

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6757311号  
(P6757311)

(45) 発行日 令和2年9月16日 (2020.9.16)

(24) 登録日 令和2年9月1日 (2020.9.1)

(51) Int. Cl.

F I

G 0 2 F 1/01 (2006.01)

F 2 1 S 2/00 (2016.01)

F 2 1 V 5/00 (2018.01)

F 2 1 V 9/40 (2018.01)

G 0 9 G 3/34 (2006.01)

G 0 2 F 1/01 B

F 2 1 S 2/00 3 3 0

F 2 1 V 5/00 3 2 0

F 2 1 V 5/00 5 0 0

F 2 1 V 9/40 4 0 0

請求項の数 42 (全 66 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2017-502643 (P2017-502643)  
 (86) (22) 出願日 平成27年7月31日 (2015.7.31)  
 (65) 公表番号 特表2017-532583 (P2017-532583A)  
 (43) 公表日 平成29年11月2日 (2017.11.2)  
 (86) 国際出願番号 PCT/CA2015/050730  
 (87) 国際公開番号 W02016/015163  
 (87) 国際公開日 平成28年2月4日 (2016.2.4)  
 審査請求日 平成30年7月3日 (2018.7.3)  
 (31) 優先権主張番号 62/031, 250  
 (32) 優先日 平成26年7月31日 (2014.7.31)  
 (33) 優先権主張国・地域又は機関  
 米国 (US)  
 (31) 優先権主張番号 62/194, 728  
 (32) 優先日 平成27年7月20日 (2015.7.20)  
 (33) 優先権主張国・地域又は機関  
 米国 (US)

(73) 特許権者 516118903  
 エムティティ イノベーション インコー  
 ポレイテッド  
 MTT INNOVATION INCO  
 RPORATED  
 カナダ国 V 6 J 2 L 2 ブリティッシュ  
 コロンビア バンクーバー ウェスト  
 フィフティーンズ アベニュー 196  
 7  
 (74) 代理人 110000877  
 龍華国際特許業務法人

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 フリーフォームレンジングのための数値的アプローチ、エリアパラメータ化フリーフォームレンジング

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

画像データによって定義される画像を表示するように、位相変調器を制御する方法であって、

2次元位相変調器上で重複しない複数のソース領域を定義し、かつ、表示面において複数の表示領域を定義する段階であって、前記複数のソース領域の各々は、境界及びソースエリアを有し、かつ、前記複数の表示領域のうち対応する表示領域及び1つ又は複数のソース強度値に関連付けられ、前記複数の表示領域の各々は、対応する表示エリアを有する、段階と、

前記画像データに基づいて、前記複数の表示領域の各々にターゲット光強度値を割り当てる段階と、

対応する前記複数のソース領域の複数の前記ソースエリアに対する前記複数の表示領域の複数の前記表示エリアの比率が、前記対応する表示領域に割り当てられる前記ターゲット光強度値に対する前記複数のソース領域の複数のソース光強度値の比率に比例するように、前記複数のソース領域の構成、前記複数の表示領域の構成、又は前記複数のソース領域及び前記複数の表示領域の両方の構成を調整する段階と、

複数の前記ソースエリアの各々に位相面を生成する段階であって、前記位相面は、前記ソースエリアに入射する光を対応する前記表示エリアに方向変更する、段階と、

前記複数のソース領域に複数の前記位相面を提供するように前記位相変調器を制御し、前記複数のソース強度値に従って、前記複数のソース領域に入射光を照射する段階と、

10

20

を備える方法。

【請求項 2】

前記画像データに基づいて、複数のターゲットソースエリアを決定し、前記複数のソース領域に対応する前記複数のターゲットソースエリアから、前記複数のソース領域の面積の集合偏差を定量化する目的関数を最も良く満たす前記複数のソース領域の前記境界の構成を決定するように最適化を実行することによって、前記複数のソース領域の前記構成を調整する段階と、を備える、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

複数の前記位相面を生成する段階は、前記最適化の後の前記複数のソース領域の前記境界の構成に基づいて、前記複数のソース領域の各々の法線ベクトルを決定し、前記位相変調器の位相を 2 次元の位置に関連付ける解の位相関数を生成するように、複数の前記法線ベクトルを統合する段階を含む、請求項 2 に記載の方法。

10

【請求項 4】

前記複数のソース領域は、複数のソース頂点の間に延びる複数の線によって定義される重複しない複数のソーススタイルを含み、前記複数のソース頂点の各々は、位置を有し、前記複数の表示領域は、複数の表示頂点の間に延びる複数の線によって定義される重複しない複数の表示スタイルを含む、請求項 2 に記載の方法。

【請求項 5】

前記複数のソーススタイル及び前記複数の表示スタイルは、三角形である、請求項 4 に記載の方法。

20

【請求項 6】

前記最適化は、前記複数のソース頂点の最適化された位置を決定する、請求項 4 又は 5 に記載の方法。

【請求項 7】

メジアンカットアルゴリズムを実行することによって、前記複数のソース領域の構成を調整する段階を備える、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 8】

複数の前記ソースエリアの各々に前記位相面を生成する段階は、放物レンズに対応する前記位相面を生成する段階を含む、請求項 1 又は請求項 7 に記載の方法。

【請求項 9】

30

複数の直交方向における焦点距離のペアによって、前記複数のソースエリア及び対応する複数の表示エリアの前記複数の直交方向におけるサイズの差に基づいて、前記放物レンズを定義する段階を備える、請求項 8 に記載の方法。

【請求項 10】

前記放物レンズを定義する段階は、2つの直交方向において複数の傾斜を特定する段階を含み、前記複数の傾斜は、前記2つの直交方向における複数のターゲット領域に対する前記複数のソース領域の変位に基づく、請求項 9 に記載の方法。

【請求項 11】

前記位相面を生成する段階は、ローパスフィルタリングを実行する段階を含む、請求項 1 から 10 のいずれか 1 項に記載の方法。

40

【請求項 12】

前記位相面を生成する段階は、位相ラップを実行する段階を含む、請求項 1 から 11 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 13】

前記複数のソース領域を照射する段階は、前記画像データに基づいて、光源の出力を制御する段階を含む、請求項 1 から 12 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 14】

前記画像の平均輝度に基づいて、前記光源の前記出力を制御する段階を備える、請求項 13 に記載の方法。

【請求項 15】

50



前記光源の前記出力を制御する段階は、前記光源の前記出力を可変アパーチャに通し、前記可変アパーチャのサイズを制御する段階を含む、請求項 13 又は 14 に記載の方法。

【請求項 16】

前記光源の前記出力を制御する段階は、前記光源の強度を変化させる段階を含む、請求項 13 から 15 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 17】

前記複数のソース領域の各々によって方向変更された前記光の少なくとも 95% は、対応する前記表示領域の範囲内に収まる、請求項 1 から 16 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 18】

前記複数のソース領域の各々によって方向変更された前記光は、実質的に、対応する前記表示領域を満たす、請求項 1 から 16 のいずれか 1 項に記載の方法。

10

【請求項 19】

統合ロッドのアレイによって、前記位相変調器からの光を前記複数の表示領域に通す段階を備える、請求項 1 から 18 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 20】

前記複数の表示領域からの光を振幅変調する段階を備える、請求項 1 から 19 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 21】

データプロセッサによって実行された場合に、前記データプロセッサに、請求項 1 から 20 のいずれか 1 項に記載の方法を実行させるためのプログラム。

20

【請求項 22】

データプロセッサによって実行された場合に、前記データプロセッサに、請求項 1 から 20 のいずれか 1 項に記載の方法を実行するプログラマブルロジックデバイスを構成させるためのプログラム。

【請求項 23】

光源によって照射されるフリーフォームレンズと、フリーフォームレンズの構成を制御するように接続されるコントローラと、を備え、前記コントローラは、

前記フリーフォームレンズの複数の画素を、各々が表示領域に対応する複数のソース領域に関連付け、

30

画像データに基づいて、前記複数のソース領域及び対応する複数の表示領域の相対的なサイズを調整し、

ソース領域に入射する光に対応する表示領域を照射させるように、各ソース領域内の前記複数の画素を制御する

ように構成される、光プロジェクタ。

【請求項 24】

前記フリーフォームレンズは、空間位相変調器を含み、前記コントローラは、前記空間位相変調器の複数の画素によって与えられる位相遅延を制御するように接続される、請求項 23 に記載の光プロジェクタ。

【請求項 25】

40

前記コントローラは、前記画像データに応じて、前記フリーフォームレンズに入射する前記光源からの光の光学出力を制御する、請求項 23 又は 24 に記載の光プロジェクタ。

【請求項 26】

前記コントローラは、前記光源に供給される出力の振幅、幅及びデューティサイクルの少なくとも 1 つを制御するように動作可能である、請求項 25 に記載の光プロジェクタ。

【請求項 27】

前記コントローラは、前記光源によって発せられた光の部分を、光除去器へと選択的に方向付けるように動作可能な光学素子を制御するように接続される、請求項 25 又は 26 に記載の光プロジェクタ。

【請求項 28】

50

前記光源と前記フリーフォームレンズとの間の光路に可変アパーチャを備え、前記コントローラは、前記可変アパーチャの開きを制御するように動作可能である、請求項 25 から 27 のいずれか 1 項に記載の光プロジェクタ。

【請求項 29】

前記光源と前記フリーフォームレンズとの間の光路に上流空間光変調器を備え、前記コントローラは、前記複数のソース領域のうち異なるものを異なるように照射するように、前記上流空間光変調器を制御するように接続される、請求項 23 から 28 のいずれか 1 項に記載の光プロジェクタ。

【請求項 30】

前記フリーフォームレンズから下流の光路に配置される下流空間光調整器を備え、前記コントローラは、ターゲット面において前記光プロジェクタによって生成される光パターンにおける光の振幅を変化させるように、前記下流空間光調整器の複数の画素を制御するように接続される、請求項 23 から 29 のいずれか 1 項に記載の光プロジェクタ。

【請求項 31】

前記下流空間光調整器は、前記複数の表示領域の各々からの光を変調させるように動作可能な複数の画素を提供するために十分な解像度を有する、請求項 30 に記載の光プロジェクタ。

【請求項 32】

前記フリーフォームレンズと前記複数の表示領域との間の光路に複数の統合ロッドのアレイを備え、前記コントローラは、前記複数の統合ロッドのうち異なるものに異なる量の光を選択的に誘導するように、前記フリーフォームレンズを制御するように動作可能である、請求項 23 から 31 のいずれか 1 項に記載の光プロジェクタ。

【請求項 33】

前記コントローラは、プログラムされたデータプロセッサを含む、請求項 23 から 32 のいずれか 1 項に記載の光プロジェクタ。

【請求項 34】

前記コントローラは、構成可能なロジックユニットと、前記構成可能なロジックユニットを構成する複数の命令を含むデータストアとを含む、請求項 23 から 33 のいずれか 1 項に記載の光プロジェクタ。

【請求項 35】

前記構成可能なロジックユニットは、FPGAを含む、請求項 34 に記載の光プロジェクタ。

【請求項 36】

画像データによって定義される画像を表示するように、フリーフォームレンズを制御する装置であって、複数のソフトウェア命令によって、

2次元位相変調器上で重複しない複数のソース領域を定義し、かつ、表示面において複数の表示領域を定義し、前記複数のソース領域の各々は、境界及びソースエリアを有し、かつ、前記複数の表示領域のうち対応する表示領域に関連付けられ、前記複数の表示領域の各々は、対応する表示エリアを有し、

前記画像データに基づいて、前記複数の表示領域の各々にターゲット光強度値を割り当て、

前記複数のソース領域の構成、前記複数の表示領域の構成、又は前記複数のソース領域及び前記複数の表示領域の両方の構成を決定し、これにより、対応する前記複数のソース領域の複数の前記ソースエリアに対する前記複数の表示領域の複数の前記表示エリアの比率が、対応する前記表示領域に割り当てられる前記ターゲット光強度値に対する前記複数のソース領域の複数のソース光強度値の比率に比例し、かつ、前記構成が、ソースエリアに入射する光を対応する前記表示エリアに方向変更させる、

プロセッサを備える装置。

【請求項 37】

フリーフォームレンズを駆動するように接続可能な駆動回路を備える、請求項 36 に記

10

20

30

40

50

載の装置。

【請求項 3 8】

前記フリーフォームレンズは、空間位相変調器を含み、前記装置は、複数の前記ソースエリアの各々に対して位相面を生成する、請求項 3 6 又は 3 7 に記載の装置。

【請求項 3 9】

前記複数のソース領域に対応する複数のターゲットソースエリアから、前記複数のソース領域の面積の集合偏差を定量化する目的関数を最も良く満たす前記複数のソース領域の前記境界の構成を決定するように最適化を実行する最適化器を備える、請求項 3 6 から 3 8 のいずれか 1 項に記載の装置。

【請求項 4 0】

前記最適化器は、回転正規化器を含む、請求項 3 9 に記載の装置。

【請求項 4 1】

前記最適化器は、平滑性正規化器を含む、請求項 3 9 又は 4 0 に記載の装置。

【請求項 4 2】

データプロセッサと、前記データプロセッサによる実行のための複数のコンピュータ可読命令を含むデータストアと、を備える光プロジェクタのコントローラであって、前記複数のコンピュータ可読命令は、請求項 1 から 2 0 のいずれか 1 項に記載の方法を前記データプロセッサに実行させる、コントローラ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

〔関連出願の相互参照〕

本願は、2014年7月31日に出願された米国出願第62/031250号及び2015年7月20日に出願された米国出願第62/194728号に基づく優先権を主張する。米国の目的で、本願は、米国特許法第119条の下で、発明の名称を位相変調撮像を用いた光誘導方法及び装置とする2014年7月31日に出願された米国出願第62/031250号、及び発明の名称をフリーフォームレンジングのための数値的アプローチ、エリアパラメータ化フリーフォームレンジングとする2015年7月20日に出願された米国出願第62/194728号に基づく利益を主張する。ここで、これらの両方は、参照により、あらゆる目的で本明細書に組み込まれる。

【0 0 0 2】

本発明は、フリーフォームレンズを用いて光を投射することに関する。いくつかの実施形態において、フリーフォームレンズは、空間位相変調器を含む。複数の実施形態は、光プロジェクタ、光を投射する方法、光プロジェクタのコンポーネント、及び、説明される方法を実装するための機械可読命令を含む有形媒体を提供する。

【背景技術】

【0 0 0 3】

光のパターンを投射することが所望の用途が、多く存在する。これらは、ディスプレイ（例えば、映画プロジェクタ、コンピュータディスプレイ、テレビ、例えば、ビルボード、仮想現実表示等の広告表示）、建築照明、自動車照明（例えば、ヘッドライト、走行灯）及び特殊効果照明（例えば、劇場のステージ照明、コンサート用照明）を含む。

【0 0 0 4】

1つの技術的課題は、高輝度を実現可能なディスプレイを提供することである。高輝度は、高い動的範囲を有する光パターンを投射する、及び/又は、例えば様々な周囲照明条件で視認可能な光パターンを投射するために利用可能である。高輝度を実現する多数の現在の表示技術には、望ましくない程に高い電力消費を伴う。

【0 0 0 5】

撮像システムにおいて光誘導を用いる主な動機は、フルスクリーンホワイト（FSW）をはるかに上回るピーク輝度レベルが実現可能なことである。これは、暗エリアから取り出された光が、より高輝度を要求するエリアに再分配（誘導）され得ることから可能であ

10

20

30

40

50

る。光誘導の他の結果は、より暗いブラックレベルにも到達可能である。画像においてハイライト及びブラックレベルを拡大することによって、より広範囲な光レベル（「増加コントラスト」）が同時に表示可能となる。

【0006】

光は、フリーフォームレンズングによって誘導可能である。光を誘導して所望の光パターンを提供するフリーフォームレンズの構成を決定することは、非常に単純な光パターンでなければ演算的に難しい。演算コーステックは、屈折及び／又は反射型の光学レイヤが光分布にどのような影響を与えるかということに関する研究分野である。

【0007】

演算コーステックへのいくつかのアプローチは、平面、二次又はガウスパッチのような予め規定された離散プリミティブの構成を決定することを含む。予め規定されたプリミティブに基づく方法は、プリミティブが互換的な態様で満たさない場合、エッジ効果の影響を受けることが多い。

【0008】

いくつかの代替的なアプローチは、最適な伝送を適用する。最適な伝送は、ユーザ固有のコスト関数が最小化されるように、ソースからターゲットへの分配をマッピングしようとする。最適な伝送は、オペレーションリサーチ及びメッシュ処理のように多様なエリアに適用されてきた。最適な伝送の定式化は、レンズ面におけるソースの強度分布から画像面におけるターゲットの分布へのマッピングを決定するために用いられる。このアプローチは、高コントラスト及び非常に良好な画像品質を実現可能であるが、高い演算コストを伴う。典型的な画像は、演算に何時間も必要とすることがある。さらに、演算は、並列化が困難である。

【0009】

所望の光フィールドを形成可能な光プロジェクタが、今なお必要とされている。演算効率の良い所望の光フィールドを生成し、かつ、所望の光フィールドの品質をさらに再現する態様が特に必要とされている。エネルギー効率の良い光照射野を再現する方法及び装置も、求められている。

【発明の概要】

【0010】

本発明は、多数の態様を有する。いくつかの態様は、光プロジェクタを提供する。いくつかの態様は、所望の光フィールド（画像を含んでよい。いくつかの実施形態において、画像は、ビデオフレームであってよい）に対応するフリーフォーム光学機器（空間位相変調器を備えてよい）を生成する方法を提供する。いくつかの態様は、対応するフリーフォームレンズの構成を生成する光照射野を特定するデータ処理方法を提供する。

【0011】

本発明は、フリーフォームレンズングにさらに関する。フリーフォームレンズングは、カスタマイズされた光学レイヤを用いてソースからの光を再分配することによって、所望の光フィールドを生成することを含む。本発明の実施形態は、フリーフォームレンズを備える光プロジェクタと、規定された光照射野を投射する方法と、フリーフォームレンズの構成を生成すべく、所望の光パターンを定義するデータ処理方法及び装置とを提供する。複数の例示的な実施形態において、光学レイヤは、カスタマイズされた屈折及び／又は反射型の素子又は位相変調器を含む。「演算コーステック」が、関連分野である。

【0012】

1つの例示的な態様は、画像データによって定義される画像を表示すべく、位相変調器を制御する方法を提供する。方法は、2次元位相変調器上で重複しない複数のソース領域を定義し、かつ、表示面において複数の表示領域を定義する段階であって、複数のソース領域の各々は、境界及びソースエリアを有し、かつ、複数の表示領域のうち対応する表示領域に関連付けられ、複数の表示領域の各々は、対応する表示領域エリアを有する、段階と、画像データに基づいて、複数の表示領域の各々にターゲット光強度値を割り当てる段階と、対応する複数のソース領域の複数のソースエリアに対する複数の表示領域の複数の表

10

20

30

40

50

示エリアの比率が、対応する表示領域に割り当てられるターゲット光強度値に対する複数のソース領域の複数のソース光強度値の比率に比例するように、複数のソース領域の構成、複数の表示領域の構成、又は複数のソース領域及び複数の表示領域の両方の構成を調整する段階と、複数のソースエリアの各々に位相面を生成する段階であって、位相面は、ソースエリアに入射する光を対応する表示エリアに方向変更するように構成される、段階と、複数のソース領域に複数の位相面を提供するように位相変調器を制御し、複数のソース強度値に従って、複数のソース領域に入射光を照射する段階と、を備える。

【0013】

他の例示的態様は、画像データによって定義される画像を表示するために有用なフリーフォームレンズ構成を生成する方法を提供する。方法は、重複しない複数のソース領域を含む2次元光源のモデルを提供する段階を備える。複数のソース領域の各々は、境界、対応するソース光強度値及びソースエリアを有する。複数のソース領域の各々は、ディスプレイの対応する表示領域に関連付けられる。複数の表示領域の各々は、ターゲットエリアを有する。方法は、画像データに基づいて、複数の表示領域の各々に光強度値を割り当てる段階に進む。方法は、対応する表示領域の表示エリアに対する複数のソース領域のターゲットソースエリアの比率が、ソース領域のソース光強度値に対する、対応する表示領域に割り当てられる光強度値の比率に比例するように、複数のソース領域の各々にターゲットソースエリアを設定する。方法は、複数のソース領域に対応する複数のターゲットソースエリアから、複数のソース領域の面積の集合偏差を定量化する目的関数を最も良く満たす複数のソース領域の境界の構成を決定するように最適化を実行する。最適化の後の複数のソース領域の境界の構成に基づいて、方法は、複数のソース領域の各々の法線ベクトルを決定し、位相を2次元の位置に関連付ける解の位相関数を生成するように、複数の法線ベクトルを統合する。位相変調器がフリーフォームレンズに解の位相関数を提供するために用いられることは、位相変調器を駆動するために適用されてよい。

【0014】

いくつかの実施形態において、複数のソース領域は、複数のソース頂点の間に延びる複数の線によって定義される重複しない複数のソーススタイルを含む。複数のソース頂点の各々は、位置を有する。いくつかの実施形態において、表示スタイルは、複数の表示頂点の間に延びる線によって定義される。

【0015】

いくつかの実施形態において、複数のソーススタイル及び複数の表示スタイルは、三角形である。最適化は、複数のソース頂点のために最適化された位置を決定してよい。

【0016】

いくつかの実施形態において、複数のソース頂点に対して複数の法線ベクトルを決定する段階は、複数の表示頂点のうち対応するものに対する複数のソース頂点の面内変位に基づく。

【0017】

いくつかの実施形態において、最適化を実行する段階は、限定的なメモリBroyden-Fletcher-Goldfarb-Shannoアルゴリズムを適用する段階を含む。いくつかの実施形態は、一連のイタレーションにおいて、次第にスケールを細かくして最適化を実行し、これにより、各イタレーションにおいて、ソース頂点及び表示頂点の数を増加させ、直前のイタレーションに対する複数の頂点の位置が、現在のイタレーションの複数の初期構成として用いられる段階を備える。

【0018】

さらなる態様及び例示的な実施形態が、添付図面に示され、及び/又は以下の説明において説明される。

【図面の簡単な説明】

【0019】

添付図面は、本発明の実施形態の非限定的な例を示す。

【0020】

【図 1】例示的な光プロジェクタの模式図である。公知の入射光分布（必ずしも均一ではないことがある）は、まず誘導され、次に振幅変調される。振幅変調は、空間光変調器によって提供されてよい。図 1 の実施形態は、透過素子を用いたプロジェクタを示す。他の（例えば、反射型）光誘導素子及び／又は振幅変調器を適用した実装が可能である。

【0021】

【図 2】図 2（a）及び 2（b）は、フリースペースの実装を模式的に示す。光は、空間位相変調器（例えば、H O L O E Y E（商標）L E T O シリーズの位相専用変調器が、いくつかの実施形態において用いられる）に、公知の分布（均一なことがある）で入射する。位相変調後、光は、空間光変調器（S L M）に続く。一実装において、空間位相変調器の異なる領域は、異なるサイズであってよく、S L M 上の領域は、同じサイズであってよい。これにより、S L M のそれぞれの領域の各々において、光強度の変更が可能となる。光路における各工程についての強度分布が図示される。空間位相変調器及び S L M はこの図では同じサイズに見えるが、これは要件ではない。

10

【0022】

【図 3】複数の統合ロッドが用いられる例示的な実装を示す。空間位相変調器の各領域からの誘導光は、統合ロッドのアレイにおいて、統合ロッドの中心にフォーカスされる。光路における各工程についての例示的な強度分布が図示される。この光は最終的なクリーンアップのために S L M に中継される。係数  $\eta$  は、空間位相変調器からの光を各統合ロッドにフォーカスさせた結果であり、概ね出力保存の度合いを示すものである。

20

【0023】

【図 4】S N S アルゴリズムの例示的なシフト及びスケール、ならびに物理的システムへのその組み込みのフローを示す図である。ターゲット画像は二分割され、本例において、2 つの分割部分において必要とされる強度は、15（左）及び 5（右）（任意の輝度単位）であることがわかる。これにより、空間位相変調器が 2 つの領域に分割され、左側の面積は右側の 3 倍である。空間位相変調器に入射する光は、次に、S L M 上の 2 つの同じサイズの領域に誘導される。

【0024】

【図 5】傾斜した放物レンズの例を示す。空間位相変調器の領域は、このようなレンズを提供するように構成されてよい。レンズの構成は、レンズが光を誘導する S L M 上の対応領域の位置及びサイズに応じて制御されてよい。

30

【0025】

【図 6 A】フリースペースの実装のために空間位相変調器上に実装可能なレンズの形状を示唆する図（縮尺通りではない）である。空間位相変調器領域のサイズは、S N S アルゴリズムによって決定されてよい。空間位相変調器の各領域の焦点が図示される。領域 1 に対する L E T O - S L M アセンブリの焦点は右に、領域 2 に対する L E T O - S L M アセンブリの焦点は左に示される。

【0026】

【図 6 B】統合ロッド実装のための空間位相変調器（例えば、L E T O）上に実装可能なレンズの形状を示唆する図（縮尺通りではない）である。空間光変調器の領域のサイズは、S N S アルゴリズムによって決定されてよい。図は、縮尺通りではない。

40

【0027】

【図 7 A】異なる表示領域に対して所望の輝度レベルを決定する画像データの処理を示す。

【図 7 B】異なる表示領域に対して所望の輝度レベルを決定する画像データの処理を示す。

【図 7 C】異なる表示領域に対して所望の輝度レベルを決定する画像データの処理を示す。8 × 16 分割されたマリリンの画像である。図 7 A は、8 × 16 ゾーンが重ね合わせられた完全な画像を示す。図 7 B は、x における第 1 回目の二分割であり、結果的に得られた中間輝度レベルを有する状態を示す。図 7 C は、図 7 B において算出及び図示された 2 つの分割部分の各々に対する、y における第 2 回目の二分割を示す。

50

【 0 0 2 8 】

【図 8】図 7 A に示されるマリリンの画像に対して算出されたレンズの  $8 \times 16$  ゾーンのセットを示す。右側の単位は、mm で示される。

【 0 0 2 9 】

【図 9】図 8 において算出された、光の波長ラムダ（この具体例においては  $638 \text{ nm}$ ）の倍数にラップされたレンズを示す。右側の単位（RHS）は、ラムダの倍数で示される。この数学的な修正オペレーション  $\text{mod}(\text{phase-pattern}, \text{lambda})$  は、位相ラップとしても知られる。

【 0 0 3 0 】

【図 10】算出された SNS 導出レンズの（理想的な）出力である。

10

【 0 0 3 1 】

【図 11】変調器面における異なる領域又はセグメントからの光（これらは、ソース領域と称されることがある）が、ターゲット面における対応領域又はセグメント（これらは、表示領域と称されることがある）に向けてこれをスケーリング及びシフトすることによって、どのように再分配されるかを示す。

【 0 0 3 2 】

【図 12】各々が対応領域を有する変調器面及びターゲット画像面、ならびに数学的導出に用いられるポイントアレイを示す図である。いくつかの実施形態において、ポイントアレイは、各ポイントが変調器面における空間位相変調器の画素と対応するように構築される。

20

【 0 0 3 3 】

【図 13】変調器面のポイントアレイと対応するターゲット画像面のポイントアレイとの間の光路長を示す図である。

【 0 0 3 4 】

【図 14】実施形態に係る変調器面のポイントアレイと対応するターゲット画像面のポイントアレイとの間の光路長を示す図である。経路長プロファイルは、ソース領域におけるポイントを、対応する表示領域と関連付けられた仮想放物線における複数のポイントから分離する距離からなる。

【 0 0 3 5 】

【図 15】例示的な物理的レンズの図である。光は、光学軸に沿って入射し、レンズ裏面に入射した後、偏光することなく透過し、次に、レンズ表面で屈折し、光学軸に対して角度  $\theta_1$  をなす。次に、光学軸に対する透過角度  $\theta_t$  が、スネルの法則によって付与される。

30

【 0 0 3 6 】

【図 16 A】パディング効果を示す画像のセットである。

【図 16 B】パディング効果を示す画像のセットである。

【図 16 C】パディング効果を示す画像のセットである。正しくパディングされていない画像は、フーリエ変換における周期性仮定により、境界歪みを有することが多い。ターゲットを中心にミラーリングされたパディングの結果、周期性を有する画像が生成される。これにより、境界歪みが減少するが、コントラストが減少する。

40

【 0 0 3 7 】

【図 17 A】画像品質において平滑性パラメータを変化させた効果を示す。

【図 17 B】画像品質において平滑性パラメータを変化させた効果を示す。

【図 17 C】画像品質において平滑性パラメータを変化させた効果を示す。

【図 17 D】画像品質において平滑性パラメータを変化させた効果を示す。平滑性パラメータを減少させた結果、コントラストを大幅に増加させることができるが、知覚可能なコースティックアーティファクトをも生成することがある。

【 0 0 3 8 】

【図 18 A】正規化の効果を示す。

【図 18 B】正規化の効果を示す。

50

【図 18C】正規化の効果を示す。

【図 18D】正規化の効果を示す。図 18A 及び 18B は、回転正規化（加重 1.0）がある場合及びない場合に演算されたエリアベースのパラメータ化のポイント位置である。図 18C 及び 18D は、結果的に得られた出力画像である。回転正規化を組み込むことは、せん断歪みを減少させる一助となり、変位をもたらす。

【0039】

【図 19A】マリリンの画像のポイント位置の例示的なマッピングを示す。マリリンの顔及び髪がレンズ面のほぼ全体にマッピングされ、低強度領域を大きく圧縮する。高圧縮にも関わらず、マッピングされた四角形のほぼ大部分は凸であり、全単射パラメータ化を示す。結果的に生成された画像における局所的なコントラストは、隣接する複数の四角形の面積比率によって決定される。

10

【図 19B】マリリンの目に対応する図 19A の拡大部分である。

【0040】

【図 20A】フリーフォームレンジングのために、フーリエ近軸（図 20A）とエリアパラメータ化アプローチ（図 20B）とを比較するアインシュタインの画像である。

【図 20B】フリーフォームレンジングのために、フーリエ近軸（図 20A）とエリアパラメータ化アプローチ（図 20B）とを比較するアインシュタインの画像である。

【図 20C】フリーフォームレンジングのために、フーリエ近軸（図 20A）とエリアパラメータ化アプローチ（図 20B）とを比較するアインシュタインの画像である。エリアパラメータ化画像は、ガンマ指数 3.0 を用いる。図 20C は、ターゲット画像である。

20

【0041】

【図 21A】基準枠の画像に対するフーリエ近軸（図 21A）及びエリアパラメータ化（図 21B）アプローチを比較する画像である。

【図 21B】基準枠の画像に対するフーリエ近軸（図 21A）及びエリアパラメータ化（図 21B）アプローチを比較する画像である。

【図 21C】基準枠の画像に対するフーリエ近軸（図 21A）及びエリアパラメータ化（図 21B）アプローチを比較する画像である。図 21C は、ターゲットである。

【0042】

【図 22A】レナの画像に対するフーリエ近軸（図 22A）及びエリアパラメータ化（図 22B）アプローチを比較する画像である。

30

【図 22B】レナの画像に対するフーリエ近軸（図 22A）及びエリアパラメータ化（図 22B）アプローチを比較する画像である。

【図 22C】レナの画像に対するフーリエ近軸（図 22A）及びエリアパラメータ化（図 22B）アプローチを比較する画像である。図 22C は、ターゲットである。

【0043】

【図 23A】マリリンの画像に対するフーリエ近軸（図 23A）及びエリアパラメータ化（図 23B）アプローチを比較する画像である。

【図 23B】マリリンの画像に対するフーリエ近軸（図 23A）及びエリアパラメータ化（図 23B）アプローチを比較する画像である。

【図 23C】マリリンの画像に対するフーリエ近軸（図 23A）及びエリアパラメータ化（図 23B）アプローチを比較する画像である。図 23C は、ターゲットである。

40

【0044】

【図 24A】「戦士」の画像に対するフーリエ近軸（図 24A）及びエリアパラメータ化（図 24B）アプローチを比較する画像である。

【図 24B】「戦士」の画像に対するフーリエ近軸（図 24A）及びエリアパラメータ化（図 24B）アプローチを比較する画像である。

【図 24C】「戦士」の画像に対するフーリエ近軸（図 24A）及びエリアパラメータ化（図 24B）アプローチを比較する画像である。図 24C は、ターゲットである。

【0045】

【図 25A】図 25E に示されるマリリンの画像に対するエリアパラメータ化のスケーリ

50



ングの効果を示す。

【図25B】図25Eに示されるマリリンの画像に対するエリアパラメータ化のスケージングの効果を示す。

【図25C】図25Eに示されるマリリンの画像に対するエリアパラメータ化のスケージングの効果を示す。

【図25D】図25Eに示されるマリリンの画像に対するエリアパラメータ化のスケージングの効果を示す。

【図25E】ターゲットである。解像度の増加により、大きく引き延ばされた領域におけるアーティファクトが減少し、空間的に適応的な離散化が有益となり得ることを示している。

10

【0046】

【図26A】図26Eに示されるアインシュタインの画像に対するエリアパラメータ化の結果における回転正規化の効果を示す。

【図26B】図26Eに示されるアインシュタインの画像に対するエリアパラメータ化の結果における回転正規化の効果を示す。

【図26C】図26Eに示されるアインシュタインの画像に対するエリアパラメータ化の結果における回転正規化の効果を示す。

【図26D】図26Eに示されるアインシュタインの画像に対するエリアパラメータ化の結果における回転正規化の効果を示す。

【図26E】ターゲットである。回転正規化器に対する加重を増加させた結果、アーティファクトの延び及びせん断を減少させるがコントラストを減少させる、より統合可能な変位が生じた。典型値は、10.0である。

20

【0047】

【図27A】図27Eに示されるマリリンの画像に対するエリアパラメータ化の結果において平滑性パラメータを変化させた効果を示す。

【図27B】図27Eに示されるマリリンの画像に対するエリアパラメータ化の結果において平滑性パラメータを変化させた効果を示す。

【図27C】図27Eに示されるマリリンの画像に対するエリアパラメータ化の結果において平滑性パラメータを変化させた効果を示す。

【図27D】図27Eに示されるマリリンの画像に対するエリアパラメータ化の結果において平滑性パラメータを変化させた効果を示す。

30

【図27E】ターゲットである。平滑性パラメータの値が低い結果、コントラストはより高いが、アーティファクトがより目立つ。平滑性パラメータの値を高くすることにより、コントラストが減少するが、アーティファクトを抑制する一助となる。典型値は、0.05である。

【0048】

【図28A】図28Eに示されるアインシュタインの画像に対するエリアパラメータ化の結果において最小面積を変化させた効果を示す。

【図28B】図28Eに示されるアインシュタインの画像に対するエリアパラメータ化の結果において最小面積を変化させた効果を示す。

40

【図28C】図28Eに示されるアインシュタインの画像に対するエリアパラメータ化の結果において最小面積を変化させた効果を示す。

【図28D】図28Eに示されるアインシュタインの画像に対するエリアパラメータ化の結果において最小面積を変化させた効果を示す。

【図28E】ターゲットである。このパラメータは、最適化によってターゲットとされた最小面積におけるハードフロアとして作用する。設定が低過ぎる場合、低品質画像であるが、優れたコントラストがもたらされる。設定が高過ぎる場合、有効な光の再分配を防げることとなる。典型値は、0.05である。

【0049】

【図29A】ターゲットである。

50

【図29B】図29Aのレナの画像に対して、場面内コントラスト67：1、ピーク明度2.9倍FSWの近軸デブラ画像である。

【図29C】図29Aのレナの画像に対して、場面内コントラスト106：1、ピーク明度2.8倍FSWのエリアパラメータ化画像である。

【0050】

【図30A】ターゲットである。

【図30B】図30Aのマリリンの画像に対する場面内コントラスト173：1、ピーク明度10.0倍FSWの近軸デブラ画像である。

【図30C】図30Aのマリリンの画像に対する場面内コントラスト582：1、ピーク明度11.92倍FSWのエリアパラメータ化画像である。

10

【0051】

【図31A】ターゲットである。

【図31B】図31Aに示される「基準枠」の画像に対する場面内コントラスト101：1、ピーク明度4倍FSWの近軸デブラ画像である。

【図31C】図31Aに示される「基準枠」の画像に対する場面内コントラスト377：1、ピーク明度6.2倍FSWのエリアパラメータ化画像である。

【0052】

【図32A】ターゲットである。

【図32B】図32Aに示されるアインシュタインの画像に対する場面内コントラスト104：1、ピーク明度8.1倍FSWの近軸デブラ画像である。

20

【図32C】図32Aに示されるアインシュタインの画像に対する場面内コントラスト759：1、ピーク明度13.15倍FSWのエリアパラメータ化画像である。

【0053】

【図33A】エリアパラメータ化及び近軸デブラ方法を同じカメラ設定と比較する広帯域照射を有するプロトタイププロジェクタ（LETO）の写真である。

【図33B】エリアパラメータ化及び近軸デブラ方法を同じカメラ設定と比較する広帯域照射を有するプロトタイププロジェクタ（LETO）の写真である。

【図33C】エリアパラメータ化及び近軸デブラ方法を同じカメラ設定と比較する広帯域照射を有するプロトタイププロジェクタ（LETO）の写真である。

【図33D】エリアパラメータ化及び近軸デブラ方法を同じカメラ設定と比較する広帯域照射を有するプロトタイププロジェクタ（LETO）の写真である。

30

【図33E】エリアパラメータ化及び近軸デブラ方法を同じカメラ設定と比較する広帯域照射を有するプロトタイププロジェクタ（LETO）の写真である。

【図33F】エリアパラメータ化及び近軸デブラ方法を同じカメラ設定と比較する広帯域照射を有するプロトタイププロジェクタ（LETO）の写真である。

【図33G】エリアパラメータ化及び近軸デブラ方法を同じカメラ設定と比較する広帯域照射を有するプロトタイププロジェクタ（LETO）の写真である。

【図33H】エリアパラメータ化及び近軸デブラ方法を同じカメラ設定と比較する広帯域照射を有するプロトタイププロジェクタ（LETO）の写真である。

【0054】

40

【図34A】広帯域照射を有するプロトタイププロジェクタ（LETO）の写真である。

【図34B】広帯域照射を有するプロトタイププロジェクタ（LETO）の写真である。

【図34C】広帯域照射を有するプロトタイププロジェクタ（LETO）の写真である。

【図34D】広帯域照射を有するプロトタイププロジェクタ（LETO）の写真である。

【0055】

【図35A】ターゲットである。

【図35B】図35Aの「アベンジャーズ」の画像の実験的キャプチャであり、場面内コントラスト1025：1、ピーク明度8.84倍FSWである。

【0056】

【図36A】ターゲットである。

50

【図36B】図36Aの「ろうそく」の画像の実験的キャプチャであり、場面内コントラスト697：1、ピーク明度9.85倍FSWである。

【0057】

【図37A】ターゲットである。

【図37B】図37Aの「F1」の画像の実験的キャプチャであり、場面内コントラスト301：1、ピーク明度6.18倍FSWである。

【0058】

【図38A】ターゲットである。

【図38B】図38Aの「雲」の画像の実験的キャプチャであり、場面内コントラスト697：1、ピーク明度7.42倍FSWである。

10

【0059】

【図39A】ターゲットである。

【図39B】図39Aの「宇宙」の画像の実験的キャプチャであり、場面内コントラスト935：1、ピーク明度16.2倍FSWである。

【0060】

【図40】ソース領域とターゲット領域との間のマッピングを模式的に示す。

【0061】

【図41】例示的な実施形態に係る装置を示すブロック図である。

【0062】

【図42】例示的な実施形態に係るプロジェクタを示すブロック図である。

20

【0063】

【図43A】例示的な実施形態に係る方法を示すフローチャートである。

【図43B】例示的な実施形態に係る方法を示すフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0064】

以下の説明の全体にわたり、本発明をより十分に理解せしめるべく、具体的な詳細が示される。しかしながら、これらの詳細がなくても、本発明は実施可能である。複数の他の例において、本発明を不必要に不明瞭にすることを避けるべく、周知の要素は詳細には示されず、又は説明されていない。従って、本明細書及び図面は、限定的な意味ではなく、例示的な意味でとらえられるべきである。

30

【0065】

本文献は、所望の光パターンを投射するフリーフォームレンズを構成する光プロジェクタ及び方法の様々な実施形態を説明する。いくつかの実施形態は、フリーフォームレンズ（いくつかの実施形態において、空間位相変調器によって提供される）を備える光誘導ステージを、空間位相変調器の位相と組み合わせる。

【0066】

いくつかの実施形態において、光誘導位相の構成は、フリーフォームレンズにおけるソース領域を投射された光パターンの表示領域と関連付ける段階を備える方法によって到達される。表示領域における所望の光強度は、表示領域及びこれらの対応ソース領域の相対的面积を変化させることによって調整される。ソース及び表示領域の相対的面积は、ソース領域の面積を変化させることによって、表示領域の面積を変化させることによって、又はソース領域の面積及び表示領域の面積の両方を変化させることによって、変更されてよい。フリーフォームレンズは、各ソース領域が光を対応する表示領域に方向付けるように構成されてよい。いくつかの実施形態において、各ソース領域によってターゲット画像面に投射される光の90%又は95%又はそれより多くが、対応する表示領域の範囲内に収まる。いくつかの実施形態において、フリーフォームレンズの照射強度は、所望の光パターンの平均的又は代表的な輝度に基づいて制御される。いくつかの実施形態において、空間位相変調器ステージは、フリーフォームレンズの上流及び下流の一方又は両方に提供される。上流SLMは、ソース領域において輝度を変化させてよい。下流SLMは、ターゲット画像面を照射する光をさらに変調させてよい。下流SLMは、いくつかの実施形態に

40

50

において、表示領域の解像度より精細な空間解像度を有してよい。

【0067】

以下の説明は、所望の光パターンを定義する画像データに応じてフリーフォームレンズを構成する様々な態様を説明する。「シフト及びスケーリング」(SNS)は、いくつかの実施形態において、位相遅延撮像チップと併せて用いられた場合に光誘導を可能とする手順型の順方向専用アルゴリズムである。SNSは、いくつかの実施形態において、エッジ効果を回避又は減少可能であるという利点を有する。いくつかの実施形態は、フリーフォームレンズを構成するために利用可能な、平面、二次又はガウスパッチのような予め規定された離散プリミティブの構成を決定する段階を含む演算コーステック方法を用いる。

【0068】

図1は、画像をより効率的に形成すべく、光誘導を入射光分布の振幅変調と組み合わせた光プロジェクタを示す基本的な図である。

【0069】

本文献は、光が位相変調撮像チップ、例えば、LCOSベースの位相変調マイクロディスプレイによって誘導される光プロジェクタの非限定的かつ例示的な実装を説明する。このようなディスプレイの例は、LETOと称されるHoloEye Photonics AG(1080×1920画素及び約6.4マイクロメートル画素ピッチ)によって生成される。LETOにおいて反射された光は、振幅変調器に入射する。これは、本事例においては、ソニー(商標)のシリコン変調器上液晶(LCOS)であり、空間光変調器(SLM)の非限定的な例である。SLMからの画像は、次に、投射スクリーンに中継される。

【0070】

複数の代替的な実装が、例えば、2つの変調器の順番を逆にすること、すなわち、まず光を振幅変調し、次に光を誘導することによって可能である。複数の他の可能な実装は、光の1波長の2分の1までのみ変調する位相変調器(いわゆる「変調器」)を含む。複数の他の可能な振幅変調器は、デジタル光プロジェクタ(DLP)又はデジタルマイクロミラーデバイス(DMD)を含み、これらの例は、テキサスインスツルメンツから入手可能である。

【0071】

システムの一実装は、図2に示されるように、LETOによって直接SLMに誘導される入射光分布を示す。複数の他の実施形態において、適した種類の光学システムが、空間位相変調器とSLMとの間に提供されてよい。このような光学システムは、例えば、レンズ、ミラー、ディフューザ、フリースペース、フィルタ等の1つ又は複数の構成を備えてよい。

【0072】

図2において示唆されるように、誘導は、SLMに入射する光を予め変調させるために用いられる。これは、空間位相変調器のいくつかの領域からの光をSLMの対応領域にレンジングすることによって、実現可能である。レンズの実装は、本事例において、x及びyにおいて焦点距離を有する単純な放物レンズであり、その2つの方向においてどれだけの増幅が必要かによって導出される。同様に、面における分布をシフトさせるべく、傾斜が、各領域におけるレンジング解、すなわち、xにおける1つ及びyにおける1つに適用される。これらの基本的なオペレーションが、「シフト及びスケーリング」(SNS)という名称の由来である。

【0073】

本システムの代替的な実装は、LETO上の複数の同じサイズの領域を用いて、SLM上の複数の異なるサイズの領域を照射する。物理的モデルの導出は、好適な実装のためのものと同様である。

【0074】

他の代替的な実装が、図3によって示される。これは、空間位相変調器とSLMとの間で、統合ロッドのアレイを用いて光が均質化されるプロジェクタを示す。均質化は、例え

10

20

30

40

50

ば、レーザ光線のプロファイルにおける凹凸を平滑にするために有益なことがある。

【0075】

異なる統合ロッドからの出力は、異なる振幅を有してよいが、これらの空間分布は、公知又は概ね公知であるものとする。各領域の焦点距離は概ね同じであり、図3A及び3Bに示される。複数の異なる領域における焦点距離の小さな差異は、同様の数値的なアパーチャ又は各統合ロッドからの光の広がりを実際にすることができる。各領域に対するシフトは、異なる。

【0076】

シフト及びスケールリングアルゴリズム

多数のアプローチが、空間位相変調器上に適切な位相変調画像を算出するために利用可能である。1つのアプローチにおいて、空間位相変調器は、いくつかの領域に分割され、ここで、異なるレンズが、必要な量の倍率及びこれたの領域に対する誘導を提供すべく定義される。ある意味において、これは、各々が空間位相変調器からの光の領域をSLMにおける対応領域に1フレームずつシフト及びスケールリングする放物レンズのプログラマブルアレイを有することと同様である。SNSアルゴリズムの目的は、ターゲット画像の高速かつ低解像度バージョンを提供することである。結果的に得られた高速の低解像度画像が具体的な用途に対して十分な解像度を有さない場合、振幅変調器を用いて、スクリーン上に所望の高解像度ターゲット画像を形成することができるが、過剰の振幅変調が回避可能なので、光の損失は最小である。

【0077】

以下の2つのセクションは、空間位相変調器及びターゲット画像面（いくつかの実施形態において、SLM上にあってよい）の各々を複数の領域に分割する2つの例示的なケースを説明する。空間位相変調器及びSLMの両方の上で、異なるサイズの領域を用いる代替的な導出も、可能である。

【0078】

アプローチ1：異なるサイズの空間位相変調器領域、等しいサイズのSLM領域

SNSアルゴリズムは、表示されるべき画像を分析し、ターゲット画像の強度要件をエリア分配に有効に変換する（これは、いくつかの意味において、メジアンカットアルゴリズムと同様である。[http://en.wikipedia.org/wiki/Median\\_cut](http://en.wikipedia.org/wiki/Median_cut)参照）。SNSは、反復的なマルチスケールリングアルゴリズムである。例示的な実施形態は、画像の右側と左側とを比較し、これに従って、位相変調器上の面積を、各側の照射要件に合致可能となるように確保することによって開始する。SNSは、次に、既に処理された複数の画像領域を繰り返し二分割し、強度要件を面積に再度変換する。この処理は、再帰的に繰り返されてよい。1つの二分割段階後の、空間位相変調器（又は他のフリーフォームレンズ）上のソース領域とSLM（又は他のターゲット面）上の表示領域との間の領域対領域マッピングの概略図が、図4に示される。

【0079】

各二分割段階の間における「照射要件」を決定する段階は、異なる態様でなされてよい。例えば、最も厳しい要件は、ターゲット画像の各部分の最大輝度レベルが実現可能となることである。これは、再方向付けのために利用可能な最小光量を残すものであり、従って、最も保守的なアプローチである。領域毎に平均輝度のみを必要とすることにより、各領域において光レベルの損失が生じ、このアプローチがいくつかの用途において許容可能たり得るにも関わらず、確実に画像品質の低下をもたらす。代替的に、各領域に対して、光のいくつかの予め定められた割合を再現することを目標としてよい。これにより、例えば、各領域の利用可能な動的範囲を超えるハイライト及び/又はブラックレベルのソフトクリップによって、領域毎に少量のトーンマッピングのみが要求される。

【0080】

要するに、SNSアプローチは、位相変調器のようなフリーフォームレンズを用いる。これは、多数の領域に分割され、これらの面積は、どれだけの光をSLM上の領域の対応するセットに伝送することを必要とされるかに応じて、全て異なってよい。相対的な領域

のサイズは、領域毎に誘導及び増幅の量を決定するものである。

【0081】

一実装において、各領域に対して必要とされる焦点面内距離及び面内シフトを算出することによって、各レンズの形状が決定される。単純な放物レンズは、以下のとおり定義されてよい。

【数1】

$$lens_i = f_{x,i} \left( 1 - \sqrt{1 - x^2 / f_{x,i}^2} \right) + m_{x,i} x + f_{y,i} \left( 1 - \sqrt{1 - y^2 / f_{y,i}^2} \right) + m_{y,i} y \quad [1A]$$

10

ここで、 $(f_{x,i}, f_{y,i})$  は、第  $i$  の領域の  $x$  及び  $y$  における焦点距離であり、 $(m_{x,i}, m_{y,i})$  は、当該領域におけるレンズの傾きである。他の複数の実装が可能である。例えば、入射光分布が位相変調器において反射角で反射するものとして処理し、光は次の変調器（例えば、SLM）又は他のターゲット面に伝送されるものであるという知見から、勾配面が導出可能である。この勾配マップは、空間位相変調器の位相マップを形成するように統合されてよい。

【0082】

フリーフォームレンズからの光をSLMに中継する2つの例示的態様が上述された。「フリースペースアプローチ」において、各領域の焦点距離は、対象のソース領域と対応する表示領域との間でどれだけの倍率が必要とされるかによって決定される。以下の式により、正しい倍率が確実に得られる。

20

【数2】

$$f_{x,i} = D / (1 - a_{x,i} / b_{x,i}) \quad [2A]$$

ここで、 $D$  は、フリーフォームレンズ（例えば、空間位相変調器）とSLMとの間の距離、 $a_{x,i}$  は、空間位相変調器上のソース領域の  $x$  サイズ、 $b_{x,i}$  は、（例えば、SLM上の）対応する表示領域の  $x$  サイズである。これらのパラメータは、図6に示される。

30

【0083】

代替的な実装において、位相変調器からの光は、統合ロッドのアレイにフォーカスされる。この場合、焦点距離の正確な値は、重要性が低い。各ソース領域からの光を全て、統合ロッドのアレイの入力面にフォーカスさせる、換言すると、 $f = D$  であってよい。当該セクションで説明されるように、各領域の焦点距離における小さな差異は、統合ロッドのアレイの出力において、光が同様の広がりを実際に示すように決定されてよい。

【0084】

領域毎に結果的に得られたレンズは、図5に示されるものと同様の外観であってよい。

【0085】

図6は、光をSLMにフォーカスさせる異なるサイズの2つのレンズの断面を示す。

40

【0086】

SNSの例示的なプロトタイプの実装は、ターゲット画像を16の  $x$  ゾーンによって8の  $y$  ゾーンに分割する（「 $x$ 」は画像の水平方向幅、「 $y$ 」は垂直方向高さ）。画像は、所望の数の領域が得られるまで、（ $x$ 、次に  $y$ 、次に  $x \dots$  方向に交互に）繰り返し二分割される。

【0087】

図7Aから7Cは、マリリン・モンローの入力画像に対して繰り返される二分割を示す。ターゲット画像は、1080 × 1920（HD解像度）であるので、8 × 16セルの各々は、135 × 120画素の大きさである。

【0088】

50

図7Bにおいて、輝度要件は、画像の左側で51、右側で48と示されている。結果として、左側(LHS)の面積は、空間位相変調器の合計面積の $51 / (51 + 48)$ となり、右側(RHS)は空間位相変調器の合計面積の $48 / (51 + 48)$ となる。この非対称性に対して、方向変更は殆ど必要なく、少量の追加の光のみがLHS上に入射することとなる。左寄りの非対称性ゆえに、RHS上に形成されるレンズは、左に向かってわずかな傾き又は傾斜を有することとなる。

【0089】

図7Cにおいて、画像のLHS及びRHSは、さらに二分割される。LHSの二分割の結果、上部で55、下部で48となる。従って、この画像の左上部の四分円は、左下部の四分円より多くの光を必要とする。下部レンズの傾きは、わずかに上方向を向く。この処理は、画像が $8 \times 16$ サブ領域に分割されるまで、さらなる二分割により、RHS等に対して繰り返される。

【0090】

ここで、これらの領域の各々に対して、レンズ形状が算出される。空間位相変調器の複数の $8 \times 16$ 領域の各々に対する面内焦点距離( $x$ 及び $y$ )は、式2Aに従って決定される。各レンズの傾きは、複数の空間位相変調器領域及びSLM上の複数の対応する表示領域の中心座標によって決定される。これらのポイントを、空間位相変調器上の第 $i$ の領域に対して $(x_1, y_1)_i$ 、SLM上の第 $i$ の表示領域に対して $(x_2, y_2)_i$ と称する。次に、 $x$ におけるシフト $m_{x,i}$ が、以下の式によって算出される。

【数3】

$$mx_i = -(x_{2,i} - x_{1,i}) / 2f_{x,i} \quad [3A]$$

同様の式が、 $y$ 方向における傾斜に対して用いられてよい。複数の $8 \times 16$ 領域の各々のレンズ形状は、式1Aに挿入された、導出された焦点距離及び傾きを用いて算出される。

【0091】

完全に二分割された $8 \times 16$ ゾーンのSNS処理に対する例示的な結果的に得られたレンズのアレイは、図8及び9に示される。

【0092】

図10は、図9に示されるレンズ画像に対する反射光の算出結果を示す。本例において、空間位相変調器とSLMとの間の距離は、170mmであった。

【0093】

図10に示される空間位相変調器からの誘導光は、ここで、SLMに中継されてよい。図10右側の単位に留意されたい。 $8 \times 16$ ゾーンのみを用いて光を方向変更することによって、均一に照射された撮像装置が伝送可能なレベルより上の、45倍を超えるピーク輝度レベルに到達可能であることが示される。いくつかの実施形態において、ピーク輝度レベルは、プロジェクタのフルスクリーンホワイトレベルの30倍又は40倍を超える。

【0094】

光を誘導することによって、対象の画像に必要なとされるレベルより上の光レベルを可能とすることが完全に可能である。この場合、光源出力のグローバルな低減は、(例えば、これをパルス幅変調することによって)実装されてよく、又は、光のいくらかは、光除去器に誘導されてよく、もしくは光のいくらかは、可変アパーチャを通して光をフォーカスさせることによって除去されてよい。

【0095】

様々なレンズが満たす(例えば、ソース領域のエッジに沿う)領域は、鋭いエッジ、及び場合によっては不要なアーティファクトをを除去すべく、平滑化されてよい。単純なローパスフィルタで十分なことがあり、又は、隣接する領域の間のオフセットが十分な効果のために最小化されてよい。

## 【0096】

アプローチ2：等しいサイズのLETO領域、異なるサイズのSLM領域

この説明のために、均一な光分布が空間位相変調器面に入射し、変調器面からいくらかの距離において、ターゲット画像面に方向変更されるものと仮定する。他の入射光分布が、用いられ、かつ、示されてよい。SLMは、任意に、ターゲット面に配置されてよいが、これは、直後の説明にとって重要ではない。

## 【0097】

変調器面に入射する均一な光は、変調器面からいくらかの距離において、ターゲット画像面に方向変更される。変調器面は、等しい面積を有する複数のセグメント（ソース領域）に分割される。その各々は、光をターゲット画像面の具体的なセグメント（表示領域）に方向変更することに関与する（図11参照）。 10

## 【0098】

このアプローチの意図は、全体的なターゲット画像に対して、各表示領域において制限された光学出力部分は、変調器全体に対して各ソース領域において制限された部分と同じである。

## 【0099】

複数の表示領域の形状は、所望の画像面の照射プロファイルが適用され、メジアンカットアルゴリズムのようなアルゴリズムを用いて演算されてよい。メジアンカットの例において、画像全体の光学出力の4分の1を有するターゲット画像面セグメントは、変調器全体の面積の4分の1を有する変調器面セグメントからの光を方向変更することによって実現されてよい。 20

## 【0100】

位相変調器

変調器上で確立される位相プロファイルは、所望の照射プロファイルを実現させるべく、ターゲット画像面に光を方向変更するために用いられる。位相プロファイルは、1ソース領域ずつ演算されてよい。ここで、ソース領域に入射する光は、当該ソース領域上の位相プロファイルによって、対応する表示領域に向けて方向変更される。

## 【0101】

各ソース領域に対して位相プロファイルを算出することは、変調器面における複数のソース領域及びターゲット面における複数の表示領域の両方を、各領域のそれぞれの位置及び向きを示す複数のポイントのグリッドとして定義することによって、より容易に実行可能である。 30

## 【0102】

ソース領域又は変調器セグメントにおけるポイントの数の典型的な選択は、位相変調に利用可能な当該セグメントにおける画素の数である。対応ソース領域及び表示領域の各ペアは、それぞれの領域にわたって均一に分散された同じ数のポイントの有する必要があり、これにより、ソース領域及び表示領域の各ペアに関連する1対1のポイントマップが可能となる。

## 【0103】

方向変更

ソース領域及び対応する表示領域の具体的なペアに関連するポイントマップが与えられれば、所望の光の方向変更を実現する位相プロファイルが、多数の異なるアプローチによって取得可能である。位相プロファイルと表面プロファイルとの間の関係は、ホイヘンス・フレネルの原理によって与えられる。位相プロファイルの勾配は、光における位相プロファイルの誘導効果を決定する。位相プロファイルは、（物理的レンズに対する）媒体の屈折率及び波動光学の支配方程式によって、物理的レンズの表面プロファイルに関連する。 40

## 【0104】

位相プロファイルが光路長の表面プロファイルに関連し得ることは周知であるので、以下のアプローチは、位相ではなく経路長の観点で説明される。 50



## 【 0 1 0 5 】

1つのアプローチにおいて、変調器セグメントの経路長プロファイルは、セグメントのペアにおいて対応するポイントを分離する物理的距離からなる。図 1 2 を参照されたい。

## 【 0 1 0 6 】

図 1 2 を参照すると、変調器面のポイントマップと対応するターゲット画像面のポイントマップとの間の光路長が、以下のように表されることが示される。

## 【 数 4 】

$$L_i = \left| \overrightarrow{M_i T_i} \right|, \quad [4A]$$

10

ここで、 $M_i$  は、変調器面における具体的ポイント  $i$  の座標であり、 $T_i$  は、ターゲット画像面において対応するポイントの座標を含み、 $L_i$  は、2つのポイントの間のベクトルの長さである。

## 【 0 1 0 7 】

複数の他のアプローチにおいて、領域のペアにおけるソース領域及び対応する表示領域の両方のポイントの中心が、利用される。これらのアプローチのうちの1つにおいて、経路長プロファイルは、ソース領域（変調器セグメント）における複数のポイントを、表示領域（ターゲット面セグメント）の中心に配置され、かつ、複数のセグメントの中心を接続するベクトルに垂直な仮想面における複数のポイントで分離した距離からなる。この距離に対して用いられる仮想面におけるポイントは、仮想面がセグメントのペアを接続する線と交差する位置に対応する（図 1 3 参照）。

20

## 【 0 1 0 8 】

図 1 3 を参照すると、変調器面のポイントマップと対応するターゲット画像面のポイントマップとの間の光路長は、以下のように表すことができる。

## 【 数 5 】

$$L_i = \frac{\overrightarrow{M_c T_c} \cdot \overrightarrow{M_i T_c}}{\overrightarrow{M_c T_c} \cdot \left( \frac{\overrightarrow{M_i T_i}}{\left| \overrightarrow{M_i T_i} \right|} \right)}, \quad [5A]$$

30

ここで、

## 【 数 6 】

$$\overrightarrow{M_c T_c}$$

は、セグメントのペアの中心を接続するベクトルであり、

## 【 数 7 】

$$\overrightarrow{M_i T_c}$$

40

は、変調器面セグメント上のポイント  $M_i$  を対応するターゲット面セグメントの中心ポイントである  $T_c$  と接続するベクトルである。複数のベクトルの間のドットは、ベクトルドット積の一般に用いられる記号を示す。

## 【 0 1 0 9 】

他のアプローチにおいて、経路長プロファイルは、ソース領域（変調器セグメント）における複数のポイントに対応する表示領域（ターゲット面セグメント）の中心を中心とする仮想放物線における複数のポイントから分離する距離からなる。この距離に対して用いられる仮想放物線におけるポイントは、セグメントのペアを接続する線が、仮想放物線のポイントをターゲット面セグメントの中心と接続する線と 90 度の角度で交差する位置に

50

配置されてよい（図 14 参照）。

【0110】

図 14 を参照すると、変調器面のポイントマップと対応するターゲット画像面のポイントマップとの間の光路長は、以下のように表すことができる。

【数 8】

$$L_i = \overrightarrow{M_i T_c} \cdot \left( \frac{\overrightarrow{M_i T_i}}{|\overrightarrow{M_i T_i}|} \right), \quad [6A]$$

【0111】

本発明の他の態様は、構成可能な光学素子（例えば、屈折又は位相変調素子）の構成を決定する他の例示的な方法を提供する。これは、ソースからの光が構成可能な光学素子と相互作用する場合に、所望の光フィールドの生成をもたらす。いくつかの実施形態において、構成可能な光学素子は、動的に再構成可能である。このような複数の方法は、高い動的範囲の投射のための画像データに対応する複数の光照射野を生成するために用いられてよい。いくつかの実施形態において、画像データは、ビデオデータを含み、ビデオデータのフレームを表示する段階は、構成可能な光学素子を構成する段階を含む。いくつかの代替的な実施形態において、方法は、光源からの光と相互作用することによって、所望の画像を形成するレンズを提供すべく、固定物理的レンズの構成（例えば、成形、機械加工等によってレンズを形成するために適用可能な構成）を定義するために適用される。

【0112】

図 15 は、光源 16 からの光 14 と相互作用する、一般化された屈折光学素子 12 の例示的な構成 10 を示す。この構成は、一般的なプロジェクタを表す。構成 10 は、素子 12 が平面状の背面 12A を有し、かつ、光源 14 からの光がコリメートされて背面 12A と垂直に到達する点で単純化されている。これらの条件は、必ずしも必要ではないが、これらは算出を単純化し、素子 12 の構成を決定するために適用可能なアルゴリズムについて、明確な説明を提供するために有用である。素子 12 の構成を生成するために適したアルゴリズムは、素子 10 の光学システムがより複雑である場合には、当業者に明らかな態様で修正されてよい。

【0113】

構成 10 において、光は光学軸 13 と平行に移動してレンズ面 12A に到達し、光学軸 13 と垂直な面 12A において物理的レンズ 12 に入射し、素子 12 の遠位面 12B に到達すると屈折し、その後、光が画像面まで移動する。素子 12 の厚みが、大半の目的（「薄いレンズという仮定」）で無視されてよく、かつ、面 12B の勾配が比較的浅いという仮定の下で、素子 12 の伝送係数は、ほぼ一定である。

【0114】

フレネルの式は、物理的レンズ面が望ましい場合には、撮像モデルとして機能する。これらの式は、入射及び透過角度（ $\theta_1$  及び  $\theta_2$ ）を 2 つの材料の屈折率（ $n_1$  及び  $n_2$ ）に関連付ける。角度  $\theta_1$  及び  $\theta_2$  は、素子 12 の材料から素子 12 を取り囲む材料へと向かう面法線ベクトル  $N$  に対して測定される。入射及び透過角度は、スネルの式によって関連付けられる。

【数 9】

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

ここで、入射光線 14 は、光学軸 13 と平行であり、法線  $N$  は、結果的に、軸 13 に対して  $\theta_1$  の向きとなる。光学軸 13 に対する透過光線の角度  $\theta_t$  は、 $\theta_t = \theta_2 - \theta_1$  となる。この結果、所与の角度  $\theta_t$  を生成するために必要な角度  $\theta_1$  に対して、以下の式となる。

【数 1 0】

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \theta_t}{\frac{n_1}{n_2} - \cos \theta_t} \right)$$

【0 1 1 5】

光学軸と整合する薄いレンズの場合、

【数 1 1】

$$\sin \theta \approx \theta$$

10

及び

【数 1 2】

$$\cos \theta \approx 1$$

を仮定する近軸近似が用いられてよい。この仮定により、前の式は、以下のように単純化される。

【数 1 3】

$$\theta_1 = \left( \frac{n_2}{n_1 - n_2} \right) \theta_t$$

20

素子 1 2 が位相変調器に置き換えられる場合、その関係は以下のように単純化される。

【数 1 4】

$$\theta_1 = \theta_t$$

【0 1 1 6】

これらの関係は、レンズ面における物理的屈折又は位相変調器のいずれかによって、入射光線がどのように偏向するかを決定する。フリーフォームレンジングの目的は、ターゲット画像の明領域において光をフォーカスさせ、暗領域において光をデフォーカスするレンズ又は位相面を決定するために、これらの関係を用いることである。以下のセクションは、照射された場合に、所望の光フィールドを生成する屈折及び／又は反射型素子及び／又は位相シフト素子の構成を生成するために利用可能な 3 つのアプローチを説明する。

30

【0 1 1 7】

アプローチ 3：近軸デブラの定式化

近軸デブラの定式化は、計算されるべき問題を大きく単純化する画像形成モデルに近軸仮定を導入することによって、ソースからターゲットへの光のマッピングを、レンズ面の演算に結び付ける。

【0 1 1 8】

このアプローチの利点は、適切に選択された離散素子に依存しない有効な物理的レンズを生成する光の再分配が保証されることである。課題は、計算されるべき問題が、条件付けが不十分な重調和システムであることであり、これは、特に、GPU又はFPGAのような高度に並列化されたハードウェアに対して、有効に影響及び解決できないほど過剰に高密度である一方、反復的な方法によりゆっくりと収束する傾向がある。

40

【0 1 1 9】

このセクションは、デコンボリューションに基づく代替的なソルバーを紹介する。システムに伴う調整の課題は、課題をフーリエ空間におけるデコンボリューションの問題として計算することによって減少し、その結果、数桁のスピードアップがもたらされる。以下のセクションは、基本的な近軸モデルを紹介し、次に、フーリエ空間において計算される代替的な定式化を提示する。

【0 1 2 0】

50

## 画像形成モデル

焦点距離  $f$  で配置される画像面上において、レンズ面上のポイントの画像は、それぞれ物理的レンズの位相面に対して、以下の複数の式によって与えられる。

【数 1 5】

$$v^* = v + f \tan\left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \theta_1\right)$$

$$v^* = v + f \tan(\theta_1)$$

10

【0 1 2 1】

これらの式は、

【数 1 6】

$$\sin\theta \approx \theta$$

及び

【数 1 7】

$$\cos\theta \approx 1$$

という近軸仮定を用いる以下の線形式により、近似されてよい。

20

【数 1 8】

$$v^* = v + f \frac{n_1 - n_2}{n_2} \theta_1$$

$$v^* = v + f \theta_1$$

【0 1 2 2】

近軸近似を用て、角度  $\theta_1$  は、以下の式を与えるレンズ面又は位相面の勾配  $p(v)$  にさらに関連付けられてよい。

30

【数 1 9】

$$v^* = v + f \frac{n_1 - n_2}{n_2} \nabla p(v)$$

$$v^* = v + f \nabla p(v)$$

【0 1 2 3】

公称焦点距離

【数 2 0】

40

$$f$$

を、位相面に対しては、

【数 2 1】

$$f$$

又は、物理的レンズに対しては、

【数 2 2】

$$\frac{n_1 - n_2}{n_2} f$$

と定義することによって、これらの 2 つの式は、単一の式にまとめることが可能である。 $v \rightarrow v^*$  のこのマッピングのヤコビアン行列式  $J$  は、次に、画像面上の任意のポイントにおける倍率を決定する。

【数 2 3】

$$|J| = \left\| \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} v^*(v) \\ \frac{\partial}{\partial y} v^*(v) \end{bmatrix} \right\|$$

10

$$= \left| \frac{\partial}{\partial x} v^*(v) \times \frac{\partial}{\partial y} v^*(v) \right|$$

$$= \left\| \begin{bmatrix} 1 + \frac{\partial}{\partial x} p(v) \\ \frac{\partial}{\partial y} p(v) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} p(v) \\ 1 + \frac{\partial}{\partial y} p(v) \end{bmatrix} \right\|$$

20

$$= \left| \frac{\partial}{\partial x} (v + f \nabla p(v)) \times \frac{\partial}{\partial y} (v + f \nabla p(v)) \right|$$

$$= 1 + f \frac{\partial^2}{\partial x^2} p(v) + f \frac{\partial^2}{\partial y^2} p(v) = 1 + f \nabla^2 p(v)$$

【0 1 2 4】

30

倍率は、画像面上の明度に反比例する。マッピング  $v \rightarrow v^*$  及び上記の式を用いることは、ポイント  $v$  の画像の強度を関連付ける。すなわち、以下の式となる。

【数 2 4】

$$I(v + f \nabla p(v)) = \frac{1}{|J|} = \frac{1}{1 + f \nabla^2 p(v)}$$

【0 1 2 5】

これは、続いて、第 1 次のテイラー級数を介して線形化され、式 1 における非線形の画像形成モデルを得ることができる。

【数 2 5】

40

$$I(v + f \nabla p(v)) \approx 1 - f \nabla^2 p(v) \quad (1)$$

【0 1 2 6】

この画像形成モデルは、ターゲット画像を可能な限り厳密に再現する位相 / レンズ面が求められるという逆の課題として表されることがある。結果的に得られた最適化の課題が、式 2 に示される。

【数 2 6】

$$p(v)^* = \operatorname{argmin}_{p(v)} \int_{\Omega} (I(v + f \nabla p(v)) - 1 + f \nabla^2 p(v))^2 d\Omega \quad (2)$$

【0 1 2 7】

式(2)において、 $I(\cdot)$ は、画像データ(画像の各ポイントにおける強度)であり、 $p(v)$ は、光学素子上における位置 $v$ の関数としての位相であり、 $\Omega$ は、画像の面積であり、

【数 2 7】

$$f$$

10

は、公称焦点距離(上述のように定義される)であり、 $p(v)^*$ は、解である光学素子の構成である。

【0 1 2 8】

式(2)を最小化する関数 $p(v)^*$ は、ターゲット画像を最もよく近似するレンズ又は位相面を定義する。

【0 1 2 9】

計算アルゴリズム

式(2)によって提供されるこの目的関数は、

20

【数 2 8】

$$I(v + f \nabla p(v))$$

の項により非線形であり、これは、ターゲット画像 $I$ のワーピングと解釈することができる。線形モデルを得るべく、このワーピングの線形化が導入されてよい。式2は、次に、アルゴリズム1において示されるように、反復的な態様で最小化されてよい。

アルゴリズム1 式(2)の線形化された最適化 近軸コースティック( $I, f$ )の手順

// 位相面を一定値として初期化する。 $p_0(v) = 0$

30

// イタレーションカウンタを初期化し、計算を開始する。 $k = 0$

一方で、 $k < k_{\max}$

// 現在の解によって、ターゲット画像をワーピングする。

【数 2 9】

$$I_p^k(v) \leftarrow I(v + f \nabla p_k(v))$$

// 現在の解を、式(2)を計算することによって更新する。

【数 3 0】

$$p^{k+1}(v) \leftarrow \operatorname{argmin}_{p(v)} \int_{\Omega} (I_p^k(v) - 1 + f \nabla^2 p(v))^2 d\Omega$$

40

// イタレーション指標を更新する。 $k = k + 1$

// 演算されたマッピングを戻す。 $p_{k_{\max}}(v)$ を戻す。

// 停止

【0 1 3 0】

アルゴリズム1の各イタレーションにおいて、画素への離散化の後、線形化された最小二乗問題が計算され、二乗された余りの総和を最小化する。

【数 3 1】

$$\frac{1}{2} \| I_p^k - 1 + \hat{f} \nabla^2 p \|_2^2$$

この問題は、市販のソルバー及び当技術分野において現在公知の他のソルバーを用いて計算可能である。アルゴリズム 1 は、シミュレーション及び物理的プロトタイプのセットアップにおいて検証されており、良好な結果を出している。しかしながら、問題は、ラプラス演算子<sup>2</sup>を二乗したことにより、条件付けが不十分である。この理由により、反復的なソルバーを用いた収束は遅くなることがあり、一方で、システム密度は、直接的なソルバーのメモリを集中化させる。

10

【0 1 3 1】

アプローチ 4：フーリエドメインにおける解

周期境界条件に対して、式(2)によって例示される問題は、フーリエ空間においてさらに効率的に計算可能である。1つのアプローチは、近接演算子を適用することである。任意の凸関数に対して、近接演算子  $\text{prox}_{\gamma F}$  (式3において定義される) は、信頼領域最適化の一段階と同様に機能する。ここで、Fを減少させるが、入力引数 q から過度に逸脱しない値 x が求められる。

【数 3 2】

$$\text{prox}_{\gamma F}(q) = \underset{x}{\operatorname{argmin}} F(x) + \frac{\gamma}{2} \| x - q \|_2^2 \quad (3) \quad 20$$

【0 1 3 2】

最小二乗目的

【数 3 3】

$$F(x) = \frac{1}{2} \| Ax - b \|_2^2$$

に対して、結果的に得られる近接演算子が以下に示される。

【数 3 4】

$$\text{prox}_{\gamma F}(q) = (\gamma + A^T A)^{-1}(\gamma q + A^T b) \quad 30$$

【0 1 3 3】

周期境界条件、及び A が巡回行列であることにより、これは、式4に示されるフーリエ空間において、極めて効率的に評価可能となる。

【数 3 5】

$$\text{prox}_{\gamma F}(q) = \mathcal{F}^{-1} \left( \frac{\mathcal{F}(b)\mathcal{F}(A)^* + \gamma \mathcal{F}(q)}{(1 + \alpha)\mathcal{F}(A)^2 + \gamma} \right) \quad (4)$$

【0 1 3 4】

40

表記 F 及び  $\mathcal{F}^{-1}$  は、順及び逆フーリエ変換を示し、\* は、凸共役を示し、乗算/除算がポイント毎に実行される。パラメータ  $\alpha > 0$  は、レンズ曲率における  $L_2$  正規化パラメータとして機能する。 $L_2$  勾配ペナルティも試されたが、解の品質に不利な効果を有することが判明した。

【0 1 3 5】

【数 3 6】

$$A = \hat{f} \nabla^2$$

【数 3 7】

$$b = 1 - I_p^k(v)$$

及び  $q = p^k(v)$  を定義することによって、問題はフーリエ空間において反復的に計算可能となり、その結果がアルゴリズム 2 となる。

アルゴリズム 2 フーリエ空間における近軸コースティック

PARAXIAL CAUSTICS FOURIER

【数 3 8】

$$(l, \hat{f}, \gamma)$$

10

の手順

// 位相面を一定値として初期化する。

【数 3 9】

$$p^0(v) \leftarrow 0$$

// イタレーションカウンタ及び一定のパラメータを初期化する。

【数 4 0】

$$A \leftarrow \hat{f} \nabla^2$$

20

$k = 0$

一方で、 $k < k_{\max}$

// 現在の解によって、ターゲット画像をワーピングする。

【数 4 1】

$$I_p^k(v) \leftarrow I(v + \hat{f} \nabla p^k(v))$$

// 最小二乗問題の右側を初期化する。

【数 4 2】

$$b \leftarrow 1 - I(v + \hat{f} \nabla p^k(v))$$

30

// 現在の解を、

// 式 4 における近接演算子を評価することによって更新する。

$p^{k+1}(v) = \text{prox}_F(p^k(v))$

// イタレーション指標を更新する。  $k = k + 1$

// 演算されたマッピングを戻す。

$p^{k_{\max}}(v)$  を戻す。

【0136】

フーリエ変換  $p^k(v)$  のキャッシュによって、アルゴリズム 2 は、イタレーション毎に、1つの画像ワーピング、いくつかのベクトルオペレーション及び1つの順/逆フーリエ変換により、実装可能である。これらのオペレーションの全ては、画素毎に、又はスキャンラインオペレーション毎に、高度に並列化可能である。

40

【0137】

図示されるように、アルゴリズム 2 は、一般的な近接アルゴリズムである近接点法の非線形的な変形である。これは、 $x^{k+1}(v) = \text{prox}_F(x^k)$  を評価することによって、 $\text{prox}_F$  を再帰的に呼び出すことからなる任意の凸  $F$  を最小化するための不動点アルゴリズムである。

【0138】

デブラの定式化においては、結果的に得られたレンズ/位相面に境界条件を割り当てることは難しい。矩形レンズを矩形画像エリアにマッピングすることが望ましい。しかしな

50



がら、フーリエを用いる場合の周期性仮定は、境界付近に深刻な歪みをもたらすことがある。図 16 A は、このような歪みが、特に、画像の上部及び下部境界の中心部分に沿って見ることができる例示的な画像である。

#### 【0139】

##### 結果

アルゴリズム 2 を用いて得られた解に従って形成された物理的レンズに対する結果の選択が、図 20 A、21 A、22 A、23 A 及び 24 A に示される。全てのレンズは、解像度  $256 \times 128$ 、画素ピッチ  $0.5 \text{ mm}$ 、 $100 \text{ mm}$  焦点距離、 $\gamma = 1.000$  及び  $\alpha = 2.0$  で、ミラーリングされたパディングを用いて演算された。2 のべき乗以外の入力寸法による不均一な再スケーリングの結果、焦点距離にわずかな誤りが生じた。全てのレンダリングは、 $130 \text{ mm}$  焦点距離で、標準的な平滑化及びループ細分割により、Blender 及び Lux Render を用いて演算された。全ての画像は、ガンマ  $2.2$  で、表示用にガンマ補正される。各画像の周りの境界は、公称フルスクリーンホワイト値を示す。演算時間は、画像毎に約 1 秒であったが、GPU に対する並列化、パイプライン化及びポーティングを介したコード最適化の余地が大きい。

10

#### 【0140】

アルゴリズム 2 は、比較的高精度な再現が可能である。光の再分配は、スクリーン寸法のおよそ  $1/4$  に限定される。これにより、いくつかの非常に高コントラストの画像に対してコントラストを限定することがある。平滑性パラメータ  $\alpha$  を下げることにより、これは改善可能であるが、図 17 B、17 C 及び 17 D を比較することによってわかるように、アーティファクトを生成することがある。

20

#### 【0141】

##### アプローチ 5：エリアベースのパラメータ化定式化

ソースからターゲットへのマッピングを決定するための他のアプローチは、エリアベースのパラメータ化である。エリアベースのパラメータ化方法は、レンズ又は位相面を複数のパッチ又は領域に細分割することに基づく。複数のパッチ又は領域は、次に、画像面にマッピングされる。このアプローチのいくつかの例は、US 61/893270（光照射野プロジェクタ及び方法）における光照射野プロジェクタ、及び US 62/031250（位相変調撮像を用いた光誘導方法及び装置）に関して説明される。ここで、これらの両方は、参照により、あらゆる目的で本明細書に組み込まれる。

30

#### 【0142】

ソースからターゲットへのマッピングは、物理的レンズの場合はフレネルマッピングにおいて、又は位相変調の場合は位相関数の勾配として、具現化されてよい。どの画像形成モデルが用いられるかに関わらず、方法は、所望の光パターンを最もよく再現するためには、レンズ面上のどの領域が画像面における特定の対応領域にマッピングすべきかを決定するように提供されなければならない。

#### 【0143】

画像面における領域内の光強度は、レンズ面における対応領域のサイズを変化させることによって制御されてよい。レンズ面における対応領域のサイズを増加させることにより、画像面の対応領域における光強度が増加する。

40

#### 【0144】

レンズ面と画像面との間のマッピングを確立する一態様は、レンズ面及び画像面の両方を、境界を有する複数の領域に分割し、レンズ面の領域と画像面の対応領域との間の対応を確立することである。例えば、図 40 は、境界 42 B によって複数のエリア 42 A に分割されたレンズ面 42 と、境界 44 B によって複数のエリア 44 A に分割された画像面 44 とを模式的に示す。矢印 45 によって示されるように、画像面 44 の各エリア 44 A は、レンズ面 42 の対応するエリア 42 A に対応する。

#### 【0145】

この点において、必須ではないが便宜上、画像面及びレンズ面は平面であることに留意されたい。概して、これらの面の一方又は両方は、湾曲してよい。また、いくつかの

50

実施形態においてあることであるが、領域 4 2 A と領域 4 4 A との間で、1 対 1 の対応は必須ではない。例えば、いくつかの実施形態において、2 つ又はそれより多くの領域 4 2 A が、1 つの領域 4 4 A に対応してよい。また、領域 4 2 A がレンズ面 4 2 を完全に包含することは、(概して望ましいが) 必須ではない。

【0146】

便宜的には、領域 4 2 A は、レンズ面 4 2 をタイル処理し、領域 4 4 A は、画像面 4 4 をタイル処理する。領域 4 2 は、「ソース領域」と称されてよく、領域 4 4 は、「ターゲット領域」と称されてよい。なぜなら、領域 4 2 は、ターゲット光パターンを再現する対応領域 4 4 を照射する光のソースとして機能するからである。

【0147】

便宜的には、境界 4 2 A はパラメータ化され、これにより、境界 4 2 B を定義するパラメータを変更することによって、領域 4 2 A のサイズが変化可能となる。境界 4 2 A 及び 4 2 B は、いくつかの実施形態において、直線を含む。他の実施形態において、境界 4 2 A 及び / 又は 4 2 B は、湾曲している。

【0148】

一態様において、領域 4 2 A 及び 4 4 A は、三角形の領域を定義する区分線形境界による三角形化によって定義される。このような実施形態において、三角形の境界は、便宜的には、三角形の頂点の位置によって定義(パラメータ化)されてよい。三角形の頂点の変位は、そこで、位相関数の勾配に対応し、一方で、三角形の内部領域は、一定曲率の面積に対応する。このエリアパラメータ化により、マッピングは、レンズ面上の区分一定領域を、画像面における区分一定領域にマッピングする。

【0149】

アルゴリズムは、画像面のエリア 4 4 A において、ターゲット光強度の再現をもたらす境界 4 2 B の境界構成を見出すために適用されてよい。例えば、画像面のレンズ面において、各三角形内のターゲット強度を再現する三角形の頂点のポイント位置を決定するために、適用されてよい。レンズ面が光源によって均一に照射される場合、画像面の領域内における光強度は、レンズ面における対応領域に対する画像面の領域の面積の比率によって与えられる。以下の例において、レンズ面が均一に照射されると仮定する。しかしながら、アルゴリズムは、レンズ面の照射の非均一性を考慮して、容易に修正されてよい。

【0150】

例示的な実施形態

アルゴリズムへの入力は、三角メッシュ  $M = \{T, V\}$  である。ここで、 $V = \{V_1, \dots, V_n\}$  は頂点のセットである。ここで、

【数 4 3】

$$v_i \in \mathbb{R}^2$$

かつ、 $T = \{T_1, \dots, T_m\}$  である。ここで、

【数 4 4】

$$t_j \in \mathbb{Z}^3$$

は、方向付けられた三角形を定義する  $V$  への整数の指標である。三角形の集合は、空間の区分線形離散化を定義する。

【数 4 5】

$$\varphi(x) = \{\varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x)\}$$

$t_j$  の符号付きエリアは、そこで、以下のとおりである。

【数 4 6】

$$A(V, t_j) = \frac{1}{2}(v_{t_{j,2}} - v_{t_{j,1}}) \times (v_{t_{j,3}} - v_{t_{j,1}})$$

10

20

30

40

50

【 0 1 5 1 】

光再分配のパラメータ化の定式化は、ソース面上における頂点の位置のセット  $V^* = \{V_1^*, \dots, V_n^*\}$  を求め、これにより、

【 数 4 7 】

$$A(V^*, t_j) = I_j A(V, t_j) \forall j \in [1, m]$$

となる。ここで、 $I_j$  は、ソース強度に対するターゲット強度である。ソース強度は、一定と仮定する。単純には、光源から公知の一定ではない光強度に適応する。いくつかの実施形態において、ソースは、特定の画像の表示を容易化する一定ではない光強度を提供するように制御されてよい。例えば、ソースは、画像のより大きい強度に対応する領域において、より強い強度分布を提供し、画像のより暗領域に対応する領域において、より弱い強度分布を提供するように制御されてよい。

10

【 0 1 5 2 】

ターゲット強度は差異が大きいことがあるので、この条件は、以下の目的関数によって表すことができる。

【 数 4 8 】

$$E_T(V^*) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \left( \frac{A(V^*, t_j)}{I_j + \varepsilon} - A(V, t_j) \right)^2 \quad (5)$$

20

【 0 1 5 3 】

ターゲット強度によって正規化することにより、誤差がターゲット画像の明領域又は暗領域のいずれに対応するかに関わらず、これらの誤差は等しく加重されることが確実となる。定数  $0 < \varepsilon < 1$  は、ターゲット強度がちょうどゼロになった場合に、問題を正規化するように機能する。

【 0 1 5 4 】

エネルギー保存は、以下を必要とする（レンズ面からの光を画像面に取り込むどのような光学システムにおいても、損失が生じないと仮定する）。

【 数 4 9 】

$$\sum_{j=1}^m A(V^*, T) = \sum_{j=1}^m A(V, T)$$

従って、画像面に到達する合計光量を、統合ターゲット強度に合致するように調整することが望ましい。これは、ソース強度を予めスケールングすることによって、例えば、光源の出力を変調させ、光源からの光を、可変アパーチャを備える、及び／又は、レンズ面と画像面との間の光路に光変調器を含む光学システムに通すことによって、実現可能である。

30

【 0 1 5 5 】

さらなる物理的制約は、光が減算不可能なことである。従って、負の面積のソース領域は、物理的な意味をなさない。アルゴリズムは、

40

【 数 5 0 】

$$A(V^*, T_j) \geq 0 \forall j$$

という制約を含んでよく、これは、結果的に得られたパラメータ化が全単射であることをさらに必要とする。

【 0 1 5 6 】

式 5 の最小化をもたらす頂点の位置  $V^*$  は、高いターゲット強度レベルに対応する三角形の拡大、及び低いターゲット強度レベルに対応する三角形の縮小をもたらす。結果的に得られた三角形が正の面積を維持すること以外に、頂点の位置に対する追加の制約は、殆ど必要ない。

50

## 【 0 1 5 7 】

式 5 を最適化する試みの直接的な結果として、頂点の分散が不十分となることがある。図 1 8 A 及び 1 8 C に、例が示される。ターゲット光照射野（例えば、画像）再現の正確性は、解の空間を低回転のものに制限する回転正規化を導入することによって、大幅に向上可能である。例えば、図 1 8 B 及び 1 8 D を図 1 8 A 及び 1 8 C と比較する。

## 【 0 1 5 8 】

アプローチ 6 : アプローチ 5 に、回転及び平滑性の正規化を追加

回転正規化器の例は、式 6 によって定義される。これは、演算メッシュの三角形毎に表される。

## 【 数 5 1 】

10

$$E_{\nabla \times}(V^*) = \sum_{j=1}^m \int_{x \in t_j} (\nabla \times \Psi_j(V^* - V, x))^2 dx \quad (6)$$

## 【 0 1 5 9 】

入力がテッセレーションされた正規グリッドの形である場合、正規化器は、そのコンポーネントの三角形ではなく、グリッド上の有限差の形で等しく表されてよい。

## 【 0 1 6 0 】

回転正規化を組み込んだ結果、ポイントマッピングにおける歪みが減少する。ポイントマッピングにおける回転を減少させることにより、有利には、頂点の変位が、平滑で連続的なレンズ面の勾配によってより良好に近似可能となる結果をももたらす。これは、頂点の位置が、最終的には、結果的に得られたレンズ又は位相場の勾配を定義するために、位相の場合は明示的に、又は物理的レンズの場合はフレネルマッピングにより暗示的に適用されるからである。

20

## 【 0 1 6 1 】

回転正規化に加えて、いくつかの実施形態は、平滑性正規化器をさらに適用する。式 7 は、平滑性正規化器の一例を提供する。

## 【 数 5 2 】

$$E_{\nabla}(V^*) = \sum_{j=1}^m \int_{x \in t_j} (\nabla \Psi_j(V^*))^2 dx \quad (7)$$

30

## 【 0 1 6 2 】

回転及び平滑性正規化器の項の両方を組み込んだ例示的な最適化が、式 8 に示される。

## 【 数 5 3 】

$$V^* = \operatorname{argmin}_{V^*} E_T(V^*) + \beta E_{\nabla \times}(V^*) + \alpha E_{\nabla}(V^*) \quad (8)$$

$$\text{subject to: } A(V^*, T_j) \geq 0 \forall j$$

40

## 【 0 1 6 3 】

式 8 は、二次の制約を受ける頂点の位置  $V^*$  の非凸四次関数であり、結果的に、最適化に影響を及ぼす。以下のセクションは、式 8 の最適解を見出すために利用可能なアプローチを説明する。

## 【 0 1 6 4 】

数値計算

いくつかの実施形態において、式 8 における回転正規化の対象は、限定的なメモリ  $\text{Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno}$  方法 (  $\text{L-BFGS}$  ) を用いて計算される。  $\text{L-BFGS}$  の様々な実装は、公に利用可能である。これらは、C プログラミング言語用の  $\text{libBFGS}$  を含む。

50

【 0 1 6 5 】

L - B F G S は、目的関数の勾配評価の履歴を用いて逆ヘッセ行列への近似を構築し、検索方向を演算する。一度検出されると、第 2 の 1 D 最適化がこの検索方向に沿って実行され、近似最小化器を求める。有利には、L - B F G S は、 $V^*$  のあらゆる値に対して、ヘッセの再評価を必要としない。

【 0 1 6 6 】

非負制約  $A(V^*, t_j) = 0$  は、システム行列又はシステム行列又はプリコンディショナの事前演算を防止する。これらの制約は、各三角形にペナルティ項を導入するログバリア方法を用いて実装されてよい。例示的なペナルティ項が、式 8 に追加可能な式 9 に示される。

【 数 5 4 】

$$E_N(V^*, \mu) = \sum_{j=1}^m -\frac{1}{\mu} \log(A(V^*, t_j)) \quad (9)$$

【 0 1 6 7 】

最初に、バリアパラメータ  $\mu$  が大きい値に設定され、次第に減少する。例えば、バリアパラメータは、係数

【 数 5 5 】

$$\tau \in (0, 1)$$

によってスケールリングされてよい。係数は、一定であってよい。結果的に得られるペナルティは、元の制約条件

【 数 5 6 】

$$A(V^*, t_j) \geq 0$$

に対して、急速により正確な近似値となる。

アルゴリズム 3 エリアベースのパラメータ化の数値最適化

AREA PARAMETERIZATIONS SOLVE

【 数 5 7 】

$$(I, \tilde{V}^*, T)$$

の手順

// バリアパラメータを初期化する。

$\mu \leftarrow 1$

// 初期マッピングを初期化する。

【 数 5 8 】

$$V^* \leftarrow \tilde{V}^*$$

一方で、 $\mu > \mu_{\min}$

// L - B F G S を介して更新されたマッピングを計算する。

【 数 5 9 】

$$V^* \leftarrow \arg \min_{V^*} E_T(V^*) + \frac{\beta}{2} E_V \times (V^*) + \frac{\alpha}{2} E_V(V^*) + \delta E_N(V^*, \mu)$$

// バリアパラメータを調整する。

10

20

30

40

50

$\mu$        $\mu$   
 // 演算されたマッピングを戻す。  
 $V^*$  を戻す。

【 0 1 6 8 】

多くの場合、ターゲット強度による逆スケーリングによって、反転された三角形は画像の暗エリアにおいてのみ生じるので、ペナルティは、（例えば、 $\sigma = 0$  を設定することによって）完全に省略されてよい。これにより、異なる  $\sigma$  値における複数の最適化は単一の最適化によって置き換え可能なので、方法のパフォーマンスが大きく改善される。

【 0 1 6 9 】

スケール空間における計算

10

回転正規化器は、統合可能なものの計算を制限する一助となるが、目的関数はポイントマッピングの四次関数であるので、式 8 において、最適化が目的関数の局所的な極小値に固定される可能性がある。これを改善する一助となるべく、最適化は、スケール空間において、粗から精細へと実行されてよい。

【 0 1 7 0 】

極小値に固定されることを回避する一助となるべく、式 8 は、スケール空間において、粗から精細へと計算される。このための疑似コードが、アルゴリズム 4 に示される。

アルゴリズム 4 エリアベースのパラメータ化のスケール空間最適化

AREAPARAMETERIZATIONRECURSIVE ( I , k )

の手順

20

$w \leftarrow width(I) / 2^k$

$h \leftarrow height(I) / 2^k$

$I_c \leftarrow BlurAndDownsample(I, w, h, \sigma)$

$w < 10$  又は  $h < 10$  の場合

// ベースレベルで、ルートパラメータ化を演算する。

【数 6 0】

$$\sigma \leftarrow \frac{2^k}{2}$$

// 画像ドメインの均一な三角形分割を生成する。

30

$V, T \leftarrow UniformMesh(w, h)$

// マッピングポイント位置を最適化する。

$V^* \leftarrow AreaParameterizationSolve(I_c, V, T)$

// 演算されたマッピングを戻す。

$V^*, T$  を戻す。

他

// パラメータ化を再帰的に演算し、線形にアップサンプリングする。

$V_c^*, T_c \leftarrow AreaParameterizationRecursive(I, k + 1)$

【数 6 1】

40

$$\tilde{V}^*, T \leftarrow UpsampleLinear2X(V_c^*, T_c)$$

// 初期条件として

【数 6 2】

$$\tilde{V}^*, T$$

を用いて現在のスケールを計算する。

【数 6 3】

$$V^* \leftarrow \text{AreaParameterizationSolve}(I_C, \tilde{V}^*, T)$$

// 演算されたマッピングを戻す。

$V^*$ ,  $T$  を戻す。

【0 1 7 1】

0 とすると、アルゴリズム 4 は、結果的に得られたパラメータ化が全単射であることを確実にする。これは、三角形が 2 倍にアップサンプリングされるので、あらゆる細分化された三角形が単一のソース三角形内に完全に含まれることから、保証される。

10

【0 1 7 2】

マルチスケールの手順により、方法は、大きな変位及び低回転を有するポイントマッピングの回復が可能となる。この結果、ポイントの変位フィールドがほぼ統合可能となる。これは、ポイントの変位を統合し、最終的なレンズ面又は位相関数を演算する場合のコードによって、行先指定されてよい。

【0 1 7 3】

位相及びレンズ面の生成

一度パラメータ化が完了すると、ポイントの変位  $V - V^*$  から物理的レンズ面の生成が可能となる。ここで、 $V$  はターゲット画像面上の点を表し、 $V^*$  は、レンズ面上の点を表す。これらの変位は、レンズ面上のポイントから画像面への面内オフセットを決定し、結果的に、レンズ面からマッピングされたポイントへの光学軸に対する角度を決定する。

20

【数 6 4】

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{v - v^*}{f} \right)$$

【数 6 5】

$$\theta_1 = \frac{n_2}{n_1 - n_2} \tan^{-1} \left( \frac{v - v^*}{f} \right)$$

【0 1 7 4】

これらの式は、入射光が光学軸に対して平行であり、かつ、光学軸及び出射する光線方向を含む面と平行な面において、光学軸に対して測定されるものと仮定する。

30

【0 1 7 5】

位相 / レンズ面の標準は、結果的に、光学軸及び出射する光線方向を含む面に対して平行な面に制約され、光学軸に対して角度  $\theta_1$  をなす。これらの標準を統合することにより、回転のない変位という理想的なケースにおいて、所望の位相 / レンズ面を生成する。しかしながら、これらのベクトルは、メッシュの頂点においてのみ定義される。これに適応するように、統合は、構造化されていないメッシュを用いて（例えば、有限要素法を用いて）実行されてよく、又は、標準は、位相 / レンズ面の画素にリサンプリングされてよい。以下の例示的な実装は、後者のアプローチをとる。これにより、選択された統合方法において、柔軟性が実現可能となる。

40

【0 1 7 6】

リサンプリングを実行するように、三角形の標準は、位相 / レンズ面を表す画像にラスライズされてよい。Phong 補間は、このラスライズに用いられてよく、その結果、標準フィールドが、区分二次パッチにより正確に表示可能となる。

【0 1 7 7】

リサンプリングされた標準フィールドが回転のないものである場合、レンズ / 位相面は、ポアソンの式を計算することによって、直接的に統合されてよい。実際、リサンプリングされた標準フィールドは、通常は回転のないものである。これは、必ずしも物理的レンズがターゲットの標準フィールドを再現することができないことを暗示するものではなく

50

、連続的かつ平滑な物理的レンズではできないということを示しているに過ぎない。平滑ではない、場合によっては不連続でさえるレンズは、不連続部分の付近に視認可能なアーティファクトが存在する可能性を犠牲にして、より一層広範囲の標準フィールドを再現することができる。

【 0 1 7 8 】

これは、自然に、ねじれ又は不連続部分のスパースなセットにおける場合を除き、標準フィールドを十分に満たすレンズ面を求めて、スパース最適化方法を用いて統合を実行するという発想につながる。これらの方法は、あらゆる平滑ではない領域のトポロジを自動的に決定するので、魅力的である。これは、禁止されたパッチを用いることとは異なる。

【 0 1 7 9 】

いくつかの適したスパース最適化方法は、以下に定義される最小絶対偏差 ( L A D ) の問題のバリエーションである。

【 数 6 6 】

$$p = \operatorname{argmin}_p \| Gp - N \|_1 \quad (10)$$

【 0 1 8 0 】

式 1 0 において、行列  $G$  は、離散勾配演算子を表し、 $p$  は、回復されるべきレンズ又は位相面であり、 $N$  は、ターゲットの標準フィールドである。L A D 問題のバリエーションは、よりスパースなノルム、例えば、ゼロノルム、又は非凸だがまだ連続的なノルムを用いることを含む。いくつかの選択肢を実験した後、式 1 1 に示される加重 L A D の定式化が、プロトタイプの実施形態のために選択された。

【 数 6 7 】

$$p = \operatorname{argmin}_p \| WGp - WN \|_1 \quad (11)$$

【 0 1 8 1 】

$W$  は、特定の不連続位置を他より優先させるために用いられる斜め加重行列である。結果的に得られた標準フィールドにおいて、画素毎に勾配行列における 2 つの列により、 $W_{2i, 2i}$  及び  $W_{2i+1, 2i+1}$  に対する加重は、

【 数 6 8 】

$$\sqrt{\frac{1.0}{\max(\varepsilon, a_i)}}$$

に設定されてよい。ここで、 $a_i$  は、画素  $i$  のマッピングされたエリアである。この加重関数は、暗領域における標準誤差を強調し、 $L_1$  最適化がそこに不連続部分を配置することを促進する。代替的な加重は、パラメータ化の平滑性を考慮してよい。式 1 1 は、A D M M、プライマルデュアル方法又は線形プログラミング定式化を含む、スパース再構成のための任意の数の数値的方法を用いて計算されてよい。

【 0 1 8 2 】

本明細書において説明されるエリアパラメータ化方法は、これらの方法が、L - B F G S 最適化への入力として、勾配評価及び単純なベクトルオペレーションのみに依存する行列なしのアルゴリズムを用いて実行可能であるので、G P U もしくは F P G A 又は他の適したハードウェア上で並列化されてよい。勾配演算は、画素毎に並列に、分析的に実行されてよい。

【 0 1 8 3 】

本明細書において説明される方法は、ターゲット光パターンのより高速の処理及び / 又はより正確な描出を様々な態様で実行するように、最適化されてよい。例えば、L - B F G S は、ドット積及び外積にわたって並列化してよい。さらに、L - B F G S アルゴリズムにおけるラインサーチパラメータのチューニング勾配演算の並列化及び / 又はテンポラ

10

20

30

40

50



りの回避、ならびにキャッシュ読み出しの最適化及びテンポラリの除去は、図 1 0 6 B、1 0 7 B、1 0 8 B、1 0 9 B、1 1 0 B、1 2 1 B、1 2 2 B、1 2 3 B、1 2 4 B 及び 1 2 5 B に示される例示的な画像を生成するために用いられるプロトタイプシステムと比較して、著しい高速化をもたらすことがある。

【 0 1 8 4 】

マルチスケール構造を用いることによって、より良好な並列化実現性を有するより高速の方法が、頂点の独立したセットに並列化を行う方法のバリエーションを用いたエリア最適化を実行することによって、実現されてよい。

【 0 1 8 5 】

暗領域における望ましくないアーティファクトは、標準的な統合手順を変更し、上述されたように、リサンプリングされた画素グリッドではなく、三角メッシュ上で動作することによって、減少することがある。レンズ/変調器に対する各ターゲット画像の画素の投射ではなく、ターゲット画像に対する各レンズ/変調器の画素の投射を最適化することによって、さらなる改善が実現可能である。これは、結果的に得られた最適化において光及び暗部の役割を逆転させ得るものであり、場合によっては、明領域にアーティファクトを生成させるが、リサンプリングを回避するであろう。欠点は、結果的に得られた最適化の安定性が低くなる可能性が高いことである。ターゲット画像への投射を最適化する場合、変調器/レンズの画素の配置における軽微な差異が、ターゲット画像内の強度に非常に急速な変化をもたらすことがある。

【 0 1 8 6 】

図 4 3 A 及び 4 3 B は、方法 1 0 0 の非限定的な例を示す。方法 1 0 0 は、解像度レベルを繰り返し高めるループ 1 0 1 A によって実行されるマルチスケール処理、及びバリアパラメータの値を繰り返し減少させるループ 1 0 1 B によって実装される可変バリアパラメータの両方を組み込む。代替的な方法は、ループ 1 0 1 A 及び 1 0 1 B のうちの 1 つのみを実行する、又はこれらのいずれも実行しない。

【 0 1 8 7 】

ブロック 1 0 2 において、ソース領域は、初期マッピング 1 0 3 を提供するように初期化される。ブロック 1 0 2 は、例えば、三角形又は他の形状のソース領域を定義する複数の頂点に位置を割り当てる段階を含んでよい。ソース領域の数（及び対応する表示領域の数）は、現在のスケール/解像度に従って変化してよい。

【 0 1 8 8 】

画像データ 1 0 5 は、目的関数 1 0 9 を構築するために用いられる。図示された実施形態において、画像データ 1 0 5 の解像度は、ブロック 1 0 6 において設定され、同ブロックは、バリアパラメータの現在値をさらに設定する。ブロック 1 0 6 は、例えば、画像データ 1 0 5 をダウンサンプリングし、又はこれをダウンサンプリング及びフィルタリングし、サイズ決定された画像データ 1 0 7 を生成する段階を含んでよい。ブロック 1 0 8 は、サイズ決定された画像データを用いて、目的関数 1 0 9 を生成する。目的関数 1 0 9 は、更新されたマッピング 1 1 5 を計算するブロック 1 1 0 に供給される。ブロック 1 1 0 は、例えば、L - B F G S ソルバーアルゴリズムを実装してよい。ブロック 1 1 0 は、上述されたように、回転正規化器 1 1 2 A、平滑性正規化器 1 1 2 B 及びエリアペナルティ 1 1 2 C の 1 つ又は複数を起動してよい。

【 0 1 8 9 】

ブロック 1 1 6 において、バリアパラメータは、（例えば、バリアパラメータの現在値をスケールリングする、又は、複数の減少したバリアパラメータの次の 1 つを選択することによって）更新される。ブロック 1 1 8 は、更新されたバリアパラメータが、用いられるべきバリアパラメータの最小値より小さいか否かを確認する。更新されたバリアパラメータ値が、用いられるべきバリアパラメータの最小値以上である場合（ブロック 1 8 において結果が N O ）、ループ 1 0 1 B を介してループの処理を戻し、次のバリアパラメータ値に対して繰り返す。ブロック 1 1 6 及び 1 1 8 は、ブロック 1 1 8 のテストに適切な変化を加えることにより、順番を逆にされてよい。

## 【 0 1 9 0 】

ブロック 1 1 8 において結果が Y E S の場合（現在のスケールに対して、全てのバリアパラメータ値が完了したことを示す）、ブロック 1 2 0 は、全てのスケールが完了したかどうかを確認する（例えば、現在の解像度が完全な解像度であるか又は最大解像度であるかを確認する。）そうである場合、処理は図 4 3 B に続く。さもなければ、ブロック 1 2 2 は、マッピング 1 1 5 の解像度及び目的関数を高め、ループ 1 0 1 A によってループの処理を戻し、新たな解像度において更新されたマッピングを得る。

## 【 0 1 9 1 】

図 4 3 B は、マッピング 1 1 5 が光プロジェクトを駆動するように処理される方法 1 0 0 の続きを示す。ブロック 1 2 4 において、マッピング 1 1 5 において定義されたソースエリアの標準がリサンプリングされ、リサンプリングされた標準 1 1 7 を生成する。ブロック 1 3 6 において、リサンプリングされた標準は統合され、ターゲット位相面 1 1 9 を生成する。ブロック 1 2 8 において、位相面 1 1 9 における位相シフト値は、調整された剰余 2 であり、位相変調器構成データ 1 2 9 が位相変調器の範囲内にあるように、これらを生成する。ブロック 1 3 0 において、位相変調器は、位相変調器構成データ 1 2 9 に従って駆動される。ブロック 1 3 2 において、画像が表示される。

## 【 0 1 9 2 】

アプローチ 7：割り当て問題の定式化

上述のアプローチのバリエーションは、式 8 によって例示された定式化の代わりに、又はこれに加えて、割り当て問題の定式化を用いて照射ソースからターゲット画像へのマッピングを生成する。割り当て問題及びこれらを計算するための技術は、オペレーションリサーチの分野内において一般的である。割り当て問題の例示的な定義が、等しい濃度のソースポイント  $s_i$  及びターゲットポイント  $t_j$  のセットについて、式 1 2 に示される。

## 【数 6 9】

$$w = \operatorname{argmin}_w \sum_i \sum_j C(i, j) w_{i, j} \quad (12)$$

$$\text{subject to: } \sum_j w_{i, j} = 1 \forall i$$

## 【 0 1 9 3 】

行列  $C(i, j)$  は、ソースポイント  $i$  からターゲットポイント  $j$  へのマッピング  $w_{i, j}$  単位のコストを示すコスト関数である。一方で、この制約により、ソース及びターゲットが、完全にマッピングされることを確実にする。標準的な線形の割り当て問題において、加重  $w_{i, j}$  は、分数であってよい。バリエーションは、バイナリ  $w_{i, j}$  を要求してよい。

## 【 0 1 9 4 】

$s_i$  がソース位置であり、かつ、 $t_j$  がターゲット位置である場合、一般的なコスト関数  $C(i, j)$  は、マンハッタン及びユークリッド距離である。多くの場合、コスト関数はスパースであり、可能な割り当て  $(i, j)$  のサブセットのみが、暗示的に割り当てられた無限のコストとの実現不可能な合致により可能であることを意味する。

## 【 0 1 9 5 】

この問題は、ソース及びターゲットポイントの分布をソース及びターゲットの輝度に比例して生成し、次に、式 1 2 を計算することによりソースとターゲットとの間の最適な割り当てを演算することによって、コースティック生成に適用されてよい。これらの割り当ては、次に、ソースからの出射角度を決定し、上述されたスネルマッピング及び標準的な統合方法が、レンズ面における光学素子の構成に至るために用いられてよい。式 1 2 を計算するために、線形プログラミング、又は 1 : 1 のマッピングを求める離散的なケースにおいては、オークションアルゴリズムもしくはハンガリーアルゴリズムを含む、いくつか

のアプローチが用いられてよい。

#### 【0196】

式12を介したコースティック形成は、例えば、結果的に得られた標準フィールドにおいて回転を誘導するせん断を最小化する点で有利なことがある。これらの利点は、対象のポイントのセットにおいて式12を計算する演算コストに対して相殺されることがある。式12は、特に大きいポイントのセットをスパースではないコスト関数により計算するために、かなりの演算を必要とすることがある。距離（マンハッタン又はユークリッド）コスト関数にスパース性を導入することは、レンジングの誘導効果を限定し、局所的な領域に対する修正を有効に制約する。

#### 【0197】

例示的な方法において、割り当て問題の定式化は、上述されたエリアパラメータ化方法によって演算されるポイントマッピングを改良し、結果的に得られた標準的なマップにおいて回転を減少させるために適用される。これにより、演算コストの高い高密度な割り当て問題を、代わりに、迅速に計算されるスパースな問題に置き換え、これを計算しなければならない状況をさらに回避する。

#### 【0198】

##### 結果の比較

このセクションは、近軸デブラ及びエリアパラメータ化アプローチの比較を提示する。近軸デブラに対して、全てのレンズは、解像度  $256 \times 128$ 、画素ピッチ  $0.5 \text{ mm}$ 、 $100 \text{ mm}$  焦点距離で、 $\alpha = 1.0$  及び  $\beta = 2.0$  でミラーリングされたパディングを用いて演算された。2のべき乗以外の入力寸法による不均一な再スケーリングの結果、焦点距離にわずかな誤りが生じた。全てのレンダリングは、 $130 \text{ mm}$  焦点距離において演算された。演算時間は、画像毎に約1秒であったが、GPUに対する並列化、パイプライン化及びポーティングを介したコード最適化の余地が大きい。

#### 【0199】

エリアパラメータ化に対して、全てのレンズが、 $\alpha = 0.05$ 、 $\beta = 0.05$  及び  $\gamma = 1.0$ 、ならびに  $\delta = 0$  で演算された。このパラメータの選択により、全てのソースエリア（例えば、三角形）が正の面積を有するように制約される要件が無効となる。しかしながら、結果的に得られたパラメータ化は、全単射である、又は全単射に近いことが多い。これは、図105A及び105Bに見ることができる。ここで、画像の暗領域は極度に圧縮されているにも関わらず（これらに対して光が殆どマッピングされていないことを示す）、これらは凸のままである。全単射マッピングを生成するアルゴリズムの傾向は、少なくとも部分的に、ターゲット強度による正規化の結果である。この結果、最適化は、ターゲットの倍率係数を実現する場合に、絶対誤差ではなく、相対誤差にペナルティを科す。演算時間は、フレーム毎に約5 - 10秒であったが、近軸デブラの結果と同じ解像度で動作することによって、4倍の高速化が可能であり、2つの演算時間が互いに接近する。

#### 【0200】

近軸デブラ及びエリアパラメータ化アプローチの比較は、図20Aから24Cに提示される。各画像は、公称入射照射を示す灰色の境界と、照射がないことを示す薄い黒色の境界とを有する。全ての画像は、ガンマ3.0を用いた図20Bのアイنشタインのエリアパラメータ化画像を除いて、ガンマ2.2でガンマ補正されている。画像は、標準平滑化及びループ細分割が有効化されたBlender及びLuxRenderを用いて、メッシュファイルからレンダリングされた。演算時間は、画像毎に約1秒であったが、GPUに対する並列化、パイプライン化及びポーティングを介したコード最適化の余地が大きい。

#### 【0201】

全体として、近軸デブラの定式化は、高精度の再現に関して、エリアパラメータ化方法よりより良好な結果を出していることがわかる。結果は、エリアパラメータ化に対する1/4解像度と比較して、近軸デブラ方法に対しては約1/8スケールで演算され、エリアパラメータ化の結果に存在するものよりさらに一層高精度を示す。この差は、エリアパラ

10

20

30

40

50

メータ化方法が近軸デブラ方法よりかなり強い誘導を与えることができるという事実、大部分が起因可能である。

【0202】

両方の方法は、入力画像をある程度歪ませる。これは、部分的には、アーティファクトをリサイズしたことに起因し、部分的には、レンズが薄いという仮定が十分に適用されない程に厚くなったレンズに起因する。いくつかのレンズは、これらの焦点距離の約10%の厚みを有する。歪みの多くは、レンズの画像面からの距離をわずかに調整することによって補正可能である。

【0203】

実験結果 いくつかの位相パターンは、プロトタイプのプロジェクタに用いるために演算された。プロトタイプのプロジェクタは、コヒーレントな532nmの緑色レーザーソースを用いる。これは、拡大されて、2の「LETO」位相変調器に中継される。位相変調器の出力は、次に、投射レンズに中継され、スクリーンに投射される。大半のパターンは、前のセクションのデフォルトパラメータを用いた。しかしながら、「ろうそく」の画像は、 $\gamma = 0.1$ を用いた。「ろうそく」(図36A)、「アインシュタイン」(図32A)及び「アベンジャーズ」(図35A)の画像は、 $L_2$ 統合を用いた。

【0204】

同じカメラ設定(ISO800, 0.01s, F20)を用いてキャプチャされたように、近軸デブラ及びエリアパラメータ化の結果の間における画像の比較が、図29Bから32Cに示される。近軸デブラの結果は、比較的低いコントラストを有するため、画像の構造が見ることが困難なことがある。エリアパラメータ化の結果は、はるかに良好なコントラストを有するが、プロジェクタ光学内の整合及びLETOの照射の均一性に敏感である。プロジェクタにおける軽微な不整合が、結果的に生成された画像に深刻な局所的歪みをもたらすことがある。結果のいくつかは、これらの歪みを示す。

【0205】

図33Aから33Hは、低出力の白色LEDからの、LETOの広帯域照射の同様の比較を示す。これらの出力画像は、図29Bから29Cと同じ位相パターンを用いて、白いビジネスカードにフォーカスされている。歪みは、ある程度減少する。これは、高められたブラックレベル及び色の収差を犠牲にして、位相パターンにおけるラップによってアーティファクトが生成されることによる。この場合、エリアパラメータ化は、近軸デブラアプローチよりもまだ優れている。

【0206】

コントラストを強調するカメラ設定を用いたエリアパラメータ化方法の結果のセットは、図34Aから34Dに示される。これらの画像は、エリアパラメータ化方法が、光の大部分を暗領域から光の領域にそらしていることを示す。

【0207】

本明細書において説明される技術は、様々な態様で実装されてよい。図41は、本発明の一実施形態に係る装置50を示す。装置50は、画像データ52を取り込み、所望の光フィールド(ピクチャ、光パターン、ビデオフレーム等であってよい)を特定し、レンズ又は位相変調器の構成を特定するデータを生成するプロセッサ54を備える。データ56は、プリントされた物理的レンズを生成する3Dプリンタ57A、又は物理的レンズもしくは物理的レンズ用のモールドを生成するフライス盤もしくは他の機械加工センタ57B、又は後で用いるためのデータストア57Cを制御するために用いられてよい。データ56は、制御可能なレンズ、ミラー/位相変調器等を含む光プロジェクタ57Dに供給されてよい。

【0208】

図42は、データ56を受信するように接続されたコントローラ62を含む光プロジェクタ60を示す。装置50のコントローラ62及びプロセッサ54の機能は、光プロジェクタ60が画像データを取り込み、これを処理するように、組み合わせられてよいことに留意されたい。他の実施形態において、光プロジェクタ60は、装置50の機能を部分的

10

20

30

40

50

に実行するプリプロセッサ装置と共に動作してよい。光プロジェクタ 60 は、次に、データを処理するさらなる段階を実行してよい。

【0209】

プロジェクタ 60 は、光源 64 と、位相変調器 66 とを含む。いくつかの実施形態において、位相変調器 66 は、動的に可変なミラー又は動的に可変なレンズによって置き換えられる。位相変調器 66 は、光源 64 から入射する光の位相を 1 画素ずつ調整し、所望の画像を画像 68 に表示させるように、ディスプレイコントローラ 62 によって制御される。画像 68 は、例えば、前方又は後方から光が投射される面を含んでよい。

【0210】

プロジェクタ 60 は、投射画像の平均明度を画像データと合致するように調整する 1 つ又は複数のメカニズムを含んでよい。図示された実施形態は、光源 64 の光出力を変化させる任意の制御信号 64A を含む。図示された実施形態は、光源 64 と位相変調器 66 との間の光路における可変アパーチャのような、任意のグローバル変調器 65 をさらに含む。グローバル変調器 65 は、位相変調器 66 において、入射する光を制御可能に減衰させるように動作可能である。他の例示的な実施形態において、位相変調器 66 は、光源 64 から受けた全ての光を画像 68 へと方向付けた結果、所望の平均画像輝度より高くなる場合に、いくらかの光を画像 68 から離れるように方向付けるように構成される。

【0211】

プロジェクタ 60 は、任意のクリーンアップステージ 67 をさらに含む。クリーンアップステージ 67 は、画像 66 への光の伝送を画素ベースで調整可能な LCD パネル又はデジタルミラーデバイス等のような空間光変調器を含んでよい。クリーンアップステージ 67 は、投射画像の平均輝度を調整するために用いられてよく、投射画像におけるアーティファクトを補正するために用いられてもよい。

【0212】

用語の解釈

文脈的に明らかに他の解釈が必要でない限り、説明及び特許請求の範囲を通して、以下のとおりとする。

・「含む」、「備え」等は、排他的又は網羅的な意味と対照的に、包括的な意味で解釈されるものとする。つまり、「含むが、限定されるものではない」ことを意味する。

・「接続」、「結合」又はこれらのあらゆる変形は、2 つ又はそれより多くの要素の間における直接的又は間接的なあらゆる接続又は結合を意味する。要素間の結合又は接続は、物理的、論理的、又はこれらの組み合わせであってよい。

・「本明細書において」、「上述」、「後述」、又は同様の語は、本明細書を説明するために用いられる場合、本明細書全体を指すものとし、本明細書のいずれかの特定部分を指すものではない。

・2 つ又はそれより多くの項目の列挙に関連して、「又は」は、語の以下の解釈、すなわち、列挙された項目のいずれか、列挙された項目の全て、及び列挙された項目のあらゆる組み合わせの全てを包含する。

・単数形「a」、「an」、及び「the」は、あらゆる適切な複数形の意味をさらに含む。

【0213】

「垂直」、「横」、「水平」、「上方」、「下方」、「前方」、「後方」、「内側」、「外側」、「垂直」、「横」、「左」、「右」、「前」、「後」、「上部」、「下部」、「上」、「下」等のような方向を示す語は、本説明及び（存在する場合には）いずれかの添付の特許請求の範囲において用いられた場合、説明及び図示される装置の具体的な向きに依存する。本明細書において説明される主題は、様々な代替的な向きを仮定してよい。従って、これらの方向を意味する用語は、厳密に定義されるものではなく、狭義に解釈されてはならない。

【0214】

本発明の実施形態は、特定用途向けに設計されたハードウェア、構成可能なハードウェア

10

20

30

40

50

ア、データプロセッサ上で実行可能なソフトウェアの提供によって構成されるプログラマブルデータプロセッサ（任意に「ファームウェア」を含んでよい）、本明細書において詳細に説明された方法における１つ又は複数の段階を実行するように具体的にプログラム、構成、もしくは構築された特別用途向けコンピュータ又はデータプロセッサ、及び／又はこれらの２つ又はそれより多くの組み合わせを用いて実装されてよい。ソフトウェアは、方法を実行するロジックを実装するＦＰＧＡのような構成可能なロジックデバイスを構成する命令を含んでよい、又はこれらからなってもよい。特定用途向けに設計されたハードウェアの例は、論理回路、特定用途向け集積回路（「ＡＳＩＣ」）、大規模集積回路（「ＬＳＩ」）、超大規模集積回路（「ＶＬＳＩ」）等である。構成可能なハードウェアの例は、プログラマブルアレイロジック（「ＰＡＬ」）、プログラマブルロジックアレイ（「ＰＬＡ」）、フィールドプログラマブルゲートアレイ（「ＦＰＧＡ」）のような１つ又は複数のプログラマブルロジックデバイスである。プログラマブルデータプロセッサの例は、マイクロプロセッサ、デジタル信号プロセッサ（「ＤＳＰ」）、埋め込みプロセッサ、グラフィックスプロセッサ、算術コプロセッサ、汎用コンピュータ、サーバコンピュータ、クラウドコンピュータ、メインフレームコンピュータ、コンピュータワークステーション等である。例えば、デバイスの制御回路における１つ又は複数のデータプロセッサは、プロセッサにアクセス可能なプログラムメモリにおけるソフトウェア命令を実行することによって、本明細書において説明された方法を実装してよい。

#### 【０２１５】

処理は、集中化されてよく、又は分散されてよい。処理が分散される場合、ソフトウェア及び／又はデータを含む情報は、集中的に又は分散されて保持されてよい。このような情報は、ローカルエリアネットワーク（ＬＡＮ）、ワイドエリアネットワーク（ＷＡＮ）、又はインターネット、有線もしくは無線データリンク、電磁気信号、又は他のデータ通信チャネルのような通信ネットワークによって、異なる機能ユニットの間で交換されてよい。

#### 【０２１６】

例えば、処理又はブロックが所与の順番で与えられる一方で、代替的な例は、複数の段階を有するルーチンを実行してよく、又は異なる順番で複数のブロックを有するシステムを採用してよく、いくつかの処理又はブロックは、削除、移動、追加、細分化、組み合わせ、及び／又は修正されて、代替例又は部分的組み合わせを提供してよい。これらの処理又はブロックの各々は、様々な異なる態様で実装されてよい。また、処理又はブロックは、時に、連続的に実行されるものとして示される一方で、これら処理又はブロックは、代わりに、並列に実行されてよく、又は、異なる時に実行されてよい。

#### 【０２１７】

さらに、要素は、時に、連続的に実行されるものとして示される一方で、これらは、代わりに、同時に又は異なる順番で実行されてよい。従って、以下の特許請求の範囲は、このようなバリエーションの全てを、これらの意図する範囲内にあるものとして含むものと解釈されることを意図するものである。

#### 【０２１８】

ソフトウェア及び他のモジュールは、サーバ、ワークステーション、パーソナルコンピュータ、タブレットコンピュータ、画像データエンコーダ、画像データデコーダ、ビデオプロジェクト、ビデオプロセッサ、ビデオエディタ、オーディオビジュアル受信機、（テレビのような）ディスプレイ、デジタル映画プロジェクト、メディアプレイヤー、マルチプロセッサシステム、マイクロプロセッサベース又はプログラマブル民生用電子機器、ネットワークＰＣ、ミニコンピュータ、メインフレームコンピュータ等、及び本明細書において説明された目的に適した他のデバイス上に存在してよい。当業者であれば、システムの態様が、他の通信、データ処理、又はコンピュータシステム構成により実施可能であることを理解しよう。

#### 【０２１９】

本発明は、プログラム製品の形で提供されてもよい。プログラム製品は、データプロセ

10

20

30

40

50

ッサによって実行された場合に、本発明の方法をデータプロセッサに実行させるコンピュータ可読命令のセットを保持する任意の非一時的媒体を含んでよい。本発明に係るプログラム製品は、多種多様な形のいずれかであってよい。プログラム製品は、例えば、フロッピー（登録商標）ディスクを含む磁気データ記憶媒体、ハードディスクドライブ、CD-ROM、DVDを含む光学データ記憶媒体、ROM、フラッシュRAM、EPROMを含む電子データ記憶媒体、配線接続され又は事前にプログラミングされたチップ（例えば、EEPROM半導体チップ）、ナノ技術メモリ等のような非一時的媒体を含んでよい。プログラム製品上のコンピュータ可読信号は、任意に、圧縮又は暗号化されてよい。

#### 【0220】

いくつかの実施形態において、本発明は、ソフトウェアで実装されてよい。より明確にすべく、「ソフトウェア」は、プロセッサ上で実行されるあらゆる命令を含み、（限定されるものではないが）ファームウェア、常駐ソフトウェア、マイクロコード等を含んでよい。処理ハードウェア及びソフトウェアの両方は、当業者に公知であるように、全体として又は部分的に、集中化又は分散（又はこれらの組み合わせ）されてよい。例えば、ソフトウェア及び他のモジュールは、ローカルメモリを介して、ネットワークを介して、分散演算環境においてブラウザ又は他のアプリケーションを介して、上述された目的に適した他の手段を介して、アクセス可能であってよい。

#### 【0221】

コンポーネント（例えば、ソフトウェアモジュール、プロセッサ、アセンブリ、デバイス、回路等）が上述される場合、異なることが示されていない限り、当該コンポーネントという記載（「手段」という記載を含む）は、本発明の例示的な実施形態における機能を実行し、かつ、開示された構造と構造的には等価ではないコンポーネントを含め、説明されたコンポーネントの機能を実行するあらゆるコンポーネント（すなわち、機能的に等価である）を、当該コンポーネントの等価物として含むものと解釈されなければならない。

#### 【0222】

以下、開示された発明の例示的な実施形態を、非限定的に列挙する。

1. 画像データによって定義される画像を表示するように、位相変調器を制御する方法であって、

2 次元位相変調器上で重複しない複数のソース領域を定義し、かつ、表示面において複数の表示領域を定義する段階であって、複数のソース領域の各々は、境界及びソースエリアを有し、かつ、複数の表示領域のうち対応する表示領域に関連付けられ、複数の表示領域の各々は、対応する表示領域エリアを有する、段階と、

画像データに基づいて、複数の表示領域の各々にターゲット光強度値を割り当てる段階と、

対応する複数のソース領域の複数のソースエリアに対する複数の表示領域の複数の表示エリアの比率が、対応する表示領域に割り当てられるターゲット光強度値に対する複数のソース領域の複数のソース光強度値の比率に比例するように、複数のソース領域の構成、複数の表示領域の構成、又は複数のソース領域及び複数の表示領域の両方の構成を調整する段階と、

複数のソースエリアの各々に位相面を生成する段階であって、位相面は、ソースエリアに入射する光を対応する表示エリアに方向変更するように構成される、段階と、

複数のソース領域に複数の位相面を提供するように位相変調器を制御し、複数のソース強度値に従って、複数のソース領域に入射光を照射する段階と、

を備える方法。

2. 画像データに基づいて、複数のターゲットソースエリアを決定し、複数のソース領域に対応する複数のターゲットソースエリアから、複数のソース領域の面積の集合偏差を定量化する目的関数を最も良く満たす複数のソース領域の境界の構成を決定するように最適化を実行することによって、複数のソース領域の構成を調整する段階と、を備える、例示的態様1（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

3. 複数の位相面を生成する段階は、最適化の後の複数のソース領域の境界の構成に

10

20

30

40

50

基づいて、複数のソース領域の各々の法線ベクトルを決定し、位相変調器の位相を2次元の位置に関連付ける解の位相関数を生成するように、複数の法線ベクトルを統合する段階を含む、例示的態様2（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

4. 複数のソース領域は、複数のソース頂点の間に延びる複数の線によって定義される重複しない複数のソーススタイルを含み、複数のソース頂点の各々は、位置を有し、複数の表示領域は、複数の表示頂点の間に延びる複数の線によって定義される重複しない複数の表示スタイルを含む、例示的態様2（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

5. 複数のソーススタイル及び複数の表示スタイルは、三角形である、例示的態様4（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

10

6. 最適化は、複数のソース頂点の最適化された位置を決定する、例示的態様4又は5（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

7. メジアンカットアルゴリズムを実行することによって、複数のソース領域の構成を調整する段階を備える、例示的態様1（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

8. 複数のソースエリアの各々に位相面を生成する段階は、放物レンズに対応する位相面を生成する段階を含む、例示的態様1（又は本明細書における任意の他の例示的態様）又は例示的態様7に記載の方法。

9. 複数の直交方向における焦点距離のペアによって、複数のソースエリア及び対応する複数の表示エリアの複数の直交方向におけるサイズの差に基づいて、放物レンズを定義する段階を備える、例示的態様8（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

20

10. 放物レンズを定義する段階は、2つの直交方向において複数の傾斜を特定する段階を含み、複数の傾斜は、直交方向における複数のターゲット領域に対する複数のソース領域の変位に基づく、例示的態様9（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

11. 位相面を生成する段階は、ローパスフィルタリングを実行する段階を含む、例示的態様1から10のいずれか1つ（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

12. 位相面を生成する段階は、位相ラップを実行する段階を含む、例示的態様1から11のいずれか1つ（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

30

13. 複数のソース領域を照射する段階は、画像データに基づいて、光源の出力を制御する段階を含む、例示的態様1から12のいずれか1つ（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

14. 画像の平均輝度に基づいて、光源の出力を制御する段階を備える、例示的態様13（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

15. 光源の出力を制御する段階は、光源の出力を可変アパーチャに通し、可変アパーチャのサイズを制御する段階を含む、例示的態様13又は14（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

16. 光源の出力を制御する段階は、光源の強度を変化させる段階を含む、例示的態様13から15（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

40

17. 複数のソース領域の各々によって方向変更された光の少なくとも95%は、対応する表示領域の範囲内に収まる、例示的態様1から16（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

18. 複数のソース領域の各々によって方向変更された光は、実質的に、対応する表示領域を満たす、例示的態様1から16（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

19. 統合ロッドのアレイによって、位相変調器からの光を複数の表示領域に通す段階を備える、例示的態様1から18（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のい

50



ずれか 1 つに記載の方法。

20. 複数の表示領域からの光を振幅変調する段階を備える、例示的態様 1 から 19 (又は本明細書における任意の他の例示的態様) のいずれか 1 つに記載の方法。

21. 画像データによって定義される画像を表示するように、位相変調器を制御する方法であって、

重複しない複数のソース領域を含む 2 次元光源のモデルを提供する段階であって、複数のソース領域の各々は、境界、対応するソース光強度値及びソースエリアを有し、かつ、ディスプレイの対応する表示領域に関連付けられ、複数の表示領域の各々は、対応する表示エリアを有する、段階と、

画像データに基づいて、複数の表示領域の各々に光強度値を割り当てる段階と、

対応する表示領域の表示エリアに対するソース領域のターゲットソースエリアの比率が、ソース領域のソース光強度値に対する、対応する表示領域に割り当てられる光強度値の比率に比例するように、複数のソース領域の各々にターゲットソースエリアを設定する段階と、

複数のソース領域に対応する複数のターゲットソースエリアから、複数のソース領域の面積の集合偏差を定量化する目的関数を最も良く満たす複数のソース領域の境界の構成を決定するように最適化を実行する段階と、

最適化の後の複数のソース領域の境界の構成に基づいて、複数のソース領域の各々の法線ベクトルを決定する段階と、

位相変調器の位相を 2 次元の位置に関連付ける解の位相関数を生成するように、複数の法線ベクトルを統合する段階と、

を備える方法。

22. 複数のソース領域は、複数のソース頂点の間に延びる複数の線によって定義される重複しない複数のソースタイルを含み、複数のソース頂点の各々は、位置を有し、複数の表示領域は、複数の表示頂点の間に延びる複数の線によって定義される重複しない複数の表示スタイルを含む、例示的態様 21 (又は本明細書における任意の他の例示的態様) に記載の方法。

23. 複数のソースタイル及び複数の表示スタイルは、三角形である、例示的態様 22 (又は本明細書における任意の他の例示的態様) に記載の方法。

24. 最適化は、複数のソース頂点の最適化された位置を決定する、例示的態様 22 又は 23 (又は本明細書における任意の他の例示的態様) に記載の方法。

25. 複数の法線ベクトルは、複数のソース頂点に配置される、例示的態様 22 又は 23 (又は本明細書における任意の他の例示的態様) に記載の方法。

26. 複数のソース頂点に対して複数の法線ベクトルを決定する段階は、複数の表示頂点のうち対応するものに対する複数のソース頂点の面内変位に基づく、例示的態様 21 から 25 (又は本明細書における任意の他の例示的態様) のいずれか 1 つに記載の方法。

27. 複数の法線ベクトルを決定する段階は、複数の変位の商の逆タンジェント及び光源とディスプレイとの間の光学距離を決定する段階を含む、例示的態様 22 (又は本明細書における任意の他の例示的態様) に記載の方法。

28. 画像データの平均強度に基づいて、複数のソース光強度を決定する段階を備える、例示的態様 21 から 27 (又は本明細書における任意の他の例示的態様) のいずれか 1 つに記載の方法。

29. 複数のソース光強度に従って、位相変調器を照射する照射ソースを制御する段階を備える、例示的態様 28 (又は本明細書における任意の他の例示的態様) に記載の方法。

30. 複数のソース光強度は等しい、例示的態様 21 から 29 (又は本明細書における任意の他の例示的態様) のいずれか 1 つに記載の方法。

31. 最適化を実行する段階は、解の位相関数の回転のコストを含める段階を含む、例示的態様 21 から 30 (又は本明細書における任意の他の例示的態様) のいずれか 1 つに記載の方法。

10

20

30

40

50

32. 回転のコストは、  
【数70】

$$E_{\nabla \times}(V^*) = \sum_{j=1}^m \int_{x \in t_j} (\nabla \times \psi_j(V^* - V, x))^2 dx$$

に従って決定される、例示的態様31（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

33. 最適化を実行する段階は、解の位相関数の非平滑性のコストを含める段階を含む、例示的態様21から32（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

10

34. 解の位相関数の非平滑性のコストは、  
【数71】

$$E_{\nabla}(V^*) = \sum_{j=1}^m \int_{x \in t_j} (\nabla \psi_j(V^*))^2 dx$$

に従って決定される、例示的態様33（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

35. 複数のソース領域は、三角形である、例示的態様21から34（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

36. 複数の表示領域は、三角形である、例示的態様21から35（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

20

37. 最適化を実行する段階は、限定的なメモリBroyden-Fletcher-Goldfarb-Shannoアルゴリズムを適用する段階を含む、例示的態様21から36（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

38. 一連のイタレーションにおいて、次第にスケールを細かくして最適化を実行し、これにより、各イタレーションにおいて、ソース頂点及び表示頂点の数を増加させ、直前のイタレーションに対する複数の頂点の位置が、現在のイタレーションの複数の初期構成として用いられる段階を備える、例示的態様21から37（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

39. 統合する段階は、複数の法線ベクトルをリサンプリングし、位相変調器の各画素にリサンプリングされた法線ベクトルを提供する段階を含む、例示的態様21から38（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

30

40. リサンプリングを実行する段階は、複数の法線ベクトルにPhong補間を実行する段階を含む、例示的態様39（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

41. 統合する段階は、スパース最適化方法を適用する段階を含む、例示的態様21から40（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

42. スパース最適化方法は、解の位相関数の勾配と複数の法線ベクトルの場との間の差を最小化する解の位相関数を見出す段階を含む、例示的態様41（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

40

43. 差は、画像の複数の暗領域における標準誤差を強調する加重差である、例示的態様42（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

44. 複数のソース領域及び複数の表示領域を均一な三角形分割に初期化する段階を備える、例示的態様21から43（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

45. 複数のソース領域の全てが正の面積を有することを要求するように、最適化を制約する段階を備える、例示的態様21から44（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

46. 最適化を制約する段階は、各ソース領域に対するペナルティ項を目的関数に含める段階（又は本明細書における任意の他の例示的態様）を含み、ペナルティ項は、ソー

50

ス領域の面積に比例し、かつ、複数のターゲットソースエリアから複数のソース領域の面積の集合偏差を定量化する目的関数の項に対向する記号を有し、方法は、複数のイタレーションの各々においてペナルティ項の比例パラメータを連続的に減少させる段階を備え、複数のイタレーションの1つにおいて決定された複数の頂点の位置は、複数のイタレーションの次の1つに対する初期条件として用いられる、例示的態様45（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

47. 複数の表示領域の少なくとも1つの内部における輝度は、フルスクリーンホワイトレベルを超える、例示的態様21（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

48. ピーク輝度は、フルスクリーンホワイトレベルの30倍を超える、例示的態様47（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

49. 複数のソース領域のうち異なるものが異なる強度の光によって照射されるように、位相変調器に入射する光を振幅変調する段階を備える、例示的態様21から48（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

50. 位相変調器を均一に照射する段階を備える、例示的態様21から48（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

51. 所望の光パターンを生成する方法であって、  
位相遅延変調器における複数のソース領域と、画像面における複数の対応する表示領域との間の対応関係を確立する段階と、

画像データから、複数の表示領域に所望の光学出力密度を決定する段階と、  
画像データに対応する複数の表示領域における電力密度分布を実現するように、画像データを用いて、複数のソース領域及び複数の表示領域の一方又は両方を調整する段階と、  
位相変調器の複数のソース領域に入射する光に対して、スケーリング及び/又はシフトを実行することによって、撮像チップの複数のソース領域の各々からの光を、複数の表示領域のうち対応する表示領域に再分配させるように動作可能な複数の位相シフトのパターンを提供するように位相変調器を制御する段階と、  
を備える方法。

52. スケーリングを提供するように構成される複数の焦点距離を有する複数のレンズを提供するように、複数のソース領域を構成する段階を備える、例示的態様51（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

53. 複数のレンズは、x方向及びy方向において異なる焦点距離を有する、例示的態様52（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

54. シフトを提供するように構成される複数の傾斜を含むように、複数のレンズを構成する段階を備える、例示的態様52（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

55. x方向及びy方向において、複数の傾斜を別個に制御する段階を備える、例示的態様54（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

56. 位相変調器を制御する段階は、複数の位相シフトのパターンに位相ラップを実行する段階を含む、例示的態様51から55（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

57. 複数のソース領域の面積を変化させる段階を備える、例示的態様51から55（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

58. 複数の表示領域の面積を変化させる段階を備える、例示的態様51から57（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

59. 複数のソース領域は、矩形である、例示的態様51から58（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

60. 複数の表示領域は、矩形である、例示的態様51から59（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

61. 複数のソース領域は、三角形である、例示的態様51から60（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

10

20

30

40

50

62. 複数の表示領域は、三角形である、例示的態様51から60（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

63. 対応する複数の表示領域に対する複数のソース領域の面積の比率は、画像データにおいて特定される対応する表示領域の最大光学出力密度に対するソース領域における光学出力密度の比率と少なくとも等しい、例示的態様51から62（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

64. 画像データをクリップし、クリップされた画像データを生成する段階を備え、対応する複数の表示領域に対する複数のソース領域の面積の比率は、クリップされた画像データにおいて特定される対応する表示領域の最大光学出力密度に対するソース領域における光学出力密度の比率と少なくとも等しい、例示的態様51から62（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

10

65. 対応する複数の表示領域に対する複数のソース領域の面積の比率は、画像データにおいて特定される対応する表示領域の平均光学出力密度に対するソース領域における光学出力密度の比率と少なくとも等しい、例示的態様51から62（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

66. 複数の表示領域の少なくとも1つの内部における光学出力密度は、フルスクリーンホワイトレベルを超える、例示的態様51から65（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

67. 複数の表示領域の少なくとも1つの輝度は、フルスクリーンホワイトレベルの40倍を超える、例示的態様66（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

20

68. 複数の表示領域の少なくとも1つの輝度は、フルスクリーンホワイトレベルの30倍を超える、例示的態様66（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

69. 複数のソース領域のうち異なるものが異なる強度の光によって照射されるように、位相変調器に入射する光を空間的に振幅変調する段階を備える、例示的態様51から69（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

70. 位相変調器を均一に照射する段階を備える、例示的態様51から69（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

71. 位相変調器によって方向変更された光を均質化する段階を備える、例示的態様51から70（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

30

72. 光を均質化する段階は、統合ロッドのアレイに光を通す段階を含む、例示的態様71（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

73. 位相変調器の複数の位相シフトのパターンを、1ソース領域ずつ算出する段階を備える、例示的態様51から73（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

74. 複数のソース領域の1つのソース領域における複数のポイントの第1のグリッドと、ソース領域に対応する表示領域における複数のポイントの第2のグリッドとを確立し、これにより、複数のポイントの第1及び第2のグリッドの複数のポイントの間に1対1の対応が存在する段階と、複数のポイントの第1及び第2のグリッドにおける複数のポイントのうち対応するもののペアに対応する複数の経路長を決定する段階と、複数の経路長に従って、ソース領域における複数の位相シフトのパターンを設定する段階と、を備える、例示的態様51から73（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

40

75. 複数の経路長は、表示領域に関連付けられた面に対して垂直に延びる、例示的態様74（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

76. 複数の経路長は、表示領域に関連付けられた放物表面に対して垂直に延びる、例示的態様74（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

77. 複数のポイントの第1のグリッドは、ソース領域内における位相変調器の各画

50

素に対して、１つのポイントを含む、例示的態様 7 4 から 7 6（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか１つに記載の方法。

7 8 . 複数のソース領域及び複数の表示領域の一方又は両方を調整する段階は、対応する複数の表示領域に対する複数のソース領域の面積の比率が複数のソース領域のターゲット光学出力密度と最も合致するように、最適化アルゴリズムを実行し、複数のソース領域及び／又は対応する複数の表示領域に対する境界を見出す段階を含む、例示的態様 5 1（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

7 9 . 最適化アルゴリズムは、複数のソース領域を定義する複数のポイントの場において、回転をペナライズするコスト関数の項を含む、例示的態様 7 8（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

8 0 . 最適化アルゴリズムは、複数の位相シフトのパターンが平滑性を欠く場合にペナライズするコスト関数の項を含む、例示的態様 7 8 または 7 9（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

8 1 . 画像データによって定義される光パターンを生成する方法であって、  
複数の光ソース領域の各々に対して、対応する表示領域のサイズ及び位置を決定する段階と、

複数のレンズのアレイをエミュレートするように位相変調器を制御する段階であって、  
複数のレンズの各々は、複数の光ソース領域の１つに対応し、かつ、複数の焦点距離及び  
複数の傾斜を有するように複数のレンズを構成し、これにより、複数のレンズの各々に入  
射する光に対応する表示領域に方向変更させる、段階と、  
を備える方法。

8 2 . 対応する複数の表示領域の面積に対する複数のソース領域の面積の比率が、画像データによって特定される対応する表示領域の輝度に対する複数のソース領域の輝度に比例するように、複数の表示領域のサイズを設定する段階を備える、例示的態様 8 1（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

8 3 . 複数の表示領域のサイズ及び位置を決定する段階は、画像データを処理する段階であって、反復的に、画像の部分を複数の部分に分割し、これにより、複数の部分の面積が、画像データによって特定される複数の部分の平均輝度の増加に伴って減少する段階を含む、例示的態様 8 2（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

8 4 . 画像の部分を複数の部分に分割する段階は、画像の部分を２つの部分に分割する段階を含む、例示的態様 8 3（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

8 5 . 複数の部分は、外形が矩形である、例示的態様 8 3 または 8 4（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

8 6 . 複数の表示領域のサイズ及び位置を決定する段階は、メジアンカットアルゴリズムの複数のイタレーションを実行する段階を含む、例示的態様 8 1（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

8 7 . 位相変調器を制御する段階は、複数のレンズのアレイに対応する位相面を生成し、位相面にローパスフィルタリングを実行する段階を含む、例示的態様 8 1 から 8 6（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか１つに記載の方法。

8 8 . 複数のレンズを構成する段階は、位相ラップを実行する段階を含む、例示的態様 8 1 から 8 7（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか１つに記載の方法。

8 9 . 画像データに基づいて、光源の出力を制御する段階を備える、例示的態様 8 1 から 8 7（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか１つに記載の方法。

9 0 . 光パターンの平均輝度に基づいて、光源の出力を制御する段階を備える、例示的態様 8 8（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

9 1 . 光源の出力を制御する段階は、光源の出力を可変アパーチャに通し、可変アパーチャのサイズを制御する段階を含む、例示的態様 8 8 または 8 9（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

10

20

30

40

50

92. 光源の出力を制御する段階は、光源の強度を変化させる段階を含む、例示的態様89から91（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

93. 複数の表示領域は、重複しない、例示的態様81から92（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

94. 複数のレンズの各々によって方向変更された光の少なくとも95%は、対応する表示領域の範囲内に収まる、例示的態様81から93（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

95. 複数のレンズの各々によって方向変更された光は、対応する表示領域を実質的に満たす、例示的態様81から94（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

10

96. 統合ロッドのアレイによって、光を、対応する複数の表示領域に方向変更する段階を備える、例示的態様81から94（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

97. 複数の表示領域からの光を振幅変調する段階を備える、例示的態様81から96（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法。

98. 光を振幅変調する段階は、光と相互作用すべく配置された空間光変調器の複数の画素を制御する段階を含む、例示的態様97（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の方法。

99. データプロセッサによって実行された場合に、データプロセッサに、例示的態様1から98（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法を実行させる、複数のコンピュータ可読命令が記録された非一時的データ記憶媒体を備えるプログラム製品。

20

100. データプロセッサによって実行された場合に、データプロセッサに、例示的態様1から98（又は本明細書における任意の他の例示的態様）のいずれか1つに記載の方法を実行するプログラマブルロジックデバイスを構成させる、複数の機械可読命令が記録された非一時的データ記憶媒体を備えるプログラム製品。

101. 光源によって照射されるフリーフォームレンズと、

フリーフォームレンズの構成を制御するように接続されるコントローラと、を備え、コントローラは、

30

フリーフォームレンズの複数の画素を、各々が表示領域に対応する複数のソース領域に関連付け、

画像データに基づいて、ソース領域及び対応する表示領域の相対的なサイズを調整し、ソース領域に入射する光に対応する表示領域を照射させるように、各ソース領域内の複数の画素を制御する

ように構成される、光プロジェクタ。

102. フリーフォームレンズは、空間位相変調器を含み、コントローラは、空間位相変調器の複数の画素によって与えられる位相遅延を制御するように接続される、例示的態様101（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載のプロジェクタ。

103. コントローラは、画像データに応じて、フリーフォームレンズに入射する光源からの光の光学出力を制御するように構成される、例示的態様101又は102（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載のプロジェクタ。

40

104. コントローラは、光源に供給される出力の振幅及び/又は幅及び/又はデューティサイクルを制御するように動作可能である、例示的態様103（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載のプロジェクタ。

105. コントローラは、光源によって発せられた光の部分を、光除去器へと選択的に方向付けるように動作可能な光学素子を制御するように接続される、例示的態様103又は104（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載のプロジェクタ。

106. 光源とフリーフォームレンズとの間の光路に可変アパーチャを備え、コントローラは、アパーチャの開きを制御するように動作可能である、例示的態様103から1

50

05 (又は本明細書における任意の他の例示的態様)のいずれか1つに記載のプロジェクト。

107. 光源とフリーフォームレンズとの間の光路に上流空間光変調器を備え、コントローラは、複数のソース領域のうち異なるものを異なるように照射するように、上流空間光変調器を制御するように接続される、例示的態様101から106 (又は本明細書における任意の他の例示的態様)のいずれか1つに記載のプロジェクト。

108. フリーフォームレンズから下流の光路に配置される下流空間光調整器を備え、コントローラは、ターゲット面においてプロジェクトによって生成される光パターンにおける光の振幅を変化させるように、下流空間光調整器の複数の画素を制御するように接続される、例示的態様101から107 (又は本明細書における任意の他の例示的態様)のいずれか1つに記載のプロジェクト。

10

109. 下流空間光調整器は、複数の表示領域の各々からの光を変調させるように動作可能な複数の画素を提供するために十分な解像度を有する、例示的態様108 (又は本明細書における任意の他の例示的態様)に記載のプロジェクト。

110. フリーフォームレンズと複数の表示領域との間の光路に統合ロッドのアレイを備え、コントローラは、複数の統合ロッドのうち異なるものに異なる量の光を選択的に誘導するように、フリーフォームレンズを制御するように動作可能である、例示的態様101から109 (又は本明細書における任意の他の例示的態様)のいずれか1つに記載のプロジェクト。

111. コントローラは、プログラムされたデータプロセッサを含む、例示的態様101から110 (又は本明細書における任意の他の例示的態様)のいずれか1つに記載のプロジェクト。

20

112. コントローラは、構成可能なロジックユニットと、構成可能なロジックユニットを構成する複数の命令を含むデータストアとを含む、例示的態様101から111 (又は本明細書における任意の他の例示的態様)のいずれか1つに記載のプロジェクト。

113. 構成可能なロジックユニットは、FPGAを含む、例示的態様112 (又は本明細書における任意の他の例示的態様)に記載のプロジェクト。

114. 画像データによって定義される画像を表示するように、フリーフォームレンズを制御する装置であって、複数のソフトウェア命令によって、

2次元位相変調器上で重複しない複数のソース領域を定義し、かつ、表示面において複数の表示領域を定義し、複数のソース領域の各々は、境界及びソースエリアを有し、かつ、複数の表示領域のうち対応する表示領域に関連付けられ、複数の表示領域の各々は、対応する表示領域エリアを有し、

30

画像データに基づいて、複数の表示領域の各々にターゲット光強度値を割り当て、

複数のソース領域の構成、複数の表示領域の構成、又は複数のソース領域及び複数の表示領域の両方の構成を決定し、これにより、対応する複数のソース領域の複数のソースエリアに対する複数の表示領域の複数の表示エリアの比率が、対応する表示領域に割り当てられるターゲット光強度値に対する複数のソース領域の複数のソース光強度値の比率に比例し、かつ、構成が、ソースエリアに入射する光を対応する表示エリアに方向変更させる、

40

ように構成されるプロセッサを備える装置。

115. フリーフォームレンズを駆動するように接続可能な駆動回路を備える、例示的態様114 (又は本明細書における任意の他の例示的態様)に記載の装置。

116. フリーフォームレンズは、空間位相変調器を含み、装置は、複数のソースエリアの各々に対して位相面を生成するように構成される、例示的態様114又は115 (又は本明細書における任意の他の例示的態様)に記載の装置。

117. 複数のソース領域に対応する複数のターゲットソースエリアから、複数のソース領域の面積の集合偏差を定量化する目的関数を最も良く満たす複数のソース領域の境界の構成を決定するように最適化を実行するように構成される最適化器を備える、例示的態様114から116 (又は本明細書における任意の他の例示的態様)のいずれか1つに

50

記載の装置。

118. 最適化器は、回転正規化器を含む、例示的態様117（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の装置。

119. 最適化器は、平滑性正規化器を含む、例示的態様117又は118（又は本明細書における任意の他の例示的態様）に記載の装置。

120. 画像データによって定義される画像を表示するように、位相変調器を制御する装置であって、

重複しない複数のソース領域を含む2次元光源のモデルを有するように構成されるコントローラを備え、

複数のソース領域の各々は、境界、対応するソース光強度値及びソースエリアを有し、かつ、ディスプレイの対応する表示領域に関連付けられ、複数の表示領域の各々は、対応する表示エリアを有し、

コントローラは、複数のソフトウェア命令によって、コントローラに、

画像データに基づいて、複数の表示領域の各々に光強度値を割り当て、

対応する表示領域の表示エリアに対する複数のソース領域のターゲットソースエリアの比率が、ソース領域のソース光強度値に対する、対応する表示領域に割り当てられる光強度値の比率に比例するように、複数のソース領域の各々にターゲットソースエリアを設定することと、

複数のソース領域に対応する複数のターゲットソースエリアから、複数のソース領域の面積の集合偏差を定量化する目的関数を最も良く満たす複数のソース領域の境界の構成を決定するように最適化を実行することと、

最適化の後のソース領域の境界の構成に基づいて、複数のソース領域の各々の法線ベクトルを決定することと、

位相変調器の位相を2次元の位置に関連付ける解の位相関数を生成するように、複数の法線ベクトルを統合することと、

を実行させるように構成される、装置。

121. 所望の光パターンを生成する装置であって、

光源と、

光源によって照射される位相遅延変調器と、

位相遅延変調器上の複数のソース領域と画像面における複数の対応する表示領域との間の対応関係を確立し、

画像データから複数の表示領域に対して所望の光学出力密度を決定し、

画像データに対応する複数の表示領域における電力密度分布を実現すべく、画像データを用いて、複数のソース領域及び複数の表示領域の一方又は両方を調整し、

位相変調器の複数のソース領域に入射する光に対して、スケーリング及び/又はシフトを実行することによって、撮像チップの複数のソース領域の各々からの光を、複数の表示領域のうち対応する表示領域に再分配するように動作可能な複数の位相シフトのパターンを提供するように、位相変調器を制御する

ように構成されるコントローラと、

を備える装置。

122. 画像データによって定義される光パターンを生成する装置であって、

光源と、

光源によって照射される位相変調器と、

複数の光ソース領域の各々に対して、

対応する表示領域のサイズ及び位置を決定し、

複数のレンズのアレイをエミュレートするように位相変調器を制御する

ように構成されるコントローラと、

を備え、

複数のレンズの各々は、複数の光ソース領域の1つに対応し、かつ、複数のレンズの各々に入射する光が対応する表示領域に方向変更されるように、焦点距離、及び傾斜を有す

10

20

30

40

50



るように複数のレンズを構成する装置。

123. データプロセッサと、データプロセッサによる実行のための複数のコンピュータ可読命令を含むデータストアと、を備える光プロジェクタのコントローラであって、複数の命令は、例示的態様1から99のいずれか1つに記載の方法をデータプロセッサに実行させるように構成される、コントローラ。

124. 画像データによって定義される画像を表示するように、フリーフォームレンズを制御する方法であって、

フリーフォームレンズ上で重複しない複数のソース領域を定義し、かつ、表示面において複数の表示領域を定義する段階であって、複数のソース領域の各々は、境界及びソースエリアならびに1つ又は複数のソース強度値を有し、かつ、複数の表示領域のうち対応する表示領域に関連付けられ、複数の表示領域の各々は、対応する表示領域エリアを有する、段階と、

画像データに基づいて、複数の表示領域の各々にターゲット光強度値を割り当てる段階と、

複数のソース領域の構成、複数の表示領域の構成、又は複数のソース領域及び複数の表示領域の両方の構成を調整し、これにより、対応する複数のソース領域の複数のソースエリアに対する複数の表示領域の複数の表示エリアの比率が、対応する表示領域に割り当てられるターゲット光強度値に対する複数のソース領域の複数のソース光強度値の比率に比例する、段階と、

複数のソースエリアの各々において、フリーフォームレンズの構成を生成する段階であって、構成は、ソースエリアに入射する光を対応する表示エリアに方向変更させるように構成される、段階と、

構成に係るフリーフォームレンズを制御し、複数のソース強度値に従って、複数のソース領域に入射光を照射する段階と、

を備える方法。

125. 本明細書に記載の新規性及び進歩性を有するいずれかの特徴、複数の特徴の組み合わせ、又は複数の特徴の部分的組み合わせを備える装置。

126. 本明細書に記載の新規性及び進歩性を有するいずれかの段階、動作、複数の段階及び/又は複数の作用の組み合わせ、もしくは複数の段階及び/又は複数の動作の部分的組み合わせを備える方法。

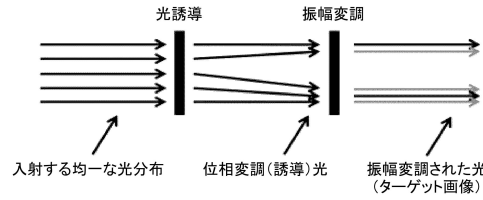
#### 【0223】

システム、方法及び装置の具体例は、例示の目的で、本明細書において説明されている。これらは、例示に過ぎない。本明細書において提供される技術は、上述された例示的なシステム以外のシステムに適用可能である。多数の変更、修正、追加、省略、及び置換が、本発明を実施する範囲内で可能である。本発明は、説明された実施形態に対する、当業者には明らかなバリエーションを含む。これらは、機能、要素及び/又は動作を等価の機能、要素及び/又は動作と置き換える、異なる実施形態の機能、要素及び/又は動作を融合及び適応させる、本明細書において説明された実施形態の機能、要素及び/又は動作を他の技術の機能、要素及び/又は機能と組み合わせる、及び/又は、説明された実施形態の機能、要素及び/又は動作の組み合わせを省略することによって得られるバリエーションを含む。

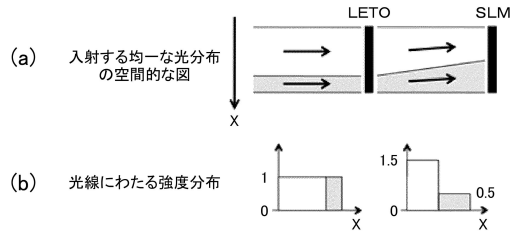
#### 【0224】

従って、以下に添付される特許請求の範囲及び以下導入される特許請求の範囲は、このような修正、置換、追加、省略、及び部分的組み合わせの全てを合理的に推定され得るように含むものと解釈されることを意図する。特許請求の範囲は、例において示された好適な実施形態によって限定されるものではないが、全体として、説明に沿った最も広い解釈が与えられるものである。

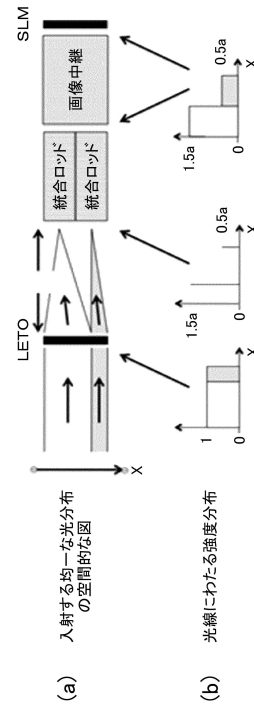
【図 1】



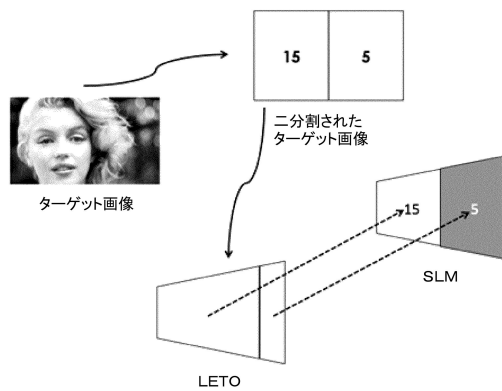
【図 2】



【図 3】



【図 4】



【図 5】

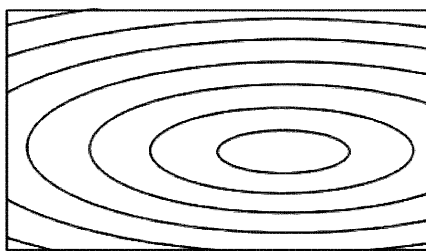
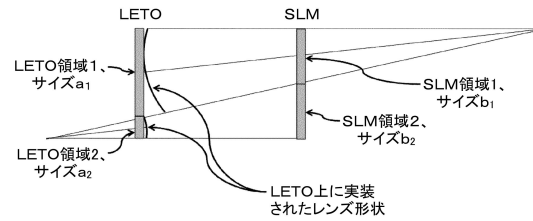
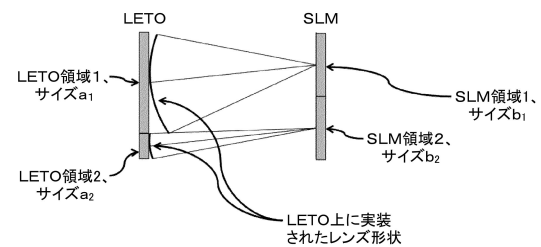


FIG. 5

【図 6 A】



【図 6 B】



【図 7 A】



【図 7 B】

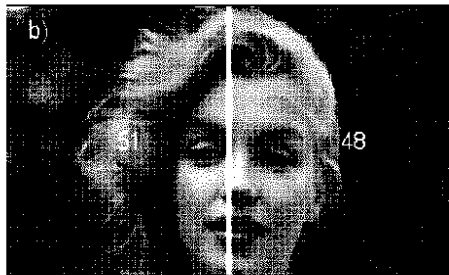


FIG. 7B

【図 7 C】

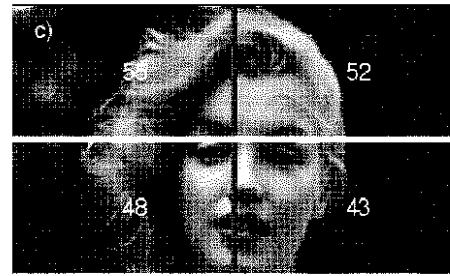


FIG. 7C

【図 8】

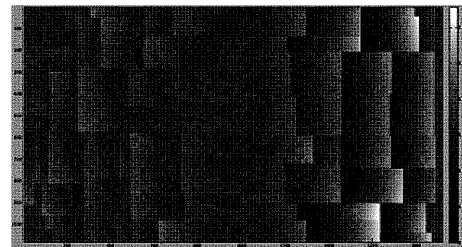


FIG. 8

【図 9】

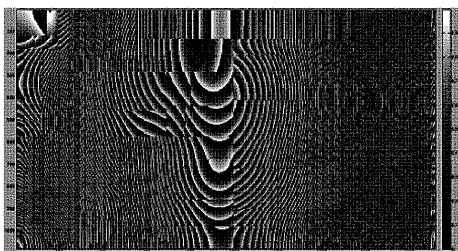


FIG. 9

【図 10】

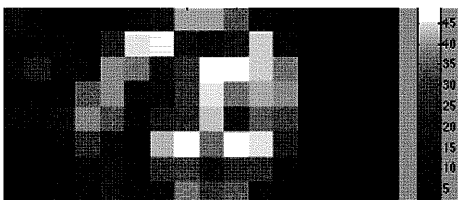
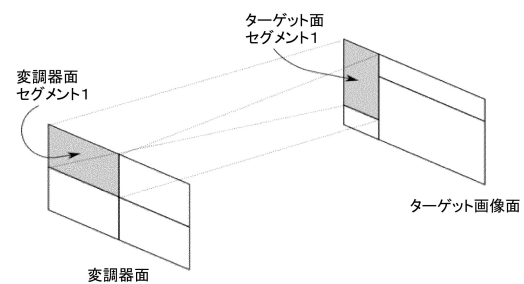
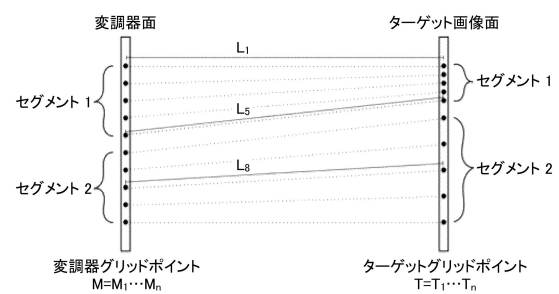


FIG. 10

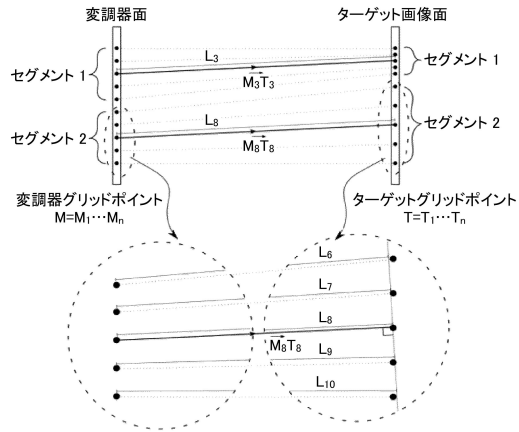
【図 11】



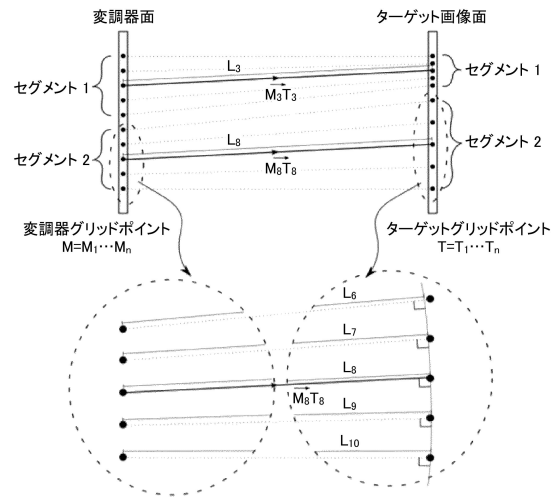
【図 12】



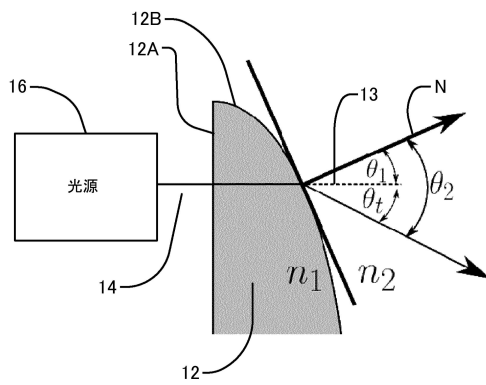
【図 13】



【図 14】



【図 15】

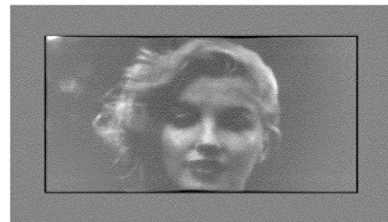


【図 16 B】



パディングされたターゲット

【図 16 C】



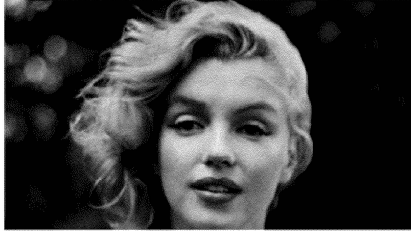
ミラーリングされたパディング

【図 16 A】



パディングなし

【図 17 A】



ターゲット

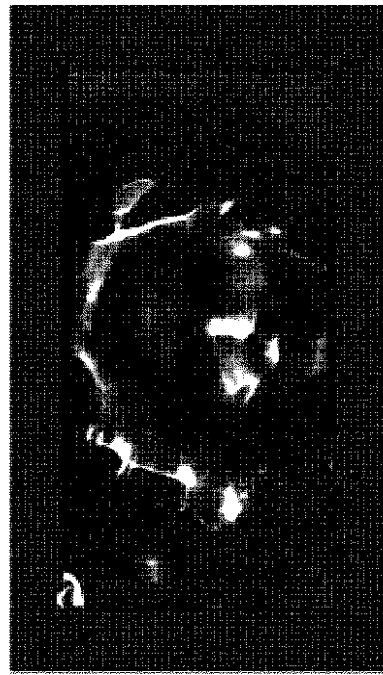
【図 17 B】

FIG. 17B  $\alpha = 2.0$ 

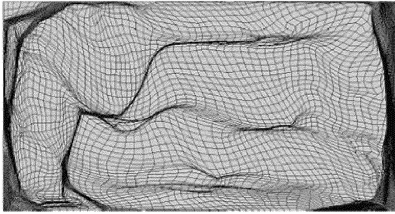
【図 17 C】

FIG. 17C  $\alpha = 0.2$ 

【図 17 D】

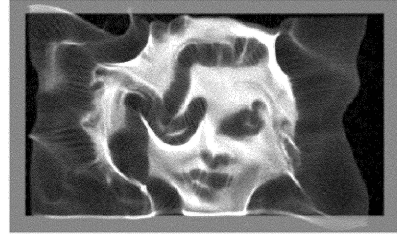
FIG. 17D  $\alpha = 0.02$

【図 18 A】



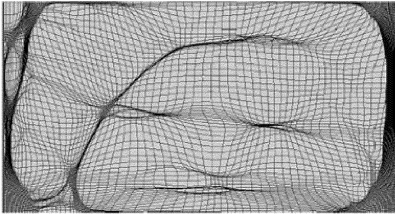
正規化されていないポイントマッピング

【図 18 C】



正規化されていないレンダリング

【図 18 B】



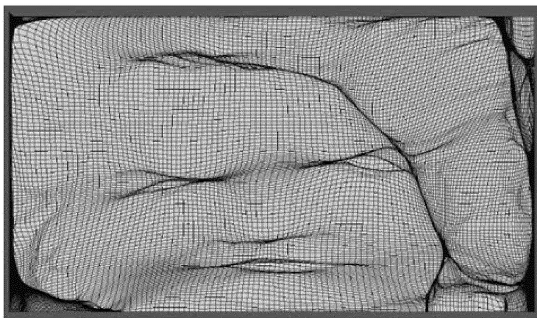
正規化されたポイントマッピング

【図 18 D】



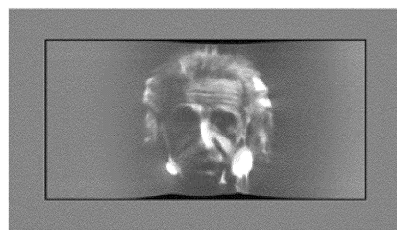
正規化されたレンダリング

【図 19 A】



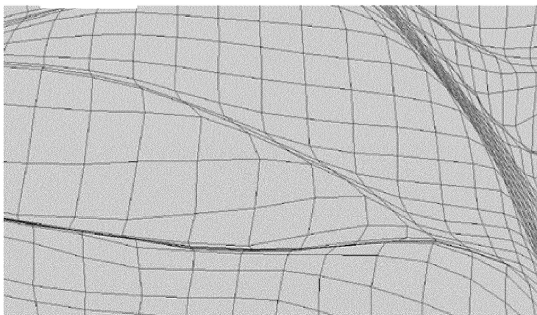
マッピングされたポイント位置

【図 20 A】



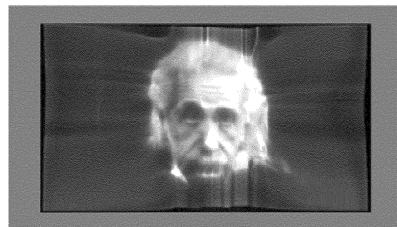
フーリエ

【図 19 B】



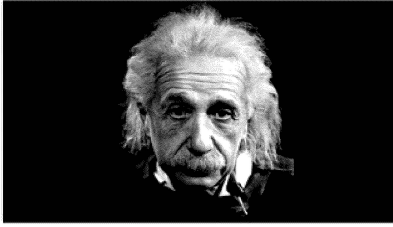
画像右側の目を拡大

【図 20 B】



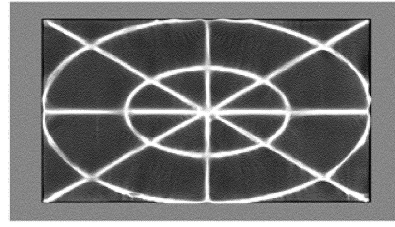
エリアパラメータ化

【図 20 C】



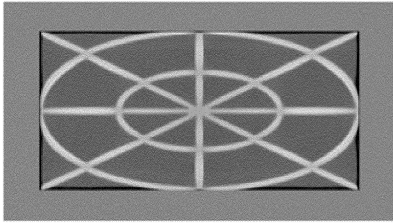
ターゲット

【図 21 B】



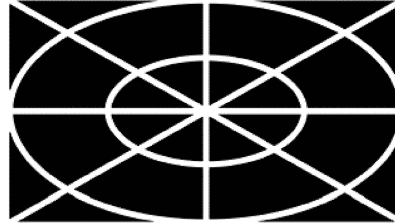
エリアパラメータ化

【図 21 A】



デブラ

【図 21 C】



ターゲット

【図 22 A】



デブラ

【図 22 C】



ターゲット

【図 22 B】



エリアパラメータ化

【図 23 A】



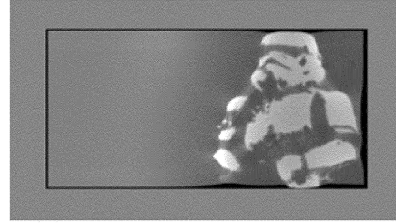
デブラ

【図 2 3 B】



エリアパラメータ化

【図 2 4 A】



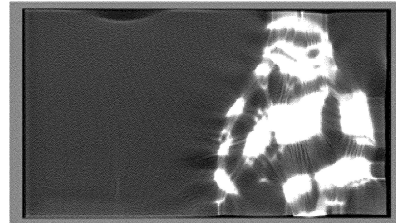
デブラ

【図 2 3 C】



ターゲット

【図 2 4 B】



エリアパラメータ化

【図 2 4 C】



ターゲット

【図 2 5 C】



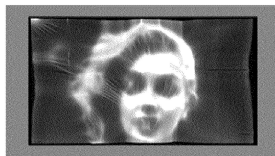
スケール 0.5

【図 2 5 D】



スケール 1.0

【図 2 5 A】



スケール 0.125

【図 2 5 E】



ターゲット

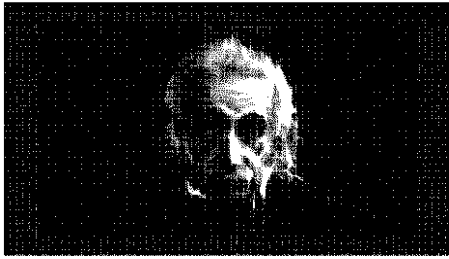
【図 2 5 B】



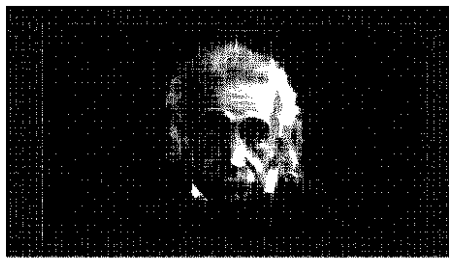
スケール 0.25



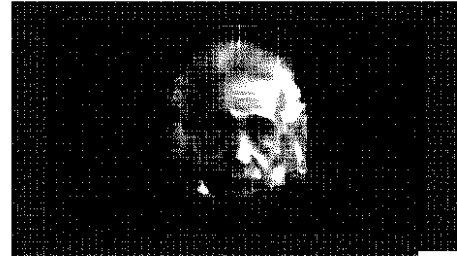
【図 26 A】

**FIG. 26A**  $\beta = 0.1$ 

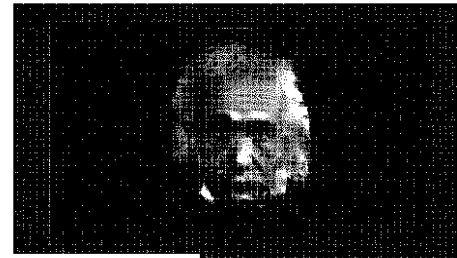
【図 26 B】

**FIG. 26B**  $\beta = 1.0$ 

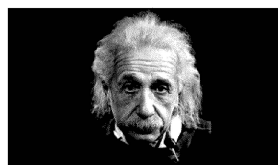
【図 26 C】

**FIG. 26C**  $\beta = 10.0$ 

【図 26 D】

**FIG. 26D**  $\beta = 100.0$ 

【図 26 E】



ターゲット

【図 27 A】

**FIG. 27A**  $\alpha = 0.001$ 

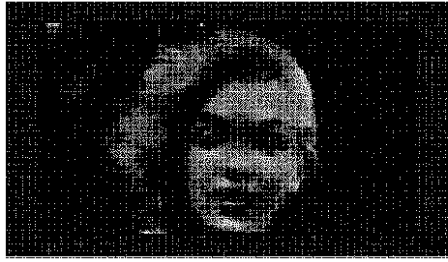
【図 27 B】

**FIG. 27B**  $\alpha = 0.01$ 

【図 27 C】

**FIG. 27C**  $\alpha = 0.1$

【図 27 D】

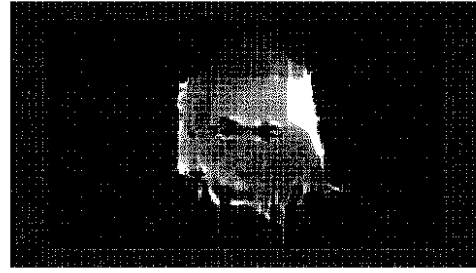
**FIG. 27D**  $\alpha = 1.0$ 

【図 27 E】

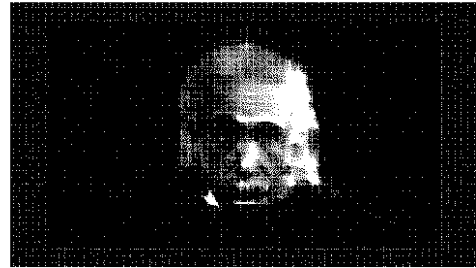


ターゲット

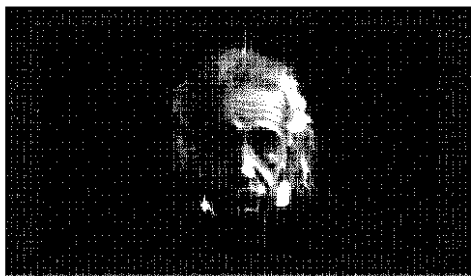
【図 28 A】

**FIG. 28A**  $\epsilon = 0.001$ 

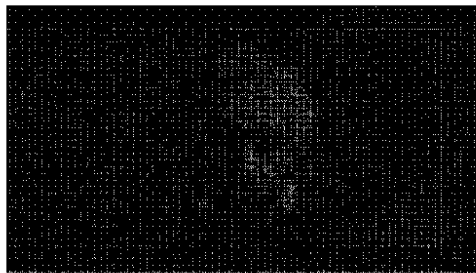
【図 28 B】

**FIG. 28B**  $\epsilon = 0.01$ 

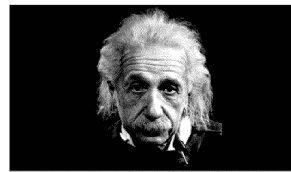
【図 28 C】

**FIG. 28C**  $\epsilon = 0.1$ 

【図 28 D】

**FIG. 28D**  $\epsilon = 1.0$ 

【図 28 E】



ターゲット

【図 29 A】



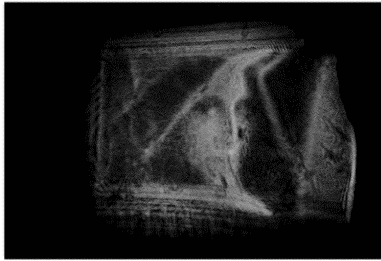
ターゲット

【図 29 B】



近軸デブラ

【図 29 C】



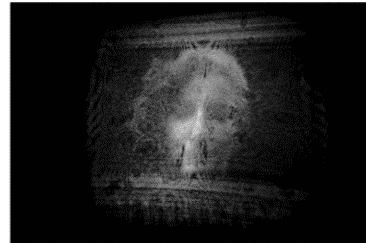
エリアパラメータ化

【図 30 A】



ターゲット

【図 30 B】



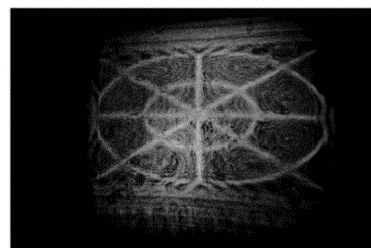
近軸デブラ

【図 30 C】



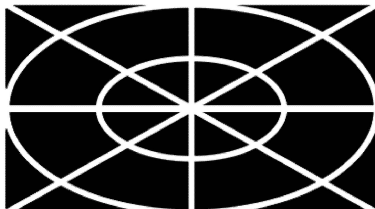
エリアパラメータ化

【図 31 B】



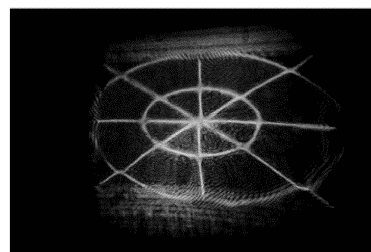
近軸デブラ

【図 31 A】



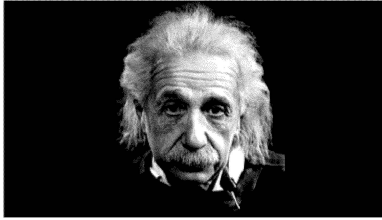
ターゲット

【図 31 C】



エリアパラメータ化

【図 3 2 A】



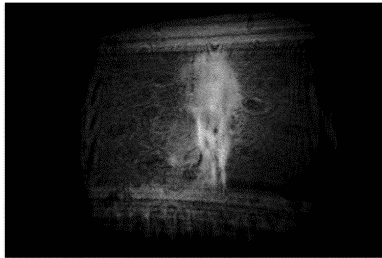
ターゲット

【図 3 2 C】



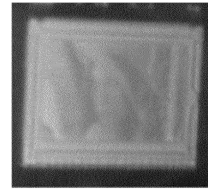
エリアパラメータ化

【図 3 2 B】



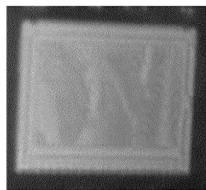
近軸デブラ

【図 3 3 A】



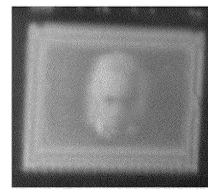
レナ、エリア

【図 3 3 B】



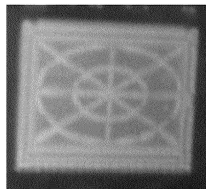
レナ、近軸

【図 3 3 E】



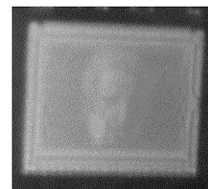
アインシュタイン、エリア

【図 3 3 C】



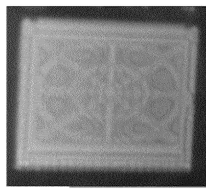
基準枠、エリア

【図 3 3 F】



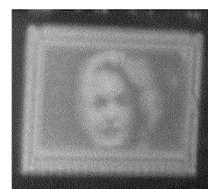
アインシュタイン、近軸

【図 3 3 D】



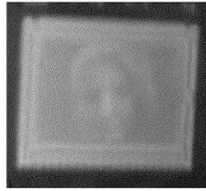
基準枠、近軸

【図 3 3 G】



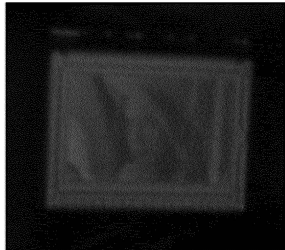
マリリン、エリア

【図 3 3 H】



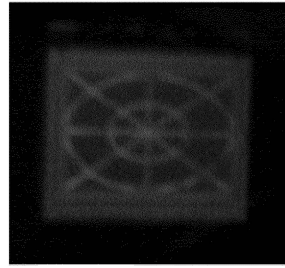
マリリン、近軸

【図 3 4 A】



レナ

【図 3 4 B】



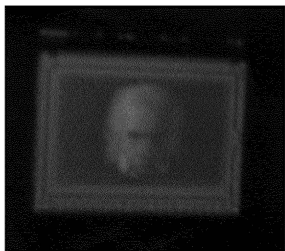
基準枠

【図 3 4 C】



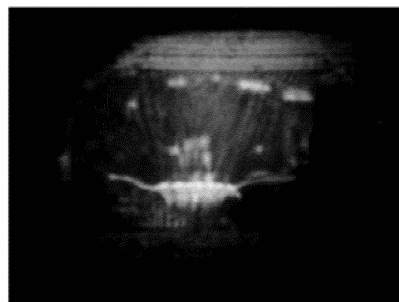
マリリン

【図 3 4 D】



アインシュタイン

【図 3 5 B】



エリアパラメータ化

【図 3 5 A】



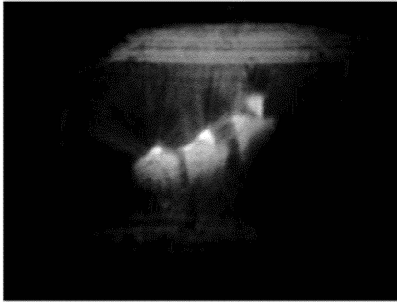
ターゲット

【図 3 6 A】



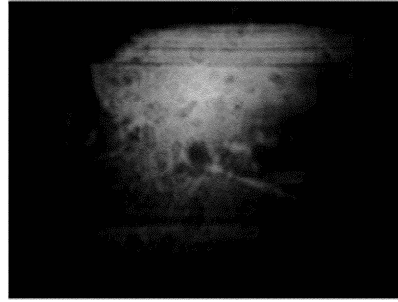
ターゲット

【図 3 6 B】



エリアパラメータ化

【図 3 7 B】



エリアパラメータ化

【図 3 7 A】



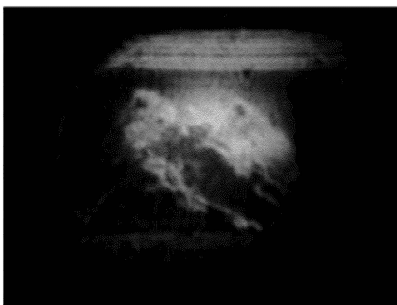
ターゲット

【図 3 8 A】



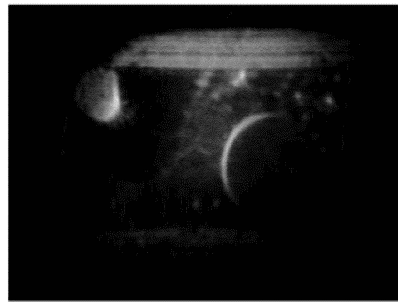
ターゲット

【図 3 8 B】



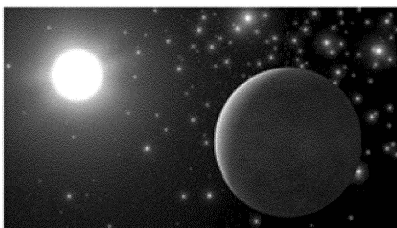
エリアパラメータ化

【図 3 9 B】



エリアパラメータ化

【図 3 9 A】



ターゲット

【図 4 0】

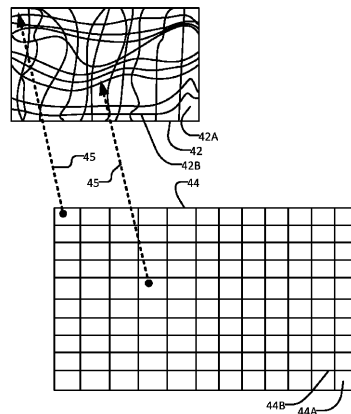
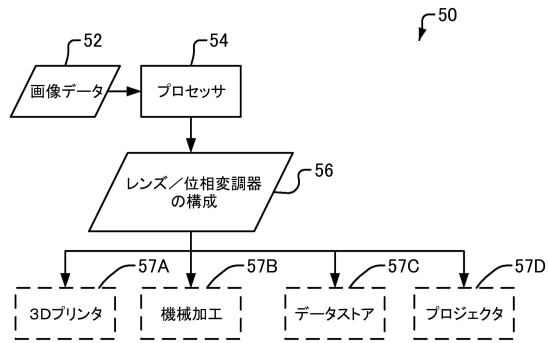
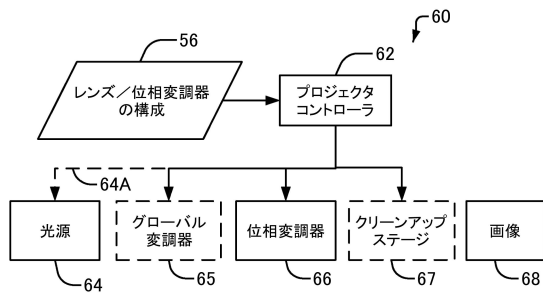


FIG. 40

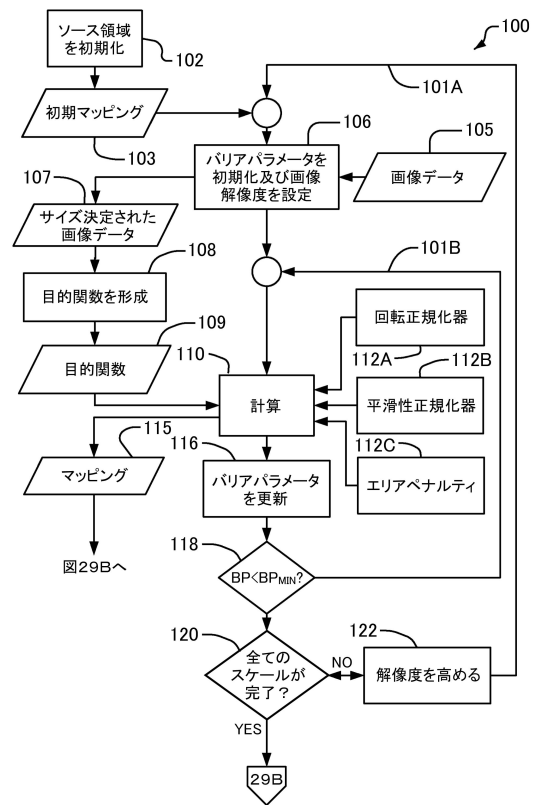
【図 4 1】



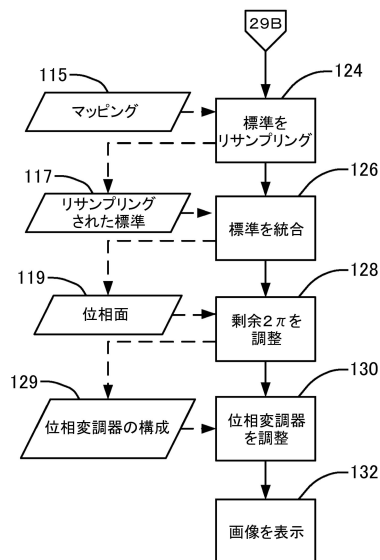
【図 4 2】



【図 4 3 A】



【図 4 3 B】



## フロントページの続き

(51)Int.Cl.			F I		
<b>G 0 9 G</b>	<b>3/20</b>	<b>(2006.01)</b>	<b>G 0 9 G</b>	<b>3/34</b>	<b>J</b>
<b>H 0 4 N</b>	<b>5/74</b>	<b>(2006.01)</b>	<b>G 0 9 G</b>	<b>3/20</b>	<b>6 1 2 U</b>
			<b>G 0 9 G</b>	<b>3/20</b>	<b>6 8 0 C</b>
			<b>G 0 9 G</b>	<b>3/20</b>	<b>6 4 2 D</b>
			<b>G 0 9 G</b>	<b>3/20</b>	<b>6 4 2 E</b>
			<b>H 0 4 N</b>	<b>5/74</b>	<b>B</b>
			<b>H 0 4 N</b>	<b>5/74</b>	<b>A</b>
			<b>H 0 4 N</b>	<b>5/74</b>	<b>D</b>

- (72)発明者 ダンバーグ、ガーウィン  
カナダ国 V 6 J 2 L 2 ブリティッシュ コロンビア バンクーバー ウェスト フィフティ  
ーンズ アベニュー 1 9 6 7 エムティティ イノベーション インコーポレイテッド内
- (72)発明者 バレストッド、アンデルス  
カナダ国 V 6 J 2 L 2 ブリティッシュ コロンビア バンクーバー ウェスト フィフティ  
ーンズ アベニュー 1 9 6 7 エムティティ イノベーション インコーポレイテッド内
- (72)発明者 クマラン、ラヴィーン  
カナダ国 V 6 J 2 L 2 ブリティッシュ コロンビア バンクーバー ウェスト フィフティ  
ーンズ アベニュー 1 9 6 7 エムティティ イノベーション インコーポレイテッド内
- (72)発明者 グレグソン、ジェイムス  
カナダ国 V 6 J 2 L 2 ブリティッシュ コロンビア バンクーバー ウェスト フィフティ  
ーンズ アベニュー 1 9 6 7 エムティティ イノベーション インコーポレイテッド内

審査官 奥村 政人

- (56)参考文献 特表2014-517337(JP,A)  
米国特許出願公開第2011/0122467(US,A1)  
Yuliy Schwartzburg, et al., High-contrast Computational Caustic Design, ACM Transactions on Graphics, 2014年 7月, Vol.33, No.4, Article 74, pp.1-11

## (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

F 2 1 K 9 / 0 0 - 9 / 9 0  
F 2 1 S 2 / 0 0 - 4 5 / 7 0  
F 2 1 V 1 / 0 0 - 1 5 / 0 4  
G 0 2 F 1 / 0 1 - 1 / 1 2 5  
1 / 2 1 - 7 / 0 0  
G 0 9 G 3 / 0 0 - 3 / 3 8  
H 0 4 N 5 / 6 6 - 5 / 7 4  
J S T P l u s / J S T 7 5 8 0 ( J D r e a m I I I )  
G o o g l e S c h o l a r