Automatische Bewertung von Bildverarbeitungsroutinen zur konturorientierten Segmentierung mit FuzzySOLUTION*

H. Münkel, C.-E. Liedtke und U. Rost

Institut für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung, Universität Hannover, Appelstr. 9a, 30167 Hannover, Germany

Zusammenfassung Derzeit herrscht ein allgemeines großes Interesse an der Bewertung von Bildverarbeitungsverfahren. In den letzten 20 Jahren wurde weltweit eine Vielzahl von Verfahren erarbeitet und es kommen immer neue dazu. Bei der Lösung eines konkreten Bildverarbeitungsproblems stellen sich daher oft die Fragen, welches Verfahren für eine vorgegebene Aufgabenstellung am besten geeignet ist und wie man Bildverarbeitungsverfahren beurteilen könnte.
Für den Spezialfall der konturorientierten Segmentierungsverfahren wird ein Lösungsansatz für dieses Problem vorgestellt. Das System FuzzySOLUTION ist in der Lage Bildverarbeitungsverfahren aufgrund einer vorgegebenen Aufgabenstellung zu konfigurieren, deren freie Parameter zu adaptieren und anschließend die einzelnen Verfahren hochsprachlich zu bewerten.

1 Einleitung

Derzeit herrscht ein allgemeines großes Interesse an der Bewertung von Bildverarbeitungsverfahren [1], [2], [3], [4], [5]. In den letzten 20 Jahren wurde weltweit eine Vielzahl von Verfahren erarbeitet und es kommen immer neue dazu (siehe z.B. [6]). Dadurch stellt sich für die Entwickler von Bildverarbeitungssystemen häufig die Frage, ob die Verfahren tatsächlich immer neu sind und welches das beste für die eigene Aufgabenstellung ist. Dieses Problem führt zur allgemeineren Frage: "Wie könnte man Bildverarbeitungsverfahren beurteilen?"

Zur objektiven Beurteilung braucht man ein Gütemaß. In der optischen Meßtechnik (z.B. Tiefenmessung durch Stereo, Bewegungsmessung, Höhen, Breitenmessung, usw.) ist die Güte durch Messung mit alternativen Verfahren direkt am physikalischen Objekt oft leicht überprüfbar. Wie sieht es aber aus, wenn nur ein Teil der Verarbeitungskette (z.B. die Segmentierung) betrachtet wird oder wenn die Ergebnisse nicht-meßtechnische oder sogar subjektive Qualitäten aufweisen. Wie muß man dann Verfahren beurteilen?

* Die Entwicklung von SOLUTION wurde unterstützt durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft. Besonderer Dank geht an das National Research Council of Canada und insbesondere an R.A. Orchard für die Entwicklung und Zurverfügungstellung von FuzzyCLIPS, in dem ein wesentlicher Teil von FuzzySOLUTION realisiert ist.

Eine objektive Beurteilung des Auswahlprozesses ist zwar nicht möglich, wir beobachten aber, daß ein Bildverarbeitungsexperte bei der Entwicklung eines Systems die nach seiner Meinung günstigsten Verfahren aussucht und auch auf der Basis der Beurteilung von Zwischenresultaten offensichtlich in der Lage ist, die Richtigkeit seiner Auswahl zu verifizieren. Deshalb wollen wir uns für die Fälle, für die es keine anderen besseren und objektiven Kriterien gibt, an der Vorgehensweise des Menschen bei der Bewertung von Bildverarbeitungsverfahren orientieren.

Für ein automatisches System zur Beurteilung von Bildverarbeitungsverfahren bedeutet dies, daß es ähnliche Beurteilungskriterien verwenden sollte, wie sie auch der menschliche Experte verwendet. Auf jeden Fall sollte der Experte in der Lage sein die von diesem System getroffenen Entscheidungen nachzuvollziehen. Dies bedeutet, daß eine explizite Wissensrepräsentation angestrebt werden muß. Da außerdem ein Mensch eher in hochsprachlichen Begriffen wie *Gut* und *Schlecht* oder *Stark* und *Schwach* anstatt in abstrakten Zahlen denkt, sollte auch das automatische System diese Begriffe verwenden.

Die Schlußfolgerungen eines menschlichen Experten beruhen nicht nur auf absolut sicherem Wissen. Daher soll das System weiterhin in der Lage sein, Unsicherheiten z.B. in Form von Fuzzy Sets und Certainty Values zu modellieren.

Wir gehen davon aus, daß eine Bewertung von Bildverarbeitungsverfahren nur im Kontext einer spezifischen Aufgabenstellung sinnvoll ist. Das heißt, das Bewertungssystem muß an die jeweilige Aufgabe vom Anwender angepaßt werden können. Dies kann z.B. bedeuten, daß die einzelnen Beurteilungskriterien unterschiedliche Prioritäten (Gewichte) erhalten oder aber das unterschiedliche Werte (Zielvorgaben) angestrebt werden sollen.

Als Ziel soll hier zunächst einmal die Gewinnung von Konturbildern aus Grauwertbildern betrachtet werden. Für die unterschiedlichsten Anwendungen wurden in der Vergangenheit spezielle Konturfindungsverfahren hergeleitet, die dann für die spezielle Anwendung sehr gut, für andere Anwendungen weniger gut funktionierten. Wir gehen davon aus, daß es genügt einen Satz von Standardverfahren (hier unterteilt in Vorverarbeitungs-, Konturverstärkungs-, Konturfindungs- und Nachbearbeitungsverfahren) festzulegen und dann für die jeweilige Aufgabenstellung zu bewerten, welche Kombination von Verfahren mit welchen Parametereinstellungen die beste ist. Eine Beurteilung der Qualität kann dabei nur für den gesamten Pfad und nicht für einzelne Operatoren erfolgen, da die Einzelverfahren in der Regel nicht unabhängig voneinander sind.

Hierfür muß im ersten Schritt eine Konfiguration, d.h. die Auswahl aller geeigneten Operatoren und deren Verknüpfung zu sinnvollen Operatorpfaden durchgeführt werden. Die Konfiguration kann anhand von Eigenschaften der zu verarbeitenden Grauwertbilder, Randbedingungen wie z.B. Rechenzeitanforderungen und A-Priori-Wissen über die Operatoren erfolgen. Durch die Konfiguration wird lediglich die Menge der insgesamt möglichen Verfahren aufgrund von Vorwissen reduziert.

Im zweiten Schritt müssen die freien Parameter an die aktuelle Aufgabenstellung adaptiert werden, da andernfalls auch gut geeignete Verfahren schlechte Ergebnisse liefern könnten.

Nachdem alle in Frage kommenden Verfahren konfiguriert und adaptiert worden sind, kann eine abschließende Bewertung und ein Vergleich der Verfahren durchgeführt werden.

Im folgenden wird das System FuzzySOLUTION vorgestellt, das die oben beschriebenen Anforderungen an ein System zur automatischen Bewertung von Bildverarbeitungsverfahren erfüllt. Es ist in der Lage eine vergleichende Bewertung von konturorientierten Segmentierungsverfahren automatisch durchzuführen und für eine vorgegebene Aufgabenstellung das am besten geeignete Verfahren auszuwählen. Im Abschnitt 2 wird die Architektur von FuzzySOLUTION vorgestellt, in 3 auf die eigentliche Bewertung näher eingegangen und im Abschnitt 4 einige Ergebnisse vorgestellt. Abschließend wird im Abschnitt 5 eine kurze Zusammenfassung gegeben.

2 Architektur von FuzzySOLUTION

Am Institut für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung wurden in den letzten drei Jahren die Systeme SOLUTION [7] und FuzzySOLUTION entwickelt. Beide Systeme sind in der Lage Low- Level- Bildverarbeitungspfade zur konturorientierten Segmentierung für vom Anwender vorgegebene Aufgabenstellungen automatisch aus einzelnen Bildverarbeitungsoperatoren zu konfigurieren und deren Parameter zu adaptieren. Sie basieren auf den Erfahrungen, die mit dem Vorgängersystem Conny [8] gesammelt wurden.

Ein Großteil des entwickelten Programmcodes wird von beiden Systemen gemeinsam benutzt. Die wesentlichen Unterschiede liegen dabei in der Verwendung von Fuzzy Sets und einer Fuzzy Inferenz Maschine für die bessere Modellierung unsicheren Wissens, verbunden mit anderen Adaptionsstrategien in der Adaptionseinheit von FuzzySOLUTION. Außerdem verfügt FuzzySOLUTION im Gegensatz zu SOLUTION bisher nicht über automatische Einheiten zum Lernen von Adaptionswissen.

Im folgenden wird nur das Konfigurations- und Adaptionssystem FuzzySOLUTION näher beschrieben.

2.1 Gesamtsystem

Abb. 1 zeigt die Struktur von FuzzySOLUTION. Über das Benutzerinterface spezifiziert der Anwender die zu lösende Aufgabe. Die Aufgabenstellung besteht aus der Festlegung des Eingangsbildes, Eigenschaften des Eingangsbildes (z.B. Rauschen), Randbedingungen (z.B. Rechenzeit) und Anforderungen an die Eigenschaften des Ergebnisbildes (z.B. die gewünschte Breite der Konturen).

Mit diesen Informationen stößt die Steuereinheit als erstes die Konfigurationseinheit an, die aus der Menge aller möglichen Operatorpfade diejenigen auswählt, die als am besten geeignet erscheinen um die Aufgabenstellung zu erfüllen. Danach wird von der Steuereinheit die Adaptionseinheit angestoßen, die für jeden konfigurierten Pfad die Parameter seiner Operatoren an die vorgegebene Aufgabenstellung anpaßt.

Zum Schluß werden alle adaptierten Pfade durch die Bewertungseinheit beurteilt, d.h. es wird festgestellt, wie gut sie die vorgegebene Aufgabenstellung erfüllen. Der Pfad, der das Konturbild mit der, im Sinne der Aufgabenstellung, besten Qualität erzeugt hat, wird dem Anwender zusammen mit dem zugehörigen Ergebnisbild über das Benutzerinterface präsentiert.

Das ganze System arbeitet wissensbasiert. Die Wissenbasis besteht dabei aus explizitem Wissen über die Konfiguration und Adaption und aus Wissen über die eigentliche Bildverarbeitung. Während das Wissen über die Bildverarbeitung in Form von Klassenhierachien und Prozeduren abgelegt ist, ist das Adaptions- und Konfigurationswissen in Form von Regeln kodiert.

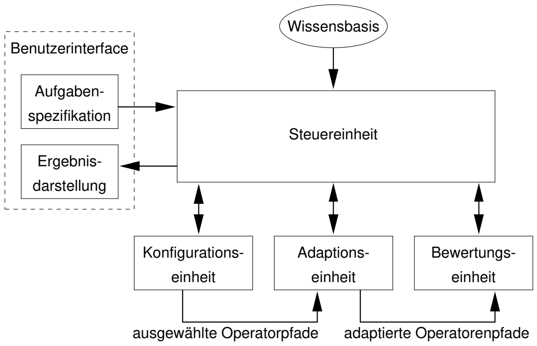

Abbildung1. Struktur von FuzzySOLUTION

2.2 Konfiguration

Für die Konfiguration werden der Aufgabenstellung Informationen über die Eigenschaften des Eingangsbildes entnommen. Diese Informationen liegen in hochsprachlicher Form vor, z.B. "das Rauschen ist stark", "die Kantenanstiegsbreiten sind gering" und "die Kantenanstiegshöhen sind groß". Weitere Informationen aus der Aufgabenstellung betreffen Forderungen nach der Rechenzeit oder der Lagegenauigkeit von Objektecken und Kanten. Auch hier werden hochsprachliche Angaben verarbeitet, z.B. "die Rechenzeit ist irrelevant", "es ist wichtig, daß die Lagegenauigkeit der Ecken hoch ist" usw.

Aufgrund dieser Informationen werden im ersten Schritt ungeeignete Operatoren ausgeschlossen. Im zweiten Schritt werden aus den verbliebenen Operatoren alle gültigen Operatorenpfade erzeugt und im letzten Schritt die freien Parameter initialisiert.

Da die Konfigurationseinheiten von SOLUTION und FuzzySOLUTION identisch sind, wird hier für eine detailliertere Beschreibung der Konfiguration auf [7] verwiesen.

2.3 Adaption

In Abb. 2 ist der Ablauf der Adaption in FuzzySOLUTION dargestellt. Im ersten Schritt wird aus dem Grauwertbild durch Ausführung des Bildverarbeitungspfades ein Konturbild erzeugt. Dabei wird der initiale Parametersatz P_0 verwendet.

Mit Hilfe von speziellen Sensoren (Meßroutinen, s.a. Abschnitt 3) werden Eigenschaften des Konturbildes (z.B. die Breite der Konturen) gemessen. Die gemessenen Werte werden auf einen Wertebereich von 0 bis 4.0 skaliert und in Fuzzy Sets (Crisp-Werte mit einem Zugehörigkeitswert von 1.0) umgewandelt.

Aus der vom Anwender vorgegebenen Aufgabenstellung (in der z.B. steht: *Es ist wichtig, daß die Breite der Konturen den Wert Nicht hat.*) wird das Globale

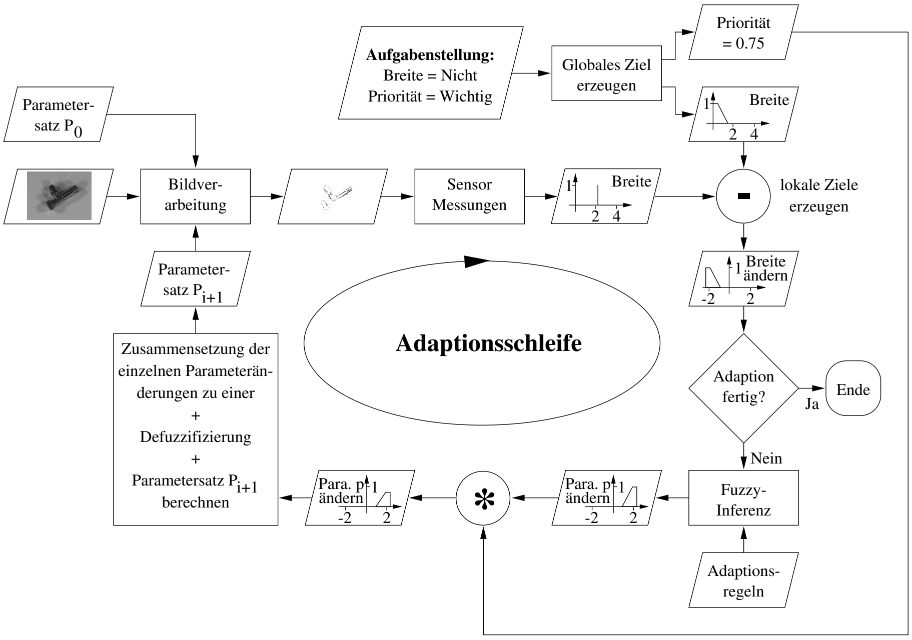

Abbildung2. Adaption in FuzzySOLUTION

Ziel für die Adaption erzeugt. Dabei werden die hochsprachlichen Werte der Konturbildbeschreibungen (z.B.: *Breite = Nicht*) in Fuzzy Sets umgewandelt. Die hochsprachlich vorgegebenen Prioritäten werden in reelle Zahlen von 0.0 bis 1.0 umgewandelt. So wird z.B. aus dem hochsprachlichen Wert *Wichtig* der numerische Wert 0.75.

Die Fuzzy Sets der Zielvorgabe werden mit den gemessenen Fuzzy Sets verglichen. Dies geschieht, indem durch eine Subtraktion die Fuzzy Sets der *lokalen Ziele* (notwendige Änderungen der Meßwerte, um das globale Ziel zu erreichen) ermittelt werden. Für die Breite ergibt sich so z.B. ein Fuzzy Set, das die Stärke der notwendigen Änderung der Breite angibt, um ausgehend von dem momentanen Zustand des Konturbildes den gewünschten Zielzustand zu erreichen. Die Fuzzy Sets der lokalen Ziele liegen in einem Wertebereich (Universe of Discourse) von -4 bis 4. Dabei bedeuten negative Werte, daß der zugehörige Sensorwert verringert und positive Werte, daß er erhöht werden soll.

Aus allen lokalen Zielen wird im nächsten Schritt ein Qualitätsmaß Q nach Gl. 1 berechnet. Dabei ist N die Anzahl aller lokalen Ziele, l_i der numerische Wert des defuzzifizierten lokalen Zieles Z_i und p_i seine Priorität aus der Aufgabenstellung. Es stellt im Prinzip ein mit den Prioritäten gewichtetes Abstandsmaß zwischen den Sollvorgaben und den Ist-Werten da und kann Werte zwischen 0.0 (schlecht) und 1.0 (gut) annehmen.

$$Q = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (l_i \cdot p_i)^2}}{4 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{N} p_i^2}} \qquad (1)$$

Wenn das Qualitätsmaß Q eine vorgegebene Mindestqualität erreicht hat, wird die Adaption an dieser Stelle beendet. Ist dies nicht der Fall, wird als nächstes eine Fuzzy-Inferenz durchgeführt. Dabei werden Regeln verwendet, die im einfachsten Fall z.B. wie folgt lauten:

Wenn die Breite verringert werden soll,
dann erhöhe den Schwellwert des Binärisierungsoperators.

Als Ergebnis einer gefeuerten Regel wird ein Fuzzy Set für eine Parameteränderung erzeugt, deren Stärke von der Stärke der zu erreichenden Sensoränderung abhängt. Wie bei einer Fuzzy-Inferenzmachine üblich, feuert aber nicht nur eine Regel, sondern alle Regeln, die mindestens zu einem gewissen Grad erfüllt sind. Alle *Teiländerungen* werden anschließend miteinander fusioniert (Vereinigung aller Fuzzy Sets). Bei FuzzySOLUTION werden allerdings zuvor noch die *Teiländerungen* mit den Prioritäten der lokalen Ziele gewichtet. Dabei wird der *Degree of Membership* aller Elemente des Fuzzy Sets mit der Priorität multipliziert. Dies hat zur Folge, daß der Anteil der *Teiländerung* an der gesamten Änderung sinkt, wenn die Priorität kleiner als 1.0 ist.

Durch Defuzzifizierung nach dem Schwerpunktverfahren wird schließlich der numerische Wert für die Parameteränderung und daraus dann der neue Parametersatz P_{i+1} ermittelt. Mit dem neuen Parametersatz beginnt das ganze wieder von vorn und wird solange durchgeführt, bis die oben genannte Abbruchbedingung erfüllt ist.

3 Das hochsprachliche Bewertungssystem

Das hochsprachliche Bewertungssystem von FuzzySOLUTION wird sowohl zur iterativen Optimierung der Parameterwerte während der Adaption als auch für die Bewertung und den Vergleich der verschiedenen Bildverarbeitungsverfahren (Operatorpfade) nach der Konfiguration und Adaption verwendet. Es besteht aus zur Zeit 19 verschiedenen Sensoren (Meßroutinen), die Eigenschaften im Konturbild (Ergebnisbild) messen.

Die Sensoren lassen sich in zwei Gruppen aufteilen. Zur ersten Gruppe gehören Sensoren, die hauptsächlich eingesetzt werden, um schnell und zuverlässig extreme Bildzustände erkennen zu können. In diesen Zuständen besitzt das Konturbild entweder sehr viele Konturpunkte, so daß die Berechnung der übrigen Sensoren extrem lange dauern würde, oder aber nur sehr wenige Konturpunkte, so daß die übrigen Sensoren entweder gar keine oder nur unzuverlässige Werte liefern. Diese Sensoren werden daher hauptsächlich während der Adaption benötigt, um das System aus diesen Extremzuständen zu bringen. Zur Qualitätsbeurteilung spielen sie höchstens eine untergeordnete Rolle. Hierfür sind hauptsächlich die Sensoren der zweiten Gruppe gedacht. Sie werden aber auch für die Adaption benötigt, wenn sich das System nicht in einem Extremzustand befindet.

Die Sensoren liefern z.B. Aussagen über die Breite, den Verflechtungsgrad, die Ausgefranstheit, die Geschlossenheit, die Zerstückelung und die Vollständigkeit von Konturen, aber auch Aussagen über den Anteil an verschiedenen Störkonturen, den Anteil an Konturpunkten pro Bildfläche oder den Anteil von Konturpunkten auf langen Geraden und großen Ellipsen.

Die Meßwerte der Sensoren können in die vier hochsprachlichen Werte *Nicht*, *Schwach*, *Mittel* und *Stark* abgebildet werden. Die eigentliche Bewertung erfolgt durch einen Vergleich der gemessen Werte mit den hochsprachlichen Vorgaben (Sollwerten) des Anwenders.

Wie bereits oben erläutert, kann der Wert Q aus Gl. 1 als Maß für die insgesamt erzielte Qualität verwendet werden. Bei einer automatischen Auswahl des besten Pfades wird Q als Entscheidungskriterium verwendet. Für den Menschen sind allerdings die hochsprachlichen Werte der Sensoren aussagekräftiger.

4 Ergebnisse

In Abb. 3 sind von links nach rechts ein stark verrauschtes Eingangsgrauwertbild, das Konturbild eines adaptierten Pfades, bestehend aus einem Gauß-Filter, einem Sobel-Operator und einem Rangfolgefilter sowie das Konturbild eines adaptierten Pfades, bestehend aus einem Gauß-Filter und einem Nichtlinearen-Laplace-Operator, dargestellt. Man erkennt deutliche Unterschiede in der Qualität der Ergebnisbilder. Während durch den Nichtlinearen-Laplace alle Konturen geschlossen wurden, sind die Konturen im Ergebnisbild des Pfades mit dem Sobel-Operator stark zerstückelt.

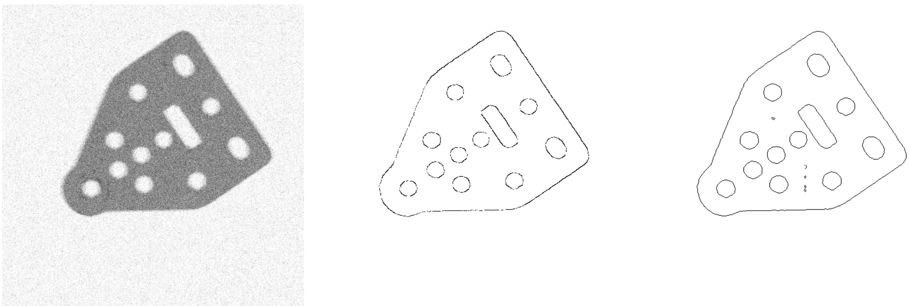

Abbildung3. Grauwertbild und zwei Konturbilder von verschiedenen Pfaden

Die Unterschiede spiegeln sich auch in den Werten der Sensoren wieder. Einige davon werden in Tab. 1 zusammen mit den Zielvorgaben des Benutzers dargestellt. Mit Ausnahme der Ausfransung wurden alle Zielvorgaben vom Pfad mit dem Nichtlinearen-Laplace-Operator (NLL) erfüllt. Der Pfad mit dem Sobel-Operator kann die Zielvorgaben dagegen nur für die Ausfransung erfüllen. Die Zielvorgaben für die übrigen, hier nicht aufgelisteten Sensoren wurden in diesem Beispiel von beiden Pfaden erfüllt.

Sensorname	Wert mit Sobel	Wert mit NLL	Zielvorgabe
Geschlossenheit	Nicht	Stark	Stark
Vollständigkeit	Mittel	Stark	Stark
Körnung	Schwach	Nicht	Nicht
Breite	Mittel	Nicht	Nicht
Ausfransung	Nicht	Mittel	Nicht
Qualitätsmaß Q	0.92	0.954	

Tabelle1. Bewertung der Ergebnisbilder aus Abb. 3

Auch das Qualitätsmaß Q (berechnet nach Gl. 1 aus vierzehn Sensoren mit der Priorität 1.0) zeigt, daß der Pfad mit dem NLL die Aufgabenstellung besser erfüllt. Der relative geringe Unterschied liegt darin begründet, daß hier lediglich 5 von 14 gleichgewichteten Sensoren vom Zielwert abweichen.

5 Schlußbetrachtungen

In dieser Veröffentlichung wurden ein Ansatz zur Bewertung von Bildverarbeitungsverfahren und das System FuzzySOLUTION vorgestellt, das nach diesem Ansatz arbeitet. Anhand eines Beispiels wurde in Abschnitt 4 gezeigt, daß es möglich ist mit FuzzySOLUTION für eine vorgegebene Aufgabenstellung verschiedene Bildverarbeitungsverfahren zu bewerten und miteinander zu vergleichen. Die hierfür notwendige Konfiguration und Adaption der Verfahren kann dabei ebenfalls mit FuzzySOLUTION erfolgen.

Da neben der Berechnung eines abstrakten Qualitätsmaßes auch hochsprachliche Aussagen über die Qualität gemacht werden, ist die Bewertung für den Menschen nachvollziehbar.

Der vorgestellte Ansatz macht Bewertungen aufgrund von theoretischen [9] oder statistischen Untersuchungen [10] nicht überflüssig. Im Gegenteil, die Ergebnisse derartiger Untersuchungen werden in FuzzySOLUTION für die Vorauswahl und Kombination verschiedener Verfahren (Konfiguration) verwendet. FuzzySOLUTION realisiert einen pragmatischen Ansatz, der Systementwicklern ein Werkzeug in die Hand gibt, um für seine spezifische Aufgabenstellung eine geeignete Lösung zu finden.

Literatur

1. Wolfgang Förstner: "10 Pros and Cons Against Performance Characterization of Vision Algorithms", Workshop on Performance Characteristics of Vision Algorithms, Cambridge, 1996.
2. V. Ramesh and R.M. Haralick: "Performance Evaluation of Edge Operators", Proceedings of the DARPA IUW 93, Washington DC, April 93, pp. 1071-79.
3. R. Haralick: "Performance Characterization Protocol in Computer Vision", Proceedings of the DARPA IUW 94.
4. M. Salotti, F. Bellet, C. Garbay: "Evaluation of Edge Detectors: Critics and Proposal", Workshop on Performance Characteristics of Vision Algorithms, Cambridge, 1996.
5. P. Courtney, N. Thacker, A. Clark: "Algorithmic Modeling for Performance Evaluation", Machine Vision and Applications 9, pp. 219-228, 1997.
6. I. Pitas: "Digital Image Processing Algorithms", Prentice Hall, 1993.
7. U. Rost, H. Münkel: "Knowledge Based Configuration of Image Processing Algorithms", Proceedings of the ICCIMA 1998.
8. C.-E. Liedtke, A. Blömer: "Architecture of the Knowledge Based Configuration System for Image Analysis CONNY", Proceedings of the 11th ICPR, International Conference on Pattern Recognition, The Hague, Vol I, pp. 375–378, Sept. 1992.
9. V. Ramesh and R.M. Haralick: "A Methodology for Automatic Selection of IU Algorithm Tuning Parameters", Proceedings of the DARPA IUW 94.
10. X. Liu, T. Kanungo, R.M. Haralick: "Statistical Validation of Computer Vision Software", Proceedings of the DARPA Image Understanding Workshop, Palm Springs, Vol. II, pp. 1533-1540, 1996.