

14 Elementare Bildverarbeitung an einem Beispiel aus der Fertigungsautomatisierung

Die **digitale Bildverarbeitung** (siehe auch Kapitel 1 und 6) ist ein relativ junger Zweig der Informatik, der sich mit der Automatisierung der Bildauswertung beschäftigt. Dabei ist beim heutigen Stand der Technik die Analyse einfacher Szenen, wie sie z.B. im Bereich der **Fertigungsautomatisierung** auftreten, vollautomatisch und in Echtzeit möglich. Im Gegensatz dazu sind komplexe **Computer-Vision**-Aufgaben – wie z.B. die vollständige Interpretation von Bildern der realen Umwelt – erst ansatzweise gelöst und derzeit noch Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten.

Im folgenden werden am Beispiel der Fertigungsautomatisierung grundlegende Methoden der Bildverarbeitung vorgestellt, wie sie bei den hier typischen Aufgabenstellungen auftreten. Die Rolle der Bildverarbeitung kann bei der Fertigungsautomatisierung grob in die folgenden drei Bereiche eingeteilt werden:

1.) Qualitätssicherung

Mit Hilfe visuell erfassbarer Objektmerkmale können z.B. die folgenden photometrischen und geometrischen Auswertungen vorgenommen werden:

- Oberflächeninspektion (z.B. Welligkeit, Kratzer, Risse, Löcher, Farb- und Texturfehler);
- Form- und Maßprüfung (z.B. Längen, Abstände, Durchmesser, Winkel, Übereinstimmung mit vorgegebenen Referenzformen);
- Vollständigkeitsüberprüfung (sind alle geforderten Einzelteile am richtigen Ort in der richtigen Orientierung vorhanden?).

In Abhängigkeit von der Häufigkeit und Schwere der erkannten Fehlstellen können Objekte aus dem Fertigungsprozess entfernt und "verschrottet" oder einer Nachbearbeitung zugeführt werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden an die Produktdatenhaltung weitergeleitet.

2.) Materialflusskontrolle und –steuerung

An allen kritischen Stellen eines Produktionsprozesses können Bildverarbeitungssysteme überprüfen, ob das *richtige* Objekt zur *richtigen* Zeit am *richtigen* Ort in ausreichender Stückzahl vorhanden ist. Neben der Nachschubsteuerung können dabei beim Auftreten von Fehlern die falschen Teile entfernt werden; bei gravierenden Fällen wird der Fertigungsprozess angehalten.

3.) Fertigung und Verpackung

Ein Bildverarbeitungssystem erkennt die durch ein Transportsystem angelieferten Objekte und ermittelt ihre Position und Orientierung sowie ihre Abmessungen. Mit Hilfe dieser Informationen kann ein Handhabungs-Roboter die Objekte gezielt ansteuern und greifen. Die einzelnen Objekte können dann sichtgesteuert verpackt, weiter bearbeitet oder zu komplexeren Objekten zusammengesetzt werden.

In den folgenden Teilkapiteln wird kurz geschildert, wie die in einem Bild enthaltenen (einfachen) Objekte automatisch ermittelt, und wie einfache geometrische Objektmerkmale (z.B. Objektgröße, Position und Orientierung) bestimmt werden können. Da diese Angaben sich auf das Bildkoordinatensystem mit der Einheit "Pixel" beziehen, müssen die Angaben anschließend in das Weltkoordinatensystem umgerechnet werden. Im Weltkoordinatensystem kann dann z.B. ein Handhabungs-Roboter die Objekte greifen; außerdem sind die Abmessungen der Objekte nun in Millimetern bekannt. Abschließend werden einfache Verfahren vorgestellt, mit denen Objektdefekte wie Löcher, Risse und "Nasen" ermittelt und vermessen werden können.

14.1 Einfache flächenorientierte Segmentierung

Bei der Fertigungsautomatisierung wird die Szene (z.B. Fließband) mit einer Kamera aufgenommen und danach werden die Bildmatrizen auf einem angeschlossenen Rechner mit Hilfe eines Soft- oder Hardware-Bildverarbeitungssystems analysiert, um die interessierenden

Objekte in den Bildern automatisch zu ermitteln. Dazu werden die Bilder in ihre relevanten Bestandteile, die **Regionen** zerlegt (segmentiert). Diese Regionen sollen maximal sein, d.h. bestimmte Regionen sollen möglichst den einzelnen Objekten oder zumindest unterschiedlich eingefärbten Objektteilen entsprechen. Andere Regionen kennzeichnen den Hintergrund des Bildes.

Für diese sogenannte **Bildsegmentierung** gibt es zwei duale Vorgehensweisen:

- die **konturorientierte Segmentierung**, die die Regionen über ihre Konturen, d.h. ihre Grenzlinien zu anderen Regionen ermittelt, und
- die **flächenorientierte Segmentierung**, die die Regionen über ihr „Inneres“, d.h. die Menge aller Bildpunkte, die zu der jeweiligen Region gehören, ermittelt.

Im folgenden wird nur auf die flächenorientierte Segmentierung eingegangen. Bei dieser Methode werden (vereinfacht ausgedrückt) Zusammenhangskomponenten gebildet, die bezüglich irgend eines Merkmals (z.B. Grauwert) homogen, d.h. einheitlich sind. Diese Zusammenhangskomponenten bilden dann die Regionen des Bildes.

Im weiteren wird vorausgesetzt, dass die zu segmentierenden Objekte sich in den Bildern deutlich vom Hintergrund abheben: z.B. helle Objekte auf dunklem Fließband. In diesem Fall kann eine flächenorientierte Segmentierung wie folgt besonders einfach durchgeführt werden:

- zunächst wird mit Hilfe einer Binarisierung zwischen den Objekt- und den Hintergrundpixeln unterschieden (siehe Kapitel 14.1.1),
- anschließend werden die Objektpixel zu Zusammenhangskomponenten zusammengefasst, die dann den einzelnen Objekten entsprechen; (siehe Kapitel 14.1.2).

14.1.1 Binarisierung

Die **Binarisierung** stellt eine Verallgemeinerung der Äquidensitenbildung aus Kapitel 6.1.1.3 dar. Bei einer Binarisierung wird ein Eingabebild B mit Grauwerten $g(i,j)$ mit Hilfe eines Schwellwertes $schwelle$ in ein binäres Ausgabebild (**Binärbild**) B' mit Grauwerten $g'(i,j)$ überführt, wobei $g'(i,j)$ nur die beiden Werte g_1' bzw. g_2' annehmen kann:

$$g'(i,j) = \begin{cases} g_1' & \text{falls } g(i,j) \leq \text{schwelle} \\ g_2' & \text{falls } g(i,j) > \text{schwelle} \end{cases} \quad (14-1)$$

(Häufig wird g_1' als Schwarz und g_2' als Weiß gewählt).

(Die Binarisierung gehört genau wie die lineare Grauwerttransformation (siehe Kapitel 6.1.1.1) zu den **Punktoperatoren**, bei denen dieselbe Berechnungsvorschrift ohne Berücksichtigung von Nachbarpixeln auf jeden Bildpunkt angewendet wird.)

Bei günstiger Wahl des Schwellwertes $schwelle$ haben im vorliegenden Fall nach der Binarisierung alle hellen Objektpixel den Wert g_2' und alle dunklen Hintergrundpixel den Wert g_1' . Ein geeigneter Schwellwert kann z.B. mit Hilfe des Histogrammes ermittelt werden.

Abbildung 14.1 zeigt links ein Bild mit mehreren hellen Objekten. In der Mitte ist das zugehörige Histogramm dargestellt. Bei derartigen **bimodalen Histogrammen** liegt ein günstiger Binarisierungs-Schwellwert zwischen den beiden „Bergen“ des Histogrammes.

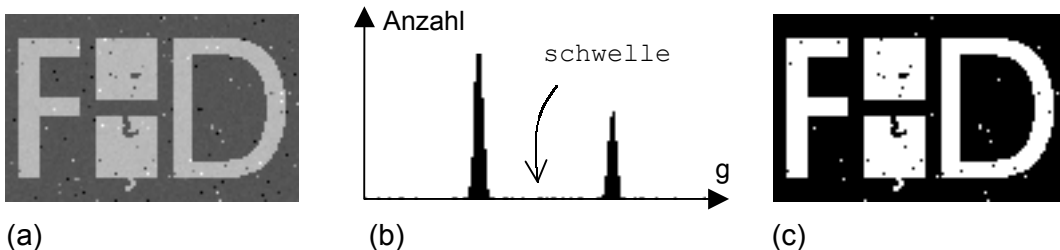


Abb. 14.1: Beispiel für eine Binarisierung:
 (a) Original-Grauwertbild B ;
 (b) Zugehöriges Histogramm mit Schwellwert $schwelle$;
 (c) Ergebnisbild B' nach der Binarisierung.

Das Ergebnis der Binarisierung mit dem in der Mitte eingezeichneten Schwellwert $schwelle$ ist auf der rechten Seite von Abbildung 14.1 gezeigt.

14.1.2 Markierung von Zusammenhangskomponenten (ZHK-Markierung)

Im nächsten Verarbeitungsschritt müssen die als Objektpixel gekennzeichneten Bildpunkte mit dem Grauwert g_2' zusammengefasst werden.

Eine zusammenhängende Menge von Bildpunkten, bei der sich jeder Punkt mit jedem anderen Punkt der Menge durch einen Pfad verbinden lässt, der nur aus benachbarten Bildpunkten der Menge besteht, wird als **Zusammenhangskomponente (ZHK)** bezeichnet. Entsprechend der beiden Nachbarschaftsbeziehungen (siehe Kapitel 6.1.2) unterscheidet man zwischen N4- und N8-Zusammenhangskomponenten.

Zur Ermittlung der Zusammenhangskomponenten kann z.B. ein **sequentielles Markierungsverfahren** eingesetzt werden, das das Binärbild B' in zwei Durchgängen in ein Ergebnisbild E mit unterschiedlich markierten Zusammenhangskomponenten überführt.

1.) Erster Durchgang: vorläufige Markierung

Das Binärbild B' wird systematisch von links/oben nach rechts/unten durchlaufen. Dabei erhält jedes (schwarze) Hintergrundpixel die Marke 0, und zu jedem (weißen) Objektpixel wird untersucht, ob in dem bereits abgearbeiteten Teil seiner N4- bzw. N8-Nachbarschaft (siehe Abbildung 14.2) ein oder mehrere bereits vorläufig markierte Objektpixel liegen.

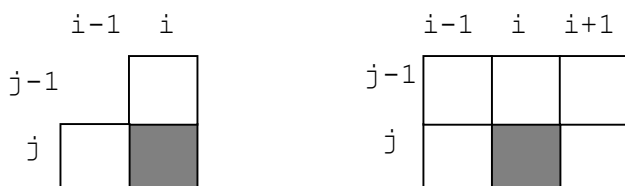


Abb. 14.2: Nachbarn eines aktuell untersuchten (dunkel eingefärbten) Objektpixels, die beim ersten Durchgang einer N4-Markierung (links) bzw. einer N8-Markierung (rechts) untersucht werden.

Bei der Auswertung der in Abbildung 14.2 gezeigten Nachbarn eines aktuell zu untersuchenden Pixels können folgende Fälle auftreten:

- falls es kein benachbartes Objektpixel gibt, so erhält das betrachtete Objektpixel eine neue vorläufige Marke, die um 1 höher, als die zuletzt vergebene vorläufige Marke ist. (das erste im Bild auftretende Objektpixel erhält also die Marke 1);
- falls es genau ein bereits vorläufig markiertes Objektpixel gibt, so erhält das aktuelle Objektpixel dieselbe vorläufige Marke;
- falls es mehrere bereits vorläufig markierte Objektpixel gibt, die alle dieselbe Marke besitzen, so erhält das aktuelle Objektpixel diese Marke als vorläufige Marke;
- falls die benachbarten Objektpixel unterschiedliche vorläufige Marken besitzen, so erhält das aktuelle Objektpixel eine dieser Marken. Zusätzlich werden alle an dieser Stelle auftretenden Marken als „äquivalent“ gekennzeichnet.

2.) Zweiter Durchgang: endgültige Markierung

Das vorläufig markierte Bild wird wieder systematisch von links/oben nach rechts/unten durchlaufen, und zu jedem Objektpixel wird ermittelt, welche Marken zur Marke dieses Pixels äquivalent sind. Die kleinste dieser Marken wird als neue Marke eingetragen.

Die Folge der so vergebenen Marken weist in der Regel Lücken auf. Deshalb werden die Marken abschließend durch Umbenennung „zusammengeschoben“, so dass die lückenlose Folge 1, 2, 3 ... der endgültigen Marken der Objektpixel entsteht. In Abbildung 14.3 ist das Ergebnisbild E der N8-Markierung für das Binärbild B' aus Abbildung 14.1 gezeigt, aus dem zuvor die kleinen Rauschstörungen entfernt wurden; siehe Kapitel 14.4.

Mit demselben Verfahren lässt sich auch auf einfache Weise feststellen, ob die abgebildeten Objekte Löcher (z.B. Bohrungen oder Materialfehler) aufweisen. Dazu wird das Binärbild zuerst invertiert, wodurch der Hintergrund heller als die Objekte wird. Danach wird wie oben beschrieben eine ZHK-Markierung für die hellen Flächen (jetzt der Hintergrund!) durchgeführt. Dabei ist zu beachten, dass nun die entgegengesetzte Nachbarschaftsbeziehung wie zur Markierung der ursprünglichen Objekte verwendet werden muss, da sonst topologische Widersprüche auftreten können. Falls der Hintergrund nach der endgültigen Markierung aus mehr als einer Marke (mit der Nummer 1) besteht, so hatte mindestens eines der im Bild auftretenden Objekte ein Loch. (Der Einfachheit halber wird vorausgesetzt, dass die Objekte sich nicht überlappen und jedes Objekt an höchstens einer Stelle den Bildrand berührt).

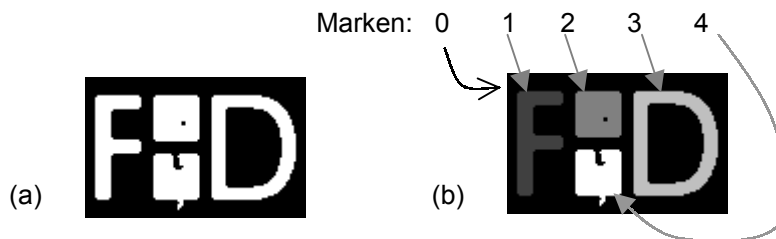


Abb. 14.3: Beispiel für eine N8-Markierung:

- (a) Binärbild B' aus Abbildung 14.1 (nach Elimination kleiner Störungen);
- (b) Ergebnisbild E der N8-Markierung für die Objektpixel mit den endgültigen Marken 0 (Hintergrund) und 1 bis 4 für die vier im Bild enthaltenen Objekte.

14.2 Ermittlung elementarer geometrischer Merkmale zur Größen- und Positionsbestimmung

Wenn die Zusammenhangskomponenten eines Bildes ermittelt sind, so können im nächsten Schritt einfache **geometrische Merkmale** der ZHKs, wie z.B. ihre Größe, berechnet werden. Bereits anhand dieses einen Merkmals können anschließend in der Regel die interessierenden Objekte beispielsweise von Störungen (Rauschen) unterschieden werden. Weiterhin können für die interessierenden Objekte ihre Position, ihre Abmessungen und ihre Orientierung ermittelt werden, so dass ein Robot-Greifarm die Objekte (nach einer Umrechnung dieser Größen in das Roboter-Weltkoordinatensystem) gezielt ansteuern und greifen kann.

Zur Berechnung der Objektmerkmale werden im folgenden zwei Ansätze vorgestellt:

- mit Hilfe der sogenannten Bounding Box lassen sich die gewünschten Größen schnell aber nur in grober Näherung ermitteln;
- exaktere Messungen sind z.B. mit Hilfe von "Momenten" möglich.

Die **Bounding Box** einer ZHK mit der Marke $marke$ ist das minimale, achsparallele Rechteck, das die ZHK vollständig umgibt; siehe Abbildung 14.4. Zur Berechnung der Bounding Box müssen die minimalen und maximalen i - und j -Koordinaten der ZHK ermittelt werden:

$$\begin{aligned}
 & i_{\min} = \min (i \mid \text{mit } g(i,j) = marke; i \in [0, M-1] \text{ und } j \in [0, N-1]) \\
 & i_{\max} = \max (i \mid \text{mit } g(i,j) = marke; i \in [0, M-1] \text{ und } j \in [0, N-1]) \\
 & j_{\min} = \min (j \mid \text{mit } g(i,j) = marke; i \in [0, M-1] \text{ und } j \in [0, N-1]) \\
 & j_{\max} = \max (j \mid \text{mit } g(i,j) = marke; i \in [0, M-1] \text{ und } j \in [0, N-1])
 \end{aligned} \tag{14-2}$$

Die Bounding Box wird durch das 2D-Intervall $[i_{\min}, i_{\max}] \times [j_{\min}, j_{\max}]$ gebildet.

Die **Momente** m_{pq} einer ZHK mit der Marke $marke$ berechnen sich nach:

$$m_{pq} = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} i^p * j^q * \delta_{marke}(i,j) \quad \text{mit } \delta_{marke}(i,j) = \begin{cases} 1 & \text{falls } g(i,j) = marke \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{14-3}$$

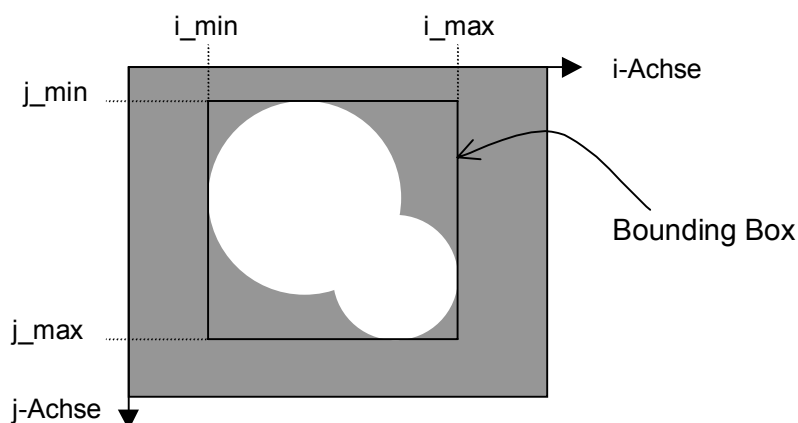


Abb. 14.4: Beispiel für eine Bounding Box.

1.) Größe:

Die Größe $groesse$ der Bounding Box mit

$$groesse = (i_{max} - i_{min} + 1) * (j_{max} - j_{min} + 1) \quad (14-4)$$

stellt eine grobe Näherung für die **Größe** einer ZHK dar. Die **Abmessungen** der ZHK in i- bzw. j-Richtung sind dabei: $(i_{max} - i_{min} + 1)$ bzw. $(j_{max} - j_{min} + 1)$.

Die exakte Größe $groesse$ einer ZHK mit der Marke $marke$ liefert das Moment m_{00} , das alle Pixel des Bildes mit der Marke $marke$ zählt:

$$m_{00} = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} i^0 * j^0 * \delta_{marke}(i,j) = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} \delta_{marke}(i,j) = groesse \quad (14-5)$$

(Die Größe aller im Bild auftretenden Zusammenhangskomponenten lässt sich auch ermitteln, indem man ein Histogramm bzgl. der zuvor ermittelten endgültigen Marken erstellt: in einem Durchlauf durch das gesamte Markenbild wird festgestellt, wie oft jede Marke $marke$ auftritt).

Da Störungen i.d.R. nur aus wenigen Bildpunkten bestehen, können im weiteren alle ZHKs gelöscht werden, deren Größe $groesse$ unterhalb eines Größen-Schwellwertes liegt. Falls unterschiedliche Objekte im Bild enthalten sind, so können diese u. U. anhand ihrer Größe klassifiziert werden; (ein weiteres einfaches Merkmal zur Klassifizierung von ZHKs ist weiter unten unter dem Stichwort "Kompaktheit" geschildert). Weiterhin kann die Objektgröße als Merkmal für die Qualitätssicherung genutzt werden, indem sie mit einer vorgegebenen Toleranz verglichen wird.

2.) Referenzpunkt:

Als **Referenzpunkt** für die Position einer Zusammenhangskomponente kann der **Mittelpunkt** $mitte$ ihrer Bounding Box gewählt werden:

$$mitte = ((i_{min} + i_{max})/2, (j_{min} + j_{max})/2) \quad (14-6)$$

Einen i.d.R. genauer platzierten Referenzpunkt stellt der **Schwerpunkt** dar, den man mit Hilfe der Momente m_{00} , m_{10} und m_{01} erhält; siehe Abbildung 14.5 (a)). Der Schwerpunkt $schwerpunkt$ mit den Koordinaten i_s und j_s ergibt sich zu:

$$i_s = m_{10} / m_{00} = \left(\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} i * \delta_{marke}(i,j) \right) / groesse$$

$$j_s = m_{01} / m_{00} = \left(\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} j * \delta_{marke}(i,j) \right) / groesse \quad (14-7)$$

3.) Orientierung:

Die **Orientierung** einfacher rechteckiger Objekte kann bestimmt werden, indem man den Winkel α zwischen der Waagrechten und der längeren Objektseite berechnet; siehe Abbildung 14.5 (b).

Nachdem unter Verwendung der Eckpunkte des Objektes die längere Seite mit Hilfe des Satzes des Pythagoras bestimmt wurde, ergibt sich der Winkel α zu

$$\alpha = \arctan(dy / dx).$$

(14-8)

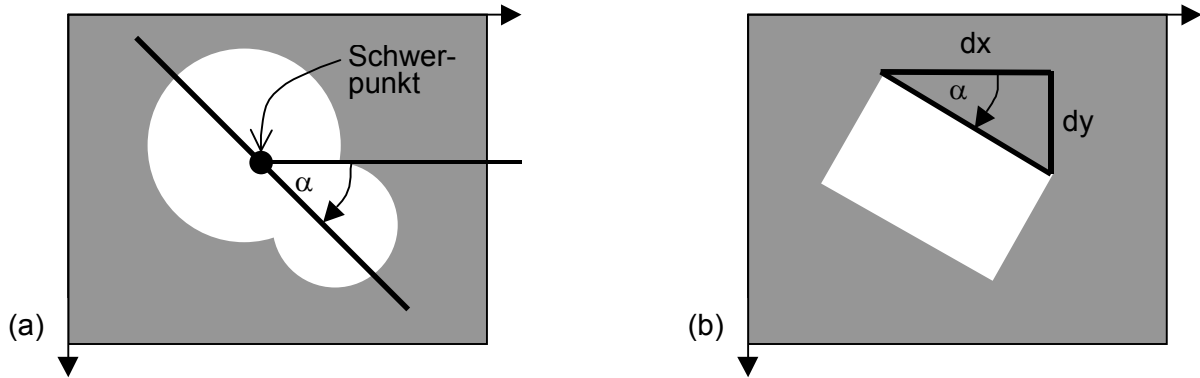


Abb. 14.5: Beispiele für die Bestimmung von Schwerpunkt und Orientierung. (In linkshändigen Koordinatensystemen verläuft eine positive Drehung im Uhrzeigersinn)

(Die kürzere Objektseite gibt die Breite des rechteckigen Objektes an. Auf ähnliche Weise lassen sich auch Winkel "am" Objekt messen und mit vorgegebenen Toleranzen vergleichen.)

Die Orientierung beliebig geformter Objekte, d.h. der Winkel α , den die x-Achse mit der Objektlängsachse hat, kann mit Hilfe von indirekten Momenten M_{ii} , M_{jj} und M_{ij} relativ genau bestimmt werden; siehe Abbildung 14.5 (a):

$$M_{ii} = m_{20} - m_{10}^2 / m_{00} = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (i * \ddot{a}_{\text{marke}}(i,j))^2 - \left(\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} i * \ddot{a}_{\text{marke}}(i,j) \right)^2 / \text{groesse}$$

$$M_{jj} = m_{02} - m_{01}^2 / m_{00} = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (j * \ddot{a}_{\text{marke}}(i,j))^2 - \left(\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} j * \ddot{a}_{\text{marke}}(i,j) \right)^2 / \text{groesse}$$

$$M_{ij} = m_{11} - (m_{10} * m_{01}) / m_{00} = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (i * j * \ddot{a}_{\text{marke}}(i,j)) - \left(\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} i * \ddot{a}_{\text{marke}}(i,j) \right) * \left(\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} j * \ddot{a}_{\text{marke}}(i,j) \right) / \text{groesse}$$

$$\alpha = - \arctan \left(\frac{M_{ii} - M_{jj} - \sqrt{(M_{ii} - M_{jj})^2 + 4 * M_{ij}^2}}{2 * M_{ij}} \right)$$

4.) Objektlänge und -breite:

Mit Hilfe der Objektorientierung können näherungsweise die Länge und die Breite eines beliebigen (aber nicht konkaven) Objektes ermittelt werden.

(14-9)

Die **Objektlänge** erhält man, indem man vom Schwerpunkt ausgehend "vorwärts" und "rückwärts" in Richtung der Objekt-Orientierung läuft, bis man die Objektkontur erreicht. Die **Objektbreite** erhält man auf ähnliche Weise, wenn man vom Objektschwerpunkt aus in beide Richtungen senkrecht zur Objektorientierung vorgeht.

5.) Kompaktheit:

Die oben ermittelte Größe einer ZHK erlaubt in der Regel bereits eine sichere Unterscheidung zwischen Objekt-ZHKs und Störungen, sowie eine Klassifizierung von Objekten mit deutlich unterschiedlicher Größe. Im folgenden wird ein weiteres einfaches geometrisches Merkmal vorgestellt, mit dem auch etwa gleich große Objekte häufig erfolgreich hinsichtlich ihrer Form unterschieden werden können.

Die **Kompaktheit** Kompaktheit einer ZHK ist definiert durch:

$$\text{Kompaktheit} = \frac{4 * \pi * \text{groesse}}{\text{umfang}^2} \quad (14-10)$$

Der Umfang umfang einer N8-ZHK ergibt sich dabei näherungsweise aus der Anzahl ihrer N4-Randpixel, d.h. es werden alle ZHK-Pixel gezählt, die in ihrer N4-Nachbarschaft ein Hintergrundpixel besitzen.

Im analogen Fall liegt die Kompaktheit zwischen 0 (für eine Strecke) und 1 (für einen Kreis). Im diskreten Fall gelten diese exakten Verhältnisse nicht, jedoch können längliche oder gebogene (konkave) Objekte durch ihren niedrigeren Kompaktheitswert in der Regel gut von rundlichen, "kompakten" Objekten unterschieden werden. (Das angegebene Kompaktheitsmaß darf nur für ZHKs ohne Löcher angewendet werden).

Für den Zugriff auf ein (unter Umständen zuvor klassifiziertes) Objekt steuert der Roboter mit seiner Greifzange den Referenzpunkt des Objektes an, dreht die Zange entsprechend der Objektorientierung und öffnet sie entsprechend der Objektbreite. Da sich alle ermittelten Merkmale auf das Bildkoordinatensystem beziehen und in Pixeln gegeben sind, müssen die Merkmale noch in die Maßeinheiten des Roboter-Weltkoordinatensystems umgerechnet werden; siehe Kapitel 14.3.

14.3 Umrechnung von Bildkoordinaten nach Roboter-Weltkoordinaten

Mit Hilfe der in Kapitel 14.2 beschriebenen Verfahren können zu allen im Bild enthaltenen Objekten ihre Positionen in Bildkoordinaten und ihre Abmessungen in Pixeln angegeben werden. Damit ein Robot-Greifarm die Objekte ansteuern und greifen kann, müssen diese Angaben abschließend vom **Bildkoordinaten-** in das **Weltkoordinatensystem** des Roboters umgerechnet werden. Dasselbe gilt, wenn die in Kapitel 14.2 ermittelten geometrischen Merkmale im Rahmen der Qualitätssicherung mit absoluten Toleranzen (z.B. in Millimetern) verglichen werden sollen.

Der Einfachheit halber wird im folgenden vorausgesetzt, dass die Kamera senkrecht von oben auf die Objekte blickt und die Bildaufnahme mit einem kleinen Öffnungswinkel der Kamera erfolgt; (also kein Weitwinkelobjektiv). Unter diesen speziellen Voraussetzungen können perspektivische Verzerrungen vernachlässigt werden und die Abbildungsgeometrie entspricht einer einfachen parallelen Senkrechtprojektion.

Im vorliegenden Fall muss lediglich bekannt sein, an welcher Position des Weltkoordinatensystems der Ursprung des Bildkoordinatensystems liegt und in welche Richtung die Achsen des Bildkoordinatensystems verlaufen. Darüber hinaus muss noch die **Auflösung** angegeben werden, d.h. die Größe eines Bildpunktes nach Umrechnung in die Weltkoordinaten muss bekannt sein.

Abbildung 14.6 zeigt ein Beispiel für die Positionierung des Bildkoordinatensystems in den Weltkoordinaten. Als weitere Vereinfachung wurde hier davon ausgegangen, dass die x-Achse des Weltkoordinatensystems und die i-Achse des Bildkoordinatensystems parallel verlaufen. (Achtung: das Weltkoordinatensystem ist ein „normales“ rechtshändiges Koordinatensystem, während es sich bei den Bildkoordinaten ein linkshändiges System handelt, bei dem der Ursprung links oben sitzt.)

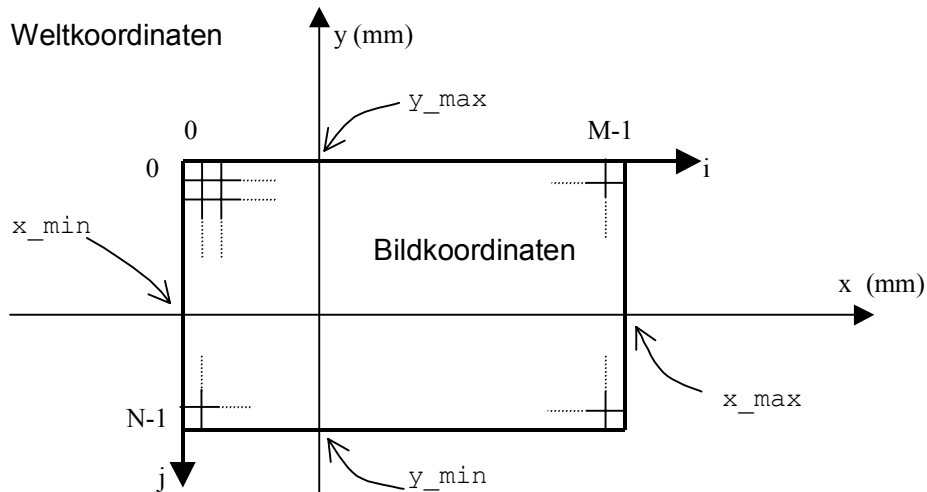


Abb. 14.6: Beispiel für die Platzierung eines Bildkoordinatensystems in den Weltkoordinaten.

In Abbildung 14.6 beginnt der Bildausschnitt an der Weltkoordinaten-Position (x_{\min}, y_{\max}) , d.h. der Ursprung des Bildkoordinatensystems liegt bei (x_{\min}, y_{\max}) . Der Bildausschnitt endet bei (x_{\max}, y_{\min}) . Da das Bild M Spalten und N Zeilen hat, ergeben sich die Abmessungen eines Bildpunktes i_{ext} bzw. j_{ext} in Millimetern zu:

$$i_{\text{ext}} = (x_{\max} - x_{\min}) / M \quad \text{und} \quad j_{\text{ext}} = (y_{\max} - y_{\min}) / N . \quad (14-11)$$

Üblicherweise gilt: $i_{\text{ext}} = j_{\text{ext}}$.

Die Umrechnung eines beliebigen Bildpunktes mit den Bildkoordinaten (i, j) in die Weltkoordinaten (x, y) ergibt sich somit zu:

$$\begin{aligned} x &= x_{\min} + i \cdot i_{\text{ext}} & \text{bzw.} \\ y &= y_{\max} - j \cdot j_{\text{ext}} . \end{aligned} \quad (14-12)$$

Die Abmessungen der Objekte in den Weltkoordinaten ergeben sich direkt mit Hilfe der obigen Formel für i_{ext} und j_{ext} .

14.4 Einfache Verfahren zur Qualitätssicherung

Mit Hilfe des in Kapitel 14.1 beschriebenen Verfahrens können die im Eingangsbild enthaltenen interessierenden Objekte segmentiert werden. Die ermittelten Objekte können dann im Rahmen der **Qualitätssicherung** untersucht werden. Dabei können z.B. die Objekt-abmessungen, Abstände, Durchmesser und Winkel mit Hilfe der in den Kapiteln 14.2 und 14.3 vorgestellten Methoden ermittelt und mit vorgegebenen Toleranzen verglichen werden.

Im Gegensatz zu den oben aufgeführten Maßprüfungen sind Formprüfungen in der Regel schwieriger durchzuführen. Hier kann z.B. die **Istform** eines Objektes mit einer exakt definierten Schablone (**Sollform**) verglichen werden, um Formabweichungen festzustellen. Auf derartige Vorgehensweisen, bei denen meist vorausgesetzt wird, dass Objekt und Schablone genau gleich ausgerichtet sind, soll hier nicht eingegangen werden.

Im folgenden wird eine einfache Klasse von Operatoren vorgestellt, mit deren Hilfe Objektdefekte wie Löcher, Risse und störende Ausläufer ("Nasen") erkannt und vermessen werden können. Die grundlegende Idee ist dabei, dass diese Defekte im Bild zuerst systematisch (und ohne Kenntnis der Defekte) behoben werden. Ein Vergleich der "reparierten" mit den ursprünglichen Objektabbildungen zeigt anschließend, *ob* und *wo* Defekte vorhanden sind und *wie groß* diese gegebenenfalls sind.

Bei den angesprochenen Operatoren handelt es sich um spezielle **Rangfolge-Operatoren**; (vgl. Kapitel 6.1.2.2). Rangfolge-Operatoren gehören zur Klasse der **lokalen Bildopera-**

toren, bei denen der Wert eines Bildpunktes unter Berücksichtigung seiner Nachbarschaft in Abhängigkeit von einer Berechnungsvorschrift verändert wird. Als Nachbarschaft wird im weiteren die N8-Nachbarschaft verwendet. Genau so gut könnten aber auch die N4-Nachbarschaft oder "größere" Nachbarschaften eingesetzt werden.

Bei den Rangfolge-Operatoren werden an jeder Bildposition (i,j) die Grauwerte der aktuellen Stelle und ihrer acht N8-Nachbarschaft betrachtet. Dabei werden diese neun Grauwerte der Größe nach sortiert:

$$g_0 \leq g_1 \leq \dots \leq g_7 \leq g_8.$$

(14-13)

Im folgenden wird an einigen Beispielen gezeigt, wie man durch die Wahl bestimmter Positionen aus dieser Sortierung Bildstörungen wirkungsvoll eliminieren, sowie Löcher, Risse und Nasen verschwinden lassen kann. (Konkrete Rechenbeispiele für spezielle Rangfolge-Operatoren sind auf Seite der letzten Seite dieses Kapitels enthalten).

Wenn man aus der Sortierung den Median, d.h. den in der Mitte stehenden Wert $g'(i,j) = g_4$ auswählt, so erhält man den **Median-Operator**, (vgl. Kapitel 6.1.2.2). Dieser Operator unterdrückt Störungen (wie z.B. Bildrauschen), ohne dabei jedoch - wie der Mittelwert-Operator - die Kanten zu verschleifen; dieser Operator wurde eingesetzt, um das von kleinen Störungen bereinigte Bild in Abbildung 14.3 (a) zu erhalten.

Zwei weitere Rangfolgeoperatoren sind die **Dilatation** und die **Erosion** mit

$$g'(i,j) = g_8 \quad \text{bzw.} \quad g'(i,j) = g_0.$$

(14-14)

Bei der Dilatation wachsen helle Objekte, indem auf allen Seiten eine ein-Pixel-breite Schicht von Objektpixeln angelagert wird. (Bei Binärbildern bedeutet dies vereinfacht, dass alle Hintergrundpixel, die in ihrer N8-Nachbarschaft ein Objektpixel besitzen, zu Objektpixeln umgefärbt werden). Bei einer Dilatation schließen sich Risse, Lücken und Löcher, deren Breite kleiner-gleich zwei Pixel ist. Durch mehrfache Anwendung der Dilatation (**n-fache Dilatation**) kann man auch breitere Risse, Lücken und Löcher schließen. Ein Beispiel für eine zweifache Dilatation ist in Abbildung 14.7 (b) dargestellt.

Bei der Erosion schrumpfen helle Objekte um eine Pixelschicht. (Bei Binärbildern entspricht dies der Umfärbung aller Objektpixel, die ein Hintergrundpixel in ihrer N8-Nachbarschaft besitzen, zu Hintergrundpixeln). Bei einer Erosion verschwinden Objekte und Ausläufer, deren Breite kleiner-gleich zwei Pixel ist. Wenn man auch breitere Objekte bzw. Ausläufer verschwinden lassen will, so wendet man die Erosion mehrfach hintereinander an: **n-fache Erosion**. Abbildung 14.7 (c) zeigt ein Beispiel für eine zweifache Erosion, die in diesem Falle auf Abbildung 14.7 (b) angewendet wird.

Obwohl die Dilatation und die Erosion gegensätzlich definiert sind, sind sie nicht invers zueinander. Bei den Kombinationen Dilatation gefolgt von Erosion bzw. Erosion gefolgt von Dilatation erhält man wieder ein Objekt, das ungefähr die Größe des ursprünglichen Objektes hat, jedoch können sich bestimmte Sachverhalte geändert haben. So schließen sich z.B. bei einer Dilatation/Erosion ein bis zwei Pixel breite Spalten und Löcher, weshalb diese Kombination auch als **Closing** bezeichnet wird. Umgekehrt verschwinden bei der als **Opening** bezeichneten Kombination Erosion/Dilatation ein bis zwei Pixel breite Objekte bzw. Ausläufer.

Um größere Lücken zu schließen (und die Objektgröße ungefähr beizubehalten) kann man beim **n-fachen Closing** auch n Dilatationen und danach n Erosionen durchführen. Entsprechend kann man auch größere Objekte verschwinden lassen, indem man durch **n-faches Opening** die Objekte erst n-fach erodiert und danach n-fach dilatiert. Häufig werden Closing und Opening nacheinander ausgeführt.

Abbildung 14.7 (c) zeigt das Ergebnis der Anwendung eines zweifachen Closing auf das Ausgangsbild aus Abbildung 14.3 (a), das in Abbildung 14.7 (a) nochmals dargestellt ist. Um nun auch noch den kleinen Ausläufer an der unteren quadratischen Fläche zu löschen, wird anschließend zuerst eine zweifache Erosion (siehe Abbildung 14.7 (d)) und abschließend eine zweifache Dilatation durchgeführt. Das Ergebnis dieses zweifachen Openings ist in Abbildung 14.7 (e) dargestellt.

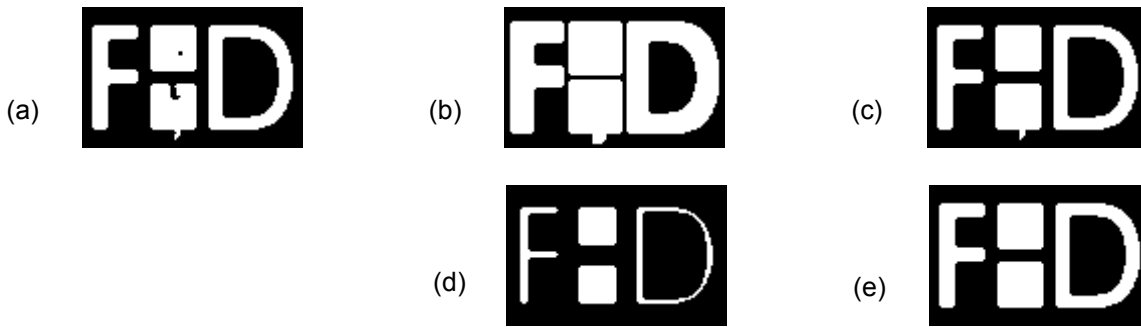


Abb. 14.7: Beispiel für die Elimination von Rissen, Löchern und Ausreißern:

- (a) Beispielbild aus Abbildung 14.3 (a);
- (b) Anwendung einer zweifachen Dilatation;
- (c) anschließend zweifache Erosion; Ergebnis: zweifaches Closing;
- (d) anschließend weitere zwei Erosionen;
- (e) abschließend zweifache Dilatation; Ergebnis: zweifaches Opening bezüglich des in (c) gezeigten Bildes.

Um nun im Rahmen der Qualitätssicherung z.B. Risse und Löcher eines Objektes zu ermitteln, führt man ein n-faches Closing für das Binärbild mit den Objekten durch und bildet anschließend ein **Differenzbild** D zwischen dem Binärbild B' und dem Closingbild C, indem man an allen Bildpositionen die Werte $c(i,j)$ des Closingbildes von den Werten $g'(i,j)$ des Binärbildes abzieht und den Betrag bildet:

(14-15)

$$D = B' - C \quad \text{bzw. pixelweise} \quad d(i,j) = |g'(i,j) - c(i,j)|.$$

Im Differenzbild sind nun alle Stellen, an denen sich das Binärbild und das Closing-Bild unterscheiden, von Null verschieden. Kandidaten für Riss- bzw. Lochpixel sind insbesondere diejenigen im Differenzbild gesetzten Pixel, deren Position im n-fachen Dilatationsbild mehr als n ein-Pixel-weite N8-Schritte vom Hintergrund entfernt ist.

Ein dünner Ausläufer eines Objektes kann auf ähnliche Weise ermittelt werden: zuerst wird für das Objekt im Binärbild ein n-faches Opening durchgeführt. Danach bildet man das Differenzbild zwischen dem Binärbild und dem Opening-Bild. Kandidaten für die gesuchten Nasen sind insbesondere diejenigen gesetzten Pixel des Differenzbildes, von deren Position im n-fach erodierten Bild ausgehend man nach n ein-Pixel-weiten N8-Schritten noch kein Hintergrundpixel erreicht.

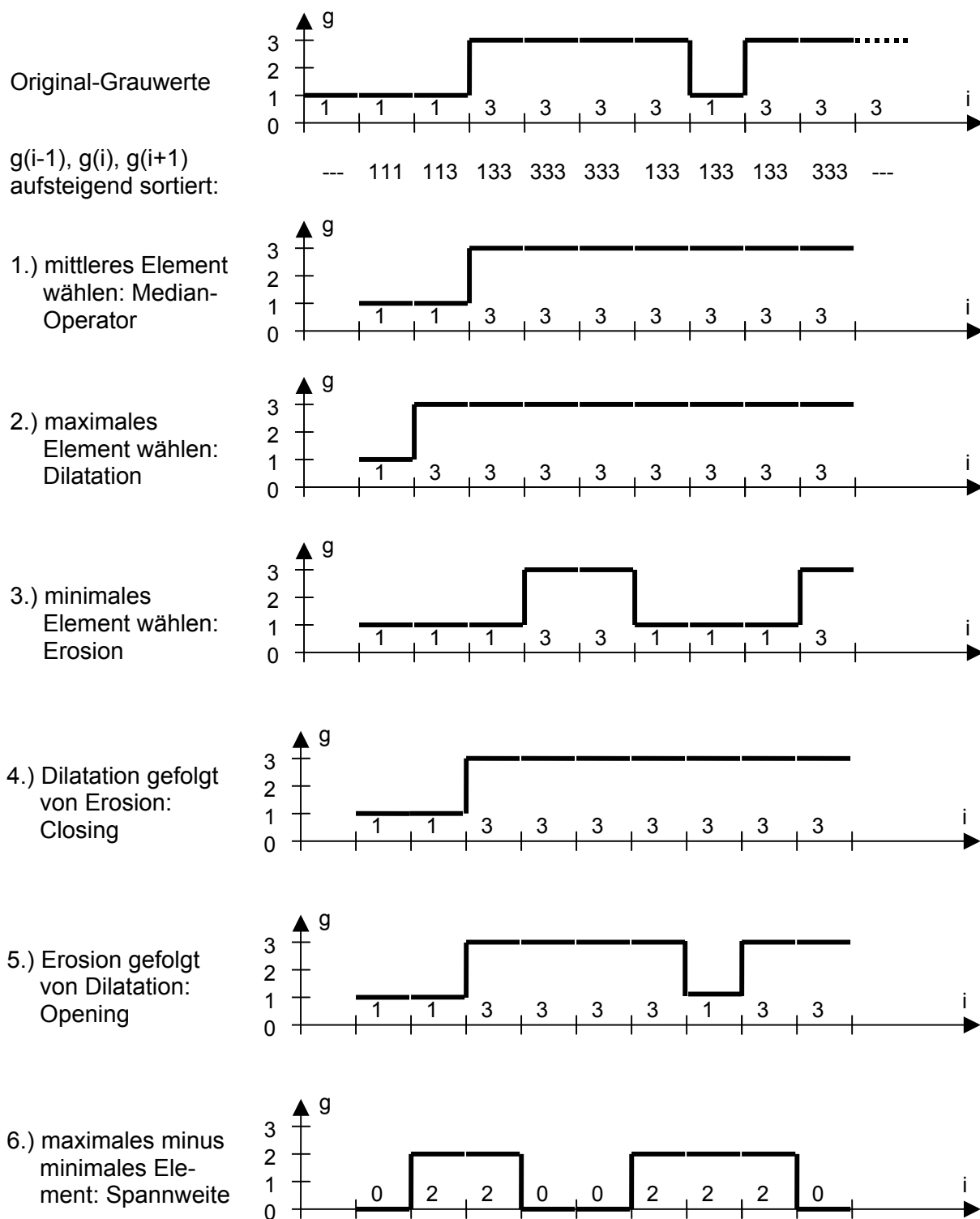
Abbildung 14.8 zeigt für das Beispielbild aus Abbildung 14.7 die ermittelten Löcher, Risse und Ausläufer. In Abbildung 14.8 (a) ist nochmals das Ausgangsbild dargestellt. Daneben ist das von Störungen bereinigte Endergebnis aus Abbildung 14.7 (e) gezeigt. In Abbildung 14.8 (c) sind nach einer Differenzbildung zwischen 14.8 (a) und 14.8 (b) nur noch die Objektdefekte zu sehen. Um diese Störungen zu den Objekten in Beziehung zu setzen, ist in Abbildung 14.8 (d) eine Überlagerung des Ausgangsbildes mit den ermittelten Defekten dargestellt. Die tatsächliche Größe der Defekte erhält man mit Hilfe der in Kapitel 14.3 beschriebenen Umrechnung vom Bild- in das Weltkoordinatensystem.



Abb. 14.8: Beispiel für die Bilddifferenz zur Anzeige von Rissen, Löchern und Ausreißern:

- (a) Ausgangsbild mit Störungen aus Abbildung 14.7 (a);
- (b) Ergebnisbild mit eliminierten Störungen aus Abbildung 14.7 (e);
- (c) Differenzbildung zwischen dem Ausgangsbild und dem zweifachen Closing-Opening-Bild aus Abbildung 14.7 (e);
- (d) Überlagerung des Ausgangsbildes mit den ermittelten Störungen.

Anhang: 1D-Beispiele zu Rangfolge-Operatoren



Bemerkungen:

- 1.) Der Median-Operator bewirkt eine kantenerhaltende Glättung.
- 2.) Die Dilatation dehnt helle Bereiche in alle Richtungen um ein Pixel aus.
- 3.) Die Erosion reduziert helle Bereiche in alle Richtungen um ein Pixel.
- 4.) Closing schließt dunkle Löcher
- 5.) Opening löscht dunkle Ausläufer und schließt helle Löcher; (hier keine Auswirkungen).
- 6.) Der Spannweiten-Operator ist ein Kantendetektor