

平成17年度 修士論文

希薄な触力覚フィードバック環境下における
仮想はさみシステムの検討

指導教官

伊藤 英則 教授
舟橋 健司 助教授

名古屋工業大学大学院 工学研究科

博士前期課程 情報工学専攻
平成16年度入学 16417536番

久保谷 太亮

目次

1	はじめに	1
2	仮想道具及び仮想物体モデル	4
2.1	仮想はさみのモデル	4
2.1.1	はさみの位置と向き及び刃のなす角	4
2.1.2	はさみの接点	6
2.1.3	はさみと手の動作の補正	7
2.1.4	操作によるはさみの状態遷移	7
2.2	仮想紙のモデル	8
3	はさみと紙の相互作用モデル	9
3.1	はさみと紙との干渉処理	9
3.2	はさみの操作による紙の切断処理	12
4	切断時の感触の補完	14
4.1	切断効果音	14
4.1.1	再生する音データ	14
4.1.2	切断音の再生	15
4.2	指と手の平の振動	16
5	実験および結果	18
5.1	システム構成	18
5.2	操作感における評価実験	20
5.2.1	実験目的	20
5.2.2	実験方法	20

5.2.3	結果と考察	22
5.3	切断効果音に関する評価実験	23
5.3.1	実験目的	23
5.3.2	切断音の種類	23
5.3.3	実験1	26
5.3.4	実験2	26
5.3.5	結果と考察	27
5.4	振動効果に関する評価実験	29
5.4.1	実験目的	29
5.4.2	実験1	29
5.4.3	実験2	30
5.4.4	実験3	31
5.4.5	結果と考察	32
5.5	切断音と振動における相互の誘発	33
5.5.1	実験目的	33
5.5.2	実験方法	33
5.5.3	結果と考察	34
5.6	切断音と振動の相互影響に関する実験	35
5.6.1	実験目的	35
5.6.2	実験方法	35
5.6.3	結果と考察	36
6	むすび	37
	謝辞	39
	参考文献	41
	研究業績	42

第1章

はじめに

バーチャルリアリティ (Virtual Reality : VR) 技術とは、コンピューター上にデータとして定義された仮想的な空間内での様々な体験を、人間の感覚のうち五感すべて、もしくはいくつかの感覚に訴えることで人間に感じさせる技術である。近年、3次元座標や、身体の関節の曲げ具合を測定する入力装置等により、仮想的な空間を映像として見るだけでなく、その仮想世界を操作し、体験する方法の研究がなされてきている。このVR技術により、我々は実世界では体験し得ない行為であっても、仮想的に体験することが可能となる。仮想体験の例として、原子力発電所などのように危険が生じる可能性のある場所での作業や、手術などの医療行為の訓練、教育、手順の確認などへの様々な応用が期待されている [1]。

仮想空間での物体操作に関わる研究が広く行われている。医療や宇宙開発、アミューズメントなどの分野で実際に仮想現実感技術が応用されるようになり、技術開発への期待も高まっている。仮想物体操作の分野では筆者らによる論文をはじめ、グローブ型の手形状入力装置を用いて直接、仮想物体を操作するなどの研究が多くある [2]。入力装置自体の開発も進んでおり、振動子により指先や手の平に情報を伝えることのできる可能なグローブや、ワイヤ等により5本の指それぞれに反力を提示することのできる可能なグローブも市販されている。

一方、仮想空間に道具を定義し、仮想の道具を介しての物体操作を実現する研究も進められている [3]。しかしこの仮想空間でははさみによる切断操作システムでは、入力装置としてマウスなどを用いているため、あたかも実際にはさみで切断を行っているような感覚を与えることは難しい。そこで手と道具、道具と物体間のそれぞれの相互作用を実現するモデルも提案されている [4, 5]。

しかし、触力覚フィードバックの導入を考えた場合、手は自由度がとても多く高い精度での再現は困難である。道具の場合は数自由度に限定できるため、実現したい仮想の道具と基本的に同じ形状の入力装置を作成することにより、比較的实现が容易になる。もちろんこの場合も装置のサイズや金額的に大きな規模になる可能性が高いが、応用分野の一つである医療等においては精度が優先されることが多い。例えば、力覚フィードバックの考慮されたはさみ、のこぎり、ナイフのシステムが提案されている [6, 7, 8, 9]。

仮想道具について、以下の3つに整理して考える。(1) マウスなどにより仮想道具を操作、(2) 道具形状の入力装置により仮想道具を操作、(3) 手形状の入力装置により仮想の手を操作し間接的に仮想道具を操作。新しい道具の導入においては、(1) と (3) はソフトウェアのみの更新により可能だが、(2) は入力装置自体を開発する必要がある。操作感に関しては、(2) が最も高く、次いで (3) が高いと考えられる。医用応用などでは (2) が適していると考えられるが、一般への VR 技術の普及を考えた場合、(3) に関する技術も重要であると思われる。

次に道具と物体の衝突時とその力覚フィードバックについて検討してみる。(1) においては力覚フィードバックの導入は困難だが、装置からの入力値を無視して仮想空間における座標を再設定することに大きな問題は起きない。(2) においては入力値を無視して再設定すると、仮想空間内の様子と入力デバイスの状態に矛盾が生じてしまうが、力覚フィードバックの導入による解決が比較的容易だと考えられる。(3) の場合は、矛盾に関しては (2) と同様であり、また力覚フィードバックの導入も報告はなされているが [10]、価格、規模などの観点から導入は容易とは言い難い。

本研究では、上記 (3) に相当する仮想はさみシステムを考える。その中でも、一般への普及を目標に、大規模になりがちな力覚フィードバック装置の備えられていないデータグローブを用い、そのために起こる矛盾を解決するための補正方法について検討する。作成したシステムでは、操作者ははさみを操作することで仮想空間内の紙との衝突、切断操作を行うことが可能である [11]。またこれまでに、視覚と力覚情報の関係についても議論がなされている [12]。本研究では上述の矛盾は補正により解決を行う。

また，本研究では仮想はさみシステムにおいて，視覚や力覚以外のフィードバックからも臨場感の向上を試みる．体性感覚を精密に再現することで，現実感を高めることができるであろうが，一般への普及を考慮した小規模なシステムでは音声や振動によるフィードバックに限定されることが多い．

そこで，本研究では仮想はさみシステムにおいて切断効果音に関する評価実験を行う．単純なスピーカシステムを用いて，録音された切断音を再生するだけでなく，誇張したり，視覚的に提示されている状況とは別の状況で録音された切断音を再生したりすることにより，切断効果音の臨場感への影響を検証する．またどのような効果音を用いれば臨場感を高めることが可能か検討する．そして，データグローブに取り付けられた振動子を用いて振動効果に関する評価実験を行う．手に振動を与えることにより，切断時の感触を実際とは異なる感覚で擬似的に補完することを試み，どのような振動効果が臨場感を高めることが可能か検討する．また，このような聴覚と振動の知覚が仮想はさみシステム上で，互いにどのような影響を及ぼすかについても検証する．また，一方がもう一方を誘発することが可能かどうかについても検証する．

第2章

仮想道具及び仮想物体モデル

2.1 仮想はさみのモデル

本研究では右手の動作に追従して移動し、また開閉するはさみを考える。ただし、簡略化のため右手がはさみを持つ、離す等の操作は考慮せず、はさみは常に右手に接しているものとする。

2.1.1 はさみの位置と向き及び刃のなす角

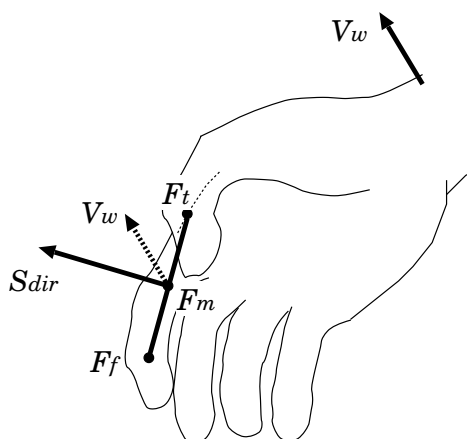


図 2.1 はさみの向き

はさみは手の親指の第1関節 F_t と人差指の第1関節 F_f に接しているものとする (図 2.1)。実際にはさみを扱う場合には刃の開閉によってはさみの向きが大きく変動しないように指に力をいれてはさみを固定させるが、力覚フィードバックのない環境では困難である。そこで、はさみの向きを刃の開閉時に変化を受けにくい点から生成す

ることを考える．図 2.1 に示すように，手の平を含む平面上に存在し，肘から手首に向かうベクトルと垂直な，手首からのベクトル V_w を考える．

F_t と F_f の中点を F_m ， F_m から F_t へのベクトルを F_{mt} とする． V_w と F_{mt} で構成される平面上に存在し， F_{mt} に対して垂直なベクトルをはさみの向き S_{dir} と定義する．

$$\mathbf{F}_m = \frac{\mathbf{F}_t + \mathbf{F}_f}{2} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{F}_{mt} = \mathbf{F}_t - \mathbf{F}_m \quad (2.2)$$

$$\mathbf{S}_{dir} = \mathbf{F}_{mt} \times \mathbf{V}_w \times \mathbf{F}_{mt} \quad (2.3)$$

次にはさみの刃の開閉の支点と刃のなす角を決定する．図 2.2 に示される l ， deg_c ははさみの形状の情報としてあらかじめ与える定数である．仮想手から得られた F_t ， F_f ，及び l ， deg_c からはさみの刃のなす角 deg を式 (2.4) で求める．はさみの支点座標 S_c (図 2.3) は，はさみの向き S_{dir} と， F_m から S_c への距離 l' から，式 (2.6) により求める．これをはさみの位置と呼ぶことにする．

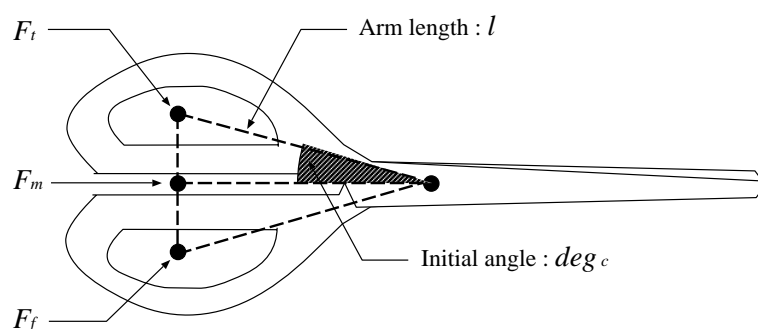


図 2.2 はさみの形状

$$deg = \sin^{-1} \left(\frac{|\mathbf{F}_{mt}|}{l} \right) - deg_c \quad (2.4)$$

$$l' = \sqrt{l^2 - |\mathbf{F}_{mt}|^2} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{S}_c = \mathbf{F}_m + \frac{l'}{|\mathbf{S}_{dir}|} \mathbf{S}_{dir} \quad (2.6)$$

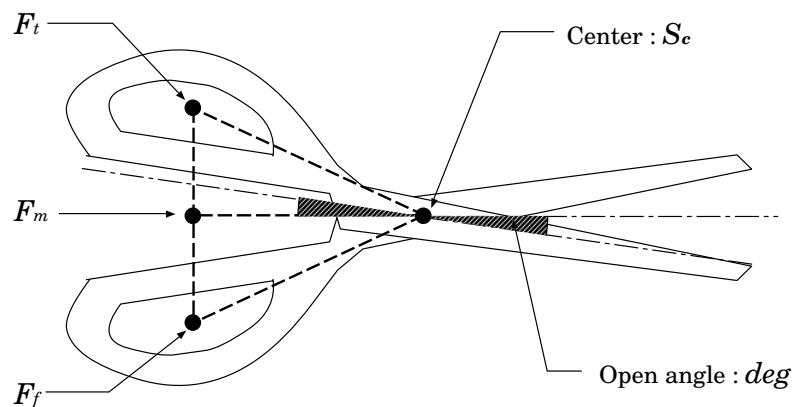


図 2.3 はさみの刃のなす角，支点

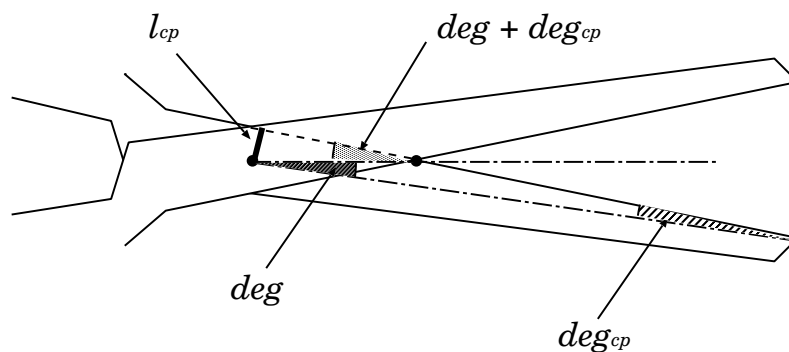


図 2.4 はさみの接点

2.1.2 はさみの接点

次にはさみの刃のかみ合う点(接点と呼ぶ)を求める。図2.4に示された l_{cp} , deg_{cp} ははさみの形状の情報としてあらかじめ与えられる定数であり，はさみの接点 S_{cp} は次式で求められる。

$$\mathbf{S}_{cp} = \mathbf{S}_c + \frac{\sin(deg + deg_{cp}) l_{cp}}{|\mathbf{S}_{dir}|} \mathbf{S}_{dir} \quad (2.7)$$

2.1.3 はさみと手の動作の補正

仮想手は3次元空間内に存在し、仮想手に追従して動く仮想はさみも3次元空間内を自由に動くことができる。しかし実際に切断を行う時には接点は紙の上に存在する。また、はさみの向きをおよそ紙面に平行にして切断操作を行う。

実世界では紙とはさみの接触感覚から手の位置を調節するが、希薄な触力覚フィードバック環境下では困難である。そこで、はさみと紙の距離が決められたしきい値 T_f 以下の場合には、その距離に応じてはさみの接点が紙に近づくようにはさみと手の位置を補正し、更にしきい値 T_n 以下の場合には接点を紙面上に位置するように補正する。同時に、はさみの向きと紙面が平行に近づくように、あるいは平行になるように補正する。

2.1.4 操作によるはさみの状態遷移

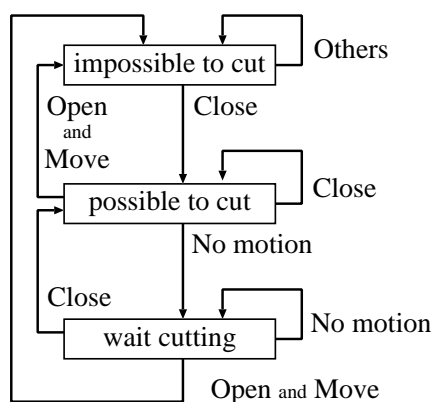


図 2.5 はさみの状態遷移

はさみに関する操作のうち実際に紙を切断するのは「刃を閉じる」操作のみであるとする。この操作を行っている状態を「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。ただし、操作者の手の動きによりゆっくりと閉じる動作が行われた場合、ある時刻 t でのはさみのなす角 $deg(t)$ に対して、 $deg(t) = deg(t + \Delta t)$ となる状況が生じ得る。不必要なデータ増加を防ぐためにこの状態を「切断待機状態」とし、図 2.5 のような状態遷移図を考える。

2.2 仮想紙のモデル

仮想の紙は平面であるものとし，頂点列を線分で結んでできる閉空間であるとする．また，その頂点を結ぶ線を「境界線」と呼ぶ．はさみによる切断操作によってはさみに切り込みが入ったときその切り込みを「切断線」と呼ぶ．境界線と切断線は，有限個の線分(境界線要素，切断線要素)からなる．紙の曲がりや切断による分離処理は考えないものとする．

まず「刃を閉じる」操作を行い，その後「刃を閉じる」以外の操作をするまでに得られた接点の軌跡を線分として結んでできる折れ線のうち，紙の内部に存在する部分を切断線とする．はさみの境界線と切断線との間の移動のために，境界線と切断線の交差情報を保持しておく．また切断線間での移動のために，切断線と切断線の交差情報も保持しておく．

第3章

はさみと紙の相互作用モデル

3.1 はさみと紙との干渉処理

本モデルでは、はさみと紙は接点においてのみ干渉し、はさみの柄などの部分は紙と干渉しないものとする。同様に、手と紙の干渉も考慮しないものとする。はさみと紙との関係を、「はさみの接点が紙面上に存在」と「はさみの接点が紙面外に存在」に分けて考える。前者を更に、「境界線上に接点が存在」、「切断線上に接点が存在」に分けて考える。これらの状態は、はさみの接点と紙との位置関係のみに基づいて決定できる。はさみの接点の位置は仮想手の情報から計算される。つまり時刻 t の処理により補正された接点 $cp(t)$ の位置は、時刻 $t + \Delta t$ において改めて補正処理を行い、補正を継続する必要がある。そこではさみの接点が紙面上に存在している、すなわちはさみと紙が接触している場合には、接触している境界線要素または切断線要素（これらをあわせて接触線分と呼ぶ）の情報、属性（境界線、切断線の違い）を保持しておく。

ここで接点（頂点）と、境界線要素または切断線要素（線分）との距離を以下のように考える（図 3.1）。

1. 点 s から、頂点 a, b を含む直線へと降ろした垂線の足 t が線分 ab 上にあれば t を s に最も近い点とし、 s から t への距離を頂点と線分の距離とする。
2. t が線分 ab 上になければ s と頂点 a, b との距離を考え、どちらか小さい方を最も近い点とし、その距離を頂点と線分の距離とする。

また、接点が線分の頂点に存在する場合、接点はその頂点により隣接する別の線分上にも存在していると考えられる。

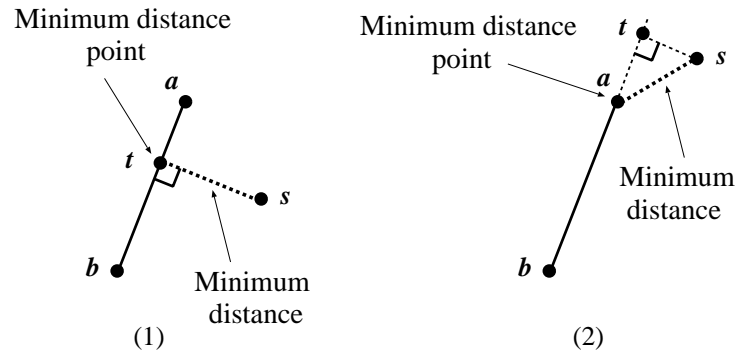


図 3.1 頂点と線分の距離

時刻 t におけるはさみの接点 $cp(t)$ と紙との位置関係，時刻 $t + \Delta t$ における手の情報から計算される接点，すなわち補正前の接点 $cp'(t + \Delta t)$ と紙との関係をもとに，以下のように手の位置補正処理を行う．

時刻 t の接点が紙面上以外に存在

接点 $cp'(t + \Delta t)$ が紙面上に存在する場合，はさみと紙が衝突したと考える．紙の内部に接点が入り込まないように， $cp(t)$ と $cp'(t + \Delta t)$ を結んでできる線分と紙の境界線とでできる交点のうち $cp(t)$ に最も近い点に接点が存在するように手の位置を補正する (図 3.2(a)) ．

接点 $cp'(t + \Delta t)$ が紙面上に存在しない場合でも，センサのノイズなどが影響して仮想の手を完全に静止させることは困難であるため， $cp'(t + \Delta t)$ と境界線との距離が決められたしきい値 T_n 未満の場合，接点が境界線上に位置するように手の位置を補正する．しきい値 T_n 以上の場合，はさみと紙は干渉しておらず補正処理も行わない．

時刻 t の接点が紙面上に存在

接点 $cp(t)$ が境界線上，切断線上の場合に分けて考える．境界線上の場合は，紙から離れる処理も考える．

- はさみの接点が紙 (境界線) から離れる処理

接点 $cp(t)$ が境界線上に存在し，その接触線分 (境界線要素) と接点 $cp'(t + \Delta t)$

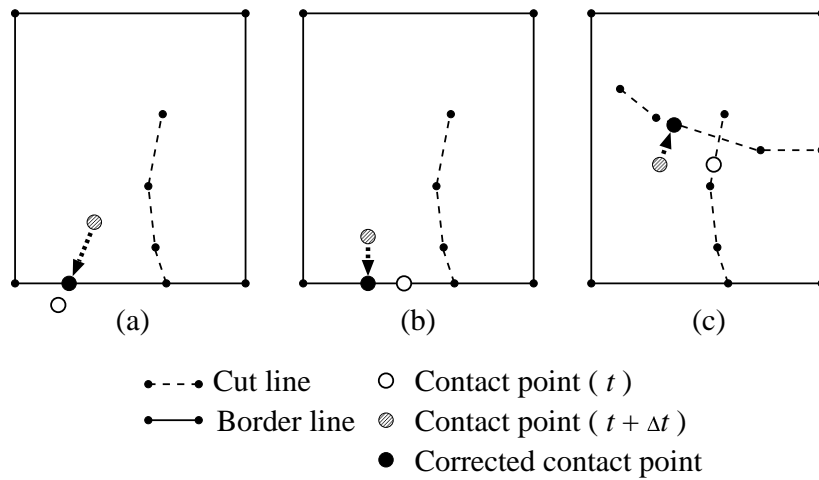


図 3.2 境界線上と切断線上での接点の移動

との距離がしきい値 T_n 以上であり, $cp'(t + \Delta t)$ が紙の外部に存在し, かつ $cp'(t + \Delta t)$ に最も近い境界線要素が接触線分と同一である, これらの条件をすべて満たしている場合には, はさみを紙から離していると判断し, 補正処理は行わない. すなわち, 接点 $cp(t + \Delta t)$ は紙から離れる.

- 境界線上から境界線または切断線上への移動

接点 $cp(t)$ が境界線上に存在し, 上述の離れる処理が行われない場合, 接点 $cp(t + \Delta t)$ の補正先の候補線分を, その接触線分 (境界線要素) とそれと交差している切断線要素とする. これらの線分上のうち $cp'(t + \Delta t)$ が最も近い点へ接点が位置するように手の位置を補正する (図 3.2(b)).

- 切断線上から切断線または境界線上への移動

接点 $cp(t)$ が切断線上に存在する場合, 接点 $cp(t + \Delta t)$ の補正先の候補線分を, その接触線分 (切断線要素), 接触線分に隣接している切断線要素, 接触線分と交差している切断線要素, 及び接触線分と交差している境界線要素とする. これらの線分上のうち $cp'(t + \Delta t)$ が最も近い点へ接点が位置するように手の位置を補正する (図 3.2(c)).

3.2 はさみの操作による紙の切断処理

はさみが切断可能状態であるとき紙の切断処理を行う．そしてその切断可能状態へと遷移する際には、「刃を閉じる」動作が行われている．しかしながら，操作者がはさみの位置や向きを全く変更せずに「刃を閉じる」動作のみを行うことは難しい．実際の操作においては「刃を閉じる」動作以外にも「はさみを移動する」動作や「はさみの向きを変える」動作が混在しており，単純に接点の軌跡を辿るだけでは正しい切断線を得ることはできない．そこで「刃を閉じる」動作とそれ以外の動作を分離して考える必要がある．

そこで，まず「刃を閉じる」以外の動作に対して衝突判定を行い，位置補正処理を行う．その後「刃を閉じる」動作による切断操作を考えることにする．時刻 t から $t + \Delta t$ の間にはすべての動作が混在して含まれる．上記のように処理を行うために，時刻 $t + \frac{\Delta t}{2}$ までに「刃を閉じる」以外の動作が完了しているものとする（図 3.3 左）．

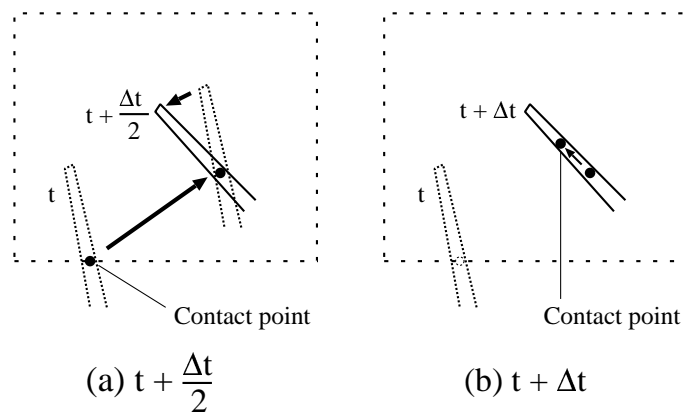


図 3.3 段階的な切断操作

まず，操作を行う前の時刻 t のはさみの支点に対する接点の位置関係に着目する．この位置関係を，時刻 $t + \Delta t$ の状態に当てはめることにより，時刻 $t + \frac{\Delta t}{2}$ の状態を決定する．時刻 t の接点を $S_{cp}(t)$ ，支点を $S_c(t)$ とすると，時刻 $t + \frac{\Delta t}{2}$ の接点 $S_{cp}(t + \frac{\Delta t}{2})$ は次式で求められる．

$$\begin{aligned}
\mathbf{S}_{cp}(t + \frac{\Delta t}{2}) &= \mathbf{S}_c(t + \Delta t) \\
&+ \frac{|\mathbf{S}_{cp}(t) - \mathbf{S}_c(t)|}{|\mathbf{S}_{dir}(t + \Delta t)|} \mathbf{S}_{dir}(t + \Delta t)
\end{aligned} \tag{3.1}$$

求められた接点 $\mathbf{S}_{cp}(t + \frac{\Delta t}{2})$ は、「刃を閉じる」以外の動作を行った後の状態であるので、これに対して位置補正処理を行う。これを $\mathbf{S}'_{cp}(t + \frac{\Delta t}{2})$ とする。また、同じ補正を時刻 $t + \Delta t$ の接点 $\mathbf{S}_{cp}(t + \Delta t)$ に適用し $\mathbf{S}'_{cp}(t + \Delta t)$ とし、これを時刻 $t + \frac{\Delta t}{2}$ から「刃を閉じる」動作を行った後の接点とする。この $\mathbf{S}'_{cp}(t + \frac{\Delta t}{2})$ と、 $\mathbf{S}'_{cp}(t + \Delta t)$ からなる線分に対して、紙の内部に存在する部分を切断線とする。

第4章

切断時の感触の補完

触力覚フィードバックのない環境では、はさみと紙の衝突時の手の拘束のみでなく、紙の切断時の感触も提示することができない。そこで切断時には、視覚的に切断の様子を観察できるだけでなく、切断音を提示することにより体験者が聴覚からも切断の様子を感じとることができるようにする。

また、厳密な触力覚フィードバックとは異なるが、グローブに取り付けた振動子からも切断の感触を擬似的に感じとることができるようにする。

4.1 切断効果音

4.1.1 再生する音データ

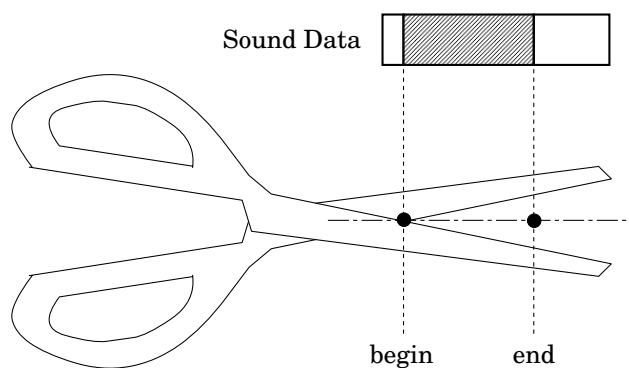


図 4.1 切断音の再生部分

再生する音は電子的に生成するのではなく、実際に録音した切断音を用いる。切断操作時に再生する部分を次のように決定する(図 4.1)。紙を切断するときの音は、紙の

厚みや材質，はさみの形状は考慮せずに，はさみの刃に対する接点の位置によって変化するものとし，接点の位置と音の再生部分に対応づけて考える．切断時，刃全体に対する切り始めの接点の位置関係を用いて音データの再生開始部を決定し，また同様に，切り終わりの接点との位置から再生終了部を決定する．

4.1.2 切断音の再生

システムにおいてリアルタイム性が要求されるため，モニターへの描画処理と切断音の再生処理が平行して行われる必要がある．そのため，切断音の再生にはスレッド処理を用いる．

また，切断音の現実感を損なわないために，より滑らかな切断音の再生を試みる必要がある．時刻 t 時に再生処理を行い，時刻 $t + \Delta t$ 時に再生処理を行おうとした場合，単純に考えると時刻 t の処理を中断もしくは終了を待って，時刻 $t + \Delta t$ の処理を行うことになる．しかし，滑らかな切断音の再生を考慮すると，このような処理に費す時間は極力少なくするべきである．そこで，再生部分の情報を要素に持つキューと，キューから要素を取り出し切断音の再生を行うスレッドを用いれば，再生したい際には単純にキューに再生部分の情報を追加するだけでよくなり，再生を行うスレッド側で自動的に連続して処理を行ってくれる．このスレッドを切断音再生スレッドと呼び，キューを再生命令キューと呼ぶ．

切断音再生スレッドはシステム実行時に起動し，再生要求があるまで待機する．切断時，音データの再生部分の情報を再生命令キューに追加し，切断音再生スレッドに再生要求を出す．切断音再生スレッドは，再生要求を受けると再生命令キューを調べ，要素があればキューから取り出し，キューが空になるまで切断音を再生する．キューが空であればスレッドは待機状態に入る．処理の流れを図 4.2 に示す．

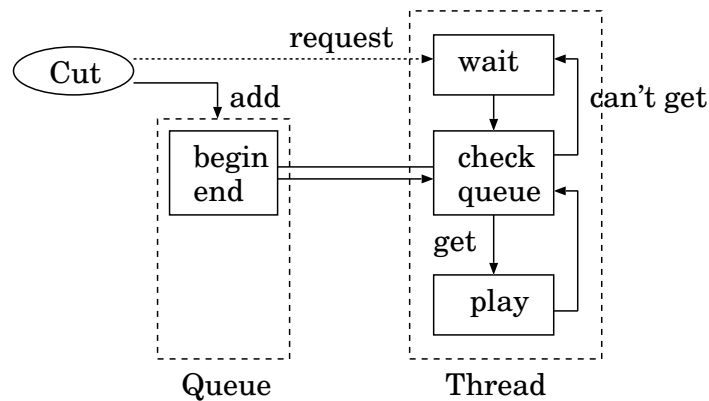


図 4.2 再生命令キューと切断音再生スレッド

4.2 指と手の平の振動

グローブには、各指の第2関節と第3関節の間と手の平に振動子を取り付けられている(図4.3)。本来、道具を操作するには一般的に道具を把持するため、指に関しては手の内側に振動デバイスが設置されるべきである。しかし、道具の種類によっては「握りこむ」操作も考えられるため、手の内側に設置された場合、手の動きが制限されてしまう。様々な道具の導入を考慮すると、この制限は望ましくないため、指の振動子は手の外側に取り付けるものとし、擬似的に感触を提示することのできる手法を検討する。

各部位に取り付けられた振動子は0-255の範囲で振動の強弱を決定することができる。ただし、1-64の値では振動が小さい。何も作業を行わず振動を知覚することだけに集中したとき、かすかに知覚できるかどうかの値の範囲は20-30である。しかし、操作を行っている際は指を動かすため、この範囲の値では振動を感じることはできない。指を動かしながら振動を感じるかどうかの値の範囲は、個人差はあれおよそ50-60であった。

切断操作中に振動を与えるにあたって、評価のよい値を検証する必要がある。何人かにシステム上で様々な部位に様々な値で振動を与え、経験的によい部位と値を調べ

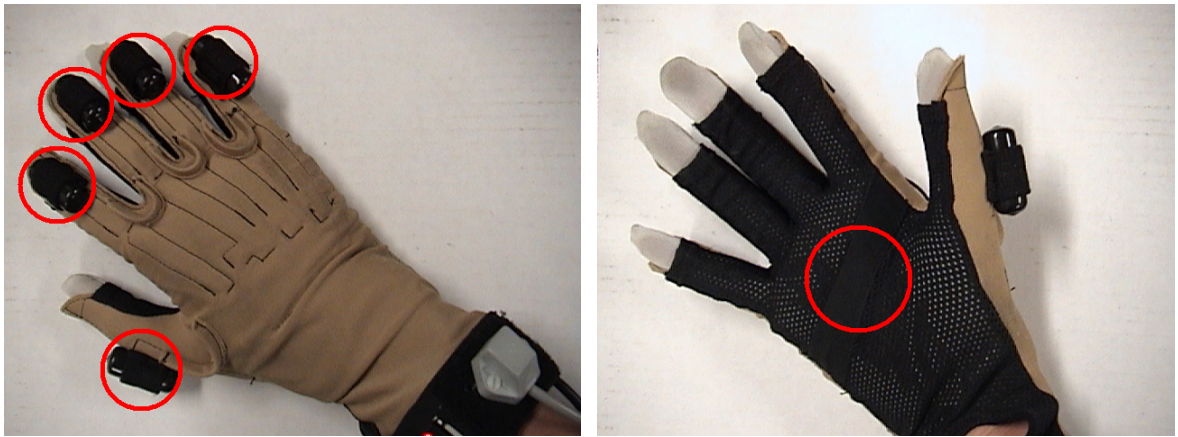


図 4.3 グローブに取り付けられた振動子

た．その結果，振動を与える部位のとしては，はさみを把持する親指，人差指，中指，手の平が候補にあがった．また値としては，60-80 の範囲の強さが候補にあがった．

また，切断操作中のどの間に振動を与ればよいかについても検証した．実際のはさみの操作を考えたとき，切断操作中に振動を与えるタイミングの候補として以下の2つパターンが考えられる．

- 材質の硬いものを切断する際，切断を行っている間中指に強く反力を感じることから，システム上でも，切断を行っている間中振動を与える．
- 薄い紙などを切断する際，はさみの刃を閉じきった瞬間，はさみの柄同士がぶつかり指に強く反力を感じることから，システム上でも，はさみの刃の先端で切断した際，振動を与える．

この2つのパターンをシステム上で試し，何人に操作してもらったところ，個人によって好みが分かれた．そのため，後述する振動に関する評価実験(第5章5.4節)では，この2つに，「はさみの刃の中ほどから先端で切断した際，振動を与える」パターンを加えて，3つのパターンで評価実験を行った．

なお，振動子を振動させる際，デバイスとの通信処理速度が若干遅いため，本研究ではリアルタイム性を考慮して，切断操作時に単純に一定の振動を加えるものとする．

第5章

実験および結果

5.1 システム構成

第2章, 第3章で述べた道具及び物体モデル, 相互作用モデルに基づいた実験システムを x86 系 IBM PC-AT 互換機 (Pentium4 2.80GHz, 1GB memory) 上で, C 言語により実装した.

操作者の手の位置, および方向は, Polhemus 社 3SPACE FASTRAK の低周波の磁界を利用したモーションセンサによって入力される. センサは次に述べるグローブの手首の部分に装着されている.

各指の関節の角度, 手首の角度等は, グローブタイプの入力装置である Immersion 社 CyberTouch を使用した. 各指と手の平には振動子が装着されており, 操作者の手に振動を伝えることが可能である.

仮想空間における手によるはさみの操作, 及び紙の切断操作の様子は, グラフィックライブラリである MesaGL を利用することで, コンピュータグラフィックスとして LCD 上に出力している. また切断音の再生には, LCD に備え付けられている単純なスピーカを用いる.

本システムを使用して実際に操作している様子を図 5.1, 図 5.2 に示す. 操作者がセンサの取り付けられたグローブを装着し, 自身の手を動かすことによって画面内の仮想手が仮想はさみで仮想紙の切断操作をしていることがわかる.



図 5.1 システムの概観

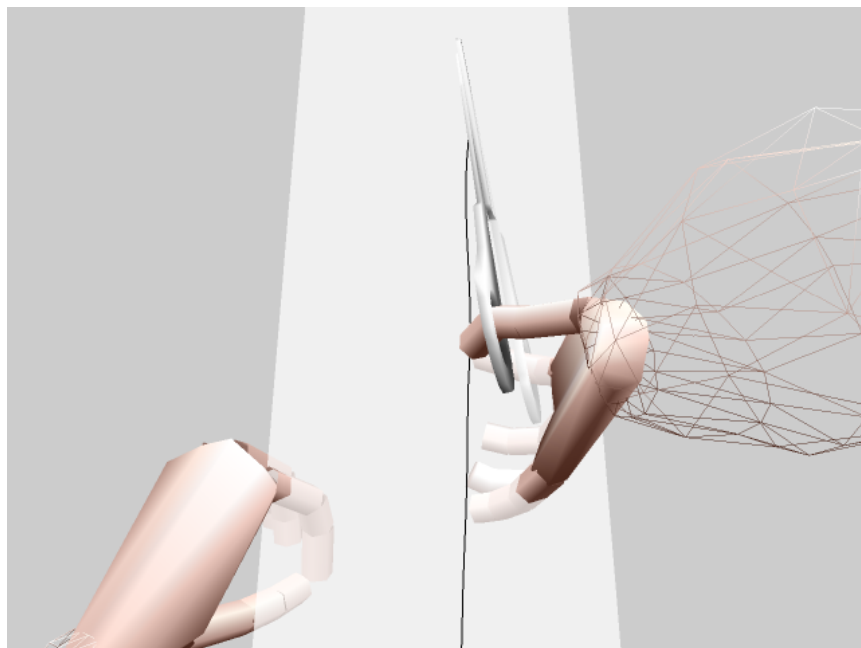


図 5.2 実行画面

5.2 操作感における評価実験

5.2.1 実験目的

第2章，第3章で述べた道具及び物体モデル，相互作用モデルに基づいて作成したシステムにおいて，実際に操作を行ってみることで，対話操作性と操作感について検証する．

5.2.2 実験方法

モニタを垂直に設置し，紙はモニタに対し45°傾いて見えるように表示した状態で，約10分間の練習の後，6人に本システムを体験してもらった．ただし，切断音は再生されないように制限してある．実験では幅30cm，長さ10mの紙の真中を切断してもらった．なお，紙は左手で移動することが可能である．

練習，実際の実験ともに，各操作者とも大きな違和感なくはさみによる切断操作が可能であった．また体験後，実際の紙(1m)を切断してもらい，仮想体験の結果との比較を行った．その結果を表5.1に示す．また，その操作感についてもアンケートを実地した．アンケートは7段階評価の形式を取り，以下の4つの質問を用意した．結果を表5.2に示す．

問1 仮想の操作感到近い(1) 実際の操作感到近い(7)

問2 操作しにくい(1) 操作しやすい(7)

問3 疲れる(1) 疲れない(7)

問4 現実世界に戻るのに支障があった(1) 支障なく現実世界に戻れた(7)

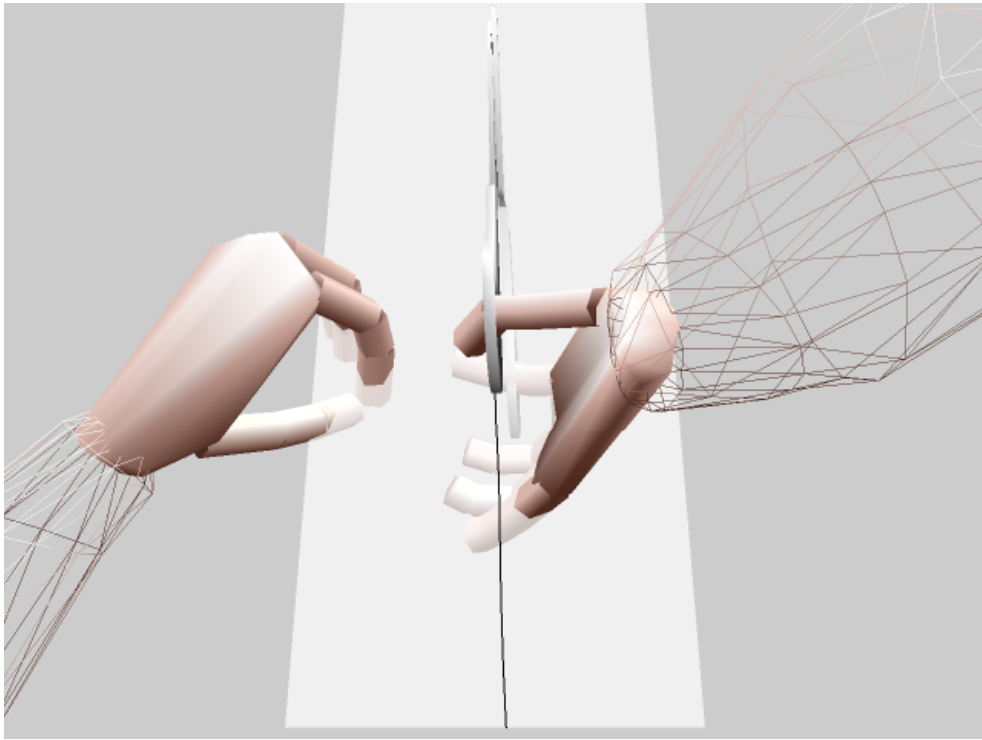


図 5.3 実験中の様子

表 5.1 実験結果

	仮想空間上	実空間上
紙 (1m) の切断時間 (秒)	23.61	33.35
中心線との誤差平均 (cm)	1.61	0.41

表 5.2 アンケート結果

	問 1	問 2	問 3	問 4
評価の平均値	3.5	3.5	2.5	7.0

5.2.3 結果と考察

実験後，被験者から「実際に紙を切っているような感覚がある」などの積極的な意見を得ることができた．問1の評価の最高値は6であった．実験結果からも比較的良好な操作が行えたと判断できる．しかし本実験のような「真中を切断」というタスクに対して，余計な力が入り腕が疲れたという意見もあった．原因として，空中に手をあげたままの動作に加え，補正量が増加したときの違和感があったためと考えられ，そのため，評価の平均値がやや低くなった．また，3～4分の集中した仮想操作の直後にも実際のはさみの操作を問題なく行えた．これは本システムにおいて自然な操作感が実現できていたためであり，変な癖がついてしまわなかったためと判断できる．実際の紙における切断時間の増加は，実際の紙は仮想の紙に対してやわらかく曲がってしまうためであると思われる．

計算速度に関しては，約 20frames/sec の描画が可能であった．

5.3 切断効果音に関する評価実験

5.3.1 実験目的

この実験では，単純なスピーカシステムを用いて，録音された切断音を再生するだけでなく，誇張したり，視覚的に提示されている状況とは別の状況で録音された切断音を再生したりすることにより，切断効果音の臨場感への影響を検証する．またどのような効果音を用いれば臨場感を高めることが可能か検討する．

5.3.2 切断音の種類

実験を行うにあたって，様々な切断音を用意した．切断音の特徴を構成する要素としては，切断される物体の材質，はさみの種類が挙げられる．そこで物体の材質には一般の普通紙と，0.3mm 程度の薄手の布を使用し，そしてはさみはステンレス製の刃の長さの違う 5 種類 (はさみ A ~ E) と切断線がギザギザとなるステンレス製のはさみ (はさみ F) 及びスチール製のたちばさみ (はさみ G) の計 7 種類のはさみ (表 5.3) を用意し，その切断音を録音した．はさみの写真を図 5.4 ~ 図 5.10 に示す．

表 5.3 用意したはさみの種類

	刃の長さ	刃の材質	特徴
はさみ A	45mm	ステンレス	—
はさみ B	60mm	ステンレス	—
はさみ C	75mm	ステンレス	—
はさみ D	105mm	ステンレス	—
はさみ E	140mm	ステンレス	—
はさみ F	40mm	ステンレス	切断線がギザギザ
はさみ G	100mm	スチール	たちばさみ



図 5.4 はさみ A



図 5.5 はさみ B



図 5.6 はさみ C



図 5.7 はさみ D

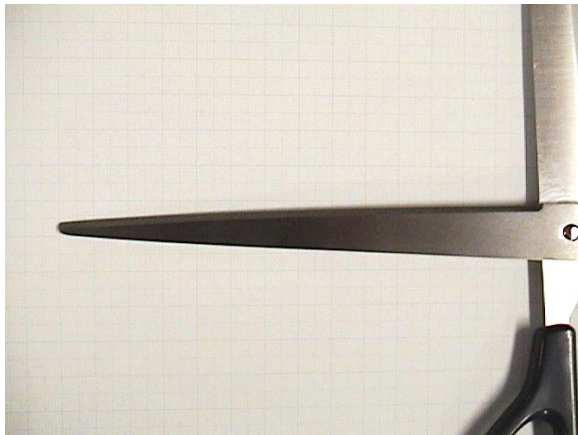


図 5.8 はさみ E

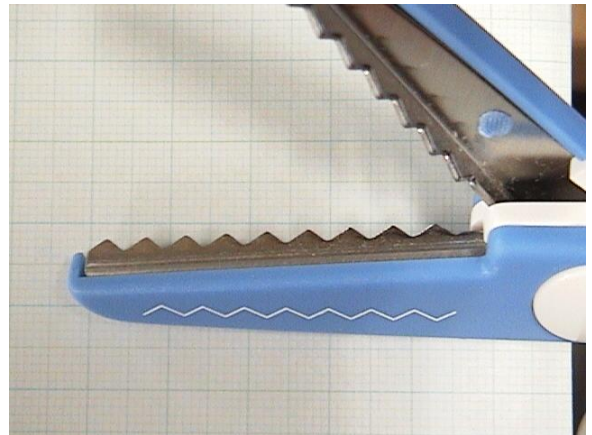


図 5.9 はさみ F

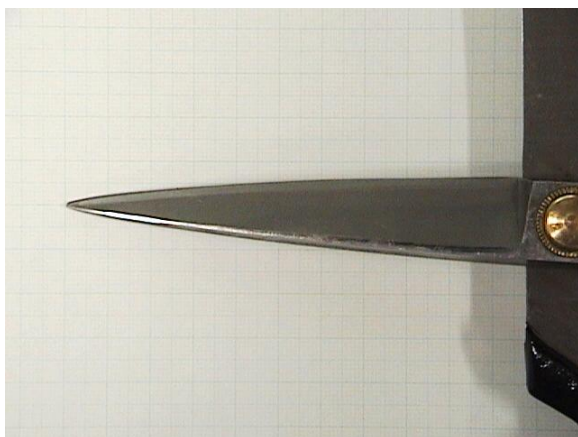


図 5.10 はさみ G

5.3.3 実験1

録音した14種類の切断音自体について、以下の環境下で得点をつけてもらった。

- 切断音のみ聞く
- システム上で操作しながら切断音を聞く

また、それぞれの環境下で、14種類の切断音をどの音も3回聞くことになるように、順番をランダムにして聞いてもらった。

実際の切断音に近いと思う音にはプラスの得点(+1 ~ +3)を、そうではない音にはマイナスの得点(-1 ~ -3)をつけてもらった。

はさみA~Gについて、切断した材質と上記の環境別に、得点を記したものを図5.11に示す。

5.3.4 実験2

実験1で最も高得点であった切断音を有効にしたシステム上で、5.2と同様の条件下で紙を切断する作業を行ってもらい、その後、切断音を無効にしたシステム上で同様の作業を行ってもらった。そして、それぞれの環境下での操作感についてアンケートを実地した。アンケートは6段階評価の形式を取り、以下の3つの質問を用意した。結果を表5.4に示す。

問1 現実感 (ない:1 ある:6)

問2 疲労度 (疲れる:1 疲れない:6)

問3 切断音ありから切断音なしへの環境の変化の際の違和感 (無:1 有:6)

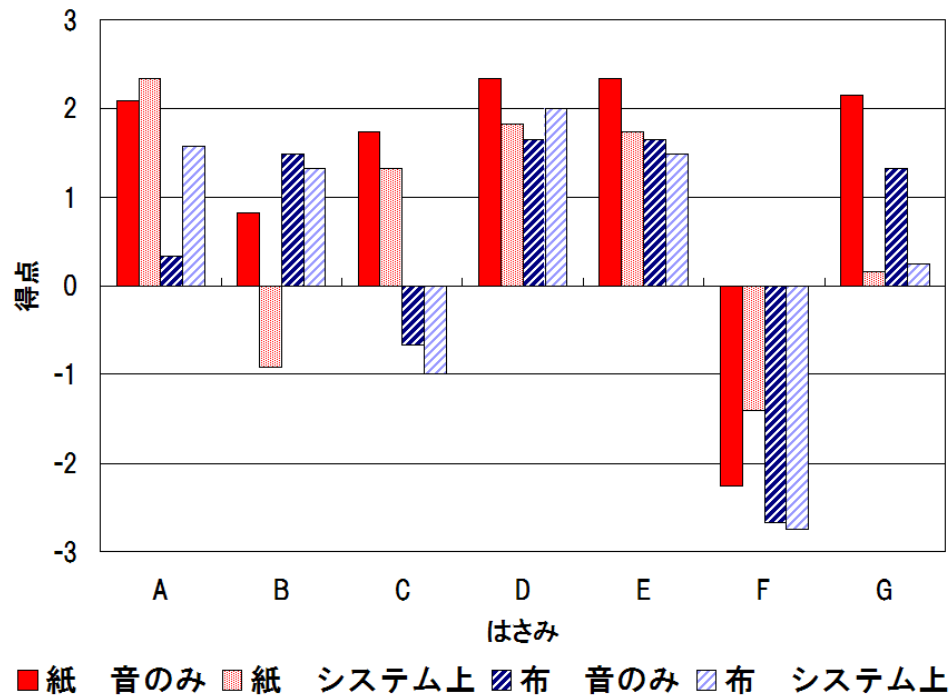


図 5.11 切断音の得点 (平均値)

5.3.5 結果と考察

実験1の結果(図5.11)において、はさみA~Cに関して得点のばらつきが見られるのに対し、はさみD,Eに関しては高い得点が安定して見られる。これは、はさみの刃の長さによる影響が考えられる。はさみの切断音は、切り始めと切り終わりの音の高さが異なっており、刃が長いものほどその変化の幅は大きい。つまりこれは、高さの変化が小さい音より、大きく変化する音の方がより高い臨場感を与えられたと考えられる。

また、はさみA~Cに関しての得点のばらつきについてだが、これは音の周波数の変化が乏しい分、切断する際に生じる雑音のような音を、その音の主だった特徴としてとらえてしまうからではないかと思われる。はさみFのように、物体が裂かれるような鈍い切断音に対して得点が低いことからそれが推察される。

表 5.4 操作感におけるアンケート結果 (切断音の有無)

	切断音あり	切断音なし
問 1	5.0	1.5
問 2	3.25	1.75
問 3	5.25	

はさみ D とほぼ同じ刃の長さを持つ、G のたちばさみに関して、VR 環境での得点が若干低めであるが、これは刃の材質による影響が考えられる。他のはさみと違い、スチール製であるため、音全体がやや高音の傾向がある。被験者からも高音であると操作において軽量感があり実感に乏しいという意見があり、このことから切断音として有効な音域が存在すると思われる。

実験 2 の結果 (表 5.4) が示すように、切断音のある環境において高い評価が得られた。疲労度についても切断音のある環境の方が疲れにくいという結果が得られた。また、切断音のある環境からない環境へと変わったとき違和感を強く感じることから、切断音より切断操作における手応えを感じていたことが分かる。これらのことから切断音に十分な有効性があると判断できる。

5.4 振動効果に関する評価実験

5.4.1 実験目的

第4章4.2節の図4.3に示すように、各指の振動子は本来の触覚とは異なり、手の外側に取り付けられている。また、はさみの操作において手の平での知覚は一般的に行われぬ。この実験では、グローブに取り付けられた振動子を利用し、実際とは異なる知覚を振動として与えることにより、擬似的な触覚が得られるかどうか、また、どのような振動を用いれば臨場感を高めることが可能か検討する。

5.4.2 実験1

実験を行うにあたって、基準となる振動の強さを決定した。振動の強さは0-255の範囲で決定することができ、一般的に十分知覚する強さを76、わずかに知覚する強さを66と経験的に定めた。

まず、振動が臨場感に影響を与えるかどうかを検証するために、以下の振動条件下、視覚のみの環境下、振動を加えた環境下、切断音を加えた環境下、振動と切断音を加えた環境下で、臨場感についての実験を行った。また、切断音は、切断効果音に関する評価実験(5.3節)の実験1より総合的に評価の高かったはさみDで紙を切った切断音を用いる。

- 親指、人差指、中指に強さ76の振動を、手の平に強さ66の振動を与える
- はさみの刃の中ほどから刃先で切断を行っているときに振動を与える

視覚のみの環境下で約10分間の練習の後、6人に4つの環境下で操作を行ってもらった。その臨場感について、7段階評価で得点をつけてもらった。結果を表5.5に示す。

表 5.5 それぞれの環境下での臨場感

	視覚のみ	振動あり	切断音あり	振動・切断音あり
得点(平均値)	2.33	3.83	5.33	6.00

5.4.3 実験2

次に振動を与えるタイミングについての比較・評価を行った。切断操作において、振動を与えるタイミングとして以下の3つが考えられる。

- 紙が切断されている間中に振動を与える
- 刃を閉じきった瞬間のはさみの柄がぶつかる時に振動を与える
- 上記2つの中間である、刃の中ほどから刃先で切断しているときに振動を与える

つまり、振動を与えるタイミングとして、切断を行っている刃の部分が「刃先」「刃の中ほどから刃先」「刃のすべて」の3つのパターンを考える。また振動の強さについては実験1と同様、親指、人差指、中指に強さ76の振動を、手の平に強さ66の振動を与える。

6人の被験者に、どのパターンも3回体験するように、順番をランダムして計9回、振動のみのシステム上で操作を行ってもらった。その後、振動について7段階評価で得点をつけてもらった。その結果を表5.6に示す。

表 5.6 振動を与える各条件における臨場感

	刃先	刃の中ほどから刃先	刃のすべて
得点 (平均値)	4.33	4.55	4.66

5.4.4 実験3

次に，振動させる振動子の部位と強さについて比較・評価を行った．振動させる振動子の部位と強さのパターンは，はさみを握っている指（親指，人差指，中指）と，手の平に焦点を置き，以下の5パターンを用意した．

- 指 (76)，手の平 (76)
- 指 (76)，手の平 (66)
- 指 (76)，手の平 (0)
- 指 (66)，手の平 (76)
- 指 (0)，手の平 (76)

6人の被験者に，どのパターンも3回体験するように，順番をランダムにして計15回，振動のみのシステム上で操作を行ってもらった．その後，振動について7段階評価で得点をつけてもらった．その結果を表5.7に示す．

表 5.7 振動を与える部位と強さ別における臨場感

振動を与える部位と強さ	得点 (平均値)
指 (76)，手の平 (76)	4.22
指 (76)，手の平 (66)	5.27
指 (76)，手の平 (0)	5.00
指 (66)，手の平 (76)	3.61
指 (0)，手の平 (76)	3.16

5.4.5 結果と考察

実験1より、振動を加えることにより臨場感の向上が見られた。しかし、切断音に比べると振動による臨場感への影響は少なかった。また、振動の強さを経験的に定める過程において、振動が強すぎると総合的な評価が低下する傾向にあった。これらのことは、振動の知覚が本来の触覚と厳密には異なっていることに起因すると考えられる。またこの結果から、切断音による高い感触の補完性も見ることもできた。

実験2では、振動を与える各条件にそれほど大きい差は見られなかったが、切断を行っている際は、長く振動を感じられる方が好まれる傾向にあると思われる。

実験3からは、振動は主に指から感じられる方が高い臨場感を示し、逆に手の平に強く振動を感じる場合、臨場感を低下させることがわかった。手の平は他の部位に比べ敏感であるため、指と手の平に同じ強さの振動を与えた場合でも、手の平の方が強く振動を感じ、評価が下がったものと思われる。

5.5 切断音と振動における相互の誘発

5.5.1 実験目的

この実験では，切断音と振動において一方のみを出力しているとき，もう一方の効果を誘発することが可能かどうかについて検証する．

5.5.2 実験方法

実験に用いる切断音として，切断効果音に関する評価実験（5.3節）の実験1より，総合的に評価の高かったはさみDの切断音を用いる．また振動は，与える部位を指と手の平とする．

切断音と振動のそれぞれについて，普通に出力した場合，わずかに出力した場合，出力しない場合を考え，以下の実験条件（表5.8）を設定した．また，振動の強さについては，普通に出力した場合は80，わずかに出力した場合は60とした．

表 5.8 実験条件

	条件1	条件2	条件3	条件4	条件5
切断音	あり	あり	あり	微弱	なし
振動	あり	なし	微弱	あり	あり

被験者3人にどの実験条件での操作も3回体験するように，順番をランダムにして計15回，システム上で操作をしてもらい，切断音と振動を感じたかどうかのアンケート（0: 感じなかった 1: わずかに感じた 2: 感じた）を行った．なお，被験者には切断音と振動をわずかに出力している場合があるということを伝えておく．結果を表5.9に示す．

表 5.9 切断音及び振動の知覚

	音:あり 振:あり	音:あり 振:なし	音:あり 振:微弱	音:微弱 振:あり	音:なし 振:あり
切断音の知覚	2.00	2.00	2.00	1.00	0.00
振動の知覚	2.00	0.00	0.66	2.00	2.00

5.5.3 結果と考察

実験の結果，振動がなく切断音が聞こえているときわずかに振動を知覚したり，また逆に，切断音がなく振動を感じているときわずかに切断音を知覚するといった，一方からもう一方の効果の誘発は見られなかった．特に切断音については，実験条件と一致する結果になった．また振動に関しては，微弱の際，知覚しなかった場合もあった．これは，手にグローブをつけているという感覚が既があり，かつ操作時には指を動かすため，振動の知覚のみをとらえることが難しいからだと思われる．

5.6 切断音と振動の相互影響に関する実験

5.6.1 実験目的

この実験では，切断音と振動を加えたシステム上で，切断音と振動の一方がもう一方に対して，各々の評価に影響を及ぼすかどうかについて検証する．

5.6.2 実験方法

実験に用いる切断音として，切断効果音に関する評価実験（5.3節）の実験1より，総合的に評価の高かったはさみD，中ほどの評価であったはさみG，最も評価の低かったはさみFの3つの切断音（切断音a～切断音c）を用いる．また，振動も同様に，振動効果に関する評価実験（5.4節）の実験3より，評価の高かった振動（指:76, 手の平:66），中ほどの評価であった振動（指:76, 手の平:76），最も評価の低かった振動（指:0, 手の平:76）の3つの振動（振動a～振動c）を用いる．

以上の切断音，振動を用いて以下の実験を行った．結果を表5.10，表5.11に示す．

1. 切断音a～cについて，高評価だった振動（振動a）がある場合とない場合の計6パターンの環境下で，被験者に操作をしてもらい，システムの総合的な評価ではなく，切断音自体について7段階評価で得点をつけてもらう．なお，被験者には切断音が3種類だということは伏せておく．
2. 振動a～cについて，高評価だった切断音（切断音a）がある場合とない場合の計6パターンの環境下で，被験者に操作をしてもらい，システムの総合的な評価ではなく，振動自体について7段階評価で得点をつけてもらう．なお，被験者には振動が3種類だということは伏せておく．

表 5.10 切断音についての評価

	得点 (平均値)
切断音:a 振動:あり	5.33
切断音:a 振動:なし	5.16
切断音:b 振動:あり	5.16
切断音:b 振動:なし	4.83
切断音:c 振動:あり	4.00
切断音:c 振動:なし	2.83

表 5.11 振動についての評価

	得点 (平均値)
振動:a 切断音:あり	6.00
振動:a 切断音:なし	5.16
振動:b 切断音:あり	5.66
振動:b 切断音:なし	4.33
振動:c 切断音:あり	3.33
振動:c 切断音:なし	2.50

5.6.3 結果と考察

切断音，振動ともにもう一方が加わることで評価が増加したことから，相互にその効果を高める影響があるといえる．第 5.5 節の実験のように，切断音と振動の，一方のみを与えて，もう一方の効果を感じさせることはできなかったが，一方にもう一方を加えることにより，その効果を向上させることはできた．

また，切断音と振動を加えたシステムの有効性を確認することもできた．

切断音に振動を加えた場合の評価の増加幅に比べて，振動に切断音を加えた場合の評価の増加幅が大きく，このことから切断音による影響の大きさを確認できる．

切断音 c に振動が加わったときの評価の増加幅が他に比べ大きかった．これは，物体が裂かれるような鈍い切断音に対して，特に振動が有効であると考えられる．

第6章

むすび

本研究では，仮想空間における手による仮想はさみを使った仮想紙の切断操作のモデルを提案し，仮想空間で直感的にはさみを操作し，紙を切断することができるシステムを作成した．

本モデルは，一般への VR 技術の普及を考え，新たな道具の追加がソフトウェアのみで行えるように，グローブ状の入力装置を対象としている．また，実験では安価とは言えない入力装置を使用した，将来的には安価なデータグローブを使用することを考え，触力覚フィードバックの希薄な環境を対象としている．そのため，本モデルでは実世界の手と仮想の手との位置などの矛盾を補正により解決している．更に，はさみと紙を正確に接触させるなどの操作が困難とならないように，入力値上は接触していなくても一致させるなどの操作支援としての補正も行い，操作性を向上させている．また，切断時の感触を視覚のみでなく切断音の提示により聴覚にも提示し，また振動の提示により擬似的に触覚に提示することにより，臨場感を高めている．本モデルは，はさみに限らず様々な道具の実現に応用が可能であると考えられる．

また，システム上で切断効果音と振動効果に関する評価実験を行い，希薄なフィードバック環境における切断音と振動効果の臨場感への影響について検証した．種類の異なるはさみ，および切断する材質を用いて録音した様々な切断音による評価実験から，臨場感をより高める音についての特性を見ることができた．また，システムにおける切断効果音の有効性を確認することができた．同様に，様々な振動効果による評価実験から，臨場感を高める振動についての特性を見ることができた．また，システムにおける振動効果の有効性を確認することができた．そして，切断効果音と振動効果の相互影響についても検証した．一方からもう一方への誘発は見られなかったが，相

互にその効果を高める影響があることを見ることができた。また、切断効果音と振動効果を導入した本システムの有効性も確認することができた。

今後の課題としては、効果音による衝突の知覚の実現や、希薄なフィードバックでも操作性を損なわないためのより良い補正方法を検討する必要がある。アンケートによる評価だけでなく、現在進めている脳活動の変化に注目した実験により、完全ではなく希薄なフィードバックのなかで、より効率的な提示方法も開発していきたい [13]。

謝辞

本研究をすすめるにあたって，日頃から多大な御尽力をいただき，御指導を賜わった名古屋工業大学 舟橋 健司 助教授ならびに伊藤 英則 教授に心から感謝致します．

また，本研究に対して御討論，御協力をいただきました中部大学 岩堀 祐之 教授，名古屋工業大学 伊藤 宏隆 助手に深く感謝致します．

また，本研究の機会および実験の機材の御提供など快い御協力を賜りました本田技研工業株式会社にお礼申し上げます．

さらに，本研究を行うにあたり共同研究として御参画いただき，実験の機会を与えて下さいました金沢工業大学 近江 政雄 教授に感謝致します．

最後に，本研究を行うにあたり多大な協力をいただいた諸先輩方をはじめとする名古屋工業大学情報メディア教育センター研究室ならびに関係者の皆様に感謝致します．

参考文献

- [1] 野村淳二, 澤田一哉. ソフトコンピューティングシリーズ10 バーチャルリアリティ. 朝倉書店, 1997.
- [2] 舟橋健司, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎. 3次元仮想空間における仮想手による物体操作モデルと一実現法. 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J81-D-II, No. 5, pp. 822–831, 1998.
- [3] 野口博和, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎. 仮想空間でのハサミによる切断操作のモデルと実現. 情報処理学会論文誌, Vol. 39, No. 12, pp. 3304–3314, 1998.
- [4] 舟橋健司, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎. 仮想空間における仮想手による道具操作のための知識とモデル. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 3, No. 3, pp. 167–176, 1998.
- [5] 日下志友彦, 北村喜文, 正城敏博, 岸野文郎. 物体間のインタラクションを考慮した仮想箸による物体操作. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J84-D-II, No. 3, pp. 519–528, 2001.
- [6] 若松秀俊, 張曉林, 本間達. 力覚表示可能なハサミ型遠隔操作装置による仮想物体の立体視加工. 電気学会論文C, Vol. 119-C, No. 10, pp. 1126–1132, 1999.
- [7] 本間達, 若松秀俊. 任意の位置姿勢で切離可能なノコギリ型力覚表示システム. 第8回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 437–440, 2003.
- [8] 若松秀俊, 高橋琢理, 本間達. ハサミ・ナイフ・ノコギリを組み合わせた遠隔操作による仮想物体の加工. 第5回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 151–154, 2000.

- [9] A. M. Okamura, R. J. Webster III, J. T. Nolin, K. W. Johnson, and H. Jafry. The haptic scissors: Cutting in virtual environments. *Proc. the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 828–833, 2003.
- [10] 北村喜文, 銅子研一, 来山真, 岸野文郎. 仮想箸のための物体の変形と力覚提示の一検討. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 7, No. 3, pp. 291–300, 2002.
- [11] 久保谷太亮, 舟橋健司, 伊藤英則, 岩堀祐之. 仮想はさみを用いた手による紙の切断システム. *日本バーチャルリアリティ学会第9回大会論文集*, pp. 165–168, 2004.
- [12] 佐々木博, 藤田欣也. 力覚提示装置を用いた硬さ提示における視覚情報の寄与と改変効果に関する実験的検討. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 5, No. 1, pp. 795–802, 2000.
- [13] 近江政雄, 舟橋健司, 久保谷太亮, 塚原大祐. フィードバックの質の違いによる脳活動の変化. *日本認知心理学会第3回大会論文集*, p. 19, 2005.

研究業績

- [1] 久保谷太亮，舟橋健司，伊藤英則，岩堀祐之. 仮想はさみを用いた手による紙の切断システム. 日本バーチャルリアリティ学会第9回大会論文集, pp. 165-168, 2004.
- [2] 久保谷太亮，舟橋健司，伊藤英則，岩堀祐之. 仮想手によるはさみを用いた紙の切断システムの実現. 平成16年度電気関係学会東海支部連合大会, P-148, 2004.
- [3] 久保谷太亮，舟橋健司，伊藤英則，岩堀祐之. 仮想はさみシステムにおける切断効果音による臨場感に関する実験. 日本バーチャルリアリティ学会第10回大会論文集, pp. 37-38, 2005.