



(10) **DE 10 2023 103 986 A1** 2023.08.24

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2023 103 986.5**
(22) Anmeldetag: **17.02.2023**
(43) Offenlegungstag: **24.08.2023**

(51) Int Cl.: **G06T 7/571** (2017.01)
G01B 11/24 (2006.01)
G01B 9/04 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
2022-024137 18.02.2022 JP

(74) Vertreter:
**Grünecker Patent- und Rechtsanwälte PartG mbB,
80802 München, DE**

(71) Anmelder:
Tokyo Seimitsu Co., Ltd., Hachioji-shi, Tokyo, JP

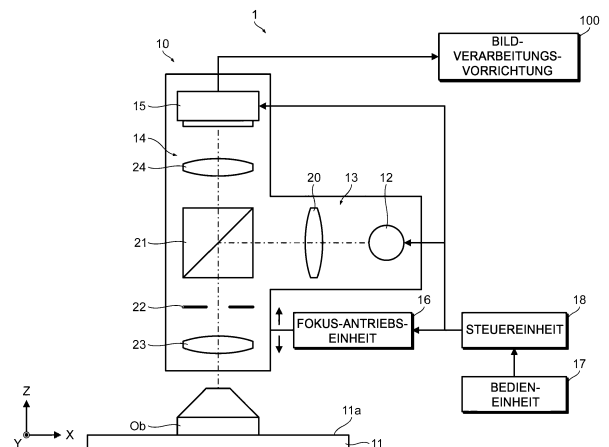
(72) Erfinder:
Hayashi, Kyohei, Tsuchiura-City, Ibaraki, JP

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Bildverarbeitungsvorrichtung, Bildverarbeitungsverfahren und 3D-Formmessvorrichtung**

(57) Zusammenfassung: Eine Bildverarbeitungsvorrichtung 100 erfasst eine Vielzahl von Bildern eines zu messenden Objektes Ob durch eine Abbildungsvorrichtung 10, wobei die Vielzahl von Bildern aufgenommen wird, während eine Fokusposition variiert wird, und korrigiert die Unschärfe in der erfassten Vielzahl von Bildern basierend auf einer Punktspreizfunktion für jede Fokusposition eines optischen Bilderzeugungssystems 14 in der Abbildungsvorrichtung 10. Die Bildverarbeitungsvorrichtung 100 berechnet außerdem für die Vielzahl von Bildern nach der Korrektur der Unschärfe einen Bewertungswert für einen Fokussiergrad für jedes Pixel und erzeugt 3D-Formdaten des zu messenden Objektes Ob auf der Grundlage des berechneten Bewertungswerts für den Fokussiergrad für jedes Pixel.



Beschreibung

Hintergrund der Erfindung

Gebiet der Erfindung

[0001] Der vorliegende Gegenstand bezieht sich auf Bildverarbeitungsvorrichtungen, Bildverarbeitungsverfahren und 3D-Formmessvorrichtungen und insbesondere auf eine Bildverarbeitungsvorrichtung, ein Bildverarbeitungsverfahren und eine 3D-Formmessvorrichtung zum Verarbeiten einer Vielzahl von Bildern eines zu messenden Objektes, die aufgenommen wurden, während die Fokusposition variiert wurde.

Beschreibung des Standes der Technik

[0002] Ein Fokusvariationsverfahren (Fokusverschiebungsverfahren) ist als Verfahren zum Messen dreidimensionaler Formen unter Verwendung optischer Mikroskope bekannt (beispielsweise Japanische Patentanmeldungs-Offenlegung Nr. 2013-020140 und Internationale Veröffentlichung Nr. 2009/096422). Bei dem Fokusvariationsverfahren wird eine Vielzahl von Bildern eines zu messenden Objektes aufgenommen, die sich in der Fokusposition unterscheiden, wobei die dreidimensionale Form des zu messenden Objektes auf der Grundlage eines Fokussierungsgrades jedes Pixels gemessen wird. Insbesondere wird die dreidimensionale Form gemessen, indem ein Bewertungswert für den Fokussierungsgrad für jedes Pixel aus jedem der erhaltenen Bilder berechnet wird, die Fokusposition angegeben wird, bei der der berechnete Bewertungswert am höchsten ist, und dadurch die Höhe des zu messenden Objektes an der jedem Pixel entsprechenden Position angegeben wird.

Literaturverzeichnis

Patentliteratur 1: Japanische Patentanmeldungs-Offenlegung Nr. 2013-020140

Patentliteratur 2: Internationale Veröffentlichung Nr. 2009/096422

Übersicht über die Erfindung

[0003] Das Fokusvariationsverfahren hat typischerweise den Vorteil, dass eine kostengünstige Messmaschine eingesetzt werden kann, da keine besonderen Raffinessen in einem optischen System erforderlich sind, verglichen mit anderen Messverfahren wie der Weißlichtinterferometrie.

[0004] Andererseits kann bei dem Fokusvariationsverfahren, wenn ein Abschnitt mit hohem Reflexionsvermögen und ein Abschnitt mit niedrigem Reflexionsvermögen in einem Sichtfeld koexistieren, der Abschnitt mit niedrigem Reflexionsvermögen nicht richtig gemessen werden. Dieses Problem tritt auf, weil der Kontrast einer unscharfen Grenze in dem Abschnitt mit hohem Reflexionsvermögen stärker ist als der Kontrast der Oberfläche des Abschnitts mit niedrigem Reflexionsvermögen. **Fig. 10** zeigt ein Beispiel für ein aufgenommenes Bild, wenn der Abschnitt mit hohem Reflexionsvermögen und der Abschnitt mit niedrigem Reflexionsvermögen im Sichtfeld nebeneinander liegen. **Fig. 10** zeigt ein Beispiel für den Fall, dass ein kegelförmiges Objekt unter Variation der Fokusposition bei vertikaler Beleuchtung abgebildet wird. **Fig. 10** zeigt ein Beispiel eines in der xz-Ebene geschnittenen Bildes, um den Einfluss der Unschärfe in Abhängigkeit von der Fokusposition zu verdeutlichen. In **Fig. 10** stellt eine dreiecksförmige Linie L die ursprüngliche Form des zu messenden Objektes dar. Wenn das kegelförmige Objekt unter vertikaler Beleuchtung abgebildet wird, zeigt ein Scheitelpunkt eine starke Reflexion an der schrägen Oberfläche mit geringem Reflexionsvermögen. Infolgedessen übersteigt der Kontrast der Unschärfe des stark reflektierenden Scheitelpunkts den Oberflächenkontrast der ursprünglichen Form, was eine ordnungsgemäße Messung erschwert, wie in einem durch ein Oval gekennzeichneten Abschnitt C in **Fig. 10** dargestellt.

[0005] Zur Lösung des Problems gibt es ein Verfahren, bei dem ein Polarisationsfilter verwendet wird (ein Verfahren, bei der ein Polarisationsfilter verwendet wird, um die direkte Reflexion zu verringern und Streulicht zu erfassen). Die Verwendung eines Polarisationsfilters hat jedoch den Nachteil, dass die Lichtmenge erheblich abnimmt und die Belichtungszeit verlängert wird. Die verlängerte Belichtungszeit führt zu einer verlängerten Messzeit. Die Verwendung des Polarisationsfilters führt auch zu einer Erhöhung der Anzahl der Komponenten.

[0006] Der vorliegende Gegenstand wurde unter Berücksichtigung derartiger Umstände entwickelt, wobei es ein Ziel des vorliegenden Gegenstandes ist, eine Bildverarbeitungsvorrichtung, ein Bildverarbeitungsverfahren

ren und eine 3D-Formmessvorrichtung anzugeben, die in der Lage sind, 3D-Formdaten eines zu messenden Objektes genau zu erfassen.

[0007] Um das Ziel zu erreichen, ist eine Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß einem ersten Aspekt des gegenwärtig offenbarten Gegenstandes eine Bildverarbeitungsvorrichtung zum Verarbeiten einer Vielzahl von Bildern eines zu messenden Objektes, wobei die Vielzahl von Bildern aufgenommen wird, während eine Fokusposition variiert wird. Die Bildverarbeitungsvorrichtung umfasst eine Bilderfassungseinheit, die dazu eingerichtet ist, die Vielzahl von Bildern des zu messenden Objektes zu erfassen, eine Bildverarbeitungseinheit, die dazu eingerichtet ist, die Vielzahl von Bildern zu verarbeiten, um Unschärfe in den Bildern auf der Grundlage einer Punktspreizfunktion für jede Fokusposition eines optischen Systems in einer Abbildungsvorrichtung, die die Vielzahl von Bildern aufnimmt, zu korrigieren, und eine 3D-Formdaten-Erzeugungseinheit, die dazu eingerichtet ist, für die Vielzahl von Bildern nach der Korrektur der Unschärfe einen Bewertungswert für einen Fokussiergrad für jedes Pixel zu berechnen und 3D-Formdaten des zu messenden Objektes auf der Grundlage des berechneten Bewertungswertes für den Fokussiergrad für jedes Pixel zu erzeugen.

[0008] Eine Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß einem zweiten Aspekt des gegenwärtig offenbarten Gegenstandes bezieht sich auf die Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß dem ersten Aspekt, wobei die Bildverarbeitungseinheit auf die Bilder in einem Frequenzbereich, der durch Fourier-Transformation der Bilder erhalten wird, ein Frequenzbereichs-Wiederherstellungsfiler auf der Grundlage der Punktspreizfunktion anwendet, um die Bilder in dem Frequenzbereich zu korrigieren, und eine inverse Fourier-Transformation an den korrigierten Bildern in dem Frequenzbereich durchführt, um die Unschärfe in den Bildern zu korrigieren.

[0009] Eine Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß einem dritten Aspekt des gegenwärtig offenbarten Gegenstandes bezieht sich auf die Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß dem zweiten Aspekt, wobei ein inverses Frequenzbereichsfiler aus der Punktspreizfunktion in dem Frequenzbereich berechnet wird, der durch die Fourier-Transformation der Punktspreizfunktion erhalten wird, und das berechnete inverse Frequenzbereichsfiler als das Frequenzbereichs-Wiederherstellungsfiler festgelegt wird.

[0010] Eine Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß einem vierten Aspekt des gegenwärtig offenbarten Gegenstandes bezieht sich auf die Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß dem zweiten Aspekt, wobei ein Frequenzbereichs-Wiener-Filer aus der Punktspreizfunktion in dem Frequenzbereich berechnet wird, der durch die Fourier-Transformation der Punktspreizfunktion erhalten wird, und das berechnete Frequenzbereichs-Wiener-Filer als das Frequenzbereichs-Wiederherstellungsfiler festgelegt wird.

[0011] Eine Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß einem fünften Aspekt des gegenwärtig offenbarten Gegenstandes bezieht sich auf die Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß dem vierten Aspekt, wobei das Wiener-Filer durch einen folgenden Ausdruck berechnet wird:

$$\text{PSFf} * (\omega_x, \omega_y, \omega_z) / \left\{ \text{PSF}_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z) \text{PSFf} * (\omega_x, \omega_y, \omega_z) + \text{SN} \right\},$$

wobei $\text{PSF}(x, y, z)$ Voxeldaten der Punktspreizfunktion sind, $\text{PSF}_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ ein Bild von $\text{PSF}(x, y, z)$ ist, das durch Fourier-Transformation abgebildet wird, $\text{PSF}_f^*(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ eine komplexe Konjugierte von $\text{PSF}_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ ist, und SN eine Konstante ist.

[0012] Eine Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß einem sechsten Aspekt des gegenwärtig offenbarten Gegenstandes bezieht sich auf die Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß dem fünften Aspekt, wobei die Konstante SN experimentell eingestellt wird.

[0013] Eine Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß einem siebten Aspekt des gegenwärtig offenbarten Gegenstandes bezieht sich auf die Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß einem der Aspekte 1 bis 6, wobei die Bildverarbeitungseinheit Voxeldaten des zu messenden Objektes auf der Grundlage von Voxeldaten der Punktspreizfunktion verarbeitet, um die Unschärfe in der Vielzahl von Bildern zu korrigieren.

[0014] Eine Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß einem achten Aspekt des gegenwärtig offenbarten Gegenstandes bezieht sich auf die Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß dem siebten Aspekt, wobei, wenn die Voxeldaten der Punktspreizfunktion in ihrer Größe kleiner sind als die Voxeldaten des zu messenden Objektes, die Bildverarbeitungseinheit die Voxeldaten der Punktspreizfunktion so anpasst, dass sie in ihrer Größe mit den Voxeldaten des zu messenden Objektes identisch sind, indem sie ein Null-Padding vornimmt.

[0015] Eine Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß einem neunten Aspekt des gegenwärtig offenbarten Gegenstandes bezieht sich auf die Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß einem der Aspekte 1 bis 8, wobei die Punktspreizfunktion erfasst wird, indem ein lumineszierender Punkt auf einer optische Achse des optischen Systems gesetzt wird und der lumineszierende Punkt abgebildet wird, während die Abbildungsvorrichtung relativ zu dem lumineszierenden Punkt bewegt wird.

[0016] Eine Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß einem zehnten Aspekt des gegenwärtig offenbarten Gegenstandes bezieht sich auf die Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß dem neunten Aspekt, wobei der lumineszierende Punkt einen Durchmesser hat, der kleiner oder gleich der optischen Auflösung der Abbildungsvorrichtung durch das optische System eingestellt ist.

[0017] Eine Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß einem elften Aspekt des gegenwärtig offenbarten Gegenstandes bezieht sich auf die Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß dem neunten oder zehnten Aspekt, wobei der lumineszierende Punkt durch eine Lochblendenbeleuchtung oder ein fluoreszierendes Kügelchen ausgebildet ist.

[0018] Eine Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß einem zwölften Aspekt des gegenwärtig offenbarten Gegenstandes bezieht sich auf die Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß einem der Aspekte 1 bis 11, wobei die Bildverarbeitungseinheit Informationen über die Temperatur erfasst, wenn das zu messende Objekt abgebildet wird, und die Unschärfe in der Vielzahl von Bildern auf der Grundlage der Punktspreizfunktion entsprechend der erfassten Temperatur korrigiert.

[0019] Eine Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß einem dreizehnten Aspekt des gegenwärtig offenbarten Gegenstandes bezieht sich auf die Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß einem der Aspekte 1 bis 12, wobei die Vielzahl von Bildern des zu messenden Objektes so aufgenommen wird, dass ein Maximalwert und ein Minimalwert der Luminanz des zu messenden Objektes innerhalb eines dynamischen Abbildungsabschnitts durch die Abbildungsvorrichtung liegen.

[0020] Eine 3D-Formmessvorrichtung gemäß einem vierzehnten Aspekt des gegenwärtig offenbarten Gegenstandes umfasst eine Abbildungsvorrichtung, die dazu eingerichtet ist, eine Vielzahl von Bildern eines zu messenden Objektes aufzunehmen, das auf eine optische Achse der Abbildungsvorrichtung eingestellt ist, während sie sich relativ zu dem zu messenden Objekt bewegt, wobei sich die Vielzahl von Bildern in der Fokusposition unterscheidet, und die Bildverarbeitungsvorrichtung gemäß einem des ersten bis dreizehnten Aspektes, wobei die Bildverarbeitungsvorrichtung dazu eingerichtet ist, die Vielzahl von Bildern des zu messenden Objektes zu verarbeiten, das von der Abbildungsvorrichtung aufgenommen wurde.

[0021] Ein Bildverarbeitungsverfahren gemäß einem fünfzehnten Aspekt des gegenwärtig offenbarten Gegenstandes ist ein Bildverarbeitungsverfahren zum Verarbeiten einer Vielzahl von Bildern eines zu messenden Objektes, wobei die Vielzahl von Bildern unter Variation einer Fokusposition aufgenommen wird. Das Bildverarbeitungsverfahren umfasst das Erfassen der Vielzahl von Bildern des zu messenden Objektes, das Korrigieren der Unschärfe in den Vielzahl von Bildern auf der Grundlage einer Punktspreizfunktion für jede Fokusposition eines optischen Systems in einer Abbildungsvorrichtung, die die Vielzahl von Bildern aufnimmt, und das Berechnen eines Bewertungswerts für einen Fokussiergrad für jedes Pixel für die Vielzahl von Bildern nach der Korrektur der Unschärfe und das Erzeugen von 3D-Formdaten des zu messenden Objektes auf der Grundlage des berechneten Bewertungswerts für den Fokussiergrad für jedes Pixel.

[0022] Der hier offenbarte Gegenstand ermöglicht es, 3D-Formdaten des zu vermessenden Objektes mit hoher Genauigkeit zu erfassen.

Figurenliste

Fig. 1 zeigt einen schematischen Aufbau einer 3D-Formmessvorrichtung;

Fig. 2 zeigt ein Beispiel für die Hardwarekonfiguration einer Bildverarbeitungsvorrichtung;

Fig. 3 ist ein Blockschaltbild der in der Bildverarbeitungsvorrichtung enthaltenen Funktionen;

Fig. 4 ist eine konzeptionelle Ansicht eines Bildes, das durch ein optisches Bilderzeugungssystem aufgenommen wurde;

Fig. 5 zeigt ein Beispiel für ein Verfahren zum Erfassen einer Punktspreizfunktion des optischen Bilderzeugungssystems;

Fig. 6 ist ein Flussdiagramm, das einen Messvorgang mit der 3D-Formmessvorrichtung veranschaulicht;

Fig. 7 zeigt ein Beispiel für die Bildwiederherstellungsverarbeitung mit einem Wiener-Filter;

Fig. 8 ist eine teilweise vergrößerte Ansicht von **Fig. 7**;

Fig. 9 ist eine teilweise vergrößerte Ansicht eines Bildes, das einer Bildwiederherstellungsverarbeitung unter Verwendung eines inversen Filters unterzogen wurde; und

Fig. 10 zeigt ein Beispiel für ein Bild, das aufgenommen wurde, wenn ein Abschnitt mit hohem Reflexionsvermögen und ein Abschnitt mit niedrigem Reflexionsvermögen in einem Sichtfeld nebeneinander liegen.

Detaillierte Beschreibung der Ausführungsformen

[0023] Nachfolgend werden bevorzugte Ausführungsformen des vorliegenden Gegenstandes unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen beschrieben.

[3D-Formmessvorrichtung]

[0024] **Fig. 1** zeigt einen schematischen Aufbau einer 3D-Formmessvorrichtung.

[0025] Wie in **Fig. 1** dargestellt, umfasst eine 3D-Formmessvorrichtung 1 in der vorliegenden Ausführungsform eine Abbildungsvorrichtung 10 und eine Bildverarbeitungsvorrichtung 100.

[Abbildungsvorrichtung]

[0026] Die Abbildungsvorrichtung 10 umfasst ein so genanntes optisches Mikroskop, das Bilder von einem zu messenden Objekt Ob aufnimmt, während es eine Fokusposition variiert. Wie in **Fig. 1** dargestellt, umfasst die Abbildungsvorrichtung 10 in der vorliegenden Ausführungsform unter anderem einen Objektisch 11, eine Beleuchtungslichtquelle 12, ein optisches Beleuchtungssystem 13, ein optisches Bilderzeugungssystem 14, eine Kamera 15, eine Fokusantriebseinheit 16, eine Bedieneinheit 17, eine Steuereinheit 18.

[0027] Der Objektisch 11 weist eine Anbringungsfläche 11a auf, auf der das zu messende Objekt Ob angebracht ist. Die Anbringungsfläche 11a ist als ebene Fläche ausgebildet, die als Referenzfläche für die Messung dient. Insbesondere sind für die Anbringungsfläche 11a eine X-Achse und eine Y-Achse festgelegt. Die X-Achse und die Y-Achse sind als zwei zueinander orthogonale Achsen festgelegt.

[0028] Beispiele für die Beleuchtungslichtquelle 12 umfassen eine Halogenlampe, eine Metallhalogenidlampe, eine Quecksilberlampe, eine Xenonlampe und eine Leuchtdiode (LED).

[0029] Das optische Beleuchtungssystem 13 umfasst eine Beleuchtungslinse 20, einen Strahlenteiler 21, eine Aperturblende 22 und eine Objektivlinse 23. Das von der Beleuchtungslichtquelle 12 emittierte Licht (Beleuchtungslicht) durchläuft die Beleuchtungslinse 20, den Strahlenteiler 21, die Aperturblende 22 und die Objektivlinse 23 und bestrahlt das auf dem Objektisch 11 angebrachte Messobjekt Ob. Zudem ist eine Konfiguration möglich, bei der das Beleuchtungslicht von der Beleuchtungslichtquelle 12 über einen Lichtleiter zu dem optischen Beleuchtungssystem 13 geleitet wird.

[0030] Das optische Bilderzeugungssystem 14 umfasst die Objektivlinse 23, die Aperturblende 22, den Strahlenteiler 21 und eine Bilderzeugungslinse 24. Der Strahlenteiler 21, die Aperturblende 22 und die Objektivlinse 23 werden gemeinsam mit dem optischen Beleuchtungssystem 13 genutzt. Das an dem Messobjekt Ob reflektierte Licht durchläuft die Objektivlinse 23, die Aperturblende 22, den Strahlenteiler 21 und die Bilderzeugungslinse 24 und tritt in die Kamera 15 ein.

[0031] Die Kamera 15 verfügt über einen Bildsensor zur elektronischen Aufnahme von Bildern des zu messenden Objektes Ob. Beispiele für den Bildsensor umfassen einen CMOS-Bildsensor (CMOS - komplementärer / sich ergänzender Metall-Oxid-Halbleiter) und einen CCD-Bildsensor (CCD - ladungsgekoppeltes Bauteil). Ein von der Kamera 15 aufgenommenes Bild wird an die Bildverarbeitungsvorrichtung 100 ausgegeben.

[0032] Die Fokusantriebseinheit 16 bewegt die Beleuchtungslichtquelle 12, das optische Beleuchtungssystem 13, das optische Bilderzeugungssystem 14 und die Kamera 15 integral entlang der optischen Abbildungsachse, um die Fokusposition zu verändern. Die optische Abbildungsachse ist orthogonal zu der Anbrin-

gungsfläche 11a des Objektisches 11 angeordnet. Daher bewegen sich die Beleuchtungslichtquelle 12, das optische Beleuchtungssystem 13, das optische Bilderzeugungssystem 14 und die Kamera 15 senkrecht zu der Anbringungsfläche 11a des Objektisches 11. Eine Achse parallel zu der optischen Abbildungsachse ist als Z-Achse definiert. Die Fokusantriebseinheit 16 umfasst einen Führungsmechanismus und einen Antriebsmechanismus. Der Führungsmechanismus führt eine Einheit (optischer Kopf), die die Beleuchtungslichtquelle 12, das optische Beleuchtungssystem 13, das optische Bilderzeugungssystem 14 und die Kamera 15 umfasst, entlang der Z-Achse. Der Antriebsmechanismus umfasst beispielsweise einen Vorschubspindelmechanismus und einen Motor, der den Vorschubspindelmechanismus antreibt.

[0033] Die Bedieneinheit 17 verfügt über verschiedene Bedientasten, mit denen die Abbildungsvorrichtung 10 bedient werden kann, um Bedieneingaben eines Benutzers zu akzeptieren. Die verschiedenen Bedientasten umfassen ein Tastfeld.

[0034] Die Steuereinheit 18 steuert integral den gesamten Betrieb der Abbildungsvorrichtung 10. Insbesondere übernimmt die Steuereinheit 18 die Steuerung der Lichtemission für die Beleuchtungslichtquelle 12, die Bildsteuerung für die Kamera 15, die Antriebssteuerung (Vorschubsteuerung) für die Fokusantriebseinheit 16 oder dergleichen. Die Steuereinheit 18 umfasst einen Computer. Der Computer fungiert insbesondere als Steuereinheit 18, indem er ein vorgegebenes Programm ausführt.

[0035] Die wie oben beschrieben konfigurierte Abbildungsvorrichtung 10 bildet das auf dem Objektisch 11 angebrachte Messobjekt Ob ab, wobei die Fokusposition mit einem konstanten Abstand variiert wird. Konkret bewegt die Fokusantriebseinheit 16 den optischen Kopf entlang der Z-Achse mit einem konstanten Abstand, wobei an jeder Position das zu messende Objekt Ob abgebildet wird. Die aufgenommenen Bilder werden nacheinander an die Bildverarbeitungsvorrichtung 100 ausgegeben.

[Bildverarbeitungsvorrichtung]

[0036] Fig. 2 zeigt ein Beispiel für die Hardwarekonfiguration der Bildverarbeitungsvorrichtung.

[0037] Die Bildverarbeitungsvorrichtung 100, die einen so genannten Computer enthält, umfasst unter anderem einen Prozessor 101, eine Hauptspeichervorrichtung (Hauptspeicher) 102, eine Hilfsspeichervorrichtung (Speicher) 103, eine Eingabevorrichtung 104, eine Ausgabevorrichtung 105, eine Eingabe-/Ausgabeschnittstelle 106.

[0038] Der Prozessor 101 umfasst beispielsweise eine Zentralverarbeitungseinheit (CPU), eine Grafikverarbeitungseinheit (GPU) oder Ähnliches.

[0039] Die Hauptspeichervorrichtung 102 umfasst beispielsweise einen dynamischen Direktzugriffsspeicher (DRAM), einen statischen Direktzugriffsspeicher (SRAM) oder ähnliches.

[0040] Die Hilfsspeichervorrichtung 103 umfasst beispielsweise ein Solid-State-Laufwerk (SSD), ein Festplattenlaufwerk (HDD) oder Ähnliches. Die Zusatzspeichervorrichtung 103 speichert Programme, die von dem Prozessor 101 ausgeführt werden, und verschiedene Daten.

[0041] Der Prozessor 101 führt verschiedene Funktionen aus, die später beschrieben werden, indem er die in der Hilfsspeichervorrichtung 103 gespeicherten Programme liest und die Programme auf der Hauptspeichervorrichtung 102 erweitert und ausführt.

[0042] Die Eingabevorrichtung 104 ist eine Vorrichtung, die es dem Benutzer ermöglicht, Anweisungen an die Bildverarbeitungsvorrichtung 100 einzugeben. Die Eingabevorrichtung 104 umfasst beispielsweise eine Maus, eine Tastatur, ein Tastfeld oder Ähnliches.

[0043] Die Ausgabevorrichtung 105 ist eine Vorrichtung, die die Ausgabe (einschließlich Anzeige) von Messergebnissen oder Ähnlichem ermöglicht. Die Ausgabevorrichtung 105 umfasst beispielsweise eine Flüssigkristallanzeigeeinrichtung (LCD), eine organische Elektrolumineszenz-Anzeigeeinrichtung (OLED) oder Ähnliches.

[0044] Die Ein-/Ausgabeschnittstelle 106 ist eine Schnittstelle zum Anschluss von Ein- und Ausgabevorrichtungen und umfasst beispielsweise einen universellen seriellen Bus (USB) oder dergleichen. Die Kamera 15

der Abbildungsvorrichtung 10 ist über die Eingabe-/Ausgabeschnittstelle 106 mit der Bildverarbeitungsvorrichtung 100 verbunden.

[0045] Fig. 3 ist ein Blockschaltbild der in der Bildverarbeitungsvorrichtung enthaltenen Funktionen.

[0046] Wie in Fig. 3 dargestellt, erfüllt die Bildverarbeitungsvorrichtung 100 die Funktionen einer Bilderfassungseinheit 100A, einer Vorverarbeitungseinheit 100B und einer 3D-Formdaten-Erzeugungseinheit 100C. Die Funktion jeder Einheit wird durch den Prozessor 101 erreicht, der ein vorgegebenes Programm (Bildverarbeitungsprogramm) ausführt.

[0047] Die Bilderfassungseinheit 100A erfasst Bilddaten des zu messenden Objektes Ob, die von der Abbildungsvorrichtung 10 aufgenommen wurden. Bei den Bilddaten handelt es sich um die Bilddaten (sog. multifokale Bilddaten) von Bildern des zu messenden Objektes Ob, die unter Variation der Fokusposition aufgenommen wurden. Eine Reihe von erfassten Bilddaten wird in der Hilfsspeichervorrichtung 103 gespeichert.

[0048] Die Vorverarbeitungseinheit 100B führt eine Verarbeitung zur Korrektur von Unschärfen in Bildern durch Bildverarbeitung durch, die als Vorverarbeitung einer Reihe von Bilddaten ausgeführt wird. Ein Detail der Bildverarbeitung wird später beschrieben. In der vorliegenden Ausführungsform ist die Vorverarbeitungseinheit 100B ein Beispiel für eine Bildverarbeitungseinheit. Die vorverarbeiteten Bilddaten werden in der Hilfsspeichervorrichtung 103 gespeichert.

[0049] Die 3D-Formdaten-Erzeugungseinheit 100C wendet einen Algorithmus eines Fokusvariationsverfahrens auf die vorverarbeiteten Bilddaten an, um 3D-Formdaten des zu vermessenden Objektes Ob zu erzeugen. Dabei sind die 3D-Formdaten eine Gruppe von Daten, in denen jedem aller Pixel in dem Bild des zu messenden Objektes Höheninformationen des zu messenden Objektes zugeordnet sind, die durch das Pixel ausgedrückt werden. Durch die Erfassung der 3D-Formdaten wird es möglich, das zu messende Objekt Ob in dreidimensionalen Computergrafiken darzustellen. Da das Fokusvariationsverfahren selbst eine bekannte Technik ist, wird auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet. Die 3D-Formdaten werden aus einem multifokalen Bild des zu messenden Objektes Ob grob nach folgendem Verfahren erzeugt. Zunächst wird eine Differenzialoperation an jedem Pixel des erhaltenen Bildes ausgeführt, um einen Bewertungswert für einen Fokussiergrad zu berechnen. Der Fokussiergrad ist ein numerischer Wert, der den Grad der Fokussierung angibt. Dann wird für jedes Pixel in dem Bild des zu messenden Objektes eine Fokusposition angegeben, bei der der Fokussiergrad maximal ist. Auf der Grundlage der Informationen über die angegebene Fokusposition werden Höheninformationen des zu messenden Objektes Ob an der Position, die jedem der Pixel entspricht, erhalten. Im Falle eines Pixels, das sich bei den Koordinaten (x_n, y_n) befindet, wird beispielsweise angenommen, dass die Fokusposition, bei der der Bewertungswert für den Fokussiergrad maximal ist, P_n ist. In diesem Fall wird eine Höhe z_n , die der Fokusposition P_n zugeordnet ist, als Höheninformation für das Pixel an den Koordinaten (x_n, y_n) erfasst. Durch die Erfassung der Höheninformationen für sämtliche Pixel können die 3D-Formdaten des zu messenden Objektes Ob erfasst werden. Die Abbildungstätigkeit erfolgt in der Regel unter Variation der Fokusposition in einem konstanten Abstand von dem Referenzpunkt (Ursprung). Es ist zudem möglich, die Reihenfolge der Abbildung als Höheninformationen zu verwenden. Die erhaltenen 3D-Formdaten werden den durch die Bildaufnahme erhaltenen Bilddaten zugeordnet und in der Hilfsspeichervorrichtung 103 gespeichert.

[Vorverarbeitung]

[0050] Wie oben beschrieben, ist bei dem Fokusvariationsverfahren, wenn ein Abschnitt mit hohem Reflexionsvermögen und ein Abschnitt mit niedrigem Reflexionsvermögen in dem Sichtfeld koexistieren, der Kontrast einer Unschärfegrenze in dem Abschnitt mit hohem Reflexionsvermögen stärker als der Kontrast der Oberfläche des Abschnitts mit niedrigem Reflexionsvermögen, was das Problem verursacht, dass eine korrekte Höhe in dem Abschnitt mit niedrigem Reflexionsvermögen nicht erfasst werden kann.

[0051] Daher wird in der vorliegenden Ausführungsform der Einfluss der Unschärfe in dem Abschnitt mit hohem Reflexionsvermögen durch Anwendung der vorgeschriebenen Bildverarbeitung auf die durch die Bildgebung erhaltenen Bilder reduziert. Insbesondere wird die Bildwiederherstellungsverarbeitung unter Verwendung eines Wiederherstellungsfilters ausgeführt, der auf einer Punktspreizfunktion (PSF) des optischen Bilderzeugungssystems 14 in der Abbildungsvorrichtung 10 basiert. Die Punktspreizfunktion wird auch als Punktbildverteilungsfunktion und Unschärfefunktion bezeichnet.

[0052] Zunächst wird der Bildwiederherstellungsvorgang unter Verwendung des Wiederherstellungsfilters beschrieben.

[0053] Fig. 4 ist eine konzeptionelle Ansicht der Bildgebung durch das optische Bilderzeugungssystem. Fig. 4 veranschaulicht, wie ein in dem Raum zu messendes Objekt bei der Bildgebung mit Hilfe von Linsen abgebildet wird. Fig. 4 zeigt ein Beispiel eines Bildes, das in der xz-Ebene geschnitten ist, um den Einfluss der Unschärfe in Abhängigkeit von der Fokusposition zu verdeutlichen. Das in der xz-Ebene geschnittene Bild wird erzeugt, indem aus jedem Bild eine bestimmte Pixelreihe parallel zu der x-Achse extrahiert wird. Das in Fig. 4 dargestellte Beispiel zeigt den Fall, dass das Bild erzeugt wird, indem aus jedem Bild eine Pixelreihe extrahiert wird, die sich durch die Mitte des Bildes und parallel zu der x-Achse erstreckt. Das zu messende Objekt hat eine kegelstumpfförmige Form.

[0054] Es wird nun angenommen, dass ein ideales Bild (Originalbild) des zu messenden Objektes $IO(x,y)$ ist und die Punktspreizfunktion des optischen Bilderzeugungssystems $PSF(x,y)$ ist.

[0055] Das aufzunehmende Bild $I(x,y)$ kann wie folgt ausgedrückt werden

$$I(x,y) = IO(x,y) * PSF(x,y) \quad \text{Ausdruck (1).}$$

Hier steht „*“ für eine Faltungsoperation.

[0056] Die Bildwiederherstellungsverarbeitung besteht darin, das Originalbild $IO(x,y)$ des zu messenden Objektes Ob ohne den Einfluss der Unschärfe aus dem aufgenommenen Bild $I(x,y)$ wiederherzustellen, wenn die Punktspreizfunktion $PSF(x,y)$ bekannt ist. Dieser Vorgang wird als Dekonvolution bezeichnet.

[0057] Die zweidimensionale Fourier-Transformation von Ausdruck (1) ergibt

$$I_f(\omega_x, \omega_y) = IO_f(\omega_x, \omega_y) PSF_f(\omega_x, \omega_y) \quad \text{Ausdruck (2).}$$

[0058] Dabei steht $I_f(\omega_x, \omega_y)$ für die Fourier-Transformation von $I(x,y)$. Der Term $IO_f(\omega_x, \omega_y)$ steht für die Fourier-Transformation von $IO(x,y)$. Der Term $PSF_f(\omega_x, \omega_y)$ stellt die Fourier-Transformation von $PSF(x,y)$ dar. Dabei steht (ω_x, ω_y) für räumliche Frequenzkoordinaten.

[0059] Da die Punktspreizfunktion $PSF(x,y)$ bekannt ist, ist auch die Punktspreizfunktion in dem Frequenzbereich $PSF_f(\omega_x, \omega_y)$ bekannt. Dividieren von $I_f(\omega_x, \omega_y)$ durch $PSF_f(\omega_x, \omega_y)$ ergibt

$$IC_f(\omega_x, \omega_y) \equiv I_f(\omega_x, \omega_y) / PSF_f(\omega_x, \omega_y) = IO_f(\omega_x, \omega_y) \quad \text{Ausdruck (3).}$$

[0060] Als Ergebnis erhält man das wiederhergestellte Bild in dem Frequenzbereich $IC_f(\omega_x, \omega_y)$. Wenn die inverse Fourier-Transformation an $IC_f(\omega_x, \omega_y)$ ausgeführt wird, erhält man ein wiederhergestelltes Bild $IC(x,y)$ in Raumkoordinaten. Daher wird $1/PSF_f(\omega_x, \omega_y)$ als inverses Filter bezeichnet.

[0061] Die Bildverarbeitungsvorrichtung 100 in der vorliegenden Ausführungsform verwendet das inverse Filter $1/PSF_f(\omega_x, \omega_y)$ als Wiederherstellungsfiler, um die Bildwiederherstellungsverarbeitung auszuführen.

[0062] Das inverse Filter $1/PSF_f(\omega_x, \omega_y)$ wird für jede Fokusposition eingestellt. Die Informationen über das eingestellte inverse Filter $1/P(u,v)$ werden im Voraus erfasst und in der Hilfsspeichervorrichtung 103 gespeichert. Die Vorverarbeitungseinheit 100B liest die Informationen über das inverse Filter $1/PSF_f(\omega_x, \omega_y)$, die in der Hilfsspeichervorrichtung 103 aufgezeichnet sind, und führt die Bildwiederherstellungsverarbeitung durch. Ein Verfahren zum Erzeugen des inversen Filters $1/PSF_f(\omega_x, \omega_y)$ wird später beschrieben.

[0063] Die Vorverarbeitungseinheit 100B führt den Bildwiederherstellungsvorgang in einem folgenden Ablauf aus.

[0064] Hier wird der Fall beschrieben, dass die Bilddaten $I(x,y)$ auf dem an der Fokusposition P_n aufgenommenen Bild verarbeitet werden.

[0065] Zunächst wird eine Fourier-Transformation der zu verarbeitenden Bilddaten $I(x,y)$ ausgeführt, um die Bilddaten auf den Frequenzbereich abzubilden.

$$I(x, y) \rightarrow I_f(\omega_x, \omega_y)$$

[0066] Der Term $I_f(\omega_x, \omega_y)$ bezeichnet Bilddaten in dem Frequenzbereich.

[0067] Als Nächstes werden Informationen über das inverse Frequenzbereichsfilter $1/PSF_f(\omega_x, \omega_y)$, das der Fokusposition P_n entspricht, erfasst.

[0068] Dann werden die Bilddaten $I_f(\omega_x, \omega_y)$ in dem Frequenzbereich mit dem inversen Frequenzbereichsfilter $1/PSF_f(\omega_x, \omega_y)$ multipliziert, um $IC_f(\omega_x, \omega_y)$ zu berechnen.

$$IC_f(\omega_x, \omega_y) = I_f(\omega_x, \omega_y) \times \left[1/PSF_f(\omega_x, \omega_y) \right]$$

[0069] Das berechnete $IC_f(\omega_x, \omega_y)$ wird einer inversen Fourier-Transformation unterzogen, um einen Absolutwert jedes Pixels zu ermitteln und so das wiederhergestellte Bild $IC(x, y)$ zu erhalten.

[0070] Die Vorverarbeitungseinheit 100B führt eine Bildwiederherstellungsverarbeitung an den Bilddaten jedes Bildes durch, das durch Abbilden erhalten wurde, und korrigiert die Unschärfe. Die Bilddaten nach der Unschärfekorrektur werden in der Hilfsspeichervorrichtung 103 aufgezeichnet.

[Verfahren zum Erfassen der Punktspreizfunktion]

[0071] Fig. 5 zeigt ein Beispiel für ein Verfahren zum Erfassen der Punktspreizfunktion des optischen Bilderzeugungssystems.

[0072] Fig. 5 zeigt ein Beispiel für den Fall, dass die Punktspreizfunktion des optischen Bilderzeugungssystems 14 unter Verwendung einer Lochblendenbeleuchtung 200 gemessen wird.

[0073] Wie in Fig. 5 dargestellt, wird ein lumineszierender Punkt durch die Lochblendenbeleuchtung 200 an der Position der Referenzfläche erzeugt, wobei die Bilder des lumineszierenden Punktes aufgenommen werden, während die Fokusposition variiert wird. Der lumineszierende Punkt ist auf der optischen Achse des optischen Bilderzeugungssystems 14 eingestellt. Als Ergebnis erhält man die Punktspreizfunktion für jede Fokusposition. Die Punktspreizfunktion für jede Fokusposition wird in die Voxeldaten $PSF(x, y, z)$ der Punktspreizfunktion aufgenommen. Dabei steht z für die Position (Höhe) in Richtung der z -Achse, die der Fokusposition entspricht.

[0074] Die Lochblenden-Beleuchtung 200 umfasst eine Lichtquelle 201, eine Kondensorlinse 202 und eine Lochblendenplatte 203. Die Lochblendenplatte 203 hat eine Lochblende 204. Bei der Lochblendenbeleuchtung 200 wird Licht von der Lichtquelle 201 durch die Kondensorlinse 202 gebündelt, und das gebündelte Licht durch die in der Lochblendenplatte 203 vorgesehene Lochblende 204 emittiert. Das durch die Lochblende 204 emittierte Licht bildet einen Leuchtpunkt. Die Lochblende 204 ist auf der Bezugsfläche und auf der optischen Achse des optischen Bilderzeugungssystems 14 angeordnet. Die Lochblende 204 hat einen Durchmesser, der gleich oder kleiner ist als die optische Auflösung der Abbildungsvorrichtung 10 durch das optische Bilderzeugungssystem 14.

[0075] Der lumineszierende Punkt kann auch durch andere Verfahren erzeugt werden. So kann beispielsweise ein fluoreszierendes Kügelchen zur Erzeugung des lumineszierenden Punktes verwendet werden. Das Verfahren mit dem fluoreszierenden Kügelchen ist ein Verfahren, bei dem ein kleines fluoreszierendes Kügelchen mit externer Beleuchtung angeregt und die angeregte Fluoreszenz abgebildet wird. In diesem Fall hat das fluoreszierende Kügelchen auch einen Durchmesser, der gleich oder kleiner ist als die optische Auflösung der Abbildungsvorrichtung 10 durch das optische Bilderzeugungssystem 14.

[0076] Da die durch die obigen Verfahren erhaltene Punktspreizfunktion eine Funktion ist, die für das optische Abbildungssystem spezifisch ist, ist es nicht notwendig, die Punktspreizfunktion erneut zu erfassen, es sei denn, die Kamera oder das optische System werden geändert. In einer Umgebung, in der die Temperatur stark schwankt, ist es jedoch wünschenswert, die Punktspreizfunktion in Abhängigkeit von der Temperatur zu erfassen. In diesem Fall werden bei der Bildwiederherstellungsverarbeitung Informationen über die Temperatur während des Abbildens des zu messenden Objektes erfasst, wobei die Bildwiederherstellungsverarbeitung auf der Grundlage der Punktspreizfunktion entsprechend der erfassten Temperatur ausgeführt wird. Mit

anderen Worten wird die Bildwiederherstellungsverarbeitung unter Verwendung eines der Temperatur entsprechenden Wiederherstellungsfilters (eines Frequenzbereichs-Wiederherstellungsfilters) ausgeführt.

[Erzeugung eines Wiederherstellungsfilters]

[0077] Wenn das inverse Filter als Wiederherstellungsfilter verwendet wird, wird die Fourier-Transformation der Punktspreizfunktion $PSF(x,y)$ ausgeführt, um $PSF_f(\omega_x, \omega_y)$ zu berechnen, und sein inverses $1/PSF_f(\omega_x, \omega_y)$ weiter berechnet, um das inverse Filter zu erzeugen.

[0078] In der obigen Ausführungsform wird die Konfiguration eingesetzt, bei der das inverse Filter im Frequenzbereich im Voraus erhalten und gespeichert wird. Es ist jedoch auch eine Konfiguration möglich, bei der das inverse Filter in dem Frequenzbereich während der Bildwiederherstellungsverarbeitung berechnet und erfasst wird.

[0079] Wenn das zu verarbeitende Bild und die zu verwendende Punktspreizfunktion unterschiedlich groß sind, wird beispielsweise ein Zero-Padding der Punktspreizfunktion ausgeführt, um die Größe des Bildes und die Größe der Punktspreizfunktion anzugleichen.

[Messvorgang]

[0080] Fig. 6 ist ein Flussdiagramm, das einen Messvorgang mit der dreidimensionalen Formmessvorrichtung veranschaulicht.

[0081] Zunächst nimmt die Abbildungsvorrichtung 10 Bilder des zu messenden Objektes Ob auf (Schritt S1). Insbesondere wird das zu messende Objekt Ob auf dem Objektisch 11 angebracht und das auf dem Objektisch 11 angebrachte zu messende Objekt Ob mit der Kamera 15 abgebildet, während die Fokusposition mit einem konstanten Abstand verändert wird. Die Bilddaten der durch Abbilden erhaltenen Bilder werden nacheinander an die Bildverarbeitungsvorrichtung 100 ausgegeben. Die Bildverarbeitungsvorrichtung 100 erfasst die von der Abbildungsvorrichtung 10 ausgegebenen Bilddaten und speichert die Bilddaten in der Hilfsspeichervorrichtung 103.

[0082] Die Bilddaten der durch Abbilden gewonnenen Bilder werden dann einer Bildwiederherstellungsverarbeitung unterzogen, die als Vorverarbeitung ausgeführt wird (Schritt S2).

[0083] Wie oben beschrieben, wird bei der Bildwiederherstellungsverarbeitung eine Fourier-Transformation der zu verarbeitenden Bilddaten $I(x,y)$ ausgeführt, um $I_f(\omega_x, \omega_y)$ zu berechnen, wobei das berechnete $I_f(\omega_x, \omega_y)$ mit dem inversen Frequenzbereichsfilter $1/PSF_f(\omega_x, \omega_y)$ multipliziert wird, um $IC_f(\omega_x, \omega_y)$ zu berechnen. Das berechnete $IC_f(\omega_x, \omega_y)$ wird dann einer inversen Fourier-Transformation unterzogen, um einen absoluten Wert für jedes Pixel zu erhalten, so dass das wiederhergestellte Bild $IC(x,y)$ erhalten wird. Auf diese Weise wird die Unschärfe in den aufgenommenen Bildern korrigiert. Die Bilddaten nach der Korrektur der Unschärfe werden in dem Hilfsspeicher 103 gespeichert.

[0084] Als Nächstes wird das Fokusvariationsverfahren auf die Bilddaten nach der Bildwiederherstellungsverarbeitung angewendet, um 3D-Formdaten zu erzeugen (Schritt S3). Insbesondere wird für die Vielzahl von Bildern nach der Korrektur der Unschärfe ein Bewertungswert für einen Fokussiergrad für jedes Pixel berechnet, wobei 3D-Formdaten des zu messenden Objektes Ob basierend auf dem berechneten Bewertungswert für den Fokussiergrad für jedes Pixel erzeugt werden. Dabei wird der Bewertungswert für den Fokussiergrad aus den Bildern berechnet, wobei die Unschärfe korrigiert wird, so dass eine genaue Berechnung ausgeführt werden kann. Auf diese Weise ist es möglich, den Kontrast der Unschärfegrenze in dem Abschnitt mit hoher Reflektivität stärker zu machen als den Kontrast der Oberfläche des Abschnitts mit niedriger Reflektivität, selbst wenn es einen Abschnitt mit hoher Reflektivität in dem Bild gibt. Auf diese Weise lässt sich der Bewertungswert für den Fokussiergrad in jedem Bild genau berechnen. Auf diese Weise lassen sich 3D-Formdaten mit hoher Genauigkeit erzeugen.

[Modifikation]

[Bildwiederherstellungsverarbeitung mit Voxeldaten]

[0085] Es ist zudem eine Konfiguration möglich, bei der die Bilddaten als Voxeldaten erfasst werden und die Bildwiederherstellungsverarbeitung gemeinsam ausgeführt wird. Die Verarbeitung erfolgt nach folgendem Verfahren.

[0086] Es wird nun angenommen, dass $I(x,y,z)$ die Voxeldaten des bei Abbilden gewonnenen Bildes sind. Die Anzahl der Pixel ist in diesem Fall (N_x, N_y) , und die Anzahl der Schichten (die Anzahl der Positionen in Höhenrichtung, an denen das Abbilden ausgeführt wird) ist N_z .

[0087] Die Voxeldaten der Punktstreufunction sind $PSF(x,y,z)$. Die Voxeldaten der Punktspreizfunktion $PSF(x,y,z)$ werden durch Aufnehmen von Bildern des auf der Bezugsfläche angeordneten lumineszierenden Punktes unter Variation der Fokusposition mit konstantem Abstand gewonnen.

[0088] Wenn die Voxeldaten $I(x,y,z)$ auf den Bildern eine andere Größe haben als die Voxeldaten der Punktspreizfunktion $PSF(x,y,z)$, wird ein Null-Padding an den Voxeldaten der Punktspreizfunktion $PSF(x,y,z)$ ausgeführt, um die Größe der Voxeldaten der Bilder und der Voxeldaten der Punktspreizfunktion anzugleichen.

[0089] Die dreidimensionale Fourier-Transformation bildet $I(x,y,z)$ auf den Frequenzbereich ab.

$$I(x,y,z) \rightarrow I_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$$

[0090] Die dreidimensionale Fourier-Transformation bildet $PSF(x,y,z)$ auf den Frequenzbereich ab.

$$PSF(x,y,z) \rightarrow PSF_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$$

[0091] Aus der Punktspreizfunktion in dem Frequenzbereich nach der Fourier-Transformation $PSF_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ wird ein inverses Filter in dem Frequenzbereich $1/PSF_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ erzeugt.

[0092] Das erzeugte inverse Frequenzbereichsfilter $1/PSF_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ wird auf die Voxeldaten der Bilder in dem Frequenzbereich $I_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ angewendet, um $IC_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ zu berechnen.

$$IC_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = I_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z) \times \left[1/PSF_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z) \right]$$

[0093] Das berechnete $IC_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ wird einer inversen Fourier-Transformation unterzogen, um einen absoluten Wert jedes Pixels zu erhalten, wodurch ein wiederhergestelltes Bild $IC(x,y,z)$ erhalten wird.

[0094] So ist eine Konfiguration möglich, bei der die Bilddaten als Voxeldaten erfasst und die Bildwiederherstellungsverarbeitung gemeinsam ausgeführt wird.

[Bildwiederherstellungsverarbeitung mit Wiener-Filter]

[0095] Die Faltung der Punktspreizfunktion funktioniert im Grunde als Tiefpassfilter, und das inverse Filter dient als Hochpassfilter. Wenn also ein einfaches inverses Filter auf die aufgenommenen Bilder des zu messenden Objektes angewendet wird und Rauschen auf der Hochfrequenzseite vorhanden ist, nimmt das Rauschen zu und beeinträchtigt die Bildverarbeitung bei dem Fokusvariationsverfahren. Mit anderen Worten ist es bei dem Fokusvariationsverfahren nicht möglich, zwischen dem Rauschen und der Reflexion des zu messenden Objektes zu unterscheiden, und daher erscheint das Rauschen als Messfehler.

[0096] Daher wird bei diesem Beispiel das Wiener-Filter als Wiederherstellungsfiler festgelegt. Das Wiener-Filter minimiert den quadratischen Fehler zwischen dem Originalbild und dem wiederhergestellten Bild.

[0097] Nachfolgend wird der Bildwiederherstellungsvorgang unter Verwendung des Wiener-Filters beschrieben. Die Beschreibung erfolgt hier beispielhaft für den Fall, dass die Bilddaten als Voxeldaten verarbeitet werden. Es wird angenommen, dass die Punktspreizfunktion $PSF(x,y,z)$ im Voraus erfasst wird.

[0098] Zunächst werden Bilddaten $I(x,y,z)$ von aufgenommenen Bildern des zu vermessenden Objektes Ob erfasst. Wie oben beschrieben, werden die Bilddaten als Voxeldaten erfasst. Die Anzahl der Pixel ist in diesem Fall (N_x, N_y) , und die Anzahl der Schichten ist N_z .

[0099] Als nächstes wird festgestellt, ob die Größe der Bilddaten $I(x,y,z)$ mit der Größe der Punktspreizfunktion $PSF(x,y,z)$ übereinstimmt oder nicht. Wenn die Größen unterschiedlich sind, wird an der Punktspreizfunktion $PSF(x,y,z)$ ein Zero-Padding ausgeführt, um die Größen anzupassen.

[0100] Anschließend wird eine dreidimensionale Fourier-Transformation der Bilddaten $I(x,y,z)$ ausgeführt, um die Bilddaten auf den Frequenzbereich abzubilden.

$$I(x,y,z) \rightarrow I_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$$

[0101] Dann wird eine dreidimensionale Fourier-Transformation der Punktspreizfunktion $PSF(x,y,z)$ ausgeführt, um die Bilddaten auf den Frequenzbereich abzubilden.

$$PSF(x,y,z) \rightarrow PSF_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$$

[0102] Daraufhin wird das Wiener-Filter mit folgendem Ausdruck berechnet:

$$PSF_f^*(\omega_x, \omega_y, \omega_z) / \{PSF_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)PSF_f^*(\omega_x, \omega_y, \omega_z) + SN\}$$

[0103] Dabei ist „ $PSF_f^*(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ “ die komplexe Konjugation von $PSF_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ und „SN“ eine reelle Zahl, die aus einem SN-Verhältnis des Bildes gewonnen wird. Für „SN“ wird für den praktischen Gebrauch eine Konstante festgelegt. Da „SN“ jedoch stark von der Verstärkung der Kamera abhängt, ist es besser, den optimalen Wert experimentell einzustellen. Experimentell bezieht sich hier auf ein Konzept, das sowohl „durch tatsächliche Experimente“ als auch „durch Computersimulationen“ umfasst.

[0104] Das berechnete Wiener-Filter wird dann auf $I_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ angewendet, um $IC_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ zu berechnen.

$$IC_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = I_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z) \left[PSF_f^*(\omega_x, \omega_y, \omega_z) / \{PSF_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)PSF_f^*(\omega_x, \omega_y, \omega_z) + SN\} \right]$$

[0105] Das berechnete $IC_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ wird einer inversen Fourier-Transformation unterzogen, um ein komplexes Bild $IC_c(x,y,z)$ zu erhalten. Dann wird ein absoluter Wert jedes Pixels aus dem komplexen Bild $IC_c(x,y,z)$ ermittelt und ein endgültiges wiederhergestelltes Bild $IC_r(x,y,z)$ erhalten.

[0106] Auf diese Weise kann die Verwendung des Wiener-Filters als Wiederherstellungsfilters das Rauschen reduzieren, insbesondere das Rauschen auf der Hochfrequenzseite, so dass die Bilder mit höherer Qualität wiederhergestellt werden können. Dies ermöglicht eine genauere Messung.

[0107] **Fig. 7** zeigt ein Beispiel für die Bildwiederherstellungsverarbeitung mit dem Wiener-Filter. **Fig. 7** zeigt ein Beispiel eines in der xz-Ebene geschnittenen Bildes, um den Einfluss der Unschärfe in Abhängigkeit von der Fokusposition zu verdeutlichen. Das zu messende Objekt hat eine kegelförmige Form.

[0108] Wie in **Fig. 7** dargestellt, kann bestätigt werden, dass die Bildwiederherstellungsverarbeitung mit Hilfe des Wiener-Filters die Unschärfe in dem Abschnitt mit hohem Reflexionsvermögen reduziert.

[0109] **Fig. 8** ist eine teilweise vergrößerte Ansicht eines Teils (eines Rahmen-f-Bereiches) von **Fig. 7**. **Fig. 9** ist eine teilweise vergrößerte Ansicht eines Bildes, das unter Verwendung des inversen Filters einer Bildwiederherstellungsverarbeitung unterzogen wurde.

[0110] Wie in **Fig. 9** dargestellt, kann bestätigt werden, dass hochfrequentes Rauschen in einem dunklen Abschnitt zunimmt, wenn ein einfaches inverses Filter verwendet wird. Bei dem Fokusvariationsverfahren ist es bei Vorhandensein eines derartigen Rauschens nicht möglich, zwischen dem Rauschen und der Reflexion des zu messenden Objektes, insbesondere der Reflexion in einem Abschnitt mit geringem Reflexionsvermögen, zu unterscheiden, weshalb das Rauschen als Messfehler erscheint.

[0111] Andererseits kann bestätigt werden, dass das Problem des Rauschens durch die Verwendung des Wiener-Filters, wie in **Fig. 8** dargestellt, gelöst wird. Daher wird eine hochgenaue Messung auch in einem Abschnitt mit geringem Reflexionsvermögen (in diesem Beispiel eine geneigte Fläche) möglich.

[Abbildungsbedingungen]

[0112] Beim Abbilden des zu messenden Objektes wird das Abbilden derart ausgeführt, dass die Luminanz nicht in allen Bildern gesättigt ist. Mit anderen Worten wird das Abbilden derart ausgeführt, dass ein Maximalwert und ein Minimalwert der Luminanz des zu messenden Objektes innerhalb eines dynamischen Abschnitts des Abbildens durch die Abbildungsvorrichtung liegen. Daher ist es vorteilhaft, eine Kamera mit einem großen Dynamikbereich (so genannte Kamera mit großem Dynamikbereich) als Kamera in der Abbildungsvorrichtung zu verwenden.

[Abbildungsvorrichtung]

[0113] In der obigen Ausführungsform wird die Konfiguration eingesetzt, bei der eine Vielzahl von Bildern mit unterschiedlicher Fokusposition aufgenommen werden, während der optische Kopf in Bezug auf das zu messende Objekt bewegt wird. Es ist jedoch auch eine Konfiguration möglich, bei der der optische Kopf fixiert ist und das zu messende Objekt für das Abbilden bewegt wird. Alternativ ist auch eine Konfiguration möglich, bei der sowohl der optische Kopf als auch das zu messende Objekt für das Abbilden bewegt werden. Mit anderen Worten kann die Bewegung zur Veränderung der Fokusposition eine Relativbewegung sein.

[Bildverarbeitungsvorrichtung]

[0114] In der obigen Ausführungsform wird der Fall beschrieben, dass die Bildverarbeitungsvorrichtung einen Computer umfasst, der sich von der Abbildungsvorrichtung unterscheidet. Die Funktionen der Bildverarbeitungsvorrichtung können jedoch in die Bildverarbeitungsvorrichtung integriert sein.

Bezugszeichenliste

1	3D-Formmessvorrichtung,
10	Abbildungsvorrichtung,
11	Objekttisch,
11a	Anbringungsfläche,
12	Beleuchtungslichtquelle,
13	Optisches Beleuchtungssystem,
14	optisches Bilderzeugungssystem,
15	Kamera,
16	Fokusantriebseinheit,
17	Bedieneinheit,
18	Steuereinheit,
20	Beleuchtungslinse,
21	Strahlteiler,
22	Aperturblende,
23	Objektivlinse,
24	Bilderzeugungslinse,
100	Bildverarbeitungsvorrichtung,
100A	Bilderfassungseinheit,
100B	Vorverarbeitungseinheit,
100C	3D-Formdaten-Erzeugungseinheit,

101	Prozessor,
102	Hauptspeichervorrichtung,
103	Hilfsspeichervorrichtung,
104	Eingabevorrichtung,
105	Ausgabevorrichtung,
106	Eingabe-/Ausgabeschnittstelle,
200	Lochblendenbeleuchtung,
201	Lichtquelle,
202	Kondensorlinse,
203	Lochblendenplatte,
204	Lochblende,
Ob	zu messendes Objekt

Patentansprüche

1. Bildverarbeitungsvorrichtung zum Verarbeiten einer Vielzahl von Bildern eines zu messenden Objektes, wobei die Vielzahl von Bildern aufgenommen wird, während eine Fokusposition variiert wird, wobei die Bildverarbeitungsvorrichtung umfasst:

eine Bilderfassungseinheit, die dazu eingerichtet ist, die Vielzahl von Bildern des zu messenden Objektes zu erfassen;

eine Bildverarbeitungseinheit, die dazu eingerichtet ist, die Vielzahl von Bildern, um Unschärfe in den Bildern zu korrigieren, auf der Grundlage einer Punktspreizfunktion für jede Fokusposition eines optischen Systems in einer Abbildungsvorrichtung zu verarbeiten, die die Vielzahl von Bildern aufnimmt; und

eine 3D-Formdaten-Erzeugungseinheit, die dazu eingerichtet ist, für die Vielzahl von Bildern nach der Korrektur der Unschärfe einen Bewertungswert für einen Fokussiergrad für jedes Pixel zu berechnen und 3D-Formdaten des zu messenden Objektes auf der Grundlage des berechneten Bewertungswertes für den Fokussiergrad für jedes Pixel zu erzeugen.

2. Bildverarbeitungsvorrichtung nach Anspruch 1, bei der die Bildverarbeitungseinheit auf die Bilder in einem Frequenzbereich, der durch Fourier-Transformation der Bilder erhalten wird, ein auf der Punktspreizfunktion basierendes Frequenzbereichs-Wiederherstellungsfiler anwendet, um die Bilder in dem Frequenzbereich zu korrigieren, und eine inverse Fourier-Transformation an den korrigierten Bildern in dem Frequenzbereich ausführt, um die Unschärfe in den Bildern zu korrigieren.

3. Bildverarbeitungsvorrichtung nach Anspruch 2, bei der ein inverses Filter für den Frequenzbereich aus der Punktspreizfunktion in dem Frequenzbereich berechnet wird, der durch die Fourier-Transformation der Punktspreizfunktion erhalten wird, und das berechnete inverse Frequenzbereichsfilter als Frequenzbereichs-Wiederherstellungsfiler festgelegt wird.

4. Bildverarbeitungsvorrichtung nach Anspruch 2, bei der ein Frequenzbereichs-Wiener-Filter aus der Punktspreizfunktion in dem Frequenzbereich berechnet wird, der durch die Fourier-Transformation der Punktspreizfunktion erhalten wird, und das berechnete Frequenzbereichs-Wiener-Filter als das Frequenzbereichs-Wiederherstellungsfiler festgelegt wird.

5. Bildverarbeitungsvorrichtung nach Anspruch 4, bei der das Wiener-Filter durch den folgenden Ausdruck berechnet wird:

$$\text{PSF}_f^* (\omega_x, \omega_y, \omega_z) / \left\{ \text{PSF}_f (\omega_x, \omega_y, \omega_z) \text{PSF}_f^* (\omega_x, \omega_y, \omega_z) + \text{SN} \right\},$$

wobei

$\text{PSF}(x, y, z)$ Voxeldaten der Punktspreizfunktion sind,

$\text{PSF}_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ ein Bild von $\text{PSF}(x, y, z)$ ist, das durch Fourier-Transformation abgebildet wird,

$\text{PSF}_f^*(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ eine komplexe Konjugierte von $\text{PSF}_f(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ ist, und

SN eine Konstante ist.

6. Bildverarbeitungsvorrichtung nach Anspruch 5, bei der die Konstante SN experimentell eingestellt wird.
7. Bildverarbeitungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, bei der die Bildverarbeitungseinheit Voxeldaten des zu messenden Objektes auf der Grundlage von Voxeldaten der Punktspreizfunktion verarbeitet, um die Unschärfe in der Vielzahl der Bilder zu korrigieren.
8. Bildverarbeitungsvorrichtung nach Anspruch 7, bei der, wenn die Voxeldaten der Punktspreizfunktion kleiner sind als die Voxeldaten des zu messenden Objektes, die Bildverarbeitungseinheit die Voxeldaten der Punktspreizfunktion durch Zero-Padding so anpasst, dass sie in ihrer Größe mit den Voxeldaten des zu messenden Objektes identisch sind.
9. Bildverarbeitungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, bei der die Punktspreizfunktion erfasst wird, indem ein lumineszierender Punkt auf einer optische Achse des optischen Systems eingestellt wird und der lumineszierende Punkt abgebildet wird, während die Abbildungsvorrichtung relativ zu dem lumineszierenden Punkt bewegt wird.
10. Bildverarbeitungsvorrichtung nach Anspruch 9, bei der der lumineszierende Punkt einen Durchmesser hat, der gleich oder kleiner als die optische Auflösung der Abbildungsvorrichtung durch das optische System eingestellt ist.
11. Bildverarbeitungsvorrichtung nach Anspruch 9 oder 10, bei der der lumineszierende Punkt durch eine Lochblendenbeleuchtung oder ein fluoreszierendes Kügelchen ausgebildet wird.
12. Bildverarbeitungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 11, bei der die Bildverarbeitungseinheit Informationen über die Temperatur erfasst, wenn das zu messende Objekt abgebildet wird, und die Unschärfe in der Vielzahl von Bildern auf der Grundlage der Punktspreizfunktion entsprechend der erfassten Temperatur korrigiert.
13. Bildverarbeitungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 12, bei der die Vielzahl von Bildern des zu messenden Objektes so aufgenommen wird, dass ein Maximalwert und ein Minimalwert der Lumianz des zu messenden Objektes innerhalb eines dynamischen Bereichs des Abbildens durch die Abbildungsvorrichtung liegen.
14. 3D-Formmessvorrichtung, umfassend:
eine Abbildungsvorrichtung, die dazu eingerichtet ist, eine Vielzahl von Bildern eines zu messenden Objektes aufzunehmen, das auf eine optische Achse der Abbildungsvorrichtung eingestellt ist, während sie sich relativ zu dem zu messenden Objekt bewegt, wobei die Vielzahl von Bildern eine unterschiedliche Fokussposition hat; und
die Bildverarbeitungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13, wobei die Bildverarbeitungsvorrichtung dazu eingerichtet ist, die Vielzahl der von der Abbildungsvorrichtung aufgenommenen Bilder des zu messenden Objektes zu verarbeiten.
15. Bildverarbeitungsverfahren zum Verarbeiten einer Vielzahl von Bildern eines zu messenden Objektes, wobei die Vielzahl von Bildern aufgenommen wird, während eine Fokussposition variiert wird, wobei das Bildverarbeitungsverfahren umfasst:
Erfassen der Vielzahl von Bildern des zu messenden Objektes;
Korrigieren der Unschärfe in der Vielzahl von Bildern auf der Grundlage einer Punktspreizfunktion für jede Fokussposition eines optischen Systems in einer Abbildungsvorrichtung, die die Vielzahl von Bildern aufnimmt; und
Berechnen eines Bewertungswertes für einen Fokussiergrad für jedes Pixel für die Vielzahl von Bildern nach der Korrektur der Unschärfe und Erzeugen von 3D-Formdaten des zu messenden Objektes auf der Grundlage des berechneten Bewertungswertes für den Fokussiergrad für jedes Pixel.

Es folgen 10 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG.1

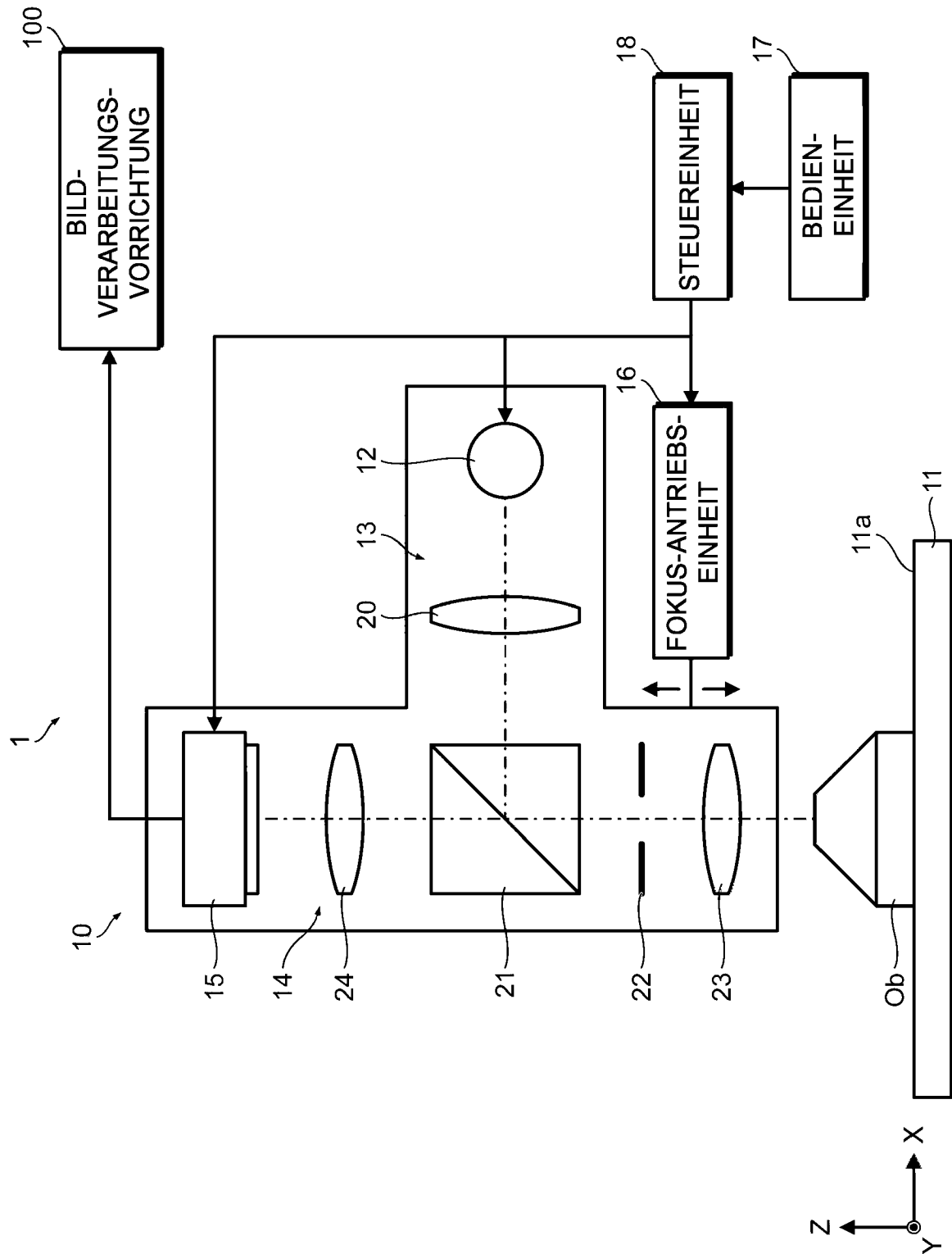


FIG.2

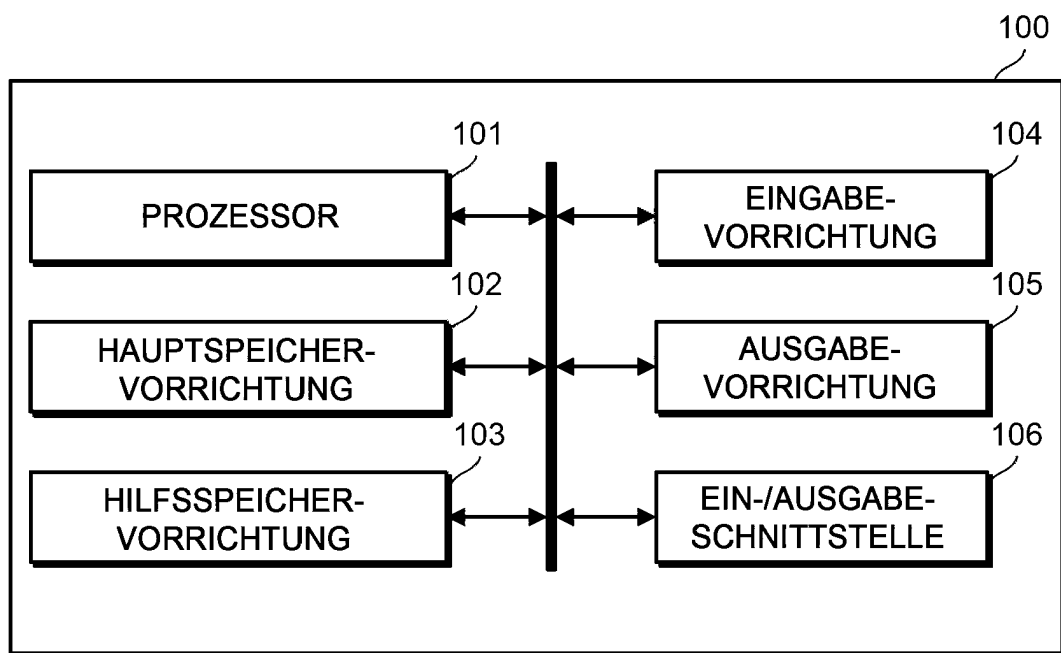


FIG.3

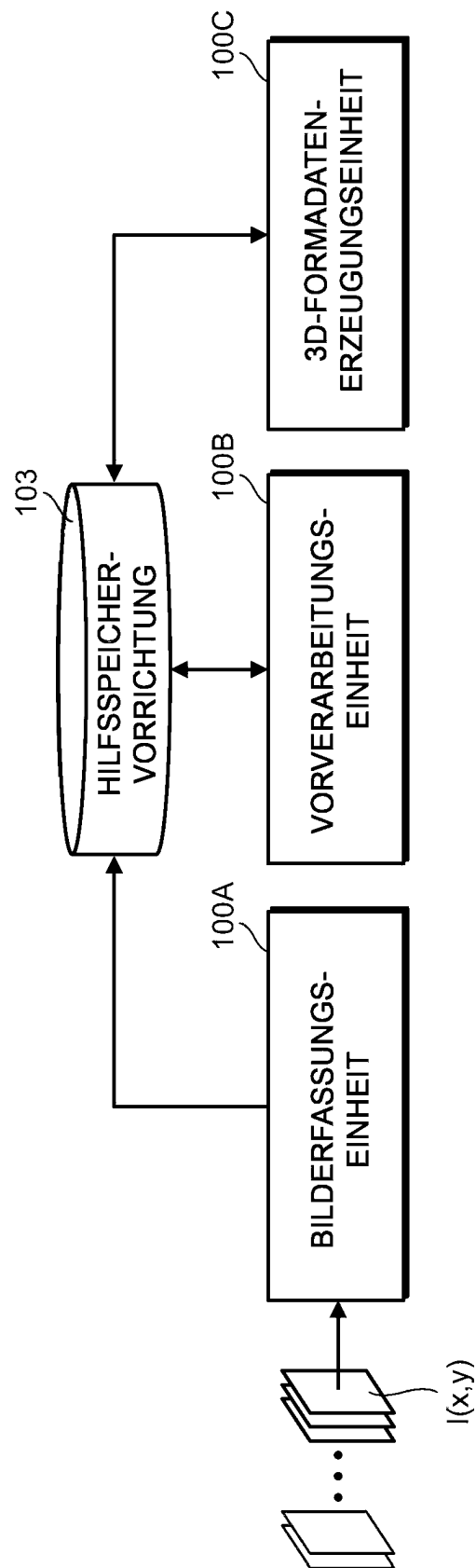


FIG.4

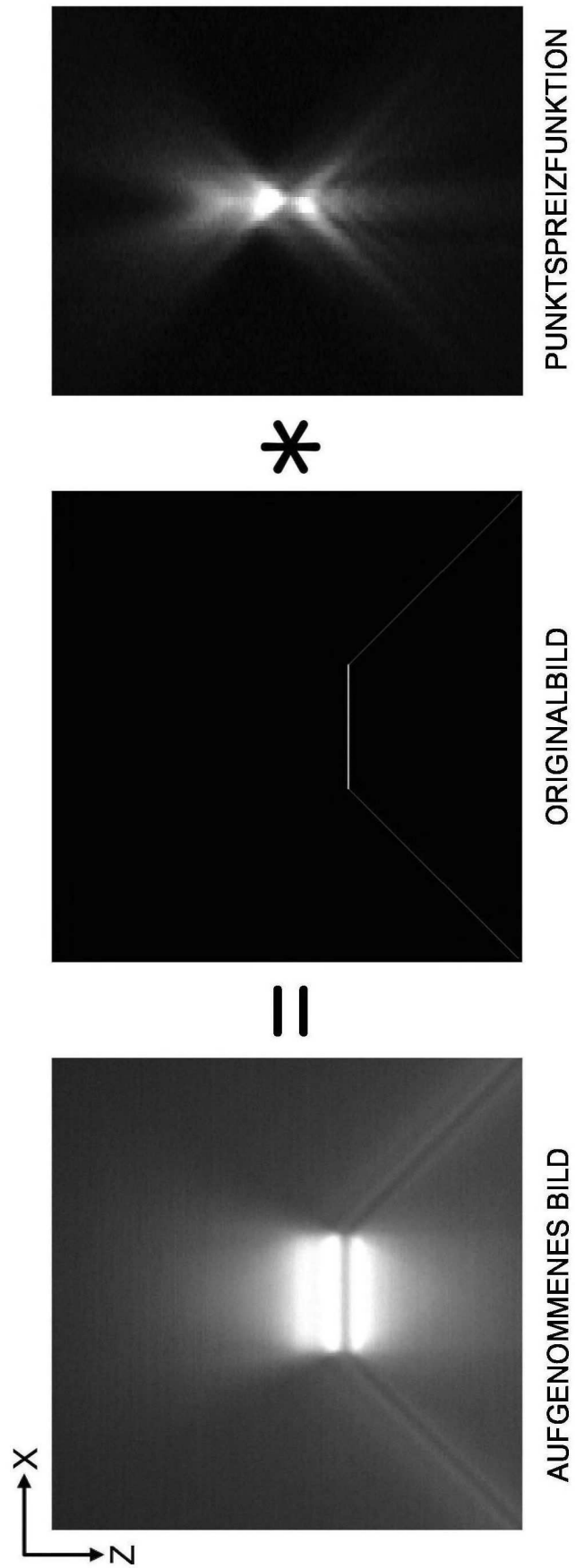


FIG.5

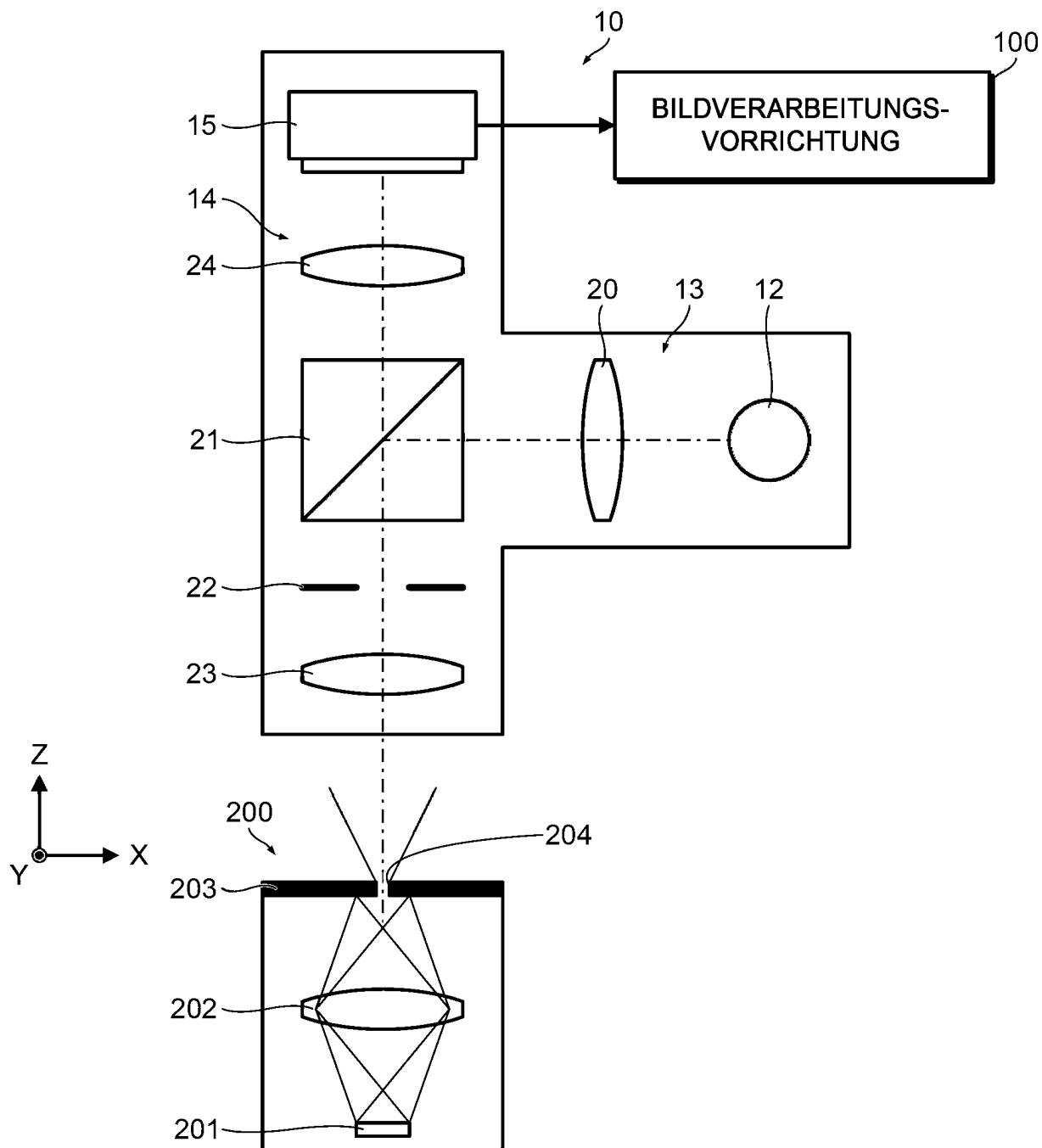


FIG.6



FIG.7

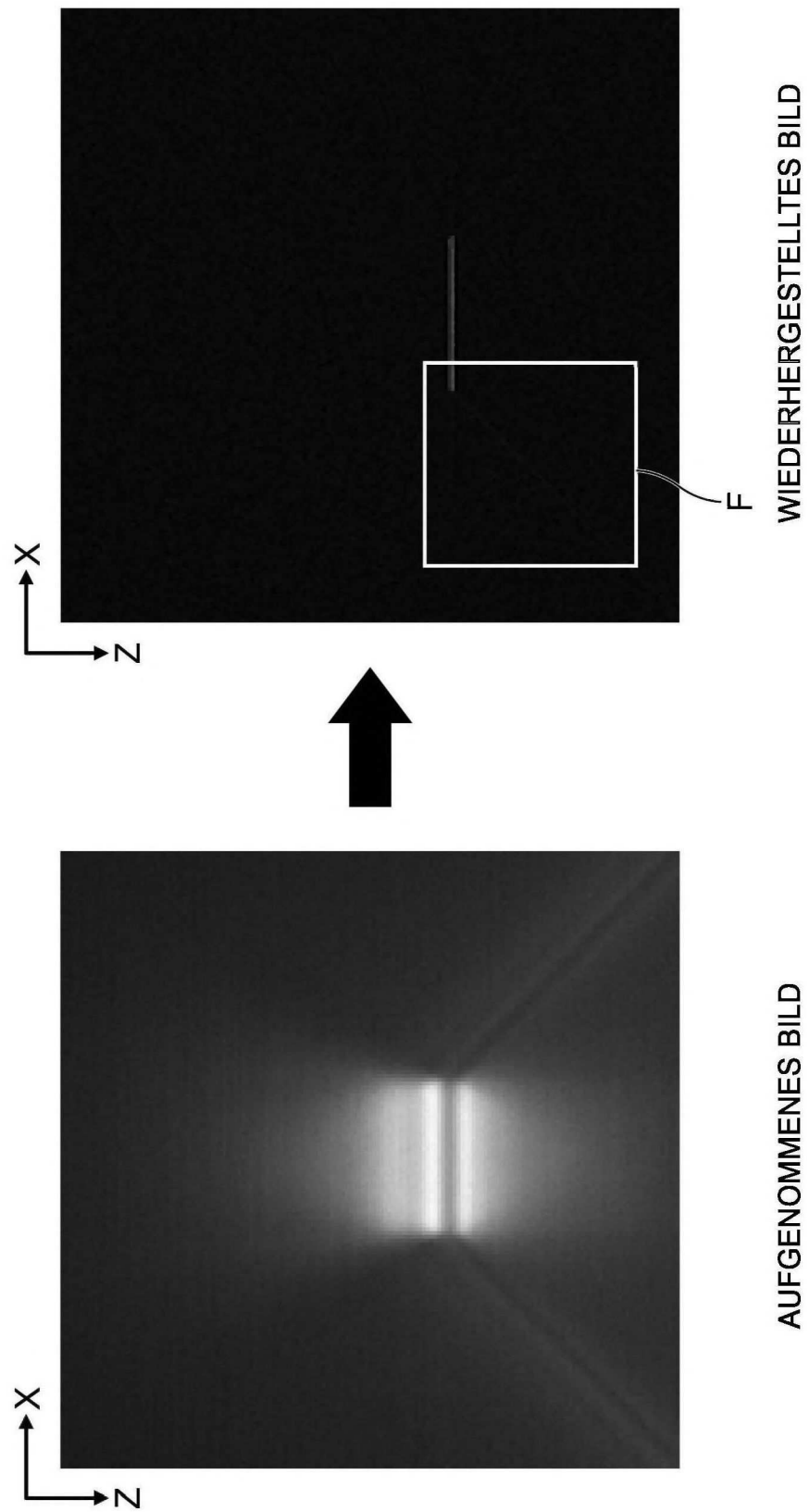


FIG.8

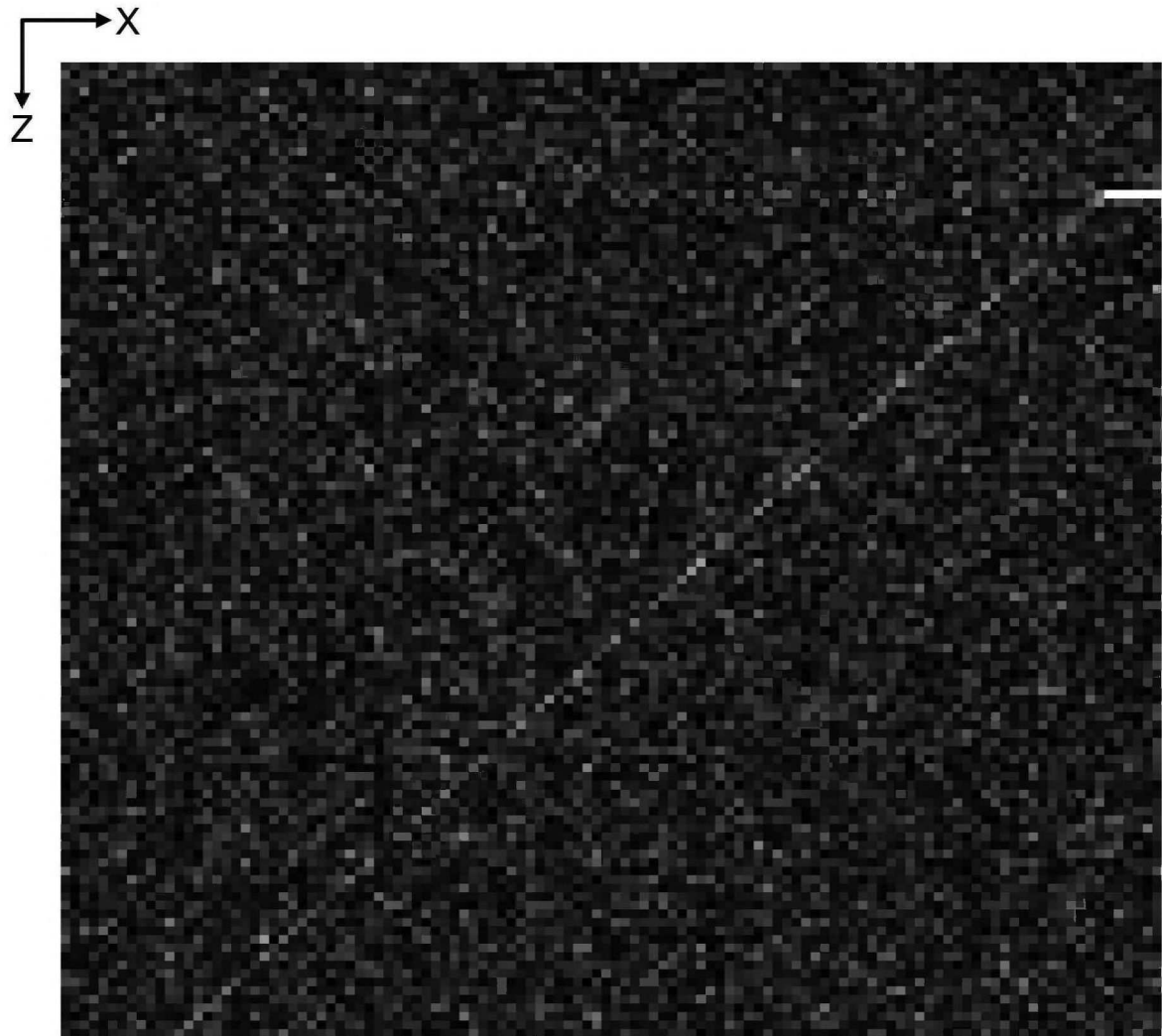


FIG.9

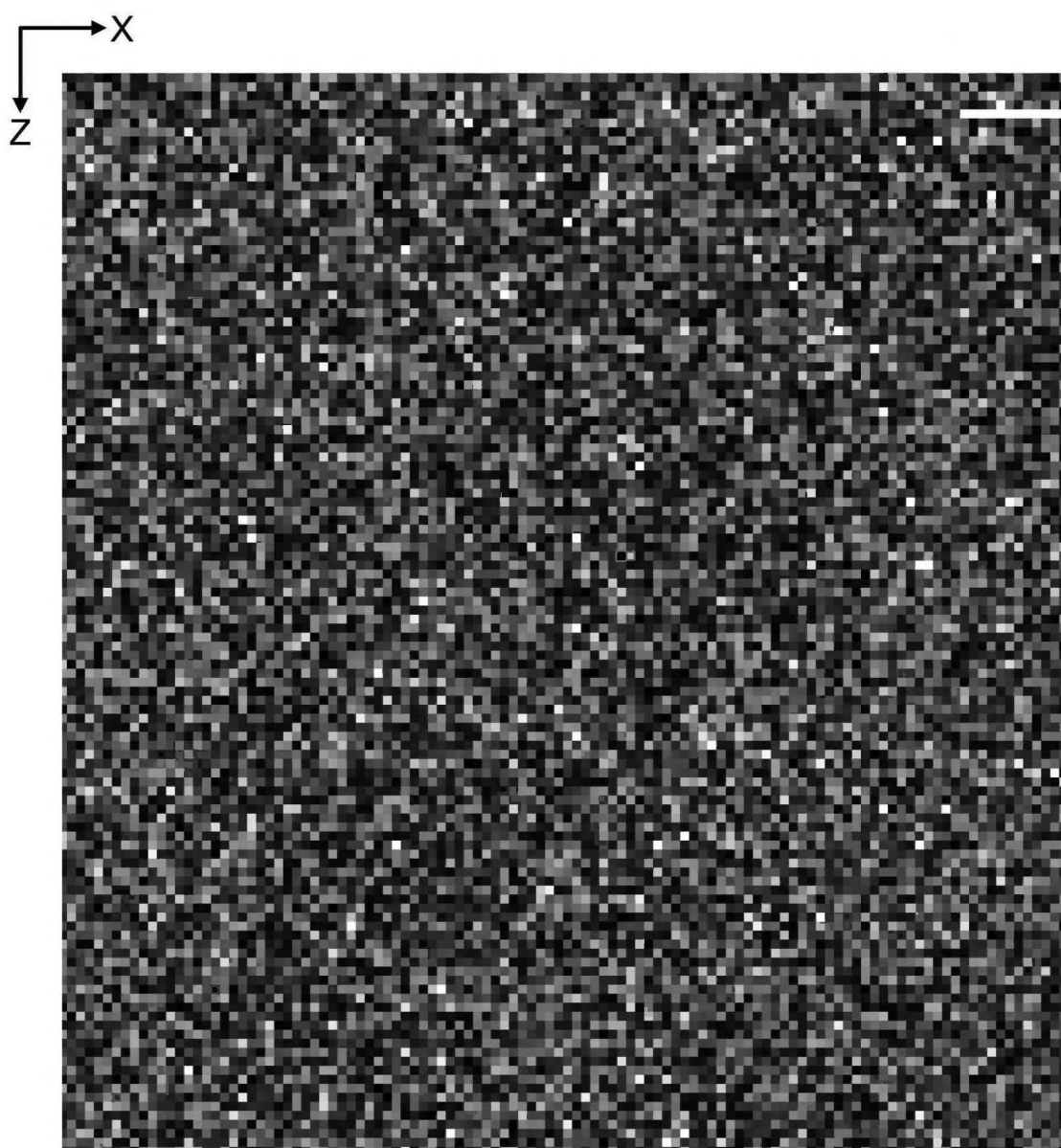


FIG.10

