらに、X_f軸およびY_f軸に対し垂直な方向をZ_f軸方向とした。本座標系のX_f、Y_fおよびZ_f軸の実空間座標系に対する傾き角ならびに原点位置O_fより、顔の向きおよび位置をそれぞれ検出することが可能である。

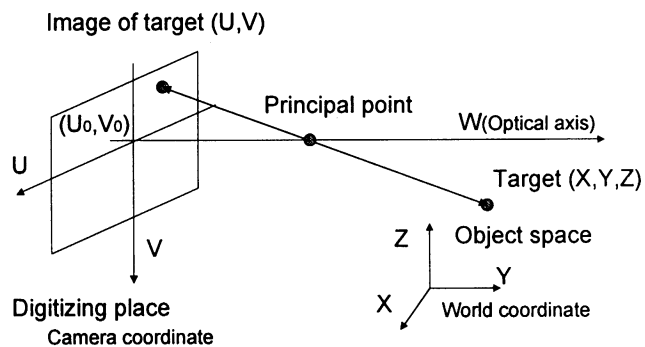


Fig. 1 Relationship between the world coordinate and camera coordinate

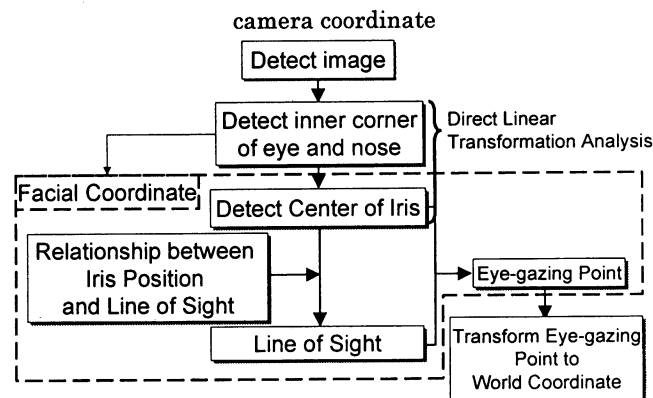


Fig.2 Flow chart for detecting eye-gazing point

3-2 瞳位置と視線方向の検出

視線の向きを求める手法はいくつか提案されており、例えば、視線が瞳中心と眼球中心の相対位置により決定されることを利用した研究例⁶⁾が報告されている。本研究では視点検出時におけるアルゴリズムを単純化するとともに、注視動作における眼球運動の個人差を考慮して、瞳中心位置(I_L, I_R)と視線の向き(V_L, V_R)の関係を較正実験で明らかにし、両者の関係を利用して視線を決定する。視線検出装置の多くは、解析に要する時間や装備の重量を考慮し、片眼を瞳位置の検出対象にしている。これに対し、本研究では視点位置を検出するために、左右の瞳中心位置を検出対象としたことから、顔画像より左右の瞳中心位置を求め、これより視線の向きを明らかにすることが可能である。

Fig.4に示すように、水平方向に5cm間隔で配置した座標値が既知である11個のマーカーをそれぞれ注視することを20歳代および30歳代の健康な男女5名の被験者に指示し、この時の顔上の特徴点を3台のビデオカメラを用いて撮影した。なお、図中の座標軸 X_w, Y_w, Z_w は、システム較正時における指標点に基づく実空間座標系を、カメラ位置はこの座標系に基づく代表的な座標値をそれぞれ示している。さらに、このマーカーを上下方向に5cm間隔で9個所移動させることにより、計99個所の注視点について計測を行った。また、注視動作における顔の向きならびに眼球移動の諸特性を明らかにするために、計測の際は被験者の

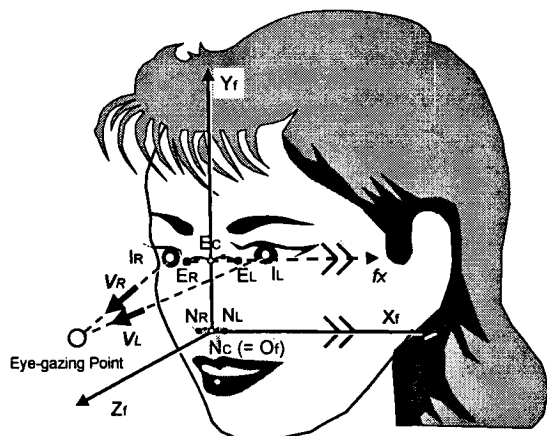


Fig. 3 Four feature points on face and the facial coordinate

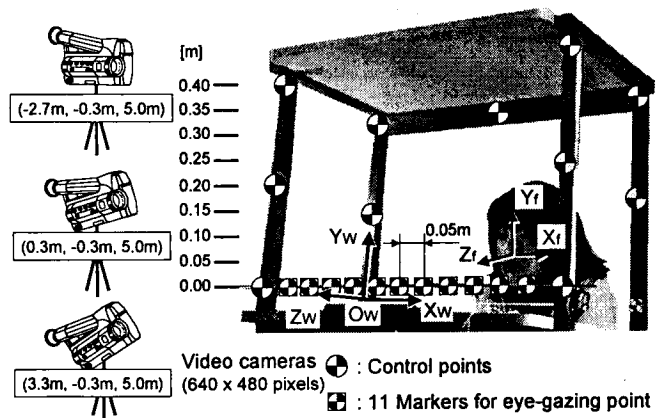


Fig.4 Configuration for calibration

頭部を物理的に拘束せず、顔の向きを一定方向に維持することを指示した。なお、解析の際に瞳位置と視線方向の関係は顔座標系に基づいて求めることから、顔の移動や向きの変化による影響は無視し得る。

Fig.5(a)に示すように、較正実験で得られる顔画像はフレームの大きさに比べ比較的小さく、この状態の画像から顔画像上の特徴点座標を直接求めることは、測定精度の点で好ましいとは言えない。一方、瞳周辺の領域の画像を単純に拡大した場合、同図中(b)に示すように、輪郭線が得られにくく、特徴点の座標の決定が困難である。そこで、本研究では Wavelet 変換および逆変換を利用することで、同図中(c)で示す拡大画像を得た。なお、Wavelet 変換に際し、Daubechies¹³⁾のマザーウェーブレットを適用した。本システムは、特徴点を含む矩形領域を指定することで前述の処理の後に画像処理し、カメラ座標系での2次元座標値を求めることが可能である。得られた座標値をもとに、左右目頭の位置(E_L, E_R)および鼻孔中心位置(N_L, N_R)の3次元座標値を求め、顔座標系を構築した。左右の視線の向き(V_L, V_R)は、左右の瞳中心位置(I_L, I_R)から注視点までのベクトルで得られることから、このベクトルと左右瞳中心位置の関係をそれぞれ求めた。

Fig.6 から Fig.9 に較正実験で得られた結果の一例を示す。Fig.6は、右瞳中心位置 I_R と視線の向き V_R の関係を示している。図中の●印は右瞳中心位置 I_R を示しており、横軸に示す X_f 座標値および縦軸に示す Y_f 座標値にそれぞれ対応している。なお、 X_f, Y_f の座標値はそれぞれ顔座標系に基づく値で示している。一方、図中の矢印は視線の向き V_R を示しており、矢印の水平方向成分は視線の向き V_R の X_f 軸方向成分 V_{RX} を Z_f 軸方向成分 V_{RZ} で除して求めた V_{RX} / V_{RZ} 値に、垂直方向成分は Y_f 軸方向成分 V_{RY} を V_{RZ} で除して求めた V_{RY} / V_{RZ} 値にそれぞれ対応している。図より、瞳中心位置が(-33, 48)において V_{RX} / V_{RZ} および V_{RY} / V_{RZ} の値はほぼ0に等しく、視線の向きが顔座標系における Z_f 軸方向にほぼ等しいことを示している。また、瞳中心位置の X_f 座標値および Y_f 座標値が増加するのに伴い、 V_{RX} / V_{RZ} 値および V_{RY} / V_{RZ} 値もそれぞれ増加しており、視線の方向は瞳中心位置

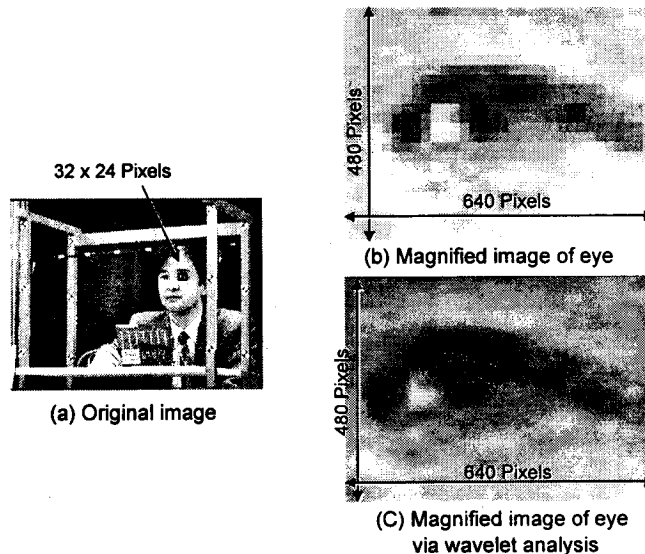


Fig.5 Magnification of facial image via wavelet analysis

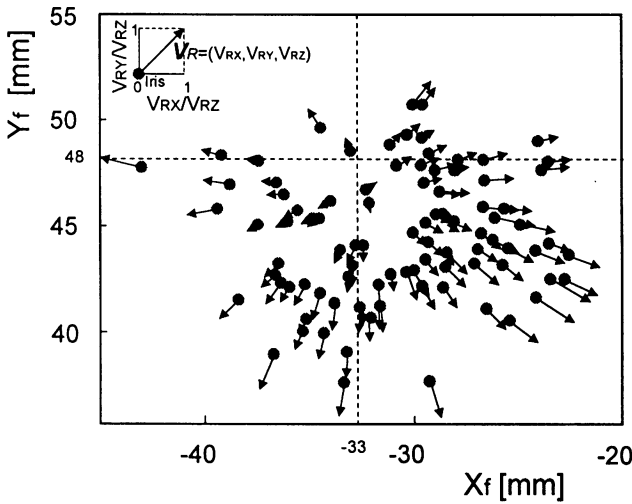


Fig. 6 Relationship between lines-of-sight and positions of right iris

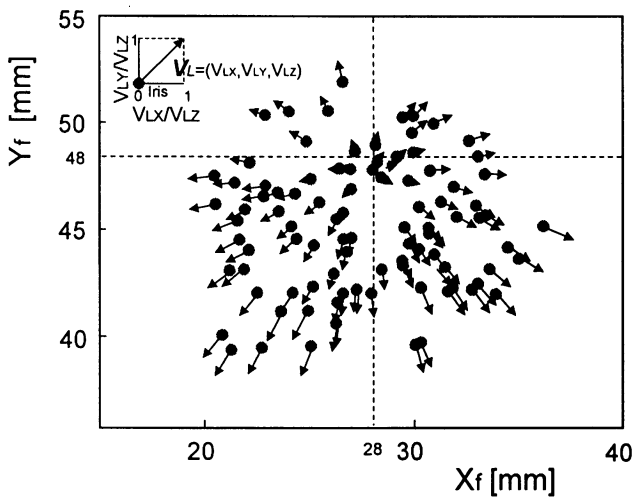


Fig. 7 Relationship between lines-of-sight and positions of left iris

に対応している。

Fig.7 は、同様に左瞳中心位置 I_L と視線の向き V_L の関係を示している。瞳中心位置が(28, 48)において、 V_{Lx} / V_{Lz} および V_{Ly} / V_{Lz} の値は、ほぼ0に等しく、視線の向きが Z_f 軸方向とほぼ等しいことを示している。また、右瞳の場合と同様に、 V_{Lx} / V_{Lz} 値および V_{Ly} / V_{Lz} 値は瞳中心位置に対応している。

Fig.6 および Fig.7 のように、瞳中心位置の移動範囲は、 Y_f 軸方向においては左右共に 12mm 程度であり、ほぼ等しい値を示している。一方、 X_f 軸方向においては右瞳が 20mm 程度であるのに対し、左瞳は 17mm 程度であり10%程度の差が生じた。しかしながら、左右の瞳中心位置と視線の向きが求められたことから、顔画像より左右の瞳中心位置を求め、これより視線の向きを明らかにすることが可能である。

Fig.8 および Fig.9 に注視点位置と瞳中心位置および顔の向きとの関係を X_f 軸方向および Y_f 軸方向についてそれぞれ示す。なお、図の横軸は注視点であるマーカーの座標値を、縦軸は顔の

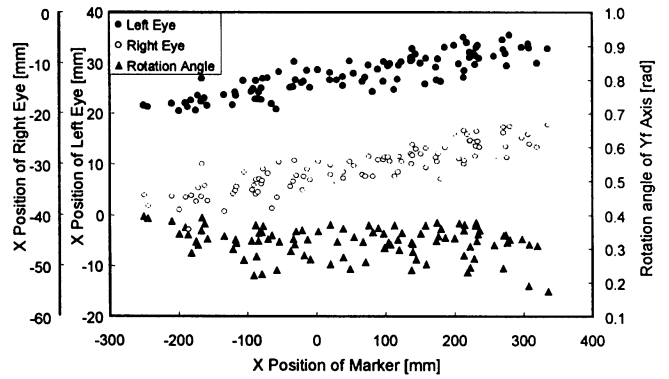


Fig. 8 Relation between face direction and position of iris (X_f -axis direction)

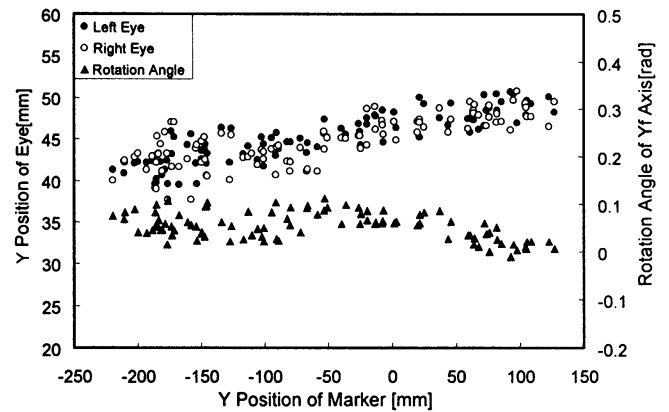


Fig. 9 Relation between face direction and position of iris (Y_f -axis direction)

向きに対応する顔座標軸の回転角と瞳中心位置をそれぞれ示している。Fig.8 に示すように注視点の X_f 座標が-100mm から 250mm の範囲内にある場合、水平方向の顔の向きに対応する▲で示す Y_f 軸の回転角は 0.38rad 程度のほぼ一定値を示すのに対し、その他の領域においては、マーカーの X_f 座標値の増加に対し、減少傾向を示す。一方、○で示す右瞳の中心位置 I_R は、マーカーの X_f 座標値の増加に伴い単調に増加傾向を示すのに対し、●で示す左瞳の中心位置 I_L は-150mm 以下および 250mm 以上の範囲で、変化量が減少する。このことは、Fig.6 に示す右瞳中心位置 I_R の X_f 軸方向の移動範囲が、Fig.7 に示す左瞳中心位置 I_L の移動範囲に対し、比較的大きいことと一致しており、被験者は利き目である左目でマーカーを注視することが、鼻の死角に入る等の理由で困難になった場合に、顔の向きを変化させて対応しているものと考えられる。

一方、注視点の Y_f 軸方向の移動に対しては、Fig.9 に示すように▲で示す X_f 軸の回転角は、注視点の Y_f 座標が 50mm 以下ではほぼ一定値を示しているのに対し、それ以上の領域では減少傾向を示す。また、この領域では●および○で示す左右瞳中心位置の変化量が減少しており、マーカーを注視するために顔の向きを変化させて対応していることがわかる。なお、左右の瞳中心位置の Y_f 軸方向移動範囲は、 X_f 軸方向のような顕著な差は認められない。

3-3 視点検出精度の検討

視点の検出は、左右両瞳中心位置(I_L, I_R)と視線の向き(V_L, V_R)を考慮し、左右の視線の交点を求めることで行う。しかしながら、計測誤差等の影響より左右の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考えられる。このような場合は、左右視線とこれらの共通垂線との交点を求め、これらの中点を視点とした。

本手法により得られる視点位置の検出精度を評価・検討するために、座標値が既知のマーカを注視した場合の被験者を、3台のビデオカメラから構成される前述の視点位置検出システムで撮影し、画像解析の結果より得られた視点位置とマーカ座標を比較・検討した。なお、画像の解像度およびフレームレートは前述の実験と同様であり、それぞれ 640×480 pixels, 30 frames/sec である。計測は、マーカを被験者の顔正面 10cm の位置から 2m までの 8 個所にそれぞれ設置して行った。

測定結果をFig.10に示す。図の横軸はマーカのZw座標値であり、Fig.4に示すシステム較正時の指標点に基づく実空間座標値を示している。なお、測定に際し実空間座標系におけるZw座標値が0になる位置に、顔座標系の原点を固定したことから、図中のZw座標値はマーカから顔までの距離にほぼ等しい。縦軸は、検出誤差 $\Delta X_w, \Delta Y_w$ および ΔZ_w を示しており、検出された視点位置の実空間座標値とマーカ座標値の差を、実空間座標系に基づくXw軸方向、Yw軸方向およびZw軸方向についてそれぞれ示している。Xw軸およびYw軸方向では、注視点と顔との距離が1m以上の領域では、測定値のばらつきが大きくなるものの、最大で30mm以下である。なお、それ以下の領域では、測定値のばらつきは比較的小さい。一方、Zw軸方向の誤差は最大で100mm程度の値を示すものの、注視対象物のZw座標より視点位置の補正が可能であることから、車椅子移動時の視点移動特性を評価する際においては、特に大きな問題は生じないものと考えられる。また、視点位置より数度の範囲内は、十分正確に注視対象物を認識することが可能であることから、事故防止システムを確立する目的においては、本視点位置検出システムは十分な精度を有しているものと考えられる。

4. 車椅子移動時の視点検出

4-1 実験方法

Fig.11に示すように、60cmの間隔で設置した2つの障害物間を幅57cmの車椅子で通過する際の視点位置を検出し、移動特性を明らかにした。なお、図中の座標軸はシステム較正の際に用いた指標点に基づく実空間座標軸を、カメラ位置はこの座標系に基づく代表値をそれぞれ示している。撮影は3台のビデオカメラを用いて行い、得られた画像をパーソナルコンピュータに入力し解析を行うことで、1mの助走区間の移動後より障害物間を通過するまでの視点位置を検出する。なお、それぞれのビデオカメラで得られた画像データの同期は、被験者に装着したLEDを一定時間で点滅させることで行った。

撮影はカメラ位置および望遠倍率を固定して行うことから、得られた顔画像はフレームに対し比較的小さく、測定精度の点で好ま

しくない。そこで、顔画像のカメラ座標値抽出点周辺を Wavelet 変換し、拡大した後にカメラ座標値を決定した。実験は、20歳代および30歳代の健康な男女5名に対して行った。被験者は、いずれも10時間程度の車椅子の使用経験を有する。よって、リハビリテーション期間における初期過程での視点位置移動特性が得られているものと考えられる。さらに、同一被験者が障害物間を歩行して通過する際も同様に計測を行い、車椅子移動時と歩行時の視線の移動特性を比較・検討した。なお、被験者に対しては、進行方向に配したマーカをできるだけ注視すること、および障害物に対し正確に回避することを指示し、移動速度ならびに歩行速度は被験者の判断に従った。

4-2 実験結果

測定開始位置から終了位置までの距離1.8mの移動に要した平均時間は、車椅子移動時においては5.3秒であったのに対し、歩行時においては2.7秒であり、平均速度で50%の差が生じた。Fig.12は車椅子移動時における顔の位置と視点位置の関係の一例を示しており、図中の横軸は顔座標系原点 O_f の実空間座標系に基づくZ座標値 Pr_z を、縦軸は視点位置をそれぞれ示している。図中Aで示す車椅子前輪が障害物に到達するまでの間において、視点位置は左右の障害物正面を交互に移動している。一方、同図中Bで示す車椅子後輪が障害物を通過するまでの間の視点位置は、左右の障害物を往復しており、かつ前後方向にも大きく移動し、車椅子と障害物との間隔を常に確認していること

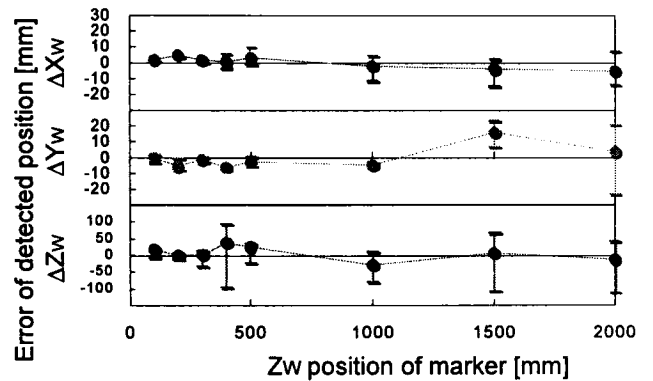


Fig. 10 Result of detection

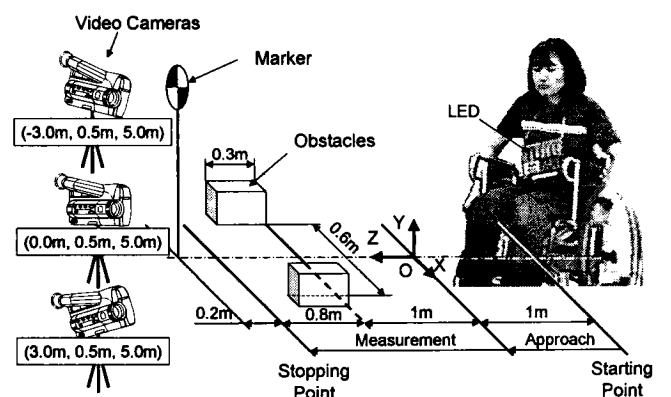


Fig. 11 Experimental setup

がわかる。他方、障害物間を通過した直後より、視点位置はマーカーの位置に急激に移動しており、測定開始後初めてマーカーを注視していることがわかる。なお、車椅子移動に対する熟練度などの影響により、多少の差異は認められるものの、全ての被験者についてほぼ同様な傾向が得られた。

一方、Fig.13 は Fig.12 の車椅子移動時の結果と同一の被験者による歩行時の視点検出結果の一例を示している。歩行時においては、測定開始直後より視点位置はマーカーの座標値とほぼ一致しており、障害物への接近過程および通過過程に関わらず常にマーカーを注視していることがわかる。これは、助走区間を歩行している間に、障害物の位置の確認を終了したことから、測定区間を移動する際において、障害物をほとんど注視することなく、障害物間を通過することが可能であったためと考えられる。

5. 結 言

本研究では車椅子移動時における視線に着目し、視点の移動特性を評価する研究の一環として、ステレオ画像解析手法を利用した非接触の視点検出システムを構築した。非接触で視点位置を検出するために DLT 法を適用し、顔上の特徴点座標を 3 次元測定した。左右目頭および鼻孔中心位置より顔の位置および向きを、左右瞳の中心位置より視線の向きをそれぞれ検出し、得られた結果をもとに視点位置を求めた。さらに、障害物間を通過す

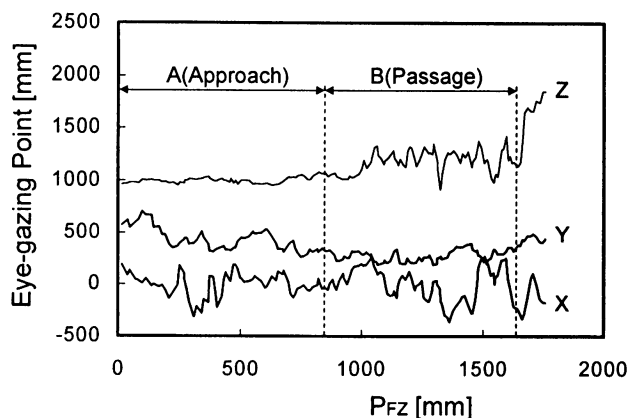


Fig. 12 Variation of eye-gazing point (wheelchair)

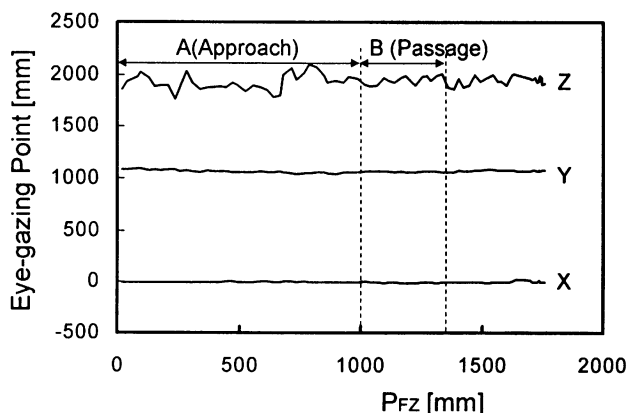


Fig. 13 Variation of eye-gazing point (walking)

る際の車椅子移動時および歩行時の視点位置検出に本システムを適用し、両者の比較を行った結果、以下に示す知見を得た。

- (1) 本視点位置検出システムは、測定デバイスを被験者に装着する必要がなく、さらに DLT 法を利用していることからカメラの設置位置に対する拘束条件が少ない。また、予め左右の瞳位置と視線の向きを明らかにすることで、複数方向の顔画像より視点位置を検出することが可能である。
- (2) 画像解析に際し Wavelet 変換を利用することで、比較的輪郭線の鮮明な拡大画像が得られることから、撮影領域を広く設定することが可能である。したがって、車椅子移動時のように顔の位置が比較的大きく移動する場合においても、視点位置の検出が可能であるとともに、得られた結果は、視点位置移動特性を評価する上で十分な精度を有する。

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), 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) 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 1971; 25(10): 1076-1081.
- 4) 大門 樹, 茂木一秀, 川嶋広尚, 動画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.
- 5) 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着用文字入力装置の試作. 機論 C 編 1997; 63(609): 1546-1550.
- 6) 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. 機論 C 編 1998; 64(620): 1237-1243.
- 7) 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. 機論 C 編 1997; 63(608): 1167-1171.
- 8) 松田光正, 岩壺卓三, 伊吹竜大, 黒坂昌弘, 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に関する研究. 機論 C 編 1997; 63(607): 875-880.
- 9) 尾田雅文, 関口行雄, 原利昭, ステレオ画像法による非接触視線検出システム. 第 14 回 LS 学会抄録 1998:81.
- 10) 尾田雅文, 原利昭, ステレオ画像法による非接触視点検出システム. 機講論 1998;98-31:222-226.
- 11) 大橋正尚, 平野一成, 高村昭生, 小野隆彦, ステレオ画像法を用いた顎運動計測装置の開発. 機講論 1996;96-20: 270-283.
- 12) 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. 機講論 1995;95-26:253-254.
- 13) 芦野隆一, 山本鎮男. ウェーブレット解析・誕生・発展・応用. 初版. 東京: 共立出版, 1997.