

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*

尾田 雅文*¹, 真田 希*², 関口 行雄*³
磯村 恒*³, 原 利昭*⁴Non-Contact Eye-Gazing Point Detection Technique
via Two Dimensional Multi Resolution AnalysisMasafumi ODA*⁵, Nozomi SANADA, Yukio SEKIGUCHI,
Tsuneshi ISOMURA and Toshiaki HARA*⁵ The Polytechnic University, Dept. of Rehabilitation Engineering,
Hashimotodai 4-1-1, Sagami-hara, Kanagawa, 229-1196 Japan

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 multi resolution 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, Biomechanics, Human Engineering, Human Interface, Physically Handicapped People, Multi Resolution Analysis

1.緒言

近年、肢体障害者が車椅子等の移乗支援装置を利用して、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ることから、適切な防止策が望まれている。これを実現させるためには、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。

人は、一般に移動時における情報の多くを視覚系からの入力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。このような観点から、近年眼球運動の計測・評価に関する研究が数多く行われており、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⁾等が報告されている。前者においては注視方向の検出精度は良好であるものの、被験者の頭部および顔部に入力装置を装着する必要があることから、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⁽³⁾。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に起因する計測値への影響は、小さいと考えられる。しかしながら、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手法を、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⁽⁴⁾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⁽⁵⁾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

* 原稿受付 2000年1月4日。

¹ 正員、職業能力開発総合大学校 (☎229-1196 相模原市橋本台4-1-1)。² 栃木職業能力開発促進センター (☎320-0072 宇都宮市若草1-4-23)。³ 職業能力開発総合大学校。⁴ 正員、新潟大学工学部 (☎950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)。

E-mail: odamasa@uitek.ac.jp

は有効であると考えられる。一方、従来の研究例の多くは、頭部の移動量が比較的小さい場合を計測対象としており、運動時や移動時の評価に適用した例は、比較的少ないようである。

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⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾の一環として、ステレオ画像解析手法を利用した眼球運動計測ならびに、2次元多重解像度解析(Multi Resolution Analysis: 以下、MRAと記す)を含む画像拡大手法に着目し、顔画像上の計測点の検出誤差による影響を出来るだけ最小にすること、および比較的頭部の移動量が多い場合の計測を考慮した非接触の視点位置測定手法を提案するとともに、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、その測定精度を評価した。さらに、本システムの実用性を検討するために、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適用し、両者における視点位置移動特性の比較を行い、その結果を考察した。

2. 視点検出方法

顔の向きおよび左右視線の向きを顔上の計測点の座標値に基づきそれぞれ測定し、両者の検出結果を考慮することによって、視点位置の検出を行う。顔上の計測点の3次元座標値は、ビデオカメラで得られた顔画像上の計測点の2次元座標値を求め、これを基にDirect Linear Transformation (DLT)法⁽¹¹⁾⁽¹²⁾を利用して決定する。DLT法を利用した3次元座標の計測は、2台のビデオカメラを用いることで十分可能であるが、顔の向きの変化や移動等の影響により、検出すべき顔上の計測点が死角に入り、得られた画像上でこれらを検出できなくなることを配慮し、本研究では3台のビデオカメラを用いた。

図1は視点位置検出の手順を示しており、以下に示す3つの過程に大別される。すなわち、ビデオカメラで得られた画像の拡大プロセス、顔画像より顔の向きおよび位置を検出するプロセス、瞳の位置より左右の視線の向きを決定し、これに基づき視点位置を求めるプロセスから構成される。本視点位置検出システムによる検出精度は、得られた顔画像の大きさによる影響が比較的小さいという特徴を有するものと考えられる。

2.1 MRAを利用した画像の拡大

設置位置が固定されたビデオカメラを用いて、移動する被験者の顔画像を得るためには、その移動領域を考慮し、撮影対象領域を広く設定する必要がある。よって、被験者の顔画像はビデオフレームに対し比較的小さくなることか

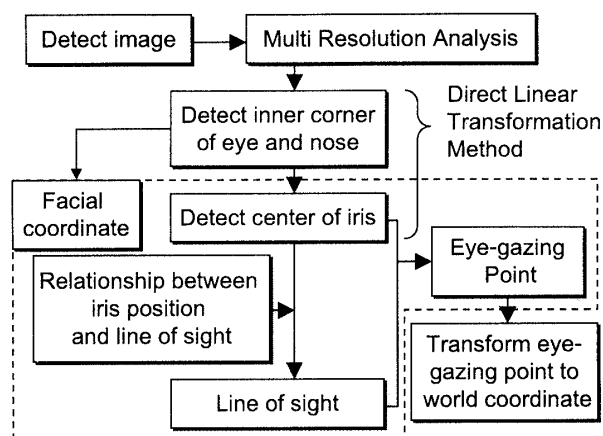


Fig.1 Flow chart for detecting eye-gazing point

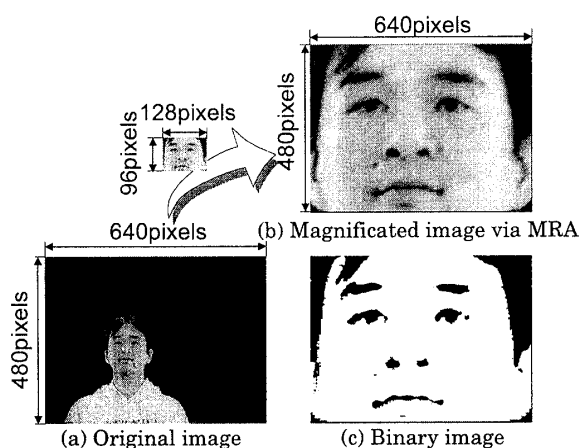


Fig.2 Magnification of facial image via MRA

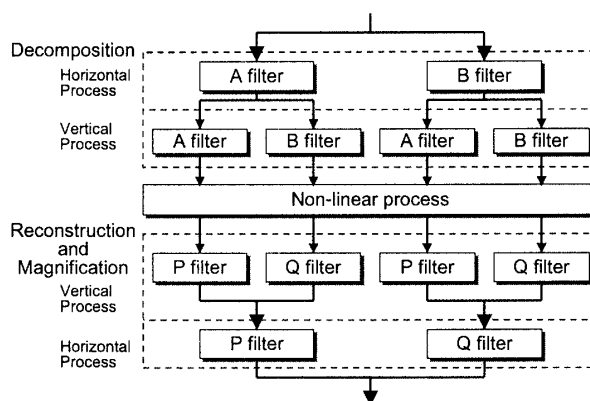


Fig.3 Flow chart for magnification of facial image

ら、顔上の計測点の検出誤差が、視点位置の検出精度に及ぼす影響が無視し得なくなる。そこで、図2に示すように得られた画像中の顔上の計測点を含む矩形領域を抽出し、この領域を2次元MRAによるフィルタ処理を含む画像拡大処理を施した。抽出する矩形領域の縦横のピクセル数は、それぞれ2の整数乗である必要があるものの、本法で得られる拡大画像は多項式補

間法のみを適用して得られる画像に比べ、細かなノイズ成分を増加させず、かつ明確な輪郭線が得られる特徴を有する。図3に本処理のフローチャートを示す。MRAのマザーウェーブレット関数 $\phi(x)$ には、次式に示すDaubechies関数⁽¹³⁾を適用した。

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

ここで、 $\phi(x)$ はスケーリング関数であり、次式に示すトウスケール関係を満たす。

$$\phi(x) = \sum_k p_k \phi(2x - k) \quad \dots(2)$$

ここで、数列 p_k, q_k ならびにスケーリング関数 $\phi(x)$ は、Daubechies 関数としての直行条件、規格化条件およびモーメントの条件を考慮するとともに、次式を適用することで決定される。

$$q_k = (-1)^k p_{1-k} \quad \dots(3)$$

MRAの適用に際し、画像の輝度および色差信号 $f(x)$ を式(4)のようにフーリエ変換し、式(5)および式(6)を

考慮し、式(7)中の数列 $c_{0,k}$ を決定する。

$$\hat{f}(x) = \sum_{x=0}^{N-1} f(x) e^{-2\pi x m i / N} \quad \dots(4)$$

$$\hat{c}(m) = \hat{f}(m) / \hat{\phi}(m) \quad \dots(5)$$

$$c_{0,k} = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \hat{c}(m) e^{-2\pi k m i / N} \quad \dots(6)$$

$$f(x) = \sum_k c_{0,k} \phi(x - k) \quad \dots(7)$$

さらに、図3中のAフィルタおよびBフィルタで示すように、得られた数列 $c_{0,k}$ は式(8)および式(9)により漸的に分解する。なお、 $j-1$ の絶対値は分解過程の繰り返し回数を示す。

$$c_{j-1,k} = \sum_l a_{l-2k} c_{j,l} \quad (j \leq 0) \quad \dots(8)$$

$$d_{j-1,k} = \sum_l b_{l-2k} c_{j,l} \quad (j \leq 0) \quad \dots(9)$$

ここで、数列 a_k および b_k は、次式で与えられる。

$$a_k = \frac{1}{2} p_k, \quad b_k = \frac{1}{2} q_k \quad \dots(10)$$

画像は2次元の情報を持つことから、水平方向について1ピクセル毎にMRAを実行した後に、垂直方向においても同様にMRAを適用した。図2中(C)に示す2値化処理における数居値の選択が容易なることを考慮し、エッジ部分を強調するために、得られた数列 $d_{j,k}$ を高周波成分に重みをつけて非線形変換し、さらに多項式補間法を利用して拡大処理した後に、次式を利用して再構成を行う。

$$c_{j,k} = \sum_l (p_{k-2l} c_{j-1,l} + q_{k-2l} d_{j-1,l}) \quad (j \leq 0) \quad \dots(11)$$

ここで、図3中のPフィルタおよびQフィルタは式(11)中の第1項および第2項による再構成過程をそれぞれ示している。再構成後、式(7)を適用して拡大画像を得た。

2.2 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、通常的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、可能な限り平常時と同じ環境を整えるために、被験者がセンサやマーカなどを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、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た。その結果に基づき、図4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利用し、これらの位置に基づく3次元

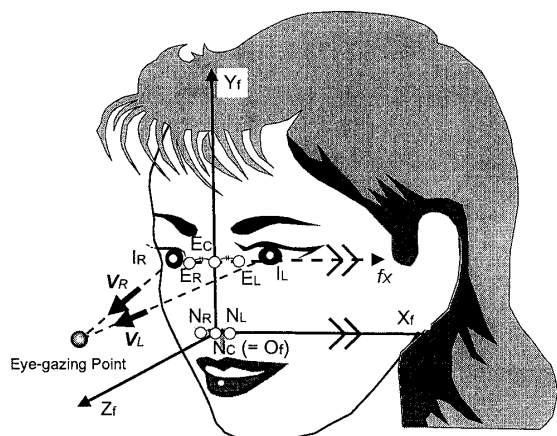


Fig.4 Four feature points on face and the facial coordinate

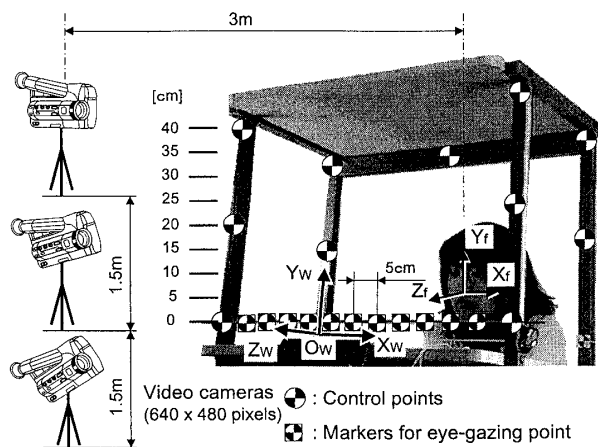


Fig.5 Configuration for calibration

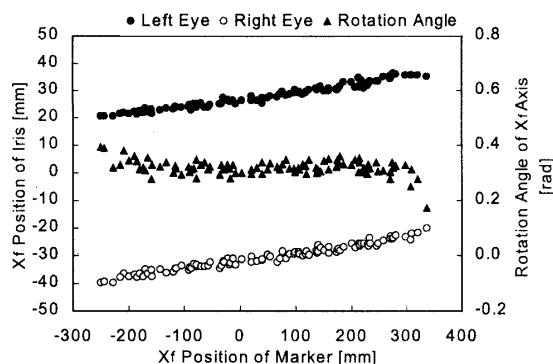


Fig.6 Relation between face direction and position of iris (X_f -axis direction)

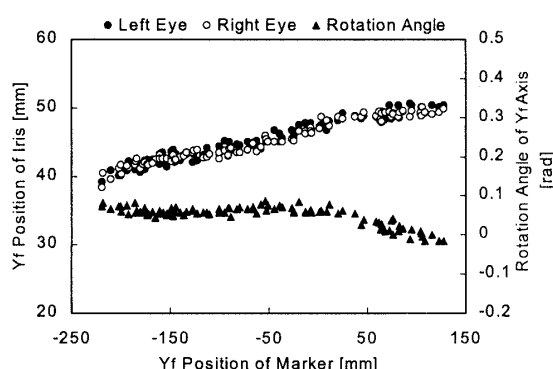


Fig.7 Relation between face direction and position of iris (Y_f -axis direction)

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、左右両鼻孔中心の midpoint N_c を座標系原点 O_f と定義し、 X_f 軸は左右両目頭を結ぶベクトル f_x と平行に、 Y_f 軸は原点 O_f と左右両目頭の midpoint E_c を通過するようにそれぞれ配置した。さらに、 X_f 軸および Y_f 軸に対し垂直に Z_f 軸を配置した。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。

2.3 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。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、それぞれの視線の向きを明らかにする。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する必要があることから、瞳中心位置 I_L, I_R と視線の向き V_L, V_R

の関係を以下に示す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。

図 5 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 個のマーカをそれぞれ注視することを被験者に指示し、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示している。さらに、このマーカを上下方向に 5cm 間隔で 9 カ所移動させることにより、計 99 カ所の注視点位置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、被験者頭部を物理的に拘束せず、顔の向きを出来るだけ一定方向に維持することを被験者に対し指示した。それぞれのビデオカメラで得られた顔画像 (640x480Pixels) 上の特徴点の 2 次元座標値をもとに、左右の目頭および鼻孔中心位置の 3 次元座標値を求め、顔座標系を構築した。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。

図 6 および図 7 は 20 歳代の健康な女性を被験者として行った較正実験で得られた結果であり、顔座標系に基づく注視点位置と瞳中心位置および顔の向きの関係を X_f 軸方向および Y_f 軸方向についてそれぞれ示している。なお、図の横軸は注視点であるマーカの座標値を、縦軸は顔の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。図 6 に示すように、注視点の X_f 座標値が -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 \blacktriangle で示す Y_f 軸の回転角は、0.38rad 程度のほぼ一定値を示す。一方、それ以外の領域においては、マーカの X_f 座標値の増加に対し減少しており、マーカが存在する方向に顔の向きを変化させていることを示す。○で示す右瞳の中心位置 I_R は、マーカの X_f 座標値の増加に伴い単調に増加傾向を示すことから、その移動範囲は 20mm 程度であるのに対し、●で示す左瞳の中心位置 I_L は -150mm 以下および 250mm 以上の領域で、変化量が減少することから、その移動範囲は 17mm 程度であり、瞳の移動量は左右で 10% 以上の差が生じた。これは、鼻の死角に入る等の理由で利き目である左瞳でマーカを注視することが困難になった場合に、被験者は顔の向きを変化させて対応していたためと考えられる。

一方、図 7 に示すように Y_f 軸方向における瞳中心の移動量は左右共に 12mm 程度であり、ほぼ等しい値を示している。垂直方向の顔の向きに対応する \blacktriangle で示す

X_f 軸の回転角は、注視点の Y_f 座標が50mm以下ではほぼ一定の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。

以上のように、左右の瞳で一部の領域において異なる移動特性が得られたものの、それぞれの瞳中心位置と視点位置の関係が求められた。左右の視線の向きは、左右の瞳中心位置から注視点までのベクトルで得られる。このベクトルと左右瞳中心位置の関係をそれぞれ求めることで、顔画像より視線の向きを明らかにすることが可能である。

2.4 視点検出精度の検討 視点位置の決定は、前述の左右両瞳中心位置 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、計測誤差等の影響により、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、そ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、図8に示すように3台のビデオカメラで、被験者から1m、2mおよび3mの距離に順次設置したX-Yテーブル上の速度1cm/sで移動するマーカーを注視する被験者を撮影した。ビデオカメラから被験者までの距離 L を3mおよび8mに設定し、それぞれ得られた視点位置の検出結果とマーカーの位置を比較・検討した。画像の解像度およびフレームレートは、それぞれ640×480 pixels, 30 frames/secとした。なお、 $L=3m$ においては、ビデオフレームと被験者の顔が、ほぼ等しい大きさになるのに対し、 $L=8m$ においては、顔画像の面積はビデオフレームに対し、1/25程度になる。

X-Yテーブルと被験者の距離 D が1mの場合の視点位置検出結果を図9および図10に示す。図中の○は、画像拡大処理を適用しない場合の検出誤差を、●は適用時の検出誤差をそれぞれ示している。図9に示す被験者とカメラの距離 L が3mの場合は、処理適用時の検出誤差の平均値は0.53cmであるのに対し、非適用時の誤差は0.51cmであることから、処理の有無による検出誤差への影響は、ほとんど無いと考えられる。一方、図10に示す被験者とカメラの距離 L が8mの場合は、処理を適用しない場合の検出誤差の平均が、1.07cmであったのに対し、適用した場合は0.56cmであった。よって、顔画像が比較的小さい場合において、画像拡大処理は特に有効であり、頭部の移動量が大きく撮影対象領域を広く設定する必要がある場合に、視点位置を検出する

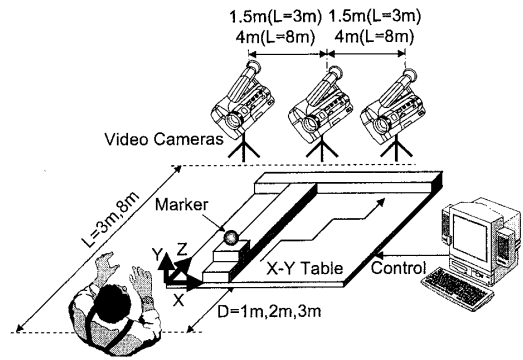
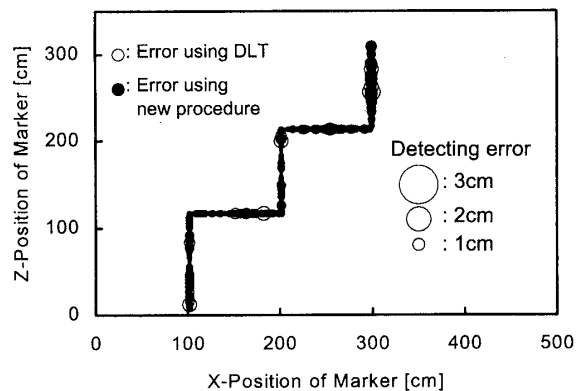
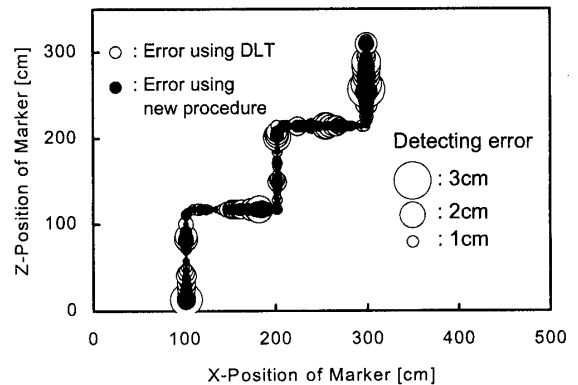
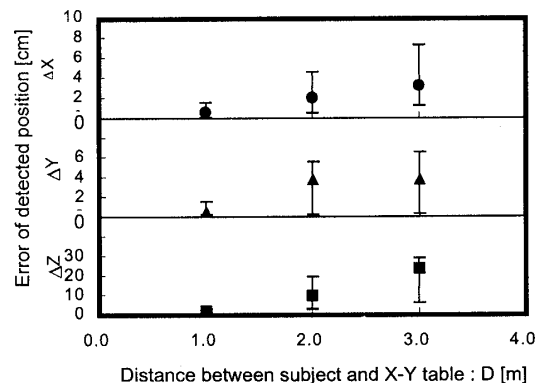


Fig.8 Experimental setup

Fig.9 Results of detection ($D=1m, L=3m$)Fig.10 Results of detection ($D=1m, L=8m$)Fig.11 Relationship between Error of detection and Distance D ($L=8m$)

ための有効な対応手段であると考えられる。

図11に被験者とカメラ間の距離Lを8mとし、拡大処理を適用した場合のX, Y, Z方向の視点位置検出誤差 ΔX , ΔY , ΔZ と被験者とX-Yテーブルの距離Dの関係を示す。距離Dが増加するに従い、検出誤差および測定値のばらつきも増加する傾向はあるものの、いずれの距離においても視線の向きの誤差は ± 2 度以下である。な

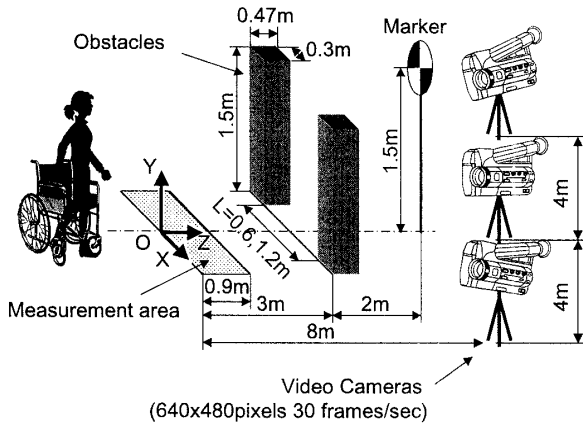


Fig.12 Experimental setup

お、Z軸方向の誤差は、最大で30cm程度の値を示すものの、実際の測定に際しては、注視対象物の座標に基づき、視点位置の補正が可能である。

3.車椅子移動時の視点検出

3.1 実験方法 本視点位置検出システムの実用性を検討するために、図12に示すように、60cmおよび120cmの間隔で設置した2つの障害物に対し、幅57cmの車椅子で接近する際の視点位置検出に本システムを適用し、その移動特性を明らかにした。さらに、同一被験者が障害物に対し歩行して接近する際の視点位置の計測を同様に行い、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、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、移動開始位置より0.9m間における移動時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

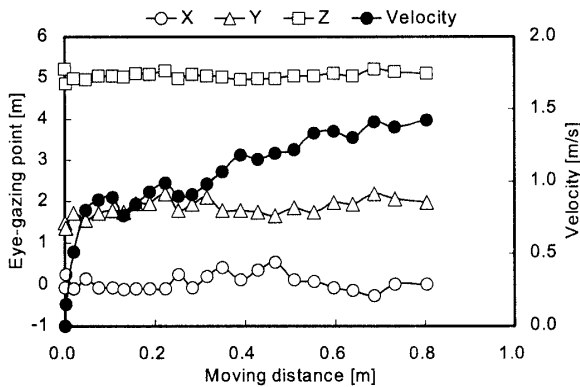


Fig.13 Variation of eye-gazing point (walking, L=0.6m)

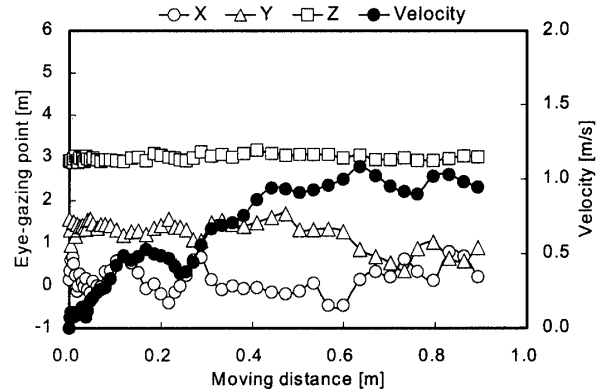


Fig.15 Variation of eye-gazing point (wheelchair, L=0.6m)

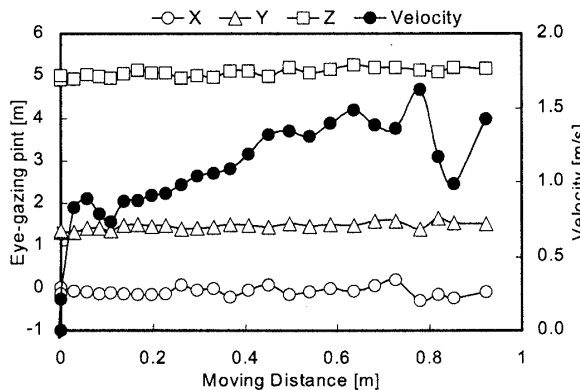


Fig.14 Variation of eye-gazing point (walking, L=1.2m)

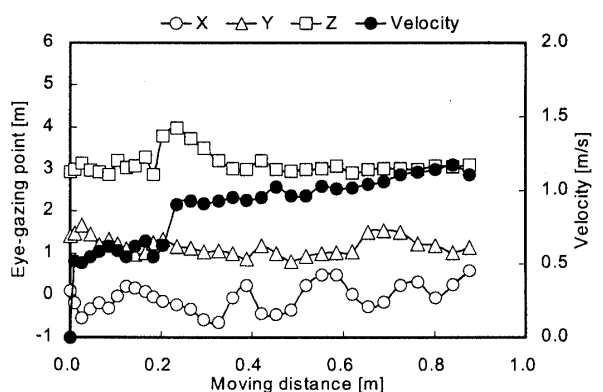


Fig.16 Variation of eye-gazing point (wheelchair, L=1.2m)

たLEDを一定時間で点滅させることで行った。

実験は、較正実験と同一な20歳代の健康な女性に対して行った。被験者は、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。なお、被験者に対しては、進行方向に配したマーカーを出来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。

3・2実験結果 図13および図14に示すように、歩行時における視点位置は、障害物を設置した間隔にかかわらず、いずれの場合も左右の障害物を往復移動している。特に図13に示すように、障害物の間隔Lが0.6mの場合に、その傾向が顕著である。しかしながら、視点位置のZ座標値は、マーカーが存在する5m前後の値を示していることから、被験者は指示どおりにマーカーに注意を配り、移動していることが推測される。これに対し車椅子移動時の視点位置は、図15および図16に示すように、歩行時に比べ視点位置の水平方向の移動がさらに顕著に表れている。また、視点位置のZ座標値は障害物が存在する3m前後の値を示している。これは、被験者が障害物を回避するために、歩行時よりも対象物への注視を必要としたためと考えられる。以上の様に、本システムを用いることで、車椅子移動時と歩行時における視点位置移動特性の差を明らかにすることが可能である。

4.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。さらに、本システムの実用性を検討するために、障害物に接近す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無く、さらに DLT 法を利用していることから、カメラの設置位置の自由度が比較的大きい。また、視点の3次元位置を検出可能であることから、被験者が遠近いずれの対象物を注視しているかを判断するのに有効である。なお、それぞれの被験者に対し予め左右の瞳位置と視線の向きの関係を明らかにする必要があるものの、この結果を

基に被験者の注視動作における瞳および頭部の移動特性を評価可能である。

(2) DLT 法を利用した非接触の視点検出システムに、2次元 MRA を利用した画像拡大処理を適用し、視点位置の検出精度、実用性に関する検討を行った。その結果、MRA を利用した画像拡大処理を適用することで、視点位置の検出誤差が減少した。特に、ビデオフレームに比べ被験者の顔画像が小さい場合にその効果が大きい。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し、撮影領域を広く設定する必要がある場合の視点位置の検出に、有効であると考えられる。

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, 自動車技術, (1977), Vol.31, No.7, 625-629.
- (3) 大門 樹, 茂木一秀, 川嶋広尚, 人間工学, (1995), Vol. 31, No.1, 39-50.
- (4) 谷島一嘉, 他 3 名, 自動車技術, (1971), Vol.25, No.10, 1076-1081.
- (5) 落合積, 他 3 名, 機論, C(1997), Vol.63, No.609, 1546-1550.
- (6) 西内信之, 柴田碧, 高田一, 機論, C(1998), Vol.64, No.620, 1237-1243.
- (7) 天谷検字, 原裕二, 青木繁, 機論, C(1997), Vol. 63, No.608, 1167-1171.
- (8) 松田光正, 他 5 名, 機論, C(1997), Vol. 63, No.607, 875-880.
- (9) 尾田雅文, 関口行雄, 原利昭, 第 14 回 LS 学会抄録, (1998), 81.
- (10) 尾田雅文, 原利昭, 機講論 No.98-31, (1998), 222-226.
- (11) 大橋正尚, 他 3 名, 機講論 No.96-20, (1996), 270-283.
- (12) 植木一範, 他 4 名, 機講論 No.95-26, (1995), 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, 共立出版, (1997), 125.