



(10) **DE 10 2017 113 471 A1** 2017.12.21

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2017 113 471.9**

(22) Anmeldetag: **20.06.2017**

(43) Offenlegungstag: **21.12.2017**

(51) Int Cl.: **G01C 25/00** (2006.01)

**G01B 11/24** (2006.01)

**G01C 11/00** (2006.01)

(66) Innere Priorität:

**10 2016 111 226.7**      **20.06.2016**

(71) Anmelder:

**Cognex Corporation, Natick, Mass., US**

(74) Vertreter:

**Meissner Bolte Patentanwälte Rechtsanwälte  
Partnerschaft mbB, 07545 Gera, DE**

(72) Erfinder:

**Große, Marcus, Dr., 07745 Jena, DE; Harendt,  
Bastian, Dr., 07749 Jena, DE**

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Kalibrierung eines bilderfassenden Sensors aus mindestens einer Sensorkamera unter Verwendung eines zeitlich kodierten Mustertargets**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Kalibrierung eines bilderfassenden Sensors aus mindestens einer Sensorkamera unter Verwendung eines zeitlich kodierten Mustertargets, wobei das zeitlich kodierte Mustertarget auf einem Flachbilddisplay angezeigt wird, wobei auf dem Flachbilddisplay eine Mustersequenz angezeigt und von der mindestens einen Sensorkamera als eine Folge von Kamerabildern aufgenommen wird, wobei bei einer festen Position des Flachbilddisplays im Raum oder jeweils für mindestens zwei sich unterscheidende Positionen des Flachbilddisplays im Raum eine Zuordnung zwischen Pixeln des zeitlich kodierten Mustertargets und erfassten Bildpunkten der Kamerabilder ausgeführt wird, wobei über einander korrespondierende Punkte die Kalibrierung erfolgt, wobei eine Gamma-Korrektur ausgeführt wird, bei der vor der Anzeige des zeitlich kodierten Mustertargets in einer beliebigen Position und/oder in jeder Position des Flachbilddisplays gemeinsam mit dem Aufnehmen der Mustersequenz durch die mindestens eine Sensorkamera eine Gamma-Kurve des Flachbilddisplays aufgenommen und korrigiert wird.

## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Kalibrierung eines bilderfassenden Sensors aus mindestens einer Sensorkamera unter Verwendung eines zeitlich kodierten Mustertargets mit den Merkmalen des Anspruchs 1.

**[0002]** Die Erfindung betrifft die Kalibrierung von Kameras selbst, die Kalibrierung mehrerer Kameras zueinander sowie die Kalibrierung eines Sensors aus mehreren Kameras in Bezug auf externe Koordinatensysteme.

**[0003]** Derartige Verfahren sind für verschiedene Kalibrieraufgaben von besonderer Bedeutung: Eine Kalibrieraufgabe ist beispielsweise die Bestimmung der inneren/intrinsischen Parameter einer Kamera. Die wichtigen Parameter sind hierbei der Abstand der Bildebene zum Projektionszentrum (Brennweite/Bildweite/Kammerkonstante/Kamerakonstante), der Schnittpunkt von Bildebene und optischer Achse (Hauptpunkt) sowie Verzeichnungparameter. Ein anderes Beispiel ist die Bestimmung der Orientierung von zwei (oder mehr) Kameras zueinander über äußere/extrinsische Parameter. Bestimmt werden dabei Rotationsmatrizen und Translationsvektoren zwischen den Koordinatensystemen der Kameras. Darüber hinaus kann die Bestimmung der Orientierung eines Mehrkameranensystems in Bezug auf ein externes Maschinenkoordinatensystem ausgeführt werden.

**[0004]** Bestimmt wird das Koordinatensystem des Kamerasystems (Sensor) in Bezug auf das eines Roboters oder einer Koordinatenmessmaschine. Der Sensor ist entweder unbeweglich befestigt (also starr in Bezug auf das Maschinenkoordinatensystem) oder als Werkzeug an der Maschine befestigt (also starr in Bezug auf Werkzeugkoordinatensystem der Maschine). Diese Problemstellung ist auch unter dem Begriff „Hand-Eye-Calibration“ bekannt.

**[0005]** Eine weitere Anwendung ist die Bestimmung der Drehachse eines Drehtellers, also Position und Richtung der Drehachse im Koordinatensystem eines Mehrkameranensystems (3D-Sensor). Hintergrund ist hier ein Drehteller zur 3D-Rundumvermessung von Objekten mit dem 3DSensor.

**[0006]** Ein anderes Anwendungsbeispiel ist die Bestimmung der Bewegungsrichtung eines Fließbandes im Koordinatensystem eines Mehrkameranensystems (3D-Sensor). Hintergrund ist eine Vermessung bewegter Objekte auf einem Fließband.

**[0007]** Üblicherweise verwendet man zur Kalibrierung Targets mit räumlichen Marken, beispielsweise Schachbrettmuster oder kodierte Kreismarken. Unabhängig davon existiert in der 3D-Vermessung

das Konzept der zeitlichen Kodierung. Dabei werden Muster auf die zu vermessenden Objekte projiziert. Dadurch erhält jeder Objektpunkt eine eindeutige zeitliche Kodierung.

**[0008]** Möglich ist auch eine zeitliche Kodierung in Anwendung auf ein Kalibriertarget. Dabei werden die Muster zur zeitlichen Kodierung nicht von einem Projektor projiziert, sondern von einem Bildschirm dargestellt. Der Bildschirm ist also das Kalibriertarget.

**[0009]** Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Kalibrierung eines bilderfassenden Sensors aus mindestens einer Sensorkamera unter Verwendung eines zeitlich kodierten Mustertargets, wird das zeitlich kodierte Mustertarget auf einem Flachbilddisplay angezeigt, wobei auf dem Flachbilddisplay eine Mustersequenz angezeigt und von der mindestens eine Sensorkamera als eine Folge von Kamerabildern aufgenommen wird. Dabei wird bei einer festen Position des Flachbilddisplays im Raum oder jeweils für mindestens zwei sich unterscheidende Positionen des Flachbilddisplays im Raum eine Zuordnung zwischen Pixeln des zeitlich kodierten Mustertargets und erfassten Bildpunkten der Kamerabilder ausgeführt, wobei über einander korrespondierende Punkte die Kalibrierung erfolgt. Hierbei wird eine Gamma-Korrektur ausgeführt, bei der vor der Anzeige des zeitlich kodierten Mustertargets vorab in einer beliebigen Position des Flachbilddisplays und/oder zusätzlich zu dem Aufnehmen der Mustersequenz in jeder Position des Flachbilddisplays durch die mindestens eine Sensorkamera eine Gamma-Kurve des Flachbilddisplays aufgenommen und korrigiert wird.

**[0010]** Bei einer Ausführungsform wird bei der Gamma-Korrektur eine zeitliche Folge aus homogenen Graubildern auf dem Flachbilddisplay angezeigt und von der mindestens eine Sensorkamera aufgenommen, wobei eine Gamma-Kurve des Flachbilddisplays ermittelt und anschließend eine korrigierende Gamma-Kurve erzeugt wird, wobei die auf dem Flachbilddisplay darzustellenden Bestandteile der Mustersequenz entsprechend der korrigierenden Gamma-Kurve angezeigt werden.

**[0011]** Bei einer Ausführungsform wird für jede Relativposition zwischen dem Flachbilddisplay und dem bilderfassenden Sensor zusätzlich zu der Mustersequenz eine zeitliche Folge aus Grauwertbildern angezeigt, wobei aus der Folge der Grauwertbilder eine korrigierende Gamma-Kurve für das gesamte Bild (genauer gesagt: den gesamten Anzeigebereich des Flachbilddisplays) oder für jeden Bildpunkt innerhalb der Sensorkamera erzeugt wird, wobei anschließend eine Gamma-Korrektur der Bilder innerhalb der Mustersequenz erfolgt. Bei der Gamma-Korrektur können die mit der Sensorkamera aufgenommenen Bilder der Mustersequenz oder die zuvor auf dem Flachbild-

display angezeigten Bilder der Mustersequenz korrigiert werden.

**[0012]** Bei einer Ausführungsform erfolgt bei der Aufnahme des Flachbilddisplays in einer festen Position im Raum eine zusätzliche automatische Anpassung der Belichtungszeit für jede Sensorkamera, wobei ein homogen weißes Bild auf dem Flachbilddisplay angezeigt und von der Sensorkamera aufgenommen wird, wobei die Belichtungszeit der Sensorkamera so nachreguliert wird, dass bei deren Endwert ein hellster Punkt auf dem Flachbilddisplay mit einem vordefinierten Intensitätswert durch die Sensorkamera erfasst wird.

**[0013]** Auch andere alternative Optimierungskriterien sind möglich, beispielsweise, dass der prozentuale Anteil an Bildpunkten, für die der in der Sensorkamera erfasste Intensitätswert einen vordefinierten Intensitätswert überschreitet, maximal einen vordefinierten Wert betragen soll (also z.B.: für maximal 10% der Bildpunkte soll der Grauwert über 250 liegen).

**[0014]** Bei einer Ausführungsform wird bei der Zuordnung zwischen den Pixeln des zeitlich kodierten Mustertargets und den erfassten Bildpunkten und der Erzeugung der Datenmenge der Punktkorrespondenzen für jede relative Position des Flachbilddisplays in Bezug auf den bilderfassenden Sensor in einem ersten Schritt lediglich eine Teilmenge von Pixeln und erfassten Bildpunkten einander zugeordnet, wobei aus den dabei erhaltenen Zuordnungen eine Homographie zwischen den angezeigten und den aufgenommenen Musterbildern berechnet wird, mit der relevante Suchbereiche für weitere Zuordnungen zwischen den angezeigten und aufgenommenen Musterbildern eingegrenzt wird. Hintergrund ist die Verkürzung der Rechenzeit bei der Zuordnung korrespondierender Punkte.

**[0015]** Bei einer Ausführungsform erfolgt die Zuordnung zwischen den Pixeln des zeitlich kodierten Mustertargets und den erfassten Bildpunkten und der Erzeugung der Datenmenge innerhalb eines vordefinierten Rasters. Hintergrund ist auch hier insbesondere die Verkürzung der Rechenzeit bei der Zuordnung korrespondierender Punkte.

**[0016]** Bei einer Ausführungsform wird als Flachbilddisplay ein Tablet-Computer mit einem auf dem Tablet-Computer ablaufenden Programm und/oder mit einem auf einer externen drahtlos mit dem Tablet-Computer kommunizierenden Steuereinheit ablaufenden Programm zum Erzeugen und Anzeigen des zeitlich kodierten Mustertargets verwendet.

**[0017]** Bei einer Ausführungsform besteht die Mustersequenz des zeitlich kodierten Mustertargets aus einer Folge statistisch erzeugter Muster.

**[0018]** Bei einer Ausführungsform besteht die Mustersequenz des zeitlich kodierten Mustertargets aus einer Folge regulärer Muster, insbesondere Streifenmuster oder Schachbrettmuster. Die Streifenmuster können einen binären oder kontinuierlichen Intensitätsverlauf aufweisen. Besonders relevant sind sinusförmige  $(1 + \cos)$ -Streifenmuster, mit denen auch bei geringer Musteranzahl eine hohe Genauigkeit bei der Punktzuordnung erzielt werden kann.

**[0019]** Bei einer Ausführungsform ist das Flachbilddisplay auf einer linear bewegten Fördereinrichtung angeordnet, wobei mittels einer Verschiebung des Flachbilddisplays durch eine lineare Bewegung der Fördereinrichtung die Bewegungsrichtung der Fördereinrichtung in Bezug auf den bilderfassenden Sensor ermittelt wird.

**[0020]** Bei einer Ausführungsform ist das Flachbilddisplay auf einer rotierenden Einrichtung angeordnet, wobei mittels einer Winkelbewegung des Flachbilddisplays durch eine Rotation der rotierenden Einrichtung die Lage und Orientierung der Rotationsachse der rotierenden Einrichtung in Bezug auf den bilderfassenden Sensor ermittelt werden.

**[0021]** Bei einer Ausführungsform ist das Flachbilddisplay auf sich bewegenden Komponenten einer Robotereinrichtung angeordnet, wobei durch eine Rotation und/oder eine Translation von einer oder mehreren der sich bewegenden Komponenten der Robotereinrichtung die Lage und Orientierung des Basiskoordinatensystems der Robotereinrichtung in Bezug auf den bilderfassenden Sensor ermittelt wird.

**[0022]** Bei einer Ausführungsform ist der bilderfassende Sensor mit einem Werkzeugpunkt einer Robotereinrichtung verbunden und das Flachdisplay statisch in Bezug auf die Robotereinrichtung angeordnet, wobei durch eine Rotation und/oder Translation des Werkzeugpunktes der Robotereinrichtung (und damit auch des bilderfassenden Sensors) die Lage und Orientierung des Werkzeugkoordinatensystems der Robotereinrichtung in Bezug auf den bilderfassenden Sensor ermittelt wird.

**[0023]** Bei einer Ausführungsform wird das Flachdisplay in unterschiedlichen relativen Lagen und/oder Orientierungen zum bilderfassenden Sensor aufgenommen und es werden innere Abbildungsparameter jeder einzelnen Sensorkamera und/oder die Lage und/oder Orientierungen der Sensorkameras zueinander ermittelt.

**[0024]** Es liegt im Sinne des erfindungsgemäßen Grundgedankens, dass zum Ausführen des hier beschriebenen und beanspruchten Verfahrens ein Tablet-Computer zur Anwendung kommt.

**[0025]** Nachfolgend soll das Verfahren beispielhaft näher erläutert werden.

**[0026]** Das Besondere an dem Verfahren ist also nicht die Kalibrierung selbst, sondern das Kalibriertarget. Gegenüber räumlichen Markern hat ein Target mit zeitlichem Marker u.a. folgende Vorteile:

- Durch die zeitliche Kodierung erhält man sehr viele Marker. Jeder Pixel des Bildschirms wird dabei zu einem Marker.
- Die Marker können den Sichtbereich der Kameras vollständig ausfüllen, sofern der Bildschirm groß genug ist. Deshalb können auch noch am Rand der Kamerabilder Marker registriert werden. Das ist für die Bestimmung von Verzeichnungsparametern bei der inneren Kalibrierung relevant.
- Die eindeutige Registrierung der Marker ist durch die zeitliche Kodierung sehr zuverlässig, präzise und einfach.
- Eine nicht vollständige Sichtbarkeit des Kalibriertargets (beispielsweise durch Verdeckung) beeinflusst das Prinzip der Kalibrierung nicht.

**[0027]** Bei der Kalibrierung kommen eine Kamera oder mehrere Kameras im Verbund zum Einsatz, die von einem PC gesteuert werden. Als Kalibriertarget wird beispielsweise ein Tablet verwendet, das über WLAN mit dem PC verbunden ist. Die Muster, die auf dem Tablet angezeigt werden sollen, werden vorab bereitgestellt. Verwendet werden statistisch erzeugte Muster, also eine zufällige zeitliche Kodierung. Aber auch andere zeitliche Kodierungstechniken (beispielsweise Streifenprojektion) sind denkbar.

**[0028]** Es werden folgende Schritte ausgeführt:

Schritt 1: (Grobe Gamma-Korrektur)

**[0029]** Zunächst wird Gamma-Kurve des Tablets vorab aufgenommen und grob korrigiert. Eine Kamera nimmt hierzu das Tablet auf, während eine Sequenz von homogenen Graubildern auf dem Tablet angezeigt wird. Aus den aufgenommenen Graubildern wird danach die Gamma-Kurve des Tablets bestimmt. Dabei gilt folgender Zusammenhang:

$$\text{Grauwert}_{\text{Kamera}} = m \cdot \text{Grauwert}_{\text{Tablet}}^y + n$$

**[0030]** Prinzipiell könnten auch andere nicht-lineare Zusammenhänge korrigiert werden. Die Gamma-Kurve ist jedoch in der Praxis am wichtigsten. Die Musterbilder, die auf dem Tablet angezeigt werden sollen, werden entsprechend des ermittelten Gamma-Wertes korrigiert:

$$\text{Grauwert}_{\text{Tablet}}' = \text{Grauwert}_{\text{Tablet}}^{-y}$$

**[0031]** Damit bleibt zwischen den Grauwerten des Tablets und den Grauwerten der Kamera(s) ein linearer Zusammenhang übrig. Tatsächlich handelt es

sich bei diesem Schritt aber nur um eine grobe Korrektur. Eine feine Korrektur wird bei jeder Vermessung separat durchgeführt. Theoretisch würde eine solche feine Korrektur ausreichen. Praktisch wäre das jedoch mit großen Ungenauigkeiten durch Rauschen verbunden, das sich insbesondere durch ein Sensorrauschen und ein Quantisierungsrauschen bemerkbar macht. Die grobe Korrektur sorgt dafür, dass der Grauwertbereich der Kameras bereits bei der Bildaufnahme besser ausgenutzt wird. Die anschließende feine Korrektur ändert die aufgenommenen Bilder folglich nur noch geringfügig.

Schritt 2: (Aufnahme des Flachbildsdisplays, Gamma-Korrektur und Punktzuordnung)

**[0032]** Es erfolgt dann eine Aufnahme des Tablets in fester Position. Die Wahl der Position des Tablets in Bezug auf den Sensor hängt von der Kalibrierungsaufgabe ab.

**[0033]** Optional erfolgt zunächst eine automatische Anpassung der Belichtungszeit für jede Kamera separat mit folgenden Schritten:

In einem Schritt a erfolgt eine Anzeige eines homogen weißen Bildes mit maximaler Helligkeit auf dem Tablet. In einem Schritt b erfolgt dann eine Aufnahme mit der Kamera. Schließlich erfolgt mit einem Schritt c eine Anpassung der Belichtungszeit der Kamera, bis der Anzeigebereich des Tablets gerade so nicht übersteuert ist. Dies entspricht einer Suche nach der optimalen Belichtungszeit, bei der beispielsweise der hellste Punkt des Anzeigebereichs des Tablets z.B. 95% des maximalen Intensitätswerts der Kamera erreicht. Es sind auch andere Optimierungskriterien möglich, wobei verschiedene Algorithmen für dieses automatische Vorgehen dabei denkbar sind. Dies kann beispielsweise eine so genannte Bisektion sein.

**[0034]** Danach kann eine Aufnahme einer Sequenz von homogenen Graubildern zur Gamma-Korrektur erfolgen:

Hierzu wird nacheinander jeweils ein Bild aus der Graubildsequenz auf dem Tablet angezeigt und von der bzw. den Kameras aufgenommen. Der Zweck der Graubilder ist eine feine Gamma-Korrektur bzw. allgemein die Korrektur eines nichtlinearen Zusammenhangs zwischen den Grauwerten des Tablets und der Kamera.

**[0035]** Die Aufnahme einer Mustersequenz schließt sich daran wie folgt an. Nacheinander wird nun ein Bild aus der Sequenz statistischer Muster auf dem Tablet angezeigt und von der bzw. den Kameras aufgenommen. Dabei sind auch andere Mustertypen denkbar, beispielsweise Streifenmuster.

**[0036]** Die hier beschriebene Reihenfolge der Muster, d.h. erst die Grauwertbilder, dann die Musterbilder, eine vertauschte Reihenfolge zwischen beiden

oder sogar eine miteinander verschachtelte Reihenfolge, spielt für das Prinzip der Kalibrierung keine Rolle. Wichtig ist lediglich, dass bei der anschließenden Auswertung bekannt ist, welches aufgenommene Bild welchem angezeigten Bild entspricht.

**[0037]** Danach erfolgt eine Auswertung der aufgenommenen Bilder für jede Kamera separat mit folgenden Schritten:

Optional wird zunächst eine Bestimmung des Anzeigebereichs des Displays ausgeführt.

**[0038]** Aus den aufgenommenen Musterbildern und/oder Grauwertbildern wird die Lage des Anzeigebereichs des Displays in den Kamerabildern bestimmt. Dazu wird die zeitliche Variation der Intensität (z.B. die zeitliche Standardabweichung der Intensitätswerte) für jeden Bildpunkt und jede Kamera herangezogen. Liegt die zeitliche Intensitätsvariation über einem vordefinierten Schwellwert, wird der entsprechende Bildpunkt dem Anzeigebereich des Displays zugerechnet. Auch weitere (statistische) Werte, wie der zeitliche Mittelwert der Intensität können als alternatives/ergänzendes Kriterium herangezogen werden. Die nachfolgenden Schritte zur Bestimmung und Korrektur der Gamma-Kurve sowie zur Zuordnung korrespondierender Bildpunkte können auf die Bildpunkte des so bestimmten Anzeigebereichs des Displays eingeschränkt werden.

**[0039]** Die Bestimmung und Korrektur der Gamma-Kurve muss nicht zwingend ausgeführt werden. Sie erfolgt mit folgenden Schritten:

Aus den aufgenommenen homogenen Graubildern wird für jeden Pixel  $(u, v)$  der Kamera der folgende Zusammenhang bestimmt:

$$\text{Grauwert}_{\text{Kamera}}(u, v) = m(u, v) \cdot \text{Grauwert}_{\text{Tablet}}(u, v)^{\gamma(u, v)} + n(u, v)$$

**[0040]** Die aufgenommenen Musterbilder werden nun entsprechend  $n(u, v)$ ,  $m(u, v)$  und  $\gamma(u, v)$  korrigiert:

$$\text{Grauwert}'_{\text{Kamera}}(u, v) = [(\text{Grauwert}_{\text{Kamera}}(u, v) - n(u, v)) / m(u, v)]^{1/\gamma(u, v)}$$

**[0041]** Dabei können prinzipiell auch andere nichtlineare Zusammenhänge korrigiert werden.

**[0042]** Alternativ kann die Gamma-Kurve auch für das gesamte Bild und nicht für jeden Pixel  $(u, v)$  einzeln bestimmt werden:

$$\text{Grauwert}_{\text{Kamera}}(u, v) = m \cdot \text{Grauwert}_{\text{Tablet}}(u, v)^{\gamma} + n$$

**[0043]** Die aufgenommenen Musterbilder werden dann entsprechend der Parameter  $n$ ,  $m$  und  $\gamma$  korrigiert:

$$\text{Grauwert}'_{\text{Kamera}}(u, v) = [(\text{Grauwert}_{\text{Kamera}}(u, v) - n) / m]^{\gamma}$$

**[0044]** Alternativ können in in einem solchen Fall, bei dem die Gamma-Kurve nicht für jeden Bildpunkt einzeln, sondern für den gesamten Anzeigebereich des Displays bestimmt wird, auch die zuvor auf dem Flachdisplay angezeigten Musterbilder wie folgt korrigiert werden:

$$\text{Grauwert}'_{\text{Tablet}}(u, v) = m \cdot \text{Grauwert}_{\text{Tablet}}(u, v)^{\gamma} + n$$

**[0045]** Die notwendige Zuordnung korrespondierender Bildpunkte wird nun wie folgt ausgeführt.

**[0046]** Jedem Pixel des Tablets wird in einem ersten Schritt der entsprechende Bildpunkt in der Kamera, der diesen Tablet-Pixel abbildet, subpixelgenau zugeordnet. Dazu wird die Ähnlichkeit der an diesen Punkten zeitlich nacheinander auf dem Tablet angezeigten bzw. von der Kamera aufgenommenen Intensitätswerte der Musterbildsequenz bestimmt. Als Ähnlichkeitsmaß kann z.B. eine normierte Kreuzkorrelation oder eine Summe absoluter Differenzen verwendet werden. Das erfolgt je nachdem, welche Art von Mustern verwendet wird, es sind durchaus auch andere Ähnlichkeitsmaße denkbar. Bei sinusförmigen Streifenmustern kann beispielsweise eine sogenannte Phasenauswertung erfolgen. Sowohl die normierte Kreuzkorrelation als auch die Phasenauswertung können lineare Zusammenhänge zwischen den angezeigten und aufgenommenen Intensitätswerten berücksichtigen.

**[0047]** Nicht-lineare Zusammenhänge, wie eine Gamma-Kurve, können nicht berücksichtigt werden. Ohne eine Gamma-Korrektur, die in diesem Verfahren zur Anwendung kommt, ist die Präzision der zugeordneten Punktkorrespondenzen deshalb vergleichsweise schlecht.

**[0048]** Als Ergebnis liegt somit eine erzeugte Liste mit Punktkorrespondenzen vor, die anschließend weiterverarbeitet wird.

**[0049]** Um die hierbei erforderliche Rechenlast zu verringern, sind verschiedene Maßnahmen möglich, die zusätzlich erfolgen können:

Zunächst können nur wenige Punkte zugeordnet werden und aus den zugeordneten Punkten eine so genannte Homographie zwischen dem Tablet und der Bildebene der Kamera bestimmt werden, mit der der Suchbereich für weitere Punktzugeordnungen eingeschränkt werden kann. Weiterhin ist es auch möglich, dass generell nicht jedem Punkt des Tablets ein Bildpunkt zugeordnet wird, sondern nur wenigen Punkten aus einem vorgegebenen Raster.

**[0050]** Diese optionalen Maßnahmen zur Reduzierung der Rechenlast haben folgenden Hintergrund:

Die Projektion der Punkte einer Ebene (hier ein Flachdisplay) in eine andere Ebene (hier die Bildebene einer Kamera) kann durch eine sogenannte Homographie beschrieben werden. Ist die Homographie für eine bestimmte Lage und Orientierung des Flachdisplays zur Kamera bekannt, so kann für jeden Punkt des Flachdisplays der korrespondierende Bildpunkt in der Kamera unmittelbar berechnet werden. Dies kann man ausnutzen, indem man zunächst in einer ersten relativ groben Punktzuordnung ohne Einschränkung des Suchbereichs nur wenigen Pixeln des Tablets (z.B. aus einem vorgegebenem Raster) einen Bildpunkt in der Kamera zuordnet und aus diesen Korrespondenzen die grobe Homographie berechnet, die die entsprechende Projektion beschreibt.

**[0051]** In einer zweiten nun feineren Punktzuordnung wird einer erheblich größeren Menge von Pixeln des Flachdisplays, z.B. in einem vorgegebenen feineren Raster oder wahlweise allen Pixeln, ein korrespondierender Bildpunkt in der Kamera zugeordnet. Nun wird jedoch für jeden Pixel des Tablets durch Anwendung der groben Homographie ein initialer Bildpunkt in der Kamera berechnet und die Suche des korrespondierenden Bildpunkts für diesen Pixel auf einen Bereich in der Bildebene der Kamera, z.B. einen Kreis oder ein Rechteck mit vorgegebener Größe, um jenen initialen Bildpunkt eingeschränkt.

**[0052]** Als nächstes wird in einem Schritt 3 eine Änderung der Lage des Tablets ausgeführt. Wo sich das Tablet befindet und wie die Lage des Tablets verändert wird, hängt von der jeweiligen Kalibrierung ab. Bei einer Kalibrierung eines Fließbands liegt das Tablet beispielsweise auf dem Fließband und wird von dem Fließband um einen beliebigen Betrag, der nicht bekannt sein muss, verschoben. Bei der Kalibrierung eines Drehtellers liegt das Tablet auf dem Drehteller und wird von diesem um einen beliebigen Betrag, der nicht bekannt sein muss, verdreht.

**[0053]** Bei der Kalibrierung eines Roboters wird das Tablet an einem Werkzeugpunkt des Roboters starr befestigt und um einen beliebigen Betrag verdreht und/oder verschoben. Die aktuelle Transformation zwischen dem Basiskoordinatensystem des Roboters und dem Werkzeugkoordinatensystem des Roboters muss jedoch bekannt sein. Prinzipiell ist es jedoch kein Problem, diese Information aus der Software des Roboters und seiner Steuerung zu ermitteln.

**[0054]** Ob die Lage des Tablets und/oder die Lage der Kameras verändert wird, hängt von der Kalibrierung ab. Entscheidend ist dabei, dass sich die relative Lage und/oder Orientierung der Kameras zum Display ändert. Dort wo von sich unterscheidenden Positionen des Flachbilddisplays die Rede ist (insbes. in Anspruch 1), ist stets gemeint, dass sich die

Lage und/oder Orientierung des Flachbilddisplays in Bezug auf den bildgebenden Sensor ändert.

**[0055]** In einem nächsten Schritt 4 werden die Schritte 2 und 3 mehrmals wiederholt. Das Tablet wird dabei an verschiedenen Positionen aufgenommen. Die Anzahl der Positionen hängt dabei von der Kalibrierungsaufgabe ab. Im Ergebnis erhält man nach mehrmaliger Anwendung von Schritt 2 und 3 zu jeder Position des Tablets und zu jeder der mindestens eine Kamera des bildgebenden Sensors eine Liste mit Punktkorrespondenzen, also eine Liste mit Pixeln des Tablets, denen der entsprechende Bildpunkt in der jeweiligen Kamera zugeordnet wurde.

**[0056]** Bei einem nächsten Schritt 5 kann dann unter Verwendung der Listen von Punktkorrespondenzen, die in Schritt 4 unter Anwendung der Schritte 2 und 3 ermittelt worden sind, die eigentliche Kalibrierungsaufgabe gelöst werden. Das konkrete Vorgehen hängt von der Kalibrierungsaufgabe ab, wie die folgenden Beispiele verdeutlichen:

Bei der Kalibrierung eines Drehtellers wird beispielsweise wie folgt verfahren:

Das Tablet wird auf den Drehteller gelegt. Das Tablet muss dabei starr mit dem Drehteller verbunden sein, darf also bei der Drehung des Tellers nicht verrutschen. Das Tablet wird anschließend mit einem Sensor aus zwei Kameras wie in Schritt 2 beschrieben aufgenommen. Der Sensor muss zuvor separat kalibriert worden sein. Der Drehteller wird nun nach jeder Aufnahme zusammen mit dem Tablet um einen beliebigen, variablen Betrag verdreht. Anschließend wird das Tablet erneut aufgenommen. Insgesamt wird das Tablet z.B. an zehn verschiedenen Winkelpositionen des Drehtellers aufgenommen.

**[0057]** Zu jeder Winkelposition des Drehtellers werden somit zwei Listen mit Punktkorrespondenzen, d.h. für jede Kamera eine Liste, erzeugt. Nun werden in diesen Listen zu jedem Pixel des Tablets die beiden korrespondierenden Bildpunkte in beiden Kameras herausgefiltert. Aus diesen Koordinaten der beiden korrespondierenden Bildpunkte kann die räumliche Lage des entsprechenden Tablet-Pixels in gewohnter Weise durch Triangulation rekonstruiert werden, denn der Sensor selbst wurde zuvor separat kalibriert.

**[0058]** Wird der oben erwähnte Schritt 4 für jede Winkelposition des Drehtellers und jeden Pixel des Tablets wiederholt, so erhält man zu jedem Pixel des Tablets eine insbesondere kreisförmige Trajektorie, die dieser Pixel bei der Drehung des Drehtellers beschreibt. Zu jeder Trajektorie kann durch einen Ebenenfit eine Ebene bestimmt werden, in der diese Trajektorie liegt. Ebenso kann durch einen Kreisfit das Zentrum des Kreises bestimmt werden.

**[0059]** Die Ebenen der Trajektorien haben stets den im Wesentlichen gleichen Normalenvektor, der die Richtung der Rotationsachse des Drehtellers definiert. Aus den Zentren der kreisförmigen Trajektorien kann zusätzlich zur Richtung der Drehachse auch dessen Lage bestimmt werden.

**[0060]** Bei einer Hand-Eye-Calibration wird das Tablet starr mit dem Werkzeugpunkt des Roboters verbunden und der Sensor, bestehend aus zwei Kameras, wird starr in Bezug auf die Basis des Roboters befestigt. Das Tablet wird nun von dem Sensor aufgenommen, wobei der Sensor zuvor separat kalibriert worden sein sollte (prinzipiell ist es möglich, während der Hand-Eye-Calibration auch die intrinsischen und extrinsischen Parameter des Kamerasystems selbst zu bestimmen). Gleichzeitig wird die aktuelle Pose des Roboters, d.h. dessen Lage und Orientierung des Werkzeugpunktes relativ zum Basis-Koordinatensystem des Roboters, gespeichert.

**[0061]** Die Lage und/oder die Orientierung des Tablets wird nun verändert, indem die Pose des Roboters, d.h. die Lage und Orientierung des Werkzeugpunktes, verändert wird. Zu jeder Pose des Roboters erhält man nun zwei Listen mit Punktkorrespondenzen, d.h. für jede Kamera eine Liste. Nun werden in diesen Listen zu jedem Pixel des Tablets die beiden korrespondierenden Bildpunkte in beiden Kameras herausgefiltert. Aus diesen Koordinaten der beiden korrespondierenden Bildpunkte kann die räumliche Lage des entsprechenden Tablet-Pixels in gewohnter Weise durch Triangulation rekonstruiert werden, denn der Sensor selbst wurde zuvor separat kalibriert. Aus den 2D-Koordinaten der Tablet-Pixel und den zugehörigen rekonstruierten 3D-Koordinaten kann zu jeder Pose des Roboters die Lage und Orientierung des Tablets relativ zum Sensor-Koordinatensystem in bekannter Weise berechnet werden.

**[0062]** Die vorhergehenden Schritte liefern zu jeder Pose des Roboters zum einen die Lage und Orientierung des Werkzeugpunktes in Bezug auf das Basiskoordinatensystem des Roboters sowie außerdem die Lage und Orientierung des Tablets in Bezug auf das Sensor-Koordinatensystem. Aus diesen korrespondierenden Lagen und Orientierungen kann die Lage und Orientierung des Sensors in Bezug auf das Basis-Koordinatensystem des Roboters in bekannter Weise berechnet werden.

**[0063]** Das erfindungsgemäße Verfahren wurde anhand von Ausführungsbeispielen erläutert im Rahmen fachmännischen Handelns sind weitere Abwandlungen möglich. Diese ergeben sich auch aus den Unteransprüchen.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Kalibrierung eines bilderfassenden Sensors aus mindestens einer Sensorkamera unter Verwendung eines zeitlich kodierten Mustertargets,

wobei das zeitlich kodierte Mustertarget auf einem Flachbilddisplay angezeigt wird, wobei auf dem Flachbilddisplay eine Mustersequenz angezeigt und von der mindestens einen Sensorkamera als eine Folge von Kamerabildern aufgenommen wird, wobei bei einer festen Position des Flachbilddisplays im Raum oder jeweils für mindestens zwei sich unterscheidende Positionen des Flachbilddisplays im Raum eine Zuordnung zwischen Pixeln des zeitlich kodierten Mustertargets und erfassten Bildpunkten der Kamerabilder ausgeführt wird,

wobei über einander korrespondierende Punkte die Kalibrierung erfolgt,

wobei eine Gamma-Korrektur ausgeführt wird, bei der vor der Anzeige des zeitlich kodierten Mustertargets vorab in einer beliebigen Position des Flachbilddisplays und/oder zusätzlich zu dem Aufnehmen der Mustersequenz in jeder Position des Flachbilddisplays durch die mindestens eine Sensorkamera eine Gamma-Kurve des Flachbilddisplays aufgenommen und korrigiert wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass

bei der Gamma-Korrektur eine zeitliche Folge aus homogenen Graubildern auf dem Flachbilddisplay angezeigt und von der mindestens eine Sensorkamera aufgenommen wird, wobei eine Gamma-Kurve des Flachbilddisplays ermittelt und anschließend eine korrigierende Gamma-Kurve erzeugt wird, wobei die auf dem Flachbilddisplay darzustellenden Bestandteile der Mustersequenz entsprechend der korrigierenden Gamma-Kurve angezeigt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass für jede Relativposition zwischen dem Flachbilddisplay und dem bilderfassenden Sensor zusätzlich zu der Mustersequenz eine zeitliche Folge aus insbesondere homogenen Grauwertbildern angezeigt wird, wobei aus der Folge der Grauwertbilder eine korrigierende Gamma-Kurve für das gesamte Bild oder für jeden Bildpunkt innerhalb der Sensorkamera erzeugt wird, wobei anschließend eine Gamma-Korrektur der Bilder innerhalb der Mustersequenz erfolgt.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass

bei der Aufnahme des Flachbilddisplays in einer festen Position im Raum eine zusätzliche automatische Anpassung der Belichtungszeit für jede Sensorkamera erfolgt,

wobei ein homogen weißes Bild auf dem Flachbilddisplay angezeigt und von der Sensorkamera aufgenommen wird,

wobei die Belichtungszeit der Sensorkamera so nachreguliert wird, dass bei deren Endwert die Intensitätswerte der Bildpunkte des Flachbilddisplays, die durch die Sensorkamera erfasst werden, ein vorab definiertes Optimierungskriterium erfüllen.

5. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei der Zuordnung zwischen den Pixeln des zeitlich kodierten Mustertargets und den erfassten Bildpunkten und der Erzeugung der Datenmenge der Punkt Korrespondenzen für jede relative Position des Flachbilddisplays in Bezug auf den bilderfassenden Sensor in einem ersten Schritt lediglich eine Teilmenge von Pixeln und erfassten Bildpunkten einander zugeordnet werden, wobei aus den dabei erhaltenen Zuordnungen eine Homographie zwischen den angezeigten und den aufgenommenen Musterbildern berechnet wird, mit der der relevante Suchbereich für weitere Zuordnungen zwischen den angezeigten und aufgenommenen Musterbildern eingegrenzt wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Zuordnung zwischen den Pixeln des zeitlich kodierten Mustertargets und den erfassten Bildpunkten und der Erzeugung der Datenmenge innerhalb eines vordefinierten Rasters erfolgt.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Flachbilddisplay ein Tablet-Computer mit einem auf dem Tablet-Computer ablaufenden Programm und/oder mit einem auf einer externen drahtlos mit dem Tablet-Computer kommunizierenden Steuereinheit ablaufenden Programm zum Erzeugen und Anzeigen des zeitlich kodierten Mustertargets verwendet wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Mustersequenz des zeitlich kodierten Mustertargets aus einer Folge statistisch erzeugter Muster besteht.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Mustersequenz des zeitlich kodierten Mustertargets aus einer Folge regulärer Muster, insbesondere Streifenmuster oder Schachbrettmuster, besteht.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Flachbilddisplay auf einer linear bewegten Fördereinrichtung angeordnet ist, wobei mittels einer Verschiebung des Flachbilddisplays durch eine lineare Bewegung der Fördereinrichtung die Bewegungsrichtung der Fördereinrichtung in Bezug auf den bilderfassenden Sensor ermittelt wird.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Flachbilddisplay auf einer rotierenden Einrichtung angeordnet ist, wobei mittels einer Winkelbewegung des Flachbilddisplays durch eine Rotation der rotierenden Einrichtung die Lage und Orientierung der Rotationsachse der rotierenden Einrichtung in Bezug auf den bilderfassenden Sensor ermittelt werden.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Flachbilddisplay auf sich bewegenden Komponenten einer Robotereinrichtung angeordnet ist, wobei durch eine Rotation und/oder eine Translation einer oder mehrerer der sich bewegenden Komponenten der Robotereinrichtung die Lage und Orientierung des Basiskoordinatensystems der Robotereinrichtung in Bezug auf den bilderfassenden Sensor ermittelt wird.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass der bilderfassende Sensor mit einem Werkzeugpunkt einer Robotereinrichtung verbunden ist und das Flachdisplay statisch in Bezug auf die Robotereinrichtung angeordnet ist, wobei durch eine Rotation und/oder Translation des Werkzeugpunktes der Robotereinrichtung (und damit auch des bilderfassenden Sensors) die Lage und Orientierung des Werkzeugkoordinatensystems der Robotereinrichtung in Bezug auf den bilderfassenden Sensor ermittelt wird.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Flachdisplay in unterschiedlichen relativen Lagen und Orientierungen zum bilderfassenden Sensor aufgenommen wird und innere Abbildungsparameter jeder einzelnen Sensorkamera und/oder die Lage und Orientierung der Sensorkameras zueinander ermittelt werden.

15. Verwendung eines Tablet-Computers für ein Verfahren zur Kalibrierung eines bilderfassenden Sensors aus mindestens einer Sensorkamera unter Verwendung eines zeitlich kodierten Mustertargets, wobei das zeitlich kodierte Mustertarget auf dem Display des Tablet-Computers angezeigt wird, wobei auf dem Display eine Mustersequenz angezeigt und von der mindestens einen Sensorkamera als eine Folge von Kamerabildern aufgenommen wird, wobei bei einer festen Position des Displays im Raum oder jeweils für mindestens zwei sich unterscheidende Positionen des Flachbilddisplays im Raum eine Zuordnung zwischen Pixeln des zeitlich kodierten Mustertargets und erfassten Bildpunkten der Kamerabilder ausgeführt wird, wobei über einander korrespondierende Punkte die Kalibrierung erfolgt.

16. Verwendung eines Tablet-Computers für ein Verfahren zur Kalibrierung eines bilderfassenden



Sensors aus mindestens einer Sensorkamera unter Verwendung eines zeitlich kodierten Mustertargets, wobei das zeitlich kodierte Mustertarget auf dem Display des Tablet-Computers angezeigt wird, wobei auf dem Display eine Mustersequenz angezeigt und von der mindestens einen Sensorkamera als eine Folge von Kamerabildern aufgenommen wird, wobei bei einer festen Position des Displays im Raum oder jeweils für mindestens zwei sich unterscheidende Positionen des Flachbilddisplays im Raum eine Zuordnung zwischen Pixeln des zeitlich kodierten Mustertargets und erfassten Bildpunkten der Kamerabilder ausgeführt wird, wobei über einander korrespondierende Punkte die Kalibrierung erfolgt. Wobei eine Gamma-Korrektur ausgeführt wird, bei der vor der Anzeige des zeitlich kodierten Mustertargets vorab in einer beliebigen Position des Flachbilddisplays und/oder zusätzlich zu dem Aufnehmen der Mustersequenz in jeder Position des Flachbilddisplays durch die mindestens eine Sensorkamera eine Gamma-Kurve des Flachbilddisplays aufgenommen und korrigiert wird.

Es folgen keine Zeichnungen