

仮想空間でのハサミによる切断操作のモデルと実現

野口 博和[†] 安田 孝美^{††}
横井 茂樹^{††} 鳥脇 純一郎^{†††}

本論文では、仮想空間中に用意したハサミを用いて同じ空間中に配置された紙を対話的に切断することが可能なシミュレーションシステム、そのための切断操作のモデル、および実現例について述べる。本システムにより、操作者はディスプレイ上に表示される仮想3次元空間を見ながらハサミに「開閉」「移動」「方向転換」の操作を与えることで、実時間応答で紙を切断することができる。上記3操作はハサミ本来の基本的な操作であるので、実世界での感覚で切断操作を行うことができる。切断操作を実現するために、3つの基本モデル、すなわち(1)紙のデータ構造、(2)操作によるハサミの状態遷移、(3)ハサミによる紙の切断および衝突処理、を実現した。また操作にともないリアルタイムに変化する紙の形状を効率良く扱うため、紙のデータ構造は頂点座標と頂点名を要素に持つ単純なリスト構造とした。ハサミは切断可能状態と切断不可能状態のいずれかの状態をとり、それぞれの状態に応じた紙の切断と紙とハサミの衝突判定を行う。紙の切断処理と衝突判定は、ハサミの刃のかみあう点の軌跡と紙の辺を利用して行う。本モデルに基づいて、ハサミによる紙を切るという操作をグラフィックワークステーション上に実現し、モデルの有効性を確認した。

A Model for Cutting Operation with Scissors in 3D Virtual Space and Implementation

HIROKAZU NOGUCHI,[†] TAKAMI YASUDA,^{††} SHIGEKI YOKOI^{††}
and JUN-ICHIRO TORIWAKI^{†††}

This paper describes a simulation system and a model for cutting a piece of paper with a pair of scissors in three dimensional (3D) virtual space. In the system, pieces of paper and a pair of scissors are defined in 3D virtual space and displayed on a graphic screen. An operator can scissor a virtual paper sheet freely and interactively with giving three basic operations, for scissors such as 'open and close', 'move' and 'change direction', to a pair of virtual scissors. In order to realize these operations in computer, we defined three basic models; (1) Data structure for a paper sheet, (2) Scissors states and transitions among them according to the operations, (3) Cutting model and Collisions detection. For the realtime processing, we use a simple list structure for the shape of a paper sheet, which keeps only the vertices of the sheet. The scissors have two kinds of states according to the operations. Updating the state of the paper sheet and the contents of the list corresponding to the interactive operations such as 'Cutting paper', 'Collisions detection' and 'Position correction of scissors' is performed, using a trace of scissors' edges and the edges of a piece of virtual paper. We realize cutting operations with this model, and understand its availability.

1. はじめに

近年、バーチャルリアリティ（以下、VR）を実現するためのハードウェア技術の進歩にともない、仮想3次元空間中における操作に関する研究が活発に行われ

ている。高速なグラフィックスハードウェアは、仮想3次元空間をリアルタイムで可視化することを可能にしている。HMD（ヘッド・マウンテッド・ディスプレイ）など、一般的なディスプレイ装置と比較して、計算機内で作られた仮想3次元仮想空間を体験するのにより優れた出力装置の開発も進み、仮想空間を体験しやすくなってきている。また、3次元位置センサやセンサ付き装身具など、仮想現実感技術のための入力装置が開発され、操作者の動作を容易にデータ化し、利用することも可能である。これらの装置の進歩を背景に、仮想空間との様々なリアルタイムインタラクシヨ

[†] 中部日本放送株式会社
Chubu Nippon Broadcasting Co. Ltd.

^{††} 名古屋大学情報文化学部
School of Informatics & Science, Nagoya University

^{†††} 名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻
Department of Information Engineering, Graduate
School of Engineering, Nagoya University

ンを可能にするための試みがさかんに行われている。

しかしながら、従来の仮想空間とのインタラクションに関する研究の多くは、自由にCG空間を体験するために、操作に対し必要なCGを適切に作り出すことを目的としたものであった^{1),2),6),7)}。一方、仮想空間中に存在する物体の変形操作に関する研究も近年さかんに行われているが、それらの多くは変形操作を及ぼした仮想空間内の物体を正しく変形し、そのデータを作り出すことが目的であり、変形を及ぼす道具について詳しくは考察されていなかった^{3)~5)}。

すなわち、これらの研究は、マウスなどの入力装置により得られた値を直接利用して、マウスカーソルなどを視認しながら仮想空間におけるオブジェクトのデータを更新するシステムが主であった。そのため操作者は、仮想オブジェクトを直接操作しているというよりは、あくまでも計算機を通して操作していると感じる場合が多い。ところで、実世界での物体操作を考えた場合、手による直接操作、あるいは道具を用いた操作が日常的に行われている。実際と同じような操作が仮想空間中で実現されることで、現実感をより強く与えることが可能である。

そこで本研究では、入力データによる道具の移動、その道具によるオブジェクトの操作を実現することにより、体験者に自身が直接操作している感覚を与えることを目的としている。

このような道具による操作が仮想空間内で実現することで、たとえば、シミュレーションシステムなどの現実性や利用価値をいっそう高めることが可能であろう。本論文では特に、ナイフのように形状の変化しない道具ではなく、形状の変化するハサミをとりあげ、それによる紙の切断システムを実現するための基本モデルについて述べる。

実世界におけるハサミによる切断操作は一般的に、まずハサミの刃を開け、刃を紙のあるところまで運び、切断方向を定め、刃を閉じることで切断を行う、という一連の操作で行われると考えられる。本システムで操作者は、ディスプレイ上に表示される仮想3次元空間を見ながらハサミに「開閉」、「移動」、「方向転換」の3操作を与えることで実時間応答で紙を変形することができる。

また、紙のデータ構造を頂点座標と頂点名を要素に持つ単純なリスト構造とし、操作にともなう紙の形状をリアルタイムに変化させることを可能とした。

2. モデルの概要

実世界でのハサミによる切断の過程は、「刃を開く」「切断開始点および方向を定める」「刃を閉る」という一連の動作の反復で行われると考えられる。これらの動作において実際に紙の形状を変化させるのは「刃を閉じる」動作のみであるため、このような切断の過程の特徴を利用してハサミの状態を規定する。

あるハサミの動作は、動作の起こる時点での空間により制限を受け、その空間に対して影響を与える。そのため、ある切断操作は、次の切断操作に影響を与えるため、操作による空間内の変化は、次の操作が起こるまでに終了する必要がある。よって、ハサミによる切断操作を仮想空間内で実現させるためには、その操作の性質上、切断が実時間応答で実現される必要がある。

以下の節では、ハサミによる切断操作を実現するために解決されるべき問題や要求について述べた後、今回提案したハサミによる切断操作モデルの概要について述べる。

2.1 モデルに要求される事柄

「方向を変える」、「移動する」、「開く」、「閉じる」で与えられるハサミの動作を考えると、ハサミが紙を切断できる動作は「閉じる」のみである。よって、この動作を操作者の切断の意志とすることができる。ハサミと紙との関係は、それらが「接触点を持つ」と「接触点がない」に大別できる。操作者によりハサミが閉じられ、ハサミの刃と紙が接点を持つとき、紙が切断される。これらの操作に基づく切断の特徴とインタラクションの実現のために、解決されるべき問題点が数多く生じる。以下に、ハサミによる切断操作のモデルに対する主な要求事項をあげる。

- できる限り短い時間で、紙とハサミの接触の有無、接触の状態を判定する方法。
- 紙の切断に対し、実時間応答に耐えうる時間で紙のデータ変更を行うための、紙のデータ構造とデータ変更処理の実現。
- 切断の順番によらず、正しい切断結果を得ることができる紙のデータ構造の実現。
- 直感的に「切る」という感覚に近い操作により、紙を切断可能なモデルの実現。
- 切断を行っていないとき、ハサミが紙の内部に入り込まないための、衝突処理および位置補正処理の実現。

これらの要求事項を解決するために、本研究ではハサミの操作のモデルと紙の切断状態のデータ構造に対

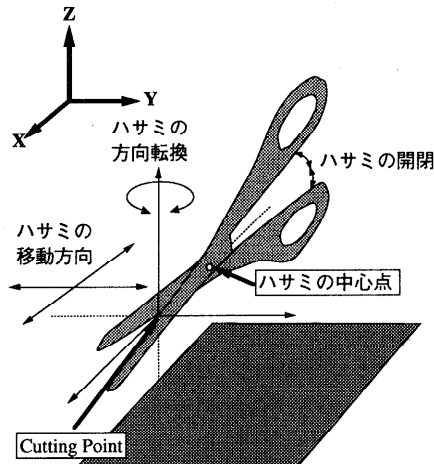


図1 ハサミの動作環境

Fig. 1 Environment of virtual scissors.

して、以下に述べるような工夫を加えた。

2.2 仮想ハサミの動作空間の設定

3次元空間に存在する自由な形状の紙の切断を考えると問題を複雑化し、実現が難しいため、今回は次のように簡略化した動作空間(条件)を設定して実現を行った(図1)。

- (1) 紙はある平面内のみ存在する。
- (2) ハサミは本来、空間内のあらゆる位置に移動できるべきである。しかし、今考えている条件下では、紙がある平面内のみ存在するために、ハサミの刃のかみ合う点(以下Cutting Point)が紙と同一平面内に存在すれば切断が可能となる。したがって、ハサミは紙を含む平面に平行な方向のみ動く。
- (3) Cutting Pointが紙の存在する平面内に存在しないと切断が行えないため、それを満たすような初期値をハサミの位置に与える。
- (4) ハサミの方向転換は、本来方向転換を行う回転方向(方位角方向)、ハサミの刃の先を上下させる方向(仰角方向)、およびハサミの刃の面を回転させる方向(Roll角方向)のすべてにおいて実現されるべきであるが、今回は方位角方向のみの方向転換とする。
- (5) ハサミの動作については、実際の動作と同様に開閉が行えるようにする。

ハサミの刃が回転する軸となる点は、ハサミの開閉が行われるとき、唯一その位置を変化させない。この点を以下ハサミの「中心点」と呼ぶこととする。また、実際にハサミで紙を切断する場合、Cutting Pointを基準として切断方向を定めると考えてよい。そのため、

ハサミの方向転換の軸を、Cutting Pointを通り、紙に垂直な直線とした。

2.3 ハサミの操作による紙の切断

実際のハサミで紙を切断する場合、よく切れるハサミであればハサミの刃の開きを固定したままナイフのように滑らせながら切断することも可能である。しかし、ハサミの構造上、施断力を利用した切断と比較して、このような切断は本来のハサミによる切断操作と考え難いので、ここでは紙の切断はハサミの刃が閉じる操作を行っているときのみ起こるとした。

2.4 ハサミの操作データの入力

先に述べたように、ハサミは操作者の与える操作命令により、「開く」、「閉じる」、「移動する」、「回転する」という動作を行う。今回の実験では特別の入力装置を用いずに、通常のグラフィックスワークステーション上での実現を試みる。そのため、本システムにおいて、「開く」操作と「閉じる」操作、および「回転する」動作は、ハサミの刃の開き角、およびハサミの回転角をダイアルボックスによって変化させることで実現する。「移動する」動作は、マウスポインタの位置を利用することにより実現する。

2.5 ハサミの切断可能状態

「刃を開く」、「切断開始点および方向を定める」、「刃を閉じる」というハサミによる切断の過程において、実際に紙の形状を変化させるのは「刃を閉じる」動作のみであると考えられる。よって、操作者がハサミを閉じているときのみハサミが紙を切断できる状態とする。このような状態のときを「切断可能な状態」、それ以外のすべての状態を「切断不可能な状態」と呼ぶこととする。切断可能な状態のとき紙は切断され、切断不可能なとき紙は切断されることはなく、ハサミは適切な位置および状態で空間内に存在する。

ハサミが切断可能な状態であるとき、ハサミの刃と切断対象物との位置関係により実際に切断する場合と切断を行わない場合が存在する。

ハサミが切断可能な状態であるとき、紙がハサミの刃の届く範囲に存在するか否かを判別する処理を「交差判定」、ハサミが切断不可能な状態であるとき、紙とハサミが接触するか否かを判別する処理を「衝突判定」と呼ぶと、図2に示すような処理手順でハサミによる切断操作を仮想空間内で実現することができる。

しかし、切断可能な状態で切断操作を行っているときに、ハサミの方向転換や移動が生じると細かな切断が生じるために、不要な紙のデータが付け加えられることがある。このような不要な紙のデータを極力削減するために、ハサミが切断可能な状態にあるときはハ

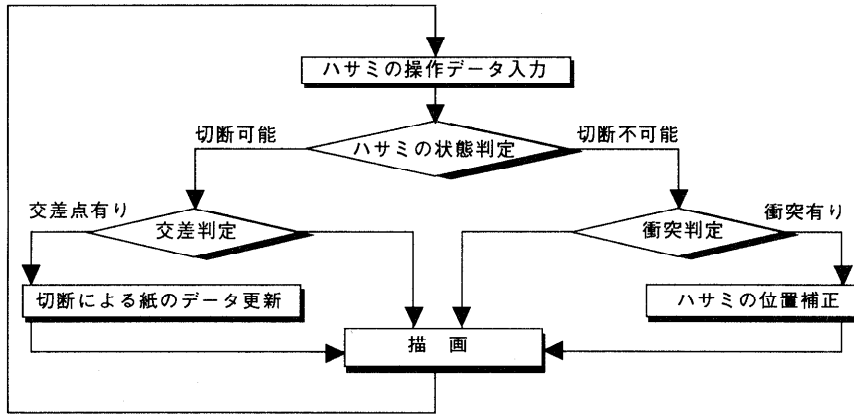


図2 処理の流れ
Fig. 2 Flow of processes.

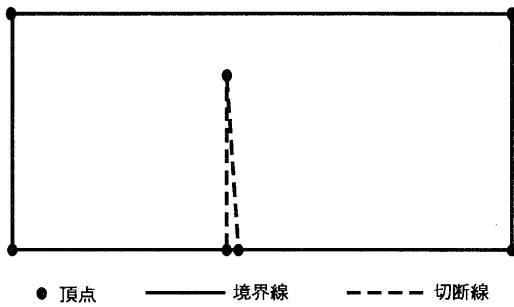


図3 頂点, 境界線, および切断線
Fig. 3 Vertices, Edge lines and Cutting lines.

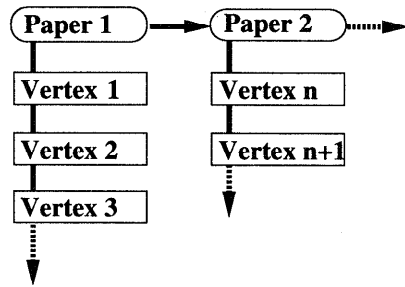


図4 紙のデータ構造
Fig. 4 Data structure of paper.

サミの方向転換や移動を行えないこととした。

3. 紙のデータ構造

3.1 紙の表現要素

仮想空間中において、紙は頂点列を線で結んでできる（平面上の）閉空間であるとする。この閉空間を結ぶ線分が左回りに見える方向を「紙の表向き」と定義し、すべての紙への操作は、紙を表向きに見た方向を基準として行う。このとき、紙を表現するためには、各頂点の座標とそれらの接続順序が与えられればよい。また、紙とハサミの位置関係は、仮想空間内に配置される紙それぞれに対して定められるため、紙とハサミとの位置関係も紙のデータとして与えた。

紙がまだ切断されていないとき、その頂点を結ぶ線を「境界線」と呼ぶ。また、ハサミが切断可能な状態のとき紙は切断されるが、紙に切り込みが入ったとき紙が「切断された」といい、その切り込みを「切断線」と呼ぶ。切断操作にともない、紙の一部分が幾何的に離れた状態になったとき紙が「分離した」という（図3）。

仮想空間中でハサミと紙の位置関係を分類すると、

「紙との接触点を持たない」、「紙の境界線上にハサミが存在する」、「紙の切断線上にハサミが存在する」の3つの場合に分けることができる。ただし、「紙との接触点を持たない」とは、ハサミが紙の外に存在するときである。これらの位置関係の分類は、Cutting Pointと紙との位置関係のみに基づいて決定される。

ハサミと紙の関係を得るのに、つねにCutting Pointの軌跡とすべての境界線および切断線の交点の有無を調べる方法と、Cutting Pointの存在する線分に属性を与えその情報を利用する方法が考えられるが、特に、衝突判定処理において、後者の方法を利用することで、処理時間は大幅に減少する。よって、紙のデータとして、頂点の3次元座標、接続の順番、および線分の属性（境界線、切断線の列）を記録することとする。

3.2 紙のデータ構造

仮想空間中で切断されていく紙のデータ管理は、紙の分離にともなうデータ増加を考慮し、各部分の紙の名前とその紙の表現要素を情報として持つリストで表す（図4）。

各々の紙のデータ構造も切断などによるデータ付加

の性質を考慮してリストで表す。紙のデータとして記録する情報は、頂点の座標、頂点の名前、次の頂点へのポインタ、境界線または切断線の属性情報である。例を図5に示す。

3.3 紙の切断および分離にともなう紙のデータの更新

交差判定の結果、紙に切断や分離が生じると、紙のデータの変更を行う。図6(a)のように、頂点 p_1, p_2, p_3, p_4 からなる紙に切断線が1本入れられたとき、 q_1, q_2, q_3 という新たな頂点が紙に加えられ、紙のデータは $p_1, q_1, q_2, q_3, p_2, p_3, p_4$ となる。ただし、 q_2 は切断可能な状態にあるハサミが、初めて切断不可能な状態になる瞬間のCutting Pointであり、 q_1, q_3 は q_2 とハサミの中心点でできる線分と、紙の境界線または切断線の線分との交点である。また、図6(b)のように、頂点 p_1, p_2, p_3, p_4 からなる紙に切断線が1本

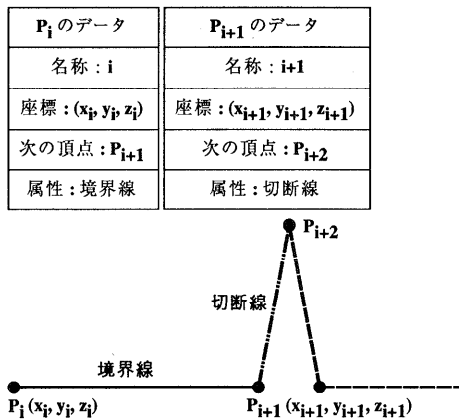


図5 紙のデータと紙の様子
Fig. 5 Relation of paper's data and shape.

入れられ分離が生じ、 q_1, q_2, q_3, q_4 という新たな頂点が紙に加えられたとき、紙のデータは p_1, q_1, q_2, p_4 および p_2, p_3, q_3, q_4 という2つの紙を表現することになる。紙の分離後、それぞれの紙の移動がない場合、 q_1, p_4 および q_3, q_4 はそれぞれ、同じ座標値をデータとして持つ。

3.4 紙の分離によるデータの分離

紙の分離が行われるとき、ハサミは必ず紙の外に存在するので、同じ座標値を持つ頂点を結んだ2本の線分に対し、Cutting Pointの軌跡は、1つの線分に対しては紙の外部から内部方向への交差が生じ、もう1つの線分に対しては紙の内部から外部方向への交差が生じる(図7)。

この特徴を利用することで、分離の発生後、1度の切断操作で2本増える切断線を、分離した紙のデータに正しく所属させることが容易に行える。また、頂点を切断線として含む紙の分離についても、例外なく処理を行うことができる。

4. 操作によるハサミの状態遷移

4.1 ハサミの状態の決定

先に述べたように、動作の種類によりハサミは「切断可能な状態」と「切断不可能な状態」の2つの状態を選択し、切断可能な状態のときは交差判定を行い、切断不可能なときには衝突判定を行う。 unnecessary 紙データの増加を避けるためには、切断可能な状態での方向転換と移動を不可能とする方が望ましいが、方向を転換しながら切断を行うことは、自然な操作を行ううえで必要な機能である。 unnecessary データ増加を防ぎながら、自然な操作を実現するために、切断可能な

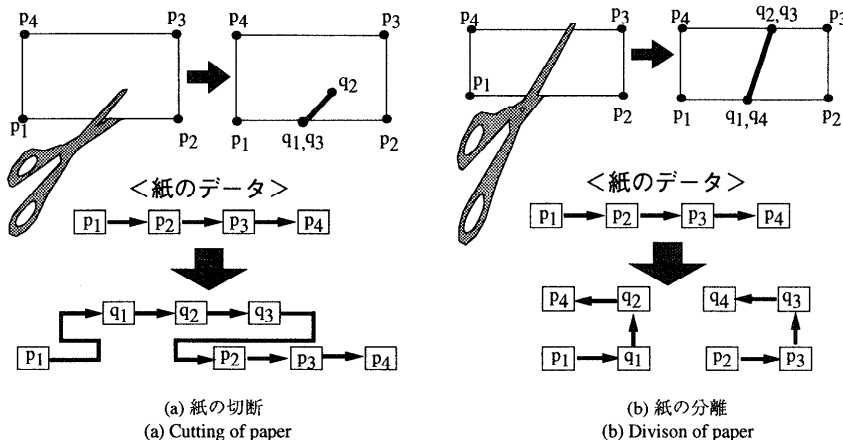


図6 紙データの更新

Fig. 6 Renewal of paper data.

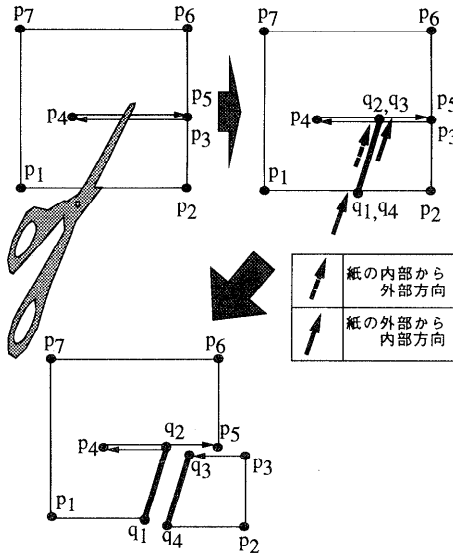


図7 紙の分離
Fig. 7 Division of paper.

状態から不可能な状態へ推移するための条件を適切に設定する必要がある。そこで、本システムでは基本的に、「ハサミの刃が開いた瞬間に切断不可能な状態へ推移する」という条件にする。さらに、操作者の方向転換および移動のデータに敏感に対応するために、切断可能な状態と切断不可能な状態を、次節のように補助的な状態に細分する。

4.2 補助状態

ハサミを閉じるためのデータは、操作者が与えたハサミの刃のなす角から得ている。現在のシステムでは、プログラムによるハサミのデータ参照とハサミの刃のなす角を取得するための入力装置による値獲得のタイミングの関係により、入力装置の取得する値変化よりもプログラムの値参照の方が高速に行われている。このため、ハサミを閉じる操作を行っているとき、ある時刻 t でのハサミのなす角 $deg(t)$ が、 $deg(t) = deg(t + dt)$ (ただし、 dt はプログラムの値参照の時間間隔) となっていることが多い。このようなときを利用して切断可能な状態から切断不可能な状態へ移る条件を与える。

すなわち、切断可能な状態のときにハサミの方向転換や移動のデータが入力されたとき、できるだけそれらのデータが反映されて切断不可能な状態へ移行できるように、切断可能な状態と切断不可能な状態を決定するための4つの補助的な状態を定義した(図8)。ただし、図8において、「閉じる」操作とは $deg(t) > deg(t + dt)$ となる入力があったとき、「閉じ

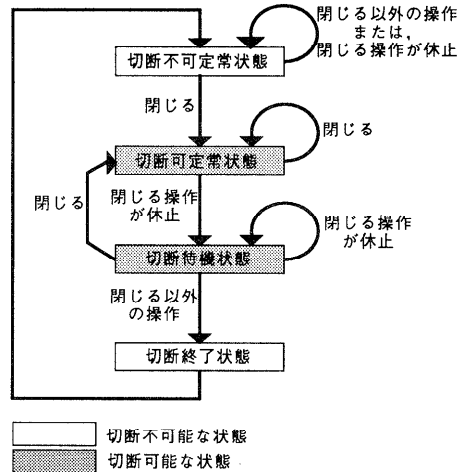


図8 補助状態の状態遷移図
Fig. 8 Transition diagram of auxiliary states.

る操作が休止」とは操作者の入力値に変化がなく、ハサミが「閉じる」、「開く」、「回転する」、「移動する」のどの動作も起こらないとき、「閉じる以外の操作」とはハサミが「開く」、「回転する」、「移動する」のどれかの動作を行ったときを、それぞれ意味する。

[補助状態]

- (1) 切断可定常状態 $deg(t) > deg(t + dt)$ のとき
- (2) 切断待機状態 切断可能な状態で $deg(t) = deg(t + dt)$ のとき
- (3) 切断終了状態 切断待機状態にハサミを閉じる以外のデータが入力されたとき
- (4) 切断不可定常状態 上記の3つの状態以外の状態のとき

補助状態(1)「切断可定常状態」および(2)「切断待機状態」のときを「切断可能な状態」と見なし、(3)「切断終了状態」および(4)「切断不可定常状態」のとき、「切断不可能な状態」と判定をする。特に、「切断終了状態」は切断可能な状態から切断不可能な状態に移行する瞬間である。このとき、紙とCutting Pointの軌跡との関係から切断による紙のデータ変更を行う。

「切断待機状態」を用いて、切断可能な状態中にハサミの方向転換や移動のデータを受け付けることで、操作者からの入力データに敏感に反応できる。このため、方向を転換しながら切断を行うことが擬似的に可能になり、直感的に自然な操作が実現された。

5. ハサミの操作による紙の切断および衝突処理

前章で述べたように、ハサミの開きによりハサミの状態を選択し、切断可能な場合には紙の「切断処理」

を行い、切断不可能な状態の場合には「衝突処理」を行う。紙の「切断処理」とは交差判定および紙のデータの更新であり、「衝突処理」とは衝突判定およびハサミの位置補正である。

5.1 交差判定

ハサミが切断可能な状態で切断が終了したとき、Cutting Point の軌跡と紙との位置関係を調べる。ここで、紙と Cutting Point の軌跡と紙の切断線または境界線と交点を持つとき、3.2 節「紙のデータ構造」において述べた手法で、紙のデータ更新を行う (図 6)。

紙の不必要なデータ付加を極力避けるために、切断可能な状態にあるとき、方向転換や移動が行えないようにハサミの動作に制限を加えた。このため、切断可能な状態になった瞬間から、切断が終了する瞬間までの、Cutting Point の軌跡は必ず直線となる。よって、切断可能な状態から切断不可能な状態に移る時点でのみ、紙のデータ更新を行えばよく、切断可能な状態につき紙のデータ更新を行う必要はない。

5.2 衝突判定

ハサミが切断不可能な状態にあり、ハサミが「閉じる」以外の動作 (「開く」、「方向転換」、「移動」) を行ったとき、紙との衝突判定を行う。特に今回は、Cutting Point 以外でハサミが紙の内部に入り込むことでは、紙の切断処理などに影響がないことや、切断線上でハサミが方向転換するとき紙が曲がらないことを考慮して、Cutting Point が紙の内部に入り込まないように衝突判定処理を行った。具体的に、Cutting Point の移動によりそれが紙の内部に入り込もうとしたとき、紙と衝突が起きたと判定し、ハサミの位置補正を行う。

ハサミの位置補正処理は、移動前と移動後の Cutting Point を頂点とする線分と、紙の境界線または切断線との交点へ Cutting Point を移動することにより行う。このとき、ハサミの向きや開きは変化しない。よって、ハサミを開くことで Cutting Point が中心点側に移動するが、この移動で Cutting Point と紙に衝突が生じた場合、ハサミは開いた後の形状を保ちながら位置補正を行う (図 9)。

ハサミと紙の位置関係は、「Cutting Point が境界線上にあるとき」、「切断線上にあるとき」、「紙とは接触を持たないとき」の 3 つの場合に分類でき、それぞれの関係において、ハサミの振舞いが制限される。よって、ハサミの位置補正処理は、それぞれの関係ごとに行うこととする。

5.3 紙とハサミの位置関係に基づく位置補正処理

ハサミと紙の位置関係は、先に述べたような 3 つの関係に分類できる。それぞれの関係において、ハサ

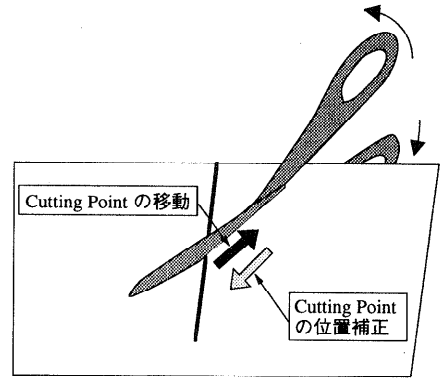


図 9 ハサミを開いたときの位置補正
Fig. 9 Position correction of the scissors.

ミの振舞いが制限されることを利用することで、位置補正処理のための処理時間を短縮することができる。各々の位置関係において要求されるハサミの振舞い、および処理内容について述べる。

[Cutting Point が紙と接触を持たないとき]

- 要求されるハサミの振舞い
 - － 紙と接触が生じないときは自由に動く。
 - － 紙と接触が生じたときは紙の中に Cutting Point が入り込まないように、適切な位置にハサミを移動する。

● 処理内容

衝突が生じた場合のみ、移動前と移動後の Cutting Point からなる線分と、紙の境界線または切断線とでできる交点に Cutting Point が位置するように位置を補正する。この処理を行うことで、紙と接触が生じないときには自由に動くことができ、紙と接触が生じたときには紙の中に Cutting Point が入り込まず適切な位置にハサミを移動することができる。

[Cutting Point が紙の境界線上にあるとき]

- 要求されるハサミの振舞い
 - － 境界線上を移動するときは滑らかに動く。
 - － 紙からハサミが離れるとき、ただちに Cutting Point が境界線から離れる。

● 処理内容

紙は頂点列を線分で一筆書きに左回りに結んでできる閉空間であるとした。このために、ある頂点と次の頂点とでできるベクトルを紙の表方向から見た場合、そのベクトルの左側は必ず紙の内部となり、右側は紙の外部となる。Cutting Point が存在する紙の境界線ベクトルと、移動前後の Cutting Point を結ぶベクトルの外積を利用すること

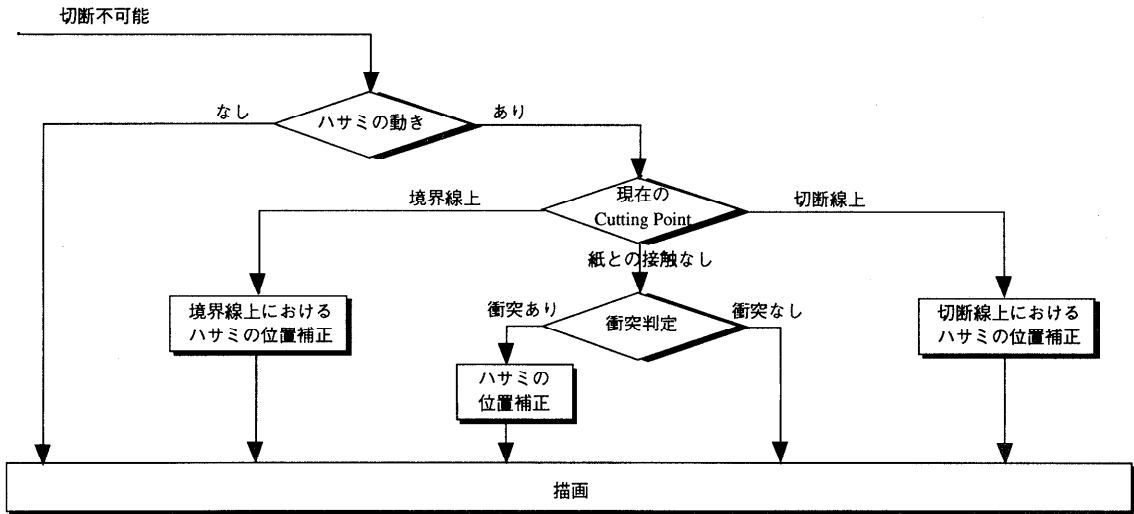


図 10 衝突判定および位置補正

Fig. 10 Flow for collisions detection and position correction of scissors.

で, Cutting Point の移動が紙の内部方向か外部方向かが特定できる。

これらの特徴を利用して, ハサミの位置補正を行う。移動前の Cutting Point は必ず境界線上にあるため, 移動前後の Cutting Point を結ぶベクトルの方向を利用して処理を行う。以下に処理の詳細を述べる。

ハサミが紙の外側へ移動したとき

位置補正の必要がないため, 入力データに従った位置へハサミを移動する。

ハサミが境界線と平行に移動したとき

位置補正の必要がないため, 入力データに従った位置へハサミを移動する。

ハサミが紙の内側へ移動したとき

現在 Cutting Point が存在する境界線属性を持つ紙の頂点から, 次の頂点へのベクトルを境界線ベクトルとする。このとき, 移動前後の Cutting Point を結ぶベクトルと境界線ベクトルのなす角を θ とする。 $\cos \theta$ の値を利用して処理を行う。

- $|\cos \theta| > |\cos \theta_c|$ のとき

現在存在する境界線上で Cutting Point を移動。

- $|\cos \theta| < |\cos \theta_c|$ のとき

Cutting Point を移動前のところへ戻す。

ただし, 定数 θ_c ($0 < \cos \theta_c < 1$) はあらかじめ設定しておく。

[Cutting Point が紙の切断線上にあるとき]

- 要求されるハサミの振舞い

– 切断線上を移動するときは滑らかに動く。

- 処理内容

現在 Cutting Point が存在する切断線属性を持つ紙の頂点から, 次の頂点へのベクトルを切断線ベクトルとする。

ハサミは切断線に沿っての移動しか行えない。よって, 移動前後の Cutting Point を結ぶベクトルと切断線ベクトルのなす角 θ を利用して以下のような処理を行う。

- $|\cos \theta| > |\cos \theta_c|$ のとき

現在存在する切断線上で Cutting Point を移動。

- $|\cos \theta| < |\cos \theta_c|$ のとき

Cutting Point を移動前のところへ戻す。

ただし, 定数 θ_c ($0 < \cos \theta_c < 1$) はあらかじめ設定しておく。

ハサミの移動が紙の境界線 (または切断線, 以下同じ) に対して平行に近い場合は, 境界線に沿って移動しているものとする。また, ハサミの移動が紙の境界線に対して垂直に近い場合は, ハサミが紙を押ししているものとする (ただし, これによる紙の移動は考えないものとする)。そこで, 実験的に θ_c の値は 45° とした。

これら衝突判定処理および位置補正処理の流れ図は図 10 のようになる。

衝突判定および位置補正処理において, ハサミと紙

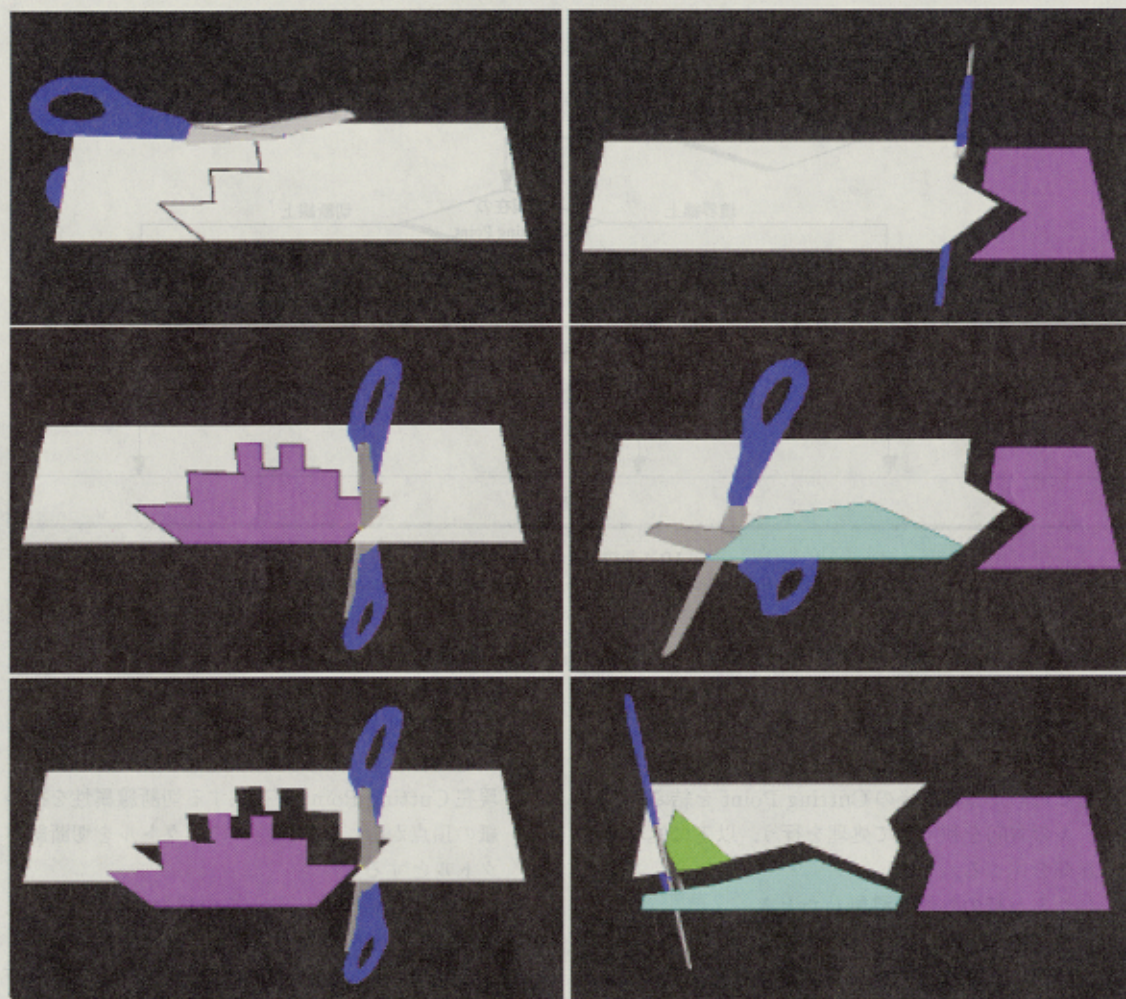


図 11 実現例
Fig. 11 Examples.

の位置関係を利用しない場合、ハサミの移動があるたびに、Cutting Point の軌跡と紙のすべての境界線および切断線との衝突を調べる必要がある。「Cutting Point が紙と接触を持たないとき」には、このように衝突を調べる必要があるが、それ以外の位置関係にあるとき、ハサミの存在する境界線または切断線が分かっているために、紙のすべての境界線および切断線との衝突を調べる必要はない。このため、ハサミと紙の位置関係を利用しない場合と比較して、位置補正処理のための処理時間を短縮することが可能となる。

6. 実現例

本文中で表現した仮想ハサミによる切断モデルを利用して紙を切断している様子を図 11 に示す。使用計算機は SGI Indigo2 Extream, 使用言語は C で開発を

行った。

本システムによる実験として、5名の被験者に5分程度の練習を行ってもらった後、自由な切断操作を行ってもらった。各被験者とも、本人の意志に従ってハサミによる紙の切断ができた。実験後、以下のような評価を受けた。「切るための道具としてハサミが見えると、計算機上のデータとして紙のデータが分割されるのではなく実際に切っている感じがする。」これは、入力装置によって得られた値に対して、直接的にデータを変更するのではなく、仮想的な道具を介して仮想的なオブジェクト（紙）のデータを更新していく手法によりシステムを実現したためである。また、次のような問題点の指摘もあった。「仮想のハサミを動かすのに、実際はマウスやダイヤルを触るのは、違和感がある。」これは、仮想的な道具と、実空間における入力装置と

の結び付きに関する問題である。

処理速度に関する評価として、紙の初期状態を長方形とし、40~50回切断した(切断線:80~100)場合の描画更新レートを計測した。描画更新レートは平均26.8 frames/sec.程度であり、操作に十分な処理速度が実現された。ただし、複雑な形状の紙に対して非常に多くの切断を施した場合などには、処理速度の低下が予想される。また、処理速度が最低となる瞬間でも上記レートの半分程度であり、さらに、実験中にこの状態が継続されることはなかった。これは、ハサミの状態を定義し、各状態に応じた処理のみを行ったためである。

7. む す び

本研究では、ハサミによる切断操作をモデル化し、仮想空間で紙をハサミでインタラクティブに切断することが可能なシミュレーションシステムを実現した。紙の形状やハサミの動作空間などに制限を与えたため、ある程度制限された範囲ではあるが、仮想空間中でハサミによる切断操作を実現することができた。

今後の課題として、ハサミの動作空間に与えた制限を極力緩めることがある。この場合、Cutting Pointと紙は必ず同じ平面上に存在しないため、衝突判定および交差判定を行うのに、ハサミの刃全体と紙の位置関係を調べる必要がある。現在のモデルでは、Cutting Pointと紙の位置関係のみを利用しているため、切断線上に存在するハサミが方向転換することができるが、ハサミの刃全体と紙の位置関係を利用した場合、切断線上での方向転換ができない。よって、ハサミの方向転換により押し曲げられる紙のシミュレーションなども実現してゆく必要がある。

現在は、折曲げのない紙の切断を考えてきたが、折曲げのある紙の切断も興味がある拡張である。この場合、紙のデータ構造に「折曲げ線」の属性を与えることで、現在のモデルを応用できると考える。

さらに、仮想空間中のハサミと実空間の入力装置(マウス、ダイヤル)との結び付きに関する問題に関しては、データグローブなどのより直感的な装置を利用し、あたかも実際にハサミで切断を行っているような感覚を与えるシステムを実現する必要があるであろう。

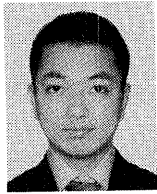
謝辞 本研究を進めるにあたり日頃ご指導および貴重なアドバイスをいただき、鳥脇研究室の皆様へ感謝いたします。なお、本研究の一部は文部省科研費の助成による。

参 考 文 献

- 1) 館 暲, 廣瀬通孝: パーチャル・テック・ラボ, 工学調査会 (1992).
- 2) 廣瀬通孝: バーチャルリアリティ応用戦略, オーム社 (1992).
- 3) 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システムの基本機能の実現, 情報処理学会論文誌, Vol.37, No.6, pp.1088-1098 (1996).
- 4) 高橋英嗣, 廣田光一, 金子豊久: 柔らかい臓器の手術シミュレーション, *Medical Imaging Technology*, Vol.14, No.4, pp.479-480 (1996).
- 5) 鈴木直樹, 高津光洋, 服部麻木, 甲斐慎也, 川上憲司: 手術シミュレーションシステムの開発, *Medical Imaging Technology*, Vol.14, No.4, pp.481-482 (1996).
- 6) 鈴木直樹, 服部麻木, 松下 聡, 甲斐慎也, 高津光洋: 手術計画システムのための臓器モデル変形アルゴリズムの開発, 第11回NICOGRAPH論文コンテスト論文集, pp.179-186 (1995).
- 7) 伊藤裕一郎, 山田雅之, 世木博久, 伊藤英則: 3次元物体を被覆する紐図形の表現法, 1995年度電気関係学会東海支部連合大会論文集, p.306 (1995).
- 8) 伊藤裕一郎, 山田雅之, 宮崎 剛, 世木博久, 伊藤英則: 3次元紐図形表現法を用いた網物パターン処理について, 情報処理学会論文誌, Vol.37, No.2, pp.249-258 (1996).
- 9) Mizuno, S., Okada, M., Yokoi, S. and Toriwaki, J.: Block manipulation with hand in virtual space, *Proc. International Conf. on Virtual Systems and MultiMedia*, pp.189-194 (1995).
- 10) 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, pp.1994-2001 (1993).
- 11) 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).
- 12) Miyazaki, S., Okada, M., Yokoi, S. and Toriwaki, J.: An interactive simulation system of ORIGAMI based on virtual space manipulation, *Proc. IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, Tokyo, pp.210-215 (1992).
- 13) Bergamasco, M., Degl'Innocenti, P., Bucciarelli, D. and Ri-gucci, G.: Grasping and moving objects in Virtual Environments: A preliminary approach towards a realistic behaviour, *Proc. IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp.44-49 (1994).

(平成9年3月27日受付)

(平成10年9月7日採録)



野口 博和 (正会員)

昭和 46 年生。平成 7 年名古屋大学工学部卒業。平成 9 年同大学大学院博士前期課程修了。同年中部日本放送(株)に入社、現在に至る。テレビ制作に関するコンテンツ、およびインターネットコンテンツにかかわるシステムプログラミング業務および研究開発に従事。



安田 孝美 (正会員)

昭和 34 年生。昭和 57 年三重大学工学部電気工学科卒業。昭和 62 年名古屋大学大学院博士課程(情報工学専攻)修了。同年同大学工学部情報工学科助手、平成 5 年同大学情報文化学部助教授となり、現在に至る。CG, VR による仮想空間生成、インターネット上でのメディア・インテグレーション、およびそれらを利用した人間活動全般に興味を持つ。本学会坂井記念特別賞、科学技術庁長官賞、市村学術貢献賞、日本 ME 学会論文賞各受賞。電子情報通信学会会員。



横井 茂樹 (正会員)

昭和 24 年生。昭和 52 年名古屋大学大学院博士課程修了。同年同大学工学部情報工学科助手。昭和 53 年三重大学工学部電子工学科助教授。昭和 57 年名古屋大学工学部情報工学科助教授、平成 5 年同大学情報文化学部自然情報学科教授、平成 10 年同大学大学院人間情報学研究科教授となり、現在に至る。工学博士。コンピュータグラフィックス、バーチャルリアリティ、マルチメディアなど、映像を中心とした情報メディア技術とその社会的影響に関する研究に従事。市村学術賞貢献賞、日本 ME 学会論文賞各受賞。電子情報通信学会、日本コンピュータ支援外科学会、日本コンピュータ外科学会、情報文化学会各会員。



鳥脇純一郎 (正会員)

昭和 14 年生。昭和 37 年名古屋大学工学部電子工学科卒業。昭和 42 年同大学大学院博士課程修了。同年 4 月同大学工学部助手。以後、昭和 45 年同助教授、昭和 49 年同大学大型計算機センター助教授、昭和 55 年豊橋技術科学大学情報工学系教授、昭和 58 年名古屋大学工学部電子工学科教授を経て、昭和 60 年 4 月より同大学工学部情報工学科教授。工学博士。パターン認識、画像処理、グラフィックス、および、それらの医学情報処理への応用に関する研究に従事。著書「パターン認識の画像処理」(朝倉書店)、「認識工学」(コロナ社)、「見えないイメージを見る」(共立出版)。電子情報通信学会、日本 ME 学会、画像電子学会、人工知能学会、コンピュータ支援画像診断学会、IEEE 各会員。