

Multitexturbasierte Volumenvisualisierung in der Medizin

Christof Rezk-Salama, Michael Scheuering

Graphische Datenverarbeitung, Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9, 91058 Erlangen
Email: {rezk,scheuering}@cs.fau.de

Zusammenfassung. Volumenvisualisierung ist mittlerweile zum festen Bestandteil zeitgemäßer medizinischer Forschung und Diagnostik geworden. Interaktivität fordert hier in der Regel teure Graphikworkstations oder spezielle Volume Rendering Hardware. Alternativ wurde bisher reduzierte Interaktivität und Bildqualität auch auf dem PC oder günstigeren Workstations angeboten. Angetrieben durch den PC Konsumermarkt werden hochwertige Graphikkarten gleichzeitig immer preiswerter und leistungsfähiger. Neueste Entwicklungen bieten extreme Polygonleistungen bei einer Füllrate im Gigapixel-Bereich. In diesem Bericht werden Verfahren vorgestellt, diese preiswerte Hardware für die wissenschaftliche Visualisierung zu verwenden. Dabei werden spezielle Fähigkeiten wie Framebuffer-Arithmetik und Single-Pass-Multi-Texturing effizient ausgenutzt, um direktes Volume Rendering mit Beleuchtung sowie Isoflächendarstellung bei interaktiver Bildrate zu ermöglichen. Das Ergebnis ist zeitgemäße Volumenvisualisierung, die in Hinblick sowohl auf Qualität als auch auf Interaktivität den Vergleich mit teuren High-End Lösungen mehr als standhält.

1 Einleitung

Bei tomographischen Datensätzen liegt die volumetrische Information in der Regel als eine Menge diskreter Abtastpunkte auf uniformem Gitter vor. Der skalare Abtastwert beschreibt dabei eine bestimmte Materialeigenschaft des aufgenommenen Gewebes, beispielsweise das Absorptionsvermögen gegenüber Röntgenstrahlung bei CT. In der Volumenvisualisierung wird durch eine *Transferfunktion* jedem dieser Materialwerte jeweils ein Farbwert und ein Opazitätswert zugewiesen. Dadurch werden dem tatsächlichen Gewebe an diesem Punkt virtuell physikalische Fähigkeiten zur *Emission* und *Absorption* von Licht zugeordnet, die zur Generierung von Bildern genutzt werden.

Die allgemein zum Rendering virtueller Szenen verwendete *Strahlungstransfergleichung* beschreibt das physikalische Phänomen der Ausbreitung von Licht in Materie. Streuung des Lichts wird in der Volumenvisualisierung in der Regel vernachlässigt. Der üblicherweise verwendete Raycasting-Ansatz approximiert die Strahlungstransfergleichung durch eine Neuabtastung des Datensatzes und durch Integration der interpolierten diskreten Emissions- und Absorptionswerte entlang der Sehstrahlen. Zur Interpolation können spezielle Fähigkeiten der Graphik-Hardware, wie beispielsweise Texturen ausgenutzt werden, um interaktive Bildraten zu erreichen.

Angetrieben durch den Massenmarkt für Multimedia-Anwendungen hat die Leistungsfähigkeit preiswerter PC-Graphikkarten immens zugenommen und teilweise die teuren High-End Lösungen im Hinblick sowohl auf Flexibilität als auch auf Performanz bereits überholt. Für eine Anwendung der Volumenvisualisierung in der Medizin spielt die Benutzerinteraktion eine entscheidende Rolle. Interaktive Darstellungen sind zwingend notwendig, um zielgerichtet Diagnosen durchzuführen. Daher ist es wünschenswert, kostengünstige hochperformante PC Hardware auch im medizinischen Bereich einzusetzen.

2 Texturbasierte Interpolation

Im Gegensatz zum Konsumermarkt ist für die wissenschaftliche Visualisierung nicht nur die Performanz wichtig, sondern auch die Qualität der resultierenden Bilder, d.h. die Exaktheit bei der Darstellung der im Datensatz enthaltenen Information. Diese wird einerseits bestimmt durch das verwendete Interpolationsverfahren, andererseits durch die Abtastrate, d.h. die Anzahl der Abtastpunkte entlang eines Sehstrahls. Trilineare Interpolation wird hier als Standardanforderung angesehen. Der Nutzen von Interpolationsverfahren höherer Ordnung ist gerade im medizinischen Bereich fraglich, da in der Regel bei tomographischen Aufnahmeverfahren, beispielsweise beim Spiral-CT, die Rekonstruktion der Schichtbilder aus Projektionsbildern lediglich durch lineare Interpolation erfolgt. Zur artefaktfreien Darstellung kleiner Strukturen – Nerven oder Blutgefäßen beispielsweise – muß darüber hinaus eine Möglichkeit gegeben sein, die Abtastrate entsprechend zu erhöhen.

Texturbasierte Verfahren versuchen die Fähigkeit der Textureinheit zur hardwarebeschleunigten Interpolation auszunutzen. Da Graphikkarten jedoch keine volumetrischen Rendering-Primitive unterstützen, muß das Volumen durch eine bestimmte Anzahl polygonaler Schichten approximiert werden. Je nach vorhandener Hardware gibt es verschiedene Strategien:

2.1 Verwendung von 3D-Texturen

Das Standardverfahren zum texturbasierten Volume-Rendering wurde 1994 von Cabral et al. [1] vorgestellt und erfordert eine Unterstützung von 3D-Texturen mit trilinearere Interpolation durch die Graphikhardware. Dieses in der Regel auf High-End Workstations implementierte Verfahren gilt als Referenz sowohl für Bildqualität als auch für Performanz. Das Volumen wird dann wie in Abb. 1 (links) dargestellt in Texturschichten zerlegt, die abhängig von der Blickrichtung immer parallel zur Bildebene verlaufen. Da sich in diesem Szenario die Schichtpolygone bei Änderung des Augpunktes ebenfalls verändern, müssen die Texturen für jedes Bild neu interpoliert werden. Da die Hardware trilineare Interpolation unterstützt, ist dies bei interaktiver Bildrate möglich.

2.2 Verwendung von 2D-Texturen

Trilinear interpolierte 3D-Texturen werden von PC-Graphikkarten nur zögerlich unterstützt. Daher will man zumindest die bilineare Interpolation der 2D-Texturen aus-

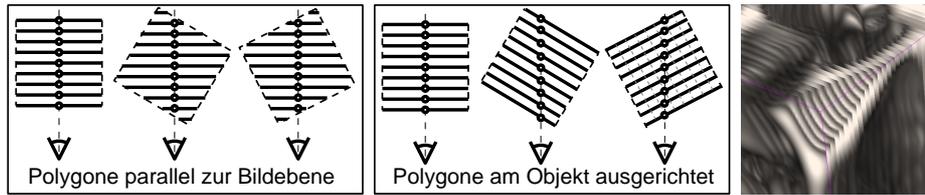


Abb. 1. Ausrichtung der Polygone an der Bildebene (links) und am Volumen (Mitte). Bei zu geringer Abtastrate führen beide Verfahren zu visuellen Artefakten (rechts).

nutzen. Wie in Abb. 1 (Mitte) dargestellt, kann dies geschehen, indem man die Schichtpolygone anstatt an der Bildebene am Objekt selbst ausrichtet. Auf diese Weise wird trilineare durch bilineare Interpolation ersetzt. Ändert sich der Winkel zwischen Blickrichtung und Schichtnormale um mehr als 45° , so wird auf einen anderen Schichtstapel umgeschaltet. Demzufolge müssen die meisten der texturbasierten Algorithmen das Volumen dreifach im Speicher halten, jeweils ein Schichtenstapel für jede Raumachse. Dies ist auch das Grundprinzip beim *Shear-Warp-Algorithmus* [2], der als Standardverfahren für Software-Implementierungen gilt.

Im Bezug auf den ursprünglichen Raycasting-Ansatz ist diese Vorgehensweise jedoch nicht ganz korrekt. Da der Winkel zwischen Blickrichtung und Schichtnormale zwischen 0° und 45° variiert, ändert sich der Abstand der Abtastpunkte blickrichtungsabhängig mit einem Faktor zwischen 1 und $\sqrt{2}$. Die Integration der Abtastwerte wird somit inkorrekt. Der größte Schwachpunkt bisheriger 2D-texturbasierter Verfahren ist jedoch die Tatsache, daß es aufgrund der festen Texturschichten nicht möglich ist, die Abtastrate zu erhöhen. Dies wird besonders dann deutlich, wenn bei starkem Zoomen visuelle Artefakte an den Schichträndern entstehen, wie sie in Abb. 1 (rechts) dargestellt sind. Die Beseitigung dieser Artefakte ist auf sehr effiziente Weise möglich durch Verwendung von Multitexturen.

2.3 Verwendung von 2D-Multitexturen

Unter Multitexturen versteht man die Möglichkeit ein einzelnes Polygon innerhalb der Rendering-Pipeline gleichzeitig mit mehreren Texturen zu versehen. In der Rasterisierung wird Farbe und Opazität eines Fragments dann als Ergebnis programmierbarer arithmetischer Operationen zwischen der Primärfarbe und mehreren Texturwerten bestimmt (*Texturkombination*). Wie in [3] beschrieben, kann diese flexible Framebuffer-Arithmetik effizient ausgenutzt werden, um echte trilineare Interpolation auch mit 2D-Texturen zu berechnen.

Die trilineare Interpolation einer Texturschicht $S_{i+\alpha}$ kann beschrieben werden als Überblenden zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schichten S_i und S_{i+1} :

$$S_{i+\alpha} = (1 - \alpha) \cdot S_i + \alpha \cdot S_{i+1}. \quad (1)$$

Die beiden Schichten S_i und S_{i+1} werden als Multitexturen aktiviert. Die bilineare Interpolation innerhalb der Texturschicht wird hierbei durch die Texturumgebung berech-

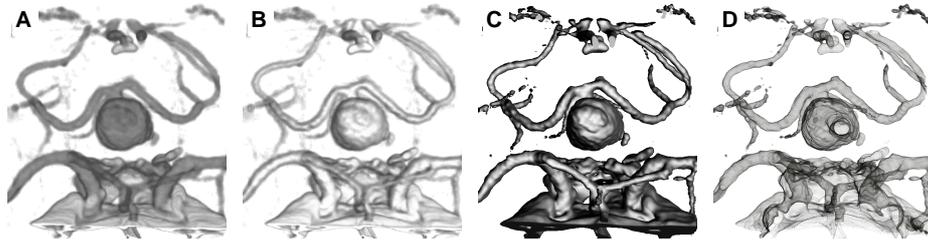


Abb. 2. Intrakranielles Aneurysma in der CT Angiographie. Direktes Volume-Rendering ohne Beleuchtung (A), mit diffuser und spekularer Beleuchtung (B). Isofläche mit diffuser und spekularer Beleuchtung (C). Transparente Isofläche (D)

net. Der fehlende dritte Interpolationsschritt in Richtung der Schichtnormale erfolgt anschließend gemäß Gleichung 1 bei der Texturkombination. Berechnungen wie diese werden auf PC-Graphikkarten mittlerweile standardmäßig unterstützt, beispielsweise im neuen Standard *DirectX* 8.0 oder unter *OpenGL* durch NVidia's *Register Combiners* [4]

Moderne Multitextur-Hardware unterstützt weitaus komplexere Möglichkeiten der Texturkombination. Beispielsweise können die RGB-Kanäle einer Textur als Vektoren interpretiert und ein Skalarprodukt berechnet werden. Dies kann genutzt werden, um das Phong-Beleuchtungsmodell in die texturbasierte Volumendarstellung zu integrieren (siehe Abb. 2 und 3), wie es beispielsweise in [5] zur Darstellung *nicht-polygonaler* Isoflächen genutzt wurde. Die Basis dieser Verfahren ist die Vorberechnung der Gradientenvektoren, deren x -, y - und z -Komponenten in einer RGB-Textur gespeichert werden. In der Rasterisierung wird dann das für die Beleuchtung benötigte Skalarprodukt zwischen Gradient und Lichtrichtung (bzw. *Halfway*-Vektor) bestimmt. Die Berechnung des Phong-Beleuchtungsmodells kann somit vollständig durch die Rasterisierungshardware erfolgen [3].

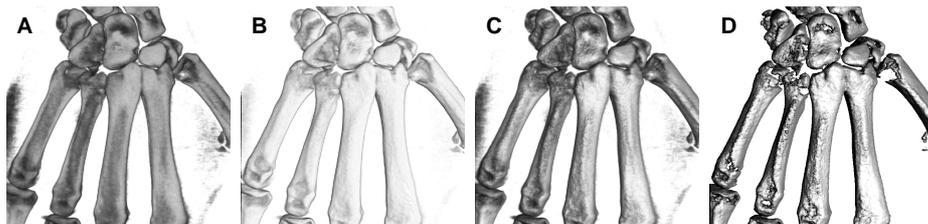


Abb. 3. Computertomographie der Mittelhandknochen. Direktes Volume-Rendering ohne Beleuchtung (A), mit diffuser Beleuchtung (B) und mit spekularer Beleuchtung (C). Isofläche mit diffuser und spekularer Beleuchtung (D)

3 Implementierung

Um medizinischem Fachpersonal den Zugriff und den Einsatz des beschriebenen Volume Rendering Systems zu ermöglichen, wurde eine Integration in die medizinische Softwareplattform *syngo* der Firma Siemens AG zu Evaluierungszwecken vorgenommen¹. Durch die Realisierung ähnlich einer Syngo-Komponente ist es möglich, die Applikation in den Workflow des Mediziners einzubinden. So erlaubt die Anwendung nun, direkt vom CT- oder MR-Scanner aufgenommene Tomographiedaten per DICOM-Protokoll zu transferieren und in einem Patientbrowser auszuwählen. Anschließend können die Daten mit den in den vorigen Kapiteln beschriebenen Visualisierungstechniken dargestellt werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Graphik-Hardware für den PC bietet sehr flexible Multitextur-Einheiten mit programmierbaren arithmetischen Operationen. Es wurde gezeigt, daß diese Möglichkeiten effizient genutzt werden können um die für medizinische Anwendungen benötigte Interaktivität und Bildqualität auch auf Low-Cost Hardware zu realisieren. Die vorgestellten Verfahren zielen darauf ab, in naher Zukunft hochqualitatives Volume Rendering auf den Schreibtisch eines jeden praktizierenden Arztes zu bringen.

Speziell für medizinische Zwecke können die Verfahren auch zur interaktiven Segmentierung erweitert werden. Dabei können die Originaldaten als eine Textur definiert und die Segmentierungs-Tags als eine zweite Textur, wodurch in Verbindung mit Texturpaletten extrem flexible Darstellungsmöglichkeiten folgen. Darüber hinaus ist es auch naheliegend die fusionierte Darstellung registrierter multimodaler Datensätze auf sehr flexible Weise mit Multitexturen zu realisieren.

Literatur

1. B. Cabral, N. Cam, and J. Foran. Accelerated Volume Rendering and Tomographic Reconstruction Using Texture Mapping Hardware. *ACM Symp. on Vol. Vis.*, 1994.
2. P. Lacroute and M. Levoy. Fast Volume Rendering Using a Shear-Warp Factorization of the Viewing Transform. *Comp. Graphics*, 28(4), 1994.
3. C. Rezk-Salama, K. Engel, M. Bauer, G. Greiner, and T. Ertl. Interactive Volume Rendering on Standard PC Graphics Hardware Using Multi-Textures and Multi-Stage Rasterization. In *Eurographics/SIGGRAPH Worksh. on Graphics Hardware*. ACM, 2000.
4. J. Spitzer. GeForce 256 and RIVA TNT Combiners. <http://www.nvidia.com/Developer>.
5. R. Westermann and T. Ertl. Efficiently Using Graphics Hardware in Volume Rendering Applications. In *Proc. of SIGGRAPH*, Comp. Graph. Conf. Series, 1998.

¹ Die Integration liegt jedoch nicht als Produkt vor, sondern lediglich als Forschungsarbeit zu Testzwecken am Institut.