

高品質なCG画像生成における アンチエイリアシング手法

中 俊弥 西村 明夫 中瀬 義盛
松下電器産業株式会社 情報通信研究センター

ハイビジョンモニタなどを用いた高画質の3次元CG (Computer Graphics) 画像生成において、視点を移動することにより強調される画像中の量子化ノイズ (ジャーキネスやテクスチャなど) を許容限界値以内に押さえるアンチエイリアシング手法について検討した。RGB-表色系での画像データを視覚に対して均等なCIELAB均等色空間に座標変換し、その明度情報 L^* を用いてフィルタ処理 (隣接3*3画素) することで、色ずれを抑えることができた。さらにフィルタの重みを注目する画素の明度値に応じて変えることで、画像全体で一様なフィルタ効果を確認した。

ANTI-ALIASING TECHNIQUE FOR HIGH QUALITY COMPUTER GRAPHICS

Toshiya Naka Akio Nishimura Yoshimori Nakase

Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. Information and Communications Research Center

1006, KADOMA, KADOMA-SHI, OSAKA, 571 JAPAN

This paper presents an anti-aliasing technique for realistic three-dimensional computer graphics. For such images, the quality is affected mainly by quantization noises (such as jerkiness, texture). The new technique proposed here includes two principal filtering processes to keep the image quality in perceptible level.

At first, transform the RGB image data into CIELAB space and utilize its psychometric lightness L^* for nearest 3*3 filtering. Then, decide the weighting ratio of the filter according to the L^* values in the scene. These two processes can keep the image quality in satisfactory level, and avoid color distortion.

1. まえがき

コンピュータを用いた画像生成技術の発達はめざましく、高品質な3次元CG画像生成法が広く検討されている。最近のCG画像では、各種のレンダリング手法を駆使して臨場感や忠実性を再現するまでにいたっている。われわれも高品質な3次元CG画像を準実時間で生成するSIG2を開発し評価・検討してきた[1][2]。

このような高品質なCG画像では、デジタル画像特有の量子化ノイズであるジャーキネスやテクスチャによる画質劣下を許容限值以内に押さえる必要が生じる。また色彩に関しても人間の色知覚に基づいた色変換処理が求められる。これらの忠実性を重視したCG画像生成系において、視点の移動による画像の拡大(ズーム)や移動に対しても、量子化ノイズを許容限值以内に押さえるアンチエイリアシング手法について検討した。

一般にアンチエイリアシングはノイズの目だつ領域の隣接画素を平均化することによってある程度の効果が得られる。フルカラー画像の場合、単純なフィルタ処理では色ずれが生じ、特に画像を拡大した時の画質劣下はさけられない。そこで今回、新たに2つの特徴を持つフィルタ処理を提案する。従来用いられてきたRGB-表色系での画像データを、人間の視覚系との対応が高いCIE-均等色空間に座標変換し、その明度情報についてのみ処理を行う。さらに画像の特徴を抽出し、各画素の明度値に応じてフィルタの重みを変える。

これらのフィルタ処理法をシミュレーションした結果、視点が移動してもとの画像が数十倍に拡大された場合でもジャーキネスやテクスチャによる劣下を許容限值以内に押さえ、色ずれのないアンチエイリアシング効果が確認できた。

* 画像のエッジ部分がギクシャクして見えたり、濃度変化の緩やかな部分で目立つモザイク状の量子化ノイズ。

2. 高品質画像における画質

カラー画像は2次元空間内に分布する各画素の輝度(明度)変化として表現される。従って画質を決める重要な要素として、空間周波数成分に対しては画素密度が、輝度成分には階調数がそれぞれ対応する。これらは互いに画質に大きく影響し、フルカラー画像の許容限界値はそれぞれ9画素/mm、40階調以上である[3]。

画素密度がこの値以下になると画像のエッジ部分でジャーキネスが生じ、また平坦部分ではテクスチャが目だってくる。この画質劣下を押さえるには、表示装置の画素密度を上記の値以上にする必要があるが、表示される画像の空間周波数がこの値以下になると結果は同じで、根本的な解決にはならない。

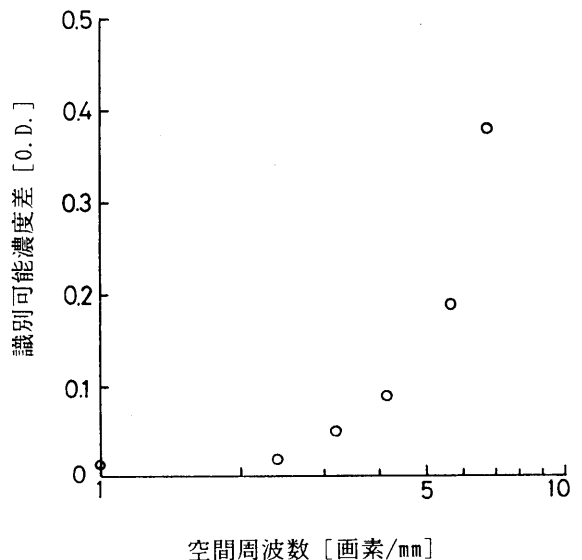


図-1 視覚の識別可能な濃度と空間周波数

このような現象はCGで生成した高品質な画像でしばしば問題となる。CGのレンダリング手法としてスキャナなどで読み取った画像デー

タをモデリングされた物体に張り付けるテクスチャマッピングが用いられるが、画像データの張り付け方によって劣下が目だってしまう。さらに視点を移動することで画像中の小領域が拡大される場合（画像の空間周波数が低下する）に、ある拡大率を越えると画質が劣下する。これらは図-1に示すような人間の視覚特性に起因するもので、空間周波数が低くなるに従って明度（濃度）差に関する識別能力が高くなるためである[3]。

3. 画質改善手段

これらの画質劣下を許容限界値以内に押さえるため、人間の視覚特性を考慮したフィルタ処理を検討した。ここで提案するフィルタ処理の特徴を以下に示す。

- ① 均等色空間内で処理を行い、しかもその明度情報 L^* についてのみ処理を加える。
- ② フィルタは 3×3 の隣接画素を利用し、注目画素の明度値 L^* に応じて画素間の重みを変える。

①, ②についてはそれぞれ以下の効果が予想される。従来カラー画像はRGB-表色系で扱われてきたが、フルカラー画像を処理する場合はRGB-表色系では色ずれなどの問題が生じる。視覚は色成分よりも明度成分の差の方が識別感度は高く、均等色空間内の明度成分について処理することでフィルタ効果を失わずに色ずれを無くすることができる。

画像フィルタはほとんどの場合一定の重み付けで処理されていた。このため画像のある部分では改善されるが、ほかの部分では劣下するなどの問題があった。ここでは注目する画素に隣接する 3×3 画素の明度値 L^* を用いて画像の特徴を抽出し、その明度値に応じてフィルタの重み係数 k を変えることで画像全体で一様なアンチエイリアシング効果を得ることができる。

3.1 均等色空間

次に均等色空間について述べる。ハイビジョンモニタなどを用いた高品質なフルカラー画像表示では、色変換処理を人間の視覚特性との対応が高い空間内で行うと良好な結果が得られる。RGB-表色系は実現は容易であるが人間の視覚特性との対応が低い[4]。

ここでは空間内で人間の感じる色の差（色差）が均等であるとされるCIE L A B均等色空間を用いる。CIE L A B均等色空間はシミュレーション実験により、色相と彩度に関しては $x-y$ 平面よりも均等性が高いことを確認した。RGB-表色系からLAB-空間への座標変換はXYZ-表色系を介して(3-1)式で変換される。

$$L^* = 116 (Y/Y_0)^{1/3} - 16$$

$$a^* = 500 [(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}]$$

$$b^* = 200 [(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}]$$

X_0, Y_0, Z_0 は基準白色に対する X, Y, Z (3-1)

(3-1)式で L^* は明度を表し、最も暗い所から明るい所まで、0から100の値を取る。また L^* の1/10倍がマンセルバリュウにはほぼ対応する。つまりこの明度値 L^* は人間の明度差に対する感覚量と線形関係にある。また (a^*, b^*) は色相と彩度を表す。各画素毎の (R, G, B) の値に対して(3-1)式を用いて (L^*, a^*, b^*) 値に変換し、その明度値 L^* だけを用いてフィルタ処理を行う。

3.2 アンチエイリアシングフィルタ

アンチエイリアシング法は画像中の量子化ノイズを除去するためのもので、基本的には平滑化

処理である。まず注目画素に隣接する3*3画素を用いて画像の特徴を抽出し、それに応じてフィルタの重み係数を変化させる。これによってそれぞれの画像に適応した効果が得られる。画像の特徴を抽出する演算子として(3-2)式の明度のラプラシアンを用いる。

$$\begin{aligned} \nabla^2 f &= \Delta_x^2 f(i, j) + \Delta_y^2 f(i, j) \\ &= [\Delta_x f(i+1, j) - \Delta_x f(i, j)] \\ &\quad + [\Delta_y f(i, j+1) - \Delta_y f(i, j)] \\ &= f(i+1, j) + f(i-1, j) + f(i, j+1) \\ &\quad + f(i, j-1) - 4f(i, j) \end{aligned}$$

$f(i, j)$ は注目画素の明度値 L^* (3-2)

ラプラシアンは方向性を持たない微分演算で、画像のエッジの成分を表す。原画像の明度値 f にその2次微分であるラプラシアン $\nabla^2 f$ の定数倍 k を(3-3)式に示すように加えることにより、エッジの両肩でアンダーシュートが生じ主観的に平滑化された画像 g が得られる。

$$g(i, j) = f(i, j) + k \nabla^2 f(i, j) \quad (3-3)$$

(3-3)式の平滑化は、定数 k の大きさによって平滑化の度合は変わり、視覚に対応した k の関数を求めることにより最適なフィルタ効果が得られる。

4. 最適化の重み関数

(3-3)式の最適な k の関数値を求めるため、平滑化の効果が最も顕著に現れる図-4.1に示すパターンを写真上に作成した。図-4.1は明度 $L^* = 100$ (一定) の白いバーと L^* が0から100まで1きざみで増加する灰色バーとの交互パターンである。図-4.1で y の正方向に白と灰色バーとの明度差が減少する。 x 方向には空間周波数が増えてあり、最も密なところで10画素/mm である。この値は2章で述べた視覚の許容限界値に近い値である。このパターンを用いることで空間周波数領域と輝度領域でのフィルタ効果を知ることができる。このパターンに(3-3)式の処理を加えてフィルタ効果を主観評価させた。標準観察条件は明視の距離25cmとし、評価方法はCCIRの条件に準拠した[6]。

まず k の値の絶対量を求めるため $k = 0$ から0.1きざみで変化させ、図-4.1のパターンの解像度がどこまで保証されるかを評価した。平滑化の係数 k が大きくなるに従って、高い空間周波数の領域から解像できなくなる。主観評価の結

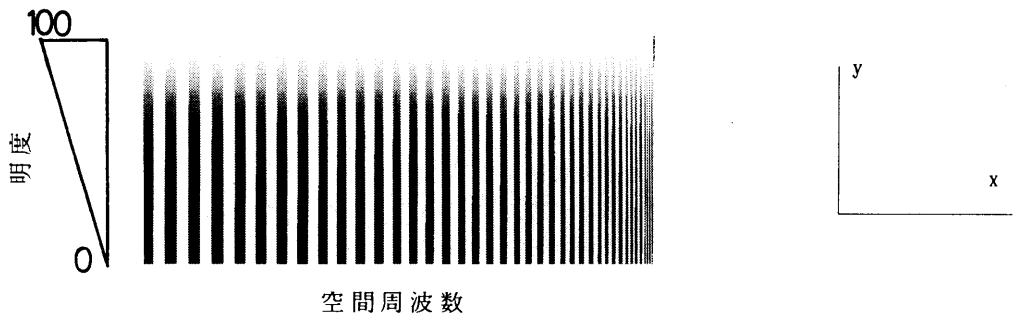


図-4.1 主観評価に用いたパターン

果 k が 0.3 以上では空間周波数 10~5 画素/mm のパターンで解像できなくなった。これから k の最大値を 0.2 とした。

次に k の関数を求めた。(3-3) 式のフィルタ効果は、隣接する 3*3 の画素間での明度の変化量つまりは画像の勾配 (Gradient) と注目画素の明度値に大きく依存する。このうち画像の勾配に関する重みは $\nabla^2 f$ が勾配に比例した効果を有するため、明度レベル L^* に対する k の関数を求めた。これは視覚の明度に対する識別感度を求める問題に帰着する。そこで図-4.1 に示したパターンの空間周波数が 1 画素/mm (視覚の MTF の最大値) の白と灰色バー(図-4.2)を用いた。

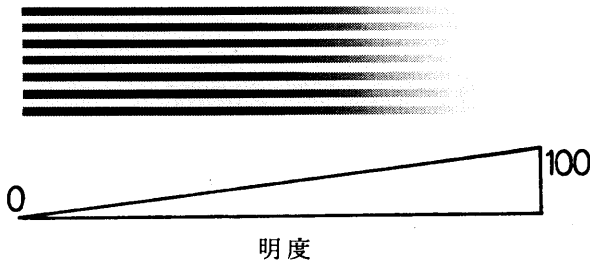


図-4.2 主観評価に用いたパターン

図-4.2では灰色部分で明度が x の正方向に1きざみ(約1mm幅)で変化している。この明度差の主観量が明るい部分と暗い部分とでどの程度異なるかに注目した。明度差に対する感度が最も高い部分での主観量を基準として5段階で評価させた。評価結果を図-4.3に示す。横軸は明度値 L^* を、縦軸は主観評価値 (MOS 値) をそれぞれ示す。これから視覚の明度値に対する感度は $L^*=73\sim 93$ で高く、比較的明るい部分で高いことがわかる。視覚の明度に対する感度として、

波長が 555nm 付近にピークを持つ比視感度曲線が知られているが、図-4.3は明度 L^* に対する感度特性を表している。そこで L^* が 82 から 89 の k を4章の前半で求めた値 0.2 として、表-4.1のように均等に重み関数を決定した。

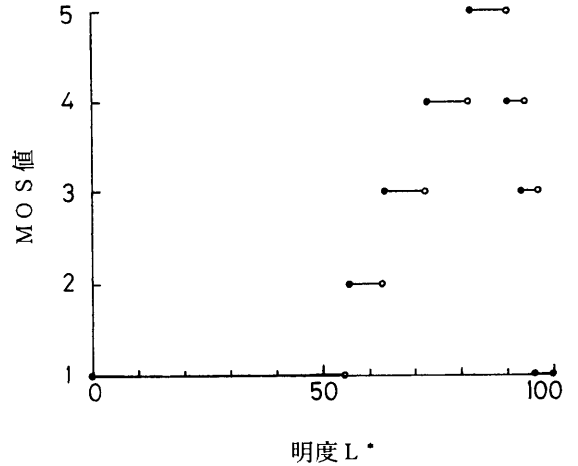
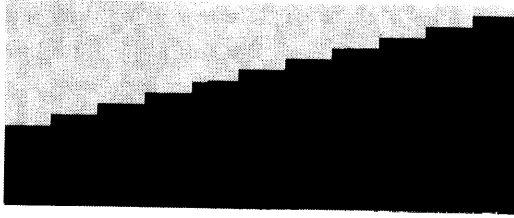


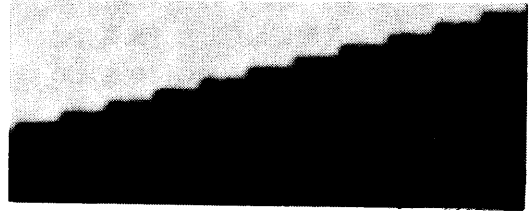
図-4.3 視覚の明度に対する感度

表-4.1 フィルタの重み係数

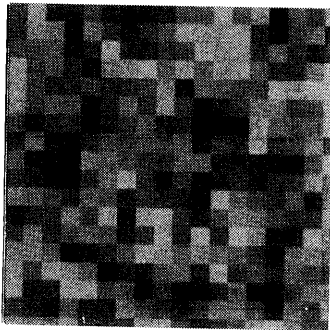
明 度 L^*	重 み k
0 ~ 54	0
55 ~ 62	0.05
63 ~ 72	0.1
73 ~ 81	0.15
82 ~ 89	0.2
90 ~ 93	0.15
94 ~ 96	0.1
97 ~ 100	0



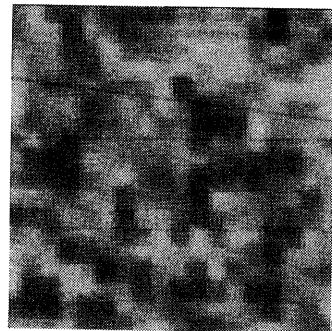
(a)



(a)



(b)



(b)

図-5 評価に用いた画像の一例

5. 評価

4章のように重み付けしたアンチエイリアシングフィルタの効果を実際の画像を用いて評価した。評価のポイントは画像中の任意の領域を拡大した時（視点の移動に対応する）に、

- ① 画像のエッジ情報を失わずにジャーキネ

スやテクスチャなどの量子化ノイズを許限界値以内に押さえること

- ② フィルタ効果に伴うテクスチャの色ずれを生じないこと

である。①は相反する効果を求めるもので、今回のフィルタの主眼の一つである。つまりCG特有の画像の形状情報を失うことなく平滑化の効果を得るものである。図-5に評価に用いた画

像の一例を示す。評価には量子化ノイズによる影響が顕著に現れる比較的簡単な画像を選んだ。

この画像の任意の領域を36倍（縦横6倍）に拡大した画像を(a), (b)に示す。図中の左側がフィルタ処理なしの原画で、右側が2章のフィルタ処理を施したものである。(a)ではエッジ部分で生じるジャーキネスが、また(b)では量子化によるテクスチャパターンがそれぞれ許容限界値以内となった。同時に色ずれはRGB-表色系を用いた場合に比較して最低限に押さえられている。従来から広く用いられているRGB-表色系でのメディアンフィルタとの比較を行った結果、今回提案したフィルタは特に文字のようなエッジの情報は損なわれずに画像の濃淡部分で一樣な平滑化の効果が得られ、色ずれは生じないことを確認した。

6. まとめ

ハイビジョンモニタなどを用いた高品質な3次元CG画像生成において問題となる量子化ノイズを除去するアンチエイリアシング処理について考察した。特にCG画像特有の視点を移動することによって強調される、画像中の量子化ノイズを許容限界値以内に押さえるためのフィルタを提案した。

従来広く用いられてきたRGB-表色系での画像データを人間の視覚に対して均等なCIE L A B均等色空間に座標変換し、その明度情報 L^* を用いてフィルタ処理することで、画像中での色ずれを最小限に押さえることができた。また、フィルタの重み係数を注目する画素の明度値 L^* に応じて変えることで、画像のシーンによって異なっていたフィルタ効果を一樣に保つことが可能となった。今回のフィルタは、数十倍の拡大率までは劣下を補償できるが、これ以上の拡大率については、画像の拡大率に応じてフィルタの重み係数を変えることで最適なフィルタ効果を得ることができる。

今後はこのフィルタ処理を用いて、工業デザインや各種シュミレーション分野での高画質な3次元CG画像生成のための処理手法を開発する予定である。

<参 考 文 献>

- [1] 安部 他, "画像生成システムSIG2", 情報処理学会グラフィックスとCAD研究会資料, 37-10, 1989.
- [2] 西村 他, "光の相互反射を考慮した高速画像生成のための一手法", 情報処理学会第37回全国大会論文集, 1988.
- [3] 中 他, "カラープリンタにおける階調数, 画素密度の許容限界", 色彩工学コンファレンス論文, vol. 4, 1987.
- [4] 池田 光男, "色彩工学の基礎", 朝倉書店, 1984.
- [5] A. Rosenfeld, ed., "Digital Picture Processing", Academic Press, 1976.
- [6] CCIR Report, "Rec. 500-2", 1985.