

創作活動支援のための
制作過程の構造解析およびシミュレーション
に関する研究

浦 正広

目次

1.	序論.....	1
1.1.	背景.....	3
1.2.	目的.....	4
1.3.	構成.....	5
2.	計算機による創作活動支援.....	9
2.1.	計算機と創作活動.....	11
2.2.	計算機による創作活動の支援事例.....	12
2.2.1.	制作過程のモデル化.....	14
2.2.2.	対話型操作による疑似的な制作環境.....	16
2.2.3.	実際の制作の補助.....	18
2.3.	制作過程を提示する創作作品における制作支援.....	20
3.	バルーンアートの構造解析.....	21
3.1.	はじめに.....	23
3.1.1.	背景.....	23
3.1.2.	目的.....	24
3.2.	バルーンアートについて.....	25
3.2.1.	制作方法の概要.....	25
3.2.2.	ロック手法.....	26
3.3.	グラフ理論に基づく構造解析手法の提案.....	28
3.3.1.	構造解析.....	28
3.3.2.	難易度評価.....	37
3.4.	構想支援ツール.....	40
3.5.	評価と考察.....	43
3.5.1.	ロック順序による違い.....	44
3.5.2.	経路による違い.....	45
3.5.3.	制作物による違い.....	47
3.5.4.	解説書の手順との比較.....	48
3.5.5.	被験者実験.....	50
3.6.	おわりに.....	54
3.6.1.	結論.....	54
3.6.2.	展望.....	55
4.	サンドアニメーションのシミュレーション.....	57

4.1.	はじめに.....	59
4.1.1.	背景.....	59
4.1.2.	目的.....	60
4.2.	サンドアニメーションとは.....	61
4.2.1.	制作環境.....	62
4.2.2.	制作技法.....	63
4.2.3.	制作例.....	67
4.3.	インタフェースの製作.....	69
4.3.1.	FTIR テーブルの製作.....	70
4.3.2.	ポインタの認識.....	71
4.4.	サンドアニメーションのシミュレーション.....	73
4.4.1.	砂の表現.....	74
4.4.2.	制作技法のシミュレーション.....	75
4.4.3.	実行例.....	81
4.5.	実験と考察.....	82
4.5.1.	処理速度.....	83
4.5.2.	作品の制作.....	84
4.6.	おわりに.....	92
4.6.1.	結論.....	92
4.6.2.	展望.....	93
5.	考察.....	95
5.1.	検討事項.....	97
5.2.	「構想」の支援.....	98
5.3.	「制作」の支援.....	99
5.4.	総合的な考察.....	100
6.	結論.....	101
6.1.	総括.....	103
6.2.	展望.....	105
6.2.1.	本研究の発展.....	105
6.2.2.	文化の保存・継承の支援.....	106
6.2.3.	人の感性要素の解明.....	106
	謝辞.....	107
	参考文献.....	111
	研究業績.....	119

図目次

図 1-1	本論文の構成.....	7
図 2-1	創作のプロセスとその構成要素.....	12
図 3-1	バルーンアートの例.....	25
図 3-2	バルーンの初期状態とツイスト操作.....	25
図 3-3	ロックツイスト.....	26
図 3-4	5個のバブルでのロックツイスト.....	26
図 3-5	ループツイスト.....	27
図 3-6	ピンチツイスト.....	27
図 3-7	チューリップツイスト.....	27
図 3-8	バルーンのグラフ化.....	29
図 3-9	図 3-8 (2)から得られた複数のオイラー経路.....	30
図 3-10	非固定の頂点が存在する形状の例.....	31
図 3-11	制作手順決定アルゴリズム.....	34
図 3-12	アルゴリズムに基づいた図 3-8 (1)の制作手順.....	35
図 3-13	図 3-11 に難易度算出処理を追加したアルゴリズム.....	38
図 3-14	概形のオイラーグラフ化.....	40
図 3-15	編集モードの機能.....	41
図 3-16	編集モードで制作中の図 3-1 (1)のウサギ.....	41
図 3-17	編集モードで制作した図 3-1 (1)のウサギ.....	42
図 3-18	表示モードによる図 3-1 (1)のウサギの制作手順の表示.....	42
図 3-19	ベーシックアニマル.....	43
図 3-20	オウム.....	43
図 3-21	ベーシックアニマルのオイラー経路.....	44
図 3-22	オウムのオイラー経路とロックの順序.....	45
図 3-23	解説書に基づくバルーンアートの制作例.....	49
図 3-24	被験者による制作例.....	52
図 3-25	構想支援システム利用例.....	53
図 3-26	複数本からなるバルーンアートの例.....	55
図 4-1	サンドアニメーションの例.....	61
図 4-2	サンドアニメーションの制作環境.....	62
図 4-3	背面光によるキャンバスの違い.....	62
図 4-4	砂を置く.....	64

図 4-5	砂を撒く	64
図 4-6	砂を飛ばす.....	65
図 4-7	砂を広げる.....	65
図 4-8	砂を削る	66
図 4-9	砂を拭う	66
図 4-10	制作する絵.....	67
図 4-11	砂を置いて描いた場合	67
図 4-12	砂を削って描いた場合	68
図 4-13	インタフェース構成.....	70
図 4-14	製作したテーブルトップインタフェース.....	70
図 4-15	ポインタの構造	72
図 4-16	入力画像からのポインタの認識	72
図 4-17	砂量と描画の関係	74
図 4-18	シミュレータの画面例	75
図 4-19	「置く」の処理	76
図 4-20	図 4-19「置く」の実行結果.....	76
図 4-21	「撒く」の処理	78
図 4-22	「撒く」の実行結果.....	78
図 4-23	「削る」の処理	80
図 4-24	「削る」の実行結果.....	80
図 4-25	シミュレーションの実行例と実際の砂との比較	81
図 4-26	絵コンテ	85
図 4-27	絵コンテに基づいて制作したサンドアニメーション	87
図 4-28	インタフェース使用例.....	90
図 4-29	レインボーアートのシミュレーション例.....	93

表目次

表 3-1	図 3-8 (2)の隣接行列	29
表 3-2	図 3-9 の各オイラー経路への適用結果.....	39
表 3-3	図 3-21 の各制作手順における非固定頂点数	44
表 3-4	図 3-22 の各オイラー経路における非固定頂点数.....	46
表 3-5	ベーシックアニマルとオウムと比較	47
表 3-6	解説書の手順と提案手法により導出された手順の比較	49
表 3-7	ロック順序による難易度の印象の比較	50
表 3-8	経路による難易度の印象の比較	51
表 3-9	制作物による難易度の印象の比較.....	51
表 4-1	調査した制作技法	63
表 4-2	実験環境	82
表 4-3	実験における変数値.....	82
表 4-4	計測結果	83
表 4-5	制作時間 (単位 : 秒)	88
表 4-6	表 4-5 における t 検定の実施結果	88

1. 序論

1.1. 背景

社会の電子化が促進されることにより、様々な分野において効率化や合理化が図られてきており、その流れは今後ますます加速されることが予想されている[1]。電子化の対象となるのは社会生活の基幹部分のすべてであり、その範囲も地球規模のものから[2]、地域社会における諸問題といったピンポイントなものなど様々ある[3][4]。また、コミュニティが電子的な空間において形成されているようなものもある[5]。

労働の分野においては、電子化の流れが促進されることにより、近い将来には人々が労働に従事する時間は減少し、それにより生じた余暇が芸術などの創作活動に充てられることが示唆されている[6]。また、情報の分野でも、システムが中心の時代から PC が中心の時代を経て、ネットワークが中心の時代となり、21 世紀はコンテンツが中心となる時代になるといったことが予言されている[7]。

21 世紀初頭である現代は、コンテンツの時代に足を踏み入れた段階であり、人々は十分な暇を得るまでには至っていないが、様々な形で創作活動に触れており、これからの人類の活動において、創作がますます重要な役割を担うことが考えられる。

創作活動は人々の生活を豊かにするものであり、その愉しみに触れる方法は作品の鑑賞と創作の 2 種に大別される。しかしながら、このうちの創作においては、一般の人々がその愉しみを享受することが容易ではないケースも多い。これは、作品が完成に至るまでのプロセスにおいて、経験則に基づいた感性や技術などの高い専門性を要するためである。

創作作品の完成までのプロセスは、

- 完成形状をイメージしてそこから素材や制作手順などを考案する「構想」の段階
- それに基づいて実際に作品を造形する「制作」の段階

に大別される。創作作品は制作環境や制作技法が作品固有のものとなるため、制作手順の「構想」が容易ではないケース、また、たとえ「構想」が成し得たとしても、造形に高度な技術が要求され「制作」が困難となるケースが生じ得る。この「構想」と「制作」の両作業は、いずれも経験を重ねることにより初めて習得できる。そのため、非熟練者が一定のクォリティの作品を制作できるようになるまでには、練習の反復により経験を積むことが必要不可欠であるといえる。しかしながら、制作に用いる素材や作品のもつ固有の制約により、反復練習の実践が容易でないなど、独習が難しいケースも存在する。

このようなケースに対しては計算機による創作支援が有効であると考えられ、既にいくつかの分野において創作を支援している先行研究も存在している。

1.2. 目的

本研究では、制作過程をパフォーマンスとして提示する創作活動を対象とした、計算機による支援手法を提案する。

これらは、創作の楽しさを実演者と聴衆がともに共有できるという特徴を持つが、その性質上、実演時の失敗が許されないこともあり、実演するにあたっては制作過程についての「構想」および「制作」の両面での理解が事前に必要となる。そのため、数ある創作物の中でも、計算機による支援が効果的に作用する領域であるといえる。

そこで、創作作品を理論的な考察の対象とし、これまで経験則に基づいて理解がなされていた作品の構造を記号化することにより、

- 「構想」においては制作過程の導出
- 「制作」においては制作過程の習得

を支援するというアプローチにより、制作過程を提示する創作作品の、計算機による創作支援を実現する。

「構想」および「制作」は、通常、実際に作品を制作するという経験によって身に付くものであり、本研究の意義は、計算機によりその行為を体系化、疑似体験を可能とすることにある。これにより、多くの人々が作品の制作を披露する機会の創出をサポートするなど、人と創作活動との距離を縮める手助けをすることが可能となる。また、創作活動のための教育における教材的な活用も可能となる。

この成果は、芸術作品の創作など、感性的な要素が作用する領域における支援に繋がることが期待される。

本論文では、3章において制作方法の「構想」が容易ではない創作作品としてバルーンアートを、4章において制作方法が理解できてもそれを「制作」するために高い技術を要する創作作品としてサンドアニメーションをそれぞれ題材としている。各作品を、その構造に基づいてモデル化し、それに基づいた構造解析による制作手順の導出、および、対話型の疑似制作環境の構築を行い、提案手法を実際の作品に適用して比較する。

結果、バルーンアートにおいては解説書に示された制作手順が導出可能となり、サンドアニメーションにおいては実環境と同等の疑似制作環境の提供が可能となる。また、提案手法により、制作過程を理解し、実際の制作が行えるようになる。

これらより、「構想」および「制作」の両面において提案手法の有効性が示される。

1.3. 構成

本論文は、図 1-1 で示すように全 6 章により構成される。

1 章では、研究の背景および目的と、その意義について述べる。

本研究は、今後、人々の生活においてますます重要となってくるであろう創作活動を対象としている。作品の創作における完成までのプロセスには、「構想」と「制作」の段階とがあり、そのどちらに創作を困難にする要因があるかは、創作作品によって異なる。

本研究では、創作作品のなかでも、制作過程をパフォーマンスとして提示するという特性を持つ、バルーンアートとサンドアニメーションの 2 つを支援の対象としている。バルーンアートにおいては「構想」の、サンドアニメーションにおいては「制作」の支援を行うことにより、その支援が有効であるかを確認する。

2 章では、計算機を用いて作品の創作支援を実現している先行事例を調査し、ケース別に示す。また、制作過程を提示する創作活動における支援手法について検討する。

これまでに行われてきた計算機による作品の創作支援を分類すると、「制作過程のモデル化」、「対話型操作による制作過程の疑似体験」、「実際の制作の補助」の 3 つに大別できる。制作過程を提示する創作作品では、その制作の難しさが、聴衆への印象を決定付ける要因の 1 つとなると考えられるため、「実際の制作の補助」により制作の難易度を下げることが好ましくないといえる。

そこで、「制作過程のモデル化」、「対話型操作による制作過程の疑似体験」というアプローチが支援において有効であると仮定する。

3 章では、「制作過程のモデル化」の事例としてバルーンアートを取り上げ、「構想」の支援を行う。

1 本のバルーンから制作されているバルーンアートは、分解したときに 1 本のバルーンになるという特徴を持つ。そのため、バルーンをグラフで表した場合に、そのグラフが一筆書き可能であるという性質を持つオイラーグラフになる。このようにしてバルーンアートの構造を定義し、それに基づいた構造解析、形状成立判定、制作手順生成および難易度評価手法について検討する。また、提案手法に基づく構想支援システムを構築する。比較実験や被験者実験により、実際の作品に提案手法を適用可能であるか、また、構想支援システムにより、実際に制作可能なバルーンアートがデザインできるかを確認する。これらより、非熟練者が提案手法により実際のバルーンアートが創作できるようになったか、その有効性を明らかにする。

4章では、「対話型操作による擬似的な制作環境」の事例としてサンドアニメーションを取り上げ、「制作」の支援を行う。

サンドアニメーションは、砂を用いて絵を描き、その制作過程そのものがアニメーションとしても成立するという特徴を持つ。制作環境や制作技法が体系化されていないので調査して、制作技法を体系化する。また、その技法を実環境と近い動作により行えるインタフェースを構築し、そのインタフェースに対しての入力と各技法における砂の振る舞いとを対応付けることで擬似的な制作環境を構築する。シミュレーションが実時間で処理可能であるかを計測し、また、被験者実験を行い、同一の作品をシミュレーションと実環境とで制作可能であるかを確認する。これらより、非熟練者が提案手法により実際のサンドアニメーションが創作できるようになったか、その有効性を明らかにする。

5章では、3、4章において示した構造解析およびシミュレーションの各手法が、制作過程をパフォーマンスとして提示する作品における創作支援として有効であるか、総合的に考察する。

バルーンアートは「構想」に、サンドアニメーションは「制作」に、創作を難しくする要因があると仮定し、それぞれ計算機による支援を行ったことで、実際に創作が行えるようになってきているか、それぞれの実験結果から確認する。結果、いずれも提案手法により実際の作品が制作できるようになり、提案手法の有効性が示されている。また、この2つの事例から、制作過程を提示する創作作品における支援の在り方について考察する。

6章では、本論文における研究成果をまとめ、また、今後の展望について述べる。

本研究では、創作の愉しさを実演者と聴衆が共有できるという特徴を持つ、制作過程をパフォーマンスとして提示する創作作品であるバルーンアートとサンドアニメーションを支援の対象としている。バルーンアートでは「構想」の、サンドアニメーションでは「制作」の支援手法を提案することで、これら作品の創作支援の実現を図っている。被験者実験を通して、被験者が提案手法により実際の作品の制作が行えるようになったことが確認できたため、本研究が人と創作活動との距離を近付けるものとなることが期待できる。また、本研究の成果は、芸術作品の創作など、人の感性が作用する領域における支援に繋がるものであると考える。

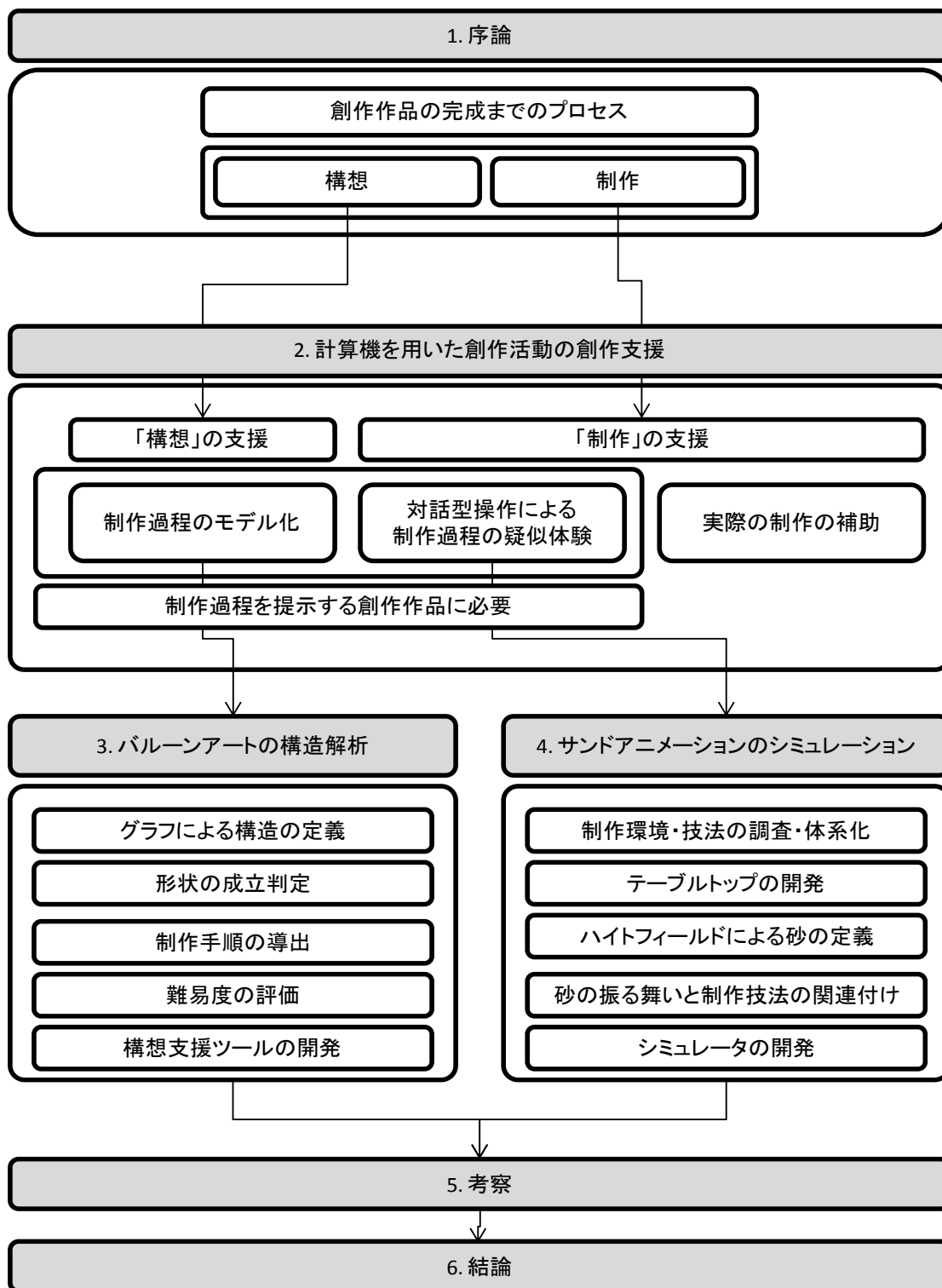


図 1-1 本論文の構成

2. 計算機による創作活動支援

2.1. 計算機と創作活動

計算機はその誕生以来、様々な形で作業の支援を行ってきており、現在では、創作分野にも携わっている。これは、計算機の性能の向上により様々な処理が可能となったためであるが、なかでも、コンピュータグラフィックス (CG) の登場により、計算機上での描画面における表現力が著しく向上したことが、その要因として挙げられる。また、インタフェースの進歩もその一翼を担っているといえる。

計算機は、その誕生当初は正確さや速さといった計算能力の高さを買われ、シミュレーションや作業支援といった領域における活用を想定して製作されている。実際に最初期のものは弾道計算などの科学技術計算を対象としており、現在もその流れを汲み、ビジネスや軍事産業等、シミュレーションや作業支援について様々な分野を対象とした情報システムが存在している。これらは、CG やインタフェースなど、その時代における最先端技術を積極的に取り入れることで、人間にとって使いやすいものが、日進月歩で提案されている[8]。しかしながら、これらシステムの目的は作成や作業の効率化や合理化が目的であり、創作の支援を目的とはしていない。

一方で、CG はその登場以来、上記で述べたビジネス等の作業支援に加え、教育やビジュアルデザイン、芸術など、様々な分野への応用が期待されている[9]。そのなかでも、創作の分野への応用としては、画像や映像のリアリティの追及に寄与する、作品の素材となる多種多様な物体の表現方法であったり[10]、ペイントツールや映像編集ツールなどの従来の制作作業のデジタル化が挙げられている。また、ニューメディア的な新たな役割についても示されており、実際に計算機を用いることで、人間だけでは創作が難しかった数理的なモデルなどを用いた表現を取り入れた、コンピュータアートも積極的に展開されている[11]。これは VR など、その時代における最先端の技術を取り入れる形で[12]、現在も発展を遂げている。

また、インタフェースについても、CUI 時代におけるキーボードから、GUI 時代におけるマウスといったように、より人の使いやすい形に進化しており、その先の進化を提唱している事例もある[13]。先に挙げたコンピュータアートなどは、インタラクティブアートやフィジカルコンピューティングなど、インタフェースの進化により深化している。

このように、計算機と創作活動とが交錯していく流れのなかで、計算機を作業のデジタル化や作品の創作の場としてではなく、創作そのものを支援するといった使い方を行っている事例が登場してきている。

2.2. 計算機による創作活動の支援事例

創作活動を支援するためには、対象とする創作作品における作品完成までのプロセスについての理解が重要であるといえる。これは、創作プロセスに基づいた造形教材の作成が一定の成果を挙げていることなどからも明らかである[14]。

計算機を用いて作品の創作支援を行う場合には、その作品の構造を計算機上で扱える形にする必要がある。そのためには、まず、作品構造を解析してモデル化することが重要となる。また、支援する個所やその内容を決定するには、前章で述べた「構想」から「制作」という作品が完成に至るまでのプロセスを把握した上で、計算機を用いることで、どの工程がどのように支援できるのかを検討する必要がある。これらの手順を踏まえた上で、実際にシステムを構築する必要がある。

創作物により、そのプロセスに多少の差異はあるが、一般に図 2-1 で示すような流れとなっており、それぞれの工程において右に示すような問題が発生する場合がある。例えば「構想」において完成形状を想定するが、折り紙など、幾何学的な制約により一般に簡易的な形状として制作されるようなものであれば、完成形状を想定すること自体が容易ではない。また、その想定した形状が実際に作成可能なものであるかを判断し、そこから制作手順を推測して選択する必要がある。一方で「制作」においても、道具や素材が特殊なものであるような場合には、それを用意して「制作」の準備をする必要がある。また、制作手順の実施に危険が伴ったり、失敗が修正できるか、どのくらいの時間を要するかなどといったことも問題点として挙げられる。

このように、それぞれの工程において問題となりうる点があるが、どの工程が問題となるかは創作物によって異なる。したがって、適切な支援を行うにあたっては、対象とする創作において、なにが創作における問題となっているのかを分析する必要がある。



図 2-1 創作のプロセスとその構成要素

計算機を用いた作品の創作支援は、様々な分野の創作活動を対象にこれまでに試みられており、これらを支援工程の観点から分類すると、以下の3種に大別される。

- 制作過程のモデル化
- 対話型操作による制作過程の疑似体験
- 実際の制作の補助

「制作過程のモデル化」については、作品の完成形状ないしそれに準ずる形状を入力とし、設計図や展開図、制作手順といった制作過程について提示することで支援するものである。また、「対話型操作による制作過程の疑似体験」では、制作過程をシミュレートすることにより疑似的に制作を体験可能とすることで支援するものである。「実際の制作の補助」については、実際に行っている制作を何らかの方法によって補助するものである。

このほかにも、ペイントツールや映像編集ツールなども広義では制作支援であるといえるが、これらは作業の効率化・合理化の面が強く、また、画像や映像などに関する幅広い分野が対象となり、特定の作品の創作を支援するものとはなっていない。そのため本研究においては、これらを創作支援としては扱わない。

以下に、主に日本でも馴染みの深い創作作品を中心に、大別した3種それぞれの事例を示す。

2.2.1. 制作過程のモデル化

創作作品の完成形状やそれに近い形を入力とし、それを計算機を用いて設計図や展開図として出力することにより、制作の支援を行っている事例がある。

たとえば、折り紙やペーパークラフトでは、紙の変形のみにより 3 次元形状を制作する必要があるなど、造形には、材料や道具により、制作過程において幾何学的な拘束が発生する場合がある。このように、制約により制作方法を推測することが難しい、「構想」の段階が完成までのプロセスにおいて問題となっている創作作品には、計算機により設計図や制作手順を導出する支援が有効であるといえる。また、このような支援において、適切な出力が得られるシステムを設計するためには、作品の構造を解析し、計算機上で扱える形に定義する必要がある。

以下に、この分野における研究事例を示す。

あやとり

あやとりは、輪になった一本のひもを指に通したり外したりすることで、東京タワーなど様々な形状を制作できる創作作品である。ひもの移動という変形の連続によりに形状が成立することから、「制作」に必要なスキルは高くない。一方、一定の長さの一本のひもにより形成する必要があるため、完成形状を想定したり制作手順を推測する「構想」が容易ではなく、目的の形状が複雑であればあるほど、実際にその形状までたどり着くことが困難となる。この問題に対して、計算機上で構造を定義することにより、目的の形状を指定することで、それに至るまでの制作過程の提示を実現している事例がある[15]。

ペーパークラフト

ペーパークラフトは、いくつかの紙のパーツを折り曲げて貼り合わせることで 3 次元形状を制作したり、平面の紙に切れ目を入れて紙を折ることにより 3 次元形状を作成する創作作品である。その特性から、造形作業の逆方向となる完成形状からの展開図の推測であったり、完成形状そのものの想定といった「構想」の作業が容易ではない。この問題の解消のため、完成形状の概形となる 3 次元モデルを入力することにより、それをアルゴリズムに基づいてペーパークラフト化し、また、それを展開することで設計図の自動生成を実現している事例がある[16][17]。

切り紙

切り紙は、紙を折り畳み、そこにはさみを入れることにより、星や雪の結晶などの連続性のある幾何学的な模様を制作可能な創作作品である。紙を折る、切るという単純な作業の組み合わせにより造形できることから「制作」は難しくないが、その単純さのため、複雑な模様となる完成形状から制作方法を推測することは容易ではなく、「構想」が困難な創作作品であるといえる。このような特徴を持つ切り紙において、完成形状となる画像を入力することにより、折り方と切り方からなる制作手順を自動で導出している事例がある[18].

折り紙

折り紙は、紙を折るという変形により様々な形状を制作する創作である。一般に用いられる紙が小さいことなどから、制作される形状は簡易的なものとなるが、巨大な紙さえあれば理論上は精巧な形状の造形も可能である。しかしながら、完成形状が複雑になればなるほど、それと紙を折るという変形とを結び付ける、制作手順を推測する「構想」は容易ではない。このように、精巧な形状の「構想」が困難である折り紙について、計算折紙幾何学に基づいて、入力された3次元モデルから、その形状を再現できるよう、紙の山折り・谷折りの個所と手順が示された展開図の生成を実現している事例がある[19].

あみぐるみ

あみぐるみは、毛糸などを編んでいくことで人形などの形を形成する、ぬいぐるみの編み物版である。編み物はやり直しも可能であるため、根気よく「制作」すれば完成させることは可能である。一方で「構想」については、デザインの自由度が高いことから完成形状の想定は難しくないが、1次元の毛糸から3次元の物体を形成するため、その制作方法を推測することは容易ではない。このような特徴を持つあみぐるみにおいて、スケッチ入力により3次元の完成形状をデザインしていくことにより、アルゴリズムに基づき、あみぐるみの手順図である編み図の自動生成を実現している事例がある[20].

2.2.2. 対話型操作による疑似的な制作環境

計算機上で疑似的な制作環境を構築し、インタラクションにより仮想・複合・拡張現実空間中で作品を造形できるようにすることで、「制作」の支援を行っている事例がある。

創作作品のほとんどは制作においてなんらかの素材を用いるため、その素材や制作環境が特殊なものであるほど、実際の制作が困難となる。このような創作作品において、計算機を用いた疑似的な制作環境により制作を支援することにより、実際の制作に先立って制作物の制作方法や完成形状が確認できるなどの効果が期待できる。とくにインタフェースが現実のものに近い場合には、練習環境としても有効に機能することが考えられる。

このような支援においては、素材の振る舞いの完全な形でのシミュレートは容易ではない。そのため、実際の制作における個々の作業での素材の振る舞いなどの、造形の構成要素を計算機で定義する必要がある。また、練習環境として提供を行う場合には、実環境に近いインタフェースを構築し、その入力と造形における素材の変化などの振る舞いとを対応させる必要がある。

以下に、この分野における研究事例を示す。

折り紙

前節で示したように、折り紙は「構想」が容易ではない創作作品である一方で、精巧なものになると制作に巨大な紙が必要となり、実際に「制作」することが困難となる。このような制作もシミュレート可能なものとして、CG が登場した早い段階から、仮想的な 3 次元空間中で対話的にリアルタイムでの折り紙の「制作」を可能としている事例がある [21].

版画

版画は、彫刻刀で版木と呼ばれる木の板を彫り、そこに墨や絵の具などで色を付けて紙を被せ、馬棟により紙をこすって転写することにより作品を造形する創作作品である。材料や道具が特殊なものであることから、準備に手間がかかったり、造形作業において道具により手を切るなどの怪我をする危険性があり、また、間違えて削ってしまった場合に修復が容易ではない、といった「制作」における問題が多数存在する。各素材や造形における振る舞いを定義し、この造形作業を計算機上で仮想的に実施できることにより、それら問題を解消するシステムを実装している事例がある [22].

バレエ

バレエは舞台舞踊であり、習得のためには実際に演じることが重要であるが、その初期の段階では様々な基本のステップを練習する。練習では、それらの動作を実際に見て体の動かし方を確認する必要があるが、手本となるステップが実演できる演者は限られ、また、組み合わせのパターンが数多くあるため、その数だけ演者を撮影した動画を用意することも容易ではない。このような特徴を持つバレエにおいて、基本ステップを計算機上で対話的に組み合わせることで、3DCGによるアニメーションとして振付をシミュレーションできるシステムを実装している事例がある[23].

水墨画

水墨画は、筆と墨からなる独特のストロークにより描かれる創作作品である。完成形状はイメージし易いが、「構想」した作品を構想通りに「制作」するためには、墨と筆の状態と描画との関係性を理解することが必要であり、そのためには経験を積むことが重要であるといえる。練習のためには紙や墨という素材が必要となるが、筆圧による筆の形状の変化と、その際の描画を定義し、力覚フィードバックデバイスを用いることで、実際の筆と同様の操作により、計算機上で独特のストロークによる水墨画を描くことができるシステムを実現している事例がある[24].

ネイルアート

ネイルアートはマニキュアやストーンにより爪をデコレーションするものである。サンプルにより印象は確認できても、爪の形は人によって様々であり、実際に自分の爪に装飾を施した際の印象などが事前に確認できない。このため、完成したときに想定していたものと違っていたという問題が発生する可能性がある。このような問題に対して、AR技術を用いることで、実際の爪の上に仮想的にデコレーションを配置して、その結果を任意の角度から閲覧可能とすることで、印象を確認することが出来るシステムを実装している事例がある[25].

2.2.3. 実際の制作の補助

実際の制作の作業を補助することにより，制作の支援を行っている事例がある．

作品の創作は，完成に至るまでに様々な工程があるが，これらの事例ではその工程の一部を計算機により支援する．また，場合によっては工程のすべてを自動で行う，自動生成といったものもある．

以下に，この分野における研究事例を示す．

似顔絵

似顔絵は写實的に描画するケースもあるが，その多くは，対象の特徴を抽出して，それを誇張したりして描画する．そのため，完成形状を想定するうえで特徴の抽出や誇張といったセンスが求められ，実際に描画する必要もある．このため，「構想」と「制作」の双方に経験的なスキルが必要となるものであるが，これらの行為を代行し，人間の顔を入力することで，システムにより自動での似顔絵の生成を実現している事例がある[26][27]．

編み物

編み物は，ひもを定められた手順で繰り返し変形することにより，目的の模様を生成する．しかしながら，この手順と生成される模様とを対応付けることは容易ではなく，実際にどのような模様が生成可能であるかを「構想」することは容易ではない．このような問題に対して，幾何学移動と遺伝的アルゴリズムを用いることで，編物の出来上がりの模様を生成するシステムを実装している事例がある[28][29]．

俳句

俳句は，5・7・5の拍による，そのなかに季語が含まれる定型詩である．表現したい事柄が思い浮かんでも，それに適した季語の選定や，少ない文字数での表現が求められ，かつ，拍に則った言葉を配置する必要があるため「構想・制作」は容易ではない．それに対し，ユーザが指定した言葉から，連想される季語など俳句に使用する言葉の候補の生成することにより，5・7・5の俳句の制作を支援するシステムを実装している事例がある[30]．

歌

歌は、音階や歌詞に基づいて発声することで生成されるが、個人により発声可能な音域が異なったり、また、適正な発声が行えない調子外れと診断される人も存在する。このため、「構想」された楽曲を実際に歌唱して「制作」することが容易ではないケースも少なくない。そのような問題に対して、楽譜と歌詞を入力することで、楽譜に沿った形で歌詞の音を発声し、歌唱を行うシステムを実装している事例がある[31].

映像

映像作品制作においては、音楽の演奏など、音とキャラクターの動きを対応付けるといふ作業が必要となるケースがある。しかしながら、音楽であれば対応付けには演奏の知識が必要であり、また、知識があっても実際の動作と一致させることは容易ではない。これに対し、MIDI インタフェースから入力された演奏データに基づいて、計算機上の 3DCG によるキャラクターの、入力を考慮した演奏の動作を実現している事例がある[32].

イラスト

イラストは対象物の特徴を捉え、それを簡素化や強調することにより描画する。このとき、同一の特徴を持つ個所については基本的には同じスタイルで描画するため、「制作」には安定した描画スキルが必要となる。これに対し、画像処理により、入力された写真の特徴によりパート化することで、一部の個所の描画を行うだけで、同一の特徴を持つ他の個所も同様の描画が適用されたイラストの「制作」を実現している事例がある[33].

ロゴ

ロゴは、企業などの理念を図案化したものである。このため、デザインにはセンスが必要となり、その「構想・制作」は容易ではない。著者らは、ロゴ化したい文字列を入力することで、策定したロゴの定義に基づいて文字列を装飾し、デザインの原案となるロゴを生成するシステムを提案している[34]. また、対話型遺伝的アルゴリズムにより、よりユーザーの理想に近いものを生成している事例もある[35].

2.3. 制作過程を提示する創作作品における制作支援

前節で示した3種類の制作支援のアプローチのうち、前者の「制作過程のモデル化」が「構想」、後者の「対話型操作による制作過程の疑似体験」、および、「実際の制作の補助」が「制作」の支援となる。制作過程をパフォーマンスとして提示する創作作品では、実演に際して制作過程を理解している必要があるため、「構想」と「制作」の両面における理解が必要となる。また、実演という形態上、図 2-1 でのプロセスにおいて示す失敗の修正が難しいことと、作品の完成までに要する時間についても考慮する必要がある。

上記で示したように、「構想」としては「制作過程のモデル化」というアプローチがある。これについては、実演に先立って事前に作品を「構想」する上で役立ち、また、制作手順が理解できるようになることで、「制作」がスムーズになることが考えられるため、その支援において有効であると考えられる。

また、「制作」については、「対話型操作による制作過程の疑似体験」と「実際の制作の補助」という2つのアプローチがある。このうちの「対話型操作による制作過程の疑似体験」については、練習環境として機能するケースもあり、実演前にその作品の制作を練習することで、実際の「制作」においても有利に働くことが考えられる。

一方で、「実際の制作の補助」については、実際の制作工程の一部を代行するものであるが、これは、対象となる工程について「制作」に関する理解がなくても計算機が代行して、ときに作品を完成まで導いてくれる。そのため、ほとんどの場合において「構想」と「制作」における制作過程の理解に寄与するものではないといえる。また、制作過程をパフォーマンスとして提示する創作作品は、その過程における制作の難しさが、聴衆に与えるパフォーマンスの印象を決定付ける一因となっており、「制作」の補助はそれを緩和させるものになってしまうことが考えられる。以上より、「実際の制作の補助」は制作過程を提示する作品の創作支援としては適さないといえよう。

そこで、「構想」においては「制作過程のモデル化」としての構造解析、「制作」においては「対話型による制作過程の疑似体験」としてのシミュレーションの各手法により、制作過程を提示する創作作品において、その制作手順の理解を補助する。

3. バルーンアートの構造解析

3.1. はじめに

本研究では、バルーンアートを対象に、グラフ理論により作品の構造を定義し、それに基づいて概形入力から制作手順を導出する仕組みを構築することにより、その「構想」の支援を行うことを目的とする。

3.1.1. 背景

バルーンアートとは、バルーンを用いて造形を行う創作作品のことであり、専門的にはバルーンモデリングとバルーンデコレーションとに分けられる[36]。このうちのバルーンモデリングは、ツイストバルーンと呼ばれる細長いバルーンを用いて、動物などの様々な形状を、ときにライブパフォーマンスとして提示しながら制作する。しかしながら、一般にはバルーンアートという言葉で知られているため、本研究では便宜上、バルーンモデリングのことをバルーンアートと表記する。

バルーンアートでは、1本もしくは複数本のバルーンを用いて、動物などの様々な形状を制作する。このとき、バルーンをひねるという単純な操作の組み合わせにより複雑な形状が制作できる。一方で、制作当初の段階では1次元的な線形状であるのに対して、完成の段階ではその線が複雑に入り組んで3次元的な形状となる。このため、完成形状から制作方法を推測することは容易ではない。

創作のプロセスにおいて、「制作」時にバルーンが割れるという失敗の修正がきかない問題もあるが、「構想」において制作方法が導けないことは、自由な創作の妨げになる問題であると考えられる。非熟練者がバルーンアートを制作する際には、解説書等で示される完成形状を確認した上で、制作手順を参考にして、それに基づいて形状を制作していく。そのため、制作したい完成形状の概形を入力することで制作手順を導出する、といった計算機による「構想」の支援が有効であると考えられる。

その実現のためには、バルーンの構造を定義し、計算機によりそれを解析して、そこから制作方法を導出する必要がある。計算機上でバルーンアートの造形を支援する試みとして、バルーンアートを題材としたモデリング教育ソフトが存在する[37]。また、バルーンの物理的な特性をシミュレートすることにより、計算機上で対話的にバルーンを操作して造形を可能にするものも存在する[38]。しかしながら、上記の事例では、計算機上で疑似的にバルーンの制作は行えても、構造解析により制作手順を提示する機能は実現されておらず、実環境における自由な形状の作成は支援できていない。

3.1.2. 目的

本研究では、バルーンアートの「構想」の支援を目的に、制作したい形状の概形を入力することで、バルーンアートの解説書に記載されているような制作手順を導出する、構想支援システムを構築する。

なお、バルーンアートには複数本のバルーンを用いて制作される作品もある。しかしながら、本研究では1本のバルーンによって制作されるバルーンアートが一筆書き可能であるという性質に着目して、その構造をモデル化するため、1本のバルーンによるバルーンアートのみを対象とする。

構想支援システムへの応用を見据え、まず、グラフ理論に基づいてバルーンアートの構造をモデル化し、その解析に基づいて形状成立の判定、制作手順の導出、および、難易度の評価の各手法を提案する[39]。バルーンアートの形状をグラフで表現することで、そのグラフは一筆書き可能であるという性質を持つオイラーグラフとなり、一筆書きの経路であるオイラー経路から、制作手順の導出が可能となる。このとき、たとえ制作手順通りに制作しても、実際にバルーンが完成形状の形で固定されるかまでは判断できない。このため、形状が成立する条件をグラフで扱える形で設定することにより、その判定を可能とする。また、バルーンアートは作品によって制作手順を複数持つものもあるが、制作時のバルーンの変形操作の難しさを数値化することにより、導出したそれらの制作手順の難易度の評価が可能となる。

また、提案手法に基づき、バルーンアートの概形を入力することで、その制作手順を導出する構想支援システムを構築する。グラフがオイラー経路を持つことで、バルーンアートの制作手順が導出できる。このため、入力された概形をグラフ化し、オイラーグラフとなるように、一定距離内に存在する複数のグラフの頂点を1つの頂点になるようグラフを変形させ、以降、先述の提案手法により制作手順を導出する。

これら提案手法を実際の作品に適用することで、その有効性を確認する。また、被験者実験により、構想支援システムにより実際のバルーンアートの「構想」と、「構想」に基づいた「制作」が行えることを確認する。

これにより、制作過程を提示する創作作品であるバルーンアートにおいて、「制作過程のモデル化」というアプローチにより、「構想」の支援を実現する。

3.2. バルーンアートについて

バルーンアートでは、バルーンを手でひねることによりパートを生成し、生成したパートの位置と空気圧を利用して、生成したひねり目を固定する。これをパートの数や大きさを変えて繰り返していくことにより、様々な形状が制作可能となる。

図 3-1 は、そのようにして制作されたウサギとワニとキリンの例である。

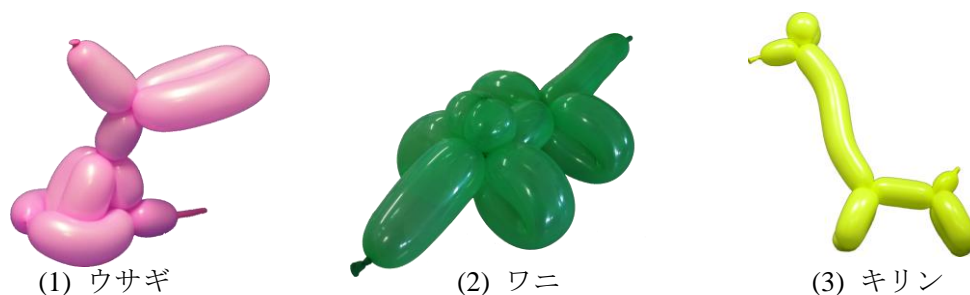


図 3-1 バルーンアートの例

3.2.1. 制作方法の概要

バルーンアートの制作には、一般的に、最大膨張時に幅5cm、長さ160cmとなるツイストバルーンを用いる。図 3-2 (1)に示すように、バルーンの両端を結び目、先端と呼び、本稿の図はすべて左側を結び目、右側を先端とする。また、図 3-2 (2)のように、バルーンをひねることをツイストと呼び、それにより生成されるパートをバブルと呼ぶ。

ツイストにより生成されたひねり目は、そのままでは元の状態に戻ろうとする力が働いて固定されない。このため、ひねり目同士、あるいは、ひねり目と結び目、ひねり目と先端をさらにツイストすることで、バブルの空気圧を利用して固定する必要がある。バルーンアートでは、このひねり目を固定する行為をロックと呼ぶ。



図 3-2 バルーンの初期状態とツイスト操作

3.2.2. ロック手法

バルーンアートには、ひねり目をロックするための手法がいくつかある[40][41][42].

ロックは、バブル内部の空気が外側に作用する空気圧を用い、複数のバブルを組み合わせることにより、ひねり目が固定されて元に戻らない状態にすることにより成立する.

基本的なロック手法を以下に示す. なお、以下の図では、バブルを大文字のアルファベット、バブルとバブル間のひねり目、結び目、先端を小文字のアルファベットで表す.

ロックツイスト

図 3-3 のように、c の位置で折り返し、b と d をツイストしてロックする. 4 個のバブルによりロックする、最も基本的なロック手法である.

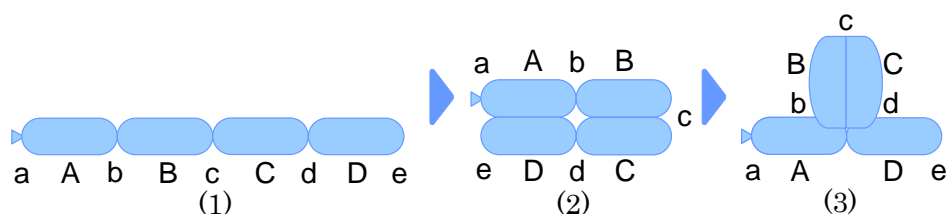


図 3-3 ロックツイスト

このとき、図 3-4 で示すように、図 3-3 の B と C のバブルの間にもう 1 つバブルがあるような場合においても、バブルを同一方向にツイストすることにより、同一の回転方向に力が掛り続けるため、その間にあるバブルも固定される.

これは、B と C の間のバブルが何個でも成立するため、4 個以上のバブルにおいてもツイストの回転の向きを揃えれば、4 個のバブルを固定するロックツイストと同様のツイストとなる.

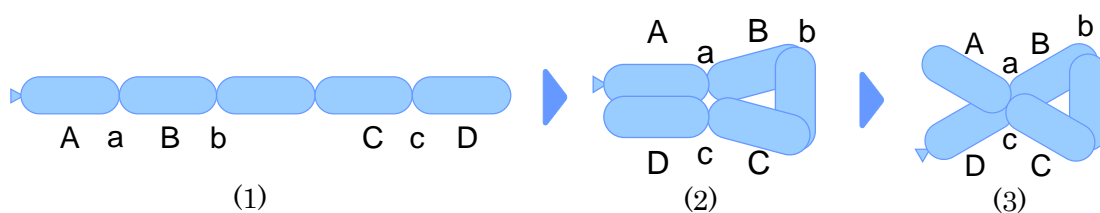


図 3-4 5 個のバブルでのロックツイスト

ループツイスト・ピンチツイスト

図 3-5のようにBのバブルを輪にして、bとcをツイストしてロックする。図 3-6のように、中央のバブルが小さい場合はピンチツイストと呼び、バブルが小さい分だけループツイストよりも割れる確率も高まるなど、ツイストが難しくなる。

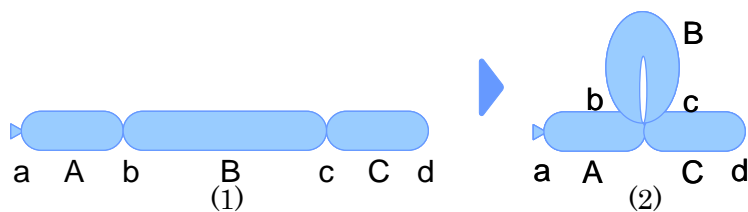


図 3-5 ループツイスト

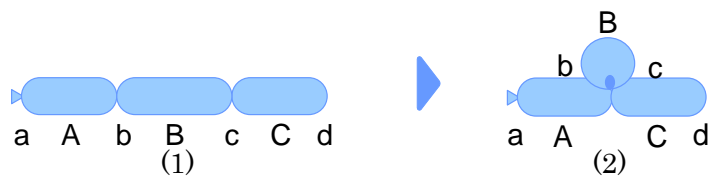


図 3-6 ピンチツイスト

チューリップツイスト

図 3-7 (2)の点線のように、バルーンの口先をバルーンの中に押し込み、押し込んだ口先ごとツイストすることによりバブルを生成する手法である。

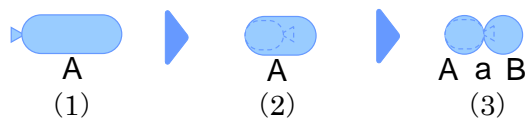


図 3-7 チューリップツイスト

チューリップツイストは1つのバブルを用いるロック手法であり、また、ほかにも空気の入っていないバルーンの先端を巻きつけてバブルを固定する手法などもあるが、これらは特殊な手法であるため、本研究においては対象外とする。

3.3. グラフ理論に基づく構造解析手法の提案

グラフ理論を用いることにより[43], バルーンアートの構造を解析する. まず, バルーンアートをグラフとして定義する. バルーンアートは, その形状が成立するための要件として, すべてのひねり目が固定されている必要がある. そのため, 形状が成立するグラフの状態か判定する手法を提案する. また, 形状が成立した場合に, そのグラフから制作手順を生成する手法を提案する. 制作手順は複数個導出される可能性もあるため, もっとも簡単な作り方が選択できるよう, 制作手順の難易度を評価する手法を提案する.

また, 提案手法に基づいて, 制作したいバルーンアートの概形を入力することで, その制作手順を導出し, 一般的な解説書に記載されている表記による出力を可能とする, 構想支援システムを構築する.

3.3.1. 構造解析

グラフ理論に基づいて, バブルをグラフの辺, バルーンの結び目と先端, および, ひねり目をグラフの頂点と見立てることにより, バルーンアートの構造を解析する.

1本のバルーンにより作成されるバルーンアートは, グラフとしたときに一筆書きが可能である. この一筆書き可能である状態のグラフを, グラフ理論ではオイラーグラフという. このグラフに対して, グラフのすべての頂点を一度だけ通る経路であるオイラー経路を求めることにより, 形状の制作に必要なバブルの隣接順序と, ロックするひねり目の位置が明らかとなる.

グラフがオイラーグラフとなりバブルの順序とロックの位置が確定しても, その時点では非固定の頂点が存在する可能性もあり, バルーンアートとして成立する形状の要件を満たしているか確定しない. このため, そのグラフがバルーンアートとして形状が成立するか否かの判定条件も定義する.

また, これら手法により, 形状がバルーンアートとして成立することが判明しても, バルーンアートにはロックの順序などに明確な決まりがなく, どのような手順で制作をしても, 最終的には形状を完成させることが可能である.

そこで, グラフの経路から制作手順を決定するアルゴリズムを考案する. バルーンアートの解説書には, 一般的に人が作り易い手順が掲載されているように見受けられる. そのため, 解説書に掲載されるような制作手順を導出するアルゴリズムを提案する.

構造の導出

グラフ理論を用いて、バルーンアートの構造を定義する。

グラフの頂点に接続する辺の数を次数という。オイラーグラフとは、頂点の次数がすべて偶数、もしくは2頂点の次数のみが奇数で、他の頂点の次数がすべて偶数であるようなグラフである。グラフがオイラーグラフか否かは、隣接行列を用いることで容易に判別可能である。隣接行列とは、ある頂点における、自分以外のそれぞれの頂点における次数について、すべての頂点を対象に行列として表したものである。

グラフの内部表現として隣接行列を用い、例として図 3-8 (1)に示す完成形状をグラフ化したものが、オイラーグラフであることを示す。

(1)は、2箇所がロックされた8個のバブルからなるバルーンアートであるが、バブルを辺、ひねり目を頂点としてグラフで表すと(2)になる。このグラフを隣接行列で表すと表 3-1となり、aとgの2頂点の次数のみが奇数であるため、隣接行列より(2)はオイラーグラフであることが分かる。

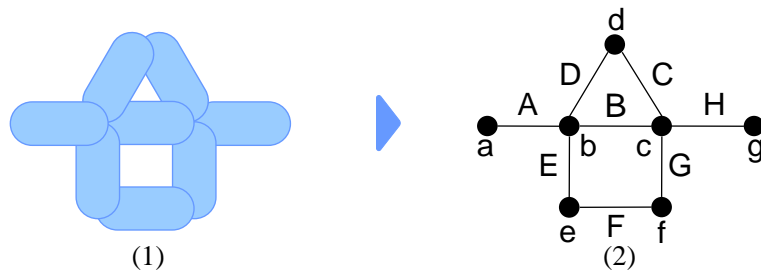


図 3-8 バルーンのグラフ化

表 3-1 図 3-8 (2)の隣接行列

	a	b	c	d	e	f	g
a		1	0	0	0	0	0
b	1		1	1	1	0	0
c	0	1		1	0	1	1
d	0	1	1		0	0	0
e	0	1	0	0		1	0
f	0	0	1	0	1		0
g	0	0	1	0	0	0	

つぎに、総当り法によりグラフのすべてのオイラー経路を求める。オイラー経路は、すべての辺を1度だけ通る頂点と辺の列である。得られた経路における辺の順序がバブルの隣接順序に対応し、経路中に同一の頂点が複数回出現した場合、それらの組み合わせがロックの位置となる。

図 3-8 (2)の場合、図 3-9 で示すように、6通りのオイラー経路が存在する。いずれの経路においても頂点 b と c が2度出現することから、それらをロックすることで目的の形状が完成する。なお、図中の点線はロックする頂点のペアを示している。ロック手法は、通常は 3.2.2 項で示したロックツイストとなるが、ロックする頂点のペアが隣接している場合、バブルの長さにより、ループツイスト、もしくは、ピンチツイストとなる。

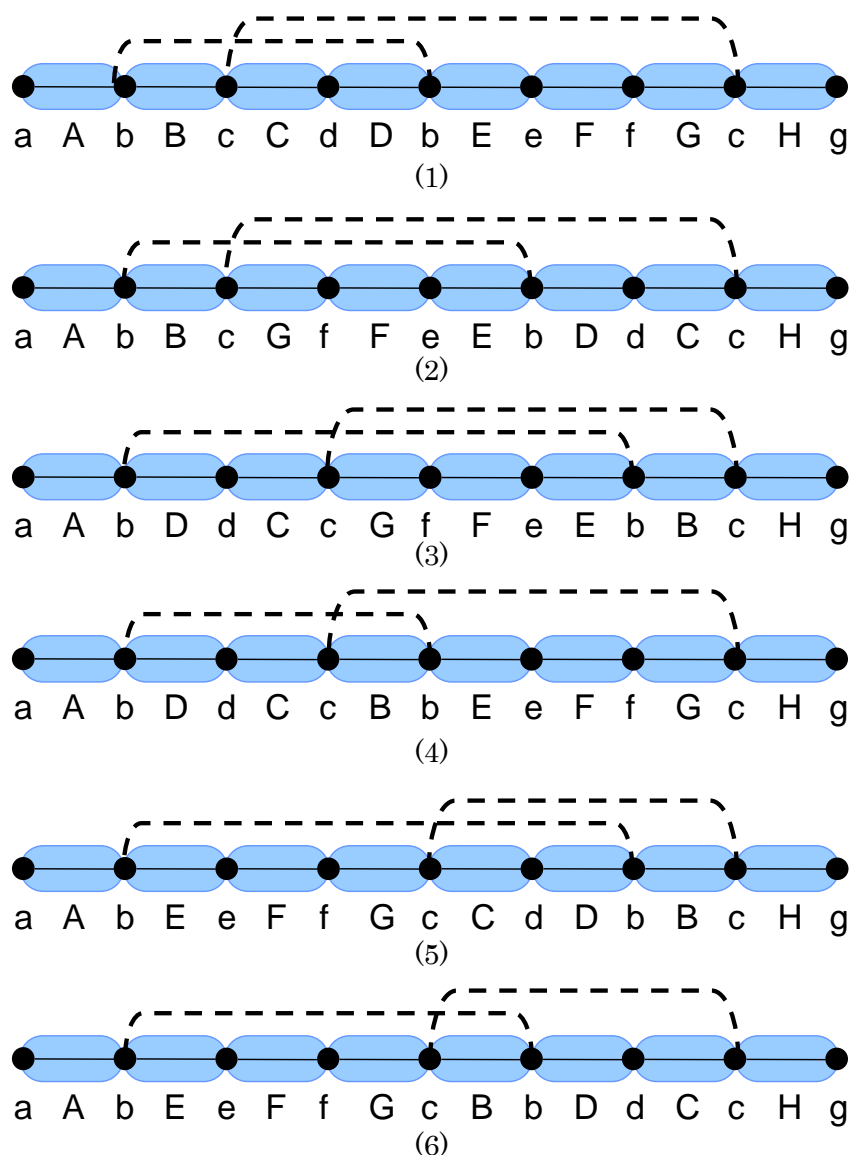


図 3-9 図 3-8 (2)から得られた複数のオイラー経路

形状の成立判定

バルーンアートは、ツイストにより生成された、すべてのひねり目がロックされることにより形状が固定される。グラフの経路において、ひねり目がロックにより固定される条件は、ひねり目に対応する頂点が

- 1) ロックする頂点そのものである
- 2) ロックされた頂点を含む閉路にある

のいずれかを満たせばよい。なお、経路の始点と終点は、それぞれ結び目と先端であるため、常に固定されているものとして考える。

非固定頂点が存在する例を図 3-10に示す。図中の黒丸が非固定の頂点を表している。(1)はツイストによるロックがないため、一旦は右図で示す完成形状になるものの、頂点が固定されず、手を離すことにより初期状態に戻ってしまう。また、(2)はロックはあるが、そのロックにより固定されない頂点が2点あるため、同様に完成形状が固定されない状態となる。

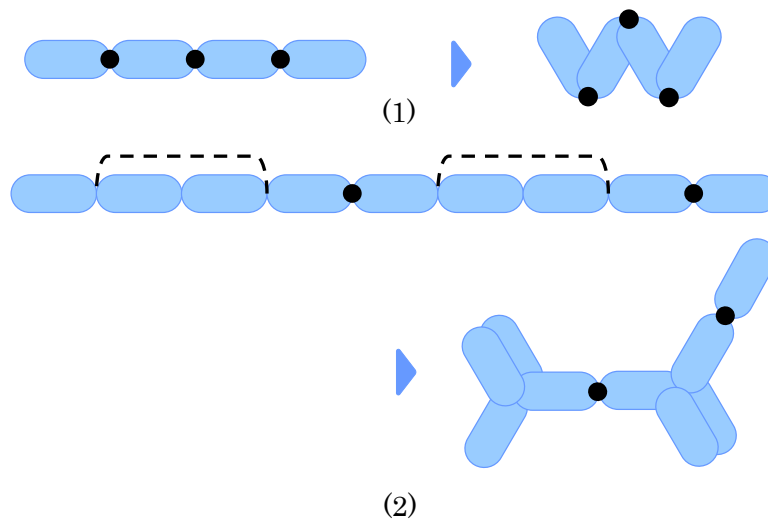


図 3-10 非固定の頂点が存在する形状の例

制作手順の決定

バルーンアートでは、ツイストしてバブルを生成する操作と、ロックしてひねり目を固定する操作を繰り返しながら形状を制作する。その過程において、どのバブルをどのような順序で生成し、どのタイミングでロックするかは自由度がある。このため、解説書などでは作りやすさを考慮した手順が提示されているように見受けられる。

先述のオイラー経路による構造の導出では、バブルの個数やそれらの隣接関係、どのひねり目をロックするかは表されている。しかしながら、このような制作の手順を明示していない。

そこで、導出したオイラー経路に基づき、バブルの生成順序、ロックするタイミングに関する制作手順を決定する方法を提案する。

本項の「構造の導出」では、バルーンアートの完成形状をグラフで表現し、オイラー経路を求めている。反対に、オイラー経路から完成形状へ至るための手順は、オイラー経路から元になったグラフを再構成することに対応し、制作手順は、この再構成の過程で必要なツイストやロックの手順に対応する。

ここではまず、オイラー経路、バルーンの初期状態、ツイストしてひねり目とバブルを生成する操作、2つのひねり目をロックする操作を形式的に表現する。そのあと、オイラー経路から制作手順を決定するアルゴリズムを示す。

このアルゴリズムでは、経路の左側、つまり、結び目の頂点側からひねり目とバブルを生成していき、ロックすべきひねり目が出現したら、そのロックを行う制作手順を生成する。

頂点が n 個のオイラー経路を、以下のように頂点 v_i と辺 e_i の列により表現する.

$$v_1 e_1 v_2 e_2 v_3 \dots v_{n-1} e_{n-1} v_n$$

ここで、頂点 v_1 と v_n は結び目と先端に対応する. v_i や e_i の具体的な値は $f(v_i)$, $f(e_i)$ で表し、図 3-2 (1) の経路ならば、

$$f(v_1) = a, \quad f(e_1) = A$$

である. バルーンアートの初期状態は頂点 $f(v_1)$, $f(v_n)$ と 1 つのバブル e から構成され、オイラー経路と区別するため、以下のようにブラケットを用いて表現する.

$$[f(v_1) e f(v_n)]$$

同様に、頂点 $f(v_i)$, $f(v_n)$ を両端にもつバブル e をつぎのように表す.

$$[f(v_i) e f(v_n)]$$

このバブルに対しツイストを 1 回行い、ひねり目 $f(v_{i+1})$ とバブル $f(e_i)$ を 1 つずつ生成する操作を $Twist(f(e_i))$ と表し、ツイスト後の状態をつぎのように表す.

$$[f(v_i) f(e_i) f(v_{i+1}) e f(v_n)]$$

完成形状のグラフを $G = (V, E)$ で表す. ここで、 V , E はそれぞれ頂点の値の集合、バブルの値の集合である.

はじめは $V = \{f(v_1)\}$, $E = \{\}$ とし、完成形状をつくる過程は、初期状態からツイストを繰り返し、生成されたひねり目の頂点の値 $f(v_{i+1})$ とバブルの値 $f(e_i)$ をグラフに追加することで表現する. また、ロックの操作は、ツイストにより生成された頂点 $f(v_{i+1})$ と等しい値がすでに V に含まれているとき行うものとし、このロックの操作を $Lock(f(v_{i+1}))$ で表す.

図 3-11 に、オイラー経路に基づき、完成形状のグラフを構築しながら、制作手順を決定するアルゴリズムを示す. なお、アルゴリズムにおいて $P = [P | x]$ は、リスト P の後方から x を追加することを表す.

入力：オイラー経路 $v_1e_1v_2e_2v_3\cdots v_{n-1}e_{n-1}v_n$

出力： P (*Twist, Lock*) のリスト

$P = []$, $V = \{f(v_1)\}$, $E = \{ \}$

for($i = 1; i \leq n - 1; i = i + 1$)

{

if($i < n - 1$)

 {

$P = [P | Twist(f(e_i))]$

 }

if($f(v_{i+1}) \in V$)

 {

$P = [P | Lock(f(v_{i+1}))]$

 }

else

 {

$V = V \cup \{f(v_{i+1})\}$

 }

$E = E \cup \{f(e_i)\}$

}

図 3-11 制作手順決定アルゴリズム

図 3-8 (1)を例にアルゴリズムの実施例を示す. 図 3-12は, 図 3-8 (1)の初期状態と, 各ロックの前後の状態を示したものである. 黒丸は固定された, 白丸は非固定の頂点を表している.

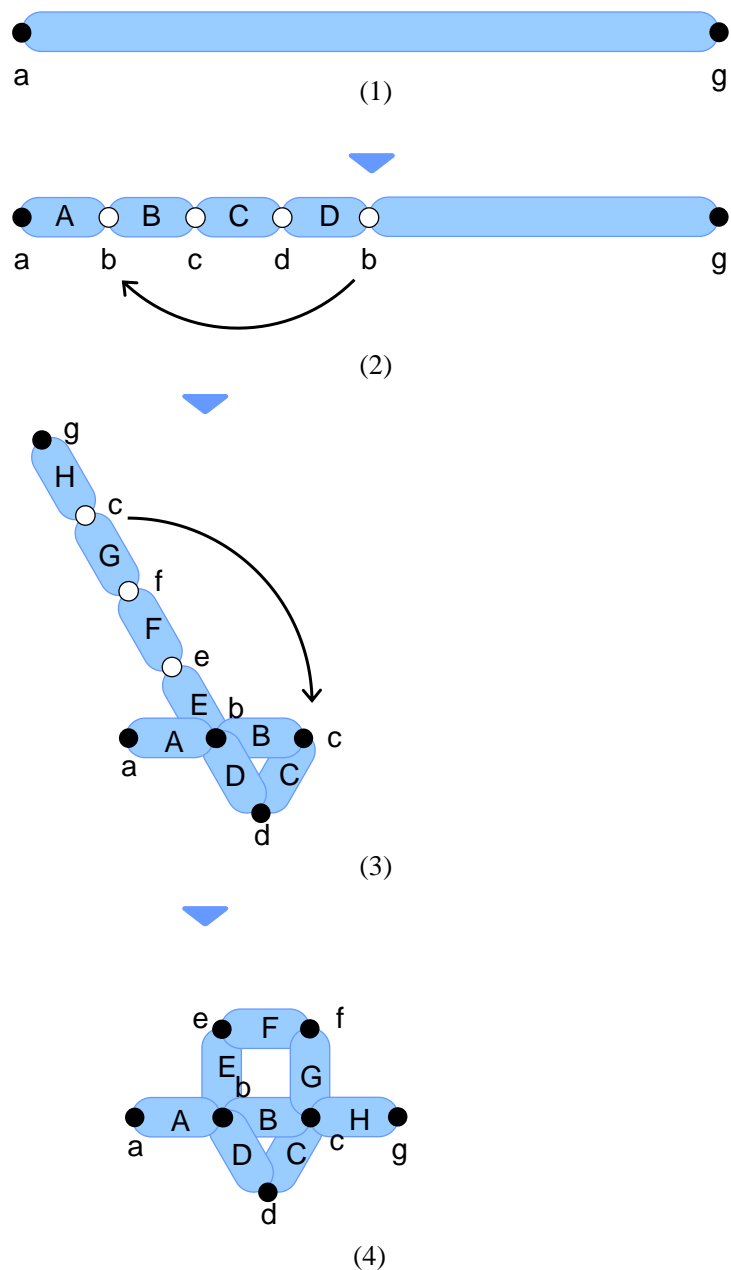


図 3-12 アルゴリズムに基づいた図 3-8 (1)の制作手順

図 3-8 (1)において、アルゴリズムに入力されるオイラー経路は、

a A b B c C d D b E e F f G c H g

であり、 $n=9$ である。このとき、アルゴリズムの各変数の初期値は

$$P = []$$

$$V = \{f(v_1)\} = \{a\}$$

$$E = \{ \}$$

となり、これは、図 3-12 (1)で示すような、バブル生成前のバルーンの初期状態に対応する。

$i=4$ までループを実施すると、各変数の値はつぎのようになる。このとき P の値は、図 3-12 (2)で示すように、ツイストにより A, B, C, D の4つのバブルを順に生成し、その後 b をロックする制作手順を表す。

$$P = [Twist(A), Twist(B), Twist(C), Twist(D), Lock(b)]$$

$$V = \{a, b, c, d\}$$

$$E = \{A, B, C, D\}$$

$i=8$ までループを実施すると、各変数はつぎのようになる。このとき P の値は、 b をロックしたあと、図 3-12 (3)で示すように、ツイストにより E, F, G の3つのバブルを順に生成して、その後 c をロックする制作手順を表す。

$$P = \left[\begin{array}{l} Twist(A), Twist(B), Twist(C), Twist(D), Lock(b), Twist(E), \\ Twist(F), Twist(G), Lock(c) \end{array} \right] V = \{a, b, c, d, e, f, g\}$$

$$E = \{A, B, C, D, E, F, G, H\}$$

3.3.2. 難易度評価

前節3.3.1の「形状の成立判定」では、ひねり目がロックにより固定される条件を示しているが、ここでは、まず、前節で示した図 3-8 (1)の制作手順の過程において、ひねり目が固定されるかどうかを確認する。

図 3-12 (2)の状態では、白丸で表したひねり目 b, c, d , b は固定されておらず、図 3-12 (3)のように b をロックして、はじめて固定の条件が満たされる。同様に、図 3-12 (3)の状態においても、白丸で表したひねり目 e, f, c は、 c をロックするまで、固定の条件を満たさない。

このように、制作の過程においては、しばしば、固定されないひねり目が現れる。このため、ロックを実施して固定の条件を満たすまで、ひねり目が戻らないように手で押さえるなどして、仮固定しながら作っていく必要がある。

このとき、仮固定しなくてはならないひねり目が多いほど、それらへの配慮が必要になるため、一般に制作は難しくなる。また、グラフが経路を複数持つ場合、制作手順により非固定の頂点個数に違いが生じる場合がある。

そこで、ロックを1つの単位として、ロックするまで仮固定しておく必要があるひねり目の個数の平均値と最大値を用い、その手順における制作の平均的、および、局所的な難易度を表すこととする[44]。

前回のロックからつぎのロックまでの間に出現する非固定頂点数の平均値、および、最大値を算出するために、図 3-11のアルゴリズムを拡張したものを図 3-13に示す。図 3-13において、変数 c は前回のロックからつぎのロックまでに出現した非固定頂点の個数、変数 Q はロック時の c の値を格納するリストとする。

入力：オイラー経路 $v_1e_1v_2e_2v_3\dots v_{n-1}e_{n-1}v_n$

出力： P (*Twist, Lock*) のリスト

$P = []$, $V = \{f(v_1)\}$, $E = \{ \}$, $c = 0$, $Q = []$

```
for( $i = 1; i \leq n - 1; i = i + 1$ )
{
    if( $i < n - 1$ )
    {
         $P = [P | Twist(f(e_i))]$ 
         $c = c + 1$ 
    }

    if( $f(v_{i+1}) \in V$ )
    {
         $P = [P | Lock(f(v_{i+1}))]$ 
         $Q = [Q | c]$ 
         $c = 0$ 
    }
    else
    {
         $V = V \cup \{f(v_{i+1})\}$ 
    }

     $E = E \cup \{f(e_i)\}$ 
}
```

図 3-13 図 3-11 に難易度算出処理を追加したアルゴリズム

これを図 3-9 (1)の経路で実施すると $Q=[4,3]$ となり, その平均値は3.5, 最大値は4となる. 同様に, 図 3-9すべての経路についての平均値と最大値を表 3-2に示す.

表 3-2 図 3-9の各オイラー経路への適用結果

経路	平均値	最大値
(1)	3.5	4
(2)	3.5	5
(3)	3.5	6
(4)	3.5	4
(5)	3.5	6
(6)	3.5	5

表より, すべての経路で平均値は同一であるが, 最大値は(1)および(4)の経路が最も少なくなり, (3)および(5)の経路が最も多くなることから, (1)と(4)の経路が最も簡単な制作手順であり, (3)と(5)の経路が最も難しい制作手順であると考えられる.

3.4. 構想支援システム

バルーンアートは、一筆書きなどの形状が成立する要件を満たす完成形状を「構想」することが容易ではない。そこで、概形を入力することによりそれをオイラーグラフに整形し、そこから制作手順を導出する構想支援システムを構築する[45].

まず、図 3-14 (1)のようにバブルを配置して制作したい形状を入力する。つぎに、(2)で示すように一定の距離内にある頂点同士を統合する。これにより、(3)で示すようにオイラーグラフを生成する。以降は、前節までに示した手法に基づき、制作手順を導出する。

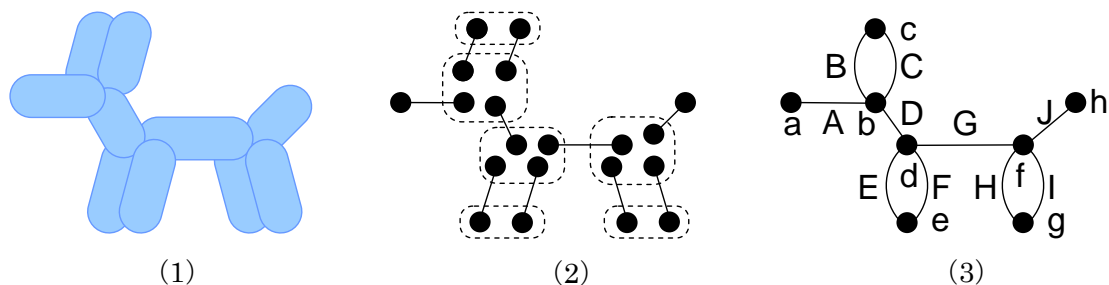


図 3-14 概形のオイラーグラフ化

構想支援システムは、「編集モード」と「表示モード」からなり、「編集モード」では図 3-15 (1)で示すように「+」ボタンでバブルを追加でき、(2)で示すように画面中のバブルの端をドラッグすることにより、その位置の変更が可能である。また、(3)で示すように「-」ボタンでバブルの削除が行える。

図 3-16 は「編集モード」で図 3-1 (1)で示したウサギを入力しているところである。図 3-17 のように形状を入力したら、「三角」ボタンで「表示モード」に切り替えることにより、入力した概形の制作手順を提案手法に基づいて解析し、一般的なバルーンアートの解説書で提示されているようなバブルの配置とロック個所が示された図を表示する。図 3-1 (1)のウサギは、図 3-18 で示すような制作手順で実際に制作が行えることがわかる。

また、制作手順表示モードへの切り替えを図った際、形状が成立していなければ、図 3-15 (4)で示すように

- グラフが一筆書きになっていません
- 固定されていない頂点があります

というメッセージを表示して、形状が成立するようにバブルを再配置することを促す。

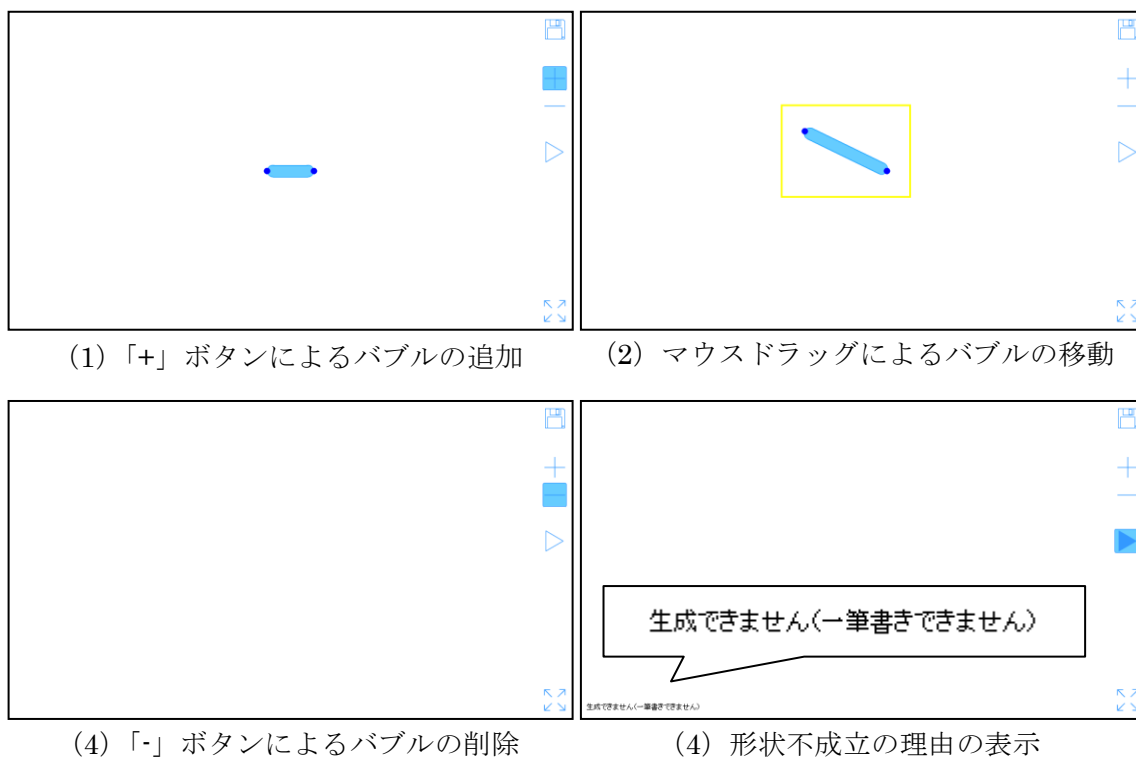


図 3-15 編集モードの機能



図 3-16 編集モードで制作中の図 3-1 (1)のウサギ

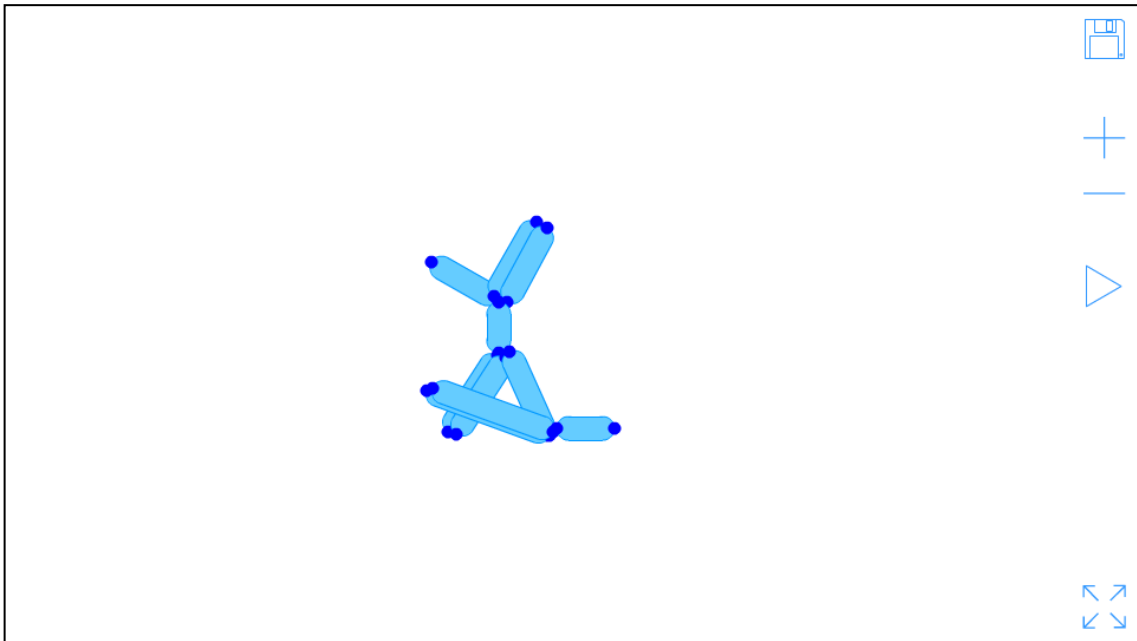


図 3-17 編集モードで制作した図 3-1 (1)のウサギ

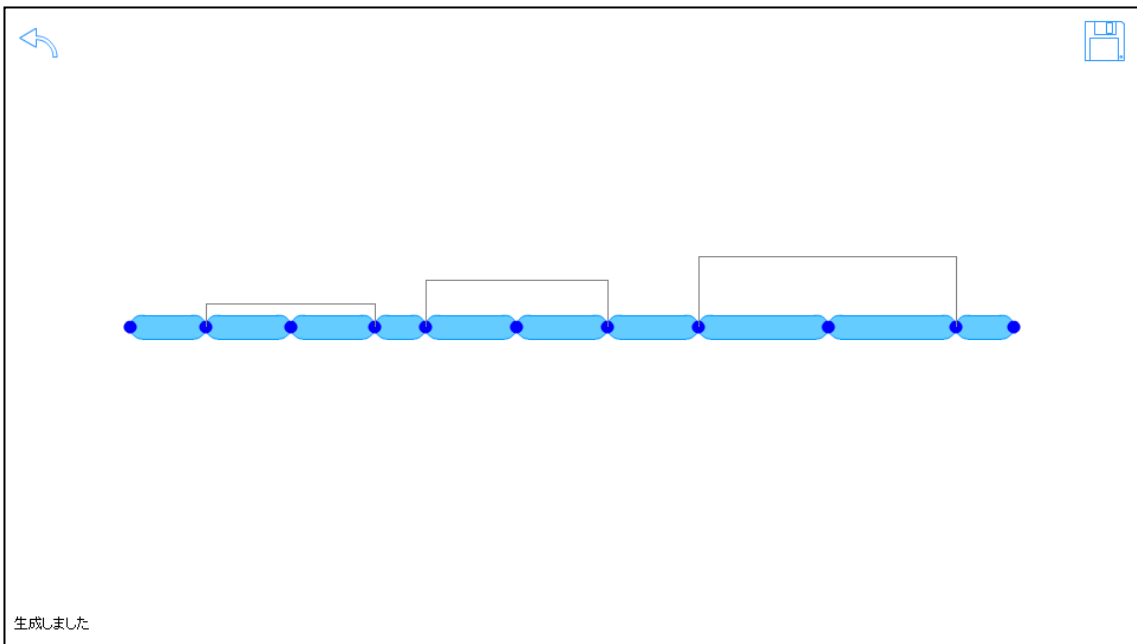


図 3-18 表示モードによる図 3-1 (1)のウサギの制作手順の表示

3.5. 評価と考察

実際のバルーンアート作品を対象に比較実験を行い、構造解析に基づき提案した制作手順導出と難易度評価の各手法の有効性を確認する。また、被験者実験においても提案手法の有効性を確認するとともに、構築した構想支援システムにより、実際のバルーンアートが「構想」でき、それが「制作」に結びつくか確認する。

比較実験では、提案手法により求まる制作手順と難易度が、実際に用いられる制作手順や、人間の感じる難しさと一致するかを確認する。そのため、ロックの順序、オイラー経路、制作物をそれぞれ比較することにより、各観点からの総合的な評価を行なう。対象とする作品は、図 3-19 に示す、バルーンアートにおいて動物を作る際の最も基本的な形状である「ベーシックアニマル」と、図 3-20 で示す、2 種類のロック手法が必要で、一度ロックした頂点を再度ロックする必要がある「オウム」とする。また、その他のバルーンアートについても、解説書に掲載された手順と、提案手法によって導出された手順とを比較することで、その有効性を確認する。

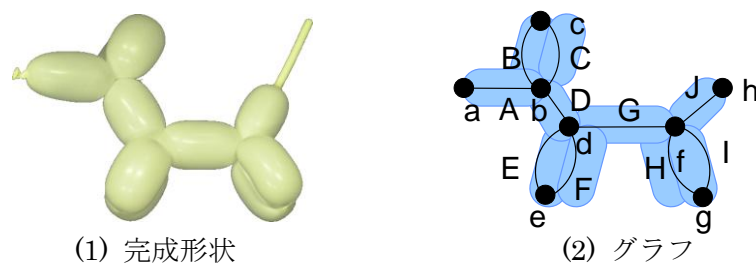


図 3-19 ベーシックアニマル

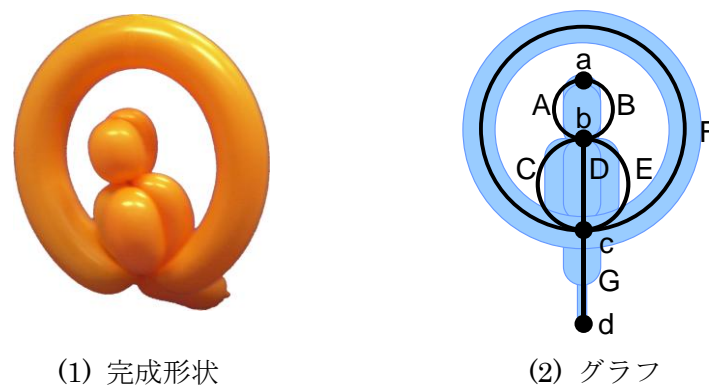


図 3-20 オウム

3.5.1. ロック順序による違い

ベーシックアニマルは、オイラー経路の始点が2点に限られ、かつ、どちらの経路もロック位置は等しくなるため、図 3-21 のオイラー経路のみを持つ。ここでは、左端のバブルから順に生成し、i, ii, iii の3つのロックの実施順序を変えたときの、非固定頂点数の平均値と最大値について比較する。

例えば、i → ii → iii の順でロックする場合には、A, B, C のバブルを生成したあとで b をロックし、つぎに、D, E, F のバブルを生成して d をロックし、G, H, I のバブルを生成したあと f をロックする。また、i → iii → ii の順でロックする場合には、まず、A, B, C のバブルを生成したあとで b をロックし、つぎに、D, E, F, G, H, I のバブルを生成して d をロックし、最後に f をロックする。

これら手順を比較すると、表 3-3 に示すように、i → ii → iii の順に制作する手順が、平均値、最大値ともに非固定頂点数が最も小さくなる。

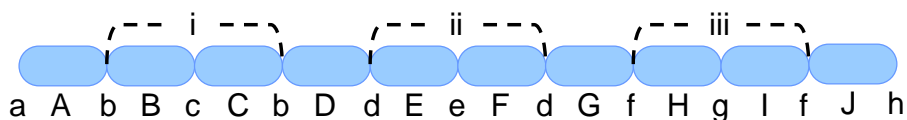


図 3-21 ベーシックアニマルのオイラー経路

表 3-3 図 3-21 の各制作手順における非固定頂点数

	ロック手順	平均値	最大値
(1)	i → ii → iii	3	3
(2)	i → iii → ii	4	6
(3)	ii → i → iii	4	6
(4)	ii → iii → i	5	6
(5)	iii → i → ii	6	9
(6)	iii → ii → i	6	9

これは、バルーンアートの解説書で推奨する手順でもあり、図 3-11 のアルゴリズムでもこの手順を生成する。一般に、左側から順にバブルを生成し、ロックできる頂点が現れたらすぐにロックを実施する手順は理解しやすく、また、非固定頂点数も少なくなることから、提案した制作手順決定アルゴリズムは妥当であると考えられる。

これらより、非固定頂点数は、制作手順の難易度を評価するための、1つの基準として用いることができると考えられる。

3.5.2. 経路による違い

図 3-22に示すように、オウムには8種類のオイラー経路が求まる。

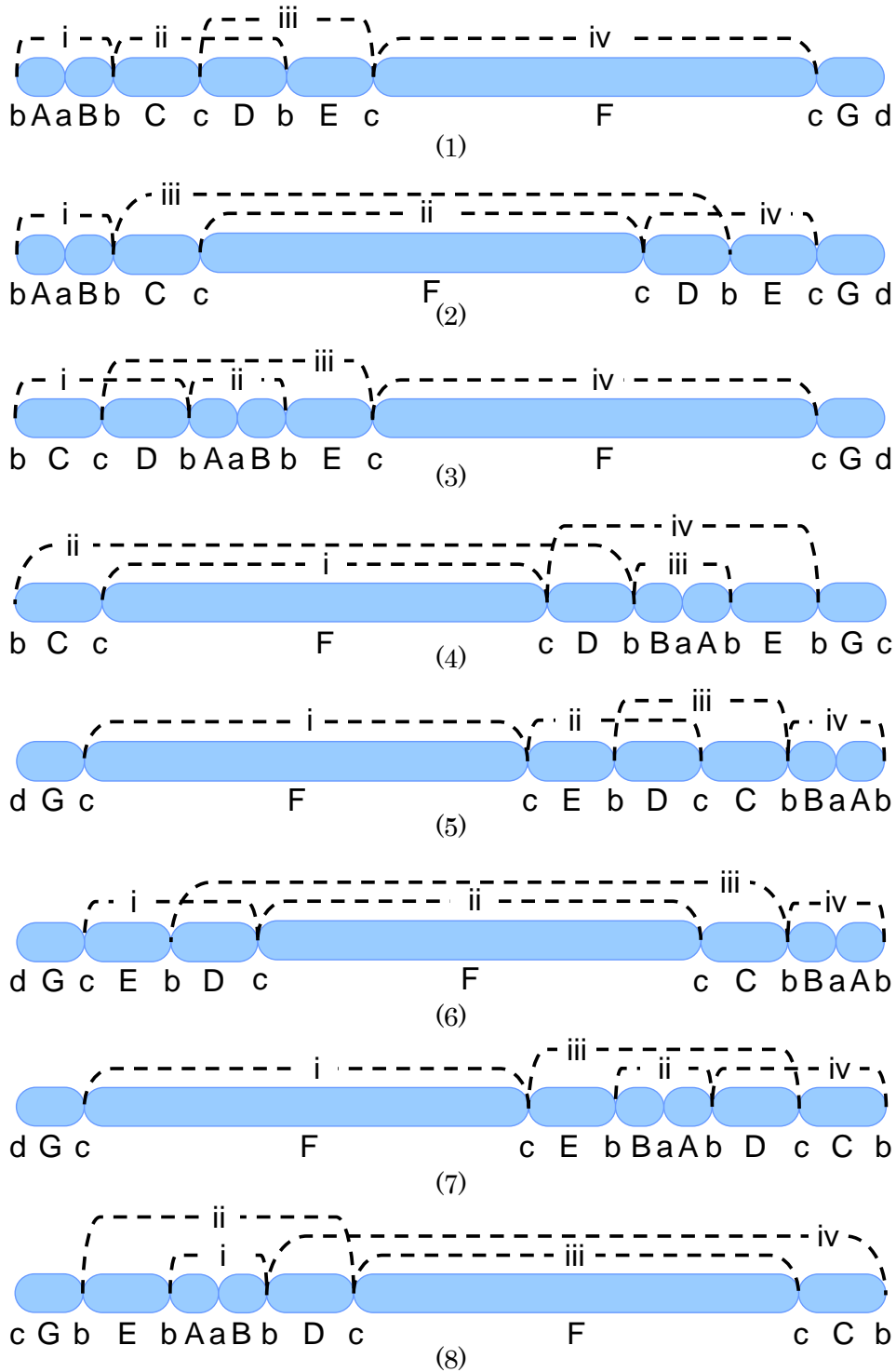


図 3-22 オウムのオイラー経路とロックの順序

図 3-22のロックを表す点線に付加されたローマ数字は、制作手順決定アルゴリズムにより生成された、その経路におけるロックの順序を表している。

提案した難易度評価手法により求まる、制作過程における各ロック時の非固定頂点数の平均値と最大値を表 3-4に示す。表より、いずれの経路を採用しても、平均値は同一であることがわかる。一方で、最大値は(1)、(2)、(3)、(4)、(5)の経路がそれぞれ最も低い。

バルーンアートの解説書では、オウムは一般的に(1)の手順によるものが掲載されているが、これは、提案手法により最大値が最も低いと評価されたものと一致する。

表 3-4 図 3-22 の各オイラー経路における非固定頂点数

経路	平均値	最大値
(1)	1.25	2
(2)	1.25	2
(3)	1.25	2
(4)	1.25	2
(5)	1.25	2
(6)	1.25	3
(7)	1.25	3
(8)	1.25	4

このことから、前項同様に、提案手法により決定される制作手順、および、その難易度は妥当なものであるといえる。

3.5.3. 制作物による違い

ベーシックアニマルとオウムの比較を表 3-5に示す。

表中のロック重複とは、例えば、図 3-22 (1)のiiとiiiのようにロックの範囲が重複している回数を指す。また、表における平均値と最大値は、表 3-3および表 3-4において最低値を取った制作手順のものである。

これらを比較すると、ベーシックアニマルの平均値と最大値が、ともに3であるのに対して、オウムは平均値が1.25、最大値が2と、いずれもオウムが低い。グラフの辺と頂点の個数も、ベーシックアニマルが10と8、オウムが7と4でオウムが少ない。一方で、ロックの回数はオウムが1だけ多く、ロックの種類も、ベーシックアニマルがロックツイストのみの1に対し、オウムはロックツイストとループツイストの2と1だけ多い。また、ロック範囲の重複回数も、ベーシックアニマルが0に対してオウムは1と1だけ多い。

これらは、ベーシックアニマルと比較して、オウムは複雑なロックを行う必要性があることを示している。3個のバブルの生成と1回のロックという、同一操作により構成されるベーシックアニマルは、最も制作が簡単な動物の形状であるといわれることから、実際の制作においてはオウムのほうが難易度が高いといえる。

以上より、異なる形状のバルーンアートを比較する場合には、非固定頂点数の平均値と最大値のみを難易度の基準とするのではなく、表に示したような、バブルとひねり目の個数や、ロックの回数、種類、範囲が重複しているか、といった要素などから、複合的に難易度を評価する必要があるといえる。

表 3-5 ベーシックアニマルとオウムの比較

	ベーシックアニマル		オウム
平均値	3	>	1.25
最大値	3	>	2
辺数	10	>	7
頂点数	8	>	4
ロック回数	3	<	4
ロック種類	1	<	2
ロック重複	0	<	1

3.5.4. 解説書の手順との比較

3.5.1 ならびに 3.5.2 で触れたように、解説書に掲載されている制作手順は、一般に人間にとって制作しやすいものが掲載されていると考えられ、これが提案手法の有効性を確認する指標の1つになるといえる。

そこで、解説書に掲載されている図 3-23 に示すバルーンアートを対象に[46]、掲載された手順を真値と仮定して、掲載されている制作手順の経路とロック順序が、提案手法に基づいて導出される平均値と最大値が最小のものと一致するかを調査する。なお、ベーシックアニマルと同一の手順で制作できる作品や、ツイストが一回のみで複数の制作手順を持たない作品、複数本から形成されている作品は調査対象から除外する。また、特殊なツイストを用いている作品は、3.2.2 で示したチューリップツイストが用いられているものについては、それを行わない形状としたものについて比較を行い、それ以外の、提案手法において扱えない構造となるものについては対象外とする。

調査結果を表 3-6 に示す。経路については、解説書掲載のものと提案手法により導出された最も簡単なものが一致した。一方で、順序についても 7 例中 6 例が一致したが、異なるものも存在した。解説書に掲載されたエレガントスワンの制作手順は、2 つのバブルの生成と、その 2 つのバブルのロックという 3 つの工程を一度のツイストで行う上級者向けの方法を採用している。これは本研究では想定していない特殊なツイストで、例外であるといえる。しかし、普通に制作するよりも仮固定が必要なひねり目の数やツイスト、ロックの回数が少なくなる方法であるため、今後、提案手法において対応できるようにすることが望ましいといえる。

以上より、提案した難易度評価手法は、解説書に掲載された手順を、制作の難易度が最も低い真値とした場合において有効であるといえる。



図 3-23 解説書に基づくバルーンアートの制作例

表 3-6 解説書の手順と提案手法により導出された手順の比較

制作物	経路	順序	一致しない理由
あんぜんなサーベル	○	○	-
おすましプードル	○	○	-
ゾウの水浴び	○	○	-
ハッピー×ハッピーベア	○	○	-
スイートライオン	○	○	-
チェスな馬	○	○	-
エレガントスワン	○	×	バブルの生成とロックを同時に行っている

3.5.5. 被験者実験

前項までで記した構造解析に基づく難易度評価手法，および，提案手法を取り入れた構想支援システムについて，バルーンアート非熟練者 10 名を被験者として，その有効性を確認する．

難易度

ロック順序の違いについては，表 3-3 の 6 つの経路の中から，それぞれランダムで抽出した手順 1, 手順 2 の 2 つの制作手順を試してもらった．また，経路の違いにおいては，表 3-4 で最大値が 2 である(1)と，最大値が 4 である(8)とを制作してもらった．有効性の確認のため，以下の項目について記述式のアンケートを行う．

- どちらの制作手順が難しかったか
- 難しいと感じた理由

結果，表 3-7, 表 3-8 で示す回答が得られた．表より，いずれの被験者においても，ロック順序と経路による違いの双方とも，数値が大きいものを難しく感じるといった，提案手法で算出した大小関係と同様の感想を得ることができた．

表 3-7 ロック順序による難易度の印象の比較

被験者	手順 1	手順 2	難しい手順	難しい理由 (要約)
A	(1)	(2)	手順 2	手で持たなければいけないバブルが多い
B	(1)	(6)	手順 2	バブルを固定するのが大変だった
C	(3)	(4)	手順 2	固定されないバブルの数が多い
D	(3)	(5)	手順 2	バブルを仮固定しておくのが難しい
E	(4)	(6)	手順 2	バブルが戻ってしまって手間が掛かった
F	(2)	(1)	手順 1	ロックするまで固定されないバブルが多い
G	(6)	(1)	手順 1	幾つものバブルを仮固定しておくのが大変
H	(4)	(3)	手順 1	手で押さえる必要のあるバブルが多い
I	(5)	(3)	手順 1	沢山のバブルを持っておく必要があるため
J	(6)	(4)	手順 1	バブルが上手く仮固定できない

表 3-8 経路による難易度の印象の比較

被験者	難しい経路	難しい理由（要約）
A	(8)	ロック順序の理由と同様
B	(8)	ロック順序の理由と同様
C	(8)	ロック順序の理由と同様
D	(8)	ロック順序の理由と同様
E	(8)	ロック順序の理由と同様
F	(8)	ロック順序の理由と同様
G	(8)	ロック順序の理由と同様
H	(8)	ロック順序の理由と同様
I	(8)	ロック順序の理由と同様
J	(8)	ロック順序の理由と同様

また、制作物の違いについては、3.5.3 項と同様に、ベーシックアニマルとオウムにより比較した。結果、表 3-9 で示すように、いずれの被験者もベーシックアニマルよりオウムが難しいと述べ、その理由については、ロックの重複によりロックしづらい個所が発生するためであるという評価によるもので一致した。

表 3-9 制作物による難易度の印象の比較

被験者	難しい制作物	難しい理由（要約）
A	オウム	固定されたバブルにバブルをねじ込むのが難しい
B	オウム	ロックされた場所をもう一度ロックするのが難しかった
C	オウム	固定されたところで再度ロックを行う必要があるため
D	オウム	ロックされた胴体に輪と尻尾をロックするのが難しい
E	オウム	バブルとバブルの間にバルーンを通すのが難しい
F	オウム	バブルの間にバルーンを入れるときに割れないか心配
G	オウム	ロック時にバブルの間にバルーンを入れる必要があるため
H	オウム	胴体と羽で同じところを2回ロックするのが難しい
I	オウム	バルーンをロックされたバブルの隙間に通す必要があるため
J	オウム	頭と胴体をロックするのが難しい

このことから、同一の制作物においては非固定頂点数、異なる制作物においてはロックの重複が、人間が難しいと感じる要因の1つであると考えられる。

構想支援システム

別の被験者 10 名に、構想支援システムについても実際に使ってもらったところ、最初はバルーンアートとして成立しない形状を入力するケースもあった。しかしながら、画面中表示される形状不成立の理由を元に修正を加えていくことで、いずれの被験者も、最終的には図 3-24 で示すようなバルーンアートとして成立する形状が制作できた。図 3-25 は実際にシステムを利用している様子である。

また、システム上で制作した形状を実際のバルーンで制作してもらったところ、図 3-24 (3)で示す、バブルの数が多すぎて熟練者でも実際に制作するのが容易ではない、被験者 M が制作した形状を除いて、いずれの被験者も実際に制作が行えた。

このことから、構想支援ツールが完成形状から制作手順を導くという、「構想」を支援していると考えられる。

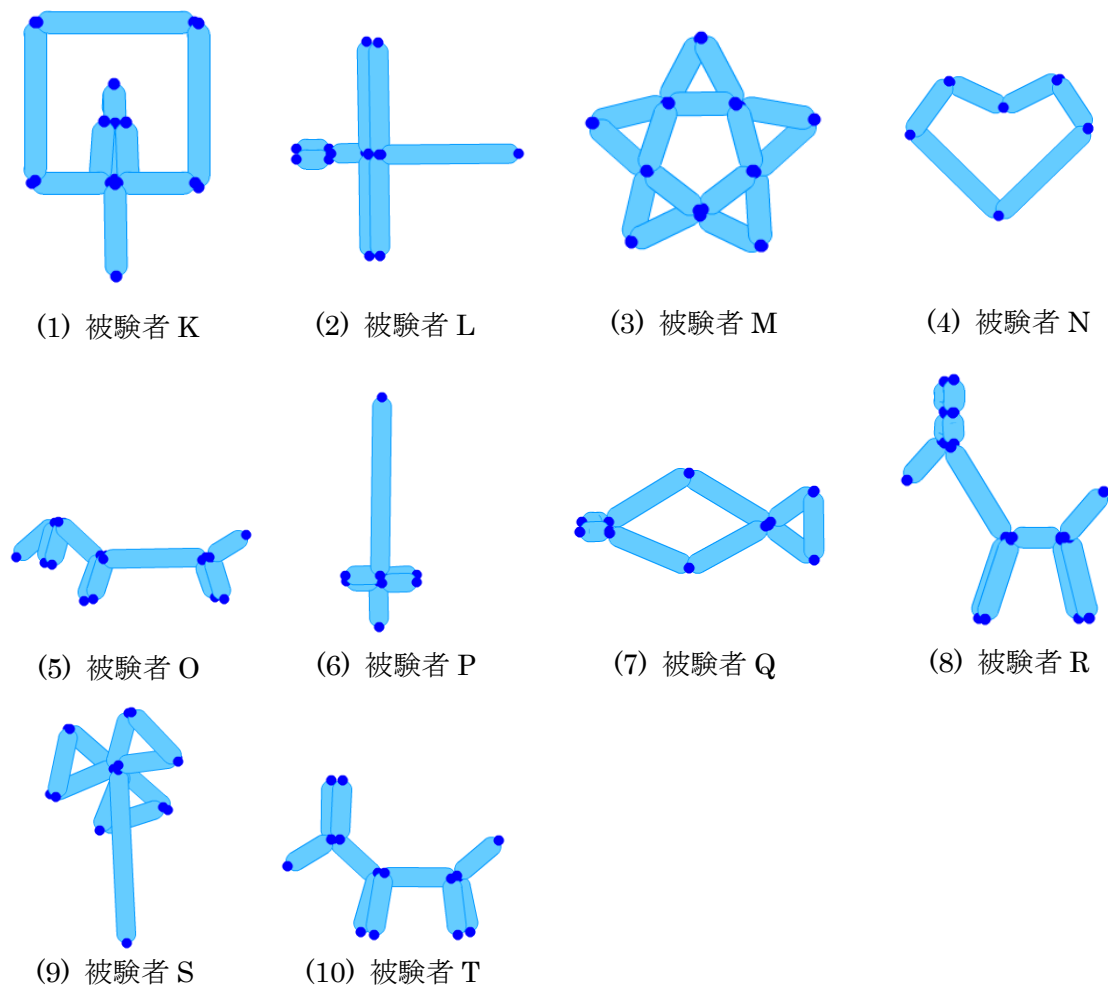


図 3-24 被験者による制作例

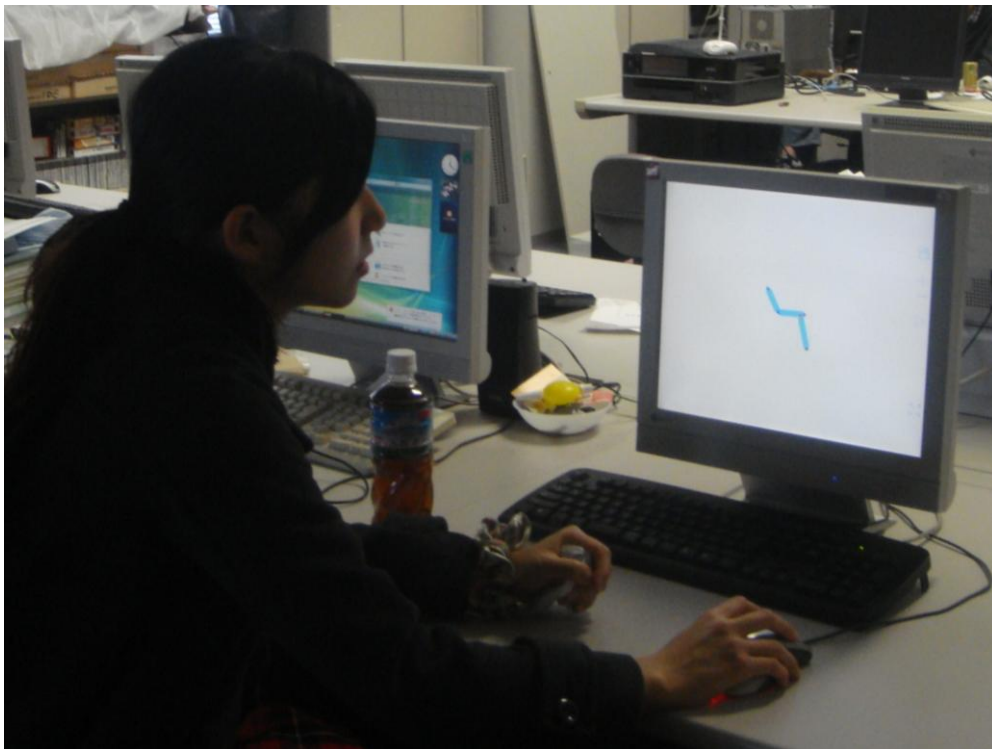


図 3-25 構想支援システム利用例

3.6. おわりに

本研究では、グラフ理論を用いたバルーンアートの構造解析を行い、その構造に基づいて形状成立の判定、制作手順の導出、難易度の評価の各手法を提案した。また、これら提案手法に基づき、制作したいバルーンアートの概形を入力することで、その制作手順を表示する構想支援システムを構築した。比較実験を行うことによりこれら提案手法の有効性を確認し、被験者実験により、システムにより実際のバルーンアートの「構想」が行えることを明らかにした。

3.6.1. 結論

本研究では、バルーンアートの創作における「構想」の支援を行った。

1本のバルーンから制作されるバルーンアートが、その形状を線として考えたとき一筆書き可能であるという点に着目し、グラフ理論により、バルーンアートの構造解析を図った。バブルをグラフの辺、ひねり目を頂点と見立てたとき、そのグラフは一筆書きが可能という性質を持つオイラーグラフになる。そのため、グラフ化したバルーンアートのオイラー経路を求めることにより、バブルの隣接順やロックの位置からなる、バルーンアートの構造の定義が可能となった。

この構造に基づき導出したオイラー経路は、組み立てたときにそのままバルーンアートとして成立する形状になるか、この段階では判別できない。そこで、グラフの頂点がすべて固定されるための条件を定義し、形状成立の可否を判定する手法を提案した。この判定をクリアしたオイラー経路に対して、グラフへと復元する手法を提案することで、バルーンアートの制作手順の決定が可能となった。この際、複数のオイラー経路が導出される場合があることから、制作時の各ロックにおける頂点の非固定数に着目した難易度評価手法を提案し、バルーンアートにおける制作の難しさを表現した。これら提案手法は、解説書に記載された制作手順と比較することにより、実際に用いられる制作手順との同一性を確認し、被験者実験を行うことにより、その有効性を確認した。

また、これら提案手法に基づいて、バルーンアートの概形を入力することで、それをオイラーグラフに自動的に整形して、バルーンアートの解説書に掲載されているような制作手順の図を表示可能な制作支援ツールを構築した。これについても、被験者実験を行うことで、その有効性を確認した。

これらより、制作過程を提示する創作作品であるバルーンアートにおいて、その「構想」を支援することができたといえる。

3.6.2. 展望

本研究においては、1本のバルーンからなるバルーンアートのみを構造解析の対象とした。しかしながら、図 3-26 で示すように、バルーンアートは複数本のバルーンから構成されるものもあり、バルーンの使用本数が増えることで作品の表現の幅が広がる。そのため、今後は、複数本のバルーンからなるバルーンアートの構造解析もできるよう、手法を拡張していきたい[47]。

構想支援システムについては、現在、設置できるバブルは直線の物のみなので、丸いものについても扱えるようにしたい。また、現在は利用者自身がバブルを配置していく必要があるが、今後は、3D モデルなどからそれに近いバルーンアートを形成し、制作手順を導出できるような方法についても考えていきたい。

「制作」に目を移すと、バルーンアートは練習の際に実際のバルーンを用いるなど、練習環境が整っていないという現状がある。提案した制作支援システムにより、概形の入力に応じて制作手順を示すことは可能である。また、システムを拡張することにより、ツイスト毎の状態の変化の表示も可能である。しかしながら、バルーンアートは手とバルーンのインタラクションにより制作を行う。このため、マウスやキーボードではなく、実際の制作と同様に手を用いて制作を練習できるインタフェースが、「制作」の支援において望ましいと考えられる。そのため、今後は、そのようなシステムについても検討したいと考えている[48][49]。

その際、現状のグラフによるモデルで理論上は制作可能な形状であっても、バルーンの耐久度などから実際には制作が難しい形状もあるため、物理特性を考慮するなど、モデルを現実のバルーンに近づける手法についても検討したい。

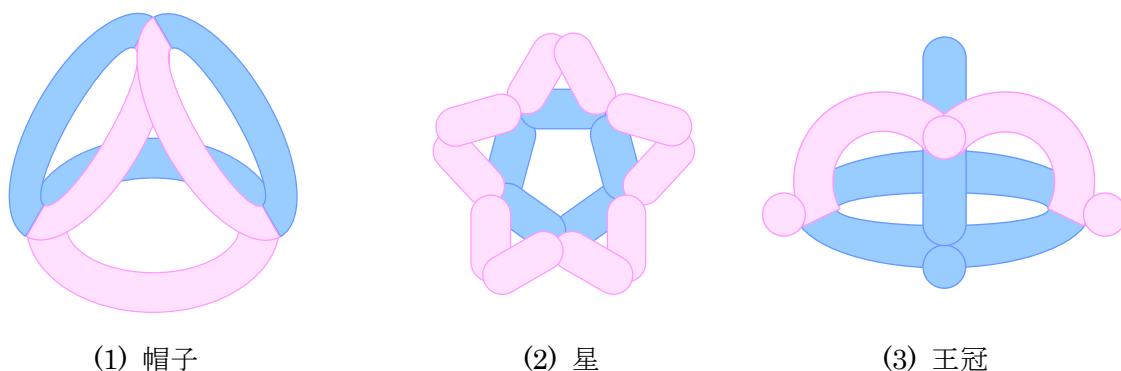


図 3-26 複数本からなるバルーンアートの例

4. サンドアニメーションのシミュレーション

4.1. はじめに

本研究では、サンドアニメーションを対象に、制作環境や制作技法を体系化し、それに基づいて練習環境となるシミュレーションを実現することで、その「制作」の支援を行うことを目的とする。

4.1.1. 背景

サンドアニメーションは、砂を用いてアニメーション作品を制作する技法であり、その制作過程そのものを披露するパフォーマンスの名称でもある。キャンバス上に砂を配置することにより描画される絵は、セピア調の温かみのある独特の表現となる。

また、制作過程そのものがアニメーションとして成立するという独自性などから、映像としてのインパクトも強い。このため、テレビコマーシャルやミュージックビデオなどにも用いられており、多くの人にとって、制作したことはないが、見たことのある創作作品となっている。

サンドアニメーションの創作は、砂による描画という特殊性に加え、アニメーションとして成立させるために、まずシーン構成を考えて、つぎに適切な技法を組み合わせる必要がある。この2つの要件のうち、前者については大まかな構成を「構想」した上で、実際の環境で試行錯誤して「制作」しながらシーン構成を固めていくことが想定される。一方で、後者は砂による描画のために、筆などの道具に比べて操作しづらいなどの理由により生成される画像は荒くなり、その荒い状態で、閲覧者がその描画物がなにかを判別できる程度の絵を描く必要がある。また、サンドアニメーションは、上映時間が10分を超えるものもあるなど、実際に手を動かしながら繰り返し練習を行わないと構成を記憶することは困難であるといえる。しかしながら、制作環境が特殊であるため環境構築が難しく、失敗の修正も難しいことから、容易には練習できないという現状がある。

そのため、「制作」を伴う試行錯誤が必要となる作品の「構想」の場合、また、実際に「制作」を行い作品の手順や技法といった構成を習得する練習の場合として、計算機上でのシミュレーションが有効であると考えられる。

また、練習の場合として機能するためには、2.2.2 項で示したように、実環境に近いインタフェースが求められるが、サンドアニメーションは、テーブル状のキャンバスに手で砂とインタラクションして作品を制作していくことから、シミュレーションのインタフェースとして、テーブル状の入力・表示環境を備えるテーブルトップが望ましいといえる。

4.1.2. 目的

本研究では、サンドアニメーションの「制作」の支援を目的に、テーブルトップインタフェースを用いて、実際の制作同様に手でキャンバス内の仮想的な砂を操作できるシミュレーション環境を構築することで、サンドアニメーションの練習環境を実現する。

練習環境として機能するシミュレーションを行うにあたり、サンドアニメーションの制作環境および制作技法を、制作者の動作も含め、計算機上で再現することを考える。サンドアニメーションは独自の制作環境や制作技法を持つが、それらが体系化されていない現状がある。そこで、アーティストの作品映像から制作環境・技法を調査し、それらを体系化する。調査から、サンドアニメーションでは手で砂を操作することにより描画を行っている。このため、シミュレーションにおいてそれら技法における表現を模倣するため、手の形状を入力可能なマルチタッチ式のテーブルトップインタフェースを製作する。

このインタフェースにおける入力と、体系化した各技法における砂の振る舞いを関連付けることにより、砂の操作を再現する。インタフェースの入力と表示はともに平面であるが、実際の環境では砂は立体的に積み重なる。そのため、2次元平面の各ピクセルに高さ情報を保持するハイトフィールドにより砂を取り扱う。また、インタフェース上で各技法を実施した際の入力と、ハイトフィールドにおける砂の振る舞いを定義する。

以上より、シミュレーションを実現する。

シミュレーションが練習環境として機能するかの確認として、まず、実時間における処理が実現できているか、様々なケースにおいて処理時間を計測する。また、アニメーションが同一の技法の組み立てによって制作可能であるか、シミュレーションと実際のサンドアニメーションの制作過程との比較を行うことにより、その再現性と有効性を確認する。

これにより、制作過程を提示する創作作品であるサンドアニメーションにおいて、「対話型による制作過程の疑似体験」というアプローチにより、「制作」の支援を実現する。

4.2. サンドアニメーションとは

サンドアニメーションは砂によりアニメーションを描く創作作品であり、Caroline Leaf氏がその先駆者とされる[50]。図4-1で示すように、独特の描画表現が可能であり、その制作過程がそのままアニメーションとなることから、映像としてのインパクトが強いといった特徴を持つ。

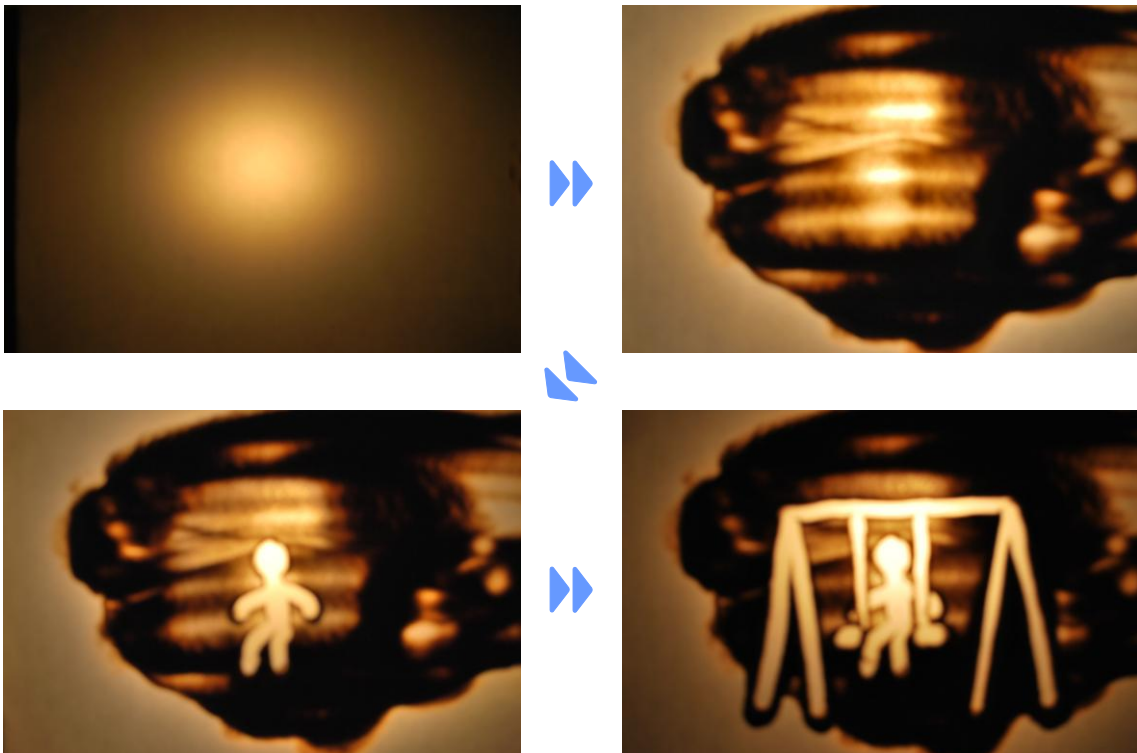


図 4-1 サンドアニメーションの例

この独特の作品を構成する要素として、サンドアニメーションは独自の制作環境および制作技法を持つが、その独自性も相まって実施者が少ないため、それらが体系化されていない現状がある。

そのため、一般の人にとってテレビなどで見かけることはあっても、制作には馴染みが薄いものとなっている。

そこで、著名なサンドアニメーションアーティストである Ferenc Cako[51]、Ilana Yahav[52]、David Myriam[53]、Joe Castillo[54]、Aleksandra Konofalskaya[55]の各氏の作品映像から、制作環境および制作技法についての調査を行い、それらを体系化する。

4.2.1. 制作環境

サンドアニメーションは、図 4-2で示すような環境下で制作される[56].

アーティストは、砂を用いてキャンバスに絵を描いていくが、このキャンバスの背面からキャンバスに向けて白熱灯が出すような暖色系の光を照射することで、砂の存在を際立たせて濃淡を表現する。パフォーマンスとして制作過程を披露する場合には、キャンバスをカメラで撮影し、その映像をスクリーンに投影する。

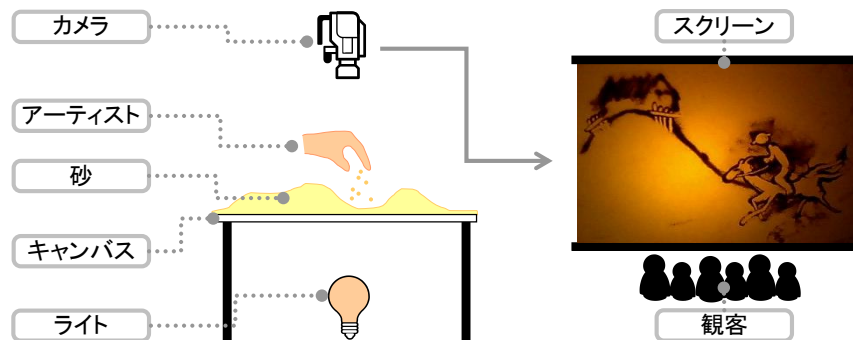


図 4-2 サンドアニメーションの制作環境

図 4-3は、同一の砂の配置における、“室内光あり・背面光なし”と“室内光なし・背面光あり”という条件によるキャンバスの違いを示したものである。左図では室内光以外の光がないために、砂同士の濃淡の差、また、キャンバスと砂との濃淡の差が表れにくくなり、描画物がはっきりしない。一方で、右図のように暗室にしてキャンバスの背面から光を照射することにより、砂が適度に光を遮り、砂の量が濃淡を表す役目を果たす。彩色されたキャンバスを用いることにより、海や陸などの風景を表現することもある。



(1) 室内光あり・背面光なし



(2) 室内光なし・背面光あり

図 4-3 背面光によるキャンバスの違い

4.2.2. 制作技法

サンドアニメーションには、その制作のための描画技法、また、それを用いたアニメーション技法が存在する。大別すると砂を追加するものと、配置された砂を取り除くものの2種になり、それらを更に分けることができる。制作には主にアーティスト自身の手が用いられ、特殊な例として、紙やブラシが用いられることもあるが、本研究では手を用いた技法のみを対象とする。

先述のサンドアニメーションアーティストの作品映像を調査したところ、表 4-1に示すような技法を組み合わせることより、作品制作を行っていることが確認できる。上から3つが砂の追加であり、下2つが砂の除去である。「砂を拡げる」については、技法によりある地点の砂を除去してはいるが、それを完全には除去せず、キャンバスの砂がない範囲に広く分散させていることから、除去ではなく追加側に属するものと定義する。

また、各技法における手の動作をみると「砂を置く」、「砂を撒く・砂を飛ばす」、「砂を拡げる・砂を削る・砂を拭う」にそれぞれグループ化できる。そのため、シミュレーションを行うにあたっては、この手の動作と砂、また影響範囲の関係性を考慮して実装を行うことが望ましいといえる。

表 4-1 調査した制作技法

技法	砂	影響範囲	手の動作
砂を置く	追加	局所的	ぶれないように掴みながら砂を投下
砂を撒く	追加	広範囲	揺すりながら撒くように砂を投下
砂を飛ばす	追加	広範囲	揺すりながら撒くように砂を投下
砂を拡げる	追加	広範囲	砂を任意の状態に移動させる
砂を削る	除去	局所的	砂を任意の状態に移動させる
砂を拭う	除去	広範囲	砂を任意の状態に移動させる

以下、調査したそれぞれの技法において、図 4-4～図 4-9の左図で手の動作を、右図で実際に試行した結果を示す[57]。

砂を置く

手で砂を持ち、キャンバス上にそれを置くよう配置することにより、線や点を描く。キャンバスと手が離れていると砂がはねて広範囲に飛び散り、配置した砂の中央が空洞になるなど線や点にならないため、キャンバスと手を近づける必要がある。砂は、親指と人差し指でつまむ方法と、掌で包み、小指側に隙間を空けてそこから落とす方法とがある。

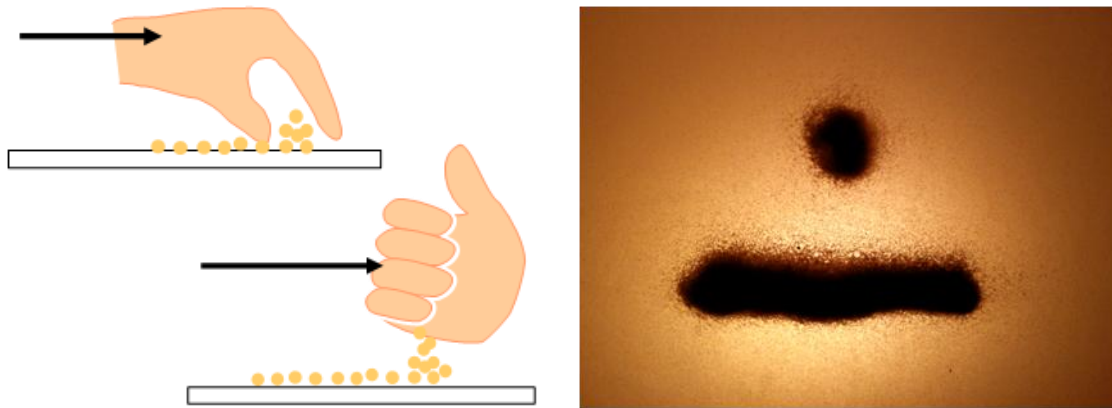


図 4-4 砂を置く

砂を撒く

手で砂を持ち、その砂を撒くことにより一定の範囲を淡く塗りつぶす。また、後述の砂を削るための下地を作る場合にも用いる。砂がある程度の範囲に広がるように、手を揺すりながら振りかけるように撒く。砂を落とす量や時間によって、その濃淡を調節する。置く同様に2通りの砂の持ち方がある。

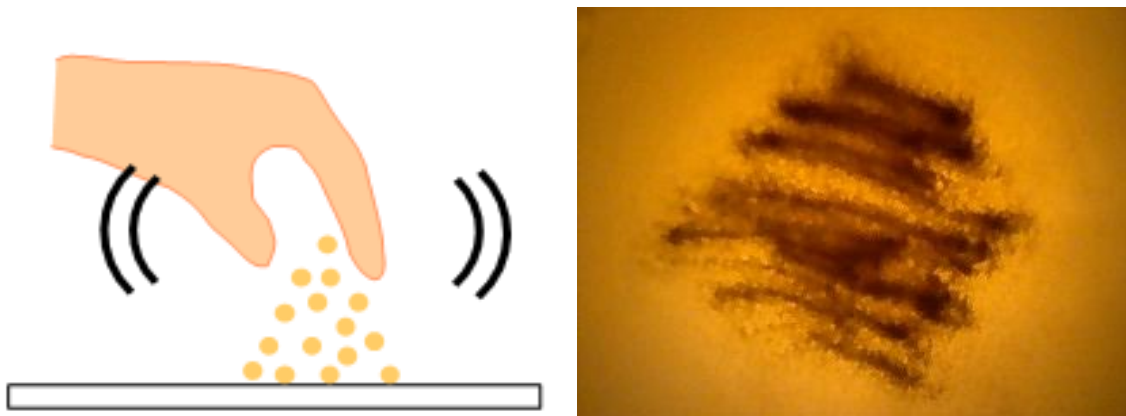


図 4-5 砂を撒く

砂を飛ばす

手で砂を持ち、飛ばすように撒くことで、速さや勢いのある動きを表現する。手を動かす際の慣性のつけ方により、細かな動きの調整を行う。他の技法に比べて、手と砂を配置する場所の距離が大きいこともあり、意図した描画結果を得ることが難しい。

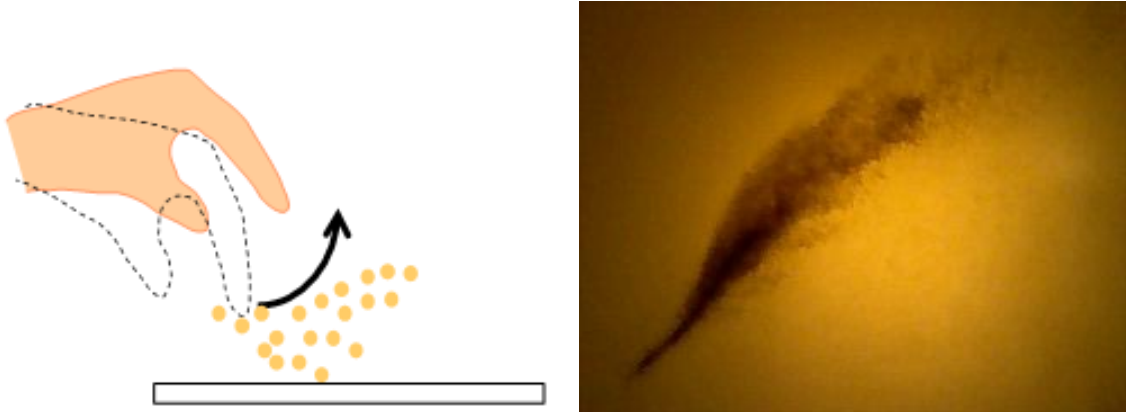


図 4-6 砂を飛ばす

砂を拡げる

キャンバスを暗色で塗りつぶした初期状態を生成したり、削るための下地を作る際に用いる。配置済みの砂を手や指で延ばすようにして行う。大まかに塗りつぶしたい場合には勢いよく、均等に塗りつぶしたい場合には手で砂の感触を確かめながら行い、それでも足りない場合には同じ作業を繰り返す。

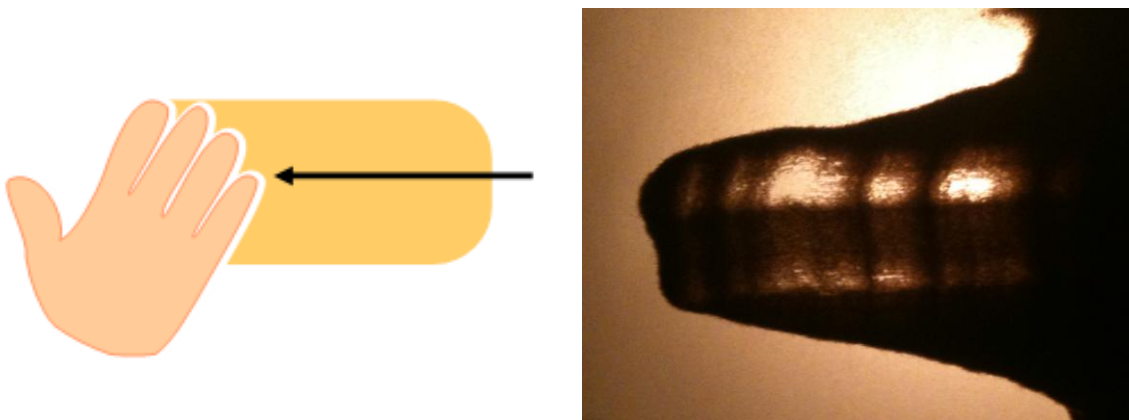


図 4-7 砂を拡げる

砂を削る

指によりキャンバス上の砂を削る。削った後にできる砂の隙間から光が洩れ、はっきりとした線に見えることから、輪郭を際立たせる際に用いられる。砂を払う、乱れた砂を整えるといった細かい作業にも用いられ、複数の指を用いて髪や波などを表現する際にも用いられる。



図 4-8 砂を削る

砂を拭う

現在の描画物を構成する砂が、新たに描く描画物の妨げになる場合、手の側面で砂をキャンバスの隅に追いやり、キャンバスの一定の領域を無地の状態にする。シーンが大きく変わる場合に、一旦まっさらなキャンバスにするために、キャンバス中の砂全体を拭う場合もある。

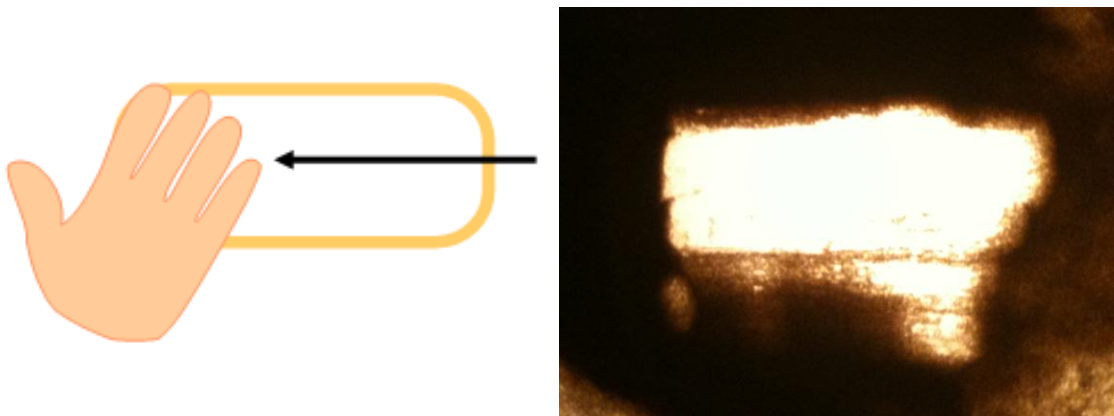


図 4-9 砂を拭う

4.2.3. 制作例

サンドアニメーションでは、その時点でキャンバスに配置されている砂を効果的に使うことでアニメーションがスムーズになるため、同一の描画物を描く場合でも、異なった技法の組み合わせが用いられることもある。

ここでは、図 4-10 の絵をサンドアニメーションで制作する場合を例に、前節で示したいくつかの技法を用いた制作手順を説明する。図 4-11 では砂を置いた場合、図 4-12 では砂を撒いてから削った場合について、左図で制作手順を、右図では実際に制作した様子を示す。また、左図の点線による矢印は手の動きを表す。

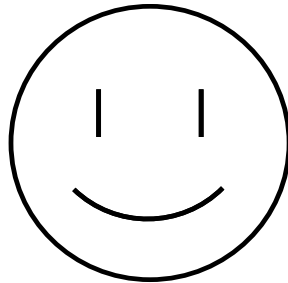
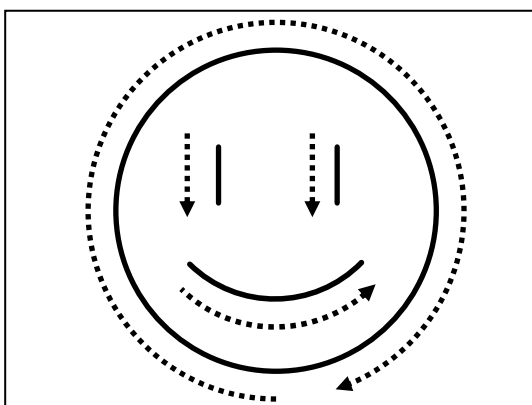


図 4-10 制作する絵

砂を置いて制作する場合

砂を置く技法を用いる場合、輪郭・目・口の各パーツを、それぞれ線として描く。



(1) 制作手順

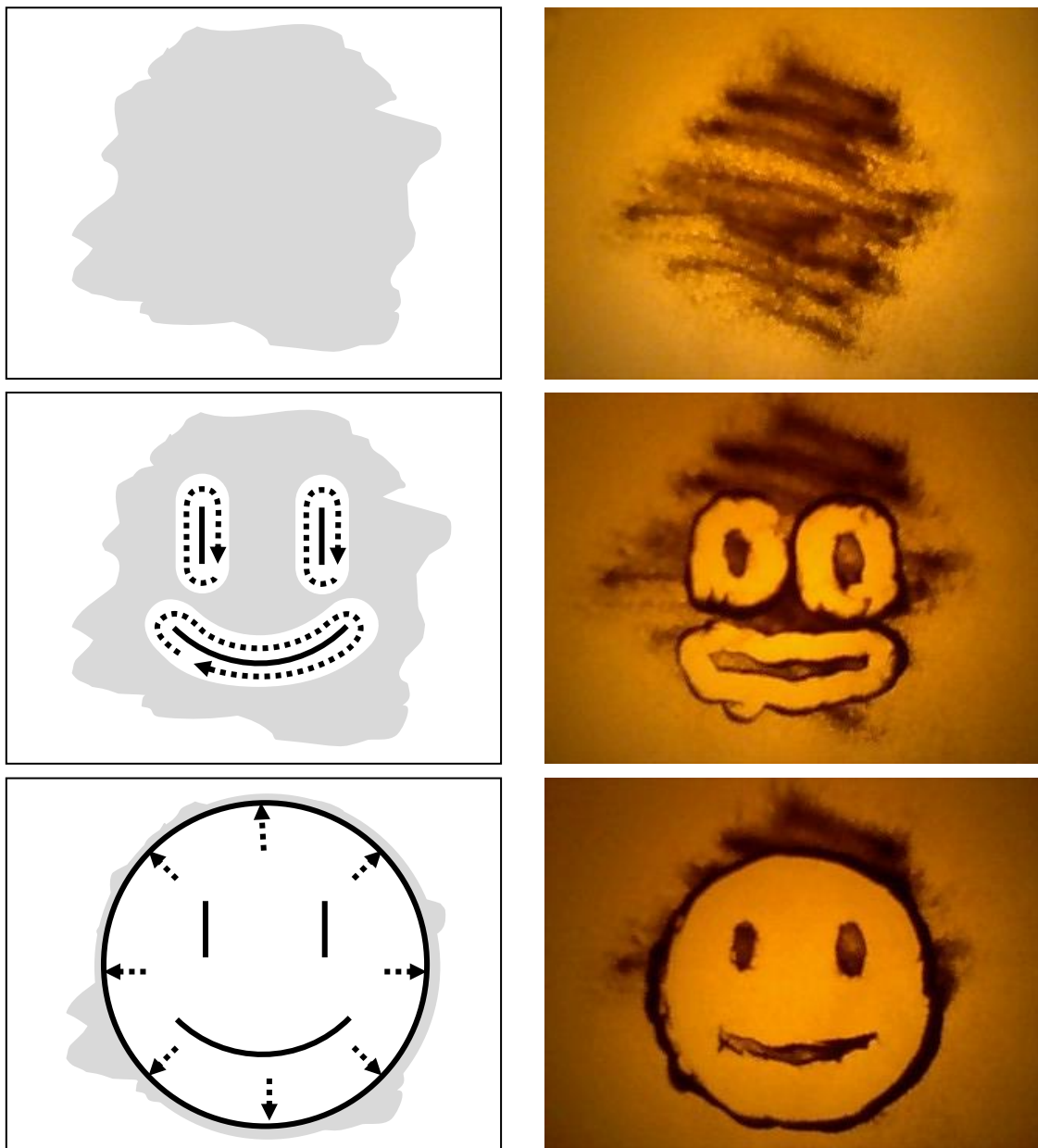


(2) 実施例

図 4-11 砂を置いて描いた場合

砂を削って制作する場合

砂を削る技法を用いる場合には、まず砂を撒いて砂を削るための下地を構成する。つぎに、目、口の各パーツの輪郭をなぞるようにして下地とそれらとを分ける。最後に、顔の輪郭となるように、残りの砂を顔の輪郭へと移動させ、形を円に変形する。置く場合よりも手間はかかるが、既に砂が配置されている場所に描く場合には、一度すべて砂をどけるよりも連続性のあるアニメーションが制作できる。



(1) 制作手順

(2) 実施例

図 4-12 砂を削って描いた場合

4.3. インタフェースの製作

前節で示したように、サンドアニメーションは主に手により砂を操作することでアニメーションを制作する。そのほとんどの技法においては、手をキャンバスと接して行い、その上、指を複数本用いたり両手を用いるなど、同時に複数の動作が行われるケースも存在する。また、重力により砂が平面に積み重なることで濃淡が変化し、キャンバス上での描画が成立する。このとき、技法により意図した描画になっているかを、適時確認する必要がある。

以上の点より、そのシミュレーションにおけるインタフェースとして、

- 実際の制作環境と同様にテーブル状である
- 手を触れることで入力が可能である
- 複数の入力に対応している
- 入力面に描画内容が表示されている

といった要件を満たすのが望ましい。

そこで、外観がテーブル状となっており、テーブルそのものが情報の入力と表示の両機能を有するテーブルトップと呼ばれる概念のインタフェースに倣ったものを製作する。また、このテーブルに対して、テーブルに接地した手の形状をポインタとし、複数ポインタリングを可能とする機能を実装する。

これにより、手で砂とインタラクションを行うというサンドアニメーションの入力に適した、マルチタッチ式のテーブルトップインタフェースを製作する[58]。

4.3.1. FTIR テーブルの製作

テーブルに接地した手の形状を入力として取得するために、FTIR（漏れ全反射）を利用して[59]、指や掌の接触センシングを行う。FTIRは、外部から物体に触れた際に、その物体の内部で反射している赤外線が接触個所の影響を受けて、物体の外部に漏れる現象のことをいう。

この赤外線が全反射するという性質を利用し、テーブルとするアクリル板の内部に赤外線を照射する。これにより、テーブルに手が触れた箇所を白、触れていない箇所を黒とするグレースケール画像が、赤外線のみを透過させるカメラを介して取得可能となる。

図 4-13 にハードウェア構成を、図 4-14 に実際に製作したテーブルトップインタフェースの外観を示す。

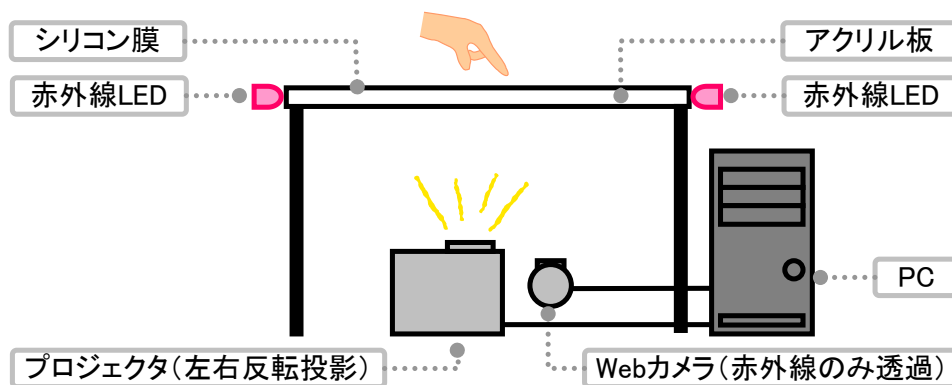


図 4-13 インタフェース構成



図 4-14 製作したテーブルトップインタフェース

4.3.2. ポインタの認識

FTIR テーブルを用いたマルチタッチ環境構築用ライブラリの1つに Touchlib がある [60]。これは複数の指によるポインティングを認識し、指が移動した際には、それぞれを個別の入力としてトラッキングする機能も有する。しかしながら、入力形状をすべて円形とみなす。サンドアニメーションにおける技法—拡げる・削る・拭う—は、砂やテーブルに触れている手の接地面形状が重要であるため、Touchlib では表現に限界がある。

手の接地面形状を取得するものとして、FTIR を用いたテーブルトップにシリコンを貼り付けることで安価に圧力センシングを実現する方法が提案されており [61]、また、このインタフェースのデモンストレーションとして、手や筆など様々な形状を入力とするペイントツールが開発されている。しかしながら、入力形状をそのまま取得して描画に反映させる処理を行っているため、各入力が移動した際に、それらをトラッキングすることができない。このため、入力の移動量が大きい場合には補完処理が行なえず、ストロークが分断されるなど、意図した結果が得られない場合がある。サンドアニメーションでは、微妙な入力の差異が表現力の違いとして現れるため、入力が適切に反映されないと作品の完成度に影響を及ぼす。そのため、サンドアニメーションの制作技法に対応するには、入力形状をトラッキング可能なポインタとして扱う必要がある。

そこで、前節のインタフェースで取得可能な画像から、テーブルに接地した手の形状をポインタとして認識し、複数ポインティングおよびトラッキングを可能とするための手法を提案する。

処理の流れを以下に記す。まず、カメラからの入力画像を2値化、ラベリングし、手が接地している領域画素およびその輪郭画素を抽出する。つぎに、各領域の輪郭画素座標の平均値を算出し、それをポインタの中心点とする。ポインタのトラッキングは、各ポインタの中心点の位置を前フレームの中心点の位置と比較し、距離の近いものを同一ポインタとして処理することで実現する。このとき、新しいポインタには識別 ID を付与する。

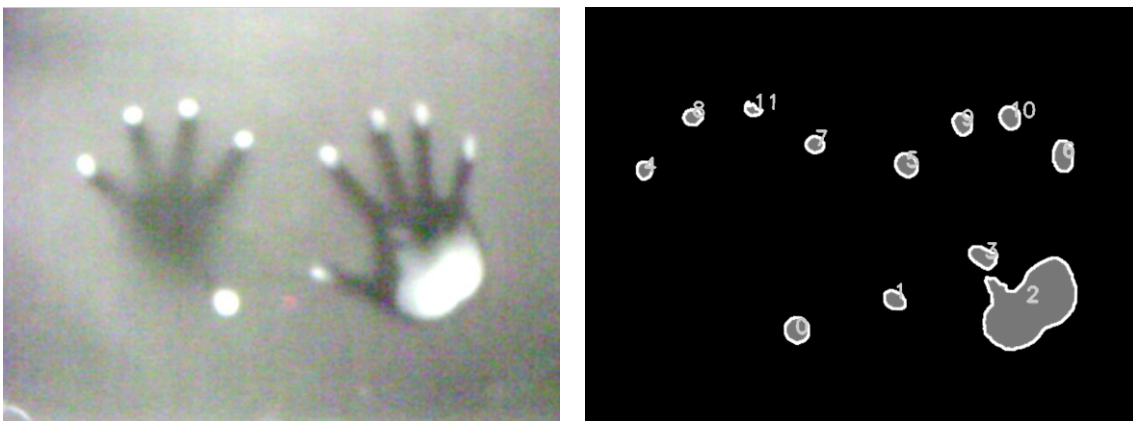
これらをポインタのパラメータとし、図 4-15 で示す構造により保持する。図 4-16 にポインタの認識例を示す。左図が処理前の、右図が処理後の画像であり、灰色が接地面、白色が輪郭、数字がポインタの識別 ID である。

```

struct pointer {
  int id;           // 識別 ID
  list<pixel> area; // 領域のリスト
  list<pixel> outline; // 輪郭のリスト
  point center;    // 中心点
};

```

図 4-15 ポインタの構造



(1) カメラからの入力画像

(2) ポインタ認識の結果

図 4-16 入力画像からのポインタの認識

4.4. サンドアニメーションのシミュレーション

4.2.2 項で示した制作技法を体系化し、各技法における砂の振る舞いを再現し、テーブルトップへの入力と対応付けることで、サンドアニメーションのシミュレーションを実現する[62].

4.2.2 項の表 4-1 で示したように、サンドアニメーションの制作技法は、手の動作と砂の振る舞いから、いくつかに分類することが可能である。このとき、いずれの技法においても手は様々な形状を取る。一方で、4.3 項で示した本研究において製作したテーブルトップ型のインタフェースは、接地面の形状をそのまま入力として扱う。このインタフェースにおいては、その性質上、全ての技法についてテーブルに触れて行う必要があるため、「砂を拡げる」や「砂を拭う」といった掌が入力されるものは判別できても、「砂を置く」と「砂を削る」のように、同じような入力となる動作の技法を判別することは難しい。このように、手のジェスチャのみで、どの技法を実施しているのかを判別することは困難であるといえる。

そこで、シミュレーション処理の手順としては、まず、シミュレートする制作技法を選択する。つぎに、4.3 項で示したように、カメラからの映像より手の接地領域を取得してポインタとして認識する。ポインタの形状や動きの情報を用いて、選択された技法に関する砂の配置処理を行い、その配置結果に基づいて描画処理を実行する。このような処理の流れにより、シミュレーションを実現する。

また、本研究により実現するシミュレーションは、テーブルトップを入力としてサンドアニメーションの「制作」を行うものであるが、テーブルトップを用いてユーザに描画を体験させるシステムは多数存在する。しかしながら、それらは入力に対応して文字や絵を描くなどの平面上を塗り重ねたり[63][64][65][66]、平面上にプリミティブなオブジェクトを生成するといった描画処理を行っている[67][68]。3D 描画のインタフェースとして用いられている事例もあるが[69]、これは入力からストロークオブジェクトを生成するものであり、描画処理自体は平面的なオブジェクト生成の派生形であるといえる。

一方で、サンドアニメーションでは、局所的に砂が積み重なったり削られたりすることにより描画が成立することから、平面的な入力で立体的な形状の変化を実現する必要がある。このため、高さを考慮した形で、砂のデータを扱う必要がある。

4.4.1. 砂の表現

コンピュータ上でリアルタイムに砂の振る舞いをシミュレートする手法は様々あるが [70][71][72][73], サンドアニメーションにおいては, 配置された砂の量が画像の濃淡や質感に影響するため, サンドアニメーションのシミュレーションのためには, キャンバス上の砂の量の管理, および, 濃淡や質感を表現する描画方法が必要である.

ここでは, ハイットフィールドにより砂量を管理し, 砂量に応じて描画を変更させることにより, 砂の濃淡や質感を表現する方法を提案する. ハイットフィールドとは, フィールドを格子状に分割し, 各セルごとに高さ (あるいは量) を管理するデータ構造である.

本研究ではキャンバスに対応する画面の各画素を1セルとし, 砂量を管理する. 砂量と色の対応関係は Ferenc Cako 氏の作品映像からサンプリングすることにより決定する. 具体的には, 砂が無い状態, すなわち, 砂量0の場合の色を RGB(255, 240, 120), 砂量が T 以上で背面光が遮断されている状態の場合の色を RGB(40, 0, 0)とする.

また, 砂量のみでの色の決定では, 砂の凹凸感までは再現されない. そこで, ディザ法によりフィールドの各画素にランダムで閾値を設定し, 砂量が閾値に満たない場合, 描画時の輝度, つまりハイットフィールドの値を描画上では低くする.

これにより, 図 4-17 で示すように, 同一の砂量でも輝度にばらつきが生じ, 砂の質感が表現できる. 図 4-17 では, 横軸が砂量で, 縦の軸は同一の砂量, つまり, ハイットフィールドの値が同一の地点における, ディザ法による閾値によって生じる砂のばらつきを表している.



図 4-17 砂量と描画の関係

なお, 実際の砂は積み重なると自重により崩落するが, サンドアニメーションにおいて砂が大規模に崩落するまで積み上がるケースはほとんど発生しない. そこで, 実時間でのシミュレーションの実現のため計算量の削減を行い, 厳密なシミュレーションによる統一的な崩落処理は行わず, 技法ごとに簡易的な崩落モデルを用いることとする.

4.4.2. 制作技法のシミュレーション

2章で調査した6つの制作技法を、手の動作と砂の状態から「置く・撒く・削る」の3つのモードに分類し、これらの組み合わせにより制作のシミュレーションを実現する。なお、実際のサンドアニメーションでは砂を「置く・撒く」際には、手はキャンバスには触れないが、本研究で用いるインタフェースでは接地が検出されないとポイントの認識が行えないため、現段階においては、手をテーブルに接地させて入力の実行を行う。

このとき、接地した領域が前項で示した処理によりポイントとして認識され、それぞれのポイントが各技法における処理の対象となる。また、各モードの選択は図4-18に示すように、シミュレーション時に表示される画面右のアイコンを指で触れるなどして選択することによって行う。「put」、「sprinkle」、「shave」の各アイコンはそれぞれモード「置く」、「撒く」、「削る」に対応し、「clear」は画面を初期化する際に用いる。

また、ハイトフィールドの値を時系列で保持することにより、それを動画ファイルとしてアニメーションの一連の流れを確認可能とする機能や、局面を撒き戻すことで失敗前の状態からやり直しを可能とする機能も実装する。



図 4-18 シミュレータの画面例

置く

砂を置く操作では、入力を得られた場合に、図 4-19 で示すようにポインタの中心点 p を中心とする半径 r の円の内側に砂を式①で定める量だけ追加する。

$$h \cdot (r - l) + e \quad \dots \text{①}$$

ここで、 h は制御定数、 l は対象画素と p との距離、 e は $\pm T/100$ の範囲をとる一様乱数とする。これにより砂を置いた際に、砂が崩落し山状に配置される様子を表現する。

また、追加する砂量を e によりランダムに微小に増減させることで、山状を保ったまま凹凸を生じさせることができ、一様でない自然な描画が得られる。また、連続する 2 フレーム間でポインタの移動距離が大きい場合、その間を一定間隔で補完しながら砂を置く処理を繰り返す。これにより、途切れのない線を描くことが可能となる。

図 4-20 に点状および線状に配置した結果を示す。図が示すように、砂により点が描画され、また、線についても切れ目なく描画されていることが確認できる。

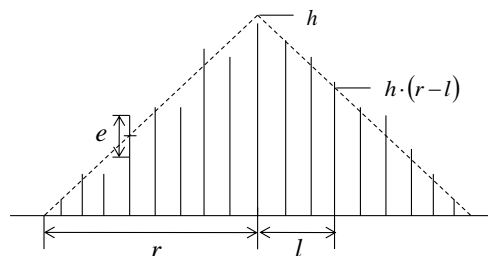


図 4-19 「置く」の処理



図 4-20 図 4-19 「置く」の実行結果

撒く

砂を一定の高さから落とす際、手の移動により発生する慣性力が小さい場合には手の位置の近辺に落ち、慣性力が大きい場合には手の位置から離れた場所に落ちるといった具合に、慣性力の大小により砂の飛び散る範囲が確定する。このため、「撒く」と「飛ばす」の2技法は、入力の変位量を考慮した同一の処理により扱うこととする。

まず、現在のフレームのポインタの中心点 p と、1 フレーム前のポインタの中心点 q との距離 d を求める。つぎに、「撒く」と「飛ばす」の処理の境界となる閾値 t を設定し、 d がその範囲内に収まった場合には慣性力がないものとし、「撒く」処理を実施する。実際の砂により試行した結果、「撒く」は「置く」と比較して、同一の量の砂を用いた場合に半径が3倍程度大きくなるのが分かる。このため、「置く」と「撒く」とで円錐の体積が同一となるよう、式①の r を $3r$ 、 h を $h/9$ に置き換えた式を用いる。これにより、「置く」より広範囲に薄く砂を配置することが可能となる。また、フレーム間の距離 d が大きい場合には、「置く」と同様に補完処理を行う。

一方で、 d が閾値 t を超えた場合に飛ばす処理を実行する。この処理では、図 4-21 で示すように、線分 qp の延長線上の点 $p' = p + s_1 \cdot \vec{qp}$ (s_1 は制御定数) を求め、点 p' を中心とする円内に数個の点 p'_i をランダムに生成する。点 q とこれら p'_i による線分上に等間隔に点を取り、それぞれの点に「撒く」処理を実行する。これにより、撒くによって描画される線分が p' の方向に何本か生成され、砂が特定の方向に飛び散る様子を再現する。

これらより、入力の変位量の大きさによって、図 4-22 左図のように撒いたり、右図のように飛ばす技法の表現が可能となる。図が示すように、「撒く」では「置く」よりも薄く撒かれており、砂が重なっている様子が確認できる。

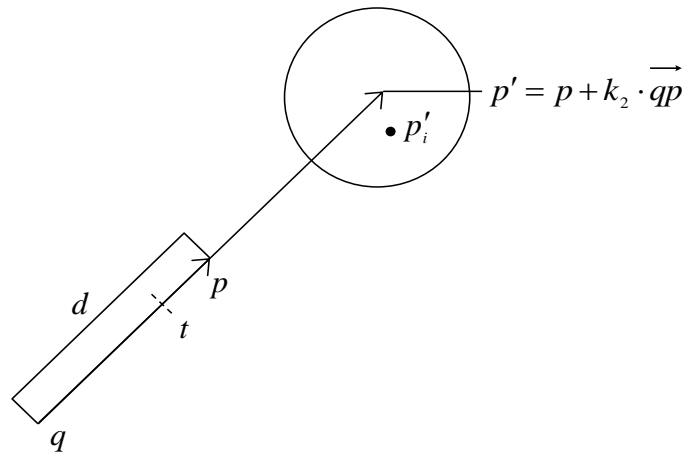
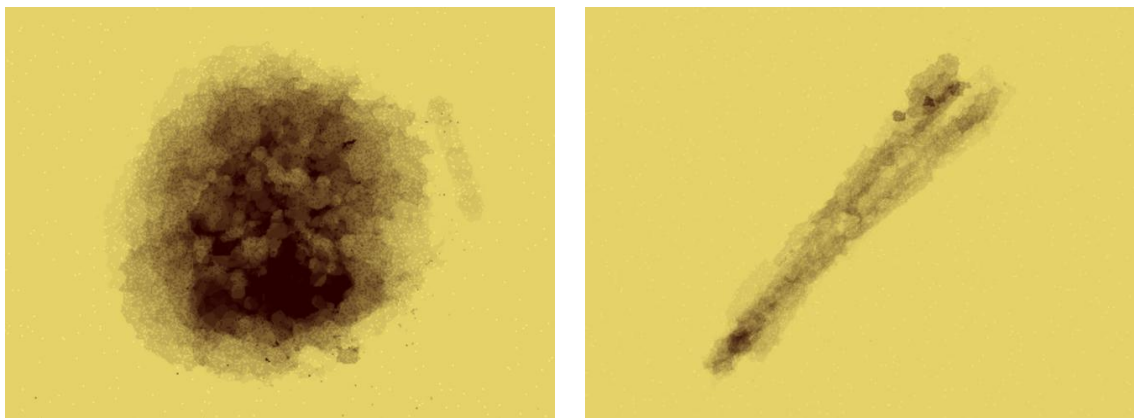


図 4-21 「撒く」の処理



(1) 撒く

(2) 飛ばす

図 4-22 「撒く」の実行結果

削る

「削る」、「拭う」、「拡げる」の3技法は、配置済みの砂が手の移動に伴い、その進行方向へ移動する。このため、ポイント領域画素上の砂をポイント輪郭画素に移動させるという処理により、これら技法のシミュレートを実現する。このとき、砂量が多い箇所ほど手による上からの圧力の影響を受け、また、その領域の砂は高低差が小さくなるため、これらを考慮した処理を行う。

まず、(i) ポインタの領域リスト *area* に格納された各画素 *i* の砂量 a_i を $s_2 \cdot a_i$ ($0 < s_2 < 1$) に変更し、(ii) さらにその砂量から v だけ減少させる。このとき、減算結果が 0 より小さければ砂量を 0 とする。つぎに、(iii) すべての *i* について上記(i)、(ii)により減少させた砂量の総和 S を求め、各画素 *i* に $S \cdot s_3 / n$ ($0 < s_3 < 1$) の量の砂を追加することにより、*area* 内の高低差を小さくする。ここで n は、*area* 内の画素数である。つぎに、(iv) $S \cdot (1 - s_3)$ の量の砂を輪郭の画素に移動させるが、その際に崩落を考慮し、輪郭を構成する *outline* の各画素 *j* を中心として「置く」と同様の処理を行う。このとき、式①の r を 3 (画素)、 h を $S \cdot (1 - s_3) / (3\pi m)$ に置き換えた式を用いる。ここで m は輪郭画素数である。

図 4-23 は処理の様子である。崩落の際に、砂は実際には右図の点線のように斜面になるが、シミュレーションでは実線のように断崖が出現する。しかし、近似的に山状になっているといえる。また、この方法では、同じ点に入力し続けると断崖が大きくなってしまいが、サンドアニメーションでキャンバスの同じ位置に長時間手を置き続けるという状況は発生しないため、通常の制作においては無視できると考える。

これらより、崩落が表現されているといえる。

また、移動量が大きい場合には、「置く」や「撒く」と同様に始点と終点の間にも同一処理を実施して補完するが、このとき、各処理で輪郭に砂が移動されるため、処理ごとに進行方向と反対側の輪郭に砂が発生してしまう。このため、補完処理時に、処理中のポイントの輪郭画素が 1 つ前の補完点におけるポイント領域と重複する場合には、その輪郭画素に砂の分配を行わないことにより、輪郭の出現を回避する。

結果、入力領域の砂の量や、入力時間により、図 4-24 左図のように砂を拭ったり、右図のように砂を拡げたりするシミュレーションが実現可能となる。

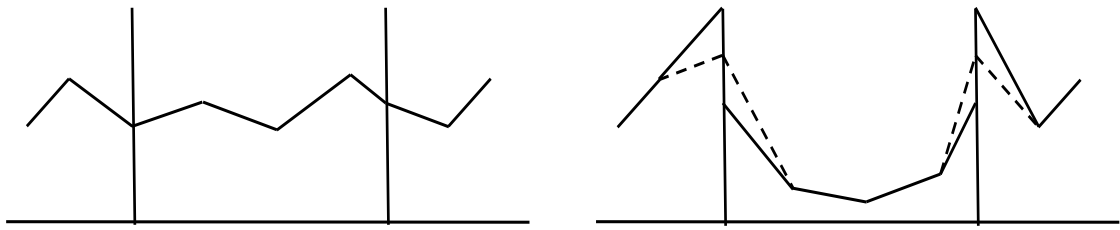
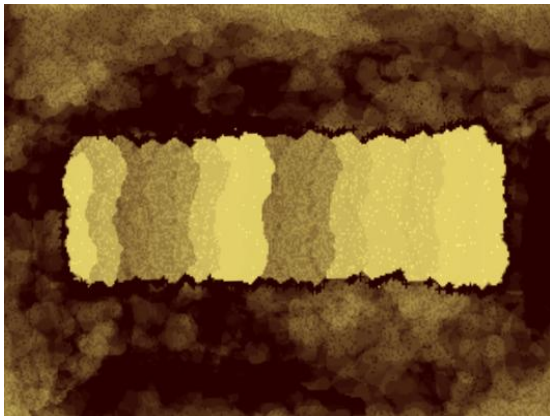
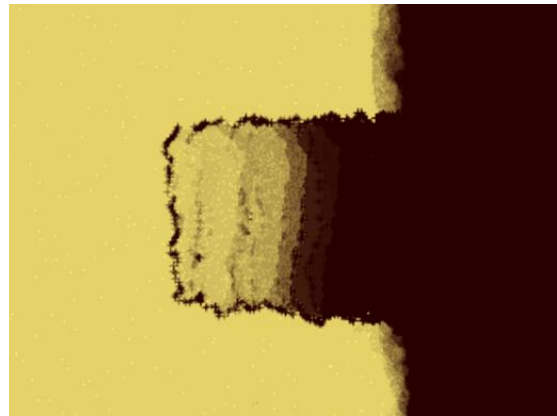


図 4-23 「削る」の処理



拭う

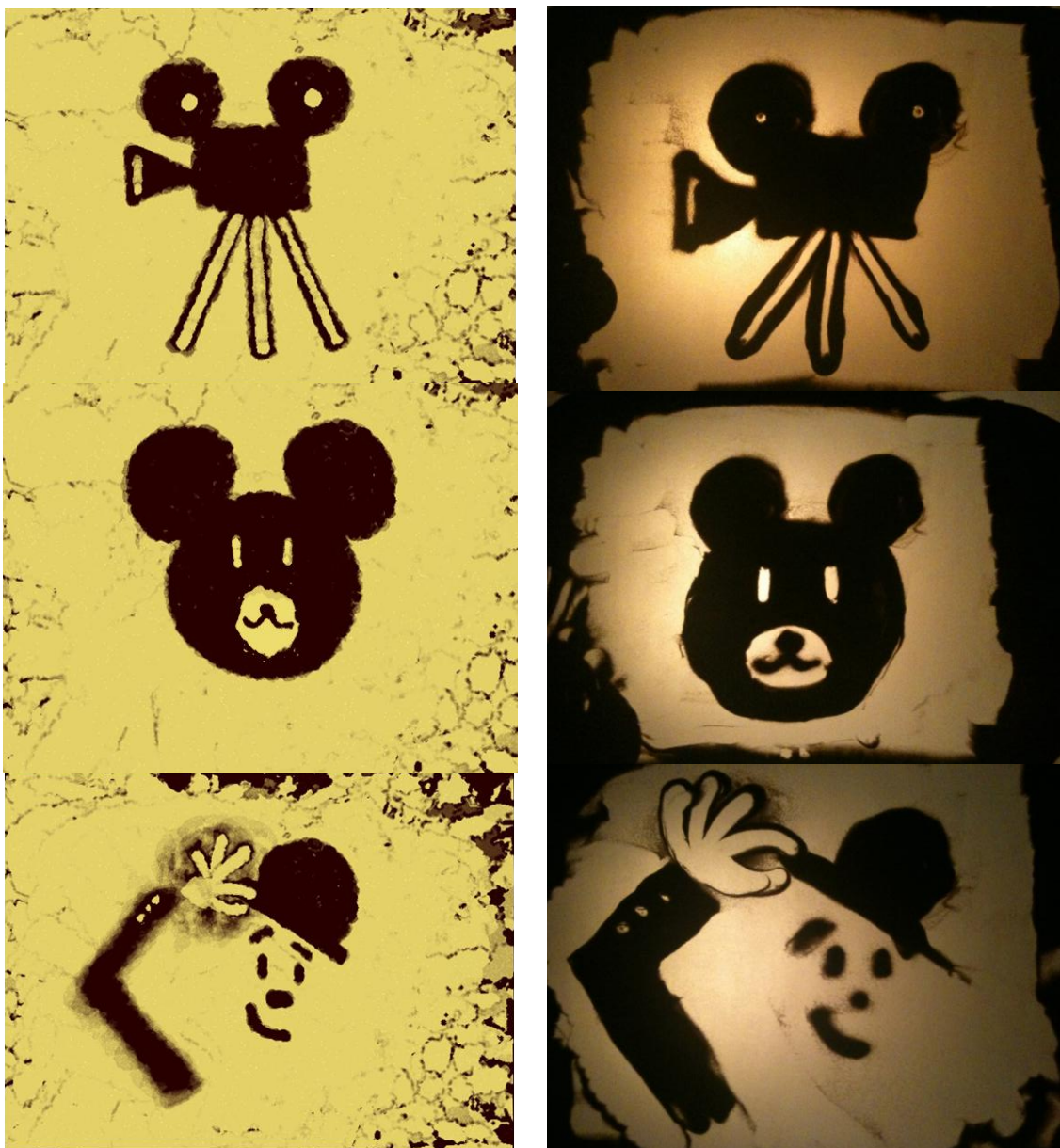


拡げる

図 4-24 「削る」の実行結果

4.4.3. 実行例

前項までで定義した砂の表現や砂の振る舞いに基づいて、前節で製作したインターフェースによる入力により描画した例を図 4-25に示す。(1)で示すように描画が行えており、実際の砂で同一の描画物を描いた(2)との比較では、映写機、熊、帽子を被った人というように、形状は異なるが描画物が同一のオブジェクトであることが確認できる。



(1) シミュレーション

(2) 実環境

図 4-25 シミュレーションの実行例と実際の砂との比較

4.5. 実験と考察

シミュレーションが作品制作の練習環境として機能するためには、実時間での処理が必要となる。また、実際の砂を用いて制作したときと同様の制作過程、および、制作結果が得られる必要がある。

そこで、それぞれ個別の処理として実装した「置く・撒く・削る」の各技法のシミュレーションにおいて、複数の環境での実施時の処理速度を計測する。これにより、シミュレーションが実時間での処理という、練習環境として機能するうえでの要件を満たしているかを確認する。

また、同一の描画物をシミュレーションと実際に砂を用いた環境でそれぞれ制作し、制作結果と制作に掛った時間、制作に使用していた技法の比較を行う。これにより、シミュレーションにおいて、実際の制作と同様の制作技法の組み立てにより作品の制作が可能であるかを確認する。

実験は、表 4-2 で示す環境により実施する。また、4.4 項で示した計算式における変数の値は、それぞれ表 4-3 に示すように設定する。

表 4-2 実験環境

OS	Windows Vista Business
CPU	Intel Core 2 Duo E6400 2.13GHz
Memory	4GB
Graphic Card	ATI Radeon HD 4800 (RV770)
Camera	FPS: 30fps Resolution: 640x480 pixel

表 4-3 実験における変数値

変数	T	h	t	s_1	s_2	v	s_3
値	1.0	0.2	30	2.0	0.25	0.2	0.5

4.5.1. 処理速度

手を接地させてから、それをポインタとして認識するまでの時間を、シミュレーションにより作品制作を行っている様子を撮影した映像から計測する。また、「置く・撒く・削る」の3動作のフレーム単位での処理時間を、プログラム中のタイマにより計測する。このとき、各技法の適用により配置される砂量や、すでにキャンバスに配置されている技法の適用範囲の砂量に応じて、処理時間が大きくなることが推測される。

このため、計測は実際の制作において発生しうる、

- 指先1本
- 指先10本
- 片手の掌
- 両手の掌

の接地の各条件で実施する。

計測の結果、ポインタの認識までに必要な時間は平均で0.5秒程度であり、これは、制作したテーブルトップ型のインタフェースに搭載されたWebカメラが、取得画像を表示する際に発生する遅延と同等であった。このことから、ポインタ認識の処理時間は、実時間処理を実現するうえで無視できるほどに小さいといえる。

また、表 4-4に示すように、「置く・撒く・削る」のいずれの操作時も、30fpsでのフレームの更新間隔である1/30sより実行時間が小さくなった。このことから、処理落ちのないシミュレーションが実現できているといえる。

以上より、処理時間の面では、シミュレーションが練習環境として機能するといえる。

表 4-4 計測結果

条件	面積 (px)	処理時間 (ms)		
		置く	撒く	削る
指 1 本	300	1	1	3
指 5 本	1700	1	1	3
手側面	3500	2	2	5
片手	13000	3	4	9
両手	27000	5	5	10

4.5.2. 作品の制作

シミュレーションによる制作と実際の砂による制作について、描画結果、制作時間、制作方法を比較することにより、シミュレーションの再現性・有効性を確認する。

制作する作品は、Ferenc Cako氏の作品を参考に作成した図 4-26の絵コンテを基にしたものとし、シミュレーションと実際の砂の双方とも、絵コンテの説明にある技法を用いて制作する。このとき、絵コンテは上から順にシーン1, 2...とする。

実験では、この絵コンテを被験者10名に提示し、実際の砂とシミュレーションの双方で作品制作を行ってもらう。このとき、制作技法実施時の動作と、各シーンで制作にかかった時間を観測し、それらを比較する。なお、実験の実施にあたり、各被験者には事前にそれぞれの環境で一通り制作技法を実施してもらい、操作に慣れた状態で実験を行う。

また、制作の慣れが計測結果に反映されないよう、被験者A～Eについては実際の砂による制作を先に行い、F～Jについてはシミュレーションによる制作を先に行うことで、平等な比較となるよう配慮する。

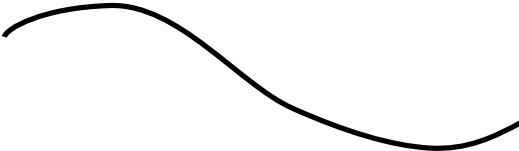
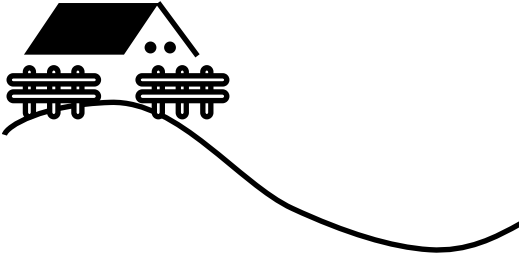
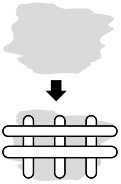
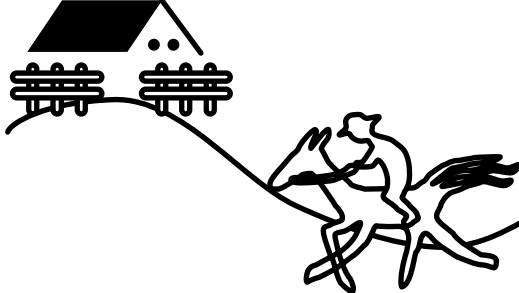

<h1 style="text-align: center;">Sand Animation</h1>	<p>下地の作成： 右の砂山を「拡げる」ことで砂を敷き 「撒く」ことで隙間を埋める</p> <p>文字の描画： 下地を「削る」ことで文字を描画</p> <p>キャンバスのクリア： 「拭う」ことで画面をクリア</p>
	<p>丘の描画： 「置く」ことで丘を描画</p>
	<p>家の描画： 「置く」ことで屋根を描画</p> <p>柵の描画： 「撒く」ことで下地を作成 「削る」ことで柵を描画</p> 
	<p>馬の描画： 「撒く」により下地を作成 「削る」により馬を描画</p> <p>人の描画： 「撒く」により下地を作成 「削る」により人を描画</p> 

図 4-26 絵コンテ

描画結果

絵コンテに基づいて被験者が制作したサンドアニメーションの、絵コンテと同様の描画となっている状態のシミュレーションのキャプチャ画像、および、実際の砂によるキャンバスの写真の一例を図 4-27に示す。左がシミュレーションによって制作したもので、右が実際に砂を用いて制作したものである。

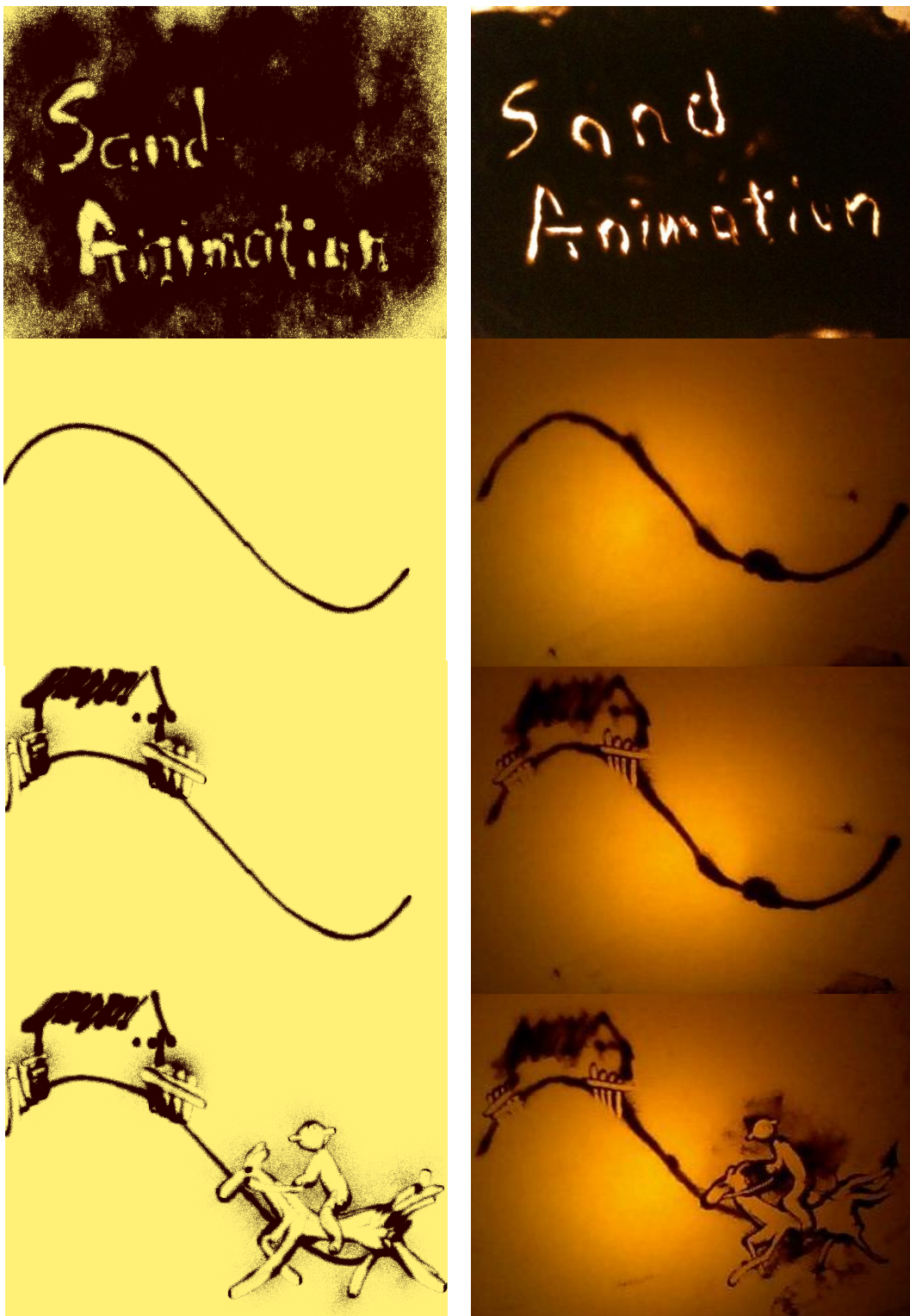
図が示すように、ディスプレイのキャプチャと実物の撮影写真であるため、背景色に差異がみられるといった相違点がある。また、それぞれ一回の施行での描画であり、最初に砂を配置したり除去したりした場所の差異により描画物の形状に影響が出ることから、柵の向きや人の傾きなど、各描画物の形状に差異がみられる部分もある。しかしながら、それらは同一の描画物であると認識でき、全体としては、様々な技法を用いた作品が同一の描画物として描かれていることが確認できる。

一方で、描画に表れない砂の状態が、現実のものとは異なっているケースが発生していることが想定される。

4.4.1で述べたように、サンドアニメーションの制作過程において、砂が大規模に崩落するまで積み上がることは少ない。そのため、「置く・撒く・削る」の各技法において、提案手法では計算式に基づいて、配置する砂を配置済みの砂の上に加算するという単純な加算処理を行っており、配置後の崩落については考慮していない。このため、例えば一定の地点において「置く」を実施し続けると、その地点に局所的に砂が積み上がるといった、実際には物理的に実現不可能な砂の形状が発生する可能性が生じる。

実験においては砂量が光を完全に遮断する T を1.0、「置く」が実行されたときに1フレームに積み重なる砂の最大量 h を0.2、フレームレートを30fpsとしていることから、シミュレーションでは0.2秒弱で光が完全に遮断される高さになる。個人差があるため正確な数値ではないが、各パラメータは実際に試行して計測した時間から逆算した値であり、実際の砂と同様の状態となることが想定される。

このようなパラメータが設定された実験では、絵コンテで示すように「置く・撒く・削る」の各技法により描画が行われたが、実験結果から、いずれの被験者も実際の砂と同等の描画ができていた。このことから、アニメーションの描画を目的に操作した場合においては、実際の砂において発生しないような極端な状態は発生しないと考えられる。



(1) シミュレーション

(2) 実環境

図 4-27 絵コンテに基づいて制作したサンドアニメーション

制作時間

つぎに，それぞれのシーンについて被験者が制作に要した時間を表 4-5に示す．

表 4-5 制作時間（単位：秒）

方法	砂				シミュレーション			
	1	2	3	4	1	2	3	4
被験者 A	24.6	8.7	26.8	25.3	37.5	11.5	31.5	29.0
B	22.6	5.3	16.6	27.6	38.8	7.9	26.0	35.4
C	18.8	13.2	32.3	43.4	35.9	14.4	38.9	45.5
D	12.8	5.6	10.3	14.0	22.8	9.1	16.4	23.3
E	26.1	11.4	24.2	34.4	40.9	12.3	31.5	46.9
F	22.4	7.6	20.7	36.4	37.9	11.4	34.2	40.6
G	31.5	11.9	24.1	29.9	51.3	14.6	41.0	43.5
H	19.8	8.2	10.7	22.1	30.7	12.0	18.4	26.4
I	22.3	9.0	17.6	30.1	44.4	9.2	21.2	31.9
J	23.6	6.1	14.1	27.9	45.2	10.1	32.6	33.9
平均	22.5	8.7	19.7	29.1	38.5	11.3	29.2	35.6

表より，いずれの被験者も実際の砂とシミュレーションとで各シーン1.1～1.9倍程度の制作時間の差が表れたことが確認できる．また，各シーンにおいて砂とシミュレーションとで有意差が現れるか t検定を実施したところ，表 4-6で示すような結果が得られた．これらの結果は， $p < 0.01$ を有意差とした場合に，いずれのシーンにおいても有意差があることを示している．

表 4-6 表 4-5 における t 検定の実施結果

シーン	1	2	3	4
p	$6.86 \cdot 10^{-7}$	0.000204	0.000258	0.000774

これは，砂を用いた実際の制作において「撒く」や「置く」はテーブルに手を接地させる必要がないが，製作したテーブルトップ型のインタフェースでは，接地を維持しながら手を移動する必要があり，手とテーブル間に摩擦が発生するなど，空中での移動に比べて移動量が制限されることが，その一因であると考えられる．

4. サンドアニメーションのシミュレーション

また、実際の砂との接触の感覚がないため、「置く・撒く」では配置された量を、「削る」では削られる量を、画面を確認しつつ操作する必要がある。加えて、4.5.1項で示したように、Webカメラを入力を検知に用いるというハードウェアの制約上、ポインタの認識に500ms程度の時間を要する。

これらのことが、実際の砂とシミュレーションにおいて、制作時間の差を発生させる原因である考えられる。

つぎに、各シーンにおける所要時間をみると、砂ではAとC以外の被験者および全体の平均では $2 < 3 < 1 < 4$ の順となっている。一方で、シミュレーションではC以外の被験者および全体の平均は、 $2 < 3 < 4 < 1$ の順となっており、時間比でみたときにC以外の被験者はシーン1の順位が一致していない。

これは、シーン1が砂をキャンバス全域に敷き詰めて、かつ、キャンバス全域を拭くという画面全域を対象とした作業を行う必要があり、その際に画面のみからキャンバスが意図した状況となっているか確認する必要があるためであると考えられる。

一方でシーン2~4については、いずれの被験者においても実際の砂とシミュレーションの双方で制作時間の大小関係が一致している。

このことから、シーン1のようにキャンバスの全域を対象とするような制作では若干の時間を要するものの、全体で見ればシミュレーションにおいてアニメーションという一連の流れが再現できているといえる。

制作方法

図 4-28はインタフェース上で「削る」の操作を実施している様子である。家の右側にある柵を構成する横向きの2本の木片を、人差し指と中指を用いて砂を削ることにより描画していることが確認できる。これは、実際のサンドアニメーションの制作においても用いられる技法であり、シミュレーションが練習環境として機能するだけのレベルになっていることを裏付ける、1つの判断基準になるといえよう。



図 4-28 インタフェース使用例

また、制作中における技法の利用状況を調査したところ、絵コンテに技法が書かれていたこともあるが、いずれの被験者も実際の砂とシミュレーションとで、各シーンとも同一の技法・手順によりアニメーションを制作していることが確認できた。

一方で、制作技法実施時の操作については相違もみられた。「削る」は、手に砂が触れないものの、実際のサンドアニメーション同様に描画物に接地したインタラクションとなるため、実際の砂においてもシミュレーションにおいても、すべての被験者が同様の操作により技法を実施していた。それに対して、「置く」と「撒く」は手で砂を掴む必要が無いため、人差し指や掌で操作するなど、実際の入力形態と異なった形が見受けられた。

4. サンドアニメーションのシミュレーション

しかしながら、シミュレーションにおいて、被験者は操作時に「置く・撒く・削る」を事前に選択する必要があるため、どの技法を用いるかの明確な意思表示がなされているといえる。つまり、たとえ実際の砂とシミュレーションとで技法実施時の操作が異なる場合においても、被験者は同一の技法を用いていると認識しているといえ、これは、いずれの被験者も実際の砂とシミュレーションとで、同一の技法の組み立てによりアニメーションを構成していたことから確認できる。

また、4.2.3で示すように、サンドアニメーションにおいて描画物を描くとき、その方法は複数ある。実験においては詳細な絵コンテがあったこともあり、同一の技法で描画を行っていたが、仮に異なる技法を用いていても、結果として意図したアニメーションが制作できれば問題はないと考えられる。本研究では、シミュレーションにおいて実際の描画物に近い描画結果が得られており、また、アニメーションも構築できている。

このように、シミュレーションでは実際の砂の場合と同様の技法を組み立てることにより描画が行え、また、アニメーションも構成できる。これらのことから、提案手法によるサンドアニメーションのシミュレーションが、実際の「制作」の練習の場、また、試行錯誤を要する「構想」の場としても機能していると考えられる。

4.6. おわりに

本研究では、サンドアニメーションの制作環境と制作技法を調査して体系化し、それぞれの技法における砂の振る舞いを定義した。また、手で表示面に触れることで、その接地形状を入力として扱えるテーブルトップ型のインタフェースを制作した。これらより、サンドアニメーションのシミュレーションを実現した。また、被験者実験を行うことで、シミュレーションが練習環境として機能し、「制作」を支援できることを明らかにした。

4.6.1. 結論

本研究では、サンドアニメーションの創作における「制作」の支援を行った。

サンドアニメーションは、制作環境や技法が一般化されていないため、アーティストの作品映像からサンドアニメーションの制作環境・技法の調査を行った。ここで得られた調査結果から、シミュレーションのインタフェースとしてテーブルトップが望ましいと判断し、FTIRを用いて、テーブルに接地した手の形状をそのまま入力にできるマルチタッチ式のテーブルトップインタフェースを製作した。

シミュレーションが練習環境として機能するためには、このインタフェース上で、実際の制作に用いる技法が行える必要がある。そのため、制作の動作と砂の関係性を定義することで、各技法の手の動作、すなわちテーブルトップへの入力に対応する、砂のふるまいを再現した。

これらにより構成されるシミュレーションが練習環境として機能するか、処理速度を計測した。結果、様々な状況下において実時間での動作が保障された。また、再現性について調査するため、被験者実験により実際の砂とシミュレーション双方の作品を制作してもらった。その結果、制作時間については実際の砂と比較してシミュレーションのほうが大きくなったが、描画結果には同一性があり、また、制作に用いた技法やその順番については、実環境とシミュレーションとで同様となったことから、その有効性と再現性が確認できた。

これらより、制作過程を提示する創作作品であるサンドアニメーションにおいて、「制作」の支援が実現できたといえる。

4.6.2. 展望

本研究で提案したシミュレーション手法により、実際のサンドアニメーションと同様の制作技法の組み立てによりアニメーションの構成が行え、また、実際の描画結果に近い画像によるアニメーションが制作できるようになった。

一方で、実際にはテーブルから手を離して行う技法も、製作したテーブルトップインタフェースではポインティングのために接地する必要があり、実環境とシミュレーションとで制作操作に相違がある。また、手で砂の感触が得られないために画面を確認しながらの制作となることも実際の環境と異なり、考察で述べたように描画状況の確認といった作業により、制作時間に影響があることが実験から確認できている。したがって、接地を必要とせず、また、砂の感触が得られるインタフェースについて検討する必要がある。

また、現状では実施者は無地のキャンバスに作品を描いていく。しかしながら、非熟練者にとってなにもない状態から制作を始めることは容易ではない。そこで、グレースケール画像からなる絵コンテを与えることで、そこから描画の手順を自動的に生成・提示できるようにするなど「構想」の部分についても支援し、それに基づいてガイド的な要素を取り入れるなどすることにより、作品の「制作」を支援する環境を整えていきたいと考えている。

その他、平面のキャンバスを創作の場としている創作作品は様々あり、図 4-29で示すように、本研究において製作したインタフェースによりそれらがシミュレートできると考えられる[74][75]。そのため、今後はインタフェース的な観点から、様々な創作作品のシミュレートが行えればと考えている。



(1) 実環境



(2) シミュレーション

図 4-29 レインボーアートのシミュレーション例

5. 考察

本研究では、制作過程をパフォーマンスとして提示する創作作品の支援を目的としている。2章で示した仮説に基づき、3章においては、バルーンアートを対象に「制作過程のモデル化」により「構想」の支援を、4章においては、サンドアニメーションを対象に「対話型による制作過程の疑似体験」により「制作」の支援を行った。3,4章で示した構造解析およびシミュレーションの各手法が有効であるか、総合的に考察する。

5.1. 検討事項

1章で示したように、創作作品が完成に至るまでのプロセスには、素材や制作手順などを考案する「構想」と、考案した制作手順に基づいて造形を行う「制作」とがある。そのため、支援を行おうとしている創作作品が、そのどちらに完成を困難なものとする要因があるかを判断し、その上で支援方法を検討する必要がある。

また、2章で示したように、「構想」と「制作」においてもいくつかの工程があり、創作作品により問題となる要因を含む工程は異なる。創作作品の制作支援としては、「制作過程のモデル化」、「対話型操作による制作過程の疑似体験」「実際の制作の支援」の3種があるが、制作過程をパフォーマンスとして提示する創作作品においては、その制作過程における難しさが聴衆の受ける印象と関連すると考えられ、「実際の制作を支援」することが印象を損なうことにつながりかねない。そのため、前二者による支援が有効であると考えられる。

以上より、対象の創作作品に対して、どのような工程をどのような方法によって支援するかを適切に設定することが、その支援を有益なものとするか否かを決定づけるものとなる。本研究においてそれが成し得ていたかを検討する。

まず、バルーンアートにおける「構想」と「制作」に関して、それを困難とさせている要因について考え、そのうえで、本研究において行った支援の有効性について考える。つぎに、サンドアニメーションについても、「構想」と「制作」に関して、それを困難とさせている要因について考え、そのうえで、本研究において行った支援の有効性について考える。最後に、これらを踏まえて総合的に考察する。

5.2. 「構想」の支援

バルーンアートでは、「制作」においてツイストバルーンという素材の準備が必要となる。また、制作中に力の掛け具合を誤ることによりバルーンが割れる失敗といった問題も存在するが、それを発生させうる造形そのものはバルーンをひねるという単調な作業であるといえる。一方で、ひねるという変形のみで形状を完成させるという制約から、完成形状が想定できなかったり、制作手順が導出できず思い描いた形状が実際に制作できないといった「構想」上の問題点がその特徴として挙げられる。

バルーンをひねる作業自体は、バルーンアートのいかなる作品においても出現するものであり、その支援はひねる作業の反復を強いるものとなるため、創作の支援として優先度が高いものではないと考える。一方で、完成形状の想定や思い描いた形状の制作については、経験を積むことによりある程度は行えるようになることが考えられるが、規模が大きくなるとそれも容易ではない。また、実際の制作の前に、理論的に正しい制作手順について、視覚的に確認が行えることには意義があると考えられる。

そこで、3章では構造解析による制作手順の導出というアプローチにより、バルーンアートの創作を支援した。1本のバルーンから造形されるバルーンアートが、バルーンを線として考えたときに一筆書きが可能となる性質を持つという点に着目し、グラフ理論に基づいてバルーンアートの構造を定義した。グラフ理論ではそのグラフを一筆書きできるものをオイラーグラフといい、その際の一筆書きの経路をオイラー経路という。バルーンアートをグラフ化することでオイラーグラフとなり、そのオイラー経路を求めることにより構造の解析が行え、制作手順の導出、形状の成立判定、難易度の評価の各手法が提案できた。これら手法については、実際のバルーンアートを対象に、ロック順序、経路、制作物の違いについて、比較実験を行った。結果、解説書に掲載される手順と同様のものが得られた。被験者実験も行い、人間が感じる難しさと提案手法による評価とが一致するか調査したところ、それらが一致したことから、その有効性を確認できた。以上より、制作過程がモデル化でき、制作手順が推測・選択できたといえる。

また、提案手法に基づいて構想支援システムを構築した。システムではバブルを配置して概形を入力することにより、それをオイラーグラフとなるよう整形し、提案手法に基づき解説書に掲載されているような形態での制作手順の表示を可能とした。これについても被験者実験を行い、結果、非熟練者である被験者がバルーンアートとして成立する形状を作れたことから、完成形状の想定が支援できたといえる。また、複雑でない形状については、表示された制作手順に基づき、被験者がバルーンアートを実際に「制作」できた。

これらより、「構想」の支援についての有効性が示されていると考えられる。

5.3. 「制作」の支援

サンドアニメーションは、「制作」のために砂やキャンバスといった環境構築が必要となる。また、アニメーションとしての一連の流れを「構想」する作業が必要となるが、変形させた砂を元の状態に戻すことは難しく、失敗が修正できないことから、ミスなく手順を実施してアニメーションを完成させるという「制作」に困難さを有する。このため、「構想」が素晴らしいものであっても、有する技術でそれが「制作」できないのであれば、パフォーマンスを伴う創作作品としての意味は薄れてしまうといえる。

また、サンドアニメーションは手と砂のインタラクションによりキャンバスに描画を行うが、これは、筆などに比べると繊細なコントロールが難しいものであるといえる。このため、単純に描画物としてみた場合には描画可能な対象物の範囲は狭い。このように、どのようなものであれば描画が可能であるかといった感覚は、「制作」を繰り返して経験を積むことにより、次第に理解できるものになっていくことが考えられるため、簡便に「制作」を試行できる場の提供に意義があると考えられる。

そこで、4章ではシミュレーションによる手順の習得というアプローチにより、サンドアニメーションの創作を支援した。

サンドアニメーションは制作環境や制作技法が体系化されていない。そこで、アーティストの作品映像から調査を行い、制作環境や制作技法を体系化した。調査から、制作の場となるキャンバスの再現には、表示面と入力面が一体化しており、手の形状をそのまま入力できるものがインタフェースとして相応しいことが明らかになった。そこで、赤外線的全反射の性質を利用し、触れた個所のみ反射が漏れる FTIR という仕組みを用いて、テーブルに触れた手の形状を取得可能なテーブルトップインタフェースを構築した。また、調査により体系化した技法と、そのときの砂の振る舞いを対応付ける必要があるため、ハイトフィールドにより砂を扱い、各技法における砂の振る舞いを定義した。以上より、作品の構造をモデル化できたと考える。

これら手法に基づき実装したシミュレーションが練習環境として機能するか、計測実験と被験者実験を行った。計測実験においては、様々な状況における処理速度を測定した結果、処理落ちがなく実時間で動作していることが確認できた。被験者実験では、実環境とシミュレーションにおける描画結果、制作時間、制作技法の組み立ての差異について調査した。結果、制作時間には有意差が見られたが、描画結果と技法の組み立てでは同一の結果が得られたことから、造形における手順の実施が可能であり、対話型での制作過程の疑似体験が実現できたと考えられる。

これらより、「制作」の支援についての有効性が示されていると考えられる。

5.4. 総合的な考察

本研究では、バルーンアートにおいて、構造解析による「構想」の支援を行った。創作のプロセスにおける、制作手順の推測が困難であるといった問題に対し、構造解析により制作手順の導出を実現し、比較実験によりその有効性を確認した。また、完成形状の想定が容易ではないといった問題に対し、構想支援ツールを制作し、被験者実験によってその有効性を確認した。

一方で、サンドアニメーションにおいて、シミュレーションによる「制作」の支援を行った。創作のプロセスにおける、素材や道具などを準備する環境構築が容易ではない、また、失敗が修正できないという問題点に対し、実際の動作に近い入力を可能とするインタフェースを製作、各技法における砂の振る舞いを再現することで、アンドゥも可能なシミュレーションを実現し、被験者実験によりその有効性を確認した。

これらにより、それぞれの創作作品について、被験者が実際に作品の創作が行えたことから、バルーンアートでは「構想」、サンドアニメーションでは「制作」の支援により、制作過程の理解が可能になったと考える。

以上より、どのような工程をどのような方法によって支援するかといったことが、本研究の事例においては適切に設定できていたと考えられる。また、制作過程をパフォーマンスとして提示する創作作品の支援として、「構想」において「制作過程のモデル化」が、「制作」において「対話型による制作過程の疑似体験」が有効であることが明らかとなったと考える。

本研究の成果により、人々が創作活動に関わる機会を創出できることが考えられる。特に本研究で対象とする制作過程をパフォーマンスとして提示する創作作品においては、他の創作作品にはない要素として、その制作における感動を制作者と聴衆の双方がその場で共有できるという特徴を持つ。そのため、本研究の成果は、人と創作活動との距離を縮めるだけでなく、人と人との距離を縮めるものとしての役割も果たせるものになるのではないかと考える。

また、本研究における成果は、芸術作品などの、感性的な要素が影響する創作についても応用できる可能性を持つと考えられる。

6. 結論

6.1. 総括

本論文では、制作過程をパフォーマンスとして提示する創作作品における、構造解析とシミュレーションという2つの観点による制作支援を目的とし、バルーンアートとサンドアニメーションの2つの創作作品を対象に、その支援手法について提案した。

これにより、制作過程を提示する創作作品における「構想」と「制作」の支援を実現した。

まず、1章において、創作作品が完成に至るまでのプロセスには「構想」と「制作」とがあり、それぞれの段階において制作を困難とする要因があることを示した。また、制作過程を提示する創作作品が、他の創作作品と比較して実演中に制作の失敗が許されないという特徴を持ち、失敗を回避するためには、制作手順や制作技法など創作作品の制作過程について、実演に先立ちあらかじめ把握しておく必要性について述べた。

また、2章では、計算機を用いることにより創作活動を支援している研究事例を取り上げ、これらを「制作過程のモデル化」、「対話型による制作過程の疑似体験」、「実際の制作の補助」の3つに分類した。制作過程を提示する創作作品においては、制作の難しさがパフォーマンス時の聴衆の印象を決定付ける一因であるため、制作の支援においては「制作過程のモデル化」および「対話型による制作過程の疑似体験」が有効であると仮定した。

これらを踏まえて、3章において、バルーンアートを対象に制作手順を導出する構造解析を実施した。

グラフ理論に基づき、バルーンを頂点と辺により扱うことで、その構造を定義して解析し、解析に基づくバルーンアートの形状の成立判定、制作手順の生成、難易度の評価の各手法を提案した。また、提案手法を取り入れ、入力されたバルーンアートの概形から制作手順を出力可能な構想支援システムを開発した。

提案手法を実際のバルーンアート作品に適用し、また、被験者実験により構想支援システムでバルーンアートのデザインを行うことにより、その有効性を確認した。

これにより、想定する完成形状からの制作手順の導出という、「構想」が容易ではないバルーンアートにおける制作過程の理解を補助し、非熟練者の制作における

- 概形からの制作手順の導出と手順の記憶
- 難易度の算出による制作物の選定

といった支援を実現した。

4章においては、サンドアニメーションを対象に、練習環境となるシミュレーションを実現した。

サンドアニメーションはアーティストが少なく、その制作環境や技法が体系化されていない。そのため、アーティストの作品映像から制作環境や技法を調査し、それらを体系化した。これらの技法を実際の動作に近い形で実現できるインタフェースとしてテーブルトップに着目し、テーブルに手を触れることで、その形状を入力とできるインタフェースを製作した。また、体系化した技法と砂の振る舞いとの関係性をそれぞれ定義した。

これらより擬似的な制作環境を構築し、実際の作品とシミュレーション環境における制作過程および結果を比較することにより、提案手法の有効性を確認した。

これにより、砂という操作が難しいものを用いてアニメーションとなるような描画物を描くという、「制作」が容易ではないサンドアニメーションにおける制作過程の理解を補助し、非熟練者の制作における

- 実環境では容易ではないやり直しも可能な練習環境の提供
- 作品のアニメーションとしての一連の流れの確認

といった支援を実現した。

また、これらを5章において総合的に考察した。制作過程をパフォーマンスとして提示する創作活動の支援において、「制作過程のモデル化」および「対話型による制作過程の疑似体験」が有効であることを確認するため、バルーンアートとサンドアニメーションを対象に、一方は「構想」を、他方は「制作」の支援手法を提案した。これらにより、被験者が実際に作品の創作を行えるようになったことから、その有効性が確認できた。

近い将来、電子社会の設計が推進されることにより、労働に従事する時間が減少した人々が、それにより生じた余暇を創作活動に充てることが示唆されている。本研究で示した成果は、人々と芸術とを身近にするものとなることが期待できる。また、芸術制作などの感性的要素が作用する領域への応用などの可能性を秘めており、コンテンツの時代とも形容される21世紀の社会の発展に寄与できるものとする。

6.2. 展望

3章で示したバルーンアート、4章で示したサンドアニメーションの双方とも、それぞれの展望で述べたように発展的な課題が存在する。また、本研究において提案した手法は創作作品の制作支援以外の領域にも適用可能であると考えられる。

そのため、今後は3、4章で述べた展望に加え、対象を様々な創作作品に広げ、以下で述べたような観点から様々検討したい。

6.2.1. 本研究の発展

本研究では、3章で示したバルーンアートについては、1本のバルーンからなる作品のみを支援の対象としている。しかしながら、複数本のバルーンにより構成される作品もあり、それらは1本の作品と比較して「構想」が困難なものとなるため、今後は、複数本からなるバルーンアートについても提案手法が適用できるよう、手法の改善を行いたいと考えている。

また、4章で示したサンドアニメーションについては、実環境に比べてシミュレーション環境のほうが制作に時間がかかることが分かっている。これは、実際の動作においてキャンバスに触れる必要がないものであっても、現在のインタフェースでは触れる必要があったり、ハードウェアの制約上、入力検知に時間を要するためであると考えられることから、今後はインタフェースについて検討したいと考えている。

また、本研究では、創作を困難とさせる要因を考慮した上で、バルーンアートでは「構想」、サンドアニメーションでは「制作」の支援を行っている。しかしながら、バルーンアートの「制作」、サンドアニメーションの「構想」に問題点が存在しないわけではない。

バルーンアートでは、複数本のバルーンにより構成されるなどツイストやロックの回数が増えてくると、手順を記憶して実演するのが難しくなり、また、ツイストの回数が増えるということは、バルーンが割れるなどして「制作」に失敗してしまう可能性が高まるといえる。そのため、計算機上で実際の制作と同様に手を用いて制作を練習できるインタフェースを備えたシステムが、「制作」の支援において望ましいと考えられる。

一方で、サンドアニメーションも、長時間の作品になると「構想」を練ることが重要になってくる。そこで、グレースケール画像からなる絵コンテを与えることで、そこから描画の手順やシミュレーションを自動的に生成・提示できるようにして、「制作」する前の段階で、まず、「構想」について確認できるシステムが、「構想」の支援について望ましいと考えられる。

6.2.2. 文化の保存・継承の支援

本研究において示した「構想」と「制作」の各段階における制作過程の理解は、計算機による支援を前提としている。このため、対象とする創作作品は、計算機上で取り扱えるデータ、つまり一定の決まりに基づいた構造となる。

これを応用することで、本研究のテーマである作品の創作支援のみならず、これまでに形として残すことが困難であった伝統文化について、その構成要素の定義を可能にすることが期待できる。伝統文化には、地域限定のものなど様々あるが、その伝承が途絶えかかっているものも少なくない。これは、体系化されていないために体験的に伝えることしかできないケースや、また、諸制約により、実際の実施が困難なケースも存在する。このような伝統文化を保存・継承するうえで、本研究のように構造解析を行ったりシミュレーション環境を提供するような取り組みは、有効なアプローチとなる可能性を有する。このため、今後はそういったものも対象に、研究を行っていければと考えている。

6.2.3. 人の感性要素の解明

創作作品を記号化して理論的な考察対象とすることにより、たとえば 3.3.2 項で示すような、人間が制作において感じる難しさ数値化することが可能となる。人間の感性にはいまだ不確定な部分も多い。本研究で示したバルーンアートは、制作過程をパフォーマンスとして提示する。このとき、その制作の難しさが作品の芸術性を高めているとも考えられるが、本研究で定量的に得られた難しさなどの成果を応用することにより、将来的に芸術性という従来は定量的に表せなかったものを表すことに繋がる可能性がある。

このように、本研究で得られた難しさの数値化のような、感性的な要素を伴う情報の定量化は、人の感性的要素を解明する上で、その1つの手がかりとなる有益なアプローチであると考えられる。このため、今後はそういった観点から、芸術作品をはじめ、様々なものを対象に研究を進めていきたいと考えている。

謝辭

多くの方のお力添えにより、博士論文を完成させることができました。

直属の指導教官であり主査である名古屋大学大学院情報科学研究科教授 安田孝美氏には、博士論文に関して幅広くご助力を賜りました。ここに深謝の意を示すとともに、遅筆なためご心配・ご迷惑を多々お掛けし、また、研究以外のことでご心労をお掛けしましたことを深くお詫び申し上げます。研究グループの教官であり、副査をお引き受けくださった同教授 横井茂樹氏には、博士論文の執筆に関してご助言を賜りました。深く感謝するとともに、同氏にも研究以外のことで多々ご迷惑をお掛けしましたこと、お詫び申し上げます。同様に研究グループの教官であり、副査をお引き受けくださった同准教授 茂登山清文氏には、上記二氏とは異なった観点からの貴重なご助言を賜りましたこと、深く感謝いたします。副査をお引き受けくださった同教授 間瀬健二氏には、論文の完成度を高めるための極めて有益なご助言を数多く賜りましたこと、深く感謝いたします。

学部および大学院博士前期課程時に在籍し、現在も共同研究などで交流いただいている中京大学情報理工学部 **Open Media Lab.**の教員の皆様にも、深く感謝いたします。同教授 宮崎慎也氏には、学部時代から研究や学会発表でお世話になり、博士前期課程および博士後期課程への進学に関してもお世話になりました。また、研究以外のことでも多々お世話になりました。同准教授 山田雅之氏には、研究の推進や論文の執筆など、研究に関して様々ご相談に乗っていただきました。博士論文として纏められるだけの水準の研究が行えたことは、すべて同氏のお力によるところととっても過言ではありません。同准教授 遠藤守氏には、外部組織との共同研究のほか博士後期課程の進学に際しても大変お世話になりました。また、同氏の推薦もあり応募したコンテストでグランプリが獲得できたことはとても良い思い出になりました。三氏に改めてお礼申し上げます。

また、1人1人すべての方のお名前を挙げられず申し訳ありませんが、研究の推進や博士論文の執筆・提出に際してお世話になりました名古屋大学大学院情報科学研究科の教職員の皆様、中京大学情報理工学部の教職員の皆様に感謝いたします。共に研究活動を行った名古屋大学大学院情報科学研究科 **Media and Design Group**の学生の皆様、中京大学情報理工学部 **Open Media Lab.**の学生の皆様にも感謝いたします。その他、様々な活動でご支援いただいたり接点がありました、すべての皆様に感謝いたします。

最後に、この場をお借りして吉村麻衣氏に心より感謝の意を申し上げます。決して順風満帆とはいえなかった研究活動をここまで続けることができ、また、その成果を博士論文として纏めることができたのは、同氏の存在なくしてありえません。

参考文献

- [1] 片山卓也, 検証進化可能電子社会 : 情報科学による安心な電子社会の実現, 情報処理, vol.46, no.5, pp.515-521 (2005)
- [2] 宇根寛 : 電子国土と地球地図 : -GIS 時代の国家地図作成機関の役割-, 地学雑誌, Vol.117, No. 2, p.387-400 (2008)
- [3] M. Goto, A. Hattori, T. Yasuda and S. Yokoi : A Grassroots Local Safety and Security Information Sharing System Managed by Citizens , International Transactions on Computer Science and Engineering (GESTS), Vol.37, No.1, pp.7-16 (2007)
- [4] 吉田千穂, 横井茂樹 : 都市農山村間における情報交流基盤のあり方について, 社会情報学研究 Vol.15, No.2, pp.109-119 (2011)
- [5] 遠藤守 : 3次元仮想世界を活用したコミュニティサービスの現状と課題, 2007年電子情報通信学会総合大会講演論文集, 基礎・境界, pp.SS-4-SS-5 (2007)
- [6] 中嶋正之 : 巻頭言, 芸術科学会誌 DiVA, No.0 (2001)
- [7] デビット・C. モシェラ : 覇者の未来, IDG コミュニケーションズ (1997)
- [8] 吉田俊介, 星野俊仁, 宮崎慎也, 大関徹, 長谷川純一, 安田孝美, 横井茂樹 : コンセプトデザインのためのデジタルツール「空間スケッチシステム」の開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.6, no.4, pp.313-322 (2001)
- [9] 横井茂樹, 安田孝美 : コンピュータグラフィックス(1), 電子情報通信学会誌, vol.76, no.3, pp.277-283 (1993)
- [10] 横井茂樹, 鳥脇純一郎 : コンピュータグラフィックスによる物体の材質感の表示, テレビジョン学会技術報告, vol.8, no.25, pp.19-24 (1984)
- [11] 幸村真佐男 : コンピュータ・アート黙示録-芸術とシステムに関する覚え書き, 美術手帖, vol.313, pp.114-117 (1969)
- [12] 大泉和文, 宮崎慎也 : 「皇帝列車」 : VR 技術を援用したフェノメナのインスタレーション作品, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.12, no.3, pp.233-238 (2007)
- [13] Hiroshi Ishii, Brygg Ullmer : Tangible Bits : Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms, Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, pp.234-241 (1997)
- [14] 佐藤昌彦 : 創作プロセスの探求と造形教材の提案, 北海道教育大学紀要, 教育科学編, vol.58, no.2, pp.71-80 (2008)
- [15] 山田雅之, RAHMAT BUDIARTO, 伊藤英則, 世木博久, アヤトリにおけるひも図形変形過程の表現とその処理, 情報処理学会論文誌, vol.35, no.3, 497-504 (1994)

- [16] Jun Mitani, Hiromasa Suzuki, Making Papercraft Toys from Meshes using Strip-based Approximate Unfolding, *ACM Transactions on Graphics*, vol. 23, no. 3, pp.259-263 (2004)
- [17] Idan Shatz, Ayellet Tal, George Leifman : Paper craft models from meshes, *The Visual Computer: International Journal of Computer Graphics*, vol.22, iss.9 (2006)
- [18] Yanxi Liu, James Hays, Ying-Qing Xu, Heung-Yeung Shum : Digital papercutting, *ACM SIGGRAPH 2005 Sketches* (2005)
- [19] Tomohiro Tachi : Origamizing 3D Surface by Symmetry Constraints, *ACM SIGGRAPH 2007* (2007)
- [20] Yuki Igarashi, Takeo Igarashi, Pillow : Interactive Flattening of a 3D Model for Plush Toy Design, *Lecture Notes in Computer Science* 5166, pp.1-7 (2008)
- [21] 宮崎慎也, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎, 仮想空間における折り紙の対話型操作の実現, *情報処理学会論文誌*, vol.34, no.9, pp.1994-2001 (1993)
- [22] 水野慎士, 岡田稔, 鳥脇純一郎 : 仮想彫刻システムを用いた版画画像の生成, *画像電子学会誌*, vol. 26, no. 4, pp. 325-332 (1997)
- [23] 曾我麻佐子, 海野敏, 安田孝美 : Web ベースの対話型バレエ振付シミュレーション・システムの試作と評価, *芸術科学会論文誌*, vol.1.1, no.1, pp.30-38 (2002)
- [24] 寺井良太, 中村徳裕, 西尾孝治, 小堀研一: Haptic Deviceを用いた仮想水墨画システムの提案, *2005年電子情報通信学会総合大会講演論文集 情報・システム2*, D-12-141, p.291 (2005)
- [25] 津田藍花, 加藤晴久, 米山暁夫, 半谷精一郎 : ライトによる色相変化特徴量を利用したネイルアートシミュレーション, *2009年電子情報通信学会総合大会講演論文集*, 基礎・境界, p.290 (2009)
- [26] 村上和人, 中山晶, 輿水大和, 福村晃夫 : 似顔絵師システムPICASSOについて, *テレビジョン学会技術報告*, vol.14, no.35, pp.17-21 (1990)
- [27] Chyi-Yeu Lin, Li-Wen Chuang, Thi Thoa Mac : Human portrait generation system for robot arm drawing, In *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp.1757-1762 (2009)
- [28] 山田雅之, 伊藤裕一郎, 世木博久, 伊藤英則, 編物デザインを支援するための編目模様生成システムの作成, *情報処理学会論文誌*, vol.36, no.11, pp.2728-2735 (1995)
- [29] Anikó Ekárt : Genetic Programming for the Design of LaceKnitting Stitch Patterns, *Applications and Innovations in Intelligent Systems XV V, Proceedings of AI-2007, the Twenty-seventh SGA International Conference on Innovative Techniques and Applications of Artificial Intelligence*, pp. 261-274 (2008)

- [30] 土佐尚子, 尾原秀登, 美濃導彦, 松岡正剛 : Hitch Haiku : コンピュータによる俳句創作支援システム, 映像情報メディア学会誌, vol.62, no.2, pp.247-255 (2008)
- [31] 剣持秀紀, 大下隼人: 歌声合成システムVOCALOID, 情報処理学会研究報告, vol.2007, no.102 (2007)
- [32] Shigeki Suzuki, Mamoru Endo, Masashi Yamada and Shinya Miyazaki : Automatic Generation of Drum Performance Based on the MIDI Code, Proc. of NICOGRAPH International 2008, CD-ROM (2008)
- [33] 岩田大輝, 豊浦正広, 茅暁陽 : 写真からの対話的イラスト生成, 情報科学技術フォーラム講演論文集, vol.9, no.3, pp.241-245 (2010)
- [34] 西田絵美, 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美 : ロゴ原案の自動デザインシステムの提案, 電子情報通信学会2種研究会 サイバーワールド (CW) 第15回研究会, pp.23-28 (2010)
- [35] 山本慎平, 鬼沢武久, 大曾根圭輔 : 対話型ロゴタイプデザイン支援, 2011年度人工知能学会全国大会論文集, CD-ROM (2011)
- [36] 学研辞典編集部 : 用例でわかるカタカナ新語辞典, 学習研究社, 改訂第3版 (2011)
- [37] 畑中啓行, 生田大介, 田中敏光, 杉江昇 : 仮想バルーンをモデリングするエデュテイメントソフトの提案, 2000年度電気関係学会東海支部連合大会論文集, p.269 (2000)
- [38] 小坂友里 : 風船の物理特性を考慮したバルーンモデリングの制作支援に関する研究, 東京工科大学2008年度卒業論文 (2009)
- [39] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美 : バルーンアートの構造解析と難易度評価手法の提案, 芸術科学会論文誌, Vol.8, No.4, pp.143-150 (2009)
- [40] 井波恭子 : 空間を彩るバルーンアートハンドブック, 金の星社 (2001)
- [41] たかせさとみ : かんたん楽しいバルーンアート, 池田書店 (2001)
- [42] 大石亜由美 : 子どもと楽しむバルーンアート, いかだ社 (2008)
- [43] R.J. ウィルソン : グラフ理論入門, 近代科学社 (2010)
- [44] Masahiro Ura, Masashi Yamada, Mamoru Endo, Shinya Miyazaki, Takami Yasuda : Analysis for Balloon Modeling Structure based on Graph Theory, Proc. of NICOGRAPH International 2009, VII-4, 2009.
- [45] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美 : バルーンアートの構造解析と作成支援ツールの開発, 第8回NICOGRAPH春季大会論文集, I-1, CD-ROM (2009)
- [46] 寺崎美保子 : 今すぐできる! バルーンアート ひねってつくる魔法の風船, 新星出版社 (2008)
- [47] 浦正広, 中貴俊, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美 : バルーンアートのグラフ構造に基づく制作手順の生成, HCG シンポジウム 2010 論文集, pp.167-172 (2010)

- [48] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美 : マルチタッチインタフェースを用いたバルーンアートシミュレータの開発, 第 14 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, CD-ROM (2009)
- [49] 寺川晃司, 浦正広, 中貴俊, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美 : テーブルトップインタフェースを用いたバルーンアートのシミュレーション, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.110, no.238, pp.37-42 (2010)
- [50] 昼間行雄 : ファンタスティックアニメーションメイキングガイド, マガジンファイブ (2006)
- [51] Ferenc Cako: Sand Animation, <http://www.sandanimation.com/>
- [52] Ilana Yahav: SandFantasy, <http://www.sandfantasy.com/>
- [53] David Myriam: The moving sand, <http://www.tramage.com/>
- [54] Joe Castillo: A Sand Story, <http://www.sandstory.com/>
- [55] Aleksandra Konofalskaya: Главная страница, <http://www.artsand.org/>
- [56] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美 : サンドアニメーション風の画像生成のためのペイントツールの開発, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.109, no.75, pp.7-12 (2009)
- [57] 原健輔, 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美 : サンドアニメーションの制作技法とそのシミュレーション, 第25回NICOGRAPH論文コンテスト論文集, I-3 (2009)
- [58] Masahiro Ura, Masashi Yamada, Mamoru Endo, Shinya Miyazaki, Takami Yasuda : A Framework of FTIR Table Pressure Sensing for Simulation of Art Performances, Proc. of NICOGRAPH International 2010, S6-4, pp.118-123 (2010)
- [59] Jefferson Y. Han: Low-Cost Multi-Touch Sensing through Frustrated Total Internal Reflection, In Proceedings of the 18th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.115-118 (2005)
- [60] David Wallin: Touchlib: an opensource multi-touch framework, <http://www.whitenoiseaudio.com/touchlib/>
- [61] J. David Smith, T.C. Nicholas Graham : Low-Cost Malleable Surfaces with Multi-Touch Pressure Sensitivity, Second Annual IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-computer System (Tabletop 2007), pp.205-208 (2007)
- [62] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美 : テーブルトップインタフェースを利用したサンドアニメーションの生成シミュレーション, 芸術科学会論文誌, vol.10, no.2, pp.58-67 (2011)

- [63] K. Nakakoji, K. Jo, Y. Yamamoto, Y. Nishinaka, M. Asada : Reproducing and Re-experiencing the Writing Process in Japanese Calligraphy, Second Annual IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-computer System (Tabletop 2007), Newport, RI, pp.75-78, (2007)
- [64] Andres Lucero, Jean-Bernard Marten : Supporting the creation of Mood Boards: Industrial Design in Mixed Reality, Proceedings of the First IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (TABLETOP '06), pp. 127-128 (2006)
- [65] Lang, D., Findlater, L., and Shaver, M. : Coolpaint: Direct Interaction Painting. In Proceedings of Human Interface Technologies Conference (2003)
- [66] P. Vandoren, T. V. Laerhoven, L. Claesen, J. Taelman, C. Raymaekers, and F. V. Reeth : IntuPaint: Bridging the gap between physical and digital painting, Proceedings of TABLETOP 2008, pp.71-78 (2008)
- [67] Philip Tuddenham, Peter Robinson : T3: Rapid Prototyping of High-Resolution and Mixed-Presence Tabletop Applications, Second Annual IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-computer System (Tabletop 2007), Newport, RI, pp.11-18 (2007)
- [68] Matthew Tobiasz, Petra Isenberg, Sheelagh Carpendale: Lark : Coordinating Co-located Collaboration with Information Visualization, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol.15, no.6, pp.1065-1072 (2009)
- [69] Paul Lapedes, Ehud Sharlin, Mario Costa Sousa, Lisa Streit: The 3D Tractus : A Three-Dimensional Drawing Board, Proceedings of the First IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (TABLETOP '06), pp.169-176 (2006)
- [70] Robert W. Sumner, James F. O'Brien, Jessica K. Hodgins : Animating Sand, Mud, and snow, Computer Graphics Forum, vol.18, no.1, pp.17-26 (1999)
- [71] Yongning Zhu, Robert Bridson : Animating Sand as a Fluid, ACM Trans. Graphics, vol. 24, no. 3, pp. 965-972 (2005)
- [72] Ya-Lun Zeng, Charlie Irawan Tan, Wen-Kai Tai, Mau-Tsuen Yang, Cheng-Chin Chiang, Chin-Chen Chang : A momentum-based deformation system for granular material. Journal of Visualization and Computer Animation, vol.18, no.4-5, pp.289-300 (2007)

- [73] Alvin W. Law, Benjamin V. Peck, Yon Visell¹, Paul G. Kry, Jeremy R. Cooperstock : A Multi-modal Floor-space for Experiencing Material Deformation Underfoot in Virtual Reality, IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and Games (2008)
- [74] 原健輔, 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美: FTIRテーブルによる圧力センシングのためのフレームワークの構築とアートシミュレーションへの応用, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.109, no.466, pp.135-140 (2010)
- [75] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美: 形状・圧力センシングを用いたテーブルトップインタフェースによるアート作品のシミュレーション, 第9回情報科学技術フォーラム講演論文集, pp.681-686 (2010)

研究業績

主論文に関連する研究業績

I. 学術雑誌論文

- [1] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美 : バルーンアートの構造解析と難易度評価手法の提案, 芸術科学会論文誌, vol.8, no.4, pp.143-150 (2009)
(芸術科学会論文誌 第9回論文賞)
- [2] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美 : テーブルトップインタフェースを利用したサンドアニメーションの生成シミュレーション, 芸術科学会論文誌, vol.10, no.2, pp.58-67 (2011)

II. 国際学術論文

- [1] Masahiro Ura, Masashi Yamada, Mamoru Endo, Shinya Miyazaki, Takami Yasuda : Analysis for Balloon Modeling Structure based on Graph Theory, Proc. of NICOGRAPH International 2009, CD-ROM (2009)
- [2] Masahiro Ura, Masashi Yamada, Mamoru Endo, Shinya Miyazaki, Takami Yasuda : A Framework of FTIR Table Pressure Sensing for Simulation of Art Performances, Proc. of NICOGRAPH International 2010, pp.118-123 (2010)

III. 口頭発表

- [1] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美 : バルーンアートの構造解析と作成支援ツールの開発, 第8回 NICOGRAPH 春季大会論文集, CD-ROM (2009.03.19)
(第8回 NICOGRAPH 春季大会論文&アート部門コンテスト 優秀論文賞)
- [2] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美 : サンドアニメーション風の画像生成のためのペイントツールの開発, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.109, no.75, pp.7-12 (2009)

- [3] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美: マルチタッチインタフェースを用いたバルーンアートシミュレータの開発, 第 14 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, CD-ROM (2009)
- [4] 原健輔, 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美: サンドアニメーションの制作技法とそのシミュレーション, 第 25 回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, CD-ROM (2009)
- [5] 原健輔, 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美: FTIR テーブルによる圧力センシングのためのフレームワークの構築とアートシミュレーションへの応用, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.109, no.466, pp.135-140 (2010)
(電子情報通信学会 マルチメディア・仮想環境基礎研究会 MVE 賞)
- [6] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美: 形状・圧力センシングを用いたテーブルトップインタフェースによるアート作品のシミュレーション, 第 9 回情報科学技術フォーラム講演論文集, pp.681-686 (2010)
- [7] 寺川晃司, 浦正広, 中貴俊, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美: テーブルトップインタフェースを用いたバルーンアートのシミュレーション, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.110, no.238, pp.37-42 (2010)
- [8] 浦正広, 中貴俊, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美: バルーンアートのグラフ構造に基づく制作手順の生成, HCG シンポジウム 2010 論文集, pp.167-172 (2010)

その他の研究業績

I. 学術雑誌論文

- [1] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美, 横井茂樹 : データ放送におけるモーショキャプチャデータの表示手法の提案, 情報科学技術レターズ, vol.6, pp.355-356 (2007)
- [2] 浦正広, 林茂実, 中村浩司, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美, 横井茂樹 : デジタルデータ放送をインフラとする地域情報化推進モデルの提案, 社会情報学研究, vol.12, no.2, pp.15-23 (2008)

II. 国際学術論文

- [1] M. Kondo, T. Yasuda, S. Yokoi, M. Ura, M. Endo, K. Iwazaki, K. Mouri, M.Noda : A Multi-platform Contents Management System for Online Constellation Learning, Proc. of Communication, Internet and Information Technology (CIIT 2007), pp.73-78 (2007)
- [2] M.KONDO, T.YASUDA, S.YOKOI, M.URA, M.ENDO, K.IWAZAKI, K.MOURI, M.NODA : Astronomy Teaching Resources Management System for Curators using Information Technology, Proc. of International Workshop on the Forefront of Information Technology, ICICIC-2008-WS01-002, CD-ROM (2008)
- [3] Masahiro Ura, Takami Yasuda, Masashi Yamada, Mamoru Endo, Shinya Miyazaki, Koji Nakamura : Map-Oriented Regional Information Management for Data Broadcasting Contents, Proc. of 12th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems, pp.536-542 (2008)
- [4] Mana Fukuyasu, Masahiro Ura, Hideyuki Kuno, Takatoshi Naka, Masashi Yamada, Mamoru Endo, Shinya Miyazaki, Takami Yasuda : Method of Designing Data Broadcasting Contents for Local Community, Proc. of NICOGRAPH International 2010, pp.130-131 (2010)

- [5] Akihiro Fukaya, Masahiro Ura, Mamoru Endo, Masashi Yamada, Shinya Miyazaki, Takami Yasuda : A Generation Method of an Ambiguous Map for Going Out from Tweets including Spatio-temporal Information, Proc. of NICOGRAPH International 2010, P8, pp.144-145 (2010)
- [6] Anna Otake, Masahiro Ura, Mamoru Endo, Masashi Yamada, Shinya Miyazaki, Takami Yasuda : An Automatic Generation System for Logo Design Drafting, Proc. of NICOGRAPH International 2011, CD-ROM (2011)
- [7] Yasuhiro Iwata, Masahiro Ura, Takatoshi Naka, Masato Goto, Mamoru Endo, Masashi Yamada, Shinya Miyazaki, Koichiro Tamura : A Video Evaluating System by using Users' Communication on Social Media, Proc. of NICOGRAPH International 2011, CD-ROM (2011)
- [8] Koji Terakawa, Masahiro Ura, Takatoshi Naka, Masashi Yamada, Mamoru Endo, Shinya Miyazaki : A Method for Visualizing Potential Relations between Users on Social Communities, Proc. of NICOGRAPH International 2011, CD-ROM (2011)

III. 口頭発表

- [1] 浦正広, 小島久幸, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也 : 携帯端末向け 3D 描画クラス群 CPGL の開発, 2005 年電子情報通信学会総合大会講演論文集 情報・システム 2, p.228 (2005)
- [2] 原田将志, 新留祐, 浦正広, 林茂実, 中村浩司, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也 : デジタルデータ放送を利用した地域社会向け生活情報コンテンツの制作, 第 21 回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp.139-144 (2005)
- [3] 浦正広, 原田将志, 新留祐, 林茂実, 中村浩司, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也 : 地域社会情報化推進のためのデジタルデータ放送の利用に関する考察, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.105, no.566, pp.7-12 (2006)
- [4] 伴昌美, 荒川知佳, 浦正広, 林茂実, 中村浩司, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也 : 地域社会向けデータ放送コンテンツ—瀬戸焼を求めて—, 第 5 回 NICOGRAPH 春季大会論文集, CD-ROM (2006)

- [5] 大久保春那, 浦正広, 林茂実, 中村浩司, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也: 瀬戸市オリジナルデータ放送一回遊促進コンテンツせとろく一, 第5回 NICOGRAPH 春季大会論文集, CD-ROM (2006)
- [6] 近藤真由, 浦正広, 遠藤守, 岩崎公弥子, 毛利勝廣, 野田学, 安田孝美, 横井茂樹: 天文教育におけるマルチプラットフォーム向けオンライン星座図鑑の設計と開発, 第69回情報処理学会全国大会講演論文集, pp.4-521-4-522 (2007)
- [7] 中園智博, 森口武博, 浦正広, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也: マルチプラットフォームに対応した入門者向けグラフィックスクラスの開発, 2007年電子情報通信学会総合大会講演論文集 基礎・境界, p.321 (2007)
- [8] 浦正広, 杉本篤, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也, 安田孝美, 横井茂樹: Widget を活用した共有型デスクトップツールの提案と試作, 第6回 NICOGRAPH 春季大会論文集 (2007)
- [9] 浦正広, 岩瀬亮, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也, 安田孝美, 横井茂樹: 6 自由度測定装置を用いた卓球フォーム改善システムの提案, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.107, no.80, pp.55-60 (2007)
- [10] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美, 横井茂樹: ゲーム木に基づくカーリングの戦略解析, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.107, no.130, pp.31-36 (2007) (電子情報通信学会 マルチメディア・仮想環境基礎研究会 MVE 賞)
- [11] 近藤真由, 浦正広, 遠藤守, 岩崎公弥子, 毛利勝廣, 野田学, 安田孝美, 横井茂樹: 天文教育におけるポッドキャスト配信に向けたコンテンツ管理手法の提案, 2007PC カンファレンス論文集, pp.267-270 (2007)
- [12] 浦正広, 林茂実, 中村浩司, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美, 横井茂樹: 地域情報化のためのデータ放送コンテンツとその評価, 2007年日本社会情報学会 (JSIS&JASIS) 合同研究大会研究発表論文集, pp.314-317 (2007)
- [13] 浦正広, 近藤真由, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也, 岩崎公弥子, 安田孝美, 横井茂樹: 天文教育におけるマルチプラットフォームコンテンツ生成のためのフレームワーク構築, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.107, no.242, pp.53-58 (2007)

- [14] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美, 横井茂樹: データ放送における Widget インタフェースの提案と試作, 第 23 回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, CD-ROM (2007)
- [15] 浦正広, 山田雅之, 安田孝美, 横井茂樹, 遠藤守, 宮崎慎也: デジタルデータ放送における配信情報のパーソナライズに関する研究, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.107, no.360, pp.43-46 (2007)
- [16] 菊池憲一, ラシキア城治, 浦正広, 宮崎慎也: 音声認識を用いた Google Earth バーチャルツアーシステム, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.107, no.454, pp.23-26 (2008)
- [17] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美: ショットの不確実性を考慮したゲームモデルとカーリング戦略分析, 電子情報通信学会 2 種研究会 サイバーワールド (CW) 第 10 回研究会, pp.1-6 (2008)
- [18] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美: カーリングシミュレーションと戦略評価手法の提案, 第 13 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.497-500 (2008)
- [19] 吉澤一平, 大西秀和, 長谷川貴弘, 浦正広, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也: 地域活性化に向けた鉄道すごろく型代替現実ゲームの提案, 2009 年電子情報通信学会総合大会講演論文集 基礎・境界, p.292 (2009)
- [20] 深谷昭宏, 浦正広, 中貴俊, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也: HTML/CSS 学習のための SaaS 型コーディングツールの開発, 2009 年電子情報通信学会総合大会講演論文集 通信 2, p.570 (2009)
- [21] 福安真奈, 堀崎千穂, 浦正広, 久野秀幸, 山田雅之, 安田孝美: 公共施設における案内情報配信のためのデータ放送コンテンツの提案, 第 71 回情報処理学会全国大会講演論文集, pp.4-699-4-700 (2009)
- [22] 浦正広, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也, 安田孝美: 鉄道すごろく型代替現実ゲームのためのフレームワーク構築, 電子情報通信学会 2 種研究会 サイバーワールド (CW) 第 12 回研究会, pp.17-20 (2009)

- [23] 深谷昭宏, 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也 : 調理操作におけるテーブルトッ
上でのマルチタッチジェスチャ認識手法の提案, 電子情報通信学会技術研究報告,
vol.109, no.281, pp.67-68 (2009)
- [24] 西田絵美, 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美 : ロゴ原案の自動デザイ
ンシステムの提案, 電子情報通信学会 2 種研究会 サイバーワールド (CW) 第 15 回
研究会, pp.23-28 (2010)
- [25] 深谷昭宏, 浦正広, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也, 安田孝美 : 時空間情報を含む「つ
ぶやき」からの推測によるお出かけスポット情報の生成, 情報処理学会創立 50 周年
記念 (第 72 回) 全国大会講演論文集, pp.2-515-2-516 (2010)
- [26] 大竹杏奈, 浦正広, 久野秀幸, 山田雅之, 安田孝美 : クーポン情報の多メディア配信
による地域活性化モデルの提案, 情報処理学会創立 50 周年記念 (第 72 回) 全国大会
講演論文集, pp.4-809-4-810 (2010)
- [27] 西田絵美, 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美 : ロゴデザイン案の自動
作成システムの提案, 第 9 回 NICOGRAPH 春季大会論文集, CD-ROM (2010)
- [28] 大竹杏奈, 浦正広, 久野秀幸, 中貴俊, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美 : 地
域活性化に向けたクーポン情報の多メディア配信システムの提案, 電子情報通信学会
技術研究報告, vol.110, no.35, pp.57-58 (2010)
- [29] 寺川晃司, 浦正広, 中貴俊, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美 : テーブルトッ
プを用いた三次元身体モデルの操作インタフェースの提案, 電子情報通信学会技術研
究報告, vol.110, no.108, pp.63-66 (2010)
- [30] 大竹杏奈, 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美 : 立体視テーブルトッ
プを用いた銅板レリーフのシミュレーション, 第 9 回情報科学技術フォーラム講演論文
集, pp.247-248 (2010)
- [31] 伊藤唯, 伊地知裕子, 浦正広, 中貴俊, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美 : 数
学学習支援のためのマルチタッチインタフェースを用いた作図ツールの提案, 第 9 回
情報科学技術フォーラム講演論文集, pp.611-612 (2010)
- [32] 深谷昭宏, 浦正広, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也, 安田孝美 : あいまいマップ 一時
空間情報が付加された「つぶやき」からの地図の生成一, 第 26 回 NICOGRAPH 論
文コンテスト論文集, CD-ROM (2010)

- [33] 深谷昭宏, 浦正広, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也, 安田孝美: 時空間情報を持つ「つぶやき」からの地図生成法の提案, 電子情報通信学会 2 種研究会 サイバーワールド (CW) 第 17 回研究会, pp.21-26 (2010)
- [34] 保田涼佑, 浦正広, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也, 安田孝美: レコメンドにより店舗サイト間を接続するバーチャルモールの提案, 情報処理学会第 73 回全国大会講演論文集, pp.4-621-4-622 (2011)
- [35] 福安真奈, 浦正広, 久野秀幸, 中貴俊, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也, 安田孝美: クーポン情報の多メディア配信システムとその評価, 情報処理学会第 73 回全国大会講演論文集, pp.4-629-4-630 (2011)
- [36] 大竹杏奈, 浦正広, 種田行男, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 運動習慣の形成・継続を支援するデータ放送コンテンツの提案, 電子情報通信学会 2 種研究会 サイバーワールド (CW) 第 18 回研究会, pp.17-22 (2011)
- [37] 西別府由梨, 浦正広, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也, 安田孝美: 深度センサ付きカメラを用いた仮想試着システムの提案, 第 10 回 NICOGRAPH 春季大会論文集, CD-ROM (2011)
- [38] 深谷昭宏, 浦正広, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也, 安田孝美: 「つぶやき」のマイニングによるお出かけガイド生成手法の提案, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.111, no.38, pp.63-64 (2011)
- [39] 岩田康宏, 浦正広, 中貴俊, 後藤昌人, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也, 田村浩一郎: ソーシャルインタラクションを利用した動画評価システムの提案と試作, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.111, no.38, pp.65-66 (2011)
- [40] 寺川晃司, 浦正広, 中貴俊, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也: ソーシャルメディアにおけるユーザ間の潜在的関係の可視化手法の提案, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.111, no.38, pp.66-67 (2011)
- [41] 深谷昭宏, 浦正広, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也, 安田孝美: つぶやきマイニングによるお出かけ情報生成法とその評価, 第 10 回情報科学技術フォーラム講演論文集, pp.837-838 (2011)

- [42] 牧野輝, 浦正広, 中貴俊, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也 : JAN コードの AR マーカー的用法についての基礎検討, 第 10 回情報科学技術フォーラム講演論文集, pp.841-842 (2011)
- [43] 佐伯拓郎, 浦正広, 中貴俊, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也 : マイクロブログを活用したプレゼンテーション聴講・共有支援システムの提案, 第 10 回情報科学技術フォーラム講演論文集, pp.863-864 (2011)
- [44] 浦正広, 中貴俊, 遠藤守, 毛利勝廣, 安田孝美, 山田雅之, 宮崎慎也 : スマートフォンを活用した対話型星座検索アプリの考案と試作, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.111, no.380, pp.37-42 (2012)

