

折り紙モデルによる葉の形状定義法と 植物の画像生成

海野啓明[†] 矢島邦昭[†] 鈴木秀一[†] 千葉則茂[‡]

仙台電波工業高等専門学校 ‡ 岩手大学工学部

切れ込みや鋸歯のある複雑な葉の形は、葉を折り畳むと葉縁が簡単な曲線になること場合がある。このことを考慮して、新しい葉の形状定義法として折り紙モデルを提案する。折り紙モデルを用いてミネカエデとカラハナソウの複雑な形の葉の画像が合理的に作成できることを示し、これが生け花のような植物のCG画像に有効に利用できることを示す。

Modeling of Leaves by Use of Origami Modelling Method and Image Generation of Plant

Keimei KAINO[†], Kuniaki YAJIMA[†], Syuichi SUZUKI[†] and
Norishige CHIBA[‡]

[†] Sendai National College of Technology
Aoba-ku, Sendai 989-31 Japan

[‡] Faculty of Engineering, Iwate University
Morioka 020 Japan

When certain types of digitate leaves are folded up along their main veins as in leaf buds, their margins of leaves are found to form simple curves or a few lines. From the viewpoint that venation and the folding leaf buds would be closely related each other, a new modeling method called by origami model is proposed. By use of this model, it is shown that complete digitate shapes such as *Acer tschonoskii* and *Humulus lupulus* would be well produced. Ikebana-like CG image of a long-stemmed *Humulus lupulus* is produced with the leaves modeled.

1. はじめに

植物の中でも草花のコンピュータ・グラフィクス (CG) では、葉、花および莖などの器官をリアルに表現する必要がある。草花は樹木に比較すると小さいので研究の対象にしやすいが、総合的に表現する必要があるので画像の評価の基準は樹木より高いと思われる。例えば、草花の個々の特徴を全ての器官について良く表現し、それとわかる画像を生成する必要がある。また、葉の形は極めて多様で複雑であり[1]、草花の画像生成のための葉の形に関する基本的な研究および文献が蓄積されているようには思われない[2][3][4]。本報告では、草花の葉の形状定義法と姿勢制御を検討する。特に、葉は草花だけでなく樹木の全体像を生成するには不可欠の器官であるので重要なテーマである。さらに、これは自然の樹木、盆栽およびインテリアとしての観葉植物や生け花などに応用することができるという意味で実用的価値は高いといえる。

葉の形状定義法では、先ず葉縁と中脈等の形を定めて、その間を平面または曲面でパッチをあてることが一般的である[5]。葉縁の形は、対象とする植物の葉に合わせれば良いのであるから、ケヤキのような単葉全縁の小さな葉を近似する場合は、比較的容易である。しかし様々な植物を対象とする場合には、次のような問題が生じてくる。第1は、葉の形は極めて多様であるから[1]、少し複雑な形になれば形を合わせるために必要なパラメータや計算量が増大するため扱いが困難になることである。このため出来るだけ合理的で簡単な形状定義法が必要となる。第2に、成長した葉は平面的ではなく、主な葉脈を谷折りとする山部の形成や、葉の反り返り(カーリング)が観察される。これらは芽の中での葉の折り畳みすなわち「葉だたみ」の影響や[4]、葉の成長と展開に伴って生じる姿勢制御によるものである。第3に、草花においては葉は芽から成長し、姿勢を変えながら展開していく。特に蔓ではかなりの期間に亘っ

て成長を続けるので、葉が芽から展開した全ての形状を用意しておく必要がある。

第1と第2の問題は、葉の形状を定義するときに葉脈を軸とするフレームワークを利用すれば解決することができる[5][6]。現在のところ、CGで生成されている葉は全縁などの比較的簡単な形状に限られており、カエデのような「切れ込み」のある葉の3次元形状を生成する程には至っていないようである(例えば Bloomenthal(1985)[7]のMighty Mapleの葉はテクスチャ・マッピングである)。第3の問題は、葉の成長と関係しており、形状定義法が成長モデルであることを要求する。L-systemにより形状と成長を同時に表現する方法では、単純な生成規則に改良を加えるだけでは「切れ込み」の数の増加に連れて扱いにくくなる(例えば形状を生成するためのパラメータの選択が困難になる)[8]。これに比較すると、主な葉脈をフレームワークとして形状定義する方法[6]の方が遥かに直感的で操作性がよい。しかし、この方法でも葉が切れ込みや鋸歯の場合は扱いにくくなる。これに加えて、主な葉脈が分岐や、「葉だたみ」の影響やカーリングを考慮しなければならぬので、より合理的な形状定義法を考案する必要が生じる。

葉の形は主な葉脈の分岐と関係が深い。さらに葉の凹凸には「葉だたみ」の影響が観察される。葉は芽の中で折り畳まれており、それが展開してから短時間で平らになるので、芽の中では平面として畳まれていると仮定してもよいであろう。「葉だたみ」には、一般的な「二つ折り」や、モミジなどに見られる「扇たたみ」など色々な固有の形式が知られている[4]。折り紙と切り紙の経験によれば、「葉だたみ」と葉の切れ込みが関係することは十分考えられる。この観点から、筆者らは切れ込みや鋸歯の形の葉の形状定義法として「折り紙モデル」を提案している[9]。このモデルによれば、主な葉脈と葉縁が平面の折り畳みにより同時に決定され、葉が芽から展開するまでを一つのモデルで表現できるので都合がよい。

本報告の目的は、切れ込み・鋸歯の葉の形状定義法について述べ、CG画像を作成し評価することである。2章では葉の切れ込み・鋸歯と折り畳みの関係を説明し、「折り紙モデル」を用いた葉の形状定義法について述べる。3章では、このモデルをモミジ（切れ込み）やカラハナソウ（鋸歯）の葉に適用する。また、茎のモデル化について説明する。さらに、葉の付き方や姿勢制御について述べ、カラハナソウのCG画像を作成し評価する。4章はまとめである。

2 葉の形と折り紙モデル

ここでは、切れ込みや鋸歯のある葉の形に見られる規則性について述べ、形状定義法として折り紙モデルの有効性を示す。

2.1 切れ込みのある葉の形

主な葉脈が葉の基から直線的かつ放射状に出る葉（モミジ、カナムグラなど、図1参照）を採集して、葉縁の形を調べた結果をまとめると以下のようなものになる[10]。主な葉脈の長さ r とそれが中脈となす角度 θ とすると、

(1) 主な葉脈の数が5本以下程度のものでは、隣合う葉脈のなす角度はほぼ等しく、アルキメデスの螺旋 $r=r_0(1-\theta/\theta_0)$ と呼ばれる式がよく成り立つ（ r_0 、 θ_0 は定数）。

(2) 主な葉脈の数が7本以上になると、中脈付近から葉の形が円に近づく傾向がある。

また、主な葉脈が葉の基から放射状に出るが、その先で2分岐を繰り返す鋸歯の葉（カラハナソウなど、図1参照）の形もアルキメデスの螺旋形で表わされる[11]。

2.2 葉の折り畳みと切れ込み

葉が芽の中で折り畳まれていることを「葉たたみ」という。最も一般的な形式

は「二つ折り」（中脈を軸にして左右の表面を合わせるように畳む）である。

「二つ折り」の葉で葉脈の主な支脈が強く、真直ぐに葉縁に達しているものでは、この支脈でも二つ折りが起きる。モミジの葉は最も典型的で「扇たたみ」と呼ばれる。これは、葉が芽から出た直後を観察するとよくわかる（図2参照）。「葉たたみ」においては、主な葉脈は折り畳みの軸となり、そこで葉は谷折りにされる。一般に、芽の中では主な葉脈は外側にある。また、対生の一方の葉の山折りの部分と折り畳まれた葉縁は内側になり、芽を対称に分割する面を形成している。モミジ、ヤマタイミンガサ、カラハナソウの葉縁を写し取り、折り畳んだ結果を図3に示す[9]。展開した葉に描いた実線と点線はそれぞれ山折りと谷折りを表わす。

モミジの例では、「扇たたみ」により葉を畳んだ後で切り取ると切れ込みができることになる。図3(a)で見られる山折りの直線と、切り取りに対応する葉縁の曲線（図2(b)）は、芽の中で両方共に一直線となるべき（すなわち芽を対称に2分する平面上にある）であるから、掌状の葉身にしわ寄せが生じる。これが葉身が鋸歯となる理由であろう。

カラハナソウでは、放射状に出る葉脈が葉縁に達するまでに数回分岐し、中脈は3分岐により左右対称に次脈の発生を繰り返す。葉たたみは複雑そうに見えるがそうではない。それは、図1(b)が示すように、葉の基から分岐して葉縁まで直線的に達する数本の山折りにより独立な部分に分けられ、中脈を含む真ん中の部分以外の部分はほぼ同じパターンになるからである。

2.3 葉の折り紙モデル[9]

折り畳みのための仮定をあげると、
仮定1 葉は芽の中で、平面から折り畳まれている、
仮定2 葉脈は葉の基で放射状に分岐し、葉縁に達するまでに分岐してもよい、

仮定3 葉を折り畳むとき、葉脈は谷折りとなる、

ことである。また、切れ込みのある葉の形を導くための仮定は、

仮定4 葉の基から分岐する山折りは葉を独立な領域に分割する、

仮定5 葉縁は折り畳まれたとき、簡単な曲線で切り取った切り口で表わされる、ことである。さらに、折り畳みがストレスなく実現できるための最も簡単な仮定は、

仮定6 葉脈のパターンは左右対称である、ことである。

平面が局所的に折り畳めるときは、山折りと谷折りのなす角度の間に「内心の定理」と呼ばれる以下の定理が成り立つ[12]。図4に示すように、一点Oをとり、これから3本の半直線OA、OB、OCを引き、これらの半直線に沿って紙を山折りするとき、第4の半直線OA'をとりこれに沿って谷折りに折れば必ず平らに折り畳める。OA'はただ一つに決まり、その関係式は図4の角度の記号を使えば、

$$B + \beta = C + \gamma = 180^\circ$$

となる。これは葉脈が2分岐する場合に相当する。分岐の数がさらに多い場合には、拡張された内心の定理[13]：

「一点Oから伸びたm本の半直線OA₁、OA₂、…、OA_mを折って平面が平らに折り畳めればmは偶数であり、点Oの周りのm個の角度を一つおきにとり、その角度を合計すると180°になる」

が成り立つ。以下ではこれを内心の定理と呼ぶ。これに依れば、中脈が谷折りとして基から葉縁まで直線的であると仮定すると、中脈上で3分岐が起きるならば中脈の左右に対称に葉脈が生じなければならないので、切れ込みのある葉が中脈について対称になることが導かれる。

3 草花の画像生成

折り紙モデルを用いて切れ込みのある複雑な葉の形を定義する。さらに茎を合成して草花の画像生成を行う。目標の一つは生け花の作品を作成することである。

3.1 葉の画像生成

折り紙モデルを切れ込みのある葉の形状定義に適用するとき、以下の示すような手順で形状を単純化し生成する。

手順1 葉の基Oから葉縁に真直ぐに達する数本の山折りで全体を分割する。分割された部分の2本の境界の山折りをOP、OQとする。

手順2 $\angle POQ$ の2等分線としてOから谷折りを発生させる。これが分岐する場合は内心の定理を適用する。また山折りは分岐しないとする。

手順3 折り畳みが決定できたら、OPまたはOQに沿って切り取る。

手順4 隣合う部分を合わせて全体の葉を作成する。

図5にモミジの中脈部分とカラハナソウの支脈部分、図7にカラハナソウの合成図を示す。このようにして、葉のフレームワークを実際の葉と比較して設計した後、内心の定理を考慮してフレームワークについて解く。このため、必要なパラメータの数は少なくなり、それらの関係は曖昧さがなく正確に決定される。その後、フレームワークが葉縁を最も良く近似するようにパラメータを選択する(ただし、葉先の尖り具合が出にくいので、この箇所ではモデルの改良が必要になる)。このフレームワークは折り畳みができるので、葉が芽から出て平らになるまでの画像が簡単に得られる。オオバミネカエデとカラハナソウのモデルを開閉させた画像をそれぞれ図6、図7に示す。閉じたモデルが開くに連れて中脈が曲線から直線になるので、あたかも葉が成長しているように見える(図6参照)。平らになるまで中脈は下に凸であるが、これを裏返せばカーリングした葉となる。折り紙モデルは大変直感的であるので、モデルに含まれるパラメータを操作し易いこと、構造がちょうつがいの様な柔軟性を持つことなど、多くの特徴があげられる。

3.2 植物の画像作成と今後の課題

参考文献

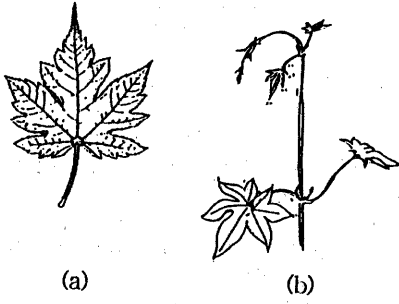
草花の葉は、茎から葉序にしたがって芽から広がる。葉序(対生, 互生など)は植物に固有であるが, 葉の広がり方は向日性などより柔軟に向きを変える[4]。さらに, カラハナソウなどの蔓植物は茎が回転しながら巻き付いていく[14]。茎の断面は多角形が多く, 葉序の周期と関係がある。また, 茎の表面構造(毛, 刺, 茎のねじれ)も考慮する必要がある。これらは樹木の枝先と共通するところが多い[15][16]。生長モデルにより茎, 葉の姿勢を自動生成するためには, 植物固有の規則を見い出す必要がある。

現在, 実物の植物を観察しながら対話的に茎と葉のモデル化を行い, 表現法を検討している。図8は, このように作成したカラハナソウの画像である。茎の断面は六角形で, ねじれを考慮した(ただし, 托葉や刺はない)。葉は図7の葉のモデルを利用している。茎は3次元の点列を曲線補間している。先端の曲り具合は表現できたと思うが, これが力学的解析により合理的に決められるならば面白いであろう。最終的には生長モデルに基づいてこのような画像を生成し, 生長過程をアニメーションで表現したい。また, 幾つかの植物を自由に組み合わせて(図9[17]), 生け花のような作品を作成するシステムを構築したい。

4 まとめ

本報告では, 切れ込みのある複雑な葉の形状定義法として折り紙モデルを提案し, モミジとカラハナソウの葉を生成した。さらに, カラハナソウの全体のCG画像を作成し, 実用的であることを示した。折り紙モデルを利用すれば, 植物の生長過程のアニメーションや生け花のCADシステムへに活用できることを示した。さらに, 茎や枝先の形状定義法の成長モデルが開発が今後の課題であることを述べた。

- [1] 阿部正敏: 葉による野生植物の検索図鑑, 誠文堂新光社, 1988
- [2] J.H.Fabre: HISTOIRE DE LA BUCHE RECITS SUR LA VIE DES PLANTES, 1867(日高敏隆, 林瑞枝訳: ファーブル植物記, 平凡社, 1984)
- [3] D.W.Thompson: On growth and form, University Press, Cambridge, 1952 (柳田友道他訳: 生物の形, 東大出版会, 1973)
- [4] 前川文夫: 植物入門, 八坂書房, 1979
- [5] P.Prusinkiewicz and A.Lindenmayer: The Algorithmic Beauty of Plants, Springer-Verlag, New York, 1990
- [6] R.Lecoustre et al.: Controlling the Architecture Geometry of a Plant's Growth - Application to the Begonia Genes, Creating and Animating the Visual World, pp.199-214, 1992
- [7] J.Bloocnthal: Modeling the mighty maple, proceedings of SIGGRAPH '85 in Computer Graphics, Vol.19, No.3, 1985
- [8] 海野啓明, 千葉則茂: 葉脈の性質を用いた葉の形状定義, 平成4年度情処学会東北支部研究会資料, 1992
- [9] K.Kaino: Geometry of Folded Pattern of Veins and Origami Model of Digitate Leaves, Form, Vol.9, pp.253-257, 1994
- [10] 海野啓明, 福井裕子: 葉脈の性質を用いた葉の画像生成とコンピュータ・グラフィクスへの応用, 仙台電波高専研究紀要, 第21号, 1991
- [11] 海野啓明, 菅野仙子: 葉脈の性質を用いた葉の形状定義法, 仙台電波高専研究紀要, 第22号, 1992
- [12] 伏見康治, 伏見満枝: 折り紙の幾何学, 日本評論社, 1979
- [13] 川崎敏和: 初等数学, 17号, pp.12-20, 1989
- [14] C.Darwin: On the movements and Habits of Climbing Plants, Longman, London, 1865 (渡辺仁訳: よじのぼり植物, 森北出版, 1991)
- [15] 奥村昭雄, 小川真樹: 光天球の中で生長する樹形(樹形の構成要素と環境への対応), Sci.Form, 2(1), pp.59-88, 1986
- [16] 千葉則茂, 大川俊一, 村岡一信, 三浦守: CGのための樹木の生長モデル—架空の「植物ホルモン」による自然な樹形の生成—, 信学論(D-II), J76-D-II, pp.1722-1734, 1993
- [17] K.Okada: Ikebana with the seasons, Shufunotomo, 1989



(a) (b)

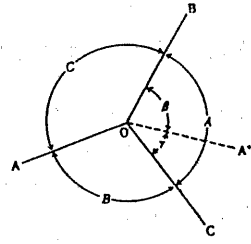
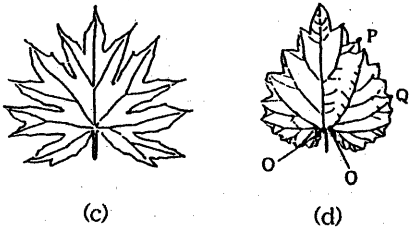


図4 内心の定理



(c) (d)

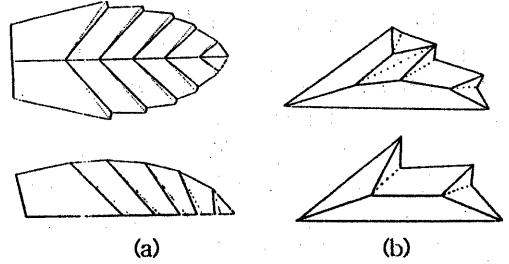
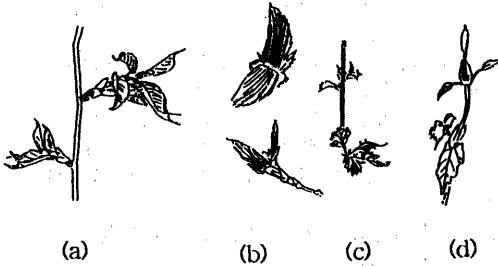


図5 折り紙モデルによる葉の一部
(a) モミジの中脈部分
(b) カラハナソウの支脈部分

図1 切れ込みのある葉

(a) オオバミネカエデ (b) カナムグラ
(c) ヤマタイミンガサ (d) カラハナソウ



(a) (b) (c) (d)

図2 葉と葉だたみ

(a) ヤマザクラ (b) イロハモミジ
(c) コゴメウツギ (d) カラハナソウ

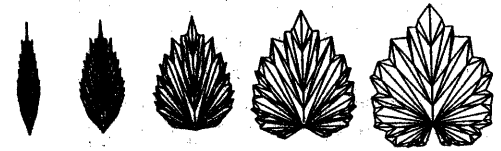
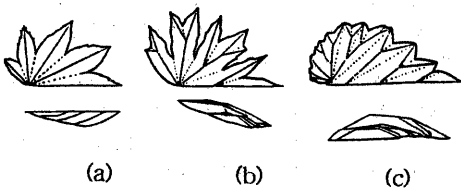


図6 カラハナソウの葉のモデル



(a) (b) (c)

図3 切れ込み鋸歯の葉の折たたみ

(a) モミジ (b) ヤマタイミンガサ
(c) カラハナソウ(鋸歯)



図7 オオバミネカエデの葉のモデル

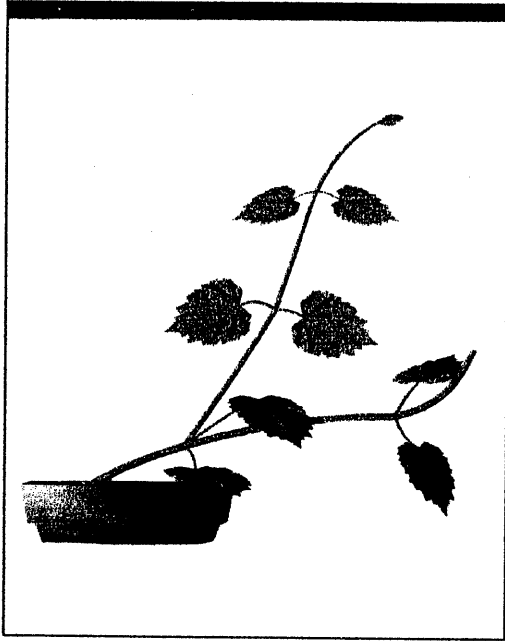


図8 カラハナソウの合成画像

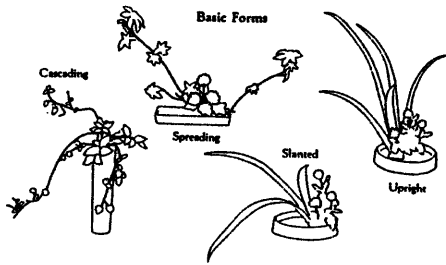


図9 生け花の型