

Process-Grammar に基づく形状変化の記述方式の提案

A Proposal of A Representation for A Shape Change Based on Process-Grammar

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, Kwansai Gakuin University

We propose a qualitative spatial representation focused on shape change. Our goal is an application of logical reasoning of the representation to an organogenesis process. In the process of organ creation and cell division, such phenomena as generation of a concave part from a simple sphere, creation of a tangent point and division of a unit are frequently observed. We propose a symbolic expression that is an extension of Leyton's Process-Grammar, to represent features such as concavity, tangent point and division. Symbolic expression and formalization of transformation rules enable us to give a reason for an observed shape change and to predict possible transformations.

1. 序論

生命科学の分野において、臓器や器官の形成に際しその過程の中にはさまざまな形状変化が見られる。個々の細胞を点とすると、点の集合によって作られた面のことを細胞シートとよぶ。臓器や器官の形成は表面が細胞シートで覆われている球体から始まる。シートが折り畳みや分割などの単純な形状変化を繰り返すことによって、徐々に臓器や器官へと変化していく。本研究の目的は、生命科学の発生過程の中で見られるような形状変化について、それらを投影した二次元平面上の図形として捉えたときの表現方法を考案し、ある変化が起こる理由を説明したり、どんな変化が起こりうるかの予測をたてたりすることである。本研究で扱う形状変化の重要な特徴は、形状がへこむこと、接点ができること、および分裂することである。そのためまずこれらの特徴に着目した形状の記号表現を提案する。

生命科学の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、通常そこでは定量的なデータが使用される。また形状の記述についても、例えば微分方程式を用いることが可能である。しかし、定量的なデータを扱うことで書き換え規則は複雑になり、計算量が多くなってしまふ。

形状を定性的に表現するための研究も多くされている。例えば、オブジェクトについてその閉包との差分を計算し階層的に表現する手法 [Cohn, 1995] や、曲率を定性的に七つに分類しそれぞれに記号を対応づけ、その記号列によってオブジェクトの輪郭を表現する手法 [Galton and Meathrel, 1999] などである。

Tosue は直線を用いて形状を近似し、辺とその隣の辺によって作られる一連の回転角によって形状を表現した [Tosue et al., 2018]。しかし、対象とする図形は曲線であるため、直線を用いると形状の変化を直観的に理解することが困難である。そこで本研究では、形状を定性的に表現するために、曲率と極値を用いる方法を使用する。

Leyton は形状がどのように変形したのか、その過程を示すために Process-Grammar を提案した [Leyton, 1988]。曲率極値を四種類の記号に分類し、それぞれにかかる力によって形状が変化する様子を遷移規則として形式化した。対象は一つの閉曲

線のみである。そこで本研究では接点と複数の閉曲線も表現できるように Leyton の方法を拡張する。

本発表の構成は以下の通りである。第 2 章では Leyton が提案した Process-Grammar について述べる。第 3 章では記述言語について述べる。第 4 章では変換規則について述べる。第 5 章では記述言語と変換規則を用いた器官形成の表現について述べる。第 6 章では結論と今後の課題について述べる。

2. Process-Grammar

Process-Grammar は、二次元上の滑らかな曲線で表現される形状が、円に対してどのような力がどのような順で加わることにより形成されたのかを六種類の遷移規則で表現するというものである。形状は、輪郭を反時計回りにたどったときの曲率を用いて表現される。曲率は四種類に区分され、記号: M^+ , m^- , m^+ , M^- を用いて表現される。曲率の最大値および最小値をそれぞれ M , m で表し、正と負の曲率をそれぞれ $+$, $-$ で表す。直観的には、 M^+ はオブジェクトの凸の部分 (特に急なカーブ) のことで、外側に向かって力がかかっている。 m^- はオブジェクトの凹の部分 (特に急なカーブ) のことで、内側に向かって力がかかっている。 m^+ はオブジェクトの凸の部分 (特にゆるいカーブ) のことで、内側に向かって力がかかっている。 M^- はオブジェクトの凹の部分 (特にゆるいカーブ) のことで、外側に向かって力がかかっている (図 1 参照)。

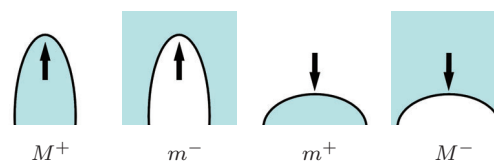


図 1: 四種類の極値

形状を表す曲率極値と力の向きを表した矢印が配置されたものを process-diagram とよぶ (図 2 参照)。

六つの遷移規則を以下に示す。

$$Cm^+ : m^+ \rightarrow m^-$$

$$CM^- : M^- \rightarrow M^+$$

$$BM^+ : M^+ \rightarrow M^+m^+M^+$$

$$Bm^- : m^- \rightarrow m^-M^-m^-$$

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@kwansai.ac.jp

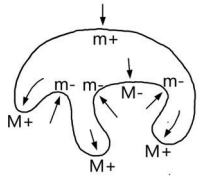


図 2: process-diagram の例

$$Bm^+ : m^+ \rightarrow m^+M^+m^+$$

$$BM^- : M^- \rightarrow M^-m^-M^-$$

Leyton はこれらの遷移規則を用いることで、どんな形状についてもその形成の過程を表現できることを証明した。

3. 記述言語

3.1 記述言語

滑らかな曲線を反時計回りにたどり、その順で process-diagram に配置された曲率極値を並べる。そのようにしてできた記号列を、形状を表現する記述式とする。開始点はどこでもよい。例えば図 2 の形状は $M^+m^-M^+m^-M^-m^-M^+m^+$ で表される。

3.2 制約条件

記号列が満たすべき条件は二つある。一つは大文字と小文字が交互に並んでいることである。形状について、外向きにかかる力と内向きにかかる力は常に隣り合っているためである。もう一つは四つ以上の記号で構成されていることである。三つの記号で構成される記号列は一つ目の制約条件を満たさない。また、二つまたは一つの記号で構成される記号列は平面状の閉じた図形として描くことができない。

3.3 内と外の識別

二つの閉曲線を扱うとき、それらの相対的位置関係として一方がもう一方の外側にあるか内側にあるかを、記号列上では以下のように識別して記述する。

$$\mathcal{L} = \{M^+, m^-, m^+, M^-\}, \mathcal{E} = \{e_1e_2\dots e_n | e_i \in \mathcal{L}\} \text{ とする。}$$

$$s, t \in \mathcal{E} \text{ とする。}$$

$$s, t \rightarrow s \text{ の外側に } t$$

$$s[t] \rightarrow s \text{ の内側に } t$$

4. 変換規則

4.1 接点の形成

接点の形成に関する変換規則を以下に示す。

$$TH : sm^-tm^- \rightarrow sm^-tm^-$$

$$TU : sm^+tm^- \rightarrow sm^+tm^-$$

$$TO : sM^+tM^+ \rightarrow sM^+tM^+$$

$$TP : sM^-tM^+ \rightarrow sM^-tM^+$$

$e_1, e_2 \in \mathcal{L}$ とする。 se_1te_2 は e_1 と e_2 が接していることを表す (図 3 参照)。

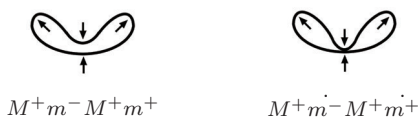


図 3: 接点の有無

4.2 膜の変化

ここでの膜の変化とは、細胞シートの融合・分裂のことを指す。図 4 において、オブジェクトが分裂する様子を示している。

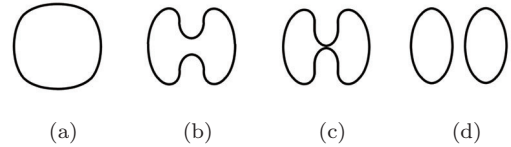


図 4: オブジェクトが分裂する様子

変化の流れとしては、まずオブジェクトについて双方向から中心に向かってへこみができる (図 4 の (a) から (b))。へこみが接する (図 4 の (b) から (c))。接した部分が分断される (図 4 の (c) から (d))。この (c) から (d) への変化の間には二つの変化が起こっている。一つ目は細胞シートの融合・分裂という変化である。二つ目は接している二つのオブジェクトが離れるという変化である。そこで (c) と (d) の間にもう一つ区別される形状を入れることにした (図 5 参照)。

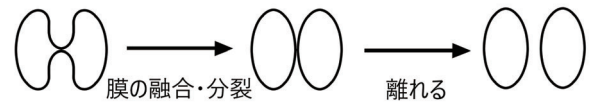


図 5: 分裂するとき起こる二つの変化

このような膜の変化は大きく四つのタイプに分けることができる (図 6 参照)。例えば *typeH* はオブジェクトの内側に向かってかかる二つの力が衝突することにより起こる変化を表している。それぞれのタイプについて上の図は変化が起きている部分の拡大図であり、膜がどのように変化するかを示している。彩色された部分はオブジェクトの内側を表す。下の図はそのような変化が起こるときに細胞シート全体がどのように変形するかの一例を示している。

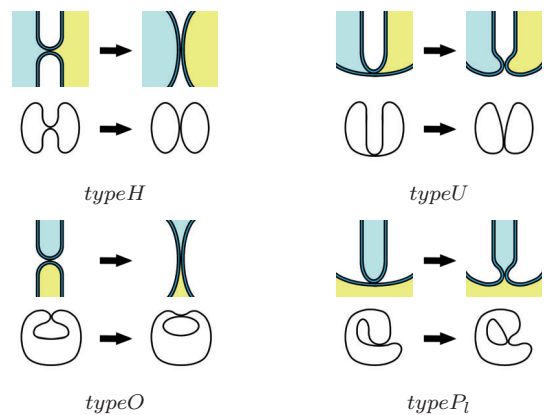


図 6: 膜の変化のパターンとそれぞれの例

四つのタイプの膜の変化に関する変換規則を以下に示す。

$$RH : sm^-tm^- \rightarrow sm^+, tm^+ \text{ (typeH)}$$

$$RU : sm^+tm^- \rightarrow sm^+M^+m^+, tm^+M^+m^+ \text{ (typeU)}$$

$$RO : sM^+tM^+ \rightarrow sM^-[tM^-] \text{ (typeO)}$$

$$RP_l : sM^-tM^+ \rightarrow sM^-m^-M^-[tM^-m^-M^-] \text{ (typePi)}$$

$$RP_r : sM^+tM^- \rightarrow sM^-m^-M^-[tM^-m^-M^-]$$

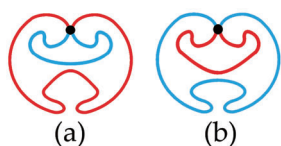
(typeP_r)

4.2.1 長さに関する条件

ここでの長さとは、記号列に使われている記号の個数のことである。記述言語の制約条件より、 s と t はそれぞれ長さが3以上でなければならない。

4.2.2 内と外の区別に関する条件

[typeO], [typeP] については、変化後に二つの閉曲線の一方がもう一方の内側に存在している。しかし、変化前の記号列のどの部分が、変化後に内側に存在する閉曲線を表す記号列になるのかは分からない。例えば図7の記号列に対して RO の変換規則を適用すると、赤部分が外側で青部分が内側の場合と、その逆の場合が考えられ、一意に定めることができない。そこで、変換規則に関して変化前の記号列の最初の記号は図の外側のどこかを指しているという条件をつける。これにより例えば図7の記号列は図7の(a)のみを指すことになる。



$m^+M+m-M-m-M-m-M+m^+M^+m+M+m-M-m-M+m^+M^+$

図7: 記号列から二つのパターンが考えられる例

4.3 分裂

分裂に関する変換規則を以下に示す。

$s \in \mathcal{E}, e \in \mathcal{L}$ とする。記号列 s について、列中に一つ e が存在するとき \dot{s} と表記する。

$DE : s_1, s_2 \rightarrow s_1, s_2$

$DI : s_1[s_2] \rightarrow s_1[s_2]$

これらは、一点で接していた二つのオブジェクト s_1 と s_2 が離れる様子を表している。

5. 器官形成の表現

器官形成の表現の例を以下に示す(図8参照)。

$S_0 : M^+m^+M^+m^+M^+m^+M^+m^+$

$\downarrow (Cm^+)$

$S_1 : M^+m^-M^+m^+M^+m^-M^+m^+$

$\downarrow (TH)$

$S_2 : M^+m^-M^+m^+M^+m^-M^+m^+$

$\downarrow (RH)$

$S_3 : M^+m^+M^+m^+, M^+m^+M^+m^+$

$\downarrow (DI)$

$S_4 : M^+m^+M^+m^+, M^+m^+M^+m^+$

例えば管状の器官が形成される場合、図8の S_0 は分裂する前の一つの細胞シートを表している。細胞シートは徐々に二つのくびれができ、 S_1 の状態に変化する。これは変換規則 Cm^+ で表現できる。二つのへこみはやがて接触し S_2 の状態に変化する。これは変換規則 TH で表現できる。接触した部分で膜の融合と分裂が起こり、一つであった細胞シートは二つの細胞シートへと変化する (S_2 から S_3 への変化)。これは変換規則 RH で表現できる。最後に二つの細胞シートは離れていく。これは変換規則 DI で表現できる。

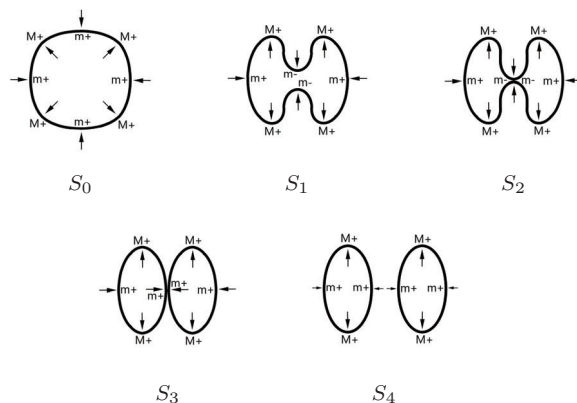


図8: 器官形成の表現の例

6. 結論

Leyton の表現方法を拡張し、接点や分割を表現できるようにした。また、分割の前後において記述式が制約条件を満たすように膜の融合・分裂という変換を形式化した。これによって、定性的な形状変化を表すことが可能になった。

本研究では膜の変化について四つのパターンを示した。その中で H, U, O の三つのタイプの変化は実際の生命の発生過程で観測される。しかし、 P のタイプの変化が実際に起こるのかは不明である。今後は、提案した表現を分析し、現れない遷移があればその理由や、特定の形状だけが現れる理由についての推論を行う。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18K11453 の助成を受けたものである。

参考文献

- [Cohn, 1995] Cohn, A. G. (1995), A hierarchical representation of qualitative shape based on connection and convexity, *Spatial Information Theory. Cognitive and Computational Foundations of Geographic Information Science, International Conference COSIT'99*, pages 311–326.
- [Galton and Meathrel, 1999] Galton, A. and Meathrel, R. (1999), Qualitative outline theory, *Proceedings of the Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 1061–1066.
- [Leyton, 1988] Leyton, M. (1988), A process-grammar for shape, *Artificial Intelligence*, 34:213–247.
- [Tosue et al., 2018] Tosue, M., Moriguchi, S., and Takahashi, K. (2018), Qualitative shape representation and reasoning based on concavity and tangent point, In *Proceedings of the 31st International Workshop on Qualitative Reasoning*.