

報告番号 甲 第 4027 号

仮想空間での対話的操作による仮想物体の
デザインおよび画像生成に関する研究

水野 慎士

目次

第1章 序論	3
1.1 研究の背景と目的	3
1.2 研究の概要と論文の構成	7
仮想空間での対話的操作による仮想物体の デザインおよび画像生成に関する研究	
2.1 研究の意義	9
2.2 仮想空間と対話	10
2.3 ユーザーインタフェース	11
2.4 CGI技術	13
2.4.1 三次元表現技術に基づく仮想空間の記述	13
2.4.2 仮想空間	17
2.4.3 仮想空間	15
2.4.4 仮想空間の表現	16
2.4.5 仮想空間の表現	19
2.4.6 仮想空間の表現	21
2.4.7 リスト型表現の計算コスト	22
2.5 画像生成技術	23
2.5.1 仮想空間	23
2.5.2 仮想空間	28
2.6 リンク	22
第3章 仮想空間に基づく仮想物体生成	33
3.1 導入	33
3.2 仮想空間生成の概要	34
3.2.1 基本の処理	34
3.2.2 仮想空間	35
3.2.3 仮想空間	35

水野 慎 士

目次

第1章 序論.....	3
1.1 研究の背景と目的	3
1.2 研究の概要と論文の構成	5
第2章 仮想彫刻による幾何モデリング	8
2.1 まえがき	8
2.2 仮想彫刻の概要	9
2.2.1 形状生成	9
2.2.2 彫刻素材と彫刻刀	10
2.2.3 ユーザ・インタフェース	11
2.3 CSG 表現	13
2.3.1 三値論理代数系に基づく曲面多面体の記述	13
2.3.2 交差判定	17
2.4 交点リスト	18
2.4.1 概要	18
2.4.2 仮想彫刻刀と視線の交点計算法	19
2.4.3 交点リストの更新規則	21
2.4.4 リスト更新の計算コスト	22
2.5 画像生成実験	23
2.5.1 画像生成法	23
2.5.2 彫刻作成実験	25
2.6 むすび	32
第3章 仮想彫刻に基づく版画画像合成	33
3.1 まえがき	33
3.2 版画画像合成の概要	34
3.2.1 基本的原理	34
3.2.2 仮想版木	35
3.2.3 仮想紙	35

3.2.4	仮想ばれん	36
3.2.5	版画作成	37
3.3	リアルな版画作成のための手法	38
3.3.1	仮想紙の凹凸の補正	39
3.3.2	仮想紙到達限界値の設定	41
3.3.3	刷り上がりのむらの再現	42
3.4	画像生成実験	43
3.5	むすび	46
第4章 仮想版木自動生成による版画画像合成		47
4.1	まえがき	47
4.2	仮想版画合成の概要	48
4.3	濃淡画像からの版木自動生成	49
4.3.1	基本的原理	49
4.3.2	画像特徴量	50
4.3.3	輪郭部の切削	50
4.3.4	濃淡部の切削の概要	51
4.3.5	特徴量による切削方向の決定	53
4.3.6	切削実行の判定	54
4.4	三次元モデルからの版木自動生成	55
4.4.1	基本的原理	55
4.4.2	切削パラメータ	55
4.4.3	版木切削法	56
4.5	画像生成実験および考察	58
4.5.1	実験結果	58
4.5.2	考察	58
4.5.3	補足実験	64
4.6	むすび	65
第5章 結論		66
謝辞		69
参考文献		70

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

コンピュータの誕生以来、その技術の発達はめざましいものがあり、それにとともなってコンピュータによって画像を生成するコンピュータ・グラフィクス (CG) も進歩し続けている。その結果、CGは産業、科学、教育、エンターテインメント他、多くの分野で利用されるようになった ([テレビジョン学会 94])。そして、近年ではCGによって仮想の三次元空間を構築し、あたかもその仮想空間に入り込んだような視覚体験や現実世界同様の物体操作を行なうことが可能なバーチャルリアリティ (VR) に関する研究が注目を浴びてきており ([Krueger 91], [PIXEL 94])、様々な分野への応用が期待されている。

VRは現実世界で人間が感じる五感をコンピュータで合成して人間に与えることで、操作者が仮想空間内に存在するように感じさせるもので、コンピュータへの入力操作に対して仮想空間の状況の変化を対話的に出力する必要がある。このとき、入力部分や出力部分において、いかに現実世界をシミュレートするかが大きな課題となる。そして、現実世界における様々な操作について、これらを仮想空間で実現する試みが行われてきた。例えば、仮想空間の様々な物体に対する変形操作 ([石黒 94]) や破壊・切断操作 ([上野 96], [野口 96])、ヘッドマウンテッドディスプレイ (HMD) を用いた仮想空間内での疑似体験 ([Surtherland 68], [Bajura 92]) などがある。また、データグローブを用いた仮想空間内の物体の操作 ([Funahashi 95]) といった仮想空間へのデータ入力部分も現実世界のものを再現したものや、反力を返す装置 ([Aoki 95]) といった、仮想空間からの出力が視覚だけでなく触覚なども考慮したものもある。さらに、より具体的な応用例として、自動車や飛行機等の運転操作シミュレーション ([鱸 94]) や手術シミュレーション ([北川 96]) などの研究も報告されている。

このようなVRにおける仮想空間に対する操作のなかでも、物体形状を対話的に生成する手法の研究は重要な問題のひとつとして挙げられる。CGにおいて、三次元物体の形状を記述することを幾何モデリングというが（[千葉91],[日本図学会89]）、当初は数式などを組み合わせることによって形状を記述していた。しかし、この方法では作成中の形状を直感的に把握することは困難である。そこで、幾何モデリングを行うためのアプリケーションが各種開発されてきた（[久保寺92],[Naylor90]）。これらにおいては、グラフィカル・ユーザ・インタフェース（GUI）などを用いたり、あらかじめ基本的な形状を用意してそれらを組み合わせる手法を用いることなどによって、ユーザは作成中の形状を把握しながら幾何モデリングを行うことが可能であった。ただし、その操作には専門的な知識が必要であり、あらゆる人々が自由にコンピュータ上で物体形状を記述できる、というところまでは至っていなかった。そこでVRの技術を応用し、現実世界において人々が物の形を作る操作を仮想空間内でシミュレートすることが検討されるようになった。その結果、粘土細工や折り紙など、様々な現実世界の形状生成操作を仮想空間内で再現する研究が報告されている（[梅村97],[宮崎93]）。

このように物体形状作成において、現実世界での手法をVR技術によって仮想空間内で再現することは、コンピュータに不慣れなユーザにとっても馴染みがある操作を可能とするため、より多くの人々にとってCG作成を身近なものになると思われる。さらに、その作成形状も現実世界のものと近いものとなることが期待される。そして後述するようにCGの分野での人の手作り風の画像や形状の必要性が唱えられていることもあり、多くの形状生成手法のコンピュータ上での実現が望まれている。

ところで、CGの分野では従来より、いかに現実世界に近いフォトリアルな画像を合成するかということを追求してきた。そのため、光線追跡法、ラジオシティ法、テクスチャマッピング、パンプマッピング、ボリュームレンダリングといったリアルな画像を生成するための手法が数多く開発されてきた（[千葉91],[テレビジョン学会94]）。そして最近では本物かCGかを区別できないほどの画像が合成できるまで技術は進歩している。そして最新のCGの技術は、映画などのエンターテインメントの分野において一般の人々も身近に接する機会が増しているが、映画「ジュラシックパーク」や「アポロ13」などでは、実写映像の中に違和感なく溶け込むほどリアルなCG映像が用いら

れている。しかしその一方で、画像が用いられる状況によっては、人が手で書いたようなフォトリアルでない画像が必要な場合がある。例えば、イラストのように伝えたい内容を強調することで人にとって分かりやすくする目的や、芸術的な目的が考えられる。そこで、近年ではコンピュータを利用した様々な手書き風画像合成手法が開発されてきた（[石原 95], [大野 95]）。その実現法としては、画像処理技術を応用したもの（[斎藤 95], [Haeberli 90]）や従来のCG技術を拡張したもの（[張 95], [Meier 96]）がある。また、筆跡を再現するためにVR技術を応用したもの（[松下 94], [Green 85]）なども研究されている。そしてこれらの手法により、現実世界における様々な描画手法による画像がコンピュータによって合成可能となってきたが、まだ実現されていない描画手法もいくつか存在し、これらをコンピュータ上で実現することが望まれている。

以上のような背景の中、本論文では、現実世界での三次元形状作成手法として最も一般的なものの一つである彫刻と、版木の彫刻から生成される版画を取り上げる。そして、それらの作成過程を仮想空間内で再現し、その仕上がりも現実世界での人の手作りの雰囲気を持つ、彫刻と版画に基づくデザインシステムの開発を目的とする。

1.2 研究の概要と論文の構成

前節で述べた状況をふまえ、本論文では仮想空間における対話型形状生成の方式として仮想彫刻と仮想版画に関する検討を行う。そして、前述した従来手法での問題を解決するため、新たな手法を提案し、システムを実現する。本システムにより、モデリング操作や作成された形状が実際の彫刻に近いものとなり、コンピュータに不慣れたユーザでもあまり違和感を感じることなくCGモデリングを体験することが可能となる。

次に、本論文ではフォトリアルでない画像生成手法のひとつとしてコンピュータによる木版画画像合成を取り上げる。現実世界において木版画はポピュラーな描画法のひとつであるが、コンピュータ上での合成についての試みはほとんど行われていない。そこで、本論文前半で述べる仮想空間での彫刻手法を応用し、現実世界における木版

画生成の手順を仮想空間内で再現することにより木版画風画像を合成する手法を提案する。そして、いくつかのアプローチによる木版画画像合成についての検討を行う。

本論文で提案するデザインシステムは図1-1に示すように、仮想彫刻サブシステム、仮想版画サブシステムから構成される。仮想版画サブシステムは、対話操作により版木作成を行うマウス操作モジュール、画像および三次元モデルに基づいて版木作成を行う特徴抽出モジュールおよび三次元解釈モジュールを持つ。

以下、第2章では、仮想空間での彫刻操作による形状生成手法とそれを用いた仮想彫刻システムの実現例について述べる([水野 94-1],[水野 95],[水野 97-1],[Mizuno 95])。まず、システムの概要を述べ、次に本システムで採用したCGの幾何モデリングの基本技法のひとつであるCSG (Constructive Solid Geometry) 表現について述べる([岡田 97],[水野 93],[水野 94-2],[Kim 89])。そしてVR環境において不可欠である対話的操作実現のために、交点リストによる形状表現や描画の方法を提案し、その詳細について説明する。最後に、本システムでの物体形状作成例を示す。

第3章では、2章で述べた仮想空間での彫刻を実現するシステムを応用した木版画画像合成法とシステムの実現例について述べる([水野 96-1],[水野 96-2],[水野 97-2])。まずシステムの概要を紹介した後、本手法による画像合成に必要な、仮想空間内の版木、紙、ばれんについて説明する。次に、より木版画らしい画像を合成するために仮想紙の振る舞いに関する検討を行った後、本手法による木版画画像合成例を示す。

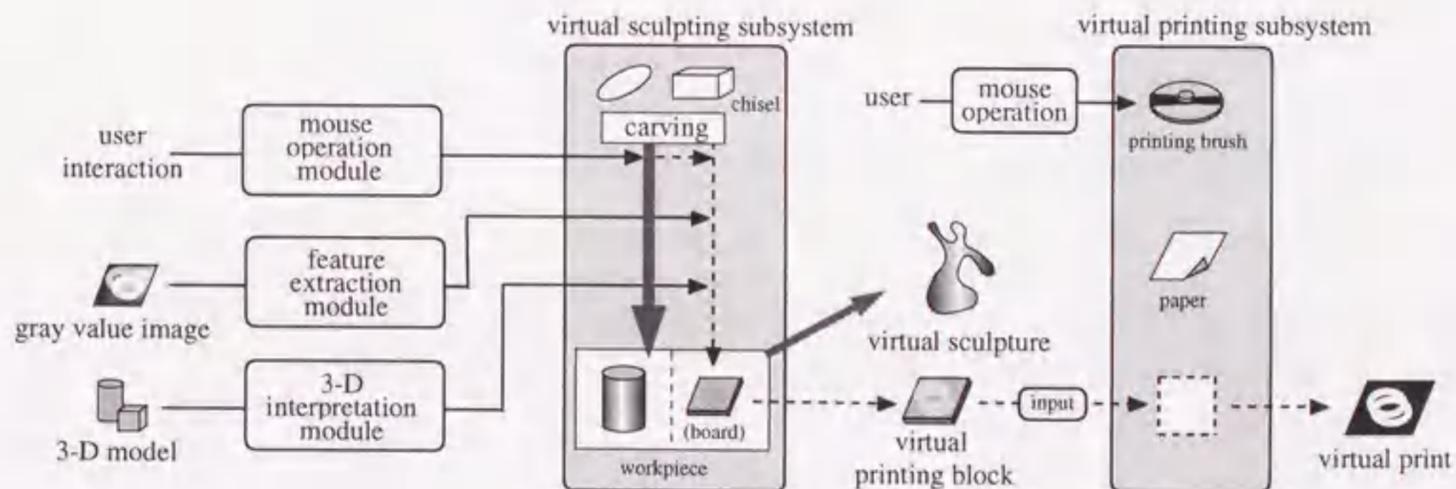


図 1-1 仮想彫刻と仮想版画に基づくデザインシステム。

Fig.1-1 Designing system with virtual sculpting and virtual woodcut printing.

第4章では、3章とは一部異なる木版画合成のアプローチとして、版木作成段階をユーザ自身の操作によるものではなく、システムが自動的に行う手法を提案する([水野 96-1],[大河内 97-1],[大河内 97-2],[水野 97-3])。まず、濃淡画像にもとづく版木自動生成法について述べ、次に三次元形状モデルにもとづく版木自動生成法について述べる。そして、両手法による木版画画像合成例を示す。

最後に、第5章では、本研究全体について成果をまとめ、今後の課題について述べる。

第2章 仮想彫刻による幾何モデリング

2.1 まえがき

近年の計算機技術の発達はめざましく、それに伴い従来は不可能だった三次元仮想空間における仮想物体の対話的操作が可能となってきた。そして現実世界における操作をコンピュータ・グラフィクス (CG) 技術を駆使して計算機上で仮想体験する研究もいろいろ行われている。それは、バーチャルリアリティ (VR) の応用分野の拡大と共に、実用面からも重要性を増している。その中で仮想空間の物体操作に関する重要な問題の一つとして、任意形状物体を対話的に生成することがあげられる。

本章では、仮想空間の物体操作および自由形状生成の具体例として、対話的に仮想的な「素材」を切削して形状を作り上げる方式（以下「仮想彫刻」と呼ぶ）の一実現方法を提案する ([水野 94-1], [水野 95], [水野 97-1], [Mizuno 95])。この手法では三次元仮想空間内の素材に対し「彫刻操作」を行うことにより、複雑な形状の物体を生成することが可能である。操作者はスクリーン上の物体に対して楕円体または直方体で定義された仮想彫刻刀の操作によって、対象物の一部を切削したり付加したりする。作成される物体の形状は表面が平面または二次曲面の一部で構成される曲面多面体であり、実際に木を削ったような表面形状を実現することができる。

ユーザが実際に彫刻を行っているように感じるためには、彫刻操作に対応して高速に表面形状が変化する必要がある。そのため本手法では、表示スクリーンの各画素に対する視線毎に視線と素材物体及び彫刻刀との交点を保持する交点リストを用意しており、このリストを利用することで高速な変形を実現している。

彫刻で作られた物体の形状はCSG (Constructive Solid Geometry) 表現で記述される。そこでは、彫刻操作を行った彫刻刀も物体を構成するプリミティブとなる。作成した物体形状のCSG表現は彫刻操作によって自動的に生成され、これを用いた物体の画像

合成が可能である。また彫刻履歴によっても作成形状の任意の視点から見た画像を合成することができる。

彫刻 (Sculpting) という操作感覚を想定したと思われる幾何モデリング法の研究としては、Galyean らの手法 ([Galyean 91]) が報告されている。これは物体をボクセルデータで表わし、その形状変形には、ボクセルの消去や生成を行ってそれをもとにポリゴンデータを生成するため、かなり自由な形状生成が可能となっている。ただし、ボクセル格子は最大で $30 \times 30 \times 30$ であるため、細かい部分の形状は表現できない。更に大きなボクセル格子を用いても、メモリコスト、計算コスト共に無視できなくなる。他に、Coquillart の手法 ([Coquillart 90]) や Jeng らの手法 ([Jeng 96]) などが報告されている。ただし、これらは sculpting と表現しているが、実際は物体を埋め込んだ格子や物体を構成する三角形パッチの対話的変形操作であり、操作感覚や作成形状が現実の彫刻とは異なる。Naylor の手法 ([Naylor 90]) ではかなり自由な対話的 CSG モデリングが実現されているが、平面しか扱うことができず、木を削ったような表面形状を表すのには適さない。本論文で提案する手法は上記の手法と比較すると、実際に木材を彫刻刀で削り取るような操作感覚で形状生成ができ、その表面は必ずしも滑らかではないが実際に木を削ったような形状になるという特徴を持つ。また形状が CSG 表現で記述されるため、光線追跡法が容易に適用でき高品質な画像を生成することができる ([水野 93], [水野 94-2])。

本章では、2.2 節で仮想彫刻の概要について述べ、2.3 節では形状記述の一手法である CSG について述べる。続いて、2.4 節で対話的操作のために提案した手法である交点リストとその並べ替え方法について述べる。そして、2.5 節で画像生成の実験結果について述べ、本手法を用いた彫刻作品の作成の例を示す。

2.2 仮想彫刻の概要

2.2.1 形状生成

本論文の仮想彫刻では、仮想空間内に彫刻素材および仮想彫刻刀が用意される。彫

刻刀は1個の楕円体または直方体で定義されたものである。そして彫刻操作としては、切削および付加が可能である。仮想彫刻では、仮想彫刻刀の位置をユーザが指定し、その仮想彫刻刀によって彫刻素材を切削もしくは付加するという操作を対話的に繰り返すことによって物体形状を生成する。なお、ここで切削は仮想彫刻刀内部の部分を素材から取り除くことによって、付加は同じ内部を素材に付け加えることによって実現される(図2-1)。

2.2.2 彫刻素材と彫刻刀

彫刻素材は、表面形状が平面または2次曲面で定義される曲面多面体をCSG(Constructive Solid Geometry)表現を用いて記述する。これにより最終的な作成形状もCSG表現で記述できる。彫刻素材としては任意の形状のものを使用できるが、実際には、円柱や直方体など現実に木を彫刻する場合と同様に単純な形状のものを使用することが多い。

仮想彫刻刀は前述したように楕円体または直方体で定義されている。仮想彫刻刀のひとつとして楕円体を用いた理由としては、まず、実際に木を彫刻刀の丸刀で切削したときの表面形状が楕円体に似ていることが挙げられる。また、楕円体は無限に広がることなく限られた範囲に収まるため、彫刻素材を切削した時に再描画する範囲が小

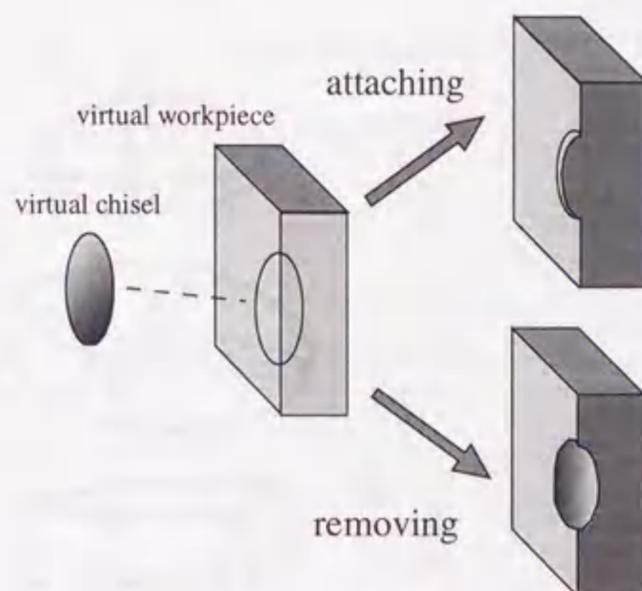


図2-1 切削と付加.

Fig.2-1 Cutting away and adding.

さくて済むことも理由の一つである。また直方体の仮想彫刻刀は3つの平行二平面によって定義され、実際の彫刻における平刀に相当する。また、直方体の角の部分を用いれば三角刀として用いることもできる。これら仮想彫刻刀の形状や大きさは用途もしくはユーザの意図に応じて変化させる。図2-2に実際に用いた彫刻刀の例を示す。

2.2.3 ユーザ・インタフェース

仮想彫刻システムは、ワークステーション上に実現される。このシステムの操作画面は二つのスクリーンといくつかのスイッチで構成され、ユーザはマウス等のポインティングデバイスを用いて、これらに対して操作を加える。図2-3にシステムの外観を示す。

二つのスクリーンには彫刻する物体が表示され、各スクリーンが別々の視点を持つ。そのため立体視等への応用も可能であるがまだ実装はしていない。スイッチは仮想彫刻刀のパラメータの変更などに用いる。仮想彫刻刀のパラメータには以下のものがある。

彫刻刀の種類・・・ 3軸の長さを変えた形の異なる楕円体または直方体から選択。

操作の種類・・・ 切削、付加の選択。

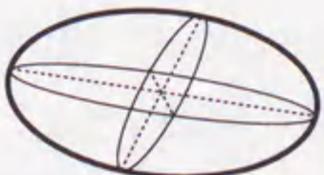
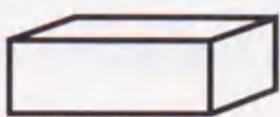
	Length of each axis	Used for :
	$x = 10$ $y = 30$ $z = 10$	normal cutting
	$x = 36$ $y = 36$ $z = 8$	wide cutting sharp cutting
	$x = 20$ $y = 30$ $z = 10$	flatt cutting

図2-2 仮想彫刻刀の例。

Fig.2-3 Examples of virtual chisel.



図2-3 システムの概観.

Fig.2-3 Appearance of the system.

彫刻刀の方向・・・ 素材法線および彫刻刀の軸まわりの回転移動.

彫刻の深さ・・・ 素材表面からの素材法線方向への平行移動.

彫刻刀の方向と深さは、切削も付加もされていない元の彫刻素材に対するもの、および現時点の彫刻物体に対するものの、いずれかから選択することができ、場合により使い分ける。そして方向や深さの値はスイッチで増減させる。また、今行った彫刻操作を取り消して一つ前の状態に戻したり、視点を移動させるためのスイッチなどもある。

彫刻操作は、表示された仮想的彫刻素材に対して直接的に行う。ユーザは彫刻刀のパラメータを決定した後、マウスカーソルをスクリーンに表示された彫刻素材上の削りたい部分に移動してクリックまたはプレス&ドラッグを行う。そのとき、スクリーン上のカーソルと視点を結ぶ直線から彫刻素材上の一点の座標が決定し、その点での素材の法線ベクトルも求めることができる。よって、前述の彫刻刀のパラメータから仮想彫刻刀の位置や方向が決定される(図2-4)。彫刻刀パラメータのうち、素材の法線方向に関する回転角はドラッグの方向によって決定することもできる。つまり、彫刻素材上でマウスドラッグを行うと、瞬時にドラッグした方向で彫刻素材の切削が行われる。これにより彫刻操作の感覚が、かなり現実の彫刻と近いものとなっている。以上は一回の彫刻操作で1つの仮想彫刻刀による切削であるが、連続した長い形状の切削も、仮想彫刻刀を連ねて用いることで実現している。これらの切削の様子を図2-5に示す。

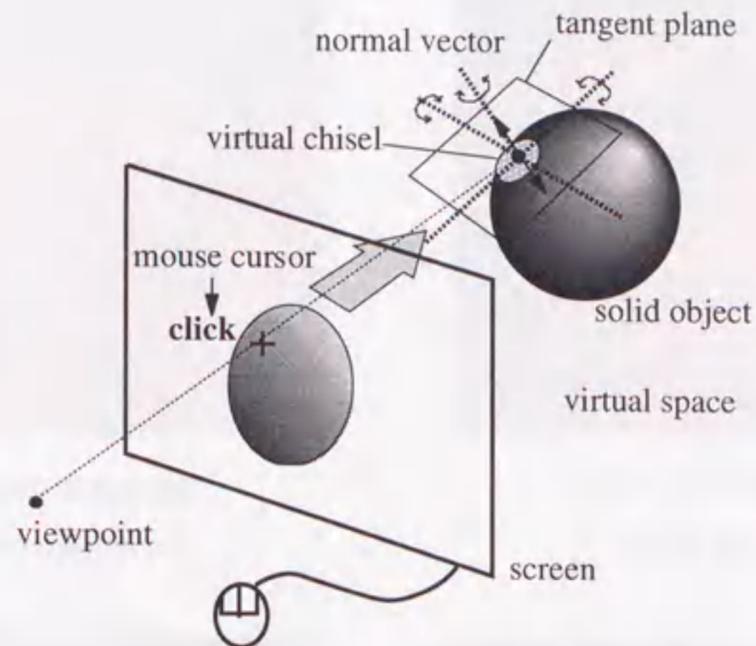


図2-4 仮想彫刻刀の置かれる例.
Fig.2-4 Examples of placing a chisel.

ユーザの操作に伴って、彫刻素材の表面は決定した仮想彫刻刀によって瞬時に切削される。なお、実際の彫刻とは異なり、仮想彫刻刀を付加したり、切削や付加される一つ前の状態に戻ることなどの操作も行うことができる。そして、ユーザはこれらの操作を繰り返すことで自由な形状を形成していく。図2-6に彫刻操作による形状生成の様子を示す。

2.3 CSG 表現

2.3.1 三値論理代数系に基づく曲面多面体の記述

彫刻によって作成した物体の形状はCSG (Constructive Solid Geometry) 表現 ([日本図学学会 89]) によって記述される。CSGは基本物体 (プリミティブ) の集合演算により、複雑な形状を記述するものである。仮想彫刻における切削と付加の操作は、それぞれ集合演算における差演算および和演算に相当し、仮想彫刻による作成形状はそのまま CSG 表現で記述することができる。

今回は、岡田らの三値論理演算に基づく CSG 表現 ([岡田 97], [Kim 89]) を用いた。これは物体と空間の点との位置関係を内部、外部の他に境界を加えた三値によって表



(a) Carving by dragging
(using one ellipsoid).



(b) Carving by dragging
(using many ellipsoids).



(c) After carving many times.



(d) Carving with flat chisels.

図2-5 彫刻操作の例.

Fig.2-5 Examples of carving operations.

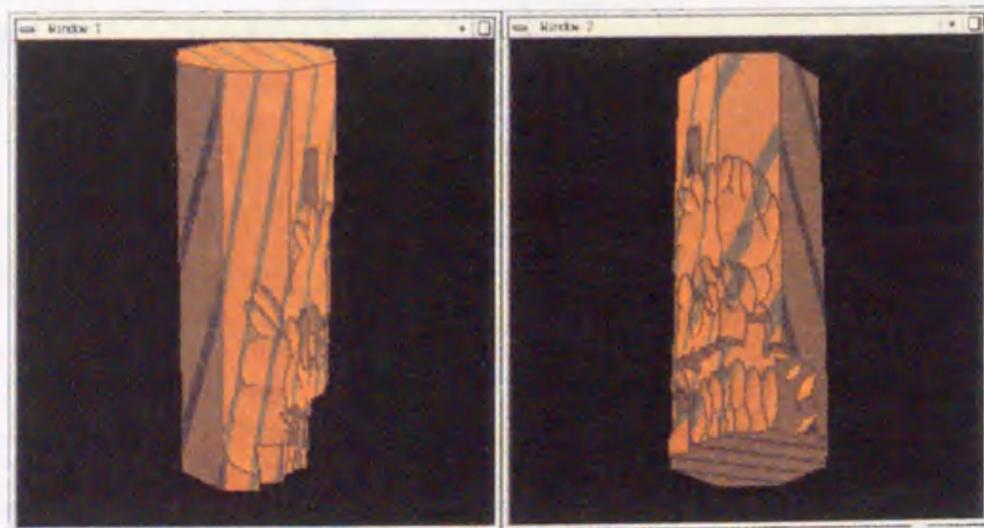


図2-6 彫刻による形状作成の過程の例.

Fig.2-6 Examples of modeling by sculpting.

すものである。本彫刻システムでは、最初にCSGで記述された彫刻素材に対して光線追跡を行う場合があるが、境界を明確にする三値論理演算は光線追跡による交点リスト作成に都合がよいため、この手法を用いた。さらに仮想彫刻システムでは岡田らの手法を拡張し、物体を構成するプリミティブとして平面または二次曲面で定義された半空間を用いることができる ([水野 93], [水野 94-2])。平面と二次曲面を表す関数はそれぞれ、

$$\text{平面} \quad \cdots \quad f_1(\mathbf{p}) = ax + by + cz + d$$

$$\text{二次曲面} \quad \cdots \quad f_2(\mathbf{p}) = Ax^2 + By^2 + Cz^2 + Dxy + Eyz + Fzx + Gx + Hy + Iz + J$$

$$\text{ただし, } \mathbf{p} = (x, y, z)$$

で定義される。ただし本システムでは各関数の係数は直接与えるのではなく、平面の場合はその平面を含む3点から係数を求め、また二次曲面の場合は基本形のアフィン変換によって係数を求める。二次関数の基本形を表2-1に示す ([日本数学会 85])。

プリミティブ R は前述した関数を用いて、

$$R = \{ \mathbf{p} \mid f_i(\mathbf{p}) \leq 0 \}$$

と表される。物体形状はプリミティブの集合演算 (三値論理演算) で記述されるが、その定義と表現法であるS式を図2-7および表2-2に示す。直方体形状の仮想彫刻刀 (平刀) は、実際には互いに直交する平行二平面を3つ用いており、そのS式 C_p は、

$$C_p = (\text{and } R_1 R_2 R_3)$$

(ただし、 R_i : 平行二平面で定義された半空間プリミティブ ($i=1,2,3$; 各プリミティブは互いに直交))

と表される。

物体形状を表すS式は彫刻操作の度に自動的に順次生成される。彫刻素材を F_0 、彫刻途中の形状を F_i 、仮想彫刻刀を C とした場合、これに1回の彫刻操作を加えた物体

表 2-1 二次曲面の分類.

Table 2-1 Classification of quadric surfaces.

	k	l	m	n	v
楕円面	1	1	1	0	1
一葉双曲面	1	1	-1	0	1
二葉双曲面	-1	-1	1	0	1
楕円錐面	1	1	-1	0	0
楕円柱面	1	1	0	0	1
楕円放物面	1	1	0	-2	0
双曲放物面	1	-1	0	-2	0
双曲柱面	1	-1	0	0	1
相交二平面	1	-1	0	0	0
放物柱面	1	0	0	-2	0
平行二平面	1	0	0	0	1
一平面	1	0	0	0	0
一直線	1	1	0	0	0
一点	1	1	1	0	0
虚楕円面	1	-1	-1	0	1
虚楕円柱面	1	-1	0	0	1
虚二平面	1	0	0	0	1

} 不可視

基本型： $k\frac{x^2}{p^2} + l\frac{y^2}{q^2} + m\frac{z^2}{r^2} + nz - v = 0$

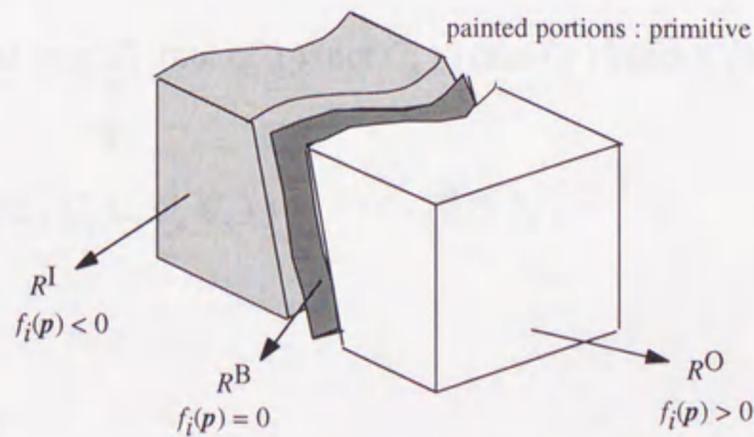


図 2-7 プリミティブの内部, 境界, 外部.

Fig.2-7 Inside, boundary and outside of a primitive.

表 2-2 三値論理演算の定義と表現法.

Table 2-2 Definition and expression of the three value logic.

	定義	表現方法
和集合	$R_1 \cup R_2$	(or $R_1 R_2$)
積集合	$R_1 \cap R_2$	(and $R_1 R_2$)
準補集合	R^{SC} $= R^O \cup R^B$	(not R)

の形状 F_{i+1} は,

$$\text{切削} : F_{i+1} = (\text{and } F_i (\text{not } C))$$

$$\text{付加} : F_{i+1} = (\text{or } F_i C)$$

と記述できる. ここで, 仮想彫刻刀 C は平刀 C_p または丸刀 C_e であるが, C_p は前述のとおりで, C_e は楕円体で定義されたプリミティブ1個をそのまま用いる. 彫刻物体の形状のS式はこの操作の反復適用によって生成することができる. しかし, 彫刻操作が繰り返されるほどS式の括弧の深さが増大するため, 交点判定の処理時間などに悪影響をおよぼす場合がある. そのため, 同一の彫刻操作が連続する場合には, S式生成時に括弧の深さの増大を防ぐ処理を施す. 以下に例を示す.

切削, 連続5回

$$(\text{and } (\text{and } (\text{and } (\text{and } (\text{and } F_0 (\text{not } C_1)) (\text{not } C_2)) (\text{not } C_3)) (\text{not } C_4)) (\text{not } C_5)) \quad \dots \text{深さ} 6,$$



$$(\text{and } F_0 (\text{not } (\text{or } C_1 C_2 C_3 C_4 C_5))) \quad \dots \text{深さ} 3.$$

2.3.2 交差判定

CSG表現によって記述された物体形状の画像を生成するには, 視線と各プリミティブ

ブとの交点について集合演算による交差判定を行う必要がある。前節の手法で記述された形状は、三値論理演算によって交点計算が行われる。これは、従来の内部と外部による二値論理演算を境界も加えた三値に拡張したものである。三値論理演算の真理値表を表2-3に示す。

実際の交差判定は次のように行う。まず、判定を行う交点 p について、形状を定義する各プリミティブ R に対する包含関係を以下のように求める。

$$F(p; R) = \begin{cases} I: p \text{ は } R \text{ の内部に存在. } f_i(p) < 0, \\ B: p \text{ は } R \text{ の境界に存在. } f_i(p) = 0, \\ O: p \text{ は } R \text{ の外部に存在. } f_i(p) > 0. \end{cases}$$

そして、これらの値を形状定義のS式に代入し、前述の真理値表に従って評価を行う。そして、B（境界）と評価された交点が定義形状の真の交点となる。

2.4 交点リスト

2.4.1 概要

仮想彫刻システムを実現するには、ユーザが彫刻操作を行う度に彫刻素材の表面形状を変形することが必要である。しかし、CSG表現の集合演算処理による可視交点の

表2-3 三値論理演算の真理値表。

Table 2-3 Truth table of the three value logic.

	$F(p; R_1 \cup R_2)$			$F(p; R_1 \cap R_2)$			$F(p; R^{SC})$	
	or			and			not	
	I	B	O	I	B	O	I	O
I	I	I	I	I	I	B	O	O
B	I	B	B	B	B	B	O	B
O	I	B	O	O	O	O	O	I

計算は対話的処理には適さない。これを高速に実現するため、交点リストを用いる。

本手法では彫刻物体の画像を生成するために、表示スクリーンの各画素ごとに視線を設定している。交点リスト (図2-8) とは、彫刻素材および彫刻刀と視線との交点を全て求め、視点から近い順に並べたものである。交点リストは表示スクリーンの全ての画素に対して用意される。リスト内の各交点は視点からの距離と含まれるプリミティブの情報を持つ。

交点リストはまず彫刻素材に対して作成される。そして彫刻操作を行った後の彫刻素材の再描画は、交点リストの更新によって行う。すなわち、最終的にリストの先頭となった交点が可視交点となり、これを用いて彫刻物体の描画を行う。

2.4.2 仮想彫刻刀と視線の交点計算法

交点リスト更新のためには、各視線ごとに仮想彫刻刀の交点を求める必要がある。楕円体で定義された彫刻刀の場合はひとつの二次方程式を解けば交点は求めること

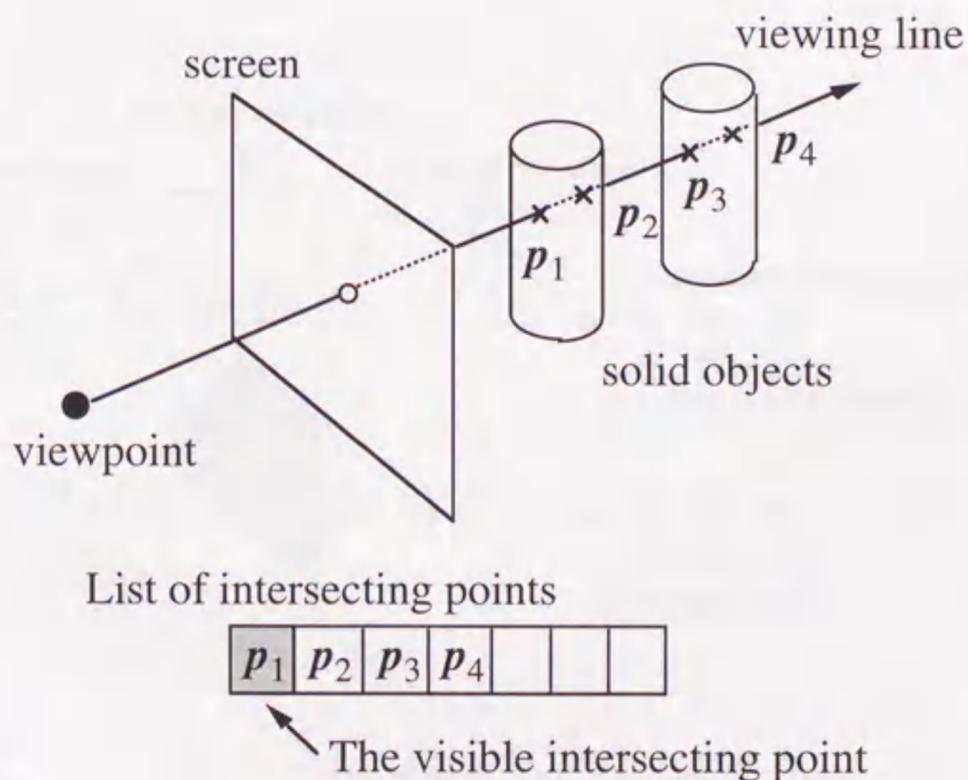


図2-8 交点リスト。

Fig.2-8 A list of intersecting points.

ができるが、直方体の場合は以下に示した手順によって求める。

- (1) 視線と直方体を構成する3組の平行二平面との交点を求める。これは視点を原点と見なして各平行二平面を表す式を求めた後、二次方程式を解くことで行う。ここで、視線と平面が平行になるとき、二次方程式の二次項と一次項の係数が共に0となる。このとき、視点が平行二平面の外部にある場合は直方体と視線との交点は存在しないので終了する。内部または境界にある場合には、この平行二平面と視線の交点は視線のマイナス無限遠方とプラス無限遠方に存在すると見なす。なお、視点位置の判定は定数項の値で簡単に行うことができる。
- (2) 求めた6つの交点を視線上に存在する順番に並べる。
- (3) 並んでいる交点のうち1番目から3番目のものが全て異なる平行二平面の組のものであれば、3番目および4番目の交点が実際に直方体境界に存在する交点である。そうでなければ、視線と直方体の交点は存在しない。

このように、直方体と視線との2つの交点を求める。実際に直方体の交点を求める様子を図2-9に示す。

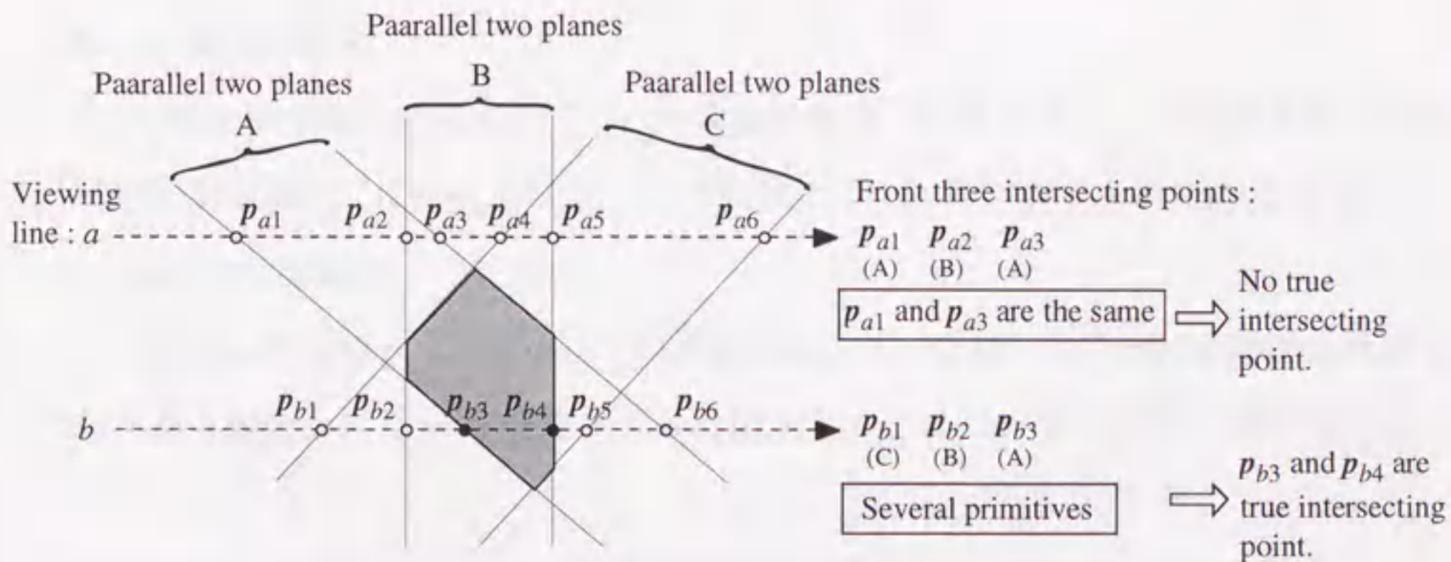


図2-9 直方体彫刻刀と視線との交点。

Fig.2-9 Intersecting points between a cubic chisel and a viewing line.

2.4.3 交点リストの更新規則

ユーザが彫刻操作を行ったとき、まず各視線に対して彫刻刀の2つの交点を求める。そして彫刻刀の交点とリスト内の交点の位置関係から交点リストを更新する。更新のアルゴリズムは以下の通りである。

[交点リスト更新アルゴリズム]

- (1) 表示スクリーンの、ある画素の視線に対する交点リストを $\{p_i | 1 \leq i \leq n\}$ とする。このとき $i_1 < i_2$ の場合、視点から見て p_{i_1} は p_{i_2} の手前にある。また、その視線と彫刻物体の交点が存在しない場合には交点リストは空 $\{\}$ である。
- (2) 視線と仮想彫刻刀の2つの交点 p_A, p_B を求め、視点からの距離により、交点リストでの位置を調べる。そして、それぞれの交点がリストにおいて、 i_A 番目、 i_B 番目 ($1 \leq i_A, i_B \leq n+1$) であったとする。ここで彫刻刀の交点が交点リストにおいて先頭になるときが1番目であり、 $i \geq 2$ のときに i 番目であるということは、交点リストにおいて p_{i-1} の次に位置するということである。
- (3) 交点リストの交点の中で、 p_A と p_B の間に存在する交点 ($\{p_{i_A}, \dots, p_{i_B-1}\}$) を全て取り除く。 i_A と i_B が等しい場合には何もしない。
- (4) (a) 切削の場合
彫刻刀の交点 p_A について、 i_A が偶数の場合 (すなわち、 p_A が彫刻素材の内部にある場合) には p_A を交点リストに加える。 p_B についても同様の操作を行う。
- (b) 付加の場合
彫刻刀の交点 p_A について、 i_A が奇数の場合 (すなわち、 p_A が彫刻素材の外部にある場合) には p_A を交点リストに加える。 p_B についても同様の操作を行う。

(1) ~ (4) を表示スクリーンの仮想彫刻刀を含む全ての視線について行う。

図2-10に交点リスト更新の様子を示す。交点リストの更新は表示スクリーンにおける仮想彫刻刀の中心を含む画素(視線)から開始し、徐々に外側に広げるようにスキャ

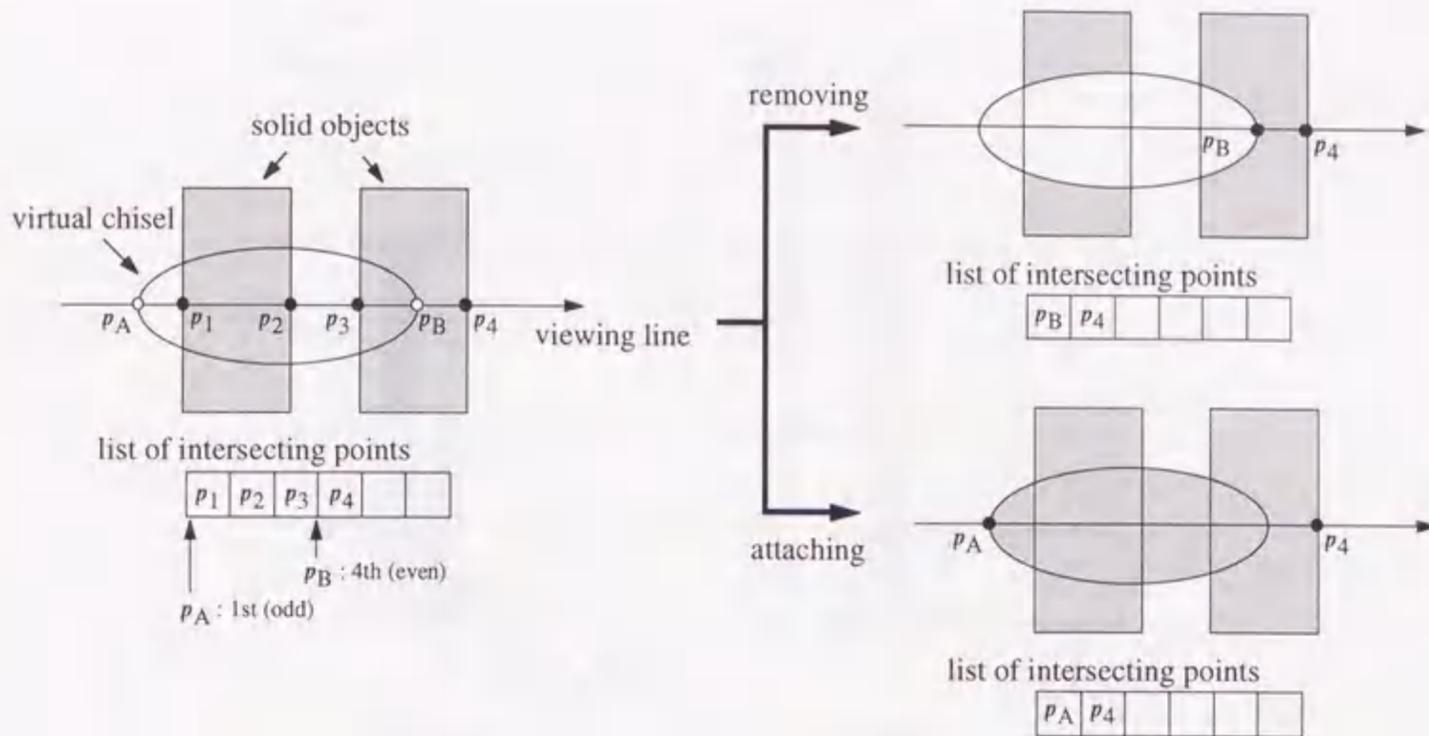


図2-10 交点リストの更新例.

Fig.2-10 Example of renewing the list of intersecting points.

ンしていく、そして完全に仮想彫刻刀を含む領域まで行う。

なお、最初の彫刻素材に対する交点リストは、2.3.2で述べたCSGにおける交差判定手法を用いて作成する必要がある。ただし、彫刻素材が仮想彫刻刀と同じく楕円体または直方体による和や差で表されていれば上記の手法がそのまま適用できる。

2.4.4 リスト更新の計算コスト

交点リストの更新に要するコストは彫刻回数には直接関係はなく、交点リストの長さに依存する。交点リストの長さは物体形状に依存し最悪の場合は彫刻回数に比例するが、実際には彫刻操作の回数が増加しても、大部分のリストの長さは小さい値に収まることが多い。図2-11に約500回の彫刻操作を行ったときの交点リストの長さの分布を示すが、リストの長さは小さい値に留まっている。そのため、1回の彫刻操作に対する交点リストの整列操作はそれまでの彫刻操作回数には関係なくほぼ一定の時間で行うことができる。

このように、交点リストの長さがそれほど増加しないことと、リスト更新を行う領域が小さいことから、素材表面の再描画は高速に行うことが可能である。実際、1回の彫刻操作での変形に対する再描画に要する時間は、0.2秒以下（リスト並べ替えに要す

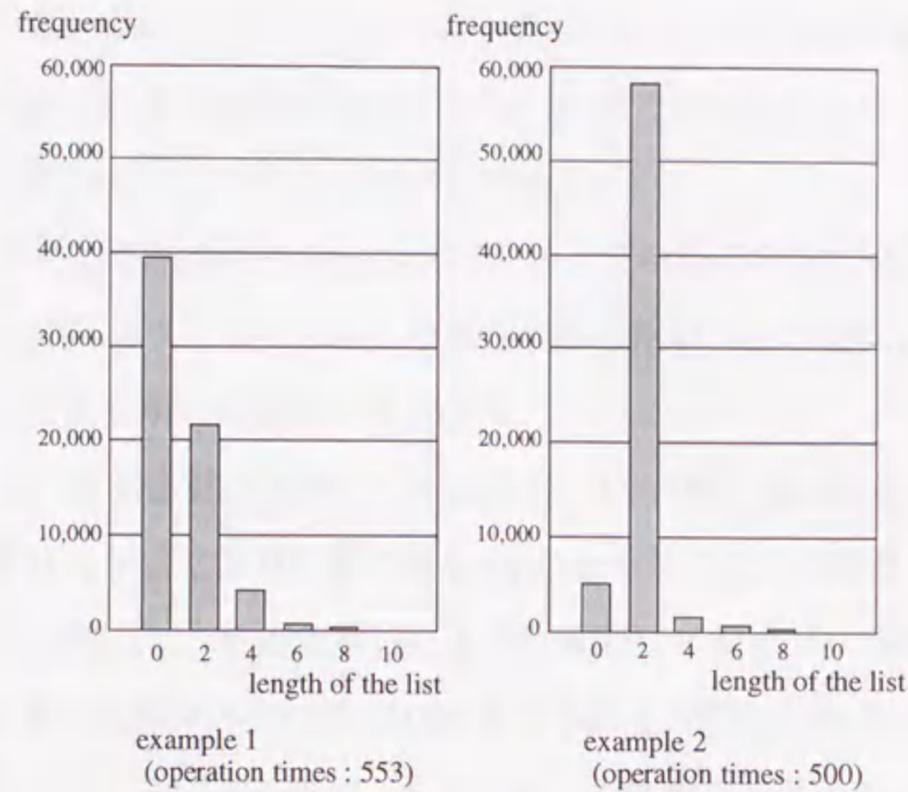


図2-11 交点リストの長さの分布.

Fig.2-11 Statistics of length of lists of intersecting points.

る時間は、0.005秒以下)であり、対話的操作のためには十分高速であると思われる。

2.5 画像生成実験

2.5.1 画像生成法

彫刻で作成した物体をユーザはディスプレイ装置に表示された画像によって鑑賞する。このとき、物体の画像は2つの方法で作成することができる。

まず一つの方法は光線追跡法である。これは本システムで生成された物体形状のCSG表現を使用する。CSG表現で記述された物体の光線追跡法による画像生成のアルゴリズムとしては、Roth ([Roth 82]), Wyvill ([Wyvill 88]), などによるものがあるが、本システムでは2.3節で述べた手法を用いた。

この手法において、画像生成に要する計算コストはプリミティブの個数 n に対して最悪で $O(n^2)$ である。なお、彫刻素材を構成するプリミティブの個数は彫刻操作回数に比べ非常に小さいことから、 n はほぼ彫刻操作によって生成されたプリミティブ数とみ

なすことができる。これからわかるように、光線追跡法は彫刻操作回数の増加とともに画像生成の計算コストが急激に増大するという欠点がある。ただし反射や屈折も考慮した高品質な画像を生成することが可能である。

もう一つの方法は彫刻操作の履歴と交点リストを用いる手法である。これは彫刻履歴の各操作ごとに交点リストを前述した更新規則を用いて並べ替え、最終的にリストの先頭となった交点を用いて画像を生成する。

この手法では、彫刻素材の状態から彫刻履歴に従い逐次的に画像を生成するので、画像生成の計算コストはやはり最悪の場合 $O(n^2)$ となる（全ての交点リストの長さが n に比例した場合）。ただし、前節で示したように実際には交点リストの長さは n に比べ非常に小さいため、計算コストはほぼ $O(n)$ となることが期待される。よって光線追跡法に比べ画像生成が高速であるので、本システムでは視点変更の際にこの手法を用いている。ただし、この手法においても複雑な彫刻素材を使った場合には、そのS式を評価する必要が生じるため画像生成時間は増大する。

図2-12に、1つの楕円体を彫刻素材として、これに切削や付加の彫刻操作を行ったとき、2つの手法による画像生成に要した時間を示す。なお、本実験において、画像サイズは 256×256 pixels であり、使用した計算機は、シリコングラフィクス社の Indigo2 (R10000 195MHz) である。

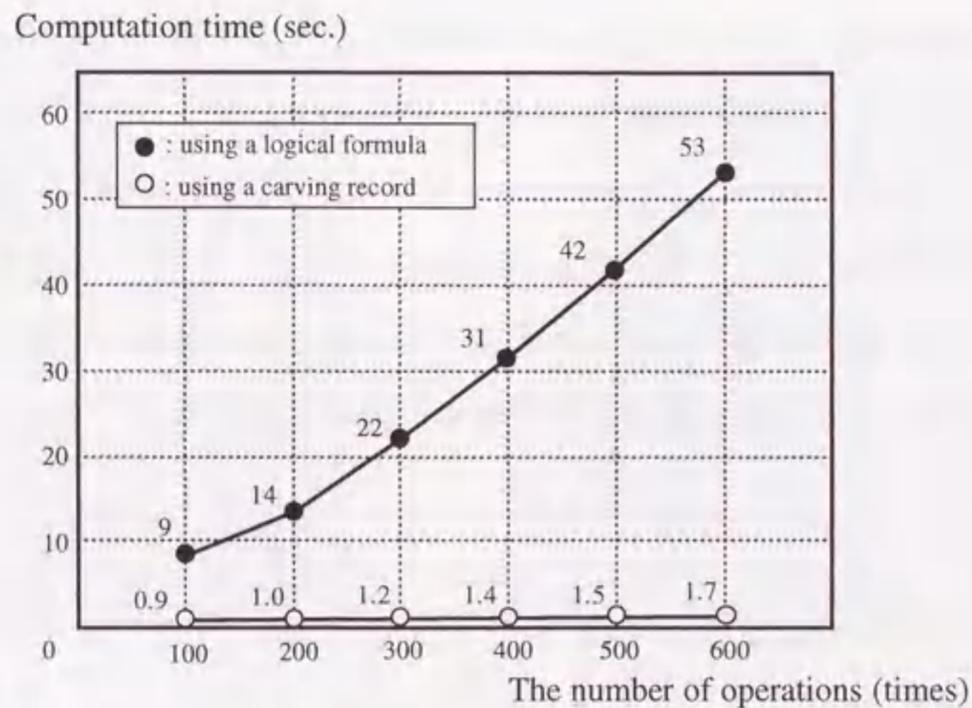


図2-12 画像生成に要する時間（画素数 256×256 の場合）。

Fig.2-12 The computation time needed to generate a figure.

2.5.2 彫刻作成実験

図2-13に本章の手法に基づく仮想彫刻システムで作成した彫刻作品の作成例を示す。

(a)は最初に用意した彫刻素材である。プリミティブとして、2個の平面、および楕円体と楕円柱の2個の二次曲面を用いている。ここで、本システムでは、彫刻素材に木目のソリッドテクスチャ ([岡田 87]) を施すことができ、その状態での彫刻も可能である。

(b)~(d)は彫刻作品の作成過程である。実際の彫刻と同様に、初めにおおまかな切削を行い、次に細かな部分の切削を行う。本作品では、楕円体のみでなく、直方体の仮想彫刻刀も用いているが、このとき、視点位置によっては切削状況がよくわからない場合がある。そのため、彫刻物体表示の際に輪郭を強調した描画の有無を選択でき、図2-13では実際に輪郭強調を行っている。これは各視線ごとに交差する彫刻物体表面の視点からの距離と法線ベクトルを求め、どちらかの値が上隣または左隣の視線における値と大きく異なる場合、その視線に対応する画素を輪郭とみなす。この操作を描画領域全体に対して行う。

(e)~(g)が完成した仮想彫刻作品である。実際に木を削って作成したような雰囲気を持たせることができた。

また、(h)にこの作品に関するデータを示す。3つのプリミティブから構成される直方体彫刻刀を多く使用したため (1006回中、368回)、彫刻回数に比べてプリミティブ数が大きい値になっている。

その他の作成例について、図2-14~図2-17に作品およびデータを示す。これらのデータが示すとおり、彫刻作成に関して、版木のような平板状の素材を用いる作品は作成が容易であるが、より立体的な切削を要求する作品は作成にかなりの時間を要した。



(a) An original solid object.



(b) Numbers of carving : 45 times.



(c) Numbers of carving : 310 times.



(d) Numbers of carving : 850 times.



(e) A generated sculpture 'Kokeshi' (1).



(f) A generated sculpture (2).

図2-13 彫刻「こけし」の作成過程.

Fig. 2-13 Process of generating a sculpture 'Kokeshi' .



(f) A generated sculpture (3).

・S式 (太字: 彫刻素材):

(and

(or

(and

(or **s3 (and s1 s2 s4)**)

(not (or s5 s6 s7 s8 s9 s10 s11 s12 s13 s14 s15 s16 s17 s18 s19 s20 s21 s22
s23 s24 s25 s26 s27 s28 s29 s30 s31 s32 (and s33 s34 s35) (and s36 s37 s38)
(and s39 s40 s41) (and s42 s43 s44) s1610 s1611 s1612))

)

s1613 s1614 s1615 s1616 s1617 (and s1618 s1619 s1620)

)

(not (or (and s1621 s1622 s1623) (and s1624 s1625 s1626) s1737 s1738
s1739 s1740 s1741 s1742 s1743 s1744 s1745 s1746))

).

- ・彫刻素材: 楕円体 (s3), 楕円柱 (s4), 平面 (s1,s2) の組合せ (プリミティブ数:4),
- ・彫刻操作回数: 1006回,
- ・総プリミティブ数: 1746,
- ・製作時間: 5時間.

(g) Data of the sculpture.

図2-13.

Fig. 2-13.



(a) A virtual workpiece.



(b) After rough carving with flat chisel.



(c) Giving finishing touches with gouge.



(d) From another view point of (c).

S式 (太字: 彫刻素材):

(or (and (or (and (or (and (**and** s1 s2 s3) (not (or (and s4 s5 s6) ...
... s1143) (not (or s1144))) s1145 s1146 s1147 s1148 s1149)

- ・ 彫刻素材: 平行二平面3個 (プリミティブ数: 3),
- ・ 彫刻操作回数: 639回,
- ・ 総プリミティブ数: 1149,
- ・ 製作時間: 6時間.

Fig. 2-14 Process of generating a sculpture 'dog' .



- ・彫刻素材：平行二平面3個 (s1,s2 s3),
- ・彫刻操作回数：500回,
- ・製作時間：30分.

S式 (太字：彫刻素材)：

(and (or (and (**and s1 s2 s3**) (not (or s4 s5 s6 s7 s476 s477
))) s478 s479 s480 s496 s497) (not (or s498 s499 s500 s501
s502 s503)))

(a) flower



- ・彫刻素材：平行二平面6個 (s1 ~ s6),
- ・彫刻操作回数：496回,
- ・製作時間：2時間30分.

S式 (太字：彫刻素材)：

(and (**and (and s1 s2 s3**) (not (**and s4 s5 s6**))) (not (or s7 s8 s9
s10 s497 s498 s499 s500 s501 s502)))

(b) cup

図2-15 彫刻の作成例(1).

Fig. 2-15 Examples of sculptures (1).



- ・彫刻素材：平面 10 個 (s1 ~ s10),
- ・彫刻操作回数：553 回,
- ・製作時間：2 時間 30 分.

S 式 (太字：彫刻素材)：

(and (and s1 s2 s3 s4 s5 s6 s7 s8 s9 s10) (not (or s11 s12 s13
s14 s549 s550 s551 s552 s553)))

(a) nipopo



- ・彫刻素材：平面 4 個 (s1 ~ s4),
楕円体 3 個 (s5,s6,s7)
- ・彫刻操作回数：1303 回,
- ・製作時間：10 時間.

S 式 (太字：彫刻素材)：

(and (or_(and_s1_s4_s5_(or_(not_s2)_s3))_s6_s7) (not (or s8 s9
s10 s11 s1306 s1307 s1308 s1309 s1310)))

(b) bear (This image is synthesized by ray tracing.)

図 2-16 彫刻の作成例(2).

Fig. 2-16 Examples of sculptures (2).



(a) vase



(b) fish



(c) gate

図2-17 彫刻の作成例(3) (光線追跡法による).
Fig. 2-17 Examples of sculptures (3) (by ray tracing).

2.6 むすび

本論文では、仮想空間内の素材に対して彫刻を行うような感覚で切削・付加操作を対話的に反復実行して任意形状物体を生成する一方法を検討し、ワークステーション上に実装して動作を検証した。本システムの特徴は次のようなものである。

- (1) 実際に木を削るような操作感覚。
- (2) 楕円体および直方体の彫刻刀を用いた曲面多面体の CSG 表現によるモデリング。
- (3) 交点リストによる高速な表面再描画。
- (4) 彫刻履歴再現による彫刻作品の画像生成。
- (5) 物体形状の CSG 表現の自動生成。
- (6) 作品の実際に木を彫刻したような雰囲気。

今後の課題としては、まず操作環境の充実が挙げられる。彫刻刀の正確な方向や位置は実際に彫刻操作を行って物体の形状を変化させなければわからないので、複雑な形状を作成するには、かなり時間と労力を要する。そのため、これらの情報を事前にユーザに知らせる方法を検討する必要がある。また、視点変更に必要な時間の低減についても検討する必要がある。例えば、彫刻作業中に解像度を可変にすることで大まかな形状における視点変更を高速に行うことなどが考えられる。

第3章 仮想彫刻に基づく版画画像合成

3.1 まえがき

コンピュータ・グラフィクスにおいて、フォトリアルな画像生成に関する研究は従来より盛んに行われてきており、その進歩は目覚ましい。特に映画等において実写と見分けられないほどリアルなCG映像が用いられている。その一方で、現実の日常世界ではイラストや芸術作品のような写真以外の表現も多く用いられており、こうしたフォトリアルでない表現をコンピュータグラフィクスによって再現すること(non photorealistic rendering)の必要性が唱えられ、また、CG研究者の関心を集め始めている([石原 95], [大野 95])。

フォトリアルでない画像生成に関する研究はいくつかの報告があるが、そのアプローチ方法は大きく分けて3種類が挙げられる。第一の手法は、筆跡等のシミュレーションによる対話的な画像生成手法であり、毛筆([松下 94])、絵の具筆([Green 85])、色鉛筆([高木 97])、インクペン([Salisbury 94])などの描画ツールの報告がある。第二の手法は、写真等の画像を画像処理などにより手書き風の画像に変換する手法であり、油絵風([斎藤 95], [斎藤 97], [Haeberli 90])、ペン画風([Salisbury 96])などの研究が報告されている。第三の手法は三次元形状モデルのレンダリングを手書き風に行う手法であり、水墨画風([張 95])、油絵風([Meier 96])、ペン画風([Winkenbach 94], [Winkenbach 96])などの研究例がある。また、ここまで挙げた研究例は主に現実世界での様々な描画手法をCGで実現することを目的とするが、その他に画像のダイナミックレンジを圧縮することを目的とした絵画の表現をまねた輝度変換手法([田中 96])なども報告されている。

ところで、本論文では仮想空間での「形」の生成とイメージーションの可視化の実験の一例として仮想彫刻システムについて前章で述べた([水野 94-1], [水野 95], [水野

97-1], [Mizuno 95]). これは三次元仮想空間内の彫刻素材に対して切削・付加の操作を実際に彫刻するような感覚で行うことで自由な形状を作成するものである。そして作成した物体の表面が、実際に彫刻刀の丸刀で削ったような形状を持つという特徴がある。

本章ではフォトリアルでない表現の一つとして木版画を取り上げ、2章で述べた仮想彫刻システムを応用し、三次元仮想空間内に作成された版木に基づき、版画画像を合成する方法について述べる ([水野 96-1], [水野 96-2], [水野 97-2])。これは、平板を彫刻刀で削って版木を作成し、墨を塗った版木の上に紙を置いた後、これをばれんでこすって版画を刷る、という現実世界で木版画を作成する過程を仮想空間内で再現することにより、対話的に版画画像を合成するものである。鏽、汚れを対象としたMillerの報告 ([Miller 94]) において木版画への言及があるが、極めて簡単にその可能性が述べられているに過ぎず、版木や版画の対話的な作成や刷り上がりむら等については実現していない。それに対して本手法では、実際の版画作成におけるばれんの操作を仮想空間内で実現し、紙と版木との位置関係や木目等を考慮に入れた。これらのことにより、生成された画像には版画独特の刷り上がりむらが生じ、実際の木版画のような仕上がりとなることが確認された。

3.2 版画画像合成の概要

3.2.1 基本的原理

本手法では、仮想版画は実際の木版画と同様に、三次元仮想空間内に定義された「版木」、「紙」、「ばれん」を用いて作成する。

版画の各画素の黒色濃度値は「版木」と「紙」との局所的な距離によって決定し、その距離が小さくなるほど濃度値が大きくなるようにする。これにより、「版木」の切削された部分は切削されていない部分に比べ「紙」との距離が大きいため、黒色濃度値は小さくなる。

「ばれん」は「版木」と「紙」との距離を局所的に変化させるのに用いる。これによ

り実際の木版画に見られる、ばれん操作による版画刷り上がりむらを再現することが可能である。

3.2.2 仮想版木

版画画像生成のための仮想版木は、仮想彫刻システムを用いて作成する。これは2章で述べたとおり仮想空間内に彫刻素材を用意し、これを仮想彫刻刀で切削または付加することにより、自由な形状を作成していくシステムである。ここで仮想彫刻刀のひとつとして楕円体を用意されており、その切削形状が彫刻刀の丸刀による切削形状と似た印象を与える。そのため、このシステムで作成した仮想版木によって生成される版画画像も実際の木版画に似た雰囲気を持つことが期待できる。

仮想彫刻システムにおける版木作成はマウスの操作によって行う。画面に表示された仮想版木の削りたい部分にマウスカーソルを移動し、マウスをプレス・アンド・ドラッグすることで、その部分が楕円体領域によって削り取られる。この操作は彫刻刀で木を削る操作に類似しており、実際に版木を作成する感覚で仮想版木を作成することが可能である。また、マウスの軌跡に沿った自由な曲線で削ることも可能である。さらに、切削するのみでなく、楕円体を付加することによって版木を盛り上げることもできる。

今回の仮想版木の作成においては、平板の切削面を仮想空間の x - y 平面に平行に定義し、その表面は $z=0$ 、内部は $z<0$ とする。版木表面の z 座標値 $b(x, y)$ は、未切削の状態では $b(x, y)=0$ 、その後の操作に応じて、切削では $b(x, y)$ の値は z 軸の負の方向に変化し、付加では正の方向に変化する。なお、仮想版木の表面の様子を図3-1に示す。

3.2.3 仮想紙

仮想紙は、2次元格子で構成されるデジタル画像で表現される。このとき (i, j) 番目の格子点の仮想空間における x, y 座標値は

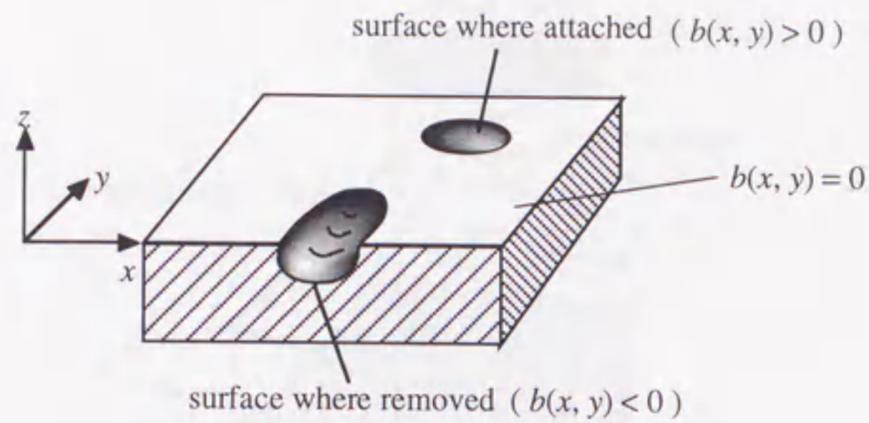


図 3-1 仮想版木表面の様子.

Fig.3-1 Surface of a virtual printing block.

$$\begin{cases} x = si \\ y = sj \end{cases}$$

を満たす. ここで, s は格子間隔である. 初期状態では仮想紙は x - y 平面に平行に置かれるが, 各格子点は z 方向にのみ移動し, これにより仮想紙の変形を表す. ただし, 仮想紙は仮想版木にめり込まないため, 各格子点 (i, j) の z 座標値 $p(i, j)$ は,

$$p(i, j) \geq b(x, y)$$

を満たす. このとき, 仮想版木と仮想紙との格子点 (i, j) における距離 $d(i, j)$ を,

$$d(i, j) = p(i, j) - b(x, y)$$

と定義する. 図 3-2 に仮想紙と仮想版木の様子を示す.

3.2.4 仮想ばれん

仮想紙を仮想版木に局所的に接近させることは, 仮想ばれんの操作によって行う.

仮想ばれんの形状は円柱とした. 操作するときは仮想空間内で x - y 平面に平行に置かれる. このとき, 仮想ばれんの位置する高さは, 仮想ばれん領域内の仮想紙格子点

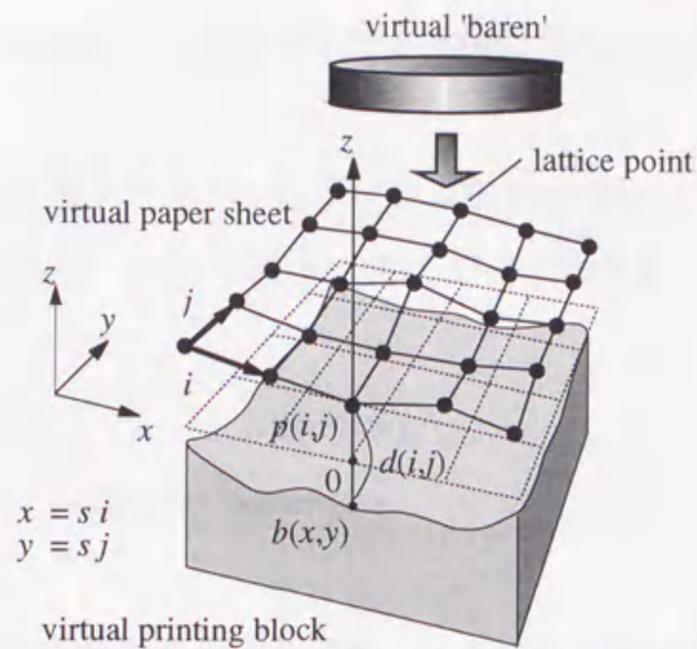


図3-2 仮想紙と仮想版木.

Fig.3-2 A virtual paper sheet and a virtual printing block.

の z 座標の平均値 p_a から決まる. このとき, 仮想ばれんの底面より z 座標値が大きい仮想紙格子点は, ばれんに押されたともみなし, その仮想ばれんの領域内に存在するすべての仮想紙格子点 $p(i,j)$ について,

$$p(i,j) = p_a - \Delta z, \quad \Delta z > 0$$

ただし, $p(i,j) < b(x,y)$ となった場合には,

$$p(i,j) = b(x,y)$$

と定める. Δz は一度にばれんが紙を押す変位量を定めるパラメータである. この操作を繰り返し行うことで, ばれんに押された格子点は少しずつ仮想版木に接近していく. 仮想ばれんによる仮想紙格子点の移動の様子を図3-3に示す.

仮想ばれんの操作はマウスによって行う. ただし, 今のところ仮想ばれんは実際には表示されず, マウスカーソルがその中心を表わす.

3.2.5 版画作成

まず, 仮想版木と仮想紙が表示される. そして, 仮想紙上でマウスをプレス・アン

ド・ドラッグ、すなわちボタンを押下したまま移動させることで、ばれんで紙をこする操作を再現する。

仮想ばれんの操作が行われると、格子点が移動した部分について、随時、黒色濃度値 $f(i,j)$ の計算が行われる。 $f(i,j)$ は以下の式によって求める。

$$f(i,j) = \begin{cases} 0 & : \text{if } d(i,j) > t_d \\ a(t_d - d(i,j)) & : \text{otherwise} \end{cases}$$

ここで、 t_d 、 a は紙が着色され始める距離、および最大黒色濃度を定めるパラメータである。上記の式により、実際の版画と同じく、仮想版木の凸部や何度もばれんでこすられた部分は他に比べてより黒くなる。なお、このように求めた $f(i,j)$ をもとに、版画画像が仮想紙に浮き出てくる。よって、対話的操作による版画画像生成ができる。図3-4に仮想版画作成の様子を示す。

3.3 リアルな版画作成のための手法

3.2節で説明した手法による仮想紙格子点の移動だけでも版画画像を生成することは可能であるが、実際の版画と比べると不自然な部分がある。本節では、版木に急激な起伏がある部分の処理について2つの手法を導入し、また刷り上がりのむらについて検討を行う。

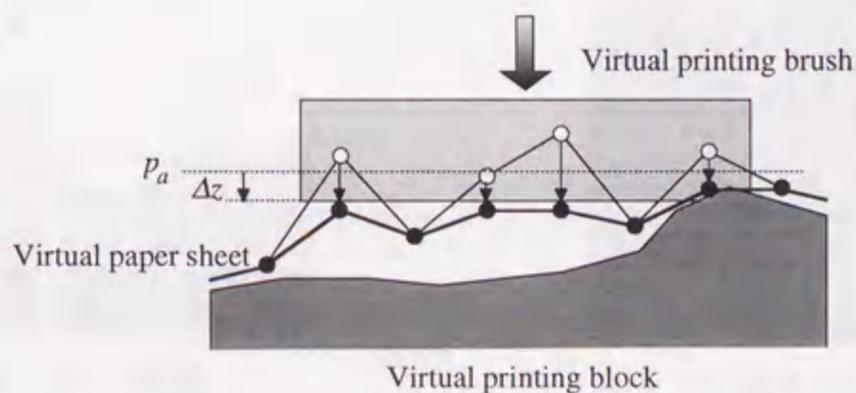


図3-3 仮想ばれんの操作による仮想紙格子点の移動。

Fig.3-3 Movement of lattice points by operating a virtual printing brush.

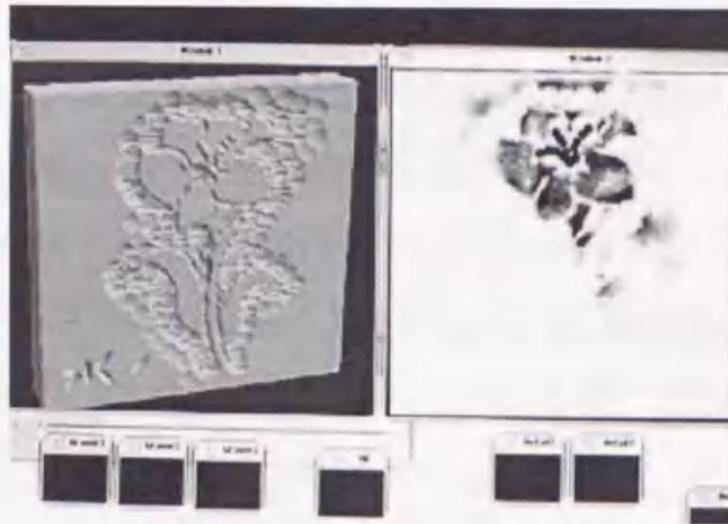


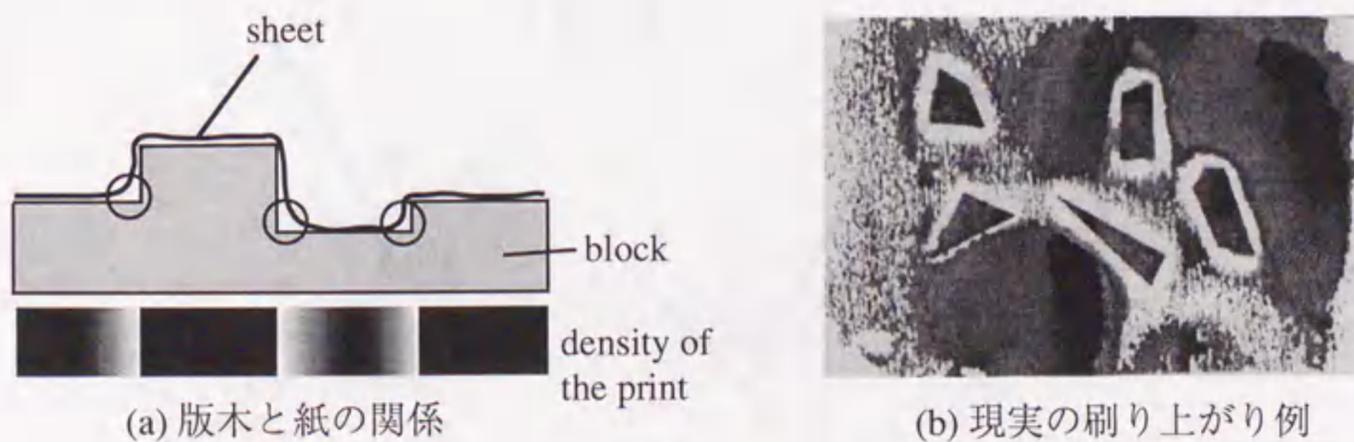
図 3-4 仮想版画作成の様子.

Fig.3-4 Example showing the process of generating a virtual printed image.

3.3.1 仮想紙の凹凸の補正

実際の版画では、版木に段差がある部分などで、紙と版木の距離が大きくなるため、黒色濃度値が低くなったり、濃度値が0になったりする(図3-5)。この現象の再現は、現実の版画らしい画像の生成のためには重要である。これを実現する手法の1つとして、仮想紙の曲率にしきい値を設けることが考えられる。そのため、仮想ばれんの操作によって仮想紙格子点を移動させるとき、仮想紙が大きい曲率を持つ場合には、それを是正する方向に格子点の位置の補正を行う。

補正は、仮想ばれんによって移動させられた注目格子点と、その4近傍の隣接格子点についての位置関係によって行う。まず、x方向について、注目格子点と2つの隣接



(a) 版木と紙の関係

(b) 現実の刷り上がり例

図 3-5 実際の版画の一部.

Fig.3-5 Part of a real woodcut print.

格子点を結んで作られる2つの線分ののなす角度 ($\theta_x: 0 < \theta_x \leq \pi$) を求める. そしてしきい値 θ_t に関して, $\theta_x < \theta_t$ となった場合, 格子点のz座標に関する位置の補正を行う. ただし版木を下方に見て, 3つの格子点が凹形状をなす場合 (Case 1) には, 注目格子点を正の方向に移動し, 凸形状をなす場合 (Case 2) には, 2つの隣接格子点で注目格子点よりz座標の小さいものは正の方向に移動する. 移動量および補正の様子を図3-6に示す. 同様の補正をy方向についても行う. このような手順により, 仮想紙の局所的曲げ角度に制限を与えている.

ところで, 仮想紙格子点の補正は, 対話的操作の実現のため, 仮想ばれんの範囲内で1度だけの走査によって行う. そのため, 前述した手法で格子点の位置の補正を行った後でも, 元の仮想紙角度が極めて小さい場合 (図3-7(i)) や他の格子点の補正の影響 (図3-7(ii)) により, 仮想紙上でしきい値 θ_t を下回る角度を持つ部分が存在する

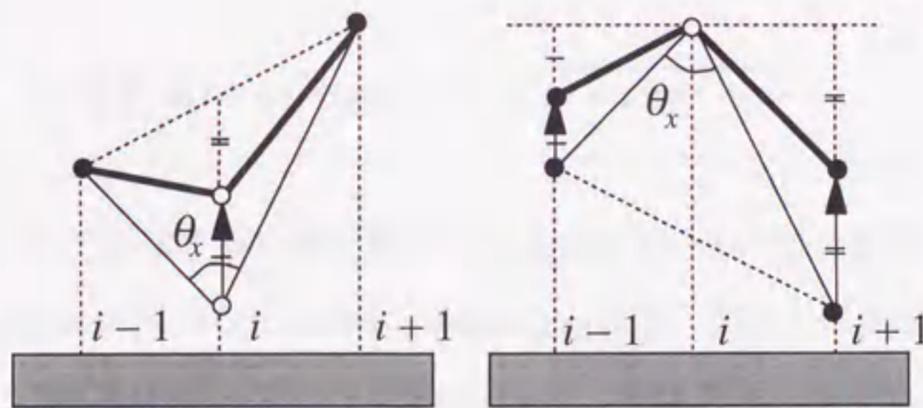


図3-6 格子点の補正.
Fig.3-6 Correction of the lattice point.

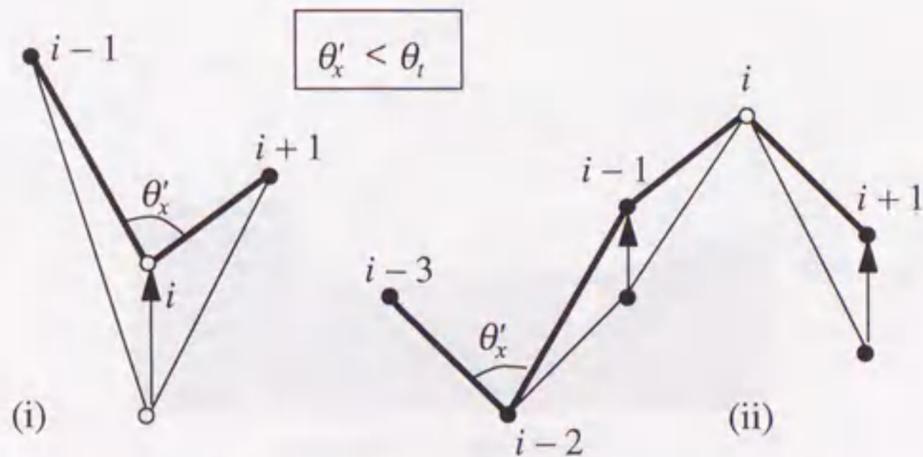


図3-7 仮想紙角度がしきい値を下回る例.
Fig.3-7 Examples of the cases that θ'_x remains to be less than θ_t .

場合がある。しかし、版画画像を生成するという目的を考えると、多少しきい値を超える曲率を持つ部分が存在することは、大きな問題にはならないと思われる。

3.3.2 仮想紙到達限界値の設定

図3-5の現象を実現するもう1つの手法として、仮想版木上に半径 r の球を転がしたと仮定し、その球の外周の軌跡のうち、仮想版木側にあるものを仮想紙格子点が到達できる限界値 $p_{lim}(i, j)$ とすることを検討した(図3-8)。これは、球に基づく凸包であり、これにより $p_{lim}(i, j)$ は、以下のように求める。

$$p_{lim}(i, j) = \min_{i_1, j_1} \{ m_z(k(i + i_1), k(j + j_1)) - \sqrt{r^2 - k^2(i_1^2 + j_1^2)} \}$$

ただし、

$$m_z(i, j) = \max_{i_1, j_1} \{ b(k(i + i_1), k(j + j_1)) + \sqrt{r^2 - k^2(i_1^2 + j_1^2)} \}$$

このように三次元物体表面に球を転がしたと仮定し、その到達領域を用いる手法は従来から画像処理等に用いられている([Sternberg 86])。また文献[Miller 94]では、CGでの細かい凹凸のある物体の汚れの表現において、物体表面と到達領域が接しない部分にのみ汚れを付着させることでリアリティを向上させており、更にこの考えをそのまま利用した版画画像の作成例も示している。本研究では、より実際の版画に近い画像を生成するため、この手法により、仮想版画の黒色濃度値を決定する要素の一つで

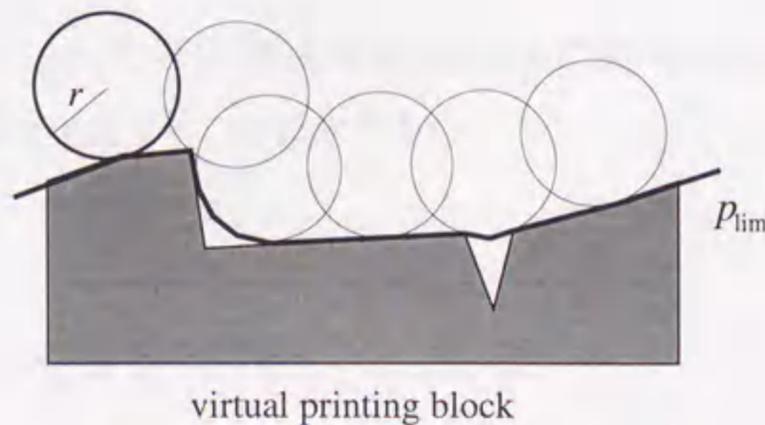


図3-8 仮想紙到達限界の考え方。

Fig.3-8 Basic idea of limitation in the amount of shift of a paper sheet.

ある仮想紙の移動を制限している。つまり、仮想ばれんで仮想紙が押された場合、各仮想紙格子点は $p(i, j) > p_{lim}(i, j)$ である限り仮想版木へ接近していき、その版木と紙の距離を基に画像を生成する。

この手法によっても、段差がある部分ではそうでない部分に比べて限界値が仮想版木の z 座標値に比べて大きくなり、ばれん操作を繰り返し行っても黒色濃度値が最大値になることはない。球の半径によって限界値は変化し、半径が大きくなるほど、段差における限界値と仮想版木の z 座標値との差は大きくなる。

また、限界値に基づいて各仮想紙格子点を版木方向に移動すれば、ばれん操作をすることなく版画画像を得ることができる。これを式で表すと、

$$p(i, j) = w p_{lim}(i, j)$$

のようになる。これは、紙がばれんによって同じように押された場合でも、版木の高さによって紙の押される圧力は異なることに基づく。実際、 w を 1 より小さい正值（ただし、 $p_{lim}(i, j) > 0$ 、であるなら $w = 1$ ）にすれば、かなり良好な版画画像が得られる場合がある。ただし、この手法では、ばれん操作による刷り上がりのむらは再現できない。

ばれん操作による刷り上がりの結果において、前節の手法（手法1）と本節の手法（手法2）は、見た目の雰囲気はそれほど変わらないことが多い。ただし、手法1は非常に大きい段差が存在した場合について、広範囲にわたって仮想紙と仮想版木との距離が広がり、やや不自然に感じることもある。またこのとき、ばれんの操作方向によって刷り上がりが大きく変化して、安定した結果が得られない場合がある。それに対して、手法2はある一定の大きさ以上の段差については限界値が変化せず、ばれんの操作方向にも影響されない。ただし、版画画像生成の前に限界値を計算する必要がある、版木作成直後に画像を生成することはできない。

3.3.3 刷り上がりのむらの再現

現実の版画には刷り上がりにむらが存在する。その原因としては、版木表面の微妙

な凹凸やばれんの使い方によるものなどが考えられる。

このうち、版木によるものについては、仮想版木表面にランダムに溝を付けることで実現した。また、材木は木目などで性質の異なる部分に分かれ、刷り上がりもそれぞれで微妙に異なる。そこで、仮想彫刻システムの木目作成機能で仮想版木を2つの部分に分け、それぞれに与える溝の深さの分散や平均を変えた。なお、溝は木目方向に沿って付け、その長さもランダムに与えた。これらにより、刷り上がりにうっすらと写る木目を再現した。

ばれんの操作によるむらは、ユーザの仮想ばれんの操作により再現できる。実際、同じ仮想版木を用いても、ばれんの操作によって、かなり雰囲気の違いが版画画像が生成される。

3.4 画像生成実験

ここまで述べた手法に基づき、版画画像生成の実験を行った。図3-9、図3-10、図3-11に例を示す。

図3-9について、(a)は、仮想彫刻システムを用いてユーザ自身が作成した仮想版木、(b)～(e)はこの仮想版木を用いて生成した版画画像である。(b)は仮想紙の局所的曲率に制限を与える手法で仮想紙の位置補正を行ったもの(手法1)であり、(c)～(e)は仮想版木の球に基づく凸包を仮想紙到達限界としたもの(手法2)である。どちらの手法においても、段差や細い部分について仮想紙がめり込んでいないのがわかる。また、(c)と(d)を比べると、ばれんの操作のやり方によって刷り上がりはかなり異なることがわかる。さらに仮想紙到達限界を基に、ばれん操作をすることなく生成した版画画像(e)は、ばれんによるむらはないものの、独特の刷り上がりとなった。また全体的に、生成された画像は、彫刻刀の切削痕による版画独特の刷り上がりが表現され、かなり木版画の雰囲気を出している。しかし、木目はまだ簡易的なものであり、実際のものとはやや異なる印象を受けた。



(a) A virtual printing block.



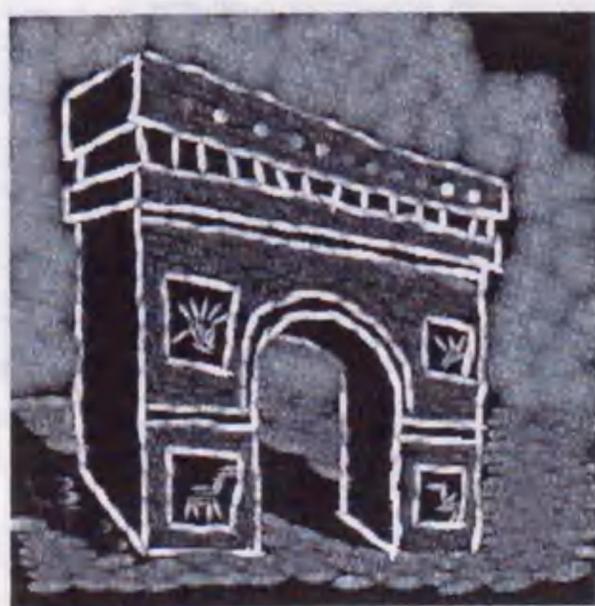
(b) A virtual print (method 1).



(c) A virtual print (method 2(1)).



(d) A virtual print (method 2(2)).



(e) A virtual print not using printing brush.

図3-9 仮想版木と合成した版画画像.

Fig.3-9 A virtual printing block and generated woodcut print images.



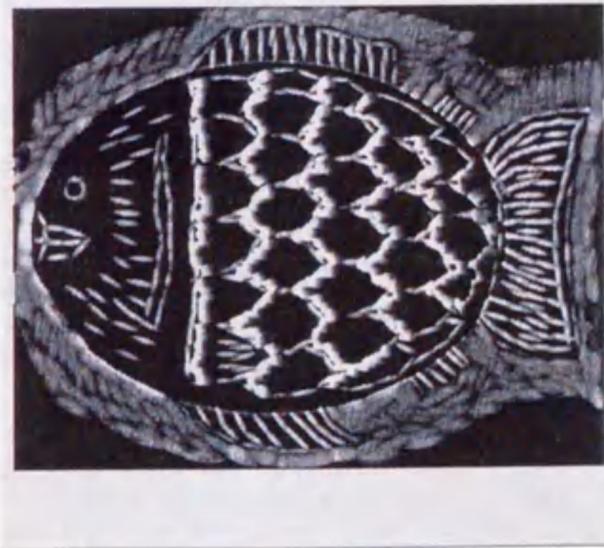
(a) A virtual printing block.



(b) A printed image by the block of (a).



(c) A virtual printing block.



(d) A printed image by the block of (c).

図3-10 仮想版木 (a)、(c) と合成した版画画像 (b)、(d).
Fig.3-10 Virtual printing blocks and generated woodcut print images.

3.5 むすび

仮想彫刻システムの応用の1つとして、仮想彫刻システムで版木を作成し、それを用いて版画画像を作成する手法を提案し、実際にシステムを実現した。これは、仮想空間内に「版木」、「紙」、「ばれん」を定義し、これらを用いて版画画像を生成するものである。仮想彫刻システムで作成した版木は、実際に彫刻刀で削ったような形状を持つ。また、仮想紙曲率に関する制限、仮想紙到達限界値の設定、ばれんの操作、木目等により、仮想版木と仮想紙の距離を変化させ、それらの効果によって版画の刷り上がりむらなど、版画としてのリアリティを高める要因を加えることができた。これらにより、現実には版画を作成する感覚で、現実の木版画に近い画像の表現が可能となった。

なお、木版画における刷り上がり濃度はインクの付着の有無によるものが多いため、連続とはならず、本来は濃く見える部分は「べた塗り」、淡く見える部分は網点状に同一濃度のインクが付着しているために生じると考えられる。この点で本件給における刷り上がり画像は現実のそれとは異なる。これは、仮想紙と仮想版木の距離に応じて網点密度を変化させることにより実現され、より現実の版画に近い仮想版画を合成することができるであろう。

今後の課題としては、版画画像生成については、版画の刷り上がりむら、特に木目等によるむら、仮想紙の曲率、仮想ばれんの底面形状や仮想版木との位置関係、などの諸要因についてより詳しく検討する必要がある。また、多色刷りの実現なども挙げられる。

第4章 仮想版木自動生成による版画画像合成

4.1 まえがき

3章では、フォトリアルでない画像生成方法の1つとして、木版画風画像の合成に関する研究を述べた。これは、2章で提案した仮想彫刻システム([水野 94-1], [水野 95], [水野 97-1], [Mizuno 95])を用いて三次元仮想空間内に作成した版木に基づき、版画画像を合成するシステムである。それはユーザ自身が平板を彫刻刀で削って版木を作成し、墨を塗った版木の上に紙を置いてこれをばれんでこすって版画をする、という木版画を作成する過程をコンピュータ上で再現することにより、対話的に版画画像を得るものであった([水野 96-1], [水野 96-2], [水野 97-2])。しかし、フォトリアルでない画像は、対話的生成以外の場合も考えられる。3章でも示したように、写真等の画像を変換して合成したり([斎藤 95], ([斎藤 97], [Haeberli 90], [Salisbury 96]), CGでのレンダリング時にフォトリアルでない画像を合成する手法がある([張 95], [Meier 96], [Winkenbach 94], [Winkenbach 96])。そして、3章で提案した木版画画像合成手法も、版画画像の合成を目的とするならば必ずしも人が直接に版木を作成する必要はなく、自動的にコンピュータに生成させてもよい。

そこで、本章では版木の作成をユーザが対話的に行うのではなく、自動的に版木を作成するための二手法、すなわち、(1)濃淡画像からの版木自動生成法([水野 96-1], [大河内 97-1], [大河内 97-2]), (2)三次元形状モデルからの版木自動生成法([水野 97-3]), について提案する。第一の手法では与えた濃淡画像の小領域における画像特徴量を求め、その値より仮想空間内に用意した平板の対応する領域での切削方法を自動的に決定する。そして、この操作を濃淡画像全体に対して行うことにより与えた濃淡画像に

対応する仮想版木を作成する。作成した版木を版画画像合成システムにおいて用いることにより、与えた画像を版画風に変化させた画像を得ることができる。

第二の手法として、濃淡画像のかわりに三次元形状モデルを与えることにより、仮想版木を自動的に作成する手法についての検討を行う。ここでは物体をスクリーンに投影したと仮定し、物体の形状(法線)および表面属性に基づいて仮想平板の各点における切削方法を決定する。そして、この操作をスクリーン全体に対して行うことにより仮想版木を作成する。この版木を用いることにより、三次元モデルに対応した版画風レンダリング画像を得ることができる。

以上のように、版画画像合成手法について、従来の仮想版木を対話的に作成する手法に加え、二次元濃淡画像および三次元形状モデルに基づいて版木を自動的に作成する手法を提案し、実際の版画に近い画像が合成できることを確認した。

本章では、4.2節で仮想版画の概要について述べ、4.3節では濃淡画像に基づく版木自動生成法について述べる。さらに4.4節で三次元モデルに基づく版木自動生成法について述べ、4.5節で両手法による版画画像合成の実験を行い、版画作品の例を示す。

4.2 仮想版画合成の概要

仮想版画は3章で述べたように、実際の版画と同様に仮想空間内に定義された「版木」、「紙」、「ばれん」を用いて作成する。

従来の手法では、ユーザ自身が仮想彫刻システムを対話的に操作して平板を切削することにより仮想版木を作成していた。本章の提案手法では、仮想彫刻システムを拡張して、濃淡画像または三次元形状モデルを与えることにより、そこから自動的に平板の切削を行い仮想版木を作成する。作成された仮想版木を用いて版画画像を合成する部分については3章で述べた版画合成システムを用いており、新たな変更はない。仮想版木作成から版画画像合成までの様子は図1-1に示した通りである。以下本章では、同図の特徴抽出部 (feature extraction module) (4.3節)、及び三次元形状解釈部 (3-D interpretation module) (4.4節)の詳細について述べる。

4.3 濃淡画像からの版木自動生成

4.3.1 基本的原理

本手法は、写真などの濃淡画像を入力して、その画像の特徴量から用いる彫刻刀の刃先の大きさや切削方向などを決定し、仮想空間内の平板を自動的に切削することにより仮想版木を作成する。作成された仮想版木を用いることで、与えた濃淡画像を木版画風に変換した画像が得られる。

与えた濃淡画像において適当な画素間隔 m_k ごとに切削を行うための注目画素 (I, J) を定め、その周囲の $n_k \times n_k$ 画素の正方形小領域における画像特徴量を求める。ここで、 $k = \{0, 1\}$ であり、それぞれ後述する輪郭部および濃淡部を表す。また、平板は仮想空間内の X - Y 平面に平行に置かれている。そのため、各注目画素は平板上の1点と対応している (図4-1)。

求めた画像特徴量によって注目画素に対応する平板上の点における切削の有無、使用する彫刻刀の種類、切削方向、切削の深さなどを決定する。これらの操作を濃淡画像全域において行うことにより仮想版木が作成される。以下に述べるように、注目画素とその周囲の小領域を用いて輪郭部と濃淡部を選択し、それぞれに対応して切削法の中から詳細を定め、切削を進める。

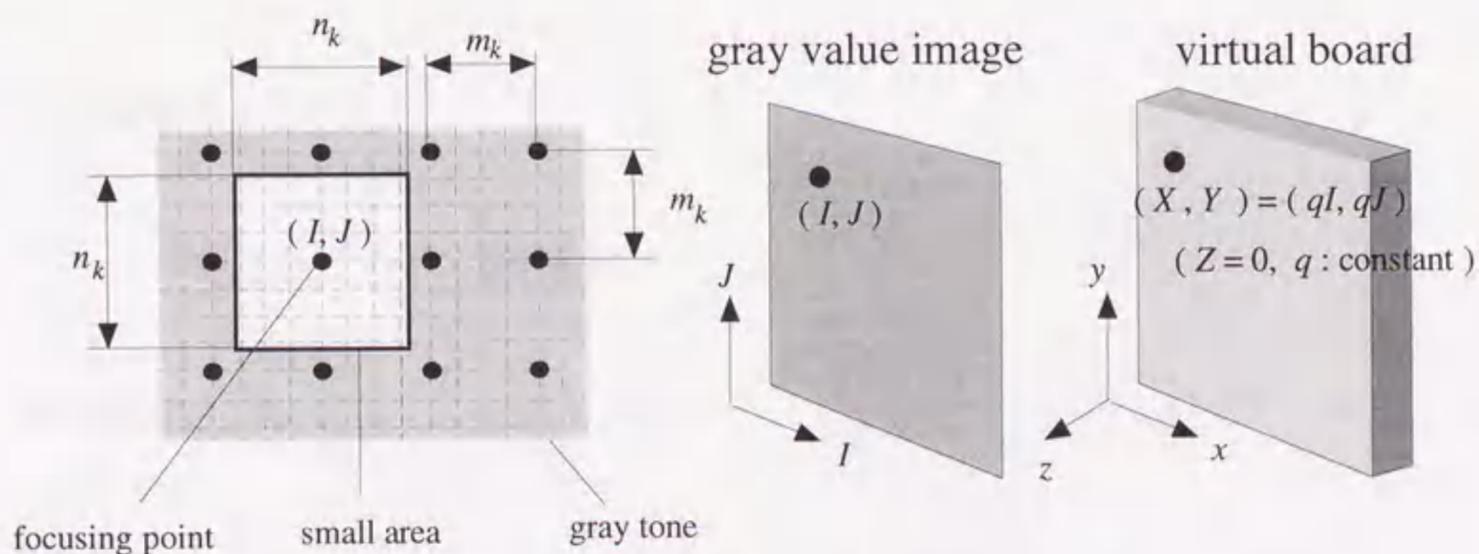


図4-1 濃淡画像の小領域。

Fig.4-1 Small area of the gray value image.

4.3.2 画像特徴量

画像特徴量は注目画素の周囲の正方形小領域に対して求める。求める特徴量は、黒色濃度値の平均、分散、勾配ベクトルである。ここで、小領域の各画素の黒色濃度値を $f_{ak}(i, j)$ ($0 \leq i, j \leq n_k - 1$, $0 \leq f_{ak}(i, j) \leq 1$) とする。このとき、濃度平均値 μ_k 、濃度値分散 σ_k^2 は、それぞれ、

$$\mu_k = \frac{1}{n_k^2} \sum_{i,j} f_{ak}(i, j)$$

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{n_k^2} \sum_{i,j} \{ f_{ak}(i, j) - \mu_k \}^2$$

と定義される。また、濃度勾配ベクトル $\mathbf{g}_k(g_{xk}, g_{yk})$ は、

$$g_{xk} = \frac{1}{N} \sum_{i,j} \{ f_{ak}(i, j) (i - \frac{n_k - 1}{2}) \}$$

$$g_{yk} = \frac{1}{N} \sum_{i,j} \{ f_{ak}(i, j) (j - \frac{n_k - 1}{2}) \}$$

$$N = \begin{cases} \frac{1}{8} n_k^3 & (n_k: \text{even}) \\ \frac{1}{8} (n_k^3 - n_k) & (n_k: \text{odd}) \end{cases}$$

と定義する。このとき、

$$-1 \leq g_{xk}, g_{yk} \leq 1, \quad 0 \leq |\mathbf{g}_k| \leq 1$$

をみたす。

4.3.3 輪郭部の切削

本手法では、左上から右下に向かって与えられた濃淡画像を2回走査する。最初の走査で、与えた濃淡画像から輪郭部を抽出して切削を行う。輪郭部は濃淡画像に対して $n_0 \times n_0$ 画素の正方形小領域を m_0 画素間隔で定めたとき、各小領域における濃度勾配ベクトルの大きさが、しきい値 t_{g0} によって、

$$|g_0| \geq t_{g0}$$

を満たす小領域と定義する。

抽出された輪郭部は、その対応する平板上の領域に対して切削が行われる。このときは大きさ固定の輪郭切削用の彫刻刀(楕円体)が用いられるが、この楕円体は小さくて深く切削できる形状である。

切削方向は平板法線を軸とする回転だけを考え、濃度勾配ベクトルに対して直角方向とする。ここで、切削方向とは彫刻刀楕円体の長軸の方向である。また黒色部分を保護するため彫刻刀楕円体の中心は濃度勾配ベクトルの反対方向に少しずらす。つまり、輪郭切削楕円体の中心の x と y 座標を、

$$(o_x, o_y) = \left(X - t \frac{g_{x0}}{|g_0|}, Y - t \frac{g_{y0}}{|g_0|} \right)$$

(t : constant)

のようにとる(図4-2)。なお、輪郭部の切削の場合は彫刻刀楕円体の中心の z 座標は仮想平板表面上に固定されている。

4.3.4 濃淡部の切削の概要

濃淡画像全域について輪郭部の切削が終了した後、2回目の走査を行って濃淡部の切削を行う。これは、基本的には与えられた画像の淡い部分は深く、濃い部分は浅く切削することを目的とする。濃淡部は濃淡画像に対して $n_1 \times n_1$ 画素の正方形小領域を m_1 画素間隔で定めたとき、各小領域における黒色濃度平均があるしきい値 t_μ に関して、

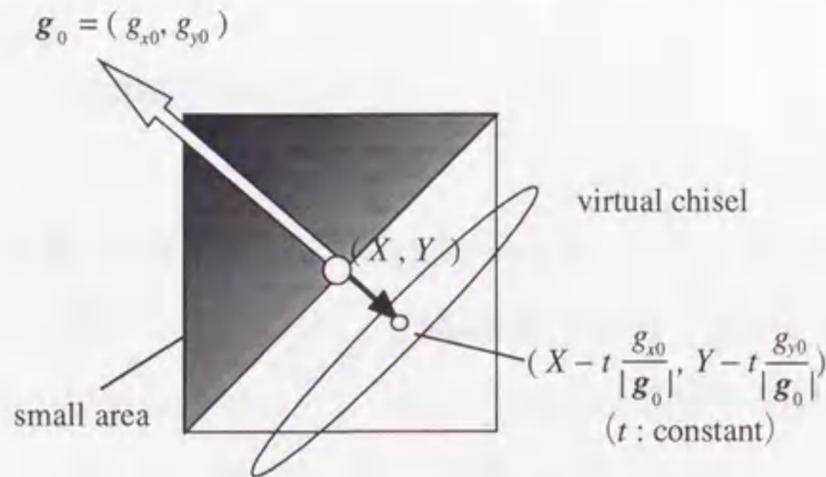


図4-2 輪郭部の切削.

Fig.4-2 Carving in the edge area.

$$\mu_1 \leq t_\mu$$

を満たす小領域である.

与えられた濃淡画像の濃度値の分布で描かれた形状を版画で表すためには、抽出された濃淡部に対して濃度平均値に応じた切削が必要になる。版画による濃淡の表現方法にはいくつか考えられ、作風を定める要素のひとつと考えられる。本章では、切削の深さおよび切削面積によって版画画像の濃淡を表すことにした。

まず、切削の深さによって濃淡を表現する場合、仮想平板表面の z 座標を0、その上部を正として、仮想彫刻刀の中心の z 座標 o_z を

$$o_z = r_z \mu_1$$

とする。ただし、 r_z は定数であり、今回は、使用する彫刻刀楕円体の長軸を平板表面(x - y 平面)に平行に置いたときの楕円体の z 軸半径を用いた。つまり、彫刻刀の形状は一定で位置を濃度により上下させ、与えた濃淡画像の黒色濃度が低い小領域ほど平板の対応する点を深く切削する。

切削面積によって濃淡を表現する場合、切削回数を変化させることで切削面積を変化させる。これは、黒色濃度値にいくつかのしきい値を設けて段階に分割し、濃度値が低い段階ほど切削回数を増やすことにより実現する(図4-3)。なお、切削回数は切削方向に平行な方向に増加させるため、彫刻刀は細長い形状を1種類用いる。

4.3.5 特徴量による切削方向の決定

濃淡部における切削方向は、輪郭部の場合と異なり、必ずしも小領域の濃度値分布により一意に定める必要はない。しかし、切削痕を効果的に残すため、平板の法線軸周りの切削方向は各小領域の勾配ベクトルの方向と一致させる（図4-4）。但し、濃度勾配ベクトルの大きさがしきい値 t_{g1} を下回る場合は、切削方向に統一性を与える。このとき、切削方向を完全にある方向 g_d に一定させるのではなく、一様乱数により方向に揺れ s を与えることで、より効果的な切削痕を表現している。平板の法線周りの切削方向ベクトルを c とすると、 c の方向は以下のように定められる。

$$c \parallel \begin{cases} g_1 & : |g_1| \geq t_{g1} \\ g_d + s & : |g_1| < t_{g1} \end{cases}$$

これに加えて、濃度表現法の別にかかわらず、濃度値分散が非常に小さい場合には、小領域の大きさに比べて大きめの彫刻刀を用いて、濃度変化が少ない領域における大胆な切削を再現している。

濃淡部では平板の法線周りの方向だけでなく、平板表面に対する角度も変化させることが考えられる。この角度は、

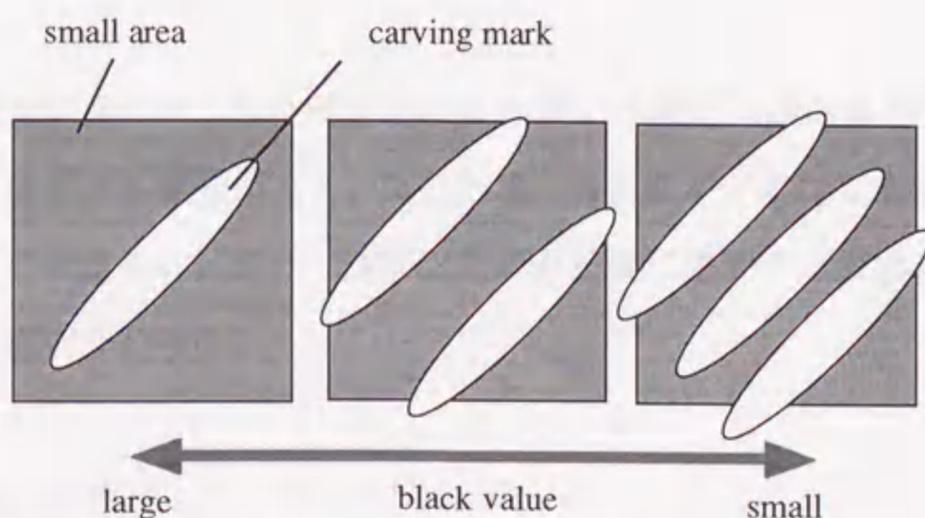


図4-3 切削回数による濃淡表現。

Fig.4-3 Representation of values of gray level with the times of cutting operation.

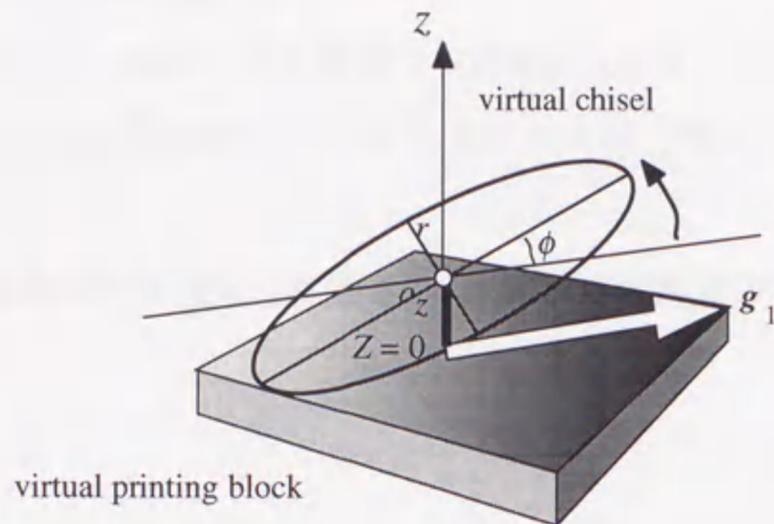


図4-4 仮想彫刻刀の位置決定.

Fig.4-4 Decision of the position of a virtual chisel.

$$\phi = \phi_{max} |g_1|$$

とする (図4-4). 平板表面に対する角度を考慮した切削を行った場合, 濃度変化が滑らかな版画画像が合成される.

なお, 濃淡部の切削方向は版画の作風を左右するものであり, 以上に挙げた決定法はその一例である.

4.3.6 切削実行の判定

濃淡部の切削において, 注目画素間隔 m_1 や用いる彫刻刀楕円体の大きさにより, 切削が密に行われすぎる場合がある. このとき, 切削痕がつぶれて木版画特有の画像を生成することができない. また, 切削回数が不必要に増加する原因にもなる. そこで以下のような規則を設ける.

[各小領域において]

- (1) 確率 P で (2) に移行. それ以外は切削は行わない.
- (2) 輪郭切削または, 隣接する小領域における切削により, 小領域中心がすでに切

削されているかどうかを調べる。

- (3) すでに切削されていればこの小領域での切削は行わないで次の小領域の処理へ移行。そうでなければ切削を行ってから次の小領域へ移行。

この規則により輪郭部の切削痕も保護され、版画特有の彫刻刀の跡を生かした画像が生成できる。

4.4 三次元モデルからの版木自動生成

4.4.1 基本的原理

本節ではもう一つの版木自動生成の手法として、三次元形状モデルを与えることにより用いる彫刻刀の種類や切削方向を決定し、仮想平板を自動的に切削して版木を作成する手法について述べる。作成された版木を用いることで三次元形状モデルの木版画風レンダリングが実現できる。

三次元モデルとしては、物体の形状、光源、視点、スクリーンが与えられ、仮想版木を定義する空間とは別の仮想空間に配置される。スクリーン上の各画素は切削を行う仮想平板上の点と対応する。そして与えた視点から物体に対して光線追跡を行う。スクリーン上の各画素について、視線上にある物体の法線ベクトルや明るさ等から、平板の対応する点における切削方法を決定する。この操作をスクリーン全体に対して行うことにより仮想版木が作成される (図4-5)。

4.4.2 切削パラメータ

版木切削のために与える三次元物体の表面には、切削パラメータが与えられる。これは通常のレンダリングの際に用いる物体表面の色やテクスチャに相当するものである。パラメータとしては、切削角度決定方法、使用する彫刻刀楕円体の種類、濃度表

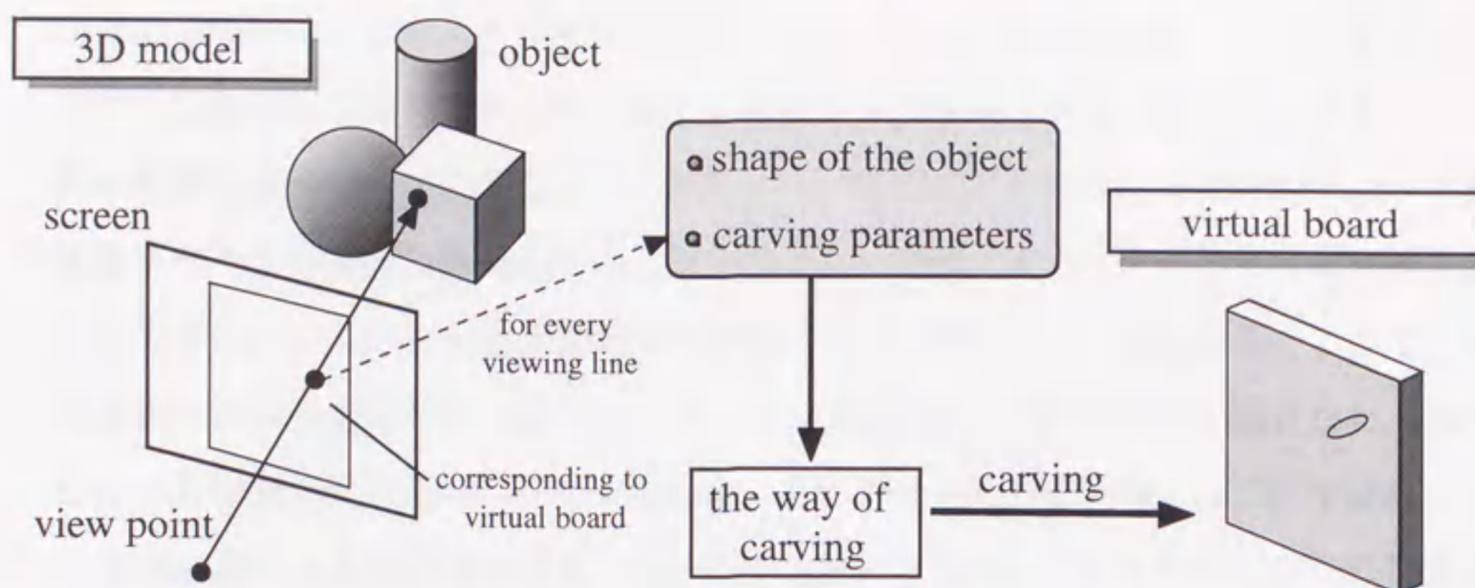


図4-5 三次元モデルからの仮想版木作成.

Fig.4-5 Generation of a virtual printing block from a 3-D model of objects.

現法，切削確率がある．

なお，現システムでは三次元物体を CSG 表現で定義している ([岡田 97], [水野 93], [水野 94-2], [Kim 89])．そして，切削パラメータは物体形状を定義するプリミティブごとに設定している．

4.4.3 版木切削法

版木の切削は視点からスクリーンの各画素への視線毎に行われる．切削方向は，視線上で最も視点に近い三次元物体表面の点 p における法線ベクトル n および鉛直ベクトル v に基づいて決定する．

まず，与えた三次元モデルを定義する仮想空間において， n および v に直交する方向を定めるベクトルのひとつ a ，および n および a に直交する方向を定めるベクトルのひとつ b ，

$$\begin{cases} a = n \times v \\ b = a \times n \end{cases}$$

が求められる。ここで求めた2つのベクトルを、それぞれ視点に基づいてスクリーンに中心投影することにより、ベクトル a' および b' が求められる (図4-6)。スクリーン面は仮想平板表面に対応しており、スクリーン面上に存在する a' , b' を用いれば、平板法線を軸とする切削方向を定めることができる。なお、2つのうちどちらの切削方向を選択するかは、三次元物体表面 p の切削パラメータによって決定する。ここで、平板表面からの角度は常に一定 (0°) とした。また、 n と v が一致する場合など、本手法により切削方向が求められない場合は、あらかじめ定めた方向に a' , b' を定める。

切削に用いる彫刻刀楕円体も、点 p での切削パラメータによってあらかじめ用意された形状の中から選択する。ただし、点 p の視点からの距離により大きさを連続的に変化させる場合もある。すなわち、楕円体の各軸の長さを視点からの距離に反比例させる。これは遠近感がはっきりした版画画像合成を得るためである。

また、モデルより計算される点 p での明るさに基づいて切削の深さまたは面積が決定される。これは、前節で述べた濃淡画像からの版木自動生成法において、黒色濃度に応じて切削法を変化させる手法と同様である。どの濃度表現法を用いるかについては切削パラメータによって定める。

切削の有無判定についても、濃淡画像に基づく手法と同様である。ただし、判定に用いる確率は一定ではなく、各プリミティブに切削パラメータの一つとして与えている。

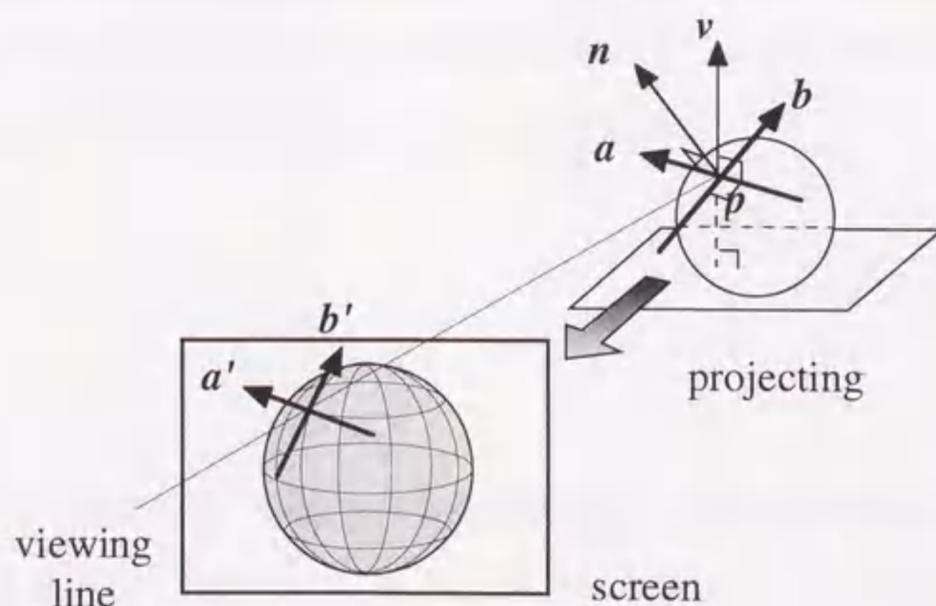


図4-6 三次元モデルからの版木作成手法における切削方向決定法。

Fig.4-6 Decision of direction of cutting in the 3-D model method.

4.5 画像生成実験および考察

4.5.1 実験結果

今回提案した手法に基づき、版画画像を合成する実験を行った。

まず、4.3節の濃淡画像からの版画画像合成について、図4-7に例を示す。(a)は与えた濃淡画像(画像サイズは 512×512)である。そして(b)は自動的に作成された仮想版木である。このとき、切削操作間隔は、 $m_0=4$, $n_0=4$, $m_1=4$, $n_1=8$ とした。また、濃淡部の切削は面積による濃淡表現手法に基づいて行った。(c)はその拡大した様子で版木には彫刻刀による切削痕が適度に残されている。(d)は作成された版木から合成された版画画像である。彫刻刀の切削痕を生かした画像となっており、ばれんによる刷りむらも再現されている。さらに、(e)は同じ濃淡画像を用い、切削の深さによる濃淡表現手法に基づき濃淡部を切削した版木で、(f)はその版木を用いて合成した版画画像である。(d)とはまた違った独特な作風となっている。その他、同手法による版画画像合成例を図4-8、図4-9に示す。

次に、4.4節の三次元モデルからの版画画像合成手法について、図4-10に例を示す。(a)は与えた三次元モデルの光線追跡法による表示である。そして(b)は自動的に作成された仮想版木である。視線本数は 128×128 で、濃淡表現は切削の深さによるものである。(c)は合成された版画画像である。(a)の版画風レンダリングが実現されている。その他同手法による版画画像合成例を図4-10(d), (e), (f)に示す。

4.5.2 考察

濃淡画像に基づく手法では、合成される版画画像は、主に切削の深さ、つまり濃淡によって描画対象を表現した作風となる。用意するものは任意の濃淡画像であるため、入手し易く特別な準備を必要としない。そして、与えられた濃淡画像に対して、注目画素間隔 m_k 、小領域の大きさ n_k 、用意する彫刻刀の大きさ、切削方法などを適当に定



(a) A given gray value image.



(c) A magnified view of (b).



(b) A virtual printing block.



(e) A virtual printing block(2).



(d) A virtual print by the block of (b).



(f) A virtual print by the block of (e).

図4-7 濃淡画像に基づく仮想版木作成と版画画像合成例.

Fig.4-7 Example of virtual printing blocks generated by the gray value method and its prints.



(a) A given gray value image.



(d) A given gray value image.



(b) A virtual printing block from the image of (a).



(e) A virtual printing block from the image of (d).



(c) A virtual print by the block of (b).



(f) A virtual print by the block of (e).

図4-8 濃淡画像に基づく仮想版木作成と版画画像合成例(2).

Fig.4-8 Examples of virtual printing blocks generated by the gray value method and its prints (2).



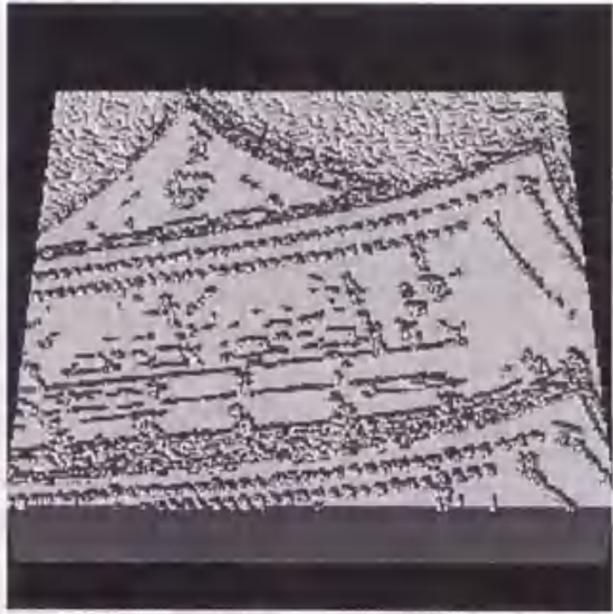
(a) A given gray value image.



(d) A given gray value image.



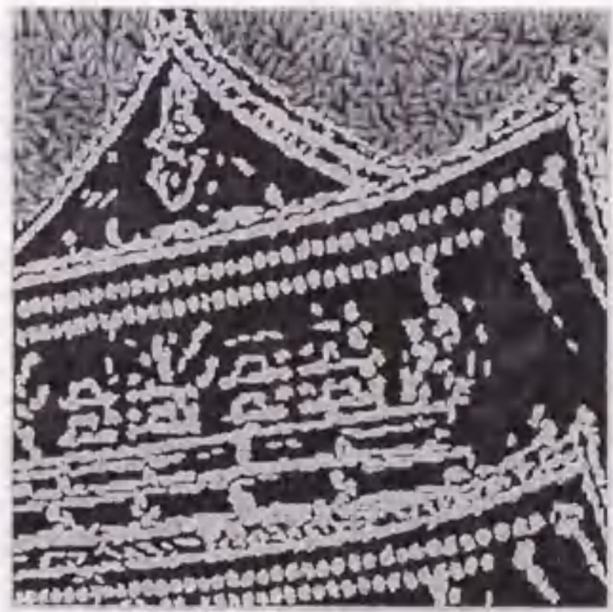
(b) A printing block from the image of (a).



(e) A printing block from the image of (d).



(c) A virtual print by the block of (b).



(f) A virtual print by the block of (e).

図4-9 濃淡画像に基づく仮想版木作成と版画画像合成例 (3).

Fig.4-9 Examples of virtual printing blocks generated by the gray value method and its prints (3).



(a) A rendering image of a 3-D model.



(d) A rendering image of a 3-D model.



(b) A printing block from the model (a).



(e) A printing block from the model (d).



(c) A virtual print by the block of (b).



(f) A virtual print by the block of (e).

図4-10 三次元モデルに基づく仮想版木作成と版画画像合成例.

Fig.4-10 Examples of virtual printing blocks generated by the 3-D model method and its prints.

めることにより、与えられた画像の濃淡分布を版画風に表現した良好な画像が得られる。小領域を小さくするほど濃淡の細かい部分まで切削を行うなど、小領域の定める値や切削方法は作風を左右し、最もよい値を定めることはできない。ただし、隣り合う小領域に対する切削痕がある程度重なるように切削間隔を定めないと、注目画素による格子模様が発生する可能性がある。格子模様の発生は、小領域間隔を小さくして、切削実行の有無にランダムな要素を加えることで防いでいるが、さらに注目画素の位置決定にランダムな要素を加えるなどの改善する必要がある。また、与える画像によっては、前述した値を変化させても良好な版画画像が合成されない。特に濃淡のはっきりしない画像や極端に細かい画像を与えた場合については、改善をする必要がある。

一方、三次元モデルに基づく手法では、合成される版画画像は、濃度に加えて切削方向によって描画対象を表現した作風となる。そして三次元形状データをあらかじめ入手する、もしくは自ら作成するため、濃淡画像に基づく手法に比べて版画作成に多くの準備が必要である。ただし、その結果、濃度だけでなく形状を考慮した版木の切削が行われ、モデルの任意の視点からの版画画像を合成できる。また、大まかな形状モデルにより自動的に切削したあと、ユーザ自身が細かい部分を切削するといった利用もできる。しかし、本手法では今のところ輪郭の抽出を行っておらず、周囲の画素との関係も無視しているため、これらを考慮した切削を実現する必要がある。また、濃淡画像の場合と同様、切削を行うための視線による格子模様が発生する場合があります、改善する必要がある。

なお、使用した計算機は、シリコングラフィクス社のIndigo2 (R10000 195MHz)である。版木作成に要する時間は、濃淡画像に基づく手法では、小領域の大きさや数、そしてそれに伴う切削回数によって異なるが、図4.8(c)の場合、約20秒(切削回数、約8000回)である。また、三次元モデルに基づく手法では、視線の本数やそれに伴う切削回数の他に、CSGで記述されたモデルのプリミティブ数によって異なり、図4.10(c)の場合、モデルの交点計算に約30秒、版木の切削に約15秒(切削回数、約4500回)の時間を要した。

4.5.3 補足実験

ここで、多色刷り版画の作成のための実験を行ったので述べる。

図4-11において、(a)は版画画像を作成するために用いたカラー画像である。画像サイズは512×512である。まず、この画像を市販のフォトタッチソフトウェア (Adobe社 Photoshop) を用いてR, G, Bの3チャンネルに分解し、各チャンネルに基づいて3枚の濃淡画像を作成する。次に、それぞれの濃淡画像を用いて、4.3節の手法に基づいて3枚の仮想版木を自動的に作成し、それらを用いて3枚の版画画像を合成する。そして、合成された3枚の版画画像をR, G, Bの各チャンネルの画像として、再びフォトタッチソフトウェアを用いて1枚のカラー画像を作成した。これを図4-11(b)に示す。

合成された画像(b)は、画像(a)をある種の手描き画像に変換した画像となっている。しかし、実際の多色刷り版画の雰囲気はあまり持たない。その最も主となる原因は、実際の多色刷り版画は複数の版木をもとに作成されるが、それぞれの版木は異なる部分を刷り上げ、お互いに色が混ざりあうことがほとんどない、ということが考えられる。また、用いられる色は版木の枚数で制限される。それに対して、今回用いた手法では、



(a) A given image.



(b) A virtual multi-color print.

図4-12 多色刷り仮想版画の作成例。

Fig.4-12 An example of a virtual multi-color print.

それぞれの版木が同じ部分を刷り上げることが起こり、さらにそれらの色が光の三原色に基づいて合成されるため、非常に多くの色が現れている。

今回行った多色刷り仮想版画の合成の実験は非常に予備的であり、今後は実際の多色刷り版画作成過程をコンピュータ内で実現する手法の検討を行う必要がある。

4.6 むすび

本章では、フォトリアルでない画像合成法の一つとして版画画像合成システムにおいて、(1)濃淡画像入力、および(2)三次元形状モデル入力、に基づいて仮想版画を合成するための仮想版木を自動作成する手法を提案した。

手法(1)では、原画像の特徴量により切削方向、深さ、彫刻刀の種類などを決定する。ここで輪郭の切削、適度な切削間隔、確率的要素を加えることなどにより、作成された仮想版木は彫刻特有の切削痕を有し、この版木を用いることで実際の木版画に近い版画画像が合成されることを確認した。また、切削方法によってはユーザ自身が仮想版木を作成するものとは違った独特の作風の作品も合成されることを確認した。

手法(2)では、与えた物体表面の法線ベクトルや切削パラメータに基づいて切削法を自動的に決定し版木を作成する。そして作成された版木を用いることで三次元モデルの版画風レンダリングを実現した。

今後の課題として、作風に関する詳細の検討、多色刷りへの対応などがある。また、自動生成の際には平刀を用いていないが、合成する版画画像によっては平刀も選択できるような拡張も行いたい。さらに、濃度値に基づく手法に三次元モデルに基づく手法を融合させた版木自動生成手法についても検討したい。

第5章 結論

本論文では、仮想空間での「形」の創造とイメージーションの可視化の一例として、VR技術を応用した仮想空間での彫刻による形状生成の実現、およびその応用として仮想彫刻を用いた版画画像合成手法を提案し、仮想空間での彫刻と版画に基づく形状デザインシステムを構築した。これはVR技術を応用し、現実世界における彫刻と版画による形状生成の手法を仮想空間に再現することにより、従来に比べてCG作成を身近なものとし、その仕上がりも現実世界での人の手作りの雰囲気を持った、彫刻と版画に基づくデザインシステムである。

第2章では、仮想空間での彫刻操作による三次元物体形状生成の手法を提案し、その手法に基づいたシステム実現例を示し、検討を行った。従来より彫刻を想定した形状生成は提案されていたが、その作成形状や操作法は問題が残るものであった。そこで、本論文の手法では、現実世界の彫刻刀の丸刀と平刀として楕円体と直方体を用意し、仮想彫刻刀として用いた。これらの仮想彫刻刀はマウスによって仮想空間の彫刻素材に対して直接的に操作される。このときの対話的操作の実現のため、交点リストおよびリスト並べ替えによる彫刻履歴に対する画像生成手法を提案した。これらの手法により、操作方法と作成形状が従来手法に比べて、より現実世界に近い彫刻体験が可能な仮想彫刻システムを実現した。さらに、本手法で作成した形状はCGモデリングの基本技法のひとつであるCSGで表現されており、光線追跡法を用いた高品質の画像生成にも有効であることが確認された。

第3章では、木版画画像合成法と、それにもとづくシステムの実現法について述べた。近年、フォトリアルでない画像生成手法の必要性が唱えられ、現実世界の様々な描画手法についてコンピュータ上で実現する試みが行われてきた。その中で木版画についてはあまり研究例が報告されていなかった。そこで、本章では2章で述べた仮想彫刻システムを利用してユーザが仮想版木を作成し、さらに仮想空間内に紙とばれんを用意することで木版画を作成する手法を提案し、システムの実現例を示した。本手

法では現実世界で木版画を作成する場合と同様の作成過程をたどり、また紙の振る舞いや刷り上がりのかすれを再現した。これらのことにより、実際の木版画に近い画像を合成可能となった。

第4章では、3章とは一部異なる木版画合成のアプローチとして、版木作成段階をユーザ操作ではなく、システムが自動的に行う手法を提案した。まず、濃淡画像に基づく版木自動生成法について述べた。これは、濃淡画像の小領域ごとに濃度値分布の特徴量を求め、切削方向や深さを決定する。さらに輪郭部と濃淡部に分けた切削、濃度値分布による彫刻刀の使い分けなどを行った。これらのことにより、ユーザ自身が作成したような作風の版木だけでなく独特な作風の版木も作成され、この版木を用いることで、写真などを木版画風に変換することが可能となった。次に三次元形状モデルに基づく版木自動生成法について述べた。これは、与えた物体表面の法線ベクトルや切削パラメータに基づいて切削法を自動的に決定し版木を作成するものである。この手法により、三次元形状の木版画風のCGレンダリングが可能となった。

本論文全体に関する今後の課題としては次のようなものがあげられる。

本論文では現実世界における様々なデザインを仮想空間において体験可能にするシステムを想定している。そのためにはユーザインタフェースが重要な要素となる。本論文ではユーザは通常のディスプレイ装置およびマウスを用いて操作を行っており、かなり良好な操作感覚を得ることができる。しかし、現在VRの分野では様々な新しいインタフェース装置が開発されており、それらの中には本論文のシステムの操作環境をより向上させるものも存在すると思われる。例えば、仮想彫刻システムにおいては、立体視ディスプレイを用いれば形状把握はより直感的に行うことができる。また、データグローブ装置なども形状作成の自由度を向上させる。さらに力覚を授受できる装置などは仮想彫刻における切削だけでなく、木版画画像合成システムでのばれん操作などにおいても、よりユーザの意志に沿ったコントロールが行なえると思われる。よってこれらユーザインタフェースを整えていくことが必要である。

また、本論文における物体作成は、プリンタ等による画像出力以外はすべてコンピュータ内の仮想空間内で完結していた。これを現実世界に持ち込むことができれば、システムの利用可能性を向上させることができる。例えば、仮想彫刻システムで作成した三次元物体を旋盤や光造形システムなどを用いて、実際の彫刻として作成したり、

それを用いて版画を刷り上げることなども実現させていきたい。特に本論文で提案した手法は、ボクセル表現等と異なり CSG で三次元形状を記述しているため、三次元空間内解像度を損なうことなく、具体化することが可能であろう。

最後に、今回は VR 技術を応用した仮想物体形状生成を行ったが、VR 技術は現在発展途上であり、今後より多くの分野での利用が期待される。そのためには、VR 技術の中でも最も重要な要素のひとつである CG の分野の発展は不可欠である。VR のための必要とされる画像をより速く正確に生成する CG 技術の向上と開発が望まれる。

謝辞

本研究は、名古屋大学大学院工学研究科において、非常に多くの方々ご指導・ご協力によって行われました。

本研究を進めるにあたって、指導教官でもあり日頃より熱心にご指導・ご助言を頂いた名古屋大学大学院工学研究科鳥脇純一郎教授に御礼申し上げます。また、研究テーマを与えて頂き、研究方針を示して頂いた名古屋大学情報処理教育センター岡田稔助教授に深く感謝いたします。また、CG班において熱心にご討論頂いた名古屋大学情報文化学部横井茂樹教授、研究その他において相談にのって頂いた名古屋大学大学院工学研究科末永康仁教授に感謝いたします。

また、名古屋大学難処理人工物研究センター齋藤豊文助教授、名古屋大学大学院工学研究科清水昭伸助手、同森健策助手には、研究において多くのご指導を頂き、さらに日常生活においてもお世話になり感謝いたします。名古屋大学情報文化学部安田孝美助教授、中京大学長谷川純一教授、同宮崎慎也助手には、研究室のディスカッション等において研究に関する多くの助言を頂き、深く感謝いたします。

私の研究生生活の場である名古屋大学大学院工学研究科鳥脇研究室の皆様には、日頃から熱心にご討論を頂き、多くの意見を頂き感謝いたします。特に同期である舟橋健司君には、5年間にわたって大学院生活を共に過ごし、研究を進めるにあたり大きな励みとなり、日常生活でも非常にお世話になり感謝します。また、大河内俊雄君には、本論文作成にあたり実験を行って頂き感謝します。

その他、私が研究生生活を過ごすにあたり、日頃お世話になった全ての方々に感謝いたします。

最後に、研究生生活を支えてくれた家族に感謝します。

参考文献

- [石原 95] 石原亘 : SIGGRAPH' 94におけるノンフォトリアリズムの研究の動向, 情報処理学会研究報告, グラフィクスとCAD, 96CG76, pp. 65-71, 1996.
- [石黒 94] 石黒正雄, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎 : コンピュータ・グラフィクスにおける弾性物体の衝突を扱う運動モデルの検討, 電子情報通信学会技術研究報告, PRU93-154, pp. 89-96, 1994.
- [上野 96] 上野淳 : 仮想空間操作における弾性物体の破壊モデルに関する研究, 名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻修士学位論文, 1996.
- [梅村 97] 梅村隆, 岡田稔 : メタボールを用いた会話的モデラのためのパッチの一生成法, 画像電子学会誌, Vol. 26, No. 4, pp. 306-313, 1997.
- [大河内 97-1] 大河内俊雄, 水野慎士, 岡田稔, 鳥脇純一郎 : 仮想版木自動生成による版画画像合成の一手法, 情報処理学会研究報告, グラフィクスとCAD, 97CG86-1, pp. 1-4, 1997.
- [大河内 97-2] 大河内俊雄, 水野慎士, 岡田稔, 鳥脇純一郎 : 版画画像合成のための仮想版木自動生成の一手法, 1997年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, p. 393, 1997.
- [大野 95] 大野義夫 : フォトリアルでないCG画像表現の手法について, 情報処理学会研究報告, グラフィクスとCAD, 95CG76-1, pp. 1-7, 1995.
- [岡田 87] 岡田稔, 横井茂樹, 鳥脇純一郎, 堀健二 : 3次元ランダムフラクタルを利用した不均質材料のテクスチャ表現, 情報処理学会論文誌, Vol. 28, No. 11, pp. 1146-1153, 1987.
- [岡田 97] 岡田稔, KIM, K-E., 横井茂樹, 鳥脇純一郎 : 半空間プリミティブと3値論理代数系に基づく多面体の記述, 情報処理学会論文誌, Vol. 38, No. 8, pp. 1583-1592, 1997.
- [北川 96] 北川英志, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎 : 仮想空間操作を利用した対話

- 型手術シミュレーション, 情報処理学会論文誌, Vol. 37, No. 6, pp. 1088-1098, 1996.
- [久保寺 92] 久保寺玄一郎, 岡田稔, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 半空間プリミティブによる対話的 CSG モデラ, 情報処理学会研究報告, グラフィクスと CAD, 92CG55-2, 1992.
- [斎藤 95] 斎藤豪, 中嶋正之: FFT を用いた写真からの手書き風画像の自動作成, 情報処理学会研究報告, グラフィクスと CAD, 95CG74-3, pp. 11-16, 1995.
- [斎藤 97] 斎藤豪, 中嶋正之: 自然画像からの手描き風画像の生成法とその色計算, 情報処理学会研究報告, グラフィクスと CAD, 97CG86-2, pp. 5-10, 1995.
- [鱸 94] 鱸俊雄, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: グラフィクスワークステーションを用いた仮想都市空間の構築および走行シミュレーション, テレビジョン学会誌, Vol. 48, No. 10, pp. 1318-1325, 1994.
- [高木 97] 高木佐恵子, 藤代一成: 水溶性色えんぴつ画の 3D モデリング - 紙の微細構造を反映した顔料付着操作 -, Visual Computing グラフィクスと CAD 合同シンポジウム' 97, pp. 117-122, 1997.
- [田中 96] 田中敏光, 田中祐治, 大西昇: 絵画をまねた画像強調法, 情報処理学会研究報告, コンピュータビジョンとイメージメディア, 96CVIM102-2, pp. 9-16, 1996.
- [千葉 91] 千葉則茂, 村岡一信: C による CG レイトレーシング, サイエンス社, 1991.
- [張 95] 張青: 樹木の水墨画調レンダリング, 情報処理学会研究報告, グラフィクスと CAD, 95CG76-7, pp. 45-50, 1995.
- [テレビジョン学会 94] テレビジョン学会編: 先端技術への手ほどきシリーズ: 3次元 CG, オーム社, 1994.
- [日本数学会 85] 日本数学会編: 岩波 数学辞典 第3版, 岩波書店, 1985.
- [野口 96] 野口博和, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 仮想ハサミによる切断操作のモデル化と実現, 第12回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp. 22-31, 1996.
- [松下 94] 松下政親, 中村剛士, 世木博久, 伊藤英則: 毛筆文字出力システムにおけるかすれのパターンの多様化, 平成6年度電気関係学会東海支部連合大会論文集, p. 285, 1994.
- [水野 93] 水野慎士, 岡田稔, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 半空間プリミティブと3値論理代数系に基づく曲面多面体の記述, 平成5年度電気関係学会東海支部連合大会講

- 演論文集, p. 374, 1993.
- [水野 94-1] 水野慎士, 岡田稔, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: コンピュータグラフィクスを用いる仮想彫刻によるモデリング, 平成5年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, p. 390, 1994.
- [水野 94-2] 水野慎士, 岡田稔, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 曲面多面体の CSG モデリングに関する一考察, 電子情報通信学会技術研究報告, PRU94-88, pp. 23-30, 1994.
- [水野 95] 水野慎士, 岡田稔, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: CSG を用いた仮想彫刻, 情報処理学会研究報告, グラフィクスと CAD, 95CG73-7, pp. 49-56, 1995.
- [水野 96-1] 水野慎士, 岡田稔, 鳥脇純一郎: 仮想彫刻を用いた版画画像の合成, 情報処理学会研究報告, グラフィクスと CAD, 96CG83-5, pp. 31-36, 1996.
- [水野 96-2] 水野慎士, 岡田稔, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 仮想彫刻からの版画作成, 1996年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, p. 411, 1996.
- [水野 97-1] 水野慎士, 岡田稔, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 仮想彫刻—仮想空間における対話型形状生成の一手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 38, No. 12, pp. 2509-2516, 1997
- [水野 97-2] 水野慎士, 岡田稔, 鳥脇純一郎: 仮想彫刻システムを用いた版画画像の生成, 画像電子学会誌, Vol. 26, No. 4, pp. 325-332, 1997.
- [水野 97-3] 水野慎士, 岡田稔, 鳥脇純一郎: 三次元モデルからの木版画風画像の生成, 1997年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, p. 392, 1997.
- [宮崎 93] 宮崎慎也, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 仮想空間における折り紙の対話型操作の実現, 情報処理学会論文誌, Vol. 34, No. 9, 1993.
- [Aoki 95] Aoki, K., Harayama, M., Komori, T., Kobayashi, T., Mori, Y. and Ojika, T. : Virtual Cormorant Fishing System, *Proc. of Virtual System and MultiMedia 95*, pp. 154-160, 1995.
- [Bajura 92] Bajura, S., Fuchs, H., and Ohbuchi, R. : Merging Virtual Objects with the Real World, *Proc. of SIGGRAPH 92*, pp. 203-210, 1992.
- [Coquillart 90] Coquillart, S. : A Sculpting tool for 3D geometric modeling, *Proc. of SIGGRAPH 90*, pp. 187-196, 1990.
- [Funahashi 95] Funahashi, K., Yasuda, T., Yokoi, S., and Toriwaki, J. : Block Manipulation with Hand in Virtual Space, *Proc. of Virtual System and MultiMedia 95*, pp. 189-194,

1995.

- [Galyean 91] Galyean, T. and Hughes, J. : Sculpting : An Interactive Volumetric Modeling Technique, *Proc. of SIGGRAPH 91*, pp. 267-274, 1991.
- [Green 85] Green, R. : The Drawing Prism: A Versatile Graphic Input Device, *Proc. of SIGGRAPH 85*, pp. 103-110, 1985.
- [Haeberli 90] Haeberli, P.:Paint by Numbers ; Abstract Image Representations, *Proc. of SIGGRAPH 90*, pp. 207-214, 1990.
- [Jeng 96] Jeng, E. K.-Y. and Xiang, Z. : Moving Cursor Plane for Interactive Sculpting, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 15, No. 3, pp.212-222, 1996.
- [Kim 89] Kim, K-E., 岡田稔, 横井茂樹, 鳥脇純一郎 : 半空間集合の CSG 表現形状データに対する光線追跡アルゴリズムの検討, 電子情報通信学会技術研究報告, PRU88-129, pp. 33-40, 1989.
- [Krueger 91] Krueger, M. W. : 人工現実 —インタラクティブメディアの展開— (Artificial Reality 2), トッパン, 1991.
- [Meier 96] Meier, B. J. : Painterly Rendering for Animation, *Proc. of SIGGRAPH 96*, pp. 477-484, 1996.
- [Miller 94] Miller, G. : Efficient Algorithms for Local and Global Accessibility Shading, *Proc. of SIGGRAPH 94*, pp. 319-326, 1994.
- [Mizuno 95] Mizuno, S., Okada, M., Yokoi, S., and Toriwaki, J. : A Virtual Sculpture System, *Proc. of Virtual System and MultiMedia 95*, pp. 308-313, 1995.
- [Naylor 90] Naylor, B. : SCULPT An Interactive Solid Modeling Tool, *Proc. of Graphics Interface '90*, pp. 138-148, 1990.
- [PIXEL 94] PIXEL No. 142 : バーチャル・リアリティの実用化を模索する, 図形情報処理センター, 1994.
- [Roth 82] Roth, S. D. : Ray Casting for Modelling Solids, *Computer Graphics and Image Processing*, Vol.18, pp. 109-144, 1982.
- [Salisbury 94] Salisbury, M. P., Anderson, S. E., Barzel, R. and Salesin, D. H. : Interactive Pen-and-Ink Illustration, *Proc. of SIGGRAPH 94*, pp. 101-108, 1994.
- [Salisbury 96] Salisbury, M., Anderson, C., Lischinski, D. and Salesin, D. H. : Scale-Depen-

- dent Reproduction of Pen-and-Ink Illustration, *Proc. of SIGGRAPH 96*, pp. 461-468, 1996.
- [Surtherland 68] Surtherland, I. E. : A Head Mounted Three Dimensional Display, *Proc. of the fall joint Computer Conference 33*, pp. 757-764, 1968.
- [Sternberg 86] Sternberg, S. R. : Grayscale Morphology, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 35, pp. 333-355, 1986.
- [Wyvill 88] Wyvill, G. and Sharp, P. : Volume and Surface Properties in CSG, *Computer Graphics 1988 (Proc. of CG International '88)*, pp. 257-266, 1988.
- [Winkenbach 94] Winkenbach, G. and Salesin, D. H. : Computer-Generated Pen-and-Ink Illustration, *Proc. of SIGGRAPH 94*, pp. 91-100, 1994.
- [Winkenbach 96] Winkenbach, G. and Salesin, D. H. : Rendering Parametric Surfaces in Pen and Ink, *Proc. of SIGGRAPH 96*, pp. 469-476, 1996.



inches 1 2 3 4 5 6 7 8
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black

Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

