

形状変化に着目した定性空間表現の提案

A Proposal of Qualitative Spatial Representation Focused on Change of Shapes

東末 桃 高橋 和子
Momo Tosue Kazuko Takahashi

関西学院大学大学院 理工学研究科
School of Science & Technology, Kwansei Gakuin University

This report proposes a qualitative spatial representation focused on the change of shapes, and describes temporal spatial reasoning using this representation. It aims at an application to the developmental biology by symbolically representing a process of development such as cell division and organ formation. In the process, we can find some crucial shape-changes such as bending, getting a hole, division and so on. We propose a language to represent such a characteristics and show the conditions to find possible state transitions from a given state. It enables qualitative simulation and backward reasoning for an observation of an unusual situation.

1. 序論

生命科学の分野において、単一の細胞が生き物の形をつくっていくプロセスの中には、さまざまな形状の変化がある。例えば細胞が一回分裂しひとつ数を増やす際に見られる形状変化や、細胞の塊の中の個々の細胞がそれぞれの決められた役割へ分化し移動していく際に見られる形状変化、あるいは細胞の集合体が臓器や器官を作り出す際に見られる形状変化など、さまざまな形状変化が複雑に組み合わさることによって、生き物の形状形成は成立している [4, 5]。

このような発生過程をシミュレートして解析したり可視化したりする研究は多く行われており、そこではデータ解析や画像処理の様々な技術が使われている。たとえば、色情報、周波数、位相、特徴点、輝度勾配、ヒストグラム、テクスチャ、エッジなどの情報を用いて、画像データから特定の部位を抽出するテクスチャ解析や、画像データから細胞数を自動でカウントするためのアルゴリズムなどである [7]。これらは、対象の量的な側面に着目し数値的な情報を取り扱う定量的なアプローチによる研究である。定量的なアプローチでは、扱うデータが正確なものである反面、そのデータ量はかなり大きなものとなる。しかし、目的によっては詳細で正確なデータを必要としないものも多い。

本研究の目的は、発生生物学において、たくさんの細胞が並ぶことによって作られる面（細胞シートとよばれる）が生き物のさまざまな臓器や器官を作っていくプロセスについて、細かい変化は見ずに形状という特性に着目し、その定性的な変化をとらえることである。

そのために本研究では定性空間推論 (Qualitative Spatial Reasoning, QSR) を使ったアプローチをとる。QSR は、画像や図形などの空間データについて、着目したい性質および特性を取り出し記号表現によって記述しようとするものである [1, 2, 3]。先に述べた定量的なアプローチとは対照的な見方で、どのような点に着目するかは、目的によって変わる。例えば二つの空間領域が存在し、その相対的な位置関係について着目する場合、必要なのは離れているか、重なっているかであり、領域間の具体的な距離については考慮しない。このようにユー

ザが必要な情報のみを扱うので、定量的なアプローチに比べてデータ量ははるかに少なくすむという利点がある。

形状に着目した QSR の一つとして、形をその輪郭線の特徴で表現する手法がある [3]。この研究では、曲線のセグメントの形状を曲率によって 7 種類に分類して基本要素とし、それを列として輪郭の形状を表現する。しかし、このような既存の QSR では発生生物学において特に重要な凹部の形成や自身と接しているといった特徴的な形状を表現することができない。そのため本研究ではこれらを表現するための独自の記述方法を提案し、それを使って発生の過程を記述する。

本発表の構成は以下の通りである。第 2 章では形状のモデル化と記述言語について述べる。第 3 章では形状の特徴によって分類されたクラス間の遷移について述べる。第 4 章では結論と今後の課題について述べる。

2. 形状の表現

2.1 特徴の表現

本研究では、細胞シートの断面図をみて、細胞シートの形状変化を線の形状変化に置き換えて扱う。形状の特徴として端点をもつ有限な線を対象とし、凹部の有無、接点の有無、空洞の数の三つに着目し、オブジェクトを分類する。

凹部の有無 対象とするオブジェクトの中に凹部があるかないかで区別する。このとき、凹部の位置や大きさについては考えない。凹部があれば D 、なければ $\neg D$ と表記する。

接しているか 対象とするオブジェクト自身が自分と接点をもつかどうかで区別する。接点をもっていれば T 、もっていなければ $\neg T$ と表記する。

空洞の数 対象とするオブジェクトが構成する、閉じた面の数によって区別する。オブジェクトが空洞を n 個含むことを、 $N(n)$ と表記する。

図 1 は管状の器官とその断面図をあらわすもので、(a) は $D \wedge \neg T \wedge N(1)$ 、(b) は $D \wedge T \wedge N(2)$ のように表記する。

連絡先: 東末 桃, 関西学院大学大学院 理工学研究科 高橋和子研究室, 兵庫県三田市学園 2 丁目 1 番地, 079-565-8391, emu48539@kwansei.ac.jp

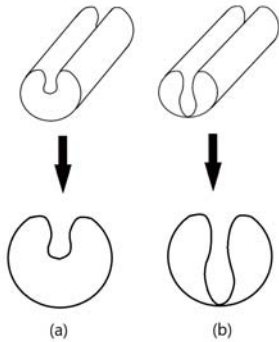
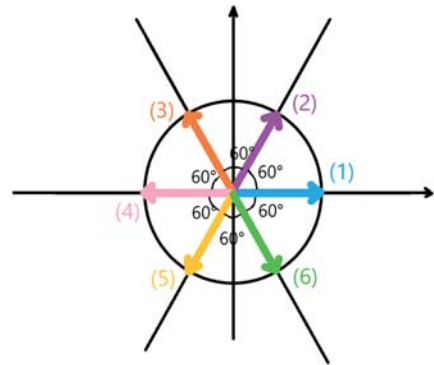


図 1: 特徴による分類

図 3: *dline* と方向の対応関係

2.2 モデル化

まずシートの断面図を線分で構成される図形にモデル化する (図 2(a)). そして、その図をセグメント単位に分解しそれらを並べる (図 2(b)).

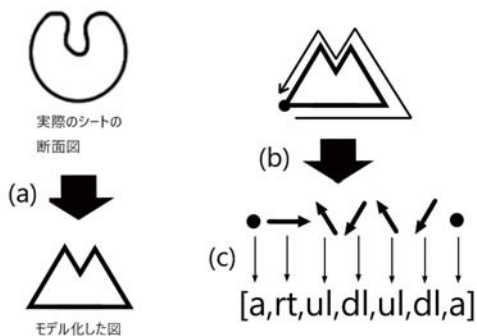


図 2: 細胞シートの形から記述言語への変換

シートの断面図をモデル化した後、各セグメントをそれぞれに対応する記号に置き換える (図 2(c)). そのようにしてできた記号列が、線の形状をあらわしていることになる。記号については以下で説明する。

2.3 記述言語

形状を表現するための記述言語を定義する。表現の基本要素である *dline* および *point*, それらの列で構成される *exp* は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} exp &::= seg|seg, exp \\ seg &::= dline|point \\ dline &::= rt|ur|ul|lt|dl|dr \\ point &::= a|b|\dots \quad (a, b, \dots \text{ は定数}) \end{aligned}$$

dline は方向をつけた線分をあらわすもので、6 種類存在する。長さは考慮しない。図 3 において、(1) から (6) はそれぞれ *rt*, *ur*, *ul*, *lt*, *dl*, *dr* に対応している。*point* は閉じた部分をつくるための点をあらわす。

2.4 特徴の判定

この記述言語を使って形状の特徴がどのように抽出されるかについて説明する。

e を *exp* とする。*e* が以下の条件のどれかを満たすとき、*e* は凹部をもつと判断する。

条件 1 *e* が以下のいずれかを部分列として含む。

[*rt*, *p*, *dl*, *rt*, *ul*, *p*, *rt*] ただし、*p* は任意の *point*

[*lt*, *p*, *dr*, *lt*, *ur*, *p*, *lt*] ただし、*p* は任意の *point*

条件 2 *e* から *point* を除いた列が以下のいずれかを部分列として含む。

[*rt* または *ur*, *dr*, *ur*, *rt* または *dr*]

[*lt* または *ul*, *dl*, *ul*, *lt* または *dl*]

e を *exp* とする。*e* が以下の条件のどれかを満たすとき、*e* は接点をもつと判断する。

p を *point*, *e* を *exp* とする。このとき、*p*, *e*, *p* の形であらわされる列を *s_point(p)* とよぶ。*s_point(p)* は直観的には *p* で閉じている線分に対応する。

条件 1 *p* を *point* とする。*s_point(p)* を部分列としてもち、かつ、その *s_point(p)* の直前または直後に *dline* がある。

条件 2 *p* を *point* とする。*s_point(p)* を部分列としてもち、かつ、*s_point(p)* が *s_point(q)* を部分列として含むような *p* と異なる *q* が存在する。

条件 3 同一の *point* を三つ以上含む。

e を *exp* とする。*e* にあらわれる *point* の集合を P_e とする。 $occur(e, p)$ を *e* 中にあらわれる *p* の数とすると、*e* に対応する図形に含まれる空洞の数は $n = \sum_{p \in P_e} |occur(e, p) - 1|$ である。

3. 状態遷移

正常な形状変化のプロセスを考えると、形状と形状の間の遷移は以下の四つになる。

遷移 1 $\neg D \wedge \neg T \wedge N(n) \rightarrow D \wedge \neg T \wedge N(n)$

遷移 2 $D \wedge \neg T \wedge N(n) \rightarrow D \wedge T \wedge N(n+1)$

遷移 3.1 $D \wedge T \wedge N(2n) \rightarrow (\neg D \wedge \neg T \wedge N(n)) \wedge (\neg D \wedge \neg T \wedge N(n))$

遷移 3.2 $D \wedge T \wedge N(2n+1) \rightarrow (\neg D \wedge \neg T \wedge N(n)) \wedge (\neg D \wedge \neg T \wedge N(n+1))$

ただし n は任意の自然数である

例えば遷移 1 は凹部が形成されるという変化をあらわしている。この遷移 1 は、凹部がなく自分との接点がなく空洞の数が n であるようなオブジェクトは、凹部があり自分との接点がなく空洞の数が n であるようなオブジェクトにのみ直接遷移可能であることをあらわしている。

2次元平面上で実現可能であり、実際にみられる変化を考えて得られる形状は八つのクラスに分類される。遷移条件に従った、八つのクラスに関する可能な状態遷移を図 4 に示す。

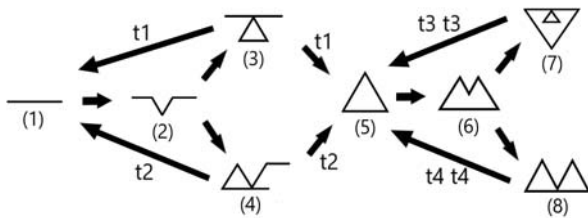


図 4: 可能な状態遷移

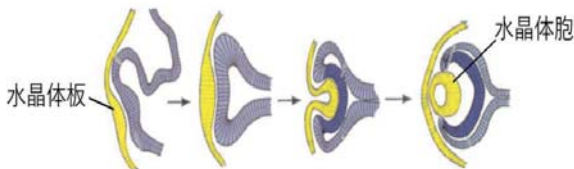


図 5: 眼の形成 [6]

図 4 において、矢印は状態間で直接遷移可能であることを示し、矢印に付加された記号 $t1$ から $t4$ は、それぞれ同時に起こる遷移であることをあらわしている。例えば (3) であらわされる形状のオブジェクトは、(1) と (5) であらわされる形状の二つのオブジェクトに分裂したことを意味する。

この状態遷移図を使って、生命科学で実際にみられる形状の変化をシミュレートすることができる。例として、人間の眼の形成について取り上げる。水晶体板とよばれる器官から、水晶体胞とよばれる器官が形成される様子 (図 5 の黄色部分) は、図 4 の状態遷移図上では $(1) \rightarrow (2) \rightarrow (3) \rightarrow (1)+(5)$ という経路をたどっている。

この状態遷移図を使ってある状態からどのようなプロセスで変化をしてどこに至るか、あるいは、ある状態に至るにはどこからどのようなプロセスで変化したかについて推論することができる。

4. 結論

発生過程における正常な形状変化のプロセスをモデル化する QSR の言語を提案した。この言語で、今まで表現できなかった凹部の有無、オブジェクト自身との接点の有無、空洞の数の三点に着目した記述が可能になった。また、それを用いて細胞シートが正常に変形していく様子を定性的にシミュレートできていることを示した。

本研究では細胞シートの断面を線としてみており、扱える対象が限られるため、今後は中身のつまった球体に凹部や空洞が形成される様子なども扱えるようにしていく。

また、任意の与えられた記述言語に対応する 2 次元平面上の図形が存在するとは限らない。今後は 2 次元平面上の図形が存在するための条件について考える必要がある。そのほか、記述言語に関する数学的な性質についても考察する予定である。

参考文献

- [1] Chen, J. Galton, A. Cohn, A. G. et al. A survey of qualitative spatial representations. *The Knowledge Engineering Review*, 30:106-136, 2013.
- [2] Cohn, A. G. Bennett, B. Gooday, J. Gotts, N. M. Qualitative spatial representation and reasoning with the region connection calculus. *GeoInformatica*, 1:275-316, 1997.
- [3] Galton, A. Meathrel, R. C. Qualitative outline theory. *Proceedings of the Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1061-1066, 1999.
- [4] 上野直人, 野地澄晴. 発生生物学がわかる. 羊土社, 2004.
- [5] Wolpert, L. Tickle, C. ウォルバート 発生生物学. メディカル・サイエンス・インターナショナル, 2016.
- [6] RAIN ON BEGINNING-眼の発生-. <http://rainonbeginning.blog.fc2.com/blog-entry-63.html>
- [7] バイオメディカルシリーズ. 医用画像処理: 細胞数の自動カウント. <https://www.mathworks.com/videos/medical-image-processing-cell-counting-120734.html>, accessed March 3, 2018.