

Intelligente software-basierte Objekttrennung in der Schüttgutsortierung

Bettina Otten, Wolfgang Melchert und Thomas Längle

Fraunhofer Institut für Opttronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB,
Fraunhoferstr. 1, D-76131 Karlsruhe

Zusammenfassung Bei der Sortierung von Schüttgütern ist die Qualität des Sortierergebnisses stark davon abhängig, wie gut das Ausgangsmaterial vor der Aufnahme vereinzelt wurde. Dies wird zum Beispiel durch die Verwendung von Rüttlern erreicht. Eine mechanische Vereinzelung von Objekten in einem Materialstrom stößt allerdings an ihre Grenzen, wenn der Durchsatz des zu prüfenden Materials erhöht wird. Je mehr Material pro Zeiteinheit geprüft werden soll, desto schwieriger wird es, die Objekte als Einzelobjekte zu erfassen. Um eine Verbesserung des Ergebnisses zu erzielen, muss dann oftmals das ausgeschleuste Material in einem zweiten Durchlauf nachsortiert werden, was den Nutzen der Prüfung mit hohem Durchsatz wiederum reduziert. Die mechanische Vereinzelung wird in der Regel durch eine Software-Lösung ergänzt, die vor der Klassifikation die Trennung der bei der Bildaufnahme noch zusammenhängenden Objekte berechnet. Zwei Verfahren zur Objekttrennung werden in dieser Arbeit vorgestellt und verglichen.

1 Einleitung

Nach einem kurzen Überblick über aktuelle Objekttrennungsv erfahren werden zwei Ansätze vorgestellt. Der erste basiert auf der Distanztransformation während der zweite die Ergebnisse einer Skeletonberechnung als Basis verwendet. Die Objekttrennung erfolgt ausschließlich auf Binärbildern, d.h. Farbinformationen aus den ursprünglichen RGB-Bildern werden nicht verwendet. Anschließend werden die mit diesen Verfahren generierten Ergebnisse erläutert. Als Materialien für die Aufnahmen werden Getreidekörner (wie oft in der Literatur beschrieben) und

Glasscherben verwendet. Letzteres, um die Qualität der Objekttrennung auch bei nicht homogenen Materialien, d.h. Materialien bei denen sich die Einzelobjekte in ihrer Form wesentlich unterscheiden können, beurteilen zu können.

2 Stand der Technik

Ein klassischer morphologischer Ansatz für die Trennung von zusammenhängenden Objekten in Binärbildern ist die Berechnung von Wasserscheiden auf dem Ergebnis einer Distanztransformation [1]. Die ermittelten Wasserscheiden entsprechen den Trennlinien zwischen den Einzelobjekten. Dieses Verfahren liefert gute Ergebnisse für runde Objekte, d.h. für Objekte, deren gemeinsame Kontur bei Berührung sehr kurz ist. Wang et al. [2] verwenden diesen Ansatz für Getreidekörner. Auftretende Übersegmentierungen werden korrigiert mit Hilfe von aus der Distanztransformation und dem Originalbild ermittelten Markerpunkten. Dieses Verfahren zeigt jedoch Schwächen bei Verdeckungen, sowie wenn zwei oder mehr zusammenhängende Objekte eine lange gemeinsame Kontur besitzen.

Zhang et al. [3] beschreiben einen Ansatz zur Trennung von Getreidekörnern mittels Ellipsen-Anpassung. Ausgehend von der annähernd elliptischen, konvexen Form von Getreidekörnern bietet sich die Ellipsen-Anpassung zum Auffinden einzelner Objekte an. Dabei werden in Abhängigkeit von jeweils sechs zufällig gewählten Konturpunkten Ellipsen generiert und anhand bestimmter Kriterien die passenden ausgewählt. Die Pixel zwischen den Ellipsen, die keiner der Ellipsen zugeordnet wurden, bilden dann den Trennbereich. Diese Vorgehensweise ist allerdings sehr rechenintensiv und eignet sich lediglich für die Trennung von bis zu drei zusammenhängenden Objekten. Eine Kombination der Ellipsen-Anpassung mit einer Konturzerlegung [4] anhand von konkaven Konturpunkten verbessert die Ergebnisse und erlaubt auch die Trennung von größeren Objektgruppen. Die Ellipsen werden dabei aus den Konturabschnitten ermittelt, die zuvor mit Hilfe eines Abstandsmaßes ausgewählt wurden. Beide Verfahren setzen voraus, dass die zu trennenden Objekte Ellipsen-förmig sind. Bei nicht elliptischen Objekten kommt es zu fehlerhaften Trennungen.

Bei sich berührenden Objekten weisen Einschnürungen oder kon-

kave Bereiche in der Kontur oft auf die Berührstellen hin. Die Betrachtung der Krümmungen der Objektkontur ist daher ein verbreiteter Ansatz für die Bestimmung dieser konkaven Konturpunkte, d.h. den Punkten auf der Kontur, in denen die Krümmung der Kontur minimal ist. Jeweils zwei zueinander passende konkave Punkte können kombiniert werden, um eine Trennlinie zu bilden. Die Paarungen werden z.B. durch ein Nearest-Neighbor-Kriterium ermittelt. Visen et al. [5] wenden dieses Verfahren auf Gersten-, Weizen- und Roggenkörnern an. Dabei wird die Krümmung jedes einzelnen Konturpunktes ermittelt. Jeder Punkt, dessen Krümmung kleiner als ein ermittelter Grenzwert ist, wird als Knotenpunkt betrachtet und für die Paarbildung zur Trennlinien-Bestimmung herangezogen. In [6] wird das Verfahren um eine Fourier-basierte Glättung sowie um eine Verbesserung der Paarungen der Knotenpunkte durch ein verbessertes Distanzmaß ergänzt. Die Glättung verhindert das Auftreten von Pseudo-Knotenpunkten. Fehler oder Störungen, die bei der Bildaufnahme entstehen können und lokale Minima in den Krümmungen verursachen können, werden auf diese Weise vor der Berechnung der Krümmungen entfernt. Ein alternatives Verfahren verwendet als Grundlage das Skelett des Hintergrundes [7], um die konkaven Konturpunkte zwischen sich berührenden Reiskörnern zu ermitteln. Die Endpunkte der offenen Skeletonlinien entsprechen dabei diesen Berührpunkten. Die Linien werden ausgehend von diesen Punkten verlängert. Mit einem passenden Endpunkt verbunden bilden sie die Trennlinien zwischen den Körnern. Die Berechnung des Hintergrund-Skeletons eines Bildes ist sehr schnell im Vergleich zur Abtastung der gesamten Objektkontur von allen im Bild enthaltenen Objektgruppen. Für alle genannten Verfahren werden gute Ergebnisse angegeben. Was offen bleibt, ist die Frage, ob und wie gut Trenn-Ergebnisse auch bei hohem Materialdurchsatz in Echtzeit erreicht werden können. Auch die Frage, wie gut die Trennung funktioniert, wenn gleichzeitig Schlechtmaterial ausgeschleust werden soll, also in den Objektclustern auch unbekannte Objekte (unbekannter Form) vorhanden sind, wird nicht behandelt.

3 Verfahren zur Trennlinienbestimmung

Für eine vergleichende Untersuchung von Qualität und Leistungsfähigkeit wurden zwei verschiedene Verfahren zur Objekttrennung realisiert.

3.1 Distanzbasiertes Verfahren

Dieses Verfahren basiert wie die klassischen morphologischen Verfahren auf der Distanztransformation. Allerdings werden hier die Informationen der Distanztransformation direkt weiterverwendet und nicht als Grundlage für eine Wasserscheidentransformation verwendet.

Bei der Distanztransformation wird jedem Pixel einer Region sein Abstand zum nächsten Hintergrundpixel als Grauwert zugewiesen. Je größer der Abstand zum Rand, desto heller der Grauwert im Ergebnisbild (vgl. Abb. 14.1). Interpretiert man die Grauwerte des Distanzbildes als Höhenwerte, kann man die Punkte mit der größten Distanz, also lokale Maxima, als Gipfel auffassen.

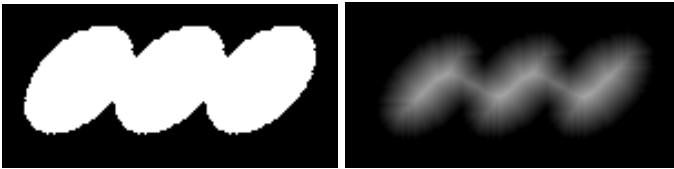


Abbildung 14.1: Ergebnis der Distanztransformation (links: Original, rechts: Distanztransformation).

Diese Gipfel werden mit Hilfe eines Maximum-Filters ermittelt. Da abhängig von der Form der ursprünglichen Region mehrere Maxima auftreten können und diese z.B. in Bereichen konstanter Höhe Ketten bilden können, ist eine weitere Reduzierung der Anzahl der Gipfelpunkte notwendig (vgl. Abb. 14.2). Ziel ist es, je Einzelobjekt einen Gipfelpunkt zu ermitteln, der dieses Objekt am besten repräsentiert.



Abbildung 14.2: Bestimmung der Gipfelpunkte (links: alle lokalen Maxima, rechts: nach Vereinzelung).

Darauf basierend können anschließend die Trennlinien bestimmt wer-

den. Dafür werden ausgehend vom zugehörigen Gipfelpunkt die Grauwerte aus der Distanztransformation entlang einer Verbindungsline zu jedem anderen Gipfelpunkt betrachtet (vgl. Abb. 14.3).

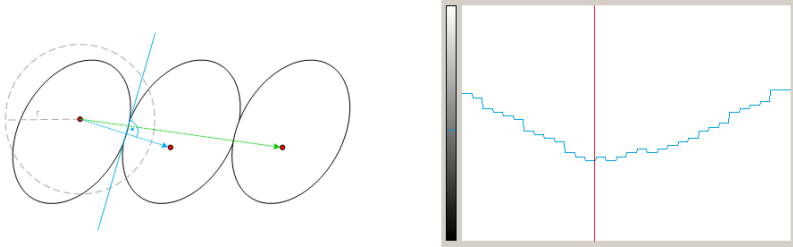


Abbildung 14.3: Trennlinienbestimmung für das linke Einzelobjekt: Der Gipfelpunkt des mittleren Objekts befindet sich außerhalb des Radius r . Entsprechen die Grauwerte entlang der Verbindungsline den erlaubten Parametern, kann hier getrennt werden (links: Paarbildung, rechts: Grauwertplot entlang der Verbindungsline zwischen linkem und mittlerem Einzelobjekt mit Position der Trennlinie (rot)).

Ein Schnitt zwischen zwei Gipfeln ist möglich, wenn der Abstand zwischen ihnen außerhalb eines bestimmten Radius (durchschnittliche Objektgröße) liegt und wenn das Tal zwischen den beiden Gipfeln tief genug ist (relativ zur mittleren Höhe der beiden Gipfel). Die Trennlinie verläuft dann rechtwinklig zur Verbindungsline und ihre genaue Position wird bestimmt durch die tiefste Stelle entlang der Verbindungsline.

3.2 Skeletonbasiertes Verfahren

Das Skelett einer Region ist eine Repräsentation der ursprünglichen Region durch die Menge der Mittelpunkte maximal großer Innenkreise und der dazugehörigen Radien. Das bedeutet, es wird für jedes Randpixel der Region unter allen es berührenden Kreisen derjenige mit dem größten Radius gesucht, der sich noch innerhalb der Region befindet. Die Vereinigung der Mittelpunkte der so ermittelten Kreise bildet ein Zusammenhangsobjekt, das auch als Skelett einer Region bezeichnet wird. Die entstehenden Skelette zeichnen sich unter anderem dadurch aus, dass sie Äste ausbilden, die zu den Ecken der Ursprungsregion „hinwachsen“ (vgl. Abb. 14.4).

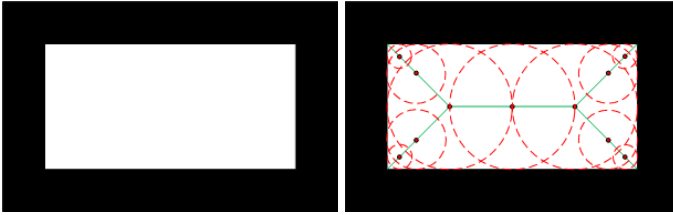


Abbildung 14.4: Skeletonberechnung für ein Rechteck (links: Original, rechts: einige Innenkreise (rot) und resultierende Skelettlinien (grün)).

Für das hier beschriebene Trennverfahren wird die Skeletonberechnung nicht auf die Region zusammenhängender Objekte angewandt, sondern auf die Hintergrundregion, die diese umschließt. Das Ergebnis ist ein Skelett, dessen Äste auf die konkaven Punkte der Objektregion „zeigen“, die von der Skelettregion umschlossen wird.

Typischerweise folgen die Skelettlinien der Außenkontur der Objektregion und bilden einen Rahmen um das eigentliche Objekt. In Bereichen, in denen das Objekt Einkerbungen aufweist, entwickeln sich die bereits erwähnten Äste zum Objekt hin (vgl. Abb. 14.5).



Abbildung 14.5: Typische Form eines Hintergrundskeletts (links: Original, rechts: Hintergrundskelett (grün)).

Für eine einfache Trennlinienbestimmung können die Endpunkte der offenen Skelett-Äste paarweise verbunden werden. Dabei werden jeweils die zwei Endpunkte mit minimaler Distanz verbunden. Dieser Ansatz führt allerdings zu Problemen, wenn nicht für jeden Endpunkt ein passender Partner vorhanden ist. Unter Berücksichtigung einer maximalen Distanz zwischen den Endpunkten könnte dann eine Trennlinie vollständig fehlen, wenn innerhalb der erlaubten Reichweite kein weiterer Endpunkt verfügbar wäre. Eine Verbindung mit einem in der Nähe gelegenen aber

aufgrund der Schnittrichtung ungeeigneten Endpunkt könnte zu inkorrekten Schnitten führen, die ein Objekt durchteilen.

Aus diesem Grund soll hier zusätzlich zu den Endpunkten der offenen Skelett-Äste auch ihre Ausrichtung berücksichtigt werden. Auf diese Weise wird die Wahrscheinlichkeit für fehlerhafte Schnitte reduziert. Außerdem können mit Hilfe dieser zusätzlichen Informationen auch Trennlinien ermittelt werden, wenn für einen Endpunkt kein Partner gefunden wurde.

Für die weitere Berechnung sind nur die Teile des Hintergrundskeletts relevant, die nicht den äußeren Rand des Skeletts bilden. Mit Hilfe einer Zerlegung des Skeletts an den enthaltenen Kreuzungspunkten können die relevanten Äste ermittelt werden (vgl. Abb. 14.6 links).



Abbildung 14.6: Für die Objekttrennung relevante Äste des Skeletts (gelb, links), ermittelte Trennlinien (grün, rechts).

Zur Bildung von Endpunkte-Paaren wird ausgehend von dem Endpunkt eines offenen Skelett-Astes innerhalb eines maximalen Radius nach weiteren Endpunkten gesucht (vgl. Abb. 14.7). Für jeden dieser Endpunkte wird anschließend der Winkel zwischen dem Ausgangs-Ast, bzw. der Strecke zwischen Start- und Endpunkt des Astes, und der potentiellen Trennlinie zwischen den beiden Endpunkten berechnet. Liegt dieser Winkel innerhalb eines zulässigen Bereichs, wird die Trennlinie akzeptiert.

Kann für einen Endpunkt kein passender Partner gefunden werden, wird der entsprechende Ast über den Endpunkt hinaus verlängert und bildet somit selbst eine Trennlinie.

4 Ergebnisse

Die vorgestellten Verfahren wurden sowohl mit synthetischen als auch mit realen Daten getestet. Bei letzteren handelt es sich um Bilder von

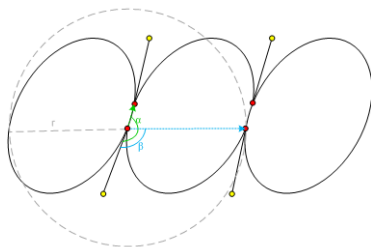


Abbildung 14.7: Trennlinienbestimmung: Paarweise Zuordnung von Endpunkten (rot) unter Berücksichtigung von Abstand und Winkel.

Getreidekörnern und Glasscherben, die mit einer RGB-Zeilenkamera aufgenommen wurden. Die synthetischen Daten bestehen aus 21 Bildern von 2 bis 7 Ellipsen, die in unterschiedlicher Anzahl und Position angeordnet sind. Bei den Getreidekörnern wurden Gruppierungen von 2 bis 9 Körnern in 210 Bildern getestet, bei den Glasscherben 70 Zusammenhangsregionen aus bis zu 7 Objekten. Beispiele für eine erfolgreiche Objekttrennung sind in Abb. 14.8 dargestellt.

Zusammenfassend lässt sich anhand der Klassifikationsergebnisse (vgl. Tabellen 14.1 und 14.2) feststellen, dass das distanzbasierte Verfahren im Vergleich zum skeletonbasierten Verfahren bessere Ergebnisse bei großen Objektzusammenhängen liefert, wohingegen letzteres vor allem bei kleineren Gruppen von z.B. 2 Objekten hervorsticht. Bei größeren Gruppen wird die Trennung generell schwieriger, da je nach Anordnung im Verhältnis zur Objektanzahl sehr wenig Kontur vorhanden ist. Innere Konturen von Löchern zwischen Objekten können bei größeren Berührstellen fehlen oder sehr kurz sein. Dies erweist sich vor allem für das skeletonbasierte Verfahren als problematisch, da für die Trennlinienbestimmung notwendige Skelett-Zweige möglicherweise gar nicht ausgebildet werden.

	Ellipsen	Getreide	Glas
Distanzbasiertes Verfahren	92%	78%	58%
Skeletonbasiertes Verfahren	96%	73%	82%

Tabelle 14.1: Gesamtergebnis: Anteil korrekt klassifizierter Einzelobjekte nach der Objekttrennung.

	Ellipsen	Getreide	Glas
Distanzbasiertes Verfahren	92%	81%	58%
Skeletonbasiertes Verfahren	100%	84%	85%

Tabelle 14.2: Ergebnis für 2-Objekt-Gruppen: Anteil korrekt klassifizierter Einzelobjekte nach der Objekttrennung.

Bei konvexen Einzelobjekten mit relativ einheitlicher Größe wie den Getreidekörnern schneidet das distanzbasierte Verfahren besser ab als bei heterogenem Material wie Glas. Die Glasscherben weisen im Vergleich zu Getreidekörnern keine einheitliche Größe auf, was es schwieriger macht, eine geeignete Maskengröße zu wählen, die bei der Ermittlung der Gipfelpunkte verwendet wird. Dies führt dazu, dass große, langgezogene Scherben geteilt werden, während kleine Glasfragmente als zu anderen Objekten zugehörig eingestuft werden. Darüber hinaus kommt es bei den Glasscherben häufiger zu Überdeckungen, so dass eine akkurate Trennung nicht mehr möglich ist. Auch das skeletonbasierte Verfahren kann keine Überdeckungen erkennen, allerdings profitiert es von der kantigen Form der Glasscherben. Die durch Brüche oftmals geraden Kanten der Glasscherben führen zu ausgeprägteren konkaven Bereichen in der Objektkontur. Das erzeugte Skelett enthält robustere Zweige, die für die Trennung verwendet werden können.

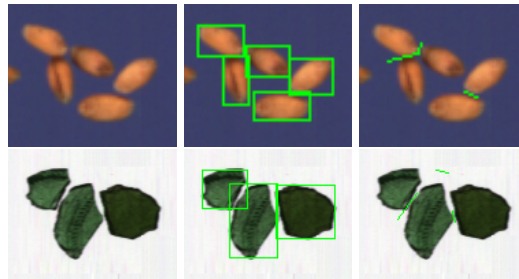


Abbildung 14.8: Erfolgreiche Objekttrennung bei Getreidekörnern (oben) und Glasscherben (unten) ((v.l.n.r.) Original, Klassifikation nach distanzbasierter Trennung (BoundingBox um resultierende Einzelobjekte (grün)), Trennlinien durch skeletonbasiertes Verfahren ermittelt (grün)).

Viele Fehlklassifikationen beim distanzbasierten Verfahren resultieren

daraus, dass die Schnitte senkrecht zur jeweiligen Verbindungslinie zwischen den Gipfeln erfolgen. Dadurch kann es je nach Lage der Einzelobjekte dazu kommen, dass die Objekte nicht ausschließlich an ihrer Berührstelle getrennt werden, sondern dass der Schnitt eines der Objekte zerteilt.

Schwächen der Objekttrennungsverfahren

Bei größeren Berührungsbereichen, z.B. wenn die gemeinsame Kontur länger ist als die minimale Objektbreite oder -länge, bildet die Distanztransformation ein Maximum in der Nähe der Berührstelle aus, anstatt zwei Maxima auf jeweils einer Seite davon. Dadurch steht nicht für jedes Einzelobjekt ein Gipfelpunkt zur Verfügung und die Objekte können nicht richtig getrennt werden (vgl. Abb. 14.9, links). Die optimale Position eines Gipfelpunktes ist der Schwerpunkt der Region des jeweiligen Einzelobjekts. Bei sich berührenden Objekten verschieben sich die Maxima allerdings in Richtung der Berührstellen. Die Auswahl des geeigneten Gipfelpunktes innerhalb einer Kette von Maxima führt möglicherweise nicht zur optimalen Position, d.h. zu dem Gipfelpunkt, der dem Schwerpunkt am nächsten liegt, da unter Umständen das letzte Pixel in der Reihe von Gipfelpositionen ausgewählt wird.



Abbildung 14.9: Links: Fehlgeschlagene Objekttrennung bei großem Berührungsbereich (links: Original, rechts: ermittelte Gipfelpunkte für das distanzbasierte Verfahren (grün)), rechts: Fehlerhafte Objekttrennung aufgrund fehlender Skelettzweige (links: Original, rechts: Trennlinien durch skeletonbasiertes Verfahren ermittelt (grün)).

Des Weiteren ist bei der Suche nach den Gipfeln die verwendete Maskengröße entscheidend dafür, ob zu viele Gipfel ausgewählt werden oder ob relevante Maxima verworfen werden.

Das skeletonbasierte Verfahren ist stark abhängig von der Qualität des erzeugten Skeletts. Dieses wiederum ist abhängig von der vorausgehenden Objektsegmentierung. Die konkaven Bereiche der Regionen sind nicht

immer spitz zulaufend, sondern entstehen oft durch eine Rundung der Kontur. Dies hat zur Folge, dass die Skelettlinien entweder nicht bis an das Objekt heranreichen oder gar nicht ausgebildet werden. Kommt bei der Objektsegmentierung ein Randabtrag zum Einsatz, der z.B. Artefakte und Farbsäume vor der Klassifizierung entfernen soll, kann dies dazu führen, dass die konkaven Konturbereiche „abgerundet“ werden und die Ergebnisse der Skeleton-Berechnung verschlechtern. Abhängig von der Form der zu trennenden Objekte kann es außerdem vorkommen, dass die Kontur eines Objektes in die Kontur eines anderen Objektes übergeht, ohne dass dabei eine Einkerbung entsteht. Ein Skelettzweig als Indikator für diesen zu trennenden Bereich kann dann nicht entstehen (vgl. Abb. 14.9, rechts). Die Skeleton-Berechnung reagiert außerdem sehr empfindlich auf Bildrauschen. Sind die Objektkonturen nicht glatt, sondern enthalten Unregelmäßigkeiten, kann dies zur Ausbildung zusätzlicher jedoch unerwünschter Skelettlinien führen.

5 Fazit

Beide vorgestellten Verfahren liefern recht gute Ergebnisse, die Qualität der Trennung erreicht allerdings bei realen Daten maximal 85%. Um hier eine Steigerung zu erreichen, müssen beide Verfahren verbessert werden.

Das distanzbasierte Objekttrennungsverfahren kann durch eine Optimierung der Vereinzelung bei der Gipfelbestimmung sowie durch eine objektbezogenen Ausrichtung der Schnittlinien bereits verbessert werden. Beim skeletonbasierten Verfahren erfolgt die Verlängerung der Skelettzweige, für die kein Partner gefunden wurde, in Richtung des Zweiges (bestimmt aus Start- und Endpunkt) und verläuft über das gesamte Objekt. Das kann dazu führen, dass mehr als nur die zwei am Endpunkt anliegenden Einzelobjekte geschnitten werden, was in einer regelrechten „Zerstückelung“ anderer Einzelobjekte resultieren kann. Eine Verlängerung muss nach dem Schnitt mit den beiden anliegenden Einzelobjekten enden. Um zuverlässig gute Resultate mit diesem Verfahren zu erreichen, muss sichergestellt werden, dass das Hintergrundskelett immer Zweige zu den konkaven Stellen ausbildet. Hier könnten zusätzliche Information z.B. aus der konkaven Hülle herangezogen werden, um diese Bereiche zu identifizieren.

In einem nächsten Schritt werden die beiden vorgestellten Verfahren

im realen Einsatz unter Echtzeitbedingungen evaluiert werden.

Literatur

1. C. Lantuéjoul, "Skeletonization in quantitative metallography," *Issues of Digital Image Processing*, vol. 34, pp. 107–135, 1980.
2. W. Wang and J. Paliwal, "Separation and identification of touching kernels and dockage components in digital images," *Canadian Biosystems Engineering*, vol. 48, pp. 7.1 – 7.7, 2006.
3. G. Zhang, D. S. Jayas, and N. D. G. White, "Separation of touching grain kernels in an image by ellipse fitting algorithm," *Biosystems Engineering*, vol. 92, no. 2, pp. 135–142, 2005.
4. L. Yan, C.-W. Park, S.-R. Lee, and C.-Y. Lee, "New separation algorithm for touching grain kernels based on contour segments and ellipse fitting," *Journal of Zhejiang University Science C (Computers and Electronics)*, vol. 12, no. 1, pp. 54–61, 2011.
5. N. S. Visen, N. S. Shashidhar, J. Paliwal, and D. S. Jayas, "Identification and segmentation of occluding groups of grain kernels in a grain sample image," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 79, no. 2, pp. 159–166, 2001.
6. H. K. Mebatsion and J. Paliwal, "A fourier analysis based algorithm to separate touching kernels in digital images," *Biosystems Engineering*, vol. 108, no. 1, pp. 66–74, 2011.
7. M. Faessel and F. Courtois, "Touching grain kernels separation by gap-filling," *Image Analysis and Stereology*, vol. 28, no. 3, pp. 195–203, 2009.