

(12) **Patentschrift**

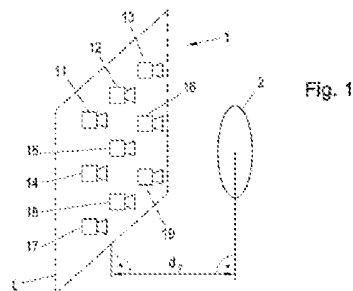
(21) Anmeldenummer: A 50322/2014 (51) Int. Cl.: **G06T 15/10** (2011.01)
(22) Anmeldetag: 08.05.2014 **G06T 5/00** (2006.01)
(45) Veröffentlicht am: 15.10.2015 **G02B 5/18** (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen: GB 2505955 A DE 102012105436 A1 US 8619082 B1	(73) Patentinhaber: AIT AUSTRIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY GMBH 1220 WIEN (AT) (72) Erfinder: Huber-Mörk Reinhold Mag. Dr. 1220 Wien (AT) Stolc Svorad Mag. Dr. 831 01 Bratislava (SK) (74) Vertreter: WILDHACK & JELLINEK PATENTANWÄLTE OG 1030 Wien (AT)
--	--

(54) **Verfahren zur Bestimmung des Abstands eines abgebildeten Gegenstands**

(57) Verfahren zur Bestimmung des Abstands eines Gegenstands (2), wobei mit einer Lichtfeld-Aufnahmeeinrichtung (1) das Lichtfeld ermittelt wird und als Bildstapel (L) zur Verfügung gestellt wird, wobei der Bildstapel (L) Teilbilder ($L_1, \dots, L_m$) aufweist und jedes Teilbild ($L_1, \dots, L_m$) durch einen unterschiedlichen Aufnahmepunkt charakterisiert ist, ein Qualitätsmaß (M) eines Pixels vorgegeben wird, das auf Grundlage der Intensitätswerte der Umgebung ermittelt wird, wobei das Qualitätsmaß (M) zwei Teilschritte (M_1, M_2) aufweist, nämlich einen linearen ersten Teilschritt (M_1), bei dem mit den Intensitätswerten der Umgebungspixel ein Zwischenergebnis ermittelt wird und zumindest einen nichtlinearen zweiten Teilschritt (M_2), bei dem aus dem Zwischenergebnis mittels einer nichtlinearen Operation ein Qualitätswert ermittelt wird. Für jedes der Teilbilder ($L_1, \dots, L_m$) wird jeweils ein Zwischenbild ($Z_1, \dots, Z_m$) erstellt. Für die einzelnen Pixel jedes Teilbildes ($L_1, \dots, L_m$) wird jeweils das Zwischenergebnis ermittelt und dem Zwischenbild ($Z_1, \dots, Z_m$) zugewiesen. Für Gegenstandsweiten ($d_1, \dots, d_n$) wird jeweils für jedes Teilbild ($L_1, \dots, L_m$) ein Verschiebungsvektor ($V_1, \dots, V_m$) ermittelt. Das dem Teilbild ($L_1, \dots, L_m$) zugeordnete Zwischenbild ($Z_1, \dots, Z_m$) wird entsprechend dem ermittelten

Verschiebungsvektor (V) verschoben, und ein Überlagerungszwischenbild ($F_1, \dots, F_n$) der Zwischenbilder ($Z_1, \dots, Z_n$) erstellt. Diesem wird die Gegenstandsweite ($d_1, \dots, d_n$) zugewiesen. In den Pixeln der Überlagerungszwischenbilder ($F_1, \dots, F_n$) wird die nichtlineare Operation des Qualitätsmaßes (M) separat pixelweise angewendet. Für jedes Überlagerungszwischenbild ($F_1, \dots, F_n$) wird jeweils ein Qualitätsbild (S) erstellt. Für jede Pixelposition wird jeweils ein Qualitätsbild (S) gesucht, für das der größte Qualitätswert ermittelt wurde. Die diesem einen Qualitätsbild zugeordnete Gegenstandsweite ($d_1, \dots, d_n$) wird für die Bestimmung des Abstandes herangezogen.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung des Abstands eines abgebildeten Gegenstands von einer Lichtfeld-Aufnahmeeinrichtung.

[0002] Aus dem Stand der Technik sind unterschiedliche Methoden zur Bestimmung des Abstands eines abgebildeten Gegenstands bzw. einzelner Teilbereiche der Oberfläche eines abgebildeten Gegenstands von einer Aufnahmeeinrichtung bekannt. Insbesondere ist es bekannt, mittels dreidimensionaler Stereomatchingverfahren die einzelnen von zueinander ausgerichteten Kameras erstellten Bilder zu korrelieren und somit eine Tiefeninformation der einzelnen abgebildeten Gegenstände zu gewinnen.

[0003] Solche Verfahren benötigen zum Teil recht aufwendige Matchingverfahren mit relativ großem Ressourcenbedarf.

[0004] Aufgabe der Erfindung ist es, die mittels einer Lichtfeld-Aufnahmeeinrichtung erstellten Lichtfelder dazu heranzuziehen, den Abstand einzelner Bereiche der Oberfläche eines abgebildeten Gegenstands zur Lichtfeld-Aufnahmeeinrichtung zu ermitteln.

[0005] Die Erfindung löst diese Aufgabe bei einem Verfahren der eingangs genannten Art mit den kennzeichnenden Merkmalen des Patentanspruchs 1. Erfindungsgemäß ist vorgesehen,

- [0006]** - dass für jedes der Teilbilder jeweils ein separates Zwischenbild erstellt und dem jeweiligen Teilbild zugeordnet wird, und für die einzelnen Pixel jedes der Teilbilder jeweils separat das Zwischenergebnis des Qualitätsmaßes ermittelt wird und dieses Zwischenergebnis dem jeweiligen Pixel im jeweiligen Zwischenbild zugewiesen wird,
- [0007]** - dass für eine vorgegebene Anzahl von vorab vorgegebenen Gegenstandsweiten jeweils
- [0008]** - für jedes Teilbild separat ein Verschiebungsvektor in Abhängigkeit von der Gegenstandsweite sowie der Position der das jeweilige Teilbild erstellenden Kamera ermittelt wird
- [0009]** - das dem Teilbild zugeordnete Zwischenbild entsprechend dem ermittelten Verschiebungsvektor verschoben wird, und
- [0010]** - jeweils ein Überlagerungszwischenbild durch Summation der Intensitätswerte für jedes Pixel der verschobenen Zwischenbilder erstellt wird und diesem Überlagerungszwischenbild die jeweilige Gegenstandsweite zugewiesen wird,
- [0011]** - dass in den einzelnen Pixeln jedes Überlagerungszwischenbildes die, insbesondere nichtlineare, Operation des zweiten Teilschritts des Qualitätsmaßes jeweils separat und pixelweise angewendet wird, und für jedes Überlagerungszwischenbild jeweils ein die erhaltenen Qualitätswerte enthaltendes Qualitätsbild erstellt wird, und
- [0012]** - dass für jede Pixelposition jeweils zumindest ein Qualitätsbild gesucht wird, für das beim Pixel an der jeweiligen Pixelposition ein großer, insbesondere der größte, Qualitätswert ermittelt wurde und die diesem zumindest einen Qualitätsbild zugeordnete Gegenstandsweite für die Bestimmung des Abstandes des jeweiligen Gegenstandspunkts von der Lichtfeld-Aufnahmeeinrichtung herangezogen wird.

[0013] Hierbei besteht der erhebliche Vorteil, dass gerade bei einer Vielzahl von erstellten Zwischenbildern eine geringe Ressourcenbelastung erreicht wird. Es ergibt sich ein wesentlicher Vorteil, wenn viele Überlagerungszwischenbilder erstellt werden, da diese nicht erst bewertet werden brauchen, sondern durch einfache Summation aus den verschobenen Zwischenbildern in Kombination mit einer, insbesondere nichtlinearen, Operation des zweiten Teilschritts des Qualitätsmaßes bewertet werden können.

[0014] Eine vorteilhafte Verbesserung des erfindungsgemäßen Verfahrens bzw. genauere Ermittlung des ermittelten Abstands sieht vor,

- [0015]** - dass für die jeweiligen Pixelposition das Qualitätsbild mit dem größten Qualitätswert ermittelt wird und die diesem Qualitätsbild zugeordnete Gegenstandsweite als Abstand herangezogen wird, oder
- [0016]** - dass für die jeweilige Pixelposition jeweils das Qualitätsbild mit dem größten Qualitätswert ermittelt wird und unter den an derselben Pixelposition liegenden Qualitätswerten von Bildern mit ähnlicher Gegenstandsweite eine Interpolation vorgenommen wird und eine Interpolationsfunktion gebildet wird, die den Verlauf der Qualität über die Gegenstandsweite angibt, und das Maximum der Qualität für diese Interpolationsfunktion gesucht wird und die dem Maximum der Qualität durch die Interpolationsfunktion zugewiesene Gegenstandsweite als Abstand herangezogen wird, wobei insbesondere ein Abstandsbild mit den Abmessungen eines der Qualitätsbilder erstellt wird und an jeder Pixelposition der Abstand bestimmt und dem Abstandsbild an der jeweiligen Pixelposition zugewiesen wird.
- [0017]** Falls die Anzahl der Überlagerungszwischenbilder groß gegenüber Anzahl der Teilbilder ist, kann auch auf einer Standardarchitektur eine vorteilhafte Ressourcenersparnis erzielt werden.
- [0018]** Zur besonders genauen Detektion des Abstands kann vorgesehen sein, dass bei Verschiebung der einzelnen Teilbilder in Abhängigkeit von der Gegenstandsweite um nicht ganzzahlige Pixelpositionen eine Interpolation der Werte der Zwischenergebnisse durchgeführt wird, insbesondere
- [0019]** - indem eine Interpolation nach dem kubischen oder linearen Verfahren durchgeführt und/oder
- [0020]** - indem der Wert des jeweils am nächsten liegenden Nachbarpixels selektiert wird.
- [0021]** Eine besonders vorteilhafte Bestimmung des Abstandes sieht vor, dass als Qualitätsmaß ein Schärfemaß in Form des Absolutbetrags einer, insbesondere ersten oder zweiten, räumlichen Ableitung des Intensitätswerts herangezogen wird, und/oder dass als Qualitätsmaß ein Schärfemaß in Form der, in einer lokalen Umgebung um das jeweilige Pixel ermittelten Fourier-Komponenten insbesondere bestimmt durch eine gewichtete Summe der Absolutwerte oder Quadrate der Koeffizienten der betrachteten Fourier-Komponenten, insbesondere höheren Ortsfrequenzen entsprechende Fourier-Komponenten, und/oder einzelner gerader und ungerader Fourier-Basisfunktionen, herangezogen wird.
- [0022]** Eine andere vorteilhafte Abstandsbestimmung sieht vor, dass als Qualitätsmaß ein Übereinstimmungsmaß herangezogen wird, zu dessen Bildung die Norm oder der Betrag der Differenz des Intensitätswerts und des Intensitätswerts eines Referenzzwischenbilds herangezogen wird, wobei eine große Übereinstimmung mit dem Referenzzwischenbild eine hohe Qualität indiziert, wobei das Referenzzwischenbild unter den Zwischenbildern ausgewählt wird, und vorzugsweise dasjenige Zwischenbild als Referenzzwischenbild ausgewählt wird, das demjenigen Teilbild zugeordnet ist, dessen Verschiebungsvektor gleich dem Nullvektor ist.
- [0023]** Zur weiteren Verbesserung des Abstandes kann vorgesehen sein, dass als Qualitätsmaß eine Kombination eines vorstehend dargestellten Übereinstimmungsmaßes und eines vorstehend dargestellten Schärfemaßes herangezogen wird, wobei eine große Übereinstimmung und eine große Schärfe jeweils eine hohe Qualität indizieren. Die einfachste Kombination besteht in einer gewichteten Summe oder in der Bildung eines Mittelwerts. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, unterschiedliche nichtlineare Operationen auf das Übereinstimmungsmaß bzw. das Schärfemaß anzuwenden oder sogar eine auf das jeweilige Pixel bezogene lokale Funktion in die Bestimmung der Kombination mit einzubeziehen.
- [0024]** Mehrere besonders bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung wird anhand der folgenden Zeichnungsfiguren näher erläutert.

- [0025]** Fig. 1 zeigt eine Lichtfeld-Aufnahmeeinrichtung mit Kameras und einem aufgenommenen Gegenstand.
- [0026]** Fig. 2 zeigt die bei der in Fig. 1 dargestellten Konfiguration erstellten Teilbilder bzw. das Lichtfeld.
- [0027]** Fig. 3 zeigt Abbilder eines Gegenstands in zwei Kameras bei unterschiedlichem Abstand zur Lichtfeld-Aufnahmeeinrichtung.
- [0028]** Fig. 4 zeigt die Verschiebung von Teilbildern zur Erreichung eines scharfen Abbilds.
- [0029]** Fig. 5 zeigt eine Verschiebung unter Annahme einer abweichenden Gegenstandsweite, was, wie in
- [0030]** Fig. 6 dargestellt, zu einem unscharfen Überlagerungsbild führt.
- [0031]** Fig. 7 zeigt eine Vorgehensweise, bei der zunächst eine Vielzahl von Überlagerungszwischenbildern ermittelt wird und anschließend für jedes der Überlagerungszwischenbilder jeweils separat ein Schärfemaß ermittelt wird.
- [0032]** Fig. 8 zeigt das bevorzugte erfindungsgemäße Vorgehen, bei dem zunächst lediglich die linearen Anteile des Qualitäts- oder Schärfemaßes bestimmt werden und anschließend die Überlagerung zur Erstellung einzelner Zwischenbilder vorgenommen wird, auf die anschließend der zweite, nichtlineare Teil des Schärfemaßes angewendet wird.
- [0033]** Fig. 9 zeigt die Bestimmung des Abstands eines in einem Pixel abgebildeten Gegenstandsbereichs des aufgenommenen Gegenstands mittels Interpolation.
- [0034]** Fig. 10 zeigt eine erste bevorzugte Ausführungsform zur Überlagerung der gegeneinander verschobenen Teilbilder des Bildstapels.
- [0035]** Fig. 11 zeigt eine weitere bevorzugte Durchführung der Überlagerung zur Ermittlung der Überlagerungszwischenbilder.

[0036] In Fig. 1 ist eine mögliche Ausführungsform einer Lichtfeld-Aufnahmeeinheit 1 dargestellt, die eine Anzahl von mit einer vorgegebenen relativen Lage rasterförmig in einer Ebene 10 angeordneten Kameras 11, ..., 19 aufweist.

Anstelle der in Fig. 1 dargestellten Ausführungsform ist es jedoch auch möglich, eine beliebige Anordnung von Kameras zu verwenden, die einen überlappenden Aufnahmebereich aufweisen, wobei die Bilder der Kameras anschließend einer numerisch-optischen Korrektur unterzogen werden können, sodass die virtuellen optischen Achsen der jeweiligen Bilder die vorstehend genannten Bedingungen erfüllen, d.h. dass die virtuellen optischen Achsen der korrigierten Bilder insbesondere parallel zueinander stehen. Eine solche numerisch-optische Korrektur ist im Bereich der Stereo-Vision allgemein bekannt und kann beispielsweise bei „Hartley, R., & Zisserman, A. (2003). Multiple view geometry in Computer vision. Cambridge university press.“ nachgelesen werden.

[0037] Mit den Kameras 11, ..., 19 der Lichtfeld-Aufnahmeeinheit 1 wird ein Bildstapel L umfassend eine Anzahl von Teilbildern $L_1, \dots, L_9$ ermittelt, wobei jedes Teilbild $L_1, \dots, L_9$ von je einer der Kameras 11, ..., 19 erstellt wird. Der Gegenstand 2 ist eben und kreisförmig und weist einen Abstand d_y zur Lichtfeld-Aufnahmeeinheit 1 auf. Die Teilbilder $L_1, \dots, L_9$ des Bildstapels L unterscheiden sich bezüglich des Aufnahmepunkts und der daraus resultierenden unterschiedlichen Beobachtungsrichtung (Fig. 2). Dies bedeutet, dass jedes der Teilbilder $L_1, \dots, L_9$ von einem unterschiedlichen Aufnahmepunkt her aufgenommen wird und entsprechend der Gegenstand 2 im jeweiligen Teilbild $L_1, \dots, L_9$ aus einem unterschiedlichen Blickwinkel abgebildet ist. Je nach Blickwinkel ist das Abbild 21, ..., 29 des Gegenstands 2 im jeweiligen Teilbild $L_1, \dots, L_9$ um einen Verschiebungsvektor $V_1, \dots, V_9$ gegenüber einem im Zentrum des Teilbilds $L_1, \dots, L_9$ befindlichen Referenzpunkt, gekennzeichnet durch ein Kreuz, verschoben.

[0038] Zur vereinfachten Darstellung wird zunächst angenommen, dass es sich bei dem abzubildenden Gegenstand 2 (Fig. 1) um einen kreisförmigen, flachen und ebenen Gegenstand

handelt, der von der Aufnahmeeinrichtung 1 bzw. den einzelnen Kameras 11, ..., 19 der Aufnahmeeinrichtung 1 einen vorgegebenen Abstand d aufweist. Aufgrund dieses Abstands erscheint das Abbild des Gegenstands 2 in den einzelnen Teilbildern $L_1, \dots, L_9$ des Bildstapels L jeweils um einen Verschiebungsvektor $V_1, \dots, V_9$ in der Bildebene verschoben. Der in Bezug auf die Verschiebung herangezogene angenommene Abstand des Gegenstands 2 zur Lichtfeld-Aufnahmeeinheit 1 wird in Analogie zur Fotografie auch als Gegenstandsweite bezeichnet.

[0039] Für die weiteren Erörterungen wird eine der Kameras 11, ..., 19 als Referenzkamera 15 bezeichnet. Betrachtet man das von der Referenzkamera 15 erstellte Teilbild L_5 als Referenzbild LR , so wird mit einer rechts oberhalb der Referenzkamera 15 angeordneten Kamera 13 ein Abbild 23 des Gegenstands 2 erstellt, das gegenüber dem Abbild 25 im Referenzbild 15 um einen Verschiebungsvektor V_3 nach links unten verschoben ist.

[0040] Fig. 3 zeigt eine Anzahl von Teilbildern $L_{3a}, \dots, L_{3d}, L_{5a}, \dots, L_{5d}$ desselben Gegenstands 2 jeweils in unterschiedlichen Abständen von den Kameras 13, 15, wobei der Gegenstand 2 jeweils einen unterschiedlichen Abstand zu den Kameras 13, 15 aufweist. Während sich in den von der Referenzkamera 15 erstellten Teilbildern $L_{5a}, \dots, L_{5d}$ jeweils nur der Durchmesser des Abbilds 21, ..., 29 des Gegenstands 2 ändert, d.h. mit steigendem Abstand verkleinert, verringert sich bei den Teilbildern $L_{3a}, \dots, L_{3d}$ der Kamera 13 auch der Abstand zum Mittelpunkt des jeweiligen Bilds, dargestellt durch ein Kreuz.

[0041] Je weiter der Gegenstand 2 von den einzelnen Kameras 11, ..., 19 oder der Lichtfeld-Aufnahmeeinheit 1 entfernt ist, umso geringer ist diese Verschiebung und umso geringer ist der Betrag des Verschiebungsvektors $V_1, \dots, V_9$. Im Aufnahmebereich der einzelnen Kameras 11, ..., 19 der Lichtfeld-Aufnahmeeinheit 1 befindet sich ein Gegenstand 2, der von allen Kameras 11, ..., 19 der Lichtfeld-Aufnahmeeinheit 1 erfasst wird. Ist der Gegenstand 2 sehr weit von der Lichtfeld-Aufnahmeeinrichtung 1 entfernt, sind die ermittelten Verschiebungsvektoren $V_1, \dots, V_9$ entsprechend kleiner.

[0042] Bei einer vorab durchzuführenden Kalibrierung wird eine Anzahl von voneinander unterschiedlichen möglichen Gegenstandsweiten $d_1, \dots, d_n$ vorgegeben, wobei angenommen wird, dass sich der Gegenstand 2 typischerweise in einem Abstand zur Lichtfeld-Aufnahmeeinrichtung 1 befindet, der zwischen der minimal vorgegebenen Gegenstandsweite d_1 und der maximal vorgegebenen Gegenstandsweite d_n liegt.

[0043] Bei dieser Kalibrierung kann für jede der Kameras 11, ..., 19 und für jede vorgegebene Gegenstandsweite $d_1, \dots, d_n$ jeweils ein Verschiebungsvektor V ermittelt werden, mit dem die Abbilder 21, ..., 29 von in derselben Ebene liegenden und parallel zur Ebene 10 der Kameras 11, ..., 19 liegenden Gegenständen 2 zur Deckung gebracht werden können. Sofern die einzelnen Teilbilder $L_1, \dots, L_m$ des Bildstapels L vorab nicht kalibriert wurden, kann eine Verschiebung auch derart vorgenommen werden, dass jedem einzelnen Pixel jeweils ein separater Verschiebungsvektor V zugewiesen wird und jedes Pixel jeweils separat entsprechend seinem Verschiebungsvektor V verschoben wird. Ein Kalibrierungsschritt angewandt auf die aufgenommenen Teilbilder gewährleistet einen Verschiebungsvektor der für alle Pixel eines Teilbildes identisch ist. Eine solcher Kalibrierungsschritt ist im Bereich der Stereo-Vision allgemein bekannt und kann beispielsweise bei „Hartley, R., & Zisserman, A. (2003). Multiple view geometry in Computer vision. Cambridge university press.“ nachgelesen werden.

Anhand der der jeweiligen Gegenstandsweite $d_1, \dots, d_n$ zugeordneten Verschiebungsvektoren V können die Teilbilder $L_1, \dots, L_m$ verschoben werden und die Abbilder 21, ..., 29 werden entsprechend verschoben. Durch die Verschiebung werden verschobene Abbilder 31, ..., 39 des Gegenstands 2 erstellt. Werden die einzelnen verschobenen Abbilder 31, ..., 39 überlagert, beispielsweise pixelweise der Mittelwert der verschobenen Abbilder 31, ..., 39 gebildet, ergibt sich als Überlagerungsbild ein Bild, in dem der Gegenstand 2 scharf abgebildet ist (Fig. 4).

[0044] Der die Verschiebung charakterisierende Verschiebungsvektor V wird durch die jeweilige relative Lage der den Gegenstand 2 aufnehmenden Kameras 11, ..., 19 der Lichtfeld-Aufnahmeeinrichtung zur Referenzkamera 15 sowie durch die vorgegebene Gegenstandsweite $d_1, \dots, d_n$ bestimmt. Befindet sich also der aufgenommene Gegenstand 2 exakt in einer Ebene, die

einen Abstand von der Lichtfeld-Aufnahmeeinheit 1 aufweist, der einer vorgegebenen Gegenstandsweite $d_1, \dots, d_n$ entspricht, so kann durch Überlagerung sämtlicher Teilbilder $L_1, \dots, L_9$ des Bildstapels L , die entsprechend ihrem Aufnahmepunkt und der jeweiligen Gegenstandsweite $d_1, \dots, d_n$ mit einem diesbezüglichen Verschiebungsvektor V verschoben wurden, ein scharfes Abbild des Gegenstands 2 erstellt werden (Fig. 4).

[0045] Werden die einzelnen Verschiebungsvektoren $V_1, \dots, V_9$ mittels eines vom Abstand des Gegenstands von der Lichtfeld-Aufnahmeeinheit 1 abweichenden Gegenstandsweite bestimmt (Fig. 5), so werden die einzelnen ermittelten Abbilder 21, ..., 29 der Teilbilder $L_1, \dots, L_9$ des Bildstapels L nicht kongruent überlagert, sondern gegeneinander verschoben überlagert, was dazu führt, dass das durch Überlagerung erstellte Abbild unscharf wird (Fig. 6).

[0046] Verwendet man allgemein Gegenstände 2, deren Oberflächen nicht in einer zur Ebene 10 der Kameras 11, ..., 19 parallelen Ebene liegen, so erscheinen unterschiedliche Bildbereiche 21, ..., 29 mit Abbildern des Gegenstands 2 entsprechend ihrem jeweiligen Abstand von der Lichtfeld-Aufnahmeeinrichtung 1 jeweils unterschiedlich scharf. Je besser die für die Bildung des Verschiebungsvektors V verwendete Gegenstandsweite mit dem tatsächlichen Abstand d des Abbilds des Gegenstands 2 von der Lichtfeld-Aufnahmeeinrichtung 1 übereinstimmt, umso schärfer erscheint Abbild $d_1, \dots, d_n$ bei einer dem Abstand $d_1, \dots, d_n$ entsprechenden Überlagerung der Teilbilder $L_1, \dots, L_m$.

[0047] Eine Möglichkeit, den Abstand eines Gegenstands 2 von der Lichtfeld-Aufnahmeeinheit 1 zu bestimmen, besteht darin, die Schärfe des Abbilds als Maß für die Qualität des überlagerten Abbilds im Bereich eines Pixels heranzuziehen und einen Schärfe- oder Qualitätswert zu ermitteln, der angibt, ob die jeweils vorgenommene Überlagerung anhand von Verschiebungsvektoren V für die gewählte Gegenstandsweite $d_1, \dots, d_n$ zu einem Überlagerungsbild $F_1, \dots, F_n$ mit guter Qualität führt. Durch die Auswertung des Qualitätsmaßes M kann pixelweise jeweils ein Qualitätswert ermittelt werden. Je höher der ermittelte Qualitätswert des jeweiligen Pixels, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Abstand des Gegenstands 2 mit der dem jeweiligen Verschiebungsvektor V zugeordneten Gegenstandsweite $d_1, \dots, d_n$ übereinstimmt.

[0048] Neben der pixelweise Ermittlung der Schärfe zur Bestimmung der Qualität der Überlagerung bestehen weitere Möglichkeiten zur Bestimmung eines solchen Qualitätsmaßes. Eine solche Möglichkeit werden später näher dargestellt.

[0049] Die Schärfe eines Bilds innerhalb eines Bildbereichs oder innerhalb der Umgebung eines Pixels lässt sich auf Grundlage unterschiedlicher Schärfemaße M bestimmen. Typischerweise umfasst die Auswertung des Schärfemaßes M , das zur Bestimmung der Bildschärfe in einem bestimmten Pixel herangezogen werden kann, mehrere Schritte, d.h. $M(\cdot) = M_2(M_1(\cdot))$, nämlich zunächst einen linearen Schritt M_1 und anschließend einen nichtlinearen Schritt M_2 .

[0050] Beim linearen ersten Teilschritt M_1 zur Auswertung des Qualitätsmaßes M wird durch Bildung einer Linearkombination der Intensitätswerte der einzelnen Umgebungspixel desjenigen Pixels, in dem die Bildschärfe zu bestimmen ist, ein Zwischenergebnis ermittelt. Bei diesem Zwischenergebnis kann es sich beispielsweise um eine erste oder zweite räumliche Ableitung des Intensitätswerts oder der einzelnen Intensitätswerte handeln. Alternativ ist es auch möglich, dass in diesem ersten Schritt in einer lokalen Umgebung das jeweilige Pixel Fourier-Komponenten ermittelt werden. Selbstverständlich ist es auch möglich, mehrere Zwischenergebnisse zu ermitteln, die linear von den Intensitäten in den Pixeln abhängen.

[0051] Im zweiten Schritt M_2 wird auf das im ersten Schritt M_1 ermittelte Zwischenergebnis eine nicht-lineare Operation angewendet, bei dem aus dem Zwischenergebnis oder den Zwischenergebnissen mittels der zweiten nicht-linearen Operation ein Schärfewert ermittelt wird, der die Bildschärfe des jeweiligen Pixels angibt.

[0052] Wie in Fig. 7 dargestellt, wird auf Grundlage des Bildstapels L des Lichtfeldes mittels Überlagerung I der jeweils im Zuge der Überlagerung zu verschiebenden Teilbilder $L_1, \dots, L_m$ eine Vielzahl von Überlagerungsbildern $E_1, \dots, E_n$ erstellt, wobei eine Anzahl von möglichen

Gegenstandsweiten $d_1, \dots, d_n$ vorgegeben wird und bei jedem Überlagerungsbild $E_1, \dots, E_n$ jeweils auf die jeweilige Gegenstandsweite abgestimmte Verschiebungsvektoren $V_1, \dots, V_m$ zur Verschiebung herangezogen werden. Anschließend wird für jedes der Überlagerungsbilder $E_1, \dots, E_n$ jeweils ein Qualitätszwischenbild $S_1, \dots, S_n$ erstellt, wobei für jedes Pixel jedes Überlagerungsbildes $E_1, \dots, E_n$ jeweils separat ein Schärfemaß S ermittelt und in das Qualitätszwischenbild $S_1, \dots, S_n$ eingetragen wird. Anschließend wird für jedes Pixel jeweils dasjenige Qualitätszwischenbild $S_1, \dots, S_n$ und die diesem zugeordnete Gegenstandsweite $d_1, \dots, d_n$ ermittelt, in dem der jeweils höchste Qualitäts- bzw. Schärfewert erkannt wurde.

[0053] Es wird anschließend ein Abstandsbild D erstellt, in das für jedes Pixel die jeweils ermittelte Gegenstandsweite $d_1, \dots, d_n$ desjenigen Bilds, bei dem die höchste Qualität oder größte Schärfe der Überlagerung im jeweiligen Pixel erkannt wurde, eingetragen wird.

[0054] Eine erste besonders vorteilhafte Ausführungsform der Erfindung, die in Fig. 8 dargestellt ist, verringert den Ressourcenbedarf bei der Auswertung des Schärfemaßes. Bei der in Fig. 7 dargestellten Ausführungsform der Erfindung wird das Schärfemaß M für jedes Überlagerungsbild $E_1, \dots, E_n$ separat ausgewertet. Bei einer genaueren Bestimmung des Abstands d des jeweiligen Gegenstands 2 von der Lichtfeld-Aufnahmeeinrichtung 1 ist dabei eine größere Anzahl von unterschiedlichen Qualitätszwischenbildern $S_1, \dots, S_n$ für jede Gegenstandsweite $d_1, \dots, d_n$ zu erstellen. Je größer die Anzahl der Qualitätszwischenbilder $S_1, \dots, S_n$ ist, umso größer ist auch die Anzahl der erforderlichen Auswertungen des Schärfes- oder Qualitätsmaßes.

[0055] Die in Fig. 8 dargestellte Ausführungsform der Erfindung macht sich nunmehr die Eigenschaft der Linearität der Überlagerung I der einzelnen verschobenen Teilbilder $L_1, \dots, L_m$ und des ersten Teilschritts M_1 des Schärfemaßes M zunutze und kehrt die Reihenfolge der Berechnung um. Zunächst wird für jedes der Teilbilder $L_1, \dots, L_m$ des Bildstapels L jeweils ein separates Zwischenbild $Z_1, \dots, Z_m$ erstellt, wobei für jedes Pixel jedes der Teilbilder $L_1, \dots, L_m$ des Bildstapels L des Lichtfelds jeweils separat die im linearen Schritt M_1 ermittelten Zwischenergebnisse abgespeichert werden. Anders als bei der in Fig. 7 dargestellten Ausführungsform wird die Überlagerung I nicht auf den Teilbildern $L_1, \dots, L_m$ des Bildstapels L des Lichtfeldes, sondern auf dem ermittelten Zwischenbildern $Z_1, \dots, Z_m$ ausgeführt, wodurch für jede vorgegebene Gegenstandsweite $d_1, \dots, d_n$ Überlagerungszwischenbilder $F_1, \dots, F_n$ erstellt werden. Auf diese Überlagerungszwischenbilder $F_1, \dots, F_n$ wird anschließend pixelweise die jeweilige nichtlineare Operation M_2 des Schärfemaßes M angewendet, sodass in den Überlagerungszwischenbildern $F_1, \dots, F_n$ die jeweils ermittelten Schärfewerte vorliegen. Diese Schärfewerte werden in einem jeweils hierfür vorgesehenen Qualitätszwischenbild $S_1, \dots, S_n$ abgespeichert.

[0056] Die Qualitätszwischenbilder $S_1, \dots, S_n$, dargestellt in Fig. 8, befinden sich nach der Durchführung des jeweiligen Verfahrens dieselben Schärfemaße wie in den in Fig. 7 dargestellten Qualitätszwischenbildern. Aufgrund der vorteilhaften Berechnung bei der in Fig. 8 dargestellten Vorgehensweise kann, insbesondere für den Fall, dass die Anzahl n der Überlagerungszwischenbilder $F_1, \dots, F_n$ die Anzahl m der Teilbilder $L_1, \dots, L_m$ des Bildstapels L übersteigt, eine erhebliche Ressourcenersparnis erzielt werden, wobei die ermittelten Endergebnisse numerisch identisch sind.

[0057] Die Bestimmung des Abstandes erfolgt bei dem in Fig. 8 dargestellten Vorgehen exakt gleich wie bei dem in Fig. 7 dargestellten Vorgehen.

[0058] Zur konkreten Bestimmung des Abstandes d eines auf ein Pixel abgebildeten Oberflächenbereichs des Gegenstands 2 von der Lichtfeld-Aufnahmeeinrichtung 1 können allgemein unterschiedliche Verfahren herangezogen werden. Eine erste besonders einfache Methode zur Ermittlung dieses Abstandes besteht darin, nach dem größten Schärfemaß oder allgemein Qualitätswert in den Qualitätsbildern $S_1, \dots, S_n$ an den jeweiligen Pixelpositionen zu suchen. Als Abstand d kann in diesem Fall die Gegenstandsweite desjenigen Qualitätsbilds $S_1, \dots, S_n$ in der Datenstruktur S zugewiesen werden, in der der jeweils größte Schärfemaß für das jeweilige Pixel aufgefunden wurde.

[0059] Es ist auch möglich, zunächst für die jeweilige Pixelposition das Qualitätszwischenbild

$S_1, \dots, S_n$ mit dem jeweils größten Schärfewert $S_{\max}$ heranzuziehen und unter den an derselben Pixelposition liegenden Schärfewerten von Qualitätszwischenbildern $S_1, \dots, S_n$ mit ähnlicher zugeordneter Gegenstandsweite eine Interpolation vorzunehmen. Es wird eine Interpolationsfunktion $S(d)$ (Fig. 9) gebildet, die den Verlauf der Schärfe bzw. Qualität über die Gegenstandsweite d angibt. Anschließend wird im Bereich der Umgebung des Maximums der Schärfe $S_{\max}$ das Maximum $S_{\max}$ der Interpolationsfunktion $S(d)$ gesucht und die dem Maximum $S_{\max}$ der durch die Interpolation zugewiesene Gegenstandsweite $d_{\max}$ dem Distanzbild D an der jeweiligen Pixelposition als Gegenstandsweite zugewiesen.

[0060] Die Überlagerung I der einzelnen gegeneinander verschobenen Zwischenbilder $Z_1, \dots, Z_m$, $L_1, \dots, L_m$ des Bildstapels L des Lichtfelds kann auf unterschiedliche Weise vorgenommen werden. Grundsätzlich werden die einzelnen Zwischenbilder $Z_1, \dots, Z_m$ um den jeweiligen Verschiebungsvektor $V_1, \dots, V_m$ verschoben und anschließend addiert, gegebenenfalls pixelweise durch die Anzahl m der Zwischenbilder $Z_1, \dots, Z_m$ dividiert.

[0061] Wie in Fig. 10 dargestellt, ist es möglich, bei einer Verschiebung bzw. einem Verschiebungsvektor V in Abhängigkeit von der Gegenstandsweite d um einen nicht ganzzahligen Pixelwert jeweils dasjenige Pixel heranzuziehen, das aufgrund einer vorgenommenen Rundung der jeweiligen durch die Verschiebung ermittelten nicht ganzzahligen Pixelposition am nächsten kommt.

[0062] Alternativ ist es, wie in Fig. 11 dargestellt, auch möglich, eine Interpolation vorzunehmen und diejenigen Pixel im Umkreis der nicht ganzzahligen Pixelposition entsprechend ihrem Abstand von der jeweils nicht ganzzahligen Pixelposition anteilig heranzuziehen.

[0063] Bei einer zweiten bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist es auch möglich, anstelle der Verwendung eines Schärfemaßes als Qualitätsmaß, ein abweichendes Qualitätsmaß wie im Folgenden dargestellt, zu verwenden. Auch bei diesem Vorgehen wird zunächst in einem ersten linearen Teilschritt M_1 ein lineares Zwischenergebnis, beispielsweise eine erste oder zweite Ableitung, ein linearer Kantenfilter oder ähnliches, bestimmt.

[0064] Im zweiten, nichtlinearen Teilschritt M_2 wird das jeweils ermittelte Überlagerungszwischenbild $F_1, \dots, F_n$ mit einem Referenzzwischenbild ZR verglichen, das nach der Ermittlung der Zwischenbilder $Z_1, \dots, Z_m$ festgelegt wird.

[0065] Typischerweise wird als Referenzzwischenbild ZR dasjenige Zwischenbild herangezogen, das durch pixelweise Anwendung des ersten linearen Teilschritts M_1 auf das Referenzbild LR verwendet ermittelt wurde. Bei dem Referenzbild L_5 des Bildstapels L handelt es sich insbesondere um dasjenige Teilbild, das vor der Überlagerung I nicht verschoben wird, bzw. für das der Bildverschiebungsvektor V in jedem Fall identisch gleich Null ist.

[0066] Als Qualitätswert S wird im zweiten nichtlinearen Teilschritt M_2 vorzugsweise die Summe der Betragsdifferenzen der einzelnen Werte oder Zwischenergebnisse von Qualitätswerten einander zugeordneter Pixel herangezogen, wobei ein geringer Intensitätsunterschied eine hohe Qualität indiziert, d.h. dass sich der abgebildete Bereich des in einer dem jeweiligen Überlagerungszwischenbild $F_1, \dots, F_n$ zugeordneten Gegenstandsweite zur Aufnahmeeinheit 1 befindet.

[0067] Bei einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist es auch möglich, eine Kombination aus dem Schärfemaß und dem aus dem Qualitätsunterschied gewonnenen Maß zu ermitteln. Der erste der beiden Teilschritte M_1 ist stets linear in Bezug auf die Pixel-Intensitäten innerhalb der Umgebung des zu untersuchenden Pixels.

[0068] Die einfachste Kombination besteht in einer gewichteten Summe oder in der Bildung eines Mittelwerts. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, unterschiedliche nichtlineare Operationen auf das Übereinstimmungsmaß bzw. das Schärfemaß anzuwenden oder sogar eine auf das jeweilige Pixel bezogene lokale Funktion in die Bestimmung der Kombination mit einzubeziehen.

[0069] Ein zusammengesetztes Maß kann beispielsweise aus dem Schärfemaß und dem durch

Vergleich mit dem Referenzzwischenbild ZR gewonnenen Maß wie folgt gewonnen werden: Beim ersten linearen Teilschritt M_1 werden für jedes der Pixel jeweils beiden räumlichen Ableitungen dlx , dly der Intensität ermittelt und als lineare Zwischenergebnisse zur Verfügung gehalten.

[0070] Im zweiten nichtlinearen Teilschritt M_2 werden einerseits die Beträge $|dlx|$, $|dly|$ der beiden räumlichen Ableitungen dlx , dly gebildet und addiert, wodurch der erste Qualitätswert $s_1 = |dlx| + |dly|$ der Auswertung des Schärfemaßes erhalten wird. Andererseits wird die Summe der Beträge der Differenzen der räumlichen Ableitungen dlx , dly und der entsprechenden räumlichen Ableitungen dlx_R , dly_R im Referenzzwischenbild ZR ermittelt und ein Übereinstimmungsmaß gemäß $s_2 = |dlx - dlx_R| + |dly - dly_R|$ erhalten. Ein kombiniertes Qualitätsmaß S wird als Differenz des Schärfemaßes s_1 und des Übereinstimmungsmaßes s_2 gemäß $S = s_2 - s_1$ erhalten. Dieses Maß identifiziert eine umso höhere Qualität je größer die Schärfe im jeweiligen Pixel und je kleiner die Abweichung zum Referenzzwischenbild ZR ist.

[0071] Wenn das Qualitäts- oder Schärfemaß wie vorstehend beschrieben zusammengesetzt ist, wird bei den bevorzugten drei Ausführungsformen der Erfindung ein numerisch identisches Ergebnis erzielt wie bei dem in Fig. 7 dargestellten Vorgehen. Es ist jedoch auch möglich, bereits im ersten Schritt M_1 ein Zwischenergebnis zu ermitteln, das nichtlinear von den Intensitätswerten abhängt, beispielsweise einen mittels eines Kantenfilters wie beispielsweise eines Canny-Filters ermittelten Wert. In diesem Fall wird zwar nicht ein numerisch identisches Ergebnis wie bei dem in Fig. 7 dargestellten Vorgehen erzielt; dennoch erhält man vernünftige Werte für die Qualität, sodass eine Bestimmung des Abstands möglich ist.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung des Abstands eines abgebildeten Gegenstands (2) oder einzelner Punkte der Oberfläche dieses Gegenstands (2) von einer Lichtfeld-Aufnahmeeinrichtung (1), wobei mit der Lichtfeld-Aufnahmeeinrichtung (1) das Lichtfeld des zu untersuchenden Gegenstands (2) ermittelt wird und in Form eines Bildstapels (L) zur Verfügung gestellt wird,
 - a) wobei der Bildstapel (L) des Lichtfeldes eine Anzahl von Teilbildern ($L_1, \dots, L_m$) aufweist, wobei jedes Teilbild ($L_1, \dots, L_m$) durch einen bezüglich des Gegenstandes (2) unterschiedlichen Aufnahmepunkt und einer daraus resultierenden unterschiedlichen Beobachtungsrichtung charakterisiert ist,
 - b) wobei ein Qualitätsmaß (M), insbesondere ein Schärfemaß (M), eines Pixels eines zweidimensionalen Bildes, vorgegeben wird, das auf Grundlage der Intensitätswerte der innerhalb einer vorgegebenen Umgebung um das jeweilige Pixel befindlichen Umgebungspixel ermittelt wird, wobei die Bestimmung des Qualitätsmaßes (M) zwei Teilschritte (M_1, M_2) aufweist, nämlich
 - aa) zumindest einen, insbesondere linearen, ersten Teilschritt (M_1), bei dem durch Bildung einer Linearkombination der Intensitätswerte der einzelnen Umgebungspixel ein Zwischenergebnis ermittelt wird und
 - bb) zumindest einen darauf folgenden, insbesondere nichtlinearen, zweiten Teilschritt (M_2), bei dem aus dem Zwischenergebnis oder den Zwischenergebnissen mittels einer, insbesondere nichtlinearen, Operation ein Qualitätswert ermittelt wird,

dadurch gekennzeichnet,

 - c) dass für jedes der Teilbilder ($L_1, \dots, L_m$) jeweils ein separates Zwischenbild ($Z_1, \dots, Z_m$) erstellt und dem jeweiligen Teilbild ($L_1, \dots, L_m$) zugeordnet wird, und für die einzelnen Pixel jedes der Teilbilder ($L_1, \dots, L_m$) jeweils separat das Zwischenergebnis des Qualitätsmaßes (M) ermittelt wird und dieses Zwischenergebnis dem jeweiligen Pixel im jeweiligen Zwischenbild ($Z_1, \dots, Z_m$) zugewiesen wird,
 - d) dass für eine vorgegebene Anzahl von vorab vorgegebenen Gegenstandsweiten ($d_1, \dots, d_n$) jeweils
 - für jedes Teilbild ($L_1, \dots, L_m$) separat ein Verschiebungsvektor ($V_1, \dots, V_m$) in Abhängigkeit von der Gegenstandsweite ($d_1, \dots, d_n$) sowie der Position der das jeweilige Teilbild ($L_1, \dots, L_m$) erstellenden Kamera (11, ..., 19) ermittelt wird
 - das dem Teilbild ($L_1, \dots, L_m$) zugeordnete Zwischenbild ($Z_1, \dots, Z_m$) entsprechend dem ermittelten Verschiebungsvektor (V) verschoben wird, und
 - jeweils ein Überlagerungszwischenbild ($F_1, \dots, F_n$) durch Summation oder Mittelwertbildung der Intensitätswerte für jedes Pixel der verschobenen Zwischenbilder ($Z_1, \dots, Z_n$) erstellt wird und diesem Überlagerungszwischenbild ($F_1, \dots, F_n$) die jeweilige Gegenstandsweite ($d_1, \dots, d_n$) zugewiesen wird,
 - e) dass in den einzelnen Pixeln jedes Überlagerungszwischenbildes ($F_1, \dots, F_n$) die, insbesondere nichtlineare, Operation des zweiten Teilschritts des Qualitätsmaßes (M) jeweils separat und pixelweise angewendet wird, und für jedes Überlagerungszwischenbild ($F_1, \dots, F_n$) jeweils ein die erhaltenen Qualitätswerte enthaltendes Qualitätsbild (S) erstellt wird, und
 - f) dass für jede Pixelposition jeweils zumindest ein Qualitätsbild (S) gesucht wird, für das bei dem an der jeweiligen Pixelposition befindlichen Pixel ein großer, insbesondere der größte, Qualitätswert ermittelt wurde und die diesem zumindest einen Qualitätsbild zugeordnete Gegenstandsweite ($d_1, \dots, d_n$) für die Bestimmung des Abstandes des jeweiligen Gegenstandspunkts von der Lichtfeld-Aufnahmeeinrichtung (1) herangezogen wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**,
 - dass für die jeweilige Pixelposition das Qualitätsbild ($S_1, \dots, S_n$) mit dem größten Qualitätswert ermittelt wird und die diesem Qualitätsbild zugeordnete Gegenstandsweite ($d_1, \dots, d_n$) als Abstand herangezogen wird, oder
 - dass für die jeweilige Pixelposition jeweils das Qualitätsbild ($S_1, \dots, S_n$) mit dem größten Qualitätswert ermittelt wird und unter den an derselben Pixelposition liegenden Qualitätswerten von Bildern mit ähnlicher Gegenstandsweite eine Interpolation vorgenommen wird und eine Interpolationsfunktion ($S(d)$) gebildet wird, die den Verlauf der Qualität (S) über die Gegenstandsweite (d) angibt, und das Maximum ($S_{\max}$) der Qualität (S) für diese Interpolationsfunktion ($S(d)$) gesucht wird und die dem Maximum der Qualität durch die Interpolationsfunktion zugewiesene Gegenstandsweite ($d_1, \dots, d_n$) als Abstand herangezogen wird,

wobei insbesondere ein Abstandsbild (D) mit den Abmessungen eines der Qualitätsbilder ($S_1, \dots, S_n$) erstellt wird und an jeder Pixelposition der Abstand (d) bestimmt und dem Abstandsbild (D) an der jeweiligen Pixelposition zugewiesen wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Anzahl (n) der Schärfebilder ($S_1, \dots, S_n$) und Überlagerungszwischenbilder ($F_1, \dots, F_n$), insbesondere bei Implementierung auf Standard-CPU-Architekturen, größer ist als die Anzahl (m) der Teilbilder ($L_1, \dots, L_m$) des Bildstapels (L) des Lichtfelds.
4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei Verschiebung der einzelnen Teilbilder ($L_1, \dots, L_m$) in Abhängigkeit von der Gegenstandsweite (d) um nicht ganzzahlige Pixelpositionen eine Interpolation der Werte der Zwischenergebnisse durchgeführt wird, insbesondere
 - indem eine Interpolation nach dem kubischen oder linearen Verfahren durchgeführt wird und/oder
 - indem der Wert des jeweils am nächsten liegenden Nachbarpixels selektiert wird.
5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Qualitätsmaß (M) ein Schärfemaß in Form der Absolutwerte oder Quadrate einer, insbesondere ersten oder zweiten, räumlichen Ableitung des Intensitätswerts herangezogen wird, und/oder

dass als Qualitätsmaß (M) ein Schärfemaß in Form der, in einer lokalen Umgebung um das jeweilige Pixel ermittelten Fourier-Komponenten, insbesondere bestimmt durch eine gewichtete Summe der Absolutwerte oder Quadrate der Koeffizienten der betrachteten Fourier-Komponenten und/oder einzelner gerader und ungerader Fourier-Basisfunktionen, herangezogen wird.
6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass als Qualitätsmaß (M) ein Übereinstimmungsmaß herangezogen wird, zu dessen Bildung die Norm oder der Betrag der Differenz des Intensitätswerts und des Intensitätswerts eines Referenzzwischenbilds (Z_R) herangezogen wird, wobei eine große Übereinstimmung mit dem Referenzzwischenbild (Z_R) eine hohe Qualität indiziert,

wobei das Referenzzwischenbild (Z_R) unter den Zwischenbildern ($Z_1, \dots, Z_m$) ausgewählt wird, und vorzugsweise dasjenige Zwischenbild ($Z_1, \dots, Z_m$) als Referenzzwischenbild (Z_R) ausgewählt wird, das demjenigen Teilbild ($L_1, \dots, L_m$) zugeordnet ist, dessen Verschiebungsvektor (V) gleich dem Nullvektor ist.
7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Qualitätsmaß (M) eine Kombination eines Übereinstimmungsmaßes nach Anspruch 6 und eines Schärfemaßes insbesondere nach Anspruch 5 herangezogen wird, wobei eine große Übereinstimmung und eine große Schärfe jeweils eine hohe Qualität indizieren.
8. Datenträger, auf dem ein Programm zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der vorangehenden Ansprüche abgespeichert ist.

Hierzu 5 Blatt Zeichnungen

1/5

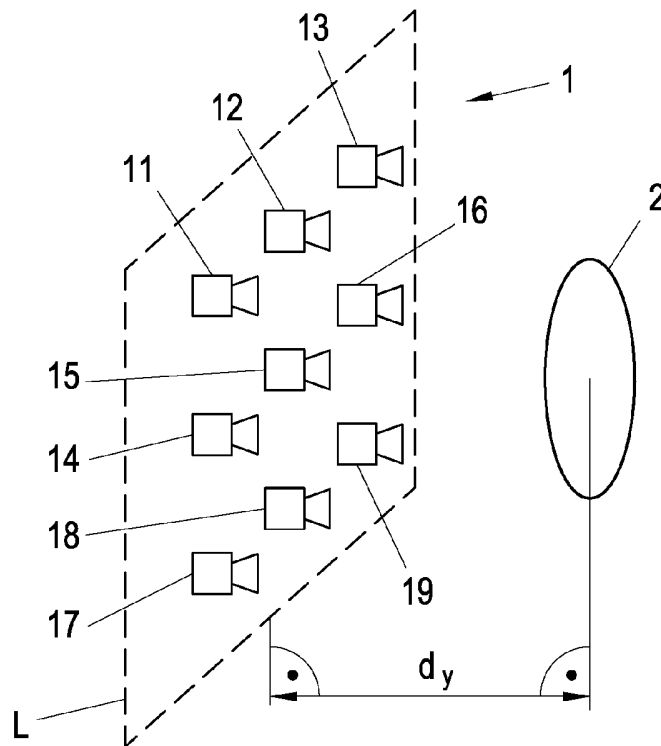
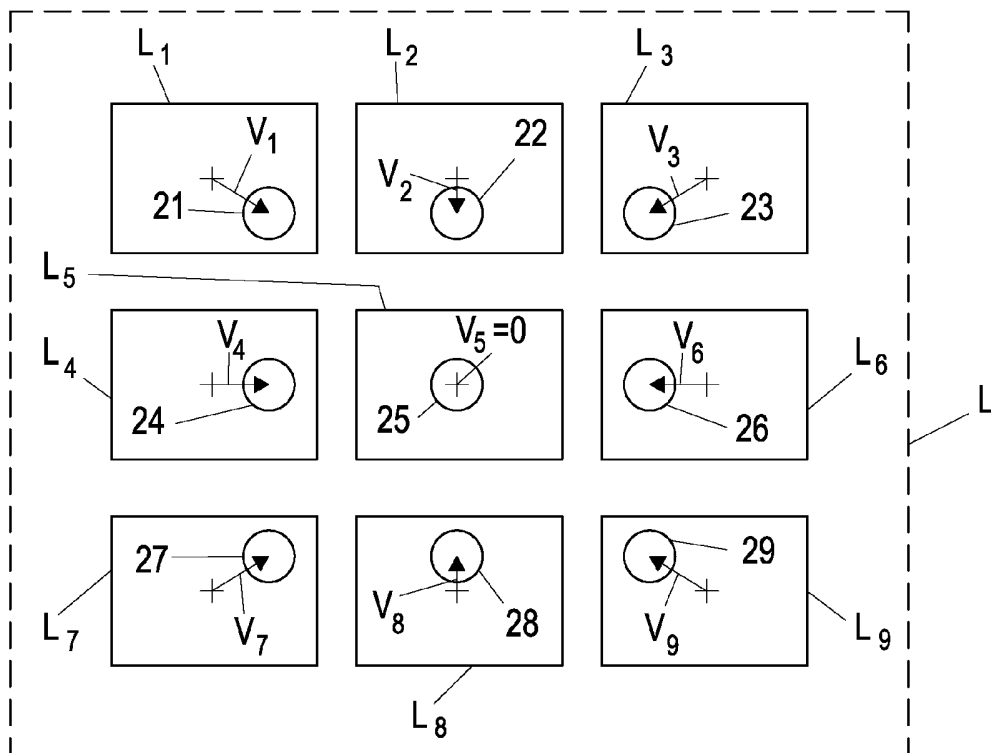


Fig. 1

Fig. 2



2/5

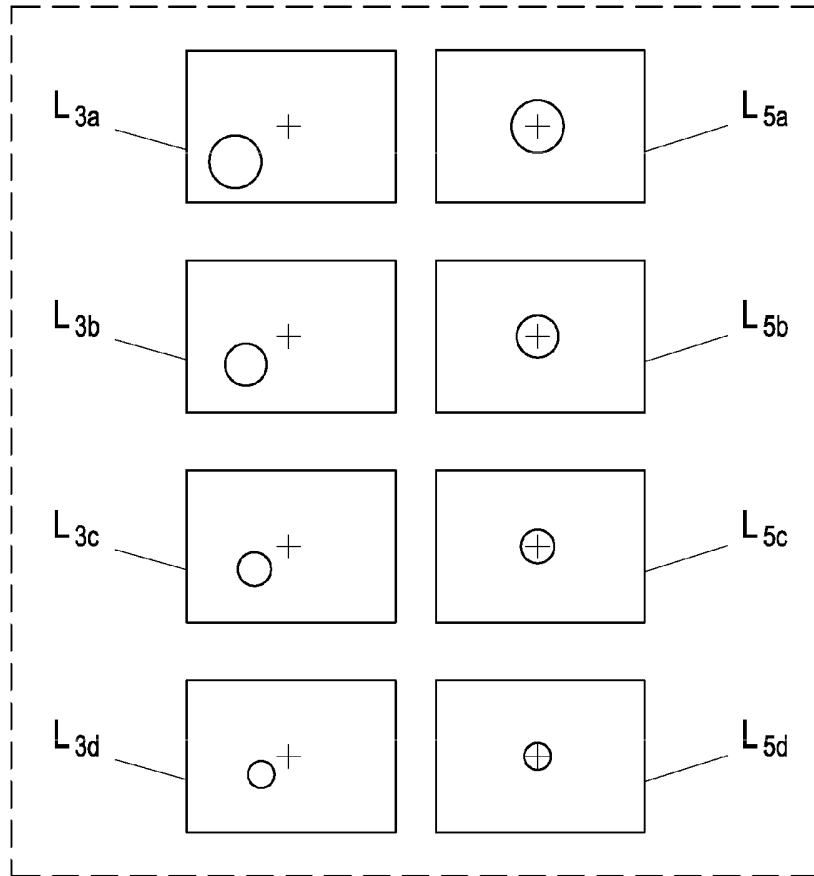


Fig. 3

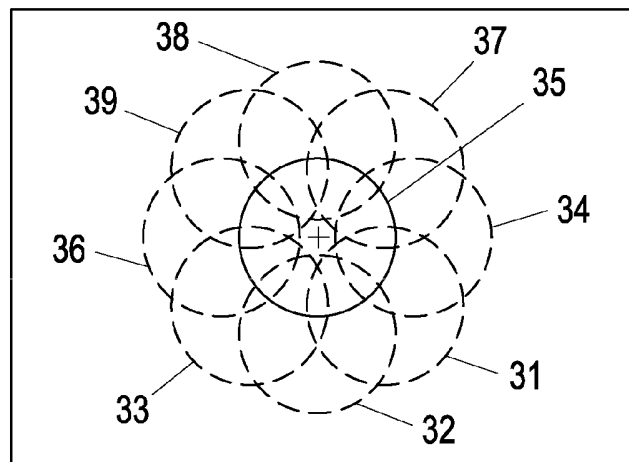


Fig. 6

3/5

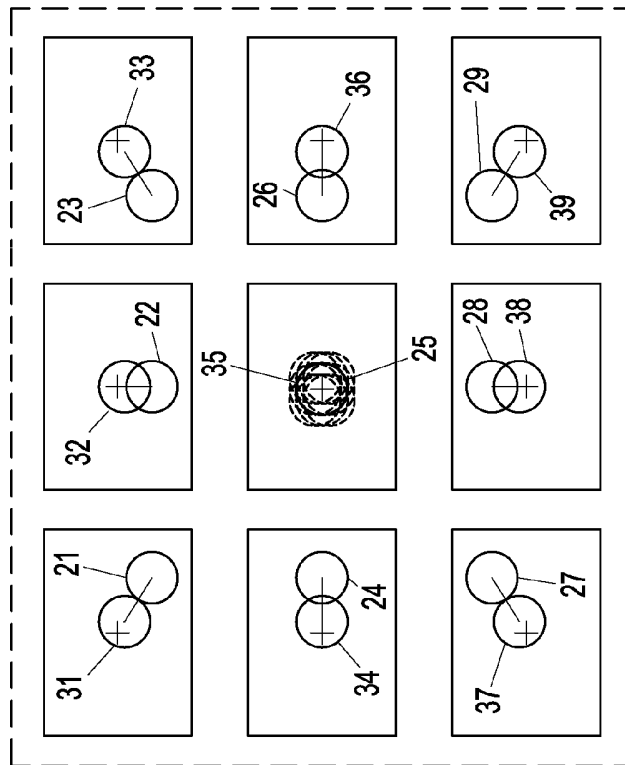


Fig. 5

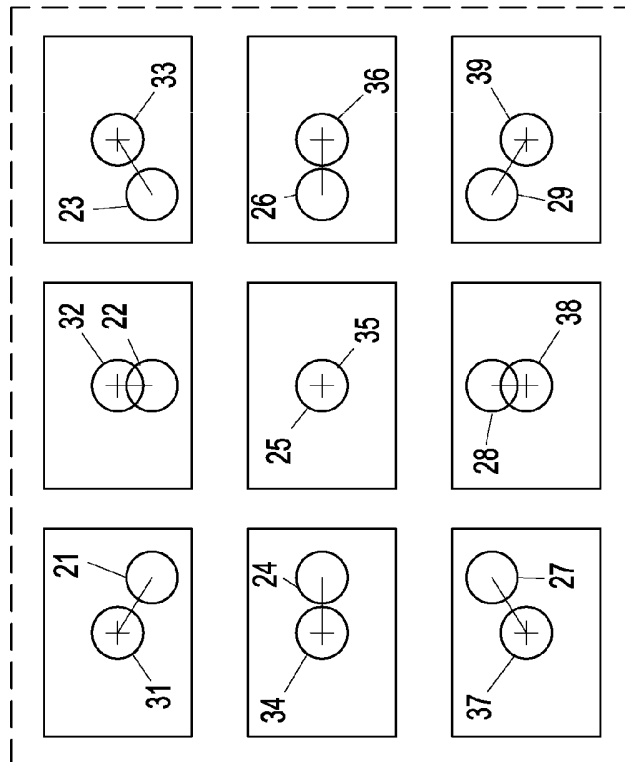


Fig. 4

4/5

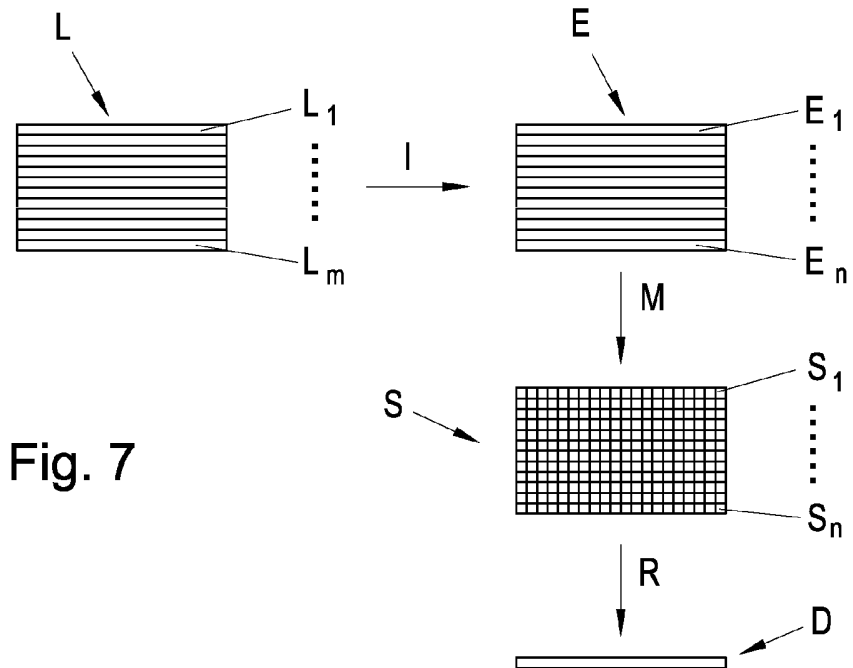


Fig. 7

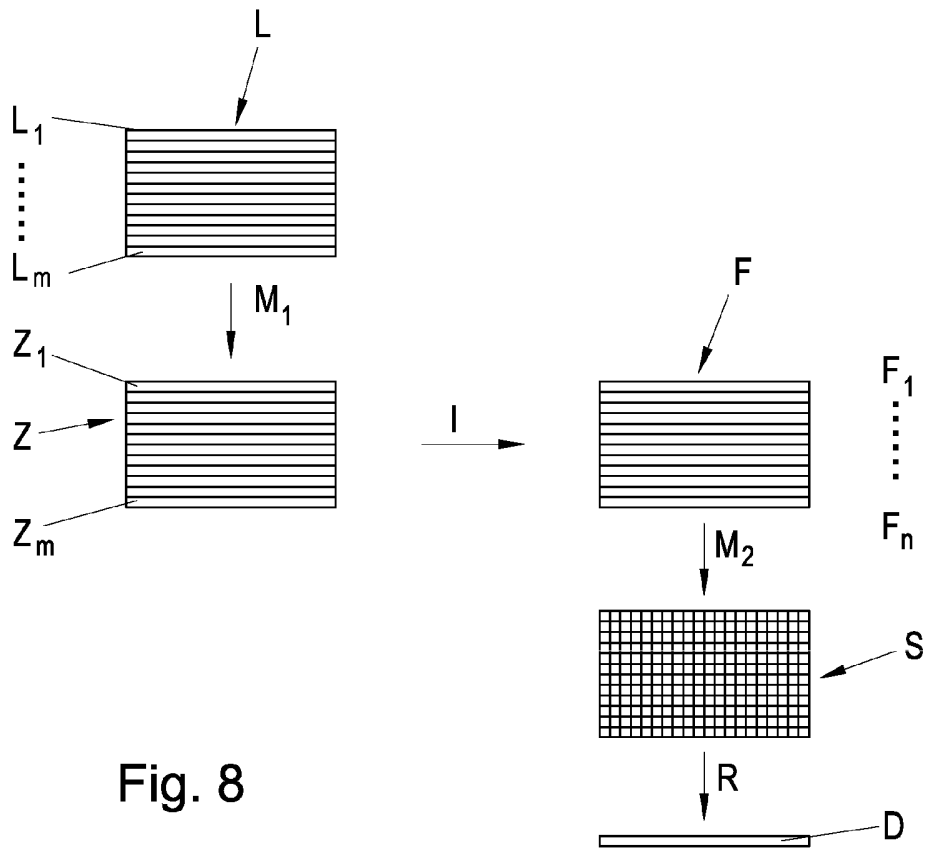


Fig. 8

5/5

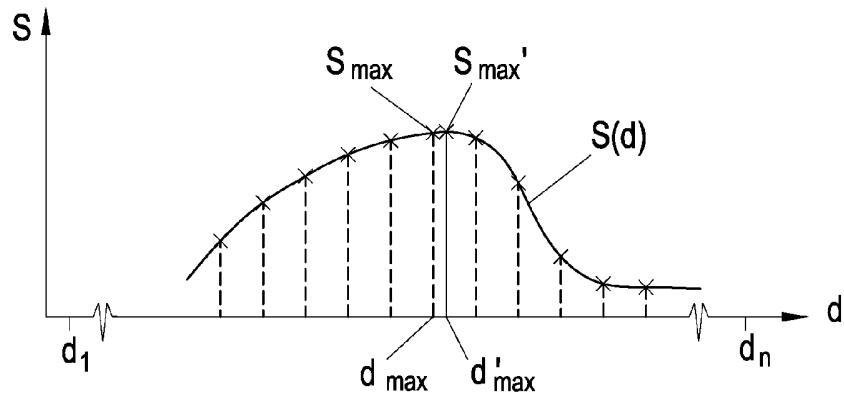


Fig. 9

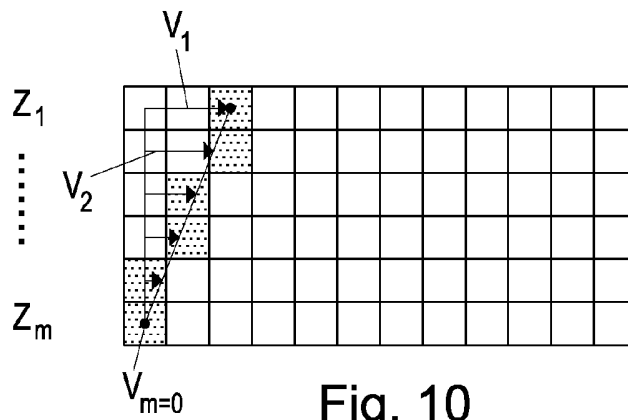


Fig. 10

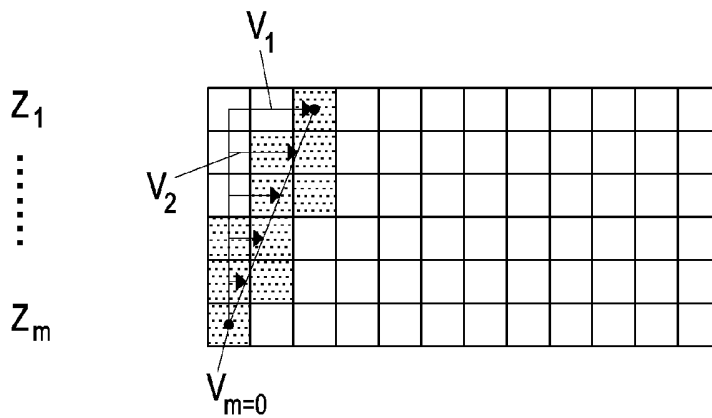


Fig. 11