Quantifizierung und Visualisierung von Regenwurmgangsystemen in computertomographischen Bildern von Bodensäulen

Dr. Karin Kotzke

26. August 1997

1 Einsatz der Röntgencomputertomographie

Die Bodensäulen werden nach Festlegung der Aufnahmebedingungen schrittweise durch die Aufnahmeebene des Computertomographen geführt. Zu den Aufnahmeparametern zählen die Schrittweite, die Dicke der zu durchleuchtenden Schicht, die Größe der resultieruenden Bildmatrix und der Zoom mit dem das Objekt abgebildet wird.

Nach dem Weiterführen des Objektes wird eine transversale Schicht mittels Röntgenstrahlen, die diese Schicht in verschiedenen Richtungen durchdringen, abgebildet. Technisch erfolgt es durch die Bewegung des Systems Röntgenstrahler - Detektor in der Ebene der abzubildenden Schicht um das Objekt.

Aus den gemessenen Intensitätswerten wird auf die Verteilung des linearen Schwächungskoeffizienten innerhalb dieser Schit rückgerechnet. Der Schwächungskoeffizient liefert die Information, die bildlich dargestellt wird. Um aus der Objektschicht eine Beziehung zu dem CT-Bild aufzubauen, wird ein raumfestes dreidimensionales Koordinatensystem (X, Y, Z) eingeführt. Die X, Y-Ebene entspricht der Mittelebene der Objektschicht (Abtastebene). Als Objektschicht wird eine Schicht mit einer quadratischen Grundfläche $L{*}L(L \sim 500mm)$ und einer Dicke S $(1mm \leq S \leq 12mm)$ angenommen.

Die quadratische Objektschicht besteht aus einer rasterförmigen Zerlegung in einzelne Volumenelemente $V_{i,k}$ $(1 \leq i, k \leq n)$. Jedes Volumenelement besitzt die Grundfläche $(L/n)^2$ und die Höhe S, wobei n die Ortsauflösung ist, z.B. $n = 256$ oder $n = 512$.

Die Daten, die der Meß- und Bildrekonstruktionsprozeß bezüglich jedes einzelnen Volumenelementes erzeugt, werden in Speicherelementen abgelegt, die ebenfalls als quadratische Matrix angeordnet sind (ganzzahlige Werte). Die Dichteauflösung wird durch die Speichertiefe t bestimmt, z.B. $t = 8$ Bit oder $t = 12$ Bit.

2 Vorverarbeitung der Bilddaten

Die Makroporen sind in der entsprechenden Skala von 0 bis 4095 (12 Bit Auflösung) im unteren für Luft repräsentativen Bereich dargestellt. Neben den Makroporen des Regenwurmgangsystems sind auch andere mit Luft gefüllte Poren dort vorzufinden (Abb. 1).

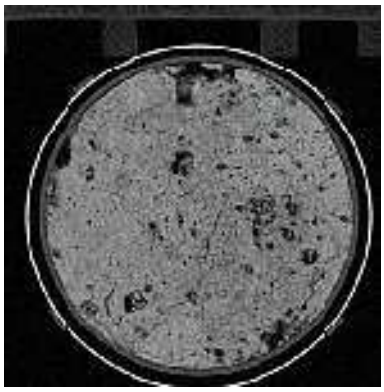

Abbildung 1: CT-Schichtbildaufnahme einer Bodensäule

Die homogene Darstellung der Makropore relativ zum umgebenden Boden und die deutliche Differenz in den Intensitätswerten erlaubt im ersten Schritt die Segmentierung durch Binarisierung der CT-Schichtbilder mit einem für Luft geeigneten Schwellwert T_{Luft}. Dieser Schwellwert wird zunächst interaktiv bestimmt. Sei $(S(x,y))$ das CT-Bild mit $(1,1) \leq (x,y) \leq (X,Y)$, dann ergibt sich das Binärbild mit

$$B(x,y) = \begin{cases} 1 & , \quad S(x,y) > T_{Luft} \\ 0 & , \quad \text{sonst} \end{cases} \tag{1}$$

In dem Binärbild sind alle Pixel, die Luft repräsentieren, gesetzt. Dies schließt sowohl die Außenluft, als auch die Poren, die nicht zum Gangsystem gehören, ein. Durch eine Maskierung des Binaärbildes kann die Außenluft relativ einfach eliminiert werden. Problematischer ist die Unterscheidung der Poren in der Probe als zum Gangsystem zugehörig bzw. nicht zugehörig.

Unter der Annahme, daß die Regenwürmer mit einem Durchmesser von mehreren Millimetern in einer Darstellung mit einer Ortsauflösung von $1mm^2$ die Makroporen erzeugen, entfallen zunächst alle Einzel- und Zweierpixel. Weiterhin sind alle Strukturen im Binärbild, die zwar in der Länge groß, aber in der Breite schmal sind (z.B. 1 Pixel), keine Kandidaten für das Gangsystem. Zur Eliminierung dieser Gruppen wird ein Filter $h(u,v)$ auf das Binärbild gesetzt (vergl. Joschko [2]).

$$\delta(x,y) = \begin{cases} 1 & , \quad B(x,y) > 0 \\ 0 & , \quad \text{sonst} \end{cases} \tag{2}$$

$$h(u,v) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 0 & 3 & 2 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$Z(x,y) = \sum_{u=-2}^{2} \sum_{v=-2}^{2} \delta(x,y) * B(x+u, y+v) * h(u,v) \tag{4}$$

$$B'(x,y) = \begin{cases} 1 & , \quad Z(x,y) > T \\ 0 & , \quad \text{sonst} \end{cases} \tag{5}$$

Mit der Belegung der Faltungsmatrix ist den direkten Nachbarn des aktuellen Pixels ein höheres Gewicht zugeordnet, als den diagonal anliegenden, da diese nach der euklidischen Distanz auch weiter entfernt liegen. Für den Schwellwert T hat sich die Wahl $T = 9$ bewährt. DieBelegung der indirekten Nachbarn ist hierbei nicht ausreichend, sondern es muß auf jeden Fall mindestens ein direkter Nachbar gesetzt sein.

Die vorhergehenden Schritte führen zu einer Darstellung der Gangränder, die teilweise zerrissen oder uneben ist, wie es in der Realität nicht der Fall ist. Als Grundform wird eine konvexe, glatte Darstellung des Gangabschnittes im Bild erwartet. Zur Anpassung der bisher erhaltenen Darstellung an diese Vorgaben wird das Binärbild dilatiert, um die Uneinheitlichkeit (zerfasert, zerrissen) zu entfernen. Anschließend erfolgt eine Erodierung, um die durch die Dilatationen entstandene Flächenzunahme wieder zurückzunehmen.

$$Z(x,y) = \max_{\substack{u=-2,\ldots,2 \\ v=-2,\ldots,2 \\ u \neq 0 \vee v \neq 0}} [B'(x+u, y+v)] * (1 - \delta(x,y)) \tag{6}$$

$$Z(x,y) = \min_{\substack{u=-2,\ldots,2 \\ v=-2,\ldots,2 \\ u \neq 0 \vee v \neq 0}} [B'(x+u, y+v)] * (1 - \delta(x,y)) \tag{7}$$

$$B''(x,y) = \begin{cases} 1 & , \quad B'(x,y) > T \\ 0 & , \quad \text{sonst} \end{cases} \tag{8}$$

Nach Beendigung dieser Verarbeitungsschritte stellt sich das Gebilde in der Säule als ein Objket dar, repräsentiert durch den Wert 1 im Binärvolumen (Abb. 2). Aussagen über Ausdehnungen der Gangabschnitte sind erst möglich, wenn diese Abschnitte als eigenständige Objekte erkannt ist.

Abbildung 2: Binärdarstellung der Luftporen in einem Schichtbild.

3 Segmentierung isolierter Gangabschnitte

In der Binärmatrix B"(x,y) sind alle Pixel, die Luftporen repräsentieren, mit dem Wert 1 gekennzeichnet, der Rest ist auf 0 gesetzt. Für das weitere Verfahren wird davon ausgegangen, daß diese gruppenbildenden Luftporen das Gangsystem darstellen. Die Gangabschnitte können zwar zum überwiegenden Teil visuell unterschieden werden, in der Binärmatrix sind sie allerdings durch die 1er Belegung zunächst ununterscheidbar in Bezug auf ihre Zugehörigkeit zu einzelnen Gangabschnitten.

Auf das Binärvolumen wird ein automatisches rekursives Segmentierungsverfahren angesetzt, das die isolierten Gangabschnitte des Gangsystems erkennt und diesen eine eindeutige Identifikationsnummer zuweist ($R(x, y, z)$). Alle Gruppen werden auf diese Weise markiert und knnen einzeln vermessen und dargestellt werden.

Sei $O(p)$ die eindeutige Identifikationsnummer mit $p\epsilon\{1, \ldots, n\}$, n ist die Anzahl der Gangabschnitte, $O(p) \neq 0 \wedge O(p) \neq 1, u, v, w\epsilon\{-1, 0, 1\}\text{und}(u, v, w) \neq (0, 0, 0)$.

$$R(Z(x, y, z)) = \begin{cases} O(p) \wedge R(Z(x+u, y+v, z+w)) \quad , & Z(x, y, z) = 1 \\ Z(x, y, z) \quad , & \text{sonst} \end{cases} \tag{9}$$

4 Quantitative Auswertungen isolierter Gangabschnitte

Zur Volumenbestimmung genügt es, die Größe C eines Voxels $V(x, y, z)$ (Volumenpixel) zu errechnen und da alle Voxel des Volumens dieselbe Größe besitzen, diesen Wert mit der Anzahl der zur Gruppe gehörenden Voxel zu multiplizieren.

$$C(V(x, y, z)) = p_x * p_y * d \tag{10}$$

p_x und p_y sind die Seitenlängen der Pixel in x und y-Richtung in der Schicht und d ist

der Schichtabstand zwischen zwei Schichten in z-Richtung.

Die Berechnung der Ganglänge L basiert auf der Verfolgung der Flächenschwerpunkte einer Gruppe über die Schichten. Durch Umrechnung der Abstände S der Schwerpunkte in mm anhand der bekannten Werte für Pixelseitenlänge p und Schichtabstand d und die Summierung der Einzelstrecken zwischen zwei Schwerpunkten i und $i+1$, ergibt sich die Ganglänge.

$$S(i, i+1) = \sqrt{(p(x_{i+1} - x_i))^2 + (p(y_{i+1} - y_i))^2 + (d(z_{i+1} - z_i))^2} \tag{11}$$

Da die Schwerpunkte in den direkt benachbarten Schichten betrachtet werden, gilt $z_{i+1} - z_i = 1$.

$$L = \sum_{i=n}^{m-1} S(i, i+1) \tag{12}$$

5 Dreidimensionale Visualisierung

Nach Abschluß der Segmentierung liegen als Ergebnis die Binärdarstellung und die Objektrepräsentation der Gangabschnitte im 3D-Volumen vor. Zur visuellen Bewertung ist eine dreidimensionale Darstellung hilfreich. Diese erfolgt über die Anwendung der Isosurface-Methode mit anschließender Triangulation [1]. Die Verwendung des Binärvolumens ist für die Darstellung des Gangsystems hinreichend (Abb. 3). Sofern nur einzelne ausgewählte Gangabschnitte darzustellen sind, ist die Objektrepräsentation im 3D-Volumen heranzuziehen (Abb. 4).

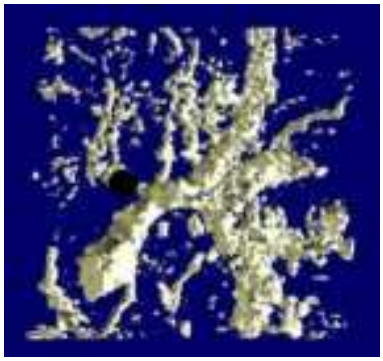

Abbildung 3: Visualisierung des gesamten Gangsystems auf Basis der Binärdarstellung.

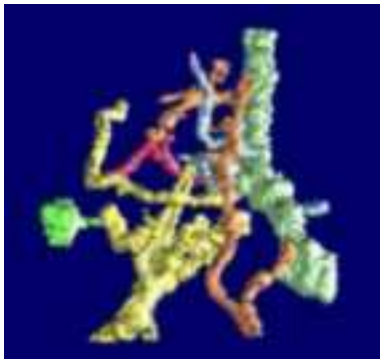

Abbildung 4: Visualisierung der vom Volumen her größten Gangabschnitte durch eine unterscheidende farbliche Markierung.

Literatur

[1] Elvins TT. *A Survey of Algorithms for Volume Visualisation.* Computer Graphics Vol 26 No 3:194-201 (1992).

[2] Joschko M, Graff O, Müller PC, Kotzke K, Lindner P, Pretschner DP, Larink O. *A non-destructive method for the morphological assessment of earthworm burrow systems in three dimensions by X-ray computed tomography.* Biol Fertil Soils 11:88-92 (1991).