

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

幾何構造を考慮した
対話的なバルーンアート設計支援システム

北野 拓磨

修士（工学）

（コンピュータサイエンス専攻）

指導教員 三谷 純, 金森 由博

2016年3月

概要

近年、3Dプリンタやレーザーカッター等の技術発展により、「日常のものづくりを計算機で支援する」という研究が「デジタルファブリケーション」という一分野をなすようになった。これにより、ぬいぐるみ、紙模型、ポップアップカード、LEGOブロックなどの創作活動分野への活用も行われている。デジタルファブリケーションの発展により、人々の創作的活動への参入への敷居が低くなり、誰もがクリエイターとなり、デザインの共有が行えるようになってきている。このような創作活動の一つである、バルーンアートのデザインに関して研究を行う。本研究では、コンピュータを用いてバルーンアート作品の設計を行うため、幾何形状を考慮した、対話的な操作によるバルーンアート設計支援システムを考案する。簡易な入力方法として、多くの物体が有する対称性を考慮した、2次元スケッチからの3次元CGモデルの構築手法を提案する。また、バルーンアート制作時に主に用いられるパターンの選択・繰り返しによる設計方法を構想する。提案システムを用いて、バルーンアートの3次元モデルを作成し、設計支援への有効性と検討すべき課題を確認した。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 論文構成	2
第2章 関連研究	3
2.1 対話的なバルーンアートの実設計	3
2.2 バルーンの変形シミュレーションに関する研究	4
2.3 グラフ理論に基づく構造解析と難易度評価	4
第3章 非線形特性を考慮した バルーンの変形シミュレーション	6
3.1 ゴム膜の表現	6
3.1.1 非線形特性を持つばねモデル	7
3.1.2 角復元力	7
3.1.3 円筒方向への復元力	9
3.1.4 不感帯の設定	9
3.2 空気の表現	9
3.3 ゴム膜と空気粒子の相互作用	10
3.4 ゴム膜同士の接触	11
3.5 バルーンの変縮実験	11
3.5.1 実験内容	12
3.5.2 実験結果	12
3.5.3 考察	13
3.6 システム動作結果	13
第4章 提案手法	14
4.1 バルーンアートの制作方法	14
4.2 バルーンアートのモデル化	17
4.3 2次元スケッチからの3次元座標値推定	19
4.4 ツイストパターン選択による形状設計	20
4.5 繰り返し構造を利用した形状変形	22

第5章 結果	25
5.1 2次元スケッチによる芯線モデル出力	25
5.2 考察	25
第6章 結論	29
謝辞	30
参考文献	31

目次

1.1	バルーンアート作品例	1
2.1	教育用システムのインタフェース (出典 [6])	3
2.2	物理特性を考慮したシミュレーションによるバブルの作成 (出典 [7])	4
2.3	バルーンのグラフ化 (出典 [8])	5
3.1	バルーンのゴム膜表現	6
3.2	ばねが伸びた時の復元力	7
3.3	隣接角の定義	8
3.4	復帰モーメント	8
3.5	空気粒子の影響範囲	9
3.6	粒子間の斥力	10
3.7	空気粒子とゴム膜の相互作用	11
3.8	応力ひずみ線図	12
3.9	非線形特性を考慮した変形シミュレーション	13
4.1	ひねり目とバブル	14
4.2	ツイストパターン例	15
4.3	バルーンに曲げグセをつける	15
4.4	曲げグセを利用した作品：ハート	15
4.5	ワープ：風船を細く引き伸ばしながら別のひねり目と接続する技法 (出典 [12])	16
4.6	オリジナル作品の作成例 (出典 [16])	16
4.7	バルーンを中心を通る芯線モデル	17
4.8	バブルの表面座標の生成	17
4.9	バルーンアートのモデル化	18
4.10	バルーンアートモデルの構造	18
4.11	バルーンアートモデルの設計方法	18
4.12	2次元描画からの3次元座標値推定	19
4.13	ペアとなる2点の対称面からの距離を求める	19
4.14	3通りの芯線スケッチ入力方法:赤い面が対称面, 緑の線が入力線	20
4.15	ツイストパターン選択による設計のイメージ図	21
4.16	システムで用いるツイストパターン	21

4.17	事前に用意しておくツイストパターンオブジェクト例, オレンジ点: 端点, 赤線: 芯線	21
4.18	バルーンアート作品: ぶどう	22
4.19	三つのバブルのグループの細分化	22
4.20	繰り返し構造の作品例: 花	23
4.21	グループ化によるバブル数の増減操作	23
5.1	芯線スケッチ入力による作品設計 (1)	26
5.2	芯線スケッチ入力による作品設計 (2)	27
5.3	Maya によるメッシュ平滑化とレンダリングを行ったモデル	28

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

近年、3Dプリンタやレーザーカッター等の技術の発達により、「日常のものづくりを計算機で支援する」研究が「デジタルファブ리케이션」という一分野をなしている。これによって、ぬいぐるみ、紙模型、ビーズワーク、カード織り、ポップアップカード、LEGOブロックなどの創作活動分野への活用も行われている [1] [2] [3] [4] [5]。人々の創造的活動への参入の垣根が低くなり、誰もがクリエイターとなり、デザインの共有が行えるようになってきている。このような創作活動の一つである、バルーンアートに関して研究を行う。

バルーンアートとは、ペンシルバルーンやツイストバルーンなどと呼ばれる、細長いゴム風船を用いて図 1.1 のような、動物などの造成物を作る行為である。本稿では、この細長いゴム風船をツイストバルーンと呼称する。ツイストバルーンを、1本から複数本用いて、それらをひねったり曲げたりすることにより、様々な形状を構築することができる。バルーンアートの形状構築は、ゴムで出来た材質による形状の変形や、作品の構造による設計制約などの考察を必要とする複雑さを持つ。このような問題に対し、計算機を用いて設計支援を行うことは、設計制約を意識した完成形状の構想などに有効であると考えられる。



(a) イヌ



(b) クマ

図 1.1: バルーンアート作品例

バルーンアートの作品を制作する際に解説書などがある場合、示された手順を参考としながら制作を進めていく [11] [12]。しかし、バルーンアートで新しい作品を作るためには、バ

ルーンのひねり方のパターンや、完成形状を保つための構造などを理解する必要があるため、制作者の経験と試行錯誤が必要となってくる。試行錯誤を経て設計した作品に対し、完成形状を写真等で記録しておくことはできるが、内部の構造を確認したり、任意の方向から確認したりするためには、制作途中を詳細に記録しておく必要がある。コンピュータを用いて、設計した作品をデータとして記録しておけば、設計者以外でも詳細な構造の確認が行うことができる。

本研究では、コンピュータを用いてバルーンアート作品の設計支援を行うシステムの実現を目指す。バルーンアート作品の完成形状を3次元モデル化すれば、様々な角度からの視認や、バルーンアートモデルの構造解析への応用などを行うことができる。リアリティのあるモデルを可視化することは、作者の作品設計の構想の手助けとなると考えられるため、卒業研究では物理特性を考慮したシミュレーションの研究を行った。本研究では、幾何形状を考慮した、対話的な操作によるバルーンアートの設計支援を行うシステムを考案する。簡易な入力方法として、多くの物体が持つ対称性を考慮した2次元スケッチからの3次元座標値推定の手法を考案する。また、バルーンアート制作時に主に用いられるパターンの選択・繰り返しによる設計方法を考察する。

1.2 論文構成

本章では本研究の背景と目的について述べた。第2章では本研究の関連研究について紹介する。第3章では、バルーンの変形シミュレーションの研究について述べ、第4章ではバルーンアート設計支援システムで利用する提案手法を述べる。第5章では、提案システムを利用した結果について示し、第6章では、結論と今後の課題について述べる。

第2章 関連研究

本章では本研究に関連するバルーンアートを対象とした研究を紹介する。まず、対話的にバルーンアートを設計することを目的とした研究について紹介する。次に、バルーンの変形シミュレーションを行った研究を紹介する。最後に、バルーンアートの形状をグラフ理論に基づき解析し、構造解析と制作手順の導出、また、その難易度評価を行った研究について紹介する。

2.1 対話的なバルーンアートの設計

バルーンアートをモチーフとした子供向けの3次元モデリング教育ソフトとして、対話的な操作でバルーンアートの設計を行うシステムの研究が行われている [6]。このシステムは、仮想空間に置かれた一本の細長いバルーンに、ひねる、曲げる、ねじるなどの対話的な操作を加える事で形状を作成している。この研究は、感性教育を主目的としたものであり、モデリング方法を単純な操作に限定してしまっているため、複数本のバルーンで構成されているような複雑な形状のバルーンアートの設計に不向きである。

本研究では、単一のバルーンからなる形状だけではなく、複数本のバルーンを用いた複雑な形状の設計も行えるようなシステムの構築を目的とする。

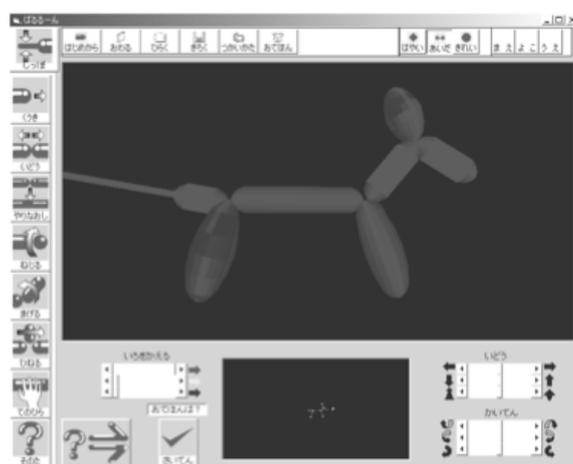


図 2.1: 教育用システムのインターフェース (出典 [6])

2.2 バルーンの変形シミュレーションに関する研究

リアリティのあるシミュレーションを行うことを目的とした、バルーンの物理的変形を考慮した変形モデルに関する研究が行われている [7]。この研究では、バルーンのゴム膜をばねモデルを用いて表現し、内部の空気を粒子法で表現することで、変形モデルを作成している。この研究の提案モデルにおいて、内部の空気粒子やゴム膜の頂点数が多くなると計算時間が膨大になってしまうため、本来のサイズより短いオブジェクトで検証を行っている。また、リアルタイム性のある実行速度を実現するため、GPGPUによる高速化を行っている。この手法の変形モデルに対して、図 2.2 に示すように、バルーンアートにおける基本的単位であるバブルを作る操作を対話的に行い、バルーンがひねられ、ゴム膜が変形し、空気粒子が移動する様子を検証している。

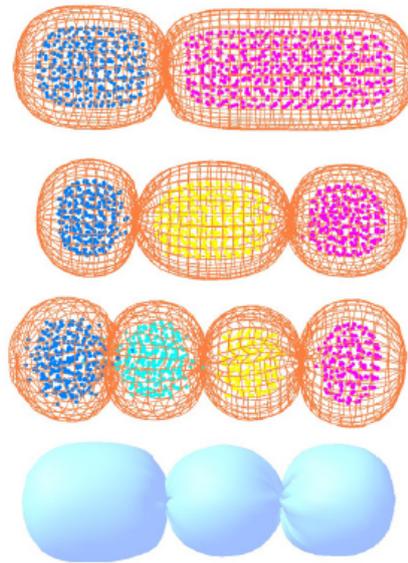


図 2.2: 物理特性を考慮したシミュレーションによるバブルの作成 (出典 [7])

2.3 グラフ理論に基づく構造解析と難易度評価

バルーンアートを、グラフ理論に基づき、バルーンの構造解析、および難易度評価を行っている研究がある [8] [9]。バルーンアートの構造を完成形状から導出する手法と、その形状が成立するか判定する手法が示されている。また、バルーンアートの完成形状から制作手順を生成し、その難易度を評価する手法も提案されている。

図 2.3 のようにバルーンアートのバブルをグラフの辺、結び目と先端、そしてひねり目を頂点と見立て、バルーンアートの構造解析を行っている。1本のバルーンからなる構造は、グラフとした時に一筆書きが可能である。このグラフは、すべての辺を一度ずつ通ることができ

るオイラーグラフであり，そのオイラー経路を求めることで形状制作に必要なバブルの隣接順序とロック条件が明らかとなるため，形状の成立判定を行うことができる．バルーンアートの制作過程において，ロック条件を満たすまで固定されていないひねり目が現れる．このひねり目はロック条件を満たすまでの間，戻らないように手で抑えるなどしておく必要がある．ひねり目を維持する個数や，ロックの順序，種類などを難易度評価の手法に用いている．複数本のバルーンアートにおいても，1本のバルーン単位に分解することで，前述の手法が応用できる．

この研究で示された手法を用いた Flash による制作支援システムが浦によって公開されている [10]．



図 2.3: バルーンのグラフ化 (出典 [8])

第3章 非線形特性を考慮した バルーンの変形シミュレーション

バルーンアートのモデルをリアリティのあるCGで表現するため、卒業研究では変形挙動のシミュレーションに取り組んだ。バルーンをゴム膜と空気粒子で構成されたモデルで表現し、その挙動を調べる。ツイストバルーンが膨らむ際、全体が一様に膨らむのではなく、膨らみ始めたところから風船を押し広げるように膨らんでいく。この特徴を再現するため、ゴム弾性を考慮した物理挙動と空気粒子を追加することが可能なモデルを作成することで、バルーンの膨らみをシミュレーションする。通常のばねモデルを用いた場合、ばね定数は一定で、質点に掛かる力は線形的な変化を表す。ばね定数がゴム膜のひずみによって非線形に変化するよう設定することで、ゴム膜の変形を実際のバルーンの挙動に近づける。

3.1 ゴム膜の表現

ゴム膜の物理挙動を考える際、非線形特性を持つばねモデルと初期状態の角度を維持しようとする角復元力を定義した。また、円筒状のゴム膜の半径方向の復元力を表現するために、2次元のシミュレーションでは上下のゴム質点同志をばねで接続することで図3.1のように表現した。

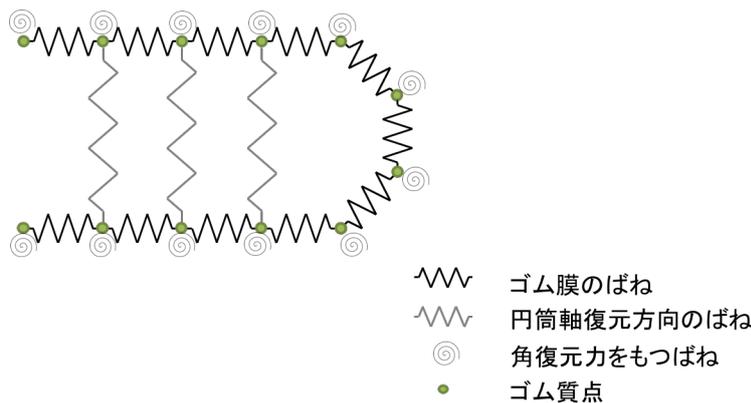


図 3.1: バルーンのごム膜表現

3.1.1 非線形特性を持つばねモデル

弾性体であるバルーンのコイル膜を、ばねモデルを用いて解析する。ばねモデルとは、物体をばねと質点の集合で表し、各ばねの伸び縮みを計算することで弾性体の変形をシミュレーションする手法である [13] [14]。ばねモデルのオブジェクトは、有限個の質点と、質点間をフックの式でつなぎ、ばねを構成する。2つの質点がばねで接続されている時、その関係は式 3.1 のように表される。

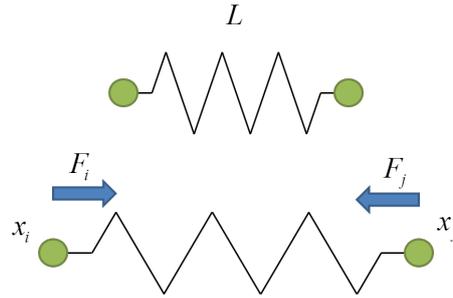


図 3.2: ばねが伸びた時の復元力

$$\mathbf{F}_i = k(|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j| - L), \mathbf{F}_j = -\mathbf{F}_i \quad (3.1)$$

\mathbf{F} は質点にかかる力、 k はばね定数、 L は初期状態の質点間の距離である自然長を表しているとする。一般に差分法により離散時間における質点の位置を計算することで、ある質点に外力を加えて動かすと質点同士が影響しあい、弾性物体の挙動を表現する。質点間の距離が自然長 L より長ければ、それに比例した力が質点を引き合わせる方向にかかる。この式に減衰項を加え、ばねの振動を緩和させるダンパの役割をもたせ、変形挙動に粘性を付加する。図 3.2 に質点間の距離によってばねモデルの力のかかる方向が変わる様子を示す。

この手法では、フックの式で用いるばね定数 k を、定数ではなく非線形特性を持たせることでより実物に近い挙動を表現することを目的としている。その非線形性を推定するために実物のバルーンを用いて実験を行い、推定した値をばね定数の変化に適用することで非線形特性を持つばねモデルを構築した。

3.1.2 角復元力

シャープな折れ曲がりやゴムらしく見えないため、初期状態の角度を維持しようとする角復元力を定義した。ばねが曲がると、原形上のばね間の角度に戻ろうとする復帰モーメントを加える。初期状態の角度からの開きによって、復帰モーメントの大きさが変化していく。円筒状にばねモデルを初期設定する際、ゴム膜の質点を時計回りに配置し、図 3.3 のように右側に隣接するばねとの角度 θ_0 を初期状態のバルーンのコイル質点の配置で設定した。

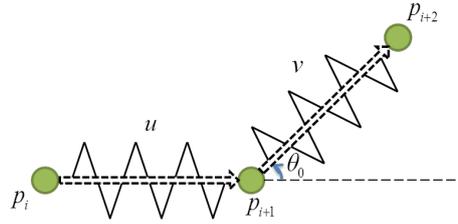


図 3.3: 隣接角の定義

質点 p_i から質点 p_{i+1} へのベクトルを \mathbf{u} , 質点 p_{i+1} から質点 p_{i+2} へのベクトルを \mathbf{v} とする。右隣のばねとの角度 θ_0 は次のように求められる。

$$\theta_0 = \text{atan2}(\mathbf{u} \times \mathbf{v}, \mathbf{u} \cdot \mathbf{v}) \quad (-\pi < \theta < \pi) \quad (3.2)$$

移動後の回転角 θ' は次のように定める。

$$\theta' = \phi - \theta \quad (3.3)$$

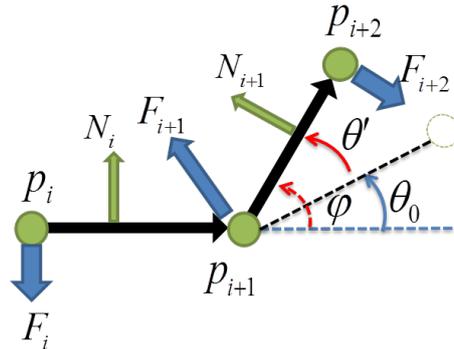


図 3.4: 復帰モーメント

元の状態に戻ろうとするときの復帰モーメントを考えると、隣接するばねの持つゴム質点 p_i, p_{i+1}, p_{i+2} に加わる力 $\mathbf{F}_i, \mathbf{F}_{i+1}, \mathbf{F}_{i+2}$ はそれぞれ

$$\mathbf{F} = -k_r \theta' \mathbf{N}_i \quad (3.4)$$

$$\mathbf{F}_{i+2} = -k_r \theta' \mathbf{N}_{i+1} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{F}_{i+1} = -(\mathbf{F}_i + \mathbf{F}_{i+2}) \quad (3.6)$$

のように定義した。加わる力を調整する定数を k_r , ベクトル \mathbf{u}, \mathbf{v} を左回りに 90 度回転させた方向での法線ベクトルをそれぞれ $\mathbf{N}_i, \mathbf{N}_{i+1}$ と定義する。

3.1.3 円筒方向への復元力

この研究では、3次元のバルーンを2次元でシミュレーションしている。そのため、実際には3次元円周上にあるゴム膜の影響による半径方向の収縮を、ゴム質点同士をつなぐことで表現している。実際のバルーンは円筒状になっており、円筒状のゴム膜の半径方向に復元力が発生する。そのまま2Dシミュレーションを行えば、半径方向に拡散していつてしまうため、このモデルでも円筒軸方向への復元力を考慮する。この復元力を再現するため、2次元のシミュレーションでは半径方向で対象となるゴム質点同士を図3.1に示すようなばねで接続することで表現した。

3.1.4 不感帯の設定

ゴムに力を加える際、張った状態になるまでには初期状態から少し余裕がある。たるみのある状態から張った状態になるまでの変形には大きな力を必要とせず、張った状態のゴムが伸びるためにはより大きな力が必要となる。その余裕のある状態を再現するために、ある程度の力が加わるまで、ゴム膜が変化しないような不感帯を設けた。

3.2 空気の表現

このモデルでは、粒子法の考え方を参考に空気を粒子として扱い、その粒子を増やしていくことで空気の流入を表現する。粒子法では自由に動き回る粒子を使って流体の動きを表現しており、各粒子が中心位置、速度などのパラメタをもち、その現象を支配している方程式によってシミュレーションが行われる。この支配方程式であるナビエ・ストークス方程式は質量保存式と運動量保存式によって構成される。このモデルでは、空気の流入による粒子数の増加を考慮するため、空気粒子は単純な斥力を考えることでその挙動を近似する。各粒子に有効半径をもたせ、その有効範囲内に存在する他の粒子から影響を受け、またそれらの粒子へ影響を与える。図3.5に粒子の影響が働く有効半径と他粒子とのつながりを表す。

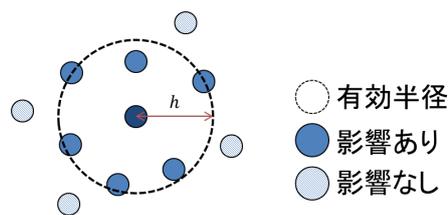


図 3.5: 空気粒子の影響範囲

粒子間の影響は周囲粒子までの距離が近いほど大きく、遠いと小さくなるような重み関数 $W(r)$ を用いて制御する。その重み関数 $W(r)$ を式3.7のように定義する。

$$W(r) = \begin{cases} \frac{h}{r} - 1 & (r \leq h) \\ 0 & (r > h) \end{cases} \quad (3.7)$$

r は粒子間の距離を表し，この距離が有効半径 h 以内であるとき斥力が働く．その様子を図 3.6 に示す．重み関数 $W(r)$ は，粒子同士の距離が近づくにつれ，値が急激に大きくなる．この重み関数 $W(r)$ を用いて，有効半径内に存在する粒子間に働く力は式 3.8 のように表される．

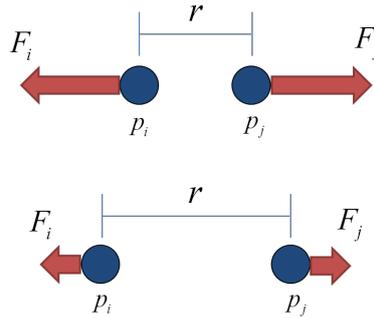


図 3.6: 粒子間の斥力

$$\mathbf{F}_i = k_a(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)W(r), \mathbf{F}_j = \mathbf{F}_i \quad (3.8)$$

k_a は加わる力を調整する定数， $\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j$ は粒子の位置を表す．この時斥力は，各粒子に対称的に働く．

3.3 ゴム膜と空気粒子の相互作用

バルーンがゴム膜内部の空気粒子に押されて膨らんでいる様子を表現するため，ゴム膜と空気粒子の相互作用を考える．空気粒子がもつ有効半径内にゴム膜が存在するとき，ゴム膜と空気粒子に力が働くと考える．まず，空気粒子の位置 V とゴム膜の両端の質点 A, B を通る直線との距離を測り，その距離が有効範囲内であれば，直線上の点 V' がばねの両端の質点 A, B からなる線分上にあるかを調べる．

あるゴム膜の両端を通る直線と任意の空気粒子の距離は次のような式で求められる．

$$d = (\mathbf{V} - \mathbf{A}) \dots \mathbf{N}\mathbf{V}' = \mathbf{V} - d\mathbf{N} \quad (3.9)$$

直線と空気粒子の距離が有効半径内であった場合，次のような式で点 V' がばねの両端の質点からなる線分上にあるかを調べる．点 V' は質点 AB を通る直線上にあるので次式のように表される．

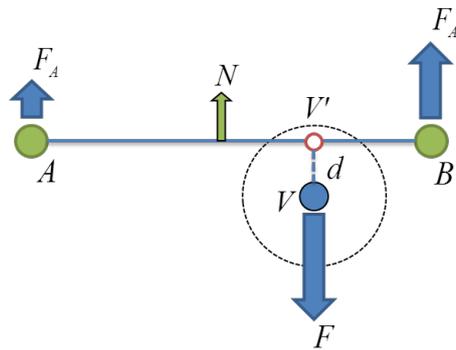


図 3.7: 空気粒子とゴム膜の相互作用

$$\mathbf{V}' = u\mathbf{A} + v\mathbf{B} (u + v = 1) \quad (3.10)$$

このとき, $0 < u, v < 1$ であれば, \mathbf{V}' は線分 AB 上にあり, ゴム膜に力を及ぼす. 空気粒子にかかる力 \mathbf{F} , ゴム質点 A, B にかかる力 $\mathbf{F}_a, \mathbf{F}_b$ は次式のように表される.

$$\mathbf{F} = kd\mathbf{N}, \mathbf{F}_a = -u\mathbf{F}, \mathbf{F}_b = -v\mathbf{F} \quad (3.11)$$

ゴム膜の法線ベクトルからゴム膜にかかる力と空気粒子にかかる力の向きを求める. ゴム膜と空気粒子には互い逆向きの力がかかるように計算される.

3.4 ゴム膜同士の接触

ゴム膜を変形すると自己干渉を起こしてしまう場合がある. この自己干渉を防ぐため, ゴム質点にも有効半径をもたせ, その有効半径内にゴム膜があるとき, 相互作用が働くようにする. ゴム膜とゴム質点との相互作用の計算手法は, 3.3 と同様の手法を用いることで求められる.

3.5 バルーンの伸縮実験

バルーンのゴム膜の物理特性を計測するため, 実物を用いて実験を行った. バルーンの材料である天然ゴムは, ひずみ量に応じて弾性係数に変化していく. ゴムなどの物理特性が示されている資料 [15] はあるが, 単一特性のみでひずみ量に応じて弾性係数に変化する非線形特性は得られない. ばねモデルのばね定数に非線形的特性を付加するため, 実際に使用するツイストバルーンを用いて応力とひずみの対応を調べた.

3.5.1 実験内容

バルーンを持つ弾性係数を計測するため、次のような実験を行った。

- ・膨張させる前（力を加える前）のバルーンと膨張後のバルーンの弾性係数を比較するため、バルーンを徐々に引き伸ばしていき、10cm 伸びる毎にかかる力を 100cm まで計測した。
- ・実験には、Sempertex 社の 260S ツイストバルーン、シンワ測定パイプ手ばかり 5kg を用いた。
- ・クリップで口ゴム部を固定し、固定した位置から 25cm 部分を自然長とし印をつけ、その部分を引っ張ることで、伸び率を計測した。

3.5.2 実験結果

実験に用いたバルーンは、自然長 L_0 は 25cm、断面積は 0.57mm^2 となっている。この自然長と断面積から、バルーンの伸びひずみと応力を計測した。バルーンをふくらませる前の結果の値を膨張前、一度全てふくらませた後しぼませたものを計測した値を膨張後と表記し、結果を次に示す。

表 3.1: バルーンの応力-ひずみ

ひずみ	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2	2.4	2.8	3.2	3.6	4
膨張前	0	0.4737	0.6316	0.7895	0.9123	1.0526	1.2281	1.3684	1.5439	1.8421	2.1053
膨張後	0	0.3333	0.4912	0.5439	0.6842	0.7368	0.8596	0.8947	0.9825	1.0526	1.1579

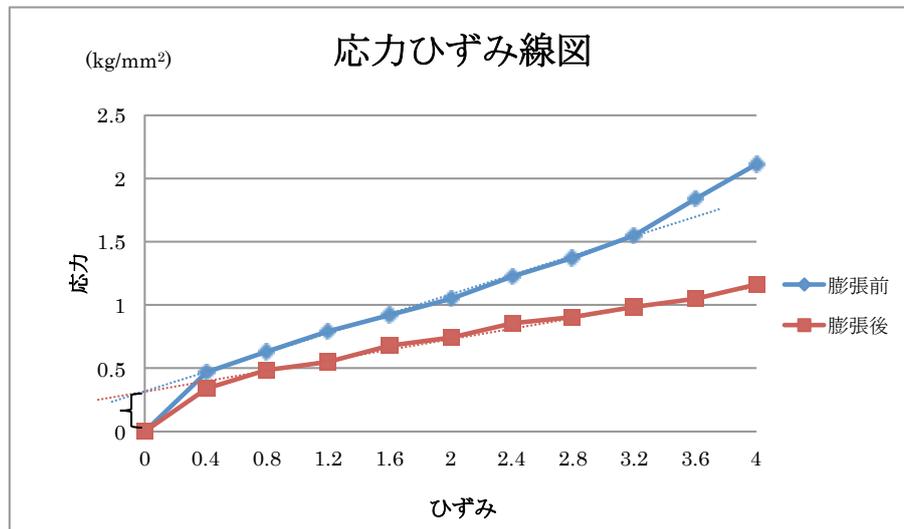


図 3.8: 応力ひずみ線図

3.5.3 考察

膨張後のバルーンは膨張前のバルーンに比べて、小さな力で伸びやすくなっていることがわかる。これは、一度負荷がかかったことで、ゴムの持つヒステリシス特性により弾性係数に変化が生じたためである。また、膨張前の変化に注目してみると、変化の割合が一様ではなく、変化していることが見て取れる。ひずみが小さな時には弾性係数が大きく、ある程度伸びたところでは小さくなっている。ひずみが大きくなると、再度弾性係数が大きくなっていることがわかる。この弾性係数の変化を近似的に表し、ゴム膜のモデルに適用することで非線形特性を持つばねモデルを構築した。

3.6 システム動作結果

この研究では提案手法をC++言語を用いて開発した。画像を表示するためにOpenGL, GLUTライブラリを用いた。空気粒子の影響範囲を青の円、空気粒子の中心点とゴム質点を赤の点で表示している。初期状態のバルーンには空気が入っていないものと仮定し、左側の吹き込み口から空気粒子を追加していく。

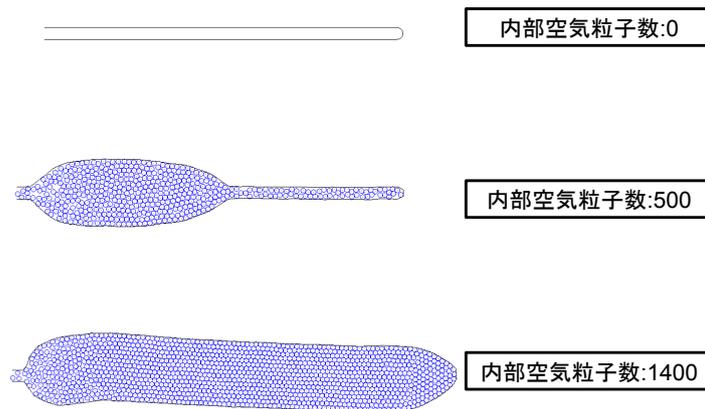


図 3.9: 非線形特性を考慮した変形シミュレーション

図 3.9 から追加された空気粒子がゴム膜を押し広げながら膨らんでいく様子が確認できる。バルーンの変形シミュレーションを行うにあたり、極端な挙動を避けるため、バルーンの大さや空気粒子の影響範囲、ゴム質点や空気粒子の質量などのパラメタは、実行結果を確認しながらバランスがとれていると思われるものを採り、調整を行った。

第4章 提案手法

本章では、提案するバルーンアート設計システムの手法について述べる。はじめに、バルーンアートの制作方法について説明し、本研究におけるバルーンアートモデルの扱いについて述べる。次に、提案システムの流れについて説明する。提案する入力手法である、2次元スケッチ入力による3次元モデル生成とツイストパターンを用いた設計手法、規則性に基づいた変形操作について述べる。

4.1 バルーンアートの制作方法

まずはじめに、バルーンアートを制作する際の手順について紹介する。一般的に、バルーンアートの作品は細長いツイストバルーンを用いて制作されている。このツイストバルーンは、最大膨張時に幅約5cm、長さ約150cmとなるものが主に用いられる。本研究では、一般的に用いられる上記サイズのツイストバルーンを対象とする。

バルーンの制作において、バルーンをひねることをツイストと呼び、それによって生成されるバルーンの小さな塊をバブルという(図4.1)。このバブルを基本単位とし、長さや曲がり具合を変え、組み合わせていくことによって様々な造形を行う。バルーンをツイストすることで出来たひねり目はそのままでは固定されず、その他のひねり目とツイストすることで摩擦により固定される。このように、ひねり目を固定することをロックと呼ぶ。ロック手法には、二つのバブルを固定するロックツイスト、一つのバブルを輪にし、その両端のひねり目を結ぶループツイストなど、図4.2のようないくつかの代表的なツイストパターンが存在する。主要なツイストパターンを基準とし、バブルの個数やサイズ、曲がりの度合いなどを調整し組み合わせることで、バルーンアートの制作を進めていく。

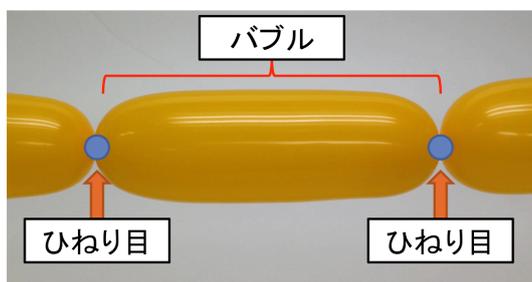


図 4.1: ひねり目とバブル



(a) ロックツイスト



(b) ループツイスト

図 4.2: ツイストパターン例

ツイストバルーンは天然ゴムを主成分とするため、素材自体の柔軟性や中の空気量の調整を行うことで自由度の高い設計を行うことができる。バルーンのゴム膜は、力を加えても元の形状に戻る弾性変形を示すが、強い力を加えると、荷重を取り除いても元の形に戻らない塑性変形を示す。この特性を利用し、図 4.3 のようにバルーンに曲げグセを作ることで、図 4.4 のようなハートなどの折れ曲がった形状を表現することが可能となる。このゴム弾性や塑性変形をシミュレーションすることで、よりリアリティのあるバルーンアートモデルの表現が可能になると推察される。



(a) 荷重を加える様子



(b) 塑性変形を起こし、曲げグセがついた様子

図 4.3: バルーンに曲げグセをつける



図 4.4: 曲げグセを利用した作品：ハート

また、バルーンアートの制作の基本は一筆書きの形状であることだが、作品の見た目はそ

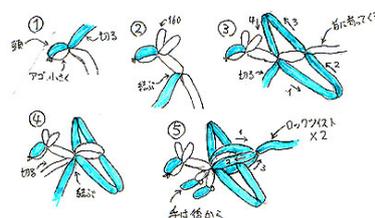
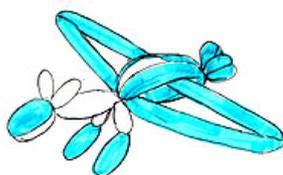
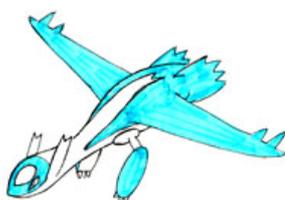
の制約を満たしていなくても制作を可能とする、ワープと呼ばれる技法がある。図 4.5 のようにバルーンの空気を移動しながら、細く引き伸ばしつつ別のひねり目に接続することで、バルーンの継続地点を変えることができる。この技法を用いることで、設計・制作の自由度を高くすることが可能である。



図 4.5: ワープ：風船を細く引き伸ばしながら別のひねり目と接続する技法 (出典 [12])

ある程度バルーンの制作に慣れてくると、自分なりのアレンジや、レシピのない作品を作ることができるようになる。新しいオリジナル作品を作るとき、[16]で紹介されているような手法が有効である。

まず、作りたいものの写真やイラストを用意し、全体の造形をイメージする。最初に用意したイメージから、それを風船で作った時のイメージにおおまかにデフォルメしていく。デフォルメ化したイメージを実際にバルーンで作る制作手順を考える、といった具合である (図 4.6)。このようなオリジナル作品設計手順において、本システムを利用することで、デフォルメ化作業と制作手順の試行錯誤の手助けになるであろうと考える。



(a) 作りたいもののイラスト (b) デフォルメ化したイラスト

(c) バルーンアートの制作手順

図 4.6: オリジナル作品の作成例 (出典 [16])

4.2 バルーンアートのモデル化

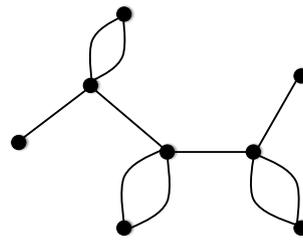
コンピュータでバルーンアートの設計をするにあたり、バルーンアートの構造のモデル化を行う。

バルーンアート作品は、基本単位となるバブルの組み合わせによって設計される。このバブルを操作することで、3次元モデルの生成を行っていく。

今回対象とするツイストバルーンは結び目やひねり目などの端点付近で細くなる円筒形状をしている。この円筒形状のバルーンを中心部を通る軸線を芯線とおく(図4.7)。



(a) バルーンアート作品：イヌ



(b)

図 4.7: バルーンを中心を通る芯線モデル

この芯線はバルーンモデルの骨格に値するものであり、概形を読み取ることができる。図4.8に示すように、芯線モデルの周りに、端点に向かって細くなるような頂点座標を生成することで、バブルの形状を表現する。生成された表面と芯線モデルを持つものをバブルのモデルとし、そのバブルの形状や色を変えていくことで、バルーンアートの3次元モデルを設計する(図4.9)。

バルーンアートの3次元CGモデルを、図4.10のような構造で定義する。

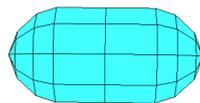


図 4.8: バブルの表面座標の生成

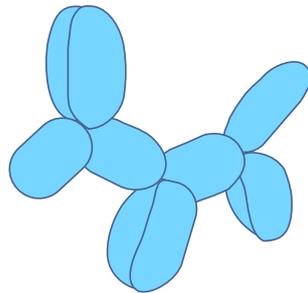
バルーンアート作品を設計する手法として、主要となる二通りの入力を考える。バルーンの芯線をスケッチ入力によって生成する方法と、ツイストパターンを用いてバブルを配置・操作していく方法を用いる(図4.11)。

物体の対称性を利用し、スケッチ入力によって大まかな3次元形状を設計し、頻出するツイストパターンや、定型的な繰り返し構造を利用してバブルを操作し、より細かな形状のバルーンアートの設計を行っていく。これらの設計によって出力される結果は、バブルによって構築された3次元CGモデルとなる。

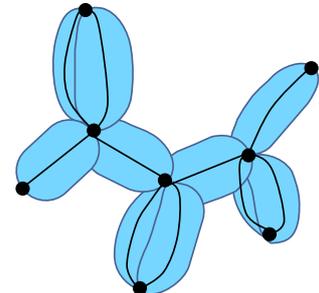
次節から、入力方法の詳細について述べていく。



(a) 実物のバルーン



(b) バブルの3次元CGモデル



(c) 芯線モデル

図 4.9: バルーンアートのモデル化

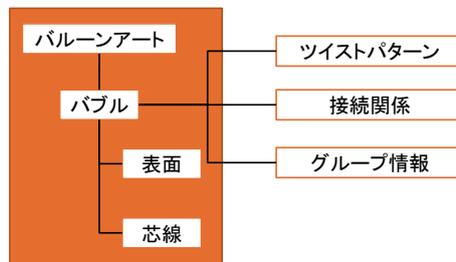


図 4.10: バルーンアートモデルの構造

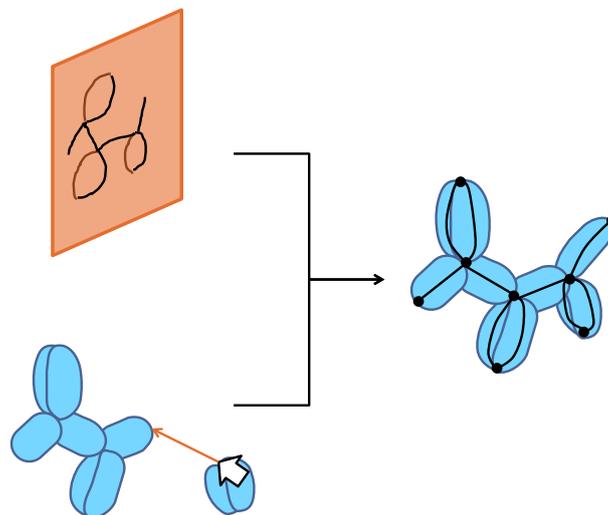


図 4.11: バルーンアートモデルの設計方法

4.3 2次元スケッチからの3次元座標値推定

バルーンの芯線をスケッチする方法では、ユーザによる画面上への直感的なスケッチを入力とし、3次元上の芯線を推定し、モデルを生成する。スケッチ入力によるデザインを実現するために、2次元の芯線スケッチ入力を3次元モデルに反映する必要がある。この問題に対し、物体の持つ対称性を用いた入力方法を考察する。動植物などの自然物や、建築物などの人工物においても、ある面から見ることで左右対称性を有する物体は多い。

バルーンアートの設計を行う空間となるアウトラインボックスを用意し、その中で制作を行っていく。アウトラインボックス内に、芯線入力の基準となる空間を二分する対称面を用意する。ユーザは対称面を基に、左右対称な形状を思い浮かべながら、スケッチを行うことで、3次元線によるバルーンアートの芯線モデルを構築していく。図 4.12 に設計の概要を示す。

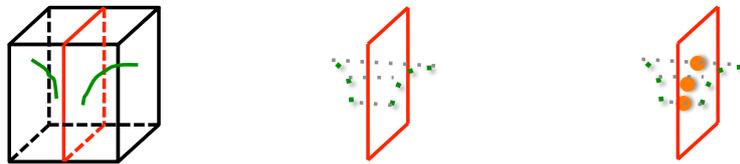


図 4.12: 2次元描画からの3次元座標値推定

アウトラインボックス内に、入力の基準となる yz 平面上に存在する対称面 S を用意する。対称面 S を構成する4つの基準点を v_0, v_1, v_2, v_3 とする (図 4.13)。その対称面 S を基準とした、対応する2次元上の2線 l_1, l_2 を入力する。入力された対応する線 l_1, l_2 を、対応する N 個の2点 $q_{1i}, q_{2i} = (x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots, N)$ の集合とみなし、ペアとなる2点のスクリーン座標上の中点 pm_i が対称面 S 上に乗ると仮定する。このとき、対称面 S 上の点 P の3次元座標値 $P = (0, x, y)$ が求められる。次に、ペアの2点 q_{1i}, q_{2i} の3次元座標値 $Q_{1i}, Q_{2i} = (x, y, z)$ の yz 座標値は、 $Q_{1i}(y, z) = Q_{2i}(y, z) = P(y, z)$ となり、対称面 S 上の中点 P から等距離に存在していることから、面 S との距離より、点 Q_{1i}, Q_{2i} の3次元座標値を求めることができる。

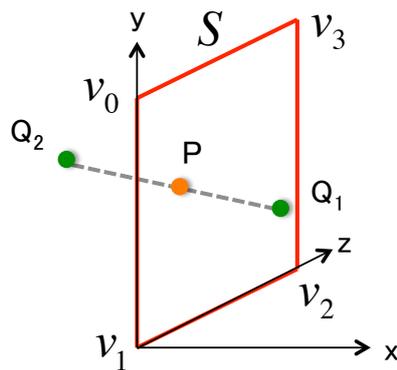


図 4.13: ペアとなる2点の対称面からの距離を求める

対応する 2 線を入力するだけでなく、対称面を考慮した 1 本のスケッチ入力から芯線モデルを生成できる入力を検討する。

図 4.14 (a) は、前述した手法に従い、入力の 2 線から 3 次元線モデルを生成する入力手法である。

図 4.14 (b) は、1 本の芯線スケッチを入力とし、入力線がそのまま対称面に乗ると想定し、対称面上に芯線モデルを生成する手法である。

図 4.14 (c) は、1 本の芯線スケッチを入力とし、その線の長さを二分する点で分割することで、2 本の線とみなし、芯線モデルを生成する手法である。

このように、複数の芯線スケッチ入力方法を設けることで、入力の簡略化を図る。

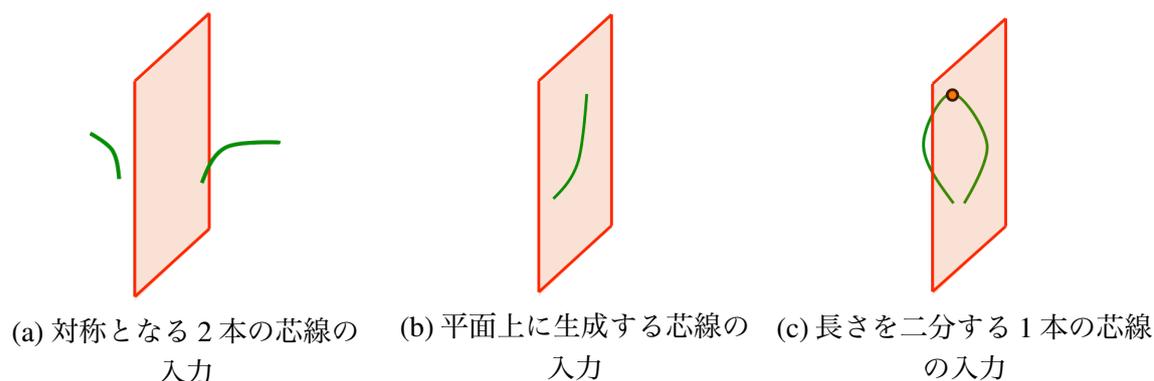


図 4.14: 3 通りの芯線スケッチ入力方法:赤い面が対称面, 緑の線が入力線

4.4 ツイストパターン選択による形状設計

バルーンアートの制作において、いくらかの特殊な設計方法はあるものの、主な制作手順は主要なツイストパターンのバブルの大きさや数を変えることによって形成されることが多い。そこで、主要なツイストパターンをモデル化し、選択・配置することで入力の簡略化を図り、設計を行う方針を考案する。システム UI のイメージを図 4.15 に示す。ツイストパターンリストから選択し、制作ウィンドウ内に配置することでバルーンアートを設計していく。

今回のシステムでは、事前に用意するツイストパターンをシングルバブル、ループツイスト、ロックツイスト、バードボディ(三つまとめ)、ピンチツイストとする。

バードボディは、鳥などの動物の身体などの部分に用いられる、バブルを三つまとめたツイストパターンである(図 4.16 (a))。ピンチツイストは、ループツイストと同じ構造で小さな一つのバブルの両端をまとめたツイストパターンである(図 4.16 (b))。

事前に用意しておくツイストパターンは、芯線モデルの生成、グループ化などの情報を付与した状態で、ユーザのボタンクリックによって制作ウィンドウにオブジェクトを生成する。

制作ウィンドウに現れたオブジェクトを移動、回転、サイズ変更など編集操作をすることでバルーンアートモデルを制作していく。

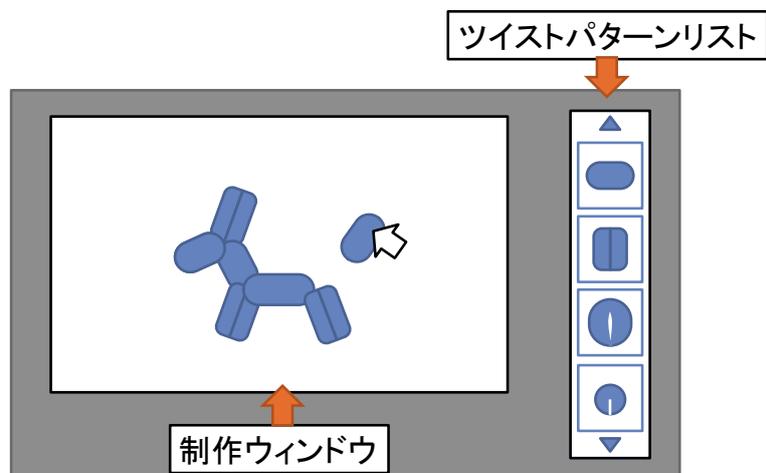
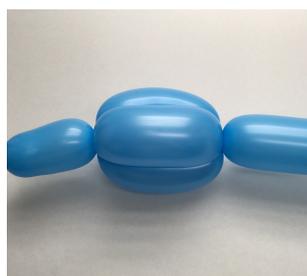


図 4.15: ツイストパターン選択による設計のイメージ図

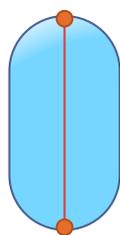


(a) バードボディ

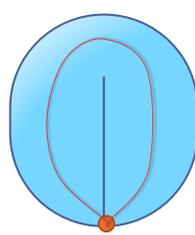


(b) ピンチツイスト

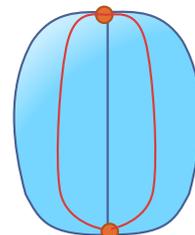
図 4.16: システムで用いるツイストパターン



(a) シングルバブル



(b) ループツイスト



(c) ロックツイスト

図 4.17: 事前に用意しておくツイストパターンオブジェクト例, オレンジ点: 端点, 赤線: 芯線

4.5 繰り返し構造を利用した形状変形

バルーンアートにおいて、定形のツイストパターンを変形することで設計を行うことが多い。バブルのグループ化を行うことで、複数のバブルの変形やひねり目による分割の変更を効率的に行うことができる。バブルをグループとみなすことで、同グループ内のバブルに同様の編集操作を行うことを可能とする。例えば、「ぶどう」(図 4.18)をバルーンで制作する際、小さな丸をいくつも作り、つなぎ合わせることによって実の形を表現する。この例では連続して16個の小さい球形のバブルを作成した。ここで作られる連続した小さなバブルを表現するために、ユーザが選択したグループ内の他のバブルにも編集操作が反映されるようにする。



図 4.18: バルーンアート作品：ぶどう

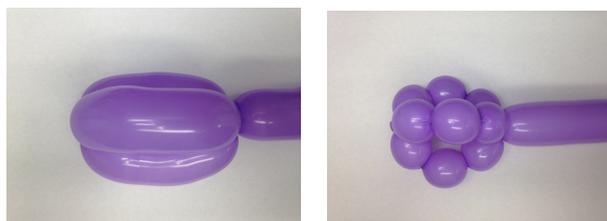


図 4.19: 三つのバブルのグループの細分化

図 4.19 の右図は、左図のそれぞれのバブルが三分割されたものと見ることができる。

また、同じグループに対して、バブルの数の増減処理を行う事を考える。大きさが同じであったり似通ったりしたバブルをグループとみなすことが多く、同じサイズのバブルの数を増やしたり減らしたりすることが有効である。図 4.20 に示した作品例、花はループツイストを5つまとめることで花びらを形成している。

バブル数の増減処理を行うために、グループ化したバブルの中心軸を求める。この中心軸は、グループ化されたバブルの複数の芯線の重心を通るものとする。



(a) ループツイスト 1つ



(b) ループツイスト 2つ



(c) ループツイスト 5つ

図 4.20: 繰り返し構造の作品例：花

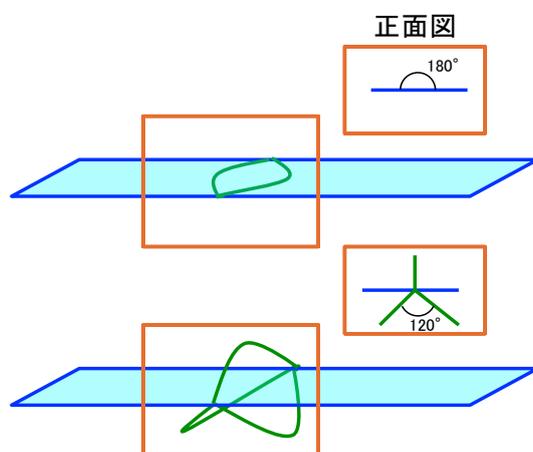


図 4.21: グループ化によるバブル数の増減操作

基本となる形状は、基準となる中心軸の周りに等分して存在すると考える(図 4.21)。ツイストパターン選択による入力では、バブルの数が3つのバードボディまでを選択可能パターンとして検討しているが、グループ化によるバブル数の増減操作を導入することで、4つ以上のバブルのまとまりを制作すること容易とするような入力方法を検討する。

第5章 結果

本章では、提案システムを用いてバルーンアートのモデルを設計し、その結果と考察を述べる。

5.1 2次元スケッチによる芯線モデル出力

本稿では、提案手法で述べた2次元スケッチ入力による3次元芯線モデル生成の手法のみ、プロトタイプの実装が完了し、ツイストパターンの配置やバブルの変形操作などは構想段階にとどまった。本章では、実装の完了している4.3節で述べた、2次元スケッチ入力による3次元芯線モデル生成を用いたバルーンアートモデルを出力しその結果を示す。本研究では、提案手法をC++言語を用いて開発し、グラフィックの処理にはOpenGL, GLUTライブラリを使用した。本手法を用いて制作方法の存在する既存のバルーンアート作品を設計を行えるか確認する(図5.1, 図5.2)。

また、市販モデリングツールのMayaを用いて、出力モデルのメッシュの細分割化を行い、質感を調整して、レンダリングを行った(図5.3)。

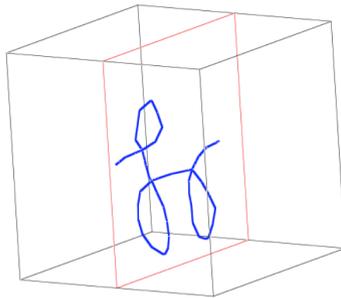
5.2 考察

対称面を利用した2次元スケッチからの3次元芯線モデル生成を利用した手法で、既存の制作手順に従った作品の芯線モデルを表現することが出来た。Mayaを用いたレンダリング結果では、より実物のバルーンアートに近いモデルらしく見て取れる。

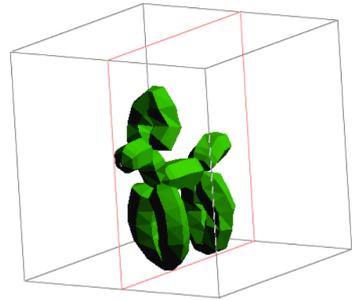
芯線スケッチ入力のみでは、バブルの数が増えるにつれ手数が増え、作業難度が上がってしまった。ツイストパターンを利用した入力や、繰り返し構造を考慮した変形操作を導入することで、複数手法の入力の組み合わせにより、より自在な設計を行うことが可能となるだろう。



バルーンアート：イヌ



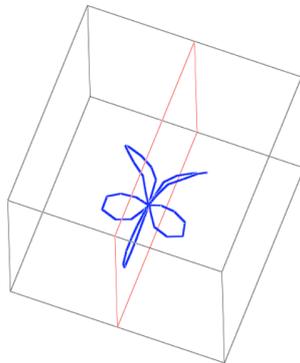
イヌの芯線モデル



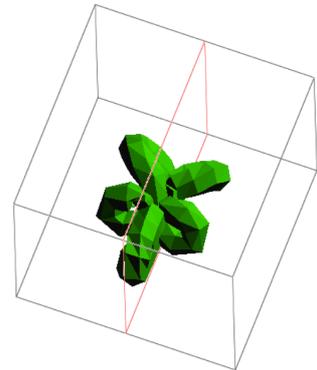
イヌのバルーンモデル



バルーンアート：花



花の芯線モデル

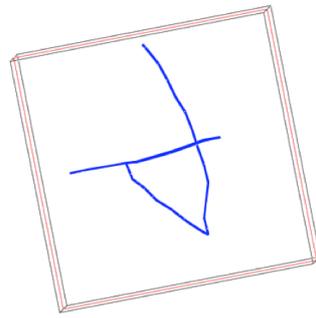


花のバルーンモデル

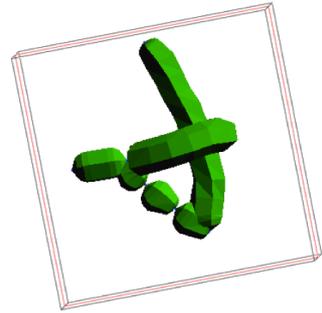
図 5.1: 芯線スケッチ入力による作品設計 (1)



バルーンアート：剣



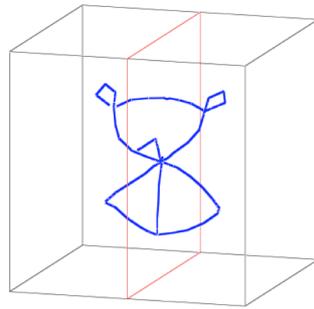
剣の芯線モデル



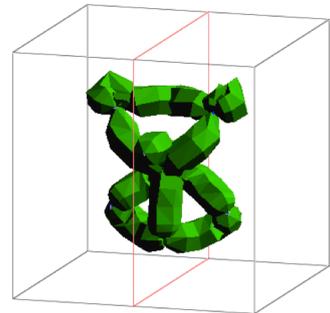
剣のバルーンモデル



バルーンアート：クマ



クマの芯線モデル

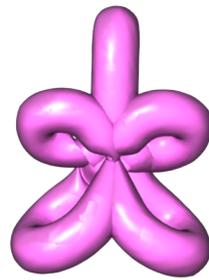


クマのバルーンモデル

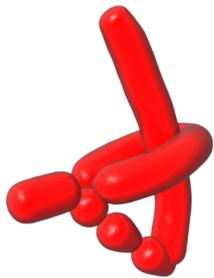
図 5.2: 芯線スケッチ入力による作品設計 (2)



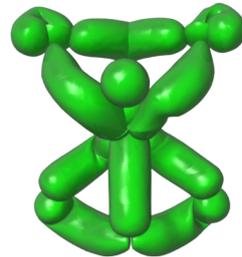
イヌのバルーンモデル



花のバルーンモデル



剣のバルーンモデル



クマのバルーンモデル

図 5.3: Maya によるメッシュ平滑化とレンダリングを行ったモデル

第6章 結論

本研究では、バルーンアートをモデル化し、計算機を用いてバルーンアート設計支援を行うシステムを考案した。提案システムでは、物体の対称性や形状の繰り返し構造を利用し、バルーンアート作品の形状設計を行った。2次元スケッチによる入力から3次元モデルを生成を行うことで直感的な操作によるバルーンアートの設計手法を提案した。また、主要なツイストパターンを用いることにより、定形の設計を容易とし、ひねり目やバブルの繰り返し構造を利用することで、詳細な設計の簡略化を行うことを可能とする方法を検討した。プロトタイプシステムの実装が完了した、2次元スケッチ入力による提案手法を用いたシステムで、既存の制作手順に基づいたバルーンアートの3次元モデルを作成し、設計支援への有効性と検討すべき課題を確認した。

提案手法の考案は行ったが、構想システムの全機能の実装を完了するに至らず、ユーザテストを行うまでには至らなかったため、今後は検討システムの実装を完了し、システムの検証、評価を行う必要がある。また、現状の手法では、バルーンアートの設計の自由度が高いという仮定の下設計を行っているため、システムの自由度が高く、実際に作成することの出来ない作品の設計が行えてしまう可能性がある。現実世界におけるバルーンアートとして整合性を保ちながら設計を行える手法の検討が必要となる。関連研究や著者の卒業研究で行った変形シミュレーションを取り入れることで、よりリアリティのある形状の表現が可能となると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，様々なご指導をいただきました本学システム情報工学研究科の三谷純教授に心より感謝申し上げます。また，金森由博助教，非数値処理アルゴリズム研究室の皆様にも日頃より大変貴重なご意見をいただきましたことを深く感謝いたします。最後に，学生生活を支えてくださった家族，苦楽をともにした友人たちに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Takeo Igarashi, Satoshi Matsuoka and Hidehiko Tanaka. Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design. SIGGRAPH '99, Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp.409-416, New York, NY, USA, 1999. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [2] Yuki Mori, Takeo Igarashi. Plushie: An Interactive Design System for Plush Toys. ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2007), vol.23, No.3, Article No.45, San Diego, USA, August 2007.
- [3] M. Skouras, B. Thomaszewski, B. Bickel, M. Gross. Computational Design of Rubber Balloons. *Comput. Graphics Forum (Proc. Eurographics)*, 2012.
- [4] Idan Shatz, Ayellet Tal, George Leifman. Paper craft models from meshes. *The Visual Computer*, International Journal of Computer Graphics, vol.22, iss.9 (2006).
- [5] Satoshi Iizuka, Yuki Endo, Jun Mitani, Yoshihiro Kanamori, Yukio Fukui. An Interactive Design System for Pop-Up Cards with a Physical Simulation. *Visual Computer (Proc. of Computer Graphics International 2011)*, 27, 6, 605-612, 2011.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美. 複数本バルーンにより構成されるバルーンアートの構造解析. 電子情報通信学会技術研究報告, vol.112, no.472, IMQ2012-87, pp.295-300(2013.03.04).
- [10] 浦正広. バルーンアートの構造解析と制作支援 Flash による制作支援システム (簡易版) . <http://www.om.sist.chukyo-u.ac.jp/~ura/balloonmodeling/simple.html>.

- [11] バルーンおやじ, ツイスター Rio. 風船チャチャチャ (ひねる風船の楽しさいっぱい 1). ナランハ, 2005.
- [12] バルーンアートのやさしい作り方サイト! キュッとバルーン.
<http://www.cuteballoon.net/>.
- [13] Eric Lengyel. ゲームプログラミングのための3Dグラフィックス数学. ボーンデジタル, 2003.
- [14] 藤沢誠. CGのための物理シミュレーションの基礎. マイナビ, 2013.
- [15] 華陽物産株式会社. ゴム物性一覧表.
http://www.kayo-corp.co.jp/common/pdf/rub_propertylist.pdf.
- [16] 横好き風船. オリジナル作品の作成.
<http://iwa.bz/ba/knowhow5/knowhow.html>.