

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7600370号
(P7600370)

(45)発行日 令和6年12月16日(2024.12.16)

(24)登録日 令和6年12月6日(2024.12.6)

(51)国際特許分類		F I		
H 0 4 N	23/69 (2023.01)	H 0 4 N	23/69	
G 0 2 B	23/00 (2006.01)	G 0 2 B	23/00	
G 0 3 B	7/095(2021.01)	G 0 3 B	7/095	
G 0 3 B	5/00 (2021.01)	G 0 3 B	5/00	D
H 0 4 N	23/55 (2023.01)	H 0 4 N	23/55	
請求項の数 41 (全25頁)				
(21)出願番号	特願2023-509835(P2023-509835)	(73)特許権者	598176743	
(86)(22)出願日	令和3年6月29日(2021.6.29)		ザイゴ コーポレーション	
(65)公表番号	特表2023-537992(P2023-537992 A)		Z Y G O C O R P O R A T I O N	
(43)公表日	令和5年9月6日(2023.9.6)		アメリカ合衆国 コネチカット州 0 6 4	
(86)国際出願番号	PCT/US2021/039698		5 5 ミドルフィールド ローレル ブルック	
(87)国際公開番号	WO2022/039838	(74)代理人	100105957	
(87)国際公開日	令和4年2月24日(2022.2.24)		弁理士 恩田 誠	
審査請求日	令和5年3月22日(2023.3.22)	(74)代理人	100068755	
(31)優先権主張番号	63/066,935		弁理士 恩田 博宣	
(32)優先日	令和2年8月18日(2020.8.18)	(74)代理人	100142907	
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)		弁理士 本田 淳	
		(72)発明者	トゥルーアックス、ブルース イー・	
			アメリカ合衆国 0 6 4 8 9 コネチカッ	
			ト州 サウシントン ウェッジウッド	
			最終頁に続く	

(54)【発明の名称】 可変ズーム撮像装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

可変ズーム撮像装置であって

物体領域に位置する物体の像領域に像を形成するように構成された撮像光学系と、

前記撮像光学系によって形成される前記像に対する開口数NAを調整可能に設定する調整可能開口絞りと、

前記像領域に位置して前記像を検出する検出器素子のアレイを含む電子検出器と、

前記電子検出器に結合され、前記検出器素子の少なくともいくつかからの信号に基づいて前記像のデジタル表現を生成する画像処理回路と、

を備え、

前記画像処理回路は、前記調整可能開口絞りによって設定される前記像に対する複数の異なる開口数の各々に対して、前記物体の異なる倍率mを有する前記デジタル表現を生成するものであり、

前記異なる倍率mは、 $m = m_{min}$ の最小倍率から $m = m_{max}$ の最大倍率まで変化してズーム比 $z = m / m_{min}$ および最大ズーム比 $z_{max} = m_{max} / m_{min}$ を規定するものであり、

前記撮像光学系は、前記調整可能開口絞りが前記複数の異なる開口数のうちの最大のものに設定されているとき、前記アレイ内の前記検出器素子のすべてにわたる全視野領域にわたって回折限界像を生成せず、

前記撮像光学系は、前記調整可能開口絞りが前記複数の異なる開口数のうちの最小のもの

に設定されているとき、前記全視野領域にわたって回折限界像を生成する、可変ズーム撮像装置。

【請求項 2】

前記撮像光学系は、前記像領域に対し前記物体領域の一定の倍率を提供するように固定されている、請求項 1 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 3】

前記デジタル表現の前記ズーム比 z は、前記デジタル表現を生成するための前記検出器素子が広がる視野領域に反比例して変化する、請求項 1 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 4】

前記調整可能開口絞りによって設定される前記複数の異なる開口数のサイズは、前記デジタル表現に対する前記ズーム比 z の増加に対応して増加する、請求項 3 に記載の可変ズーム撮像装置。

10

【請求項 5】

前記調整可能開口絞りによって設定される前記複数の異なる開口数のサイズは、1 よりも大きいズーム比の範囲にわたって、前記デジタル表現に対する前記ズーム比 z の増加に対応して線形に増加する、請求項 4 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 6】

前記調整可能開口絞りによって設定される前記像に対する前記開口数 NA は、

【数 1】

$$NA \propto \frac{\lambda}{2p\left(\frac{z_{max}}{z}\right)}$$

20

によって与えられ、ここで、 p は検出器素子の最大横方向寸法であり、 λ は前記電子検出器上に前記像を形成するのに使用される光の中心波長である、請求項 4 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 7】

前記デジタル表現は、 $N_1 \times N_2$ (N_1 および N_2 は正の整数) の画素アレイ内の各画素における少なくとも 1 つの強度値を含む、請求項 4 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 8】

N_1 および N_2 は各々 400 以上である、請求項 7 に記載の可変ズーム撮像装置。

30

【請求項 9】

前記電子検出器における前記検出器素子のアレイは、少なくとも $M \cdot N_1 \times M \cdot N_2$ のアレイと同じ大きさのアレイを含み、ここで、 M は z_{max} 以上の正の整数である、請求項 7 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 10】

z_{max} は 3 以上である、請求項 9 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 11】

前記画像処理回路は、 $M/z \times M/z$ の検出器素子の対応するサブアレイ内の前記検出器素子からの前記信号のうちの 1 つ以上から前記 $N_1 \times N_2$ のアレイ内の各画素の前記強度値を決定することによって、ズーム比 z を有する前記デジタル表現を生成する、請求項 9 に記載の可変ズーム撮像装置。

40

【請求項 12】

前記画像処理回路は、 $M/z \times M/z$ の検出器素子の前記対応するサブアレイ内の前記検出器素子からの前記信号のうちの 1 つのみから前記 $N_1 \times N_2$ のアレイ内の各画素の前記強度値を決定することによって、ズーム比 z を有する前記デジタル表現を生成する、請求項 11 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 13】

前記画像処理回路は、 $M/z \times M/z$ の検出器素子の前記対応するサブアレイ内の前記検出器素子からの前記信号の加重平均から前記 $N_1 \times N_2$ のアレイ内の各画素の前記強度

50

値を決定することによって、ズーム比 z を有する前記デジタル表現を生成する、請求項 1 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 1 4】

前記デジタル表現内の複数の前記画素に対応する前記検出器素子の複数の前記サブアレイは、前記デジタル表現を生成するための前記検出器素子が広がる前記視野領域内で互いに反復的に離間している、請求項 1 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 1 5】

前記画像処理回路は、1 つまたは複数の検出器素子の対応するサブアレイ内の前記検出器素子からの前記信号のうちの 1 つ以上から前記 $N_1 \times N_2$ のアレイ内の各画素の前記強度値を決定することによってズーム比 z を有する前記デジタル表現を生成し、各前記対応するサブアレイ内の前記検出器素子の数は、前記調整可能開口絞りによって調整可能に設定される前記開口数 NA の増加に伴って減少する、請求項 7 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 1 6】

前記撮像光学系は、前記物体からの光を前記開口絞りによって画定される瞳孔に向ける第 1 の光学系のセットと、前記瞳孔からの光を像領域に向ける第 2 の光学系のセットとを含む、請求項 1 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 1 7】

前記物体を照明することにより前記物体の前記像を形成するための光を前記撮像光学系に提供するように構成された光源をさらに備える請求項 1 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 1 8】

ビームスプリッタと基準面とを含む干渉計構成要素をさらに備え、前記光源はさらに、前記基準面を照明するように構成されており、前記ビームスプリッタは、前記撮像光学系によって前記像領域上に形成された前記像が干渉像となるように前記物体および前記基準面からの光をコヒーレントに組み合わせるように構成されている、請求項 1 7 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 1 9】

前記光源はコヒーレントレーザである、請求項 1 7 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 2 0】

前記検出器素子のアレイの面積が $0.25 \text{ cm}^2 \sim 10 \text{ cm}^2$ である、請求項 1 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 2 1】

前記最小倍率が $1/10 \sim 1/5$ である、請求項 1 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 2 2】

前記最小倍率が $1/2 \sim 5$ である、請求項 1 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 2 3】

前記検出器素子のアレイ上に撮像される前記物体領域の面積が $0.04 \text{ cm}^2 \sim 10,000 \text{ cm}^2$ である、請求項 1 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 2 4】

前記調整可能開口絞りは連続的に調整可能である、請求項 1 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 2 5】

前記調整可能開口絞りは複数の離散的設定の各々に離散的に調整可能である、請求項 1 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 2 6】

前記調整可能開口絞りが機械的な開口絞りである、請求項 1 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 2 7】

前記調整可能開口絞りが電子的な開口絞りである、請求項 1 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 2 8】

前記ズーム比に対するユーザ入力に応答して、前記調整可能開口絞りを電子的に調整するように構成されたユーザ制御インタフェースをさらに備える請求項 1 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 29】

前記ユーザ制御インタフェースは、前記ズーム比に対する前記ユーザ入力に応答して前記電子検出器による前記物体の倍率を前記画像処理回路に設定させる、請求項 28 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 30】

前記画像処理回路は、前記デジタル表現を生成するために使用される前記検出器素子のサンプリングを調整することによって、前記電子検出器による前記物体の倍率を設定するように構成されている、請求項 29 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 31】

前記開口絞りは、公称円形の開口を提供して前記開口数を規定する、請求項 1 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 32】

前記開口絞りは、公称矩形の開口を提供して前記開口数を規定する、請求項 1 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 33】

前記撮像光学系は、前記調整可能開口絞りが前記複数の異なる開口数のうちの最大のものに設定されているときに前記アレイ内の前記検出器素子のすべてにわたる全視野領域に対応する前記物体の全視野領域について前記物体からのすべての光線軌道を通過させるのに十分な大きさの直径を有していない、請求項 4 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 34】

前記撮像光学系は、前記調整可能な口絞りが前記複数の異なる開口数のうちの最小のものに設定されているときに前記物体の前記全視野領域について前記物体からのすべての光線軌道を通過させるのに十分な大きな直径を有している、請求項 33 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 35】

前記撮像光学系は、前記調整可能開口絞りが前記複数の異なる開口数のうちの最大のものに設定されているとき、前記全視野領域の面積を z_{max} で割った面積に等しい最大ズーム視野領域にわたって回折限界像を生成する、請求項 1 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 36】

前記像領域内の所与の視野（「FOV」）において前記開口数 NA に対する回折限界像を生成する前記撮像光学系は、当該撮像光学系が、コヒーレント照明のために前記 FOV 内の任意の場所で $d = \lambda / NA$ 相当の小さな空間周期 d を有する特徴を前記像領域内に生成できることを意味する、請求項 35 に記載の可変ズーム撮像装置。

【請求項 37】

デジタルズームを実装する可変ズーム撮像装置とともに使用するための光学撮像システムであって、

a) 物体領域に位置する物体の像領域に像を形成するように構成された撮像光学系と、
b) 前記撮像光学系によって形成される前記像に対する開口数 NA を調整可能に設定する調整可能開口絞りと、を備え、

c) 前記撮像光学系は、前記物体領域内の前記物体の連続的に減少する視野に対応して前記調整可能開口絞りにより設定される前記像に対する複数の連続的に増加する開口数 NA の各々について、前記像を回折限界像として形成するように設計されており、

d) 前記撮像光学系は、前記調整可能開口絞りが複数の異なる開口数のうちの最大のものに設定されているとき、前記像領域の全体にわたる全視野領域にわたって前記像を回折限界像として生成しない、光学撮像システム。

【請求項 38】

前記撮像光学系は、前記調整可能開口絞りが複数の異なる開口数のうちの最大のものに

10

20

30

40

50

設定されているときに前記像領域の全体にわたる全視野領域に対応する前記物体の全視野領域について前記物体からのすべての光線軌道を通過させるのに十分な大きさの直径を有していない、請求項 37 に記載の光学撮像システム。

【請求項 39】

前記撮像光学系は、前記調整可能開口絞りが複数の異なる開口数のうちの最小のものに設定されているときに前記物体の前記全視野領域について前記物体からのすべての光線軌道を通過させるのに十分な大きさの直径を有している、請求項 38 に記載の光学撮像システム。

【請求項 40】

前記像領域内の所与の視野（「F O V」）において前記開口数 N A に対する回折限界像を生成することは、前記撮像光学系が、コヒーレント照明のために前記 F O V 内の任意の場所で $d = \lambda / N A$ 相当の小さな空間周期 d を有する特徴を前記像領域内に生成できることを意味する、請求項 37 に記載の光学撮像システム。

【請求項 41】

前記撮像光学系は、前記物体領域と前記開口絞りとの間の第 1 の光学系のセットであって、前記物体からの光を前記開口絞りによって画定される瞳孔に向ける前記第 1 の光学系のセットと、前記開口絞りと前記像領域との間の第 2 の光学系のセットであって、前記瞳孔からの光を前記像領域に向ける前記第 2 の光学系のセットとを含む、請求項 37 に記載の光学撮像システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、可変ズーム撮像装置に関する。より具体的には、本開示は、費用効率の高い方法で高品質の可変ズームを可能にする高解像度光学センサとともに使用するための光学撮像システムに関する。本出願は、2020年8月18日に出願された米国仮出願第 63 / 066, 935 号に対する優先権を主張し、その全内容が参照によって本明細書に組み込まれる。

【背景技術】

【0002】

光学撮像システムは、物体領域に位置する物体の像領域（典型的には像面）に像を形成する。光学撮像システムは、レンズまたは湾曲ミラーなどの 1 つまたは複数の光学撮像素子を含む。幾何光学の枠組み内では、各光学撮像素子の特性やそれらの互いの位置決めならびに物体領域および像領域の各々に対する位置決めにより、物体領域の各点から出射する光線が像領域内の対応する点で集合的に再結合されることで像が形成される。したがって、光学撮像システムは、物体領域内の物体の空間特徴に対応する像領域に光の空間分布を生成する。具体的には、像は、物体の空間特徴が入射光にどのように異なる影響を与えるのか（例えば、反射、透過、回折、散乱、および／または減衰）に対応する。いくつかの場合には、周辺光により物体が照明されることで、光学撮像システムにより捕捉される光線が生成されて像が形成される一方、他の場合には、照明源が特に使用されることで、この照明光が生成されて像が生成される。像領域上に撮像される物体領域内の複数点の空間的広がり

【0003】

一般に、光学撮像システムが像視野内の小さな特徴を再現可能な程度は、光学撮像システムの像側開口数 N A に依存し、これは像領域内の各点で光学撮像システムにより再結合される光線の像領域における角度範囲に対応する。例えば、像側開口数 N A は、 $n \cdot \sin \theta$ として表すことができ、ここで、 θ は像領域に入射する最も傾いた光線（すなわち、周辺光線）と光軸との間に形成される角度であり、 n は像領域直前の媒体の屈折率である。光学撮像システムの開口絞りは、この角度範囲外の光線が像領域に到達するのを防止することによってこの開口数 N A を設定するシステム内要素である。

【0004】

像領域内の像に対する光学撮像システムの倍率 m' は、像領域内の像における各特徴の横方向寸法が物体における各特徴の横方向寸法に対してどの程度増加（または減少）するか
の尺度である。したがって、横方向寸法 D を有する物体の特徴は、 $m' \cdot D$ に等しい横
方向寸法を有する像で再現される。多くの場合、ユーザによって選択可能な様々な倍率の
範囲を光学撮像システムに対して提供することが望ましい。例えば、ユーザは、より低い
倍率 m'_1 で大きな物体視野にわたって物体を見た後に、より大きい倍率 m'_2 でこの物
体視野のサブセットを見ることを望む、すなわちその物体視野のサブセットに「ズーム」
することを望む場合がある。最小倍率 $m = m_{min}$ から最大倍率 $m' = m'_{max}$ まで変化
する様々な倍率 m を提供する撮像システムは、ズーム比 $z = m' / m'_{min}$ および最大ズ
ーム比 $z_{max} = m'_{max} / m'_{min}$ を定義する。 $z_{max} > 1$ の光学撮像システムは、
可変ズームシステムと呼ぶことができる。

10

【0005】

従来、可変ズーム光学システムは、互いに移動して可変倍率を提供する1つまたは複数の
光学撮像素子を有するシステムと、いくつかの異なる光学モジュールのうちの1つを光
路に挿入して可変倍率を提供するタレット（turret）を有するシステムとを含む。光学的
には、この可変倍率は、像側開口数を固定する一方、物体視野を減少させつつ物体側開口
数を増加させることによって達成される。

【0006】

光学撮像システムによって生成される物体の像のデジタル表現を捕捉および記憶するた
めに、検出器素子のアレイを有する光学センサ（本明細書では「検出器」または「カメラ」
とも称される）が像領域上に位置付けられ得る。各検出器素子は、その検出器素子に入
射する光の強度の測定値（または、いくつかの例では、光の複数色の各々について検出器
素子に入射する光の強度の測定値）に対応する電気信号を生成する。画像処理回路は、検
出器素子のアレイに結合されており、電気信号を処理して像のデジタル表現を記憶する。
現在の技術的進歩により、別個の検出器素子の非常に大きな横方向密度を提供する高分解
能光学センサが可能となっている。実際に、検出器素子の数は、デジタル表現に必要な典
型的な画素数よりもはるかに多くすることができる。結果として、いくつかの従来技術の
撮像システムは「デジタルズーム」を実装し、それによって、最終的なデジタル表現にお
ける物体の異なる倍率 m は、検出器素子のセット全体のうちの対応するサブセットにより
デジタル表現を生成することで単純に得られる。具体的には、最小ズームは、光学シス
テムの像視野内の検出器素子のアレイ全体にわたって検出器素子をサンプリングすること
に対応し、より大きいズームは、光学システムの像領域の連続したより小さいサブセット内
にのみ存在する検出器素子をサンプリングすることに対応する。

20

30

【発明の概要】

【0007】

本発明者は、従来技術のズームシステムにおけるいくつかの問題を認識している。光学
ズームを実装するシステムは可動部品を必要とし、それによって堅牢性の低下とともに、
ズーム中の振動、像のふらつき、または焦点シフトの可能性を増加させて性能を低下させ
る可能性がある。また、それらは典型的には、より多くの素子および／またはより複雑な
素子を必要とし、それによって製造および設計のコストを増加させる。一方で、デジタル
ズームを実装するシステムは、光学撮像システムの設計とズーム範囲全体にわたる検出器
素子サンプリングとの間の不整合を受ける。

40

【0008】

例えば、検出器が $10,000 \times 10,000$ の検出器素子のアレイを有し、像のデジ
タル表現のための所望の解像度が 1000×1000 と仮定すると、ズーム範囲は原理的
には、デジタルズームを使用して1から10までとすることができる。具体的には、最低
ズームでは、デジタル表現の各画素は、検出器素子の対応する 10×10 サブアレイ上に
マッピングされ、最高ズームでは、デジタル表現の各画素は、検出器素子のアレイ全体内
の 1000×1000 サブアレイ内の単一の対応する検出器素子上にマッピングされる。

50

しかしながら、 1000×1000 のデジタル表現の解像度は、光学撮像システムによって検出器アレイ上に生成される光学像の解像度よりも良くない可能性がある。異なるズームに対する検出器アレイサンプリングにおけるこの差は、光学撮像システムに異なる制約を課す。このため、検出器素子の横方向寸法が p である場合、光学撮像システムは、最低ズームでは、約 $10 \cdot p$ 程度の小さな特徴サイズを有する光学像を生成するのに十分な解像度を提供するだけでよいが、最高ズームでは、約 p 程度の小さな特徴サイズを生成するのに十分な解像度を提供する必要がある。

【0009】

したがって、デジタルズームのみを用いて全ズーム範囲にわたる撮像の高品質デジタル表現を提供するには、光学撮像システムは、最高デジタルズーム設定に対して十分な解像度を提供しなければならない。同時に、光学撮像システムは、最低ズームに対応する物体視野全体からの光線束を捕捉しなければならない。それによって多くのおよび／またはより大きな光学撮像素子を必要とするなど光学撮像システムの複雑さが増す。これは一般に、物体視野および像側 NA の各々の増大とともに光学撮像システムの複雑さが増大するためである。例えば、微細な解像度で比較的大きな領域の画像を生成するように光学系を設計するよりも、粗い解像度で比較的小さな領域の画像を生成するように光学系を設計する方が容易である。前者を行うには、一般に、より大きな物体視野内のより多くの数の点の各々から対応するより大きな光線束を方向付けるために、より多くの数の光学素子、より大きな光学素子、および／またはより複雑な光学素子が必要である。

【0010】

これらの問題を解決するために、本発明者は、デジタルズーム設定によって要求される解像度に従って像側開口数 NA を調整するための可変開口絞りを含むはるかにより単純な光学撮像システムとデジタルズームとを組み合わせるシステムを開示する。最低ズームでは、開口絞りは最小 NA に設定され、光学撮像システムは、この最小 NA で物体視野全体からの光線束を捕捉して検出器上に光学像を生成するように設計される。より高いズームでは、開口絞りの開口は、より高いズームに対応する物体視野の（より小さい）サブエリアに必要な解像度を提供するためにより大きな NA に設定される。光学撮像システムは、物体視野のこのサブエリアからの光線束をこのより大きな NA で捕捉して検出器上に光学像を生成するように設計される。一方、光学撮像システムの設計を単純化するために、光学撮像システムは、このサブエリアの外側の物体視野からの光線束の全てをこのより大きい NA で捕捉するには設計されていない。これは、検出器の特定の部分にぼやけた像を生成する可能性があるものの、それらの部分はこれらのより高いズームで光学像のデジタル表現を生成するために使用される検出器のサンプリング領域の外側にある検出器素子に対応する。これは、光学撮像システムに対する設計制約を大幅に低減し、それによってコストおよび複雑さを低減しつつ、依然としてズーム範囲全体にわたって所望の解像度を有する物体のデジタル画像を生成する。

【0011】

したがって、より一般的には、以下の実施形態が開示される。

概して、一態様において、可変ズーム撮像装置が開示される。可変ズーム撮像装置は、
 i) 物体領域に位置決めされた物体の像領域に像を形成するように構成された撮像光学系と、
 ii) 前記撮像光学系によって形成される像に対する開口数 NA を調整可能に設定する調整可能開口絞りと、
 iii) 前記像を検出するために前記像領域に位置決めされた検出器素子のアレイを含む電子検出器と、
 iv) 前記検出器素子の少なくともいくつかからの信号に基づいて前記像のデジタル表現を生成するために前記電子検出器に結合された画像処理回路とを含む。前記画像処理回路は、前記調整可能開口絞りによって設定される前記像に対する複数の異なる開口数の各々に対して前記物体の異なる倍率 m を有する前記デジタル表現を生成するものであり、前記異なる倍率 m は、 $m = m_{min}$ の最小倍率から $m = m_{max}$ の最大倍率まで変化してズーム比 $z = m / m_{min}$ および最大ズーム比 $z_{max} = m_{max} / m_{min}$ を規定する。

【0012】

前記可変ズーム撮像装置の実施形態は、以下の追加特徴のうちのいずれかを含み得る。

前記撮像光学系は、前記像領域に対し前記物体領域の一定の倍率を提供するように固定されてもよい。

【0013】

前記デジタル表現のズーム比 z は、前記デジタル表現を生成するための前記検出器素子が広がる視野領域に反比例して変化し得る。例えば、前記複数の異なる開口数のサイズは、前記デジタル表現に対する前記ズーム比 z の増加に対応して増加するように前記調整可能開口絞りによって設定され得る。さらに、特定の実施形態では、前記調整可能開口絞りによって設定される前記複数の異なる開口数のサイズは、1 よりも大きいズーム比の範囲にわたって、前記デジタル表現に対する前記ズーム比 z の増加に対応して線形に増加し得る。例えば、前記調整可能開口絞りによって設定される前記像に対する前記開口数 NA は、

【0014】

【数1】

$$NA \propto \frac{\lambda}{2p\left(\frac{z_{max}}{z}\right)}$$

によって与えられ得る。ここで、 p は検出器素子の最大横方向寸法であり、 λ は前記電子検出器上に前記像を形成するのに使用される光の中心波長である。

【0015】

前記デジタル表現は、 $N_1 \times N_2$ (N_1 および N_2 は正の整数) の画素アレイ内の各画素における少なくとも1つの強度値を含み得る。例えば、 N_1 および N_2 は各々400以上であってよい。

【0016】

前記電子検出器における前記検出器素子のアレイは、少なくとも $M \cdot N_1 \times M \cdot N_2$ のアレイと同じ大きさのアレイを含み得る。ここで、 M は z_{max} 以上の正の整数である。例えば、 z_{max} は3以上であってよい。特定の実施形態では、前記画像処理回路は、 $M/z \times M/z$ の検出器素子の対応するサブアレイ内の前記検出器素子からの前記信号のうちの1つ以上から前記 $N_1 \times N_2$ のアレイ内の各画素の前記強度値を決定することによって、ズーム比 z を有する前記デジタル表現を生成する。他の特定の実施形態では、前記画像処理回路は、 $M/z \times M/z$ の検出器素子の前記対応するサブアレイ内の前記検出器素子からの前記信号のうちの1つのみから前記 $N_1 \times N_2$ のアレイ内の各画素の前記強度値を決定することによって、ズーム比 z を有する前記デジタル表現を生成する。さらに別の特定の実施形態では、前記画像処理回路は、 $M/z \times M/z$ の検出器素子の前記対応するサブアレイ内の前記検出器素子からの前記信号の加重平均から前記 $N_1 \times N_2$ のアレイ内の各画素の前記強度値を決定することによって、ズーム比 z を有する前記デジタル表現を生成する。また、特定の実施形態では、前記デジタル表現内の複数の前記画素に対応する前記検出器素子の複数の前記サブアレイは、前記デジタル表現を生成するための前記検出器素子が広がる前記視野領域内で互いに反復的に離間している。

【0017】

概して、特定の実施形態では、前記画像処理回路は、1つまたは複数の検出器素子の対応するサブアレイ内の前記検出器素子からの前記信号のうちの1つ以上から前記 $N_1 \times N_2$ のアレイ内の各画素の前記強度値を決定することによってズーム比 z を有する前記デジタル表現を生成し、各前記対応するサブアレイ内の前記検出器素子の数は、前記開口絞りによって調整可能に設定される前記開口数 NA の増加に伴って減少する。

【0018】

前記撮像光学系は、前記物体からの光を前記開口絞りによって画定される瞳孔に向ける第1の光学系のセットと、前記瞳孔からの光を像領域に向ける第2の光学系のセットとを含み得る。前記可変ズーム撮像装置は、前記物体を照明することにより前記物体の前記像

を形成するための光を前記撮像光学系に提供するように構成された光源をさらに含み得る。例えば、前記光源はコヒーレントレーザであってよい。また、特定の実施形態では、前記可変ズーム撮像装置は、ビームスプリッタと基準面とを含む干渉計構成要素をさらに含み得る。前記光源はさらに、前記基準面を照明するように構成されており、前記ビームスプリッタは、前記撮像光学系によって前記像領域上に形成された前記像が干渉像となるように前記物体および前記基準面からの光をコヒーレントに組み合わせるように構成されている。

【0019】

特定の実施形態では、前記検出器素子のアレイの面積は $0.25 \text{ cm}^2 \sim 10 \text{ cm}^2$ である。

特定の実施形態では、前記可変ズーム撮像装置がフィゾー干渉計などである場合には、前記最小倍率は $1/10 \sim 1/5$ である。他の特定の実施形態では、前記可変ズーム撮像装置が顕微鏡干渉計などである場合には、前記最小倍率は $1/2 \sim 5$ である。

【0020】

特定の実施形態では、前記検出器素子のアレイ上に撮像される前記物体領域の面積は $0.04 \text{ cm}^2 \sim 10,000 \text{ cm}^2$ である。

前記調整可能開口絞りは連続的に調整可能であってよい。あるいは、前記調整可能開口絞りは、複数の離散的設定の各々離散的に調整可能であってよい。例えば、調整可能開口絞りは、機械的な開口絞りまたは電子的な開口絞りであってよい。また、例えば、開口絞りは、公称円形の開口を提供して開口数を規定してもよい。あるいは、例えば、開口絞りは、公称矩形の開口を提供して開口数を規定してもよい。

【0021】

前記可変ズーム撮像装置は、前記ズーム比に対するユーザ入力に応答して、前記調整可能開口絞りを電子的に調整するように構成されたユーザ制御インタフェースをさらに含み得る。例えば、前記ユーザ制御インタフェースは、前記ズーム比に対する前記ユーザ入力に応答して、前記検出器による前記物体の倍率を前記画像制御回路に設定させ得る。さらに、例えば、前記画像制御回路は、前記デジタル表現を生成するために使用される前記検出器素子のサンプリングを調整することによって、前記検出器による前記物体の倍率を設定するように構成され得る。

【0022】

特定の実施形態では、撮像光学系は、調整可能開口絞りが複数の異なる開口数のうちの最大のものに設定されているときにアレイ内の検出器素子のすべてにわたる全視野領域に対応する物体の全視野領域について物体からのすべての光線軌道を通過させるのに十分な大きさの直径である必要はない。しかしながら、そのような実施形態では、撮像光学系は、調整可能開口絞りが複数の異なる開口数のうちの最小のものに設定されているときに物体の全視野領域について物体からのすべての光線軌道を通過させるのに十分な大きさの直径を有し得る。

【0023】

特定の実施形態では、撮像光学系は、調整可能開口絞りが複数の異なる開口数のうちの最大のものに設定されるとき、アレイ内の検出器素子のすべてにわたる全視野領域にわたって回折限界像を生成しない。しかしながら、そのような実施形態では、撮像光学系は、調整可能開口絞りが複数の異なる開口数のうちの最小のものに設定されているとき、全視野領域にわたって回折限界像を生成し得る。また、例えば、撮像光学系は、調整可能開口絞りが複数の異なる開口数のうちの最大のものに設定されているとき、全視野領域の面積を z_{max} で割った面積に等しい最大ズーム視野領域にわたって回折限界像を生成し得る。像領域内の所与の視野（「FOV」）において開口数NAに対する回折限界像を生成する撮像光学系は、その撮像光学系が、コヒーレント照明のためにFOV内の任意の場所で $d = \lambda / \text{NA}$ 相当の小さな空間周期dを有する特徴を像領域に生成できることを意味する。

【0024】

概して、別の態様では、デジタルズームを実装する可変ズーム撮像装置とともに使用す

10

20

30

40

50

るための光学撮像システムが開示される。光学撮像システムは、i) 物体領域に位置する物体の像領域に像を形成するように構成された撮像光学系と、ii) 前記撮像光学系によって形成される前記像に対する開口数 NA を調整可能に設定する調整可能開口絞りを含む。前記撮像光学系は、前記物体領域内の前記物体の連続的に減少する視野に対応して前記調整可能開口絞りにより設定される前記像に対する複数の連続的に増加する開口数 NA の各々について、前記像を回折限界像として形成するように設計されている。

【0025】

前記光学撮像システムの実施形態は、前記可変ズーム撮像装置について上述した特徴のいずれかをさらに含み得る。

本明細書で参照される全ての文書（それがあある場合）は、その全体が参照によって組み込まれる。本開示と参照によって組み込まれる任意の文書とが矛盾する場合、本開示が優先する。

【0026】

本発明の1つまたは複数の実施形態の詳細は、添付の図面および以下の説明に記載される。本発明の他の特徴、目的、および利点は、説明および図面、ならびに特許請求の範囲から明らかになる。種々の図面における同様の参照符号は、同様の要素を示している。

【図面の簡単な説明】

【0027】

【図1A】図1Aは、第1の低倍率用の可変ズーム撮像装置の概略図である。

【図1B】図1Bは、第1の低倍率用の図1Aの可変ズーム撮像装置によって実施されるデジタルサンプリングの概略図である。

【図2A】図2Aは、第2の高倍率用の可変ズーム撮像装置の概略図である。

【図2B】図2Bは、第2の高倍率用の図1Aの可変ズーム撮像装置によって実施されるデジタルサンプリングの概略図である。

【図3】図3は、物体をセンサ上に撮像するための例示的な撮像光学システムの光線追跡図であり、システムは、コリメータ、開口絞り、および接眼レンズを有し、コリメータおよび接眼レンズのために薄いレンズ近似を使用する。

【図4】図4は、物体をセンサ上に撮像するための例示的な撮像光学システムの光線追跡図であり、システムは、コリメータ、開口絞り、および接眼レンズを有し、コリメータおよび接眼レンズのために薄いレンズ近似を使用する。

【図5】図5は、物体をセンサ上に撮像するための例示的な撮像光学システムの光線追跡図であり、システムは、コリメータ、開口絞り、および接眼レンズを有し、コリメータおよび接眼レンズのために薄いレンズ近似を使用する。

【図6】図6は、図3～図5に示すシステムの接眼レンズ部分の光線追跡図であり、図6および図7は、全物体視野およびより小さな開口絞り（図6に示す）と、 $1/3$ 物体視野サイズ（センサによりレンダリングされるデジタル表現の倍率が3倍になる）および3倍の大きさの開口絞り（図7に示す）との光線束を比較する図である。

【図7】図7は、図3～図5に示すシステムの接眼レンズ部分の光線追跡図であり、図6および図7は、全物体視野およびより小さな開口絞り（図6に示す）と、 $1/3$ 物体視野サイズ（センサによりレンダリングされるデジタル表現の倍率が3倍になる）および3倍の大きさの開口絞り（図7に示す）との光線束を比較する図である。

【図8】図8は、実際のレンズ要素を使用した6レンズ接眼レンズの光線追跡図である。

【図9】図9は、実際のレンズ要素を使用した6レンズ接眼レンズの光線追跡図である。

【図10】図10は、実際のレンズ要素を使用した6レンズ接眼レンズの光線追跡図である。

【図11】図11は、実際のレンズ要素を使用した5レンズ接眼レンズであって、デジタルズームを実装した可変ズームシステムの回折限界撮像を可能にするための本発明の光学設計簡略化を実装した5レンズ接眼レンズの光線追跡図である。

【図12】図12は、3レンズコリメータを含む、図8～図10に示された接眼レンズのための光学システム全体の光線追跡図である。

10

20

30

40

50

【図 1 3】図 1 3 は、2 レンズコリメータを含む、図 1 1 に示された接眼レンズのための光学システム全体の光線追跡図であり、光学システム全体は、デジタルズームを実装した可変ズームシステムの回折限界撮像を可能にする本発明の光学設計簡略化を実装しており、図 1 3 は、1 1 0 0 画素解像度での全物体視野の撮像を示す図である。

【図 1 4】図 1 4 は、2 レンズコリメータを含む、図 1 1 に示された接眼レンズのための光学システム全体の光線追跡図であり、光学システム全体は、デジタルズームを実装した可変ズームシステムの回折限界撮像を可能にする本発明の光学設計簡略化を実装しており、図 1 4 は、1 1 0 0 画素解像度での $1/3$ 物体視野（画素寸法が図 1 3 の画素寸法の $1/3$ ）の撮像を示す図である。

【図 1 5】図 1 5 は、ビームスプリッタを介して物体を照明するための照明源としてレーザ源をさらに含む図 1 3 および図 1 4 の光学撮像システムの概略図である。

【図 1 6】図 1 6 は、センサ上に形成される物体の像が基準波面と干渉して物体の干渉像を生成するように、基準要素を含むことによって干渉光学撮像システムとしてさらに実装された図 1 5 の光学撮像システムの概略図である。

【発明を実施するための形態】

【0 0 2 8】

画像ズームは、多くの光学システムにおいて重要な特徴である。画像のズームインは、小さい画像サイズよりも良好な横方向解像度をユーザに提供する。良好に設計されたズームシステムは、ズーム比に正比例して使用可能な解像度を増加させる。これは、通常、センサ上の撮像光線束の開口数を固定する一方、レンズ視野を減少させつつ物体空間開口数を増加させることによって行われる。新たな超高解像度センサの出現は、画像全体における解像度要素の必要数がセンサ全体におけるセンサ要素の数よりも大幅に少ない用途のサブセットに対して画像ズームのための代替方法（「デジタル」ズーミング）を提供する。しかしながら、上述したように、デジタルズームは、一般に、光学撮像システムの設計とデジタルズーム範囲全体にわたる検出器素子サンプリングとの間の不整合を受ける。

【0 0 2 9】

本発明の実施形態は、開口絞りのサイズが所望のズーム比に比例して増加し、比例的に小さくされたセンサの面積をサンプリングすることによって視野が調整される撮像システムを含む。光学システムは、現在選択されているズーム比によって指定される視野にわたって撮像を回折限界のまま維持するように設計される。このズームシステムの実施形態は、焦点を維持しながらズームを調整するために複数の光学要素を移動させる複雑なカム機構を必要とする標準的な光学ズームよりもはるかに単純とすることができる。さらに、少なくともいくつかの実施形態では、ズームシステムは、センサの表示領域を変更しながら開口絞りのサイズを調整することのみを必要とする。さらに、ズームシステムは、焦点を維持しつつ、多くの機械的に作動する光学ズームシステムにおいて観察される像のふらつきを回避することができる。

【0 0 3 0】

本発明の可変ズーム撮像システム 1 0 0 の代表的な実施形態が、第 1 の低倍率 m_1 （図 1 A）のものと第 2 の高倍率 m_2 （図 2 A）のものについて、図 1 A および図 2 A に示されている。可変ズーム撮像システム 1 0 0 は、物体領域 1 1 0 上の物体 1 1 5 の像領域 1 5 0 上に像を生成するように構成されている。以下でさらに説明するように、倍率 m_1 、 m_2 は、像の最終的なデジタル表現に関するものであり、像領域内の物体の像の光学倍率 m' とは対照的であり、光学倍率 m' は図 1 A および図 2 A に示された本発明の可変ズーム撮像システム 1 0 0 においては一定である。この光学要素に加えて、可変ズーム撮像システム 1 0 0 は、検出器素子の各々における光強度値を測定することによって像を検出するように構成された $N \times N$ の検出器素子のアレイ（本明細書では高分解能センサとも称される）を備えた電子検出器 1 4 5 を含む。画像処理回路 1 5 5 は、検出器 1 4 5 に電氣的に結合されており、強度値を記憶および処理して像のデジタル表現を提供する。画像処理回路 1 5 5 は、ユーザインタフェース 1 9 0 に電氣的に結合されており、そのユーザインタフェースからコマンドを受信して、デジタル表現をユーザインタフェース 1 9 0 に提供

する。可変ズーム撮像システム100の光学要素は、z軸に対応する光軸105に沿って延在し、1つまたは複数の光学要素のうちの第1の光学モジュール130（本明細書では「コリメータ」とも称される）と、1つまたは複数の光学要素のうちの第2の光学モジュール140（本明細書では「接眼レンズ」とも称される）と、第1の光学モジュール130と第2の光学モジュール140との間に位置付けられる開口絞り135を含む。光学モジュール130、140内の光学素子は、例えば、レンズおよび／または曲面ミラーを含み得る。本実施形態では、物体領域110と像領域150の双方がx-y平面に平行に延在しており、検出器145の検出器素子のアレイも同様である。開口絞り135は、光学撮像システムの像側開口数NAを変化させるための可変開口を提供し、ユーザがこの像側開口数NAを制御できるようにユーザインタフェース190に動作可能に結合されている。この開口は、像側開口数NAに倍率mを乗じたものに等しい物体側開口数も制限する。

【0031】

コリメータ130および接眼レンズ140は、物体領域110上の物体115の光学像を像領域150上に生成するための光学撮像システムを形成する。具体的には、光学撮像システム内の各光学素子の特性（例えば、寸法および屈折力）や、それら光学素子の互いの位置決めならびに物体領域および像領域の各々に対する位置決めによって、物体領域の各点から出射する光線が像領域内の対応する点で集合的に再結合されることにより像が形成される。これは、物体領域110上の3つの点および像領域150上の3つの対応する点に関して、図1Aおよび図2Aの各々に概略的に示されている。光軸105上に1組の対応点が存在し、物体視野および像視野（図1AにおいてA_{1O}およびA_{1I}で示されており、図2AにおいてA_{2O}およびA_{2I}で示されている）の外縁に2組の他の対応点が存在する。物体領域110の各点から出射する光線束の中心光線125は主光線と呼ばれ、図1Aおよび図2Aにおいて実線の矢印で示されている。図1Aおよび図2Aにおける光学撮像システムは、開口絞り135によって提供される開口の中心を通過する主光線が物体領域110および像領域150の各々に対して垂直であるため、テレセントリックシステムである。物体領域110の各点から出射する光線束の最も外側の光線120（図1A）および光線220（図2A）は周辺光線と呼ばれ、図1Aおよび図2Aにおいて破線の矢印で示されている。開口絞り135によって提供される開口の縁部は、周辺光線の経路と一致し、周辺光線が物体領域110から出て像領域150に入射する角度の範囲を定める。

【0032】

第1の低倍率 m_1 （図1Aに図示するもの）で動作する可変ズーム撮像システム100を構成するために、ユーザインタフェース190は、可変開口絞り135によって光線束に対するより小さな開口を提供し、それにより、光軸105に対して像領域150に入射する周辺光線120のより小さな角度 θ_1 をもたらすことで、より小さな像側開口数 NA_1 をもたらす。逆に、第2の高倍率 m_2 （図2Aに図示するもの）で動作する可変ズーム撮像システム100を構成するために、ユーザインタフェース190は、可変開口絞り135によって光線束に対するより大きな開口を提供し、それにより、光軸105に対して像領域150に入射する周辺光線220のより大きな角度 θ_2 をもたらすことで、より大きな像側開口数 NA_2 をもたらす。特定の実施形態では、接眼レンズ140はfの有効焦点距離を有するとともに、開口絞り135および像領域150はそれぞれ接眼レンズ140の前焦点面および後焦点面に位置付けられ、この場合、像領域に入射する周辺光線角度 θ は、 $\tan \theta = r / f$ および $NA = n \cdot \sin [\arctan (r / f)]$ の式を満たし、ここで、rは、光軸105からx-y平面に平行な開口絞りの開口の縁までの距離である。例えば、光軸に垂直に配置された円形開口絞りの場合、rは開口絞りの開口の半径である。多くの撮像システムにおいて一般的であるより小さな角度 θ の制限では、NAの式は $NA = n \cdot r / f$ に簡略化される。

【0033】

重要なこととして、可変ズーム撮像システム100の異なる倍率 m_1 、 m_2 は異なる開口絞りの開口に対応する一方、コリメータ130および接眼レンズ140の各々の光学要素は同じままであり、互いに移動せずまたは物体領域および像領域に対して移動せず、そ

れによって非常に安定した堅牢なシステムを提供する。むしろ、図 1 B および図 2 B にそれぞれ概略的に示されるように、異なる倍率を提供するためにデジタルズームが使用される。具体的に、図 1 A および図 1 B は、デジタル表現 195 を生成するための検出器 150 の複数の検出器素子の画像処理回路 155 によるサンプリングを概略的に示す。説明を容易にするために、これらの図におけるデジタル表現 195 は、 3×3 の画素アレイにわたる値を有するものとして示されており、検出器は、 9×9 の検出器素子のアレイを有するものとして示されている。

【0034】

図 1 B に示されるように、第 1 の低倍率 m_1 において、デジタル表現 195 内の各画素における強度値は、検出器 145 における 3×3 の検出器素子の空間的に対応するブロック内の 1 つまたは複数の値から導出される。例えば、強度値は、 3×3 の検出器素子のブロック内の中心検出器素子の強度値に単純に対応し得るものであってもよいし、 3×3 の検出器素子のブロック内の強度値の平均値に対応し得るものであってもよいし、 3×3 の検出器素子のブロック内の強度値の加重平均（例えば、中心検出器素子が周囲の検出器素子よりも大きく重み付けされるなど）に対応し得るものであってもよいし、または 3×3 の検出器素子のブロック内の強度値のより複雑な関数に対応し得るものであってもよい。いずれにしても、デジタル表現は、像視野寸法 A_{1I} に対応する像領域 150 上の検出器の全領域にわたる検出器素子から導出され、したがって、デジタル表現のスケールは、物体視野寸法 A_{1O} に対応する。

【0035】

一方、図 2 B に示されるように、第 2 の高倍率 m_2 では、 3×3 のデジタル表現 195 内の各画素における強度値は、検出器 145 の中心にある 3×3 の検出器素子のブロック内の対応する検出器素子の強度値から導出される。この場合、デジタル表現は、像視野寸法 A_{2I} に対応する像領域 150 上の検出器の全領域のうちの中央 3 分の 1 のみの検出器素子から導出され、したがって、デジタル表現のスケールは、物体視野寸法 A_{2O} に対応し、これは、図 1 B および図 2 B の例示的な描写に基づく、 A_{1O} の 3 分の 1 である。結果として、この例示的な描写では、第 2 の高倍率 m_2 は、第 1 の低倍率 m_1 よりも 3 倍大きい。

【0036】

当然ながら、実際の実施形態では、検出器の分解能は、より多くの検出器素子、例えば、少なくとも 1000×1000 またはさらに多くの $10,000 \times 10,000$ 以上の大きさの検出器素子を提供する。結果として、さらなる実施形態では、デジタルズームのより多くの漸次的変化が可能であり、デジタル表現のための連続的により大きくなる倍率は、検出器によって提供される検出器素子のアレイの連続的により小さくなる面積をサンプリングすることに基づく。この増加するデジタル倍率に光学的に適応するために、可変開口絞りは、開口絞りを対応的に増加させることにより NA を増加させるように設定されており、デジタル表現によって捕捉される検出器上の光学像の領域（すなわち、寸法 A_i を有する像視野）は、デジタル表現内の各画素に対応する検出器素子のブロック程度のサイズを有する画像特徴に関する回折限界となるようにされる。一方、この領域の外側の検出器上の光学像の品質は高品質である必要はなく、これは、デジタル表現がそれらの領域をサンプリングしないためであり、その結果、光学撮像システムに対する設計制約が軽減される。

【0037】

例えば、デジタル表現に必要な画像解像度が $N \times N$ 画素であると仮定すると、ズーム比 z の所望の範囲は $z_{min} = 1$ から $z_{max} = M$ の範囲であり、ここで、 M は正の整数である。さらなる実施形態では、検出器は、少なくとも $M \cdot N \times M \cdot N$ の検出器素子のアレイによって提供される解像度を有するように選択される。例えば、ズーム比が 1 である場合の一実施形態では、検出器アレイ全体が読み取られ、次いでサブサンプリングされることにより、 M 番目の行ごとにすべての M 番目の画素が選択されて光学像の $N \times N$ デジタル表現内の各画素の値が導出される。画像処理回路は、ユーザインタフェースとの通信を介し

10

20

30

40

50

て、このサンプリングを変更することにより、より高いズーム比を提供することができる。例えば、1に等しいズーム比を提供するためにM番目の行ごとにすべてのM番目の画素をサンプリングする代わりに、画像処理回路は、 $M / (M - m)$ に等しいズーム比 z を提供するために、 $(M - m)$ 番目の行ごとにすべての $(M - m)$ 番目の画素をサンプリングしてもよく、ここで、 m は0から $M - 1$ までであり、画像処理回路は、このサンプリングにおいて $N \times N$ デジタル表現を行うのに十分な検出器アレイの中央部分のみを読み取る。これらの整数サンプリング間隔を使用して、固有の検出器素子をサンプリングすることができる。例えば、 $M = 3$ である場合、 $m = 0, 1, 2$ の整数値は、それぞれ1, 1.5, 3のズーム比 z に対応する 3×3 , 2×2 , 1×1 の画素ブロックをサンプリングすることに対応する。ただし、検出器素子を補間することによって中間ズーム比を選択することもできる。さらに、図1Bおよび図2Bに関して上述したように、画像処理回路は、検出器素子の空間的に対応する $(M - m) \times (M - m)$ ブロック内の1つまたは複数の強度信号から、これらの検出器素子信号の平均化、重み付け平均化、またはより複雑な処理によって、デジタル表現内の各画素における強度値を導出することもできる。

【0038】

検出器素子のサンプリングによって提供される解像度を利用し、そのような各ズーム比のデジタル表現によって回折限界像が捕捉されることを可能にする光学像を提供するために、可変開口絞りによって（例えば、ユーザインタフェースによる制御下で）設定される像側開口数 NA は、

【0039】

【数2】

$$NA = \frac{\lambda}{2p(M-m)} \quad (1)$$

によって与えられ得る。

【0040】

ここで、 p は検出器素子の最小横方向寸法であり、 λ は検出器上に像を形成するのに使用される光の中心波長である。より一般的には、非整数サンプリングを含めて、 NA は、

【0041】

【数3】

$$NA = \frac{\lambda}{2p\left(\frac{z_{max}}{z}\right)} \quad (2)$$

に従って設定することができる。

【0042】

結果として、光学撮像システムは、デジタルズームの増加に対応して連続的に小さくなる像視野 A_E に対して、より大きな NA で回折限界されるように設計されることのみを必要とする。特定のズーム比について像視野の外側における回折限界でない検出器上の像品質は、それらの領域がそのズーム比に対するデジタル表現を生成するのに必要とされないので問題にならない。これは、光学撮像システムが補正される必要がある視野サイズが開口絞りの開口のサイズに反比例して減少するので、撮像光学系の光学設計者にとって重要な利点である。例えば、2倍のズームでは、絞りは1倍の場合の2倍の大きさであるが、視野は $1/2$ の大きさである。視野サイズに対する開口絞りサイズのこのトレードオフは、回折限界を意図する従来のデジタルズームシステムに通常必要とされるような全視野サイズおよび全解像度を備えた一次光学撮像システムを設計する必要がある場合に比べて、光学システムを設計することを容易にする。また、光学連続ズームまたはタレット (turret) 上の一連のズームリレーレンズに対するこのアプローチの利点は、開口絞り以外に移

動光学素子がないことである。これにより、ズーム中の画像位置シフトおよび焦点シフトを最小限に抑えるために必要な厳しいアセンブリ公差および位置合わせ公差が回避される。

【0043】

また、ユーザエクスペリエンスも大きく改善される。例えば、移動レンズがないので、カメラ上の像位置は、規定上、異なるズーム位置間で固定される。また、焦点はズームとともにシフトしないので、ユーザは最大倍率にズームして像の焦点を合わせることができ、より低いズームに切り替えたときに焦点がシフトしないことを確信することができる。さらに、物体とカメラとの間の生画素横方向較正はズーム比によって変化しないため、任意のズーム位置における単一較正は、すべてのズーム位置を較正するのに十分である。さらに、より低いズームにおける検出器素子アレイのサブサンプリングは、個々の検出器素子サイズが、サンプリングされる検出器素子間の距離と比較して小さいため、より高い機器伝達関数（「ITF」（instrument transfer function））を提供することができる。

10

【0044】

さらなる実施形態では、像側開口数NAとズーム比zとの関係は、上述した式（1）または（2）に示されるものとはいくらか異なり得る。例えば、式（1）および（2）は、物体のコヒーレント照明を仮定している。インコヒーレント照明を考慮するために、アッペ解像限界の一般式、

【0045】

【数4】

$$d = \lambda / (NA + NA') \quad (3)$$

20

を考えることができる。

【0046】

ここで、dは像内で分解可能な最小空間周期であり、NA'は物体の照明の開口数である。この照明開口数NA'は、コヒーレント照明におけるNA'=0から、像側開口数を満たすインコヒーレント照明におけるNA'=NAまで変化する。式（1）および（2）は、所与のズーム設定zに対応する最小空間周期を解決するコヒーレント照明のこのアッペの式に対応する。

30

【0047】

【数5】

$$d = 2p \left(\frac{z_{max}}{z} \right) \quad (4)$$

例えば、最大ズームでは $d = 2p$ であり、これは2つの検出器素子のサイズに対応する。したがって、インコヒーレント照明を含む他の実施形態では、式（1）および（2）における像側NAの式は、像側開口数を満たすインコヒーレント照明の限界において最大で $1/2$ に低減される。

40

【0048】

さらに、式（1）および（2）は、インコヒーレント照明を考慮するように修正されているか否かにかかわらず、オーバーサンプリングについて考慮せず、これにより、開口数は、所与のデジタルズーム設定に対応する最小空間周期を解決するために必要なものよりもいくらか大きい。したがって、他の実施形態では、像側開口数NAは、インコヒーレント照明を考慮するように修正されているか否かにかかわらず、式（1）および（2）によって与えられるものよりもいくらか大きくすることができる。しかしながら、重要なことは、像側開口数NAが、概して、ズーム比zの増加に対応して増加することである。

【0049】

本発明の特徴を実装する光学撮像システムは、シノプシス社（Synopsys）のCode

50

V（登録商標）光学設計ソフトウェアまたはゼマックス社（Zemax LLC）の類似のソフトウェア等の当該技術分野で周知の従来の光学設計ソフトウェアを使用して設計することができる。次に、本発明から得られる光学設計の簡略化を図3～図14に示す。これらの図は、そのような光学設計ソフトウェアから生成された光線トレース図を含み、撮像光学システムの様々な設計に関するいくつかの物点についての主光線や、いくつかの場合には周辺光線の伝播を示す。

【0050】

光学撮像システムを製造するコストは、一般に、光学素子の数ならびにそれらのサイズおよび精度によって決定される。したがって、コストは、素子の数を最小限に抑え、それらのサイズを縮小し、面に対する公差およびそれらの位置合わせの公差をより緩くすることによって制御される。多くの場合、光学撮像システムはテレセントリック撮像システムとして設計される。拡大または縮小のために設計されたテレセントリック撮像システムでは、典型的には2つのレンズ群が存在し、2つのレンズ群はそれら2つのレンズ群の間に共通の焦点を有するように分離される。システムの開口絞りはこの点に配置される。2つの焦点が一致する場所に絞りを配置することによって、レンズの物体側および像側の両方の主光線が光軸に平行になる。図1Aおよび図2Aの実施形態では、これらの2つのレンズ群は、コリメータ130および接眼レンズ140に対応する。

【0051】

図3は、センサ（すなわち、検出器素子のアレイを有する検出器）上に物体の像を生成するために薄レンズ近似を使用する単純テレセントリック光学撮像システムを示す。テレセントリック光学撮像システムは、共通の焦点を共有するコリメータおよび接眼レンズを含み、開口はその焦点に位置決めされる。レンズのサイズは、視野（図1Aおよび図2Aの実施形態における物体視野A₀に対応する）と開口絞りサイズとの組み合わせによって決定される。図4に示されるように、視野サイズが小さくなると、必要なレンズのサイズが小さくなる。さらに、図5に示されるように、開口絞りサイズを大きくすると、レンズの必要サイズが大きくなり、これは、物体視野内の各物点から出射する光線のより大きな角度範囲を光学システムが捕捉する必要があるためである。

【0052】

ここで、システムの接眼レンズ部分のみに着目すると、図6および図7は、全物体視野およびより小さな開口絞り（図6に図示するもの）に対する光線束と、1/3の物体視野サイズ系（センサによってレンダリングされるデジタル表現に対して3倍の倍率をもたらす）および3倍の大きさの開口絞り（図7に図示するもの）に対する光線束とを比較する。特に、図6のシステムでは、光線束は接眼レンズのより大きな直径を必要とするものの接眼レンズ上で比較的小さいビームフットプリントをもたらす一方、図7のシステムでは、より小さな直径が必要であるがビームフットプリントが大きく、このより小さな直径を実質的にカバーする。その結果、この3倍ズーム状態では、接眼レンズは、接眼レンズの中心の小さな領域にわたってのみ高品質であることが必要とされる。

【0053】

図8～図10は、複数のレンズ要素によって形成される実際の接眼レンズと同じ原理を示す。具体的に、図8は、センサの全視野にわたって3300画素解像度を提供するように設計された6要素接眼レンズを示す。対照的に、図9は、同じシステムを示すが、絞りサイズは1100画素解像度のみを提供するように低減されており、接眼レンズのレンズ要素上ではるかに小さい光線束フットプリントをもたらす。最後に、図10は、図6と同じ3300画素解像度を有する一方、1/3の物体視野（センサによってレンダリングされるデジタル表現に対して3倍の倍率をもたらす）を有するシステムを示し、これは、図9のものと同様の（またはさらに小さい）光線束フットプリントを示す。

【0054】

図8と図9との間で必要とされるレンズの直径を低減することによって、接眼レンズのコストが低減される。これらの撮像仕様を満たす接眼レンズはもはや6つの要素を必要としないので、さらなる簡略化およびコスト削減も可能である。例えば、新たな接眼レンズ

10

20

30

40

50

が図 1 1 に示されており、要素の数が 6 から 5 に低減されている。

【0055】

加えて、図 8 の接眼レンズとともに使用される大型コリメータは、全体のシステムレイアウトを提示する図 1 2 に示されるように、物体視野全体にわたって 3300 画素の撮像性能を達成するために 3 つの要素を必要とする。一方、図 1 1 に示される接眼レンズとともに使用され、全体のシステムレイアウト全体を提示する図 1 3 および図 1 4 に示されたコリメータは、2 つの要素しか必要とせず、さらなるコスト節約になる。図 1 3 は、1100 画素解像度で物体視野全体を撮像する本発明のシステムを示し、図 1 4 は、1100 画素解像度であるが、画素寸法が図 1 3 の画素寸法の 3 分の 1 であり、1/3 の物体視野（センサによってレンダリングされるデジタル表現に対して 3 倍の倍率をもたらす）を撮像するシステムを示す。

10

【0056】

図 1 2 ～図 1 4 に示す全体のシステムレイアウトは、コリメータと開口絞り位置との間の光路に沿ってビームスプリッタ要素（矩形要素として図示するもの）を含む。ビームスプリッタの目的は、物体（例えば、検査中の試験部品）を照明するための照明源（例えば、レーザ源）からの光を結合して、コリメータおよび接眼レンズによってセンサ上に撮像される光線を生成することである。これらの追加要素を含む全体のシステムが図 1 5 に示されている。具体的に、レーザ源からの光は、レーザ焦点レンズによって集束された後、ビームスプリッタによって反射され、2 レンズコリメータを通過して、物体視野内の物体（例えば、試験部品）を照射する。次に、この照明光に回答して試験部品から出射した光は、ビームスプリッタと、システムの像側開口数を規定するとともに 2 レンズコリメータの焦点に位置する開口絞りとを通して、2 レンズコリメータによって撮像される。開口絞りを通して光は、次いで、5 レンズ接眼レンズによって集束され、物体のデジタル表現を捕捉するために使用されるセンサ上で物体の光学像を形成する。

20

【0057】

他の実施形態では、異なる照明構成を使用することができる。例えば、照明源は側方からまたは後方からある角度で物体を照明してもよく、あるいは周囲光を使用して物体を照明してもよい。上述したように、照明はコヒーレント（例えば、レーザ源からなど）であってもインコヒーレントであってもよく、その結果、あるサイズの特徴を解像するのに必要な開口数 NA に異なる要件が生じる。

30

【0058】

さらに、他の実施形態では、可変ズーム撮像システムは、図 1 6 に概略的に示されるように干渉システムとして構成することができ、これは、図 1 5 のシステムに対する基準要素をさらに含み、5 要素接眼レンズを通して照明光を反射してセンサに戻すことで試験部品からの光と干渉させ、センサ上に試験部品の干渉像を形成して、その干渉像を画像処理回路により処理することで干渉像のデジタル表現を生成することができる。例えば、当該技術分野で知られているように、干渉撮像は、撮像される物体領域内の試験部品に関する表面高さ情報を提供するために使用することができる。具体的に、図 1 6 では、基準要素は、物体の直前に位置する透過フラットであり、照明光の小部分を反射してセンサに戻すことで、物体から反射する照明光と干渉させる。

40

【0059】

本発明の実施形態は、多くの異なる実装を有することができる。例えば、光学撮像システムによって提供される絶対倍率は、1 より大きくてもよく（すなわち、拡大してもよく）、または 1 より小さくてもよい（すなわち、縮小してもよい）。例えば、特定の実施形態では、最小倍率は、フィゾー干渉計における撮像光学系に適するように、1/10 ～ 1/5 の間であり得る。別の例では、特定の実施形態において、最小倍率は、顕微鏡干渉計内の撮像光学系に適するように、1/2 ～ 5 の間であり得る。また、例えば、検出器素子のアレイの面積は、0.25 cm² ～ 10 cm² の間のいずれかなど、実装に応じて広い範囲にわたって変化し得る。これに関連して、検出器素子のアレイ上に撮像される物体領域の面積も、その実装に応じて、0.04 cm² ～ 10,000 cm² の間のいずれかな

50

ど、広い範囲にわたって変化し得る。

【0060】

また、いくつかの実施形態では、調整可能開口絞りは、連続的に調整可能とした開口を提供するが、他の実施形態では、調整可能開口絞りは、複数の離散的設定の各々に離散的に調整可能である。調整可能開口絞りは、機械的に作動してもよいし、電子的に作動してもよい。また、図1Aおよび図2Aの実施形態は、ズーム比に対するユーザ入力に応答して調整可能開口絞りを調整するように構成されるユーザ制御インタフェースを有するが、他の実施形態では、開口絞りを手動で調整することもできる。典型的には、開口絞りの開口は円形であるが、正方形または長方形の開口を有する実施形態も可能である。

【0061】

〔範囲〕

本明細書および添付の特許請求の範囲で使用される「1つ」は、例えば、「単一」という用語が使用される場合のように文脈が明確に指示しない限り、複数の指示対象を含む。

【0062】

本明細書で使用される「適合した」および「構成される」という用語は、要素、構成要素、または他の主題が、所与の機能を実行するように設計および／または意図されることを意味する。したがって、「適合した」および「構成される」という用語の使用は、所与の要素、構成要素、または他の主題が、単に所与の機能を実行する「ことができる」ことを意味すると解釈されるべきではない。

【0063】

2つ以上のエンティティのリストに関して「～のうちの少なくとも1つ」および「～のうちの1つ以上」という句は、本明細書で使用される場合、エンティティのリスト内のエンティティの任意の1つ以上を意味し、エンティティのリスト内に具体的に列挙された各エンティティおよびすべてのエンティティのうちの少なくとも1つに限定されない。例えば、「AおよびBのうちの少なくとも1つ」（あるいは「AまたはBのうちの少なくとも1つ」または「Aおよび／またはBのうちの少なくとも1つ」も同等）は、Aのみ、Bのみ、またはAとBとの組み合わせを指し得る。

【0064】

第1のエンティティと第2のエンティティとの間に置かれた「および／または」という用語は、本明細書で使用される場合、(1) 第1のエンティティ、(2) 第2のエンティティ、および(3) 第1のエンティティおよび第2のエンティティ、のうちの1つを意味する。「および／または」で列挙された複数のエンティティも同じように解釈されるべきであり、すなわち、そのように結合されたエンティティの「1つまたは複数」と解釈されるべきである。「および／または」の句によって具体的に識別されるエンティティ以外の他のエンティティが、具体的に識別されるそれらのエンティティに関連するかまたは関連しないかにかかわらず、任意選択で存在してもよい。

【0065】

本明細書は、多くの特定の装形態の詳細を含むが、これらは、いずれかの発明すなわち特許請求され得るものの範囲に対する限定として解釈されるべきではなく、むしろ、特定の発明の特定の装形態に特有の特徴の説明として解釈されるべきである。

【0066】

別個の実施形態の文脈において本明細書に記載されている特定の装形態において組み合わせることもできる。逆に、単一の実施形態の文脈で説明されている様々な装形態は、複数の装形態で別々に、または任意の適切なサブコンビネーションで装することもできる。

【0067】

さらに、装形態は特定の組み合わせ（コンビネーション）で作用するものとして上記で説明され、最初にそのように特許請求されている場合もあるが、特許請求されている組み合わせからの1つまたは複数の装形態は、場合によってはその組み合わせから削除することができ、特許請求されている組み合わせは、サブコンビネーションまたはサブコンビネーシ

10

20

30

40

50

ヨンの変形を対象とすることができる。

【0068】

同様に、動作は特定の順序で図面に示されているが、これは、所望の結果を達成するために、そのような動作が示された特定の順序でもしくは連続的な順序で実行されること、またはすべての図示された動作が実行されることを必要とすると理解されるべきではない。特定の状況では、マルチタスク処理および並列処理が有利であり得る。さらに、上述の実施形態における様々なシステム構成要素の分離は、すべての実施形態においてそのような分離を必要とすると理解されるべきではなく、説明されたプログラム要素およびシステムは、一般に、単一のソフトウェア製品と一緒に統合され得るか、または複数のソフトウェア製品にパッケージ化され得ることを理解されたい。

10

【0069】

以上、本発明の特定の実施形態について説明した。他の実施形態は、以下の特許請求の範囲内に含まれる。いくつかの場合には、特許請求の範囲に記載された動作は、異なる順序で実行することができ、依然として望ましい結果を達成することができる。加えて、添付の図面に示される処理は、所望の結果を達成するために、図示された特定の順序または連続的な順序を必ずしも必要としない。いくつかの実装形態では、マルチタスク処理および並列処理が有利であり得る。

【0070】

本発明のいくつかの実施形態について説明したが、本発明の思想および範囲から逸脱することなく、様々な変形がなされ得ることが理解され得る。したがって、他の実施形態は、以下の特許請求の範囲内にある。

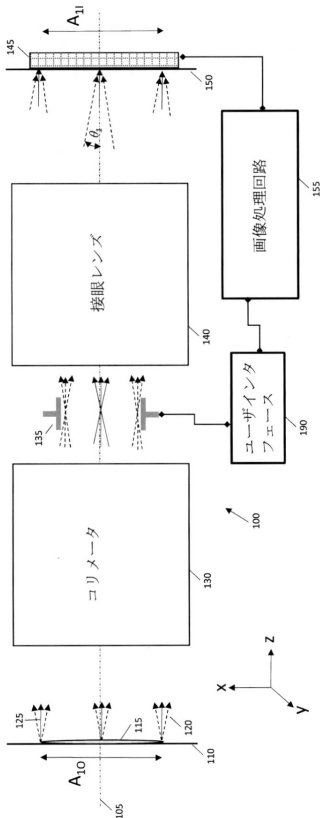
20

30

40

50

【図面】
【図 1 A】



【図 1 B】

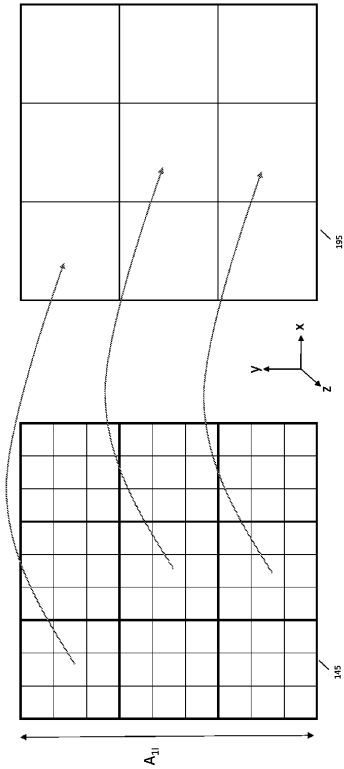
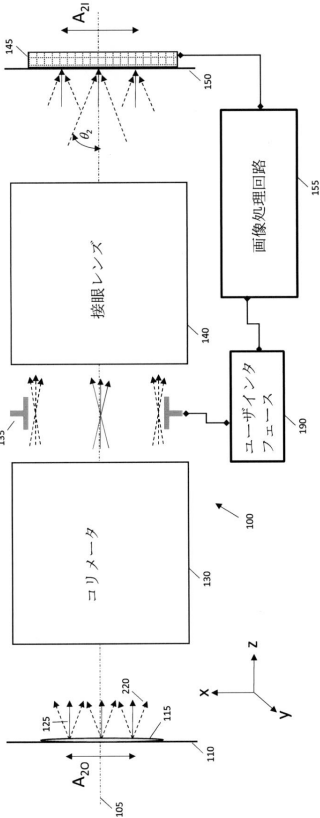


FIG. 1B

【図 2 A】



【図 2 B】

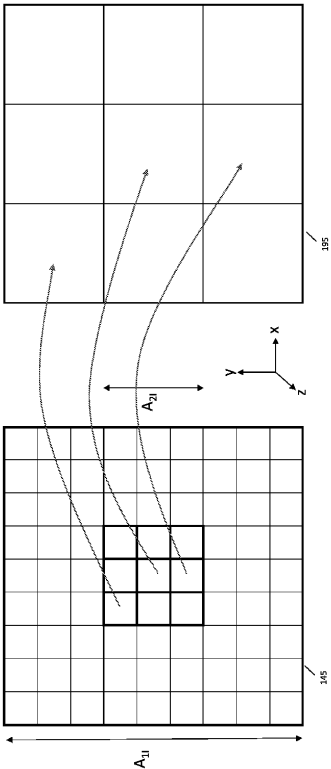


FIG. 2B

10

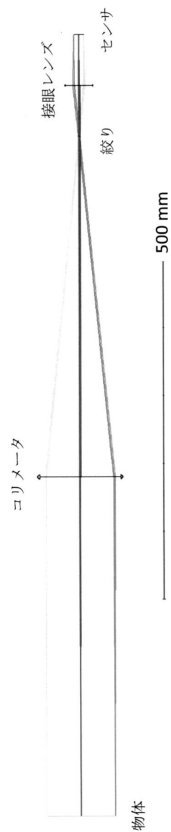
20

30

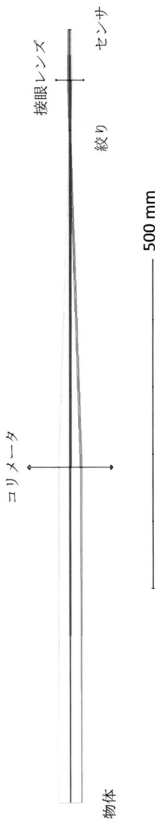
40

50

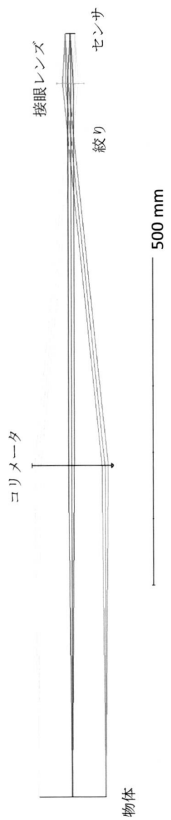
【図 3】



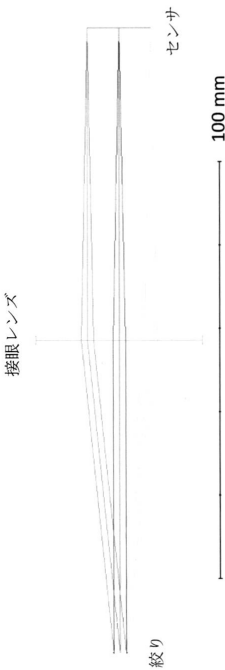
【図 4】



【図 5】



【図 6】



10

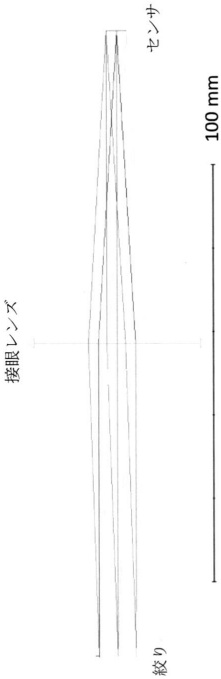
20

30

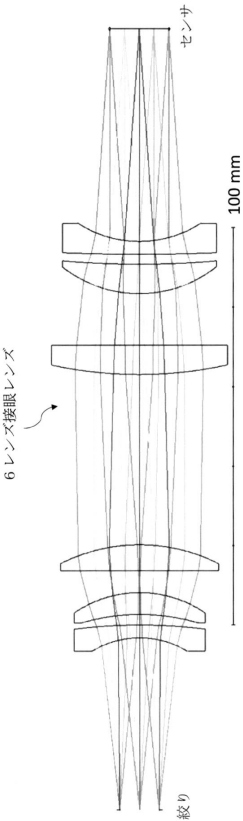
40

50

【図 7】



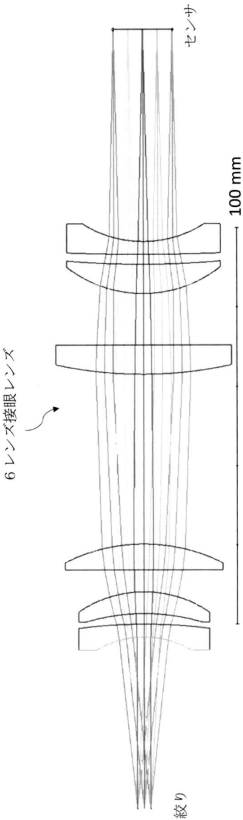
【図 8】



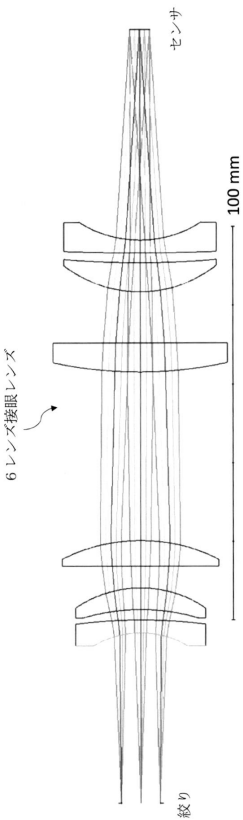
10

20

【図 9】



【図 10】

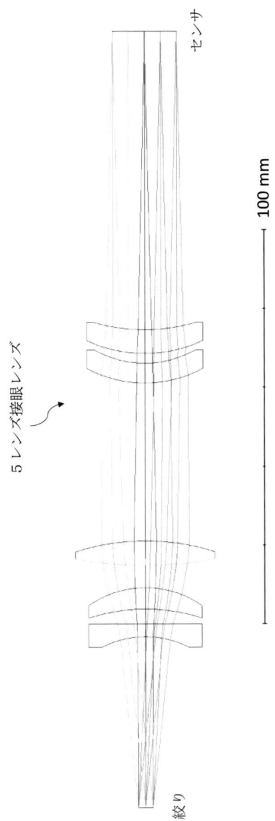


30

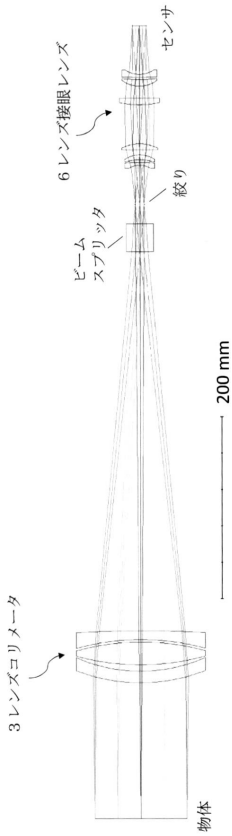
40

50

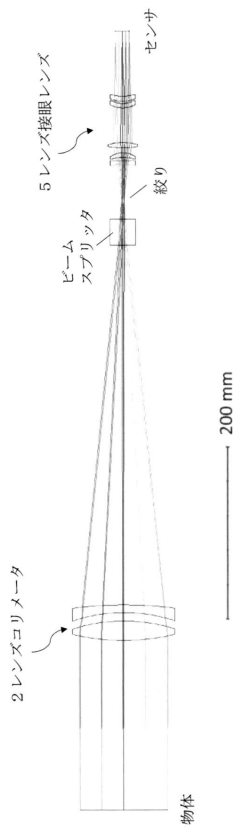
【図 1 1】



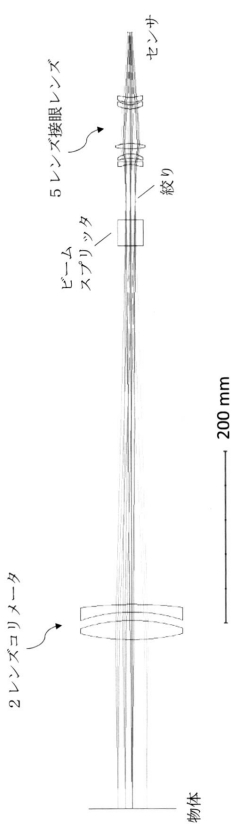
【図 1 2】



【図 1 3】



【図 1 4】



10

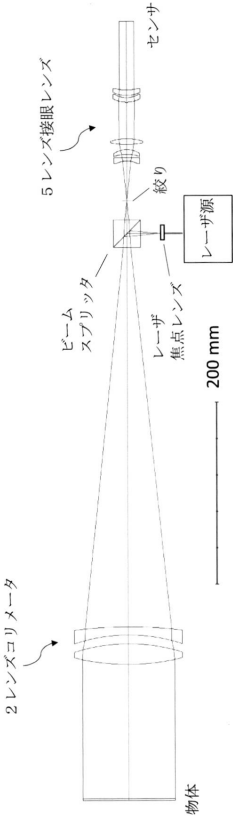
20

30

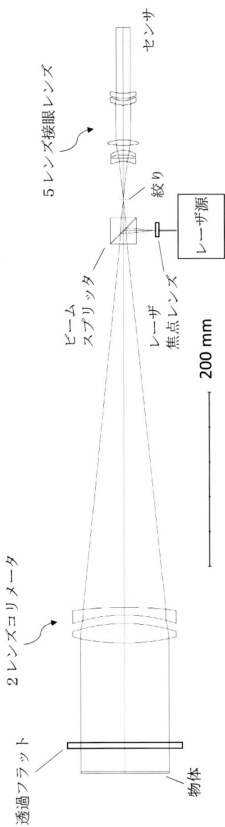
40

50

【図 15】



【図 16】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

ロード 388

審査官 登丸 久寿

- (56)参考文献 特開2002-064745 (JP, A)
特開2003-091860 (JP, A)
米国特許出願公開第2001/0048474 (US, A1)
特開2003-110903 (JP, A)
国際公開第03/028366 (WO, A1)
特表2016-528557 (JP, A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
- | | |
|------|-------|
| H04N | 23/69 |
| G02B | 23/00 |
| G03B | 7/095 |
| G03B | 5/00 |
| H04N | 23/55 |