

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

浦正広[†] 山田雅之[‡] 遠藤守[‡] 宮崎慎也[‡] 安田孝美^{††}[†] 中京大学人工知能高等研究所 [‡] 中京大学情報理工学部 〒470-0393 愛知県豊田市貝津町床立 101^{††} 名古屋大学大学院情報科学研究科 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町E-mail: [†] [‡] {ura, myamada, endo, miyazaki}@om.sist.chukyo-u.ac.jp, ^{††} yasuda@is.nagoya-u.ac.jp

あらまし バルーンアートは細長いバルーンにより様々な形状を制作する造形である。著者らはこれまでに1本のバルーンからなるバルーンアートについて、グラフ理論による構造解析手法と、それに基づく制作支援システムを提案している。また、複数本のバルーンを用いたバルーンアートについても、バルーンを1本ずつに分解して考えることで解析手法が応用できることを確認している。しかしながら、知識のないものがバルーンを複数本に分解して考えることは容易ではない。そこで本論文では、バルーンアートの構造を定義したグラフを、制作に必要な最小の本数に分割する手法を提案する。提案手法を実際のバルーンアート作品に適用し、その有効性を確認する。

キーワード バルーンアート, 構造解析, 複数本バルーン

Structure Analysis for Balloon Modeling made by Multiple Balloons

Masahiro URA[†] Masashi YAMADA[‡] Mamoru ENDO[‡]Shinya MIYAZAKI[‡] and Takami YASUDA^{††}[†] Institute for Advanced Studies in Artificial Intelligence, Chukyo University[‡] School of Information Science and Technology, Chukyo University 101 Tokodachi, Kaizu, Toyota, 470-0393 Japan^{††} Graduate School of Information Science, Nagoya University Furo, Chikusa, Nagoya, 464-8601 JapanE-mail: [†] [‡] {ura, myamada, endo, miyazaki}@om.sist.chukyo-u.ac.jp, ^{††} yasuda@is.nagoya-u.ac.jp

Abstract Balloon modeling is the artistic technique of twisting balloons into various shapes.. We have proposed a method for analyzing structure of balloon modeling made by one balloon based on graph theory, and developed a system for supporting balloon modeling making base on the method previously. We also have confirmed that the method is applicable in balloon modeling made by multiple balloons by separating balloons into one at a time. In this paper, we propose a method for separating a graph which is defined as a structure of balloon modeling into the minimum number that is needed for making.

Keyword Balloon Modeling, Structure Analysis, Multiple Balloons

1. はじめに

造形は様々あり、その目的も実用的な機能や芸術的な表現、遊びや知育など多岐にわたる。材料の特性に応じた加工手法によって作られる造形物はそれぞれ特有の構造をもつ。構造の特徴がわかれば、それを数理的に表せ、また、加工手法を有限種の操作として表現できれば、操作の組み合わせと造形物の構造とが対応付けられる。これらは造形物や造形プロセスの計算機による記録、分析、造形支援へ発展させることができ、既に様々な造形について試みられている^{[1][2][3][4][5][6]}。

バルーンアートは細長い風船により様々な形状を制作する造形である^{[7][8][9][10]}。バルーンをひねるという単純な加工で制作できる反面、完成形状から制作手段を想像することは容易ではない。計算機により制作支援する試みがいくつか存在するが^{[11][12]}、これらでは制作手順を導出する機能は実現されていない。

そのため著者らは、グラフ理論に基づき、1本のバルーンによるバルーンアートにおける構造の導出、形状成立の判定、制作手順の生成、難易度の算出を行う各手法を提案し^{[13][14]}、与えた概形から制作手順を導出する制作支援システムを開発している^{[15][16]}。また、複数本からなるバルーンアートについても、バルーンを1本ずつに分解して考えることで、提案手法が適用できることを確認している^[17]。しかしながら、バルーンアート初心者にとって、自身の与えた概形を複数本のバルーンに分割して考えることは容易ではなく、制作支援システムにおいて、その問題への対応が課題となっている。

そこで本論文では、バルーンアートの構造を定義したグラフを、制作に必要な最小の本数に分割する手法を提案する。提案手法を実際のバルーンアート作品に適用することにより、その有効性を確認する。

2. バルーンアートのグラフ表現

バルーンの形状をグラフで表現することにより、オイラー経路から構造の導出、また、その形状がバルーンアートとして成立するかの判定が可能となる。複数本からなるバルーンアートは、バルーンごとになるようグラフを分解し、それぞれオイラー経路を求めることにより、同様に構造が導出できる。

2.1. バルーンアートの制作手法

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 2-1 (1)に示すように、バルーンの両端をそれぞれ結び目、先端と呼ぶ。図 2-2 (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部分をバブルと呼ぶ。ツイストにより生成されたひねり目はそのままでは固定されず、ひねり目同士かひねり目と結び目、ひねり目と先端をツイストして固定する必要がある。ひねり目を固定することをロックと呼び、同一バルーン、もしくは図 2-2 のように、異なるバルーンのひねり目同士をツイストする。

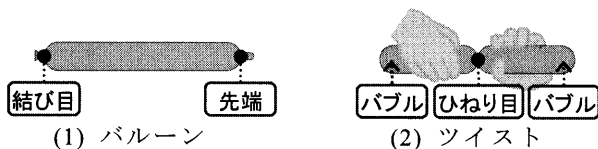


図 2-1 バルーンの初期状態とツイスト操作



図 2-2 2本のバルーンによるロック

2.2. 構造の導出

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。グラフの内部表現として隣接行列を用い、例として図 2-3 (1)に示す完成形状を構成する 2つのグラフがオイラーグラフであることを示す。(1)は、2本のバルーンにより構成される、3箇所がロックされた 10個のバブルにより構成される。これを(2), (3)で示すようにバルーンごとに分離し、それぞれをグラフで表すと(4), (5)となる。このとき、線がグラフの辺、黒丸が頂点を表し、白丸は他のバルーンによりロックされる、つまり、グラフ分離前は同一のものであった頂点を表す。このグラフを隣接行列で表すと表 2-1, 2-2 となり、(4)は a と g, (5)は z と y の 2頂点の次数のみがそれぞれ奇数であるため、双方のグラフともオイラーグラフであるといえる。

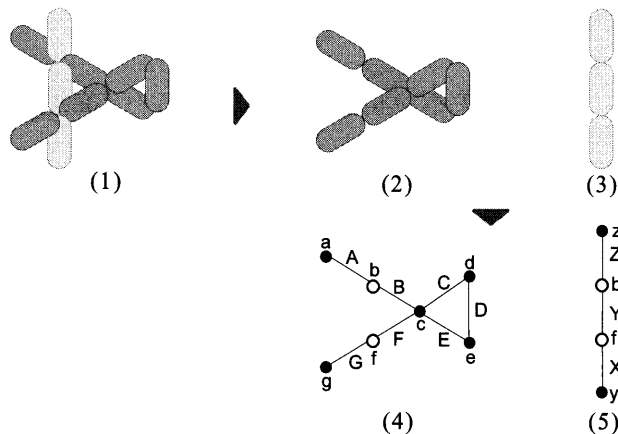


図 2-3 バルーンのグラフ化

表 2-1 (4)の隣接行列

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

表 2-2 (5)の隣接行列

	z	b	f	y
z		1	0	0
b	1		1	0
f	0	1		1
y	0	0	1	

2.3. 制作手順の生成

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位置となる。図 2-3 (4)の場合は図 2-4 (1), (2)で示すように 2通り、図 2-3 (5)の場合は図 2-4 (3)で示すように 1通りのオイラー経路が存在する。(1)と(2)いずれの経路においても頂点 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。

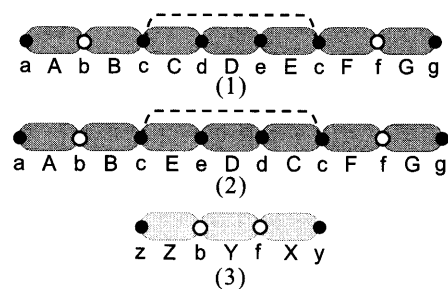


図 2-4 得られたオイラー経路

このオイラー経路を、バルーンごとに左辺から登場順にバブルを制作しロックしていくと、図 2-5 で示すような結果が得られる。なお、図 2-5 (1)において、グラフの経路として図 2-4 (1)を選択している。

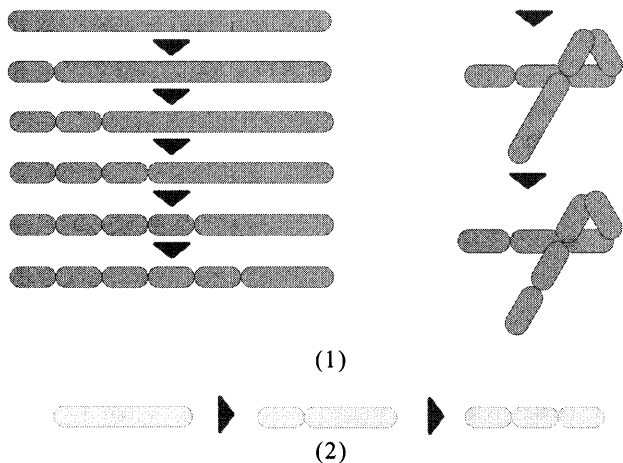


図 2-5 それぞれの制作手順

これを、2本のバルーンで重複する頂点が出現する段階でロックしていくことにより、図2-6 (1)の制作手順が、一方のバルーンを先に制作した後に他方のバルーンを用いてロックしていくことにより、図2-6 (2)の制作手順が得られる。

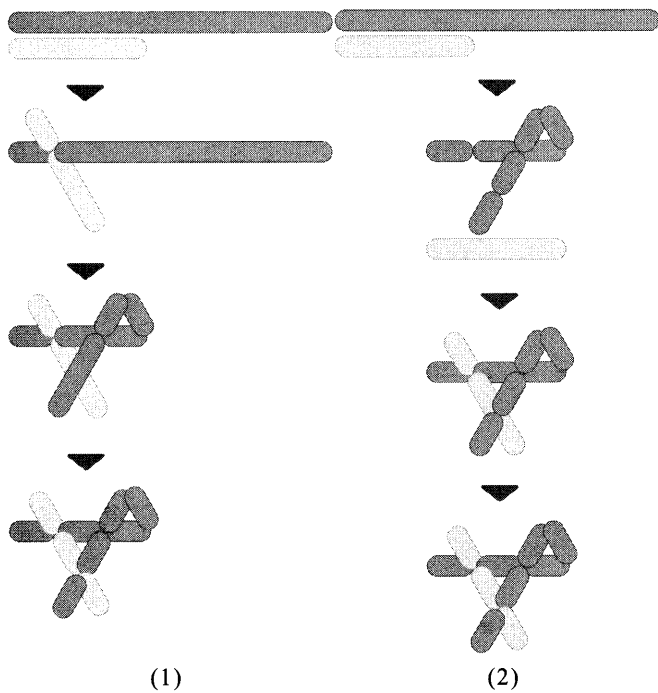


図 2-6 組み合わされた制作手順

2.4. 形状成立の判定

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、その形状が固定される。1本のバルーンからなるバルーンアートでは、その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) その頂点を含む閉路にロックする頂点があるのいずれかを満たせばよい。

2)の条件を満たすグラフの例を図2-6に示す。頂点dとeは、いずれも自身の含まれる閉路にロックする頂点であるcを含むため、ロックされる。また、頂点bとfも、自身を含む閉路に固定された頂点であるaとcが存在するため、同様にロックされる。



図 2-7 2)を満たす頂点を含むグラフの例

また、非固定頂点が存在する例を図2-7に示す。図中の黒丸が非固定の頂点である。(1)はロックがなく、(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ある。(2)の非固定頂点はロックされた頂点と隣接しているものの、自身とその固定点とを含む経路が閉路でないため、完成形状が固定されない状態となる。

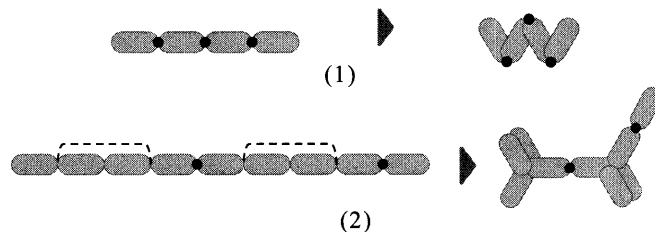


図 2-8 非固定の頂点が存在する形状の例

一方で、(2)のケースにおいて、図 2-9 に示すように非固定の頂点をロックするように1本のバルーンを追加することで、非固定の頂点が固定される。また、追加したバルーンについても、いずれの頂点も 1)もしくは 2)の条件を満たすため形状が成立する。

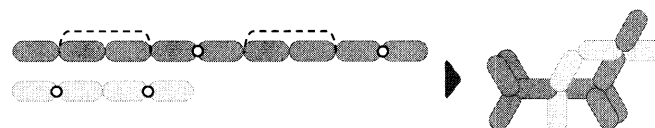


図 2-9 2本のバルーンにより固定される頂点の例

このように、複数本によるバルーンアートにおいては 1), 2)に加えて

- 3) 他のバルーンによりロックされる頂点であるの条件が追加される。

2.5. 難易度の算出

バルーンアートでは、ロックによりひねり目が固定されるまでは手で押さえる必要があり、これが制作を難しくする一因となっている。そこで、制作における非固定頂点数の最大値、および、総和をロック数で割った平均値を難易度として用いる。例えば図 2-6 の場合、(1)は最大値 4 で平均値 2.67、(2)は最大値 5 で平均値 3 であり、(1)の手順が易しいことがわかる。

3. 複数本バルーンによる形状の構造解析

前章までで示すように、著者らはこれまでに1本のバルーンからなるバルーンアートの構造解析手法を提案し、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、その手法が応用できることを示している。しかしながら、制作支援システムの実装を考えたときに、概形を与えた際、その制作には複数本が必要であることを、バルーンアート初心者が概形から判断すること困難であるといえる。

そこで、グラフを複数の経路に分割する手法を提案する。ここでは、グラフを与え、そのグラフを作成するための手順を求める手法について述べる。経路は最大でバブルの数だけ分割が可能であるが、提案方法では、バルーンの本数が最少で済む手順を求める。

3.1. 経路分割の生成

次数が奇数である頂点の個数を $2n$ とするとき、グラフの経路分割の大きさの最小値は n である。ここでは経路分割の大きさが n となる経路分割を全て求める方法を述べる。

まず、次数が奇数であるすべての頂点を n 個の組に分ける。この各組の辺を両端に持つ仮想の辺を追加すると、グラフの頂点の次数は全て偶数なる。図 3-1 (1) のバルーンアートを例に考える。これをグラフにした図 3-1 (2) には次数が奇数の頂点が4個あり、2組への分け方は、図 3-2 (1), (2), (3) で示すように3通り存在する。図では、辺 H, I が追加した仮想の辺である。このとき、グラフの頂点の次数はすべて偶数になることから、オイラー経路が存在する。

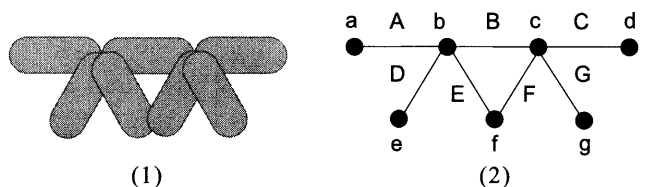


図 3-1 次数が奇数である頂点が4点あるグラフ

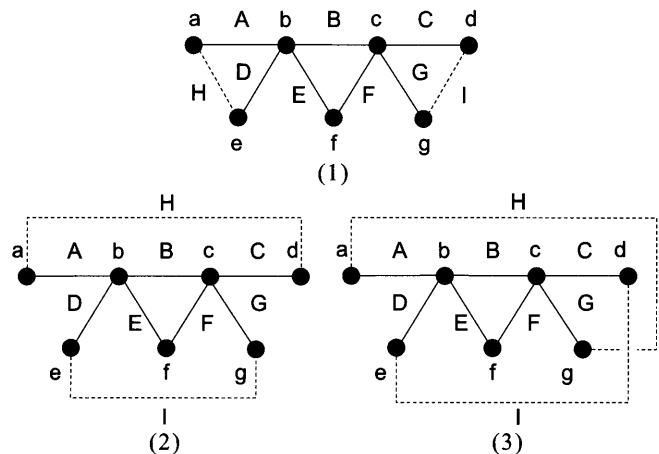


図 3-2 図 3-1 (2) に仮想辺を追加したグラフ

図 3-2 (1) の場合、図 3-3 で示す4つのオイラー経路が存在する。これらの経路は実際には2つのグラフであるが、仮想辺により接続されていることから、そのグラフは図で示すように環になる。

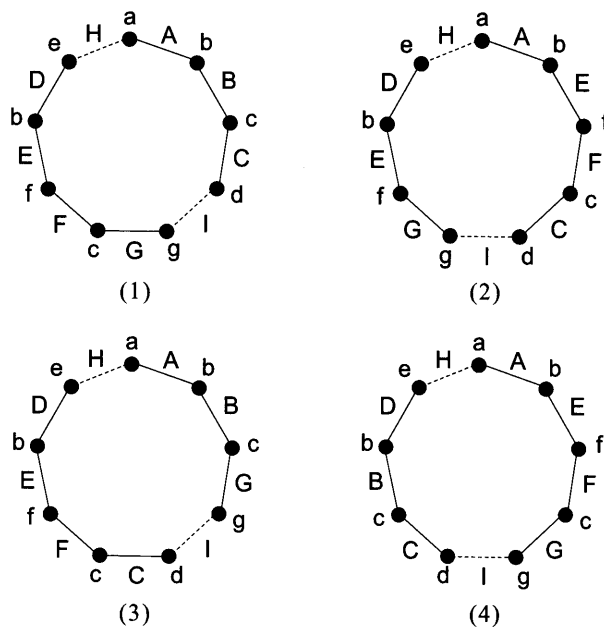


図 3-3 図 3-2 (1) のオイラー経路される頂点の例

つぎに、仮想的に追加した辺を取り除く。各オイラー経路から仮想辺である H, I を取り除くと、グラフの経路分割が得られる。図 3-3 で示す4つのオイラー経路からは、それぞれ図 3-4 で示す4つの経路分割が得られる。

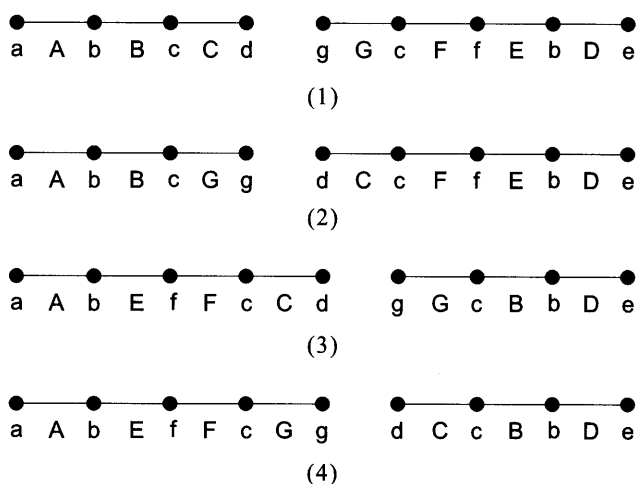


図 3-4 図 3-3 から得られる分割経路

図 3-2 (c), (d) についても同様に行うと、それぞれ6個の経路分割が得られる。これらの3通りの分け方で合計16個の経路分割が得られるが、その中でユニークな経路分割は8個となる。

3.2. 制作手順の生成

2.3 ではバルーンの左方向からの生成する手順のみを示しているが、実際には右方向から生成しても同一の形状が生成可能である。そのため、経路分割により得られた経路は、どちら向きから制作を開始しても形状の形成が可能となる。図 3-2 (2)は奇数の次数を持つ頂点が 4 点あることから、前節で示すように最少では 2 本のバルーンにより生成可能である。そのため、経路分割により得られた 8 個の経路は、分割された 2 つのグラフそれぞれが 2 つの開始方向を持つ。このことから、1 つの経路分割につき 4 通り、つまり、ユニークな 8 個の経路分割で計 32 通りの構造を持つ。

これを、2.3 で述べ図 2-6 (1)で示したように、登場順にバブルの生成、ロックの実施を行う制作手順により生成することにより、図 3-1 (1)で示す形状の生成が可能となる。図 3-5 には構造の一例を、図 3-6 には制作の流れを示す。なお、図中の点線はロックを表す。

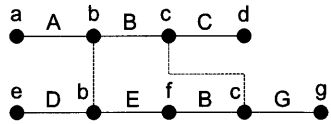


図 3-5 構造の一例

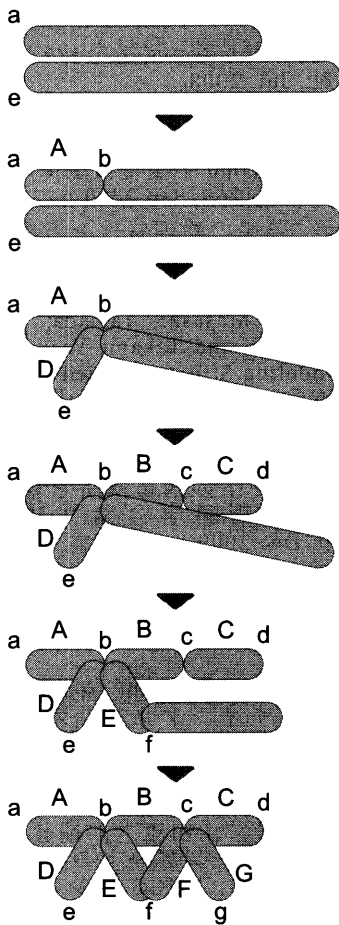


図 3-6 図 3-5 の制作の流れ

4. 評価

複数本のバルーンにより構成される実際のバルーンアート作品が、提案手法により構造を定義でき、また、制作手順が得られるかを確認する。制作するバルーンアートは図 4-1 で示す亀とし、図 4-2 で表すグラフ構造を持つものとする。

グラフのオイラー経路は一般にグラフ探索により求めるが、オイラー経路の数は辺の個数や各辺の次数が大きくなると指数的に増えることから、現実的な時間内で全てのオイラー経路を探索することが困難となる。そこで今回は、計算機によるランダム探索によりオイラー経路の抽出を行い、30,000 個の制作手順を生成する。また、得られた制作手順の候補は 2.5 で述べた難易度の算出に基づき、易しい順にソートする。ここでは、固定されているひねり目の数の最大値が小さいほど、また、これが等しい場合は総和が小さいほど順位を高くする。



図 4-1 バルーンアートによる亀の CG モデル

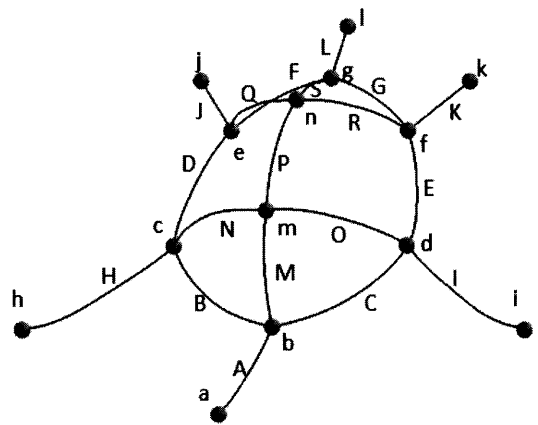


図 4-2 亀のグラフ

亀のグラフには次数が奇数となる頂点が 6 つ存在することから、前章で述べた仮想的な辺を追加することが可能な頂点の組み合わせは、15 通りになる。

得られた制作手順のうちで、最も難易度が低かったものの1つを図4-3に示す。これは3本のバルーンにより構成され、この手順において固定されないひねり目の最大値は2、総和は13である。また、図4-4はこの手順により実際に制作した亀であるが、図4-1のような形状として制作できていることが確認できる。

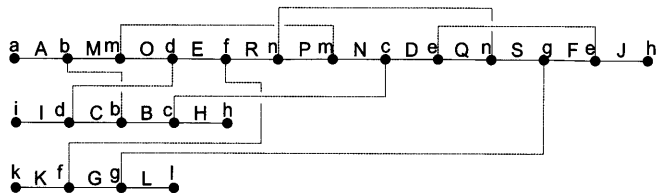


図 4-3 亀の制作手順の一例

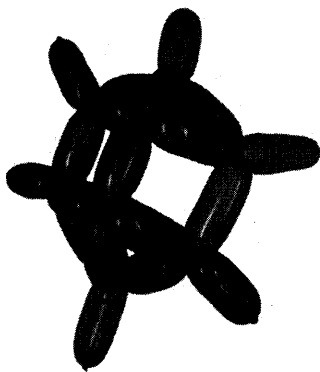


図 4-4 図 4-3 の制作手順により制作した亀

5. おわりに

本論文では、複数本のバルーンにより構成されるバルーンアートについて、完成形状のグラフを分割して構造を定義する手法、および、その制作手順を導出する手法を提案した。また、提案手法を実際のバルーンアート作品に適用し、その有効性を確認した。

バルーンアートでは、2章で述べたひねり目同士をツイストするロック以外にも、複数のバブルの隙間にバブルを押し込むことで、物理的にひねり目を固定するスラスト操作と呼ばれるロック手法がある。今回は考慮の対象としなかったバルーンの長さや個々のバブルの配置などを考慮することにより、形状維持可能かどうかをより厳密に判定でき、スラスト操作を含めた詳細な制作手順の提示が可能となる。これらについて考慮した構造解析手法が実現できると、実用性の高い制作支援システムの開発につながると考えられることから、これを今後の課題としたい。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金、人工知能研究振興財団研究助成、中京大学特定研究助成による。

文 献

- [1] Jun Mitani and Hiromasa Suzuki, "Making Papercraft Toys from Meshes using Strip-based Approximate Unfolding," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 23, No. 3, pp.259-263, Aug.2004.
- [2] Yuki Igarashi, and Takeo Igarashi "Pillow: Interactive Flattening of a 3D Model for Plush Toy Design," *Lecture Notes in Computer Science* 5166, pp.1-7, Aug.2008.
- [3] Xian-Ying Li, Tao Ju, Yan Gu and Shi-Min Hu, "A Geometric Study of V-style Pop-ups: Theories and Algorithms," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 30, No. 4, Article 98, Jul. 2011.
- [4] Shiqing Xin, Chi-Fu Lai, Chi-Wing Fu, Tien-Tsin Wong, Ying He and Daniel Cohen-Or, "Making Burr Puzzles from 3D Models," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 30, No. 4, Article 97, Jul. 2011.
- [5] 内田忠, 伊藤英則, "折り紙過程の知識表現とその処理プログラムの作成," *情報処理学会論文誌*, Vol.32, No.12, pp.1566-1573, Jul. 1991.
- [6] Miyazaki S, Yasuda T, Yokoi S, and Toriwaki J, "An Interactive Simulation System of ORIGAMI Based on Virtual Space Manipulation", *Proc. IEEE International Workshop on Robot and Human Communication '92*, pp.210-215, Sep.1992.
- [7] 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, Apr.2008.
- [8] 高田佳子, ファンタジー・バルーン, 大月書店, Apr.1999.
- [9] 大石亜由美, 壁画・イベントに生かす 子どもと楽しむバルーンアート, いかだ社, Mar.2008.
- [10] ほしいんた, "楽しくつくろう!バルーン工作", ブティック社, Jul. 2008.
- [11] 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, Sep.2000.
- [12] 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.
- [13] Masahiro Ura, Masashi Yamada, Mamoru Endo, Shinya Miyazaki, and Takami Yasuda "Analysis for Balloon Modeling Structure based on Graph Theory," *Proc. of NICOGRAPH International 2009*, VII-4, Jun.2009.
- [14] 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, Dec.2009
- [15] 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, Mar.2009.
- [16] 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, 1B1-3, Sep.2009.
- [17] 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*, HCG2010-B3-3, pp.167-172, Oct.2010.