

機械視覚に基づいたボリュームデータの画像生成法

A Rendering Method of Volume Data Based on Machine Vision

田中法博*

Norihiro Tanaka

本稿では、コンピュータグラフィックスにおいて複雑な表面構造を持つ物体の高品質な映像生成のための機械視覚に基づいたボリュームデータの画像生成手法を提案する。本研究では、まずデジタルカメラの幾何特性や色応答特性を述べる。そして、複雑な表面構造を持つ物体表面のボリュームモデル化手法を述べる。次に、カメラ系を用いて実シーン中の物体の表面反射特性をボリュームモデルに対して獲得する方法を述べる。ここで獲得した各種情報から、ボリュームデータの画像生成法を提案する。ここでは特に人物のコンピュータグラフィックス映像の生成を対象とする。カメラ系で計測したデジタル画像から映像化に必要な情報の獲得方法を提案し、獲得情報に基づいて映像化を行う。今回は、実際の人物画像からではなく、シミュレーション画像から得られたデータからボリュームモデルを用いて人の肌やドレイプなどの映像化を行う。

1. はじめに

近年の映画やゲームなどの分野で用いられている高品質な映像は、コンピュータグラフィックス (CG) 技術に大きく依存してきている。しかしながら、現在の CG 映像は、個人の感性や経験に基づいて制作されていることが多く、その品質は制作者の経験や能力に大きく依存している。このことは高品質な CG 映像を安定して生成できないという問題につながる。こういった背景から計測データから CG 生成に必要な情報を獲得し、その情報に基づいて客観的で安定な映像生成法が注目されている。計測データに基づいて物体を映像化できれば、物体を精密にしかも安定に映像化することができる。

本研究では、特に3次元コンピュータグラフィックス (3DCG) を用いて物体の映像生成を行う。3DCG は、光源、物体、視覚系の三者の幾何的な関係や光源の分光特性、また物体表面の反

射特性をモデル化してコンピュータ上で3次元シーンをシミュレートして物体を映像化する¹⁾。

このため高品質な映像を生成するためには、高い精度のモデルと実シーンの精密な計測データが必要となる。一般的にこういった情報は、カメラ系を用いた画計測から得ることが有効である。この方法の最大の特徴は、計測データが2次元であり、空間解像度が高い情報が得られる。このことは、通常の光センサのような一次元情報と比較して圧倒的に有利な点である^{2)~5)}。

計測データはカメラ系のセンサアレイから得られた2次元画像として得られる。これまで、この画像情報を用いてシーン内の3次元空間から有効な情報を得るために画像理解や画像認識に関する研究が数多くなされてきた^{2)~5)}。こういった研究分野の本来の目的は、コンピュータに視覚を持たせること、つまり機械視覚を実現することである⁶⁾。

しかしながら、2次元の画像情報から、3次元

*産業社会学部助教

空間内のシーンを推定するためには、まだ一次元の未知変数が残るため、数学的にモデル解を決定することができない。これに対して、これまでゴニオメトリックに画像を計測して物体表面の光反射を計測する方法や陰影情報から物体形状を推定し、3次元情報を復元する方法が提案されている⁷⁾。

しかしながら、これらの研究では物体表面は滑らかな曲面を仮定しており、複雑な表面構造の解析には適していない。複雑な物体表面構造の表現には、ボリュームモデル^{8)~11)}が適しているが、これらに光反射解析手法を適用することは難しい。

そこで、本稿では機械視覚に基づき、光反射解析から物体表面反射特性情報を獲得し、その情報を基にボリュームモデルの映像生成手法を提案する。

本稿では、まず3次元シーンの光反射を大域照明モデルと局所照明モデルで記述し、それを撮影するカメラ系の光に対する応答をモデル化する。その後、ボリュームモデルの構築方法を述べ、それをカメラ系から得られた情報に基づいて映像化する方法を述べる。そして、獲得したデータに基づいてCG生成を行い本手法の妥当性を検証する。

2. シーンの映像化モデル

2.1 シーンの映像化プロセス

太陽や電球などの光源から出た光は、物体上で反射されて目に届き、それが脳で解釈されて色として認識する。シーンの映像化は、このプロセスをコンピュータ上でシミュレートして、最終的には画像上の画素の色を決定することである。

この色決定のために3次元シーンの光と物体間の関係をモデル化したものを照明モデルと呼ぶ。この照明モデルは大きく分けて、2種類あり、これらを用いて3次元空間上の物体を画像解析したり、映像再現したりする。まず1つめは、3次元空間内で光源や物体間の光反射の3次元的な関係を記述したものを大域照明モデルと呼ぶ。そして次に、2つめは、物体表面の局所的な反射特性を記述した局所照明モデルを局所照明モデルと呼ぶ。

2.2 大域照明モデル

大域照明モデルとして、本研究ではKajiyaのレンダリング方程式¹⁾を用いる。Kajiyaは、熱力学の理論に基づいて3次元シーン全体を映像化するための光反射をレンダリング方程式として記述した。このモデルは(1)式のように記述されている。

$$I(x, x') = g(x, x')[\varepsilon(x, x') + \int_S \rho(x, x', x'')I(x', x'')dx''] \quad (1)$$

x, x', x'' : サンプル点の位置パラメータ
 $I(x, x')$: x' から x へのエネルギー
 $g(x, x')$: 幾何的条件を与える項
 $\varepsilon(x, x')$: x' から x へのエネルギー
 $\rho(x, x', x'')$: x' での反射率

理論的には、(1)式を解けば、3次元空間内の全ての物体を映像化することができる。しかしながら、この式は解析的に解くことができないため、本研究では後述するレイトレーシングアルゴリズムを用いて近似解を得る。

2.3 局所照明モデル

大域照明モデルに対して、物体表面上の任意点での光反射モデルを述べる。物体表面の色は、局所的な光反射により決まる^{12),13)}。この光反射を数学的にモデル化したものを光反射モデルと呼ぶ^{14)~17)}。物体表面は2色性反射の特性を持つと仮定する^{18),19)}。2色性反射モデルは、次式のように拡散反射と鏡面反射の線形結合で表すことができる。

$$I_l(x) = w_d c_b + w_s e \quad (2)$$

ここで w_d , w_s は、それぞれ拡散反射成分量、鏡面反射成分量となる。また c_b , e は、それぞれ 3×1 の拡散反射成分の色ベクトル、鏡面反射成分の色ベクトルである。

本論文では3次元光反射モデルとしてTorrance-Sparrowモデル¹⁴⁾を採用した。筆者らのこれまでの研究で、Torrance-Sparrowモデルは複雑で多くの未知パラメータを含むものの、非常に高い精度

で光反射を記述していることを検証した⁵⁾。このモデルでは物体表面は、完全鏡面の微小面で構成されており、ハイライトの広がり、この微小面の向の分布であると仮定している。ここで位置パラメータ x に対して次のベクトルが与えられる。 \mathbf{V} は視線ベクトル、 \mathbf{Q} は微小鏡面の法線ベクトルで \mathbf{V} と \mathbf{L} の 2 等分ベクトルとして与えられ、さらに φ は \mathbf{N} と \mathbf{Q} のなす角であり、ハイライト位相角と呼ぶ。Torrance-Sparrow モデルに基づいて輝度値 I_i を記述すると次式のようになる。

$$I_i(x) = w_d \mathbf{c}_b + w_s \mathbf{e} \\ = \alpha \cos(\theta_i) \mathbf{c}_b + \beta \frac{D(\varphi, \gamma) F(\theta_q, n) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{\cos(\theta_r)} \mathbf{e} \quad (3)$$

ここで右辺第 1 項と第 2 項は、それぞれ、拡散反射成分と鏡面反射成分を表わす。 α と β は、拡散反射成分、鏡面反射成分の重み係数である。

さらに第 2 項の鏡面反射成分はいくつかの関数から構成されている。まず、 D は物体表面の表面粗さを示す関数で、 \mathbf{Q} の方向を向く微小面の割合を表現する。この分布関数としてグローバルな面法線 \mathbf{N} を中心とする次式のガウス関数を仮定した。

$$D(\varphi, \gamma) = \exp\{-\ln(2)\varphi^2/\gamma^2\} \quad (4)$$

ここで γ は表面の粗さを表わす指標となる。次に、 F は Fresnel 反射率である。本来、Fresnel 反射率は、屈折率 $n(\lambda)$ 、吸収係数 $k(\lambda)$ といった波長関数をパラメータとして持つ関数であるが、本研究で仮定する不均質誘電体では、 $n(\lambda) = \text{const}$ 、 $k = 0$ とおくことができる。この場合、入射角 θ_q と屈折率 n の関数として次式のように記述できる¹⁶⁾。

$$F(\theta_Q, n) = \frac{1(g - \cos(\theta_Q))^2}{2(g + \cos(\theta_Q))^2} \left\{ 1 + \frac{[\cos(\theta_Q)(g + \cos(\theta_Q)) - 1]^2}{[\cos(\theta_Q)(g - \cos(\theta_Q)) + 1]^2} \right\} \quad (5)$$

ただし $g^2 = n^2 + \cos(\theta_Q) - 1$ である。さらに、 G は物体表面の微小面が互いを遮蔽する割合を決定する関数である。隣接する微小面は、互いに他をマスクしたり、光の当たらない陰ができることができる。この遮蔽の割合は次式で示す。

$$G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L}) = \min \left\{ 1, \frac{2\cos\varphi \cdot \cos\theta_r}{\cos\theta_Q}, \frac{2\cos\varphi \cdot \cos\theta_l}{\cos\theta_Q} \right\} \quad (6)$$

3. カメラモデル

ここではカメラによる撮像系をモデル化する。カメラのモデル化は幾何モデルと色応答モデルの 2 つの立場から行う。

3.1 幾何モデル

3 次元物体は、カメラにより画像平面に透視変換され射影される^{6), 20)}。この射影をモデル化したものが、カメラ系の幾何モデル^{21) ~ 23)}であり、本研究では、この撮像系の幾何モデルに基づいて画像から対象物体の法線情報などの幾何情報を得る。図 1 は、3 次元空間上の物体がカメラにより画像上に射影されている様子を示す。3 次元空間 $[X, Y, Z]$ 上にある物体は、射影変換行列 \mathbf{M} で画像上の 2 次元座標 $[x, y]$ 上に射影される。

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

またカメラ系は理想的なピンホールカメラであり、レンズ系の歪みがないと仮定すると、この変換行列 \mathbf{M} は、カメラの焦点距離 (α_x, α_y) と画像上の光軸点 (x_0, y_0) より記述できる (図 2)。これらのパラメータは、カメラ固有のパラメータである。カメラの射影行列 \mathbf{M} は、これらのパラメータから次式のように記述できる。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & x_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

これを (7) 式に代入して、最終的には次式が得られる。

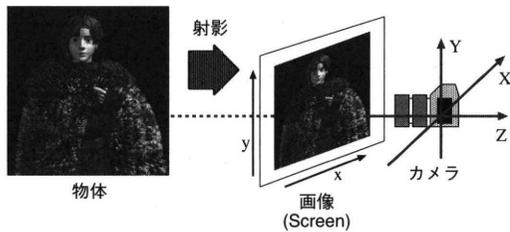


図1 3次元物体の画像への射影

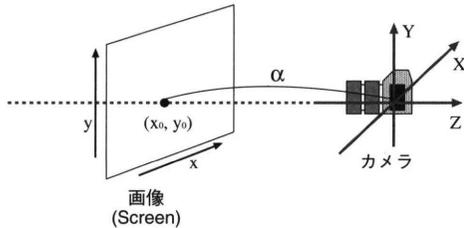


図2 カメラパラメータと射影の関係

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & x_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

3.2 色応答モデル

図3は、反射光に対するカメラの色応答をモデル化したものである。光源から発せられた光は、物体表面で反射した反射光がカメラ系に入力する。CCD センサに入力した光は、照明光が物体表面で反射され、カメラ系のセンサにより感知され感度特性の影響を受ける。最終的にカメラ系に入射した光は RGB の色信号へと変換される。この変換の過程を分光的にモデル化する^{4), 18)}。カメラ系の色応答 $\rho_{R,G,B}$ を数学的にモデル化すると次式のようになる。

$$\rho_{R,G,B} = \int_{400}^{700} S(\lambda)E(\lambda)R_{R,G,B}(\lambda)d\lambda \quad (10)$$

ここで物体表面の分光反射率は、 $S(\lambda)$ 、カメラの分光感度は各 R、G、B センサに対して $R_{R,G,B}(\lambda)$ と記述する。

4. 複雑な表面構造のモデル化

4.1 カメラデータに基づいた映像化

これまで述べた視覚系モデルに基づいて、物体表面の映像化を行う。ただし、人の肌や布による

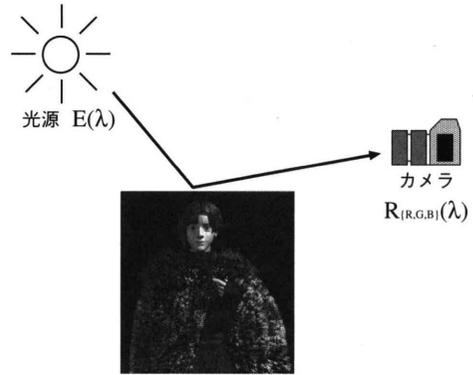


図3 カメラの色応答モデル

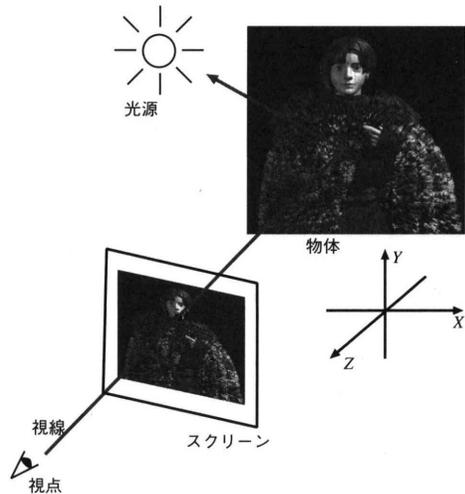


図4 物体の映像化手法(レイトレーシングアルゴリズム)

ドレイプの映像化を行うが、ここでは肌や布の物理的なモデリングは行わず、単純な密度空間の集合であると仮定する。

4.2 ボリュームモデル

物体表面の複雑な表面構造は、先行研究で行った手法を用いる²⁴⁾。ボリューム空間は、三次元空間 $[X, Y, Z]$ 内の部分空間 $[x, y, z]$ として存在する。物体形状は、ボリューム空間内では仮想微粒子の密度分布として表現される⁸⁾。ボリューム空間の映像化は、図4のように視線探索法により行う。

4.3 ボリューム空間の実装

このときボリューム空間は、離散化し3次元配

列で表現し、物体（仮想微粒子）の密度、表面反射特性情報を格納する。この3次元配列で表現されたボリューム空間をボリュームボックスと呼び、ボリュームボックス内に格納されたデータをボリュームデータと呼ぶ。物体表面の微細構造は、このボリュームデータにより記述する。

4.4 ボリューム空間内の輝度計算

ボリューム空間内では空間内部の仮想微粒子の密度に対して輝度計算を行う。この空間内部では、任意の点で密度 $\rho(x, y, z)$ が与えられている。この密度によって、光源からの光は減衰する。光線はそのボリューム空間内の経路 $s_1 \sim s_2$ において、経路に沿って各点の密度 $\rho(x, y, z)$ によって非線型に減衰させられる。このとき、光線の経路上のボリューム空間の透過率 f は次式で与えられる。ボリューム空間を通過して視点に到達する光の輝度 I は次式のように求める。

$$I = \int_{f_{near}}^{f_{far}} \left[\exp\left(-\tau \int_{f_{near}}^t \rho(x(u), y(u), z(u)) du\right) \cdot I_t(x(t), y(t), z(t)) \cdot \rho(x(t), y(t), z(t)) \right] dt \quad (11)$$

4.5 ボリューム空間内に視線方向ベクトル

ボリューム空間内で視線探索を行うためには、ボリューム空間内の3次元情報を獲得する必要がある。これは2次元空間の情報から3次元空間の情報を推定することを意味するが、未知変数の一つ残るため、完全な推定ができない。そのため、絶対的な3次元座標ではなく方向ベクトルのみを推定する。

ここではボリューム空間を貫く視線ベクトルを算出する。この視線ベクトル $\mathbf{v} = [v_x, v_y, v_z]$ は、カメラ系の射影行列を逆変換して求める。

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x - v_0)/\alpha_x \\ (u_0 - y)/\alpha_y \\ 1.0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

ただし、 $|\mathbf{v}| = 1$ として正規化する。

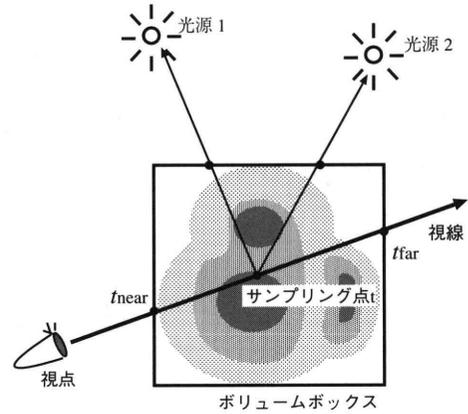


図5 ボリュームボックス内での輝度計算
(長野大学紀要論文第26巻3号より引用)

5. シミュレーション実験

カメラデータから物体表面の反射特性データを獲得し、コンピュータグラフィックス映像を生成する。カメラ系から得られた色信号より物体表面の材質を推定する。本研究では、カメラデータは、3.2で述べた方法で用いてCGデータからシミュレーションにより生成した。画像解析は、このシミュレーション結果に基づいて行った。

この画像解析結果に基づいて、ボリュームデータを用いた物体の映像化を行った。ここでは、天使と修道女をイメージしたオブジェクトを生成し、羽、ドレイブ、肌の部分をそれぞれボリュームモデルで記述する。

映像化の条件として、照明環境は白色の点光源



図6 ドレイブや羽の質感の映像化

を3灯配置し、カメラ系は、シミュレーションデータ作成用に用いたデジタルカメラ (Canon EOS Kiss Digital $f=55\text{mm}$ レンズ) のカメラパラメータを用いた。

物体表面材質は、ランダムに生成したポリウムデータにより構成されている。ただし、人の肌は粒子状物質、布は円筒形状物質で構成されると仮定している。それ以外の面は、通常の不均質誘電体を仮定した。図6、7、8は、本手法で生成したCG映像である。

6. おわりに

本論文では、ポリウムモデルに対して機械視覚に基づいた映像化手法を提案した。本手法の特徴は、複雑な表面構造を持つ物体に対して計測データに基づいて安定した品質の映像が生成できることである。

まず照明光と物体間の光反射のモデル化技術について述べ、カメラ系の幾何モデルと色応答モデ

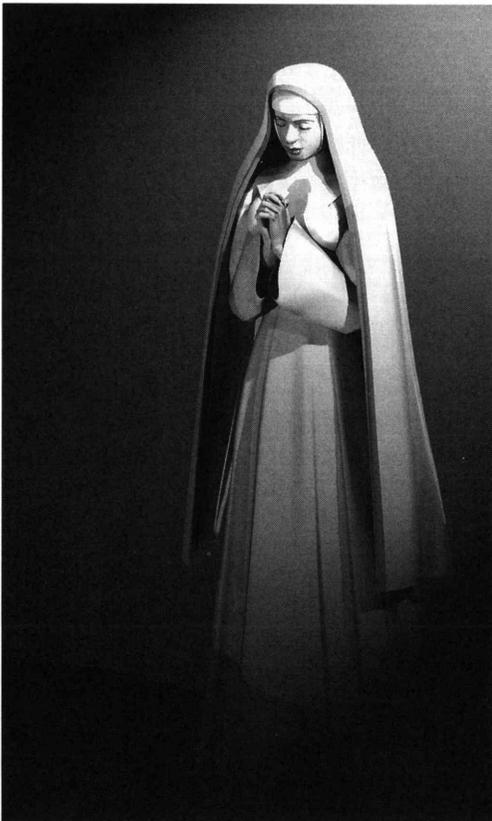


図7 肌の質感の映像化



図8 全体の映像化例

ルについて述べた。さらに、微細で複雑な表面構造を持つ物体表面のモデル化技術について述べ、それを機械視覚から得られた情報に基づいて映像化する方法を述べた。

このことにより、ポリウムデータのモデルパラメータ決定は、計測データに基づいてできるようになった。このことは、複雑な表面構造を持つ物体に対しても安定で高品質な映像化ができるようになったことを意味する。

しかしながら、今回はポリウムデータの幾何情報に関するモデル化が不十分であるため映像生成時の形状設定に対して多くの仮定条件を含んでいる。この問題を解決するためには、ポリウムデータに対しての幾何データ推定アルゴリズムをより汎用化できるようにしなければならない。また実験データも実際の撮影データではなくシミュレーションデータを用いている。今後、実際の撮影環境での実験を行う必要がある。

参考文献

- 1) J. T. Kajiya : The rendering equation, roughened surfaces, *Computer Graphics*, pp. 143 - 150 (1985).
- 2) H. Haneishi, T. Iwanami, N. Tsumura, and Y. Miyake : Goniospectral imaging of 3D objects, *Proc. 6th Color Imaging Conf.*, pp. 173 - 176 (1998).
- 3) Y. Sato, M.D. Wheeler and K. Ikeuchi : Object shape and reflectance modeling from observation, *Proc. of SIG-GRAPH 97*, pp. 379 - 387 (1997).
- 4) N. Tanaka, S. Tominaga and T. Kawai : A method for

- estimating parameters of a 3 D spectral reflection model, *Proc. International Symposium on Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives*, pp. 127 - 130, (1999).
- 5) 田中法博, 富永昌治: 3次元反射モデルの解析と推定, *情報学論: コンピュータビジョンとイメージメディア*, Vol.41, No. SIG10 (CVIM1), pp. 1 - 11 (2000).
- 6) 徐剛, 辻三郎: 3次元空間ビジョン, 共立出版 (1998).
- 7) N. Tanaka, S. Tominaga and T. Kawai: Estimation of the Torrance-Sparrow reflection model from a single multi-band image, *Proc. 15th International Conference on Pattern Recognition*, Vol. 3, pp. 600 - 603, (2000).
- 8) J. T. Kajiya and T. L. Kay: Rendering fur with three dimensional textures, *ACM Computer Graphic*, Vol. 23, No. 3, pp. 271 - 280 (1989).
- 9) F. Nayret: A general and multiscale model for volumetric textures, *Proc. of Interface 95*, pp. 83 - 91 (1995).
- 10) 立野玲子, 山口裕美, 藤代一成, 東多恵子, 櫻庭均: Voxel Stuffing: 3方向の平行粗断像列を用いた高品質ポリューム補間, *画像電子学会論文誌*, Vol. 29, No. 4, pp. 292 - 301 (2000).
- 11) 中村浩子, 竹島由里子, 藤代一成, 奥田洋司: 形状/色分布特徴を考慮した区間型ポリュームの半自動詳細度制御, *情報処理学会論文誌*, Vol. 42, No. 5, pp. 1115 - 1123, (2001).
- 12) H.C. Lee, E.J. Breneman and C. Schulte: Modeling light reflection for computer color vision, *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 12, No. 4, pp. 402 - 409, (1990).
- 13) E. P. Lafortune, S. Foo, K. E. Torrance and D. P. Greenberg: Non-linear approximation of reflectance functions, *Proc. of SIGGRAPH 97*, pp. 117 - 126 (1997).
- 14) K. E. Torrance and E. M. Sparrow: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces, *J. of Optical Society of America A*, Vol. 57, No. 9, pp. 1105 - 1114 (1967).
- 15) B. T. Phong: Illumination for computer-generated pictures, *Comm. ACM*, Vol. 18, No. 6, pp. 311 - 317 (1975).
- 16) R.L. Cook and K.E. Torrance: A reflection model for computer graphics, *Computer Graphics*, Vol. 15, pp. 307 - 315 (1981).
- 17) J. F. Blinn: Model of light reflection for computer synthesized pictures, *Computer Graphics*, Vol. 11, No. 2, pp. 192 - 198 (1977).
- 18) S. Tominaga: Surface reflectance estimation by the dichromatic model, *Color Research and Application*, Vol. 21, No. 2, pp. 104 - 114 (1996).
- 19) S. A. Shafer, G. J. Klinker and T. Kanade: A physical approach to color image understanding, *SPIE Proceedings*, Vol. 1250, pp. 222 - 235 (1990).
- 20) 金谷健一: 画像の3次元解釈の統計的信頼性, *画像の認識理解シンポジウム (MIRU92)*, pp. II 207 - 214 (1992).
- 21) R. Y. Tsai: An efficient and accurate camera calibration technique for 3 D machine vision, *Proc. CVPR*, pp. 364 - 374 (1986).
- 22) R. Y. Tsai: A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3 D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses, *J of RA*, Vol. 3, pp. 323 - 344 (1987).
- 23) I. W. Faig: Calibration of close-range photogrammetric systems: Mathematical formulation, *Photometric Eng. and Remote Sensing*, Vol. 41, pp. 1479 - 1486 (1975).
- 24) 田中法博: 画像生成のための物体表面のポリュームモデリング, *長野大学紀要論文*, Vol. 26, No. 3, pp. 27 - 35 (2004).