

拘束節点による 樹木の揺らぎのシミュレーション

河野充 佐藤義人 千葉則茂
岩手大学 日立製作所 岩手大学

CGによる樹木の画像生成の試みが、形の科学から芸術の分野まで多くの観点からなされてきている。著者らの一部も、種々の建設計画、フライトシミュレータやドライビングシミュレータ、および映画の特殊撮影効果などのための景観シミュレーションへの応用を目指し、自然な樹形を生成する生長モデルの開発を試みてきている。このような目的からは、静的な樹形のみならず、枝や葉の風による自然な揺らぎの表現が重要となる。

本報告では、風による樹木の揺らぎのシミュレーション法について報告する。これは、樹木を“緩やかに拘束しあう隣接節点”からなる木構造を用いて表し、その動きのシミュレーションを行うというものである。

MOTION SIMULATION OF BRANCHES SWAYING IN THE WIND BASED ON LOOSELY COUPLED PARTICLES

Mitsuru Kono Yoshihito Sato Norishige Chiba
Iwate University Hitachi,Ltd. Iwate University

Several attempts to produce CG image of botanical trees have been made in a wide range of areas from science on from to art. One of the authors have been trying to develop a growth model of trees for producing a realistic shape of a tree which plays a vital role in the CG simulations of natural sceneries required for various applications, such as environmental assessment for large construction projects, flight simulations, driving simulations, and special effects in films. From the viewpoints of these applications, an efficient motion simulation method of branches and leaves swaying in the wind is required as well as that of the shape of a tree.

In this paper, we present a simulation method of the motion of branches swaying in the wind. The method employs a tree structure model whose adjacent nodes (i.e. particles) are loosely coupled and change their positions according to behavioral rules.

1 はじめに

これまで、CGによる樹木の画像生成の試みが、形の科学から芸術の分野まで多くの観点からなされてきている（サーベイ [千葉89] と [大野91] を参考されたい。主な文献を参考文献に示す）。筆者らの一部も、種々の建設計画、フライトシミュレータやドライビングシミュレータ、および映画の特殊撮影効果などのための景観シミュレーションへの応用を目指し、自然な樹形を生成する生長モデルの開発を試みてきている [石井86] [金丸88] [金丸90] [金丸91]。このような目的からは、静かな樹形のみならず、枝や葉の風による自然な揺らぎの表現が重要となる。これまで、頭髮や布の動きに関する研究の報告 [安生91] [中嶋89] [原島90] はあるが、樹木に関する報告はみあたらない [大野91]。

樹木の揺らぎとして以下のようなものが観察される。

- (1) そよ風による葉のみの揺らぎ。広葉樹一般に観察される。
- (2) 弱風より強い風による幹のしなるような大きな揺らぎ。特に針葉樹やポプラのように細くそびえる高木で見られる。
- (3) 強風により樹木全体がかき乱され、関連しながらも枝が独立してざわめくような揺らぎ。特に高木広葉樹で観察される。森林では、“風が走る”のが認識される。

本研究では、(2)、(3)の揺らぎに適するシミュレーション法について検討を行っている。風を必要とせず、樹木がシナリオにしたがって“自発的に揺らぐ”ようなシミュレーション法も考えられるが、(3)の風の走りを表現するためには、(a)風の生成法と、(b)風に対する樹木の揺らぎのシミュレーション法を用意しておく方がより自然で高い表現力が期待される。特に、枯葉の舞のシミュレーションや [Wej91]、炎や煙のシミュレーション [村岡91] との共存性もよい。

本報告では、(b)の風に対する樹木の揺らぎのシミュレーション法について報告する。これは、樹木を“緩やかに拘束しあう”隣接節点からなる木構造（これを節点モデルと呼ぶ）で近似し、その動きのシミュレーションを行うというものである。

2 節点モデルによる樹木の揺らぎのシミュレーション手法

2.1 節点モデル

節点モデルでは、樹木として与えられた形状を節点とそれらの緩やかな隣接関係で表す。節点は質量を持った点で、力を受けるとその力に従って行動する。節点は与えられた樹木上に動きの表現に必要な数だけ配置する。

それぞれの節点は一種の行動モデルに従って動く。節点は外力を受けるとその力に従って運動するが、隣接節点どうしは互いに近づきすぎたり離れすぎたりしないように位置関係を補正し合い、全体として樹木形状を崩さないよう行動する。

節点どうしの位置関係を保つためには、節点から節点へ力を伝達する必要がある。例えばある節点 k が、隣接節点 i から離れすぎているようなときには、節点 k は節点 i から引かれるような力を受ける。節点間の力の伝達は緩やかな接続関係によるものであり、節点の移動は、他の節点による強い拘束を受けず、ある程度自由に動くことができる。すなわち、ある時刻で受ける力にのみ依存して、その微小時間後の位置が定まる。

2.2 樹木の形状と節点の状態

樹木として与えられた形状を初期状態とする。与えられた樹木 T を以下のように表す。

$$T = \{P_T, L_T\}$$

P_T は樹木上にとった n 個の節点 p_i の集合である。

$$P_T = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$$

L_T は P_T の各点について、隣接する節点を示す隣接リストである(図2.1)。樹木が振動するとき、 P_T はシミュレーション中で座標を変更するが、樹木の位置関係を表現している L_T は変化しない。

節点 p_k は、時刻 t の位置ベクトル $p_k(t)$ 、および隣接点 p_{k_i} との距離 l_{k_i} と、方向ベクトル r_{k_i} の初期状態(安定状態とも呼ぶ) $l_{k_i}(0)$ 、 $r_{k_i}(0)$ を保持しておき、節点が隣接するそれぞれの節点に対しどれだけ初期状態からずれているかを計算するために用いられる。(図2.2)。

また、節点には自由に動ける点と、樹木の根のような動けない点があり、その情報も与える。動けない点を定節点と呼び、その節点は移動しない。

2.3 変形の検出と節点の運動の計算

節点モデルは、節点が移動することによって隣接関係が変形し、変形による復原力により節点が移動する。距離のずれや、方向のずれの検出法と、それぞれの変形による復原力を示す。また、復原力が与えられたときに節点の運動をどのように計算するかを示す。

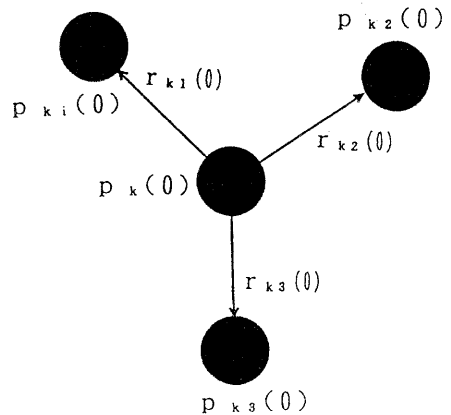
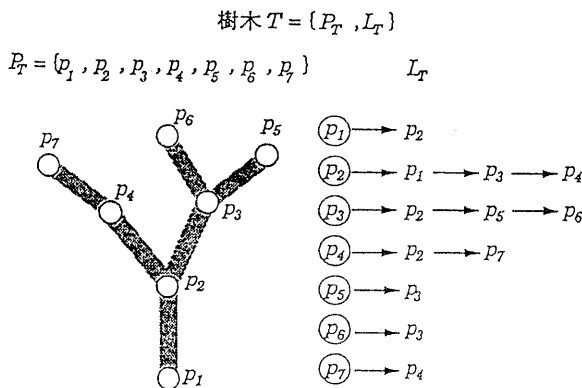
2.3.1 距離のずれ

節点 p_k と節点 p_{k_i} との距離が、初期状態(安定状態)から伸びていたり縮んでいたりしたときに、もとに戻そうとする力が働く(図2.3)。

時刻 t における距離 $l_{k_i}(t)$ と、初期状態における距離 $l_{k_i}(0)$ を比較することで、伸び縮みを考える。距離の変化を

$$d_{k_i}(t) = l_{k_i}(t) - l_{k_i}(0)$$

とする。 $d_{k_i}(t)$ が正なら、節点 p_k 、 p_{k_i} 間の距離を縮める方向へ、 $d_{k_i}(t)$ が負なら、節点間の距離を伸



ばす方向へ移動力が働く。節点 p_k に対する節点 p_{k_i} に対する移動力を $M_{k_i}^{dis}(t)$ と書くと、

$$M_{k_i}^{dis}(t) = K_{dis} d_{k_i}(t) r_{k_i}(t)$$

となる。ここで K_{dis} は定数で、距離の伸びに対する比例係数である。移動力 $M_{k_i}^{dis}(t)$ の方向は、節点 p_{k_i} から p_k へ一直線に向かう方向である。

2.3.2 方向のずれ

節点 p_k からみて節点 p_{k_i} の方向が、基準となる方向（後で説明する）からずれている場合に、基準方向へ戻そうとする力が節点 p_{k_i} に働く（図2.4）。

時刻 t における節点 p_k からみた節点 p_{k_i} の方向を $r_{k_i}(t)$ 、基準となる方向を $b_{k_i}(t)$ とする。 p_k からみて方向が $b_{k_i}(t)$ で距離が $l_{k_i}(t)$ の位置を $p(t)$ とすると、

$$p(t) = p_k(t) + l_{k_i}(t) b_{k_i}(t)$$

であり、このとき働く移動力を $M_{k_i}^{dir}$ とすると、

$$M_{k_i}^{dir}(t) = K_{mdir}(p(t) - p_{k_i})$$

となる。移動力 $M_{k_i}^{dir}$ は p_{k_i} から $P(t)$ に向かう方向で、 $P(t)$ と p_{k_i} の距離に比例した大きさとする。

以下、基準方向について説明する。方向のずれを検出するとき使用する基準となる方向は、接続している節点の本来あるべき方向を示すものであり、この方向を基準ベクトルとして求める。基準ベクトルは、節点で記憶している初期状態での接続している節点との相対的位置関係から求められる。

簡単のため3つの節点の場合で説明する（図2.5）。ある節点 p_k において、安定状態での接続している節点への方向ベクトル $r_{k_1}(0)$ 、 $r_{k_2}(0)$ の相対的位置関係を記憶しておく。今、時刻 t において p_k 、 p_{k_1} 、 p_{k_2} が運動して元の位置から変化したとする。 p_k から p_{k_1} を指す方向ベクトルを $r_{k_1}(t)$ とすると、記憶してある r_{k_1} 、 r_{k_2} の相対的位置関係より、 $r_{k_1}(t)$ に対する基準ベクトル $b_{k_2}(t)$ が求められる。つまり $r_{k_1}(t)$ と $b_{k_2}(t)$ の関係は、安定状態での $r_{k_1}(0)$ 、 $r_{k_2}(0)$ の関係に等しい。この基準ベクトル $b_{k_2}(t)$ は、 p_{k_1} から見て p_{k_2} があるべき方向を指している。同様にして $r_{k_2}(t)$ に対して $b_{k_1}(t)$ が求められる。

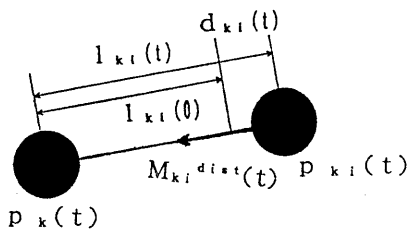


図 2.3 距離のずれ

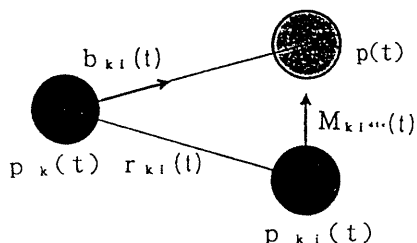


図 2.4 方向のずれ

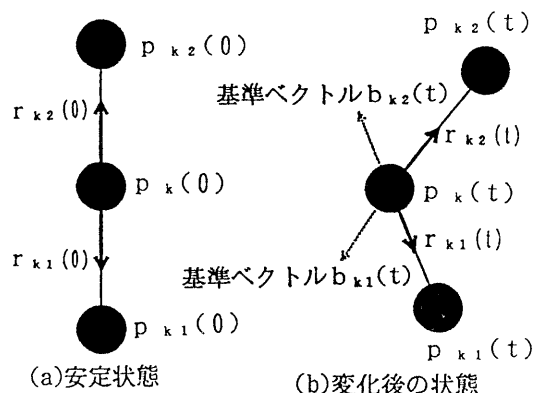


図 2.5 基準ベクトル

質点の速度を変化させる原因となる作用を移動力と呼ぶ。節点は移動力，すなわち外力と復原力を受けた場合には，質点と同じ運動を行う。

ここで，それぞれの節点に加わる移動力の計算アルゴリズムをまとめておく。

{移動力の計算アルゴリズム}

```

for それぞれの節点 $p_k$  do 移動力 $M_k(t)$ を零とする；
for それぞれの節点 $p_k$  do
  for それぞれの節点 $p_{k_i}$  do
    begin
      距離のずれによる力 $M_{k_i}^{dist}$ の計算；
      節点 $p_{k_i}$ の移動力 $M_{k_i}(t)$ に $M_{k_i}^{dist}$ を加算；
      基準ベクトル $b_{k_i}(0)$ を $p_k-p_{k_i}$ 方向に合わせる；
      for 他の隣接点 $p_{k_j}$  do
        begin
          方向のずれによる力 $M_{k_j}^{dir}$ の計算；
          節点 $p_{k_j}$ の移動力 $M_{k_j}(t)$ に加算
        end
      end
    end
  end
end；

```

2.4.3 節点の運動

ある時刻 t に節点 p_k が位置 $p_k(t)$ にあり，速度 $V_k(t)$ で運動しているとする。同じ時刻 t に節点 p_k に対して，移動力 $M_k(t)$ が与えられたとする。このときに，時刻 $t+dt$ における節点 p_k の位置 $p_k(t+dt)$ を求める。ここで dt は 1 タイムステップの間隔であるとする (図 2.6)。

このとき，加えられた移動力によって節点 p_k に加速度が生じる。この加速度を $a_k(t)$ とすると，

$$a_k(t) = \frac{M_k(t) - K_{air} V_k(t)}{m_k}$$

として計算する。

ここで節点は空気抵抗を受けるとし，空気抵抗は節点の速度に比例するとしている。 $K_{air} V_k(t)$ は空気抵抗による減衰力を表し， K_{air} は定数係数である。また m_k は節点 p_k の質量とする。上式で計算した $a_k(t)$ を用いて，時刻 $t+dt$ における速度は次のように計算できる。

$$V_k(t+dt) = V_k(t) + a_k(t)dt$$

さらに， dt 時間後の節点 p_k の位置を計算すると，

$$p_k(t+dt) = p_k(t) + V_k(t+dt)dt$$

となる。

以上のような計算により， dt 時間後の節点の位置を求める。

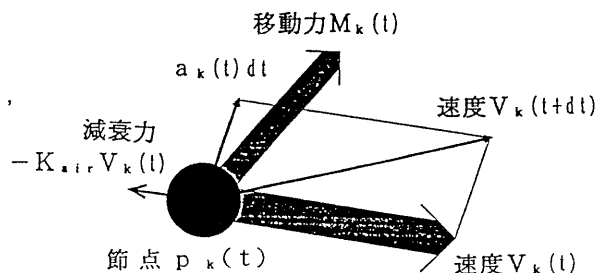


図 2.6 節点の運動

3. シミュレーション例

図3.1-図3.3にシミュレーション例を示す。図3.1と図3.2は棒状の物体であり、図3.3は木構造をした物体である。いずれも、左から右へ時間経過に応じた形状を示している。それぞれの条件は右表のようである。

	節点数	風	K_m^{dir}
図3.1	10	(1)	20
図3.2	10	(1)	10
図3.3	29	(2)	20

K_m^{dir} は方向のずれの修正に対するパラメータである。なお、風は以下のものを示す。

- (1) ある時刻から、風力風向が一定の風が吹き、しばらく後吹きやむ。
- (2) ある時刻から、風向一定で、風力がサインカーブ状に変化する風が吹き、しばらく後吹きやむ。

図3.1と図3.2からは、期待される K_m^{dir} の効果が確認できる。図3.3からは、木の枝の場所による風を受ける時刻のずれが形状変化に表れていることが確認できる。

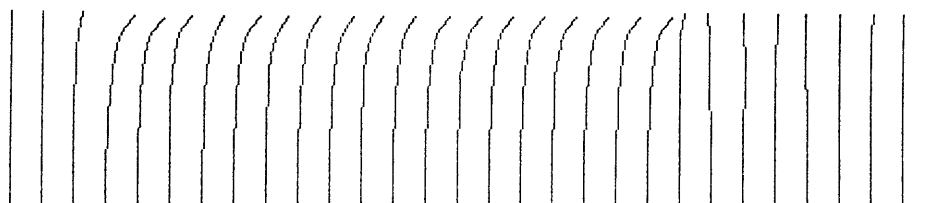


図 3.1 節点 10個 (a)

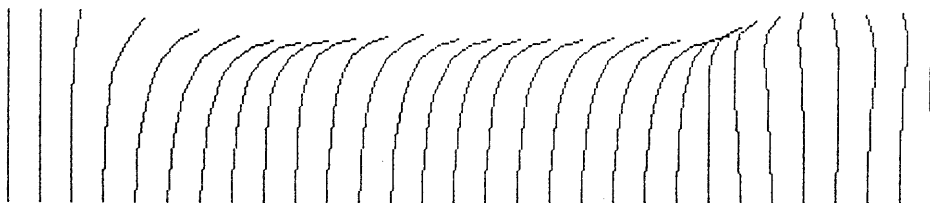


図 3.2 節点 10個 (b)

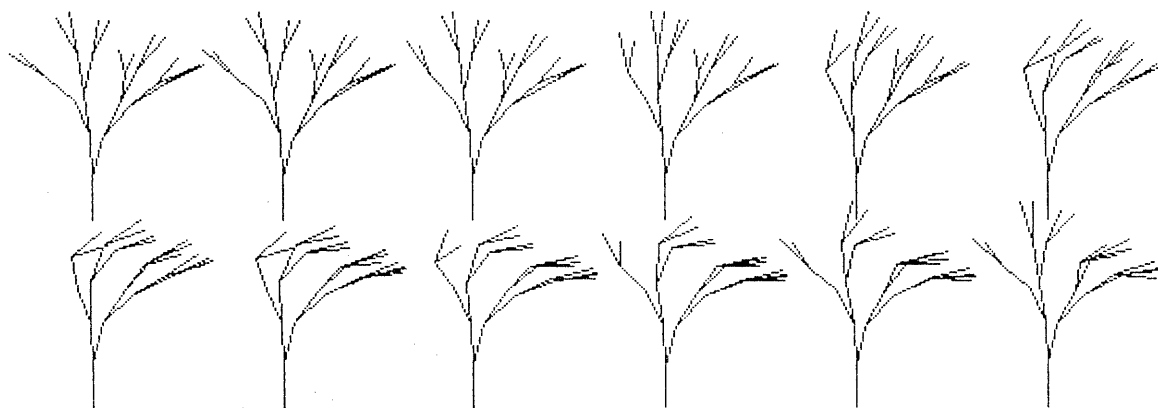


図 3.3 節点 29個

4 おわりに

本報告では、CGのための樹木の揺らぎのシミュレーション法の開発を目的とし、緩やかに拘束しあう隣接節点からなる木構造である節点モデルによるシミュレーション法を提案した。

今回は、風向き一定の風に対する揺らぎのシミュレーション例のみ示した。実際は、風向き一定の風をあてたととしても、樹木との衝突により風自身の方向や強さが場所により複雑に変化する。そのため、それぞれの枝が関連しながらも独立に揺らぐような複雑な運動が生じる。これらは、樹木による風への影響を無視するにしても、少なくとも複雑な風の場（乱流場）を用意し、その中での樹木の振舞いをシミュレーションする必要がある。この点について、現在検討を行っている。

また、与えられた形状モデルに対する、節点と各パラメタの自動設定法も検討する必要がある。与えられた樹木の形状モデルが枝同士の交差をもたないものでも、揺らぎのシミュレーションにより、枝の交差や通り抜けが生じることがある。このような干渉の効率的な検出法も重要となる。

参考文献

- [出原74] 出原栄一, コンピュータによる樹木の成長シミュレーション, 数理科学, 132, 1974年6月, 34-38
- [本多78] 本多久夫, 樹木の幾何学的模型, 数理科学, 184, 1978年10月, 18-25.
- [本多81] 本多久夫, 樹木の分岐, 数理科学, 221, 1981年11月, 51-57.
- [出原83] 出原栄一, 樹木, 築地書館, 1983.
- [Aon84] M. Aono, T. L. Kunii, Botanical Tree Image Generation, IEEE Computer Graphics & Applications, May 1984, 10-34.
- [Gar84] G. Y. Gardner, Simulation of Natural Scenes Using Textured Quadric Surfaces, SIGGRAPH '84, 11-20.
- [Smi84] A. R. Smith, Plants, Fractals, and Formal Languages, SIGGRAPH '84, 1-10.
- [Blo85] J. Bloomenthal, Modeling the Mighty Maple, SIGGRAPH '85, 305-311.
- [本多85] 本多久夫, 樹形の三次元モデル, Science on From, 1(1), 1985, 85-94.
- [Ree85] W. T. Reeves, R. Blau, Approximate Probabilistic Algorithms for Shading and Rendering Structured Particle Systems, SIGGRAPH '85, 313-322.
- [石井86] 石井啓資, 千葉則茂, 斎藤伸自, 自然の画像生成 木の手続き的形狀定義法, 情報グラフィックスとCAD, 86-CAD-21, 1986年5月.
- [奥村86] 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), Science on From, I:2(1), 1986, 59-88. II:3, 1988, 127-141.
- [Opp86] P. E. Oppenheimer, Real Time Design and Animation of Fractal Planets and Trees, SIGGRAPH '86, 55-64.
- [金丸88] 金丸直義, 千葉則茂, 斎藤伸自, CGのための樹木の生長モデル, 第4回NICOGRAPH, 30-38, 1988.
- [中嶋88] 中嶋正之, 福田智美, 安居院猛, 景観表示のための樹木の生成方法, 第4回NICOGRAPH, 22-29, 1988.
- [Pru88] P. Prusinkiewicz, A. Lindenmayer, J. Hanan, Developmental Model of Herbaceous Plants for Computer Imagery Purposes, SIGGRAPH '88, 141-150.

- [Ref88] P. de Reffye, C. Edelin, J. Francon, M. Jaeger, C. Puech, Plant Models Faithful to Botanical Structure and Development, SIGGRAPH' 88, 151-158.
- [千葉89] 千葉則茂, 樹木・草本の生成に関する研究動向, 情処グラフィックスとCAD, 89-CAD-40, 1989年8月, 81-86.
- [GRE89] N. Greene, Voxel Space Automata: Modeling with Stochastic Growth Processes in Voxel Space, SIGGRAPH '89, 175-184.
- [戸川89] 戸川隼人, 花のCG, サイエンス社, 1988.
- [中嶋89] 中嶋正之, 三輪喜良, 安居院: 確率モデルによる頭髪の動きの表現
- [井上90] 井上秀紀, 江島俊郎, 小谷一孔, 宮原誠, 様々な自然物に適用できる樹木の形状定義法, 情処グラフィックスとCADシンポジウム, 1990年11月, 157-166.
- [金丸90] 金丸直義, 高橋清明, 千葉則茂, 斎藤伸自, 向日性による樹木の自然な枝振りのシミュレーション, 情処グラフィックスとCADシンポジウム, 1990年11月, 167-175.
- [Pru90] P. Prusinkiewicz, A. Lindenmayer, The Algorithmic Beauty of Plants, Springer Verlag, 1990.
- [原島90] 原島博, 小林誠司, 森島繁生: 糸状物体の質感および運動の表現
- [大野91] 大野義夫, 植物を対象とするCG技術の研究動向, 情報処理学会研究報告, 91-CG-52, 1991年8月, 13-18.
- [大崎91] 大崎恵一, 山本寧, 鈴木悌司, 佐藤創, 樹形モデルを用いた針葉樹の表現, グラフィックスとCAD, 91-CG-52, 1991年8月.
- [春口91] 春口巖, 関数形式による樹木モデリングシステム, グラフィックスとCAD, 91-CG-52, 1991年8月.
- [乃万91] 乃万司, 植物の生長/非生長モデル 環境の影響の非生長的表現に向けて, グラフィックスとCAD, 91-CG-52, 1991年8月.
- [金丸91] 金丸直義, 高橋清明, 千葉則茂, 斎藤伸自, 潜伏芽と力枝を考慮した樹木の生長モデル, 情処グラフィックスとCAD, 91-CG-52, 1991年8月.
- [戸川91] 戸川隼人, (ファジー+スケルトン)オブジェクトによる日本画適表現, 情処グラフィックスとCAD, 91-CG-52, 1991年8月.
- [安生91] 安生健一, 宇佐美芳明, 栗原恒弥, 3次元コンピュータグラフィックスによる頭髪表現, 情処グラフィックスとCADシンポジウム, 1991年11月, 127-134.
- [村岡91] 村岡一信, 渡邊俊臣, 守田空悟, 千葉則茂, 三浦守, 渦場による炎の延焼のCGシミュレーション, 情処グラフィックスとCADシンポジウム, 1991年11月, 219-225.
- [Wej91] J. Wejchert, D. Haumann, Animation Aerodynamics, NICOGRAPH' 91.
- [Bre91] D. Breen, Coupled Particles: An Application, NICOGRAPH' 91.