

Title	九谷焼絵付け体験のための力触覚モデル
Author(s)	長瀬, 文彦
Citation	
Issue Date	2007-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/3576
Rights	
Description	Supervisor:井口 寧, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

九谷焼絵付け体験のための力触覚モデル

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

長瀬 文彦

2007 年 3 月

修 士 論 文

九谷焼絵付け体験のための力触覚モデル

指導教官 井口 寧 助教授

審査委員主査 井口 寧 助教授

審査委員 松澤 照男 教授

審査委員 日比野 靖 教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

510071 長瀬 文彦

提出年月: 2007 年 2 月

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 論文の構成	2
第2章 芸術分野とバーチャルリアリティ技術について	3
2.1 はじめに	3
2.2 コンピュータとVR技術	3
2.3 VR技術と芸術分野	5
2.4 VR技術を利用した芸術分野における従来研究	6
2.5 VRインターフェース	7
2.5.1 力覚を提示するVRインターフェース	7
2.5.2 視覚に向けたVRインターフェース	10
2.6 筆モデルを考慮した研究	11
2.7 九谷焼について	12
2.8 まとめ	13
第3章 絵付け体験システムに用いられる要素技術	15
3.1 はじめに	15
3.2 3Dオブジェクトの生成	15
3.2.1 OpenGLについて	15
3.2.2 ポリゴンを用いた表現	16
3.3 描画の表現手法	17
3.3.1 シェーディング (shading)	17
3.3.2 マッピング (mapping)	18

3.4	力覚生成の手法	22
3.4.1	有限要素法を用いたモデル	22
3.4.2	ばね・ダンパを用いたモデル	22
3.5	まとめ	24
第4章	力覚提示装置を用いた絵付け体験システムの構築	26
4.1	はじめに	26
4.2	絵付け体験システムについて	26
4.3	システム構成	28
4.3.1	PHANTOM Desktop	29
4.3.2	使用する PC	30
4.3.3	Ghost SDK	30
4.4	接触力の生成	31
4.4.1	ばね・ダンパモデルによる反力の表現	31
4.4.2	絵筆全体の反力の生成	33
4.5	まとめ	36
第5章	絵付け体験用絵筆の接触力の評価	37
5.1	はじめに	37
5.2	評価方法	38
5.3	結果	40
5.3.1	絵付け時の荷重と仮想オブジェクトからの反力	40
5.3.2	定数の決定方法	47
5.3.3	被験者による主観評価	48
5.4	まとめ	49
第6章	結論	50
6.1	まとめ	50
6.2	今後の課題	51

図 目 次

2.1	フライトシミュレータの概観	5
2.2	CyberGrasp	8
2.3	SPIDAR の概観	9
2.4	HMD の概観	10
2.5	CAVE の概観	11
2.6	色絵絵替わり八角皿	12
3.1	ポリゴンを用いた表現	17
3.2	シェーディングとシャドーイング	18
3.3	TextureMapping	19
3.4	バンプマッピングの考え方	20
3.5	ソリッドテクスチャリングの考え方	21
3.6	有限要素法	22
3.7	Maxwell モデル	23
3.8	Voight モデル	23
4.1	システムの体験	27
4.2	システムの構成	28
4.3	PHANToM Desktop	29
4.4	面相筆	33
4.5	面相筆にかかる荷重	34
4.6	深さの二乗に対する面相筆にかかる荷重	35
5.1	荷重の計測	37

5.2	絵付け用の九谷焼茶碗	38
5.3	被験者の一人：円	41
5.4	被験者の一人：仮想空間上 円	41
5.5	被験者の平均：円	42
5.6	被験者の平均：仮想空間上 円	42
5.7	被験者の一人：四角形	43
5.8	被験者の一人：仮想空間上 四角形	43
5.9	被験者の平均：四角形	44
5.10	被験者の平均：仮想空間上 四角形	44
5.11	被験者の一人：星型六角形	45
5.12	被験者の一人：仮想空間上 星型六角形	45
5.13	被験者の平均：星型六角形	46
5.14	被験者の平均：仮想空間上 星型六角形	46
5.15	被験者の反力変化	47

表 目 次

4.1	PHANToM 性能表	30
4.2	PC 環境	30
5.1	被験者によるアンケートの集計結果	48

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

近年のめざましいコンピュータの性能の向上により、コンピュータグラフィックス (CG) といった非常に多くの演算量を必要とする分野に対しても研究が行われるようになってきた。コンピュータグラフィックスには、2次元の画像処理、3次元の画像処理、それらを用いてのアニメーションなどの動画といったものに大別できる。

その応用として行われている分野がバーチャルリアリティ (Virtual Reality: VR) である。バーチャルリアリティとは、コンピュータ上で作成した仮想世界を人間に疑似体験させることを行うテクノロジーである。これを用いたシステムには、フライトシミュレータなどのライドシミュレータや、放送局で用いられているバーチャルスタジオシステムなどがあり、最近では多かれ少なかれ、なじみのあるものとなっている。また、バーチャルリアリティ技術における人間とコンピュータの間に直感的な橋渡しを行うインターフェースという特性上、直感的な操作を必要とする芸術といった分野においても盛んに研究が行われている。

そこで、本研究ではその芸術分野におけるバーチャルリアリティ技術の利用に着目した。ここで考えている芸術とは石川県の伝統工芸である九谷焼である。

九谷焼は絵付けを主としている焼き物である。焼き物の絵付け (上絵付) や釉薬を用いた色付けを行う制作過程では、学習の際、実際に手を使った動作で早く効果が得られ、立体表示による没入感で、現実には体験している感覚を得られる。これを実現するため力覚提示装置 PHANTOM を用いる。これを用いて九谷焼絵付の体験学習を仮想空間上で行うことで、練習のコストと時間の削減がはかれる。

また、絵付けが主である九谷焼の場合、一度に大量の器を買い付けて売れる絵柄を描くことしかできず、新作を作り出せないという問題を抱えている。VR 技術を用いれば、九谷焼の新たな絵柄の作品を制作することができ、予め作品に対する評価を受けることができ

るだろう。そうなることにより、多大にかかるコストの削減と新作を生み出す機会が得られる。

そこで今研究では、新作を作り出すための支援となるべく、絵付けの体験学習が行えるような3次元のシステムの開発に向けた研究を行う。

1.2 論文の構成

本論文は以下の内容で構成している。

第1章では、序論として本研究の背景と目的を示した。

第2章では、コンピュータとVR技術の関わりを述べ、VR技術を用いた芸術技術に関する従来研究について検討を行い、その代表的な手法についての問題点を説明する。また、近年のVR技術の利用目的や視覚に訴える、もしくは触覚を与えるVRインターフェースについての概略を述べる。

第3章では、仮想環境を構築する上での様々な表現方法について説明する。また、今回構築する3次元における絵付け体験のシステムの概略について説明する。

第4章では、本研究で提案する3次元で行う絵付けシステムにおける、反力生成手法について説明する。また、システム構成等についての説明も行う。

第5章では、前章までに説明した提案手法を用いてシステムを動作させ、反力生成の実験を行い、システムの性能評価を行う。

第6章に本論文のまとめと今後の課題について述べる。

第2章 芸術分野とバーチャルリアリティ技術について

2.1 はじめに

バーチャルリアリティの技術は広い分野において、その利用方法が開発されている。その背景にはコンピュータの利用をもっと直感的にするというバーチャルリアリティ技術の持っている要素に関係している。

通常、コンピュータグラフィックスというものは、コンピュータと操作する人間の間には現実とは異質の世界を介しての作業となっている。その隔たりのため、操作が直感的にはなにくく、また現実感を得ることができなかった。

そこで、五感を刺激する効果を組み合わせて、人工的に現実感を作り出す技術としてバーチャルリアリティの技術が生まれた。つまり、コンピュータとの対話を求めて生まれた技術であるといえる。

そして、この技術はコンピュータ性能の向上やネットワークの高速化により、急速に進歩してきた。

2.2 コンピュータとVR技術

バーチャルリアリティの起源は、1960年代にI. Sutherlandが当時、計算機による図形処理の研究を進めていて、2次元的な描写しかできないディスプレイに不満を抱いたため、HMD(Head Mounted Display)による立体視を開発したことに始まり、その後、この研究に刺激されたF. P. Brooksが触った感触を与えるフォースフィードバックを行うシステムを開発したりといったように広まっていった。[3]

近年のコンピュータの発達に伴い、コンピュータも以前の数値シミュレーションからよ

りグラフィカルな描写を行うことを要求されるようになってきた。

バーチャルリアリティ技術はコンピュータの発達により実現するようになった技術である。バーチャルリアリティとはコンピュータにより仮想的に生成された疑似空間内でリアル・ノンリアルな内容についてをシミュレーションし、人間とのインターフェースとして働かせる技術である。

人間は手を使うことで空間とのつながりを持っている。人間の脳は手と空間の両方の状況を感じつつ手の操作を行う。

力覚提示装置は手の感覚の触覚に関しての制御を行うことで、手を操作することを助けるため、仮想空間内における操作性を向上させることができる。

以前のバーチャルリアリティ技術は視覚と音声を中心に行われてきた。コンピュータの性能向上を果たしている現在では、力触覚提示装置による力覚や触覚の仮想的な再現を実現できるようになっている。。

バーチャルリアリティ技術の発展は、一般に画像や音声であったものに加えて、力覚といった新たな感覚に関しても仮想的に提示することができるため、力覚提示装置を用いた仮想現実システムという方面の研究も盛んになってきている。鈴木ら [11] によると、仮想力覚提示を伴った仮想現実システムの応用分野として、以下のような分野が存在すると分類している。

- 芸術分野

- － インタラクティブアート，造形支援システム

- 医療・福祉分野

- － 医療用シミュレータ，リハビリ支援システム

- 工業分野

- － ロボットの遠隔操作

- アミューズメント分野

- － コンピュータゲーム，ライドシミュレータ

現在もこれらの分野を中心に様々な研究開発が行われており、実用化に向けて進歩し続けている。

現在、これらの分野の中でも、多くの人にとって特に身近なバーチャルリアリティの世界はアミューズメント分野であろう。ゲームセンターにあるようなコンピュータゲームにもよく用いられているため、バーチャルリアリティは一般にゲームのイメージもある。しかし、教育としてのライドシミュレータも、たとえば車の教習所においてあったりするためによく知られているものである。ライドシミュレータには、このような身近なものから、航空機などのフライトシミュレータ (図 2.1, [3]) といったものまで存在する。

今後は更に VR 技術が人々の生活に身近で役立つ技術として発展していくことが期待される。



図 2.1: フライトシミュレータの概観

2.3 VR 技術と芸術分野

バーチャルリアリティはコンピュータによる仮想空間上でグラフィカルなシミュレーションを行うことができるという特徴があるため、この装置を利用して、現在では様々なアプローチによる VR 環境での芸術技術の表現法についての研究が行われている。その手

法に関しては、視覚のみに訴えかけるものから力覚を伴うものなど様々である。

多種多様のこの分野の研究において共通していることは、芸術のテクニックを仮想空間上での表現のために、仮想空間内におけるオブジェクト同士の衝突判定を行い、反力や変形、移動等の挙動をコンピュータ上で計算して提示するシステムの構築を行っているということである。

そこで、VR 環境下での芸術分野における作業に関する研究の紹介をする。

2.4 VR 技術を利用した芸術分野における従来研究

芸術のテクニックを表現しようとさまざまな力覚を伴ったシステムの研究が行われている。

吉田ら [9] が開発した Sumi-Nagashi システムは、コンピュータ上で生成された墨絵を机の上にプロジェクタを用いて投影することで机をキャンバスのように扱うことができ、コンピュータ上に絵を描いていくというものである。キャンバスのように扱われている机にはモータを用いて反力を生成することができるため、筆型デバイスの位置情報を受け取ることで操作する人間に反力を返す。没入感に関しては、机に直接触れて作業しているため難しい。

野間ら [10] の開発したシステムは、リニア誘導モータによりスクリーン自体が力触覚提示装置となるというものである。

スクリーンを力触覚提示装置として扱うことで操作者の視界を遮るものを一切無しにして自由に指先に力覚を与えることができる。

しかし、システム全体が非常に大規模なものになってしまう上に、2 自由度の力覚が提示できるのみのこのシステムでは、触る対象であるオブジェクトの特性を十分に表現できない。

2.5 VR インターフェース

以下に、バーチャルリアリティで用いられているさまざまな VR インターフェースとしての装置について説明する。

2.5.1 力覚を提示する VR インターフェース

これまで、様々な種類の仮想力覚提示装置が提案および開発されている。

CyberGrasp

CyberGrasp は、手に装着することで各指先に反力を提示する力触覚デバイスである。[4] 仮想空間内で物体を操作すると、物理特性を反力として操作している人間に力をフィードバックする。

反力は指先に取り付けられたワイヤーからの張力により発生し、各指に最大 1.2 [N] の反力を提示することが可能となっている。

ユーザは CyberGlove と呼ばれるセンサによって指の動きを取得するデバイスを装着し、その上から CyberGrasp を装着する。

CyberGrasp は力触覚発生装置 (FCU: Force Control Unit) に接続されており、これによって CyberGlove から得られる入力データに応じた力触覚をデバイスに出力する。

図 2.2 にその外観を示す。

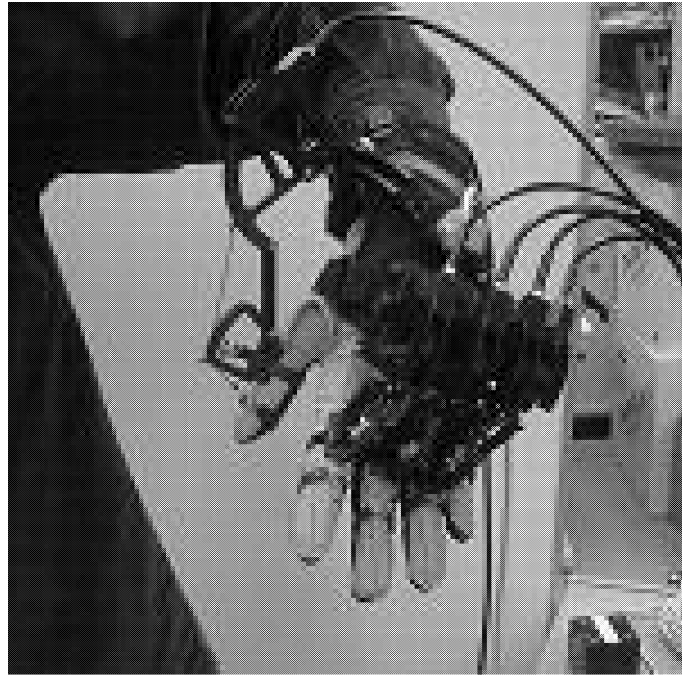


図 2.2: CyberGrasp

SPIDAR (Space Interface Device for Artificial Reality)

SPIDAR は、佐藤ら [5], [6], [7] によって開発された力触覚提示デバイスである。これは糸の張力を利用したデバイスとなっており、立方型のフレーム内の角の点とそこからのびるワイヤーで1つの点が支えられている構造となっている。

図 2.3 にその外観を示す。図は SPIDAR シリーズの中のひとつで中央のボールで制御するタイプのものである。[8]

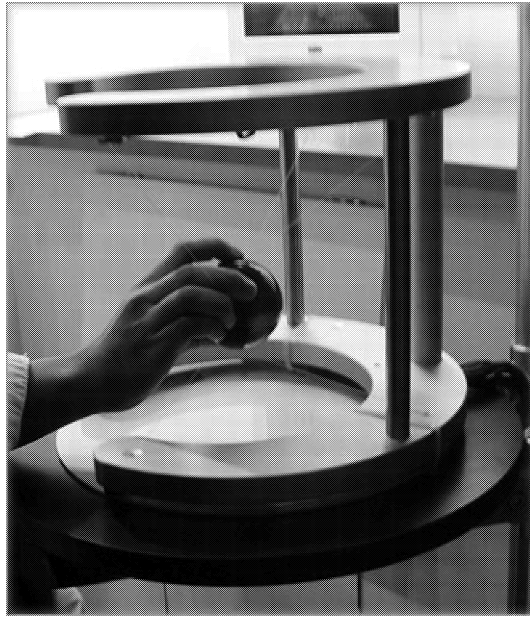


図 2.3: SPIDAR の概観

SPIDAR はフレームに取り付けたモーターにより空間内の座標をつかみ、また発生した力でワイヤーを引き、その張力によって反力を提示している。

ユーザはフレーム内で中央のパーツを操作することでその反力を感じることができる。

しかし、そのフレームをディスプレイと操作者の間に置かなければならず、また、操作範囲はそのフレーム内に限られるといった問題点がある。

2.5.2 視覚に向けた VR インターフェース

HMD:Head Mount Display

頭に装着して視界を覆うヘッドマウントディスプレイ (HMD) は、頭部装着型ディスプレイと訳されることもある。

液晶ディスプレイなどの小型な表示できる装置を常に両目を覆うように取り付けるため、頭部に設置する。両目を覆うのは立体視を考慮しているためで、左右で別々の映像を出力できるものが多い。また、頭部の位置センサと組み合わせることで全周囲の映像を表示させることも可能となるものである。

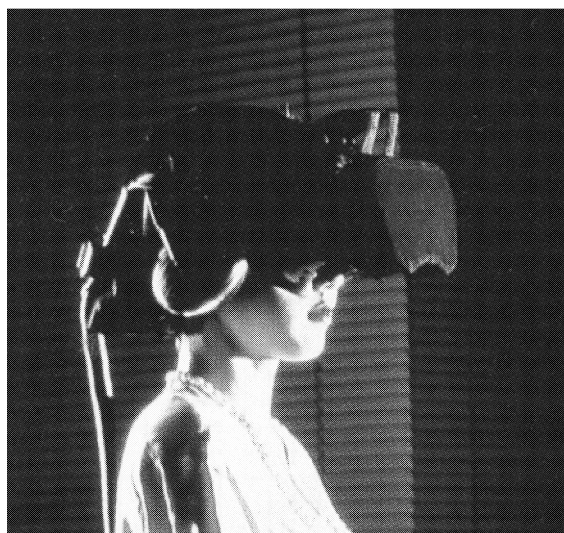


図 2.4: HMD の概観

CAVE

CAVE とは、シカゴにあるイリノイ大学 Electronic Visualization Laboratory によって設計されたもので、前面、左右面、底面の四方を巨大なスクリーンで囲んでいる没入型ディスプレイである（図 2.5）。

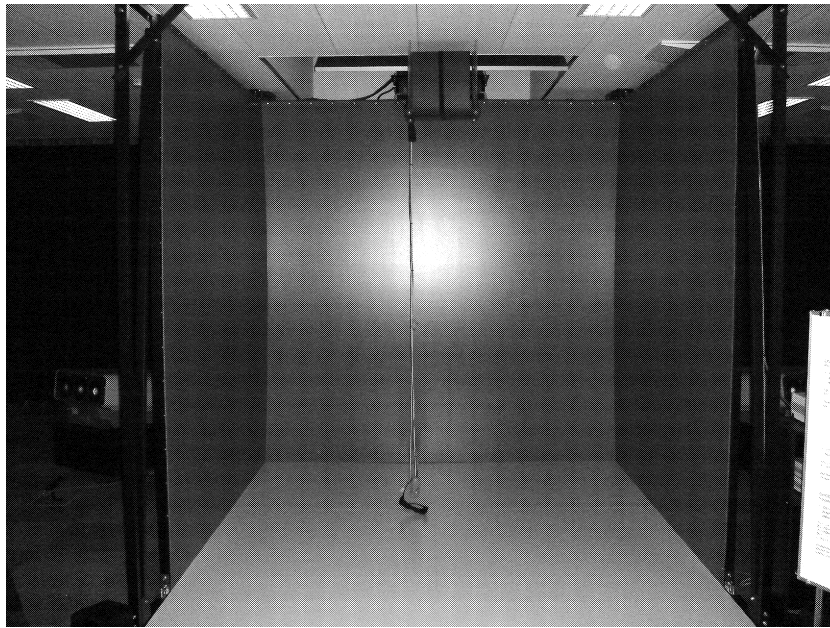


図 2.5: CAVE の概観

2.6 筆モデルを考慮した研究

Daniel ら [16] は、前節の CAVE を用いることで、周囲の世界そのものをキャンバスに見立てて描画を行うことのできるシステムを開発した。このシステムでは筆やバケツ等いくつかのツールでの描画が可能となっている。筆での描画は、スクリーンに向かって筆を移動させると、その部分に描画が行われるというものである。

しかし、筆は入力デバイスとしてのみ動作し反力を得ることができないため、視覚的な没入感のみでの作業になり、現実感に乏しい部分がある。

鈴木ら [11] は、バネ-ダンパモデルに基づいた筆モデルの構築をおこなっている。これは書道における筆を用いて、筆の接する面積を変動させて描画を行うことにより、豊かな表現を実現しているものである。

しかし、平面に対しての筆のシステムであり、立体には対応していない。

本研究では、バーチャルリアリティ空間上の 3 D オブジェクトに対し、絵筆を用いての現実感のあるシステムの構築を目的としている。

2.7 九谷焼について

九谷焼は石川県を代表する伝統工芸の一つである陶磁器のことである。その焼き物としての特色としては、陶磁器表面の色使いにある。しかしながら、焼き物として陶磁器を作るところから九谷焼は始まる。

実際の九谷焼の図 2.6 を示す。[15]

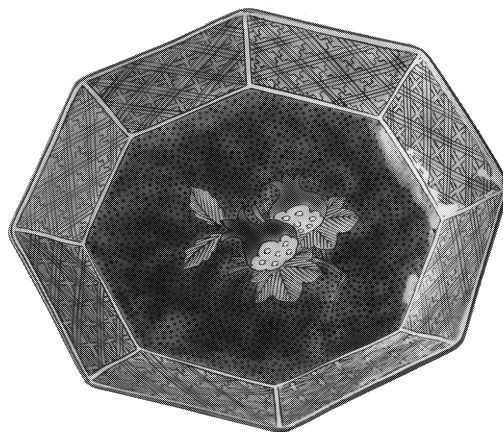


図 2.6: 色絵絵替わり八角皿

その実際の制作過程においては、まず九谷焼の原料となる陶石を採石してきて、それを粉碎し、細かい粉状にする。次には粉にした陶石を粘土状にするため、水簸槽とよばれる場所に浸し、鉄分などの不純物を除去する。そののち水簸槽に沈殿した原料の余分な水分

を抜き、適当な固さになるようにし、杯土を生成する。この杯土を使い、土もみという作業を行う。これをしっかりと行うことで焼成後のヒビや歪みを防ぐことができる。

ここまでの工程が、制作前の段階となる。次には実際の成形になる。成形にもろくろ成形以外にも角形のものを作る場合の鑄込み成形、押型成形、手捻り成形などがあるが、現在の九谷焼ではやはりろくろ成形が主流となっている。成形が終わると、焼成に入る前に乾燥と仕上げという作業が入る。仕上げとは、半乾きの状態の時にかんを用いて高台や外側の削り、縁の仕上げを行うことをいう。この作業を経た後に、素焼きが行われる。陶磁器が壊れないように、窯の温度を約800度まで徐々にあげていき、8時間ほどかけて焼成が終わる。

次に行われることは、色づけである下絵付けと施釉が行われる。施釉では、釉薬を素焼きの表面に均等に塗るために、流しがけや浸しがけを行う。

その後、本窯という作業に入る。この作業では、徐々に温度を上げていくものの、先の焼成とは異なり、約1300度まで15時間程度の焼成を行う。

焼成後には、前段階に行った施釉による釉薬が透明なガラス質になることで陶器の表面を覆う。

これらの工程の後、上絵付けの作業に入る。この上絵付けこそが九谷焼のもっとも大事な特色である。上絵付けの後には、800度から1000度くらいの窯で焼成され、そこで完成となる。

以上のような行程を通し、九谷焼は制作される。

本研究において行いたいことは、以上の行程の中の上絵付けにあたる部分である。

2.8 まとめ

本章では、バーチャルリアリティ技術についての歴史やその特徴を用いた応用的な利用のされ方についての説明を行った。また、その技術に関する研究についても多少説明を行った。

バーチャルリアリティ技術の有している特徴のため、芸術などの文化的な分野においても期待されている。その芸術の一環として九谷焼についての説明も行った。

ここでは、バーチャルリアリティの応用的な使われ方の説明であったが、実際に求めら

れていることは現実により近い仮想世界である。しかしながら、たとえば筆を用いた芸術のテクニックに関して見てみると様々な研究が行われており、そのテクニックを仮想空間上で実現させているが、限りなく現実に近いようなシステムは未だ開発されていない。

そこで次章では、仮想空間内でのオブジェクトの表現方法についての説明を行う。

また、実際の筆の力覚についての検討を行う。

第3章 絵付け体験システムに用いられる要素技術

3.1 はじめに

これまでに仮想空間において3次元オブジェクトを表現するさまざまな手法が提案されている。

本章では、その代表的なオブジェクト表示手法について説明し、本研究のシステムで用いるオブジェクト表現について述べる。

また、力触覚の表現方法についても同様に代表的なモデルについて説明する。

3.2 3Dオブジェクトの生成

3.2.1 OpenGL について

3次元CG描画プログラムを効率的に開発したり、高速描画処理を行うには、コンピュータシステムにあらかじめ準備されている3次元CG用APIを利用して記述する。

OpenGLは多くのコンピュータ上で3DCG表示を行うためのAPIである。Silicon Graphics社(SGI)が中心に開発し、IRIS GLというグラフィックスライブラリをベースに、さまざまなOSやハードウェア上で動作するように改良されている。また、Linux OS上においては、Mesa 3DというOpenGLのAPIを独自に実装したライブラリが広く使われている。OpenGLは、標準化されているために互換性に優れているという長所があるものの、標準でサポートしない高度な処理は、各メーカーの独自拡張機能を利用する必要がある。本研究で利用しているSensAble社のGhost SDKもそのひとつである。

プログラムでは、カメラモデル設定、照明環境設定、座標変換行列の設定、オブジェク

ト座標系でのポリゴン記述などにより、3次元CGのレンダリングが行われる。

そのほかにも3次元CG描画プログラム用のAPIとしてDirectX GraphicsやJava3Dといったものもある。

3.2.2 ポリゴンを用いた表現

3次元コンピュータグラフィックスで、立体の形状を表現するときに使用する多角形のことをポリゴン(多角形:Polygon)という。そのポリゴンの集合を用いることにより3次元のモデリングを行える。

ポリゴンで表現したオブジェクトの例を図3.1に示す。

ポリゴンは、計算のしやすさの面から三角形が使われることが一般的で、頂点とその順序で方向を持った表すことができる。

コンピュータを用いて立体として図形を扱う場合、物体表面を微小な三角形のポリゴンに分割して数値データ化することにより、様々な視点や環境による物体の見え方を計算によって生成し、画像として描画することができる。

ポリゴンの数を増やせば増やすほど表現が精細になっていくが、計算量が増えるため描画に時間がかかるようになる。

そのことを利用し、一秒間あたりに処理できるポリゴン数がビデオチップやゲーム機の性能の指標として使われることもある。

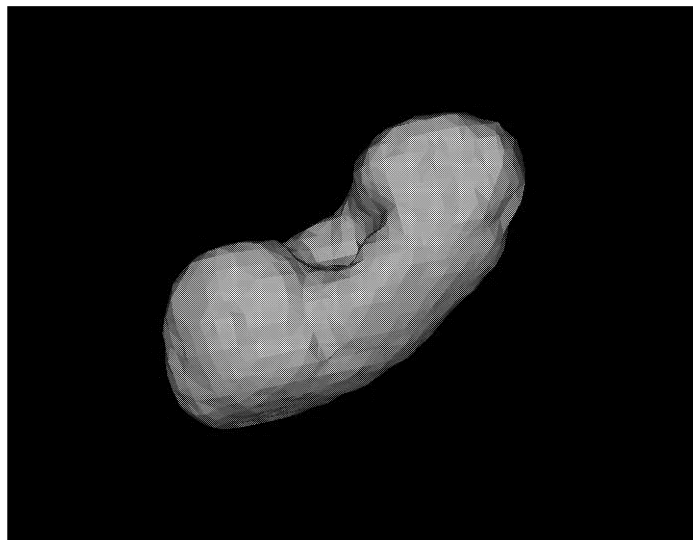


図 3.1: ポリゴンを用いた表現

3.3 描画の表現手法

3.3.1 シェーディング (shading)

光源によって照らされた物体をみると、物体表面の場所によりその明るさが異なっている。つまり、光の照射方向と面の向きにより明るさが変化している。3次元CGにおいて、光の当たり具合によってコントラストが変化する部分の明るさを計算して表示することをシェーディングという。

シェーディングのモデルを構成する要素には、物体を照らす光源の種類のほか、それらの特性、光と物質の相互作用、反射、透過、屈折などの光学的性質がある。要素のひとつである光源には、太陽光線のような平行光線、一点から出た光が放射状に広がる点光源、長さを持つ線光源、大きさを持つ面光源がある。光と物質の相互作用を考えた場合、直射光、間接光に分類され、間接光の中に反射光、透過光、散乱光が含まれる。

また、光が物体に遮られた部分に影をつけるシャドーイングはシェーディングと対をなすものであり、両方を行うことにより、写実的な画像を生成することができる。シェー

ディフューズとシャドウイングについて図 3.2 に示す。[14]

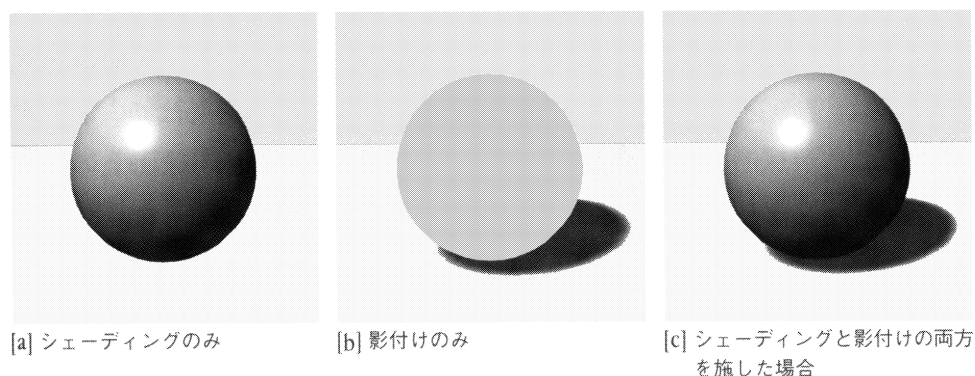


図 3.2: シェーディングとシャドウイング

3.3.2 マッピング (mapping)

実際の物体の表面状態は細かい凹凸や反射率の変化がある。それと同様の表面状態を正確に直接ポリゴンなどで再現することはたいへん手間がかかる上に、表示するための効率も悪い。そこで用いられるのがマッピングという技法である。これは3次元物体と画像を対応付けし、模様や凹凸といった表示効果を追加することができる。このマッピングという技法には、2次元平面上で定義される画像や関数を3次元物体面や曲面上にマッピングする手法と、3次元空間で定義されるパターンや関数を3次元物体にマッピングする方法がある。前者の手法には、画像や模様を貼り付けて表示するテクスチャマッピングや凹凸を表現するバンプマッピングなどがあり、後者の手法には、ソリッドテクスチャリングがある。

テクスチャマッピング (texture mapping)

物体面上の各点とテクスチャ上の点をそれぞれ対応付けて行われる。テクスチャマッピングの代表的な対応付けには投影による方法、極座標変換を用いる方法、パラメー

タ座標を用いる方法の3種類がある。

投影による方法は、透視投影や平行投影の投影方向を逆にして、スクリーン上にテクスチャーを配置し、物体面にそれを投影する方法である。フィルムに映っている画像を OHP などの投影装置でスクリーンに映すことと同じ考え方である。この方法は、スポットライトの照明効果や影の表示などにも用いられる。

極座標変換を用いる方法は、物体の中心に極座標系の原点を置き、計算点の3次元直交座標を極座標へ変換し、極座標系の経度と緯度を表す角度を正規化することによりテクスチャーの座標と対応付ける方法である。主に球形の物体表面のマッピングに対して用いられている。この手法の欠点は、極に近い地点のマッピングはテクスチャーが圧縮されてしまうことにある。

パラメータ座標を用いる方法は、ベジェ曲面などのパラメトリック曲面上にテクスチャーをマッピングする場合に主に用いられる。パラメトリック曲面では、3次元空間の曲面上の点を2つのパラメータ (u, v) により表す。これらのパラメータを変化させることにより、曲面上の点の3次元座標値を得るので、このパラメータをテクスチャの座標と対応付けることで行う。さまざまな3次元形状のモデルに対してマッピングできるが、テクスチャーが歪んでマッピングされてしまうという問題があるため、それを解決する手法が研究、開発されている。そのテクスチャーマッピングの例を図 3.3 に示す。

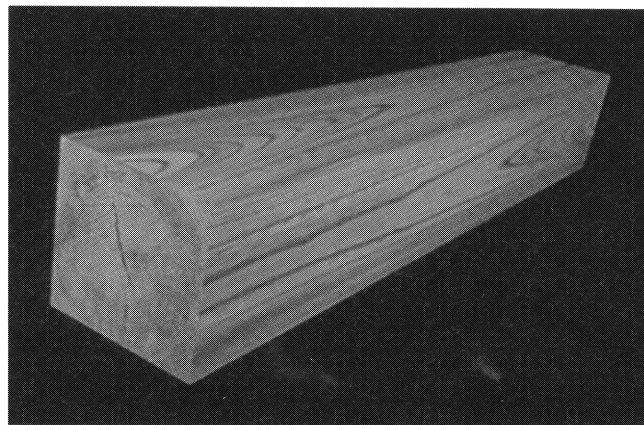


図 3.3: TextureMapping

バンプマッピング (bump mapping)

実際のオブジェクトには凹凸のある模様は少なくない。それを3Dオブジェクトで再現する場合、ポリゴンでその凹凸を作る場合、手間と計算量が非常に大きくなってしまう。そこで、凹凸を定義したテクスチャを追加することでシェーディングによる面の明るさを変化させて凹凸感を表現する技法がバンプマッピングである。

バンプマッピングの考え方について図3.4に示す。[14]

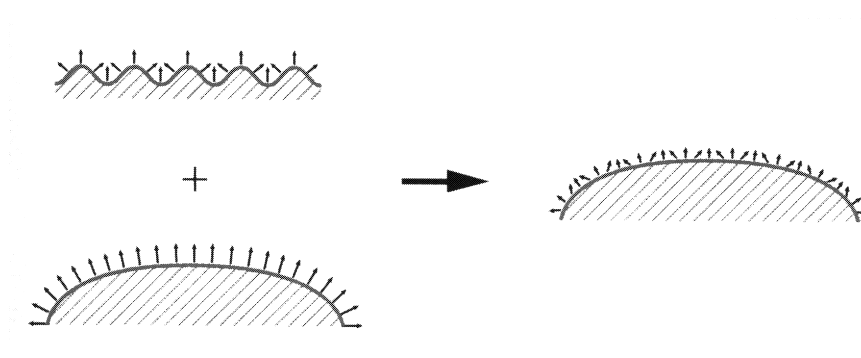


図 3.4: バンプマッピングの考え方

ソリッドテクスチャリング (solid texturing)

木材や大理石のテクスチャを六面体の各面にマッピングして表示する場合、それぞれの境界部分のテクスチャ同士の模様を合わせてマッピングすることは困難である。また、球体の表面のように極座標系を利用している場合、テクスチャが1点に集中して極が生じる。

そこで開発された技法がソリッドテクスチャリングである。これは3次元空間で定義される関数を用いて3次元テクスチャを定義しておくことで、それをさまざまな形状に切り出して表示することが可能である。そうすることにより、3Dオブジェクトの切り出しや切断面においてもリアルな画像を生成することができる。

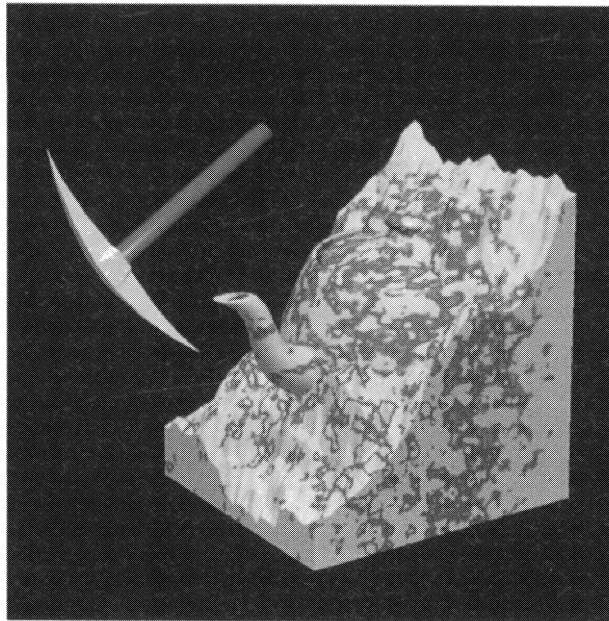


図 3.5: ソリッドテクスチャリングの考え方

3.4 力覚生成の手法

3.4.1 有限要素法を用いたモデル

有限要素法（FEM:Finite Element Method）は、コンピュータにより構造物の変形や応力を解析するための近似手法である。

この手法では、対象となる物体を有限個の「要素」に分割して、それぞれの領域について計算を進める。その要素の形状は様々であるが、図 3.6 の様に三角形要素をとる場合が多い。

この有限要素法により、どのような形状のものでも扱える、3次元解析、弾塑性解析等が比較的容易に行え、更に粘弾性解析やクリープ解析、疲労解析等、従来までは扱えなかった問題についても適用可能であるという特色を持っていることから、現在の工学の分野では欠かせない手法となっている。

この手法は要素の数を増やすほどにその精度は向上するが、その分計算量が膨大になってしまうという欠点もある。

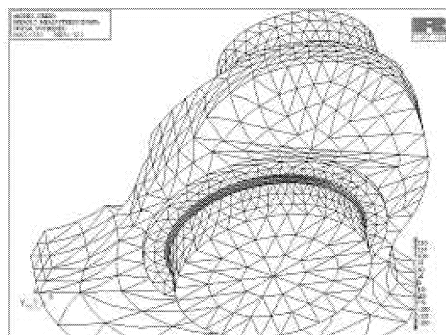


図 3.6: 有限要素法

3.4.2 バネ・ダンパを用いたモデル

バネモデルは、加重、除重すると瞬時に変形する性質を持っていて、一方のダンパモデルの方は、加重すると徐々に変形し、除重してもそのままの形を維持する性質を持って

いる。

この2つのモデルを組み合わせることで、加重すると徐々に変形し、力を加えるのをやめると元の形状には戻らないが、徐々に元に戻り始めるという性質を表すことができる。

組み合わせとして、バネとダンパを直列に繋いだモデルをマクスウェルモデルと呼び、並列に繋いだフォークトモデルと呼ぶものがある。以下にその図 3.7、3.8 を示す。

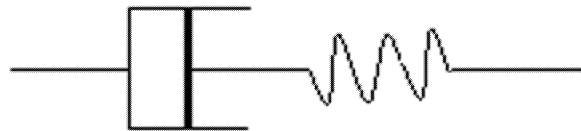


図 3.7: Maxwell モデル

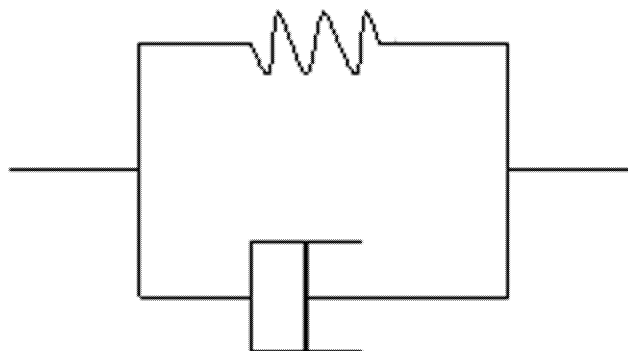


図 3.8: Voigt モデル

マクスウェルモデルに加重した場合、はじめ瞬時にバネが伸び、徐々にダンパの部分が

伸びていき、除重するとバネが瞬時に縮む。しかし、ダンパの部分は伸びっぱなしの状態になるため、元の形状には戻らない。

フォークトモデルの方に加重すると、バネ部分が瞬時に伸びようとし、並列に繋がったダンパの部分がそれを抑制するため、徐々に伸び始める。のち除重すると、バネとダンパが互いに影響し合い、徐々に元の形に戻る。[13]

ここで、ばねモデルを用いたとき、それにより生じる反力 $\mathbf{F}_s$ は、

$$\mathbf{F}_s = -k_s \cdot \mathbf{x} \quad (3.1)$$

となる。 k_s はばね定数、 $\mathbf{x}$ は変位を表す。

一方のダンパモデルで生じる反力 $\mathbf{F}_d$ は、

$$\mathbf{F}_d = -k_d \cdot \mathbf{v} \quad (3.2)$$

となる。ここで、 k_d はダンピング定数、 $\mathbf{v}$ はオブジェクトの速度ベクトルを表す。

この二つより、マクスウェルモデルとフォークトモデルは表されるが、本研究では徐々に元の形に戻ることのできるフォークトモデルを利用する。

そこで、フォークトモデルにより求められる反力 $\mathbf{F}$ はこの2つより、

$$\mathbf{F}_{sd} = \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_d \quad (3.3)$$

と表される。

3.5 まとめ

本章では、使用者に向けた視覚と触覚に対する仮想オブジェクトの表現方法について説明した。

本研究における提案システムでは、視覚的な表現のためにはポリゴンを使用して、仮想空間のオブジェクトの作成を行う。

また、触覚を示すためには、ばねダンパモデルを用いて反力の生成を行うことにした。次章では、提案する提示システムの構築に関しての説明を行う。

第4章 力覚提示装置を用いた絵付け体験 システムの構築

4.1 はじめに

実際の九谷焼の絵付けには、絵付けを行うためにたくさんの材料が必要となり、またやり直しができないものであるため、絵付けを学ぶためには大変な経費と時間を要してしまっている。

そこで、これを改善するべく、仮想空間上で九谷焼絵付けと同等のことを行おうと考えたものがこの力覚提示装置を用いた絵付け体験システムである。

4.2 絵付け体験システムについて

本研究では、九谷焼という焼き物についての絵付けを行うことを前提としている。そのため、オブジェクトの形状は平面だけではなく曲面も含んだ形状の物となっている。それゆえに、通常のマウスやペン型の入力装置では、これを行うことは極めて困難であるといえる。

そこで、本研究で提案しているシステムを構築するためには、バーチャルリアリティを実現するための装置が必要となる。

これを構築するために用いた主な装置は、力覚提示装置である PHANToM と PC である。実際の体験システムの画像を図 4.1 示す。



図 4.1: システムの体験

4.3 システム構成

本研究におけるシステムの構成は、以下の図 4.2 のようになっている。

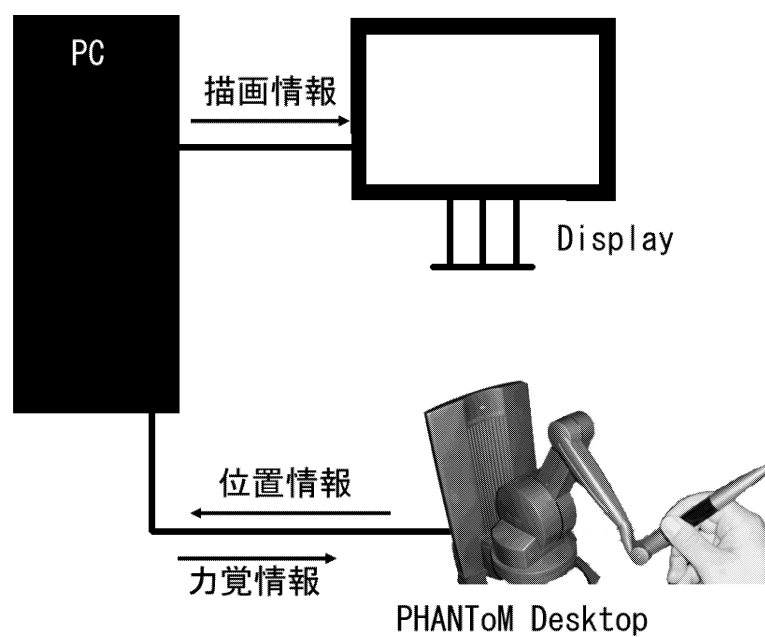


図 4.2: システムの構成

4.3.1 PHANToM Desktop

力触覚提示装置については様々な研究・開発が行われているが、現在、よく使用されている力覚提示装置は SensAble 社で製造されている PHANToM である。

その外観を図 4.3 に示す。



図 4.3: PHANToM Desktop

PHANToM はポイント型のもので位置入力、力出力のデバイスである。入力には位置の 3 自由度とポインタの回転の 3 自由度の計 6 自由度で、出力は位置のみの 3 自由度と回転も含めた 6 自由度のタイプがある。

ユーザは先端部分をペン状に持ち、仮想環境に対して位置を入力し、操作の結果を反力を出力として得る。

本研究で用いたものは、入力が X, Y, Z と回転の 6 自由度、出力が X, Y, Z の 3 自由度の PHANToM Desktop である。

この機構により、操作者に対してオブジェクトの形や硬さ、素材感等を提示することが可能となっている。

表 4.1 は本システムで利用した PHANoM のスペックである。

このデバイスを直接 PC のパラレルポートに接続することで使用可能となる。

位置精度	1100dpi (0.023mm)
最大フォース	7.9N (約 0.8kg 重)
動作空間 (奥×高×横)	120 × 120 × 160mm

表 4.1: PHANToM 性能表

4.3.2 使用する PC

本システムで使用する PC の環境を表 4.2 に示す。

CPU	Main Memory	OS	VGA
Pentium4 2.8GHz	1GB	WindowsXP Pro	Radeon9600Pro

表 4.2: PC 環境

4.3.3 Ghost SDK

GHOST (the General Haptics Open Software Toolkit) は米国 SensAble Technologies 社が開発した、力触覚提示装置 PHANToM の制御用の上位アプリケーション・プログラミング・ツールキット (API) である。これは 3 次元の触覚技術をアプリケーションに組み込むことを可能としたソフトウェアである。

これはオブジェクト志向型の C++ 言語のツールキットとなっており、ビルトイン機能、外部モデル用ライブラリに加え、拡張機能を使用すれば、”触れる”アプリケーションを作成することができる。また 3 次元 CG 用のプログラミング言語である OpenGL に対応しているため、3D モデリングなどの追加を行うことができる。

本研究では、力覚生成部分で GHOST を利用することで仮想環境を構築した。

4.4 接触力の生成

4.4.1 ばね・ダンパモデルによる反力の表現

ここで考える接触力とは、PHANToM を筆と見立てて、仮想空間内の 3 D オブジェクトに触れる際にユーザーに返る反力に関してのことである。

はじめに、仮想空間内のオブジェクトを認識させるため、物体表面を境界とし、そこを定数とおいてみた。

$$\mathbf{F} = \begin{cases} C & (x \leq 0) \\ 0 & (x > 0) \end{cases} \quad (4.1)$$

ここで、C は物体表面の境界としての定数としており、そのほかの仮想空間内を力のかからない 0 とした。ここでは定数を十分大きな値として 10000 を入れている。これにより、物体を知覚することができたが、筆として扱っているという現実感には程遠いものであった。

筆と物体の間には筆の弾力とともに、釉薬による粘性が生じる。

そこで、残留変位、戻り変位を表現するレオロジーモデルとしてマス・バネ・ダンパ法 (MSD 法) を用いる。これは、バネモデルとダンパモデルを複数、直列や並列に繋げ、その両端に質点を配置する手法ことである。

筆の場合、面から話すことで形状は元に戻るため、フォークトモデルが向いていると考えられる。

そこで、新たな反力生成モデルとして、物体の認識にかかる部分、つまり定数とおいていた部分をばねモデルとして作成を行った。ばねモデルとは、入力された距離に対し、線形的な応力を返すモデルである。これを用いることにより、表面を定数とするよりも柔らかい反力を返すようにすることができる。

このばねモデルを使用した際の式は、

$$\mathbf{F}_s = -k_s \cdot \{(\mathbf{x}_{p,t+\Delta t} + \mathbf{y}_{p,t+\Delta t} + \mathbf{z}_{p,t+\Delta t}) - (\mathbf{x}_{p,t} + \mathbf{y}_{p,t} + \mathbf{z}_{p,t})\} \quad (4.2)$$

となる。ここで、 $\mathbf{F}_s$ はばねによる反力で、 k_s はばね定数を表している。また、オブジェクトに接触した時のポイントの座標を $(x_{p,t}, y_{p,t}, z_{p,t})$ とし、そこから Δt 後のポイントの座標を $(x_{p,t+\Delta t}, y_{p,t+\Delta t}, z_{p,t+\Delta t})$ としている。

また、この式から $|\mathbf{F}_s|$ は、

$$|\mathbf{F}_s| = -k_s \cdot \sqrt{(x_{p,t+\Delta t} - x_{p,t})^2 + (y_{p,t+\Delta t} - y_{p,t})^2 + (z_{p,t+\Delta t} - z_{p,t})^2} \quad (4.3)$$

となる。筆の長さを l とすると、

$$\sqrt{(x_{p,t+\Delta t} - x_{p,t})^2 + (y_{p,t+\Delta t} - y_{p,t})^2 + (z_{p,t+\Delta t} - z_{p,t})^2} \leq l \quad (4.4)$$

という範囲になる。

また、物体表面においての絵の具による粘性を感じさせるため、ばねモデルと同時に物体表面から内部にかけて、減衰器モデルを用いる。減衰器モデルとは、入力された速度に対し、応力を返すモデルである。

よって、この減衰器モデルを使用した際の式は、

$$\mathbf{F}_d = -k_d \cdot (\mathbf{v}_x + \mathbf{v}_y + \mathbf{v}_z) \quad (4.5)$$

となる。ここで、 $\mathbf{F}_d$ は減衰器による反力を表し、 k_d は減衰係数、 $\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y, \mathbf{v}_z$ は PHANToM のポイントの速度となる。

これらを用いて合わせることにより、作り出される力 $\mathbf{F}_{sd}$ は、

$$\mathbf{F}_{sd} = \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_d \quad (4.6)$$

となる。

4.4.2 絵筆全体の反力の生成

F_{sd} による接触力は、一点で触れた場合の反力となる。本研究において行おうと思っていることは、絵筆についての取り扱いであるため、その特性に合わせなければならない。

ここで、筆の形状を三角錐と見立てて近似する方法も検討した。しかし、本研究において使用している面相筆の形状は毛の長さが一様であるため、三角錐よりもむしろ円柱に近い形状であり、あまり相応しい近似ではないと判断した。

そこで本研究にて用いられる面相筆の反力特性を実際に測定した。

実際に使用した面相筆は図 4.4 である。

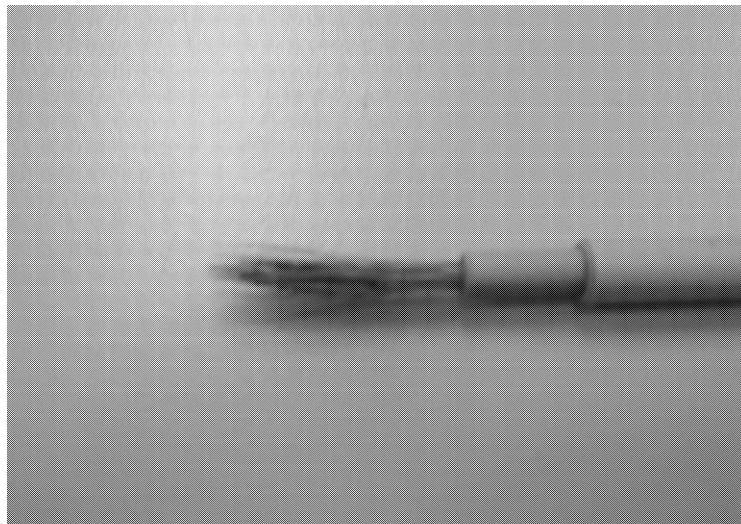


図 4.4: 面相筆

この計測では、実際に釉薬をつけた状態の面相筆を用いて、電子秤の上で垂直状態で 1mm 間隔に沈めていったときの荷重を測定した。以下にその測定結果のグラフを図 4.5 に示す。

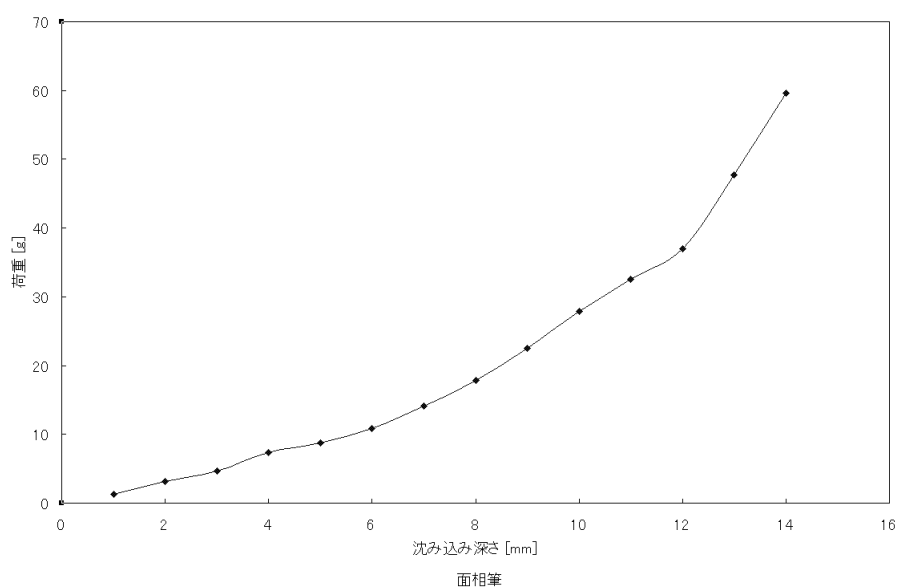


図 4.5: 面相筆にかかる荷重

このグラフによると、反力は沈み込みの深さが徐々に緩やかな上昇傾向を示している。よって、これは筆の沈み込みの深さに対して線形的ではない反力ということになる。そこで、このグラフから筆の沈み込みに対して線形になるもので近似のものを探したところ、沈み込みの深さの二乗を行ったものが近い形状を示した。図 4.6 が先の図 4.5 の沈み込みの深さを二乗した場合のものである。

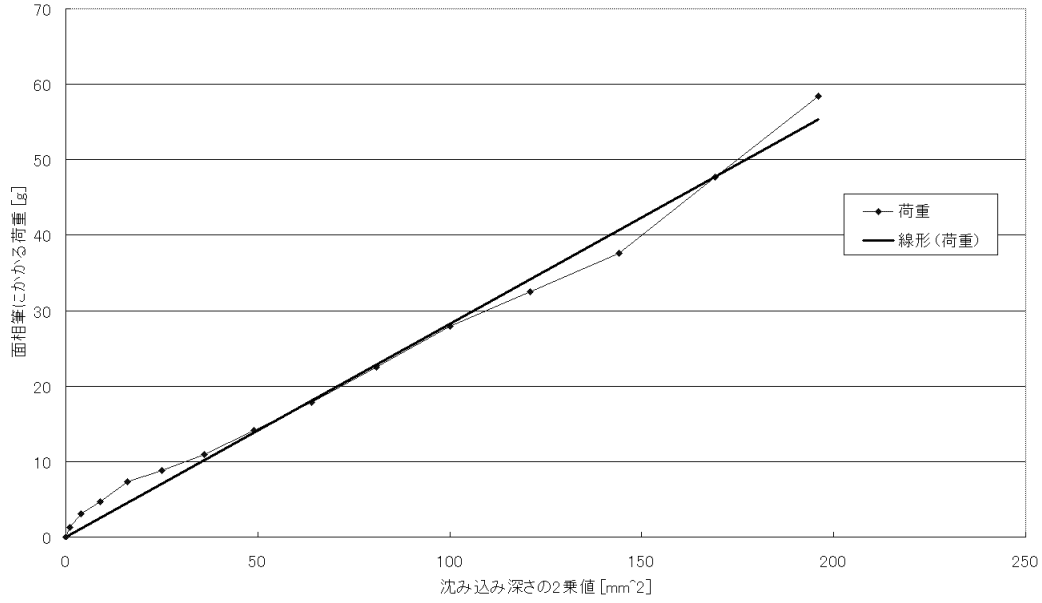


図 4.6: 深さの二乗に対する面相筆にかかる荷重

この結果をふまえ、本研究においては沈み込み深さの二乗を用いて、絵筆全体を表す係数とする。

沈み込みの深さ d は、前項より

$$d = \sqrt{(x_{p,t+\Delta t} - x_{p,t})^2 + (y_{p,t+\Delta t} - y_{p,t})^2 + (z_{p,t+\Delta t} - z_{p,t})^2} \quad (4.7)$$

と表現することができる。

よって、絵筆全体を表した場合の反力 $\mathbf{F}$ の式は、

$$\mathbf{F} = (\mathbf{F}_s + \mathbf{F}_d) * \{(x_{p,t+\Delta t} - x_{p,t})^2 + (y_{p,t+\Delta t} - y_{p,t})^2 + (z_{p,t+\Delta t} - z_{p,t})^2\} \quad (4.8)$$

となる。

これにより、柔らかい絵筆の感触に近づけることが可能となる。

4.5 まとめ

本章では、まず本研究におけるシステムの構成についての説明を行った。

そして力覚提示に関して手法の説明を行った。

また、実際の絵付けで用いられている面相筆を持って、その垂直からの荷重の計測を行った。

その結果から、絵筆全体を表現する係数の検討を行った。それを導入することで筆としての触感を高めた。

第5章 絵付け体験用絵筆の接触力の評価

5.1 はじめに

今研究では、九谷焼の技法の中の絵付けに注目しての研究を行っている。陶磁器の絵付けの場合には、釉薬という水や油には溶解しない着色用の色材で顔料の一種のものをを用いるのであるが、その点で通常の絵画とは異なる。

そのため、接触力の評価のために、実際の絵付けの中でも用いられている筆や釉薬、陶磁器を用いて、そこにかかる荷重の計測を行った。計測についての図は図 5.1 で示す。



図 5.1: 荷重の計測

5.2 評価方法

直径 12cm、高さ 5.5cm（高台部分 0.5cm 含む）の九谷焼の茶碗をもって評価を進める。
（図 5.2）

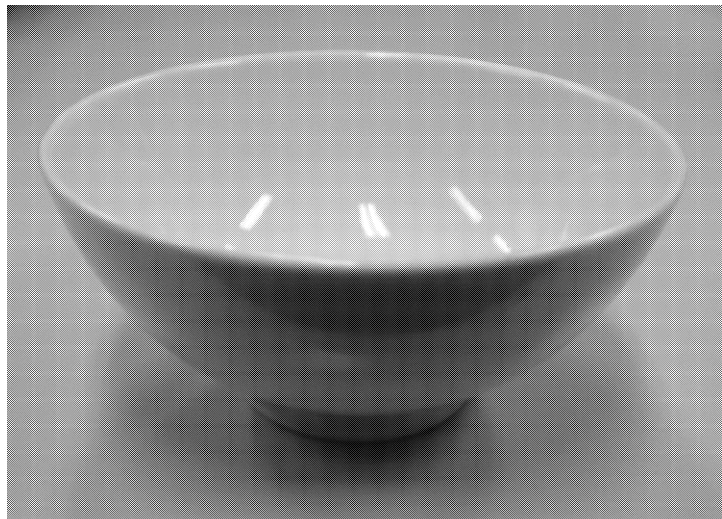


図 5.2: 絵付け用の九谷焼茶碗

まず、被験者には実際の九谷焼の器に描いてもらい、筆と操作についての感覚を知ってもらう。

また、電子天秤の上にその器を載せた状態で、湯実際に釉薬をつけた面相筆を用いて図形を描いてもらう。その状態を記録して、器にかかる荷重を計測する。このときに描いてもらった図形は、円、四角形、星型六角形の三つである。

その際にかかる荷重を計測した結果を次の項の表 5.1 に示す。その結果をふまえ、ばね・ダンパの係数の決定を行う。その後、PHANToM による画面操作を行ってもらう。

二つめの評価として、主観的に筆モデルについての操作感や触感についての評価をアンケート形式で判断する。

まず、実際の PHANToM による画面上での操作をしてもらい、画面上の器の表面にポイントをもうけ、そのポイントの場所にカーソルを持って行ってもらい、ずれを検証する。カーソルの場所とポイントとがあっていれば得点とする。

次に、被験者にアンケートを行い、被験者の主観的な判定を行う。アンケートは各項目を5段階の評価に分け、良好な結果を高い点数とし、その得点を求める。

評価項目は以下の通りである。

1. 操作感

a. 思った通りの場所にポインタを持って行くことができた。

1. オブジェクトの中央部
2. オブジェクトの上部
3. オブジェクトの下部
4. オブジェクトの右側
5. オブジェクトの左側

b. 思うように線が引くことができた。

1. x 軸 (横) 方向に関して
2. y 軸 (縦) 方向に関して
3. 右上方向から左下方向に関して
4. 左上方向から右下方向に関して
5. 円に関して

2. 筆の感覚

a. 物体を認識することができた。

b. 粘性を感じる事ができた。

1. x 軸 (横) 方向に関して
2. y 軸 (縦) 方向に関して
3. 右上方向から左下方向に関して
4. 左上方向から右下方向に関して
5. 円に関して

3. 表現

a. 筆を扱っているように感じた。

b. 釉薬を扱っているように感じた。

それぞれの項目に対し、被験者一人あたり 5 点で評価してもらおう。5 点を良い、1 点を悪いとする。これらを総合的にみて近似性を導く。

そして最後に、被験者からの自由な意見を言ってもらおう。

5.3 結果

5.3.1 絵付け時の荷重と仮想オブジェクトからの反力

前の項で得た実験の結果を示す。

次のグラフは、被験者に最初に行った実際の九谷焼の絵付けの際の荷重の推移である。

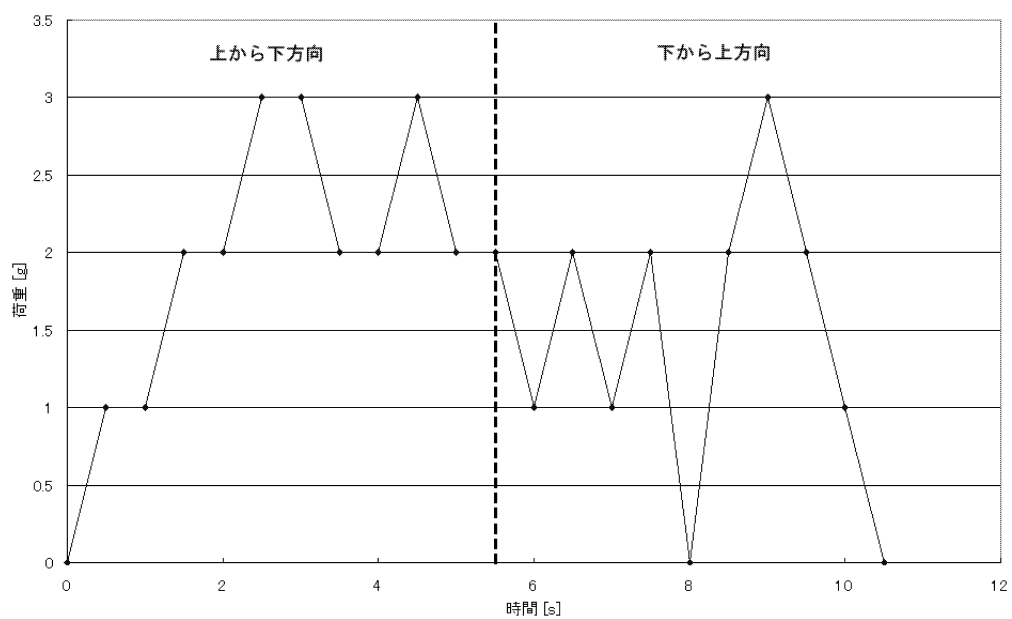


図 5.3: 被験者の一人：円

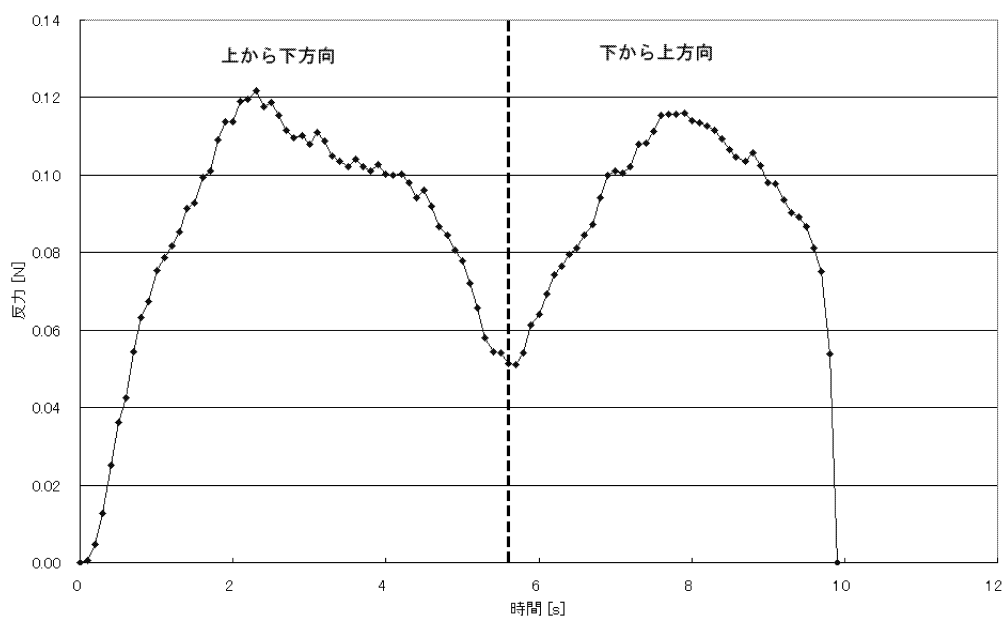


図 5.4: 被験者の一人：仮想空間上 円

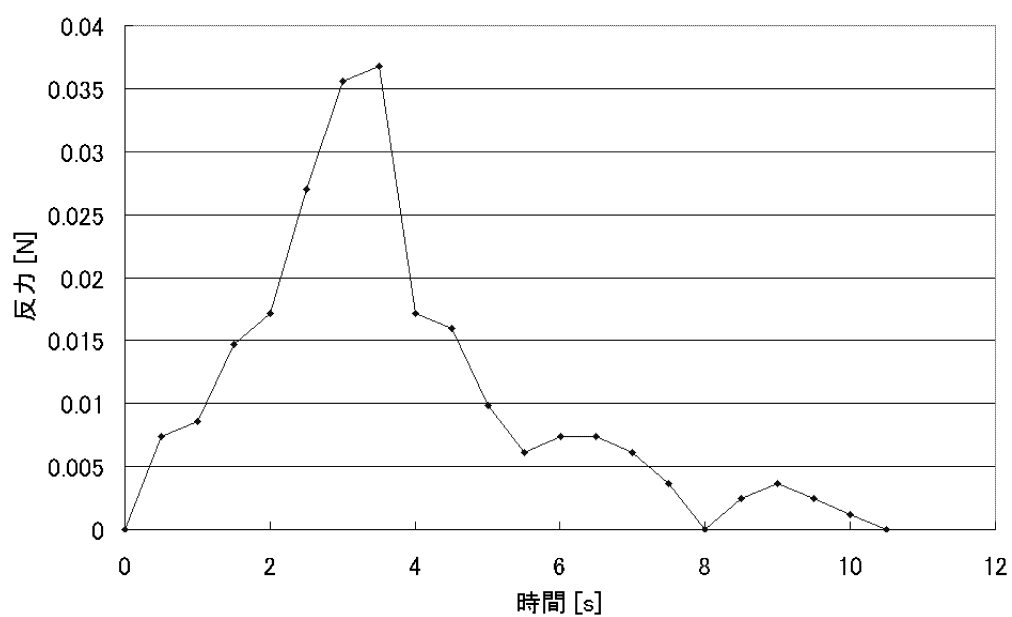


図 5.5: 被験者の平均：円

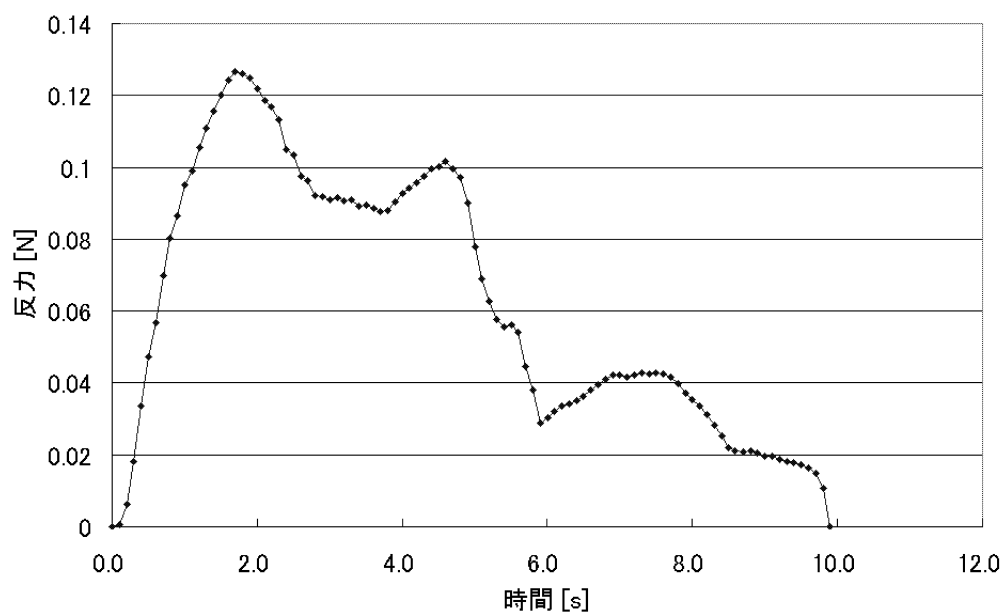


図 5.6: 被験者の平均：仮想空間上 円

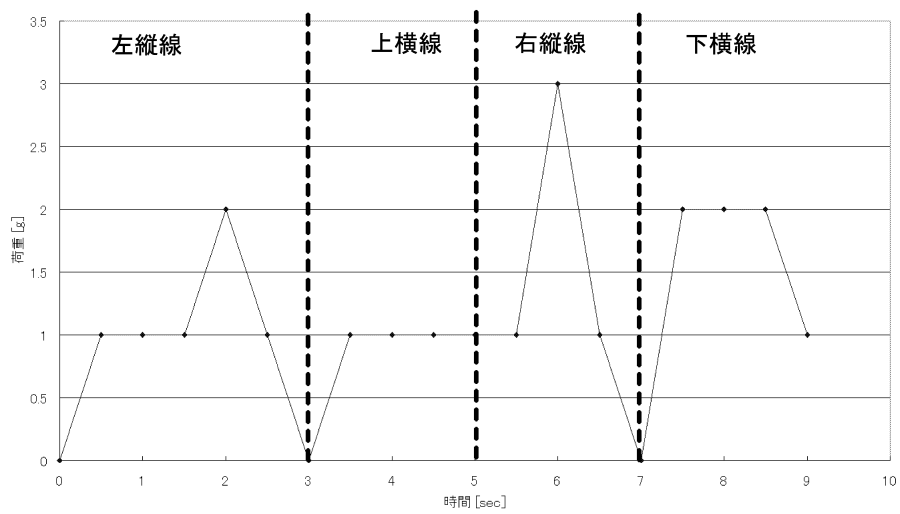


図 5.7: 被験者の一人：四角形

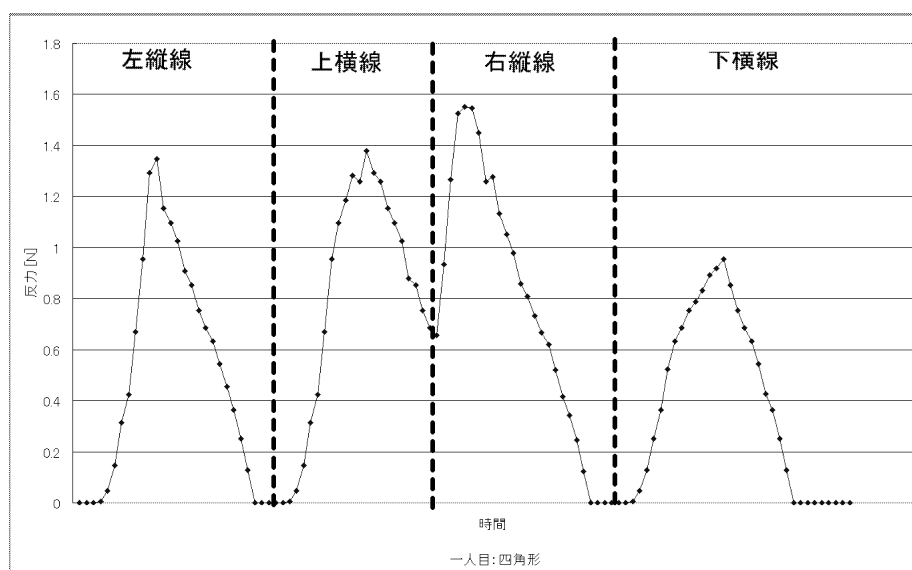


図 5.8: 被験者の一人：仮想空間上 四角形

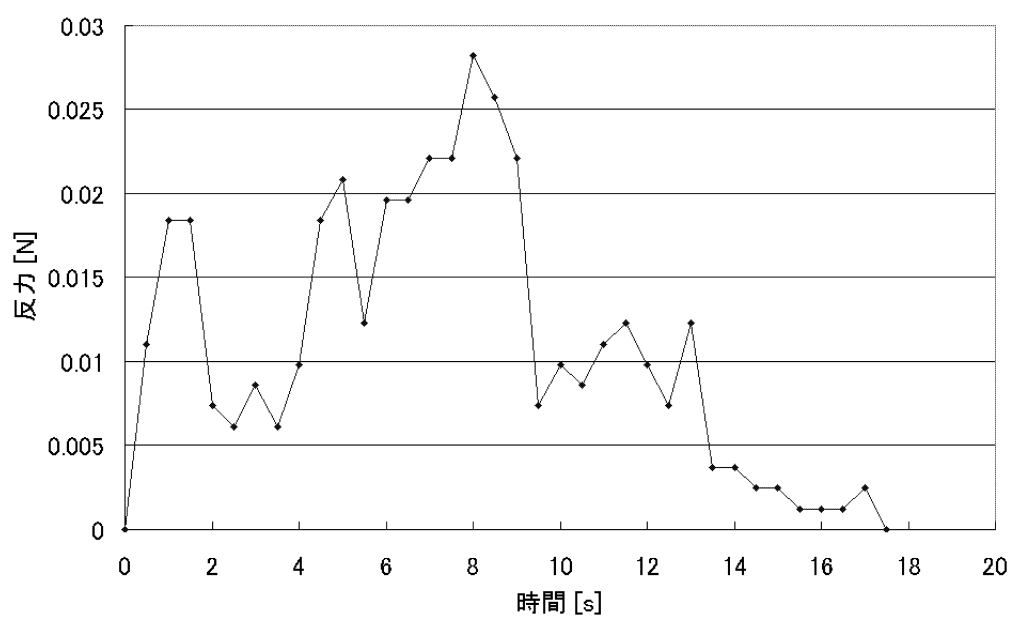


図 5.9: 被験者の平均：四角形

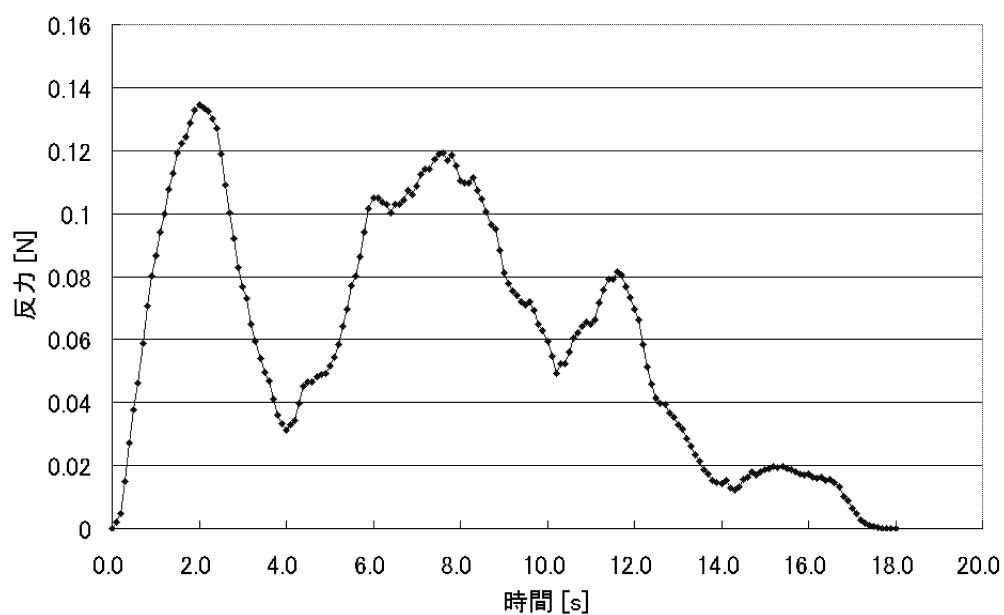


図 5.10: 被験者の平均：仮想空間上 四角形

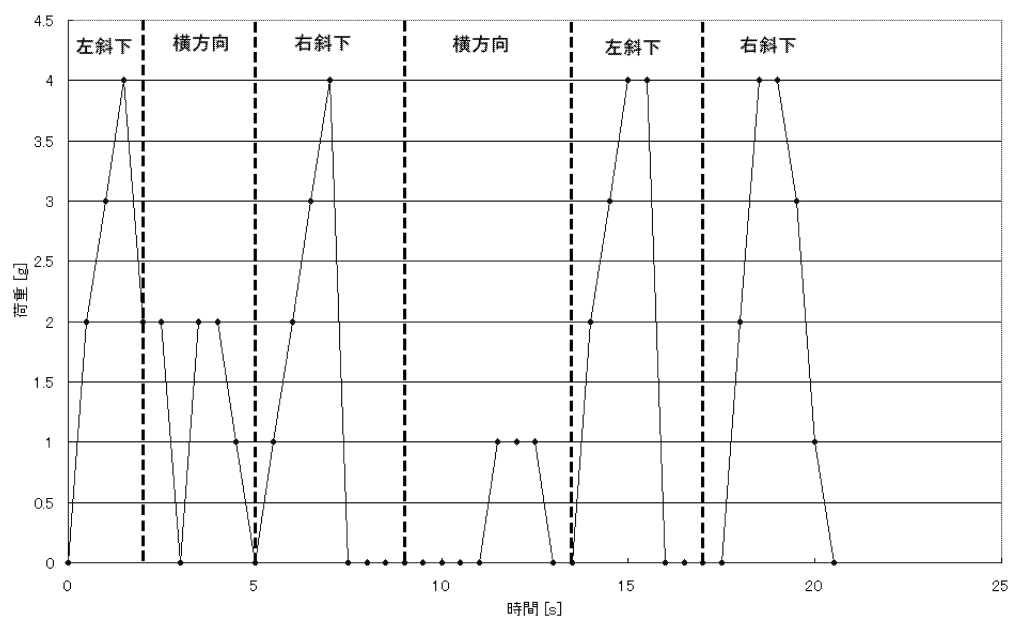


図 5.11: 被験者の一人：星型六角形

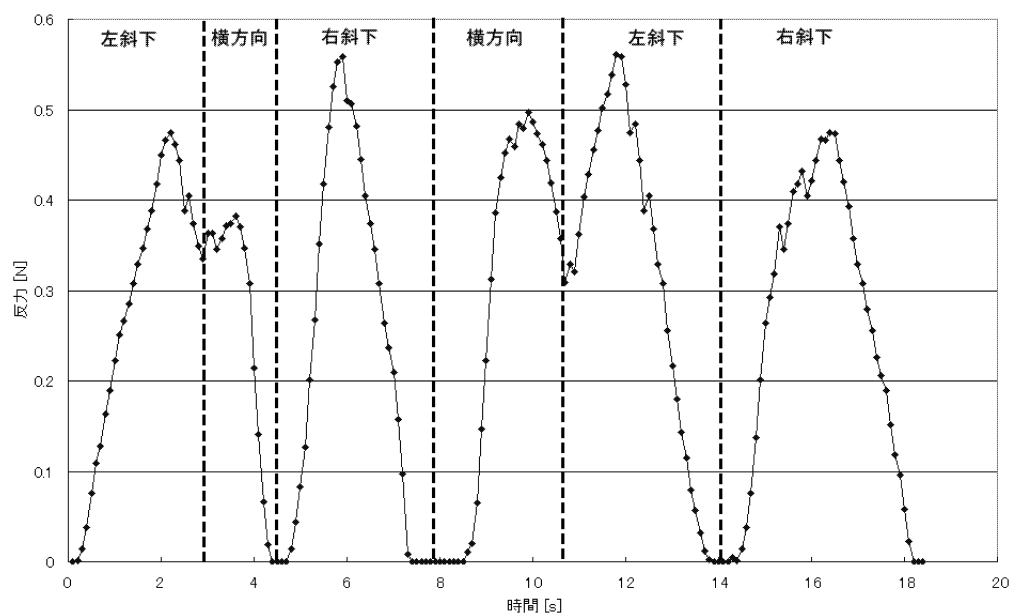


図 5.12: 被験者の一人：仮想空間上 星型六角形

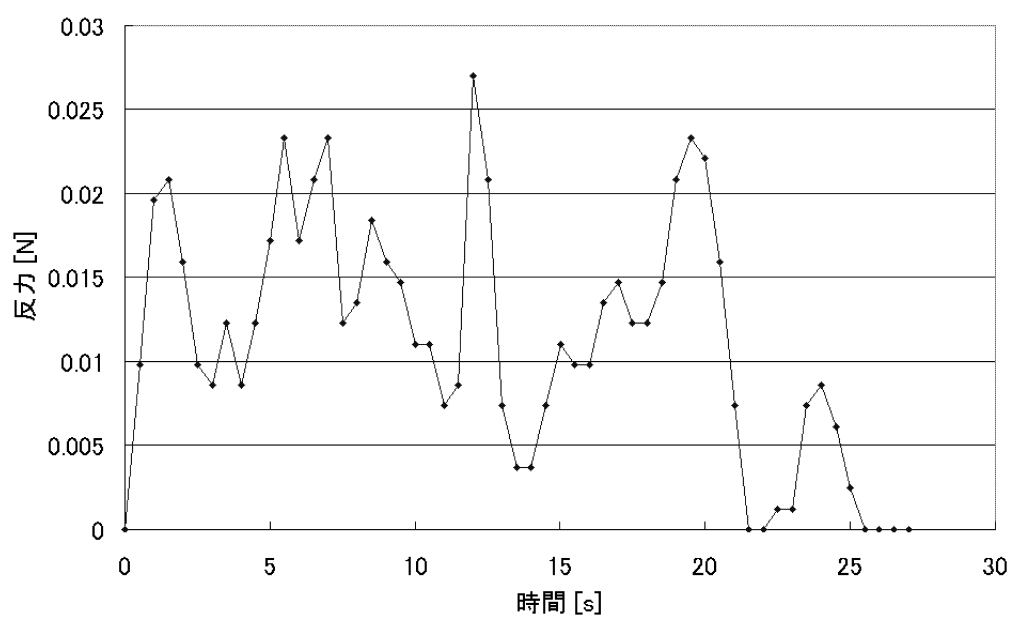


図 5.13: 被験者の平均：星型六角形

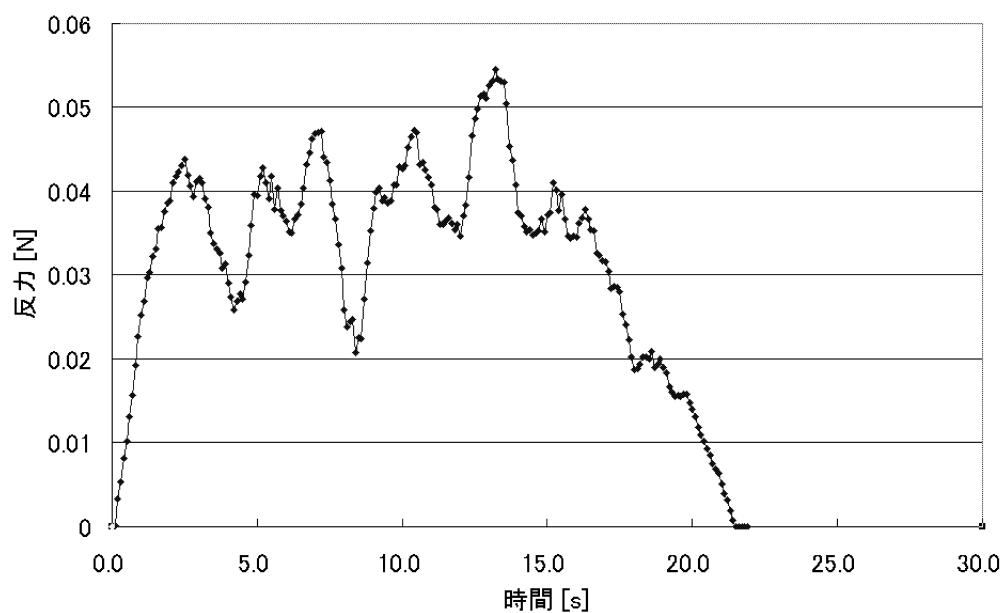


図 5.14: 被験者の平均：仮想空間上 星型六角形

5.3.2 定数の決定方法

現段階においてのバネ定数とダンパ定数は未定のままであるので、これらの決定を行う。

前までに行った 10 名の被験者による実験の中の実際の絵付けにおける荷重測定の結果から各定数の決定を行う。

始めに計測した実際の絵筆の反力変化のデータを調査した結果を示す。

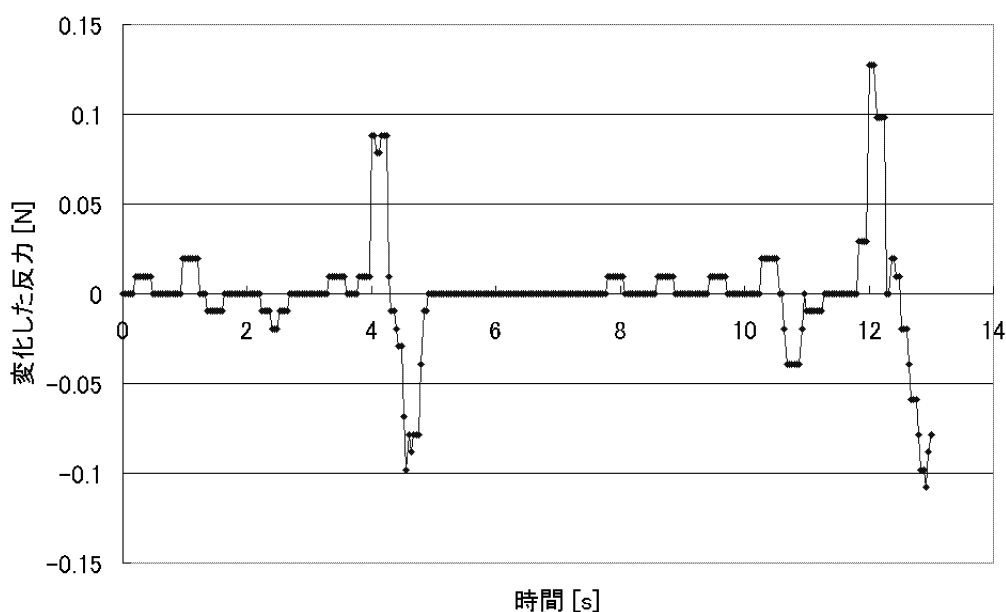


図 5.15: 被験者の反力変化

これによると、0.3 秒で 0.127N 変化する場合が最も大きな変化であることが分かった。そこで、それを基に各定数を計算してみる。

ばね定数 k_s は、単位が $kg/(1000 * s^2)$ 、ダンパ定数 k_d の場合は $kg/(1000 * s)$ である。これから各定数を計算する。

その結果、ばね定数 k_s は 0.000144、ダンパ定数 k_d は 0.000043 という値になった。

5.3.3 被験者による主観評価

この後の値は、被験者のアンケートによる主観評価の結果である。被験者10人における結果について、各項目の平均点を以下に示す。

設問番号	平均点	分散	標準偏差
1-a-1	4.6	0.44	0.66
1-a-2	4	0.8	0.89
1-a-3	3.8	0.96	0.97
1-a-4	4	0.8	0.89
1-a-5	4.2	0.56	0.74
1-b-1	3.4	0.64	0.8
1-b-2	3.6	0.64	0.8
1-b-3	3.5	0.65	0.8
1-b-4	3.2	0.96	0.97
1-b-5	2.8	1.56	1.24
2-a	4.5	0.85	0.92
2-b-1	3.4	0.84	0.91
2-b-1	3.5	1.05	1.02
2-b-3	3.5	1.25	1.11
2-b-4	3.4	1.64	1.28
2-b-5	3.2	1.16	1.07
3-a	3.5	1.05	1.02
3-b	3.4	1.44	1.2
全体	3.63	0.48	0.69

表 5.1: 被験者によるアンケートの集計結果

最後にある被験者からのコメントとして、

- ・ 筆と面の接点を点で感じる。
- ・ ポインタにより接点がわかりにくい。

との回答があった。

5.4 まとめ

本章では、提案手法の検証のための性能評価を行った。

性能評価は、データ比較と主観評価の2つで評価を行った。

また、そのときのデータを元に係数の基準を設けた。

主観評価では、各項の中にさらに、 x （横）方向、 y （縦）方向と奥行きを含む部分に分けた項目を作り、得点をつけて評価を行ってもらった。

その結果、提案手法により釉薬のような粘性を感じることができたとの結果を得た。

また主観評価により、本研究における問題点も明らかになった。

次章では、本研究についてまとめ、問題点や改善点にも触れることで今後の課題についての説明を行う。

第6章 結論

6.1 まとめ

現在のコンピュータの性能の高さにより、コンピュータを用いたグラフィックスの表示というものが比例して正確なものとなってきており、また広く普及もしてきた。

その影響から、今日ではバーチャルリアリティ（VR：仮想現実）という分野が行われるようになった。それは、コンピュータグラフィックス（CG）を用いて仮想空間をコンピュータ上に作成し、仮想世界同士または現実世界と仮想世界の間の相互の対話を可能にしようということである。

このVRの技術を利用することで、現実の世界とコンピュータ上の仮想空間内とでシミュレーションを行うことが可能となってきた。この技術の進歩により、現実世界で行うことが困難または危険な作業を仮想的に体験したり、実際に行う前の検証といったシミュレーションを行うことが可能となった。

そのようなシミュレーションの対象の多くは視覚に関してであった。現在では、それに力触覚などの新たな刺激を加えることでより没入感を高めたVRシステムの構築がよく行われるようになってきた。代表的な力触覚デバイスとして、PHANToMやCyberGrasp等があり、これらの様な視覚以外の刺激を行うデバイスの開発も進んでいる。

現在、力触覚を利用するVRシステムの目的として注目されている分野は、文化資源の保護についての分野である。

ここでの文化資源とは、伝統文化や芸術の技術についてを指している。

伝統工芸や芸術には作品とともに製作の際の技術という情報が重要である。

現在では伝統工芸や芸術における制作技術に関する情報をVR技術によって再現するためのシステムの開発が盛んに行われている。しかし、多くの研究開発は視覚による内容に関して行われている。視覚による情報は生活する上だけでなく、芸術を感じる情報とし

でも重要な要素と考えられる。そのため、バーチャルリアリティによる没入感を高めるためには、視覚情報に向けたフィードバックが最も有効であると捉えられていたということが挙げられる。

伝統工芸や芸術における技術の保護について考えると視覚とともに力触覚に関する情報も再現すべき重要な要素である。

本研究では、その伝統文化の一環として九谷焼をモチーフにし、よりリアルな力触覚を提示できる VR システムの構築を目的とする。

力触覚の提示手法に主な焦点を置き、よりリアルな感触を操作する人間に対して提示するシステムの構築を目指す。

本論文では、焼き物の絵付け時の筆による操作といったものを可能にするシステムを提案した。提案したシステムでは、筆先のばねダンパモデルによるシステムを提案し、これによって釉薬を用いたときの触覚についてのシミュレーション環境を提供する。

第2章では、VR 技術についての概要や、本研究に関連する従来研究について述べた。

第3章では、仮想空間内でのオブジェクト表現手法について説明した。

第4章では、絵付け体験システムの触覚生成を構築した。

本研究での提案手法であるバネ - ダンパモデルを用いた反力生成について説明した。

また、絵筆全体の表現を行うため、絵筆を用いて実際の反力を調べた。その結果を用いて係数の決定を行った。

第5章では、構築した絵付け体験システムの触覚モデルに関しての性能評価を行った。

性能評価では、実際の絵付け時と仮想空間においての力の加わり方を比較し、さらに使用者によるアンケートを行うことにより主観評価を行った。

主観評価の結果から使用者に釉薬の粘性らしい触覚を与えることができるということを確認した。

6.2 今後の課題

今回構築できたのは絵付けにおける触覚生成のモデルであった。通常の筆触覚システムとの違いは、釉薬を考慮に入れた筆モデルに関しての部分と器を考慮した接触部分に

ある。

本研究においては接触モデルであるが、絵付けを体験させるシステムのためには筆による描画も行う必要がある。

また、主観評価のアンケートの結果から奥行きがつかみ辛いという問題点も挙げた。このことから立体視を考慮すべきと考える。

謝辞

本研究を行うにあたり，御指導，御鞭撻をいただいた北陸先端科学技術大学院大学 井口寧助教授に厚く感謝の意を表します。また、松澤照男教授、日比野靖教授には，本研究の遂行にあたり，適切な御意見、御助言を賜り，深く感謝致します。副テーマにおいて小谷 一孔助教授には，熱心に御指導いただき，深く感謝致します。

そして日頃より支えてくださいました井口研究室の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 文部科学省科学技術・学術審議会資源調査分科会,
“文化資源の保存、活用及び創造を支える科学技術の振興”,
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu3/toushin/04021901.htm.

- [2] 野間, 宮里,
“仮想空間におけるハプティクス”,
映像情報メディア学会技術報告, Vol.21, No.47, pp.1- 6,(1997).

- [3] 廣瀬,
“バーチャル・リアリティ応用戦略”
オーム社, (1992)

- [4] Immersion Corporation: 3D Technologies Cyber Grasp:
<http://www.immersion.com/products/3d/interaction/cybergrasp.shtml>.

- [5] 佐藤,
“ハプティックインタフェース SPIDAR”,
<http://sklab-www.pi.titech.ac.jp/~msato/spidar.pdf>.

- [6] 佐藤, 平田, 河原田,

“空間インタフェース装置 SPIDAR の提案”,
電子情報通信学会論文誌, D-II, Vol.J74-D-II,
No.7, pp.887-894 (1991).

[7] 佐藤, 平田, 河原田,
“仮想空間のためのインターフェースデバイス - SPIDAR -”,
信学技報, PRU 89-88, pp.51-58 (1993).

[8] <http://hotwired.goo.ne.jp/p-monkey/003/03/index.html>

[9] Yoshida, Kurumisawa, Noma,
“Sumi-Nagashi : Creation of New Style Media Art with Haptic Digital Colors”,
12th annual ACM international conference on Multimedia, pp.636-643 (2004).

[10] 野間,
“Proactive Desk : 触感覚を提示するデジタルデスク環境”,
社団法人映像情報メディア学会, pp.27-30 (2003).

[11] 鈴木, 井口, 堀口,
“力触覚提示装置を用いた書道用筆モデルの提案”,
日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10 No.4 pp.573-580 (2005).

[12] 廣瀬, 森, 李, 加納,
“VR ベース 3 次元意匠形状作成システム - 基本システムの概念および試作 - ”,
日本バーチャルリアリティ学会第 5 回大会論文集, pp.221-224 (2000).

- [13] 登尾,
“モデリング -Modeling-”,
<http://www.noblab.jp/research/rheo/main/modeling>
- [14] コンピュータグラフィックス編集委員会,
”コンピュータグラフィックス”,
画像情報教育振興協会（CG-ARTS 協会）, (2004)
- [15] 中島,
” やきものを楽しむ 2 九谷焼 ” ,
小学館, (2003.5)
- [16] Daniel F, Daniel Acevedo, Tomer,
“CavePainting : A Fully Immersive 3D Artistic Medium and Interactive Experience”,
2001 symposium on Interactive 3D graphics, pp. 85-93 (2001).
- [17] M.Segal, C.Korobkin, R.Widenfelt, J.Foren, P.Haeberi,
“Fast Shadows and Lighting Effects Using Texture Mapping”,
Proceedings of SIGGRAPH '92, pp.249-252(1992).
- [18] Maneesh Agrawala, *et al.*,
“ 3D Painting on Scanned Surfaces ” ,
Proc.1995 Symposium on Interactive 3D graphics,pp.145-151, (1995).
- [19] Meehae, *et al.*,
“Interacting with the Virtually Recreated Peranakans”,

1st international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia, pp.223-229 (2003).

[20] Bill Baxter, *et al.* ,

“ DAB : Interactive Haptic Painting with 3D Virtual Brushes ” ,

28th annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp.461-468, (2001).

[21] Massie, T.and K.Salisbury,

“The PHANToM Haptic Interface : A Device for Probing Virtual Objects”,

ASME Winter Annual Meeting,DSC-Vol.55-1,ASME,New York,pp.295-300, (1994).

[22] Cassidy, *et al.* ,

“ Computer-Generated Watercolor ” ,

24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, (1997).

研究業績

長瀬 文彦, 井口 寧,
”力覚と CAVE を活用した九谷焼絵付の体験学習および
新作の制作支援を行うシステムの開発に関する研究”,
2006 年度 電気関係学会 北陸支部連合大会, 金沢工業大学.