Verfahren zur Triangulation ungeordneter 3D-Punktmengen

Frank Gaßmann, Karl-Heinz Franke

Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V. (ZBS),
Gustav-Kirchhoff-Straße 5, D-98693 Ilmenau
eMail: frank.gassmann@zbs-ilmenau.de
URL: http://www.zbs-ilmenau.de

Zusammenfassung. Der Beitrag beschreibt ein Verfahren zur Triangulation ungeordneter 3D-Punktmengen. Auf der Basis einer Analyse existierender Ansätze und den allgemeinen Anforderungen an ein solches Verfahren werden die Herangehensweise, das Verfahrensprinzip, Implementierungsdetails dokumentiert sowie Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens aufgezeigt.

1 Einleitung

Entscheidend für den Erfolg scannender 3D-Meßtechnik sind geschlossene Lösungen mit hoher Leistungsfähigkeit, die von der Signalisierung und Abtastung der Oberflächen über die Extraktion von Punktemengen bis zur geforderten Qualitätsbewertung, zum komplexen Messergebnis oder zum Produkt (rapid prototyping) reichen. Das Verarbeitungsziel ist häufig das CAD-Flächenmodell des abgetasteten Objektes (reverse engineering). Andere Zielstellungen können die direkte Erzeugung von Fräsdaten, die Generierung von Volumenmodellen für FEM-Modellierungen oder die Stereolithografie (STL) - Fertigung oder auch einfach die Datenaufbereitung für Visualisierungszwecke sein.

Die unmittelbar nach der Digitalisierung eines Werkstückes folgenden Verarbeitungsschritte sind für alle Verarbeitungsanliegen ähnlich: Neben optionalen Vorver- und Nachbearbeitungsoperationen (Datenreduktion, Redundanzminderung, Glättung, Interpolation, Homogenisierung, Ausreißerbeseitigung) ist eine Strukturierung der Messpunkte mit dem Ziel einer Rekonstruktion der Objektform notwendig. Inhalt des Strukturierungsvorgangs ist die Aufklärung von Messpunktnachbarschaften. Ergebnis ist i.d.R. ein Dreiecksnetz.

Gegenstand der folgenden Kapitel sind Verfahren zur Rekonstruktion auch unvollständig digitalisierter Objektoberflächen (surface reconstruction). Es wird angenommen, dass bzgl. der Nachbarschaften der 3D-Punkte keinerlei a-priori – Informationen vorliegen (scattered data). Ausgehend von praktischen Erfordernissen werden ganz allgemein Anforderungen an derartige Triangulationsverfahren, eine Systematik bekannter Verfahren sowie ein spezifischer am ZBS entwickelter Lösungsansatz dargestellt. Neben dem eigentlichen Rekonstruktionsverfahren wird hier insbesondere auf Details einer praktische Aspekte berücksichtigenden Implementierung eingegangen.

2 Anforderungen an ein Rekonstruktionsverfahren

Die praktischen Anforderungen für eine Flächenrekonstruktion ergeben sich einerseits aus dem allgemeinen Verarbeitungsziel einer 3D-Oberflächenrekonstruktion bzw. den speziellen Anforderungen der einbettenden Anwendung und andererseits aus den Eigenschaften der Rohpunktwolken, die sowohl vom Objekt als auch vom Digitalisierverfahren abhängig sind.

Moderne flächenhaft scannende Digitalisiersysteme liefern umfangreiche Datenmengen in der Größenordnung von bis zu mehreren Millionen Punkten. Die Rohpunktwolken weisen objekt- und verfahrensabhängig solche Eigenschaften wie Positionsrauschen, Häufungspunkte, Ausfälle und Ausreißer auf. Als besonders problematisch für die weitere Verarbeitung erweisen sich Datensätze mit stark schwankenden Punktdichten. Werden Punktwolken aus mehreren Teilmessungen kombiniert, besteht bei Kalibrierungenauigkeiten die Gefahr von Klaffungen. Ein potentielles Rekonstruktionsverfahren sollte auch in der Lage sein, unvollständige Punktmengen oder Punktmengen, die voneinander isolierte Objektbereiche repräsentieren, zu verarbeiten.

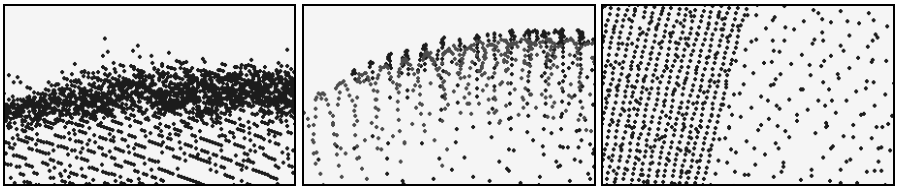

Abb. 1: Typische Eigenschaften von Punktwolken optischer Digitalisierer (Mehrkamerasystem), v.l.n.r.: Positionsrauschen und Ausreißer, Klaffungen durch Kalibrierungenauigkeiten, lokale Dichteschwankungen

Die allgemeinen Anforderungen an ein Rekonstruktionsverfahren können wie folgt zusammengefasst werden:

- *Robustheit*: Ein Algorithmus sollte tolerant gegenüber den o.g. unerwünschten Eigenschaften der Rohpunktwolken sein. Die Robustheit (oder Rekonstruktionsgüte) eines Verfahrens ist das entscheidende Kriterium für dessen Bewertung.
- *Speicherbedarf*: Bei der Implementation eines Algorithmus muss beachtet werden, dass die Größe der Punktwolken ernorm sein kann. I.d.R. benötigen die internen Datenstrukturen ein Vielfaches des Speichers der Rohdaten.
- *Geschwindigkeit*: Die Laufzeit ist ebenfalls eine Forderung, die bei der Implementierung zu beachten ist. Das betrifft insbesondere die bei allen Verfahren notwendigen umfangreichen Suchvorgänge (Punktnachbarschaften).
- *Automatismus*: Angestrebt wird eine automatische Arbeitsweise des Verfahrens. Der Anteil an manuell und unter Nutzung von Fachwissen einzustellenden Parametern ist zu minimieren.
- *Universalität*: Das Verfahren sollte universell einsetzbar sein und unabhängig von den Spezifika des generierenden Digitalisiersystems arbeiten. Leider impliziert diese Forderung auch eine Einschränkung bzgl. der Nutzbarkeit zusätzlicher Informationen wie z.B. aus der Sensoranordnung ableitbare Punktnachbarschaften (Scanlinien, Ansichtsbilder) oder durch den Digitalisiervorgang ermittelte Flächennormalen.

3 Stand der Technik

Die Rekonstruktion von Objektoberflächen aus Punktmengen ist seit ca. 25 Jahren Gegenstand der Forschung. Aufgrund der Fortschritte bei der Entwicklung optischer Digitalisierer (hohe Messgeschwindigkeit, deutlich verbesserte Messgenauigkeit, Ganzkörperdigitalisierung, große Datenmengen) verstärkten sich die Bemühungen um praktisch nutzbare Triangulationsverfahren noch einmal in den letzten Jahren. Entsprechend groß ist die Anzahl der momentan bekannten Verfahren und entsprechend vielfältig die zugrunde liegenden Verfahrensprinzipien. Allerdings ist bis heute kein Verfahren bekannt, welches allen in Kapitel 2 genannten Ansprüchen genügt. Die den Rekonstruktionsverfahren zugrunde liegenden Prinzipien berücksichtigen bzw. erfordern z.T. in erheblichem Maße spezielle Eigenschaften der Datenbasis (ungeteilte Flächen, volumenbegrenzend, andere a-priori-Informationen, ...). Hindernis für einen praktischen Einsatzes ist außerdem vielfach die ungenügende Rekonstruktionsgüte der Algorithmen. Um diese zu verbessern, wird die Punktwolke häufig vorverarbeitet. I.d.R. ist auch eine manuelle Nachbearbeitung (Flächenränder, Fehlstellen, fehlerhafte Vernetzungen) erforderlich.

Hinsichtlich der eingesetzten Methodik beim Aufbau der Netzstruktur können die Rekonstruktionsmethoden wie folgt eingeteilt werden:

- *Oberflächenorientierte Netzreduktion*
- *Abstandsbasierte Methoden*
- *Deformationsmethoden*
- *Inkrementelle Methoden*

Da die entwickelten Algorithmen zum einen vielfach unabhängige Verfahrensschritte kombinieren und zum anderen gleichermaßen Kombinationen kompletter Rekonstruktionsmethoden darstellen können, sind sowohl die vorgestellte Systematik als auch die nachfolgende Einordnung der Ansätze als Vorschlag anzusehen.

3.1 Oberflächenorientierte Netzreduktion

Die Methodik von Verfahren der Oberflächenorientierten Netzreduktion gliedert sich folgende Teilschritte: Zuerst wird eine initiale räumliche Vernetzung der Punktmenge (i.A. eine 3D-Delaunay-Triangulation) generiert. Anschließend werden diejenigen Dreiecke identifiziert, welche die Objektoberfläche repräsentieren. Vertreter dieser Methoden sind [Bois84], [Edel94], [Edel92], [Atta97], [Schr97a], [Schr97b] sowie [Well97].

Verfahren dieser Gruppe sind sehr aufwendig bzgl. Laufzeit- und Speicherbedarf. Die Ansätze liefern immer topologisch korrekte Vernetzungen. Probleme bereitet häufig die Selektion derjenigen Dreiecke, die zur Objektoberfläche gehören. Die Konsequenz ist, dass nichtkonvexe Objekte oft falsch trianguliert oder räumlich getrennte Teilpunktwolken fälschlicherweise verbunden werden.

3.2 Abstandsbasierte Methoden

Unter dem Begriff Abstandsbasierte Methoden wird eine Vielzahl z.T. sehr unterschiedlicher Ansätze zusammengefasst. Allen Verfahren gemeinsam ist, dass zur Identifikation von Oberflächenpunkten und Punktnachbarschaften Distanzkriterien angewandt werden. Typische Vertreter dieser Kategorie sind Ansätze, welche gleitende Approximationsverfahren ([Hopp92], [Hopp94]) verwenden, räumliche Zell-

zerlegungen ([Roth97]) sowie Verfahren, deren Abstandsmaß auf einer räumlichen Mittelachsentransformation basiert [Bitt95], [Amen00], [Amen01], [Amen02].

Die Verfahren sind z.T. nur auf Punktmengen anwendbar, die ein Volumen vollständig begrenzen. Verfahren, welche auf Raumzerlegungen arbeiten, sind sehr sensitiv gegenüber der Parametrierung der Zerlegung sowie lokalen Punktdichteschwankungen.

3.3 Deformationsmethoden

Ausgangspunkt von Deformationsmethoden ist immer eine initiale, die Objektform bereits approximierende Oberflächenbeschreibung. Im Rekonstruktionsverlauf wird versucht, diese Beschreibung sukzessive zu verbessern. Vertreter der Deformationsmethoden sind [Hosc93] (geometrische Modellierung); [Algo96] (physikalische Modellierung) sowie [Baad93] und [Baad94] (neuronale Netze).

Deformationsmethoden benötigen immer eine initiale Oberfläche, welche die Topologie bereits grob erfasst. Dies ist für den allgemeinen Fall kaum zu gewährleisten. Eine saubere Behandlung unvollständiger Volumenbegrenzungen ist ebenfalls problematisch. Die Herangehensweise des Warpings kann auch zur Nachbearbeitung der Ergebnisse anderer Approximationstechniken genutzt werden.

3.4 Inkrementelle Methoden

Inkrementelle Methoden arbeiten oberflächenorientiert. Ausgehend von einer Startsituation (global oder lokal) wird die Oberflächenbeschreibung anhand lokaler Kriterien sukzessive solange verfeinert bzw. erweitert, bis jeder Punkt der Ausgangspunktmenge eine entsprechende Behandlung erfahren hat. Vertreter Inkrementeller Methoden sind [Bern99], [Huan02], [Bois84] sowie [Gopi00].

Wachstumsverfahren arbeiten stabil auf Punktwolken ohne extreme Dichteschwankungen. Unvollständige Digitalisierungen und räumlich getrennte Oberflächenbereiche stellen kein Problem dar. Die Verfahren gewähren eine lineare Zeitkomplexität und haben einen geringen Speicherbedarf.

4 Verfahren zur Triangulation ungeordneter Punktwolken

4.1 Anliegen und Herangehensweise

Ein Schwerpunkt der Arbeiten am ZBS Ilmenau sind Verfahren zur Erzeugung und Verarbeitung von 3D-Daten[1]. Für eine Reihe spezieller Aufgabenstellungen aus dem Bereich des Reverse Engineering werden triangulierte Daten vorausgesetzt. Ausschlaggebend für die Entwicklung eines eigenen Verfahrens zur Triangulation von Punktmengen war, dass einerseits kaum kommerzielle Lösungen zur Verfügung standen und diese andererseits nicht den vorgegebenen Randbedingungen entsprachen oder mit den o.g. Unzulänglichkeiten behaftet waren. Das gewünschte Triangulationsmodul sollte mit hoher Qualität und weitgehend automatisch unvollständige und ungeordnete Oberflächenabtastungen verarbeiten können. Hinsichtlich der Rekonstruktionsgüte sollten insbesondere Positionsrauschen und vorhandene Ausreißer toleriert bzw. erkannt werden.

---

1 Im Ergebnis der Arbeiten stehen kommerzielle Softwaremodule zur Visualisierung, zur Segmentierung und Vermessung von Regelgeometrien, zur Homogenisierung und Glättung von Punktwolken, Kompressions- und Kalibrieralgorithmen etc. zur Verfügung.

Die Entscheidung für die Entwicklung eines inkrementell arbeitenden Verfahrens basiert hauptsächlich auf den in Kapitel 3 aufgeführten Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahrensgruppen. Zudem bieten Wachstumsverfahren einen breiten Spielraum für eigene Modifikationen.

Aus theoretischer Sicht sollte das 2D-Delaunay-Kriterium (Abb. 2) eine Rolle spielen, da eine Delaunay-Triangulation die optimale Dreiecksvernetzung einer ebenen Punktwolke darstellt. Allerdings kann das Kriterium nur durch eine Projektion lokaler 3D-Punktmengen in eine Tangentialebene auf den vorliegenden Fall einer im R^3 eingebetteten Oberfläche übertragen werden. Topologisch korrekt ist eine solche Projektion genau dann, wenn die Streuung der Daten in Richtung der Flächennormalen unterhalb des Punktabstandes in der Fläche liegt. Es wird im Weiteren angenommen, dass die Ausgangsdaten, abgesehen von Ausreißern, diese Bedingung erfüllen.

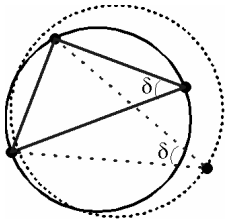

Abb. 2: Delaunay-Winkel für zwei Anschlusspunkte

4.2 Verfahrensprinzip

Das Grundprinzip des realisierten Algorithmus ist ein Wachstumsverfahren, ähnlich dem Step-by-Step Algorithmus [McCu80], aber auf 3D-Punkte erweitert. Ausgehend von mehreren bestehenden Teiltriangulationen (Startsituation) werden an den Rändern Punkte angefügt und so sequentiell die vollständige Triangulation aufgebaut. Der Ablauf sieht dabei so aus, dass zu jeder äußeren Kanten der Fläche der nächste anzufügende Punkt im Sinne eines lokalen 2D-Delaunay-Kriteriums gesucht wird. Anschließend wird an der Position des global besten Punktes ein Dreieck eingefügt. Natürlich wird die Suche des optimalen Nachbarn nicht in jedem Schritt für alle äußeren Kanten durchgeführt, sondern nur für die neu hinzugefügten und jene, deren Zielpunkt nicht mehr verfügbar ist.

Der prinzipiell einfache Algorithmus wurde durch zusätzliche Restriktionen hinsichtlich der Kantenlängen und des Winkels zwischen zwei benachbarten Dreiecken erweitert, die für ein robustes Verhalten auch bei mäßig verrauschten Daten und die Erhaltung von Konkavitäten und inneren Unterbrechungen sorgen. Eine weitere Konsequenz ist die simultane Detektion von Ausreißern. Diese werden nicht in die Triangulation integriert, da sie entweder sehr niedrig priorisiert oder gar nicht als Einfügekandidaten ausgewählt werden. Sehr wesentlich für die Robustheit des Algorithmus ist das quasiparallele Wachstum, ausgehend von einer möglichst großen Zahl von Startdreiecken.

4.3 Einzelheiten

Starttriangulation

Im Gegensatz zu anderen Ansätzen arbeitet das Wachstumsverfahren auf einer mehrere isolierte Dreiecke umfassenden Starttriangulation. Ein Einzeldreieck wird so erzeugt, dass die Ausgangspunktmenge in disjunkte Teilmengen, die zusätzlich einen bestimmten Mindestabstand voneinander haben, zerlegt wird. In jeder Teilmenge wird das Punktpaar mit dem kleinsten Abstand gesucht. Bei lokaler Betrachtung stellt ein solches Paar per Definition immer auch eine Delaunay-Kante dar. Zu

jeder derart bestimmten Kante wird nun der Delaunay-Nachbar gesucht und ein Startdreieck erzeugt.

Kriterium zur Kandidatenauswahl

Das Kriterium zur Auswahl eines Punktes als potentiellen Anschlusspunkt für eine Randkante ist wie folgt definiert: Als geometrisch zulässige Kandidaten kommen nur Punkte in Frage, die in demjenigen aus Flächennormale und Randkante definierten Halbraum liegen, der den dritten Punkt des Randdreiecks nicht enthält. Eine zusätzliche Restriktion stellt eine maximale Kantenlänge dar, die sich aus dem Minimum eines lokalen Dichtemaßes und einer globalen Höchstkantenlänge errechnet. Als Einfügepunkt wird nun der Punkt ausgewählt, dessen Delaunay-Winkel am größten ist.

Priorisierung der Einfügekandidaten

Die Kantenpriorität zur Auswahl eines anzufügenden Punktes aus den Einfügekandidaten der Randkanten berechnet sich aus drei einzelnen Prioritätswerten wie folgt: Als Basispriorität wird der bei der Kandidatenauswahl ermittelte Delaunay-Winkel verwendet. Einen weiteren Prioritätswert stellt der Winkel zwischen den Flächennormalen der Dreiecke dar. Hierdurch werden Punkte favorisiert, die einen ebenen Anschluss realisieren (Abb. 3). Zusätzlich werden solche Verbindungen bevorzugt, die nicht zum Zerreißen der Fläche führen (Abb. 4).

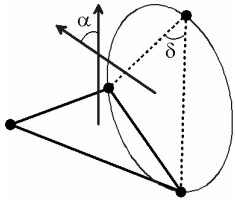

Abb. 3: Normalenrelation benachbarter Dreiecke

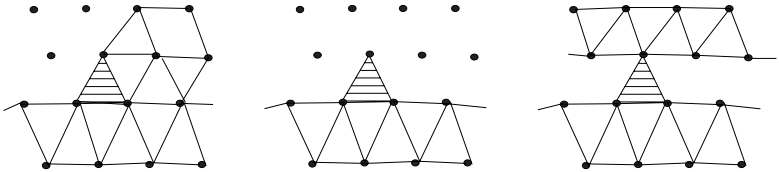

Abb. 4: Priorisierung nach Anschlusssituation, v.l.n.r.: p_t=1: Anfügen eines inneren Dreiecks, p_t=2/3: Anfügen eines freien Punktes, p_t=1/3: Schließen einer offenen Verbindung zwischen zwei Teilflächen (keine gemeinsame Kante)

4.4 Implementierung

Ungeachtet des einfachen Ansatzes ist die Implementierung sehr komplex, da eine große Menge von Informationen verwaltet werden muss (räumliche Suchvorgänge, Strukturen der bereits ermittelten Teiltriangulationen, Beziehungen zwischen Kanten und möglichen Anschlusspunkten, Prioritätsliste für den Wachstumsvorgang usw.) und die Verwaltung dieser Daten auch bei großen Punktwolken ein praktisch akzeptables Zeitverhalten liefern soll.

Datenstruktur zur Netzrepräsentation

Zur Netzrepräsentation wird eine winged-edge Datenstruktur [Kett98] eingesetzt. Diese stellt eine redundanzarme Variante zur Verwaltung von Polyedern dar (orientierte Doppelkanten für aneinandergrenzende Dreiecke, Abb. 5). Die Struktur er-

laubt einen wahlfreien Zugriff auf alle Komponenten (Punkte, Kanten, Dreiecke) und gestattet Nachbarschaftsoperationen mit geringem Suchaufwand (Zugriff, Navigation, Einfügen: in O(1)).

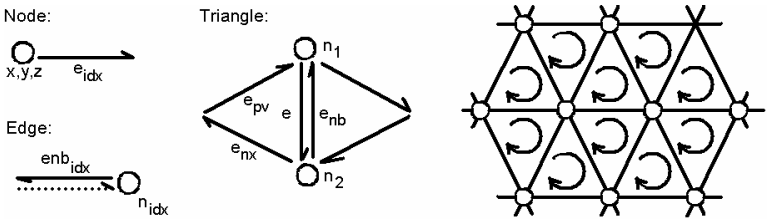

Abb. 5: Winged-Edge-Datenstruktur

Datenstruktur zur Unterstützung von Suchvorgängen

Im Verlauf des Netzaufbaus sind für jede Dreieckskante i.d.R. mehrfach die Punkte einer lokalen Umgebung zu ermitteln (range query). Da der Anteil derartiger Suchvorgänge an der Gesamtlaufzeit einer Oberflächenrepräsentation erheblich ist, müssen diese durch eine geeignete Organisation der Daten (Gridfiles, Octree, k-d-Tree, ...) unterstützt werden. Die vorliegende Implementierung nutzt dafür eine simple Zellzerlegung [Welc71]. Der Zugriff auf eine Raumzelle erfolgt koordinatenbasiert per Hash-Tabelle (Vermeidung von Leerzellen). Die Suchstruktur stellt für Punktmengen ohne starke Dichteschwankungen einen guten Kompromiss zwischen Implementierungsaufwand, Speicherbedarf und Suchgeschwindigkeit dar.

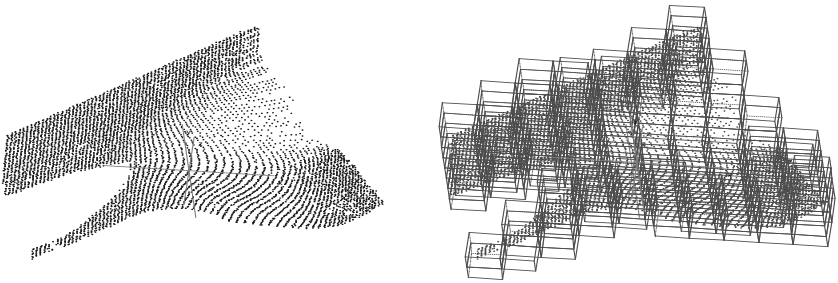

Abb. 6: Zellzerlegung: l.: Ausgangspunktmenge, r.: Raumzellen der Zerlegung

5 Bewertung

Der Algorithmus arbeitet problemlos, solange die lokale Ebenheit (Abschnitt 4.1) gegeben ist und eine einigermaßen homogene Punktverteilung auf der Fläche vorliegt. Das Laufzeitverhalten entspricht bei realen Datensätzen etwa O(n*log n), obwohl es theoretisch im schlechtesten Fall auch bei $O(n^2)$ liegen kann.

Das Verfahren ist damit hinsichtlich Qualität und Effizienz mit den Vernetzungsmodulen anderer kommerzieller Softwarepakete (Surfacer, PolyWorks, Imageware, CATIA, geomagic Wrap, ...) vergleichbar.

Die nachfolgende Abb. 7 zeigt exemplarisch den Triangulationsverlauf und das erzeugte Dreiecksnetz einer durch einen optischen Mehransichtenscanner erzeugten Punktwolke[2].

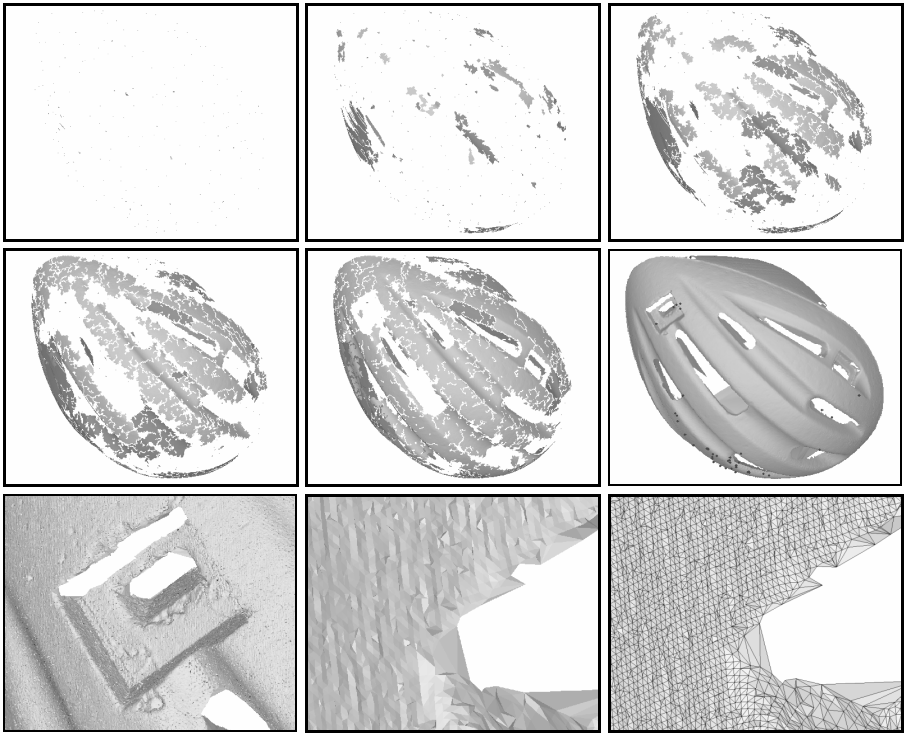

Abb. 7: Triangulationsverlauf und Ergebnis (175.000 Punkte), v.l.n.r., v.o.n.u.: Startsituation (500 Dreiecke), Teilvernetzungen (10%, 35%, 50%, 75%), Triangulationsergebnis (350.000 Dreiecke, Markierungen: Ausreißer), Details (Zoom 2.5 und 10), Detail (Zoom 10, Dreiecksgitter überlagert)

6 Literatur[3]

[Kett98] Lutz Kettner. Designing a data structure for polyhedral surfaces. In Symposium on Computational Geometry, pp. 146–154, 1998.

[McCu80] McCullagh, M. J.; Ross, Ch. G.: Delaunay triangulation of a random data set for isarithmic mapping. The Cartographic Journal, 17(2):93-99, 1980.

[Welc71] Welch, T.: Bounds on the information retrieval efficiently of statistic file structures. Technical Report 88, MIT, June 1971.

---

[2] Die Rohdaten wurden mit dem 3D-Messsystem kolibri der IVB GmbH Jena erzeugt und freundlicherweise vom Institut für Optik und Feinwerktechnik Jena zur Verfügung gestellt.

[3] Auf die Dereferenzierung der in Kap. 3 angegebenen Rekonstruktionsverfahren wurde aus Platzmangel verzichtet. Eine vollständige Literaturliste kann beim Autor angefordert werden.