

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2016-221304
(P2016-221304A)

(43) 公開日 平成28年12月28日(2016.12.28)

(51) Int.Cl. F I テーマコード(参考)
A 6 1 B 3/103 (2006.01) A 6 1 B 3/10 M 4 C 3 1 6

審査請求 有 請求項の数 17 O L 外国語出願 (全 50 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2016-149131 (P2016-149131)</p> <p>(22) 出願日 平成28年7月29日 (2016.7.29)</p> <p>(62) 分割の表示 特願2014-524129 (P2014-524129) の分割</p> <p>原出願日 平成24年8月3日 (2012.8.3)</p> <p>(31) 優先権主張番号 13/198,442</p> <p>(32) 優先日 平成23年8月4日 (2011.8.4)</p> <p>(33) 優先権主張国 米国 (US)</p>	<p>(71) 出願人 508218235 クラリティ メディカル システムズ インコーポレイテッド アメリカ合衆国 94588 カリフォルニア州, プレザントン, スート 200, ウェスト ラス ポジタス ブルヴァード 5775</p> <p>(74) 代理人 100102978 弁理士 清水 初志</p> <p>(74) 代理人 100102118 弁理士 春名 雅夫</p> <p>(74) 代理人 100160923 弁理士 山口 裕孝</p> <p>(74) 代理人 100119507 弁理士 刑部 俊</p>
---	---

最終頁に続く

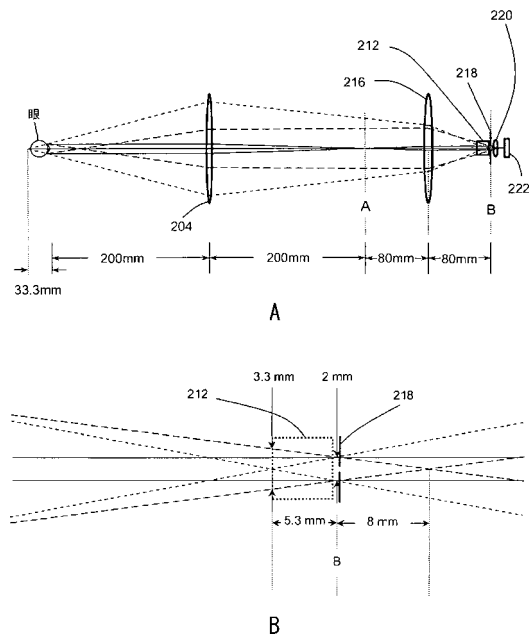
(54) 【発明の名称】 ジオプトリーレンジの大きなリアルタイムシーケンシャル波面センサ

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 視力矯正手技または評価手技のためのダイナミックレンジの大きなシーケンシャル波面センサを提供する。

【解決手段】 リレー過程のどこかで、大きな眼ジオプトリーレンジ内である眼からの波面ビームが波面像空間および/またはフーリエ変換空間内の特定の軸距離レンジにわたる望ましい物理的寸法に収められるような様式で、瞳孔面または角膜面から波面サンプリング面まで波面を光学的にリレーし、リレーされた波面を横方向にシフトさせるため、ビーム全体を完全にインターセプトしひいてはシフトさせる波面ビームシフティング装置 212 を配する。

【選択図】 図 2



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

波面物体空間内の波面物体平面から波面像空間内の波面像平面まで波面ビームの伝搬をガイドしかつ波面をリレーするように構成された光学リレーシステムと；該波面像平面に実質的に位置決めされたサンプリングアパーチャと；該波面像空間内の該アパーチャの前に位置決めされ、かつ該波面像空間内で実質的に該波面ビーム全体を遮るように構成されたビームシフティング要素とを具備する、波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

【請求項 2】

前記光学リレーシステムが、第一および第二レンズを具備する4-Fリレーシステムである、請求項1記載の波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

10

【請求項 3】

前記ビームシフティング要素が、前記リレーされた波面ビームを前記サンプリングアパーチャに対してシフトさせるように構成された可動式の透過媒質を具備する、請求項1記載の波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

【請求項 4】

前記ビームシフティング要素が、前記リレーされた波面ビームを前記サンプリングアパーチャに対してシフトさせるように構成された可動式の反射表面を具備する、請求項1記載の波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

【請求項 5】

前記ビームシフティング要素が、電気光学式または磁気光学式または音響光学式のビームシフティング要素を具備する、請求項1記載の波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

20

【請求項 6】

波面物体空間内の波面物体平面から少なくとも1つのフーリエ変換空間内の少なくとも1つのフーリエ変換面を介して波面像空間内の波面像平面まで波面ビームの伝搬をガイドしかつ波面をリレーするように構成された少なくとも2つの波面リレーステージを具備し、該少なくとも1つのフーリエ変換空間が第二または後続の波面リレーステージ内にある、光学リレーシステムと；該波面像平面に実質的に位置決めされたサンプリングアパーチャと；該フーリエ変換空間内の該少なくとも1つのフーリエ変換面に実質的に位置決めされ、かつ該フーリエ変換空間内で実質的に該波面ビーム全体を遮るように構成されたビームシフティング要素とを具備する、波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

30

【請求項 7】

前記2つの波面リレーステージが、第一、第二、第三、および第四レンズを具備する2つのカスケード式4-F波面リレーステージを具備し、前記フーリエ変換面が該第三レンズと該第四レンズとの間にある、請求項6記載の波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

【請求項 8】

前記2つの波面リレーステージが、2つの正のレンズの間に1つの負のレンズが位置決めされた3つのレンズを具備する第一波面リレーステージと、2つのレンズを具備する第二4-F波面リレーステージとを具備し、前記フーリエ変換面が、該第二4-F波面リレーステージの該2つのレンズの間にある、請求項6記載の波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

40

【請求項 9】

前記ビームシフティング要素が、リレーされた波面ビームを前記サンプリングアパーチャに対してシフトさせるように構成された可動式の透過媒質を具備する、請求項6記載の波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

【請求項 10】

前記ビームシフティング要素が、リレーされた波面ビームを前記サンプリングアパーチャ

50

ャに対してシフトさせるように構成された可動式の反射表面を具備する、請求項6記載の波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

【請求項11】

前記ビームシフティング要素が、電気光学式または磁気光学式または音響光学式のビームシフティング要素を具備する、請求項6記載の波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

【請求項12】

直径と焦点距離と光軸とを各々が有する第一および第二レンズを含み、入射波面を物体空間内の物体平面から波面像空間内の波面像平面までビーム路に沿ってリレーするように構成された、光学波面リレーシステムであって、該第一および第二レンズの該焦点距離および直径が、該物体平面において大きなジオプトリレンジを有する入射波面ビームを該波面像平面までガイドするように選択される、光学波面リレーシステムと；該波面像空間内で該第二レンズと該波面像平面との間に位置決めされ、かつ該波面像空間内で実質的に該波面ビーム全体を遮るよう構成された、反射式ビームシフティング要素と；該反射式ビームシフティング要素によって反射される前に実質的に該波面ビーム全体を遮るよう配され、第一偏光状態にある光を透過させるようおよび第二偏光状態にある光を反射するよう構成され、かつ第一光軸に対し実質的に45度に配向されている、偏光ビームスプリッタ（PBS）と；該PBSと該反射式ビームシフティング要素との間に配され、かつ、該反射式ビームシフティング要素によって反射された該波面ビームが該PBSによって反射されるよう該波面ビームの偏光状態を変えるよう構成された、偏光回転子要素と；該波面像平面に実質的に位置決めされ、かつ該PBSによって反射された該波面ビームをサンプリングするよう構成された、サンプリングアパーチャと；該アパーチャの前または後に配されたサブ波面集束レンズと；該サブ波面集束レンズおよび該サンプリングアパーチャの後ろに位置決めされた像スポット位置検知装置とを具備する、視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項13】

患者の眼から戻ってきた波面ビームがサンプリングアパーチャに対して横方向に変位していたとしても、該眼の横方向のいかなる動きにもかかわらず該眼からの波面の意図される同じ部分がサンプリングされることを可能にするよう前記反射式ビームシフティング要素が該変位を補償できるように、該反射式ビームシフティング要素が該患者の該眼の該横方向の動きに応じて動的にDCオフセットされるようにさらに構成されている、請求項12記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項14】

波面生成用ビームを放出するよう構成された光源と；第一レンズの後方焦点面に配され、かつ、該波面生成用ビームを患者の眼に向けるようおよび該眼の相対的な横方向の動きに追従するよう該ビームをスキャンするよう構成された、ビームシフティングミラーとをさらに具備する、請求項12記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項15】

測定された眼軸距離に適用可能な補正済みキャリブレーション曲線を使って患者の眼からの波面を正しく特徴付けできるよう物体平面と該眼との間の軸距離を測定するよう構成された軸距離測定装置をさらに具備する、請求項12記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項16】

波面像平面において波面像を縮小するために第一レンズの焦点距離が第二レンズの焦点距離より大きい、請求項12記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項17】

第一および第二レンズの直径が40 mmであり、第一レンズの焦点距離が200 mmであり、

10

20

30

40

50

かつ第二レンズの焦点距離が80 mmである、請求項16記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項18】

直径と焦点距離と光軸とを各々が有する第一および第二レンズを含み、入射波面を第一物体空間内の第一物体平面から第一波面像空間内の第一波面像平面まで第一光束路に沿ってリレーするように構成された、第一光学波面リレーシステムであって、該第一および第二レンズの該焦点距離および直径が、該第一物体平面において大きなジオプトリレンジを有する入射波面光束を該第一波面像平面までガイドするように選択される、第一光学波面リレーシステムと；直径と焦点距離と光軸とを各々が有する第三および第四レンズを含み、該第一波面像平面に実質的にある第二物体空間内の第二物体平面を有し、かつ、
 10
 該入射波面を該第一波面像平面から第二波面像空間内の第二波面像平面まで第二光路に沿ってさらにリレーするように構成された、第二光学波面リレーシステムであって、該第三レンズが、該波面光束を該第三レンズと該第四レンズとの間に位置するフーリエ変換面までガイドするように構成されている、第二光学波面リレーシステムと；該第三レンズと該第四レンズとの間に位置する該フーリエ変換面に実質的に配され、望ましい大きなジオプトリレンジにわたって実質的に該波面光束全体を遮るため該第三レンズの該光軸に沿って位置決めされ、かつ該第二光路を折返すように配向された、反射式光束シフティング要素と；該第二波面像平面またはその近くに位置決めされた波面サンプリングアパーチャと；該アパーチャの前または後に配されたサブ波面集束レンズと；該サブ波面集束レンズおよび該サンプリングアパーチャの後ろに位置決めされた像スポット位置検知装置と
 20
 を具備する、視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項19】

患者の眼から戻ってきた波面光束がサンプリングアパーチャに対して横方向に変位していたとしても、該眼の横方向のいかなる動きにもかかわらず該眼からの波面の意図される同じ部分がサンプリングされることを可能にするよう前記反射式光束シフティング要素が該変位を補償できるように、該反射式光束シフティング要素が該患者の該眼の該横方向の動きに応じて動的にDCオフセットされるようにさらに構成されている、請求項18記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。
 30

【請求項20】

測定された眼軸距離に適用可能な補正済みキャリブレーション曲線を使って患者の眼からの波面を正しく特徴付けできるよう物体平面と該眼との間の軸距離を測定するように構成された軸距離測定装置をさらに具備する、請求項18記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項21】

前記反射式光束シフティング要素が、第四レンズの光軸の周りで波面光束を制御可能にシフトさせるように構成された微小電気機械システム(MEMS)ミラーを具備する、請求項18記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。
 40

【請求項22】

第一波面像平面において波面像を縮小するために第一レンズの焦点距離が第二レンズの焦点距離より大きい、請求項18記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項23】

第一および第二レンズの直径が40 mmであり、第一レンズの焦点距離が200 mmであり、かつ第二レンズの焦点距離が80 mmである、請求項18記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項24】

第一波面像平面から第二波面像平面まで波面像を拡大するために第三レンズの焦点距離
 50

が第四レンズの焦点距離より小さい、請求項18記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプत्रीレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項25】

第一レンズと第二レンズとの間でビーム路を折返すための少なくとも1つの反射要素を含む、請求項18記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプत्रीレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項26】

第一レンズと第二レンズとの間に配されかつ第一ビーム路を折返すように配向された第一および第二反射要素をさらに具備する、請求項18記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプत्रीレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

10

【請求項27】

波面生成用ビームを放出するように構成された光源と；患者の眼の網膜および/もしくは角膜にわたって該波面生成用ビームをシフトさせることを可能にするためにまたは該眼の相対的な横方向の動きに追従するために該波面生成用ビームを第一光軸に沿って第一レンズに向けるよう構成された、網膜ビームシフティングミラーおよび/または角膜ビームシフティングミラーとをさらに具備する、請求項18記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプत्रीレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項28】

前記波面生成用ビームを前記網膜ビームシフティングミラーおよび/または角膜ビームシフティングミラーまでガイドするため光源に連結された光ファイバと；該光ファイバからの光を連結するように構成された少なくとも1つの光ファイバカプラを含む光ファイバ式干渉計とをさらに具備する、請求項27記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプत्रीレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

20

【請求項29】

患者の眼の同平面ビデオ画像または静止画像を提供するように構成された画像センサと；第一レンズと第二レンズとの間に配され、第一結像用ビームスプリッタ/コンバイナにより反射された光の少なくとも一部を該画像センサに向けるように構成された、第一結像用ビームスプリッタ/コンバイナとをさらに具備する、請求項18記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプत्रीレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項30】

直径と焦点距離と光軸とを各々が有する第一および第二レンズを含み、入射波面を第一物体空間内の第一物体平面から第一波面像空間内の第一波面像平面まで第一ビーム路に沿ってリレーするように構成された、第一光学波面リレーシステムであって、該第一および第二レンズの該焦点距離および直径が、該第一物体平面において大きなジオプत्रीレンジを有する入射波面ビームを該第一波面像平面までガイドするように選択される、第一光学波面リレーシステムと；直径と焦点距離と光軸とを有し、かつ該第一波面像平面に実質的に位置する第二物体空間内の第二物体平面を有する、第三レンズであって、該波面ビームをフーリエ変換面までガイドするように構成された、第三レンズと；該フーリエ変換面に実質的に配された反射式ビームシフティング要素であって、該第三レンズが第二波面リレーシステムの2つのレンズとして機能しかつ反射された波面ビームを第二波面像空間内の第二波面像平面までガイドするように、望ましい大きなジオプत्रीレンジにわたって実質的に該波面ビーム全体を遮るよう該第三レンズの光軸に沿って位置決めされて該光軸に対して実質的に垂直に配向され、かつ、該第三レンズを通過して戻る反射波面ビームを形成するため該波面ビームを反射するよう配向されている、反射式ビームシフティング要素と；該第三レンズによって透過される前に該波面ビームを遮るよう配向され、第一偏光状態にある光を透過させるようおよび第二偏光状態にある光を反射するよう構成され、かつ該第三レンズの光軸に対し実質的に45度に配向されている、偏光ビームスプリッタ(PBS)と；該第三レンズと該反射式ビームシフティング要素との間または該PBSと該第三レンズとの間に配され、かつ、該PBSが該反射波面ビームを該第三レンズの該光軸に対して実質的に垂直に反射するよう該波面ビームの偏光状態を変えるよう構成された、偏

30

40

50

光回転子要素と；該PBSにより反射された該反射波面ビームを遮るため該第二波面像平面またはその近くに位置決めされた波面サンプリングアパーチャと；該アパーチャの前または後に配されたサブ波面集束レンズと；該サブ波面集束レンズおよび該サンプリングアパーチャの後ろに位置決めされた像スポット位置検知装置とを具備する、視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項 3 1】

患者の眼から戻ってきた波面ビームがサンプリングアパーチャに対して横方向に変位していたとしても、該眼の横方向のいかなる動きにもかかわらず該眼からの波面の意図される同じ部分がサンプリングされることを可能にするよう前記反射式ビームシフティング要素が該変位を補償できるように、該反射式ビームシフティング要素が該患者の該眼の該横方向の動きに応じて動的にDCオフセットされるようにさらに構成されている、請求項30記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

10

【請求項 3 2】

測定された眼軸距離に適用可能な補正済みキャリブレーション曲線を使って患者の眼からの波面を正しく特徴付けできるように第一物体平面と該眼との間の軸距離を測定するように構成された軸距離測定装置をさらに具備する、請求項30記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項 3 3】

第一波面像平面において波面像を縮小するために第一レンズの焦点距離が第二レンズの焦点距離より大きい、請求項30記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

20

【請求項 3 4】

第一および第二レンズの直径が40 mmであり、第一レンズの焦点距離が200 mmであり、かつ第二レンズの焦点距離が80 mmである、請求項33記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項 3 5】

被検眼の同平面ビデオ画像または静止画像を提供するように構成された画像センサと；第一光学波面リレーシステムの第一レンズと第二レンズとの間に配され、第一結像用ビームスプリッタ/コンバイナにより反射された光の少なくとも一部を該画像センサに向けるように構成された、第一結像用ビームスプリッタ/コンバイナとをさらに具備する、請求項30記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

30

【請求項 3 6】

第一レンズと第二レンズとの間に配されかつ第一ビーム路を折返すように配向された第一および第二反射要素をさらに具備する、請求項35記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項 3 7】

波面生成用ビームを放出するように構成された光源と；患者の眼の網膜および/もしくは角膜にわたって該波面生成用ビームをシフトさせることを可能にするためにまたは該眼の相対的な横方向の動きに追従するために該波面生成用ビームを第一光軸に沿って第一レンズに向けるよう構成された、網膜ビームシフティングミラーおよび/または角膜ビームシフティングミラーとをさらに具備する、請求項18記載の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

40

【請求項 3 8】

以下の段階を含む、波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法：物体空間内の物体平面から波面像空間内の波面像平面まで波面ビームの伝搬をガイドしつつ波面をリレーする段階；該リレーされた波面を、該波面像平面に実質的に配されたサンプリングアパーチャを用いてサンプリングする段階；ならびに、該波面像空間内の該アパーチャの前に配されたビームシフティング要素を用いて、実質的に該波面ビーム全体を遮

50

り、かつ該リレーされた波面をシフトさせる段階。

【請求項 39】

測定された物体軸距離に適用可能な補正済みキャリブレーション曲線を使って該物体からの波面を正しく特徴付けできるように前記物体平面と該波面を放出する該物体との間の物体軸距離を測定する段階をさらに含む、請求項38記載の波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法。

【請求項 40】

波面を放出する物体のライブビデオ画像または静止画像をキャプチャ/記録する段階をさらに含む、請求項38記載の波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法。

【請求項 41】

物体の相対的な横方向の動きに追従するため、波面生成用ビームを該物体に向け、かつ該物体のライブ画像に従って該ビームをスキャンする段階をさらに含む、請求項40記載の波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法。

【請求項 42】

前記物体からの前記波面ビームが前記サンプリングアパーチャに対して横方向に変位していたとしても、該物体の横方向の動きにかかわらず該物体からの波面の意図される同じ部分がサンプリングされることを可能にするよう前記ビームシフティング要素が該変位を補償できるように、該物体のライブ画像に従って該ビームシフティング要素を動的にDCオフセットする段階をさらに含む、請求項40記載の波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法。

【請求項 43】

以下の段階を含む、波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法：物体空間内の物体平面から少なくとも1つのフーリエ変換空間内の少なくとも1つのフーリエ変換面を介して波面像空間内の波面像平面まで波面ビームの伝搬をガイドしかつ波面をリレーする段階であって、該少なくとも1つのフーリエ変換空間が第二または後続の波面リレーステージ内にある、段階；該リレーされた波面を、該波面像平面に実質的に配されたサンプリングアパーチャを用いてサンプリングする段階；ならびに、該少なくとも1つのフーリエ変換空間内の該少なくとも1つのフーリエ変換面に実質的に配されたビームシフティング要素を用いて、実質的に該波面ビーム全体を遮り、かつ該リレーされた波面をシフトさせる段階。

【請求項 44】

測定された物体軸距離に適用可能な補正済みキャリブレーション曲線を使って該物体からの波面を正しく特徴付けできるように前記物体平面と該波面を放出する該物体との間の物体軸距離を測定する段階をさらに含む、請求項43記載の波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法。

【請求項 45】

波面を放出する物体のライブビデオ画像または静止画像をキャプチャ/記録する段階をさらに含む、請求項43記載の波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法。

【請求項 46】

物体の相対的な横方向の動きに追従するため、波面生成用ビームを該物体に向け、かつ該物体のライブ画像に従って該ビームをスキャンする段階をさらに含む、請求項45記載の波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法。

【請求項 47】

前記物体からの前記波面ビームが前記サンプリングアパーチャに対して横方向に変位していたとしても、該物体の横方向の動きにかかわらず該物体からの波面の意図される同じ部分がサンプリングされることを可能にするよう前記ビームシフティング要素が該変位を補償できるように、該物体のライブ画像に従って該ビームシフティング要素を動的にDCオフセットする段階をさらに含む、請求項45記載の波面ビームをシフトさせかつ波面をサン

10

20

30

40

50

プリングするための方法。

【請求項 48】

以下の段階を含む、視力矯正手技または評価手技のため大きなジオプトリーレンジにわたって波面をシーケンシャルに検知するための方法：直径と焦点距離と光軸とを各々が有する第一および第二レンズを含む第一光学波面リレーシステムを用いて、入射波面を第一物体空間内の第一物体平面から第一波面像空間内の第一波面像平面まで第一ビーム路に沿ってリレーする段階であって、該第一および第二レンズの該焦点距離および直径が、該第一物体平面において大きなジオプトリーレンジを有する入射波面ビームを該第一波面像平面までガイドするように選択される、段階；直径と焦点距離と光軸とを各々が有する第三および第四レンズを含み、該第一波面像平面に実質的にある第二物体空間内の第二物体平面を有する、第二光学波面リレーシステムを用いて、該入射波面を該第一波面像平面から第二波面像空間内の第二波面像平面まで第二光路に沿ってさらにリレーする段階であって、該第三レンズが、該波面ビームを該第三レンズと該第四レンズとの間に位置するフリーエ変換面までガイドするように構成されている、段階；該第三レンズと該第四レンズとの間に位置する該フリーエ変換面に実質的に配されたビームシフティング要素を用いて、実質的に該波面ビーム全体を遮りかつ該リレーされた波面を該第二波面像平面においてシフトさせる段階；該リレーされた波面を、該第二波面像平面に実質的に配されたサンプリングアパーチャを用いてサンプリングする段階；該サンプリングされた波面部分を、該アパーチャの前または後に配されたサブ波面集束レンズを用いて集束させる段階；ならびに、該サンプリングされた波面部分により形成された像スポットの位置を、該サブ波面集束レンズおよび該サンプリングアパーチャの後ろに配された像スポット位置検知装置を用いて検知する段階。

【請求項 49】

測定された眼軸距離に適用可能な補正済みキャリブレーション曲線を使って患者の眼からの波面を正しく特徴付けできるように第一物体平面と該波面を放出する該眼との間の軸距離を測定する段階をさらに含む、請求項48記載の視力矯正手技または評価手技のため大きなジオプトリーレンジにわたって波面をシーケンシャルに検知するための方法。

【請求項 50】

患者の眼のライブビデオ画像または静止画像をキャプチャ/記録する段階をさらに含む、請求項48記載の視力矯正手技または評価手技のため大きなジオプトリーレンジにわたって波面をシーケンシャルに検知するための方法。

【請求項 51】

眼の相対的な横方向の動きに追従するため、波面生成用ビームを該眼に向け、かつ該眼のライブ画像に従って該ビームをスキャンする段階をさらに含む、請求項50記載の視力矯正手技または評価手技のため大きなジオプトリーレンジにわたって波面をシーケンシャルに検知するための方法。

【請求項 52】

眼からの波面ビームが前記サンプリングアパーチャに対して横方向に変位していたとしても、該眼の横方向の動きにかかわらず該眼からの波面の意図される同じ部分がサンプリングされることを可能にするよう前記ビームシフティング要素が該変位を補償できるように、該眼のライブ画像に従って該ビームシフティング要素を動的にDCオフセットする段階をさらに含む、請求項50記載の視力矯正手技または評価手技のため大きなジオプトリーレンジにわたって波面をシーケンシャルに検知するための方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

関連出願

本出願は、いずれもすべての目的について参照により組み入れられる、2006年1月20日提出の出願番号第11/335,980号であり2008年11月4日発行の米国特許第7,445,335号である「Sequential Wavefront Sensor」の一部継続出願である、2007年6月12日提出の出願番号

10

20

30

40

50

第11/761,890号であり2010年10月19日発行の米国特許第7,815,310号である「Adaptive Sequential Wave front Sensor and its Applications」の分割出願である、2010年5月28日提出の出願番号第12/790,301号「Adaptive Sequential Wave front Sensor with Programmed Control」の一部継続出願である。

【0002】

発明の技術分野

本発明の1つまたは複数の態様は、概して眼科用波面センサに関し、特に、波面センサモジュール、および視力矯正手術手技のための眼科機器へのその取り付けまたは統合、ならびに、手術手技中に視力を評価および/または矯正するための眼科機器への統合に関する。

【背景技術】

【0003】

発明の背景

背景の節で述べられる内容は、背景の節で言及されたということのみで先行技術とみなされるべきでない。同様に、背景の節で言及されるかまたは背景の節の内容に関連する問題は、先行技術において先に認識されていたものとみなされるべきでない。背景の節の内容は、それ自体もまた発明でありうる異なるアプローチを示すものにすぎない。

【0004】

眼科用途向けの波面センサは、概して、大型で独立式のデスクトップ機器である。これまでも、波面センサを、LASIKシステム（例えばUS6685319（特許文献1）を参照）、眼底カメラ（例えばUS6572230（特許文献2）を参照）、共焦点走査レーザー検眼鏡（例えばUS7057806（特許文献3）を参照）などの眼科機器に統合する試みはなされているが、概してこれらの統合は、波面センサを眼科機器に取り付けまたは統合される別個のコンパクトなモジュールとし、元の眼科機器をそのままに保つことを、目指してはいない。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】US6685319

【特許文献2】US6572230

【特許文献3】US7057806

【発明の概要】

【0006】

発明の概要

本発明は新しい器械および新しい方法に関する。本発明は、患者の瞳孔面または角膜面から波面サンプリング面まで波面を光学的にリレーすることによって作動する。リレーされた波面を横方向にシフトさせるため、波面スキャン装置がビーム全体を完全に遮ることができひいてはビーム全体をスキャンできるよう、リレー過程のどこかで、大きな眼ジオプトリーレンジ内である眼からの波面ビームは、波面像空間および/またはフーリエ変換空間内の特定の軸距離レンジにわたって望ましい物理的寸法に収められる。本発明は、大きなダイナミックレンジを有するリアルタイムシーケンシャル波面センサとして機能してもよい。本開示と同じ特許権者に権利付与されている、先に開示されたシーケンシャル波面センサ（US7445335）と比較して、波面スキャン装置は波面リレーシステムの第一フーリエ変換空間内にはアレンジされておらず、波面像空間および/または別のフーリエ変換空間内にアレンジされている。この必要性が生じるのは、市販されているほとんどの波面スキャン装置が、比較的狭いビーム幅のレーザービームをスキャンするように設計されているからである。

【0007】

波面スキャン装置が、大きな眼ジオプトリーレンジにわたる波面ビームと完全に相互作用できるようにするため、波面リレーシステムは、波面像空間および/またはフーリエ変換空間内の軸距離レンジにわたって波面ビームの側方または横方向の寸法を縮小すること

10

20

30

40

50

が好ましい。その結果、眼からの入射波面が大きなジオプトリーレンズにわたって変動する場合であっても、ビーム反射用または透過用ウィンドウが比較的小さい市販のレーザービームスキャナを直接使って、波面ビーム全体を完全に遮りひいてはスキャンすることができる。次に、シフトされた波面が波面像サンプリング面でサンプリングされてもよい。

【0008】

本発明の1つの目的は、各臨床医または術者について手術または眼検査の作業距離を一定にし（例えば、ほとんどの眼科手術用顕微鏡について150 mm～200 mm）、かつ、典型的な瞳孔サイズである患者の眼から出てくる光エネルギーが光学素子で完全に回収されたがって望ましい眼ジオプトリーレンズ全体で信号対雑音比が保たれるようにすることである。

【0009】

基本的な光学設計と併せて、種々の設計選択肢も開示する。先行技術の設計に関連する問題についても対処する。本発明の1つの目的は、眼が物体平面に（側方および/または軸方向に）正確に位置決めされていない場合でも、望ましい作業距離レンジにわたって波面センサが単調な出力で作動できるよう、波面リレーステージの物体平面をインテリジェントに選択することである。

【0010】

本発明の別の目的は、シーケンシャル波面センサを使って、白内障の屈折矯正手術および/もしくは眼内レンズ移植ならびに/または他の眼検査もしくは視力矯正手技に望ましい大きなジオプトリーレンズ（例えば $\pm 30D$ 以上）にわたって、患者の眼の波面収差を測定することである。これは、光学素子の寸法およびレイアウトを適切に選択することによって部分的に実現される。同時に、本発明の光学構成は、市販の光ビームスキャナが比較的狭い光ビームを限定的な角度レンジおよび/または変位レンジにわたってスキャンするように設計されているにもかかわらず、このスキャナを全ジオプトリーレンズ用の波面スキャン装置として使うことも可能にする。

【0011】

本発明の別の目的は、ハードウェアおよび/またはソフトウェアの手段を使って、光学波面リレーステージの固有の収差を少なくとも部分的に補正または低減することである。ハードウェアを使った補正では、波面のリレーおよび/またはシフトに使われる光学素子が適切に設計および選択される。あるいは、波面収差補正用の素子が波面ビーム路に挿入されてもよい。そのような波面補償用素子の例としては、球状の波面補償プレート、波面チルト補償装置、変形可能ミラー、MEMS（微小電気機械システム）ミラーアレイ、透過式の液晶式波面補償器などがある。ソフトウェアを使った補正では、まずキャリブレーション処理を介して固有の光学系収差を測定し、測定された全体の収差からそれを減算してもよい。

【0012】

本発明のまた別の目的は、眼に最も近い波面センサの第一光学入力ポート位置に共用レンズを配しながらかつ術者または臨床医のために十分な作業距離を残すこと、および光ビーム路を折返すことによって、ダイナミックレンジの大きなシーケンシャル波面センサを物理的にコンパクトにすることである。光ビーム路の折返しは、光エネルギーの重大な損失がなく、かつ、患者に眼検査および/または外科手術を行う眼科臨床医の通常のやり方に物理的に干渉せずに手術用顕微鏡などの眼科機器に統合できるように波面センサパッケージをコンパクトにできるように行われる。一方、手術用顕微鏡からの照明ビームは、起こりうる鏡面反射が手術用顕微鏡の視認用路内に向けられて顕微鏡視野内にグレアを生じることがないように、レンズおよび/またはプリズムおよび/またはミラーを使って適切に曲げられる。

【0013】

本発明のまた別の目的は、自己キャリブレーションが行えるよう、ダイナミックレンジの大きなシーケンシャル波面センサモジュールの内部に基準波面を生成するための手段を提供することである。この自己キャリブレーションは複数の目的に使われうる。1つは、

10

20

30

40

50

眼からの波面を生成するため患者の眼内に向けられる光ビームが、波面センサの光学系に対して十分にアライメントしているかをチェックすることである。別の目的は、波面センサモジュール内部の光学素子の光学アライメントをモニタして、アライメントが許容レンジ内であることを確認することである。また別の目的は、位置検知装置／検出器（PSD）上に基準像スポット位置を確立することであり、これにより、例えば温度変化といった環境要因などの結果として生じる、光学素子の（許容範囲内の）わずかなアライメントずれによる固有の光学系収差を、波面解析／計算において考慮に入れることができる。同様に重要なまた別の目的は、ガイダンスおよび／またはフィードバックを提供する前に確認または検証を行うことである。

【 0 0 1 4 】

本発明のまた別の目的は、環境要因または他の要因によってもたらされる光学構成要素のマイナーなアライメントずれまたは動きを補償し、それにより光学系およびレイアウトの固有誤差を最小にするため、光ビームスキャナのDCオフセット性能を用いることである。

【 0 0 1 5 】

本発明のまた別の目的は、可変焦点レンズをサブ波面集束レンズとして使って、その焦点距離をクローズド制御ループの様式で動的に調整することであり、これにより、サブ波面集束レンズによって形成された像スポットを、精度および確度をより高めるため像スポットの横移動の測定に使われる位置検知装置（PSD）上に概ね集束させることができる。位置検知装置としてクワドラント検出器を使うケースでは、クワドラント検出器上に到着する像スポットのサイズは好ましくは特定のサイズに保たれ、そのような目的に可変焦点レンズが使われてもよい。

【 0 0 1 6 】

本発明のまた別の目的は、位置検知装置としてクワドラント検出器が使われる場合に、波面の大きなダイナミックレンジにクワドラント検出器が対応できるように像スポットサイズを望ましいサイズレンジ内に保つため、サブ波面集束レンズとしてアキシコンレンズを使うことである。

【 0 0 1 7 】

本発明のまた別の目的は、製品製造という点においても、手術用顕微鏡もしくは細隙灯生体顕微鏡またはペンチトップ型収差計に関して複数の設計レイアウトを有さないという点においても、物品のコスト増大を最小にするために、標準的構成の既存の光路内に追加の光学素子を投入することによって波面センサの作業距離レンジをさらに拡大することである。

【 0 0 1 8 】

本発明のまた別の目的は、測定された眼距離に適用可能な正しいキャリブレーション曲線を使って患者の眼からの波面収差を正しく特徴付けできるよう、ダイナミックレンジの大きなシーケンシャル波面センサモジュールからの光学的な眼距離測定手段を提供することである。

【 0 0 1 9 】

本発明のまた別の目的は、網膜上の小領域にSLD（スーパーluminescent発光ダイオード）ビームをスキャンするかまたは横方向に移動させて、スペckル除去および平均化を行うことであり、かつまた可能性として、これにより眼に送達される光パワーの増大が許容され、これは信号対雑音比を増大させる。

【 0 0 2 0 】

本発明のまた別の目的は、網膜上の像スポットが制御可能となって眼からの波面のより一貫した測定が可能となるよう、SLDビームの発散／収束を動的に集束または調整することである。

【 0 0 2 1 】

本発明のまた別の目的は、CCD/CMOS眼画像センサなどの手段を使って眼の動きを同定しかつ限定レンジ内で眼の動きに追従するためSLDビームをスキャンまたは移動させること

10

20

30

40

50

、および、眼がよくアライメントされておらずかつ動いている場合でも高精度の波面測定を実現できるよう、その情報を使って波面データを補正することである。加えて、CCD/CMOSは、入射SLDビームを検知/検出および追跡し、それを眼、角膜、または瞳孔上の望ましい位置と関連させてもよい。ここでも、複数の設計を有さず「プラグアンドプレイ」手法を使うことによってコストを最小にできる。

【0022】

本発明のまた別の目的は、より高いSLDパワーが眼に送達されて信号対雑音比が増大するよう、SLDのオンとオフとをスマートに切り替えて露光時間を節約するため、CCD/CMOS像およびパターン認識を波面信号検出と組み合わせる用いることである。

【0023】

本発明のまた別の目的は、SLDビーム用のスキャナを、眼の屈折矯正を行うための手術用レーザービームのスキャンにも使うために、同じ光ファイバまたは別の自由空間光ビームコンバイナを介してSLDビームと組み合わせることができる手術用光源としてレーザーを含めることである。可視波長を備えた同じレーザービームまたは異なるレーザーもまた、眼を「マークする」かまたは術者を「ガイドする」ため、すなわち、術者が手術用顕微鏡を介してレーザーマークを見ることができるよう眼の上に「オーバーレイする」ために使われてもよい。

【0024】

本発明のまた別の目的は、無水晶体条件の場合のように角膜または水晶体の屈折力をタンデム式または独立式に引き出せるよう、眼軸距離を測定するかまたは眼の生体測定を行うため、低光コヒーレンス干渉計または光コヒーレンストモグラファー(OCT)を波面センサモジュールに組み込むことである。

【0025】

本発明のこれらおよび他の特徴および利点は、以下の好ましい態様の詳細な説明を添付の図面とともに検討することによって、より容易に当業者に明らかになるであろう。

【図面の簡単な説明】

【0026】

【図1】シーケンシャル波面センサを示した図である。

【図2】(図2A)単ステージ式の4-F波面リレーシステムが透過式の波面シフティング装置と組み合わされている、1つの態様を示した図であり、波面シフティング装置は、波面を横方向にスキャンして、シフトされた波面の一部のみが波面サンプリングアパーチャを通過しそして位置検知装置上に集束されることを可能にする。(図2B)図2Aの波面像空間内の、ビームが比較的狭い軸レンジに対応する領域の拡大略線図である。

【図3】図2Aおよび図2Bに示した波面像空間で波面ビームスキャンを行うために使われる透過式の斜角ビームスキャナの例示的ケースを示した図である。

【図4】チルトしたガラスブロックを光路内に投入するかまたはそのようなガラスブロックをビーム軸周囲で回転させることによって波面ビームの変位を実現するため、図2Aおよび図2Bに示した波面像空間で使われる透過式ビームスキャナの別の例を示した図である。

【図5】波面ビームを横に反射しかつその間にビームを斜角スキャンするため、波面像平面より前の波面像空間で使われる、反射式ビームスキャナの例を示した図である。

【図6】波面光ビームを逆向きに反射するため、かつ、波面を横方向にシフトさせるという点においてビームをより対称的にスキャンするため、波面像平面より前の波面像空間で使われる、反射式ビームスキャナの別の例を示した図である。

【図7】カスケード化された2ステージ式4-F波面リレーまたは8-F波面リレーの、ビーム路が折返されていない態様が、本発明の波面センサモジュールで使われている様子を示した図である。

【図8】第二波面像平面で横方向の波面シフティングを実現するため、単一のレンズが2回使われ、かつ、反射式ビームスキャナ、偏光ビームスプリッタ(PBS)、および四分の一波長板(1/4プレート)と組み合わされている、図7の第二ステージ4-F波面リレーの1つの態様を示した図である。

10

20

30

40

50

【図9】図8のMEMSスキャンミラーのスキャンまたは斜角チルト、および、第二波面像平面におけるリレーされた波面像にDC波面チルトオフセットを伴わない横方向シフトを示した図である。

【図10】波面ビームが斜め横の様式で反射およびスキャンされる、図7の第二4-F波面リレーステージの代替的態様を示した図である。

【図11】波面ビーム路が折返されている、波面センサモジュールの1ステージ式4-Fリレーの態様を示した図である。この図には、SLDビーム発射用の光学系、前眼部結像用の光学系、および固視用の光学系の一例も示されている。

【図12】4-F波面リレーステージが2つある波面センサモジュールの別の態様を示した図である。この態様において、図11に示した波面ビームを曲げるための1つのミラー（ミラー1）は除去されて大きな偏光ビームスプリッタ（PBS 1）で置換され、SLDビームはPBSの後ろから発射される。加えて、SLDビームは、マイナーな眼の動きに追従するかかつ/または網膜上の小さなスキャン領域にわたって到着するようにスキャンまたは変位される。

【図13】4-F波面リレーステージが2つある別の態様を示した図である。この態様において、発射されたSLDビームと異なりもとの偏光を備えた、眼から戻ってきた光波は、波面センサモジュールからの眼距離、眼内の（自然のまたは移植された）水晶体の位置、前房深度、眼の長さ、ならびに可能性として角膜および/または水晶体の前面および後面の曲率といった、他の眼の解剖学的パラメータの測定に使われる。

【図14】本明細書に開示する波面センサモジュールを細隙灯顕微鏡または手術用顕微鏡に統合する1つの態様を示した図である。この態様において、第一4-Fリレーの第一レンズは波面センサモジュールの第一光学入力ポート部に配され、かつ顕微鏡と共用される。

【図15】図14と似ているが、手術用顕微鏡からの照明ビームが患者の眼に到着しながらも顕微鏡視野にはグレアを生じないように向けられるよう、共用レンズおよび補償レンズにプリズムが追加されている別の態様を示した図である。

【図16】顕微鏡の対物レンズが除去されかつその焦点機能が波面センサモジュールの入力ポート部の共用レンズによって部分的または完全に供される、波面を顕微鏡に統合する別の態様を示した図である。

【図17】図14、図15、および図16に示したダイクロイック式またはショートパス式のビームスプリッタが、波面リレーの第一レンズとして機能しかつ手術用顕微鏡のために可視スペクトルに対する透明プレートとしても機能する、特別に作られた45°近赤外集束ミラー（SLDスペクトルのみを反射するようにコーティングされている）で置換される、波面を顕微鏡に統合する別の態様を示した図である。

【図18】近赤外の波面ビームを波面センサモジュールに向けかつ手術用顕微鏡用に光の可視スペクトルを通過させるため、ダイクロイック式またはショートパス式のビームスプリッタが使われている、本明細書に開示する波面センサモジュールを手術用顕微鏡に統合する別の態様を示した図である。

【発明を実施するための形態】

【0027】

詳細な説明

次に、本発明の種々の態様を詳しく述べる。これら態様の実施例は添付の図面に図示されている。これらの態様との関連において本発明を説明するが、この説明には、本発明をいかなる態様にも限定する意図はないことが理解されるであろう。以下の説明において意図されるのは、添付の特許請求の範囲によって定義される本発明の精神および範囲に含まれうる代替物、改変物、および同等物をカバーすることである。以下の説明において、種々の態様の十分な理解を提供する目的で、多数の具体的な詳細が示されるが、本発明はこれら具体的な詳細の一部または全部を伴わずに実現されてもよい。その他、本発明を不必要にわかりにくくすることがないように、周知の処理操作は詳しく説明されていない場合もある。さらに、本明細書の様々な箇所に出現する「実施例態様」という句は、それぞれが必ずしも同じ実施例態様を参照するわけではない。

【0028】

10

20

30

40

50

ヒトの眼の波面収差測定に使われる典型的な波面センサにおいて、眼の瞳孔または角膜面からの波面は、一般的に、周知の4-Fリレー原理を1回または複数回使って波面検出面または波面サンプリング面にリレーされる（例えば、J. Liang, et al. (1994) "Objective measurement of the wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor," J. Opt. Soc. Am. A 11, 1949-1957; J. J. Widiker, et al. (2006) "High-speed Shack-Hartmann wavefront sensor design with commercial off-the-shelf optics," Applied Optics, 45(2), 383-395; US7654672を参照）。そのような4-Fリレーシステムは、入射波面の位相情報を保存しながら、かつ有害な伝搬作用を伴わずにそれをリレーすることを可能にする。加えて、焦点距離が異なる2つのレンズを使った無限焦点結像システムを構成して4-Fリレーを実現することにより、リレーは、入射波面の拡大または縮小およびそれに伴う入射波面の発散または収束の縮小または拡大に対応できる（例えばJ. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, 2nd ed. McGraw-Hill, 1996を参照）。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 9 】

図1に、4-Fリレーシステムを利用したシーケンシャル波面センサ100の態様の例示的略線図を示す。波面102を有する、直線偏光した光の入力ビームが第一レンズ104によって集束される。集束するビームは、通過する偏光方向が入射ビームの偏光方向とアライメントするような様式でアレンジされている偏光ビームスプリッタ（PBS）106を通る。その結果、直線偏光した収束ビームがPBS 106を通過する。PBS 106の後方に四分の一波長板108が置かれ、速軸が、四分の一波長板108の通過後に円偏光ビームが生じるように配向されている。

【 0 0 3 0 】

以下の説明において、最終波面像平面における波面の二次元横方向シフティングを説明するために「波面シフティング（wavefront shifting）」という用語が使われ、光ビームスキャナまたはディスプレイサを使って実現される波面シフティングを説明するために「波面スキャンニング（wavefront scanning）」という用語が使われる。

【 0 0 3 1 】

入力収束ビームは、モーターシャフト114にマウントされた、チルトしたスキャンニングミラー112の反射表面上に集束される。ミラーで反射された光ビームは発散性であり、ビーム中心の主光線は、スキャンミラー112のチルト角度およびモーター114の回転位置に依存する方向に変更されている。反射ビームは円偏光したままであると予測されるが、円偏光の回転方向は左手から右手、または右手から左手に変更されている。ゆえに、戻り光路で2回目に四分の一波長板108を通過する際に、ビームはまた直線偏光となるが、その偏光方向はもとの入射ビームの偏光方向と直交する方向に回転している。したがって、偏光ビームスプリッタ106において、戻りビームは、図1に破線の光線で示されているように大部分が左に反射される。

【 0 0 3 2 】

反射された発散ビームをコリメートしてもとの入力波面の複製124を生成するため、PBS 106の左隣に第二レンズ116が置かれる。スキャンミラーがチルトされているため、複製波面124は横方向にシフトされる。複製波面124の小部分を選択するため、第二レンズ116の後方かつサブ波面集束レンズ120の直前にアパーチャ118が置かれる。サブ波面集束レンズ120は、選択されたサブ波面を位置検知装置122上に集束し、位置検知装置122は、シーケンシャルに選択されたサブ波面から生成された集束光点の図心を決定するのに使われる。ステップ的にモーター114を回転させかつスキャンミラー112のチルト角度を変化させることにより、複製波面の任意の部分を選択してシーケンシャルにアパーチャ118を通過させることができるように、複製波面の半径および方位のシフト量を制御できる。結果として、各サブ波面の図心がパラレルではなくシーケンシャルに取得されることを除いて、標準的なHartmann-Shack波面センサのケースと同様にもとの入射ビームの波面全体を特徴付けることができる。

【 0 0 3 3 】

図1に図示した具体例の第一および第二レンズ104および116は4-Fリレーシステムの機能を供する。ビームスキャナ112は、第一レンズ104の後方焦点面またはフーリエ変換面に位置し、かつ第二レンズ116の前方焦点面に位置する。

【0034】

しかし、波面をシフティングするためフーリエ変換面またはその近くで斜角ビームスキャナを使う、図1に図示したシーケンシャル波面センサにおいて4-Fリレーシステムが使われる場合、眼からのもとの波面の絶対ジオプトリー値が大きいと（正または負のいずれか）、フーリエ変換面でのビーム幅が、ビームスキャナによって完全に遮るには大きくなりすぎる可能性がある。広い眼ジオプトリーレンジをカバーするには、瞳孔から来る光エネルギーが失われないよう、ビームスキャナが大きなビーム相互作用ウィンドウを有する必要がある。残念ながら、そのような大きなウィンドウサイズのビームスキャナは概して入手が容易でないか、または市販されている場合でも非常にかさばり、かつ高速スキャンが必要であれば高価になる。ゆえに、大きな眼ジオプトリーレンジをカバーするシーケンシャル波面センサにおいて比較的低コストでありかつ市販されているビームスキャナの使用を可能にする光学設計が、求められている。

【0035】

図2Aに、単ステージ式の4-F波面リレーシステムが透過式の波面シフティング装置と組み合わされている実施例態様を示す。この波面シフティング装置は、波面を横方向にスキャンして、シフトされた波面の一部のみが波面サンプリングアパーチャを通過しそして位置検知装置上に集束されることを可能にする。この態様において光ビーム路は折返していない。光路が折返していない目的は、技術的詳細の説明を容易にするためであることに留意されたい。実際の装置において、光路は異なるやり方で折返されていてもよい。例えば、装置を物理的にコンパクトにして細隙灯生体顕微鏡または手術用顕微鏡への波面センサの統合を容易にするため、光路が折返されるかまたは曲げられていてもよい。

【0036】

図2Aの実施例において、4-Fリレーシステムの第一レンズ204は、40 mmの直径と、眼科手術用顕微鏡の典型的な焦点距離（作業距離に概ね等しい）である200 mmの有効焦点距離とを有する。眼は、好ましくは4-Fリレーシステムの第一レンズ204の前方焦点面またはその近くに位置する。4-Fリレーシステムのフーリエ変換面Aは、大文字Aで表された垂直の破線で示されているように、4-Fリレーシステムの第一レンズ204の後方焦点面かつ第二レンズ216の前方焦点面にある。この実施例において、4-Fリレーシステムの第二レンズ216は、40 mmの直径と、80 mmの有効焦点距離とを有する。4-Fリレーシステムのリレーされた波面像平面は、大文字Bで表された垂直の破線で示されているように、第二レンズ216の後方焦点面にある。4-Fリレーシステムに使われる2つのレンズの有効焦点距離が異なっていることにより、眼からの入射波面の複製または像は、当業者に周知であるように、横方向の次元において $200/80 = 2.5$ 倍、光学的に縮小される。

【0037】

図2Aに見られるように、眼が正視眼で、したがって眼からの波面が平面に近い場合、眼からの光ビームは、実線の光線で表されるように比較的狭くかつ平行である。例えば、瞳孔の直径が5 mmならば、ビームの直径は約5 mmになる。正確なビーム形状は、波面生成のため眼に送達される光ビーム（図2Aには示されていない）の関数である、網膜上の光散乱スポットサイズにも依存する。

【0038】

眼からのビームは、4-Fリレーシステムの第一レンズ204を通過した後、第一フーリエ変換面Aにおいて光軸上に集束され、そこで収束ビームから発散ビームに変わる。このビームは4-Fリレーシステムの第二レンズ216によって再コリメートされ、そして、4-Fリレーシステムに使われる2つのレンズの有効焦点距離の違いによって、ビーム直径が2 mmまで縮小される。この正視眼のケースにおいて、図1に図示した具体例のように、ウィンドウが比較的小さいビームスキャナが第一フーリエ変換面Aのどこかに位置していると、ビームはそこに置かれたビームスキャナによって完全に遮られる。一方、フーリエ変換面Aに

おける斜角スキャンは、当業者に周知であるように、4-Fリレーシステムの第二レンズ216の後に横方向のビーム変位に変換される。

【0039】

しかし、眼が無水晶体眼または強度遠視眼もしくは強度近視眼である場合、眼からの波面は平面でなくなり、大きく発散または収束する。換言すると、眼からのビームは比較的平行なビームではなくなり、発散ビームまたは収束ビームになる。図1の短い破線の光線は、ジオプリー値が+30Dである発散波面のケースを示している（本発明者らは、眼からの発散波面が正のジオプリー値を有し、眼からの収束波面が負のジオプリー値を有すると定義している）。+30Dは、通常は無水晶体状態（典型的な遠視ジオプリー値+20D）と角膜由来の遠視+10Dとを足したものである。図に見られるように、短い破線の光線で表される発散ビームがフリー変換面Aに伝搬したとき、ビーム幅はかなり大きくなる。事実、瞳孔の直径が5 mmで眼からの波面の遠視ジオプリー値が+30Dである場合、これは、瞳孔面より33.3 mm後方かまたは4-Fリレーシステムの第一レンズから233.3 mm離れたところに位置する点光源から来る、自由空間中の発散ビームと等価である。この発散ビームは、点光源位置から33.3 mmのところにある5 mmの瞳孔によって制限されて、発散ビーム円錐を形成する。

10

【0040】

与えられた仮定によれば、このビームは、4-Fリレーシステムの第一レンズ位置に到達したときに直径が35 mmとなり、フリー変換面Aに到達したときに直径が30 mmとなる。したがって、図1に図示した具体例のようにフリー変換面Aでビームスキャナが使われるのであれば、波面をシフトさせるという目的を達するには、5 mmの瞳孔に対して必要なウィンドウサイズは少なくとも直径30 mmになる。そのような大きなウィンドウサイズのスキャナは、コスト、サイズ、および市販品入手可能性の点で理想的ではない。

20

【0041】

図2Aの長い破線の光線は、-20Dという高度近視のケースを示している。この場合、眼からの収束ビームは、長い破線の光線で表されているように、眼を出た後50 mmの距離で1点に収束して、発散ビームに変化する。この-20Dビームは、2つのレンズ間のフリー変換空間において+30Dビームより狭いが、それでも正視ビームよりはるかに広い。これらの検討が示しているのは、図1に図示した具体例のようなスキャン手法は、フリー変換面近くのどこかに位置するスキャナの光ビーム相互作用ウィンドウのサイズの限定に依存する限定的なジオプリーレンジ内でのみ機能するということである。

30

【0042】

本開示において、本発明者らは、ビームスキャナなどの波面シフティング装置を、第一レンズと第二レンズとの間の第一フリー変換空間ではなく、波面像空間または後続のステージのフリー変換空間にアレンジすることを意図する。

【0043】

図2Aの波面像空間内のビームが比較的狭い軸レンジに対応する領域の拡大略線図である図2Bに見られるように、短い破線および長い破線の光線で表されるビームはいずれも、波面像平面Bに到達したときに、正視眼のケースと同様にビーム直径2 mmまで縮小される。しかし、短い破線の光線で表されるビームは、リレーされた波面像平面Bより前の波面像空間において高度の収束ビームから高度の発散ビームに変化し、長い破線の光線で表されるビームは、リレーされた波面像平面Bより後の波面像空間において比較的高度の収束ビームから比較的高度の発散ビームに変化する。換言すると、瞳孔からの波面は波面像平面Bに伝搬されるが、+30Dビームは波面像平面Bにおいて高度に発散性であり、-20Dビームは波面像平面Bにおいて比較的高度に収束性である。

40

【0044】

リレーされた波面の横方向次元の光学的縮小は、ビーム円錐の発散（または収束）が物体空間内でのものと比べて増大していることに関連する。薄いレンズの結像式を使って計算できるように、眼からの+30Dの発散波面では、リレーされた点光源像はB平面の5.33 mm前方に位置し、一方、眼からの-20Dの収束波面では、リレーされた点光源像はB平面の8.0

50

mm後方に位置する。

【0045】

物体または患者の眼の側では+30Dのビーム円錐の発散（点光源位置とビーム幅測定平面との間の距離にわたる、軸位置におけるビーム幅の比として定義される）は $5\text{ mm}/33.33\text{ mm} = 0.15$ であったが、リレーされたビーム円錐の発散は $2\text{ mm}/5.33\text{ mm} = 0.375$ となっていることを考えると、ビーム円錐の発散は $0.375/0.15 = 2.5$ 倍に増大している。同様に、-20Dのビーム円錐の収束は $5\text{ mm}/50\text{ mm} = 0.1$ であったが、 $2\text{ mm}/8\text{ mm} = 0.25$ となり、したがってビーム円錐の収束もまた $0.25/0.1 = 2.5$ 倍に増大する。

【0046】

したがって、5 mmの瞳孔に対する+30D~-20Dの眼波面ジオプトリーレンズについて、ビームが比較的狭くなる波面像空間内の軸レンズが存在する。問題は、ビームがビームスキャナによって完全に遮られ、かつスキャンされたビームが波面リレー平面Bまで移動する際にリレー波面の横方向シフトが生じるように、この軸レンズ内のどこに（光ビームスキャナなどの）波面シフティング装置をアレンジするかである。

10

【0047】

波面ビーム幅レンズは瞳孔サイズの関数であるため、ビームスキャナの特定のウィンドウサイズあたりの眼波面ジオプトリー測定レンズは、リレーされた波面のより小さい領域をスキャンすることによって調整できることに留意されたい。したがって、異なるキャリブレーション曲線を取得しこれによりさらに大きな眼ジオプトリー測定レンズをカバーするため、この特性を利用して、瞳孔サイズ上のより小さな領域をサンプリングしてもよい。

20

【0048】

完全な波面リレーシステムでは、波面リレー平面Bにおいてビーム幅は直径2 mmになる。5 mmの瞳孔に対する+30D~-20Dの眼ジオプトリーレンズについて、光軸に沿ったビーム幅は、眼の波面ジオプトリー値に応じて波面像空間内でさまざまとなるが、波面リレー平面Bより右側では短い破線の光線、波面リレー平面Bより左側では長い破線の光線で示されているように、特定の空間体積内に制限される。図2Aおよび図2Bに示されたようなケースにおいて、透過式の光ビームスキャナまたはディスプレイ212をアレンジするための最良の場所は、意図される眼ジオプトリーレンズ全体にわたってスキャナのウィンドウがビーム幅より大きい限り、波面リレー平面Bより左側のどこかとなる。

30

【0049】

例えば、透過式光ビームスキャナ212のビーム相互作用ウィンドウが直径約4 mmである場合、図2Bに点線のボックスで示されているように、このスキャナが波面リレー平面Bの左側にアレンジされてもよい。透過式ビームスキャナ212は、電気光学式、磁気光学式、音響光学式、液晶式、または機械式のスキャナであってもよい。一般に透過式ビームスキャナは屈折率が空気より大きい光学材料で作られており、したがって波面リレー平面Bはさらに右方向に押されることに留意されたい。このことは、スキャナが斜角スキャナであるならば、波面リレー像平面Bで波面を横方向シフトさせるといいう点において利点となりうる。

【0050】

換言すると、斜角ビームスキャナのケースにおいて、ビームスキャナの前面と波面リレー平面Bとの間の距離は、波面全体のサンプリングを可能にするために必要なスキャン角度レンズに影響する。ビームスキャナのビーム相互作用ウィンドウが大きい場合は、スキャン角度レンズの要件を小さくするため、さらに左にアレンジしてもよい。あるいは、スキャナの仕様によるスキャン角度レンズが望ましいレンズに満たない場合は、ビームスキャナのスキャン角度レンズ要件が装置の仕様の範囲内になるよう、光学設計の最適化を行って、1ステージ式4-F波面リレーの第二レンズとして有効焦点距離がより短いレンズを選択してもよい。

40

【0051】

斜角ビームスキャンの場合、波面は、波面像平面Bまでリレーされた際に、DC角度また

50

は波面チルトオフセット、ならびに、非点収差および/またはコマ収差など他の何らかの追加の収差を被る可能性があることに留意されたい。しかし、これらのDCオフセットおよび/または追加的な固有の収差は、当業者に周知であるように、測定された全体的な収差から減算できるよう、キャリブレーションおよびソフトウェアのデータ処理を介して考慮に入れることができる。

【0052】

図3に、透過式の斜角ビームスキャナ312がスキャンに使われている例示的ケースを示す。この実施例において、ビームスキャナ312は、波面像平面Bがちょうどスキャナ媒質の後方射出面にくるような長さの光学媒質を有すると仮定される。図に見られるように、眼からのコリメートした正視ビームが斜角的にスキャンされる時、ビームが波面像平面Bに到達する際に、波面全体が横方向にシフトするとともに波面チルトのDCオフセットが生じる。その結果、正視波面が波面サンプリングアパーチャ318によってサンプリングされ、さらにサブ波面集束レンズ320によって集束されて、サブ波面集束レンズ318の焦点面かまたは焦点面の前方もしくは後方かのいずれかに位置決めされていてもよい位置検知装置(PSD)322に到着するとき、像スポットはPSD 322の軸中心位置ではなく、波面チルトの結果としてDCオフセットが生じている。

10

【0053】

+30Dビームおよび-20Dビームの像スポット位置も、それぞれ短い破線および長い破線により図3に示されている。これらのビームはサブ波面集束レンズに当たる前に発散性および収束性であるため、焦点面でよく集束せず、かつ、正視のケースの基準像位置と異なる位置に来る。しかし、像スポットを使って像スポットの図心位置を示すことはなお可能であり、キャリブレーションを用いてスポット位置を実際の波面収差に相関させることも可能である。

20

【0054】

このケースにおいて、位置検知装置322が2D(二次元)のラテラルエフェクト検出器か、またはCCDもしくはCMOS画像センサなどの2D検出器アレイである場合は、ソフトウェア式のデータ処理によって図心位置を見出すことができることに留意されたい。しかし、位置検知装置322がクワドラント検出器である場合、像スポットが小さすぎれば4つの象限のうち1つだけに到着する可能性があり、像スポットの図心位置を見出すことが不可能になる。一方、像スポットが大きすぎればクワドラント検出器の外側に出てしまう可能性があり、読み取りが不正確になる。加えて、サンプリングされるサブ波面が平面のサブ波面と異なり収束性または発散性である場合も、クワドラント検出器上の像スポットサイズはさまざまになる可能性があり、その結果、異なるチルト角度でも同じ比の光エネルギーが4つの象限のそれぞれに到着する可能性がある。

30

【0055】

これらの制限を克服するため、サブ波面集束レンズ320の軸位置および/または焦点距離を変更するかまたは動的に変化して、像スポットが4つの象限で共用されるよう、像スポットを十分大きくするかまたは望ましいサイズレンジ(例えば、1つの象限のサイズにほぼ等しいサイズまたは直径など)にしてもよい。あるいは、望ましい眼ジオプトリー測定レンジの範囲内で像スポットが常に4つの象限で共用されかつクワドラント検出器の感光領域を超えて動かないよう、サブ波面集束レンズ318の焦点距離が適切に選択されてもよく、クワドラント検出器の位置もまた適切に選択されてもよい。別の代替として、サンプルサブ波面の像スポットサイズの変化に因るため、クワドラント検出器の位置もまた、特に軸方向において、動的に動かされてもよい。また別の代替として、像スポットサイズを望ましいサイズレンジ内に保つため、サブ波面集束レンズとしてアキシコンレンズが使われてもよい。また別の代替として、拡散器の特定の距離を通った後に像スポットが4つの象限で共用されるよう、クワドラント検出器の前に拡散器をアレンジして、比較的よく集束された小さな像スポットを故意に拡散させてもよい。

40

【0056】

図4に、チルトしたガラスブロックを光路内に投入するか、またはそのようなガラスブ

50

ロックをビーム軸周囲で回転させかつチルト角度を変えることによって実現された、透過式ビームスキャナ412の別の実施例を示す。スキャナ412は光学式のビーム変位スキャナである。ガラスブロックは屈折率が空気より大きいため、波面像平面Bはさらに右方向に押される。ガラスブロックのチルト角度および/または厚さはビーム変位量を決定する。この場合も、ビーム変位スキャンの結果として追加の収差（非点収差など）が波面に導入される可能性があるが、これらの追加的な収差はキャリブレーションおよびソフトウェアのデータ処理を介して考慮に入れることができる。

【0057】

図5に、波面ビームを横に反射しかつその間にビームをスキャンするために反射式ビームスキャナ512が使われている実施例を示す。図5において波面ビームは入射ビームに対して約90度曲げられて横に反射されたものとして示されているが、これは制限となるべきではなく、ビームは任意の角度で反射されてよいことに留意されたい。ビームを約90度に反射することに伴う1つの問題は、反射式スキャンミラー上のビーム形状が一般に楕円状であることであり、これにより、反射式スキャンミラーの形状および/またはサイズに、より厳しい要件が課される可能性がある。もう一つの問題は、斜角スキャンがピボット点を通る鏡面の法線に対してしか対称でないため、波面の横方向シフトが正確に対称とはならないことであり、このことは、スキャンミラーの駆動信号か、または、正確な波面収差を見出すためのアルゴリズムおよびデータ処理ソフトウェアかのいずれかに対して、事実上さらに負担をかけることになる。

【0058】

図6に、波面の横方向シフトという点においてより対称的な態様を示す。この態様は、光エネルギー効率の良い反射式構成と組み合わせた光学ビームスキャンミラー612を使用し、これは本質的に、図3のビーム折返しパージョンである。この態様において、入射する波面は直線偏光したものと仮定されており、偏光ビームスプリッタ（PBS）606は四分の一波長板608またはファラデー回転子と組み合わされてアイソレータとして作用する。波面ビームが反射式ビームスキャナ612により反射されて戻り、波長板608またはファラデー回転子を2回目に通過するとき、ビームの偏光方向は回転されて直交方向またはs偏光方向になり、その結果、ビームは偏光ビームスプリッタ606により横にまたは下向きに反射されて波面サンプリングアパーチャ618に向かい、そこから、サンプリングされたサブ波面はサブ波面集束レンズ620によって集束されて、位置検知検出器（PSD）622に到着する。大きな眼ジオプトリージをカバーする必要があることから、PBS 606は比較的大きな入射角レンジにわたって機能する必要があり、PBS 606の良い選択肢としては、望ましい近赤外波長域で動作するように設計されたワイヤグリッド式の偏光ビームスプリッタプレートがあるが、特別に設計された他のキューブ型またはプレート型のPBSもまた使われてもよい。

【0059】

この点において、波面を1回リレーすることに加えて、波面シフティングの多数の有利な代替または機会を取り入れるため、波面を2回または複数回リレーしてもよいことに留意されたい。例えば、中間の波面リレー平面において波面を小さいサイズまで横方向に縮小し、ビームスキャナを中間波面リレー平面よりさらに後方に位置決めすることによって横方向スキャンを引き続き実現し、次に、次の波面リレーステージにおいて、サンプリングに望ましい波面サイズまで波面を拡大してもよい。

【0060】

より重要な点として、大きな眼ジオプトリージ測定レンジについて、第二フーリエ変換面において波面ビーム幅が十分に小さくなって斜角の波面シフティング装置またはビームスキャナによって完全に遮られるように、第二ステージの波面リレーに使われるレンズの焦点距離を選択してもよい。その結果、第二または後続のフーリエ変換面における斜角スキャンは、最終波面像平面における波面の横方向シフトをもたらし、DC波面チルトの問題が解決される。

【0061】

10

20

30

40

50

図7に、例示的波面センサモジュールにおいて使われている、カスケード化された2ステージ4-F波面リレーまたは8-F波面リレーの、ビーム路が折返されていない態様を示す。この態様において、波面ビーム幅が（望ましい眼ジオプトリー測定レンジのすべてにわたって）、ビームスキャナ712によって完全に遮られるレンジ内に保たれる第二フーリエ変換面Cまたはその周囲で波面ビームを斜角的にスキャンすることによって、シーケンシャルな横方向の波面シフティングが実現される。

【0062】

第一4-F波面リレーステージは図1のものと同じであることに留意されたい。図7の実施例において、第二4-F波面リレーステージは、焦点距離が同じ8 mmでかつ直径が同じ8 mmである第一および第二レンズ740および742を使って実現されている。後述するように、焦点距離が異なるレンズもまた第二ステージに使われてもよいことに留意されたい。図7の実施例において、カスケード化された2つの波面リレーステージは具合よく接続されているが、このことは、精密なカスケード化が絶対的に必要であることを意味しない。

【0063】

図7に示されているように、波面像平面Bにおける第一波面リレーの後、波面ビーム幅は2.5倍の倍率で縮小されるが、ビームの発散および/または収束のレンジは前述のように2.5倍増大する。第二4-Fリレーステージの第一レンズの焦点距離が短く（8 mm）かつ開口数（NA）が比較的大きいことにより、第二フーリエ変換面Cでは第一フーリエ変換面Aより波面ビーム幅ははるかに小さくなる。したがって、透過式の斜角ビームスキャナ712を第二フーリエ変換面Cにアレンジして、波面ビームを完全に遮ることができる。第二フーリエ変換面Cにおいて波面ビームを斜角的にスキャンすることにより、第二波面像平面Dにおける波面像は、DC波面チルトの導入を伴うことなく横方向にシフトされる。第二波面像平面Dにおいて、横方向にシフトされた波面は、前述のように波面サンプリングアパーチャ718によってサンプリングされてもよく、そしてサブ波面集束レンズ720によって位置検知装置（PSD）722上に集束されてもよい。

【0064】

第二フーリエ変換面における波面ビーム幅が確実に小さくなるよう、第二4-Fリレーの第一レンズ740として使われるレンズは、当業者に周知であるように、焦点距離が比較的短く、かつ開口数（NA）またはビーム円錐受光角が比較的大きい必要がある。

【0065】

図8に、第二波面像平面Dにおける横方向の波面シフティングを実現するため、単一のレンズ840が2回使われ、かつ、反射式ビームスキャナ812、偏光ビームスプリッタ（PBS）806、および四分の一波長板（1/4 プレート）808と組み合わせられている、第二ステージ4-F波面リレーの1つの態様を示した図である。図8に見られるように、平面Bにおける第一波面像の波面ビーム直径が2.0 mmならば、第二ステージ4-F波面リレーに焦点距離8 mmのレンズ840を使うことにより、薄いレンズの結像式を使って見出されるように、眼からの+30Dの波面ビームの場合、第二フーリエ変換面Cにおける波面ビーム幅は3.0 mmである。事実、眼からの波面がジオプトリー値-30Dという高度の近視波面であっても、第二フーリエ変換面におけるビーム幅はやはり3.0 mmであり、この理由は単純に、第二フーリエ変換面Cにおけるビーム幅が第一波面像平面Bにおける波面チルトの角度分布に直接依存するからであり、+30Dおよび-30Dの波面は、第一波面像平面Bに結像されるとき、1つは収束性で他方は発散性であるもの、いずれも同じ角度分布を有するからである。ゆえに、図8に示す設計は、+30D~-30Dの眼ジオプトリー測定レンジをカバーできる。

【0066】

平面C（第二フーリエ変換面）におけるこの直径3.0 mmのビームは、例えば、MEMS（微小電気機械システム）式の斜角ビームスキャナ812によって反射されて、焦点距離8 mmの同じレンズ840を再度通るように戻されてもよい。四分の一波長板808およびPBS 806を使用することにより、戻り路でPBS 806に到達したときの波面ビームの偏光は、90度回転して元の偏光方向に対し垂直になっており、ゆえにこのビームは横に（図8において下向きに）反射される。望ましいサブ波面をサンプリングするため、（PBSがガラスキューブ

であればさらに押されて離れている可能性がある)第二波面像平面Dに、波面サンプリングアパーチャ818が置かれてもよい。サンプリングされたサブ波面は、前述のように、サブ波面集束レンズ820を通過して位置検知検出器(PSD)822に到着してもよい。

【0067】

図8において、MEMSスキャナの反射面は入射波面ビームの光軸に対して直角であるように示されており、したがって波面の中央部分のみが波面サンプリングアパーチャ818によってサンプリングされることに留意されたい。中央部分をサンプリングしているため、正視波面、遠視波面、および近視波面について、サンプリングされるサブ波面の平均チルトはサブ波面集束レンズ820の光軸に対して直角であり、したがって、位置検知検出器822に到着する像スポットは、これらの各ケースで像スポットサイズが異なっても、良好にセンタリングされる。換言すると、眼からの波面の中央部分のみがサンプリングされる場合、位置検知検出器822上の図心位置は、これら3つのケースで同じである。

10

【0068】

MEMSスキャナは、平面Dにおけるリレー波面像が、DC波面チルトオフセットを伴わずに横方向にシフトされるよう、入射波面ビームを斜角的にスキャンできるものとして解釈されるべきであり、図9にそのようなケースを示す。このケースにおいて、サンプリングアパーチャ918によりサンプリングされた正視波面は位置検知検出器(PSD)922に対してセンタリングされたままであるが、遠視波面および近視波面については、中心から離れ、かつ互いに反対側にあることに注意されたい。この最終的な結果は、大きなビーム相互作用ウィンドウを有するスキャナを使って第一フーリエ変換面Aにおいて波面ビームを斜角スキャンした場合(リレーされた第一波面像平面Bにおいて波面の横方向シフトが生じる)と基本的に同じである。異なるのは、ここではビーム相互作用ウィンドウがはるかに小さいスキャナが使われてもよいことである。

20

【0069】

図8および図9の光学構成に伴う1つの問題は、PBSおよび四分の一波長板が、追加の望ましくない反射および光エネルギー損失をもたらす可能性があることである。さらに、PBSは大きな入射角許容レンジを有する必要があるが、これは、(標準的なPBSより光エネルギー効率が低い)ワイヤグリッド式のPBSを使うべきである可能性が非常に高いことを意味する。さらに、四分の一波長板もまた、ビーム入射角についてより広いレンジをカバーし、かつ、スーパーミネッセントダイオード(SLD)光源のケースなどでは波面ビームのスペクトル幅についてもより広いレンジをカバーするため、ゼロオーダーのものである必要がある可能性が非常に高い。

30

【0070】

図10に第二4-F波面リレーステージの代替的態様を示す。この態様において、波面ビームは後ろ向きに反射されてスキャンされるのではなく、反射された波面ビームが第二4-Fリレーの第一レンズ1040に当たらない限りにおいて、斜め横の様式で反射およびスキャンされる。このとき、反射された波面ビームと入射波面ビームとの間の角度は、MEMSスキャナ1012の表面積要件を小さくするため比較的小さく保たれてもよいが、45°など別の角度も使われてもよい。加えて、第二4-Fリレーの第二レンズ1042の焦点距離は、第二4-Fリレーの第一レンズ1040の焦点距離より大きい。

40

【0071】

このアレンジには多数の利点がある。第一の利点は、図8および図9と比較してPBSおよび四分の一波長板の必要性がないことであり、その結果、光エネルギー損失および望ましくない反射に関連する問題が解決される。第二4-Fリレーに使われる第一および第二レンズ1040および1042は、SLD光源の比較的狭いスペクトルレンジに対応するよう、光学的な反射防止コーティングが施されていてもよい。このことは、構成要素コストの実質的な節約ももたらす。第二の利点は、第二波面像リレー平面Dにおいて望ましいビーム幅のリレー波面像が生じるように、この第二4-Fリレーの第二レンズ1042の焦点距離が好みによって選択されてもよいことである。

【0072】

50

ゆえに、第一4-Fリレーの第二レンズの焦点距離および第二4-Fリレーの第一レンズ1040の焦点距離の選択に関して、眼ジオプत्री測定レンジに対する望ましい波面ビーム幅レンジ、ならびに、波面センサモジュールの製造に必要なアライメントおよび/またはアセンブリ精度を制御および/または実現するという点において、さらなる最適化の機会が存在しうる。第三の利点は、反射された波面ビームと入射波面との間の角度を比較的小さく保つことにより、反射スキャン鏡面に到着する波面ビームサイズも比較的小さく保てることである。第四の利点は、斜角スキャンが第二フーリエ変換面で行われるため、前述のように波面チルトDCオフセットが生じないことである。図8および図9の態様と比較した第五の利点は、光学素子/構成要素の位置が互いに近すぎないことであり、その結果、それらをマウントするための機械設計はるかに容易になり、制約が少なくなる。

10

【0073】

図10に見られるように、正視、遠視、および近視の3つのケースについて、第二波面像平面Dで波面がシフトされると、サンプリングされた波面は、位置検知検出器1022上に集束された後、図9のケースと非常に同じように振る舞う。換言すると、サンプリングアパーチャによりサンプリングされた正視波面は位置検知検出器に対してセンタリングされたままであるが、遠視波面および近視波面は中心から離れ、かつ互いに反対側になる。

【0074】

図10の態様の1つの短所は、MEMSスキャナ1012のスキャン駆動パターンが図9の態様と比較してやや複雑になりうることである。MEMSミラースキャンへの反応による波面の横方向シフトは異なる可能性がある。スキャン角度レンジが大きい場合は、この反応を直線関係で近似できるが、結果的に円形スキャンを得るためには円形スキャンの代わりに楕円の駆動信号が必要となる可能性がある。一方、斜角スキャンレンジが大きい場合は、反応が非線形になる可能性があり、最終的に良好な円形スキャンを得るために駆動信号に変更を加える必要が生じる可能性がある。あるいは、波面情報を抽出するため、他のスキャンパターンが使われてもよく、かつソフトウェアのデータ処理が用いられてもよい。

20

【0075】

第二または後続のフーリエ変換面において波面スキャン動作が行われる場合、波面ビーム幅は第一フーリエ変換面のそれよりはるかに小さくなりうることに留意されたい。したがって、図7~図10で説明したことに加えて、前述のように他の斜角ビームスキャン手段を使って最終波面像平面において波面シフティングを実現することもまた現実的である。1つの好例は、第二フーリエ変換面Cにおいて小さな回転式光学くさびを使って波面の輪状サンプリングを実現することである。

30

【0076】

この点において、波面リレーステージが2つ以上であるアプローチが取られる場合、リレーステージは良好に相互接続するか、互いにわずかにオーバーラップするか、または互いにわずかに離れるように作られていてもよいことに留意されたい。たとえ波面が厳密にリレーされない場合でもキャリブレーションにより差異に対応できるため、システムは機能する。加えて、波面リレーステージが複数ある場合は、占有されていない1つまたは複数の波面像平面が存在するため、中間波面リレー平面に可変焦点レンズが置かれてもよく、これにより、波面の球面ジオプत्री値を動的に変化させて球面ジオプत्री値の大きなDCオフセットを補償するかかつ/または波面センサのジオプत्री測定ダイナミックレンジをさらに向上させることができる。あるいは、集束パワーが異なる(正および負の両方の)比較的小さな複数のレンズを1つまたは複数の波面像平面に投入して、球面ジオプत्री補償を実現するかまたは波面センサのジオプत्री測定ダイナミックレンジを向上させてもよい。

40

【0077】

波面シフトまたはビームスキャナのほか、他の光学素子についても好ましい選択が存在することに留意されたい。例えば、患者の眼からの波面ビームが高度に発散性または収束性である場合は、図2および図7に示されているように、第一ステージ4-Fリレーの第一および第二レンズにビームが当たるときにビーム幅が大きくなることを先に述べた。このケ

50

ースにおいて、第一ステージ4-Fリレーの第一および第二レンズとして球面レンズが使われているならば、これらのレンズ、特に焦点距離が比較的短い第二レンズによって球面収差が導入される可能性がある。本開示の1つの特徴として、球面レンズの使用によって導入される球面収差を実質的に低減できるように、光学波面リレーシステムに1つもしくは複数の非球面レンズおよび/または球面収差補償プレートが使われてもよい。具体的には、第一ステージ4-Fリレーの第二レンズが平凸の非球面レンズならば、好ましくは第一ステージ4-Fリレーの第一レンズに向く前面が凸面で、後面が平面である。この理由は、患者の眼からの波面ビームが高度に発散性または収束性である場合のみ、第一ステージ4-Fリレーの2つのレンズに到達したときの波面ビームは幅広になり、2つのレンズを通過する周辺部の光線が球面収差低減のための補正を必要とするからである。一方、患者の眼からのビームが正視に近い場合、ビームは狭くなり、したがって2つのレンズの中央部または近軸部としか相互作用せず、実質的な球面収差は生じない。同じ議論は第二ステージにも適用できる。

10

20

30

40

50

【0078】

同じく、図2および図7に示される波面リレーシステムは、設計上の距離に厳密に位置決めされていない患者の眼についても機能しうることに留意されたい。眼の位置が特定のレンジ内にあり、かつ例えば低コヒーレンス干渉式の測定などによって既知であり、かつ、眼ジオプトリー値の関数としてのシステム出力の応答が単調である限り、キャリブレーションされた関係を実際の眼の位置に対して使うことで眼の波面収差を求めることができる。換言すると、眼位置の許容レンジは、意図される眼の屈折のジオプトリーレンジにわたって、設計上の作業距離における有効波面が特異点を過ぎないようなレンジであるべきである。

【0079】

この点を示すため、患者の眼が第一レンズから200 mmではなく150 mmのところにいるケースを考える。患者の眼がジオプトリー値+20Dの遠視であるならば、これは事実上、眼の瞳孔面から50 mm後方に位置する点光源、または第一4-Fリレーの第一レンズから200 mmに位置する、すなわちこの第一レンズの物体平面に位置する点光源と等価である。ゆえに、この点光源は波面像平面にも点光源としてリレーされ、適切なサンプリングができない。この特異点を過ぎると、発散性の眼の波面（例えばジオプトリー値+25Dの遠視波面）は、第一4-Fリレーの第一レンズの物体平面とこの第一レンズとの間の軸レンジ内に位置する点光源によく対応し、このことは、設計上の距離である、この第一レンズから200 mmの物体平面軸位置において、有効波面が収束性になることを意味する。この結果、システム出力は単調でなくなる。この問題を解消する1つの代替として、眼距離が眼位置の制限レンジ外であることが見出された場合、設計上の眼ジオプトリーレンジにわたってシステム応答が単調のままとなるよう、追加のレンズまたはレンズの組み合わせを4-Fリレーシステムに投入してもよい。1つまたは複数のレンズを既存のモジュールに投入することは、異なるモジュールを設計および製作するよりはるかにコストが少なくすむため、このアプローチは製造にも恩典をもたらす。

【0080】

同じく、波面サンプリングアパーチャは厳密に最終波面像平面に位置していなくてもよいことに留意されたい。波面サンプリングアパーチャの軸位置にわずかなオフセットがある場合は、眼からの発散波面または収束波面に関して、同じサンプリングアパーチャサイズでサンプリングされる眼波面の空間サイズが、正視波面のケースと比べてわずかに異なる。眼の球面および円柱の屈折異常だけを決定する場合、空間サンプリングサイズの不整合の問題はキャリブレーションで解消できる。一方、サンプリングアパーチャは故意に軸方向に動的に可動にされていてもよく、これにより、設計上の物体平面に眼が位置している場合にサンプリングアパーチャが確実に波面像平面にあるようにするだけでなく、設計上の物体平面に眼が位置していない状況に対応し、同じアパーチャサイズで同じサイズのサブ波面がサンプリングされるようにサンプリングアパーチャの軸位置を調整することもできる。

【 0 0 8 1 】

図11に、波面センサモジュール内で波面ビーム路が折返されている、1ステージ式4-Fリレーの態様を示す。この態様において、波面ビーム路は第一および第二ミラー1150および1152（ミラー1およびミラー2）により折返されてモジュールをコンパクトにしており、MEMSスキャンミラー1112は、図6について説明したように、波面をシフトさせるため小さな偏光ビームスプリッタ（PBS 2）1106および四分の一波長板1108と組み合わされている。

【 0 0 8 2 】

MEMSスキャンミラー1112を使って波面ビームを（直接横に偏向させてスキャンするのではなく）後ろ向きに反射しかつ該ビームを光軸周囲でスキャンすることによって、スキャンは回転対称になり、かつその結果、横方向シフトされた波面が波面サンプリングアパーチャ1118によりサンプリングされてサブ波面集束レンズ1120により位置検知検出器1122上で集束された際に、波面収差、特に球面ジオプトリー値、円柱ジオプトリー値、および円柱軸を求めるために必要なアルゴリズムおよびデータ処理ソフトウェアは、きわめてシンプルかつ高速になることに留意されたい。

【 0 0 8 3 】

図11には、折返された波面ビーム路に加えて、前眼部の結像用である第一ビーム路1154、固視ターゲットを眼に向けるための第二ビーム路1156、および、眼から波面ビームを作り出すためスーパーミネッセントダイオード（SLD）ビームを眼に発射する第三ビーム路1158というさらに3つのビーム路が示されている。

【 0 0 8 4 】

図11に見られるように、光の少なくとも一部そしてより好ましくは可視光の大部分（および可能性として近赤外の一部）を反射し、かつ、SLDスペクトルレンジの近赤外光を実質的にまたはより好ましくは完全に透過させるため、ダイクロイック式またはロングパス式のビームスプリッタ1160が使われてもよい。望ましい眼ジオプトリー測定レンジにわたる眼からの波面がウィンドウの縁部で乱されることなく完全に遮られるよう、ダイクロイック式またはロングパス式のビームスプリッタ1160は、十分大きな光インターセプト用ウィンドウを有するべきである。ダイクロイック式またはロングパス式のビームスプリッタの反射は2つの機能を担う。1つは、手術用顕微鏡などの照明光源または室内灯もしくは他の追加の照明光により生じる眼からの光の可視スペクトル部分を画像センサ1162に向けることで、これにより、眼を波面センサモジュールにアライメントする際に臨床医を助けるなど、さまざまな目的のためにライブの瞳孔イメージを表示することが可能になる。もう1つの機能は、必要であれば眼が固視用のターゲットを持てるように、可視である固視ターゲット1164の像を眼に向けることである。

【 0 0 8 5 】

波面センサモジュール内の反射光ビーム路のさらに先には、固視ターゲットに関連する光ビームおよび画像センサに関連する光ビームを分ける／組み合わせる機能を担う、小さなビームスプリッタ1166がある。この小さなビームスプリッタ1166はさまざまなスペクトル特性のものであってよく、例えば、可視スペクトルレンジで動作するように設計された単純な50:50広帯域ビームスプリッタであってもよい。しかし、光学効率をより良くするため、固視光源1164のスペクトル幅が比較的狭いならば、固視光の良好な反射を可能にしかつ残りのスペクトルを画像センサ1162まで透過させるため、この小さなビームスプリッタ1166の反射スペクトルが固視光源スペクトルに一致するようにされてもよい。しかし（図12に示すように）固視ターゲット1164および画像センサ1162の位置は入れ替えられてもよく、したがって、小さなビームスプリッタ1166の反射および透過のスペクトル特性もまた変更されてもよい。

【 0 0 8 6 】

画像センサの前のレンズ（レンズ1）1168は、ディスプレイ（図には示していない）上に患者の眼の前眼部のライブ画像を示すため、望ましい光学拡大を提供するように設計されている。このレンズは、鮮明な瞳孔画像が得られるよう画像センサ平面が瞳孔平面と共役（conjugate）するように、必要であればフォーカスを調整するのに

10

20

30

40

50

使われるダイナミックレンズであってもよい。このレンズはまた、臨床医/術者が所望に応じて倍率を変更するのに使用できるよう、ズームレンズであってもよい。固視ターゲットの前のレンズ(レンズ2)1170は、正しいサイズおよび明るさの快適な固視ターゲットを患者の眼に提供するように設計されていてもよい。このレンズはまた、固視ターゲットが眼の網膜とコンジュゲートするように、または、臨床医/術者の必要に応じて眼を異なる距離に固視させるかもしくは眼にフォグをかけるため、フォーカスの調整に使われてもよい。固視光源1164は、例えば手術用顕微鏡の照明光などと区別するため、フラッシュもしくは明滅するか、または望ましいレートで色が変化してもよい。固視光源の色もまた変化してもよい。固視ターゲット1164は、光源により背面照明した気球などの画像か、または臨床医/術者の所望に応じて表示パターンまたはスポットが可変であるマイクロディスプレイであってもよい。加えて、マイクロディスプレイ式の固視ターゲットはまた、眼の収差マップの2Dアレイを生成できるよう、異なる方向を見るように患者をガイドするために使われてもよく、この2Dアレイは、患者の非中心視または周辺視の視力の評価に使われてもよい。

10

20

30

40

50

【0087】

固視ターゲット、前眼部画像、および/または他のデータはまた、顕微鏡に送り戻され、接眼レンズを介して見えるようにされてもよい(これはいずれの光学構成にも示されていない)。この情報は、一連のレンズを介するか、または顕微鏡もしくは生体顕微鏡の作業距離と同一平面内である物理的距離を介して、ダイクロイックまたはビームスプリッタによって、観察者の視線と同軸上に投影される。

【0088】

画像センサ1162は白黒またはカラーのCMOS/CCD画像センサであってもよく、固視光源は、異なる背景光条件に基づいて出力光パワーを動的におよび/または手動で制御できる赤色または緑色の発光ダイオード(LED)であってもよい。例えば、手術用顕微鏡からの比較的強い照明ビームが点灯されている場合は、患者が固視ターゲットを容易に見つけてそれを固視できるよう、固視光源の明るさが増大されてもよい。前眼部のライブ画像の被写界深度を制御するため、可変式の絞りまたはアパーチャ(図11には示されていない)もまたレンズ1168の前または後ろにアレンジされていてもよい。アパーチャサイズを動的に変更することにより、眼が軸方向に動いて設計上の距離から外れた場合のぼやけの程度を制御でき、そして、絞りまたはアパーチャのサイズの関数としての、ぼやけと眼の軸上の位置との関係を、眼の軸距離を決定するための信号として使うことができる。代替として、眼距離はまた、2つ以上の近赤外照明光源が角膜で反射された近赤外像スポットを使用する三角測量などの周知の手段によって測定されてもよく、以下に開示するような、低コヒーレンス干渉法に基づく眼距離測定もまた用いられてもよい。

【0089】

画像センサ信号は、ライブの瞳孔画像を提供することに加えて、他の目的にも使われてもよい。例えば、ライブ画像はヘッドアップディスプレイに表示されてもよく、または、細隙灯顕微鏡もしくは手術用顕微鏡の接眼レンズに組み込まれた半透明マイクロディスプレイに表示されてもよい。

【0090】

ライブ画像は、瞳孔のサイズおよび横方向位置の検出に使われてもよい。瞳孔サイズが小さいことが見出された場合は、それに応じて波面サンプリング領域が小さくされてもよい。換言すると、自動的および/もしくは動的な調整、ならびに/または瞳孔サイズに応じた波面検知領域の倍率変更を行うためか、または、眼ジオプトリー測定のダイナミックレンズを拡大/縮小もしくは制御するために、瞳孔サイズ情報が閉ループ様式で使われてもよい。

【0091】

瞳孔が十分にセンタリングされていないことが見出された場合は、瞳孔の横方向オフセット量を使って、そのような瞳孔位置オフセットによって導入される測定波面誤差を補償してもよい。加えて、例えば鏡面反射されて角膜から戻ってきたSLDビームが波面センサ

の位置検知装置 / 検出器 (PSD) に入ることを防ぐなどのため、SLDビームが常に設計上の同じ角膜位置から角膜に入るよう、瞳孔に追従するようにSLDビームをスキャンさせてもよい。入射SLDビームはまた、眼をセンタリングするためか、SLDビームを瞳孔の中心から意図的にオフセットさせるためか、またはSLDビームに対する眼の位置を決定するためのフィードバック / ガイダンスを提供するために、画像センサによって撮像されてもよい。波面サンプリング用の波面ビームシフタ / スキャナもまた、瞳孔の動きに追従するための適切なオフセットを備えるようにチューニングされてもよい。さらに、眼が水で灌流されているかもしくは光学バブル (optical bubble) が存在すること、または、眼瞼が光路内にあるか、顔の皮膚、術者の手、手術用のツールもしくは機器が画像センサの視野内にあり波面ビーム路をブロックしていることが見出された場合は、「ダーク」または「ブライ

10

【0092】

画像センサはまた、波面センサモジュールからの眼距離を決定するため、固視ターゲットと組み合わせられかつこれとタンデムで機能してもよい。画像センサによりキャプチャされたPurkinje像もまた、鏡像の原理に基づいて有効レンズ位置 (ELP) を決定するために使われてもよい。画像センサはまた、「眼トラッカー」として、キャリブレーション / アライメントに対する屈折波面エネルギーシフトに関連して、波面センサとともに機能してもよい。

【0093】

さらに、波面センサは、眼が乾いているかどうかを見出すために使われてもよく、そして眼をいつ灌流するかを知らせるため術者または臨床医にビデオ信号またはオーディオ信号の形態でリマインダが送られてもよい。さらに、画像センサからの信号はまた、患者の眼が有水晶体、無水晶体、または偽水晶体の状態にあるかを同定するために使われてもよく、かつこれに応じて、必要な期間のみSLDパルスがオンにされてもよく、または他の変数、コントロール、もしくは計量が行われてもよい。これらのアプローチは患者のSLDビームへの全曝露時間を減らすことができ、ゆえに、よりピークパワーの高いSLDパルスを使用できる可能性があり、これは波面測定 of 信号対雑音比を高めるか、フィードバック計量を向上させるか、または、ユーザーインターフェース / ディスプレイを介したユーザー入力フィールドの特徴の実施を可能にする。

20

30

【0094】

図11において、大きなサイズの偏光ビームスプリッタ (PBS 1) 1174が、スーパーミネソタダイオード (SLD) ビームを患者の眼に発射するために使われている。大きなウィンドウサイズを使う理由は、望ましい大きなジオプトリーレンジにわたる眼からの波面ビームが、PBSにより部分的に遮られるのではなく完全に遮られるようにするためである。この態様において、SLD 1172からのビームは、PBS 1174によって実質的に完全に反射され、そして眼に発射されて眼波面を生成するように、s偏光している。

【0095】

SLDビームは、ビームが角膜平面から眼に入るとき、角膜平面においてコリメートされているかまたは (発散性もしくは収束性に) 集束もしくは部分的に集束されているように、あらかじめ形づくられるかまたは操作されていてもよい。SLDビームは、小さな像スポットとして網膜に到着する場合、反射および / または散乱される。または、ビームが既定の形状を有する場合、反射の幾何学形状もしくは幾何学形状の変化が評価されてもよい。本開示の1つの局面として、SLDビームはまた、患者用の固視ターゲットとして直接使われてもよい。こうして生成される戻りの波面ビームは、もとの偏光および直交する偏光の両方を有する。当業者に周知であるように、眼科用の波面センサ用途では、通常、直交偏光の波面ビームのみが眼波面測定に使われる。その理由は、もとの偏光方向においては、角膜および水晶体 / 眼内レンズ (IOL) からの比較的強い反射SLD光波が存在する可能性があり、これは波面測定に重大な誤差をもたらす可能性があるからである。したがって、大きな偏光ビームスプリッタ1174の別の機能は、直交偏光した波面ビームのみを通過させ、

40

50

かつ、もとの方向に偏光している戻り波面ビームを、吸収されるかまたは後述する他の目的に使用されるよう横に向けることであり、後述する他の目的としては例えば、波面センサモジュールに戻っている、角膜または水晶体によるSLDの鏡面反射があるかをモニタすることなどがある。

【0096】

図11において、可視光および/または環境背景光を除去し、かつ、SLD 1172が生成する波面ビーム光の比較的狭い望ましいスペクトルのみが波面センサモジュールの他の部分に入ることを許容するため、大きな偏光ビームスプリッタ1174の後に帯域通過フィルタ1176がアレンジされている。

【0097】

ダイクロイック式またはロングパス式のビームスプリッタ1160、大きなサイズの偏光ビームスプリッタ (PBS 1) 1174、および帯域通過フィルタ1176は、波面ビーム路に沿った任意の場所にアレンジされていてよいことに留意されたい。しかし、偏光ビームスプリッタ1174がキューブ型PBSである場合は特にそうであるが、偏光ビームスプリッタ1174によるSLDビームの反射によって散乱SLD光が生じることがあり、ライブの瞳孔像上にこの散乱SLD光が結像されることを、大きなサイズの偏光ビームスプリッタ (PBS 1) の前にダイクロイック式またはロングパス式のビームスプリッタをアレンジすることによって回避できる。加えて、ダイクロイック式またはロングパス式のビームスプリッタ1160、大きなサイズの偏光ビームスプリッタ1174、および帯域通過フィルタ1176を第一波面リレーレンズ1104と第二波面リレーレンズ1116との間にアレンジすることにより、望ましい眼ジオプトリレーンズにわたる波面ビームの入射角はより小さいレンジ内になり、ゆえにこれらすべての光学構成要素は標準的なコーティングによってより良好に機能して望ましい性能を提供できる。

【0098】

波面センサモジュールの光学構成にはバリエーションが存在しうる。図11において、本発明者らは、SLDビームが静止していることを示した。しかし、SLDビームは、追加の利点を提供するためスキャンされてもよい。図12に、4-F波面リレーステージが2つある波面センサモジュールの別の態様を示す。この態様において、図11において波面ビームを曲げるために使われている1つのミラー (ミラー1、すなわち1150) は除去されて大きな偏光ビームスプリッタ (PBS 1) 1274で置換されており、SLDビームはこのPBS 1274の後ろから発射されていることに注意されたい。加えて、SLDビームは、マイナーな眼の動きに追従するように、および/または、角膜の異なる位置に到着するかかつ/もしくは網膜上の小さなスキャン領域に到着するようにスキャンされる。この態様では、狭帯域フィルタ1276が、偏光ビームスプリッタ (PBS 1) 1274と次のビーム折返しミラー (ミラー2) 1252との間にアレンジされていることにも注意されたい。図示されているのは1つのみであるが、図7、図8、図9、および図10において説明した第二ステージ4-F波面リレーのうち任意のものが図12に用いられてよいことに留意されたい。

【0099】

図12に示されているように、SLDビームは大きな偏光ビームスプリッタ (PBS 1) 1274の後ろから発射されるため、発射されて眼に伝搬するSLDビームはPBS 1274に対してp偏光している。その結果、眼波面測定のための直交偏光した波面ビームはPBS 1274に対してs偏光しており、このビームは大きな偏光ビームスプリッタ (PBS 1) 1274によって反射される。したがって、図12に示されているように、小さい偏光ビームスプリッタ (PBS 2) 1206、関連する四分の一波長板1208、波面サンプリングアパーチャ1218、サブ波面集束レンズ1220、および位置検知検出器 (PSD) 1222の配向および/または位置にも、これに応じた変更が必要になる。

【0100】

動作の1つの実施例において、SLDビームが常に望ましい角膜位置から眼に入りかつ (特定の眼の動きのレンジ内の) 眼の動きの結果として虹彩によって部分的または完全にブロックされることがないようにするため、スキャナ位置が正視眼の網膜とコンジュゲートす

10

20

30

40

50

るように、図12に示されるSLDビームスキャン用の角膜スキャンミラー1180が、第一4-Fリレー1204の第一レンズの後方焦点面に位置決めされていてもよい。このケースにおいて、角膜スキャンミラー1280の斜角スキャンは、角膜に対してSLDビームの横方向スキャンを生じさせるが、なおかつ同じ網膜位置にSLDビームが到着することを許容する。画像センサがキャプチャした瞳孔のライブ画像は、瞳孔の横方向位置を見出すため、および、SLDビームが眼の動きに追従できるように角膜スキャンミラー1280を駆動するフィードバック信号を提供するために使われてもよい。

【0101】

動作の別の実施例において、SLDビームが網膜上の小領域の周囲に到着しかつこれをスキャンできるよう、図12に示される網膜スキャンミラー1282が、SLDビーム形状操作作用レンズ(レンズ3)1284の後方焦点面において角膜平面とコンジュゲートするように位置決めされていてもよい。例えば(偏光保持(PM)シングルモードファイバなどの)シングルモード光ファイバ1288などの出力ポートからのSLDビームを網膜スキャンミラー1282上に集束もしくはコリメートさせるかまたは形づくるため、別のレンズ1286(レンズ4)が使われてもよい。このレンズ(レンズ4)1286もまた、眼条件(例えば水晶体眼、無水晶体眼、および偽水晶体眼など)に応じた角膜または網膜上のSLDビームスポットサイズの動的制御を実現するため、動的に集束可能なレンズかまたは軸方向に可動なレンズであってもよい。

10

【0102】

網膜上の小領域にわたってSLDビームをスキャンさせることは複数の恩典を提供しうる。1つは、スポットサイズが非常に小さい場合は特にそうであるが、SLDビームが常に同じ網膜スポット領域に到着することによって生じるスペックル効果を減じることである。別の恩典は、よりピークパワーの高いパルス状SLDビームを眼に到着させて光学波面測定の実験対雑音比を高められるよう、やや大きな網膜領域にわたって光エネルギーを向けられることである。また別の恩典は、網膜の局所解剖的な不均一性によって生じる波面測定誤差を平均化して排除できるように、小さいが比較的同じである網膜領域にわたって波面測定を平均化することが可能になることである。また別の恩典は、例えばSLDビームが網膜上にスキャンされる際に波面応答を測定するなどによって、網膜の不均一性を決定できることである。

20

【0103】

角膜および網膜に対するSLDビームのスキャンは独立かつ同時に行われてもよいことに留意されたい。換言すると、2つのSLDビームスキャナは、互いに独立でありながらも、同時、同期的、または非同期的に起動されてもよい。

30

【0104】

加えて、眼の屈折手術または網膜手術を行うために眼手術用レーザービームをスキャンできるよう、治療用レーザービーム(図12には示されていない)が眼手術用光源としてSLDビームと組み合わせられて、同じ光ファイバを介するかまたは別の自由空間光ビームコンバイナを介して眼に送達されてもよく、そして、SLDビーム用と同じ1つもしくは複数のスキャナまたは他のスキャナに送達されてもよいことにも留意されたい。SLDビームと眼手術用レーザービームとは波長が異なってもよく、そして、光ファイバ式の波長分割多重化または自由空間ダイクロイックコンバイナを使って組み合わせられてもよい。可視波長を備えた同じレーザービームまたは異なるレーザービームもまた、眼を「マークする」かまたは術者を「ガイドする」ため、すなわち、術者が手術用顕微鏡を介してレーザーマークを見ることができるよう眼の上に「オーバーレイする」ために使われてもよい。

40

【0105】

眼波面測定には網膜から戻ってきて直交偏光を備えたビームのみが使われるが、このことは、角膜、水晶体(またはIOL)、および網膜から戻ってきた、もとの偏光を備えたビームが無用であることを意味しない。それどころか、もとの偏光を備えたこれらの戻りビームは、非常に有用な情報を提供しうる。図13に、第二4-Fリレーステージが図10について説明したものと同様である、4-F波面リレーステージが2つある別の態様を示す。図13に

50

において、もとの偏光を備えた、眼から戻ってきた光波は、波面センサモジュールからの眼距離、眼内の（自然のまたは移植された）水晶体の位置、前房深度、眼の長さ、および可能性として他の眼の解剖学的パラメータの測定に使われることに留意されたい。

【0106】

図13に見られるように、大きな偏光ビームスプリッタ（PBS 1）1374を通過する、戻ってきた光波は、光学低コヒーレンス（OLC）測定または光コヒーレンストモグラフィ（OCT）測定に典型的に用いられるように、低コヒーレンス光ファイバ干渉計構成によって集められる。SLD光の一部が波面センサモジュールに送られ、かつSLD光の別の一部が基準アーム1392に送られるよう、SLD出力ファイバ1388はシングルモード（SM）（かつ必要であれば偏光保持式（PM））であってもよく、かつ、通常のシングルモード（SM）ファイバ（または必要であればPM-SM光ファイバ）カブラ1390に接続されていてもよい。基準アーム1392の光路長は、眼の1つまたは複数の光学インターフェースから戻ってきた光の光路長に対応するものとおおまかにマッチするようにスキャンもしくは変更されてもよく、さらには切り替わられてもよい。眼の異なる部分から戻ってきた光波は、ファイバカブラ1390において、基準ファイバアーム1392を介して戻ってきた基準光波と再結合して、光学低コヒーレンス干渉を生じる。図13に示されているように、この干渉信号は検出モジュール1394により検出されてもよい。

10

【0107】

スペクトラルドメイン、掃引光源、タイムドメインなどを含め、種々のOLC/OCT構成および検出スキームが用いられてもよい。（例えば手術用顕微鏡または細隙灯生体顕微鏡などへの取り付けのために）波面センサモジュールをコンパクトに保つため、検出モジュールおよび基準アーム（ファイバケーブル、および軸方向にスキャンまたは動かされてもよい基準ミラーを含む）、さらにはSLDおよびファイバカブラさえも、波面センサモジュールハウジングの外側に位置していてもよい。こうすることの理由は、検出モジュール、基準アーム、および/またはSLD光源は、OLC/OCT動作に使われるスキームによってはかさばる可能性があるからである。例えば、US7815310に述べられているように平衡検波スキームが用いられる場合は、SLDファイバアームにファイバ型光サーキュレータを組み込む必要がある可能性がある。タイムドメイン検出が用いられる場合は、基準アームが光路長スキャナまたは高速スキャン式の光遅延ラインを含む必要がある可能性がある。スペクトラルドメイン検出スキームが用いられる場合は、検出モジュールが光学分光計およびラインスキャンカメラを含む必要がある可能性がある。掃引光源検出スキームが用いられる場合は、SLD光源が波長スキャナを含む必要がある可能性がある。

20

30

【0108】

動作の1つの実施例において、比較的強いOLC/OCT信号を集められるようにするため、例えば角膜、（自然または人工の）水晶体、および網膜などからの比較的強い鏡面反射を特異的に光ファイバ干渉計に戻すように角膜スキャンミラーおよび/または網膜スキャンミラーを制御して、これら眼の構成要素の光学インターフェースの軸距離を測定できるようにしてもよい。眼波面測定では鏡面反射が回避されるべきであるため、この動作は眼波面測定と逐次的に分けられてもよい。あるいは、2つの異なる波長帯が使われてもよく、かつスペクトル分離/組成が用いられてもよい。一方、鏡面反射が波面センサモジュールによって集められているかの指標としてOLC/OCT信号強度が使われてもよく、そうであるならば波面センサデータが破棄されてもよい。

40

【0109】

動作の別の実施例において、前眼部にわたって、または網膜の特定体積にわたってSLDビームがスキャンされてもよく、そして眼のさまざまな部分の解剖学的構造の測定が行われてもよい。具体的には、角膜の屈折力および/または（自然または人工の）水晶体の屈折力を決定または測定できるよう、角膜の1つまたは複数の環状リング（または放射状、らせん状、星形など他のパターン）の中心および周囲における少数のスキャンポイントとしてSLDビームを到着させてもよい。

【0110】

50

この点において、波面のシフトおよびSLDビームのスキャンに使われるビームスキャナはまた、本開示に追加の恩典をもたらすため、動的なDCオフセットを有していてもよいことに留意されたい。本発明の1つ局面として、波面のシフトおよび/またはスキャンに使われるスキャナは、スキャンされた波面ビームが波面サンプリングアパーチャに対して回転対称のままとなるよう、温度または機械振動といった環境変化の結果として光学素子に生じるアライメントずれに対する補償を提供するために使われてもよい。

【0111】

一方、位置検知検出器(PSD)上の基準点もまた、キャリブレーションによって補償された像スポット位置に関して、必要であれば調整されてもよい。サンプリングされた像スポットビームに、位置検知装置/検出器(PSD)に対する斜角のDCオフセットがある場合、これはキャリブレーションおよびデータ処理によって対応できる。

10

【0112】

画像センサからのフィードバック信号を介して特定レンジ内の瞳孔の動きに追従するため、SLDビームのスキャンに使われるスキャナを用いてもよいことに先に言及した。波面センサモジュールに対して眼が動いた場合も、波面センサモジュールに対して眼が良好にセンタリングされている場合と同じ角膜位置から同じ角度でSLDビームが眼に入るようにできるが、眼から戻ってくる波面ビームは波面センサモジュールの光軸に対して横方向にずれる。その結果、リレーされる波面もまた横方向にずれる。このケースにおいて、この変位を補償し、かつスキャンされた波面ビームが波面サンプリングアパーチャに対して回転対称のままとなるよう、波面のシフトに使われるスキャナのDCオフセットが用いられてもよい。このケースにおいて、瞳孔の横方向位置によって、サンプリングされた像スポットビームには位置検知装置/検出器(PSD)に対する斜角のDCオフセットが存在する可能性があるが、これもまたキャリブレーションおよびデータ処理によって対応可能である。

20

【0113】

画像センサ、波面センサ、鏡面反射検出器、および/または低コヒーレンス干渉計により提供される情報の組み合わせに関して、すべての情報を組み合わせて、正しいキャリブレーション曲線および/またはデータ処理アルゴリズムの自動選択を実現することが可能である。一方、データ完全性の指標、信頼性指標、白内障の不透明度の指標、または光学パブルの有無の指標が、音声、ビデオ、または他の手段により術者または臨床医に示されてもよい。組み合わせられた情報はまた、眼圧(IOP)の検出、測定、および/またはキャリブレーションに使われてもよい。組み合わせられた情報はまた、多焦点レンズなど、移植された眼内レンズ(IOL)のセンタリングおよび/またはチルトを検出および/または確認するために使われてもよい。組み合わせられた情報はまた、有水晶体、無水晶体、および偽水晶体などの眼の状態の検出に使われてもよい。水晶体または眼球系の光学媒質の光散乱度および/または不透明度を示すために波面センサ信号がOLC/OCT信号と組み合わせられてもよい。

30

【0114】

ここでも、眼の屈折手術および/または網膜手術を行うために、ならびに、光調節可能レンズのIOL度数を微調整するために、あるいは、フェムト秒レーザーを用いて行われ得るようなまたは術後に細隙灯生体顕微鏡にてLRI/AK切開術もしくはレーザーを使って行われ得るようなT切開を実施または微調整するために、眼手術用レーザービームをスキャンできるように、眼手術用光源としてのレーザー(図13には示されていない)をSLDと組み合わせ、同じ光ファイバを介してまたは別の自由空間光ビームコンバイナを介して眼に送達して、SLDビーム用と同じ1つもしくは複数のスキャナまたは他のスキャナに送達されてもよい。可視波長を備えた同じレーザービームまたは異なるレーザーもまた、眼を「マークする」かまたは術者を「ガイドする」ため、すなわち、術者がディスプレイ上にまたは手術用顕微鏡を介してレーザーマークを見ることができるよう眼または眼の像の上に「オーバーレイする」ために使われてもよい。

40

【0115】

この点において本発明者らは、本開示において、視力矯正手技に特に好適であるジオブ

50

トリレーンジの大きなシーケンシャル波面センサが開示されたと述べるができる。このシーケンシャル波面センサは、1つまたは2つ以上の波面リレーステージと、最終波面リレー像平面またはその近くに位置決めされた波面サンプリングアパーチャと、アパーチャの前または後ろのサブ波面集束レンズと、サブ波面集束レンズの後ろに位置決めされた像スポット位置検知装置と、最終波面像平面において波面を横方向にシフトさせるために波面像空間またはフーリエ変換空間のいずれかのどこかにアレンジされた波面シフティング装置（光ビームスキャナなど）とを含んでいてもよい光学波面リレーシステムを具備する。本開示の1つの局面は、入射波面の大きなジオプトリーレーンジにわたって波面ビームが波面シフティング装置により完全に遮られるように波面シフティング装置が選択および位置決めされることである。好ましくは、（たとえ眼からの入射波面が大きなジオプトリーレーンジにわたってばらついていても）波面シフティング装置空間内の特定の軸距離レンジにわたって波面ビーム幅が比較的小さく保たれ、ビームが例えばコンパクトなビームスキャナなどによって完全にシフトされるように、リレーされた波面ビームは、波面シフティング装置の領域において、横方向の寸法が縮小される。

10

20

30

40

50

【0116】

しかし、波面リレーシステムは周知の4-F波面リレー構成に限定されるべきではないことに留意されたい。波面リレーシステムは、光学波面を物体平面から像平面までリレーする機能を供する限り、任意の光学構成であってよい。例えば、3つのレンズを具備し2つの正のレンズの間に1つの負のレンズが位置決めされている、US20100208203に開示されている波面リレー構成が、本発明において1回または複数回使われてもよい。

【0117】

波面ビームは波面シフティング装置空間内で縮小されなくてもよく、比が1:1の波面リレーシステムか、さらには拡大式の波面リレーシステムであってよい。

【0118】

波面シフティング装置空間は、波面像空間またはフーリエ変換空間であってよい、波面シフティング装置が位置決めされている体積として解釈されるべきである。波面シフティング装置は、シーケンシャルな様式で波面を有効にシフトさせる機能を行う任意の装置として解釈されるべきであり、これには、すべての種類の光ビームスキャナおよびディスプレイサが含まれる。波面シフティング装置は、波面を有効に横方向にシフトさせられる限り、1つもしくは複数ある波面リレーステージの1つの波面像空間内か、または、1つもしくは複数ある波面リレーステージの1つのフーリエ変換空間内にアレンジされていてもよい。重要なのは、望ましいジオプトリーレーンジにわたる波面ビームが、確実に、波面シフティング装置により完全に遮られるようにすることである。波面シフティングは、ビーム伝搬方向を変えるかもしくはビームを横方向にずらすかのいずれかにより実現されてもよく、または、組み合わせ効果もしくは波面ビームを徐々に曲げるなどの他の手段によって実現されてもよいことに留意されたい。ビームスキャナは透過式または反射式のいずれかの性質であってよく、かつ、ビームスキャナは光ビーム斜角スキャナもしくは光ビーム横方向変位スキャナ、またはその組み合わせであってよい。

【0119】

波面サンプリングアパーチャは、固定されたアパーチャサイズを有していてもよく、または例えば0 mm~6 mmなどサイズおよび形状が調整可能な可変アパーチャであってよく、かつまた、必要であれば軸方向または横方向に動的に動くことができてもよい。アパーチャはまた、異なるサイズ、形状、または直径のドロップイン（drop-in）アパーチャであってよい。アパーチャはサブ波面集束レンズの前にアレンジされていなくてもよく、波面をサンプリングする機能を供することができる限り、波面シフティング装置より後の任意の場所にアレンジされてよい。

【0120】

サブ波面集束レンズは絶対的に必要ではなく、随意的でありうる。サブ波面集束レンズは可変焦点（または焦点距離）のレンズであってよく、さらには、眼の状態（有水晶体、無水晶体、偽水晶体など）によって焦点距離が異なる動的なドロップイン・レンズであ

ってもよい。サブ波面集束レンズはアパーチャのすぐ隣に置かれている必要はなく、例えばアパーチャにおいてサンプリングされた波面を位置検知装置／検出器（PSD）の前または後の空間内の平面までリレーするため、アパーチャの前か後のいずれかに、アパーチャから遠く離れて置かれていてもよい。ここで、Hartmann波面センサ対Hartmann Shack波面センサの場合がそうであるように、サブ波面集束レンズがなくてもシステムは機能しうることに留意されたい。必要であれば、サブ波面集束レンズの焦点は動的に変にされていてもよく、その場合は、位置検知装置／検出器に到着する像スポットを望ましいサイズに制御して入射波面をより高精度に測定できるよう、波面サンプリングアパーチャのサイズに応じてサブ波面集束レンズの焦点距離をリアルタイムで調整することができる。

【0121】

PSDは、クワドラント検出器、ラテラルエフェクト位置検知検出器、2次元検出器アレイ、直交する2つのリニア検出器アレイ、または光ビームの位置を検知できる任意の装置であってもよい。

【0122】

前述の態様について説明した光学構成および関連パラメータは実施例にすぎないことに注意されたい。現実において、波面センサモジュールが手術用顕微鏡または細隙灯生体顕微鏡と統合される場合、光学構成および光学ビーム路の折返しは、異なる要因の考慮に基づいて異なる可能性がある。

【0123】

図14に、本明細書に開示する波面センサモジュールを手術用顕微鏡14100に統合する1つの態様を示す。この態様において、第4-Fリレーの第一レンズ1404は波面センサモジュールの第一光学入力ポート部にアレンジされている。この第一レンズ1404は手術用顕微鏡14100（または細隙灯生体顕微鏡）と波面センサモジュールとにより共用される。第4-Fリレーのこの第一レンズ1404を患者の眼にできるだけ近くアレンジすることの恩恵は、この第一レンズ1404の設計上の焦点距離を4-F波面リレーの要件に対して最短にでき、したがって全体的な光路長を最短にできることである。このことと、波面ビーム路をさらに折返すこととの組み合わせにより、波面センサモジュールをコンパクトにできる。加えて、同じ直径のレンズが波面ビーム光路のさらに下流にアレンジされている場合と比べて、眼からの波面のより大きなジオプトリレンジをカバーすることができる。さらに、波面センサには光学ウィンドウをこの位置に有する必要性が常に存在するため、この第一レンズ1404は、第一波面リレーステージのウィンドウおよび第一レンズという二重の目的を担うことができる。

【0124】

図14に示されるダイクロイック式またはショートパス式のビームスプリッタ1461は、近赤外の波面ビームを波面センサモジュールの残りの部分に向けて高効率で偏向させながら、かつ可視光線のほとんどを手術用顕微鏡まで通過させるために使われる。前述のように患者の前眼部の鮮明なライブ画像を画像センサによってキャプチャできるよう、眼からの可視光線の小部分（または、SLDスペクトルレンジ外の近赤外光にさらに大きな部分があれば、そのような部分でもよい）も波面センサモジュールに向けて偏向されるように、ダイクロイック式またはショートパス式のビームスプリッタ1461が設計されていてもよい。図14に示される波面センサモジュールの残りの部分は、使われうるさまざまな光学構成候補の1つの呈示にすぎないことに留意されたい。したがって、波面センサモジュールの解釈は、前述した可能なすべての構成をカバーすべきである。

【0125】

ダイクロイック式またはショートパス式のビームスプリッタ1461の上方の補償レンズ14102は、複数の機能を満たすために使われる。第一に、手術用顕微鏡によって形成される術者に提示される術野が第4-Fリレーの第一レンズ1404の使用によって影響を受けないよう、この補償レンズ14102は、共用レンズ（第4-Fリレーの第一レンズ1404）の影響を補償するよう設計されている必要がある。第二に、補償レンズ14102はまた、埃または湿気が波面センサモジュールに入ることを防ぐために必要となりうる上部光学ウィンドウとし

10

20

30

40

50

て機能してもよい。補償レンズ14102の第三の機能は、手術用顕微鏡14100からの照明ビームが共用レンズ（第4-Fリレーの第一レンズ1404）に当たった時に共用レンズからの鏡面反射が手術用顕微鏡の2つの立体鏡の視野に戻されて術者の術野視認を妨げることがないように、この照明ビームを光軸から離れるように向けることである。最後に、補償レンズ14102はまた、光の可視スペクトルのみを透過させるようにコーティングされていてもよい。この様式において、照明光源からのSLDスペクトルに対応する照明光のUVおよび近赤外スペクトル部分は患者の眼に到着せず、したがって、波面センサモジュールに入って位置検知装置／検出器を飽和させ得るかまたはバックグラウンドノイズを生じ得る、眼から戻ってきた近赤外背景光を生じない。

【0126】

図15に示されているように、手術用顕微鏡の照明ビーム出口の直下となる補償レンズの部分が照明ビームをさらに曲げるように補償レンズ14102が特別に設計されるかまたはプリズム／ミラー15104が追加されていてもよく、かつ、照明ビームを患者の眼に向けて戻すため、下部のレンズの隣に別のプリズム15105またはミラーが追加されていてもよいことに留意されたい。

【0127】

図14および図15に示す態様において、手術用顕微鏡のものの対物レンズ14101または15101は保たれており、取り外されないことに留意されたい。しかし、代替として、手術用顕微鏡の対物レンズ14101または15101が取り外されてもよく、そしてその焦点機能が、図16に示される、4-Fリレーステージを1つのみ有する波面センサモジュールの入力ポート部の共用レンズ1604によって部分的または完全に供されていてもよい。このケースにおいて、共用レンズ1604が適切に設計されている限り、照明ビームを前述のように向けるためにプリズム部分または別個のプリズム16104が引き続き必要である可能性はあるものの、図14および図15に示される補償レンズ14102および15102さえも単純な光学ウィンドウ16106で置換できる可能性がある。したがって、補償の概念は照明ビームに対して提供される光学機能も含むべきであることから、補償レンズ14102／15102の定義は、照明ビーム曲げ部分を備えた光学ウィンドウも含むべきである。加えて、上部の光学ウィンドウもまた、光の可視スペクトルのみを透過させるようにコーティングされていてもよい。この様式において、光の近赤外スペクトル部分は患者の眼に到着せず、したがって、波面検知検出器に入って検出器を飽和させ得るかまたはバックグラウンドノイズを生じ得る、眼から戻ってきた近赤外背景光を生じない。

【0128】

この点において、図14、図15、および図16の態様において、波面センサモジュールの入力ポート部の第一レンズは共用されているため、光の可視スペクトルおよび近赤外スペクトルを両方とも通過させ、かつ好ましくは導入する追加の収差が最小である必要があることに留意されたい。このレンズのための1つの良い選択肢は、可視スペクトルおよび近赤外スペクトルを検査するよう設計された色消しレンズである。必要であれば、非球面の色消しレンズが使われてもよい。第4-Fリレーステージの第二レンズの前に狭帯域フィルタが使われてもよいことから、第二レンズおよび後続のレンズがある場合、それらのレンズはSLD光源の近赤外スペクトルレンジでのみ機能するよう設計されたレンズであってもよい。それらのレンズは非球面レンズであってもよい。

【0129】

別の代替的態様として、図14、図15、および図16に示されるダイクロイック式またはシヨートパス式のビームスプリッタ1461、1561、および1661は、図17に示されているように、4-Fリレーステージの第一レンズとして機能するように特別に作られた（SLDスペクトルのみを反射するようにコーティングされた）45°近赤外集束ミラー17108で置換されてもよい。一方でこの集束ミラーは、手術用顕微鏡のための可視スペクトルに対して透明プレートとして機能する。このケースにおいて、手術用顕微鏡17101のものの対物レンズは保たれており、上部および下部の光学ウィンドウ17110および17112は2つのガラス板で作られていてもよく、そして下部のウィンドウは顕微鏡からの照明光の鏡面反射を逸らすよう

10

20

30

40

50

にチルトされていてもよい。45°近赤外集束ミラー17108が4-Fリレーの第一レンズとして機能し、かつその軸位置が患者の眼からより遠ざけられているため、4-Fリレーの第二レンズ1716および波面センサ光学系の残りの部分はそれに応じて調整される必要がある。この態様の利点は、顕微鏡視野への影響が最小になることである。

【0130】

図18に、本明細書に開示する波面センサモジュールを手術用顕微鏡18100に統合する別の態様を示す。この態様において、SLDスペクトルの近赤外波面ビームを波面センサモジュールに向け、かつ光の可視スペクトルを手術用顕微鏡用に通過させるために、ダイクロイック式またはショートパス式のビームスプリッタ1861が使われる。ここでも、スペクトル反射された可視光線が顕微鏡の立体視野に入ることを防ぐため、下部の光学ウィンドウ18112がチルトされていてもよい。上部の光学ウィンドウ18110は、光の可視スペクトルを透過させるようにコーティングされていてもよい。4-Fリレーの第一レンズ1804は、手術用顕微鏡の照明用路および視認用路に入らない限りにおいて、機械的に可能な限り眼に近くアレンジされていてもよい。眼と4-Fリレーの第一レンズ1804との間の距離が長くなるため、4-Fリレーの第二レンズ1816および波面センサ光学系残りの部分は、前述のケースと比べてさらに後方にされる必要がある。このことにより、波面センサモジュールがよりかさばるようになるとともに、同じ眼波面ジオプトリレンジをカバーするために必要な4-Fリレーの第一レンズの直径がより大きくなる可能性がある。しかし利点は、他の態様と比べて、顕微鏡視野への影響がさらに小さくなることである。

10

20

【0131】

本発明の追加の局面として、現実の開示において、SLDビームを拡散反射してキャリブレーション波面を作り出すためにSpectralonプレートなどの拡散反射性表面が光路に投入されてもよく、このキャリブレーション波面は、SLDビームの光学アライメントおよび光学素子の光学アライメントならびにSLDビームの光パワーをチェックするために波面センサモジュールが使用できてよい。

【0132】

すべての態様において、本発明者らはSLDスペクトルが近赤外レンジにあることを述べたことに留意されたい。しかし、他のスペクトルレンジが使われてもよいことから、このことは限定として考えられるべきではない。近赤外光源はヒトの眼に見えないという点で波面検知に好適であるが、可視光線もまた、SLDビームを固視光源またはターゲットとして直接使用でき、かつ眼が可視光線のみを見るため波面測定がより正確になるという意味において好適である。

30

【0133】

同じく、波面検知および/またはOLC/OCT測定に使われる波長はスキャンまたはチューニングされてもよいことにも留意されたい。波長をチューニングまたはスキャンすることの1つの恩典は、眼の色収差も測定できることである。別の恩典は、波長をチューニングすることにより、角膜、水晶体、および硝子体、さらには網膜または脈絡膜も含む、眼組織の分光測定が行えることである。また別の恩典は、掃引光源式のOLC/OCT検出スキームを直接利用できることである。波長チューニングは、可視スペクトルレンジ全体、および必要であれば近赤外スペクトルレンジ全体も含む、大きなスペクトルレンジをカバーしてもよい。

40

【0134】

本明細書に開示する波面センサモジュールは、広範な用途のため、他のさまざまな眼科機器と組み合わせられてもよく、例えば、LASIKまたは水晶体破碎ならびに角膜切開に使われるフェムト秒レーザーまたはエキシマレーザーと統合されてもよい。眼手術の術前、術中、および術後に光学パブルまたは他の光学的不均一性が水晶体内または前房内に存在しているかを示すため、ライブ画像、OLC/OCT、および波面信号が組み合わせられてもよい。波面情報はまた、LASIK手技を閉ループ様式で直接ガイドするのに使われてもよい。

【0135】

本発明はまた、適応光学系と統合または組み合わせられてもよい。変形可能ミラー式また

50

は液晶（LC）式の透過波面補償器を用いて、波面誤差を補償するためのリアルタイム波面操作を行ってもよい。

【0136】

これらの態様はまた、光学素子、眼鏡、IOLを測定するため、および／または光学素子を作る切削／機械加工装置をガイドするために配備されてもよい。

【0137】

これらの態様はまた、細胞および／もしくは分子解析用の顕微鏡または他の計測用途に合わせて適合されてもよい。

【0138】

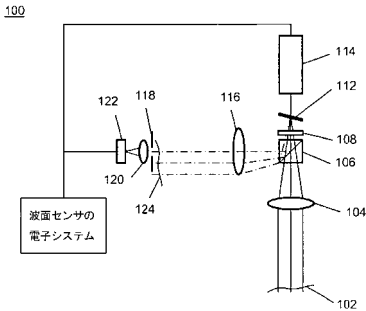
本発明はまた、レンズの製作、眼鏡の確認、微生物学用途などに使われてもよい。

10

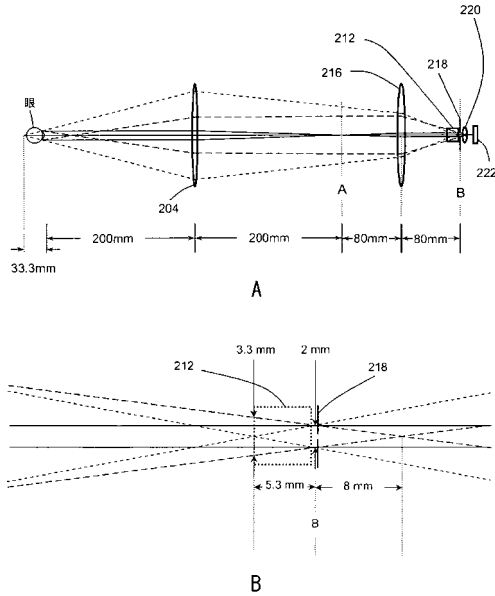
【0139】

本明細書において、本発明の教示を組み入れた種々の態様を示しかつ詳述してきたが、当業者は、これらの教示を組み入れた多数の他の種々の態様を容易に案出できる。

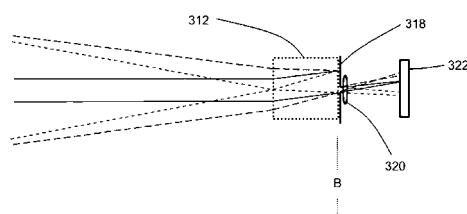
【図1】



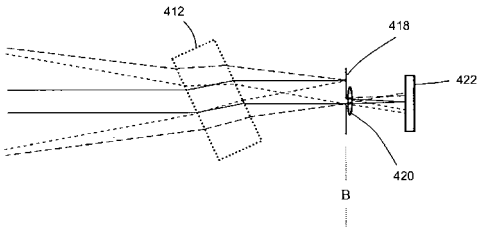
【図2】



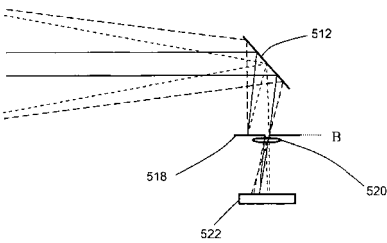
【図3】



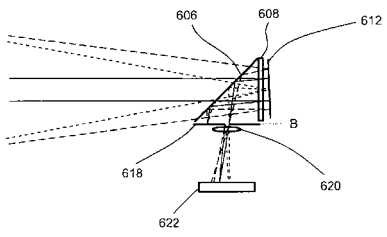
【図4】



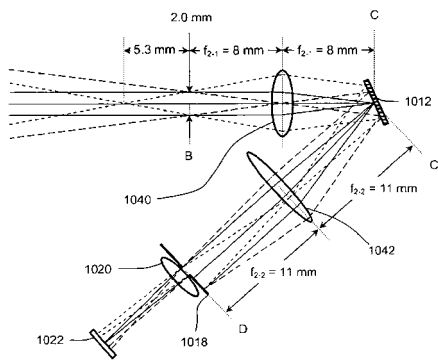
【図5】



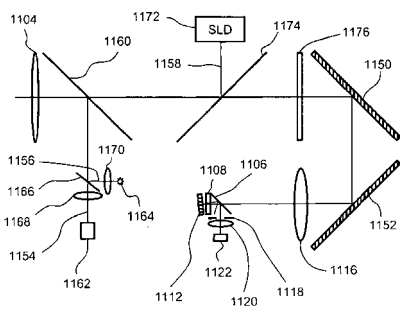
【図6】



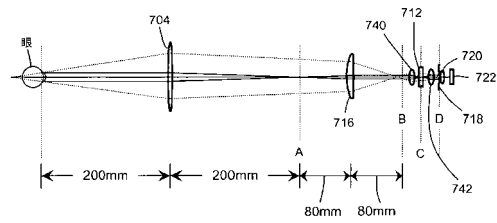
【図10】



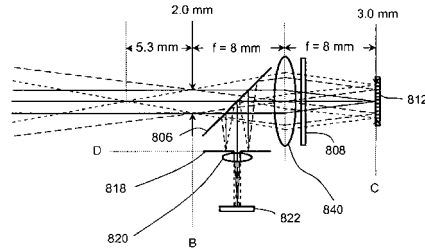
【図11】



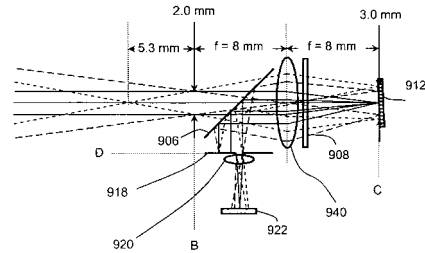
【図7】



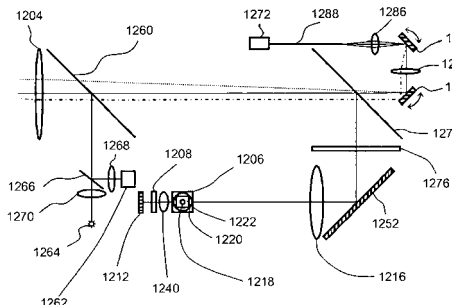
【図8】



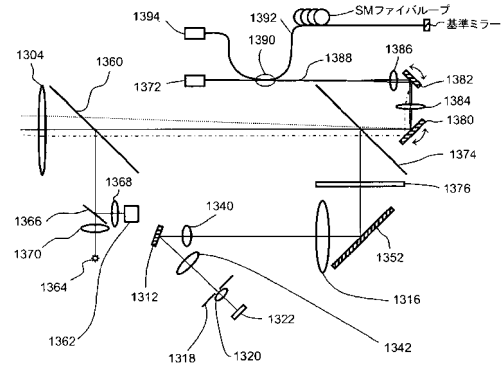
【図9】



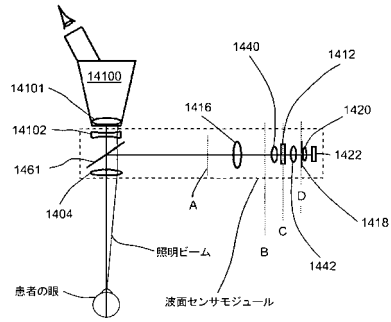
【図12】



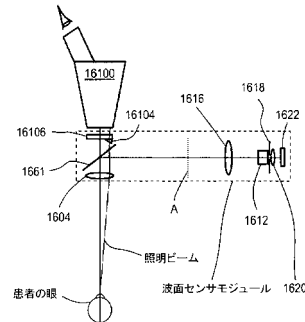
【図13】



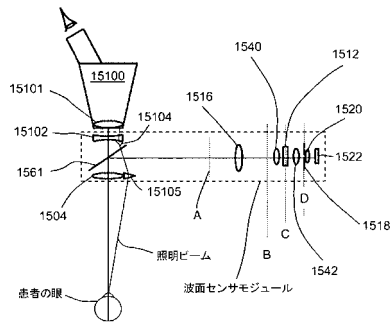
【図14】



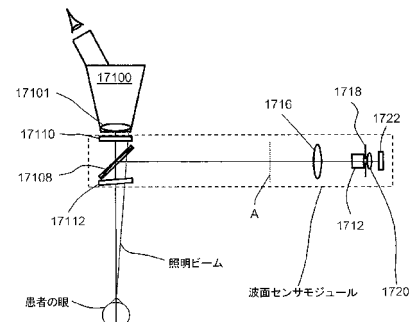
【図16】



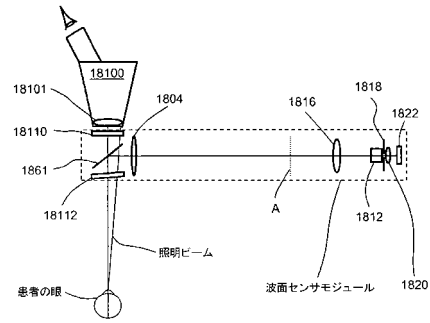
【図15】



【図17】



【図18】



【手続補正書】

【提出日】平成28年8月26日(2016.8.26)

【手続補正1】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【特許請求の範囲】

【請求項1】

直径と焦点距離と光軸とを各々が有する第一および第二レンズを含み、入射波面を第一物体空間内の第一物体平面から第一波面像空間内の第一波面像平面まで第一ビーム路に沿ってリレーするように構成された、第一光学波面リレーシステムであって、該第一および第二レンズの該焦点距離および直径が、該第一物体平面において大きなジオプトリレンジを有する入射波面リレービームを該第一波面像平面までガイドするように選択される、第一光学波面リレーシステムと；

直径と焦点距離と光軸とを各々が有する第三および第四レンズを含み、該第一波面像平面に実質的に位置する第二物体空間内の第二物体平面を有し、かつ、該入射波面を該第一波面像平面から第二波面像空間内の第二波面像平面まで第二光路に沿ってさらにリレーするように構成された、第二光学波面リレーシステムであって、該第三レンズが、該波面リレービームを該第三レンズと該第四レンズとの間に位置するフーリエ変換面までガイドするように構成されている、第二光学波面リレーシステムと；

該第三レンズと該第四レンズとの間に位置する該フーリエ変換面に実質的に配され、望ましい大きなジオプトリレンジにわたって実質的に該波面リレービーム全体を遮るため該第三レンズの該光軸に沿って位置決めされ、かつ該第二光路を反射された波面ビームが該第三レンズによって遮られることを防ぐ大きさを有する折り返し角度で折返すように配向された、反射式ビームシフティング要素と；

該第二波面像平面またはその近くに位置決めされた波面サンプリングアパーチャと；

該アパーチャの前または後に配されたサブ波面集束レンズと；

該サブ波面集束レンズおよび該サンプリングアパーチャの後ろに位置決めされた像スポット位置検知装置と

を具備する、視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項2】

該第二物体空間内の該第二物体平面に実質的に配された可変焦点レンズをさらに具備し、該可変焦点レンズは該第一物体平面および該第二波面像平面と実質的にコンジュゲートしかつ該波面が該第一物体平面から該第二波面像平面までリレーされるときに該波面の球面ジオプトリ値を動的に変化させるように構成されている、請求項1記載のジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項3】

該像スポット位置検知装置が、クワドラント像スポット位置検知装置を含み、該ジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサが、該サブ波面集束レンズと該クワドラント像スポット位置検知装置との間に位置決めされた拡散器をさらに具備し、

該サブ波面集束レンズがサブ波面を該拡散器上の像スポットに集束させ、該拡散器が、該像スポットが該クワドラント像スポット位置検知装置に到達したとき該クワドラント像スポット位置検知装置の全ての象限で共用されることを確実にするために該像スポットを大きくする、

請求項1記載のジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項4】

該クワドラント像スポット位置検知装置が4つの象限を含み、各象限に入射した該像スポットの部分の比が、遮られかつサンプリングされた入射波面ビームのチルトを示す、請

求項3記載のジオプत्रीレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項5】

直径と焦点距離と光軸とを各々が有する第一および第二レンズを含み、入射波面を第一物体空間内の第一物体平面から第一波面像空間内の第一波面像平面まで第一光束路に沿ってリレーするように構成された、第一光学波面リレーシステムであって、該第一および第二レンズの該焦点距離および直径が、該第一物体平面において大きなジオプत्रीレンジを有する入射波面ビームを該第一波面像平面までガイドするように選択される、第一光学波面リレーシステムと；

__直径と焦点距離と光軸とを有し、かつ該第一波面像平面に実質的に位置する第二物体空間内の第二物体平面を有する、第三レンズであって、該波面ビームをフーリエ変換面までガイドするように構成された、第三レンズと；

__該フーリエ変換面に実質的に配された反射式ビームシフティング要素であって、該第三レンズが第二波面リレーシステムの2つのレンズとして機能しかつ反射された波面ビームを第二波面像空間内の第二波面像平面までガイドするように、望ましい大きなジオプत्रीレンジにわたって実質的に該波面ビーム全体を遮るように該第三レンズの光軸に沿って位置決めされて該光軸に対して実質的に垂直に配向され、かつ、該第三レンズを通過して戻る反射波面ビームを形成するため該波面ビームを反射するよう配向されている、反射式ビームシフティング要素と；

__該第三レンズによって透過される前に該波面ビームを遮るように配され、第一偏光状態にある光を透過させるようおよび第二偏光状態にある光を反射するよう構成され、かつ該第三レンズの光軸に対し実質的に45度に配向されている、偏光ビームスプリッタ（PBS）と；

__該第三レンズと該反射式ビームシフティング要素との間または該PBSと該第三レンズとの間に配され、かつ、該PBSが該反射波面ビームを該第三レンズの該光軸に対して実質的に垂直に反射するよう該波面ビームの偏光状態を変えるよう構成された、偏光回転子要素と；

__該PBSにより反射された該反射波面ビームを遮るため該第二波面像平面またはその近くに位置決めされた波面サンプリングアパーチャと；

__該アパーチャの前または後に配されたサブ波面集束レンズと；

__該サブ波面集束レンズおよび該サンプリングアパーチャの後ろに位置決めされた像スポット位置検知装置と

を具備する、視力矯正手技または評価手技のためのジオプत्रीレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項6】

患者の眼から戻ってきた波面ビームがサンプリングアパーチャに対して横方向に変位していたとしても、該眼の横方向のいかなる動きにもかかわらず該眼からの波面の意図される同じ部分がサンプリングされることを可能にするよう前記反射式ビームシフティング要素が該変位を補償できるように、該反射式ビームシフティング要素が該患者の該眼の該横方向の動きに応じて動的にDCオフセットされるようにさらに構成されている、請求項1または5記載のジオプत्रीレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項7】

測定された眼軸距離に適用可能な補正済みキャリブレーション曲線を使って患者の眼からの波面を正しく特徴付けできるよう該物体平面と該眼との間の軸距離を測定するように構成された軸距離測定装置をさらに具備する、請求項1または5記載のジオプत्रीレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

【請求項8】

以下の段階を含む、波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法：

__物体空間内の物体平面から少なくとも1つのフーリエ変換空間内の少なくとも1つのフーリエ変換面を介して波面像空間内の波面像平面まで波面ビームの伝搬をガイドしかつ波面をリレーする段階であって、該少なくとも1つのフーリエ変換空間が波面リレーステー

ジ内にある、段階；

___該リレーされた波面を、該波面像平面に実質的に配されたサンプリングアパーチャを用いてサンプリングする段階；ならびに、

___該少なくとも1つのフーリエ変換空間内の該少なくとも1つのフーリエ変換面に実質的に配されたビームシフティング要素を用いて、実質的に該波面ビーム全体を遮り、かつ該リレーされた波面をシフトさせる段階。

【請求項 9】

測定された物体軸距離に適用可能な補正済みキャリブレーション曲線を使って該物体からの波面を正しく特徴付けできるように前記物体平面と該波面を放出する該物体との間の物体軸距離を測定する段階をさらに含む、請求項8記載の波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法。

【請求項 10】

波面を放出する物体のライブビデオ画像または静止画像をキャプチャ/記録する段階をさらに含む、請求項8記載の波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法。

【請求項 11】

物体の相対的な横方向の動きに追従するため、波面生成用ビームを該物体に向け、かつ該物体のライブ画像に従って該ビームをスキャンする段階をさらに含む、請求項10記載の波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法。

【請求項 12】

前記物体からの前記波面ビームが前記サンプリングアパーチャに対して横方向に変位していたとしても、該物体の横方向の動きにかかわらず該物体からの波面の意図される同じ部分がサンプリングされることを可能にするよう前記ビームシフティング要素が該変位を補償できるように、該物体のライブ画像に従って該ビームシフティング要素を動的にDCオフセットする段階をさらに含む、請求項10記載の波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法。

【請求項 13】

以下の段階を含む、視力矯正手技または評価手技のため大きなジオプトリーレンジにわたって波面をシーケンシャルに検知するための方法：

___直径と焦点距離と光軸とを各々が有する第一および第二レンズを含む第一光学波面リレーシステムを用いて、入射波面を第一物体空間内の第一物体平面から第一波面像空間内の第一波面像平面まで第一ビーム路に沿ってリレーする段階であって、該第一および第二レンズの該焦点距離および直径が、該第一物体平面において大きなジオプトリーレンジを有する入射波面ビームを該第一波面像平面までガイドするように選択される、段階；

___直径と焦点距離と光軸とを各々が有する第三および第四レンズを含み、該第一波面像平面に実質的にある第二物体空間内の第二物体平面を有する、第二光学波面リレーシステムを用いて、該入射波面を該第一波面像平面から第二波面像空間内の第二波面像平面まで第二光路に沿ってさらにリレーする段階であって、該第三レンズが、該波面ビームを該第三レンズと該第四レンズとの間に位置するフーリエ変換面までガイドするように構成されている、段階；

___該第三レンズと該第四レンズとの間に位置する該フーリエ変換面に実質的に配されたビームシフティング要素を用いて、実質的に該波面ビーム全体を遮りかつ該リレーされた波面を該第二波面像平面においてシフトさせる段階；

___該リレーされた波面を、該第二波面像平面に実質的に配されたサンプリングアパーチャを用いてサンプリングする段階；ならびに、

該サンプリングされた波面部分を、該アパーチャの前または後に配されたサブ波面集束レンズを用いて集束させる段階；ならびに、該サンプリングされた波面部分により形成された像スポットの位置を、該サブ波面集束レンズおよび該サンプリングアパーチャの後ろに配された像スポット位置検知装置を用いて検知する段階。

【請求項 14】

測定された眼軸距離に適用可能な補正済みキャリブレーション曲線を使って患者の眼からの波面を正しく特徴付けできるように第一物体平面と該波面を放出する該眼との間の軸距離を測定する段階をさらに含む、請求項13記載の視力矯正手技または評価手技のため大きなジオプトリーレンジにわたって波面をシーケンシャルに検知するための方法。

【請求項15】

患者の眼のライブビデオ画像または静止画像をキャプチャ/記録する段階をさらに含む、請求項13記載の視力矯正手技または評価手技のため大きなジオプトリーレンジにわたって波面をシーケンシャルに検知するための方法。

【請求項16】

眼の動きに追従するため、波面生成用ビームを該眼に向け、かつ該眼のライブ画像に従って該ビームをスキャンする段階をさらに含む、請求項15記載の視力矯正手技または評価手技のため大きなジオプトリーレンジにわたって波面をシーケンシャルに検知するための方法。

【請求項17】

眼からの波面ビームが前記サンプリングアパーチャに対して横方向に変位していたとしても、該眼の横方向の動きにかかわらず該眼からの波面の意図される同じ部分がサンプリングされることを可能にするよう前記ビームシフティング要素が該変位を補償できるように、該眼のライブ画像に従って該ビームシフティング要素を動的にDCオフセットする段階をさらに含む、請求項15記載の視力矯正手技または評価手技のため大きなジオプトリーレンジにわたって波面をシーケンシャルに検知するための方法。

【手続補正2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0025

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0025】

[本発明1001]

波面物体空間内の波面物体平面から波面像空間内の波面像平面まで波面ビームの伝搬をガイドしかつ波面をリレーするように構成された光学リレーシステムと；該波面像平面に実質的に位置決めされたサンプリングアパーチャと；該波面像空間内の該アパーチャの前に位置決めされ、かつ該波面像空間内で実質的に該波面ビーム全体を遮るように構成されたビームシフティング要素とを具備する、波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

[本発明1002]

前記光学リレーシステムが、第一および第二レンズを具備する4-Fリレーシステムである、本発明1001の波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

[本発明1003]

前記ビームシフティング要素が、前記リレーされた波面ビームを前記サンプリングアパーチャに対してシフトさせるように構成された可動式の透過媒質を具備する、本発明1001の波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

[本発明1004]

前記ビームシフティング要素が、前記リレーされた波面ビームを前記サンプリングアパーチャに対してシフトさせるように構成された可動式の反射表面を具備する、本発明1001の波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

[本発明1005]

前記ビームシフティング要素が、電気光学式または磁気光学式または音響光学式のビームシフティング要素を具備する、本発明1001の波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

[本発明1006]

波面物体空間内の波面物体平面から少なくとも1つのフーリエ変換空間内の少なくとも1

つのフーリエ変換面を介して波面像空間内の波面像平面まで波面ビームの伝搬をガイドし、かつ波面をリレーするように構成された少なくとも2つの波面リレーステージを具備し、該少なくとも1つのフーリエ変換空間が第二または後続の波面リレーステージ内にある、光学リレーシステムと；該波面像平面に実質的に位置決めされたサンプリングアパーチャと；該フーリエ変換空間内の該少なくとも1つのフーリエ変換面に実質的に位置決めされ、かつ該フーリエ変換空間内で実質的に該波面ビーム全体を遮るように構成されたビームシフティング要素とを具備する、波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

[本発明1007]

前記2つの波面リレーステージが、第一、第二、第三、および第四レンズを具備する2つのカスケード式4-F波面リレーステージを具備し、前記フーリエ変換面が該第三レンズと該第四レンズとの間にある、本発明1006の波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

[本発明1008]

前記2つの波面リレーステージが、2つの正のレンズの間に1つの負のレンズが位置決めされた3つのレンズを具備する第一波面リレーステージと、2つのレンズを具備する第二4-F波面リレーステージとを具備し、前記フーリエ変換面が、該第二4-F波面リレーステージの該2つのレンズの間にある、本発明1006の波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

[本発明1009]

前記ビームシフティング要素が、リレーされた波面ビームを前記サンプリングアパーチャに対してシフトさせるように構成された可動式の透過媒質を具備する、本発明1006の波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

[本発明1010]

前記ビームシフティング要素が、リレーされた波面ビームを前記サンプリングアパーチャに対してシフトさせるように構成された可動式の反射表面を具備する、本発明1006の波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

[本発明1011]

前記ビームシフティング要素が、電気光学式または磁気光学式または音響光学式のビームシフティング要素を具備する、本発明1006の波面ビームシフティングおよび波面サンプリングのための器械。

[本発明1012]

直径と焦点距離と光軸とを各々が有する第一および第二レンズを含み、入射波面を物体空間内の物体平面から波面像空間内の波面像平面までビーム路に沿ってリレーするように構成された、光学波面リレーシステムであって、該第一および第二レンズの該焦点距離および直径が、該物体平面において大きなジオプトリレンジを有する入射波面ビームを該波面像平面までガイドするように選択される、光学波面リレーシステムと；該波面像空間内で該第二レンズと該波面像平面との間に位置決めされ、かつ該波面像空間内で実質的に該波面ビーム全体を遮るように構成された、反射式ビームシフティング要素と；該反射式ビームシフティング要素によって反射される前に実質的に該波面ビーム全体を遮るように配され、第一偏光状態にある光を透過させるようにおよび第二偏光状態にある光を反射するように構成され、かつ第一光軸に対し実質的に45度に配向されている、偏光ビームスプリッタ（PBS）と；該PBSと該反射式ビームシフティング要素との間に配され、かつ、該反射式ビームシフティング要素によって反射された該波面ビームが該PBSによって反射されるように該波面ビームの偏光状態を変えるよう構成された、偏光回転子要素と；該波面像平面に実質的に位置決めされ、かつ該PBSによって反射された該波面ビームをサンプリングするように構成された、サンプリングアパーチャと；該アパーチャの前または後に配されたサブ波面集束レンズと；該サブ波面集束レンズおよび該サンプリングアパーチャの後ろに位置決めされた像スポット位置検知装置とを具備する、視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1013]

患者の眼から戻ってきた波面ビームがサンプリングアパーチャに対して横方向に変位していたとしても、該眼の横方向のいかなる動きにもかかわらず該眼からの波面の意図される同じ部分がサンプリングされることを可能にするよう前記反射式ビームシフティング要素が該変位を補償できるように、該反射式ビームシフティング要素が該患者の該眼の該横方向の動きに応じて動的にDCオフセットされるようにさらに構成されている、本発明1012の視力矯正手技または評価手技のためのジオプत्रीーレンズの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1014]

波面生成用ビームを放出するように構成された光源と；第一レンズの後方焦点面に配され、かつ、該波面生成用ビームを患者の眼に向けるようおよび該眼の相対的な横方向の動きに追従するよう該ビームをスキャンするように構成された、ビームシフティングミラーとをさらに具備する、本発明1012の視力矯正手技または評価手技のためのジオプत्रीーレンズの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1015]

測定された眼軸距離に適用可能な補正済みキャリブレーション曲線を使って患者の眼からの波面を正しく特徴付けできるよう物体平面と該眼との間の軸距離を測定するように構成された軸距離測定装置をさらに具備する、本発明1012の視力矯正手技または評価手技のためのジオプत्रीーレンズの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1016]

波面像平面において波面像を縮小するために第一レンズの焦点距離が第二レンズの焦点距離より大きい、本発明1012の視力矯正手技または評価手技のためのジオプत्रीーレンズの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1017]

第一および第二レンズの直径が40 mmであり、第一レンズの焦点距離が200 mmであり、かつ第二レンズの焦点距離が80 mmである、本発明1016の視力矯正手技または評価手技のためのジオプत्रीーレンズの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1018]

直径と焦点距離と光軸とを各々が有する第一および第二レンズを含み、入射波面を第一物体空間内の第一物体平面から第一波面像空間内の第一波面像平面まで第一ビーム路に沿ってリレーするように構成された、第一光学波面リレーシステムであって、該第一および第二レンズの該焦点距離および直径が、該第一物体平面において大きなジオプत्रीーレンズを有する入射波面ビームを該第一波面像平面までガイドするように選択される、第一光学波面リレーシステムと；直径と焦点距離と光軸とを各々が有する第三および第四レンズを含み、該第一波面像平面に実質的にある第二物体空間内の第二物体平面を有し、かつ、該入射波面を該第一波面像平面から第二波面像空間内の第二波面像平面まで第二光路に沿ってさらにリレーするように構成された、第二光学波面リレーシステムであって、該第三レンズが、該波面ビームを該第三レンズと該第四レンズとの間に位置するフーリエ変換面までガイドするように構成されている、第二光学波面リレーシステムと；該第三レンズと該第四レンズとの間に位置する該フーリエ変換面に実質的に配され、望ましい大きなジオプत्रीーレンズにわたって実質的に該波面ビーム全体を遮るため該第三レンズの該光軸に沿って位置決めされ、かつ該第二光路を折返すように配向された、反射式ビームシフティング要素と；該第二波面像平面またはその近くに位置決めされた波面サンプリングアパーチャと；該アパーチャの前または後に配されたサブ波面集束レンズと；該サブ波面集束レンズおよび該サンプリングアパーチャの後ろに位置決めされた像スポット位置検知装置とを具備する、視力矯正手技または評価手技のためのジオプत्रीーレンズの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1019]

患者の眼から戻ってきた波面ビームがサンプリングアパーチャに対して横方向に変位していたとしても、該眼の横方向のいかなる動きにもかかわらず該眼からの波面の意図され

る同じ部分がサンプリングされることを可能にするよう前記反射式ビームシフティング要素が該変位を補償できるように、該反射式ビームシフティング要素が該患者の該眼の該横方向の動きに応じて動的にDCオフセットされるようにさらに構成されている、本発明1018の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1020]

測定された眼軸距離に適用可能な補正済みキャリブレーション曲線を使って患者の眼からの波面を正しく特徴付けできるように物体平面と該眼との間の軸距離を測定するように構成された軸距離測定装置をさらに具備する、本発明1018の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1021]

前記反射式ビームシフティング要素が、第四レンズの光軸の周りで波面ビームを制御可能にシフトさせるように構成された微小電気機械システム(MEMS)ミラーを具備する、本発明1018の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1022]

第一波面像平面において波面像を縮小するために第一レンズの焦点距離が第二レンズの焦点距離より大きい、本発明1018の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1023]

第一および第二レンズの直径が40 mmであり、第一レンズの焦点距離が200 mmであり、かつ第二レンズの焦点距離が80 mmである、本発明1018の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1024]

第一波面像平面から第二波面像平面まで波面像を拡大するために第三レンズの焦点距離が第四レンズの焦点距離より小さい、本発明1018の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1025]

第一レンズと第二レンズとの間でビーム路を折返すための少なくとも1つの反射要素を含む、本発明1018の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1026]

第一レンズと第二レンズとの間に配されかつ第一ビーム路を折返すように配向された第一および第二反射要素をさらに具備する、本発明1018の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1027]

波面生成用ビームを放出するように構成された光源と；患者の眼の網膜および/もしくは角膜にわたって該波面生成用ビームをシフトさせることを可能にするためにまたは該眼の相対的な横方向の動きに追従するために該波面生成用ビームを第一光軸に沿って第一レンズに向けるよう構成された、網膜ビームシフティングミラーおよび/または角膜ビームシフティングミラーとをさらに具備する、本発明1018の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1028]

前記波面生成用ビームを前記網膜ビームシフティングミラーおよび/または角膜ビームシフティングミラーまでガイドするため光源に連結された光ファイバと；該光ファイバからの光を連結するように構成された少なくとも1つの光ファイバカプラを含む光ファイバ式干渉計とをさらに具備する、本発明1027の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1029]

患者の眼の同平面ビデオ画像または静止画像を提供するように構成された画像センサと

；第一レンズと第二レンズとの間に配され、第一結像用ビームスプリッタ/コンバイナにより反射された光の少なくとも一部を該画像センサに向けるように構成された、第一結像用ビームスプリッタ/コンバイナとをさらに具備する、本発明1018の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1030]

直径と焦点距離と光軸とを各々が有する第一および第二レンズを含み、入射波面を第一物体空間内の第一物体平面から第一波面像空間内の第一波面像平面まで第一ビーム路に沿ってリレーするように構成された、第一光学波面リレーシステムであって、該第一および第二レンズの該焦点距離および直径が、該第一物体平面において大きなジオプトリレンジを有する入射波面ビームを該第一波面像平面までガイドするように選択される、第一光学波面リレーシステムと；直径と焦点距離と光軸とを有し、かつ該第一波面像平面に実質的に位置する第二物体空間内の第二物体平面を有する、第三レンズであって、該波面ビームをフーリエ変換面までガイドするように構成された、第三レンズと；該フーリエ変換面に実質的に配された反射式ビームシフティング要素であって、該第三レンズが第二波面リレーシステムの2つのレンズとして機能しかつ反射された波面ビームを第二波面像空間内の第二波面像平面までガイドするように、望ましい大きなジオプトリレンジにわたって実質的に該波面ビーム全体を遮るように該第三レンズの光軸に沿って位置決めされて該光軸に対して実質的に垂直に配向され、かつ、該第三レンズを通過して戻る反射波面ビームを形成するため該波面ビームを反射するよう配向されている、反射式ビームシフティング要素と；該第三レンズによって透過される前に該波面ビームを遮るように配され、第一偏光状態にある光を透過させるようにおよび第二偏光状態にある光を反射するように構成され、かつ該第三レンズの光軸に対し実質的に45度に配向されている、偏光ビームスプリッタ(PBS)と；該第三レンズと該反射式ビームシフティング要素との間または該PBSと該第三レンズとの間に配され、かつ、該PBSが該反射波面ビームを該第三レンズの該光軸に対して実質的に垂直に反射するように該波面ビームの偏光状態を変えるよう構成された、偏光回転子要素と；該PBSにより反射された該反射波面ビームを遮るため該第二波面像平面またはその近くに位置決めされた波面サンプリングアパーチャと；該アパーチャの前または後に配されたサブ波面集束レンズと；該サブ波面集束レンズおよび該サンプリングアパーチャの後ろに位置決めされた像スポット位置検知装置とを具備する、視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1031]

患者の眼から戻ってきた波面ビームがサンプリングアパーチャに対して横方向に変位していたとしても、該眼の横方向のいかなる動きにもかかわらず該眼からの波面の意図される同じ部分がサンプリングされることを可能にするよう前記反射式ビームシフティング要素が該変位を補償できるように、該反射式ビームシフティング要素が該患者の該眼の該横方向の動きに応じて動的にDCオフセットされるようにさらに構成されている、本発明1030の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1032]

測定された眼軸距離に適用可能な補正済みキャリブレーション曲線を使って患者の眼からの波面を正しく特徴付けできるように第一物体平面と該眼との間の軸距離を測定するように構成された軸距離測定装置をさらに具備する、本発明1030の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1033]

第一波面像平面において波面像を縮小するために第一レンズの焦点距離が第二レンズの焦点距離より大きい、本発明1030の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1034]

第一および第二レンズの直径が40 mmであり、第一レンズの焦点距離が200 mmであり、かつ第二レンズの焦点距離が80 mmである、本発明1033の視力矯正手技または評価手技の

ためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1035]

被検眼の同平面ビデオ画像または静止画像を提供するように構成された画像センサと；第一光学波面リレーシステムの第一レンズと第二レンズとの間に配され、第一結像用ビームスプリッタ/コンバイナにより反射された光の少なくとも一部を該画像センサに向けるように構成された、第一結像用ビームスプリッタ/コンバイナとをさらに具備する、本発明1030の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1036]

第一レンズと第二レンズとの間に配されかつ第一ビーム路を折返すように配向された第一および第二反射要素をさらに具備する、本発明1035の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1037]

波面生成用ビームを放出するように構成された光源と；患者の眼の網膜および/もしくは角膜にわたって該波面生成用ビームをシフトさせることを可能にするためにまたは該眼の相対的な横方向の動きに追従するために該波面生成用ビームを第一光軸に沿って第一レンズに向けるよう構成された、網膜ビームシフティングミラーおよび/または角膜ビームシフティングミラーとをさらに具備する、本発明1018の視力矯正手技または評価手技のためのジオプトリレンジの大きなシーケンシャル波面センサ。

[本発明1038]

以下の段階を含む、波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法：物体空間内の物体平面から波面像空間内の波面像平面まで波面ビームの伝搬をガイドしかつ波面をリレーする段階；該リレーされた波面を、該波面像平面に実質的に配されたサンプリングアパーチャを用いてサンプリングする段階；ならびに、該波面像空間内の該アパーチャの前に配されたビームシフティング要素を用いて、実質的に該波面ビーム全体を遮り、かつ該リレーされた波面をシフトさせる段階。

[本発明1039]

測定された物体軸距離に適用可能な補正済みキャリブレーション曲線を使って該物体からの波面を正しく特徴付けできるように前記物体平面と該波面を放出する該物体との間の物体軸距離を測定する段階をさらに含む、本発明1038の波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法。

[本発明1040]

波面を放出する物体のライブビデオ画像または静止画像をキャプチャ/記録する段階をさらに含む、本発明1038の波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法。

[本発明1041]

物体の相対的な横方向の動きに追従するため、波面生成用ビームを該物体に向け、かつ該物体のライブ画像に従って該ビームをスキャンする段階をさらに含む、本発明1040の波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法。

[本発明1042]

前記物体からの前記波面ビームが前記サンプリングアパーチャに対して横方向に変位していたとしても、該物体の横方向の動きにかかわらず該物体からの波面の意図される同じ部分がサンプリングされることを可能にするよう前記ビームシフティング要素が該変位を補償できるように、該物体のライブ画像に従って該ビームシフティング要素を動的にDCオフセットする段階をさらに含む、本発明1040の波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法。

[本発明1043]

以下の段階を含む、波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法：物体空間内の物体平面から少なくとも1つのフーリエ変換空間内の少なくとも1つのフーリエ変換面を介して波面像空間内の波面像平面まで波面ビームの伝搬をガイドしかつ波面を

リレーする段階であって、該少なくとも1つのフーリエ変換空間が第二または後続の波面リレーステージ内にある、段階；該リレーされた波面を、該波面像平面に実質的に配されたサンプリングアパーチャを用いてサンプリングする段階；ならびに、該少なくとも1つのフーリエ変換空間内の該少なくとも1つのフーリエ変換面に実質的に配されたビームシフティング要素を用いて、実質的に該波面ビーム全体を遮り、かつ該リレーされた波面をシフトさせる段階。

[本発明1044]

測定された物体軸距離に適用可能な補正済みキャリブレーション曲線を使って該物体からの波面を正しく特徴付けできるよう前記物体平面と該波面を放出する該物体との間の物体軸距離を測定する段階をさらに含む、本発明1043の波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法。

[本発明1045]

波面を放出する物体のライブビデオ画像または静止画像をキャプチャ/記録する段階をさらに含む、本発明1043の波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法。

[本発明1046]

物体の相対的な横方向の動きに追従するため、波面生成用ビームを該物体に向け、かつ該物体のライブ画像に従って該ビームをスキャンする段階をさらに含む、本発明1045の波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法。

[本発明1047]

前記物体からの前記波面ビームが前記サンプリングアパーチャに対して横方向に変位していたとしても、該物体の横方向の動きにかかわらず該物体からの波面の意図される同じ部分がサンプリングされることを可能にするよう前記ビームシフティング要素が該変位を補償できるように、該物体のライブ画像に従って該ビームシフティング要素を動的にDCオフセットする段階をさらに含む、本発明1045の波面ビームをシフトさせかつ波面をサンプリングするための方法。

[本発明1048]

以下の段階を含む、視力矯正手技または評価手技のため大きなジオプトリーレンジにわたって波面をシーケンシャルに検知するための方法：直径と焦点距離と光軸とを各々が有する第一および第二レンズを含む第一光学波面リレーシステムを用いて、入射波面を第一物体空間内の第一物体平面から第一波面像空間内の第一波面像平面まで第一ビーム路に沿ってリレーする段階であって、該第一および第二レンズの該焦点距離および直径が、該第一物体平面において大きなジオプトリーレンジを有する入射波面ビームを該第一波面像平面までガイドするように選択される、段階；直径と焦点距離と光軸とを各々が有する第三および第四レンズを含み、該第一波面像平面に実質的にある第二物体空間内の第二物体平面を有する、第二光学波面リレーシステムを用いて、該入射波面を該第一波面像平面から第二波面像空間内の第二波面像平面まで第二光路に沿ってさらにリレーする段階であって、該第三レンズが、該波面ビームを該第三レンズと該第四レンズとの間に位置するフーリエ変換面までガイドするように構成されている、段階；該第三レンズと該第四レンズとの間に位置する該フーリエ変換面に実質的に配されたビームシフティング要素を用いて、実質的に該波面ビーム全体を遮りかつ該リレーされた波面を該第二波面像平面においてシフトさせる段階；該リレーされた波面を、該第二波面像平面に実質的に配されたサンプリングアパーチャを用いてサンプリングする段階；該サンプリングされた波面部分を、該アパーチャの前または後に配されたサブ波面集束レンズを用いて集束させる段階；ならびに、該サンプリングされた波面部分により形成された像スポットの位置を、該サブ波面集束レンズおよび該サンプリングアパーチャの後ろに配された像スポット位置検知装置を用いて検知する段階。

[本発明1049]

測定された眼軸距離に適用可能な補正済みキャリブレーション曲線を使って患者の眼からの波面を正しく特徴付けできるよう第一物体平面と該波面を放出する該眼との間の軸距

離を測定する段階をさらに含む、本発明1048の視力矯正手技または評価手技のため大きなジオプトリーレンジにわたって波面をシーケンシャルに検知するための方法。

[本発明1050]

患者の眼のライブビデオ画像または静止画像をキャプチャ/記録する段階をさらに含む、本発明1048の視力矯正手技または評価手技のため大きなジオプトリーレンジにわたって波面をシーケンシャルに検知するための方法。

[本発明1051]

眼の相対的な横方向の動きに追従するため、波面生成用ビームを該眼に向け、かつ該眼のライブ画像に従って該ビームをスキャンする段階をさらに含む、本発明1050の視力矯正手技または評価手技のため大きなジオプトリーレンジにわたって波面をシーケンシャルに検知するための方法。

[本発明1052]

眼からの波面ビームが前記サンプリングアパーチャに対して横方向に変位していたとしても、該眼の横方向の動きにかかわらず該眼からの波面の意図される同じ部分がサンプリングされることを可能にするよう前記ビームシフティング要素が該変位を補償できるように、該眼のライブ画像に従って該ビームシフティング要素を動的にDCオフセットする段階をさらに含む、本発明1050の視力矯正手技または評価手技のため大きなジオプトリーレンジにわたって波面をシーケンシャルに検知するための方法。

本発明のこれらおよび他の特徴および利点は、以下の好ましい態様の詳細な説明を添付の図面とともに検討することによって、より容易に当業者に明らかになるであろう。

フロントページの続き

(74)代理人 100142929

弁理士 井上 隆一

(74)代理人 100148699

弁理士 佐藤 利光

(74)代理人 100128048

弁理士 新見 浩一

(74)代理人 100129506

弁理士 小林 智彦

(74)代理人 100114340

弁理士 大関 雅人

(74)代理人 100114889

弁理士 五十嵐 義弘

(74)代理人 100121072

弁理士 川本 和弥

(72)発明者 チョウ ヤン

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 プレザントン ディアビラ アベニュー 4 3 2 5

(72)発明者 シェア ウィリアム

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 プレザントン ケンパー コート 7 9 3 6

Fターム(参考) 4C316 AA03 AA08 AA09 AA13 AA21 AA25 AB02 AB06 AB09 AB11

FA19 FC12 FY01 FY04 FY05

【外国語明細書】

2016221304000001.pdf

2016221304000002.pdf

2016221304000003.pdf

2016221304000004.pdf