グラフィクスとCAD 14－3
（1984. 9. 4）

コンピュータ・グラフィクスにおける感性の挿入に関する研究

長江貞彦，辻合秀一，宮本貴朗（大阪府立大学）

1. はじめに

コンピュータ・グラフィクスによる生成画像の表示では，その処理時間などの制約もあって，通常は生成されたオブジェクト・スペース上の画像データを，そのまま画素の位置でサンプル表示することが多い。しかし，ある目的によっては，オブジェクト・スペース上の画像データを入力情報とし，これに付加処理的な操作をほどこすことによって，最終的に人間が望ましいと判断できる画像データの出力情報を得ることも可能である。この方法によれば，コンピュータ・グラフィクスの画質改善に役立つばかりでなく，人間の感性に馴染み易い画像の入出力に寄与しうる可能性も残されており，*man-machine* 系の *interactive* なシステムの開発につながるものと考えられる。

以下では，付加的な処理に一部，波面収差による情報処理の手法を導入し，コンピュータと人間との対話を図かりながら，人間の感性を挿入するための基本的な手法について，ひとつの提案を試みる。

2. 基本概念

コンピュータ・グラフィクスにおけるCRT画像のように，物体のある領域が1次光源であり，しかも各々の領域から発生する光は互に *incoherent*（非干渉）である場合は，処理計算の単純化からいっても，幾何光学に基づく光線追跡法が波動光学や他の方法と比べて有利である。光線追跡法は，いわばピンホール・カメラの原理をそのままコンピュータ処理による立体表現の画像にシミュレーションしたもので，出図時間の長ささえ気にしなければ，パーソナル・コンピュータでも処理できる極めて応用範囲の広い，便利な方法である。

しかし，このようにして得られる画像は，一般にS/N比が従来の写真法などと比較して極めて高いため，かえって人間の視覚的な特性から遊離し，いわゆる“きれいすぎる絵”として印象される傾向がある。例えば，着物の柄をコンピュータ・グラフィクスで創作した場合，出来あがった実物はどうしても「整いすぎた，かたい」イメージが残ったり，テレビのアニメーション画像では，背影と主体との間に，いわゆる絵画でいう周辺の空気，すなわち“気象”が感じられず，人間の感性には，なじみにくい画像しか得られないといった特性がみられる。

この問題を解決する方法として，2値表示装置に中間調（ハーフトーン）を表示するディザ法（*dithering*）もあり，そのうち，特に或値を乱数（雑音）によって変化させるランダム・ディザ法[1]が提唱されている。この方法は画像信号（多値）を点描的な出図に変化させるもので，一般にコントラストは低下するものの，S/N比を適当にコントロールすることによって，人間の視覚に関する特性になじみ易くする効果を図ったものと考えられる。

その他，より完全な中間調の画像を得るために，多重露光法による光学的な重

みつけ加算を行なう方法もあり、写真技術の働力と、処理時間の長ささえいとわなければ、上記のディザ法と同様、S/N比を適当にコントロールする方法として有効と思われる。

本研究では、波動光学における fresnel や fraunhofer 回折現象を、実際には起り得ない部分に、あえて利用することにより、人間の感性になじみ易い画像を求めようとするものである。これはあたかも油絵において、バックと対象物との境界の処理に、両者の領域を互に“くいこませ”ながら、対象物の存在感を主張する場合と似ている。この技法は、例えば図1のような角柱どうしの相貫体の表示において、バックと両角柱の面との境界はもとより、①や②、および②'の shade (陰) はもちろん、③の shadow (影) に適用されることはもちろん、それらの区別や、バックとの係わりにおいても、画像の調子を変えることになる。また、日常生活において、対象物が風化した感じの、いわゆる“ウェザリング”や、写真などで体験するハレーションの感じも処理できる可能性も残されている。現下では、ピクセル内での情報には限界があるが、その周辺をあえて修正することによって、全体としては、それらしい雰囲気を出すことも可能だと思われる。

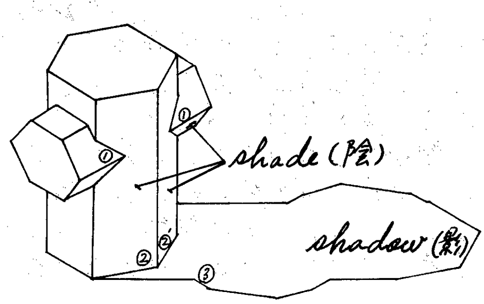


図1

3. 波面収差の求め方[2)]

3.1 incoherent 照明

いま、物体上の異る点から出る光が、互に干渉しない光で照明される場合を考える。一般に、物体上の点の座標を(x_0, y_0)とするとき、これを中心とする領域$dx_0 dy_0$から画像平面に達する光の強度分布は、文献2)より

$$I_1(x_1, y_1) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} I_0(x_0, y_0)\left|K(x_1-x_0, y_1-y_0)\right|^2 dx_0 dy_0 \qquad (1)$$

で表わされる。ここにKは利用する系の開口に関する瞳関数G(後述)による光の透過関数で、一般には複素関数で表わされる。ところで、式(1)は incoherent 照明の場合に、画像の強度分布が物体の強度分布と透過関数の絶対値の2乗とのたたみこみ積分(convolution)である。そこで、これらの関数を Fourier 積分の形で表わすと、I_0は

$$g_0(f, g) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} I_0(x_0, y_0) \exp 2\pi i(f x_0 + g y_0)\, dx_0 dy_0 \qquad (2)$$

となり、さらにI_1とKは、それぞれ式(3)および(4)となる。すなわち、

$$\mathcal{J}_1(f,g)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} I_1(x_1,y_1)\exp 2\pi i(fx_1+gy_1)\,dx_1\,dy_1 \tag{3}$$

$$\mathcal{K}(f,g)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} |K(x,y)|^2 \exp 2\pi i(fx+gy)\,dx\,dy \tag{4}$$

これらの式に たたみこみ積分の定理 を応用すると

$$\mathcal{J}_1(f,g)=\mathcal{J}_0(f,g)\,\mathcal{K}(f,g) \tag{5}$$

が得られる。これは，物体上の点から画像への光の強度分布は出力の情報を$\mathcal{J}_1$入力の情報を$\mathcal{J}_0$とするとき，$\mathcal{K}$ という線型フィルタを通ることがわかる。いいかえれば，最終的な画像として望まれる$I_1(x,y)$の分布は，いわゆる画像入力の$I_0(x,y)$をFourier変換して，強度の空間周波数スペクトル$g_0(f,g)$を求め，これを付加的な操作（フィルタリング）で周波数変調$\mathcal{J}_0(f,g)\cdot\mathcal{K}(f,g)$とすることにより，$\mathcal{J}_1(f,g)$のコントロールが可能となる。したがって，この$\mathcal{K}(f,g)$の正規化が画像の画質に関する決定に大きな係わりをもつ。人間の感性を全て$\mathcal{K}(f,g)$に関連つけることは不可能で，かつ，無意味であるが，コンピュータ・グラフィクスの一部，例えば3次元物体の陰影，すなわち shade と shadow の境界に，強調する形で導入することは可能であると思われる。したがって，この$\mathcal{K}(f,g)$の正規化が画像の画質に関する決定に大きな係わりをもつ。
以下，$\mathcal{K}(f,g)$の想定をどうするかをみるため，いま少し$\mathcal{K}(f,g)$を調べると

$$\mathcal{K}(f,g)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} k(f'+f,g'+g)\,k^*(f',g')\,df'\,dg' \tag{6}$$

で表わされる。ここにk^*はkの複素共役である。この右辺は，いわゆる関数kの自己相関関数（auto-correlation function）である。図1に示すように，

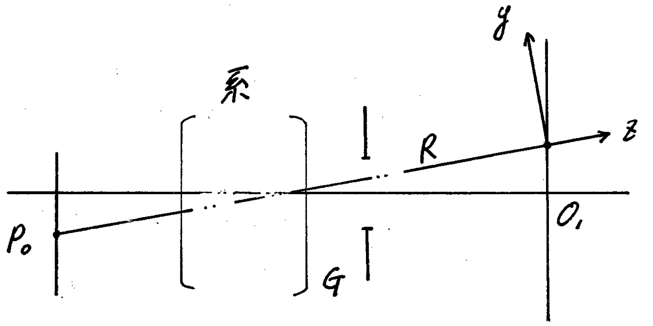


図1　　物体面(x_0,y_0,z_0)　　瞳(ξ,η,ζ)　　像面(x,y,z)

$k(f,g)$ は利用する系の開口に関する瞳関数 G に等しいとして，G の座標を (ξ,η,ζ)，像面の座標を (x,y,z) とし，系の収差を無視すれば，次式を得る。

$$k\left(\frac{\xi}{\lambda R},\frac{\eta}{\lambda R}\right)=\frac{1}{(\lambda R)^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}G(\xi'+\xi,\eta'+\eta)G^*(\xi',\eta')d\xi'd\eta' \qquad (7)$$

ここに，λ は使用する光の波長を，R は瞳面における参照球面の像面に至る半径（距離）で $(\xi/\lambda R)$,$(\eta/\lambda R)$ は光学系のディメンジョンに依存しないためのの無次元化による変換座標である。

3.2 O.T.F.の計算

式(7)は系の瞳関数の自己相関関数が，系のO.T.F. すなわち系の周波数特性（Optical Transfer Function）を与える。ただし，この計算の過程には物体から瞳面に至る光路の光軸との入射角も，瞳面から像面に至る光路の光軸との射出角も十分に小さく，いわゆる"近軸光線の条件"が成立しているものとしている。ここでは，一部分のみ波動光学の手法を用い，その結果を幾何光学に基づく光線追跡法へと流用するため，近軸光線の条件は始めから成立しているものとみなし，以下に具体的なO.T.F.の計算を行なう。

いま，図3に示すように射出瞳の領域を A とすれば，開口の外側では瞳関数 $G(\xi',\eta')$ は 0 である。したがって，ξ',η' 面における式(7)の積分領域は開口 A と，A と同じ形で ξ',η' 方向にそれぞれ ξ,η だけ A に対して移動した領域と共通な部分（図中のハッチング部分）となる。そこで，計算を簡単にするため，半径が a の円形開口の場合は $(\xi^2+\eta^2)\geqq a^2$，すなわち $(f^2+g^2)\geqq(2a/\lambda R)^2$ が成立するところでは，2つの領域が重ならないで，かつ，瞳の内側では全ての光波を通過させるものとすれば，$|G|=1$ と正規化することが可能となる。このように，積分の領域を単純化し，系は無収差の回転対称系（角度 θ だけ回わす）で，焦点ずれ，すなわちdefocusのみが存在する場合のO.T.F.は計算が可能となる。この具体的な計算は後述する。

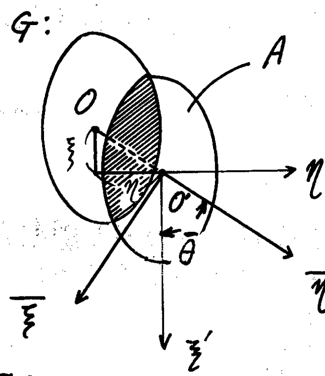


図3

ところで，コンピュータ・グラフィクスにおいて用いられる光源は，一般に白色光源であるから，その波長の範囲は $0.4\sim0.7\times10^{-3}\,\mu m$ と考えられる。したがって $\lambda_1=0.4\times10^{-3}\,\mu m$ (B)，$\lambda_2=0.6\times10^{-3}\,\mu m$ (G)，$\lambda_3=0.7\times10^{-3}\,\mu m$ (R) とし，系の可能性を考えて，一応 $a/R=10^{-2}$ mm とした。こうすれば，光源から視点方向，すなわち z 軸の，結像面からのずれが，約1～30mm前後分解能が約1～40/mmのレンジで計算が可能となる。なお，系は回転対称系であるから，$J_0(f,0)=J_0(0,g)$ であるので，ここでは一応，$g=0$ として扱い，z をパラメータとする $J_1(f,0)/J_1(0,0)$ をO.T.F.とみなす。もちろん，z を固定して，R もしくは a のパラメータで，O.T.F.を求めることも可能である。

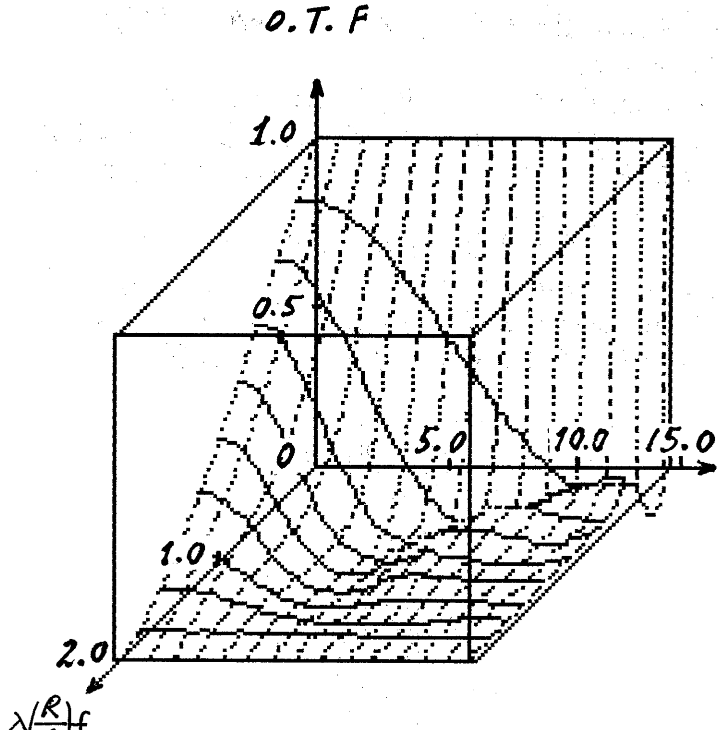


図 3

ファクター	O.T.F
f → 大	OTF → 小
a → 大	OTF → 小
R → 小	OTF → 小
z → 小	OTF → 小
λ → 大	OTF → 小

→は，その傾向ありを示す。

〔注〕従来のコンピューターグラフィクスではO.T.Fが→大ほど，よい画像と考えられていた．しかしここでは，部分的にO.T.Fを小さくする方法をとる。

4. シミュレーション

例えば，右図の写真のように，明暗の大きなところで，しかも反射光が強い場合，その部分でハレーションが起って，本来は暗い所まで光が回わり込んでいる。いいかえれば，本来は暗い所まで，明るく光って見える現象であり，同図においては，ローターリーエンジンのローター部の面が鏡面であり，あまりにも明る過ぎて，周辺の情報をみだしてしまっている。

図 4

以下，このような場合をコンピューターグラフィクスで実現する方法をのべる。

アルゴリズム

- <u>step 1</u>：ray-trace をする。
- <u>step 2</u>：現在，得られている画像に満足しなければ，step 3 で用いる探索の半径 r，明暗の差 m，step 4 で用いる視点から見た物体面への距離の差 ε を決定する。もし満足していれば，終了する。
- <u>step 3</u>：m 行 n 列マトリックス上のピクセル ($i=0,\cdots,m$, $j=0,\cdots,n$) の強度 $\{I_{ij}\}$ が，中心 (i,j) 半径 r の内点 (s,t) に対して I_{ij}，I_{st} とし，$I_{st}-I_{ij} \geq m$ ならば step 4 へ移る。すべてのピクセルに対して探索が終われば，step 2 へ戻る。ただし，探索を簡

単にするため、図5の流れ図にも示したように、距離を無限大のノルムとして処理している。

・ **step 4**: (i,j), (s,t) の法線ベクトルを N_{ij}, N_{st} とし、もし $(N_{st}, N_{ij})/\|N_{st}\|\|N_{ij}\| = \pm 1$ のとき、物体表面上の平面は同一平面であるとみなす。いま、(i,j), (s,t) における視点と物体との距離を d_{ij}, d_{st} とする。

もし、(i,j), (s,t) が同一平面上でないとき、かつ、視点から物体への距離の差が ε より小さいとき、すなわち $|d_{st}-d_{ij}|<\varepsilon$ のとき、便法として fresnel の回折を求め、それ以外の場合は、同様に fraunhofer の回折を求めるものとする。そして step 3 へ戻る。

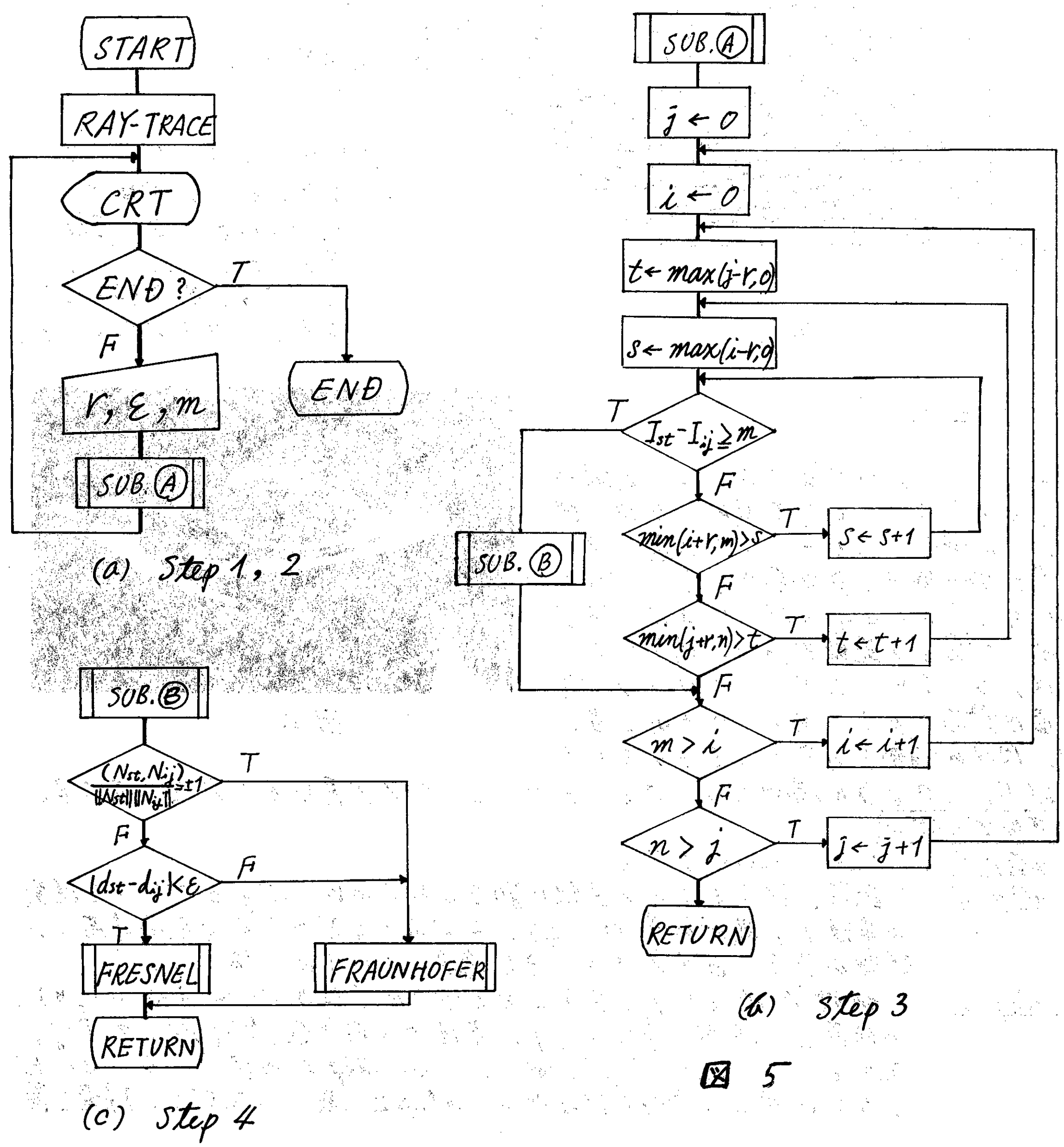
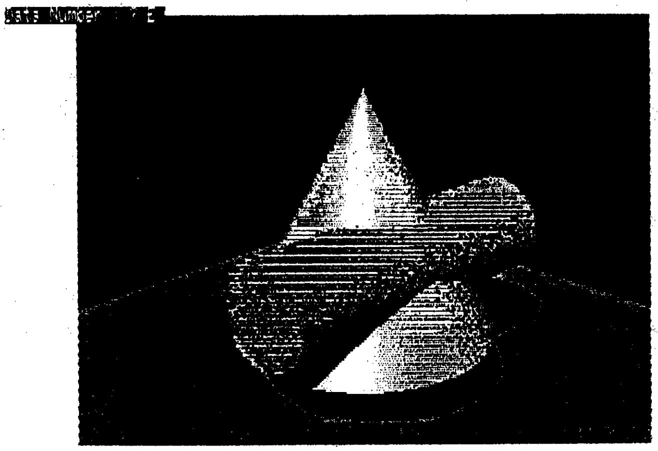
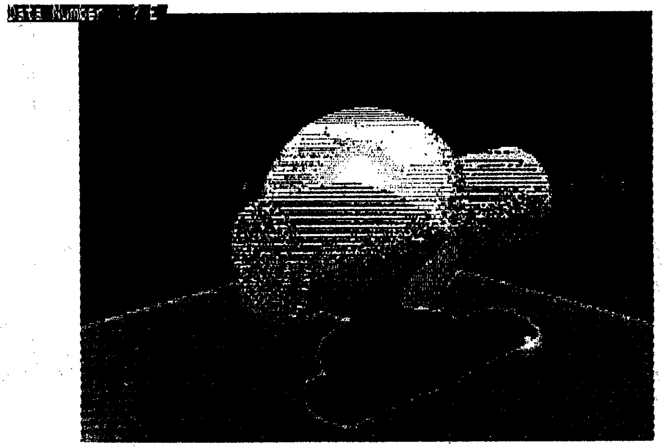


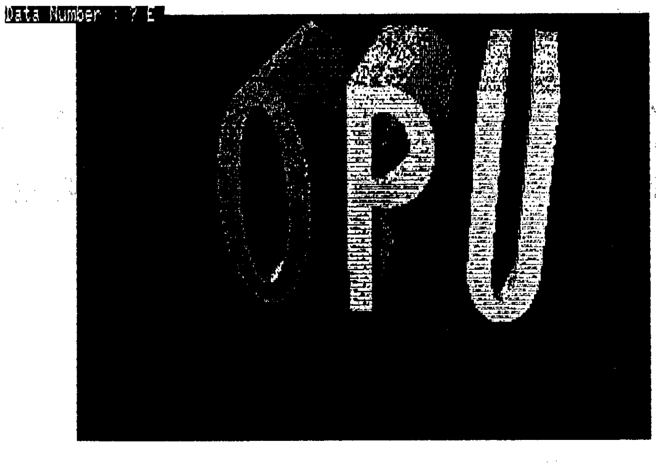
図 5



(a) 相貫体
(円錐と円柱)



(b) 相貫体
(球と円柱)



(c) ロゴ
(Osaka
Prefecutural
University)

図 6

5. テスト・アンド・ラン

目下の所，まだ顕著な効果をあげていないが，対象物と考えている画像は，おおよそ図6に示したようなものである。一応，市販のマイクロ・コンピュータでCRT上にカラー・ディスプレイしているが，ここでは白黒のみで示してある。光学的な操作による画像の合成もほぼ完成され，カメラレス・アニメーションも実用化されつつある今日，本研究におけるデジタル画像に人間の感性を挿入し，しかも，その再現性が容易な技術を提供できるものとすれば，レンズ系などの光学系を介さず，絵図的な画像から写真的な画像までカバーできる可能性があり，デジタル画像の応用が拡がるものと思われる。

今後，さまざまな画像の表現を試行し，ウェザリングをはじめ，強弱さもくるんだ Fresnel や Fraunhofer 効果が，実際の場面において有効かどうかのトライアルをして行きたいと思っている。

6. おわりに

人間の感性を挿入するための，コンピュータ・グラフィックスに一部分，波動光学的な要素を取り入れることを試みた。もとより，日常生活においては，幾何光学で十分処理できるものであり，無駄な努力と思われるが，これらを手段に，あえて対象物とバックとの境界などに interactive な挿入を試みることによって，いわゆる"味のある"画像が得られる感触を得た。今後，数多くのテスト・ランを試みることによって，その可否を明らかにしていく所存である。

なお，本研究を遂行するにあたり，御教示を賜わった大阪府立大学総合科学部福永節夫教授と高島修直教授に感謝の意を表わします。さらに，研究ゼミナールの場において御助言・御支援を頂いた大阪府立大学総合科学部大学院生の藤下拓二，野口典正の両君，学部生の鶴野玲治，明知暢也ならびに工学部学部生の田路敬，金山雅一の諸君に心からのお礼を申しあげます。

参考文献

1) 山本強；COMPUTER・GRAPHICS・パソコンによる3次元グラフィックスの実際 CQ出版（1983年，10月）.
2) M. Barn, E. Wolf ; Principles of Optics ; PERGAMON PRESS, 1970. 4th Ed.