

Title	コンピュータグラフィックスを用いた高品質画像のリ アルタイム生成に関する研究				
Author(s)	向井, 信彦				
Citation	大阪大学, 2001, 博士論文				
Version Type	VoR				
URL	https://hdl.handle.net/11094/22989				
rights					
Note					

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

コンピュータグラフィックスを用いた

高品質画像のリアルタイム生成に関する研究

2001 年 9 月

大阪大学大学院 基礎工学研究科

向井信彦

論文要旨

近年におけるコンピュータの計算処理能力の向上とその低価格による急速な普及により,コンピュ ータグラフィックス(G)の実用化が進み,産業界や医療業界では G をキー技術とするバーチャル リアリティ(VR)を使用した様々な応用システムが開発されている.本論文は,今後も急速に発展し 続けていくであろう CG 応用システムにおいて,開発システムの要求を満足する品質を備えた画像を, その目的を達成するのに充分な応答速度で生成する方式に関する研究の成果について論ずる.

最初に,CGの基本である直線を取上げ,量子化されたディジタル直線が備える性質について考察する.続いて,導出されたディジタル直線の性質を利用して,ディジタル画像の輪郭を追跡しながら, 同時に直線近似を行う方式を提案する.また,ディジタル直線の性質を利用した簡易直線近似方式に より,移動する物体の形状をリアルタイムに認識する方法に関する提案を行い,その結果について報 告する.

次に,ディジタル直線の性質を利用し,直線を構成する画素の位置を画素単位で逐一判断すること なく,高速に直線を描画する方式について論じた後,CG で一般的に利用されるポリラインを対象と して,ポリラインを構成する端点の状態遷移を利用した高速なクリップ判定方式について論述する.

さらに,高品質表示と高速表示を両立させるために CG で扱う大規模なデータを階層化し,表示の 目的に応じて,高品質表示と高速表示の優先度を切り替えて表示する方式について論ずる.特に,概 略データを用いた高速表示から詳細データを用いた高品質表示へ切り替える際に表示速度を犠牲に することなく,階層化されたデータを徐々に詳細表示化する方式について論述する.

最後に,CGをキー技術とするVRへの応用例として,近年医療業界から特に要請の強い医療応用シ ステムである手術シミュレータを取上げて,実用的なシステムを構築した結果について詳述する.本 システムは,本論文の前半で記載したCGを用いた高品質画像のリアルタイム生成に関する研究成果 を実システムに適用したものであり,手術練習のために必要な品質を備えた画像を,手術練習装置と して充分な応答速度で生成する方式を実現している.以上の結果から,本論文によりCGを用いた高 品質画像のリアルタイム生成に関する研究の基礎を築くことができたと考える.

第章	序論	1
	1.1 研究の背景	1
	1.2 論文の目的	2
	1.3 論文の構成	
第章	コンピュータグラフィックス	6
	2.1 コンピュータグラフィックスの歴史	
	2.2 コンピュータグラフィックスの基礎問と解決策	8
	2.2.1 座標系と座標変換	8
	2.2.2 隐面消去技术	
第三章	ディジタル直線	19
	3.1 アナログ直線の量子化	
	3.2 ディジタル直線の性質	
	3.3 ディジタル直線による点列の直線近似	
	3.4 ディジタル直線を用いた移動物体の認識	
羓章		
	4.1 直線描画方式	
	4.1.1 従来の直線描画方式	
	4.1.2 ディジタル直線を利用した高速直線描画方式	
	4.2 直線のクリップ	
	4.2.1 従来のクリップ方式	
	4.2.2 ポリラインの状態野を利用した高速クリップ判定方式	
新章	大規模グラフィックスデータの高速表示	64
	5.1 従来のグラフィックスデータ削減方法	
	5.2 複数項点マージによるデータ削減方法	
	5.3 グラフィックスデータの階層化と削減方法の評価	
	5.4 高速复元のための階層化データ作成方法	
	5.5 大規模グラフィックスデータの階層化表示	
第 一律	バーチャルリアリティ技術と医療応用	80
	6.1 バーチャルリアリティ技術	
	6.1.1 視覚インタフェース	
	6.1.2 <i>力覚インタフェース</i>	
	6.2 医療応用システム	
	6.2.1 手術ナビゲーションシステム	
	6.2.2 手株シミュレーションシステム	
乳 章	手術シミュレータ	89
	7.1 眼科手術	
	7.2 文家 症列	
	7.3 眼泪手術シミュレータ	
	7.4 PC ベースリアルタイムシミュレータ	
	7.5 高品質画像のリアルタイム生成方式	
	7.5.1 黄ヶ湖康の増産製産モデル	
	7.5.2 加鬱性黄斑変性症の網膜モデル	
	7.5.3 模類画像のリアルタイム生成	
	7.6 画像の品質と性指語評価	

第 章	結論		
謝辞	•••••		
参考文朝	ť		
関連文権	ť		131
付録	•••••		133
	付録	1	
	付録	2	

第一章 序論

1.1 研究の背景

近年における計算機処理能力の向上により、数年前までは映画やテレビドラマだけの夢の世界であ ったものが次々と実現している.現在では日本国民の二人に一人は持っているという携帯電話,いつ でもどこでも気軽に電話して相手にメッセージを伝えることができるだけでなく、電子メールを使 用することにより、音声を出すことなく相手との会話を楽しむことができる。また、デジタルカメラ で撮影した映像を即座に送信したり、超小型 CCD カメラを備えることにより、相手の顔を見ながら会 話を楽しんだりすることも可能となってきた.また、計算機を構成するハードウェアコンポーネント の小型化及び低価格化に伴い, ファミリーコンピュータ(ファミコン)やパーソナルコンピュータ(パ ソコン)が急速に普及してきている.特に,低価格なファミコンに搭載されるゲームが大流行し,CPU からアプリケーションに至るまで米国の独占市場であったコンピュータ分野において日本のオリジ ナル製品が世界を支配し始めている. 最近ではファミコンをネットワークで接続し, 友達同士が離れ た場所に居ても一緒に楽しむことのできるネットワーク型対戦ゲームが流行しており、パソコン分 野においても多くのマニアがゲームソフトを開発し,フリーウェアやシェアウェアと称して,無料あ るいは非常に低価格で提供している.これらのソフトにはゲーム以外にも計算機の開発,診断,新た なソフト開発に利用できるツール類など数多くのものが含まれており、コンピュータはもはや一部 の専門家のみが大型計算機室と呼ばれる隔離された部屋で扱うものではなく、ごく普通の人達が日 常生活において必要とされるものに変化してきている.

また、医療の分野においてもコンピュータの導入は大きな恩恵をもたらしている、従来、診察を担 当する医師のみが手書きで作成していたカルテも電子化され、一旦ファイルとして保存された電子 カルテはいつでもどこでもどの医師でも参照することができる様になってきている、この結果とし て、診察を担当する医師と手術を行う医師の間でのカルテの取り違えミスなどが減少すると共に、米 国ではごく一般的になっている**セカンドオピニオン**が可能となりつつある.つまり,診察を担当した 医師の意見だけでなく、別の医師の意見を聞いて、治療や手術の方法を患者自身が決めることが可能 となってきている. さらに, 一般にインフォームドコンセントと呼ばれているものがある. これは, 医師は患者に対して診断、治療方法などについて十分な説明をする必要があることを表現する新し い概念であり、患者は自分自身の病気について正しい知識を持ち、自らが治療方法を選択するもので ある.当然のことながら、医師側としても患者に対する病気の説明として、コンピュータを使用した 分かりやすい説明が求められると共に、治療や手術に対する医師側の技量が求められる.通常は動物 実験を通して薬の有効性を確かめたり、動物を利用した手術の練習を行ったりしている.しかしなが ら,動物愛護という観点から、この動物を利用した実験や手術練習は好ましくない. さらに、動物に は発病しない人間特有の病気も数多く存在し、これらの病気に対しては練習の機会が皆無に等しい と言っても過言ではない、当然の結果として、実技訓練を一度も行うことなく、実患者を対象とした 手術をせざるを得ない医師も少なくないことは事実である.

そこで、近年ではバーチャルリアリティ技術やコンピュータグラフィックス技術を利用して動物に は発病しない人間特有の病気を仮想的に創造し、仮想空間上で手術の練習を行うことができるシミ ュレータ(**手術シミュレータ**)や、コンピュータの支援を受けながら実際の手術をより効率的に行う システム(**手術支援システム**)の開発が行われている.バーチャルリアリティ技術を利用した仮想空 間上におけるシミュレータは何も医療分野に限定されたことではない.以前から有名なものとして、

1

航空機の飛行訓練を行うフライトシミュレータ,自動車教習所で路上運転を行う前に体験するドラ イブシミュレータ,原子炉など危険な場所での実作業を効率よく実行できるように予め訓練してお くための各種訓練シミュレータなどが存在する.また,家庭や個人で使用するファミコンだけでな く,繁華街のアーケードに設置されているゲームなども仮想空間上での体験であり,若年層から壮年 層に至るまで幅広い年代での娯楽となってきている.

これらの市場動向を中長期的に捉えると、バーチャルリアリティ技術やコンピュータグラフィック ス技術を利用した応用製品、応用システムは今後も発展する傾向にある.しかも、ハードウェア技術 の急速な進歩により、システムの低価格化、高速化がさらに一層推し進められると共に、自然現象の 解析がさらに進展し、コンピュータグラフィックスにより生成される映像のさらなる高度化が期待 される.コンピュータグラフィックスで生成した従来の映像は、一見するだけで人工生成物と判別す ることが可能であった.その一つの要因は、現実世界の事象をコンピュータの世界に取り込む際に生 ずる量子化(ディジタル化)である.例えば、一本の直線を考えてみる.定規を当てて紙の上に描か れた直線は真っ直ぐに延びているが、コンピュータのディスプレイ上に描かれた直線はディスプレ イの表示解像度に応じてギザギザしており、とても真っ直ぐとは言えない.また、紙の上に描かれた 直線の傾きは常に一定であるにも関わらず、コンピュータのディプレイ上に描かれた直線の傾きは 局所的に変化している.これらのディジタル化により生ずる不具合については、ディスプレイの解像 度を向上させたり、直線の解決を図ってきた.

映像生成において、もう一つ重要な課題が残されている.それは、映像の生成時間である.コンピ ュータを構成するハードウェアコンポーネントの急速な技術革新により、従来では数日から数週間 かけて生成していたコンピュータグラフィックスによる映像生成時間は急速に短縮され、数分から 数時間で生成できるようになってきたが、それでも映像生成時間の点において充分満足されている とは言い難い.特に、各種シミュレータやゲームの世界ではリアルタイム表示が必須であり、映像の 品質が多少悪くてもリアルタイムで表示することが第一の課題となっている.人間が違和感を感ず ることなく、自然な動画(アニメーション)を生成するためには、1秒間に約 30 枚の画像を生成す る必要があり、この場合、一枚の画像生成に与えられた時間はわずかに約 33 ミリ秒である.映像の 品質向上のために自然現象を詳細に解析した表示アルゴリズムを開発し、このアルゴリズムを基に 自然な画像をコンピュータグラフィックスにより生成することを試みても、映像生成速度が間に合 わない場合は表示アルゴリズムや表示モデルデータの簡略化を行わなければならない.あるいは、表 示アルゴリズムを開発する初期の段階で、簡略化された高速な表示方式を検討する必要が生じてく る.

1.2 論文の目的

本論文では上記のような技術的課題を背景とし,近年益々身近な存在となっているコンピュータグ ラフィックスを用いて,現在では各家庭にも一般に普及しているパーソナルコンピュータを使用し, 高品質な映像をリアルタイムに生成する方式の検討を目的とする.

そのためには、まずコンピュータグラフィックスを用いた映像生成方法を修得する必要があり、先 人が築き上げてきたコンピュータグラフィックスに関する技術の習得を図る.勿論、高品質な映像の 生成、あるいは高速な表示方式には様々な方式があり、全てを網羅することはできない.そこで、コ ンピュータグラフィックスにおける基礎的な課題を取り上げ、その課題解決方法についての概要を 記述することにする.コンピュータグラフィックスの基礎的な課題と,その解決方法を理解していれ ば,さらに高度な映像生成方式を検討する上での基礎固めを行うことができる.

その後、コンピュータグラフィックスで生成した映像と自然界にある物体の映像を異にする一つの 要因であるディジタル化について考える.コンピュータグラフィックスで映像を生成する以上、この ディジタル化は避けることのできないものであるから、ディジタル化とは何なのか、理想的なディジ タル化はどうすればよいのか、さらに理想的なディジタル化によって得られた映像はどのようにな っているのかを調べることにより、コンピュータグラフィックスで生成した映像と自然界の物体映 像を異質にしている本質を探ることにする.

ディジタル化の本質が理解できれば、次に、コンピュータグラフィックスを用いて映像を生成する ための高速化方式を検討する.勿論、ハードウェア技術の進歩により、同じアルゴリズムを用いてい ても自然に高速な描画が可能となるが、ここでは、ディジタル化の本質を理解した上での高速処理に ついて検討する.さらに、充分なハードウェアリソースがなく、高速な表示を行うことができない場 合にも、表示の目的に応じて表示方式を変更することにより、ユーザが満足できる画質と速度を保つ 映像を提供することができる.例えば、山の上から街を見たとき、街中に住んでいる人や道路を走っ ている車の詳細までも見える必要はない.大きな物体としての山や川、あるいは鉄道やビルディング などが見えていれば充分である.一方、山から下って街中を散策する場合には、一軒一軒の家や出会 う人々が詳細に描かれていなければならない.このような状況は他にも存在する.例えば、表示物体 が動いているときと、静止しているときである.表示物体が動いているときには表示速度が重要であ り、ユーザと対話的な処理を行う場合、リアルタイムな応答速度が要求される.一方、表示物体が静 止している際には、ユーザは表示対象物の詳細を見ようとするであろうから、表示物体の細部を細か く描く必要がある.このように、表示の目的に応じて表示方式を変更し、高品質な映像生成とリアル タイムな表示速度の両立性について検討する.

最後に、これらの検討結果を実際の応用分野に適用して、その効果を検討する.コンピュータグラ フィックスを用いた応用分野としては、工業や教育など様々な分野が存在するが、近年特に話題とな っている医療分野に検討結果を適用し、応用システムを製作すると共に実使用を通じた評価を行う. その際、高度な計算能力を備える大型計算機やスーパーグラフィックスワークステーションなどを 用いることなく、一般に普及しているパーソナルコンピュータを用いて、画像の品質が重要となる医 療分野においても充分満足できる高品質な映像をリアルタイムに生成する方式の検討を行う.

1.3 論文の構成

本節では、論文の構成と概要について記述する.

初めに第二章では、今日までにコンピュータグラフィックスが発展してきた歴史を振り返ると共 に、コンピュータグラフィックスの基礎的な課題とその解決方法について概説する.近年における計 算機処理能力の急速な向上と共に、コンピュータグラフィックスの標準化、開発ツールの高度化によ リ、コンピュータグラフィックスの基礎的な知識がなくても、ある程度のソフトウェアを製作するこ とは可能になってきている.しかしながら、コンピュータグラフィックスの基礎を充分に理解しない でソフトウェアの開発を行っていると、思わぬ落とし穴に落ち入ったり、非効率な作業が多発して応 答速度が極端に悪くなったりすることがある.また後の章でも述べるが、本研究の目的はコンピュー タグラフィックスを用いた画像生成において、高品質な画像をリアルタイムに生成する手法の研究 であるため、高速表示を維持したまま高品質な画像を生成する手法の考案には、まず、コンピュータ グラフィックスの基礎的課題を解決しておく必要がある.そのため,本研究における手法を考える上で,最低限必要なコンピュータグラフィックスの基礎的課題とその解決方法について述べることにする.

第三章では、全ての描画における基本単位である直線について議論する.コンピュータグラフィックスでは表示物体を全て多角形(**ポリゴン**)の集まりとして定義するが、多角形を構成する各辺は線分で構成されているため、コンピュータグラフィックスで扱う直線がどのような性質を持つのかを最初に調べておく必要がある.自然界における真っ直ぐなアナログ直線を計算機の世界に取り込む際に行われる量子化規則を定め、この規則に従ってディジタル化された直線を発生する.発生したディジタル直線を構成する各画素の列を詳しく調べることにより、ディジタル直線の性質が明確となる.このディジタル直線の性質を利用すれば、2次元平面上に投影された物体の境界を直線で近似する際、高速な直線近似方式を考案することができる.物体の境界を高速に直線で近似することにより、物体の形状を高速に認識することが可能となる.そこで、ディジタル直線の性質を利用した高速直線近似が有効であることを確かめるために、簡単な形状を持つ二つの物体をリアルタイムで認識する実験を行ったので、結果について報告する.

第四章では、直線の高速描画方式について議論する.通常の直線描画方式では、直線を構成する各 画素の位置を直線の量子化規則に従って逐一定めていく.この際,DDA(Digital Differential Analyzer)^[1,2]など様々な高速描画方式が考案されているが、基本的には各画素の位置を逐一決定す る方式であるため、高速描画には向かない、第三章で求められたディジタル直線の性質を利用するこ とにより、直線を構成する各画素の位置を逐一決定するのではなく、直線を構成する画素の中で同一 方向に並ぶ画素の個数を求め、画素列単位での一括描画を行うことにより、高速な直線描画が可能と なる.また、コンピュータグラフィックスでは、物体を描画する枠あるいは描画するウィンドウ内の みを表示するという規則があるため、表示対象物の一部でもこの描画枠から外にはみ出している部 分があれば、その部分を描画対象から取り除かなければならない.この処理は**クリップ**と呼ばれ、物 体を描画する枠は**クリップ枠**と呼ばれる.基本的には、表示対象物の境界を構成している直線のどの 部分がクリップ枠からはみ出しているのかを調べ、クリップ枠内に入っている部分のみを描画する ことになる.この際,直線とクリップ枠との交点計算が必要となり,多大な処理時間を要する.そこ で、本章ではポリラインと呼ばれる連続した線分列(折れ線)を描画する場合に、現在対象となって いる線分の終点が次に対象となる線分の始点になることを考慮して、この折れ線を構成する各点の 2次元空間上における状態の遷移を考えることにより、最小限の演算量で高速にクリップ処理を実 行する方法について述べる.

前章までは、コンピュータグラフィックスにおいて最も基本となる直線について議論してきたが、 第五章では、大規模なグラフィックスデータを高速に表示する方式について議論する.近年における コンピュータ処理能力の向上により、複雑なグラフィックスデータも高速に表示できるようになっ てきたが、表示ハードウェアが高速になると、今度はコンピュータグラフィックスで生成される画像 の質が問われるようになり、高品質な画像を生成するために、グラフィックスデータが大規模で複雑 となってくる.当然のことながら、大規模で複雑なグラフィックスデータを単純な処理を高速に行う ハードウェアだけで対応させるには限界が生ずるため、大規模なグラフィックスデータを効率よく 表示させる手法が必要となってくる.特に、単一の計算機のみを用いてコンピュータグラフィックス 映像を生成するだけではなく、インターネットなどの通信ネットワークを介してコンピュータグラ フィックス映像を高速に表示させるためには、通信回線に応じた対策が必要となる.最も有効な手段 として考えられているのは、大規模なグラフィックスデータを階層的に構成し、概略データから詳細

4

データへと順次送信することにより,受信側では表示物体の概略イメージから詳細イメージへと 徐々に変化する画像を得る方式である.このように,概略データから詳細データへと徐々に変化する 画像を表示する方法は,画像通信の世界では業界標準となっている JPEG Progressive 方式と思想を 同じにするものであり,今後の画像表示の方向性を示している.インターネットなどでウェブブラウ ザを介して色々なサイトにアクセスする場合,受信側では興味ある映像が送られている場合は,最終 イメージが到着するまで徐々に画質が向上していく映像を見ながらユーザは待つであろうし,興味 のない映像が送られてくる場合には,すぐに別のサイトへ移動することが可能である.また,単一の 計算機のみを用いてコンピュータグラフィックス映像を表示する場合でも,物体を回転したり視点 を移動したりしている間は概略データを用いた高速表示を行い,物体が静止した段階で詳細データ を用いて高品質画像を生成することは,コンピュータグラフィックス映像の効率的な表示に繋がる. 第二章から第五章までで,コンピュータグラフィックスの基礎的課題とその解決方法から,コンピュ ータグラフィックスを用いた映像生成において最も基本となる直線の高速描画,さらに大規模で複 雑なグラフィックスデータを階層化することにより,コンピュータの処理能力あるいは通信回線速 度に応じた効率的な表示方式を検討する.

第六章では、コンピュータグラフィックスと共に今後益々発展していくと思われるバーチャルリア リティ技術について概説する.バーチャルリアリティ技術とは、仮想空間上に現実には存在しない仮 想物体を表示するが、仮想空間の物は現実空間の物と同じように表示され、本質的には仮想空間を現 実空間と同一であると感じさせる技術である.そのために、単なるコンピュータグラフィックスの3 次元表示だけではなく、両眼視差映像を与えることによる立体視表示、あるいは仮想空間上の表示物 体に触れたときに感じる力覚や触覚の提示などの技術がある.バーチャルリアリティ技術はフライ トシミュレータやドライブシミュレータあるいはゲームなど、産業分野での応用が盛んに行われて いるが、今後重要と思われる分野として医療分野が存在する.医療は手術などの人命に関わる重要な 技術、技量が要求される分野であり、バーチャルリアリティ技術を利用した応用システムが数多く研 究開発されている.医療分野において、特に人命に関わる手術を対象としたとき、どのような応用シ ステムが存在するのかについて概説する.

第七章では、バーチャルリアリティ技術を医療分野に適用したシステムの一例として、手術シミュ レータを取り上げて議論する.特に、マイクロサージェリーと呼ばれ、非常に精緻な技術を要求され る眼科手術について、具体的な症例を対象として手術シミュレータを構築する方法について論ずる. 眼科を対象とした手術シミュレータを構築するためには、当然のことながら、工学知識だけでなく眼 科に関する医学知識も必要となるため、眼科で行われている手術の種類と術式について概説した後、 実際に構築したシミュレータシステムについて記述する.システム構築の中でも特に、前章までに議 論してきたコンピュータグラフィックスに関する様々な知識を利用して実際の手術における映像と 本質的には同一である高品質な手術映像をリアルタイムに生成する方式について検討し、手術の練 習として充分満足できる画質を備えた映像をリアルタイムに生成するため方策について述べる.

第二章 コンピュータグラフィックス

2.1 コンピュータグラフィックスの歴史

21世紀となった現在では、ゲームソフトを始めとした一般消費者市場だけでなく、フライトシミュ レータやドライブシミュレータといった産業市場、さらには手術の支援や計画などの医療市場にも コンピュータグラフィックスの技術が当たり前のように利用されている.しかしながら、コンピュー タグラフィックスの歴史はまだ 40 年にも満たないほど浅いのである.コンピュータグラフィックス の始まりは、1963 年に米国マサチューセッツ工科大学において Ivan E. Suther land 博士がスケッチ パッド (Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System)を発表した時とされている ^[1,2]. これは、スタイラスペンで画面上にインタラクティブに線を描くシステムであり、現在におけ る対話型グラフィックスの元祖である.勿論、スケッチパッドシステム以前にもコンピュータの画面 上に図形を描くシステムは存在した.例えば、1950 年に MIT の Whirlwind I と呼ばれる計算機には 簡単な図形を描画するシステムが取り付けられていたが、その方法はバッチ処理によるものであり、 対話処理に適したものではなかった^[1]. Suther land 博士が発明したスケッチパッドシステムの登場 により、人間とコンピュータがグラフィックスという媒体を通して対話することができるようにな ったのである.

その後のコンピュータグラフィックスは、CAD(Computer Aided Design)と共に発展していく^[2]. CAD にも数多くの種類が存在するが、これらを大別すると、電気 CAD に代表される2次元 CAD と金型 CAD に代表される3次元 CAD になる. 電気 CAD はまさにコンピュータなどの電子回路設計に利用されるも のであり、各LSIの配置及び結線を製図としてまとめるシステムである. 電気 CAD が使用される以前 は、紙の上に鉛筆と消しゴムを持って設計図を描いていた. 製図という作業はかなりの時間と労力を 要するだけでなく、修正が非常に困難である.一度製作した図面を基に製品の試作版を作成すると、 必ずと言ってよいほど不具合個所が発見される.この不具合個所が発見されるたびに、設計図を修正 するわけであるが、鉛筆と消しゴムを持って紙の上に描いた図面の修正は非常に困難であり、ごく一 部の小さな個所における修正を除いて、この修正という作業は新たな製図とほぼ同等な作業となる. つまり、修正のたびに相当な時間と労力が製図に費やされるのである.ところが、コンピュータグラ フィックスの登場により、そして CAD システムの開発により、製図の修正が非常に容易となったので ある.ある LSI の配置を変更する場合,新たな位置をペンやマウスで指定するだけで,周辺回路を自 動的に再配置し,各部品間の配線を自動的に描画してくれる.鉛筆と消しゴムを持って紙の上で図面 を修正する場合、変更箇所の部品を消去し、新たに変更された個所に書き加えるだけでなく、部品の 位置が変更になったことによる配線の変更には大幅な時間が必要となる.ところが,電気CADを用い れば、部品の位置変更と共に各部品を繋いでいる配線も自動的に変更してくれ、修正のための時間も 労力も大幅に短縮することができる. 部品配置個所の修正がごくわずかであれば, 元の位置から新た な位置まで部品をマウスでインタラクティブに移動できるだけでなく、移動の途中でも部品間の結 線を繋いだまま表示してくれる. これはまさに, Sutherland 博士が開発した対話型グラフィックス の元祖であるスケッチパッドシステムの賜物である。勿論、これら図面修正の自動化には、コンピュ ータグラフィックスだけでなく、Al(Artificial Intelligence)技術も大いに貢献している.

一方,3次元 CAD を代表するものとして金型 CAD がある.図面の製作という点では電気 CAD と同じ 2次元図面の製作であるが,複数枚(通常は3枚)の図面を製作し,最終的な製品イメージを3次元 で表示するという点が異なる.2次元平面上に3次元物体を投影して表示するためには,表示物体を 正確に表現するための様々な技術が必要となる.例えば,**隠線/隠面消去技術**がその一つである.隠 線あるいは隠面消去技術とは文字通り,隠れた線あるいは面を消去し,物体の3次元的な把握を容易 にする手法である.例えば,サイコロを例に取って考えてみる.図2-1はサイコロを2次元平面上に 展開した図であり,紙の上にこのような図を書いておく.この図を切り取り,サイコロ面の境界部分 を折り曲げて離れた境界をセロハンテープで接着すると,図2-2(b)のようなサイコロができ上がる. しかしながら,この(b)の図をコンピュータグラフィックスで描画することは,それほど単純ではな い.コンピュータグラフィックスでサイコロを描かせる場合,まず,サイコロが6つの面から構成し ていることを記述する.そして,各面の組み立て時における位置,つまり,各面を構成する頂点の3 次元座標値を知らせる.コンピュータグラフィックスで各面を順に描画すると,図2-2(a)のような 図が描かれる.これは,サイコロを見たとき,どの面が見え,どの面が隠れているのかを考慮してい ないからである.物体をある視点から眺めたとき,見える部分と見えない部分が存在する.この見え る部分と見えない部分を正確に計算し,見える部分のみを描画することにより,図2-2(b)のように サイコロを3次元的に表現することができる.その詳細な方法については,次節で述べることにする が,Romney(1967), Warnock(1969), Watkins(1970)らの研究によるところが大きい^[2].



図 2-1 サイコロの展開図

また、別の課題としてクリッピングという処理が存在する.クリッピングとは、ある一定領域(通常は2次元空間における矩形領域あるいは3次元空間における視点を頂点とした四角錐)に入る物体のみを表示するという処理である.逆に言えば、指定された領域以外の物体は表示しないということになる.コンピュータグラフィックスで扱うデータ量は、数オブジェクトという小規模なものから、工場や街、あるいは国や地球、さらには宇宙全体という大規模なものまで様々である.例えば、電子回路設計を考えた場合、LSIを構成する回路図には様々なゲート部品が存在し、その間に無数の配線が施されている.勿論、LSI全体を表示することもあるが、全体を表示した場合は全体的な配置を把握するのみであり、LSI 回路の詳細を掴むことは困難である.LSI 回路の詳細を見る場合には、LSI 回路を構成している一部の領域のみを切り出して、注目している領域のみを拡大表示することにより、LSI 回路の一部を詳細に検討することが可能となる.この拡大表示において、注目すべき領域を切り出し、その注目している領域のみを表示する処理がクリッピングである.クリッピングについては、Suther land(1968)、Weiler(1977)らによって多くの研究^[3]がなされてきたが、本論文でも第四章において従来の方法を詳しく説明した後、さらなる高速化についての検討を行う.

図 2-2 サイコロの立体図

その他,自由曲面生成に関する研究(Coons, Reisenfield, Bezierら)や陰影表示手法に関する研究(Gouraud, Phong, Whittedら),さらに半透明表示方法(Newell-Shanchaら),材質感表現(Catmullら),照明モデル(中前ら)など今日までに数多くの研究がなされている^[3].

2.2 コンピュータグラフィックスの基礎課題と解決策

本節では、今日までに築き上げられてきたコンピュータグラフィックス技術の中でも、特に基礎的 な課題とその解決方法について概説することにする.但し、基礎的な技術の中でも直線の描画及びク リッピング処理についてはより詳しい研究を行ったので、第三章及び第四章で論ずることにする.

2.2.1 座標系と座標変換

2.2.1.1 コンピュータグラフィックスで扱う座標系



図 2-3 座標系と変換処理の流れ

図 2-3 に、コンピュータグラフィックスを用いて画像を生成する際の座標系と変換処理の一般的な 流れを示す^[2,4]. コンピュータグラフィックスで表示する物体は全て**ワールド座標系**という一つの大 きな空間で定義されるが、最初から全ての物体をこの座標系上で定義したのでは表示処理の扱いが 困難となる.何故なら、ワールド座標系で定義した個々の物体を独立に動かす必要性が多々存在する が、全ての物体をワールド座標系でのみ定義したのでは、個々の物体を独立に動かすことが困難とな るからである.表示物体の移動、変形、及びワールド座標系で定義された空間を見る視点位置の移動 は全てマトリックス演算で実現可能であるが、このマトリックス演算については後述することにし、 ここではまず、モデリング座標系について説明する.表示物体を最初からワールド座標系という統一 された座標空間上で定義するのではなく、表示物体固有の座標系で定義する.例えば、図2-2で定義 したサイコロのモデリング座標系は図2-4のようになる.



図 2-4 モデリング座標系

図 2-5 ワールド座標系

図 2-4 では、サイコロの中心を原点とし、右横方法にX軸(Xm:^{注1})、右奥方向にY軸、上方向にZ 軸を取っている.こうすると、単位立方体(一辺の長さが1の立方体)を構成する頂点座標は、 (-0.5,-0.5,-0.5)、(0.5,-0.5,-0.5)、(0.5,0.5,-0.5)、(-0.5,0.5,-0.5)、(-0.5,-0.5,0.5)、 (0.5,-0.5,0.5)、(0.5,0.5,0.5)、(-0.5,0.5,0.5)と表現することができ、全ての座標値を絶対値 0.5の範囲内に収めることが可能となる.勿論、図 2-4のように、必ずしも立方体の中心に原点を取 る必要はない.例えば、左下手前の角(-0.5,-0.5,-0.5)を原点としてモデリング座標系を定義しても よいし、図 2-4 で示すような直行座標系ではなく、円筒座標系、あるいは極座標系など、個々の表示 物体の特徴を生かした自由な座標系で定義することが可能である.

上記のように、個々の物体に固有のモデリング座標系上で定義された複数の表示物体をワールド座 標系という統一された座標空間上に移動させる.図2-5 では、球と四角錐という二つの表示物体をワ ールド座標系上に並べた例を示しているが、この場合、球は中心を原点とした極座標で、四角錐は底 面の中心を原点とした直行座標でモデリング座標系が定義されている.但し、ワールド座標系は通 常、直交座標を用いて定義することになっている.コンピュータグラフィックスではこのように、 個々のモデリング座標系で自由に定義された表示物体を全て統一されたワールド座標系上に配置し、 グラフィックス空間、あるいは仮想的な3次元世界を創造する.この世界は、我々が生存する3次元 空間と同等である.そして、我々が3次元空間上を自由に移動し、好きな位置及び角度から自然の風 景、あるいは車や建物などの人工物を写真に取ることができるように、コンピュータグラフィックス でも、任意の位置及び角度から広角や望遠といった任意のレンズを用いてグラフィックス空間を2 次元平面上へ投影して描画することができる.このためには、視点座標系という新たな座標系を導入 する必要がある.視点座標系とは、グラフィックス空間上でのカメラの位置(視点)を原点とし、見 たい方向(被写体が存在する方向)に広がっている座標系である.図2-6にワールド座標系と視点座 標系の関係を示す.

^{注1}モデリング座標系(Modelling Coordinate)には m を添えることにより,他の座標系と区別することにする。例えば、ワールド座標系(World Coordinate)はw,視点座標系(Viewing Coordinate)はv,デバイス座標系(Device Coordinate)はdを添えることにする。



図 2-6 ワールド座標系と視点座標系の関係

図に示すように、視点座標系の原点(視点位置)は、ワールド座標系上の任意の位置で定義することができる.また、視点座標系のZ軸方向(視線方向)により、見る方向(視野方向)が決定される. なお、図 2-6 からでは少し理解しずらいが、視点座標系は通常、右横方向にX軸、上方向にY軸、奥 行き方向にZ軸を取ることになっている.従って、視点座標系は通常、左手系座標系として定義され る.これに対して、モデリング座標系及びワールド座標系は通常、右手系座標系として定義される. 視点座標系において、視点位置から見た映像をある投影面(通常は XY 平面に平行な面)上に投影し た像が最終画像として表示される.この最終画像が表示される空間は 2 次元平面であり、コンピュー タの性能、特にビデオボード(あるいはグラフィックスボード)に搭載されている表示メモリなどの デバイスに依存するため、デバイス座標系と呼ばれる.図 2-7 にデバイス座標系を示す.



図 2-7 デバイス座標系に表示された物体

表示投影面に投影され、デバイス座標系上に表示された映像は多くの画素から構成されており、画像と同様に扱われる.通常、画像処理分野では左上を原点し、右方向にX軸、下方向にY軸を取る2次元座標系が用いられるため、3次元コンピュータグラフィックスでもデバイス座標系は画像処理における座標系に従うこと場合が多い.

以上で,基本的な座標系の流れ(モデリング座標 ワールド座標 視点座標 デバイス座標)を説 明した.次に,各座標系間の繋ぎ役としての処理を行う座標変換について概説する.

2.2.1.2 表示処理に必要な座標変換

3次元グラフィックスで扱う座標はXYZの三つであるが、平行移動や透視変換(視点からの距離 に応じて表示物体の大きさが小さくなる変換)を考えると、次元を一つ増やして、4次元同次座標と して扱うと便利である. モデリング変換とは、モデリング座標系上で定義された表示物体をワールド 座標系上に配置するための変換処理であり、表示物体の拡大縮小、回転、せん断及び平行移動という 四つの変換処理の組み合わせとして定義される.

$$(X_{m}, Y_{m}, Z_{m}, 1)M_{m} = (X_{w}, Y_{w}, Z_{w}, 1)....(2-1)$$
$$M_{m} = M_{e}M_{r}M_{s}M_{t}$$

但し,

 M_m :モデリング変換マトリックス M_e :スケール変換マトリックス(X,Y及びZ座標の拡大縮小) M_r :回転マトリックス(X,Y及びZ軸周りの回転) M_s :せん断マトリックス(固定点からの距離に応じた歪を生じさせる変形) M_t :平行移動マトリックス(X,Y及びZ方向の平行移動)

$$M_{e} = \begin{pmatrix} S_{x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{y} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad M_{s} = \begin{pmatrix} 1 & c & e & 0 \\ a & 1 & f & 0 \\ b & d & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad M_{t} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T_{x} & T_{y} & T_{z} & 1 \end{pmatrix} \dots (2-2)$$

- R_x : X軸周りの回転マトリックス
- *R*_v: Y軸周りの回転マトリックス

R_z: Z軸周りの回転マトリックス

上記マトリックスによりモデリング変換を実行し、モデリング座標系上で定義した表示物体をワールド座標系上の任意の位置に任意の大きさ及び形に変形させて表示することが可能である.次に、**視野変換**について述べる.視野変換とはワールド座標系から視点座標系への変換であり、ワールド座標系上の任意の位置に視点を移動し,視線方向をZ軸の正方向として左手座標系を定義することと等価である.通常、ワールド座標系、視点座標系とも直行座標系で定義し、スケールの変化や空間的な歪みが存在しないため、基本的には回転と平行移動のマトリックス(*M*,及び*M*,)で構成される.但し、2.2.1.1にも記述したように、ワールド座標系は通常右手座標系として定義される.従って、右手座標系から左手座標系への変換マトリックスが必要となるが、これはZ軸の向きを入れ替えるだけの簡単なマトリックスである.最終的に、視野変換マトリックスは次のように記述することができる.

M,:視野変換マトリックス

M: 座標系変換マトリックス (Z軸の方向を180度反転)

コンピュータグラフィックスを用いた画像生成における最後の変換処理として,透視変換が存在す る.透視変換とは,視点座標系上で捕らえた表示物体の集まり(シーン)をある2次元平面上へ投影 する変換処理である.勿論,2次元平面上へ投影する際に,視点座標空間内に存在する物体を投影面 上に平行に投影する方法(**平行投影法**)も存在する.平行投影の場合,視点座標系のZ軸が視線方向 と一致している限り,Z座標を無視し,X,Y座標のみを有効にして描画すればよいため,平行投影 のマトリックスは極めて単純であり,X,Y座標に対応する部分を1に,他の部分を0にすれば生成 できる.しかしながら,通常,カメラなどで風景写真を撮影した場合,手前にある物が大きく,遠方 にある物ほど小さく写っており,この被写体の大きさにより遠近感が得られている.従って,コンピ ュータグラフィックスを用いて画像を生成する際にも,手前にある物ほど大きく,遠方にある物ほど 小さく描画して遠近感を出す手法が要求される.



図 2-8 透視変換の原理

図 2-8 は、視点座標系をY軸上空からY軸の負の向きに眺めた様子を示している.図中、 $P_1(X_1,Y_1,Z_1)$ 及び $P_2(X_2,Y_2,Z_2)$ という2つの点を表示しているが、2点の(X,Y)座標値は同一であ り、Z座標値のみ異なるとする.また、投影面をZ=h で表されるXY平面に平行な平面とする.こう すると、2点(P_1 及び P_2)を投影面(Z=h)上へ投影して得られる座標値(Q_1 及び Q_2)は、三角形の相似 形原理から、次の様にして得られる.

 $Q_1(hX_1/Z_1, hY_1/Z_1, h)$ $Q_2(hX_2/Z_2, hY_2/Z_2, h)$(2-6)

ここで、 $X_1 = X_2 \mathcal{D} \vec{U} Y_1 = Y_2$ であり、かつ、 $Z_1 > Z_2$ であることを考慮すると、投影面上において、 Q_2 の方が Q_1 よりも大きなX 及びY 座標値を持つことが分かる.つまり、近くにあるもの(P_2) ほど、遠くにあるもの(P_1)よりも大きく表示され、我々が常日頃から感じている遠近法の原理と一致する.ここで、透視変換マトリックスは次のように記述することができる.

 $(X^*, Y^*, Z^*, 1)(1/W^*)M_u = (X_d, Y_d, X_d, 1)$ $(X_v, Y_v, Z_v, 1)M_pM_j = (X^*, Y^*, Z^*, W^*).....(2-7)$ $M_u = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad M_p = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1/h \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \qquad M_j = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots \dots (2-8)$ $M_u : \mathring{\Psi} \dot{\Omega} \nabla \mathsf{F} \mathsf{V} \mathsf{V} \mathscr{V} \mathcal{J} \mathcal{J}$

M_j:座標系変換マトリックス(Y軸の方向を180度反転)

以上で、コンピュータグラフィックスを用いて描画処理を行う上で、最低限必要な座標系と座標変 換について述べてきた.なお、図 2-3 における視点座標系上で行われるクリップ処理については、本 論文の第四章で詳しく議論することにする.

2.2.2 **隠面消去技術**

コンピュータグラフィックスが発展してきた歴史の中で、もう一つ重要な基礎的課題がある.それ は、表示対象物体の中で、見えない部分を如何にして隠すのかという問題(隠面消去問題)である.今 日のコンピュータ技術の発展、特にハードウェアの大量生産による低価格化のお陰で、今日ではハー ドウェア資源を充分活用した方法が主流となっているが、歴史的には様々な方法が存在し、コンピュ ータグラフィックスの原理を理解する上で、それらの方法を知っておくことは重要である.ここで は、歴史的に見て代表的と思われる四つの方法について概説する.

2.2.2.1 優先順位法

世の中に存在する風景や物体を写真で撮影する場合,隠れて見えない部分には必ず,その物体の前 に別の物体が存在している.つまり,視点から遠い距離に存在する物体は,視点とその物体との間に 別の物体が存在し,この物体によって視点が遮られるために,隠れて見えなくなるのである.従っ て,表示対象物体を視点からの距離に応じて順番に並べ,遠い物体から順に描いていけば,最終的に 手前にあって他の物体に遮られない物体(あるいは物体の一部)が残り,隠面消去問題が解決すると いう考えに基づく手法が**優先順位法**である.



図 2-9 優先順位法による隠面消去処理

図 2-9 に,優先順位法により隠面消去処理問題が解決できる簡単な例を示す.図中(a)は視点座標 系のY軸上空からY軸の負の向きに眺めた風景であり,球,直方体,三角錐の3つの物体が存在す る.これらの物体を Z=h という投影面上に投影して描いた図形が(b)である.視点から最も遠い距離 に存在する球は,立方体及び三角錐により物体の一部が隠れて見えなくなっている.直方体は球と三 角錐との中間に位置するため,球の一部を隠している一方で,三角錐により直方体の一部も隠されて いる. 三角錐は全ての物体の中で最も視点に近い距離にあるため, どの物体にも隠されることなく, 全てが見えており, 隠面消去問題が解決されている. 勿論, 各表示物体は複数の面(三角錐は4面, 直 方体は6面, 球は分割数に依存した面数)から構成されており, それぞれの面単位に優先順位を決め て描画する必要がある. こうすることにより, 最も手前にある三角錐でも視点方向を向いている面は 他の面により隠されることはないが, 視点と逆方向を向いている面は他の面により隠されて最終的 には表示されない. 表示対象物体の優先順位が簡単に決定できる場合は, 単純に視点から遠くにある 物体(あるいは面)から順に描画すればよく, 非常に高速な表示方法である. しかしながら, 表示物 体の数や物体を構成する面数が増加するにつれ, この優先順位が簡単に求められなくなるという欠 点が存在する.

2.2.2.2 スキャンライン法

優先順位法は、表示物体を視点から遠くにあるものより順位をつけ、この順番に描画することによ り隠面消去問題を解決するという方法であった.しかしながら、物体数や物体を構成する面の数が増 加するにつれ、優先順位の決定が困難となる.一方、CRTやLCDなどの表示デバイスは、走査線(あ るいはスキャンライン)と呼ばれるラインにより、構成されている.図 2-10 に表示デバイスの走査 線を示す.走査線は通常、左上を原点とし、右方向にX軸、下方向にY軸を取るデバイス座標系にお いて、Xの正方向に走査するラインであり、左から右へ、上から下へと走査を続ける.右から左へ、 下から上へと線が戻る帰線時間は表示されない.スキャンライン法とは、このスキャンライン単位で 隠面消去問題を解決しようという方法である.つまり、表示対象物体をスキャンライン面(スキャン ラインを含み、XY平面に垂直な平面)で切断した際の切り口から、視点に最も近い線分列を求めよ うという方法である.優先順位法が表示物体単位、あるいは表示物体を構成している面単位で隠面消 去問題を解決しようとしていたのに対し、スキャンライン法では対象とするスキャンライン上に存 在する物体の線のみを問題にすればよく、隠面消去問題がより単純化されている.



図 2-10 表示デバイスの走査線

図 2-11 にスキャンライン法の原理を示す.表示物体として,少し大きめの三角形とこれよりも小 さな四角形を対象とする.また,説明の単純化のために,透視変換ではなく平行投影を考える.今, Z=0 という投影面に表示対象物である三角形と四角形を平行投影し,Y=k というスキャンラインのみ

図 2-11 スキャンライン法

を対象として考えると、それぞれの表示物体に対応した線分が得られる.図において、三角形は線分 ad、四角形は線分 bd が得られ、点 c において両者が交差している.これらの線分を分割し、線分を 構成する端点のZ値を比較することにより三角形は線分 ab 及び線分 cd が、また、四角形は線分 bc が視点に最も近い線分として判断され、隠面消去問題が解決される.線分の端点の比較だけでは視点 からの距離の判定が不可能な場合、線分をさらに分割して判定することになる.このように、スキャ ンライン毎に隠線消去問題を解決し、最終的に隠面消去問題を解決する方法がスキャンライン法で ある.

2.2.2.3 Zバッファ法

優先順位法は表示物体あるいは表示物体を構成している面単位に,また,スキャンライン法は投影 面の走査線上で表示対象物を構成する線単位に,隠面消去問題を解決してきた.Zバッファ法は,さ らに細かく,表示対象物を構成している画素単位に隠面消去問題を解決する方法である.



図 2-12 Zバッファ法の原理

図 2-12 にZバッファ法の原理図を示す. Zバッファ法とは、表示対象物を描画するフレームバッ ファ以外に、対象物の奥行き情報を格納するZバッファという2種類のバッファを用いて隠面消去 問題を解決する方法である.最初に、フレームバッファを背景色(図 2-12 では無色)で、また、Z バッファを無限遠点の距離(図 2-12 では9)で初期化する.この方法では優先順位法のように、表 示対象物を奥行きから順に並べる必要はない.対象となる物体を無作為に選んで、物体を構成してい る画素単位に、物体の画素の色をフレームバッファに描画すると共に、画素の奥行き情報(Z値)を Zバッファに書き込む.但し、このフレームバッファ及びZバッファへの書き込みは無条件に行うの ではなく、書き込み時に条件判定を行う.つまり、これから書き込もうとする画素のZ値とその画素 に対応するZバッファの位置に既に書き込まれている値とを比較し、これから書き込もうとする画 素のZ値が既に書き込まれているZ値よりも小さい(つまり、視点に近い)場合にのみ、フレームバ ッファ及びZバッファへの書き込みを行い、これから書き込みをするZ値が既に書き込まれている Z値よりも大きい場合は、フレームバッファ及びZバッファの双方とも書き込みを行わない.書き込 みをするZ値と既に書き込まれているZ値とが等しい場合は、デバイス依存となる.図 2-12 では表 示対象物の色として、三角形を斜線で、四角形をクロスパターンで表している.また、三角形の距離 情報(Z値)を5,四角形の距離情報を3としている.勿論,図形が投影面に対して斜めになっている場合は,距離情報は単一物体内でも変化するが,ここでは説明を単純化するため,図形はXY平面に平行であり,物体内のZ値は同一であると仮定している.二つの表示対象物である三角形と四角形を,各物体を構成している画素単位にZバッファとの比較を行いながら,フレームバッファ及びZバッファへの書き込みを行った結果が図 2-12(a)及び(b)である.図では,四角形の一部と三角形の一部が重なっているが,四角形のZ値(3)が三角形のZ値(5)よりも小さいため,四角形のZ値が優先され,四角形の一部が三角形の一部を隠す結果を示している.

2.2.2.4 光線追跡法

上記で説明した手法は全て、表示物体あるいは表示物体を構成している面、線、点を単位として隠 面消去問題を解決する手法であったが、ここで述べる**光線追跡法**は発想が少し異なる. 元々、カメラ で撮影した映像というのは、カメラに入射してくる光線により結像されるものである. 従って、この カメラに入射する光線を逆に辿ることにより、映像画面を構成する各画素に写っている物体と、その 色を調べようというものである. 光線追跡法は視線を逆に辿ることから、**視線逆探索法**とも呼ばれ る.



図 2-13 光線追跡法の原理

図 2-13 に光線追跡法の原理図を示す.光線追跡法とは,視点に入ってくる光線を逆に辿ることに より,視点に最も近い物体を判別する手法であるため,まず,視点と映像画面を構成する各画素とを 結ぶ直線を考え,この直線と表示物体(あるいは表示物体を構成している面)との交点を調べる.そ して,この表示物体との交点の距離を比較し,最も小さい距離を与える物体が表示されるという考え に基づく方法である.原理は非常に単純であるだけでなく,光線を辿る際に光線が鏡などにぶつかっ た場合には,鏡などからの2次反射も考慮されている.つまり,同じアルゴリズムを再帰的に用いる ことにより,高次の反射特性をも考慮することができる.また,反射時におけるエネルギーの減少 や,光線が別の物体に遮られて光源まで辿り着けない場合には,影を生成する処理も同一のアルゴリ ズムで実現可能である.このように,光線追跡法は映像が生成される基となる光線を逆に辿ることに より,隠面消去問題を解決するだけでなく,半透明表示,付影処理など,高品質画像を生成する上で 非常に有効な手法である.しかしながら,ただ一つの欠点が存在する.それは,非常に膨大な計算コ ストを要するということである. 例えば、1,000×1,000の画面上に一体が1,000ポリゴン(多角形) で構成されている表示物体を100体表示することを考える. 視点と画面上の各画素とを結ぶ光線の数 は100万本存在し、この100万本の光線と1,000ポリゴンとの交点計算を行う必要があるため、表示 物体1体につき必要な交点計算は10億回となる. さらに、表示物体は100体存在するから、全ての 表示物体との交点計算は1,000億回となり、1,000億回の計算の中から視点に最も近い物体との交点 を調べる必要がある. さらに、1,000億回の交点計算と1,000億回の交点距離比較を行っただけでは、 視点から最も近い物体の交点を調べただけであり、鏡などからの2次反射や、影処理、半透明処理な どを行うためにはさらなる時間を要することになる.

一方,光線追跡法は非常に並列化し易い手法であり,各画素単位で独立の処理が行えるため,多く の並列化手法が検討されてきた.また,現在におけるコンピュータ計算能力の向上や,コンピュータ グラフィックス描画能力の向上により,かなりの高速化が実現できているが,現状では毎秒30枚あ るいは60枚という画像を生成する**リアルタイム表示**には適していない.現在におけるコンピュータ グラフィックスは,大量生産によるハードウェアコストの低価格化に伴い,安価で高速なメモリを大 量に利用できるZバッファ法が主流となっており,Zバッファ法を用いたグラフィックスボードが 広く利用されている.ただ,Zバッファ法は隠面消去問題を解決しただけであり,付影処理など高品 質画像を生成する上での課題も多い.そこで本研究では,コンピュータグラフィックスを利用した映 像生成方式としては,現在主流となっているZバッファ方式を採用して高速な映像生成を行うが,こ のZバッファ方式を採用するだけでは解決できなかった高品質画像の生成という課題を解決するこ とにより,コンピュータグラフィックスを用いた高品質な画像のリアルタイム生成に関する手法に ついて論ずることにする.

第三章 ディジタル直線

3.1 アナログ直線の量子化

コンピュータグラフィックスとは、与えられた数値データから所望の画像を生成する技術であり、 この画像生成において最も基本となるのは直線の描画である.これは丁度、絵画の世界における線描 画を基本としたデッサンの重要性に類似している.我々が通常、紙の上に鉛筆や筆で描く直線とコン ピュータのディスプレイ上にディジタル化された直線とは少し性質が異なる.従って、最初にコンピ ュータグラフィックスを扱う上で最も基本となるディジタル化された直線の性質を詳しく調べるこ とにする.ディジタル化された直線の性質を調べるためには、その前に、紙の上に鉛筆などを使用し て描画する直線をコンピュータ内で取り扱えるように変換する量子化規則について定義しておく必 要がある.なお、本論文では線幅を持たない真っ直ぐな直線を**アナログ直線**と呼び、これに対してコ ンピュータ内で取り扱われる量子化された直線を**ディジタル直線**と呼ぶことにする.言い換えると、 アナログ直線とは直線の始点及び終点を与えることにより一意に定まる直線であるのに対し、ディ ジタル直線とは直線の始点及び終点を与えただけでは直線を構成する始点から終点に至る画素列を 一意に定めることができず、アナログ直線をに至る画素列を一意に定めることがである.

二次元平面上の線幅を持たない真っ直ぐなアナログ直線を量子化して、コンピュータ内で取り扱う ことのできるディジタル直線を生成すると、ディジタル直線を構成する各画素間には繋がりがあり、 この画素の繋がりの方向を記述するのにチェイン符号を用いると便利である.チェイン符号^[5-8]と は、画素の連なりを符号化したもので、その基本となる方向及び符号は図 3-1に示すように8の剰 余系により定められる.図3-1において点Pを注目する画素とすると、右方向から順に0、1、…、7 の符号を割当てていく.例えば001000100は、図3-2で示すディジタル直線を構成する画素列の繋 がりをチェイン符号を用いて符号化したものである.



図 3-1 チェイン符号

図 3-2 ディジタル直線

次に,ディジタル直線を一意に定めるためのアナログ直線の量子化について考える.点Pを始点と する直線は点Pから任意の方向へ延びる無数の直線が定義可能であるが,直線の性質を調べる上で 直線の対称性を考慮して,ある限定された範囲内の直線のみを対象としても一般性を失うことはな い.点Pを原点とし,そこから様々な方向に延びる様々な直線を図形の対称性を考慮して分類する と、図 3-3のように分類することができる.そこで、図 3-3のA領域(直線の傾きが0度から45度の範囲内に入る第1象限の直線)について考え、量子化規則を次のように規定する(図 3-4参照).

<直線の量子化規則>

- X座標値に関しては整数値のみを取るように量子化を行い, *i* 番目の量子化された X座標値を *X_i* とする.
- 2) X_i に対応するアナログ直線上の点のY座標値を Y_a とし、 Y_a の小数点以下に関しては Y_a の絶対値を四捨五入して Y_a と同符号与えることにより、i番目の量子化されたY座標値 Y_i を定める.



図 3-3 直線の分類

図 3-4 アナログ直線の量子化

ここで、上記量子化規則を図形の対称性を考慮して、点Pから様々な方向に延びる直線へと一般化 すると、図 3-3 の各領域に対しての量子化規則は次の様になる.

<領域A, D, E, Hに対する量子化規則>

- X座標値に関しては整数値のみを取るように量子化を行い, *i* 番目の量子化された X座標値を *X_i* とする.
- 2) X_i に対応するアナログ直線上の点のY座標値を Y_a とし、 Y_a の小数点以下に関しては Y_a の絶対値を四捨五入して Y_a と同符号与えることにより、i番目の量子化されたY座標値 Y_i を定める.

< 領域 B, C, F, G に対する量子化規則 >

- Y座標値に関しては整数値のみを取るように量子化を行い, *i* 番目の量子化された Y座標値を *Y_i*とする.
- 2) Y_i に対応するアナログ直線上の点のX座標値を X_a とし、 X_a の小数点以下に関しては X_a の 絶対値を四捨五入して X_a と同符号与えることにより、i番目の量子化されたX座標値 X_i を定 める.

3.2 ディジタル直線の性質

前節において、図形の対称性を考慮しながら直線の量子化規則を定めた.本節では、量子化された 直線(ディジタル直線)の性質について調べる.図3-3のA領域における直線を量子化し、その量子 化された直線を構成しているチェイン符号を調べると、次の3種類のタイプに分類することができ る.

< A領域におけるディジタル直線の分類 >

- 1) X軸上の直線を構成するチェイン符号列は、全て0から構成される(図3-5(a)).
- (図 3-5 (b)).
- 3) その他の直線を構成するチェイン符号列は、0と1の組み合わせである(図3-5(c)).

上記の事柄を他の領域にも広めて考察を加えると、ディジタル直線には次の一般的な性質が備わっていることが分かる.

<ディジタル直線の一般的な性質>

- ディジタル直線を構成するチェイン符号化列は高々2種類のチェイン符号から構成されており、その符号間の差は8の剰余系で1である.
- 2) 二種類のチェイン符号のうち、一方は常に孤立して現れる(連続して現れない).
- 3) 孤立して現れるチェイン符号間の距離はほぼ一定である.



図 3-5 ディジタル直線の分類

さらに,上記 < ディジタル直線の一般的な性質 > における 3)のチェイン符号間の距離,つまり同一 チェイン符号で繋がりが表現されている画素列を構成する画素の個数を詳しく調べてみることにす る.図 3-5 (a)及び(b)のタイプの直線は常に一種類のチェイン符号から構成されているため,詳し く調べる対象から除外することにする.図 3-5 (c)についてチェイン符号化列を調べると,傾きが 1/2 以上の直線はアナログ直線の量子化規則における四捨五入という特性上,最初のチェイン符号が1 となるのに対し,傾きが1/2未満の直線は最初のチェイン符号が0となることが分かる.つまり,直 線の傾き1/2が,最初のチェイン符号が0になるのか1になるのかを決める閾値となっている.従っ て,図3-5(c)の直線はその性質上,次の2種類の直線に分類することができる.

< A 領域におけるディジタル直線の詳細分類>

直線の傾きが0度を超え、かつtan⁻¹(1/2)(約26.6)度未満の直線はチェイン符号0の 列が並んだ後、チェイン符号1が単独で現れて直線の補正を施し、さらにチェイン符号0 の列が並ぶという繰り返しにより直線が構成されている(図3-6のline 1).

直線の傾きがtan⁻¹(1/2)(約26.6)度以上で,かつ45度未満の直線はチェイン符号1の 列が並んだ後,チェイン符号0が単独で現れて直線の補正を施し,さらにチェイン符号1 の列が並ぶという繰り返しにより直線が構成されている(図3-6のline 2).

図 3-6 より,上記 < A領域におけるディジタル直線の詳細分類 > における は、チェイン符号 0 の方向に直線を構成するチェイン符号列が並び、1の方向に補正を施した後、再び 0 の方向にチェ イン符号列が並んでいる.一方、上記 < A領域におけるディジタル直線の詳細分類 > における は、チェイン符号 1 の方向に直線を構成するチェイン符号列が並び、0 の方向に補正を施した後、 再び 1 の方向にチェイン符号列が並ぶ構成となっている.そこで、この直線の趨勢を表すチェイン 符号列(上記 の場合は 0 のチェイン符号列, の場合は 1 のチェイン符号列)を**趨勢列**,また、そ の方向を**趨勢方向**と呼び、補正を表すチェイン符号(上記 の場合は 1 のチェイン符号, の場合 は 0 のチェイン符号)を補正項、また、その方向を補正方向と呼ぶことにする.



図 3-6 ディジタル直線の詳細な分類



図 3-7 趨勢方向の画素列

ここで、直線の始点を(0,0)、終点を(m,n)(但し、 $m \ge n$ は互いに素な正の整数)とすると、直線の傾きはa = n/mとなる。今、直線の傾きが45度未満の場合を考えているからm > nであり、始点から終点までの直線を構成する画素の総数はm+1個、Y軸方向の段差の数はn+1段となる。次に $m \ge n$ が互いに素ではない正の整数の場合を考える。 $m \ge n$ が互いに素ではないから、二つの最大共役数をcとすると、(m,n)=($c \times m, c \times n$)(但し、 $m \ge n$ は互いに素な正の整数)と記述することができ、始点(0,0)から終点(m,n)に至る直線は、(0,0)から(m,n)までの基本となる直線パターンの繰り返しになっており、この場合には、基本パターンをc回繰り返すことになる。そして、この基本となる直線パターンの繰り返しにおいて、(m,n)という点は最初の直線パターンの終点であると同時に、後の直線パターンの始点にもなっている。そこで、このディジタル直線を構成する途中の画素で基本パターンの終点と始点が重なる点を**中継点**(図3-7における黒色の点)と呼ぶことにする.

次に、単独で現れるチェイン符号間の距離、つまり同一チェイン符号で繋がりが表現されている画素列を構成する画素の個数を調べてみることにする.図 3-7 に示すように、直線の始点から始まり 趨勢方向に並ぶ最初の画素列の個数を L_a 、直線の途中における中継点を含まないk 番目の趨勢方向 に並ぶ画素列の個数を L_k (但し、 $1 \le k \le n - 1$)、直線の途中における中継点を含む趨勢方向に並ぶ 画素列の個数を L_s 、直線の終点に至る趨勢方向に並ぶ最後の画素列の個数を L_z とすると、ディジタ ル直線は以下の性質を持っていることが分かる.なお、数式導入の過程は付録として記すことにする.

<ディジタル直線の性質>

) 0 < a = 1/h < 1/2(n = 1, m = h)の場合(L_k は存在せず,途中の画素列は全て L_s)

$$L_a = \lceil h/2 \rceil, L_s = h, L_z = (h+1) - \lceil h/2 \rceil$$

$$2L_a - 1 \le L_s \le 2L_a, L_a \le L_z \le L_a + 1$$

) 0<a=n/m<1/2(n≠1,n,mは互いに素な正の整数)の場合(図3-7のline1)

$$L_{a} = \left\lceil \frac{m}{2n} \right\rceil, L_{k} = \left\lceil \frac{(2k+1)m}{2n} \right\rceil - \left\lceil \frac{(2k-1)m}{2n} \right\rceil$$
$$L_{s} = \left\lceil \frac{m}{2n} \right\rceil - \left\lceil \frac{(2n-1)m}{2n} \right\rceil + m, L_{z} = m+1 - \left\lceil \frac{(2n-1)m}{2n} \right\rceil$$
$$2L_{a} - 2 \le L_{k} \le 2L_{a}, 2L_{a} - 2 \le L_{s} \le 2L_{a}, L_{z} = L_{a}$$

) 1/2 ≤ a = n/m < 1(n,m は互いに素な正の整数)の場合(図3-7のline 2)

$$L_{a} = \left\lfloor \frac{m}{2(m-n)} \right\rfloor + 1, L_{k} = \left\lfloor \frac{(2k+1)m}{2(m-n)} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{(2k-1)m}{2(m-n)} \right\rfloor$$
$$L_{s} = \left\lfloor \frac{m}{2(m-n)} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{\{2(m-n)-1\}m}{2(m-n)} \right\rfloor + m, L_{z} = m - \left\lfloor \frac{\{2(m-n)-1\}m}{2(m-n)} \right\rfloor$$

 $2L_a - 2 \leq L_k \leq 2L_a, 2L_a - 2 \leq L_s \leq 2L_a - 1, L_a - 1 \leq L_z \leq L_a$

但し、 $\begin{bmatrix} X \end{bmatrix}$ は X 以上の最小の整数 (つまり、少数点以下切り上げ)を、 $\begin{bmatrix} X \end{bmatrix}$ は X を超えない最大の整数 (つまり、小数点以下切り捨て)を求める関数である.

3.3 ディジタル直線による点列の直線近似

本節では、前節でその性質を調べたディジタル直線を用いて、自然界に存在する物体の境界を直線 で近似する方法(ディジタル直線近似)を提案する.例えば、対象物体をカメラで撮影し印画紙に印 刷した後にイメージスキャナを用いてディジタル画像として取り込んだり、あるいは最初からディ ジタルカメラを用いて撮影したりすると、対象物体をディジタル画像データとして入力することが できる.この対象物の境界を直線で近似するには、通常、微分オペレータを用いて境界部分の点列を 抽出した後、これらの点列を近似する直線を想定し、近似直線と元の点列との誤差が最小となるよう に最適な近似直線を見つける.近似直線と元の点列との誤差解析には一般に誤差の二乗が最小とな る最小二乗誤差法が用いられるが、元の点列と近似直線との最大誤差を最小とするミニマックス近 似法もよく用いられる近似手法である^[9].また、与えられた点列に対して、点列の両端点を結ぶ一本 の直線を割当てて直線と点列との誤差を計算し、次に誤差が最大となる点を順次加えて近似直線を 反復的に分割することにより、点列を複数の直線で近似する方法(本論文では**反復近似法**と呼ぶ)も 報告されている^[10].

最初に,両近似方法について簡単に説明しておく.図3-8はミニマックス近似方法を説明する図であり,図3-8ではaからiまでの8点を与えている.最初に点a及びbを対象として,これら2点を

結ぶ直線L1を考えると、両点とも近似直線L1上に乗っているので、その誤差は0となり、与えられ た直線L1は2点a及びbを最もよく近似する直線となる.次に、点cを含めた3点を考え、これら の点を近似する直線L2を考える.近似直線の誤差として、各点から近似直線L2までの距離を計算し、 最大距離(つまり最大誤差)が最小となるように、直線のパラメータを計算する.もし、最大誤差が 与えられた閾値以下であれば次の点dを含めた近似直線L3を考え、最大誤差が閾値を超えるまで一 本の直線で近似する点列の対象範囲を拡大する.一方、近似直線L2の段階で最大誤差が閾値を超え ている場合には、一段階前の近似直線L1を採用し、点cから新たな近似直線L4を考えて、直線近似 を続ける.最終的には得られた近似直線の交点(図3-8の 印の点)を結ぶことにより、与えられた 点列を直線で近似することができる.



図 3-8 ミニマックス近似方法

図 3-9 反復近似方法

一方,反復近似方法では全ての点列を対象として、2点間の距離が最大となる点を求める.図 3-9 では点 a と e の距離が最大となっているので、この2点を採択された点とする.そして、この2点を 結ぶ直線L1を近似直線として考え,残りの点から近似直線L1までの距離を計算する.次に、これら の点の中で最大距離を与える点(図 3-9 では c)を求め、この点を採択された点に追加すると共に、こ の点からの距離を最大とする近似直線L1を構成する点 a 及び e と、この点 c とを結ぶ直線L2 及び L3を近似直線として追加する.そして再び、各点から近似直線L1、L2及びL3までの距離を求め、最 大距離を与える点を採択された点として追加すると共に、この点からの距離を最大とする近似直線 を構成する点と、この点とを結ぶ直線を近似直線として追加し、各点から近似直線までの距離が閾値 以下になるまでこの計算を繰り返す.全ての点から近似直線までの距離が閾値以下になれば、採択さ れた点を結ぶことにより、与えられた点列を直線で近似することができる.ミニマックス近似方法で は近似直線の交点を計算し、新たに生成された交点列が与えられた点列を直線で近似するための点 列となるが、反復近似方法では新たな点は生成されず、近似直線を構成する点は全て与えられた点の 一部であるという点が異なる.

次に、ディジタル直線近似について説明する.前節では線幅を持たない真っ直ぐなアナログ直線を 量子化することにより得られるディジタル直線についてその性質を調べたが、ディジタルカメラな どで撮影した自然物のディジタル画像データにはノイズが混入する.このため、紙の上に定規などを 用いて真っ直ぐに引いたアナログ直線をディジタル画像として取り込んでも前節で証明したディジ タル直線の性質を満足する直線とはならない.一例を図 3-10 に示す.図において、 は傾き 1/6 の ノイズが混入しない状態でのディジタル直線を構成する画素列であり、 はノイズが混入した状態 の量子化直線を構成する画素列である.また,直線が単独で現れることはほとんどなく,通常は物体 の境界線として現れる.このため,前記2方法を含めた従来の方法では,入力されたディジタル画像 に対して微分オペレータや二値化及び細線化処理などを施すことにより,物体の境界線を抽出した 後,これらの点列を対象に直線近似を行っていた.一方,3.1にて説明したチェイン符号を用いると, 微分オペレータや二値化及び細線化処理などの物体の輪郭を抽出する前処理を行うことなく,対象 物体の境界を追跡しながら,直線近似の対象となる点列を直接抽出することが可能であり,高速な直 線近似を期待することができる.





図 3-10 ノイズのないディジタル直線と実際の直線

図 3-11 境界追跡方法

そこで,ディジタル直線近似を次の様にして行う.

<ディジタル直線近似方法>

- 1) 対象物体の境界をチェイン符号を用いて追跡する.
- 2) 境界追跡により得られた複数の画素列から、ノイズが混入していない状態のディジタル直線を 推測して発生させる.
- さらに対象物体の境界追跡を続け、逐次得られる画素と既に発生させているノイズが混入していない状態でのディジタル直線を構成する画素との差分を取り、差分が閾値以下であれば同一直線での近似を続ける.
- 逐次得られる画素とノイズが混入していない状態でのディジタル直線を構成する画素との差分 が閾値を超える場合は同一直線での近似を終了し、1)からの処理を対象物体の境界追跡が一周 するまで続ける。

以下,上記アルゴリズムについて解説する.まず,境界追跡は次のようにして行うことができる. 今,図 3-11 の点Pから点Qが見つかったと仮定すると,点Pから点Qへのチェイン符号は5 であ る.従って,チェイン符号5 と逆方向のチェイン符号である1 から反時計回りに一つ進めたチェイ ン符号である2 から始め,チェイン符号で指す先に次の境界点が存在するかどうかを調べる.も し,境界点が存在していない場合は,順次反時計回りにチェイン符号を更新しながら,次の境界点 が発見されるまで続ける.図 3-11 ではチェイン符号7 で次の境界点が見つかっているため,この チェイン符号7 の逆方向のチェイン符号3 から反時計回りに一つ進めたチェイン符号4 より,次の 境界点が存在するかどうかを調べる.ここでチェイン符号は8 の剰余系で成り立っているため,チ ェイン符号 C1 の逆方向のチェイン符号 C2 及び最初の検索対象となる画素の方向を示すチェイン符 号 C3 は一般に,次のようにして計算することができる. C2 = (C1+4)%8, C3 = (C1+5)%8 (但し, x%y は x を y で除算した際の余りを表す)

また、境界追跡を始める最初の点は、例えば対象物体の画像を上から順次走査し、最初に見つかった点を取ればよい.画像走査は通常、左から右へ行われるため、このときのチェイン符号は0であり、次の境界点を見つけるためのチェイン符号は5(=(0+5)%8)から始めればよい.また、境界追跡を行う場合、基本的には入力画像を二値化してから行うが、濃淡画像やカラー画像でも輝度や各カラー要素における二値化の閾値を明確にしておけば、最初から二値化を施しておく必要はない. 従って、対象物体の境界を追跡しながらその物体の境界を直線近似する方法は、前処理としての二値化や微分オペレータ、あるいは細線化などの輪郭抽出処理が不要となり、高速な直線近似を期待することができる.

次に,境界追跡により得られた複数の画素列から,ノイズが混入していない状態のディジタル直 線を推測する方法について説明する.



図 3-12 ディジタル直線近似

図 3-13 チェイン符号の領域

図 3-12 において、点Pから物体の境界を追跡し、順次境界点 印が見つかるものとする、ディジ タルカメラなどで入力した自然画像のデータではノイズなどの混入により、3.1の量子化規則に従う ディジタル直線とは異なるため、開始点から次の境界点を抽出しただけでは直線の趨勢方向は得ら れない.そこで,直線近似の開始点からの数画素を参照してノイズが混入していない状態のディジタ ル直線の趨勢方向を決定する.この参照すべき画素を**参照画素**、その個数を**参照点数**と呼ぶことにす る.物体の境界追跡において、次の境界点の方向を表すチェイン符号のベクトル(例えばチェイン符 号0なら(1,0),1なら(1,1))を加算し、その合成ベクトルを直線の趨勢方向とする.そして、直 線の趨勢方向決定後、その趨勢方向を表すベクトルが属する領域のチェイン符号と異なるチェイン 符号が現れると、その方向を直線の補正方向とする。例えば、図 3-12 において、点Pからの参照点 数を4(チェイン符号の数は3)として、境界追跡により得られた境界点の方向を表すチェイン符号 のベクトルを加算して直線の趨勢方向を表すベクトル V1=(3,0)を生成し、このベクトル V1 が属す る領域のチェイン符号を図 3-13 より0と求める.その後,境界追跡を進める過程で,直線の趨勢方 向を表すチェイン符号0と異なる方向のチェイン符号1が現れると、この方向 V2 を補正方向とし、 これら2つのベクトル(V1とV2)の合成ベクトルからノイズが混入していない状態のディジタル直 線の傾きを求め、3.1 の量子化規則に従って、ディジタル直線(図 3-12 の 印)を発生させる.な お,直線の趨勢方向を表すベクトル(x,y)から,そのベクトルが属する領域のチェイン符号を求め る方法は図 3-13を参照すると、次のアルゴリズムで記述することができる.

<ペクトルが属する領域のチェイン符号の求め方> もし、(x > 0,2|y| < |x|)なら、チェイン符号は0 もし、($x > 0, y > 0,2|y| \ge |x|, |y| \le 2|x|$)なら、チェイン符号は1 もし、(y > 0, |y| > 2|x|)なら、チェイン符号は2 もし、($x < 0, y > 0,2|y| \ge |x|, |y| \le 2|x|$)なら、チェイン符号は3 もし、($x < 0, y > 0,2|y| \ge |x|, |y| \le 2|x|$)なら、チェイン符号は4 もし、($x < 0, y < 0,2|y| \ge |x|, |y| \le 2|x|$)なら、チェイン符号は5 もし、($x < 0, y < 0,2|y| \ge |x|, |y| \le 2|x|$)なら、チェイン符号は5 もし、(y < 0, |y| > 2|x|)なら、チェイン符号は6 もし、($x > 0, y < 0,2|y| \ge |x|, |y| \le 2|x|$)なら、チェイン符号は7

もし, (x = 0, y = 0)なら, 対応するチェイン符号はなし

3.1 の量子化規則に従ったディジタル直線が発生できると、境界追跡により得られる物体の境界点 と発生させたディジタル直線との差分を求め、この差分がある一定の閾値以内であれば同一直線に よる近似を続け、閾値を超える場合は同一直線での近似を終了し、発生したディジタル直線との差分 が閾値を超る境界点を始点として新たな直線近似を始める.図3-12 では境界点とディジタル直線と の差分の閾値を1とし、点Qまでは差分が閾値1以内であるが、点Rにおいて差分が2となるため、 同一直線L1 での直線近似を終了し、点Rを開始点として新たなディジタル直線L2を用いた近似を行 っている.ここで、境界点とディジタル直線との距離差分算出方法は3.1 の量子化規則に従う.つ まり、図3-3における領域A、D、E、Hに対しては同一のX座標値に対応するY座標値の差分を2 点間の距離差分とし、領域B、C、F、Gに対しては同一のY座標値に対応するX座標値の差分を2 点間の距離差分とする.

ここで、閾値の決め方について説明する.同一直線での近似を続けるか否かの判断基準となる閾値 は直線近似における許容誤差を考慮して決定すべきものである.図 3-14 に示すように、傾きq が 0 度から 45 度の範囲内に入るアナログ直線を 3.1 の量子化規則に従って得られたディジタル直線を構 成する各画素は、元のアナログ直線とY軸方向に最大1/2 の距離誤差を持つ.従って、この点Pから Y軸方向にlだけ離れた点Qのアナログ直線までの距離誤差は $\{l+(1/2)\}\cos q$ となる.境界追跡に より得られた参照画素を基に算出した趨勢方向が図 3-3 の領域A、D、E、Hに属する場合、境界点 とディジタル直線との距離差分は、同一X座標値に対応する Y座標値の差により計算されるので、点 Pと点QとのY軸方向の距離 lを閾値として決定しなければならない.ディジタル直線近似における 許 容 誤 差 を e とする と、 $\{l+(1/2)\}\cos q \le e$ を満 足 する l を求めることになる. $l \le (e/\cos q) - (1/2)$ であるから、 $l = \lfloor (e/\cos q) - (1/2) \rfloor$ となり、直線近似の許容誤差 e を用いて 同一直線での近似を続けるか否かの判断基準となる閾値 l を算出することができる.



図 3-14 ディジタル直線近似の誤差

このようにして,対象物体の境界を追跡しながら,その境界を構成している画素列を部分的に直線 で近似し,これらの直線の交点を計算して得られた交点を結ぶことにより,ディジタル直線での近似 を行う.例えば,図3-12において,最初に算出された近似直線L1と次に算出された近似直線L2の 交点Sを求め,これらの交点を結ぶことにより,最終的な近似直線を得ることができる.但し,2直 線の交点を求める際,2直線の傾きが平行に近い場合には適当な位置に交点を求めることができな いため,このような場合には次の補正を行う.



図 3-15 近似直線の交点補正

図 3-15 (a) は点 P を始点としてディジタル直線近似を行い,点Qまで近似した時点で近似直線 L1 を抽出し,点Rから新たに別の近似直線 L2 にて近似する場合であり,抽出された近似直線 L1 及び L2 が平行で両直線の交点が存在しない場合である.このような場合には,最初のディジタル直線近似における終点Qから次の近似直線 L2 に下ろした垂線の足を a,また,次のディジタル直線近似における始点R から最初の近似直線 L1 に下ろした垂線の足を b として a と b の中点 c を算出し,この 点を直線 L1 及び L2 の交点として代用する.一方,図 3-15 (b) は点 P 'を始点としてディジタル直

線近似を行い,点Q'まで近似した時点で近似直線L1'を抽出し,点R'から新たに別の近似直線L2'で近似する場合であり,この場合は2直線L1'とL2'の傾きが非常に近いことから,その交点dが本来の点(Q'あるいはR')から離れている場合である.このような場合には,後のディジタル直線における始点R'を2直線L1'及びL2'の交点として代用する.こうすることにより,ディジタル直線近似により得られる最終画像が本来の画像から大きくずれることを防ぐことができる. 但し,最終的な近似直線が補正されているため,対象物体から近似直線までの誤差に変動が生ずるので,最終的な近似直線を対象とした誤差評価を行う必要がある.

以上のようにして得られたディジタル直線近似(DL法)を実際の画像に適用し,従来の方法である ミニマックス近似(MM法)及び反復近似(RA法)と比較した.直線近似の方法及び近似精度の評価 については,次のように行っている.まず,入力された画像から微分オペレータ及び細線化処理によ り物体の輪郭部分を抽出し,この図形をOriginalとする.ここではこの物体の輪郭であるOriginal を抽出する前処理を輪郭抽出と呼び,物体の境界を直線で近似する際に行う境界追跡と区別する.つ まり,輪郭抽出はOriginalを求める前処理であるのに対し,境界追跡は直線近似中に行う処理であ る点が異なる.輪郭抽出では対象物体に微分オペレータを施した後,細線化処理を行うことにより, Originalを1ドットの点列で構成する図形としているが,境界追跡はその性質上,物体の輪郭を構 成する1ドットの点列を追跡する手法であるため,最終的にはOriginalと同じ図形を得ることがで きる.従って,微分オペレータ及び細線化処理による輪郭抽出処理ではなく,境界追跡を用いて Original 図形を求めてもよいが,従来の手法では境界追跡による輪郭抽出についての言及はなかっ たため,従来用いられている微分オペレータ及び細線化処理を輪郭抽出の手法として採用している.

上記のようにして得られた Original に対して MM 法及び RA 法を適用し, Original 図形を構成する 点列を直線で近似して,近似直線同士の交点を求める.次に,求められた直線の交点を結んで得られ る直線に対して 3.1 で記述した量子化規則に従い,8連結の画素列として近似図形を表現する.そし て,近似された図形と Original 図形の誤差を次のようにして計算する.まず,Original 図形の内点 であるが近似図形の外点である画素の数を E1,次に Original 図形の外点であるが近似図形の内点で ある画素の数を E2 とし,(E1-E2)を Original 図形の面積で除した値を誤差として定義している.

また前述しているとおり、DL法に関しては物体の境界を直接追跡しながら同時に直線近似も行うため、輪郭抽出時間は不要となる.各方法の比較一覧を表 3-1 に、その平均値を表 3-2 に、また、処理結果画像を図 3-16~3-22 に示す.

評価尺度としては、直線近似により得られる交点の数、近似誤差、直線近似に要する総時間、及び 結果としての図形を比較することによる主観評価などを取り上げている.但し、結果を示す図(図 3-16~3-22)は直線近似結果(交点を結ぶ直線を量子化した結果)をプリントアウトした後、イメー ジスキャナによりコンピュータ内に取り込み、論文掲載のための縮小処理を施しているために近似 直線の一部が欠けた状態となっている.

30

	方法	頂点数	面積	近似時間	E1	E2	圧縮率	誤差
1. ティーポット	MM	49	37,847	33分06秒	819	136	0. 060	0. 018
輪郭点数: 811 画素	RA	38	37,660	2 分 26秒	880	10	0. 047	0. 023
面積:38,530 画素	DL	47	37, 356	3 分 04秒	1,233	59	0. 057	0. 030
輪郭抽出時間: 1分56秒		(57)*						(0.070)**
2. モンキースパナ	MM	53	10, 838	29分35秒	391	343	0. 076	0. 004
輪郭点数: 697 画素	RA	23	10, 849	1 分 42秒	197	160	0. 033	0. 003
面積:10,886回素	DL	30	10, 830	2 分 30秒	322	266	0. 043	0. 005
輪郭抽出時間: 1分43秒		(32)*						(0.046)**
3. 電話の受話器	MM	43	11,462	22分35秒	321	279	0. 075	0. 004
輪郭点数: 571 画素	RA	23	11, 394	1 分 31秒	188	78	0. 040	0. 010
面積:11,504 画素	DL	29	11, 191	2 分 03秒	436	123	0. 050	0. 027
輪郭抽出時間: 1分23秒		(40)*						(0.070)**
4. コーヒーミル	MM	51	30, 818	50 分 22 秒	418	462	0. 046	-0.001
輪郭点数: 1, 120回素	RA	48	30, 762	3分23秒	271	237	0. 043	0. 001
面積:30,796 画素	DL	54	31, 496	3 分 48秒	278	978	0. 048	-0.023
輪郭抽出時間: 2 分 37秒		(161)*						(0.144)**
5. フライパン	MM	53	33, 057	30分36秒	478	351	0. 064	0. 004
輪郭点数: 825 画素	RA	28	33, 150	2 分 13 秒	197	164	0. 034	0. 001
面積:33,184 画素	DL	32	32,618	2 分 56秒	625	59	0. 039	0. 017
輪郭抽出時間: 2分06秒		(52)*						(0.063)**
6. ハサミ	MM	55	11,400	50 分 02秒	405	501	0. 056	-0.009
輪郭点数: 985 画素	RA	42	11,025	2 分 58秒	371	102	0. 043	0. 024
面積:11,294 画素	DL	49	11, 109	3分23秒	561	376	0. 050	0. 016
輪郭抽出時間: 2分33秒		(113)*						(0.115)**
7. 数字の5	MM	53	8, 898	24 分 40秒	378	325	0. 076	0. 006
輪郭点数: 695 画素	RA	42	8, 922	2 分 20秒	186	157	0. 060	0. 003
面積: 8,951 画素	DL	44	8, 896	2 分 30秒	381	326	0. 063	0. 006
輪郭抽出時間: 2 分 40秒		(76)*						(0.100)**

表 3-1 直線近似結果一覧

MM: ミニマックス近似 (Kurozumi and Davisの方法)

RA: 反復近似 (Ramerの方法)

DL:ディジタル直線近似(本論文の提案方法)

E1: Original 図形の内点であるが、近似図形の外点である画素の数

E2: Original 図形の外点であるが、近似図形の内点である画素の数

圧縮率=頂点数/輪郭点数

誤差= (E1- E2)/Original 図形の面積

* DL法の近似結果に対して、近似直線までの距離が閾値を超える元図形の輪郭点数但し閾値は全て2回素

** 精度=(*の数)/(輪郭点数)

	MM	RA	DL			
圧縮率	0.06	0.04	0.05			
誤差	0.007	0.009	0.018			
精度	0	0	0.09			
頂点数比	1.25	0.86	1			
輪郭抽出時間	2分10秒	2分10秒	0秒			
直線近似時間	34分25秒	2分21秒	2分53秒			

表 3-2 近似結果の平均値






図 3-17 直線近似結果の比較(モンキースパナ)







図 3-19 直線近似結果の比較(コーヒーミル)



図 3-20 直線近似結果の比較(フライパン)







図 3-22 直線近似結果の比較(数字の5)

本実験では、安立電気社製 Packet e を使用し、BASIC を用いてプログラムを組んでいる.ディジ タル直線近似における参照点数は3とし、閾値誤差は全てにおいて2画素としている.また、直線近 似の開始点を矢印にて示しているが、これは、次のようにして求められる.

- 1) 画面の中央を走査し、最初に発見された境界点を直線近似の開始点とする.
- 2) 上記走査により境界点が見つからなければ、画面を中央線により2分割し、各画面に対して1)の走査を繰り返す。

図 3-16~3-22より, DL法の画質(主観評価)はMM法とRA法の中間に位置することが分かる.また,物体の境界を直線近似したことによる圧縮率(近似直線の交点数を Original 図形の輪郭を構成する画素の総数で除した値)に関しても,表3-2より,DL法はMM法とRA法の中間に位置していることが分かる.但し,誤差についてはあまりよい結果が出ているとは言えず,特に,近似直線の交点補正を行っているために,近似誤差が閾値を超えている画素も存在する.この閾値を超える画素の割合を精度として表3-2で表している(この値は0に近いほど精度が高いことになる).

MM 法は3つの方法の中で最も誤差が小さいのにも関わらず, 圧縮率及び主観評価の画質が悪い. これは, 順次与えられる点列を逐一直線で近似しており, 最大誤差を最小とする誤差補償を行って いるために,細かな近似直線が多数抽出された結果である思われる.これに対して, RA 法は近似の 最初に2点間の距離が最大となる点を求め, これらの点を結ぶ直線を基本とし, 基本直線を順次二 分割することにより近似を行っていることから,近似処理としては大局的な処理方法であると言え る.この大局的な処理方法のお陰で圧縮率がよく,同時に主観評価の画質もよい結果となってい る.しかしながら,大局的な処理を行うということは,必ず前処理としての微分オペレータ及び細 線化処理による輪郭抽出時間が必要となる.本実験では MM 法も引用文献に従って輪郭抽出を行っ てから直線近似処理を施したが, MM 法は RA 法と異なり大局的な処理は施していないため, DL 法と 同じく,境界追跡を行いながら同時に直線近似を行うことが可能である.但し,このことを考慮し て MM 法から輪郭抽出時間を削除しても MM 法の直線近似にかかる総時間はあまり変わらない. MM 法 は最大距離を最小とする直線を求める計算に多大な時間がかかっており,このことが近似処理に膨 大な時間を要する原因となっている.

一方 DL 法は、物体の境界を直接追跡しながら直線近似も行っており、輪郭抽出時間が不要である.前述したように、境界追跡が行えるということは近似処理が局所的に行えるということであり、上記の評価より、局所処理を行う方法(MM 法)は大局処理を行う方法(RA 法)に比べて主観評価が悪いということになるが、図 3-16~3-22 から判断して DL 法は RA 法とほぼ同じ画質を保っていることが分かる.結果として、DL 法は局所処理による高速近似を行っているにも関わらず近似結果として得られる画質もよいので、近似誤差が厳密ではなく、むしろ直線近似の高速性が要求される応用分野では効率的な直線近似を提供する方式であると言える.

3.4 ディジタル直線を用いた移動物体の認識

前節では、ディジタル直線を用いて物体の境界を効率よく近似する方式を考案した.そこで本節では、この直線近似方式を動画像に適用し、移動物体のリアルタイムな形状認識が可能かどうかを検証する.但し、ここでは33ms毎にCCDカメラから入力されてくる映像を基にリアルタイムな形状認識を行うため、ディジタル直線近似における参照点数を基に直線の趨勢方向を決定すると、その趨勢方向を表すベクトルが属する領域のチェイン符号(図3-13参照)から8の剰余系で1だけ異なるチェイン符号を同一直線で近似する際の許容範囲とし、これ以外のチェイン符号が現れると、別の直線として近似を続ける.

実験では、縦×横=130×136 cm²の矩形リング上面に黒色画用紙を敷き詰めて入力画像の背景とし、このリング上に、リモートコントロールで移動できる物体の上面に白画用紙で作成した三角形あるいは四角形の図形を貼り付けて認識対象物とした.認識対象物体である三角形は底辺 15cm,高さ20cmの二等辺三角形であり、四角形は一辺 15cmの正方形である.この状況を地上から229cmの天井に取り付けた CCD カメラより撮影し、得られた映像を基に物体の形状認識を行う.この様子の一部(対象物のある部分を拡大表示した映像)を図 3-23 に示す.背景となる矩形リングを黒画用紙で覆い,認識対象物の上面に白画用紙で作成した図形を貼り付けることにより、入力される画像データは適当な閾値を設けることで、容易に二値化することができる.CCD カメラにより得られた映像の解像度は 128×128 であり、得られた画像を走査し、各物体の境界を追跡しながら境界部分を直線で近似する.近似された物体が3本の直線から構成されていれば三角形、4本の直線から構成されていれば四角形である.但し、実際の画像にはかなりのノイズが混入するため、認識対象物以外にも数種類の物体を認識するが、物体の面積がある一定の閾値以下のものはノイズと判断している.

次に,認識が正しく行われていることを検証するために,各物体の形状を認識した後,三角形の物体を四角形の物体に近づけるプログラムを組み込んだ.三角形は底辺15cm,高さ20cmの二等辺三角形であるから,三角形として認識された物体の各直線間の角度を求めることにより,二等辺三角形の 頂角方向が分かるので,三角形物体の姿勢制御を容易に行うことができる.そして,図3-24 に示す ように,二等辺三角形の重心から頂角に至るベクトルと二等辺三角形の重心から四角形の重心に至 るベクトルのなす角度を求め,この角度がある一定の閾値q(実験では40度)を超えていれば二等 辺三角形に回転(右回転あるいは左回転)という制御命令を,閾値以下の角度であれば前進という制 御命令を三角形の物体に送信し,三角形の物体が備えている車輪を回転させることにより,四角形の 物体に近づけることができる.





図 3-23 認識対象移動物体

図 3-24 制御命令

実験は次のようにして行った.天井に取り付けられた CCD カメラから 33ms 毎に入力される映像を CPU 68000 を搭載する安立電気社製 Packet e で処理し,境界部分の直線近似及び物体の形状認識 を施した後,三角形に与える制御命令を,CPU Z-80A を搭載する NEC 社製 PC-8001 mk に RS-232C を介して送信する.そして,PC-8001 mk は 40MHz あるいは 20MHz の無線信号により,三角形の物 体に制御命令を伝え,三角形の物体は姿勢を制御しながら四角形の物体に近づく.これら一連の処理 は全て 33ms 以内に行われ,ディジタル直線によるリアルタイムな形状認識を実証することができた.

図 3-25 は、カメラを露光したまま実験の様子を捉えたものであり、二等辺三角形が右回転することにより四角形の方向に向きを変え、さらに前進することにより四角形に近づいている様子を示している.また、図 3-26 は四角形の物体をリモートコントロールにより人間が操作できる状況での実験結果を示すものである.物体の形状認識により、三角形の物体が四角形の物体に近づいてくると、リモートコントロールにより四角形の物体を三角形の物体から遠ざけているが、四角形の物体が移動しても新たな位置を認識し、三角形の物体が自律的に姿勢を制御しながら四角形の物体を追跡している様子を理解することができる.

なお、3.3及び3.4における研究は1984年に行ったものであり、使用している計算機(CPU 68000 を搭載する安立電気社製 Packet e)の処理能力は現在の計算機に比べてかなり低いものであるが、 考案したアルゴリズムは計算機に依存するものではない.このため、現在の高速計算機を使用すれば CPU のクロック数で100倍以上の性能向上が見込めることから、表3-2に掲載している DL 法の平均 直線近似時間(2分53秒=173秒)は数秒で実現することが可能となり、非常に高速な直線近似方法 を提供することができる.また、3.4の実験もリアルタイムな形状認識を行うために直線近似方法を 簡略化したが、3.3のDL 法を適用し、ディジタル直線の性質を用いた移動物体の高速形状認識も可 能となる.簡略化した直線近似方式でなく、ディジタル直線の性質を用いた近似方式(DL 法)を適 用することにより、三角形や四角形などの単純な形状だけでなく、五角形や六角形、あるいは星形の ような複雑な形状をリアルタイムで認識することも可能となる.





図 3-25 移動物体の認識(目標物は静止) 図 3-26 移動物体の認識(目標物も移動)

第四章 高速描画

第三章では、アナログ直線を量子化することによって得られるディジタル直線の性質を調べると共に、このディジタル直線の性質を利用して、物体境界部の直線近似、あるいは移動物体のリアルタイムな形状認識を行った.本章では、さらにディジタル直線の性質を利用することによって、コンピュータグラフィックスでの直線描画を高速に行う方法について議論する.また、コンピュータグラフィックスではクリップという概念があり、クリップ枠と呼ばれるある一定の矩形領域内に存在する部分のみを表示する必要がある.このため、描画する直線とクリップ枠を構成する直線の内、どの直線とが交差するのかを判定する必要があり、この判定を高速に行う方式について述べる.

4.1 直線描画方式

4.1.1 従来の直線描画方式

従来の代表的な直線描画方式としては、DDA(Digital Differential Analyzer)を挙げることができる^[1,2]. DDA とは、直線の位置に対する微分値である傾きを計算し、描画すべき画素の位置を直線の傾き(微分値)の加算により、逐一求める方法である.アナログ直線をディジタル化する際の量子化規則は3.1に記載した方法と同一であり、XYの各座標値を四捨五入することは各座標値に予め0.5を加算しておき、各座標値の小数部分を切り捨てることと同値となる.このことを考慮し、直線の始点を (X_0, Y_0) 、終点を (X_1, Y_1) とすると、DDA による直線描画アルゴリズムは次の様に記述することができる.なお、図形の対称性を考慮して、図3-3におけるAの領域について議論する.

< DDA **アルゴリズム** >

- 1) $L = X_1 X_0, A = (X_1 X_0) / L, B = (Y_1 Y_0) / L$ を計算する.
- 2) $X = X_0 + 0.5, Y = Y_0 + 0.5, C = 0$ と初期設定する.
- 3) (| X | | Y |)を点描画し, X = X + A, Y = Y + B, C = C + 1とする.
- 4) *C* = *L*+1なら終了.そうでなければ3)に戻る.

上記方法は非常に単純であり、直線の傾きを加算するだけで自動的に描画すべき画素の位置を決定 することができる.しかしながら、ディジタル直線の描画を考えると、次に描画すべき画素はX方 向、Y方向あるいは両方向に高々一つ移動するだけであり、図3-3のAの領域を対象とする限り、上 記Aは常に1となる.このことを考慮して、Bresenham^[11]は次の直線描画アルゴリズムを考案してい る.

<Bresenhamのアルゴリズム>

- 1) $a = (Y_1 Y_0)/(X_1 X_0)$ を計算する.
- 2) $X = X_0, Y = Y_0, E = a 0.5$ と初期設定する.
- 3) (X,Y)を点描画し, E > 0ならY = Y + 1, E = E 1とする.
- 4) $X = X + 1, E = E + a \ge 0$, $X = X_1 + 1$ なら終了. そうでなければ3)に戻る.

Bresenham のアルゴリズムでは、常に×座標値を1更新しながらディジタル直線とアナログ直線との誤差Eを四捨五入の閾値である0.5と比較することにより、Y座標値を1更新するかどうかの判断を行っている.初期設定としてEから0.5を引いておくことにより、Eを0と比較するだけでよく、非常に高速な処理が期待できる.さらに、(X,Y)は常に整数値を取るため、切り捨て関数処理が不要となる.しかしながら、ここでも問題点が一つ存在する.それは誤差Eの蓄積である.通常、直線の傾きは小数値となるため、有効桁数で切り捨てられた部分が蓄積し、最終的には直線の終点に到達しない可能性もある.そこで、整数値のみを用いて上記アルゴリズムを実行できる改良型Bresenhamアルゴリズムが提唱されている.基本的な考え方は、 ${(Y_1 - Y_0)/(X_1 - X_0)} - (1/2)$ を0と比較しているので、 $2(X_1 - X_0)$ を乗算して $2(Y_1 - Y_0) - (X_1 - X_0)$ としても0との比較に影響は出ない.このとき、誤差Eに加算すべき値は $2(Y_1 - Y_0)$ となり、1を引く操作は $2(X_1 - X_0)$ を引く操作となることを考慮すれば、アルゴリズムは次のように記述することができる.

<改良型 Bresenham アルゴリズム>

- 1) $a = 2(Y_1 Y_0), b = 2(X_1 X_0)$ を計算する.
- 2) $X = X_0, Y = Y_0, E = \mathbf{a} (X_1 X_0)$ と初期設定する.
- 3) (X,Y)を点描画し, E > 0ならY = Y + 1, E = E bとする.
- 4) $X = X + 1, E = E + a \ge 0, X = X_1 + 1$ なら終了.そうでなければ3)に戻る.

上記アルゴリズムでは除算を一切用いず,整数演算のみで計算できるため,高速処理が可能なだけでなく,除算による切り捨て誤差の蓄積が全く発生しない.従って,通常は上記改良型Bresenhamアルゴリズムを用いて直線を描画するのが一般的である.

4.1.2 ディジタル直線を利用した高速直線描画方式

前節で説明した改良型 Bresenham アルゴリズムを用いると,整数演算のみで高速に、しかも誤差を 蓄積することなく直線を描画することができる.しかしながら,描画すべき画素の位置を決定するた めには,逐一Eを0と比較する必要があった.一方,前章で述べたように、ディジタル直線には趨勢 方向が存在し、この方向に趨勢列の数だけ直線を構成する画素が同じチェイン符号を持って並んで いる.また、その並びの数は前節で証明したディジタル直線の性質から明確に計算できるため、この ディジタル直線の性質を利用すれば、描画すべき画素の位置を逐一判断することなく、高速な直線描 画を期待することができる.以下、前節同様、図形の対称性を考慮して、傾きが0から45度の範囲 (図3-3の領域A)に入る直線について、アルゴリズムを検討する.

前章 3.2 で記載したディジタル直線の性質より,直線の傾きが1/hとなる場合は,n = 1, m = hと 置き換えることにより,傾きn/mの場合に包含することができる.また,付録-2の(A-9)及び(A-28) より,k番目の直線の補正方向を与える画素のX座標値は,直線の傾きaが0 < a < 1/2のときは [$\{(2k-1)m\}/(2n)$], $1/2 \le a < 1$ のときは[$\{(2k-1)m\}/\{2(m-n)\}$]+1と記述できるので,このことを考慮し,直線の始点を (X_0, Y_0) ,終点を (X_1, Y_1) とすると、ディジタル直線の性質を利用した直線描画アルゴリズムは次のようになる(図4-1及び4-2参照).

) 直線の傾き (a = 0) の場合

- 1) $X = X_0, Y = Y_0$ と初期設定する.
- 2) (X,Y)を点描画し, X = X + 1とする.
- 3) $X = X_1 + 1$ なら終了.そうでなければ2)に戻る.
-) **直線の傾き** (0 < a < 1/2) の場合
- 1) $m = (X_1 X_0), n = (Y_1 Y_0)$ を計算する.
- 2) $X = X_0, Y = Y_0, k = 0, X_k = 0$ と初期設定する.
- 3) X_{k+1} = [{(2k+1)m}/(2n)]を計算し, (X,Y)から(X + X_{k+1} − X_k − 1,Y)までX_{k+1} − X_k個の 画素をチェイン符号0の方向に描画し, X = X + X_{k+1} − X_k, Y = Y + 1, k = k + 1, X_k = X_{k+1} とする.
- 4) k = nなら, (X_k, n) から(m, n)まで $m X_k + 1$ 個の画素をチェイン符号0の方向に描画して 終了. そうでなければ3)に戻る.

) 直線の傾き(1/2≤a<1)の場合

- 1) $m = (X_1 X_0), n = (Y_1 Y_0), n' = m n$ を計算する.
- 2) $X = X_0, Y = Y_0, k = 0, X_k = 0$ と初期設定する.
- 3) $X_{k+1} = \lfloor \{(2k+1)m\}/(2n') \rfloor + 1 を計算し, (X,Y) から (X + X_{k+1} X_k 1, Y + X_{k+1} X_k 1)$ まで $X_{k+1} - X_k$ 個の画素をチェイン符号 1 の方向に描画し, $X = X + X_{k+1} - X_k, Y = Y + X_{k+1} - X_k - 1, k = k+1, X_k = X_{k+1} とする.$
- 4) k = n'なら, $(X_k, X_k m + n)$ から(m, n)まで $m X_k + 1$ 個の画素をチェイン符号1の方向に 描画して終了. そうでなければ3)に戻る.

) 直線の傾き (a = 1) の場合

- 1) $X = X_0, Y = Y_0$ と初期設定する.
- 2) (*X*,*Y*)を点描画し, *X* = *X* + 1,*Y* = *Y* + 1 とする.
- 3) $X = X_1 + 1$ なら終了.そうでなければ2)に戻る.



図 4-1 傾き (0 < a < 1/2) の直線



図 4-2 傾き (1/2≤a < 1)の直線

上記アルゴリズムを用いれば、描画すべき画素の位置を逐一判断する必要がなく、高速に直線を描 画することができる.しかしながら、除算や切り上げ、あるいは切り捨て関数を使用しているため、 これらの処理を改良型 Bresenham アルゴリズム同様、整数の演算処理に置き換えることができれば、 さらなる高速処理が可能となる.そこで、上記アルゴリズムを整数の演算処理で実現可能かどうかを 検討する.

本節では図形の対称性を考慮して、図 3-3 の領域Aについて議論している.従って、直線の傾き n/mは1以下の値であるが、その逆数m/nは1以上の値となるため、mをnで除した際の商を Q_0 、余りを R_0 とすれば、m/nは次のように表現することができる.

$$\frac{m}{n} = Q_0 + \frac{R_0}{n} \qquad (0 \le R_0 < n)....(4-1)$$

また、直線の補正方向を与える画素のX座標値は、直線の傾きaが0 < a < 1/2のとき、一般に $\left[\{ (2k-1)m \}/(2n) \right] (0 < k \le n)$ と表記されるため、切り上げ関数の中にある数値も同様に、以下のように表現することができる.

$$\frac{(2k-1)m}{2n} = Q_k + \frac{R_k}{2n} \qquad (0 \le R_k < 2n)....(4-2)$$

特に, k=1の場合について考えると,

$$\frac{m}{2n} = Q_1 + \frac{R_1}{2n} \qquad (0 \le R_1 < 2n)...(4-3)$$

と表され、本式を式(4-1)と比較すると、次のことが言える.

$$Q_1 = \left\lfloor \frac{Q_0}{2} \right\rfloor, R_1 = \begin{cases} R_0 & (Q_0 | \mathbf{d} | \mathbf{d} \mathbf{b}) \\ R_0 + n & (Q_0 | \mathbf{d} | \mathbf{b} \mathbf{b}) \end{cases}$$
(4-4)

まず, $R_0 \neq 0$ 場合について考える.式(4-4)より $R_1 \neq 0$ が成り立ち,式(4-2),(4-3)より,

$$Q_k + \frac{R_k}{2n} = \frac{(2k-1)m}{2n} = (2k-1)\frac{m}{2n} = (2k-1)(Q_1 + \frac{R_1}{2n}) = (2k-1)Q_1 + \frac{(2k-1)R_1}{2n}\dots(4-5)$$

となる.従って, $R_k = (2k-1)R_1$ であり, $R_1 \neq 0$ から, $R_k \neq 0$ も成り立つ.すると, k番目の直線の補正方向を与える画素のX座標値 X_k は次のようになる.

$$X_{k} = \left[\frac{(2k-1)m}{2n}\right] = \left[Q_{k} + \frac{R_{k}}{2n}\right] = Q_{k} + 1 \quad (\because R_{k} \neq 0)....(4-6)$$

次に,k+1番目の直線の補正方向を与える画素のX座標値 X_{k+1} を考えると、次の漸化式が成り立つ.

従って, X_k から X_{k+1} –1 までの画素列の長さ L_k は, 式(4-6)及び(4-7)より次のようになる.

$$L_{k} = \mathsf{X}_{k+1} - X_{k} = \begin{cases} Q_{0} & (R_{k+1} \le 2n) \\ Q_{0} + 1 & (R_{k+1} > 2n) \end{cases}$$
(4-9)

また,最初の画素列の長さ L_0 は,式(4-6)より次のようになる.

 $L_0 = X_1 - 0 = Q_1 + 1....(4 - 10)$

一方,直線の終点に至る最後の画素列の長さ L_n は,n番目の直線の補正方向を与える画素のX座標値 X_n を計算することにより、次のように得られる.

$$X_{n} = \left[\frac{(2n-1)m}{2n}\right] = \left[m - \frac{m}{2n}\right] = \left[m - (Q_{1} + \frac{R_{1}}{2n})\right] = \left[(m - Q_{1}) - \frac{R_{1}}{2n}\right]$$
$$= m - Q_{1} \quad (\because R_{1} < 2n)....(4-11)$$

$$\therefore L_n = m - X_n + 1 = m - (m - Q_1) + 1 = Q_1 + 1...(4 - 12)$$

従って,式(4-8),(4-9),(4-10),(4-12)より, $R_0 \neq 0$ 場合についてまとめると次のようになる.

$$Q_{k+1} = Q_k + Q_0, R_{k+1} = R_k + 2R_0 \qquad (0 < k < n-1)$$

$$L_0 = L_n = Q_1 + 1$$

$$L_k = \begin{cases} Q_0 & (R_{k+1} \le 2n) \\ Q_0 + 1 & (R_{k+1} > 2n) \end{cases}$$
(4-13)

となる.また,最初の画素列の長さ L_0 は,式(4-14)より次のようになる.

$$L_0 = X_1 - 0 = \begin{cases} Q_1 & (R_1 = 0) \\ Q_1 + 1 & (R_1 \neq 0) \end{cases}$$
(4-18)

一方, 直線の終点に至る最後の画素列の長さ L_n は, n番目の直線の補正方向を与える画素のX座標値 X_n を計算することにより,次のように得られる.

$$X_{n} = \left[\frac{(2n-1)m}{2n}\right] = \left[m - \frac{m}{2n}\right] = \left[m - (Q_{1} + \frac{R_{1}}{2n})\right] = \left[(m - Q_{1}) - \frac{R_{1}}{2n}\right]$$
$$= m - Q_{1} \qquad (\because R_{1} < 2n).....(4-19)$$

 $\therefore L_n = m - X_n + 1 = m - (m - Q_1) + 1 = Q_1 + 1....(4 - 20)$

従って,式(4-16),(4-17),(4-18)及び(4-20)より, $R_0 = 0$ 場合についてまとめると次のようになる.

$$\begin{aligned} Q_{k+1} &= Q_k + Q_0, R_{k+1} = R_k = R_1 \quad (0 < k < n-1) \\ L_0 &= \begin{cases} Q_1 & (R_1 = 0) \\ Q_1 + 1 & (R_1 \neq 0) \end{cases}, \quad L_n = Q_1 + 1 \\ L_k = Q_0 \quad (0 < k < n) \dots \dots \dots (4-21) \end{aligned}$$

次に, 直線の傾きa が $1/2 \le a < 1$ の場合について考える. m - n = n'とすると, 式(4-1)同様, 次の様に表現できる.

$$\frac{m}{m-n} = \frac{m}{n} = Q_0 + \frac{R_0}{n} \qquad (0 \le R_0 < n')....(4-22)$$

また,直線の補正方向を与える画素のX座標値は、一般に $[{(2k-1)m}/(2n')]+1$ と表されるため、切り捨て関数の中にある数値も同様に、以下のように表現することができる.

$$\frac{(2k-1)m}{2n'} = Q_k + \frac{R_k}{2n'} \qquad (0 \le R_k < 2n')....(4-23)$$

特に, k=1の場合について考えると,

$$\frac{m}{2n} = Q_1 + \frac{R_1}{2n} \qquad (0 \le R_1 < 2n') \dots (4 - 24)$$

と表され、本式を式(4-22)と比較すると、次のことが言える.

$$Q_1 = \left\lfloor \frac{Q_0}{2} \right\rfloor, R_1 = \begin{cases} R_0 & (Q_0 | \mathbf{d} | \mathbf{d} | \mathbf{d}) \\ R_0 + n & (Q_0 | \mathbf{d} | \mathbf{d} | \mathbf{d}) \end{cases}$$
(4-25)

次に, *k* 番目の直線の補正方向を与える画素の X 座標値 *X_k* を計算すると,式(4-23)より次のようになる.

$$X_{k} = \left\lfloor \frac{(2k-1)m}{2n} \right\rfloor + 1 = \left\lfloor Q_{k} + \frac{R_{k}}{2n} \right\rfloor + 1 = Q_{k} + 1....(4-26)$$

また,k+1番目の直線の補正方向を与える画素のX座標値 X_{k+1} は,式(4-22)及び(4-26)より次のようになり、漸化式が得られる.

$$X_{k+1} = \left[\frac{\{2(k+1)-1\}m}{2n}\right] + 1 = \left[\frac{(2k-1)m}{2n} + \frac{2m}{2n}\right] + 1 = \left[Q_k + \frac{R_k}{2n} + Q_0 + \frac{2R_0}{2n}\right] + 1$$
$$= \left[(Q_k + Q_0) + \frac{R_k + 2R_0}{2n}\right] + 1 = \begin{cases}Q_k + Q_0 + 1 & (R_k + 2R_0 < 2n)\\Q_k + Q_0 + 2 & (R_k + 2R_0 \ge 2n)\end{cases}$$
(4-27)

 $Q_{k+1} = Q_k + Q_0, R_{k+1} = R_k + 2R_0$(4-28) 従って、 X_k から $X_{k+1} = 1$ までの画素列の長さ L_k は、式(4-26)及び(4-27)より次のようになる.

$$L_{k} = X_{k+1} - X_{k} = \begin{cases} Q_{0} & (R_{k+1} < 2n') \\ Q_{0} + 1 & (R_{k+1} \ge 2n') \end{cases}$$
(4-29)

また、最初の画素列の長さ L_0 は式(4-26)より、

 $L_0 = X_1 - 0 = Q_1 + 1....(4 - 30)$

となる.一方, 直線の終点に至る最後の画素列の長さ L_n はn番目の直線の補正方向を与える画素のX座標値 X_n を計算することにより、次のように得られる.

$$X_{n} = \left[\frac{(2n'-1)m}{2n'}\right] + 1 = \left[m - \frac{m}{2n'}\right] + 1 = \left[m - (Q_{1} + \frac{R_{1}}{2n'})\right] + 1 = \left[(m - Q_{1}) - \frac{R_{1}}{2n'}\right] + 1$$
$$= \begin{cases} m - Q_{1} + 1 & (R_{1} = 0) \\ m - Q_{1} & (R_{1} \neq 0) \end{cases}$$
(4-31)

$$\therefore L_{n'} = m - X_{n'} + 1 = \begin{cases} Q_1 & (R_1 = 0) \\ Q_1 + 1 & (R_1 \neq 0) \end{cases}$$
(4-32)

従って,式(4-28),(4-29),(4-30)及び(4-32)より,直線の傾き*a*が1/2≤a≤1の場合について まとめると次のようになる.

$$Q_{k+1} = Q_k + Q_0, R_{k+1} = R_k + 2R_0 \qquad (0 < k < n' - 1)$$

$$L_0 = Q_1 + 1, L_n = \begin{cases} Q_1 & (R_1 = 0) \\ Q_1 + 1 & (R_1 \neq 0) \end{cases}$$

$$L_k = \begin{cases} Q_0 & (R_{k+1} < 2n') \\ Q_0 + 1 & (R_{k+1} \ge 2n') \end{cases} \qquad (0 < k < n') \dots (4 - 33)$$

ここでもし, $R_0 = 0$ とすると, 式(4-24)及び(4-28)より, $R_{k+1} = R_k + 2R_0 = R_k = ... = R_1 < 2n^2$ であるから, $L_k = Q_0 = - c$ となる.

上記結果に対して,直線の傾きn/mが0ということはn=0と同値,n/m=1/2ということは2n=mと同値,n/m=1ということはn=mと同値であることを考慮すると,図 3-3 の領域Aを対象とした,ディジタル直線の性質を用いた高速直線描画アルゴリズムは図 4-3~4-5 のようになる. なお, int(x)はxの小数点以下を切り捨てる関数,x%yはxをyで除した際の余りを求める演算子である.



図 4-3 ディジタル直線の性質を利用した高速直線描画アルゴリズム(全体処理)



図 4-4 ディジタル直線の性質を利用した高速直線描画アルゴリズム(傾き 1/2 未満の場合)



図 4-5 ディジタル直線の性質を利用した高速直線描画アルゴリズム(傾き 1/2 以上の場合)

4.2 **直線のクリップ**

コンピュータグラフィックスの用途は工業製品製作のための CAD/CAM, 映画/ゲームなどのエンター テインメント,教育用エデュテイメント,医療あるいは産業用各種シミュレータなど様々であるが, いずれの分野をとっても扱うグラフィックスデータの量は非常に多い.これらの大規模データを一 度に全てを表示していたのでは、いくら最近のハードウェア技術が進歩していてもリアルタイムな 表示は困難である.一方、コンピュータグラフィックスの応用分野からすると、構築した大規模デー タを一度に全てを見ることは稀であり、大規模なデータを構築してもその一部を拡大表示して見る ことが多い.つまり,全体を見るときは各部の詳細なデータは不要であり,全体的なデータの配置状況が分かればよく,詳細データを見るのは一部を拡大表示するときである.全体データの概略状況をリアルタイムに把握するためには大規模データをそのまま表示するのではなく,詳細データを簡略化してグラフィックス表示データを削減する必要があると同時に,一部の領域を詳しく表示することを可能とするための詳細データも保持しておく必要がある.つまり,データの階層化が重要となる.一方,一部の領域を詳しく表示する際には,全てのグラフィックスデータを表示対象とする必要はなく,表示される領域に入るデータを高速に抽出すればよい.この表示領域に入るグラフィックスデータの抽出処理をクリップと呼び,コンピュータグラフィックスの高速表示に重要な役割を果たす.データの階層化については次章で述べることにし,本節では高速表示に重要なクリップ処理について論ずることにする.



図 4-6 3 次元コンピュータグラフィックスのクリップ処理

第二章でも記述したように、コンピュータグラフィックスで扱うデータは最初、モデリング座標系 上で定義され、各モデルデータをモデリング変換によりワールド座標系上に配置した後、視野変換に より視点座標系のデータとして記述される.視点座標系は視点を原点とした座標系であり、変換され たデータのどの部分を表示するのかを決定するためのクリップ処理が、この視点座標系上で行われ る(図2-3参照).図4-6に示すように、視点を頂点としたピラミッドのうち、視点に最も近い平面 (Near Plane)と視点から最も離れている面(Far Plane)との間に挟まれた部分(View Volume)が 表示対象となり、表示対象範囲内に存在する物体(あるいは物体の一部)がView Plane に投影され て、最終的な画像が表示される.ここで、表示対象となる View Plane は平面であり、この View Plane のうち、View Volume により切り取られた部分(View Window)が、デバイス座標系におけるクリッ プ枠となる^[11].3次元コンピュータグラフィックスにおける View Volume は一般に台形体となるた め、側面と表示物体との交点計算に多大な計算時間を要する.そこで、視点座標系上のデータを全 て、一辺が単位長さ(1.0)となる立方体形状の座標系(**正規化視点座標系**)上のデータに変換した後、 クリップ処理を行う場合もある.この場合、View Volume を構成する面は全て視点座標系を構成する 各軸(X,Y,Z)と直交し、クリップ処理は容易となる.あるいは、View Volume を対象とした3次元ク リップ処理は表示物体を包含する矩形体(**バウンディングボックス**)で概略のクリップ処理を行い、 少なくともその一部が表示される物体は全て、透視変換によりデバイス座標系上のデータに変換し た後、View Windowを対象とした2次元クリップ処理に帰着させる場合が多い.従ってここでは、コ ンピュータグラフィックスにおいて表示対象となるデータに対し、View Window(つまりクリップ枠) 内に存在する物体、あるいは物体の一部を高速に抽出する方式について検討する.

4.2.1 従来のクリップ方式

2次元クリップ処理で最も有名な方法は、Cohen-Sutherland(CS)の手法^[1,12]である.



図 4-7 Cohen-Sutherland のクリップ方法

CS 法では,図4-7 に示すように 2 次元デバイス座標系において,クリップ枠を構成する 4 本の直線 を $X = X_i$, $X = X_r$, $Y = Y_b$ 及び $Y = Y_t$ とし,直線の両端点(X,Y)に対して,それぞれ次の符号 (ABCD)を求める.

 $Y ≤ Y_t$ なら A=0,そうでなければ A=1 $Y ≥ Y_b$ なら B=0,そうでなければ B=1 $X ≤ X_t$ なら C=0,そうでなければ C=1 $X ≥ X_t$ なら D=0,そうでなければ D=1 すると、クリップ枠を構成する4本の直線により9つの領域に分割された2次元空間の各領域に対し、図4-7に示す符号が得られる. 左端の符号A = 1 は対象となる点が $Y = Y_t$ よりも上側にあることを,次の符号B = 1 は対象となる点が $Y = Y_b$ よりも下側にあることを、その次の符号C = 1 は対象となる点が $X = X_t$ よりも右側にあることを、最後の符号D = 1 は対象となる点が $X = X_t$ よりも右側にあることを、 なる点が $X = X_t$ よりも右側にあることを、最後の符号D = 1 は対象となる点が $X = X_t$ よりも右側にあることを、 にあることを示す。図 4-7 には様々な直線を示しているが、例えば line1 の両端点 S_1 及び E_1 に対す る符号は共に(0000)となり、line2 の S_2 に対する符号は(1001)、 E_2 に対する符号は(0101)となる。 従って、次のことが言える.

<クリップ処理アルゴリズム>

- 1) 直線の両端点に対する符号が共に(0000)であれば、その直線はクリップ枠内に存在する.
- 2) 直線の両端点に対する符号のビット毎の AND が(0000)でなければ、その直線はクリップ枠を構成する4本の直線の内、いずれかの直線よりもクリップ枠の外側に存在する.
- 3) 上記いずれにも当てはまらない場合は、直線を分割してさらに詳しく調べる.

上記アルゴリズムの 3)において、さらに詳しく調べるための分割には様々な方法がある.一つは Clipping Divider^[12]であり、直線の両端点の平均を取ることにより、直線の中点を求めて直線を二 分割する.二分割された各直線に対し、上記アルゴリズムを適用して 1)あるいは 2)により、直線が クリップ枠内に存在するか、あるいはクリップ枠外に存在するかが判断されるまで繰り返す.直線の 中点を求める手法は非常に単純であり、ハードウェア化が容易であることから高速処理が期待でき る.しかしながら、この中点分割方法では直線のクリップ処理を行うためには数回の中点計算が必要 となり、最終的に得られた直線の端点には数回の中点計算による誤差が蓄積されている.一方、直線 がクリップ処理により切断される点は直線とクリップ枠との交点であるため、直線の中点を求める のではなく、直接、クリップ枠との交点計算を行う方法が提案されている^[2].アルゴリズムのフロー チャートを図 4-8 に示す.

図 4-8 に示すアルゴリズムを用いれば、直線とクリップ枠との交点を直接計算することにより、計 算誤差の蓄積を抑えた精度の高いクリップ処理が実行できる.しかしながら、図 4-8 のアルゴリズム にも短所は存在する.図のアルゴリズムに従えば、直線がクリップインでもクリップアウトでもない 場合、必ず直線の端点のどちらかはクリップ枠の外にあるため、その点を対象として、直線がどのク リップ枠と交わるのかを判断しているが、不必要な交点計算を伴うことがある.例えば、図 4-7 の line3 では最初のループで $X = X_i$ との、次のループで $X = X_i$ との交点を計算するが、最終的には クリップアウトと判断され、非表示となる.また、line5の場合、アルゴリズムに従うと、 $X = X_i$ 、 $X = X_i$ 及び $Y = Y_b$ に対して3回の交点計算を行うが、図より判断すれば $X = X_i$ 及び $Y = Y_b$ に対 して2回の交点計算でよいことが分かる.

そこで、直線を構成する両端点の2次元座標系上における位置を考慮しながら、最小の交点計算で 行えるクリップ処理方法が、二人のNichoIIとLeeによって考案されている^[13].この方法では、クリ ップ枠を構成する4本の直線とクリップ対象となる直線との交点計算を行う前に、クリップ対象と なる直線の始点とクリップ枠のコーナー点とを結ぶ直線を考え、この直線とクリップ対象となる直 線とを比較することにより、クリップ対象となる直線がクリップ枠を構成する直線の内、どの直線と 交差しているのかを判断して最小限の交点計算でクリップ処理を実行している.



図 4-8 クリップ処理フローチャート





図 4-9 クリップ領域の分類

図 4-10 領域Aのクリップ処理

Nicholl-Lee-Nicholl の方法(NLN 法)では、まずクリップ枠を構成する4本の直線により分割され る9つの領域を図4-9に示すように区分し、図形の対称性を考慮することにより、領域A、D及びE のみを検討対象とする。例えば、領域BはTLとBRを結ぶ直線(y=-x)に対して領域Dと対称となって いるため、この直線に対して折り返すことにより領域Dに帰着することができる。また、領域Cは図 形を反時計回りに 90 度回転することにより、領域Aに帰着できる。領域AあるいはDに帰着してク リップ処理を行った後、逆の手順を辿ることにより元の図形に戻すことができる。

直線の始点座標を (X_0, Y_0) ,終点座標を (X_1, Y_1) とすると、クリップ処理アルゴリズムは次の様になる.

<NLN 法のクリップアルゴリズム>

- 1) $X_0 < X_1$ as b, LeftColumn h.
- X₀ > X_rなら,図形を180度回転させてLeftColumnで処理後,逆方向に180度回転させて元に 戻す.
- 3) 上記いずれでもなければ CenterColumn へ.

<LeftColumn>

- 1) $X_1 < X_1$ なら, 直線はクリップアウト.
- 2) $Y_0 > Y_t \& B$, TopLeftCorner \land .
- 3) $Y_0 < Y_b$ なら, $Y = (Y_t + Y_b)/2$ で折り返して TopLeftCorner で処理後, 逆方向に折り返して元 に戻す.
- 4) 上記いずれでもなければ Left Edge (領域Dの処理ルーチン)へ.

<TopLeftCorner >

- 1) $Y_1 > Y_t$ as $y_t > Y_t$ by $y_t > Y_t$ 1) $Y_1 > Y_t$ 1) Y
- 2) 始点($S(X_0, Y_0)$)とクリップ枠の左上コーナー点(TL)とを結ぶ直線(図 4-10 の L1)を考え,クリップ対象となる直線が L1 より下にあれば、つまり、 $(Y_t Y_0)(X_1 X_0) > (X_t X_0)(Y_1 Y_0)$ であれば、LeftBottomRegion へ.
- クリップ対象となる直線がL1よりも上にあれば、y=-xで折り返してLeftBottomRegionで処理 後、逆手順で元に戻す.

<LeftBottomRegion >

- 1) $Y_1 > Y_b$ なら、図 4-10 の L1 と L3 に挟まれる直線(M1 あるいは M2)となり、 $X_0 < X_l$ であるから $X = X_l$ との交点計算を行う.さらに、 $X_1 > X_r$ を満足していれば $X = X_r$ との交点計算も行 い、対象となる直線はクリップインとなる.
- 2) $X_1 \leq X_r$ の場合は、始点(S)とクリップ枠の左下コーナー点(BL)とを結ぶ直線(図 4-10 の L3)を 考え、クリップ対象となる直線がL3より下にあれば、つまり、 $(Y_b - Y_0)(X_1 - X_0) > (X_l - X_0)(Y_1 - Y_0)$ であれば、直線はクリップアウトとなる、クリップ対象となる直線がL3 の上にある場合は $X = X_l$ との交点計算を行っており、 $Y_1 > Y_b$ かつ $X_1 \leq X_r$ であるから、対象となる直線はクリップインとなる.
- 3) $Y_1 > Y_b$ でない場合は、 $Y_1 \le Y_b$ が成り立つ.従って、 $X_1 < X_r$ であれば、 $Y = Y_b$ との交点計算 を行う. $X_1 \ge X_r$ の場合は、始点(S)とクリップ枠の右下コーナー点(BR)とを結ぶ直線(図 4-10 の L2)を考える.直線が L2 の下、つまり、 $(Y_b - Y_0)(X_1 - X_0) > (X_r - X_0)(Y_1 - Y_0)$ であれば $Y = Y_b$ と、そうでなければ $X = X_r$ との交点計算を行う.いずれの場合にも、 $X_0 < X_l$ である から、 $X = X_l$ との交点計算を行い、対象となる直線はクリップインとなる.



図 4-11 領域Dのクリップ処理

図 4-12 領域 E のクリップ処理

<LeftEdge>

- 1) $X_1 < X_1$ なら, 直線はクリップアウト.
- 2) $Y_1 < Y_h \Box S$, P2Bottom \land .
- 3) $Y_1 > Y_t$ なら, $Y = (Y_t + Y_h)/2$ で折り返して P2Bottom で処理後, 逆方向に折り返して元に戻す.
- 4) 上記いずれでもなければ、 $Y_b < Y_1 < Y_t > x_0$ 、図 4-11 の M2 となる.従って、 $X_0 < X_t$ である から $X = X_t$ との交点計算を行うと共に、 $X_1 > X_t$ であれば $X = X_t$ との交点計算も行い、対象となる直線はクリップインとなる.

< P2Bottom >

- 1) 始点(S)とクリップ枠の左下コーナー点(BL)とを結ぶ直線(図 4-11 の L1)を考え、クリップ対象 となる直線がL1より下にあれば、つまり、 $(Y_b - Y_0)(X_1 - X_0) > (X_l - X_0)(Y_1 - Y_0)$ であれば、 直線はクリップアウトとなる.
- 2) クリップ対象となる直線が L1 より上にある場合、<LeftEdge>の 2)より、 $Y_1 < Y_b$ が成り立って いるから、 $X_1 < X_r$ なら $Y = Y_b$ との交点計算を行う. $X_1 \ge X_r$ の場合、始点(S)とクリップ枠 の右下コーナー点(BR)とを結ぶ直線(図 4-11 の L2)を考える. クリップ対象となる直線がL2 の 下、つまり、 $(Y_b - Y_0)(X_1 - X_0) > (X_r - X_0)(Y_1 - Y_0)$ であれば $Y = Y_b$ と、L2 の上にあれば $X = X_r$ との交点計算を行う. 1), 2)いずれの場合にも、 $X_0 < X_l$ であるから $X = X_l$ との交点 計算を行い、対象となる直線はクリップインとなる.

<CenterColumn>

- 1) $Y_0 > Y_t$ なら、図形を 90 度反時計回りに回転させて、LeftEdge で処理後、逆方向に回転させて 元に戻す.
- 2) $Y_0 < Y_b$ なら、図形を 90 度時計回りに回転させて、LeftEdge で処理後、逆方向に回転させて元に戻す.
- 3) 上記いずれでもなければ Inside へ.

<lnside>

- 1) $X_1 < X_l$ なら, P2Leftへ.
- 2) X₁ > X_rなら,図形を 180 度回転させて P2Left で処理後,再び 180 度回転させて元に戻す.
- 3) 上記いずれでもない場合, $X_1 < X_1 < X_r$ となる. 従って, $Y_1 > Y_t$ なら $Y = Y_t$ と, $Y_1 < Y_b$ なら $Y = Y_b$ と交点計算を行う. どちらにも当てはまらない場合は $Y_b < Y_1 < Y_t$ となり, 交点計算の必 要はなく, 対象となる直線はクリップインとなる.

<P2Left>

- 1) $Y_1 > Y_t \Delta S$, P2LeftTop \wedge .
- 2) $Y_1 < Y_b$ なら, 図形を 90 度時計回りに回転させて P2Left Top で処理後, 逆方向に回転させて元に 戻す.
- 3) 本ルーチンでは<Inside>の 1)より, $X_1 < X_1$ が成立しているから,上記いずれでもない場合は $X = X_1$ との交点計算を行い,対象となる直線はクリップインとなる.

< P2LeftTop >

1) 始点(S)とクリップ枠の左上コーナー点(TL)とを結ぶ直線(図 4-12 の L1)を考える.クリップ対象となる直線が L1 の下,つまり, $(Y_t - Y_0)(X_1 - X_0) > (X_t - X_0)(Y_1 - Y_0)$ であれば $X = X_t$ と, L1 の上であれば $Y = Y_t$ との交点計算を行い,対象となる直線はクリップインとなる.

4.2.2 ポリラインの状態遷移を利用した高速クリップ判定方式

前節で述べた NLN 法は、クリップ枠を構成する四つのコーナー点とクリップ対象となる直線を比較 することにより、最小限の四則演算でクリップ処理を実行することができる.しかしながら、このク リップ処理には非常に多くの条件判断を伴う.特に、高速性が要求されるクリップインの判断はあら ゆる条件判断の最後となり、四則演算の数を減少させたとはいえ、これらの条件判断に要する時間を 無視することはできない.近年、コンピュータの処理速度は大幅に向上しているが、その性能向上の 要因としてプロセッサのパイプライン化を挙げることができる^[14-16].つまり、プロセッサはクロック 数を向上させるだけでなく、複数の命令をパイプライン化することにより、性能向上を図っているの である.しかしながら、条件判断に伴う分岐命令は、このプロセッサのパイプラインを乱し、処理速 度を低下させてしまう.

一方,コンピュータグラフィックスで扱う直線は,通常ポリラインと呼ばれ,複数の連続した点列 を結ぶ折れ線である.つまり,ポリラインを構成する複数の端点を連続して並べることにより,点の 座標変換量を削減して描画性能の向上を図るものである.そこで本論文では,コンピュータグラフィ ックスで通常扱われるポリラインを対象とし,クリップ処理に要する四則演算の回数だけでなく,比 較及び分岐命令の数をも最小とするクリップ方法について論ずる.

従来のクリップ方式では図4-9に示すように、クリップ枠を構成する4本の直線で分割される九つ の領域を考え、図形の対称性を利用することにより三つの場合に分類してアルゴリズムを構築して きた.本クリップ方式ではこの領域をさらに拡張して、図4-13に示す21種類の領域を考える.

基本的な考え方はNLN法と同じく、直線を構成する両端点の位置情報を調べながら、最小限の演算 量でクリップ処理を行うことである.しかしながら、本クリップアルゴリズムは連続した点列を結ぶ 折れ線を対象としているため、1本の直線のクリップ処理を行った後、連続して次の直線のクリップ 処理を行う必要がある.その際,最初の直線の終点は次の直線の始点となるため,終点の位置情報を 用いることにより高速なクリップ処理が可能となる.但し、NLN法によるクリップ処理を終えた段階 では、従来の9分割された領域のいずれに属するかは不明なことが多いため、二つ、あるいは三つと いう複数の領域に跨る範囲を考え、これらの領域にも符号を割当てる.さらに、終点情報を利用する ことにより、NLN 法では様々な条件判断の最後に位置していたクリップイン処理を高速に実行するこ とも可能となる. つまり, 最初の直線のクリップ処理により, その終点の位置情報が上記 21 種類の 領域符号で記述され、この領域符号を用いて次のクリップ処理が実行される. 直線のクリップ処理を 実行する度にその終点の位置情報は変化(**状態遷移**)し,状態の変化に応じた最適なクリップ処理ア ルゴリズムを適用することができる. 最初の直線がクリップアウトであれば、次の直線も同じような 領域に属するためクリップアウトとなる可能性が高く、最初の直線がクリップインであれば、次の直 線もクリップインとなる確率が高い. このように, ポリラインを構成している点列の状態遷移に応じ た最適なクリップ処理アルゴリズムを適用することにより、最少量の演算及び分岐命令で、高速なク リップを実行することが可能となる.本論文で提案する手法は,ポリラインを構成する点列の状態遷 移に応じて最適なクリップ処理アルゴリズムを適用する方法であるため、本手法を State Transition(ST) 法と呼ぶことにする.



図 4-13 拡張クリップ領域

本クリップ方式もNLN法と同様,図形の対称性を考慮してアルゴリズムを記述するが,実際のアル ゴリズムではNLN法のように図形の折り返しや回転を行うのではなく,あらゆる場合のプログラムコ ードを記述しておいた方が,より高速なクリップ処理を実行することができる.以下,アルゴリズム を記述する.なお,クリップ枠を構成する4本の直線,クリップ対象となる直線の始点及び終点の座 標はNLN法と同一のものを使用する.

<状態遷移を利用したクリップアルゴリズム>

- 1) $X_0 < X_1$ なら State1 へ.
- 2) $X_0 > X_r$ なら State3 (図形の対称性を考慮すれば State1 に相当)へ.
- 3) $Y_0 < Y_b$ なら State24 (図形の対称性を考慮すれば State22 に相当)へ.
- 4) $Y_0 > Y_t$ なら State28 (図形の対称性を考慮すれば State22 に相当)へ.
- 5) 上記いずれでもなければ, State29へ.

<State1>

- 1) $X_1 < X_1$ ならクリップアウト. 終点の領域符号は1で,次のクリップはState1から開始.
- 2) $Y_0 < Y_b$ なら State23 の 2) (図形の対称性を考慮すれば State21 の 2) に相当)へ.
- 3) $Y_0 > Y_t$ なら State21 の 2)へ.
- 4) 上記いずれでもなければ, State22の2)へ.

<State11>

- 1) $X_1 < X_1$ ならクリップアウト. 終点の領域符号は1で,次のクリップはState1から開始.
- 2) $Y_0 > Y_t$ なら State21 の 2)へ.
- 3) 上記いずれでもなければ, State22の2)へ.

<State21>

- 1) $X_1 < X_1$ ならクリップアウト.終点の領域符号は1で、次のクリップはState1から開始.
- Y₁ > Y_iならクリップアウト. 終点の領域符号は17 で,次のクリップはState17(図形の対称性 を考慮すればState11に相当)から開始.
- 3) 始点(S)とクリップ枠の左上コーナー点(TL)とを結ぶ直線 LL を考える.クリップ対象となる直線が LL の下、つまり、 $(Y_t Y_0)(X_1 X_0) > (X_t X_0)(Y_1 Y_0)$ であれば 4)へ、そうでなければ 8)へ、
- 4) $Y_1 < Y_h$ なら 5)へ. そうでなければ 7)へ.
- 5) 始点(S)とクリップ枠の左下コーナー点(BL)とを結ぶ直線 LL を考える.クリップ対象となる直線が LL の下,つまり, $(Y_b Y_0)(X_1 X_0) > (X_l X_0)(Y_1 Y_0)$ であればクリップアウト.終点の領域符号は14で,次のクリップはState14から開始.そうでなければ $X = X_l$ でクリップして6)へ.
- 6) $X_1 < X_r$ なら $Y = Y_b$ でクリップ.終点の領域符号は 24 で、次のクリップは State24 から開始. そうでなければ、始点(S)とクリップ枠の右下コーナー点(BR)とを結ぶ直線 LL を考える.クリ ップ対象となる直線が LL の下、つまり、 $(Y_b - Y_0)(X_1 - X_0) > (X_r - X_0)(Y_1 - Y_0)$ であれば $Y = Y_b$ でクリップ.そうでなければ $X = X_r$ でクリップ.いずれの場合も、終点の領域符号は 25 で、次のクリップは State25 から開始.
- 7) $X = X_1$ でクリップ後, $X_2 > X_r$ なら, $X = X_r$ でクリップ.終点の領域符号は 26 で,次のク リップは State26 から開始.そうでなければ終点はクリップイン.終点の領域符号は 29 で,次 のクリップは State29 から開始.
- 8) $X_1 > X_r$ x = 0
- 9) 始点(S)とクリップ枠の右上コーナー点(TR)とを結ぶ直線 LL を考える.クリップ対象となる直線が LL の上,つまり、(Y_t − Y₀)(X₁ − X₀) < (X_r − X₀)(Y₁ − Y₀)であればクリップアウト.終点の領域符号は 15 で.次のクリップは State15 から開始.そうでなければ Y = Y_t でクリップして 10)へ.
- 10) $Y_1 > Y_b$ なら $X = X_r$ でクリップ.終点の領域符号は 26 で、次のクリップは State26 から開始. そうでなければ、始点(S)とクリップ枠の右下コーナー点(BR)とを結ぶ直線 LL を考える.クリ ップ対象となる直線が LL の下、つまり、 $(Y_b - Y_0)(X_1 - X_0) > (X_r - X_0)(Y_1 - Y_0)$ であれば $Y = Y_b$ でクリップ.そうでなければ $X = X_r$ でクリップ.いずれの場合も、終点の領域符号は 25 で、次のクリップは State25 から開始.
- 11) $Y = Y_t$ でクリップ後, $Y_1 < Y_b$ なら $Y = Y_b$ でクリップ. 終点の領域符号は 24 で, 次のクリップ は State24 から開始. そうでなければ終点はクリップイン. 領域符号は 29 で, 次のクリップは State29 から開始.

<State22>

- 1) $X_1 < X_1$ ならクリップアウト. 終点の領域符号は1で,次のクリップはState1から開始.
- 3) 始点(S)とクリップ枠の左下コーナー点(BL)とを結ぶ直線 LL を考える.クリップ対象となる直線が LL の下,つまり,(Y_b − Y₀)(X₁ − X₀)>(X₁ − X₀)(Y₁ − Y₀)であればクリップアウト.終点の領域符号は14で,次のクリップはState14から開始.そうでなければ X = X₁でクリップして4)へ.
- 4) $X_1 < X_r \text{ cos } 2$)より $Y_1 < Y_b$ であるから、 $Y = Y_b$ でクリップ.終点の領域符号は24で、次のクリップはState24から開始.そうでなければ、始点(S)とクリップ枠の右下コーナー点(BR)とを結ぶ 直線 LL を考える.クリップ対象となる直線が LL の下、つまり、 $(Y_b Y_0)(X_1 X_0) > (X_r X_0)(Y_1 Y_0)$ であれば $Y = Y_b$ でクリップ.そうでなければ、 $X = X_r$ でクリップ.いずれの場合も終点の領域符号は25で次のクリップはState25から開始.
- 5) $Y_1 > Y_t$ $x \le 6$ $(x \le 3)$ $(x \ge 3)$ (
- 6) 始点(S)とクリップ枠の左上コーナー点(TL)とを結ぶ直線 LL を考える.クリップ対象となる直線が LL の上,つまり, $(Y_t Y_0)(X_1 X_0) < (X_l X_0)(Y_1 Y_0)$ であればクリップアウト.終点の領域符号は 17 で.次のクリップは State17 から開始.そうでなければ, $X = X_l$ でクリップして 7)へ.
- 7) $X_1 < X_r$ なら 5)より $Y_1 > Y_t$ であるから、 $Y = Y_t$ でクリップ.終点の領域符号は 28 で、次のク リップはState28から開始.そうでなければ、始点(S)とクリップ枠の右上コーナー点(TR)とを 結ぶ 直線 LL を考える.クリップ対象となる直線が LL の上、つまり、 $(Y_t - Y_0)(X_1 - X_0) < (X_r - X_0)(Y_1 - Y_0)$ であれば $Y = Y_t$ でクリップ.そうでなければ、 $X = X_r$ でクリップ.いずれの場合も終点の領域符号は27 で次のクリップはState27 から開始.
- X = X₁でクリップ後, X₁ > X_rなら X = X_rでクリップ. 終点の領域符号は 26 で, 次のクリップは State26 から開始. そうでなければ終点はクリップイン. 終点の領域符号は 29 で, 次の クリップは State29 から開始.

<State29>

- 1) 図 4-7 に示す Cohen-Suther land の 4 ビット符号 ABCD を作成する.
- 2) ABCD=0000 なら直線はクリップイン. 終点の領域符号は29 で次のクリップはState29 から開始.
- 3) ABCD=0001 なら X = X, でクリップ. 終点の領域符号は22 で次のクリップはState22 から開始.
- 4) ABCD=0010 なら X = X, でクリップ. 終点の領域符号は 26 で次のクリップは State 26 から開始.
- 5) ABCD=0100 なら Y = Y_b でクリップ. 終点の領域符号は 24 で次のクリップは State24 から開始.
- 6) ABCD=1000 なら Y = Y, でクリップ. 終点の領域符号は 28 で次のクリップは State28 から開始.
- 7) ABCD=0101 なら,始点(S)とクリップ枠の左下コーナー点(BL)とを結ぶ直線LLを考える.クリッ プ対象となる直線がLLの上,つまり, $(Y_b - Y_0)(X_1 - X_0) < (X_l - X_0)(Y_1 - Y_0)$ であれば $X = X_l$ でクリップ.そうでなければ $Y = Y_b$ でクリップ.いずれの場合も終点の領域符号は23 で,次のクリップはState23 から開始.
- 8) ABCD=1001 なら、始点(S)とクリップ枠の左上コーナー点(TL)とを結ぶ直線 LL を考える. クリッ プ対象となる直線が LL の下、つまり、 $(Y_t - Y_0)(X_1 - X_0) > (X_t - X_0)(Y_1 - Y_0)$ であれば $X = X_t$ でクリップ. そうでなければ $Y = Y_t$ でクリップ. いずれの場合も終点の領域符号は 21 で、次のクリップは State21 から開始.

- 9) ABCD=0110 なら、始点(S)とクリップ枠の右下コーナー点(BR)とを結ぶ直線 LL を考える. クリッ プ対象となる直線が LL の上、つまり、 $(Y_b - Y_0)(X_1 - X_0) < (X_r - X_0)(Y_1 - Y_0)$ であれば $X = X_r$ でクリップ. そうでなければ $Y = Y_b$ でクリップ. いずれの場合も終点の領域符号は 25 で、次のクリップは State25 から開始.
- 10) ABCD=1010 なら,始点(S)とクリップ枠の右上コーナー点(TR)とを結ぶ直線 LL を考える.クリ ップ対象となる直線が LL の下,つまり, $(Y_t - Y_0)(X_1 - X_0) > (X_r - X_0)(Y_1 - Y_0)$ であれば $X = X_r$ でクリップ.そうでなければ $Y = Y_t$ でクリップ.いずれの場合も終点の領域符号は 27 で,次のクリップは State27 から開始.

以上で,直線を構成する点列の状態遷移を利用したポリラインクリップ判定方式について述べた. ここで、従来のクリップ方式である CS 法及び NLN 法と本手法 (ST 法)に関して、クリップ処理に要す る演算量(四則演算及び比較/分岐命令)の比較を行う.但し、従来の方法はポリラインを対象とし ていないため,参考として CS 法でポリラインを対象とした場合に一つ前のクリップ符号(4ビット コード)を保持し、次のクリップ処理においては終点のクリップコードのみを計算するように改良し た方法を用いることとした. この改良版 CS 法を Updated CS (UCS)法と呼ぶ. 図 4-14, 4-15 及び 4-16 は、始点の状態を固定した場合に、終点の状態に応じてクリップ処理に必要な演算量を算出し、ST 法と NLN 法及び UCS 法とを比較したものである. 例えば, 図 4-14 はクリップ対象とする直線の始点 が State21 の状態にある場合を示す図であり, 終点が同じく State21 にある場合は左上の欄を参照す ることにより、この場合に ST 法で必要な演算は比較及び分岐がそれぞれ1回ということが分かる. また、図 4-15 は直線の始点が State22 の状態にある場合を示す図であり、終点が State25 にある場 合には ST 法で必要な演算量は右下の欄を参照することにより、比較 5、加算 2、減算 4、乗算 2、除 算2及び分岐5となる. 図 4-16 には直線の始点の状態を示していないが, 図 4-14 及び 4-15 と同じ く、直線の始点がState29に属する場合に、終点の状態に応じて必要な演算量を算出している、図形 の対称性を考慮すれば、始点の状態が State21, 22 及び 29 で全ての場合を包含しているので、これ らの図で示されている演算量を比較すれば、直線の始点及び終点の状態に応じて各手法で必要な演 算量を比較/分析することができる.

図に示されている演算量を比較すると ST 法は, 従来最小の演算量でクリップ処理を行うと評価さ れていた NLN 法に比べて全ての場合において,より少ない演算量でクリップ処理を実現していること が分かる.また,UCS 法と比較しても,ほとんどの場合においてより少ない演算量でクリップ処理を 実行している.UCS 法と比較して ST 法の方が演算量が多くなっている項目は,図 4-14 及び図 4-16 において 印を付けた部分である.この部分は,実際に直線とクリップ枠との交点計算を行う前に, 直線がどのクリップ枠との交点計算を行う必要があるのかをチェックするために必要な減算及び乗 算であり,UCS 法がこのチェック処理を不要としているために,ST 法及び NLN 法の方が演算量が多く なっている.しかしながら,多くなっている演算量はわずか 0.5,あるいは 1.0 であるのに対し,UCS 法ではこのチェック処理を不要としたことにより,その他の演算量(比較,加算,除算及び分岐)の 演算量がかなり多くなっており,特にパイプライン制御を乱す原因となる比較及び分岐の回数が ST 法に比べて非常に多くなっている.これらの事柄を総合すると,ST 法は全ての場合において,NLN 法 及び UCS 法よりもより少ない演算量でクリップ処理を実行できることになる.

始占													
	(····)	UCS	NLN	ST		UCS	NLN	ST		UCS	NLN	ST	
٤t	較	<u>``6</u>	2.5	1	比較	6	5	2	比較	6	5	2	
カ	〕算、	0	0.	0	加算	0	0	0	加算	0	0	0	
洞	算	^{ار} 0	0	0.	減算	0	0	0	減算	0	0	0	
秉	算	0	0	0	乗算.	0	0	0	乗算	0	0	0	
除	算	ò,	0	0	除算	0	0	0	除算	0	0	0	
分	岐	2 \	2.5	1	分岐	2	5	2	分岐	2	5	2	,
		UCS	NLN	ST		UCS	NLN	ST		UCS	NLN	ST Y	t
٤t	較	6	2.5	1	比較	18.5	8	5	比較	``27	8.5	5.5	
ታበ	算	0	0 [`] \	0	加算	1.5	1	1	加算	2.5	2.	2	
洞	算	0	0 \	0	減算	3.5	4	(4)	減算	4.5	5	ΈÐ.	
秉	算	0	0	``````````````````````````````````````	乗算	1.5	2	2	乗算	2.5	3	3	
除	算	0	0	ò	除算	1.5	1	1	除算	2.5	2	2	
分	岐	2	2.5	1	分岐	10	8	5	分岐	15.5	8.5	5.5 v	,
		UCS	NLN	ST	N	UCS	NLN	ST		UCS	NLN	ST I	b
٤t	較	6	2.5	1	比較	28.5	8.5	5.5	比較	32.25	10	7	
לו	算	0	0	0	加算	2.5	2	2	加算	3	2	_2	
洞	算	0	0	0	減算、	4.5	5	\bigcirc	減算	5	6	\bigcirc	
秉	算	0	0	0	乗算	`\2.5	3	3	乗算	3	4	(4)	
除	算	0	0	0	除算	2.5	2	2	除算	3	2	2	
分	岐	2	2.5	1	分岐	17	8.5	5.5	分岐	19	10	7	
	X_{I}							2	X_r				

図 4-14 クリップ処理に要する演算量の比較(始点が State21 にある場合)

		UCS	NLN	ST		UCS	NLN	ST		UCS	NLN	ST	
	比較	6	3.5	1	比較	23.75	10.5	5	比較	28	11.5	6	
	加算	0	0	0	加算	2	2	2	加算	2.5	2	2	
	減算	0	0	0	減算	4	4	4	減算	4.5	4	4	
	乗算	0	0	0	乗算	2	2	2	乗算	2.5	2	2	
	除算	0	0	0	除算	2	2	2	除算	2.5	2	2	
	分岐	2	3.5	1	分岐	13.75	10.5	5	分岐	16.5	11.5	6	
		UCS	NLN .	ST		UCS	NLN	ST		UCS	NLN	ST	\boldsymbol{Y}_t
	比較	6	3.5	1	比較	14.25	9.5	4	比較	23.5	9.5	4	
始点 <	加算	0	0	0	加算	1	1	1	加算	2	2	2	
	減算	0	0	0	減算	3	3	3	減算	4	4	4	
	乗算	·- <u></u> 0	0	0	乗算	1	1	1	乗算	2	2	2	
	除算	0	0	0	除算	1	1	1	除算	2	2	2	2
	分岐	2	3.5	·1	分岐	7.25	9.5	4	分岐	13.5	9.5	4	v
		UCS	NLN	ST	· · · · · · ·	UCS	NLN	ST		UCS	NLN	ST	Y _b
	比較	6	3.5	1	比較	23.75	9.5	4	比較	27.5	10.5	5	
	加算	0	0	0	加算	2	2	2	加算	2.5	2	2	
	減算	0	0	0	減算	4	4	4	減算	4.5	4	4	
	乗算	0	0	0	乗算	2	2	2	乗 [`] 算`·	- 2.5	2	2	
	除算	0	0	0	除算	2	2	2	除算	2.5	2	2	
	分岐	2	3.5	1	分岐	13.25	9.5	4	分岐	16	10.5	·•.5	
			X_{l}					Z	X_r				

図 4-15 クリップ処理に要する演算量の比較(始点が State22 にある場合)

	UCS	NLN	ST		UCS	NLN	ST		UCS	NLN	ST	
比較	18	7	5	比較	15	7	4	比較	19	8	5	
加算	1.5	1	1	加算	1	1	1	加算	1.5	1	1	
減算	4.5	4	4	減算	3	3	3	減算	4.5	4	4	
乗算	1.5	2	\odot	乗算	1	1	1	乗算	1.5	2	\odot	
除算	1.5	1	1	除算	1	1	1	除算	1.5	1	1	
分岐	9.5	7	1	分岐	8	7	1	分岐	10.5	8	1	
	UCS	NLN	ST		UCS	NLN	ST		UCS	NLN	ST	\boldsymbol{Y}_t
比較	13	7	4	比較	5	8	4	比較	14	8	4	
加算	1	1	1	加算	0	0	0	加算	1	1	1	
減算	3	3	3	減算	0	0	0	減算	3	3	3	
乗算	1	1	1	乗算	0	0	0	乗算	1	1	1	
除算	1	1	1	除算	0	0	0	除算	1	1	1	
分岐	6	7	1	分岐	1	8	1	分岐	7	8	1	17
	UCS	NLN	ST		UCS	NLN	ST		UCS	NLN	ST	\boldsymbol{Y}_{b}
比較	18	8	5	比較	15	8	4	比較	19	9	5	
加算	1.5	1	1	加算	1	1	1	加算	1.5	1	1	
減算	4.5	4	4	減算	3	3	3	減算	4.5	4	4	
乗算	1.5	2	2	乗算	1	1	1	乗算	1.5	2	\odot	
除算	1.5	1	1	除算	1	1	1	除算	1.5	1	1	
分岐	9.5	8	1	分岐	8	8	1	分岐	10.5	9	1	
			λ	X_{l}			2	X_r				

図 4-16 クリップ処理に要する演算量の比較(始点が State29 にある場合)

第五章 大規模グラフィックスデータの高速表示

前章の後半では、クリップ処理の高速化について述べた.コンピュータグラフィックスで構築され る描画用データには大規模なものが多く、全ての詳細なデータをリアルタイムに表示するためには 多大な計算コストが要求される.一方、応用面からすると全てのデータを詳細に表示することは稀で あり、全体的な概要を把握するか、あるいは一部の領域を詳細に表示するかのどちらかである.従っ て、表示領域内に属するデータを高速に抽出するクリップ方式は重要である.また、全体的な概要を 表示する際は、個々の部分に対する詳細な表示を行う必要はなく、詳細データを基に削減されたデー タを用いれば全体的な概要を高速に表示することができる.さらに、構築されたグラフィックスデー タが小規模で個々のデータのみを表示する際にも、表示対象物体が動的に動く場合と静止している 場合とでは要求される表示画像の品質が異なる.つまり、物体が動いている場合にはリアルタイムな 表示が重要であり、特に人間の操作に応じてインタラクティブに物体が動く場合には、人間に表示の 遅延を感じさせない程度の高速処理が必要となる.ところが、動いている物体が一旦静止すると、表 示物体の詳細な部分までも正確に表現する必要がある.

このような、概略データの高速表示と詳細データの高品質表示を同時に満足させるためには、対象 とするグラフィックスデータを階層化し、全体表示あるいは動画表示の際には概略データを用いた 高速表示を、また、一部領域の拡大表示あるいは静止画表示の際には詳細データを用いた高品質表示 を行う方法が一般的である。そこで本章では、グラフィックスデータの階層化と階層化されたデータ の高速表示方式について論ずることにする。なお本論文では、**削除**とは元データから一部のデータを 取り除くこと、**削減データ**とは元データからデータを削除することにより減少したデータとする。

5.1 従来のグラフィックスデータ削減方法

グラフィックスデータの階層化は LOD(Level of Details)と呼ばれ, 1996 年の SIGGRAPH でかなり 多くの論文が発表された^[17-20].本研究もほぼ同時期に行ったものであるが,データ階層化の基本的な 考えは Hoppe^[18]の考え方と同じであるため,データ削減の一手法として Hoppe の方法を採用する.



図 5-1 グラフィックスデータの削減(頂点マージ法)

コンピュータグラフィックスのデータは通常ポリゴンで構成されているが、最も基本となるポリゴ ンは三角形であり、三角形を定義する平面の方程式は三角形を構成する三つの頂点から唯一に決定 されることから、ポリゴンを三角形に分割してデータとして保存したり、あるいは描画時に三角形に 分割して表示処理したりすることが多い、そこで、本章で扱うグラフィックスデータは全て三角形か ら構成されているものとする.

図 5-1(a)のような図形を構成するグラフィックスデータに対して, Hoppeの考えを適用してデータの削減を行うと次の様になる.今,頂点Vを削除すると仮定してみる.この場合,単に頂点Vを取り除いただけでは図 5-1(b)に示すように,頂点Vを用いて生成されていた VAB, VBC,

VCD及び VDAが消滅し、四角形ABCDという穴が生成される.コンピュータグラフィック スのデータは全てポリゴン(基本的には三角形)で構築されており、ポリゴンのない部分は描画され ない.つまり、表示物体に穴が開いてしまい、幾何学的な位相が異なることになる.このような穴を 開けることなく頂点Vを削除するためには、単に頂点Vを取り除くのではなく、頂点Vを用いて生成 されている三角形の他の頂点に、頂点Vを移動(マージ)することを考える.つまり、頂点Vを用い て生成されている三角形としては、 VAB、 VBC、 VCD及び VDAの四つがあり、これ らの三角形を構成する他の頂点とは頂点A、B、C及びDの四つであるから、頂点Vをこれらの一つ の頂点にマージすることを考える.例えば、頂点Vを頂点Aにマージすると、図 5-1(c)のように新 たな面として ABC及び ACDが生成され、図5-1(b)の場合に生成された穴は塞がれるため、幾 何学的な位相の変化は生じない.この方法は、削除対象となる頂点を,その頂点を用いて生成されて いる三角形を構成する他の頂点にマージすることにより頂点を削除する方法なので、ここでは**頂点** マージ法と呼ぶことにする.ここで頂点Vを頂点Aにマージすることにより、 VAB、 VBC、 VCD及び VDAはそれぞれ、直線AB、 ABC、 ACD及び直線ADとなり、直線は面を 構成しないから削除すると、新たに生成される ABC及び ACDだけが残ることになる.

次に,頂点マージ法による誤差を計算する.頂点Vを頂点Aにマージすることにより, VAB, VBC, VCD及び VDAが消滅し,新たに ABC及び ACDが生成されているから,頂 点Vから新たに生成された ABC 及び ACD までの距離を計算し,その最大値を頂点Vを 頂点Aにマージしたことにより発生する誤差と定義する.図 5-1(c)では頂点Vから ABC 及び

ACDまでの距離は等しく、どちらの距離を採用してもよいが、通常は全て異なる距離誤差を持つ ため、これらの最大距離を誤差とする.

上記では一例として、頂点Vを頂点Aにマージした場合について説明したが、頂点Vを他の頂点で あるB、C及びDのどの頂点にマージしても構わない.そこで、上記で定義した誤差に対して、最小 誤差を与える頂点へのマージを採択する.つまり、最大誤差を最小に抑えるようにデータ削減を行う 方法であり、データ削減に対する閾値としての誤差に関しては、第三章で述べたミニマックス法^[9] の考えを取り入れている.さらに、上記では頂点Vを削除するという仮定の基にデータの削減方法を 検討してきたが、データの削減が目的であるため、削除対象となる頂点はVに拘る必要はない.つま り、ここでもミニマックス法の考えを適用し、グラフィックスデータを構成している各頂点を削除す ると仮定した場合に計算される誤差を調べ、最も小さな誤差を与える頂点を削除対象とする.そし て、削除対象となった頂点はその頂点から新しい面までの最大距離が最小となるようにマージすべ き頂点を調べ、その頂点へマージすることによりデータを削減する.アルゴリズムを用いて自動的な データ削減を行う際、プログラムの終了条件としては次の2種類が考えられる.一つは、距離誤差を 閾値として与え、上記で定義した誤差がこの閾値を超えない限りデータ削減を続け、誤差が閾値を超 えた時点で終了する方法であり、もう一つは、削減目標となるデータ数(頂点数や面数)を与え、目 標以下のデータ量となるまで削減を繰り返し行う方法である.Hoppeのデータ削減方法に誤差解析としてミニマックス処理を適用したアルゴリズムを以下に示す.

<頂点マージ法によるデータ削減アルゴリズム>

- データを構成する全ての頂点に対して、その頂点を他の頂点にマージすることにより生成される面までの距離を計算し、その最大距離を誤差とする.この誤差の中で最も小さな値を与える場合を採択し、削除対象となる頂点をマージする先の頂点を決定する.
- 全ての頂点に対して計算された誤差の中で最小値を与える場合を採択し、削除対象となる頂 点及びそのマージ先の頂点を決定する.
- 今までに削除された全ての頂点に対し、上記削除により新たに生成される面までの距離誤差 を調べる.もし、距離誤差が閾値を超えている場合にはデータ削減を終了させる.そうでなけ れば4)へ行く.
- 4) 上記により決定された削除対象となる頂点をそのマージ先の頂点に移動することにより、頂 点を一つ削除すると同時に、頂点の削除により直線となる三角形も削除する(但し、新たに生 成される面は頂点の移動により自動的に生成される).
- 5) データ削減の終了条件(頂点数や面数あるいは閾値誤差)が満足されていれば終了. そうでな ければ 1)へ戻る.

5.2 複数頂点マージによるデータ削減方法

前節では、削除対象となる頂点をその頂点を用いて生成されている三角形の他の頂点にマージす ることにより、頂点を削除するという Hoppe の方法について検討してきた.しかしながら、頂点の 削除方法としては別の方法も考えられる.例えば、削除対象となる頂点をただ単純に他の頂点にマ ージするのではなく、削除対象となる頂点及び他の頂点をも含めてマージすべき新たな頂点を生成 し、この新たに生成される頂点に削除対象となる頂点及び他の頂点の全てをマージする方法であ る.この方法を用いると新たに頂点を生成する必要はあるが、削除対象となる頂点だけでなく他の 頂点をも同時にマージすることができるため、一度に複数の頂点を削除することが可能となる.そ こで、この方法を**複数頂点マージ法**と呼ぶことにする.



図 5-2 グラフィックスデータの削減(複数頂点マージ法)

図 5-2(a) に示す図形に対して,頂点 Vを削除すると仮定する.頂点 Vを用いて生成されている三角 形は VAB, VBC, VCD及び VDAであるから,それらの三角形を構成する頂点 V以外 の頂点は頂点A,B,C及びDの4つである.従って,削除対象となる頂点 V及び他の4頂点(A, B,C及びD)の平均を取ることにより新たな頂点Nを生成する.そして,頂点Nに全ての頂点をマ ージすると,図 5-2(c)に示すような四角錐が得られる.頂点マージ法では一回の削除計算に対して 1頂点のみの削除を行ったが,複数頂点マージ法では5頂点を1頂点にマージするため,一回の計算 で4頂点の削除を行うことができる.

誤差計算は頂点マージ法と同様に行う.つまり,削除された各頂点から新たに生成される面までの 距離を計算し,その最大値を誤差距離とする.そして,最も小さい誤差距離を与える頂点を削除対象 としてデータの削減を行う.ここで,図5-2に従って,新たに生成される面及び消滅する面について 調べておく.図5-2(a)では,図形を構成する面は14個の三角形から成り立っており, VAB,

VBC, VCD, VDA, BAE, BEF, CBF, CFG, DCG, DGH, ADH, AHE, GHE及び GEFである.頂点V, A, B, C及びDを頂点Nにマージす ることにより、上記三角形は次のように変形する.点N,点N,点N,点N,直線NE, NEF, 直線NF, NFG,直線NG, NGH,直線NH, NHE, GHE及び GEFである.点 及び直線は面を構成しないため削除すると、NEF, NFG, NGH, NHE, GHE及 び GEFだけが残ることになる.但し, NEF, NFG, NGH及び NHEの4面は新た に生成された面であり, GHE及び GEFの2面は変化しない面である.複数頂点マージ法によ るアルゴリズムを以下に記述する.

<複数頂点マージ法によるデータ削減アルゴリズム>

- データを構成する全ての頂点に対して、対象となる頂点と、その頂点を用いて生成される三角 形を構成する全ての頂点の平均を取ることにより新たな頂点を生成し、対象となる頂点を含む 全ての頂点を新たに生成される頂点にマージする、マージされた全ての頂点から、複数頂点の マージより新たに生成される面までの距離を計算し、その最大距離を誤差とする.
- 全ての頂点に対して計算された誤差の中で最小値を与える場合を採択し、削除対象となる頂点 及び新たに生成するマージ先の頂点を決定する.
- 今までに削除された全ての頂点に対し、上記削除により新たに生成される面までの距離誤差を 調べる.もし、距離誤差が閾値を超えている場合にはデータ削減を終了させる.そうでなけれ ば4)へ行く.
- 4) 上記により決定された削除対象となる全ての頂点を新たに生成されたマージ先の頂点に移動することにより、複数の頂点を削除すると同時に、頂点の削除により直線あるいは点となる三角形も削除する.(但し、新たに生成される面は頂点の移動により自動的に生成される.)
- 5) データ削減の終了条件(頂点数や面数あるいは閾値誤差)が満足されていれば終了. そうでな ければ1)へ戻る.
5.3 グラフィックスデータの階層化と削減方法の評価

前節及び前々節で述べた二つのデータ削減方法(頂点マージ法及び複数頂点マージ法)を用いて一 つのグラフィックスデータに対して複数のデータ削減を行い、その削減されたデータの量に応じて 段階的に表示を行うと、グラフィックスデータの階層化表示を行うことができる.本章における研究 では、対象とするグラフィックスデータとして、VRML(Virtual Reality Modeling Language)^[21]を用 いることにした.VRMLとは、インターネット上の表記言語であるHTML(HyperText Markup Language) の3次元グラフィックス版であり、インターネットを介して3次元コンピュータグラフィックスを 扱う上での業界標準となるデータ形式である.VRMLは元々、SGI社のOpen Inventorを基にしたもの であるが、現在では、SGI、IBM、SUN など主なコンピュータメーカが参画するVAG(VRML Architecuture Group)により、その仕様が決定されている.VRML は単なるグラフィックスデータの形式を定めたも のではなく、インターネット上での動きを記述することもできる言語であるが、本研究ではデータ形 式だけを用いてデータの削減と階層化の実験を行った.

図 5-3 に示すドルフィンは 285 頂点, 563 三角形から構成される VRML 形式のグラフィックスデータ である.図 5-4 及び 5-5 に頂点マージ法及び複数頂点マージ法により階層化されたデータの表示結果 を示す.



図 5-3 ドルフィン(285 頂点,563 三角形)





(c) 100頂点196三角形



(d) 50頂点96三角形

図 5-4 頂点マージ法によるグラフィックスデータの階層化



(a) 198頂点391三角形



(c) 100頂点194三角形



(b) 147頂点289三角形



(d) 50頂点92三角形

図 5-5 複数頂点マージ法によるグラフィックスデータの階層化

図 5-4 では、グラフィックスデータの削減に伴いドルフィンの形状も徐々に劣化しており、ほぼ予 想通りの階層化を実現することができた.しかしながら、一度に複数の頂点を削除した複数頂点マー ジ法では図 5-5 に示すように、データを削減するにつれてドルフィンの形状が急激に劣化しているの が分かる.これは、一度に複数の頂点を削除するために新たな頂点を生成したことから、データ削減 を重ねるにつれて新たに生成された頂点の影響により、ドルフィン形状が元形状から急激に離れて いったものと推測される.そこで、頂点マージ法及び複数頂点マージ法をもう少し定量的に評価する ために、各方法を用いた場合のデータ削減に要する時間及びデータ削減に伴い発生する誤差の解析 を行った.



図 5-6 頂点マージ法及び複数頂点マージ法に要するデータ削減時間



図 5-7 頂点マージ法及び複数頂点マージ法の誤差

データ削減プログラムはLispを用いて作成し, Sun Workstaion(SPARC Station 1)にて実行させた 結果が図 5-6 である. 複数頂点マージ法は新たな頂点を生成することにより一度に複数の頂点削除を 目的としたものであるため,一度に一つの頂点しか削除できない頂点マージ法に比べてデータ削減 時間が短いことが分かる.しかしながら図 5-7 に示すように,同じ頂点数まで削減したデータを比較 した場合,元の頂点から新たに生成される面までの距離誤差が,頂点マージ法に比べて複数頂点マー ジ法の方が大きいことが分かる.つまり,図 5-4 及び図 5-5 を比較した際に,複数頂点マージ法のグ ラフィックスデータの方が頂点マージ法のグラフィックスデータに比べて形状の劣化が大きい定量 的な裏付けが出来たことになる.

結局,新たな頂点を生成して一度に複数の頂点削除を行うよりも,元の頂点座標を変更することなく一度に一つの頂点削除を行った方が,最終的な誤差及び形状の劣化が少ないことが分かった.そこで次節では,頂点マージ法により削減及び階層化されたデータを基に,粗い形状データから詳細な形状データへと徐々に復元する階層化表示方法について検討する.

5.4 高速復元のための階層化データ作成方法

本節では,頂点マージ法により削減された複数のグラフィックスデータに対して頂点数に応じた階 層化を行うと共に,階層化されたデータ間に関連性を持たせることにより高速に元のグラフィック スデータを復元する方法を検討する.

頂点マージ法では複数頂点マージ法と異なり、新たな頂点を生成することなく、必ず元のグラフィ ックスデータの頂点にマージさせることにより対象となる頂点を削除する.従って、削減されたグラ フィックスデータを構成する頂点は全て元のデータの頂点と同一であり、頂点数の増減はあっても、 頂点の座標値に変更はない.従って、頂点データに関して粗いデータから詳細なデータへ復元するた めには、基本的には削除された頂点データを追加すればよいわけである.しかしながら面データに関 しては、単純に削除された面を追加するだけでは元の詳細なグラフィックスデータを復元すること はできない.何故なら、幾何的な位相の変化を発生させることなく、つまり、グラフィックスデータ に穴を生じさせることなく頂点データの削除を行ったため、元の面データが削除されるだけでなく、 新たな面データが生成されているからである.従って、面データに関しては元のグラフィックスデー タを復元するためには、単純に削除された面データを追加するだけでなく、新たに生成された面デー

以下,具体的な例を用いて説明する.図 5-8 に示すのは VRML Ver.1.0 データの一例であり,頂点 データ(Coordinate3)及び面データ(IndexedFacetSet)の一部を割愛しているが,図 5-4(d)の 50 頂点 で構成されるドルフィンの VRML データである. Transform, ShapeHints 及び Material は属性デー タであり,ドルフィンデータをモデリング座標系からワールド座標系に変換するモデリング変換で 必要となるデータ,面を構成する頂点の並びや法線ベクトル生成時に使用されるデータ及びドルフ ィンの色属性データである.これらのデータは最初に設定しておけばよいものであり,グラフィック スデータの階層化やデータの高速復元に関して特に留意すべきものではない.一方,Coordinate3 及 び IndexedFaceSet はグラフィックスデータを構成する頂点及び面データであり,データの階層化及 び高速復元に深く関係するデータである.

Coordinate3 は 3 次元座標を持つ頂点データであり, point[の後に, x y z の座標値が順に並んで いる.座標値と座標値の間はカンマ(,)で区切られ,]まで座標値データは続く.グラフィックスデ ータの形式によっては,最初に格納されている座標値の数を表示しているものもあるが,この形式で は座標値データの数に関する記述はなく,座標値データを入力する際に数える必要がある.また, IndexedFaceSet は面を構成する頂点座標の番号を表すデータであり,三角形なら三つ,四角形なら 四つの番号が並ぶ.頂点データのxyz がブランクにより区切られていたのとは異なり,面データ を構成する頂点の番号は全てカンマ(,)で区切られているため,面の区切りを示すために,-1 が用 いられる.つまり,カンマ(,)で区切られた番号データを-1 が現れるまで順に読み込むことで,一 つの面を構成する頂点の数とその番号が分かる.頂点データと同様に,面を構成する頂点の数に関す る記述はなく,また,表示物体を構成する面の数に関する記述もない.なお,頂点データの番号は0 からではなく,1から始まる.従って,図5-8のグラフィックスデータを構成する最初(1番目)の 面は27,6及び1番目の頂点から構成される三角形であり,1番目の頂点座標は(88.8501,0,496.294) であることが分かる.

#VRML V1.0 ascii

Se	eparator { Transform {
rotation center	1 0 0 4.71239 -63.8645 0 193.138
vertexOrdering creaseAngle	ShapeHints { COUNTERCLOCKWISE 1.5708
ambientColor diffuseColor specularColor emissiveColor shininess transparency poir	<pre>} Material { 0.092332 0.0928379 0.101263 0.38087 0.382957 0.417708 0.533333 0.533333 0.533333 0 0 0 0.9333333 0 } Coordinate3 { 1 [88.8501 0 496.294, 39.0601 -11.68 511.024, -201.22 0 402.574, -177.09 -13.97 423.654,</pre>
Ind coo	-25.9599 77.22 353.294, 236.17 86.61 277.854, 214.58 52.32 317.734] } lexedFaceSet { rdIndex [27, 6, 1, -1, 28, 27, 1, -1, 5, 4, 3, -1, 6, 5, 3, -1, 49, 25, 45, -1, 48, 25, 49, -1, 49, 25, 48, -1]
	}

図 5-8 VRML のデータ例

図5-1(a)の図形を対象にし、図5-9(a)のように表示物体のモデリング座標系を取ると、図形のVRML データ(頂点データ及び面データ)は図 5-9(b)のように記述される.このデータに対し、頂点9を 頂点5にマージして、対象となっている頂点9を削除すると、図 5-10 のようになる.但し、図 5-10(b)では、削除される頂点データ9 及び 頂点9を頂点5にマージすることにより、直線となる 565と 855を横線にて抹消している.また、図 5-9(b)における 679及び 789は図 5-10(b)において、 675及び 785となり、新しい三角形が生成されている.

従って、図 5-9(b) 及び 図 5-10(b)を比較すると、削減されたデータ(図 5-10(b))から元のデー タ(図 5-9(b))を復元するためには、頂点データに対して削除された頂点9を追加すると共に、面 データに対しては新たに生成された 675 及び 785を削除すると共に、削除されていた 569, 679, 789及び 859を追加する必要がある.



図 5-9 表示物体の形状と VRML データ(削減前のデータ)



図 5-10 表示物体の形状と VRML データ(削減後のデータ)

図 5-10 の場合は、削除される頂点データの番号が最後の番号であったために頂点の順番を表す番 号に変化は生じず、結果的に面を構成する頂点の番号を入れ替える必要はなかった.しかしながら、 一般に削除される頂点の番号が最後とは限らず、最後ではない番号の頂点を削除すると削除した頂 点以降の番号が一つ繰り上がることになる.従って、データ削減の場合には、削除した番号以降の頂 点番号を持つ面データを書き換える必要がある.削減されたデータを元のデータに復元する際にも 同様の処理が必要とされるが、削除された頂点データを必ずしも元の順番に戻す必要はない.面デー タは面を構成する頂点の番号のみで構成されているため、面を構成する頂点の番号が正しく記述さ れていれば、削除された頂点データを必ずしも元の位置に戻さなくてもよいわけである.しかも、削 減されたデータから元のデータを復元する際に、削除された頂点データを頂点データ列の最後に追 加すれば、追加される以前から存在している面データを書き換える必要 はなくなる.そこで、削減されたデータから元データを復元する際には、削除された頂点及び面デー タはデータリストの最後に追加することにする.

上記では説明を簡単にするために、単純な図形を対象とし、しかも、一つの頂点を削除した場合を 例に取ってデータリストを比較しながら説明を行ったが、グラフィックスデータを階層化する場合、 通常は複数の頂点を削除して削減データを作成する.例えば、図 5-4 では頂点数 50,100,150 及び 200 から成る4階層のデータを作成している.そこで、複数の頂点を削除したデータから元の、ある いは一つ前の詳細なデータを復元する際に必要となる追加あるいは削除すべきデータ(頂点及び面デ ータ)を作成するアルゴリズムを次に示す.但し、アルゴリズムを起動する前に、対象となるグラフ ィックスデータには同一座標を持つ複数の頂点がないことを確認しておく.もし,同一座標を持つ複数の頂点データがあれば,それらは一つにまとめることができる.重複している頂点データを一つの 頂点データにマージすることにより重複している頂点データを一つにまとめると共に,重複してい る頂点データを一つにまとめることにより直線や点となって表示に影響を与えない三角形も削除し ておく.

< 階層化データ作成アルゴリズム>

- 1) 削減データ及び元データ(あるいは一つ前の詳細データ)を比較し,頂点データに関する差分 を求める.
- 頂点データに関する差分は削減データから元データを復元する際に追加される頂点群である から、これらを頂点追加リストとして作成する.
- 3) 頂点追加リストに記述されている頂点群を削減データに追加し、新データとする(図 5-11(a)).
- 4) 元データ及び新データを比較し、差分を求める.頂点の数は同じであり、差分は頂点データの 番号の違いである.従って、この番号の違いを調べ、元データの頂点番号を新データの頂点番 号へ変換する頂点番号変換表を作成する(図 5-11(b)).
- 5) 上記で作成した頂点番号変換表を用いて,元データの面データを構成する頂点番号を書き換 え,これを新データの面データとする(図 5-11(c)).
- 6) 削減データの面データと新データの面データを比較し、差分を求める.差分は削減データから 新データを復元する際に追加すべき面データ及び削除すべき面データであるから、これらを 面追加リスト及び面削除リストとする(図 5-11(d)).
- 7) 得られた頂点追加リスト,面削除リスト及び面追加リストを,削減データの頂点データ及び面 データに追加すると,階層化データが作成される(図 5-11(e)).



図 5-11 階層化データの作成

現状の VRML 仕様には、上記頂点追加リスト、面削除リスト及び面追加リストに対応する記述様式 が存在しないため、VertexAddition、FacetDeletion 及びFacetAdditionを追加して階層化データフ ァイルを作成することにした.図5-3のドルフィンを3階層化したデータファイルを図5-12に示す. 最も粗いデータが Coordinate3 及び IndexedFaceSet に記述されており、このデータに最初の VertexAdditionを追加し、FacetDeletionを削除すると共にFacetAdditionを追加することにより、 次の詳細なデータが得られる.さらに、その後にある VertexAdditionを追加、FacetDeletionを削

除して FacetAddition を追加すれば最も詳細なデータを得ることができる.なお,紙面の都合上,本 来は縦に並ぶデータ列を便宜上,横に記述している.

#VRML V1.0 ascii		VertexAddition {	VertexAddition {
		point [-19.6099 -8.13 512.804,	point [13.6601 0 548.364,
Separator {		96.2101 0 561.824,	-24.9399 0 513.564,
	Transform {	78.1801 0 521.184,	21.2801 -6.1 547.094,
rotation	1 0 0 4.71239		
center	-63.8645 0 193.138	•••••	•••••
	}	233.63 9.65 310.114,	-59.9999 78.23 350.244,
	ShapeHints {	222.45 24.13 336.024,	219.66 73.15 302.744.
vertexOrdering	COUNTERCLOCKWISE	236.42 21.59 294.364]	217.63 52.32 320.784 1
creaseAngle	1.5708	}	}
	}	FacetDeletion {	FacetDeletion {
	Material {	coordIndex [27, 6, 1, -1,	coordIndex [10, 2, 26, -1,
ambientColor	0.092332 0.0928379 0.101263	28, 27, 1, -1,	18, 11, 20, -1,
diffuseColor	0.38087 0.382957 0.417708	5, 4, 3, -1,	27. 50. 11.
specularColor	0.533333 0.533333 0.533333		
emissiveColor	0 0 0		
shininess	0.933333	49, 25, 45, -1,	146, 147, 49, -1,
transparency	0	48, 25, 49, -1,	148, 146, 49, -1,
	}	49, 25, 48, -1]	8, 146, 148, -1]
	Coordinate3 {	}	}
poir	nt [88.8501 0 496.294,	FacetAddition {	FacetAddition {
	39.0601 -11.68 511.024,	coordIndex [0, 52, 53, -1,	coordIndex [150, 151, 50, -1,
	-201.22 0 402.574,	27, 50, 1, -1,	50, 152, 150, -1,
	-177.09 -13.97 423.654,	1, 54, 27, -1,	153, 150, 152, -1,
	•••••	•••••	•••••
	-25.9599 77.22 353.294.	146, 147, 49, -1,	232, 233, 112, -1,
236 17 86 61 277 854		148, 146, 49, -1,	256, 255, 125, -1,
214 58 52 32 317 734 1		8, 146, 148, -1 1	185, 74, 188, -1]
	}	}	}
Inc	dexedFaceSet {	,	}
COC	ordindex [27 6 1 -1		
	28, 27, 1, -1.		
	5 4 3 -1		
	653-1		
	•••••		
	49, 25, 45, -1,		
	48, 25, 49, -1,		
	49, 25, 48, -1]		
	}		

図 5-12 3 階層化したドルフィンデータ

5.5 大規模グラフィックスデータの階層化表示

前節で作成した階層化データファイルを用いれば,頂点追加リストにある頂点群を頂点データに追加し,面削除リストにある面群を面データから削除すると共に,面追加リストにある面群を面データに追加すれば,粗いデータから詳細なデータへと段階的にグラフィックスデータを切り替えて画像の品質を徐々に向上させることができる.本研究により作成した階層化データを表示するネットワークブラウザを,JAVAを用いて作成した.ドルフィンデータの表示例を図 5-13 に示す.

作成したネットワークブラウザはGraNet(Graphics for Network)と呼ばれ、次の機能を備える.

- 表示データの入力:表示すべきデータファイルの入力には2種類の方法がある.一つは、Input fileというウィンドウでファイル名を入力する方法であり、もう一つは、WRL filesというウ ィンドウ上に表示されているファイルをダブルクリックする方法である.入力されたデータ は Loaded Imagesというウィンドウに表示され、一度入力されたデータはそのファイル名をダ ブルクリックすることにより、表示データを切り替えることができる.なお、通常の VRML フ ァイルは拡張子として.wrl を使用しているため、本研究で作成した階層化データファイルの 拡張子を.refと定義する.
- 2) **色の変更:** Change Color の下に示されているRGBのカラーバーを移動させると, R, G, B 各色要素を別々に変更することができる.また,白色バーを移動させると,色相を変更せず に,全体の輝度を変更することができる.Color Reset というボタンをクリックすると,元の 色に戻る.
- 3) 拡大縮小及び回転: Zoom の下にある+ボタンをクリックすると表示物体が拡大され、ボタンをクリックすると表示物体は縮小される. Reset ボタンをクリックすると元の状態に戻る. Rotation の下にあるX, YあるいはZボタンをクリックすると、表示物体はそれぞれX, Y あるいはZ軸周りに回転する. Reverse ボタンをクリックしてからX, YあるいはZボタンを クリックすると、逆方向に回転する. All Reset というボタンをクリックすると、全ての属性デ ータ(色、大きさ、軸周りの回転角など)が初期状態に戻る.
- 4) マウスオペレーション:マウスによる操作も可能である.マウスを上下方向に移動させると、 X軸回りの回転,左右方向に移動させるとY軸回りの回転,左上から右下あるいは右下から左 上に移動させるとZ軸周りの回転,左下方向に移動させると拡大,右上方向に移動させると縮 小する.

本研究では、グラフィックスデータの削減方法として頂点マージ法を用いた.頂点マージ法は、 元々存在するグラフィックスデータの頂点に削除対象となる頂点をマージすることによりデータ削 減を行う方法であり、頂点を削除する際にグラフィックスデータに穴が開くことはなく、幾何学的な 位相を保つことができる.また、階層化したデータを用いて、元のグラフィックスデータを徐々に復 元(Progressive Refinement)する場合、頂点データに関しては削除されたデータを追加するだけよ い.コンピュータグラフィックスを用いて物体を表示する際、対象物体を構成している頂点データの 座標変換を行い、変換された座標値を基に表示プリミティブ(通常は三角形)を描画する.データを 階層化することにより複数のデータを持つと、各段階の表示処理に多大な時間を要し、最終となる詳 細データの表示が遅くなる可能性がある.しかしながら、作成したデータの頂点データは全て元の頂 点データであり、途中段階で削除される余分な頂点データは存在しない.従って、座標変換に関する 限り余分な変換処理を行う必要はなく、Progressive Refinement の各段階では頂点追加リストに記 述されている頂点データのみの座標変換を行えばよいことになる.結果として、面データの追加削除 処理を伴うものの、最終的な詳細データを最初から表示する場合とほぼ同等の処理時間で途中段階 の画像表示を行うことができる.

ブラウザを使用してマウスで物体の移動(拡大縮小あるいは回転など)を行っている間は粗いデー タを用いて物体が表示され、リアルタイムな拡大縮小あるいは回転を行うと共に、マウスを静止させ た瞬間に次の段階のデータを用いた表示処理が始まる.こうすることにより、表示物体の画質は徐々 に向上し、最終的には最も詳細なデータを用いた高品質画像を得ることができる.

Applet GraNet: Poly	/hedron.class		energy (1997) (1997) (1997) (1997) (1997) (1997) (1997) (1997) (1997) (1997) (1997) (1997) (1997) (1997) (1997)	
Applet				
Input file	dol_one_3i.ref	OK Cle	OK Clear	
WRL files	Loaded Images	Change Color	Color Reset	
dol_one_100.wrl	dol_one_285.wrl	R232	I P	
dol one 200.wrl		G233		
dol_one_250.wrl		L 255		
dol_one_280.wrl		2200		
dol_one_50.wrl		Rotation Reverse	All Reset	
		X Y		
		Reset	()	
	15			
		N N		
		1		

I.

Applet started



第六章 バーチャルリアリティ技術と医療応用

6.1 バーチャルリアリティ技術

近年におけるコンピュータグラフィックスの発展に伴い,コンピュータグラフィックスを利用した 様々な応用技術が生まれてきた.その一つが**バーチャルリアリティ(**Virtual Reality) 技術である. バーチャルリアリティ技術とは,現実には存在しない事物を仮想的に創造し,コンピュータグラフィ ックスを使用してインタラクティブに表示する技術であり,**仮想現実感**と訳される.しなしながら, バーチャルリアリティ技術の第一人者である東京大学の舘教授によれば,この訳は適切ではない. Virtual とは "Existing in effect or essence through not in actual fact or form"であり,日 本語に訳すと、「表面あるいは名目上そうではないが事実上の,本質としては」となり、Virtual Reality は "Entity that has the essence of real entity through not the real entity itself" となり、日本語では「現物そのものではないが現物のエッセンスを有するもの」となる^[22].つまり、バ ーチャルリアリティ技術とは、現実には存在しないがそのものの本質を備えているもの、あるいは現 実に存在するものと同様の効果を与えるものを生み出す技術であり、バーチャルリアリティという 言葉をそのまま用いるか、あるいは**人工現実感**と訳した方がよい.

具体的な例を示すと、テレビや冷蔵庫などの家電製品、あるいは自動車や電車などの乗り物を製作 する前には必ず本物そっくりのモックアップ(模型)を作成し、製品に対する様々な評価を行う.色 や形状などの外見上のデザイン評価に加え、製品の操作感覚なども重要なポイントとなる.そこで、 コンピュータグラフィックスを用いて本物そっくりの映像を作成し、その映像をリアルタイムに表 示することにより、まさに製品そのものが目の前に存在しているかのような錯覚を引き起こすこと により、製品の評価を行おうとするものである.視点を変えることにより、どこからでも自由な角度 からの映像がリアルタイムに生成され、思考を中断させることなく、製品の評価を行うことができ る.また、製品そのものを手にとって触れ、製品の操作感覚を確かめるのと同様に、バーチャルリア リティ技術により生み出された映像に触れ、製品に触れたときの感触を味わうこともできる.勿論、 製品評価においては破壊試験もあり、製作した製品がどこまでの危険に耐えられるのか、あるいは製 品が破砕された際の人間への影響はどの程度などかについての評価も重要であるが、現状の技術で は、バーチャルリアリティ技術を用いて、これらの破壊検査及びその評価までを包含しようとはして いない.現状では、破壊試験などの最終評価に使用するモックアップは別途製作するとしても、最終 評価を行う以前の製品評価のために繰り返し製作される数多くのモックアップに代替するものとし て、バーチャルリアリティ技術を使用して作成したモックアップ映像を利用している.

バーチャルリアリティ技術とは、「現実には存在しないが、そのものの本質を備えているもの、あ るいは現実に存在するものと同様の効果を与えるものを生み出す技術」であるから、コンピュータグ ラフィックスにより生成された映像は、製品が本来備えている品質を持ち、製品に触れたときと同じ 感覚を与えることができるだけの特性を備えている必要性を要する.まさに、目の前に製品そのもの があるかのような錯覚を引き起こすことが必要であり、人間に錯覚を引き起させるためには、人間の 五感に対して、現実に存在する製品が与えるのと同じ効果を与える必要がある.人間の五感には、視 覚、触覚、聴覚、嗅覚及び味覚が存在するが、人間の五感の約 80%を占めると言われる視覚が最も 重要である.その他の重要な五感としては、聴覚が挙げられる.人間の聴覚に対しては、音声認識、 音声合成などの独自の技術分野があり、音楽や電話のオペレータへの応用として盛んに研究されて いる.一方、近年急速に研究が進められてきた技術として、触覚がある.バーチャルリアリティ技術 を用いて作成した映像は後で述べる立体視表示技術を使用することで3次元空間上に投影されるが、 この空中に浮いた製品に触れることは以前においては非常に困難であった.しかしながら、近年では 反力を表現できるデバイスの開発が盛んに進められており、このデバイスを使用すれば、3次元空間 上に浮いた物体に触れ、その感触を得ることが可能である.このように、バーチャルリアリティ技術 ではコンピュータグラフィックスで生成した物体がまさに目の前にあるかのような錯覚を引き起こ すだけでなく、目の前にある物体に触れて、その感触を味わうことができる.そこで、本章では特に、 人間の五感の約 80%を占めると言われる視覚と、近年盛んに研究が進められている触覚を取り上げ てその技術動向を探ることにし、次章では具体的な応用システムを取り上げて、高品質画像のリアル タイム生成に関する検証を行うものとする.

6.1.1 **視覚インタフェース**

6.1.1.1 立体視

バーチャルリアリティ技術により生成されたコンピュータグラフィックス映像があたかも3次元 空間上に存在するかのような錯覚を人間に与えるためには、立体視が不可欠となる.人間は左右両眼 の目で3次元物体を捕らえるが、左右両眼の目の奥にある網膜上に結像した映像は視神経を通じて脳 に伝えられ、脳に伝達された2枚の映像の差分から各物体までの距離を計算し、3次元立体映像とし て認識している.

ここで少し用語について定義しておく、絵画や漫画などで描かれている映像あるいは画像は通常, 2次元画像と呼ばれる.2次元画像とは文字通り、XYという2軸を持つ平面上に描かれた画像であ る.絵画手法には遠近法など、描く物体を立体的に見せる方法もあるが、描かれた画像は一方向から 見た画像のみであり、角度を変えて別の方向から見ることはできない.これに対して、コンピュータ グラフィックスで生成した画像は、元々XYZという3軸を持つモデリング空間上で定義されてお り、ワンショットとして捉えた画像が一方向から見た映像であっても、角度を変えて別の方向からの 画像を生成することも可能である.このように3次元空間上で定義されたデータを基に生成された 画像を3次元画像と呼ぶ.3次元画像は3次元空間上で定義されたデータを基に生成された であるから、基になる3次元空間上で定義されるデータには幾つかのものが存在する.一つは上記で述 べたモデリング空間上で定義されたモデリングデータである.別のものとして、医療分野で使用され ているX線 CT (Computed Tomography)や磁気共鳴画像診断(MRI: Magnetic Resonance Imaging) 装置などによって得られる人体の断層像データがある^[23,24].断層像の一枚一枚は2次元画像である が、複数枚の断層像を並べることにより3次元空間上で定義された画像データが得られるため、ポリ ュームレンダリング^[25]という複数点列の可視化手法を用いると、視点を変更して任意の角度からの 画像を生成することが可能である.

一方, **立体画像**とは,人間の左右両眼に対して視差を考慮した2枚の画像を与えることにより,脳 において,与えられた2枚の画像から各物体までの距離を計算して生成された,3次元空間上に浮い ている,あるいは飛び出して見える画像のことを言う.なお,映像と画像にも,本来それぞれ別の定 義が存在し,信号処理の分野では映像あるいは映像信号,画像処理の分野では画像という言葉を用い ることが多いと思われるが,本論文では特に明確な区別は行わず,ほぼ同義語として扱う.

さて,上記にて定義した3次元立体画像(映像),つまり,視点位置を変更して任意の角度から見 える3次元空間上に浮かぶ映像を生成するためには,コンピュータグラフィックスを利用してモデリ ング座標空間上で定義したモデリングデータを基に左右両眼に対して,視差を考慮した画像(**視差画** 像)を生成する必要がある.そして,生成された二つの画像は確実に分離されて,左眼用画像は左眼 に,右眼用画像は右眼に入力されなければならない.そのためには,HMD(Head Mounted Display)と 呼ばれるデバイスを使用する方法が一般的であり,様々な装置が開発されている^[26].これらのデバイ スには,メガネ式のものや頭から被るもの,あるいは双眼鏡のように覗き込むタイプのものまで様々 なものがある.しかしながら,コンピュータグラフィックスを用いて人工的に生成した映像を,左右 両眼の目に強制的に入力したのでは自然な立体視を行うことができず,逆に,強制的な立体視による 障害が報告されている^[27,28].そこで,これらのデバイスを使用することなく,裸眼で自然な立体視を 実現する研究が盛んに行われており,それらの方式をまとめると次の様になる.

- 1) レンティキュラ方式:レンティキュラと呼ばれるカマボコ状の板から左右両眼の眼に対応する 二つの映像を投影する.投影される映像の面はカマボコの凸凹に応じた角度が付けられている ため、左眼用の映像は左眼に、右眼用の映像は右眼に入力されるように設計されている.この ため、メガネなどのデバイスを用いることなく、裸眼状態で自然な立体視を行うことができる. しかしながら、この方式ではレンティキュラ板に設けられている映像面の傾斜が一定であるた めに視野領域が固定され、観察者は頭を移動させることができないという欠点を持つ^[29].同様 な方式として、パララックスバリア方式やイメージスプリッタ方式^[30]などがあり、視野領域を 拡大するために、これらの方式を組み合わせるなどの様々な工夫がなされている^[31].
- 2) 視点追従法:レンティキュラなどの方式における視野領域固定の問題を解決するために、観察 者の頭の位置を認識してこの位置を追跡することにより、観察者の両眼には分離された左右の 視差画像が確実に入力されるよう工夫した方法である^[32,33].
- 3) 多眼ステレオグラム:上記二つの方法は基本的に左右両眼に入力される画像を分離し、左眼には左眼用の画像を、右眼には右眼用の画像を入力するように設計することで、メガネなし立体視を実現していた.多眼ステレオグラムも基本的な考えは同じであるが、左右それぞれの眼に入力される画像が一つではない点が異なる.つまり、左右それぞれの眼には複数の画像が重畳された状態で入力される.これらの合成画像を左右それぞれの眼で認識した後、人間の脳の処理により立体視を実現するものである.一つの眼に複数の映像が入力されるため、観察者は頭を移動させると、これら複数映像の重畳度合いが異なり、別の角度から見た映像として認識することができる.従って、観察者はメガネを用いずに立体視を行うことができるだけでなく、頭を自由に動かせることも可能となる^[34,35].
- 4) ホログラフィ:オーストリア・ハンガリー二重帝国の科学者ガボールによって1947年に発明された方法で、当時の論文には「新しい顕微鏡の原理」として紹介された.電子顕微鏡は光学顕微鏡と異なり、レンズによる集光での拡大を行うことはできない.従って、入力される電子線の波長と出力される可視光の波長との倍率で拡大表示することになる.この原理を応用し、電子線により撮像した像を可視光により再生すると、その倍率で拡大像が得られる.この像がホログラフィである.発明当時は、得られる像が二重になるなどの問題が発生し、解決策として参照光を斜めから照射する方法、レーザーを光源として使用する方法などが考案された.ホログラムは電子線により撮影した像を可視光で再生する方法であり、メガネをかけることなく3

次元立体映像を得ることができる.しかも,視点を変更して任意の角度から見ることも可能で あるが,解像度や色の問題,さらには動画への対応など課題も多い.

6.1.1.2 高臨場感

コンピュータグラフィックスで生成された映像が、あたかも目の前の3次元空間上に実在するかの ような錯覚を人間に与えるためのもう一つの技術課題は、臨場感あるいは没入感である.通常のパー ソナルコンピュータに備え付けられているディプレイは 14 インチから 21 インチくらいのものが多 く、コンピュータのディスプレイを見ていても、同時に周囲環境が目に入ってくる.従って、コンピ ュータのディプレイ上に表示されているものは、距離をおいた仮想世界で生成されているものであ り、現実の3次元空間に存在するものと錯覚することはない.しかしながら、画面が大きくなり、コ ンピュータグラフィックスで生成された映像以外、周囲環境が一切視界に入ってこない状況になる と、観察者自身がコンピュータの中に入り込んだような没入感を与えることができる.そして、この 没入感を実現する表示デバイスを IPD(Immersive Projection Display)と呼ぶ.

最も有名な IPD として、III inois 大学で開発された CAVE(Cave Automatic Virtual Environment) を挙げることができる. CAVE は正面,左右の側面及び床面の4面に大型スクリーンを設け,背面投 射により3次元立体映像を映し出す.観察者は液晶シャッターメガネを装着することにより,映し出 された映像を立体視することができるだけでなく、4面の大型ディプレイが観察者を取り囲んでい るため,没入感も与えることが可能となる^[36]. III inois 大学で CAVE が開発されてから,日本国内で も同様な IPD が数多く開発された.有名なものとして,東京大学で開発された CABIN(Computer Augmented Booth for Image Navigation),筑波大学の CoCABIN,郵政省の UNIVERS,岐阜県の COSMOS などがある. CABIN は CAVE に上面を加えて5面構成とし, COSMOS はさらに背面を加えて6面構成と している.

CAVE を始めとするこれらの IPD は全て平面ディプレイを用いて構成しているが,面と面との境目で 映像の不連続性が発生し,没入感を損なう.そこで,球面スクリーンで IPD を構成しようという研究 も行われている.(財)イメージ情報科学研究所で開発された半球面ドーム型 V R 体験システムは,水 平3台,垂直2台の合計6台のプロジェクタを配置し,水平180度,垂直90度という大型半球面ド ーム上に前面投射で映像を映し出す.平面映像を球面に投影することにより歪みが生ずるが,球面へ のマッピングを2回行うことで歪みを解消している^[37].また,筑波大学では全周球面ディスプレイの 研究も行われている^[38,39].

6.1.2 **力覚インタフェース**

バーチャルリアリティ技術のもう一つの特徴は、フォースフィードバックである.コンピュータグ ラフィックスを用いて作成した物体がまさに目の前にあるかのような錯覚を与えるだけでなく、実際に、その物体を手で触れて感じることができる.重い物体を持つと重く感じるし、軽い物体を持つ と軽く感じる.また、硬い物体に触れた場合と柔らかい物体に触れた場合とで感じる力の大きさが異 なる.人間の五感で言えば触覚ということになるが、人間の皮膚に感じるような微妙な感触を発生さ せることは困難であるため、通常は力覚という言葉で表現している.但し、現在では触覚を表現でき るような力制御の研究も数多くなされている. フォースフィードバックを実現するためには、力を表現するデバイスが必要であり、そのデバイス を力覚提示装置(ハプティックデバイス)と呼ぶ、表示されている物体から返される力(反力)を表 現するためには様々な機構が考えられ、その機構によりハプティックデバイスを分類すると次の様 になる.

- 把持型:ペン状,あるいは球状のものを掴んで反力を感じるタイプで,SensAble Technologies 1) 社の PHANToM, 筑波大学の Haptic Master などがある^[40].基本的には DC モータとパンタグラ フ機構を用いて反力を発生させるものであり、入力はXYZという位置3自由度に各軸周り の回転3自由度を加えた6自由度が一般的であるが、出力は位置の3自由度のみのものや、回 転も加えた6自由度のものまで様々である. 出力自由度が大きくなればなるほど, 様々な反力 を発生することができるという長所の反面,位置センサやDCモータなどの数が増えることに より,把持しているペンあるいは球などが重くなるという短所もある.このために,重力補償 を行わない限り, 自重による重みを感じたり, 速く動かそうとしても DC モータの制御により 遅く感じたりすることがある.基本的な反力発生アルゴリズムは次のようになる.例えば、球 や立方体など簡単な仮想モデルを用意し、ペンや球など把持している物体で、仮想空間上に設 定されているモデルを押すと、その仮想的モデルを構成する面あるいは点の位置と把持して いるペン先あるいは,球の中心位置がずれる.物体を押す方向を正としてペン先とモデルとの 差分を計測し、その差分に応じた反力を発生させる、実際の物体、例えば、机や壁などを手で 押す場合、押す手の位置は不変であり、押す力に応じて反力が発生するが、ハプティックデバ イスを用いた場合は、ペン先の位置と対象物との差分により力を発生しているため、対象物に めり込んだ状態で力を感じることになる.従って、実際に計測される位置を補正し、対象物上 にペン先が乗っているようにグラフィックスの描画を行う必要がある.
- 2) グローブ型:手にグローブを装着して指を曲げると、指関節の曲がり度合いに応じて反力が発生する.グローブには関節の曲がり度合いを検出する位置センサとワイヤーが取り付けられており、指の曲げ度合いに応じた力でワイヤーを引っ張ることにより、反力が発生する. Virtual Technologies社の CyberGraspや、New Jersey州立大学 Rutgersの Handmaster などがある^[40,41].把持型では手で握っているものに反力が発生し、ペンや球を介して人間の手に反力が伝達されるのに対し、グローブ型では直接手の指に反力を発生することができるので、実際の力覚に近いものを表現することができる.また、グローブに装着したワイヤーを引っ張る方式であるため、手が壁にぶつかった瞬間に反力を発生し、手が壁の中に入り込むと、壁の位置まで戻すように反力が発生するため、把持型のように手の位置を補正してグラフィックス表示する必要はない.また、5本の指に対して、それぞれ別々の反力を発生することが可能であり、力覚表現の自由度が高いと言える.但し、グローブに接続されたワイヤーをコントロールするための計算機が必要であり、かなり高価なシステムとなる.
- 3) ワイヤーテンション型:手や指に直接糸を装着し、この糸を引っ張る際の張力により反力を発生させる.このタイプのハプティックデバイスとしては、東京工業大学の SPIDAR^[42]や東京大学のウェアラブルフォースディスプレイ^[43]などがある.SPIDARの場合は、親指、人差し指、中指及び薬指の4本の指に糸を装着し、各指に対する反力を発生させる.把持型やグローブ型のように、何かを持ったり装着したりする必要がないので、自然な反力の発生が可能となる.特

に,装着するものの重みがないため,自重による重力補償を行う必要がない.また,ウェアラ ブルフォースディスプレイとは,衣服を着るように人間の体に装着して自由に動くことので きるハプティックデバイスであり,ユーザが自由に動き回れるというメリットは大きい.ウェ アラブルコンピュータ(衣服に装着し,大容量のバッテリを備えることにより野外でも使用可 能なコンピュータ)の研究も盛んであるように,ハプティックデバイスの小型軽量化と共に, 今後の研究における一つの方向性を示している

4) 接触型:上記のハプティックデバイスは基本的に何かを把持したり、あるいは装着したりする ことにより反力を発生させるものであるが、人間の指で直接対象物に触れることにより、物に 触れた感触(いわゆる触覚)に関する研究も行われている.例えば、穴の空いた振動子を用い て人間が感じる触覚の精度を調べる研究^[44]やステッピングモータにより回転するシリンダに 触れることにより人間が滑り現象をどこまで認識できるのかについての研究^[45]、あるいは弾 性波動を用いた皮膚感覚の表現に関する研究^[46]などがある.これらの研究は、力覚からさら に進んだ触覚についての研究であるが、解決する課題も多い.

6.2 医療応用システム

バーチャルリアリティ技術の応用として、6.1 節でも述べたが、実際のモックアップを製作するこ となく製品を評価するシステムがある.このバーチャルリアリティ技術を利用して製作したモック アップは**ディジタルモックアップ**と呼ばれ、近年急速に普及しているものの一つであるが、もう一 つ、近年急速に発展してきているバーチャルリアリティ技術の応用として、医療応用システムが挙げ られる.従来の医療では、専門の教育を受けた医師が長年培ってきた知識と経験を基にして医療行為 を行っていた.その方法はまさに徒弟制度であり、名医と呼ばれる優秀な先生の医療行為を見ること により、その手法を学ぶ方法が一般的であった.特に外科手術においては、全く同じ症例を持つ患者 はほとんどなく、一人一人の患者に対して手術を執刀する医師(**執刀医**)の知識と経験から判断され る手術の方式(**術式**)を、実際の手術現場(**術場**)で見学することにより学び取ってきたわけである.

しかしながらレントゲンが発明されて以来、人体を切り裂くことなく、その内部を見ることができ るようになった.そして、MRIの登場により人体の3次元画像が得られるようになり、従来では複数 のレントゲン写真を並べることにより判断していた人体内部に潜む病巣を、ボリュームレンダリン グを用いることで簡単に3次元表示することが可能となってきた.この複数のレントゲン写真から 人体内部に潜む病巣を発見するのにはかなりの熟練を要するが、ボリュームレンダリングのお陰で 高度な技量を持たない医師でも病巣を容易に発見することができるようになってきた.それだけで はなく、得られた3次元画像はコンピュータ内部に取り込まれているため、コンピュータを利用した 高速解析が可能となり、病巣の可能性がある部位までコンピュータが教えてくれるようになってき ている.このように、コンピュータは医療の世界に深く入り込み、現在ではコンピュータを使用した 機器がなければ医療行為を行うことができないほどになっている.そこで、コンピュータグラフィッ クスの応用技術であるパーチャルリアリティ技術を用いて、現在使用あるいは研究されている医療 システムについて本節でまとめる.そして、次章においては、パーチャルリアリティ技術を応用した 医療システムを実際に構築し、コンピュータグラフィックスを用いて、医療システムにも充分通用で きる画質を備えた高品質な映像を、医療行為を行う上で充分な応答性を持って生成する方式につい ての検討を行う.

6.2.1 手術ナビゲーションシステム

実際の手術中(**術中**)における手術操作の支援あるいはガイド(ナビゲーション)を行うシステム である.手術が効率よく行えるように執刀医を支援するものであり,一般に手術支援システムと呼ば れる.近年の手術は,低侵襲手術と呼ばれる手術が一般的になってきている.低侵襲手術とは,人体 を大きく切り開くのではなく,必要最小限の小さな穴を開け,その穴から内視鏡など人体内部を見る ことのできるカメラを挿入し,このカメラにより得られる映像を見ながら別の穴から挿入された手 術器具(術具)を用いて行う手術の総称である.人体内部を見るカメラとして内視鏡が用いられる場 合には,特に内視鏡手術と呼ばれる.低侵襲手術を行うことにより術中の出血量を抑えることがで き,手術時間も短縮される.結果として,手術後(術後)の入院日数が減少し,早期退院,早期社会復 帰が可能となる^[47].しかしながら,従来のように患者の体を大きく切開するわけでないので患者の体 内を直接見ることができず,内視鏡などの人体内部を見ることができる装置で得られる手術映像を 基に,その映像を表示するモニタを見ながら手術を行うことになる.当然のことながら,執刀医にか かる負荷は増大するため,執刀医にかかる負荷を減少し,コンピュータの支援による手術(CAS: Computer Aided Surgery)^[47]をサポートするシステムが数多く開発されている.現在開発中の CAS システムには,次のような特徴がある.

- 1) 手術支援ロボット:低侵襲手術では患者の体内を大きく切開することなく、必要最小限の穴を開 け、その穴より術具を挿入すると共に、内視鏡などの体内に挿入したカメラで得られる映像を基 に手術を行う、そのため、人体を大きく切開する開腹手術に比べ、術中における作業では細やか な神経と器用さが要求される.また,執刀医が術中,両手に持つ術具で手術を行っている間,内視 鏡などのカメラを持つ助手が必要となる、しかしながら、人間が内視鏡を持つと、手ぶれなどに より映像が安定せず、手術の効率が低下することがある、そこで、この内視鏡を支持するロボッ ト (Computer Motion 社製 AESOP) が開発されている. このロボットは, 執刀医が発する音声を理 解し、予め定められている音声命令により、執刀医の意のままに内視鏡の位置を変更することが できる.また、患者の体内で行われる手術の操作には極めて繊細な技量が要求されるため、執刀 医の動きを縮小して患者の体内に挿入された術具に伝達するロボットがあれば、この繊細な技量 が要求される手術も容易となり、低侵襲手術の普及を促進することができる、現在では、術中に おける手術の手助けを行うマスタースレーブ型ロボット(Intuitive Surgical 社製 da Vinchi)も開 発されている.このロボットを用いた手術では、執刀医は患者から離れた位置で顕微鏡を覗く. すると、患者体内の状況が 3 次元立体映像として現れ、執刀医が両手に持つマニピュレータを操 作すると、その動きが 5:1 あるいは 3:1 の割合で患者の体内に挿入された術具に伝達される. 結果 として、体内における細かな作業を実行することができ、手術効率が向上する[48]. 但し、このマ スタースレーブ型ロボットにはフォースフィードバック機能が備わっていないという欠点もあ り、現在さらに機能を向上中である.
- 2) オーグメンティドリアリティ:6.1ではバーチャルリアリティ技術とは、現実には存在しないが、 そのものの本質を備えているもの、あるいは現実に存在するものと同様の効果を与えるものを生 み出す技術であると説明した.つまり、バーチャルリアリティ技術はコンピュータグラフィック スで生成した本物そっくりのものを表現する技術である.これに対して、現実世界には存在し得

ないが、コンピュータグラフィックス技術を使用することで、現実世界のものを扱う以上に都合 がよくなるものを表現する技術、あるいは現実世界では見えないものを表現することにより、現 実世界での表現を補足することができる技術を、オーグメンティドリアリティ(Augmented Reality)技術と呼ぶ^[49].例えば、手術を行う患者の病巣は患者の体内に存在するため、体の外 からは見ることができない.しかしながら、手術前(術前)に撮影したX線CT、あるいはMRI装 置により得られた3次元画像を用いれば、患者の体内に潜んでいる病巣を表示することができ る.そして、この患者の体内にある病巣を患者の体表面上に重畳表示することができれば、低侵 襲手術において必要最小限の穴を開ける位置を正確に把握することができ、結果としての手術の 効率、あるいは成功率が高まる.また、脳外科などでは放射線を照射することにより、体内の腫 瘍を攻撃する**放射線治療**と呼ばれる手術方法がある.この場合も、体内に潜む腫瘍の位置を正確 に把握して、術前に得られた3次元映像を術中に、患者の体表面上に正確に位置合わせ (Registration)を行って表示することができれば、ピンポイントで腫瘍に放射線をあてることが 可能となり、良性の組織にダメージを与えるこなく、悪性腫瘍のみを攻撃することが可能となる.

6.2.2 手術シミュレーションシステム

前節で述べた手術ナビゲーションシステムは、術中に手術の支援を行うシステムであり、手術を成 功させるためには極めて重要なシステムであるが、執刀医を支援する手術ロボットの安全性やオー グメンティドリアリティで表示する画像の品質が問題となる.術中に使用するロボットにおいては、 患者の体内で暴走しないこと、及び問題があった場合にはすぐに停止するフェ-ルセーフ機能^[48]が 備わっていることなどが必須となる.一方、オーグメンティドリアリティでは患者の体表面上に表示 される患者体内の映像は、正確な位置合わせが必要であると共に、手術時間の経過に伴う臓器の変形 が問題となる.つまり、いくら術前に高品質の画像を得、正確な位置合わせの基に表示を行ったとし ても術中における変形までは考慮されていない.従って本来は、術中に変形した患者体内の映像を即 座に取り込み、その映像を基に患者の体表面上に表示するシステムが必要となる.術中に患者体内の 映像を取り込むための研究もなされているが、X線 CT の場合は執刀医と患者への被爆量の問題など 実現するための課題も多い.

そこで、術中では不十分となる部分を補い、手術を成功へと導くためには、できるだけ正確に手術の計画を立て、手術のシミュレーションを行っておく必要がある.このシステムを手術シミュレーションシステムと呼び、次の大きな二つの目的がある.

1) 術前計画:実際の手術における手順を計画し、手術が手順どおりスムーズに遂行されるかどうか を模擬(シミュレーション)する.このためには、実際の患者の個人差に基づいたモデル作りが 重要である.例えば、小耳症耳介形成術という手術がある.これは、小さな耳を大きくするため の手術であり、シリコン樹脂を用いて形成した軟骨を耳に埋め込む手術である.この際、元々存 在する耳の一部を削り取り、その削り取られた助軟骨から最適な耳のモデルを生成する.その際、 実際の手術を行う前に、どの部分の助軟骨を採取し、どのような形のモデルを生成すればよいの かをシミュレーションしておく^[50].あるいは、低侵襲手術で脳腫瘍を取り除くために、細い管を 脳に穿刺することがある.この場合も、どの位置からどの方向にどれだけの深さまで管を挿入す ればよいのかを事前に把握しておく必要がある. 術中支援も重要であるが, 術前に得られた3次 元画像を表示すると共に, ファントムと呼ばれるダミーの患者を使用して実際に穿刺を行うこと により, 脳腫瘍だけを正確に採取できるのかどうかをシミュレーションしておくことは重要であ る^[51].

- 2) 手術練習:手術を成功させるためには、実患者を対象とした手術計画や術中支援が重要となるが、これには個々の患者の特徴を反映させた正確なモデル作りが必要であり、この正確なモデルを基にした正確な模擬が必要となる.しかしながら、実患者の個々の特性を充分反映させたモデル作りは非常に困難であり、また時間の要する作業となる.従って、全ての病気、全ての患者に対して充分な術前計画を行うことはできない.また、この術前計画が有効となるのは、ある程度の熟練された技量を持つ医師に対してであり、最初に手術の基本的な技量を修得する必要がある.そこで、一般的な症例を対象とし、手術の基本技量の修得を目的としたシミュレータが数多く開発されている.以下、主な手術シミュレータを挙げる.
 - a) **器官縫合:**BDI 社製 Virtual Surgery というシステムがある. 血管,尿管などの器官の縫 合を練習するシステムであり, SensAble Technologies 社製 PHANToM を用いてフォースフ ィードバックを実現している. シミュレーション後には,練習に対する評価結果が表示さ れる.
 - b) 脳外科手術:脳の手術に関しては、郵政省、国立がんセンター、東京大学、東京医科歯科 大学などかなり多くの機関で研究が進められている.基本的には、X線CTあるいはMRIに より得られた3次元画像をVolume Renderingあるいは、3次元画像からポリゴンを生成し て Surface Rendering により表示し、脳穿刺の練習をするシステムが多い.
 - c) 内視鏡手術: 脳外科手術と同様, X線CT あるいはMRI により得られた3次元画像を基に体 内の表示を行うが,実際に内視鏡を挿入した場合と同じ状況を作成し,内視鏡手術におけ る器官の分岐をシミュレーションする. これは名古屋大学で積極的に研究が進められてい るが, HT Medical 社製 PreOp Endscopic Simulator という製品もある.
 - d) 内臓手術:肝臓を始めとする各種内臓のシミュレータであり、慈恵医大では3本の指で肝臓を摘んだ感覚を表現できるハプティックデバイスをススギ㈱技術研究所と共同で開発している.また、肝臓のような柔らかいものの変形を表現するために、剛体球が詰まった臓器モデル(球充填臓器モデル)の開発も行っている^[52,53].
 - e) 眼科手術:眼の手術シミュレータであり、Georgia Institute of Technology が開発した Eye Surgery Simulation、及び Colorado 大学が開発した Opthalmic Surgical Simulator がある.対象症例は共に白内障手術であり、白く白濁した眼球内部に存在する水晶体を人 エレンズと置き換えることが最終目的であるが、現状では眼球表面の切開練習のみであ る.また、Mannheim大学では、眼球奥に存在する眼底画像を見ることができるシミュレー タ(EyeSi)を開発している.

第七章 手術シミュレータ

前章で述べたように、コンピュータグラフィックスを利用した応用技術であるバーチャルリアリティが様々な分野で活用され、数多くの応用システムが生み出されている.その中でも特に、医学と工学の技術が融合し、人間にとって最も大切な"命"を守るための医療応用システムが様々な研究機関で開発されている.

この医療応用システムを大別すると、術中に執刀医の支援を行う手術ナビゲーションシステムと、 術前に手術の計画を立てたり、あるいは医師の技量を向上させるために手術の訓練を行ったりする 手術シミュレーションシステムの二つに分けられる.手術ナビゲーションシステムは、執刀医の手術 を支援するためのロボットの開発や、実際には見えない患者体内の病巣を患者の体表面上に重畳表 示することにより、手術の効率を高めるオーグメンティドリアリティ技術の向上が重要な課題であ る.一方、手術シミュレーションシステムは、実際の患者を対象として手術の手順を確認したり、あ るいは新しい術式を仮想的に試みることによって手術の成功率を高めたりする術前計画と、医師の 技量向上を目的とする手術訓練の二つがある.今後の医療分野においては、個々の患者を対象とし、 常に新しい術式を試みることによって、今まで助からなかった患者をも救うことのできる術前計画 は非常に重要であると考えられる.

しかしながら、術前計画を行うためには、個々の患者の特性を充分に反映した非常に精密なモデル を作成する必要があり、この精密なモデルの作成には現状の技術で解決すべき課題が山積している. また、例え精密なモデルが完成したとしても、この非常に精密なモデルを基にして現実の物理現象に 忠実に従うシミュレーション技術が必要となり、このためには膨大な計算時間を要する.個々の患者 に対して術前計画のための時間を充分にかけることができる状況であれば、現状の技術でも術前計 画は一つの解を与えている.ところが、医療の現場を見てみると、毎日のように数多くの手術が行わ れ、予定されていた手術だけでなく、突然運び込まれた急患があるという現状を考えると、残念なが ら個々の患者に対して充分な術前時間があるとは言えない.また、医療現場では患者の数に比較し て、医師や看護婦の絶対数が不足しており、人為的な医療ミスが多発しているだけでなく、全ての医 師が充分な手術の技量を持っているとは言えないのが現状である.

医師の技量を向上させるためには通常,動物や遺体を使用した手術の練習を行うが,実際の患者で ある生体と,動物や遺体との間にはかなりの差がある.特に,遺体を使用する場合には死後硬直を回 避することはできないため,術中の手術感覚は術場でしか学ぶことができない.また,動物を使用す る場合でも,人間特有の病気は動物に発病しないため,微妙な手術の技量はやはり術場でしか学ぶこ とができないのが現状である.さらに,最近の工学技術の発達により,最新式手術器具が数多く開発 されているが,これらの最新式手術器具の使用方法を学ぶのも重要である.最もよい例は低侵襲手術 の代表例である内視鏡手術の術式学習方法である.内視鏡により捕らえられる映像のみを頼りにし て,最小限の切開により開けられた小さな穴から術具を挿入した手術は非常に困難であり,実際の手 術を行う前に充分な訓練が必要となる.術前計画においては,膨大な時間をかけても充分に正確な解 を得ることが重要であるが,一方,手術練習に関しては,実際の手術を再現できるだけの充分な応答 速度を持つシステムの構築が要求される.患者の体を切開したのに何の変化も現れず,数分後に切開 部分が裂けていくようでは,手術シミュレーションとしての役割を果たしているとは言えない.

そこで、本章では今までに検討してきたコンピュータグラフィックスの高速化技術を用いて、その 応用システムとして近年特に注目を集めている手術シミュレータの高品質な映像生成を、手術訓練 という目的を充分果たすことのできる高速描画処理により実現するシステムの開発について述べ、 本論文の最終目的であるコンピュータグラフィックスを用いた高品質画像のリアルタイム生成に関 する研究の最終成果を示すことにする.

7.1 眼科手術

6.2.2 で記述したように、手術練習を目的とした手術シミュレータにも様々なシステムが存在する ^[54-56].対象部位も脳,眼,鼻,歯,肺,心臓,肝臓,骨など様々であり,現在のところ,これらを全 て包含するような万能手術シミュレータは存在せず、それぞれ個別のシステムとなっている.コンピ ュータグラフィックスを用いた高品質画像のリアルタイム生成に関する研究を、実際のシステムを 開発して検証するためにはどの部位を選んでもよいのであるが、実際の手術についての医学的な知 識がなければ手術シミュレータを開発することは不可能である.そのような状況の中、三菱電機㈱情 報技術総合研究所と、旭川医科大学眼科教室との間で共同研究契約を締結することになり、眼科手術 に関する知識を習得する機会を得ることができるようになった.

眼科医は通常動物の眼,特に豚の眼を使用して手術の練習を行うが,使用される豚の眼は死後硬直 により硬くなっており,生体の眼を対象とした手術練習を充分に行えないのが現状である^[57].また, 網膜剥離などの症例は人間特有の病気であるため,このような人間特有の病気を持つ動物眼は存在 せず,本当の練習は実患者を対象とした実際の手術に頼らざるを得ないという現実が存在する.これ らの症例では動物や遺体を用いた手術練習が不可能であり,医療現場では手術教育が大きな課題と なっている^[58].そこで,近年急速に発展しているバーチャルリアリティ技術を使用して,医療側から 早急な開発を要望されている手術シミュレータを,医学的知識を充分習得することのできる眼科手 術を対象として構築し,コンピュータグラフィックスを用いた高品質画像のリアルタイム生成に関 する実検証を行うことにした.

本節ではまず,眼科手術について概説することにする.眼科手術はマイクロサージェリー^[59]と呼ば れ、非常に精細な熟練技量が要求される手術である.成人の眼球は直径約 24mm の球とみなすことが できる.この小さな眼球に直径約 1mm 程度の小さな三つの穴(**ポート**)を開けて術具を挿入し、一つ の術具を固定すると共に他の二つの術具を左右両手に持って手術を行う,いわゆる低侵襲手術の一 つである.手術を行う医師(**術者**)は、手術顕微鏡と呼ばれる双眼鏡型の顕微鏡を覗くと眼球の立体 映像を見ることができる.左右両手にはそれぞれ別の術具を持ち、これらの術具を駆使して、直径 24mm という非常に小さな空間内で手術を遂行する.また、足元には**フットスイッチ**と呼ばれる 2 種 類のペダルが用意されており、このペダルを踏むことで、手術顕微鏡の位置設定、手術映像の拡大/ 縮小、あるいは術具動力の制御などを行うことができる.従って、眼科用手術シミュレータの構築に は、次のような要求仕様がある.

1) 立体視:両眼視差を利用した左右2枚の立体視映像を生成するだけでなく、生成された画像は精緻な立体感覚を与えるだけの充分な画質が要求される.例えば、成人の眼球半径は約12mmであり、眼底付近は半径約6mmのほぼ平面とみなせる円となる.このほぼ平面とみなせる円上にほとんど平面である膜が増殖しているが、このほぼ平面とみなせる円とほとんど平面である膜との距離が分かるくらいの精緻な立体感覚を生み出す必要がある.何故なら、この立体感覚が欠如すると、誤って術具で眼底に触れてしまい、眼底から出血する恐れがあるからである.立体視の方法としては、生成した一つの画像を人間の瞳孔間距離だけ左右にずらすことにより立体画像を生成する方法もあるが、この方法では、左右両眼

の輻輳角を考慮していないため本来は隠れて見ない部分が見えたり,逆に見えるはずの部 分が隠れたりする結果となる.従って,輻輳角を考慮した正確な左右2画像を生成する必 要がある.

- 2) 術具感覚:眼科手術では、眼球表面に設けられた小さなポートから左右の術具を挿入し、この眼球内部に挿入された二つの術具を左右両手に持って手術を行う.この際、左右両手に持った術具を眼球内部に挿入するときの感覚が重要である.このためには、左右両手に持つ術具の先端における3次元空間での座標値、及び各軸周りの回転角を位置センサなどで読み取り、術者が持っている術具の位置制御を行って正確な位置、及び姿勢情報を基に術具を描画しなければならない.同時に、術具を眼球内部に挿入する際には、術具と眼球との間に摩擦力が発生するため、この摩擦力を正確に模擬しなければならない.このためには、ハプティックデバイスを使用して、正確に計算された反力を術者に伝達する必要がある.
- 3) 応答性能:シミュレータとしての必須要件はリアルタイムな応答速度である.いくら正確な物理モデルを基に物理現象を忠実に模擬しても一枚の画像が表示されるまでに、数分あるいは数時間かかるようでは手術の練習は行えない.手術の練習を行うためには、通常、1秒間に30枚もの画像を生成する必要があると言われている.つまり、30Hzの応答性能が必要となる.しかも、上記で述べたように眼科手術では立体視可能な手術顕微鏡を用いた手術を行うため、両眼視差に基づく左右2枚の画像を生成しなければならない.結果として、30Hzの応答性能を確保するためには、1秒間に60枚もの画像を生成する必要がある.さらに、左右両足に設けられたフットスイッチ及び左右両手に持つパプティックデバイスからの情報を基に、術者に対して反力を発生すると同時に、手術の進行状況に応じて、腫瘍部位の変形や出血などの処理を行わなければならない.そのためには、手術シミュレータを構築するプラットホームの選定や、搭載する CPU の数、さらに動作するプログラムの負荷分散などを考慮して、手術シミュレータの構築を行わなければ必要な応答性能を確保することはできない.

眼科手術にも様々な症例が存在するため、手術シミュレータを構築する上でターゲットとする症例 を決めなければならない.そこで次に、眼科手術の代表的な症例について記述することにする.眼科 手術の主な症例を列挙すると、次のようになる.

1) 白内障手術:眼の中には水晶体というレンズが存在し、外界から入射される光は水晶体で集光 されて網膜上に像を結ぶ、網膜上に結像された映像は眼底奥にある視神経乳頭から視神経を介 して脳に伝達され、映像として認識される.ところが、年齢と共に、この水晶体の収縮が悪く なり、硬直して網膜上に像が結ばれなくなる.これが遠視と呼ばれるものであるが、さらに症 状が悪化すると、水晶体が白濁して外界からの光が網膜上に到達しなくなる.この結果、徐々 に目が見えなくなるという病気が白内障である.従って、白濁して硬くなった水晶体を細かく 砕いて眼外に取り出すと共に、水晶体の代わりとなる人工レンズを眼内に挿入する.この手術 が白内障手術である^[57].

- 2) 緑内障手術:正常な人の目では、眼内の圧力(眼圧)は一定に保たれている.ところが、眼圧が一定に保たれなくなると、様々な病気を引き起こす.このように、眼圧が一定に保たれなくなったことにより引き起こされる病気が緑内障である.通常は眼圧が正常値よりも高くなることが多いため、上昇した眼圧を下げるための手術が多い.このためには、目の奥に穴を開けて眼内の圧力を下げる方法などがあり、非常に難しい手術の一つである^[60].
- 3) 網膜・硝子体手術:眼内にある水晶体の下は大きな空洞となっており、この中には硝子体(しょうしたい)と呼ばれるゲル状組織(卵の白身のような液体)が存在している.通常この硝子体には弾力があり眼圧を一定に保っているが、年齢と共に硝子体が収縮を始める.すると、眼の底の部分(眼底)には、水晶体を通過してきた光が結像する網膜があり、硝子体と網膜は接しているために硝子体の収縮により、網膜が引っ張られて剥離を引き起こす.これが網膜剥離であるが、それ以外に、詰まった血管が破裂することにより新たな膜が生成されたり、あるいは網膜上の一部に穴が開いたりする病気がある.このように、網膜と硝子体とは一体となっているため、これらに関する病気の手術を総称して網膜・硝子体手術と呼ぶ^[61].
- 4) 角膜手術:眼球組織の中で唯一外気に触れている部分であり、最も丈夫に作られているが、逆に角膜に傷がつくと眼内を守るものがなくなるため、様々な病気が引き起こされる.弱くなった角膜を正常な角膜と取り替える角膜移植もこの手術の一つであるが、通常は角膜に混入した異物を取り除くことが手術の主な目的となる^[60].

7.2 対象症例

前節では、充分な医学的知識を習得することのできる環境を考慮して、手術シミュレータの対象を 眼科手術としたが、眼科手術にも大きく分けると前述した4種類の手術が存在する.この中で、眼科 医が最初に取り組むのが白内障である.白内障は、年齢と共に硬くなった水晶体を人工レンズと置き 換える手術であり、眼科手術の中でも最も症例数が多い手術である.また、死後硬直しているとはい え、豚眼を用いた練習が行える状況にあるため、まず白内障で一流の手術技量を身につけた後、他の 手術を行うのが一般的な教育方針となっている.これに対して、他の三つ手術はどれを取っても困難 な手術であるが、特に網膜・硝子体手術は対象となる範囲が広く、網膜剥離のように動物の眼には発 病しない人間特有の病気が多い.従って、バーチャルリアリティ技術を使用した手術シミュレータの 開発が他の手術に比べて強く要求されているため、網膜・硝子体手術を対象手術として手術シミュレ

しかしながら、網膜・硝子体手術を対象手術としても、個々の症例はそれぞれ異なるため、具体的 な症例を設定し、しかも個々の症例に依存する多様性を取り除いて、対象とする症例を単純化しなけ れば、手術シミュレータとして取り扱うことのできるモデルを作成することはできない.そこで、網 膜・硝子体手術の中でも比較的頻繁に現れ、しかも動物眼を使用した練習が困難な次の2症例を対象 症例として取り上げることにした.

- 1) 黄斑前膜症:眼底中心部(黄斑部)にある血管がつまった後に破裂して、その破裂した部分には新たな膜(増殖膜)が生成される.この生成された増殖膜は、例えば手に擦り傷を負った場合にできるかさぶたのようなものであり、体表面上に生成したかさぶたは自然に剥がれてなくなるが、眼内に生成したかさぶたは自然には剥がれず、放置しておくとさらなる増殖を繰り返す恐れがあるため取り除かなければならない.このように黄斑部の網膜上面(あるいは前面)に増殖膜が生成される症例を黄斑前膜症と呼ぶ.
- 2) 加齢性黄斑変性症: 黄斑部に増殖膜が生成されるという点では黄斑前膜症と同じであるが、黄斑前膜症では網膜上面に増殖膜が生成されるのに対し、網膜の一部が盛り上がり、その中に増殖膜が生成する点が異なる. 年齢を重ねるにつれて黄斑部が変形することにより生ずる症状であるため、加齢性黄斑変性症と呼ばれるが、網膜の下に生成された増殖膜を取り除くことが主目的であるため、この手術は網膜下手術と呼ばれる.

上記では対象となる二つの症例を取り上げ、それぞれの症例の特徴について述べた.次に、対象 となる症例の手術手順について概略を述べることにする^[62].

< 黄斑前膜症の手術手順>

- 麻酔:眼球の奥に注射して麻酔を施す局所麻酔が基本である.従って,眼球には麻酔がかけられているために手術中の痛みは感じないが,手術中も患者の意識はあり,術後,医師が患者に話しかけて眼を動かせることにより,手術の最終確認を行うこともある.但し,かなりの痛みを伴うことが予想される場合などには全身麻酔を施し,術中は患者の意識が全くないこともある.
- 2) 開瞼:人間は自然な状態では瞬きをしたり、瞼を閉じたりするが、術中は常に瞼を開けた状態 を保たなければならない、そのために、開瞼器という器具を使用して強制的に瞼を開く、眼の 幅(瞼裂幅)が小さい人は瞼を大きく開くことができないため、瞼を少し切開して眼を大きく 開かせることもある。
- 3) **結膜切開:** 瞼の根元部分の膜を**結膜**といい, 眼の瞳以外の大部分を覆っている膜(**強膜**)を露 出するために, 結膜を切開する. 360 度にわたる円状の切開と, 強膜を部分的に露出させるた めの部分切開とがある. 当然のことながら出血を伴うために, 電気コテ(**焼灼器**)で止血する.
- 4) 制御糸: 瞼を強制的に開かせると共に、眼があまり動かないようにするための糸をかける.通常は、眼の耳側にある筋肉(外直筋)と鼻側にある筋肉(内直筋)の2箇所に制御糸をかけるが、360度にわたる円状の結膜切開を行った場合には、眼の頭側にある筋肉(上直筋)及び足側にある筋肉(下直筋)にもかける.

- 5) **強膜切開:強膜刀**と呼ばれる先の尖ったメスで,外直筋の下方に穴(強膜切開創)をつくる.この場合,強膜切開創より眼内に存在する硝子体が流出する恐れがあるため,止金で抑える.出血した場合には焼灼器で止血を行う.
- 6) 灌流液注入:後で述べるが、眼内に存在する硝子体を切除吸引して、眼外に取り出す、眼内にある硝子体が除去された分だけ眼圧が低下するので、眼圧を一定に保つために、灌流カニューレという装置を上記にて設けた強膜切開創より挿入し、術中、外れないようにナイロン糸で縫合/固定する.その後、灌流カニューレより、灌流液(通常は生理的食塩水)を眼内に注入し、術中、眼圧を一定に保つ.
- 7) 強膜切開:上記同様,強膜刀にて強膜を切開し、左右の術具を挿入するための強膜切開創を設ける.強膜切開創を設ける位置は、患者の頭を12時とした場合に、2時と10時の位置である. また上記同様,眼内の硝子体が流出しないように、止金で抑えておく.
- 8) レンズリング装着:網膜・硝子体手術は、眼の奥の手術であるために、眼(角膜)の上にコン タクトレンズを置き、このコンタクトレンズを通して眼内を観察する. レンズリングとはコ ンタクトレンズを置くための金属の輪であり、術中外れないように縫付ける.
- 9) 術具挿入:左右の手に持つ術具を挿入する.右利きの医師は通常,左手にライトガイドと呼ばれる術具を持つ.眼内は真っ暗であり,術中,手術室の明かりも消されるために,何の光もない状態となる.このような状況の中では,左手に持つライトガイドが唯一の明かりとなり,眼科外科医はこのライトガイドの明かりのみを頼りにして,眼内の様子を観察する.一方,利き手である右手には,症例に応じて様々な術具を持つ.黄斑前膜症の場合は,後述する硝子体切除吸引と増殖膜剥離が主な作業工程となるため,硝子体切除吸引を行うための硝子体カッター,及び増殖膜剥離を行うためのビーラーと鑷子が主な術具となる.
- 10) コンタクトレンズ設置:助手がレンズリングの上にコンタクトレンズを置くと、眼内の手術が 開始される.コンタクトレンズには様々な種類のものが存在し、通常は、コンタクトレンズの 表面が水平にカットされているものを使用する.このコンタクトレンズでは、レンズを通過 する光が屈折することなく直進するため、眼底中央部を観察することができる.一方、レンズ 表面が斜めにカットされていると、カットの角度に応じてコンタクトレンズを通過する光が 屈折し、眼底周辺部を観察することができる.また、硝子体切除吸引により除去された硝子体 の代わりに生理的食塩水を注入する場合と、特殊なガスを注入する場合とでは、これらの物 質の屈折率が異なる.このため、硝子体の代わりに注入されている物質の屈折率に応じて、眼 内の様子をより明確に観察するための様々な種類のコンタクトレンズが用意されている.
- 11) 硝子体吸引切除:上記にて挿入したライトガイドと硝子体カッターの先端が硝子体の中に入っていることを確認してから硝子体切除吸引を始める.足元に用意されているフットスイッチの一つは手術顕微鏡の視点位置、フォーカス、ズームなどを調整するためのものであるが、もう一つ別に用意されているフットスイッチは硝子体切除吸引のための吸引圧力調整用である.従って、フットスイッチを押下すると硝子体カッターの先に取り付けられている刃が稼

動し、刃の部分に触れている硝子体はカッターの吸引圧力によりカッター内部に吸引された 後に切除され、カッターの内部を通過して眼外へ排出される.フットスイッチの踏込み量に 応じて吸引圧力が変化するので、硝子体同士の癒着が強い部分では吸引圧を上げ、逆に、硝子 体と網膜との癒着が強い部分では網膜剥離を引き起こす可能性があるため、吸引圧を下げる. 硝子体切除吸引の順番としては、水晶体後方部分から始め、手前にある**前部硝子体**、中央部分 にある**中央硝子体**の切除吸引を済ませた後、網膜に近い**後部硝子体**の切除吸引を行う.この 間、眼内にある硝子体をくまなく切除吸引するために、レンズ表面が斜めにカットされてい るコンタクトレンズと交換したり、コンタクトレンズを回転させることによりカット面の方 向を変更させたりすることにより、眼内のあらゆる部分を観察しながら硝子体切除吸引を行う.

- 12) 増殖膜剥離: 黄斑部上面に生成している増殖膜の剥離を行う. 増殖膜は薄く透明な膜であり, 所々に網膜との癒着個所が存在する. 丁度,和紙の上に張られたセロハンテープを剥がす動 作に類似している. 膜の周辺部分に探りを入れて,掴みやすそうな個所を見つけると共に,発 見された掴みやすそうな個所をさらに少し持ち上げることにより,容易に全体の膜を剥がす ことを試みる. そのために、2 種類の術具が用意されている. 一つはピーラーと呼ばれる術具 であり,注射針の先端を少し折り曲げたような器具である. この折り曲げられた先端部で,掴 みやすそうな個所を探すと共に、その部分を少し持ち上げる. もう一つの術具は鑷子と呼ば れる術具であり,ピンセットに似た器具である. 術具を持つ手元の部分に鑷子の先端部を開 閉させるスイッチがあり、このスイッチを押下することにより、鑷子の先端部が閉じるよう に設計されている. この鑷子を用いて、先ほどピーラーで少し持ち上げられた増殖膜の個所 を掴んでゆっくり剥がすことにより、増殖膜を剥離することができる. 剥離された増殖膜は そのまま眼外へ排出される.
- 13) 網膜剥離復位:網膜が眼底から剥離している個所があれば、その部分をレーザーにより眼底に 接着する.この際、次の加齢性黄斑変性症のように、網膜の下に生理的食塩水が入り込んでい る場合は、灌流カニューレより特殊なガスを眼内に注入し、網膜下に入り込んでいる生理的 食塩水を眼外へ排出した後、レーザーによる接着を行う.
- 14) 器具除去: 左右両手に持つ術具を眼内から取り出すと共に、コンタクトレンズ及びレンズリン グを外す.
- 15) 強膜縫合:上記にて作成した三つの強膜切開創を縫合する.
- 16) 結膜縫合: 取り付けた制御糸及び開瞼器を外し、切開した結膜を縫合する.

<加齢性黄斑変性症の手術手順>

本症例の手術手順は黄斑前膜症の手術手順とほぼ同一であり,異なる部分は12)増殖膜剥離の みであるため,この部分についてのみ手順を記述する.

- a) 網膜膨張:網膜の一部が山のように盛り上がり、その下に増殖膜が生成されている症例であるため、網膜の下に術具を挿入して増殖膜を取り出さなければならない.そのためには、増殖膜が生成している部分を大きく膨張させて、膜を掴みやすくするための空間を作成する必要がある.このために、サブレチナルカニューレと呼ばれる先の曲がった術具を挿入して少し盛り上がった網膜上の側面に穴を開けると共に、開けられた穴から生理的食塩水を注入することで、盛り上がった網膜内部の圧力を上昇させ、増殖膜剥離を行う空間を大きくする.サブレチナルカニューレの先端が曲がっていることにより、網膜に傷をつけることなく、山のように盛り上がった網膜の側面に穴を開けることができる.
- b) 増殖膜剥離:上記サブレチナルカニューレの挿入と生理的食塩水の注入により膨張した網膜にサブレチナル鑷子と呼ばれる術具を挿入して、網膜下に生成している増殖膜を掴み、網膜外へ取り出す.この術具は黄斑前膜症で使用した鑷子と基本構造は同じであるが、術具の先端がサブレチナルカニューレと同じ様に曲げられている点が異なる.先端の開閉は手元のスイッチにより行い、網膜外へ取り出された増殖膜はそのまま眼外へと排出される.
- c) ガス置換:サブレチナルカニューレを使用して網膜下に生理的食塩水を注入したために、網膜剥離復位を行う前には、眼内に存在する生理的食塩水を特殊なガスで置換して網膜下に存在する生理的食塩水を眼外へ排出しておく必要がある.フルートニードルと呼ばれる術具を眼内に挿入し、灌流カニューレからは生理的食塩水の代わりに特殊なガスを眼内に注入すると、ガス球が眼内で膨張して、このガス球の圧力により眼内に存在する生理的食塩水はフルートニードルの内部を通過して眼外へ排出される.

上記2症例とも手術手順としては、麻酔及び開瞼に始まり、強膜及び結膜縫合で終了する非常 に長い工程がある.しかしながら、麻酔や開瞼あるいは切開や縫合は動物の眼を利用すれば練習 可能であるため、必ずしも全工程の練習が行える手術シミュレータを構築する必要はなく、動物 の眼を使用しても練習が不可能な手術の工程を対象として、バーチャルリアリティ技術を利用し た手術シミュレータを開発すればよい.上記手術手順の中で、動物の眼を使用しても練習不可能 な部分は、動物の眼では発病しない病気である増殖膜を剥離する動作の練習ということになる. しかしながら、増殖膜剥離にあたって、その前の工程である硝子体切除吸引は重要な手順の一つ である.何故なら、硝子体切除吸引を充分に行わない状態で増殖膜剥離を行うと、増殖膜及び網 膜が残存している硝子体と癒着し、網膜剥離を引き起こす恐れがあるからである.また、加齢性 黄斑変性症の場合には、網膜下に生理的食塩水を注入しているため、ガス置換により眼内の生理 的食塩水を完全に眼外へ排出しておかなければ網膜剥離復位を行うことができない.

従って全工程の中で, 黄斑前膜症の場合には硝子体切除吸引及び増殖膜剥離を, 加齢性黄斑変 性症の場合には硝子体切除吸引, 網膜膨張, 増殖膜剥離及びガス置換を対象症例における対象手 術手順として, 手術シミュレータを開発することにした.

7.3 眼科用手術シミュレータ

前節までに記述した症例及び手術手順を対象として,手術シミュレータを開発した.シミュレータ のハードウェア構成を図 7-1 に示す.



図 7-1 手術シミュレータのハードウェア構成

図7-1に示すように、術者は両眼で手術顕微鏡を覗きながら、両手に術具を持ち、両足ではフット スイッチを使用して手術を遂行する.従って、シミュレータでも同様の環境を構築する必要がある. バーチャルリアリティの立体視技術には様々なタイプのものが存在するが、通常用いられるのは偏 光メガネあるいは頭から被るHMDタイプのものが一般的である.しかしながら、手術顕微鏡は両眼で 手術の対象(**術野**)を覗き込むタイプなので、眼科用手術シミュレータとしては、双眼鏡型の立体視 ディスプレイが立体視のユーザインタフェースとしては最適である.そこで、n.Vison 社製 Virtual Binoculars を採用することにした.他にも双眼鏡型立体視ディスプレイは製品化されているが、安 価な装置のほとんど全ては液晶を用いたタイプである.液晶を用いることにより、デバイスのコスト を削減して安価な表示装置を作成することが可能となるが、表示される映像の画質が手術の練習と して充分とは言えない.特に、画像を構成している各画素の境目が認識できたり、輝度や色調が均一 ではないため、手術練習用シミュレータとしては不適格であると判断した.これに対して、CRTを使 用したタイプは手術の練習としては充分満足できる画質を提供しており、画素の境目が見えること なく、また輝度や色調も均一であり、実際の手術映像を撮影したビデオと比較したところ、ほぼ同等 の画質を備えていることが分かった.Virtual Binoculars も液晶タイプと CRT タイプの双方が用意 されているが、本シミュレータでは CRT タイプを採用することにした.

次に術具であるが、7.1 でも述べたように眼球と術具との間に発生する摩擦力を模擬し、ユーザに はこの摩擦力により生ずる反力を伝達する必要がある.従って、反力を発生することのできるハプテ ィックデバイスを使用することとし、ハプティックデバイスの先駆けであり、世界的なシェアと共に その有効性が実証されている SensAble Technologies 社製 PHANTOM を選択した. PHANTOM は入力に関 しては位置 X Y Z の 3 自由度に加え、各軸周りの回転 3 自由度を加えた 6 自由度を持つが、出力に関 しては反力ベクトルの方向を表す 3 自由度しか持たず、回転力であるトルク力を発生することはで きない.現在では出力 6 自由度を持つ PHANTOM も開発/製造されているが、非常に高価であると共に、 開発当初には存在しなかったために、出力 3 自由度の PHANTOM Model 1.5を採用することにした.開 発当初はトルクカ発生の不可能性が問題視されたが、模擬すべき重要な反力は眼球と術具との摩擦 力であり、回転に関しては、発生するベクトルの方向を術具回転の方向を考慮して変更することによ り、トルクカの簡易的な模擬を行うことで問題を解決している.

フットスイッチであるペダルも、実際の手術を模擬する上で重要な役割を果たす.手術シミュレー タとして実環境と同等の環境を構築するためには、術場で用いられている手術顕微鏡及び硝子体切 除吸引圧などの制御を行うための手術装置に接続されているフットスイッチと同等の機能を持つペ ダルを用意しなければならない.そのため、実際の手術で用いられている手術顕微鏡(ZEISS 社製手 術顕微鏡 OPMI CS)及び手術装置(Alcon 社製手術装置アルコンアキュラス VS400)に接続されてい るフットスイッチを購入し、内部構造を調査すると共に、これらのペダルを計算機に接続できるよう に改修を加えた.但し、実際の手術で使用されているフットスイッチには様々な機能が用意されてい るが、本シミュレータでは対象となる症例及び手術手順を実現する上で必要な機能のみを抽出し、こ れらの機能のみを使用可能としている.

バーチャルリアリティ技術を駆使した手術シミュレータを構築するためには,その中心となる計算 機の選択は極めて重要である.特に、コンピュータグラフィックスで生成する立体視画像は、手術映 像という極めてリアルな画像を1秒間に30回、しかも両眼合わせて60枚生成しなければならない. さらに実際の手術では、手術顕微鏡内に映し出されている映像は術者だけでなく、執刀医を補助する 助手も見ることができる.ただ単純に同じ映像を表示するだけであれば、術者用に生成した立体視画 像の映像信号を分配器を用いて分ければよいことになる.しかしながら、これではバーチャルリアリ ティ技術を駆使した手術シミュレータの有効性が半減する.例えば,運転免許取得の際に使用するド ライブシミュレータや航空機の操縦訓練のために使用するフライトシミュレータでは、実際には発 生してはいけない事故を仮想的に発生させることにより、事故回避能力の向上を訓練の目的の一つ としており、訓練後にはコンピュータが判断した客観的評価を得ることができる. このことを考慮す ると、手術シミュレータの場合もただ単純に術者と同じ映像を表示するのでなく、実際には得られな いが訓練としては有効な映像(例えば,手術映像を別の角度から見た画像など)を表示することによ り、シミュレータとしての有効性を高めることができる. そのためには、中心となる計算機にはさら なる画像生成能力が要求される. さらに, 上記にて採用を決定した PHANToM や Virtual Binoculars の計算機への接続可否、つまり、接続インタフェースとそのデバイスドライバの有無をも考慮しなけ ればならない. そこで, 高度なグラフィックス生成能力を持ち, PHANToM や Virtual Binoculars の 接続も可能な高性能グラフィックスワークステーション(GWS: Graphics WorkStation)である SGI 社製 Onyx2(R10000 195MHz 2CPU Infinite Reality)を採用することにした. 但し, 実際の手術に使 用されている手術顕微鏡や手術装置に接続しているフットスイッチを Onyx2 に接続するためのイン タフェースは非公開であり、ドライバも存在しないため、これらのフットスイッチは周辺制御 PC に 接続し、フットスイッチより入力された情報は周辺制御 PC から GWS へ LAN を経由して伝達される構 成とした.

また、手術教育の現場では、実際の手術をビデオに録画して指導医が研修医に術式を教授したり、 あるいはビデオ録画されている手術についての反省や新方式の検討なども行ったりしているため、 本シミュレータでも Down Converter を介して、計算機の映像信号をビデオ録画できる構成としてい る.

次に、手術シミュレータのソフトウェア構造について説明する.



図 7-2 手術シミュレータのソフトウェア構造

図 7-2 に示すように手術シミュレータのアプリケーション(AP: APplication)部分は、手術マネ ージャ部、Haptic部及びCG(Computer Graphics)部の三つに大別される.手術マネージャ部は手術の 進行状況を司る部分であり、例えば眼内に挿入した術具が眼底に接すると出血を引き起こすとか、手 術装置のフットスイッチを押下すると硝子体切除吸引が開始されるなどの手術の進行状況に応じて 発生する現象を模擬する. Haptic 部は基本的にハプティックデバイスを用いて反力を発生させる部 分であるが、反力を発生させるためには、例えば術具が眼内に挿入されて摩擦力が生じているとか、 術具が増殖膜を掴んでいるのかなどの判断も行わなければならない.従って、反力発生に必要な干渉 計算や黄斑部上面に生成している増殖膜の変形計算も行っている.CG 部は基本的に表示処理を行う 部であり、眼球内外部や術具の他に、Haptic 部にて計算された増殖膜の変形結果を表示する.これ ら三つの部の間には共通データが存在し、この共通データを介してお互いの情報をやり取りしてい る.例えば、Haptic部にて計算された増殖膜の変形結果も、この共通データを介して Haptic部から CG 部へ情報が伝達される.

反力を発生させるハプティックデバイスはSensAble Technologies 社製 PHANTOM を採用しているため、その制御には同社より提供されているGhost Lib. を使用している. 通常、映像生成におけるリアルタイムとは 30Hz を意味し、1 秒間に30 枚の画像を生成できればよいが、ハプティック制御の応

答速度は 30Hz では充分とは言えず,通常は 1kHz の高速応答性能が要求される.特に,硬い物質を表現するためには最低 1kHz の応答性能が必要であり,1kHz が保証されないとハプティックデバイスの 正常動作も保証されない.一方,CG 部のリアルタイム応答は 30Hz であるから,CG 部に情報を提供す る 30Hz のルーチンとハプティックデバイスを制御する 1kHz のルーチンが混在することになる.しか しながら,Ghost Lib.にはこれらの制御用ライブラリが用意されているため,細かなチューニングを 行わない限り,応答性能の異なる2種類のルーチン制御は可能である.但し,1kHz という応答性能 はコンピュータグラフィックスでの応答性能である 30Hz の 30 倍以上であり,術具を挿入した際に眼 球上に設けたポートと術具との間で発生する摩擦力の力覚と,目にフィードバックされる視覚との 間の整合性を保つ必要がある.

前述したように、手術顕微鏡及び手術装置に備え付けられているフットスイッチを直接GWSである Onyx2 に接続することは困難であったために、一旦 PC に接続し、LAN を介して情報を送信している. 従って、GWS 及び PC 双方には情報をやり取りするための I/O Driver が必要であり、この Driver は PC 及び GWS の仕様に合わせて自作した.なお、PC には mtt 社製 heron シリーズ (CPU は AMD-K6 MMX 233MHz 64MB Main Memory)を使用している.また、PC を介して得られたフットスイッチの情報は Haptic 部により読み取られた後、共通データに書き込まれることによって、手術マネージャ部及び CG 部へ伝達される.

手術シミュレータの心臓部とも言えるコンピュータグラフィックスによる映像生成であるが、コン ピュータグラフィックスの世界では業界標準となっている OpenGL を採用することにした. OpenGL と Ghost Lib.を混在させたサンプルプログラムは PHANTOM の開発元である SensAble Technologies 社よ リ提供されおり、両ライブラリの整合性は非常によい. 但し、シミュレータの世界では OpenGL の上 位ライブラリとして知られている Performer がよく用いられる. Performer には、シミュレータの開 発で重要なフレームレイト制御や、CAD で作成したモデルデータのローダーなどが予め用意されてお り、開発工程を短縮することができる. そこで、コンピュータグラフィックスの映像生成には Performer を用いることとし、高速性能が必要な部分は直接 OpenGL を用いて記述することにより性 能向上を図っている.

立体視映像の生成にも様々な方法が存在するが、ここではQuad Buffer + フィールドシーケンシャ **ル方式**を採用した.通常のコンピュータグラフィックス描画方式では、フレームメモリへの書き込み 途中の映像が表示されることを防ぐために、2枚のフレームメモリを用意し、メモリへの書き込みが 終わった段階で瞬時に書き込むフレームメモリと表示するフレームメモリを切り替える.このよう にすることで、フレームメモリに書き込んでいる途中の映像が表示されることはない、この方式を Double Buffer **方式**と呼ぶ. この Double Buffer 方式を立体視映像生成にも適用すると, 立体視を行 うために左右2枚のフレームメモリが必要であり、さらにそれぞれのフレームメモリに対して Double の Buffer が必要となるから, 合計4枚つまり, Quadの Buffer が必要となる. この方式をQuad Buffer 方式と呼ぶ. Quad Buffer 方式を採用すると、左右両眼に対して生成された映像の切り替えに 対する同期が完全に保証されるため,左右の画像表示に時間的なずれを生ずることない. 手術シミュ レータとして採用した GWS である Onyx2 にはこの Quad Buffer を実現するための充分なフレームメモ リが用意されており、この同期が取れた左右両眼の映像をフィールドシーケンシャル信号として出 力している、フィールドシーケンシャル信号とは、RGBの信号を別々の信号線ではなく、同一の信 号線上に時分割で各色に対応するフィールドに分けて伝送する方式の信号であり、同一の信号線を 用いて送信することにより、左右両眼に対する同期を取ることができる. 従って, Quad Buffer + フ ィールドシーケンシャル方式を採用すると、完全に同期の取れた左右両眼に対応する信号が Virtual

Binoculars に表示され, 立体視において左右両眼に対応する映像の間で時間的なずれを生ずること はない.

7.4 PC ペースリアルタイムシミュレータ

前節では、高性能GWSをベースとした手術シミュレータの構築について述べた.高性能GWSをベー スとした手術シミュレータでは高品質な映像をリアルタイムに生成することができる反面、コンピ ュータグラフィックスを用いた映像生成能力の高さに比例して高価となる.また、立体視の実現にあ たっては、左右両眼の同期を完全に取ることのできるQuad Buffer + フィールドシーケンシャル方 式を採用し、この方式を実現することのできるVirtual Binocularsを使用したが、システム構築に 用いた Virtual Binoculars は片眼SXGA(1280x1024)の解像度の映像を表示する能力を持つこともあ り、非常に高価な装置である.さらに、左右の術具を実現するために採用した PHANToM Model 1.5も 世界に先駆けて製品化されたこともあり、3自由度を持つ反力しか表現できないものの、やはり高価 な装置である.従って、これらの装置を組み合わせて構築した手術シミュレータシステムは、生成す る映像の品質及び応答性能に関して手術練習として使用するための充分な条件を備えているが、シ ステムが高価となるため、多くの眼科医に気軽に利用して頂き、手術技量の向上に貢献するという本 来の目的を達成することが困難となる.

そこで、より多くの眼科医に気軽に利用して頂くという本来の目的を達成するために、近年急速に 普及すると共に、年々性能が向上している PC をベースとした手術シミュレータの構築を検討した. 但し、PC を使用してシステムを構築した結果、システム価格を下げることができたとしても、生成 する映像の品質低下あるいは応答性能の劣化を引き起こしては本末転倒となる.本節では、PC を使 用して手術シミュレータを構築するが、映像の品質及び応答性能をできるだけ保ったまま、システム 価格を低下させるという方針で、PC ベースのリアルタイム手術シミュレータを構築する方法につい て述べる.

最初に検討すべき課題はベースとなる PC を何にするかであり,現実感のある手術映像を高速に生 成するために搭載するグラフィックスアクセラレータの選択である.GWS ベースのシミュレータを PC 化する最大の目的は,必要とされる画質及び応答性能を維持したまま,より多くの眼科医に使用して 頂けるようにシステムの低価格化を図ることであり,世の中での普及度及び搭載されるグラフィッ クスアクセラレータの種類及び性能を考慮すると,WindowsNT ベースの PC が最適であると考えられ る.現在では,Windows2000に搭載される高速なグラフィックスアクセレータの種類も増えたが,開 発当初,Windows2000 は未だ出荷されていなかった.また,Linux に搭載されるグラフィックスアク セラレータの種類も徐々に増えてきているが,普及度及び搭載されるグラフィックスアクセラレー タの性能面では,WindowsNT に勝るものは現状ない.

そこで、コンピュータグラフィックスを用いた手術映像生成において、最も影響力の強いグラフィックスアクセラレータの選択にあたり、各種グラフィックスアクセラレータの性能評価を行った.性能評価の項目は次の2点である.

- 1) OpenGL のベンチマークテストである ViewPerf(CDRS)
- 2) OpenGL で生成されたアプリケーションの性能評価

1)に関しては、グラフィックスアクセラレータの製造元より対象となる基板の性能評価結果が提供 されているが、ベンチマークテストのソースも公開されているので、評価対象となる PC での測定が 可能である.2)に関して本来は手術シミュレータのデモ版を作成し、GWS と PC の双方でデモ版によ る性能評価を行うと、PC に搭載されるグラフィックスアクセラレータを変更した場合の性能比較だ けでなく、GWS と PC を比較して、PC を用いた場合に GWS を用いた場合とほぼ同等性能が出せるのか どうかを調べることも可能となる.

しかしながら、手術シミュレータのデモ版を製作するということは、手術シミュレータ自身を開発 することとほぼ同程度の工程を要することから、既に市販されているソフトウェアを用いた評価が 可能かどうかを調査した.調査の結果、GWS ベースの手術シミュレータで採用した Onyx2 と開発対象 としている WindoesNT 版 PC の双方で動作するグラフィックスライブラリとして、Vega というソフト ウェアが存在することが分かった. Vega とは、MultiGen・Paradigm 社が開発した OpenGL の上位ライ ブラリであり、GWS をベースとした手術シミュレータで採用した Performer とほぼ同等の機能を持つ ソフトウェアである.そこで、これら二つの項目に対し、対象となる GWS 及び PC を用いて性能評価 を行った.性能評価結果を表 7-1 に示す.

		11 1 7 7 7	1 / / / / / / / / / /		
計	算機	CPU速度	アクセラレータ	ViewPerf 性能	Vega 性能
Gate	Way	266MHz	FireGL4000	32.92	13fps
Gate	Way	266MHz	AccelGALAXY	56.04	14fps
Gate	Way	400MHz	AccelGALAXY	80.72	20fps
Inte	rgraph	450MHz	WildCat4000	71.02	25fps
0nyx	2	195MHz	InfiniteReality	161.29	30fps

表 7-1 グラフィックスアクセラレータの性能比較

注1) ViewPerf は高い値ほど高性能であることを示す.

注2) fps: Frames Per Second: 1秒間あたりの生成画像枚数であり,高い値ほど高性能である.

表 7-1 より,同一のグラフィックスアクセラレータ(例えば AccelGALAXY)を用いた場合,CPU速度の向上(266MHz から 400MHz)に対応して ViewPerf性能(56.04 から 80.72)及び Vega 性能(14fps から 20fps)も向上していることが分かる.しかしながら,GateWay(400MHz) + AccelGALAXY と Intergraph(450MHz) + WildCat4000を比較すると,ViewPerfの性能が高いからと言って必ずしもVega の性能が高いわけではないことが分かる.これは一般的なベンチマークテストである ViewPerf の性能向上のために様々な高速化対策が取られていることに拠るものである.手術シミュレータは一つのアプリケーションであり,GWS では Performer を用いて記述していたことより,Performer とほぼ同等機能を持つ Vega による評価を優先させて、グラフィックスアクセラレータとしては Intense3D 社製 WildCat4000 を採用することにした.

Intense3D社製WildCat4000を搭載したIntergraphが現状の性能評価では最も高い値を示している が、それでも従来のシミュレータでベースとなっていたOnyx2の性能には及ばない.従って、PCを 使用した手術シミュレータの構築にあたっては、ソフトウェアの最適な負荷分散、あるいは画質を劣 化させない程度のポリゴンの削減などを行い、最大限の性能を引き出すための工夫を行う必要があ る.この高品質画像のリアルタイム生成に関する検討については次節で述べることにする.

次に,立体視の実現方法について検討しなければならない. Onyx2ではQuad Buffer + フィールド シーケンシャル方式を採用することにより、完全に同期の取れた左右両眼に対応する立体視画像を 生成することができた.しかしながら、上記性能評価にて採用を決定した WildCat4000 では Quad Buffer を実現するだけの充分なフレームメモリ容量を持たない. これは WildCat4000 に限らず, ほ とんど全ての PC に搭載されているグラフィックスアクセラレータに対して言えることでもある. 従 って, Quad Buffer + フィールドシーケンシャル方式とは別の方式を考えなければならない. 通常の PC に搭載されているフレームメモリでは SXGA(1280 x 1024)を表示することは可能である.また, n.Vision 社製 Virtual Binoculars には、片眼で SXGA を表示することのできる高性能仕様と、片眼 VGA(640×480)を表示することのできる低価格仕様があり、低価格仕様も液晶ではなく CRT を使用し ている. さらに眼科外科医の評価では, 立体視用ディスプレイとして CRT タイプのものを使用した場 合、VGAの解像度でも手術練習としては充分使用可能であるという結果が得られている.そこで、PC から出力される SXGA(1280×1024)の画面を4分割し、4分割された画面うち二つの画面に左右両眼 に対応する手術映像を生成すると共に、この分割された2画面を別々の Scan Converter を使用して 切り出せば、Virtual Binoculars へ入力する二つの映像信号を生成することができる.この際、立 体視用の左右両眼に対応する画像の同期についての問題が発生するが、PC から出力される映像信号 を一度分配器に入力し、この分配器を介して二つの Scan Converter に入力すると、実験上では、左 右の画像信号にずれを認めることはできなかった、従って、立体視の実現方法としては、Scan Converter による切り出し方式を採用することにした. この際, SXGA(1280x1024)の解像度を持つ全 画面を4分割し、そのうち分割された二つの画面を左右両眼に対応する画像生成に使用すると、分割 された画面領域のうち二つの画面が残ることになる、そこで、この残った画面領域の一つに執刀医を 補助する助手用の画像を、また別の領域にユーザインタフェース用入力画面を表示すれば、分割され た画面の全てを有効に利用することができる.この様子を図7-3に示す.



図 7-3 立体視実現のための画面分割
次に、左右の術具について検討する. Onyx2 に左右の術具として接続した PHANTOM Model 1.5 は出 カ3自由度しか持たないとは言え、かなり高価な装置である.一方、眼科の手術において、最も重要 な力覚は術具を挿入した際の術具と眼球との間に発生する摩擦力である.従って、高価なパプティッ クデバイスを用いなくても、物理的に摩擦力を発生させることは可能である.摩擦力発生の方法とし ては、術具挿入部分に**ブッシュ**と呼ばれる輪を取り付け、このブッシュの締め付け具合を調整するこ とにより、摩擦力を発生すると共に、発生する力を調整することも可能となる.また、PHANTOMを用 いた場合には、PHANTOMの先端に発生している反力を、術具と眼球との接触部から発生しているよう に反力の位置を変更する必要があった.また、出力3自由度しか持たないためにトルク力を発生する ことができず、発生する力の方向を変更することにより、擬似的なトルク力を生成していた.これに 対してブッシュを利用する方法では物理的な力を発生することができるため、術具に発生させる力 を計算する必要がない.従って、Onyx2 に直接接続していた PHANTOM の代わりにブッシュを用いた模 擬術具を周辺制御 PC に接続して LAN 経由でメインの PC に情報を伝達することにより、反力発生に要 していた時間をコンピュータグラフィックスによる画像生成に振分けることができる.こうするこ とにより、性能評価時点では Onyx2 と PC との間に残っていた性能差分を吸収し、高品質な映像をリ アルタイムに生成できる可能性が出てきた.

さらに、PHANTOM の先端には位置センサが取り付けられており、この位置センサと PHANTOM の先端 部分が干渉するために、左右の術具先端を 50mm 以下にすることができないという問題があった.こ れに対して、成人の眼球は直径約 24mm であるから、実際の手術の環境を構築するためには、左右の 術具先端を 20mm 程度にまで近づける必要がある.ブッシュを用いた方式では、ブッシュの取り付け 位置に位置センサを左右対称構造で取り付けると共に、術具先端位置をブッシュ取り付け位置の先 に仮想的に設定することにより、この仮想的な術具先端位置では左右の間隔を 20mm とすることが可 能となる.結果として、PHANTOM では解決できなかった左右の術具間距離の問題を解決することがで きた.図7-4 にブッシュを用いて製作した模擬術具を示す.

また, Onyx2 をベースとした手術シミュレータでは, 実際の手術顕微鏡(ZEISS 社製手術顕微鏡 OPMI CS)及び手術装置(Alcon 社製手術装置アルコンアキュラス VS400)に接続しているフットスイッチ を購入して改造を加えることにより周辺制御 PC へ接続して,必要な情報を LAN 経由で Onyx2 に伝達 していたが,実際の手術顕微鏡に接続しているフットスイッチは高価であるため,必要な機能のみを 抽出して簡易なフットスイッチを製作することにした.この簡易版フットスイッチの製作も,システ ム価格の低価格化に寄与している.図7-5 に製作した簡易版フットスイッチを示す.



図 7-4 ブッシュを使用した模擬術具



図 7-5 簡易版フットスイッチ

上記のように検討した結果, PC をベースとしたリアルタイム手術シミュレータの構成は, 図 7-6 の ようになる.なお,最終的にはメイン PC として,WildCat4000 を搭載可能なWindowsNT 版 PC とし,開 発時点における価格対性能比を考慮して,DELL 社製 Precision 610 (Pentium 550MHz 2CPU)を採 用している.



図 7-6 PC ベースリアルタイム手術シミュレータのハードウェア構成

なお、PC ベースリアルタイム手術シミュレータのソフトウェア構成は、図 7-7 のようになる.図 7-6 に示すように、左右の術具は周辺制御 PC に接続し反力を発生させる必要がないため、左右のフ ットスイッチと同じ I/O Driver で位置及び各種スイッチの情報を入力し、LAN 経由にてメイン PC 上 で動作する Device 部に伝達している.ここで、GWS ベースの手術シミュレータではハプティックデ バイスである PHANToM を採用していたが、PC ベースの手術シミュレータではハプティックデバイス を用いず、ブッシュを使用した模擬術具を使用しているため、Haptic 部を Device 部と名称変更して いる.また、CG 部で行うコンピュータグラフィックスを用いた手術映像の生成に関して、性能評価 時点では Performer と同等機能を持つ Vega が候補となったが、使用ライセンスの問題及びリアルタ イム制御機能など必要な機能の全てが網羅されていないことなどが判明したため、OpenGL を用いて 必要な機能を全てC++言語にてコーディングしている.



図 7-7 PCベースリアルタイム手術シミュレータのソフトウェア構造

7.5 高品質画像のリアルタイム生成方式

前節では、高性能 GWS をベースとして開発した眼科用手術シミュレータをより多くの眼科医に使用 して頂くことを目的に、PC をベースとして開発するための方策について述べた.必要な機能を抽出 して、機能面での劣化を引き起こすことなく、低価格化するための指針については明確となったが、 最終的に生成される手術映像の画質及び応答性能に劣化が生ずるようでは本末転倒となる.本節で は、高性能 GWS から PC へとベースとなる計算機を変更して低価格化を図ったにも拘わらず、生成さ れる手術映像の画質と応答性能を満足させるための方式(高品質画像のリアルタイム生成方式)につ いて述べる.

7.5.1 黄斑前膜症の増殖膜剥離モデル

7.2 節で記述したように、本論文では黄斑前膜症と加齢性黄斑変性症の二つの症例を対象として手 術シミュレータを構築し、高品質画像のリアルタイム生成に関する実証を行うことにした.手術とい う非常に高度な品質が要求される映像を、手術練習を行うにあたり充分な応答速度を持って生成す るためには、物理現象を忠実に模擬することのできる精密なモデルを基にして、映像品質を劣化させ ることなくリアルタイムに画像を生成することのできる高速なモデルを考案する必要がある.本節 では, 黄斑前膜症の手術シミュレータを構築するにあたり, 高品質な映像を生成するためには膨大な 時間を必要とする増殖膜剥離を対象として, 映像品質を劣化させることなくリアルタイムに立体視 画像を生成する方法について記述する.

通常,自由曲面の変形を扱う場合には,有限要素法や質点パネモデルが用いられる^[63].有限要素法 とは,対象物を細かな要素に分割し,各要素における変形が全体としてどの様に影響を及ぼすのかを 調べて,細かく分割された多数の要素から成る物質の変形を取り扱うものであるが,各要素の変形処 理には膨大な計算量が必要とされることから,リアルタイム応答には不向きであると言われている. 一方,質点パネモデルは細かく分割された各要素にある程度の質量を与えると共に,この質量を持つ 点(質点)の間をバネで結合する.物質の変形に応じてバネの長さも変化するので,パネの変位に応 じた内力が発生すると仮定して,物質の変形を取り扱うものである.例えば,一枚の増殖膜を有限要 素法あるいは質点バネモデルにより各要素に分解すると,図 7-8(a)のようになる.図において,ハ ッチされた部分が増殖膜の内部を表し,これを有限要素法あるいは質点バネモデルで扱えるように, 細かな要素に分解したものの外周を太線で示す.基本的には四角形あるいは三角形で構成される要 素の集まりとなる.図 7-8(a)に示す全ての要素に対して逐一質点とバネ力に基づく運動方程式を解 いていたのでは非常に時間がかかり,高速に変形画像を生成することはできないので,リアルタイム に画像を生成するためには分割する要素の数を減らして,図 7-8(b)のような構成を考える.図 7-8(a)及び(b)の太線を比較すると明らかなように,画像生成のリアルタイム性を重視して物質の構 成要素数を削減すると,画質が劣化していることが分かる.



図 7-8 モデル分割数と画質の関係

図 7-9 増殖膜モデル

そこで、画質を劣化させることなくリアルタイムな画像生成を実現するために、図7-9のような増 殖膜のモデル(高速膜剥離モデル)を考える.図7-9は、図7-8(a)と同じ分割数で増殖膜の要素を 構成している.しかしながら、増殖膜内部の点全てに対して運動方程式を解いていたのでは、リアル タイムな応答性能を実現することはできない.従って、分割数は同じであるが、変形計算を行う重要 点を抽出し、この重要点に対する計算のみを行う.眼科手術において膜の剥離を行う場合、膜の外周 部分に触れて周辺部を少し持ち上げた後、持ち上がった部分を摘んで膜を剥離する.このとき重要と なる点は膜の外周部分であるが、眼底網膜上に接着している増殖膜を剥離するためには、増殖膜と網 膜との接着部分を調べなければならない.この接着部分が広いと、網膜と増殖膜との癒着力が大き く、膜は剥がれにくい.膜を剥離するにつれて接着部分が小さくなり、癒着力も下がるため、膜は剥 離し易くなる.図7-9においてで示した点が増殖膜の外周部分を構成する点であり、で示した点 が網膜との癒着を示す境界線を構成する点である、増殖膜モデルを作成する際、膜を構成する格子上 の点を全て与えるのは困難であるため、大きな丸(及び)を与えると、それらの間を補間して自 動的に小さな丸(及び)を生成するようにしている.

ここで、増殖膜上の点 a を摘んで図中の点 b の方向に膜を持ち上げることを考える. 点 a 及び b から z=-R 平面上へ下ろした垂線の足を a'及び b'とする. ここで、 \overrightarrow{ab} 及び \overrightarrow{ab} を含む平面を考える. この平面は X 軸とa の角度をなしているから、この平面を Z 軸周りに時計方向へa だけ回転すると X Z 平面に一致し、図 7-10(a)のように表される.





図 7-10 膜剥離モデル

点 a から点 b まで円孤を描きながら膜を持ち上げたとすると、その膜剥離における回転中心 p を求めことができる. 点 p は z=-R 上にあり、点 a 及び b より等距離にある点である. また、点 a も元々は z=-R 上で点 p から点 a あるいは点 b と等距離にある点 o に存在していたとする. すると、増殖膜と網膜との接着境界線上の点 q も点 p を中心にして回転し、線分 bp 上の点 r に移動すると考えられ

る. ここで,点 q と点 r がバネで結合されていたと仮定すると,この距離が大きくなり弾性限界を超 えると,バネは切断されて膜の復元力は失われることになる.従って,線分 qr がある一定の閾値を 超えると膜は剥がれて,増殖膜と網膜との接着の境界点は点 q から点 p へ移動する.この様子をX Y 平面に投影したものが図 7-10(b)である.この場合,線分 pq と直交する直線 L に対して折れ曲がる 形で増殖膜は変形する.また,増殖膜と網膜との境界部分は点 s 及び t (薄くハッチされた 印)に 移動する.また,点 a の移動に伴って増殖膜の外周を構成している点も移動するため,その移動量を 計算する.直線 L と交差する点より左下にある部分の外周は変化しないから,直線 L と交差する点(u 及び v)で移動量が 0 となるように,各点の移動量を比例配分にて計算する.

上記のようにして増殖膜の外周部分及び網膜との接着境界部分の点が求められるので、これらの点 を基に他の点の補間計算を行うことにより、増殖膜を構成する全ての点の位置を求めることができ る.このように、膜を構成する全ての点に対する計算を行うのではなく、膜剥離という特性を考慮し て重要な点を抽出すると共に、重要な点に対してのみ変形計算を行い、他の点に関しては重要点から の補間計算にて移動量を計算することにより、画質を劣化させることなく、高速に画像を生成するこ とができる.結果としての図及び性能評価については、7.6で述べることにする.

7.5.2 加齢性黄斑変性症の網膜モデル

前節では、黄斑前膜症のリアルタイムなシミュレーションを実現するために、生成する画像の品質 を劣化させることなく、剥離する増殖膜の変形動作を高速に計算することのできる方式について述 べた.本節では、加齢性黄斑変性症を実現するにあたり、生成する画像の品質を劣化させることな く、高速に網膜と術具との接触判定を行う方式について述べる.

7.2 で記述したように、加齢性黄斑変性症では黄斑部の網膜が盛り上がり、その中に増殖膜が生成 する病気であり、網膜下にある増殖膜を取り除くためにサブレチナルカニューレと呼ばれる術具を 挿入して生理的食塩水を注入することにより、網膜を持ち上げる.その際、術具と網膜が接触してい るかどうかを判定しなければならない.術具と網膜が接触していれば術具を網膜に挿入して生理的 食塩水を注入することができるが、術具と網膜が接触していなければ術具から網膜内に生理的食塩 水を注入することはできず、網膜を膨張させることはできない.通常、網膜や増殖膜というグラフィ ックスモデルはポリゴンで生成されているため、この接触判定にはポリゴンとポリゴン、あるいはポ リゴンと直線との交点計算を必要とする.このため、ポリゴン数が増加するにつれて接触判定の時間 がかかることになり、リアルタイムな接触判定を行うためには、ポリゴン数を削減しなければならな い.しかしながら、ポリゴン数を削減すると上記の増殖膜でも説明したように画質が劣化し、手術練 習としての充分な画質を持つ映像を生成することはできなくなる.

そこで、グラフィックス描画としては生成されたポリゴンを使用するが、接触判定にはポリゴンを 使用せず、盛り上がった網膜を数学関数にて表現する方法を考える.つまり、ポリゴンモデルと数学 モデルの両方を備える新しいモデル(**ハイブリッドモデル**)を導入するわけである。例えば、直線と 球との接触判定において、球を構成するポリゴンと直線との交点計算を行うよりも、直線と球の方程 式を解いた方がはるかに高速である。しかしながら、球をコンピュータグラフィックスを用いて描画 するためには、球を構成するポリゴンを必要とする。勿論、光線追跡法を用いる場合、ポリゴンに分 割することなく球の方程式をそのまま使用することは可能であるが、光線追跡法ではリアルタイム な描画は困難である。一方、Zバッファ法などの手法ではポリゴン単位の描画となり、ポリゴンの分 割数に応じた品質を持つ球を描画することができる。 ここで問題となるのは、如何にして盛り上がった網膜を数学関数で表現するのかという点である. 幾つかの手術ビデオを観察した結果、加齢性黄斑変性症の網膜の盛り上がり方には特徴があること が分かった.網膜は小さな山、あるいは丘のように少し盛り上がっており、サブレチナルカニューレ の挿入により、その山、あるいは丘は相似的に膨張するという点である.従って、網膜の盛り上がり 部にcos 関数を割当てて、網膜全体を表現する方法を考案した.図 7-11 のように盛り上がった網膜 は次のように記述することができる.

$$F(x, y, z) = \begin{cases} (R \sin q \cos f, R \sin q \sin f, -R \cos q) & \text{if } R \sin q > r \\ (R \sin q \cos f, R \sin q \sin f, -R \cos q + h(\cos h + 1)) & \text{if } R \sin q \le r \end{cases}$$

where, $0 \le q \le p/2$, $0 \le f \le 2p$, $h = (R \sin q / r)p$, $0 \le h \le p$ (for $R \sin q \le r$).....(7-1)



図 7-11 網膜モデル

ここで、網膜の盛り上がりが黄斑部で生じていることを考慮すると、qをほぼ0とみなすことができるので、式(7-1)において $R\sin q \leq r$ の場合、

 $z = -R\cos \mathbf{q} + h(\cos \mathbf{h} + 1) \cong -R + h(\cos \mathbf{h} + 1).$ (7-2)

となる.従って,

 $h = \cos^{-1}((R+z)/h-1)....(7-3)$

と求めることができる.また、式(7-1)より、 $h = (R \sin q / r)p$ であるから、

 $(R\sin q/r)p = h = \cos^{-1}((R+z)/h - 1)...(7-4)$

となる. 結果として,

 $R\sin q = (r/p)\cos^{-1}((R+z)/h-1)...(7-5)$

と計算することができ、術具先端の座標値を(x, y, z)とすると、術具先端が盛り上がった網膜の中にあるのか外にあるのかという接触判定のアルゴリズムは次のようになる.



図 7-12 術具と網膜の接触判定

< 術具と網膜の接触判定アルゴリズム >

1) 術具先端の Z 座標値に対して、 $-R \leq z$ かつ、 $z \leq -R + 2h$ が成り立っていなければ、 術具先端は網膜外にある.成り立っていれば 2) へ進む.

2) 式(7-5)に従い, $R\sin q = (r/p)\cos^{-1}((R+z)/h-1)$ を計算する.また,術具先端の座標値に対して, Z軸からの距離 $\sqrt{(x^2+y^2)}$ を計算する.

3) $R\sin q \ge \sqrt{(x^2 + y^2)}$ が成り立っていれば、術具先端は網膜内に存在する. 成り立っていなければ 術具先端は網膜外にある.

7.5.3 **模擬画像のリアルタイム生成**

前節及び前々節では、手術映像生成に時間の要する処理を取り上げ、生成する画像の品質を劣化さ せることなく、高速に画像を生成する方式について検討してきた.本節ではさらに、手術映像生成に 必須となる4項目、つまり、1) 硝子体吸引画像、2) 光照射と付影処理、3) 焦点調節、及び4) 出 血表現について、高速な画像生成方法について検討する.4項目はいずれも、正確な模擬をしていて はとてもリアルタイムな画像生成をすることができない項目であり、現実感のある画像を簡易に生 成する方法について述べる.

1) 硝子体吸引画像

術具として硝子体カッターを持ち,手術装置用フットスイッチを押下すると,硝子体切除吸引が開始される.硝子体は複数の繊維から構成されているゲル状組織であるから,正確な模擬を行うためには,一本一本の繊維の吸引動作を正確に模擬する必要がある.しかしながら繊維の本数は非常に多く,一本一本の挙動を正確に模擬することは現実的ではない.また,繊維の塊を考えて,束となった繊維の吸引動作を模擬しても,実際の手術で行われている硝子体吸引動作に近い映像を生成することはできない.そこで,硝子体カッターの先端にある吸引口に仮想的な面を考え,この面に硝子体吸引画像をテクスチャマッピングにより貼り付ける方法を採用することにした.



図 7-13 硝子体吸引画像の生成

図 7-13(a)に示すように、硝子体カッターの先端に仮想的な三角形を2枚用意し、この三角形に図 7-13(b)に示す硝子体吸引画像を貼り付ける.形状を三角形とすることにより、眼内に広く存在する 硝子体が硝子体カッターの小さな口から吸い込まれている様子を模擬することができる.また、硝子 体が吸引されている様子を示すために、貼り付ける画像の位置を時間の経過と共に移動させる.図 7-13(b)に示す三角形が図 7-13(a)の三角形に貼り付けられるが、この貼り付けられる部分が時間の 経過と共に上へ移動する.そして、貼り付ける範囲が上端に達すると再び初期状態に戻ることによ り、硝子体吸引が延々と続けられることになる.但し、硝子体吸引が進行するに従って、眼内に残る 硝子体の量は少なくなるため、時間の経過と共に貼り付ける画像の透明度を上げている.こうするこ とにより、最初は濃い硝子体吸引が行われるが、硝子体吸引の進行と共に眼内に残る硝子体の量は減 少し、吸引される硝子体も次第に薄くなっていく様子を模擬することができる.本方式はほとんど全 てのグラフィックスアクセラレータで採用されている方式であるため、他の時間を要する処理に影 響を及ぼすことなく、現実感のある硝子体切除吸引画像を高速に生成することができる.

2)光照射と付影処理

眼科手術は片手にライトガイドを持ち,他の手には硝子体カッター,ピーラー,鑷子などの術具を 持って行う手術である.従って,ライトガイドを当てることにより照射される領域の模擬と,ライト ガイドの照射による他方の術具の眼底上に生成される影の表現が必要となる.PC をベースとした手 術シミュレータでは,コンピュータグラフィックスによる画像生成用ライブラリとして OpenGL のみ を使用しているが, OpenGL ではスポットライトを表現する関数が用意されているため,照射領域や 光の減衰に関するパラメータを調整することにより、ライトガイドの光照射を模擬することができる.しかしながら影を生成する関数はなく、影の生成には多大な計算時間を必要とする.

影とは、光源から放たれた光が届かない部分にできるものである.従って、光源を視点としてグラフィックス処理により生成した画像には映っていないが、人間の目あるいはカメラの位置を視点として生成した画像上には映っているものの輝度を落とすことにより、付影処理を行うことができる. しかしながら、この方法では常に、光源と人間の目という二つの視点を考え、しかも一方には映っているが他方には映っていないものを探し出す必要があり、通常の倍以上の描画処理時間が必要となる.

そこで、リアルタイムに影を生成するために、影ポリゴンを作成することにした. 図 7-14 に示す ように、ライトガイドから照射された光により、術具は眼底に影を落とす. 従って、ライトガイドの 先端である光源の位置と術具を構成する各ポリゴンの頂点位置を結ぶ直線を考え、この直線が眼底 と交わる点を求めると、これらの点が影ポリゴンを構成する頂点となる. 眼底上に生成されたこれら の点列を結ぶことにより、影を描画することができる. 但し、図 7-14 にも示すように、ライトガイ ドの光源位置と術具を結ぶ線を考えると、術具全体に対して影ポリゴンが生成されるが、スポットラ イト光源の照射領域の調整,及び光の減衰係数の変更などにより、濃い影と薄い影を生成することが できる.



図 7-14 影ポリゴンによる影生成方法

3) 焦点調節

眼科用の手術顕微鏡は約50倍という高倍率なズームが行えるレンズを使用しており、また被写体 深度も深く、非常に鮮明な3次元立体映像を得ることができる.その反面、焦点調整を怠ると、画像 がボケて鮮明な映像を得ることができない.術具を交換する際には焦点を角膜上に合わせ、術具を眼 内に挿入して黄斑部にある増殖膜を剥離する際には焦点を眼底上に合わせるべきである.従って、術 具を交換する度に常に焦点を合わせることが習慣となるような訓練を実施しなければならない.

ボケを生成するためには、通常平滑化フィルタを用いる.あるいは対象となる画像をフーリエ変換 により周波数領域に変換した後、低周波成分のみを抽出して逆フーリエ変換することにより元の画 像に戻せば,ボケた画像を生成することも可能である.しかしながら,いずれの方法を採用したとし ても画像を構成する画素単位の処理が必要となり,リアルタイムなボケの生成は困難である.

一方,眼科の手術において,焦点調整の練習は実物の顕微鏡を使用して行うこともできる.従って, 生成された映像のボケの品質はさほど重要ではなく,上記にも記したように,眼科の手術練習を行う 際には常に焦点調整を行う習慣を身に付けさせることが重要である.つまり,焦点がずれていれば鮮 明ではない手術映像を呈示し,焦点がずれていることをユーザに認識させることができればよいわ けである.そこで,手術映像と視点との間に一枚の仮想的な面を用意し,焦点のずれ具合に応じて仮 想面の色を変更する.例えば,焦点が合っているときには仮想面は100%透明となり,鮮明な手術映 像を提供するが,焦点がずれてくるに従って仮想面の透明度は減少し,逆に不透明度が増加するので 次第に手術映像が見えにくくなる.こうすることにより,映像のボケを完全に模擬しなくとも,手術 練習中に常に焦点調整を行うという訓練の目的を達成することができる.

4)出血表現

手術中に出血はつきものであり、メスで切開した際には必ずと言ってよいほど出血を引き起こす. しかしながら、最初から予想されている出血だけではなく、予期せぬところから出血することもあ る.出血は合併症の一つであり、手術中もできるだけ少ない出血を心がけるべきである.眼科の手術 においては、眼底に**アーケード**と呼ばれる太い血管がある.この血管に触れて出血を引き起こすこと はまず避けなければならないことであるが、このアーケード以外にも細い血管が数多くあり、また、 網膜の下にある血管は観察することができない.従って、増殖膜剥離中に誤って血管のある部分に触 れて、出血を引き起こす可能性もある.

本来の出血表現は、眼底に存在する血管を全てグラフィックスのモデルとして登録し、この登録された血管にふれた場合にのみ、出血を引き起こすようにするべきである.また、血管の太さも一様ではないことから、太い血管と細い血管とで出血の量に違いが現れ、血管から出血する様子も流体力学を基にした血液の流れモデルを解析して模擬すべきである.しかしながら、これらの事柄を全て行っていたのでは、術具と血管との干渉計算に多大な時間を要するだけでなく、流体力学を基にした出血 画像の生成には膨大な計算及び画像生成時間を要する.従って、本シミュレータでは高速に、しかも 術具と網膜との接触状況に応じて出血状態が変化するように、次の仮定を設けて出血モデルを構築 した.

<出血モデル>

- 網膜には弾力があり、術具が網膜に触れただけでは出血しないことから、術具が眼底下一定以上の深さにまで達すると出血を引き起こす。
- 2) 出血量は眼底下に入り込んだ術具の深さに依存し、術具の侵入度が深いほど出血量は多い.また、 出血は円状に発生するとし、出血量が多いほど出血の円は大きくなる.
- アーケードやその支線以外に、網膜下にも多数の血管があり、手術観察下では認識不可能なもの もあるため、出血はあらゆる場所から起る.



図 7-15 出血モデル

図 7-15 に出血のモデルを示す. 術具が眼底下一定以上まで侵入した場合に出血が起るため, 術具 先端に円状の出血マークを付けたのでは, 出血マークが眼底より下にあるために, 顕微鏡から観察す ることはできない. 従って, 図で示すように, 術具侵入の深さに依存した大きさの出血マークを生成 し, このマークを眼底面上まで移動させる. また, 出血は時間とともに出血量を増していくため, 出 血マークの透明度を時間と共に下げている. こうすることにより, 最初は薄く出ていた出血が時間と 共に出血量が増大し, 次第に濃くなっていく様子を模擬することができる.

7.6 画像の品質と性能評価

本章では、手術シミュレータというバーチャルリアリティ技術を応用した医療システムを対象と し、コンピュータグラフィックスを用いて手術練習という目的を満足することのできる高品質な画 像のリアルタイム生成について検討を進めてきた.本節では、その結果としての画像と性能について 評価を行う.



図 7-16 PC ベース手術シミュレータの構成

図 7-16 に PC ベース手術シミュレータの構成を示す. 左下に見える計算機が画像生成を行うメイン PC であり, DELL 社製 Precision 610 (Pentium 550MHz 2CPU 512MB Main Memory Intense3D 社製 WildCat4000 搭載)を使用している. その横にあるのが, 手術顕微鏡及び手術装置を制御するフット スイッチであり, 左が手術顕微鏡, 右が手術装置用スイッチである. 右下にある計算機は模擬術具及 びフットスイッチからの情報を入力し, LAN でメイン PC に情報を伝達する周辺制御 PC であり, mtt 社製 heron シリーズ PC (AMD-K6 MMX 233MHz 1CPU 64MB Main Memory)を使用している.

机の上右側に乗っているのが、上から周辺制御PCのモニタ、メインPCからの映像を分配する分配 器、映像を切り出す Scan Converter (デジタルアーツ社製 DSC06j 入力対応解像度 640×400~ 1600×1200 出力対応解像度 640×480~1280×1024),双眼鏡型手術顕微鏡(n.Vision 社製 Virtual Binoculars)の制御ボックスである.その隣にあるのが、メイン PC により生成された映像を表示す る CRT であり、CRT の画面上で、下の段に表示されている映像が Scan Converter により切り出され て左隣にある Virtual Binoculars に送られる. Virtual Binoculars の下にあるのが模擬術具であり、 入力 6 自由度を持つが、ハプティックデバイスのように出力の制御は行わず、ブッシュにより術具と 眼球との摩擦力を模擬している.この装置も必要な機能のみを抽出して自作することにより、術具間 距離を接近させると共に、低価格化に寄与している.



図 7-17 PC ベース手術シミュレータの初期画面

図 7-17 に、PC をベースとした手術シミュレータの初期画面を示す. 眼球は黒目(角膜)を示す半 球と白目(強膜)を示す球の2つの球から構成されている. 眼球左斜め上には生理的食塩水を注入す る灌流カニューレが既に装着されており、また、左右の切開創が設けられて、左右の術具が挿入され ている. 左に挿入されている術具はライトガイドであり、左の術具から少し光が漏れている様子が理 解できる. 下側に描画されている二つの画像は立体視用画像であり、これらの画像は Scan Converter を介して切り出された後、双眼鏡型手術顕微鏡(Virtual Binoculars)に入力されて立体的な眼球を 観察することができる. 左下にある画像が左目に、右下にある画像が右目に入力される.

左上にある画像は助手用の画像であり、術者と同じく上から見た手術の様子を示しているが、図 7-3 に示すように、別の角度から見ることも可能である.右上にある画像はユーザインタフェース用 画面であり、左右の術具がメニューとして表示されている.挿入されている術具を抜いてから、メニ ュー上にある術具をクリックすれば、術具の交換を行うことができる.但し、右利きの手術者は必ず 左手にライトガイドを持たなければならない.また、角膜上に載せているコンタクトレンズの交換や 回転などを行い、任意の方向を見ることも可能となっている.メニュー画面下の方には、手術進行状 況や警告、さらにエラーや手術後の成績なども表示できるようになっている.

図 7-18 に手術シミュレータで使用した術具の例を示す. ライトガイドは単純な円柱であり, 23 ポ リゴンから構成されているが, 硝子体カッターには硝子体を切除吸引する口があり, このために 327 ポリゴンから構成されている.また, サブレチナルカニューレやサブレチナル鑷子などは先が曲がっ ているのが特徴であり, 先が曲がっていることにより, 網膜に平行に術具を動かし, 盛り上がった網 膜内にある増殖膜を摘んで剥離することができる. 鑷子とよばれるものはピンセット状になってお り、術具の手元にあるスイッチを押すと先端が閉じる仕様となっている.また、これらの術具は全て 実際の手術で使用する術具とほぼ同じである.



ライトガイド(23ポリゴン)



ピーラー(226ポリゴン)



硝子体カッター(327ポリゴン)



鑷子(132ポリゴン)



サブレチナルカニューレ(101ポリゴン) サブレチナル鑷子(110ポリゴン)



図 7-18 手術シミュレータで使用する術具例

図 7-19 にモデルの違いによる増殖膜の比較を示す.図 7-19(a)は質点バネモデルで作成した増殖膜 であり、30Hz というリアルタイム応答性能を出すために、103 ポリゴンから構成されている.一方,

図 7-19(b)は本論文で提案した黄斑前膜の高速膜剥離モデルで作成したものであり,973 ポリゴンから構成されているが、質点バネモデルと同等の応答性能を出すことができる.図 7-19 の(a)及び(b)を比較すると、質点バネモデルによる膜は構成するポリゴンが少ないために、同じ大きさの増殖膜を構成すると、一つ一つのポリゴンの大きさが大きくなり増殖膜を構成するポリゴンの辺を認識することができるくらい画質が劣化しているのが分かる.一方、本論文で提案した増殖膜モデルを構成するポリゴンの数は質点バネモデルの約 10 倍であり、ポリゴンが細かくなっているために、ポリゴンを構成する辺を認識することは困難であり、増殖膜の周辺は滑らかな曲線で構成されている.これは、増殖膜を構成する全てのポリゴンに対して、その頂点の変形を計算するのではなく、重要と考えられる増殖膜の外周及び網膜と癒着している境界部分の点についてのみ、その移動量を求め、他の点については重要と考えられる点の計算結果より、その補間計算で求める.このことが、増殖膜の画質を保ったまま、高速な画像生成を行える理由である.

図 7-20 に黄斑前膜症の手術映像を示す.図 7-20(a)は左からライトガイドで光を照射しながら,右 手で硝子体カッターを用いて眼内にある硝子体の切除吸引を行っている様子であり,手術装置に接 続されているフットスイッチを押下すると硝子体切除吸引が開始され,スイッチを離すと硝子体切 除吸引は中断される.左からライトガイドで光を照射することにより,右手に持った術具の影が眼底 網膜上に生成されている様子が理解できる.また,時間と共に眼内に存在する硝子体の量は減少し, 代わりに灌流カニューレより生理的食塩水が流入し,切除吸引する硝子体の色は徐々に薄くなる.こ れは,硝子体カッターの先に仮想的に設けられた三角形に貼り付ける硝子体吸引画像の透明度を増 すことにより,吸引される硝子体の色を時間の経過と共に薄くすることで対応している.

一方,図 7-20(b)に示すのは、左からライトガイドで光を照射しながら、右手でピーラーを用いて 増殖膜の剥離をしている様子を示すものである.増殖膜の変形は増殖膜の周辺部と、増殖膜と網膜と の接着境界部の計算のみを行っているが、現実感のある剥離の様子が伺える.また、右端に大きくみ える明るい円状の物体は視神経乳頭と呼ばれる神経の集まりであるが、そこからアーケードと呼ば れる太い血管が延びているのが分かる.視神経乳頭近くとライトガイド近くには出血の痕があり、時 間の経過と共に出血の色は濃くなっている.これは、出血マークに貼り付ける画像の不透明度を時間 の経過と共に増加させることにより対応している.

図 7-21 には、加齢性黄斑変性症の手術映像を示す.中心にある丸いものが盛り上がった網膜であ り、その下に増殖膜が発生している.図7-21(a)はサブレチナルカニューレを盛り上がった網膜に差 し込み、生理的食塩水を注入して網膜を膨張させている様子を示す映像である.一方、図7-21(b)は 膨張した網膜にサブレチナル鑷子を挿入し、サブレチナルカニューレで開けた穴から網膜下にある 増殖膜を取り出している様子を示す映像である.加齢性黄斑変性症で発生する増殖膜は黄斑前膜症 で発生する増殖膜と異なり、増殖膜の大きさも小さく、網膜から取り出すと小さく固まる性質を持 つ.網膜下から取り出された増殖膜はそのまま眼外へ排出される.

図7-21(a)及び(b)いずれの場合も30Hzというリアルタイムな応答性能を達成している. これは,加 齢性黄斑変性症の網膜モデルを,ポリゴンと数学関数という二つのモデルから構成するハイブリッ ドモデルを採用しているためで,術具と網膜との干渉計算には数学関数のモデルを用いることによ り高速な計算を行うと共に,コンピュータグラフィックスでの描画に際しては,ポリゴンを用いるこ とにより高速なグラフィックスアクセラレータの性能を充分に引き出している. その結果として,盛 り上がった網膜の形状を粗くすることなく,リアルタイムな画像生成が行えるわけである. なお,盛 り上がった網膜は1560 ポリゴンから構成されており,手術映像の画質としては充分である.











(a)

(b)









(b)

図 7-21 加齢性黄斑変性症の手術映像

第八章 結論

本論文では、近年益々身近な存在となり、今後さらに発展を遂げていくであろうコンピュータグラ フィックスを取上げ、コンピュータグラフィックスを用いた画像生成における基礎的な知識を土台 として、コンピュータグラフィックスの基本要素に関する高速化手法について検討した.その後、コ ンピュータグラフィックスから発展したバーチャルリアリティ技術を利用して、その応用分野の一 つである医療システムを考え、実際に手術シミュレータを構築することにより、高品質な画像をリア ルタイムに生成する方策について検討を重ねてきた.

まず第二章では、先人が切り開いてきたコンピュータグラフィックスに関する基礎的な課題とその 解決方法について論じ、コンピュータグラフィックスを用いた画像生成及び高速描画についての土 台を築いた.コンピュータグラフィックスを用いて図形を描画するためには、モデリング座標系上で 個々の表示物体を定義した後、ワールド座標系上において全ての表示物体の位置関係を定め、さらに ワールド座標系上に存在する全ての表示物体を描画するのではなく、一部の領域を切り出して高速 に描画するためのクリップ処理を行う. この結果として得られた表示対象物体のみを描画すること により、ワールド座標系上に定められている表示物体が多数存在しても高速に描画することができ る.また、コンピュータグラフィックスを用いて3次元的な映像を生成するためには、視点から見え ている面と隠れている面を区別し、如何にして隠れた面を消去するのかという隠面消去問題が重要 である.これには様々な手法が存在するが,常に高品質画像と高速描画という相反する二面性を持っ ている、特に、光線追跡法を用いて画像の描画を行えば、隠面消去問題だけでなく、2次反射や影処 理あるいは半透明表示などの問題も同時に解決することができる.しかしながら、光線追跡法による 描画には多大な計算時間を要するため、現状ではリアルタイムな描画は困難であるとされている。-方,近年の大量生産によるハードウェアコストの低下に伴い,大量のメモリを使用したZバッファ法 がコンピュータグラフィックスの描画手法では主流となってきている.Zバッファ法を用いれば、非 常に高速に隠面消去問題を解決することができるため、通常の PC に搭載されている多くのグラフィ ックスアクセラレータはZバッファ法を採用している. そこで,通常の PC に搭載されているグラフ ィックスアクセラレータを用いて高速に、しかも高品質な画像を生成する手法について検討するこ とにした.

第三章では、コンピュータグラフィックスを用いた描画において、最も基本となる直線について検 討した.線幅を持たない真っ直ぐなアナログ直線をディジタル化した際に得られる直線(ディジタル 直線)の性質を調べるために、まず直線の量子化規則を定め、この量子化規則に従って量子化された ディジタル直線の性質をチェイン符号を用いて調べた.すると、同じチェイン符号が連続して現れる ことが分かり、同じチェイン符号が連続して現れる部分の直線を構成する画素の個数を調べると、そ の個数は数式で表現できるというディジタル直線の性質を示した.そして、このディジタル直線の性 質を利用して、日常生活で用いられる物体の境界部分を直線で近似する方法を検討した結果、ディジ タル直線を用いた直線近似方法は物体の境界を追跡しながら局所的に直線近似も行える方法である ため、従来必要とされていた物体の境界を抽出するという前処理が不要となり、高速な直線近似が行 えることを証明した.さらに、この高速な直線近似方法を用いて移動する物体の輪郭を調べることに より、その物体の形状を認識し、一方の物体を他方の物体が追跡するという実験を行い、ディジタル 直線を用いた直線近似方法が物体形状の高速な認識にも使用可能であることを示した.

第四章では、このディジタル直線の性質を用いて高速に直線を描画する方法について検討した.従 来の直線描画手法はDDA に代表されるとおり、ディジタル直線を構成する画素の位置を一点一点判断 する方式であった.これに対して、ディジタル直線を利用した描画手法では同じチェイン符号を持つ 画素の集まりの個数を調べることにより、これらの画素の位置を一点一点判断することなく一度に 描画することができる.従って、従来のDDA法に比べて高速な直線描画を行うことができる.また、 コンピュータグラフィックスにおける描画において、重要なクリップ処理の問題に取り組んだ.ワー ルド座標系上に非常に多くの表示物体を定義していても、詳細な表示を行う場合には一部の物体の みを抽出して描画するため、クリップ処理は高速描画にとって必須の課題である.従来のクリップ処 理手法は、常に両端点を持つ直線を対象としてクリップ処理を扱っていた.しかしながら、コンピュ ータグラフィックスで非常によく用いられる直線は連続した点列を結ぶポリラインであるため、ポ リラインを対象とした高速なクリップ処理を検討する必要がある.しかも、従来の手法では計算時間 の対象として四則演算のみを取上げていたが、近年におけるパイプライン処理によるプロセッサの 高速化を考慮すると、四則演算に加えて比較及び分岐も計算時間の対象に加える必要がある.そこ で、ポリラインを対象とした場合、最初の直線の終点が次の直線の始点となることに着目し、連続し た点列の2次元座標空間上における状態がどの様に遷移するのかを考え、この状態の遷移を利用し て高速なクリップ判定手法を考案した.結果として、四則演算に比較及び分岐を加えた計算時間に対 し、最小の演算回数でクリップ処理を実行できることを証明した.

第五章では、大規模グラフィックスデータの階層化について議論した.コンピュータグラフィック スを用いた画像生成において高品質な画像を生成しようとすると、表示対象物体を構成するポリゴ ンを細かくする必要が生ずる、ポリゴンを細かくすると当然のことながら表示対象となるポリゴン の数が増え、より多くの描画時間が必要とされる、しかしながら、表示物体を拡大したり、あるいは 回転させたりと、対象物体を移動している場合には物体の細部を詳細に表示する必要はなく、表示物 体の概略が表現できればよい.一方,対象となる物体が静止すると、物体の細部に至るまで細かな表 示を行わないと高品質な画像は得られない. そこで、非常に多くのポリゴンから構成される大規模グ ラフィックスデータを対象とし、そのデータを階層化する方法を検討した. 階層化したデータを別々 に保存し、動画生成あるいは静止画生成の場合を使い分け、動画生成の場合は粗いデータを、また静 止画生成の場合には細かなデータを用いて画像生成してもよいのであるが、動画から静止画に移っ た瞬間は粗いデータを用いた描画を行った後に細かなデータを用いた描画を行うという二重描画が 必要となる.これでは、折角グラフィックスデータを階層化して高速描画を試みたとしても結果とし て、最終的な高精細な描画の表示が遅くなってしまう.そこで、グラフィックスデータを階層化し て、複数のデータを持つが、粗いデータから細かなデータを高速に復元することのできる方式を考案 した、本方式では、元のデータに存在する頂点座標を変更することなく、粗いデータから細かなデー タを復元する際には、削除された頂点データを追加するだけで行える.従って、データ復元の際に頂 点に対する余分な座標変換が発生することはなく、最初から細かなデータを用いて描画した場合と ほぼ同じ時間で、粗いデータから細かなデータへと徐々に変化しながら、最終的には詳細なデータを 用いた表示を行うことができる.

第六章では、コンピュータグラフィックスから発展したバーチャルリアリティ技術について調査した.バーチャルリアリティ技術では人間の五感を対象とし、その実現方法を研究しているが、五感のうち約80%をも占めると言われている視覚が最も重要である.また、近年におけるハプティックデバイスの登場により、今までには実現できなかった感覚である力覚(触覚)が実現できるようになってきたため、視覚及び触覚を取上げ、それらの感覚を実現する各種装置についての調査を行った.さらに、バーチャルリアリティ技術は工学分野だけでなく、医療の領域にも応用されており、医学分野

の応用システムである手術ナビゲーションシステム及び手術シミュレーションシステムについての 調査も行った.

第七章では、バーチャルリアリティ技術の医療応用である手術シミュレータを取上げ、その構築方 法について検討した.手術シミュレータを構築するためには手術そのものについての医学的な知識 が必要である.そこで、構築するシミュレータの対象である眼科手術についての調査を行った.眼科 手術で用いられる器械類とその特徴、眼科手術の種類と特徴を調査し、対象となる手術を網膜・硝子 体手術に決定した.これは、網膜・硝子体手術で発生する病気には人間特有の病気が多く、動物の眼 を用いた手術練習が困難であることから、バーチャルリアリティ技術を利用した手術シミュレータ の早期開発が要望されていたからである.さらに、網膜・硝子体手術の中でも練習対象とする症例を 黄斑前膜症と加齢性黄斑変性症の二つとし、その手術手順について調べた.手術手順の大部分は動物 の眼を用いた練習が可能であることから、動物の眼を用いても手術練習が行えない部分を取り出し、 この部分についての手術シミュレータを構築することにした.

眼科手術の練習という目的を達成するためには、実際の手術映像に近い高品質な映像を作成する必 要があり、しかも、手術練習を行うことのできる充分な応答速度が必要となる、そのため、開発当初 は高性能グラフィックスワークステーションをベースとした手術シミュレータを構築し、手術の練 習という目的を達成することのできる映像の品質と応答性能について検証した.しかしながら,高性 能グラフィックスワークステーションは映像生成能力の高さに比例して高価な計算機であるため, 高性能グラフィックスワークステーションをベースとした手術シミュレータは非常に高価なシステ ムとなる. そこで, 近年急速に普及し, 年々性能が向上している PC を用いて低価格な手術シミュレ ータを構築する方策について検討した.但し、低価格なシステムを構築しても、映像の品質が劣化し たり、応答性能が悪くなったりして、手術練習という本来の目的を達成することができない. そこ で、映像の品質を劣化させることなく、高速に画像を生成することのできる手法についての検討を行 った、黄斑前膜症の増殖膜剥離で採用した高速膜剥離モデルでは、増殖膜を構成するポリゴンの数を 削減することなく、増殖膜の変形において重要な点を抽出し、この重要点のみの変形計算を行うと共 に,他の点については計算された重要点からの補間により求める.この結果として,増殖膜の品質を 劣化させることなく,リアルタイムな増殖膜剥離練習を実現することができた.また,加齢性黄斑変 性症で採用したハイブリッドモデルでは、盛り上がった網膜と術具との干渉計算を高速に行うため に、盛り上がった網膜をポリゴンで定義するだけでなく、網膜形状を数学関数でも記述できるような モデルを考案した.この結果、網膜形状を表す数学関数を用いることにより、術具と網膜との干渉計 算を高速に行うことができると同時に、網膜を構成するポリゴンを用いることにより高速な描画を も実現することができた.その他,硝子体吸引画像,光照射と付影処理,焦点調整,出血表現などに ついても,現実感のある画像を高速に生成する方法について検討し,PC ベースの手術シミュレータ が手術練習という目的を達成することのできる高品質な画像をリアルタイムに生成することができ ることを実証した.

本論文で検討してきた内容はいずれもコンピュータグラフィックスで高品質な画像を高速に生成 するための基本的な研究であり、今後さらに研究を深める必要がある.コンピュータの処理能力も 年々向上してきており、数年前までは実現不可能と思われていた事柄が数年先には実現可能なもの になりつつあり、要求される画像の品質と応答性能の問題は永遠のテーマである.従来では計算機の 処理能力不足により実現不可能と思われていたリアルタイムな映像生成が実現してくると、今度は さらに高度な品質を持つ画像の生成が要求され、そのためにコンピュータ処理能力のさらなる向上 が期待されることになる.その意味では、本研究で行った事柄は画像の品質と応答性能という永遠の テーマに対する研究の一過程であり、今後とも世の中の技術動向に柔軟に対応しながら、研究活動を 続けて行きたいと考えている.

謝辞

本論文をまとめるにあたり,始終懇切なるご指導ご鞭撻を賜りました大阪大学大学院・基礎工学研 究科の宮崎文夫教授に心より感謝申し上げます.宮崎先生には大阪大学・基礎工学部及び基礎工学研 究科・博士前期課程在学中にも多大なご指導を頂きました.重ねて御礼申し上げます.また,本論文 をまとめるにあたり,数多くの貴重なご意見を頂きましたシステム科学分野主任の井口征士教授,並 びに機械科学分野主任の田中正夫教授に,心より感謝申し上げます.さらに,学位取得に関しまして は,立命館大学の有本卓教授に深く感謝申し上げます.有本先生には,大阪大学・基礎工学部及び基 礎工学研究科・博士前期課程在学中には,多大なるご指導ご鞭撻を賜り,有本先生が東京大学に移ら れてからも機会がある度にお会いし,学位取得という大きな目標に向かって励ましのお言葉を頂き ました.おそらく,有本先生の励ましがなかったなら,この論文は存在しなかっただろうと思いま す.ここに,改めて心より感謝申し上げます.

大阪大学大学院・基礎工学研究科の升谷保博講師,並びに西川敦助手にはゼミナールなどで貴重な ご意見を頂き,同林清重技官には大阪大学在学中より,常日頃から心温かいご支援を賜りました.こ こに,感謝の意を表します.また,宮崎研の方々からはゼミナールなどで貴重なご意見を頂きまし た.特に,現在三菱電機㈱勤務の小荒健吾氏からは数多くのご助言を頂きました.ここに御礼申し上 げます.また,大阪大学大学院・博士後期課程入学及び学位取得に際し,数多くのご助言を頂きまし た㈱東芝勤務の吉見卓氏に深く感謝申し上げます.

東京工芸大学の小野文孝教授には、小野先生が三菱電機㈱情報技術総合研究所在職中より、表示インタフェース技術部長として、論文原稿の査読など数多くのご指導ご鞭撻を賜りました.また、小野 先生が東京工芸大学に移られてからも、本論文に関して多大なご指導を賜りましたことを心より感 謝申し上げます.

大阪大学大学院・基礎工学研究科・博士後期課程入学に際し,数々のご支援を賜りました尾形仁士 三菱電機㈱開発本部長(元情報技術総合研究所長),並びに中島邦男専任(元インタフェース部門統 括)に深く感謝の意を表します.また,大学入学後も引き続きご支援を賜りました瀬政孝義メディア 基盤技術部長(元表示インタフェース技術部長),並びに室井克信チームリーダを始めとするグラフ ィック応用チームの皆様に感謝の意を表します.

手術シミュレータという医療応用システムを構築するにあたり,数々の医学知識をご教授下さいました旭川医科大学の吉田晃敏教授に心より感謝申し上げます.また,手術シミュレータの構築及び評価にあたり,数多くのご助言を頂きました引地泰一講師に心より感謝申し上げます.

大規模グラフィックスデータの階層化に関しては、米国コーネル大学 Bruce Land 博士より数多くのご指導ご鞭撻を賜りました.また、米国コーネル大学在学中には地理情報システムなどに関し、 Chris Pelkie 博士より数多くのご助言を頂きました.ここに、深く感謝致します.

最後に,学位取得を陰ながら支えて頂いた義父黒田昭三氏,妻多恵子,息子祐貴,そして両親に感謝の意を表します.本論文を見ることなく昨年秋に他界した故黒田允子義母に感謝の意を表すると 共に,本論文をできれば天国にまで届けたい.

参考文献

- [1] W.M. ニューマン, R.F. スプロール著, 大須賀監訳: 対話型コンピュータグラフィックス, マ グロウヒルブック社 (1984)
- [2] 山口:コンピュータディスプレイによる図形処理工学,日刊工業新聞社(1981)
- [3] 中前, 西田: 3次元コンピュータグラフィックス, 昭晃堂 (1986)
- [4] J. Neide et al: OpenGL Programming Guide(日本語版), The Official Reference Document for OpenGL Release 1, Addison Wesley (1993)
- [5] H. Freeman: Computer Processing of Line Drawing Images, Comput. Surv., Vol.6, No.1, pp.57-97 (1974)
- [6] 木村, 矢代, 今井: ディジタル画像における線図形可変ベクトル符号化法, 信学論(D),
 Vol.J66-D, No1, pp.73-80 (1983)
- [7] 木本,安田: Hilditch 法を用いた細線化図形の方向類別チェイン差分符号化方式,第4回情報 理論とその応用研究会資料, pp.238-247 (1983)
- [8] 中島,安居院:ディジタル輪郭線のデルタ符号化について,信学論(D), Vol.J64-D, No2, pp.109-115 (1981)
- [9] Y. Kurozumi and W. Davis: Polygonal Approximation by the Minimax Method, Comput. Gr. Image Process., Vol.19, pp.248-264 (1982)
- [10] U.E. Ramer: An Interactive Procedure for the Polygonal Approximation of Plane Curves, Comput. Gr. Image Process., Vol.1, pp.244-256 (1972)
- [11] A. Watt: 3D Computer Graphics, Addison Wesley (1993)
- [12] R.F. Sproull and I.E. Stherland: A Clipping Divider, Fall Joint Computer Conference, Vol.33, pp.765-775 (1968)
- [13] T.M. Nicholl et al: An Efficient Algorithm for 2-D Line Clipping Its Development and Analysis, ACM Computer Graphics, Vol.21, No.4, pp.253-262 (1987)

- [14] 矢野:マイクロプロセッサの命令セットアーキテクチャ,情報処理, Vol.29, No.12, pp.1420-1427 (1988)
- [15] 鹿子木:プロメテウスの火 マイクロプロセッサ(完),ディジタル化の主役 DSP, bit 誌, Vol.19, No.14, pp.83-89 (1989)
- [16] 持田:DSPの現状と動向,情報処理, Vol.30, No.11, pp.1291-1299 (1989)
- [17] A. Certain et al: Interactive Multiresolution Surface Viewing, SIGGRAPH 96 Conference Proceedings, pp.91-98 (1996)
- [18] H. Hoppe: Progressive Meshes, SIGGRAPH 96 Conference Proceedings, pp.99-108 (1996)
- [19] P. Lindstorm et al: Real-Time Continuous Level of Detail Rendering of Height Fields, SIGGRAPH 96 Conference Proceedings, pp.109-118 (1996)
- [20] J. Cohen et al: Simplification Envelopes, SIGGRAPH 96 Conference Proceedings, pp.119-128 (1996)
- [21] J.R. Vacca: VRML Bringing Virtual Reality to the Internet, AP Professional (1996)
- [22] 舘: Virtual Reality and R-Cubed, 第8回産業用バーチャルリアリティ展 IVR2000, リード エグジビションジャパン, pp.6-35 (2000)
- [23] 信太他:人体内を自由に観察できる高速ヘリカル CT, 東芝レビュー, Vol. 52, No. 5, pp. 37-40 (1997)
- [24] (社)日本放射線機器工業会編集:医用画像・放射線機器ハンドブック,名古屋美術印刷 (1995)
- [25] 藤代:ボリュームビジュアリゼーション&グラフィックス ボリューム表現の共通基盤の確立
 を目指す,NIKKEI COMPUTER GRAPHICS, 2000 年 1 月号, pp.68-69 (2000)
- [26] HMD 特集 HMD 製品紹介, 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol.3, No.2, pp.27-41 (1998)
- [27] 柴田他: 2 眼式立体映像観察時の視機能に関する研究, 3D 映像, Vol.12, No.4, pp.8-12 (1998)
- [28] 井上他: HMD における立体画像の再生位置と視覚負担, 3D 映像, Vol.12, No.4, pp.13-18 (1998)

- [29] 梶木:自然な立体視を目指した立体表示技術の動向,画像電子学会 第174回研究会講演予稿, pp. 43-48 (1999)
- [30] 山下他:イメージスプリッタ方式 2D/3D ディスプレイのインターネットへの応用, 3次元画 像コンファレンス'97 講演論文集, pp.225-230 (1997)
- [31] 能瀬他:リアレンチ方式めがねなし 3D 液晶ディスプレイ,3次元画像コンファレンス'97 講 演論文集, pp.219-224 (1997)
- [32] 今井他:画像シフト光学系を用いた視点追従型立体プロジェクタ, 3D 映像, Vol.12, No.4, pp.45-54 (1998)
- [33] 小林: 広視域複数者対応メガネなし 3D ディスプレイ シーフォン 3D ディスプレイのしくみ と製品化,画像電子学会 第174回研究会講演予稿, pp.25-30 (1999)
- [34] 梶木他: 超多眼領域の立体表示における単眼視差の効果, 3次元画像コンファレンス'97 講 演論文集, pp.166-171 (1997)
- [35] 梶木他:超多眼領域の立体視覚, 3D 映像, Vol.12, No.4, pp.25-30 (1998)
- [36] 内田: CAVE システムの動向と課題, 画像電子学会第 174 回研究会講演予稿, pp. 49-53 (1999)
- [37] 澤田他:半球面スクリーンを用いた多人数型及びパーソナル型 3D 没入ディスプレイ 都市環 境ヒューマンメディアにおける半球面ドーム型 VR 体験システムー, 3 次元画像コンファレン ス 2000 講演論文集, pp.79-82 (2000)
- [38] 岩田:シームレス全周球面ディスプレイ,日本バーチャルリアリティ学会 第3回大会論文集, pp.155-158 (1998)
- [39] 橋本,岩田:凸面鏡を用いた全方向球面ディスプレイの光学設計,日本バーチャルリアリ ティ学会 第3回大会論文集, pp.159-162 (1998)
- [40] 広田, 坂口:仮想空間のためのハプティックス技術の現状,日本機械学会誌, Vol.102, No.971, pp.40-44 (1999)
- [41] T.H. Massie: Trends and Issues in the Application of Haptic Interfaces, 第 8 回産業 用バーチャルリアリティ展 IVR2000, リードエグジビションジャパン, pp.71-90 (2000)
- [42] M. Sato: 4+4 Fingers Manipulating Virtual Objects in Mixed Reality Environment, ISMR 2001, pp.27-34 (2001)

- [43] 広瀬他:ワイヤーテンションを用いたウェアラブルフォースディスプレイの開発,日本 バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol 3, pp.1-4 (1998)
- [44] 浅村他:選択刺激子による触感の呈示,日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol.3, pp.15-18 (1998)
- [45] 久米他: 触滑り感覚ディスプレイの検討, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol.3, pp.19-20 (1998)
- [46] 奈良他:弾性波動を用いた皮膚感覚ディスプレイ(第二報),日本バーチャルリアリティ 学会大会論文集, Vol.3, pp.21-24 (1998)
- [47] 土肥他:特集 CAS(Computer Aided Surgery) コンピュータ外科の現状, 医器学, Vol.66, No.12, pp.685-689 (1996)
- [48] 斎藤: 医療・福祉用ロボットの制御, 日本機械学会誌, Vol.103, No.984 pp.765-769 (2000)
- [49] 伊関他:特集 CAS(Computer Aided Surgery) バーチャルリアリティ技術と外科手術,医
 器学, Vol.66, No.12, pp.698-702 (1996)
- [50] 金子他:シリコン樹脂製助軟骨モデルを用いた小耳症耳介形成術の手術シミュレーション,日本コンピュータ支援外科学会誌, Vol.6, No.2, p.11 (1998)
- [51] 加藤他: 術前画像誘導下脳穿刺マニピュレータの開発, 第7回コンピュータ支援画像診断 学会大会/第6回日本コンピュータ外科学会大会 合同論文集, pp.73-74 (1997)
- [52] 江積他:手術シミュレーションシステムにおける弾性臓器モデルの開発,第7回コン ピュータ支援画像診断学会大会/第6回日本コンピュータ外科学会大会 合同論文集, pp.91-92 (1997)
- [53] N. Suzuki: Virtual Surgery System using Deformable Organ Models and Force Feedback System with Three Fingers, Lecture Notes in Computer Science, Vol.1496, pp.397-403 (1998)
- [54] 鈴木他: 触覚を伴った手術作業が可能なバーチャル手術システムの開発, 日本バーチャル リアリティ学会論文誌, Vol.3, No.4, pp.237-243 (1998)
- [55] P.F. Neumann et al: Virtual Reality Vitrectomy Simulator, Lecture Notes in Computer Science, Vol.1496. pp.910-917 (1998)

- [56] 江他: 脳外科手術のためのナビゲーションシステムについて, 日本コンピュータ支援外科 学会会誌, Vol.6, No.2, p.13 (1998)
- [57] 大鹿他:超音波白内障手術の修得,メディカルビュー (1997)
- [58] 佐竹,田中: VOPS(VideoOverlay Parameters System)を用いた白内障手術教育,眼科手術, Vol.11, No.4, pp.441-443 (1998)
- [59] 永田監修:眼科マイクロサージェリー 第3版, ㈱ミクス (1997)
- [60] 臼井, 坪田編集: カラーアトラス眼科手術/Special Technique, 診断と治療社 (1996)
- [61] 山中他:アトラス 網膜・硝子体手術,メディカル葵出版 (1995)
- [62] 増田監訳:眼科手術手技アトラス、メディカルサイエンスインターナショナル (1991)
- [63] 広田, 金子: 柔らかい仮想物体の表現, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol.3, pp.299-302 (1998)

関連文献

学術論文誌

- [101] 向井, 有本: ディジタル直線の性質に基づく高速多角形近似を用いた移動物体の認識, 情報 処理学会論文誌, Vol.28, No.2, pp.156-167 (1987)
- [102] 向井:状態遷移を利用した高速ポリライン・クリップ方式,情報処理学会論文誌, Vol.32, No.2, pp.188-196 (1991)
- [103] 向井,原田,室井,宮本,浦谷,矢野:PCベースリアルタイム手術シミュレータの開発,電 子情報通信学会論文誌 D- , Vol.J84-D- , No.6, pp.1213-1221 (2001)

国際学会論文集

- [104] N. Mukai, M. Harada, K. Muroi, T. Hikichi, and A. Yoshida: New Graphics Models for PC Based Ocular Surgery Simulator, Medicine Meets Virtual Reality 2001, J.D.Westwood et al.(Eds.), IOS Press, pp.329-335 (2001)
- [105] T. Hikichi, A. Yoshida, S. Igarashi, N. Mukai, M. Harada, K. Muroi, and T. Terada: Vitreous Surgery Simulator, Archives of Ophthalmology, Vol.118, pp.1679-1681 (2000)
- [106] N. Mukai, M. Harada, K. Muroi, T. Hikichi, and A. Yoshida: New Model for Membrane Peeling in Ocular Surgery Simulator, MODSIM 2001 (2001) (採録決定 2001 年 12 月に発表予定)

学術研究会予稿集

- [107] 向井,森田,有本:ディジタル直線の性質を利用した境界追跡による高速特徴点抽出アルゴ リズム,第 29 回情報処理学会全国大会, pp.1043-1044 (1984)
- [108] 田中,向井,志賀: 高速画像回転処理の実現法,第 35 回情報処理学会全国大会, pp.2005-2006 (1987)
- [109] 向井, 亀山, 風間: 効率的な隠面消去領域抽出方式, 第 35 回情報処理学会全国大会, pp.2283-2284 (1987)
- [110] 飯塚,向井,亀山: ME400 のグラフィック・エンジン(1) ハードウェア方式 ,第 39 回情 報処理学会全国大会,pp.1908-1909 (1989)
- [111] 向井, 飯塚, 亀山: ME400のグラフィック・エンジン(2) ファームウェア方式と性能評価, 第 39 回情報処理学会全国大会, pp.1910-1911 (1989)
- [112] 向井, 亀山:3 次元地形形状の3 角形パッチ生成方法,第45 回情報処理学会全国大会, pp.2-393 - 2-394 (1992)
- [113] 向井,原田,室井,寺田,引地,吉田:硝子体手術シミュレータシステム,第 38 回日本 ME 学会大会,p.282 (1999)

- [114] 向井, 原田, 室井, 寺田: 眼科手術シミュレータシステム, 三菱電機技報, Vol.73, No.11, pp.34-37 (1999)
- [115] 原田, 向井, 室井: 手術シミュレータにおける力覚提示方式, 第 4 回知能メカトロニクス ワークショップ, pp.247-249 (1999)
- [116] 原田, 向井, 室井: 眼球手術シミュレータにおける膜剥離モデル, 日本バーチャルリアリ ティ学会第5回大会論文集, pp.421-424 (2000)
- [117] 向井, 原田, 室井, 瀬政: 眼科用手術シミュレータの開発, 画像電子学会第 182 回研究会, pp.7-13 (2000)

付録

付録 1

本節では、第三章で紹介したディジタル直線の性質を導くために必要となる整数に関する基本的な 定理について証明する.

<定理1>

正の実数 x に対して次式が成立する.^{注 2)} $\begin{bmatrix} x \\ -1 \le \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} \le \end{bmatrix} x$

(証明)

x = q + r(qは正の整数, $r \downarrow 0 \le r < 1$ を満たす小数)とおくと,

$$\begin{bmatrix} x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q+r \end{bmatrix} = \begin{cases} q+1 & (0 < r < 1) \\ q & (r=0) \end{cases}$$
 従って,
$$\begin{bmatrix} x \end{bmatrix} - 1 = \begin{bmatrix} q+r \end{bmatrix} - 1 = \begin{cases} q & (0 < r < 1) \\ q-1 & (r=0) \end{cases}$$
 一方,
$$\begin{bmatrix} x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q+r \end{bmatrix} = q$$
であるから,

 $\therefore [x] - 1 \le \lfloor x \rfloor \le \lceil x \rceil \ge tas.$

<定理2>

*m*を正の整数, *x*を正の実数(但し, *x* ≤ *m*)とすると,次式が成立する. [m-x]=m-[x]

(証明)

 $x = q + r(q \text{ は正の整数}, r \text{ t} 0 \le r < 1$ を満たす小数)とおくと,

$$\lceil m-x \rceil = \lceil m-(q+r) \rceil = \lceil (m-q)-r \rceil = \begin{cases} (m-q-1)+1 & (0 < r < 1) \\ m-q & (r=0) \end{cases}$$

一方, $\lfloor x \rfloor = \lfloor q+r \rfloor = q$ であるから,
 $\therefore \lceil m-x \rceil = m-q = m-\lfloor x \rfloor$

(x)はxを超えない最大の整数を、[x]はx以上の最小の整数を求める関数である

<定理3>

正の実数xに対して,次式が成立する.

 $\begin{bmatrix} x \end{bmatrix} \le 2 \begin{bmatrix} x/2 \end{bmatrix} \le \begin{bmatrix} x \end{bmatrix} + 1$

(証明)

x = q + r(qは正の整数, rは $0 \le r < 1$ を満たす小数)とおくと,

 $\lfloor x \rfloor = \lfloor q + r \rfloor = q$

1) 0 < r < 1の場合, [x] = [q + r] = q + 1だから,

a) q=2j (j は正の整数)のとき

 $2\lceil x/2 \rceil = 2\lceil (q+r)/2 \rceil = 2\lceil (2j+r)/2 \rceil = 2\lceil j+(r/2) \rceil = 2(j+1)$ = (2 j+1)+1 = (q+1)+1 = $\lceil x \rceil$ +1

b) q=2j+1 (j は正の整数)のとき

$$2\lceil x/2 \rceil = 2\lceil (q+r)/2 \rceil = 2\lceil (2j+1+r)/2 \rceil = 2\lceil j+\{(r+1)/2 \} \rceil = 2(j+1)$$

= $(2j+1)+1 = q+1 = \lceil x \rceil$
 $\therefore \lceil x \rceil \le 2\lceil x/2 \rceil \le \lceil x \rceil + 1$

- 2) r = 0の場合, [x] = [q + r] = qだから,
 - a) q=2j (jは正の整数)のとき 2[x/2] = 2[(q+r)/2] = 2[(2j)/2] = 2[j] = 2j = q = [x]
 - b) q=2j+1 (j は正の整数)のとき

$$2\lceil x/2 \rceil = 2\lceil (q+r)/2 \rceil = 2\lceil (2j+1)/2 \rceil = 2\lceil j+(1/2) \rceil = 2(j+1)$$

= (2j+1)+1 = q+1 = $\lceil x \rceil$ +1

 $\therefore [x] \le 2[x/2] \le [x] + 1$

従って、1)及び2)より、 $[x] \leq 2[x/2] \leq [x]+1$

<定理4>

m を正の整数, *x* を整数ではない正の実数とすると,次式が成立する. [m-x] = m - [x] + 1

(証明)

$$x = q + r(q \ \mathsf{dEOB} x), r \ \mathsf{d} 0 < r < 1 を満たす小数) とおくと,$$

 $\left[m - x\right] = \left[m - (q + r)\right] = \left[(m - q) - r\right] = m - q = m - \lceil x \rceil + 1$
 $(\because \lceil x \rceil = \lceil q + r \rceil = q + 1)$
 $\therefore \lceil m - x \rceil = m - \lceil x \rceil + 1$

<定理5>

正の実数 x_1 及び x_2 に対して、次式が成立する.

 $\lceil x_1 - x_2 \rceil - 1 \le \lceil x_1 \rceil - \lceil x_2 \rceil \le \lceil x_1 - x_2 \rceil \le \lceil x_1 \rceil - \lceil x_2 \rceil + 1$

(証明)

$$x_1 = q_1 + r_1(q_1$$
は正の整数, r_1 は $0 \le r_1 < 1$ を満たす小数)及び

$$x_2 = q_2 + r_2(q_2)$$
は正の整数, r_2 は $0 \le r_2 < 1$ を満たす小数)とおくと,

1) $r_1 \neq 0 \land r_2 \neq 0$ の場合

$$\begin{bmatrix} x_1 - x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (q_1 + r_1) - (q_2 + r_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (q_1 - q_2) + (r_1 - r_2) \end{bmatrix} = \begin{cases} q_1 - q_2 + 1 & (r_1 - r_2 > 0) \\ q_1 - q_2 & (r_1 - r_2 \le 0) \end{cases}$$

$$\neg \overleftarrow{r}, \ \begin{bmatrix} x_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_2 \end{bmatrix} = (q_1 + 1) - (q_2 + 1) = q_1 - q_2 \ \overleftarrow{c} \overleftarrow{b} \underbrace{c} \overleftarrow{b} \underbrace{c},$$

$$\therefore \begin{bmatrix} x_1 - x_2 \end{bmatrix} - 1 \le \begin{bmatrix} x_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_2 \end{bmatrix} \le \begin{bmatrix} x_1 - x_2 \end{bmatrix} \le \begin{bmatrix} x_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_2 \end{bmatrix} + 1$$

2)
$$r_1 \neq 0 \land r_2 = 0$$
 の場合

$$\begin{bmatrix} x_1 - x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (q_1 + r_1) - q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (q_1 - q_2) + r_1 \end{bmatrix} = q_1 - q_2 + 1$$

一方, $\begin{bmatrix} x_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_2 \end{bmatrix} = (q_1 + 1) - q_2 = q_1 - q_2 + 1$ であるから,
 $\therefore \begin{bmatrix} x_1 - x_2 \end{bmatrix} - 1 \le \begin{bmatrix} x_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_2 \end{bmatrix} \le \begin{bmatrix} x_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_2 \end{bmatrix} + 1$

3)
$$r_1 = 0 \land r_2 \neq 0$$
の場合

$$\begin{bmatrix} x_1 - x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 - (q_2 + r_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (q_1 - q_2) - r_2 \end{bmatrix} = q_1 - q_2$$

一方, $\begin{bmatrix} x_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_2 \end{bmatrix} = q_1 - (q_2 + 1) = q_1 - q_2 - 1$ であるから,
 $\therefore \begin{bmatrix} x_1 - x_2 \end{bmatrix} - 1 = \begin{bmatrix} x_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_2 \end{bmatrix} \le \begin{bmatrix} x_1 - x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_2 \end{bmatrix} + 1$

4)
$$r_1 = 0 \wedge r_2 = 0$$
の場合
 $\begin{bmatrix} x_1 - x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 - q_2 \end{bmatrix} = q_1 - q_2$
一方, $\begin{bmatrix} x_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_2 \end{bmatrix} = q_1 - q_2$ であるから,
 $\therefore \begin{bmatrix} x_1 - x_2 \end{bmatrix} - 1 \le \begin{bmatrix} x_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_2 \end{bmatrix} \le \begin{bmatrix} x_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_2 \end{bmatrix} + 1$

従って、1)、2)、3)及び4)より、 $\lceil x_1 - x_2 \rceil - 1 \le \lceil x_1 \rceil - \lceil x_2 \rceil \le \lceil x_1 - x_2 \rceil \le \lceil x_1 \rceil - \lceil x_2 \rceil + 1$

<定理6>

正の実数 x に対して,次式が成立する.

 $\lfloor x \rfloor - 1 \le 2 \lfloor x/2 \rfloor \le \lfloor x \rfloor$

(証明)

 $x = q + r(q \text{ は正の整数}, r \text{ t} 0 \le r < 1 を満たす小数) とおくと, <math>\lfloor x \rfloor = \lfloor q + r \rfloor = q$

1) q=2j (j は正の整数)のとき,

$$2[x/2] = 2[(q+r)/2] = 2[(2j+r)/2] = 2[j+(r/2)] = 2j = q = [x]$$

2) q=2j+1 (jは正の整数)のとき,

 $2\lfloor x/2 \rfloor = 2\lfloor (q+r)/2 \rfloor = 2\lfloor (2j+1+r)/2 \rfloor = 2\lfloor j+\{(r+1)/2\} \rfloor = 2j = q-1 = \lfloor x \rfloor - 1$ $\therefore \lfloor x \rfloor - 1 \le 2\lfloor x/2 \rfloor \le \lfloor x \rfloor$

<定理7>

正の実数 *x*₁ 及び *x*₂ に対して,次式が成立する.

- $\lfloor x_1 \rfloor \lfloor x_2 \rfloor 1 \leq \lfloor x_1 x_2 \rfloor \leq \lfloor x_1 \rfloor \lfloor x_2 \rfloor \leq \lfloor x_1 x_2 \rfloor + 1$
- (証明)

 $x_1 = q_1 + r_1(q_1)$ は正の整数, r_1 は $0 \le r_1 < 1$ を満たす小数) 及び

 $x_2 = q_2 + r_2(q_2)$ は正の整数, r_2 は $0 \le r_2 < 1$ を満たす小数)とおくと,

$$\lfloor x_1 - x_2 \rfloor = \lfloor (q_1 + r_1) - (q_2 + r_2) \rfloor = \lfloor (q_1 - q_2) + (r_1 - r_2) \rfloor = \begin{cases} q_1 - q_2 & (r_1 - r_2 \ge 0) \\ q_1 - q_2 - 1 & (r_1 - r_2 < 0) \end{cases}$$

$$- \overleftarrow{D}, \ \lfloor x_1 \rfloor - \lfloor x_2 \rfloor = q_1 - q_2 \ \overleftarrow{C} \overrightarrow{D} \overrightarrow{D} \overrightarrow{D},$$

$$\therefore \lfloor x_1 \rfloor - \lfloor x_2 \rfloor - 1 \le \lfloor x_1 - x_2 \rfloor \le \lfloor x_1 \rfloor - \lfloor x_2 \rfloor \le \lfloor x_1 - x_2 \rfloor + 1$$

<定理8>

*m*を正の整数, *x*を正の実数とすると,次式が成立する. $m - \lfloor x \rfloor - 1 \le \lfloor m - x \rfloor \le m - \lfloor x \rfloor$

(証明)

$$x = q + r(q \mathrel{\text{i}} \operatorname{LE} \mathfrak{O} \hspace{0.5mm} \underline{\mathrm{g}} \hspace{0.5mm} \underline{\mathrm{g}}, r \mathrel{\text{i}} 0 \leq r < 1 \mathrel{\text{c}} \overline{\mathrm{s}} \overline{\mathrm{h}} \operatorname{c} \overline{\mathrm{s}} \operatorname{h} \overline{\mathrm{s}} \overline{\mathrm{s}} \rangle \mathrel{\text{c}} \operatorname{s} \langle \underline{\mathrm{k}} \rfloor = q$$
1) $r \neq 0 \mathrel{\text{O}} \mathrel{\text{c}} \underline{\mathrm{e}}, \lfloor m - x \rfloor = \lfloor m - (q + r) \rfloor = \lfloor (m - q) - r \rfloor = m - q - 1 = m - \lfloor x \rfloor - 1$
2) $r = 0 \mathrel{\text{O}} \mathrel{\text{c}} \underline{\mathrm{e}}, \lfloor m - x \rfloor = \lfloor m - q \rfloor = m - q = m - \lfloor x \rfloor$

$$\therefore m - \lfloor x \rfloor - 1 \leq \lfloor m - x \rfloor \leq m - \lfloor x \rfloor$$

付録 2

本節では、第三章で紹介したディジタル直線の性質について証明する.

Y 4 $b = L_z$ $b = d_z$ $d = d_$

) 0<a=1/h<1/2 (aは直線の傾き,hは正の整数)の場合

図 A-1 傾き 0<1/h<1/2 のディジタル直線

この場合の直線は図 A-1 に示すように、X座標値 0 からhまでのディジタル直線を構成す る画素列のパターンを繰り返すことにより、全体のディジタル直線が構成されている. 図に おいて黒色画素は中継点であり、この中継点は一つ前のディジタル直線(例えばX座標値が 0 からhまでのディジタル直線)の終点であると同時に、次のディジタル直線(X座標値が hから 2 hまでのディジタル直線)の始点でもある.そこで、最初の画素列の並びである L_a よりも一つ少ない数を $a(=L_a-1)$ 、終点に達する画素列の数(つまり L_z)をbとすると、 a+b=hとなる.ここで、最初にY座標値が1となる画素のX座標値xは次式を満たす.

 $(1/h)x \ge 1/2$(A-1)

ゆえに, $x = \lceil h/2 \rceil$ であり, L_a を構成する画素列のX座標値は0から $\lceil h/2 \rceil$ -1までであるから, $L_a = \lceil h/2 \rceil$ となる. 最初のディジタル直線を構成する画素列のX座標値は0からhまでであり,その個数はh + 1であるから, $b = (h+1) - \lceil h/2 \rceil$ となり,これ値が L_z となる.

また,始点あるいは終点を含まない途中状態におけるディジタル直線は,常に中継点を含 むので, $L_s = a + b = h$ となる.つまり,

 $L_a = \lceil h/2 \rceil, L_s = h, L_z = (h+1) - \lceil h/2 \rceil...(A-2)$

が成立する.次に、これらの関係について調べる.前節の定理3より、 正の実数*x*に対して、 $[x] \le 2[x/2] \le [x] + 1$ が成立するので、正の整数hに対しては、

$$h = \lceil h \rceil \le 2\lceil h/2 \rceil \le \lceil h \rceil + 1 = h + 1$$
が成立し、 $2\lceil h/2 \rceil - 1 \le h \le 2\lceil h/2 \rceil$ となる.ここで、
(A-2)を代入すると、 $2L_a - 1 \le L_s \le 2L_a$(A-3)
が成立する.ここで、hは正の整数であるから、hを偶数($h = 2j, j$ は正の整数)と奇数
($h = 2j + 1$)に分けて考える.

a) h=2j のとき, $\lceil h/2 \rceil = \lceil (2j)/2 \rceil = j = h/2 \ \mbox{cbs} \ b,$ $L_z = (h+1) - \lceil h/2 \rceil = (h+1) - (h/2) = (h/2) + 1 = \lceil h/2 \rceil + 1 = L_a + 1$ b) h=2j+1のとき, $\lceil h/2 \rceil = \lceil (2j+1)/2 \rceil = \lceil j + (1/2) \rceil = j + 1 = (2j+1+1)/2 = (h+1)/2$ であるから $L_z = (h+1) - \lceil h/2 \rceil = (h+1) - (h+1)/2 = (h+1)/2 = \lceil h/2 \rceil = L_a$

 $\therefore L_a \le L_z \le L_a + 1.....(A-4)$ よって, 式(A-2), (A-3)及び(A-4)より, $L_a = \lceil h/2 \rceil L_s = h, L_z = (h+1) - \lceil h/2 \rceil$ $2L_a - 1 \le L_s \le 2L_a, L_a \le L_z \le L_a + 1....(A-5)$

) 0 < a = n/m < 1/2 (a は直線の傾き, n, mは互いに素な正の整数)の場合



図 A-2 傾き 0<n/m<1/2 のディジタル直線

)の場合と同様に,最初にY座標値が1となる画素のX座標値 x_1 は次式を満たす.

 $(n/m)x_1 \ge 1/2$(A-6)

よって、 $x_1 = \lceil m/(2n) \rceil$ であり、 L_a を構成する画素列の×座標値は0から $\lceil m/(2n) \rceil - 1$ までであるから、 $L_a = \lceil m/(2n) \rceil$(A-7)となる.一般に、Y座標値がkとなる最初の×座標値 x_k は、

 $(n/m)x_k \ge (k-1) + (1/2)....(A-8)$

を満足する最小の整数であるから, $x_k = \left\lceil \frac{(2k-1)m}{2n} \right\rceil$(A-9)

となる.従って、Y座標値がkとなるディジタル直線を構成する画素列の個数 L_k は、次式で求められる.

$$L_{k} = x_{k+1} - x_{k} = \left\lceil \frac{\{2(k+1)-1\}m}{2n} \right\rceil - \left\lceil \frac{(2k-1)m}{2n} \right\rceil = \left\lceil \frac{(2k+1)m}{2n} \right\rceil - \left\lceil \frac{(2k-1)m}{2n} \right\rceil.(A-10)$$

ここで、全体のディジタル直線は×座標値が0からmまでの範囲のディジタル直線を繰り 返すことにより構成されていることを考慮すると、最初の中継点を含む画素列の長さ*L*。の 一部に、終点を含む画素列の長さ*L*。が含まれている.最初にY座標値がnとなる×座標値

 x_n は式(A-9)より, $x_n = \left[\frac{(2n-1)m}{2n}\right]$ であり, 最初の中継点のX座標値はmであるから,

L_は次式にて求められる.

$$L_{z} = m - \left\lceil \frac{(2n-1)m}{2n} \right\rceil + 1 = m + 1 - \left\lceil \frac{(2n-1)m}{2n} \right\rceil....(A-11)$$

最後に、中継点を含む画素列の長さ L_sを求める、中継点は一つ前のディジタル直線を構成 する画素列の終点であると同時に、次のディジタル直線を構成する画素列の始点でもあるた め、(A-7)及び(A-11)によって求めた画素列から、次の様にして求めることができる.

$$L_{s} = L_{z} + L_{a} - 1 = m + 1 - \left\lceil \frac{(2n-1)m}{2n} \right\rceil + \left\lceil \frac{m}{2n} \right\rceil - 1 = \left\lceil \frac{m}{2n} \right\rceil - \left\lceil \frac{(2n-1)m}{2n} \right\rceil + m.$$
....(A-12)

よって,式(A-7),(A-10),(A-11)及び(A-12)より,

$$L_a = \left\lceil \frac{m}{2n} \right\rceil, L_k = \left\lceil \frac{(2k+1)m}{2n} \right\rceil - \left\lceil \frac{(2k-1)m}{2n} \right\rceil$$
$$L_{s} = \left[\frac{m}{2n}\right] - \left[\frac{(2n-1)m}{2n}\right] + m, L_{z} = m + 1 - \left[\frac{(2n-1)m}{2n}\right]....(A-13)$$

となる.次に、これらの関係について調べる.前節の定理5より、
正の実数
$$x_1 & \otimes x_2$$
に対して、 $[x_1 - x_2] - 1 \le [x_1] - [x_2] \le [x_1 - x_2] \le [x_1] - [x_2] + 1$ が成
立するので、 $x_1 = \frac{(2k+1)m}{2n}, x_2 = \frac{(2k-1)m}{2n} \ge d \le x_1 - x_2 = \frac{2m}{2n} = \frac{m}{n}$ であるから、
 $\left[\frac{m}{n}\right] - 1 \le \left[\frac{(2k+1)m}{2n}\right] - \left[\frac{(2k-1)m}{2n}\right] \le \left[\frac{m}{n}\right]$(A-14)
また、定理3より、正の実数xに対して、 $[x] \le 2[x/2] \le [x] + 1$ が成立するので、
 $x = \frac{m}{n} \ge d \le x$.
 $\left[\frac{m}{n}\right] \le 2\left[\frac{m}{2n}\right] \le \left[\frac{m}{n}\right] + 1$(A-15)
となり、
 $\left[\frac{m}{n}\right] - 2 \le 2\left[\frac{m}{2n}\right] - 2 \le \left[\frac{m}{n}\right] - 1$(A-16)
が成立する.従って、式(A-14)、(A-15)及び(A-16)より、
 $2\left[\frac{m}{2n}\right] - 2 \le \left[\frac{m}{n}\right] - 1 \le \left[\frac{(2k+1)m}{2n}\right] - \left[\frac{(2k+1)m}{2n}\right] \le \left[\frac{m}{n}\right] \le 2\left[\frac{m}{2n}\right]$(A-17)
ここで、式(A-13)より、 $L_u = \left[\frac{m}{2n}\right], L_x = \left[\frac{(2k+1)m}{2n}\right] - \left[\frac{(2k-1)m}{2n}\right] = \frac{(2n-1)m}{2n}$ であるから、
 $x_1 = \frac{(2n-1)m}{2n}, x_2 = \frac{m}{2n} \ge d \le x_1 - x_2 = \frac{(2n-1)m}{2n} - \frac{m}{2n} = \frac{(2n-2)m}{2n} = m - \frac{m}{n}$
であるから、

$$\left\lceil m - \frac{m}{n} \right\rceil - 1 \le \left\lceil \frac{(2n-1)m}{2n} \right\rceil - \left\lceil \frac{m}{2n} \right\rceil \le \left\lceil m - \frac{m}{n} \right\rceil....(A-19)$$

となる.ここで、 $m \ge n$ は互いに素な正の整数であるから、m/nは整数ではない正の実数となる.

すると、定理4より、正の整数*m* 、整数ではない正の実数*x* に対して、 [m-x] = m - [x] + 1

が成り立ち,
$$x = m/n$$
とすると, $\left[m - \frac{m}{n}\right] = m - \left[\frac{m}{n}\right] + 1....(A-20)$

$$2\left\lceil \frac{m}{2n}\right\rceil - 2 \le \left\lceil \frac{m}{n}\right\rceil - 1 \le \left\lceil \frac{m}{2n}\right\rceil - \left\lceil \frac{(2n-1)m}{2n}\right\rceil + m \le \left\lceil \frac{m}{n}\right\rceil \le 2\left\lceil \frac{m}{2n}\right\rceil$$

ここで、式(A-13)より、
$$L_a = \left[\frac{m}{2n}\right], L_s = \left[\frac{m}{2n}\right] - \left[\frac{(2n-1)m}{2n}\right] + m$$
であるから、

∴ $2L_a - 2 \le L_s \le 2L_a$(A - 22) となる.また、定理4より、正の整数*m*、整数ではない正の実数*x*に対して、

$$[m-x] = m - [x] + 1$$
が成り立ち, m とn は互いに素な正の整数であるから, $\frac{m}{2n}$ は整数

ではない正の実数となる.
$$x = \frac{m}{2n}$$
とすると, $m - x = m - \frac{m}{2n} = \frac{(2n-1)m}{2n}$ であるから,
$$\left[\frac{(2n-1)m}{2n}\right] = m - \left[\frac{m}{2n}\right] + 1 \ge t$$
なり, 式(A-13)より,

$$\begin{split} L_{a} &= \left\lceil \frac{m}{2n} \right\rceil, L_{z} = m+1 - \left\lceil \frac{(2n-1)m}{2n} \right\rceil$$
を考慮すると,

$$L_{a} &= \left\lceil \frac{m}{2n} \right\rceil = m+1 - \left\lceil \frac{(2n-1)m}{2n} \right\rceil = L_{z}$$
(A-23)
となる. 式(A-13), (A-18), (A-22)及び(A-23)より,

$$L_{a} &= \left\lceil \frac{m}{2n} \right\rceil, L_{k} = \left\lceil \frac{(2k+1)m}{2n} \right\rceil - \left\lceil \frac{(2k-1)m}{2n} \right\rceil \\\\
L_{s} &= \left\lceil \frac{m}{2n} \right\rceil - \left\lceil \frac{(2n-1)m}{2n} \right\rceil + m, L_{z} = m+1 - \left\lceil \frac{(2n-1)m}{2n} \right\rceil \\\\
2L_{a} - 2 \le L_{k} \le 2L_{a}, 2L_{a} - 2 \le L_{s} \le 2L_{a}, L_{z} = L_{a}$$
(A-24)

となる.

) $1/2 \le a = n/m < 1$ (a は直線の傾き, n, mは互いに素な正の整数)の場合



図 A-3 傾き1/2≤n/m<1のディジタル直線

この場合は)及び)と異なり、ディジタル直線の趨勢方向はチェイン符号1の方向である.従って、ディジタル直線を構成する画素列のうち、最初にX座標値とY座標値の差が1となる画素のX座標値 x₁は、次式を満足する最小の整数である.

$$x_1 - \frac{n}{m}x_1 > \frac{1}{2}$$
.....(A-25)

従って,
$$x_1 > \frac{m}{2(m-n)}$$
であるから, $x_1 = \left\lfloor \frac{m}{2(m-n)} \right\rfloor + 1$ と記述できる.

よって、ディジタル直線を構成する最初の画素列、つまり画素のX座標値とY座標値との 差が0の個数は

$$L_a = \left\lfloor \frac{m}{2(m-n)} \right\rfloor + 1....(A-26)$$

となる.一般に、ディジタル直線を構成する画素のX座標値とY座標値との差がkとなる 最初の画素のX座標値 x_k は、次式を満足する最小の整数である.

$$x_k - \frac{n}{m}x_k > (k-1) + \frac{1}{2}$$
....(A-27)

従って,
$$x_k > \frac{(2k-1)}{2} \frac{m}{(m-n)}$$
であるから, $x_k = \left\lfloor \frac{(2k-1)m}{2(m-n)} \right\rfloor + 1....(A-28)$

と記述できる.

よって、ディジタル直線を構成する画素列で、画素のX座標値とY座標値との差がkの個 数は

$$L_{k} = x_{k+1} - x_{k} = \left\{ \left\lfloor \frac{\{2(k+1)-1\}m}{2(m-n)} \right\rfloor + 1 \right\} - \left\{ \left\lfloor \frac{(2k-1)m}{2(m-n)} \right\rfloor + 1 \right\} = \left\lfloor \frac{(2k+1)m}{2(m-n)} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{(2k-1)m}{2(m-n)} \right\rfloor$$

.....(*A* – 29)

ここで、)と同様に、全体のディジタル直線はX座標値が0からmまでの範囲のディジタ ル直線を繰り返すことにより構成されていることを考慮すると、最初の中継点を含む画素列 の長さ*L*_sの一部に、終点を含む画素列の長さ*L*_zが含まれている.最初にX座標値とY座標 値の差がm-nとなるX座標値 x_{m-n} は式(A-28)より、 $x_{m-n} = \left\lfloor \frac{\{2(m-n)-1\}m}{2(m-n)} \right\rfloor$ +1であ

る.最初の中継点のX座標値はmであるから, L_z は次式にて求められる.

$$L_{z} = m - \left\{ \left\lfloor \frac{\{2(m-n)-1\}m}{2(m-n)} \right\rfloor + 1 \right\} + 1 = m - \left\lfloor \frac{\{2(m-n)-1\}m}{2(m-n)} \right\rfloor \dots \dots \dots \dots (A-30)$$

最後に、中継点を含む画素列の長さ L_sを求める.中継点は一つ前のディジタル直線を構成 する画素列の終点であると同時に、次のディジタル直線を構成する画素列の始点でもあるた め、(A-26)及び(A-30)によって求めた画素列から、次の様にして求めることができる.

$$L_{s} = L_{z} + L_{a} - 1 = m - \left[\frac{\{2(m-n)-1\}m}{2(m-n)}\right] + \left[\frac{m}{2(m-n)}\right] + 1 - 1$$
$$= \left[\frac{m}{2(m-n)}\right] - \left[\frac{\{2(m-n)-1\}m}{2(m-n)}\right] + m....(A-31)$$

よって, 式(A-26), (A-29), (A-30)及び(A-31)より,

c.

$$L_{a} = \left\lfloor \frac{m}{2(m-n)} \right\rfloor + 1, L_{k} = \left\lfloor \frac{(2k+1)m}{2(m-n)} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{(2k-1)m}{2(m-n)} \right\rfloor$$
$$L_{s} = \left\lfloor \frac{m}{2(m-n)} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{\{2(m-n)-1\}m}{2(m-n)} \right\rfloor + m, L_{z} = m - \left\lfloor \frac{\{2(m-n)-1\}m}{2(m-n)} \right\rfloor \dots \dots \dots (A-32)$$

となる.次に、これらの関係について調べる.前節の定理7より、正の実数 x_1 及び x_2 に対して、 $\lfloor x_1 \rfloor - \lfloor x_2 \rfloor - 1 \le \lfloor x_1 - x_2 \rfloor \le \lfloor x_1 \rfloor - \lfloor x_2 \rfloor \le \lfloor x_1 - x_2 \rfloor + 1$ が成立する.

$$\begin{split} x_1 &= \frac{(2k+1)m}{2(m-n)}, x_2 = \frac{(2k-1)m}{2(m-n)} \textit{とすると}, \\ x_1 &= \frac{(2k+1)m}{2(m-n)} - \frac{(2k-1)m}{2(m-n)} = \frac{2m}{2(m-n)} = \frac{m}{m-n} \textit{であるから}, \end{split}$$

$$\left\lfloor \frac{m}{m-n} \right\rfloor \le \left\lfloor \frac{(2k+1)m}{2(m-n)} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{(2k-1)m}{2(m-n)} \right\rfloor \le \left\lfloor \frac{m}{m-n} \right\rfloor + 1....(A-33)$$

となる.ここで、 $m \ge n$ は互いに素な正の整数であるから、m/nは整数ではない正の実数となる.また、定理6より、正の実数xに対して、 $\lfloor x \rfloor - 1 \le 2 \lfloor x/2 \rfloor \le \lfloor x \rfloor$ が成立するの

で, $x = \frac{m}{m-n}$ とすると,

$$\left\lfloor \frac{m}{m-n} \right\rfloor - 1 \le 2 \left\lfloor \frac{m}{2(m-n)} \right\rfloor \le \left\lfloor \frac{m}{m-n} \right\rfloor \succeq t \ge 0,$$

$$\therefore \left\lfloor \frac{m}{m-n} \right\rfloor - 1 \le 2 \left\{ \left\lfloor \frac{m}{2(m-n)} \right\rfloor + 1 \right\} - 2 \le \left\lfloor \frac{m}{m-n} \right\rfloor....(A-34)$$

$$\therefore \left\lfloor \frac{m}{m-n} \right\rfloor + 1 \le 2 \left\{ \left\lfloor \frac{m}{2(m-n)} \right\rfloor + 1 \right\} \le \left\lfloor \frac{m}{m-n} \right\rfloor + 2....(A-35)$$

$$2\left\{\left\lfloor\frac{m}{2(m-n)}\right\rfloor+1\right\}-2\leq \left\lfloor\frac{m}{m-n}\right\rfloor\leq \left\lfloor\frac{(2k+1)m}{2(m-n)}\right\rfloor-\left\lfloor\frac{(2k-1)m}{2(m-n)}\right\rfloor\leq \left\lfloor\frac{m}{m-n}\right\rfloor+1\leq 2\left\{\left\lfloor\frac{m}{2(m-n)}\right\rfloor+1\right\}$$
.....(A-36)

ここで式(A-32)より,
$$L_a = \left\lfloor \frac{m}{2(m-n)} \right\rfloor + 1, L_k = \left\lfloor \frac{(2k+1)m}{2(m-n)} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{(2k-1)m}{2(m-n)} \right\rfloor$$
であるから,
 $\therefore 2L_a - 2 \le L_k \le 2L_a$(A-37)
となる.また, $\left\lfloor \frac{2(m-n)-1}{2} \frac{m}{(m-n)} \right\rfloor = \left\lfloor m - \frac{m}{2(m-n)} \right\rfloor$ であり, さらに, 定理8より,
正の整数*m*, 正の実数*x*に対して, $m - \lfloor x \rfloor - 1 \le \lfloor m - x \rfloor \le m - \lfloor x \rfloor$ が成立するので,

$$x = \frac{m}{2(m-n)} \not \leq \not \forall \not \leq \not \leq,$$

$$m - \left\lfloor \frac{m}{2(m-n)} \right\rfloor - 1 \leq \left\lfloor m - \frac{m}{2(m-n)} \right\rfloor \leq m - \left\lfloor \frac{m}{2(m-n)} \right\rfloor$$

$$\therefore m - \left\lfloor \frac{m}{2(m-n)} \right\rfloor - 1 \leq \left\lfloor \frac{\{2(m-n)-1\}}{2} \frac{m}{(m-n)} \right\rfloor \leq m - \left\lfloor \frac{m}{2(m-n)} \right\rfloor$$

$$\begin{split} \therefore -m + \left[\frac{m}{2(m-n)} \right] &\leq \left[\frac{\{2(m-n)-1\}}{2} \frac{m}{(m-n)} \right] \leq -m + \left[\frac{m}{2(m-n)} \right] + 1.....(A-38) \\ \therefore 2 \left[\frac{m}{2(m-n)} \right] &\leq \left[\frac{m}{2(m-n)} \right] - \left[\frac{\{2(m-n)-1\}}{2} \frac{m}{(m-n)} \right] + m \leq 2 \left[\frac{m}{2(m-n)} \right] + 1 \\ \therefore 2 \left\{ \left[\frac{m}{2(m-n)} \right] + 1 \right\} - 2 \leq \left[\frac{m}{2(m-n)} \right] - \left[\frac{\{2(m-n)-1\}m}{2(m-n)} \right] + m \leq 2 \left\{ \left[\frac{m}{2(m-n)} \right] + 1 \right\} - 1 \\ \Box \equiv \nabla, \ \exists (A-32) \downarrow \cup, \\ L_u = \left[\frac{m}{2(m-n)} \right] + 1, L_z = \left[\frac{m}{2(m-n)} \right] - \left[\frac{\{2(m-n)-1\}m}{2(m-n)} \right] + m \bigtriangledown \exists \delta h \land \delta, \\ \Phi \downarrow \exists c, \ 2L_u - 2 \leq L_z \leq 2L_u - 1.....(A-39) \\ E \downarrow \& \delta . \ \exists f L, \ \exists (A-38) \downarrow \cup, \\ \left[\frac{m}{2(m-n)} \right] \leq m - \left[\frac{\{2(m-n)-1\}}{2} \frac{m}{(m-n)} \right] \leq \left[\frac{m}{2(m-n)} \right] + 1 \\ \therefore \left\{ \left[\frac{m}{2(m-n)} \right] \right\} = M - \left[\frac{\{2(m-n)-1\}}{2} \frac{m}{(m-n)} \right] \leq \left[\frac{m}{2(m-n)} \right] + 1 \\ \therefore \left\{ \left[\frac{m}{2(m-n)} \right] + 1 \right\} - 1 \leq m - \left[\frac{\{2(m-n)-1\}m}{2(m-n)} \right] \leq \left[\frac{m}{2(m-n)} \right] + 1 \\ \Box \equiv \nabla, \ \exists (A-32) \downarrow \cup, \ L_u = \left[\frac{m}{2(m-n)} \right] + 1, L_z = m - \left[\frac{\{2(m-n)-1\}m}{2(m-n)} \right] \lor \eth \delta h \circlearrowright \delta, \\ \Phi \downarrow \exists c, \ d \to d \end{pmatrix} = M - \left[\frac{(2k+1)m}{2(m-n)} \right] - \left[\frac{(2k-1)m}{2(m-n)} \right] + m, L_z = m - \left[\frac{\{2(m-n)-1\}m}{2(m-n)} \right] \\ L_u = \left[\frac{m}{2(m-n)} \right] + 1, L_k = \left[\frac{(2k+1)m}{2(m-n)} \right] - \left[\frac{(2k-1)m}{2(m-n)} \right] \\ L_u = \left[\frac{m}{2(m-n)} \right] - \left[\frac{(2(m-n)-1)m}{2(m-n)} \right] + m, L_z = m - \left[\frac{\{2(m-n)-1\}m}{2(m-n)} \right] \\ L_u = 2 \leq L_u \leq 2L_u - 2 \leq L_u \leq 2L_u - 1, L_u - 1 \leq L_z \leq L_u \dots (A-41) \\ E \updownarrow \delta . \end{split}$$

以上をまとめると式(A-5),(A-24)及び(A-41)より,ディジタル直線の性質は次の様になる.

<ディジタル直線の性質>

) 0<a=1/h<1/2 (aは直線の傾き,hは正の整数)の場合

$$L_a = \lceil h/2 \rceil, L_s = h, L_z = (h+1) - \lceil h/2 \rceil$$
$$2L_a - 1 \le L_s \le 2L_a, L_a \le L_z \le L_a + 1$$

) 0 < a = n/m < 1/2 (a は直線の傾き,n,mは互いに素な正の整数)の場合

$$L_{a} = \left\lceil \frac{m}{2n} \right\rceil, L_{k} = \left\lceil \frac{(2k+1)m}{2n} \right\rceil - \left\lceil \frac{(2k-1)m}{2n} \right\rceil$$
$$L_{s} = \left\lceil \frac{m}{2n} \right\rceil - \left\lceil \frac{(2n-1)m}{2n} \right\rceil + m, L_{z} = m+1 - \left\lceil \frac{(2n-1)m}{2n} \right\rceil$$
$$2L_{a} - 2 \le L_{k} \le 2L_{a}, 2L_{a} - 2 \le L_{s} \le 2L_{a}, L_{z} = L_{a}$$

)
$$1/2 \le a = n/m < 1$$
 (a $lagle a lagle a$