

物理モデルによる花の萎れのシミュレーション

松浦 真司 齊藤 剛史 金子 豊久 栗山 繁
豊橋技術科学大学 情報工学系

自然現象の一つである花の萎れ現象を、物理モデルを用いてシミュレーションする手法を提案する。萎れの対象はダイナミックに変形しながら萎れるアサガオとする。萎れ現象のモデルとして、バネ-マスモデルを用いる。実物のアサガオの構造を考慮して、構造は5個の曜部とその間に張られる薄膜部から構成し、外と内の二層膜モデルとする。萎れは、内外の膜のバネに異なる収縮率を与えることにより全体の大きさの収縮と、花卉の内側への巻き込みを実施する。1個の曜部モデルを用いて、収縮率の違いがどのように反映するかを検討した後、アサガオの全体モデルでシミュレーションを行い、実物に近い萎れを再現することができた。

Fading Simulation of a Flower Based upon Physical Model

Shinji Matuura Takeshi Saitoh Toyohisa Kaneko Shigeru Kuriyama
Dept. of Information and Computer Sciences,
Toyohashi University of Technology

This paper is concerned with the modeling and simulation of the fading phenomena of flower. A simulation model is constructed based upon a spring-mass network model. Its trumpet-shaped structure consists of five pillars and five thin double layers. The fading is simulated as follows: two contraction values are given to the springs of internal and external layers so that the whole size shrinks, and the petal is wound inward. It was found that our fading model can simulate actual fading of flower very well.

1. はじめに

近年、コンピュータグラフィックス (CG) は科学技術計算結果の可視化や医療画像の三次元表示、映画やCMの特殊効果、ゲームなど幅広い分野で用いられている。これはコンピュータの性能が飛躍的に進歩を遂げ、高品質な画像が低コスト、短時間で生成可能な環境が整ってきているからである。これに伴い、形状が複雑な木や山岳、海岸線などの自然物 [1]~[3]、厳密な方程式を定義することが困難な煙や炎の揺らぎや水の沸騰、ひび割れ、植物の生長などの自然現象をCGで再現する手法 [4]~[7] が提案されている。

本研究は様々な自然現象の中で萎れ現象に着目する。自然界に存在する萎れは花や葉、野菜、果物な

どの植物に多く見られる。本研究ではこれらの中で特にダイナミックに変形しながら萎れるアサガオを対象とする。花を対象としたCGとして立野らのバラ [8], [9] があり、これらはフォトリアルな質感表現を目指している。Prusinkiewiczら [10] は、花や木などの生長モデルにL-system法などを用いて多くの成果を出している。本研究はアサガオの蕾から開花、萎れまでの一連の過程を物理モデルによる方法により再現することを最終目標とするが、本稿の焦点は萎れに限定し、アサガオの開花状態から萎れの過程を観測に基づいてシミュレーションすることを目的とする。

また、一般的なシミュレーションでは多くのパラメータを必要とするため、操作が容易でない。本研究はなるべく少ないパラメータで萎れを再現することも目的とする。

2. アサガオの物理モデル

2.1. 実物の観測

アサガオの実物写真を図1に示す。アサガオの構造は、曜と呼ばれる肉厚の部分とその間の薄膜に大別できる。本論文ではこれらを曜部と薄膜部と呼ぶことにする。また上面から撮影したアサガオの萎れの様子を図2に示す。この図より、アサガオの萎れは花卉の外側、特に曜部から内側に徐々に巻いていくことがわかる。アサガオが満開の状態から萎れるとき、以下の二つが特徴的である。

1. 全体的に大きさが収縮する。
2. 内側に巻き込まれていく。

1. は花卉が水分を失い収縮することにより、2. は内側と外側の収縮率が異なるものと考えられる。これらの観測を基に、実物に沿ったモデルの構築と萎れのシミュレーションを実現する。

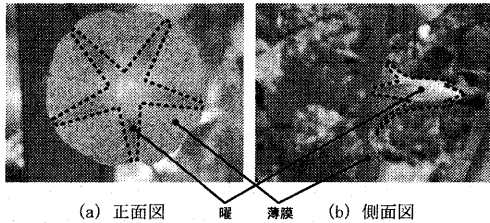


図1: 対象とするアサガオ

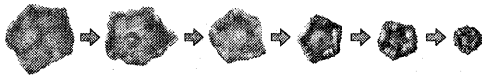


図2: アサガオの萎れの過程

2.2. モデルの構造

構築するアサガオは、ノードとバネから構成され、ノードに質量を与えたバネ-マスモデルを用いて表現する。萎れるとき花卉を内側に巻き込ませるために、花卉の膜を一層で表現するのではなく、外と内の二層膜モデルとする。更に実際のアサガオの構造を考慮して、曜部と薄膜部の2つの異なる性質のモデルを作成する。曜部は薄膜部よりバネ定数を強くすることにより肉厚（堅さ）を表現し、逆に薄膜部はバネ定数を小さく設定する。また花卉の根元から

先端までを D 個のセクション $S_i (i = 1, \dots, D)$ に等分割する。 S_i における内側と外側のバネの長さをそれぞれ I_i, O_i とする。図3(b)に $D = 20$ の場合の曜部モデルの側面図を示す。

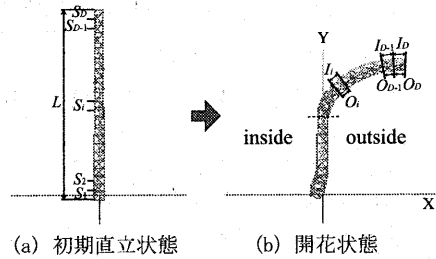


図3: 1個の曜部モデル

2.3. モデルの構築

アサガオの全体モデルは5個の曜部と5個の薄膜部から構成する。全体モデルは、曜部を作成した後薄膜部を作成する。

曜部モデルの作成について図3を用いて説明する。開花状態のアサガオの花弁は漏斗形である。この形状を設計するには、開花状態の形状をあらかじめ定義する方法と、シミュレーションにより形状を作成する方法が考えられる。本研究の最終目標は蕾から開花、萎れまで一連のシミュレーションを行うことである。このため、直立した曜部から簡易的にシミュレーションを行い開花状態を得る。まずノードに質量を与え、外側のバネに収縮率を与えた曜部を直立させる(図3(a))。ここで直立時の高さを L とする。そしてシミュレーションを行い同図(b)のような状態に安定させる。

次に前述で作成した曜部モデルを5個放射状に配置する。図4(a)は根元の半径 $R = 0.005m$ にした場合の状態である。薄膜部は配置された曜部間に張る。これらの操作により図4(b)に示すアサガオの全体モデルを得る。構築したアサガオモデルのノード数、バネ数、ポリゴン数を表1に示す。またモデル構築に関するパラメータを表2に示す。曜部と薄膜部は異なるバネ定数を与える。曜部のバネ定数は内側に巻き込む性質を持たせるため、縦方向のバネ定数 k_{pv} を最も大きな値とする。

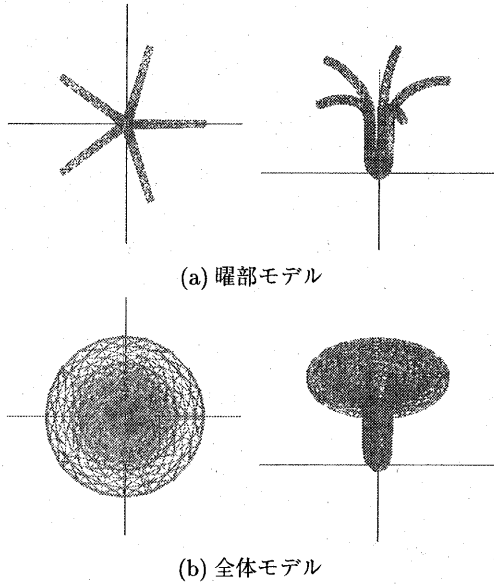


図 4: アサガオモデル

2.4. 萎れ処理

アサガオの萎れは 2.1. で述べたように大きさの収縮と、内側への巻き込みの 2 つの特徴がある。本研究ではこの現象を以下に述べる方法により再現する。

- モデルを構成しているバネを収縮させ、バネの力によってノードを移動させる。すべてのバネに収縮率を与えることにより、アサガオ全体の大きさを収縮させる。
- 二層モデルにおいて内側のバネの収縮率 γ_i を外側の収縮率 γ_o よりも大きくし、バネの力により花卉先端のノードを内側に巻き込ませる。巻き込み過ぎて先端のノードが花卉を突き抜けるのを防ぐために、ノードと面の衝突判定処理を行う。またバネを収縮しノードを移動させるため、力の均衡が崩れる。そのためノードを平衡させるための安定処理を行う。

次に本論文で提案する萎れの処理手順を説明する。またフローチャートを図 5 に示す。シミュレーションはノードの移動に伴う短い時間経過 τ と、収縮に伴う長い時間経過 t の 2 つの時間に基づいて行う。

(1) 初期化

萎れの初期状態は開花状態とする。開花状態は 2.3 で述べた方法により構築する。また後述 (3) ~ (6) で

表 1: アサガオモデルの詳細

	曜部	薄膜部	全体
ノード数	84	126	1050
バネ数	446	1279	8625
ポリゴン数	164	336	2500

表 2: モデル構築に関するパラメータ

パラメータ		曜部	薄膜部
幅	根元 $W_b[m]$	0.004	0.004
	先端 $W_t[m]$	0.002	0.002
高さ	根元 $T_b[m]$	0.003	0.003
	先端 $T_t[m]$	0.002	0.002
ノード質量	$m[g]$	0.005	0.005
直立時の高さ	$L[m]$	0.06	—
バネ定数	縦 $k_{pv}[-]$	500	3
	横 $k_{ph}[-]$	300	3
	斜め $k_{pd}[-]$	200	3

用いる数値計算に関するパラメータを表 3 に示す。

表 3: 数値計算に関するパラメータ

パラメータ	値
安定条件 $\delta x[m]$	1.0×10^{-6}
重力加速度 $g[m/sec^2]$	9.8
長い時間間隔 $t[hour]$	0.5
短い時間間隔 $\tau[sec]$	0.001
粘性抵抗重み係数 $\alpha[-]$	20

(2) バネの収縮

萎れはモデルを構成するバネを収縮させることにより実現する。実物の観測に基づいて決定した時間 t におけるバネの収縮 $f(t)$ を次式で定義する。

$$f(t) = \gamma e^{at} + (1 - \gamma)$$

右辺第 2 項は限界バネ収縮率である。 a は減衰係数を示し本論文では $a = -5$ とする。 $\gamma = 0.3, 0.5, 0.7$ における $f(t)$ を図 6 に示す。

(3) 力の計算

モデルの全ノードにインデックス番号 i を割り当てる。バネを収縮させることにより、力の均衡が崩れる。この時ノード i に働く力 F_i は、(1) 式で示すノード i に接続するバネによる力の総和 f_{ij} と下向

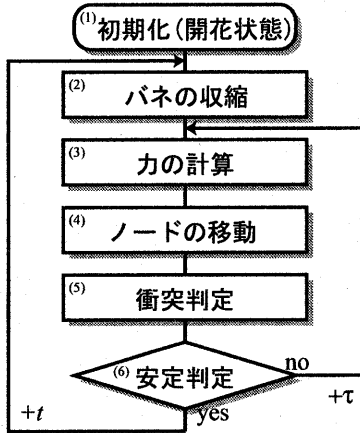


図5: 萎れ処理の流れ

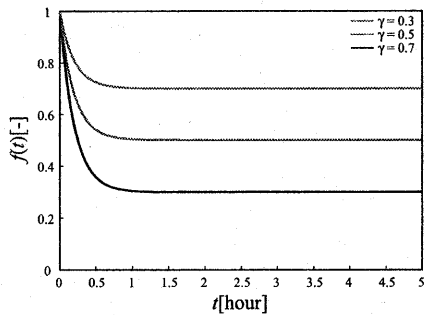


図6: バネの収縮: $f(t) = \gamma e^{-at} + (1 - \gamma)$

きの重力加速度 g における力の和である.

$$\mathbf{F}_i = \sum_j \mathbf{f}_{ij} + m_i \mathbf{g} \quad (1)$$

$$\mathbf{f}_{ij} = k_{ij} \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|} (|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j| - L_{0ij})$$

ただし, m_i はノード i の質量, \mathbf{x}_i はその変位, k_{ij} はノード i と j を接続するバネ定数, L_{0ij} はバネの自然長である.

(4) ノードの運動の計算

微小時間 τ における変位量 \mathbf{x}_i は, バネによる力 \mathbf{F}_i と粘性抵抗 c による力が働いている状態の運動方程式 (2) 式を解くことにより求まる.

$$\mathbf{F}_i = m_i \frac{d^2 \mathbf{x}_i}{dt^2} + c \mathbf{v}_i \quad (2)$$

$$c = \alpha \sqrt{k_{max} \times m}$$

(2) 式右辺の第2項は, ノードが速やかに移動を完了するダンパの役割を果たす. バネとダンパを並列してノードを接続する方法があるが, 一つのノードには様々な方向から複数のバネが接続されているため, 厳密にその挙動を解くことは困難であり, 多大な処理時間を要する. そのため, 重み係数 α を導入し, ノード自体が粘性を持っているように設定をする. ここで k_{max} は最大バネ定数である. (2) 式の解は次のようになる.

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_i^p + \left(\mathbf{v}_i^p - \frac{\mathbf{F}_i}{c} \right) \left\{ \exp\left(-\frac{c}{m_i} \tau\right) \right\} \quad (3)$$

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i^p + \left(\mathbf{v}_i^p - \frac{\mathbf{F}_i}{c} \right) \left(-\frac{m_i}{c} \right) \left\{ \exp\left(-\frac{c}{m_i} \tau\right) - 1 \right\} + \frac{\mathbf{F}_i}{c} \tau \quad (4)$$

ここで, \mathbf{v}_i はノード i の速度, \mathbf{x}_i^p と \mathbf{v}_i^p は τ 時間前のノードの変位と速度を示す.

(5) 衝突処理

アサガオはダイナミックに変形しながら萎れる. ノードを移動させた場合, 花卉の巻き込みによりノードが面を突き抜けてしまうことがある. このためノードの衝突判定を行う必要がある.

まずノードが移動する前の位置 \mathbf{x}^p と, 移動後の位置 \mathbf{x} を考える. 次に面上のある1つの頂点 \mathbf{P} と2点の内積をそれぞれ求め, 両結果の符号が同じならば面と衝突していない, 異なっていれば面と衝突していると判断する. すなわち,

$$(\mathbf{P} \cdot \mathbf{x}^p)(\mathbf{P} \cdot \mathbf{x}) > 0 \rightarrow \text{衝突なし}$$

$$(\mathbf{P} \cdot \mathbf{x}^p)(\mathbf{P} \cdot \mathbf{x}) \leq 0 \rightarrow \text{衝突あり}$$

とする. 衝突があった場合, \mathbf{x}^p から \mathbf{x} へ向かうベクトルを考え, このベクトルと面の交点 \mathbf{p} を求める [11]. 次に \mathbf{p} を含む面の法線ベクトル \mathbf{n} を求め, \mathbf{x} を \mathbf{n} に平行な面上の点 \mathbf{x}' に移動する (図7). \mathbf{x}' を面上におくのは, 花卉の先端が巻き込みにより内側の面に接した状態を表現するためである. 以上の処理により, ノードが花卉を突き抜ける現象を回避し, 花卉の巻き込みを表現することができる.

(6) 安定の判断

すべてのノードの位置変位量が0にあるとき, モデルは安定したものと見なされる. しかし実際のシミュレーションでは, 完全に安定な状態を求めるのは難しい. そこで変位誤差 δx を定義し, すべてのノードの変位量が δx より小さい場合, モデルが安定であるとする. モデルが安定していれば, 現在の

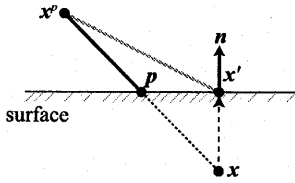


図 7: 衝突処理

収縮率ではこれ以上ノードの移動に伴う花卉の巻き込みはないと考えられるので、長期時間 t を進める。

2.5. 計算量の削減

図 5 のフローチャートにおいて (2)~(4) の処理はすべてのノードに対して処理を行う必要がある。一方 (5) 衝突判定は、すべてのノードに適用する必要はない。ここでは衝突判定を行う範囲を絞り込む方法を述べる。

萎れ処理を開始して花卉が内側に巻き込まれるとき、最初に内側の面と衝突するのは花卉先端のノードである (図 8)。そのため最初の衝突が起きるまで衝突判定は、花卉先端のノードだけに適用する。また判定処理を行う面 (セクション) は図 8 に示すように、ノードとセクションの座標を Y 軸に投影し、先端ノードと重なるセクションとする。また、一度衝突判定を行ったノードは、そのセクションを保持しておき、次の衝突判定は直前とその近傍セクションを対象として行う。

更にアサガオは下側半分は円筒形部分では上側と比べるとほとんど収縮しない。そこで処理の高速化を図るために、下半分に対するノードの移動計算を行わず固定状態にする (図 8)。

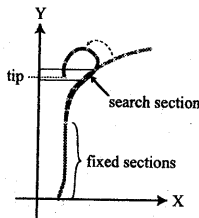


図 8: 衝突判定の探索場所

3. シミュレーション

本論文では、アサガオの全体モデルでシミュレーションを行う前に、1つの曜部モデルを用いて萎れのシミュレーションを行った。 $\gamma_o = 0.05$ と固定し、

$\gamma_i = 0.3, 0.5, 0.7$ に設定した場合のシミュレーション結果を図 9 に示す。全結果とも先端が花卉の内側に徐々に巻いていることが確認できる。また結果を比較すると、収縮率 γ_i の値が大きい方が巻き方は強くなっている。このことより、 γ を調節することにより萎れ方を調整することが可能と言える。さらに衝突判定の処理を行っているため、巻いた先端が花卉を貫いていないことが確認できた。またこれらの処理時間を表 4 に示す。ここで本実験で使用した計算機は DOS/V PC (CPU: Pentium4 1.8GHz, Memory: 256MB) である。

表 4: 曜部モデルの処理時間

収縮率		処理時間 [m]				
γ_i	γ_o	1[h]	2[h]	3[h]	4[h]	5[h]
0.3	0.05	1	1	1	4	10
0.5	0.05	0	0	1	6	10
0.7	0.05	0	0	2	5	7

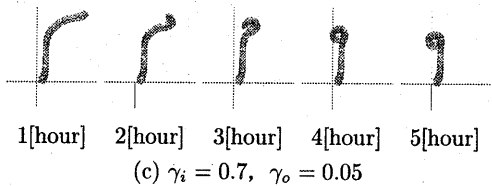
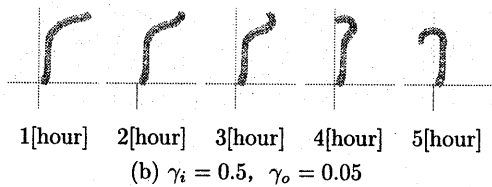
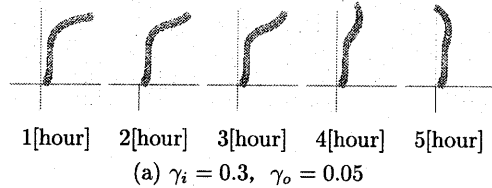


図 9: 収縮率を変化させた場合の曜部モデルの萎れ

次に全体モデルによるシミュレーションを行った。収縮率を $\gamma_i = 0.7, \gamma_o = 0.05$ としたときの結果を

図 10 に、処理時間を表 5 に示す。花卉の外輪、特に曜部の先端から徐々に萎れ、薄膜部は曜部の動作に合わせて巻かれていることがわかる。曜部モデルの実験結果と同様に収縮率が大きい程、内側に早く巻き込むことがわかる。また処理時間は 7 時間 20 分であった。

表 5: 全体モデルの処理時間

収縮率		処理時間 [m]				
γ_i	γ_o	1[h]	2[h]	3[h]	4[h]	5[h]
0.7	0.05	9	32	84	255	440

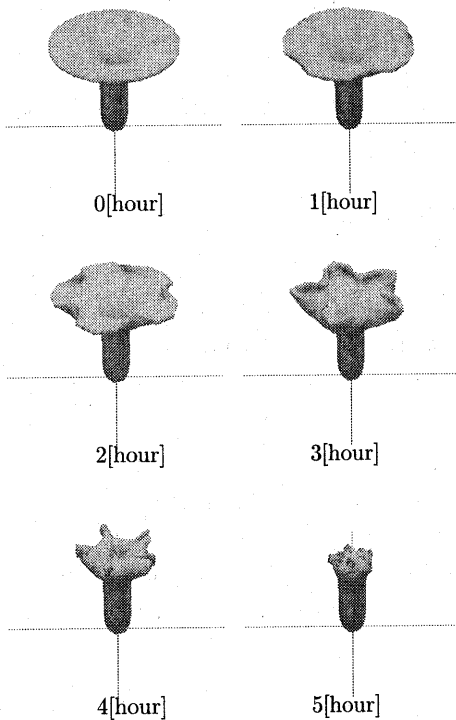


図 10: 全体モデルの萎れ ($\gamma_i = 0.7$, $\gamma_o = 0.05$)

4. まとめ

本論文では自然現象の一つである萎れ現象を実現する手法として、ダイナミックに変形しながら萎れていくアサガオを対象としたモデルを構築した。モデルはバネーマスモデルを適用した。構造は実物に

似た特徴を持たせるために曜部と薄膜部から構成し、花卉の巻き込みを行わせるために二層膜モデルとした。内と外のパネに収縮率を与えることにより実物に似た萎れを再現することができた。提案手法ではモデルの構造に 14 個のパラメータを用いた。一方、萎れ現象のためのパラメータは収縮率だけであり、容易に操作可能なモデルと言える。さらに処理の高速化を図るために、衝突判定の探索範囲の絞り込み処理を行った。

今後の課題として、処理時間の改善、蕾から開花、萎れまで一連の過程の再現などが挙げられる。

参考文献

- [1] 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, Vol. J76-D-II, No. 8, pp. 1722–1734, Aug. 1993.
- [2] 金山知俊, 阪田省二郎, 増山繁. 分岐規則を再現し, 光, ホルモンの影響を考慮した樹木の生長モデル. 信学論, Vol. J79-D-II, No. 8, pp. 1362–1373, Aug. 1996.
- [3] Przemyslaw Prusinkiewicz, Lars Mundermann, Radoslaw Karwowski, and Brendan Lane. The use of positional information in the modeling of plants. *ACM SIGGRAPH*, 2001.
- [4] 村岡一信, 千葉則茂, 高橋宏道, 三浦守. 渦場と粒子による煙や炎の 2 次元 CG シミュレーション. 信学論, Vol. J76-D-II, No. 8, pp. 1735–1745, Aug. 1993.
- [5] 続木正博, 金子豊久. 物理モデルによる水の沸騰シミュレーションとアニメーションの生成. 信学論, Vol. J81-D-II, No. 2, pp. 342–351, Feb. 1998.
- [6] 広田光一, 星野直昭, 金子豊久. 物理的モデルに基づくひび割れパターンの発生. 情報処理学会論文誌, Vol. 37, No. 12, pp. 2235–2242, Dec. 1996.
- [7] 広田光一, 加藤弘和, 金子豊久. 成長を考慮した樹皮の CG モデル. 情報処理学会論文誌, Vol. 39, No. 11, pp. 3027–3034, Nov. 1998.
- [8] 立野竜也, 寺戸育夫, 剣持雪子, 小谷一孔. 微視的・巨視的構造に基づくバラの花のフォトリアルなコンピュータグラフィックス生成 — 反射モデルと形状モデル —. 情報処理学会グラフィクスと CAD, Vol. 96-12, pp. 67–72, 1999.
- [9] 立野竜也, 剣持雪子, 小谷一孔. バラの品種と生長特性を考慮した花卉の微視的構造に基づく反射・透過モデルと CG 画像生成. 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 120-9, pp. 65–72, 2000.
- [10] Przemyslaw Prusinkiewicz and Aristid Lindenmayer. *The Algorithmic Beauty of Plants*. Springer-Verlag, 1990.
- [11] 技術編 CG 標準テキストブック. 財団法人画像情報教育振興協会, 1999.