

3D-Modellierung für die photogrammetrische Oberflächenrekonstruktion

MARTIN SCHLÜTER*

Die allgemeine Flächenmodellierung im \mathbb{R}^3 steht z.Zt. für die direkte Anwendung in dreidimensionalen GIS zur Diskussion, vgl. [6]. Derartige Oberflächenmodelle stellen sich dem Geodäten ganz allgemein als interessantes und vielseitiges neues Werkzeug dar – hier wird ein solches Modell speziell im Hinblick auf die Integration in die digitale Bildzuordnung ausgearbeitet und diskutiert.

Zunächst erfolgt eine kurze Einführung in die digitale Bildzuordnung im Objektraum samt den bisher erreichten Ergebnissen. Darauf aufbauend, wird der Übergang von den bislang üblicherweise verwendeten $2\frac{1}{2}$ D-Oberflächenmodellen zu einem 3D-Oberflächenmodell begründet. Dabei werden insbesondere Anwendungen bezüglich großmaßstäbiger Luftbilder und des photogrammetrischen Nahbereiches ins Auge gefaßt. Vertieft diskutiert werden die Festlegung der expliziten Topologie der Oberflächenstützpunkte über eine Dreiecksvermaschung im \mathbb{R}^3 und die Auswahl eines geeigneten lokalen Interpolators.

1 Bildzuordnung im Objektraum

Die digitale Bildzuordnung im Objektraum ist ein allgemeiner Ansatz zur Rekonstruktion von Geometrie und Radiometrie des Objektraumes aus digitalen Bilddaten nach dem Prinzip der Stereophotogrammetrie, vgl. die Einführung in das *Facetten-Stereosehen* von B. WROBEL, [21]. Eine Übersicht ähnlicher Ansätze findet sich auch in [19].

Für die vorliegende Arbeit wird die Vorgehensweise nach der *direkten Methode*, vgl. [19], unterstellt: Jeder Bildpixelgrauwert wird als Beobachtung im Sinne einer vermittelnden Ausgleichung interpretiert. Als unbekannte Parameter werden die Stützwerte von Interpolationsfunktionen für die Oberflächengeometrie $Z = f(X, Y)$ und für die Oberflächenradiometrie $G = f(X, Y)$ angesetzt. Der geometrische Übergang zwischen Bild- und Objektraum erfolgt über das perspektive Kameramodell, der radiometrische Übergang wird mit Hilfe lokaler linearer Transferfunktionen approximiert.

Der nichtlineare Charakter der resultierenden Verbesserungsgleichungen erfordert eine iterative Vorgehensweise unter Einbeziehung der Bildpyramidenteknik: Ausgehend von den groben Bilddaten der obersten Bildpyramidenstufe wird zunächst eine sehr weitmaschige, ebenfalls grobe Oberflächenbeschreibung ermittelt. Schritt für Schritt werden dann nacheinander die feineren Stufen der Bildpyramide abgearbeitet, wobei auch die Gitterauflösung für die unbekannt Parameter im Objektraum entsprechend verfeinert wird.

Beispiele für Anwendungen der Bildzuordnung im Objektraum auf Luftbilder finden sich beispielsweise in [3], [13] und [15], für die Farbbildzuordnung vgl. [20]. Zu unterschiedlichen Zeitepochen aufgenommene Bilddaten können gemeinsam für eine simultane Schätzung der Geometrie herangezogen werden, vgl. [8].

*Dipl.-Ing. Martin Schlüter, TH Darmstadt, Institut für Photogrammetrie und Kartographie, Petersenstr. 13, 64287 Darmstadt, email: ms@gauss.phgr.verm.th-darmstadt.de

2 Vom $2\frac{1}{2}$ D- zum 3D-Oberflächenmodell

Die in [15] dokumentierten Ergebnisse einer hochauflösenden DGM- und Orthobildbestimmung aus großmaßstäbigen Luftbildern zeigen, daß die simultane Verwendung von mehr als zwei Bildern für die Objektrekonstruktion ein ganze Reihe typischer Fehlerquellen der automatischen Auswertung ausschaltet. Was die rekonstruierten Gebäude angeht, scheinen jedoch Verbesserungen nötig und möglich, da die Rekonstruktionsergebnisse insbesondere im Bereich der vertikalen Gebäudeelemente nicht immer den ansonsten hohen Qualitätskriterien genügen, vgl. z.B. die in [15] veröffentlichten Ergebnisse.

Abb. 1 soll diesen Effekt schematisch verdeutlichen: Die Geometrie vertikaler Elemente im Objektraum, in Abb. 1(a) sei als Beispiel der Sollzustand eines Gebäudes im Objektraum skizziert, kann unter Verwendung einer $2\frac{1}{2}$ D-Oberflächenmodellierung nur in einer mehr oder weniger geglätteten Form rekonstruiert werden, vgl. Abb. 1(b), wobei die Geometriestützstellen als fette Punkte dargestellt sind. Dabei handelt es sich zunächst um ein rein geometrisches Modelldefizit – mit Hilfe von Interpolationsfunktionen $Z = f(X, Y)$ und $G = f(X, Y)$ als Geometrie- und Radiometriemodell können vertikale bzw. überhängende Teile der Objektoberfläche nicht beschrieben, also auch nicht rekonstruiert werden.

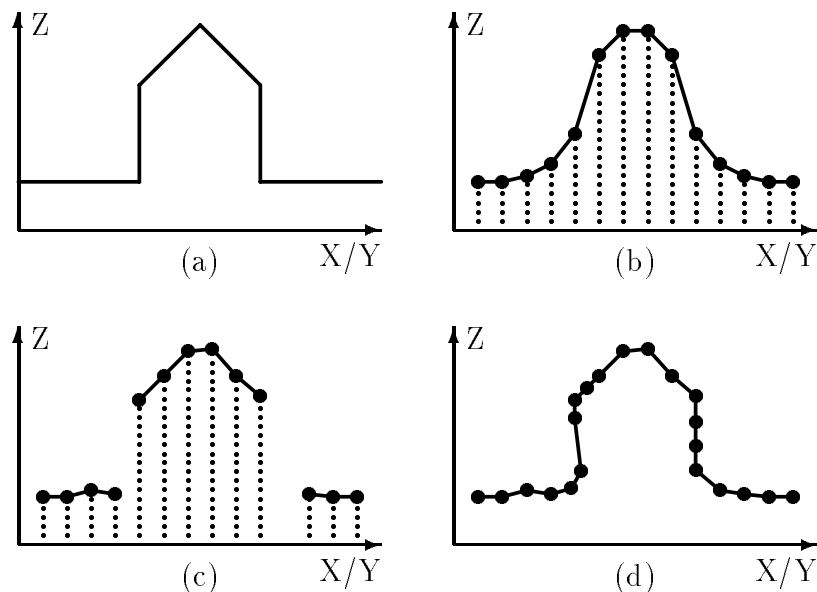


Abbildung 1: Qualitätsstufen der Oberflächenrepräsentation

In der Praxis wirken weitere Faktoren für diesen Effekt zusammen, so beispielsweise die häufig auftretende direkte Nachbarschaft texturarmer Schatten- und Dachbereiche zu den vertikalen Wänden. Dies führt dazu, daß Lösungsansätze, welche die Detektion und Elimination von tendentiell un stetigen Gebieten der Objektoberfläche anstreben, vgl. Abb. 1(c) und [14], in vielen Fällen die Gefahr der Verschlechterung des Gesamtergebnisses in sich bergen können. Denn der lokale Verzicht auf Bildinformation bedingt eine ausreichende Bildinformation bzw. Grauwerttextur in unmittelbarer Nachbarschaft, welche nicht immer vorausgesetzt werden kann.

Anzustreben ist also eine allgemeine Oberflächenmodellierung für den \mathbb{R}^3 , welche das aufgezeigte geometrische Modelldefizit überwindet, vgl. Abb. 1(d). Bedingung für die Rekonstruktion der -wie auch immer gelagerten- Flächen bleibt natürlich die Sichtbarkeit

dieser Flächen in mindestens zwei Bildern. Eine Verdeckungsanalyse, vgl. [14], ist erforderlich für eine korrekte Zuordnung der einzelnen Abbildungsstrahlen. Damit steht aber nun die gesamte Grauwerttextur der vollständigen Fläche für die Oberflächenrekonstruktion zur Verfügung!

Eine solche allgemeine Flächenmodellierung im \mathbb{R}^3 mag im Einzelfall auch bei kleinmaßstäbigen Aufgabenstellungen, zum Beispiel im Hochgebirge, interessant sein. In der Regel wird aber ein größer werdender Auswertemaßstab die stärkere Notwendigkeit einer solchen Modellierung mit sich bringen – konsequenterweise ist hier der photogrammetrische Nahbereich unter dem besonderen Aspekt, daß auch eine größere Anzahl Aufnahmen unterschiedlichster Aufnahmerichtungen in die simultane Auswertung einfließen können, mit einzubeziehen. Da die hier vorgestellte Methode rein geometrischen Charakter hat, ist die vorgenommene Beschränkung auf den auch im Folgenden immer wieder unterstellten Fall der Gebäuderekonstruktion aus Luftbildern nur als exemplarisch zu verstehen.

Der Ablauf des auf einer solchen Modellierung basierenden Rekonstruktionsverfahrens ist in Abb. 2 skizziert, wobei die jeweilige Startfläche fett, der aus den ausgeglichenen Stützpunktpositionen resultierende Flächenverlauf fein dargestellt ist. Abb. 2(a) zeigt die Vorgehensweise mit einem $2\frac{1}{2}$ D-Oberflächenmodell und bilinearer Interpolation (C^0 -Stetigkeit am Facettenrand). Parameterzuschläge für die Geometrie werden nur in einer globalen Richtung angebracht.

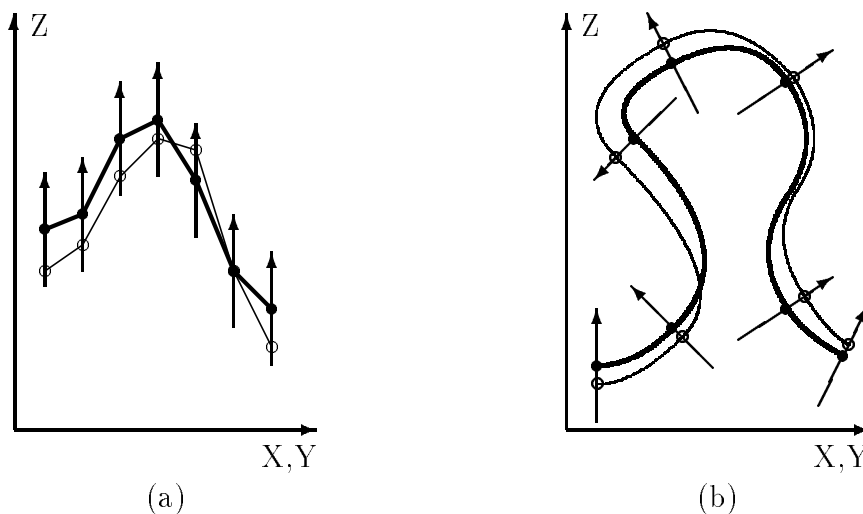


Abbildung 2: Ein Iterationsschritt der photogrammetrischen Rekonstruktion für unterschiedliche Modellierungen der Objektoberfläche

In Abb. 2(b) sind die wesentlichen Eigenschaften eines 3D-Oberflächenmodells dargestellt: Die topologische Verknüpfung der Stützpunkte ist explizit vorgegeben und die Parameterzuschläge einer Iteration der Kleinsten-Quadrate-Schätzung liefern eine Flächenverschiebung in die Flächennormalenrichtungen anstatt in eine globale Richtung wie in Abb. 2(a). In Abb. 2(b) wird exemplarisch ein G^1 -stetiger Interpolator unterstellt.

3 Komponenten der 3D-Oberflächenrepräsentation

Ein wesentlicher Aspekt der neu vorgeschlagenen Oberflächenmodellierung ist die Auflösung der impliziten Stützpunkttopologie des $2\frac{1}{2}$ D-Oberflächenmodells durch die explizite Festlegung der Stützpunkttopologie im Rahmen einer Dreiecksvermaschung. In Abb. 3 ist skizziert, wie erst die topologischen Beziehungen der Stützpunkte untereinander den

Oberflächenverlauf wiedergeben, vgl. Abb. 3(b), im Gegensatz zu den noch strukturlosen Stützpunkten im \mathbb{R}^3 , vgl. Abb. 3(a). Vollständig wird das geometrische Oberflächenmodell durch die Auswahl eines für den \mathbb{R}^3 adäquaten Interpolators, vgl. Abb. 3(c).

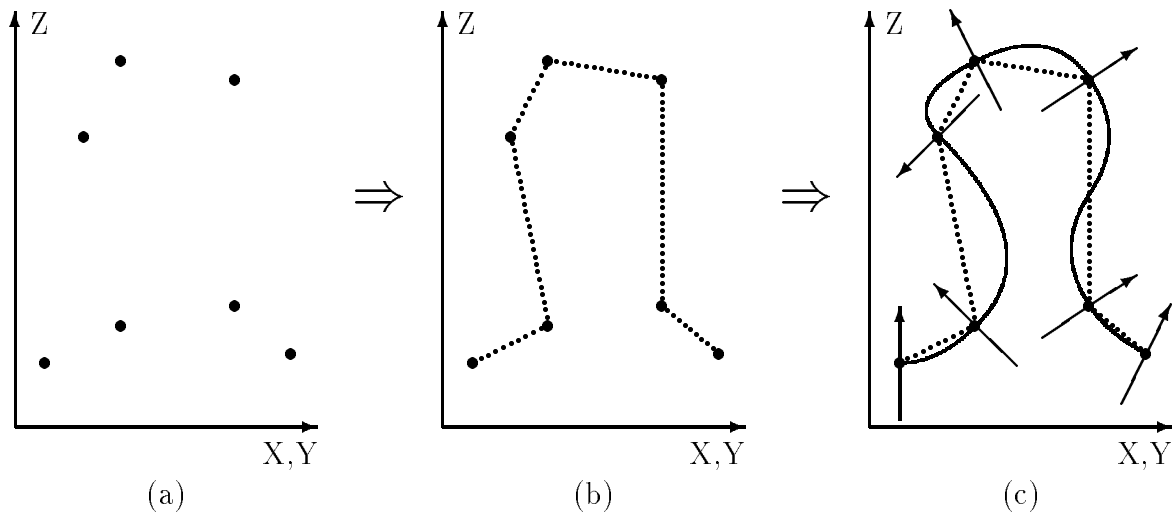


Abbildung 3: Schritte zur 3D-Oberflächenrepräsentation

3.1 Zur Festlegung der Topologie

Zur expliziten Festlegung der Stützpunkttopologie bedient man sich üblicherweise der einfachsten flächenhaften Elemente, also Dreiecken. Um im Rahmen des Rekonstruktionsverfahrens zu einer Oberflächenvermaschung mit Dreieckselementen im \mathbb{R}^3 zu gelangen, gibt es zwei grundsätzlich zu unterscheidende Vorgehensweisen:

Die erste Variante geht davon aus, daß die Rekonstruktion im Rahmen der Bildpyramide, bzw. des Mehrgitterverfahrens, zunächst mit einem $2\frac{1}{2}$ D-Oberflächenmodell startet und daß dies auch zulässig ist. Dann ist es trivial, bei der Prolongation der Oberflächendaten für eine neue Pyramidenstufe auf eine Starttriangulation überzugehen, da hierfür eine Triangulation der neuen Stützpunkte zunächst in der globalen Parameterebene des $2\frac{1}{2}$ D-Oberflächenmodells durchgeführt werden kann. Einschlägige zweidimensionale Triangulationsverfahren, wie die *Delauney-Triangulation* oder die *Triangulation mit minimalem Gewicht*, haben bereits Eingang in die Geodäsie gefunden, beispielsweise im Zusammenhang mit dem Aufbau hochqualitativer Geländemodelle, vgl. [12]. Im weiteren Verlauf der Rekonstruktion muß dann aber davon ausgegangen werden, daß eine erneute Projektion auf eine globale Parameterebene nicht mehr zulässig ist. Unter steter Beibehaltung der Starttriangulation kann aber eine weitere Stützpunktverdichtung pro Pyramidenebene vorgenommen werden, zusätzlich kann die geometrische Form der einzelnen Dreiecke durch lokale Refinementtechniken, wie z.B. die Laplace'sche Glättung, immer wieder verbessert werden. Eine grundsätzliche Neuvermaschung mit Hilfe von Standardalgorithmen verbietet sich aber, und damit verliert die Rekonstruktion deutlich an Flexibilität. Die Einschränkungen wachsen im photogrammetrischen Nahbereich: Der direkte Einstieg in die Rekonstruktion mit einer aus der Bündelausgleichung gewonnenen Stützpunktwolke im \mathbb{R}^3 als Startwert ist so nicht möglich.

Für die zweite Variante wird daher die Starttriangulation direkt im \mathbb{R}^3 angesetzt. Angestrebt wird damit, daß sowohl vor als auch während der Rekonstruktion, z.B. bei der Prolongation für eine neue Pyramidenebene, stets die Möglichkeit einer Neutriangu-

lation gegeben ist. Das Ergebnis einer Delauney-Triangulation im \mathbb{R}^3 ist *per definitionem* aber zunächst eine Tetraedervermaschung, vgl. Abb. 4. Dabei ist in Abb. 4(a) zunächst eine Stützpunktwolke im \mathbb{R}^3 dargestellt, während Abb. 4(b) die konvexe Hülle der Tetraedervermaschung zeigt. Die eigentliche Oberflächenvermaschung stellt, bei ausreichender Stützpunktdichte, eine Untermenge aller Tetraederflächen dar, vgl. Abb. 4(c).

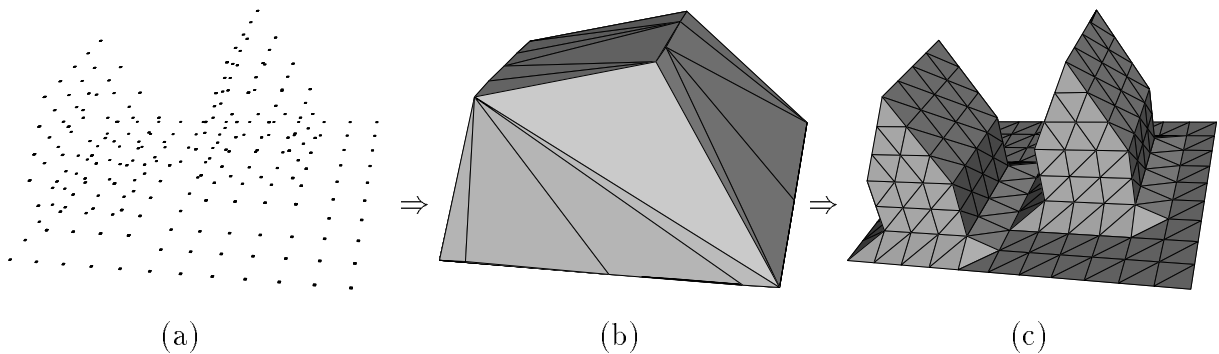


Abbildung 4: Oberflächenvermaschung im \mathbb{R}^3

Hier stellt sich also das Problem, daß mit der Triangulation noch keine Oberflächenvermaschung gefunden ist. In den letzten Jahren wurden eine Reihe von Verfahren vorgestellt, welche den Übergang von einer Punktwolke zu einer Oberflächenvermaschung liefern sollen:

Zum einen besteht die Möglichkeit, die in Abb. 4 angedeutete Vorgehensweise über den Umweg der Tetraedertriangulation zu nutzen: Bei der in [4] vorgestellten Methode der α -Shapes werden die Umkreisradien der Oberflächensimplices, also die Radien der Umkugeln der Tetraeder, die Radien der Umkreise der einzelnen Dreiecke sowie die einzelnen Kantenlängen bis zu einer interaktiv vorzugebenden Schranke α ausgewählt. Bei weitgehend konstanter Punktdichte auf der Oberfläche bilden die für ein bestimmtes α verbleibenden Außendreiecke die Oberflächenvermaschung. Die *Sculptering*-Technik nach BOISSONAT [1] verzichtet auf die Interaktion. Hier werden außenliegende Tetraeder der kompletten Tetraedertriangulation Schritt für Schritt nach einer festgelegten Heuristik eliminiert, bis alle Stützpunkte freigelegt sind, also zu Oberflächenpunkten geworden sind.

Andere Verfahren arbeiten auch im \mathbb{R}^3 , verzichten aber auf die Tetraedertriangulation: In [16] werden die einzelnen Stützpunkte durch *Blobs*, räumlich ausgedehntere, kugelähnliche Graphikprimitive ersetzt. Über eine Voxelisierung erhält man eine Approximation des räumlichen Gesamtgebildes, welches dann recht einfach wieder auf eine Oberflächenvermaschung der ursprünglichen Stützpunkte zurückgeführt werden kann. [18] und [9] arbeiten mit Nachbarschaftsgraphen: Alle Stützpunkte werden zunächst über einen euklidischen Minimalbaum verknüpft. Auf dieser Basis können heuristische Annahmen über den lokalen Oberflächenverlauf getroffen werden, mit denen die Startverknüpfung bis zu einer vollständigen Dreiecksvermaschung verdichtet wird. Abschließend sei erwähnt, daß eine Reihe von Vorschlägen einfach darauf abzielen, das Triangulationsproblem lokal auf eine zweidimensionale Triangulation zurückzuführen ([2]), beispielsweise über die Approximation lokaler Tangentialebenen aus lokalen Stützpunktverteilungen, vgl. z.B. [1].

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß alle genannten Verfahren ein vollautomatisches Auffinden einer korrekten Oberflächenvermaschung nicht garantieren können. Dies hat seinen Grund zum Teil darin, daß (mangels Zusatzinformation) als Grundhypothese stets unterstellt werden muß, daß die Verbindungsstrecken euklidisch nah benachbarter Stützpunkte Teil der Oberflächentriangulation sind. Damit werden implizit hohe Anfor-

derungen an die Qualität der Stützpunktverteilung gestellt – diese Qualität ist aber meist nur ungenügend bekannt. Doch auch bei günstiger Stützpunktverteilung können die Verfahren im Einzelfall unsinnige Lösungen liefern: Ein hoher Rechen- und Speicheraufwand wie beispielsweise in [16] kann sich in einem solchen Einzelfall auszahlen.

Für die Anwendung im Rahmen der digitalen Bildzuordnung zeichnet sich die *Sculptering* Technik nach BOISSONAT, [1], aus: Diese Vorgehensweise ermöglicht es, auf sehr einfache Weise die Zusatzinformation bekannter Abbildungsstrahlen miteinzubringen – im Verlauf eines Abbildungsstrahles zwischen Projektionszentrum und Oberflächenschnittpunkt dürfen sich keine Oberflächenelemente befinden. Dadurch läßt sich das *Sculptering* entscheidend unterstützen. Für die Triangulation im \mathbb{R}^3 , kann auf Standardsoftware zurückgegriffen werden, der Verlauf der Abbildungsstrahlen wird für die Verdeckungsanalyse während der Rekonstruktion sowieso benötigt, vgl. [14].

3.2 Lokale Stützpunktinterpolation im \mathbb{R}^3

Deutet man die einzelnen Dreiecksflächen der Oberflächentriangulation als Interpolationsflächen, so liegt mit der Vermaschung bereits eine G^0 -stetige Oberflächenbeschreibung vor, vgl. die Stetigkeitsdefinition nach [5]. Ein lokaler Interpolator mit einem höheren Stetigkeitsgrad muß auf die Tatsachen Rücksicht nehmen, daß für jedes Oberflächendreieck ein neues Parametersystem vorliegt und daß somit die Randkurve einer $G^i; i \geq 1$ -stetigen Oberflächenfacette in der Regel nur über eine Vektorfunktion im \mathbb{R}^3 beschrieben werden kann. Üblicherweise wird daher so vorgegangen, daß zunächst in den Stützpunkten Zusatzinformationen über den Flächenverlauf festgelegt werden, anhand derer anschließend ein Randkurvennetz aufgebaut wird, in welches abschließend die interpolierenden Oberflächenfacetten eingehängt werden.

Für einen G^1 -stetigen Interpolator muß in jedem Stützpunkt der Flächennormalenvektor als Zusatzinformation vorliegen, vgl. Abb. 3(c) und Abb. 5(a). Man gewinnt ihn approximativ aus den Stützpunktlagen in einer vordefinierten topologischen oder geometrischen Nachbarschaft, vgl. z.B. [17]. Aufgrund der hohen Stützpunktdichte bei der photogrammetrischen Rekonstruktion ist dieser Schritt hier unkritisch (– im Gegensatz zu dem Fall, in welchem ein Objekt mit nur möglichst wenigen, manuell ausgewählten Stützpunkten beschrieben wird).

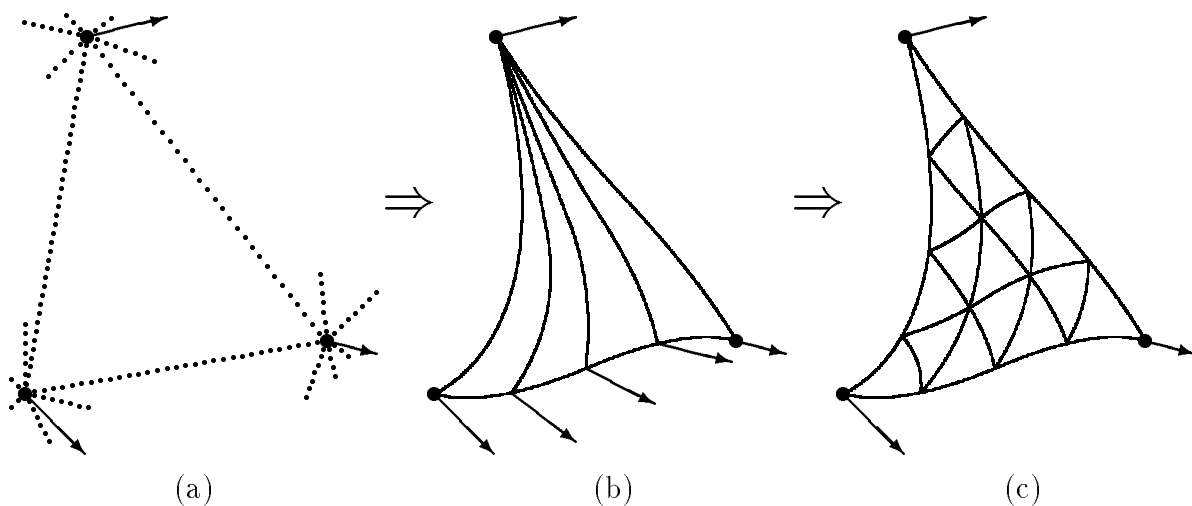


Abbildung 5: Transfiniten Interpolation im \mathbb{R}^3 (G^1 -Stetigkeit)

Verschiedene Ansätze bauen aus diesen Vorgaben das lokale Kontrollpunktnetze kubischer Bézier Splineflächen auf, vgl. [17]. Nachteilig ist dabei, daß die strenge Festlegung dieser Kontrollpunkte zunächst nur als globale Lösung möglich ist. Umgeht man diese Schwierigkeit mit geeigneten Approximationen, vgl. z.B. [11], welche als Zwischenschritt zunächst ein Randkurvennetz festlegen, so verbleiben die bei ebenen Gebieten auftretenden numerischen Instabilitäten, welche Regularisierungstechniken erforderlich machen. Im Hinblick auf einen vollautomatischen, schnellen Ablauf erscheint dagegen der streng lokale und numerisch sehr stabile Ansatz des von [10] vorgeschlagenen transfiniten Interpolators als vorteilhaft: Die Randkurven werden über kubische Hermite Splines beschrieben, auch die Flächennormalenvektoren auf den Randkurven werden als Funktion, abhängig nur von den beiden aufspannenden Stützpunkten und ihren Flächennormalen, festgelegt. Damit kann von jedem Stützpunkt aus zu jedem beliebigen Punkt auf der gegenüberliegenden Randkurve ein weiterer kubischer Hermite Spline eingehängt werden, vgl. Abb. 5(b). Durch Überlagerung der drei möglichen Flächenbeschreibungen nach Abb. 5(b) mit einer geeigneten Gewichtsfunktion erhält man die G^1 -stetige Interpolationsfläche, Abb. 5(c).

Wird eine weitere Vereinfachung zur Minimierung der Rechenzeit angestrebt, so kann die Interpolationsfläche eines Dreieckselementes natürlich auch wieder durch kleinere, ebene Dreiecke approximiert werden, mit welchen schnelle Rechenoperationen durchführbar sind. Es bietet sich an, eine solche feinere Unterteilung mit den Dreiecken des Oberflächengrauwertmodells gleichzusetzen, für welche in der Regel sowieso eine deutlich feinere Auflösung als für die Geometriefacetten gewählt wird. An Abb. 5(c) veranschaulicht bedeutet dies, daß nun die dargestellten Schnittpunkte der Flächenparameterlinien als Stützpunkte des Oberflächengrauwertmodells interpretiert werden, wobei die Ränder der 16 Subdreiecke durch lineare Verbindungen approximiert werden.

Damit liegt ein stabiler, vollautomatischer Interpolator für eine unregelmäßige Dreiecksvermaschung im \mathbb{R}^3 vor. Die Erweiterung bezüglich G^2 -Stetigkeit ist in analoger Vorgehensweise möglich, vgl. [7].

Literatur

- [1] BOISSONNAT, JEAN-DANIEL: *Geometric structures for three-dimensional shape representation*. ACM Transactions on Graphics, 3(4):266–286, October 1984.
- [2] CHOI, B. K., H. Y. SHIN, Y. I. YOON, and J. W. LEE: *Triangulation of scattered data in 3d space*. Computer-Aided Design, 20(5):239–248, 1988.
- [3] EBNER, HEINRICH, CHRISTIAN HEIPKE, and MIKAEL HOLM: *Global image matching and surface reconstruction in object space using aerial images*. In *Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision*, volume 1944, pages 45–57, Orlando, Florida, April 1993. SPIE.
- [4] EDELSBRUNNER, HERBERT and ERNST PETER MÜCKE: *Three-dimensional alpha shapes*. ACM Transactions on Graphics, 13(1):43–72, 1994.
- [5] FARIN, GERALD E.: *Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design: A Practical Guide*. Academic Press, San Diego, 1990.
- [6] FRITSCH, DIETER: *Three-dimensional geographic information systems – status and prospects*. In *18th Congress of the ISPRS*, volume 31, part B3, Comm. 3 of IAPRS, pages 215–221, Wien, 1996.

- [7] HAGEN, HANS and HELMUT POTTMANN: *Curvature continuous triangular interpolants*. In LYCHE, TOM and LARRY L. SCHUMAKER (editors): *Mathematical Methods in Computer Aided Geometric Design*, pages 373–384. Academic Press, London, 1989.
- [8] LEHN, MATTHIAS: *Oberflächenrekonstruktion mit dem Facetten-Stereosehen unter Verwendung multitemporaler Luftbilder*. Diplomarbeit, TH Darmstadt, Institut für Photogrammetrie und Kartographie, 1996.
- [9] MENCL, ROBERT: *A graph-theoretic approach to surface reconstruction*. Technical Report 568, FB Informatik LS VII, Universität Dortmund, 1995.
- [10] NIELSON, GREGORY M.: *A transfinite, visually continuous, triangular interpolant*. In FARIN, GERALD E. (editor): *Geometric Modelling: Algorithms and New Trends*, pages 235–246. SIAM, Philadelphia, 1987.
- [11] PFEIFER, NORBERT and HELMUT POTTMANN: *Surface models on the basis of a triangular mesh - surface reconstruction*. In *18th Congress of the ISPRS*, volume 31, part B3, Comm. 4 of *IAPRS*, pages 638–643, Wien, 1996.
- [12] REINHARDT, WOLFGANG: *Interaktiver Aufbau hochqualitativer digitaler Geländemodelle an photogrammetrischen Stereosystemen*. Dissertation, TU München, DGK C 381, München, 1991.
- [13] SCHENK, TONI und AMNON KRUPNIK: *Ein Verfahren zur Mehrfachbildzuordnung im Objektraum*. ZPF, 64(1):2–11, Januar 1996.
- [14] SCHLÜTER, MARTIN: *Object space based surface reconstruction with discontinuities – an approach*. In *Spatial Information from Digital Photogrammetry and Computer Vision*, volume 30 part 3/1,2 of *IAPRS*, pages 737–744, Munich, 1994. SPIE.
- [15] SCHLÜTER, MARTIN and BERNHARD WROBEL: *High resolution surface reconstruction of a landscape from large scale aerial imagery by facets stereo vision – an extended test*. In *18th Congress of the ISPRS*, volume 31, part B3, Comm. 3 of *IAPRS*, pages 758–763, Wien, 1996.
- [16] URAY, PETER: *From 3D Point Clouds to Surfaces and Volumes*. Dissertation, TU Graz, 1996.
- [17] VELTKAMP, R.C.: *Closed G^1 -continuous cubic Bézier surfaces*. Technical Report CS-R9226, Centrum voor Wiskunde en Informatica, Department of Interactive Systems, Amsterdam, 1992.
- [18] VELTKAMP, R.C.: *Closed Object Boundaries from Scattered Points*, volume 885 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, New York, 1994.
- [19] WEISENSEE, MANFRED: *Modelle und Algorithmen für das Facetten-Stereosehen*. Dissertation, TH Darmstadt, DGK C 374, München, 1992.
- [20] WROBEL, BERNHARD and BORIS KAISER: *Facets Stereo Vision (FAST Vision) applied to digital colour images*. In *18th Congress of the ISPRS*, volume 31, part B3, Comm. 3 of *IAPRS*, pages 960–964, Wien, 1996.
- [21] WROBEL, BERNHARD P.: *Geometrisch-Physikalische Grundlagen der digitalen Bildmessung*. SIPUS – Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, 13:223–242, 1989.