

## LOKALE LOGISCHE ALGORITHMEN FÜR BINÄRBILDER

Peter Gais, Karsten Rodenacker, Uta Jütting

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH  
Institut für Strahlenschutz  
Ingolstädter Landstraße 1  
8042 Neuherberg bei München

Die Transformation von digitalisierten Binärbildern mit dem Zweck lokale und globale Formeigenschaften zu messen, erfordert Algorithmen, die eine parallele Verarbeitung notwendig machen. Die Implementierung und Anwendung von Verfahren der Mathematischen Morphologie auf und an unserem Arrayprozessor wird beschrieben und diskutiert. Die Anwendung bezieht sich auf den Bereich der automatischen Mikroskopbildanalyse. Hier sind im Binärbild wesentliche Schritte die Reinigung eines Bildfeldes, die Extraktion der relevanten Objekte sowie die Zerlegung zusammenhängender Objekte.

### 1. EINFÜHRUNG

Die Mathematische Morphologie (MM) ist ein mengentheoretischer Ansatz um Methoden zu formalisieren, die auf Mengen des n-dimensionalen euklid'schen Raumes Anwendung finden. Sie wird hauptsächlich auf Mengen des zweidimensionalen Raumes angewendet. Ziel dabei ist es, quantitative Aussagen über Mengen, deren geometrische Struktur sowie Form und Anordnung zu machen. Als Binärbild wird in diesem Sinne eine Teilmenge der Ebene betrachtet, meist innerhalb einer abgeschlossenen, rechteckigen Fläche. Dies mag eine bestimmte physikalische Eigenschaft eines Objektes beschreiben, z.B. die Fläche des Objektes unter einer bestimmten Projektion. Betrachtet man die pixel eines Binärbildes als Teilmenge des euklid'schen Raumes, so ist es naheliegend, mengentheoretische Operationen anzuwenden. Dies geschieht gerade in der MM, die durch die Schule in Fontainebleau (Matheron/1/, Serra/2/) formalisiert und entwickelt worden ist.

In unserer Gruppe beschäftigen wir uns hauptsächlich mit der Verarbeitung mikroskopischer Bildvorlagen wie Präparaten der exfoliativen Zytologie, der Punktionszytologie und der Histologie. Dies schließt das vollautomatische Erkennen der Zellen, deren Segmentation und Reinigung, das Extrahieren von Merkmalen mit anschließender Klassifikation ein. Bilder der Größe 256\*256 pixel werden mit einer TV-Kamera aufgenommen, digitalisiert und im Arrayprozessor AP-120B (AP) abgespeichert, in dem dann die Operationen der MM ausgeführt werden (Abb. 1). Die Grauwerttiefe beträgt 8 bit, die Größe eines Bildpunktes kann 0.25 µm und größer gewählt werden. Gemessen wird transmittiertes Licht.

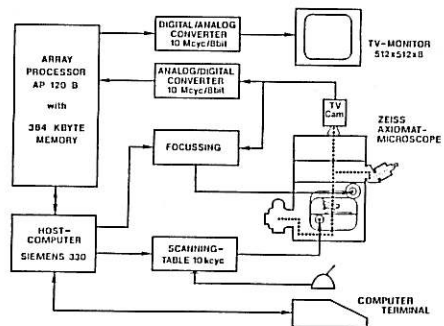


Abb. 1: Bildverarbeitungssystem

## 2. THEORIE

Die Basisoperationen auf Mengen bzw. Binärbilder werden im folgenden beschrieben, wobei  $X$  und  $Y$  Teilmengen des euklid'schen Raumes  $E$  sind:

Vereinigung	$X \cup Y = \{x \in E   x \in X \vee x \in Y\}$	OR
Durchschnitt	$X \cap Y = \{x \in E   x \in X \wedge x \in Y\}$	AND
Komplement	$X^c = \{x \in E   x \notin X\}$	NOT
Differenz	$X \setminus Y = X \cap Y^c$	
Translation	$X + a = \{x + a   x \in X\}$	SHIFT

Von diesen Grundoperationen sind folgende wichtige lokale Operationen abgeleitet:

Erosion	$X \ominus B = \bigcap \{X + b   b \in B\}$
Dilatation	$x \oplus B = \bigcup \{X + b   b \in B\}$
Fermeture	$X^B = (X \oplus B) \ominus B$
Ouverture	$X_B = (X \ominus B) \oplus B$

$B$  ist dabei eine Vektormenge für die Translation. Sie wird strukturierendes Element genannt.

## 3. IMPLEMENTIERUNG AUF DEM ARRAYPROZESSOR

## Datenstruktur

Die oben gezeigten Grundoperationen der MM beziehen sich immer auf ganze Bildfelder und ein Bildfeld ist gerade die Datenstruktur für die ein Arrayprozessor mit zweidimensionaler Adressierungsmöglichkeit /3/ am besten geeignet ist. Einige Arrayprozessoren besitzen keine zweidimensionale Adressierungshardware (z.B. AP 120B) und sind daher besser für eindimensionale Felder geeignet. Die meisten, und insbesondere die von uns verwendeten Bildverarbeitungsprozeduren sind jedoch so strukturiert, daß die Daten als Folge von eindimensionalen Feldern verarbeitet werden können. Das Datenformat des AP mit 38 bit Gleitpunkt ist für Binärbildverarbeitung nicht geeignet, daher packen wir 32 Binärpixel in ein AP-Wort.

## Hardware des AP 120B

Zwei wichtige Eigenschaften neben der schnellen Zykluszeit von 167 nsec führen zu den kurzen Rechenzeiten des AP: Parallele Verarbeitungselemente und eine Pipelinestruktur.

## Parallele Verarbeitungselemente

Unser AP besitzt folgende Verarbeitungselemente, die mit verschiedenen Datenbussen verbunden sind, so daß jede Einheit mit jeder anderen benötigten Einheit in Verbindung treten kann:

- 38 bit Gleitpunktspeicher und -Tafelspeicher (96 KW)
- 38 bit Gleitpunktregister (64)
- 38 bit Gleitpunktaddierer (1)
- 38 bit Gleitpunktmultiplizierer (1)
- 64 bit Programmspeicher (4 KW)
- 16 bit Integerregister (16)
- 16 bit Integerrechenwerk (1)
- 1 Prozessorkontrolleinheit

Alle Einheiten können parallel arbeiten.

### Pipelinestruktur

Nicht alle der oben genannten Einheiten führen ihre Funktion in einem Maschinenzyklus (167 nsec) aus. Ein Daten- bzw Tafelspeicherzugriff und eine Gleitpunktmultiplikation kann jederzeit initiiert werden, der Wert ist aber erst drei Zyklen später verfügbar. Bei der Gleitpunktaddition liegt das Ergebnis zwei Zyklen später vor. Als allgemeine Regel kann man sagen: Ist die Zahl der Instruktionen zum Aufbau der Pipeline klein, verglichen mit der Zahl der Datenelemente, die verarbeitet werden sollen, beträgt die effektive Speicher-, Additions- und Multiplikationszeit nahezu eine Zykluszeit.

### Software des AP 120B

Auf den ersten Blick erscheint es eine schwierige Aufgabe zu sein, ein AP-Programm zu schreiben, das die Parallel-/Pipelinestruktur des AP nutzt. Es existiert aber eine sehr umfangreiche Unterprogramm-Bibliothek /4/, die eine leichte Programmierung auf Fortran-Ebene zuläßt. Für die Binärbildverarbeitung mußten die logischen Operationen und die davon abgeleiteten Grundoperationen für die MM in AP-Assembler (APAL) neu geschrieben werden.

### 4. VERARBEITUNGSZEITEN

#### Logische- und Punktoperationen

Durch das Packen von 32 Binärbildpunkten in ein 38 bit AP-Wort und den Einsatz von AP-Assembler-Routinen erreichen wir folgende Verarbeitungszeiten:

Operation	Binärbild 256*256 pixel Zeit in msec
- NOT	1.6
- AND / OR	2.7
- BITSUCHEN	2.7
- SHIFT + -	5.1

#### Lokale Operationen

Die lokalen Operationen Erosion / Dilatation sind in ihrem zeitlichen Aufwand von dem strukturierenden Element B abhängig. B ist dabei als Menge von Translationsvektoren anzusehen. Ausgehend von einem strukturierenden Element  $B = \begin{matrix} \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet \end{matrix}$  z.B. haben wir Translationen des ganzen Bildes nach Norden und Süden, die sich bei der Programmierung als Adreßrechnung niederschlagen, also nahezu keine Rechenzeit benötigen, sowie je eine Translation nach Osten und Westen. Mit vier AND / OR Operationen werden die Teilergebnisse verknüpft. Die effektiven Zeiten für die wichtigsten lokalen Operationen auf dem AP mit dem oben angegebenen strukturierenden Element sind folgende:

Operation	Binärbild 256*256 pixel Zeit in msec
- EROSION/DILATATION	18.4
- OUVERTURE	36.8
- FERMETURE	36.8

#### Iterative Verfahren

Die iterativen Verfahren gehören zur dritten Stufe in der Hierarchie und sind wiederum aus den Grundoperationen ableitbar. Die Verarbeitungszeiten sind hier nicht nur vom strukturierenden Element abhängig, sondern auch maßgeblich vom Bildinhalt. Als Zeitbeispiel sei hier die Operation Grassfire genannt, die hauptsächlich zur Objektrekonstruktion verwendet und in Kap. 5 erklärt wird:

Operation	Binärbild 256*256 pixel Zeit in msec
- GRSF	39.6 * DZ

Die Durchlaufzahl DZ hängt sowohl von der Ausdehnung des gewählten strukturierenden Elementes als auch von der Objektgröße im Markerbild ab.

## 5. ANWENDUNG

Die automatische Verarbeitung mikroskopischer Bilder schließt die Digitalisierung, die Shadingkorrektur, die Segmentation in Objekte (Zellen) und Untergrund, die Beseitigung unerwünschter Objekte wie Artefakte, die Segmentation der Einzelobjekte in verschiedene Bereiche (Zytoplasma, Zellkern) und eine weitere Unterteilung des Zellkernes bis hin zu Kernstrukturen ein /5,6,7,8/. Am Schluß dieser Prozedur werden objektspezifische Merkmale bestimmt, die zur Klassifizierung führen. Im folgenden wollen wir die Anwendung der MM während dieses Prozesses an Beispielen zeigen. Der erste Schritt nach erfolgter Segmentation (Graubild-Binärbild) ist die Beseitigung kleiner, nicht interessierender Objekte.

## Bildreinigung

Eine Ouverture im Binärbild mit einem vorgegebenen, möglichst kreisförmigen strukturierenden Element B beseitigt alle Objekte in die sich das strukturierende Element B nicht einbeschreiben läßt. Das Resultat ist ein Markerbild mit Objektveränderungen die vom strukturierenden Element und der Objektform abhängen.

## Bildrekonstruktion

Eine optimale Rekonstruktion der Objektformen wird durch folgenden Algorithmus erreicht, der auf das markierte Binärbild zusammen mit dem Originalbinärbild angewendet wird.

```

procedure GRSF(A,X,B)
image A,X,Y,Z
begin Y = 0; Z = A;
while Y <> Z do
begin Y = Z; Z = (Z ⊕ B) ∩ X;
end;
A = Z;
end;

```

A bedeutet hier das Markerbild, das am Ende der Prozedur das rekonstruierte Binärbild enthält, X das Originalbinärbild und B ein möglichst kleines strukturierendes Element, das die Rekonstruktion nicht markierter Objekte vermeidet, also Objektgrenzen nicht überspringt.

## Objekttrennung

Nach der Bildreinigung und Bildrekonstruktion ist es für die Einzelzellanalyse nötig Zellverbände mit sich berührenden Zellen zu trennen. Ein Zerlegungsalgorithmus dazu, der als Ergebnis Einzelzellen liefert, wird folgendermaßen beschrieben:

```

procedure ZERLEG(A)
image A,C,D,E,F
begin C = A; C = C ⊕ B1;
while C <> 0 do
begin D = C ⊕ B1; E = GRSF(D,C,B2);
E = EXOR(E,C);
if E <> 0 then
begin F = GRSF(C,A,B2); F = NOT(F);
C = NOT(C); E = EXOR(F,C);
if CONNEX(E) <> 0 then
begin C = SKELETT(C,F);
C = EXOR(C,F); A = EXOR(A,C);
end;
end;
C = D;
end;
end;

```

A enthält das Original und als Ergebnis das zerlegte Bild. C, D, E und F sind Hilfsbilder. Die Bestimmung der Konnexitätszahl (CONNEX) und des Skelettes (SKELETT) sind in [2] beschrieben.  $B_i$  sind strukturierende Elemente. Ausgehend von Einschnürungen an den zu zerlegenden Objekten wird das Exoskelett angewendet, bei dem versucht wird eine Anzahl von Objekten zu erzeugen, die der Anzahl von Einschnürungen entspricht. Die Objekte werden als konvex angenommen. Durch die sukzessive Anwendung von Erosionen mit möglichst kreisförmigem strukturierenden Element werden die Zentren von Objekten erzeugt und diese dienen im folgenden Skelettschritt zur Zerlegung des Originalen. In Abb.2 ist das Ergebnis der Zerlegung als Folge Originalbild - Binärbild ungerneigt - Binärbild zerlegt und gereinigt - dargestellt. Zur Veranschaulichung des Zerlegungsprozesses wird zusätzlich das Distanzbild mit Äquidistanzlinien gezeigt. Die Äquidistanzlinien zeigen die Wirkung der sukzessiven Anwendung von Erosionen. Alle Objekte, die durch dieses Binärbild im Graubild markiert sind, können nun der Merkmalsextraktion für Einzelobjekte zugeführt und anschließend klassifiziert werden.

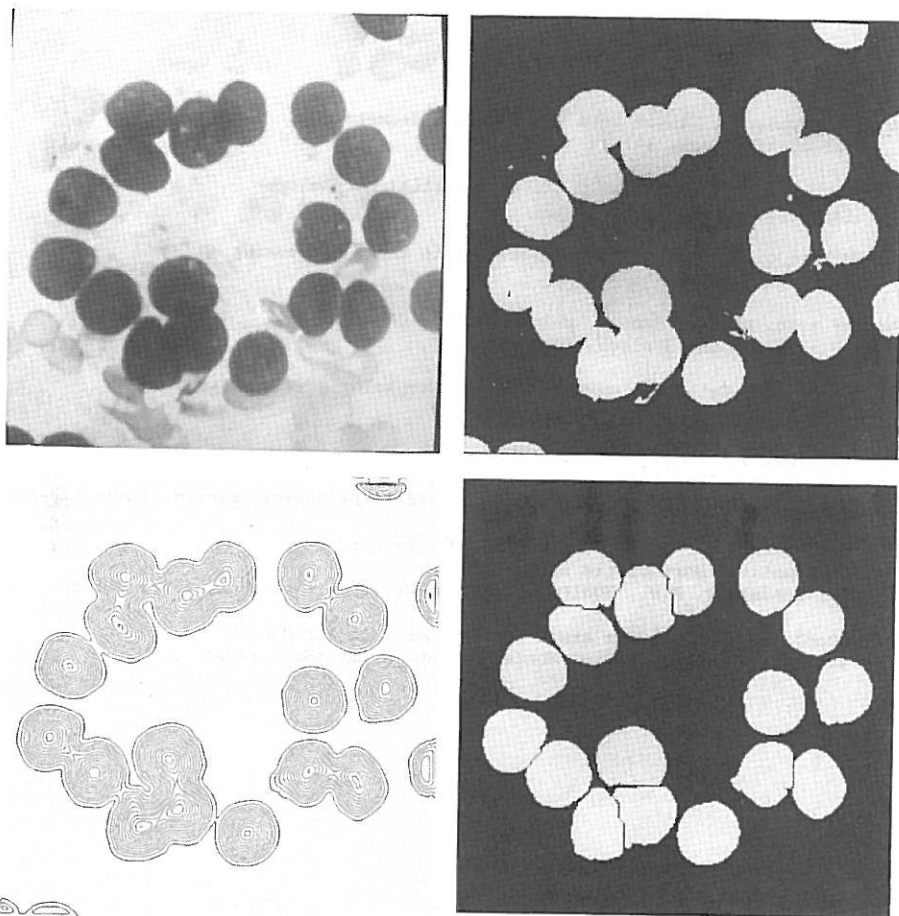


Abb. 2: Thyrocyten  
 Original - Binärbild ungerneigt  
 Äquidistanzbild - Binärbild zerlegt und gereinigt

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Die Implementierung und Anwendung von Mengenoperationen, abgeleitet von der Mathematischen Morphologie, wurde gezeigt. Die Hauptvorteile dieser Algorithmen sind die einfache Parallelisierbarkeit, die Operatorenhierarchie, die Möglichkeit der Anwendung dieser Algorithmen über look-up-table und die Zerlegbarkeit der lokalen Algorithmen in eine Sequenz von Basisoperationen.

Unter Verwendung des multipurpose Arrayprozessors AP 120B von Floating Point Systems kristallisieren sich verschiedene Vor- und Nachteile heraus. Nachteile sind die eindimensionale Adressierung, der schwierige Bitzugriff, der fehlende Bit-shift im Datenbereich sowie das Fehlen der logischen Operationen für gepackte Datendarstellungen. Zu den Vorteilen zählt die einfache Programmierung der Algorithmen, die Nutzung der geringen Zykluszeit von 167 nsec, die geschlossenen Algorithmen, die den Hostrechner entlasten, die modulare Lösung, die an zeitkritischen Stellen Assemblereinschübe zuläßt sowie die geschlossene Lösung der Datenerhaltung von Grau- und Binärbildern im AP.

## LITERATUR

- /1/ Matheron, G., Random Sets and Integral Geometry  
(Wiley, New York, 1975)
- /2/ Serra, J., Image Analysis and Mathematical Morphology  
(Academic Press, London 1982)
- /3/ Wolfe, G.J., Use of Array Processors in Image Processing  
SPIE, vol. 301 (1981) 43-47
- /4/ AP Math. Library Manual, vol.2 860-7288-004  
(Floating Point Systems, Inc)
- /5/ Meyer, F., Cytologie Quantitative et Morphologie Mathématique  
Thèse, Ecole des Mines de Paris (1979)
- /6/ Jütting, U., Gais, P., Rodenacker, K., Schenck, U., Burger, G.,  
Analyse von Objekttagglomeraten in Bildern  
in: Kazmierczak, H., Mustererkennung 1983 (VDE-Verlag, Berlin, 1983) 137-142
- /7/ Rodenacker, K., Gais, P., Jütting, U., Burger, G.  
Mathematical Morphologie in Grey-Images  
in: Schüssler, H.W., EUSIPCO-83 (North-Holland, Amsterdam, 1983) 131-134
- /8/ Guedj, M., Rapport sur stage d'ingénieur à la GSF Munich  
Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, S-128 (Nov. 1982)