

複合現実環境における自然現象の効果的表現方法

一舞い散る桜吹雪の場合一

Effective Modeling and Representation of Natural Phenomena in Mixed Reality Space: A Case Study of Falling Cherry Blossoms

一刈良介, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行

Ryosuke ICHIKARI, Asako KIMURA, Fumihisa SHIBATA, and Hideyuki TAMURA

立命館大学 情報理工学部

(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

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. In order to study the difficulties and solutions of representing such phenomena in MR environment, "falling cherry blossoms" was chosen as a challenging thesis. We proposed an effective method to approximate movements of fluttering petals 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.

Key Words: *Mixed Reality, Physics-based Modeling, Real-time Rendering, Monte Carlo Method, Random Walk*

1. はじめに

複合現実感 (Mixed Reality: MR) は、医療、建築、工業製品の設計や組立の分野で実用化が推進されているが、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。現実世界の事物のもつ存在感・臨場感と、CG映像で描く仮想世界の柔軟性をミックスすることにより、より楽しく表現力豊かな作品が制作できるからである。MR技術をゲームやインタラクティブ・アートに用いた発表事例[1][2]の他に、ショールームや博覧会の体験型アトラクションとしての設置や開発が進行し、クリエイティブ業界からの関心も高まっている。

実写とCGの合成という点では、映画における視覚効果(VFX)の進歩が目覚ましい。そのCG映像のクオリティの向上は、物理現象を丹念にモデル化し、照明条件も正確に合致させる努力により達成されている。その質的向上の影響は、コマーシャル・フィルム、ミュージック・ビデオ、ビデオゲームにも及んでいる。

MRアトラクションへの関心が高まってくれば、演出面の充実を図るため、同じような自然現象や複雑な現象を表現することが求められるだろう。ところが、1コマの描画に十分な時間がかけられる映画のVFXと比べて、実時間描画という絶対的な制約のあるMRシステムでは、表現できる物理シミュレーションにかなりのハンデがある。一方、同じく実時間描画の制約のあるビデオゲームに比べると、

現実環境との幾何学的・光学的整合性を保つことが大きな課題となる。これらを克服して豊かな表現力をもつには、MR環境に適した物理現象の効果的な表現方法を順次開発して充実させて行く必要がある。

本論文では、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・整理する。さらに、雪、木の葉、花びら等の落下現象の中から、要望の多い桜花を取り上げ、その舞い散る様をMR環境で実現する方法を考案する。個々の花びらの動きを力学的にシミュレーションするのは非現実的であるので、正規乱数を用い近似したところ、良好な結果を得たので報告する。

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. 桜花の舞い落ちる現象の表現方法

3.1 MR 環境下でのモデル化の検討

最近の映画における視覚効果では、建築物の爆発や荒れた海の表現などには、かなり精密な物理シミュレーションを行なって、写実性の高い CG 映像を生み出している。花びらや枯葉など舞い散る様子は、花びらや葉が軽いために空気抵抗を受け、風の影響を受けてひらひらと舞いながら落下するものと考えられる。その花びら 1 枚 1 枚に対してかかる外力を、厳密に物理モデルを立てて計算することは極めて難しい。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はあるが[3]、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。

雲、霧、炎、水しぶき等の自然現象の CG 表現には、しばしばパーティクル法が用いられる。しかしながら、この方法では、全体的な動きは巧みに表現できても、個々の粒子（この場合、花びら、葉など）の動きを把握し、それぞれとインタラクションすることはできない。

そこで本研究では、花びらの舞う様子を、落下運動中の水平方向への移動量が下記のような確率変数を用いて近似的に表現する方法を採用することにした。

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

ランダムウォーク（酔歩）とは、現在からの移動量を確率変数により決定する確率過程のモデルである。ふらふらとふらつく酔っ払いのような軌跡 X_t を持つ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 ε_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 σ 、平均値 0 の分布をもつことも示している。

さらに、iid のうちで正規分布により ε_t が分布する場合は NID と呼ばれる。正規乱数によるランダムウォークでは、最も高い確率で平均値の量だけ移動するので、平均値を 0 とすることにより、最も自然らしいふらつきを表現するモデルとなる。このふらつきの軌跡は株価など、さまざまな原因で値が変動するものを表現するのに用いられているが[4]、我々は、桜の花びらの落下運動においても同様な手法が有効ではないかと考えた。

3.2.2 乱数の違いによる軌跡の比較

乱数の種類としては、値域内でどの値も等確率で発生する「一様乱数」と、平均値を中心に発生確率が正規分布をなす「正規乱数」がよく用いられる。予備実験として、まずこの 2 種類の乱数のどちらが花びらのランダムウォークに適しているかを比較検討した。

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が、実際に MR システムを用いて視覚的に比較評価を行なったところ、直観的にも正規乱数の方が花びらの舞い落ちる様子に近い現象が観察された。よってこれ以降は、正規乱数によるランダムウォークを用いることにした。

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

3.3 自然現象のモデル化

3.3.1 桜の花びらの落下の特徴

質量が少なく、表面積の大きな桜の花びらは、空気抵抗の影響を強く受け、移動・回転を伴って、人間には無風と感じる状態でもふらふらとふらつきながら落下する。多数の花びらが風に乗って舞い散る様は「桜吹雪」と呼ばれる現象を示す。

花びら自体が回転している時は、比較的ぶれずにそのままの方向に落下し、回転しない時には水平方向にかなりぶれることが観察できる。また、横風に吹かれた時は、平行移動量が増し、そのトレンドを保ったまま落下する。この

ような特徴をもつ落下現象を、次のようにモデル化する。

3.3.2 平行移動のモデル

平行移動のモデルとして次の式(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する。 t は時間、 X_t を花びらの x 座標、 Y_t を y 座標、 Z_t を z 座標とする。

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

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

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

ここで、 σ とは正規乱数の任意の標準偏差、 b はフレームあたりの落下量、 w は風による影響を示す。

3.3.3 回転のモデル

花びらの回転のモデルとして、次の式(5)を用いる。 R_t を時刻 t における回転量とし、 Mr_t を移動のベクトルとする。 $S_{\max}$ は最大の回転量である。

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

3.4 更新時間の差による影響の調整

上記パラメータを種々調整しながら、花びらの自然な落下を得る上では、1 フレームでの移動量を固定して他のパラメータを調整するのが好都合である。花びらだけを描く場合はそれで済むが、他の仮想オブジェクトも存在する MR アトラクションでは、描画負荷によって実時間描画のフレームレートが変化するので、実際に移動するスピードが変わってしまい、体験者は極めて不自然な動きを感じるようになる。

その対策としては、システムが負荷を把握し、負荷に応じた移動量を随時計算することにより、正確な移動量を設定できるようにする必要がある。具体的には、まず1フレームの描画に要する時間をはかり、fps (1秒あたりのフレーム数)を求める。現在のfpsを f とし、基準のfpsを f_o 、基準の移動量を M_o 、基準の回転量 R_o 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。

$$Mv = Mv_o(f_o/f) \quad (6)$$

$$R = R_o(f_o/f) \quad (7)$$

ただし、水平方向のランダムウォークに対しては、この方式ではゆらぎが小さくなってしまいうので、次のように分散値を調整する。 f_o/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。

$$E(\varepsilon_i^2) = \sigma^2, E(\varepsilon_i \varepsilon_j) = 0 \quad \text{より}$$

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

これは、移動量 ε_i にfpsの比率 $a (= f_o/f)$ 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、水平方向の調整した移動量は次式で表わせる。

$$Mh = Mh_o \sqrt{(f_o/f)} \quad (9)$$

4. MR アトラクションへの実装と評価

4.1 Cherry Blossom Cyberview

本手法を活かして、MR アトラクション「Cherry Blossom Cyberview—サイバー観桜会—」を制作した。これは、実物の桜の木の幹の光景にCGで描いた仮想の枝と満開の桜花を合成描画し、その木から花びらを降らして花吹雪を演出するアトラクションである。システムの機器構成等は、文献[5]に譲る。

MR 空間全体に吹く一定の風と強さと方向を変化させ、その効果を花吹雪に反映させることができる(図1)。落下する花びらは、体験者が手にした扇子状デバイスで受け止めることができ、それを傾けることでもう一度散らすインタラクションを許している(図2)。また、扇子を揺らして起こした風によって、仮想の花びらが舞う効果も実現できる。



図1：桜の舞い散る様子



図2：扇子状デバイスの使用の様子
(上：花びらを受け止める様子，下：花びらを散らす様子)

4.2 パラメータの調整とその順序

花びらの落下アニメーションを自然らしく見せるには、システム全体の描画性能や満開の桜花とバランスを取った形でのパラメータ調整が必要となる。ここで、対象となるパラメータは、平行移動モデル中の σ 、 b 、 w と回転モデルでの $S_{\max}$ である。

パラメータ調整は、花びらの中でも桜花の舞いであると感じられるよう、主観的に自然であると判断する値に設定することにした。(1)まず落下速度 b を決め、(2)続いて花びらの揺らぎの分散値 σ でたまかな動きを決定してから、(3)回転量 $S_{\max}$ を加味して自然らしさを演出する。そして、(4)一定方向の風の影響を表す w は、付加的な効果として、プログラム実行中（即ち、体験中に）変更できるようにした。具体的な設定値は表2の通りである。ここで、落下速度 b に関しては、個々の花びらについては一定であるが、その値自体には少し変化を持たせた。

このアトラクションにおいては、花びらの枚数は50枚とし、2700mm(z 座標)の地点から地面(0mm)の地点までをアニメーションさせる区間とし、地面に到達すれば2700mm地点にまた移動させる方法を採用した。今回の実装では、実行描画レートfpsは平均で約10fpsであった。

表2：パラメータの調整結果

σ	8	(単位: mm)
b	8~16 までの値を一様乱数で決定	(単位: mm)
$S_{\max}$	50	(単位: 度)

4.3 モデルの妥当性の評価

負荷の変化による落下スピードの変化の調整結果を表3に示す。表3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fps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4に示す。高負荷のfpsは約10、低負荷のfpsは約25である。表3では調整をするとfpsが変化しても、同じスピードで落下することがわかる。同様に回転も同じスピードをすることがわ

かる。表4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、fpsが違ってても散らばり具合が同じであることがわかる。

上記パラメータの調整の結果、目標とした要件はすべて満足することができた。まさに桜花らしい振る舞いを演出することができ、体験者からも高い評価を得ている。扇子で受け止めるというインタラクションで落下運動を中断・再開しても不自然さを感じない。他の花びらや木の葉に対しても、本モデルの基本的考え方やパラメータの調整順序は十分有効で、モデルの微修正や若干のパラメータ調整で実現可能であると考えられる。

表3：負荷に依存しない落下スピードの調整結果

単位	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4：標準偏差の調整 (単位: mm)

	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. むすび

本論文は、実時間描画の制約がある複合現実環境での利用を想定して、正規乱数のランダムウォークを利用した自然現象の表現方法を提案するものである。この方法は、リアルタイムに計算しながらアニメーションできるが、力学的シミュレーションに品質的に劣らない優れた結果をもたらすことが、実際にMRアトラクションに実装して実証された。今後はこの方式を発展させて、他の自然現象にも適応していく予定である。

参考文献

- [1] 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”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.4, pp.699-705, 1999.
- [2] Y.Okuno, H.Kakuta, and T.Takayama: “Jellyfish Party: Blowing soap bubbles in Mixed Reality Space”, Proc.ISMAR03, pp.358-359, 2003.
- [3] 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.
- [4] 養谷 千風彦: “よくわかるブラック・ショールズモデル”, 東洋経済新報社, 2000.
- [5] 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VR学会第9回大会論文誌, 2004 (本大会) .