

コンピュータグラフィックスにおける 布地の反射モデルに関する研究

鈴木克知† 安田孝美† 横井茂樹†

鳥脇純一郎† 稲垣勝彦††

†名古屋大学工学部情報工学科 ††名古屋市立女子短期大学被服科

本論文では、コンピュータ・グラフィックスにおける布地の材質感表現について述べる。これは、布地の質感をその形状により表現しようとする従来の研究に対して、布の微視的な構造から光の反射モデルを考案して、シェーディングにより質感を表現しようとする初めての試みである。

具体的には布地における反射光を、(1)表面での正反射光、(2)布地内部からの反射光、(3)拡散反射光、の3つの成分から構成されると考える。本研究の特徴は、布地の微視的な構造による独特の反射を、断面形状が楕円の微小面分布を考えることによりモデル化することにある。

提案する布地独自の光の反射モデルにより、絹、木綿、玉虫織りの各種材質感の表示実験を行い、ほぼ満足のいく結果を得た。

Light Reflection Model of Cloth Objects for Computer Graphics

Katsunori SUZUKI†, Takami YASUDA†, Shigeki YOKOI†,

Jun-ichiro TORIWAKI† and Katsuhiko INAGAKI††

† Faculty of Engineering, Nagoya University †† Nagoya Municipal Women's Junior College
Chikusa-ku, Nagoya 464-01, Japan

This paper describes a method to express the reality of several kinds of cloth object. This is the first report to propose a light reflection model based on the detail structure of cloths, although conventional studies tried to express the natural shape of the cloth.

In our model, the reflected lights from the cloth are divided into three kinds of light, which are (1) specular element from the surface of the cloth, (2) internal element and (3) diffuse element. The original point of this study is to calculate these reflected light elements by concerning the distribution of tiny facets' direction which has the elliptical section.

We have got good results to express silk, cotton and iridescent cloths by our model.

1. はじめに

レイ・トレーシング¹⁾に代表されるレンダリング法により、コンピュータ・グラフィックス(CG)においてガラスや金属等の硬い材質の物体の質感はかなりよく表現出来るようになってきている。また最近では、弾性体のような軟らかい質感を持つ物体のCG表現に関する研究に脚光が集まっており、その種の報告もいくつかされている²⁾。

このようなCGにおける質感表現の現状において、織物の表示は従来、布を表す表面に実際の布地の模様を投影して表示するテクスチャ・マッピング法により質感を表現していたにすぎなかった³⁾。最近では、布地固有のしわなどの物理的形状を力学的な法則を基にして計算機により求め、現実感のある布地形状を表現する研究がいくつか報告されている⁴⁾ - ⁶⁾。また、テクスチャ・マッピング法においても、フラクタルを用いたよりリアルな表示法が報告されている⁷⁾。しかし、これらの手法では陰影計算は簡単なシェーディング技法が用いられているにすぎず、このため布地独特の光沢感をもった質感までを表現するには至っていない。本文ではこうした布地特有の材質感を形状からではなく、布地の微視的構造を考慮した光の反射モデルを考案することにより、その陰影付けにより布地らしさを表現する方法について述べる。以下、第2章では布地の微視的な構造について簡単に紹介し、第3章ではその構造を基にした布地独特の基本的な反射光モデルを提案する。また、第4章では各種の質感を持たせるための本モデルの応用について述べ、その表示例を第5章に示す。

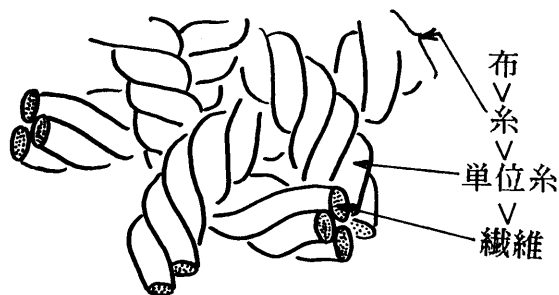


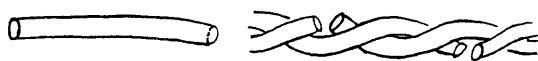
図1. 布の構造

2. 布地の構造

本章では、布地の微視的な構造について簡単に述べる(図1)⁸⁾。布地の最小構成単位は繊維(fiber)である。一般に、繊維は太さに対して十分な長さを持ち、絹やナイロンなどではその長さが数百mにも及ぶものがある。しかし、木綿などのように数cm程しかないものも存在する。繊維の太さは数 μ mから数十 μ m程度のもが多く、通常の状態では1本1本の繊維を肉眼で見分けることは困難である。繊維は染料を用いて着色することができ、染料は繊維内部までほぼ一様に浸透し、光が透過する際に染料固有のスペクトル吸収により透過光のスペクトルを変化させる。

繊維を数十から数百本集めて束にした1本を単位糸または単糸(unit string)という。絹やナイロンなどの長い繊維はよりがかけられない場合もあり、繊維がほぼ平行に並んでいるものが多い。一方、木綿などの短い繊維ではよりをかけて、繊維と繊維とをつなぐことにより長い糸を構成する。前者をフィラメント糸(filament string)、後者をスパン糸(span string)という(図2)。単糸が1本または数本集まり、一般に呼ばれる糸(string)となる。単糸は場合によりよられることもある。

このようにしてできた糸が縦横交互に織り重なり布となる。布の織り方には様々な方法があるが、縦横1本ずつの糸を交互に織り重ねた最も単純な織り方を平織りという(図3)。以下、3章では基本的なフィラメント単糸の平織りに対する反射光モデルを検討し、4章で他の織り方についても検討することにする。



(a) フィラメント糸 (b) スパン糸
図2. 単糸

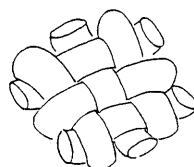


図3. 平織り

3. 反射光モデル

光源を出て布地に到達した光は繊維との反射、透過を繰り返した後、我々の目に届くことになる。文献9)の繊維における光沢(光の反射)についての研究によれば、繊維における反射光は、方向性の有無、光の色、反射位置、などにより3つの成分に分けて考えられることが知られている(図4、表1)。(1)正反射光(Specular)は布地表面で1回反射するのみのもので、方向性を有し、光源の色と等しい色を持つ。(2)内部反射光(Internal)は一度布地内部に入り、繊維の境界面において反射や透過をして布地表面上に現れるもので、方向性を有し、繊維の染料によるスペクトル吸収により繊維の色を持つ。(3)拡散反射光(Diffuse)は布地内部での光の散乱により方向性を失ったもので、これも繊維と等しい色を持つ。本研究ではこれら3種類の成分に対し、反射光モデルを検討する。

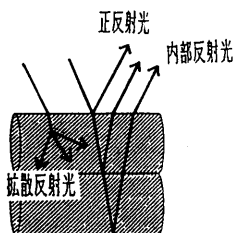


図4. 反射光の3成分

表1. 3つの反射光の性質

	反射位置	方向性	色
正反射光	表面	ある	光源
内部反射光	内部	ある	布地
拡散反射光	内部	ない	布地

3.1 正反射光(Specular)

光源からの光が布地の表面で1回反射して視点に届く反射光を正反射光(Specular)という。一般の布地表面は複雑な構造をしているが、フィラメント単糸の平織りにおいては図5のような平行繊維層と考

えられる。繊維形状には様々なものがあるが、繊維が束になった単糸の形状は図6のような円柱がつぶされた楕円柱と考えられる。本研究ではこの単糸を最小単位と考える。正反射光は表面の単糸のみによって引き起こされるので、この楕円柱の表面での光の反射について考えることにより、その反射傾向を知ることができる。

正反射光は鏡面反射光とも呼ばれ、光源方向 L と視線方向 V の二等分方向 H を法線として持つ微小面によって引き起こされると考えられる(図7)。この反射光については、高木らの異方性反射モデル¹⁰⁾を利用してモデル化を行った。すなわち、布地表面における H 方向をもつ微小面の割合を求めることを考える(図8)。単糸を横断面方向から見た場合、単糸表面の微小面の法線方向の分布は小さい(図9(a))。これに対し、単糸を縦断面方向から見た場合の方向分布は大きくなる(図9(b))。以上の2方向の分布特性から3次元的な分布をモデル化したものが図10である。正反射を引き起こす微小面の割合は、注目している布地表面上の点にこの分布特性を示す立体をおき、その点から H 方向への立体表面までの距離として与えられる。このようなモデルを考えることで反射方向に関して異方性をもたせることができる。また、単糸は透明体と考えられ、その

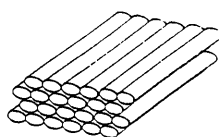


図5. 平行な層



図6. 単糸の形状

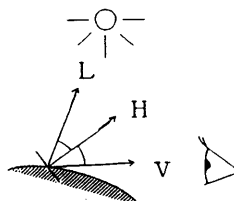


図7. 正反射を引き起こす微小面の方向

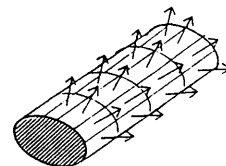
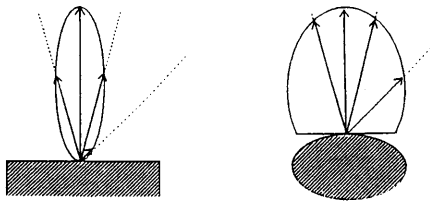


図8. 微小面の法線方向



(a) 横断面方向 (b) 縦断面方向
図9. 微小面の法線の断面分布

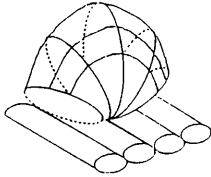


図10. 微小面の法線の3次元分布

反射率は光の入射角よりフレネルの式を用いて求めることができる¹¹⁾. 結局, 正反射光の強度 L_s は式(1)のように求められる.

$$L_s \propto \alpha \cdot r \cdot L_0 \quad (1)$$

但し, α はH方向を向く微小面の割合, r は表面での光の反射率, L_0 は入射光強度を表す. 色については光源の色がそのまま正反射光の色になるものとする.

3. 2 内部反射光(Internal)

光源からの光が布地内部に浸透し, 単糸の境界で反射, 透過を繰り返して布地表面から射出して視点に届く反射光を内部反射光(Internal)という. 布地を縦断面方向から見た場合, 単糸は図11のように並んでおり, これは図12のような平行な透明フィルムを重ね合わせたものと考えられる. そこで, 単糸層を平行に並んだフィルムの重ね合わせとして近似して, 内部反射光を考えることにする. これを完全な平行層とすると, 光はすべて同じ方向に射出してしまうので(図12), 光が層の境界で反射, 透過をする際には単糸の形に応じた散乱を考慮することにする(図13). 単糸の形状は3.1節で述べたように楕円柱をしており, 横断面方向から見た場合, 単糸表面での反射光と内部からの反射光は射出

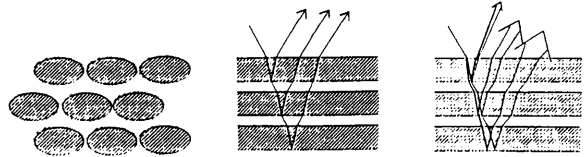
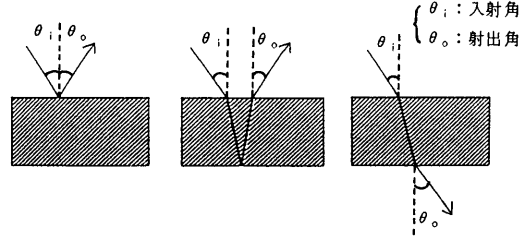
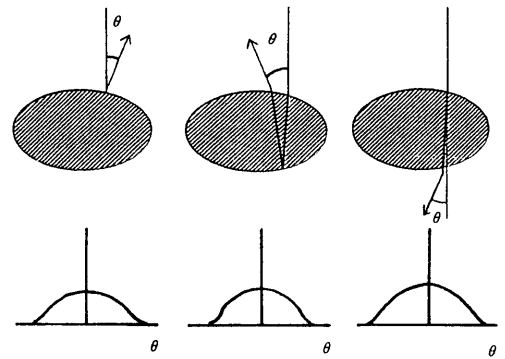


図11. 単糸断面 図12. フィルム層 図13. 散乱を考慮



(a) 表面での反射光 (b) 内部での反射光 (c) 透過光
図14. 単糸の横断面から見た反射・透過光



(a) 表面での反射光 (b) 内部での反射光 (c) 透過光
図15. 単糸の縦断面から見た反射・透過光

する進行方向がほぼ同一であり(図14(a),(b)), また, 透過光の射出方向も入射光の方向とほぼ等しい(図14(c)) ことがわかる. 一方, 縦断面方向から見た場合の表面での反射光, 内部からの反射光, 透過光の射出方向について簡単な数値実験をした結果, 各々図15に示すような方向分布を持ち, すべてがある程度の散乱を受けることがわかった.

光は単糸を一層透過または反射する毎に単糸に沿う方向にはあまり散乱を受けず, 単糸に垂直な方向には散乱されることになる. このような異方性は正反射光の持つ異方性と似ており, 内部反射光の方向分布を正反射光の場合に用いた微小面モデルと同様のモデルで考えることにする. 但し, (1) 透過, 反射回数の増加に伴い散乱の度も増加すること, (2) 反射または透過により光が減衰すること, また,

(3) 単糸内でのスペクトル吸収により光が着色されることを考慮しなければならない。

まず、光が散乱を受けることにより方向性を失っていく現象を実現するために、反射、透過の回数が増える度に反射モデルの立体の断面形状を楕円から円に近づけ、異方性を失わせた(図16)。内部反射光のある方向への強度割合はその方向へのこの立体中の光の通過距離として求めることができる。

次に、反射、透過する毎に反射率、透過率を掛けていき、反射、透過による光の減衰を実現する。いま、入射光 L_0 が単糸内で反射、透過を各々 m 回、 n 回して表面に射出光 L_1 として現れたとすると、 L_1 の強度は

$$L_1 \propto r^m \cdot t^n \cdot L_0 \quad (2)$$

として求められる。但し、反射率 r 、透過率 t は第1層のものとはほぼ等しいと仮定する。

最後に、単糸内での光のスペクトル吸収は単糸内の光の進行距離を d とし、単糸固有の光の吸収率を c とすれば、射出光 L_2 は入射光 L_0 に対して式(3)のように求められる¹²⁾。

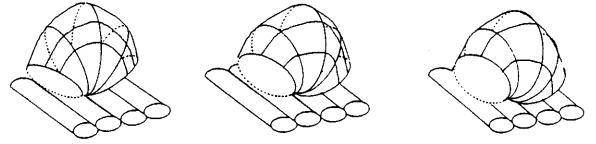
$$L_2 \propto \exp(-c \cdot d) \cdot L_0 \quad (3)$$

本研究では簡単のため、スペクトルを R 、 G 、 B の3成分に代表させて式(3)の計算を行っている。この場合、 R 、 G 、 B 各々について単糸の吸収率を与えなければならない。

結局、これらを考慮した内部反射光の強度 L_1 は、

$$L_1 \propto L_0 \sum_k \beta_k \cdot r^{m_k} \cdot t^{n_k} \cdot \exp(-c \cdot d_k) \quad (4)$$

として求められる。ここで、 β_k は光の入射方向と視点方向とで決まる第 k 層での内部反射光の強度割合を示す。また、 d_k 、 m_k 、 n_k は第 k 層で反射して表面に現れるまでに光が繊維内を通過する距離、繊維境界での反射及び透過の回数を各々示す。



(a) 1層目で反射 (b) 2層目で反射 (c) 3層目で反射
図16. 反射回数の増加に伴う立体反射モデルの変形

3.3 拡散反射光(Diffuse)

布地内部で散乱を受けた光が表面から出てくる反射光を拡散反射(Diffuse)という。拡散反射光 L_D は一般に方向性を持たず、視線方向には依存しない。完全拡散面を仮定してこれを求めると、光源方向 L と布地の法線方向 N とのなす角 θ の余弦に比例するものとして式(5)で与えられる。

$$L_D \propto L \cdot N / |L| \cdot |N| \quad (5)$$

光の色は布地の色になるが、縦糸と横糸の色が異なる場合にはその中間の色になると考えてよい。

以上の3成分の反射光を考慮することによりCGにより布地を表示する際、多数の単糸が含まれる領域が一つの画素に入る状態で観察していると考えている(図17)。そこで、縦糸による反射と横糸による反射が共に一つの画素に入ることになる。本研究では簡略化のため、一つの画素に同数の縦糸と横糸が入るものとし、上記のようにして求めた正反射光強度と、糸の方向を変えて求めた正反射光強度との平均を求めることでこの効果を表現する。

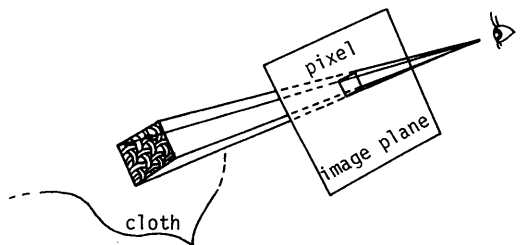
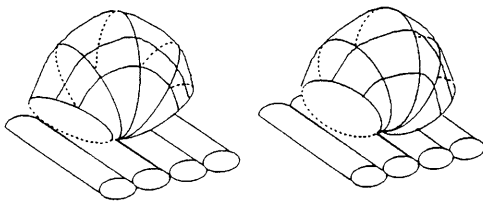


図17. 1画素に入る布領域

4. 各種布地の質感表現法

3章では、フィラメント単糸による平織りについての反射モデルを考察してきたが、このモデルをスパン単糸による平織りに応用することを考える。2章で述べたように、フィラメント糸はよりがかけられていないのに対し、スパン糸は数本の繊維をよることで糸を構成している。このためスパン糸の表面形状はより複雑となり、反射を正確にモデル化することは難しい。しかし、おおまかな反射傾向としては次のように考えられよう。表面形状が複雑になることから、正反射光は異方性を失うことになる。また、繊維の切れ目が多く存在することから、内部反射光は散乱をより多く受け、これもまた方向性を失い、拡散反射成分が増加することになる。これらの現象を実現するために、正反射光の微小面の方向分布の割合及び内部反射光の強度分布の割合を表す立体の断面形状を円に近付け(図18)、反射の異方性を減少させる。これにより、フィラメント糸及びスパン糸による布地の質感の差を表現することができる。

次に、織り方について、平織り以外の簡単な織り方について考察する。一般に布地は縦糸と横糸が交互に織り重なっているが、表面に現れる縦糸と横糸の割合が違う場合がある。こうした布地の質感は一つの画素に入る縦糸と横糸の割合を変えることである程度表現できる。また、玉虫織りのように縦横の糸の色が異なる場合についても縦糸、横糸のスペクトル吸収率を変えることで本モデルにより実現可能である。縦糸をフィラメント糸、横糸をスパン糸としてモデル化することも可能であり、これらの組合せによりある程度織り方の違いによる布地の質感を表現できると考えられる。



(a) フィラメント糸 (b) スパン糸
図18. 糸の違いによる微小面の方向分布の割合
(内部反射光の強度分布)

5. 各種布地の表示実験

本モデルを用いて各種の布地の質感を表現した実験例を示す。図19は3章で述べた布地の3種類の反射光成分を単独に表示したものである。正反射光、内部反射光、拡散反射光の各成分を図中左上、右上、左下に各々示す。布地の形状は単純なしわを三角関数で簡易的に表現し、視点、光源の位置は布地の鉛直上方にあるものとしている。

次に、異なる織り目方向に対する布地の見え方の差を図20に示す。左の例は縦横に織り目が通っているのに対し、右の例は斜め45度づつに織り目が通っており、表示例からもその差が判別できる。

以上はフィラメント単糸による平織りによる布地の表示例であったが、図21ではフィラメント糸とスパン糸による質感の差を示す。ここでは、スパン糸による布地として木綿の質感(上)を、フィラメント糸による布地として絹(下)を表現した。また、図22は一般に玉虫織りと呼ばれる特殊な織り方の表示例である。縦糸をフィラメント糸、横糸をスパン糸で構成しており、全体的には異方性の少ないスパン糸の色に近い布地となるが、ある方向から見た場合は異方性の顕著なフィラメント糸の色が強く現れていることがわかる。

これらの表示結果を繊維の専門家の立場からみると、図21からフィラメント糸とスパン糸との質感の差は良く表現されていると評価できる。また、平織りの質感も本方法により表現可能と考えられる。更に、現在では考慮していない繊維の形状は、本モデルの微小面の方向分布を示す立体形状や反射率を変化させることで、今後、疑似的に表現することが可能と考えられる。これにより、絹とレーヨン、あるいはアセテートなどの質感の差もある程度表現できるであろう。しかしながら、これらの材質は肉眼でも分別が難しいものであるから、CGによりどれ程の質感が表現できるかは今のところ分からない。

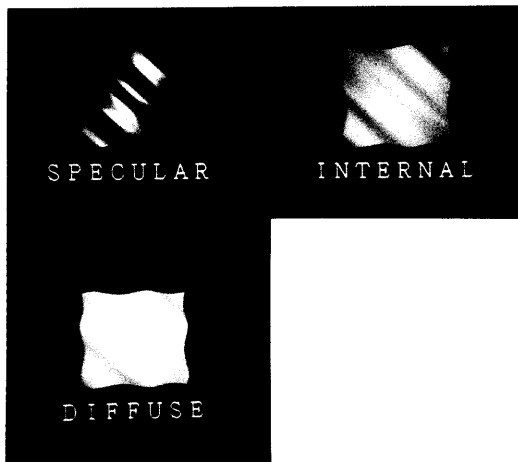


図19. 布地の3種類の反射光成分



図22. 玉虫織り

6. おわりに

本文では、コンピュータ・グラフィックスによる布地の質感表現の一手法について述べた。これは従来の形状あるいはテクスチャーによる布地の質感表現ではなく、光の反射特性をモデル化することによる質感表現法であり、以下の特徴を有するものである。

- (1) 布地における反射光を正反射光，内部反射光，拡散反射光の3成分に分けて考える。
- (2) 反射光の異方性を反射モデルに取り入れる。
- (3) 布地を平行層の集合として捉え，多重層による反射モデルから内部反射光成分を考察する。

本反射モデルを各種の布地の質感表現に適用し，絹，木綿，玉虫織り等の質感にほぼ満足のいく結果が得られた。

今後は，本モデルを更に発展，修正し，より多くの材質の布地の質感表現を試みる予定である。また，実際の服の形状に本モデルを適用する際の問題点の検討，及び形状も含めたより自然な布地表現の手法を検討していきたい。

最後に，日頃熱心に御討論を頂く研究室の諸氏に感謝する。



図20. 織り目方向の異なる布地

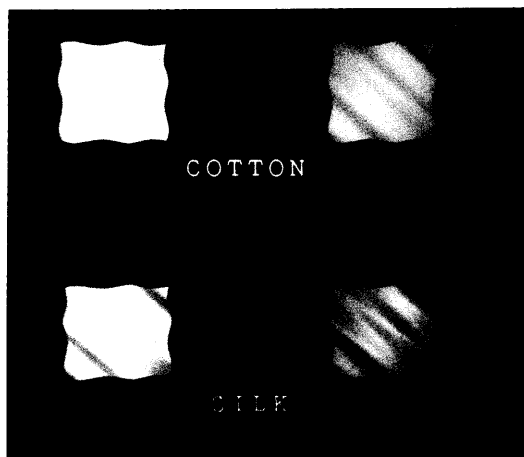


図21. フィラメント糸とスパン糸による布地

参考文献

- 1) Whitted, T.: An Improved Illumination Model for Shaded Display, C. ACM, Vol. 23, No. 6, pp. 343-349 (1980).
- 2) 例えば, Terzopoulos, D. and Witkin, A.: Deformable Models, IEEE Comput. Graph. & Appli., Vol. 8, No. 6, pp. 41-51 (1988).
- 3) Blinn, J.F. and Newell, M.E.: Texture and Reflection in Computer Generated Images, Comm. ACM, Vol. 19, No. 10, pp. 542-547 (1976).
- 4) Weil, J.: Synthesis of Cloth Object, Proc. SIGGRAPH'86, pp. 49-54, (1986).
- 5) 宇田紀之, 鶴岡信治, 木村文隆, 三宅康二: 布地物体の材質感表現, 第3回NICOGRAPH論文コンテスト論文集, pp. 192-199, (1987).
- 6) 安居院猛, 大川雅弘, 中嶋正之: 束縛条件の強い布地物体の表現, 昭和63年電子通信学会春期全国大会, pp. 2, 285-2, 286 (1988).
- 7) 木元宏次, 大野義夫: テクスチャ・マッピングによる布の材質感表現, 情報処理学会第37回全国大会, pp. 1685-1686 (1988).
- 8) 石川欣造: 繊維, 東京電機大学出版局 (1986).
- 9) 稲垣勝彦: 織物の光沢に関する研究, 東京工業大学博士学位論文 (1979).
- 10) 高木淳, 横井茂樹, 鶴岡信治, 三宅康二: 異方性反射モデルに関する検討, 情報処理学会グラフィクスとCAD研究会, 11-1 (1983).
- 11) 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎, 鶴岡信治, 三宅康治: 透明物体のための改良光線追跡法, 情報処理学会論文誌, Vol. 25, No. 6, pp. 953-959 (1984).
- 12) 安田孝美, 横井茂樹, 鶴岡信治, 三宅康治: 透明物体のための改良光線追跡法(2), 情報処理学会論文誌, Vol. 26, No. 4, pp. 591-599 (1985).