

Abstract

Two ingredients are necessary to synthesize realistic images: an accurate rendering algorithm and, equally important, high-quality models in terms of geometry *and* reflection properties. In this dissertation we focus on capturing the appearance of real world objects. The acquired model must represent both the geometry and the reflection properties of the object in order to create new views of the object with novel illumination. Starting from scanned 3D geometry, we measure the reflection properties (BRDF) of the object from images taken under known viewing and lighting conditions. The BRDF measurement require only a small number of input images and is made even more efficient by a view planning algorithm. In particular, we propose algorithms for efficient image-to-geometry registration, and an image-based measurement technique to reconstruct spatially varying materials from a sparse set of images using a point light source. Moreover, we present a view planning algorithm that calculates camera and light source positions for optimal quality and efficiency of the measurement process. Relightable models of real-world objects are requested in various fields such as movie production, e-commerce, digital libraries, and virtual heritage.

Kurzfassung

Zur Synthetisierung realistischer Bilder ist zweierlei nötig: ein akkurates Verfahren zur Beleuchtungsberechnung und, ebenso wichtig, qualitativ hochwertige Modelle, die Geometrie *und* Reflexionseigenschaften der Szene repräsentieren. Die Aufnahme des Erscheinungsbildes realer Gegenstände steht im Mittelpunkt dieser Dissertation. Um beliebige Ansichten eines Gegenstandes unter neuer Beleuchtung zu berechnen, müssen die aufgenommenen Modelle sowohl die Geometrie als auch die Reflexionseigenschaften beinhalten. Ausgehend von einem eingescannten 3D-Geometriemodell, werden die Reflexionseigenschaften (BRDF) anhand von Bildern des Objekts gemessen, die unter kontrollierten Lichtverhältnissen aus verschiedenen Perspektiven aufgenommen wurden. Für die Messungen der BRDF sind nur wenige Eingabebilder erforderlich. Im Speziellen werden Methoden vorgestellt für die Registrierung von Bildern und Geometrie sowie für die bildbasierte Messung von variierenden Materialien. Zur zusätzlichen Steigerung der Effizienz der Aufnahme wie der Qualität des Modells, wurde ein Planungsalgorithmus entwickelt, der optimale Kamera- und Lichtquellenpositionen berechnet. Anwendung finden virtuelle 3D-Modelle beispielsweise in der Filmproduktion, im E-Commerce, in digitalen Bibliotheken wie auch bei der Bewahrung von kulturhistorischem Erbe.

Summary

One central problem in computer graphics is synthesizing realistic images that are indistinguishable from real photographs. The basic theory behind rendering such images has been known for a while and has been turned into a broad range of rendering algorithms ranging from slow but physically accurate frameworks to hardware-accelerated, real-time applications that make a lot of simplifications. One fundamental building block to these algorithms is the simulation of the interaction between incident illumination and the reflective properties of the scene. The limiting factor in photo-realistic image synthesis today is not the rendering per se but rather modeling the input to the algorithms. The realism of the outcome depends largely on the quality of the scene description passed to the rendering algorithm. Accurate input is required for geometry, illumination and reflective properties. An efficient way to obtain realistic models is through measurement of scene attributes from real-world objects by *inverse rendering*. The attributes are estimated from real photographs by inverting the rendering process.

Work on acquisition of realistic 3D objects is described in this dissertation. The first algorithm is devoted to a high-precision registration of input images to a scanned 3D geometry model of the object. This automatic method is based on the silhouette of the object observed in the images but also considers texture information. The registration maps the images as textures onto the geometry in such a way that fine detail present in multiple images is precisely aligned. The resulting texture represents the object's appearance under fixed illumination.

One way to achieve realistic rendering under novel viewing and lighting conditions requires measuring the reflection properties of the surface (technically, the *bidirectional reflectance distribution function* or BRDF). It is necessary to reproduce variation in the diffuse and in the specular part of the BRDF across the surface. *Image-based BRDF measurement* estimates these properties from real images of the object from various view points under different illumination conditions. In a new algorithm we capture spatially varying BRDFs from a small set of input images using a point light source, and excluding other sources of illumination from the environment. Reliable reflection properties are obtained by fitting a BRDF model to measured samples of whole clusters of surface points belonging to the same material. Spatial variation in the diffuse and the specular part is recovered as a per-pixel linear combination of cluster BRDFs.

The quality of the estimated BRDF parameters depends on the selected camera and light source positions. We measure the quality as the uncertainty of the parameter estimation with respect to the input images. By analyzing the uncertainty it is possible to determine viewing and lighting directions that are optimal for the measurement. We integrate these insights into a view planning algorithm that captures reflection properties of real-world objects more efficiently than an

unplanned series of input images. The planning algorithm guides experts and non-experts alike through the acquisition process and ensures that the BRDF is captured with almost the same quality for all surface points.

In conclusion, we have developed several techniques to capture the appearance of real-world objects. Spatially varying per-pixel reflection properties are recovered from images in an efficient acquisition process resulting in realistic, reliable models of high quality.

Zusammenfassung

Ein zentrales Problem in der Computergraphik ist die Berechnung realistischer Bilder, die von einer Photographie kaum zu unterscheiden sind. Die grundlegende Theorie zur Berechnung solcher Bilder ist seit langem bekannt und führte zur Entwicklung einer Reihe von Algorithmen zur Beleuchtungsberechnung. Diese reichen von langsamen, aber genauen, physikalisch fundierten Methoden bis hin zu Hardware-beschleunigten Verfahren, die viele vereinfachende Annahmen treffen. Die Simulation von Reflexionen an Oberflächen ist dabei wesentlicher Bestandteil dieser Verfahren. Der beschränkende Faktor bei der Berechnung photorealistischer Bilder ist heutzutage weniger die Beleuchtungsberechnung an sich als vielmehr die Modellierung der Eingabedaten. Der Realitätsnähe der erzeugten Bilder wird hauptsächlich von der Qualität der Szenenbeschreibung beeinflusst, die als Eingabe dient. Genaue Angaben über die Geometrie, die einfallende Beleuchtung und die Reflexionseigenschaften der zu berechnenden Szene sind nötig. Diese Attribute können mit *bildbasierten* Verfahren effizient aus Photographien ermittelt werden. Realistische Modelle von realen Gegenständen werden bestimmt, indem man den Syntheseprozess umkehrt (engl. *inverse rendering*). Die vorliegende Arbeit beschreibt Verfahren zur Akquisition realistischer 3D-Modelle.

Der erste Algorithmus ermöglicht eine sehr genaue Registrierung der Eingabebilder zu gemessenen 3D-Geometriemodellen. Der Algorithmus berücksichtigt dabei sowohl die Silhouette des Objekts im Bild als auch die ermittelte Texturinformation. Durch die Registrierung können die Bilder so genau als Textur auf die Geometrie abgebildet werden, dass auch sehr feine Strukturen aus unterschiedlichen Bildern nach der Projektion übereinstimmen. Die berechnete Textur repräsentiert das Erscheinen des Objekts unter den festen Beleuchtungsverhältnissen, die während der Aufnahme gewählt wurden.

Um beliebige Ansichten des Objekts unter beliebiger Beleuchtung korrekt darstellen zu können, müssen die Reflexionseigenschaften in Form der so genannten BRDF (engl. *bidirectional reflectance distribution function*) gemessen werden. Da die Reflexionseigenschaften auf der Oberfläche beliebig variieren können, ist es notwendig, Änderungen sowohl im diffusen als auch im spekularen Anteil der BRDF zu berücksichtigen. Mit Hilfe von bildbasierten BRDF-Messungen werden die Reflexionseigenschaften an Hand von Bildern des Objekts gemessen, die unter kontrollierten Lichtverhältnissen aus verschiedenen Ansichten aufgenommen wurden. In einem neuen Verfahren wird die BRDF heterogener Objekte aus wenigen Aufnahmen gemessen, bei denen eine einzige Punktlichtquelle das Objekt beleuchtet. Durch die Anpassung eines BRDF-Modells an alle Messwerte von Oberflächenpunkten, die zu dem selben Basismaterial gehören, werden die Reflexionseigenschaften zuverlässig bestimmt. Räumliche Änderungen der Reflexionseigenschaften werden als Linearkombination der Basis-BRDFs für jeden

Punkt einzeln ausgedrückt.

Die zur Aufnahme ausgewählten Positionen von Kamera und Lichtquelle beeinflussen die Qualität der berechneten BRDF. Wir bestimmen die Qualität durch Messung der Unsicherheit der ermittelten BRDF-Parameter in Abhängigkeit von den Eingabebildern. Die Analyse der Unsicherheit erlaubt somit die Berechnung optimaler Blick- und Lichtrichtungen für die Messung. Hierauf basierend wurde ein Planungsalgorithmus entwickelt, mit dessen Hilfe die Reflexionseigenschaften effizienter gemessen werden können als durch eine ungeplante Aufnahmeserie. Der Planungsalgorithmus unterstützt den Anwender während des Aufnahmevorganges und stellt sicher, dass die BRDF für alle Oberflächenpunkte des Objekts in annähernd gleicher Qualität bestimmt wird.

Zusammenfassend wurden mehrere Methoden entwickelt, um das Erscheinungsbild realer Objekte zu akquirieren. Durch einen effizienten, bildbasierten Aufnahmevorgang werden für jeden Oberflächenpunkt Reflexionseigenschaften gemessen. Die resultierenden Modelle erlauben, Ansichten des virtuellen Objekts unter beliebiger Beleuchtung in hoher Qualität zu synthetisieren.