

Ausarbeitung zum Seminarvortrag Modellierung von Baumstrukturen mit einem einzigen Polygonnetz

1 Einführung

Modellierung von Pflanzen stellt eine große Herausforderung in der Computergrafik dar. Pflanzen, betrachtet aus geringer Distanz, sollen sanfte Übergänge in den Ästen sowie eine große Detailvielfalt in jeder Skalierungsstufe aufweisen. Deshalb werden die Pflanzenmodelle in der Computergrafik als sehr kompliziert eingestuft.

In der Arbeit von Lluch, Vivo und Monserrat wird eine Methode zur Modellierung von Bäumen und Pflanzen, sowie beliebigen anderen verzweigten Strukturen vorgestellt. Die Methode benutzt ein einziges Polygonnetz, das leicht vereinfacht werden kann. Solche Art von Modellierung ist mit einigen Schwierigkeiten verbunden, und zwar die Gewährleistung von sanften Übergängen in der Polygonstruktur selbst, sowie bei einer beliebigen Vergrößerung. Diese Schwierigkeiten zu beheben ist die Hauptmotivation der Autoren.

2 Bisherige Forschungsergebnisse

Zu Beginn werden in dem Artikel einige Forschungsergebnisse kurz zusammengefasst, die zum Zeitpunkt des Erscheinens des Artikels bereits existierten. Die wichtigsten Grundsätze, an die sich die meisten Autoren, die sich mit Pflanzenmodellierung beschäftigen, halten sind: auf botanischen Prinzipien basierte Modellierung sowie Modellierung, die eine realitätsnahe Darstellung anstrebt, ohne direkt die Naturphänomene zu kopieren. Beide Grundsätze werden entweder durch formale Methoden zur Beschreibung verzweigter Strukturen realisiert, oder durch Techniken, basierend auf der Beobachtung verschiedener Elemente. Die am meisten verbreiteten Darstellungsformen der Bäume oder anderer verzweigter Strukturen sind Zylinder oder abgeschnittene Kegel, die die Zweige darstellen. Auch existieren viele Ansätze, die ein Polygonnetz für jeden Ast als Modell benutzen.

Das Modell, das in dem Artikel selbst vorgestellt wird basiert auf parametrischen L-Systemen. Der Hauptunterschied zu anderen Modellierungsansätzen liegt in der Benutzung von zufälligen Variablen in dem System und der Generierung von speziellen Modulen, die Kontrolle über die Ableitung der Zeichenketten ermöglichen.

3 Probleme und Lösungsansätze der Pflanzenmodellierung

In dem Artikel werden einige bereits bekannte Probleme in der Pflanzenmodellierung aufgeführt, sowie die Lösungsansätze dazu erläutert. Viele Modelle zur Beschreibung von Krümmungen von Ästen bringen Unglattheiten mit sich. Große Probleme entstehen ebenso bei Darstellungen von Verzweigungen. In diesem Fall können sich die Polygone von verschiedenen Ästen überschneiden, wenn getrennte Polygonnetze für jeden Ast benutzt werden. Dies verursacht optische Unstimmigkeiten an den Übergängen, wie die Abbildung 1 zeigt. Als Lösungsansatz zu diesem Problem wird in dem Artikel ein einziges Polygonnetz für das gesamte Pflanzenmodell vorgeschlagen.

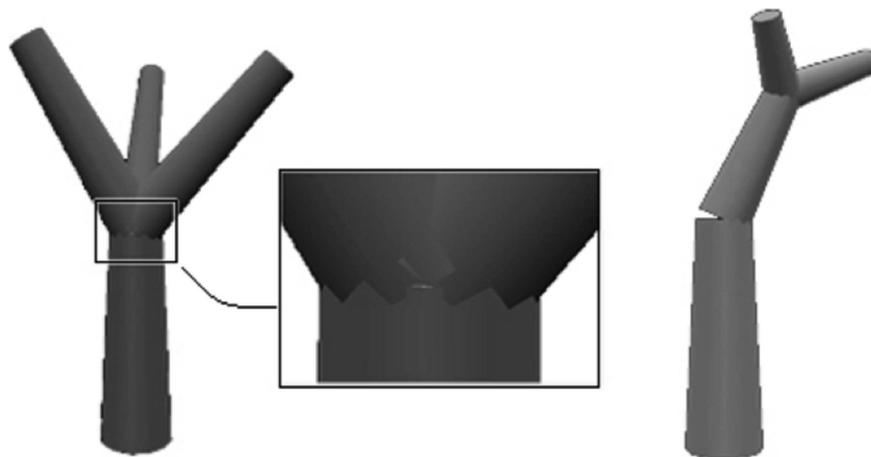


Abbildung 1: Optische Fehler an den Verzweigungsstellen

Ebenso ein schwerwiegendes Problem der Pflanzenmodellierung entsteht beim Rendering. Selbst die mächtigsten graphischen Beschleuniger (Acceleratoren) sind nicht in der Lage eine ausreichend hohe Bildfrequenz zum interaktiven Rendering von Szenen mit wenigen Bäumen zu erzeugen, wenn ein „brute-force-Algorithmus“ benutzt wird. Deshalb müssen Techniken zur Beschleunigung der Visualisierung für solche Szenen benutzt werden.

Als eine der wichtigsten Anwendungen der Baummodellierung heutzutage wird das Rendering von Ökosystemen erwähnt. Dabei ist es notwendig, gleichzeitig eine große Anzahl von Bäumen zu repräsentieren. In diesen Anwendungen ist eine schnelle Visualisierung von jedem Baummodell sehr wichtig. Es werden einige Methoden zur Beschleunigung der Visualisierung genannt. Einen zu der Zeit neuen Ansatz liefert die Arbeit in dem Artikel, und zwar erlaubt ein einziges Polygonnetz die Benutzung einer Multiresolutionsstruktur.

4 Baummodellierung aus einem einzigen Dreiecksnetz

Die in der Arbeit beschriebene Methode der Baummodellierung besteht im Wesentlichen aus drei Schritten. Der erste Schritt ist die Baummodellierung selbst, danach wird aus dem Modell ein Polygonnetz konstruiert und anschließend werden die Übergänge an den Verzweigungen verfeinert. Als Ergebnis erhält man ein einziges dreidimensionales Polygonnetz, das den Baum repräsentiert und mit einem L-System konstruiert wurde. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte genauer erläutert.

4.1 Baummodellierung

Die Interpretation von Zeichenketten ist basiert auf der sogenannten Schildkrötenmetapher („turtle metaphor“), die bereits in vorherigen Vorträgen ausführlich erläutert wurde. Im Folgenden wird dennoch eine kurze Beschreibung angegeben.

In dem Modell wird eine „virtuelle“ Schildkröte durch ein dreidimensionales Koordinatensystem gelenkt. Durch die Spur dieser Bewegung wird später der gewünschte Baum festgelegt. Dabei wird die Schildkröte in jedem Schritt durch folgende Parameter charakterisiert: die Position, die Orientierung und den Stack, in dem vorherige Positionen und Orientierungen gespeichert sind. Die Position der Schildkröte wird durch einen Punkt im Koordinatensystem angegeben. Die Bewegung kann nur in Richtung des Kopfes der Schildkröte erfolgen. Die Orientierung der Schildkröte kann durch die Rotationsbewegungen um jede der Achsen des Koordinatensystems variiert werden. Bei jeder Bewegung erzeugt die Schildkröte eine elliptische oder runde Kontur in der Ausgangs- und in der Endposition. Die Größe dieser Kontur wird von der gewünschten Dicke und Neigung des späteren Astes bestimmt.

Um die durch die Schildkröte erzeugten Konturen zu speichern, wird eine hierarchische Baumstruktur erschaffen (siehe Abbildung 2). Dabei besteht jeder Knoten des Baumes aus:

- der durch die Schildkröte erzeugten Kontur,
- der Transformationsmatrix (enthält die Drehung und die Verschiebung der Schildkröte, die den Weg vom vorherigen (Vater-) Knoten zum aktuellen Knoten beschreiben),
- dem Zeiger zum nächsten Bruder-Knoten,
- dem Zeiger zum ersten Sohn-Knoten
- und dem Zeiger zum Vater-Knoten (der Knoten, von dem die Schildkröte gestartet ist, um den aktuellen Knoten zu erreichen).

Alle Sohnknoten, die von einem und demselben Vaterknoten ausgehen, werden entsprechend der Reihenfolge, in der sie generiert wurden in einer Liste gespeichert. Dabei hat jeder Vaterknoten nur einen direkten Zugang zu dem jeweils ersten Sohn.

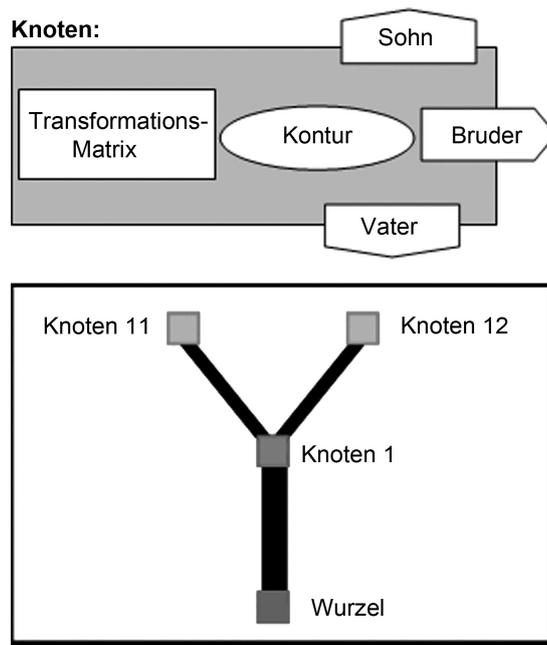


Abbildung 2: Hierarchische Baumstruktur

Die oben beschriebene hierarchische Struktur wird durch die Interpretation der Zeichenkette erhalten, die durch das L-System produziert wurde. Ausgehend von dieser Struktur wird ein Dreiecksnetz generiert, und zwar mit Berücksichtigung der Form der Konturen und der durch die Struktur geschaffenen Topologie. Das Netz wird durch das Verbinden von Ecken zweier Konturen konstruiert, die jeweils einen Ast repräsentieren.

4.2 Das Polygonnetz

Die Verfasser des Artikels haben eine Softwarebibliothek zur Konstruktion des Polygonmodells entwickelt. Es ermöglicht die Konstruktion des Dreiecksnetzes aus der Folge der Konturen. Wie die Abbildung 3 zeigt, wird bei dem hier präsentierten Rekonstruktionsalgorithmus der Querschnitt der Kindknoten aus der Kontur des Vaterknotens gewonnen. Die Abbildung zeigt auch, dass direkte Anwendung des Algorithmus eine Geometrie erzeugt, die optische Fehler aufweist, und zwar an dem Knotenansatz. Aus diesem Grund wird zusätzlich eine Verfeinerungsmethode angewendet, die im Folgenden präsentiert wird.

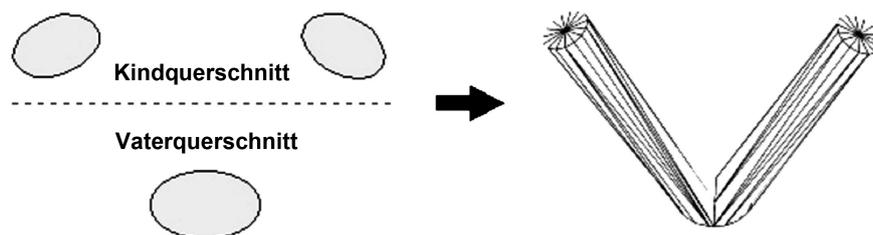


Abbildung 3: Erzeugung eines Dreiecksnetzes aus aufeinanderfolgenden Querschnitten

4.3 Verfeinerung der Verzweigungen

Ein Algorithmus namens „Verfeinerung durch Intervalle“ wurde entwickelt, um geometrische Fehler zu beheben, die an den Verzweigungen von Ästen (Baumknoten) entstehen. Der Algorithmus fügt zu der Struktur zwischen einem Vaterknoten und seinen Söhnen Gruppen neue Konturen hinzu, um den Übergang abzuglätten.

Dabei wird angenommen, dass die Zweige des Baumes durch Zylinder oder abgeschnittene Kegel dargestellt werden. Die Zylinder bzw. Kegel werden durch eine Kontur definiert, wobei die Höhe und Breite der Zylinder bzw. Kegeln der Länge und Dicke der Zweige entsprechen. Der Algorithmus lässt sich in vier Schritte unterteilen:

1. Hinzufügen der Subkonturen
2. Berechnung der Ellipsenparameter
3. Erzeugen einer neuen Kontur
4. Hinzufügen des neuen Knotens in die Baumstruktur

Im Folgenden werden einzelne Schritte erläutert.

Algorithmus: Verfeinerung durch Intervalle:

1. Hinzufügen der Subkonturen

Man betrachtet das Gebiet vom Anfang der Verzweigungen bis die Zweige völlig voneinander getrennt sind. In diesem Gebiet werden in immer gleichem Abstand voneinander neue Konturen hinzugefügt, wie in Abbildung 4 dargestellt. Die neuen Konturen entstehen durch die horizontale Schnittebene der Verzweigungsstelle und sind ellipsenförmig. Je kleiner die Abstandsintervalle gewählt werden, desto glatter erscheint der Übergang.

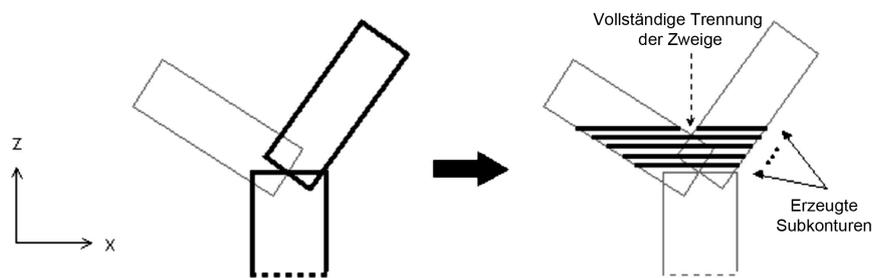


Abbildung 4: Hinzufügen der Subkonturen

2. Berechnung der Ellipsenparameter

Das Ziel in diesem Schritt ist es, folgende Größen für jede elliptische Subkontur des Astes zu bestimmen (siehe Abb. 5):

- r_e - der kleine Radius,

- R_e - der große Radius,
- C - Zentrum der Ellipse,
- γ - der Rotationswinkel.

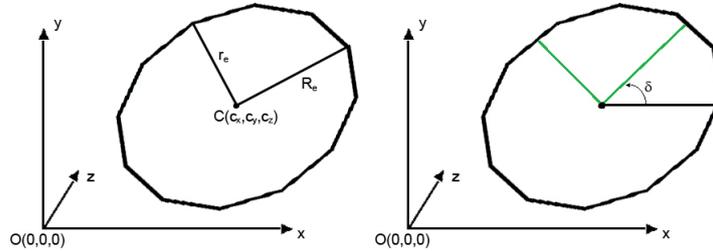


Abbildung 5: Ellipsenparameter

Zur Berechnung der beiden Radien werden als v der Vektor entlang der Mittelachse des Astzylinders, als v_{proj} die Projektion von v auf die Schnitt Ebene und als α der Winkel zwischen v und seiner Projektion definiert (siehe Abb. 6, A-B). Dann lässt sich der kleine Radius r_e als Abstand von v zur Außenwand des Zylinders r_c (oder auch als Radius des Zylinders) ablesen und der große Radius R_e mit der Definition des Sinus bestimmen:

$$\sin(\alpha) = \frac{r_e}{R_e} \quad \Leftrightarrow \quad R_e = \frac{r_e}{\sin(\alpha)}.$$

Der Mittelpunkt der Ellipse ist eindeutig bestimmt durch die Höhe h der Schnitt Ebene und den Rotationswinkel γ . Dabei ist die Höhe h gerade die z -Achsenkoordinate des in Abb. 6 B definierten Vektors p . Wegen der Orthogonalität von p zum Vektor v ist die Höhe gegeben durch

$$p_x \cdot v_x + p_y \cdot v_y + p_z \cdot v_z = 0 \quad \Leftrightarrow \quad h = p_z = \frac{-(p_x \cdot v_x + p_y \cdot v_y)}{v_z}$$

Da die Koordinaten von v bekannt sind, bleibt es, die Koordinaten p_x und p_y von p zu bestimmen. Sei u_{vp} der Einheitsvektor in die Richtung der Projektion von v auf das „Dach“ des unteren Zylinders und λ die Länge dieser Projektion (siehe Abb. 6 B). Dann ist λ leicht mit der Definition des Cosinus zu berechnen:

$$\cos(\beta) = \frac{\lambda}{r_e} \quad \Leftrightarrow \quad \lambda = r_e \cdot \cos(\beta), \quad \text{wobei } \beta = 90^\circ - \alpha.$$

Wir erhalten also für die Koordinaten von p

$$p_x = -\lambda \cdot u_{vp_x}, \quad p_y = -\lambda \cdot u_{vp_y}.$$

Wenn der Punkt S in Abb. 6 C als Ursprung des Koordinatensystems angenommen wird, ergibt sich für den Rotationswinkel

$$\cos(\delta) = \frac{v_x}{\|v\|} = \frac{v_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}} \quad \Leftrightarrow \quad \delta = \arccos\left(\frac{v_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}}\right),$$

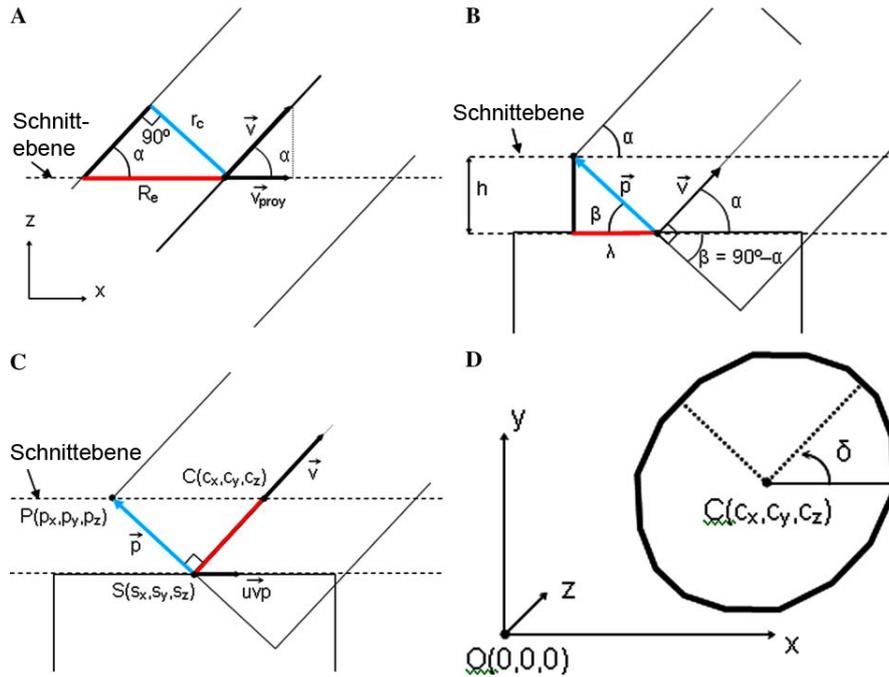


Abbildung 6: A-C: Frontansichten der Astzylinder, D: Sicht auf die zu berechnenden Ellipse in der Schnittebene

wobei mit $\|\cdot\|$ die Euklidische Norm und somit die Länge eines Vektors bezeichnet wird.

3. Erzeugen einer neuen Kontur

In diesem Schritt wird aus den einzelnen ellipsenförmigen Astkonturen eine einzige Kontur für jedes Höhenintervall erstellt. Zunächst ist zu bemerken, dass die Ellipsen durch Polygone approximiert sind und dass deren Ecken gegen den Uhrzeigersinn sortiert sind. Die Anzahl der Ecken ist abhängig von der Größe des Astes und dem visuellen Anspruch, der gewährleistet werden soll.

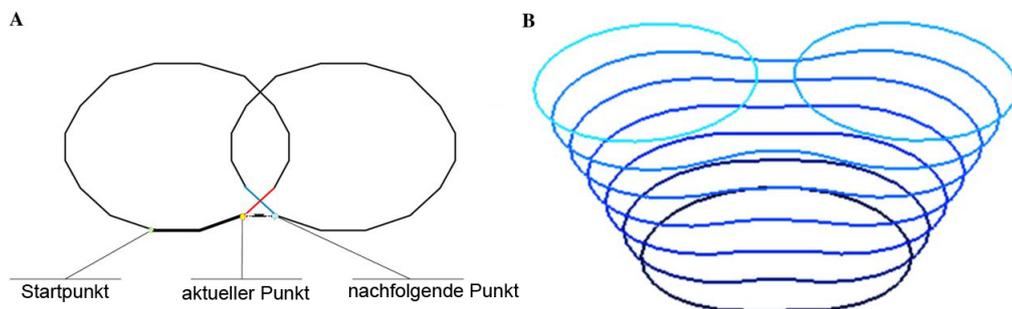


Abbildung 7: Generieren einer neuen gemeinsamen Kontur

Man beginnt mit einem Punkt, der zu einer einzigen Ellipse gehört und nicht von mehreren Ellipsen geteilt wird. Dann folgt man den Kanten dieser Ellipse gegen den Uhrzeigersinn bis man einen Schnittpunkt mit einer anderen Ellipse erreicht. Anstatt sich weiter auf der Ellipse zu bewegen und den Schnittpunkt zu

überqueren, erzeugt man eine neue Kante von dem Beginn der aktuellen Kante zum Ende der Kante der Ellipse, die geschnitten wird (siehe Abb. 7 A). Man folgt nun den Kanten der nächsten Ellipse und wiederholt gegebenenfalls den Vorgang bis es keine Überschneidungen mehr gibt.

Als Resultat dieses Vorgangs für eine gegebene Abzweigungsstelle erhält man neue Konturen, wie in Abb. 7 B dargestellt.

4. Hinzufügen des neuen Knotens in die Baumstruktur

In diesem Schritt werden die oben konstruierten neuen Knoten in die hierarchische Baumstruktur eingebunden. Jede neue Kontur für jedes Intervall stellt einen neuen Knoten dar, der mit Erhaltung der bestehenden Baumstruktur wie in Abb. 8 hinzugefügt wird.

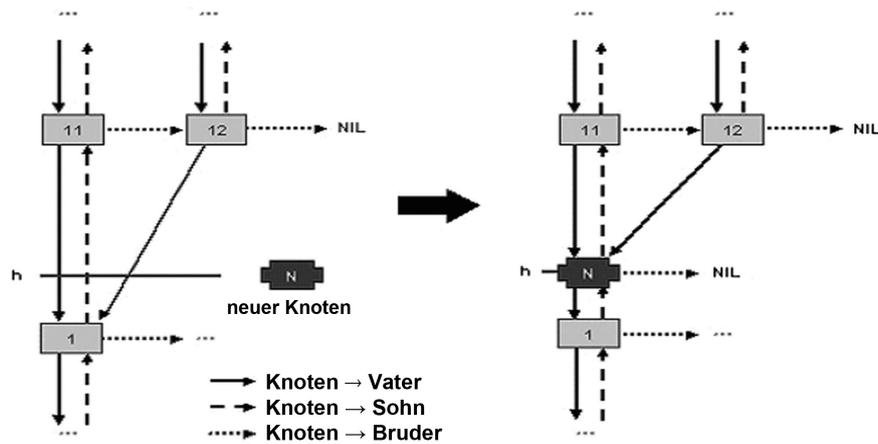


Abbildung 8: Hinzufügen eines neuen Knoten zu der Baumstruktur

5 Ergebnisse und Zusammenfassung

Im letzten Abschnitt des Artikels werden die Ergebnisse am Beispiel eines Dreiecksnetzes präsentiert, sowie die Vor- und Nachteile der beschriebenen Methode diskutiert.

Das Resultat des im Artikel beschriebenen Algorithmus ist ein einziges dreidimensionales Dreiecksnetz als Baummodell. Die Abbildung 9 zeigt die optische Verbesserung der Astübergänge, die durch den Algorithmus erreicht wird. Allerdings steigt mit dem Grad der Verfeinerung auch der Aufwand der Methode, da durch die Verfeinerung dem Netz weitere Dreiecke hinzugefügt werden. Der Ausmaß der steigenden Kosten ist in der Tabelle 1 dargestellt. Dabei gibt die Auflösung der Konturen die Anzahl der Ecken in dem konturenapproximierenden Polygon an. Man sieht, dass bei 15 Ecken im Polygon die Anzahl der Dreiecke sich nach der Verfeinerung in etwa verdreifacht, was eine Verzögerung der Darstellung und einen großen Rechenaufwand bei weiteren Operationen an dem Modell als Folge hat. Dieser Nachteil lässt sich allerdings mit einem Downsampling-Algorithmus beheben, in dem die Anzahl der Dreiecke bei einer ähnlich guten optischen Feinheit verringert werden kann. Abbildung 10 zeigt das Ergebnis des

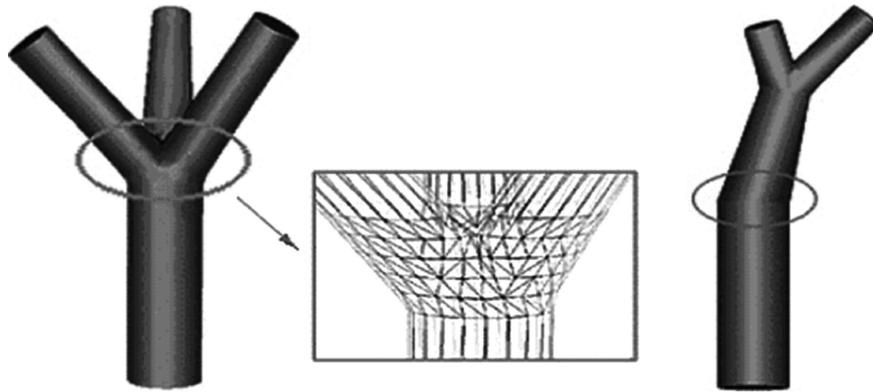


Abbildung 9: Ein einziges Polygonnetz glättet den Astübergang ab

Downsamplings.



Abbildung 10: Ergebnis der Anwendung eines Downsamplings

Ein weiterer Nachteil dieser Methode besteht darin, dass bei einer hinreichenden Vergrößerung das Dreiecksnetz zum Vorschein kommt und somit wieder optische Unglatterheiten entstehen. Während der Diskussion nach dem Vortrag wurde ein weiterer Nachteil dieser Methode erwähnt, und zwar scheint es unmöglich mit diesem Algorithmus Baumstrukturen zu glätten, bei denen die Äste eine Biegung in Richtung Boden machen, da in diesem Fall in dem Schnitt der Verzweigung keine Ellipsen entstehen. Eventuell ließe sich dieses Problem lösen durch Verwendung nicht-horizontaler Schnittebenen.

Ein weiterer Vorteil der Baummodellierung mit einem einzigen Polygonnetz, neben der optischen Verbesserung der Übergänge, ist die Möglichkeit, auf einem solchen Netz dynamische Modelle, wie zum Beispiel Einwirkung von Wind, zu implementieren. Ebenso ist eine Anwendung von Texturen auf das gesamte Modell möglich. Das Modell lässt sich außerdem auf andere verzweigte Strukturen wie Blutgefäße und Pipelines anwenden.

Auflösung der Konturen	Anzahl der Polygone	
	Original	Verfeinert
5	4998	9708
9	5028	10142
12	5343	13762
15	8435	24482

Tabelle 1: Die Anzahl der Dreiecke im Netz im Vergleich

Als Ausblick für die weitere Arbeit erwähnen die Autoren die Implementierung eines Modells, das einen glatten Übergang zwischen verschiedenen Auflösungsstufen mit einem mäßigen Aufwand ermöglicht.

Literatur:

Modelling tree structures using a single polygonal mesh, J. Lluch, R. Vivó, C. Monserrat, Graphical Models, Volume 66, Issue 2 (March 2004), pp. 89-101