

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2015-165610

(P2015-165610A)

(43) 公開日 平成27年9月17日(2015.9.17)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
H04N 5/232 (2006.01)	H04N 5/232 Z	5B072
G03B 5/00 (2006.01)	G03B 5/00 C	5C122
G03B 15/02 (2006.01)	G03B 15/02 F	
G03B 15/00 (2006.01)	G03B 15/00 T	
G06K 7/015 (2006.01)	G06K 7/015 C	
審査請求 未請求 請求項の数 13 O L (全 48 頁) 最終頁に続く		

(21) 出願番号 特願2014-39912 (P2014-39912)
 (22) 出願日 平成26年2月28日 (2014.2.28)

(71) 出願人 000006747
 株式会社リコー
 東京都大田区中馬込1丁目3番6号
 (74) 代理人 100089118
 弁理士 酒井 宏明
 (72) 発明者 笠原 亮介
 東京都大田区中馬込1丁目3番6号 株式
 会社リコー内
 (72) 発明者 澤木 太郎
 東京都大田区中馬込1丁目3番6号 株式
 会社リコー内
 Fターム(参考) 5B072 AA02 AA08 CC24 DD02 DD22
 DD23 JJ11 KK02 LL19

最終頁に続く

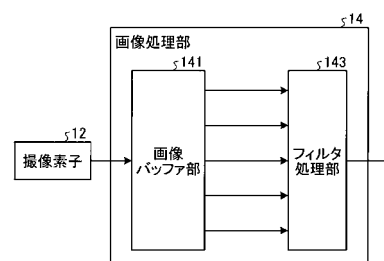
(54) 【発明の名称】 撮像装置、撮像システムおよび撮像方法

(57) 【要約】

【課題】 所定の大きさを有する被写体を、焦点を合わせて撮像することができる撮像装置、撮像システムおよび撮像方法を提供する。

【解決手段】 シャインプルーフの原理に基づき、撮像素子12のセンサ面をレンズユニットの主面に対して傾けて配置させることにより、合焦位置がレンズユニットの光軸方向に延伸した合焦面が形成され、フィルタ処理部143は、周波数特性Rに基づく逆変換フィルタによる逆変換処理を実行することによって、レンズユニットの光軸方向に延伸した合焦面の各位置において、レンズユニットの光軸方向に被写界深度を拡張させる。

【選択図】 図9



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

入射した光に収差を与える光学系と、
前記光学系を通過した前記光を画素に変換して画像を撮像する撮像手段と、
前記光学系の光軸上の所定範囲において前記撮像手段により撮像された撮像画像に対して、前記収差を復元する逆変換フィルタにより逆変換処理を実行して被写界深度を拡張する逆変換手段と、
を備え、
前記光学系および前記撮像手段は、合焦位置が前記光軸の方向に延伸した合焦面を形成するように配置され、

10

前記逆変換手段は、前記合焦面の各位置において前記被写界深度を拡張する撮像装置。

【請求項 2】

前記合焦面は、前記撮像手段の検出面が前記光学系の主面に対して傾いて配置されたことにより形成された請求項 1 に記載の撮像装置。

【請求項 3】

前記検出面の長手方向が前記主面に対して傾いて配置された請求項 2 に記載の撮像装置。

【請求項 4】

前記光学系は、多焦点レンズを含み、
前記撮像手段の検出面は、前記光学系の前記主面に対して平行に配置された請求項 1 に記載の撮像装置。

20

【請求項 5】

前記合焦面の各位置において前記被写界深度が拡張された合焦領域に含まれるように光線を照射する光源をさらに備えた請求項 1～4 のいずれか一項に記載の撮像装置。

【請求項 6】

前記光源は、前記光線が被写体に照射された場合に該被写体に形成される該光線のポイントの形状が正規の形状となるように、該光線の断面形状を歪ませた状態で該光線を照射する請求項 5 に記載の撮像装置。

【請求項 7】

前記逆変換フィルタは、被写体の理想画像の画素の周波数特性と、前記逆変換手段により前記逆変換処理がなされた出力画像の画素の周波数特性との平均二乗誤差を最小にするフィルタである請求項 1～6 のいずれか一項に記載の撮像装置。

30

【請求項 8】

前記逆変換フィルタは、被写体の理想画像の所定部分の画素の周波数特性と、前記逆変換手段によって前記逆変換処理がなされた出力画像の所定部分の画素の周波数特性との平均二乗誤差を最小にするフィルタである請求項 1～6 のいずれか一項に記載の撮像装置。

【請求項 9】

前記逆変換フィルタの周波数特性は、前記撮像画像全体に対して前記収差を復元するためのフィルタの周波数特性と、該フィルタの周波数特性を補正する補正フィルタの周波数特性との積である請求項 8 に記載の撮像装置。

40

【請求項 10】

前記逆変換手段により前記逆変換処理がなされた出力画像に基づいて、情報を所定的方式により記号化したコードを認識する認識処理手段をさらに備えた請求項 1～9 のいずれか一項に記載の撮像装置。

【請求項 11】

請求項 1～10 のいずれか一項に記載の撮像装置と、
前記撮像装置から前記逆変換処理がなされた出力画像を受信する通信手段と、該出力画像を表示する表示手段とを備える情報処理装置と、
を備えた撮像システム。

【請求項 12】

50

請求項 1～9 のいずれか一項に記載の撮像装置と、
前記逆変換手段により前記逆変換処理がなされた出力画像に基づいて、情報を所定の方法により記号化したコードを認識する認識処理手段と、
を備えた撮像システム。

【請求項 13】

光学系および撮像手段が、合焦位置が前記光学系の光軸の方向に延伸した合焦面を形成するように配置された撮像装置の撮像方法であって、

前記光学系により入射した光に収差を与える光学処理ステップと、

前記撮像手段により前記光学系を通過した前記光を画素に変換して画像を撮像する撮像ステップと、

前記光学系の光軸上の所定範囲において撮像した撮像画像に対して、前記収差を復元する逆変換フィルタにより逆変換処理を実行して、前記合焦面の各位置において被写界深度を拡張する逆変換ステップと、

を有する撮像方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、撮像装置、撮像システムおよび撮像方法に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、情報のデジタル化の発展に伴い、撮像装置に分野においてもデジタル化の発展が著しい。特に、デジタルカメラに代表される撮像装置において、撮像面は従来のフィルムに置き換わって固体撮像素子が使用されている。固体撮像素子（以下、単に撮像素子という）として、CCD（Charge Coupled Device）センサまたはCMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor）センサ等が使用されている。

【0003】

このように、撮像素子を使用した撮像装置は、被写体からの光を光学系によって取り込み、固体撮像素子によって光を電気信号に変換して抽出するものである。このような撮像装置として、デジタルカメラの他、ビデオカメラ、コードリーダー（バーコードリーダー、二次元コードリーダー等）、携帯電話機、携帯情報端末（PDA：Personal Digital Assistant）および産業用カメラ等が挙げられる。

【0004】

このような、CCDまたはCMOS等の撮像素子を備えた撮像装置として、多焦点の光学系を利用し、焦点が合う被写体側の位置（以下、合焦位置という）を光学系の光軸方向に延伸させ、被写体（バーコード等）の読み取り可能範囲を広げる撮像装置が提案されている（特許文献1参照）。特許文献1に記載された撮像装置は、動作が遅いオートフォーカス機構を用いずに、多焦点の光学系を用いることで、高速に被写体（バーコード等）の読み取りを行っている。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、特許文献1に記載された撮像装置は、光学系によって合焦位置を光学系の光軸方向に延伸させているが、各合焦位置における被写界深度の制限により、その合焦位置において、サイズの大きい被写体の全体に焦点を合わせて撮像することができないという問題点があった。

【0006】

本発明は、上記に鑑みてなされたものであって、所定の大きさを有する被写体を、焦点を合わせて撮像することができる撮像装置、撮像システムおよび撮像方法を提供することを目的とする。

10

20

30

40

50

【課題を解決するための手段】

【0007】

上述した課題を解決し、目的を達成するために、本発明は、入射した光に収差を与える光学系と、前記光学系を通過した前記光を画素に変換して画像を撮像する撮像手段と、前記光学系の光軸上の所定範囲において前記撮像手段により撮像された撮像画像に対して、前記収差を復元する逆変換フィルタにより逆変換処理を実行して被写界深度を拡張する逆変換手段と、を備え、前記光学系および前記撮像手段は、合焦位置が前記光軸の方向に延伸した合焦面を形成するように配置され、前記逆変換手段は、前記合焦面の各位置において前記被写界深度を拡張することの特徴とする。

【発明の効果】

10

【0008】

本発明によれば、所定の大きさを有する被写体を、焦点を合わせて撮像することができる。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】図1は、第1の実施の形態の撮像システムの全体構成の一例を示す図である。

【図2】図2は、第1の実施の形態の情報処理装置のハードウェア構成の一例を示す図である。

【図3】図3は、第1の実施の形態の撮像装置の構成の一例を示す図である。

【図4】図4は、被写体の距離によって焦点が合うか否かの説明をする図である。

20

【図5】図5は、シャインプルーフの原理を説明する図である。

【図6】図6は、シャインプルーフの原理によりレンズユニットの光軸方向に延伸させた合焦面を説明する図である。

【図7】図7は、撮像画像の位置によって焦点が合うか否かを説明する図である。

【図8】図8は、第1の実施の形態の撮像装置における光学系周辺の要部構成の一例を示す図である。

【図9】図9は、第1の実施の形態の撮像装置の画像処理部の構成の一例を示す図である。

【図10】図10は、第1の実施の形態の撮像装置の撮像素子により撮像される撮像画像の一例を示す図である。

30

【図11】図11は、第1の実施の形態の画像処理部の画像バッファ部の構成の一例を示す図である。

【図12】図12は、撮像素子から出力される画素が画像バッファ部に入力される動作を示すタイミングチャートである。

【図13】図13は、第1の実施の形態の画像処理部のフィルタ処理部の構成の一例を示す図である。

【図14】図14は、逆変換フィルタの構成の一例を示す図である。

【図15】図15は、画像を逆変換フィルタによってフィルタ処理することを説明する図である。

【図16】図16は、画像において逆変換フィルタのフィルタ処理の対象となる対象部分画像をスキャンする動作を説明する図である。

40

【図17】図17は、第1の実施の形態の画像処理部のフィルタ処理部の逆変換フィルタを決定するための周波数特性を演算する流れを示すフローチャートである。

【図18】図18は、光学系を通過した光による撮像画像の空間周波数特性を示す図である。

【図19】図19は、逆変換処理が行われた画像の空間周波数特性を示す図である。

【図20】図20は、合焦面の各位置において被写界深度が拡張された場合に形成される合焦領域を説明する図である。

【図21】図21は、撮像素子上でピントの合う領域が拡大されることを説明する図である。

50

【図 2 2】図 2 2 は、第 1 の実施の形態の変形例に係る撮像装置における光学系周辺の要部構成の一例を示す図である。

【図 2 3】図 2 3 は、撮像画像における各エリアによってパワースペクトルが異なることを説明する図である。

【図 2 4】図 2 4 は、撮像画像全体のパワースペクトルと最適フィルタとを説明する図である。

【図 2 5】図 2 5 は、撮像画像の平坦部のエリアのパワースペクトルと最適フィルタとを説明する図である。

【図 2 6】図 2 6 は、撮像画像のテクスチャ部のエリアのパワースペクトルと最適フィルタとを説明する図である。

【図 2 7】図 2 7 は、第 2 の実施の形態の画像処理部のフィルタ処理部の構成の一例と動作を説明する図である。

【図 2 8】図 2 8 は、第 2 の実施の形態の変形例の画像処理部のフィルタ処理部の構成の一例と動作を説明する図である。

【図 2 9】図 2 9 は、第 3 の実施の形態のコードリーダーの外観構成の一例を示す図である。

【図 3 0】図 3 0 は、第 3 の実施の形態のコードリーダーの合焦面の位置および動作を説明する図である。

【発明を実施するための形態】

【0010】

以下に、図面を参照しながら、本発明に係る撮像装置、撮像システムおよび撮像方法の実施の形態を詳細に説明する。また、以下の実施の形態によって本発明が限定されるものではなく、以下の実施の形態における構成要素には、当業者が容易に想到できるもの、実質的に同一のもの、およびいわゆる均等の範囲のものが含まれる。さらに、以下の実施の形態の要旨を逸脱しない範囲で構成要素の種々の省略、置換、変更および組み合わせを行うことができる。

【0011】

(第 1 の実施の形態)

< 撮像システムの全体構成 >

図 1 は、第 1 の実施の形態の撮像システムの全体構成の一例を示す図である。図 1 を参照しながら、本実施の形態の撮像システム 500 の構成について説明する。

【0012】

図 1 に示すように、本実施の形態の撮像システム 500 は、撮像装置 1 と、PC 2 と、を備えている。撮像装置 1 と PC 2 とは、Ethernet (登録商標) ケーブル等の通信ケーブル 3 によって通信可能に接続されている。

【0013】

撮像装置 1 は、被写体 4 からの光を電気信号に変換することによって被写体 4 を撮像し、撮像画像の情報 (以下、単に撮像画像という) から画像処理を実行し、画像処理後の画像を、通信ケーブル 3 を介して PC 2 へ送信する。PC 2 は、撮像装置 1 から受信した画像に対して所定の処理を実行する。

【0014】

例えば、撮像装置 1 は、生産ラインを流れる製品に添付されたバーコードを撮像して、バーコードの画像を PC 2 に送信する。PC 2 は、受信した画像からバーコードの情報を読み出して解析する。

【0015】

なお、図 1 に示すように、撮像システム 500 は、撮像装置 1 と PC 2 とが通信ケーブル 3 を介してデータを通信する有線通信方式のシステムとしているが、これに限定されるものではない。例えば、撮像装置 1 と PC 2 とは、Wi-Fi (登録商標) (Wireless Fidelity) 等の無線通信方式によって互いにデータが通信可能であってもよい。

10

20

30

40

50

【0016】

また、撮像装置1およびPC2が生産ラインにおいて使用される場合、撮像システム500は、PC2がPLC(Programmable Logic Controller)等に通信可能に接続されている構成としてもよい。この場合、撮像システム500の動作として、以下の動作が一例として挙げられる。撮像装置1は、生産ラインを流れる製品に添付されたバーコードを撮像して、バーコードの画像をPC2に送信する。PC2は、受信したバーコードの画像から、生産ラインを流れている製品の品番を判定する。PC2は、判定した品番が、生産ラインにおいて段替えされている品番と不一致である場合、判定した品番に対応する製品は異なる品番の製品であることを示す信号をPLCに送信する。PLCは、PC2から異なる品番の製品であることを示す信号を受信した場合、その製品を生産ラインから除去するように生産ラインの動作を制御する。

10

【0017】

<情報処理装置の構成>

図2は、第1の実施の形態の情報処理装置のハードウェア構成の一例を示す図である。図2を参照しながら、情報処理装置の一例であるPC2のハードウェア構成について説明する。

【0018】

図2に示すように、情報処理装置の一例であるPC2は、通信部21(通信手段)と、操作部22と、表示部23(表示手段)と、記憶部24と、外部記憶装置25と、制御部26と、を備えている。上記の各部は、バス27によって接続され、互いにデータの送受信が可能となっている。

20

【0019】

通信部21は、通信ケーブル3を介して、撮像装置1と通信する装置である。通信部21は、例えば、NIC(Network Interface Card)等の通信装置によって実現される。通信部21の通信プロトコルは、例えば、TCP(Transmission Control Protocol)/IP(Internet Protocol)またはUDP(User Datagram Protocol)/IP等によって実現される。

【0020】

操作部22は、ユーザによって制御部26に対して所定の処理を実行させるための操作入力を行う装置である。操作部22は、例えば、マウス、キーボード、テンキー、タッチパッドまたはタッチパネルにおける操作入力機能によって実現される。

30

【0021】

表示部23は、制御部26により実行されているアプリケーション画像等を表示する装置である。表示部23は、例えば、CRT(Cathode Ray Tube)ディスプレイ、液晶ディスプレイ、プラズマディスプレイまたは有機EL(Electroluminescence)ディスプレイ等によって実現される。

【0022】

記憶部24は、PC2で実行される各種プログラムおよびPC2で行われる各種処理に使用されるデータ等を記憶する装置である。記憶部24は、例えば、ROM(Read Only Memory)およびRAM(Random Access Memory)等の記憶装置によって実現される。

40

【0023】

外部記憶装置25は、画像、プログラムおよびフォントデータ等を蓄積して記憶する記憶装置である。外部記憶装置25は、例えば、HDD(Hard Disk Drive)、SSD(Solid State Drive)、光ディスク、または光磁気ディスク(MO:Magneto-Optical Disk)等の記憶装置によって実現される。

【0024】

制御部26は、PC2の各部の動作を制御する装置である。制御部26は、例えば、C

50

PU (Central Processing Unit) およびASIC (Application Specific Integrated Circuit) 等で実現される。

【0025】

< 撮像装置の構成 >

図3は、第1の実施の形態の撮像装置の構成の一例を示す図である。図3を参照しながら、本実施の形態の撮像装置1の構成について説明する。

【0026】

図3に示すように、撮像装置1は、レンズユニット11（光学系）と、撮像素子12（撮像手段）と、画像処理部14と、認識処理部15（認識処理手段）と、通信部16と、光源17と、を備えている。

10

【0027】

レンズユニット11は、被写体4からの光を集光し、撮像素子12に対して結像させるユニットである。レンズユニット11は、1枚以上のレンズで構成された光学系によって実現される。レンズユニット11は、位相板11aと、絞り11bとを備えている。被写体4は、例えば、人物、被監視物、バーコード、2次元コードまたは文字列等である。

【0028】

位相板11aは、レンズユニット11に入射する光に対して収差を与える作用を有する。その結果、位相板11aは、撮像素子12に入射される光に対して点像分布関数を付加する作用を奏し、撮像素子12で撮像される画像がぼけた状態とする代わりに広い被写界深度でそのぼけが一定となるようにする。なお、レンズユニット11に入射する光に対して収差を与えるのは、位相板11aに限定されるものではなく、レンズユニット11に含まれるレンズによって収差が与えられるものとしてもよい。

20

【0029】

絞り11bは、レンズユニット11に入射する光の量を自在に調整する部材であり、位相板11aの近傍に配置されている。

【0030】

撮像素子12は、レンズユニット11に入射する被写体からの光を電気信号に変換することによって被写体4を撮像して画像を生成する固体撮像素子である。撮像素子12は、固体撮像素子を構成する各検出単位によって撮像した画像を構成する画素を出力する。撮像素子12は、例えば、CCDセンサまたはCMOSセンサ等によって実現される。

30

【0031】

画像処理部14は、撮像素子12から出力される撮像画像から、フィルタ処理を施した画像（出力画像）を生成する。

【0032】

認識処理部15は、画像処理部14によりフィルタ処理が実行された画像に基づいて、所定の対象物を認識する認識処理を実行する。所定の対象物とは、例えば、人物、被監視物、バーコード、2次元コードまたは文字列等である。

【0033】

通信部16は、通信ケーブル3を介して、PC2と通信する装置である。通信部16は、例えば、認識処理部15から出力される画像をPC2に対して送信する。通信部16は、例えば、NIC等の通信装置によって実現される。通信部16の通信プロトコルは、例えば、TCP/IPまたはUDP/IP等によって実現される。

40

【0034】

光源17は、後述するように、発光した光線が、センサ面（検出面）がチルトした（傾いた）撮像素子12によりレンズユニット11の光軸方向に延伸した合焦面に沿うように設置された光源である。光源17は、LED (Light Emitting Diode) またはレーザ等の発光装置である。

【0035】

なお、認識処理部15は、撮像装置1に含まれる構成としているが、撮像装置1に接続

50

される外部機器の機能によって実現されるものとしてもよい。例えば、認識処理部 15 は、撮像装置 1 ではなく P C 2 において実現されるものとしてもよい。

【0036】

また、画像処理部 14 および認識処理部 15 は、ソフトウェアであるプログラムが実行されることによって実現されてもよく、または、ハードウェア回路によって実現されてもよい。ただし、以下の説明において、特に画像処理部 14 はハードウェア回路で構成されている場合を例に説明する。

【0037】

<シャインプルーフの原理について>

図 4 は、被写体の距離によって焦点が合うか否かの説明をする図である。図 5 は、シャインプルーフの原理を説明する図である。図 6 は、シャインプルーフの原理によりレンズユニットの光軸方向に延伸させた合焦面を説明する図である。図 7 は、撮像画像の位置によって焦点が合うか否かを説明する図である。図 4～7 を参照しながら、本実施の形態に係る撮像装置 1 が採用するシャインプルーフの原理について説明する。

【0038】

図 4 に示すように、通常、撮像装置のレンズユニット 11 における光軸に垂直な面（主面）と、撮像素子 12 のセンサ面とは略平行に配置されている。光学系であるレンズユニット 11 には、所定の被写界深度があり、被写界深度に含まれる焦点以外の点において、被写体は焦点が合わない（合焦しない）。ここで、被写界深度とは、撮像装置の光学系からある距離にある被写体に対して、焦点が合っていると許容できる光学系の光軸方向の距離範囲のことをいう。図 4 に示す 3 つの被写体 4a～4c のうち、焦点が合う合焦位置にあるのは、被写体 4b のみで、被写体 4a、4c は合焦位置にない。したがって、撮像素子 12 で結像されるのは、被写体 4b のみであり、被写体 4a、被写体 4c は、撮像素子 12 で結像しない。

【0039】

そのため、一般的には、このような広い範囲の合焦位置（フォーカス位置）をサポートするために、機械的にレンズの位置を変更するオートフォーカス等の方法が用いられている。しかしながら、オートフォーカス機構はサイズが大きくなる上に高価であり、かつ合焦させるために、レンズを移動させて合焦位置を探索する必要があり、被写体に焦点の合った画像を得るまでに時間がかかるという問題点がある。

【0040】

これを解決する方法の一例として、図 5 に示すように、撮像素子 12 のセンサ面を、レンズユニット 11 の主面に対して傾けたシャインプルーフの原理を用いる方法がある。シャインプルーフの原理とは、図 5 に示すように、撮像素子 12 のセンサ面と、レンズユニット 11 の主面とが 1 つの直線で交わる場合、合焦する被写体側の面（以下、合焦面 50 と称する）も同じ直線で交わるという原理である。すなわち、撮像素子 12 の位置によって被写体側の合焦位置が変わることになり、被写体との距離に応じた適切な場所、すなわち、合焦面 50 上に被写体を配置することによって、レンズユニット 11 の光軸方向の広い範囲において合焦した撮像画像を得ることができる。

【0041】

このようにシャインプルーフの原理を用い、撮像素子 12 のセンサ面を、レンズユニット 11 の主面に対して傾けることによって、合焦位置がレンズユニット 11 の光軸方向に延伸した合焦面 50 を形成することができる。この場合、図 6 に示すように、被写体 4a～4c を合焦面 50 上に配置した状態で、撮像素子 12 により撮像すると、被写体 4a～4c のいずれにも焦点が合った撮像画像を得ることができる。

【0042】

しかしながら、図 6 に示すシャインプルーフの原理を用いて合焦位置をレンズユニット 11 の光軸方向に延伸させる場合、被写体との距離に応じて、撮像画像上での合焦した状態で表示される適切な撮像位置が変わる。したがって、ユーザは、被写体の距離に応じて、適切な撮像位置となるように撮像装置 1 を移動させる必要があり、容易に被写体の撮像

10

20

30

40

50

位置を決定することができないという問題点が出てくる。例えば、図 7 に示すように、撮像画像 100 に含まれている大きさおよび形状が全て同一の被写体 4a～4d のうち、被写体 4a～4c は、合焦面 50 上に配置されているため、焦点が合った状態で撮像されている。この場合、被写体 4a は、合焦面 50 上の撮像装置 1 に近い位置に配置されており、被写体 4c は、合焦面 50 上の撮像装置 1 から遠い位置に配置されており、被写体 4b は、被写体 4a と被写体 4c との中間に位置する合焦面 50 上に配置されている。しかし、被写体 4d は、撮像装置 1 からの距離が被写体 4a と同じ距離に配置されているが、合焦面 50 上に配置されていないために、焦点が合っていない状態で撮像されている。したがって、被写体 4d を焦点が合った状態で撮像するために、ユーザは、被写体 4d の撮像位置が、図 7 における被写体 4a の撮像位置となるように撮像装置 1 を移動させなければならないが、これは容易にできることではない。以下、図 8 を参照しながら、この問題を解決するための本実施の形態のレンズユニット 11 周辺の要部構成について説明する。

【0043】

<レンズユニット周辺の要部構成>

図 8 は、第 1 の実施の形態の撮像装置における光学系周辺の要部構成の一例を示す図である。図 8 を参照しながら、撮像装置 1 のレンズユニット 11 周辺の要部構成について説明する。

【0044】

図 8 に示すように、撮像素子 12 は、センサ面がレンズユニット 11 の主面に対して傾けて配置されており、シャインプルーフの原理によって、合焦位置がレンズユニット 11 の光軸方向に延伸した合焦面 50 が形成されている。すなわち、合焦面 50 は、レンズユニット 11 の光学特性、およびレンズユニット 11 と撮像素子 12 のセンサ面（結像面）との位置関係に基づいて、形成される。また、光源 17 は、撮像素子 12 のセンサ面と、レンズユニット 11 の主面とが交わる直線の位置に配置されている。そして、光源 17 は、照射する光線 60 の方向をレンズユニット 11 の画角の中心軸方向からずらし、光線 60 を合焦面 50 上に位置するように照射する。光線 60 は、被写体に照射した場合に、円形のポインタが形成されるものとしてもよいし、矩形状のポインタが形成されるものとしてもよい。

【0045】

以上のように光源 17 を配置することによって、光源 17 が照射する光線 60 は、合焦面 50 上に配置された被写体を照射することになる。図 8 に示すように、被写体 4a～4c は、いずれも、合焦面 50 上に配置されているので、光線 60 によって照射されることになる。逆に、被写体が光線 60 により照射されるように、被写体または撮像装置 1 を移動させることによって、被写体を焦点が合う撮像位置に配置させることができる。すなわち、ユーザは、光源 17 が照射する光線 60 が示す位置に被写体（例えば、二次元コード等）が配置されるように、撮像装置 1 を移動させることによって、容易に被写体の距離に応じた適切な撮像位置とすることができ、被写体の焦点が合った撮像画像を得ることができる。

【0046】

なお、光源 17 が照射する光線 60 は、被写体における撮像装置 1 に対する面がレンズユニット 11 の主面と略平行等に配置されている場合、被写体の面に対して斜めから照射することになる。したがって、被写体に照射された光線 60 のポインタは、歪んだ形状を呈することになる。よって、光源 17 は、元から断面形状が歪んだ状態の光線 60 を照射し、被写体の面に対して斜めから照射されたときに正規の形状（円形、矩形等）となるようにしてもよい。

【0047】

また、通常、撮像素子 12 におけるセンサ面は、長方形の形状となっている。例えば、撮像素子 12 が、640×480 のマトリックス状に配置された検出素子で構成された場合等である。この場合、撮像素子 12 を、センサ面の長手方向が、レンズユニット 11 の主面に対して傾けて配置させることが望ましい。これによって、合焦面 50 をレンズユニ

ット 11 の光軸方向により大きく延伸させることができる。

【0048】

また、光源 17 は、撮像素子 12 のセンサ面と、レンズユニット 11 の主面とが交わる直線の位置に配置されているものとしたが、これに限定されるものではない。すなわち、光源 17 から照射される光線 60 が、合焦面 50 上に位置するように照射されるものとするれば、光源 17 はどの位置に配置されてもよい。

【0049】

ここで、上述のように、シャインプールの原理を用いて、合焦位置がレンズユニット 11 の光軸方向に延伸した合焦面 50 を形成させたとしても、上述のようにレンズユニット 11 が有する所定の被写界深度の制限により、レンズユニット 11 の主面に平行な方向については焦点が合う範囲が狭い。したがって、レンズユニット 11 の主面に平行な方向において焦点が合う範囲を超える大きさの被写体については、被写体の全体に対して焦点を合わせて撮像することができないことになる。

【0050】

ここで、合焦面 50 上の各位置において、上述のレンズユニット 11 の光軸方向の被写界深度の拡張をすることができれば、焦点が合う領域が広くなり、大きな被写体の全体に対して焦点の合った状態で撮像することが可能となる。ここで、被写界深度拡張 (E D o F : E x t e n d e d D e p t h o f F i e l d) の概略について説明する。レンズユニット 11 に含まれるレンズおよび位相板 11a は、撮像素子 12 に入射される被写体の光に収差を与えて点像分布関数 (P S F : P o i n t S p r e a d F u n c t i o n) を付加する働きをする。例えば、レンズは、収差として、撮像素子 12 に入射される被写体の光に球面収差を与える。レンズユニット 11 は、収差によって撮像素子で撮像する画像がぼけた状態にする代わりに広い被写界深度でそのぼけが一定となるようにする。したがって、レンズユニット 11 によってぼけた画像は、所定の M T F (M o d u l a t i o n T r a n s f e r F u n c t i o n) の値が得られるように補正する必要がある。M T F は、被写体の持つコントラストを、どれくらい忠実に再現できるかを数値化した値、すなわちコントラストの再現率を示す。このような、レンズユニット 11 によってぼけた画像に対して、ぼけを補正する撮像装置として、点像分布関数の逆変換処理を施すことによって、M T F を向上させ、高解像度の画像に補正することができる。逆変換処理は、光学系によってぼけた画像を形成する各画素に対して、逆変換フィルタによるフィルタ処理を施すことにより画像のぼけ (収差) を復元することによって実現される。以下、画像処理部 14 の構成の詳細を説明すると共に、逆変換処理による被写界深度拡張 (E D o F : E x t e n d e d D e p t h o f F i e l d) の方法の一例について説明する。

【0051】

<画像処理部の構成および動作>

図 9 は、第 1 の実施の形態の撮像装置の画像処理部の構成の一例を示す図である。図 10 は、第 1 の実施の形態の撮像装置の撮像素子により撮像される撮像画像の一例を示す図である。図 9 を参照しながら、本実施の形態の撮像装置 1 の画像処理部 14 の構成について説明する。

【0052】

撮像素子 12 は、上述のように、レンズユニット 11 に入射する被写体からの光を電気信号に変換することにより被写体 4 を撮像し、画像を生成する固体撮像素子である。以下、撮像素子 12 は、V G A の画像を形成して出力するものとして説明する。具体的には、撮像素子 12 は、図 10 に示すように、例えば、X 方向に 640 個、Y 方向に 480 個の検出素子によって、640×480 のマトリックス状に配列された画素で構成される画像である撮像画像 101 を撮像する。

【0053】

なお、撮像素子 12 が撮像する画像の大きさは 640×480 の V G A の画像であるものとしたが、これに限定されるものではなく、異なる大きさの画像であってもよい。

【0054】

図9に示すように、本実施の形態の画像処理部14は、画像バッファ部141と、フィルタ処理部143（逆変換処理手段）とを備えている。

【0055】

画像バッファ部141は、撮像素子12から出力される画素を順に入力してバッファリングする装置である。画像バッファ部141の具体的な構成および動作については、図11および12において後述する。

【0056】

フィルタ処理部143は、画像バッファ部141から出力される画素に対して、フィルタ回路によって、所定のフィルタ処理を行う。本実施の形態においては、フィルタ処理に使用するフィルタとして、位相板11aの作用によって点像分布関数を与えられたぼけた画像に対して、ぼけ（収差）を補正（復元）する逆変換処理をするための逆変換フィルタを例に説明する。フィルタ処理部143の具体的な構成および動作については、図13～16において後述する。

【0057】

<<画像バッファ部141の構成および動作>>

図11は、第1の実施の形態の画像処理部の画像バッファ部の構成の一例を示す図である。図12は、撮像素子から出力される画素が画像バッファ部に入力される動作を示すタイミングチャートである。図11および12を参照しながら、画像処理部14の画像バッファ部141の構成および動作について説明する。

【0058】

画像バッファ部141は、図11に示すように、レジスタ1411a～1411dと、ラインバッファ1412a～1412dと、を備えている。画像バッファ部141は、撮像素子12から出力される画素を入力部1410から入力し、バッファリングした画素を出力部1413a～1413eから出力する。撮像素子12によって検出される画像の640×480の各画素について、X方向のX番目およびY方向のY番目の画素を（X，Y）の画素というものとする。

【0059】

図11に示すように、レジスタ1411aの入力側は、入力部1410および出力部1413aに接続されている。レジスタ1411a～1411dの出力側は、それぞれラインバッファ1412a～1412dの入力側に接続されている。ラインバッファ1412a～1412cの出力側は、それぞれレジスタ1411b～1411dの入力側に接続されている。そして、ラインバッファ1412a～1412dの出力側は、それぞれ出力部1413b～1413eに接続されている。

【0060】

次に、図12を参照しながら、撮像素子12によって検出された画像の出力動作について説明する。撮像素子12は、検出した画素をX方向の1水平ラインずつ走査しながら、その1水平ラインに含まれる画素を出力する。具体的には、撮像素子12は、Y方向の1番目の水平ラインに含まれる画素を、X方向の1番目の画素から640番目の画素まで順に出力する。撮像素子12は、上記の動作を、Y方向の480番目までの水平ラインに含まれる画素の出力をそれぞれ行う。

【0061】

上記の動作を図12に示すタイミングチャートに基づいて説明する。図12に示すように、撮像素子12は、有効フレーム信号がオン状態のとき、1フレーム分、すなわち1画像分の画素を出力する。撮像素子12において、有効フレーム信号がオン状態になってからフレーム開始期間Aを経て、Y方向の1番目の水平ラインの画素の出力許可を示す有効ライン信号L1がオン状態になる。撮像素子12は、有効ライン信号L1がオン状態になっている有効データ期間Tの間に、Y方向の1番目の水平ラインを走査し、その水平ラインに含まれるX方向の1～640番目の画素（（1，1）～（640，1）の画素）を順に出力する。撮像素子12によってY方向の1番目の水平ラインの画素が出力された後、

有効ライン信号 L 1 がオフ状態になる。

【0062】

撮像素子 1 2 において、有効ライン信号 L 1 がオフ状態になってから水平ブランキング期間 B を経て、Y 方向の 2 番目の水平ラインの画素の出力許可を示す有効ライン信号 L 2 がオン状態になる。撮像素子 1 2 は、有効ライン信号 L 2 がオン状態になっている有効データ期間 T の間に、Y 方向の 2 番目の水平ラインを走査し、その水平ラインに含まれる X 方向の 1 ～ 6 4 0 番目の画素（（1，2）～（6 4 0，2）の画素）を順に出力する。撮像素子 1 2 によって Y 方向の 2 番目の水平ラインの画素が出力された後、有効ライン信号 L 2 がオフ状態になる。

【0063】

撮像素子 1 2 は、以上の動作について、有効ライン信号 L 4 8 0 がオン状態になっている有効データ期間 T の間に、Y 方向の 4 8 0 番目の水平ラインに含まれる X 方向の 1 ～ 6 4 0 番目の画素を出力するまで行う。撮像素子 1 2 において、有効ライン信号 L 4 8 0 がオフ状態になってからフレーム終了期間 C を経て、有効フレーム信号がオフ状態になる。以上の動作によって、撮像素子 1 2 による 1 フレーム分の画素の出力が終了する。また、撮像素子 1 2 において、有効フレーム信号がオフ状態になってから垂直ブランキング期間 D を経て、再び有効フレーム信号がオン状態になり、次の 1 フレーム分の画素の出力が開始される。

【0064】

次に、図 1 1 を参照しながら、画像バッファ部 1 4 1 における撮像素子 1 2 から出力される画素のバッファリング処理について説明する。画像バッファ部 1 4 1 は、撮像素子 1 2 から出力される画素を入力部 1 4 1 0 から入力する。具体的には、画像バッファ部 1 4 1 は、まず、Y 方向の 1 番目の水平ラインについて、撮像素子 1 2 から入力した（1，1）の画素を、出力部 1 4 1 3 a から出力すると共に、レジスタ 1 4 1 1 a に格納する。

【0065】

画像バッファ部 1 4 1 は、次のタイミングで、レジスタ 1 4 1 1 a に格納した画素をラインバッファ 1 4 1 2 a の記憶領域 1 a に格納する。そして、画像バッファ部 1 4 1 は、撮像素子 1 2 から次に入力した（2，1）の画素を出力部 1 4 1 3 a から出力すると共に、レジスタ 1 4 1 1 a に格納する。

【0066】

画像バッファ部 1 4 1 は、次のタイミングで、記憶領域 1 a に格納した画素をラインバッファ 1 4 1 2 a の記憶領域 2 a にシフトして格納し、レジスタ 1 4 1 1 a に格納した画素を記憶領域 1 a に格納する。そして、画像バッファ部 1 4 1 は、撮像素子 1 2 から次に入力した（3，1）の画素を出力部 1 4 1 3 a から出力すると共に、レジスタ 1 4 1 1 a に格納する。

【0067】

以上の動作を繰り返すことにより、画像バッファ部 1 4 1 は、撮像素子 1 2 から入力した Y 方向の 1 番目の水平ラインの画素を出力部 1 4 1 3 a から出力する。それと共に、画像バッファ部 1 4 1 は、Y 方向の 1 番目の水平ラインの 1 ～ 6 3 9 番目の画素をラインバッファ 1 4 1 2 a の記憶領域 6 3 9 a ～ 1 a にそれぞれ格納し、6 4 0 番目の画素をレジスタ 1 4 1 1 a に格納する。

【0068】

次に、画像バッファ部 1 4 1 は、ラインバッファ 1 4 1 2 a の記憶領域 1 a ～ 6 3 9 a に格納した画素を記憶領域 2 a ～ 6 4 0 a にシフトして格納し、レジスタ 1 4 1 1 a に格納した画素を記憶領域 1 a に格納する。画像バッファ部 1 4 1 は、記憶領域 6 4 0 a に格納した（1，1）の画素を出力部 1 4 1 3 b から出力すると共に、レジスタ 1 4 1 1 b に格納する。そして、画像バッファ部 1 4 1 は、Y 方向の 2 番目の水平ラインについて、撮像素子 1 2 から入力した（1，2）の画素を出力部 1 4 1 3 a から出力すると共に、レジスタ 1 4 1 1 a に格納する。すなわち、画像バッファ部 1 4 1 は、X 方向の値が同一の画素である（1，1）および（1，2）の画素を、出力部 1 4 1 3 b および 1 4 1 3 a から

10

20

30

40

50

それぞれ出力する。

【0069】

画像バッファ部141は、次のタイミングで、レジスタ1411bに格納した画素をラインバッファ1412bの記憶領域1bに格納する。画像バッファ部141は、ラインバッファ1412aの記憶領域1a～639aに格納した画素を記憶領域2a～640aにシフトして格納し、レジスタ1411aに格納した画素を記憶領域1aに格納する。画像バッファ部141は、記憶領域640aに格納した(2, 1)の画素を出力部1413bから出力すると共に、レジスタ1411bに格納する。そして、画像バッファ部141は、撮像素子12から次に入力した(2, 2)の画素を出力部1413aから出力すると共に、レジスタ1411aに格納する。

10

【0070】

画像バッファ部141は、次のタイミングで、記憶領域1bに格納した画素をラインバッファ1412bの記憶領域2bにシフトして格納し、レジスタ1411bに格納した画素を記憶領域1bに格納する。画像バッファ部141は、ラインバッファ1412aの記憶領域1a～639aに格納した画素を記憶領域2a～640aにシフトして格納し、レジスタ1411aに格納した画素を記憶領域1aに格納する。画像バッファ部141は、記憶領域640aに格納した(3, 1)の画素を出力部1413bから出力すると共に、レジスタ1411bに格納する。そして、画像バッファ部141は、撮像素子12から次に入力した(3, 2)の画素を出力部1413aから出力すると共に、レジスタ1411aに格納する。

20

【0071】

以上の動作を繰り返すことにより、画像バッファ部141は、撮像素子12から入力したY方向の1および2番目の水平ラインの画素についてX方向の値が同一の画素を、出力部1413aおよび1413bからそれぞれ同一のタイミングで出力する。それと共に、画像バッファ部141は、Y方向の1番目の水平ラインの1～639番目の画素をラインバッファ1412bの記憶領域1b～639bにそれぞれ格納し、640番目の画素をレジスタ1411bに格納する。さらに、画像バッファ部141は、Y方向の2番目の水平ラインの1～639番目の画素をラインバッファ1412aの記憶領域1a～639aにそれぞれ格納し、640番目の画素をレジスタ1411aに格納する。

【0072】

以上の動作のように、画像バッファ部141は、撮像素子12から入力した各水平ラインの画素をラインバッファ1412a～1412dにバッファリングする。それと共に、画像バッファ部141は、X方向の値が同一の画素、すなわち、(X, Y-4)、(X, Y-3)、(X, Y-2)、(X, Y-1)および(X, Y)の画素を、出力部1413a～1413eからそれぞれ同一のタイミングで出力する。

30

【0073】

なお、図11は画像バッファ部141の構成の一例を示すものであり、この構成に限定されるものではなく、上述した画像バッファ部141のバッファリング処理と同様の作用を奏する構成であればよい。

【0074】

<<フィルタ処理部143の構成および動作>>

図13は、第1の実施の形態の画像処理部のフィルタ処理部の構成の一例を示す図である。図14は、逆変換フィルタの構成の一例を示す図である。図15は、画像を逆変換フィルタによってフィルタ処理することを説明する図である。図16は、画像において逆変換フィルタのフィルタ処理の対象となる対象部分画像をスキャンする動作を説明する図である。図13～16を参照しながら、画像処理部14のフィルタ処理部143の構成および動作について説明する。

40

【0075】

フィルタ処理部143は、図13に示すように、レジスタ1432a～1432e、1433a～1433e、1434a～1434e、1435a～1435e、1436a

50

～1436eおよび1437a～1437eを備えている。フィルタ処理部143は、乗算器1438a～1438e、1439a～1439e、1440a～1440e、1441a～1441eおよび1442a～1442eを備えている。フィルタ処理部143は、加算器1443a～1443e、1444a～1444e、1445a～1445e、1446a～1446eおよび1447a～1447cを備えている。フィルタ処理部143は、画像バッファ部141から出力される画素を入力部1431a～1431eから入力する。そして、フィルタ処理部143は、入力した画素について、導出方法を後述するフィルタ係数を有する逆変換フィルタによってコンボリューション演算（畳み込み演算）を行い、演算値を出力部1448から出力する。

【0076】

乗算器1438a～1438e、1439a～1439e、1440a～1440e、1441a～1441eおよび1442a～1442eは、入力側から入力される画素の値とフィルタ係数との乗算値を出力する回路である。具体的には、乗算器1438a～1442aは、それぞれフィルタ係数a55～a51と画素との乗算値を出力する。乗算器1438b～1442bは、それぞれフィルタ係数a45～a41と画素との乗算値を出力する。乗算器1438c～1442cは、それぞれフィルタ係数a35～a31と画素との乗算値を出力する。乗算器1438d～1442dは、それぞれフィルタ係数a25～a21と画素との乗算値を出力する。乗算器1438e～1442eは、それぞれフィルタ係数a15～a11と画素との乗算値を出力する。加算器1443a～1443e、1444a～1444e、1445a～1445e、1446a～1446e、ならびに1447aおよび1447cは、入力側から入力される2つのデータの値の加算値を出力する回路である。加算器1447bは、入力側から入力される3つのデータの値の加算値を出力する回路である。

【0077】

図13に示すように、入力部1431a～1431eは、それぞれレジスタ1432a～1432eの入力側に接続されている。レジスタ1432a～1437aは、直列に接続している。レジスタ1432b～1437b、1432c～1437c、1432d～1437dおよび1432e～1437eのそれぞれについても同様である。

【0078】

入力部1431a～1431eは、それぞれ乗算器1438a～1438eの入力側に接続されている。レジスタ1432a～1435aの出力側は、それぞれ乗算器1439a～1442aの入力側に接続されている。レジスタ1432b～1435bと乗算器1439b～1442bとの接続関係、レジスタ1432c～1435cと乗算器1439c～1442cとの接続関係、レジスタ1432d～1435dと乗算器1439d～1442dとの接続関係、およびレジスタ1432e～1435eと乗算器1439e～1442eとの接続関係もそれぞれ同様である。

【0079】

乗算器1438a～1438eの出力側は、それぞれ加算器1443a～1443eの入力側に接続されている。加算器1443a～1446aは、直列に接続している。加算器1443b～1446b、1443c～1446c、1443d～1446dおよび1443e～1446eのそれぞれについても同様である。

【0080】

乗算器1439a～1442aの出力側は、それぞれ加算器1443a～1446aの入力側に接続されている。乗算器1439b～1442bと加算器1443b～1446bとの接続関係、乗算器1439c～1442cと加算器1443c～1446cとの接続関係、乗算器1439d～1442dと加算器1443d～1446dとの接続関係、および乗算器1439e～1442eと加算器1443e～1446eとの接続関係もそれぞれ同様である。

【0081】

加算器1446aおよび1446bの出力側は、加算器1447aの入力側に接続され

10

20

30

40

50

ている。加算器 1446 d および 1446 e の出力側は、加算器 1447 c の入力側に接続されている。加算器 1446 c、1447 a および 1447 c の出力側は、加算器 1447 b の入力側に接続されている。加算器 1447 b の出力側は、出力部 1448 に接続されている。

【0082】

次に、図 13～16 を参照しながら、フィルタ処理部 143 における逆変換処理について説明する。逆変換処理に使用されるフィルタは、図 14 に示すように、上述したフィルタ係数 a11～a15、a21～a25、a31～a35、a41～a45 および a51～a55 によって構成されるタップ数が 5×5 の線形フィルタである逆変換フィルタ 121 である。逆変換フィルタ 121 による逆変換処理の対象となる画像の部分、図 15 に示す対象部分画像 131 であるものとする。対象部分画像 131 は、画素 A11～A15、A21～A25、A31～A35、A41～A45 および A51～A55 によって構成された 5×5 の部分画像である。

【0083】

レジスタ 1432 a～1432 e、1433 a～1433 e、1434 a～1434 e、1435 a～1435 e、1436 a～1436 e および 1437 a～1437 e には、データが格納されていない状態、すなわち、0 の値が格納された状態であるものとする。フィルタ処理部 143 は、入力部 1431 a～1431 e から対象部分画像 131 の画素 A51、A41、A31、A21 および A11 を入力し、それぞれレジスタ 1432 a～1432 e に格納すると共に、乗算器 1438 a～1438 e に入力させる。乗算器 1438 a～1438 e は、それぞれのフィルタ係数である a55、a45、a35、a25 および a15 と、それぞれ入力した画素 A51、A41、A31、A21 および A11 との乗算値を出力する。乗算器 1438 a～1438 e によって演算された乗算値は、加算器 1447 a～1447 c によって加算される。加算値は、加算器 1447 b から出力され、出力部 1448 からフィルタ処理部 143 の外部に出力される。

【0084】

フィルタ処理部 143 は、次のタイミングで、レジスタ 1432 a～1432 e に格納した画素 A51、A41、A31、A21 および A11 を、それぞれレジスタ 1433 a～1433 e にシフトして格納し、乗算器 1439 a～1439 e に入力させる。フィルタ処理部 143 は、入力部 1431 a～1431 e から対象部分画像 131 の画素 A52、A42、A32、A22 および A12 を入力し、それぞれレジスタ 1432 a～1432 e に格納すると共に、乗算器 1438 a～1438 e に入力させる。乗算器 1439 a～1439 e は、それぞれのフィルタ係数である a54、a44、a34、a24 および a14 と、それぞれ入力した画素 A51、A41、A31、A21 および A11 との乗算値を出力する。乗算器 1438 a～1438 e は、それぞれのフィルタ係数である a55、a45、a35、a25 および a15 と、それぞれ入力した画素 A52、A42、A32、A22 および A12 との乗算値を出力する。乗算器 1439 a～1439 e によって演算された乗算値、および乗算器 1438 a～1438 e によって演算された乗算値は、加算器 1443 a～1443 e および 1447 a～1447 c によって加算される。加算値は、加算器 1447 b から出力され、出力部 1448 からフィルタ処理部 143 の外部に出力される。

【0085】

そして、以上の動作が繰り返された結果、レジスタ 1432 a～1436 a、1432 b～1436 b、1432 c～1436 c、1432 d～1436 d および 1432 e～1436 e に、それぞれ画素 A55～A51、A45～A41、A35～A31、A25～A21 および A15～A11 が格納されたものとする。また、乗算器 1438 a～1442 a、1438 b～1442 b、1438 c～1442 c、1438 d～1442 d および 1438 e～1442 e に、それぞれ画素 A55～A51、A45～A41、A35～A31、A25～A21 および A15～A11 が入力されたものとする。乗算器 1442 a～1442 e は、それぞれのフィルタ係数である a51、a41、a31、a21 お

10

20

30

40

50

よび a 1 1 と、それぞれ入力した画素 A 5 1、A 4 1、A 3 1、A 2 1 および A 1 1 との乗算値を出力する。乗算器 1 4 4 1 a ~ 1 4 4 1 e は、それぞれのフィルタ係数である a 5 2、a 4 2、a 3 2、a 2 2 および a 1 2 と、それぞれ入力した画素 A 5 2、A 4 2、A 3 2、A 2 2 および A 1 2 との乗算値を出力する。乗算器 1 4 4 0 a ~ 1 4 4 0 e は、それぞれのフィルタ係数である a 5 3、a 4 3、a 3 3、a 2 3 および a 1 3 と、それぞれ入力した画素 A 5 3、A 4 3、A 3 3、A 2 3 および A 1 3 との乗算値を出力する。乗算器 1 4 3 9 a ~ 1 4 3 9 e は、それぞれのフィルタ係数である a 5 4、a 4 4、a 3 4、a 2 4 および a 1 4 と、それぞれ入力した画素 A 5 4、A 4 4、A 3 4、A 2 4 および A 1 4 との乗算値を出力する。乗算器 1 4 3 8 a ~ 1 4 3 8 e は、それぞれのフィルタ係数である a 5 5、a 4 5、a 3 5、a 2 5 および a 1 5 と、それぞれ入力した画素 A 5 5、A 4 5、A 3 5、A 2 5 および A 1 5 との乗算値を出力する。

10

【0086】

乗算器 1 4 3 8 a ~ 1 4 3 8 e、1 4 3 9 a ~ 1 4 3 9 e、1 4 4 0 a ~ 1 4 4 0 e、1 4 4 1 a ~ 1 4 4 1 e および 1 4 4 2 a ~ 1 4 4 2 e によって演算された乗算値は、図 1 3 に示す全ての加算器によって加算される。加算値は、加算器 1 4 4 7 b から出力され、出力部 1 4 4 8 からフィルタ処理部 1 4 3 の外部に出力される。この加算値は、図 1 5 に示すように、対象部分画像 1 3 1 に対して逆変換フィルタ 1 2 1 によってコンボリューション演算した値、すなわち、図 1 5 の式 (1) で表される演算値と同一である。コンボリューション演算の演算値は、対象部分画像 1 3 1 の中央に位置する画素である中央データに対して逆変換処理を実行した値となる。すなわち、コンボリューションの演算値は、逆変換処理後の画像において、逆変換処理前の画像の中央データに相当する位置の画素となる。

20

【0087】

次に、フィルタ処理部 1 4 3 の逆変換処理について、図 1 6 を参照しながら、画像 1 0 5 において X 方向の水平ラインを走査しながら逆変換処理をする動作の概略を説明する。図 1 6 (a) は、フィルタ処理部 1 4 3 が、画像 1 0 5 における (1, 1) の画素に対して逆変換フィルタ 1 2 1 によって逆変換処理をする状態を示している。図 1 6 (a) に示すように、(1, 1) の画素を中央データ 1 3 5 a としてコンボリューション演算するためには、(1, 1) の画素を中央データとする対象部分画像 1 3 1 a と、画像 1 0 5 とが重複している部分の画素が必要になる。すなわち、対象部分画像 1 3 1 a のうち、図 1 5 に示す対象部分画像 1 3 1 の画素 A 3 3 ~ A 3 5、A 4 3 ~ A 4 5 および A 5 3 ~ A 5 5 に相当する画素が必要である。

30

【0088】

そのためには、画素 A 3 3 ~ A 3 5、A 4 3 ~ A 4 5 および A 5 3 ~ A 5 5 に相当する画素が、画像バッファ部 1 4 1 の出力部 1 4 1 3 a ~ 1 4 1 3 c から出力されている必要がある。さらに、画素 A 3 5 ~ A 3 3、A 4 5 ~ A 4 3 および A 5 5 ~ A 5 3 に相当する画素が、フィルタ処理部 1 4 3 のレジスタ 1 4 3 2 c ~ 1 4 3 4 c、1 4 3 2 b ~ 1 4 3 4 b および 1 4 3 2 a ~ 1 4 3 4 a に格納されている必要がある。そして、対象部分画像 1 3 1 a において、画像 1 0 5 と重複していない部分の画素は「0」として取り扱うものとする。

40

【0089】

以上の状態において、フィルタ処理部 1 4 3 は、図 1 5 に示したコンボリューション演算と同様に、対象部分画像 1 3 1 a に対して逆変換フィルタ 1 2 1 によってコンボリューション演算を行う。フィルタ処理部 1 4 3 は、画像 1 0 5 の対象部分画像 1 3 1 a の中央データ 1 3 5 a である (1, 1) の画素に対してコンボリューション演算した値を、逆変換処理後の画像の (1, 1) の画素として出力する。

【0090】

次に、フィルタ処理部 1 4 3 は、図 1 6 (b) に示すように、コンボリューション演算の対象となる画素を X 方向にひとつシフトし、対象部分画像 1 3 1 b の中央データ 1 3 5 b である (2, 1) の画素に対して逆変換処理をする。そして、フィルタ処理部 1 4 3 は

50

、X方向の水平ラインをシフトしながらコンボリューション演算を繰り返し、図16(c)に示すように、X方向の水平ラインの最後の画素である(640, 1)の画素に対して逆変換処理をする。(640, 1)の画素は、図16(c)に示すように、対象部分画像131cの中央データ135cである。

【0091】

以上のように、フィルタ処理部143は、X方向の水平ラインをシフトしながらコンボリューション演算を繰り返し、水平ラインの最後の画素に対する逆変換処理が終了すると、Y方向の次の水平ラインに対して同様に逆変換処理を行う。

【0092】

図16(d)～16(f)は、フィルタ処理部143が、画像105におけるY方向の4番目の水平ラインの画素に対して逆変換処理を行う状態を示している。図16(d)は、フィルタ処理部143が、画像105における(1, 4)の画素に対して逆変換フィルタ121によって逆変換処理をする状態を示している。図16(d)に示すように、(1, 4)の画素を中央データ135dとしてコンボリューション演算するためには、(1, 4)の画素を中央データとする対象部分画像131dと、画像105とが重複している部分の画素が必要になる。そして、対象部分画像131dにおいて、画像105と重複していない部分の画素は、上述と同様に「0」として取り扱うものとする。

【0093】

図16(e)は、フィルタ処理部143が、画像105における(5, 4)の画素に対して逆変換フィルタ121によって逆変換処理をする状態を示している。図16(e)に示すように、(5, 4)の画素を中央データ135eとする対象部分画像131eは全体が画像105と重複しているので、フィルタ処理部143は、対象部分画像131eに含まれる画素をすべて利用した逆変換処理が可能となる。

【0094】

そして、フィルタ処理部143は、X方向の水平ラインをシフトしながらコンボリューション演算を繰り返し、図16(f)に示すように、X方向の水平ラインの最後の画素である(640, 4)の画素に対して逆変換処理をする。(640, 4)の画素は、図16(f)に示すように、対象部分画像131fの中央データ135fである。

【0095】

以上のように、フィルタ処理部143は、画像105を構成する各画素に対して逆変換フィルタ121によるコンボリューション演算を行って逆変換処理をするので、位相板11aによってぼけた画像を補正し、画像の解像度を向上させることができる。

【0096】

なお、上述のように、画像105における逆変換フィルタ121によるコンボリューション演算の対象となる対象部分画像について、画像105と重複していない部分の画素は「0」としたが、これに限定されるものではない。例えば、対象部分画像の画像105と重複していない部分の画素は、対象部分画像の中央データを基準にして、対象部分画像の画像105と重複している部分の画素を折り返した場合の画素を用いるものとしてもよい。

【0097】

具体的に、図16(a)の対象部分画像131aを例にして説明する。対象部分画像131aのそれぞれの画素の名称を、仮に図15に示す対象部分画像131の画素の名称と同様とする。この場合、対象部分画像131aの画像105と重複していない部分の画素は、画素A11～A15、A21～A25、A31、A32、A41、A42、A51およびA52である。また、対象部分画像131aの画像105と重複している部分の画素は、画素A33～A35、A43～A45およびA53～A55である。

【0098】

このとき、画素A31、A32、A41、A42、A51およびA52は、中央データを基準にして、対象部分画像131aの画像105と重複している部分の画素を折り返し、それぞれ画素A35、A34、A45、A44、A55およびA54の値を用いる。ま

10

20

30

40

50

た、画素 A 1 3 ~ A 1 5 および A 2 3 ~ A 2 5 は、中央データを基準にして、対象部分画像 1 3 1 a の画像 1 0 5 と重複している部分の画素を折り返し、それぞれ画素 A 5 3 ~ A 5 5 および A 4 3 ~ A 4 5 の値を用いる。そして、画素 A 1 1、A 1 2、A 2 1 および A 2 2 は、中央データを基準にして、対象部分画像 1 3 1 a の画像 1 0 5 と重複している部分の画素のうち点対象の位置関係にある画素、すなわち、それぞれ A 5 5、A 5 4、A 4 5 および A 4 4 の値を用いる。以上のような方法によって、対象部分画像の各画素を決定するものとしてもよい。

【0099】

また、図 1 4 および 1 5 に示すように、フィルタ処理部 1 4 3 が有する逆変換フィルタはタップ数が 5×5 のフィルタとしているが、これに限定されるものではない。すなわち、フィルタのタップ数は 3×3 、 15×15 または 21×21 等異なるタップ数としてもよい。この場合、フィルタのタップ数に合わせて、対象部分画像の大きさも一致させる必要がある。また、フィルタによる逆変換処理の対象となる中央データが存在するように、フィルタのタップ数は奇数である必要がある。

【0100】

また、逆変換フィルタは、例えば 15×15 以上のタップ数であることが好ましい。逆変換フィルタは、タップ数が多いほど、位相板によって被写界深度が拡張されてぼけが加えられた画像に対して、ぼけを補正できる光軸上の幅を大きくすることができる。したがって、タップ数が多い逆変換フィルタを用いることによって、位相板およびレンズの被写界深度についての設計のバリエーションを増やすことができる。

【0101】

<逆変換フィルタの周波数特性の導出>

まず、1 箇所のフォーカス位置において光学系であるレンズユニット 1 1 によって広がったスポットを一点に集まるように復元する逆変換処理に使用される逆変換フィルタの周波数特性の導出方法について説明する。上述の周波数特性を実現するフィルタとしては、2 次元の線形フィルタかつ FIR (Finite Impulse Response) フィルタが好適である。

【0102】

まず、撮像素子 1 2 によって撮像された画像への光学系による影響のモデルを以下の式 (2) に示す 2 次元のコンボリューション演算 (畳み込み演算) の式によって表す。

【数 1】

$$\text{image}_{\text{captured}}(x,y) = \iint \text{image}_{\text{ideal}}(x-x',y-y') \cdot h(x,y,x',y') dx' dy' \quad \cdots \text{式}(2)$$

【0103】

ここで、 $\text{image}_{\text{captured}}$ は光学系を通して検出された 2 次元の撮像画像の画素であり、 $\text{image}_{\text{ideal}}$ は被写体 4 そのものを示す理想画像の画素であり、 h は光学系の PSF を示す。

【0104】

以下、画像処理系 (撮像素子 1 2 および画像処理部 1 4) に加わるノイズの影響を考慮して、逆変換処理後の画像の各画素と、理想画像の各画素との誤差についての平均二乗誤差を最小とする逆変換フィルタの周波数特性の導出を考える。平均二乗誤差は、以下の式 (3) によって表される。

【数 2】

$$E[|\text{image}_{\text{ideal}}(n) - \text{image}_{\text{processed}}(n)|^2] \quad \cdots \text{式}(3)$$

【0105】

ここで、 $E[]$ は期待値 (平均値) を示し、 n は画像上の位置を示し、 $\text{image}_{\text{processed}}(n)$ は、 $\text{image}_{\text{captured}}(n)$ に対して逆変換処理をした

画像の画素を示す。なお、 $image_captured$ は、ノイズが含まれていることを考慮する。

【0106】

波形 $x(n)$ が持つ全エネルギーの n の全領域についての総和と、波形 $x(n)$ のエネルギーのフーリエ変換 $X(\omega)$ の全周波数成分についての総和とが等しいとするパーセバルの定理より、式(3)は、周波数領域における平均二乗誤差として以下の式(4)で表される。

【数3】

$$E[|IMAGE_{ideal}(\omega) - IMAGE_{processed}(\omega)|^2] \quad \cdots \text{式(4)} \quad 10$$

【0107】

ここで、 $IMAGE_{ideal}(\omega)$ は $image_{ideal}(n)$ の周波数特性を示し、 $IMAGE_{processed}(\omega)$ は $image_{processed}(n)$ の周波数特性を示し、 ω は空間周波数を示す。

【0108】

ここで、逆変換フィルタの周波数特性を $R(\omega)$ とすると、以下の式(5)の最小値を与える周波数特性 $R(\omega)$ が最適の逆変換フィルタとなる。

【数4】

$$E[|IMAGE_{ideal}(\omega) - R(\omega) \cdot IMAGE_{captured}(\omega)|^2] \quad \cdots \text{式(5)} \quad 20$$

【0109】

ここで、 $IMAGE_{captured}(\omega)$ は、 $image_{captured}(n)$ の周波数特性である。

【0110】

式(5)において、 $IMAGE_{ideal}(\omega) = S(\omega)$ 、および $IMAGE_{captured}(\omega) = X(\omega)$ とし、式(5)の最小値をもとめるため、式(5)を R^* によって微分すると、下記の式(6)が得られる。

【数5】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial E[|S(\omega) - R(\omega) \cdot X(\omega)|^2]}{\partial R^*} = \frac{\partial E[(S(\omega) - R(\omega)X(\omega))(S(\omega) - R(\omega)X(\omega))^*]}{\partial R^*} \\ & = \frac{\partial E[S(\omega)S(\omega)^* - S(\omega)(R(\omega)X(\omega))^* - R(\omega)X(\omega)S(\omega)^* - R(\omega)X(\omega)(R(\omega)X(\omega))^*]}{\partial R^*} \\ & = \frac{\partial E[|S(\omega)|^2 - S(\omega)R(\omega)^*X(\omega)^* - R(\omega)X(\omega)S(\omega)^* + R(\omega)|X(\omega)|^2R(\omega)^*]}{\partial R^*} \\ & = \frac{\partial \{E[|S(\omega)|^2] - R(\omega)^*E[S(\omega)X(\omega)^*] - R(\omega)E[X(\omega)S(\omega)^*] + R(\omega)R(\omega)^*|X(\omega)|^2\}}{\partial R^*} \\ & = R(\omega) \cdot E[|X(\omega)|^2] - E[S(\omega) \cdot X(\omega)^*] \end{aligned} \quad \cdots \text{式(6)} \quad 30$$

【0111】

ここで、 $E[|X(\omega)|^2]$ は、ノイズを含んだ撮像画像のパワースペクトルの平均値であり、 $E[S(\omega) \cdot X(\omega)^*]$ は、ノイズを含んだ撮像画像と理想画像との相互パワースペクトルの平均値である。

【0112】

式(5)の最小値をもとめるため式(6)の最右辺を0とすると下記の式(7)が得られる。

【数 6】

$$R(\omega) \cdot E[|X(\omega)|^2] - E[S(\omega) \cdot X(\omega)^*] = 0 \quad \cdots \text{式(7)}$$

【0 1 1 3】

式(7)から下記の式(8)が得られる。

【数 7】

$$R(\omega) = \frac{E[S(\omega) \cdot X(\omega)^*]}{E[|X(\omega)|^2]} \quad \cdots \text{式(8)}$$

10

【0 1 1 4】

この式(8)に示す周波数特性 $R(\omega)$ に基づく逆変換フィルタが、上述の式(3)に示す平均二乗誤差を最小とする最適のフィルタとなる。

【0 1 1 5】

ここで、ノイズの周波数特性を $W(\omega)$ とし、光学系のPSFである h の周波数特性を $H(\omega)$ として、上述の式(2)を周波数空間で示すと下記の式(9)で示される。

【数 8】

$$X(\omega) = H(\omega)S(\omega) + W(\omega) \quad \cdots \text{式(9)}$$

【0 1 1 6】

20

ノイズの周波数特性 $W(\omega)$ と、周波数特性 $S(\omega)$ とが無相関であるとする、 $E[S(\omega) \cdot W(\omega)^*] = 0$ であるので、上述の式(8)の右辺の分母に、式(9)を代入すると、下記の式(10)が得られる。

【数 9】

$$\begin{aligned} E[S(\omega) \cdot X(\omega)^*] &= E[S(\omega)(H(\omega)S(\omega) + W(\omega))^*] \\ &= E[S(\omega)(H(\omega)S(\omega))^* + W(\omega)^*] = E[S(\omega)(S(\omega)^* H(\omega)^* + W(\omega)^*)] \\ &= E[|S(\omega)|^2 H(\omega)^*] + E[S(\omega)W(\omega)^*] = E[|S(\omega)|^2 H(\omega)^*] = H(\omega)^* \cdot E[|S(\omega)|^2] \end{aligned}$$

$$\cdots \text{式(10)}$$

30

【0 1 1 7】

同じくノイズの周波数特性 $W(\omega)$ と、周波数特性 $S(\omega)$ とが無相関であるとする、 $E[W(\omega) \cdot S(\omega)^*] = 0$ および $E[S(\omega)^* \cdot W(\omega)] = 0$ であるので、上述の式(8)の右辺の分母に、式(9)を代入すると、下記の式(11)が得られる。

【数 10】

$$\begin{aligned} E[|X(\omega)|^2] &= E[(H(\omega)S(\omega) + W(\omega))(H(\omega)S(\omega) + W(\omega))^*] \\ &= E[H(\omega)S(\omega)H(\omega)^* S(\omega)^* + H(\omega)S(\omega)W(\omega)^* + W(\omega)H(\omega)^* S(\omega)^* + W(\omega)W(\omega)^*] \\ &= E[|H(\omega)S(\omega)|^2] + E[|W(\omega)|^2] = E[|H(\omega)|^2 |S(\omega)|^2] + E[|W(\omega)|^2] \\ &= |H(\omega)|^2 \cdot E[|S(\omega)|^2] + E[|W(\omega)|^2] \end{aligned}$$

40

$$\cdots \text{式(11)}$$

【0 1 1 8】

上述の式(8)、(10)および(11)から、下記の式(12)に示す周波数特性 $R(\omega)$ が得られる。

【数 11】

$$R(\omega) = \frac{H(\omega)^* \cdot E[|S(\omega)|^2]}{|H(\omega)|^2 \cdot E[|S(\omega)|^2] + E[|W(\omega)|^2]} \quad \cdots \text{式(12)}$$

50

【0119】

この式(12)に示す周波数特性 $R(\omega)$ に基づく逆変換フィルタが、画像処理系のノイズを考慮した場合の上述の式(3)に示す平均二乗誤差を最小とする最適なフィルタとなる。ここで、 $E[|S(\omega)|^2]$ は理想画像のパワースペクトルの平均値であり、 $E[|W(\omega)|^2]$ はノイズのパワースペクトルの平均値であり、 $|H(\omega)|^2$ は光学系の周波数特性のパワースペクトルである。

【0120】

また、上述の式(12)に示す周波数特性 $R(\omega)$ を適用した場合において、逆変換処理後の画像の各画素と、理想画像の各画素との二乗誤差についての周波数領域における積分を取ると、下記の式(13)が得られる。

【数12】

$$\begin{aligned} & \int |S(\omega) - R(\omega) \cdot X(\omega)|^2 d\omega \\ &= \int |S(\omega) - R(\omega) \cdot \{H(\omega)S(\omega) + W(\omega)\}|^2 d\omega \\ &= \int |(1 - R(\omega)H(\omega))S(\omega) - R(\omega)W(\omega)|^2 d\omega \\ &= \int \{ (1 - R(\omega)H(\omega))S(\omega) - R(\omega)W(\omega) \} \{ (1 - R(\omega)H(\omega))S(\omega) - R(\omega)W(\omega) \}^* d\omega \\ &= \int \{ |1 - R(\omega)H(\omega)|^2 |S(\omega)|^2 - S(\omega)R(\omega)^* W(\omega)^* (1 - R(\omega)H(\omega)) \\ &\quad - R(\omega)W(\omega)S(\omega)^* (1 - R(\omega)H(\omega))^* + |R(\omega)W(\omega)|^2 \} d\omega \\ &= \int \{ |1 - R(\omega)H(\omega)|^2 |S(\omega)|^2 + |R(\omega)|^2 |W(\omega)|^2 \} d\omega \end{aligned}$$

…式(13)

【0121】

上記の式(13)の演算においては、上述のように、ノイズの周波数特性 $W(\omega)$ と、周波数特性 $S(\omega)$ とが無相関であることを利用している式(13)の最右辺の第1項は、逆変換処理後の画像の復元しきれなかった誤差量を示している。第2項は、ノイズによる誤差量を示している。

【0122】

式(13)の積分値が最小となるように、光学系の周波数特性 $H(\omega)$ を設計することによって、上述の式(5)に示す周波数領域における平均二乗誤差が最小となる光学系および逆変換フィルタの組み合わせを得ることができる。また、パーセバルの定理より、上述の式(3)に示す実空間における平均二乗誤差が最小となる光学系および逆変換フィルタの組み合わせを得ることができる。

【0123】

ただし、上述の式(12)に示す周波数特性 $R(\omega)$ に基づく逆変換フィルタは、レンズユニット11の光軸方向の1箇所のフォーカス位置(すなわち1箇所の周波数特性 H)において、光学系によって広がったスポットを復元することができるものである。したがって、式(12)に示す周波数特性 $R(\omega)$ に基づく逆変換フィルタは、スポットの形状が異なるその他のデフォーカス位置においては、スポットを復元するための最適なフィルタにはならない。

【0124】

次に、レンズユニット11の光軸方向のあるデフォーカス位置範囲内において光学系であるレンズユニット11によって広がったスポットを復元する逆変換処理に使用される逆変換フィルタの周波数特性の導出方法について説明する。これによって、1箇所のフォーカス位置における最適な逆変換フィルタではなく、複数の位置において最適な逆変換フィルタをもとめることができる。

【0125】

まず、2箇所のデフォーカス位置を想定し、上述の式(5)を変形して、2つの画像に

10

20

30

40

50

ついでに周波数領域における平均二乗誤差の和は、下記の式（１４）で表される。

【数１３】

$$E[|IMAGE1_{ideal}(\omega) - R(\omega) \cdot IMAGE1_{captured}(\omega)|^2] + E[|IMAGE2_{ideal}(\omega) - R(\omega) \cdot IMAGE2_{captured}(\omega)|^2]$$

…式(14)

【０１２６】

２つの画像は、それぞれ I M A G E 1 および I M A G E 2 に対応する。

【０１２７】

式（１４）において、 $IMAGE1_{ideal}(\omega) = S1(\omega)$ 、 $IMAGE1_{captured}(\omega) = X1(\omega)$ 、 $IMAGE2_{ideal}(\omega) = S2(\omega)$ および $IMAGE2_{captured}(\omega) = X2(\omega)$ とする。そして、式（１４）の最小値をもとめるため、式（１４）を R^* によって微分すると、下記の式（１５）が得られる。

【数１４】

$$\frac{\partial E[|IMAGE1_{ideal}(\omega) - R(\omega) \cdot IMAGE1_{captured}(\omega)|^2] + E[|IMAGE2_{ideal}(\omega) - R(\omega) \cdot IMAGE2_{captured}(\omega)|^2]}{\partial R^*}$$

$$= R(\omega) \cdot E[|X1(\omega)|^2] - E[S1(\omega) \cdot X1(\omega)^*] + R(\omega) \cdot E[|X2(\omega)|^2] - E[S2(\omega) \cdot X2(\omega)^*]$$

$$= R(\omega) \{ E[|X1(\omega)|^2] + E[|X2(\omega)|^2] \} - \{ E[S1(\omega) \cdot X1(\omega)^*] + E[S2(\omega) \cdot X2(\omega)^*] \}$$

…式(15)

【０１２８】

式（１５）の最小値をもとめるため式（１５）の最右辺を 0 として、周波数特性 $R(\omega)$ について解くと、下記の式（１６）が得られる。

【数１５】

$$R(\omega) = \frac{E[S1(\omega) \cdot X1(\omega)^*] + E[S2(\omega) \cdot X2(\omega)^*]}{E[|X1(\omega)|^2] + E[|X2(\omega)|^2]} \quad \dots \text{式(16)}$$

【０１２９】

撮像装置 1 によって同一の画像を撮像しているものと仮定すると、 $S1(\omega) = S2(\omega)$ となり、これを $S(\omega)$ とおき、さらに、上述の式（９）の関係式から下記の式（１７）が得られる。

【数１６】

$$R(\omega) = \frac{\{H1(\omega)^* + H2(\omega)^*\} \cdot E[|S(\omega)|^2]}{\{|H1(\omega)|^2 + |H2(\omega)|^2\} E[|S(\omega)|^2] + 2E[|W(\omega)|^2]}$$

…式(17)

【０１３０】

この式（１７）に示す周波数特性 $R(\omega)$ に基づく逆変換フィルタが、上述の式（１４）に示す周波数領域の平均二乗誤差を最小とする最適なフィルタとなる。

【０１３１】

以上は 2 つの画像の場合であったが、 N 個の画像、すなわち、 N 箇所のデフォーカス位置に一般化した周波数特性 $R(\omega)$ は、下記の式（１８）で表される。

10

20

30

40

【数 1 7】

$$R(\omega) = \frac{\sum_{n=1}^N \{H_n(\omega)^*\} \cdot E[|S(\omega)|^2]}{\sum_{n=1}^N \{|H_n(\omega)|^2\} E[|S(\omega)|^2] + N \cdot E[|W(\omega)|^2]} \quad \cdots \text{式(18)}$$

【0 1 3 2】

この式(18)に示す周波数特性 $R(\omega)$ に基づく逆変換フィルタが、画像処理系のノイズを考慮し、式(14)に基づく複数のデフォーカス位置に対応する周波数領域の平均二乗誤差を最小とする最適なフィルタとなる。なお、できるだけ多くのデフォーカス位置、すなわち、できるだけ大きな N の値によって周波数特性 R を導出するのが好ましい。

【0 1 3 3】

また、上述の式(17)に示す周波数特性 $R(\omega)$ を適用した場合において、逆変換処理後の画像の各画素と、理想画像の各画素との二乗誤差についての周波数領域における積分を取ると、下記の式(19)が得られる。

【数 1 8】

$$\begin{aligned} & \int |S(\omega) - R(\omega) \cdot X_1(\omega)|^2 + |S(\omega) - R(\omega) \cdot X_2(\omega)|^2 d\omega \\ &= \int \left[|S(\omega) - R(\omega) \cdot \{H_1(\omega)S(\omega) + W(\omega)\}|^2 + |S(\omega) - R(\omega) \cdot \{H_2(\omega)S(\omega) + W(\omega)\}|^2 \right] d\omega \\ &= \int \left[|1 - R(\omega)H_1(\omega)|^2 |S(\omega)|^2 + |1 - R(\omega)H_2(\omega)|^2 |S(\omega)|^2 + 2|R(\omega)|^2 |W(\omega)|^2 \right] d\omega \end{aligned} \quad \cdots \text{式(19)}$$

【0 1 3 4】

上記の式(19)の演算においては、上述のように、ノイズの周波数特性 $W(\omega)$ と、周波数特性 $S(\omega)$ とが無相関であることを利用している。

【0 1 3 5】

上述の式(19)について、 N 個の画像、すなわち、 N 箇所のデフォーカス位置に一般化すると、下記の式(20)が得られる。

【数 1 9】

$$\begin{aligned} & \int \sum_n^N |S(\omega) - R(\omega) \cdot X_n(\omega)|^2 d\omega \\ &= \int \left[\sum_n^N \{|1 - R(\omega)H_n(\omega)|^2 |S(\omega)|^2\} + N |R(\omega)|^2 |W(\omega)|^2 \right] d\omega \end{aligned} \quad \cdots \text{式(20)}$$

【0 1 3 6】

式(20)に示す値を N で割った値である下記の式(21)で示される値を N 箇所のデフォーカス位置に一般化した場合の周波数領域における平均二乗誤差 MSE (Mean Square Error)であると定義する。

10

20

30

40

【数 20】

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \int \left[\sum_n^N \{ |1 - R(\omega) H_n(\omega)|^2 |S(\omega)|^2 \} + N |R(\omega)|^2 |W(\omega)|^2 \right] d\omega$$

…式(21)

【0137】

式(21)に示すMSEが最小となるように、光学系の周波数特性 $H(\omega)$ を設計することによって、上述の式(14)に示す周波数領域における平均二乗誤差が最小となる光学系および逆変換フィルタの組み合わせを得ることができる。また、パーセバルの定理により、実空間における平均二乗誤差が最小となる光学系および逆変換フィルタの組み合わせを得ることができる。したがって、式(18)に示す周波数特性 $R(\omega)$ に基づいて、例えば、画像処理部14の画像バッファ部141が有する逆変換フィルタ121を導出するものとすればよい。

10

【0138】

以上のように、 N 箇所のデフォーカス位置、すなわち、複数のデフォーカス位置について、式(18)に示す周波数特性 $R(\omega)$ から最適な逆変換フィルタをもとめることができる。これによって、デフォーカス位置によってスポットの形状が変わっても、同一の逆変換フィルタによって復元することができるので、より広い範囲にまで被写界深度を拡張することができる。

20

【0139】

図17は、第1の実施の形態の画像処理部のフィルタ処理部の逆変換フィルタを決定するための周波数特性を演算する流れを示すフローチャートである。図17を参照しながら、式(18)に示す周波数特性 R を具体的に演算する流れについて説明する。

【0140】

<<ステップS1>>

まず、レンズユニット11における面曲率および面間隔等、ならびに位相板11aの特性等の光学系パラメータに基づいて、レンズユニット11に対する光線追跡演算によりPSFを導出する。ここで、複数のデフォーカス位置における光学系パラメータによって光線追跡演算を行い、PSFを導出する。そして、ステップS2へ進む。

30

【0141】

<<ステップS2>>

ステップS1で導出したPSFをフーリエ変換することによって、光学系の周波数特性 H を導出する。そして、ステップS5へ進む。

【0142】

<<ステップS3>>

画像処理系(撮像素子12および画像処理部14)に加わるノイズ特性を測定する。そして、ノイズ特性をフーリエ変換することによって、ノイズの周波数特性 W を導出する。なお、ノイズ特性の測定が困難である場合は、空間周波数によらず、撮像素子12の S/N 比の値を定数としてノイズの周波数特性 W を導出するものとしてもよい。そして、ステップS5へ進む。

40

【0143】

<<ステップS4>>

撮像装置1により、自然風景またはバーコード等を様々な大きさおよび撮影条件によって撮像された画像を理想画像とする。理想画像を構成する画素の値をフーリエ変換し、空間周波数 ω についての平均値を被写体の周波数特性 S として導出する。なお、被写体の周波数特性 S は、被写体から出る光に収差を与えない光学系を通過した光に基づく撮像画像の画素の周波数特性としてもよい。また、被写体の周波数特性 S は、定数としてもよい。そして、ステップS5へ進む。

50

【0144】

<<ステップS5>>

ステップS2で導出した光学系の周波数特性H、ステップS3で導出したノイズの周波数特性W、およびステップS4で導出した被写体の周波数特性Sから、上述の式(18)を使用して、逆変換フィルタの周波数特性Rを演算する。

【0145】

<MTFの空間周波数特性>

図18は、光学系を通過した光による撮像画像の空間周波数特性を示す図である。図19は、逆変換処理が行われた画像の空間周波数特性を示す図である。図18および19を参照しながら、画像の空間周波数特性について説明する。

10

【0146】

まず、図18を参照しながら、レンズユニット11（光学系）を通過した光が撮像素子12によって撮像された画像についての空間周波数 ω に対するMTFについて説明する。図18に示される目標空間周波数特性201は、被写体の撮像画像のコントラストが完全に再現された場合のMTFの空間周波数 ω についての特性(MTF=1)を示す。

【0147】

上述したように、レンズユニット11を通過した光は、収差を与えるレンズおよび位相板11aの作用によって点像分布関数(PSF)が付加される。図18における空間周波数特性202は、レンズユニット11を通過した光に基づいて、撮像素子12によりフォーカス位置において撮像された撮像画像のMTFの空間周波数 ω についての特性を示す。図18における空間周波数特性203は、レンズユニット11を通過した光に基づいて撮像素子12によってあるデフォーカス位置において撮像された撮像画像のMTFの空間周波数 ω についての特性を示す。レンズユニット11を通過した光はPSFが付加されているので、フォーカス位置における空間周波数特性202、およびデフォーカス位置における空間周波数特性203は、図18に示すように、何れも目標空間周波数特性201よりも低い値となる。

20

【0148】

次に、図19(a)を参照しながら、図13に示すフィルタ処理部143が有する逆変換フィルタが、上述の式(12)に示す周波数特性Rによってもとめられた場合を考える。この場合において、撮像素子12によって撮像された画像がフィルタ処理部143によって逆変換処理が行われた画像についての空間周波数 ω に対するMTFについて説明する。

30

【0149】

図19(a)における空間周波数特性202aは、撮像素子12によりフォーカス位置において撮像された撮像画像について、フィルタ処理部143により逆変換処理された画像のMTFの空間周波数 ω についての特性を示す。図19(a)における空間周波数特性203aは、撮像素子12によりあるデフォーカス位置において撮像された撮像画像について、フィルタ処理部143により逆変換処理された画像のMTFの空間周波数 ω についての特性を示す。上述のように、式(12)は、1箇所のフォーカス位置において、レンズユニット11によってPSFが付加された画像を復元する逆変換フィルタの周波数特性Rを示すので、空間周波数特性202aは、MTF=1となり、目標空間周波数特性201と一致する。しかし、式(12)に示す周波数特性Rから導出された逆変換フィルタは、フォーカス位置におけるスポットとは形状の異なるデフォーカス位置には対応していないので、空間周波数特性203aのMTFは、空間周波数特性202aのMTFよりも低くなる。

40

【0150】

次に、図19(b)を参照しながら、図13に示すフィルタ処理部143が有する逆変換フィルタが、上述の式(18)に示す周波数特性Rに基づいてもとめられた場合を考える。この場合において、撮像素子12によって撮像された画像がフィルタ処理部143によって逆変換処理が行われた画像についての空間周波数 ω に対するMTFについて説明す

50

る。

【0151】

図19(b)における空間周波数特性202bは、撮像素子12によりデフォーカス位置P1において撮像された撮像画像について、フィルタ処理部143により逆変換処理された画像のMTFの空間周波数 ω についての特性を示す。図19(b)における空間周波数特性203bは、撮像素子12によりデフォーカス位置P2において撮像された撮像画像について、フィルタ処理部143により逆変換処理された画像のMTFの空間周波数 ω についての特性を示す。上述のように、式(18)は、複数のデフォーカス位置において、すなわち、レンズユニット11の光軸方向の所定の位置範囲(被写界深度)において、レンズユニット11によってPSFが付加された画像を復元する逆変換フィルタの周波数特性Rを示す。したがって、被写界深度に含まれる何れのデフォーカス位置においても、撮像素子12により撮像され、かつ、フィルタ処理部143により逆変換処理された画像の空間周波数特性におけるMTFは、目標空間周波数特性201のMTFに近接することになる。すなわち、上述の逆変換フィルタによって複数のデフォーカス位置における画像が逆変換処理された画像の周波数特性は、図19(b)に示すように、目標空間周波数特性201よりも大きい値であったり、小さい値であったりする。いずれにしても、上述の逆変換フィルタによって逆変換処理された画像の周波数特性は、図19(b)に示すように、目標空間周波数特性201に近接する。

【0152】

このように、フィルタ処理部143は、式(18)に示す周波数特性R(ω)に基づいてもとめられた逆変換フィルタによる逆変換処理によって、所定の位置範囲において、レンズユニット11によってPSFが付加された画像を復元することができる。したがって、所定の位置範囲においてスポットの形状が変わっても、同一の逆変換フィルタによって復元することができるので、より広い範囲にまで被写界深度を拡張することができる。

【0153】

<合焦領域の形成>

図20は、合焦面の各位置において被写界深度が拡張された場合に形成される合焦領域を説明する図である。図21は、撮像素子上でピントの合う領域が拡大されることを説明する図である。図20および21を参照しながら、合焦面50の各位置において被写界深度が拡張されることによって形成される合焦領域51について説明する。

【0154】

上述のように、フィルタ処理部143が、上述の式(18)に示す周波数特性R(ω)に基づく逆変換フィルタによる逆変換処理を実行することによって、図20(a)に示すように、合焦面50の各位置において、矢印の方向(レンズユニット11の光軸方向)に被写界深度が拡張する。したがって、逆変換処理をしない場合、被写体が合焦面50上に位置しないと焦点が合った状態で撮像されないのに対して、上述の逆変換処理を実行することによって、焦点が合う領域がレンズユニット11の光軸方向に拡張され、合焦領域51が形成される。すなわち、被写体がこの合焦領域51内に含まれていれば、被写体の全体に対して焦点が合った状態で撮像することが可能となる。例えば、図20(b)に示すように、様々な角度で配置された被写体4e~4gは、いずれも全体が合焦領域51に含まれているので、全体に対して焦点が合った状態で撮像されることができる。この場合、光源17から照射される光線60は、少なくとも合焦領域51内に含まれるように照射すればよい。

【0155】

また、例えば、上述の図8に示す合焦面50上の被写体4cが配置された位置(合焦面50の奥側)における合焦範囲を、撮像素子12のセンサ面において考えると、フィルタ処理部143によって逆変換処理がされない場合、図21(a)に示すように、合焦範囲は狭い。これに対して、フィルタ処理部143によって逆変換処理が実行される場合、図21(b)に示すように、撮像素子12のセンサ面において合焦面50の奥側に対応する合焦範囲は広くなる。

【0156】

以上のように、本実施の形態に係る撮像装置1は、シャインブルーフの原理に基づき、撮像素子12のセンサ面をレンズユニット11の主面に対して傾けて配置させ、合焦位置がレンズユニット11の光軸方向に延伸した合焦面50を形成させている。さらに、光源17を、照射する光線60の方向をレンズユニット11の画角の中心軸方向からずらし、光線60を合焦面50上に位置するように照射するように配置するものとしている。これによって、レンズユニット11の光軸方向の広い範囲において合焦した撮像画像を得ることができると共に、ユーザは、光源17が照射する光線60が示す位置に被写体が配置されるように、撮像装置1を移動させることによって、容易に被写体の距離に応じた適切な撮像位置とすることができ、被写体に焦点が合った撮像画像を得ることができる。なお、光源17は、光線60を厳密に合焦面50上に位置するように照射することは、必ずしも必要ではなく、少なくとも、光線60を、合焦面50と少しずれた位置、かつ合焦面50と平行となるように照射する等のように、合焦面50の近傍に照射するようにしても、上述の効果を得ることはできる。

10

【0157】

また、フィルタ処理部143が、上述の式(18)に示す周波数特性 $R(\omega)$ に基づく逆変換フィルタによる逆変換処理を実行することによって、レンズユニット11の光軸方向に延伸した合焦面50の各位置において、レンズユニット11の光軸方向に被写界深度が拡張する。これによって、焦点が合う領域がレンズユニット11の光軸方向に拡張され、合焦領域51が形成される。そして、被写体が合焦領域51内に含まれていれば、所定の大きさを有する被写体でも、被写体の全体に対して焦点が合った状態で撮像することが可能となる。また、レンズユニット11の光軸方向の広い範囲において、被写体の全体に対して合焦した撮像画像を得ることができる。

20

【0158】

なお、本実施の形態に係る撮像装置1は、光源17を備えるものとし、ユーザは、光源17が照射する光線60が示す位置に被写体が配置されるように、撮像装置1を移動させることによって、容易に被写体の焦点が合った撮像画像を得ることができるものとしている。しかし、例えば、撮像装置1が生産ライン等において固定して使用される場合、被写体(例えば、生産ラインを流れるワークに貼付された二次元コード等)が、通常、合焦面50または合焦領域51を必ず通過するように撮像装置1は固定される。この場合は、必ずしも光源17は必要がなく、被写体が合焦領域51内に含まれていれば、所定の大きさを有する被写体でも、被写体の全体に対して焦点が合った状態で撮像することができるといふ効果は得られる。

30

【0159】

また、上述のように、シャインブルーフの原理を用いて、合焦位置がレンズユニット11の光軸方向に延伸した合焦面50を形成させ、レンズユニット11が有する被写界深度の制限による狭い合焦範囲において撮像可能な小さな被写体を扱う場合は、必ずしも、フィルタ処理部143の逆変換処理による被写界深度の拡張は必要がない。この場合においても、光源17を備えた撮像装置1は、レンズユニット11の光軸方向の広い範囲において合焦した撮像画像を得ることができると共に、ユーザは光源17が照射する光線60が示す位置に被写体が配置されるように、撮像装置1を移動させることによって、容易に被写体の距離に応じた適切な撮像位置とすることができ、被写体の焦点が合った撮像画像を得ることができるという効果が得られる。

40

【0160】

また、被写界深度拡張のために、上述の式(18)に示す周波数特性 $R(\omega)$ に基づく逆変換フィルタによる逆変換処理を例に挙げたが、被写界深度拡張の方法はこれに限定されるものではない。すなわち、異なる逆変換フィルタによる逆変換処理、または、異なるその他の処理によって被写界深度の拡張が実現されるものとしてもよい。

【0161】

<第1の実施の形態の変形例>

50

本実施の形態の変形例に係る撮像装置について、上述の本実施の形態に係る撮像装置 1 と相違する点を中心に説明する。

【0162】

図 22 は、第 1 の実施の形態の変形例に係る撮像装置における光学系周辺の要部構成の一例を示す図である。図 22 を参照しながら、本実施の形態の変形例に係る撮像装置の光学系周辺の要部構成について説明する。

【0163】

本変形例に係る撮像装置は、第 1 の実施の形態に係る撮像装置 1 におけるレンズユニット 11 を、多焦点レンズ 11c (光学系) に置換した構成を有する。このような多焦点レンズ 11c を用いることによって、図 22 に示すように、第 1 の実施の形態における合焦面 50 と同様に、合焦位置が光軸方向に延伸した合焦面 50a を形成することができる。また、多焦点レンズ 11c を用いることによって、撮像素子 12a は、センサ面が多焦点レンズ 11c の主面に対して傾けて配置する必要がなく、撮像素子 12a のセンサ面と、多焦点レンズ 11c の主面とは平行の状態となっている。なお、平行の状態とは、厳密に平行である状態に限定するものではなく、略平行である状態を含むものとする。このような本変形例に係る撮像装置の構成を採用することによって、図 22 に示す合焦面 50a 上に存在する 3 つの被写体 4a ~ 4c は、いずれも撮像素子 12a 上で結像する。すなわち、合焦面 50a は、多焦点レンズ 11c の光学特性、および多焦点レンズ 11c と撮像素子 12a のセンサ面 (結像面) との位置関係に基づいて、形成される。そして、光源 17 は、照射する光線 60 の方向を多焦点レンズ 11c の画角の中心軸方向からずらし、光線 60 を合焦面 50a 上に位置するように照射する。

【0164】

以上のように、撮像装置の光学系として多焦点レンズ 11c を用いることにより、合焦位置が光軸方向に延伸した合焦面 50a を形成できると共に、撮像素子 12a のセンサ面を多焦点レンズ 11c の主面に対して傾けて配置する必要のない構成とすることができる。したがって、撮像装置の全体のサイズをコンパクトにすることが可能となる。

【0165】

(第 2 の実施の形態)

第 2 の実施の形態に係る撮像装置について、第 1 の実施の形態に係る撮像装置と相違する点を中心に説明する。第 1 の実施の形態においては、被写界深度拡張のためのフィルタ処理部 143 における逆変換処理として、所定の位置範囲 (複数のデフォーカス位置) においてスポットの形状が変わっても、同一の逆変換フィルタによって復元することができる処理について説明した。本実施の形態においては、ノイズを抑制しながら、光学的な収差であるぼけを復元する逆変換処理により被写界深度拡張を実現する動作について説明する。本実施の形態において、撮像システムの全体構成、撮像システムの構成、レンズユニット 11 周辺の要部構成、および画像バッファ部 141 の構成については、第 1 の実施の形態における図 1 ~ 3、8 および 11 に示す構成と同様である。

【0166】

<局所的な逆変換フィルタの周波数特性 R' について>

図 23 は、撮像画像における各エリアによってパワースペクトルが異なることを説明する図である。図 24 は、撮像画像全体のパワースペクトルと最適フィルタとを説明する図である。図 25 は、撮像画像の平坦部のエリアのパワースペクトルと最適フィルタとを説明する図である。図 26 は、撮像画像のテクスチャ部のエリアのパワースペクトルと最適フィルタとを説明する図である。図 23 ~ 26 を参照しながら、局所的な逆変換フィルタの周波数特性 $R'(\omega)$ について説明する。

【0167】

第 1 の実施の形態の逆変換フィルタの周波数特性 $R(\omega)$ をもとめる式 (12) における周波数特性 $S(\omega)$ は、既知であるものとし、すなわち、理想画像全体の周波数特性であるといえるものである。しかし、図 23 に示すように、実際の撮像素子 12 によって実

際に撮像された画像である撮像画像102は、テクスチャ部102a、およびテクスチャ部102aとは異なる平坦部を有するものである。第1の実施の形態においては、図24(a)に示す既知である理想画像全体の周波数特性 $S(\omega)$ に基づいて、上述の式(21)に示すMSEが最小となるような図24(b)に示す逆変換フィルタの周波数特性 $R(\omega)$ を用いて逆変換処理を実行する動作を説明した。この周波数特性 $R(\omega)$ に基づいてフィルタ処理を実行すると、撮像画像102全体では、確かに上述の式(21)に示すMSEを最小にすることができる。しかし、例えば、撮像画像102における平坦部であるエリア103においては、スペクトルがない部分の空間周波数 ω の領域まで増幅されてしまい、不要なノイズが増加する。

【0168】

ここで、図25(a)に示すように、理想画像においてエリア103に相当する局所的なエリアの周波数特性を $S'(\omega)$ とする。そして、周波数特性 $S'(\omega)$ のスペクトルが存在する空間周波数 ω の領域(低周波数領域)のみを増幅し、エリア103において最小のMSEを与えるような局所的な逆変換フィルタの周波数特性 $R'(\omega)$ を考えることができる(図25(b)参照)。

【0169】

また、テクスチャ部102aを含むエリア104においては、図26(a)に示すように、理想画像においてエリア104に相当する局所的なエリアの周波数特性 $S'(\omega)$ は、空間周波数 ω の高周波領域までスペクトルが存在する。したがって、エリア104の周波数特性 $S'(\omega)$ については、高周波領域まで増幅し、エリア104において最小のMSEを与えるような局所的な逆変換フィルタの周波数特性 $R'(\omega)$ を考えることができる(図26(b)参照)。

【0170】

このように、画像の逆変換処理として、局所的に逆変換フィルタをかける周波数特性 $R'(\omega)$ を導出することによって、ノイズの増幅を抑制し、画像のテクスチャの再現性を向上することができる。以下に、局所的な逆変換フィルタの周波数特性 $R'(\omega)$ 、および、周波数特性 $R'(\omega)$ による逆変換処理の演算を簡略化するために導出する周波数特性 $K(\omega)$ について説明する。

【0171】

まず、上述の式(12)に示す周波数特性 $R(\omega)$ をもとめる式の中の周波数特性 $S(\omega)$ を、理想画像の局所的なエリアの周波数特性 $S'(\omega)$ に置き換えると、下記の式(22)で示される局所的なエリアの最小のMSEを与える周波数特性 $R'(\omega)$ が得られる。

【数21】

$$R'(\omega) = \frac{H(\omega)^* \cdot E[|S'(\omega)|^2]}{|H(\omega)|^2 \cdot E[|S'(\omega)|^2] + E[|W(\omega)|^2]} \quad \cdots \text{式(22)}$$

【0172】

この周波数特性 $R'(\omega)$ を、撮像画像ごと、かつ、撮像画像の局所的なエリアごと(画素ごと)にもとめることによって、局所的なエリアの最小のMSEが得られ、かつ、撮像画像全体に共通の周波数特性 $R(\omega)$ に基づく逆変換フィルタによる逆変換処理を実行するよりもノイズの増加を抑制することができる。なお、周波数特性 $R'(\omega)$ をもとめる局所的なエリアは、画素ごとに限らず、撮像画像の所定の画素群(所定部分)ごとであってもよい。

【0173】

ここで、式(22)の中の周波数特性 $S'(\omega)$ は、撮像画像から直接得ることができないので、上述の式(9)を使用して、理想画像の局所的なパワースペクトルの平均値 $E[|S'(\omega)|^2]$ を下記の式(23)のように定義する。

【数 2 2】

$$E[|S'(\omega)|^2] = E\left[\left|\frac{X'(\omega) - W(\omega)}{H(\omega)}\right|^2\right] \approx E\left[\left|\frac{X'(\omega)}{H(\omega)}\right|^2\right] \quad \cdots \text{式(23)}$$

【0174】

ここで、 $X'(\omega)$ は、撮像画像の局所的なエリア（画素）の周波数特性であり、式（23）は、 $X'(\omega) \gg W(\omega)$ の関係から近似をとっている。すなわち、撮像画像のノイズ成分は、画素よりも十分小さいと仮定している。また、ここで、平均値 $E[|S'(\omega)|^2]$ は、より正確には、周波数特性 $S(\omega)$ に対して周波数特性 $X(\omega)$ についての最小の MSE を与える逆変換フィルタの周波数特性 $R(\omega)$ を用いた場合、下記の式（24）によって表される。

【数 2 3】

$$E[|S'(\omega)|^2] \approx E[|R(\omega)X'(\omega)|^2] \quad \cdots \text{式(24)}$$

【0175】

次に、ノイズのモデルを下記のように考える。撮像画像のノイズは、画素によらず定常的な振幅を持つノイズと、その画素に比例する振幅を持つノイズとを有することを考慮し、下記の式（25）のように定義する。

【数 2 4】

$$E[|w(n)|^2] = E[|kx(n)|^2 + |c|^2] = E[k^2|x(n)|^2 + |c|^2] \quad \cdots \text{式(25)}$$

【0176】

ここで、 k は、撮像画像の画素に比例する振幅を持つノイズの比例定数であり、 c は、撮像画像の各画素に依存しない定常的な振幅を持つノイズ成分である。パーセバルの定理により、式（25）を周波数領域に変換すると、下記の式（26）となる。

【数 2 5】

$$E[|W(\omega)|^2] = E[k^2|X(\omega)|^2 + |c|^2] \quad \cdots \text{式(26)}$$

【0177】

上述の式（24）および（26）を、式（22）に代入すると、下記の式（27）が得られる。

【数 2 6】

$$R'(\omega) = \frac{H(\omega)^* \cdot E[|R(\omega)X'(\omega)|^2]}{|H(\omega)|^2 \cdot E[|R(\omega)X'(\omega)|^2] + E[k^2|X(\omega)|^2 + |c|^2]} \quad \cdots \text{式(27)}$$

【0178】

k と c とは、グレースケールチャートの撮像画像の解析によって得ることができ、その値を用いることによって、最小の MSE を与える局所的な逆変換フィルタの周波数特性 $R'(\omega)$ が得られる。

【0179】

実際の回路実装においては、上述の局所的な逆変換フィルタの周波数特性 $R'(\omega)$ を画素ごとに直接演算することで実現は可能であるが、局所的な逆変換フィルタをもとめるのは演算負荷が大きいので、以下の方法を用いて、演算負荷を低減することができる。なお、以下においては、式（25）に示す撮像画像の画素に比例する振幅を持つノイズである $k^2|x(n)|^2$ の成分は省略するが、導出する式のノイズのパワースペクトル $|W$

$|H(\omega)|^2$ に、この項を追加することによって、その効果を得ることができる。

【0180】

まず、式(22)を下記の式(28)のように変形する。

【数27】

$$R'(\omega) = \frac{H(\omega)^*}{|H(\omega)|^2 + E\left[\frac{|W(\omega)|^2}{|S'(\omega)|^2}\right]} \quad \cdots \text{式(28)}$$

10

【0181】

ここで、局所的な逆変換フィルタの周波数特性 $R'(\omega)$ と、逆変換フィルタの周波数特性 $R(\omega)$ との比を $K(\omega)$ とすると、 $K(\omega)$ は下記の式(29)で表される。

【数28】

$$K(\omega) = \frac{R'(\omega)}{R(\omega)} = \frac{\frac{|H(\omega)|^2}{E[|W(\omega)|^2]} + E\left[\frac{1}{|S(\omega)|^2}\right]}{\frac{|H(\omega)|^2}{E[|W(\omega)|^2]} + E\left[\frac{1}{|S'(\omega)|^2}\right]} \quad \cdots \text{式(29)}$$

20

【0182】

そして、予めもとめておいた周波数特性 $R(\omega)$ と、式(29)に示す $K(\omega)$ とによって、局所的な逆変換フィルタの周波数特性 $R'(\omega)$ をもとめることを考えると、周波数特性 $R'(\omega)$ は、下記の式(30)によってもとめることができる。

【数29】

$$R'(\omega) = K(\omega)R(\omega) \quad \cdots \text{式(30)}$$

【0183】

30

すなわち、予めもとめておいた周波数特性 $R(\omega)$ に基づく逆変換フィルタと直列に、 $K(\omega)$ という特性に基づくフィルタ（以下、補正フィルタと称する）を作用させることによって、周波数特性 $R'(\omega)$ に基づく局所的な逆変換フィルタと同等なフィルタ処理を行うことが可能となる。

【0184】

ここで、式を簡略化するため、以下の式(31)に示すように $A(\omega)$ を定義する。

【数30】

$$A(\omega) = \frac{|H(\omega)|^2}{E[|W(\omega)|^2]} \quad \cdots \text{式(31)}$$

40

【0185】

この式(31)を上述の式(29)に代入すると、補正フィルタの周波数特性 $K(\omega)$ は、下記の式(32)によってもとめることができる。

【数 3 1】

$$K(\omega) = \frac{R'(\omega)}{R(\omega)} = \frac{A(\omega) + E\left[\frac{1}{|S(\omega)|^2}\right]}{A(\omega) + E\left[\frac{1}{|S'(\omega)|^2}\right]} \quad \cdots \text{式(32)}$$

【0 1 8 6】

なお、ノイズが大きいものと仮定し、 $A(\omega) \ll E[1/|S'(\omega)|^2]$ かつ $A(\omega) \ll E[1/|S(\omega)|^2]$ であるとする、式(32)は、下記の式(33)のように簡略化されて表される。

【数 3 2】

$$K(\omega) = \frac{R'(\omega)}{R(\omega)} = \frac{E\left[\frac{1}{|S(\omega)|^2}\right]}{E\left[\frac{1}{|S'(\omega)|^2}\right]} = \frac{E[|S'(\omega)|^2]}{E[|S(\omega)|^2]} \quad \cdots \text{式(33)}$$

20

【0 1 8 7】

さらに、被写体の典型的なスペクトルを一様分布とし、 $E[|S(\omega)|^2] = 1$ とすると、式(33)は、下記の式(34)のようにさらに簡略化されて表される。

【数 3 3】

$$K(\omega) = \frac{R'(\omega)}{R(\omega)} = E[|S'(\omega)|^2] \quad \cdots \text{式(34)}$$

【0 1 8 8】

なお、実用上は、 $A(\omega) \ll E[1/|S'(\omega)|^2]$ かつ $A(\omega) \ll E[1/|S(\omega)|^2]$ が成立しない場合を考慮して、以下の式(35)に示すように比例係数 t を導入して周波数特性 $K(\omega)$ を表すこともできる。

【数 3 4】

$$K(\omega) = \frac{R'(\omega)}{R(\omega)} = t \cdot E[|S'(\omega)|^2] \quad \cdots \text{式(35)}$$

【0 1 8 9】

また、補正フィルタの周波数特性 $K(\omega)$ を演算するための式(32)～(35)における理想画像の局所的なパワースペクトルの平均値 $E[|S'(\omega)|^2]$ は、上述に示した式(24)によってもとめることができる。

【0 1 9 0】

40

以上のように、局所的な逆変換フィルタの周波数特性 $R'(\omega)$ は、予めもとめておいた逆変換フィルタの周波数特性 $R(\omega)$ と、式(32)～(35)によって算出される補正フィルタの周波数特性 $K(\omega)$ とを乗算することによってもとめることができるので、演算負荷を低減することができる。

【0 1 9 1】

<フィルタ処理部の構成および動作>

図27は、第2の実施の形態の画像処理部のフィルタ処理部の構成の一例と動作を説明する図である。図27を参照しながら、画像処理部14のフィルタ処理部143aの構成をおよび動作について説明する。

【0 1 9 2】

50

フィルタ処理部 143a (逆変換処理手段) は、図 27 に示すように、FT (Fourier Transform) 部 1431_1 と、乗算器 1432_1 ~ 1432_50 と、K 演算部 1433_1 と、乗算器 1434_1 ~ 1434_50 と、IFT (Inverse Fourier Transform) 部 1435_1 と、備えている。

【0193】

FT 部 1431_1 は、例えば、 5×5 の画素を入力して、フーリエ変換を実行し、周波数領域に変換する。その結果、FT 部 1431_1 は、 5×5 の画素すなわち 25 個のデータから、25 個の複素数に変換して、25 個の実部データおよび 25 個の虚部データ (まとめてデータ $X'1 \sim X'50$ と表すものとする) を出力する。

【0194】

乗算器 1432_1 ~ 1432_50 は、入力される 2 つのデータを乗算して出力する。乗算器 1434_1 ~ 1434_50 についても同様である。

【0195】

K 演算部 1433_1 は、上述の式 (24)、および式 (32) ~ (35) のいずれかに基づいて、入力される周波数特性 $R(\omega)$ と $X'(\omega)$ との乗算値から補正フィルタの周波数特性 $K(\omega)$ を出力する。なお、K 演算部 1433_1 は、周波数特性 $K(\omega)$ の値と、周波数特性 $R(\omega)$ と $X'(\omega)$ との乗算値、すなわち、周波数特性 $S'(\omega)$ とが関連付けられたルックアップテーブルを参照して、周波数特性 $K(\omega)$ をもとめるものとしてもよい。

【0196】

IFT 部 1435_1 は、乗算器 1434_1 ~ 1434_50 から出力される乗算値 (周波数領域の値) から実空間の値に変換する逆フーリエ変換を実行して、 1×1 の画素を出力する。この IFT 部 1435_1 から出力される画素が、撮像画像の 5×5 の画素に対して、周波数特性 $R'(\omega)$ に基づく逆変換フィルタによって逆変換処理が実行された画素となる。

【0197】

次に、フィルタ処理部 143a の動作の一連の流れについて説明する。まず、撮像素子 12 によって撮像された撮像画像は、上述のように画像バッファ部 141 によってバッファリングされ、画像バッファ部 141 から 5 つの画素が出力される。したがって、フィルタ処理部 143a の FT 部 1431_1 は、画像バッファ部 141 から 5×5 の画素を単位として入力するものとする。FT 部 1431_1 は、入力した 5×5 の画素に基づいてフーリエ変換を実行して周波数領域に変換し、25 個の複素数に変換して、25 個の実部データおよび 25 個の虚部データであるデータ $X'1 \sim X'50$ を出力する。

【0198】

次に、乗算器 1432_1 は、FT 部 1431_1 から出力されたデータ $X'1$ 、および逆変換フィルタの周波数特性 $R(\omega)$ から導出され、データ $X'1$ に対応するフィルタ係数 $R1$ を入力する。乗算器 1432_1 は、データ $X'1$ とフィルタ係数 $R1$ とを乗算して、乗算値 $R1 \cdot X'1$ を出力する。同様に、乗算器 1432_2 ~ 1432_50 は、それぞれ、FT 部 1431_1 から出力されたデータ $X'2 \sim X'50$ 、およびフィルタ係数 $R2 \sim R50$ を入力し、それらの乗算値 $R2 \cdot X'2 \sim R50 \cdot X'50$ を出力する。

【0199】

次に、K 演算部 1433_1 は、上述の式 (24)、および式 (32) ~ (35) のいずれかに基づいて、入力した乗算値 $R1 \cdot X'1 \sim R50 \cdot X'50$ から、それぞれ周波数特性 $K(\omega)$ に基づく補正フィルタの係数であるフィルタ係数 $K1 \sim K50$ を演算する。

【0200】

次に、乗算器 1434_1 は、乗算器 1432_1 から出力された乗算値 $R1 \cdot X'1$ と、K 演算部 1433_1 から出力されたフィルタ係数 $K1$ とを乗算して、データ $R1 \cdot K1 \cdot X'1$ を出力する。同様に、乗算器 1434_2 ~ 1434_50 は、それぞれ乗

10

20

30

40

50

算器 1 4 3 2 __ 2 ~ 1 4 3 2 __ 5 0 から出力された乗算値 $R_2 \cdot X'_2 \sim R_{50} \cdot X'_{50}$ と、K 演算部 1 4 3 3 __ 1 から出力されたフィルタ係数 $K_2 \sim K_{50}$ とを乗算して、それぞれデータ $R_2 \cdot K_2 \cdot X'_2 \sim R_{50} \cdot K_{50} \cdot X'_{50}$ を出力する。

【0201】

そして、I F T 部 1 4 3 5 __ 1 は、乗算器 1 4 3 4 __ 1 ~ 1 4 3 4 __ 5 0 からそれぞれ出力されたデータ $R_1 \cdot K_1 \cdot X'_1 \sim R_{50} \cdot K_{50} \cdot X'_{50}$ に基づいて、実空間の値に変換する逆フーリエ変換を実行し、 1×1 の画素を出力する。上述のように、I F T 部 1 4 3 5 __ 1 から出力される画素が、撮像画像の 5×5 の部分画像の画素に対して、その 5×5 の画素のうち中央の画素に対応した周波数特性 $R'(\omega)$ に基づく逆変換フィルタによって逆変換処理が実行された画素となる。

10

【0202】

以上のように、フィルタ処理部 1 4 3 a が、上述のように、局所的な逆変換フィルタの周波数特性 $R'(\omega)$ に基づく逆変換フィルタにより逆変換処理を実行することによっても、レンズユニット 1 1 の光軸方向に延伸した合焦面 5 0 の各位置において、レンズユニット 1 1 の光軸方向に被写界深度を拡張させる。これによって、焦点が合う領域がレンズユニット 1 1 の光軸方向に拡張され、合焦領域 5 1 (図 2 0 参照) が形成される。そして、被写体が合焦領域 5 1 内に含まれていれば、所定の大きさを有する被写体でも、被写体の全体に対して焦点が合った状態で撮像することが可能となる。また、レンズユニット 1 1 の光軸方向の広い範囲において、被写体の全体に対して合焦した撮像画像を得ることができる。

20

【0203】

また、撮像素子 1 2 によって撮像された撮像画像ごと、かつ、撮像画像の局所的なエリアごと (画素ごと) に、逆変換フィルタの周波数特性 $R'(\omega)$ をもとめるものとしている。この周波数特性 $R'(\omega)$ に基づく逆変換フィルタによって局所的なエリアごと (画素ごと) に逆変換処理を実行することによって、局所的なエリアについて最小の M S E (平均二乗誤差) が得られると共に、撮像画像全体に共通の周波数特性 $R(\omega)$ に基づく逆変換フィルタによる逆変換処理を実行するよりもノイズの増加を抑制することができる。

【0204】

また、局所的な逆変換フィルタの周波数特性 $R'(\omega)$ を、上述の式 (3 0) に示すように $K(\omega) \cdot R(\omega)$ と定義し、周波数特性 $R(\omega)$ に基づく逆変換フィルタの処理と、周波数特性 $K(\omega)$ に基づく補正フィルタの処理とを分けてフィルタ回路を構成するものとしている。さらに、周波数特性 $K(\omega)$ の導出する回路は、上述の式 (3 2) ~ (3 5) に示す計算式に基づいて構成するものとしている。これによって、周波数特性 $R'(\omega)$ を画素ごとに直接導出する場合と比較して、演算負荷を低減することができ、実装するフィルタ回路を簡略化することができる。

30

【0205】

なお、図 1 1 および 2 7 で説明したように、画像バッファ部 1 4 1 は、5 つの画素を出力して、フィルタ処理部 1 4 3 a は、 5×5 の画素を入力してタップ数が 5×5 である逆変換処理を実行するものとしたが、これに限定されるものではない。すなわち、逆変換処理のタップ数は 3×3 、 11×11 または 21×21 等異なるタップ数としてもよい。この場合、フィルタによる逆変換処理の対象となるフィルタ処理部 1 4 3 a に入力する画素群において、中央の画素が存在するように、フィルタのタップ数は奇数である必要がある。

40

【0206】

< 第 2 の実施の形態の変形例 >

本実施の形態の変形例に係る撮像装置について、上述の本実施の形態に係る撮像装置の構成および動作と相違する点を中心に説明する。本変形例においては、図 2 7 に示す画像処理部 1 4 のフィルタ処理部 1 4 3 a は、後述する図 2 8 に示すフィルタ処理部 1 4 3 b に置き換えられている。

【0207】

50

図 28 は、第 2 の実施の形態の変形例の画像処理部のフィルタ処理部の構成の一例と動作を説明する図である。図 28 および図 14～16 を参照しながら、画像処理部 14 のフィルタ処理部 143b の構成および動作について説明する。

【0208】

フィルタ処理部 143b (逆変換処理手段) は、図 28 に示すように、逆フィルタ処理部 1436__1 と、DCT (Discrete Cosine Transform: 離散コサイン変換) 部 1431a__1 と、K 演算部 1433a__1 と、ビットダウン部 1437__1～1437__9 と、乗算器 1434a__1～1434a__9 と、IDCT (Inverse Discrete Cosine Transform: 逆離散コサイン変換) 部 1435a__1 と、を備えている。

10

【0209】

逆フィルタ処理部 1436__1 は、例えば、 5×5 の画素を入力して、上述の式 (12) によって導出される周波数特性 $R(\omega)$ に基づく逆変換フィルタによって逆変換処理を実行する。

【0210】

DCT 部 1431a__1 は、逆フィルタ処理部 1436__1 によって逆変換処理された画像において、例えば、 3×3 の画素を入力し、離散コサイン変換を実行し、周波数領域に変換する。その結果、DCT 部 1431a__1 は、 3×3 の画素すなわち 9 個のデータから、9 個の周波数領域の値に変換して出力する。ここで、DCT 部 1431a__1 に入力される 3×3 の画素は、逆フィルタ処理部 1436__1 により周波数特性 $R(\omega)$ に基づく逆変換フィルタによって逆変換処理されている画素なので、DCT 部 1431a__1 が出力する 9 個の周波数領域の値を、本変形例において、それぞれ乗算値 $R1 \cdot X'1 \sim R9 \cdot X'9$ と表すものとする。

20

【0211】

K 演算部 1433a__1 は、上述の式 (24)、および式 (32)～(35) のいずれかに基づいて、入力される周波数特性 $R(\omega)$ と $X'(\omega)$ との乗算値から補正フィルタの周波数特性 $K(\omega)$ を出力する。具体的には、K 演算部 1433a__1 は、上述の式 (24)、および式 (32)～(35) のいずれかに基づいて、入力した乗算値 $R1 \cdot X'1 \sim R9 \cdot X'9$ から、それぞれ周波数特性 $K(\omega)$ に基づく補正フィルタの係数であるフィルタ係数 $K1 \sim K9$ を演算する。なお、K 演算部 1433a__1 は、周波数特性 $K(\omega)$ の値と、周波数特性 $R(\omega)$ および $X'(\omega)$ の値とが関連付けられたルックアップテーブルを参照して、周波数特性 $K(\omega)$ をもとめるものとしてもよい。

30

【0212】

ビットダウン部 1437__1～1437__9 は、K 演算部 1433a__1 から出力されるフィルタ係数 $K1 \sim K9$ に対して、それぞれ量子化ビット数を減少させる。これは、フィルタ係数 $K1 \sim K9$ は、量子化ビット数を減少させて、補正フィルタによるフィルタ処理を実行しても、画像の劣化にはほとんど影響がないためである。したがって、ビットダウン部 1437__1～1437__9 によりフィルタ係数 $K1 \sim K9$ の量子化ビット数を減少させることによって、後段の乗算器 1434a__1～1434a__9 による演算負荷を低減することができる。

40

【0213】

乗算器 1434a__1～1434a__9 は、入力される 2 つのデータを乗算して出力する。

【0214】

IDCT 部 1435a__1 は、乗算器 1434a__1～1434a__9 から出力される乗算値 (周波数領域の値) から実空間の値に変換する逆離散コサイン変換を実行して、 1×1 の画素を出力する。この IDCT 部 1435a__1 から出力される画素が、撮像画像の 5×5 の画素に対して、周波数特性 $R'(\omega)$ に基づく逆変換フィルタによって逆変換処理が実行された画素となる。

【0215】

50

次に、フィルタ処理部 143b の動作の一連の流れについて説明する。まず、撮像素子 12 によって撮像された撮像画像は、上述のように画像バッファ部 141 によってバッファリングされ、画像バッファ部 141 から 5 つの画素が出力される。したがって、フィルタ処理部 143b の逆フィルタ処理部 1436__1 は、画像バッファ部 141 から 5×5 の画素を単位として入力するものとする。この逆フィルタ処理部 1436__1 における周波数特性 $R(\omega)$ に基づく逆変換フィルタによる逆変換処理の動作の詳細を、図 14~16 を参照しながら説明する。

【0216】

逆変換処理に使用されるフィルタは、図 14 に示すように、フィルタ係数 $a_{11} \sim a_{15}$ 、 $a_{21} \sim a_{25}$ 、 $a_{31} \sim a_{35}$ 、 $a_{41} \sim a_{45}$ および $a_{51} \sim a_{55}$ によって構成されるタップ数が 5×5 の線形フィルタである逆変換フィルタ 121 であるとする。また、逆変換フィルタ 121 による逆変換処理の対象となる画像の部分、図 15 に示す対象部分画像 131 であるものとする。対象部分画像 131 は、画素 $A_{11} \sim A_{15}$ 、 $A_{21} \sim A_{25}$ 、 $A_{31} \sim A_{35}$ 、 $A_{41} \sim A_{45}$ および $A_{51} \sim A_{55}$ によって構成された 5×5 の部分画像である。

【0217】

逆変換フィルタによる逆変換処理は、図 15 に示すように、対象部分画像 131 に対して逆変換フィルタ 121 によってコンボリューション演算した値、すなわち、式 (1) で表される演算値となる。コンボリューション演算の演算値は、対象部分画像 131 の中央に位置する画素である中央データに対して逆変換処理を実行した値となる。すなわち、コンボリューションの演算値は、逆変換処理後の画像において、逆変換処理前の画像の中央データに相当する位置の画素となる。

【0218】

次に、逆フィルタ処理部 1436__1 の逆変換処理について、図 16 を参照しながら、画像 105 において X 方向の水平ラインを走査しながら逆変換処理をする動作の概略を説明する。図 16 (a) は、逆フィルタ処理部 1436__1 が、画像 105 における (1, 1) の画素に対して逆変換フィルタ 121 によって逆変換処理をする状態を示している。図 16 (a) に示すように、(1, 1) の画素を中央データ 135a としてコンボリューション演算するためには、(1, 1) の画素を中央データとする対象部分画像 131a と、画像 105 とが重複している部分の画素が必要になる。すなわち、対象部分画像 131a のうち、図 15 に示す対象部分画像 131 の画素 $A_{33} \sim A_{35}$ 、 $A_{43} \sim A_{45}$ および $A_{53} \sim A_{55}$ に相当する画素が必要である。

【0219】

そのためには、画素 $A_{33} \sim A_{35}$ 、 $A_{43} \sim A_{45}$ および $A_{53} \sim A_{55}$ に相当する画素が、画像バッファ部 141 の出力部 1413a~1413c から出力されている必要がある。そして、対象部分画像 131a において、画像 105 と重複していない部分の画素は「0」として取り扱うものとする。

【0220】

以上の状態において、逆フィルタ処理部 1436__1 は、図 15 に示したコンボリューション演算と同様に、対象部分画像 131a に対して逆変換フィルタ 121 によってコンボリューション演算を行う。逆フィルタ処理部 1436__1 は、画像 105 の対象部分画像 131a の中央データ 135a である (1, 1) の画素に対してコンボリューション演算した値を、逆変換処理後の画像の (1, 1) の画素として出力する。

【0221】

次に、逆フィルタ処理部 1436__1 は、図 16 (b) に示すように、コンボリューション演算の対象となる画素を X 方向にひとつシフトし、対象部分画像 131b の中央データ 135b である (2, 1) の画素に対して逆変換処理をする。そして、逆フィルタ処理部 1436__1 は、X 方向の水平ラインをシフトしながらコンボリューション演算を繰り返し、図 16 (c) に示すように、X 方向の水平ラインの最後の画素である (640, 1) の画素に対して逆変換処理をする。(640, 1) の画素は、図 16 (c) に示すよう

に、対象部分画像 1 3 1 c の中央データ 1 3 5 c である。

【0 2 2 2】

以上のように、逆フィルタ処理部 1 4 3 6 __ 1 は、X 方向の水平ラインをシフトしながらコンボリューション演算を繰り返し、水平ラインの最後の画素に対する逆変換処理が終了すると、Y 方向の次の水平ラインに対して同様に逆変換処理を行う。

【0 2 2 3】

図 1 6 (d) ~ 1 6 (f) は、逆フィルタ処理部 1 4 3 6 __ 1 が、画像 1 0 5 における Y 方向の 4 番目の水平ラインの画素に対して逆変換処理を行う状態を示している。図 1 6 (d) は、逆フィルタ処理部 1 4 3 6 __ 1 が、画像 1 0 5 における (1, 4) の画素に対して逆変換フィルタ 1 2 1 によって逆変換処理をする状態を示している。図 1 6 (d) に示すように、(1, 4) の画素を中央データ 1 3 5 d としてコンボリューション演算するためには、(1, 4) の画素を中央データとする対象部分画像 1 3 1 d と、画像 1 0 5 とが重複している部分の画素が必要になる。そして、対象部分画像 1 3 1 d において、画像 1 0 5 と重複していない部分の画素は、上述と同様に「0」として取り扱うものとする。

【0 2 2 4】

図 1 6 (e) は、逆フィルタ処理部 1 4 3 6 __ 1 が、画像 1 0 5 における (5, 4) の画素に対して逆変換フィルタ 1 2 1 によって逆変換処理をする状態を示している。図 1 6 (e) に示すように、(5, 4) の画素を中央データ 1 3 5 e とする対象部分画像 1 3 1 e は全体が画像 1 0 5 と重複しているので、逆フィルタ処理部 1 4 3 6 __ 1 は、対象部分画像 1 3 1 e に含まれる画素をすべて利用した逆変換処理が可能となる。

【0 2 2 5】

そして、逆フィルタ処理部 1 4 3 6 __ 1 は、X 方向の水平ラインをシフトしながらコンボリューション演算を繰り返し、図 1 6 (f) に示すように、X 方向の水平ラインの最後の画素である (6 4 0, 4) の画素に対して逆変換処理をする。(6 4 0, 4) の画素は、図 1 6 (f) に示すように、対象部分画像 1 3 1 f の中央データ 1 3 5 f である。

【0 2 2 6】

次に、DCT 部 1 4 3 1 a __ 1 は、上述のように逆フィルタ処理部 1 4 3 6 __ 1 によって逆変換処理された画像に対して、例えば、 3×3 の画素を入力し、離散コサイン変換を実行して周波数領域に変換し、9 個の周波数領域の値である乗算値 $R1 \cdot X'1 \sim R9 \cdot X'9$ を出力する。このように、DCT 部 1 4 3 1 a __ 1 による周波数領域への変換は、第 2 の実施の形態における図 2 7 に示す FT 部 1 4 3 1 __ 1 による周波数領域への変換後に出力するデータ数が入力データ数の 2 倍の数になるのに対し、出力するデータ数が入力データ数と同一となる。したがって、DCT 部 1 4 3 1 a __ 1 の後段の回路を簡略化することができる。もちろん、DCT 部 1 4 3 1 a __ 1 および IDCT 部 1 4 3 5 a __ 1 ではなく、代わりに第 2 の実施の形態で示したものと同じくそれぞれ FT 部および IFT 部を用いてもよい。

【0 2 2 7】

次に、K 演算部 1 4 3 3 a __ 1 は、上述の式 (2 4)、および式 (3 2) ~ (3 5) のいずれかに基づいて、入力した乗算値 $R1 \cdot X'1 \sim R9 \cdot X'9$ から、それぞれ周波数特性 $K(\omega)$ に基づく補正フィルタの係数であるフィルタ係数 $K1 \sim K9$ を演算する。

【0 2 2 8】

次に、ビットダウン部 1 4 3 7 __ 1 ~ 1 4 3 7 __ 9 は、K 演算部 1 4 3 3 a __ 1 から出力されるフィルタ係数 $K1 \sim K9$ に対して、それぞれ量子化ビット数を減少させ、量子化ビット数が減少したフィルタ係数 $K1 \sim K9$ をそれぞれ出力する。

【0 2 2 9】

次に、乗算器 1 4 3 4 a __ 1 ~ 1 4 3 4 a __ 9 は、DCT 部 1 4 3 1 a __ 1 から出力された乗算値 $R1 \cdot X'1 \sim R9 \cdot X'9$ と、ビットダウン部 1 4 3 7 __ 1 ~ 1 4 3 7 __ 9 からそれぞれ出力されたフィルタ係数 $K1 \sim K9$ とを乗算して、それぞれデータ $R1 \cdot K1 \cdot X'1 \sim R9 \cdot K9 \cdot X'9$ を出力する。

【0 2 3 0】

そして、IDCT部1435a__1は、乗算器1434a__1～1434a__9からそれぞれ出力されたデータ $R_1 \cdot K_1 \cdot X'_1 \sim R_9 \cdot K_9 \cdot X'_9$ に基づいて、実空間の値に変換する逆離散コサイン変換を実行し、 1×1 の画素を出力する。上述のように、IDCT部1435a__1から出力される画素が、撮像画像の 5×5 の部分画像の画素に対して、その 5×5 の画素のうち中央の画素に対応した周波数特性 $R'(\omega)$ に基づく逆変換フィルタによって逆変換処理が実行された画素となる。

【0231】

以上のように、画像処理部14のフィルタ処理部143bの構成を、図28に示される構成とすることによって、第2の実施の形態の同様の効果を有する。

【0232】

また、図28に示すフィルタ処理部143bにおいては、撮像画像の 5×5 の画素を逆フィルタ処理部1436__1による周波数特性 $R(\omega)$ に基づく逆変換フィルタによって逆変換処理を実行した後、その逆変換処理をした画像から、画素数を減少させた 3×3 の画素に対して、DCT部1431a__1以降の補正フィルタによるフィルタ処理を実行している。すなわち、補正フィルタのタップ数は、周波数特性 $R(\omega)$ に基づく逆変換フィルタのタップ数よりも小さいものとしている。これは、K演算部1433a__1による補正フィルタのフィルタ係数を演算するためにK演算部1433a__1に入力されるデータの数を減少させても、画像の劣化にはほとんど影響がないためである。これによって、実装するフィルタ回路をさらに簡略化することができる。

【0233】

なお、K演算部1433a__1によって出力されたフィルタ係数を、ビットダウン部1437__1～1437__9によって、量子化ビット数を減少させているが、これは必須ではなく、ビットダウン部1437__1～1437__9を必ずしも設ける必要はない。また、このビットダウン部を、第2の実施の形態のフィルタ処理部143aに適用し、フィルタ処理部143aにおけるK演算部1433__1の後段側に設置することも可能である。

【0234】

(第3の実施の形態)

第3の実施の形態においては、第1または第2の実施の形態に係る撮像装置をコードリーダーに適用した場合について説明する。したがって、第3の実施の形態のコードリーダーは、第1または第2の実施の形態に係る撮像装置の構成および動作と同様である。

【0235】

<コードリーダーの構成および動作>

図29は、第3の実施の形態のコードリーダーの外観構成の一例を示す図である。図30は、第3の実施の形態のコードリーダーの合焦面の位置および動作を説明する図である。図29および30を参照しながら、本実施の形態に係る撮像装置としてのコードリーダー1__1の構成および動作について説明する。図29のうち、図29(a)は、コードリーダー1__1の側面図を示し、図29(b)は、コードリーダー1__1の平面図を示す。

【0236】

コードリーダー1__1は、バーコードまたは二次元コード等を被写体として撮像（読み取り）するハンディタイプの装置である。図29(a)に示すように、コードリーダー1__1は、ヘッド31と、取っ手32と、を備えている。ヘッド31は、図29(b)に示すように、被写体からの光を集光し、撮像素子12（図示せず）に対して結像させるレンズユニット11と、光線60を照射する光源17と、を備えている。取っ手32は、ユーザが把持する部分であり、情報を所定の方式により記号化したバーコードまたは二次元コード等（コード）の被写体を撮像するトリガとなる操作ボタン（図示せず）が備えられている。

【0237】

撮像素子12は、図示しないが、センサ面がレンズユニット11の主面に対して傾けて配置されており、シャインプルーフの原理によって、合焦位置がレンズユニット11の光軸方向に延伸した合焦面50b（図30参照）が形成されている。光源17は、図30に

10

20

30

40

50

示すように、照射する光線 60 の方向をレンズユニット 11 の画角の中心軸方向からずらし、光線 60 を合焦面 50 b 上に位置するように照射する。認識処理部 15（図示せず）は、撮像素子 12 によって撮像されたバーコードまたは二次元コード等の撮像画像であって、画像処理部 14 によりフィルタ処理が実行された画像に基づいて、バーコードまたは二次元コード等を認識する処理を実行する。

【0238】

以上の構成によって、レンズユニット 11 の光軸方向の広い範囲において合焦した撮像画像を得ることができると共に、ユーザは、光源 17 が照射する光線 60 が示す位置にバーコードまたは二次元コード等の被写体が配置されるように、コードリーダー 1__1 を移動させることによって、容易に被写体の距離に応じた適切な撮像位置とすることができ、被写体に焦点が合った撮像画像を得ることができる。

10

【0239】

また、図示しないフィルタ処理部 143（143 a、143 b）によって、逆変換フィルタによる逆変換処理を実行することによって、レンズユニット 11 の光軸方向に延伸した合焦面 50 b の各位置において、レンズユニット 11 の光軸方向に被写界深度が拡張する。これによって、焦点が合う領域がレンズユニット 11 の光軸方向に拡張され、合焦領域が形成される。そして、バーコードまたは二次元コード等の被写体が合焦領域内に含まれていれば、所定の大きさを有する被写体でも、被写体の全体に対して焦点が合った状態で撮像することが可能となる。また、レンズユニット 11 の光軸方向の広い範囲において、バーコードまたは二次元コード等の全体に対して合焦した撮像画像を得ることができる。

20

【0240】

なお、図 29 に示すように、コードリーダー 1__1 は、ハンディタイプの装置としているが、これに限定されるものではなく、固定式のコードリーダーであってもよい。

【符号の説明】

【0241】

- 1 撮像装置
- 1__1 コードリーダー
- 2 PC
- 3 通信ケーブル
- 4、4 a～4 g 被写体
- 11 レンズユニット
- 11 a 位相板
- 11 b 絞り
- 11 c 多焦点レンズ
- 12、12 a 撮像素子
- 14 画像処理部
- 15 認識処理部
- 16 通信部
- 17 光源
- 21 通信部
- 22 操作部
- 23 表示部
- 24 記憶部
- 25 外部記憶装置
- 26 制御部
- 27 バス
- 31 ヘッド
- 32 取っ手
- 50、50 a、50 b 合焦面

30

40

50

5 1	合焦領域	
6 0	光線	
1 0 0 ~ 1 0 2	撮像画像	
1 0 2 a	テクスチャ部	
1 0 3、1 0 4	エリア	
1 0 5	画像	
1 2 1	逆変換フィルタ	
1 3 1、1 3 1 a ~ 1 3 1 f	対象部分画像	
1 3 5 a ~ 1 3 5 f	中央データ	
1 4 1	画像バッファ部	10
1 4 3、1 4 3 a、1 4 3 b	フィルタ処理部	
2 0 1	目標空間周波数特性	
2 0 2、2 0 2 a、2 0 2 b	空間周波数特性	
2 0 3、2 0 3 a、2 0 3 b	空間周波数特性	
5 0 0	撮像システム	
1 4 1 0	入力部	
1 4 1 1 a ~ 1 4 1 1 d	レジスタ	
1 4 1 2 a ~ 1 4 1 2 d	ラインバッファ	
1 4 1 3 a ~ 1 4 1 3 e	出力部	
1 4 3 1 a ~ 1 4 3 1 e	入力部	20
1 4 3 1 __ 1	F T 部	
1 4 3 1 a __ 1	D C T 部	
1 4 3 2 a ~ 1 4 3 2 e	レジスタ	
1 4 3 2 __ 1 ~ 1 4 3 2 __ 5 0	乗算器	
1 4 3 3 a ~ 1 4 3 3 e	レジスタ	
1 4 3 3 __ 1、1 4 3 3 a __ 1	K 演算部	
1 4 3 4 a ~ 1 4 3 4 e	レジスタ	
1 4 3 4 __ 1 ~ 1 4 3 4 __ 5 0	乗算器	
1 4 3 4 a __ 1 ~ 1 4 3 4 a __ 9	乗算器	
1 4 3 5 a ~ 1 4 3 5 e	レジスタ	30
1 4 3 5 __ 1	I F T 部	
1 4 3 5 a __ 1	I D C T 部	
1 4 3 6 a ~ 1 4 3 6 e	レジスタ	
1 4 3 6 __ 1	逆フィルタ処理部	
1 4 3 7 a ~ 1 4 3 7 e	レジスタ	
1 4 3 7 __ 1 ~ 1 4 3 7 __ 9	ビットダウン部	
1 4 3 8 a ~ 1 4 3 8 e	乗算器	
1 4 3 9 a ~ 1 4 3 9 e	乗算器	
1 4 4 0 a ~ 1 4 4 0 e	乗算器	
1 4 4 1 a ~ 1 4 4 1 e	乗算器	40
1 4 4 2 a ~ 1 4 4 2 e	乗算器	
1 4 4 3 a ~ 1 4 4 3 e	加算器	
1 4 4 4 a ~ 1 4 4 4 e	加算器	
1 4 4 5 a ~ 1 4 4 5 e	加算器	
1 4 4 6 a ~ 1 4 4 6 e	加算器	
1 4 4 7 a ~ 1 4 4 7 c	加算器	
1 4 4 8	出力部	
A	フレーム開始期間	
B	水平ブランキング期間	
C	フレーム終了期間	50

D 垂直ブランキング期間

T 有効データ期間

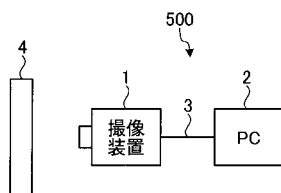
【先行技術文献】

【特許文献】

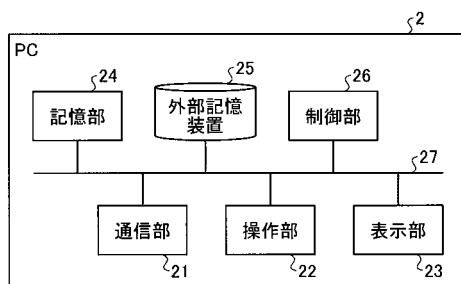
【0242】

【特許文献1】特開2010-152881号公報

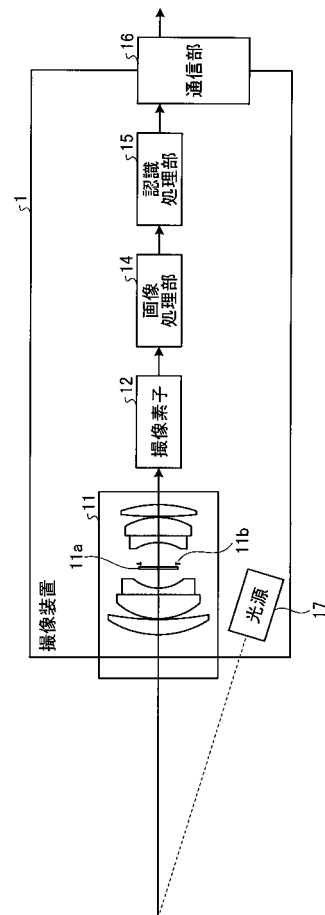
【図1】



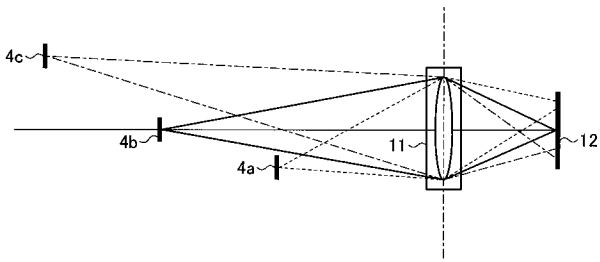
【図2】



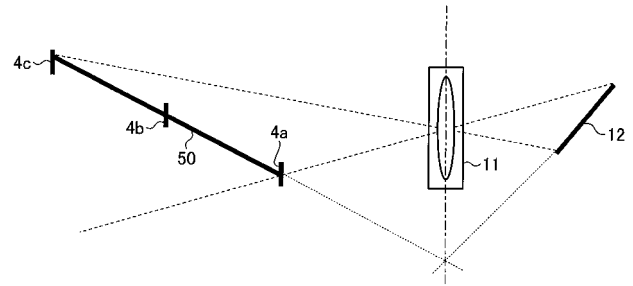
【図3】



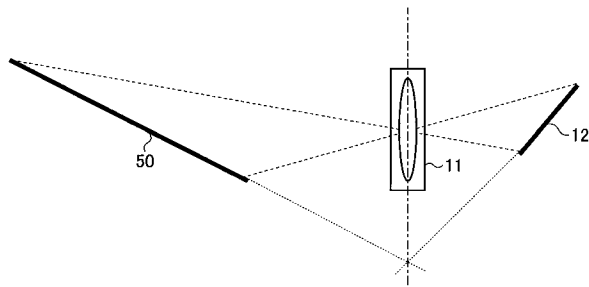
【図 4】



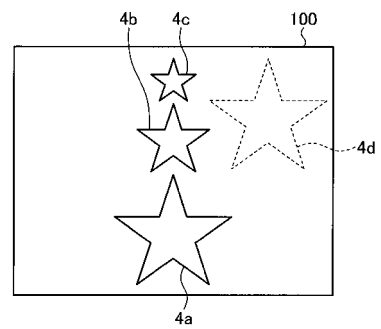
【図 6】



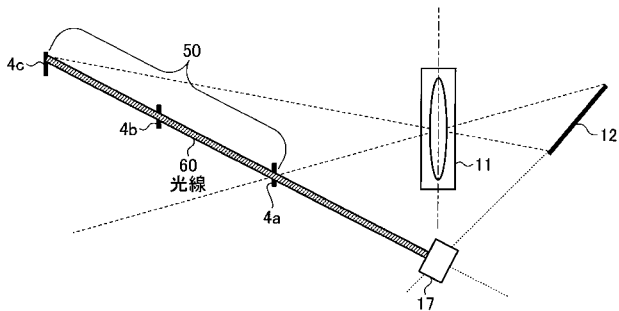
【図 5】



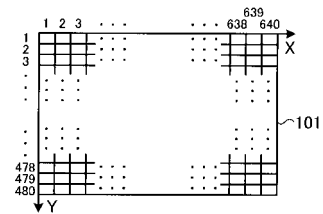
【図 7】



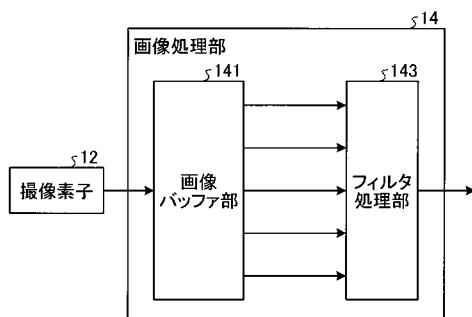
【図 8】



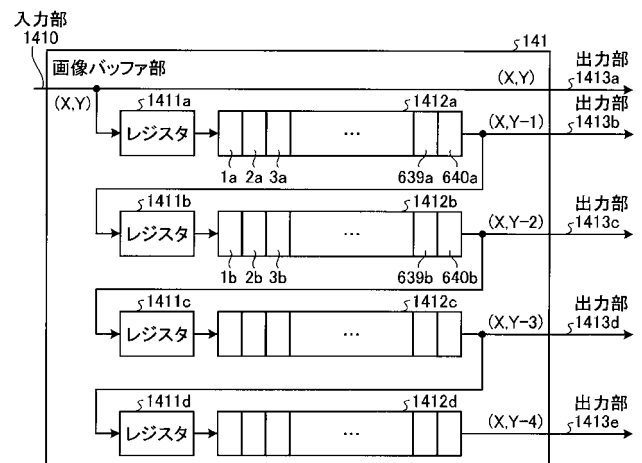
【図 10】



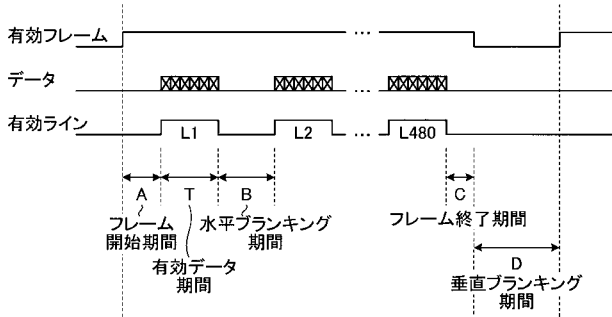
【図 9】



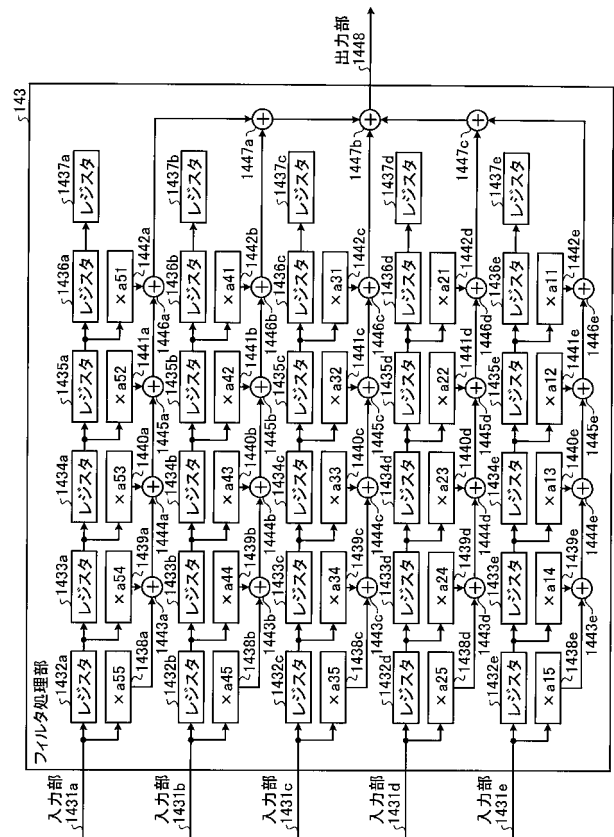
【図 11】



【図 1 2】



【図 1 3】



【図 1 4】

逆変換フィルタ

a11	a12	a13	a14	a15
a21	a22	a23	a24	a25
a31	a32	a33	a34	a35
a41	a42	a43	a44	a45
a51	a52	a53	a54	a55

【図 1 5】

通常画像の対象部分画像

A11	A12	A13	A14	A15
A21	A22	A23	A24	A25
A31	A32	A33	A34	A35
A41	A42	A43	A44	A45
A51	A52	A53	A54	A55

*

コンボリューション

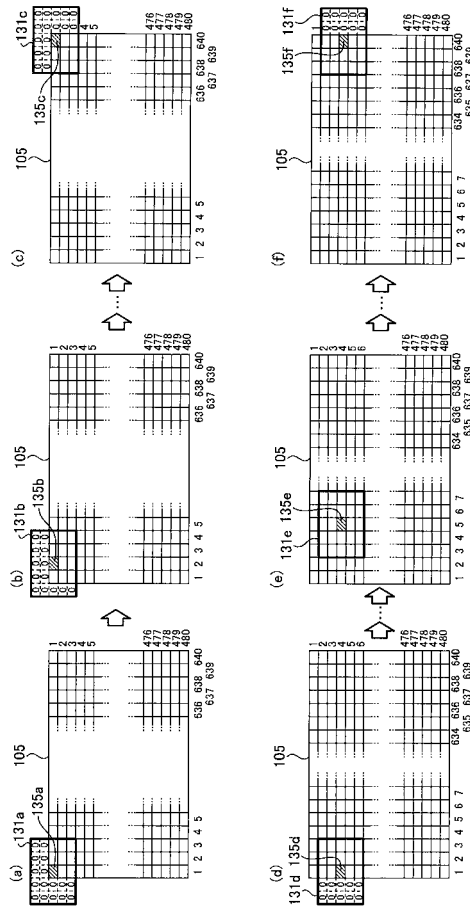
逆変換フィルタ

a11	a12	a13	a14	a15
a21	a22	a23	a24	a25
a31	a32	a33	a34	a35
a41	a42	a43	a44	a45
a51	a52	a53	a54	a55

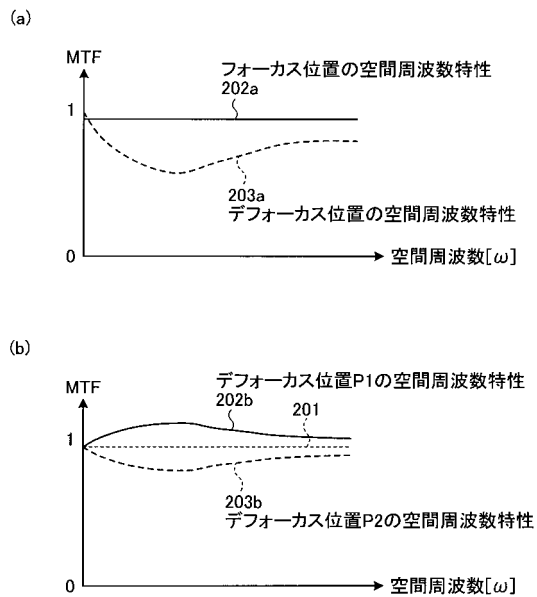
=

$$\begin{aligned}
 &A11 \times a11 + A12 \times a12 + A13 \times a13 + A14 \times a14 + A15 \times a15 \\
 &+ A21 \times a21 + A22 \times a22 + A23 \times a23 + A24 \times a24 + A25 \times a25 \\
 &+ A31 \times a31 + A32 \times a32 + A33 \times a33 + A34 \times a34 + A35 \times a35 \\
 &+ A41 \times a41 + A42 \times a42 + A43 \times a43 + A44 \times a44 + A45 \times a45 \\
 &+ A51 \times a51 + A52 \times a52 + A53 \times a53 + A54 \times a54 + A55 \times a55 \\
 &\dots \text{式(1)}
 \end{aligned}$$

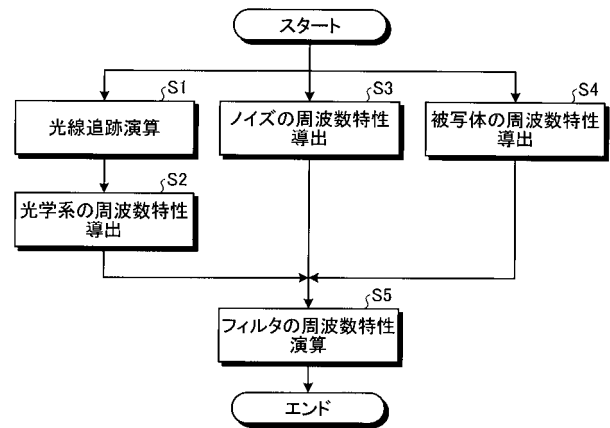
【図 16】



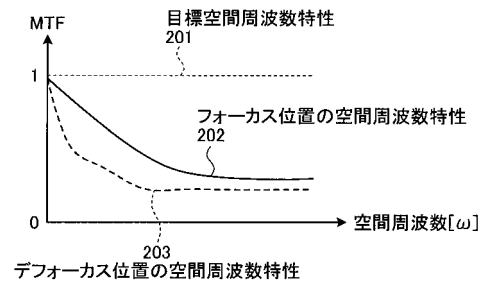
【図 19】



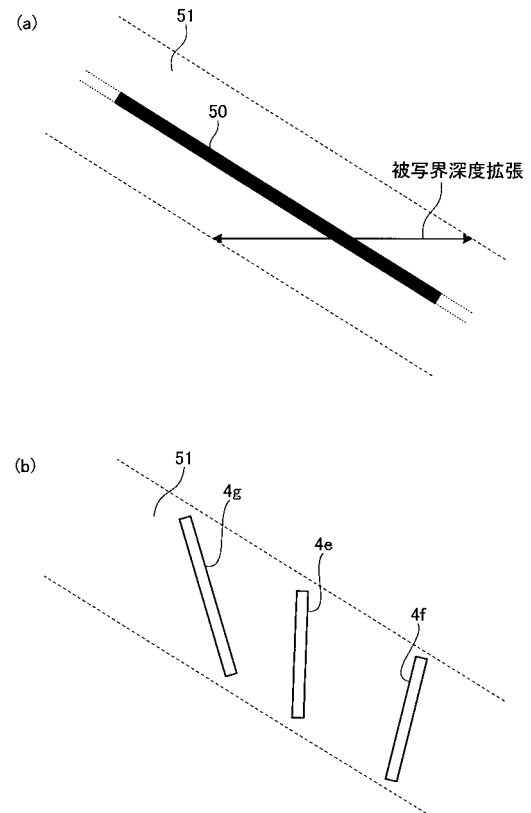
【図 17】



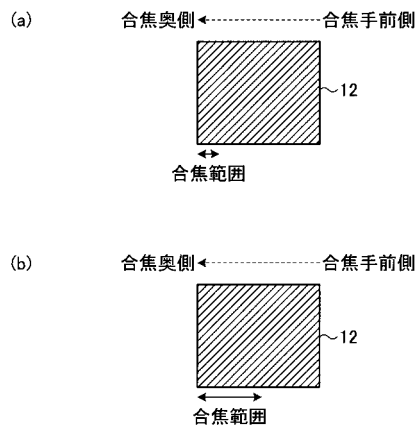
【図 18】



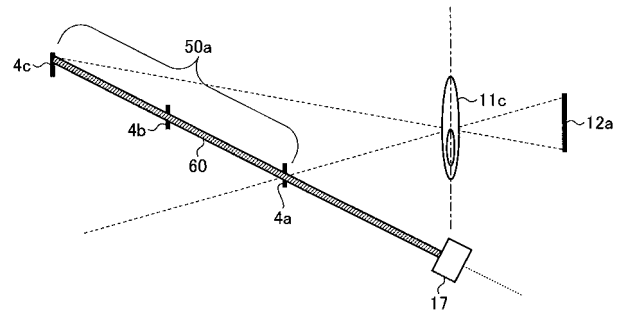
【図 20】



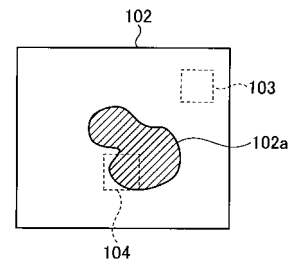
【図 2 1】



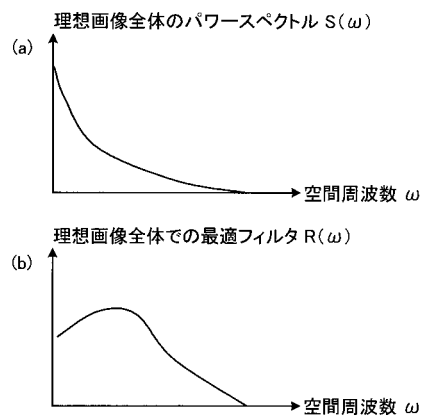
【図 2 2】



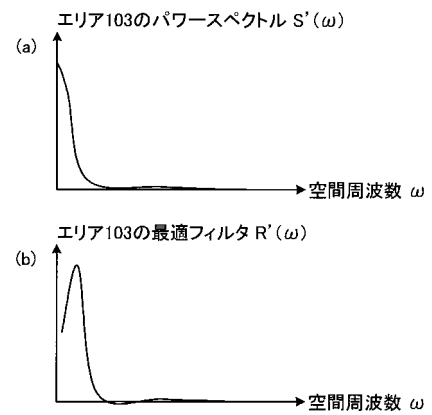
【図 2 3】



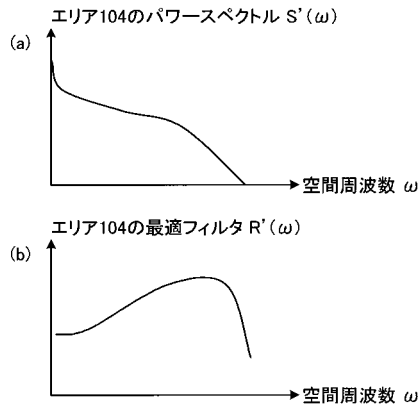
【図 2 4】



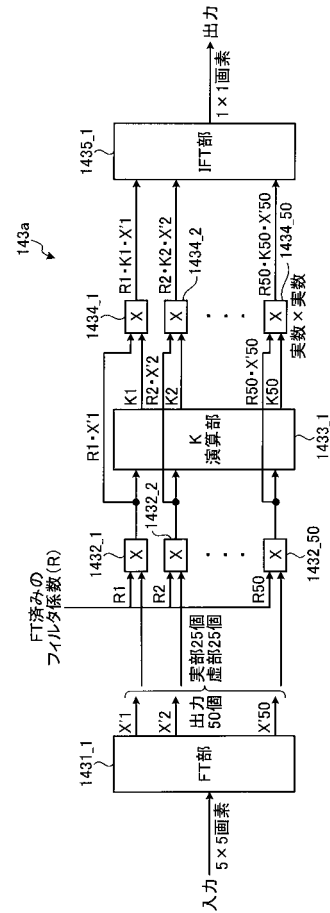
【図 2 5】



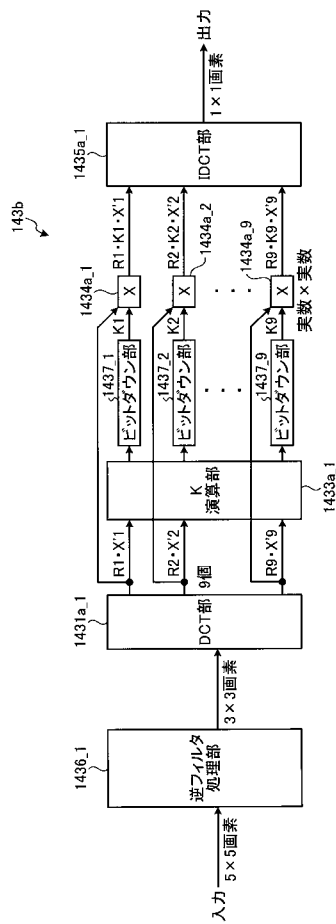
【図 26】



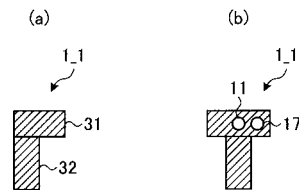
【図 27】



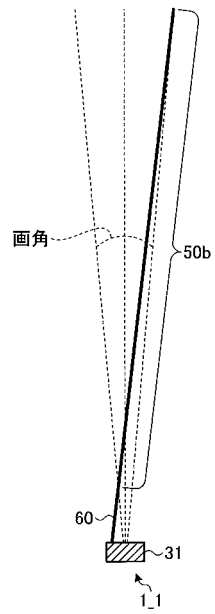
【図 28】



【図 29】



【図 30】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.			F I		テーマコード (参考)
G 0 6 K	7/00	(2006.01)	G 0 6 K	7/00	E
G 0 6 K	7/10	(2006.01)	G 0 6 K	7/10	L

F ターム(参考) 5C122 DA04 EA37 EA68 FB02 FB03 FC01 FC02 FH11 FH14 FH23
GG21 HA88 HB01 HB02 HB06 HB10