

Freiformflächen zur Modellierung von Deformationsmessungen

Albert Grimm-Pitzinger und Stefan Rudig

Zusammenfassung

Mit der Weiterentwicklung von terrestrischen 3D-Laserscannern in den letzten Jahren können diese bereits für ingenieur-geodätische Anwendungen mit höheren Genauigkeitsanforderungen eingesetzt werden. Ein Laserscanner ermöglicht den Übergang von einer diskreten Punktverteilung zu einer flächenhaften Erfassung von Objekten, zum Beispiel im Rahmen einer Deformationsmessung. An die Stelle korrespondierender Punkte wie bisher üblich tritt die wesentlich höhere Informationsdichte der Fläche, was eine bessere Grundlage für die Beurteilung durch den Bauingenieur darstellt. Aus der großen Punktmenge eines Scans müssen zunächst Flächen, die im Allgemeinen keiner Regelgeometrie genügen, abgeleitet und analytisch beschrieben werden. Diese Freiformflächen werden im vorliegenden Artikel aus NURBS (non uniform rational B-Splines) generiert, die eine echte 3D-Modellierung erlauben. Der Vorteil gegenüber einer 2.5D-Darstellung liegt in der exakten Beschreibung gekrümmter Oberflächen beliebiger Raumlagen. Testobjekt war eine Bogenstaumauer am Wörglerbach. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass durch Modellierung von Flächen aus den Punktwolken ein Genauig-

keitsgewinn gegenüber dem gemessenen Einzelpunkt erreicht wird.

Summary

Further development of terrestrial laserscanners in the past years allows their usage for geodetic purposes with higher requirements in accuracy. Usually few points represent an object in the case of deformation measurements. The new approach is generating surfaces out of the dense dot matrix from the scan. This provides more information for civil engineers than single points can. The first step is to limit the object surface(s) of interest, which cannot be described by basic geometric figures like cylinders or cones in general. In this paper surfaces are generated by means of NURBS (non uniform rational B-Splines). One advantage of these capable tools is modelling in three-dimensional space, which makes it possible to describe surfaces of any shape and spatial position. Test object was a dam wall constructed to keep back thunder storm flood in Tirol – Austria. Results so far showed, that the method of generating surfaces brings an increase of accuracy compared with the measured single point.

1 Theoretische Grundlagen

NURBS (non uniform rational B-Splines) wurden zur Vereinheitlichung von inkompatiblen Einzellösungen als Geometriestand eingeführt und finden auf Grund ihrer Flexibilität im Bereich der dreidimensionalen Modellierung weltweit Verwendung. Ließen sich ursprünglich Kurventypen wie Kreise, Ellipsen etc. mit Polynomen nicht darstellen, so konnten nun sämtliche Kegelschnitte durch rationale Funktionen wiedergegeben werden. Geometrisch betrachtet sind Kurven vektorwertige Funktionen eines Parameters und Abbildung einer Geraden in den dreidimensionalen Euklidischen Raum. Flächen sind Funktionen zweier Parameter und wiederum Abbildung eines Gebietes R der u,v-Ebene in den Raum. Eine nicht-rationale B-Spline-Fläche S(u,v) lässt sich in Tensor-Produkt-Schreibweise wie folgt darstellen:

$$S(u,v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) \cdot N_{j,q}(v) \cdot P_{i,j} \quad 0 \leq u,v \leq 1 \quad (1)$$

Die geometrischen Koeffizienten $P_{i,j}$ sind die Punkte eines bidirektionalen Kontrollnetzes, die $N_{i,p}(u)$ und $N_{j,q}(v)$ sind die nicht-rationale B-Spline-Basisfunktionen, die über den Knotenvektoren U und V definiert sind. Die Grade der Basisfunktionen p und q in den zwei Parameterrichtungen müssen nicht zwangsläufig identisch sein. Führt man in Gleichung (1) noch zusätzliche Gewichte $w_{i,j}$ ein, erhält man eine NURBS-Fläche S(u,v) zu

$$S(u,v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) \cdot N_{j,q}(v) \cdot w_{i,j} \cdot P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) \cdot N_{j,q}(v) \cdot w_{i,j}} \quad 0 \leq u,v \leq 1 \quad (2)$$

oder in abgekürzter Schreibweise mit $R_{i,j}(u,v)$ als rationale Basisfunktionen zu

$$S(u,v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,j}(u,v) \cdot P_{i,j} \quad 0 \leq u,v \leq 1 \quad (3)$$

Eine der wichtigsten Eigenschaften von NURBS-Flächen ist der so genannte lokale Einfluss. Die Basisfunktionen $R_{i,j}(u,v)$ sind gleich 0, wenn sich (u,v) außerhalb von $[u_i, u_{i+p+1}] \times [v_j, v_{j+q+1}]$ befindet. Die Veränderung eines Punktes $P_{i,j}$ oder eines Gewichtes $w_{i,j}$ wirkt sich daher ebenfalls nur in diesem Intervall aus, was größtmögliche Flexibilität für die Modellierung bedeutet. Statt den Punktkoordinaten des R^3 werden meist homogene, vierdimensionale Koordinaten verwendet und die vierte Koordinate als Punktgewicht betrachtet. Dadurch kann für die Berechnung im Wesentlichen der nicht-rationale Ansatz verwendet werden, eine Rückabbildung liefert schlussendlich wieder Punkte des R^3 . Detailliertere Ausführungen dazu sind unter anderem in Piegl (1997) und Hoschek (1989) gegeben.

Abb. 1 zeigt beispielhaft die quadratischen B-Spline-Basisfunktionen einer Parameterrichtung für sechs Kontrollpunkte, deren Beitrag zum Kurvenverlauf durch einen Wert zwischen 0 und 1 beschrieben wird. Da die End- bzw. Eckpunkte interpoliert werden, tritt an den Rändern jeweils der Wert 1 auf. Abb. 2 zeigt eine biquadratische B-Spline-Fläche mit dem dazugehörigen Kontrollpunktnetz.

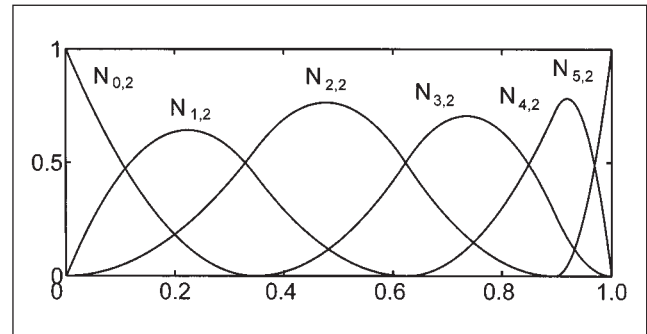


Abb. 1: B-Spline-Basisfunktionen

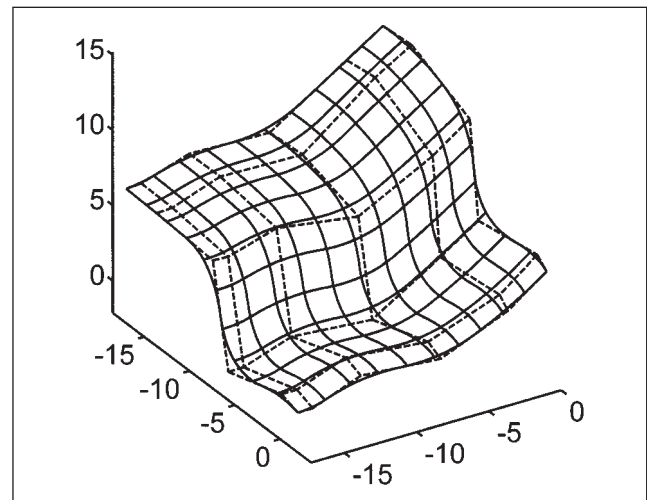


Abb. 2: B-Spline-Fläche

2 Anwendung auf Messdaten

Für die Berechnung von B-Spline-Kurven oder -Flächen aus einem Satz von Punkten sind die Kontrollpunkte P_i bzw. $P_{i,j}$ zunächst unbekannt. Es soll eine approximierende Fläche entstehen, deren Abstände zu den gegebenen Punkten minimiert werden. Nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate lassen sich zu gegebenen Messpunkten Q_0, \dots, Q_m die Kontrollpunkte P_0, \dots, P_n bestimmen. Der einfache, nicht-rationale Fall für eine B-Spline-Kurve C(u) sei hier kurz dargestellt. Für m Messpunkte, n Kontrollpunkte und den Grad p der Kurve soll gelten: $m > n$ und $1 \leq p \leq n$.

$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) \cdot P_i \quad u \in [0,1] \quad (4)$$

Die Randpunkte werden interpoliert, daher sind $Q_0=C(0)$ und $Q_m=C(1)$. Für die restlichen Q_k gilt:

$$\sum_{k=1}^{m-1} |Q_k - C(\bar{u}_k)|^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

Das Minimierungsproblem führt zu einem linearen Gleichungssystem, das um einen Strafterm zur Einhaltung einer vorgegebenen Fehlertoleranz oder einer angestrebten Glättung erweitert werden kann. Für die praktische Durchführung der Berechnung und Modellierung stehen Routinen von mathematischer Software ebenso zur Verfügung wie mehrere kommerzielle Software-Pakete. Vielfach wird die Erstellung von NURBS-Flächen in zwei Schritten ausgeführt. Zunächst werden B-Splines in einer Parameterrichtung definiert und anschließend in der anderen Parameterrichtung wiederum mit B-Splines zu einer Fläche komplettiert. Für Berechnungen mit höherem Genauigkeitsanspruch ist jedoch grundsätzlich einem gesamtheitlichen Lösungsansatz der Vorzug zu geben. Die Optimierung kann dabei in zwei Teile zerlegt werden, die iterativ und alternierend ablaufen. Zum einen wird bei festen Punktgewichten ein lineares least-squares-Problem gelöst, zum anderen durch neue Gewichtungsfaktoren die Zielfunktion weiter minimiert.

3 Testobjekt

Etwa 5 km südlich der Stadt Wörgl im Tiroler Unterinntal wurde vom forsttechnischen Dienst der Wildbach- und Lawinenverbauung eine Staumauer zur Rückhaltung von Hochwasser und Muren errichtet. Die Länge der Krone beträgt ca. 40 m, die sichtbare Höhe über dem Boden des Staubeckens ca. 25 m (Abb. 3). In der Mitte des Mauerfußes befindet sich ein Ablassrohr, das die im Rückhaltebecken gestaute Hochwasserspitze konstant an den



Abb. 3: Sperre Wörglerbach, Ansicht vom wasserseitigen Messpfeiler

Unterlauf abgeben soll. Die vertikal angebrachten Metallschienen sollen eine Verklauung des Rohres durch Geschiebe verhindern. Parallel zur behördlich vorgeschriebenen Kontrollvermessung von Punkten an der Krone wurde die Staumauer mit einem terrestrischen 3D-Laserscanner gesamtheitlich erfasst. Es handelte sich dabei um ein Gerät des Typs LMS Z360i der Firma Riegl Laser Measurement Systems. Bei einer Reichweite von bis zu 200 m auf natürliche Ziele wird die Streckengenauigkeit mit $6\text{ mm} + 20\text{ ppm}$ für den gemittelten Einzelpunkt angegeben. Die Winkelauflösung von $0,002^\circ$ entspricht etwa 5 mm in 50 m Entfernung. Das Gesichtsfeld von 90° vertikal und 360° horizontal wird zusätzlich von einer Digitalkamera erfasst, um die Messpunkte fotorealistisch mit dem entsprechenden RGB-Farbwert zu belegen. Als Gerätestandpunkte dienten zwei Messpfeiler, deren Entfernung zur Staumauer luft- und wasserseitig ca. 60 m beträgt.

Die gekrümmte Oberfläche des gegenständlichen Objektes macht es unmöglich, die Deformationen in nur einer einzigen Koordinatenrichtung anzugeben, sondern es sind radiale Abweichungen zu bestimmen. Darin liegt der große Vorteil der echten 3D-Flächenmodellierung gegenüber der 2.5D-Darstellung, die in diesem Fall zu systematisch verfälschten Ergebnissen führen würde. Außerdem sind die modellierten Flächen gleichzeitig Teil der 3D-Visualisierung des Gesamtobjektes.

4 Bisherige Ergebnisse

Abb. 4 zeigt die berechneten Freiformflächen der beiden Mauerseiten, die Luftseite konnte auf Grund diverser Sichthindernisse nicht zur Gänze erfasst werden. Nur Punkte mit Abweichungen von unter 1 cm auf die Fläche wurden für die endgültige Flächenberechnung akzeptiert, die verbleibenden Residuen zeigen keine systematischen

Effekte. Die RMS-Werte (root mean square) für die Punktabstände betragen für die Wasserseite mit 23.500 Punkten rund 3 mm, für die Luftseite mit 14.000 Punkten rund 4 mm. In Abb. 5 ist die Verteilung der Residuen bei der Berechnung der wasserseitigen Fläche in Form eines Histogramms dargestellt. Über den Punktabständen von 0 bis 5 mm zur Fläche wurden die jeweiligen Häufigkeiten in Prozent aufgetragen. Die ursprüngliche Genauigkeit des gemessenen Einzelpunktes betrug ca. 7 mm. Durch Ersetzen des Einzelpunktes mit einer analytisch beschreibbaren NURBS-Fläche konnte die Unsicherheit eines Flächenpunktes auf die Hälfte – etwa 3 mm – reduziert werden. In diesem Wert enthalten sind Anteile aus der vorhandenen Oberflächenrauigkeit des Objektes sowie die Restfehler aus der Flächenberechnung.

Da noch keine Folgemessung stattgefunden hat, konnten bislang keine realen Deformationen

Abb. 4: Freiformflächen Staumauer, Wasserseite (links), Luftseite (rechts)

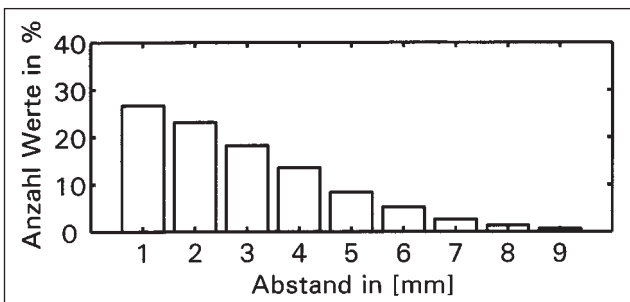
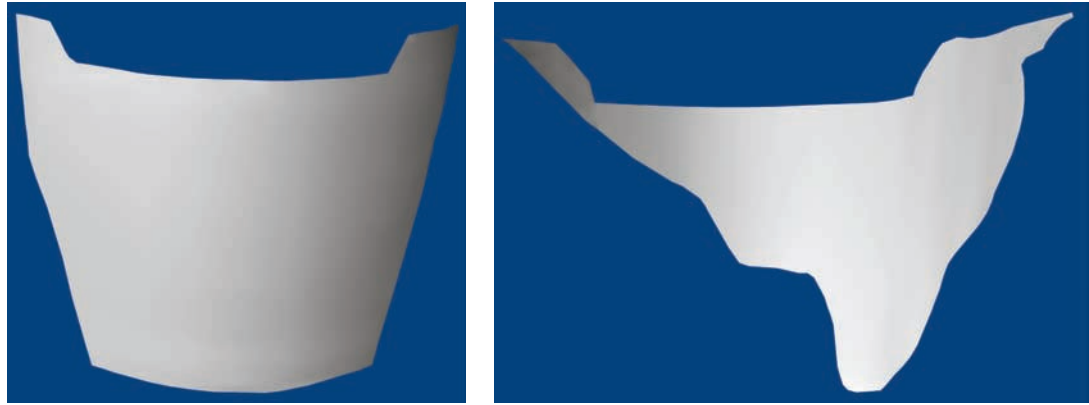


Abb. 5: Histogramm der Residuenverteilung aus der Flächenberechnung

berechnet werden. Es wurden jedoch Messreihen auf verschiedenartige Testflächen durchgeführt und Objektbewegungen simuliert. Dazu wurde eine 2.5×1 m große Freiformfläche vor und nach einer Bewegung von 3 cm am linken Ende mit einem Punktraster von etwa 2 cm gescannt. Da die Fläche bei diesem Test nicht in einen Schlitten eingespannt werden konnte, wurden diskrete Punkte mittels Tachymeter kontrolliert. Die erhaltenen Abweichungen stimmen mit der Tachymetermessung überein, Abb. 6 zeigt eine farbcodierte Darstellung des Ergebnisses.

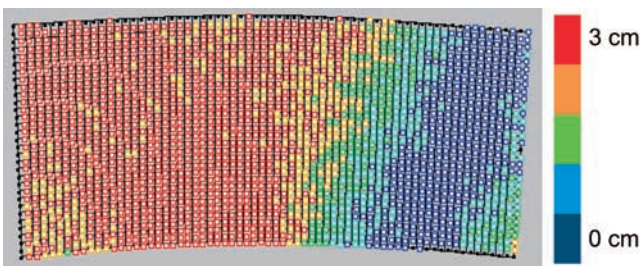


Abb. 6: Testfläche mit simulierter Deformation

5 Schlussbemerkung

Die Berechnung von Freiformflächen liefert viel versprechende Ergebnisse bei der Anwendung für Deformationsmessungen. Punktunsicherheiten von ca. 7 mm aus der Laserscanner-Messung konnten durch Generierung von NURBS-Flächen auf ca. 3 mm halbiert werden. Gleichzeitig mit einer verbesserten Aussage über die Objekt-

geometrie sind die bisherigen Ergebnisse eine ausgezeichnete Grundlage für weiterführende Deformationsanalysen. Aus den analytisch beschreibbaren Flächen können neben der Berechnung von Normalvektoren und Krümmungen in jedem Punkt auch Differenzmodelle zwischen mehreren Epochen auf einfache Weise abgeleitet werden. Das vorgestellte Projekt befindet sich derzeit noch in Bearbeitung. Folgemessungen bei Halb- und Vollstau sind mit Einsetzen der Schneeschmelze im Frühjahr 2004 geplant bzw. bereits in Vorbereitung.

Aus geodätischer Sicht sei noch anzumerken, dass sich die Anwendung von üblichen Kalibrierungsverfahren für Laserscanner eher schwierig gestaltet. In einigen Publikationen zu diesem Thema wurden zwar die Auswirkungen auf die resultierenden Punktkoordinaten aufgezeigt, ein Rückschluss auf gerätetechnische Ursachen bzw. bestimmte Bauteile gelingt meist nicht.

Dank

Unser Dank richtet sich an die Firma Riegl Laser Measurement Systems aus Horn in Niederösterreich, die einen Laserscanner des Typs LMS Z360i samt Mitarbeiter zur Verfügung stellte. Außerdem erhielten wir jederzeit Unterstützung beim Umgang mit dem firmeneigenen Programm RISCAN PRO für das Handling der Punktwolken.

Literatur

- Piegl, T., Tiller, W.: The NURBS Book. Springer Verlag, Berlin 1997.
 Hoschek, J., Lasser, D.: Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung. Teubner Verlag, Stuttgart 1989.
 Riegl Laser Measurement Systems: Spezifikationen des Laserscanners LMS Z360i, www.riegl.com 2004.
 Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN Norm 18710: Ingenieurvermessung, Teil 1 Grundsätze, Teil 4 Überwachung. Beuth Verlag, Berlin 2002.

Anschrift der Autoren

Ao. Univ. Prof. Dr. Albert Grimm-Pitzinger / Dipl.-Ing. Stefan Rudig
 Institut für Geodäsie
 Universität Innsbruck
 Technikerstraße 13
 A-6020 Innsbruck
 albert.grimm@uibk.ac.at
 st.rudig@gmx.at