

L-system による樹木成長規則の同定とそれに基づいた木状建築の創生

正会員 ○杉本 涼太郎*
同 張 景耀**樹木形状 3D モデリング L-system
点群データ 木状建築

1. 研究背景

樹木の形状は様々な要因からくる条件の下でそれらに適応するように最適な樹形へと成長する[1]. この樹形の力学的合理性と意匠性に注目し、建築に応用する研究はこれまでも存在する. その例として樹木構造の部材配置に関する研究[2,3]や、樹木構造の形態創生[4]についての研究などが挙げられる. これらの研究は樹形に注目した研究ではあるものの、建築的観点から形態創生を行っているため、樹木の持つ生物的要素を建築に反映できていないのが現状である. そこで、本研究では樹木特性を生かして建築に応用することを目的として、樹木はどのように成長するのかを同定する. そして、同定した成長規則をもとに木状建築の創生を行う. ここでの木状建築とは図1に示すような樹形自体が構造となり、部材の先に雨や日光よけとなるようなパネルを配置した屋外に設置される建築である. 本研究では、まず LiDAR を用いて樹木をモデリングし、次にモデルから得た情報を基に樹木の成長過程(成長規則)を L-system に基づいて同定する. そして最後に、同定した成長規則をもとに木状建築の創生を行った.

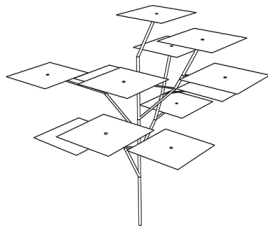


図1 木状建築

2. 樹木の形状計測とモデリング

本研究では樹冠が丸く広い空間を作ることができる広葉樹に注目し Velodyne VLP16 (LiDAR) を用いて落葉広葉樹(図2)の形状計測をした. モデル化する段階で葉の部分削除することは困難であることから、計測する対象は落葉樹とし、葉を落とす冬の時期に計測を行った. 計測対象の規模は幅約5m、樹高4.5m程度である. LiDAR による計測データは点群データ(図3)で出力されるので各枝の点群データをもとに最小2乗近似を用いて各枝の中心線を抽出し、骨組モデル(図4)を作成した. 骨組モデルは枝長さ・枝の分岐角度・骨組モデル接続関係・節点座標を情報として持つモデルである.



図2 落葉広葉樹

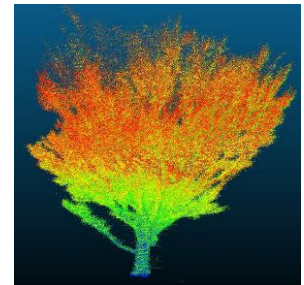


図3 点群データ

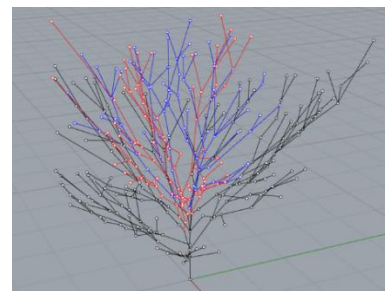


図4 骨組モデル

3. L-system による樹木成長規則の同定手法

本研究では L-system を用いて樹木の成長を表現する. 実測で作成した骨組モデルと L-system によって生成した形状の接続関係に注目し、それらの類似度を評価することで樹木の位相で記述する成長規則を同定する.

L-system は形式文法の一つであり、樹木の成長を文字列で表現するアルゴリズムである[5]. その基本構造は(1)式に示す形式文法 G で定義される.

$$G = \{V, S, \omega, P\} \quad (1)$$

ここで、 V は変数、 S は定数、 ω は初期状態、 P は置換規則である. L-system における開始記号 ω が樹木の初期形状に対応し、置換規則 P が樹木の成長規則と対応している. 初期状態では枝の成長方向は図5のZであり、図5に示す回転方向を表す記号によって成長方向を更新していき、樹木の成長表現を行う. L-system の成長規則に従って初期形状から何回か成長させたモデル(以下、L-system モデル)が得られる. L-system モデルと実測で得られた骨組モデルとの一致度が最大となるを成長規則と初期形状、すなわち開始記号 ω と置換規則 P を同定する. ω と P を同定できれば今後の成長予測を行うことも可能となる. 図6に成長規則同定の模式図を示す.

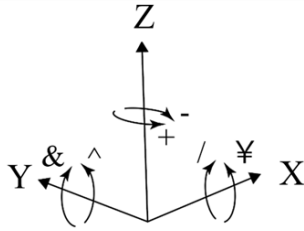


図5 L-systemの全体座標系と記号の向き

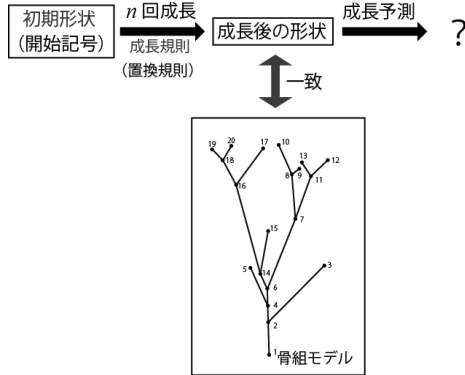


図6 成長規則の同定手順

位相の評価にあたっては節点の座標情報は必要なく節点同士の接続関係のみ分かればよい。L-systemモデルの位相と骨組モデルの位相を定量的に評価するためにそれぞれグラフ構造を用いて表す。グラフの構造分布行列によってグラフの類似度 R を計算し、類似度 $R[6,7]$ を最大にするような初期位相を表す文字列 ω と成長規則 P を同定する。

グラフに存在する N 個のノードを v_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$)とし、グラフに含まれる部分構造を $P = \{P_1, P_2, \dots, P_M\}$ とする。 P_j に含まれる v_i の個数を y_{ij} とし、 y_{ij} を要素とする $N \times M$ の行列をグラフの構造分布行列と呼ぶ。2つの構造分布行列を M_{k1} , M_{k2} とし、それぞれに含まれる i 行 j 列目の成分を y_{1ij} , y_{2ij} とする。また、部分構造 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_M\}$ に含まれる節点数を N_{pj} とする。この時、 i 行 j 列目の成分の一致度 C_{ij} は(2)式に示すように M_{k1} , M_{k2} の i 行 j 列目の成分の一致している数に、その部分構造に含まれる節点数を重み付けした値で表す。

$$C_{ij} = \min(y_{1ij}, y_{2ij}) \times N_{pj} \quad (2)$$

また、 i 行 j 列目不一致度 E_{ij} は(3)式に示すように M_{k1} , M_{k2} の i 行 j 列目成分の不一致度を表す。

$$E_{ij} = |y_{1ij} - y_{2ij}| \quad (3)$$

これを用いてグラフの類似度 R は(4)式のように、一致度の総和を不一致度の総和と不一致度の総和の和で除した値として計算される。2つのグラフが完全に一致する時、類似度 $R=1$ となる。

$$R = \sum_i C_{ij} / \left(\sum_{ij} C_{ij} + \sum_{ij} E_{ij} \right) \quad (4)$$

初期位相は分岐方式の異なる2種類の節点 a , b の接続によって図7のように表す。節点 a は分岐せずに成長する節点、節点 b は2分岐して成長する節点である。それぞれ

の節点数と接続関係によって位相の種類が多くなる。そこで本研究では遺伝的アルゴリズム(GA)によって成長規則と初期位相を同定する。L-systemを用いるにあたって初期位相を文字配列によって表現する。1文字目は節点を表す文字が入るので、“a”、“b”のいずれかとなり、文字列の最後は分岐終了を表す文字が入る。そのため、L-systemによる文字配列の1文字目と最後の文字を除く n 文字で構成される文字配列の各文字を変数とし、各変数に代入される文字をGAによって決定し、類似度が最大となる初期位相を表す文字配列を決定する。入力される文字の種類は“[a”、“[b”、“]”の3種類で、これに文字を入力しないという選択肢を加えた4つの中から各文字にいずれかを入力する。ここで変数 x_i には数値を入力するため、4つの選択肢を1~4の数字に置き換えることが必要である。類似度の計算については指定回数成長させたモデルの各成長段階での類似度を計算させて、その中で類似度が最大のものを採用する。

N 個の節点からなる初期位相の1文字目と最後の文字を除く n 文字で構成される文字配列の各文字を変数 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$)とする。節点数によって文字数 n は決まり節点数 N を用いて(5)式で表す。初期節点数の最小数を N_α , 最大数を N_β として、 $N_\alpha \leq N \leq N_\beta$ ($N_\alpha \geq 3$)における類似度最大化問題は、節点数 N における変数の総和の最大値を S_N^H , 最小値を S_N^L として、(6)式のように定式化できる。

$$n = 2N - 5 \quad (5)$$

$$\text{変数: } x_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 2N_\beta - 5)$$

$$\text{Maximize: } R(x) \quad (6)$$

$$\text{制約条件: } S_{N_\beta}^L \leq \sum_{i=1}^{2N_\beta-5} x_i \leq S_{N_\alpha}^H$$

表1に示した条件で類似度最大化問題を解き、樹木の成長規則と初期位相を同定した。“a” “b” “f” “g”はそれぞれ節点を表す。成長回数が5回で類似度は最大で0.7702となり、成長規則は“a→f[b]”, “b→g[a][b]”となった。この成長規則の模式図が図8であり、この時の初期位相は図9である。成長回数5回の段階で最大となっており、成長予測を行うという観点からも、信頼性の高い成長規則となった。

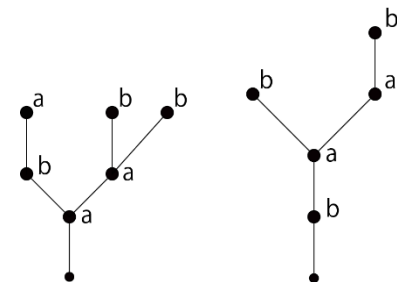


図7 初期位相の例

表 1 設定条件

成長回数	5
初期節点数 n	$14 \leq n \leq 25$
成長規則①	$a \rightarrow f[a], a \rightarrow f[b]$
成長規則②	$b \rightarrow g[a][a], b \rightarrow g[a][b], b \rightarrow g[b][b]$
成長規則③	$f \rightarrow f$
成長規則④	$g \rightarrow g$
個体数	100
世代数	10
エリート選択数	5%

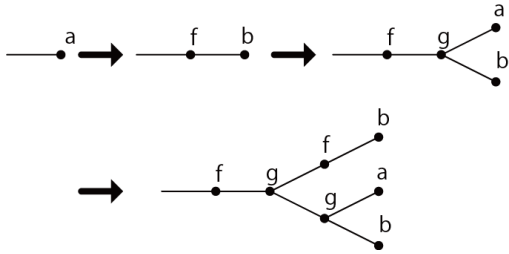


図 8 同定した成長規則

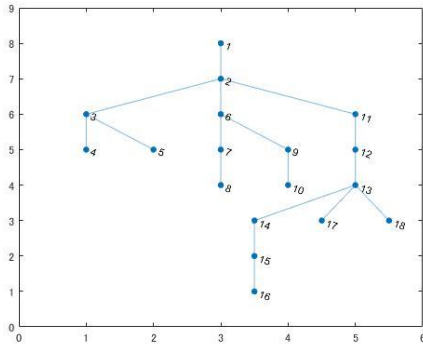


図 9 同定した初期位相

4. 木状建築の創生

ここでは、同定した樹木の成長規則を用いて木状建築の創生を行う。まず、長さ・角度といったパラメータは任意の値を指定して初期形状と成長規則を決め、成長後の形状を決定する。形状を決定する際に、できるだけ少ない部材で広い空間をつくることが要求されるため、部材数を減らすことが必要である。樹木が成長する際に葉同士が重ならないように枝を伸ばす原理を基に、枝ごとに成長回数を制限することにより、部材数を減らす。その後、部材の先端にパネルが設置されることを想定し断面算定を行う。

形状の決定に必要なパラメータの種類を表2に示す。 L_1, r_l, Q, L_{pmax} が枝の成長の制限に関わるパラメータであり、ひとつの節点を中心として1辺の長さ L_1 の正方形のパネルを仮定する。 XY 平面に投影したときに2節点間で重なるパネルの領域 A が基準値 Q を超えた時に、 Z 座標の小さい節点からの成長を止める。成長を止めることで、その節点からはそれ以上部材が増えないため、部材総数を減らすことにつながる。

表 2 設定パラメータの種類

n	成長回数
$l_a(mm)$	節点 a とつながる枝 (枝 a) の長さの初期値
$l_b(mm)$	節点 b とつながる枝 (枝 b) の長さの初期値
r_l	枝の長さの倍率
$a(^{\circ})$	基準回転角
$L_1(mm)$	1 節点あたりのパネル 1 辺の長さの初期値
r_l	パネルの 1 辺の長さの倍率
Q	成長の制限の基準値
L_{pmax}	パネルの 1 辺の長さの上限値

$$Q = \frac{A}{L_i^2} \quad (7)$$

設定値 Q は正方形パネルの面積に対する領域 A の割合として(7)式で定義する。この原理を適用することによって、日光をより多く取り入れるような形状へと成長する樹木特性を反映する。

成長後の樹形が水平方向に広い空間を作るため、水平方向の広がり方を考慮して枝の分岐角度を設定し図 10 のように初期形状を設定した。これを以下に示す成長規則①、②と表3に示すパラメータの値にしたがって7回成長させ、先端に3m×3mのソーラーパネルを設置することを想定して断面算定を行った。ここではX軸まわりの a 度の回転を $R_x(a)$ 、Y軸まわりの a 度の回転を $R_y(a)$ 、Z軸まわりの a 度の回転を $R_z(a)$ で表す。

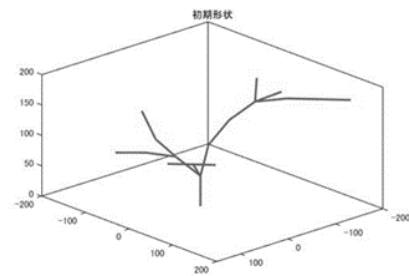


図 10 初期形状

表 3 パラメータの設定値

n	7
$l_a(mm)$	50
$l_b(mm)$	50
r_l	$\sqrt[3]{15}$
$a(^{\circ})$	10
$\theta(^{\circ})$	10
$L_1(mm)$	100
r_l	2
Q	0.8
$L_{pmax}(mm)$	3000

成長規則①	$a \Rightarrow f[R_y(2a)R_z(2a)a]$
成長規則②	$b \Rightarrow g[R_x(-2a)R_z(a)a][R_y(-2a)R_z(a)b]$

断面算定には枝の先端点に荷重 P を与え、厚さ t の中空鋼管を用いた場合の各部材の断面を計算した。ある節点 $n_i(x_i, y_i, z_i)$ と接続する N_b 個の先端の節点 $n_j(x_j, y_j, z_j)$ ($j = 1, 2, \dots, N_b$)がある時、 n_i についての X 軸まわりのモーメント M_x と Y 軸まわりのモーメント M_y を(8)式、(9)式で計算し、(10)式によりモーメントを合成し、設定した許容応力度 f_b と M から(11)式より断面係数 Z_b を計算し、(12)式から断面径 D を求める。算出した断面径を反映したモデル化結果が図 11 に示される。

$$M_x = \sum_{j=1}^N P(y_j - y_i) \quad (8)$$

$$M_y = \sum_{j=1}^N P(x_j - x_i) \quad (9)$$

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad (10)$$

$$Z_b = \frac{M}{f_b} \quad (11)$$

$$Z_b = \frac{\pi}{32D} \{D^4 - (D-t)^4\} \quad (12)$$

また、さらに広い空間をつくる場合に単体の樹木を大きく成長させるのではなく、一定の間隔を空けて複数の木状建築を建てることで余分な高さを抑えて広い空間をつくるため、複数の木状建築の創生を行った。複数の木状建築の創生にあたって、単体の場合と同様に、2 節点間でパネルの重なる領域 A の計算を異なる木状建築間でも計算し、成長を制限する。

ここでは単体の樹木と同様の成長規則、パラメータを用いて複数の木状建築を創生した場合の適用例を示す。原点 $(0,0)$ を中心として、 $(0, D_0)$, $(0, -D_0)$, $(D_0, 0)$, $(-D_0, 0)$ の位置に木状建築を創生した。 $D_0=5\text{m}$ の時のモデル化結果を図 12 に示す。

木状建築が単体・複数のどちらの場合についても、成長の制限を行うことで部材数の削減は行われたが、パネルの重なりが多い部分とパネルに覆われていない部分が存在する結果となった。パネルの重なりが多い部分に関してはパネルを1枚に統合し、数本の部材で1枚のパネルを支えることで余分なパネルを減らすといった改善が考えられる。また、水平方向への広がりを考え部材の成長方向が徐々に下へ傾くように X 軸、 Y 軸まわりの回転を指定した成長規則を設定したことで部材が放射状に広がる結果とならなかった。広い空間を覆うことができる成長規則への改善が今後の課題として挙げられる。

5. 結論

本研究で得られた成果を以下に示す。

1. 樹木の点群データからの骨組モデルの作成方法を提案し、骨組モデルの作成を行い、枝長さや枝の分岐角度の情報を得た。
2. 樹木骨組モデルのデータから得た情報をもとに、L-systemで表現される成長規則を同定する手法を提案し、位相についての成長規則を同定した。
3. 同定した位相に関する成長規則を用いて、長さや角度については任意の値を設定し、単体の場合と、複数の場合について木状建築を創生した。

謝辞

本研究は、独立行政法人日本学術振興会科学研究費助成事業（研究課題 19H05369）の支援を受けて実施した研究成果の一部である。

参考文献

- 1) Karl J Niklas: Morphological evolution through complex domains of fitness, Proc. Natl. Acad. Sci. USA Vol. 91, pp. 6772-6779, July 1994
- 2) 森永 信行, 宮里 直也, 斎藤 公男, 岡田 章: 樹木構造の「構造形態」に関する基礎的研究 (その1) 示力図を用いた部材配置決定法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 2006年9月
- 3) 坂井 初, 宮里 直也, 斎藤 公男, 森永 信行, 岡田 章: 樹木構造の「構造形態」に関する基礎的研究 (その2) 座屈形状と水平荷重抵抗性能の把握, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 2006年9月
- 4) 今澤和貴, 佐々木 睦朗: L-System による形状表現に関する研究 - 樹木ラマー構造の構造形態創生 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 2013年8月
- 5) Przemyslaw Prusinkiewicz, Aristed Lindenmayer: The Algorithmic Beauty of Plants, Springer, 1996
- 6) 和田 貴久, 大野 博之, 稲積 宏誠: 部分構造に基づく構造類似性を用いた特徴抽出システムとその応用, 日本データベース学会論文誌 Vol.7, No.1
- 7) 和田 貴久, 大野 博之, 稲積 宏誠: 構造類似性を基にしたグラフクラスタリング手法の検討, FIT2006 (第5回情報科学技術フォーラム)

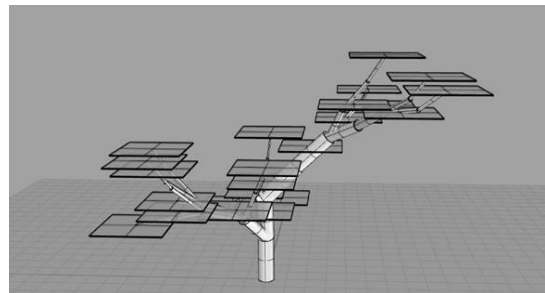


図 11 木状建築の 3D モデル

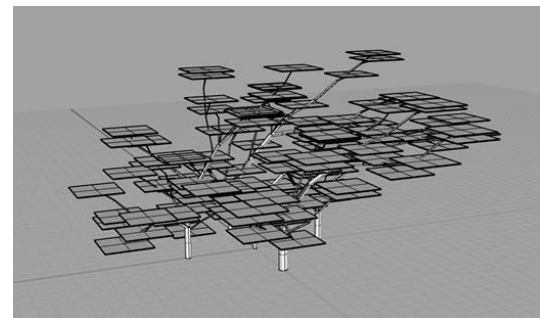


図 12 複数の木状建築の 3D モデル

*竹中工務店 修士 (工学)

**京都大学大学院工学研究科 准教授 博士 (工学)

* Takenaka Corporation, M. Eng

** Associate Prof, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr. Eng