

形状特徴表現のためのエッジ強調描画手法

望月 義典[†] 近藤 邦雄[†] 佐藤 尚^{††}

本論文では、三次元形状の理解を容易にする画像を生成するエッジ強調描画手法について述べる。形状特徴の誇張や陰影の強調など、画像に対するさまざまな強調によって、従来のリアリティの高い画像の生成方法に比べて、対象物の形状や質感などの情報を分かりやすく表現することができる。特にエッジは、形状把握のうえで重要な存在である。本研究では、三次元形状モデルに対して、エッジをその構造的な特徴ごとに分類し、特徴に合わせてエッジの幅や色の情報を指定して描画する方法を提案する。従来のエッジ描画手法では、エッジの幅や色を自由に指定して描画することは困難であったが、提案手法により短時間で容易に描画を行うことができるようになった。

Enhanced Edge Drawing Technique for Communicating Impression of 3-D Shapes

YOSHINORI MOCHIZUKI,[†] KUNIO KONDO[†] and HISASHI SATO^{††}

We introduce a series of graphics algorithms which generate images so as to emphasize their three dimensional characteristics. Compared with photorealistic rendering, shape features can be readily understood if certain geometric properties are enhanced. Especially, edge enhancement is an important technique to understand shape features. We propose a new edge drawing technique for 3-D shapes that classifies edge by structural features and can specify properties of edges such as width and color. In traditional way of drawing edges, it is difficult to specify properties of edges. Our method can draw edges more quickly and easily.

1. はじめに

コンピュータグラフィックスの分野では、レイトレーシング法やラジオシティ法など、リアリティの高い画像を得るための研究がさかんに行われ、写実的な画像を生成することが可能となっている。一方、画像は情報伝達の手段という観点からとらえることができ、この場合、必ずしも写実的な画像が優れているとは限らない。対象物の特徴を、大雑把な省略や極端な変形、誇張など、さまざまな強調を行って表現することにより、写実的な画像よりも、対象物を的確にとらえることができる。このため、従来からさまざまな表現方法が提案されてきたが¹⁰⁾、特に、面と面の境界、あるいは面と背景の境界を形成するエッジの強調は、面と面の区別を明確にし、形状を分かりやすくするうえで重要な表現方法である¹¹⁾。

工業デザイン分野や各種マニュアルなどでは、写真よりも、イラストのような、物体形状の特徴を分かりやすく表現した画像が用いられている場合が多く、エッジを強調した画像は工業的な需要も高い。しかし、現在のところ、このような特徴を強調した画像の生成は、人手によるところが大きく、その作業は豊富な経験とかなりの時間を必要としている。

従来から、このようなエッジ強調の重要性から、いくつかのエッジ描画手法が提案されている。二次元画像では、微分フィルタを用いた方法、人手による描画作業の支援システム¹⁾などがある。微分フィルタによる方法では、輝度の不連続な部分にだけエッジ描画が行われるため、同一輝度を持った2つの平行面が前後に並んでいるような部分にはエッジを描くことができない。人手による方法では、エッジを任意に加工することはできるものの、全体に均一な処理を施すことが難しい。

三次元形状モデルを用いる場合、Gバッファ法²⁾、ポリゴン近似による方法などがある。Gバッファ法では、輝度画像でなく、視点からの距離に応じて生成した距離画像に対しフィルタリングを行うことで、エ

[†] 埼玉大学工学部情報システム工学科
Department of Information and Computer Sciences,
Saitama University
^{††} 神奈川工科大学
Kanagawa Institute of Technology

ジ描画を実現している。しかし、基本がフィルタリングであるため、エッジを任意に加工することは困難である。また、ワイヤフレームにより、エッジとなる各境界と面との交差部分を求め、隠れた部分は描画しないという隠線消去法を基本とした方法^{3),4)}もあるが、かなりの計算時間を必要とする。また、隠面消去との組合せを考慮する場合、エッジ部分と面の周囲が同じ奥行きを持つため、計算誤差などによりエッジが面の後ろ側に隠れる可能性がある。エッジ部分を曲面パッチやポリゴン近似したデータとして持つ場合は、隠面消去法と同じアプローチでエッジ部分を描くことができる。特に、フォトリアリスティックレンダリングの分野で、ハイライトを正確に算出するための手法として用いられることが多い^{5),6)}。しかし、エッジ部分の形状近似が行われていないデータも多く、その場合には新たにデータを追加しなければならない。

以上のように、従来のエッジ描画法では、エッジの特徴に合わせた描き分けが非常に難しい、あるいは計算コストが非常に高くなるという欠点がある。

本研究では、エッジを加工して表示することができ、なおかつ計算コストも低くおさえるために、

- (1) エッジ抽出処理は、三次元形状データを基に、三次元空間上で行う
- (2) エッジの線としての情報を抜い、ワイヤフレームにたよらない描画方法を用いる
- (3) エッジ部分の曲面パッチ化やポリゴン近似を用いずに実現する

ようにする。これによって、短時間で容易にエッジ強調画像を生成することが可能となる。

以上の考えをもとに、本研究では、ポリゴンの集合で表現された三次元形状モデルを対象とし、エッジ描画処理をZバッファ法⁷⁾と組み合わせた手法を提案する。本手法は、基本の処理はZバッファ法と同じであるため、計算コストを増大させることなく、隠線消去と隠面消去を同時に実現させることができる特徴を持つ。

以下、2章で情報伝達手段としての画像の重要性、特徴強調の有効性を示し、3章でエッジの特徴分析と描画アルゴリズムについて説明し、4章で作画例とともに本手法の有効性を示す。

2. 形状認識と特徴強調画像

本章では、形状、陰影などの特徴をうまく伝達する表現方法を確立するために、人の形状認識について分析する。

画像は、眼球という光を感受する感覚器官を通じて、

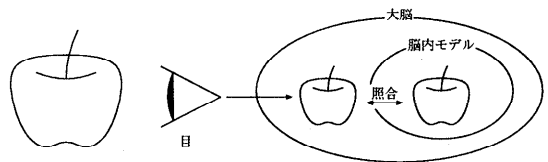


図1 知覚のしくみ

Fig. 1 Process of perception.

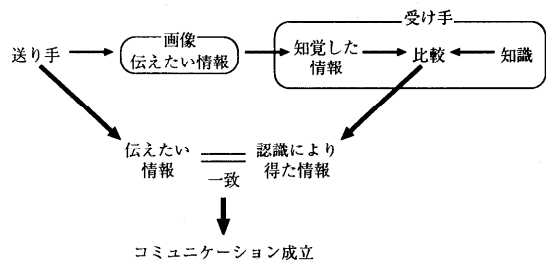


図2 画像によるコミュニケーション

Fig. 2 Communication by image.

人間に伝達される。この視覚像は、眼球の中の網膜上に投影される。この網膜像は、視神経を通じて大脳に送られ、そこで処理される。この処理を経ることで起こる、現実感や実在感をともなう統合的な認知反応、すなわち、見えているものがどのようなものかをとらえることを知覚という⁸⁾。この知覚という処理は、伝達された視覚情報を、過去の経験や学習によって作られ脳内に蓄積されたさまざまな物体や形状をパターン化したモデルと比較、照合し、一致させるものである(図1)。

画像を用いてコミュニケーションを図ろうとする場合、図2のように、送り手が伝えたいと思っている情報と、受け手が画像から認識して得た情報とが一致することが必要不可欠である。このとき、認識は、受け手自身の経験や学習によって得ていた知識と、提示された画像から知覚によって得た情報を比較することにより行われる。

したがって、画像によるコミュニケーションをより正確に行うためには、間違った知覚が起こらないような画像にすることが重要である。そのため、一般的に人が経験的に持っている脳内モデルとできるだけ一致するように、対象物を表現することが必要になる。

脳内モデルは、物体を写実的な表現でとらえたものでなく、物体の幾何学的構造や、明るさや色彩の変化パターンなどの特徴などに分類したものである。網膜上に投影される視覚情報は、単に画像強度の情報だけ持つ画素の集合であるので、視覚情報からこのような特徴への分類を行うことが必要となる。この視覚情報からの特徴の分類は、

- (1) 画像強度の変化から、縁、不連続点、小塊などの組織構造を獲得する
- (2) これらの情報から、局所的な表面方向、距離、奥行きの不連続点、表面方向の不連続点など、可視表面の幾何学的構造の情報を引き出すという処理により行われる⁹⁾。したがって、これらの処理がスムーズに行われるような画像が、形状を分かりやすく表現した画像ということができる。

3. エッジ強調

本章では、形状を分かりやすく表現するためのエッジ規則について述べ、エッジ描画アルゴリズムについて説明する。

エッジとは、面と面の境界、あるいは面と背景の境界を形成する線である。人の視覚は、物体の境界部分に対して特に敏感である。これは、境界部分が、知覚における組織構造の獲得の段階における領域分割の、重要かつ基礎的な情報となるからである。したがって、境界部分が正しく取得できないと間違った組織構造の獲得を行うことになり、最終的に形状認識にも悪影響を及ぼすことになる。このため、形状を認識するうえで、エッジ強調は重要な手法である。

3.1 エッジの分析

エッジは、黒く描画しただけでもある程度効果を発揮するが、面との位置関係などにより、いくつかの性格に分類される。そのため、エッジに何らかの加工を施し、これらを区別する必要がある。そこで、エッジに対する効果的な加工方法を検討するため、エッジの性格について分析する。

エッジは、輪郭線と内形線の2種類に分類される。エッジを形成する2つの面のうち、1つだけが可視面であるものが輪郭線、2つとも可視面であるものが内形線である。画像中、エッジをはさんで2つの面がある場合、このエッジが内形線の場合は、2つの面はつながっている面どうしである。一方、輪郭線の場合は、2つの面の間には奥行き之差が必ず生じている。このため、輪郭線と内形線によりこの違いを明確に表現する必要がある。

また、エッジを形成する面が2つとも可視になっている内形線は、光があたって見える場合が多く、これに比べて、輪郭線は光って見えることは少ない。さらに、輪郭線の場合、その奥の別の面によるエッジが手前の輪郭線と交差し、あたかもつながって見えてしまうような場合がある。これを防ぐような表現方法も必要となってくる。

以上のような分析から、輪郭線、内形線に対する強

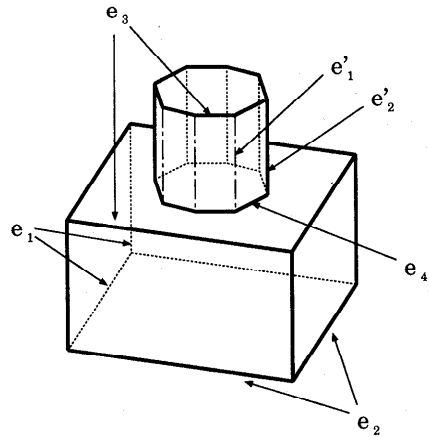


図3 エッジの分類

Fig. 3 Classification of edge.

調規則は以下のようにする。

- 規則1 輪郭線は内形線より太くする。
- 規則2 輪郭線の色は濃くし、内形線の色は薄くする。
- 規則3 輪郭線の奥に面が見える場合、外側に薄い色の線を描く。

3.2 エッジの分類

エッジを形成する2つの面の可視、不可視の状態によって、エッジは

- 描かれないエッジ： e_1
- 輪郭線になるエッジ： e_2
- 内形線になるエッジ： e_3

の3つに分類できる(図3)。

両方とも不可視となっている場合、エッジそのものも視点から不可視となり、描かれないエッジ(e_1)となる。片面だけ不可視のエッジ(e_2)または両面とも可視のエッジ(e_3)は、視点から可視となり、基本的には描かれるエッジとなる。

本研究で用いる三次元形状モデルは、ポリゴンの集合体であり、各部品ごとにグループ化されている。また、円柱の側面なども多面体近似されたデータを用いるが、スムーズシェーディングをして境界のない滑らかな曲面として表現するために、視点から可視となっているエッジ(e'_1)でも描画を行わない。この属性情報は、円柱などのプリミティブ情報に付加している。また、スムーズシェーディングされる部分のうち、面が手前から奥に回り込んでいる部分に、背景との境界部分が現れる。この境界部分を形成するエッジ(e'_2)は、手前の面は可視で、奥の面は不可視となるため、輪郭線となる。

また、エッジ(e_4)は、データ上で同一の部品、すなわち相貫により生じたエッジの場合は内形線として、

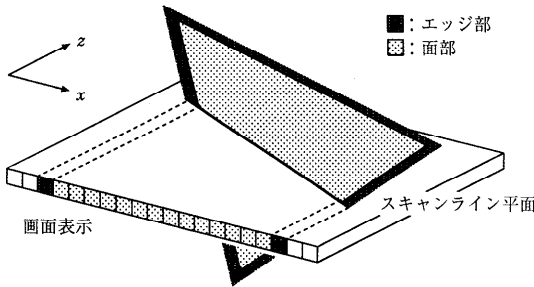


図4 Zバッファ組み込みによるエッジ描画
Fig. 4 Edge drawing with Z buffer method.

別の部品の場合は輪郭線として描く。
以上をまとめると、次のようになる。

- 描かれないエッジ： e_1
 - エッジを構成する2つの面がともに不可視の場合
 - エッジを構成する2つの面がスムーズシェーディングされる部分であり、両面とも可視である場合
- 輪郭線として描かれるエッジ： e_2
 - エッジを構成する2つの面のうち、片方だけ不可視の場合
- 内形線として描かれるエッジ： e_3
 - エッジを構成する2つの面がともに可視の場合

3.3 エッジ描画アルゴリズム

本節では、前述のエッジ強調規則を表現に生かすためのアルゴリズムについて述べる。本研究では基本レンダリングアルゴリズムにZバッファ法を用いている。従来のZバッファ法では、各ポリゴンのスキャンライン平面での断面部分を求め、画像として表示している。本提案手法では、このスキャン処理において、エッジとなる部分がポリゴンの周囲にはりついていると想定し、エッジとなる部分についても従来のZバッファ法をそのまま適用することによって、エッジの描画をレンダリングと同時に実現させる(図4)。この方法により、指定したエッジの幅、色などの情報を反映したエッジを描画することができる。

以下に、提案するエッジ描画アルゴリズムの概要を示す。

ステップ1 エッジの幅および色を指定する。

ステップ2 エッジの描画残しを防ぐため、以下のステップ3、4の処理を縦横のスキャンに対して行う。

ステップ3 ポリゴンのスキャンにおいて、エッジとして描かれる部分の位置および幅を算出する。

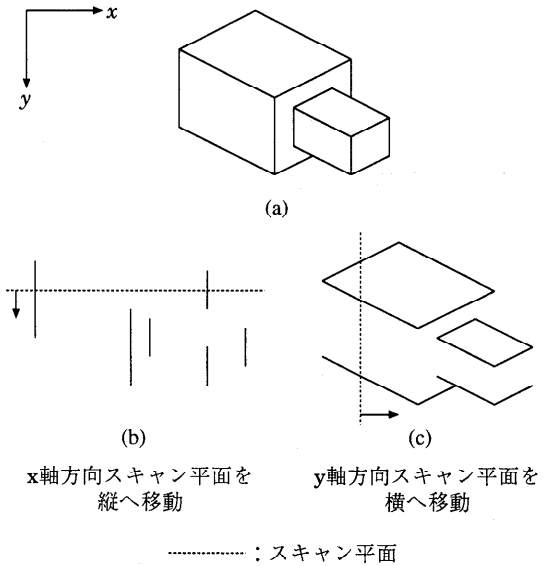


図5 両方向スキャン
Fig. 5 Two way scanning.

ステップ4 エッジ部は指定された色で、面部はシェーディングによって得られた色で、描画を行う。

次に、これらの処理のうち、ステップ2～ステップ4について、具体的な方法を述べる。

3.3.1 ステップ2：両方向スキャン

Zバッファ法では、ポリゴンの各エッジ部分において、スキャンライン上を横切る点を求め、範囲内をポリゴンの指定色で描画している。ここで、エッジがスキャンラインに対して平行になっているとき、エッジとスキャンラインが完全に一致しない限り、横切る点が存在しなくなる。スキャンは画素の幅で行われるため、一致することは期待できない。このとき、エッジの前後では違うポリゴンとなっているため、表示上は色の違いにより境界が現れるものの、エッジとして描画することはできない。

本提案手法では、この横切る点上に、幅を持たせたエッジを描くため、全エッジと横切る点を求める必要がある。そこで、図5のように、一度x軸方向のスキャン平面を縦へ移動させるスキャンを行った後、2度目にy軸方向のスキャン平面を横へ移動させるスキャンを行う手法を提案する。このとき、エッジのスキャン平面に対する角度が大きい場合に、エッジを描画する。(a)の形状に対しては、各スキャンによって、(b)と(c)のようにエッジが描画される。

具体的には、エッジとスキャン平面の正接が1より大きい場合に、エッジ描画の処理を行うことにより実現する。正接1以上という条件にすると、計算誤差に

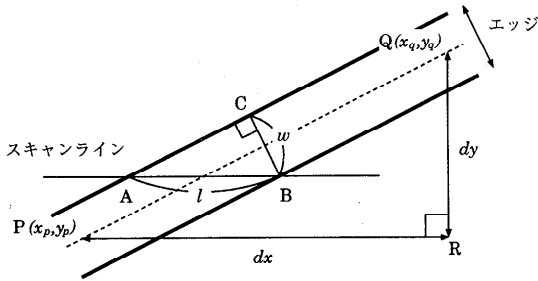


図6 エッジ長の算出
Fig. 6 Calculation of edge width.

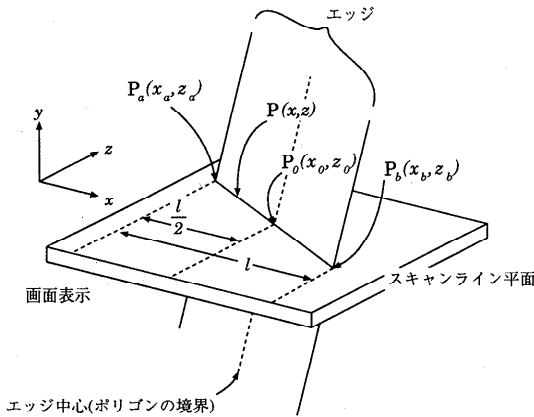


図7 エッジの左端, 右端
Fig. 7 Left side and right side of edge.

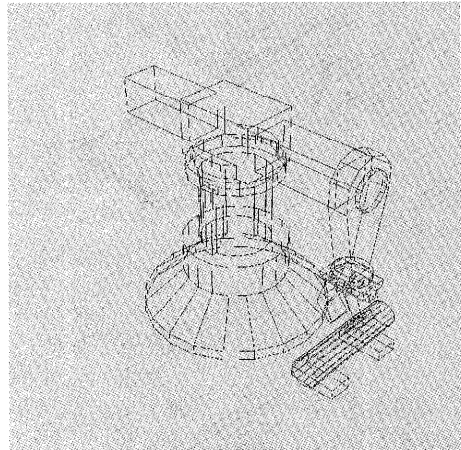
よって2度のスキャン両方で描画されないエッジが生じる場合があるので、正接0.9以上として処理を行う。

また、スキャンを2度行くと、2度目のスキャン時に上書きが生じ、1度目のスキャンで描かれたエッジの部分が消えてしまう。このため、1度目のスキャン時にエッジとして抽出された画素を登録しておき、2度目のスキャンのときには、すでに登録された画素に対しては何も処理を行わない。

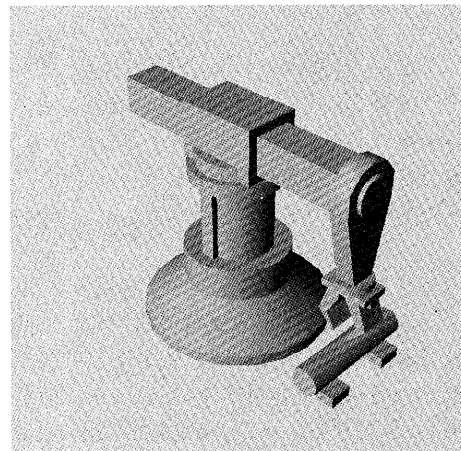
3.3.2 ステップ3: エッジ描画長の算出

エッジの幅を設定してZバッファ法を適用するために、エッジとしてスキャンされる部分の縦横各スキャン平面方向の幅 l を求める方法を図6を用いて述べる。なお、以下では x 軸方向のスキャン平面に対する求め方を示す。 y 軸方向についても同様である。

図6において、エッジ上の2点 $P(x_p, y_p)$ 、 $Q(x_q, y_q)$ が与えられたとき、 dx 、 dy はそれぞれ P 、 Q 間の x 方向、 y 方向の幅、 w は設定するエッジの幅、 l は求めるエッジのスキャン平面方向の幅を表す。 A 、 B は l の両端、 C は B からエッジの幅方向へ下ろした垂線の足である。このとき、 $\triangle ABC \sim \triangle PQR$ であるから、



(a) ワイヤフレーム



(b) シェーディング

図8 形状モデルの例
Fig. 8 Example of model.

$$\frac{AB}{BC} = \frac{PQ}{QR} \tag{1}$$

すなわち

$$\frac{l}{w} = \frac{\sqrt{dx^2 + dy^2}}{dy} \tag{2}$$

$$l = \frac{\sqrt{dx^2 + dy^2}}{dy} w \tag{3}$$

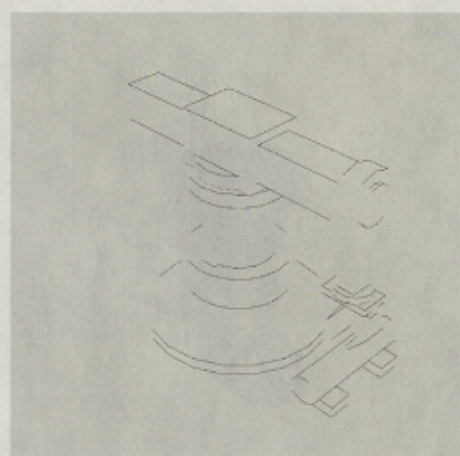
と表すことができる。式(3)により、 l が求められる。

3.3.3 ステップ4: エッジの描画

図7に、エッジの幅と描画位置の関係を示す。スキャンライン上のエッジ中心上の点 $P_0(x_0, z_0)$ に対して、スキャンライン上のエッジの左端、右端の点をそれぞれ $P_a(x_a, z_a)$ 、 $P_b(x_b, z_b)$ とする。このとき、エッジの描画ははじめ位置 x_a および描き終わり位置 x_b は、前述の l を用いると、それぞれ

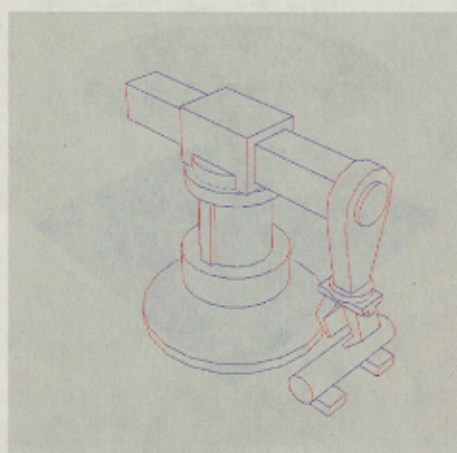


(a)



(b)

図9 エッジ描画処理経過
Fig. 9 Process of edge drawing.



(a)



(b)

図10 エッジ描画処理結果
Fig. 10 Result of edge drawing.

$$x_a = x_0 - \frac{l}{2} \quad (4)$$

$$x_b = x_0 + \frac{l}{2} \quad (5)$$

となる。

そして、通常のZバッファ法を適用し、描画対象点 $P(x, z)$ において、 $x_a \leq x \leq x_b$ の場合に、指定されたエッジの色で描画を行うことにより、隠面消去が行われる。

以上の各ステップによって、エッジ描画が可能となる。

4. 作画例

まず、図8(a), (b)で示されるモデルに対し、エッジ描画処理を行った。図9(a)がスキャン平面を縦に、図9(b)が横に移動させた結果である。モデルの表面

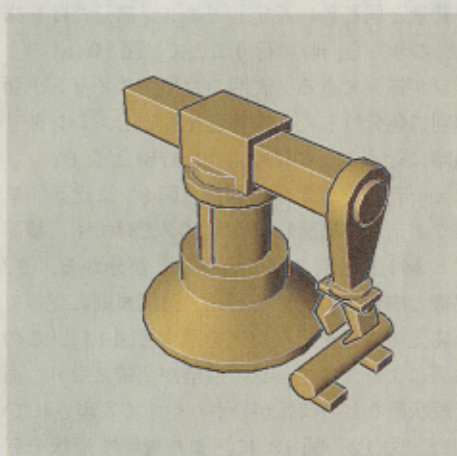
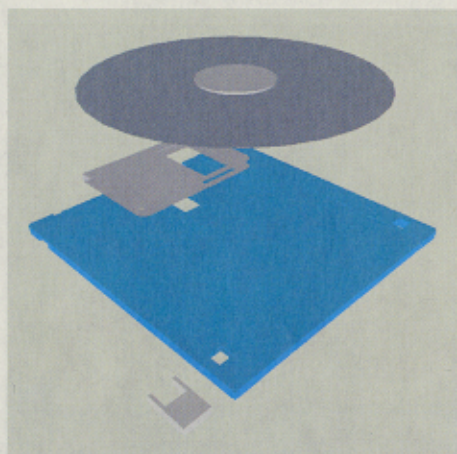


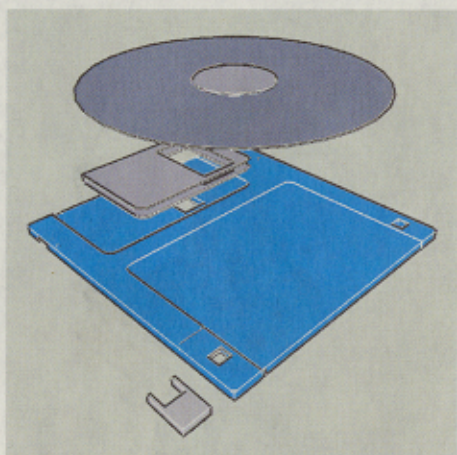
図11 描き分けによる強調
Fig. 11 Enhancement of width and color.



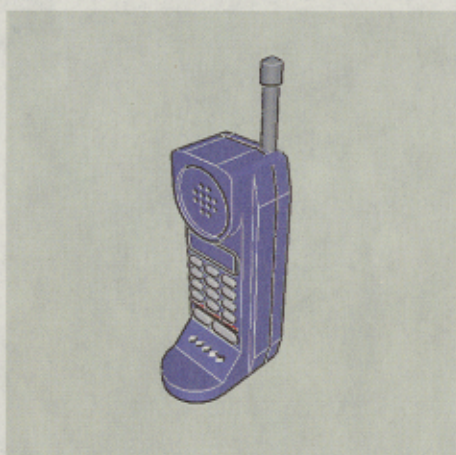
(a) シェーディングだけ



(a) シェーディングだけ



(b) 提案手法による作画例



(b) 提案手法による作画例

図 12 フロッピーモデルによる作画例

Fig. 12 Example of image using floppy model.

図 13 電話機モデルによる作画例

Fig. 13 Example of image using telephone model.

色を背景と同じ色に設定し、エッジ部分だけを描画させた。これらを同時に行うことで、図 10 (a) のようにエッジが描画できる。説明のため、スキャン平面移動方向別に色分けした。本体色を設定し、レンダリングと同時に行うことにより、図 10 (b) となる。

シェーディングだけの画像 (図 8) に比べ、単一幅で黒くエッジを描画した (図 10) だけでも、境界部分のはっきりと区別されていることが分かる。さらに、輪郭線と内形線の区別を行い、強調規則に従って幅と色を変えて描画を行った例を示す (図 11)。このような強調により、各エッジの性格が明確となり、面と面の接続状態などの情報が分かりやすく表現されている。

また、図 12、図 13 に、より複雑な形状モデルの作画例を示す。これらモデルについても、形状がより分かりやすく表現されていることが分かる。

表 1 計算時間の比較

Table 1 Comparison of calculation time.

モデル	シェーディング だけ (A)	エッジ作画例 (B)	(B)/(A)
図 8	8 秒	21 秒	2.63
図 12	11 秒	28 秒	2.55
図 13	9 秒	22 秒	2.44

なお、各モデルにおける計算時間の比較を、表 1 に示す。本描画実験は、Sun の SPARCstation20 を用い、X Window System の下で行った。

5. まとめ

本研究では、情報伝達手段としての画像の役割に注目し、形状の特徴を強調するレンダリング手法として、エッジの幅や色などの幾何情報を指定するエッジ描画

手法を提案した。

本手法は、エッジを面としてとらえ、エッジ描画処理をZバッファ法に組み込むことによって実現している。本研究の結果、以下のことが可能となった。

- (1) 本研究で提案したエッジ描画手法により、エッジの種類を描き分けが容易にできる。
- (2) 本エッジ描画手法は、隠線消去と隠面消去を同時に処理することが可能である。
- (3) 本エッジ描画手法は、従来法であるZバッファ法の約2.5倍程度の計算コストによって描画可能である。

参 考 文 献

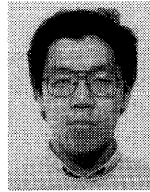
- 1) 近藤邦雄, 木村文彦, 田嶋太郎: インタラクティブレンダリングシステムによる3次元形状の表現, 情報処理, Vol.26, No.11, pp.1401-1408 (1985).
- 2) Saito, T. and Takahashi, T.: Comprehensible Rendering of 3-D Shapes, *Computer Graphics*, (Proc. SIGGRAPH '90), Vol.24, No.4, pp.197-206 (1990).
- 3) Roberts L.G.: Machine Perception of Three Dimensional Solids, MIT Lincoln Lab. Rep., TR 315 (1963).
- 4) Petty J.S. and Mach K.D.: Contouring and Hidden-line Algorithms for Vector Graphic Display, Air Force Applied Physics Lab. Rep., AFAPL-TR-77-3 (1977).
- 5) 齊藤隆文, 新谷幹夫, 高橋時市郎: 稜線のハイライト表示とその拡張, 情報処理学会グラフィックスとCADシンポジウム論文集, pp.9-16 (1988).
- 6) 田中敏光, 高橋時市郎: 精密レンダリング法とそのハイライト生成への応用, 情報処理学会論文誌, Vol.33, No.4, pp.471-480 (1992).
- 7) Edwin C.: Computer Display of Curved Surfaces, *Proc. IEEE Conf. Comput. Graphics Pattern Recognition Data Struct.*, p.11 (1975).
- 8) 堤 浪夫: かたちの発想, 鳳山社 (1986).
- 9) デビッド・マー: ビジョン, 産業図書 (1987).
- 10) 大野義夫: フォトリアルでないCG画像の生成に

ついて, 情報処理学会研究報告, 95-CG-76, pp.1-7 (1995).

- 11) 齊藤隆文: Comprehensible Rendering—これからの課題, 情報処理学会研究報告, 95-CG-76, pp.89-94 (1995).

(平成9年9月16日受付)

(平成10年12月10日採録)



望月 義典 (学生会員)

1995年埼玉大学工学部情報工学科卒業。1997年同大学院理工学研究科博士前期課程修了。現在、同大学院博士後期課程在学中。コンピュータグラフィックスの研究に従事。



近藤 邦雄 (正会員)

1979年名古屋工業大学第2部機械工学科卒業。名古屋大学教養部図学教室, 1988年東京工芸大学電子工学科講師を経て1989年埼玉大学工学部情報工学科助教授。コンピュータグラフィックス, ユーザインタフェース, 形状モデリング, 感性と知識をもとにした画像処理の研究に従事。工学博士。日本図学会等会員。



佐藤 尚 (正会員)

1987年学習院大学理学部数学科卒業。1989年国際基督教大学大学院修士課程修了。1990年学習院大学大学院後期課程中退。同年埼玉大学工学部助手。1997年尚美学園短期大学講師。1998年神奈川工科大学講師, 現在に至る。情報数学, コンピュータグラフィックスの研究に従事。博士(理学)。