

Parameterlose Kontursegmentierung

Petko Faber

Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn
Nußallee 15, 53115 Bonn
email: npf@ipb.uni-bonn.de

Zusammenfassung In diesem Beitrag wird ein Ansatz zur Segmentierung einer aus einer ikonischen Beschreibung eines Bildes extrahierten Kontur in eine Menge von Kurven verschiedener Ordnungen vorgestellt. Die Funktion des allgemeinen Ansatzes wird anhand der Zerlegung einer Kontur in eine Menge von Geraden- und Ellipsensegmente gezeigt. Charakteristische Eigenschaften dieses Ansatzes sind: (1) die *parameterlose* Segmentierung, (2) die *Invarianz* gegenüber geometrischen Transformationen, (3) die Simplizität des gewählten Ansatzes und (4) die verhältnismäßig effiziente Segmentierung.

1 Einleitung

Die Segmentierung der aus einer ikonischen Beschreibung \mathcal{E} eines Bildes extrahierten Konturen spielt bei der Bestimmung prägnanter Merkmale eine wichtige Rolle. Dabei kann die Segmentierung und damit auch die Beschreibung von \mathcal{E} in Abhängigkeit von der konkreten Applikation erfolgen. Zur Segmentierung einer Kontur sind aus der Literatur verschiedene Ansätze bekannt, wobei jedoch in den meisten Fällen eine Beschränkung hinsichtlich der Approximation nur eines Kurventyps erfolgt; die Extraktion bzw. Approximation von Kurven höherer Ordnung wird häufig vernachlässigt, was ursächlich durch zum einen die auf Grund der zunehmenden Parameteranzahl wachsenden Komplexität bei der Bestimmung einer Approximation, zum anderen durch die im allgemeinen schlechtere Konditionierung des Gesamtsystems bedingt sein kann.

Andererseits wurde in verschiedenen Arbeiten (z.B. [9, 13]) herausgearbeitet, daß bei vielen Applikationen die Approximation einer gegebenen Kontur durch eine Menge von Kurven *verschiedener* Typen vorteilhafter als die Approximation durch eine Menge von Kurven nur eines Typs sein kann.

In [5] wird ein Segmentierungsverfahren skizziert, das auf einer rekursiven Teilung der Kontur beruht und im Unterschied zu alternativen Verfahren, wie z. B. in [7, 8] und [10] beschrieben, *parameterlos* ist. Die Teilung einer Kontur wird somit *nicht* auf der Grundlage heuristisch bestimmter Parameter realisiert, sondern ergibt sich auf der Basis des Vergleiches von sogenannten *Signifikanzwerten* (SW).

$$SW = \frac{\text{max. Abweichung der Kontur vom approx. Segment}}{\text{Länge des approx. Segmentes}} \quad (1)$$

Der SW basiert auf einem pseudo-psychologischen Modell perzeptueller Signifikanz, d. h., die visuell tolerierte Abweichung der durch ein Segment approximierten Kontur nimmt mit wachsender Länge der Segmente zu.

An der Stelle der größten Abweichung zwischen Kontur und Approximation wird die Kontur gesplittet und an die dabei entstehenden Teilkonturen Kurven des gleichen Typs angepaßt. Für die drei Approximationen wird der *SW* bestimmt. Sind die *SW* der beiden Teile der Kontur größer als der *SW* der gesamten Kontur, terminiert die Segmentierung, andernfalls wird der Prozeß von Approximation und Splitting fortgesetzt.

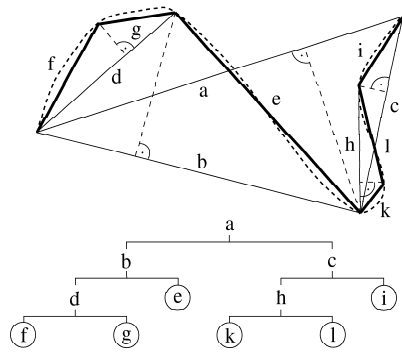


Abbildung 1. Zerlegung einer Kontur in Geradensegmente

können. Ausgangspunkt ist die Approximation einer Kontur durch Kurven aller zugelassenen Ordnungen, d. h., z. B. durch Geraden- und Ellipsensegmente. Die berechneten *SW* der verschiedenen Approximationen werden zur Determinierung der aktuell „besten“ Approximation und damit zur Bestimmung des für die weitere Zerlegung der Kontur notwendigen Punktes maximaler Abweichung der Approximation von der Kontur genutzt. Das Ergebnis ist ein *vollständiger Segmentierungsbaum*. Darauf aufbauend wird die „beste“ Repräsentation der Kontur über eine Durchmusterung des Segmentierungsbaums, beginnend bei der höchsten Auflösungsstufe, gesucht. Das in [9] beschriebene Verfahren gliedert sich somit in zwei Stufen: (1) die Generierung des vollständigen Segmentierungsbaumes und (2) die Beseitigung der dadurch bedingten „Übersegmentierung“.

Ausgehend von diesen beiden Verfahren wird das in diesem Beitrag vorgestellte Verfahren unter zwei konkreten Aspekten betrachtet: (1) der Verbesserung der in [6] vorgeschlagenen Generalisierung durch eine Erweiterung der Menge möglicher Kurventypen und (2) die Verbesserung der Performance gegenüber der des in [9] skizzierten Verfahrens durch eine verbesserte Zerlegungsstrategie.

2 Grundlagen

Wesentlich für die Beschreibung des allgemeinen Ansatzes ist die Beantwortung der Fragestellungen: *Was ist gegeben?* und *Was ist gesucht?*. Der Input besteht zum einen aus allen Punkten $\mathbf{a}_i = (x_i, y_i)$, $i \in [1, n]$, einer in \mathcal{E} detektierten *Kontur*, zum anderen aus der Menge der möglichen Approximationen (Interpretationen), wobei jedoch die Beschränkung auf die beiden Kurventypen *Geraden-*

In der Abb. 1 ist die Segmentierung einer Kontur (gestrichelte Linie) in eine Menge von Geradensegmenten skizziert. Das Ergebnis ist eine Beschreibung der Kontur durch die Menge von Geradensegmenten $\{f, g, e, k, l, i\}$. Der Vorteil dieses Verfahrens ist die nichtparametrische Segmentierung; der Nachteil, daß nur Segmente *ein und desselben Typs* approximiert werden. Eine Verallgemeinerung des in [6] beschriebenen Verfahrens wird in [9] vorgestellt. Das Ziel des Verfahrens ist ebenfalls eine *parameterlose* Segmentierung einer Kontur in Kurvenssegmente, welche allerdings jetzt gleichzeitig *verschiedener* Ordnungen sein

segment und *Ellipsensegment* für eine symbolische Beschreibung in den meisten Fällen ausreichend ist und der **Output** des Verfahrens ist eine Liste von Segmenten (Geraden- und Ellipsensegmenten), welche eine gegebene Kontur *optimal im Sinne des Zielfunktional* \mathcal{F} beschreiben. Das Zielfunktional \mathcal{F} wird dabei über die Bewertung der Signifikanzwerte der einzelnen Approximationen definiert. Bevor im Abschnitt 3 das Segmentierungsverfahren detailliert beschrieben wird, werden nachfolgend die wesentlichen Grundlagen für die Approximation von Geraden- und Ellipsensegmenten an eine Kontur skizziert. Die Gleichungen zur Approximation der entsprechenden Segmente können ausgehend von der allgemeinen Gleichung für Kurven 2. Ordnung in der Ebene $\mathbf{F}(\mathbf{z}, \mathbf{a}) = \mathbf{z} \cdot \mathbf{a}$ hergeleitet werden, wobei $\mathbf{z} = [A \ B \ C \ D \ E \ F]$ und $\mathbf{a} = [x^2 \ xy \ y^2 \ x \ y \ 1]^T$. Der Abstand eines Punktes \mathbf{a}_i von einer Kurve $\mathbf{F}(\mathbf{z}, \mathbf{a}) = 0$ wird als *algebraische Distanz* $\mathbf{F}(\mathbf{z}, \mathbf{a}_i) = d_i$ bezeichnet. Ein möglicher Ansatz zur Bestimmung einer Approximation für eine gegebene Kontur besteht in der *Minimierung* der algebraischen Abstände über die Menge aller Punkte im Sinne der kleinsten Quadrate

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}(\mathbf{z}, \mathbf{x}_i)^2 \rightarrow \text{Min.} \quad (2)$$

Um dabei zum einen die triviale Lösung $\mathbf{z} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ auszuschließen und zum anderen zu gewährleisten, daß eine sich möglicherweise ergebende Lösungsvielfalt für ein und dieselbe Punktmenge nur eine Kurve im zweidimensionalen Raum darstellt, werden an den Parametervektor \mathbf{z} Nebenbedingungen gestellt, deren Formulierung sich (idealerweise) am Kontext der Aufgabenstellung orientieren sollten, oftmals jedoch willkürlich motiviert sind.

Approximation von Geradensegmenten. Die allgemeine *Gerade* in der Ebene wird durch die Gleichung $Dx + Ey + F = 0$ vollständig beschrieben. Die zu minimierende Summe der Quadrate der algebraischen Abstände ist damit:

$$\Delta = \sum_{\mathbf{a}_i \in \mathcal{A}} \left[Dx_i + Ey_i + F \right]^2 \rightarrow \text{Min.} \quad (3)$$

Mittels der Nebenbedingung $D^2 + E^2 = 1$ und der Restriktion, daß die approximierte Gerade durch Anfangs- und Endpunkt der Kontur, (x_1, y_1) bzw. (x_n, y_n) , geht, kann die Gleichung problemlos gelöst werden¹. Das Ergebnis der Approximation ist eine Gleichung in der *Hesse'schen Normalform*.

Approximation von Ellipsensegmenten. Den Ausgangspunkt der Approximation eines *Ellipsensegmentes* bildet die allgemeine Gleichung für Kurven 2. Ordnung in der Ebene. Aufgrund der Festlegung, daß das approximierte Ellipsensegment ebenfalls durch Anfangs- und Endpunkt der Kontur, (x_1, y_1) bzw. (x_n, y_n) , geht, können zwei Parameter, hier D und E , problemlos eliminiert werden. Um für die verbleibenden vier Parameter A , B , C und F die triviale Lösung

¹ Der Vorteil der gewählten Nebenbedingung gegenüber anderen ist: die algebraischen Distanzen sind identisch den Euklidischen Distanzen. Damit erfüllt das Abstandsmaß die Forderung nach *Invarianz* gegenüber geometrischen Transformationen.

auszuschließen ist die Formulierung einer Nebenbedingung notwendig². Die Verwendung der Nebenbedingung

$$(\mathbf{z}')^T \mathbf{Cz}' = AC - 4B = 1 \quad \text{mit} \quad \mathbf{z}' = [A \ B \ C \ F], \quad (4)$$

bietet sich dabei an³. Die numerische Lösung des sich dabei ergebenden nichtlinearen Gleichungssystems liefert die Parameter eines optimal durch die Punkte $a_i \in \mathcal{A}$, $i \in [1, n]$, gelegten Ellipsensegmentes unter Restriktionen. Die dabei zu minimierende Summe⁴ ist:

$$\Delta = \sum_{a_i \in \mathcal{A}} \left[A (x_i^2 + a_{10}x_i - a_{01}y_i) + B (x_i y_i + b_{10}x_i - b_{01}y_i) + C (y_i^2 + c_{10}x_i - c_{01}y_i) + F (1 + f_{10}x_i - f_{01}y_i) \right]^2 \rightarrow \text{Min.} \quad (5)$$

mit

$$\begin{aligned} a_{10} &= \frac{x_n^2 y_1 - x_1^2 y_n}{x_1 y_n - x_n y_1}, & b_{10} &= \frac{x_n y_1 y_n - x_1 y_1 y_n}{x_1 y_n - x_n y_1}, & c_{10} &= \frac{y_1 y_n^2 - y_1^2 y_n}{x_1 y_n - x_n y_1} \\ a_{01} &= \frac{x_1^2 x_n - x_1 x_n^2}{x_1 y_n - x_n y_1}, & b_{01} &= \frac{x_1 x_n y_1 - x_1 x_n y_n}{x_1 y_n - x_n y_1}, & c_{01} &= \frac{x_n y_1^2 - x_1 y_n^2}{x_1 y_n - x_n y_1} \\ f_{10} &= \frac{y_1 - y_n}{x_1 y_n - x_n y_1}, & f_{01} &= \frac{x_n - x_1}{x_1 y_n - x_n y_1} \end{aligned}$$

In [1] und [4] wird ein relativ einfacher Ansatz zur Lösung des Gleichungssystems vorgestellt. Die Minimierung wird dabei durch Lösen eines rang-defizienten verallgemeinerten Eigenwertproblems realisiert. Angewandt auf die Gl. (5) ergibt sich das *verallgemeinerte Eigenwertproblem*: $\mathbf{Bz}' = \lambda \mathbf{Cz}'$ mit $\mathbf{B} = \mathbf{U}^T \mathbf{U}$ und der Matrix

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} x_1^2 + a_{10}x_1 - a_{01}y_1 & x_2^2 + a_{10}x_2 - a_{01}y_2 & \dots & x_n^2 + a_{10}x_n - a_{01}y_n \\ x_1 y_1 + b_{10}x_1 - b_{01}y_1 & x_2 y_2 + b_{10}x_2 - b_{01}y_2 & \dots & x_n y_n + b_{10}x_n - b_{01}y_n \\ y_1^2 + c_{10}x_1 - c_{01}y_1 & y_2^2 + c_{10}x_2 - c_{01}y_2 & \dots & y_n^2 + c_{10}x_n - c_{01}y_n \\ 1 + f_{10}x_1 - f_{01}y_1 & 1 + f_{10}x_2 - f_{01}y_2 & \dots & 1 + f_{10}x_n - f_{01}y_n \end{bmatrix}^T.$$

² Häufig wird dabei auf die Nebenbedingung $F = -1$ zurückgegriffen. Eine plausible Begründung für die Wahl dieser Nebenbedingung, abgesehen von Linearität und Einfachheit, wird dabei meist nicht angegeben. Andere Autoren schlagen Nebenbedingungen der Form $A^2 + B^2 + C^2 + D^2 + E^2 + F^2 = 1$, $A^2 + \frac{1}{2}B^2 + C^2 = 1$ bzw. $A + C = 1$ vor. Kritisch anzumerken ist, daß die bisher erwähnten Restriktionen nicht notwendigerweise die Anpassung einer Ellipse bedingen. Vielmehr kann durch diese Formulierungen an eine beliebige Kontur eine *Ellipse*, eine *Hyperbel* oder eine *Parabel* angepaßt werden. ³ Im Zusammenhang mit dem Anpassen von Ellipsen wurde diese Nebenbedingung erstmals in [3] verwendet. Auf Grund dieser scharfen Formulierung ist die Approximation einer Ellipse an eine gegebene Punktmenge *immer* gewährleistet. ⁴ Da die wahre Euklidische Distanz eines Punktes x_i von einer Ellipse nicht durch direkte Methoden bestimmt werden kann, wird eine algebraische Distanz als Approximation genutzt. In z. B. [1] und [11] wurde gezeigt, daß auf Grund der Nebenbedingung (Gl. 4) die algebraische Distanz *a*) *ähnlich* der Euklidischen Distanz und somit *b*) hinreichend *invariant* gegenüber Euklidischen Transformationen ist.

Die Lösung des Eigenwertproblems liefert vier Eigenwerte, von denen genau ein Eigenwert $\lambda_i < 0$ ist. Der diesem Eigenwert zugehörige Eigenvektor ist die gesuchte Lösung für die Approximation eines Ellipsensegmentes an die Kontur.

3 Segmentierungsverfahren

Das Verfahren zur Segmentierung einer Kontur in eine Menge von Geraden- und Ellipsensegmente basiert auf den in [5, 12] skizzierten Ansätzen. Ausgehend von der eingangs erwähnten allgemeinen Struktur der *parameterlosen Segmentierung* läßt sich das Verfahren in die Menge der iterativen Verfahren einordnen, wobei auf Grund der Integration sogenannter kontextueller Informationen in den Prozeß der Segmentierung eine Spezifizierung des nachfolgend dargestellten Verfahrens als *Relaxationsverfahren* vorgenommen werden kann. Damit läßt sich das Segmentierungsverfahren in die drei Phasen *Initialisierung*, *Aktualisierung* und *Evaluierung* gliedern⁵.

Initialisierung. In der Initialisierungsphase wird die Kontur \mathcal{A} entweder durch ein Geradensegment oder durch ein Ellipsensegment approximiert. Dazu werden in einem ersten Schritt an \mathcal{A} beide Typen von Kurven angepaßt und in einem zweiten Schritt die für die beiden Approximationen $\mathcal{H}_T, T = \{\text{Geradensegment } g, \text{Ellipsensegment } e\}$, berechneten Signifikanzwerte SW_T

$$SW_T = \frac{\max_{a_i \in \mathcal{A}} \left(\min_{h_j \in \mathcal{H}_T} \| \mathbf{x}(a_i) - \mathbf{x}(h_j) \|^2 \right)}{\ln g(\mathcal{H}_T)} \quad (6)$$

mit

$$\mathbf{x}(a_i) = \begin{pmatrix} x(a_i) \\ y(a_i) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x}(h_j) = \begin{pmatrix} x(h_j) \\ y(h_j) \end{pmatrix}, \quad \begin{array}{l} x(a_i), y(a_i) \in \mathbb{N} \\ x(h_j), y(h_j) \in \mathbb{R} \end{array}$$

miteinander verglichen. Die Kontur \mathcal{A} wird dann genau der Interpretation zugeordnet, durch welche sie besser approximiert wird, d. h., für welche der berechnete SW_T absolut kleiner ist.

Aktualisierung. Normalerweise stellt die initiale Zuordnung nicht die optimale Segmentierung von \mathcal{A} dar, so daß eine entsprechende Aktualisierung notwendig ist. Der prinzipielle Ablauf der Aktualisierung ist wie folgt definiert:

1. Die gegebene Kontur wird an der Position pos_T geteilt.
2. An die beiden entstehenden Teilsegmente werden sowohl Geraden- als auch Ellipsensegmente angepaßt.
3. Die berechneten Signifikanzwerte SW_T werden als Akzeptanzkriterium für die aktuelle Teilung verwendet.

⁵ Für eine detaillierte Darstellung der Struktur von Relaxationsverfahren und speziell dem Aufbau der Aktualisierung als wesentliches Differenzierungsmerkmal gegenüber „gewöhnlichen“ Iterationsverfahren wird auf [2] verwiesen.

Die Teilung von \mathcal{A} wird im Gegensatz zu [9] nicht nur restriktiv zum Ergebnis der Initialisierung vorgenommen, sondern temporär an *allen*, entsprechend den verschiedenen Approximationen bestimmten Positionen maximaler Abweichung realisiert, wodurch zwar einerseits die Komplexität des Verfahrens wächst, andererseits aber auch die Wahrscheinlichkeit zunimmt, eine optimale Teilung und damit eine optimale Approximation der Kontur durch eine Menge von Geraden- und Ellipsensegmenten zu finden.

$$pos_T = \arg \max_{a_i \in \mathcal{A}} \left(\min_{h_j \in \mathcal{H}_T} \| \mathbf{x}(a_i) - \mathbf{x}(h_j) \|^2 \right) \quad (7)$$

Damit existieren genau zwei Positionen, an denen \mathcal{A} geteilt werden kann, wodurch sich insgesamt 12 verschiedene Möglichkeiten der Kombination der Approximationen ergeben, die \mathcal{A} vollständig beschreiben. In der Abb. 2 sind die möglichen Approximationen einer, an den verschiedenen Positionen geteilten Kontur (gestrichelte Linie) skizziert, wobei in Anbetracht einer besseren Übersichtlichkeit die verschiedenen Approximationen in zwei Skizzen dargestellt sind.

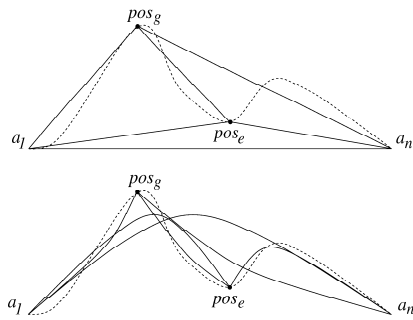


Abbildung 2. Menge aller Approximationen für eine Kontur \mathcal{A}

In jedem Iterationsschritt s gilt es, diejenige Kombination von Approximationen auszuwählen, die die Kontur am „besten“ beschreibt“. Entsprechend der charakteristischen Eigenschaft der Segmentierung (*parameterlos*) ist diese Entscheidung anhand von aus der aktuellen Segmentierung ableitbaren Kriterien zu realisieren. Die Basis des gesamten Verfahrens bilden somit die für die verschiedenen Approximationen der (gesplitteten) Kontur berechneten Signifikanzwerte $SW_T^{[s]}$. Um Aussagen über die Akzeptanz der aktuellen Zerlegung von \mathcal{A} treffen zu können, ist die

Formulierung einer Strategie zur Bewertung der Zerlegung notwendig. Denkbare Strategien sind z. B. die Bestimmung

- I. der Teilkontur mit dem *niedrigsten* $SW_T^{[s]}$, und darauf aufbauend
 - a) der Kombination, welche den k -kleinsten $SW_T^{[s]}$, $k = \{2, 3\}$, oder
 - b) der Kombination, welche den niedrigsten mittleren $SW_T^{[s]}$ hat,
- II. der Kombination mit dem niedrigsten, *arithmetisch gemittelten* $SW_T^{[s]}$ bzw.
- III. der Kombination mit dem niedrigsten, *gewogen gemittelten* $SW_T^{[s]}$.

Evaluierung. Das Segmentierungsverfahren terminiert genau dann, wenn ein aus (allen) Signifikanzwerten $SW_T^{[s]}$ der jeweils approximierten Teile der Kontur, bezogen auf die aktuell betrachtete Teilkontur, bestimmter Wert größer ist als der Signifikanzwert $SW^{[s-1]}$ der aktuellen Approximation. Es liegt dann eine lokale Konsistenz vor. Wird die lokale Konsistenz für alle aktuellen Teile der Kontur angenommen, ist ein Zustand globaler Konsistenz erreicht und das Verfahren terminiert.

4 Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen konzentrieren sich hier auf die Evaluierung des Segmentierungsergebnisses. In Bezug auf die zur Bewertung einer aktuellen Zerlegung verwendete Strategie haben experimentelle Untersuchungen gezeigt, daß die Strategie I.a) die besten Ergebnisse respektive der nachfolgend formulierten Kriterien liefert. Zur Beurteilung der Performance des Segmentierungsverfahrens im Vergleich zu anderen Verfahren⁶ gilt es jetzt, geeignete Kriterien zu formulieren. Die Kriterien zur Charakterisierung der Performance orientieren sich dabei an den in [9] definierten Merkmalen:

- die Anzahl aller approximierten Segmente \mathcal{H}_T für die Kontur \mathcal{A} ,
- die *mittlere Genauigkeit* aller approximierten Segmente \overline{ISE} ,
- die *minimale Genauigkeit* aller approximierten Segmente ISE_{max} , d. h. die *maximale* Abweichung über alle approximierten Segmente bezüglich \mathcal{A} ,
- den *mittleren Signifikanzwert* \overline{SW} ,
- das Verhältnis zwischen $\overline{ISE} \cdot \text{card}(\mathcal{H}_T)$ und $\text{card}(\mathcal{A})$ (FOM_1) und
- das Verhältnis zwischen der Anzahl der Parameter aller approximierten Segmente multipliziert mit \overline{ISE} und $\text{card}(\mathcal{A})$ (FOM_2) handelt.

In der Tabelle 1 wird anhand der Werte \mathcal{H}_T , \overline{ISE} , ISE_{max} und \overline{SW} sowie der beiden Verhältnisse FOM_1 und FOM_2 die Segmentierung charakterisiert. Für einen direkten Vergleich mit Ergebnissen anderer Segmentierungsverfahren (Segmentierung nach [6] und [9]) enthalten die zwei letzten Zeilen der Tabelle die entsprechenden Werte.

Testbild	Strategie							
		\mathcal{H}_T	\overline{ISE}	ISE_{max}	\overline{SW}	FOM_1	FOM_2	
\mathcal{B}_1	I.a)	228	175	1.3962	6.4392	0.1235	33.3234	174.8801
	Rosin/West	297	58	1.3542	6.2534	0.1250	42.5968	165.9745
	Lowe	585	—	1.2521	9.9611	0.1286	50.9951	203.9805
		<i>g</i>	—	168	3.3375	17.0294	0.1808	14.5078
\mathcal{B}_2	I.a)	287	198	1.6129	9.2980	0.2148	59.4853	306.6994
	Rosin/West	623	77	1.6270	7.5263	0.2509	72.7235	352.9167
	Lowe	572	—	1.6617	6.3881	0.2762	84.5815	338.3259
		<i>e</i>	—	267	2.7782	28.2843	0.3446	33.5376

Tabelle 1. Merkmale zur Charakterisierung des Segmentierungsverfahrens sowie der Verfahren nach Lowe [6] und Rosin/West [9] anhand der Testbilder \mathcal{B}_1 und \mathcal{B}_2

Um einen direkten Vergleich mit den in [9] dargestellten Ergebnissen zu ermöglichen, wird eine in [9] verwendete ikonische Beschreibung der Szene⁷ „ICCV32“ (\mathcal{B}_1) genutzt. Die zweite Szene \mathcal{B}_2 ist ein Ausschnitt aus einer Industriaufnahme. Die in der Tabelle 1 und den Abbildungen 3 und 4 skizzierten Ergebnisse

⁶ Der Vergleich mit Verfahren, welche auf der Integration von *heuristisch* festgelegten Schwellwerten basieren, ist schwierig, da die Bestimmung der Schwellwerte i. a. stark applikationsabhängig ist und daher in der Literatur häufig unzureichend dokumentiert wird. ⁷ <ftp://ftp.cs.curtin.edu.au/pub/geoff>

zeigen, daß das hier vorgestellte Segmentierungsverfahren erfolgreich zur Generalisierung von Konturen eingesetzt werden kann. Die Menge der dabei approximierten Segmente beschreibt die Menge der aus der ikonischen Beschreibung eines Bildes extrahierten Konturen in akzeptabler Qualität (\overline{ISE} und ISE_{max}).

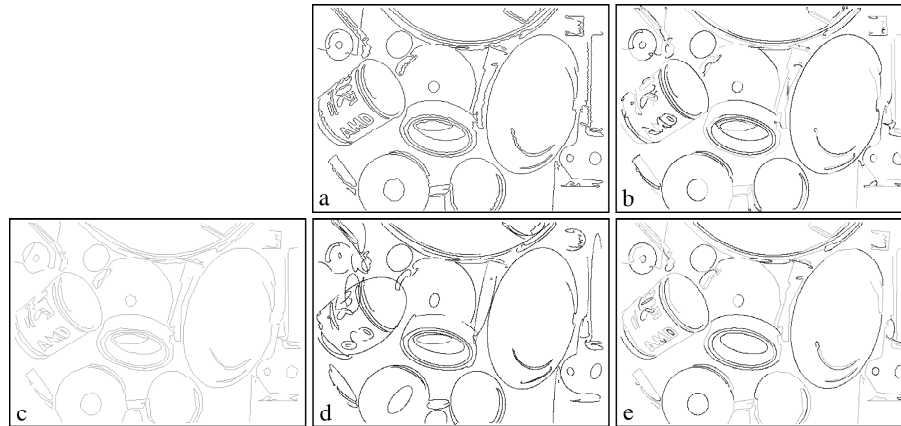


Abbildung 3. a) Testbild \mathcal{B}_1 , Segmentierung der a) ikonischen Beschreibung von \mathcal{B}_1 nach der Vorschrift b) *I.a*), c) *Lowe* [Geradensegmente], d) *Lowe* [Ellipsensegmente] und e) *Rosin/West* [Geraden- und Ellipsensegmente]

Der essentielle Unterschied zur Generalisierung von Konturen nach dem in [6] beschriebenen Ansatz ist die *gleichzeitige* Approximation von Geraden- und Ellipsensegmenten und respektive des Ansatzes von Rosin/West [9] die Modifikation der Strategie zur Bewertung der aktuellen Generalisierung einer Kontur und der damit verbundenen Formulierung einer geeigneten Vorschrift zur Bestimmung der aktuell „besten“ Generalisierung. Damit wird im Gegensatz zu [9] nur der *notwendige* Segmentierungsbaum generiert, wodurch die Generalisierung effizienter wird.

Zusammengefaßt kann das hier vorgestellte Ansatz zur Segmentierung von Konturen durch folgende Eigenschaften charakterisiert werden: (1) die *parameterlose* Segmentierung, (2) die *Invarianz* gegenüber geometrischen Transformationen, (3) die *Simplizität* des gewählten Ansatzes und (4) die verhältnismäßig effiziente Segmentierung.

Literatur

1. F. L. Bookstein. Fitting conic sections to scattered data. 9:56–71, 1979.
2. P. Faber. *Relaxationsverfahren in der Mustererkennung: Ein allgemeiner Ansatz*. Shaker Verlag, Aachen, 1999.
3. A. W. Fitzgibbon and R. B. Fisher. A buyer’s guide to conic fitting. IEE, BMVA Press, 1995.
4. A. W. Fitzgibbon, M. Pilu, and R. B. Fisher. Direct least squares fitting of ellipses. Technical report, University of Edinburgh, 1996.

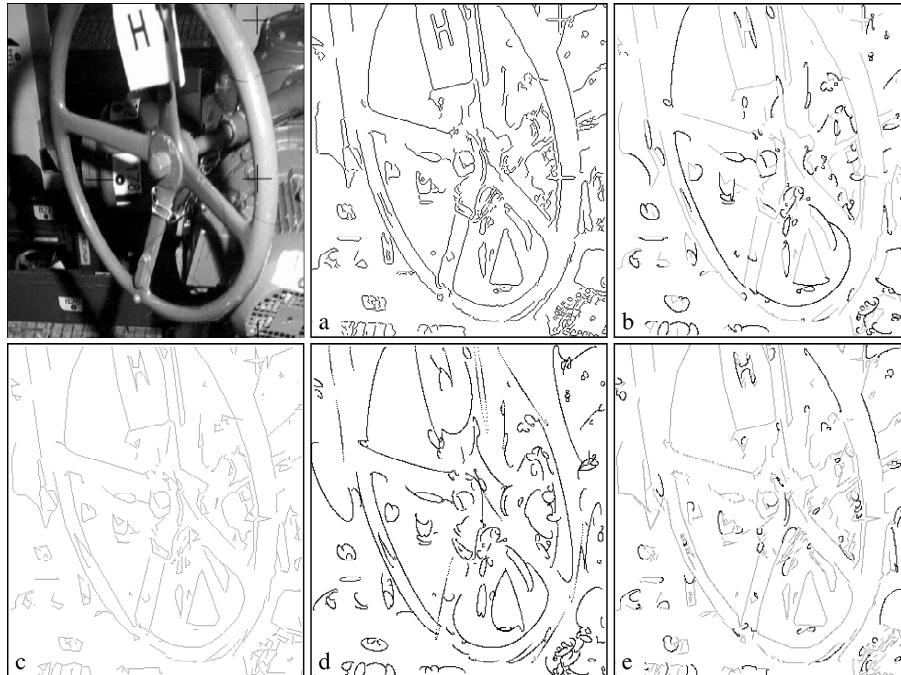


Abbildung 4. a) Testbild \mathcal{B}_2 , Segmentierung der a) ikonischen Beschreibung von \mathcal{B}_2 nach der Vorschrift b) I.a), c) Lowe [Geradensegmente], d) Lowe [Ellipsensegmente] und e) Rosin/West [Geraden- und Ellipsensegmente]

5. D. G. Lowe. *Perceptual Organization and Visual Recognition*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht-Boston-London, 1985.
6. D. G. Lowe. Three-dimensional object recognition from single two-dimensional images. 31:355–395, 1987.
7. T. Pavlidis. Curve fitting with conic splines. *ACM Transactions on Graphics*, 2(1):1–31, 1983.
8. S. Pollard and J. Porrill. Robust recovery of 3D ellipse data. In *British Machine Vision Conference*, pages 39–48. Springer Verlag, 1992.
9. P. L. Rosin and G. A. W. West. Nonparametric segmentation of curves into various representations. 17(12):1140–1153, December 1995.
10. Y. Shirai. Recognition of real-world objects using edge cues. In A. R. Hanson and E. M. Riseman, editors, *Computer Vision Systems*, pages 353–362. Academic Press, New York, 1978.
11. G. Taubin. Estimation of planar curves, surfaces and non-planar space curves defined by implicit equations, with applications to edge and range image segmentation. 13(11):1115–1138, November 1991.
12. G. A. W. West and P. L. Rosin. Techniques for segmenting image curves into meaningful descriptions. 24(7):643–652, July 1991.
13. D. M. Wuenscher and K. L. Boyer. Robust contour decomposition using a constant curvature criterion. 13(1):41–51, January 1991.