



(10) **DE 10 2014 206 309 B4** 2023.05.25

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2014 206 309.4**
(22) Anmeldetag: **02.04.2014**
(43) Offenlegungstag: **09.10.2014**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **25.05.2023**

(51) Int Cl.: **G01B 11/24 (2006.01)**
G01B 11/00 (2006.01)
H04N 25/48 (2023.01)
G06T 3/40 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(30) Unionspriorität:
13/857,319 **05.04.2013** **US**

(73) Patentinhaber:
MITUTOYO CORPORATION, Kawasaki-shi,
Kanagawa, JP

(74) Vertreter:
MERH-IP Matias Erny Reichl Hoffmann
Patentanwälte PartG mbB, 80336 München, DE

(72) Erfinder:
Gladnick, Paul Gerard, Seattle, Wash., US

(56) Ermittelter Stand der Technik:
siehe Folgeseiten

(54) Bezeichnung: **System und Verfahren zum Erhalten von Bildern mit Versatz zur Verwendung für verbesserte Kantenauflösung**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Erfassen mehrerer Bilder in einem Inspektionssystem (10, 100) mit maschineller Bildverarbeitung zur Verwendung bei der Durchführung von Messabläufen an einem Werkstück (20), das Verfahren umfassend:

Bereitstellen eines optischen Systems (34, 205) in dem Inspektionssystem (10, 100) mit maschineller Bildverarbeitung, wobei das optische System (34, 205) eine Vergrößerung M bereitstellt;

Bereitstellen einer Kamera (260) in dem Inspektionssystem (10, 100) mit maschineller Bildverarbeitung, wobei die Kamera (260) einen ersten Pixelabstand P aufweist und eine Betriebsart für schnelle Mehrfachbilderfassung aufweist;

Bereitstellen von Abtastabläufen für Bilder mit Sub-Pixelversatz, umfassend:

Bereitstellen einer ersten Bilderfassungsbewegung, die das Bewegen eines Werkstücks (20) und der Kamera (260) mit einer ersten Geschwindigkeit S relativ zueinander entlang einer ersten Richtung umfasst;

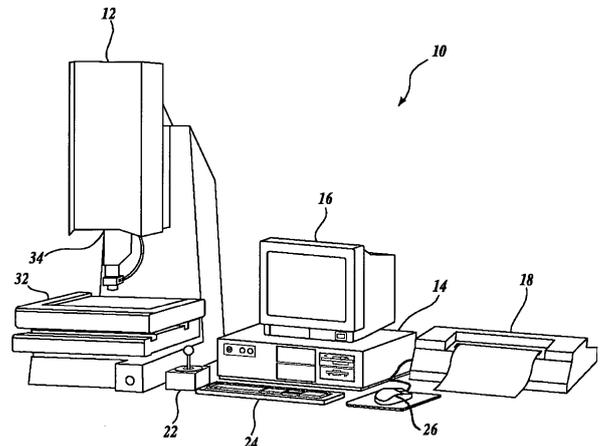
Erfassen mehrerer Bilder eines Bereichs von Interesse während der Bilderfassungsbewegung unter Verwendung der Betriebsart der schnellen Mehrfachbilderfassung, wobei die mehreren Bilder umfassen:

ein zu einer ersten Zeit t1 erfasstes erstes Bild (600A) des Bereichs von Interesse; und ein zu einer zweiten Zeit t2 nach der ersten Zeit t1 erfasstes zweites Bild (600B) des Bereichs von Interesse;

wobei ein Versatz O zwischen dem ersten und zweiten Bild (600A, 600B) ungefähr gleich $M \cdot S \cdot (t_2 - t_1)$ ist und das Inspektionssystem (10, 100) mit maschineller Bildverarbei-

tung so konfiguriert ist, dass O ungleich nP ist, wobei n eine Ganzzahl ist,

wobei das Erfassen der Vielzahl von Bildern umfasst: Verwendung eines ersten Stroboskopblitzes (SF1) mit einer Zeitsteuerung, die der ersten Zeit t1 entspricht, um das erste Bild (600A) zu erfassen; und Verwendung eines zweiten Stroboskopblitzes (SF2) mit einer Zeitsteuerung, die der zweiten Zeit t2 entspricht, um das zweite Bild (600B) zu erfassen.



(56) Ermittelte Stand der Technik:

DE	100 47 211	A1
DE	10 2009 015 594	A1
US	6 542 180	B1
US	7 324 682	B2
US	7 454 053	B2
US	7 499 584	B2
US	7 567 713	B2
US	8 111 905	B2
US	8 111 938	B2
US	2005 / 0 280 714	A1

Beschreibung

ALLGEMEINER STAND DER TECHNIK

[0001] Präzisionsinspektionssysteme mit maschineller Bildverarbeitung (oder kurz Bildverarbeitungssysteme) können genutzt werden, um präzise dimensionale Messungen von untersuchten Objekten zu erhalten und verschiedene andere Eigenschaften von Objekten zu untersuchen. Solche Systeme können einen Computer, eine Kamera und optische Systeme sowie einen in mehrere Richtungen beweglichen Präzisionstisch umfassen, um der Kamera zu ermöglichen, die Merkmale eines zu untersuchenden Werkstücks zu scannen. Ein beispielhaftes System aus dem Stand der Technik, das im Handel erhältlich ist, ist die QUICK VISION®-Serie von PC-basierten Bildverarbeitungssystemen und die QVPAK® Software der Mitutoyo America Corporation (MAC) mit Sitz in Aurora, IL. Die Merkmale und Arbeitsabläufe der Bildverarbeitungssysteme der QUICK VISION®-Serie und der QVPAK®-Software werden beispielsweise in dem im Januar 2003 veröffentlichten Benutzerhandbuch der optischen 3D CNC Messmaschine QVPAK und in der im September 1996 veröffentlichten Bedienungsanleitung der optischen 3D CNC Messmaschine QVPAK allgemein beschrieben, die jeweils vorliegend vollinhaltlich durch Bezugnahme mit aufgenommen werden. Dieses Produkt, wie beispielsweise durch das QV-302 Pro-Modell veranschaulicht wird, ist in der Lage, ein mikroskopartiges optisches System einzusetzen, um Inspektionsbilder von Werkstücken in verschiedenen Vergrößerungen zu liefern und den Tisch so zu bewegen, wie es notwendig ist, die Werkstückoberfläche über die Grenzen eines einzelnen Videobildes hinaus zu überqueren. Ein einzelnes Videobild umfasst typischerweise nur einen Teil des zu beobachtenden oder zu untersuchenden Werkstücks bei der gewünschten Vergrößerung, Messauflösung und den physikalischen Größenbeschränkungen solcher Systeme.

[0002] Die Bilderfassung kann durchgeführt werden, während eine Relativbewegung zwischen der Kamera und dem Werkstücktisch genutzt wird, wodurch der Inspektionsdurchsatz erheblich erhöht wird. In derartigen Systemen ist es vorteilhaft, eine Stroposkoplichtbeleuchtung vorzusehen, um während einer kontinuierlichen Bewegung eine Bilderfassung zu ermöglichen, ohne das Bild zu verwischen (oder zu trüben). Ein beispielhaftes Verfahren, das in unterschiedlichen Bildverarbeitungssystemen zum Erfassen von Bildern bei kontinuierlichen Bewegungsabläufen eingesetzt werden kann, wird im US-Patent US 7 499 584 B2 beschrieben, das hiermit durch Bezugnahme vollinhaltlich mit aufgenommen wird.

[0003] Mehrzweckinspektionssysteme zur maschinellen Bildverarbeitung, wie das QUICK VISION™-

System, sind im Allgemeinen auch programmierbar, um eine automatische Video-Inspektion zu bieten. Das US-Patent US 6 542 180 B1 (das '180 - Patent) lehrt verschiedene Aspekte einer derartigen Video-Inspektion und ist vorliegend durch Bezugnahme vollinhaltlich mit aufgenommen. Wie in dem '180-Patent gelehrt wird, weisen automatisierte messtechnische Geräte zur Video-Inspektion im Allgemeinen Programmiermöglichkeiten auf, die eine durch den Benutzer definierte automatische Inspektionsabfolge für jede bestimmte Werkstückkonfiguration ermöglichen. Dies kann durch Text-basiertes Programmieren realisiert werden, beispielsweise durch einen Aufzeichnungsmodus, der fortschreitend den Inspektionsablauf „lernt“, indem eine Abfolge von Maschinensteuerungsanweisungen gespeichert wird, die einer Abfolge von durch einen Benutzer mit Hilfe einer grafischen Benutzeroberfläche ausgeführten Inspektionsabläufen entspricht, oder durch eine Kombination beider Verfahren. Ein solcher Aufzeichnungsmodus wird oft als „Lernmodus“ oder „Trainingsmodus“ oder „Aufzeichnungsmodus“ bezeichnet. Sobald die Inspektionsabfolge im „Lernmodus“ definiert ist, kann eine solche Abfolge dann genutzt werden, um automatisch Bilder eines Werkstücks während eines „Programmlaufmodus“ aufzunehmen (und zusätzlich zu analysieren oder zu untersuchen).

[0004] Die Maschinensteuerungsanweisungen einschließlich der spezifischen Inspektionsabfolge (d.h., wie jedes Bild aufzunehmen ist und wie jedes aufgenommene Bild zu analysieren/untersuchen ist) werden im Allgemeinen als „Teileprogramm“ oder „Werkstückprogramm“ gespeichert, das bezeichnend für die bestimmte Werkstückkonfiguration ist. Beispielsweise definiert ein Teileprogramm, wie das jeweilige Bild aufzunehmen ist, wie die Kamera relativ zum Werkstück zu positionieren ist, bei welcher Beleuchtungsstufe, mit welcher Vergrößerungsstufe, usw.. Ferner definiert das Teileprogramm, wie ein aufgenommenes Bild zu analysieren/untersuchen ist, beispielsweise durch Verwendung eines oder mehrerer Video-Werkzeuge, wie etwa Video-Werkzeuge zur Kanten-/Randerkennung.

[0005] Video-Werkzeuge (oder kurz „Werkzeuge“) und andere grafische Benutzeroberflächen können dazu verwendet werden, manuelle Inspektionen und/oder Maschinensteuerungsvorgänge auszuführen („Handbetrieb“). Deren Einstellparameter und Bedienung können ebenfalls während des Lernmodus aufgezeichnet werden, um automatische Inspektionsprogramme oder „Teileprogramme“ zu schaffen. Video-Werkzeuge können beispielsweise Werkzeuge zur Kanten-/Randerkennung, Autofokuswerkzeuge, Form- oder Mustervergleichswerkzeuge, Dimensionmesswerkzeuge und dergleichen umfassen.

[0006] Teileprogramme zum Erfassen von Bildern von Kantenmerkmalen legen typischerweise ein Maß der Vergrößerung fest. Beim Auswählen eines Vergrößerungsmaßstabs können verschiedene Abwägungen berücksichtigt werden. Beispielsweise können stärkere Vergrößerungen zwar eine höhere Auflösung bieten, sie bieten jedoch auch ein kleineres Sichtfeld in Bezug auf das Gesamtwerkstück und können zu einer größeren Verzerrung führen und ferner teurere Hardware für die Vergrößerungselemente erfordern. Geringere Vergrößerungen können ein größeres Sichtfeld und weniger Verzerrung sowie geringere Kosten bieten, können jedoch nicht das gewünschte Maß an Auflösung und entsprechender Genauigkeit für bestimmte Anwendungen bereitstellen. In einigen solchen Fällen ist die Auflösung eines Bildes eines Objekts durch den Pixelabstand im Kameradetektor begrenzt, indem die räumliche Abtastung an dem Objekt durch den Pixelabstand und die Vergrößerung bestimmt wird. Es ist ein Verfahren bekannt, das auf diese Situation eingeht indem mehrere Bilder erfasst werden, die um ein bekanntes Subpixel-Inkrement relativ zueinander gestuft oder versetzt sind, und die Vielzahl an Datensätzen werden dann kombiniert, um die Bildabtastdichte an dem Objekt wirksam zu erhöhen. In einigen Fällen haben sich solche Verfahren jedoch als zu schwierig erwiesen, um von relativ unerfahrenen Benutzern verstanden und ausgeführt zu werden, oder sie sind für viele industrielle Umgebungen und/oder Anwendungen zu langsam für einen zweckmäßigen Einsatz. Einige Systeme aus dem Stand der Technik haben eine Zitterbewegung der Kamera oder einer optischen Komponente vorge schlagen, um den gewünschten Versatz „automatisch“ bereitzustellen. Solche Verfahren sind jedoch mechanisch aufwändig und können Schwingungen und/oder Nicht-Wiederholbarkeit einleiten, die sich mit präzisen Inspektionstoleranzen nicht vereinbaren lassen.

[0007] Weiterer Stand der Technik ist in folgenden Dokumenten beschrieben: US 2005/ 0 280 714 A1, DE 10 2009 015 594 A1, DE 100 47 211 A1.

[0008] Ein verbessertes Verfahren und System, das relativ unerfahrenen Benutzern ermöglicht, ein gewünschtes Maß an Auflösung und Genauigkeit zu erhalten, während vergleichsweise kostengünstigere (z.B. vorhandene Systeme) und geringere Vergrößerung genutzt werden, wäre deshalb wünschenswert.

[0009] Zur Lösung des vorbeschriebenen Problems gibt die vorliegende Erfindung ein Verfahren mit den Merkmalen von Anspruch 1 an. Darüber hinaus wird ein Inspektionssystem mit den Merkmalen von Anspruch 11 angegeben. Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen sind in den abhängigen Ansprüchen definiert.

Figurenliste

Fig. 1 ist ein Schaubild, das verschiedene typische Komponenten eines Mehrzweck-Präzisionsinspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung zeigt.

Fig. 2 ist ein Blockdiagramm eines Abschnitts eines Steuersystems und eines Abschnitts von Bildverarbeitungscomponenten eines Inspektionssystems mit maschineller Bildverarbeitung ähnlich dem von **Fig. 1**, mit den hier vorliegend beschriebenen Merkmalen.

Fig. 3 ist ein Schaubild eines beispielhaften Punktwerkzeugs, das eine Kante in einem Bild überlagert.

Fig. 4 ist ein Schaubild, das ein beispielhaftes Verfahren zum Bestimmen einer Kantenposition basierend auf einem Satz von Pixel-Intensitätswerten darstellt.

Fig. 5 ist ein Schaubild einer Tabelle, die die Notwendigkeit einer erhöhten Abtastrate einer Kante bei verschiedenen Vergrößerungen darstellt.

Die **Fig. 6A-6C** sind Schaubilder, die erste und zweite Bilder einer Kante darstellen, die unter Verwendung von Abtastabläufen von Bildern mit Sub-Pixelversatz aufgenommen wurden, sowie kombinierte Daten von den ersten und zweiten Bildern.

Fig. 7 ist ein Zeitschaubild, das eine Abfolge der Erfassung der Bilder der **Fig. 6A-6C** darstellt.

Fig. 8 ist ein Ablaufdiagramm, das ein Ausführungsbeispiel einer Routine für das Erfassen von ersten und zweiten Bildern unter Verwendung von Abtastabläufen von Bildern mit Subpixelversatz darstellt.

AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG

[0010] Es wird ein Verfahren zum Erfassen mehrerer, relativ zueinander Subpixelversätze aufweisende Bilder in einem Inspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung angegeben. Das Inspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung umfasst ein optisches System mit einer Vergrößerung M und einer Kamera, die einen ersten Pixelabstand P und eine Betriebsart der schnellen Mehrfachbilderfassung aufweist. Es werden Abtastabläufe von Bildern mit Subpixelversatz eingesetzt, die das Vorgeben einer ersten Bilderfassungsbewegung und das Erfassen mehrerer Bilder eines Bereichs von Interesse umfassen. Die erste Bilderfassungsbewegung umfasst das Bewegen des Werkstücks und der Kamera mit einer ersten Geschwindigkeit S relativ zueinander entlang einer ersten Richtung. Die mehreren Bilder werden mit der Betriebsart der schnellen Mehrfachbilderfassung der Kamera während der Bil-

derfassungsbewegung erfasst. Die mehreren Bilder umfassen mindestens ein erstes zur Zeit t_1 erfasstes Bild des Bereichs von Interesse und ein zweites, zu einer zweiten Zeit t_2 nach der ersten Zeit t_1 erfasstes Bild des Bereichs von Interesse. Ein Versatz O zwischen dem ersten und dem zweiten Bild relativ zu Objekten in deren Sichtfeld (FOV) ist ungefähr gleich $M \cdot S \cdot (t_2 - t_1)$, und das Inspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung ist so konfiguriert, dass O ungleich nP ist, wobei n eine Ganzzahl ist. In verschiedenen Ausführungen kann der Versatz O im Bereich von $(n+0,2)P < O < (n+0,8)P$ liegen. Die Betriebsart der schnellen Mehrfachbilderfassung des Kamerasystems arbeitet derart, dass der Unterschied zwischen den ersten und zweiten Zeitpunkten ($t_2 - t_1$) höchstens 50 Mikrosekunden oder höchstens 25, 10 oder 5 Mikrosekunden in verschiedenen Ausführungsformen beträgt, oder auch weniger, wenn das Kamerasystem dies zulässt.

[0011] In verschiedenen Ausführungen kann der erste Pixelabstand P mindestens entweder einen Pixelabstand P_y in Spaltenrichtung oder einen Pixelabstand P_x in Reihenrichtung aufweisen. Der Versatz O kann eine Komponente O_x entlang einer Spaltenrichtung der den Pixelabstand P_x aufweisenden Kamera und einer Komponente O_y entlang einer Reihenrichtung der den Pixelabstand P_y aufweisenden Kamera umfassen. Die erste Bilderfassungsbewegung und ein Bildzeitverlauf in der Betriebsart der schnellen Bilderfassung können so konfiguriert werden, dass mindestens eine der Versatzkomponenten eine nichtganze Zahl K mal dem entsprechenden Pixelabstand umfasst. In einer Ausführung kann die nichtganze Zahl K in einem Bereich von $(n+0,2) < K < (n+0,8)$ liegen, wobei n eine Ganzzahl ist.

[0012] Das Verfahren kann ferner das Aufheben oder Kompensieren des Versatzes O umfassen, derart, dass das Werkstück in den Bildern und/oder Bilddaten deckungsgleich ist. Die deckungsgleichen Bilddaten können dann kombiniert werden, um Bilddaten mit einer Auflösung bereitzustellen, die besser als die systemeigene Auflösung einer Kamera ist, die Bilder in dem Inspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung erfasst. Das Kombinieren der deckungsgleichen Bilddaten kann mindestens auf einem der folgenden Dinge basieren: Speichern von Positionsdaten, einer Korrelationsanalyse der Bilder, oder Bewegungs- und Zeitdaten.

[0013] In verschiedenen Ausführungen können die Abläufe in einem Mehrfachbildmodus eines Kantenwerkzeugs enthalten sein. Das Kantenwerkzeug kann einen Einzelbildmodus und einen Mehrfachbildmodus enthalten, wobei der Mehrfachbildmodus auf der Basis von mindestens entweder einer Vergrößerung oder einer Benutzerauswahl angewendet wird. Die Bilddaten des während des Mehrfachbildmodus aufgenommenen ersten und zweiten Bildes können

kombiniert werden, um die Auflösung auf ein gewünschtes Maß zu erhöhen. Ein zusammengesetztes Bild, das zur Bestimmung der Kantenposition verwendet wird, kann basierend auf den kombinierten Daten des ersten und zweiten Bildes erstellt werden. Das zusammengesetzte Bild kann während eines Lernmodus angezeigt werden. Die während des Mehrfachbildmodus verwendeten Systemparameter, um die Daten erhöhter Auflösung bereitzustellen, können während des Lernmodus konfiguriert werden, und die Konfiguration kann in einem Teilprogramm aufgezeichnet werden.

[0014] Die erste Bilderfassungsbewegung kann in einer Richtung getätigt werden, die quer zu einer Kantenrichtung einer zu vermessenden Kante verläuft. In einigen Ausführungsformen und/oder Anwendungen kann ein Lernmodus das Durchführen und/oder Definieren von Abläufen umfassen, wie etwa Abläufe zum Vermessen der Kante, Bestimmen eines Winkels der Kante, Einstellen der Bewegungsrichtung quer zur Kante (z.B. zu einem Winkel entsprechend dem Winkel der Kante plus ungefähr 90 Grad, in einer Ausführungsform), Berechnen zweier Wegpunkte auf der Basis der Bewegungsrichtung und Werkzeugpositionsparameter und dergleichen. In bestimmten Fällen können die ersten und zweiten Bilder mehrere Kanten des Werkstücks im Bereich von Interesse umfassen. Wenn in solchen Fällen eine Festlegung getroffen wird, dass mehrere Kantenwerkzeuge innerhalb des Bereichs von Interesse hinsichtlich der mehreren Kanten eingesetzt werden, dann kann der Lernmodus eine Mehrkantenwerkzeug-Routine einsetzen. Die Mehrkantenwerkzeug-Routine kann umfassen, die Winkel der mehreren Kanten zu bestimmen, zu bestimmen, ob eine einzelne Bewegungsrichtung bestimmt werden kann, die innerhalb eines vorgegebenen Winkelgradbereichs von der Senkrechten in Bezug auf jeden Winkel der mehreren Kanten liegt, und falls ja, die bestimmte Bewegungsrichtung zu verwenden, und falls nicht, mindestens eine zweite Bewegungsrichtung hinzuzufügen, um mindestens ein drittes Bild zu erhalten. Der Lernmodus kann dem Benutzer ebenfalls eine Option bieten, bei der Bestimmung der Bewegungsrichtung zu unterstützen.

[0015] Nachfolgend werden verschiedene Ausführungsformen der Erfindung beschrieben. Die folgende Beschreibung bietet spezifische Einzelheiten für ein genaues Verständnis und eine klärende Beschreibung dieser Ausführungsformen. Der Fachmann wird jedoch verstehen, dass die Erfindung ohne viele dieser Einzelheiten durchgeführt werden kann. Außerdem sind einige hinlänglich bekannten Strukturen oder Funktionen nicht ausführlich gezeigt oder beschrieben, um eine unnötige Verschleierung der relevanten Beschreibung der verschiedenen Ausführungsformen zu vermeiden. Die in der nachfolgend vorgestellten Beschreibung verwendete Ter-

minologie soll in ihrer umfassendsten sinnvollen Weise ausgelegt werden, auch wenn sie im Zusammenhang mit einer ausführlichen Beschreibung von bestimmten spezifischen Ausführungsformen der Erfindung verwendet wird.

[0016] Fig. 1 ist ein Blockdiagramm eines beispielhaften Inspektionssystems mit Bildverarbeitung 10, das gemäß den hier beschriebenen Verfahren eingesetzt werden kann. Das Inspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung 10 umfasst eine Bildverarbeitungsmessmaschine 12, die zum Austausch von Daten und Steuerungssignalen betriebsbereit mit einem Steuerungscomputersystem 14 verbunden ist. Das Steuerungscomputersystem 14 ist ferner zum Austausch von Daten und Steuerungssignalen betriebsbereit mit einem Monitor oder einer Anzeige 16, einem Drucker 18, einem Joystick 22, einer Tastatur 24 und einer Maus 26 verbunden. Der Monitor oder die Anzeige 16 kann eine Benutzeroberfläche anzeigen, die geeignet ist, die Betriebsabläufe des Inspektionssystems mit maschineller Bildverarbeitung 10 zu steuern und/oder zu programmieren. Es versteht sich, dass in verschiedenen Ausführungsformen ein Touchscreen-Tablet oder dergleichen die Funktionen beliebiger oder aller der Komponenten bestehend aus dem Computersystem 14, dem Display 16, dem Joystick 22, einer Tastatur 24 und der Maus 26 ersetzen kann und/oder zusätzlich bereitstellen kann.

[0017] Der Fachmann wird verstehen, dass das Steuerungscomputersystem 14 im Allgemeinen jedes beliebige Computersystem oder -gerät umfassen kann. Geeignete Computersysteme oder -geräte können Personal-Computer, Server-Computer, Mini-Computer, Zentralrechner, dezentralisierte Rechnerumgebungen, die beliebige der Vorgenannten enthalten, und dergleichen umfassen. Derartige Computersysteme oder -geräte können einen oder mehrere Prozessoren aufweisen, die eine Software ausführen, um die hier beschriebenen Funktionen durchzuführen. Prozessoren umfassen programmierbare Mehrzweck- oder zweckgebundene Mikroprozessoren, programmierbare Steuerungen, anwendungsspezifische integrierte Schaltungen (ASICs), programmierbare logische Schaltungen (PLDs) oder dergleichen, oder eine Kombination solcher Vorrichtungen. Die Software kann in einem Speicher, wie einem Direktzugriffsspeicher (RAM), einem Festwertspeicher (ROM), Flash-Speicher oder dergleichen, oder einer Kombination solcher Komponenten gespeichert werden. Die Software kann ebenfalls in einer oder mehreren Speichervorrichtungen wie Magnetplatten oder Bildplatten, Flash-Speichervorrichtungen oder jeder beliebigen Art von nichtflüchtigen Speichermedien zum Speichern von Daten gespeichert werden. Die Software kann ein oder mehrere Programmmodule enthalten, die Routinen, Programme, Objekte, Komponenten,

Datenstrukturen und dergleichen enthalten, die bestimmte Aufgaben ausführen oder bestimmte abstrakte Datentypen realisieren. In dezentralisierten Rechnerumgebungen kann die Funktionalität der Programmmodule kombiniert oder über mehrere Computersysteme oder -geräte hinweg verteilt werden und über Serviceabrufe abgerufen werden, entweder in einer drahtgebundenen oder drahtlosen Konfiguration.

[0018] Die Bildverarbeitungsmessmaschine 12 umfasst einen beweglichen Werkstücktisch 32 und ein optisches Abbildungssystem 34, das ein Zoomobjektiv oder Wechselobjektive umfassen kann. Die Zoomobjektive oder Wechselobjektive bieten im Allgemeinen verschiedene Vergrößerungen für die durch das optische Abbildungssystem 34 gelieferten Bilder. Das Inspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung 10 ist in der Regel vergleichbar mit der oben angesprochenen QUICK VISION®-Serie der Bildverarbeitungssysteme und der QVPAK®-Software sowie ähnlichen, aus dem Stand der Technik bekannten, handelsüblichen Präzisionsinspektionssystemen mit Bildverarbeitung. Das Inspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung 10 wird ebenfalls in den allgemein zugewiesenen US-Patenten US 7 454 053 B2, US 7 324 682 B2, US 8 111 905 B2 und US 8 111 938 B2 beschrieben, die jeweils vorliegend vollinhaltlich durch Bezugnahme mit aufgenommen werden.

[0019] Fig. 2 ist ein Blockdiagramm eines Steuerungssystemabschnitts 120 und eines Abschnitts einer Bildverarbeitungskomponente 200 eines Inspektionssystems mit maschineller Bildverarbeitung 100 ähnlich dem Inspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung 10 von Fig. 1, und mit Merkmalen wie hier vorliegend beschrieben. Wie nachfolgend näher beschrieben wird, wird der Steuerungssystemabschnitt 120 zur Steuerung des Abschnitts der Bildverarbeitungskomponente 200 eingesetzt. Der Abschnitt der Bildverarbeitungskomponente 200 umfasst einen optischen Baugruppenabschnitt 205, Lichtquellen 220, 230 und 240 und einen Werkstücktisch 210 mit einem mittigen durchsichtigen Abschnitt 212. Der Werkstücktisch 210 ist steuerbar entlang der X- und Y-Achse beweglich, die in einer Ebene liegen, die im Allgemeinen parallel zu der Oberfläche des Tisches ist, auf dem ein Werkstück 20 positioniert werden kann. Der optische Baugruppenabschnitt 205 umfasst eine Kamera 260, einen Strahlteiler 291, ein Wechselobjektiv 250 und kann eine Objektivrevolverbaugruppe 280 mit den Objektiven 286 und 288 umfassen. Alternativ zu der Objektivrevolverbaugruppe kann eine feste oder auswechselbare Objektivlinse 250 mit veränderbarer Vergrößerung, oder eine Objektivlinsenkonfiguration oder dergleichen umfasst werden. Eine austauschbare Linse kann manuell oder automatisch ausgetauscht werden.

[0020] Die optische Baugruppenabschnitt 205 ist entlang einer Z-Achse, die im Allgemeinen orthogonal zu der X- und der Y-Achse verläuft, steuerbar bewegbar, indem ein steuerbarer Motor 294 eingesetzt wird, der einen Stellantrieb antreibt, um den optischen Baugruppenabschnitt 205 entlang der Z-Achse zu bewegen, um den Fokus des Bildes des Werkstücks 20 zu ändern. Der steuerbare Motor 294 ist mit der Eingabe/Ausgabe-Schnittstelle 130 über eine Signalleitung 296 verbunden.

[0021] Ein Werkstück 20 oder eine Wanne oder Haltevorrichtung, die mehrere Werkstücke 20 hält, die mittels des Inspektionssystems mit maschineller Bildverarbeitung 100 abgebildet werden sollen, wird auf den Werkstücktisch 210 abgelegt. Der Werkstücktisch 210 kann so gesteuert werden, dass er sich derart relativ zu dem optischen Baugruppenabschnitt 205 bewegt, dass sich die auswechselbare Objektivlinse 250 zwischen Stellen auf einem Werkstück 20 und/oder zwischen mehreren Werkstücken 20 bewegt. Eine oder mehrere der folgenden Beleuchtungen umfassend eine Tischbeleuchtung 220, eine Koaxialbeleuchtung 230 und eine Oberflächenbeleuchtung 240 (z.B. ein Ringlicht) kann Quellenlicht 222, 232, beziehungsweise 242 ausstrahlen, um das Werkstück oder die Werkstücke 20 zu beleuchten. Die Lichtquelle 230 kann Licht entlang einer Strecke ausstrahlen, die einen Spiegel 290 aufweist. Das Quellenlicht wird als Werkstücklicht 255 reflektiert oder übertragen, und das für die Abbildung genutzte Werkstücklicht durchläuft die austauschbare Objektivlinse 250 und die Objektivrevolverbaugruppe 280 und wird durch die Kamera 260 gesammelt. Das Bild des Werkstücks (der Werkstücke) 20, aufgenommen von dem Kamerasystem 260, wird an eine Signalleitung 262 zum Steuersystemabschnitt 120 ausgegeben. Die Lichtquellen 220, 230 und 240 können über Signalleitungen oder Busse 221, 231 beziehungsweise 241 mit dem Steuersystemabschnitt 120 verbunden werden. Um die Bildvergrößerung zu ändern kann der Steuersystemabschnitt 120 über eine Signalleitung oder einen Bus 281 die Objektivrevolverbaugruppe 280 entlang der Achse 284 drehen, um eine Linse des Revolvers auszuwählen.

[0022] Wie in **Fig. 2** dargestellt umfasst der Steuersystemabschnitt 120 in verschiedenen Ausführungsbeispielen eine Steuerung 125, die Eingabe/Ausgabe-Schnittstelle 130, einen Speicher 140, einen Werkstückprogrammgenerator und -umsetzer 170 und einen Stromversorgungsabschnitt 190. Diese Komponenten, wie auch die nachfolgend beschriebenen, zusätzlichen Komponenten, können jeweils durch einen oder mehrere Daten-/Steuerbusse und/oder Anwendungsprogrammierschnittstellen oder durch direkte Verbindungen zwischen den verschiedenen Elementen miteinander verbunden werden.

[0023] Die Eingabe/Ausgabe-Schnittstelle 130 umfasst eine Abbildungssteuerungsschnittstelle 131, eine Bewegungssteuerungsschnittstelle 132, eine Beleuchtungssteuerungsschnittstelle 133 und eine Linsensteuerungsschnittstelle 134. Die Bewegungssteuerungsschnittstelle 132 kann ein Positionsteuerungselement 132a und ein Geschwindigkeits-/Beschleunigungssteuerungselement 132b umfassen, obwohl solche Elemente zusammengeführt und/oder nicht unterscheidbar sein können. Die Beleuchtungssteuerungsschnittstelle 133 umfasst Beleuchtungssteuerelemente 133a-133n und 133fl, die beispielsweise die Auswahl, Leistung, Ein-/Aus-Schalter und gegebenenfalls das Abtastpuls-Timing für die verschiedenen entsprechenden Lichtquellen des Inspektionssystems mit maschineller Bildverarbeitung 100 steuern.

[0024] Der Speicher 140 kann einen Abschnitt eines Bilddateispeichers 141, einen Kantenerkennungsspeicher-Abschnitt 140ed, einen Speicherabschnitt 142 für das Werkstückprogramm, der ein oder mehrere Teileprogramme oder dergleichen aufweisen kann, und einen Video-Werkzeugabschnitt 143 umfassen. Der Video-Werkzeugabschnitt 143 umfasst den Video-Werkzeugabschnitt 143a und andere Video-Werkzeugabschnitte (z.B. 143n), die die GUI, den Bildverarbeitungsablauf usw. für jedes der entsprechenden Video-Werkzeuge bestimmen, sowie einen Bereich-von-Interesse (ROI)-Generator 143roi, der automatische, halbautomatische und/oder manuelle Abläufe unterstützt, die verschiedene ROI definieren, die in verschiedenen im Video-Werkzeugabschnitt 143 enthaltenen VideoWerkzeugen betriebsfähig sind.

[0025] Im Rahmen dieser Offenbarung, und wie einem Durchschnittsfachmann bekannt ist, bezieht sich der Begriff Video-Werkzeug im Allgemeinen auf eine relativ komplexe Reihe von automatischen oder programmierten Abläufen, die ein Benutzer eines Bildverarbeitungsgeräts über eine relativ einfache Benutzeroberfläche (z.B. einer grafischen Benutzeroberfläche, editierbaren Fenstern, Menüs und dergleichen) einsetzen kann, ohne die schrittweise Abfolge von in dem Video-Werkzeug enthaltenen Abläufen zu erzeugen oder auf eine generalisierte textbasierte Programmiersprache oder dergleichen zurückzugreifen. Beispielsweise kann ein Video-Werkzeug eine Reihe von komplexen, vorprogrammierten Bildverarbeitungsabläufen und Berechnungen beinhalten, die im Einzelfall durch Abstimmen einiger Variablen oder Parameter angewandt und angepasst werden, welche die Abläufe und Berechnungen steuern. Zusätzlich zu den zugrundeliegenden Abläufen und Berechnungen umfasst das Video-Werkzeug die Benutzeroberfläche, die dem Benutzer ermöglicht, diese Parameter für einen bestimmten Fall des Video-Werkzeugs abstimmen zu können. Beispielsweise ermöglichen

viele Video-Werkzeuge der maschinellen Bildverarbeitung einem Benutzer einen grafischen Bereich von Interesse (ROI) durch einfaches „Ziehen eines Griiffs“ mittels einer Maus zu konfigurieren, um die Positionsparameter einer Teilmenge eines Bildes zu definieren, das durch die Bildverarbeitungsabläufe eines bestimmten Falls eines Video-Werkzeugs analysiert werden soll. Es ist anzumerken, dass die sichtbaren Benutzeroberflächenmerkmale manchmal als das Video-Werkzeug bezeichnet werden, wobei die zugrundeliegenden Abläufe implizit beinhaltet sind.

[0026] Insbesondere umfasst der Video-Werkzeugabschnitt 143 in verschiedenen Ausführungsformen gemäß der Erfindung ein Kantenpositionswerkzeug 143el, das verschiedene Abläufe und Merkmale im Zusammenhang mit Kantenpositionsabläufen bereitstellt, wie nachfolgend näher beschrieben wird. Wie bei vielen Video-Werkzeugen umfasst der Gegenstand der Kantenpositionserfassung und Mehrfachbilderfassung dieser Offenbarung sowohl Schnittstellenmerkmale als auch zugrundeliegende Bildverarbeitungsabläufe und dergleichen, und die betreffenden Merkmale können als Merkmale des in dem Video-Werkzeugabschnitt 143 enthaltenen Kantenpositionswerkzeug 143el gekennzeichnet werden. In einer Ausführungsform kann das Kantenpositionswerkzeug 143el einen Steuerungsabschnitt 143mc für den Kantenpositionsmodus, einen Abschnitt 143si für den Standard-Einzelbilderfassungsmodus und einen Abschnitt 143fm für den schnellen Mehrfachbilderfassungsmodus umfassen. Kurz gesagt kann der Abschnitt 143si für den Standard-Einzelbilderfassungsmodus in ähnlicher Weise arbeiten wie bekannte Kantenpositionswerkzeuge, beispielsweise indem ein Einzelbild aufgenommen wird, Pixelintensitätswerte und entsprechende Werte der Gradientengröße entlang einer Abtastlinie über eine Kante hinweg in dem Bild bestimmt werden, und die Position der Kante als einer Spitze der Gradientengröße entsprechend erkannt wird. Der Abschnitt 143fm für den schnellen Mehrfachbilderfassungsmodus arbeitet auf der Basis von Verfahren der vorliegenden Erfindung. Im Gegensatz zum Abschnitt 143si für den Standard-Einzelbilderfassungsmodus nutzt der Abschnitt 143fm für den schnellen Mehrfachbilderfassungsmodus einen schnellen Mehrfachbilderfassungsmodus einer Kamera in Verbindung mit einer gleichzeitigen gesteuerten Bewegung des Tisches und/oder der Kamera, um mehrere Bilder einer Kante mit einem erwünschten Sub-Pixelversatz zwischen den Bildern zu erhalten. Die Bilddaten werden dann kombiniert und stellen eine Auflösung bereit, die besser als die systemeigene Auflösung einer Kamera ist, die Bilder in dem Inspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung erfasst. Der Steuerungsabschnitt 143mc für den Kantenpositionsmodus kann, wie hier offenbart, Abläufe ausführen, um ein Kantenpositionswerkzeug 143el oder Werkzeugmodi zu konfigurieren,

je nachdem, welches Werkzeug oder welcher Modus aktiviert wird.

[0027] Das Kamerasystem weist eine Betriebsart der schnellen Mehrfachbilderfassung auf, derart, dass ein Unterschied zwischen dem ersten und zweiten Zeitpunkt (t_2-t_1), zu denen aufeinanderfolgende Bilder aufgenommen werden können, höchstens 50 Mikrosekunden oder höchstens 25, 10 oder 5 Mikrosekunden in verschiedenen Ausführungsformen beträgt, oder auch weniger, wenn das Kamerasystem dies zulässt. In derartigen Ausführungsformen lässt die Betriebsart der schnellen Mehrfachbilderfassung des Kamerasystems eine Differenz (t_2-t_1) zu, die kurz genug ist, in dem Bild des Inspektionssystems mit maschineller Bildverarbeitung Schwingungseffekte einzufrieren (z.B. derart, dass schwingungsbedingte Verzerrungen tatsächlich während t_2-t_1 konstant sind), was eine wichtige Betrachtung bezüglich der Genauigkeit der Objektrekonstruktion und der Messung ist, die auf den kombinierten Bilddaten basiert, die von den zwei zu den Zeiten t_2 und t_1 erfassten zwei Bildern bereitgestellt werden. Weiterhin ist eine solche Zeit (t_2-t_1) kurz genug, um in den zwei entsprechenden Bildern einen gewünschten Sub-Pixelversatz zu ermöglichen, während gleichzeitig eine relativ hohe Bewegungsgeschwindigkeit während deren Erfassung ermöglicht wird. Beispielsweise kann mit einer Vergrößerung von 1 ein Sub-Pixelversatz von 2,5 Mikrometern mit einer Bewegungsgeschwindigkeit von 0,25 Meter/Sekunde erhalten werden, wenn (t_2-t_1) 10 Mikrosekunden beträgt. Es versteht sich, dass herkömmliche Kameras in Präzisionsinspektionssystemen mit maschineller Bildverarbeitung nicht in der Lage sind, diese Art von Abläufen zu bieten, und typischerweise Bildfrequenzen von einigen Millisekunden bieten. Es werden jedoch einige Kameras verfügbar, die diese Art des Betriebs bereitstellen können. Beispielsweise kann das Model AM-200CL von JAI Inc. (Produkte und Information sind über JAI Inc., San Jose, Kalifornien, USA erhältlich) mit einem Pixelabstand $D_p = 5,5$ Mikrometer, wenn es wie weiter unten mit Bezug auf **Fig. 7** beschrieben betrieben wird, aufgrund von speziellen Signalverarbeitungsmerkmalen im Zusammenhang mit dem Pixel-Array des Kameradetektors zwei Bilder mit einer Bild-zu-Bild-Zeit von 5 Mikrosekunden erfassen. Solche Kameras, wenn in Kombination mit den hier offenbarten verschiedenen anderen Merkmalen und Abläufen verwendet, stellen ein System bereit, das relativ ungeübten Benutzern eines Präzisionsinspektionssystems mit maschineller Bildverarbeitung ermöglicht, ein erwünschtes Maß an Auflösung und Genauigkeit zu erhalten, während gleichzeitig relativ kostengünstige Systeme (z.B. vorhandene Bewegungssteuerungssysteme im Gegensatz zu komplexen, in Zitterbewegung versetzte Bauteile) und geringere Vergrößerungen eingesetzt werden.

[0028] Alternative Ausgestaltungen sind für das Kantenpositionswerkzeug 143el möglich. Der Abschnitt 143si für den Standard-Einzelbildfassungsmodus und der Abschnitt 143fm für den schnellen Mehrfachbildfassungsmodus können aufgeteilte Modussteuerungsfunktionen aufweisen, derart, dass ein separater Modussteuerungsabschnitt 143mc entfallen kann. Alternativ kann das Kantenpositionswerkzeug 143el ein oder mehrere gattungsgemäße Kantenpositionswerkzeugelemente bereitstellen und der Modussteuerungsabschnitt 143mc kann Abläufe bereitstellen, die die Benutzeroberfläche und Wechselbeziehungen der gattungsgemäßen Kantenpositionselemente auf eine Weise lenken, die davon abhängt, ob ein Standard-Einzelbildwerkzeugverhalten oder ein Verhalten eines Werkzeugs für schnelle Mehrfachbilder mit Sub-Pixelversatz erwünscht wird. In einem solchen Falle können die Schaltungen, Routinen oder Anwendungen, die die Abläufe des Abschnitts 143si für den Standard-Einzelbildfassungsmodus und/oder den Abschnitt 143fm für den schnellen Mehrfachbildfassungsmodus bereitstellen, ineinander übergehen oder nicht unterscheidbar sein. In bestimmten Ausführungen kann der Modussteuerungsabschnitt 143mc dazu benutzt werden, um ein separates Werkzeug für den schnellen Mehrfachbildmodus zu realisieren. Allgemeiner ausgedrückt kann diese Erfindung in jeder derzeit bekannten oder später entwickelten Form, die im Zusammenhang mit dem Inspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung 100 betrieben werden kann, realisiert werden, um die hier vorliegend offenbarten Merkmale in Bezug auf die Abläufe des schnellen Mehrfachbilds mit Sub-Pixelversatz bereitzustellen.

[0029] Die Signalleitungen oder Busse 221, 231 und 241 der Tischbeleuchtung 220, die Koaxialleuchten 230 und 230', beziehungsweise die Oberflächenbeleuchtung 240, sind alle mit der Eingabe-/Ausgabeschnittstelle 130 verbunden. Die Signalleitung 262 von der Kamera 260 und die Signalleitung 296 von dem steuerbaren Motor 294 sind mit der Eingabe-/Ausgabeschnittstelle 130 verbunden. Zusätzlich dazu, dass die Signalleitung 262 Bilddaten leitet, kann sie ein Signal von der Steuerung 125 leiten, das die Bildfassung einleitet.

[0030] Eine oder mehrere Anzeigevorrichtungen 136 (z.B. die Anzeige 16 von **Fig. 1**) und eine oder mehrere Eingabevorrichtungen 138 (z.B. der Joystick 22, die Tastatur 24, und die Maus 26 von **Fig. 1**) können ebenfalls mit der Eingabe-/Ausgabeschnittstelle 130 verbunden werden. Die Anzeigevorrichtungen 136 und Eingabevorrichtungen 138 können verwendet werden, um eine Benutzeroberfläche anzuzeigen, die verschiedene Merkmale der grafischen Benutzeroberflächen (GUI) aufweisen kann, die dazu verwendet werden können, Inspektionsabläufe durchzuführen, und/oder um Teileprogramme

zu schaffen und/oder Teileprogramme zu modifizieren, um von dem Kamerasystem 260 aufgenommene Bilder zu betrachten, und/oder um den Bildverarbeitungssystem-Abschnitt 200 direkt zu steuern. Die Anzeigevorrichtungen 136 können Merkmale der Benutzeroberfläche anzeigen, die dem Video-Werkzeug 143el für Kantenposition zugeordnet sind.

[0031] In verschiedenen Ausführungsbeispielen erzeugt der Benutzer, wenn er das Inspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung 100 nutzt, um ein Teileprogramm für das Werkstück 20 zu erzeugen, Teileprogrammanweisungen, indem er das Inspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung 100 in einem Lernmodus betreibt, um eine gewünschte Schulungssequenz für die Bildaufnahme bereitzustellen. Eine Schulungssequenz kann beispielsweise das Positionieren eines bestimmten Werkstückmerkmals eines repräsentativen Werkstücks im Sichtfeld (FOV), das Einstellen von Lichtstärken, das Fokussieren oder Autofokussieren, das Aufnehmen eines Bildes und das Bereitstellen einer auf das Bild angewandte Schulungssequenz umfassen (z.B. indem eine Instanz von einem der Video-Werkzeuge auf dieses Werkstückmerkmal angewendet wird). Der Lernmodus arbeitet so, dass die Sequenz(en) erfasst oder aufgezeichnet werden und in entsprechende Teileprogrammanweisungen umgewandelt werden. Wenn das Teileprogramm ausgeführt wird, bewirken diese Anweisungen, dass das Inspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung die erlernten Abläufe der Bildaufnahme und der Inspektion reproduziert, um dieses bestimmte Werkstückmerkmal (d.h., das entsprechende Merkmal an der entsprechenden Position) automatisch im Programmablaufmodus an einem Werkstück oder an Werkstücken zu inspizieren, die dem beim Erstellen des Teileprogramms verwendeten repräsentativen Werkstück entsprechen.

[0032] **Fig. 3** ist ein Schaubild eines beispielhaften Punktwerkzeugs 310, das eine Kante 305 am Rand einer dunkleren oder schattierten Fläche 308 in einem Bild 300 überlagert (z.B. auf einer Bildanzeigevorrichtung). Das Punktwerkzeug 310 sowie andere Arten von Videowerkzeugen zur Kantenerkennung werden im US-Patent US 7 567 713 B2 näher beschrieben, das hiermit durch Bezugnahme vollinhaltlich mit aufgenommen wird. In **Fig. 3** wird zum Zwecke der Erläuterung die schattierte Fläche 308 gezeigt, um Pixel mit relativ niedrigerer Intensität im Bild 300 anzudeuten. Wie nachstehend näher beschrieben wird, kann das Punktwerkzeug 310 konfiguriert werden, um die Position eines Kantenpunkts im Bild zu bestimmen, und ähnliche Abläufe können dem Ablauf eines anderen Typs von Werkzeug (z.B. der Art eines Box-Werkzeugs), das mehrere Kantenpunkte lokalisiert, zugrunde liegen. Eine grafische Benutzeroberfläche des Punktwerkzeugs 310 kann einen Körper 311, einen Kantenselektor 312 und

einen Polaritätsanzeigerpfeil 314 umfassen. Der Pfeil 314 kann im Allgemeinen über eine Kante hinweg von hell zu dunkel oder von dunkel zu hell weisen, um in bestimmten Situationen die Zuverlässigkeit der Kantenfindung zu verbessern, wie in den hier mit aufgenommenen Referenzen erklärt wird. In der Darstellung von **Fig. 3** verdeckt der Körper 311 eine nominale Abtastlinie 320, die durch den Körper definiert wird und mit diesem nominal zusammenfällt.

[0033] Während des Betriebs wählt der Benutzer das Punktwerkzeug 310 (z.B. von einer Video-Werkzeugleiste am Rande einer Anzeige) und bestimmt eine zu erkennende Kante, indem der Körper 311 über das Kantenmerkmal gesetzt und der Kantenselektor 312 so nahe wie möglich an die Kante an einer gewünschten Position entlang der Kante gesetzt wird. Der Punktwerkzeugkörper 311 kann ausgerichtet werden, um eine gewünschte Abtastlinienausrichtung über die Kante hinweg zu definieren und anzuzeigen, wie durch den Winkel A im dargestellten x-y-Koordinatensystem in der rechten oberen Ecke von **Fig. 3** angedeutet wird. In **Fig. 3** sind Bildpixel in Reihen entlang der x-Koordinatenrichtung und in Spalten entlang der y-Koordinatenrichtung angeordnet. Der Winkel A zeigt also einen nominalen Abtastlinienrichtungswinkel relativ zu der Pixelreihe in einem Bild an. Der Pfeil 314 zeigt entlang r Referenzrichtung oder Polarität, die der Kantenerkennung zuzuordnen ist (z.B. zugeordnet in Bezug darauf, ob die Kante als eine aufsteigende oder abfallende Kante, etc. erkannt wird). Während des Betriebs und nachdem das Punktwerkzeug vollständig konfiguriert ist, können die Anweisungen einer zugrunde liegende Kantenpunkt-Lokalisierungsroutine ausgeführt werden, um Abläufe auszuführen, die Datenpunkte des Intensitätsprofils (z.B. Pixelintensitätsdaten) analysieren, die einer Abtastlinie zugeordnet sind, die nominal mit dem Körper 311 des Punktwerkzeugs 310 zusammenfällt, und es können verschiedene Abläufe durchgeführt werden, um die Kantenposition des zugrunde liegenden Merkmals zu erkennen. Wie nachfolgend mit Bezug auf die **Fig. 4** näher beschrieben wird, kann in verschiedenen Ausführungsbeispielen die Kantenpunkt-Lokalisierungsroutine eine Kantenposition auf der Basis der Gradientengröße entlang eines der Abtastlinie zugeordneten Intensitätsprofils bestimmen. Wie nachfolgend in Bezug auf **Fig. 4** näher beschrieben wird kann in verschiedenen Ausführungsbeispielen die Kantenpunktlokalisierungsroutine des Punktwerkzeugs 310 eine Kantenposition auf der Basis der Größe des Gradienten entlang eines der Abtastlinie zugeordneten Intensitätsprofils bestimmen. Es versteht sich, dass die Abtastlinienrichtung wahrscheinlich nicht exakt mit der Richtung der Bildpixelreihen- und/oder -spalten zusammenfällt. In einem solchen Falle kann der Bildwert an einer „Pixel“-Position entlang der Abtastlinienrichtung durch Interpolation auf der Basis der umliegenden Bildpixel gemäß

verschiedener bekannter Verfahren bestimmt werden. Das Berechnen von interpolierter Bildintensität entlang einer gewünschten Linie und/oder Richtung auf der Basis von zuvor erhaltenen Bilddaten wird durch das US-Patent US 7 567 713 B2 von Ding gelehrt, das hiermit durch Bezugnahme vollinhaltlich mit aufgenommen wird.

[0034] Die Richtung der Kante und der Abtastlinie betrifft einen weiteren Vorteil der hier offenbarten Systeme und Verfahren gegenüber dem Stand der Technik. Es versteht sich, dass die maßgebliche Richtung für die erhöhte räumliche Abtastdichte (und der zugehörige Sub-Pixelversatz zwischen kombinierten Bildern), wie zuvor dargelegt und nachfolgend näher beschrieben, nominal quer (z.B. rechtwinklig) zu dem mit verbesserter Auflösung abzubildenden und zu lokalisierenden Kantenmerkmal verläuft. Es versteht sich, dass die hier offenbarten Systeme und Verfahren in dieser Hinsicht besonders vielseitig sind (im Gegensatz zu bisher bekannten mechanischen Zitterverfahren, die die Sub-pixelversätze nur entlang einer vorbestimmten Richtung bereitstellten). Insbesondere kann ein Standard-Bewegungssteuerungssystem eine Bewegungsrichtung quer zu einer beliebigen Kante bereitstellen, und die Betriebsart der schnellen Mehrfachbilderstellung der Kamera kann Bilder erfassen, die den gewünschten Sub-Pixelversatz entlang derjenigen Richtung aufweisen, die am wichtigsten für den Zweck der gewünschten Verbesserung der Auflösung ist.

[0035] Zusammenfassend werden im Allgemeinen die Kantenpunkte durch verschiedenen Video-Werkzeuge bestimmt, die geometrische Formen an die Kantenpunkte anpassen können, um entsprechende zugrunde liegende Bildmerkmale zu messen. In einem herkömmlichen Verfahren zum Betreiben eines Video-Werkzeugs werden, abhängig vom Typ des Werkzeugs (z.B. Punkt-, Box-, Kreis-Werkzeug, etc.) und entsprechend definierter Werkzeugparameter, eine oder mehrere Abtastlinien innerhalb des ROI definiert oder erzeugt. Für jede nominale Abtastlinie bestimmt oder wählt das Werkzeug einen Satz von Datenpunktpositionen des Intensitätsprofils, die die nominale Abtastlinie annähern. Die den Datenpunktpositionen zugeordneten Intensitätswerte werden bestimmt, um das der Abtastlinie zugeordnete Intensitätsprofil zu definieren. In einer Ausführungsform analysiert dann ein Kantenerkennungsalgorithmus Gradienten entlang des Intensitätsprofils, um diejenige Position entlang des Intensitätsprofils zu finden, die der maximalen Gradientengröße entspricht, wie beispielsweise nachfolgend mit Bezug auf **Fig. 4** näher beschrieben wird. Die Position des maximalen Gradienten entlang des Intensitätsprofils wird dazu verwendet, diejenige Kantenpunktposition in dem Bild zu bestimmen, die der nominalen Abtastlinie zugeordnet ist.

[0036] Fig. 4 ist ein Schaubild einer Kurve 400, das ein beispielhaftes Verfahren zum Bestimmen einer Kantenposition auf der Basis eines Intensitätsprofils 410 darstellt. Wie in Fig. 4 gezeigt, umfasst das Intensitätsprofil 410 einen Satz von Bildpixelintensitäts(grau)werten 425, die den eine Abtastlinie darstellenden Positionen entsprechen (wie z.B. die in Fig. 3 gezeigte Abtastlinie 320). Die die Abtastlinie darstellenden Datenpunkte oder Positionen werden als „Pixelzahlen“ von 0-50 entlang der horizontalen Achse gekennzeichnet. Ausgehend vom Datenpunkt 0 zeigen die Bildintensitätswerte zunächst bis ungefähr zum Datenpunkt 23 einen relativ dunkleren Bereich an, dem dann bis zum Datenpunkt 50 ein relativ hellerer Bereich folgt.

[0037] Die Größenwerte der Gradienten 426 werden von den Intensitätswerten 425 abgeleitet und werden ebenfalls in Fig. 4 gezeigt. Verschiedene herkömmliche Algorithmen finden diejenige Position entlang der horizontalen Achse, die einer Spitze der Gradientengröße entspricht und identifizieren diese Position als eine Kantenposition. Wenn mehrere Spitzen von Gradientengrößen vorliegen, kann der Kantenselektor des Video-Werkzeugs und/oder der Richtungsanzeiger (z.B. der Kantenselektor 312 und/oder der Polaritätsanzeiger 314 des Punktwerkzeugs 310) den Algorithmus dabei unterstützen, die erwünschte Spitze zu identifizieren. In Fig. 4 zeigt das Maximalgradientenkriterium (das heißt, die Gradientenspitze) an, dass sich Kante ungefähr am Datenpunkt 23 befindet. Durch Anwendung von Verfahren, die Kurvenanpassung, Schwerpunktbestimmung oder dergleichen umfassen können, kann sich eine Spitze einer Gradientengröße relativ präzise zwischen den Datenpunkten des Intensitätsprofils befinden, was im Allgemeinen für die Sub-Pixelmessauflösung und Wiederholbarkeit beim Bestimmen der Position der entsprechenden Kante in dem Bild förderlich ist.

[0038] Wie nachfolgend mit Bezug auf die Fig. 5 - Fig. 8 näher beschrieben wird, ist es für die genaue Bestimmung der Position der Kante in einem Bild mit Sub-Pixelmessauflösung von Wichtigkeit, dass das Bild eine ausreichende räumliche Abtastdichte aufweist. Als spezifisches Beispiel befinden sich mit Bezug auf Fig. 4 ungefähr fünf Datenpunkte (d.h. die Datenpunkte 22 - 26) auf dem Übergangsbereich der Kante 305 von Fig. 3. In bestimmten Ausführungen stellt diese räumliche Abtastdichte eine ausreichende Auflösung zum Bestimmen der Kante mit einem gewünschten Genauigkeitsgrad der Sub-Pixel dar. Es versteht sich jedoch, dass bei einer Ausführung, in der eine geringere Vergrößerung verwendet wird, die Abtastdichte an dem abgebildeten Objekt dadurch reduziert werden wird, dass jedes Pixel einer größeren Fläche entsprechen wird, und die Mittelpunkte der Flächen weiter voneinander beabstandet werden, was Informationen in Bezug auf feine Strukturen und/oder scharfe Kanten an

dem Objekt ausmitteln oder eliminieren kann. Mit Bezug zu dem Beispiel von Fig. 4 wird in einer Ausführung, bei der nur die Hälfte der Vergrößerung genutzt wird (d.h., somit ein größeres Sichtfeld erzeugt wird), die Anzahl der dem Kantenübergang entsprechenden Pixel reduziert werden. Bei bestimmten Ausführungen kann diese niedrigere Abtastdichte die Sub-Pixelmessauflösung auf ein unannehmbar niedriges Maß reduzieren, wie nachfolgend mit Bezug auf Fig. 5 näher beschrieben wird. Wie nachfolgend mit Bezug auf die Fig. 6A - Fig. 6C beschrieben wird, kann die Abtastdichte wirksam durch die Verwendung mehrerer Bilder erhöht werden. Insbesondere können Abtastläufe für Bilder mit Sub-Pixelversatz verwendet werden, um erste und zweite Bilder mit einem Sub-Pixelversatz zueinander zu erhalten. Die aus den zwei Bildern bestimmten Daten können dann kombiniert werden, um ein zusammengesetztes Bild mit einer höheren räumlichen Abtastdichte bereitzustellen, um so eine gewünschte Messauflösung zu erreichen.

[0039] Fig. 5 ist ein Schaubild einer Tabelle 500, die die Notwendigkeit einer erhöhten Abtastung einer Kante bei verschiedenen Vergrößerungen darstellt. Wie in Fig. 5 gezeigt wird, umfasst die Tabelle 500 eine PT-Spalte 510, die einen Linsenvergrößerungsfaktor eines Vergrößerungswechslers zeigt, eine Tubus-EFL-Spalte, die eine effektive Tubuslinsenbrennweite zeigt, eine Spalte 530 für die Gesamtvergrößerung M, eine Spalte 540 für die entsprechende optische Auflösung, eine Spalte 550 für eine erwartete 1/2 Größe der Unschärfe und eine Spalte 560 für einen erforderlichen Abtastabstand, die einen notwendigen Kamera-Pixelabstand für das Abtasten der 1/2 Größe der Unschärfe bei der Nyquist-Frequenz zeigt, wodurch sichergestellt wird, dass der Kamera-Pixelabstand nicht der die Auflösung der Bildinformation begrenzende Faktor ist. Für eine erste Reihe 501 der Tabelle 500 zeigt die PT-Spalte 510 einen Wert von 1X, die Tubus-EFL-Spalte 520 zeigt einen Wert von 100, die Spalte 530 der Gesamtvergrößerung M zeigt einen Wert von 5, die Spalte 540 der optischen Auflösung zeigt einen Wert von 0,65, die Spalte 550 der erwarteten 1/2 Größe der Unschärfe zeigt einen Wert von 3,25 und die Spalte 560 des erforderlichen Abtastabstands zeigt einen Wert von 1,63. Für eine zweite Reihe 502 zeigt die PT-Spalte 510 einen Wert von 2X, die Tubus-EFL-Spalte 520 zeigt einen Wert von 200, die Spalte 530 der Gesamtvergrößerung M zeigt einen Wert von 10, die Spalte 540 der optischen Auflösung zeigt einen Wert von 0,65, die Spalte 550 der erwarteten 1/2 Größe der Unschärfe zeigt einen Wert von 6,50 und die Spalte 560 des erforderlichen Abtastabstands zeigt einen Wert von 3,25. Für eine dritte Reihe 503 zeigt die PT-Spalte 510 einen Wert von 4X, die Tubus-EFL-Spalte 520 zeigt einen Wert von 400, die Spalte 530 der Gesamtvergrößerung M

zeigt einen Wert von 20, die Spalte 540 der optischen Auflösung zeigt einen Wert von 0,65, die Spalte 550 der erwarteten 1/2 Größe der Unschärfe zeigt einen Wert von 13,00 und die Spalte 560 des erforderlichen Abtastabstands zeigt einen Wert von 6,50.

[0040] Im Allgemeinen stellt die Tabelle 500 dar, dass bei hohen mikroskopischen Vergrößerungen ein Objekt im Allgemeinen durch einen Detektor überabgetastet werden kann. Die Werte der Tabelle 500 stellen die Werte einer Einzelobjektivlinse mit $NA = 0,42$ (Effektive Brennweite $EFL = 20$ mm). Als ein spezifisches Beispiel dienen bestimmte vorhandene Kameras (z.B. eine JAI-AM-200CL -Produkte und Informationen sind von JAI Inc. San Jose, Kalifornien, USA erhältlich) mit einem Pixelabstand $D_p = 5,5$ μm , die den in der Reihe 503 angezeigte PT4X-Zustand (d.h., für den die Spalte 560 für den erforderliche Abtastabstand einen erforderlichen Wert von 6,50 μm oder weniger anzeigt, für den der Pixelabstand von 5,50 μm diese Bedingung erfüllen würde) leicht überabtasten würden. Dagegen würde diese Pixelgröße die in den Reihen 501 und 502 angezeigten Anforderungen für die PT1X- und PT2X-Zustände nicht erfüllen, für die der erforderliche Pixelabstand und/oder Abtastabstand höchstens 1,63 μm , bzw. 3,25 μm beträgt, wofür der Pixelabstand von 5,50 μm zu groß ist. Es versteht sich, dass die verschiedenen in einem Inspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung verwendeten optischen Konfigurationen in einer Weise analog zu der in der Tabelle 500 gezeigten oder ähnlichen Weise charakterisiert und die Ergebnisse als Referenz gespeichert werden können. In bestimmten Ausführungsformen, wenn ein Mehrfachbildmodus in einem Kantenwerkzeug enthalten ist, können dann die Kantenwerkzeuge die Charakterisierung einer aktuellen optischen Konfiguration auswerten, um zu bestimmen, ob die Bilddatenauflösung durch die optische Auflösung oder die Auflösung des Kameradetektors (das heißt, den Pixelabstand) eingeschränkt wird. Wenn die Auflösung des Kameradetektors der einschränkende Faktor ist, kann die Benutzeroberfläche des Inspektionssystems mit maschineller Bildverarbeitung dem Benutzer die Möglichkeit anbieten, die Mehrfachbildbetriebsart für ein Kantenwerkzeug zu wählen (was einfach als Wahl einer „Superauflösung“ oder dergleichen charakterisiert werden kann), da dies möglicherweise die Messauflösung des Kantenwerkzeugs verbessert. Alternativ kann das Inspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung die Mehrfachbildbetriebsart automatisch wählen, wenn die Auflösung des Kameradetektors der einschränkende Faktor ist. Diese letztere „automatische“ Auswahl kann ferner von einer durch den Benutzer eingestellten allgemeinen Einstellung abhängen, die die automatische Auswahl im Rahmen eines gesamten Teileprogramms zulässt oder verweigert. Für Werkstücke, die keine scharfen Kantenübergänge oder fein verteilten Kanten besitzen

kann die Auflösung des Kameradetektors (das heißt, der Pixelabstand) beispielsweise noch ausreichend sein, um die räumlichen Frequenzen der Merkmale auf dem Werkstück abzutasten, selbst dann, wenn die Auflösung des Kameradetektors im Vergleich zu der Auflösung der optischen Bauteile der einschränkende Faktor ist.

[0041] Obwohl der PT-Wert von 4X in der Reihe 503 gezeigt wird, um eine erwünschte Abtastdichte zu erreichen, kann bei bestimmten Ausführungen das Sichtfeld möglicherweise nicht alle der gewünschten Kantenmerkmale in einem Einzelbild ausreichend erfassen, und/oder kann höhere Verzerrungen als erwünscht aufweisen, und/oder es kann zu teuer zu realisieren sein, oder eine Linse mit höherer Vergrößerung kann für einige Systeme oder Benutzer einfach nicht unmittelbar erhältlich sein. Mit anderen Worten, in bestimmten Ausführungen können das , und/oder das Maß an Verzerrungen und/oder Kostenfaktoren vorschreiben, die PT-Werte 2X oder 1X zu verwenden, obwohl ein Werkstück Merkmale und/oder Kanten enthalten kann, für die es wünschenswert wäre, mit einer höheren Auflösung abgebildet und gemessen zu werden. Wie nachfolgend mit Bezug auf die **Fig. 6 - Fig. 8** beschrieben wird, können durch Einsatz von Abtastabläufen von Bildern mit Sub-Pixelversatz Daten von mehreren Bildern erfasst und kombiniert werden, um eine erwünschte Abtastdichte, Wiederholbarkeit und/oder Genauigkeit selbst bei relativ niedrigeren Vergrößerungen, die aus einigen der oben dargelegten Gründe wünschenswert sein können, zu erreichen.

[0042] Als ein spezifisches erläuterndes Beispiel kann eine Bilderfassungsabfolge mit einer Kamera durchgeführt werden, die eine Betriebsart der schnellen Mehrfachbilderfassung unterstützt, z.B. der Kamera, auf die bereits Bezug genommen wurde – das Modell AM-200CL von JAI Inc. (Produkte und Informationen sind von JAI Inc., San Jose, Kalifornien, USA erhältlich), mit einem Pixelabstand $D_p = 5,5$ Mikrometer. Die Anzahl von Bildern pro schnelle Erfassungsabfolge bei diesem speziellen Kameratyp ist 2. Bei einem ungefähr 2X unterabgetasteten Zustand (5,5 : 3,5), ähnlich dem für Reihe 502 in **Fig. 5** dargestellten Zustand, kann eine konstante Tischgeschwindigkeit V_x vorgeschrieben werden, um eine Verlagerung oder einen Versatz Δx an dem Objekt zu erzielen, was zu einem Bruchteil von $1/L$ eines Pixelversatzes des Objekts bei der Kamera führt, wenn die Vergrößerung M beträgt. Für $\frac{1}{2}$ Pixelversatz beträgt $L=2$. Bei einer angenehmen Vergrößerung von 10 beträgt dann $\Delta x = D_p/(L \cdot M) = 0,275$ μm . In einem spezifischen Beispiel können die Bildzu-Bild-Zeit T_i und die Lichtimpulszeit T_{lp} 6 Mikrosekunden bzw. 4 Mikrosekunden betragen. Somit kann eine effektive Zeitdifferenz T_{diff} zwischen den Belichtungen (z.B. der Zeit zwischen dem Zwischenspeichern der den Belichtungen entsprechenden effekti-

ven Positionen während der Bewegung) als $T_{diff} = [0,5T_{lp} + T_i + 0,5T_{lp}] = 10$ Mikrosekunden angenommen werden, wobei der Faktor (die Faktoren) $\frac{1}{2}$ für das Zwischenspeichern einer Position bei Halbzzeit des durch den Lichtimpuls definierten Belichtungszeitraums steht (stehen), um die durchschnittliche Werkstück- oder Bild-Position aufgrund einer Bewegung während der Belichtung darzustellen. Um den gewünschten Versatz zu erzielen beträgt somit in diesem Beispiel die gewünschte Geschwindigkeit $V_x = (0,275 \text{ Mikrometer}/10 \text{ Mikrosekunden}) = 27,5 \text{ mm/s}$. So können bei Verwendung dieser Parameter zwei Bilder des Objekts innerhalb von 10 Mikrosekunden erfasst werden, bei denen Pixel um ungefähr $\frac{1}{2}D_p$ verschoben sind, wodurch die räumliche Abtastfrequenz einer Kante relativ zum Pixelabstand in einem Einzelbild um ungefähr 2X erhöht wird. Eine diesbezügliche Erläuterung wird auch nachfolgend mit Bezug auf **Fig. 7** gegeben.

[0043] Als weiteres spezifisches Beispiel weisen einige Kameras (z.B. solche mit 2 CCD-Arrays) einen schnellen Mehrfachbilderfassungsmodus auf, der 3 Bilder innerhalb von ungefähr 15 Mikrosekunden (z.B. das Modell AD-081CL von JAI Inc.) mit einem Pixelabstand $D_p = 4,65$ Mikrometer erfassen kann. Die Anzahl von Bildern pro schnelle Erfassungsabfolge beträgt 3 für diesen speziellen Kameratyp. Bei einem ungefähr 3X unterabgetasteten Zustand (einem gewünschten/erforderlichen Abtastschritt von 1,63 Mikrometern, beispielsweise ähnlich dem für Reihe 501 in **Fig. 5** dargestellten Abtastschritt), kann eine konstante Tischgeschwindigkeit V_x vorgeschrieben werden, um eine Verlagerung oder einen Versatz Δx an dem Objekt zu erzielen, was zu einem Bruchteil von $1/L$ eines Pixelversatzes des Objekts bei der Kamera führt, wenn die Vergrößerung M beträgt. Für $1/3$ Pixelversatz beträgt $L=3$. Bei einer angenommenen Vergrößerung von 5 beträgt dann $\Delta x = D_p/(L \cdot M) = 0,31 \text{ um}$. In diesem spezifischen Beispiel können die Bild-zu-Bild-Zeit T_i und die Lichtimpulszeit T_{lp} 1,5 Mikrosekunden bzw. 4 Mikrosekunden betragen. Somit kann eine effektive Zeitdifferenz T_{diff} zwischen der ersten und zweiten und/oder der zweiten und der dritten Belichtung (z.B. der Zeit zwischen dem Zwischenspeichern der zwei den aufeinanderfolgenden Belichtungen entsprechenden effektiven Positionen während der Bewegung) als $T_{diff} = [0,5T_{lp} + T_i + 0,5T_{lp}] = 5,5$ Mikrosekunden angenommen werden, wobei der Faktor (die Faktoren) $\frac{1}{2}$ für das Zwischenspeichern einer Position bei Halbzzeit des durch den Lichtimpuls definierten Belichtungszeitraums steht (stehen), um die durchschnittliche Werkstück- oder Bild-Position aufgrund einer Bewegung während der Belichtung darzustellen. Somit beträgt in diesem Beispiel die gewünschte Geschwindigkeit V_x , um den gewünschten Versatz zwischen den 3 Bildern zu erzielen, $V_x = (0,31 \text{ Mikrometer}/5,5 \text{ Mikrosekunden}) = 56,4 \text{ mm/s}$.

[0044] Die **Fig. 6A - Fig. 6C** sind Schaubilder, die schematisch dargestellte erste und zweite Bilder 600A und 600B einer Kante darstellen, die unter Verwendung von Abtastabläufen an Bildern mit Sub-Pixelversatz und kombinierten Daten 605C der ersten und zweiten Bilder erfasst wurden. Wie **Fig. 6A** zeigt stellt das erste Bild 600A ein Pixel-Array PA relativ zu einer Kante EG1 eines Werkstücks dar. Wie gezeigt umfasst das Pixel-Array PA sieben Reihen und sieben Spalten von Pixeln. Ein Punktwerkzeug PT (z.B. ähnlich dem Punktwerkzeug 310 von **Fig. 3**) stellt eine Abtastlinie über die mittlere Reihe von Pixeln des Pixel-Arrays PA hinweg dar. Die Kante EG1 ist an der Position P1 gezeigt, die einen Abstand X_1 von der linken Kante des Pixel-Arrays PA hat.

[0045] Unterhalb des Bilds 600A ist ein Diagramm 605A gezeigt, das ein Intensitätsprofil 610 (ähnlich dem Intensitätsprofil 410 von **Fig. 4**) zum Inhalt hat. Das Intensitätsprofil 610A umfasst einen Satz von Bildpixel-Intensitäts(grau)werten 625A, die den die Abtastlinie des Punktwerkzeugs PT darstellenden Positionen entsprechen. Die Datenpunkte der Abtastlinie sind als sieben Punkte, ein Punkt pro Pixel, quer durch das Diagramm dargestellt. Von links nach rechts zeigen die Bildintensitätswerte zunächst einen relativ dunkleren Bereich für den ersten zum dritten Pixel an, dem dann ein relativ hellerer Bereich folgt, insbesondere für das fünfte bis zum siebten Pixel. Das vierte Pixel (d.h., das mittlere Pixel, wird mit einem Pixelintensitätswert E1 gekennzeichnet, der wie gezeigt zwischen den hohen und den niedrigen Werten der anderen Pixel liegt und einen Übergangswert für die Kante EG1 darstellt. Es versteht sich, dass das Intensitätsprofil 610A eine relativ begrenzte Abtastung der Kante darstellt (z.B. im Gegensatz zu dem Intensitätsprofil 410 von **Fig. 4**, bei dem sich mehrere Pixel im Übergangsbereich für die Kante befinden).

[0046] **Fig. 6B** stellt ein Bild 600B dar, in welchem das Werkstück mit der Kante EG1 und das Pixel-Array PA relativ zueinander um einen dem Abstand Δx entsprechenden Sub-Pixelversatz verschoben wurden. Mit anderen Worten, während sich die Kante EG1 an einer Position P1 in einem Abstand X_1 von der linken Kante des Pixel-Arrays PA in **Fig. 6A** befand, zeigt sich in **Fig. 6B**, dass die Kante EG1 in einer Richtung DIR1 bewegt wurde und sich nun an einer Position P2 in einem Abstand X_2 von der linken Kante des Pixel-Arrays PA befindet. Der Unterschied zwischen den Abständen X_1 und X_2 ist der Sub-Pixelversatz ΔX . Es versteht sich, dass obwohl in einigen Ausführungsformen der Sub-Pixelversatz ΔX manchmal weniger als ein Pixel betragen kann, der Sub-Pixelversatz ΔX in verschiedenen anderen Ausführungsformen mehr als ein Pixel betragen kann solange es sich nicht um eine ganzzahlige Anzahl von Pixeln handelt, so

dass die Abtastdichte erhöht wird, wie nachfolgend näher beschrieben wird.

[0047] Unterhalb des Bilds 600B ist ein Diagramm 605B gezeigt, das ein Intensitätsprofil 610 zum Inhalt hat. Das Intensitätsprofil 610B umfasst Datenpunkte, die den sieben Pixelwerten entsprechen, welche der Abtastlinie des Punktwerkzeugs PT entsprechen. Das dritte Pixel ist mit einem Pixelintensitätswert E2 gekennzeichnet, der einen Übergangswert für die Kante EG1 darstellt. Ähnlich dem Intensitätsprofil 610A von **Fig. 6A** stellt das Intensitätsprofil 610B von **Fig. 6B** eine relativ begrenzte Abtastung der Kante EG1 dar.

[0048] **Fig. 6C** zeigt eine Diagramm 605C eines Intensitätsprofils 610C, das kombinierte Daten aus den Intensitätsprofilen 610A und 610B der **Fig. 6A** und **Fig. 6B** darstellt. Wie in **Fig. 6C** gezeigt wird, werden vierzehn Pixelintensitätswerte dargestellt, die sieben Pixelintensitätswerten aus **Fig. 6A** und den sieben Pixelintensitätswerten aus **Fig. 6B** entsprechen. Die vierzehn Pixelintensitätswerte von **Fig. 6C** stellen somit eine höhere Abtastdichte dar als diejenige, die jeweils seitens der Einzelbilder 600A oder 600B erreicht wurde. Somit kann also durch Verwendung mehrfacher Bilder mit einem Sub-Pixelversatz des Objekts relativ zum Detektor (wie, z.B. durch die Bilder 600A und 600B dargestellt) die Abtastdichte einer Kante erhöht werden.

[0049] Es versteht sich, dass die zusammengesetzten Bilddaten mit der erhöhten Abtastdichte auch den Vorteil aufweisen können, dass Alias-Effekte von Kanten reduziert werden, die enger beieinander liegen als der zweifache Pixelabstand, wenn sie auf eine Kamera vergrößert werden, wie dies beim Überprüfen von feinen periodischen Strukturen wie Gittern oder IC-Masken oder dergleichen anzutreffen ist. In bestimmten Anwendungen können feine periodische Strukturen durch die Optik eines Inspektionssystems mit maschineller Bildverarbeitung aufgelöst werden, können jedoch zu eng zueinander beabstandet sein, um realistisch abgebildet und/oder gemessenen zu werden, wenn eine Kamera mit einer begrenzten Pixelabtastdichte verwendet wird. Durch Erhöhung der Abtastdichte unter Verwendung von mehreren Bildern mit Sub-Pixelversatz können die Kanten der Merkmale mit feinen periodischen Mustern durch Verwendung von Kantenerkennungsalgorithmen aufgelöst und gemessen werden.

[0050] **Fig. 7** ist ein Zeitdiagramm 700 einer beispielhaften Abfolge unter Verwendung einer Betriebsart der schnellen Mehrfachbildfassung einer Kamera, die einen solchen Modus unterstützt, um die Bilder der **Fig. 6A** und **Fig. 6B** zu erfassen. Um solche Abläufe zu erreichen, sind stehen verschiedene handelsübliche Kameras zur Verfügung (z.B. JAI AM-200CL, JAI AD-081CL, PCO PixelFly,

etc.), die mit einem Modus ausgestattet sind, der kurze Bild-zu-Bild-Zeiten von ≈ 5 Mikrosekunden bereitstellt und die Kombination von zwei, drei oder mehr schnell erfassten Bildern erlaubt (abhängig vom Kameramodell). **Fig. 7** stellt eine Bild-Zeitabfolge in einer solchen Kamera dar (z.B. einer JAI-Kamera mit 1-CCD, die zwei Bilder mit einer kurzen Bild-zu-Bild-Zeit erbringt).

[0051] Das Zeitdiagramm 700 umfasst eine Auslösesignallinie 710, eine EEN-Signallinie 720, eine Belichtungssignallinie 730, eine Transfer-Gate-Signallinie 740 und eine Anzeigesignallinie 750. Zu einer Zeit T1 wird die Auslösesignallinie 710 von hoch nach niedrig aktiviert, und die EEN-Signallinie 720 wird entsprechend aktiviert und somit ein erstes Belichtungsfenster EW1 gestartet (z.B. mit einem Zeitablauf von 4 μ s oder 8 μ s, in verschiedenen Ausführungsformen). Zu einer Zeit T2 kehrt die Auslösesignallinie 710 zu einem hohen Zustand zurück. Zur Zeit T3 zeigt die Belichtungssignallinie 730 eine Belichtungsdauer in Bezug auf einen ersten Stroboskopblitz SF1.

[0052] Zu einem Zeitpunkt T4 zeigt die EEN-Signallinie 720 das Ende des ersten Belichtungsfensters EW1 an, die Belichtungssignallinie 730 zeigt das Ende der Belichtungsdauer in Bezug auf den ersten Stroboskopblitz SF1 an, die Transfer-Gate-Signallinie 740 zeigt das Ende des ersten Bildfelds FM1 und den Beginn eines zweiten Bildfelds FM2 an. Die dreieckige Signalform in dem Zeitraum (T4-T3) zeigt an, dass beginnend zur Zeit T3 und endend zur Zeit T4 die Beleuchtung während dieser stroboskopischen Beleuchtungsdauer zunimmt. Die zweite Beleuchtung beginnt zu einer Zeit T5, nach der Bild-zu-Bild-Zeit (T5-T4). Es versteht sich, dass in einigen Ausführungsformen des schnellen Mehrfachbildfassungsmodus die Bild-zu-Bild-Zeit durch Hardware oder Firmware festgelegt oder eingeschränkt sein kann. Es sollte deshalb verstanden werden, dass es wünschenswert sein kann, den Zeitpunkt des Endes der Zeit T4 des Kamera-Integrationszeitraums (z.B. basierend auf der Auslösezeit dieses Integrationszeitraums und dessen bekannter Dauer) zu kennen, so dass die Stroboskopbeleuchtung so eingestellt werden kann, dass das erste Bild korrekt belichtet wird und ungefähr gleichzeitig mit dem Ende des Integrationszeitraums zur Zeit T4 endet. Dies bewirkt, dass die effektive Belichtungszeit des ersten Bildes nur um die Bild-zu-Bild-Zeit vom Start der Erfassung des zweiten Bildes entfernt endet, wodurch der Gesamtstart und die Dauer des ersten Bildintegrationszeitraums für die effektive Zeitverzögerung zwischen dem ersten und zweiten Bild weitgehend bedeutungslos wird. Beispielhafterweise und nicht in einschränkender Weise kann in einigen Ausführungsformen und/oder Anwendungen die Zeit (T4-T3) im Bereich von 6 Mikrosekunden liegen,

und die Bild-zu-Bild-Zeit (T5-T4) kann im Bereich von 1,5 bis 5 Mikrosekunden liegen.

[0053] Die Anzeigesignallinie 750 zeigt den Beginn eines ersten Anzeigezeitraums RP1 zur Zeit T4 an. Der erste Anzeigezeitraum RP1 entspricht der Anzeige der an der Signallinie 730 zwischen den Zeiten T3 und T4 entsprechend des ersten Stroboskopblitzes SF1 angestiegenen Bildbelichtung. Zur Zeit T5 zeigt die EEN-Signallinie 720 den Beginn eines zweiten Belichtungsfensters EW2 an (entsprechend eines Bildfeldes in bestimmten Ausführungen), und die Belichtungssignallinie 730 zeigt einen Belichtungszeitraum für einen zweiten Stroboskopblitz SF2 an. Zur Zeit T6 zeigt die Belichtungssignallinie 730 an, dass der Belichtungszeitraum für den zweiten Stroboskopblitz SF2 endet.

[0054] Zu einer Zeit T7 zeigt die Anzeigesignallinie 750 das Ende der ersten Anzeigezeitraums RP1 an. In einigen Ausführungsformen und/oder Anwendungen kann (T7-T6) im Bereich von 16 Millisekunden liegen. Zur Zeit T8 zeigt die EEN-Signallinie 720 das Ende des zweiten Belichtungsfensters EW2 an, die Transfer-Gate-Signallinie 740 zeigt das Ende des zweiten Bildfelds FM2 und den Beginn eines dritten Bildfelds FM3 an, und die Anzeigesignallinie 750 zeigt den Beginn eines zweiten Anzeigezeitraums RP2 an. Der zweite Anzeigezeitraum RP2 entspricht der Anzeige der an der Signallinie 730 zwischen den Zeiten T5 und T6 entsprechend des zweiten Stroboskopblitzes SF2 angestiegenen Bildbelichtung. Falls erwünscht oder erforderlich ist die Betriebsart der schnellen Mehrfachbilderfassung ab einer Zeit T9 bereit für einen weiteren Zyklus mit den nächsten Stroboskopblitzen SF3 und SF4 und den entsprechenden nächsten Anzeigezeiträumen RP3 und RP4.

[0055] Fig. 8 zeigt ein Ablaufdiagramm eines Ausführungsbeispiels einer Routine 800 zur Erfassung erster und zweiter Bilder unter Verwendung einer Betriebsart der schnellen Mehrfachbilderfassung, um Abtastabläufe für Bilder mit Sub-Pixelversatz in einem Inspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung bereitzustellen. An einem Block 810 wird ein optisches System mit einer Vergrößerung M in einem Inspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung bereitgestellt. An einem Block 820 wird in dem Inspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung eine Kamera bereitgestellt, die einen ersten Pixelabstand P und eine Betriebsart der schnellen Mehrfachbilderfassung aufweist. An einem Block 830 werden Abtastabläufe für Bilder mit Sub-Pixelversatz bereitgestellt, die eine erste Bilderfassungsbewegung vorsehen, bei der das Werkstück und die Kamera mit einer ersten Geschwindigkeit S entlang einer ersten Richtung relativ zueinander bewegt werden. An einem Block 840 werden als ein weiterer Bestandteil der Abtastabläufe für Bilder mit Sub-Pixelversatz mehrere Bilder eines Bereichs von Interesse wäh-

rend der Bilderfassungsbewegung unter Verwendung der Betriebsart der schnellen Mehrfachbilderfassung aufgenommen. Die mehreren Bilder umfassen mindestens ein zu einer ersten Zeit t1 erfasstes erstes Bild des Bereichs von Interesse und ein zu einer zweiten Zeit t2 nach der ersten Zeit t1 erfasstes zweites Bild des Bereichs von Interesse, wobei ein Versatz O zwischen den ersten und zweiten Bildern besteht. Der Versatz O entspricht ungefähr gleich $M \cdot S \cdot (t2 - t1)$, und das Inspektionssystem mit maschineller Bildverarbeitung ist so konfiguriert, dass O ungleich nP ist, wobei n eine Ganzzahl ist.

[0056] Aus dem Vorstehenden wird verständlich, dass spezifische Ausführungsformen der Erfindung hier zum Zwecke der Erläuterung beschrieben werden, dass jedoch verschiedene Abänderungen vorgenommen werden können, ohne vom Schutzzumfang der Erfindung abzuweichen. Der Fachmann wird beispielsweise verstehen, dass das dargestellte Ablaufdiagramm auf vielfältige Weise abgeändert werden kann. Insbesondere kann die Reihenfolge der Schritte umgestellt werden, Schritte können parallel ausgeführt werden, Schritte können weggelassen werden, andere Schritte können aufgenommen werden, usw.. Folglich wird die Erfindung außer durch die anhängenden Ansprüche nicht eingeschränkt.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Erfassen mehrerer Bilder in einem Inspektionssystem (10, 100) mit maschineller Bildverarbeitung zur Verwendung bei der Durchführung von Messabläufen an einem Werkstück (20), das Verfahren umfassend:
 Bereitstellen eines optischen Systems (34, 205) in dem Inspektionssystem (10, 100) mit maschineller Bildverarbeitung, wobei das optische System (34, 205) eine Vergrößerung M bereitstellt;
 Bereitstellen einer Kamera (260) in dem Inspektionssystem (10, 100) mit maschineller Bildverarbeitung, wobei die Kamera (260) einen ersten Pixelabstand P aufweist und eine Betriebsart für schnelle Mehrfachbilderfassung aufweist;
 Bereitstellen von Abtastabläufen für Bilder mit Sub-Pixelversatz, umfassend:
 Bereitstellen einer ersten Bilderfassungsbewegung, die das Bewegen eines Werkstücks (20) und der Kamera (260) mit einer ersten Geschwindigkeit S relativ zueinander entlang einer ersten Richtung umfasst;
 Erfassen mehrerer Bilder eines Bereichs von Interesse während der Bilderfassungsbewegung unter Verwendung der Betriebsart der schnellen Mehrfachbilderfassung, wobei die mehreren Bilder umfassen:
 ein zu einer ersten Zeit t1 erfasstes erstes Bild (600A) des Bereichs von Interesse; und ein zu

einer zweiten Zeit t_2 nach der ersten Zeit t_1 erfasstes zweites Bild (600B) des Bereichs von Interesse; wobei ein Versatz O zwischen dem ersten und zweiten Bild (600A, 600B) ungefähr gleich $M \cdot S \cdot (t_2 - t_1)$ ist und das Inspektionssystem (10, 100) mit maschineller Bildverarbeitung so konfiguriert ist, dass O ungleich nP ist, wobei n eine Ganzzahl ist, wobei das Erfassen der Vielzahl von Bildern umfasst:

Verwendung eines ersten Stroboskopblitzes (SF1) mit einer Zeitsteuerung, die der ersten Zeit t_1 entspricht, um das erste Bild (600A) zu erfassen; und Verwendung eines zweiten Stroboskopblitzes (SF2) mit einer Zeitsteuerung, die der zweiten Zeit t_2 entspricht, um das zweite Bild (600B) zu erfassen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, ferner das Betreiben des Inspektionssystems (10, 100) mit maschineller Bildverarbeitung aufweisend, um die mehreren Bilder zu verarbeiten und den Versatz derart zu beseitigen, dass das Werkstück (20) in den Bildern deckungsgleich ist, und die Daten der deckungsgleichen Bilder zu kombinieren, um Bilddaten mit einer Auflösung bereitzustellen, die besser als diejenige ist, die durch die systemeigene Auflösung der Kamera (260), die die mehreren Bilder in dem Inspektionssystem (10, 100) mit maschineller Bildverarbeitung erfasst, möglich ist.

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei das Kombinieren der deckungsgleichen Bilddaten auf mindestens einem der Folgenden basiert: Zwischenspeichern der Position; Bewegung und Zeitablauf; oder Korrelation.

4. Verfahren nach Anspruch 2, wobei der Versatz O in einen Bereich von $(n + 0,3)P < O < (n + 0,7)P$ fällt.

5. Verfahren nach Anspruch 2, wobei die Abläufe in einem Kantenwerkzeug enthalten sind, das einen Einzelbildmodus und einen Mehrfachbildmodus umfasst, wobei der Mehrfachbildmodus basierend auf mindestens einer Vergrößerung oder einer Benutzerauswahl verwendet wird und die Bilddaten von dem ersten und dem zweiten Bild (600A, 600B) während des Mehrfachbildmodus aufgenommen werden.

6. Verfahren nach Anspruch 2, wobei die ersten und zweiten Bilder (600A, 600B) eine Kante (EG1) des Werkstücks (20) im Bereich von Interesse umfassen, und das Bereitstellen der ersten Bilderfassungsbewegung das Definieren einer Bewegungsrichtung umfasst, die quer zu einer Kantenrichtung der Kante verläuft.

7. Verfahren nach Anspruch 6, wobei die Kantenposition auf der Basis der kombinierten Bilddaten

des ersten und zweiten Bildes (600A, 600B) bestimmt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Bilderfassungsbewegung unter Verwendung mindestens einer ersten makroskopischen Bewegungsachse des Inspektionssystems (10, 100) mit maschineller Bildverarbeitung bereitgestellt wird.

9. Verfahren nach Anspruch 1, wobei $(t_2 - t_1)$ höchstens 50 Mikrosekunden beträgt.

10. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der erste Pixelabstand P mindestens entweder ein Pixelabstand P_y in Spaltenrichtung oder ein Pixelabstand P_x in Reihenrichtung ist, und der Versatz O umfasst eine Komponente O_x entlang einer Spaltenrichtung der den Pixelabstand P_x aufweisenden Kamera und eine Komponente O_y entlang einer Reihenrichtung der den Pixelabstand P_y aufweisenden Kamera.

11. Inspektionssystem (10, 100) mit maschineller Bildverarbeitung zum Erfassen einer Vielzahl von Bildern, das zur Verwendung bei der Durchführung von Messabläufen an einem Werkstück (20) genutzt wird, wobei das Inspektionssystem (10, 100) mit maschineller Bildverarbeitung Folgendes umfasst: ein optisches System (34, 205), das eine Vergrößerung M bereitstellt, eine Kamera (260), die einen ersten Pixelabstand P aufweist und die eine Betriebsart für schnelle Mehrfachbilderfassung aufweist; und einen Speicher (140) zum Speichern von programmierten Anweisungen, die, wenn sie von einem Prozessor ausgeführt werden, Operationen durchführen, die Folgendes umfassen: Bereitstellen von Abtastabläufen für Bilder mit Sub-Pixelversatz, umfassend:

Bereitstellen einer ersten Bilderfassungsbewegung, die das Bewegen eines Werkstücks (20) und der Kamera (260) mit einer ersten Geschwindigkeit S relativ zueinander entlang einer ersten Richtung umfasst;

Erfassen mehrerer Bilder eines Bereichs von Interesse während der Bilderfassungsbewegung unter Verwendung der Betriebsart der schnellen Mehrfachbilderfassung, wobei die mehreren Bilder umfassen:

ein zu einer ersten Zeit t_1 erfasstes erstes Bild (600A) des Bereichs von Interesse; und ein zu einer zweiten Zeit t_2 nach der ersten Zeit t_1 erfasstes zweites Bild (600B) des Bereichs von Interesse; wobei das Erfassen der Vielzahl von Bildern umfasst:

Verwendung eines ersten Stroboskopblitzes (SF1) mit einer Zeitsteuerung, die der ersten Zeit t_1 entspricht, um das erste Bild (600A) zu erfassen; und Verwendung eines zweiten Stroboskopblitzes (SF2) mit einer Zeitsteuerung, die der zweiten Zeit t_2 entspricht, um das zweite Bild (600B) zu erfassen; wobei ein Versatz O zwischen dem ersten und zwei-

ten Bild (600A, 600B) ungefähr gleich $M \cdot S \cdot (t_2 - t_1)$ ist und das Inspektionssystem (10, 100) mit maschineller Bildverarbeitung so konfiguriert ist, dass O ungleich nP ist, wobei n eine Ganzzahl ist.

Es folgen 8 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

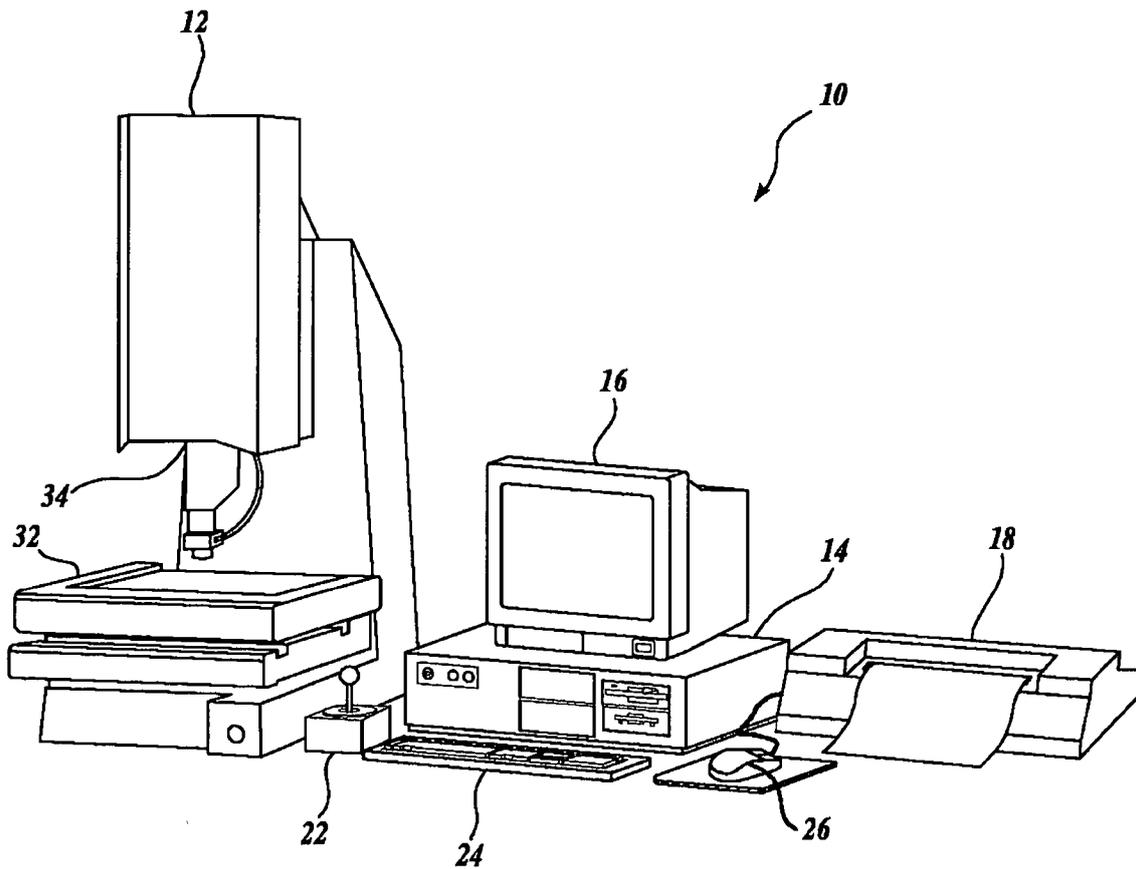


Fig. 1.

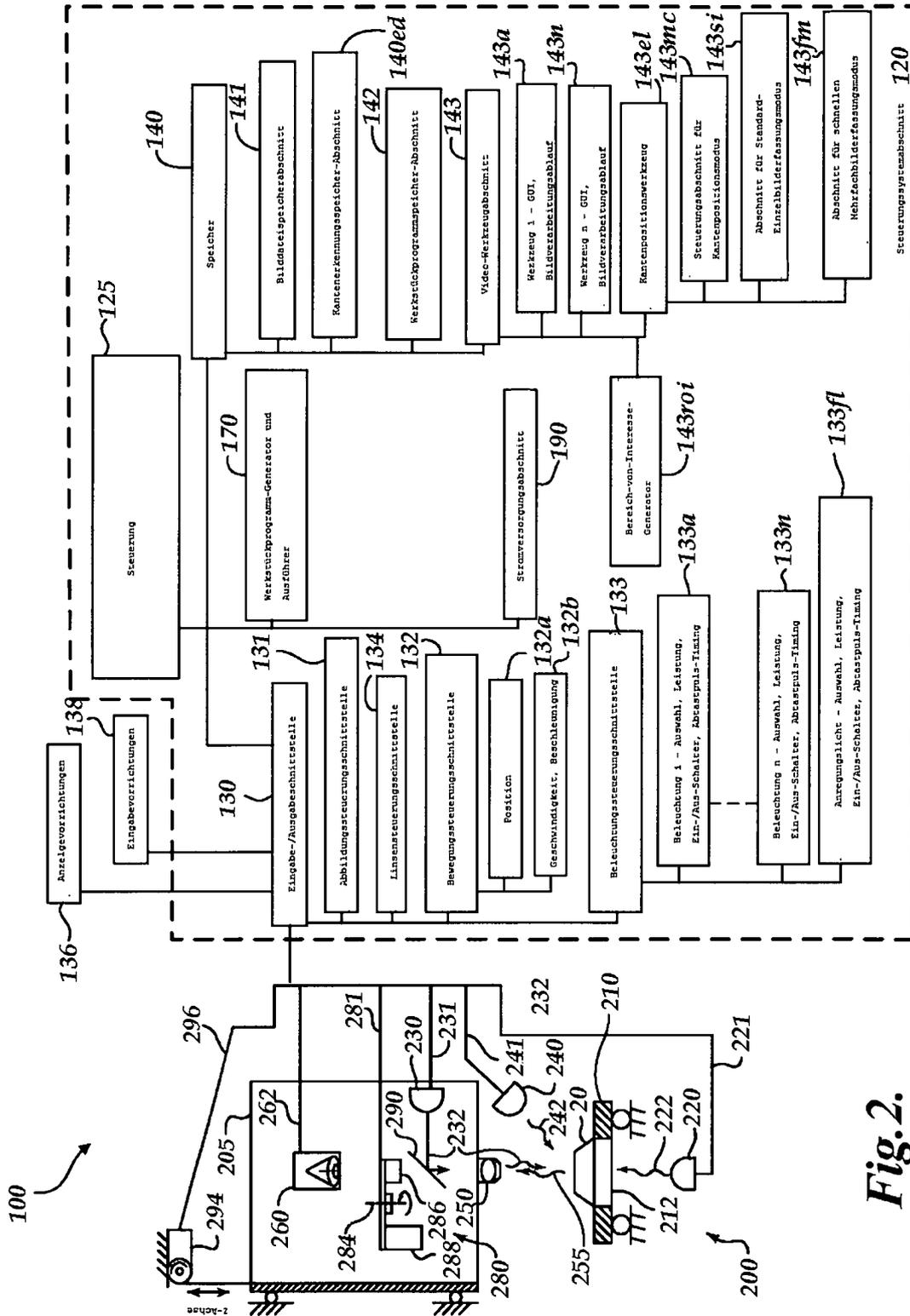


Fig. 2.

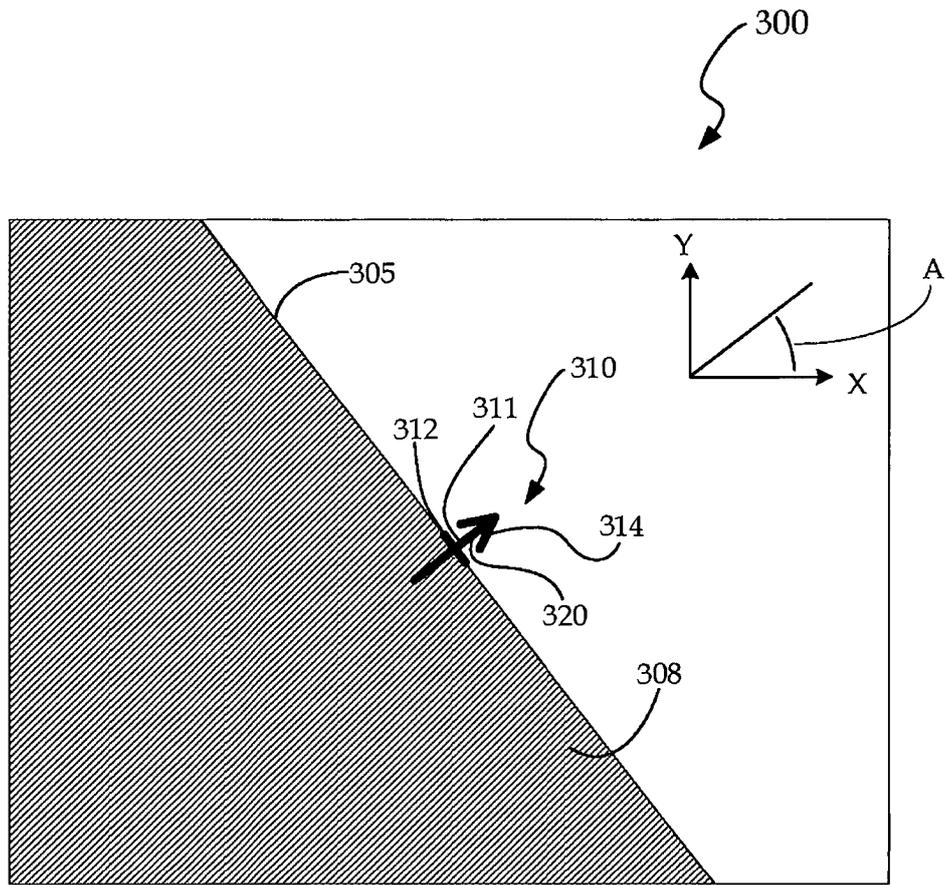


Fig.3.

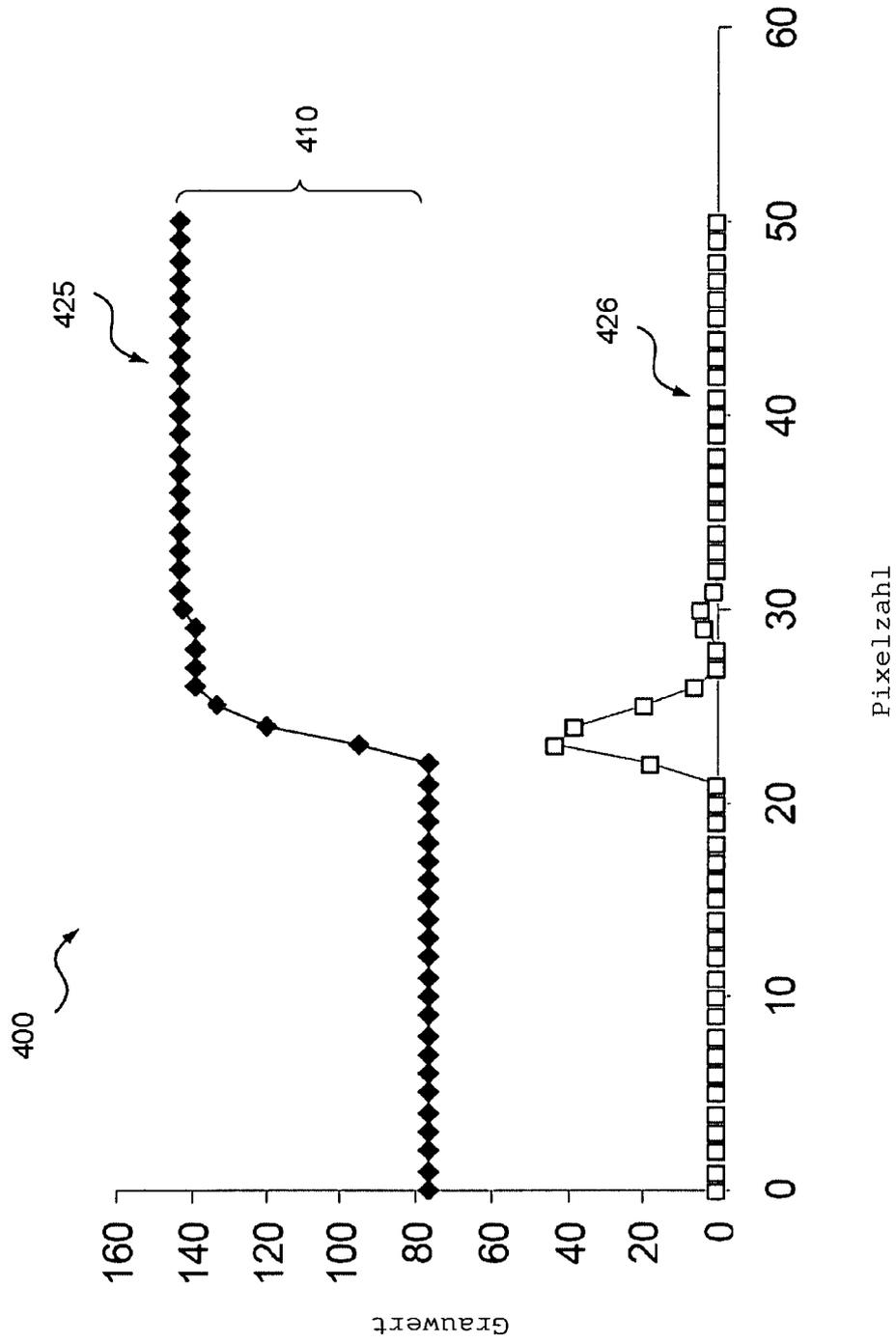


Fig. 4.

500 ↗

510	520	530	540	550	560
PT	Tubus-EFL (mm)	Gesamt M	Optische Auflösung (µm) [1/2 Airy-Scheibchen]	Erwartete $\frac{1}{2}$ Größe der Unschärfe (µm)	Erforderliche Pixelgröße (µm)
1X	100	5	0.65	3.25	1.63
2X	200	10		6.5	3.25
4X	400	20		13	6.5

501
502
503

Fig. 5.

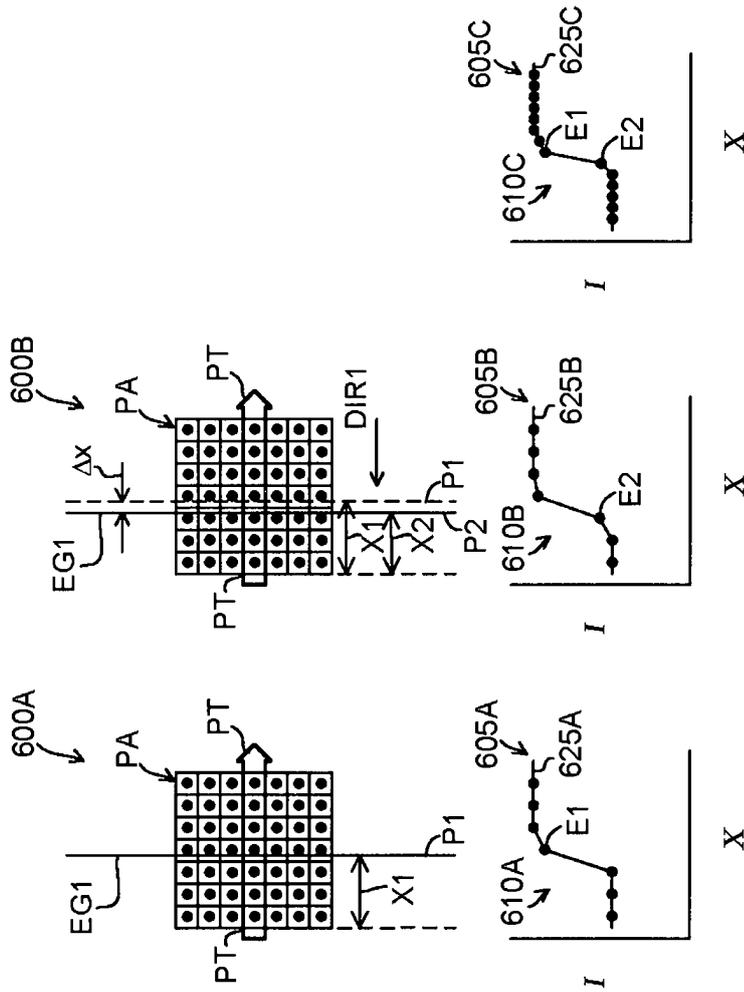


Fig. 6C.

Fig. 6B.

Fig. 6A.

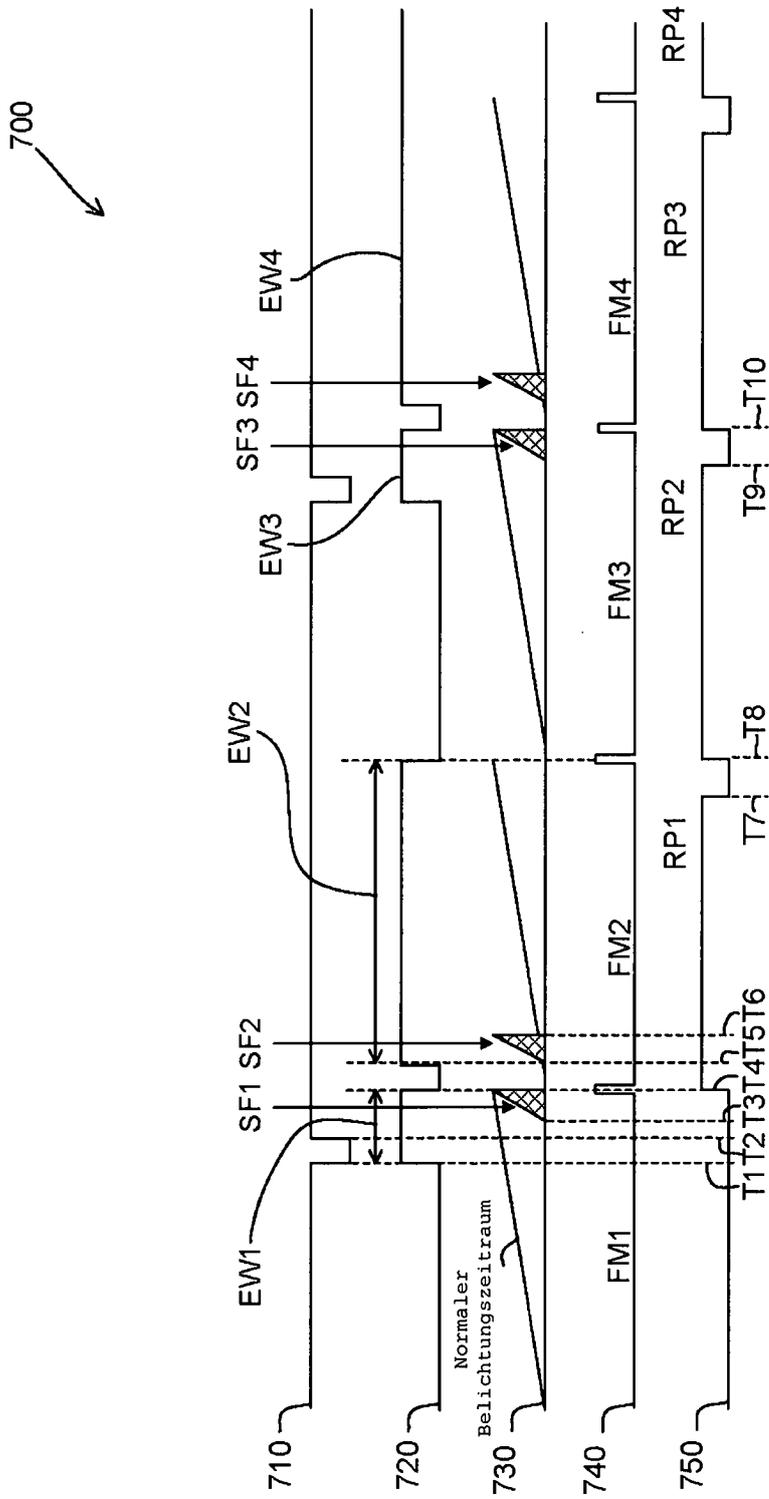


Fig. 7.

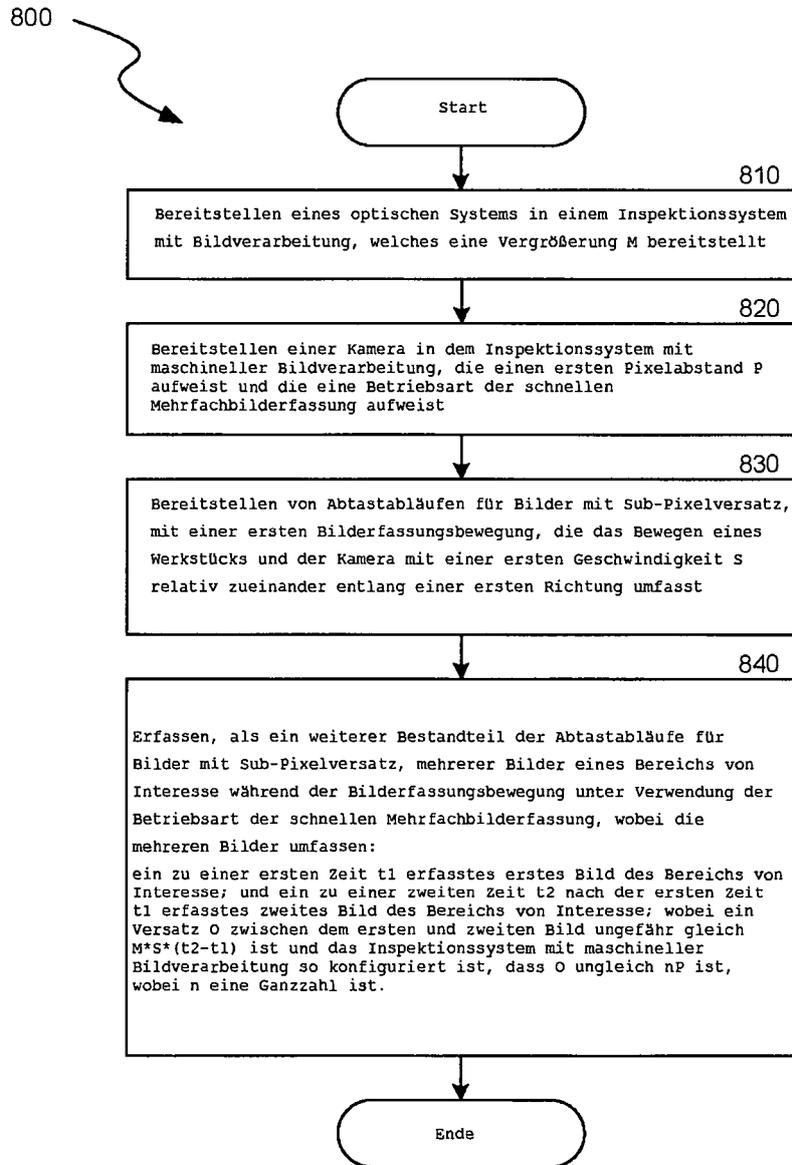


FIG. 8.