

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 50990/2016
(22) Anmeldetag: 28.10.2016
(45) Veröffentlicht am: 15.12.2019

(51) Int. Cl.: **G06T 7/00** (2017.01)
G01N 21/956 (2006.01)
G01N 21/88 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
US 2003031356 A1
US 2004160628 A1
US 5172420 A

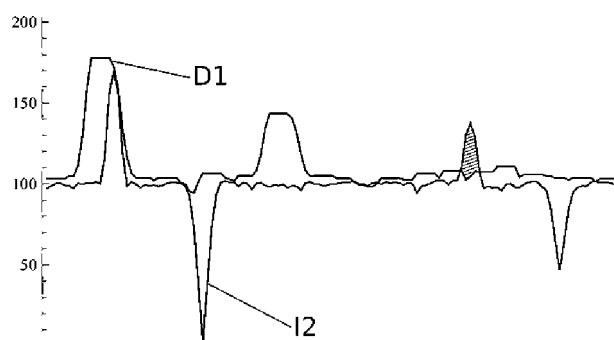
(73) Patentinhaber:
AIT Austrian Institute of Technology GmbH
1220 Wien (AT)

(74) Vertreter:
Wildhack & Jellinek Patentanwälte OG
1030 Wien (AT)

(54) Verfahren zum Prüfen eines Gegenstands

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Prüfen eines Gegenstands,

- wobei ein Referenzbild (R) und ein Gegenstandsbild (B) vorgegeben werden,
- wobei ein Referenz-Minimalbild (U) auf Grundlage des Referenzbilds (R) gebildet wird,
- wobei ein unteres Referenz-Glättungsbild (G_1) durch Anwendung eines Referenz-Glättungsfilters (g_1) auf das Referenz-Minimalbild (U) gebildet wird
- wobei ein unteres Referenz-Schrankenbild (I_1) als pixelweises Minimum des Referenz-Minimalbilds (U) und des unteren Referenz-Glättungsbilds (G_1) erstellt wird,
- wobei ein oberes Gegenstands-Schrankenbild (A_2) als dem Gegenstandsbild (B) identisch, sowie ein Gegenstands-Dilationsbild (D_2) durch Anwenden eines Gegenstands-Dilationsfilters (d_2) auf das obere Gegenstands-Schrankenbild (A_2) festgelegt wird,
- wobei ein Fehlerbild ($F_1 = I_1 - D_2$) durch pixelweise Subtraktion des Gegenstands-Dilationsbilds (D_2) vom unteren Referenz-Schrankenbild (I_1) ermittelt wird, und
- wobei Bereiche in denen die betreffenden Pixelfehlerwerte positive Werte aufweisen, als fehlerhaft markiert werden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft Verfahren zur Prüfung von Gegenständen, das insbesondere auf dem pixelweisen Vergleich zweier Bilder bzw. dem Vergleich eines Gegenstandsbilds mit einem oder mehreren Referenzbildern basiert.

[0002] In der Industrie gewinnt die automatische Qualitätskontrolle - z.B. im Druckbereich oder bei der Oberflächeninspektion - immer mehr an Bedeutung. Dazu wird der zu prüfende Gegenstand unter kontrollierten Bedingungen, typischerweise mit vorgegebener Ausrichtung und Beleuchtung, mit einem Aufnahmesystem, wie insbesondere einer Kamera oder einem Scanner, aufgenommen und mit einer Anzahl von Referenzbildern verglichen, die aus einer Referenzbildmenge T entnommen sind. Diese Referenzbildmenge T umfasst ein oder mehrere Referenzbilder. Das bzw. jedes Referenzbild wird entweder durch eine künstlich erstellte Vorlage oder eine Aufnahme eines für gut befundenen Referenzgegenstands festgelegt. Vorzugsweise wird dafür das selbe Aufnahmesystem verwendet.

[0003] Aus dem Stand der Technik ist es bekannt, dass das Gegenstandsbild vor dem Vergleich mit dem Referenzbild helligkeitsnormiert wird und auf das Referenzbild bildregistriert wird, d.h. so verzerrt bzw. entzerrt wird, dass es besser mit dem Referenzbild übereinstimmt. Trotzdem ist bei den aus dem Stand der Technik bekannten Vergleichsverfahren mit gravierenden Unterschieden zwischen dem angepassten Gegenstandsbild und dem Referenzbild zu rechnen, die nicht als fehlerhafte Abweichungen bewertet, sondern toleriert werden sollen.

[0004] Diese an sich vernachlässigbaren Unterschiede kommen zum einen davon, dass die Bildregistrierung nicht perfekt ist. Zum anderen gibt es regelmäßig unvermeidliche Unterschiede in der Bildschärfe zwischen dem Referenzbild und dem Gegenstandsbild. Die Bildschärfeunterschiede werden durch das Aufnahmesystem verursacht und entstehen auch bei der Bildregistrierung, wenn Pixel interpoliert werden müssen.

[0005] Die aus dem Stand der Technik bekannte Verwendung eines Differenzbilds durch pixelweise Differenzbildung zwischen einem Referenzbild und einem allenfalls entzerrten Gegenstandsbild, ist daher nicht zufriedenstellend.

[0006] Die Aufgabe der Erfindung ist es daher, ein Verfahren bereitzustellen, das verbesserte Ergebnisse liefert und insbesondere nur echte Abweichungen detektiert, die von tatsächlichen Abweichungen des Gegenstands von einem durch das Referenzbild vorgegebenen Soll herrühren; solche Abweichungen sind beispielsweise verursacht durch Kratzer oder Verschmutzungen am Gegenstand. Kleine Bildregistrierungsfehler und Bildschärfeunterschiede sollen hingegen toleriert werden.

[0007] Die Erfindung löst die Aufgabe durch Erstellung von zumindest einem Fehlerbild gemäß dem Verfahren zur Prüfen eines Gegenstands mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1. Dabei ist vorgesehen, dass

[0008] a) ein Gegenstandsbild erstellt wird, das eine Abbildung des Gegenstands enthält,

[0009] b) zumindest ein Referenzbild vorgegeben wird, das ein Abbild enthält, das mit dem Abbild des Gegenstands auf Übereinstimmung zu prüfen ist,

[0010] c) ein Referenz-Maximalbild und/oder ein Referenz-Minimalbild auf Grundlage des zumindest einen Referenzbilds, insbesondere durch pixelweise Bildung des Minimums und/oder Maximums einer Mehrzahl von Referenzbildern gebildet wird, wobei für den Fall, dass nur ein Referenzbild zur Verfügung steht, das Referenz-Maximalbild und/oder das Referenz-Minimalbild dem Referenzbild gleichgesetzt werden/wird,

[0011] d) ein oberes Referenz-Glättungsbild durch Anwendung eines Referenz-Glättungsfilters auf das Referenz-Maximalbild gebildet wird, und/oder wobei ein unteres Referenz-Glättungsbild durch Anwendung des Referenz-Glättungsfilters auf das Referenz-Minimalbild gebildet wird,

[0012] e) zumindest eines der folgenden Bilder erstellt wird:

- [0013] - ein oberes Referenz-Schrankenbild als pixelweises Maximum des Referenz-Maximalbilds und des oberen Referenz-Glättungsbilds,
- [0014] - ein unteres Referenz-Schrankenbild als pixelweises Minimum des Referenz-Minimalbilds und des unteren Referenz-Glättungsbilds,
- [0015] - ein Referenz-Dilationsbild durch Anwenden eines Referenz-Dilationsfilters auf das obere Referenz-Schrankenbild,
- [0016] - ein Referenz-Erosionsbild durch Anwenden eines Referenz-Erosionsfilters auf das untere Referenz-Schrankenbild,
- [0017] f) auf Grundlage des Gegenstandsbilds zumindest eines der folgenden den Gegenstand charakterisierenden Bilder erstellt wird:
- [0018] - ein oberes Gegenstands-Schrankenbild, das festgelegt wird
- [0019] - als dem Gegenstandsbild identisch, oder
- [0020] - als pixelweises Maximum des Gegenstandsbilds und eines Gegenstands-Glättungsbilds, wobei das Gegenstands-Glättungsbild durch Anwendung eines Gegenstands-Glättungsfilters auf das Gegenstandsbild gebildet wird,
- [0021] - ein unteres Gegenstands-Schrankenbild, das festgelegt wird,
- [0022] - als dem Gegenstandsbild identisch, oder
- [0023] - als pixelweises Minimum des Gegenstandsbilds und des Gegenstands-Glättungsbilds, wobei das Gegenstands-Glättungsbild durch Anwendung eines Gegenstands-Glättungsfilters auf das Gegenstandsbild gebildet wird,
- [0024] - ein Gegenstands-Dilationsbild durch Anwenden eines Gegenstands-Dilationsfilters auf das obere Gegenstands-Schrankenbild,
- [0025] - ein Gegenstands-Erosionsbild durch Anwenden eines Gegenstands-Erosionsfilters auf das untere Gegenstands-Schrankenbild,
- [0026] g) auf Grundlage der in den Schritten e) und f) ermittelten Bilder zumindest eines der folgenden Fehlerbilder ermittelt wird:
- [0027] - ein erstes Fehlerbild durch pixelweise Subtraktion des Gegenstands-Dilationsbilds vom unteren Referenz-Schrankenbild,
- [0028] - ein zweites Fehlerbild durch pixelweise Subtraktion des oberen Referenz-Schrankenbilds vom Gegenstands-Erosionsbild,
- [0029] - ein drittes Fehlerbild durch pixelweise Subtraktion des Referenz-Dilationsbilds vom Gegenstands-Minimumbild,
- [0030] - ein viertes Fehlerbild durch pixelweise Subtraktion des Gegenstands-Maximumbilds vom Referenz-Erosionsbild, und
- [0031] h) Bereiche des Gegenstands als potentiell fehlerhaft markiert werden, die auf Bildbereiche zumindest eines Fehlerbilds abgebildet werden, in denen die betreffenden Pixelfehlerwerte positive Werte oder einen positiven Schwellenwert überschreitende Werte aufweisen.
- [0032] Eine einfache Herangehensweise, aufgrund der erstellten Fehlerbilder auf potentiell fehlerhafte Bereiche des Gegenstands zu schließen, sieht vor, dass in Schritt g) zumindest zwei der Fehlerbilder gebildet werden und ein Maximum-Fehlerbild durch pixelweise Maximumbildung der in Schritt g) erstellten Fehlerbilder ermittelt wird, und wobei Bereiche des Gegenstands als potentiell fehlerhaft markiert werden, die auf Bildbereiche des Maximum-Fehlerbilds abgebildet werden, in denen die betreffenden Pixelfehlerwerte positive Werte oder einen positiven Schwellenwert überschreitende Werte aufweisen.
- [0033] Um bei Aufnahmen, bei denen jeweils Bildbereiche, insbesondere Rahmen, mit nicht

relevanten Informationen vorhanden sind, Ressourcen und Rechenzeit einzusparen, kann vorgesehen sein, dass für den Vergleich ausschließlich Teilbereiche des Gegenstandsbilds herangezogen werden, die sich insbesondere an vorgegebenen Positionen des Gegenstandsbilds befinden.

[0034] Zur der Erstellung eines mehrkanaligen Gegenstandsbilds kann vorgesehen sein, dass die ein oder mehrkanaligen Referenzbilder und das ein oder mehrkanalige Gegenstandsbild gebildet wird, indem

[0035] - ein Rohbild des Gegenstands ermittelt wird und jeder Bildkanal durch Anwendung einer oder mehrerer der folgenden Operationen auf das Rohbild erstellt wird:

[0036] i) durch Anwendung von Filtern, insbesondere eines Kantentfilters, auf das Rohbild, und/oder

[0037] ii) durch Anwendung von Bildkanal-Mischoperationen auf ein mehrkanaliges Rohbild zur Erstellung eines einkanaligen Bildes.

[0038] Zur Überprüfung eines Gegenstands anhand eines mehrkanaligen Gegenstandsbilds kann vorgesehen sein, dass

[0039] - die Referenzbilder und das Gegenstandsbild mehrere Kanäle enthalten und für jeden Bildkanal einzeln zumindest eines der folgenden Bilder gemäß Schritt d) und e) aus Anspruch 1 erstellt wird,

[0040] - ein oberes Referenz-Schrankenbild,

[0041] - ein unteres Referenz-Schrankenbild,

[0042] - ein Referenz-Dilationsbild,

[0043] - ein Referenz-Erosionsbild,

[0044] - das Gegenstandsbild mehrere Kanäle enthält, und für jeden Bildkanal gemäß Schritt f) aus Anspruch 1 zumindest eines der folgenden Bilder erstellt wird:

[0045] - ein oberes Gegenstands-Schrankenbild,

[0046] - ein unteres Gegenstands-Schrankenbild,

[0047] - ein Gegenstands-Dilationsbild,

[0048] - ein Gegenstands-Erosionsbild,

[0049] - wobei für zumindest zwei Kanäle, insbesondere für alle Kanäle, zumindest ein Fehlerbild gemäß Schritt g) erstellt wird, und ein Maximum-Fehlerbild durch pixelweise Maximumbildung der so erstellten Fehlerbilder ermittelt wird.

[0050] Eine vorteilhafte Einstellung der Bildschärfe sieht vor, dass insbesondere bei der Bildung der Referenz- und/oder Gegenstands-Glättungsbilder die Umgebungen und/oder die Gewichte der jeweiligen Glättungsfiler so gewählt werden, dass das oder die Referenz- Glättungsbild(er) und das oder die Gegenstands-Glättungsbild(er), im Wesentlichen dieselbe Bildschärfe aufweisen.

[0051] Vorteilhaft kann vorgesehen sein, dass für den Fall, dass mehrere Fehlerbilder gebildet werden, die bei der Erstellung von Referenz- und/oder Gegenstands-Erosionsbildern und/oder Referenz- und/oder Gegenstands-Dilationsbildern verwendeten Filter jeweils dieselbe Pixelumgebung aufweisen.

[0052] Für große Schärfenunterschiede zwischen Referenzbildern und Gegenstandsbild kann vorgesehen sein,

[0053] - dass eine Vielzahl von oberen Referenz-Glättungsbildern durch Anwendung von Referenz-Glättungsfilttern mit unterschiedlicher Glättungsstärke auf das Referenz-Maximalbild erstellt wird und das obere Referenz-Schrankenbild als pixelweises Maximum des Referenz-

Maximalbilds und aller oberen Referenz-Glättungsbilder gebildet wird, und/oder

[0054] - dass eine Vielzahl von unteren Referenz-Glättungsbildern durch Anwendung von Referenz-Glättungsfiltern mit unterschiedlicher Glättungsstärke auf das Referenz-Minimalbild erstellt wird und das untere Referenz-Schrankenbild als pixelweises Minimum des Referenz-Minimalbilds und aller unteren Referenz-Glättungsbilder gebildet wird.

[0055] Um Bildregistrierungsfehler tolerieren zu können, verwendet die Erfindung die Bildoperationen Dilation und/oder Erosion. Um Schärfenunterschiede zu tolerieren oder zu kompensieren werden Glättungsfilter, wie beispielsweise der Gauß-Filter, verwendet.

[0056] Die Anwendung eines Dilationsfilters und Erosionsfilters stellen Basisoperationen der morphologischen Bildverarbeitung dar. Dabei werden pixelweise die Maximalwerte (bei Dilation) bzw. Minimalwerte (bei Erosion) innerhalb einer Umgebung, umfassend alle Nachbapixel sowie das Pixels selbst, gebildet. Die Filtergröße bestimmt, welche Pixel als Nachbar angesehen werden.

[0057] Üblich ist es beispielsweise bei einem Digitalbild alle acht unmittelbaren Nachbapixel, die an das betreffende Pixel horizontal, vertikal oder diagonal angrenzen zur Umgebung zu zählen. Es können aber zusätzlich auch weiter vom betreffenden Pixel entfernt liegende Pixel der Umgebung zugerechnet werden. In diesem Fall ist der vom betreffenden Filter verursachte Ausdehnungseffekt stärker.

[0058] Durch, insbesondere lineare, Interpolation zwischen den Ergebnissen zweier Filter mit ganzzahligen Filtergrößen kann eine stufenlose justierbare Filtergröße des Dilations- oder Erosionsfilters erzielt werden.

[0059] Glättungsfilter sind Filter, die die Bildschärfe reduzieren. Für gewöhnlich wird dazu pixelweise die gewichtete Summe aller Nachbapixel gebildet. Die Gewichte sind dabei umso kleiner, je weiter weg die Nachbapixel von Zentrumspixel liegen. Vorzugsweise wird ein Gauß-Filter als Glättungsfilter verwendet. Der Glättungseffekt kann durch Wahl der Nachbapixel und der Gewichte stufenlos variiert werden.

[0060] Fig. 1a zeigt jeweils eine Zeile einer Anzahl von Referenzbildern (R_1, \dots, R_5) einer Referenzbildmenge T,

[0061] Fig. 1b die betreffende Zeile eines daraus ermittelten Referenz-Minimalbilds U und Referenz-Maximalbilds V.

[0062] Fig. 2 zeigt die betreffenden Zeilen eines daraus erstellten oberen Referenz-Glättungsbilds H_1 und unteren Referenz-Glättungsbilds G_1 ,

[0063] Fig. 3a und 3b zeigen Zeilen der daraus ermittelten charakteristischen Bilder.

[0064] Fig. 4a zeigt eine Zeile eines Gegenstandsbilds B,

[0065] Fig. 4b zeigt die betreffende Zeile eines Gegenstands-Glättungsbilds G_2 .

[0066] Fig. 5a und 5b zeigen die betreffenden Zeilen der ermittelten den Gegenstand charakterisierenden Bilder.

[0067] Fig. 6 bis 9 zeigen die Erstellung einzelner Fehlerbilder.

[0068] Fig. 10 zeigt die jeweils betroffene Zeile der vier Fehlerbilder.

[0069] Fig. 11 zeigt zum Vergleich das Ergebnis des dem Stand der Technik bekannten Verfahrens des pixelweisen Vergleichs des Gegenstandsbildes mit dem Referenzbild.

[0070] Im Folgenden wird eine erste Ausführungsform der Erfindung näher dargestellt. Dabei wird eine in Fig. 1a dargestellte Referenzbildmenge T umfassend eine Mehrzahl von n Referenzbildern R_1, \dots, R_n vorgegeben.

[0071] Basierend auf den Referenzbildern R_1, \dots, R_n wird ein Referenz-Maximalbild V durch

pixelweise Bildung des Maximums der Pixelintensitätswerte gebildet. Jedes Pixel des Referenz-Maximalbilds V erhält als Intensitätswert den maximalen Intensitätswert unter denjenigen Pixeln der Referenzbildern R_1, \dots, R_n , die an der zugehörigen Position innerhalb des jeweiligen Referenzbilds R_1, \dots, R_n liegen (Fig. 1b).

[0072] Weiters wird basierend auf den Referenzbildern R_1, \dots, R_n ein Referenz-Minimalbild U durch pixelweise Bildung des Minimums der Pixelintensitätswerte gebildet. Jedes Pixel des Referenz-Minimalbilds U erhält als Intensitätswert den minimalen Intensitätswert unter denjenigen Pixeln der Referenzbildern R_1, \dots, R_n , die an der zugehörigen Position innerhalb des jeweiligen Referenzbilds R_1, \dots, R_n liegen (Fig. 1b).

[0073] In weiterer Folge wird, wie in Fig. 2 dargestellt, ein oberes Referenz-Glättungsbild H_1 durch Anwendung eines Referenz-Glättungsfilters g_1 auf das Referenz-Maximalbild V gebildet. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel wird als Glättungsfiler ein Gauß-Filter verwendet, der eine Varianz von 1,0 aufweist. Genau genommen wird der Glättungsfiler durch einen Binomialfilter mit den Koeffizienten $(1, 4, 6, 4, 1) / 16$ approximiert, was näherungsweise einem Gaußfilter mit der Varianz 1,0 entspricht.

[0074] Weiters wird ein ebenfalls in Fig. 2 dargestelltes unteres Referenz-Glättungsbild G_1 durch Anwendung des Referenz-Glättungsfilters g_1 auf das Referenz-Minimalbild U gebildet.

[0075] Zum Vergleich mit dem Gegenstandsbild B (Fig. 4a) werden aus den Referenzbildern die folgenden charakteristischen Bilder A_1, I_1, D_1, E_1 ermittelt, die in Fig. 3a und Fig. 3b dargestellt sind:

[0076] Ein oberes Referenz-Schrankenbild A_1 wird als pixelweises Maximum des Referenz-Maximalbilds V und des oberen Referenz-Glättungsbilds H_1 ermittelt. Analog dazu wird ein unteres Referenz-Schrankenbild I_1 als pixelweises Minimum des Referenz-Minimalbilds U und des unteren Referenz-Glättungsbilds G_1 ermittelt (Fig. 3a). In weiterer Folge wird ein Referenz-Dilationsbild D_1 durch Anwenden eines Referenz-Dilationsfilters d_1 auf das obere Referenz-Schrankenbild A_1 ermittelt. Schließlich wird ein Referenz-Erosionsbild E_1 durch Anwenden eines Referenz-Erosionsfilters e_1 auf das untere Referenz-Schrankenbild I_1 ermittelt (Fig. 3b).

[0077] Auf Grundlage eines vom Gegenstand erstellten Gegenstandsbilds B werden die folgenden den Gegenstand charakterisierenden Bilder A_2, I_2, D_2, E_2 (Fig. 4a und Fig. 4b), nach im wesentlichen denselben Kriterien erstellt wie die für die Referenzbilder charakteristischen Bilder A_1, I_1, D_1, E_1 (Fig. 3a und Fig. 3b).

[0078] Zunächst wird ein Gegenstands-Glättungsbild G_2 (Fig. 4b) durch Anwendung eines Gegenstands-Glättungsfilters g_2 auf das Gegenstandsbild B (Fig. 4a) gebildet. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel wird als Glättungsfiler ein Gauß-Filter verwendet, der eine Varianz von 1,0 aufweist.

[0079] Anschließend wird ein oberes Gegenstands-Schrankenbild A_2 ermittelt, das als pixelweises Maximum des Gegenstandsbilds B und des Gegenstands-Glättungsbilds G_2 festgelegt wird. Ein unteres Gegenstands-Schrankenbild I_2 wird als pixelweises Minimum des Gegenstandsbilds B und des Gegenstands-Glättungsbilds G_2 festgelegt (Fig. 5a).

[0080] Weiters wird ein Gegenstands-Dilationsbild D_2 durch Anwenden eines Gegenstands-Dilationsfilters d_2 auf das obere Gegenstands-Schrankenbild A_2 ermittelt. Schließlich wird ein Gegenstands-Erosionsbild E_2 durch Anwenden eines Gegenstands-Erosionsfilters e_2 auf das untere Gegenstands-Schrankenbild I_2 ermittelt (Fig. 5b).

[0081] Nachdem die die Referenzbilder charakterisierenden Bilder A_1, I_1, D_1, E_1 sowie die den Gegenstand charakterisierenden Bilder A_2, I_2, D_2, E_2 ermittelt sind, werden diese auf erfindungsgemäß festgelegte Art paarweise verglichen.

[0082] Ein erstes Fehlerbild F_1 wird durch pixelweise Subtraktion des Gegenstands-Dilationsbilds D_2 vom unteren Referenz-Schrankenbild I_1 ermittelt. Für jedes Pixel an der Bildposition mit den Koordinaten x, y wird ein Pixelfehlerwert $F_1[x, y]$ wie folgt festgelegt.

[0083] $F_1[x, y] = I_1[x, y] - D_2[x, y]$

[0084] Fig. 6 zeigt eine Gegenüberstellung des Gegenstands-Dilationsbilds D_2 und des unteren Referenz-Schrankenbilds I_1 . Bereiche, in denen das erste Fehlerbild F_1 positive Werte aufweist, sind schraffiert dargestellt.

[0085] Ein zweites Fehlerbild F_2 wird durch pixelweise Subtraktion des oberen Referenz-Schrankenbilds A_1 vom Gegenstands-Erosionsbild E_2 ermittelt. Für jedes Pixel an der Bildposition mit den Koordinaten x, y wird ein Pixelfehlerwert $F_2[x, y]$ wie folgt festgelegt.

[0086] $F_2[x, y] = E_2[x, y] - A_1[x, y]$

[0087] Fig. 7 zeigt eine Gegenüberstellung des Gegenstands-Erosionsbild E_2 und des oberen Referenz-Schrankenbilds A_1 . Bereiche, in denen das zweite Fehlerbild F_2 positive Werte aufweist, sind schraffiert dargestellt.

[0088] Ein drittes Fehlerbild F_3 wird durch pixelweise Subtraktion des Referenz-Dilationsbilds D_1 vom Gegenstands-Minimumbild I_2 ermittelt. Für jedes Pixel an der Bildposition mit den Koordinaten x, y wird ein Pixelfehlerwert $F_3[x, y]$ wie folgt festgelegt.

[0089] $F_3[x, y] = I_2[x, y] - D_1[x, y]$

[0090] Fig. 8 zeigt eine Gegenüberstellung des Gegenstands-Minimumbild I_2 und des Referenz-Dilationsbilds D_1 . Bereiche, in denen das dritte Fehlerbild F_3 positive Werte aufweist, sind schraffiert dargestellt.

[0091] Ein viertes Fehlerbild F_4 wird durch pixelweise Subtraktion des Gegenstands-Maximumbilds A_2 vom Referenz-Erosionsbild E_1 ermittelt. Für jedes Pixel an der Bildposition mit den Koordinaten x, y wird ein Pixelfehlerwert $F_4[x, y]$ wie folgt festgelegt.

[0092] $F_4[x, y] = E_1[x, y] - A_2[x, y]$

[0093] Fig. 9 zeigt eine Gegenüberstellung des Gegenstands-Maximumbilds A_2 und des Referenz-Erosionsbilds E_1 . Bereiche, in denen das vierte Fehlerbild F_4 positive Werte aufweist, sind schraffiert dargestellt.

[0094] In Fig. 6 bis 9 sind diejenigen Bereiche der Fehlerbilder, in denen der betreffende Pixelwert des zugehörigen Fehlerbilds einen positiven Wert aufweist, schraffiert dargestellt. Im vorliegenden Fall deuten positive Werte im Fehlerbild F auf fehlerhafte Abweichungen f hin, die nicht durch kleine Bildregistrierungsfehler oder Schärfenunterschiede zu erklären sind. Der Gegenstand wird in denjenigen Bereichen als fehlerhaft angesehen, die auf Bildbereiche zumindest eines Fehlerbilds abgebildet werden, in denen die betreffenden Pixelfehlerwerte positive Werte aufweisen. In dem vorstehend genannten Beispiel werden die einzelnen Werte des Fehlerbilds F mit dem Wert 0 als Schwellenwert verglichen. Davon abweichend kann aber auch vorgesehen sein, dass ein Schwellenwertvergleich mit einem alternativen Wert, insbesondere einem positiven Wert, erfolgt.

[0095] Werden, wie im vorliegenden Fall mehrere Fehlerbilder F_1, \dots, F_4 gebildet, so kann aus diesen Fehlerbildern F_1, \dots, F_4 ein Maximum-Fehlerbild F_{\max} durch pixelweise Maximumbildung der erstellten Fehlerbilder F_1, \dots, F_4 ermittelt werden (Fig. 10). Jeder Pixelfehlerwert des Maximum-Fehlerbilds F_{\max} an einer vorgegebenen Bildposition entspricht dem maximalen Pixelfehlerwert der an der jeweils entsprechenden Bildposition in den Fehlerbildern F_1, \dots, F_4 liegenden Pixel. Im vorliegenden Fall mit vier Fehlerbildern F_1, \dots, F_4 kann das Maximum-Fehlerbild F_{\max} mittels der folgenden Vorschrift ermittelt werden:

[0096] $F_{\max}[x, y] = \max\{F_1[x, y], F_2[x, y], F_3[x, y], F_4[x, y]\}$

[0097] Der Gegenstand wird in diesem Fall in denjenigen Bereichen als fehlerhaft angesehen, die auf Bildbereiche des Maximum-Fehlerbilds F_{\max} abgebildet werden, in dem der betreffende Pixelfehlerwert $F_{\max}[x, y]$ einen positiven Wert oder einen einen positiven Schwellenwert überschreitenden Wert aufweist.

[0098] Im einfachsten Fall einer Qualitätsbeurteilung werden die Bereiche des Gegenstands als

fehlerhaft erkannt, die auf Bildbereiche zumindest eines Fehlerbilds abgebildet werden, in dem der betreffende Pixelfehlerwert einen positiven Wert oder einen einen positiven Schwellenwert überschreitenden Wert aufweist. Insbesondere kann auch der gesamte Gegenstand als mangel- bzw. fehlerhaft erkannt werden, wenn ein einziger Pixelfehlerwert den Schwellwert überschreitet.

[0099] Selbstverständlich können aber auch komplexere Auswertungsmethoden verwendet werden. So kann z.B. pixelweise ein Toleranzwert vom Fehlerbild F subtrahiert werden, um kleine Abweichungen, die z.B. schon wegen Kamerarauschen unvermeidlich sind, zu akzeptieren. Danach können verbleibende positive Pixel im Fehlerbild F , die in unmittelbarer Nachbarschaft zueinander liegen, zu Gruppen zusammengefasst werden (connected-component labeling). Jede so erkannte Pixelgruppe kann dann einzeln bewertet werden. Beispielsweise kann die Summe der zur Pixelgruppe gehörigen Pixelwerte berechnet und mit einem Schwellwert verglichen werden.

[00100] In einem zweiten Ausführungsbeispiel, das im Übrigen dem ersten Ausführungsbeispiel entspricht, kann anstelle einer Referenzbildmenge T auch nur ein einziges Referenzbild R aufweisen. In diesem Fall werden das Referenz-Maximalbild V und das Referenz-Minimalbild U auf denselben Wert gesetzt und sind identisch mit dem Referenzbild R . In diesem Fall wird das einzige Referenzbild R denselben Schritten unterzogen wie das Gegenstandsbild B ; das Verfahren ist letztlich ein Bild-zu-Bild-Vergleich.

[00101] Die Dilationsfilter d_1 und d_2 sowie Erosionsfilter e_1 und e_2 verwenden zur Ermittlung des Filterwerts vorzugsweise dieselbe Nachbarschaft von Pixeln. In allen vorher genannten Ausführungsbeispielen können ohne Kenntnis über die Art der Herstellung der Bilder, dh ohne Kontextwissen, vorzugsweise auch dieselben Glättungsfilter $g_1 = g_2$ verwendet werden.

[00102] Kontextwissen kann aber in die geeignete Wahl der Filtergrößen einfließen. Wenn beispielsweise bekannt ist, dass das Referenzbild R oder die Referenzbilder R_1, \dots, R_n keine von einem Aufnahmesystem erstellten Bilder sind, sondern von einem Computer erstellt wurden und über maximale Bildschärfe verfügen, dann kann davon ausgegangen werden, dass das Gegenstandsbild B an keiner Stelle schärfer ist als dieses Referenzbild R bzw. diese Referenzbilder R_1, \dots, R_n . Demzufolge kann man für den Gegenstands-Glättungsfilter g_2 , den man auf das Gegenstandsbild B anwendet die Größe 0 verwenden bzw. kann dieser Glättungsvorgang unterbleiben. Die Filtergröße des auf das Referenzbild R angewendeten Referenz-Glättungsfilters g_1 wird dagegen so groß gewählt, sodass das Referenzbild R und das Gegenstandsbild B im Wesentlichen dieselbe Bildschärfe aufweisen.

[00103] Im Allgemeinen wird man danach streben, die Glättungsfilter g_1 und g_2 so groß zu wählen, dass erlaubte bzw. unvermeidliche Unterschiede in der Bildschärfe gerade noch toleriert werden. Bei einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung kann es günstig sein, nicht nur einen Referenz-Glättungsfilter g_1 auf das Referenzbild R oder die Referenzbilder R_1, \dots, R_n anzuwenden, sondern eine Anzahl I von Referenz-Glättungsfiltern $g_{1,1}, \dots, g_{1,I}$ mit jeweils unterschiedlicher Filtergröße.

[00104] Dabei wird eine Anzahl von I oberen Referenz-Glättungsbildern ($H_{1,1}, \dots, H_{1,I}$) durch Anwendung der Referenz-Glättungsfiltern $g_{1,1}, \dots, g_{1,I}$ mit unterschiedlicher Glättungsstärke auf das Referenz-Maximalbild V erstellt. Das obere Referenz-Schrankenbild (A_1) wird als pixelweises Maximum des Referenz-Maximalbilds V und aller oberen Referenz-Glättungsbilder $H_{1,1}, \dots, H_{1,I}$ gebildet.

[00105] Auf dieselbe Weise kann dieselbe Anzahl I von unteren Referenz-Glättungsbildern $G_{1,1}, \dots, G_{1,I}$ durch Anwendung der Referenz-Glättungsfiltern $g_{1,1}, \dots, g_{1,I}$ mit unterschiedlicher Glättungsstärke auf das Referenz-Minimalbild U erstellt werden. Das untere Referenz-Schrankenbild I_1 wird als pixelweises Minimum des Referenz-Minimalbilds U und aller unteren Referenz-Glättungsbilder $G_{1,1}, \dots, G_{1,I}$ gebildet.

[00106] In den vorhergehenden Ausführungsbeispielen wurden jeweils insgesamt vier Fehlerbilder F_1, \dots, F_4 erstellt. Aber auch eine weniger anspruchsvolle Prüfung, mit der nur einzelne,

bestimmte Fehler gefunden werden, ist in bestimmten Fällen ausreichend zur zuverlässigen Erkennung von Fehlern in Gegenständen. Da in diesem Fall einzelne Bildverarbeitungsoperationen zur Erzeugung der nicht benötigten Fehlerbilder nicht durchgeführt werden brauchen, kann das Verfahren dementsprechend schneller unter Verwendung von geringeren Computerressourcen durchgeführt werden.

[00107] Es kann auch vorgesehen sein, nicht das ganze Bild zu prüfen, sondern nur Teilbereiche davon. Üblicherweise werden vom Gegenstandsbild B nur jene Bildteile geprüft, die den Gegenstand bzw. die zu prüfenden Teile davon darstellen. Hintergrundpixel werden ausgelassen. Alternativ kann man natürlich auch alle Pixel prüfen und die Hintergrundpixel erst im betreffenden Fehlerbild F ausblenden.

[00108] Bei dem Gegenstandsbild B kann es sich um ein von einer Bildaufnahmeeinheit unmittelbar erstelltes Rohbild handeln. Alternativ kann das Gegenstandsbild B auch von einem Rohbild des Gegenstands durch Anwendung von Filtern und/oder Mischoperationen auf Bildkanäle, insbesondere Farbmischungsoperationen auf Farbkanäle, gebildet werden. Bei der Erstellung eines Gegenstandsbilds kann eine Vielzahl unterschiedlicher Bearbeitungsprozesse auf das betreffende Rohbild angewendet werden.

[00109] Auch wenn die Erfindung bislang nur für die Anwendung auf einen einzelnen Bildkanal beschrieben wurde, ist es ohne weiteres möglich, eine Vielzahl (m) unterschiedlicher vom Rohbild abgeleiteter Bildkanäle zu erstellen, wobei jeder der m Bildkanäle jeweils auf eine unterschiedliche Weise erstellt wurde. Ebenso ist es möglich, für das oder die Referenzbilder jeweils mehrere, insbesondere dieselbe Anzahl m, Bildkanäle zur Verfügung zu stellen, wobei jeweils für jeden Bildkanal ein separater Vergleich durchgeführt und jeweils separate Fehlerbilder ($F_{1,1}, \dots, F_{4,1}; \dots; F_{1,m}, \dots, F_{4,m}$) erstellt werden.

[00110] Die einfachste Möglichkeit, bei der die Bilder mehrere Kanäle aufweisen, besteht darin, dass sowohl als Gegenstandsbilder als auch als Referenzbilder jeweils Farbbilder mit einer Anzahl von Farbkanälen zur Verfügung gestellt werden. Die obigen Bildverarbeitungsoperationen können somit auch auf Farbbilder angewendet werden. Es kann eines der vorstehend beschriebenen Verfahren auf jeden Farbkanal einzeln angewendet werden. Abschließend kann man die pro Farbkanal entstehenden Fehlerbilder beispielsweise durch pixelweise Maximumsbildung oder pixelweise Addition zu einem gemeinsamen Fehlerbild F_{\max} kombinieren.

[00111] Darüber hinaus können zusätzlich oder stattdessen aus den Gegenstandsbildern bzw. den Referenzbildern Feature-Bilder erstellt werden, die anschließend auf Übereinstimmung geprüft werden. So kann beispielsweise aus einem Gegenstandsbild und/oder einem Referenzbild jeweils ein Kantenbild erzeugt werden; alternativ besteht auch die Möglichkeit, dass aus einem mehrkanaligen Bild als Merkmal eine bestimmte Linearkombination der Farbkanäle gewählt wird und derart ein Bildkanal eines Gegenstandsbilds bzw. Referenzbilds gebildet wird.

[00112] Die einzelnen Bildkanäle können vorteilhaft gebildet werden durch die, insbesondere mehrfache, Durchführung der folgenden Schritte:

[00113] i) die Anwendung eines Filters, insbesondere eines Kantenfilters, auf das Rohbild, und/oder

[00114] ii) die Anwendung von Mischoperationen auf ein mehrkanaliges.

[00115] In diesen Fällen werden die Fehlerbilder jeweils kanalweise bestimmt, wobei für jeden Bildkanal eines oder mehrere der vorstehend genannten Fehlerbilder ermittelt werden können. Die Fehlerbilder aller Kanäle werden durch pixelweise Maximumsbildung oder pixelweise Addition zu einem gemeinsamen Fehlerbild F_{\max} kombiniert.

[00116] Wenn das Verfahren bei gleichbleibendem Referenzbild oder gleichbleibenden Referenzbildern auf mehrere Gegenstände bzw. die zugehörigen Gegenstandsbilder B angewendet werden soll, dann empfiehlt es sich, alle oder zumindest die aufwändigsten Rechenoperationen, die auf die Referenzbilder angewendet werden, vorab nur einmal auszuführen und die betreffenden Ergebnisse, insbesondere ein unteres Referenz-Schrankenbild I_1 , ein oberes Referenz-

Schrankenbild A_1 , ein Referenz-Dilationsbild D_1 und/oder ein Referenz-Erosionsbild E_1 zu speichern und bei Bedarf zu laden.

[00117] So wie in den vorstehend genannten Figuren jeweils auf eine Zeile oder eine Spalte eines zweidimensionalen Bilds Bezug genommen wurde, eignet sich das Verfahren auch für den Vergleich eindimensionaler Daten, insbesondere einzelner Bildzeilen. Darüber hinaus kann das Verfahren auch auf mehrdimensionale Daten, zB 3D-Daten eines Computertomographen, angewendet werden.

[00118] Vorzugsweise haben alle vorstehend genannten Bilder dieselben Abmessungen, dh dieselbe Anzahl von Zeilen und Spalten. Sofern nur einzelne Teilbereiche der Bilder für die dargestellten Berechnungsschritte verwendet werden, sind diese Teilbereiche der Bilder vorzugsweise gleich groß.

[00119] Die Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens gegenüber dem Stand der Technik sind aus Fig. 11 ersichtlich. Dargestellt sind die Beträge, um die das Gegenstandsbild B das Referenz-Minimalbild U unter bzw. das Referenz-Maximalbild V überschreitet. Hier wird klar, dass die geringe Verschiebung des Gegenstandsbilds B zum Referenzbild R zur Detektion erheblicher Bildfehler X führt, denen kein Fehler des zu untersuchenden Gegenstands zu Grunde liegt.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Prüfen eines Gegenstands, wobei ein Gegenstandsbild (B) erstellt wird, das eine Abbildung des Gegenstands enthält,
 - a) wobei zumindest ein Referenzbild (R ; R_1, \dots, R_n) vorgegeben wird, das ein Abbild enthält, das mit dem Abbild des Gegenstands auf Übereinstimmung zu prüfen ist,
 - b) wobei ein Referenz-Maximalbild (V) und/oder ein Referenz-Minimalbild (U) auf Grundlage des zumindest einen Referenzbilds (R), insbesondere durch pixelweise Bildung des Minimums und/oder Maximums einer Mehrzahl von Referenzbildern (R_1, \dots, R_n) gebildet wird, wobei für den Fall, dass nur ein Referenzbild (R) zur Verfügung steht, das Referenz-Maximalbild (V) und/oder das Referenz-Minimalbild (U) dem Referenzbild (R) gleichgesetzt werden/wird,
dadurch gekennzeichnet,
 - d) dass ein oberes Referenz-Glättungsbild (H_1) durch Anwendung eines Referenz-Glättungsfilters (g_1) auf das Referenz-Maximalbild (V) gebildet wird, und/oder wobei ein unteres Referenz-Glättungsbild (G_1) durch Anwendung des Referenz-Glättungsfilters (g_1) auf das Referenz-Minimalbild (U) gebildet wird,
 - e) dass zumindest eines der folgenden Bilder erstellt wird:
 - ein oberes Referenz-Schrankenbild (A_1) als pixelweises Maximum des Referenz-Maximalbilds (V) und des oberen Referenz-Glättungsbilds (H_1),
 - ein unteres Referenz-Schrankenbild (I_1) als pixelweises Minimum des Referenz-Minimalbilds (U) und des unteren Referenz-Glättungsbilds (G_1),
 - ein Referenz-Dilationsbild (D_1) durch Anwenden eines Referenz-Dilationsfilters (d_1) auf das obere Referenz-Schrankenbild (A_1),
 - ein Referenz-Erosionsbild (E_1) durch Anwenden eines Referenz-Erosionsfilters (e_1) auf das untere Referenz-Schrankenbild (I_1),
 - f) dass auf Grundlage des Gegenstandsbilds (B) zumindest eines der folgenden den Gegenstand charakterisierenden Bilder erstellt wird:
 - ein oberes Gegenstands-Schrankenbild (A_2), das festgelegt wird
 - als dem Gegenstandsbild (B) identisch, oder
 - als pixelweises Maximum des Gegenstandsbilds (B) und eines Gegenstands-Glättungsbilds (G_2), wobei das Gegenstands-Glättungsbild (G_2) durch Anwendung eines Gegenstands-Glättungsfilters (g_2) auf das Gegenstandsbild (B) gebildet wird,
 - ein unteres Gegenstands-Schrankenbild (I_2), das festgelegt wird,
 - als dem Gegenstandsbild (B) identisch, oder
 - als pixelweises Minimum des Gegenstandsbilds (B) und des Gegenstands-Glättungsbilds (G_2), wobei das Gegenstands-Glättungsbild (G_2) durch Anwendung eines Gegenstands-Glättungsfilters (g_2) auf das Gegenstandsbild (B) gebildet wird,
 - ein Gegenstands-Dilationsbild (D_2) durch Anwenden eines Gegenstands-Dilationsfilters (d_2) auf das obere Gegenstands-Schrankenbild (A_2),
 - ein Gegenstands-Erosionsbild (E_2) durch Anwenden eines Gegenstands-Erosionsfilters (e_2) auf das untere Gegenstands-Schrankenbild (I_2),
 - g) dass auf Grundlage der in den Schritten e) und f) ermittelten Bilder zumindest eines der folgenden Fehlerbilder (F_1, \dots, F_4) ermittelt wird:
 - ein erstes Fehlerbild ($F_1=I_1-D_2$) durch pixelweise Subtraktion des Gegenstands-Dilationsbilds (D_2) vom unteren Referenz-Schrankenbild (I_1),
 - ein zweites Fehlerbild ($F_2=E_2-A_1$) durch pixelweise Subtraktion des oberen Referenz-Schrankenbilds (A_1) vom Gegenstands-Erosionsbild (E_2),
 - ein drittes Fehlerbild ($F_3=I_2-D_1$) durch pixelweise Subtraktion des Referenz-Dilationsbilds (D_1) vom Gegenstands-Minimumbild (I_2),
 - ein viertes Fehlerbild ($F_4=E_1-A_2$) durch pixelweise Subtraktion des Gegenstands-Maximumbilds (A_2) vom Referenz-Erosionsbild (E_1), und

- h) dass Bereiche des Gegenstands als potentiell fehlerhaft markiert werden, die auf Bildbereiche zumindest eines Fehlerbilds (F_1, \dots, F_4) abgebildet werden, in denen die betreffenden Pixelfehlerwerte positive Werte oder einen positiven Schwellenwert überschreitende Werte aufweisen.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei in Schritt g) zumindest zwei der Fehlerbilder (F_1, \dots, F_4) gebildet werden und ein Maximum-Fehlerbild (F_{\max}) durch pixelweise Maximumbildung der in Schritt g) erstellten Fehlerbilder (F_1, \dots, F_4) ermittelt wird, und wobei Bereiche des Gegenstands als potentiell fehlerhaft markiert werden, die auf Bildbereiche des Maximum-Fehlerbilds (F_{\max}) abgebildet werden, in denen die betreffenden Pixelfehlerwerte positive Werte oder einen positiven Schwellenwert überschreitende Werte aufweisen.
 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei für den Vergleich ausschließlich Teilbereiche des Gegenstandsbilds (B) herangezogen werden, die sich insbesondere an vorgegebenen Positionen des Gegenstandsbilds (B) befinden.
 4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die ein oder mehrkanaligen Referenzbilder (R_1, \dots, R_n) und das ein oder mehrkanalige Gegenstandsbild (B) gebildet wird, indem
 - ein Rohbild des Gegenstands ermittelt wird und jeder Bildkanal durch Anwendung einer oder mehrerer der folgenden Operationen auf das Rohbild erstellt wird:
 - i) durch Anwendung von Filtern, insbesondere eines Kantenfilters, auf das Rohbild, und/oder
 - ii) durch Anwendung von Bildkanal-Mischoperationen auf ein mehrkanaliges Rohbild zur Erstellung eines einkanaligen Bildes.
 5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei
 - die Referenzbilder (R_1, \dots, R_n) und das Gegenstandsbild (B) mehrere Kanäle (m) enthalten und für jeden Bildkanal (i) einzeln zumindest eines der folgenden Bilder gemäß Schritt d) und e) aus Anspruch 1 erstellt wird,
 - ein oberes Referenz-Schrankenbild ($A_{1,i}$),
 - ein unteres Referenz-Schrankenbild ($I_{1,i}$),
 - ein Referenz-Dilationsbild ($D_{1,i}$),
 - ein Referenz-Erosionsbild ($E_{1,i}$),
 - das Gegenstandsbild (B) mehrere Kanäle(m) enthält, und für jeden Bildkanal (i) gemäß Schritt f) aus Anspruch 1 zumindest eines der folgenden Bilder erstellt wird:
 - ein oberes Gegenstands-Schrankenbild ($A_{2,i}$),
 - ein unteres Gegenstands-Schrankenbild ($I_{2,i}$),
 - ein Gegenstands-Dilationsbild ($D_{2,i}$),
 - ein Gegenstands-Erosionsbild ($E_{2,i}$),
 - wobei für zumindest zwei Kanäle, insbesondere für alle Kanäle, zumindest ein Fehlerbild ($F_{1,1}, \dots, F_{4,1}; \dots; F_{1,m}, \dots, F_{4,m}$) gemäß Schritt g) erstellt wird, und ein Maximum-Fehlerbild (F_{\max}) durch pixelweise Maximumbildung der so erstellten Fehlerbilder ($F_{1,1}, \dots, F_{4,1}; \dots; F_{1,m}, \dots, F_{4,m}$) ermittelt wird.
 6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei bei der Bildung der Referenz- und/oder Gegenstands-Glättungsbilder (G_1, G_2, H_1, H_2) die Umgebungen und/oder die Gewichte der jeweiligen Glättungsfiler (g_1, g_2) aufgrund von Kontextwissen so gewählt werden, dass das oder die Referenz-Glättungsbild(er) (G_1, H_1) und das oder die Gegenstands-Glättungsbild(er) (G_2, H_2), dieselbe Bildschärfe aufweisen.
 7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei für den Fall, dass mehrere Fehlerbilder (F_1, \dots, F_4) gebildet werden, die bei der Erstellung von Referenz- und/oder Gegenstands-Erosionsbildern (E_1, E_2) und/oder Referenz- und/oder Gegenstands-Dilationsbildern (D_1, D_2) verwendeten Filter jeweils dieselbe Pixelumgebung aufweisen.

8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,
- wobei eine Vielzahl von oberen Referenz-Glättungsbildern ($H_{1,1}, \dots, H_{1,i}$) durch Anwendung von Referenz-Glättungsfilttern ($g_{1,1}, \dots, g_{1,i}$) mit unterschiedlicher Glättungsstärke auf das Referenz-Maximalbild (V) erstellt wird und das obere Referenz-Schrankenbild (A_1) als pixelweises Maximum des Referenz-Maximalbilds (V) und aller oberen Referenz-Glättungsbilder ($H_{1,1}, \dots, H_{1,i}$) gebildet wird, und/oder
 - wobei eine Vielzahl von unteren Referenz-Glättungsbildern ($G_{1,1}, \dots, G_{1,i}$) durch Anwendung von Referenz-Glättungsfilttern ($g_{1,1}, \dots, g_{1,i}$) mit unterschiedlicher Glättungsstärke auf das Referenz-Minimalbild (U) erstellt wird und das untere Referenz-Schrankenbild (I_1) als pixelweises Minimum des Referenz-Minimalbilds (U) und aller unteren Referenz-Glättungsbilder ($G_{1,1}, \dots, G_{1,i}$) gebildet wird.

Hierzu 8 Blatt Zeichnungen

1/8

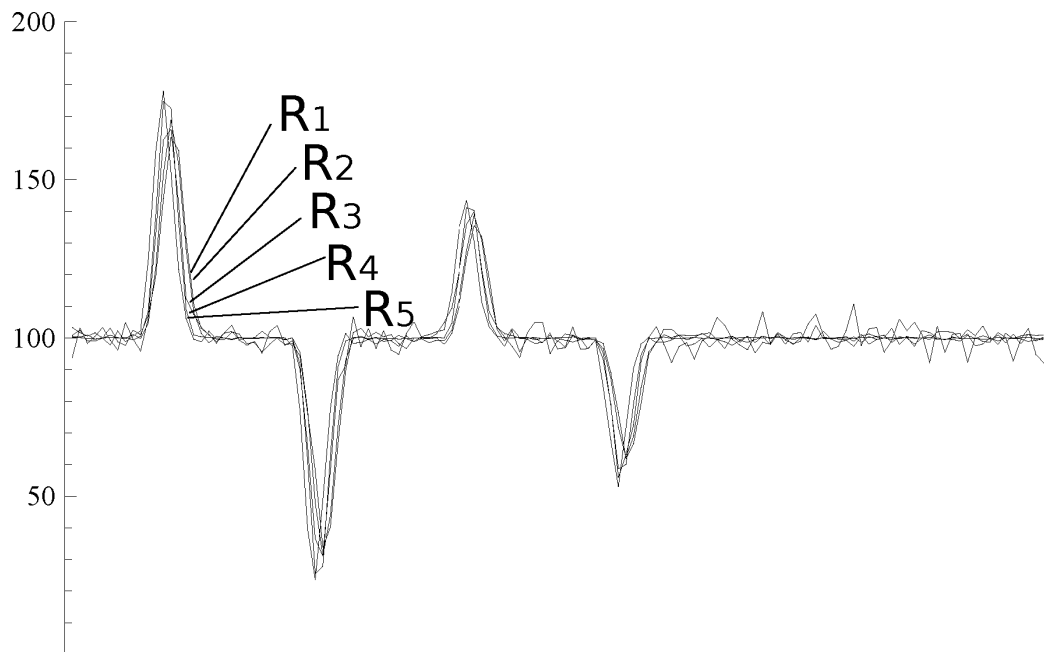


Fig. 1a

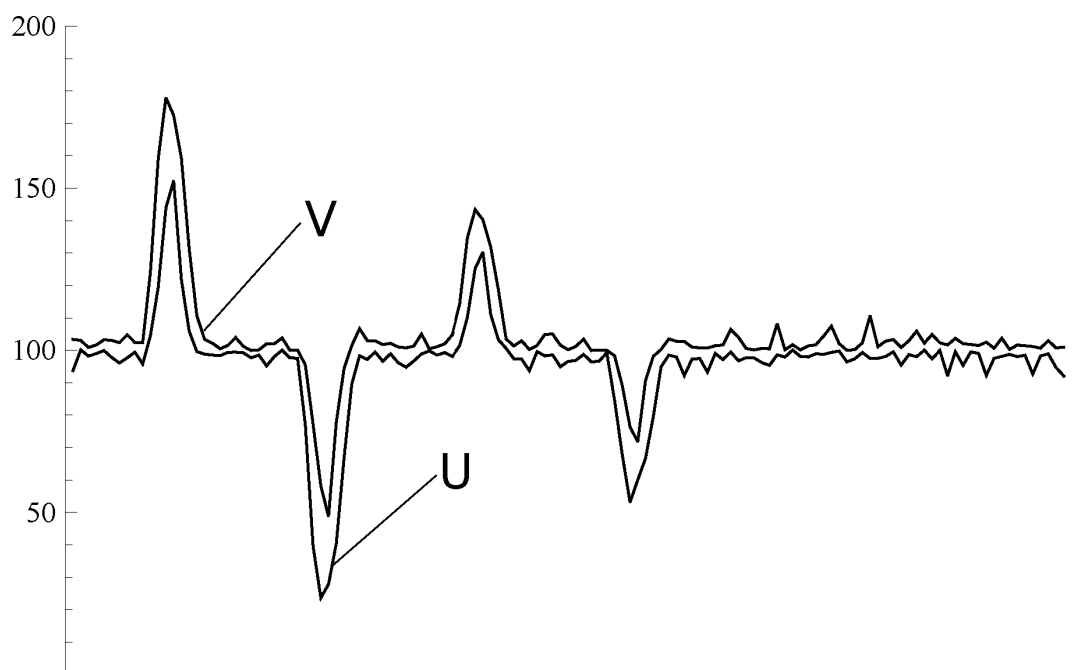


Fig. 1b

2/8

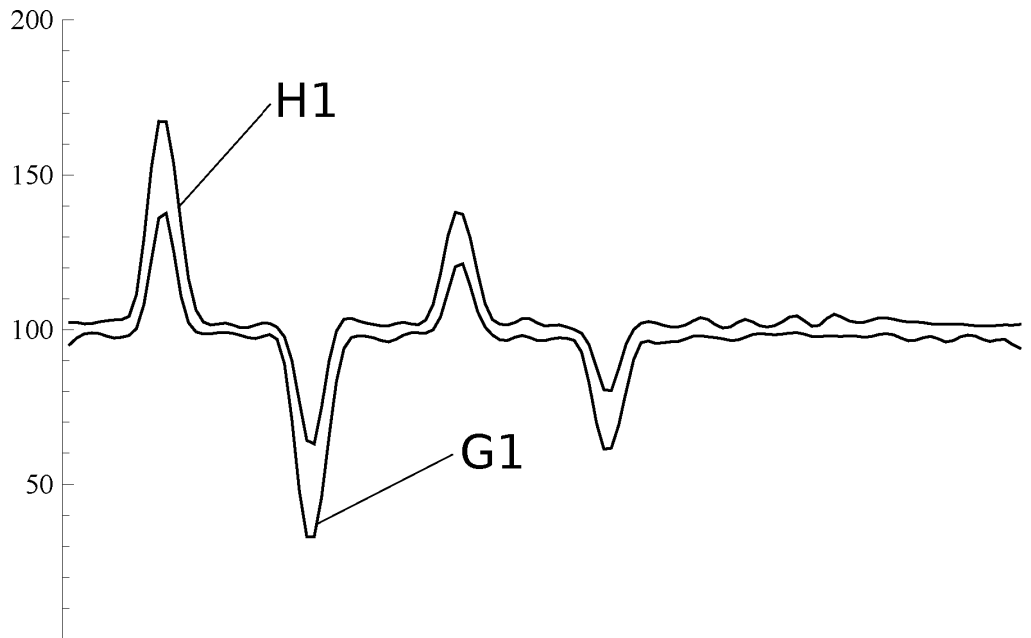


Fig. 2

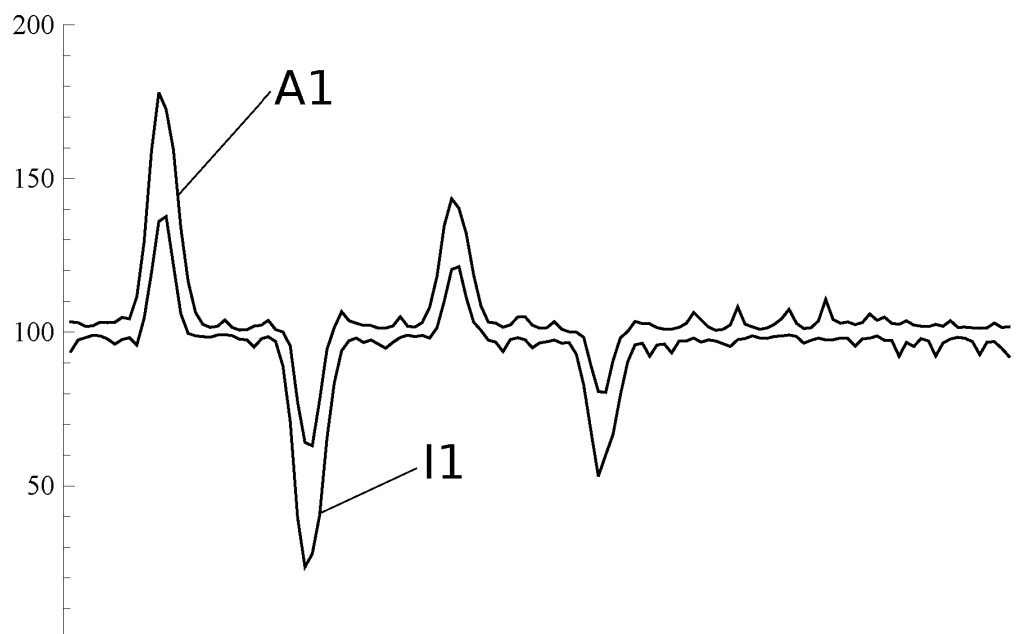


Fig. 3a

3/8

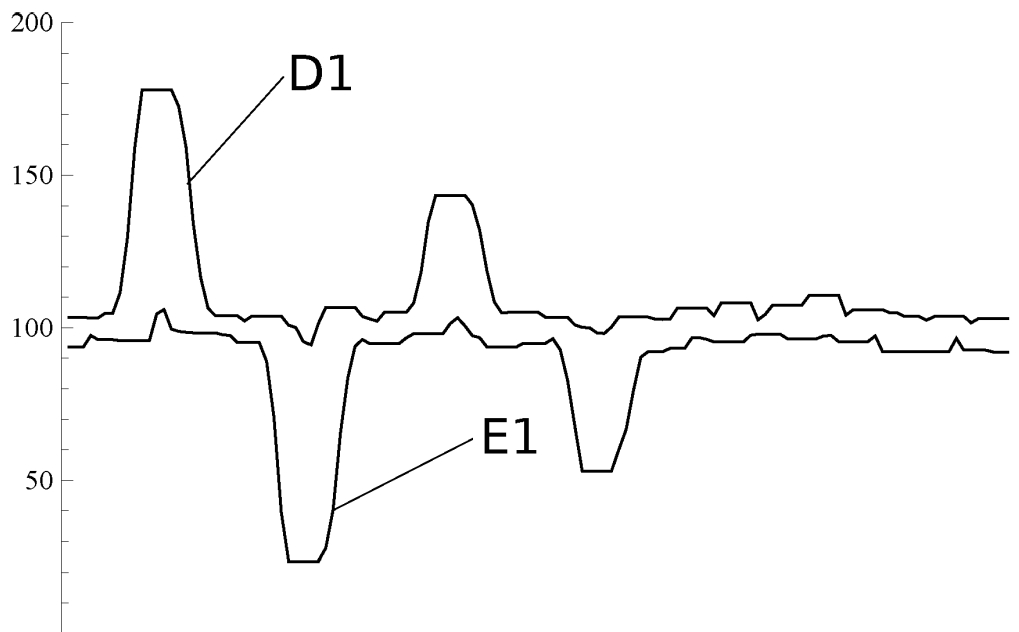


Fig. 3b

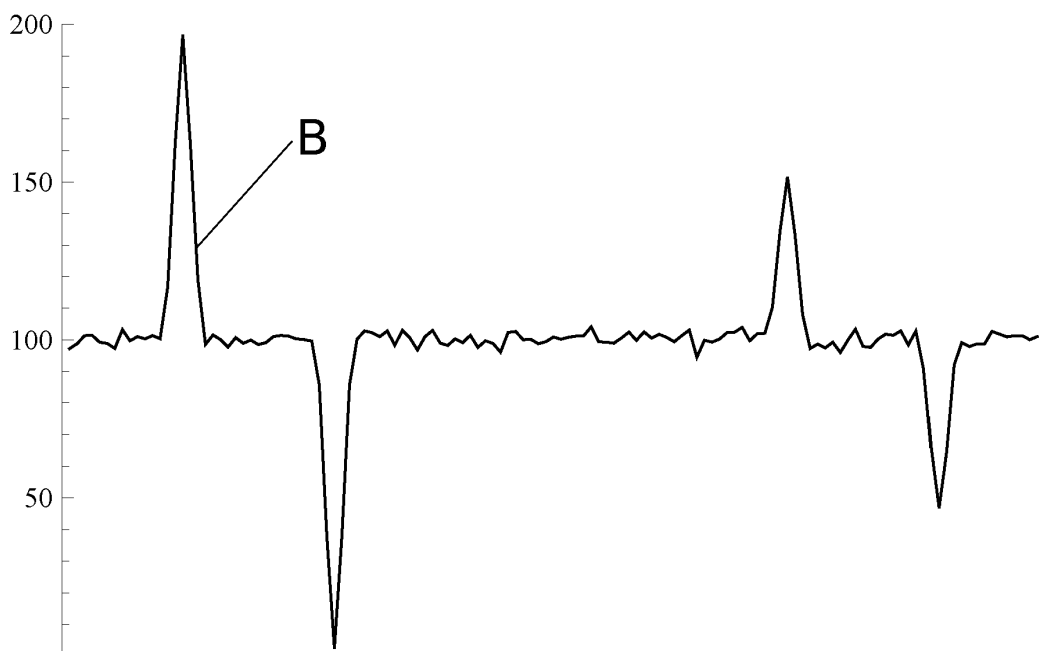


Fig. 4a

4/8

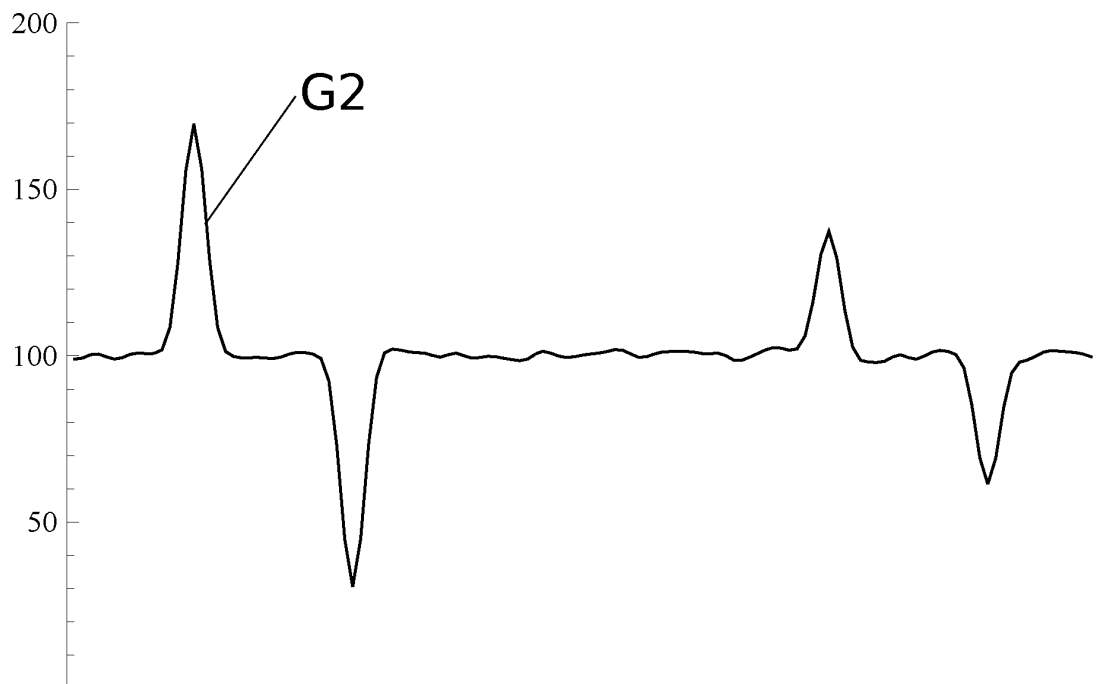


Fig. 4b

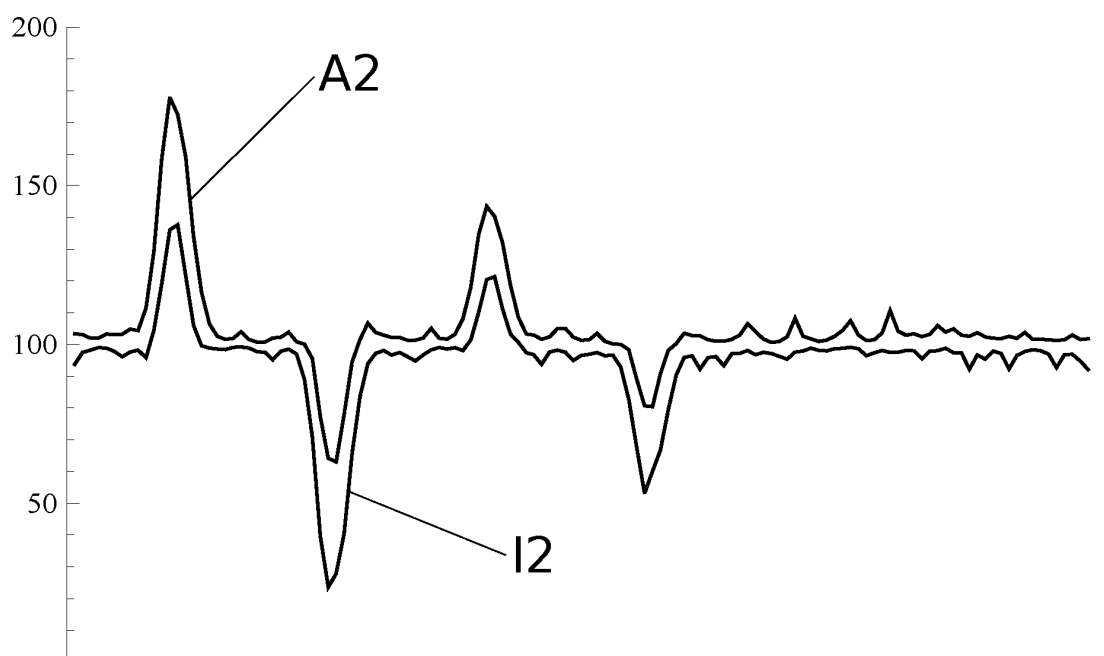


Fig. 5a

5/8

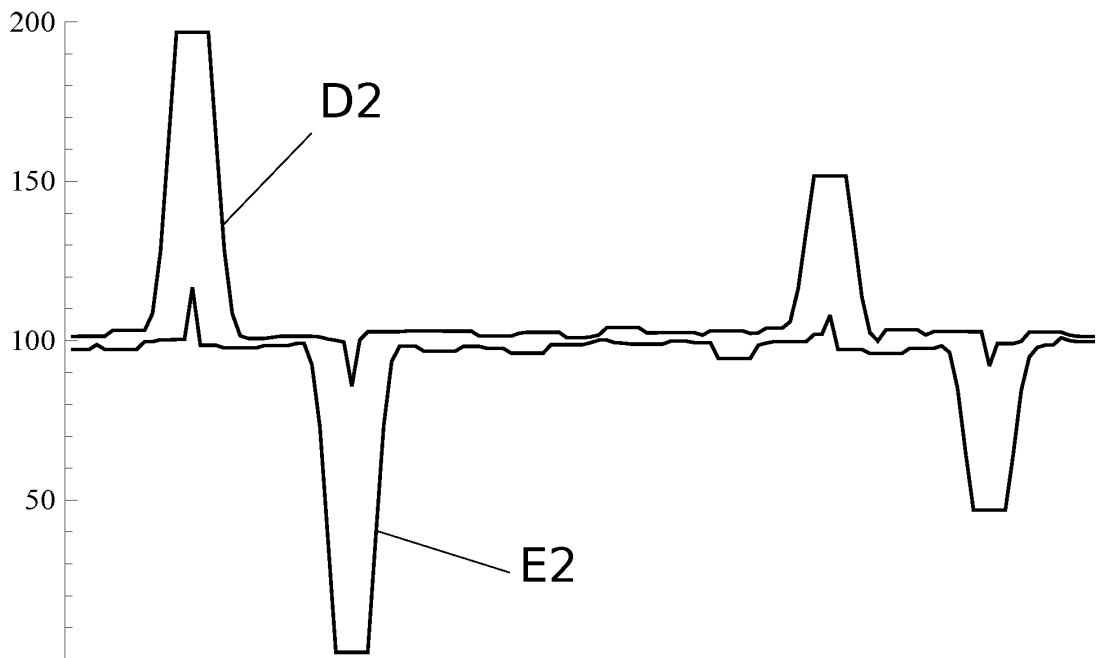


Fig. 5b

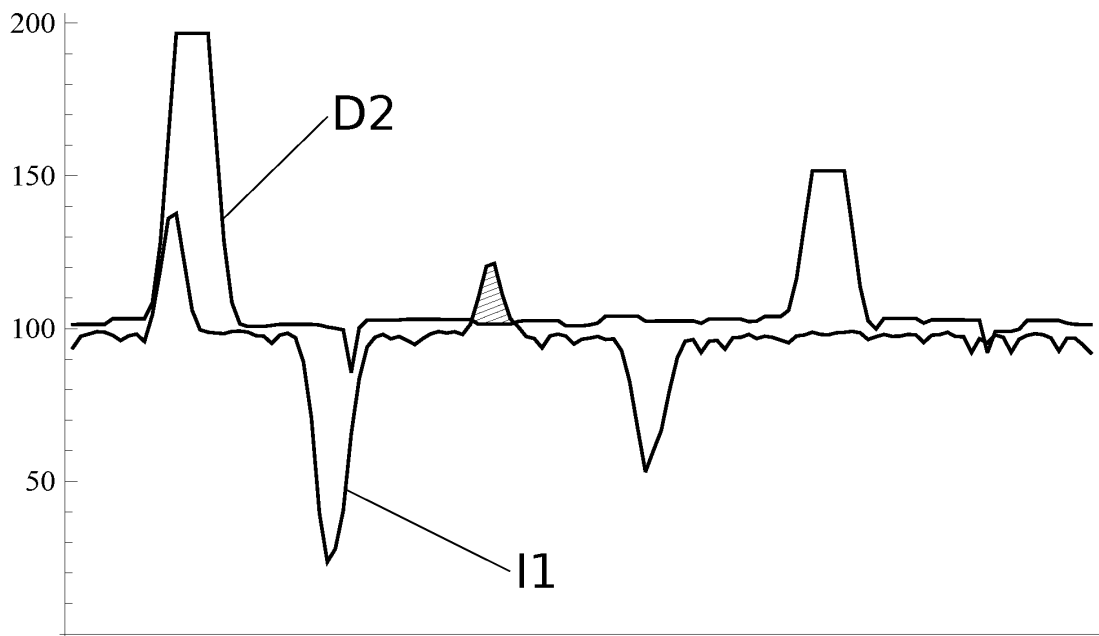


Fig. 6

6/8

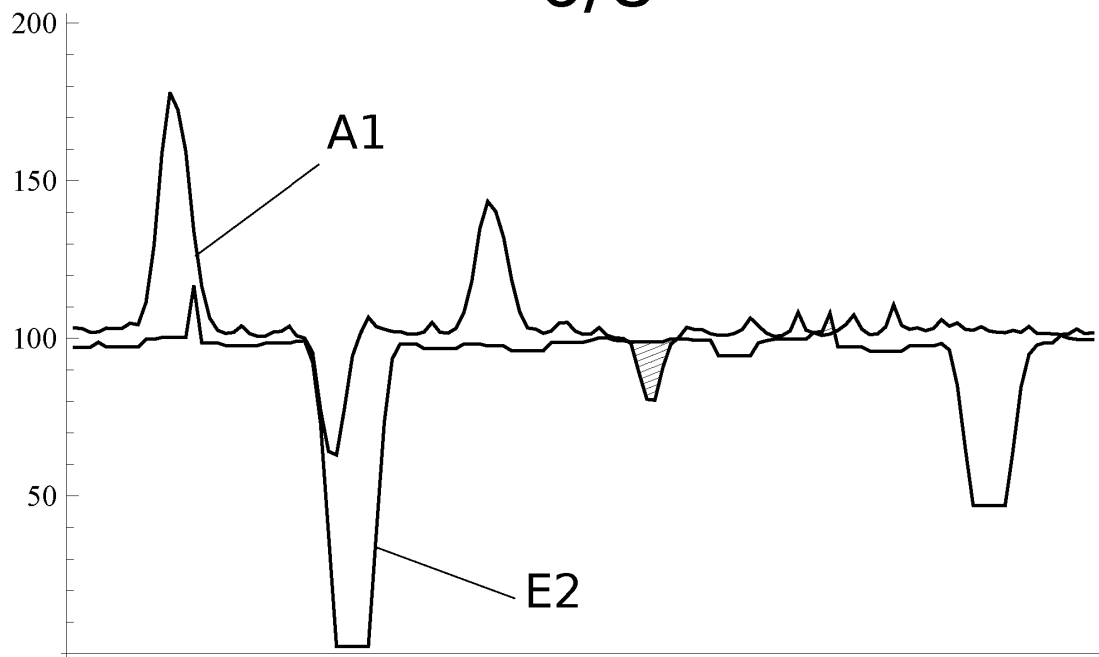


Fig. 7

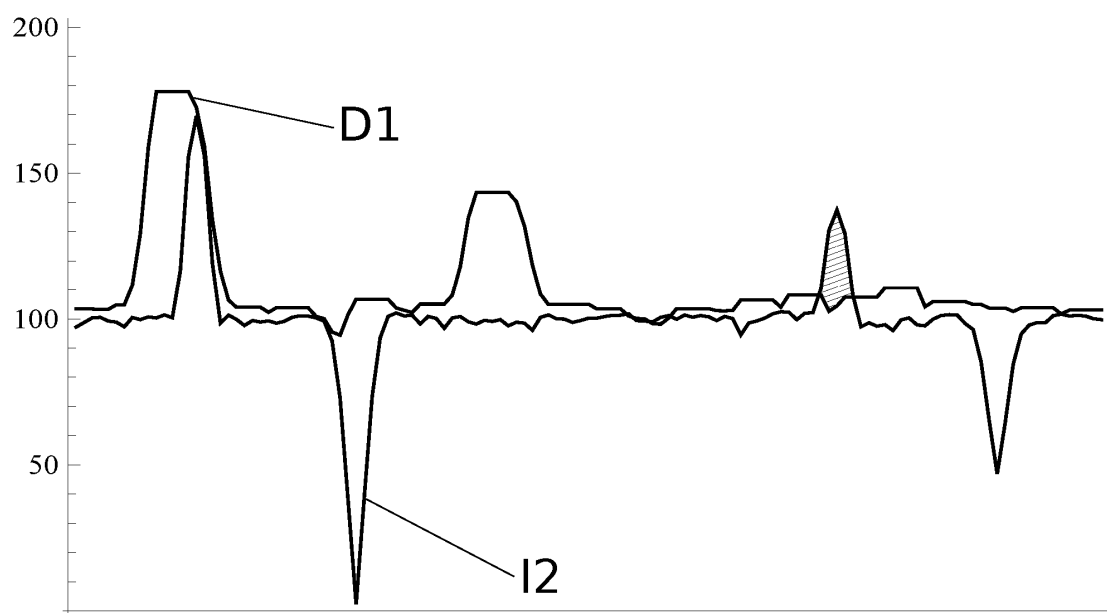


Fig. 8

7/8

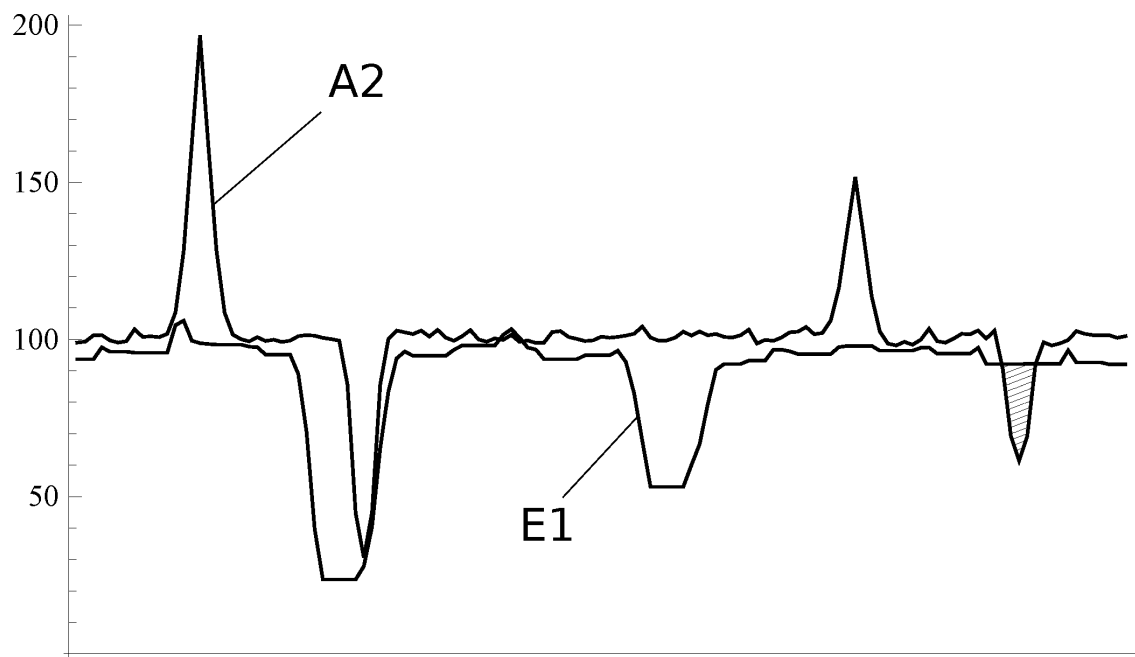


Fig. 9

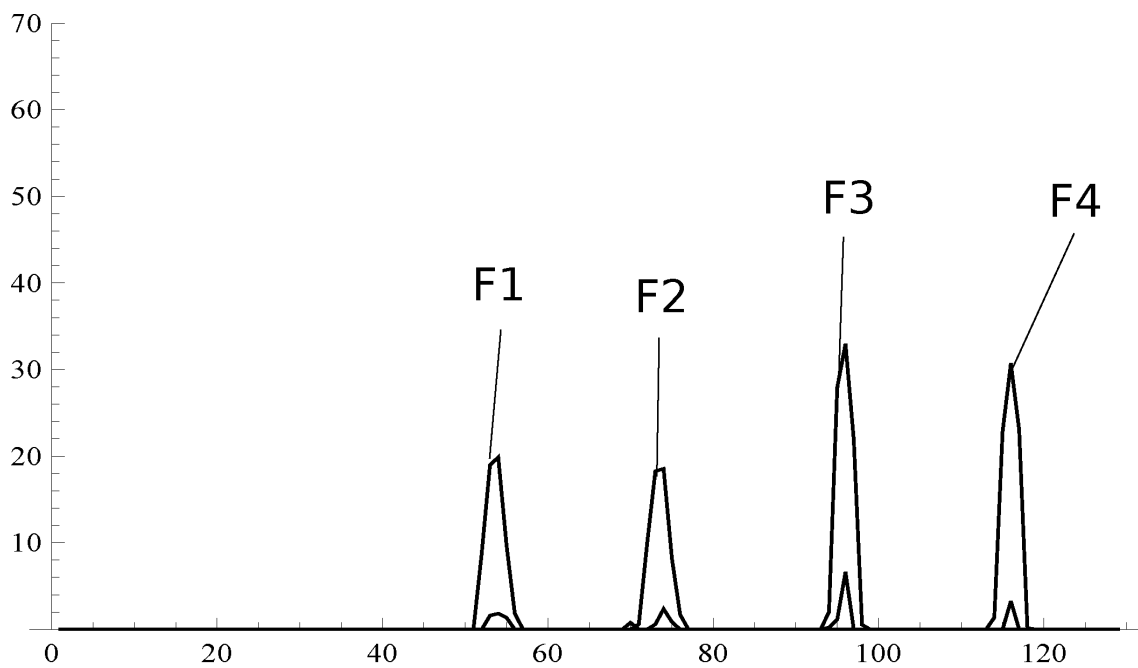


Fig. 10

8/8

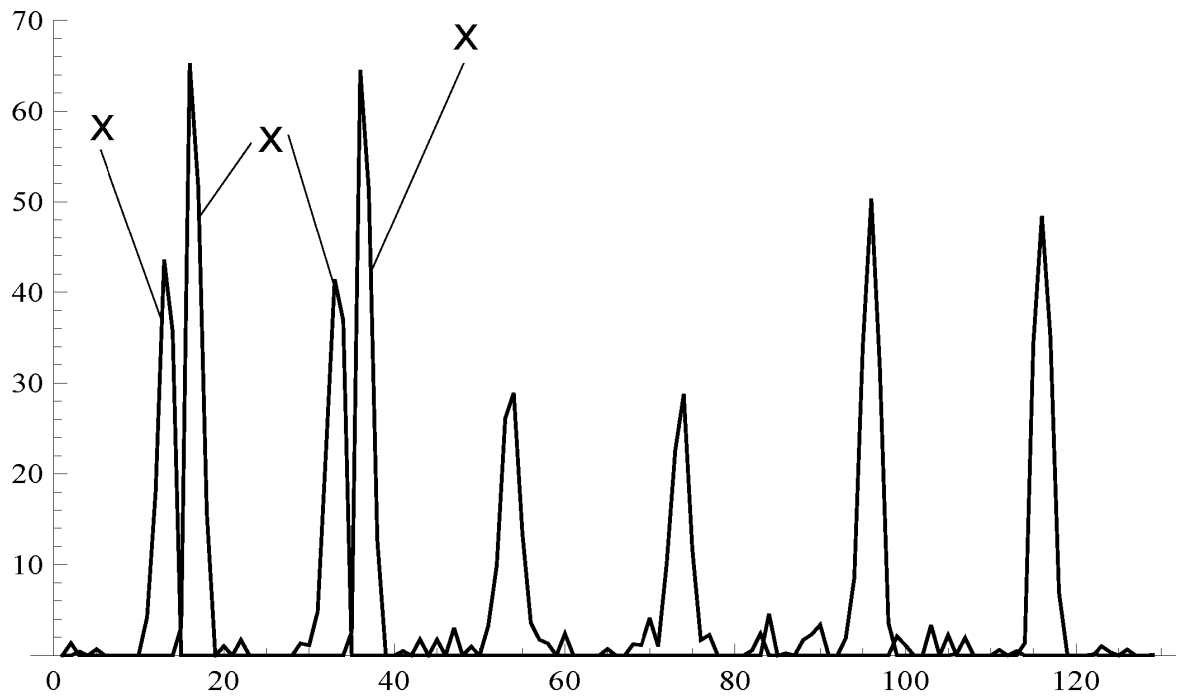


Fig. 11