

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7283841号
(P7283841)

(45)発行日 令和5年5月30日(2023.5.30)

(24)登録日 令和5年5月22日(2023.5.22)

(51)国際特許分類

F I

A 6 1 B 3/113(2006.01)

A 6 1 B 3/113

請求項の数 4 (全22頁)

(21)出願番号	特願2019-64828(P2019-64828)	(73)特許権者	000003609
(22)出願日	平成31年3月28日(2019.3.28)		株式会社豊田中央研究所
(65)公開番号	特開2020-162759(P2020-162759 A)	(73)特許権者	000000011
(43)公開日	令和2年10月8日(2020.10.8)		株式会社アイシン
審査請求日	令和4年3月25日(2022.3.25)	(73)特許権者	000003207
			トヨタ自動車株式会社
		(74)代理人	100084995
			弁理士 加藤 和詳
		(72)発明者	小島 真一
			愛知県長久手市横道4 1 番地の1 株式
			会社豊田中央研究所内
		(72)発明者	大須賀 晋
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 視線計測装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

被観察者の顔を撮像する撮像部と、
前記被観察者の目に対して光を照射する光照射部と、
前記撮像部によって撮像された前記顔を表す顔画像から、カメラ座標系における眼球中心の3次元座標を推定するカメラ座標系眼球中心座標計算部と、
前記顔画像上の目の瞳孔中心位置から、カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の3次元座標を推定する第1瞳孔中心計算部と、
前記カメラ座標系における眼球中心の3次元座標と、前記カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の3次元座標とに基づいて、前記カメラ座標系において、前記眼球中心の3次元位置から瞳孔中心の3次元位置へ向かう3次元の光軸ベクトルを計算する第1眼球位置姿勢推定部と、
前記カメラ座標系における眼球中心の3次元座標と、前記光軸ベクトルと、予め定められた3次元眼球モデルとに基づいて、カメラ座標系における角膜反射像の3次元座標を求める角膜反射像計算部と、
前記カメラ座標系における角膜反射像の3次元座標から、前記顔画像上の角膜反射像の画像座標を推定する第1画像座標計算部と、
前記顔画像上の目の角膜反射像の位置から、カメラ座標系における角膜反射像の3次元座標を推定する角膜反射像計算部と、
前記カメラ座標系における眼球中心の3次元座標と、前記カメラ座標系における角膜反

射像の３次元座標とに基づいて、前記カメラ座標系において、前記眼球中心の３次元位置から角膜曲率中心の３次元位置へ向かう３次元の光軸ベクトルを計算する第２眼球位置姿勢推定部と、

前記カメラ座標系における眼球中心の３次元座標と、前記光軸ベクトルと、予め定められた３次元眼球モデルとに基づいて、カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の３次元座標を求める第２瞳孔中心計算部と、

前記カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の３次元座標から、前記顔画像上の瞳孔中心の画像座標を推定する第２画像座標計算部と、

前記角膜反射像の画像座標と、前記瞳孔中心の画像座標とに基づいて、角膜反射法により、視線ベクトルを求める視線検出部と、

を含む視線計測装置。

【請求項２】

前記撮像部と前記光照射部との位置関係、前記撮像部と前記目との位置関係、及び前記撮像部に関するパラメータが、前記撮像部の撮像方向と前記光照射部の光照射方向とが同軸であるとみなすための予め定められた制約条件を満たす

請求項１記載の視線計測装置。

【請求項３】

前記第１眼球位置姿勢推定部は、

前記カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の３次元座標と前記カメラ座標系における眼球中心の３次元座標とを結んだ線分と、前記カメラ座標系における眼球中心の３次元座標と前記撮像部の３次元座標とを結んだ線分とのなす角を算出し、

前記なす角に対応して予め定められた角度補正量を取得し、

前記カメラ座標系における眼球中心の３次元座標と前記カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の３次元座標とを結んだベクトルと、前記取得した前記角度補正量と、前記算出した前記なす角と、前記カメラ座標系における眼球中心の３次元座標とに基づいて、前記カメラ座標系において、前記眼球中心の３次元位置から瞳孔中心の３次元位置へ向かう３次元の光軸ベクトルを計算する請求項２記載の視線計測装置。

【請求項４】

前記第２瞳孔中心計算部は、

前記光軸ベクトルと、前記カメラ座標系における眼球中心の３次元座標とに基づいて、前記カメラ座標系における眼球中心の３次元座標と前記カメラ座標系の角膜曲率中心の３次元座標とを結んだ線分と、前記カメラ座標系における眼球中心の３次元座標と前記撮像部の３次元座標とを結んだ線分とのなす角を算出し、

前記算出された前記なす角に対応して予め定められた角度補正量を取得し、

前記カメラ座標系における眼球中心の３次元座標と、前記光軸ベクトルと、前記角度補正量とに基づいて、前記カメラ座標系における眼球中心の３次元座標と前記カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の３次元座標とを結んだベクトルを算出し、

前記算出されたベクトルと、前記カメラ座標系における眼球中心の３次元座標と、予め定められた３次元眼球モデルとに基づいて、カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の３次元座標を求める請求項２記載の視線計測装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【０００１】

本発明は、視線計測装置に係り、特に、顔を撮像した画像から、視線を計測する視線計測装置に関する。

【背景技術】

【０００２】

従来より、角膜の曲率中心と眼球の回転中心とが異なるので、眼球運動に伴ってプルキンエ像が平行移動するのをビデオカメラあるいはＣＣＤカメラで撮影し、眼球運動を計算する方法が知られている（非特許文献１）。角膜前面からの反射によって得られる像を利

10

20

30

40

50

用する方法が角膜反射法である。

【0003】

角膜反射像に関して複数光源を用いたり、投光パターンを時間変化させることで眼鏡映り込みと区別して検出できるようにする技術が知られている（例えば、特許文献1、2）。

【0004】

特許文献1では、赤外光パターンを使用し、特許文献2では、複数光源を使用している。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0005】

【文献】野城真理、「3章 生体計測と神経心理学」、インターネット<URL : http://www.ieice-hbkb.org/files/S3/S3gun_10hen_03.pdf>

10

【特許文献】

【0006】

【文献】特開2014-188322号公報

特開2017-111746号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

上記非特許文献1に記載の技術のように、単一光源を用いる方法では、眼鏡への外乱光の映り込みと角膜反射像の区別が難しい。

20

【0008】

また、上記特許文献1、2に記載の技術では、角膜反射像を得るために、複数の光源や投光パターンを用いるための装置が必要となるため、装置コストがかかってしまう。

【0009】

本発明は、上記の問題点を解決するためになされたもので、簡易な構成で、視線計測のために、顔画像上の角膜反射像の画像座標又は瞳孔中心の画像座標を精度良く求めることができる視線計測装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0010】

上記の目的を達成するために第1の発明に係る視線計測装置は、被観察者の顔を撮像する撮像部と、前記被観察者の目に対して光を照射する光照射部と、前記撮像部によって撮像された前記顔を表す顔画像から、カメラ座標系における眼球中心の3次元座標を推定するカメラ座標系眼球中心座標計算部と、前記顔画像上の目の瞳孔中心位置から、カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の3次元座標を推定する瞳孔中心計算部と、前記カメラ座標系における眼球中心の3次元座標と、前記カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の3次元座標とに基づいて、前記カメラ座標系において、前記眼球中心の3次元位置から瞳孔中心の3次元位置へ向かう3次元の光軸ベクトルを計算する眼球位置姿勢推定部と、前記カメラ座標系における眼球中心の3次元座標と、前記光軸ベクトルと、予め定められた3次元眼球モデルとに基づいて、カメラ座標系における角膜反射像の3次元座標を求める角膜反射像計算部と、前記カメラ座標系における角膜反射像の3次元座標から、前記顔画像上の角膜反射像の画像座標を推定する画像座標計算部と、を含んで構成されている。

30

40

【0011】

第1の発明によれば、簡易な構成で、顔画像上の目の瞳孔中心位置から、視線計測のために顔画像上の角膜反射像の画像座標を精度良く求めることができる。

【0012】

上記第1の発明に係る視線計測装置において、前記撮像部と前記光照射部との位置関係、前記撮像部と前記目との位置関係、及び前記撮像部に関するパラメータが、前記撮像部の撮像方向と前記光照射部の光照射方向とが同軸であるとみなすための予め定められた制約条件を満たすようにすることができる。

【0013】

50

また、上記第1の発明に係る視線計測装置において、前記眼球位置姿勢推定部は、前記カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の3次元座標と前記カメラ座標系における眼球中心の3次元座標とを結んだ線分と、前記カメラ座標系における眼球中心の3次元座標と前記撮像部の3次元座標とを結んだ線分とのなす角を算出し、前記なす角に対応して予め定められた角度補正量を取得し、前記カメラ座標系における眼球中心の3次元座標と前記カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の3次元座標とを結んだベクトルと、前記取得した前記角度補正量と、前記算出した前記なす角と、前記カメラ座標系における眼球中心の3次元座標とに基づいて、前記カメラ座標系において、前記眼球中心の3次元位置から瞳孔中心の3次元位置へ向かう3次元の光軸ベクトルを計算するようにすることができる。

【0014】

第2の発明に係る視線計測装置は、被観察者の顔を撮像する撮像部と、前記被観察者の目に対して光を照射する光照射部と、前記撮像部によって撮像された前記顔を表す顔画像から、カメラ座標系における眼球中心の3次元座標を推定するカメラ座標系眼球中心座標計算部と、前記顔画像上の目の角膜反射像の位置から、カメラ座標系における角膜反射像の3次元座標を推定する角膜反射像計算部と、前記カメラ座標系における眼球中心の3次元座標と、前記カメラ座標系における角膜反射像の3次元座標とに基づいて、前記カメラ座標系において、前記眼球中心の3次元位置から角膜曲率中心の3次元位置へ向かう3次元の光軸ベクトルを計算する眼球位置姿勢推定部と、前記カメラ座標系における眼球中心の3次元座標と、前記光軸ベクトルと、予め定められた3次元眼球モデルとに基づいて、カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の3次元座標を求める瞳孔中心計算部と、前記カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の3次元座標から、前記顔画像上の瞳孔中心の画像座標を推定する画像座標計算部と、を含んで構成されている。

【0015】

第2の発明によれば、簡易な構成で、顔画像上の目の角膜反射像の位置から、視線計測のために顔画像上の瞳孔中心の画像座標を精度良く求めることができる。

【0016】

上記第2の発明に係る視線計測装置において、前記撮像部と前記光照射部との位置関係、前記撮像部と前記目との位置関係、及び前記撮像部に関するパラメータが、前記撮像部の撮像方向と前記光照射部の光照射方向とが同軸であるとみなすための予め定められた制約条件を満たすようにすることができる。

【0017】

また、上記第2の発明に係る視線計測装置において、前記瞳孔中心計算部は、前記光軸ベクトルと、前記カメラ座標系における眼球中心の3次元座標とに基づいて、前記カメラ座標系における眼球中心の3次元座標と前記カメラ座標系の角膜曲率中心の3次元座標とを結んだ線分と、前記カメラ座標系における眼球中心の3次元座標と前記撮像部の3次元座標とを結んだ線分とのなす角を算出し、前記算出された前記なす角に対応して予め定められた角度補正量を取得し、前記カメラ座標系における眼球中心の3次元座標と、前記光軸ベクトルと、前記角度補正量とに基づいて、前記カメラ座標系における眼球中心の3次元座標と前記カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の3次元座標とを結んだベクトルを算出し、前記算出されたベクトルと、前記カメラ座標系における眼球中心の3次元座標と、予め定められた3次元眼球モデルとに基づいて、カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の3次元座標を求めるようにすることができる。

【発明の効果】

【0018】

以上説明したように、本発明の視線計測装置によれば、簡易な構成で、視線計測のために、顔画像上の角膜反射像の画像座標又は瞳孔中心の画像座標を精度良く求めることができる、という効果が得られる。

【図面の簡単な説明】

【0019】

【図1】本発明の実施の形態に係る視線計測装置の構成を示すブロック図である。

【図 2】照射部と画像撮像部の配置を示す図である。

【図 3】照射部と画像撮像部と目の位置関係を示す図である。

【図 4】本発明の実施の形態に係る視線計測装置の角膜反射像推定部の構成を示すブロック図である。

【図 5】各種座標系を説明するための図である。

【図 6】三次元眼球モデルと画像撮像部との位置関係を示す図である。

【図 7】本発明の実施の形態に係る視線計測装置の瞳孔推定部の構成を示すブロック図である。

【図 8】本発明の実施の形態に係る視線計測装置における視線計測処理ルーチンの内容を示すフローチャートである。

【図 9】本発明の実施の形態に係る視線計測装置における角膜反射像推定処理ルーチンの内容を示すフローチャートである。

【図 10】本発明の実施の形態に係る視線計測装置における瞳孔推定処理ルーチンの内容を示すフローチャートである。

【図 11】角膜反射法を用いた視線検出方法を説明するための図である。

【図 12】眼球モデルフィッティング法を用いた視線検出方法を説明するための図である。

【図 13】角膜反射法で求めた視線ベクトルと眼球モデルフィッティング法で求めた視線ベクトルの違いを説明するための図である。

【発明を実施するための形態】

【0020】

以下、図面を参照して本発明の実施の形態を詳細に説明する。なお、本実施の形態では、撮像された顔画像から、視線ベクトルを推定する視線計測装置に本発明を適用した場合を例に説明する。

【0021】

<本発明の実施の形態の概要>

本発明の実施の形態で主に扱うのは角膜反射法による視線検出技術であるが、後の説明のため眼球モデルフィッティング法についても概要を述べておく。

【0022】

角膜反射法は、図 11 に示すようにカメラと近赤外 LED を用い、角膜に映り込んだ近赤外 LED（角膜反射像）と瞳孔の位置関係から視線ベクトルを求める手法である。

【0023】

眼球モデルフィッティング法は、図 12 に示すように目尻・目頭の特徴点に対し三次元眼球モデルを当てはめることで眼球中心位置を推定し、眼球中心と瞳孔中心を結ぶベクトルを視線ベクトルとする手法である。必ずしも目尻・目頭の特徴点を用いる必要はなく、何らかの手段で眼球中心を推定する手法を用いれば良い。

【0024】

図 13 は 2 種類の視線検出法で求める視線の詳細な説明図である。角膜反射法で求める視線ベクトルを g_{cr} とし、眼球モデルフィッティング法で求める視線ベクトルを g_{eb} とする。角膜反射法では、角膜曲率中心座標を計算で求めることができるため、角膜に関連した情報として角膜反射像と角膜曲率中心および角膜表面上で観測される瞳孔中心（以後、見かけの瞳孔中心と呼ぶ）の 3 つが得られる。そのため、角膜での光の屈折を計算に組み込むことができ、正しい瞳孔中心と角膜曲率中心を結ぶベクトルとして視線ベクトルを計算できる。それに対して、眼球モデルフィッティング法では、角膜に関連した情報が見かけの瞳孔中心しか得られないために角膜屈折を扱うことができず、視線ベクトルは見かけの瞳孔中心と眼球中心を結ぶベクトルとして計算される。図 13 に示すように視線ベクトル g_{cr} と g_{eb} は厳密には一致しない。また、二つの視線ベクトルの角度差（以後、視線誤差と呼ぶ） ρ は一定ではなく、眼球の位置と向きによって変化する。角膜反射法で求める視線ベクトル g_{cr} が正しいとすると、この視線誤差 ρ が大きいことは眼球モデルフィッティング法の視線推定精度の劣化を意味する。

【0025】

そこで、本発明の実施の形態では、カメラと照明が同軸とみなせる画像撮像部と、眼球中心推定技術と、３次元眼球モデルと、光軸ベクトルの補正技術を用いることで、瞳孔中心の観測結果から角膜反射像座標を推定する。また、角膜反射像の観測結果から瞳孔中心座標を推定する。ソフトウェアによる実装であるため、ハードウェアの追加は不要である。

【００２６】

<視線計測装置の構成>

図１に示すように、本発明の実施の形態に係る視線計測装置１０は、対象とする被験者の顔を含む画像を撮像するＣＣＤカメラ等からなる画像撮像部１２と、被験者の目に対して光を照射する照射部１３と、画像処理を行うコンピュータ１４と、ＣＲＴ等で構成された出力部１６とを備えている。

【００２７】

画像撮像部１２は、１つのカメラであり、照射部１３は、例えば、１つの近赤外ＬＥＤである。本実施の形態では、画像撮像部１２の撮像方向と照射部１３の照射方向とが同軸ではないが、同軸とみなされるように配置されている（図２）。具体的には、以下の（１）式に示す制約条件を満たす配置となっている（図３）。なお、（１）式を満たした上で、２つの近赤外ＬＥＤをカメラの左右両側に配置してもよい。

【００２８】

【数１】

$$x < \frac{L}{f} \frac{r + L}{r}$$

（１）

【００２９】

ただし、Ｌは、画像撮像部１２から角膜曲率中心へ向かう直線と角膜との交点と、画像撮像部１２との間の距離であり、ｒは、角膜曲率半径であり、ｆは、画像撮像部１２のピクセル単位の焦点距離である。

【００３０】

コンピュータ１４は、ＣＰＵ、後述する視線計測処理ルーチンのプログラムを記憶したＲＯＭ、データ等を記憶するＲＡＭ、及びこれらを接続するバスを含んで構成されている。このコンピュータ１４をハードウェアとソフトウェアとに基づいて定まる機能実現手段毎に分割した機能ブロックで説明すると、図１に示すように、コンピュータ１４は、画像撮像部１２から出力される濃淡画像である顔画像を入力する画像入力部２０と、画像入力部２０の出力である顔画像の時系列から、角膜反射像の画像座標の時系列を推定する角膜反射像推定部２２と、画像入力部２０の出力である顔画像の時系列から、瞳孔中心の画像座標の時系列を推定する瞳孔推定部２４と、角膜反射像の画像座標の時系列と、瞳孔中心の画像座標の時系列とから、角膜反射法（図１１参照）を用いて、カメラ座標系における視線ベクトルを計算する角膜反射法視線検出部２８とを備えている。

【００３１】

画像入力部２０は、例えば、Ａ／Ｄコンバータや１画面の画像データを記憶する画像メモリ等で構成される。

【００３２】

角膜反射像推定部２２は、図４に示すように、カメラ座標系眼球中心座標計算部３０と、見かけの瞳孔中心計算部３２と、眼球モデル記憶部３４と、眼球位置姿勢推定部３６と、カメラ座標系角膜反射像計算部４０と、角膜反射像画像座標計算部４２とを備えている。

【0033】

カメラ座標系眼球中心座標計算部30は、以下のように、顔画像から、図5に示すカメラ座標系における眼球中心の3次元座標を推定する。

【0034】

まず、予め、図5に示す顔モデル座標系における眼球中心（点E）の3次元座標

$$\overrightarrow{CE} = e_m$$

10

を求めておく（図6参照）。

【0035】

例えば、顔画像の角膜反射像から計算した角膜曲率中心と瞳孔中心を使って視線を計算し、計算した視線を用いて、眼球モデル座標系における眼球中心の3次元座標を推定する。

【0036】

そして、カメラ座標系における顔モデル座標系の位置姿勢（回転並進ベクトル）を求める。

【0037】

例えば、現在の顔画像に顔モデルをフィッティングさせることで、カメラ座標系に対する顔モデル座標系の現在の回転行列Rと並進ベクトルtを求める。

20

【0038】

そして、求めた回転並進ベクトルにより、顔モデル座標系における眼球中心の3次元座標をカメラ座標系における眼球中心の3次元座標に変換する。

【0039】

具体的には、カメラ座標系における現在の眼球中心の3次元座標eを、以下の式に従って計算する。

【0040】

【数2】

$$e = Re_m + t$$

30

(2)

【0041】

見かけの瞳孔中心計算部32は、以下に説明するように、顔画像上の目の瞳孔中心位置から、カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の3次元座標を推定する。

【0042】

まず、顔画像から、瞳孔中心を検出し、図5に示す画像座標系における瞳孔中心座標を求める。

40

【0043】

具体的には、従来既知の技術を用いて、瞳孔中心の検出を行い、画像座標系における瞳孔中心座標

$$D = (D_x, D_y)$$

を求める。

【0044】

そして、瞳孔中心の画像座標からカメラ座標系における3次元座標を推定する。

50

【0045】

具体的には、カメラ座標系における瞳孔中心のZ座標を何等かの測距手段で求め、 d_z とする。画像中心の座標を (x_c, y_c) とする。カメラ座標系における瞳孔中心の3次元座標

$$\mathbf{d} = (d_x, d_y, d_z)$$

は、ピクセル単位で表される焦点距離を f とすると以下になる。

【0046】

【数3】

10

$$\mathbf{d} = \left(\frac{(D_x - x_c)d_z}{f}, \frac{(D_y - y_c)d_z}{f}, d_z \right)$$

(3)

20

【0047】

眼球モデル記憶部34には、2つの球からなる眼球モデルおよびそのパラメータが記憶されている。具体的には、眼球モデル記憶部34には、角膜曲率半径 r 、眼球中心 E と角膜曲率中心 A との距離 u 、角膜曲率中心 A と真の瞳孔中心 B との距離 s 、及び大気の屈折率 n_1 と房水の屈折率 n_2 の比 (n_1/n_2) が記憶されている。なお、角膜曲率中心 A と真の瞳孔中心 B との距離 s 、及び大気の屈折率 n_1 と房水の屈折率 n_2 の比 (n_1/n_2) は、角膜反射法視線検出部28で角膜反射法を用いてカメラ座標系における視線ベクトルを計算する際に用いられるパラメータである。

【0048】

眼球位置姿勢推定部36は、以下に説明するように、カメラ座標系における眼球中心の3次元座標と、カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の3次元座標とに基づいて、カメラ座標系において、眼球中心の3次元位置から瞳孔中心の3次元位置へ向かう3次元の光軸ベクトルを計算する。

30

【0049】

まず、画像撮像部12の撮像方向と照射部13の照射方向とが同軸とみなされるように配置されていること、図6に示す角 CED から、角度補正量を推定する。

【0050】

具体的には、眼球中心 E から見かけの瞳孔中心までのベクトルを

【0051】

$$\overrightarrow{ED} = \mathbf{g}_{eb}$$

40

【0052】

とすると、以下の式で表される。

【0053】

【数4】

50

$$\mathbf{g}_{eb} = \mathbf{d} - \mathbf{e} = \begin{pmatrix} \frac{(D_x - x_c)d_z}{f} - e_x \\ \frac{(D_y - y_c)d_z}{f} - e_y \\ d_z - e_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

【0054】

カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の3次元座標と前記カメラ座標系における眼球中心の3次元座標とを結んだ線分と、カメラ座標系における眼球中心の3次元座標と前記撮像部の3次元座標とを結んだ線分とのなす角CEDについて

$$\angle CED = \omega$$

とすると、角CEDの角度 ω を、以下の式に従って計算する。

【0055】

【数5】

$$\omega = \arccos \left(\frac{\mathbf{g}_{eb} \cdot (-\mathbf{e})}{\|\mathbf{g}_{eb}\| \|\mathbf{e}\|} \right) = \arccos \left(\frac{-\left(\frac{(D_x - x_c)d_z}{f} - e_x\right)e_x - \left(\frac{(D_y - y_c)d_z}{f} - e_y\right)e_y - (d_z - e_z)e_z}{\sqrt{\left(\frac{(D_x - x_c)d_z}{f} - e_x\right)^2 + \left(\frac{(D_y - y_c)d_z}{f} - e_y\right)^2 + (d_z - e_z)^2} \sqrt{e_x^2 + e_y^2 + e_z^2}} \right) \quad (5)$$

【0056】

そして、角CEDの角度と、角膜反射法で求める視線ベクトル $\mathbf{g}_{cr}$ と眼球モデルフィッティング法で求める視線ベクトル $\mathbf{g}_{eb}$ との角度差 ρ との関係を予め求めておき、当該関係を用いて、角CEDの角度に対応する角度差 ρ を、補正量 ρ として求める。

【0057】

そして、カメラ座標系における眼球中心の3次元座標 $\mathbf{e}$ と、眼球中心Eから見かけの瞳孔中心までのベクトル $\mathbf{g}_{eb}$ と、角度補正量 ρ とに基づいて、カメラ座標系において、眼球中心の3次元座標から瞳孔中心の3次元座標へ向かう3次元の光軸ベクトル $\mathbf{g}$ を、以下の式で計算する。

【数6】

$$\mathbf{g} = \mathbf{g}_{eb} \cos \rho + \left(\frac{-\mathbf{g}_{eb} \times \mathbf{e}}{\|\mathbf{g}_{eb} \times \mathbf{e}\|} \right) \times \mathbf{g}_{eb} \sin \rho + \left(\frac{-\mathbf{g}_{eb} \times \mathbf{e}}{\|\mathbf{g}_{eb} \times \mathbf{e}\|} \right) \left(\frac{-\mathbf{g}_{eb} \times \mathbf{e}}{\|\mathbf{g}_{eb} \times \mathbf{e}\|} \cdot \mathbf{g}_{eb} \right) (1 - \cos \rho)$$

【0058】

このように、補正量と眼球中心の3次元座標から光軸ベクトルが定まり、眼球中心の3次元座標と合わせれば、眼球モデルの位置姿勢が推定できる。

【0059】

カメラ座標系角膜反射像計算部40は、以下に説明するように、カメラ座標系における眼球中心の3次元座標と、光軸ベクトルと、予め定められた3次元眼球モデルとに基づいて、カメラ座標系における角膜反射像の3次元座標を求める。

【0060】

まず、カメラ座標系における眼球中心の3次元座標 e と、光軸ベクトル g と、眼球モデル記憶部34に記憶されている眼球中心 E と角膜曲率中心 A との距離 u とを用いて、以下の式に従って、カメラ座標系における角膜曲率中心 A の3次元座標 a を推定する。

【0061】

【数7】

10

$$a = e + u \frac{g}{\|g\|}$$

(7)

【0062】

そして、ベクトル CA 上で、角膜曲率中心 A からの距離が r となる点を求める。

20

【0063】

具体的には、角膜反射像 P の3次元ベクトルを

$$p = (p_x, p_y, p_z)$$

とすると、点 P は直線 CA 上で点 A から長さ r だけ C 側の点になるので、 p は以下の式 (8) で求められる。

【0064】

【数8】

30

$$p = \frac{a}{\|a\|} (\|a\| - r)$$

(8)

【0065】

角膜反射像画像座標計算部42は、以下の説明するように、カメラ座標系における角膜反射像の3次元座標から、顔画像上の角膜反射像の画像座標を推定する。

40

【0066】

まず、カメラパラメータを用いて、カメラ座標系における角膜反射像の3次元座標を、2次元投影する。

【0067】

具体的には、ピクセル単位で表される焦点距離を f 、画像中心の座標を (x_c, y_c) とすると、角膜反射像の画像座標 (P_x, P_y) は以下になる。

【0068】

【数9】

50

$$P_x = f \frac{p_x}{p_z} + x_c$$

(9)

【0069】

【数10】

$$P_y = f \frac{p_y}{p_z} + y_c$$

10

(10)

【0070】

以上の各部の処理により、瞳孔中心の観測値から角膜反射像の画像座標を推定することができる。

【0071】

20

瞳孔推定部24は、図7に示すように、カメラ座標系眼球中心座標計算部50と、カメラ座標系角膜反射像計算部52と、眼球モデル記憶部54と、眼球位置姿勢推定部56と、見かけの瞳孔中心計算部60と、瞳孔中心画像座標計算部62とを備えている。

【0072】

カメラ座標系眼球中心座標計算部50は、カメラ座標系眼球中心座標計算部30と同様に、顔画像から、カメラ座標系における眼球中心の3次元座標を推定する。

【0073】

カメラ座標系角膜反射像計算部52は、前記顔画像上の目の角膜反射像の位置から、カメラ座標系における角膜反射像の3次元座標を推定する。

【0074】

30

まず、従来既知の技術を用いて、顔画像から角膜反射像を検出し、画像座標における角膜反射像の座標

$$P = (P_x, P_y)$$

を求める。

【0075】

そして、角膜反射像の画像座標からカメラ座標系における角膜反射像の3次元座標を推定する。

40

【0076】

具体的には、カメラ座標系における角膜反射像座標のZ座標を何等かの測距手段で求め、 p_z とする。画像中心の座標を (x_c, y_c) とする。カメラ座標系における角膜反射像の3次元座標

$$p = (p_x, p_y, p_z)$$

はピクセル単位で表される焦点距離を f とすると以下になる。

50

【 0 0 7 7 】

【数 1 1】

$$\boldsymbol{p} = \left(\frac{(P_x - x_c)p_z}{f}, \frac{(P_y - y_c)p_z}{f}, p_z \right)$$

(11)

10

【 0 0 7 8 】

眼球モデル記憶部 5 4 には、眼球モデル記憶部 3 4 と同様に、角膜曲率半径 r 、眼球中心 E と角膜曲率中心 A との距離 u 、角膜曲率中心 A と真の瞳孔中心 B との距離 s 、及び大気の屈折率 n_1 と房水の屈折率 n_2 の比 (n_1 / n_2) が記憶されている。なお、角膜曲率中心 A と真の瞳孔中心 B との距離 s 、及び大気の屈折率 n_1 と房水の屈折率 n_2 の比 (n_1 / n_2) は、角膜反射法視線検出部 2 8 で角膜反射法を用いてカメラ座標系における視線ベクトルを計算する際に用いられるパラメータである。

【 0 0 7 9 】

眼球位置姿勢推定部 5 6 は、以下に説明するように、カメラ座標系における眼球中心の 3 次元座標と、カメラ座標系における角膜反射像の 3 次元座標とに基づいて、カメラ座標系において、眼球中心の 3 次元位置から角膜曲率中心の 3 次元位置へ向かう 3 次元の光軸ベクトルを計算する。

20

【 0 0 8 0 】

まず、画像撮像部 1 2 の撮像方向と照射部 1 3 の照射方向とが同軸とみなされるように配置されていること、カメラ座標系における角膜反射像の 3 次元座標 $\boldsymbol{p}$ 、及び角膜曲率半径 r を用いて、カメラ座標系における角膜曲率中心 A の 3 次元座標を推定する。

【 0 0 8 1 】

具体的には、角膜曲率中心 A の 3 次元ベクトルを $\boldsymbol{a}$ とすると、 $\boldsymbol{a}$ は直線 CP を長さ r だけ P 側に伸ばしたもののなので、以下の式で表される。

【 0 0 8 2 】

30

【数 1 2】

$$\boldsymbol{a} = \frac{\boldsymbol{p}}{\|\boldsymbol{p}\|} (\|\boldsymbol{p}\| + r)$$

(12)

【 0 0 8 3 】

40

そして、カメラ座標系における角膜曲率中心 A の 3 次元座標と、カメラ座標系における眼球中心の 3 次元座標とから光軸ベクトルを求める。

【 0 0 8 4 】

具体的には、光軸ベクトル $\boldsymbol{g}$ は、カメラ座標系における眼球中心 E からカメラ座標系における角膜曲率中心 A に向かうベクトルなので、以下の式に従って計算される。

【 0 0 8 5 】

【数 1 3】

50

$$g = a - e$$

(13)

【0086】

以上のように、光軸ベクトルが定まり、眼球中心座標の推定値と合わせれば、眼球モデルの位置姿勢が推定できる。

【0087】

見かけの瞳孔中心計算部60は、以下に説明するように、カメラ座標系における眼球中心の3次元座標と、光軸ベクトルと、予め定められた3次元眼球モデルとに基づいて、カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の3次元座標を求める。

【0088】

まず、光軸ベクトル g と、カメラ座標系における眼球中心の3次元座標 e とに基づいて、カメラ座標系における眼球中心の3次元座標 E とカメラ座標系の角膜曲率中心の3次元座標 A とを結んだ線分 EA と、カメラ座標系における眼球中心の3次元座標 E と画像撮像部12の3次元座標 C とを結んだ線分 EC とのなす角 CEA を算出する。

【0089】

具体的には、角 CED の角度を ω とし、角 DEA の角度を ρ とし、角 CEA の角度を

$$\acute{\omega}$$

とすると、以下の式で表される。

【0090】

【数14】

$$\acute{\omega} = \omega + \rho$$

(14)

【0091】

従って、内積計算により、

$$\acute{\omega}$$

は以下の式で求められる。

【0092】

【数15】

$$\acute{\omega} = \arccos \frac{(-e) \cdot g}{\| -e \| \| g \|}$$

(15)

【0093】

そして、算出された角 C E A の角度に対応して予め定められた角度補正量を取得する。

【0094】

具体的には、角 C E A の角度と、角膜反射法で求める視線ベクトル g_{cr} と眼球モデルフイッティング法で求める視線ベクトル g_{eb} との角度差 ρ との関係を予め求めておき、当該関係を用いて、角 C E A の角度に対応する角度差 ρ を、補正量 ρ として求める。

【0095】

そして、カメラ座標系における眼球中心の3次元座標 e と、光軸ベクトル g と、角度補正量 ρ と、に基づいて、カメラ座標系における眼球中心の3次元座標 E とカメラ座標系における角膜曲率中心の3次元座標 A とを結んだベクトル g_{eb} を以下の式で計算する。

【数16】

$$g_{eb} \approx g \cos(-\rho) + \left(\frac{-g \times e}{\|g \times e\|} \right) \times g \sin(-\rho) + \left(\frac{-g \times e}{\|g \times e\|} \right) \left(\frac{-g \times e}{\|g \times e\|} \cdot g \right) (1 - \cos(-\rho))$$

10

【0096】

そして、カメラ座標系における眼球中心の3次元座標 E とカメラ座標系における角膜曲率中心の3次元座標 A とを結んだベクトル g_{eb} 上で、角膜曲率中心 A からの距離が r となる点を求める。

【0097】

具体的には、 E と D の距離を x とおく。三角形 $E D A$ において、 $A E = u$ 、 $A D = r$ 、角 $D E A$ の角度 $= \rho$ なので、余弦定理により以下の式(17)が成り立つ。 x の二次方程式である式(17)を x について解き、大きい方の解を E と D の距離 x とする。

【0098】

【数17】

$$r^2 = x^2 + u^2 - 2xu \cos \rho$$

30

(17)

【0099】

また、瞳孔中心 D の3次元ベクトルを

$$d = (d_x, d_y, d_z)$$

とすると、 D はベクトル g_{eb} 上で E から距離 x にある点なので、 d は以下の式(18)で求められる。

【0100】

【数18】

$$d = x \frac{g_{eb}}{\|g_{eb}\|} - e$$

(18)

50

20

40

【 0 1 0 1 】

瞳孔中心画像座標計算部 6 2 は、カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の 3 次元座標から、顔画像上の瞳孔中心の画像座標を推定する。

【 0 1 0 2 】

具体的には、カメラパラメータを用いて、カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の 3 次元座標を、2 次元投影する。

【 0 1 0 3 】

例えば、 f をピクセル単位で表される焦点距離、画像中心座標を (x_c, y_c) とすると、瞳孔中心の画像座標 (D_x, D_y) は以下になる。

【 0 1 0 4 】

【数 1 9】

$$D_x = f \frac{d_x}{d_z} + x_c$$

(19)

【数 2 0】

$$D_y = f \frac{d_y}{d_z} + y_c$$

(20)

【 0 1 0 5 】

以上説明した各部の処理により、角膜反射像の観測値から瞳孔中心の画像座標を推定することができる。

【 0 1 0 6 】

角膜反射法視線検出部 2 8 は、角膜反射像の画像座標と、瞳孔中心の画像座標とに基づいて、角膜反射法により、視線ベクトルを求めて、出力部 1 6 により出力する。

【 0 1 0 7 】

この際、角膜反射像の推定値と検出された角膜反射像の観測値とを比較して、角膜反射像の観測値が正しいかどうか判断すると共に、瞳孔中心の推定値と検出された瞳孔中心の観測値とを比較して、瞳孔中心の観測値が正しいかどうか判断する。そして、正しいと判断された角膜反射像の観測値と瞳孔中心の観測値を用いて、角膜反射法により、視線ベクトルを求める。

【 0 1 0 8 】

<視線計測装置の動作>

次に、視線計測装置 1 0 の動作について説明する。まず、照射部 1 3 により近赤外の光を被験者の目に照射しているときに、画像撮像部 1 2 で被験者の顔画像を連続的に撮像する。

【 0 1 0 9 】

そして、コンピュータ 1 4 において、撮像された顔画像毎に、図 8 に示す視線計測処理ルーチンを実行する。

【 0 1 1 0 】

10

20

30

40

50

まず、ステップ S 1 0 0 において、画像撮像部 1 2 で撮像された顔画像を取得する。

【0 1 1 1】

そして、ステップ S 1 0 2 において、顔画像から、角膜反射像の画像座標を推定する。

【0 1 1 2】

ステップ S 1 0 4 では、顔画像から、瞳孔中心の画像座標を推定する。

【0 1 1 3】

ステップ S 1 0 6 では、角膜反射像の画像座標と、瞳孔中心の画像座標とに基づいて、角膜反射法により、視線ベクトルを求めて、出力部 1 6 により出力して、視線計測処理ルーチンを終了する。

【0 1 1 4】

上記ステップ S 1 0 2 は、図 9 に示す角膜反射像推定処理ルーチンにより実現される。

【0 1 1 5】

まず、ステップ S 1 1 0 において、現在の顔画像に顔モデルをフィッティングさせることで、カメラ座標系に対する顔モデル座標系の現在の回転行列 R と並進ベクトル t を求める。

【0 1 1 6】

そして、ステップ S 1 1 2 において、求めた回転並進ベクトルにより、顔モデル座標系における眼球中心の 3 次元座標をカメラ座標系における眼球中心の 3 次元座標に変換する。

【0 1 1 7】

ステップ S 1 1 4 では、顔画像から、瞳孔中心を検出し、画像座標系における瞳孔中心座標を求める。

【0 1 1 8】

ステップ S 1 1 6 では、瞳孔中心の画像座標からカメラ座標系における 3 次元座標を推定する。

【0 1 1 9】

ステップ S 1 1 8 では、画像撮像部 1 2 の撮像方向と照射部 1 3 の照射方向とが同軸とみなされるように配置されていること、カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の 3 次元座標と前記カメラ座標系における眼球中心の 3 次元座標とを結んだ線分と、前記カメラ座標系における眼球中心の 3 次元座標と前記撮像部の 3 次元座標とを結んだ線分とのなす角 C E D の角度から、角度補正量を推定する。

【0 1 2 0】

ステップ S 1 2 0 では、角 C E D の角度 ω と、カメラ座標系における眼球中心の 3 次元座標 e と、角度補正量とに基づいて、カメラ座標系において、眼球中心の 3 次元位置から瞳孔中心の 3 次元位置へ向かう 3 次元の光軸ベクトル g を計算する。

【0 1 2 1】

ステップ S 1 2 2 では、カメラ座標系における眼球中心の 3 次元座標 e と、光軸ベクトル g と、眼球モデル記憶部 3 4 に記憶されている眼球中心 E と角膜曲率中心 A との距離 u とを用いて、カメラ座標系における角膜曲率中心 A の 3 次元座標 a を推定する。

【0 1 2 2】

そして、ステップ S 1 2 4 では、ベクトル C A 上で、角膜曲率中心 A からの距離が r となる点を求め、角膜反射像 P の 3 次元ベクトルを推定する。

【0 1 2 3】

ステップ S 1 2 6 では、カメラ座標系における角膜反射像の 3 次元座標から、顔画像上の角膜反射像の画像座標を推定する。

【0 1 2 4】

上記ステップ S 1 0 4 は、図 1 0 に示す瞳孔中心推定処理ルーチンにより実現される。

【0 1 2 5】

まず、ステップ S 1 3 0 では、現在の顔画像に顔モデルをフィッティングさせることで、カメラ座標系に対する顔モデル座標系の現在の回転行列 R と並進ベクトル t を求める。

【0 1 2 6】

10

20

30

40

50

そして、ステップ S 1 3 2 において、求めた回転並進ベクトルにより、顔モデル座標系における眼球中心の 3 次元座標をカメラ座標系における眼球中心の 3 次元座標に変換する。

【0 1 2 7】

ステップ S 1 3 4 では、顔画像から角膜反射像を検出し、画像座標における角膜反射像の座標を求める。

【0 1 2 8】

そして、ステップ S 1 3 6 では、角膜反射像の画像座標からカメラ座標系における角膜反射像の 3 次元座標を推定する。

【0 1 2 9】

ステップ S 1 3 8 では、画像撮像部 1 2 の撮像方向と照射部 1 3 の照射方向とが同軸とみなされるように配置されていること、カメラ座標系における角膜反射像の 3 次元座標 p 、及び角膜曲率半径 r を用いて、カメラ座標系における角膜曲率中心 A の 3 次元座標を推定する。

【0 1 3 0】

そして、ステップ S 1 4 0 において、カメラ座標系における角膜曲率中心 A の 3 次元座標と、カメラ座標系における眼球中心の 3 次元座標とから光軸ベクトルを求める。

【0 1 3 1】

ステップ S 1 4 2 では、光軸ベクトル g と、カメラ座標系における眼球中心の 3 次元座標 e とに基づいて、カメラ座標系における眼球中心の 3 次元座標 E とカメラ座標系の角膜曲率中心の 3 次元座標 A とを結んだ線分 EA と、カメラ座標系における眼球中心の 3 次元座標 E と画像撮像部 1 2 の 3 次元座標 C とを結んだ線分 EC とのなす角 CEA を算出し、算出された角 CEA の角度に対応して予め定められた角度補正量を取得する。

【0 1 3 2】

ステップ S 1 4 4 では、カメラ座標系における眼球中心の 3 次元座標 e と、光軸ベクトル g と、角度補正量 p と、に基づいて、カメラ座標系における眼球中心の 3 次元座標 E とカメラ座標系における角膜曲率中心の 3 次元座標 A とを結んだベクトル g_{eb} を計算する。

【0 1 3 3】

そして、ステップ S 1 4 6 において、カメラ座標系における眼球中心の 3 次元座標 E とカメラ座標系における角膜曲率中心の 3 次元座標 A とを結んだベクトル g_{eb} 上で、角膜曲率中心 A からの距離が r となる点を求め、カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の 3 次元座標とする。

【0 1 3 4】

ステップ S 1 4 8 では、カメラ座標系における見かけの瞳孔中心の 3 次元座標から、顔画像上の瞳孔中心の画像座標を推定する。

【0 1 3 5】

以上説明したように、本発明の実施の形態に係る視線計測装置によれば、簡易な構成で、顔画像上の目の瞳孔中心位置から、視線計測のために顔画像上の角膜反射像の画像座標を精度良く求めることができる。また、簡易な構成で、顔画像上の目の角膜反射像の位置から、視線計測のために顔画像上の瞳孔中心の画像座標を精度良く求めることができる。

【0 1 3 6】

また、カメラと照明が同軸とみなせる画像撮像部と、眼球中心推定技術と、3次元眼球モデルと、光軸ベクトルの補正技術を用いることで、角膜反射法で用いる 2 つの観測値（瞳孔中心と角膜反射像）の一方の観測結果から他方の画像座標のモデルベース推定が可能となる。これにより、観測値と推定値との比較で観測結果が正しいかどうか判断可能になり、低コストに観測の信頼性を上げることができる。

【符号の説明】

【0 1 3 7】

- 1 0 視線計測装置
- 1 2 画像撮像部
- 1 3 照射部

10

20

30

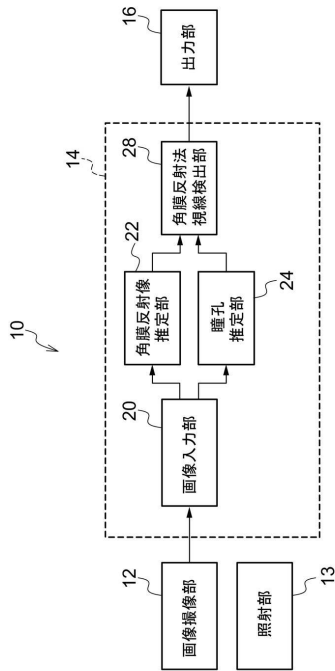
40

50

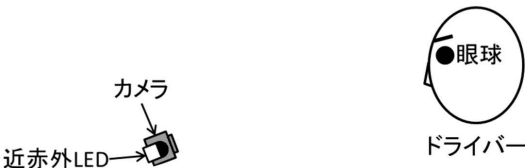
- 1 4 コンピュータ
- 1 6 出力部
- 2 0 画像入力部
- 2 2 角膜反射像推定部
- 2 4 瞳孔推定部
- 2 8 角膜反射法視線検出部
- 3 0 カメラ座標系眼球中心座標計算部
- 3 2 見かけの瞳孔中心計算部
- 3 4、5 4 眼球モデル記憶部
- 3 6、5 6 眼球位置姿勢推定部
- 4 0 カメラ座標系角膜反射像計算部
- 4 2 角膜反射像画像座標計算部
- 5 0 カメラ座標系眼球中心座標計算部
- 5 2 カメラ座標系角膜反射像計算部
- 6 0 見かけの瞳孔中心計算部
- 6 2 瞳孔中心画像座標計算部

【図面】

【図 1】



【図 2】



10

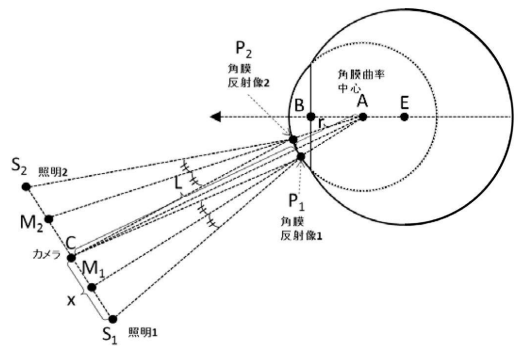
20

30

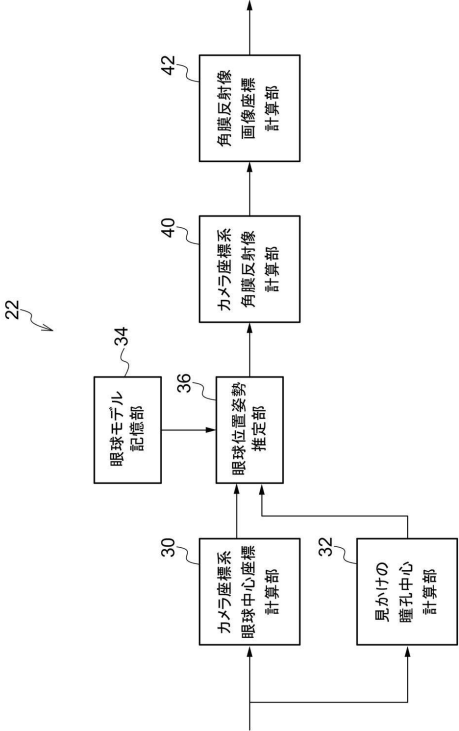
40

50

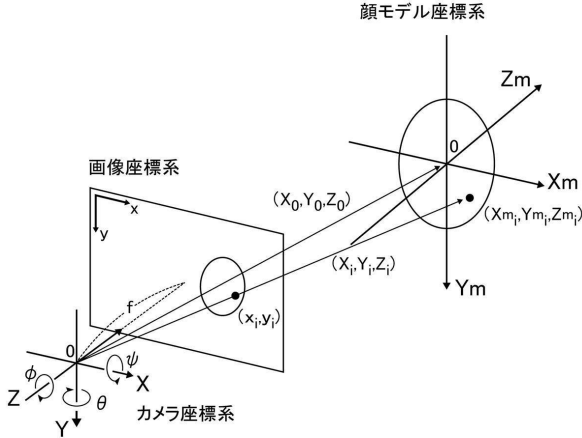
【図 3】



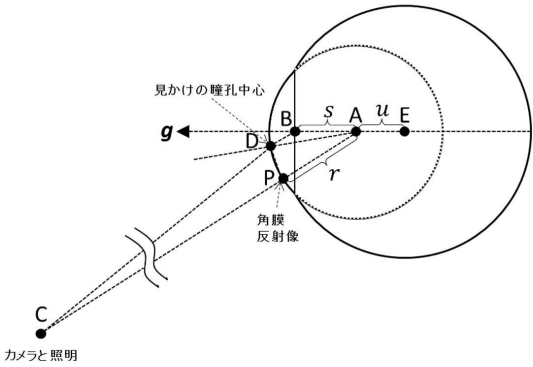
【図 4】



【図 5】



【図 6】



10

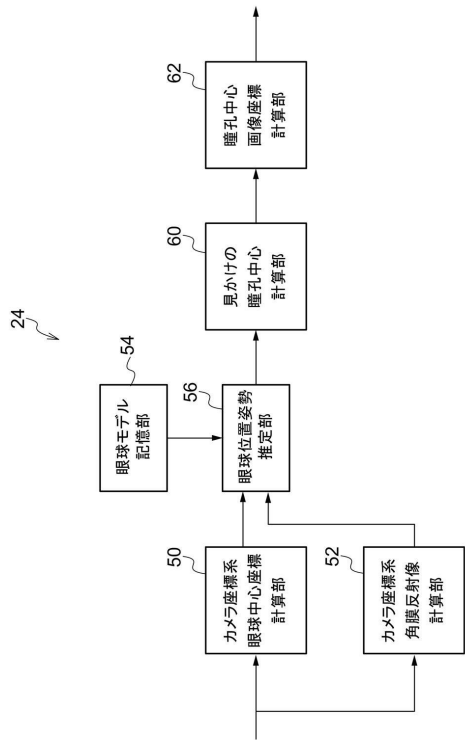
20

30

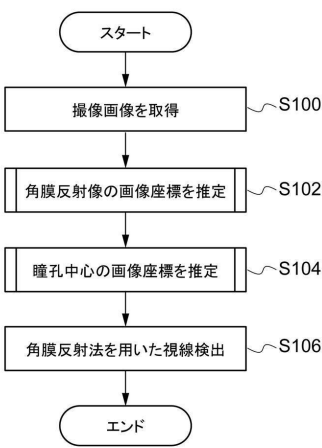
40

50

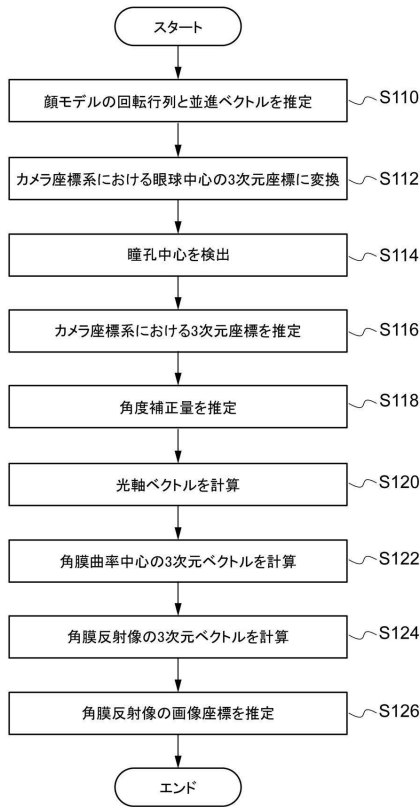
【図 7】



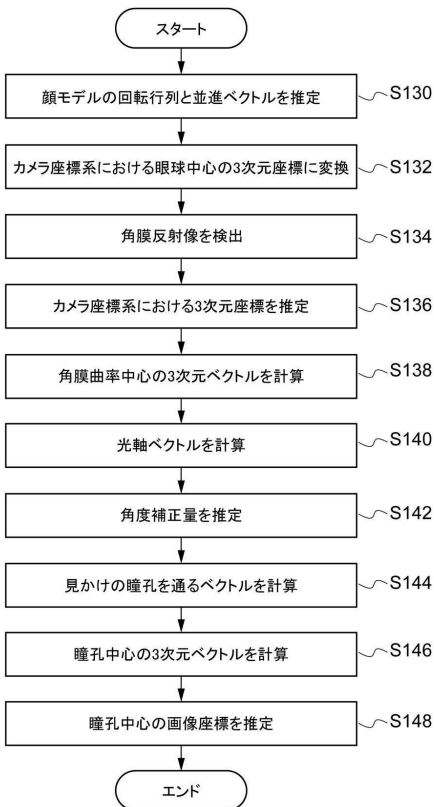
【図 8】



【図 9】



【図 10】



10

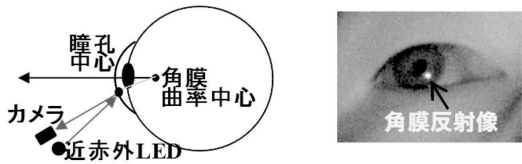
20

30

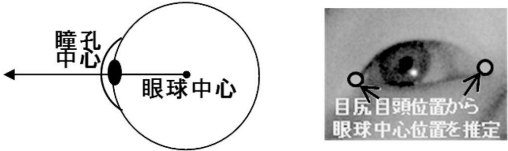
40

50

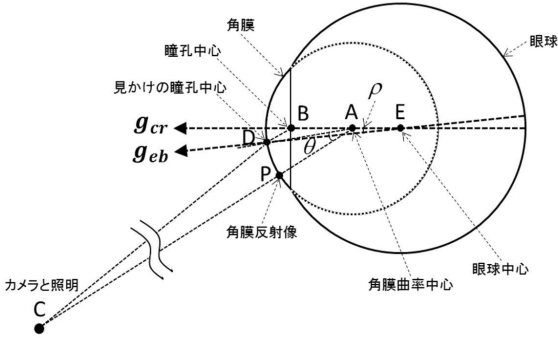
【図 1 1】



【図 1 2】



【図 1 3】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

- 愛知県刈谷市朝日町2丁目1番地 アイシン精機株式会社内
(72)発明者 加藤 隆志
愛知県刈谷市朝日町2丁目1番地 アイシン精機株式会社内
(72)発明者 山田 祐也
愛知県刈谷市朝日町2丁目1番地 アイシン精機株式会社内
(72)発明者 松村 健
愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内
審査官 小野 健二
(56)参考文献 特開2019-000135 (JP, A)
特開2019-000136 (JP, A)
特開2008-136789 (JP, A)
特開2019-025195 (JP, A)
国際公開第2011/021936 (WO, A1)
(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
A61B 3/00-3/18