

Title	水彩画の触感フィードバックを提示するペイントシステムの構築
Sub Title	Digital painting system that displays haptic feedback of watercolor painting
Author	田中, 博和(Tanaka, Hirokazu) 南澤, 孝太(Minamizawa, Kota)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2016
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2016年度メディアデザイン学 第481号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002016-0481

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文 2016年度（平成28年度）

水彩画の触感フィードバックを提示する
ペイントシステムの構築

慶應義塾大学大学院
メディアデザイン研究科

田中 博和

本論文は慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科に
修士(メディアデザイン学) 授与の要件として提出した修士論文である。

田中 博和

審査委員：

南澤 孝太 准教授 (主査)

奥出 直人 教授 (副査)

砂原 秀樹 教授 (副査)

修士論文 2016年度 (平成28年度)

水彩画の触感フィードバックを提示する ペイントシステムの構築

カテゴリー：サイエンス / エンジニアリング

論文要旨

元来、水彩画は筆さばき一つで素早く質の高い表現が可能であることを生かし、建築物や植物、地形等を記録したりイラストを描く際に広く重宝されてきた。近年、デジタルにて絵を描くことがプロアマ問わず急速に広まりつつある。コンピュータによる絵画(デジタルペインティング)は戻る機能やレイヤーなど利便性や柔軟性が高く、映像やゲーム業界における視覚的なアイデア出しやイラスト制作にて広く用いられている。しかし、水彩画材と描き心地が大きく異なるため、水彩画材にて用いらてきたスキルや経験を流用できない。そこで、本研究は水彩画材を描いた際の視覚効果と触感フィードバックを再現し提示することで、デジタルペインティングの利便性へアクセスしながら、水彩画の性質を生かした素早く質の高い表現が可能なペイントシステムを開発した。描き心地を通じた素材とのインタラクションは文字を書いたり、絵を描いたりする上で非常に重要である。本システムは画材の質感、筆の変形感、絵の具の粘性といった触感情報を顔料の流体シミュレーションと共に提示することで、水彩画材が本来持っている描き心地の良い触感フィードバックの提示を実現する。

キーワード：

触感, ハプティック, 水彩画, デジタルペインティング, 振動触感, PseudoHaptics

慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科

田中 博和

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2016

Digital Painting System that displays Haptic feedback of Watercolor painting

Category: Science / Engineering

Summary

This paper propose a painting application that reproduce not only visual effect of traditional painting such as watercolor but also haptic feeling without mechanical systems. In recent years, although the digital painting with Photoshop or a tablet has been widely used, draw comfort of such painting system is inferior to traditional materials, because they do not offer any haptic feeling of painting. Our system offers haptic feeling of painting with a brush by vibrotactile and pseudo haptic. The visual effect of watercolor painting such as absorption of diffuse of pigment is generated by physical simulation. Our system also displays haptic feeling of brush deformation by vibrotactile which express a direction where the brush deform to. The vibrotactile effect improved draw comfort, the haptic effect is not enough to prompt users to use brush techniques. Also, Our haptic system did not improve the quality of works painted with our system.

Keywords:

Haptic, Traditional Painting, Digital Painting, Vibrotactile, PseudoHaptics

Graduate School of Media Design, Keio University

Hirokazu Tanaka

目 次

第 1 章 序論	1
1.1. はじめに	1
1.2. 絵を描く際における触感の重要性	2
1.3. 研究目的	3
1.4. 論文構成	4
第 2 章 関連研究	5
2.1. デジタルペインティングの歴史	5
2.1.1 Example-based	6
2.1.2 Simulation-based	7
2.2. 振動と温冷覚の触感提示	9
2.3. 触感コンテンツ制作のプラットフォーム	11
2.4. 触覚提示のあるペイントシステム	11
2.4.1 DAB: Interactive Haptic Painting with 3D Virtual Brushes	12
2.4.2 FlexStroke	12
2.4.3 Colorful Touch Palette	12
2.4.4 Augmented Airbrush for Computer Aided Painting	13
2.4.5 先行研究における課題	13
第 3 章 描き心地の提示手法の検討	15
3.1. 振動触感による描き心地提示手法の検討	15
3.2. 振動触感がもたらす描き心地への影響の定量化	16
3.2.1 実験参加者	16
3.2.2 実験環境	16

3.2.3	実験手法	17
3.2.4	解析手法	17
3.2.5	実験結果	19
3.3.	振動触感による描き心地の再現可能性の検討	20
3.3.1	触感ペイントシステム Tangment	21
3.3.2	振動触感の抽出方法	23
3.3.3	Tangment のフィールドテスト	25
3.3.4	実験参加者	25
3.3.5	実験環境	25
3.3.6	実験手順	26
3.3.7	フィールドテストの結果	26
3.4.	描き心地の再現可能性の検討のまとめ	28
第4章	視触覚提示による描き心地の再現の提案と実装	29
4.1.	水彩画における筆の視触覚的役割	29
4.2.	振動触感による変形の提示	30
4.3.	顔料の疑似粘性手法	32
4.4.	画材の材質感の提示	33
4.5.	システム構成	34
4.6.	ソフトウェア概要	35
4.7.	顔料のシミュレーション	36
4.7.1	格子ボルツマン法	36
4.7.2	顔料モデルの実装	37
4.7.3	GLSL による実装	38
第5章	評価実験	40
5.1.	実験1: 本システムにおける振動触感の効果の検証	41
5.1.1	実験参加者と実験環境	41
5.1.2	実験手順	42
5.1.3	解析手法	44

5.1.4	実験結果	44
5.1.5	3 要因の分散分析の結果	44
5.1.6	実験参加者による主観的完成度の評価	47
5.1.7	実験参加者が完成度が高いとみなした作品群	47
5.1.8	実験参加者が完成度が低いとみなした作品群	48
5.2.	考察	49
5.3.	実験 2: 視覚効果におけるパラメータの適切な値の検証	50
5.3.1	実験環境	50
5.3.2	実験結果	51
5.3.3	実験参加者による主観的完成度の評価	52
5.3.4	考察	53
5.4.	実験 3: 筆の変形感提示を提示する上で適切な振動子の個数の検証	54
5.4.1	実験環境と実験参加者	55
5.4.2	実験手順	55
5.4.3	実験結果	56
5.4.4	考察	56
5.5.	実験 4: 本システムにおける適切なパラメータの組み合わせの検証	61
5.5.1	実験環境と実験参加者	61
5.5.2	実験手順	62
5.5.3	実験結果	64
5.5.4	考察	75
5.6.	総合考察	79
第 6 章 結論		81
参考文献		83
謝辞		87

目 次

2.1	Strassmann brushes	6
2.2	Moxi, Baxter (left to right)	7
2.3	WetBrush	8
2.4	WaterColor effects by Curtis	9
2.5	Platform for Haptic Contents	10
2.6	Haptic Painting Systems: DAB, FlexStroke, Coloful Touch Palette, Augmented Airbrush (left to right)	13
3.1	Digital Painting and Traditional Painting	16
3.2	Exprimment of Draw Confort	18
3.3	Exprimment Method	19
3.4	Velocity change on Note	20
3.5	Velocity change on Sketchbook	20
3.6	Velocity change on Note	20
3.7	Velocity change on Sketchbook	20
3.8	FTT of 3 waves including note, sketchbook, and drawing paper	21
3.9	Tangment: Haptic Painting System	22
3.10	Haptic Onomatopoeia [29]	23
3.11	Textile Capture	24
3.12	Display of Tangent at Miraikan	25
3.13	Haptic Painting Works	28
4.1	Pendvice	30
4.2	The direction of brush bending displayed by vibrotactile	31

4.3	System	35
4.4	Pigment Simulation	37
5.1	The participant at Experiment 4	41
5.2	Drawing template	43
5.3	Draw comfort at some condition of vibrotactile and water amount	45
5.4	Draw comfort at some condition of vibrotactile and pigment density	46
5.5	Best works chose by the participants	48
5.6	Worst works chose by the participants	49
5.7	Draw comfort between default value of water amount and user specified value	54
5.8	Works by participant 1	56
5.9	Works by participant 2	57
5.10	Works by participant 3	58
5.11	Works by participant 4	59
5.12	Works by participant 5	60
5.13	UI of the painting system	63
5.14	Photographs for painting	63
5.15	Participant A with our painting systems	64
5.16	Works by participant A	65
5.17	Works by participant B	67
5.18	Works by participant C	69
5.19	Works by participant D	71
5.20	Works by participant E	73
5.21	Works by participant D and E	77

表 目 次

5.1	Value of each parameter at all trials	42
5.2	The result of ANOVA	44
5.3	The evaluation of painting works by the participants	47
5.4	Value of each parameter at all trials	51
5.5	The result of ANOVA	52
5.6	The result of ANOVA	52
5.7	Value of each parameter at all trials	53
5.8	Value of each parameter at all trials	55
5.9	Value of each parameter at all trials	62
5.10	Total score of Draw comfort at each training	74
5.11	Total score of Performance at each training	74

第1章 序

論

1.1. はじめに

有史以前から、ブラシによる絵画は趣味や教育としてだけでなくプロのアーティストやデザイナー間で重要な表現の為の道具として長い進歩の道ゆりを人類の歴史とともに歩んできた。有史以前に確認された最古の絵画としては1940年にフランスにて発見されたラスコーの洞窟壁画がある。

元来絵を描く道具として、動物の骨や木の棒が使われてきた。そしてそれが時を経てブラシへと進化した。また、木の板のパレットが初めて使われたのは16世紀である。元々は貝殻が使われていた。顔料としては、19世紀になってチューブ入り絵の具が発明される以前は、絵画の顔料は画家が自然界から採取した鉱物、樹脂、植物の花等から自分で製造していた。しかし、このような自然物から抽出した顔料は今日一般的に見られるような彩度の高い色を提示することができなかった。カドミウムイエローやコバルトブルーのような鮮やかな色の顔料は、産業革命以降に科学的な製法や大量生産が可能になってから初めて登場したものである。今日に至るまで、多様な手法によって、画家は自然界にある色を採取し、自由に再利用してきた。このように、アーティスト達は自身の作品をより繊細で深みに富んだものにできるよう様々なツールや技法を進化させてきた。

近年、コンピュータにて絵を描くことがプロアマ問わず急速に広まりつつある。コンピュータによる絵画(デジタルペインティング)は戻る機能やレイヤー等の利便性の高さから人気である。また、デジタルにすることでアナログ画材では不可能な細かいパラメータの調節や現実では実現困難な状態も提示することができる。その利便性の為、Pixivに見られるようなアマチュアのユーザが趣味でイラスト

をインターネットで公開し共有するような場だけでなく、映画やビデオゲームのようなプロの場でも積極的に用いられている。デジタルペインティングの為の商用ソフトウェアとしては、Adobe Photoshop、Corel Painter、ArtRage、Clip studio 等がある。デジタルペインティングは絵を描くことへの敷居を下げ、より多くの人に手軽に使える絵を描くツールを提供するだけでなく、デザインやエンターテインメント業界の発展において重要な役割を果たすだろう。

1.2. 絵を描く際における触感の重要性

元来人間は絵を描くとき、目で見ただけでなく、素材の質感や画材の動きをはじめキャンバスの大きさ、絵の具の冷たさや独特の匂い等、様々な五感情報を全身で感じている。フランスの画家であり、近代絵画の父であるポール・セザンヌは、「自然にならって絵を描くことは、対象を模写することではなく、いくつかの感覚を実現させることだ」[25]と述べている。このことから絵描きは、描く対象を目で見るだけでなく、手で触れたり、匂いを感じとったりすることで、対象の本質を描き出そうとすることがうかがわれる。

近年、デジタルペインティングには Photoshop、Corel Painter 等のペイントソフトウェアや、タブレット等のハードウェアが積極的に活用され、より効率的な作業が可能となってきた。一方、プロの絵描きにおいては元来油彩や水彩等の伝統的な画材が多く用いられてきたことから、これらの画材への熟練が求められている。その為、アナログ画材の視覚的表現をデジタルペインティングに取り込もうとする研究が多数なされてきた。

既存のデジタルペインティングで提示できない五感情報の内、重要なものに触感がある。絵を描く動作は、人差し指、中指、親指を使ってブラシを握り、キャンバスの表面に期待した角度で押し付け、指や腕を動作させながら線を引いたり、領域を塗りつぶしたりするといった身体的運動が伴う。何かを握ったり、持ち上げたりする動作をする上で触感には欠かせない。触感を通じた素材とのインタラクションは文字を書いたり、絵を描いたりする上で非常に重要である。例えば、我々はボールペンや万年筆等の筆記用具を選ぶとき、値段や耐久性について書き心地

を追求する傾向にある。一方で、iPadを始めとするペンタブレットは一般に書き心地があまり良くないとされている。例えば、タブレットの場合、ユーザが狙った通りに滑らかな曲線を引くのが難しい。なぜなら、人間の手はツルツルしたタブレットの上では安定した姿勢を維持することができず、微小なブレが生じてしまうからである。それゆえに現状では、タブレットで綺麗な曲線を描く場合、ユーザからの入力に補正をかけたりにすることで手ブレによる線の歪みを減らすことが多い。

しかしこの手法では、ユーザの本物の入力を直に出力しておらず、ユーザの期待とは異なった出力がされてしまう場合が多い。他にも、タブレットの表面に摩擦のあるシートを貼り付ける手法もあるものの、液晶タブレットの場合、画面が見づらくなってしまう。また、シートはプラスチック製の為、紙等における描き心地の再現度は改善の余地がある。

1.3. 研究目的

絵描きにとって、素早く質の高い描写を行うことは、現代のゲームや映像製作の場においても自身のアイデアを短時間で形にし、何度も練り直しながら他者と共有する上で重要である。また、アナログ画材のうち水彩画は筆さばき一つで素早く質の高い表現が可能であることを生かし、建築物や植物、地形等を記録したりイラストを描く際に広く重宝されてきた。このように、水彩画と近年のデジタルペインティングは用途が近く、水彩画の性質は現代のデジタルペインティングにて期待される用途に適合しやすいと考えた。そこで、本研究はデジタルペインティングの利便性を水彩画のスキルと共に使えるようにするペイントシステムを開発することで、デジタルペインティングの利便性へアクセスしながら、水彩画のノウハウを十分に活かせるペイントシステムを提案する。本システムは画材の質感等の触感や、絵の具の物理シミュレーションによる視覚効果の提示を行うことで、水彩画材を模した触感フィードバックの提示を実現する。また、ユーザにとって描き心地のよい触感は個人差がある。その為、本システムは提示する触感をそれぞれのユーザにとって描き心地が良くなるよう、触感的性質の調節が可

能な手法を用いる。

1.4. 論文構成

本論文は、第2章にて関連研究について述べ、第3章で提案手法について、第4章でその実装方法について説明する。第5章では本システムの効果に対して行った検証実験について説明し、第6章にて結論を述べる。

第2章 関連研究

2.1. デジタルペインティングの歴史

コンピュータ上で絵を描くことによって、直前の動作を自由に訂正できるだけでなく、作品全体に自由な変更をかけたり、新しいアイデアを探索したりすることができる。また、質の高い画材や道具は高価であるものの、デジタルであればこれらに金銭的成本をかけずにすむ。一方で、アナログ画材が多様で深みのある表現が可能であることから、それらの画材や道具をコンピュータ上で再現しようという試みがなされてきた。しかし、コンピュータの性能上の制限やそれらの物理現象の複雑さなどから、アナログ画材のシミュレーションは今日でもCGにおける難しい問題である。そのため、アナログ画材のエッセンスを様々な手法でモデル化し既存のコンピュータ上で動作することが可能な描画アルゴリズムの研究が数多く行われてきた。これまでなされてきたデジタルペインティングの研究は、その手法ごとに Procedural、Example-based、Simulation-based の3通りに分類される。

Procedural Method はテクスチャベースの手法であり、デジタルペインティングのアルゴリズムの中では最も古く提案された手法である。ブラシ先とキャンバスが接する接触面の画像をスタンプのようにサンプリングし、入力された軌跡上に等間隔で配置する。また、入力のブラシ圧に応じて、スタンプの大きさと間隔を調節することで、ブラシらしい質感とストロークを実現する。1986年に Strassmann ら [1] が初めて提案した。この手法は更に入力されたブラシ圧からストロークの濃さを変化させたり、進行方向に応じてスタンプの向きを変えたりすることでアナログ画材を再現している。簡単な仕組みのためとても高速で結果が得られるこ

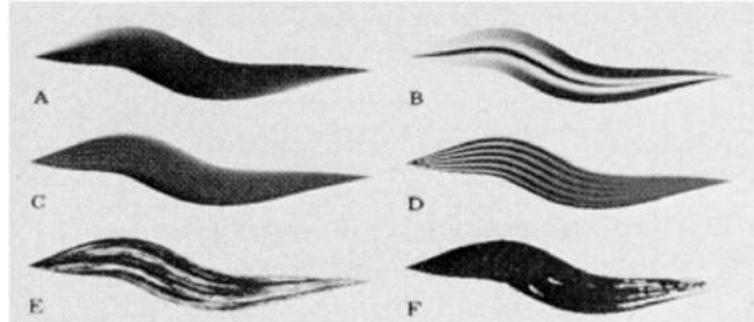


図 2.1: Strassmann brushes

とから、Adobe Photoshop や Corel Painter 等多くの商用ソフトウェアで採用されている。しかし、事前にサンプリングした画像のストロークしか再現できない上に、本物の画材と比べて、不自然な見た目であることも多い。

2.1.1 Example-based

Hsu ら [2] が提案した、Example-based Method はテクスチャ合成を利用することで、入力画像からブラシストロークを再現することができる。テクスチャ合成によって本物のブラシストロークの入力画像を変形し、拡張することで、ユーザの軌跡に合わせて画像にある通りのブラシストロークを出力する。この手法と入力画像からブラシストロークの領域を自動検出するアルゴリズムによって、写真撮影したブラシストロークを簡単にデジタルに取り込むことができる。Example-based Method は Procedural Method と比べてアナログ画材の再現性は高いが、画像を変形するため、ストロークの間が反復してしまうような違和感のある結果が生じる。また、水彩画のような流体による時間変化も再現することができない。この手法は Adobe Photoshop Sketch にて商用利用されている。

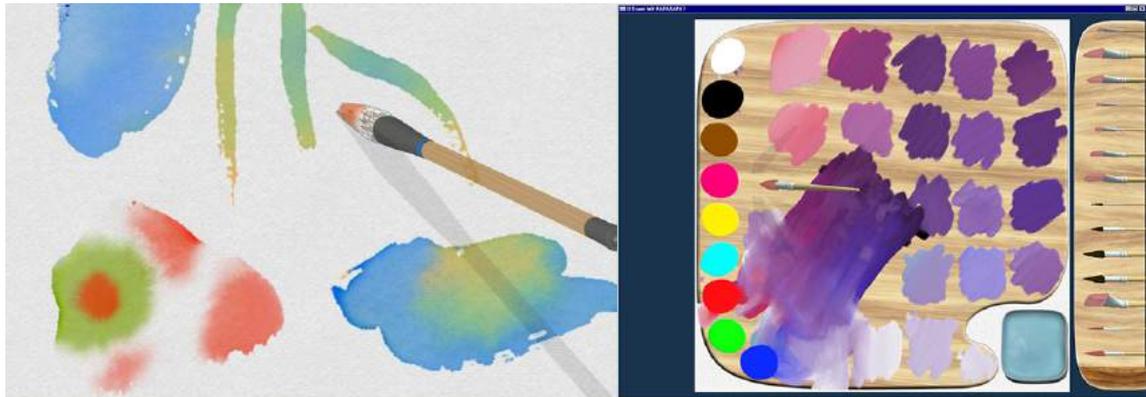


図 2.2: Moxi, Baxter (left to right)

2.1.2 Simulation-based

ブラシと画材との間に生じる物理現象をシミュレーションすることで、アナログ画材を最も現実的に再現する。ブラシの変形の始め、顔料の流体動作や紙への染み込み方に対する様々な物理モデルが提案されてきた。

アナログ画材を再現する上で、まずブラシのシミュレーションが必要である。ブラシの変形をシミュレーションする手法としては、ブラシを3次元空間上で衝突や変形を物理的に求めるものが多く考えだされている。現実のアナログ画材では、ブラシストロークは、変形したブラシの一部が紙に接触することによって生じる。変形したブラシの形状は持ち方だけでなく、動かし方によって多様である。つまり、描き手の身体動作がストロークの形状に大きく影響する。これらの挙動を確実にデジタルに取り入れるには、ブラシを3次元のモデルとして再現することが最も適切である。また、ブラシの形状を3次元で表示することによって、不透明度やブラシ圧による弾性を数値パラメータとして示すユーザーインターフェイスよりも直感的にペイントシステムをコントロールすることが可能となる。

Wongら [3] や Saitoら [4] はブラシを簡単な立体形状で再現することでシミュレーションを行った。Wongらはブラシを逆さまのコーンのモデルで表し、更に幾つかの調節可能なパラメータを用いる手法を提案した。また、Saitoらはベジェ曲線を中心とし、曲線に沿って円を配置するモデルを提案した。Baxter[5]らは、ブ

ブラシを3Dメッシュと弾性を持った関節から構成することでブラシの変形や摩擦感をモデル化した。1999年にSaitoとNakajima [4]は、エネルギー最小化問題を用いたモデルを提案した。同様に、Chu and Tai [6]もエネルギー最小化問題によるモデル化を2002年に提案している。2015年にZhili [8]らが提案したWetBrush、ブラシを毛先のレベルまで再現する手法を初めて行った。ブラシの先端にある毛を近似することなくシミュレーションすることによって、先端のぼらつきや放射状の広がり等、それまでの手法では不可能だった変形を提示することが可能になった。



図 2.3: WetBrush

次に、アナログ画材の絵の具の動作をシミュレーションした研究について述べる。アナログ画材の顔料はブラシからキャンバスへ配置された後、水分の流れに乗って移動したり、キャンバスの内部に浸み込んだりすることによって複雑なテクスチャを生成する。また、粘性のある絵の具は厚塗りすることで凹凸等の立体的な形状を持ったストロークを形成する。1997年にCurtisら [9]が水彩画の流体シミュレーションを行ったのが初となる。Curtisらは水彩画のブラシストロークをその物理的性質に基づいて分類した。Curtisらが提案したモデルは、紙の表面上と紙の繊維質の内のシミュレーションから構成される。紙の表面上の流体動作にはNavier-Stokes法形式が用いられた。

また、Curtisらは自然界にある顔料の色の性質を忠実に再現する為、発色の計算は通常のRGBモデルを用いず、クベルカムク拡散方程式を採用した。クベルカムク拡散反射モデルとは、ある物質に対する光の拡散と反射の物理モデル

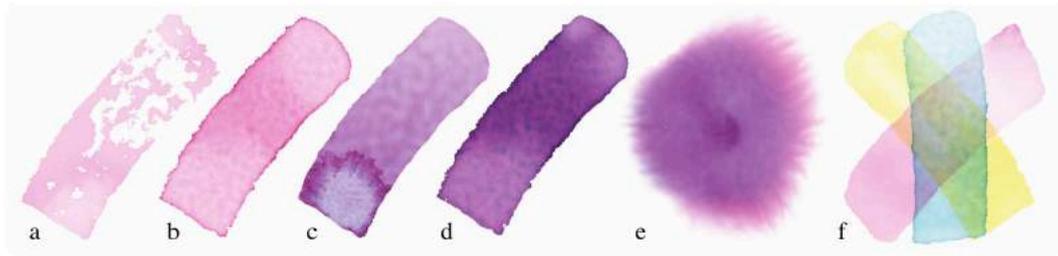


Figure 2 Simulated watercolor effects created using our system.

図 2.4: WaterColor effects by Curtis

である。クベルカムンク拡散反射モデルは、ある物体の拡散反射の性質を、光を吸収する値 K と、光を反射する値 S で定義する。 K の値が高いと黒ずみやすく、 S の値が高いと白味が強くなる。

Baxter ら [10] は 2001 年に油彩のシミュレーションを行った。Baxter らのシステムはパレットに乗せた絵の具をその場で自由に混ぜ、ブラシを使ってキャンバスに塗るところまでをインタラクティブに行うことができる。

2.2. 振動と温冷覚の触感提示

触感提示は、バーチャル空間や、遠隔地にある物体の触り心地を感じる為の技術である。CG と比較して触感提示の研究は発展途上の段階にあるものの、触感提示の重要性は見直されてきており、研究が盛んに行われている。触感を提示する方法としては力触覚アームを用いて素材の硬さ等を力触覚として提示する手法が主だった。例えば、Salisbury ら [11] は、力触覚アームに PHANToM を用いている。PHANToM は、3 軸の力触覚アームで、先端にペン型のグリップが搭載されている。ユーザはペンを握ることで、力覚フィードバックを感じる。

一方で、素材の微細な凹凸等の触感を力触覚アームよりも正確に提示する方法として、素材の振動触感を提示する手法が提案されている。人間はものに触れた際の微細な凹凸を振動として感じており、指先に小型の振動子を使って振動を伝えることで、その触り心地等を提示することができる。

2009年にKuchenbeckerらによるHaptography [12]は、それまでのHaptic Displayでは提示することのできない高周波の振動触感の重要性に注目し、振動子を用いて振動触感の記録と提示を行う手法を提案した。Kuchenbeckerらは、圧力センサー、加速度センサー、振動センサーを搭載したペン型のデバイスを開発し、そのデバイスで本物の素材の表面をなぞることでその質感を記録した。そして、記録したデータを元に、加速度や圧力等の相関関係を踏まえながら数理モデルを構築した。更に、完成したモデルから振動を生成し、振動子を搭載した別のペンデバイスから提示することで、ある素材の触覚を自由に提示できる。この仕組みによって任意の素材の触感をデータとして取り込むことが可能になる。

また、触感においては温度感覚も重要である (Jonesら [18])。温冷覚に関する研究は振動触感と比べて遅れているが、近年では注目が集まっている。温度提示の手法としては、ある物体に触れた際の指先の温度を記録し、その温度を提示することで物体と指先との温度の変化を提示するものがCaldwellら [13]やInoら [14]によって提案されている。また、温度変化をモデル化することで、異なる多様な物体ごとの温度提示を、それぞれ記録することなく提示する手法もある。主だった温度変化のモデルとしては、Citerinら [15]やDemlら [16]が提案している。



図 2.5: Platform for Haptic Contents

2.3. 触感コンテンツ制作のプラットフォーム

近年、触れること・身体を動かすことの価値が多方面から見直されており、触れることに価値をおいたコンテンツに関する研究が数多くなされている。その為、触感コンテンツを創作する為の環境も様々なツールが提案されている。例えば、南澤らによる TECTILE toolkit [19] を使えば、実素材の触感の記録と再生を簡単に行うことができる。TECTILE toolkit は触感を記録するマイクロフォンと再生に用いる振動子、刺激の強度をコントロールする増幅器で構成される。これらは一般的な音響機器と同様の構成の為、多くのユーザにとって使用法を習得しやすい。竹内らはユーザが手軽に触感コンテンツを創作し、オンライン上で発信することができるプラットフォームである、TouchCast [20] を提案した。TouchCast は「触感のコピー&ペーストによるコンテンツの創作環境」「触感検索エンジン」「触感コンテンツのオンラインプラットフォーム」を提供する。竹内らは「触感のコピー&ペースト」として同研究で開発したペン型の I/O デバイスで行った。TouchCast は、マイクを搭載したペンデバイスで素材をなぞり、生じた振動を記録する。記録した振動触感の提示は、振動子を通して行われる。ユーザは I/O デバイスで触感を取得し、データベースに蓄積できる。データベースにある触感は自由に検索することが可能で触感コンテンツの創作に利用できる。完成したコンテンツはソーシャルネットワーク上で共有・体験される。

2.4. 触覚提示のあるペイントシステム

ペンタブレット等のハードウェアや Adobe Photoshop、Corel Painter 等のソフトウェアによって水彩画や油絵のようなアナログ画材のデジタル上での再現は既に一般的となっている。しかし、これらの環境ではブラシの変形や画材間の摩擦、絵の具の凹凸等のアナログ画材特有の触感を提示することができない。その為、バーチャルでアナログ画材の触感を再現する為の様々な手法が検討されてきた。

2.4.1 DAB: Interactive Haptic Painting with 3D Virtual Brushes

Baxter らは DAB [10] と呼ばれる油絵を描く触感を PHANToM で提示するペイントシステムを提案した。DAB はブラシの変形を物理シミュレーションすることで力触覚フィードバックを実現した。しかし、画材の材質感は考慮されておらず、更に PHANToM の可動範囲が狭い為ユーザの動作が制限されてしまっている。

2.4.2 FlexStroke

Xin らの FlexStroke [21] は先端が多様な形状に変形するペンデバイスによって、異なるアナログ画材を描いた触感を提示する。Xin らが開発したペンデバイスの先端は JAMMING 構造を成している。JAMMING 構造は、ゴム製の先端に空気を出し入れすることで形状や硬さを電圧で制御する。このペンデバイスによって、唐筆、油彩筆、クレヨンの描き味を再現することができるが、紙を始めとする画材の質感は提示されない。

2.4.3 Colorful Touch Palette

廣部らの Colorful Touch Palette [22] は電気触覚ディスプレイによって様々な触感を色に持たせ、指先で触感を感じながら色を塗ることができるペイントシステムである。廣部らのシステムは、触覚フィードバックに高密度電極マトリクスを用いており、提示信号を人間の触覚受容器の活動特性に合わせて妥当に生成することで、指先に多様な触感を提示する。Colorful Touch Palette で提示される凹凸等の触感は経皮電気刺激を利用して提示されていることから、実素材から採取されたものとは厳密には異なる。また、経皮電気刺激は人によっては痛みを感じさせる場合がある。

2.4.4 Augmented Airbrush for Computer Aided Painting

Roy ら [23] はエアブラシの練習をする為のシステムを提案した。このシステムはエアブラシの視覚効果と描き心地をシミュレーションすることで初心者には現実に近い環境で練習することを可能にする。Roy らのデバイスはスプレーから顔料が噴出される際の触感を提示するだけでなく、ユーザの手の動作を補助することで最適な手の動きを導く。



図 2.6: Haptic Painting Systems: DAB, FlexStroke, Coloful Touch Palette, Augmented Airbrush (left to right)

2.4.5 先行研究における課題

これらの先行研究に見られる通り、デジタルペインティングに触感を持たせる為の研究が行われている。PHANToMのような力触覚アームを用いることで、筆

記用具と画材の衝突や筆の変形などの基本的な触覚フィードバックの提示が提案されてきた。

一方で、描き心地は紙の種類を始めとするキャンバスの素材の違いにも左右される。例えば、水彩画同士でも、一般的な画用紙と、ポスター用紙では描き心地は大きく異なる。これまで、筆記表具の反力や引っかかりの提示に成功した例はあるものの、同時にキャンバスの素材も自由に変えることのできるシステムは提案されていない。水彩画の場合、描き手は自身の目的や、描き心地の好みによってキャンバスの素材を選ぶ。それゆえ素材ごとに応じた描き心地の提示がデジタルペインティングでも求められると考えられる。また、既存の筆のしなりや反力を提示する手法は、力覚アームが用いられてきた。力覚アームは反力を提示する確実な方法ではあるものの、描き手の動作をアームで妨げてしまうことがある。そのため、アームを用いることなく、描き手の動作を妨げない形で、同様の触覚フィードバックを提示できる機構も必要である。

第3章

描き心地の提示手法の検討

3.1. 振動触感による描き心地提示手法の検討

人間は指先を通して画材が提示する触感情報を感じている。画材が提示している触感のうち、重要な触感情報を選択して優先的に提示することが望ましい。一般にタブレットのような摩擦の無い表面よりも、紙のようなザラザラした素材の方が描き心地が良い。画材の表面には微細な凹凸がある、その凹凸と筆が接触することで、特有の振動が生じる。紙をなぞった際に生じる振動が描き心地に影響している為と考えられる。絵描きは描き心地の良かった紙からタブレットへ移ったとき、急に絵の完成度が落ちてしまう場合が多い。描き心地が異なると作品そのものも変わってしまう。その為、画材の振動触感は、その画材らしさだけではなく、描き心地に影響を与え、強いては絵描きの絵の完成度に影響を与えると考えた。また、振動触感は、大掛かりな機構を用いることなく提示できる。更に、振動触感を切り替えることで、同じ表面の上で異なる画材の触感を提示でき、書き手にあった描き心地を自由に提示することが可能となる。そこで、振動触感の描き心地への影響を検証する為、以下の実験とフィールドワークを行った。

- 振動触感による描き心地への影響の定量化
- 振動触感を用いた触感ペイントシステム Tangment を開発。振動触感でどれだけ多様な素材感を提示できるかをフィールドワークにて検証



図 3.1: Digital Painting and Traditional Painting

3.2. 振動触感をもたらす描き心地への影響の定量化

まず、振動触感が、どれだけ描き心地に対して影響力があるかを検証した。ある素材の描き心地を定量的に数値化すれば、異なる素材間の描き心地や、振動触感の有無ごとの描き心地を比較することができる。そこで、振動触感の提示における描き心地の値の変化を見ることで、その振動触感の描き心地への影響力を測定する。ある素材に振動触感を提示した場合に描き心地の値が向上すれば、振動触感が描き心地において重要な要素であることを確かめることができるはずである。

3.2.1 実験参加者

実験参加者は成人男性5名である。利き手は全員右利きで、いずれもタブレットで絵を描くことについては初心者だった。その為、試行を行う前に3分ほどタブレットに慣れてもらう為のチュートリアルを用意した。

3.2.2 実験環境

表面の摩擦感と柔らかさに応じて紙素材の内から画用紙、ノート用紙、スケッチブック、液晶タブレットをサンプル素材として選定した。各素材の実物を用意し、振動触感を抽出した。液晶タブレットは、Wacom社のCintiq 13HDを使用。

ペンデバイスに振動子を搭載することで振動触感を提示する。振動子は Haptuator Mark 2 を使用した。振動のアンプには TECHTILEtoolkit を使用した。本実験では、実験参加者の手の動作を毎フレームごとに計測する為、試行ごとに入力を記録するペイントシステムを開発した。このペイントシステムは、ペンデバイスの位置と筆圧を読み込み、線を描画する。更に、実験参加者の手の動作に合わせて、任意の素材の振動触感を提示可能である。

3.2.3 実験手法

実験手順は以下の通りである。

1. 実験参加者は一定の長さ、角度、位置の直線をなぞる。
2. 手の動きを毎フレームごとに計測し、各フレームの速度、加速度、躍度を計算
3. 以上の試行をすべての素材に対して約 50 回行う。
4. 同様の試行を振動による疑似触感に対しても行う。

実験の様子を図 3.2 に示す。

3.2.4 解析手法

描き心地の良い線を描く時、手は自然で滑らかな動きをとる。よって、手の動きを滑らかに加減速できる素材が描き心地の良い素材であると仮定した。描き心地を定量的に評価する為、本研究は Flash and Hogan ら [24] の Jerk 最小モデルを用いた。Jerk 最小モデルは、運動軌道の粗さを躍度で表し、2 点間を結ぶ運動のうち、躍度の時間微分を最小化するものを最も滑らかな軌道とする。始点 x_0 と終点 x_f に対して、ある時刻 τ における手先の位置を以下の式で表すことができる。

$$x(\tau) = x_0 + (x_f - x_0)(6\tau^2 - 15\tau^4 + 10\tau^3) \quad (3.1)$$



図 3.2: Experiment of Draw Confort

$$\tau = \frac{t}{T} \quad (3.2)$$

t は動作開始時からの時間であり、 T は動作開始から終了までにかかる時間である。この時、動きの速度、加速度は滑らかな曲線を描く。加速度の変化が滑らかなであれば、それだけ手にかかる負担も少ない。計測した軌跡と Jerk 最小モデルで算出された理論上の軌跡を比較すれば、その素材がどれだけ手の負担にならない動きをしやすいかを計測することができる。本実験では各フレームの計測値と予測値間の距離を取得し、始点から終点まで合計した値を描き心地の測定値とする。測定値は以下の式で求める。

$$\epsilon = \sum_i \sqrt{dx_i^2 + dy_i^2} \quad (3.3)$$

書き心地の良いと思われる素材を選定し、実物体に対して Jerk 最小モデルに基づいた実験を行い、最も書き心地のよい素材を選ぶ。次に、それらをなぞった際

に生じる振動を記録し、その振動に対して再び同じ実験を行うことで、二つの実験で最も描き心地の良い素材が一致するかを確かめる。

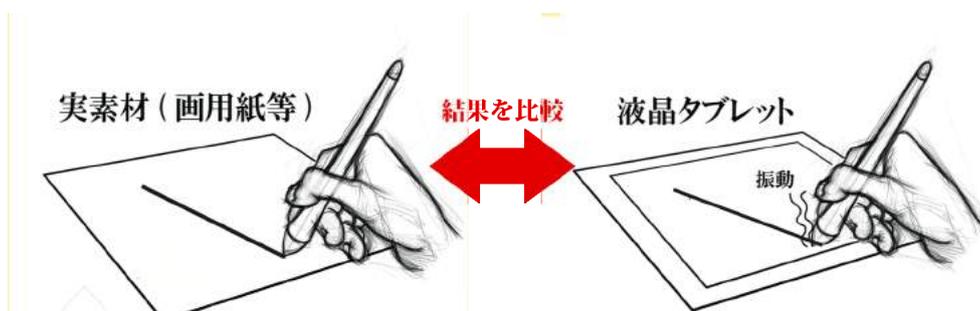


図 3.3: Experiment Method

素材の選定には光本ら [34] の行った実験結果を参考にした。光本らは、書き心地のよい素材は、摩擦感、なぞった際に生じる音、感触 (柔らか) さの有無を評価軸とした。そこで本実験では、表面の摩擦感と柔らかさに応じて紙素材の内から画用紙、ノート用紙、スケッチブック、をサンプル素材として選定した。更に、液晶タブレットを加え、以上4つに対して書き心地を比較した。

3.2.5 実験結果

実素材のみと振動のみを提示した試行の結果を表3.3.2と表3.3.2に示す。表3.3.2は各素材を約47回なぞった際の Jerk 最小モデルとの各時間のずれを mm 単位で計算し積分したものの平均、表3.3.2は同じ試行をタブレットの上で振動を提示したものである。実素材の場合ではスケッチブックが最も描き心地がよく、画用紙、ノート用紙が続いた。疑似触感の場合は、画用紙、スケッチブック、ノート用紙が続いた。タブレットは他3つと比べて描き心地が悪かった。また、各紙素材の振動数をFFTで分析した。スケッチブックとノート用紙の周波数帯は大きく分離しているが、描き心地がよかった画用紙の周波数はノート用紙の側に寄っている。結果、摩擦感が少なく、固いノート用紙よりもスケッチブックや画用紙が描き心地が良いことがわかった。また、振動のみの疑似触感の場合は、何もないタブレットの場合が他と比べて描き心地が悪かった。これは摩擦や感触の無い表面でも、

何らかの疑似触感を提示することで描き心地がある程度改善することを示唆している。図3.8より描き心地は周波数帯によって完全に分離しづらいことがわかる。個々の周波数に着眼すると、スケッチブックのみが1500 4000 Hz帯の周波数を多く含んでいる。一方、ノート用紙は200 500 Hz帯に集中しており、258. 398 Hzが最も多い周波数だった。ノート用紙の描き心地が最も悪かったことから、この周波数帯は描き心地を悪くすると考えられる。

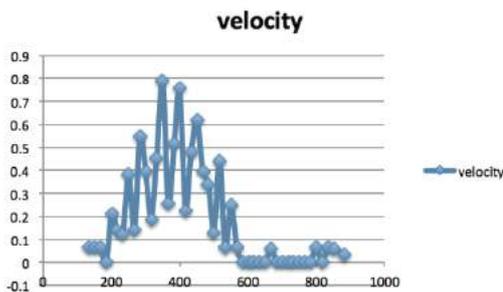


図 3.4: Velocity change on Note

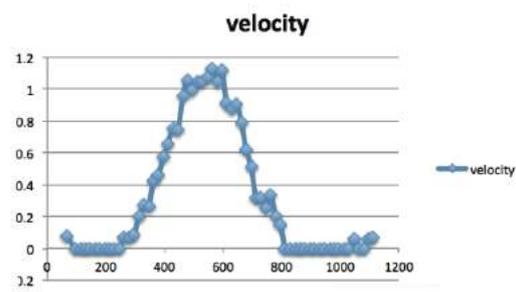


図 3.5: Velocity change on Sketchbook

	試行数 (N=3)	描き心地の値 ϵ
スケッチブック	47	673mm
画用紙	47	792mm
ノート用紙	47	844mm

図 3.6: Velocity change on Note

	試行数 (N=3)	描き心地の値 ϵ
スケッチブック	47	897mm
画用紙	47	894mm
ノート用紙	47	921mm
タブレット	47	1024mm

図 3.7: Velocity change on Sketchbook

3.3. 振動触感による描き心地の再現可能性の検討

振動触感によるタブレットの描き心地の改善に対する検証実験の結果から、アナログ画材である画用紙の振動触感が最も描き心地が良かったことがわかる。こ

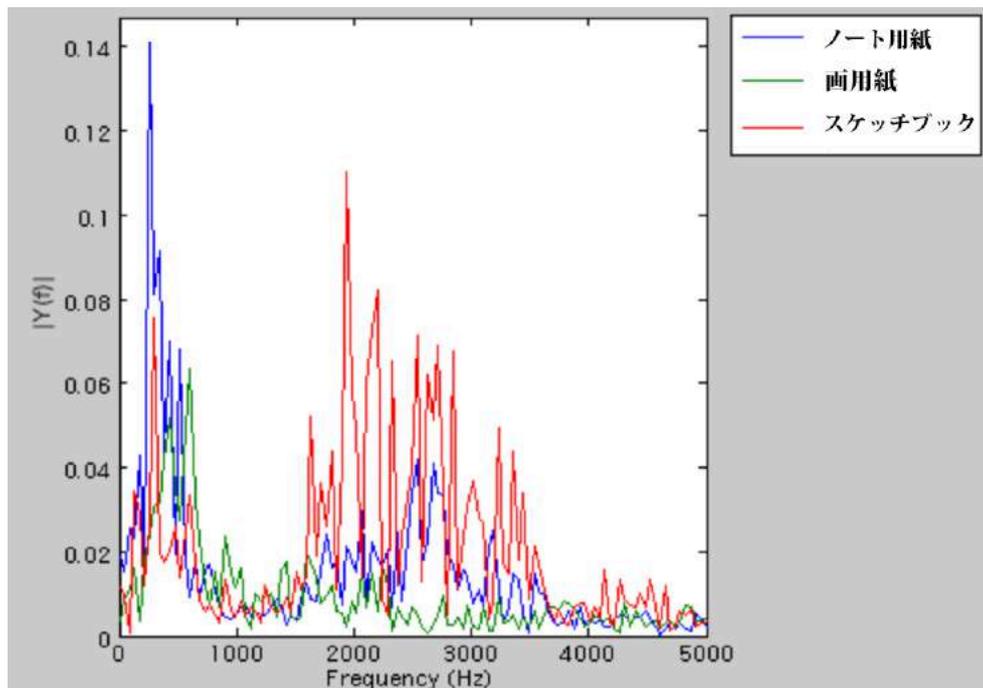


図 3.8: FTT of 3 waves including note, sketchbook, and drawing paper

のことから、アナログ画材において振動触感は重要な役割を果たしていると思われる。振動触感における振動の波形は、なぞる素材によって異なる。よってある素材の描き心地を提示する場合は、その素材をなぞった振動を提示すればその描き心地も再現できると思われる。そこで、振動触感によってどれだけ多様な素材の描き心地を再現できるか検証する為、触感ペイントシステム Tangment を開発した。

3.3.1 触感ペイントシステム Tangment

Tangment は、ある素材の表面をマイクの付いたペンデバイスでなぞり、その際に生じた振動を記録する。記録した振動は手の動きに合わせて再生する。Tangment では、早川ら [29] の触相図に基づいて赤レンガ、ダンボール、草、ペンキ、麻布、鉛ブラシ、水と、消しゴムの 7 通りの触感を取り込んでいる。早川らは、触感を「ざらざら」「ぬるぬる」等のオノマトペを触感に当てはめ、2次元平面上の分布

に配置することで触感の感性的な分類を行い、以下の触相図を提案した。

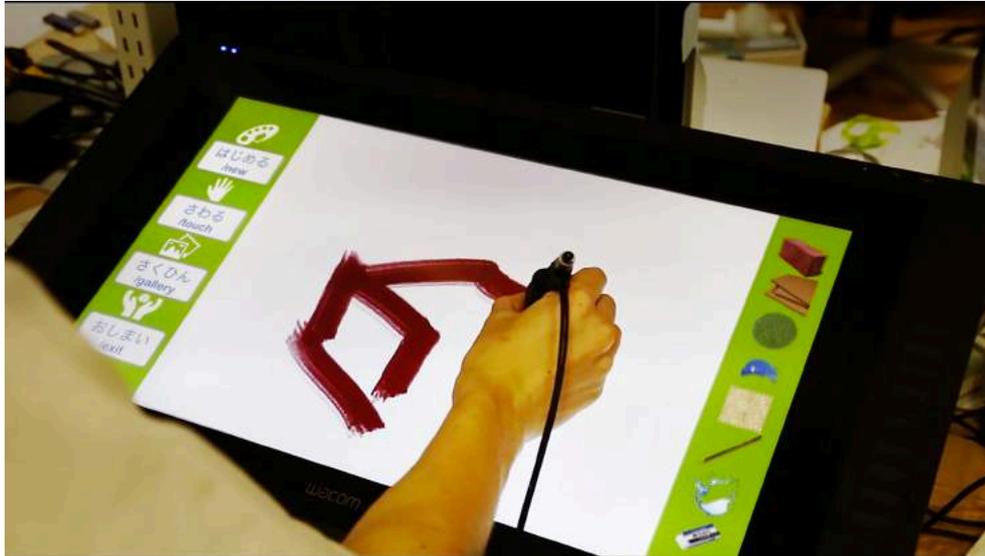


図 3.9: Tangment: Haptic Painting System

早川らは、触感を分類する因子として粗さ、湿度、硬さの3つを軸として触感の分類を行った。筆者は、このうちの7通りの触感を、触相図に基づき性質がかぶらないように選んだ。触相図上の触感を幅広く再現する為、振動触感の他に温冷覚と Pseudo Haptics による疑似粘性を提示した。Pseudo Haptics という現象を使うと、力覚的な機構を用いることなく擬似的に粘性を感じさせることができる。Pseudo Haptics とは、ユーザが操作するマウスポインタ等を移動に遅延を生じさせる等して変調させると、擬似的な触力覚を感じる現象であり、Pseudo Haptics によって触力覚を感じさせた例が数多く報告されている [30]。渡邊らの研究である Visual Haptics [31] は、力覚的な機構を使うことなく、水や蜂蜜、ガムテープなどの粘性感を提示する手法を提案している。ペンキの触感は温冷覚と Pseudo Haptics を組み合わせることでひんやりしていてぬるぬるした触感を再現している。

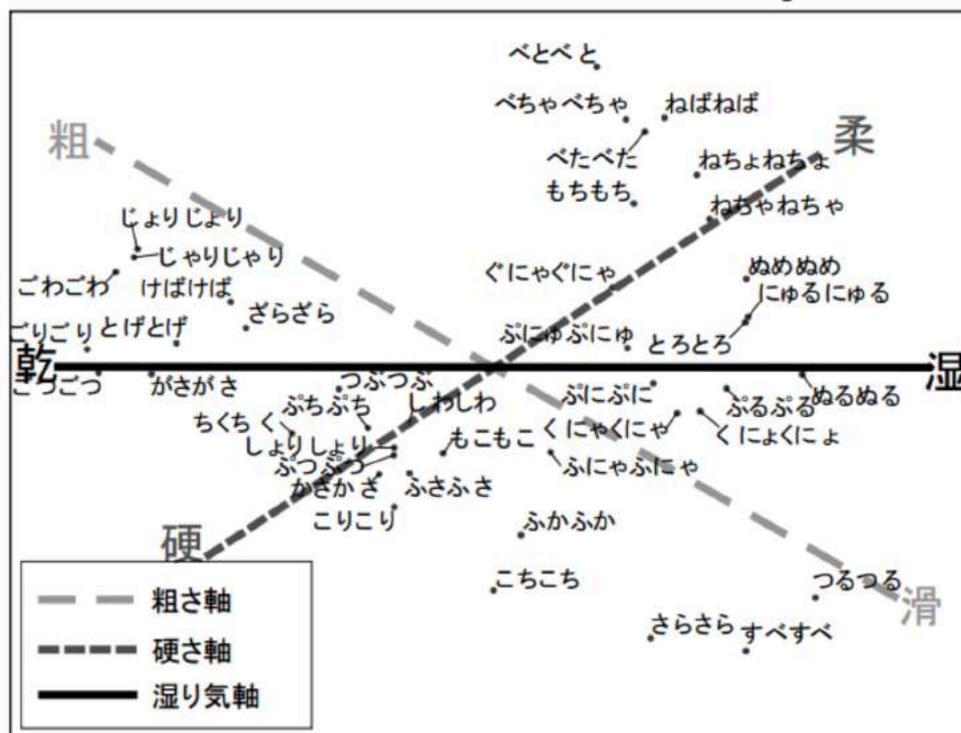


図 3.10: Haptic Onomatopoeia [29]

3.3.2 振動触感の抽出方法

本システムで用いる振動は全て現実の物理世界から抽出したものである。振動触感を抽出するに当たって以下の機材からなる環境を構築した。

1. 小型マイクを先端に搭載したペンデバイス
2. マイクからの振動を増幅する為のアンプ
3. 振動を記録し、データに変換するソフトウェア Textile Capture

小型マイクとアンプは、TECTILE toolkit に付属しており、本システムも TECTILE toolkit に付属の機材を用いて記録を行った。記録する振動の長さは25秒程である。マイクで記録した振動はWAV形式のファイルに変換される。WAV形式は、音声を無圧縮で記録したデータで、MP3とは異なり可聴域に含まれない周

波数もデータに含まれている。一般に人間の可聴域は最低 20Hz から最大で 20、000Hz である。この為、振動触感のデータは、可聴域外の振動をトリミングしない形式が相応しい。

振動触感抽出の手順を以下にしめす、下準備として、対象の素材を頑丈な台の上に乗せ、しっかり固定する。次にペンデバイスのマイクが機能しているか確認し、手に握る。振動を WAV ファイルに変換するソフトウェアとして、Textile Capture を用いた。



図 3.11: Textile Capture

1. Textile Capture を開き、DEVICE-OFF を ON にする。
2. Textile Capture は、同じ素材での振動の記録を何回か繰り返しおこなう。ユーザはこの中で最も出来の良かったものを使用する。Wait にて待ち時間、Record にて録音時間、また Repeat にて何回録音を繰り返すかを指定する。
3. REC ボタン (またはスペースキー) を押すと録音が始まる。録音が始まる直前には必ず事前に指定した待ち時間が入る。
4. ペンデバイスで素材を一回端から端へなぞり、振動を起こす。この時、なぞる速度とブラシ圧は可能な限り一定であることが望ましい。
5. 4. の動作を指定した回数だけ繰り返す。

3.3.3 Tangment のフィールドテスト

Tangment は東京都にある日本科学未来館にて 2014 年 10 月 22 日から 2015 年 6 月 15 日まで常設展示された。この期間に 285000 名が展示ブースに来場した。常設展にて、7つの触感を Tangment がどれだけ再現できているかを検証した。常設展では、実際に Tangment で触感絵画を創作してもらい各触感について実験参加者に意見を聞いた。



図 3.12: Display of Tangment at Miraikan

3.3.4 実験参加者

実験参加者は、日本科学未来館の来場者である幅広い年齢層の人々、特に小学生前後の子供達である。図 3.12 に体験者の様子を示す。体験者はペンタブレットの使用に不慣れな人も多く見られたが、多くの人は選んだ触感で描き心地が変わることを理解し様々な作品を創作していた。

3.3.5 実験環境

Tangment のハードウェアは、触感を提示する為のペンデバイス、キャンバスの役割を担う液晶ペンタブレットから構成される。液晶ペンタブレットは Wacom 社の Cintiq を用いた。触感を提示する機構はペンデバイスに全て搭載した。Tangment

の触感はペンデバイスを通してユーザの手に伝えられる。ペンデバイスには振動子、2つのペルティエ素子が埋め込まれており、振動触感と温冷覚が提示される。振動子は Haptuator Mark 2 を使用した。ペルティエ素子はペンデバイスの左右にそれぞれ温度提示を行う表面が皮膚に触れる形で埋め込まれている。アプリケーションはペイントモード、ギャラリーモード、鑑賞モードの3つから構成されている。ペイントモードは、ペンデバイスを使って絵を描く部分である。完成した作品は保存することで後から鑑賞できる。ギャラリーモードは、過去に保存した絵の一覧が表示される。ユーザが一覧の中から鑑賞したい絵を選択すると鑑賞モードに移行する。鑑賞モードでは、選択した絵を見るだけで無く。ペンデバイスを通して触感に触る事ができる。ペイントモードは、キャンバス、ブラシ、パレットから構成されている。ユーザは、パレットから触感を選び、キャンバスの上に Tangment を塗ることで描画する。

3.3.6 実験手順

体験者には、触感ペイントシステムで触感絵画を描いてもらい、更に他の人の作品を鑑賞してもらった。常設展の為、触感絵画を創作する上での制限時間は特に設けていない。

3.3.7 フィールドテストの結果

本システムを体験してもらった結果、幾つかの触感についてはかなり本物らしい触感が出ており、その中でもレンガ、ダンボールはほぼ、視覚的イメージとペンデバイスを通して伝わってくる触感が一致しているという意見を頂いた。特に温冷覚を提示した水の触感は、本来は水に触れているわけではないにも関わらず水特有の冷い触感を突然感じられることに驚いていた。体験者が実際に創作した触感絵画の一部である。体験者が描いた作品はすべてデータベースに保管されており、触感の提示が作品に与える影響の評価用のデータとして自由に参照することができる。一方で、ペンデバイスの先端がタブレットと衝突する際に振動の性質が変化しているのではないかという指摘を頂いた。提示する振動覚は本来、ペ

ンデバイスで対象の実物体をなぞった際に生じた振動ものを記録して、変質無く出力するのが適切である。一方、Tangmentにて使用した液晶タブレットは、微小ながら表面に凹凸がある。この凹凸は、保護フィルムを貼る事である程度軽減させているものの、完全には解消できておらず、提示する振動覚に影響を与えていると考えられる。

常設展示期間中に、体験者達によって22,339点の作品が創作された。図3.13に、体験者が創作した触感絵画のうち代表的なものを示す。作品群を分析したところ、主に4種類の傾向があることが判った。まず、視覚的に写実的なものが挙げられる。これは高いスキルを持って描かれているが、触感による効果はあまり意識されていない。次にモザイク画のように様々な触感を縦横方向に並べたものである。これらの作品は触れてなぞることで異なった触感が連続で提示されるという触感効果がある。

また、異なる触感を複雑なパターンで配列した例も見られた。興味深い現象として、同じ触感でも塗る形状を変えることで印象が変化する効果があった。例えば、レンガの触感を丸みを帯びた形状に塗った場合と尖った形状で塗った場合では、尖った場合の方が、刺激が強いように感じられた。このように、同じ触感も塗るパターンを変えることで異なる触感効果を生じさせることができると考えられる。更に、水の冷たい触感をそのまま水の表現に生かした例も数多く見られた。この作品と同じように、水の触感を集中的に使った作品、画面全体を水で塗りつぶしたような作品も多かった。

フィールドテストより、振動触感は乾燥して比較的ザラザラした素材の触感は視覚的イメージと一致しており、本物らしく再現できるものの、柔らかい素材の再現度は芳しくなかった。アナログ画材のキャンバスの場合、画用紙のように硬めで表面に微小な凹凸があるものが殆どの為、柔らかい素材の再現は必要でない。一方、温冷覚の提示によって再現できる触感の種類を広げることができることも判った。例えば、指先に冷たい温度を提示することで素材が湿っていたり、濡れていたたりする感覚が喚起された。



図 3.13: Haptic Painting Works

3.4. 描き心地の再現可能性の検討のまとめ

以上二つの検証より振動子と視覚効果を用いた画材の描き心地の提示について3点が判った。

1. 振動触感は、描き心地に重要な影響を持っている。
2. 振動触感の提示であれば、絵を描く動作に必要なキャンバス画材の触感を再現できる。
3. 振動触感と視覚効果を的確に組み合わせることが、触感提示の効果を高める。

これらの結果より、振動触感と視覚効果のみで水彩画で用いられるような画材の描き心地をある程度再現できることが示された。この手法は触感提示の機構を一つのペンデバイス内に格納できる。更に、液晶タブレット等のハードウェアも既存のものを流用することができる為、筆と画材の描き心地を出す上で非常に簡便である。よって、本研究はこれらの手法に基づいてシステムの開発を行う。

第4章

視触覚提示による描き心地の再現の 提案と実装

前章では、振動触感と視覚効果によってどれだけ水彩画の描き心地を再現できるかを検討した。本章では、前章から得られた結果に基づいて水彩画の描き心地を提示する手法について述べ、実装までの流れを挙げる。

4.1. 水彩画における筆の視触覚的役割

水彩画に関するテクニックについて男鹿和雄ら [26] と Linda [27] の書籍を参考にすると、絵描きは丸筆を使って木の葉や枝のような自然物を描写する際、頭で考えるのではなく、筆のしなりのエネルギーを生かしながらリズムカルに手を動かすことが効果的であると述べている。これらから、筆そのものは単純な形状であるものの、立体的な性質を生かすことによって多様な表現を可能にしていることがわかる。

一般に、筆の先端は押し付けるとしなりながら広がる。また、筆の繊維はバネ力を持っており変形に対して戻ろうと反力が働く。これらは、筆の変形によって生じる反力等の触感で感じることで、目で見るとよりも素早く柔軟な動作を実現していると考えられる。このテクニックをデジタルペインティングにて自然に行うことができるのが理想である。

4.2. 振動触感による変形の提示

本システムを実現する上で、ユーザの絵を描く動作を妨げてはならない。過去に、DAB [10] のように PHANToM 等の機械的なアームを用いることで絵を描く触感の提示を行ったシステムが幾つかある。しかし、アームの使用はアームが障害物になってしまったり、アームの可動域の外へ動くことはできなかつたりする等、ユーザの絵を描く動作を妨げてしまう。大がかりな機構が必要な触感はなるべく避けるべきである。

筆を紙に押し付けると必ず特定の方向にしなり、変形する。筆は繊維同士の摩擦力や水分によって引き合うことで、変形した筆はしなりやねじれを解消し元の形に戻ろうとする反力が発生する。この反力は筆がしなっている向きとは逆の方向にかかり、指に伝わる。反力は、筆が保持している絵の具の水分が多ければ多い程大きくなる。絵描きはこの力を指先で瞬時に感じることで、筆の状態を感じていると考えられる。この力は力覚的な運動によって発生しているものの、その力の大きさは微小である。そこで本研究は、アーム等の力覚的な機構を一切使うことなく、振動の提示のみで筆のしなりの反力をユーザの指に伝える手法を提案する。

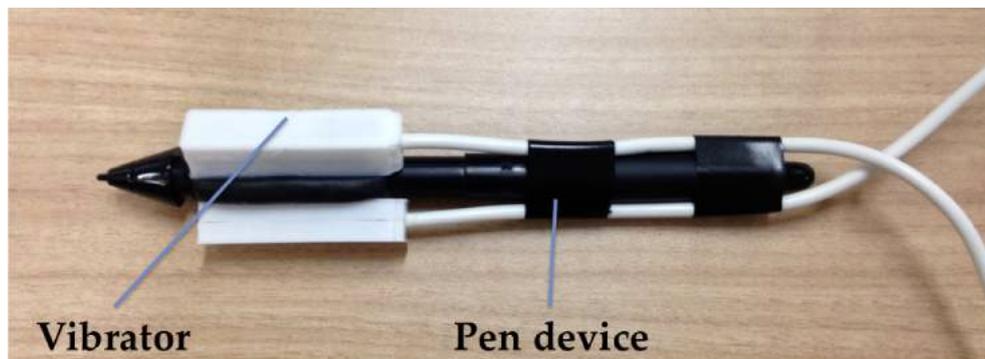


図 4.1: Pendevice

先端が変形した筆の形状は紙の法線方向に対して非対称である。この筆を握って紙の表面をなぞると、筆と紙の接触面にて生じた振動も筆内を非対称に伝わる。

その結果、指先で触れる位置によって感じられる振動が異なると考えられる。本手法はこの原理を利用することで筆の変形を振動で提示する。複数の振動子をペンデバイスに搭載し、それぞれの位置に異なる振動を提示する。ユーザは各振動子の上に指を置くことで、現実と同様に筆の変形による振動の変質を感じることができる。図4.2は本システムで用いたペンデバイスである。振動子を二つ搭載することで、筆の変形感を提示する。

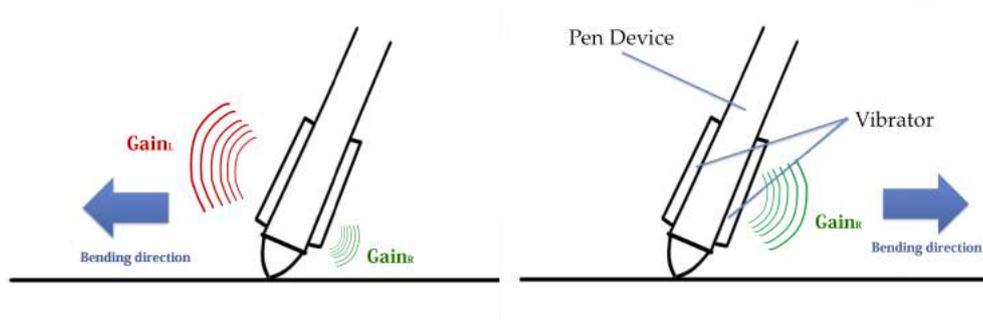


図 4.2: The direction of brush bending displayed by vibrotactile

4.3. 顔料の疑似粘性手法

Tangment での試行に基づき、絵の具の粘性を Pseudo Haptics で提示する手法を考案した。絵の具の粘性は、絵の具に含まれる水分と顔料の割合から決まる。例えば、同じ量の絵の具でも水分量が多いと色水のような絵の具になり、顔料の占める割合が高いと粘性が高く硬い絵の具になる。水分量の多い絵の具は紙の内部に染み込みやすく、乾燥した領域へ広がりやすい。水分量の少ない絵の具の場合、顔料の粒子間に水分が入らない為顔料の移動が起こらず、紙の内部へ染み込むこともない。その為、一度塗った箇所から絵の具が広がりにくく、広げようとするには粘性による反力が伴う。また、水分量と顔料が両方とも少ない場合、紙の凹凸の深い部分にのみ顔料が移動する為、画材の凹凸に応じたまだら模様ができる。この時、顔料は殆ど移動せず、広がらない。一方で、絵の具がゲル状かペースト状かによって粘性の具合は異なる。絵の具には顔料を固定する為に固着材が、顔料を均一に広げる為の溶剤が含まれている。その為、固着材と溶剤の種類によって絵の具の粘性の質感も異なる。例えば、水彩絵の具は固着材にアカシア樹脂(アラビックガム)を用いている。アカシア樹脂は水に対して溶解性が高く、粘性があるもののネバつきにくい。この性質が固形水彩絵の具等に用いられている。また、ゲル状の絵の具はアクリル系の絵の具に多い。水彩画はその本分である透明な表現だけでなく、分厚く塗ったり不透明水彩絵の具を用いたりすることで油彩やアクリル画に近い表現も可能な為、汎用性が高いからである。その為、水彩画系の絵の具ではあまり見られないゲル状の絵の具の再現は本システムでは扱わないものとする。

本システムでは、Pseudo Haptics の粘性を制御するパラメータとして、水分量 ρ と顔料の密度 p を定義する。水分量 ρ は筆が含む量である。この二つのパラメータから絵の具の粘性が決定され、筆の変形の性質に影響を与える。筆が紙に接触した際の水分量 $\hat{\rho}$ は ρ の内、筆が接触している部分の水分量である。本システムでは $\hat{\rho}$ は ρ と筆の変形した角度のヒューリスティック関数から求めている。水分量が多いと水分子同士が引き合うことによって筆の繊維と紙の繊維同士が吸着する。その為、水分量が多いほど、筆と紙の間の摩擦は大きくなり、筆は紙に引っ張られるようになる。本システムでは、この性質を水分量 ρ に応じて筆と紙の間の摩擦

に一定量の力を加えることで実現している。顔料の密度 p は筆が紙に接触した時の顔料の濃さを表す。顔料の密度 p が高いと、絵の具の粘性によって筆の弾力性が高くなる。筆は弾力性が高くなると、紙との摩擦が減った際により粘り気のあるバネのようにしなるようになる。本システムでは、顔料の密度と筆の弾力力を比例させることで、絵の具による粘性を提示する。以下に粘性を提示する数式を示す。渡邊ら [32] の手法に基づき、筆の根元から直前の筆先の位置へ筆先が引っ張られる手法を用いた。

$$Tip = Tip + \frac{(P - Tip)}{\alpha} \quad (4.1)$$

ここで、 Tip は筆先の位置、 P は筆の根元の位置を表す。 α は、1 以上の定数である。どのような粘性が提示されるかは、 α の値によって決定される。本システムでは、水分量 ρ と顔料の密度 p に基づき、以下の式で α を決定した。

$$\alpha = \max(1.0, \left(\frac{p}{\rho}\right)^m) \quad (4.2)$$

顔料の密度 p が水分量 ρ よりも高い値の時に粘性が強まる。ここで、 m は粘性の弾力性を表す。本システムでは $m = 2$ または 3 と設定した。1号筆(直径 1.5mm) が一回あたりに染み込ませることができる水分量が最大 0.1ml である。そこで、本システムでは、水分量 ρ と顔料の密度 p の最大値を 0.05(ml) とした。

4.4. 画材の材質感の提示

画用紙やキャンバス等のアナログ画材のザラザラした材質感を提示する為、触感ペイントシステム Tangment と同様の方法で事前に記録した振動の WAV ファイルをループ再生する。ユーザがペンデバイスでクリックした瞬間に再生を開始、ドラッグ中はループ再生が行われ、ペンデバイスを離すと再生を止める。また、振動の再生速度はドラッグ中の手を動かす速度に比例させる。その時点での手の位置を取得し、直前のフレームの手の位置とのユークリッド距離から求める。手の位置は、液晶タブレットによってピクセル単位で検出される。手の速度は mm

単位で取得する為、ピクセル単位での距離を液晶ディスプレイの dpi で割ることで inch 単位の距離を取得し、更に mm 単位に変換した。

4.5. システム構成

本システムは、水彩画の視覚的シミュレーション並びに触覚提示を行うアプリケーションと振動触覚の提示を行うハードウェアから構成される。水彩画の視覚的シミュレーションは、絵の具と紙のインタラクションに関するシミュレーションと筆先の変形のシミュレーションから構成される。振動触覚の提示を行うハードウェアは TECTILE toolkit と、幾つかの振動子を搭載したペンデバイスから成る。毎フレームごとに紙の表面と内部の水分の移動と蒸発、それに伴う顔料の粒子の移動が行われる。ユーザがペンデバイスによる入力を行うと、本システムはペンデバイスの位置に応じて筆先の変形を計算し、筆と紙の接触面を求める。そして、接触面に基づいて、筆から紙へ水分と顔料を紙の表面へ移動させる。紙の表面の水分と顔料は、流体シミュレーションによって、紙の内部へ染み込み、紙の凹凸の底へ固定される。筆先の変形後の形状は、絵の具の粘性によって変化し、粘性は水分量と顔料の密度によって決定される。ユーザがペンデバイスをドラッグすると、筆で紙の表面をなぞった時同様に振動触覚が提示される。ユーザは、ペンデバイスから位置情報、筆圧、ペンの傾き、ペンの回転を入力することができる。

本システムは MacBook Pro(Retina、Mid 2012)上で開発され、動作した。OSは、OS X Yosemite バージョン 10.10.5である。MacBook の仕様の詳細は、CPU: Intel Core i7 2.6Ghz、メモリ:DDR3 8GB、グラフィックスカード: NVIDIA GeForce GT 650M 1024MBである。ペイントシステムは 1500 × 1500 の解像度でほぼ 60FPS を維持しながら動作した。

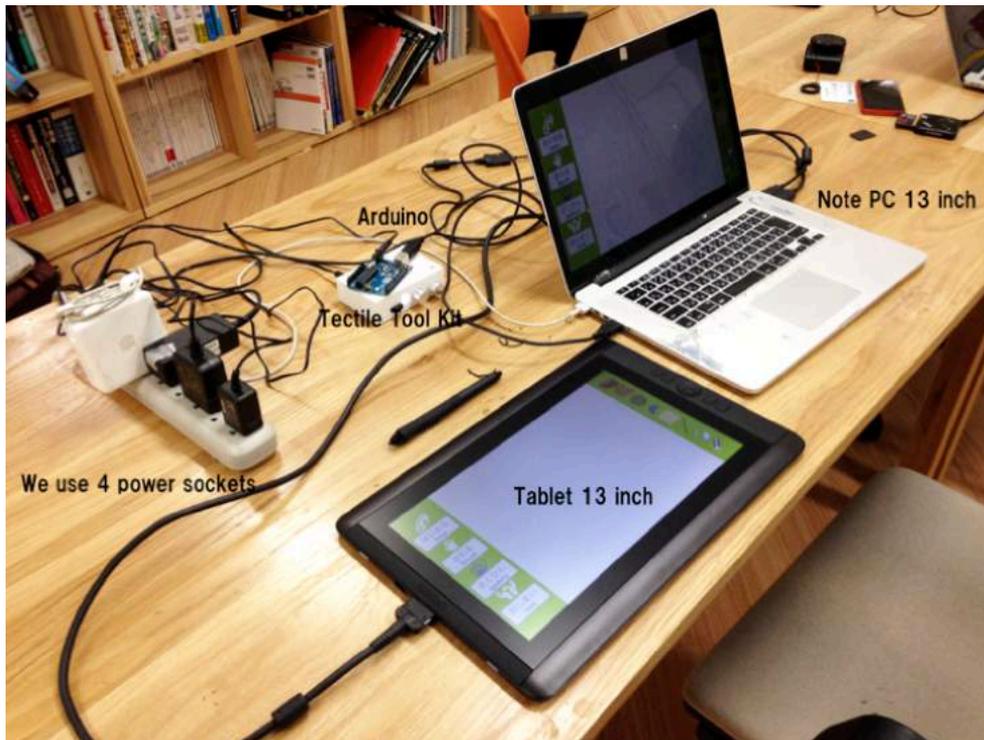


図 4.3: System

4.6. ソフトウェア概要

本システムを構成するソフトウェアは、ペイントシステム、水彩画の筆の変形のシミュレーション、顔料と紙のインタラクションのシミュレーション、振動触感と温冷覚を制御するシステムから構成されている。水彩画の視覚的シミュレーションは XCODE 上で C/C++ を使って書かれ、OpenGL4.1 と GLSL を用いて実装を行った。ペイントシステムにおけるウィンドウの生成をはじめ、ペンタブレットやキーボードからの入出力や OpenGL のレンダリングコンテキストの生成等は Apple の Cocoa の機能を利用することで実現している。Cocoa は OSX 用のアプリケーションを開発する為の API で、言語として Objective-C を採用している。Objective-C は C 言語を Smalltalk 型のオブジェクト指向機能を持つよう拡張したプログラミング言語である。Apple 社の OSX や iOS 上で動作する。Objective-C は C/C++ の拡張なので、C/C++ と互換性を持っており、C/C++ のコードと共

用することができる。本システムでは、ウィンドウの生成等、OSX に依存する部分は Objective-C を使って実装し、水彩画のシミュレーション等、OSX への依存度が低く、効率的な計算資源の管理が要求される箇所は C/C++ で実装した。振動触感は音声データとして扱われる。ソフトウェア上で音声を制御する為の API として OpenAL を使用した。OpenAL は PC 上で音声を扱う為のフリーの API で、クロスプラットフォームである。3次元空間における音の反響をシミュレーションすることができ、3D ゲーム等で多用される。

4.7. 顔料のシミュレーション

水彩画を始めとする水彩画の視覚的現象は紙の表面や、内部を水に乗って顔料粒子が流れることによって生じる。一般に、水彩画用の紙は麻や綿を原料とする極細の繊維からできている。更に、その隙間に糊を染みこませることで、顔料が必要以上に浸み込んだり、拡散したりすることを防いでいる。糊は主にセルロースがよく用いられる。糊が入ることによって繊維内の水の拡散や染み込みをブロックし、絵の具の広がり具合を調節する。顔料は、直径が 0.05 から 0.5 マイクロメートルの球体をした微粒子である。顔料は紙繊維の内部に入ると、繊維や糊がブレーキとなることで特定の位置に固定される。顔料の重さは素材によって様々で、軽い方が水の流れに乗って広がりやすい。顔料が、凹凸の荒い紙の深い部分に集中すると粒化した見た目になる。水彩画家はこれらの化学的な現象を応用することで様々な表現を制御している。以上の性質を踏まえ、流体内の顔料の移動、水と顔料の紙への吸収、時間変化に伴う水の紙からの蒸発をシミュレーションする。

水彩画の流体シミュレーションは Chu らの Moxi [7] に基づき、格子ボルツマン法と、Chu らが提案した紙のモデルを用いた。

4.7.1 格子ボルツマン法

格子ボルツマン法 (以下 LBM) は水が流れる領域を格子状に近似し、格子間を移動する水の密度を計算することによって、少ない計算量で流体の性質を再現する。格子ボルツマン法は、空間を格子状に近似する。各格子は格子内の水粒子の

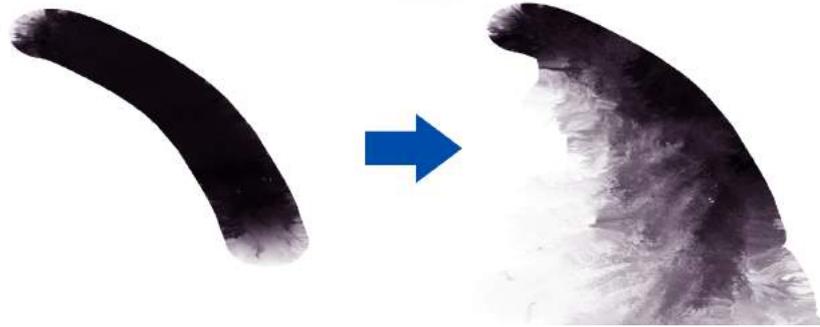


図 4.4: Pigment Simulation

密度の値を持つ。毎時間ごとの粒子の移動や衝突を格子間における速度分布関数の更新によって行う。格子の構造には幾つかの派生が提案されており、DXQYモデルと表記される。この表記にて、Xは空間の次元数、Yは格子内の粒子の移動を近似するベクトルの数である。本システムは、キャンバスを2次元平面に近似する。その為、D2Q9モデルの格子を用いた。本システムでは、キャンバスの解像度の1ピクセルごとに1つの格子を割り当てた。よって、キャンバスの流体領域全体を幅×高さ×9の配列で実装した。

4.7.2 顔料モデルの実装

Chu and Taiらは、紙と絵の具の接触を3つのレイヤーモデルで定義した。このモデルは、紙を表面レイヤー、流体レイヤー、固定レイヤーの3つで表す。絵の具はまず筆から表面レイヤーに付着される。表面レイヤーの水分は時間変化と共に流体レイヤーに移動する。染み込んだ水分は流体レイヤー内を水分子や紙の凹凸との衝突を繰り返しながら移動する。この時絵の具に含まれていた顔料は水分子と一緒に移動する。また、水分子は一定の割合で蒸発する。最後に、移動速度が一定未満になった顔料は、固定レイヤーに移され、最終的に固定される。各レイヤー間の計算過程は画用紙と同じ解像度のテクスチャに保存され、毎フレームごとに状態が更新される。紙の凹凸を2次元テクスチャでモデル化する。本システムでは、水彩画、アクリル画、ポスターカラー等、幅広いアナログ画材で用

いられている、TMK ポスター紙をスキャンしてテクスチャとした。Chu and Taiらは、毎フレームごとの水分の蒸発率 ϵ を $0 \leq \epsilon \leq 0.005$ が適切であると述べた。この値が高いと、顔料が固定レイヤーに早く移るようになる。本システムでは、紙に塗られた顔料を後から広げたり、混ぜたりしやすくする為、水分の蒸発率 ϵ を0.00005とした。

4.7.3 GLSL による実装

LBM 並びに顔料のシミュレーションは、OpenGL のシェーダ言語である GLSL 上にて実装した。GPU とはコンピュータの画面への色等の出力を制御するチップである。GPU は元来、3D ゲームを高速で動作させることを目的として、3次元から2次元への座標変換や、ラスライズ、テクスチャの貼り付け等の処理を高速で行う構造をしていた。これらの処理は並列処理によって実現されている。この並列性を踏まえ、GPU の並列処理を物理計算等、画像処理以外の分野に応用する手法が2000年代中盤以降広がっている。当初 GPGPU は既存のシェーダ言語がシミュレーション環境の構築に用いられたが、その後、NVIDIA の CUDA、Intel の OpenCL 等、GPGPU 向けの統合開発環境が多数公開され現在に至っている。

本システムでは、CUDA や OpenCL 等の GPGPU 専用の環境を用いず、シェーダ言語である GLSL で実装した。CUDA 等の統合開発環境はシェーダ言語を使う上で必要とされる専門知識や複雑な手続きを省略し、C/C++ と同様の文法だけで GPU 上のメモリを確保し、自由に並列処理を行うことができる。しかし、これらの手続きで確保したメモリ領域は OpenGL や DirectX のようなグラフィックス用 API と共有することができない。その為、CUDA や OpenCL で処理した結果は、一度 OpenGL 等で確保したメモリ領域にコピーしなければならない。ペイントシステムは、キャンバスとして 5000×5000 相当の解像度が望ましい。この大きさのテクスチャを毎フレームごとにコピーすることは計算負担が大きい。また、流体シミュレーション自体も過程が複雑で計算負担が高い為、少しでも負担を減らさなければならない。シェーダ言語なら、計算結果をフレームバッファオブジェクト (FBO) に指定した OpenGL 内で GPU のメモリ上に領域の確保を行ったテクスチャに対して直に計算結果を出力できる。その為毎フレームごとの流体の状態を

オーバーヘッド無しで画面に出力することが可能である。以上の理由から、本システムは格子ボルツマン法のアルゴリズムを全てGLSLによって実装している。

第5章

評価実験

本章では、第4章までで開発したペイントシステムについて、その有効性を検証する評価実験を行った。本システムによるアナログ画材の描き心地の提示によって、ユーザの主観的描き心地やパフォーマンスに影響が生じるかを調べる。振動触感による画材感と筆の変形感の提示やアナログ画材の物理的特徴の視覚提示をユーザの指先に感じさせれば、アナログ画材で絵を描いた際に見られるような筆圧による筆先の形状や濃淡を生かした表現をストレス無く思い通りに行うことが可能になると考え、以下の検証を試みた。

1. 実験1では、振動触感が有る場合と無い場合における実験参加者の主観的描き心地と完成度を比較し、本システムにおいて振動触感がどれ程重要かを検証した。
2. 実験2では、本システムによる流体シミュレーションを用いたアナログ画材の視覚効果は二つのパラメータを持っている。二つのパラメータを変えた際の結果を比較し、目標を達成する上で適切な値を検証した。
3. 実験3では、筆の変形感を振動触感で提示する上で、適切な振動子の個数を検証した。
4. 実験4では、実験参加者にフルカラーの絵を有る程度時間をかけて描いてもらい、振動提示の数、視覚効果の有無の内、目標を達成する上で適切な組み合わせを検証した。



図 5.1: The participant at Experiment 4

5.1. 実験1: 本システムにおける振動触感の効果の検証

まず、本システムで絵を描く上で、振動触感の提示がどれだけ実験参加者による描き心地と創作した作品の完成度における主観評価に影響を与えるかを検証した。振動触感による描き心地の改善が、水彩画や油彩画のような絵の具を用いたアナログ画材をデジタルでシミュレーションした場合においても有効かどうかを実験にて確かめた。

5.1.1 実験参加者と実験環境

実験参加者は成人11名であった。利き手は全員右利きで、いずれもタブレットで絵を描くことについては初心者だった。その為、試行を行う前に3分ほどタブレットに慣れる為のチュートリアルを用意した。

実験参加者が絵を描く液晶タブレットにはWacomのCintiq 13HDを用いた。使用したペンデバイスの振動子の個数は二つである。

5.1.2 実験手順

本システムを用いてテンプレートとなる水墨画を8枚模写してもらった。各試行では、異なるパラメータの振動触感と視覚効果の提示を行い、描かれた作品を比較した。視覚効果は二つのパラメータ、水分量、顔料の密度を持つ。本実験では、水分量と顔料の密度は0.01、0.05のどちらかを設定した。また、振動は提示する場合としない場合の試行を設けた。よって、実験参加者が試行した条件は水分量、顔料の密度と振動触感の提示の有無を組み合わせ、全部で8通りである。試行の順番は、実験参加者ごとにランダムである。表5.1にて各試行におけるパラメータの組み合わせを示す。

試行	水分量	顔料の密度	振動
1	0.01	0.01	無
2	0.01	0.05	無
3	0.05	0.01	無
4	0.05	0.05	無
5	0.01	0.01	有
6	0.01	0.05	有
7	0.05	0.01	有
8	0.05	0.05	有

表 5.1: Value of each parameter at all trials

実験参加者には、一枚の作品が完成するごとに、その際の描き心地を8段階で評価してもらった。試行の間、実験参加者は模写する元的水墨画を自由に観察することができる。実験参加者には一枚あたり最大1分間の試行時間を与えた。1分以内に作品が完成しなかった場合は、実験参加者からの希望があれば時間を更に1分間延長した。

最後に、8枚の作品が全て完成したら、実験参加者に自分で描いた作品の中から

ら最も完成度の高かったものと、最も低かったものを選んでもらった。また、実験参加者がそれらを選んだ理由について回答させた。



図 5.2: Drawing template

図 5.2 は実験参加者が模写する水墨画である。笹の葉を描いたものを、フリー素材より選んだ。この水墨画は書道でも見られるようなブラシのストロークを利用しながら筆圧によるブラシの先端の変形を活かして描かれたものである。このように筆の性質を活かすと、笹の葉のような楕円状の形状は字を描くように一筆書きで描くことが可能である。本システムによる触感提示を行えば、実験参加者は筆の形状を適切に認識できるようになり、このようなブラシの先端の変形を活かした描画を優先的に行うようになると考えた。以上の理由より、模写を行う対象として、この水墨画を選んだ。その為、実験中に提示する顔料の色は水墨画らしきを出す為にアイボリーブラックで統一、水分の色は湿っている領域を区別してもらう為に少しだけ青みを増した。

5.1.3 解析手法

実験参加者には、各試行ごとに描き心地を8段階のアンケートで評価してもらった。アンケートに基づき各試行での主観的な描き心地と、実験参加者が選んだ最も良い作品と悪い作品を比較した。更に、水分量、顔料の密度、振動提示の有無について繰り返しのある3要因の分散分析によって解析した。この統計により、いずれの条件が描き心地に影響を与えるかを検証した。統計ソフトウェアとしてR(ver 3.2.4)を使用した。

5.1.4 実験結果

5.1.5 3要因の分散分析の結果

実験参加者から得られた各試行での描き心地と、水分量、顔料の密度、振動触感の有無、との相関関係を求めることで、各パラメータがどれだけ描き心地を変える要因になっているかを分散分析で計算した。各パラメータのF値とP値を表5.2にて示す。

パラメータ	F値	P値
振動	$F(1,70)=11.35$	$p < 0.001^{**}$
水分量	$F(1,70)=2.52$	0.12
顔料の密度	$F(1,70)=3.18$	0.08
振動:水分量	$F(1,70)=2.52$	0.12
振動:顔料の密度	$F(1,70)=0.04$	0.84
水分量:顔料の密度	$F(1,70)=0.16$	0.69
振動:水分量:顔料の密度	$F(1,70)=0.16$	0.69

表 5.2: The result of ANOVA

図 5.3 は振動触感と水分量の描き心地に対する影響を示したものである。横軸の振動触感の有無と直線、点線の水分量で表される試行における主観的描き心地の平均を表す。振動触感が有の場合は、水分量の値に関わらず、描き心地が向上することが示されている。

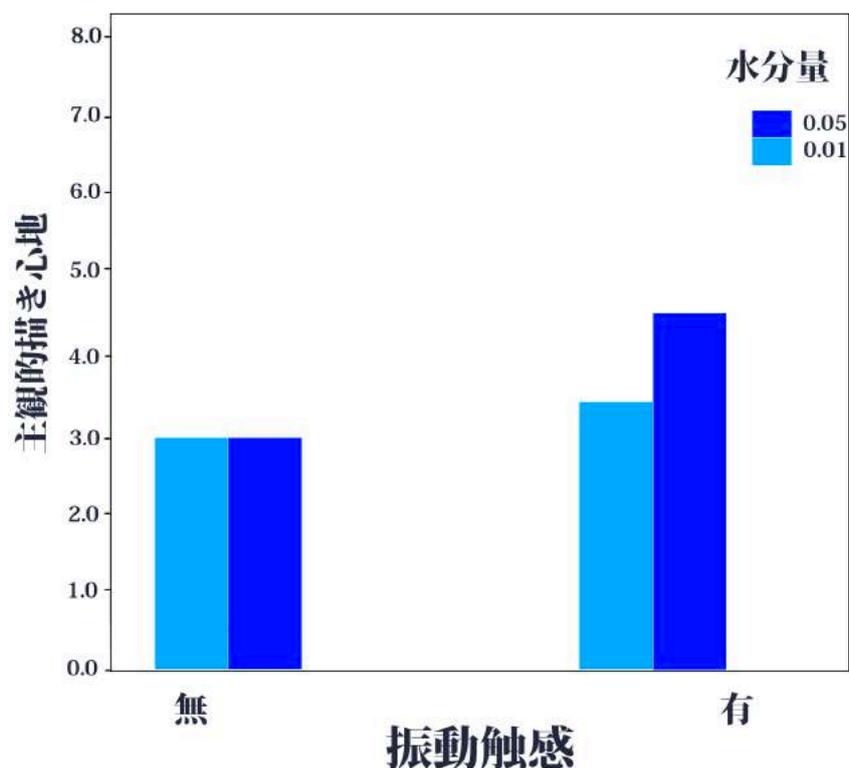


図 5.3: Draw comfort at some condition of vibrotactile and water amount

図 5.4 は振動触感と顔料の密度の描き心地に対する影響を示したものである。水分量の場合と同様に、振動触感を提示すると主観的描き心地が向上することが示されている。また、顔料の密度が高い方が、描き心地が底上げされた。

分散分析より、3つのパラメータのうち振動触感に主観的描き心地に対する有意差が見られた。[振動:水分量]、[振動:顔料の密度]、[振動:水分量:顔料の密度]の交互作用はそれぞれ、 $p=0.85$ 、 $p=0.12$ 、 $p=0.70$ であり、いずれも有意でない。交互作用は有意でなかったことから、主効果について検討した結果、振動触感のみ

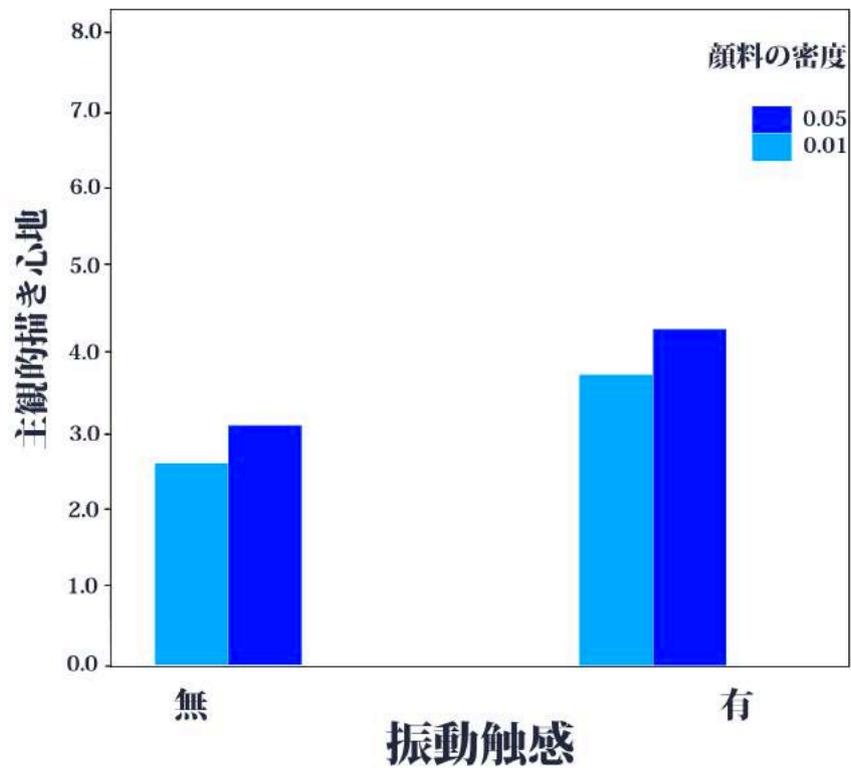


図 5.4: Draw comfort at some condition of vibrotactile and pigment density

が主観評価に統計的有意に影響を与えることが判った ($F(1,70)=10.92, p < 0.01$)。更に、図 5.3 と図 5.4 は振動触感が他のパラメータに関わらず同様に描き心地を向上させることを示している。また、全試行での描き心地の平均は 3.43 だった。

5.1.6 実験参加者による主観的完成度の評価

表5.3は、各パラメータの組み合わせでの試行の元で実験参加者によって創作された作品が、完成度が最高と評価された回数と、完成度が最低と評価された回数を示す。最高と評価された試行の内、振動触感が有だったものは11点中5点だった。分散分析の結果より、振動触感が主観的描き心地に最も影響することが示されたものの、作品の完成度には必ずしも直結していないことがわかる。

試行	水分量	顔料の密度	振動	最高	最低
1	0.01	0.01	無	0	1
2	0.01	0.05	無	4	0
3	0.05	0.01	無	1	1
4	0.05	0.05	無	1	1
5	0.01	0.01	有	0	5
6	0.01	0.05	有	2	0
7	0.05	0.01	有	0	3
8	0.05	0.05	有	3	0

表 5.3: The evaluation of painting works by the participants

5.1.7 実験参加者が完成度が高いとみなした作品群

図5.5にて11人の実験参加者が行った試行のうち最も完成度が高いと判断した作品の内代表的な5点を示す。完成度が最も高いと実験参加者がみなした試行での主観的描き心地の平均は、4.0だった。これは、全試行における描き心地の平均を上回っている。最も完成度が高かった作品に対する実験参加者の意見は、「線が太いと描きづらい」、「描きやすい試行では水分と顔料のバランスが良かった」、「細かい線を出しやすかった」、「濃い方が描いている実感を得やすかった。」、「振動があるとよい引っかかりが生じて描きやすかった。」というコメントが得られた。

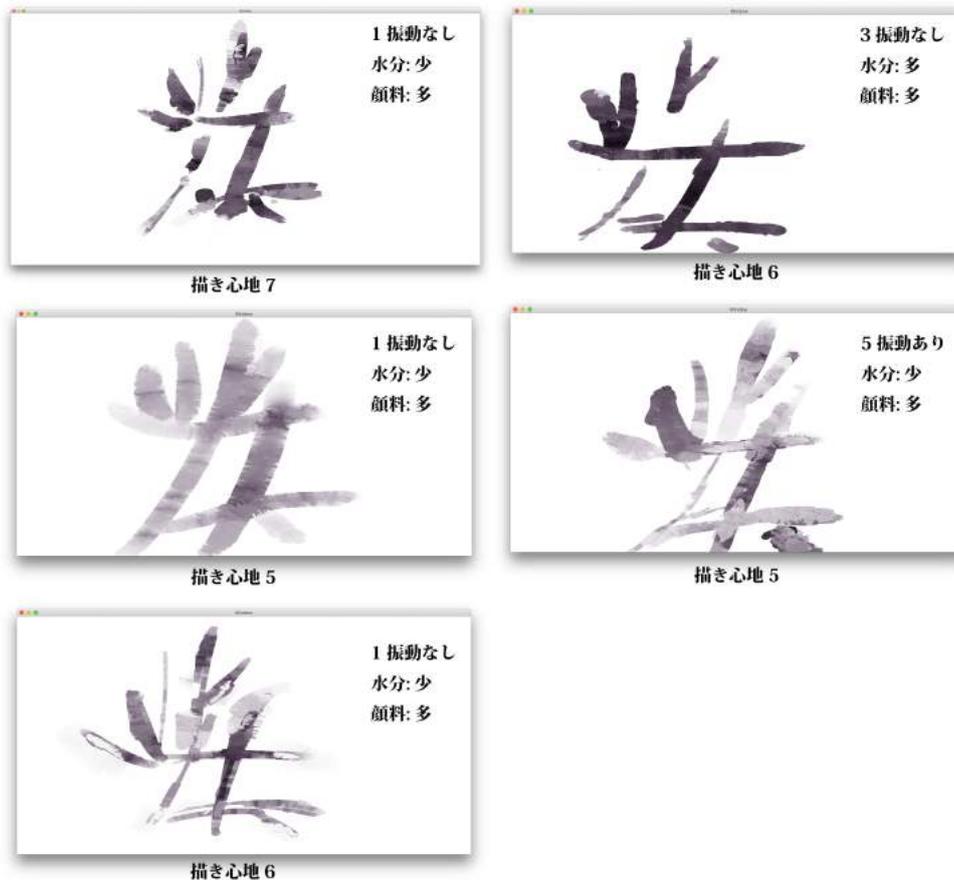


図 5.5: Best works chose by the participants

5.1.8 実験参加者が完成度が低いとみなした作品群

図 5.6 は、各実験参加者が最も完成度が低いと判断した作品の内代表的な 5 点である。最も完成度が低いと実験参加者がみなした試行での主観的描き心地の平均は、3.27 だった。これは、全試行における描き心地の平均を下回っており、実験参加者が最も完成度が低いとみなした作品は、描き心地が悪いという傾向が見られたことがわかる。最も完成度が低かった作品に対する実験参加者の意見は、「一度で期待した通りに塗ることができないので、何度も線を描き直す必要があった」、「一度で書き上げることができず、二度書きする必要があった」、「筆の状態が見えない為、どのような線が出るかわかりづらい」、「どのようなストロークが

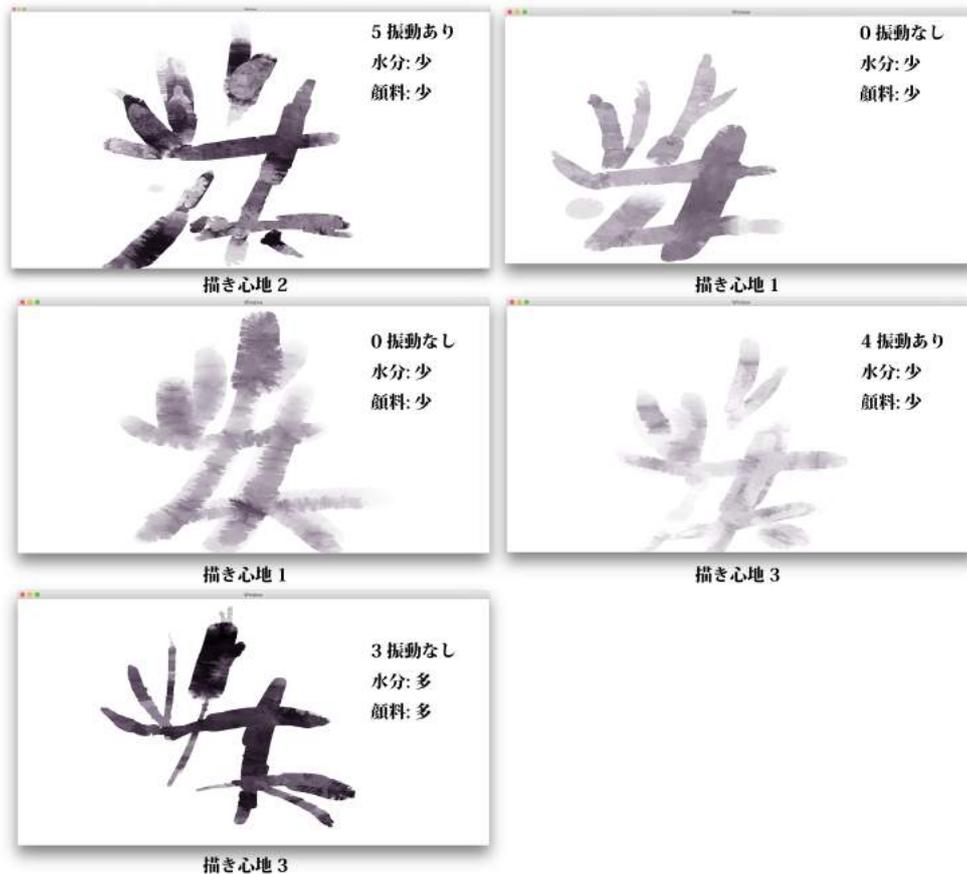


図 5.6: Worst works chose by the participants

出るか予想できない」といったものが得られた。

5.2. 考察

本実験では、二つの振動子を用いて方向感と、流体シミュレーションによる視覚効果を提示した。分散分析の結果この場合でも確かに先行研究 [35] と同様に、振動触感が描き心地を向上させるという結果を確認することができた。

振動触感が描き心地に影響を与えることが判ったものの、振動触感の提示と作品の完成度の向上に相関は見られなかった。一方で、実験参加者からの、「描きやすい試行では水分と顔料のバランスが良かった」という意見に見られる通り、絵

の具の成分の配合のバランスの方が描き心地に影響した可能性がある。

絵の具の性質は水分量と顔料の密度から決まる。絵の具の水分量が少なすぎると、顔料が紙に染み込む量は限定される。また、水分量が多すぎると、顔料は余分な水分に乗って塗った範囲の外へ広がってしまう。本実験では、水分量と顔料の密度の値は最大値の0.05と最小値0.01のみを設定していた。これらの値を実験参加者にとって適切に設定することで、これらのパラメータの描き心地や完成度への貢献を高める可能性がある。そこで次節では、実験参加者によって視覚効果のパラメータを設定することで得られる効果について検討する。

5.3. 実験2: 視覚効果におけるパラメータの適切な値の検証

実験2では、本システムによる視覚効果に注目し、その効果の検証を行った。視覚効果は水分量と顔料の密度をパラメータとして持っている。実験1と同様に異なるパラメータにおける試行での実験参加者の主観評価を比較することで、

1. 水分量と顔料の密度どちらが描き心地において重要か
2. 描き心地を改善する上でそれぞれ適切な値は存在するか
3. 実験参加者がパラメータを選ぶことで、作品の完成度は向上するか

の3点を調べた。実験1では、各パラメータは0.01と0.05の二つのうちどちらかを設定したが、本実験では適切な値について評価を行う為、事前に実験参加者ごとにパラメータをキャリブレーションしてもらった。

5.3.1 実験環境

実験参加者は成人11名で、実験の流れは実験1と同様であるが、冒頭で本システムにおける視覚効果のキャリブレーションを行う。本実験では、視覚効果のパラメータのうち水分量を実験参加者に選んでもらった。キャリブレーションでは

実験参加者に 0.01 から 0.05 の範囲の間で自由に水分量の値を調節しながら直線を描いてもらい、どの値が一番その実験参加者にとって丁度良いかを決めてもらう。これは、一般にアナログ画材では絵の具に水分や溶かし油を加えることで絵の具の状態を絵描きが制御することが広く行われているからである。それゆえ、本システムの場合も水分量の調節が重要ではないかと仮説立てた。

振動触感の効果は実験1で示されている為、本実験では振動触感を提示しなかった。実験1と同様に各試行ごとに描き心地を8段階で評価してもらい、その結果を分散分析した。今回は振動触感を提示しない為、2要因の分散分析を行った。各試行における視覚効果のパラメータ(水分量、顔料の密度)を表5.4にて示す。表5.4にて user defined は、実験参加者が任意に設定した値を表す。

試行	水分量	顔料の密度
1	0.01	0.01
2	0.01	0.05
3	0.05	0.01
4	0.05	0.05
5	user defined	0.01
6	user defined	0.05

表 5.4: Value of each parameter at all trials

5.3.2 実験結果

繰り返しのある2要因の分散分析の結果、水分量と顔料の密度のうち水分量に主観的描き心地に対する有意差が見られた。[水分量:顔料の密度]の交互作用は $p=0.3457$ であり、有意でない。交互作用は有意でなかったことから、主効果について検討した結果、水分量が、描き心地の主観評価に統計的に影響を与えることが判った ($F(1,62)=11.352, p < 0.01$)。また、水分量に関する多重比較の結果、水

分量を実験参加者が自分で設定した時とそうでない時では主観的描き心地が異なり、主観評価が向上した。実験参加者が選んだ水分量の値の平均は 0.0302 で、標準偏差は 0.01 だった。

視覚効果における各パラメータの F 値と P 値を表 5.5 にて示す。

パラメータ	F 値	P 値
水分量	$F(1,62)=11,35$	$p < 0.001$ **
顔料の密度	$F(1,62)=0.32$	0.57
水分量:顔料の密度	$F(1,62)=0.90$	0.34

表 5.5: The result of ANOVA

なお、表 5.6 は、Bonferroni 法によって水分量の各値の描き心地に対する影響を示す。

	0.01	0.05	user
0.01	-	N.S	0.0034
0.05	N.S	-	0.0159
user	0.0034	0.0159	-

表 5.6: The result of ANOVA

5.3.3 実験参加者による主観的完成度の評価

表 5.7 にて、各試行の元で実験参加者によって創作された作品が、完成度が最高と評価された回数と、完成度が最低と評価された回数を示す。最高と評価された試行の内、水分量を実験参加者が設定したものが 12 点中 9 点だった。また、最低と評価された作品 11 点は全て実験参加者が水分量を決めることができなかった試行に含まれている。

試行	水分量	顔料の密度	最高	最低
1	0.01	0.01	0	5
2	0.01	0.05	0	3
3	0.05	0.01	0	1
4	0.05	0.05	3	2
5	user defined	0.01	4	0
6	user defined	0.05	5	0

表 5.7: Value of each parameter at all trials

図 5.7 に水分量と顔料の密度が描き心地に与える影響を示す。水分量と顔料の密度が 0.01, 0.01 の場合が最も主観的描き心地が低かった。同じく、水分量と顔料の密度が 0.05, 0.05 の場合も低かった。一方、水分量を実験参加者が決定した場合は、顔料の密度の値に関わらず主観的描き心地は他の試行よりも向上した。

5.3.4 考察

実験 2 の結果より、視覚効果のパラメータのうち、水分量を実験参加者が自分で設定すると、主観的描き心地が統計的有意に向上することが判った。顔料の密度の値に関わらず、水分量を実験参加者の決めた値になった時に主観的描き心地が高い。このことは、顔料の密度より水分量の方が視覚効果の描き心地への影響力において重要な要因になることを示しており、水分量次第で視覚効果の影響力が左右されると思われる。更に、水分量を実験参加者が決めることで作品の主観的完成度も同時に向上することが示された。

実験参加者が選んだ水分量の平均値は 0.030 で標準偏差は 0.012 だった。標準偏差の値は平均値の 3 分の 1 を占めている為、個人差は大きいと言える。

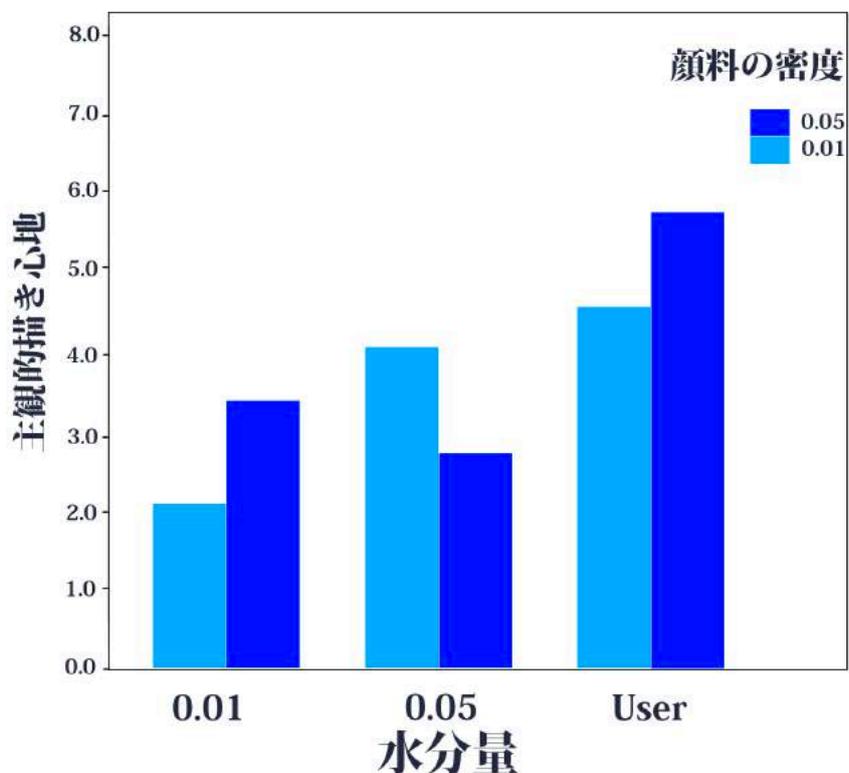


図 5.7: Draw comfort between default value of water amount and user specified value

5.4. 実験3: 筆の変形感提示を提示する上で適切な振動子の個数の検証

本システムでは、筆の変形感を二つの振動触感で提示している。筆の変形感を提示することで、筆圧を活かした表現をよりストレス無く使うことができるはずである。二つの振動子による筆の変形感の提示が、実験参加者の感じる描き心地と実験参加者が創作する作品の完成度にどれだけ影響を与えるかを検証した。

5.4.1 実験環境と実験参加者

実験参加者は成人5名であった。利き手は全員右利きである。実験参加者のうち3名はタブレットで絵を描くことに慣れており、残り2名は初心者だった。いずれの実験参加者も、試行を行う前に3分ほどタブレットに慣れる為のチュートリアルを用意した。

実験に用いたソフトウェアと機材は実験1、2のものと同様である。実験参加者が絵を描く液晶タブレットにはWacomのCintiq 13HDを用いた。使用したペンデバイスの振動子の個数は二つである。

5.4.2 実験手順

本システムを用いて、実験1、2と同様にテンプレートとなる水墨画を4枚模写してもらった。実験参加者が試行した条件は振動触感を1つの振動子で提示した場合、2つの振動子で提示した場合の2通りと水分量が0.03、0.05の場合の4通りである。顔料の密度は、実験2より、描き心地への寄与率は高く無いので、最小値0.01と最大値0.05の中央値である0.03に固定した。各試行での描き心地の評価と、完成度の評価は実験1、2と同様に行った。実験表5.8にて各試行におけるパラメータの組み合わせを示す。試行の順番は、実験参加者ごとにランダムである。

試行	振動提示の数	水分量
1	1	0.01
2	1	0.05
3	2	0.01
4	2	0.05

表 5.8: Value of each parameter at all trials

5.4.3 実験結果

以下に、各実験参加者によるすべての試行の結果を示す。縦方向に筆の変形感を出す為に動作させた振動子の数、横方向に水分量を取り、各試行における実験参加者が創作した絵、その際の試行の順番、実験参加者が感じた描き心地を示す。また、実験参加者が最も完成度が高いと判断した作品は黄色い枠、低いと判断した作品は赤い枠で囲った。

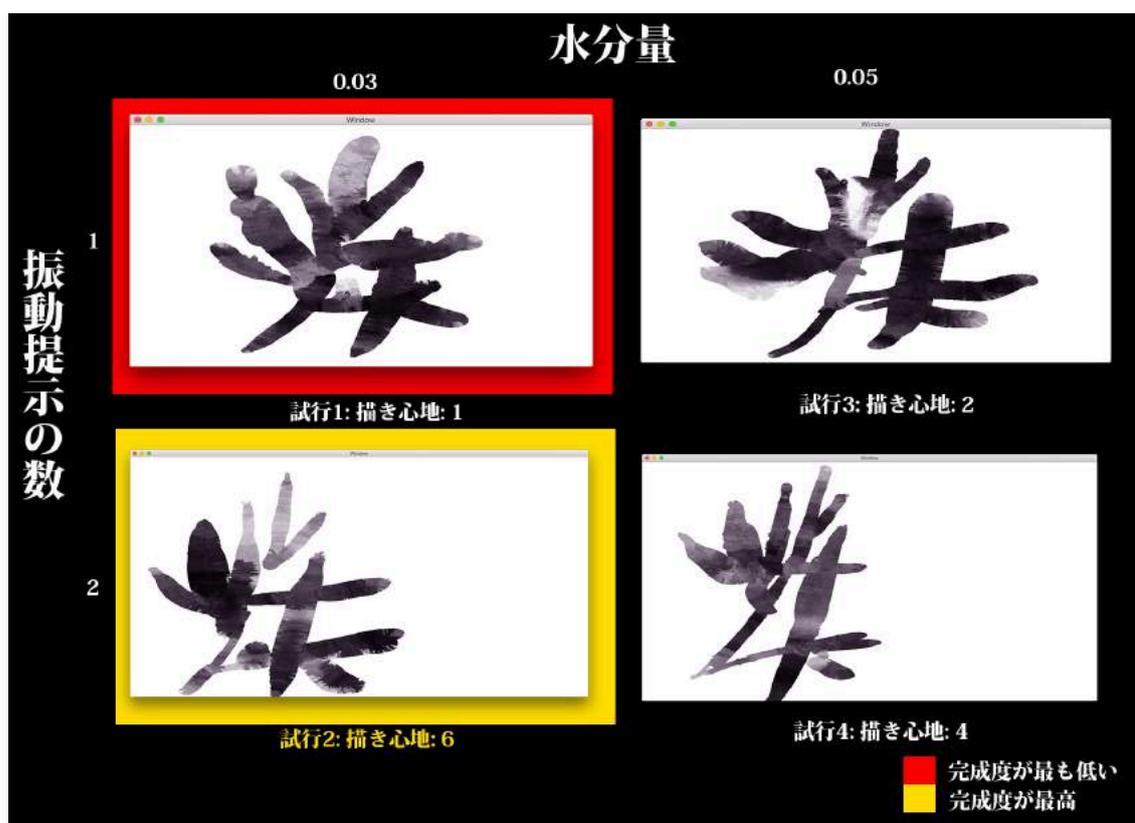


図 5.8: Works by participant 1

5.4.4 考察

実験参加者の内4人は振動の提示が二つだった試行の方が描き心地を良いと感じ、更に完成度も高いと回答した。実験参加者の内一人は、振動提示が一つのみ

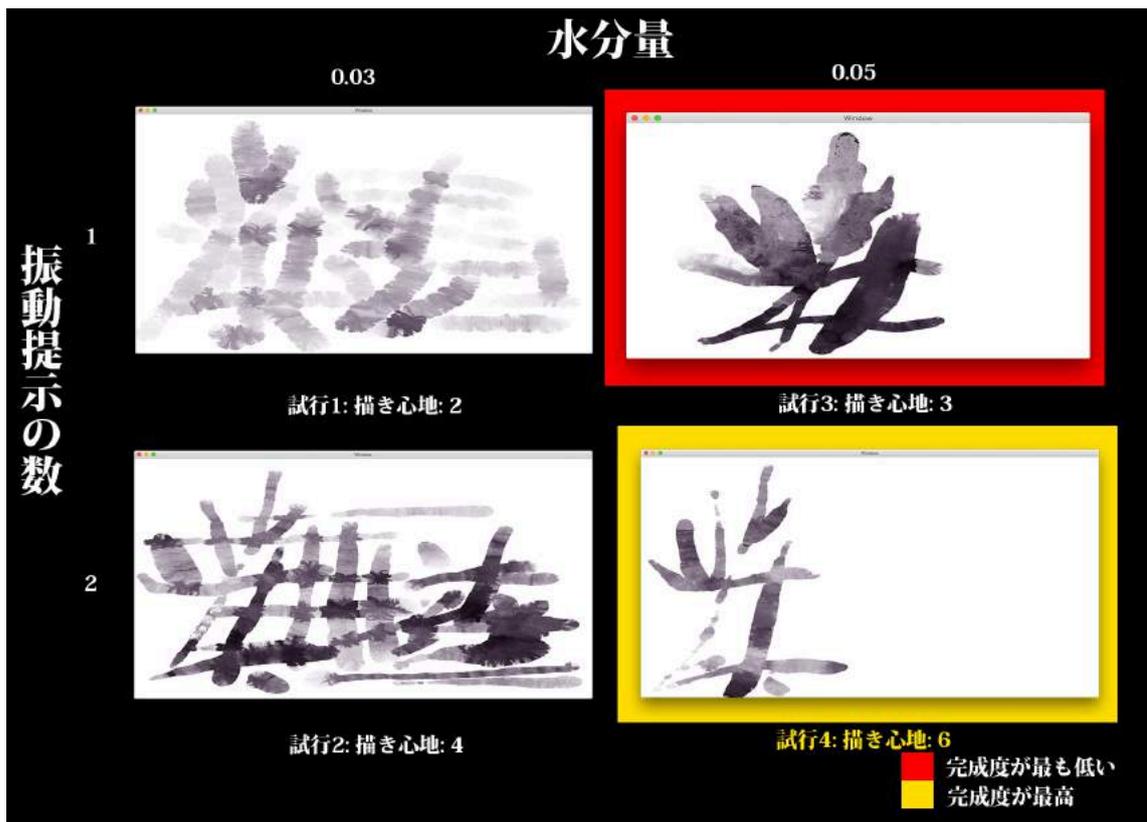


図 5.9: Works by participant 2

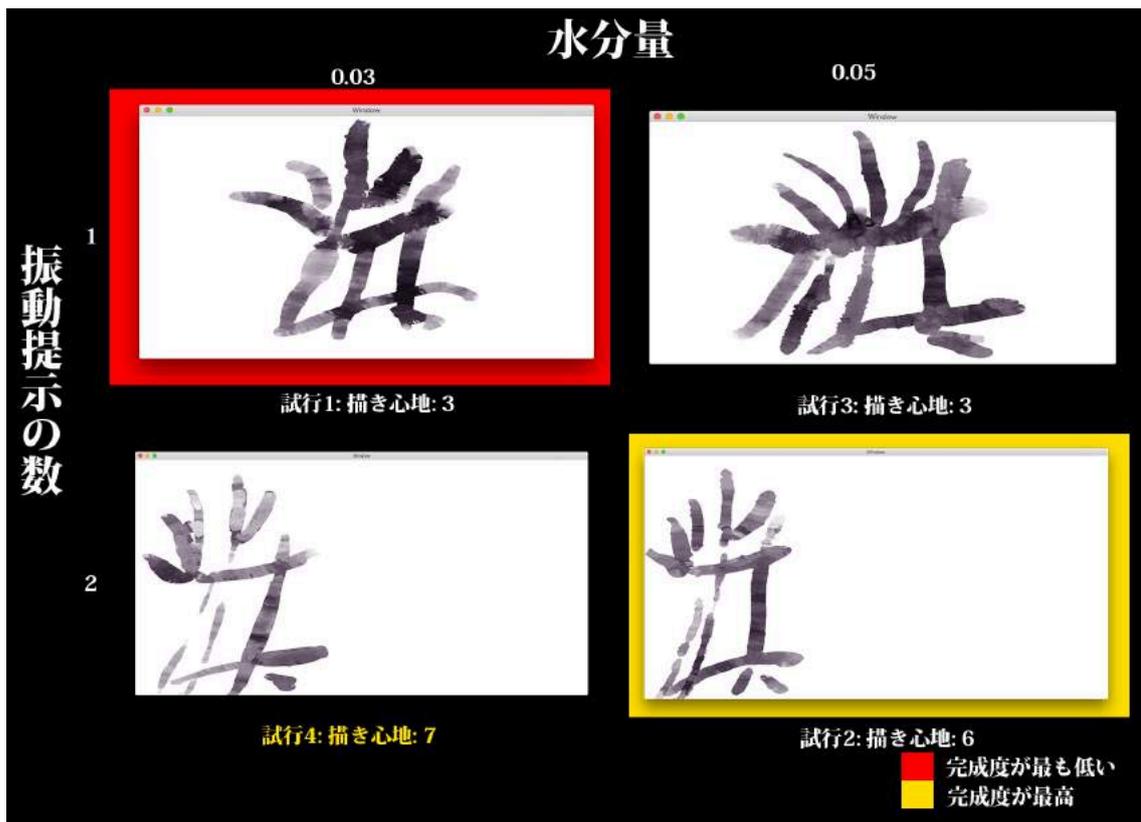


図 5.10: Works by participant 3

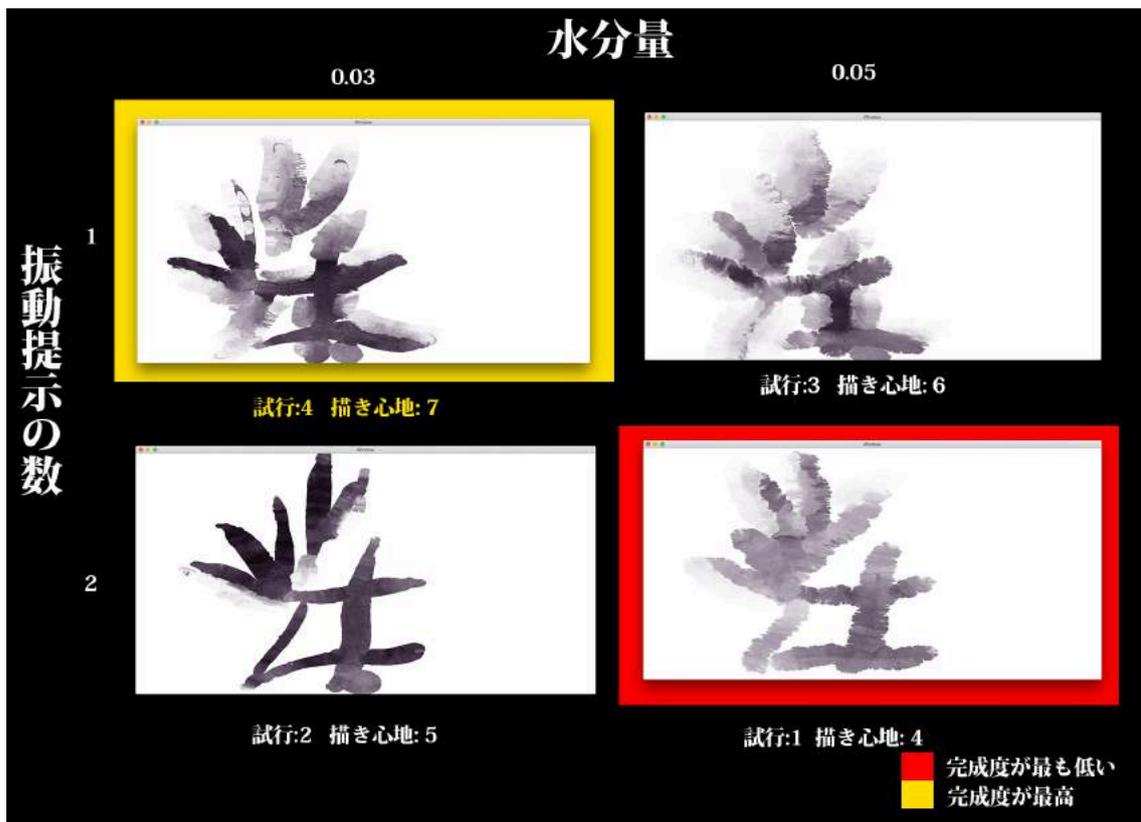


図 5.11: Works by participant 4

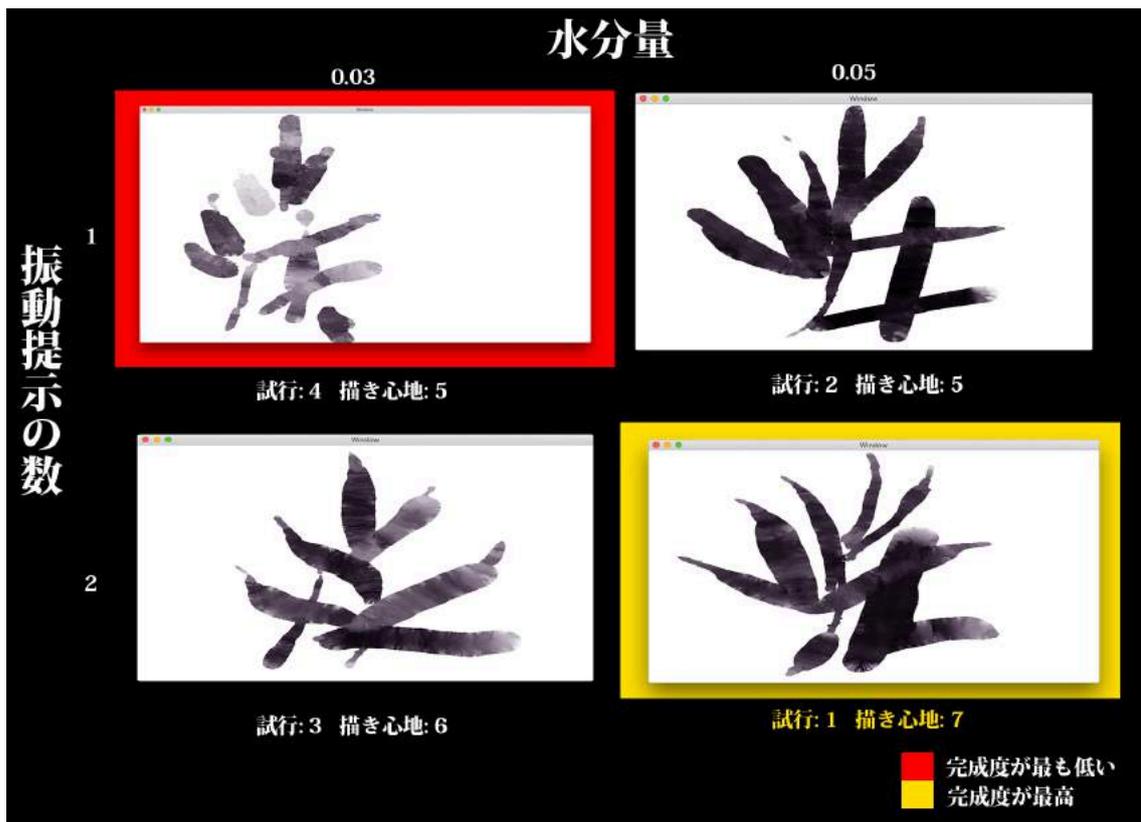


図 5.12: Works by participant 5

だった場合は、ペンデバイスに微小な回転がかかることで、手に伝わるペンデバイスのバランスが悪く感じられたと述べている。また、振動提示が二つの場合の方が、筆圧をコントロールしやすく、太い線から細い線への遷移がしやすかったという意見も得られた。一方で、実験参加者4は、残り5人の実験参加者と異なり、振動提示が1の場合を描き心地が良かったと回答している。実験参加者4に、振動1、水分量0.03の試行における描き心地が良いと感じた理由を伺ったところ、実験参加者4は3Dモデリングを得意としており、絵を描いたり、筆を使うことは苦手だったそうである。しかし、3Dモデリングの際にペンタブレット自体はしばしば使用する為、ペンタブレット自体には慣れていていた。その結果、筆の変形感や弾力感の無い試行である振動提示の数が1の試行を優先的に選んだと思われる。水分量は0.03と0.05で描き心地と完成度に対する劇的な違いは見られなかったものの、それぞれの実験参加者が描き心地を良いと選んだ作品5点の内3点は水分量が0.03のものだった。実験2より、描き心地に対して丁度良い水分量の平均は0.0302で、標準偏差が0.01あることが示されており、確かに適切な水分量は0.03側に寄っている。

5.5. 実験4: 本システムにおける適切なパラメータの組み合わせの検証

最後に、本システムにおける視触覚提示の全てのパラメータの組み合わせの元で、実験参加者にフルカラーの絵を描いてもらった。各試行において実験参加者の感じた描き心地と、創作した作品の完成度を比較することで、振動触感と視覚効果がどれだけ描き心地と完成度に寄与しているかを検証し、最も効果の大きいパラメータの組み合わせを調べた。

5.5.1 実験環境と実験参加者

実験参加者は成人5名であった。利き手は全員右利きである。実験参加者のうち3名はタブレットで絵を描くことに慣れており、残り2名は初心者だった。

実験機材は以前の実験のものと同様である。実験参加者が絵を描く液晶タブレットには Wacom の Cintiq 13HD を用いた。使用したペンデバイスの振動子の個数は二つである。視覚効果におけるパラメータである水分量は 0.04、顔料の密度は 0.03 で固定した。

実験表 5.9 にて各試行におけるパラメータの組み合わせを示す。試行の順番は、実験参加者ごとにランダムである。

試行	振動提示の数	視覚効果の有無
1	0	無
2	0	有
3	1	無
4	1	有
5	2	無
6	2	有

表 5.9: Value of each parameter at all trials

実験に用いたソフトウェアは既に述べた実験のものと同様に、複数の振動子による筆の変形感と画材の質感、流体シミュレーションによる視覚効果を提示する。更に、本実験では実験参加者にフルカラーの絵を描いてもらう為、7色分の顔料を保持するカラーパレットを用意した。また、異なる視触覚効果を提示する筆を4つ用意した。更に、紙の表面を流れている顔料を途中で吸い取ることができる消しゴムを使用可能にした。図 5.13 に、実験にて用いたペイントシステムの UI を示す。

5.5.2 実験手順

実験参加者に、本システムを用いてテンプレートとなる一つの写真を6回模写してもらった。各試行では、異なるパラメータの振動触感と視覚効果の提示を行



図 5.13: UI of the painting system

い、完成した作品を比較した。視覚効果は提示する場合としない場合の二通り、振動触感は何も提示しない場合、一つの振動子で提示する場合、二つで提示する場合の試行を設けた。よって、実験参加者が試行した条件は視覚効果の有無と振動触感を提示する振動子の数が、0、1、2の場合を組み合わせ、全部で6通りである。各試行が終わるごとに、その際の描き心地を8段階で評価してもらった。更に、参加者自身によって完成度を1最小0点、最大100点で点数付けしてもらった。表5.1にて各試行におけるパラメータの組み合わせを示す。試行の順番は、実験参加者ごとにランダムである。実験参加者には以下3点の写真の内から一つを模写する対象として選んでもらった。それぞれ、山、海、草原の写真である。制限時間は、1枚あたり最大20分まで使用可能とした。



図 5.14: Photographs for painting



図 5.15: Participant A with our painting systems

5.5.3 実験結果

5名の被験者が本実験にて創作した全ての作品を示す。更に、試行中の実験参加者の動作を観察した記録を示す。観察するにあたって、参加者の色合い、構図、筆使いの変化に注目した。

図 5.16 は被験者 A の作品群である。A は 1 枚目の山の写真を模写の対象として選択した。A はエフェクトデザイナーで、手描きで絵を描くことには熟練していない。また、A は絵を描くことがあまり得意で無いと述べていた。試行中、A は主に小さなハッチングを多用し、少しずつ色を塗り重ねることで画を構成していた。山や木などの形状を一筆描きすることはほぼなく、作品中の殆ど全ての要素をハッチングして描いていた。

各試行間における A の動作等の違いを観察したところ、振動提示の数が 2 の時は、若干手を動かす動作が速くなっていた。振動提示の数が 0 の時は、手首のみを多く動かしていたのに対して、1 や 2 の時は腕全体を動かすようになっていた。また、視覚効果を提示すると、ハッチングの手を動かす幅が大きくなる傾向があった。

色合いの傾向は、試行 1 のみ薄く塗られている為、下地の画用紙が見えており色が全体的に白い。A の作品は試行を重ねるにつれて筆に含めた顔料の密度が徐々に

に増やしていき、黒ずんだ色合に変化している。色相や彩度に変化はほぼ見られない。また、構図に関して大きな違いは見られない。筆使いは試行2の時点で、筆圧を生かして画面左の川の細長い形状を描いている。この特徴は試行1には見られず、残りの試行では全て確認される。

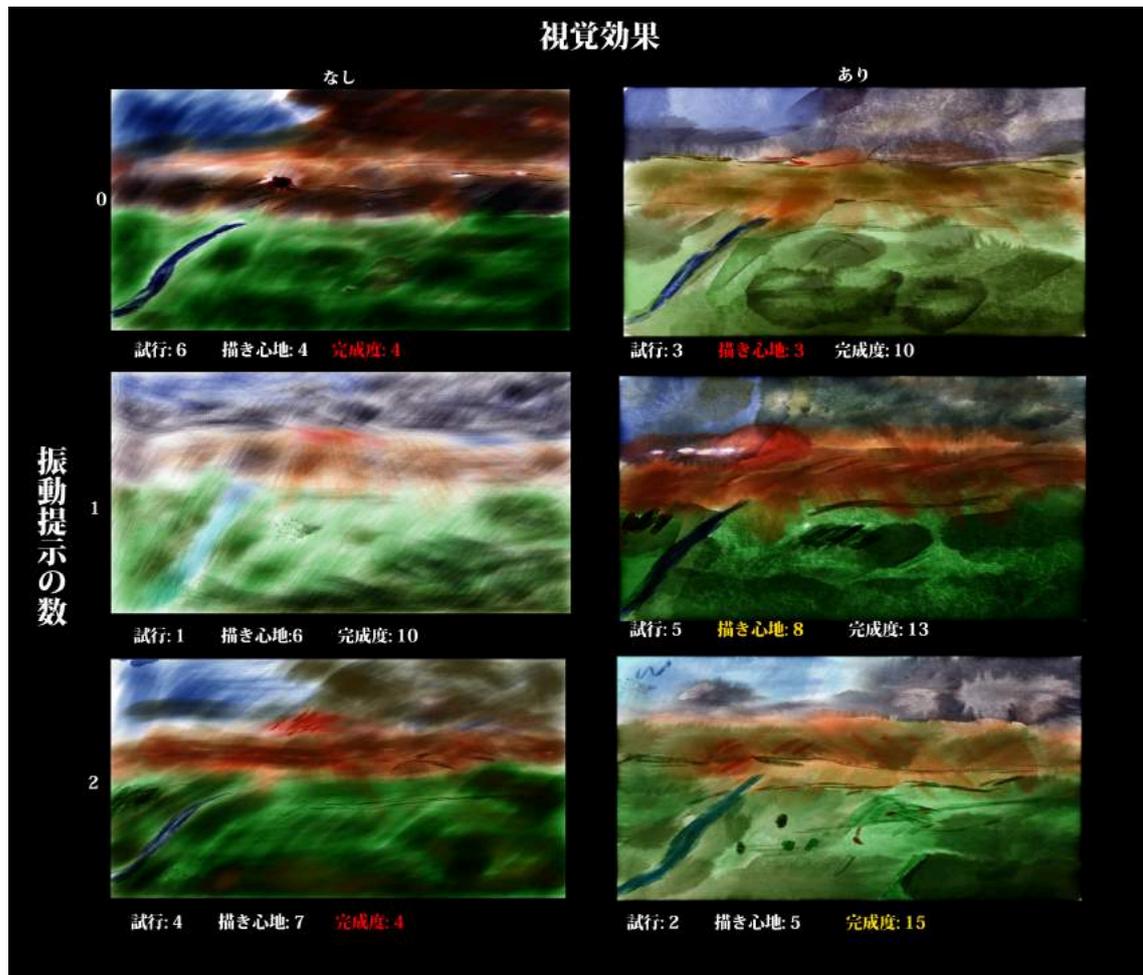


図 5.16: Works by participant A

図5.17は被験者Bの作品群である。Bは二枚目の海の写真を模写した。Bはサウンドデザイナーで、手描きで絵を描くことには熟練していない。BはAと比べて手をゆっくり動かす傾向があった。Aが小刻みなハッチングが動作の中心だったのに対して、Bは肘を使い、比較的ゆっくりした動作で太いストロークによる塗りを行っていた。最初に塗った箇所をそのまま残す傾向があり、塗り重ねの回数はAよりも少なかった。Bの場合、振動触感を提示すると、手首から先を回転させる動作が増えた。また、視覚効果を提示した場合の方が、筆で絵を描く際に見られる払いの動作に近い動きを行っていた。払いの動作とは、手を比較的大きく動かしながら徐々に筆圧を下げていく動作である。

Bの作品はすべての試行ごとに使用した色相はかなり異なっているものの、試行5、6の時点である程度変化が収束した。彩度や明度に変化は見られない。構図もバラツキが大きく、試行13にかけて雲を丸い点を並べて描く傾向がみられた。また、試行5、6は画面手前に岩を設置するようになった。

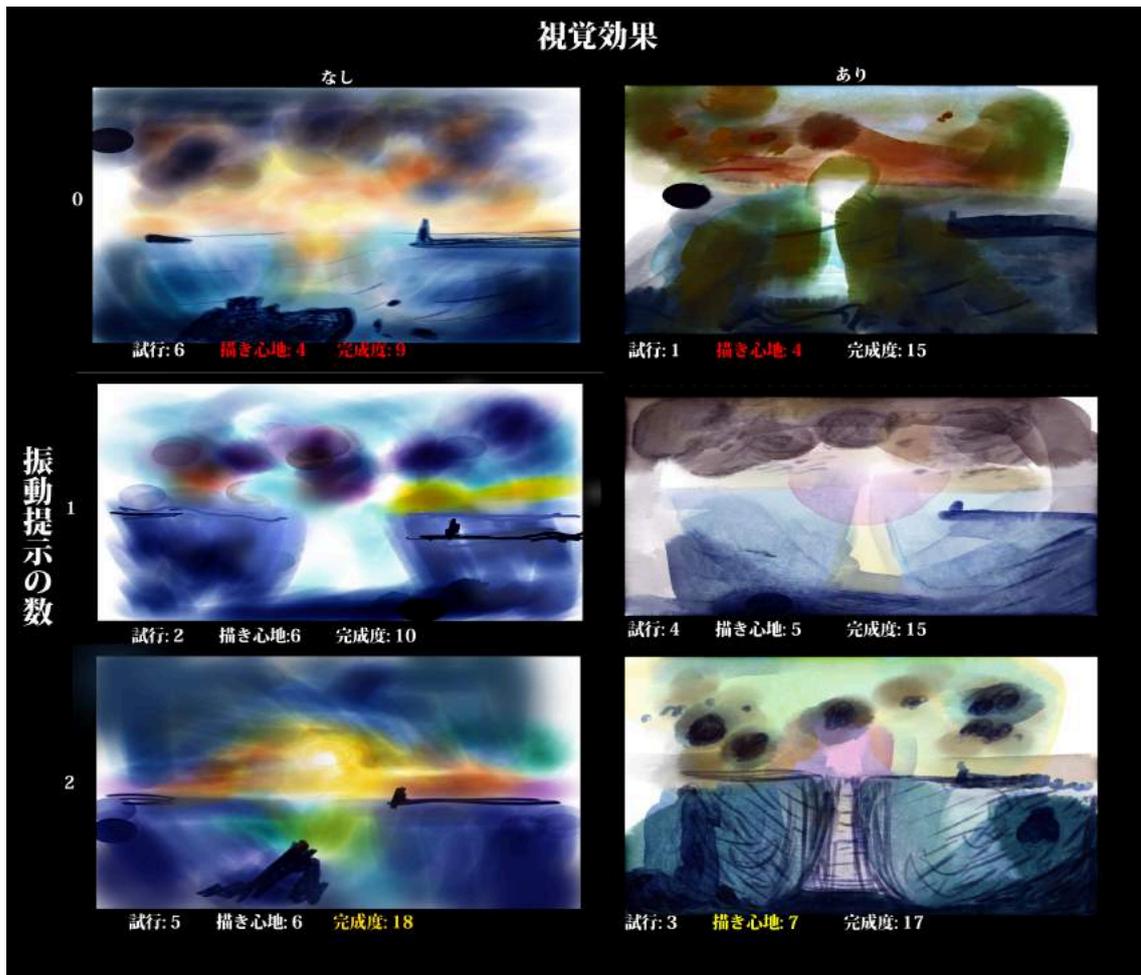


図 5.17: Works by participant B

図5.18は被験者Cの作品群である。Cは1枚目の山の写真を模写の対象として選択した。Cはキャラクターデザイナーで、手描きで人物画を描くことには慣れているが、風景画にはあまり慣れていない。ZBrush、Maya等を用いた3Dモデリングに熟練している。Cは、大まかな構図を手を左右に大きく動かしながら塗り、細部を小刻みなハッチングで塗りつぶしていた。Cは他の実験参加者よりも濃い色を何度も塗り重ねる傾向が強く、ブラシストロークの跡や紙の質感等を塗りつぶしてしまうことが多かった。Cの作品はいずれも、一度濃く塗りつぶした箇所を消しゴムツールを使って紙に染み込んだ顔料を吸い取ることで色を明るくし、太陽の光等の明るい部分を描写するという手法を取っていた。

Cは、視覚効果があると、手を止めて持ち上げることが増えた。これは、ハッチングの継続時間が短くなったことを意味する。振動提示の数に対しては、動作に目立った違いは見られなかった。

Cの作品における色合の傾向は終始一括しており、途中で変更された様子は見られない。構図も、試行1の時点で殆ど完成している。筆使いに関しても同様である。

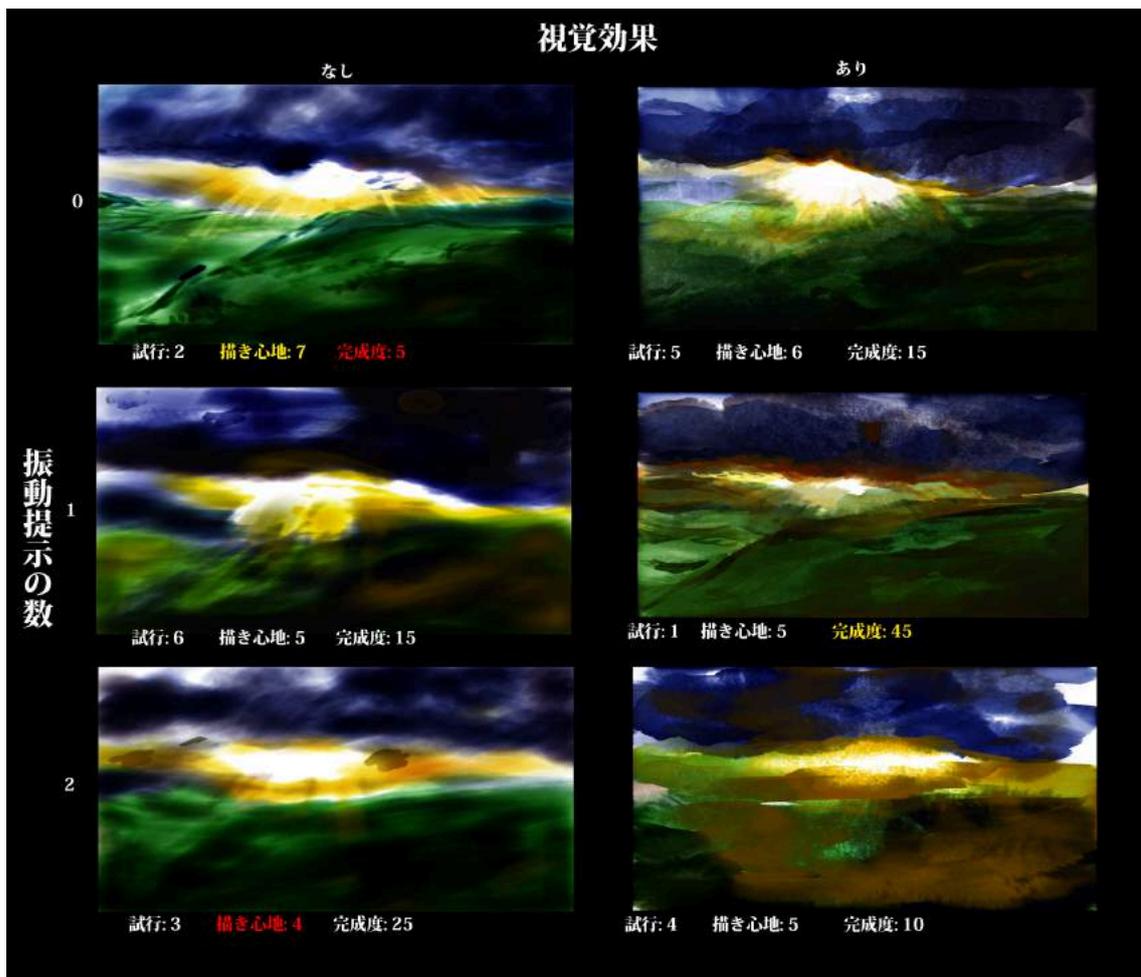


図 5.18: Works by participant C

図5.19は被験者Dの作品群である。Dは1枚目の山の写真を模写の対象として選択した。Dはキャラクターデザイナーで、手描きで人物画だけでなく、風景画両方を描くことに慣れている。また、Dはタブレットを使うことにも慣れている。油絵を専攻していた。Dは6点の作品を描く際、まず黄色等の暖色系の色で薄い地塗りを行ってから雲や地面等を別の色で厚く塗るという方法を取っていた。これは、油絵で多く見られる手法で、事前に構図を確定すると同時に、絵の色合いに統一感を持たせることを可能にする。Dのペンを動かす動作は他の実験参加者と比べてゆっくりとしていて注意深いものだった。実際に、Dの作品では雲や山等の形状を殆ど一回の動作で描ききっており、AやCのようなハッチングは全く使われていない。また、視覚効果が有る場合は、雲の柔らかい輪郭を表現するのに紙の染み込みを意図的に使用していた。また、振動を提示すると、動作が少しだけ注意深くなる傾向が見られた。

Dの作品の構図は全試行を通して殆ど変化は見られなかった。Dは、各要素を全試行中殆ど同じ手順で描いていた。また、選択した色も、オレンジで地塗り、雲に青みがかかった色、深緑色の大地と、殆ど同様だった。ただし、色の配合のバランスは各試行ごとに違いが見られた。Dに色合の変化についてインタビューしたところ、選んだ色をキャンバス上で形状を描きつつ重ね塗りしたので、試行ごとに色味のバランスを統一することは出来なかったとのことだった。



図 5.19: Works by participant D

図5.20は被験者Eの作品群である。Eは1枚目の山の写真を模写の対象として選択した。Eはキャラクターデザイナーで、手描きで人物画と風景画両方を描くことに慣れている。Eは素早く、左右に長いストロークを多用する傾向があった。この動作は左右に一度動かし、手を持ち上げるので、ハッチングではない。EもDと同様に、初めの段階で薄く地塗りを行っていた。ただし、Dが地塗りに黄色のみを用いたのに対して、Eは事前に空や山のような大まかな構成要素ごとに特定の色を用いていた。この手法は油絵よりも水彩画にて一般的である。地塗りの段階で確定した色に対して完成まで別の色を殆ど塗り重ねないので、鮮やかな色を出しやすくなる。実際に、Dの作品は構成している色数が多く、比較的鮮やかに見える。

Eは、視覚効果の有無によって多用したブラシが異なっていた。視覚効果が無い時は、ザラザラした質感のブラシを多く、有りの時はシンプルな丸ブラシを多く用いていた。振動提示は2の時に筆圧を敏感にコントロールする傾向があった。

Eの作品はストロークの形状や細部に違いはあるものの、全体の構図や手順、各要素ごとの手の動作に殆ど違いは見られなかった。例えば、雲を描く際は、下から斜め上にかけて払う動作が多く見られた。

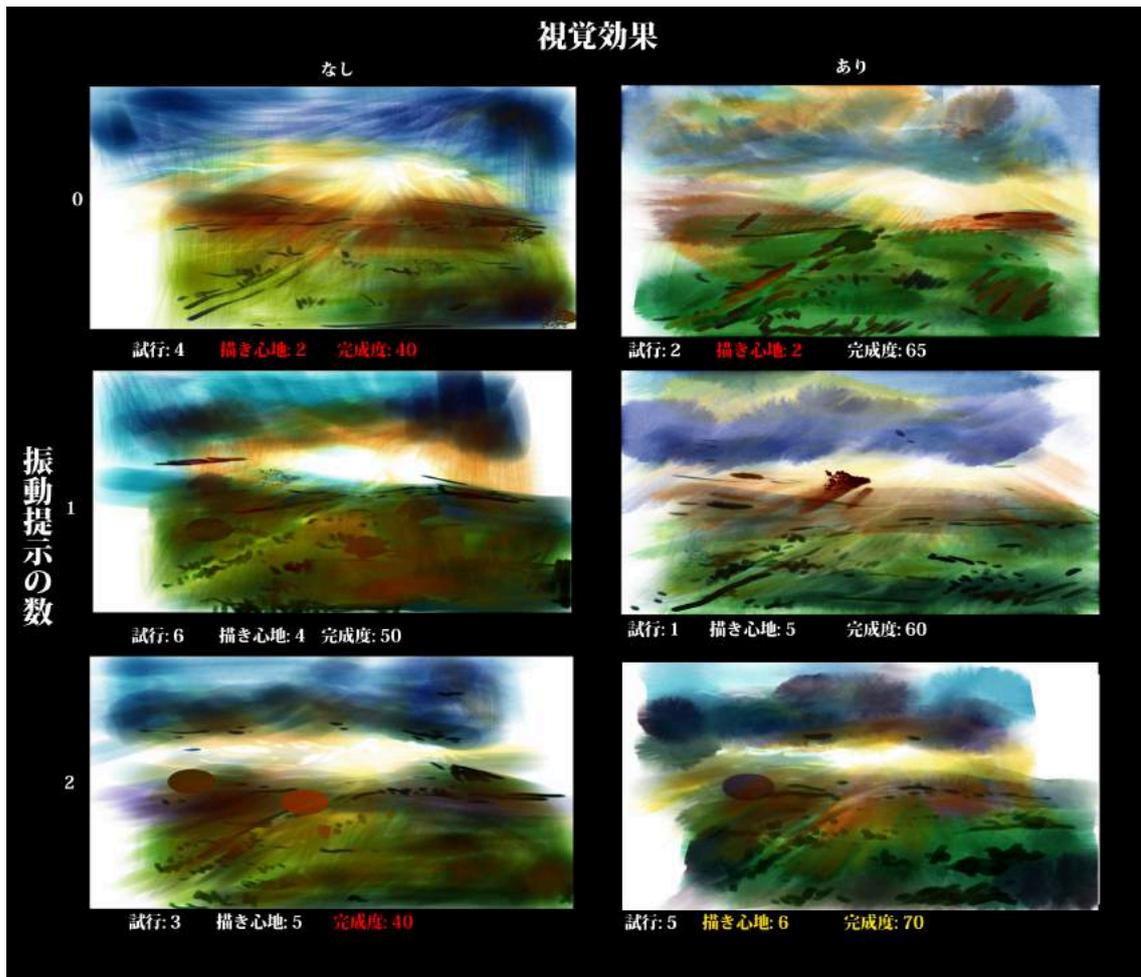


図 5.20: Works by participant E

表5.10は、全てのパラメータの組み合わせごとに、実験参加者が判断した描き心地の点数の合計を表す。縦方向が振動提示の数で、横方向が視覚効果の有無である。

触 \ 視	無	有
0	21	20
1	25	29
2	28	30

表 5.10: Total score of Draw comfort at each training

表5.11は、全てのパラメータの組み合わせごとに、実験参加者による作品の完成度の点数を各試行ごとに合計したものである。縦方向が振動提示の数で、横方向が視覚効果の有無である。

触 \ 視	無	有
0	113	190
1	125	223
2	122	192

表 5.11: Total score of Performance at each training

5.5.4 考察

本実験では、二つの振動子を用いて筆の変形感、画材の材質感を提示する手法と、流体シミュレーションによる視覚効果を提示することでどれだけ描き心地と作品の完成度に影響が生じるかを、振動提示の数と視覚効果の有無の組み合わせごとの結果を比較することで検証した。表5.10、より、描き心地が最も向上したのは振動提示の数が2つ、視覚効果が有の場合だった。表5.11より、最も実験参加者が完成度を高く評価したものは振動提示の数が1、視覚効果が有の試行だった。

実験参加者による主観的完成度は視覚効果があった方が、振動提示の数に関わらず向上している。また、視覚効果有りの試行のうち最も完成度のスコアが高かったのは、振動提示の数が1のものだった。このことから、主観的完成度と振動提示の数は必ずしも比例していないと思われる。

各試行の順番はランダムに並べ替え、実験参加者ごとに異なる順番で提示した。実験参加者が最も完成度が高いと判断した作品のうち、1番目に作成されたものは1つ、2番目に作成されたものは1つ、4番目に作成されたものは1つ、5番目に作成されたものは2つ、6番目に作成されたものは1つである。このように、完成度の高い作品が作成された試行は広く分布している。以下に、各実験参加者の訓練効果の傾向を考察した。

- 参加者 A: 最も完成度の高かった作品は試行2、振動提示2、視覚効果有である。試行2は、訓練効果の有無に関わらず、残り4つの試行よりも完成度が高かった。Aは試行2の時点での訓練効果を残りの試行にて適応できたにも関わらず、試行2の完成度を上回ることにはなかった。よって、参加者Aの場合、訓練効果の完成度への影響は限定的と考えられる。
- 参加者 B: 全試行を通して色合、構図、筆使いに変化が見られた。様々な色合や構図のパターンを発揮しつつ、最も完成度が高かった試行5、振動提示2、視覚効果無にて変化が収束した。よって試行5は、事前の試行錯誤が完成度に影響を与えていたと思われる。しかし、次の試行6、振動提示0、視覚効果無にて完成度を大きく落とした。訓練効果が蓄積されていたにも関わらず、振動提示の数が2の方が0よりも大きく完成度を高めたことから、

振動提示の効果が訓練効果を上回ったと考えられる。

- 参加者 C: 最も完成度の高かったものは、試行1、振動提示1、視覚効果有りのものだったので、訓練効果が生じる余地は皆無だった。試行1は完成度を以降の作品を大きく上回った。
- 参加者 D: 最も完成度の高かった作品は、試行4、振動提示2、視覚効果有りのものである。事前の試行にて色合や構図の変化が大きかったことから、試行4までの間に、全体的な色のバランスや要素を塗る手順を試行錯誤していた可能性は十分に考えられる。Dは、試行5、6にて更に色合の変更を行った。しかし、これらの試行では試行4の完成度を超えることはできなかった。まず、視覚効果有の場合の試行の方が振動提示の状態に関わらず明らかに完成度が高い。よって訓練効果よりも視覚効果の有無の方が完成度に寄与していると思われる。試行1から4にかけて参加者Dの手順や描画方法、選んだ色に殆ど変化は見られなかった。インタビューより、結果の色合の違いも、試行錯誤によるものではないことが伺える。この間に訓練効果によるDの絵画スキルの変化は観察されなかった。
- 参加者 E: 色合、構図、筆使いに関しては、彩度における若干の変化、雲や草木の形状の試行ごとの変化が見られた。水彩画を始めとするアナログ画材においては、自然物の形状は有機的で不規則な性質を再現するため、構造や手順を深く考えず、素早く手が動くままに描写する傾向がある。その為、水彩画を経験していた参加者Eの試行においても雲や草木などの自然物の描写もこのように不揃いだったと思われる。最も完成度の高かった作品は、試行5、振動提示2、視覚効果有だった。試行6、振動提示1、視覚効果無は直前の試行よりも完成度が落ちた。更に、視覚効果無の試行は試行の順番に全体的に完成度が低い為、参加者Eにおいても視覚効果の有無が訓練効果よりも結果に寄与したと考えられる。参加者Eにおいても、手順や描画方法は全試行にて一括していた。細部の形状や位置の違いはEの絵画スキルの性質によるものであると思われる。水彩画を始めとするアナログ画材においては、自然物の形状は有機的で不規則な性質を再現するため、構造や手順

を深く考えず、素早く手が動くままに描写する傾向がある。その為、水彩画を経験していた参加者 E の試行においても雲や草木などの自然物の描写もこのように不揃いだったと思われる。E の場合も、全試行間に訓練効果による絵画スキルの変化は観察されなかった。

実験参加者の動作への影響の傾向としては、振動提示のみがあった場合では、実験参加者の動作に劇的な変化は確認されなかった。しかし、A を除く全ての実験参加者は、振動提示と視覚効果が両方あった試行にて実験参加者の手の移動や筆圧の加え方が注意深くなるという傾向が見られた。実験参加者のうち、D、E は振動提示が2の時にこの傾向が強く観察された。D と E による、振動提示が2、視覚効果が有りの試行における作品を以下に示す。

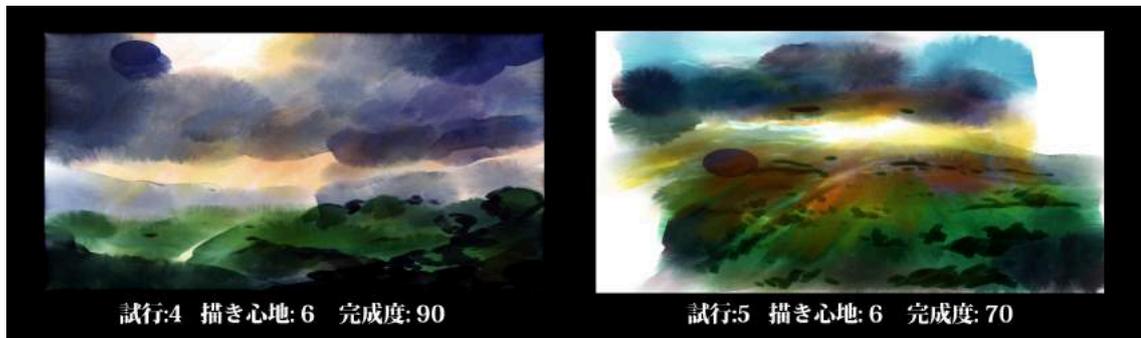


図 5.21: Works by participant D and E

どちらの作品も、顔料が紙に染み込んで滲みを起こす性質を利用して、雲の形状や空模様等の柔らかい輪郭を的確に捉えている。また、紙への顔料の浸透が、湿っている領域と乾燥している領域の境目で止まり、そこに顔料が集まることでシャープな輪郭が生じる性質を利用して、山等の地形の形状を必要に応じてはつきりと描いている。これらの技法は水彩画や油絵のようなアナログ画材の絵では多く利用されている。実験参加者にインタビューしたところ、D は油絵を4年間専攻しており、E は水彩画に熟練していた。実験参加者のアナログ画材で絵を描いた経験が最も長かったのはこの2名であった。この2点の作品より、本システムで絵を描く上でアナログ画材と同様のテクニックが有効であることがわかる。一方で、同実験参加者らによる他の視覚効果有りの試行ではアナログ画材の性質を

ここまで有効に使い分けることができなかったことを参加者らはインタビューにて認めている。

DとEに振動提示2、視覚効果有りの試行について聞いたところ、Dは、「少しだけストロークが重く感じた。この重いストロークの方が、紙に絵の具を染み込ませている感じが出ていた」Eは「他の試行よりも少ない筆圧で太い線が出やすかったので力加減を弱めた」と述べている。

複数の振動提示による描き心地の上昇幅を見てみると、視覚効果有の場合における振動提示の数が1から2間の上昇幅は29から30と少ない。また主観的完成度の評価が最も高かった試行は、振動提示1、視覚効果ありの場合である。よって、本システム実験参加者全体に使用してもらう上で最もコストパフォーマンスの良いものは、振動提示1、視覚効果ありの場合であると思われる。

しかし、アナログ画材に習熟したDとEは振動提示が2の場合にて最も自身のスキルを発揮している。DとEは、ブラシストロークの輪郭のシャープさや質感を制御することで、多様な効果を実現していた。輪郭を制御する上で重要なパラメータは、本来は筆の押し付け、払うまでの動作のさせ方であり、本システムの場合筆圧と手の移動距離に当たる。例えば、Eが雲を描くとき、Eは下から上へ払う動作一つで雲の塊を描いていた。一見単純な動作であるものの、筆圧をかけてから離すタイミング次第で結果は大きく変わる。この場合、筆圧を下げ始めてから完全に離すまでの時間と、その間の手の移動距離を適切に選ぶことで雲らしい柔らかいグラデーションが生じる。絵を素早く描く上では、このパラメータを瞬時に決定し、手をその通りに動かさなければならない。この時、自身がどれだけの筆圧をどの方向に加えているかを知る手段が、筆の変形感である。ただし、筆の変形感を読み取った上で適切な手の動作を選べるようになるには訓練を要する。アナログ画材の習熟に一定の期間を要するのはこの為である。この一連の動作が確実にできていたのはDとEだった。DとEは、筆の変形感を読み取ることによって適切な動作を選択しており、二つの振動提示は読み取りの精度を上げていたと考えられる。

このことから、描き心地を向上させた上で、更にアナログ画材のスキルをストレスなく応用できるペイントシステムを構築する上では、振動子を二つ用いる方

が良いと考えられるが、この効果はアナログ画材に習熟したユーザーでないと体感しづらいと思われる。

5.6. 総合考察

実験1の結果で得られた実験参加者の作品より、振動触感の有無で実験参加者の主観的完成度に大きな違いは見られなかったものの、振動触感によって主観的描き心地が向上した。このことは、振動触感が、単純な図形を細い線で書いたり、メモをとったりするだけでなくアナログ画材の視覚効果で絵を描く場合においても有効であることを示している。更に、統計的有意が確認されたことからタブレットとアナログ画材の描き心地の違いに関する要因に振動触感が大きな影響を持っていることが改めて確認できた。また、図5.3、図5.4では、振動触感の提示によって、他のパラメータの値に関わらず描き心地が向上している。このことは、振動触感視覚効果のパラメータに関わらず効果を持つことを示している。つまり、振動触感の提示はより多くの様々な画材の視覚効果に対しても効果を失うことなく、有効に機能するのではないかと思われる。

実験2では、視覚効果におけるパラメータを実験参加者が制御できるようにし、視覚効果の主観的な描き心地に対する影響を調べた。その結果、実験参加者が設定したパラメータの場合の方が主観的描き心地と、完成度が向上した。今回実験参加者に設定させたパラメータは水分量である。分散分析を行った結果、視覚効果においては水分量が最も描き心地に統計的有意に働くことが判った。一方で、顔料の密度に関しては有意差は見られなかった。水分量が多いと、実験参加者が絵の具を塗った領域よりも湿った領域が水圧によって広がりやすくなる。その為、絵の具が塗った領域にとどまらず、アナログ画材に特有な輪郭のにじみ等が制御しづらくなり、実験参加者にとってストレスとなる。一方、水分量が少なすぎると、紙に顔料が十分に染み込むことが出来ないため、実験参加者の望む濃さの制御ができなくなってしまう。この為、水分量は実験参加者の入力と期待される出力を一致させる上で重要であると考えられる。

実験参加者自身の調節によって得られた水分量の値は標準偏差が大きく、個人

差が見られた。このことから、万人にとって丁度よい水分量の値を確定することはできなかった。しかし同時に、実験参加者ごとに個別の値を設定させることが、結果的に描き心地と完成度の向上に結びつくことを示していると思われる。

実験3では、筆の変形感の提示がどれだけ描き心地と完成度に影響を与えているかを検証した。その結果、実験参加者のうち4人が筆の変形感を2つの振動提示で実現した試行の方が描き心地が良く、その最の作品の完成度も高いと回答した。また、水分量に関しては、0.03と0.05のうち0.03に近い方が丁度良いということが判った。これは、実験2における実験参加者らが選んだ水分量の値の平均0.0302に近い。

実験参加者は、振動提示が1つだと、ペンデバイスに微小な回転がかかり、手に持った最のバランスを悪く感じられたと述べている。また、振動提示が2の方が、筆圧をコントロールしやすく、太い線から細い線への遷移がしやすかったという意見も得られた。

実験4では、実験参加者にフルカラーの絵を描いてもらい、振動提示が0、1、2、視覚効果が有無の場合ごとに各パラメータを組み合わせた試行における主観的描き心地と完成度を比較した。実験参加者に本システムを用いて写真を元に絵を描いてもらい、その最の描き心地と完成した作品の完成度を点数付けしてもらった。その結果、振動提示が2の場合の方が1の場合よりも若干描き心地が高いと評価された。視覚効果が有だと、描き心地、完成度共に高くなる傾向があった。

また、アナログ画材に熟練した実験参加者は、アナログ画材特有の技法を的確に本システムにて取り込んでいることが観察された。更に、これらの参加者は、振動提示が2の試行にて最も完成度の高い作品を創作している。よって、本システムによる触感提示が、実験参加者のアナログ画材のスキルをデジタルタブレット上にて活かす上で有効であることが示された。以上の結果より、アナログ画材の視触覚効果を提示することによって、デジタルペインティングにおいてアナログ画材で絵を描く上でのスキルや経験を活かしやすくなったと考えられる。

第6章

結 論

本研究は、水彩画を、視覚的特徴だけでなく描き心地も再現することで、ユーザがストレスなく柔軟で素早く、自分にあった描画が可能なペイントシステムの実現を検討した。

第1章では、既存のデジタルペインティングの現状と、絵を描く際における触感の重要性について述べた。デジタルペインティングはプロアマ問わず広く普及しているが、アナログ画材に比べて描き心地が良くない。よって、描き心地の個人差を踏まえた上でデジタルペインティングの描き心地を水彩画に近づけ、改善する手法が必要であると考え、本研究に着手した。

第2章では、デジタルペインティングの歴史と触感提示の歴史を概観しながら関連研究について述べた。まず、デジタルペインティングの研究で、簡易的手法である Procedural 法、素材の画像を加工する Example-based 法、水彩画の視覚的特徴を物理的に再現する Simulation-based 法と、それらの事例について述べた。

次に、触感提示の主だった手法について述べ、特に加速度センサーとマイクを用いて物体の素材感を記録し、別の場所で振動子を用いて提示する手法を取り上げた。

更に、力覚アームや電気刺激を用いた触覚提示のあるペイントシステムを取り上げ、既存の研究では実現されておらず、ユーザが水彩画に近い描き心地でストレスなく絵を描く上で更に必要な要素について述べた。

第3章では、振動触感が描き心地にどれだけ影響を持っているか、振動触感でどこまで水彩画の描き心地を再現できるかを実験や日本科学未来館でのフィールドワークを通して検証した。その結果、振動子と視覚効果を用いた水彩画の描き心地の提示について、1. 振動触感は、描き心地に重要な影響を持っている。2. 振

動触感の提示であれば、絵を描く動作に必要なキャンバス画材の触感を再現できる。3. 振動触感と視覚効果を的確に組み合わせることが、触感提示の効果を高める。の3点を明らかにした。

第4章では、第3章での検証結果を踏まえ、振動触感による画材感の提示と、複数の振動子によるブラシの変形による非対称な反力を提示する手法を提案した。次に、視覚効果による粘性感の提示手法について述べた。更にシステム構成、視覚効果の物理シミュレーションの実装方法について説明した。

第5章では本システムの評価実験を行った。評価実験の結果より、本システムによる視触覚効果の提示が、絵を描いた時のユーザの主観的描き心地を向上させることが判った。これは、単純な図形や文字を書く場合だけでなく、筆と絵の具を使う絵に見られるような厚塗りをデジタルで行う場合でも振動触感が有効であることを示している。更に、被験者が自分でパラメータを設定すれば主観的完成度も向上することが示された。このことから、描き心地の良い触感提示には個人差があり、パラメータの調節が重要であると思われる。また、筆の変形感の提示が筆圧の強弱を活かした表現を行う上で描き心地を向上させ、アナログ画材の技法をデジタルタブレットで行う上でも有効であることが示された。

アナログ画材における描き心地の、手の動作や作品そのものに対する効果に注目したペイントシステムはまだ無い。また、描き心地そのものが持つ効果や影響に対する研究も現状ではかなり少ない。今後、効果的に描き心地を提示するシステムを開発する上で、更なる描き心地に対する研究が必要である。

参 考 文 献

- [1] STRASSMANN, S. 1986. Hairy Brushes, SIGGRAPH 1986 Proceedings, ACM Press, 1986, pp. 225 - 232.
- [2] HSU AND I.H.H. LEE 1994. Drawing and animation using skeletal strokes, SIGGRAPH 94 Proceedings, ACM Press, 1994, pp. 109 - 118.
- [3] IP, H. H. S., AND WONG, H. T. F., 1997. Calligraphic Character Synthesis using Brush Model. In CGI'97, Computer Graphics International conference, pp. 13-21, Hasselt-Diepenbeek, Belgium, June 23-27 1997.
- [4] SAITO S. AND NAKAJIMA, M. 1999. 3D physics-based brush model for painting, SIGGRAPH 99 Sketches, Conference Abstracts and Applications, ACM Press, 1999, p. 266.
- [5] BAXTER, W. V., 2004. Physically based interactive painting. PhD Thesis. University of North Carolina at Chapel Hill.
- [6] Chu, Nelson SH, and Chiew-Lan Tai. "An efficient brush model for physically-based 3D painting." Computer Graphics and Applications, 2002. Proceedings. 10th Pacific Conference on. IEEE, 2002.
- [7] Chu, Nelson S-H., and Chiew-Lan Tai. "MoXi: real-time ink dispersion in absorbent paper." ACM Transactions on Graphics (TOG) 24.3 (2005): 504-511.
- [8] CHEN, Zhili, et al. Wetbrush: GPU-based 3D painting simulation at the bristle level. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2015, 34.6: 200.

- [9] CURTIS, C., ANDERSON, S., SEIMS, J., FLEISCHER, K., AND SALESIN, D., 1997. Computer-Generated Watercolor, In Proceedings of ACM SIGGRAPH 97, ACM Press, 421-430.
- [10] BillBaxteretal.: “ DAB:interactivehapticpaintingwith 3D virtual brushes,” Proc. SIGGRAPH '01, pp. 461- 468,1997
- [11] Salisbury, J. Kenneth, and Mandayam A. Srinivasan. ”Phantom-based haptic interaction with virtual objects.” Computer Graphics and Applications, IEEE 17.5 (1997): 6-10.
- [12] McMahan, William, and Katherine J. Kuchenbecker. ”Haptic display of realistic tool contact via dynamically compensated control of a dedicated actuator.” Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2009.
- [13] D.G. Caldwell and C. Gosney, “ Enhanced Tactile Feedback (TeleTaction)Using a Multi-Functional Sensory System,” Proc. IEEE Int ' l Conf. Robotics and Automation (ICRA ' 93), pp. 3923-3928,1993.
- [14] S. Ino, S. Shimizu, T. Odagawa, M. Sato, M. Takahashi, T. Izumi,and T. Ifukube, “ A Tactile Display for Presenting Quality of Materials by Changing the Temperature of Skin Surface,” Proc. IEEE Int ' l Workshop Robot and Human Comm. (ROMAN ' 93), pp. 220-224, 1993.
- [15] J. Citerin, A. Pocheville, and A. Kheddar, “ A Touch RenderingDevice in a Virtual Environment with Kinesthetic and ThermalFeedback,” Proc. IEEE Int ' l Conf. Robotics and Automation(ICRA ' 06), pp. 3923-3928, 2006.
- [16] B. Deml, A. Mihalyi, and G. Hanning, “Development andExperimental Evaluation of a Thermal Display,” Proc. EuroHapticsConf., pp. 257-262, 2006.
- [17] 佐藤克成, and 前野隆司. ”1P1-C01 温・冷空間分割刺激における温度感覚提示モデル (触覚と力覚 (3)).” ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要

- 集 2012 (2012).
- [18] Jones, Lynette A., and Hsin-Ni Ho. "Warm or cool, large or small? The challenge of thermal displays." *Haptics, IEEE Transactions on* 1.1 (2008): 53-70.
- [19] Minamizawa, Kouta, et al. "TECHTILE toolkit: a prototyping tool for design and education of haptic media." *Proceedings of the 2012 Virtual Reality International Conference*. ACM, 2012.
- [20] Takeuchi, Yuta, et al. "TouchCast: an on-line platform for creation and sharing of tactile content based on tactile copy & paste." *Adjunct proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology*. ACM, 2012.
- [21] Liu, Xin, Haijun Xia, and Jiawei Gu. "FlexStroke: a jamming brush tip simulating multiple painting tools on digital platform." *Proceedings of the adjunct publication of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*. ACM, 2013.
- [22] Hirobe, Yuki, et al. "Colorful touch palette." *ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies*. ACM, 2010.
- [23] Shilkrot, Roy, et al. "Augmented airbrush for computer aided painting (cap)." *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 34.2 (2015): 19.
- [24] 「妻を帽子とまちがえた男」 オリバー・サックス著 高見幸郎, 金沢泰子訳 晶文社." *ハヤカワ・ノンフィクション文庫* (1993): 69.
- [25] 「セザンヌ」 ガスケ著, 與謝野 文子 訳 岩波書店." *岩波文庫* (2009).
- [26] MLA 男鹿和雄, and 石井芳征. "INTERVIEW 背景美術 男鹿和雄 (SPECIAL FEATURE 名作はいかにして生まれるのか? スタジオジブリのレイアウト術)." *美術手帖* 60.912 (2008): 48-53.

- [27] Linda Cateura. Oil Painting Secrets From a Master: 25Th Anniversary Edition. Watson-Guptill. 1995
- [28] 3Dtotal. com (Firm). Digital Painting Techniques. Vol. 1. Taylor & Francis, 2009.
- [29] 早川智彦, 松井茂, 渡邊 淳司: オノマトペを利用した触り心地の分類手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 15(3), pp.487-490, 2010.
- [30] 中小路久美代, 山本恭裕, and 小池康晴. "擬似触覚を利用した重みのコミュニケーションのためのビジュアルインタラクションデザイン." 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) 2010.3 (2010): 1-6.
- [31] Keita Watanabe, Michiaki Yasumura. VisualHaptics: Generating Haptic Sensation Using Only Visual Cues, ACE2008, Proceedings of the International Conference on ACE2008, pp405, December 2008
- [32] 渡邊恵太, and 安村通晃. "味ペン: 仮想筆先による触覚的「書き味」 感覚提示の提案と試作." インタラクション (2007): 183-184.
- [33] T. Flash, N. Hogan: The Coordination of Arm Movements, J. Neuroscience, vol.5, pp.1688-1703, 1985.
- [34] 光本恵, et al. ペン入力端末の書き心地改善のための実験および考察. 全国大会講演論文集, 53.4: 149-150, 1996.
- [35] 田中博和, 花光宣尚, 南澤孝太: "描き心地に関わる振動覚の検証と再現の検討." ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015(Robomec2015), 2A2-V09 (2015.5)

謝 辞

本研究の指導教員であり、幅広い知見からの確な指導と暖かい励ましやご指摘をしていただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の南澤孝太准教授に心から感謝いたします。

そして、慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科の仲谷正史先生からは研究の方向性をはじめ、過去の研究についての議論や触感にまつわる面白いエピソード、そして実験の手法に関するきめ細かい助言を何度もしていただきました。ここに感謝の意を表します。

また、慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科の花光氏は、私がこの研究に関わるきっかけを与えてくれただけでなく、私の作成した触感ペイントシステムに Tangment という素敵な名前をつけていただきました。当初触感について何も分からなかった自分に2年間ここまで研究に必要なありとあらゆることを指導していただきました。花光氏には言葉で言い表せない程非常に感謝しております。

本研究を進める上で、実験に協力してくれた総勢18名の実験参加者の皆さまにも大変心から感謝いたします。また、お忙しいにも関わらず、長い時間をかけ、本システムを使って美しい風景画を描いてくれたDさんとEさんには記してお礼を申し上げます。

最後になりますが、2年間を通して様々なご支援と活動の機会を与えてくださった Reality Media、Embodied Media の皆さまに感謝申し上げます。また、Reality Media でのプロジェクトに誘っていただきました慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科OBの上田氏へのお礼を申し上げたく、謝辞にかえさせていただきます。