

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号
特許第5665775号
(P5665775)

(45) 発行日 平成27年2月4日 (2015.2.4)

(24) 登録日 平成26年12月19日 (2014.12.19)

(51) Int. Cl.

F I

GO 2 B 13/14 (2006.01)

GO 2 B 13/14

GO 6 T 5/20 (2006.01)

GO 6 T 5/20

B

請求項の数 14 (全 20 頁)

(21) 出願番号	特願2011-553140 (P2011-553140)	(73) 特許権者	512187435
(86) (22) 出願日	平成22年3月5日 (2010.3.5)		レイセオン カナダ リミテッド
(65) 公表番号	特表2012-519919 (P2012-519919A)		カナダ国、ケー1アール 7エックス7、
(43) 公表日	平成24年8月30日 (2012.8.30)		オンタリオ、オタワ、360 アルバート
(86) 国際出願番号	PCT/US2010/026389		ストリート、スイート 1640
(87) 国際公開番号	W02010/102227	(74) 代理人	100104411
(87) 国際公開日	平成22年9月10日 (2010.9.10)		弁理士 矢口 太郎
審査請求日	平成25年2月2日 (2013.2.2)	(74) 代理人	100142789
(31) 優先権主張番号	12/398,600		弁理士 柳 順一郎
(32) 優先日	平成21年3月5日 (2009.3.5)	(72) 発明者	シャピエル、スタニスワフ
(33) 優先権主張国	米国 (US)		カナダ国、エルOケー 1アールO オン
			タリオ、ポート マックニコール、137
			シルバー パーチ クレセント

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 拡張被写界深度を有する正確な画像化方法および装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

装置であって、光景からの光の放射を光学軸に沿う方向に向かわせる光学系を有し、この光学系は長手方向の色分散を有し、この色分散は分光的特徴の機能であり、この分光的特徴は同一の応答に対して複数の別々の波長を含むものであり、前記光学系は前記複数の別々の波長を各々異なる焦点に合焦されるように構成されており、前記焦点は前記光学軸に沿って等間隔に離間しており、これにより拡張被写界深度領域に対して前記光学軸に沿って等間隔に多色ぼやけを生成するものであり、
前記光学系は、互いに相反する側に第1および第2の光学表面を有する第1のレンズと、前記第1のレンズから離間して配置された、互いに相反する側に第3および第4の光学表面を有する第2のレンズとを含み、前記第1、第2、第3、および第4の光学表面の1つは非球面ベースの回折光学表面であり、前記第1、第2、第3、および第4の光学表面のうち、上記1つの面とは別の1つは非球面である装置。

【請求項 2】

請求項1記載の装置において、前記光学系を通過した光の光路に位置する画像検出器を含むものである装置。

【請求項 3】

請求項2記載の装置において、前記画像検出器の出力を処理し、前記拡張被写界深度領域を含む前記光景の鮮明な画像を生成する構成を含むものである装置。

【請求項 4】

請求項 2 記載の装置において、前記画像検出器の出力をデコンボリューションして (deconvolve)、前記拡張被写界深度領域を含む前記光景の鮮明な画像を生成する構造を含むものである装置。

【請求項 5】

請求項 1 記載の装置において、前記光景からの光の放射は、前記第 1、第 2、第 3、および第 4 の光学表面を連続して通過するものであり、前記第 2 の光学表面は前記非球面ベースでの前記回折光学表面であり、前記第 4 の光学表面は前記非球面である装置。

【請求項 6】

方法であって、光景からの光の放射を光学軸に沿う方向に向かわせる光学系を使用する工程を有し、この光学系は長手方向の色分散を有し、この色分散は分光的特徴の機能であり、この分光的特徴は同一の応答に対して複数の別々の波長を含むものであり、前記光学系は前記複数の別々の波長を各々異なる焦点に合焦されるように構成されており、前記焦点は前記光学軸に沿って等間隔に離間しており、これにより拡張被写界深度領域に対して前記光学軸に沿って等間隔に多色ぼやけを生成する方法であって、

前記方法はさらに、互いに相反する側に第 1 および第 2 の光学表面を有する第 1 のレンズと、前記第 1 のレンズから離間して配置された、互いに相反する側に第 3 および第 4 の光学表面を有する第 2 のレンズとを含む前記光学系を構成する工程を含み、前記第 1、第 2、第 3、および第 4 の光学表面の 1 つは非球面ベースでの回折光学表面であり、前記第 1、第 2、第 3、および第 4 の光学表面のうち、上記 1 つの面とは別の 1 つは非球面である方法。

【請求項 7】

請求項 6 記載の方法において、前記光学系を通過した光の放射を画像検出器に衝突させる工程を含むものである方法。

【請求項 8】

請求項 7 記載の方法において、前記画像検出器の出力を処理する工程を含み、前記拡張被写界深度領域を含む、前記光景の鮮明な画像を生成するものである方法。

【請求項 9】

請求項 7 記載の方法において、前記画像検出器の出力をデコンボリューションする工程を含み、前記拡張被写界深度領域を含む、前記光景の鮮明な画像を生成するものである方法。

【請求項 10】

請求項 6 記載の方法において、前記光学系を設定する工程は、さらに、

前記第 1 および第 2 のレンズを配置する工程であって、前記光景からの光の放射が前記第 1、第 2、第 3、および第 4 の光学表面を連続して通過するようになるものである、前記配置する工程と、

前記第 2 の光学表面を選択する工程であって、当該第 2 の光学表面が前記非球面ベースでの回折光学表面となるものである、前記選択する工程と、

前記第 4 の光学表面を選択する工程であって、当該第 4 の光学表面が前記非球面となるものである、前記選択する工程と

を含むものである方法。

【請求項 11】

光学軸を有する光学系を設計する方法であって、

光景の分光的特徴を特定する工程であって、この分光的特徴は複数の波長を含むものである、前記特定する方法と、

前記複数の波長の範囲内で、同一の応答に対して複数の別々の波長を決定する工程と、

前記複数の別々の波長と前記光学軸に沿って等間隔に離散した複数の焦点との間のマッピング関係を生成する工程であって、このマッピング関係は前記別々の波長の各々を前記焦点のそれぞれの 1 つにマッピングするものである、前記生成する工程と、

前記光学系を前記マッピング関係に応じて設定する工程であって、前記光学系は長手方向の色ぼやけを有し、前記光学軸に沿って等間隔に離散した拡張被写界深度に対する多色

10

20

30

40

50

ぼやけを生成するものである、前記設定する工程と、
を含む方法。

【請求項 1 2】

請求項 1 1 記載の方法であって、前記特定する工程は、前記選択された波長の範囲内で、前記特有の光景のさらなるスペクトル応答曲線を特定する工程を含み、前記スペクトル応答曲線の各々は前記特有の光景のそれぞれの異なる温度に対応するものであり、

前記決定する工程は、前記選択された波長の範囲内で、前記スペクトル応答曲線の下
の面積を等面積の複数のセグメントに分割する異なる複数のさらなる波長ノードを決定する
工程を含むものであり、

前記生成する工程は、前記複数のさらなる波長ノードと前記光学軸に沿って等分に間隔
が空けられた複数のさらなる焦点との間のさらなるマッピング関係を生成する工程を含み
、このさらなるマッピング関係は、前記さらなる波長ノードの各々を前記さらなる焦点の
それぞれの 1 つにマッピングする工程であり、および

前記設定する工程は、前記マッピング関係のそれぞれに応じて実行されるものである
ことを特徴とする方法。

【請求項 1 3】

請求項 1 2 記載の方法において、前記マッピング関係の各々はそれぞれの誤差関数であ
り、および

前記設定する工程は、前記誤差関数の各々の同時結合最小化を実行する工程を含むもの
である

ことを特徴とする方法。

【請求項 1 4】

請求項 1 3 記載の方法において、前記実行する工程は、減衰最小二乗法を使用して実行
されるものである方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は画像処理技術に関し、より具体的には、拡張された被写界深度を提供すること
を意図する画像処理技術に関する。

【背景技術】

【0002】

従来の光学系は一般に、物体空間において被写界深度が限られているという欠点があり
、それに伴い像空間において焦点深度が限定されてしまう。例えば、これらの限界は、多
くの電気光学結像系（例えば、デジタルカメラ）および赤外線前方監視（forward
looking infrared: FLIR）システムで存在している。

【0003】

1 つの具体的な例として、非冷却検出器配列を有する既存の最新鋭 FLIR 撮像装置が
考えられる。一般に約 70 m から無限の範囲に位置する全ての対象または他の被写体は鮮
明に見えるが、より撮像装置に近いあらゆるものの検出器配列からの画像はぼやける。被
写体が撮像装置から例えば 15 m の距離で突然現れた場合、当該対象を特定するまたはさ
らには認識することは困難若しくは不可能である。前記撮像装置に焦点を再度合わせるよ
うにすることができるが、これは時間を要しかつ可動部分を含んでいることになる。さら
に重要なことは、この方法で撮像装置の焦点を再度合わせる試みにより、遠くにある物（
例えば 50 m から無限）の画像がぼやけてしまうので、その遠くにある物を認識するおよ
び / または正確に特定するは非常に困難である。

5 m から無限の異なる距離で同時に現れる複数の被写体の鮮明な熱画像を生成すること
ができる撮像装置が望まれている。しかしながら、実際問題として、非冷却検出器を有す
る従来型の携帯撮像装置でそのような深い被写界深度を達成することは単純な作業ではな
い。理論的に可能な方法の 1 つは、光学部を絞ることである。しかしながら、これは常に
かなりの光の消失が含まれるため、非冷却検出器を有する熱撮像装置にとっては問題であ

10

20

30

40

50

る（なぜならそのような検出器は適切に動作するため非常に速い光学部を必要とするからである）。更に、光学部を絞ることはまた、（少なくとも良く補正された光学部において）解像度の消失を含むものである。

1つの異なる手法は段階的な焦点調節を行い、同時に各段階で個別の画像を記録し、その後複数の記録画像を融合させる。しかしながら、これは可動部分を必要としかつ比較的遅く、複雑で費用のかかる解決策である。また、画像融合プロセスの間、いかなる所与の被写体の鮮明な画像も、他の焦点段階で撮られた同一被写体の不鮮明な画像と重複し、これはコントラストを下げ、高度でかつ長期の画像処理ルーチンを必要とする。上記タイプの既存の技術はそれらの使用目的に対してほとんどの場合十分であったが、あらゆる点において満足されては来なかった。

10

この出願の発明に関連する先行技術文献情報としては、以下のものがある（国際出願日以降国際段階で引用された文献及び他国に国内移行した際に引用された文献を含む）。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

- 【特許文献01】 米国特許出願公開第2006/171041号明細書
- 【特許文献02】 米国特許出願公開第2006/050409号明細書
- 【特許文献03】 米国特許第4965441号明細書
- 【特許文献04】 米国特許出願公開第2011/0026909号明細書
- 【特許文献05】 米国特許出願公開第2009/0316995号明細書
- 【特許文献06】 米国特許第5748371号明細書
- 【特許文献07】 米国特許第6097856号明細書
- 【特許文献08】 米国特許第6842297号明細書
- 【特許文献09】 米国特許第6927922号明細書
- 【特許文献10】 米国特許第7106511号明細書
- 【特許文献11】 米国特許第7224540号明細書
- 【特許文献12】 米国特許出願公開第2008/0158377号明細書

20

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献01】 Novel Optical Systems Design and Optimization XI 10 Aug. 2008 San Diego, CA, USA, vol. 7061, Proceedings of the SPIE - the International Society for Optical Engineering SPIE - the International Society for Optical Engineering USA LNKD - doi: 10.1117/12.793826 ISSN: 0277-786X

30

【図面の簡単な説明】

【0006】

本発明のさらなる理解が、次に続く詳細な説明から理解され、添付の図面と併せて得られるであろう。

40

【図1】図1は、本発明の態様を実施する、ならびに光学部、画像検出器、コンピュータ、および表示部を含む装置の線図である。

【図2】図2は、図1の装置における、3つの異なる波長の1つに対するスルーフォカス単色相対光学伝達関数（relative optical transfer functions: ROTFs）、対応する多色ROTF、および回析限界応答を示すグラフである。

【図3】図3は、図1の装置における、7つの異なる波長の1つに対するスルーフォカス単色ROTFs、対応する多色ROTF、および回析限界応答を示すグラフである。

【図4】図4は、図1の光学部を示す線図であり、光学部の意図的な長手方向（すなわち軸方向）色収差が全体システムの連続したブロードバンド、不均一、スペクトル応答にど

50

のようにマッチされているかを示す。

【図５】図５、６、および７は、仮定のシーンまたは被写体に対して、個々の異なる温度 300 K、350 K、および 400 K に対応する異なる黒体スペクトル曲線を示し、これらの曲線はそれらのピーク値に基づいて正規化されている。

【図６】図５、６、および７は、仮定のシーンまたは被写体に対して、個々の異なる温度 300 K、350 K、および 400 K に対応する異なる黒体スペクトル曲線を示し、これらの曲線はそれらのピーク値に基づいて正規化されている。

【図７】図５、６、および７は、仮定のシーンまたは被写体に対して、個々の異なる温度 300 K、350 K、および 400 K に対応する異なる黒体スペクトル曲線を示し、これらの曲線はそれらのピーク値に基づいて正規化されている。

10

【図８】図８は、図１に示すタイプの画像検出器を使用した従来の光学部の線図である。

【図９】図９は、不等間隔の波長ノードの長手方向色収差を光学軸に沿って均等に分配するように光学部を設定する手順を示す流れ図である。

【図１０】図１０は、図１の光学部でもある、図９の手順を使用して得られる例示的な光学部の線図である。

【図１１】図１１は、図１０の光学部を具体化する図１の装置を用いて達成される軸方向幾何学的光学伝達関数の動作を示すグラフである。

【図１２】図１２は、被写体の後ろに２つの輪を伴った熱源を有する実験的シーンの線図である。

【図１３】図１３は、図２のシーンにおける線Ａ－Ｂに沿った強度分布を表す３つの曲線を示すグラフである。

20

【発明を実施するための形態】

【０００７】

図１は、光学軸１３を伴う光学部１２と、画像検出器１４と、コンピュータ１６と、表示部１７とを含む装置１０の線図である。図１の前記装置１０は遠赤外（long wave infrared: LWIR）放射を含む動作範囲で設定されている、しかし、代わりに前記電磁スペクトルの他の範囲で動作するように設定することもできる。

【０００８】

前記光学部１２の例示的な実施については、あとで詳細に説明する。図１の目的は、前記光学部１２を図式的に説明することである。シーンが前記光学軸１３に沿った位置２７に配置される対象または被写体２６を含むと仮定する。また、簡単にするため、前記被写体２６が唯一２つの単色スペクトル線を伴う分光的特徴を有すると初めに仮定する。別の言い方をすれば、前記被写体２７によって放射、反射、または透過される光の放射は事実上異なる色を表す唯一２つの波長_１および_２を含む。以下での説明を明確にするため、図１は、各光の放射ビームを表す単一光線を使用する。このようにして、例えば、単一光線３１が、位置２７にあるとき前記被写体２６によって放射、反射、または透過される前記光の放射を示すのに使用される。

30

【０００９】

前記光学部１２は、長手方向（つまり軸方向）色収差をそこを通過する光の放射の中に意図的に導入するように設定される。図１の前記装置１０は、前記光学部１２によって導入される意図的な長手方向（つまり軸方向）色収差を除き、光学的に完全であると仮定する、このため異なる波長で構成され、前記光学部１２を通過する光の平行ビームが前記光学軸に沿って完全なしかし個別の焦点を結ぶ。このようにして例えば、前記光の放射３１の２つの異なる波長_１および_２は前記光学部１２によって異なって屈折され、そして、波長_１の光の放射３６は前記光学軸上の焦点３７で収束するが、波長_２の光の放射３８は前記光学軸上の異なる焦点３９で収束する。この説明を簡単にするためおよび一般性を失わないようにするため、前記画像検出器１４は前記光学軸１３に沿って前記波長_１の光の放射３６の焦点３７に位置付された。波長_２の光の放射３８の図示された光線は、前記画像検出器１４の前記焦点３７から外れた点４２でぶつかる。言い換えれば、前記被写体２６が位置２７にあるとき、波長_１の光の放射は前記画像検出器１４で焦点が

40

50

鮮明に合されるが、波長₂の光の放射は前記検出器14で意図的に不明瞭な状態である。図1の上部は、前記被写体26が位置27にある状態に対応するグラフを含み、さらに波長₁の単色スルーフォーカス光学伝達関数(optical transfer function: OTF)46、波長₂の単色スルーフォーカスOTF47、およびさらに曲線48が曲線46および47の合計である波長₁および₂の多色スルーフォーカスOTF48を描写する。

【0010】

さて、前記被写体26が、位置27から異なる位置56に前記光学部12から離れるように移動すると仮定する。参照番号58は波長₁および₂を含む、位置56の前記被写体26からの多色光の放射の1つの光線を表す。前記光学部12は長手方向(つまり軸方向)色収差を導入することにより、波長₁の単色光の放射61が焦点62を有し、前記画像検出器14上の前記光学軸13から外れた点42でぶつかる。参照番号61は波長₁で放射の単色光線を表し、これは、焦点62で前記光軸13と交差し、前記画像検出器上で前記光学軸から外れた前記点42でぶつかる。参照番号63は、前記焦点37で前記光学軸13と交差する、波長₂で放射の単色光を表す。

【0011】

簡単にするためおよび一般性を失わないようにするため、前記被写体26の位置56が図1で選択され、これにより波長₂の光の放射は前記画像検出器14の焦点37に収束する。これにより、前記被写体26が位置56にあるとき、波長₂の光の放射は前記画像検出器14上で焦点が鮮明に合されるが、波長₂の光の放射は前記画像検出器14上で意図的な度合いで不鮮明な状態である。図1の下部は、前記被写体26が位置56にあるときの状態に対応するグラフを含み、さらに波長₁の単色スルーフォーカス光学伝達関数(optical transfer function: OTF)66、波長₂の単色スルーフォーカスOTF67、およびさらに曲線68が曲線66および67の合計である波長₁および₂の多色スルーフォーカスOTF68を描写する。

【0012】

図1の実施形態において、前記画像検出器14は、LWIR光の放射を検出するように設定される従来装置である。特に、前記画像検出器14は、45ミクロンのピクセルピッチ、22サイクル/mmのサンプリング周波数、および11サイクル/mmのナイキスト周波数を伴う19,200ピクセル(160×120ピクセル)の非冷却マイクロボロメータ配列(microbolometric array)である。しかしながら、他の適切な装置を前記画像検出器14の代わりとして使用することも可能である。前記画像検出器14によって検出された画像は、電子的形態で74でコンピュータ16に供給される。前記コンピュータ16のハードウェアは従来のものであり、プロセッサ76とメモリ77とを含む。前記メモリ77は前記プロセッサ76によって実行されるコンピュータプログラムを格納し、また実行の際に前記コンピュータプログラムによって利用される静的および動的データを格納する。

【0013】

前記被写体26が位置27にある場合、74で前記画像検出器14から前記コンピュータ16によって受け取られる画像の示す波長₁の光の放射は鮮明に見えるが、波長₂の光の放射は不鮮明である。前記プロセッサ76によって実行される前記コンピュータプログラムは74で受け取った画像情報を取り込み、波長₁および₂のそれぞれの光の放射が鮮明に見える処理画像を生成するため、波長₂の不鮮明な光の放射を鮮明に見えるようにする(一意的な回復カーネル(recovery kernel)を備える)標準デコンボリューションアルゴリズムを適用する。この処理画像は、次に、従来の表示部17に供給され、表示される。この件についてはさらに詳しく後で述べるように、前記光学部12は、前記被写体26の特有の分光的特徴に機能するように設定される色分散を有し、これにより、拡張被写界深度領域に関して、前記光学軸13に沿って略空間的に一定である色ぼやけを生成する。この全体システムは、幾何学的光学伝達関数(geometric optical transfer function: GOTF)を有し、前

10

20

30

40

50

記プロセッサ 76 で実行される前記コンピュータプログラムは、前記 GOTF の逆数を回復カーネル (recovery kernel) として使用して、前記標準デコンボリューションアルゴリズムを実行する。

【 0014 】

一方、前記被写体 26 が位置 56 にある場合には、その後 74 で前記画像検出器 14 から前記コンピュータ 16 によって受け取られた画像の示す波長 λ_2 の光の放射は鮮明に見えるが、波長 λ_1 の光の放射は不鮮明な状態である。前記プロセッサ 76 によって実行される前記コンピュータプログラムは 74 で受け取られた前記画像情報を取り込み、前記波長 λ_1 および λ_2 のそれぞれの光の放射が鮮明に見える処理画像を生成するため、波長 λ_1 の不鮮明な光の放射を鮮明に見えるようにする (一意的な回復カーネル (recovery kernel) を備える) 標準デコンボリューションアルゴリズムを適用する。この処理画像は、その後従来の表示部 17 に供給され、表示される。

【 0015 】

前記ぼやけた光の放射と鮮明な光の放射の重ね合わせが前記被写体 26 の位置 27 および 56 のそれぞれに関する前記画像検出器 14 の同一反応を生成する場合、前記システムは前記被写体の画像を本質的に同一の不鮮明な状態で記録する。前記画像検出器 14 によって知覚されるぼやけが同一であるので、前記同一のデコンボリューションカーネル (deconvolving kernel) が両方の位置で使用することができる。実際、2つの同一のまたは酷似する被写体が同時にそれぞれの位置 27 および 56 に置かれた場合、ぼやけは逆フィルタリングの単一動作でそれらの画像の各々から同時に取り除かれ、両方の被写体を鮮明に描写する処理画像を生む。

【 0016 】

さらに詳細に、2a の全幅を有するスリット射出瞳と、前記画像検出器のピクセルピッチが p である前記画像検出器へのワーキング焦点距離 s' を有する一次元の光学系を検討する。(前記シーンまたは被写体からの光のスペクトル放射 / 反射、伝搬媒質および光学部を通る分光透過、および前記画像検出器のスペクトル応答を含む) 全体配列に関するスペクトル加重係数は λ_1 が c_1 で λ_2 が c_2 であると仮定する。さらに、 $c_1 + c_2 = 1$ となるような標準正規化を仮定する。また、前記光学部の長手方向 (つまり軸方向) 色収差が、前記画像検出器の平面から波長 λ_2 の焦点までの距離が dz' であると仮定する。前記検出器での幾何学的ぼやけのサイズは dz' / N であって、 N は前記光学部の有効 F 値である。このぼやけは、幾何学的点広がり関数 (point spread function : PSF) として解釈され、その (幾何学的光学限界での対応する単色 OTF 応答を示す) フーリエ変換は、

【 0017 】

【数 1】

$$\text{sinc}[(v'/N)(z' - dz')],$$

【 0018 】

であって、 v' は検出器空間のサイクル / mm の空間周波数であり、 $\text{sinc}(x) = \sin(Bx) / (Bx)$ である。この時点で、前記空間周波数および長手方向 (すなわち軸方向) 焦点ぼやけに関する無次元変数を以下のように導入するのが都合良い、

【 0019 】

【数 2】

$$v = v' / v'_{nyq}$$

$$dz = dz' / [(2p) N],$$

【 0020 】

であって、 $v'_{nyq} = 1 / (2p)$ は前記画像検出器のナイキスト周波数を表し、 p は前記検出器のピクセルピッチである。前記ナイキスト定理に従って、前記ぼやけの適切

なサンプリングを獲得するため、唯一 1 以下の正規化周波数 ν および 1 以上の正規化焦点移動 d_z に興味がある。

【 0 0 2 1 】

$c_1 = c_2 = 1/2$ または言い換えれば前記 2 つのスペクトル線（波長 λ_1 および λ_2 を表す）の両方が同じ強度を有し、これにより同一の検出器応答を生成する場合、多色 O T F 応答は両方の被写体位置が同じであることは明らかであろう。この場合には、次に逆フィルタリングがいずれかの位置の前記被写体の鮮明な画像および 2 つの位置のそれぞれの 2 つの類似の被写体の鮮明な画像を伝送する。

【 0 0 2 2 】

上記のように、デコンボリューションが拡張焦点深度を有する画像を得るのに使用することができる。デコンボリューション使用の基礎となる理論の幾つかを簡単に述べる。線形システム理論によれば、インコヒーレント照明での拡張被写体の光学画像に適用されて、前記画像の強度分布 $g(x', y')$ は 2 つの関数のコンボリューションである。第 1 は前記被写体の拡大バージョンでの強度分布 $o(x', y')$ であり、単一点の画像での強度分布を表す第 2 は、インコヒーレント点広がり関数 $psf(x', y')$ として知られている。このように、

【 0 0 2 3 】

【数 3】

$$g(x', y') = o(x', y') \otimes psf(x', y'), \quad (1)$$

【 0 0 2 4 】

であって、 \otimes はコンボリューションの演算（接合積族（F a l t u n g））を表し、 (x', y') は像平面でのデカルト座標である。これは、前記画像面が前記光学軸に沿って位置 z' にあることを前提とする。

【 0 0 2 5 】

一般的に、 $psf(x', y')$ は光学系によって引き起こされる、回析および波面収差によるぼやけ効果を含む低下を表す。前記系が完全な場合には、その後回析のみが $psf(x', y')$ の形状に影響を及ぼす。この議論では、前記点広がり関数の回析限定バージョンが $psf_0(x', y')$ によって表されている。

【 0 0 2 6 】

二次元のコンボリューションは、前記画像領域にわたる複雑で長期の二次元積分を付含めることができる。フーリエ変換に関するよく知られているコンボリューション定理の使用を通して、上記の関係は、対応する強度関数のフーリエ変換の積として同等に表現することができる。特に、 $G(u', v')$ 、 $O(u', v')$ 、および $OTF(u', v')$ が強度分布のフーリエ変換 $g(x', y')$ 、 $o(x', y')$ 、および $psf(x', y')$ である場合、前記コンボリューションは、前記積によって単純に置き換えられ、

【 0 0 2 7 】

【数 4】

$$G(u', v') = O(u', v') \cdot OTF(u', v'), \quad (2)$$

【 0 0 2 8 】

であって、 (u', v') は空間周波数を表し、 $psf(x', y')$ のフーリエ変換は、検討中の前記光学系の光学伝達関数 $OTF(u', v')$ である。

【 0 0 2 9 】

上記方程式 (1) および (2) は数学的に等価であるが、方程式 (2) によって表される空間周波数領域法の方が通常使用するのに便利のため、以下の説明においてこれを使用する。この方法は、完全なデジタル結像系の他の構成要素（例えば、前記画像検出器、前記電子機器、および前記表示部）から成り、それらはそれ自体の伝達関数を有する。しかしながら代わりに、上記の方程式 (1) によって表される前記画像空間領域で対処することも可能である。

【 0 0 3 0 】

デコンボリューションは、拡大された被写体でぼやけていない強度分布 $o(x', y')$ を回復するための古典的なテクニックであり、そのぼやけた画像の強度分布 $g(x', y')$ が十分であることが提供され、前記光学部の点伝がり関数 $psf(x', y')$ によって表される前記ぼやけの原因と本質が知られている。前記デコンボリューションは、単に $O(u', v')$ に関する上記方程式 (2) を解くことによって空間周波数領域で同等に実行することができる、

【 0 0 3 1 】

【 数 5 】

$$O(u', v') = G(u', v') X[1/OTF(u', v')], \quad (3)$$

10

【 0 0 3 2 】

そして、 $O(u', v')$ に達するためにこの結果の逆フーリエ変換を取り込む。前記空間周波数領域でデコンボリューションを実行する方法は、しばしば逆フィルタリングとして言及され、逆数の

【 0 0 3 3 】

【 数 6 】

$$1/OTF(u', v') = K(u', v') \quad (4)$$

【 0 0 3 4 】

が回復関数または回復カーネルとして知られている。

20

【 0 0 3 5 】

この既知のデコンボリューションの方法（前記関数 $o(x', y')$ によって説明されるような真の被写体または対象を回復する試み）は本明細書では使用しない。本明細書での目的は、画像の回折限定バージョン $g_0(x', y')$ を元の状態に戻すことである。このような画像は前記光学部が収差のなかった場合にのみ作成され、これにより考慮された画質劣化の源のみが光の回折である。実際問題として当然、純粋な回折限界的な光学系は現実の世界では存在しない。それにもかかわらず、この方法は多くのイメージングアプリケーションおよび装置に対してまだ十分に適切である。

【 0 0 3 6 】

前記光学が完全である、言い換えれば本当に回折限界である場合、前記光学の光学伝達関数は、 $OTF_0(u', v')$ として表現することができる。便宜上、相対的光学伝達関数 (relative optical transfer function: ROTF) を導入するのは役に立つ：

30

【 0 0 3 7 】

【 数 7 】

$$ROTF(u', v') = OTF(u', v') / OTF_0(u', v'). \quad (5)$$

【 0 0 3 8 】

回折限界的な光学系に関して、興味のある全ての空間周波数に対して $ROTF(u', v') = 1.0$ である。実際上の理由で本明細書では、画像収集に使用される前記検出器配列のナイキスト空間周波数より低い空間周波数に対してのみ考慮する。（前記検出器ナイキスト周波数は、前記検出器空間サンプリング周波数 $1/p$ の半分であり、 p はピクセルピッチである。）さらに、空間周波数バンドは、前記画像コントラストがゼロに落ちるまたはノイズフロアより下がる場所またはコントラスト反転が起る場所では無視される。

40

【 0 0 3 9 】

本明細書での目的は、被写体または対象の画像の回折限界バージョンを回復することであるので、通常の逆フィルタリング方法は以下のように修正される：

【 0 0 4 0 】

【数 8】

$$G_0(u', v') = G(u', v') \cdot [OTF_0(u', v') / OTF(u', v')]. \quad (6)$$

【0041】

そこで、前記回復関数は前記相対的伝達関数の逆数であり、言い換えれば $1 / ROTF(u', v')$ である。逆フーリエ変換を上記結果に適用した後、前記回析限界の画像 $g_0(x', y')$ が最終的に元に戻される。

【0042】

回復カーネル (recovery kernel) $1 / ROTF(u', v')$ を成立させることに関して以下の発見的近似を考慮する：

【0043】

【数 9】

$$OTF(u', v') = OTF_0(u', v') \times GOTF(u', v'). \quad (7)$$

【0044】

方程式 (7) は、前記 OTF の真の値 (波面収差および回析の複合効果を計上する方法で計算される) が 2 つのより単純な項の積として表すことができることを示している。第 1 の項は、単純に対応する回析限界の OTF であり、回析のみを含み収差は含まない。第 2 の項は、光学伝達関数 ($GOTF$) の幾何学的近似であり、光線収差のみを含み回析は含まない。

【0045】

前記 $GOTF$ 項

は、幾何学的な光線パターンを使用して予測されるように (または言い換えれば、前記光線の間の回析および干渉効果を無視して、横軸の光線収差のみを考慮に入れることによって)、前記 PSF の強度分布のフーリエ変換を実行することによって容易に発見することができる。これは、特に光学が 3 つ以上の波の収差を有する場所で、迅速な数値 OTF 計算を現状に対して十分に正確に許容することによって前記計算を単純化する。本明細書において、分析の目的でおよび特に適切なぼやけた画像を生成する光学の迅速かつ効率的な設計のために、これを使用する。方程式 (6) と (7) を比較することによって、回析限界の画像を元に戻すために要求される前記回復カーネル (recovery kernel) が単に前記 $GOTF$ の逆数、または言い換えれば、 $1 / GOTF(u', v')$ であることが明らかである。

【0046】

上記のように、前記 $GOTF$ は、所与の画像平面での横軸の光線収差が知られているとき発見することができる。従って、おおそ一定のぼやけを有するひどくぼやけた画像は、前記光学の $GOTF$ が知られているとき、変換されてその回析限界の同等のものに戻ることができ、その後逆フィルタリングの処理で回復カーネル (recovery kernel) として使用される。

【0047】

図 1 に示される特定の実施形態に戻って参照すると、1 つの目的は、前記光学には長手方向 (つまり軸方向) 色収差がなかったかのように、位置 27 および 56 の両方にある前記被写体 26 の回析限界の画像を回復させることである。この様な場合、幾何学的光学近似での逆フィルタリング処理は、以下の回復利得関数の使用を必要とする：

【0048】

【数 10】

$$2 / \{ \text{sinc}(vz) + \text{sinc}[v(z + dz)] \} \equiv 2. \quad (8)$$

【0049】

前記被写体のデコードされた鮮明な回析限界の画像は、前記被写体の両方の位置で同一である。前記光学によって提供されなければならない長手方向 (つまり軸方向) 色収差は

10

20

30

40

50

、
【 0 0 5 0 】

【 数 1 1 】

$$dz' = 2p N dz = - (s')^2 K/V, \quad (9)$$

【 0 0 5 1 】

であって、 V は屈折、回折、またはハイブリッド光学のいずれかに関して関連のあるアップベ数であり（本明細書では単純にするため接触する一組の薄いレンズによって表す）、対応する光強度 $K = 1 / (EFL)$ において、 EFL は光学モジュールの有効な焦点距離である。 V によって表される利用可能な色分散の合計に関して、最小が要求される長手方向（つまり軸方向）色収差を伝送する最小のバックワーキング（back-working）共役 s' がある。イメージング遠隔被写体には、これは最小値 $EFL_{min} = 2pN/V$ である。

10

【 0 0 5 2 】

最小画像共役のためのこの要件はまた、物体空間（前記検出器配列の所与の寸法）での最大可能な視野を設定する。前記長手方向（つまり軸方向）色収差の量に応じて、完全な重複（ $dz = 0$ 、前記長手方向（つまり軸方向）色収差を有さない完全な光学の参照シナリオを表す）、部分的重複（おおよそ一定のスルーフォーカスOTF応答での全ての中間位置における被写体処理）、または重複なし（前記被写体の2つの個別の位置のみの処理）であり得る。

20

【 0 0 5 3 】

便宜上および単純にするため、図1の先の検討では、前記被写体26が2つの波長（ λ_1 および λ_2 ）のみを放射、反射、または透過すると仮定した。実際問題として当然で、前記被写体26は2つの波長のみではなくそれ以上の波長を通常放射、反射、または透過する。従って、説明目的のため、図1の前記被写体26が3つ以上の異なる別々の波長を放射、反射、または透過し、かつ、前記光学12の意図的な長手方向（つまり軸方向）色収差が前記光学軸13に沿って同等の強度の複数の、別々の、等距離の焦点を生成して、そのような焦点のそれぞれが異なる波長に対応するようになると仮定する。

【 0 0 5 4 】

各追加の波長のため、または言い換えれば各新規の等間隔焦点のため、長手方向（つまり軸方向）色収差の新規増分量が必要であり、このようにして結果として生じる画像にはよりぼやけが見える。前記2つの波長の場合、正規化色焦点移動 dz は、ナイキスト条件を満足させるため1より小さくないことが必要であるが、同時に連続する単色OTFsの適切な重複を提供するため2未満でなくてはならない。その結果として、結果として生じる多色スルーフォーカスOTF応答は、拡張された焦点深度にわたってわずかな変化があるだけである。前記ステップの最適選択は、含まれる別々の波長（スペクトル線）の数 M によって決まる。

30

【 0 0 5 5 】

前記被写体26が2つのみの異なる波長の代わりに3つの異なる波長を放射、反射、または透過すると仮定する。図2は、ナイキスト周波数での前記3つの波長のそれぞれに対する前記スルーフォーカス単色相対的OTFs（ROTFs）（前記軸ステップ $dz = 10$ によって分離される前記単色焦点を有する）を示すグラフであり、また結果として生じる単色ROTF101および（前記長手方向（つまり軸方向）色収差を表さない）回析限界の応答102を示す。

40

【 0 0 5 6 】

さて、前記被写体26が、2つまたは3つだけの異なる波長の代わりに7つの異なる波長を放射、反射、または透過すると仮定する。図3は、ナイキスト周波数での（前記軸ステップ $dz = 10$ によって分離される前記単色焦点を有する）前記7つのスルーフォーカス単色相対的OTFs（ROTFs）を示すグラフであり、また結果として生じる多色ROTF106および（前記長手方向（つまり軸方向）色収差を表さない）回析限界の応答

50

102を示す。等距離の焦点が漸次増加されると、拡張焦点深度が漸次大きくなり、鮮明な画像を回復するのに必要な回復獲得(recovery gain)がまた漸次大きくなる。同じ強さのMスペクトル線のため、前記スペクトル重量はすべて同一であり、すべて $1/M$ に等しい。同時に、前記焦点深度は約M倍拡張され、回析限界の画像を達成するために要求される回復獲得係数(recovery gain factor)はMである。

【0057】

実際的な問題として当然、図1の前記被写体26は、2つ、3つ、または7つの特定の波長のみを放射、反射、または透過するのではないであろう。代わりに、それは光の放射の比較的連続するスペクトルを放射、反射、または透過する。図4は、図1の前記被写体26および前記光学12を示す線図であり、前記光学12の意図的な長手方向(つまり軸方向)色収差が前記全体システムの連続的なブロードバンドの、不均一なスペクトル応答にマッチする。

【0058】

この点について、 $R(\lambda)$ が図1に示す全体配列の累積スペクトル応答を表し、それは、(1)前記被写体26の分光的特徴、(2)前記画像検出器14のスペクトル応答、および(3)全ての媒体(大気、あらゆる光学屈折および反射物質、あらゆる回析構造物、あらゆる薄膜コーティングなどを含む)を通る分光透過の積である。図4の右下部分は、 $\lambda_{min} \sim \lambda_{max}$ の範囲のこの累積スペクトル応答 $R(\lambda)$ を表す曲線126を有するグラフを描写する。 $\lambda_{min} \sim \lambda_{max}$ の範囲において、前記 $R(\lambda)$ 累積応答曲線126の下全面積はAである。概念的に、前記 $R(\lambda)$ 曲線126の下この面積Aを等面積 $A = A/M$ のMセグメントに分ける。図4において、8つの前記Mセグメントが参照番号131~138で特定される。

【0059】

第1のセグメント131において、前記第1のセグメントを等面積 $A/2 = A/2M$ の2つのサブセグメントに分ける第1の波長 λ_1 を選択する。132から138までの他のセグメントのそれぞれに対して、関連するセグメントを等面積 $A/2 = A/2M$ の2つのサブセグメントに分けるそれぞれの波長 $\lambda_2 \sim \lambda_M$ を得るために、同様のことを行う。これらのセグメントを分ける波長 $\lambda_1 \sim \lambda_M$ は、本明細書では波長ノードと言及する。今述べたような方法は、前記波長ノード $\lambda_1 \sim \lambda_M$ を選択するための1つの可能な技術である。しかしながらこれの代わりに、他の適切な技術を使用して波長ノードを選択することも可能である。1つの実施例として、前記波長ノードを前記対応するセグメントの重心の横座標で定義することができる。

【0060】

さらに図4を参照して、前記波長ノード λ_1 と λ_2 の間にそれぞれが面積 $A/2 = A/2M$ を有する2つのサブセグメントがあることに気付くであろう。このように、前記2つの波長ノード λ_1 と λ_2 の間の前記曲線126の下面積は、 $A = A/M$ である。一般化すると、図4の隣接する波長ノード $\lambda_1 \sim \lambda_M$ のそれぞれの対の間の前記曲線126の下面積は同一であり、 $A = A/M$ である。これからの当然の結果として、波長目盛りに沿って隣接する波長ノード $\lambda_1 \sim \lambda_M$ の間は不均一な間隔であることに気付くべきである。当然のことながら、前記累積スペクトル応答 $R(\lambda)$ が前記全体のスペクトルバンド $\lambda_{min} \sim \lambda_{max}$ にわたって比較的一定であった場合、前記波長ノードは等間隔である。しかし、実際のところ、前記累積スペクトル応答 $R(\lambda)$ は典型的には不均一であり、これにより前記波長ノードは典型的には不均一な間隔である。

【0061】

前記波長ノード $\lambda_1 \sim \lambda_M$ の各々が面積 $A = A/M$ を有するそれぞれのセグメント131~138と関連するので、前記M対応スペクトル線のそれぞれに対するスペクトル重量は同じであり、 $1/M$ である。このように、ブロードバンドスペクトル応答の場合は、同じ強さの一群のM離散スペクトル線として都合良く再公式化される。一般に、これは一群の不等距離波長ノード $\lambda_1 \sim \lambda_M$ を生じさせ、それは、図4を参照して、前記光学軸1

10

20

30

40

50

3 に沿って等間隔にある一組の焦点 $F P_1 \sim F P_M$ にマッピングされ、前記焦点 $F P_1 \sim F P_M$ の各々は前記波長ノード $\lambda_1 \sim \lambda_M$ のそれぞれの 1 つに直接対応する。図 4 において、マッピング機能は、159 の破線ボックスによって図式的に表されている。

【0062】

不等距離波長ノード $\lambda_1 \sim \lambda_M$ の等距離の焦点 $F P_1 \sim F P_M$ へのマッピングは、適切な長手方向（つまり軸方向）色収差（色焦点移動）を提供する光学 12 で達成することができる。1 つの分析レベルにおいて、純粋な屈折光学のため、前記必要な色点移動を波長（または回折のためのその逆数 $1/\lambda$ ）の低次多項式によって表すことができる。一方、技術系のためのより実用的な方法は、前記要求される等距離の色焦点移動値をメリット関数の目的として設定すると同時に、前記光学を市販のレンズ構造のコンピュータプログラムで最適化する。このことについて、適切なレンズ設計コンピュータプログラムの例として、カリフォルニア州パサデナの Optical Research Associates から商標名 CODE V で市販されているプログラム、ワシントン州ベルビューの Zemax Development Corporation から商標名 ZEMAX（登録商標）で市販されているプログラム、またはニューヨーク州ピッツフォードの Sinclair Optics, Inc. から商標名 OSLO で市販されているプログラムがある。これらは単なる例であり、これらの代わりに他の適切なレンズ設計コンピュータプログラムを使用することも可能である。

【0063】

図 4 において 159 で図式的に示されるマッピング機能に関して、このマッピング機能を実行する 1 つの方法は、誤差関数を使用して行うことである。より具体的には、1 つの適切な誤差関数は、個々の欠陥の適切に加重された二乗の合計である。特に、幾つかの欠陥値が計算され、各欠陥値は目標値と興味のある特定のパラメータの計算値との間の差である。このような欠陥値の各々は次に 2 乗され、その後この 2 乗の値にそれらの相対的重要性に従って重みが付けられる。次に、前記重み付き 2 乗が合計される。

【0064】

上記の ZEMAX（登録商標）を使用する際、前記誤差関数は一連の「AXCL」オペランドを使用して生成することができる。各 AXCL は色焦点移動（2 つの異なる波長に対応する 2 つの焦点の間の軸方向距離）を計算する。このようにして、図 4 について言えば、波長 λ_1 および λ_2 に対するノードを使用して AXCL (1, 2) を計算し、波長 λ_2 および λ_3 に対するノードを使用して AXCL (2, 3) を計算し、波長 λ_3 および λ_4 に対するノードを使用して AXCL (3, 4) を計算し、と続く。これらの AXCL オペランドは、隣接する波長ノードから対応する隣接の焦点間の軸方向距離へのマッピングを行う。

【0065】

前記 ZEMAX（登録商標）ソフトウェアは、次に、これら AXCL の全てが等しくなるような方法で初期レンズ設定を再最適化するように求められる。AXCL が収束しなければならないような特定の値を定めるのではなく、単に全ての AXCL が等しくなる設定を求めるようにするのが良く、これによって最適化プロセスがこの追加の自由度を活用することができるようになる。技術的には前記誤差関数を定義するために、連続する AXCL の間の差のみが欠陥として ZEMAX（登録商標）の中に入力される必要がある。前記 ZEMAX（登録商標）ソフトウェアは、次に前記一連の AXCL オペランドにわたって使用することができる、AXCL が結果として生じるレンズ設定において全て等しくなる「EQUA」オペランドを有する。ZEMAX（登録商標）の最適化アルゴリズムは、次に前記初期レンズ設定を取り込み、前記誤差関数を次第に減少させる目的で、前記誤差関数（重み付き 2 乗の合計）が選択された閾値より低くなるまでその設定（例えば、レンズ曲率半径、レンズ厚さ、レンズ間の空隙など）のパラメータを反復的に調整する。

【0066】

前記 ZEMAX（登録商標）ソフトウェアは、通常このカスタム誤差関数（重み付き 2 乗の合計）と初期設定誤差関数とを組み合わせるように設計されている。前記初期設定誤

10

20

30

40

50

差関数の1つの特徴は、（普通は望ましくないと考えられている）長手方向（つまり軸方向）色収差を取り除くように設計されていることである。しかしながら、本明細書で開示されている最適化を実行するとき、前記初期設定誤差関数は無効に（または少なくとも中心波長でその単色部分に減少）されるべきである。これにより、前記初期設定誤差関数が前記カスタム誤差関数に対して機能しなくなることを確かにする。言い換えれば、前記初期設定誤差関数は、前記カスタム誤差関数が意図的に確立しようとする前記長手方向（つまり軸方向）色収差を取り除こうと試みないことを確実にする。

【0067】

特定のシーンまたは被写体26に適切な、意図的な長手方向（つまり軸方向）色収差を有する光学12を設定する1つの技術の実施例を提供する。上記のように、図1の装置10は、電磁スペクトルの様々な異なる部分のいずれかに用いられるように設定され得るが、LWIR光の放射（約8～12μmの波長）で用いられるように設定されることもある。このように、以下の説明は前記スペクトルのLWIR部分との関連で行うが、開示される方法は前記電磁スペクトルの他の部分にも同様に適用可能である。

【0068】

この説明目的のため、興味のある対象または被写体26が約300K～400Kの間の温度を有すると仮定される。例えば、健康な人は、人種、年齢、または性別に関係なく、概して約310K（37℃）の光の放射を放射する。図5、6、および7の各々は、7～14μmの範囲にわたるそれぞれの異なる温度に対応する黒体スペクトル曲線を示す。すなわち、図5の曲線は温度300Kに対応し、図6の曲線は温度350Kに対応し、なら

【0069】

図5～7の各々において、前記曲線の下の面積は、等面積の8つのセグメントに分割されており、これらのセグメントは縦の実線によって区切られている。次に、これら8つのセグメントは、等面積の2つのサブセグメントに分けられており、縦の破線によって示されている。前記縦の破線に対応する波長は、本明細書において波長ノードと言及される。いずれの2つの隣接する縦の破線の間における前記曲線の下面積は同じであり、さらにあらゆる2つの隣接する縦の実線の間における前記曲線の下面積と等しい。

【0070】

先に説明したように、前記画像検出器14（図1）は、19,200ピクセル（160×120ピクセル）を有する（および45ミクロンのピクセルピッチを有する）非冷却マイクロボロメータ配列（microbolometric array）である。こうして、サンプリング周波数は22サイクル/mmであり、ナイキスト周波数は11サイクル/mmである。当技術分野で知られているように、このタイプの非冷却配列は非常に速い光学（例えば、約f/1程度）を必要とする。大気および前記光学12の分光透過は、前記画像検出器14のスペクトル応答とともに、理想的な「頂冠」スペクトル曲線を定義する。結果として、前記全体のシステムの合計累積スペクトル応答R（ ）は、所与の熱的シーンまたは被写体を示す黒体スペクトル曲線に比例する。その結果として、図5～7に示す前記波長ノードは、効果的に前記全体システムを表している。

【0071】

上記のように、前記画像検出器14は非常に速い光学12を必要とする。図8は、14で示すタイプの画像検出器とともに使用される既存の光学181の線図である。前記光学181は、2つに分かれて間隔の空いたレンズ183と184とを含む。前記レンズ181は前面186と後面187とを有し、前記レンズ184は前面188と後面189とを有する。前記画像検出器14の保護筐体は、光強度を有さない保護ウィンドウ192を含む。前記光学181は、60ミリメートルの焦点距離と、f/1.15のF値とを有する。前記レンズ183および184はそれぞれ、カルコゲナイドガラスから作られ、なぜなら前記カルコゲナイドガラスはLWIR光の放射を透過するからである。光学に妥当な視野（field of view：FOV）を提供するため、レンズの数を低く抑えな

がら、前記後面 1 8 7 および 1 8 9 はそれぞれ非球面である。

【 0 0 7 2 】

前記低いレンズの数を維持しながら、長手方向（つまり軸方向）色収差を補正するため、前記レンズ 1 8 3 の前記裏面 1 8 7 は同心回折光学表面（*d i f f r a c t i v e o p t i c a l s u r f a c e* : D O S）であり、それは非球面ベース上の前記レンズの絞り（瞳）に最も近くに提供される。前記 D O S は前記非球面ベースに比較的低コストで、ダイヤモンド切削を使用して形成できる。図 8 のこの従来技術の配置において、1 8 7 の前記 D O S は、特に長手方向（つまり軸方向）色収差を補正するように設計されている。対照的に上記のように図 1 の前記光学 1 2 は、特定の方法で意図的な長手方向（つまり軸方向）色収差を導入する。図 8 の 1 8 1 で示す従来技術の光学は出発点として使用され、長手方向（つまり軸方向）色収差を意図的に導入するだけでなく、不等間隔の波長ノードに対する長手方向（つまり軸方向）色収差の均等な分布を提供する方法で導入するような（図 5 ~ 7）前記光学 1 2（図 1）を得るように修正される。

10

【 0 0 7 3 】

図 9 は、適切な意図的な長手方向（つまり軸方向）色収差を有する光学を設定する 1 つの可能な手順を示す流れ図であり、特に前記光学が前記光学軸に沿って不等間隔の波長ノードの前記長手方向（つまり軸方向）色収差を均等に分布する。ブロック 2 0 1 において、1 若しくはそれ以上のスペクトル応答曲線が特有のシーンまたは被写体として特定される。本明細書の説明にある実施例に、図 5 ~ 7 に示される前記スペクトル応答がある。次に、ブロック 2 0 2 において、波長ノードの各組がそれぞれの曲線に特定され、前記波状ノードは、前記スペクトル応答曲線の下の面積を均等なセグメントに分割する。図 5 ~ 7 の各々において、前記波長ノードは縦の破線に対応する波長である。

20

【 0 0 7 4 】

次に、ブロック 2 0 3 において、誤差関数またはマッピング関係が各組の波長ノードに対して生成される。前記誤差関数は、前記組の波長ノードを前記光学軸に沿って均等に間隔が空けられた複数の焦点にマッピングされる。このような誤差関数またはマッピング機能の 1 つは、図 4 に図式的に 1 5 9 で示されている。

【 0 0 7 5 】

そして、ブロック 2 0 6 において、前記光学 1 2 は、前記誤差関数の各々の同時結合最小化を含む方法で設定される。本明細書で説明する特定の実施例において、これは標準 Z E M A X（登録商標）レンズ設計ソフトウェアの不可欠な要素である減衰最小二乗アルゴリズムを使用して実行された。しかしながら、代わりに異なるレンズ設計ソフトウェアおよび/または異なる自動最適化アルゴリズムを使用することも可能である。

30

【 0 0 7 6 】

図 1 0 は、図 1 の装置 1 0 で使用され、本発明の観点を具体化する前記結果として生じる光学 1 2 の線図である。前記画像検出器 1 4 は、そのゼロ出力ウィンドウ 1 9 2 とともにまだ存在している。前記光学 1 2 は 2 つのレンズ 2 2 1 および 2 2 2 を含む。前記レンズ 2 2 1 はカルコゲナイドガラスでできており、前記レンズ 2 2 2 はゲルマニウムでできている。前記光学 1 2 は、5 7 . 5 ミリメートルの焦点距離と $f / 1 . 1 0$ の F 値とを有する。前記レンズ 2 2 1 は前面 2 2 6 と後面 2 2 7 とを有し、前記レンズ 2 2 2 は前面 2 2 8 と後面 2 2 9 とを有する。前記表面 2 2 9 は非球面である。前記表面 2 2 7 は、非球面ベースの D O S であり、当該 D O S は 2 8 個の同心円状の輪（コンセントリックリング）を含む。前記 D O S は光強度にのみ貢献し（または言い換えれば、高次項を有さない）、意図的な長手方向（すなわち軸方向）色収差の望ましい程度を提供する。図 1 1 は、前記装置 1 0（図 1 および 1 0）で達成される軸方向 G O T F 性能を示すグラフである。図 1 1 は、黒体被写体の温度が 3 0 0 K ~ 4 0 0 K で変化するとき、拡張被写界深度にわたる最小変化があることを示す。

40

【 0 0 7 7 】

前記被写界深度が増加できるという事実の比較実証を提供するために、実験が実施された。前記実験には、8 ~ 1 2 μm 熱バンド（L W I R）で光の放射の画像を記録するよう

50

に設計された単一の従来の赤外線カメラを使用した。前記カメラは、 $76,800$ ピクセル (320×240 ピクセル) および $45\ \mu\text{m}$ のピクセルピッチの不冷却赤外線検出器を含んだ。前記カメラは、2つの非球面カルコゲナイドレンズを有する従来の十分な修正 $f/1.1$ レンズ配置を含み、 60mm の有効焦点距離を有した。比較評価を促すため、意図的な長手方向 (つまり軸方向) 色収差の適切な程度および分布を追加するように設計された設定とともに別々の追加回折素子が作られた。前記回折素子は、前記従来のカメラの前に選択的に取り外し可能に搭載されることにより、前記カメラが前記回折素子の有無にかかわらず使用することができた。この取り外し可能な回折素子は、7つの輪と、ゼロ合計回折 - 屈折光強度と、回転対称とを有した。 300K の黒体源に対して上述の手順を使用するように設計された。前記最後の最適化は、上述した方法で ZEMAX (登録商標) レンズ設計ソフトウェアを使用して実行された。前記 ZEMAX (登録商標) はまた、ぼやけた画像をデコンボリューションするための対応するカーネルを生成するのに使用された。

10

【0078】

前記カメラの焦点が、当該カメラから 150cm から無限の間隔を空けた選択された位置に合わされた。前記カメラの焦点が合わされた、選択された位置に比べて拡張した視野に配置された被写体とともに、様々な実験シーンが提供された。各実験シーンに対して、所定の位置の前記取り外し可能な回折素子で画像が撮られ (例えば、意図的に彩色的にぼやけた画像)、また前記回折素子なしで画像が撮られた (例えば、従来の画像)。前記ぼやけた画像からの情報は、それらの画像の処理バージョンを得るため、 $1/\text{GOTF}$ カーネルを使用してデコンボリューションされた。前記処理画像は、前記従来の画像の被写界深度より大きい被写界深度を有する鮮明な画像であった。

20

【0079】

1つの実施例として、図12は、2つの輪271および272を伴う被写体の後ろに熱源を有する実験シーンの線図である。これらの輪271および272は、従来の被写界深度よりさらに離れたおおよそ5倍の距離で前記カメラから間隔を空けられた。上述したように、このシーンと同様の画像が前記取り外し可能な回折素子でまたはなしで撮られた。前記取り外し可能な回折素子で撮られた画像に関する前記画像からの情報は、処理画像を得るため上記で説明したカーネルを使用してデコンボリューションされた。図13は、(1) 図12の線A-Bに沿った期待強度分布を表す曲線281、(2) 前記取り外し可能な回折素子なしで撮られた従来の画像からの線A-Bに沿った強度分布を表す曲線282、および(3) 回折素子で撮られた意図的なぼやけた画像からの情報のデコンボリューションを通して得られた処理画像から線A-Bに沿った強度分布を表す曲線283である。前記期待強度分布を表す前記曲線281は、前記カメラの通常の焦点限界内の位置に配置される2つの輪の被写体を伴い、前記回折素子なしで撮られた個別の参照画像を基にした近似値であった。図13において、従来の画像の曲線282から、前記2つの輪がぼやけており、前記強度分布が前記輪の領域内で比較的均一であることが分かる。結果として、前記輪かまたは前記輪の間の分離のいずれかを明確に特定するのは困難である。それと対照的に、前記処理画像からの前記曲線283は、むしろはっきりと前記2つの輪の各々 (およびそれらの間の分離) を特定する。

30

40

【0080】

幾つかの選択された実施形態の先の議論から明らかなように、本明細書で開示の技術は、時間および/または空間で著しく変化しないスペクトル特性を有するイメージングシーンまたは被写体に適切な、作業に基づいた光学デジタルシステムで使用できる。それは、このようなシーンまたは被写体の前記分光的特徴の少なくとも部分的知識を前提とする。このような作業に基づいたシステムの幾つかの実施例は、熱探知カメラ、光学的結像器 (optical imager)、および蛍光顕微鏡である。

【0081】

前記開示技術の1つの態様は、光軸に沿って長手方向 (すなわち軸方向) 色収差の所定の分布を有する光学系によって生成される意図的にぼやけた画像の、デコンボリューション

50

ン（同様の復号または回復動作）を使用した、拡張焦点深度（拡張被写界深度）の提供である。この所定の分布は、前記全体システムの累積スペクトル応答に適切にマッチすることを確実にし、これは、シーンまたは被写体の分光的特徴、媒質（大気）の分光透過、結像光学系の分光透過、および画像検出（または画像を記録するための構造）のスペクトル応答を含む。

【0082】

1つの関連する考察は、システムの所与の累積スペクトル応答関数が、前記光学の適切な所定の長手方向（すなわち軸方向）色収差を使用することにより、対応する軸方向一定の多色イメージング応答（例えば、OTFまたはPSF）にマッピングできることである。言い換えれば、シーンまたは被写体の分光的特徴が与えられかつ前記システムのスペクトル特性が知られている場合、波長に関連する色焦点移動の変化を表す曲線は、前記光学軸に沿った多色ぼやけが拡張深度の領域にわたり一定であるような方法で形作ることができる。この条件がおおよそでも満たされる場合、あらゆる標準デコンボリューション技術は、単一動作でぼやけた画像を復号するのに（一意の回復カーネルとともに）使用することができ、そして、前記拡張被写界深度にわたる対応する鮮明な画像が得られる。外来の高価なオプティカルハードウェアは必要としない。このようにして、例えば、位相マスク、または別々に処理される多数の独立したスペクトル（カラー）チャネルへの光の放射のスペクトル分割を実行するハードウェアを使用する必要はない。大幅に異なる温度で撮られた灰色体の分光的特徴に関して、前記光学の軸方向色収差でおおよそ一定のぼやけを得ることは可能である。これは重要なことである、なぜなら熱赤外（ヒト、動物、空、砂、エンジンなどを含む）での熱の共通ソースの多くは、よく知られている灰色体モデルによって特徴付けられることができるからである。本明細書で開示される技術の使用を通して、拡張被写界深度を有するIR赤外線画像の新世代を提供するのに実際に役に立つ。

【0083】

前記開示技術は、シーンまたは被写体が少なくとも2つの個別のスペクトル線（2つの個別の波長）を有する光の放射を放射、反射、または透過する場所で働く。厳密に言えば、前記開示技術は、単一スペクトル線（単一波長）から成る単色光の放射には使用できない。しかし、現実の世界では純粋な単色光の放射は存在せず、準単色光の放射が観察できる。準単色光の放射が、高分散性の光学が完全な単色焦点移動を作成するのに十分なスペクトルバンド幅を有する場合、前記開示技術は成功裏に使用することができる。当然の成り行きとして、シーンまたは被写体から受け取られる光の放射が多くの個別スペクトル線から成る（または連続するブロードバンドスペクトル分布を有する）ブロードバンド光の放射である場合、より良い結果が得られる。

【0084】

上記で開示された方法が、幾何学的光学ベース回復カーネルを使用して逆フィルタリングを介して画像のぼやけ修正を達成するが、代わりに多くの他のデコンボリューション技術（従来の線形技術および制約付き非線形技術の両方を含む）のいずれかを使用することも可能である。幾つかの例として、疑似逆フィルタリング、ウィーナーフィルタリング、ファンシッター（Van Cittert）の技術、および最大エントロピー技術を含む。場合によっては、満足のいくぼやけ修正をコンボリューションなしに例えば単一画像処理ツールを使用することによって達成することができる。このような技術は、ぼやけ修正された画像、より良い信号対雑音比のため交換できる場合には好ましい。選択された実施形態が詳細に説明および解説されてきたが、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と範囲から逸脱することなく様々な代替および変更が可能なことは理解されるべきである。

【図 1】

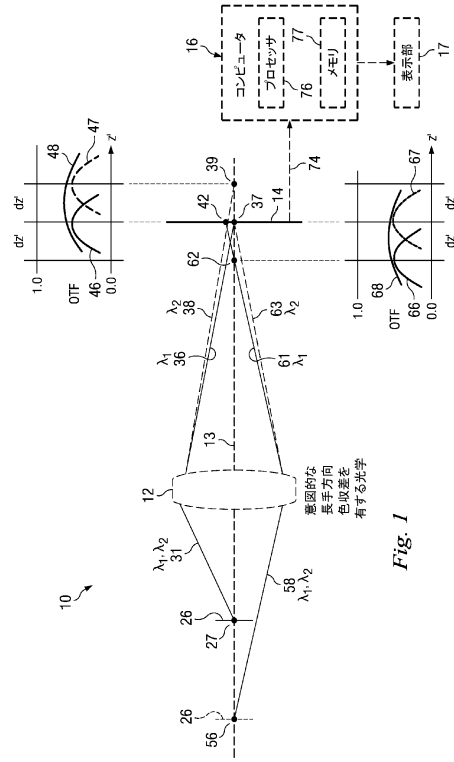


Fig. 1

【図 2】

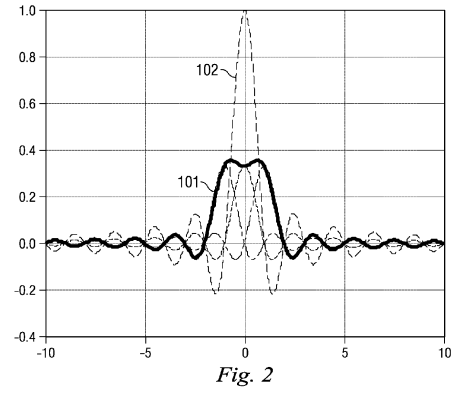


Fig. 2

【図 3】

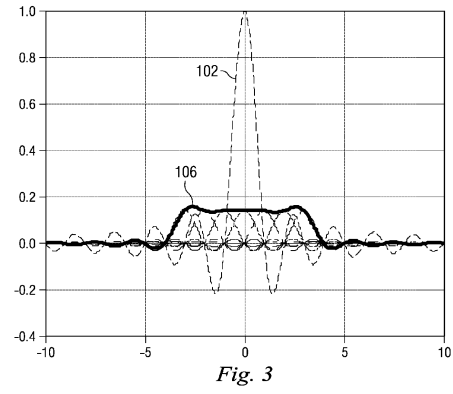


Fig. 3

【図 4】

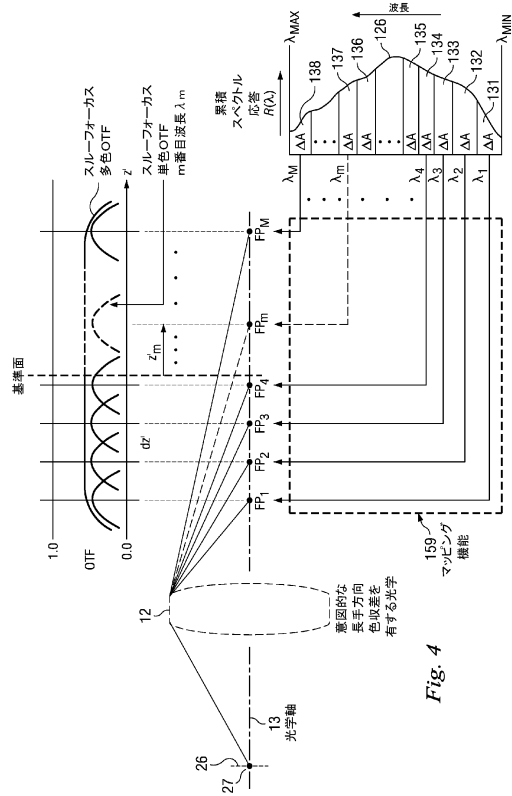


Fig. 4

【図 5】

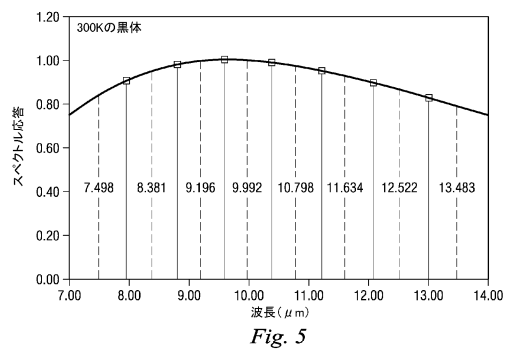


Fig. 5

【図 6】

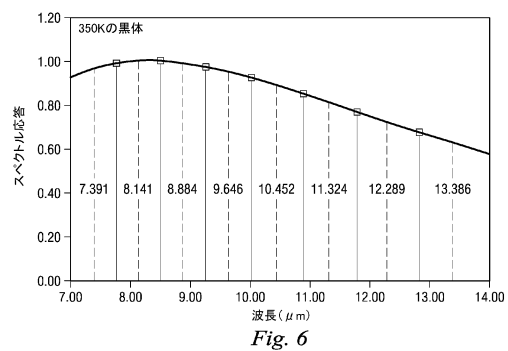


Fig. 6

【図 7】

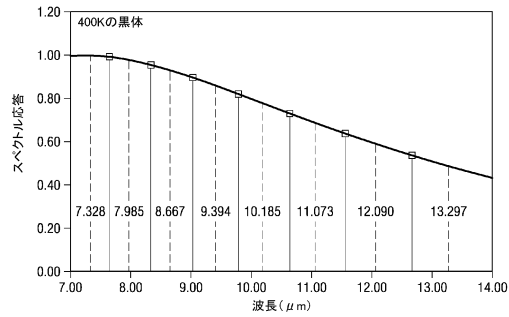
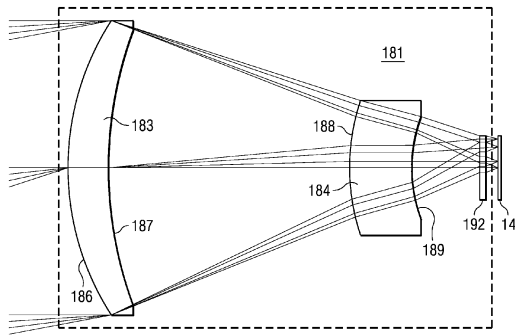


Fig. 7

【図 8】

Fig. 8
(従来技術)

【図 9】

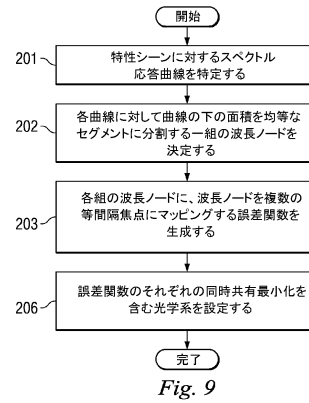


Fig. 9

【図 10】

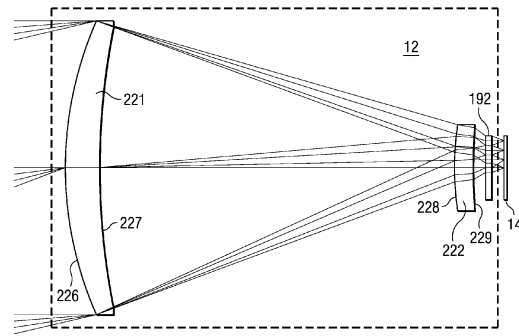


Fig. 10

【図 11】

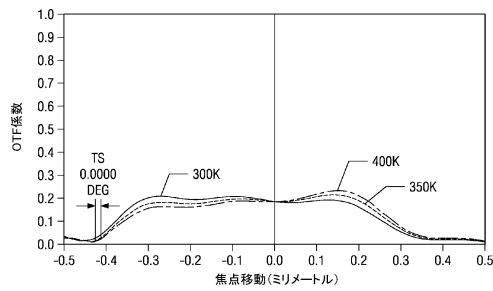
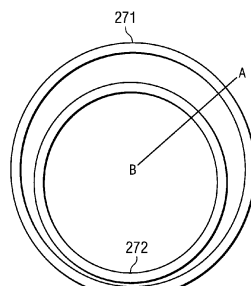


Fig. 11

【図 12】

Fig. 12
(従来技術)

【図 13】

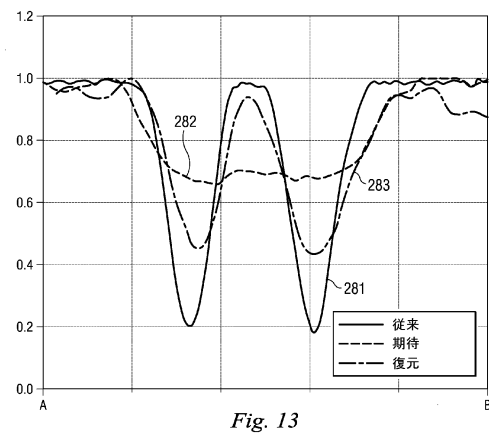


Fig. 13

フロントページの続き

- (72)発明者 グリーンハル、キャサリン、エー．
カナダ国、エル４アール ２ジェイ５ オンタリオ、ミッドランド、３１８ ジョン ストリート
- (72)発明者 デニス、ドナルド、ジェイ．
カナダ国、エル４エム ４ワイ８ オンタリオ、バリー、アールアール １、１４１０ ハイウェイ ９３

審査官 原田 英信

- (56)参考文献 米国特許出願公開第２００６／０１７１０４１（ＵＳ，Ａ１）
特開２００８－２７６１８５（ＪＰ，Ａ）
特開２００７－３０４５２５（ＪＰ，Ａ）
特表２００８－５１１８５９（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)

G 0 2 B 9 / 0 0 - 1 7 / 0 8
G 0 2 B 2 1 / 0 2 - 2 1 / 0 4
G 0 2 B 2 5 / 0 0 - 2 5 / 0 4