

## Zur digitalen Projektion und Visualisierung von Türmen

ELLI PETSÄ, Athen (Griechenland)

**Zusammenfassung:** Dieser Beitrag behandelt die Abwicklung zylinder- und kegelförmiger Oberflächen, die in architekturphotogrammetrischen Dokumentationen häufig auftreten und als Problem der Einbildphotogrammetrie mit Amateurkameras zu betrachten sind. Es werden die Abwicklungs- und Visualisierungsvorgänge behandelt und an den Beispielen von Türmen fototexturierte 3D-Modelle gezeigt.

**Summary:** *Digital Projection and Visualisation of Towers.* This contribution discusses the development of cylindrical and conic surfaces, which are often encountered in architectural documentation and may be regarded as a question of single-image photogrammetry with amateur cameras. The processes of development and visualisation are outlined, and photo-textured 3D models are presented at the examples of towers.

---

### Einleitung

In der architekturphotogrammetrischen Dokumentation trifft man sehr oft auf Oberflächen, die regelmäßig gekrümmt sind und meistens als mathematische Körper zweiter Ordnung beschrieben werden können. Am häufigsten handelt es sich dabei um Zylinder, Kegel und Sphären. Im allgemeinen bietet in solchen Fällen das Endprodukt einer konventionellen Orthogonalprojektion dem Architekten bzw. dem Archäologen keine akzeptable Lösung, d.h. solche Objekte sollen in anderen geeigneten Projektionen verebnet werden (THEODOROPOULOU 2000). Um den kostengünstigen Charakter der gegenwärtigen Architekturphotogrammetrie beizubehalten, sollten die entsprechenden Verfahren durch einfache Mittel ausführbar sein, vor allem durch die Bearbeitung von Klein- oder Mittelformatbildern auf Standard-PCs.

Aber welche Abbildung ist jeweils die am besten geeignete? Die Antwort auf diese Frage ist bei doppelt gekrümmten Oberflächen auf keinen Fall trivial (z. B. bei sphärischen Gewölben). In manchen Fällen könnte man vielleicht von Anfang an eine gegebene kartographische Abbildung wählen, wie im Fall der abstandstreuen zylind-

rischen Abbildung für die Darstellung von Globusoberflächen (SACHER et al. 1999). Aber das ist nicht immer möglich, vor allem nicht in der häufigen Fällen, in denen die Benutzer des Endproduktes selbst nicht in der Lage sind, eine bestimmte Projektion festzulegen. Als einzige Alternative erscheint dann das Experimentieren mit verschiedenen Abbildungen, abhängig von den Forderungen der jeweiligen Anwendung. Das war beispielsweise der Fall bei der digitalen Auswertung von byzantinischen Wandgemälden auf sphärischen Oberflächen, wo sich die endgültige Wahl der Mollweide-Abbildung als Ergebnis mehrerer Transformationsversuche ergab (KARRAS et al. 1997).

Kegel und Zylinder sind dagegen abwickelbare Flächen und können ohne weiteres mit einheitlichem Maßstab in die Ebene ausgebreitet werden (KARRAS et al. 1996, HEMMLEB & WIEDEMANN 1997, THEODOROPOULOU et al. 2001). Die geometrisch korrekte Darstellung ist zweifellos die wichtigste Forderung einer Dokumentation. Eine fotorealistische Visualisierung mit Bildtextur wird jedoch oft zusätzlich verlangt. Das digitale Abwicklungsprodukt stellt dafür die ideale Textur dar. Dieser Beitrag behandelt kurz die Entfaltung und die fototexturierte

Visualisierung von zylindrischen bzw. kegelförmigen Oberflächen am Beispiel von drei Türmen.

## 1 Der Abwicklungsvorgang

Die digitale Auswertung von Objekten, die näherungsweise als mathematische Körper zu betrachten sind, ist im Prinzip eine Methode der Einbildphotogrammetrie. Jeder Objektpunkt einer konkaven bzw. konvexen Oberfläche kann sich eindeutig als der Schnitt des entsprechenden Strahles eines durch die innere und äußere Orientierung festgelegten Bildbündels mit dem ausgleichenden Körper ergeben. Da zu allen Objektpunkten entsprechende Punkte der Abwicklungsebene (allgemeiner der Projektionsebene) eindeutig korrespondieren, ist damit auch die Korrespondenz zwischen Bild- und Abwicklungskoordinaatensystem eindeutig festgelegt. In diesem Sinne erlaubt die Rückprojektion von der Abwicklungsebene auf die Oberfläche und davon auf die Bildebene, die Interpolation der gesuchten Grauwerte des digitalen Endproduktes (KARRAS et al. 1996). Ergebnis dieses Prozesses sind abgewinkelte Bilder, die dann zu einem einheitlichen Mosaik verknüpft werden sollen. Das erfolgte hier interaktiv über den Hintergrund der „abgewinkelten“ Passpunkte.

Dieser Vorgang setzt a) die bekannte Gleichung des Körpers und b) bekannte Bildorientierungen voraus. Für (a) wird ein Objektpunkthaufen benötigt, der geodätisch oder photogrammetrisch durch eine Bündelblockausgleichung gemessen sein kann. Das Letztere würde mehr überlappende Bilder als sonst für die Auswertung nötig verlangen, was in sich ein Problem bei der Aufnahme hoher Objekte aus unkonventionellen Kameraplattformen (siehe folgende Beispiele 2, 3) darstellt. Abhängig von Objektform und Umgebung kann es auch sein, dass man mit mehreren Zoom-Objektiven und -Fokussierungen aufnehmen muß (siehe Beispiel 3), was komplizierte „block-variante“ Bündelblockausgleichungen hervorbringen würde.

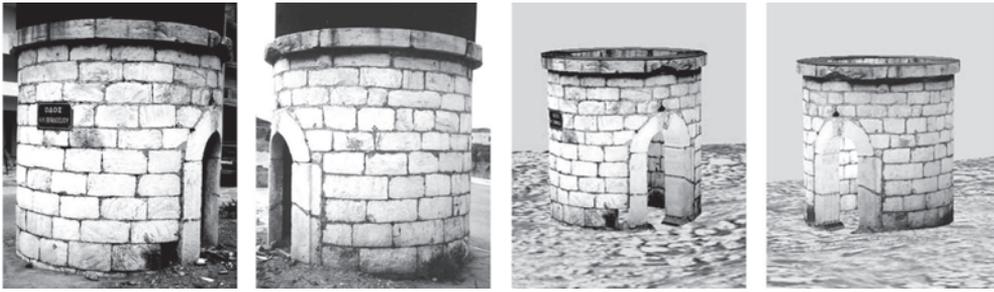
Aus diesen Gründen wurden hier alle Objektpunkte, die auch als Passpunkte dienten, geodätisch erfasst. Die innere Orientierung aller Aufnahmen war völlig unbekannt. Eine Ausnahme bildete die von vornherein bekannte Radialverzeichnungskorrektur eines Weitwinkelobjektivs. Sowohl für den Rückwärtseinschnitt als auch für den Resamplingprozess wurde deshalb die Direkte Lineare Transformation oder DLT (ABDEL-AZIZ & KARARA 1971) mit zahlreichen Passpunkten eingesetzt, die für unkalibrierte Amateurbilder besonders gut geeignet ist.

## 2 Genauigkeitsüberlegungen

Die Genauigkeit der Projektion ist vor allem vom Schnittwinkel des jeweiligen Bündelstrahles mit der mathematischen Oberfläche abhängig, durch welchen sich die Messfehler und die Restfehler der äußeren Orientierung in die Projektionsebene fortpflanzen. Dieser Schnittwinkel muss deshalb relativ groß sein, d.h. ein zylindrischer oder kegelförmiger Körper sollte im allgemeinen aus wenigstens sechs Bildern abgewickelt werden, die um ihn herum gut verteilt sind (KARRAS et al. 1996). Aus dieser Perspektive ist auch der Einsatz von Normal- anstelle von Weitwinkelobjektiven zu bevorzugen. Deformationen bzw. Abweichungen des realen Objekts vom idealen ausgleichenden Körper verursachen Versetzungen der Abbildung, die ebenfalls vom jeweiligen Schnittwinkel abhängen. Solche „gefährlichen“ Teile der Oberfläche sind möglichst frontal aufzunehmen.

## 3 Visualisierung

Die maßstabsgerechte Information einer Auswertung ist, wie gesagt, die primäre Forderung der Dokumentation. Heutzutage erweisen sich jedoch oft auch visuelle Produkte als besonders nutzbar, z. B. für archäologische und architekturelle Animierungen oder für den „virtuellen Tourismus“. In dieser Hinsicht wächst die Bedeutung sowohl der Web-basierten als auch frei und leicht zu „browsenden“ VRML-Modelle, insbesondere mit realistischer, aus den Originalbildern entnommener Fototextur.



**Abb. 1:** Zylindrischer Wasserturm. Originalbilder (links) und virtuelle Bilder (rechts).

Im vorliegenden Fall braucht man eigentlich das Bildmaterial zylindrischer Oberflächen nicht weiter zu bearbeiten, denn das Abwicklungsmosaik selbst stellt eine maßstabsgetreu entzerrte Textur dar; man sollte nur das Mosaik an allen Öffnungen transparent machen. Für einen Kegel braucht man dagegen die Abwicklung als orthogonales Bild, nämlich in einer Abbildung, deren Maßstab in der Richtung der Kegelachse abnimmt (KARRAS et al. 2001). Das 3D-Modell ist einfach zu konstruieren, und auf das Geländemodell zu stellen und zu orientieren. Um den Eindruck der „Dicke“ an den Öffnungen eines z. B. konvexen Körpers zu erzeugen, dupliziert man mehrmals (so dicht und tief wie nötig) die Körperoberfläche im Inneren mit einem stetig abnehmenden Durchmesser. Falls für die innere Oberflä-

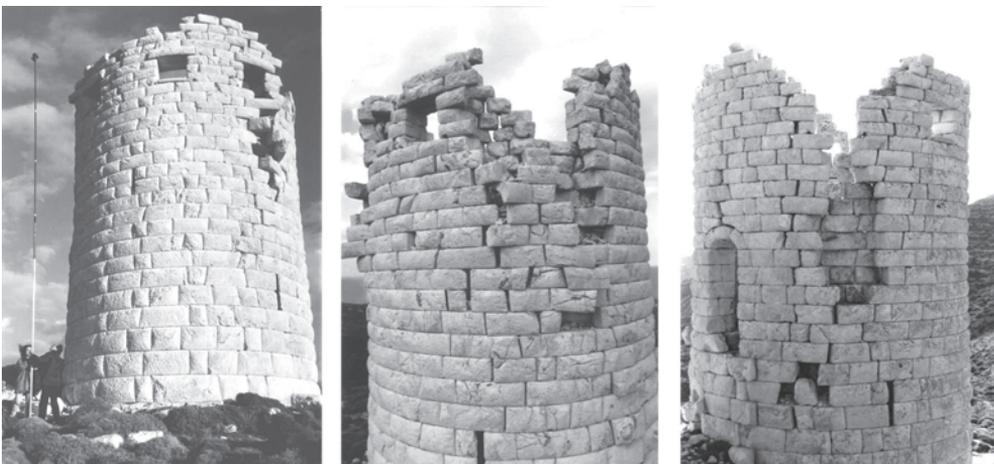
che keine Textur vorhanden ist, so könnte man diese auch mit demselben Bildmaterial überlagern lassen.

#### 4 Praktische Anwendungen

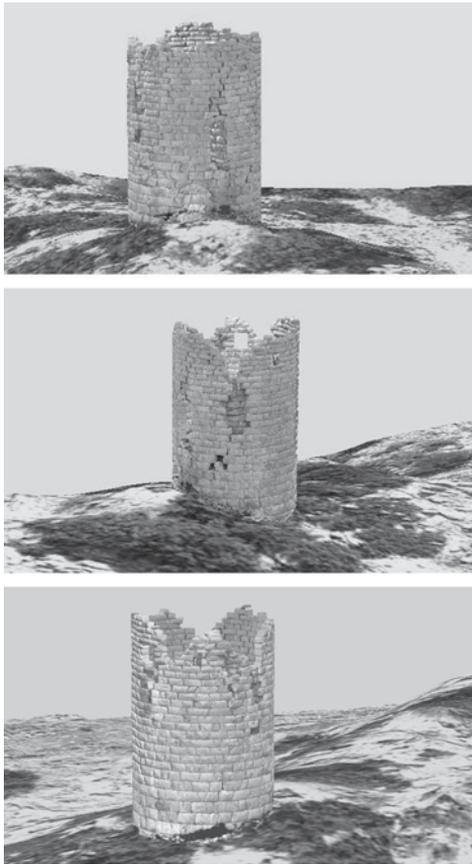
Der eben umschriebene Abwicklungs- und Visualisierungsvorgang wurde in drei Fällen angewandt.

Beispiel 1: *Kleiner zylindrischer Wasserturm*

Das Objekt, dessen Höhe 2,5 m beträgt, besitzt einen Radius von 1,25 m; sein Kronenradius ist 1,35 m. Es wurde von 6 Standpunkten auf 35 mm-Film mit einer Brennweite von 70 mm erfasst. Der ausgleichende Zylinder stützte sich auf 24 Passpunkte und zeigte eine mittlere Radialabweichung von



**Abb. 2:** Antiker zylindrischer Turm auf der Insel Icaria im Ägäischen Meer.



**Abb. 3:** Foto-texturierte Bilder des Turms der Abb. 2.

ungefähr 1 cm. Die 2D-Ähnlichkeitstransformation zwischen Mosaik und „abgewickelten“ Passpunkten erlaubte eine Genauigkeitsschätzung von 1 cm auf der Abwicklungsebene (KARRAS et al. 1996). Zwei Ansichten des photorealistischen VRML-Modells sind in Abb. 1 (rechts) wiedergegeben. Zusätzlich sieht man auch zwei der 6 Originalaufnahmen (Abb. 1, links).

#### Beispiel 2: Antiker zylindrischer Turm

Die Verfasserin wurde vom griechischen Kultusministerium mit der digital-photogrammetrischen Auswertung im Maßstab 1 : 25 der äußeren zylinderförmigen Oberfläche eines archäologisch bedeutenden

antiken Turmes beauftragt (~ 300 v. Chr.). Das Monument, mit einem äußeren Durchmesser von 8,5 m und einer Höhe von 12 m, befindet sich auf relativ flachem Gelände in einer isolierten Gegend der Insel Ikaria im Ägäischen Meer und ist nur zu Fuß zugänglich.

Der Turm hat schwere Deformationen erlitten, die sich stellenweise als erhebliche Abweichungen vom idealen Zylinder ausdrücken. Trotz der Ausschaltung dieser Stellen vom Ausgleichsvorgang, an dem 90 Passpunkte teilnahmen, betrug die mittlere Radialabweichung 6,8 cm, was zum Teil den stark gewölbten Steinen zuzuschreiben ist. Zum Zweck der Frontalaufnahme wurde eine leichte 35 mm-Kamera mittels einer zusammensteckbaren Angelrute gehoben, die durch zusätzliche Stangen bis zu einer Höhe von 9 m reichen kann (Abb. 2, links) und Aufnahmen guter Qualität im mittleren Maßstab ~ 1 : 300 ermöglichte (Abb. 2, Mitte und rechts). Durch dieses Mittel wurde der Turm in zwei Höhen von jeweils 8 Standpunkten aus fotografiert, wobei für jedes Bild nicht weniger als 15 Passpunkte vorhanden waren. Alle Bilder wurden danach mit einer Pixelgröße im Objekt-Abwicklungsraum von 2,5 mm abgewickelt und interaktiv geometrisch und radiometrisch zu einem Mosaik vereinigt. Das Mosaik wurde zuletzt den Passpunkten durch Affintransformation mit einer mittleren Abweichung um 3 cm angepasst. Diese Genauigkeitsschätzung beschränkt sich lediglich auf die Passpunkte, die den ausgleichenden Körper bestimmen, d. h. die Fehler an den Stellen der Deformation können nicht genau geschätzt werden (THEODOROPOULOU et al. 2001). Die Genauigkeitsabweichung von 3 cm ist zwar zu groß für den gewünschten Maßstab, aber von vornherein lag es fest, dass man wegen der Objektabweichungen vom „Soll-Zustand“ mit einem solchen Fehler rechnen musste.

Das 3D-Zylindermodell wurde mit der Textur des Abwicklungsmosaiks überlagert und maßstabsgerecht auf das geodätisch gemessene, ebenfalls foto-texturierte Gelände angepasst (KARRAS et al. 2001). In Abb. 3 sind Ansichten des VRML-Modells zu sehen.

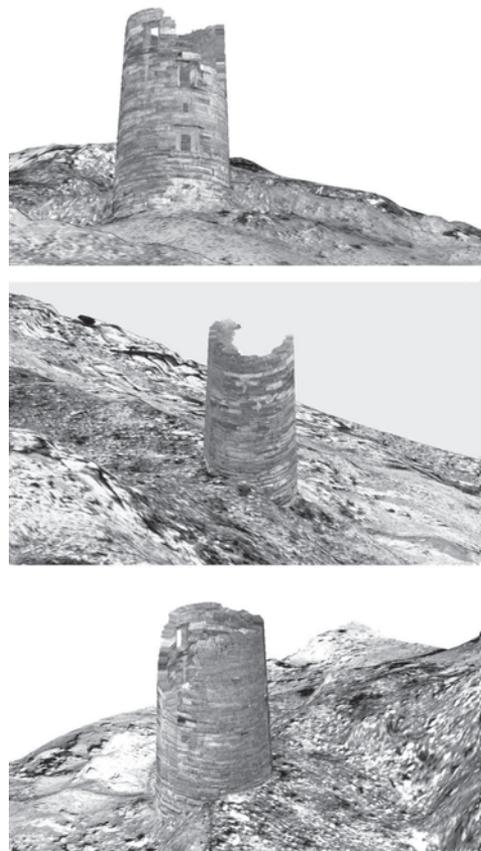


**Abb. 4:** Kegelförmiger antiker Turm auf der Insel Andros im Ägäischen Meer.

### Beispiel 3: *Antiker kegelförmiger Turm*

Ein weiterer Auftrag seitens des griechischen Kultusministeriums betraf die photogrammetrische Auswertung eines anderen, in diesem Fall kegelförmigen Turmes der gleichen Epoche, ebenfalls im Maßstab 1 : 25. Die äußeren Durchmesser dieses Turmes betragen etwa 10 m am Fuß und 8,5 m am oberen Rand, während seine Höhe bis zu 19 m reicht. Das Monument, das ebenfalls nur zu Fuß zugänglich ist, liegt auf der Insel Andros im Ägäischen Meer auf steil abfallendem Gelände.

Auch hier kann man erhebliche, die Regelmäßigkeit der Turm-Oberfläche störende Deformationen feststellen, die von der Ausgleichung ausgeschlossen wurden. Die mittlere Abweichung aus 200 Objektpunkten betrug 5,2 cm normal zu der Oberfläche. Wegen der Höhe des Turmes erwies sich hier der Einsatz des obengenannten Kameraträgers als unpraktisch. Stattdessen wurden eine klein- und eine mittelformatige Kamera mit verschiedenen Zoom-Objektiven benutzt, um den Turm möglichst frontal aus der hügeligen Umgebung aufzunehmen. Man schaffte es sogar auch aus sehr großen Entfernungen zu fotografieren, dank einer Brennweite von fast 1 m, wie sie aus dem Zusammenwirken eines 300 mm Tele-Objektivs mit zwei 1,4 × bzw. 2 × Tele-Konver-



**Abb. 5:** Foto-texturierte Bilder des Turms der Abb. 4.

tern resultierte. Das Monument wurde auf diese Weise von 7 Standpunkten aus zwei Höhen aufgenommen. Auch hier waren für jedes Bild viele Passpunkte vorgesehen. In Abb. 4 sind eine allgemeine Ansicht (links) und zwei der benutzten Bilder zu sehen. Die Pixelgröße der Abwicklung war ebenfalls 2,5 mm. Der mittlere Restfehler der Affintransformation zwischen Mosaik und Passpunkten betrug 4 cm (THEODOROPOULOU et al. 2001).

Für die erfolgreiche Foto-Texturierung eines 3D-Kegelmodells braucht man, wie schon erwähnt, die „gekrümmte“ Form des Mosaiks nur so umzubilden, dass es das orthogonale Digitalbild völlig ausfüllt. Der Kegel wurde danach auf das Geländemodell orientiert und dessen erheblichen Höhenunterschieden angepasst (KARRAS et al., 2001). In Abb. 5 sind Ansichten des VRML-Modells zu sehen.

## 5 Schlusswort

Regelmäßig gekrümmte Oberflächen kommen in der Architekturphotogrammetrie häufig vor und sind in geeigneten Abbildungen darzustellen. Diese einbildphotogrammetrische Aufgabe kann man in der Regel kostengünstig mit einfachen Mitteln lösen, nämlich mit Amateurkameras und eigener Software. Bisherige Erfahrungen, wie sie auch hier bei der Abwicklung zylinder- und kegelförmiger Türme vorgestellt wurden, sprechen dafür, dass man auch unter ungünstigen Aufnahmebedingungen Produkte hoher Qualität erwarten kann. Die Visualisierung mit Foto-Textur erscheint dann als relativ einfach.

Zum Schluss seien zwei offene Fragen erwähnt. Das Problem der nicht abwickelbaren Oberflächen erscheint komplizierter, insbesondere soweit es die Wahl der geeigneten Projektion betrifft. Eine weitere und vielleicht interessantere Frage würde lauten: wie könnte man eine gekrümmte Oberfläche, die stellenweise von dem entsprechenden analytischen Körper erheblich abweicht, genauer verebnen, nämlich mit Einbeziehung ihrer eigentlich existierenden Form?

## Danksagung

Besonderer Dank wird den Studenten AMALIA DIMAROGONA und STEFANOS KOUROUPIS für ihre Teilnahme an die Vorbereitung der virtuellen Produkte ausgedrückt.

## Literatur

- ABDEL-AZIZ, Y. I. & KARARA, H. M., 1971: Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. ASP Symposium on Close-Range Photogrammetry, Falls Church, Virginia, S. 1–18.
- HEMMLER, M. & WIEDEMANN, A., 1997: Digital rectification and generation of orthoimages in architectural photogrammetry. International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, XXXII, 5C1B: 261–267.
- KARRAS, G. E., PATIAS, P. & PETSAS, E., 1996: Monoplotting and photo-unwrapping of developable surfaces in architectural photogrammetry. International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, XXXI, 5: 290–294.
- KARRAS, G. E., PATIAS, P., PETSAS, E. & KETIPIS, K., 1997: Raster projection and development of curved surfaces. International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, XXXII, 5C1B: 179–185.
- KARRAS, G. E., PETSAS, E., DIMAROGONA, A. & KOUROUPIS, S., 2001: Photo-textured rendering of developable surfaces in architectural photogrammetry. International Symposium on Virtual & Augmented Architecture, Dublin, 21–22 Juni, Springer Verlag, S. 147–158.
- SACHER, G., HEMMLER, M. & SCHEER, A., 1999: Abbildung von Globusoberflächen in die Ebene mit Hilfe digitaler photogrammetrischer Methoden. Der Globusfreund, 47–48: 305–320.
- THEODOROPOULOU, I., 2000: The definition of reference surfaces for architectural photogrammetry. International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, XXXIII, 5: 830–837.
- THEODOROPOULOU, I., PETSAS, E. & KARRAS, G. E., 2001: Digital surface development of large cylindrical and conic structures with a single-image technique. The Photogrammetric Record, 17(97): 25–37.

Anschrift der Verfasserin:

Prof. ELLI PETSAS, Department of Surveying  
Technological Educational Institute of Athens  
GR-12210 Athens, Greece

Tel.: +30 1 8622884, e-mail: petsa@teiath.gr