

産業情報論集 第13巻 第1・2号合併号

折り紙ロボットの予備設計：
格子状に連結された折り紙ロボットにおける折り目位置の調整

Preliminary Design of Origami Robot:
Adjustment of Fold Line Positions on Grid Origami Robot

曹 真
Makoto SO

沖縄国際大学産業情報学部

2017年3月

折り紙ロボットの予備設計： 格子状に連結された折り紙ロボットにおける折り目位置の調整

Preliminary Design of Origami Robot:
Adjustment of Fold Line Positions on Grid Origami Robot

曹 真
Makoto SO

【要 旨】

ロボットは機能を増すごとに躯体の構造が複雑化する。それゆえ求められる機能が多様化および高度化するほど、そのロボットの設計は困難となり、ひいては操作や保守といった運用の問題にも繋がってくる。本稿では、それら設計および運用の問題を解消すべく、単純な構造でありながら、様々な状況に応じて適切な機能を提供し、なおかつ可用性が高い「折り紙ロボット」の実現に向け、その主旨を示し、特に格子状に連結された折り紙ロボットにおける折り目位置の調整について、その実験計画をまとめた。

【目 次】

1. はじめに
2. 折り紙ロボットの概要
3. 折り目の調整
4. 折り紙ロボットの意義
5. まとめ

1. はじめに

産業競争力の向上や現代の社会が抱える様々な問題の解決にあたり、ロボット技術の発展には大きな期待が寄せられている。「インターネットの次はロボットが経済を牽引する」という考えのもと、アメリカ、EU、韓国、日本の各国では、製造業、流通、医学、教育などの多分野において専用ロボットの研究・開発が推し進められている。各分野におけるロボットへの要望は、危険地帯での作業、生産工場での不休労働、不整地での高速移動、先進医療や福祉介護現場での繊細かつ柔軟な動作など多岐にわたり、社会の様相に応じてロボットに課せられる機能は多様化かつ高度化し続けている。加えて、過酷条件下においても安定して稼働し続け、例えば故障したとしても容易にメンテナンスできるといった利便の良さも求められている。

しかしながら、一般的にロボットはその機能を増すほどに、その躯体の構造が複雑化する。そのため、高い機能を持ち、さらに状況に応じて幾つかの機能を持ち合わせるとなると、その設計は困難を極め、ひいては操作や耐久性、保守といった運用の問題にも関わってくる。

そのような背景のもと、本研究では、それらロボットの高機能化にまつわる設計と運用の問題の解決にあたり、「折り紙」、「マルチエージェントシステム」および「濃度勾配による形態形成」をキーワードとして、様々な状況に応じて多様な機能を提供し、なおかつ可用性の高い「折り紙ロボット」の構築を目指す。それを以てより使い勝手の良いロボットの開発に寄与し、特にロボットを要する産業の推進に貢献する所存である。

研究の運びとしては、序盤にはより簡易なモデルとして格子状に連結された折り紙

ロボットについて実験を進め、知見をそろえていくとともに、後にはより複雑なモデルとして非晶質状に連結された折り紙ロボットなどについての実験へと進めていく。

2. 折り紙ロボットの概要

2.1. 折り紙ロボットの構想

本研究で提案する「折り紙ロボット」について、「折り紙」、「マルチエージェントシステム」、「濃度勾配による形態形成」を要点として、その構想を説明する。

「折り紙」が持つ機能性への着目と「折り紙の公理」の利用

本研究で提案する折り紙ロボットはシート状の躯体を成す。基本的にその概形は正方形であり、厚みは十分に薄いものとする。その躯体上には任意に折り目を施すことができ、また必要に応じて折り目の形状を変位させることができる。そしてその折り目を適切に屈伸させることで、折り紙ロボット全体に意図した動作を生み出すことができる。折り目の形状に従い、シート状の物体には強度補強や展開動作などの様々な機能が備わることから [1]、折り目の形状の調整と、折り目の屈伸動作の調整によって、折り紙ロボットには適宜有益な機能を実装していくことが可能である。

折り目を施す際は、「折り紙の公理」[2]を利用する。「折り紙の公理」とは「紙を折る」という操作を体系化したものであり、この公理にもとづけば、定規とコンパスを用いて描くことのできる線分は、すべて折り目としてシート上に生成することができる。

折り紙の公理では、シートの四端、四隅、既に施された折り目を基準の位置とし

て、それらのうち、いずれか二つを重ね合わせ、その中心（双方から等距離の箇所）に新たな折り目を作ることが基本の操作となる。この基本操作を繰り返していくことで、またその過程で作られていく折り目を新たな基準の位置として加えていくことで、結果的にシート全体に任意の折り目が描ける。

「マルチエージェントシステム (MAS)」の利用

MAS とは、複数の要素が集合することにより、要素単体では成しえなかった困難な課題を全体で達成する仕組みのことである。本研究で提案する折り紙ロボットは、その躯体が複数の微細なロボットの集合で形成されている。本研究においては、その微細なロボットがエージェントであり、それらが結晶状または非晶質状に連結し、シート状の躯体および折り目を形成することで、シート全体で多様な機能を実現する。

各エージェントは単純な動作（隣接エージェントとの連結および連結部の屈伸）のみを成し、また近接する環境の状態のみを認識する。

本研究の始めでは、より簡易なモデルとして、各エージェントが格子状に連結して正方形を形成した折り紙ロボット（図 1）について実験を進める。またこの場合、エージェント自身が認識できる情報は以下の二つとする。

- 四端、四隅、折り目との隣接状態（いずれかと接しているかどうか。）
- 隣接したエージェントが保持するモルフォゲンの種類とその濃度

高い機能を持たない分、構造は単純となり、各エージェントは壊れにくくなる。

そして各個体すべてが均質（躯体の構造と組み込まれるプログラム（スキーム）が同じ）なので、一部が壊れたとしても別のエージェントとの交換で修復が完了する。

折り紙ロボットには、ロボット全体の統制役は存在しない。躯体全体は単純な機能を持ったエージェント群のみで構成される。しかしそれらが連結し、そのうえで個々が役割を果たした結果、躯体全体に意図された折り目が施され、特定の機能が実現される。

「濃度勾配による形態形成」の利用

折り紙の公理の利用には、シートの端、隅、既存の折り目からの距離測定が必要になる。しかし単純なエージェントは近接情報しか認識できず、躯体全体における自身の位置が把握できない。そこで「濃度勾配」[3]という、生物が自身の体を形成する際に用いるモルフォゲンの濃度勾配を利用した距離の測定方法を用いる。

「濃度勾配」とは、生物細胞内で発生する化学物質（モルフォゲン）の濃度変化であり、その濃度差を測ることで、モルフォゲンの発生源からある一点までの直線距離を推定することができる。つまり、折り紙の公理に従って折り目を作成する際、必要になる定規（直線）とコンパス（距離）の役割を濃度勾配による測定方法が担うことで、単純なエージェントの集合体であるシート上に任意の折り目を生成することが可能になる。

2.2. 折り紙ロボット（格子状連結）のモデル

折り紙ロボット（格子状連結）の仕様

- 折り紙ロボットの躯体は、エージェント群による格子状の連結で構成され、一枚のシート状（正方形）を成す。

- エージェントは、濃度勾配の条件が揃うと、隣接エージェントとの間（連結部）に折り目を構成する。
- エージェントは、各個体が均質（ハードウェアおよび組み込まれたスキームが同じ）である。
- エージェントは、隣接情報のみを認識する。
隣接情報：
（ア）四端、四隅、折り目との隣接状態
（イ）隣接エージェントが保持するモルフォゲンの種類とその濃度

エージェントに組み込まれるスキーム

各エージェントには、以下に示すスキームが組み込まれる。その結果、既定のモルフォゲンが、一定の割合でその濃度を上げながら、シート全体に伝播していくことになる。

- 隣接エージェントが保持するモルフォゲンの種類とその濃度を認識する。
- 隣接エージェントが保持するモルフォゲンを、濃度を上げたうえで自身も保持する。（伝播）
- 伝播時のモルフォゲン濃度の上昇量は、モルフォゲンの種類ごとに一定である。（勾配）
- 隣接エージェントと、既定のモルフォゲンの濃度が等しくなった場合、互いの連結部分を折り目とする。
- 隣接する環境の状態（四端、四隅、折り目）を認識する。
- 端、隅、折り目に接するエージェントは、その区別に応じた既定のモルフォゲンを自身に保持する。

2.3. 折り紙ロボット（格子状連結）における折り目の生成例

エージェントのスキームを以下とした場

合、 a と β の両端から測って等距離の箇所、つまり折り紙ロボットの中心に折り目が形成される（図2左）。

- a 端にいる場合、 a を濃度1で保持する。
- β 端にいる場合、 b を濃度1で保持する。
- 隣接Aが a を保持する場合、濃度を勾配 45° で上げ自身も保持する。
- 隣接Aが b を保持する場合、濃度を勾配 45° で上げ自身も保持する。
- 隣接A間で a と b の濃度が等しい場合、間の連結部を折り目とする。

（ a, b ：モルフォゲン、A：エージェント）

3. 折り紙ロボット（格子状連結）における折り目位置の調整

3.1. 濃度勾配の変化による折り目位置の調整

折り紙ロボットに何かしらの機能を実装させるには、その躯体に施す折り目の設計が要である。本研究では設計に必要な一要素である、「特定の折り目に対する位置の調整」に焦点を当てる。

折り紙の公理ではシート上に任意の折目を描ける。しかし、端、隅、既存の折り目のうち、いずれか二つを重ね合わせて、その中心（双方からの等距離の箇所）に新たな折り目を施していくという操作であるため、目的の折り目の位置が基点の中心に無い場合、そこに合わせ込むために何重にも似たような処理を繰り返す必要が生じる。

そこで、より簡易な折り目位置の調整方法として、濃度勾配の仕組みにおいて、モルフォゲンの濃度勾配に意図的に変化を与えることによって、折り紙の公理が描く折り目の位置を調整する操作を試みる。

折り目の調整例

2.3にて折り目の生成例を示したが、それと同様のスキームで、 a (α 側) の濃度勾配よりも b (β 側) の濃度勾配を小さくすると、 a と b が等濃度となる箇所が α 側に推移する (図 2 右)。

この濃度勾配の変化によって生じる折り目位置の推移を基本に、特定のタスクを課された折り紙ロボットにおける最適な折目位置の調整を図る。

3.2. 遺伝的アルゴリズムによるモルフォゲン濃度勾配の最適化

本研究において提案する折り紙ロボットは、シート状の躯体に施された折り目を屈伸させることで特定の動作を実現するものである。そしてその折り目の形状はモルフォゲンの濃度勾配によって調整される。研究序盤の実験では、与えられたタスクの最適な達成に繋がる濃度勾配を求めるために、物理シミュレーター上で折り紙ロボットを動かす、遺伝的アルゴリズムを利用して、最も効果的にタスクを達成する濃度勾配を算出する。そこでの折り紙ロボットは、既に折り目の概形は決まっており、遺伝的アルゴリズムは、既にある折り目の位置の調整を担うものとする。

例) 折り紙ロボット (格子状連結、Ver. 前進) における最適な濃度勾配・折目位置の検証

各エージェントが保持するシーケンス
(疑似コード)

```
if ( 前端に位置 )  $a$  を濃度 1 で保持
if ( 後端に位置 )  $b$  を濃度 1 で保持
if ( 自身の  $a$  濃度 == 隣接Aの  $b$  濃度 )
    隣接間を折目①とする
    and  $c$  を濃度 1 で保持
```

```
if ( 自身の  $b$  濃度 == 隣接Aの  $a$  濃度 )
    隣接間を折目①とする
```

and d を濃度 1 で保持

```
if ( 自身の  $a$  濃度 == 隣接Aの  $c$  濃度 )
    隣接間を折目②とする
```

```
if ( 自身の  $c$  濃度 == 隣接Aの  $b$  濃度 )
    隣接間を折目③とする
```

```
if ( 隣接Aが  $n$  を保持 ) (  $n : a \sim d$  )
     $n$  の濃度を勾配  $x_n$  で増やして保持
```

※ a, b, c, d : モルフォゲン、A: エージェント

折り紙ロボット (格子状連結、Ver. 前進) (図 3) は、各折り目にて同時に同じ角度で屈伸を繰り返す、前進を目的とする。基本の形状として、前端から後端にかけて、前進方向に対して垂直に三つの折り目が施されるとする。

モルフォゲン a, b, c, d のそれぞれに対する勾配 x_a, x_b, x_c, x_d の値を調整することで、前進に最適な折り目の位置を測る。現状は、組み合わせ最適化問題と捉え、遺伝的アルゴリズムにより適切な勾配を算出する。適応度を前進距離とし、選択・交叉・突然変異を繰り返す、その結果として折り目が最適に調整された個体を生み出していく。

4. 折り紙ロボットの意義

4.1. 実用に対して期待される効果

折り紙ロボットの動作は、身体に持つ折り目によって規定される。つまりは、同じ躯体であっても、折り目を変化させることで、異なる動きが可能となる。災害地や僻地の探索にロボットが利用される機会があるが、折り紙ロボットであれば、環境の変化に応じて折り目を変化させ、その都度最適な動作を行うことができる。加えて躯体の機構が単純なことから、故障しづらく、

劣悪な環境下でも安定した稼働が期待できる。

このような折り紙ロボットの高い柔軟性と可用性を活かす案として、折り紙ロボットによる血管や心臓の代替組織の実現がある。人工の臓器は故障せず、安定して稼働し続けなければならない。現在、先端の人工心臓は複雑なメカニズムにもとづいたものであるが、故障率やメンテナンス性を考えると、より単純な機構によって成り立つ人工心臓の実現には意義がある。

心臓は解剖すると、単純な伸縮運動を繰り返す一本の管状の組織となるという説がある [4]。その管が既定の手法で巻かれることで、周知の心臓の形となり、単純な伸縮は心臓の鼓動となり、血液を力強く押し出し体内を循環させる機能を実現するとされている。この説に従えば、まず帯状の折り紙ロボットをらせん状に巻き、折目の屈伸運動によって口径が伸縮する管を形成し (図 4)、更にそれを心臓同様の手法で巻くことができれば、実際の心臓に近い人工心臓を作れる可能性がある。心臓は一本の管状の組織であるという説は、現状、あくまで一説であるが、その是非を検討する意味でも、このアプローチには意義がある。また、たとえ生物学的に正しい構造でなくとも、機能として心臓と同様のものを実現できれば、この研究には相応の意義があるといえる。

この実験に着手する際は、まずは単純な伸縮を行うシートから血管のイメージに近い管を作成する。そしてそれを適切に巻くことで心臓を形作るといふ、流れ的にも発生学に近いプロセスを踏みたいと考えている。

4.2. 生物に対する類比

各エージェントはまったく均質であり、同

じ動作機構を持ち、共通の情報 (スキーム) を保持する。そのスキームにもとづいて、シート全体に折り目が発生し、その折り目の形状によって全体の動作が決定される。この一連の機構は、個々の細胞が持つ共通の遺伝子情報によって生物の生態が決定されることの類比であるとするれば、本研究は生命の機構の根幹を探り、「生命の様に動く機械」の研究に寄与できると考える。

折り紙ロボットを MAS で構成する場合、エージェントは近接情報しか把握できないため、折り紙の公理に要する距離の測定ができない。その問題を解消したのが「濃度勾配による形態形成」である。濃度勾配は生物の発生において、胚の状態から頭や胴体といった身体部分のサイズや位置を決めるための物差しの役割を担う。それにより、全体における自身の位置が把握できない細胞の集合である胚を、遺伝子情報に従い、正確に分化していくことが可能になる。本研究は、その仕組みを折り紙ロボットに応用する試みともいえる。

折り紙の公理と濃度勾配による形態形成にもとづいたスキーム (遺伝子) が組み込まれたエージェント (細胞) 群は、外部からの指示や全体の統制役を必要とせず、自身らの集合体であるシート状の躯体に、意図された折目 (身体構造) を施すことができる。自律的に折り目を作り出し、機能を実現することは自己組織化の様態であり、折り紙ロボットの研究は、生命活動や知性に対する類比としての興味深さがある。

5. まとめ

本稿では、機能の多様化および高度化にまつわるロボットの設計と運用の問題を

解決すべく、複雑な構造が無くとも、様々な状況に応じて適切な機能を提供でき、なおかつ可用性の高いロボットである「マルチエージェントシステムを用いた折り紙ロボット」の実現を掲げ、その主旨と実験計画をまとめた。

特に研究序盤では、MAS と濃度勾配による形態形成を利用した折り紙ロボット(格子状連結)において、煩雑な操作である折り目位置の調整に対し、濃度勾配の意図的な変化による簡易な折り目位置の調整操作を試みる。

実験では物理シミュレーター上で折り紙ロボットを動かし、遺伝的アルゴリズムの利用により、タスク達成に向けた最適な折り目を形成する濃度勾配を導出する。

折り紙ロボットは、高い機能性と可用性を併せ持つほか、その自己組織化の様態から、生命や知性に対する類比としての興味深さもあり、双方の面から産業や科学の発展に貢献すべく研究を進める所存である。

参考文献

- [1] T. Nojima, "Analytical Modeling of Origami and Its Applications : Mainly for Engineering Applications," *Applied Mathematics*, vol. 18, no. 4, pp. 271-284, 25 12 2008.
- [2] H. Huzita and B. Scimemi, "The algebra of paper-folding," *Proceedings of the First International Meeting of ORIGAMI SCIENCE and TECHNOLOGY*, 1989.
- [3] P. A. Lawrence, *The Making of a Fly : the Genetic of Animal Design.*,

Blackwell Scientific Publications Ltd, 1992.

- [4] F. Torrent-Guas, M. J. Kocica, A. F. Corno, M. Komeda, F. Carreras-Costa, A. Flotats, J. Cosin-Aguillar and H. Wen, "Towards new understanding of the heart structure and function," *European journal of cardio-thoracic surgery*, vol. 27, no. 2, pp. 191-201, 1 2 2005.

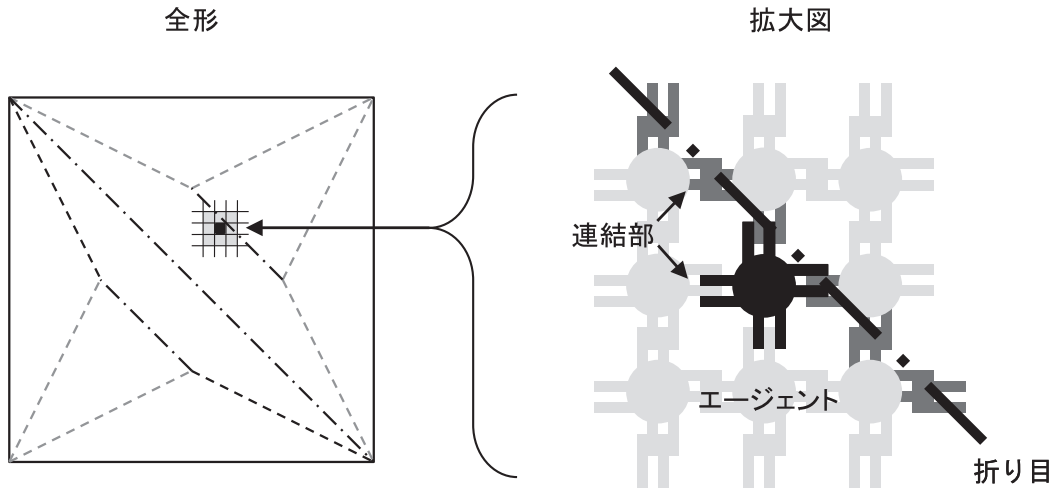


図 1. 折り紙ロボットの(格子状連結)概形

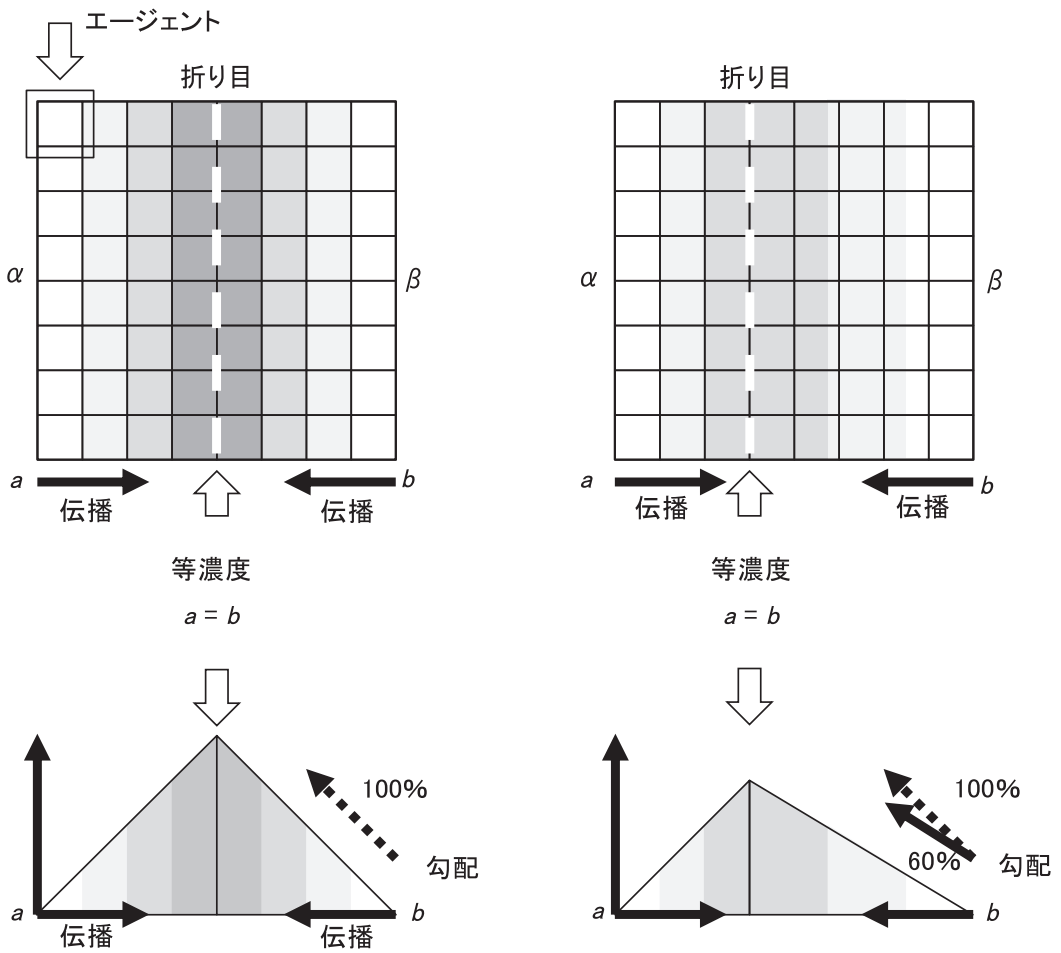


図 2. 濃度勾配の変化による折り目位置の推移

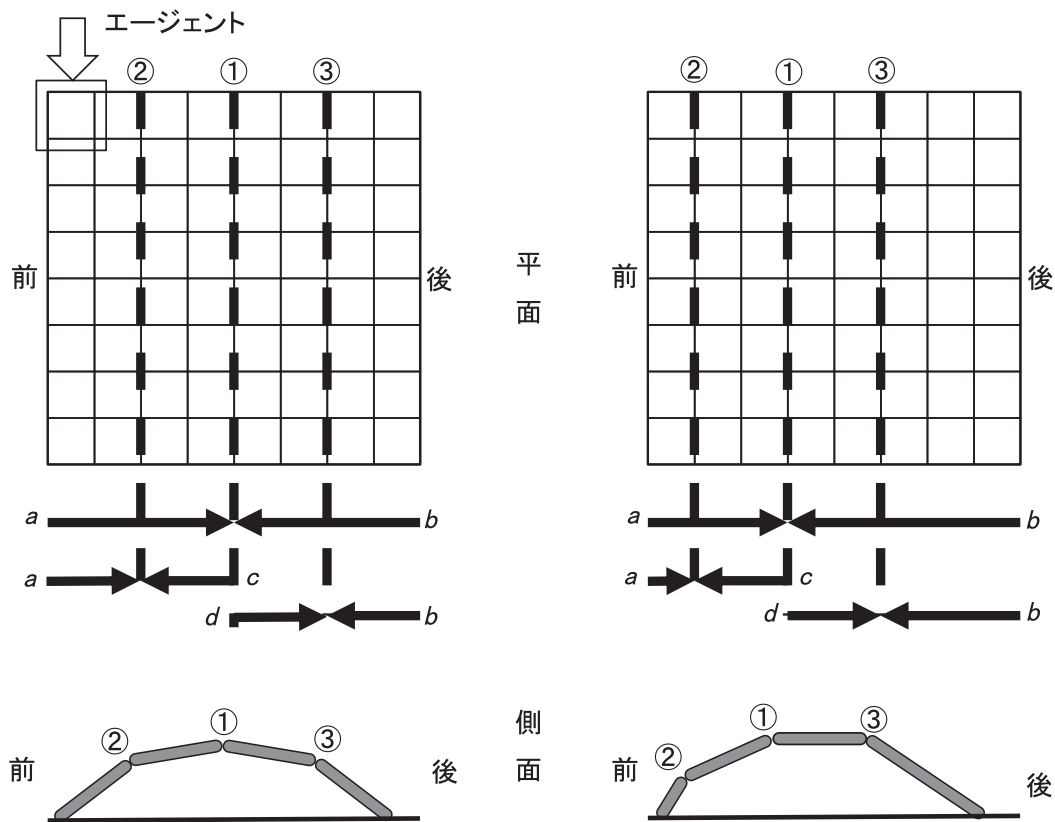
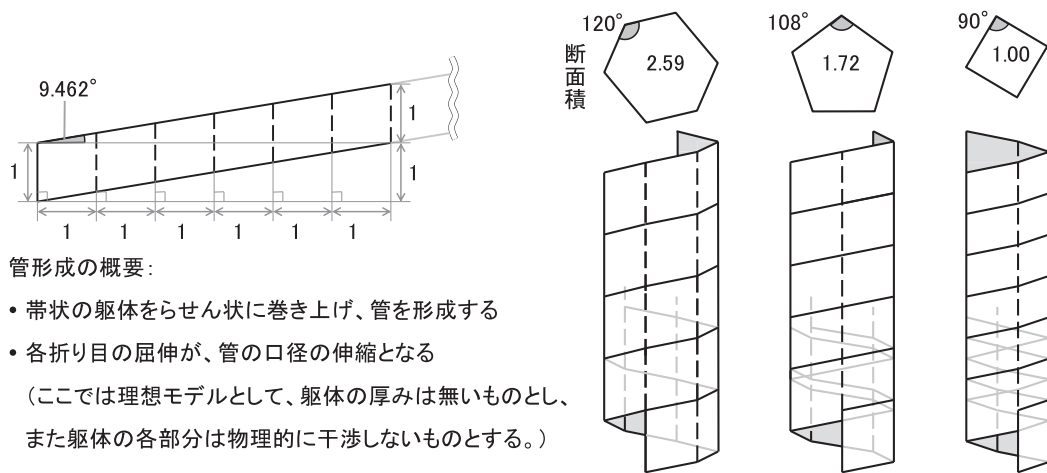


図 3. 折り紙ロボット（格子状連結、Ver. 前進）の折り目



管形成の概要:

- 帯状の躯体をらせん状に巻き上げ、管を形成する
- 各折り目の屈伸が、管の口径の伸縮となる
(ここでは理想モデルとして、躯体の厚みは無いものとし、また躯体の各部分は物理的に干渉しないものとする。)

図 4. 折り紙ロボットによる管の形成

