TODOs

Masterarbeit

Berechnung charakteristischen Eigenschaften von botanischen Bäumen mithilfe von 3D-Punktwolken.

Name:	**Anton Wetzel**
E-Mail:	anton.wetzel@tu-ilmenau.de
Matrikelnummer:	60451
Studiengang:	Informatik Master
Betreuer:	**Tristan Nauber**
E-Mail:	tristan.nauber@tu-ilmenau.de
Professor:	**Prof. Dr.-Ing. Patrick Mäder**
E-Mail:	patrick.maeder@tu-ilmenau.de
Fachgebiet:	Data-intensive Systems and Visualization Group
Datum:	03.12.2023

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU

Inhaltsverzeichnis

1. Glossar

1.1. Punktwolken

Koordinatensystem ist eine Menge von Achsen, mit den eine Position genau beschrieben werden kann. Im Normalfall werden kartesische Koordinaten verwendet, welche so orientiert sind, dass die x-Achse nach rechts, die y-Achse nach oben und die z-Achse nach hinten zeigt.

Punkt ist eine dreidimensionale Position, welcher zusätzlichen Informationen zugeordnet werden können.

Punktwolke ist eine Menge von Punkten. Für alle Punkte sind die gleichen zusätzlichen Informationen vorhanden.

Normale ist ein normalisierter dreidimensionaler Vektor, welcher die Orientierung einer Oberfläche von einem Objekt angibt. Der Vektor ist dabei orthogonal zur Oberfläche, kann aber in das Objekt oder aus dem Objekt gerichtet sein.

1.2. Datenstrukturen

Voxel ist ein Würfel im dreidimensionalen Raum. Die Position und Größe vom Voxel kann explicit abgespeichert oder relative zu den umliegenden Voxeln bestimmt werden.

Tree ist eine Datenstruktur bestehend aus Knoten, welche wiederum Kinderknoten haben können. Die Knoten selber können weitere Informationen enthalten.

Octree ist ein Tree, bei dem ein Knoten acht Kinderknoten haben kann. Mit einem Octree kann ein Voxel aufgeteilt werden. Jeder Knoten gehört zu einem Voxel, welcher gleichmäßig mit den Kinderknoten weiter unterteilt wird. Eine Veranschaulichung ist in Abbildung 1 gegeben.

Quadtree ist ein Tree, bei dem ein Knoten vier Kinderknoten haben kann. Statt eines Voxels bei einem Octree, kann ein Quadtree ein zweidimensionales Quadrat unterteilen. Eine Veranschaulichung ist in Abbildung 2 gegeben.

Leaf-Knoten ist ein Knoten, welcher keine weiteren Kinderknoten hat. Für Punktwolken gehört jeder Punkt zu genau einem Leaf-Knoten.

Branch-Knoten ist ein Knoten, welcher weitere Kinderknoten hat.

Root-Knoten ist der erste Knoten im Tree, alle anderen Knoten sind direkte oder indirekte Kinderknoten vom Root-Knoten.

***k*-dimensionaler-Baum** ist eine Datenstruktur, um im k-dimensionalen Raum für eine Position die nächsten Punkte zu bestimmen.

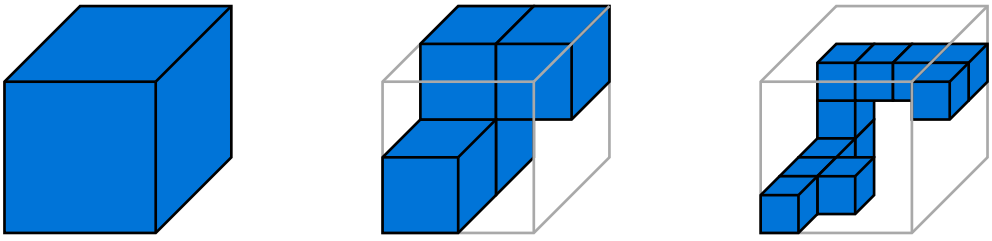


Abbildung 1: Unterschiedliche Stufen von einem Octree.

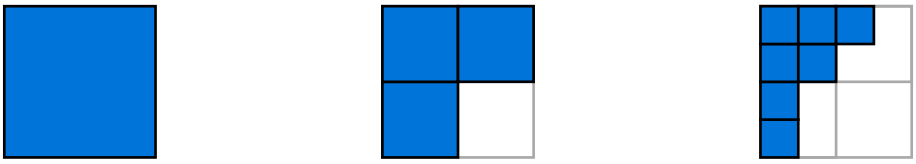


Abbildung 2: Unterschiedliche Stufen von einem Quadtree.

1.3. Akronyme

Todo: Akronyme

I. Überblick

1. Testdaten

Der benutze Datensatz [1] beinhaltet 12 Hektar Waldfläche in Deutschland, Baden-Württemberg. Die Daten sind mit Laserscans aufgenommen, wobei die Scans von Flugzeugen, Drohnen und vom Boden aus durchgeführt wurden. Dabei entstehen 3D-Punktwolken, welche im komprimiert LAS Dateiformat gegeben sind.

Der Datensatz ist bereits in einzelne Bäume unterteilt. Zusätzlich wurden für 6 Hektar die Baumart, Höhe, Stammdurchmesser auf Brusthöhe und Anfangshöhe und Durchmesser der Krone gemessen. Mit den bereits bestimmten Eigenschaften können automatisch berechnete Ergebnisse validiert werden.

2. Ablauf

Der Import wird in mehreren getrennten Phasen durchgeführt. Dabei wird die Arbeit für eine Phase so weit wie möglich parallelisiert.

Todo: Referenzen zu späteren Abschnitten

2.1. Diskretisierung

Die Eingabedaten können beliebig viele Punkte enthalten. Für die weiteren Phasen wird deshalb eine vereinfachte Version berechnet, bei der alle Punkte in diskrete Voxel unterteilt werden. Die vereinfachte Version kann vollständig im Hauptspeicher geladen sein.

2.2. Segmente bestimmen

Für jeden gefüllten Voxel wird bestimmt, zu welchem Segment er gehört. Dafür werden die gefüllten Voxel nach der Höhe geordnet. Von Oben nach Unten werden die Voxel zu einem Segment zugeordnet. Dafür werden Voxel dem gleichen Segment zugeordnet, zu dem nach Voxel gehören.

2.3. Segmente unterteilen

Für jeden Punkt wird der zugehörige Voxel bestimmt und das Segment vom Voxel dem Punkt zugeordnet. Die Punkte werden in Segmente unterteilt gespeichert.

2.4. Analyse und Speichern

Für jedes Segment werden die benötigten Eigenschaften für die Visualisierung berechnet. Dabei werden Eigenschaften spezifisch für jeden Punkt und Eigenschaften für das Gesamte Segment bestimmt.

Die fertigen Segmente werden einzeln abgespeichert, dass diese separat angezeigt werden können. Zusätzlich wird ein Octree mit allen Segmenten kombiniert erstellt.

2.5. Speichern vom Octree

Für alle Branch-Knoten im Octree wird mit den Kinderknoten eine vereinfachte Punktwolke als Detailstufe für das Anzeigen berechnet. Die Baumstruktur und alle Knoten mit den zugehörigen Punkten werden abgespeichert.

Todo: Mehr Überblick

3. Stand der Technik

Punktwolken können mit unterschiedlichen Lidar Scanverfahren aufgenommen werden. Aufnahmen vom Boden oder aus der Luft bieten dabei verschiedene Vor- und Nachteile [2]. Bei einem Scan von Boden aus, kann nur eine kleinere Fläche abgetastet werden, dafür mit erhöhter Genauigkeit, um einzelne Bäume genau zu analysieren [3]. Aus der Luft können größere Flächen erfasst werden, wodurch Waldstücke aufgenommen werden können, aber die Datenmenge pro Baum ist geringer [4].

Nach der Datenerfassung können relevante Informationen aus den Punkten bestimmt werden, dazu gehört eine Segmentierung in einzelne Bäume [5] und die Berechnung von Baumhöhe oder Kronenhöhe [4].

Ein häufiges Format für Lidar-Daten ist das LAS Dateiformat [6]. Bei diesem werden die Messpunkte mit den bekannten Punkteigenschaften gespeichert. Je nach Messtechnologie können unterschiedliche Daten bei unterschiedlichen Punktwolken bekannt sein, aber die Position der Punkte ist immer gegeben. Aufgrund der großen Datenmengen werden LAS Dateien häufig im komprimierten LASzip Format [7] gespeichert. Die Kompression ist Verlustfrei und ermöglicht eine Kompressionsrate zwischen 5 und 15 je nach Eingabedaten.

LASTools [8] ist eine Sammlung von Software für die allgemeine Verarbeitung von LAS Dateien. Dazu gehört die Umwandlung in andere Dateiformate, Analyse der Daten und Visualisierung der Punkte. Durch den allgemeinen Fokus ist die Software nicht für die Verarbeitung von Waldteilen ausgelegt, wodurch Funktionalitäten wie Berechnungen von Baumeigenschaften mit zugehöriger Visualisierung nicht gegeben sind.

II. Berechnung

1. Separierung in Bäume

1.1. Diskretisieren

Die Eingabedaten können beliebig viele Punkte beinhalten, wodurch es wegen Hardwarelimitierungen nicht möglich ist alle Punkte gleichzeitig zu laden. Um eine schnellere Verarbeitung zu ermöglichen, wird zuerst eine vereinfachte Version der ursprünglichen Punktewolke bestimmt.

Dafür wird die gesamte Punktwolke in gröbere Voxel unterteilt und Punkte im gleichem Voxel werden zusammengefasst. Die Größe von den Voxeln ist dabei als Makroparameter einstellbar (WIP). Als Standartwert wird 5cm verwendet.

Für jeden Voxel wird gespeichert, wie viele Punkte zum Voxel gehören.

1.2. Segmente bestimmen

1.2.1. Bodenhöhe bestimmen

(Momentan programmiert nur niedrigster Punkt)

Für die Berechnung der Bodenhöhe wird Quadrate entlang der Horizontalen betrachtet. (WIP) Zuerst werden alle Voxel zusammengefasst, welche unabhängig von der Höhe zum gleichen Quadrat gehört.

Weil die zugehörige, zugehörig, zugehöre Punktanzahl von jedem Voxel gespeichert ist, kann die Gesamtanzahl der Punkte von einem Quadrat bestimmt werden. Das gewünschte Quantil wird als Makroparameter festgelegt und es wird die Bodenhöhe zu gewählt, dass der Anteil der Punkte unter der Bodenhöhe dem Quantil entspricht. Als Standartwert wird 2% verwendet.

1.2.2. Bäume bestimmen

(Noch im Wandel)

Für die Bestimmung der Bäume werden alle Voxel, die über dem Boden liegen in horizontale Scheiben unterteilt. Alle Punkte unter der Bodenhöhe werden nicht weiter segmentiert.

Von der höchsten Scheibe aus werden die Voxel zu Segmenten zugeordnet. Dafür wird jeder Voxel in der Scheibe betrachtet. Für den momentanen Voxel wird der nächste Voxel in einer höheren Scheibe gesucht, wobei es eine Maximaldistanz gibt. Wird ein naher Voxel gefunden, so wird dem momentanen Voxel das gleiche Segment wie dem gefundenen Voxel zugeordnet. Wenn kein naher Voxel gefunden wird, so ist der momentane Voxel der Anfang von einem neuen Segment.

1.3. In Segmente unterteilen

Nachdem alle Voxel zu einem Segment gehören werden alle originalen Punkte nochmal geladen. Dabei wird für jeden Punkt der zugehörige Voxel bestimmt und dem Punkt das Segment vom Voxel zugeordnet.

Die Punkte werden nach Segment getrennt abgespeichert, um weiter zu verarbeitet zu werden.

2. Eigenschaften

Die Baumeigenschaften werden für jedes Segment einzeln berechnet. Dabei sind alle Punkte im Segment verfügbar.

2.1. Nachbarschaft

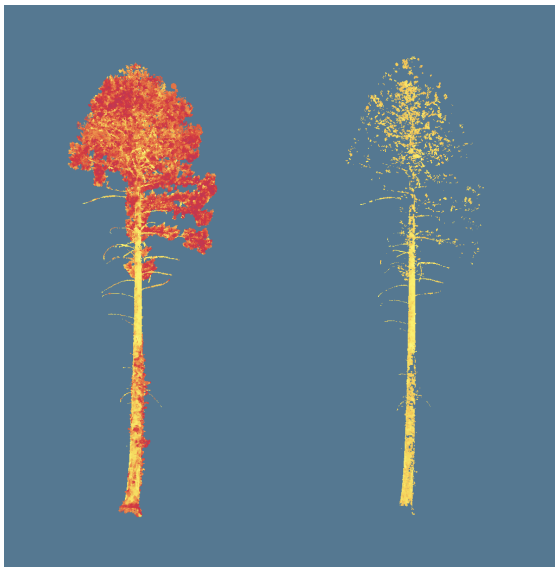
Um relevante Eigenschaften für einen Punkt zu bestimmen, werden die umliegenden Punkte benötigt. Dafür wird für alle Punkte ein **KD-Baum** erstellt. Mit diesem können effizient für ein Punkt die k-nächsten Punkte bestimmt werden.

2.2. Krümmung

Die Krümmung der Oberfläche wird für jeden Punkt geschätzt. Dafür werden die Positionen der Punkte in der Nachbarschaft betrachtet. Zuerst wird der geometrische Schwerpunkt bestimmt, dass die Positionen der Punkte um diesen verschoben werden können. Ohne die Verschiebung würde die globale Position der Punkte das Ergebnis verfälschen. Mit den Positionen der Punkte kann die Kovarianzmatrix bestimmt werden.

Die Eigenvektoren der Kovarianzmatrix bilden eine Orthonormalbasis und die Eigenwerte geben die Ausdehnung entlang des zugehörigen Basisvektors an. Der kleinste Eigenwert gehört zu Dimension mit der geringsten Ausdehnung. Je kleiner der Eigenwert, desto näher liegen die Punkt in der Nachbarschaft Ebene aufgespannt durch die Eigenvektoren zugehörig zu den größeren Eigenwerten.

Wenn die Eigenwerte λ_i mit $i \in \mathbb{N}_0^2$ absteigend nach größer sortiert sind, dann kann die Krümmung c mit $c = \frac{3\lambda_2}{\lambda_0+\lambda_1+\lambda_2}$ berechnet werden. c liegt dabei im abgeschlossenen Bereich $[0; 1]$.



Todo: Aktuelle Bilder

2.3. Punkthöhe

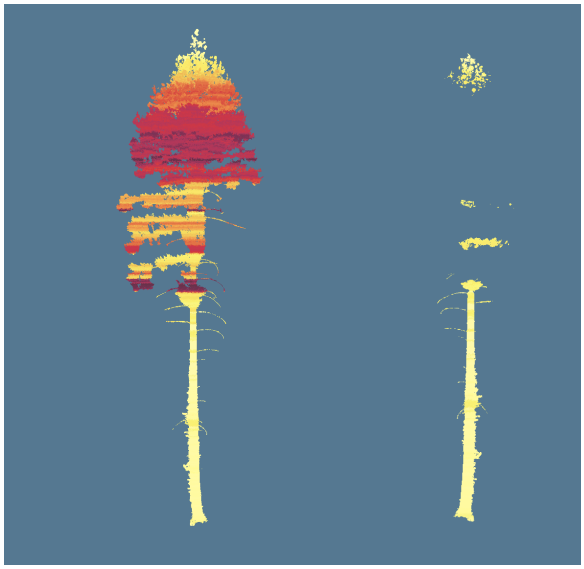
Für jeden Punkt wird die relative Höhe im Segment bestimmt. Dafür wird die Mindesthöhe y_{min} und die Maximalhöhe y_{max} im Segment benötigt. Die Höhe h für den Punkt mit

der der Höhe p_y kann mit $h = \frac{p_y - y_{min}}{y_{max} - y_{min}}$ berechnet werden. Die relative Höhe liegt dabei im Bereich [0; 1].

2.4. Ausdehnung

Der Baum wird entlang der Horizontalen in gleichhohe Scheiben unterteilt. Die Höhe der Scheiben ist dabei einstellbar. Für jede werden alle Punkte in der Scheibe betrachtet. Zuerst wird der geometrische Schwerpunkt der Positionen berechnet, womit die durchschnittliche Standartabweichung entlang der Horizontalen bestimmt wird.

Die größte Varianz von allen Scheiben wird verwendet, um die Varianzen auf den Bereich [0; 1] zu normieren. Für jeden Punkt wird die Varianz der zugehörigen Scheibe zugeordnet.



Todo: Mehr Baumeigenschaften

3. Segmentierung von einem Baum

Todo: Baumeigenschaften + ? → Segmente

4. Eigenschaften für Visualisierung

4.1. Normale

Mit den Eigenvektoren aus Abschnitt 2.2 wird die Normale für die Umgebung bestimmt. Der Eigenvektor, welcher zum kleinsten Eigenwert gehört, ist orthogonal zur Ebene mit der größten Ausdehnung.

4.2. Punktgröße

Für die Punktgröße wird der durchschnittliche Abstand zu den umliegenden Punkten bestimmt.

5. Baumart

Todo: Segmente + Eigenschaften + ? → Klassifizierung?

- out of scope?
- neural?

III. Meshing

Todo: Meshing

IV. Visualisierung

1. Technik

- Rust
- WebGPU (wgpu)
- native Window (website?)
- LAS/LAZ

2. Punkt

2.1. Dreieck

Als Basis für einen Punkt wird ein Dreieck gerendert. Das Dreieck muss so gewählt werden, dass der Einheitskreis mit Zentrum $(0, 0)$ vollständig enthalten ist.

Das kleinste Dreieck ist ein gleichseitiges Dreieck. In Abbildung 3 ist die Konstruktor für die Längen gegeben. Ein mögliches Dreieck hat die Eckpunkte $(-\tan(60°), -1)$, $(\tan(60°), -1)$ und $(0, 2)$.

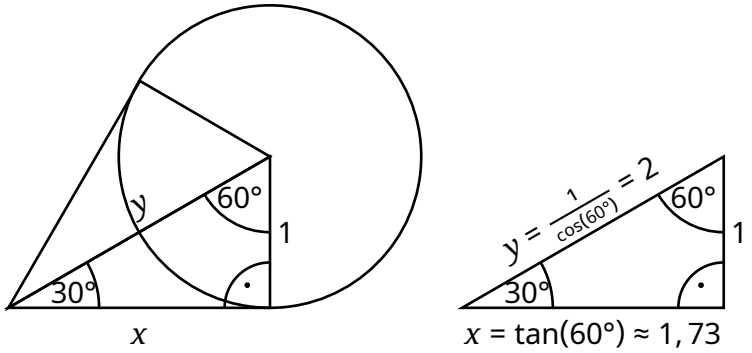


Abbildung 3: Längen für das kleinste gleichseitige Dreieck, welches den Einheitskreis enthält.

Für jeden Punkt wird mit der Position p, Normalen n und Größe s die Position der Eckpunkte vom Dreieck im dreidimensionalen Raum bestimmt. Dafür werden zwei Vektoren bestimmt, welche paarweise zueinander und zur Normalen orthogonal sind.

Für den erste Vektor a wird mit der Normalen $n = \left(n_x, n_y, n_z\right)$ das Kreuzprodukt $a = \left(n_x, n_y, n_z\right) \times \left(n_y, n_z, -n_x\right)$ bestimmt. Weil $|n| > 0$ ist, sind $\left(n_y, n_z, -n_x\right)$ und n unterschiedlich. a muss noch für die weiteren Berechnungen normalisiert werden. Ein Beispiel ist in Abbildung 4 gegeben.

Für den zweiten Vektor b wird das Kreuzprodukt $b = n \times a$ bestimmt. Weil das Kreuzprodukt zweier Vektoren orthogonal zu beiden Vektoren ist, sind n, a und b paarweise orthogonal.

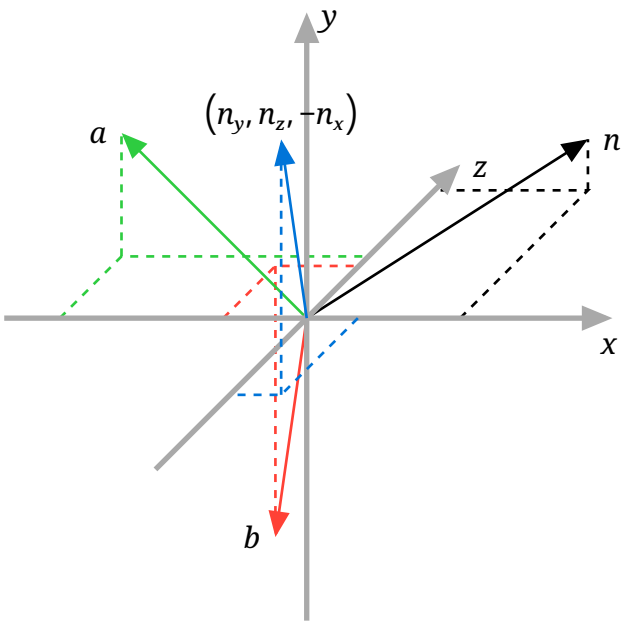


Abbildung 4: Beispiel für die Berechnung von a und b paarweise orthogonal zu n.

Die Vektoren a und b spannen eine Ebene auf, welche orthogonal zu n ist. Für den Eckpunkt i vom Dreieck mit den Koordinaten (x_i, y_i), wird die Position $p_i = p + a * x_i * s + b * y_i * s$ berechnet werden. In Abbildung 5 ist die Berechnung dargestellt.

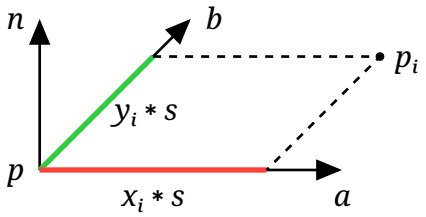


Abbildung 5: Berechnung von einem Eckpunkt.

2.2. Vergleich zu Quadrat als Basis

Als Basis kann ein beliebiges Polygon gewählt werden, solange der Einheitskreis vollständig enthalten ist. Je mehr Ecken das Polygon hat, desto kleiner ist der Bereich vom Polygon, der nicht zum Kreis gehört. Für jede Ecke vom Polygon muss aber die Position berechnet werden.

Ein Dreieck kann mit einem Dreieck dargestellt werden, für eine Quadrat werden zwei benötigt. Für das Dreieck werden dadurch drei Ecken und eine Fläche von $\frac{w*h}{2} = \frac{\tan(60°)*2*2}{2} = \tan(60°) * 2 \approx 3.46s$ benötigt. Für das Quadrat werden sechs Ecken und eine Fläche von $w * h = 2 * 2 = 4$ benötigt. In Abbildung 6 ist ein graphischer Vergleich.

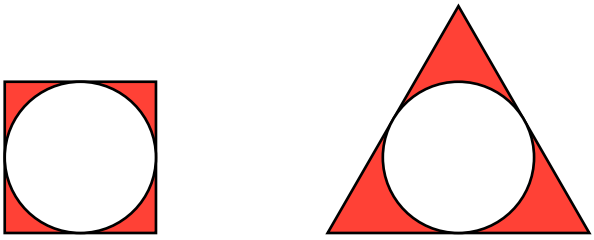


Abbildung 6: Quadrat und Dreieck, welche den gleichen Kreis enthalten.

Todo: Triangle Strip für Quadrat

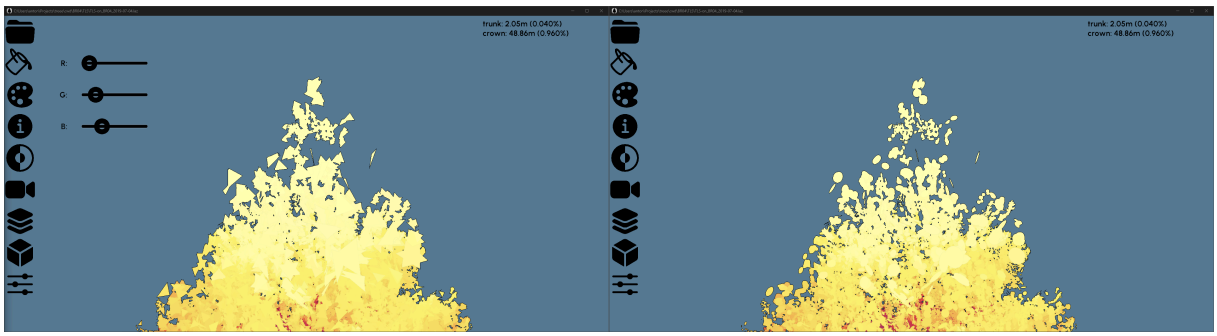
Todo: Messwerte

2.3. Instancing

Weil für alle Punkte das gleiche Dreieck als Basis verwendet wird, muss dieses nur einmal zur Grafikkarte übertragen werden. Mit **Instancing** wird das gleiche Dreieck für alle Punkte verwendet, während nur die Daten spezifisch für einen Punkt sich ändern.

2.4. Kreis

Die Grafikpipeline bestimmt alle Pixel, welche im transformierten Dreieck liegen. Für jeden Pixel kann entschieden werden, ob dieser im Ergebnis gespeichert wird. Dafür wird bei den Eckpunkten die untransformierten Koordinaten abgespeichert, dass diese später verfügbar sind. Für jeden Pixel wird von der Pipeline die interpolierten Koordinaten berechnet. Nur wenn der Betrag der interpolierten Koordinaten kleiner 1 ist, wird der Pixel im Ergebnis abgespeichert.



Todo: Bilder Crop

3. Dynamische Eigenschaft

- eigenschaften als 32 bit unsigned integer
- look up table für farbe basierend auf eigenschaftwert

4. Subpunktwolken (Bäume)

Note: Oben/Unten Teilung in 2 Segmente für Debug

4.1. Auswahl

Um ein bestimmtes Segment auszuwählen, wird das momentan sichtbare Segment bei der Mausposition berechnet. Als erstes werden die Koordinaten der Maus mit der Kamera in dreidimensionalen Position und Richtung umgewandelt. Die Position und Richtung bilden zusammen einen Strahl.

Im Octree wird vom Root-Knoten aus die Blatt-Knoten gefunden, welche den Strahl enthalten. Dabei werden die Knoten näher an der Position der Kamera bevorzugt. Für den Blattknoten sind die Segmente bekannt, welche Punkte in diesem Knoten haben. Für jedes mögliche Segment wird für jeden Punkt überprüft, ob er entlang des Strahls liegt.

Sobald ein Punkt gefunden ist, müssen nur noch Knoten überprüft werden, die näher an der Kamera liegen, weil alle Punkte in weiter entfernten Knoten weiter als der momentan beste gefunden Punkt liegen.

4.2. Anzeige

Im Octree kann zu den Punkten in einem Leaf-Knoten mehrere Segmente gehören. Um die Segmente einzeln anzuzeigen wird jedes Segment separat abgespeichert. Sobald ein einzelnes Segment ausgewählt wurde, wird dieses geladen und anstatt des Octrees angezeigt. Dabei werden alle Punkte des Segments ohne vereinfachte Detailstufen verwendet.

Die momentan geladenen Knoten vom Octree bleiben dabei geladen, um einen schnellen Wechsel zu ermöglichen.

5. Eye-Dome-Lighting

Um die Punktwolke auf Anzuzeigen, werden die Punkte aus dem dreidimensionalen Raum auf den zweidimensionalen Monitor projiziert. Dabei gehen die Tiefeninformatio-

nen verloren. Mit der Rendertechnik **Eye-Dome-Lighting** werden die Kanten von Punkten hervorgehoben, bei denen die Tiefe sich stark ändert.

Todo: Vergleichsbild

Beim Rendern von 3D-Scenen wird für jeden Pixel die momentane Tiefe vom Polygon an dieser Stelle gespeichert. Das wird benötigt, dass bei überlappenden Polygonen das nähere Polygon an der Kamera angezeigt wird. Nachdem die Scene gerendert ist, wird mit den Tiefeninformationen für jeden Pixel der Tiefenunterschied zu den umliegenden Pixeln bestimmt.

Todo: Farb- und Tiefenbild

Je größer der Unterschied ist, desto stärker wird der Pixel im Ergebnisbild eingefärbt. Dadurch werden Kanten hervorgehoben, je nachdem wie groß der Tiefenunterschied ist. Für den Effekt kann die Stärke und die Farbe angepasst werden.

Todo: Stark und Schwache Effekt Bild

6. Detailstufen

Je nach Scannertechnologie und Größe des abgetasteten Gebietes kann die Punktwolke unterschiedlich viele Punkte beinhalten. Durch Hardwarelimitierungen ist es nicht immer möglich alle Punkte gleichzeitig anzuzeigen, während eine interaktive Wiedergabe gewährleistet ist.

Besonders für weit entfernte Punkt ist es nicht notwendig, alle Punkte genau wiederzugeben. Deshalb wird für weit entfernte Punkte eine vereinfachte Version angezeigt. Diese besteht aus weniger Punkten und benötigt dadurch weniger Ressourcen, bietet aber eine gute Approximation der ursprünglichen Daten.

Todo: Vergleich alle Punkt und vereinfachte Versionen

Für die gesamte Punktewolke wird ein Octree mit den Punkten erstellt. Der zugehörige Voxel vom Root-Knoten wird so gewählt, dass alle Punkte im Voxel liegen. Rekursiv wird der Voxel in acht gleichgroße Voxel geteilt, solange in einem Voxel noch zu viele Punkte liegen. Bei dem Octree gehört jeder Punkt zu genau einem Leaf-Knoten.

Für jeden Branch-Knoten wird eine Punktwolke berechnet, welche als Vereinfachung der Punkte der zugehörigen Kinderknoten verwendet werden kann. Dafür wird de Algorithmus aus Abschnitt 6.1 verwendet.

Beim anzeigen wird vom Root-Knoten aus zuerst geprüft, ob der momentane Knoten von der Kamera aus sichtbar ist. Für die Knoten wird mit den Algorithmen aus Abschnitt 6.2 entschieden, ob die zugehörige vereinfachte Punktwolke gerendert oder der gleiche Algorithmus wird für die Kinderknoten wiederholt wird.

6.1. Berechnung der Detailstufen

Todo: Kopiert vom Fachpraktikum

Die Detailstufen werden wie bei „Fast Out-of-Core Octree Generation for Massive Point Clouds“ [9] von den Blättern des Baumes bis zur Wurzel berechnet. Dabei wird als Eingabe für einen Knoten die Detailstufen der direkten Kinder verwendet. Als Anfang werden alle originalen Punkte in einem Blatt als Eingabe benutzt.

Dadurch haben zwar Berechnungen der gröberen Detailstufen für Knoten näher an der Wurzel nur Zugriff auf bereits vereinfachte Daten, dafür müssen aber auch viel weniger Punkte bei der Berechnung betrachtet werden. Solange die Detailstufen eine gute Vereinfachung der ursprünglichen Punkte sind, kann so der Berechnungsaufwand stark verringert werden.

Der Voxel, welcher zu dem Knoten gehört, wird in gleich große Zellen unterteilt. Für jede Zelle mit Punkten wird ein repräsentativer Punkt bestimmt. Dafür wird für die Zelle die Kombination aller Eingabepunkte, welche in der Zelle liegen berechnet. Die Anzahl der Zellen ist dabei unabhängig von der Größe des ursprünglichen Voxels, wodurch bei gröberen Detailstufen durch den größeren Voxel auch die Zellen größer werden und mehr Punkte zusammengefasst werden.

6.2. Auswahl der Detailstufen?

6.2.1. Abstand zur Kamera

- Schwellwert
- Abstand zur kleinsten Kugel, die den Voxel inkludiert
- Abstand mit Größe des Voxels dividieren
- Wenn Abstand größer als Schwellwert
  - Knoten rendern
- sonst
  - Kinderknoten überprüfen

6.2.2. Auto

- wie Abstand zur Kamera
- messen wie lang rendern dauert
- Dauer kleiner als Mindestdauer
  - Schwellwert erhöhen
- Dauer kleiner als Maximaldauer
  - Schwellwert verringern

6.2.3. Gleichmäßig

- gleich für alle Knoten

- auswahl der Stufe

7. Kamera/Projektion

7.1. Kontroller

- bewegt Kamera
- kann gewechselt werden, ohne die Kameraposition zu ändern

7.1.1. Orbital

- rotieren um einem Punkt im Raum
- Kamera fokussiert zum Punkt
- Entfernung der Kamera zum Punkt variabel
- Punkt entlang der horizontalen Ebene bewegbar
- To-do: Oben-Unten Bewegung

7.1.2. First person

- rotieren um die Kamera Position
- Bewegung zur momentanen Blickrichtung
- Bewegungsgeschwindigkeit variabel
- To-do: Oben-Unten Bewegung

7.2. Projektion

7.2.1. Perspektive

- Projektion mit Field of View Kegel

7.2.2. Orthogonal?

Todo: Orthogonal?

7.2.3. Side-by-Side 3D?

8. Bedienung/Interface

Todo: Bedienung/Interface

Todo: Referenzen

Bibliographie

[1] H. Weiser *u. a.*, „Terrestrial, UAV-borne, and airborne laser scanning point clouds of central European forest plots, Germany, with extracted individual trees and manual forest inventory measurements“. [Online]. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1594/PANGAEA.942856

[2] J. J. Donager, A. J. Sánchez Meador, und R. C. Blackburn, „Adjudicating perspectives on forest structure: how do airborne, terrestrial, and mobile lidar-derived estimates compare?“, *Remote Sensing*, Nr. 12, S. 2297, 2021.

[3] M. Disney, „Terrestrial LiDAR: a three-dimensional revolution in how we look at trees“, *New Phytologist*, Nr. 4, S. 1736–1741, 2019, doi: https://doi.org/10.1111/nph.15517.

[4] T. Suzuki, S. Shiozawa, A. Yamaba, und Y. Amano, „Forest Data Collection by UAV Lidar-Based 3D Mapping: Segmentation of Individual Tree Information from 3D Point Clouds“, *International Journal of Automation Technology*, S. 313–323, 2021, doi: 10.20965/ijat.2021.p0313.

[5] A. Burt, M. Disney, und K. Calders, „Extracting individual trees from lidar point clouds using treeseg“, *Methods in Ecology and Evolution*, Nr. 3, S. 438–445, 2019, doi: https://doi.org/10.1111/2041-210X.13121.

[6] L. Graham, „The LAS 1.4 specification“, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, Nr. 2, S. 93–102, 2012.

[7] M. Isenburg, „LASzip: lossless compression of LiDAR data“, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, Nr. 2, S. 209–217, 2013.

[8] C. Hug, P. Krzystek, und W. Fuchs, „Advanced Lidar Data Processing with Lastools“, 2004. Verfügbar unter: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14167994

[9] M. Schütz, S. Ohrhallinger, und M. Wimmer, „Fast Out-of-Core Octree Generation for Massive Point Clouds“, *Computer Graphics Forum*, Nr. 7, S. 155–167, 2020, doi: https://doi.org/10.1111/cgf.14134.