

2011年度 卒業論文

「絞め殺しの木」の
絞めつける根の自動生成に関する研究

指導教員：渡辺 大地 講師
三上 浩司 講師

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト
学籍番号 M0108406
本間 義弘

2011年度 卒業論文概要

論文題目

「絞め殺しの木」の
絞めつける根の自動生成に関する研究

メディア学部

学籍番号：M0108406

氏名

本間 義弘

**指導
教員**

渡辺 大地 講師
三上 浩司 講師

キーワード

3DCG、プロシージャル、自動生成、絞め殺しの木、根

3次元コンピュータグラフィックスの分野では、様々な自然物の表現研究が盛んである。その中でも、コンピュータを制作支援に役立てるプロシージャル技術に関する研究は数多い。プロシージャル技術の研究で特に行われているのが、樹木を始めとする植物の3Dモデルの自動生成である。この技術の研究で対象となるのは、幹や枝葉といった部分が大半を占めており、根に着目した研究は少ない。植物には非常に多くの種類が存在するが、その中にはユニークな根をもつものがある。その一例として、一般に「絞め殺しの木」と呼ぶ樹木がある。この木の根は地上の他の樹木や岩に絡みつき、宿主を絞め殺すように成長するという特徴をもつ。そのユニークな特徴ゆえに、ビデオゲームやアニメーションなどのコンテンツにしばしば登場する。

本研究では、絞め殺しの木の絞めつける根の自動生成を提案する。絞め殺しの木の根は、不規則かつ滑らかに伸びている。そこで、生成する根が伸びる道筋は、ベジェ曲線と乱数値を使って決定した。また、根と物体との間に干渉判定を用いることで、絞め殺しの木の特徴である、宿主に絡みつき絞め殺すような根の張り方を再現することができた。さらに、根の太さや色といったパラメータを変更可能にすることで様々な外観の根の生成を実現した。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景と目的	1
1.2	本論文の構成	3
第2章	絞め殺しの木について	4
2.1	絞め殺しの木とは	4
2.2	絞め殺しの木の根	5
第3章	絞め殺しの木の根の形状生成	8
3.1	本研究で生成する根の仕様	8
3.2	主軸根の経路制御	10
3.3	分岐根の経路制御	14
3.3.1	第1分岐根	14
3.3.2	干渉判定による第1分岐根の成長点の位置変更	16
3.3.3	第1分岐根の派生による主軸根の経路修正	18
3.3.4	第2分岐根	20
3.4	形状生成	22
3.4.1	面の生成	22
3.4.2	第1分岐根の一部平滑化	23
第4章	検証と考察	26
4.1	実装結果	26
4.2	課題	30
第5章	まとめと展望	31
	謝辞	32
	参考文献	33
	引用画像	36

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景と目的

3次元コンピュータグラフィックス (3DCG) の分野では、植物を始め様々な自然物の表現研究が盛んであり、その成果は映像コンテンツやビデオゲーム、景観シミュレーションなど多様な表現の場にも貢献している。3DCG における研究分野のひとつに、プロシージャル技術の研究がある。これは、3DCG の制作をコンピュータの力を使って効率よく行うことを目的とした研究分野である。プロシージャル技術は、コンピュータに実装したアルゴリズムによって、人間が手作業で制作するよりも短時間で必要素材を自動的に作り出すことを可能にする。また、パラメータを変更することで、様々な形状の素材を生み出すこともできる。

プロシージャル技術の研究では、特に樹木を始めとする植物の 3D モデルの自動生成を取り扱ったものが盛んであり、様々な手法の提案や研究成果の報告がある。植物の生成研究で使われている代表的な手法として、記号変換法則を生成アルゴリズムとした L-System と、自己相似を生成アルゴリズムとしたフラクタル理論がある。この 2つの手法をベースとした研究 [1][2][3][4] は多く行われている。また、Lopez ら [5] による生成アルゴリズムに植物ホルモンを組み入れた研究や、Deussen ら [6] による植物の個体差や日光などの成長環境を組み入れた研究など、植物の生態としての部分に注力した研究も存在している。2次元画像から樹木の 3D モデル

を生成する研究 [7][8] もある。さらに実用化し、実際のコンテンツ制作の場で使用可能な商用ミドルウェア [9] もある。

このように、植物を扱ったプロシージャル技術の研究は数多くある。しかし、その多くは草花や樹木の幹、枝葉を研究対象としており、根に着目して行っている研究は少ない。植物の多くは地中に根を張るが、中には地上に特殊な根を張る植物がある。その1つが本研究で扱う「絞め殺しの木」と一般に呼ぶ樹木である。絞め殺しの木は、他の樹木や岩などに特殊な根を絞め殺すように絡みつかせ、成長する樹木である。次の図 1.1 は実際の絞め殺しの木が、根で宿主となった樹木を絞め殺している様子である。



図 1.1: 絞め殺しの木が宿主を絞め殺す様子

(左):©L. Shyamal, (右):©Aacool

この特殊な樹木は、様々なビデオゲームやアニメーションなどのコンテンツで目にすることができ、景観を彩る素材として一定需要のある樹木である。しかし、この樹木の根は非常に複雑な形状をしているため、その 3D モデルを人間による手作業で制作するのは容易ではない。また、根に関する既存研究として、KIM[10]による土壌の状態を考慮した地中の根の生成研究や、田中 [11] による地中に根を張る樹木の地上部に出ている根の生成研究といった、主要な根を地中に張るタイ

プの植物を対象としたものがある。主要な根が地上部に出た特殊な樹木の研究としては、佐藤 [12] によるヤエヤマヒルギの生成研究がある。物体に絡みつくといい特徴に着目すると、笠倉 [13] による支柱などに巻きつくツル植物の生成研究や、進藤ら [14] による吸盤の働きを考慮したツタの生成手法がある。しかし、上記を含め、既存の研究では、絞め殺しの木特有の根の形状を再現することは難しい。

そこで本研究では、絞め殺しの木の根に特化した自動生成手法を提案する。まず、本研究の目的は、絞め殺しの木の絞めつける根の形状の自動生成を目的とし、幹や枝といった根以外の部位は対象外とした。また、特定の樹木種への限定や生態的特徴は考慮せず、見た目としての形状再現を目指した。生成手順は点列を配置した後、各点列を線分で結び根の経路を決定する。そして、その点列の位置情報を基に 3D モデルの生成を行う。根の生成経路の決定には干渉判定を組み合わせた。これにより、根が宿主の上を這ったり、宿主を絞めつけるように絡みつくといい表現を可能にした。また、根の太さや色、分岐の有無といった一部分を制御可能にし、ある程度ユーザーが自動生成する根を微調整できるようにした。その結果、実際の絞め殺しの木の根のように、宿主を絞めつけるような根の生成とその複雑な形状の再現に成功した。

1.2 本論文の構成

本論文は、第 2 章で絞め殺しの木について紹介する。また第 3 章にて、絞め殺しの木の根の自動生成について説明する。第 4 章では、提案手法を実装した結果の検証と考察を述べる。最後に、第 5 章にて本研究のまとめと展望を示す。

第 2 章

絞め殺しの木について

この章では本研究で扱う、絞め殺しの木について説明する。2.1 節では絞め殺しの木がどのような特徴をもった樹木かを説明する。2.2 節では絞め殺しの木のもつ特殊な根に関して説明する。

2.1 絞め殺しの木とは

「絞め殺しの木」とはガジュマルやアコウといったイチジク属の俗称である。そのように呼ぶのは、根の一部が他の樹木や岩を宿主として絞め殺すようにして成長するからである。絞め殺しの木は東南アジアなどの熱帯雨林に多く分布している。熱帯雨林は多くの植物でひしめき合っているため、太陽光の争奪戦が植物間で常に行われている。この生存競争を勝ち抜くために、絞め殺しの木は、より高い所へ枝葉を伸ばすために宿主を利用し、宿主の樹冠を越えて太陽光を得る。そして宿主への日光を遮るだけでなく、時には宿主を絞め殺す場合もある。この木の種子は多くの場合、鳥によって運ばれ、糞と一緒に宿主となる樹木や岩の上に落ちた後、発芽する [15]。次の図 2.1 は、岩を宿主としたものの実際の写真である。



図 2.1: 岩を宿主とした絞め殺しの木の根

©Roadkill99

2.2 絞め殺しの木の根

絞め殺しの木は発芽すると2種類の根を出す。1つは宿主の枝や幹の周りを絞めつけるようにして伸びる根である。もう1つは空中に垂れ下がり、まっすぐと地面を目指して伸びる根である。地面を目指す根が地面に到達するまでの間、宿主を絞めつける根は、宿主の樹皮やそこについた泥などから溶け出した養分を吸収し、絞め殺しの木をゆっくりと成長させていく。そして、空中から伸びていた根が地面に到達すると、地中から多くの養分を吸収できるようになり、いっきに成長速度が速まる。すると、根全体が太く硬くなり、幹となりつつ、宿主を絞める力が強くなる。さらに新しい根を出して宿主を網目状に覆ってゆく [16]。その結果として「絞め殺し」をしているような形となる。この根は気根といい、自身を支える役割をもつ [17][18]。次の図 2.2 は、絞め殺しの木の根の成長過程を示したものである。

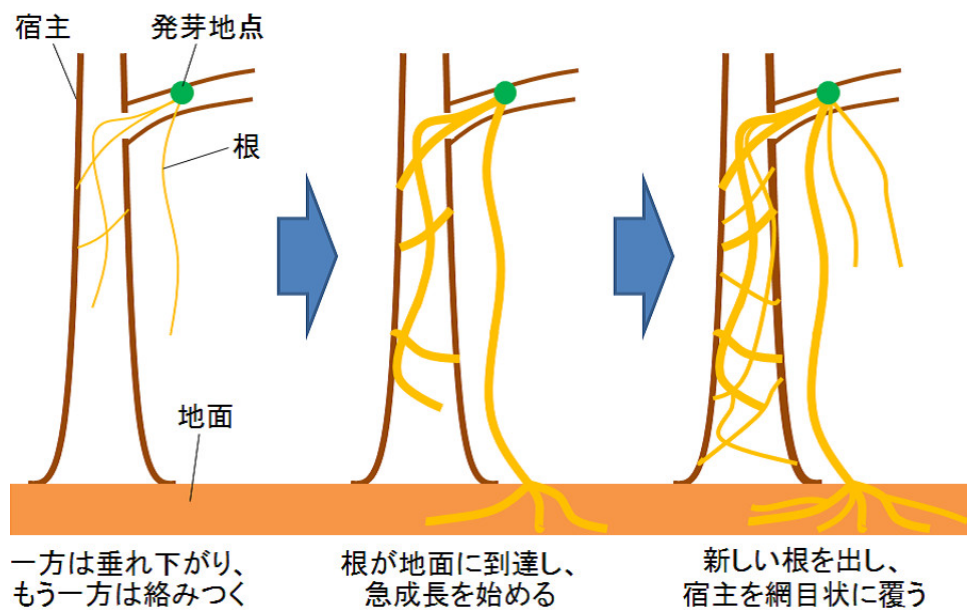


図 2.2: 絞め殺しの木の根の成長過程

宿主を絞め殺した結果、その宿主の樹幹が腐り枯死した場合でも、網目状に伸びた根は自身を支えるだけの強度がある。そのため中には宿主が消滅した結果、網目の中にぽっかりと空間ができている木もある。次の図 2.3 は、網目の中が空洞になった根の写真である。

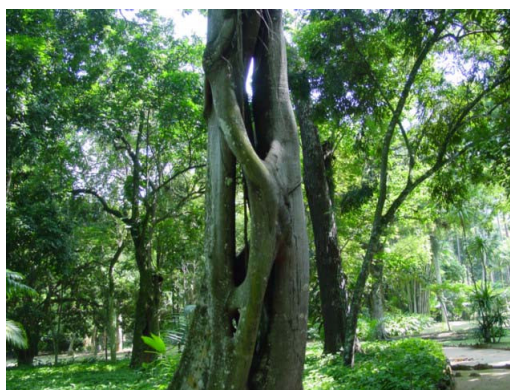


図 2.3: 宿主が枯れ果てた後の様子

©LeonardoG

本研究では、これらの宿主を絞めつける根を研究対象とし、特定の植物種への限定をせず、また成長環境、成長法則による根への影響は考慮しないものとした。

第 3 章

絞め殺しの木の根の形状生成

この章では絞め殺しの木の根の 3D モデルを自動生成するための提案手法に関して説明していく。3.1 節では本研究で生成する根の定義や仕様を説明する。3.2 節と 3.3 節で根の這う経路の決定方法に関して説明する。3.4 節で根の 3D モデルを生成する手法を説明する。なお、 I を乱数を表す関数とする。例として一様乱数では、 $I(1 \leq x \leq 3)$ のように記述し、有限個の数値から 1 つを選択する場合は $I(1, 2, 3)$ のように記述する。

3.1 本研究で生成する根の仕様

絞め殺しの木の根の 3D モデルを自動生成するにあたり、本研究独自の根に関する定義を説明する。

絞め殺しの木の根は網目状に伸び、成長に伴い新たな根を次々と伸ばすため、根の本数を明確に決めることはできない。そこで本研究では、初期状態の根の本数を根と根の結合のしやすさを考慮して 6 本とした。また、根には「主軸根」、「第 1 分岐根」、「第 2 分岐根」の 3 種類を設定した。主軸根は初期状態から伸び続ける根とする。第 1 分岐根は異なる主軸根同士を結ぶ根とする。第 2 分岐根は異なる第 1 分岐根同士を結ぶ根とする。図 3.1 は 3 種類の根の接続関係を示したものである。

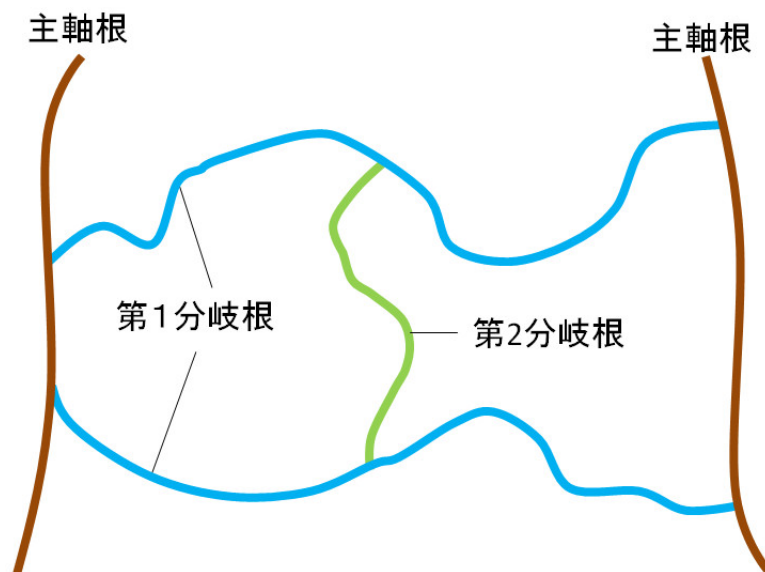


図 3.1: 3種類の根の接続関係

また、第1分岐根、第2分岐根の双方を指す場合は分岐根と呼ぶ。以上の3種類の根を組み合わせて、網目状に成長する根を再現した。そして各根は点列を線分で結んだ経路に生成する。点列を構成する点を成長点と呼ぶ。

本研究では、様々な外観の根を作り出せるように「根の太さ」「根の色」「根の筒形状の分割数」の設定パラメータを変更可能とした。根の成長方向に対して垂直に切り口を入れた断面の半径を r とする。根の筒形状の分割数は偶数 n とする。根の分割に関しては3.4節で詳しく述べる。

本手法では次の手順で根の生成を行う。

1. 成長点の位置を決定し、対応する成長点を線分で結び経路を決定する。
2. 成長点の位置情報と設定パラメータ情報を基に3Dモデルを生成する。2番目の手順の終了後は再び1番目の手順に戻り、3Dモデルを生成し終わるまで処理を繰り返す。

成長点と根が這う経路の決定に関しては、3.2節と3.3節で解説する。3Dモデルの生成処理に関しては、3.4節で解説する。

3.2 主軸根の経路制御

まず、主軸根の初期状態について説明する。初期状態では1点の成長点 G を中心に成長点を6つ配置している。 G を除く各成長点に要素番号 $(1, 1)$ 、 $(2, 1)$ 、 \dots 、 $(6, 1)$ を順に割り当てる。この6つの成長点は G から伸びる経路の通過点であり、主軸根を6方向に伸ばしている。図 3.2 は初期状態の主軸根における、成長点の要素番号と経路を示したものである。

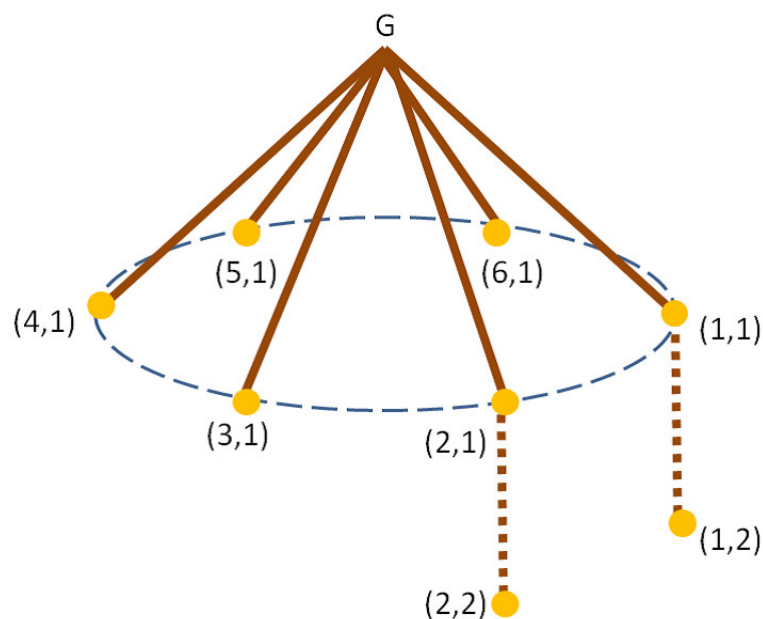


図 3.2: 初期状態における成長点と経路

次に、主軸根における成長点の決定方法について解説する。主軸根の経路は対応した成長点同士を線分で結ぶことで決定する。原則として、要素番号 a, b の成長点と接続関係をもつのは要素番号 $(a, b - 1)$ 、 $(a, b + 1)$ の成長点である。ただし、初期状態の成長点に関しては1点 G から主軸根が伸びているため $(1, 1)$ 、 $(2, 1)$ 、 \dots 、 $(6, 1)$ が $(a, b + 1)$ の接続関係をもつこと以外は成り立たないため例外とする。ここでは G を除く主軸根の成長点の1つを M とし、新たな成長点 M' の位置を決定する場合を例に説明する。まず、 M の位置に半径 r の球 S を設定する。 S を移動

させることで M' の位置を決定する。 S の中心座標を S^i とする。 M の位置に S がある場合 S^0 とし、 S が移動するたび、その中心座標を S^1, S^2, \dots, S^5 としてここでは表す。 S の移動処理を計 5 回行った後の S の中心座標 S^5 の位置を M' の位置とする。そして M と M' を線分で結んだものが主軸根の経路となる。5 回という回数は調整の結果、主軸根の成長距離と成長方向が不自然でなく、かつ各主軸根の経路に不規則さを与えることができた回数として設定した。

S の移動方法に関して説明する。まず、 $U = (0, 1, 0)$ は上方向を表すものと本研究では定義する。 $\Lambda = (G_x, S_y^i, G_z)$ とする。主軸根の成長距離と成長方向に影響する値として乱数関数 I を用いる。ただし、 I の値は S の移動のたびに变化する。移動後の S の位置 S^{i+1} は式 (3.1) により決定する。“ \times ” は外積記号とする。

$$S^{i+1} = S^i + \frac{V}{|V|} I(0 \leq x \leq 4) + \left(\frac{V}{|V|} \times U \right) I(-4 \leq x \leq 4) \quad (3.1)$$

根が地面を這うように伸びるとき、 V は次のように定義する。

$$V = S^i - \Lambda$$

根が上から下へ向かって伸びるとき、 V は次のように定義する。

$$V = S^i - \Lambda - U$$

次の図 3.3 は主軸根の経路決定を示したものである。

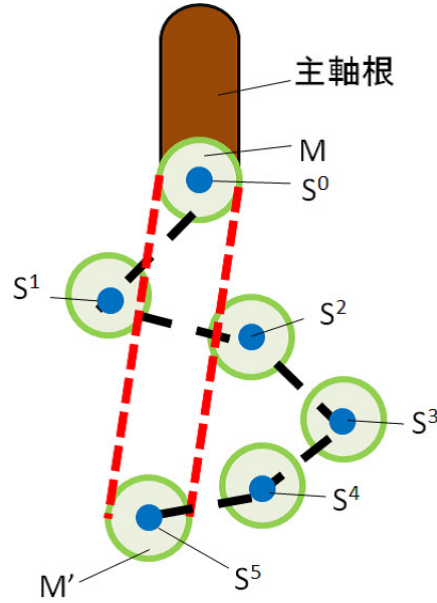


図 3.3: 主軸根の経路決定

また、球 S は座標値移動の際、宿主や地面との干渉判定を行う。本研究では宿主および地面はすべて直方体で設定した。ここでは、 S^i と直方体上のある平面上の四辺形領域 β との干渉判定を例に説明する。 β 上の点 \mathbf{E} は平面上の 3 点 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} と実数 u 、 v を使って式 (3.2) のように表すものとする。

$$\mathbf{E} = \mathbf{A} + u(\mathbf{B} - \mathbf{A}) + v(\mathbf{C} - \mathbf{A}) \quad (3.2)$$

u 、 v は $0 \leq u \leq 1$ 、 $0 \leq v \leq 1$ の範囲内の実数とする。次に、 β に対して垂直となる単位ベクトル \mathbf{N} を外積を使い、式 (3.3) より求める。

$$\mathbf{N} = \frac{(\mathbf{B} - \mathbf{A}) \times (\mathbf{C} - \mathbf{A})}{|(\mathbf{B} - \mathbf{A}) \times (\mathbf{C} - \mathbf{A})|} \quad (3.3)$$

そして、 \mathbf{E} と S^i の距離 d を式 (3.4) より求める。

$$d = |(\mathbf{E} - \mathbf{A}) \cdot \mathbf{N}| \quad (3.4)$$

ここで $d < r$ ならば球 S が β の属する平面上に干渉していることがわかるが、 β と干渉しているかはまだ分からない。 S^i が β 内の垂直平面上にあり、さらに $0 \leq u \leq 1$

かつ $0 \leq v \leq 1$ を満たしていることを確かめる必要がある。そこで式 (3.2) と式 (3.4) から式 (3.5) を組み、 β 上に S が干渉しているかを検証する。

$$\mathbf{A} + u(\mathbf{B} - \mathbf{A}) + v(\mathbf{C} - \mathbf{A}) = \mathbf{S}^i + d\mathbf{N} \quad (3.5)$$

\mathbf{A} を移項し次のようにする。

$$u(\mathbf{B} - \mathbf{A}) + v(\mathbf{C} - \mathbf{A}) = \mathbf{S}^i + d\mathbf{N} - \mathbf{A} \quad (3.6)$$

式 (3.6) を行列で表したものが式 (3.7) である。 p の値は、 $\mathbf{S}^i + d\mathbf{N}$ で示す線分が β が属する平面と交わっている場合、0 となる。

$$\begin{bmatrix} B_x - A_x & C_x - A_x & 0 & 0 \\ B_y - A_y & C_y - A_y & 0 & 0 \\ B_z - A_z & C_z - A_z & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ p \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{S}^i + d\mathbf{N} - \mathbf{A} \quad (3.7)$$

$\mathbf{S}^i + d\mathbf{N}$ で示す線分と β が属する平面は平行ではないものとし、正則行列 $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} B_x - A_x & C_x - A_x & 0 & 0 \\ B_y - A_y & C_y - A_y & 0 & 0 \\ B_z - A_z & C_z - A_z & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ として式 (3.7) を式 (3.8) へ置き換える。

$$\mathbf{F} \begin{bmatrix} u \\ v \\ p \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{S}^i + d\mathbf{N} - \mathbf{A} \quad (3.8)$$

次に式 (3.8) に対して、 \mathbf{F} の逆行列を掛け合わせて式 (3.9) のようにし、 u と v の値を導く。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ p \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{F}^{-1}(\mathbf{S}^i + d\mathbf{N} - \mathbf{A}) \quad (3.9)$$

結果、 $d < r$ かつ $0 \leq u \leq 1$ かつ $0 \leq v \leq 1$ ならば、 \mathbf{S}^i が β 内の垂直平面上にあることがわかり、 β 上に S が干渉していることとなる。同様に、この処理を他の領域に対しても繰り返し行い、干渉判定をしていく。干渉を確認した場合、 S の

移動回数が5回未満であってもその時点で移動処理を終了し、干渉を確認する前の S^{i-1} の座標値を M' として設定する。そして、 M と M' の2点を結んだ線分が主軸根の経路となる。図3.4は干渉判定を確認した場合の経路決定を示したものである。

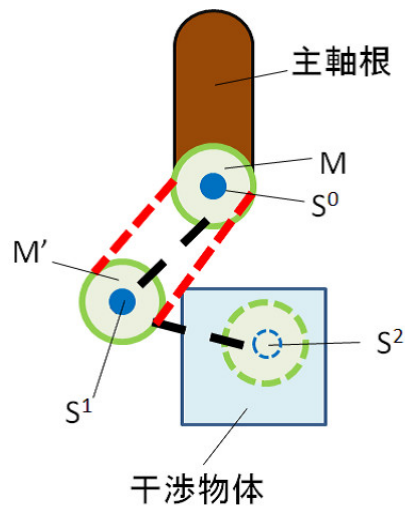


図 3.4: 干渉判定を確認した場合の経路決定

3.3 分岐根の経路制御

この節では、第1分岐根と第2分岐根の根が這う経路の決定方法に関して説明する。また第1分岐根における干渉判定や第1分岐根の派生による主軸根への影響についても説明する。

3.3.1 第1分岐根

絞め殺しの木の根がつくる網目形状は不規則ながらも滑らかな形状をしている。この複雑形状を再現するために第1分岐根の経路決定処理では、次の手法を用いた。

まず、第1分岐根の開始点と終了点について説明する。まず第1分岐根が派生するのは主軸根の要素番号 $(a, 4)$ 以降の成長点とした。これは3.4.2節で解説する、

第1分岐根の分岐部の平滑化を適用するためである。そして第1分岐根は隣り合う主軸根同士を結ぶ。例として、主軸根の要素番号 (a, b) の成長点から伸び始めた第1分岐根の終着点は要素番号 $(a+1, b)$ となる。ただし、 $a=6$ の場合は $a=1$ の成長点と繋がる。要素番号 (a, b) の主軸根の各成長点は $\mathbf{M}^{(a,b)}$ のように今後示すものとする。また、第1分岐根は、主軸根の成長点4つおきに生成するものとした。第1分岐根同士の間隔が狭いと網目形状がつぶれてしまい、見た目として不十分だったためである。

次に、主軸根の成長点 $\mathbf{M}^{(a,b)}$ と $\mathbf{M}^{(a+1,b)}$ の間に第1分岐根の経路を構成する成長点の決定方法を説明する。第1分岐根の各成長点を \mathbf{K}^i とし、 i には任意の値が入るものとする。 \mathbf{K}^i の決定にはベジエ曲線 [19] を利用する。本研究では4つの制御点をもつ3次ベジエ曲線とした。制御点をそれぞれ \mathbf{P}_0 、 \mathbf{P}_1 、 \mathbf{P}_2 、 \mathbf{P}_3 とする。3次ベジエ曲線式は式 (3.10) で示すものであり、本研究ではこの曲線式を $\mathbf{Q}(t)$ とする。 t は $0 \leq t \leq 1$ となる任意の値である。

$$\mathbf{Q}(t) = (1-t)^3\mathbf{P}_0 + 3t(1-t)^2\mathbf{P}_1 + 3t^2(1-t)\mathbf{P}_2 + t^3\mathbf{P}_3 \quad (3.10)$$

第1分岐根における各制御点の位置は乱数関数 I を利用した式 (3.11) より決定する。ただし、 I の値は制御点の設定ごとに変化するものとする。

$$\begin{aligned} \mathbf{g} &= \mathbf{P}_3 - \mathbf{P}_0, \\ \mathbf{P}_0 &= \mathbf{M}^{(a,b)}, \\ \mathbf{P}_1 &= \mathbf{P}_0 + \frac{1}{3}\mathbf{g} + (0, I(-15, 15), 0), \\ \mathbf{P}_2 &= \mathbf{P}_0 + \frac{2}{3}\mathbf{g} + (0, I(-15, 15), 0), \\ \mathbf{P}_3 &= \mathbf{M}^{(a+1,b)} \end{aligned} \quad (3.11)$$

以上から $\mathbf{M}^{(a,b)}$ と $\mathbf{M}^{(a+1,b)}$ の間に曲線をつくることができる。この曲線において t を0から0.05ずつ増加していった結果をサンプリングする。サンプリングした順に、その位置に成長点を \mathbf{K}^0 、 \mathbf{K}^1 、 \dots 、 \mathbf{K}^{20} と設定する。次に、絞め殺しの木の根のように不規則な根の経路を目指すため、 \mathbf{K}^i の位置を変える。乱数関数 I を用い

る。その値は K^i の値ごとに変化するものとする。移動後の K^i の位置は式 (3.12) により決定する。

$$\begin{aligned}
 K^i &= Q(t) + \left(0, I \left(-\frac{3}{2} \leq x \leq \frac{3}{2} \right), 0 \right), \\
 i &= 0, 1, \dots, 20, \\
 t &= \frac{i}{20}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

このとき並行して干渉判定も行い、物体との干渉があった場合は成長点の位置変更を行う。位置変更の詳細は 3.3.2 節で解説する。図 3.5 は第 1 分岐根の成長点の位置関係をまとめたものである。

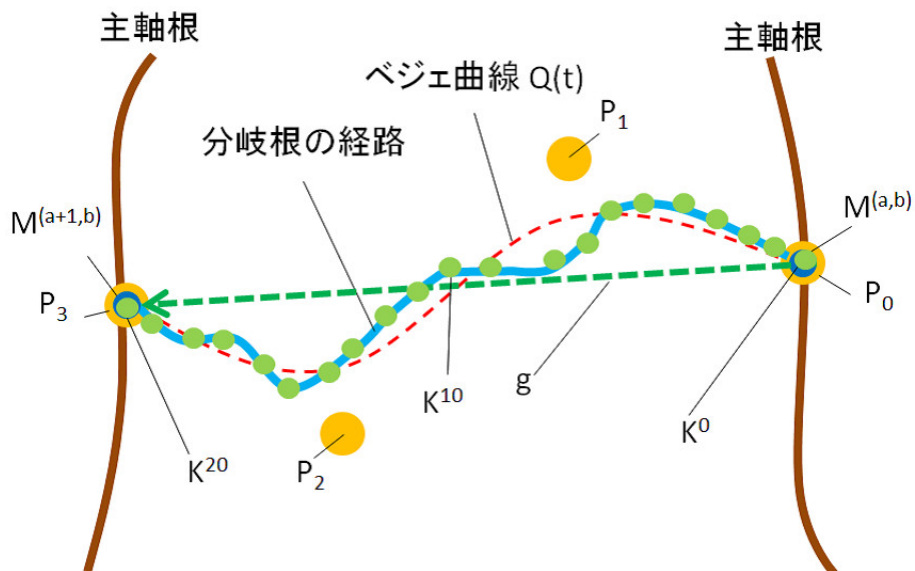


図 3.5: 第 1 分岐根の成長点の位置関係

3.3.2 干渉判定による第 1 分岐根の成長点の位置変更

絞め殺しの木の根は様々な形状の樹木や岩といった宿主に網目状に絡みつく。本研究では第 1 分岐根の成長点の決定の際に干渉判定を行い、宿主となる物体を迂回しつつも絞めつけるようにした。干渉判定の方法は主軸根の成長点の決定の際に行う方法と同じであるため、ここでは干渉判定後に行う成長点の位置変更つい

て説明する。なお、成長点の位置変更を適用したのは第1分岐根のみであり、成長距離が短い第2分岐根には適用しなかった。物体に干渉した場合の具体的な処理内容を解説する。3次ベジエ曲線の制御点を \mathbf{P}_0 、 \mathbf{P}_1 、 \mathbf{P}_2 、 \mathbf{P}_3 とする。第1分岐根は \mathbf{P}_0 から \mathbf{P}_3 へ向けて生成している。このとき3次ベジエ曲線を利用して第1分岐根の成長点 \mathbf{K}^i 、 \mathbf{K}^{i+1} を設定したとする。そして \mathbf{K}^{i+1} の位置が物体内部に設定され、このままだと第1分岐根の経路が物体内部をとってしまう場合を例とする。

干渉状態をなくすために、 \mathbf{K}^i の y 軸座標を中心に \mathbf{K}^{i+1} の回転移動を行う。ここでは座標値を 1° ずつ回転移動し、干渉状態がなくなるまで行う。回転移動後の \mathbf{K}^{i+1} の座標値 $\mathbf{K}^{(i+1)'}$ は式 (3.13) によって求める。 $\mathbf{T}(\mathbf{K}^i)$ を \mathbf{K}^i の平行移動行列とする。 $\mathbf{R}(\theta)$ を y 軸周りの回転行列とする。

$$\mathbf{K}^{(i+1)'} = \mathbf{T}(\mathbf{K}^i)\mathbf{R}(\theta)\mathbf{T}(-\mathbf{K}^i)\mathbf{K}^{i+1} \quad (3.13)$$

また、回転移動を左右どちら回りに行うかはランダムに決める。干渉状態がなくなったら、各制御点の位置も変更する。変更後の制御点はそれぞれ \mathbf{P}'_0 、 \mathbf{P}'_1 、 \mathbf{P}'_2 、 \mathbf{P}'_3 とする。 \mathbf{P}'_0 の座標値は $\mathbf{K}^{(i+1)'}$ と同じ場所になる。 \mathbf{P}'_3 は変化せず座標値はそのままとなる。 \mathbf{P}'_1 、 \mathbf{P}'_2 の座標値は式 (3.11) より決定する。図 3.6 は第1分岐根の成長点の位置変更を図として示したものである。

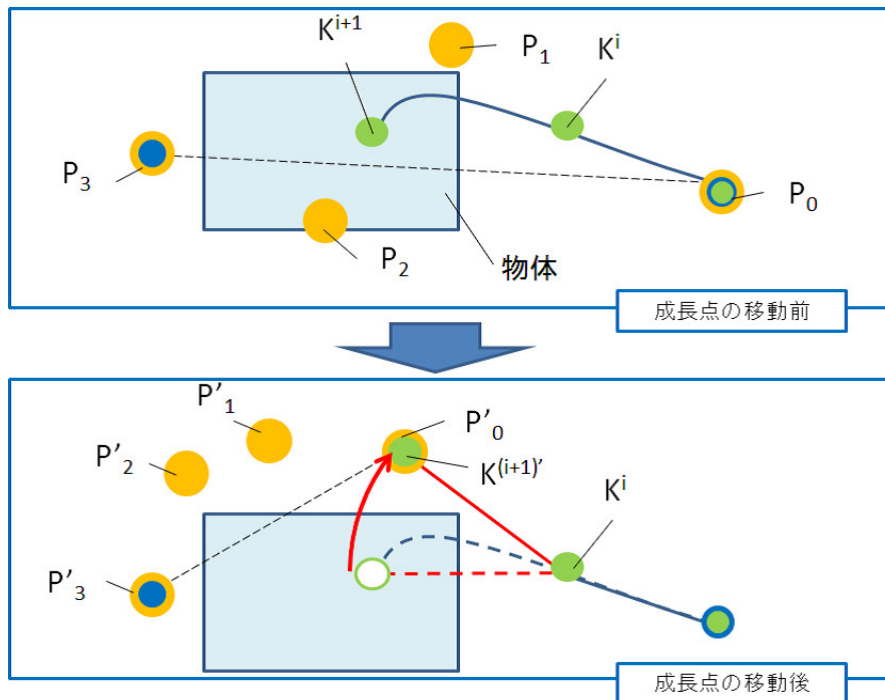


図 3.6: 干渉判定による第 1 分岐根の成長点の位置変更

3.3.3 第 1 分岐根の派生による主軸根の経路修正

第 1 分岐根の生成による主軸根の経路変化について解説する。実際の絞め殺しの木の根を見ると、分岐箇所は 2 つの根が互いに反るような曲線を描くようになっていることがわかる。この分岐を再現するため、第 1 分岐根の経路に合わせ、分岐開始側の主軸根の成長点を移動する。曲線に近い経路を作るために、ここでもまた 3 次ベジェ曲線を用いる。修正するのは、主軸根の分岐点となる成長点 $M^{(a,b)}$ から第 1 分岐根が派生した場合、 $M^{(a,b)}$ から $M^{(a,b+5)}$ の間の成長点である。曲線の 4 つの制御点をそれぞれ P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 とする。ここでは各制御点の位置は式

(3.14) より決定する。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{e} &= \mathbf{M}^{(a,b+1)} - \mathbf{K}^1, \\
 \mathbf{P}_0 &= \mathbf{M}^{(a,b)}, \\
 \mathbf{P}_1 &= \mathbf{K}^1 + 2\mathbf{e}, \\
 \mathbf{P}_2 &= \mathbf{M}^{(a,b+2)}, \\
 \mathbf{P}_3 &= \mathbf{M}^{(a,b+5)}
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

制御点の決定後、3次ベジェ曲線式に対し t の値を 0 から 0.2 ずつ増加していった結果をサンプリングする。そしてサンプリング結果を順に $\mathbf{M}^{(a,b)}$ から $\mathbf{M}^{(a,b+5)}$ の移動先とし、修正対象となった各成長点の位置を再決定する。新しく決定した $\mathbf{M}^{(a,b)}$ から $\mathbf{M}^{(a,b+5)}$ の成長点を要素番号順に線分で結んだものが、修正後の経路となる。図 3.7 は経路修正の際の位置関係をまとめたものである。

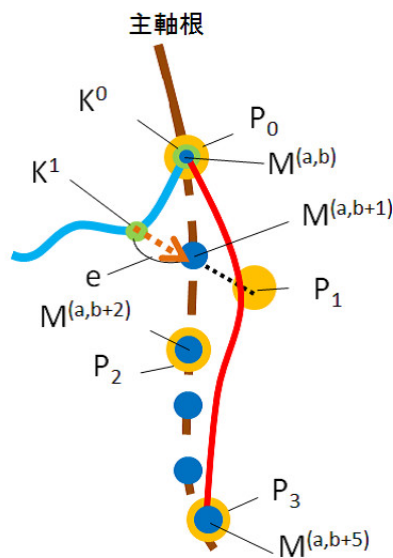


図 3.7: 主軸根の経路修正

3.3.4 第2分岐根

第1分岐根同士を結ぶ、第2分岐根もまた根の滑らかな経路をつくるために3次ベジェ曲線を用いた。しかし、第2分岐根は第1分岐根と比べ生成距離が短い。そのため、3次ベジェ曲線からサンプリングした結果から成長点を設定した後に乱数値を用いて各成長点を再び移動させると成長経路の滑らかさが失われ不自然な外観となってしまう。そこで、第2分岐根の各成長点の位置決定は3次ベジェ曲線からサンプリングした結果から成長点を設定したところで完了した。

まず、第2分岐根が接続する第1分岐根について説明する。主軸根の成長点 $M^{(a,b+5)}$ から派生する第1分岐根の各成長点を $K^{0'}$ 、 $K^{1'}$ 、 \dots 、 $K^{20'}$ とする。第2分岐根が結ぶのは $M^{(a,b)}$ から派生した第1分岐根と $M^{(a,b+5)}$ から派生した第1分岐根である。つまり、同じ主軸根から派生し、なおかつ分岐点が隣り合う第1分岐根同士を第2分岐根によって繋ぐ。

次に、曲線の制御点の設定方法について解説していく。4つの制御点をそれぞれ P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 とする。また、 $U = (0, 1, 0)$ は上方向を表すものであり、 G は初期状態の主軸根が集まる1点である。第2分岐根における各制御点の位置は乱数関数 I を用いた式 (3.15) より決定する。 I の値は制御点の設定ごとに変わるものとする。

$$\begin{aligned} \mathbf{f} &= \mathbf{P}_3 - \mathbf{P}_0, \\ \mathbf{D} &= \mathbf{P}_0 + \frac{1}{3}\mathbf{f}, \\ \mathbf{D}' &= \mathbf{P}_0 + \frac{2}{3}\mathbf{f}, \\ \mathbf{W} &= (D_x - G_x, 0, D_z - G_z), \\ \mathbf{W}' &= (D'_x - G_x, 0, D'_z - G_z), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{P}_0 &= \mathbf{K}^{10}, \\
\mathbf{P}_1 &= \mathbf{D} + \left(\frac{\mathbf{W}}{|\mathbf{W}|} \times \mathbf{U} \right) I(-20, 20), \\
\mathbf{P}_2 &= \mathbf{D}' + \left(\frac{\mathbf{W}'}{|\mathbf{W}'|} \times \mathbf{U} \right) I(-20, 20), \\
\mathbf{P}_3 &= \mathbf{K}^{10'}
\end{aligned} \tag{3.15}$$

そして3次ベジェ曲線式に対し t の値を0から0.2ずつ増加していった結果をサンプリングする。サンプリングした値を順に第2分岐根の成長点の位置として設定する。対応する各成長点を線分で結んだものが第2分岐根の成長経路となる。図3.8は第2分岐根の経路決定に関わる要素の位置関係をまとめたものである。

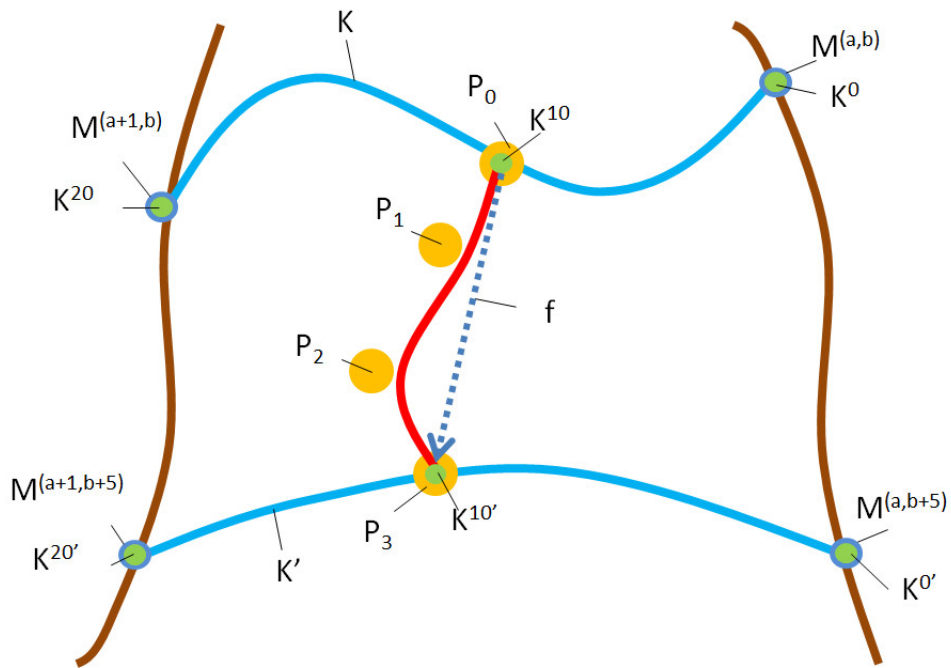


図 3.8: 第 2 分岐根の経路決定に関わる要素の位置関係

3.4 形状生成

3.4.1 面の生成

主軸根、第1分岐根、第2分岐根それぞれの根の生成経路が決定した後、経路に沿って面を生成する。図3.9は面を構成する頂点の決定処理を示したものである。

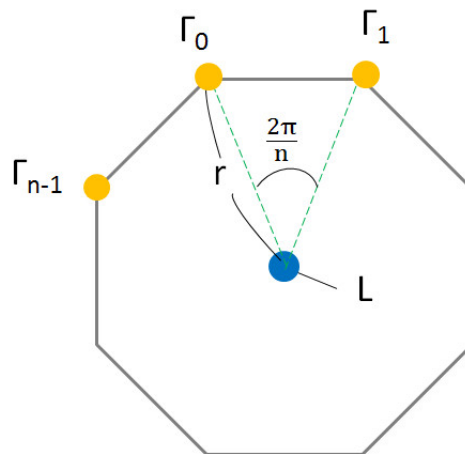


図3.9: 頂点の決定方法

まず、成長点 L の周りに面の頂点を根の経路に対して垂直となる円上に配置する。このとき、配置する頂点数は分割数 n により決定し、根の半径は r である。 L から r 離れた距離に頂点 Γ_0 を設定し、その後、角度 $\frac{2\pi}{n}$ となる位置に新たな頂点 Γ_1 を設定する。 $\frac{2\pi}{n}$ ずつ頂点を円状に n 回設定していく。その後、次の成長点の頂点設定に移行する。

頂点座標が全て決定した後、対応する各頂点を結び、面を生成していく。図3.10は複数の成長点と頂点の接続例である。

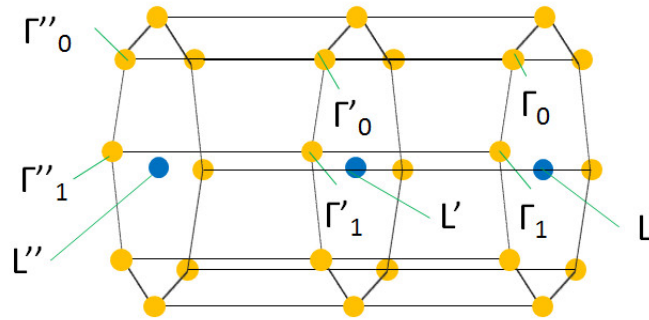


図 3.10: 各頂点による面の生成

3.4.2 第 1 分岐根の一部平滑化

実際の絞め殺しの木の根を見ると、分岐する根の接続部は太くなっており、その後、一定の太さに収束している。この外観を本手法の第 1 分岐根においても実現する。具体的には、第 1 分岐根の面生成の際に、頂点座標全体の配置形状を楕円形に近付けることで、平滑化を図る。ここでは主軸根の成長点 $\mathbf{M}^{(a,b)}$ から第 1 分岐根が派生する場合を例とする。ただし第 1 分岐根が派生するのは主軸根の要素番号 $(a, 4)$ 以降の成長点である。まず $\mathbf{K}'' = (K_x^0 - K_x^{20}, 0, K_z^0 - K_z^{20})$ とする。また z 軸と \mathbf{K}'' のなす角を γ とする。

次に、分岐開始点の頂点の配置を説明する。3.4.1 節で説明した要領で頂点を円を描く様に第 1 分岐根の各成長点の周りに配置する。ただし、両端の成長点 \mathbf{K}^0 、 \mathbf{K}^{20} の配置は異なる。両端の成長点を囲む頂点を Γ' とする。 \mathbf{K}^0 の場合、式 (3.16) より、 Γ' の総数のうち半数を $\mathbf{M}^{(a,b-3)}$ を中心に配置し、もう半数を $\mathbf{M}^{(a,b+2)}$ に配置する。

$\mathbf{R}'(\gamma)$ を y 軸周りの回転行列とする。

$$\begin{aligned}
 & \left(0 \leq i \leq \frac{n}{2} - 1 \text{ のとき} \right) \\
 & \qquad \qquad \qquad \Gamma'_i = \mathbf{M}^{(a,b-3)} + \mathbf{R}'(\gamma)\Gamma_i, \\
 & \left(\frac{n}{2} \leq i \leq n - 1 \text{ のとき} \right) \\
 & \qquad \qquad \qquad \Gamma'_i = \mathbf{M}^{(a,b+2)} + \mathbf{R}'(\gamma)\Gamma_i
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

同じ要領で分岐終了点となる \mathbf{K}^{20} でも $\mathbf{M}^{(a+1,b-2)}$ と $\mathbf{M}^{(a+1,b+2)}$ の成長点に各頂点を半数ずつ配置し、楕円形に近い頂点配置を行う。分岐開始点の根の太さを分岐終了点よりも大きくとったのは、どちらから伸びているのか、わかりやすくするためである。また、分岐の開始点と終了点付近のその他の第1分岐根の太さを、第1分岐根の中心に向かうほど小さくすることで、根の形状として不自然にならないようにした。図3.11は第1分岐根の平滑化処理を図として示したものである。

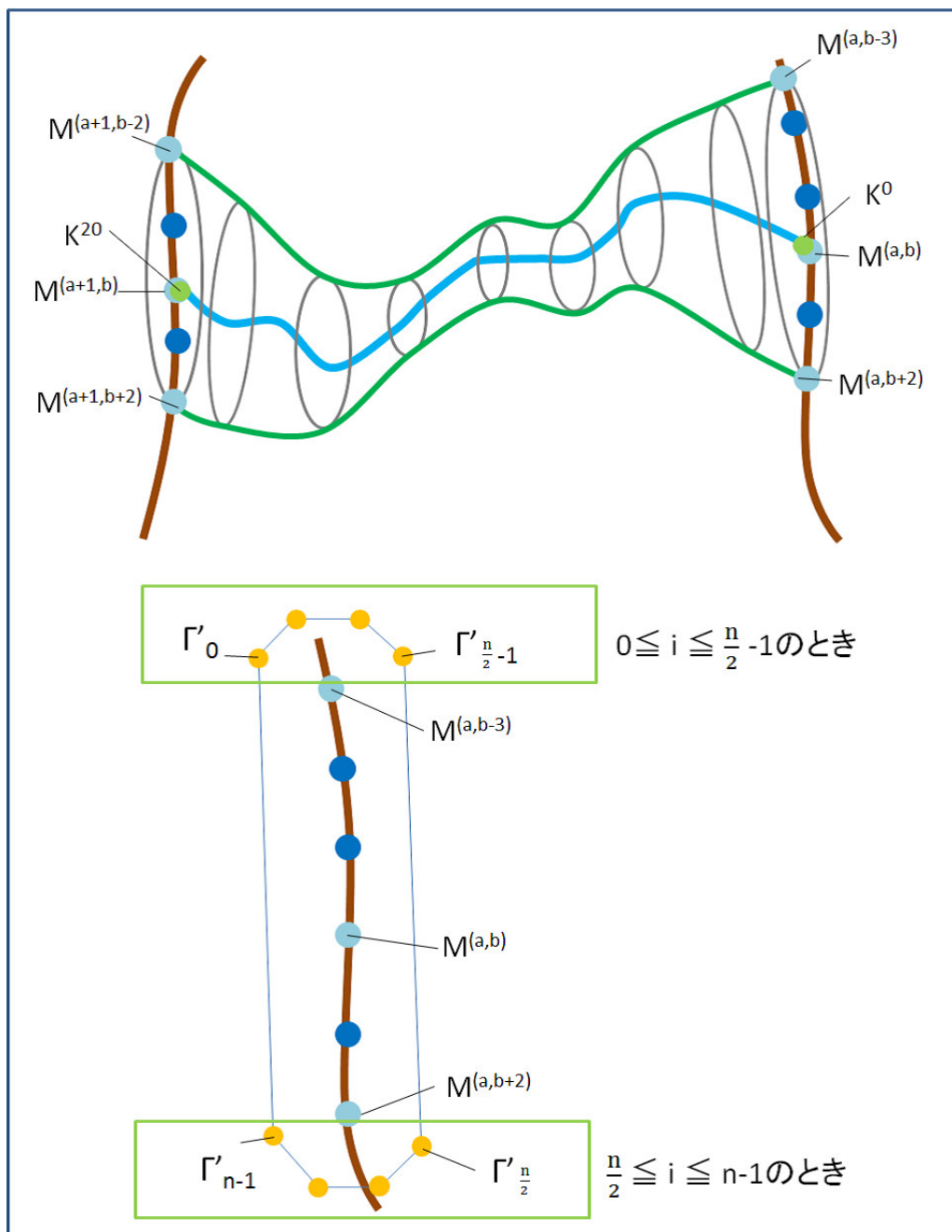


図 3.11: 第 1 分岐根の平滑化

第 4 章

検証と考察

4.1 実装結果

第 3 章で述べた手法を用いて実装したプログラムによる、絞め殺しの木の根の 3D モデルの自動生成の検証結果を記す。実装には、3D グラフィックツールキットである FK System[20] を用いた。図 4.1 と図 4.2 は実際の絞め殺しの木の根と本研究で自動生成した 3D モデルの比較である。

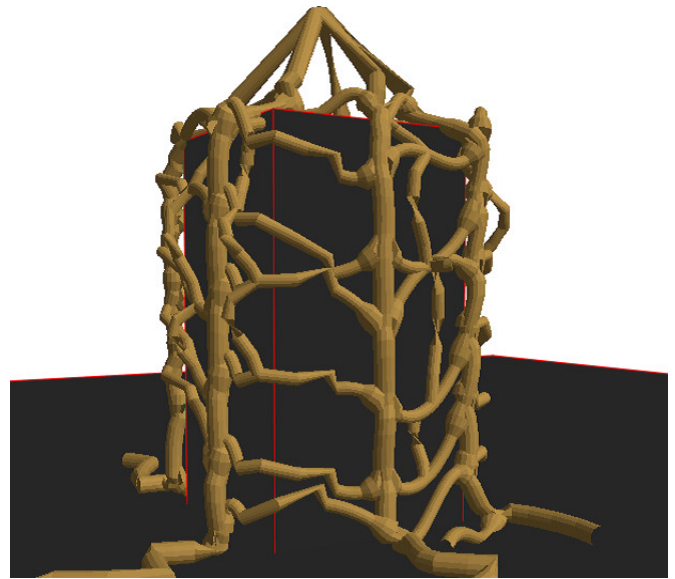


図 4.1: 実物の写真 (左) と自動生成したもの (右)

(左):©Poyt448

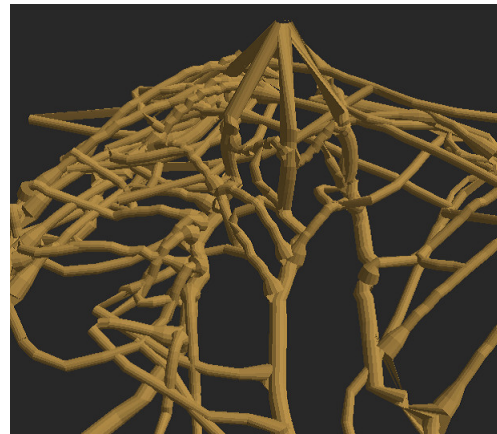


図 4.2: 実物の写真 (左) と自動生成したもの (右)

(左):©Poyt448

図 4.1 より、実際の絞め殺しの木の根のように、宿主を根で網目状に覆い、絞め

つけているように見える。また、図 4.2 より、複雑に入り組んだ網目形状も作り出すことができている。図 4.3 は根の太さと色のパラメータを変化させた生成結果の比較である。また、図 4.4 は根の分割数の違いによる生成結果を比較したものである。

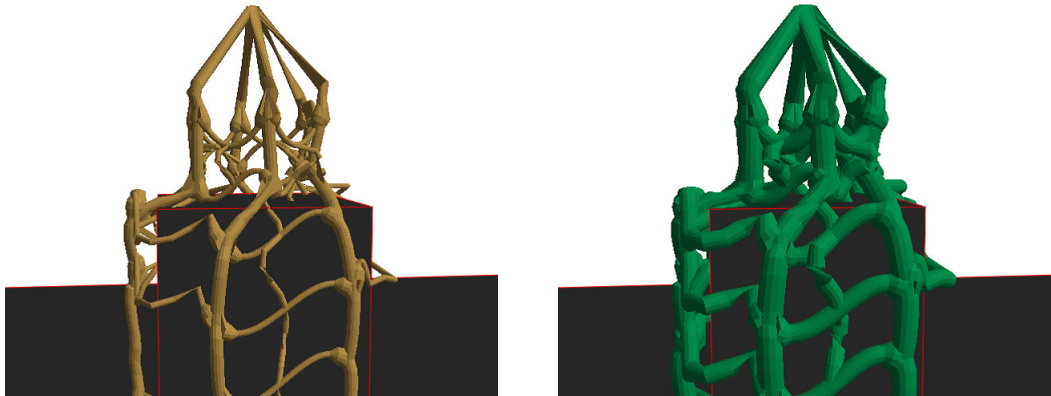


図 4.3: 根の太さと色による見た目の変化

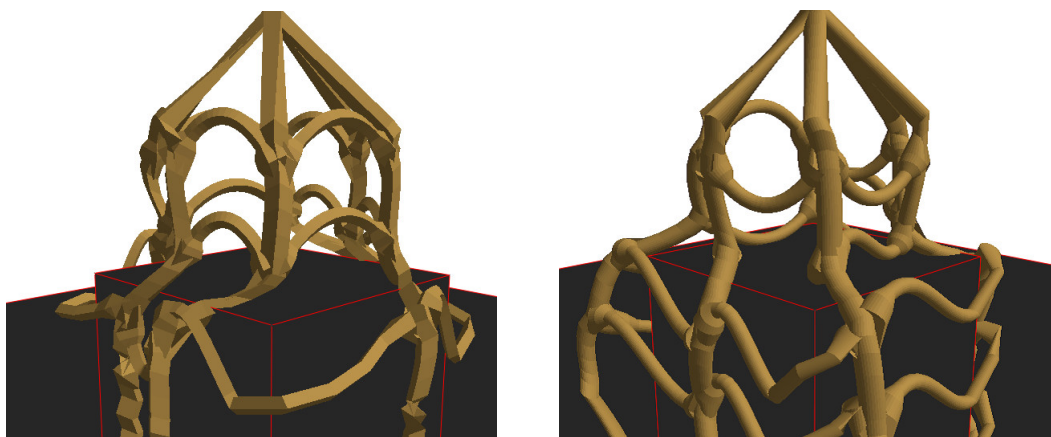


図 4.4: 4 分割の場合 (左) と 30 分割の場合 (右)

パラメータや分割数の変更により、様々なバリエーションの根をつくり出すこ

とができた。図 4.5 は第 1 分岐根の生成による主軸根の経路修正の修正前と修正後を比較したものである。

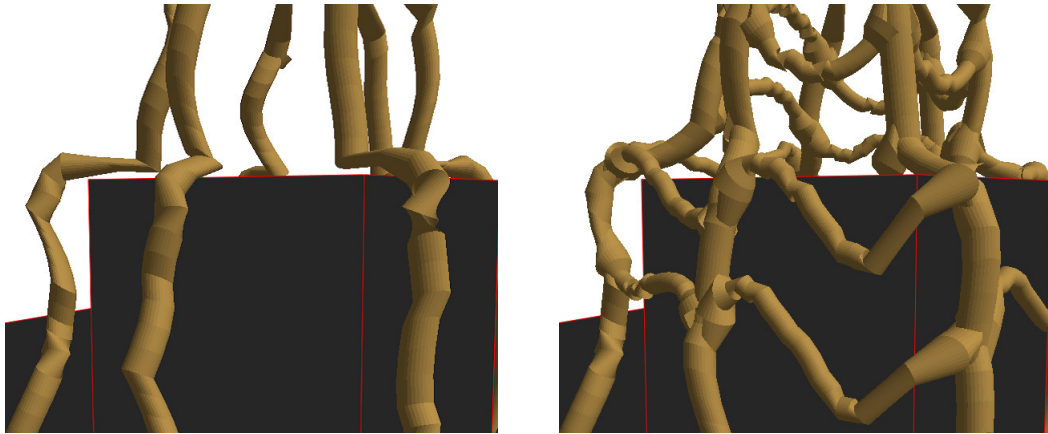


図 4.5: 経路修正前 (左) と経路修正後 (右)

修正後の方が修正前に比べ、主軸根の経路がなだらかになっていることがわかる。図 4.6 は実際の絞め殺しの木の根の分岐箇所と、平滑化を行った第 1 分岐根の分岐箇所の比較である。



図 4.6: 実物の分岐部分 (左) と平滑化を行った分岐部分 (右)

(左):©Roadkill99

実際の根の分岐点のように、本手法で生成した第1分岐根は滑らかなカーブを描くように分岐している。図4.7は、複雑な形状をした物体に対して、根の自動生成を行った結果である。

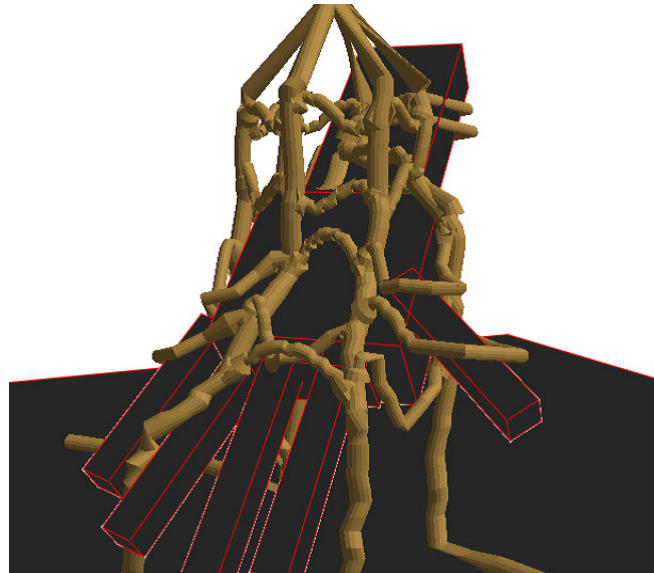


図 4.7: 複雑形状への絞めつけ

根の伸びる経路の決定に干渉判定を用いたことで、複雑な形状をした物体に対しても絡みつきや分岐が適応していることがわかる。

4.2 課題

根を上から下へ向かって生成するときは、複雑な網目形状の生成に成功している。しかし、主軸根の位置関係によっては、分岐根の生成が途中で途切れてしまう場合や、分岐根の経路が曲線というよりも直線に近くなってしまう場合がある。根の生成状況や位置関係に応じて生成アルゴリズムを変化させていくことが必要である。

第 5 章

まとめと展望

本研究では、絞め殺しの木の絞めつける根の 3D モデルを自動生成する手法を提案した。特定の植物種への限定や生態的特徴は考慮せず、絞め殺しの木特有の根の網目形状の自動生成を目的とした。この木の根は樹木や岩などに絡みつき、絞めつける特性をもつ。そこで、根の生成経路の決定に干渉判定を用いることで、様々な形状をもった宿主への張り付きや迂回する表現を実現することができた。

また、絞め殺しの木の根は分岐と結合によって網目状に成長するが、この形状は不規則かつ滑らかなものとなっている。この複雑な網目形状の再現は、根の分岐経路の設定にベジェ曲線や乱数値、分岐部の平滑化を行うことで実現した。その後、決定した根の経路情報を基に 3D モデルを生成していくと共に、根の色や太さ、筒形状の分割数を変更することで、様々な見た目の根を生成することに成功した。

本研究をさらに発展させる方法として、絞め殺しの木の生態的特徴や成長環境を考慮しての根の自動生成シミュレーションを提案する。本研究では、根の詳細な成長条件や自然環境による根の成長への影響は考慮していないため、根の部位に応じた長さや太さ、分岐回数といった再現が不十分である。より実物に近い、絞め殺しの木の根を再現するには、これらの情報を組み込んでいくことが必要である。

謝辞

本研究に関わった方々に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] J.Venter, A.Hardy, “Generating plants with gene expression programming,” *AFRIGRAPH '07*, pp.159–167, 2007.
- [2] R.Měch, P.Prusinkiewicz, “Visual models of plants interacting with their environment,” *SIGGRAPH '96*, pp.397–410, 1996.
- [3] 桑原 教彰, 志和 新一, 鉄谷 信二, and 岸野文郎, “フラクタルを用いた階層的な樹木形状表現による 3次元樹木画像の高速生成方法”, 電子情報通信学会論文誌. D-II , Vol.78, No.7, pp.1091–1104, 1995.
- [4] P.Ferraro, C.Godin, P.Prusinkiewicz, “Toward a quantification of self-similarity in plants,” *Fractals*, Vol.13, No.7, pp.91–109, 2005.
- [5] G.Lopez, R.R.Favreau, C.Smith, E.Costes, P.Prusinkiewicz, T.M.DeJong, “Integrating simulation of architectural development and source–sink behaviour of peach trees by incorporating markov chains and physiological organ function submodels into l-peach,” *Functional Plant Biology*, pp.761–771, 2008.
- [6] O.Deussen, P.Hanrahan, B.Lintermann, R.Měch, M.Pharr, P.Prusinkiewicz, “Realistic modeling and rendering of plant ecosystems,” *SIGGRAPH '98*, pp.275–286, 1998.

- [7] 坂口 竜己, 大谷 淳, 中津 良平, “実写映像に基づいた 3次元樹木モデルの生成”, 電子情報通信学会論文誌. D-II, Vol.82, No.9, pp.1469–1477, 1999.
- [8] 岡部 誠, 五十嵐 健夫, “手書きスケッチに基づく樹木の 3次元モデリング”, 情報処理学会研究報告. グラフィクスと CAD 研究会報告, No.86, pp.41–46, 2003.
- [9] Interactive Data Visualization, “SpeedTree.”
<http://www.speedtree.com/>.
- [10] KIM Jijoon, “A Growth Model for Root Systems of Virtual Plants with Soil and Moisture Control,” *IEICE transactions on information and systems* , Vol.89, No.5, pp.1743–1750, 2006.
- [11] 田中 美穂, “樹木の根モデルの自動生成および簡易修正についての研究”, 東京工科大学学士論文, 2008.
- [12] 佐藤 成樹, “ヤエヤマヒルギの支柱根の自動生成について”, 東京工科大学学士論文, 2009.
- [13] 笠倉 修, “生長過程を考慮したツル植物の自動生成の研究”, 東京工科大学学士論文, 2009.
- [14] 進藤 亜梨, 坂本 雄児, “吸盤の働きを考慮したツタの CG モデル生成手法”, 電子情報通信学会技術研究報告. ITS, Vol.109, No.414, pp.233–238, 2010.
- [15] “絞め殺しの木 - Wikipedia.”
<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%9E%E3%82%81%E6%AE%BA%E3%81%97%E3%81%AE%E6%9C%A8>.
- [16] 高橋 英一, “「根」物語 -地下からのメッセージ-”, 研成社, 1194.
- [17] 福原 達人, “植物形態学.”
<http://www.fukuoka-edu.ac.jp/~fukuhara/keitai/index.html>.

- [18] H.de Kroon, E.J.W.Visser, “根の生態学”, シュプリンガー・ジャパン, 2008.
- [19] 鳥谷 浩志, 千代倉 弘明, “3次元CADの基礎と応用”, 共立出版, 1991.
- [20] Fine Kernel Project, “Fine Kernel Tool Kit System.”
<http://fktoolkit.sourceforge.jp/>.

引用画像

- 図 1.1(左): L. Shyamal, “絞め殺しの木 - Wikipedia”
http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Strangler_fig_kerala.jpg
- 図 1.1(右): Aacool, “Strangler fig - Wikipedia, the free encyclopedia”
http://en.wikipedia.org/wiki/File:StranglerFig_BRHills.jpg
- 図 2.1: Roadkill99, “絞め殺しの木 - Wikipedia”
http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Strangler_fig_boulder_katandra.jpg
- 図 2.3: LeonardoG, “絞め殺しの木 - Wikipedia”
<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Ficus2.jpg>
- 図 4.1(左): Poyt448, “Strangler fig - Wikipedia, the free encyclopedia”
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ficus_watkinsiana_on_Syzygium_hemilampra-Ilu.jpg
- 図 4.2(左): Poyt448, “Strangler fig - Wikipedia, the free encyclopedia”
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ficus_obliqua_Watagans_National_Park.jpg

- 図 4.6(左): Roadkill99, “絞め殺しの木 - Wikipedia”

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%>

AB:Strangler_fig_boulder_katandra.jpg