

# グレア推論モデルの実時間描画システム

松田麻衣子 池戸恒雄

法政大学 情報科学部 デジタルメディア学科

## 要旨

ブルーム、ハローおよびフレアから成るグレア効果について、光源を点光源だけでなく、円柱、半球、楕円などの形状に対して推論法によるモデル化をおこない、それらの実時間描画を行うためのアルゴリズムとハードウェアを開発した。グレア効果は、光源の強度、形状、指向性、大気状態、眼鏡の有無、年齢などが考慮されており、ガウスノイズ発生、エリアフィルのためのポリゴン変数生成、およびポリゴン内挿輝度補間のそれぞれの処理により、光源の周辺のエリアを秒間12億ピクセルで輝度を生成する。これらモデルのハードウェア化により、テクスチャマッピング法ではなく、推論法による実時間描画を可能とした。

## A Realtime Renderer for Glare Effect Based upon Empirical Approach

Maiko Matsuda and Tsuneo Ikedo

Department of Digital Media Science,

Faculty of Computer and Information Sciences, Hosei University

## Abstract

Hardware algorithm for glare effect caused by intraocular light scattering and diffraction grating is discussed, including the effects of bloom, halo and flare line for various light-source shapes, on the basis of empirical and experimental approaches. The effect is considered the determinants of - e.g., light-source intensity, shape, directivity, atmospheric condition, glasses, and age -. The renderer is comprised mainly by RAM tables, multipliers, and adders. Technologies shown in this paper produce the glared effect combining with bump-mapped rough surface shading, environment mapping and shadow casting at rate of a billion pixels per second.

## はじめに

照明モデルは1970年以来推論法や物理モデルを基に活発に研究されてきたが、グレア効果を推論モデル化し、ポリゴンレンダリングの対象として取り上げた研究は少ない。その理由は主に、(1)グレア効果が個人個人によって異なる眼球内の散乱光や精神物理的な知覚によるものであり、定量的モデルを定めることが困難であること、(2)テクスチャマッピング技術で似た映像を容易に表示できることにある。しかし高細密な映像システムでの実時間のグレア効果は、特に光が動的に変化する、例えば、水面の反射、木漏れ日、車のヘッドライト、鏡面物体の反射閃光など現実感のあるシーンを作る上で重要な役割を担うものと考えられる。

凡そ一世紀に渡り、細胞質などの密度変化による眼球内の散乱光の特性が研究されてきた。Bettelheim, et al [1]は水晶体の散乱光を測定し、ブルームが仰角に対して指数的に減衰し、方位角には影響されないことを示した。Walraven, et al. [2] はブルームが角膜、水晶体、網膜の屈

折率の変化に起因することを示し、また Voss [3] はグレアを3つの減衰関数を用いた推論モデルで表現した。Hemenger [4]はさらにこれらモデルにハロー効果を加えたモデルを提案した。Nakamae, et al [5] and Spencer, et al. [6] はそれぞれ回折効果や、定量的モデルでCG化を行った。ブルームとフレアは発生機構が異なる。水晶体の円周上にある繊維状細胞による回折格子によってフレア(光源から放射線状に放たれる光線)が発生するのに対して、ブルームの発生は眼球内への入射光の散乱による。フレアについてその線数、幅、長さを決めることは、個人個人の目の屈折率が異なる事から困難である。また過去示された推論モデルは光源が点光源であることを前提としている。一方、実際の描画システム[7]ではテクスチャマッピングが用いられている。この方法は街灯のように動かない光源には良いが、現実では、さまざまな光源があり、また動的な指向性を持っている。これらはハローやフレアの分布に影

響する。実時間と現実感の両者を光反射モデルと共に得るためには、グレア生成を推論法に基づくハードウェアで行う必要があるだろう。この論文は様々な光源においてグレア効果を生成する、実時間レンダラの構造と評価を行うものである。

### グレア推論式

眩しい光あるいはグレア光は、眼球内での入力光の屈折変動で生じたものである。グレアは

一般に 3 つの成分で構成される。(1)ブルーミング(disability glare or veiling luminance)、(2)ハロー(カラーの環)および(3)水晶体の放射線状に並んだ細胞質での回折によって生じるフレアラインである。経験関数としてブルーミングは(ratio of ambient luminance:  $Leq$ , and illuminance at the cornea:  $E$  とすると)下記の式で表される。

$$i(\theta)_{bloom} = Leq/E = A/(\theta + \theta_0)^m \quad (1)$$

ここで  $A$  は光源から視点ラインとの成す角(源論文では  $i(\theta)$  は ( ) で与えられている) であり各定数は測定値と合うように決定される。一例[3]として  $A = 29$ ,  $\theta_0 = 0.13$ ,  $m = 2.8$  ( $< 8^\circ$ )とされている。指数  $m$  は 1.5-3 の範囲に設定される。一方ハローは下記の式で与えられる[4]。

$$i(\theta)_{halo} = A \exp[-(\theta - \theta_1)^2 / \alpha^2] \quad (2)$$

ここで  $A$  は環境光より 10 倍大きな値であるとし  $i = 2.95$ , and  $\alpha = 0.225^\circ$  at 568 nm, ハローの幅は  $0.35^\circ$  また直径は  $3^\circ$  と測定されている[5]。

### グレア決定要素

式(1)および(2)は点光源によるブルーミングとハロー効果を表すことができるが、フレアラインについて数式モデルを確立することは難しい。これはフレアラインの発生が水晶体の細胞核の屈折率変動に関係するからである。一方、ハローは主に水晶体外側の繊維状細胞の光回折によって生じる。この結果フレアは昼間虹彩が閉じてくると減少する。式(1)からブルーミングは周辺光に影響される。年齢もまたグレア

(+: proportion, -: inverse proportion, ○: affect strongly, △: affect weak)

	Items	Index	Remarks	Bloom	Flare
1	Light-Source Intensity	I	Intensity = Area Size x I $0 \leq \text{area size} \leq 1$	+	+
2	Light-Source Types: Size Point/circle Cylindrical Elliptic Polygon	S $P_0$ $P_0, a, b, \mathbf{N}$ $P_0, a, b, \mathbf{N}$ $P_0, P_1, \dots$ $P_n$	Coordinate (x, y, z, a, b, $\mathbf{N}$ ) a: Semimajor axis b: Semiminor axis $\mathbf{N}(N_x, N_y, N_z)$ : Semiminor direction	+	-
3	Directivity	D	D (Dx, Dy, Dz)	△	○
4	Ambient light	$E_1$		-	-
5	Age	$A_f$		+	△
6	Atmosphere: Mist	$M_f$		+	-
7	Glasses (nearsighted)	G	On	-	+

表1 Determinants

ア効果に関係し、年齢が上がるほど水晶体の濁りが増し、ブルーミングが増加する。これらの条件は(1)および(2)式のAに関係する。また近視メガネを掛けた場合は、掛けない場合に比べてフレアラインが増加する。これは近視レンズが入力光を水晶体の外側に向かって屈折するためと考えられる。霞みや霧もまたブルーミングやフレアに影響を与える。さらにフレアラインは光源の大きさに比例し、その指向性にも影響される。また、我々が見る夜景にはさまざまな形の光源があり、一般にそれらがカバーなどにより強い指向性を持っている。この結果、無指向性で点光源だけの実装では、夜景の現実感を表現するには不十分である。表1は定性的なグレアの決定要因を示している。

### ブルーミング

ブルーミングは主に2つの要素に分けることができる。一つは光源の周り、もう一つはその周辺である。光源の周りでは光源の外周からの角度に対応して急激に光度が減衰するもので、一方、周辺では図2や式(1)のように光度が指数的に減衰するものである。このため我々は下記の式でブルーミングを表す。

#### Light-source (Circle):

$$i_s(\theta) = \begin{cases} A & 0 \leq \theta \leq \theta_0 \\ A \cdot \exp(-\theta^n) + B/(\theta + \theta_1)^m & \theta_0 \leq \theta \end{cases} \quad (3)$$

#### Light-source (Cylindrical or Elliptic):

$$i_c(\theta) = \begin{cases} A & 0 \leq \theta \leq \theta_0 \\ A \cdot \exp[-\theta(a, b, \mathbf{N}, \mathbf{D})^n] + B/[\theta(a, b, \mathbf{N}, \mathbf{D}) + \theta_1]^m & \theta_0 \leq \theta \end{cases} \quad (4)$$

ここで  $\theta$  は光源と視線との成す角。  $\theta_0$ 、  $\theta_1$  はそれぞれ

れ光源中心と光源外郭との成す角、および経験値である。指数  $n, m$  はそれぞれ  $n=3, m=2$  で与えられる。 $A$  は角膜に入る光度であり、 $B$  は表 2 の要因から決定される。

## フレアラインとハロー

グレア効果の中で、夜、特に近視メガネを掛けた人が強く認知するものは、ランダムに分布したフレアラインである。観測によるとラインの数・長さ・光度は、光源の強さ・形に影響を受ける。これは年齢によらない個人の肉体的な違い(回折率の変動)や、メガネの屈折率等に関係する。光源の形はハローにも影響を与える。我々はフレアとハローに関して下記の式を定義する。

$$ic(\theta) = R(I, G, 1/S, 1/B_l, 1/M_g, a, b, N, D) + C \cdot \exp[-(\theta - \theta_1 \cdot \lambda / 568)^2 / \alpha^2] \quad (5)$$

上記の式で2項目は波長を加えた式(2)のハロー光度を示している。 $\theta_1$  は光源の外周と視線との成す角である。 $R()$  はフレアライン関数で表 1 のパラメータにより決定される。ガウス分布関数によりフレアラインの数が光源を中心に生成される。これは光源の光度、メガネに比例し、環境光、光源の大きさ、大気(霞み)状態に反比例する。

### フレアラインの数と分布

関数  $R()$  は光度・長さ・分布角度を定義する。これらは下式の関係からガウス乱数分布を基に生成される。

$$\begin{cases} Flare_{intensity} = R1(I, 1/M_g, a, b, N, D), \\ Flare_{length} = Gauss(num) \cdot len \\ Flare_{width} = R1(I, S, a, b), \\ Flare_{angle} = Gauss(num) \cdot ang + R(N) \\ num = R1(I, G, 1/S, 1/B_l, 1/M_g), \\ len = R1(I, G, 1/B_l), \quad ang = R1(a, b, N, D) \end{cases} \quad (6)$$

ここで  $num, len$ , および  $ang$  はフレアライン数、長さ、および分布角である。例えばライン数は  $I, G$  に比例し、 $S, B_l, M_g$  に反比例する。光源が円の場合には式(6)の関数  $ang$  と  $R(N)$  はそれぞれ 1 と 0 に設定される。水晶体の回折格子が放射線状に分布していることを考慮すると、フレアは対称的な 2 つの分布を持つことになる。このような特性を式(6)に考慮する必要がある。

## グレア動画

もし光源が常に動かないか、光度と環境光が動的に変化しないのであれば、グレア効果はテクスチャマッピングを用いて容易に表現することができる。しかしフレアライン

は入力角や光源の変化により、動的、且つ鋭敏に変化する。

## 木漏れ日の表現

我々は木漏れ日を実時間で実装するため、大気の流れによる木の葉の揺れを  $1/f$  ノイズでシミュレーションし、これを光源の面積に対応させる。このため前記の式全ての経験値に影響を与えることになる。 $1/f$  ノイズは下式の漸化式で与えられる。

$$S_{n+1} = F(S_n) \\ F(S_n) = \begin{cases} S_n + uS_n^z & 0 \leq S_n \leq a \\ (S_n - a)/(1-a) & a < S_n \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

ここで  $F(a), u$ , および  $z$  はそれぞれ  $1, 0 < u$ , and  $1 < z < 2$  で与えられる。漏れたそれぞれの光の光度は全体の光源の強さを  $I$  とすると、式(9)のカオス  $S(t)$  との積となり、下式となる。

$$I(t) = I \times S(t) \quad t = 0, 1, 2, \dots, \quad (10)$$

木漏れ日の場合、光源は複数に分割されるためそれらの位置;  $P_0, P_1, P_2, \dots$ , and  $P_{n-1}$  にそれぞれのカオス;  $S_0(t), S_1(t), S_2(t), \dots$ , and  $S_{n-1}(t)$  を独立に対応させ、それぞれ分割単位毎にグレアを発生する。全体の輝度  $I_p$  は下式で与えられる。

$$I_p = I \times \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} S_i(t) \quad (11)$$

## 水面の全反射及び光沢物体での鏡面反射

我々のシステムは、フォン、Cook/Torrance、そして異方性反射モデルに基づく映像を描画するラフ面シェーダー[8]を内蔵している。ここでは光源入射角や面法線との成す角( $\cos$ )や反射角と視点角とが成す角( $\cos$ )がハードウェアで計算されており、グレアの計算にもこれらの値を使用することが出来る。我々はフレアやハローは視点に入る入射光と環境光が表 2 に示すような特定のコントラストレベルを超えた場合に現れるように回路を実装した。

表 2. Glare Effect Conditions

Metallic Object	$Ips = I \times Is \times \cos^2 \alpha$ $Ips / Ia \geq 40$ $I$ : light-source intensity, $Is$ : specular coefficient, $Ic$ : ambient light
Water	$Ips = I \times \cos \alpha$ $Ips / Ia \geq 40$ and $1 - \eta^2 (1 - \cos^2 \theta) < 0$ : ratio of refraction index ( $1/ media$ )

$I_{ps}$  は鏡面反射光、 $I_a$  は環境光である。グレアはコントラストが 40 を超えた場合に現れる。40 以下ならば、 $I_{ps}$  が 255 レベル以上の光度を持っていても 255 レベルに飽和处理を行う。

## ハードウェア実装

グレアを描画する基本技術は、ブルームの霞んだ広がりや、フレアラインのジャギーをどのように無くすかにある。グレアは、光源の形や指向性に応じて、ブルーム、フレアおよび光束が、光源の周りに多様な明暗の変化をもって混在している。上記の効果を得るためには、フィルタリングが一つの解決方法である[5] [6]が、従来のフィルタ方式では計算負荷が大きい。また実時間処理で用いられているほとんどのフィルタ、例えば BiLinear や TriLinear フィルタでは完全にジャギーを取ることや、十分なぼかしを得ることができない。一方、近年のグラフィックスプロセッサには秒間 3 億ポリゴンの描画性能が要求[9]されている。この性能は従来の面フィルタ手法では達成できない。アライアスを無くし、十分なぼかしを得る効果的な方法は、式(3)、(4)および(5)を直接用いて特定の領域を内挿することで得られる。内挿領域は光源あるいはフレアラインの周りの四角形で定義される。しかし、光度の分布は光源の形に対応して特定のパターンを持つものとする。よって式の角度変数

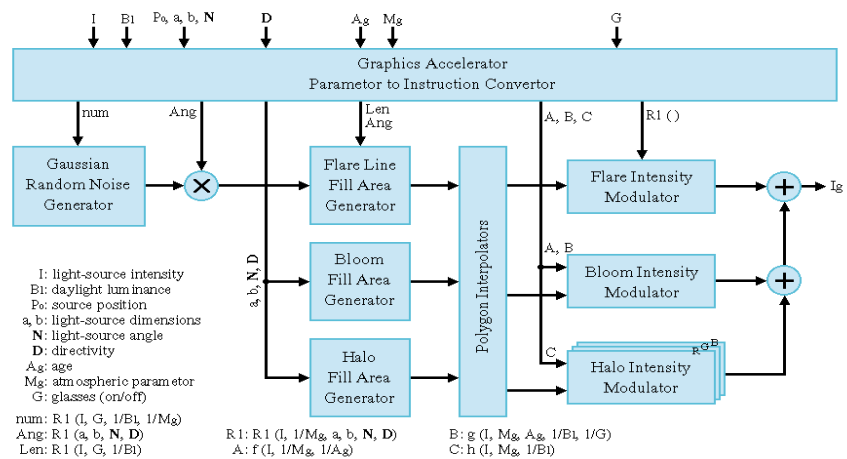


図 1. グレア効果レンダラ

は光源と内挿点との距離の変数に変換する必要がある。我々は基本的な光度分布の形として、パラメトリックな関数として変形を加えることにした。式(3)、(4)および(5)から得られる関数は RAM テーブル、乗算器および加算器を用いて実装される。図 1 にグレア効果レンダラを示す。

図 1 においてアプリケーションプロセッサから表 1 に示すそれぞれの変数がグラフィックス・アクセラターに与えられ、これらから、フレアラインを生成するガウスノイズ発生器、フレア、ブルーム、ハローの、それぞれのレンダリングのためのポリゴン変数を決定する。ポリゴンは内挿補間回路を経たのちそれぞれの輝度変調回路において内挿点の輝度が決定される。この変調回路を図 2 に示す。

それぞれの変調回路の出力は合成されて、画素の輝度として出力される。図 2 において RAM に記憶されたテーブ

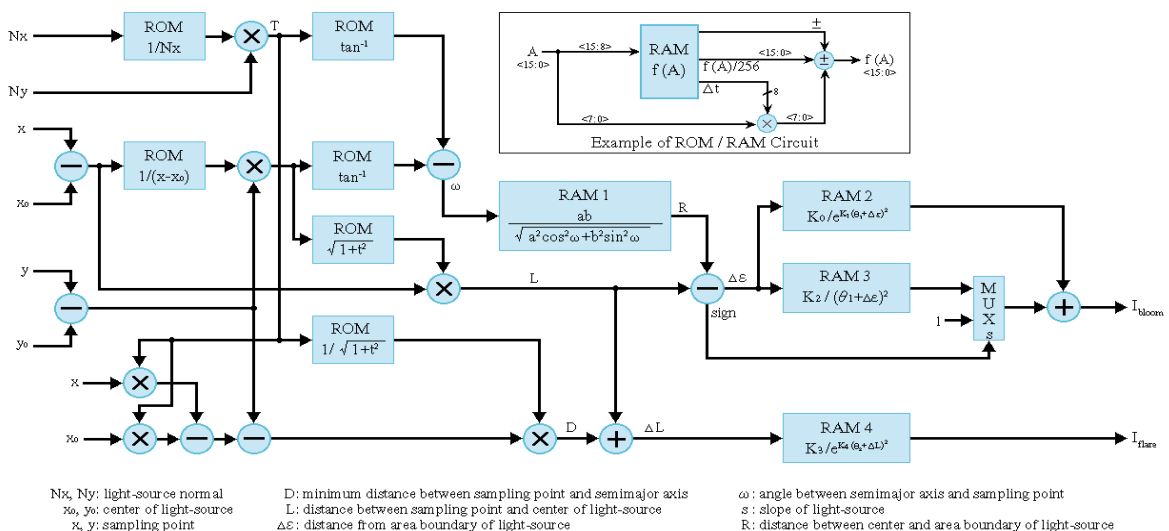


図 2. ブルームおよびフレア輝度変調回路

ルは楕円分布をもつ輝度生成例を示す。この回路では輝度の分布はRAMテーブルによって、円、楕円、なすび型などの任意形状が設定できる。よって球、線または半球状の光源によるフレアを描画できる。図3には図2に対応した光源形状のハローの輝度変調回路を示す。

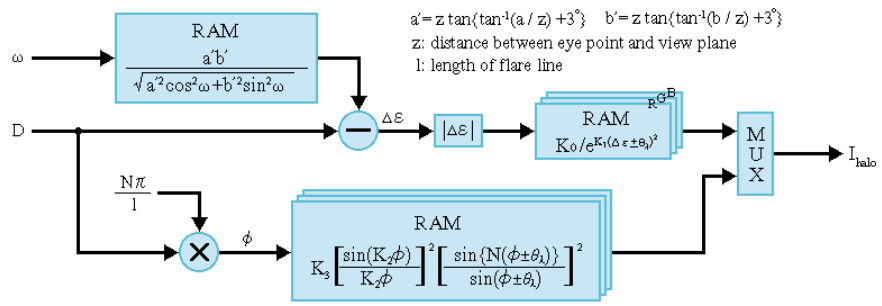


図3. ハロー輝度変調回路

### 評価

図4 ~ 8にシミュレーション結果を示す。



図4 点光源 楕円光源

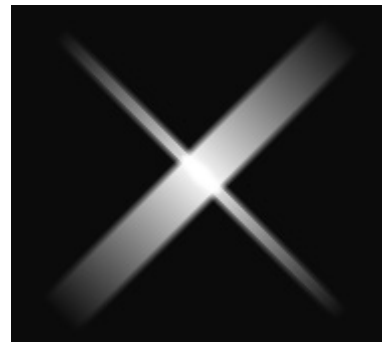


図5 楕円光源からのフレアライン

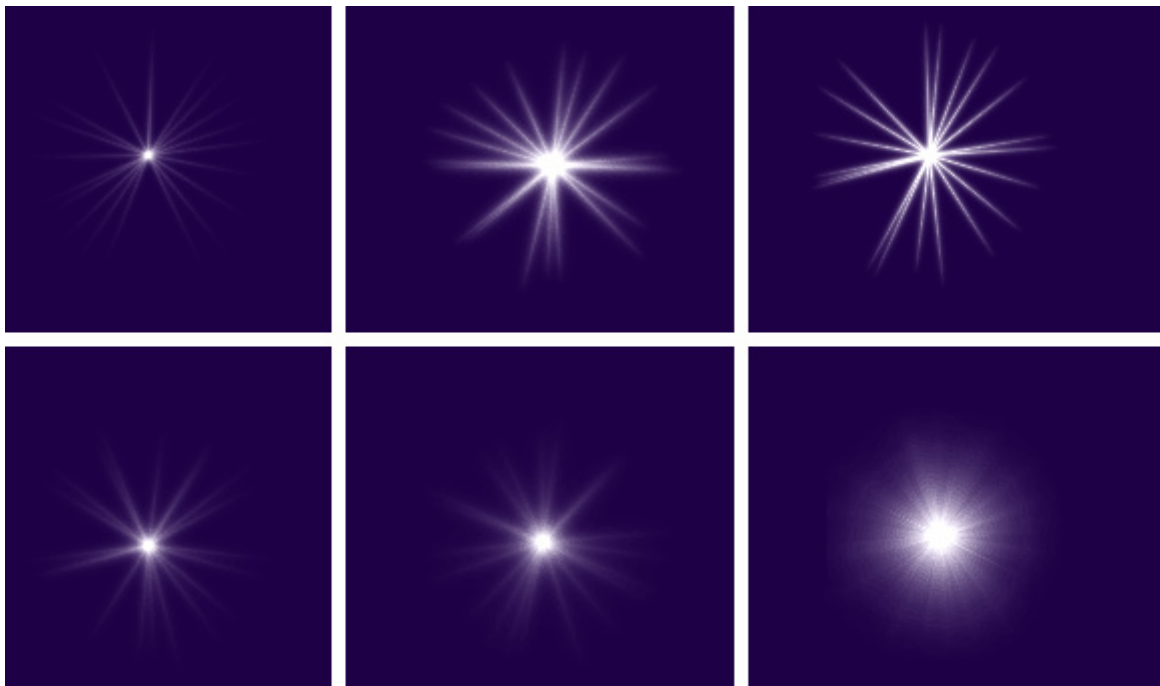


図6 フレアラインモデル



図7 街灯 (左)原画 (中)ブルームを加えたもの (右) (中)に halo を加えたもの



図8 木洩れ陽

## あとがき

ハードウェア化を目的とする実時間グレアのモデリングとその評価を行ったが、これらの回路がチップに実装されることで、従来のテクスチャマッピングによる手法と異なり、刻々と変化するグレア効果を表現することができる。それぞれの回路はメモリーテーブルを中心に構成されており、輝度変調回路で約8万ゲートである。この結果、現在のASICの容量からみれば回路規模も小さい。今後の問題としては、表1の要因と、ポリゴン化パラメータの関係を一元的な数式モデルとして確立することである。

## 参考文献

- [1] F. A. Bettelheim and M. Paunovic, "Light scattering of normal human lens," *Biophysical Journal* 26. 3., pp. 85 – 99, April 1979.
- [2] J. Walraven, "Spatial characteristics of chromatic induction; the segregation of lateral effects from straylight artifacts," *Vision Res.* 13, pp. 1739 – 1753, 1973.

- [3] J. J. Vos, "Disability glare – a state of the art report," *C I E, Journal* 3. 2., pp. 39 – 53, 1984

- [4] R. P. Hemenger, "Sources of intraocular light scatter from inversion of an empirical glare function," *Applied Optics* 31. 19, pp. 3687 – 3693, July 1992.

- [5] E. Nakamae, K. Kaneda, T. Okamoto, and T. Nishita, "Lighting Model Aiming at Drive Simulators," *Computer Graphics*, Vol. 24, No. 4, Aug. 1990.

- [6] G. Spencer, P. Shirley, K. Zimmerman, and D. Greenberg, "Physically-Based Glare Effects for Digital Images," *Computer Graphics, SIGGRAPH '95*, pp. 325 – 334, Aug. 1995.

- [7] "The RenderMan™ Companion," Addison-Wesley, Reading MA, 1989.

- [8] Ikedo T., and Ohbuchi E., "A Realtime Rough Surface Shader" *Computer Graphics International 2000, CGI2000*, pp. June 2000.

- [9] M. Macedonia, "The Empire Strikes Back... with the X-Box," *IEEE Computer*, Vol.33, No.6, pp. 104–106, June 2000.