

# 複合現実型アトラクションのための自然落下物表現法

一刈良介<sup>\*1</sup>, 木村朝子<sup>\*1</sup>, 柴田史久<sup>\*1</sup>, 田村秀行<sup>\*1</sup>

**Modeling and Representation of Falling Natural Objects in Mixed Reality Attractions**

Ryosuke Ichikari<sup>\*1</sup>, Asako Kimura<sup>\*1</sup>, Fumihisa Shibata<sup>\*1</sup>, and Hideyuki Tamura<sup>\*1</sup>

**Abstract** — Compared with visual effects in movies or full CG animations, Mixed-Reality based content production, a technique to overlap CG image with real world scene, demands more strict real-time representation and consistency with real environment. Natural phenomena are sometimes too complicated to describe in MR environment by physical modeling. We pick up “Falling Natural Objects” such as cherry blossoms, autumn leaves and snow to represent for stage effects. We proposed an effective method to approximate movements of fluttering natural objects by normal random walk. A simulation confirmed that the proposed method was also adaptable to wind change and different CPU load to represent various polygon size objects.

**Keyword** : Mixed Reality, Physics-based Modeling, Real-time Rendering, Random Walk, Interaction

## 1. はじめに

現実空間と仮想世界を違和感なく融合する複合現実感 (Mixed Reality; MR) [1] [2]は, 医療・福祉, 建築・都市設計, 工業製品の設計・組立の分野で実用化が進む一方, アート&エンターテインメント分野からも大きな期待が寄せられている. MR空間を活用した先駆的なゲームやインタラクティブアート [3][4] が引き金となり, 既に高級ショールームや愛知万博の体験型アトラクションとして採用されるに至っている[5]. 今後様々な複合現実型コンテンツが開発されて行くと予想される.

となると, コンテンツのレベルアップのためには, 単に目の前の光景に CG オブジェクトを発生させる面白さだけでなく, 他の映像コンテンツで利用される演出効果も取り揃えておくことが望ましい. 例えば, 背景に花吹雪や落葉の様子など, 季節感を出すのに自然落下物を加えることなどが考えられる.

しかるに, 映画や CF の VFX(Visual Effects)としての「実写映像と CG 映像の合成」に比べると, MR コンテンツでは実時間対話体験で用いるという制約が表現上の大きな障害となる. いかにコンピュータが速くなったとはいえ, 花びらや葉の1つ1つの落下運動を, 空気抵抗を考えて正確な物理的

計算で実時間描画するのは, 現時点では極めて困難であるといえる.

落下運動の表現手法として, 既発表の文献では, 映像から花びらの動きを分析しニューラルネットによる学習を用いた例[6]はあるが, 実時間制限のある MR 環境下での描画実行を前提としたものではない. CG アニメーション映画では花びらが舞うシーンはよく見られるが, 映画制作では実時間描画は要求されていない. オフライン作業で適宜手付けのアニメーションにより実現されていると考えられる. 一方, ビデオゲーム分野においても自然落下物の表現が考えられるが, これまで顕著な例はなく, 文献も公表されていない.

季節感を与える CG 映像生成法としては, 積雪場面のシミュレーションが既に試みられている [7][8]. 数は少ないが雪が降る様を描いた研究もある. Wang ら[9]は雪のパターンのテクスチャを円錐の内側にはり, カメラを動かすことにより降雪過程を表現したが, 雪の結晶1つ1つの動きはあまりリアルとは言えない. 一般的には, パーティクル法によってマクロな視点から自然現象を描くことも盛んだが, 落下物を受け止めたり, 体験者の動作が落下物に影響を及ぼすといったインタラク션을演出したい MR アトラクションには不向きである.

本研究の目的は, 自然落下物をあらゆる自然条件下で正確に表現することではなく, MR 環境下でそ

\*1 立命館大学大学院理工学研究科

\*1 Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

れらしく見える演出効果としての自然現象表現法を開発することにある。そこで、まずMRアトラクションが満たすべき一般的な要件を分析・整理した。それらの要件を満たす表現方法として、本研究では正確な物理モデリングには頼らず、確率過程を用いた近似的な手法で自然落下物を描写でき、かつ要素オブジェクトと対話的操作可能な方法（カーリー(Karlie)法）を考案した。

本論文では、まず演出効果として最も要望の多い、桜花の散る様子を表現するのにこの方法をいかに適用するかについて述べる。ついで、これを拡張発展させることで、紅葉や雪の落下現象の表現にも対応できることを確認し、本手法の表現能力の高さを実証した。

## 2. MRアトラクションに求められる要件

3D-CG映像を駆使した体験型アトラクションを制作する上で、MR環境での実現には以下のような諸条件を考慮する必要があると考えられる。

### (1)実時間レンダリングとリアリティ

複雑な自然現象をできる限り写実性を高めた視覚効果として加える上での最大の障害は、実時間描画という絶対的制約である。さらに、単独で描画精度を保つだけでなく、他のオブジェクトやイベントの負荷に応じて、描画のレベルを制御できる方式でなくてはならない。

### (2)実世界の有効利用と整合性

MRは現実世界の事物や背景を利用できることが最大の特長であるから、それを有効利用する演出が好まれる。その分、仮想物体と現実物体の幾何的・光学的整合性が要求され、設置現場の環境への適応性も求められる。

### (3)タンジブル・インタフェースの活用

体験型アトラクションとしては、実際に手に取って操作できたり、操作結果が直感的に知覚できるタンジブル・インタフェースを導入することが望まれる。したがって、そうした対話デバイスで仮想物体を操作できるような表現方法を採用することが必要となってくる。

### (4)共同体験者とのコラボレーション

単独利用者での利用も考えられなくないが、複数人の同時体験、相互に影響を及ぼし合う実現形態が好まれる。この場合、ある体験者の視野内に別の体験者が登場するので、それを考慮した表現方法にならざるを得ない。それならば、むしろ体験者間でのインタラクションを積極的に許すような方式のアトラクションであることが望まれる。

## 3. ランダムウォークを用いた落下現象の表現

### 3.1 MR環境下でのモデル化の検討

演出効果として採用するに足る自然物の落下現象は、舞散る花びらや落葉のように、空気抵抗や風の影響を受けやすい物体であって、重力に従って一気に落下する物体ではない。花びらなどは、無風もしくは微風状態では、横方向つまり水平方向にぶれながら不規則に動く。こうした落下物体の動きを表現するのに、重力や落下物体の各箇所にかかる力を物体毎に正確に計算するには膨大な計算量が必要な上に、時々刻々変化する風の影響は正確にモデル化することすら難しい。

本研究では、実時間描画という制約条件下での実現のために、落下物体の各粒子の位置を把握しながら、その粒子の動きを確率変数を用いて近似する方法を採用する。

### 3.2 確率変数とランダムウォーク

#### 3.2.1 ランダムウォーク

確率変数による時系列の数値の変動を扱うものは確率過程と呼ばれる。確率過程の中で、株価の値動きなど不規則に揺らぎながら変動するものを扱うには、「ランダムウォーク」というモデルを用いるのが一般的である[10]。日本語では「酔歩」と訳されるように、ふらつく酔っ払いの千鳥足のような軌跡を示す。我々は確率過程が花吹雪のような現象の近似的表現に適していると考えた。本研究では、落下物の平行移動にランダムウォークを採用し、回転運動もそれに関連付けた独自の手法を考案した。

「ランダムウォーク」とは、現在時刻からの移動量を確率変数により決定する確率過程で、離散的な数列を生成できるモデルは次式で表現される。

$$X_t = X_{t-1} + \varepsilon_t, \quad \varepsilon_t \sim \text{iid}(0, \sigma^2) \quad (1)$$

ここで iid とは、確率変数  $\varepsilon_t$  が同一の分布に従い、独立であることを意味し、(1)式では標準偏差  $\sigma$ 、平均値 0 の分布をもつことも示している。

この種の確率過程でよく用いる乱数の種類には、一様乱数と正規乱数がある。

一様分布では定義した値域のどの値も発生確率は同確率であるが、ランダムウォークへの適応を考えると、次にどこに移動するのも同確率というのは不自然である。

一様乱数と比べての正規乱数は、期待値に近いほど高い確率で発生する乱数である。中心極限定理から多数の確率変数の和は正規分布に従うことが知られている。本手法ではさまざま要因により揺れ動く落下物をシミュレーション対象にしているため、このような落下物の揺れの移動量は正規分布に

従っていると考えられる。

これを確かめるため、実際に一様乱数と正規乱数をランダムウォークの確率変数に適用して、フレーム間移動量の違いを検討した。

表1 乱数の違いによる移動量の比較

移動量	一様乱数	正規乱数
時刻 1	22.595794	13.740404
2	11.222372	12.261904
3	14.427442	13.477576
4	15.150301	10.836201
⋮	⋮	⋮
t	16.762307	20.850414
平均	17.6419978	13.5122057

空気抵抗の影響が大きい落下運動では、 $z$ 座標の移動は一定（等速度運動）で、 $x, y$ 座標に関してランダムウォークによる移動（ゆらぎ）が生じると考え、その1回の移動における移動量を比べた。一様乱数の値域は正規乱数の $\pm 3\sigma$ とし、正規乱数には分散1、平均0の正規乱数を用いた。表1から分かるように、正規乱数を用いた方が平均移動量は少ない。平均移動量が少ない方が自然な落下運動であると考えられる。またMRシステムを用いて視覚的に比較評価を行ったところ、正規乱数を用いた方が花びらの落下表現として自然であった。以上より本手法のモデルでは正規乱数を採用する。

### 3.3 桜の花びらの落下のモデル化

#### 3.3.1 桜の花びらの落下の特徴

まず、演出効果として最も要望の多い桜吹雪を実現するのに、図1のようなCGモデルを落下現象の粒子とした。



図1 桜の花びらのCGモデル

Fig.1 Petal of cherry blossom (CG model)

実際に桜の花びらが散り、風に舞う様を観察すると、酔歩的な移動と激しい回転運動を伴っている。人間には無風と感じる状態では、大きな空気抵抗を受けて落下するため、重力による等加速度運動はせず、ほぼ等速度で落下する。酔歩平行移動と回転運動は独立ではなく、回転がない時、ランダムに平行

移動を起こしているように見える。これは、空気抵抗によるある一定の力が、花びらの回転か平行移動のどちらかに振り分けられるためであると予想される。一方、風の影響は独立で、上記の落下現象に風のベクトルを加えることで表現できると考えられる。

#### 3.3.2 桜の花びらの平行移動のモデル

平行移動のモデルとして、式(1)を拡張した次式(2)(3)(4)を用いる。花びらは、 $x, y$ 方向の水平面内でゆらいで酔歩移動をし、 $z$ 軸方向に一定速度で落下するものとし、ここに風の影響が加わる。 $t$ は時間、 $X_t, Y_t, Z_t$ はそれぞれ花びらの $x$ 座標、 $y$ 座標、 $z$ 座標とする。

$$X_t = X_{t-1} + \varepsilon_t + w_x, \varepsilon_t \sim \text{NID}(0, \sigma^2) \quad (2)$$

$$Y_t = Y_{t-1} + \varepsilon_t + w_y, \varepsilon_t \sim \text{NID}(0, \sigma^2) \quad (3)$$

$$Z_t = Z_{t-1} - b + w_z \quad (4)$$

ここで、NIDとは、確率変数がiidであり、かつ正規分布に従うことを表す。また、 $\sigma$ とは正規乱数の任意の標準偏差、 $b$ は毎フレームあたりの落下量、 $w_x, w_y, w_z$ はそれぞれ風の影響の $x, y, z$ 方向成分を示す。ただし、 $b$ は各花びらでは固定値だが、多数の花びらでは乱数により変化させる。

#### 3.3.3 桜の花びらの回転のモデル

花びらの回転運動は、酔歩平行移動が起こっていない時に生じると考え、次式(5)で時刻 $t$ における回転量と $R_t$ を定義した。

$$R_t = S_{\max} - \|Mr_t - Mr_{t-1}\| \quad (5)$$

ここで、 $Mr_t$ は時刻 $t$ における移動のベクトル、 $S_{\max}$ は最大の回転量である。即ち、乱数による平行移動量の変化が少ない時に激しく回転する。このようにして、回転量もランダムウォークと相関関係も持っている。

花びらの回転運動は慣性が大きく、同じ方向に連続して回転しているように見えるので、中心軸は各花びらで固定し、落下開始時の花びらの向きは一様乱数でランダムに分布させた。

### 3.4 更新時間の差の調整

以上のモデル化で、パラメータを調整すれば桜花の散る様子は近似的に表現できるが、桜花単独でなく他のCGオブジェクトが存在してCPU負荷が増す場合には、花びらの動きは不自然になる。これはアニメーションの設定を単位時間当たりの変化ではなく、フレーム毎の変化として設定しているからである。

この問題を解決するには、描画更新時間（フレー

ムレート)に対応した移動量を各フレームで移動させれば,以下のように調整することで単位時間当たりの移動量が一定にできる.

現在のフレームレートを  $f$  とし, 基準フレームレートを  $f_0$ , 基準の移動量を  $Mv_0$ , 基準の回転量を  $R_0$  とすると, 次式によって時間調整済みの落下移動量  $Mv$ , 回転量  $R$  が求められる.

$$Mv = Mv_0(f_0 / f) \quad (6)$$

$$R = R_0(f_0 / f) \quad (7)$$

ただし, 水平方向の移動量の調整に関して, この方式を用いると, 移動後の座標値の分散が変化してしまうので, 次のように分散を調整する.  $f_0 / f$  を  $a$  とおき,  $X_t$  を基準移動量でのランダムウォーク,  $X'_t$  を調整した移動量でのランダムウォークとすると, 次の式(8)の結果が得られる.

$$\begin{aligned} E(\varepsilon_i^2) &= \sigma^2, E(\varepsilon_i \varepsilon_j) = 0 \text{ より} \\ \text{Var}(X'_{t/a}) &= E(X'_{t/a} - X_0)^2 \\ &= E(\sqrt{a}\varepsilon_1 + \sqrt{a}\varepsilon_2 + \dots + \sqrt{a}\varepsilon_{t/a})^2 \\ &= aE(\varepsilon_1^2) + aE(\varepsilon_2^2) + \dots + aE(\varepsilon_{t/a}^2) \\ &\quad + \sum_{\substack{i=1, \\ i \neq j}}^{t/a} \sum_{j=1,}^{t/a} E(a\varepsilon_i \varepsilon_j) \\ &= \sigma^2 a t / a = \text{Var}(X_t) \end{aligned} \quad (8)$$

これは, 移動量  $\varepsilon_i$  にフレームレートの比率  $a$  ( $= f_0 / f$ ) の平方根を乗じて, そのランダムウォークの期間を  $t/a$  とした時の末期での分散は, 基準の末期の分散と一致させることができることを意味している.

以上まとめると, 基準の水平方向移動量を  $Mh_0$  とすると, 水平方向の調整後の移動量  $Mh$  は次式で表わせる.

$$Mh = Mh_0 \sqrt{f_0 / f} \quad (9)$$

## 4. MR アトラクションへの実装と評価

### 4.1 Cherry Blossom Cyberview とそのシステム構成

前節で述べた桜花の落下現象を表現する方法を「カーリー(Karlie)法」と名付け, MR アトラクション Cherry Blossom Cyberview [11] に実装して, モデルの妥当性も評価した. このアトラクションでは, 室内に置いた実物の木の幹をビデオシースルー HMD を通して眺めると, CG で描いた枝と満開の桜が重畳描画されて見える. さらに, MR 空間全体に吹く一定の強さと方向の風を与えて, その効果を花吹雪に反映させることができる(図 2). また, 後述する扇子を用いて花びらに影響を及ぼす MR インタラクションも体験できる.



図 2 Cherry Blossom Cyberview の客観視点

Fig.2 Objective point of view of Cherry Blossom Cyberview

この MR コンテンツは, キヤノン製 MR プラットフォーム・システム (MRPS) の複数人同時体験可能なマルチユーザ・タイプ上に構築されている. MRPS の特長は, 小型ビデオカメラを内蔵したビデオシースルー HMD (Canon VH-2002) を利用し, 幾何学的位置合わせに物理的な位置姿勢センサとマーカ識別のハイブリッド方式を採用していることである. ここでは, 体験者の HMD と手にする扇子デバイスの位置姿勢検出に Polhemus 社の磁気センサ 3SPACE FASTRAK を使用した. マーカとして, 実物の木の幹と支柱部に, 比較的簡単な色マーカを配置した.

## 4.2 MR 空間におけるインタラクション

### 4.2.1 デバイスの仕組み

MR アトラクションの大きな特長の 1 つは, 体験者と複合現実空間との実時間インタラクションが可能なことである. また, 体験者の起こす行動が, 複合現実空間にその場で影響を及ぼすことは, MR コンテンツの臨場感を増す効果にも繋がる. 特に, 実物体に触れるという行為とそれを視認・体感できることが, 受身的な映像エンターテインメントにはない大きな魅力を生むことに繋がっている.

MR アトラクションでのインタラクションには, なるべく直観的に対話デバイスを操作できることが望ましい. 本手法では, 自然現象と物理法則を再現し, 以下のようなインタラクションを考案し, これを実現した.

- 落下する花びらに扇子をかざすと拾うことができる.
- 扇子に花びらを乗せている時に, 扇子を傾けると乗せていた花びらが再び落ちる.
- 扇子を扇ぐと風が発生して, 風に吹かれた花びら

は風の方向に飛ばされる。

#### 4.2.2 扇子型対話デバイス

対話デバイスとして位置姿勢センサをつけた扇子を利用した。この扇子の外観と座標系を図3に示す。この画像から分かるように、扇子のセンサ座標系では、扇子の要から扇の弧の midpoint に向かう方向を X 軸、扇子の表面から垂直方向を Z 軸とし、センサがついていない側を正とする。また X 軸、Z 軸のどちらに対しても垂直な方向を Y 軸とする。

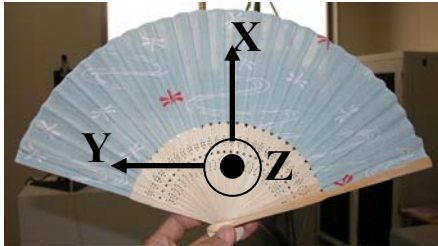


図3 扇子とセンサ座標系

Fig.3 Folding fan and sensor coordinate

#### 4.2.3 キャッチ&リリース

実世界の重力による影響を再現して、落下物（ここでは花びら）を扇子デバイスでキャッチし、傾けることで再び落下させるインタラクションを実現した（図4）。このインタラクションでは、CG物体の3次元位置と扇子の位置姿勢を用いて、扇子が上を向いている時にCG物体が降って来れば扇子上に花びらが堆積し、扇子の傾きが一定値以上になるとこれを解放する。



図4 扇子デバイスによるインタラクション  
(上：キャッチ，下：リリース)

Fig.4 Interaction by using folding fan

(Top: catch, Bottom: release)

#### 4.2.4 扇子で風を起こす

扇子を扇ぐことにより風が起こり、CG物体を風の方向に飛ばすインタラクションを実現した。まず、扇子のスピードが閾値を超えたことを検知することにより、風の発生とする。この時、風が吹く範囲にあるCG物体は飛ばされることとする。その範囲は距離と角度で決定し、扇子の位置姿勢とCG物体の位置により、影響を受けるCG物体を決める。影響範囲を図5に示す。その影響とは風の方向への平行移動である。

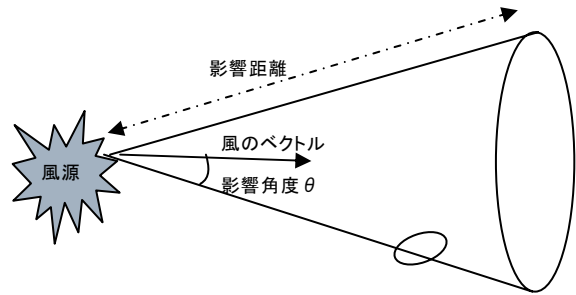


図5 風とその影響範囲

Fig.5 Cone of influence by wind

#### 4.3 カーリー法の妥当性の評価

Cherry Blossom Cyberviewでは、パラメータ設定は試行錯誤的に行なった。花びらの長径1.5cm、ランダムウォークの標準偏差 $\sigma = 8$ 、落下速度の平均値 $b = 12\text{mm}/\text{フレーム}$ で、かなり自然な振る舞いの落下現象が表現できた。

本研究で開発したカーリー法では、負荷に応じてフレーム間の落下量や水平移動量、回転量を変化させることができる。その調整結果を、以下表を用いて説明する。

表2では、落下量の標準偏差と平均を負荷と調整の有無ごとに示している。また、フレームレート(フレーム/秒)の違いによる $x, y$ 座標値の時刻における標準偏差の調整結果を表3に示す。高負荷のフレームレートは約10、低負荷のフレームレートは約25である。表2では調整をしても落下スピードを一定に保っていることが分かる。同様に回転量も調整できる。表3から同じ位置であると考えられる100期と250期の標準偏差がほぼ同じであることがわかるので、フレームレートが違っていても散らばり具合が同じであることが分かる。実際のフレームレートは、花びら50枚を満開の桜の木と共に描画した場合は約12、花びらの落下のみだと約25であった。

自然らしさを与える表現法は、定量的に評価を下すことが難しく、なるべく多くの人々に体験してもらい満足度を向上させて行く必要がある。本研究では、研究室の見学者に体験してもらい、その感想を

もとに手法を改善して完成度を向上させた。その振舞いは Web サイト[12]に上げた動画で観察することができる。実際には両眼立体視しているのもっとリアリティは高い。

さらに、より客観的な評価を得るべく、本学会第9回大会（於京都大学、2004年9月）で技術展示を行なった。約200名のVR/MRの専門家が体験されて、違和感のない動きであると高い評価を得、大きな不満はなかった。扇子デバイスによるインタラクションに関しても、仮想の重力や風の存在を体感することができたという評価を得た。

表2 負荷に依存しない落下スピードの調整結果 (単位:mm/s)

Table2 Result of speed adjustment

	低負荷調整 有り	低負荷調整 無し	高負荷調整 有り	高負荷調整 無し
標準偏差	0.00094148	1.81296595	0.00059518	0.74957435
平均	120.000106	300.644322	120.000088	119.7075

表3 標準偏差の調整 (単位:mm)

Table3 Adjustment of standard deviation

	10fps	25fps
100期	78.8867	51.62375
150期	-	58.21557
200期	125.0103	66.91784
250期	-	78.17054
300期	155.6313	88.19373

## 5. 他の季節感を与える落下現象への適用

### 5.1 紅葉の舞い落ちる現象の演出

#### 5.1.1 紅葉の落下の特徴

桜の花を描くのに威力を発揮したカーリー法を、他の季節感を表わす自然物落下現象に適用することを試みた。桜花に続いて要望が多いのは、秋を彩る楓の葉の紅葉とそれが落葉する様である。

実際にこの落葉の様子を熟視して観察したところ無風もしくは微風状態で、桜花と同様にゆらゆらと舞い、ランダムウォークと考えられる平行移動を呈しながら落下していた。ただし、回転運動に関してはかなり様子が異なり、表裏面が逆転するような前後回転(pitching)することはなく、ほぼ同一面を上方に向け、水平面での回転(yawing)と回転軸を若干傾ける運動(rolling)が観察された。これは、桜の花びらに比べて、楓の葉は表面積も質量も大きく、また柄の部分が対称軸となり前後回転が起きにくいためと考えられる。

#### 5.1.2 平行移動と回転のモデル

桜の花びらと紅葉の葉の落下の特徴は似ているので、平行移動のモデルに桜の花びらと同様に式(2)(3)(4)を用いる。ぶれ量を示すパラメータ $\sigma$ の値の変更を行うだけで、紅葉の落下時の移動をうまく表現することができた。また、経験値として得たパラメータ $\sigma$ は花びらと楓の葉の長径にほぼ比例することも判明した。

平行移動量と回転量の関係を考えるモデルとしては、桜花で考えた式(5)を用いる。ただし、桜花の落下の際の回転軸は花びらごとにランダムに与え、落下中は変化しないものとした、楓の葉の場合は回転軸が時間的に変化するモデルを採用する。

観察で得た楓の葉の回転特徴を反映させるには、回転軸を示す3次元ベクトルの $z$ 値を $x, y$ に比べて相対的に大きくすることにより、 $z$ 軸方向に偏った回転軸が実現できる。回転軸 $V_r$ は、一様分布に従う確率変数を $Rn_x, Rn_y, Rn_z$ とし、式(10)のように表現した。

$$V_r = (Rn_x/10, Rn_y/10, Rn_z) \quad (10)$$

#### 5.1.3 紅葉のCGモデルと落下の様子

楓の紅葉には、図6のCGモデルを用いて表現した。桜の花びらは大きさ一定のものが多数咲いていても違和感を感じなかったが、紅葉の場合には、柄の部分を除く長径4.5cmのものを基準に、0.8~1.2倍の範囲で正規乱数によって大きさを変化させたものを用いて、見た目の均一さを避けた。



図6 楓の紅葉のCGモデル

Fig.6 Maple leaf (CG model)

Cherry Blossom Cyberviewをベースとして、枝と葉を楓に変え、上述の落下モデルを適用した結果を図7に示す。この場合も、かなり体験者満足度の高いMRコンテンツを表現することができた。桜花の場合と同様に、紅葉の落下の様子も動画で示す[12]。



図7 紅葉へ応用した様子  
Fig.7 Falling autumn leaves

## 5.2 雪の落下現象の演出

### 5.2.1 雪の落下の特徴

雪の降り方は、含まれる水分の量や、風の吹き方で大きく異なる。木枯らしが吹く寒い夜の「吹雪」の舞う様は、「桜吹雪」の場合より著しく激しく、乾燥した雪ほど風の影響を受けやすい。一方、風の余りない日に水分を多く含んだ雪の降る様は、かなり桜の花びらに似ている。ただし、水平方向の動きは桜の花びらより雪は小さく、落下スピードは速いと観察される。

本研究では、こうした雪の降る様子をほぼすべてカバーすることは試みない。本研究の目的は、自然現象の正確なシミュレーションではなく、アトラクションの演出効果としての自然落下物の表現であるから、ともかく冬という季節感を与える降雪現象を描写できればいいからである。換言すれば、本稿で述べたカーリー法の変形の範囲内で、雪が降っているように見える描写が作れるかどうかである。

### 5.2.2 平行移動と回転のモデル

平行移動のモデルは、桜花の場合と同じ式(2)(3)(4)と同じだが、落下速度が速く、ぶれがあまり多くないので、パラメータ $\sigma$ を相対的に小さい値にする。

雪の回転のモデルでも、桜の花びらの場合と同様に式(5)を用いる。紅葉の場合のような特別な改良は加えず、雪に見せることができるかが争点である。

### 5.2.3 雪のCGモデルと落下の様子

雪の結晶の形状は実に様々であり、これを多数のポリゴンで描いていたのでは、実時間処理の制限内では描画できない。ここでは、図8のモデルを基本としてこれを描画実行時に変形を加えた。変形は、基本モデルの $x, y$ 方向のスケールを0.5~1.5、 $z$ 方向のスケールを0~1倍になるように拡大倍率を一様乱数で決めることにより実現した。

この処理を行うことで、より自然な雪に見えることが期待できる。描画例を図9に示す。桜花、紅葉と同様に、雪の落下の様子も動画で示す[12]。



図8 雪の結晶の基本モデル  
Fig.8 Snow flake (Standard CG model)



図9 雪の降る様子  
Fig.9 Falling snow

## 5.3 異なる現象間でのパラメータ設定

実際にMR空間で表現してみた際に、経験的に適切であると思われた水平方向の標準偏差の設定値は次の表4のようになった。この表からわかるように、長さ $l$ と適当な標準偏差の設定値は比例関係にあることがわかった。モデルの長さ $l$ として適切な標準偏差値を $\sigma$ とすると、その関係は式(11)で表わせる。この関係を利用すると、新しい落下物への応用時や落下物の大きさを変更する場合に、パラメータ設定の目安にすることが期待できる。

表4 落下物体ごとのパラメータ設定例

Table4 Result of parameter setting

	桜花	紅葉	雪
長さ( $l$ )	1.5cm	4.5cm	0.75cm
水平方向標準偏差( $\sigma$ )	8	24	4

$$\sigma = 5.3 \times l \quad (11)$$

## 6. むすび

実時間描画の制約がある複合現実型アトラクションにおいて、自然落下物を表現する上で効果的な方法(カーリー法)を考案した。アニメーションの品質を落とさずに計算量を削減するために、正規乱数のランダムウォークを利用した方法である。ま

た、実時間描画において有効な、他の負荷に依存しないアニメーション設定を実現することができた。

まず桜花の落下現象を表現するのに考案した手法が、若干の変更を行うだけで、紅葉、雪の落下を描くことにも適応できることを確認した。本手法により、「それらしく見せる」ことを目的とする演出効果の現実的な手法をクリエイタに提供できると考えている。MR アトラクションの実時間制約とインタラクション機能の両面を満足させるこの種の演出効果手法が多数用意されることで、MR コンテンツのクオリティも向上して行くことが期待できる。

### 参考文献

- [1] 田村 (編):「特集:複合現実感」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No.4, 1999.
- [2] 田村, 山本 (編):「特集:複合現実感 2」, 同上, Vol. 7, No.2, 2002.
- [3] 大島, 佐藤, 山本, 田村: “RV-Border Guards: 複数人参加型複合現実感ゲーム”, in [1], pp.699-705, 1999.
- [4] Y. Okuno, H. Kakuta, and T. Takayama: “Jellyfish Party:Blowing soap bubbles in mixed reality space,” Proc. ISMAR03, pp. 358 - 359, 2003.
- [5] <http://www.expo2005.or.jp/jp/N0/N1/N1.1/N1.1.27/index.html>
- [6] 青木, 諸岡, 長谷川, 長橋: “自然現象の計測と学習に基づく映像生成”, 第 9 回画像センシングシンポジウム, pp.259-264, 2003.
- [7] P. Fearing: “Computer modeling of fallen snow,” Proc. SIGGRAPH 2000, pp. 37 - 46, 2000.
- [8] T. Nishita, H. Iwasaki, Y. Dobashi, and E. Nakamae, “A modeling and rendering method for snow by using meatballs,” Computer Graphics Forum, Vol.16, No.3, pp.357-364, 1979.
- [9] N.Wang and B.Wade: “Rendering falling rain and snow,” SIGGRAPH 2004 Sketches, 014-wang.pdf, 2004.
- [10] 津野義道著: “ランダムウォーク 乱れに潜む不思議な現象”, 牧野書店, 2002.
- [11] 木村, 橋本, 一刈, 種子田, 鬼柳, 柴田, 田村: “Cherry Blossom Cyberview - サイバー観桜会- ”, 日本バーチャルリアリティ学会第 9 回大会論文集, pp.609-610, 2004.
- [12] <http://www.rm.is.ritsumeai.ac.jp/karlie/>

(2005 年 4 月 13 日受付)

### [著者紹介]

#### 一刈 良介 (学生会員)



2005 年立命館大学理工学部情報学科卒。現在、同大学院理工学研究科博士前期課程在学中。複合現実感の研究に従事。

#### 木村 朝子 (正会員)



1996 年大阪大学基礎工学部卒。1998 年同大学院基礎工学研究科修士了。同大学助手を経て、立命館大学理工学部助教授。現在、同 情報理工学部メディア情報学科助教授。実世界指向インタフェース、複合現実感、ハプティックインタフェースの研究に従事。

2001 年より 2002 年まで Mayo Clinic にて Special Project Associate。電子情報通信学会、情報処理学会、ヒューマンインタフェース学会、ACM、IEEE 各会員。博士 (工学)。

#### 柴田 史久 (正会員)



1996 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。1999 年同研究科博士後期課程修了。大阪大学産業科学研究所助手を経て、2003 年 4 月より立命館大学理工学部助教授。現在、同 情報理工学部情報コミュニケーション学科助教授。博士 (工学)。モバイルコンピューティング、複合現実感等の研究に従事。電子情報通信学会、情報処理学会、日本ロボット学会、IEEE 各会員。2004 年日本 VR 学会学術奨励賞受賞。

#### 田村 秀行 (正会員)



1970 年京都大学工学部電気工学科卒。工業技術院電子技術総合研究所、キヤノン (株) 等を経て、2003 年 4 月より立命館大学理工学部教授。現在、同 情報理工学部メディア情報学科教授。工学博士。1997 年より 2001 年まで、MR システム研究所にて「複合現実感研究プロジェクト」を率いた。本学会元理事、現在、評議員、複合現実感研究委員会顧問。編著書「Mixed Reality」(Ohmsha & Springer)「コンピュータ画像処理」(オーム社)など。IEEE、ACM、電子情報通信学会、情報処理学会、人工知能学会、映像情報メディア学会等の会員。