

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6963820号
(P6963820)

(45) 発行日 令和3年11月10日(2021.11.10)

(24) 登録日 令和3年10月20日(2021.10.20)

(51) Int.Cl. F I
G O 6 T 7 / 7 0 (2017.01) G O 6 T 7 / 7 0 B

請求項の数 13 (全 37 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2018-533562 (P2018-533562) (86) (22) 出願日 平成29年8月10日 (2017. 8. 10) (86) 国際出願番号 PCT/JP2017/029092 (87) 国際公開番号 W02018/030515 (87) 国際公開日 平成30年2月15日 (2018. 2. 15) 審査請求日 令和2年6月30日 (2020. 6. 30) (31) 優先権主張番号 特願2016-158944 (P2016-158944) (32) 優先日 平成28年8月12日 (2016. 8. 12) (33) 優先権主張国・地域又は機関 日本国 (JP)</p>	<p>(73) 特許権者 304023318 国立大学法人静岡大学 静岡県静岡市駿河区大谷836 (74) 代理人 100088155 弁理士 長谷川 芳樹 (74) 代理人 100124800 弁理士 諏澤 勇司 (74) 代理人 100170818 弁理士 小松 秀輝 (72) 発明者 海老澤 嘉伸 静岡県浜松市中区城北3丁目5-1 国立 大学法人静岡大学内 審査官 山田 辰美</p>
---	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 視線検出装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

対象者の眼を含む複数の眼画像を得る画像取得部と、
 前記画像取得部の近傍に配置されて、前記眼において角膜反射を生じさせるための光を前記対象者に照射する光源と、

前記複数の眼画像を利用して、前記複数の眼画像に含まれた前記眼の瞳孔形状、瞳孔中心の位置 (P _S) 及び角膜反射の位置 (G _S) に関する情報を取得し、取得された前記情報に基づいて前記対象者の視線を得る画像処理部と、を備え、

前記画像処理部は、

前記瞳孔中心の位置 (P _S) 及び前記角膜反射の位置 (G _S) を利用して、第1光軸候補を得る第1光軸取得部と、

前記瞳孔形状を利用して、第2光軸候補を得る第2光軸取得部と、

前記複数の眼画像に含まれた前記瞳孔の外形形状を所定形状に近似すると共に、前記所定形状における長径 (L _A) と短径 (L _B) とにより示される評価値 (R = L _A / L _B) を得る第4演算部と、

前記瞳孔形状に基づく前記評価値を利用して前記対象者の眼の光軸を取得するための情報を生成すると共に、前記情報に基づいて選択した前記第1光軸候補及び前記第2光軸候補のいずれか一方を前記光軸として出力する光軸情報取得部と、

前記眼の視軸に対する前記光軸のずれを示す較正情報を提供する較正情報部と、

前記較正情報を利用して、前記光軸を較正することにより前記視線としての前記視軸を

10

20

得る視軸取得部と、を有し、

前記光軸情報取得部は、

前記評価値 ($R = L_A / L_B$) の逆数の逆余弦成分として得られる傾き (s) が閾値より小さい場合に、前記第 1 光軸候補を前記光軸として選択する情報を生成し、

前記評価値 ($R = L_A / L_B$) の逆数の逆余弦成分として得られる傾き (s) が閾値より大きい場合に、前記第 2 光軸候補を前記光軸として選択する情報を生成する、視線検出装置。

【請求項 2】

前記較正情報は、ずれ角 (θ_0) であり、

前記ずれ角 (θ_0) は、前記視軸に対する前記光軸のずれを示すベクトルであり、大きさ ($|\theta_0|$) 及び前記視軸に前記光軸の傾き (θ_0) によって示される、請求項 1 に記載の視線検出装置。

10

【請求項 3】

前記画像処理部は、

前記画像取得部の位置 (O_S) から前記瞳孔中心の位置 (P_S) へ向かう第 1 ベクトル (OP) を得る第 1 演算部と、

前記角膜反射の位置 (G_S) から前記瞳孔中心の位置 (P_S) へ向かう第 2 ベクトル (r) を得る第 2 演算部と、

前記第 1 ベクトル (OP) を法線とする仮想視点平面を得る第 3 演算部と、

前記所定形状の短軸と水平軸との間の傾き (α) を得る第 5 演算部と、
を有し、

20

前記第 1 光軸取得部は、前記第 1 ベクトル (OP) を基準とした角 (β) の大きさ ($|\beta|$) と、前記仮想視点平面に含まれた水平軸を基準とした傾き (α) とにより示される前記第 1 光軸候補を、前記角 (β) の大きさ ($|\beta|$) に関連付けられた前記第 2 ベクトル (r) の大きさ ($|r|$) と、前記傾き (α) に関連付けられた前記第 2 ベクトル (r) と前記水平軸のなす傾き (α') と、を利用して取得し、

前記第 2 光軸取得部は、前記第 1 ベクトル (OP) を基準とした前記角 (β) の大きさ ($|\beta|$) と前記仮想視点平面に含まれた水平軸を基準とした前記傾き (α) とにより示される前記第 2 光軸候補を、前記角 (β) の大きさ ($|\beta|$) に関連付けられた前記評価値 (R) と、前記傾き (α) に関連付けられた前記傾き (α') と、を利用して得る、請求項 1 又は 2 に記載の視線検出装置。

30

【請求項 4】

前記第 1 光軸取得部は、前記第 2 ベクトル (r) の大きさ ($|r|$) を、第 1 係数 (k) を利用して前記角 (β) の大きさ ($|\beta|$) に関連付ける、請求項 3 に記載の視線検出装置。

【請求項 5】

前記画像取得部は、前記複数の眼画像に含まれる第 1 眼画像を得ると共に第 1 カメラ位置 (O_{S1}) に配置された第 1 カメラと、前記複数の眼画像に含まれる第 2 眼画像を得ると共に第 2 カメラ位置 (O_{S2}) に配置された第 2 カメラと、を有し、

前記眼は、第 1 眼と第 2 眼とを有し、

40

前記第 1 眼は、第 1 角膜反射の位置 (G_{S1}) と、第 1 瞳孔中心の位置 (P_{S1}) と、第 1 光軸と、を有し、

前記第 2 眼は、第 2 角膜反射の位置 (G_{S2}) と、第 2 瞳孔中心の位置 (P_{S2}) と、第 2 光軸と、を有し、

前記画像処理部は、

前記第 1 眼画像を利用して、前記第 1 角膜反射の位置 (G_{S1}) から前記第 1 瞳孔中心の位置 (P_{S1}) へ向かう第 3 ベクトル (r_1) と前記第 1 カメラ位置 (O_{S1}) から前記第 1 瞳孔中心の位置 (P_{S1}) へ向かう第 4 ベクトルとに基づいて、前記第 1 カメラ位置 (O_{S1}) と、前記第 1 瞳孔中心の位置 (P_{S1}) と、前記第 4 ベクトルを法線とする第 1 仮想視点平面に前記第 1 光軸が交差する位置と、を含む第 1 仮想光軸平面に関する情

50

報を得る第6演算部と、

前記第2眼画像を利用して、前記第2角膜反射の位置(G_{S2})から前記第2瞳孔中心の位置(P_{S2})へ向かう第5ベクトル(r_2)と前記第2カメラ位置(O_{S2})から前記第2瞳孔中心の位置(P_{S2})へ向かう第6ベクトルとに基づいて、前記第2カメラ位置(O_{S2})と、前記第2瞳孔中心の位置(P_{S2})と、前記第6ベクトルを法線とする第2仮想視点平面に前記第2光軸が交差する位置と、を含む第2仮想光軸平面に関する情報を得る第7演算部と、

前記第1係数(k)を得る係数部と、をさらに有し、

前記係数部は、

前記第1仮想光軸平面と前記第2仮想光軸平面とが互いに交差する交線及び前記第4ベクトルから得られる第5角度(θ_1)と、前記第3ベクトル(r_1)の大きさ($|r_1|$)と、を利用して、前記第1眼に対応する前記第1係数(k_1)を得ると共に、前記交線及び前記第6ベクトルから得られる第5角度(θ_2)と、前記第5ベクトル(r_2)の大きさ($|r_2|$)と、を利用して、前記第2眼に対応する前記第1係数(k_2)を得る、請求項4に記載の視線検出装置。

10

【請求項6】

前記第4演算部は、前記第1眼画像を利用して、前記第1眼画像に含まれた前記瞳孔の外形形状を示す前記所定形状の長径(L_{A1})と短径(L_{B1})との比である第1評価値($R_1 = L_{A1} / L_{B1}$)を得ると共に、前記第2眼画像を利用して、前記第2眼画像に含まれた前記瞳孔の外形形状を示す前記所定形状の長径(L_{A2})と短径(L_{B2})との比である第2評価値($R_2 = L_{A2} / L_{B2}$)を取得し、

20

前記画像処理部は、前記第1評価値(R_1)と前記第2評価値(R_2)とを比較して、水平方向における前記対象者の視線方向を判別する方向判定部をさらに有する、請求項5に記載の視線検出装置。

【請求項7】

前記第2光軸取得部は、前記評価値(R)の逆数の逆余弦成分を、第2係数(h)を利用して前記角(θ)の大きさ($|\theta|$)に関連付ける、請求項3~6のいずれか一項に記載の視線検出装置。

【請求項8】

前記第2光軸取得部は、前記角(θ)の大きさ($|\theta|$)の取得において、前記対象者が有する眼球の角膜における屈折に起因する瞳孔輪郭のずれが補正された補正評価値(R')を利用する、請求項3~7のいずれか一項に記載の視線検出装置。

30

【請求項9】

前記眼は、第1眼と第2眼とを有し、

前記画像処理部は、

前記第1眼における瞳孔中心の位置(P_{S1})、前記第2眼における瞳孔中心の位置(P_{S2})、前記対象者が有する一对の鼻孔のうち、第1鼻孔の位置(N_{S1})、及び、第2鼻孔の位置(N_{S2})のそれぞれの三次元座標を取得する座標取得部と、

前記瞳孔中心の位置(P_{S1})、前記瞳孔中心の位置(P_{S2})、前記第1鼻孔の位置(N_{S1})、及び、前記第2鼻孔の位置(N_{S2})を利用して、前記対象者の顔姿勢を取得する顔姿勢取得部と、をさらに有する、請求項1~8のいずれか一項に記載の視線検出装置。

40

【請求項10】

前記画像取得部は、前記対象者の顔を含む第1画像を得る第1カメラと、前記第1カメラから離間した位置に配置されると共に前記対象者の顔を含む第2画像を得る第2カメラを有し、

前記座標取得部は、前記第1画像及び前記第2画像に基づくステレオマッチング法により、前記第1眼における瞳孔中心の位置(P_{S1})、前記第2眼における瞳孔中心の位置(P_{S2})、前記第1鼻孔の位置(N_{S1})、及び、前記第2鼻孔の位置(N_{S2})のそれぞれの三次元座標を取得する、請求項9に記載の視線検出装置。

50

【請求項 1 1】

前記画像取得部は、前記対象者の顔を含む第3画像を得る一台の第3カメラを有し、
前記座標取得部は、前記第1眼、前記第2眼、前記第1鼻孔及び前記第2鼻孔から生成される3個の特徴点間の距離を算出する距離演算部と、

前記第3カメラによって取得された前記第3画像を利用して、前記第3画像における3個の前記特徴点に関する二次元座標を算出する二次元座標演算部と、

前記距離演算部において取得された前記距離と、前記座標取得部において取得された前記二次元座標とを利用して、生成された3個の前記特徴点のそれぞれの三次元座標を算出する三次元座標演算部と、を有する、請求項10に記載の視線検出装置。

【請求項 1 2】

前記光軸情報取得部は、前記瞳孔形状に基づいて、前記第1光軸候補及び前記第2光軸候補のいずれか一方を前記光軸として選択するための情報を生成する、請求項1～11のいずれか一項に記載の視線検出装置。

【請求項 1 3】

対象者の眼を含む複数の眼画像を得る画像取得部と、

前記画像取得部の近傍に配置されて、前記眼において角膜反射を生じさせるための光を前記対象者に照射する光源と、

前記複数の眼画像を利用して、前記複数の眼画像に含まれた前記眼の瞳孔形状、瞳孔中心の位置 (P_s) 及び角膜反射の位置 (G_s) に関する情報を取得し、取得された前記情報に基づいて前記対象者の視線を得る画像処理部と、を備え、

前記画像処理部は、

前記瞳孔中心の位置 (P_s) 及び前記角膜反射の位置 (G_s) を利用して、第1光軸候補を得る第1光軸取得部と、

前記瞳孔形状に基づき、前記対象者が有する眼球の角膜における屈折に起因する瞳孔輪郭のずれが補正された評価値 (R') を利用して、第2光軸候補を得る第2光軸取得部と、

前記瞳孔形状に基づき、前記第1光軸候補及び前記第2光軸候補の少なくとも一方を利用して、前記対象者の眼の光軸を取得するための情報を生成する光軸情報取得部と、

前記眼の視軸に対する前記光軸のずれを示す校正情報を提供する校正情報部と、

前記校正情報を利用して、前記光軸を校正することにより前記視線としての前記視軸を得る視軸取得部と、を有する、視線検出装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明の一形態は、視線検出装置に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、近赤外光源等の光源とビデオカメラとを使用した視線検出装置が普及しつつある。視線検出装置は、「瞳孔 - 角膜反射法」と呼ばれる検出方法を用いる。ビデオカメラに対する被験者の視線方向の角度が変化すると、ビデオカメラで得られる画像中の瞳孔と角膜反射との位置関係が変化する。「瞳孔 - 角膜反射法」は、この位置関係の変化を利用して、視線方向を得る。「瞳孔 - 角膜反射法」は、まず、座標が既知である視標を被験者に注視させる。その結果、「瞳孔 - 角膜反射法」は、画像における瞳孔と角膜反射との位置関係と視線方向の角度との関係を得る。次に、「瞳孔 - 角膜反射法」は、当該関係を利用して視線方向を得る。瞳孔 - 角膜反射法は視線検出精度が高いという利点を有する。

【0003】

例えば、特許文献1は、瞳孔 - 角膜反射法を用いた視線検出装置を開示する。視線検出装置は、カメラ校正 (ステレオ校正) がなされた2台以上のビデオカメラを有する。各カメラは、近赤外光源を有する。カメラと近赤外光源とを含む構成は、単に光学系と呼ばれる。視線検出装置は、近赤外光源を制御して点灯させながら、各カメラを利用して画像を

10

20

30

40

50

得る。視線検出装置は、取得した画像を利用して、瞳孔の座標と光源の角膜反射の座標とを得る。そして、視線検出装置は、それらの相対位置座標を利用して視線方向を得る。視線検出装置は、瞳孔の三次元座標の取得と、各カメラから瞳孔までの距離の正確な取得と、その距離の変化により変化する角膜反射 - 瞳孔中心ベクトルの較正と、により高精度な注視点の検出ができる。特許文献1の視線検出装置は、瞳孔の三次元位置が必要である。従って、瞳孔は、2台以上のカメラによって得られた複数枚の画像に含まれている必要がある。また、瞳孔及び角膜反射は、視線角度を決定するために、少なくとも1枚の画像に含まれている必要がある。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2005-185431号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

対象者の視線が光学系から大きくずれた方向に向いた場合、角膜における光源の反射光である角膜反射が角膜の領域からはみ出るおそれがある。この場合、光源の反射光は、角膜反射から白目反射と呼ばれる状態に変化する。白目反射を利用する視線検出は、精度が低下する傾向にある。角膜反射が得られる視線角度範囲は被験者によって大きく異なる。視線角度範囲は、およそ30度以上40度以下程度である。要するに、瞳孔 - 角膜反射法は視線方向の検出が可能な角度範囲が限られる傾向がある。従来の視線検出装置は、カメラに光源が取り付けられている。この構成によれば、被験者がカメラに向かう方向に対して大きくずれた方向を見た場合に、角膜反射が出現しない状態が生じ得る。従って、角膜反射を利用する瞳孔 - 角膜反射法は、視線を検出可能な範囲を拡大することが難しかった。

【0006】

本発明は、対象者の視線方向の検出範囲を拡大することが可能な視線検出装置を提供する。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明の一形態に係る視線検出装置は、対象者の眼を含む複数の眼画像を得る画像取得部と、画像取得部の近傍に配置されて、眼において角膜反射を生じさせるための光を対象者に照射する光源と、複数の眼画像を利用して、複数の眼画像に含まれた眼の瞳孔形状、瞳孔中心の位置 (P_s) 及び角膜反射の位置 (G_s) に関する情報を取得し、取得された情報に基づいて対象者の視線を得る画像処理部と、を備え、画像処理部は、瞳孔中心の位置 (P_s) 及び角膜反射の位置 (G_s) を利用して、第1光軸候補を得る第1光軸取得部と、瞳孔形状を利用して、第2光軸候補を得る第2光軸取得部と、瞳孔形状に基づき、第1光軸候補及び第2光軸候補の少なくとも一方を利用して、光軸を得るための情報を生成する光軸情報取得部と、眼の視軸に対する光軸のずれが角度によって示された較正情報を提供する較正情報部と、較正情報を利用して、光軸を較正することにより視線としての視軸を得る視軸取得部と、を有する。

【0008】

視線検出装置は、第1光軸取得部と第2光軸取得部とを有する。第1光軸取得部は、瞳孔中心の位置 (P_s) と角膜反射の位置 (G_s) とを利用して光軸を得る。従って、第1光軸取得部は、角膜反射が得られる視線の範囲において視線を検出できる。第2光軸取得部は、瞳孔の形状を利用して光軸を得る。従って、第2光軸取得部は、角膜反射が得られない視線の範囲であっても視線を検出できる。そして、光軸情報取得部は、瞳孔の形状を利用して第1光軸候補または第2光軸候補のいずれかを選択するための情報を生成する。第1光軸候補及び第2光軸候補から選択された光軸は、視軸取得部において、視軸に対するずれが較正される。その結果、視線としての視軸が得られる。従って、視線検出装置は

10

20

30

40

50

、視線を良好に検出できる範囲を、角膜反射が得られる狭い範囲から、角膜反射が得られない広い範囲まで拡大することができる。

【0009】

較正情報は、ずれ角 (θ_0) であり、ずれ角 (θ_0) は、視軸に対する光軸のずれを示すベクトルであり、大きさ ($|\theta_0|$) 及び視軸に光軸の傾き (α_0) によって示されてもよい。この構成によれば、視軸に対する光軸のずれを好適に較正することができる。

【0010】

画像処理部は、画像取得部の位置 (O_S) から瞳孔中心の位置 (P_S) へ向かう第1ベクトル (OP) を得る第1演算部と、角膜反射の位置 (G_S) から瞳孔中心の位置 (P_S) へ向かう第2ベクトル (r) を得る第2演算部と、第1ベクトル (OP) を法線とする仮想視点平面を得る第3演算部と、複数の眼画像に含まれた瞳孔の外形形状を楕円として近似すると共に、楕円の長径 (L_A) と短径 (L_B) とにより示される楕円度 ($R = L_A / L_B$) を得る第4演算部と、楕円の短軸と水平軸との間の傾き (β) を得る第5演算部と、有し、第1光軸取得部は、第1ベクトル (OP) を基準とした角 (θ) の大きさ ($|\theta|$) と、仮想視点平面に含まれた水平軸を基準とした傾き (α) とにより示される第1光軸候補を、角 (θ) の大きさ ($|\theta|$) に関連付けられた第2ベクトル (r) の大きさ ($|r|$) と、傾き (α) に関連付けられた第2ベクトル (r) と水平軸のなす傾き (β) と、を利用して取得し、第2光軸取得部は、第1ベクトル (OP) を基準とした角 (θ) の大きさ ($|\theta|$) と仮想視点平面に含まれた水平軸を基準とした傾き (α) とにより示される第2光軸候補を、角 (θ) の大きさ ($|\theta|$) に関連付けられた楕円度 (R) と、傾き (β) に関連付けられた傾き (α) と、を利用して得てもよい。

【0011】

この構成によれば、第1光軸取得部において第1光軸候補を好適に得ることができる。また、第2光軸取得部において第2光軸候補を好適に得ることができる。

【0012】

第1光軸取得部は、第2ベクトル (r) の大きさ ($|r|$) を、第1係数 (k) を利用して角 (θ) の大きさ ($|\theta|$) に関連付けてもよい。第1係数 (k) によれば、第2ベクトル (r) の大きさ ($|r|$) を角 (θ) の大きさ ($|\theta|$) に好適に変換することができる。

【0013】

画像取得部は、複数の眼画像に含まれる第1眼画像を得ると共に第1カメラ位置 (O_{S1}) に配置された第1カメラと、複数の眼画像に含まれる第2眼画像を得ると共に第2カメラ位置 (O_{S2}) に配置された第2カメラと、を有し、眼は、第1眼と第2眼とを有し、第1眼は、第1角膜反射の位置 (G_{S1}) と、第1瞳孔中心の位置 (P_{S1}) と、第1光軸と、を有し、第2眼は、第2角膜反射の位置 (G_{S2}) と、第2瞳孔中心の位置 (P_{S2}) と、第2光軸と、を有し、画像処理部は、第1眼画像を利用して、第1角膜反射の位置 (G_{S1}) から第1瞳孔中心の位置 (P_{S1}) へ向かう第3ベクトル (r_1) と第1カメラ位置 (O_{S1}) から第1瞳孔中心の位置 (P_{S1}) へ向かう第4ベクトルとに基づいて、第1カメラ位置 (O_{S1}) と、第1瞳孔中心の位置 (P_{S1}) と、第4ベクトルを法線とする第1仮想光軸平面に第1光軸が交差する位置と、を含む第1仮想光軸平面に関する情報を得る第6演算部と、第2眼画像を利用して、第2角膜反射の位置 (G_{S2}) から第2瞳孔中心の位置 (P_{S2}) へ向かう第5ベクトル (r_2) と第2カメラ位置 (O_{S2}) から第2瞳孔中心の位置 (P_{S2}) へ向かう第6ベクトルとに基づいて、第2カメラ位置 (O_{S2}) と、第2瞳孔中心の位置 (P_{S2}) と、第6ベクトルを法線とする第2仮想光軸平面に第2光軸が交差する位置と、を含む第2仮想光軸平面に関する情報を得る第7演算部と、第1係数 (k) を得る係数部と、をさらに有し、係数部は、第1仮想光軸平面と第2仮想光軸平面とが互いに交差する交線及び第4ベクトルから得られる第5角度 (θ_1) と、第3ベクトル (r_1) の大きさ ($|r_1|$) と、を利用して、第1眼に対応する第1係数 (k_1) を得ると共に、交線及び第6ベクトルから得られる第5角度 (θ_2) と、第5ベクトル (r_2) の大きさ ($|r_2|$) と、を利用して、第2眼に対応する第1

10

20

30

40

50

係数 (k_2) を得てもよい。

【0014】

この構成によれば、画像取得部が画像を得るごとに、視線と、第1係数 (k_1, k_2) と、が得られる。従って、第1係数 (k_1, k_2) を逐次更新することが可能になる。その結果、第2ベクトル (r) の大きさ ($|r|$) を角 (θ) の大きさ ($|\theta|$) に変換する精度を向上させることができる。また、第2ベクトル (r) の大きさ ($|r|$) と角 (θ) の大きさ ($|\theta|$) との関係が非線形である場合であっても、第2ベクトル (r) の大きさ ($|r|$) に対応する第1係数 (k_1, k_2) を得ることが可能になる。従って、第2ベクトル (r) の大きさ ($|r|$) を角 (θ) の大きさ ($|\theta|$) に変換する精度をさらに向上させることができる。

10

【0015】

第4演算部は、第1眼画像を利用して、第1眼画像に含まれた瞳孔の外形形状を示す楕円の長径 (L_{A1}) と短径 (L_{B1}) との比である第1楕円度 ($R_1 = L_{A1} / L_{B1}$) を得ると共に、第2眼画像を利用して、第2眼画像に含まれた瞳孔の外形形状を示す楕円の長径 (L_{A2}) と短径 (L_{B2}) との比である第2楕円度 ($R_2 = L_{A2} / L_{B2}$) を取得し、画像処理部は、第1楕円度 (R_1) と第2楕円度 (R_2) とを比較して、水平方向における対象者の視線方向を判別する方向判定部をさらに有してもよい。

【0016】

この構成によれば、簡易な処理によって、視線方向を得ることができる。

【0017】

第2光軸取得部は、楕円度 (R) の逆数の逆余弦成分を、第2係数 (h) を利用して角 (θ) の大きさ ($|\theta|$) に関連付けてもよい。第2係数 (h) によれば、楕円度 (R) を角 (θ) の大きさ ($|\theta|$) に好適に変換することができる。

20

【0018】

第2光軸取得部は、角 (θ) の大きさ ($|\theta|$) の取得において、対象者が有する眼球の角膜における屈折に起因する瞳孔輪郭のずれが補正された補正楕円度 (R') を利用してもよい。この構成によれば、角膜における屈折に起因する瞳孔輪郭のずれが補正される。従って、瞳孔形状法における視線検出の精度を高めることができる。

【0019】

眼は、第1眼と第2眼とを有し、画像処理部は、第1眼における瞳孔中心の位置 (P_{S1})、第2眼における瞳孔中心の位置 (P_{S2})、対象者が有する一对の鼻孔のうち、第1鼻孔の位置 (N_{S1})、及び、第2鼻孔の位置 (N_{S2}) のそれぞれの三次元座標を得る座標取得部と、瞳孔中心の位置 (P_{S1})、瞳孔中心の位置 (P_{S2})、第1鼻孔の位置 (N_{S1})、及び、第2鼻孔の位置 (N_{S2}) を利用して、対象者の顔姿勢を得る顔姿勢取得部と、をさらに有してもよい。

30

【0020】

この構成によれば、視線検出可能な範囲を拡大することができる。さらに、この構成によれば、対象者の顔姿勢を得ることができる。

【0021】

画像取得部は、対象者の顔を含む第1画像を得る第1カメラと、第1カメラから離間した位置に配置されると共に対象者の顔を含む第2画像を得る第2カメラを有し、座標取得部は、第1画像及び第2画像に基づくステレオマッチング法により、第1眼における瞳孔中心の位置 (P_{S1})、第2眼における瞳孔中心の位置 (P_{S2})、第1鼻孔の位置 (N_{S1})、及び、第2鼻孔の位置 (N_{S2}) のそれぞれの三次元座標を取得してもよい。

40

【0022】

この構成によれば、視線検出可能な範囲を拡大することができる。さらに、この構成によれば、対象者の顔姿勢を好適に得ることができる。

【0023】

画像取得部は、対象者の顔を含む第3画像を得る一台の第3カメラを有し、座標取得部は、第1眼、第2眼、第1鼻孔及び第2鼻孔から生成される3個の特徴点間の距離を算出

50

する距離演算部と、第3カメラによって取得された第3画像を利用して、第3画像における3個の特徴点に関する二次元座標を算出する二次元座標演算部と、距離演算部において取得された距離と、座標取得部において取得された二次元座標とを利用して、生成された3個の特徴点のそれぞれの三次元座標を算出する三次元座標演算部と、を有してもよい。

【0024】

この構成によれば、視線検出可能な範囲を拡大することができる。さらに、この構成によれば、対象者の顔姿勢を好適に得ることができる。

【0025】

光軸情報取得部は、瞳孔形状に基づいて、第1光軸候補及び第2光軸候補のいずれか一方を光軸として選択するための情報を生成してもよい。この構成によれば、第1光軸候補及び第2光軸候補のいずれか一方を光軸として選択することができる。

10

【発明の効果】

【0026】

本発明によれば、対象者の視線方向の検出範囲を拡大することが可能な視線検出装置が提供される。

【図面の簡単な説明】

【0027】

【図1】図1は、実施形態に係る視線検出装置の構成を示す図である。

【図2】図2は、角膜反射 - 瞳孔中心法の原理を説明するための図である。

【図3】図3の(a)部及び図3の(b)部は、瞳孔形状法の原理を説明するための図である。

20

【図4】図4は、瞳孔形状法の原理を説明するための図である。

【図5】図5は、視線に対する光軸のずれを説明するための図である。

【図6】図6は、光軸のずれの較正を説明するための図である。

【図7】図7は、視線検出装置の光学系を説明するための図である。

【図8】図8は、画像処理装置の構成を説明するための図である。

【図9】図9は、視線検出装置の構成を説明するための機能ブロック図である。

【図10】図10は、視線検出装置の動作を説明するためのフロー図である。

【図11】図11は、第1係数を得る方法を説明するための図である。

【図12】図12は、光軸を得る別の方法を説明するための図である。

30

【図13】図13は、変形例に係る視線検出装置を説明するための機能ブロック図である。

【図14】図14は、視線方向を検出する原理を説明するための図である。

【図15】図15は、視線方向を検出する原理を説明するための図である。

【図16】図16は、特徴点を説明するための図である。

【図17】図17は、別の変形例に係る視線検出装置を説明するための機能ブロック図である。

【図18】図18は、世界座標系とカメラ座標系の関係を説明するための図である。

【図19】図19は、さらに別の変形例に係る視線検出装置を説明するための機能ブロック図である。

40

【図20】図20は、拘束条件法による特徴点の三次元座標の算出を説明するための図である。

【図21】図21は、光軸情報取得部の動作を説明するための図である。

【発明を実施するための形態】

【0028】

以下、添付図面を参照しながら本発明を実施するための形態を詳細に説明する。図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

【0029】

図1に示されるように、視線検出装置1は、ディスプレイ装置30を見ている対象者Mの視線方向を検出するコンピュータシステムである。視線検出装置1は、対象者Mの眼を

50

光学系 15 によって撮像する。光学系 15 は、カメラ 10 (画像取得部、第 1 カメラ、第 2 カメラ、第 3 カメラ) と光源 13 とを有する。そして、視線検出装置 1 は、画像処理装置 20 (画像処理部) を利用して対象者 M の視線方向を検出する。対象者 M とは、視線方向を検出する対象となる人である。つまり、対象者 M は被験者である。視線検出装置 1 の利用目的は何ら限定されない。視線検出装置 1 は、例えば、よそ見運転の検出、運転者のサイドミラー及びブルームミラーの安全確認動作の確認、運転者の眠気の検出、商品の興味の度合いの調査、アミューズメント装置等に利用されるコンピュータへのデータ入力、乳幼児の自閉症診断等の診断用装置などに利用することができる。

【0030】

視線検出装置 1 は、画像処理装置 20 が 2 個の視線検出処理を適宜選択する。その結果、所望の精度が得られる視線の範囲が拡大する。第 1 の視線検出処理は、角膜反射 - 瞳孔中心法である。角膜反射 - 瞳孔中心法は、対象者 M がカメラ 10 に近い位置に表示された視標 A 1 を見ている場合に選択される。第 2 の視線検出処理は、瞳孔形状法である。瞳孔形状法は、対象者 M がカメラ 10 から遠い位置に表示された視標 A 2 を見ている場合に選択される。

10

【0031】

図 2 に示されるように、以下の説明において、視線とは、対象者 M の瞳孔中心の位置 P_s と該対象者 M の注視点とを結ぶ線である。「注視点」とは、対象者 M が見ている点である。「視線」という用語は、起点、終点、及び方向の意味 (概念) を含む。「視線ベクトル」とは、対象者 M の視線方向を示す。「視線ベクトル」は、「視線方向」を表す一形態である。画像処理装置 20 の検出結果である視線方向の出力先は何ら限定されない。例えば、画像処理装置 20 は判定結果を画像、図形、またはテキストでモニタに表示してもよい。また、画像処理装置 20 は、判定結果をメモリやデータベースなどの記憶装置に格納してもよい。さらに、画像処理装置 20 は、判定結果を通信ネットワーク経由で他のコンピュータシステムに送信してもよい。

20

【0032】

〔角膜反射 - 瞳孔中心法〕

角膜反射 - 瞳孔中心法の原理について説明する。図 2 は、対象者 M と、カメラ 10 と、ディスプレイ装置 30 と、仮想視点平面 V_S と、画像例 S_G と、を示す。ディスプレイ装置 30 には、注視点 Q が示される。仮想視点平面 V_S には、注視点 T が示される。仮想視点平面 V_S とは、後述するカメラ - 瞳孔中心ベクトル OP (第 1 ベクトル) を法線とする仮想的な平面である。画像例 S_G は、対象者 M の瞳孔 P を含む高解像度画像の一例である。画像例 S_G には、瞳孔 P と角膜反射 G とが示される。

30

【0033】

カメラ - 瞳孔中心ベクトル OP は、瞳孔中心の位置 P_s からカメラの位置 O_s へ向かう。視線ベクトル PQ は、瞳孔中心の位置 P_s から注視点 Q の位置 (Q_s) へ向かう。視線ベクトル PT は、瞳孔中心の位置 P_s から注視点 T の位置 T_s へ向かう。角膜反射 - 瞳孔中心法では、視線として、視線ベクトル PT を得る。画像例 S_G に示された角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r (第 2 ベクトル) は、角膜反射の位置 G_s から瞳孔中心の位置 P_s へ向かう。角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r は、カメラ 10 の光軸を Z 軸としたピンホールモデルにおいて、角膜反射の位置 G_s と瞳孔中心の位置 P_s とが共通の $X - Y$ 平面上に存在するという仮定に基づく。

40

【0034】

傾き θ は、仮想視点平面 V_S におけるカメラ - 瞳孔中心ベクトル OP 周りの回転角である。傾き θ' は、水平軸 X' に対するカメラの位置 O_s と注視点 T の位置 T_s とをとる直線の傾きである。傾き θ は、仮想視点平面 V_S における平面的な角である。傾き θ' は、大きさ $|\theta'|$ を有するスカラである。角 α は、カメラ - 瞳孔中心ベクトル OP と視線ベクトル PQ とのなす角である。角 β は、三次元空間における立体的な角である。角 β は、大きさ $|\beta|$ と偏角としての傾き θ とによって一つの直線 (視線) を示す。従って、角 β は、 $\beta = (|\beta|, \theta)$ のように示される。画像例 S_G に示された傾き θ' は、角膜反射 - 瞳

50

孔中心ベクトル r と画像面における水平軸 X' とのなす角である。傾き θ は、画像面における平面的な角である。傾き θ は、大きさ $|\theta|$ を有するスカラである。

【0035】

ここで、図2に示された構成に対して、2個の仮定を設ける。

【0036】

第1の仮定は、式(1)に示される。第1の仮定とは、角 θ が角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r に比例するという関係である。

【数1】

$$\theta = kr \dots (1)$$

前述したように角 θ は、角 θ の大きさ $|\theta|$ と傾き θ とにより示される。第1係数 k は所定の定数である。角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r は、カメラ - 瞳孔中心ベクトル OP の大きさを利用して補正される。この補正により、角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r は、実寸に変換される。これらの定義と式(1)とによれば、式(2)が示される。

【数2】

$$\theta = k|r| \dots (2)$$

【0037】

第2の仮定は、式(3)に示される。第2の仮定とは、仮想視点平面 VS における傾き ϕ が瞳孔 P を含む画像における傾き ϕ' と等しいという関係である。

【数3】

$$\phi = \phi' \dots (3)$$

【0038】

第1の仮定と第2の仮定とを利用することにより $(|\theta|, \theta)$ と $(|r|, \theta)$ とを一対一に対応させることができる。従って、角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r と傾き θ とを利用することにより、角 θ の大きさ $|\theta|$ と傾き θ とを得る。ここで、角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r は、カメラ10によって取得した画像例 S_G から得る。これら角 θ の大きさ $|\theta|$ と傾き θ とによれば、角 θ を得ることができる。

【0039】

なお、視線ベクトル PQ を利用して、ディスプレイ装置30における注視点 Q の三次元座標を得てもよい。注視点 Q は、式(4)に示されるように、視線ベクトル PQ とディスプレイ装置30との交点である。

【数4】

$$Q = nPT + P \dots (4)$$

【0040】

〔瞳孔形状法〕

瞳孔形状法について説明する。図3の(a)部は、対象者 M がカメラ10を含む光学系15を見ているときの対象者 M の眼球50を示す。図3の(b)部は、対象者 M が光学系15とは別の場所を見ているときの対象者 M の眼球50を示す。図3の(a)部及び図3の(b)部に示す例示では、対象者 M の眼球50がカメラ10を含む光学系15から無限遠にあると仮定する。図3の(a)部に示されるように、対象者 M が光学系15を見ているとき、カメラ10から得られる画像における瞳孔 P の形状は、円である。この円の直径 TD は長さ A である。一方、図3の(b)部に示されるように、軸線 $A3$ に対して眼球50の光軸 AL が傾き θ_s だけ傾いた場合、画像における瞳孔 P の形状は、楕円である。この楕円は、長径 L_A と短径 L_B とにより示される(式(5)参照)。

【数5】

$$\begin{aligned} \text{長径} &= A \\ \text{短径} &= A \cos(\theta_s) \end{aligned} \dots (5)$$

10

20

30

40

50

【0041】

ここで、楕円度 R を定義する。画像における瞳孔 P の形状が楕円であるとき、楕円度 R は長径 L_A と短径 L_B とにより示される（式（6）参照）。

【数6】

$$\text{楕円度} = \frac{\text{長径}}{\text{短径}} \dots (6)$$

そして、式（5）及び式（6）によれば、傾き θ_s は式（7）により示される。この傾き θ_s は、図3の（a）部における角 θ の大きさ $|\theta|$ に対応する。

【数7】

$$\theta_s = \cos^{-1}\left(\frac{\text{短径}}{\text{長径}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{1}{\text{楕円度}}\right) \dots (7)$$

10

【0042】

図4は、光学系15から見た眼球50を示す。例えば、瞳孔 P_a は、対象者 M が光学系15を見ているときの様子を示す。瞳孔 P_b は、対象者 M が光学系15よりも上方を見ているときの様子を示す。その他の瞳孔 P_c は、対象者 M が光学系15とは別の位置を見ているときの様子をそれぞれ示す。矢印 D は、視線方向を示す。図4に示されるように、視線方向（矢印 D ）によって、瞳孔 P の形状を示す楕円の短軸方向が変化する。短軸方向は、水平軸 X' に対する視線方向（矢印 D ）の傾き θ' により示される。傾き θ' は、図2における傾き θ に対応する（ $\theta' = \theta$ ）。

20

【0043】

従って、逆余弦成分（傾き θ_s ）と短軸の方向（傾き θ' ）とを得ることにより、角 θ の大きさ $|\theta|$ と傾き θ とを得る。ここで、逆余弦成分（傾き θ_s ）は、画像に含まれた瞳孔 P の形状から得る。従って、角 θ の大きさ $|\theta|$ と傾き θ とにより示される視線ベクトル PT を得る。

【0044】

〔光軸と視軸との間のずれ〕

図5は、眼球50における光軸 AL と視軸 AS とを示す。光軸 AL は、眼球50の光学系の対称軸である。視軸 AS は、対象者 M が実際に視標を見ている軸である。視軸 AS は、網膜56における中心窩57をとおる。一般に、視軸 AS は、光軸 AL に対して約5度程度ずれる。

30

【0045】

上述した角膜反射 - 瞳孔中心法及び瞳孔形状法の結果は、光軸 AL である。従って、角膜反射 - 瞳孔中心法及び瞳孔形状法では、光軸 AL が視線に対応すると仮定する。視軸 AS と光軸 AL との間にはずれがある。視軸 AS は、瞳孔中心の位置 P_s 及び中心窩57をとおる軸である。光軸 AL は、角膜52から水晶体53の中心へと延びる法線である。このずれによれば、対象者 M が光学系15を注視した場合、角膜反射の位置 G_s は瞳孔中心の位置 P_s に一致しない。従って、角膜反射 - 瞳孔中心法及び瞳孔形状法によって得られる結果を校正すれば、視線検出装置1の出力結果は、実際の視線に近づく。

【0046】

40

〔比較例に係る光軸の校正方法〕

眼球50の光軸 AL が視軸 AS に対応すると仮定する。この場合、角膜反射 - 瞳孔中心法では、角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r と、カメラ - 瞳孔中心ベクトル OP と視線ベクトル PQ となす角 θ_L との間に、式（8）に示される関係が成立する。ここで、角 θ_L は、光軸 AL が視線であるとした仮定に基づくことを示す。

【数8】

$$\theta_L = kr \dots (8)$$

ここで、視軸 AS と光軸 AL とのずれは眼球50に依存する。そして、ずれの原因は式（8）において角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r に含まれると仮定する。この仮定は、下記

50

式(9)により示される。

【数9】

$$\mathbf{r}_s = \mathbf{r} - \mathbf{r}_0 \cdots (9)$$

式(9)において、ずれベクトル \mathbf{r}_0 は視軸ASと光軸ALのずれを示す。ずれベクトル \mathbf{r}_0 は、注視点較正により得られる。角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル \mathbf{r} は、光軸ALに対応する。角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル \mathbf{r} は、画像上の瞳孔Pと角膜反射Gとを利用して得る。ベクトル \mathbf{r}_s は、光軸ALからずれ(ずれベクトル \mathbf{r}_0)が除かれた視軸ASに対応する。ここで、眼球50の光軸ALを視軸AS(視線)とした仮定に代えて、式(6)における角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル \mathbf{r} が視軸ASを示すベクトル \mathbf{r}_s であると仮定する。この仮定によれば、式(10)を得る。式(10)において、傾き θ_s は、視軸ASを視線とする仮定に基づくことを示す。

10

【数10】

$$\theta_s = k r_s = k(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) = k r - k r_0 \cdots (10)$$

ここで、第1係数 k は一定値である。角膜反射 - 瞳孔中心法の説明において、角 θ の大きさ $|\theta|$ と角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル \mathbf{r} の大きさ $|\mathbf{r}|$ との間には線形関係があると仮定した(式(2)参照)。この関係は、角 θ が小さいときに成立する。しかし、この関係は、角 θ が大きいために成立しない。そこで、角 θ の大きさ $|\theta|$ または角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル \mathbf{r} の大きさ $|\mathbf{r}|$ に応じて、第1係数 k を変化させる。すなわち、角 θ の大きさ $|\theta|$ と角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル \mathbf{r} の大きさ $|\mathbf{r}|$ との関係は、非線形であると仮定する。そうすると、視軸ASと光軸ALとの間のずれによって生じる式(10)の第2項($-k|\mathbf{r}_0|$)は、第1係数 k に依存して変化する。従って、眼球50に固有であるはずの視軸ASと光軸ALとのずれ(ずれベクトル \mathbf{r}_0)が角 θ の大きさ $|\theta|$ に応じて変化することになり、矛盾が生じる。

20

【0047】

〔本実施形態に係る光軸の較正方法〕

視線検出装置1は、ずれ角 θ_0 を導入する。ずれ角 θ_0 は、視軸ASに対する光軸ALのずれを示す。図6に示されるように、ずれ角 θ_0 によれば、式(10)に代わる新たな定義式として式(11)を得る。

30

【数11】

$$\theta_s = k r - \theta_0 \cdots (11)$$

$$\theta_s = \theta' - \theta_0$$

式(11)において、傾き θ_s は、視軸ASを示すベクトルに対応する。ずれ角 θ_0 は、視軸ASに対する光軸ALのずれを示すベクトルに対応する。ずれ角 θ_0 は、ずれ角 θ_0 の大きさ $|\theta_0|$ と傾き θ_0 とにより定義される。ずれ角 θ_0 は、 $\theta_0 = (|\theta_0|, \theta_0)$ である。式(11)によれば、比較例に係る較正方法において生じる矛盾が生じない。また、式(11)は、角膜反射 - 瞳孔中心法に適用可能である。また、式(11)は、瞳孔形状法にも適用可能である。

40

【0048】

〔視線検出装置の構成〕

以下、視線検出装置1の構成について詳細に説明する。その後、視線検出装置1の動作について詳細に説明する。

【0049】

図1に示されるように、視線検出装置1は、一対のカメラ(第1カメラ及び第2カメラ)10と画像処理装置20とを有する。一対のカメラ10は、ステレオカメラである。視線検出装置1は、対象者Mが見る対象であるディスプレイ装置30をさらに備えてもよい。しかし、視線検出装置1の利用目的は既に述べたように限定されない。従って、対象者Mの視線の先にある物体はディスプレイ装置30に限定されない。例えば、対象者Mの視

50

線の先にある物体は、自動車のフロントガラスであってもよい。要するに、ディスプレイ装置 30 は視線検出装置 1 における必須の要素ではない。

【0050】

カメラ 10 は、対象者 M の眼を撮影する。対象者 M の眼は、瞳孔 P 及び瞳孔 P の周辺を含む。カメラ 10 は、画像処理装置 20 からの命令に応じて対象者 M を撮像する。そしてカメラ 10 は、画像を画像処理装置 20 に出力する。カメラ 10 は予めカメラ較正が行われている。以下の説明において、必要に応じて、一对のカメラ 10 を、カメラ 10_L と、カメラ 10_R とに区別する。カメラ 10_L は、対象者 M の左側に配置される。カメラ 10_R は、対象者 M の右側に配置される。一对のカメラ 10_L、10_R は画像処理装置 20 と無線または有線により接続される。その結果、カメラ 10 と画像処理装置 20 との間で各種のデータまたは命令が送受信される。一对のカメラ 10_L、10_R は水平方向に沿って所定の間隔を設けて配置される。一对のカメラ 10_L、10_R は、対象者 M の顔より低い位置に配置される。その結果、対象者 M が眼鏡をかけているときに生じ得る顔画像における反射光の写り込みを防止できる。水平軸線に対するカメラ 10 の仰角は、例えば 20 度以上 35 度以下である。この範囲によれば、瞳孔 P を確実に検出できる。また、この範囲によれば、対象者 M の視野範囲を妨げることを回避できる。

10

【0051】

カメラ 10 は、インターレーススキャン方式の一つである N T S C 方式を採用する。N T S C 方式によれば、画像は、1 秒間に 30 枚得られる。画像は、奇数番目の水平画素ラインで構成される奇数フィールドと、偶数番目の水平画素ラインで構成される偶数フィールドと、を含む。画像は、奇数フィールドの画像と偶数フィールドの画像とが 1 / 60 秒の間隔で交互に撮影されることで生成される。従って、一つのフレームは、一对の奇数フィールド及び偶数フィールドに相当する。

20

【0052】

図 7 に示されるように、カメラ 10 は、対物レンズ 11 と、光源 13 とを有する。対物レンズ 11 は、円形状の開口部 12 に収容される。光源 13 は、開口部 12 の外側に設けられる。光源 13 は、対象者 M の眼に向けて照明光を照射する。光源 13 は、複数の発光素子 13 a と複数の発光素子 13 b とを有する。発光素子 13 a は、中心波長が 850 nm の出力光を出射する半導体発光素子 (L E D) である。発光素子 13 a は、開口部 12 の縁に沿って等間隔でリング状に配置される。発光素子 13 b は、中心波長が 940 nm の出力光を出射する半導体発光素子である。発光素子 13 b は、発光素子 13 a の外側に等間隔でリング状に配される。発光素子 13 a、13 b は、カメラ 10 の光軸に沿って照明光を出射する。なお、光源 13 の配置は図 7 に示す構成に限定されず、カメラ 10 をピンホールモデルとみなすことができれば他の配置であってもよい。光源 13 は、画像処理装置 20 からの命令に応じたタイミングに従って、照明光を出射する。

30

【0053】

画像処理装置 20 は、カメラ 10 及び光源 13 の動作を制御する。また、画像処理装置 20 は、対象者 M の視線方向の検出処理を実行する。画像処理装置 20 は、据置型または携帯型のパーソナルコンピュータにより構築されてもよい。また、画像処理装置 20 は、ワークステーションにより構築されてもよい。さらに、画像処理装置 20 は、他の種類のコンピュータにより構築されてもよい。あるいは、画像処理装置 20 は、複数台の任意の種類コンピュータを組み合わせて構築されてもよい。複数台のコンピュータを用いる場合、これらのコンピュータはインターネット又はイントラネットなどの通信ネットワークを介して互いに接続される。

40

【0054】

図 8 は、画像処理装置 20 の一般的なハードウェア構成を示す。図 8 に示されるように、画像処理装置 20 は、CPU (プロセッサ) 101 と、主記憶部 102 と、補助記憶部 103 と、通信制御部 104 と、入力装置 105 と、出力装置 106 とを有する。CPU 101 は、オペレーティングシステムやアプリケーション・プログラムなどを実行する。主記憶部 102 は、ROM 及び RAM により構成される。補助記憶部 103 は、ハードデ

50

ディスク及びフラッシュメモリなどにより構成される。通信制御部 104 は、ネットワークカード又は無線通信モジュールにより構成される。入力装置 105 は、キーボード及びマウスなどにより構成される。出力装置 106 は、ディスプレイ及びプリンタなどにより構成される。

【0055】

〔画像処理装置〕

画像処理装置 20 の各機能要素は、以下の動作により実現される。CPU 101 または主記憶部 102 は、所定のソフトウェアを読み込む。CPU 101 は、通信制御部 104、入力装置 105 及び出力装置 106 など動作させる。主記憶部 102 または補助記憶部 103 は、データの読み出し及び書き込みを行う。なお、処理に必要なデータやデータ

10

【0056】

図 9 に示されるように、画像処理装置 20 は、点灯制御部 21 と、画像入力部 22 と、算出部 23 と、を有する。点灯制御部 21 は、光源 13 の点灯タイミングを制御する。画像入力部 22 は、カメラ 10 の撮影タイミングを光源 13 の点灯タイミングに同期して制御する。その結果、画像処理装置 20 は、カメラ 10 から画像（複数の眼画像のデータ）を得る。算出部 23 は、画像入力部 22 から入力された画像を利用して、対象者 M の視線を検出する。

【0057】

算出部 23 は機能的構成要素として、記録部 24 と、前処理部 26 と、演算部 27 と、第 1 光軸取得部 28 と、第 2 光軸取得部 29 と、光軸情報取得部 31 と、視軸取得部 32 と、校正情報部 33 と、係数部 34 と、を有する。

20

【0058】

記録部 24 は、視線検出処理に利用される種々の情報を有する。記録部 24 は、前処理部 26 及び演算部 27 から参照可能である。記録部 24 は、例えば、カメラ 10 に関する内部パラメータや、カメラの位置 O_S といった予め取得される情報を有する。

【0059】

前処理部 26 は、画像入力部 22 及び記録部 24 から情報を受け入れる。そして、前処理部 26 は、演算部 27 へ結果を出力する。具体的には、前処理部 26 は、画像入力部 22 から画像を受け入れる。次に、前処理部 26 は、それらの画像から暗瞳孔画像及び明瞳孔画像を得る。また、前処理部 26 は、記録部 24 からカメラ 10 に関する情報を受け入れる。前処理部 26 は、これらの情報を利用して、瞳孔中心の位置 P_S 、角膜反射の位置 G_S 、瞳孔 P の長軸及び瞳孔 P の短軸を得る。そして、前処理部 26 は、瞳孔中心の位置 P_S 、角膜反射の位置 G_S 、瞳孔 P の長軸、及び瞳孔 P の短軸を含む情報を、演算部 27 に出力する。

30

【0060】

演算部 27 は、前処理部 26 及び記録部 24 から情報を受け入れる。そして、演算部 27 は、光軸情報取得部 31、第 1 光軸取得部 28 及び第 2 光軸取得部 29 へ結果を出力する。具体的には、演算部 27 は、前処理部 26 から瞳孔中心の位置 P_S 、角膜反射の位置 G_S 、瞳孔 P の長径 L_A 及び瞳孔 P の短径 L_B を含む情報を受け入れる。また、演算部 27 は、記録部 24 からカメラ 10 に関する情報を受け入れる。演算部 27 は、これらの情報を利用して、視線検出処理に用いられる種々の情報を得る。演算部 27 は、第 1 演算部 27 a と、第 2 演算部 27 b と、第 3 演算部 27 c と、第 4 演算部 27 d と、第 5 演算部 27 e と、第 6 演算部 27 f と、を有する。

40

【0061】

第 1 演算部 27 a は、カメラ - 瞳孔中心ベクトル OP （第 1 ベクトル）を得る。カメラ - 瞳孔中心ベクトル OP は、カメラの位置 O_S から瞳孔中心の位置 P_S へ向かう。第 2 演算部 27 b は、角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r （第 2 ベクトル）を得る。角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r は、角膜反射の位置 G_S から瞳孔中心の位置 P_S へ向かう。第 3 演算部 27 c は、仮想視点平面 VS を得る。仮想視点平面 VS は、カメラ - 瞳孔中心ベクトル

50

ルOPを法線とする仮想的な平面である。第4演算部27dは、瞳孔Pの外形形状を楕円として近似する。その結果、第4演算部27dは、楕円度Rを得る。楕円度Rは、楕円の長径と短径との比である。第5演算部27eは、瞳孔を示す楕円の短軸と水平軸との間の傾き θ を得る。第6演算部27fは、第1眼画像を利用して、第1仮想光軸平面に関する情報を得る。第1仮想光軸平面に関する情報は、第1角膜反射の位置 G_s から第1瞳孔中心の位置 P_s へ向かう第3ベクトルと、第1カメラ位置から第1瞳孔中心の位置 P_s へ向かう第4ベクトルとに基づく。第1仮想光軸平面に関する情報は、第1カメラ位置と、第1瞳孔中心の位置 P_s と、第4ベクトルを法線とする第1仮想視点平面に第1光軸AL1が交差する位置と、を含む。第7演算部27gは、第2眼画像を利用して、第2仮想光軸平面に関する情報を得る。第2仮想光軸平面に関する情報は、第2角膜反射の位置 G_s から第2瞳孔中心の位置 P_s へ向かう第5ベクトルと第2カメラ位置から第2瞳孔中心の位置 P_s へ向かう第6ベクトルとに基づく。第2仮想光軸平面に関する情報は、第2カメラ位置と、第2瞳孔中心の位置 P_s と、第6ベクトルを法線とする第2仮想光軸平面に第2光軸AL2が交差する位置と、を含む。

【0062】

第1光軸取得部28は、角膜反射 - 瞳孔中心法に基づく処理により光軸ALを得る。第1光軸取得部28は、演算部27から情報を受け入れる。第1光軸取得部28は、光軸情報取得部31に結果を出力する。第1光軸取得部28は、画像から得られる瞳孔中心の位置 P_s 及び角膜反射の位置 G_s を利用して、光軸ALを得る。より詳細には、第1光軸取得部28は、角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r （第2ベクトル）の大きさ $|r|$ と、角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r と水平軸 X' とがなす傾き θ と、を利用して、光軸ALを得る。光軸ALは、カメラ - 瞳孔中心ベクトルOPを基準とした角 α （第1角度）と、仮想視点平面VSに含まれた水平軸 X' を基準とした傾き β （第2角度）とにより示される。角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r （第2ベクトル）の大きさ $|r|$ は、角 α に関連付けられる。角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r は、傾き β に関連付けられる。

【0063】

第2光軸取得部29は、瞳孔形状法に基づく処理により光軸ALを得る。第2光軸取得部29は、演算部27から情報を受け入れる。第2光軸取得部29は、光軸情報取得部31に処理結果を出力する。第2光軸取得部29は、楕円度R及び傾き θ （第4角度）を得る。傾き θ は、短径の軸線と水平軸 X' との間の傾きである。第2光軸取得部29は、角 α に関連付けられた楕円度Rと、傾き θ に関連付けられた傾き β と、を利用して光軸ALを得る。

【0064】

光軸情報取得部31は、演算部27、第1光軸取得部28及び第2光軸取得部29から情報を受け入れる。光軸情報取得部31は、視軸取得部32に結果を出力する。光軸情報取得部31は、瞳孔形状に基づき、第1光軸候補及び第2光軸候補の少なくとも一方を利用して、光軸ALを得るための情報を生成する。光軸ALを得るための情報とは、第1光軸候補及び第2光軸候補のいずれか一方を光軸ALとして選択するための情報である。具体的には、光軸情報取得部31は、画像から得られる瞳孔Pの形状を利用して、第1光軸候補または第2光軸候補のいずれか一方を選択する。そして光軸情報取得部31は、選択した光軸候補を視軸取得部32に出力する。このような処理では、第1光軸取得部28及び第2光軸取得部29においてそれぞれ光軸候補を得る。その後、視軸の傾きに応じて適切な候補を最終的な結果として選択する。例えば、光軸情報取得部31は、カメラ - 瞳孔中心ベクトルOPに対する角 α が30度以下であるとき、第1光軸候補を選択する。光軸情報取得部31は、カメラ - 瞳孔中心ベクトルOPに対する角 α が30度より大きいとき、第2光軸候補を選択する。なお、この角 α の閾値は、所望の値に設定してよい。

【0065】

視軸取得部32は、第1光軸取得部28または第2光軸取得部29から情報を受け入れる。視軸取得部32は、校正情報部33からも情報を受け入れる。視軸取得部32は、校正情報を利用して、第1光軸取得部28または第2光軸取得部29から入力された光軸A

10

20

30

40

50

Lを校正する。その結果、視軸取得部32は、視軸ASを得る。

【0066】

校正情報部33は、視軸取得部32に校正情報を提供する。校正情報とは、上述したずれ角 θ である。校正情報は、予め取得されて校正情報部33に記録されてもよい。校正情報は、校正情報部33において算出されたてもよい。校正情報部33が校正情報を得る場合、校正情報部33は、演算部27、第1光軸取得部28及び第2光軸取得部29などと接続される。そして、校正情報部33は、これら機能的要素より入力される情報を利用して、校正情報を得る。

【0067】

係数部34は、第1光軸取得部28に第1係数kを提供する。この第1係数kは予め取得されて係数部34に記録されてもよい。また、第1係数kは、係数部34において算出されてもよい。係数部34が第1係数kを得る場合、係数部34は、演算部27、第1光軸取得部28及び第2光軸取得部29などと接続される。そして、係数部34は、これら機能的構成要素から入力される情報を利用して、第1係数kを得る。

【0068】

〔視線検出処理〕

次に、図10を参照しつつ、視線検出装置1の動作について説明する。

【0069】

〔処理の概要〕

図10に示されるように、点灯制御部21は光源13の点灯タイミングを制御する。画像入力部22は、点灯タイミングに同期するように、それぞれのカメラ10から明瞳孔画像（眼画像）及び暗瞳孔画像（眼画像）を得る（ステップS11）。続いて、第1光軸取得部28は、第1光軸候補を得る（ステップS12）。続いて、第2光軸取得部29は、第2光軸候補を得る（ステップS13）。続いて、光軸情報取得部31は、瞳孔Pの形状を利用して、視線検出処理として角膜反射・瞳孔中心法または瞳孔形状法のいずれの結果を出力として選択するかを決定する（ステップS14, S15, S16）。続いて、視軸取得部32は、校正情報を利用して光軸候補を校正する（ステップS17）。これらステップS11, S12, S13, S14, S15, S16, S17を実行することにより、視線としての視軸ASを得る。続いて、算出部23は、視線を得る処理を終了するか否かを判断する（ステップS18）。処理を終了すると判断した場合、画像処理装置20は、視線検出処理を終了する（ステップS18: YES）。処理を終了しないと判断した場合、画像処理装置20は、再びステップS11から順に各ステップを実行する。以上の処理は、視線検出処理の終了の指示が受け付けられるまで、繰り返し実行される。

【0070】

以下、各ステップの処理について詳細に説明する。

【0071】

〔眼画像の取得〕

眼に入った光は網膜で乱反射する。乱反射した光のうち、瞳孔Pを通り抜けた光は強い指向性をもって光源へ戻る性質を有する。カメラの露光と、カメラの開口部近傍に配置された光源の発光とが同時に行われたとき、網膜で反射した光の一部は、カメラ10の開口部12に入射する。従って、光学系15によれば、明瞳孔画像を得ることができる。明瞳孔画像では、瞳孔Pの周辺よりも瞳孔Pが明るく写っている。これに対して、カメラ10の露光と、カメラ10の開口部12から離間した位置に配置された光源13の発光とが同時に行われたとき、眼から戻ってきた光はカメラ10の開口部12にほとんど戻らない。従って、光学系15によれば、暗瞳孔画像を得ることができる。暗瞳孔画像では、瞳孔Pが暗く写っている。また、透過率が高い波長の光を眼に照射すると、網膜での光の反射が多くなる。従って、瞳孔Pは明るく写る。一方、透過率が低い波長の光を眼に照射すると、網膜での光の反射が少なくなる。従って、瞳孔Pは暗く写る。視線検出装置1の光源13は、発光素子13aが透過率が高い波長の光（中心波長が850nm）を発する。発光素子13aは、開口部12に隣接した位置に設けられる。また、発光素子13bは、眼の

10

20

30

40

50

透過率が低い波長の光（中心波長が940nm）を発する。発光素子13bは、開口部12から離れた位置に設けられる。

【0072】

明瞳孔画像を得る場合、点灯制御部21及び画像入力部22は、カメラ10の奇数フィールドに合わせて発光素子13aを点灯させる。暗瞳孔画像を得る場合、点灯制御部21及び画像入力部22は、カメラ10の偶数フィールドに合わせて発光素子13bを点灯させる。さらに、画像入力部22は、カメラ10_Lの作動タイミングをカメラ10_Rの作動タイミングに対してわずかにずらす。カメラ10の露光時間は、ずらし時間以下に設定される。点灯制御部21は、カメラ10の露光時間中に、対応する発光素子13a及び発光素子13bを交互に発光させる。この制御によれば、一方のカメラ10の光源13からの光が他方のカメラ10の画像に与える影響を抑制することができる。換言すると、この制御によれば、クロストークの発生を抑制できる。

10

【0073】

画像入力部22は、これらの一連の制御により得られる明瞳孔画像及び暗瞳孔画像をカメラ10から受け入れる。入力された画像は、奇数フィールドまたは偶数フィールドのみに有効画素を有する。従って、画像入力部22は、隣接する有効画素の画素ラインの輝度平均をそのライン間の画素値に埋め込む。その結果、画像入力部22は、明瞳孔画像または暗瞳孔画像を得る。画像入力部22は、カメラ10によって得られた明瞳孔画像及び暗瞳孔画像を算出部23に出力する。

【0074】

20

〔角膜反射の位置 G_s の取得〕

前処理部26は、画像入力部22から入力された明瞳孔画像及び暗瞳孔画像のそれぞれから角膜反射Gを得る。具体的には、前処理部26は1枚の画像に対してPタイル法による2値化とラベリングとを行う。そして、前処理部26は、形状や輝度平均などの情報を利用して、その画像から複数の角膜反射Gを得る。このような処理により、前処理部26は明瞳孔画像及び暗瞳孔画像のそれぞれから、角膜反射Gを得る。続いて、前処理部26は明瞳孔画像及び暗瞳孔画像から得られた角膜反射Gを利用して、明瞳孔画像及び暗瞳孔画像中の角膜反射の位置 G_s を得る。

【0075】

前処理部26は、位置較正量を得る。位置較正量は、明瞳孔画像と暗瞳孔画像との間での角膜反射の移動量である。位置較正量は、推定または算出された角膜反射の位置 G_s に基づく。続いて、前処理部26は、差分画像を得る。具体的には、前処理部26は、二つの角膜反射の位置 G_s が一致するように、前フィールド（ i 番目のフィールド）の画像を、次フィールド（ $(i+1)$ 番目のフィールド）の画像に位置較正量だけずらす。次に、前処理部26は、これら2画像から差分画像を得る。そして、前処理部26は一致させた角膜反射の位置 G_s 、つまり画像座標に基づく角膜反射の位置 G_s を示す座標を得る。

30

【0076】

〔瞳孔中心の位置 P_s の取得〕

前処理部26は、明瞳孔画像及び暗瞳孔画像を利用して、差分画像を得る。差分画像を得る場合、前述した位置較正量を利用して明瞳孔画像及び暗瞳孔画像との位置合わせを行ってもよい。この差分画像は、強調された瞳孔Pを含むため、瞳孔画像とも呼ばれる。続いて、前処理部26は、差分画像から瞳孔中心の位置 P_s を特定する。差分画像は、前フレームと輝度が大きく変化しない。そこで、前処理部26は、前フレームで検出された瞳孔Pの輝度平均を利用して、その平均輝度の半分の値を閾値として差分画像を2値化する。そして、前処理部26は、2値化された差分画像に対して、ラベリングを行う。続いて、前処理部26は、瞳孔Pらしい面積、サイズ、面積比、正方形度、及び瞳孔特徴量等の形状パラメータを利用して、ラベルづけされた画素の連結成分の中から瞳孔Pを得る。そして、前処理部26は、差分画像における瞳孔中心の位置（座標）を得る。

40

【0077】

続いて、前処理部26は瞳孔中心の三次元座標を得る。具体的には、前処理部26は、

50

2台のカメラ10においてそれぞれ得られた2個の瞳孔画像を準備する。続いて、前処理部26は、2個の瞳孔画像のそれぞれにおける瞳孔中心の位置 P_S の座標を得る。続いて、前処理部26は、瞳孔中心の位置 P_S を利用して、ステレオ法により瞳孔中心の位置 P_S の三次元座標を得る。

【0078】

ステレオ法は、画像中の点の座標について、その点の空間上の位置を決定する。まず、互いに異なる位置に配置された複数台のカメラを利用して対象物を撮影する。次に、カメラの内部パラメータ及び外部パラメータを用いて、空間上の位置を決定する。内部パラメータは、カメラのレンズの焦点距離、画像中心、画素サイズなどを含む。外部パラメータは、カメラの位置や姿勢などを含む。具体的には、前処理部26は、画像座標系における瞳孔中心の位置 P_S の座標と、三次元空間内の世界座標系における瞳孔中心の位置 P_S の座標との関係式を、キャリブレーションデータを参照しながら得る。続いて、前処理部26は、関係式を利用して、世界座標系における瞳孔中心の位置 P_S の三次元座標を得る。

10

【0079】

前処理部26は、差分画像において瞳孔Pを示す領域の外縁部を抽出する。外縁部を抽出する処理は、特に限定されることはない。そして、前処理部26は、抽出した形状を楕円として近似するための近似式を得る。そして、前処理部26は、当該近似式を利用して、瞳孔Pを楕円とみなした場合における長径 L_A 及び短径 L_B に関する情報を得る。

【0080】

以上の処理によれば、角膜反射の位置 G_S 及び瞳孔中心の位置 P_S に関する情報が得られる。演算部27は、これらの情報と、記録部24に記録された情報とを利用して、第1視線検出処理、第2視線検出処理、及び視軸算出処理に用いられる情報を得る。

20

【0081】

第2演算部27bは、図2に示されるように、瞳孔中心の位置 P_S の三次元位置を利用して、仮想視点平面 $V S' - Y'$ を設定する。仮想視点平面 $V S' - Y'$ は、カメラ-瞳孔中心ベクトル OP を法線とする平面である。カメラ-瞳孔中心ベクトル OP は、カメラ10の開口部12の中心を原点 O とし、その原点 O と瞳孔中心の位置 P_S を結ぶベクトルである。仮想視点平面 $V S' - Y'$ は、カメラ10で捉えられる画像の投影面(画像面)に対応する。ここで、 X' 軸は、世界座標系の $XW - ZW$ 平面と仮想視点平面 $V S' - Y'$ との交線に相当する。

30

【0082】

第2演算部27bは、画像面 S_G における角膜反射 G から瞳孔中心の位置 P_S までのベクトル r_G を得る。そして、第2演算部27bは、ベクトル r_G を、角膜反射-瞳孔中心ベクトル r に変換する。角膜反射-瞳孔中心ベクトル r は、カメラの拡大率を用いてベクトル r_G を実寸に換算したベクトルである。カメラの拡大率は、カメラ-瞳孔中心ベクトル OP の距離から得られる。このとき、各カメラ10をピンホールモデルと考え、角膜反射の位置 G_S と瞳孔中心の位置 P_S とが、仮想視点平面 $V S' - Y'$ と平行な平面上にあると仮定する。つまり、第2演算部27bは、角膜反射-瞳孔中心ベクトル r を得る。角膜反射-瞳孔中心ベクトル r は、瞳孔中心の位置 P_S と角膜反射の位置 G_S との相対座標を示す。相対座標は、仮想視点平面 $V S' - Y'$ と平行であって瞳孔中心の位置 P_S の三次元座標を含む平面上における座標である。また、角膜反射-瞳孔中心ベクトル r は、角膜反射の位置 G_S から瞳孔中心の位置 P_S までの実距離を示す。

40

【0083】

〔第1視線検出処理〕

第1視線検出処理は、第1光軸取得部28において実行される。第1光軸取得部28は、角膜反射-瞳孔中心法を利用して第1光軸候補を得る。第1視線検出処理において第1光軸取得部28は、式(12)に示された光軸 AL に対応する角 θ を得る。

【数12】

$$\theta = kr \cdots (12)$$

式(12)において、角膜反射-瞳孔中心ベクトル r は第2演算部27bにおいて得ら

50

れているので既知である。角 θ の成分である傾き θ_s は、角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r と水平軸 X' とのなす角度である。従って、傾き θ_s は、既知である。そうすると、角 θ の大きさ $|\theta|$ を得ることにより、角 θ が得られる。角 θ の大きさ $|\theta|$ は、式 (13) により得られる。

【数 13】

$$\theta = k|r| \cdots (13)$$

つまり、角 θ の大きさ $|\theta|$ は、角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r の絶対値を算出し、その絶対値に第 1 係数 k を乗ずることにより得られる。上述の処理により、角 θ の大きさ $|\theta|$ と角 θ の傾き θ_s とが得られる。その結果、第 1 光軸候補としての角 θ が得られる。

10

【0084】

〔第 2 視線検出処理〕

第 2 視線検出処理は、第 2 光軸取得部 29 において実行される。第 2 光軸取得部 29 は、瞳孔形状法を利用して第 2 光軸候補を得る。瞳孔形状法においても光軸 AL に対応する角 θ を得る。瞳孔形状法では、角 θ の成分である大きさ $|\theta|$ が、傾き θ_s (図 3 の (b) 部参照) に対応すると仮定する。傾き θ_s は、式 (14) を利用して得る。

【数 14】

$$\theta_s = \cos^{-1}\left(\frac{\text{短径}}{\text{長径}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{1}{\text{楕円度}}\right) \cdots (14)$$

20

【0085】

瞳孔形状法では、角 θ の成分である傾き θ_s が、傾き θ'_s (図 4 参照) に対応すると仮定する。第 2 光軸取得部 29 は、短軸の方向を利用して傾き θ'_s を得る。上述の処理により、角 θ の大きさ $|\theta|$ に対応する傾き θ_s と、角 θ の傾き θ_s に対応する傾き θ'_s と、が得られる。その結果、第 2 光軸候補としての角 θ が得られる。

【0086】

〔視線検出処理の選択〕

光軸情報取得部 31 は、視線検出処理として、角膜反射 - 瞳孔中心法に基づく処理または瞳孔形状法に基づく処理のいずれかを選択する。この選択は、カメラ - 瞳孔中心ベクトル OP と光軸 AL (視線ベクトル PT) とのなす角 θ の大きさ $|\theta|$ に基づく。具体的には、光軸情報取得部 31 は、角 θ の大きさ $|\theta|$ が小さい場合、角膜反射 - 瞳孔中心法を選択する。なぜならば、角 θ の大きさ $|\theta|$ が小さい ($\theta \rightarrow 0$) とき、差分画像における瞳孔 P の外周縁の形状は円形状に近似する。すなわち、長径と短径との差が小さくなる。従って、楕円度 R から求まる傾き θ_s はばらつきが大きくなる傾向にある。傾き θ_s は、楕円度 R の逆数の逆余弦成分だからである。従って、角 θ の大きさ $|\theta|$ が小さい ($\theta \rightarrow 0$) ときには、瞳孔形状法よりも角膜反射 - 瞳孔中心法が良好な結果を得ることができる。一方、光軸情報取得部 31 は、角 θ の大きさ $|\theta|$ が大きい場合、瞳孔形状法を選択する。なぜならば、角 θ の大きさ $|\theta|$ が大きくなると、楕円度 R から求まる傾き θ_s はばらつきが小さくなる傾向にある。従って、角 θ の大きさ $|\theta|$ が大きいときには、角膜反射 - 瞳孔中心法よりも瞳孔形状法が良好な結果を得ることができる。

30

40

【0087】

また、角膜反射 - 瞳孔中心法では角 θ の大きさ $|\theta|$ が小さい場合、角 θ と角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r との間の線形性 (式 (1) 等参照) が高い。従って、視線の検出精度を高めることが容易である。一方、角 θ の大きさ $|\theta|$ が大きい場合、角膜反射 G が検出し難くなる場合があり得る。さらに、角膜反射 G が出現している場合であっても、角膜の周縁部に角膜反射 G が形成された場合、非線形性が表れたり、画像処理による白目反射との誤検出もしやすい。

【0088】

そこで、画像処理装置 20 は、閾値を設定する。この閾値は、角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r と角 θ との関係において線形性が支配的である範囲 (大多数の対象者 M において角

50

膜反射 G が現れる範囲) と、角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r と角 θ の関係において非線形性が支配的である範囲とを分別する。閾値としては、角 θ の大きさ $|\theta| = 30$ 度程度が例示される。なお、閾値は、30 度に限定されず、所望の値を用いてよい。そして、画像処理装置 20 は、視線検出処理を選択するための角 θ の大きさ $|\theta|$ を瞳孔 P の楕円度 R を利用して得る。具体的には、画像処理装置 20 は角 θ の大きさ $|\theta|$ に対応する傾き θ_s を得る。そして、光軸情報取得部 31 は、楕円度 R から得た傾き θ_s が閾値より小さい場合、角膜反射 - 瞳孔中心法の結果を選択し、第 1 光軸候補を視軸取得部 32 に出力する。一方、光軸情報取得部 31 は、楕円度 R から得た傾き θ_s が閾値より大きい場合、瞳孔形状法の結果を選択し、第 2 光軸候補を視軸取得部 32 に出力する。

【0089】

〔視軸を取得する処理〕

視軸を取得する処理は、視軸取得部 32 において実行される。視軸を取得する処理とは、視軸 AS に対する光軸 AL のずれを較正する処理である。例えば、第 1 光軸候補が光軸 AL1 として視軸取得部 32 に出力された場合、視軸取得部 32 は、式 (15) に示される処理を行う。すなわち、視軸取得部 32 は、光軸 AL としての角 θ_{AL1} からずれ角 θ_0 を減算するベクトル演算を実行する。式 (15) において、傾き θ_s は、視軸 AS である。角 θ_{AL1} は、第 1 光軸候補である。

【数 15】

$$\theta_s = \theta_{AL1} - \theta_0 \cdots (15)$$

【0090】

第 2 光軸候補が光軸 AL として視軸取得部 32 に出力された場合、視軸取得部 32 は、式 (16) に示される処理を行う。すなわち、視軸取得部 32 は、光軸 AL としての角 θ_{AL2} から、ずれ角 θ_0 を減算するベクトル演算を実行する。式 (16) において、傾き θ_s は、視軸 AS である。角 θ_{AL2} は、第 2 光軸候補である。

【数 16】

$$\theta_s = \theta_{AL2} - \theta_0 \cdots (16)$$

【0091】

視線検出装置 1 は、第 1 光軸取得部 28 と第 2 光軸取得部 29 とを有する。第 1 光軸取得部 28 は、瞳孔中心の位置 P_s と角膜反射の位置 G_s とを利用して光軸 AL を得る。従って、視線検出装置 1 は、角膜反射 G が得られる視線の範囲において視線検出を行うことができる。第 2 光軸取得部 29 は、瞳孔 P の形状を利用して光軸 AL を得る。従って、視線検出装置 1 は、角膜反射 G が得られない視線の範囲であっても視線検出を行うことができる。そして、光軸情報取得部 31 は、瞳孔 P の形状を利用して第 1 光軸取得部 28 または第 2 光軸取得部 29 のいずれかを選択する情報を得る。選択された光軸候補は、視軸取得部 32 において、光軸 AL と視軸 AS のずれが較正されて視線としての視軸 AS が得られる。従って、視線検出装置 1 は、視線を良好に検出できる範囲を、角膜反射 G が得られる狭い視線の範囲から、角膜反射 G が得られない広い視線の範囲まで拡大することができる。

【0092】

すなわち、視線検出装置 1 によれば、角膜反射 - 瞳孔中心法と、瞳孔形状法とを、同じプラットフォーム (土台、基礎的理論) において実行することが可能である。角膜反射 - 瞳孔中心法は、画像から得られる角膜反射の位置 G_s と瞳孔中心の位置 P_s の相対位置を利用して、視線 (或いは注視点) を検出する。瞳孔形状法は、楕円度 R と短軸の方向により規定される瞳孔 P の形状を利用して、視線 (或いは注視点) を検出する。

【0093】

具体的には、角膜反射 - 瞳孔中心法は、カメラ 10 の較正が実施された光学系 15 を利用して瞳孔 P の三次元座標を得る。次に、角膜反射 - 瞳孔中心法は、カメラ 10 の瞳孔中心ベクトル OP と眼球 50 の光軸 AL との間の角 θ を得る。これらは、画像から得られる角膜

10

20

30

40

50

反射 - 瞳孔中心ベクトル OP と角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r とを利用して得る。一方、瞳孔形状法は、まず、瞳孔 P の三次元座標を得る。次に、瞳孔形状法は、カメラ 瞳孔中心ベクトル OP を求める。次に、角 θ を得る。角 θ は、瞳孔 P の外形形状を示す楕円の楕円度 R と短軸の方向とを利用して得る。従って、視線検出装置 1 によれば、角膜反射 - 瞳孔中心法と瞳孔形状法とを同じプラットフォームにおいて実行することができる。

【0094】

さらに、視線検出装置 1 は、角膜反射 - 瞳孔中心法において、座標が既知の較正用視標を対象者 M に注視させる。その結果、視線検出装置 1 は、視軸 AS (視軸 AS の方向ベクトル) と光軸 AL (光軸の方向ベクトル) とのずれをずれ角 θ_0 として得る。このずれを得る処理を、ユーザ較正又は注視点較正と呼ぶ。視線検出処理 (又は注視点検出処理) を行う場合、光軸 AL として取得された出力結果をずれ角 θ_0 を利用して較正する。その結果、視軸 AS を得ることができる。同様に、瞳孔形状法においても、ユーザ較正によって明らかになったずれ角 θ_0 を、光軸 AL として取得された出力結果の較正に利用することが可能である。

10

【0095】

より詳細には、視線検出装置 1 は、視軸 AS と光軸 AL とのずれの較正を、視線を得る処理における後段で行う。換言すると、視線検出装置 1 は、光軸 AL を得る処理の後に較正処理を行う。この構成によれば、光軸 AL を得る処理が異なる処理であっても、それらの処理から得られる結果は光軸 AL である。従って、較正処理を容易に実行することができる。

20

【0096】

なお、較正処理は、1 点を見て較正する処理 (一点較正法) であってもよいし、その他の処理であってもよい。そうすると、例えば、画面中央に提示した視標を一瞬見たときに、角膜反射 - 瞳孔中心法を実行する。その結果、較正情報 (ずれ角 θ_0) が得られる。そして、対象者 M が光学系 15 から大きく離れた位置を見た場合であって、瞳孔形状法を適用する際にも、較正情報 (ずれ角 θ_0) を利用することができる。従って、較正に対する対象者 M の負担を軽減できる。さらに、角膜反射 - 瞳孔中心法の場合よりも、広い角度範囲における視線検出が可能となる。

【0097】

発明者らの実験によれば、視線検出装置 1 における所定の視線検出精度が得られる範囲は、角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル OP を基準として水平方向におよそプラスマイナス 45 度であった。この範囲は、実際に実験を行って確認された。さらに、検出範囲として、角 θ の大きさ $|\theta| = 60$ 度を想定する。この場合、楕円度 R (短径と長径との比) は 0.5 である。従って、画像処理の改善及び光源制御をすることにより、 $|\theta| = 60$ 程度までは計測可能と予測できる。なお、検出範囲が 45 度以上である遠隔の視線検出装置や注視点検出装置は、これまでに報告例はない。

30

【0098】

〔第 1 係数 k の取得〕

上述の説明では、角膜反射 - 瞳孔中心法の式 (17) には、第 1 係数 k が含まれていた。

40

【数 17】

$$\theta = k|r| \cdots (17)$$

この第 1 係数 k は、一定値として扱ってもよい。また、第 1 係数 k は、変化する値として扱ってもよい。例えば、角 θ が小さいときには、式 (17) において、角 θ と角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r との関係は線形性が強い。従って、第 1 係数 k は一定値として扱う。一方、角 θ が大きいときには、式 (17) において、角 θ と角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r との関係は非線形性が強い。従って、第 1 係数 k は、角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r に応じて変化する値として扱う。また、第 1 係数 k は、対象者 M の眼球 50 が有する個性にもよっても変化する。

50

【 0 0 9 9 】

〔一定値としての第1係数kの取得〕

今、対象者Mがディスプレイ装置30における任意の点を見た場合、カメラ10のそれぞれについて式(18)が得られる。ここでカメラ10_Lは、位置(O_{S1})に配置され、カメラ10_Rは、位置(O_{S2})に配置されている。また、左目(第1眼)に生じる角膜反射Gは位置(G_{S1})であり、右目(第2眼)に生じる角膜反射Gは位置(G_{S2})である。さらに、左目の瞳孔中心位置は、位置(P_{S1})である。右目の瞳孔中心位置は、位置(P_{S2})である。角θ₁は、カメラ10_Lから得られる視軸ASを示す。角θ₁'は、カメラ10_Lから得られる光軸ALを示す。角θ₀は、ずれ角を示す。角膜反射 - 瞳孔中心ベクトルr₁(第3ベクトル)は、カメラ10_Lから得られるベクトルを示す。角θ₂は、カメラ10_Rから得られる視軸ASを示す。角θ₂'は、カメラ10_Rから得られる光軸ALを示す。角膜反射 - 瞳孔中心ベクトルr₂(第5ベクトル)は、カメラ10_Rから得られるベクトルを示す。ここで、式(18)において、第1係数kとずれ角θ₀は眼球固有の値であるため、共通とする。

10

【数18】

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \theta_1' - \theta_0 = k r_1 - \theta_0 \dots (18) \\ \theta_2 &= \theta_2' - \theta_0 = k r_2 - \theta_0\end{aligned}$$

【 0 1 0 0 】

式(18)より、式(19)が得られる。

20

【数19】

$$\begin{aligned}\theta_2 - \theta_1 &= \theta_2' - \theta_1' = k(r_2 - r_1) \\ k &= \frac{\theta_2' - \theta_1'}{r_2 - r_1} \dots (19)\end{aligned}$$

式(19)において、第1係数kは正の実数である。従って、式(19)は、式(20)のように示される。

【数20】

$$k = \frac{|\theta_2' - \theta_1'|}{|r_2 - r_1|} = \frac{|\theta_2 - \theta_1|}{|r_2 - r_1|} \dots (20)$$

30

式(20)において、最右辺の分子(|θ₂ - θ₁|)は、瞳孔Pから見た2台の光学系15の間の角度である。従って、式(20)を利用することにより、一定値としての第1係数kを取得できる。なお、式(20)によれば、対象者Mが任意の視標を見ている場合であっても、フレームごとに第1係数kを得ることができる。

【 0 1 0 1 】

〔可変値としての第1係数kの取得〕

角膜反射 - 瞳孔中心ベクトルrの大きさ|r|と角θとの関係が非線形である場合、式(17)は、式(21)のように示される。

【数21】

$$\theta = f(r) \dots (21)$$

40

また、式(21)は、式(22)のように示される。式(22)において関数fは、非線形関数である。従って、関数fが既知である場合、第1係数kを得ることができる。次に、関数fを得る方法について説明する。

【数22】

$$k = \frac{f(\theta_2) - f(\theta_1)}{r_2 - r_1} \dots (22)$$

【 0 1 0 2 】

まず、関数fは、角θの大きさである|r|と角膜反射 - 瞳孔中心ベクトルrの大きさ

50

$|r|$ とを示す。式(22)では、角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r の傾き θ と、角 θ_0 の傾き θ_0 が一致する。換言すると、式(23)に従う。

【数23】

$$|\theta| = \theta = f(|r|) \cdots (23)$$

【0103】

上記の式(23)と仮定とに従えば、カメラ10で得られる画像とカメラの内部パラメータとを利用して、角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r の傾き θ を得る。図11には、2台の光学系15について、2個の仮想光軸平面 VL_1, VL_2 が示される。仮想光軸平面 VL_1, VL_2 の交線 CL は、光軸 AL に対応する。仮想光軸平面 VL_1 は、第1カメラの位置 (O_{S1}) と、瞳孔中心の位置 (P_{S1}) と、第1仮想視点平面に第1光軸が交差する位置と、を含む。第1仮想視点平面は、第1カメラ位置 (O_{S1}) から瞳孔中心の位置 (P_{S1}) へ向かう第4ベクトルを法線とする平面である。仮想光軸平面 VL_2 は、第2カメラの位置 (O_{S2}) と、瞳孔中心の位置 (P_{S2}) と、第2仮想視点平面に第2光軸が交差する位置と、を含む。第2仮想視点平面は、第2カメラ位置 (O_{S2}) から瞳孔中心の位置 (P_{S2}) へ向かう第6ベクトルを法線とする平面である。

10

【0104】

この光軸 AL の求め方によれば、角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r の大きさ $|r|$ 及び角 θ の大きさ $|\theta|$ に関係なく光軸 AL を得ることができる。光軸 AL が求まるということは、すなわち、光学系15について、角 θ_0 が求まることに相当する。従って、第5角度 (θ_1) と、第3ベクトル (r_1) の大きさ ($|r_1|$) と、を利用することにより、左目に対応する第1係数 (k_1) を得る。第5角度 (θ_1) は、第1仮想光軸平面と第2仮想光軸平面とが互いに交差する交線及び第4ベクトルから得られる。さらに、交線及び第6ベクトルから得られる第5角度 (θ_2) と、第5ベクトル (r_2) の大きさ ($|r_2|$) と、を利用して、右目に対応する第1係数 (k_2) を得る。

20

【0105】

それぞれの光学系15から角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r_1, r_2 も求まる。従って、角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r の大きさ $|r|$ と角 θ の大きさ $|\theta|$ との関係をプロットすれば、式(23)に示された非線形関数 f を決定することができる。なお、角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r の大きさ $|r|$ と大きさ $|\theta|$ との関係は、対象者 M がどの方向を見ているかでも決定できる。従って、対象者 M がいるいろいろな方向を見ている間にデータを蓄積することができる。なお、この場合、角膜反射の位置 G_S と瞳孔中心の位置 P_S とが共に検出できるときである場合を想定している。

30

【0106】

関数 f を取得した後は、カメラ10において取得された画像から角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル r を利用して角 θ を得る。従って、カメラ10ごとに眼球50の光軸 AL を得ることができる。なお、関数 f は、予め取得されたものを繰り返し用いてもよい。また関数 f は、データが増えるごとに更新されてもよい。座標が既知である視標を対象者 M に注視させると、角 θ が求まる。同時に瞳孔 P が求まるので、瞳孔 P と視標位置をとる視軸 AS を得ることができる。

40

【0107】

〔第2係数 h の取得〕

上述の説明において、瞳孔形状法は、角膜反射 - 瞳孔中心法における第1係数 k に相当する係数を含まなかった。しかし、瞳孔形状法においても、式(24)のように第1係数 k に相当する第2係数 h を含めることができる。

【数24】

$$\theta = h\theta' - \theta_0 \cdots (24)$$

第2係数 h は、第1係数 k と同様に、一定値として扱ってもよい。また第2係数 h は、変化する値として扱ってもよい。第2係数 h は、第1係数 k と同様の方法により得る。

50

【 0 1 0 8 】

瞳孔 P は、角膜というレンズを介して物体を観察している。従って、カメラ 1 0 に対する視線の角度が大きくなるほど、角膜に起因する光の屈折により楕円度 R と角 θ の関係が乖離する。このため、楕円度 R と角 θ の関係において、非線形較正が必要になる。上述の第 1 係数 k の取得処理によれば、瞳孔 P の楕円の短軸方向のみの情報から仮想光軸平面 VL_1, VL_2 が得られる。従って、第 1 係数 k の取得処理は、屈折による影響を受けない。すなわち、第 1 係数 k の取得処理は、屈折を考慮する必要がない。

【 0 1 0 9 】

〔較正情報の取得〕

視線検出処理は、上述したステップ S 1 1 ~ S 1 8 を繰り返し行うことにより実行される。上述の説明において、光軸 AL と視軸 AS のずれを示す較正情報は、ずれ角 θ_0 として説明した。このずれ角 θ_0 は、ステップ S 1 1 ~ S 1 8 を含む繰り返し処理の前に行われるキャリブレーションステップにおいて取得される。

10

【 0 1 1 0 】

図 1 2 に示されるように、対象者 M が中央の視標 A 4 を見た場合、対象者 M の瞳孔 P から視標 A 4 に向かう視軸 AS_1 が形成される。一方、別の処理を実行することにより、光軸 AL 1 が求まる。そして、光軸 AL 1 とディスプレイ装置 3 0 との交点 T_1 が求まる。図 1 2 は、交点 T_1 を原点とした仮想平面を示す。

この仮想平面は、図 1 2 における仮想視点平面のカメラの位置を、眼球の光軸 AL とディスプレイとの交点に置き換えたものである。このとき、仮想平面 VP_1 と世界座標系の X - Z 平面（水平面）との交線を、仮想平面 VP_1 の水平軸とする。仮想平面 VP_1 と視軸 AS との交点を得る。そして、仮想視点平面の座標系におけるベクトルに変換する。その結果、視軸 AS と光軸 AL とのずれを表す較正情報（ずれ角 θ_0 ）を得る。

20

【 0 1 1 1 】

以上、本発明をその実施形態に基づいて詳細に説明した。しかし、本発明は上記実施形態に限定されない。本発明は、その要旨を逸脱しない範囲で様々な変形が可能である。

【 0 1 1 2 】

〔変形例 1〕

図 1 3 に示されるように、視線検出装置 1 の画像処理装置 2 0 A は、方向判定部 3 5 を有してもよい。方向判定部 3 5 は、カメラ 1 0 の瞳孔中心ベクトル OP に対する視軸 AS の方向を判別する。

30

【 0 1 1 3 】

図 1 4 の (a) 部、(b) 部、(c) 部、(d) 部は、対象者 M の瞳孔 P、光彩 5 5 及び角膜反射 G の位置関係を示す。図 1 4 の (a) 部は、カメラ 1 0 の右側における視標を対象者 M が見ている場合の瞳孔 P、光彩 5 5 及び角膜反射 G の位置関係を示す。図 1 4 の (b) 部は、カメラ 1 0 の右側であって (a) 部における視標よりもカメラ 1 0 に近い位置における視標を対象者 M が見ている場合の瞳孔 P、光彩 5 5 及び角膜反射 G の位置関係を示す。図 1 4 の (c) 部は、カメラ 1 0 或いは光源 1 3 を対象者 M が見ている場合の瞳孔 P、光彩 5 5 及び角膜反射 G の位置関係を示す。図 1 4 の (d) 部は、カメラ 1 0 の左側における視標を対象者 M が見ている場合の瞳孔 P、光彩 5 5 及び角膜反射 G の位置関係を示す。図 1 4 の (e) 部は、カメラ 1 0 の左側であって (d) 部における視標よりもカメラ 1 0 から遠い位置における視標を対象者 M が見ている場合の瞳孔 P、光彩 5 5 及び角膜反射 G の位置関係を示す。

40

【 0 1 1 4 】

図 1 4 の (a) 部及び (e) 部に示されるように、光源 1 3 から発せられた光の反射像（角膜反射 G）は、角膜より外側に生じている。すなわち、光源 1 3 から発せられた光の反射像は、白目の領域に生じている。図 1 4 の (b) 部及び (d) 部に示されるように、光源 1 3 から発せられた光の反射像は、角膜上において瞳孔 P から離れた位置に生じている。図 1 4 の (c) 部に示されるように、光源 1 3 から発せられた光の反射像は、角膜上において瞳孔 P に近い位置に生じている。

50

【 0 1 1 5 】

図 1 4 の (a) 部及び図 1 4 の (d) 部に示されるように、白目の領域に生じた反射像は、白目の形状の不均一性などにより安定しない。従って、白目の領域に生じた反射像は、高精度な視線検出への利用には不向きである。例えば、白目の領域に生じた反射像が瞳孔 P の左右のどちらに存在するかによって、単に右を見ているか左を見ているかを判定する方法が知られている。しかし、眼鏡をかけている場合に生じる光源の眼鏡反射像は、眼鏡、対象者 M 及び対象者 M の頭部の角度によって画像の特徴が大きく変化する。さらに、白目反射も変化する。従って、画像の特徴を利用して、右を見ているか左を見ているかを区別することが難しい場合があり得る。また、視線方向によっては白目反射が出現しないこともある。従って、反射像を利用する視線方向の判定によれば、視線方向の判定が困難である場合が生じ得る。

10

【 0 1 1 6 】

図 1 4 の (a) 部と (e) 部と、を比較すると、画像における瞳孔 P の形状は、左の指標を見ている場合でも、右の指標を見ている場合でも、同じである。具体的には、瞳孔 P の形状を示す楕円度 R は、カメラ 瞳孔中心ベクトル O P に対する視軸 A S の角度が同じであれば、左の指標を見ている場合でも、右の指標を見ている場合でも、同じである。すなわち、瞳孔 P の楕円度 R を利用する方法は、光学系 1 5 を挟んで点対称の位置にある指標を見ている場合 (例えば、右上と左下)、どちらも楕円度 R が同じ値を示すために区別できない。

【 0 1 1 7 】

20

そこで、画像処理装置 2 0 A は、方向判定部 3 5 を有していてもよい。方向判定部 3 5 は、カメラ 瞳孔中心ベクトル O P に対する視線方向を判別する。図 1 5 の (a) 部は、2 台の水平に並べられた光学系 $1 5_L$ 、 $1 5_R$ の右側を対象者 M が見た場合を示す。このとき、傾き θ_1 は、傾き θ_2 より大きい。傾き θ_1 は、対象者 M の左の光学系 $1 5_L$ と左目の視線 A G₁ との間の傾きであり。傾き θ_2 は、右の光学系 $1 5_R$ と左目の視線 A G₂ との間の傾きである。その結果、右側の光学系 $1 5_R$ の画像 G R R から得られる楕円度 R₂ は、左側の光学系 $1 5_L$ の画像 G R L から得られる楕円度 R₁ よりも大きい。右目についても同様のことがいえる。逆に図 1 5 の (b) 部のように、対象者 M が大きく左側を見た場合、右側の光学系 $1 5_R$ の画像 G R R から得られる楕円度 R₂ は、左側の光学系 $1 5_L$ の画像 G R L から得られる楕円度 R₁ よりも大きい。この方法によれば、左右の光学系 $1 5_L$ 、 $1 5_R$ でそれぞれ取得された画像 G R L、G R R に含まれた瞳孔 P の楕円度 R₁、R₂ を比較することによって、対象者 M が大きく右を見ているか、又は、左を見ているかのいずれであるかを区別できる。

30

【 0 1 1 8 】

〔変形例 2〕

視線検出装置 1 は、図 9 に示された機能ブロック図の構成に限定されることはない。視線検出装置 1 は、処理の効率化などのために各機能ブロック間の関係を適宜変更してもよい。例えば、視線検出装置 1 は、第 1 光軸取得部 2 8 及び第 2 光軸取得部 2 9 が、演算部 2 7 を構成する第 1 演算部 2 7 a、第 2 演算部 2 7 b、第 3 演算部 2 7 c、第 4 演算部 2 7 d、第 5 演算部 2 7 e、第 6 演算部 2 7 f 及び第 7 演算部 2 7 g を含んでもよい。また、視線検出方法は、図 1 0 のフロー図に示された順に限定されることはなく、各ステップの順を変更してもよい。例えば、視線検出方法は、第 1 光軸取得部 2 8 及び第 2 光軸取得部 2 9 において光軸候補を得る前に、光軸取得部を選択し、選択された光軸取得部においてのみ光軸 A L を得てもよい。また、視線検出方法は、光軸の較正処理を第 1 光軸候補が得られた後に直ちに実行し、且つ、光軸の較正処理を第 2 光軸候補が得られた後に直ちに実行してもよい。この場合、視線検出方法は、1 個の視軸 A S を得る処理において、較正処理を 2 回実行する。

40

【 0 1 1 9 】

〔変形例 3〕

ところで、実施形態に係る視線検出装置 1 の第 2 光軸取得部 2 9 は、瞳孔形状を利用し

50

て光軸を得た。瞳孔 P は角膜 5 2 に覆われている (図 5 参照) 。その結果、カメラ 1 0 は、角膜 5 2 を介した瞳孔 P の画像を出力する。そうすると、光が角膜 5 2 を通過する際に屈折が生じる可能性がある。従って、画像上の角膜輪郭の位置は、実際の瞳孔輪郭の位置に対してずれる可能性がある。そこで、視線検出装置 1 は、楕円度 R を補正する。その結果、実際の瞳孔輪郭の位置に対する画像上における瞳孔輪郭の位置のずれは、補正される。具体的には、視線検出装置 1 は、楕円度 R が補正された補正楕円度 R ' を得る。そして、視線検出装置 1 は、補正楕円度 R ' を利用して、視線検出処理を行う。楕円度 R の補正は、第 2 光軸取得部 2 9 が実行してもよい。また、楕円度 R の補正は、楕円度 R を得る第 4 演算部 2 7 d が実行してもよい。楕円度 R の補正には、例えば式 (2 5) を利用する。

【数 2 5】

$$R' = a \times R^2 + b \times R \cdots (25)$$

式 (2 5) において、R ' は補正楕円度である。R は楕円度である。a 及び b は係数である。これら係数 a , b は、実験的に得てもよい。一例として、a = 0 . 3 及び b = 0 . 7 としてもよい。また、角膜 5 2 における屈折の影響を補正可能であれば、数式の構成は式 (2 5) に限定されることはない。

【0 1 2 0】

第 2 光軸取得部 2 9 は、楕円度 R の逆数の逆余弦成分を直接に利用して、傾き θ_s を得てもよい (式 (7) 参照) 。

【0 1 2 1】

第 2 光軸取得部 2 9 は、補正楕円度 R ' の逆数の逆余弦成分を直接に利用して、傾き θ_s を得てもよい (式 (2 6) 参照) 。

【数 2 6】

$$\theta_s = \cos^{-1} \left(\frac{1}{R'} \right) \cdots (26)$$

式 (2 7) に示されるように、第 2 光軸取得部 2 9 は、補正楕円度 R ' の逆数の逆余弦成分に対して第 2 係数 (h) を乗じてもよい。その結果、さらに補正した値として傾き θ_s が得られる。

【数 2 7】

$$\theta_s = h \times \cos^{-1} \left(\frac{1}{R'} \right) \cdots (27)$$

【0 1 2 2】

このような係る視線検出装置 1 によれば、瞳孔形状法に基づく視線検出の精度をさらに高めることができる。

【0 1 2 3】

〔変形例 4〕

本実施形態に係る視線検出装置 1 は、角膜反射 - 瞳孔中心法に基づく処理を行うプラットフォーム上において、瞳孔形状法に基づく処理も実行する。すなわち、本実施形態に係る視線検出装置 1 は、一つのプラットフォーム上において、角膜反射 - 瞳孔中心法に基づく処理と瞳孔形状法に基づく処理とを実行する。しかし、このようなプラットフォームに限定されることはなく、別の処理を実行するプラットフォーム上において、角膜反射 - 瞳孔中心法に基づく処理と瞳孔形状法に基づく処理とを実行してもよい。

【0 1 2 4】

例えば、対象者 M の顔姿勢を得るプラットフォーム上において、角膜反射 - 瞳孔中心法に基づく処理と瞳孔形状法に基づく処理とを実行してもよい。ここでいう「顔姿勢」とは、対象者 M の頭蓋骨の位置と方向とを意味する。顔姿勢は、対象者 M の眼球の向き (例えば視線) とは関係がない。例えば、顔姿勢を検出する技術として、発明者らによる特許文献 (特開 2 0 0 7 - 2 6 0 7 3 号公報) がある。

【0 1 2 5】

10

20

30

40

50

まず、顔検出方法の基本原理について説明する。図16に示されるように、対象者Mの顔姿勢は、顔姿勢ベクトル V_B によって示される。顔姿勢ベクトル V_B は、対象者Mの瞳孔及び鼻孔を利用して得る。例えば、顔姿勢ベクトル V_B は、左瞳孔中心の位置 P_{S1} 、右瞳孔中心の位置 P_{S2} 、及び鼻孔間中心の位置 P_0 の3点を通る平面の法線ベクトルである。これら左瞳孔、右瞳孔、左鼻孔(第1鼻孔)中心、右鼻孔(第2鼻孔)中心及び鼻孔間中心は、特徴点とすることができる。これら特徴点の三次元座標はいくつかの計算手法により得られる。

【0126】

図17に示されるように、視線検出装置1Bは、物理的には実施形態に係る視線検出装置1と同様の構成を有する。一方、視線検出装置1Bは、画像処理装置20Bにおける機能的構成要素が視線検出装置1に対して相違する。視線検出装置1Bは、顔姿勢を検出するための機能的構成要素として座標取得部26aと、顔姿勢取得部36と、を有する。座標取得部26aは、算出部23Bにおける前処理部26Bに含まれる。顔姿勢取得部36は、算出部23Bに含まれる。

10

【0127】

座標取得部26aは、前処理部26の構成要素である。座標取得部26aは、瞳孔中心の位置(P_{S1} , P_{S2})に関する三次元座標を得る。また、座標取得部26aは、鼻孔の位置(P_0 , N_{S1} , N_{S2})に関する三次元座標を得る。なお、座標取得部26aは、当該三次元座標を得ることができればよい。従って、座標取得部26aは、前処理部26の構成要素である必要はない。座標取得部26aは、第1カメラ10Lによって取得された第1画像と第2カメラ10Rによって取得された第2画像とを利用して、ステレオマッチング法により、瞳孔中心の位置(P_{S1} , P_{S2})の三次元座標と、鼻孔の位置(P_0 , N_{S1} , N_{S2})の三次元座標と、を得る。

20

【0128】

座標取得部26aは、具体的には以下の動作を行う。図18に示されるように、ステレオ法による瞳孔中心の三次元座標の決定には、3個の座標系を利用する。

3個の座標系とは、世界座標系 C_W (X_W , Y_W , Z_W)、カメラ座標系 C_C (X_C , Y_C , Z_C)及び画像座標系 C_G (X_G , Y_G , Z_G)である。世界座標系 C_W は、複数のカメラの間で共有する任意の点を規定する。特徴点の三次元座標は、世界座標系 C_W に基づく。世界座標系 C_W とカメラ座標系 C_C との関係は、式(28)により示される。式(28)における回転行列 M_R 及び並進ベクトル T_R は、カメラ較正により得られる定数である。座標取得部26aは、式(28)を利用して、世界座標系 C_W における瞳孔中心の位置(P_{S1} , P_{S2})を得る。

30

【数28】

$$\begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{pmatrix} = M_R \begin{pmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{pmatrix} + T_R \cdots (28)$$

【0129】

顔姿勢取得部36は、瞳孔中心の位置(P_{S1} , P_{S2})の三次元座標と、鼻孔の位置(N_{S1} , N_{S2})の三次元座標と、を利用して顔姿勢ベクトルを得る。

40

【0130】

顔姿勢取得部36は、4個の座標情報(P_{S1} , P_{S2} , N_{S1} , N_{S2})を利用して、3個の基準部位を得る。3個の基準部位の集合は、基準部位群である。次に、顔姿勢取得部36は、仮想平面を設定する。仮想平面は、生成された3つの基準部位により示される点を頂点とする三角形の平面である。顔姿勢取得部36は、当該仮想平面の重心をとる顔姿勢ベクトル V_B を得る。顔姿勢ベクトル V_B は、顔姿勢を示す情報である。

【0131】

例えば、顔姿勢取得部36は、基準部位群として、右目の瞳孔中心の位置 P_{S1} 、左目の瞳孔中心の位置 P_{S2} 、及び鼻孔間中心の位置 P_0 を選択してもよい(図16参照)。

50

鼻孔間中心の位置 P_0 とは、右の鼻孔の位置 N_{S_1} と左の鼻孔の位置 N_{S_2} との平均である。顔姿勢取得部 36 は、第 1 基準部位群として、右目の瞳孔中心の位置 P_{S_1} 、左目の瞳孔中心の位置 P_{S_2} 及び右の鼻孔の位置 N_{S_1} を選択する。そして、顔姿勢取得部 36 は、これらを利用して第 1 法線ベクトルを得る。また、顔姿勢取得部 36 は、第 2 基準部位群として、右目の瞳孔中心の位置 P_{S_1} 、左目の瞳孔中心の位置 P_{S_2} 及び左の鼻孔の位置 N_{S_2} を選択する。そして、顔姿勢取得部 36 は、これらを利用して第 2 法線ベクトルを得る。なお、顔姿勢取得部 36 は、第 1 法線ベクトル及び第 2 法線ベクトルの平均を顔姿勢ベクトル V_B として得てもよい。

【0132】

変形例に係る視線検出装置 1B は、視線検出可能な範囲を拡大することができる。また、視線検出装置 1B は、対象者 M の顔姿勢を得ることができる。

10

【0133】

〔変形例 5〕

座標取得部の動作は、ステレオマッチング法に基づく処理に限定されない。座標取得部の動作は、瞳孔 P 及び鼻孔の三次元座標が取得可能な処理であれば任意の処理を選択してもよい。例えば、図 19 に示されるように、座標取得部 26b は、拘束条件法と呼ばれる処理により三次元座標を得てもよい。拘束条件法は、特徴点の間の距離（以下「特徴点間距離」又は単に「距離」という）を拘束条件として利用して、特徴点の三次元座標を得る。特徴点間距離とは、例えば、左瞳孔中心の位置 P_{S_1} と右瞳孔中心の位置 P_{S_2} との間の距離 L_1 、左瞳孔中心の位置 P_{S_1} と鼻孔間中心の位置 P_0 との間の距離 L_2 及び右瞳孔中心の位置 P_{S_2} と鼻孔間中心の位置 P_0 との間の距離 L_3 である（図 16 参照）。また、ステレオ法の実施には光学系（例えばカメラ）が 2 個必要である。しかし、拘束条件法は、一台のカメラ（第 3 カメラ）で取得された第 3 画像だけで三次元座標を得ることができる。従って、拘束条件法によれば、2 個の光学系を離間して配置し、それぞれの光学系を利用することにより、顔方向の検出範囲を光学系の離間方向に拡大することが可能になる。

20

【0134】

図 19 に示されるように、視線検出装置 1C は、物理的には実施形態に係る視線検出装置 1 と同様の構成を有する。一方、視線検出装置 1C は、画像処理装置 20C における機能的構成要素が視線検出装置 1 に対して相違する。視線検出装置 1C は、顔姿勢を検出するための機能的構成要素として座標取得部 26b を有する。座標取得部 26b は、算出部 23C における前処理部 26c に含まれる。座標取得部 26b は、距離演算部 26c と、二次元座標演算部 26d と、三次元座標演算部 26e とを有する。また、算出部 23C は、顔姿勢取得部 36 を有する。

30

【0135】

視線検出装置 1C における撮像光学系は、焦点距離 f のピンホールモデルと仮定することができる（図 20 参照）。カメラ座標系 C_C における鼻孔画像（撮像平面 PL ）上の右瞳孔、左瞳孔、左鼻孔、及び右鼻孔の中心点の二次元座標をそれぞれ、 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、及び Q_4 とする。カメラ座標系 C_C は、ピンホールの位置原点 O_R とする。前処理部 26 は、これら 4 点の二次元座標を利用して、両鼻孔の中点（鼻孔間中心）の座標（鼻孔間中心座標） P_0 と、右瞳孔中心の位置 P_{S_1} と、左瞳孔中心の位置 P_{S_2} と、を得る。ここで、 $P_n = (X_n, Y_n, Z_n)$ ($n = 0, 1, 2$) である。

40

【0136】

3 個の特徴点（鼻孔間中心、左瞳孔及び右瞳孔）間を結んだ三角形の各辺の距離は、それらのうちの任意の 1 点を i とし、他の点を j とすると、点 i, j の間の距離 L_{ij} で示される（式（29）参照）。この距離 L_{ij} は、予め実測されることにより得られる。この距離 L_{ij} を得る処理は、距離演算部 26c により実行される。

【数 29】

$$L_{ij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2} \cdots (29)$$

50

【 0 1 3 7 】

各特徴点に対応する撮像平面 P L 上の二次元位置は、ピンホールから各特徴点への位置ベクトルと、カメラの焦点距離 f とを用いて示される（式（ 2 9 ）参照）。撮像平面 P L 上の二次元位置を得る処理は、二次元座標演算部 2 6 d により実行される。

【 数 3 0 】

$$Q_n = (X_n \times (f/Z_n), Y_n(f/Z_n)) \cdots (30)$$

また、ピンホールから各特徴点へ向かう位置ベクトルに対応した単位ベクトルは式（ 3 0 ）により示される。

【 数 3 1 】

$$\vec{u}_n = \frac{(x_n, y_n, f)}{\sqrt{x_n^2 + y_n^2 + f^2}} \cdots (31)$$

各特徴点の位置ベクトルは定数 a_n ($n = 0, 1, 2$) を利用し、式（ 3 1 ）により示される。

【 数 3 2 】

$$\vec{P}_n = a_n \vec{u}_n \cdots (32)$$

そうすると、式（ 3 3 ）が成立する。

【 数 3 3 】

$$|P_m - P_n|^2 = a_m^2 + a_n^2 - 2a_m a_n (\vec{u}_m, \vec{u}_n) = L_{mn}^2 \cdots (33)$$

これにより式（ 3 4 ）が得られる。

【 数 3 4 】

$$\begin{cases} a_0^2 + a_1^2 - 2a_0 a_1 (\vec{u}_0, \vec{u}_1) = L_{01}^2 \\ a_1^2 + a_2^2 - 2a_1 a_2 (\vec{u}_1, \vec{u}_2) = L_{12}^2 \\ a_2^2 + a_0^2 - 2a_2 a_0 (\vec{u}_2, \vec{u}_0) = L_{20}^2 \end{cases} \cdots (34)$$

顔姿勢取得部 3 6 は、連立方程式（式（ 3 4 ））を利用して、 a_0, a_1, a_2 を得る。そして、顔姿勢取得部 3 6 は、連立方程式の解を式（ 3 2 ）に適用する。その結果、顔姿勢取得部 3 6 は、位置ベクトルを得る。位置ベクトルは、各特徴点の三次元座標を示す。三次元座標を得る処理は、三次元座標演算部 2 6 e により実行される。

【 0 1 3 8 】

変形例に係る視線検出装置 1 C は、視線検出可能な範囲を拡大することができる。また、視線検出装置 1 C は、対象者 M の顔姿勢を得ることができる。

【 0 1 3 9 】

上記実施形態において、光軸情報取得部 3 1 が生成する情報は、第 1 光軸候補及び第 2 光軸候補のいずれか一方を光軸 A L として選択するための情報である。例えば、光軸情報取得部 3 1 が生成する情報は、第 1 光軸候補及び第 2 光軸候補の両方を利用して、光軸 A L を生成する情報であってもよい（式（ 3 5 ））。式（ 3 5 ）において、第 1 光軸候補の情報（大きさ $|\theta_1|$ ）には重み係数 w_1 が設定され、第 2 光軸候補の情報（大きさ $|\theta_2|$ ）には重み係数 w_2 が設定される。従って、光軸情報取得部 3 1 が生成する情報は、式（ 3 5 ）を示す情報と、式（ 3 5 ）における重み係数 w_1, w_2 としてもよい。

【 数 3 5 】

$$|\theta| = w_1 \times |\theta_1| + w_2 \times |\theta_2| \cdots (35)$$

$$w_1 + w_2 = 1$$

【 0 1 4 0 】

図 2 1 の（ a ）部及び（ b ）部に示されるように、重み係数 w_1, w_2 は、傾き θ_s を変数として 0 から 1 の間の値を取り得る。図 2 1 の（ a ）部に示されるように、閾値 θ_T （例えば 30 度）を設定する共に当該閾値 θ_T を含む所定の数値範囲を設定する。傾き

10

20

30

40

50

s が所定の数値範囲内に存在しない場合であり、且つ、傾き s が所定の数値範囲よりも小さい側に存在する場合、重み係数 w_1 を 1 とし、重み係数 w_2 を 0 とする。逆に、傾き s が所定の数値範囲内に存在しない場合であり、且つ、傾き s が所定の数値範囲よりも大きい側に存在する場合、重み係数 w_1 を 0 とし、重み係数 w_2 を 1 とする。換言すると、傾き s が所定の数値範囲よりも小さい側に存在する場合、第 1 光軸候補を光軸 A L とする。一方、傾き s が所定の数値範囲よりも大きい側に存在する場合、第 2 光軸候補を光軸 A L とする。さらに、傾き s が所定の数値範囲内に存在する場合、重み係数 w_1 と重み係数 w_2 とを用いて光軸 A L を得てもよい。例えば、傾き s が閾値 τ と等しい場合、重み係数 w_1 を 0.5 とし、重み係数 w_2 を 0.5 としてもよい。また、重み係数 w_1 , w_2 と傾き s との関係は、図 21 の (b) 部に示されるように、ステップ状に変化させてもよい。この場合、傾き s が閾値 τ より小さい場合、光軸 A L の取得に第 1 光軸候補が用いられる。傾き s が閾値 τ より大きい場合、光軸 A L の取得に第 2 光軸候補が用いられる。すなわち、上記実施形態に示された光軸情報取得部 31 の動作と同じである。

10

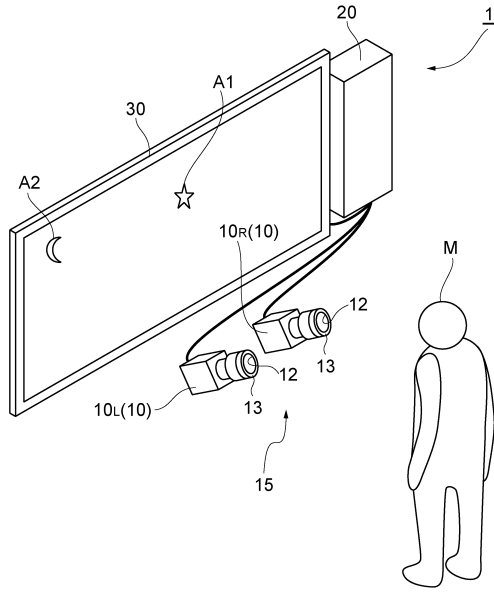
【符号の説明】

【0141】

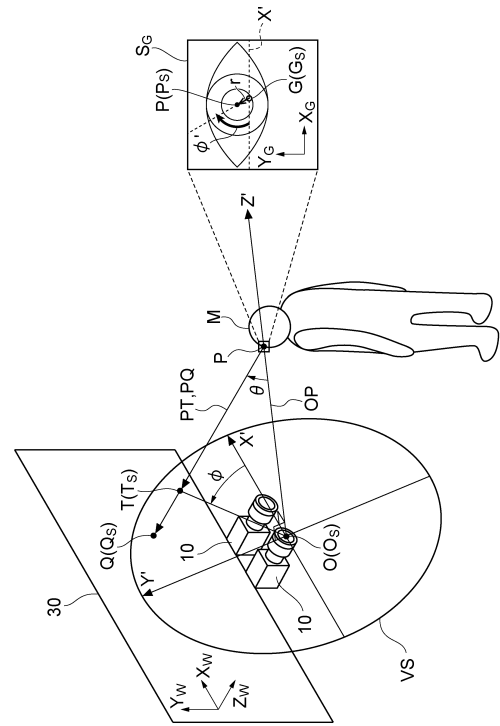
1 ... 視線検出装置、10, 10_L, 10_R ... カメラ (画像取得部)、11 ... 対物レンズ、12 ... 開口部、13 ... 光源、13a, 13b ... 発光素子、15 ... 光学系、20 ... 画像処理装置 (画像処理部)、21 ... 点灯制御部、22 ... 画像入力部、23 ... 算出部、24 ... 記録部、26 ... 前処理部、27 ... 演算部、27a ... 第 1 演算部、27b ... 第 2 演算部、27c ... 第 3 演算部、27d ... 第 4 演算部、27e ... 第 5 演算部、27f ... 第 6 演算部、28 ... 第 1 光軸取得部、29 ... 第 2 光軸取得部、30 ... ディスプレイ装置、31 ... 光軸情報取得部、32 ... 視軸取得部、33 ... 較正情報部、34 ... 係数部、35 ... 方向判定部、50 ... 眼球、52 ... 角膜、53 ... 水晶体、56 ... 網膜、57 ... 中心窩、101 ... CPU、102 ... 主記憶部、103 ... 補助記憶部、104 ... 通信制御部、105 ... 入力装置、106 ... 出力装置、A1, A2 ... 視標、A3 ... 軸線、AL ... 光軸、AS ... 視軸、CL ... 交線、G ... 角膜反射、OP ... カメラ - 瞳孔中心ベクトル、P, Pa, Pb, Pc ... 瞳孔、PQ, PT ... 視線ベクトル、Q, T ... 注視点、r, r₁, r₂ ... 角膜反射 - 瞳孔中心ベクトル、M ... 対象者、VS ... 仮想視点平面、VL₁, VL₂ ... 仮想光軸平面。

20

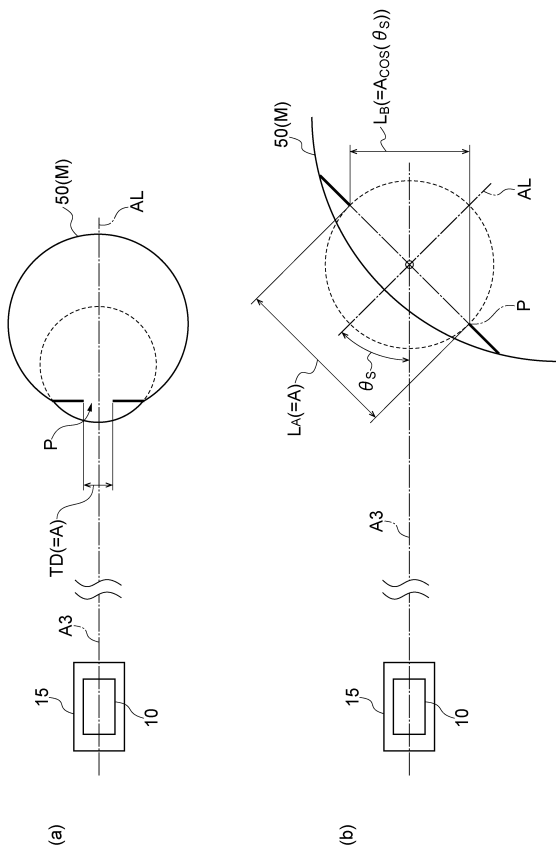
【 図 1 】



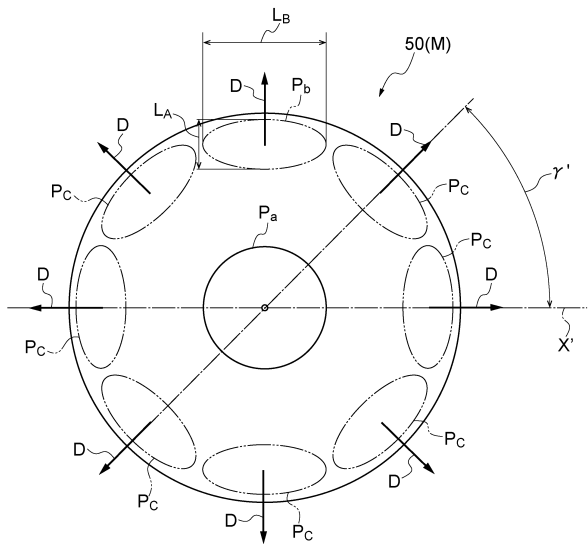
【 図 2 】



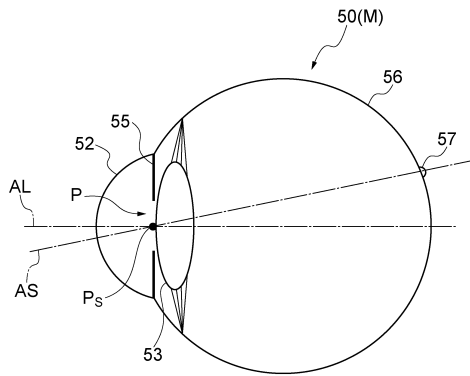
【 図 3 】



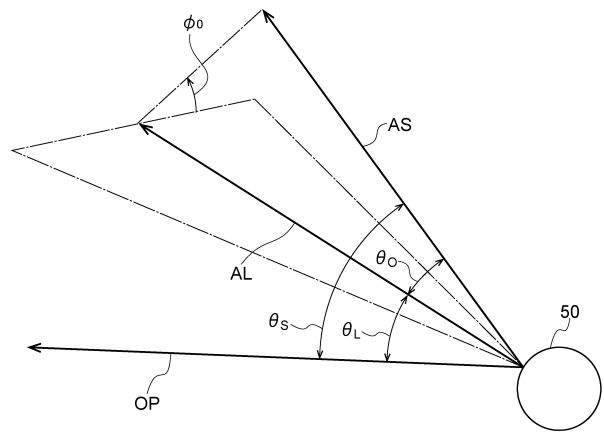
【 図 4 】



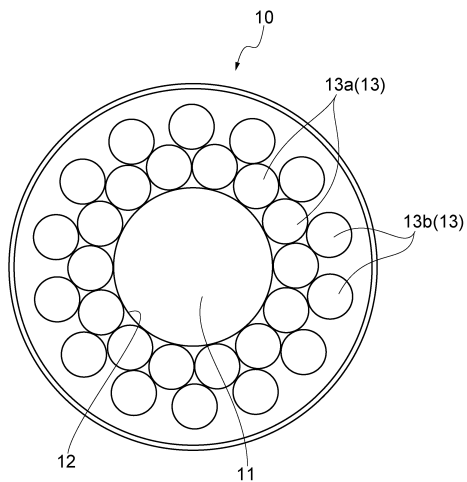
【図5】



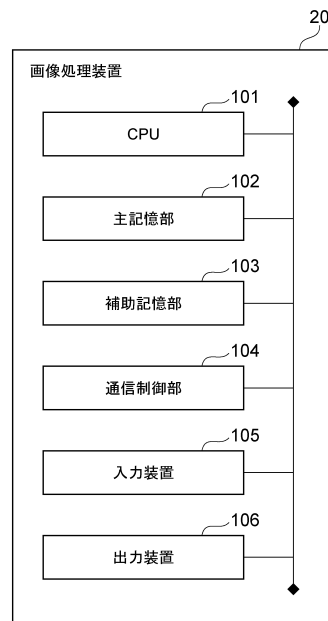
【図6】



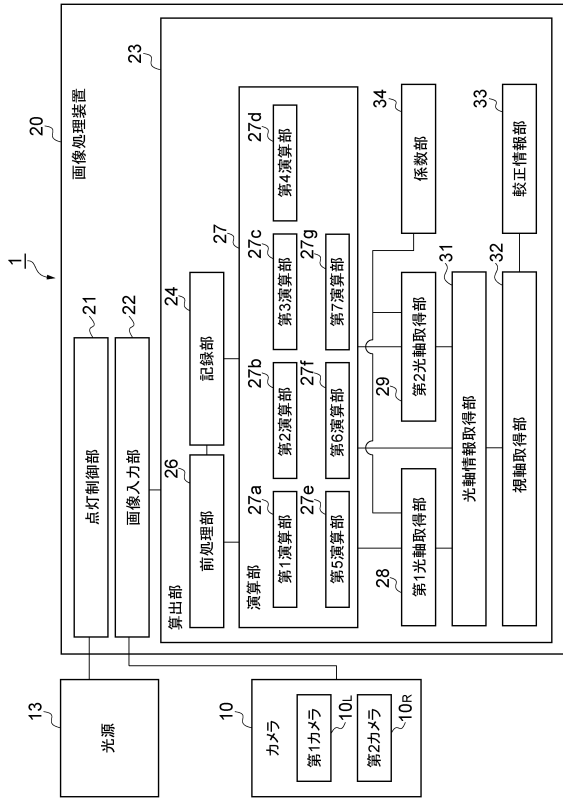
【図7】



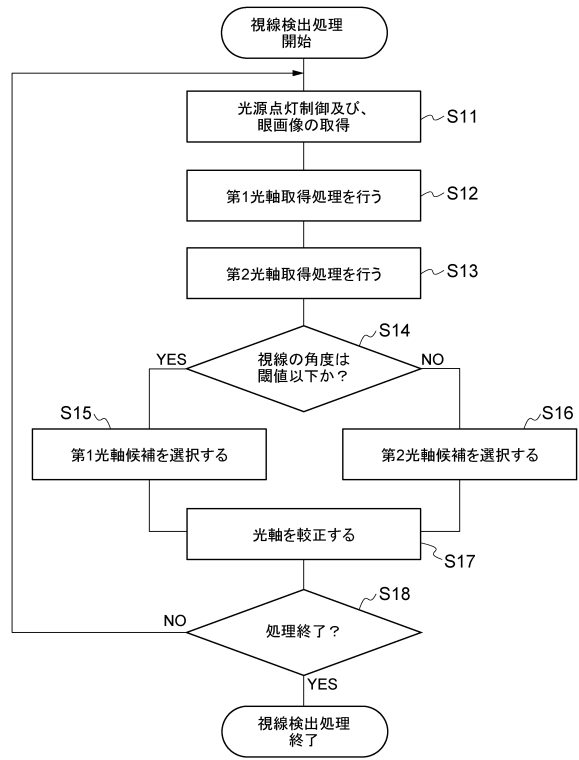
【図8】



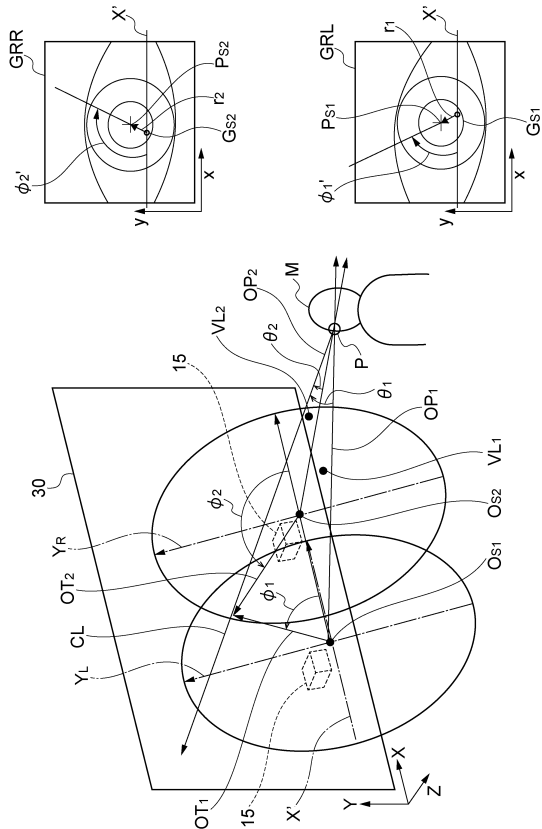
【図9】



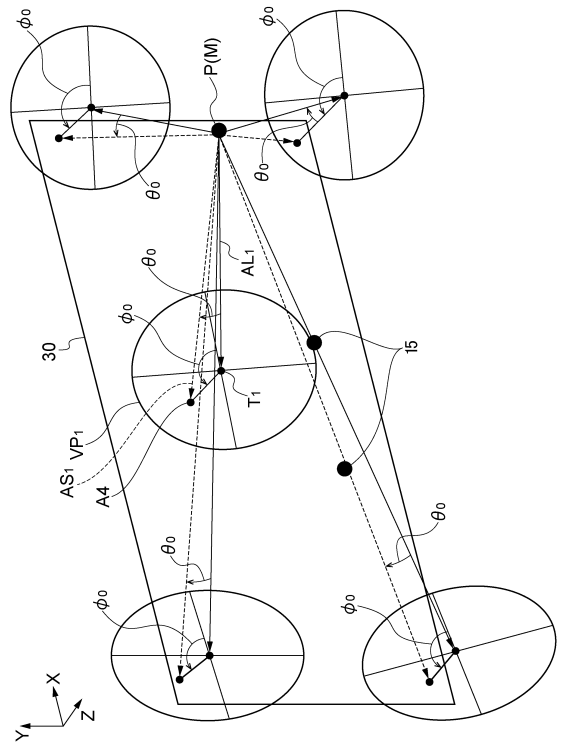
【図10】



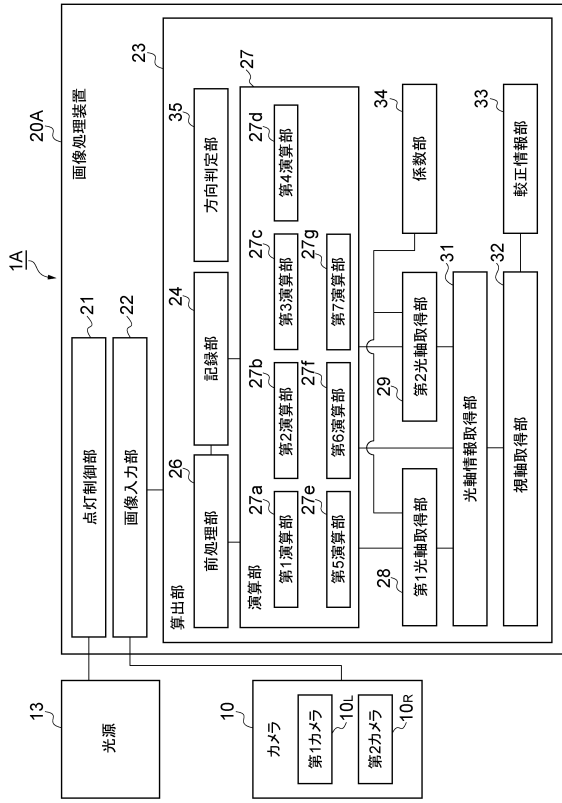
【図11】



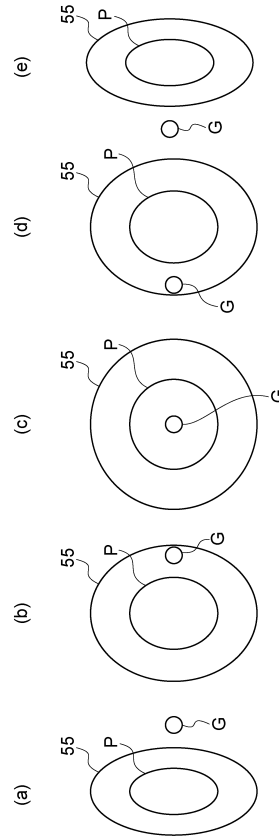
【図12】



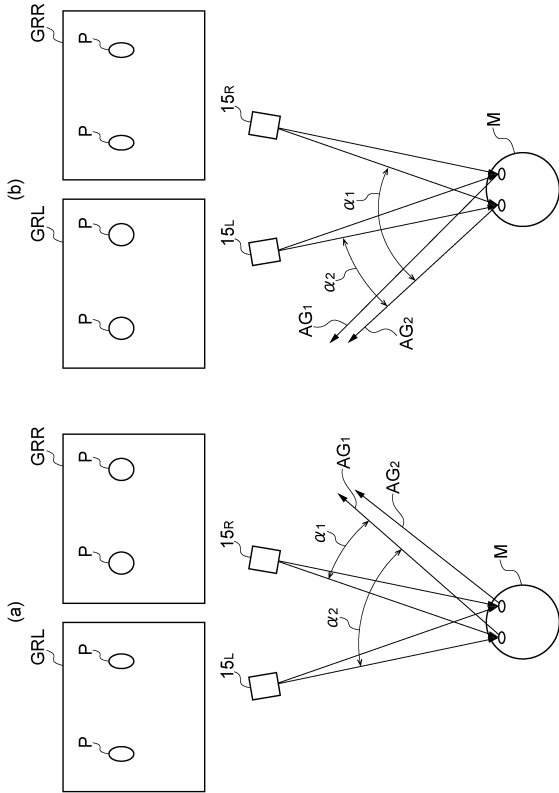
【図13】



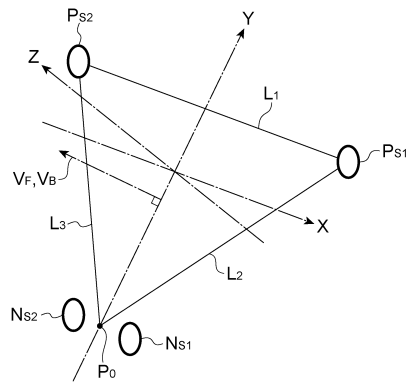
【図14】



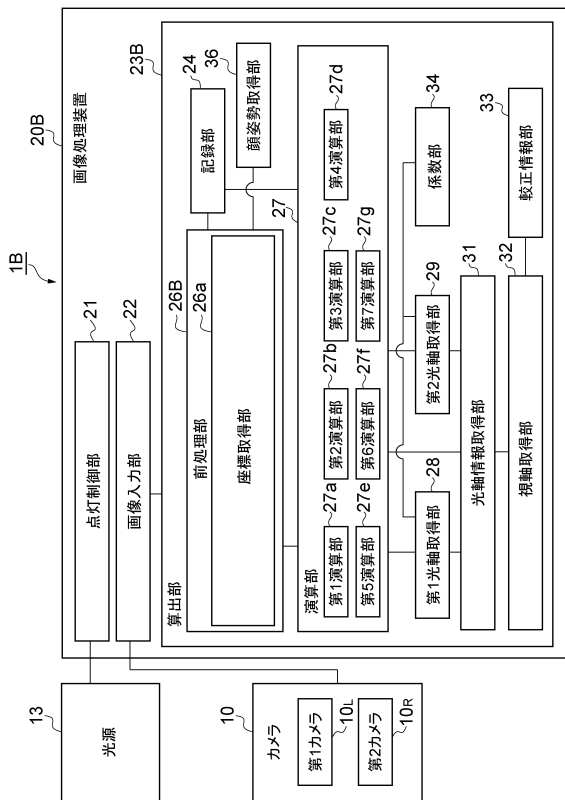
【図15】



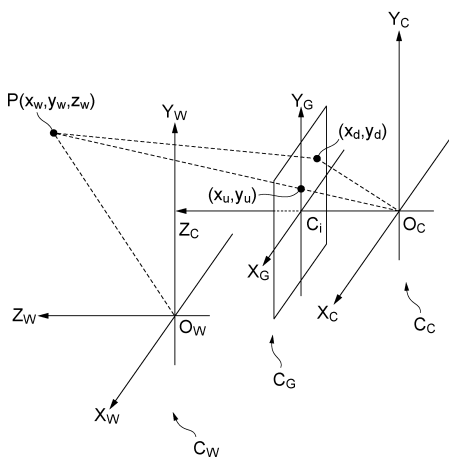
【図16】



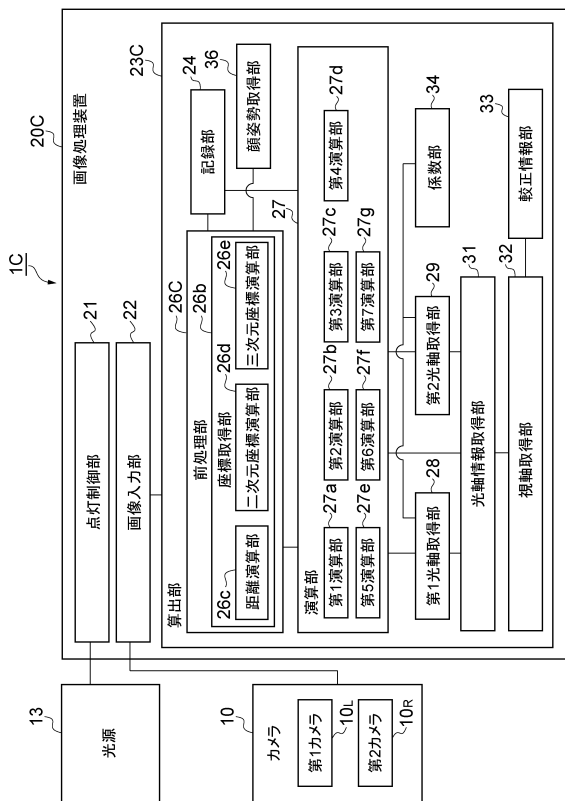
【図17】



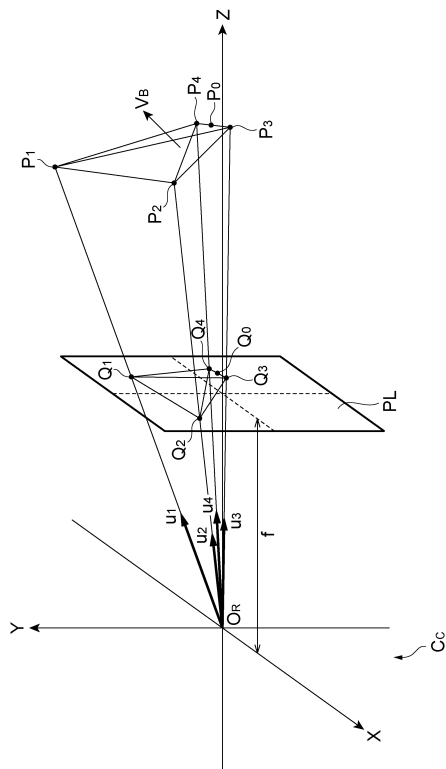
【図18】



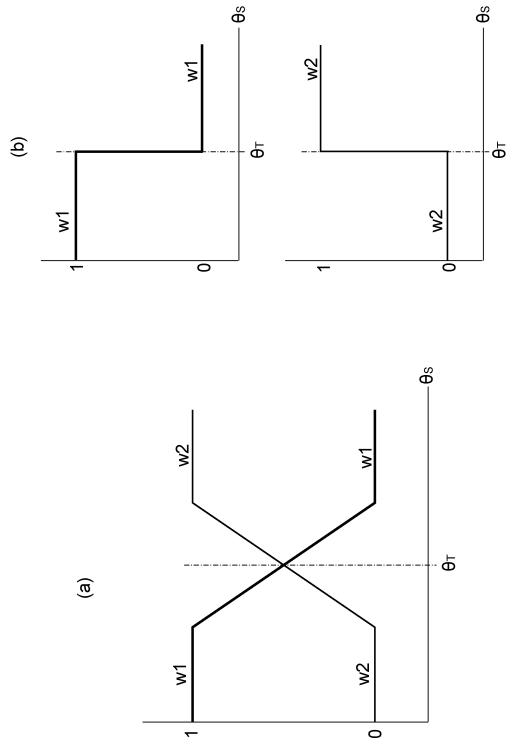
【図19】



【図20】



【 2 1 】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2016-051315(JP,A)
国際公開第2016/098406(WO,A1)
特開2005-230049(JP,A)
特開2007-271554(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G06T 7/00-7/90