

Verfahren zum Erzeugen einer volumetrischen Textur für ein 3D-Modell eines physischen Objekts

5

Gebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft Verfahren zum Erzeugen einer volumetrischen Textur für ein 3D-Modell eines physischen Objekts.

10

Hintergrund der Erfindung

Es ist bekannt, Begrenzungsflächen-Modelle hinsichtlich ihres Erscheinungsbildes zu bearbeiten. Hierzu werden in Visualisierungsprogrammen üblicherweise Textu-
15 ren, insbesondere zweidimensionale Bildtexturen auf die Oberfläche eines 3D-Modells appliziert. Durch eine Veränderung der Oberfläche bzw. Begrenzungsfläche des 3D-Modells kann die Oberfläche des Objekts um Details angereichert werden, ohne dabei die Komplexität der Objektgeometrie zu erhöhen. Beispielsweise kann die Farbe der Oberfläche geändert werden, der Normalenvektor von Oberflächen-
20 abschnitten, oder aber die Oberfläche abschnittsweise verschoben werden.

Insbesondere durch die Anpassung des Normalenvektors von Oberflächenabschnitte eines Objekts können 3D-Effekte simuliert werden. Diese Visualisierungstechnik ist auch unter dem Begriff "Bump-Mapping" bekannt. Mittels Bump-Mapping
25 kann beispielsweise eine raue Oberfläche des 3D-Modells eines Objekts simuliert werden, obwohl die Oberfläche an sich glatt ist.

- 2 -

In Bezug auf den 3D-Druck haben die üblichen Verfahren zum Bump-Mapping eines Objekts jedoch den Nachteil, dass die simulierten 3D-Effekte nur virtuell vorhanden sind, d.h. beim physischen, 3D-gedruckten Objekt fehlen bzw. nicht gedruckt werden können. Der Normalenvektor einer Oberfläche kann nämlich nur in
5 einer Simulation verändert bzw. angepasst werden, jedoch nicht bei einer realen Oberfläche eines physischen Objekts in der Realwelt.

Aufgabe der Erfindung

10 Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, Verfahren bereitzustellen, mittels welchen das Bump-Mapping von realen physischen Objekten ermöglicht wird, wobei das reale physische Objekt durch ein 3D-Druckverfahren hergestellt wird.

Erfindungsgemäße Lösung

15 Die Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen nach dem unabhängigen Patentanspruch 1 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den abhängigen Unteransprüchen definiert.

20 Erfindungsgemäß wird ein Verfahren zum Erzeugen einer volumetrischen Textur für ein 3D-Modell eines physischen Objekts bereitgestellt. Das 3D-Modell umfasst eine triangulierte Oberfläche mit einer Mehrzahl von ersten Dreiecken. Jedes erste Dreieck der Mehrzahl von ersten Dreiecken weist eine Flächennormale auf. Jede Ecke jedes ersten Dreiecks der Mehrzahl von ersten Dreiecken weist erste Textur-
25 koordinaten und eine Ecknormale auf.

Für jedes erste Dreieck wird in einem ersten Schritt eine erste Ebene parallel zu dem ersten Dreieck in einem ersten vorbestimmten Abstand entlang der Flächennormalen des ersten Dreiecks erzeugt.

30

- 3 -

In einem zweiten Schritt wird ein mittels der Ecknormalen des ersten Dreiecks auf die erste Ebene projiziertes zweites Dreieck erzeugt.

5 In einem dritten Schritt wird ein Volumenbereich erzeugt. Der Volumenbereich weist eine Anzahl von zweiten Voxeln auf und umfasst das erste Dreieck und das zweite Dreieck, d.h. das erste Dreieck und das zweite Dreieck liegen innerhalb des Volumenbereiches. Der Volumenbereich umgibt also die Anzahl von zweiten Voxeln und das erste Dreieck.

10 In einem vierten Schritt wird über die Anzahl von zweiten Voxeln iteriert, wobei ein erster Abstand des jeweiligen zweiten Voxels zum ersten Dreieck berechnet wird und ein auf einer um den ersten Abstand beabstandeten zweiten parallelen Ebene projiziertes drittes Dreieck erzeugt wird. Jeder Ecke des dritten Dreiecks sind zweite Texturkoordinaten zugeordnet. Für das jeweilige zweite Voxel werden dritte
15 Texturkoordinaten aus den zweiten Texturkoordinaten abgeleitet.

In einem fünften Schritt wird ein Voxel-Modell generiert. Das Voxel-Modell umfasst erste Voxel. Die zweiten Voxel korrespondieren zu den ersten Voxel. Die dritten Texturkoordinaten und der erste Abstand des zumindest einen zweiten Voxels
20 werden als 3D-Koordinaten den korrespondierenden ersten Voxeln zugeordnet. Dadurch repräsentiert das Voxel-Modell die volumetrische Textur des 3D-Modells.

Das erfindungsgemäße Verfahren kann für 3D-Modelle mit einer beliebigen triangulierten Oberfläche angewendet werden und ist somit vielseitig einsetzbar. Dabei
25 hat eine durch ein Voxel-Modell repräsentierte volumetrische Textur eine Reihe von Vorteilen.

Erstens, kann die volumetrische Textur mit einem nahezu beliebigen Detailreichtum modelliert werden. Jedes Voxel des Voxel-Modells der volumetrischen Textur
30 kann dabei unterschiedliche Materialien oder unterschiedliche Farben aufweisen bzw. sich in anderen Fertigungsparametern unterscheiden. Auf diese Weise lässt

- 4 -

sich ein in üblichen Visualisierungsprogrammen auf ein 3D-Modell appliziertes digitales Bump-Mapping auf reale physische Objekte aus dem 3D-Drucker übertragen.

- 5 Zweitens, können Voxel-Modelle höchst effizient und robust, d.h. ohne numerische Instabilitäten, verarbeitet werden. Beispielsweise können Bearbeitungen des Voxel-Modells parallelisiert und/oder mittels binären Rechenoperationen beschleunigt werden. Somit kann eine mittels eines Voxel-Modells repräsentierte volumetrische Textur erheblich schneller und effizienter bearbeitet werden als eine volumetrische
- 10 Textur, welche durch ein polygonbasiertes Modell repräsentiert wird.

- Drittens, basiert das erfindungsgemäße Verfahren auf einfach auszuführenden, wenig rechenintensiven geometrischen Operationen, wie etwa das Aufspannen einer parallelen Ebene oder die Berechnung von Schnittpunkten von Ecknormalen mit
- 15 der parallelen Ebene. Somit ermöglicht das Verfahren ein effizientes Erzeugen von zweiten Voxeln und Berechnen dessen Texturkoordinaten. Das erfindungsgemäße Verfahren lässt sich demnach auch auf größere Begrenzungsflächen-Modelle bzw. Oberflächen von Objekten anwenden.

- 20 Es ist vorteilhaft, in einem Vereinigungsschritt eine Vereinigungsmenge der zweiten Voxel aller Volumenbereiche zu ermitteln, um sich überlappende zweite Voxel zu entfernen. Sich überlappende zweite Voxel entstehen insbesondere bei benachbarten ersten Dreiecken eines konkaven Oberflächenabschnitts des 3D-Modells.

- 25 Der Vorteil am Bilden einer Vereinigungsmenge der zweiten Voxel aller Volumenbereiche liegt darin, dass überlappende zweite Voxel eliminiert werden, was die Effizienz der Verarbeitung der volumetrischen Textur hinsichtlich zweier Aspekte erhöht: Das Verarbeiten der volumetrischen Textur wird beschleunigt, und es wird weniger Speicherplatz benötigt, um das resultierende Voxel-Modell, also die volumetrische Textur, zu speichern.
- 30

Vorteilhaft ist es auch, wenn das Voxel-Modell in einem Transformationsschritt auf das 3D-Modell des physischen Objekts angewendet wird. Hierzu werden die 3D-Texturkoordinaten der ersten Voxel des Voxel-Modells in kartesische Koordinaten X, Y und Z transformiert.

5

Durch die Anwendung des Voxel-Modells auf das 3D-Modell kann das 3D-Modell inklusive der volumetrischen Textur in einem 3D-Drucker hergestellt werden. Auf diese Weise können digitale Visualisierungseffekte, wie etwa raue oder musterbehaftete Oberflächen, in einem nahezu beliebigen Detailreichtum auf einem physischen Objekt realisiert werden.

10

In einem vorteilhaften Aspekt der Erfindung wird jedem ersten Voxel des Voxel-Modells ein Abstandsattribut zugeordnet, wobei dem Abstandsattribut ein zweiter Abstand zuordenbar ist. Der zweite Abstand wird zwischen dem jeweiligen ersten Voxel und einer die volumetrische Textur abschließenden zweiten Oberfläche des physischen Objekts gemessen.

15

Üblicherweise wird keine konstant dicke Hülle als volumetrische Textur über die Oberfläche eines Objekts gelegt, sondern eine Hülle deren Dicke lokal variiert. Daher ist es vorteilhaft, mittels einem Abstandsattribut jedem Voxel einen Abstand zur resultierenden Oberfläche des physischen Objekts zuzuordnen, also derjenigen Oberfläche, welche durch Anwendung der volumetrischen Textur auf das ursprüngliche physische Objekt resultiert.

20

Vorteilhaft ist es, dem Abstandsattribut von ausgewählten ersten Voxeln einen zweiten vorbestimmten Abstand zuzuordnen, um die volumetrische Textur zu gestalten.

25

In einem vorteilhaften Aspekt des erfindungsgemäßen Verfahrens werden jene zweite Voxel, deren erster Abstand zum ersten Dreieck negativ oder größer als der erste vorbestimmte Abstand ist, verworfen.

30

- 6 -

Dadurch können Voxel, die unterhalb der Oberfläche des Objekts oder weit außerhalb der anzuwendenden volumetrischen Textur liegen, eliminiert werden. Somit reduziert sich die Anzahl der zweiten Voxel auf jene zweite Voxel, die zur Erzeugung der volumetrischen Textur benötigt werden.

Vorteilhafterweise werden jene zweite Voxel, von denen eine der dritten Texturkoordinaten negativ ist, verworfen.

Eine weitere Beschränkung der Anzahl der zweiten Voxel auf diejenigen, welche zur Repräsentation der volumetrischen Textur minimal benötigt werden, hat den technischen Vorteil, dass die Komplexität des Voxel-Modells erheblich reduziert wird. Damit einher geht eine schnellere bzw. effizientere Bearbeitung des Voxel-Modells.

Ferner ist es vorteilhaft, wenn die zweiten Voxel des Volumenbereichs für jedes der ersten Dreiecke jeweils gleich, also parallel, ausgerichtet sind.

Die räumliche Ausrichtung der Volumenbereiche kann die räumliche Ausrichtung der zweiten Voxel definieren. Somit ist es vorteilhaft, alle Volumenbereiche jeweils parallel auszurichten. Parallel ausgerichtete zweite Voxel ermöglichen eine leichtere Bearbeitung des Voxel-Modells als Ganzes. Beispielsweise können binäre Operationen, wie das Bilden einer Vereinigungsmenge, bei parallel ausgerichteten zweiten Voxeln effizienter durchgeführt werden.

Vorteilhafterweise werden in dem vierten Schritt die dritten Texturkoordinaten als baryzentrische Koordinaten in dem dritten Dreieck berechnet.

Weiter vorteilhaft ist es, wenn in dem vierten Schritt die dritten Texturkoordinaten (U_V ; V_V) mittels trilinearer Interpolation zwischen zweiten Voxeln ($VX2$) berechnet werden.

Kurzbeschreibung der Figuren

Weitere Einzelheiten und Merkmale des erfindungsgemäßen Verfahrens sowie
5 konkrete, insbesondere vorteilhafte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung in Verbindung mit der Zeichnung. Es zeigt:

- Fig. 1 ein Ausführungsbeispiel für den ersten Schritt des erfindungsgemäßen
10 Verfahrens;
- Fig. 2 ein Ausführungsbeispiel für den zweiten Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens;
- Fig. 3 ein Ausführungsbeispiel für den dritten Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens;
- 15 Fig. 4 ein Ausführungsbeispiel für den ersten Teil des vierten Schritts des erfindungsgemäßen Verfahrens;
- Fig. 5 ein Ausführungsbeispiel für den zweiten Teil des vierten Schritts des erfindungsgemäßen Verfahrens; und
- Fig. 6 ein Flussdiagramm einer Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens.
20

Detaillierte Beschreibung der Erfindung

Fig. 1 illustriert die Ausführung des ersten Schritts des erfindungsgemäßen Verfahrens.
25

Das 3D-Modell eines physischen Objekts, für welches eine volumetrische Textur erzeugt werden soll, umfasst eine triangulierte Oberfläche mit einer Mehrzahl von ersten Dreiecken. Beispielsweise kann die Oberfläche des physischen Objekts
30 durch ein Triangulated irregular network (TIN) repräsentiert sein. Hierbei teilen sich jeweils zwei benachbarte erste Dreiecke eine Kante und zwei Eckpunkte, so

dass die Oberfläche des physischen Objekts durch ein Netz von nicht überlappenden ersten Dreiecken repräsentiert wird.

Das erfindungsgemäße Verfahren wird nachfolgend anhand eines solchen, in Fig. 1
5 gezeigten, ersten Dreiecks D1 erläutert, wobei das Verfahren für alle Dreiecke der Oberfläche entsprechend angewandt wird. In einer Ausgestaltung der Erfindung kann das Verfahren aber auch nur für eine Teilmenge der Dreiecke der Oberfläche angewandt werden, beispielsweise wenn nur eine Seite eines 3D-Modells mit einer volumetrischen Textur versehen werden soll.

10

Jede Ecke jedes ersten Dreiecks D1 weist erste Texturkoordinaten U_{D1} ; V_{D1} auf. Die Texturkoordinaten werden üblicherweise durch ein UV-Mapping erzeugt. Das UV-Mapping bezeichnet jenen Prozess, mittels welchem ein 2D-Bild einer Oberfläche eines 3D-Modells erzeugt wird. Demnach stellt das 2D-Bild ein aufgefaltetes,
15 tes, durch Dreiecke strukturiertes Netz dar. Den Eckpunkten der Dreiecke, also den Knoten im aufgefalteten Netz, sind dabei 2D-Texturkoordinaten U_{D1} ; V_{D1} zugeordnet, wobei jede der Texturkoordinaten üblicherweise einen Wert im Intervall zwischen null und eins aufweist.

20 Jedes erste Dreieck D1 weist eine Flächennormale N_D auf.

Ferner weist jede Ecke jedes ersten Dreiecks eine Ecknormale N_{D1} , N_{D2} , N_{D3} auf. Je nach der Krümmung der Oberfläche des physischen Objekts kann in einer von zwei benachbarten ersten Dreiecken D1 geteilten Ecke die Ecknormale N_{D1} des ei-
25 nen Dreiecks von der Ecknormalen N_{D1} des benachbarten Dreiecks abweichen.

Wie in Fig. 1 gezeigt, wird in dem ersten Schritt S1 eine erste Ebene E1 parallel zu dem ersten Dreieck D1 in einem ersten vorbestimmten Abstand z entlang der Flächennormale N_D des ersten Dreiecks erzeugt. Der erste vorbestimmte Abstand z
30 kann dabei die maximale Dicke der volumetrischen Textur bestimmen. Ziel der

nachfolgenden Schritte ist es, zwischen der ersten Ebene E1 und dem ersten Dreieck D1 eine Voxelstruktur zu erzeugen, wobei den Voxeln Texturkoordinaten zugeordnet werden.

- 5 **Fig. 2** illustriert eine Ausführung des zweiten Schritts des erfindungsgemäßen Verfahrens.

In dem zweiten Schritt S2 wird ein mittels der Ecknormalen N_{D1} ; N_{D2} ; N_{D3} des ersten Dreiecks D1 auf die erste Ebene E1 projiziertes zweites Dreieck D2 erzeugt.

10

Die drei Eckpunkte des zweiten Dreiecks D2 ergeben sich aus den Schnittpunkten der Ecknormalen N_{D1} ; N_{D2} ; N_{D3} mit der ersten Ebene E1. Das zweite Dreieck D2 ist also parallel zum ersten Dreieck D1 im ersten vorbestimmten Abstand z ausgerichtet. Je nach Ausrichtung der Ecknormalen N_{D1} ; N_{D2} ; N_{D3} kann das zweite Dreieck D2 eine gleichgroße Fläche (nicht gezeigt) wie das erste Dreieck D1, eine größere Fläche (wie in Fig. 2 gezeigt) als das erste Dreieck D1, oder eine kleinere Fläche (nicht gezeigt) als das erste Dreieck D1 aufweisen, wobei auch die Winkel des ersten Dreiecks D1 verschieden zu den Winkeln des zweiten Dreiecks D2 sein können.

20

In den folgenden Schritten des erfindungsgemäßen Verfahrens soll eine Voxelstruktur in dem Volumen eines Pyramidenstumpfes bzw. Prismas mit dreieckiger Grundfläche zwischen dem ersten Dreieck D1 und dem zweiten Dreieck D2 erzeugt werden.

25

Fig. 3 illustriert eine Ausführung des dritten Schritts des erfindungsgemäßen Verfahrens.

- 30 In dem dritten Schritt S3 wird ein Volumenbereich VB erzeugt, wobei der Volumenbereich VB eine Anzahl von zweiten Voxeln VX2 aufweist. Ferner umfasst der Volumenbereich VB das erste Dreieck D1 und das zweite Dreieck D2, d.h. das erste

Dreieck D1 und das zweite Dreieck D2 sind in diesem Volumenbereich eingeschlossen.

Der Volumenbereich VB kann in einer beliebigen Größe und Ausrichtung erzeugt werden, solange dieser das erste Dreieck D1 und das zweite Dreieck D2 umfasst bzw. umschließt. Der Volumenbereich VB weist eine Anzahl von zweiten Voxeln VX2 auf. Zweckdienlich ist es, wenn die zweiten Voxel VX2 des Volumenbereichs VB parallel zu dem ersten Dreieck D1 und damit zur ersten Ebene E1 ausgerichtet wird. Vorteilhaft ist zudem, wenn der Volumenbereich VB durch die Anzahl der zweiten Voxel VX2 definiert bzw. repräsentiert wird. In Fig. 3 sind eine Anzahl von zweiten Voxeln VX2 mit gestrichelten Kanten gekennzeichnet. Das ausgewählte zweite Voxel VX2, anhand welchem die nachfolgenden Schritte des erfindungsgemäßen Verfahrens näher erläutert werden, ist dagegen mit durchgezogenen Linien dargestellt.

Die zweiten Voxel VX2 dienen als Hilfsmittel der Bestimmung der Texturkoordinaten jener Voxel, welche die volumetrische Textur repräsentieren. Ziel der nachfolgenden Verfahrensschritte ist daher, die zweiten Voxel VX2 des Volumenbereichs VB zu charakterisieren, d.h. die Texturkoordinaten jedes zweiten Voxels in Bezug auf die Oberfläche des physischen Objekts zu ermitteln. Die gewonnenen Informationen können schließlich einem Voxel-Modell VM, welches die volumetrische Textur repräsentiert, zugeordnet werden.

Fig. 4 illustriert eine Ausführung eines ersten Teils des vierten Schritts des erfindungsgemäßen Verfahrens.

Im vierten Schritt S4 des erfindungsgemäßen Verfahrens wird über die Anzahl von zweiten Voxeln VX2 des Volumenbereichs VB iteriert.

In dem ersten Teil S4.1 des vierten Schritts S4 wird ein erster Abstand d des jeweiligen zweiten Voxels VX2 zum ersten Dreieck D1 berechnet. Der erste Abstand d

gibt demnach den Abstand eines zweiten Voxels VX2 zum betrachteten Oberflächenausschnitt des physischen Objekts an. Vorzugsweise wird der betragsmäßig minimale Abstand zwischen dem jeweiligen zweiten Voxel VX2 und dem ersten Dreieck D1 berechnet.

5

Fig. 5 illustriert eine Ausführung des zweiten Teils S4.2 des vierten Schritts S4 des erfindungsgemäßen Verfahrens.

Im zweiten Teil S4.2 des vierten Schritts S4 wird auf einer zweiten zum ersten Dreieck D1 parallelen Ebene E2, die um den ersten Abstand d von dem ersten Dreieck D1 beabstandet ist, ein drittes Dreieck D3 erzeugt.

Zunächst wird also eine zweite Ebene E2 im ersten Abstand d vom ersten Dreieck D1 erzeugt. Die hier erzeugte zweite Ebene E2 ist in Fig. 5 entsprechend fett gekennzeichnet. Die Eckpunkte des dritten Dreiecks sind durch die Schnittpunkte der Ecknormalen N_{D1} ; N_{D2} ; N_{D3} mit der zweiten Ebene E2 gegeben. Jeder Ecke des dritten Dreiecks D3 sind zweite Texturkoordinaten U_{D3} ; V_{D3} zugeordnet. Die zweiten Texturkoordinaten U_{D3} ; V_{D3} resultieren dabei aus den ersten Texturkoordinaten U_{D1} ; V_{D1} des ersten Dreiecks D1.

20

Aus den zweiten Texturkoordinaten U_{D3} ; V_{D3} werden für das jeweilige zweite Voxel VX2 dritte Texturkoordinaten U_V ; V_V abgeleitet. Vorzugsweise werden die dritten Texturkoordinaten U_V ; V_V als baryzentrische Koordinaten in dem dritten Dreieck D3 berechnet. Somit geben die dritten Texturkoordinaten U_V ; V_V die Position des jeweiligen zweiten Voxels VX2 in Bezug auf die Eckpunkte des dritten Dreiecks D3 in der zweiten Ebene E2 an.

Es ist vorteilhaft, wenn jene zweite Voxel VX2, deren erster Abstand d zum ersten Dreieck D1 negativ oder größer als der erste vorbestimmte Abstand z ist, verworfen werden. Vorzugsweise werden auch jene zweite Voxel VX2, von denen eine der dritten Texturkoordinaten U_V ; V_V negativ ist, verworfen.

30

Vorzugsweise können in dem zweiten Teil S4.2 des vierten Schritts S4 die dritten Texturkoordinaten U_V ; V_V der zweiten Voxel VX2 mittels trilinearer Interpolation zwischen zweiten Voxeln (VX2) berechnet werden. Die zweiten Voxel VX2 eines

5 Volumenbereichs VB bilden vorzugsweise ein regelmäßiges dreidimensionales Gitter, auf welchem die Werte für die dritten Texturkoordinaten U_V ; V_V trilinear interpoliert werden können.

Nach der Ausführung des vierten Schritts des erfindungsgemäßen Verfahrens füllen

10 die zweiten Voxel VX2 demnach das Volumen des Pyramidenstumpfes bzw. Prismas mit einer Dreiecksgrundfläche zwischen dem ersten Dreieck D1 und dem zweiten Dreieck D2 aus. Dabei weist jedes zweite Voxel VX2 dritte Texturkoordinaten U_V ; V_V und einen ersten Abstand d zum ersten Dreieck D1 auf.

15 In einem fünften Schritt S5 des erfindungsgemäßen Verfahrens wird ein Voxel-Modell VM generiert. Das Voxel-Modell VM umfasst erste Voxel VX1, wobei die zweiten Voxel VX2 zu den ersten Voxel VX1 korrespondieren. Die dritten Texturkoordinaten U_V ; V_V und der erste Abstand d der zweiten Voxel VX2 werden als 3D-Texturkoordinaten U ; V ; W den korrespondierenden ersten Voxeln VX1 zuge-

20 ordnet. Beispielsweise werden die dritten Texturkoordinaten U_V ; V_V und der erste Abstand d der zweiten Voxel VX2 in die korrespondierenden ersten Voxel VX1 kopiert. Das Voxel-Modell VM repräsentiert somit die volumetrische Textur des 3D-Modells des physischen Objekts.

25 Vorzugsweise wird vor der Erzeugung des Voxel-Modells VM in einem Vereinigungsschritt des erfindungsgemäßen Verfahrens eine Vereinigungsmenge der zweiten Voxel VX2 aller Volumenbereiche VB ermittelt, um sich überlappende zweite Voxel VX2 zu entfernen.

30 Durch die unterschiedliche Ausrichtung von Ecknormalen benachbarter erster Dreiecke D1 in geteilten Eckpunkten, können sich überlappende Pyramidenstümpfe mit

- einer dreieckigen Grundfläche entstehen, und damit sich überlappende zweite Voxel VX2. Zwar können sich die dritten Texturkoordinaten U_V , V_V der sich überlappenden zweiten Voxel in der Regel unterscheiden, da sich die dritten Texturkoordinaten U_V , V_V in diesem Fall auf unterschiedliche dritte Dreiecke D3 beziehen.
- 5 Doch sich überlappende zweite Voxel VX2 repräsentieren (zumindest teilweise) die gleiche Raumeinheit doppelt, wovon sich die Hälfte einsparen lässt, und somit die Bearbeitungseffizienz erhöhen lässt.

- Vorzugsweise wird das Voxel-Modell in einem siebten Schritt S7 des erfindungsgemäßen Verfahrens auf das 3D-Modell des physischen Objekts angewendet.
- 10

- Besonders vorteilhaft ist dabei, wenn jedem ersten Voxel VX1 des Voxel-Modells ein Abstandsattribut zugeordnet wird, wobei dem Abstandsattribut ein zweiter Abstand d_2 zuordenbar ist. Der zweite Abstand d_2 wird zwischen dem jeweiligen ersten Voxel VX1 und einer die volumetrische Textur abschließenden zweiten Oberfläche des physischen Objekts gemessen. Dabei ist vorgesehen, dass die Oberfläche der volumetrischen Textur innerhalb des ersten vorbestimmten Abstands z von der Oberfläche des physischen Objekts verläuft.
- 15

- Die volumetrische Textur bzw. deren Oberfläche lässt sich vorteilhafterweise gestalten, indem dem Abstandsattribut von ausgewählten ersten Voxeln VX1 ein zweiter vorbestimmter Abstand $d_{+\infty}$ zugeordnet wird. Es ist vorgesehen, dass der zweite vorbestimmte Abstand $d_{+\infty}$ angibt, dass die betroffenen ersten Voxel VX1 außerhalb der volumetrischen Textur liegen. Somit lässt sich durch Manipulation der Abstandswerte der ersten Voxel VX1 eine volumetrische Textur mit einem beliebigen Detailreichtum erzeugen, mittels welcher ein Bump-Mapping für ein physisches Objekt aus dem 3D-Drucker erzeugt werden kann.
- 20
- 25

- Fig. 6** zeigt ein Flussdiagramm einer Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens.
- 30

Die oben stehend ausgeführten Ausgestaltungen der einzelnen Schritte des erfindungsgemäßen Verfahrens werden durch das Flussdiagramm der Fig. 6 in Beziehung zueinander gesetzt und zusammengefasst.

- 5 Für jedes erste Dreieck D1 der triangulierten Oberfläche eines 3D-Modells eines physischen Objekts werden die Verfahrensschritte S1 bis S4 in der in Fig. 6 dargestellten Reihenfolge ausgeführt. Der Schritt S4 umfasst hierbei eine Iteration über die zweiten Voxel VX2 des jeweiligen Volumenbereichs VB.
- 10 Nachdem für jedes zweite Voxel VX2 jedes Volumenbereichs VB, also für jedes erste Dreieck D1, dritte Texturkoordinaten U_V , V_V berechnet wurden, ist in dem fünften Schritt S5 vorgesehen, zunächst ein Voxel-Modell VM zu erzeugen. Das Voxel-Modell umfasst erste Voxel VX1, wie vorstehend beschrieben. Anschließend werden die dritten Texturkoordinaten U_V , V_V und der erste Abstand d der
15 zweiten Voxel VX2 den korrespondierenden ersten Voxel VX1 als 3D-Texturkoordinaten U; V; W zuzuordnen.

- Vorzugsweise kann in einem Vereinigungsschritt, insbesondere vor der Zuordnung der 3D-Texturkoordinaten U; V; W, eine Vereinigungsmenge der zweiten Voxel
20 VX2 wie vorstehend beschrieben gebildet werden.

Das erzeugte Voxel-Modell VM repräsentiert die volumetrische Textur des 3D-Modells eines physischen Objekts.

- 25 In einem Transformationsschritt (nicht gezeigt) können die triangulierte Oberfläche und die volumetrische Textur in ein kartesisches Koordinatensystem transformiert werden, sodass ein 3D-Modell mit applizierter volumetrischer Textur resultiert. Aus dem resultierten 3D-Modell können Steueranweisungen für einen 3D-Drucker abgeleitet werden, mittels welchen das durch Bump-Mapping angereicherte physische Objekt gedruckt werden kann.
30

Bezugszeichenliste:

	VM	Voxel-Modell
	VX1	erste Voxel
5	VX2	zweite Voxel
	D1	erstes Dreieck
	D2	zweites Dreieck
	D3	drittes Dreieck
	E1	erste Ebene
10	E2	zweite Ebene
	ND	Flächennormale des ersten Dreiecks D1
	N_{D1}, N_{D2}, N_{D3}	Ecknormalen des ersten Dreiecks D1
	U_{D1}, V_{D1}	erste Texturkoordinaten
	U_{D3}, V_{D3}	zweite Texturkoordinaten
15	U_V, V_V	dritte Texturkoordinaten
	U, V, W	3D-Texturkoordinaten des Voxel-Modells VM
	d	erster Abstand
	d2	zweiter Abstand
	z	erster vorbestimmter Abstand
20	$d_{+\infty}$	zweiter vorbestimmter Abstand

Ansprüche

5

1. Verfahren zum Erzeugen einer volumetrischen Textur für ein 3D-Modell eines physischen Objekts, wobei
 - das 3D-Modell eine triangulierte Oberfläche mit einer Mehrzahl von ersten Dreiecken ($D1$) umfasst,
 - 10 - jedes erste Dreieck ($D1$) eine Flächennormale (N_D) aufweist,
 - jede Ecke jedes ersten Dreiecks ($D1$) erste Texturkoordinaten (U_{D1} ; V_{D1}) und eine Ecknormale (N_{D1} ; N_{D2} ; N_{D3}) aufweist, und
 - wobei für jedes erste Dreieck ($D1$):
 - in einem ersten Schritt ($S1$) eine erste Ebene ($E1$) parallel zu dem
 - 15 ersten Dreieck ($D1$) in einem ersten vorbestimmten Abstand (z) entlang der Flächennormalen (N_D) des ersten Dreiecks ($D1$) erzeugt wird,
 - in einem zweiten Schritt ($S2$) ein mittels der Ecknormalen (N_{D1} ; N_{D2} ; N_{D3}) des ersten Dreiecks ($D1$) auf die erste Ebene ($E1$) projiziertes zweites Dreieck ($D2$) erzeugt wird,
 - 20 - in einem dritten Schritt ($S3$) ein Volumenbereich (VB) erzeugt wird, wobei der Volumenbereich (VB) eine Anzahl von zweiten Voxeln ($VX2$) aufweist und das erste Dreieck ($D1$) und das zweite Dreieck ($D2$) umfasst,
 - 25 - in einem vierten Schritt ($S4$) über die Anzahl von zweiten Voxeln ($VX2$) iteriert wird, wobei
 - ein erster Abstand (d) des jeweiligen zweiten Voxels ($VX2$) zum ersten Dreieck ($D1$) berechnet wird, und

- auf einer zweiten zum ersten Dreieck (D1) parallelen Ebene (E2), die um den ersten Abstand (d) von dem ersten Dreieck (D1) beabstandet ist, ein drittes Dreieck (D3) erzeugt wird, wobei
 - 5 - jeder Ecke des dritten Dreiecks (D3) zweite Texturkoordinaten (U_{D3} ; V_{D3}) zugeordnet sind, und
 - für das jeweilige zweite Voxel (VX2) dritte Texturkoordinaten (U_V ; V_V) aus den zweiten Texturkoordinaten (U_{D3} ; V_{D3}) abgeleitet werden, und
 - 10 - in einem fünften Schritt (S5), ein Voxel-Modell (VM) generiert wird, wobei das Voxel-Modell erste Voxel (VX1) umfasst, wobei die zweiten Voxel (VX2) zu den ersten Voxel (VX1) korrespondieren, und die dritten Texturkoordinaten (U_V ; V_V) und der erste Abstand (d) der zweiten Voxel (VX2) als 3D-Texturkoordinaten
 - 15 (U ; V ; W) den korrespondierenden ersten Voxeln (VX1) zugeordnet werden, sodass das Voxel-Modell (VM) die volumetrische Textur des 3D-Modells repräsentiert.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei in einem Vereinigungsschritt, eine Vereinigungsmenge der zweiten Voxel (VX2) aller Volumenbereiche (VB) ermittelt wird, um sich überlappende zweite Voxel (VX2) zu entfernen.
- 20
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Voxel-Modell (VM) in einem Transformationsschritt auf das 3D-Modell des physischen Objekts angewendet wird.
- 25
4. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei jedem ersten Voxel (VX1) des Voxel-Modells ein Abstandsattribut zugeordnet wird, wobei dem Abstandsattribut ein zweiter Abstand (d2) zuordenbar ist, wobei der zweite
- 30 Abstand (d2) zwischen dem jeweiligen ersten Voxel (VX1) und einer die volumetrische Textur abschließenden zweiten Oberfläche des physischen Objekts gemessen wird.

5. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei dem Abstandsattribut von ausgewählten ersten Voxeln (VX1) ein zweiter vorbestimmter Abstand ($d_{+∞}$) zugeordnet wird, um die volumetrische Textur zu gestalten.
- 5
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei jene zweite Voxel (VX2), deren erster Abstand (d) zum ersten Dreieck (D1) negativ oder größer als der erste vorbestimmte Abstand (z) ist, verworfen werden.
- 10
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei jene zweite Voxel (VX2), von denen eine der dritten Texturkoordinaten (U_V ; V_V) negativ ist, verworfen werden.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die zweiten Voxel (VX2) des Volumenbereichs (VB) für jedes der ersten Dreiecke (D1) jeweils gleich ausgerichtet sind.
- 15
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei in dem vierten Schritt die dritten Texturkoordinaten (U_V ; V_V) als baryzentrische Koordinaten in dem dritten Dreieck (D3) berechnet werden.
- 20
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei in dem vierten Schritt die dritten Texturkoordinaten (U_V ; V_V) mittels trilinearärer Interpolation zwischen zweiten Voxeln (VX2) berechnet werden.