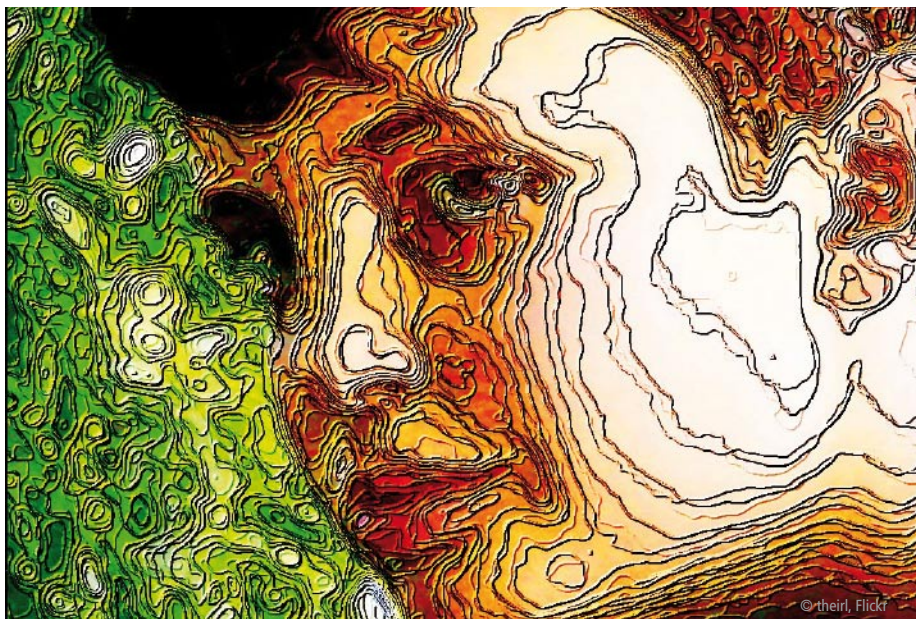


# Konturverfolgung

## Grundlagen der Bildverarbeitung: Konturbasiertes Pattern-Matching

Beim Pattern-Matching wird ein Bild nach einem vorgegebenen Muster abgesucht: dem „template“ oder dem „Modell“. Das Verfahren liefert grundsätzlich für jeden Bildpunkt ein Ähnlichkeitsmaß. Je höher dieser „score“, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich das gesuchte Muster tatsächlich an dieser Stelle befindet. Es gibt Vergleichsmethoden, die sich auf die Kontur von Objekten beziehen. Sie setzen nicht an Grauwertmustern an, sondern verarbeiten die Kanten, die in einem Bild vorhanden sind.



### Konturen

Die Kontur ist die Randlinie eines Binärobjekts. Die Begriffsbildung setzt folglich voraus, dass Objekte bereits vom Hintergrund segmentiert sind, z.B. durch eine Binarisierung. Hintergrundpixel können z.B. schwarz sein, Vordergrundpixel weiß. Abbildung 1 zeigt ein Beispiel für diese Situation. Eine Zusammenhangsanalyse, das „labeling“, liefert dann die einzelnen Binärobjekte und in der Regel gleich auch deren Umrandung, wie im rechten Teil von Abbildung 1 zu sehen ist.

Konturpixel sind dabei diejenigen Objektpixel, die sowohl Nachbarn im Hintergrund als auch im Objekt haben (genauer: die mit dem Objekt über die Achter-Nachbarschaft und mit dem Hintergrund über die Vierer-Nachbarschaft zusammenhängen). Aufgrund dieses Kriteriums kann man diese speziellen Objektpunkte abtrennen und separat als Kontur abspeichern. Eine bekannte und effiziente Methode zur Codierung der Kontur ist ein Richtungscode. Dabei werden die einzelnen Konturpixel, ausgehend von einem Startpunkt, längs der

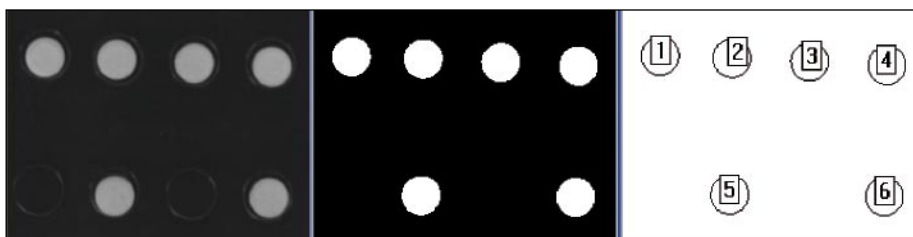


Abb. 1: Graustufenbild, Binärbild und Labelbild mit Konturen der Binärobjekte

Kontur verfolgt und der jeweils erforderliche Richtungsschritt zum nächsten Konturpunkt als ganze Zahl zwischen 0 und 7 abgelegt. Abbildung 2 zeigt ein Beispiel, das den sog. Freeman-Code verwendet. Den Startpunkt  $(x, y)$ , im Bild rot gezeichnet, ermittelt man durch Antasten von links nach rechts und von oben nach unten. Er ist auf diese Weise eindeutig definiert. Die Kontur enthält die gesamte Information über das Binärobjekt. Das wird verständlich, wenn man sich klar macht, dass man das Objekt aufgrund der Kontur vollständig rekonstruieren kann. Es muss folglich möglich sein, ein Objekt allein aufgrund seiner Kontur zu erkennen. Betrachten wir z.B. ein ideales Quadrat, dessen Kanten parallel zu den Koordinatenachsen liegen. Der Startpunkt  $(x, y)$  der Codierung ist dann die linke obere Ecke. Die Kontur wird gegen den Uhrzeigersinn abgearbeitet, so dass die erste Kante die Richtung 6 hat, die zweite die Richtung 0, die dritte die Richtung 2 und die vierte die Richtung 4. Je nach Kantenlänge des Quadrats wird folglich der Freeman-Code mit einer Gruppe von z.B. 20 Richtungen mit Code 6 beginnen, gefolgt von 20 Richtungen 0 usw. Vier gleich lange Gruppen von Richtungen, bei denen am Ende ein Wechsel um  $90^\circ$  entgegen dem Uhrzeigersinn auftritt, codieren demnach ein Quadrat. Die Richtungsänderung um  $90^\circ$  entspricht einer Addition von  $+2$  (modulo 8) auf die aktuelle Richtung, ist also algorithmisch sehr einfach feststellbar. Selbst ein ideales Rechteck wird jedoch nach einer realen Bildaufnahme nicht mehr nur vier einheitliche Richtungsgruppen aufweisen, erst recht nicht bei freier Drehlage. Allerdings kann man den Freeman-Code glätten und dann auf Geradenstücke mit entsprechenden Richtungswechseln am Ende zurück schließen. Mit diesem einfachen Beispiel ist bereits die grundlegende Idee des konturbasierten Pattern-Matching beschrieben. Aus der Kontur wird ein geometrisches Modell des Objekts gewonnen, das nicht als Grauwertmuster, sondern in abstrakten Begriffen beschrieben wird. In diesem Sinne liegt ein Quadrat vor, wenn die Kontur aus vier gleich langen Geradenstücken besteht, die an den Endpunk-

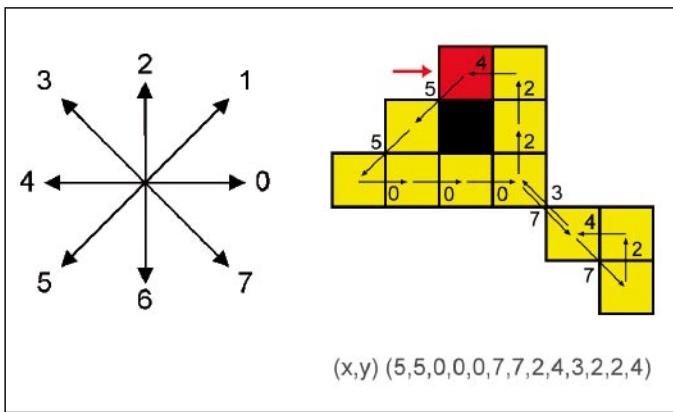


Abb. 2: Richtungscodierung nach Freeman (links) und Beispiel für die Konturcodierung (rechts). Die Kontur wird vom Startpunkt (x,y) aus (rot) entgegen dem Uhrzeigersinn abgearbeitet und die Richtung des jeweils nächsten Konturschritts notiert.

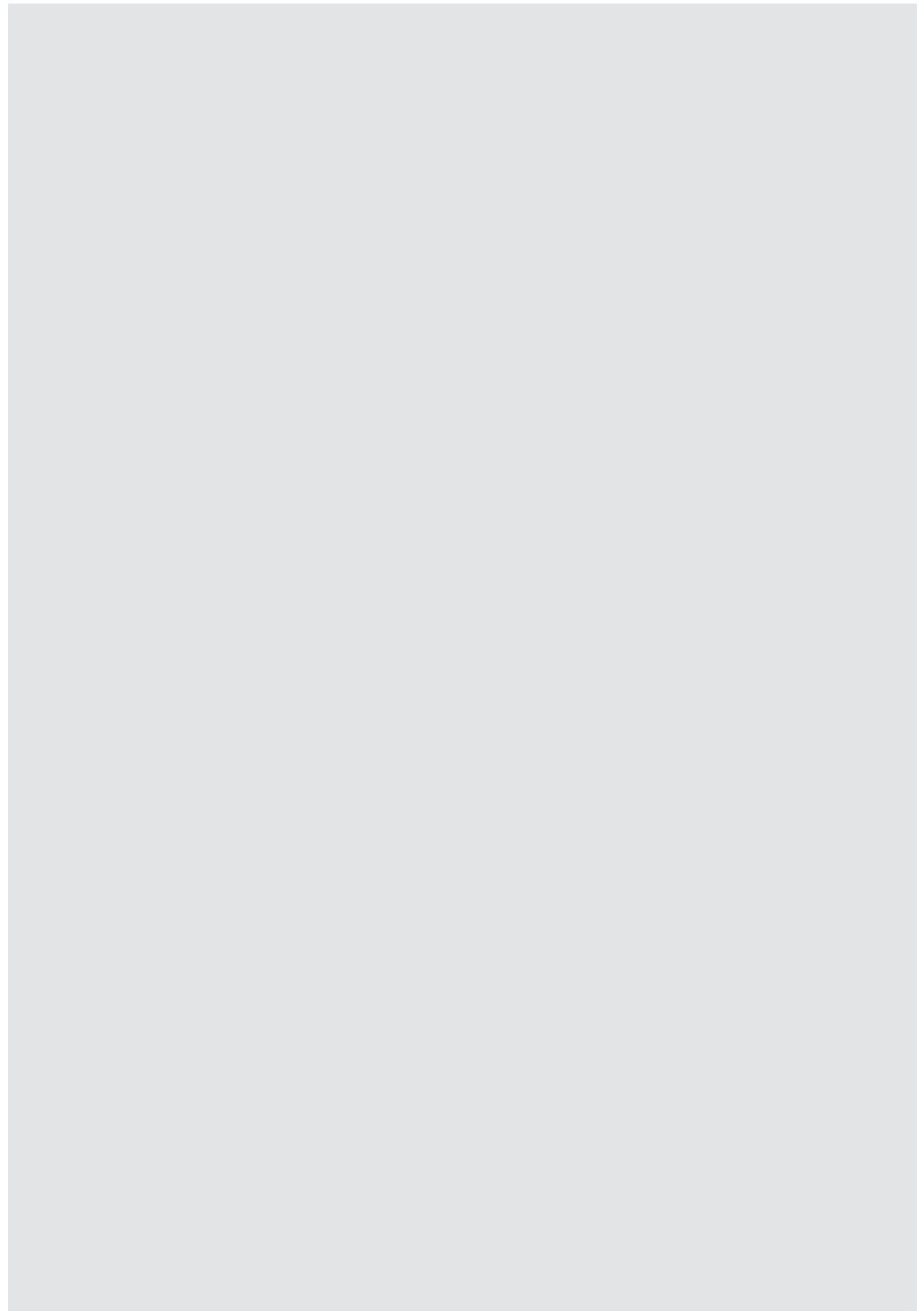
ten aneinandergrenzen, und wenn dort ein Richtungswechsel um  $90^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn auftritt. Es ist unmittelbar klar, dass diese Beschreibung unabhängig von der Drehlage und unabhängig von der Größe des Objekts immer ein Quadrat beschreibt. Das Model ist also a priori lage- und skalierungsinvariant, eine sehr nützliche Eigenschaft.

### Korrelation auf der Kontur

Wie oben angedeutet, kann direkt der geglättete Konturcode mit dem Konturcode des gesuchten Objekts verglichen werden. Sofern das Verfahren skalierungsinvariant sein soll, also auch gleichartige Objekte unterschiedlicher Größe gefunden werden sollen, muss der Konturcode zunächst auf eine Referenzlänge normiert und entsprechend umgerechnet werden. Wenn auch die Drehlage frei ist, beginnen die Konturcodierungen in der Regel bei verschiedenen Startpunkten auf der Kontur. Die Vergleichsprozedur wird dadurch wesentlich komplexer. Gelegentlich behilft man sich mit der Berechnung von Merkmalen aus dem Konturcode, z.B. einem Histogramm der Richtungs-codes. Dabei ist jedoch zu beachten, dass zwangsläufig Information verloren geht und die Klassifizierung im Allgemeinen nicht mehr eindeutig ist. Eine Alternative ist die Codierung der Kontur als Radiusfunktion. Dazu wird der Schwerpunkt

des Objekts ermittelt und, ausgehend von einer Referenzrichtung, in festen Winkelabständen der Abstand zwischen dem Schwerpunkt und Kontur bestimmt. Dieser „Radius“ oder auch Polarabstand wird über dem Winkel aufgetragen. Die Radiusfunktion ist charakteristisch für das Objekt und wird gelegentlich als Signatur bezeichnet. Ein Beispiel zeigt Abbildung 3. Die rote Kurve im rechten oberen Bereich

der Abbildung ist die geglättete Radiusfunktion für das fünfeckige Objekt, das links abgebildet ist. Für ein zweites, in einem Suchbild gefundenes Objekt schiebt man die vorgegebene über die gefundene Radiusfunktion und berechnet jeweils die Korrelation. Liegt die Korrelation über einer vorher empirisch festgelegten Schwelle, gilt dies als Übereinstimmung. Damit ist das Objekt gefunden



und außerdem seine Drehlage bestimmt, denn es ist bekannt, bei welcher Winkelposition die Übereinstimmung aufgetreten ist. Dieses Verfahren kann man als die Übertragung des klassischen „pattern matching“ mit Berechnung der Grauwert-Korrelation zwischen „template“ und Bildausschnitt auf die Auswertung der Kontur betrachten und somit als „konturbasiertes Pattern Matching“ bezeichnen. Die abstrakten Eigenschaften des Modells werden dabei jedoch gar nicht verwendet.

### Geometric Model Finder

Das Pattern Matching, angewandt auf die Konturcodierung, setzt ein Binärobjekt im Bild voraus, also eine erfolgreiche Segmentierung und eine durchgängige Randlinie. Die Beschreibung des gesuchten Objekts in Form eines geometrischen Modells hingegen eröffnet eine Möglichkeit, das Modell direkt mit Strukturen im Graustufenbild zu vergleichen. Dazu wird das Graustufenbild zunächst in ein Kantenbild umgerechnet, und im Idealfall werden die Kanten auf eine Breite von einem Pixel verdünnt. Die Konturen von Objekten treten dann als Kanten hervor. Allerdings gibt es auch Kanten, die nicht unmittelbar zu Objekträndern gehören, sondern aus der Textur von Oberflächen oder aus Schatten entstehen, und manche Konturen sind unterbrochen. Auf diesem Kantenbild wird im nächsten Schritt nach den geometrischen Grundformen gesucht, auf die sich das Modell des gesuchten Objekts bezieht. Handelt es sich z.B. um das oben diskutierte Quadrat, so wird das Kantenbild zunächst nach Geraden abgesucht. Für diesen Zweck gut geeignet ist die Hough-Transformation, die für Geradenstücke und auch für unterbrochene Geraden im Bild jeweils einen „score“ berechnet, der es erlaubt, die besten Kandidaten für tatsächlich vorliegende Geraden im Bild von zufälligen

Übereinstimmungen mit dem Geradenmodell zu trennen [1]. Auch für Kreise gibt es eine Variante der Hough-Transformation, die wir im Rahmen dieser Artikelserie bereits behandelt haben [2]. Geraden und Kreise reichen völlig aus, um reale Objekte im Sinne einer Polygondarstellung, ergänzt um Kreissegmente, zu modellieren. Für das oben genannte Beispiel eines Quadrats bedeutet das geometrische Modell, dass vier gleich lange Geraden im Bild vorkommen müssen, die sich an den Endpunkten berühren und für die am Ende jeweils ein Richtungswechsel von 90° gegen den Uhrzeigersinn auftritt. Werden im Kantenbild nur drei gleich lange Geraden gefunden, und die vierte Gerade ist nur halb so lang wie die drei anderen, die Anforderungen in Bezug auf die Richtungen sind jedoch erfüllt, und es gibt außerdem drei Berührungspunkte an den Enden, so ist möglicherweise lediglich ein Teil der Kontur des Quadrats von einem anderen Objekt überdeckt oder durch einen Schatten verdunkelt. Man wird diese Struktur dann vielleicht nicht mit Sicher-

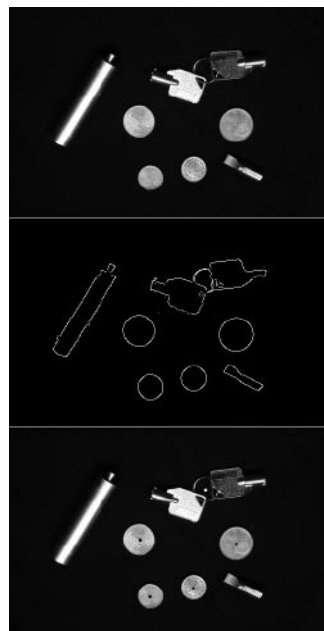


Abb. 4: Graustufenbild (oben), Kantenbild (Mitte) und Ergebnis der Hough-Transformation für Kreise (unten); eingeblendet in das Originalbild sind als Punkte die Mittelpunkte der gefundenen Kreise. Auch der teilweise verdeckte Schlüsselring wird gefunden.

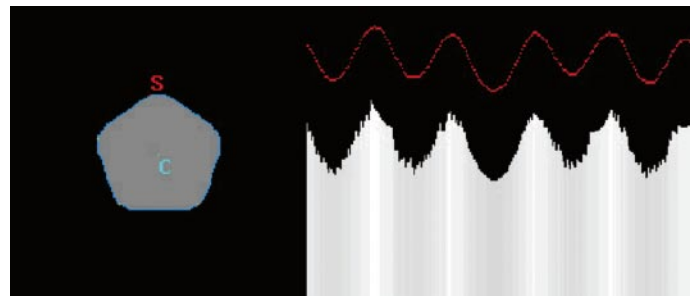


Abb. 3: Ein Objekt und seine zugehörige Radiusfunktion. C ist der Schwerpunkt des Objekts, S das erste Konturpixel im Polarabstandsplot.

heit als Quadrat klassifizieren, aber sehr wohl als einen Kandidaten für weitergehende Analyse in Betracht ziehen. Viele „Geometric Model Finder“ arbeiten mit mehr oder weniger komplexen Varianten der Hough-Transformation für geometrische Primitive und nutzen die Relationen zwischen diesen Strukturelementen im Rahmen eines vorher aufgestellten Modells oder verwenden eine Verallgemeinerung der Hough-Transformation [3]. Dadurch wird erreicht, dass auch Objekte gefunden werden, deren Kontur nicht durchgängig im Kantenbild erscheint oder die teilweise von Fremdobjekten überdeckt sind. Je mehr Parameter zugelassen werden, desto aufwendiger wird die Implementierung, und die Ausführungszeit stößt schnell an die Grenzen, die zumindest bei der Bildverarbeitung in der laufenden Produktion üblich sind.

### Fazit

Wer von konturbasiertem Pattern Matching spricht, meint meist Suchverfahren in Graustufenbildern, die auf Kantenbildern aufsetzen und geometrische Modelle von Objekten verwenden. Solche „geometric model finder“ funktionieren auch bei teilweise überdeckten Objekten und können skalierungs- und lageinvariant sein. Wie die klassische Grauwertkorrelation liefern auch die konturbasierten Ver-

fahren lediglich eine (gelegentlich recht geringe) Wahrscheinlichkeit für die Übereinstimmung zwischen den Strukturen im Suchbild und dem Modell. Es gibt eine große Variantenvielfalt für die Konzeption und Implementierung dieser Methoden [4]. Abbildung 4 verdeutlicht am Beispiel der Hough-Transformation für Kreise, dass auch einfache Varianten bereits stabil gegen Reflexe und inhomogene Beleuchtungsverteilung sein können, Fremdstrukturen gut diskriminieren und auch bei Überdeckung funktionieren. Komplexere Modelle geraten in Bezug auf die Rechenzeit schnell außer Kontrolle und müssen sorgfältig optimiert werden [4]. Zweifellos sind die „geometric model finder“ eine wertvolle Ergänzung des Instrumentariums der Bildverarbeitung und gehören mittlerweile zu den Grundlagen dieses Gebietes.

### Literatur

- [1] W. Burger, M. J. Burge, Digitale Bildverarbeitung, Springer, 2005, S.152–167
- [2] INSPECT 3/2008, S.24 ff.
- [3] D.H. Ballard, Generalizing the Hough-transform to detect arbitrary shapes, Pattern Recognition Vol. 13, No. 2, p 111–122, 1981
- [4] Steger, C., Ulrich, M., Wiedemann, C., Machine Vision Algorithms and Applications, Wiley-VCH, Weinheim 2008, p. 222 ff.

### ► Autor

Prof. Dr. Christoph Heckenkamp  
Hochschule Darmstadt  
Studiengang Optotechnik und Bildverarbeitung  
heckenkamp@h-da.de  
www.fbmn.h-da.de

