

## Sammanfattning

### Engelska:

Light scattering in turbid media is essential for such diverse applications as paper and print, computer rendering, optical tomography, astrophysics and remote sensing. This thesis investigates angular variations of light reflected from plane-parallel turbid media using both mathematical models and reflectance measurements, deals with several applications and proposes novel computational methods for solving the governing equations.

Angular variations of light reflected from plane-parallel turbid media is studied using both mathematical models and reflectance measurements. It is found that the light is reflected anisotropically from all media encountered in practice, and that the angular variations depend on the medium absorption and transmittance and on the angular distribution of the incident light. If near-surface bulk scattering dominates, as in strongly absorbing or highly transmitting media or obliquely illuminated media, relatively more light is reflected in large polar (grazing) angles. These results are confirmed by measurements using a set of paper samples. The only situation with isotropic reflectance is when a non-transmitting, non-absorbing medium is illuminated diffusely, and it is shown that this is the only situation where the widely used Kubelka-Munk model is exactly valid.

A number of applied problems is studied, including reflectance measurements, angle resolved color and point spreading. It is seen that differences in instrument detection and illumination geometry can result in measurement differences. The differences are small and if other sources of error - such as fluorescence and gloss - are not eliminated, the differences related to instrument geometry become difficult to discern. Furthermore, the dependence of point spreading in turbid media on the medium parameters is studied. The asymmetry factor is varied while maintaining constant the optical response in a standardized measurement geometry. It is seen that the point spreading increases as forward scattering becomes more dominant, and that the effect is larger if the medium is low-absorbing with large mean free path. It is argued that the directional inhomogeneity of the scattering medium must be captured by the model to reproduce experimental results. Finally, the angle resolved color of a set of paper samples is assessed both theoretically and experimentally. The chroma decreases and the lightness increases as the observation polar angle increases. The observed differences are clearly large, and a modification of the  $L^*a^*b^*$  formalism including angle dependent chromatic adaptation is suggested here to handle this situation.

The long standing issue of parameter dependence in the Kubelka-Munk model is partially explained by recognizing that light reflected from paper samples in standardized measurements has angular variations, and by using the appropriate model in the calculation of the scattering and absorption coefficients.

The radiative transfer (RT) equation is solved with a recently proposed particle method (DFPM), both in standard cases and in cases previously considered intractable. Fluorescence is added to the RT equation, thus including wavelength as an additional dimension, and this equation is solved using DFPM. The discrete RT equation can be written as a system of linear equations, and a comprehensive analysis of the convergence properties of DFPM when solving this type of problems is presented.

### Svenska:

Ljusspridning är viktigt inom så vitt skilda områden som papper och tryck, datorrendering, tomografi, astrofysik och fjärranalys. Denna avhandling behandlar vinkelmässiga variationer hos ljus som reflekteras från planparallella medier, med hjälp av både mätningar och matematiska modeller, samt undersöker flera tillämpningar och föreslår nya beräkningsmetoder för att lösa ingående ekvationer.

Vinkelmässiga variationer hos ljus som reflekteras från planparallella medier studeras med både matematiska modeller och reflektansmätningar. Det visas att ljus reflekteras anisotropiskt från alla förekommande medier, och att de vinkelmässiga variationerna beror på mediets absorption och transmittans och på vinkelfördelningen hos det infallande ljuset. Om yt nära bulkspridning dominerar, som i kraftigt absorberande eller transmitterande medier och i medier med snett infallande ljus, så ökar den relativa mängden ljus som reflekteras i stora polära vinklar (närmare mediets yta). Dessa resultat bekräftas med reflektansmätningar på ett antal pappers-prover. Det enda fallet då ljus reflekteras isotropiskt är då ett icke-transmitterande, icke-absorberande medium belyses diffust, och det visas att detta är det enda fallet då den kända Kubelka-Munk modellen är exakt giltig.

Ett antal tillämpade problem studeras, inkluderande reflektansmätningar, vinkel-upplöst färg och punktspridning. Det visas att skillnader i instruments detektor- och belysningsgeometri kan ge upphov till mätskillnader. Dessa skillnader är små och om andra felkällor - som fluorescens och glans - inte elimineras, så blir de geometrirelaterade skillnaderna svåra att urskilja. Vidare så studeras hur punktspridning beror på det spridande och absorberande mediets parametrar. Asymmetrifaktorn varierar medan uppmätt mätvärde i en standardiserad mätgeometri hålls konstant. Man ser att punktspridningen ökar när mediet är mer framåtspridande, och att effekten är större om mediet är lågabsorberande med stor medelfri väg. Det föreslås att den modell som används måste beskriva de laterala skillnader som kan finnas i mediet för att stämma med experiment. Slutligen så undersöks den vinkelupplösta färgen hos en mängd pappersprover både teoretiskt och experimentellt. Färgmättnaden minskar och ljusheten ökar när betraktningvinkeln ökar och närmar sig mediets yta. De iakttagna skillnaderna är uppenbart stora, och en förändring av  $L^*a^*b^*$ -formalismen som inbegriper vinkelberoende kromatisk adaptation föreslås för att hantera denna situation.

Den sedan länge diskuterade frågan om parameterberoende i Kubelka-Munk-modellen förklaras delvis genom att ta hänsyn till att ljus som reflekteras från papper i

standardiserade mätningar är anisotropt, och genom att använda tillämpliga modeller för att beskriva detta när mediets spridnings- och absorptionskoefficienter beräknas.

Strålningstransportekvationen löses med en ny partikelmetod (DFPM), både i standardfall och i fall som andra metoder inte kan hantera. Fluorescens inkluderas i ekvationen som löses med DFPM. Den diskretiserade strålningstransportekvationen kan skrivas som ett system av linjära ekvationer, och en omfattande analys av DFPMs konvergensgenskaper för denna typ av problem presenteras.