

景観評価画像作成のための物体属性を考慮した アンチエリアシング手法

加藤 二二和[†] 金 田 和 文^{††}
森 重 樹^{†††} 山 下 英 生^{††}

本論文では、送電線などの細い物体や水面を含む景観評価画像を作成する際、効率良くエリアシングを除去して高品質な画像を生成する方法を提案する。提案手法では、表示する物体の属性により、多面体で構成された物体と特定形状を持たない物体の2種類に分類し、それぞれの特性に従ってエリアシング発生の可能性のある画素を抽出し、その画素においてのみそれぞれに適した手法を適用することによりエリアシングの除去を行う。そのため、アンチエリアシング処理を局所的に、かつ効率良く行うことができる。また、多面体で構成された物体のエリアシングの除去では、多角形の可視領域を求める際に浮動小数点演算による計算誤差の影響を受けにくくするための多角形どうしの交点の求め方およびクリッピング方法を提案し、特定形状を持たない物体である水面に対するエリアシングの除去では、波面の複雑さと水面への映り込みの複雑さを考慮したアンチエリアシング手法を提案する。

An Anti-aliasing Method in Consideration of Object Attributes for Generating Landscape Evaluation Images

FUJIWA KATO,[†] KAZUFUMI KANEDA,^{††} SHIGEKI MORI^{†††}
and HIDEO YAMASHITA^{††}

This paper presents a method for generating high-quality landscape evaluation images which include long and thin transmission lines and water surfaces without any aliasing. In our method, objects are first classified by their attributes into two groups: polygonal objects, and non-polygonal objects such as water. Second, pixels with a possibility of aliasing are extracted according to the characteristics of the two groups. Finally, suitable anti-aliasing methods for the objects are applied to each extracted pixel. The proposed method efficiently eliminates aliasing because of the local processing. We also propose novel ways to find intersections of polygons, and to clip polygons, which can reduce floating point calculation errors in extracting the visible portion of the polygons. For eliminating the aliasing of a water surface, which is a non-polygonal object, an anti-aliasing method which takes account of the complexity of wave surfaces and reflections in the water is proposed.

1. はじめに

送電線建設時の景観評価を目的として、コンピュータグラフィックスで景観予測画像を作成する場合、铁塔境界部分が階段状になったり送電線が途中で切れる、いわゆるエリアシングが問題となる。自治体や地域住民への説明などに使う場合に、エリアシングによる画

質の劣化が誤解を招く原因となることがあり、高品質で正確な画像作成が望まれている。高品質な景観予測画像作成のためには、細く長い電線などの電力設備はもとより、電力設備の見え方を左右する背景となる空や雲、海、地形などの自然景観もエリアシングなく正確に表示される必要がある。

本論文では、このような景観予測画像作成の際の物体属性を考慮したアンチエリアシング手法を提案する。すなわち、表示する物体の属性により、電力設備や地形など「多角形で構成された物体」と海などの水面のような「特定形状を持たない物体」の2種類に分類し、それぞれに適したレンダリング手法¹⁾とその物体属性に適したアンチエリアシング手法を用いてエリアシングの除去を行う。

[†] 東京電力株式会社システム研究所

Computer & Communications R&D Center, Tokyo Electric Power Company

^{††} 広島大学工学部

Faculty of Engineering, Hiroshima University

^{†††} 松下電器産業株式会社テレビ事業部

Television Division, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

具体的には、多角形で構成された物体に対しては、レンダリング手法としてスキャンライン法を適用し、エリアシングが発生する可能性のある画素についてのみ多角形どうしのクリッピングを行い、画素に含まれる多角形の可視領域を正確に求め、可視領域の面積比に応じて画素の色を決定する。また、特定形状を持たない物体に対しては、レンダリング手法としてレイトレーシング法を適用し、ランダムにサンプル点を発生させ、サンプル点上での色を加算平均することにより画素の色を決定する。

ここでは、スキャンライン法とレイトレーシング法に対するアンチエリアシング手法を整理し、提案する手法の位置づけを明確にする。

西田・中前が提案したマルチスキャンニング法²⁾は、スキャンラインの間に仮想的なサブ・スキャンラインを挿入することで面積の計算精度を向上させる手法であるが、スキャンラインと交点を持たない細く水平な物体が存在する場合には、多くのサブ・スキャンラインを挿入しなければならず、計算時間が増加する。また、必要な部分のみサブ・スキャンラインを挿入するアダプティブな処理もなされていない。

田中・高橋が提案した直交スキャンライン法³⁾は、水平・垂直両方向のスキャンラインを用い多角形の頂点を考慮して面積を求めているため、マルチスキャンニング法に比べ、正確に多角形の面積を求めることができる。しかしながら、送電線のようなスキャンラインの幅より細い物体が水平に存在する場合では、この手法を用いても正確に面積を求めることができない。

Catmull が文献 4) で提案したアンチエリアシング手法は、各画素に含まれる多角形の面積を正確に求めることができる。しかし、この手法は、すべての画素に対して、そこに存在する多角形をクリッピングしそれぞれの面積を求めるため、スキャンライン法等の面積近似手法に比べて計算時間が長くなる。

レイトレーシング法においてサンプル点を増加してエリアシングを除去する手法としては、格子状に規則正しくサンプル点を増やす方法^{5),6)}とランダムに発生させる方法^{7),8)}が提案されている。後者の方が比較的小さいサンプル点数でエリアシングが目立たなくなる手法であるといわれている。

提案手法は、エリアシング発生のある画素をあらかじめ抽出するため、エリアシング除去処理を局所的に行うことができる。また、この処理において物体の属性に適したアンチエリアシング手法を用いるため、属性の異なる物体が混在する場合でも効率良く高品質画像を作成することができる。なお、本論文で

は特定形状を持たない物体として水面のみを扱う。なぜならば、景観予測画像中で特定形状を持たない物体として雲もあるが、雲はその輪郭がはっきりせず、エリアシングの問題は生じにくいからである。また、本論文では影の境界に生じるエリアシングも取り扱っていない。それは、より写実的で高品質な画像生成のためには、天空光⁹⁾や太陽の大きさを考慮した照明モデル¹⁰⁾を用いる必要があり、これらによって影の境界に半影が生じるためエリアシングは大きな問題とならないためである。

以下、2章において物体属性による物体の分類と物体属性に応じたエリアシング発生画素の抽出法について述べる。3章において多角形で構成された物体に対するアンチエリアシング手法、4章で水面に対するアンチエリアシング手法について述べる。5章では提案手法を用いて、鉄塔・送電線、川辺の建築物の表示を行い、提案手法の有効性を示す。

2. 物体属性に応じたエリアシング除去

シーンに含まれる物体の属性を考慮し、物体属性に適したアンチエリアシング手法を適用するためには、前処理として属性による物体の分類とそれぞれの物体属性に対してエリアシング発生画素を抽出する必要がある。そこで、図1に示すようにレンダリングシステムをスキャン処理部とレンダリング処理部に分離し¹¹⁾、スキャン処理部においてスキャンラインと物体との交点およびエリアシング発生のある画素を求め、これをファイルに出力する。レンダリングの際には、このファイルを読み込み、エリアシング発生の可能性のある画素では物体属性に適したエリアシン

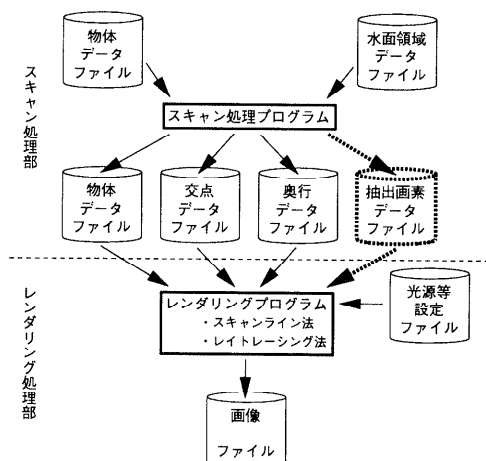


図1 レンダリングシステムの構成

Fig. 1 Configuration of rendering system.

グ除去をともなうレンダリング手法を適用し、それ以外の画素ではエリアシング除去をともなわないレンダリング手法を適用することにより各画素の色を決定する。このように処理を分離することにより、物体の色や光源位置などスキャン処理に無関係な変更を行う際の画像作成時間を短縮することができる。

2.1 多角形で構成された物体のエリアシング発生画素抽出

多角形で構成された物体をスキャンライン法でレンダリングする場合、スキャンラインと物体との交点は必ず多角形の輪郭線上に存在する。したがって、エリアシング発生の可能性のある画素は多角形の輪郭部分の画素である。そこで、次の条件を満たす画素をエリアシング発生画素として抽出する。

- (1) 送電線を構成する多角形の輪郭部分が投影される画素（送電線は、文献 12）で提案した複数の多角形モデルを使用）
- (2) 送電線以外で、物体を構成する多角形の水平に近い傾きを持つ辺が投影される画素

2.2 特定形状を持たない物体のエリアシング発生画素抽出

特定形状を持たない物体、すなわち、水面におけるエリアシング発生の可能性のある画素は、他の物体との境界のみならず、波や映り込みにより水面領域全体となる。そこで、水面領域を定義するために入力してある物体が投影される画素を求め、それらすべての画素をエリアシング発生画素として抽出する。

3. 多角形で構成される物体に対する処理

多角形で構成された物体に対するアンチエリアシング処理は、2.1 節で抽出したエリアシング発生画素に対してのみ行う。そのため、提案するアンチエリアシング手法の基本は、文献 4) で Catmull が提案した方法を画素単位に処理するように変更したものである。

3.1 処理手順

提案手法の処理手順を以下に述べる。

- (1) ステップ (2)~(6) の処理をエリアシング発生画素として抽出された画素に対して行う。
- (2) 計算対象画素に一部でも含まれる可能性のある多角形を minimax テストによりすべて抽出する。
- (3) 抽出された多角形を Cohen-Sutherland のクリッピングアルゴリズム¹³⁾を用いて画素境界をなす 4 辺でクリッピングする。
- (4) 画素境界でクリッピングされた多角形を前後判定し、視点に近い順に並べたリストを作成する。
- (5) 画素境界でクリッピングされた多角形どうしの

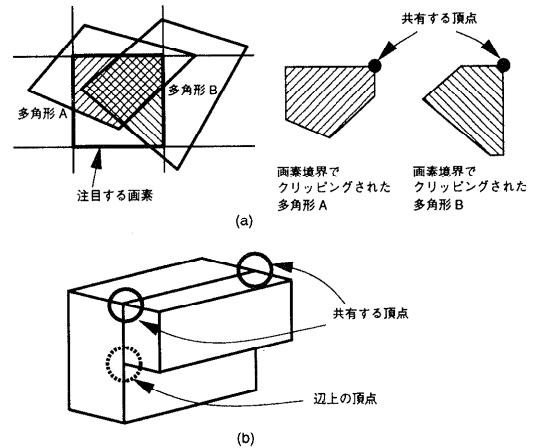


図 2 複数の多角形に共有される頂点
Fig. 2 Vertices shared with polygons.

クリッピングを行う。

- (6) クリッピングされた多角形の面積を計算し、画素の色を決定する。

なお、提案手法では、以下の 3 点を前提条件とする。

- 物体を構成する多角形はすべて凸多角形である。ただし、クリッピング処理においてクリッピングされた多角形が凹多角形になることを許す。
- 多角形を構成する頂点は投影面上で右回りに番号付けされる。
- 物体は接することはあっても干渉しない。

上記処理手順のステップ (5) の多角形どうしのクリッピング処理では、基本的に Weiler らが文献 14) で提案した手法、すなわち、多角形を構成する辺の交点を求めた後、多角形の頂点と交点のつながりをたどる方法を採用する。しかしながら、提案手法では画素境界で多角形をクリッピングするため、図 2 (a) に示すようにクリッピングされた後の多角形の頂点が同じ座標になることが多い。また、上記前提条件のもとで複雑な形状の建築物を表現する場合、図 2 (b) に示すように頂点を元々共有する多角形や他の多角形の辺上に存在する場合が多くなる。実用上、交点を求める際には、このような場合の処理を考慮しておかなければならない。なぜならば、浮動小数点演算による計算誤差の影響により交点のつながりに誤りが生じ、クリッピングが正しく行われず、多角形の可視領域を正確に求められない場合が発生するからである。文献 14) では頂点を共有した場合や、辺上に頂点が存在する際の処理についていっさい触れられていないので、この問題を解決するために、浮動小数点演算による計算誤差の影響を受けにくいクリッピングアルゴリズムを開発した。

```

for (i=1; i<=N; i++) n[i]=1;
for (j=1; j<=N; j++){
  if (j番目の多角形 != NULL){
    for (i=j+1; i<=N; i++){
      for (k=1, h=0; k<=n[i]; k++){
        if (iのk番目の多角形 != NULL){
          if (iのk番目の多角形とj番目の多角形に交点が存在) /*3.2.1節参照*/
            頂点探索によりクリッピング後のiのk番目の多角形の新しい頂点列を記憶. 2つ以上に分割される場合, iのn[i]+h+1番目以降に頂点列を記憶し, h=h+(分割により増加した多角形数)とする; /*3.2.2節参照*/
          else if (j番目の多角形がiのk番目の多角形を完全に包含)
            多角形リストのiのk番目をNULLとする;
          else if (iのk番目の多角形がj番目の多角形を完全に包含){
            3.1節ステップ(6)の面積計算時にiのk番目の多角形の面積からj番目の多角形の面積を引くことを記憶;
            break;
          }
        }
      }
      n[i]=n[i]+h;
    }
  }
}

```

図3 多角形どうしのクリッピングアルゴリズム

Fig. 3 Polygon clipping algorithm.

3.2 多角形どうしのクリッピングアルゴリズム

画素境界でクリッピングされた多角形どうしのクリッピングアルゴリズムをC言語の疑似コードで表したものを図3に示す。なお、3.1節の処理手順のステップ(4)の前後判定により視点から近い順に並べられた多角形リストには、N個の多角形があるものとし、視点に近い多角形がそれより遠い多角形をクリッピングすることとする。また、ここでは画素境界でクリッピングされた多角形を単にi番目の多角形と記述し、他の多角形によりクリッピングされた多角形は、複数個に分割される場合があるので、元の多角形の番号iと分割後の番号kを組み合わせ、iのk番目の多角形と記述する。アルゴリズムを見て分かるように、クリッピングする多角形は、つねに他の多角形にクリッピングされていない元の多角形(画素境界ではクリッピングされている)を使用しているのが特徴である。

3.2.1 交点算出法

多角形の辺と辺の関係、頂点と辺の関係に着目し、クリッピングされる多角形が凹多角形である場合も考慮した交点算出法を提案する。本手法では次の4つの場合のみを交点として取り扱う。

- (1) 辺と辺が頂点を含まない部分で交差する場合(図4(a)参照)。
- (2) クリッピングされる可能性のある多角形(以下、被切断多角形Aと呼ぶ)の頂点 a_i がクリッピングする可能性のある多角形(以下、切断多角形Bと呼ぶ)の辺 $\overline{b_{j-1}b_j}$ 上に存在し、かつ頂点 a_i に隣接する2つの頂点 a_{i-1} , a_{i+1} のうち、1点のみが辺 $\overline{b_{j-1}b_j}$ の進行方向に向かって左側(辺上を除く)に

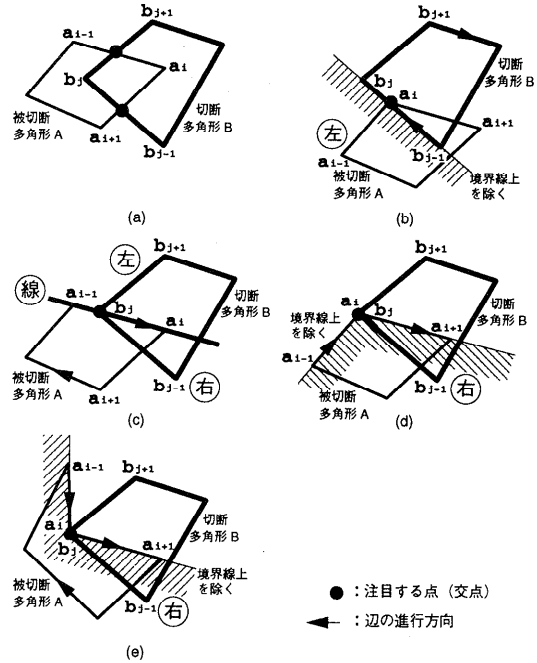


図4 交点の条件を満たす例

Fig. 4 Examples of intersections.

存在する場合(図4(b)参照)。

- (3) 切断多角形Bの頂点 b_j が被切断多角形Aの辺 $\overline{a_{i-1}a_i}$ 上に存在し、かつ頂点 b_j に隣接する2つの頂点 b_{j-1} , b_{j+1} がその辺 $\overline{a_{i-1}a_i}$ で作られる3つの領域(右側, 線上, 左側)の同じ領域に存在しない場合(図4(c)参照)。
- (4) 被切断多角形Aの頂点 a_i と切断多角形Bの頂点 b_j が一致し、かつ切断多角形Bの頂点 b_j に隣接する2つの頂点 b_{j-1} , b_{j+1} のうち、1点のみが被切断多角形Aの頂点 a_i を含む2辺 $\overline{a_{i-1}a_i}$, $\overline{a_i a_{i+1}}$ の進行方向に向かって右側(辺上を除く)に存在する場合。ただし、図4(d), (e)に示すように被切断多角形Aが凸多角形と凹多角形の2通りの場合が存在する。

3.2.2 頂点探索によるクリッピング

被切断多角形から切断多角形により隠される部分を削除するクリッピングの方法は、クリッピングにより被切断多角形が2つに分かれることを考慮した以外は、文献14)で提案された頂点列を探索していく方法と同じである。以下にクリッピング方法を説明する。

まず、頂点を探索する際の現在の位置を示すポイントをCPとする。そして、CPの位置によって、次の4つの状態に分類する。

- 状態1: 被切断多角形の頂点
- 状態2: 奇数番目に遭遇した交点

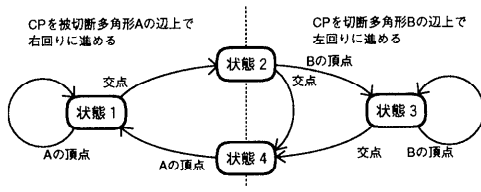


図5 頂点探索の方法

Fig. 5 Vertices traversal method for polygon clipping.

- 状態3: 切断多角形の頂点
- 状態4: 偶数番目に遭遇した交点

- (1) 状態1の頂点を始点および終点とし、CPを始点にセットする。
- (2) 図5に示すように、CPを進めることによりクリッピング後の頂点を探索する。途中、CPが終点と等しければステップ(3)へ。
- (3) 未探索の状態1の頂点があれば、ステップ(1)へ、なければ処理を終了する。

4. 水面に対する処理

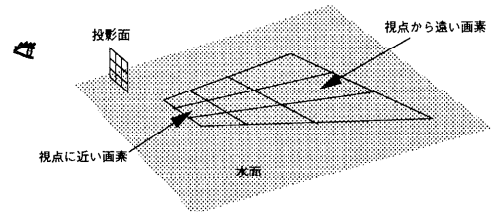
4.1 処理手順

水面の波は、一般的によく用いられている複数のストークス波を重ね合わせてモデリングする方法¹⁵⁾を用いる。この水面に対するアンチエイリアシング手法として、波をモデリングする際の波長や振幅、そして水面に映り込んだ物体を考慮して、複数のサンプル点を発生させる方法を提案する。以下に処理手順を示す。

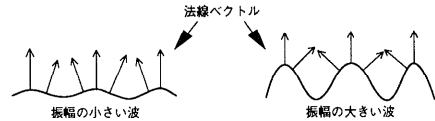
- (1) 1画素に含まれる波のサイクル数や振幅を考慮(4.2節参照)し、画素内に発生するサンプル点数を決定する。
- (2) モンテカルロ法を用いてサンプル点の発生位置(4.3節参照)を決定し、レイトレーシング法を用いてサンプル点での色を計算する。
- (3) ステップ(2)で求めた各サンプル点の色を用いて、水面への映り込みの複雑さ(4.4節参照)を推定し、さらに追加するサンプル点数を決定する。
- (4) 追加されたサンプル点の発生位置をモンテカルロ法を用いて決定し、レイトレーシング法を用いて追加サンプル点での色を計算する。
- (5) ステップ(2)とステップ(4)で求めたサンプル点での色を加算平均し、画素の色とする。

4.2 波を考慮したエイリアシング除去

3次元データの2次元への変換には透視投影法を用いているため、図6(a)に示すように、1画素内に投影される3次元空間の領域は、視点から遠ざかるにつれ広がる。すなわち、視点から遠くなるほど画素に含まれる波のサイクル数が増える。また、図6(b)



(a) 視点からの距離による画素の占める領域の面積



(b) 振幅の大きさによる法線ベクトルの変化率の違い

図6 透視投影と波の振幅の影響

Fig. 6 Influence of perspective projection and wave amplitude.

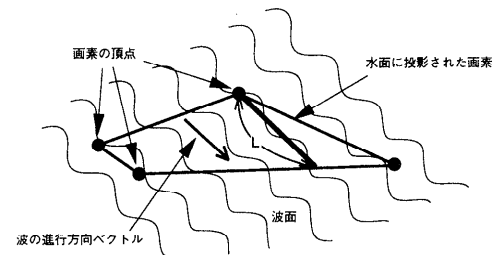


図7 サイクル数

Fig. 7 Number of cycles.

に示すように、振幅の大きい波の方が振幅の小さい波よりも水面での法線ベクトルの変化が大きい。すなわち、波の振幅が大きくなるほど水面での色の変化も大きくなる傾向がある。したがって、上記2点から視点から遠い領域ほど、そして、波の振幅が大きいほどサンプル点数を多くする必要があるといえる。

この点を考慮し、画素内に発生させるサンプル点数を式(1)により求める。

$$N = k_w \sum_{i=1}^M (A_i n_i) \quad (1)$$

N : 画素に発生させるサンプル点数

k_w : サンプル点数を制御する係数

A_i : 波 i の振幅値

n_i : 画素内に投影される波 i のサイクル数

M : ストークス波数

なお、図7に示すようにサイクル数は、水面上に投影された1画素の領域に含まれる波の進行方向に沿った最大長さ L をその波長 λ_i で割ったものとする。

4.3 サンプル点発生位置の決定

画素内に複数のサンプル点を発生させる場合、文献

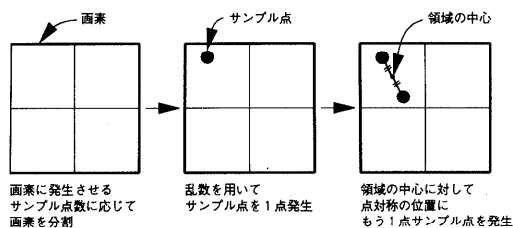


図8 サンプル点発生方法

Fig. 8 Sampling point generation.

8) 等に述べられているようにランダムにサンプル点を発生する方がエリアシングが生じる可能性が低い。我々は、モンテカルロ法の一手法であるヘイパーの方法¹⁶⁾による推定量の分散の通減法を行ったサンプリング手法を開発した。サンプル点の発生位置決定方法は以下のとおりである(図8参照)。

(1) 式(2)を用いて画素の分割数を決定し、投影面上の画素を等間隔な格子状の領域に分割する。

$$D = \lfloor \sqrt{N/2} \rfloor \quad (2)$$

D : 画素の x, y 方向の分割数

$\lfloor \rfloor$: 小数点以下の切捨て演算

(2) 一様乱数を用いて画素内に、サンプル点を1点発生する。

(3) ステップ(2)で発生したサンプル点がステップ(1)で分割したどの領域に存在するかを調べ、その領域の中心に対して点対称となる位置にサンプル点をもう1点発生する。

(4) ステップ(2)~(3)の処理をサンプル点数の1/2回分繰り返す。

4.4 映り込みの複雑さを考慮したエリアシング除去
レイトラシング法を用いた水面のレンダリングでは、水面での光の反射・屈折により、水面上に映り込みが生じる。エリアシングを抑えるためには、複雑な物体が映り込んでいる画素にはより多くのサンプル点を発生する必要がある。この映り込みの複雑さをサンプル点での色のばらつき、すなわち、各画素の輝度値の分散を用いて追加するサンプル点数を式(3)により決定する。なお、輝度値と人間が感じる明るさの間には非線形な関係があるといわれており、フェビナーの式より対数を用いる¹⁷⁾。

$$N' = k_r \log_{10} I_v \quad (3)$$

N' : 画素に追加するサンプル点数

k_r : サンプル点数を制御する定数

I_v : RGB各成分における輝度値の分散の最大値

表1 計算時間の比較(鉄塔・送電線)

Table 1 Calculation time (transmission towers and lines).

手 法	CPU 時間
提案手法	5 分 10 秒
マルチスキヤニング法 (11 本)	7 分 13 秒

使用計算機: SGI-Indy R4400SC 175 MHz

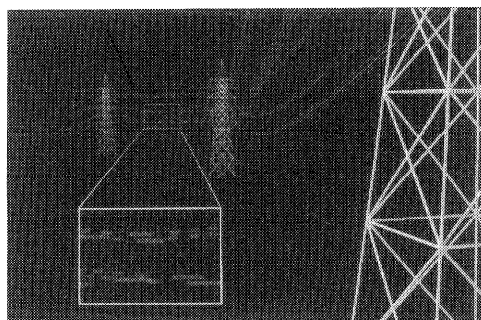
画像サイズ: 1000×650 ピクセル

5. 適用と評価

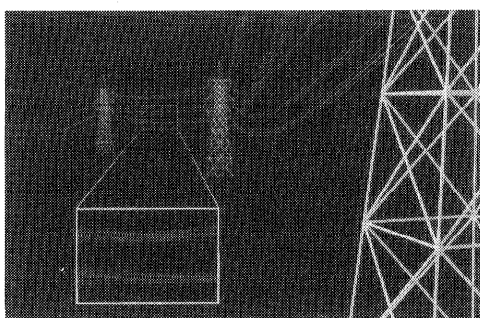
提案手法の有効性を評価するため、鉄塔や送電線、川辺の建築物の表示に適用した。

図9(a)は従来のスキャンライン法を用いて作成した鉄塔・送電線の画像である。鉄塔や送電線は鏡面反射を表現するためにPhongの反射モデルを使用している。なお、電線のエリアシングがよく分かるように背景を削除し、左下に特徴的な部分を4倍に拡大したものをはめ込んで表示している。アンチエリアシング処理がなされないため、画像中央の送電線がたるんでいる部分にエリアシングによる画質劣化、すなわち細かい物体が切れる現象が発生し、手前の鉄塔の支柱境界部分が階段状となっている。図9(b)は提案手法を用いて作成した画像である。送電線の切れる現象が除去され、鉄塔の支柱の階段状の境界がスムーズになっており、エリアシングが除去されていることが分かる。また、マルチスキヤニング法を用いた場合、提案手法とほぼ同等の画質を得るためには、サブ・スキャンラインを11本挿入しなければならなかった。表1に示すように両者の計算時間を比較すると、提案手法はマルチスキヤニング法より約30%計算時間が短縮されている。

図10(a)は従来のスキャンライン法を用いて作成した川辺の建築物の画像である。特に画像中央の建物の境界部分や画像右側にある高層ビルの窓において、エリアシングの影響が目立っている。図10(b)は提案手法を用いて作成した画像であり、前述のエリアシングによる影響が除去されている。また水面を比較すると、提案手法により作成された画像の方がより自然な水面を表現している。特に、画像右側にある高層ビルの映り込みが現実感を増しているのが分かる。なお、水面に対するアンチエリアシングのためのパラメータは、 k_w を800.0、 k_r を3.0とした。また、マルチスキヤニング法を用いた場合、提案手法とほぼ同等の画質を得るためには、サブ・スキャンラインを4本挿入しなければならなかった。表2に示すように両者の計算時間を比較すると、提案手法はマルチスキヤニング



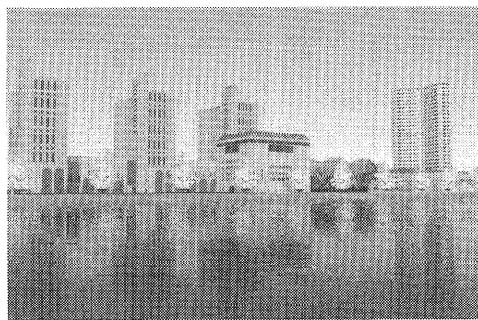
(a) スキャンライン法 (エアアシング除去なし)



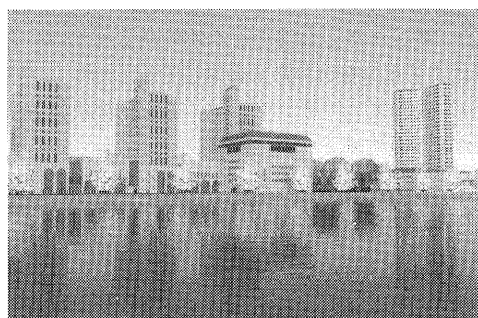
(b) 提案手法

図9 鉄塔・送電線への適用

Fig. 9 Application to transmission towers and lines.



(a) スキャンライン法 (エアアシング除去なし)



(b) 提案手法

図10 建築物と水面への適用

Fig. 10 Application to buildings and water surface.

表2 計算時間の比較 (建築物と水面)

Table 2 Calculation time (buildings and water surface).

手 法	CPU 時間
提案手法	1 時間 50 分 27 秒
マルチスキャンニング法 (4 本)	12 時間 15 分 15 秒

使用計算機: SGI-Indy R4400SC 175 MHz

画像サイズ: 1000×650 ピクセル

法より約 85% 計算時間が短縮されている。

6. おわりに

本論文では、景観評価画像作成のための物体属性を考慮したアンチエアアシング手法について提案し、その有効性を示した。提案手法は次の特徴を持つ。

- エリアシング発生のある画素をあらかじめ抽出するため局所処理を行うことができ、効率良く短時間にエアアシング除去を行うことができる。
- 物体の属性に適したアンチエアアシング手法を用いてエアアシング除去を行うため、属性の異なる物体が混在する場合でも、効率良く高品質画像を作成することができる。

また、多角形で構成された物体に対するアンチエアアシング手法では、多角形の可視面領域計算の際に、浮動小数点演算による計算誤差の影響を受けにくく、

ストークスの波を重ね合わせてモデリングされた水面に対して、波面の複雑さと水面への映り込みの複雑さの両者を考慮したエアアシング除去法を開発した。

今後の課題としては以下の点があげられる。

- 提案手法では 1 画素内に多角形と水面が混在する場合は、水面領域に対するアンチエアアシング手法を用いてエアアシング除去を行っている。しかし、河川を横断する送電線が存在する景観を表示する際には、表示精度の点から 1 画素をさらに多角形領域と水面領域に分割し、その属性に合ったエアアシング除去法により色計算を行った方がより精度の高い画像を得ることができると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 中前栄八郎, 多田村克己, 西田友是: 局所レイレーシングによる陰影表示, 情報処理学会論文誌, Vol.27, No.11, pp.1077-1085 (1986).
- 2) 西田友是, 中前栄八郎: マルチスキャンニング法によるスムーズエッジ処理を施した三次元物体の陰影表示, 情報処理学会論文誌, Vol.25, No.5, pp.703-711 (1984).
- 3) 田中敏光, 高橋時市郎: アンチ・エアアシングのための直交スキャンライン法, 情報処理学会論文誌, Vol.32, No.2, pp.197-205 (1991).

- 4) Catmull, E.: A Hidden-Surface Algorithm with Anti-aliasing, *Computer Graphics*, Vol.12, No.3, pp.6-11 (1978).
- 5) Crow, F.C.: The Aliasing Problem in Computer-Generated Shaded Images, *Comm. ACM*, Vol.20, No.11, pp.799-805 (1977).
- 6) Whitted, T.: An Improved Illumination Model for Shaded Display, *Comm. ACM*, Vol.23, No.6, pp.343-349 (1980).
- 7) Dippé, M.A.Z. and Wold, E.H.: Antialiasing Through Stochastic Sampling, *Computer Graphics*, Vol.19, No.3, pp.69-78 (1985).
- 8) Mitchell, D.P.: Generating Antialiased Images at Low Sampling Densities, *Computer Graphics*, Vol.21, No.4, pp.65-72 (1987).
- 9) Nishita, T. and Nakamae, E.: Continuous Tone Representation of Three-Dimensional Objects Illuminated by Sky Light, *Computer Graphics*, Vol.20, No.4, pp.125-132 (1986).
- 10) Takita, S., Kaneda, K., Akinobu, T., Iriyama, H., Nakamae, E. and Nishita, T.: A Simple Method for Rendering Penumbra Caused by Sunlight, *The Visual Computer*, Vol.7, No.5-6, pp.259-268 (1991).
- 11) Nakamae, E., Ishizaki, T., Nishita, T. and Takita, S.: Compositing 3D Images with Antialiasing and Various Effects, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.9, No.2, pp.21-29 (1989).
- 12) Kaneda, K., Iriyama, H., Kato, F. and Nakamae, E.: Realistic Image Synthesis of Complex Objects Using a Simplified Model, *Proc. Modeling in Computer Graphics*, pp.277-291 (1991).
- 13) van Dam, F.: *Computer Graphics Principles and Practice*, chapter 4.2.1 a), Addison-Wesley (1990).
- 14) Weiler, K. and Atherton, K.: Hidden surface removal using polygon area sorting, *Computer Graphics*, Vol.11, No.2, pp.214-222 (1977).
- 15) Kaneda, K., Yuan, G., Tomoda, Y., Baba, M., Nakamae, E. and Nishita, T.: Realistic Visual Simulation of Water Surfaces Taking into Account Radiative Transfer, *Proc. CAD/Graphics '91*, pp.25-30, Hangzhou, International Academic Publishers (1991).
- 16) 津田：モンテカルロ法とシミュレーション，培風館 (1978).
- 17) 照明学会 (編)：ライティングハンドブック，オーム社 (1987).

(平成9年3月31日受付)

(平成9年10月1日採録)



加藤 二和 (正会員)

昭和39年12月22日生。平成元年3月広島大学大学院工学研究科博士課程前期システム工学専攻修了。同年4月東京電力(株)入社。電力分野へのコンピュータグラフィックス技術応用システムの研究開発に従事。電気学会会員。



金田 和文 (正会員)

昭和34年10月1日生。昭和59年3月広島大学大学院工学研究科博士課程前期システム工学専攻修了。同年4月中国電力(株)入社。昭和61年広島大学工学部第二類(電気系)助手，平成7年同大学同学部助教授。この間，平成3年1年間米国ブリガムヤング大学へ出張。コンピュータグラフィックス，画像処理の研究開発に従事。工学博士。電気学会，電子情報通信学会各会員。



森 重樹 (正会員)

昭和44年10月15日生。平成6年3月広島大学大学院工学研究科博士課程前期システム工学専攻修了。同年4月松下電器産業(株)入社。テレビ生産ラインにおける管面調整機の開発に従事。



山下 英生 (正会員)

昭和16年10月22日生。昭和39年3月広島大学工学部電気工学科卒業。昭和43年3月同大学大学院修士課程修了。広島大学工学部電気工学科助手，昭和53年同大学同学部第二類(電気系)助教授。平成4年同大学同学部教授。有限要素法による電気機器の電磁界解析，コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。工学博士。IEEE，電気学会，電子情報通信学会各会員。