

## 2-2 レンダリング

金田和文

広島大学 大学院工学研究院

### 1. はじめに

レンダリング技術はリアルな表現を追究して様々な方向に進化してきている。本稿では主に SIGGRAPH と EUROGRAPHICS で発表された論文を大きく三つに分類してまとめる。(1)リアルタイムやインタラクティブな応用に向けて高速化を指向する手法、(2)表示モデルに磨きをかけることにより更にリアリティを追究する手法、(3)人の視覚特性を利用したアプローチによりリアリティ実現を目指す手法である。更に、新たな分野として活発に研究が進められているコンピューショナルフォトグラフィーや、従来から活発に研究が続けられている炎、煙、水などの流体や布地の表現などについても述べる。

### 2. リアルタイム・インタラクティブ指向

時間のかかるレンダリング処理を高速化する手段として、アルゴリズムの改良をはかるアプローチと GPU などのグラフィックスハードウェアを巧みに利用する方法があり、後者の研究が主流を占めている。また、ユーザがレンダリングに介入して意に叶う映像制作の手助けを目指す研究も注目を集めている。

#### 2.1 GPU による高速化

GPU を利用した高速化として、フォトンマッピングのギャザリング処理を GPU により並列実行する手法<sup>1)</sup>や、大域照明計算部に GPU を活用する手法<sup>2)</sup>がある。いずれの手法ともインタラクティブレートでの画像生成を実現している。半透明物体での散乱光の計算においても、物質内部と外部を結ぶパスを高速に求めることにより高速化を実現する手法を開発し、GPU 上にインプリメントを行っている<sup>3)</sup>。また、レイトレーシングやフォトンマッピングにおいて要素技術となっているバウンディングボリュームの階層化(BVH)や kd-tree を GPU により高速作成・構築する手法も提案されている<sup>4),5)</sup>。

#### 2.2 インタラクティブアプリケーション指向

ユーザがインタラクティブに画像中の影や映り込みな

どを修正して、シェーディングにそれを反映させる方法が開発されている<sup>6),7)</sup>。これらの手法もインタラクティブ性を確保するために GPU を利用している。また、PRT(Pre-computed Radiance Transfer)により高速性を確保し、容易に操作できるユーザインタフェースを用いて照明条件や物質特性を変えながら画像生成を行う手法も提案されている<sup>8)</sup>。

#### 2.3 焦点ぼけ・ブレ・コースティックス

GPU を利用してレンズによる焦点ぼけをリアルタイムで表示する手法が開発されている<sup>9),10)</sup>。また、動きによるブレを周波数空間でのせん断(shear)として処理することにより高速化をはかる手法が提案されている<sup>11)</sup>。焦点ぼけとブレを同時に取り扱うことのできる高速表示手法も開発されている<sup>12)</sup>。

レンズによる集光効果や光線が空間を通過する際の光跡の表示もレンダリングの計算コストが高い代表的な例である。光線や視線を六次元空間上の点に射影することにより光線探索を高速化し、光跡を含むコースティックスを高速に表示する手法が提案されている<sup>13)</sup>。

#### 2.4 髪

ヘアデザインへの応用などでは髪をリアルかつ高速に表示することが求められる。集合体としての髪の毛は表面下散乱を起こす物質として取り扱われ計算コストが高い。環境光を球面動径基底関数(SRBF)に展開し、単散乱と多重散乱を前計算によりテーブル化することにより、環境光下でのリアルな髪をインタラクティブに表示する手法が開発されている<sup>14)</sup>。また、アニメ制作向けの手法として、髪の毛の表示を三つの輝度成分(反射、透過-反射-透過、透過)に分けて計算することにより、高速性とアーティストの要望に応えるシェーディングを実現している<sup>15)</sup>。

### 3. 物理/実験に基づく表示モデル

リアルな表示のためには光と物質とのインタラクションをどのようにモデル化するかが重要となる。これまで物理則に基づく多くの表示モデルが開発されてきた。し

## 2-2 レンダリング

かし、表示パラメータが既知である物質はそれほど多くなく、様々な物質の表示に困難をきたしていた。一方、計測や実験データに基づく表示モデルでは、様々な物質のリアルな表示を実現できる。近年は半透明物質や人の肌などの表面下散乱物質のレンダリングが注目を集めている。また、モニタディスプレイでなく、3Dプリンタなどの従来とは異なる出力媒体を利用する試みもなされている。更に、強力なレンダリング手法であるフォトンマッピング法の進展についてもふれる。

### 3.1 表面下散乱・異方性反射

物理則に基づくレンダリングとビジュアライゼーション分野でのボリュームレンダリングの融合を目指し、異方性の散乱特性をもつ物質の表示を行う手法が提案されている<sup>16)</sup>。シミュレーション結果や実験に基づいた表面下散乱表示モデルも提案されている<sup>17)</sup>。層状反射モデルにより人の肌をリアルに表示する手法も開発されている<sup>18),19)</sup>。これらの手法は実際の肌を撮影することにより各層での反射率や表示パラメータを取得している。

異方性反射をもつ金属面のSVBRDF(表面位置もパラメータに含めた六次元のBRDF)を計測しテーブル化することにより金属面をリアルに表示する手法が開発されている<sup>20)</sup>。

### 3.2 ものづくり

物質の表面下散乱光を計測し、食品サンプルなどのような表面下散乱を伴う製品を3Dプリンタ出力で実際に作成する試みが行われている<sup>21),22)</sup>。これらの研究では限られた出力用素材で様々な表面下散乱特性を実現することに工夫がなされている。また、指定したBRDFをもつ反射面をフライス盤を使って作る手法<sup>23)</sup>や、インクを組み合わせる金属のような光沢感・質感を近似出力する手法<sup>24)</sup>も提案されている。

### 3.3 フォトンマッピング

光の反射・屈折・散乱やコースティックスなどを取り扱える大域照明モデルであるフォトンマッピング法は最も強力なレンダリング手法の一つである。その拡張として漸進的フォトンマッピング法が開発されている<sup>25)</sup>。この手法は漸進的ラジオシティ法に類似して、最初はレイトレーシングで、フォトンのトレースを続けていき徐々に精度を向上させる。焦点ぼけやブレそして光沢面の反射効果などを効率的に表示できるよう改良されている<sup>26)</sup>。また、ブルーノイズのスペクトルパターンとなるようフォトン再分配するアプローチにより画像中のノイズを減少させる手法も提案されている<sup>27)</sup>。

## 4. 視覚特性

映像情報の受け手は人であり、人の視覚特性はコンピ

ュータグラフィックス(CG)においてますます重要となってきた。EUROGRAPHICS 2010でのReinhardによる基調講演でもこのことが話題となっている<sup>28)</sup>。CGと視覚特性との関連は、色調再現や色の見えのモデルにはじまり、心理物理学実験による調査や性能評価、視覚特性をうまく利用した手法やシステムなど幅広い。

### 4.1 トーンマッピング

人の色知覚を考慮してハイダイナミックレンジ画像(HDRI)を変換する手法が提案されている<sup>29),30)</sup>。また、高輝度物体を見たときに生じるグレアを瞳孔やまつ毛による光の回折と眼球内での光の散乱を考慮して表現する手法も提案されている<sup>31)</sup>。視差による奥行き感を調整・変更する手法も開発され<sup>32)</sup>、TMO(Tone Mapping Operator)に対抗してDMO(Display Mapping Operator)と呼称している。ローダイナミックレンジ画像(LDRI)からHDRIへの変換手法(rTMO)も開発されており、それらの手法の性能評価が行われている<sup>33)</sup>。

### 4.2 心理物理学的実験

心理学的テストを開発して明るさや材質感の知覚の違いを調査<sup>34)</sup>したり、知覚テストにより表示パラメータの選定を行う手法<sup>35)</sup>が提案されている。また、物質の反射特性を簡単な操作で変更するシステムを開発し、心理物理学的実験によりその評価を行っている<sup>36)</sup>。

### 4.3 視覚特性の利用

視覚特性を巧みに利用した興味深い研究も行われている。陰影画像から実物のレリーフを作成する手法を開発し、光を当てる方向により異なる像が現れる合成レリーフを製作している<sup>37)</sup>。ディスプレイの表示フレームごとに表示画像を変えて高解像度画像を通常の表示よりも高解像度に見えるように表示する方法<sup>38)</sup>や、リフレッシュレートの高いディスプレイで動きのブレのより良い表示法<sup>39)</sup>も提案されている。

## 5. 新たな分野・活性分野

従来の写真の枠組みを大きく変えるコンピュータショナルフォトグラフィーの新たな可能性がEUROGRAPHICS 2009の基調講演で話題となっている<sup>40)</sup>。更に、流体や布地の動きのシミュレーションも活発に研究が行われている分野である。

### 5.1 コンピュータショナルフォトグラフィー

通常のカメラ画像あるいはカメラに付加装置を付けて撮影した画像から焦点ぼけやブレなどを補正する種々の手法が提案されている。ブレ補正では異なる露出時間の画像を用いて動きによるブレを取り除く手法<sup>41)</sup>や、ジャイロスコープと加速度センサをカメラに装着しブレ補正を行う手法<sup>42)</sup>などがある。焦点ぼけを補正し被写

界深度(DOF)の深い画像を得る手法として、格子状のレンズやディフューザをカメラレンズに取り付けて撮影した画像からぼけを除去してパンフォーカス画像を得る手法が提案されている<sup>43),44)</sup>。画像とあわせてデプスマップも同時に取得する手法も提案されている<sup>45)</sup>。この手法では撮影時にRGBのカラーフィルタを使用する。更に、ポータブルでプログラマブルなコンピュータショナルフォトグラフィー用カメラのアーキテクチャも提案されている<sup>46)</sup>。

## 5.2 流体・布地

ミルククラウンなどのシート状になった液体の動きや、水しぶきや気泡を含む流体の表示法が研究されている。前者については、スケールを変えた2段階のシミュレーションにより表面張力を考慮して高速表示を可能とする手法<sup>47)</sup>や、後者では水しぶきと気泡の両者を考慮したシミュレーション法<sup>48)</sup>が提案されている。渦流を含む煙の流れ<sup>49)</sup>やGPUを用いた炎の高速表示手法<sup>50)</sup>も提案されている。また、ビデオ映像をもとにユーザの介入により所望のアニメーション(炎, 煙, 水流)を作成できる手法も開発されている<sup>51)</sup>。

布地の表現では、動く人体にフィットしてしわなどが変化する様相を高速に表示する手法が開発されている<sup>52)</sup>。

## 参考文献

- 1) T. Ritschel, et al.: "Micro-Rendering for Scalable, Final Gathering", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH ASIA), Vol. 28, No. 5, # 132(2009).
- 2) R. Wang, et al.: "An Efficient GPU-based Approach for Interactive Global Illumination", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH), Vol. 28, No. 3, # 91(2009).
- 3) B. Walter, et al.: "Single Scattering in Refractive Media with Triangle Mesh Boundaries", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH), Vol. 28, No. 3, # 92(2009).
- 4) C. Lauterbach, et al.: "Fast BVH Construction on GPUs", Computer Graphics Forum(EUROGRAPHICS), Vol. 28, No. 2, pp. 375-384(2009).
- 5) K. Zhou, et al.: "Real-Time KD-Tree Construction on Graphics Hardware", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH ASIA), Vol. 27, No. 5, # 126(2008).
- 6) T. Ritschel, et al.: "Interactive On-Surface Signal Deformation", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 36(2010).
- 7) T. Ritschel, et al.: "Interactive Reflection Editing", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH ASIA), Vol. 28, No. 5, # 129(2009).
- 8) F. Pellacini: "envyLight: An Interface for Editing Natural Illumination", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 34(2010).
- 9) S. Lee, et al.: "Depth-of-Field Rendering with Multiview Synthesis", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH ASIA), Vol. 28, No. 5, # 134(2009).
- 10) S. Lee, et al.: "Real-Time Lens-Blur Effects and Focus Control", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 65(2010).
- 11) K. Egan, et al.: "Frequency Analysis and Sheared Reconstruction for Rendering Motion Blur", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH), Vol. 28, No. 3, # 93(2009).
- 12) Q. Hou, et al.: "Micropolygon Ray Tracing With Defocus and Motion Blur", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 64(2010).
- 13) X. Sun, et al.: "Line-Space Gathering for Single Scattering in Large Scenes", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 54(2010).
- 14) Z. Ren, et al.: "Interactive Hair Rendering Under Environment Lighting", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 55(2010).
- 15) I. Sadeghi, et al.: "An Artist-Friendly Hair Shading System", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 56(2010).
- 16) W. Jakob, et al.: "A Radiative Transfer Framework for Rendering Materials With Anisotropic Structure", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 53(2010).
- 17) C. Donner, et al.: "An Empirical BSSRDF Model", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH), Vol. 28, No. 3, # 30(2009).
- 18) A. Ghosh, et al.: "Practical Modeling and Acquisition of Layered Facial Reflectance", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH ASIA), Vol. 27, No. 5, # 139(2008).
- 19) C. Donner, et al.: "A Layered, Heterogeneous Reflectance Model for Acquiring and Rendering Human Skin", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH ASIA), Vol. 27, No. 5, # 140(2008).
- 20) Y. Dong, et al.: "Manifold Bootstrapping for SVBRDF Capture", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 98(2010).
- 21) M. Hasan, et al.: "Physical Reproduction of Materials With Specified Subsurface Scattering", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 61(2010).
- 22) Y. Dong, et al.: "Fabricating Spatially Varying Subsurface Scattering", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 62(2010).
- 23) T. Weyrich, et al.: "Fabricating Microgeometry for Custom Surface Reflectance", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH), Vol. 28, No. 3, # 32(2009).
- 24) W. Matsusik, et al.: "Printing Spatially-Varying Reflectance", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH ASIA), Vol. 28, No. 5, # 128(2009).
- 25) T. Hachisuka, et al.: "Progressive Photon Mapping", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH ASIA), Vol. 27, No. 5, # 130(2008).
- 26) T. Hachisuka and H. W. Jensen: "Stochastic Progressive Photon Mapping", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH ASIA), Vol. 28, No. 5, # 141(2009).
- 27) B. Spencer and M. W. Jones: "Into the Blue: Better Caustics through Photon Relaxation", Computer Graphics Forum(EUROGRAPHICS), Vol. 28, No. 2, pp. 319-328(2009).
- 28) E. Reinhard: "More than a Quick User Study: Perception in Computer Graphics", Computer Graphics Forum(EUROGRAPHICS), Vol. 29, No. 2, p. xix(2010).
- 29) M. H. Kim, et al.: "Modeling Human Color Perception under Extended Luminance Levels", ACM Trans. on Graphics(SIGGRAPH), Vol. 28, No. 3, # 27(2009).
- 30) R. Mantiuk, et al.: "Color Correction for Tone Mapping", Computer Graphics Forum(EUROGRAPHICS), Vol. 28, No. 2, pp. 193-202(2009).
- 31) T. Ritschel, et al.: "Temporal Glare: Real-Time Dynamic Simulation of the Scattering in the Human Eye", Computer Graphics Forum(EUROGRAPHICS), Vol. 28, No. 2, pp. 183-192(2009).

## 2-2 レンダリング

- 32) M. Lang, et al.: "Nonlinear Disparity Mapping for Stereoscopic 3D", ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 75 (2010).
- 33) B. Masia, et al.: "Evaluation of Reverse Tone Mapping Through Varying Exposure Conditions", ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH ASIA), Vol. 28, No. 5, # 160 (2009).
- 34) J. Wills, et al.: "Toward a Perceptual Space for Gloss", ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), Vol. 28, No. 4, # 103 (2009).
- 35) J. Krivanek, et al.: "Effects of Global Illumination Approximations on Material Appearance", ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 76 (2010).
- 36) W. B. Kerr and F. Pellacini: "Toward Evaluating Material Design Interface Paradigms for Novice Users", ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 35 (2010).
- 37) M. Alexa and W. Matusik: "Reliefs as Images", ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 60 (2010).
- 38) P. Didyk, et al.: "Apparent Display Resolution Enhancement for Moving Images", ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 113 (2010).
- 39) P. Didyk, et al.: "Perceptually-motivated Real-time Temporal Upsampling of 3D Content for High-refresh-rate Displays", Computer Graphics Forum (EUROGRAPHICS), Vol. 29, No. 2, pp. 713-722 (2010).
- 40) F. Durand: "Computation is the New Optics: Coded Imaging in Computational Photography", Computer Graphics Forum (EUROGRAPHICS), Vol. 28, No. 2, p. xvii (2009).
- 41) A. Agrawal, et al.: "Invertible Motion Blur in Video", ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), Vol. 28, No. 3, # 95 (2009).
- 42) N. Joshi, et al.: "Image Deblurring Using Inertial Measurement Sensors", ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 30 (2010).
- 43) A. Levin, et al.: "4D Frequency Analysis of Computational Cameras for Depth of Field Extension", ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), Vol. 28, No. 3, # 97 (2009).
- 44) O. Cossairt, et al.: "Diffusion-Coded Photography for Extended Depth of Field", ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 31 (2010).
- 45) Y. Bando, et al.: "Extracting Depth and Matte Using a Color-Filtered Aperture", ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH ASIA), Vol. 27, No. 5, # 134 (2008).
- 46) A. Adams, et al.: "The Frankencamera: An Experimental Platform for Computational Photography", ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 29 (2010).
- 47) N. Thürey, et al.: "A Multiscale Approach to Mesh-Based Surface Tension Flows", ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 48 (2010).
- 48) V. Mihalef, et al.: "Simulation of Two-phase Flow with Sub-scale Droplet and Bubble Effects", Computer Graphics Forum (EUROGRAPHICS), Vol. 28, No. 2, pp. 229-238 (2009).
- 49) S. Weissmann and U. Pinkall: "Filament-Based Smoke With Vortex Shedding and Variational Reconnection", ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 115 (2010).
- 50) C. Horvath and W. Geiger: "Directable, High-Resolution Simulation of Fire on the GPU", ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), Vol. 28, No. 3, # 41 (2009).
- 51) M. Okabe, et al.: "Animating Pictures of Fluid Using Video Examples", Computer Graphics Forum (EUROGRAPHICS), Vol. 28, No. 2, pp. 677-686 (2009).
- 52) H. Wang, et al.: "Example-Based Wrinkle Synthesis for Clothing Animation", ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH), Vol. 29, No. 4, # 107 (2010).