JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	媒体中の剛体運動に対する対話的なシミュレーション
Author(s)	宮田，一乗
Citation	科学研究費助成事業研究成果報告書：1-4
Issue Date	2015-05-28
Type	Research Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/12813
Rights	
Description	研究種目：挑戦的萌芽研究，研究期間：2014～2014，課題番号：26540051，研究者番号：00308355，研究分野：コンピュータグラフィックス

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２７ 年　 ５ 月 ２８ 日現在

機関番号：１３３０２
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2014～2014
課題番号：２６５４００５１

研究課題名（和文）媒体中の剛体運動に対する対話的なシミュレーション

研究課題名（英文）An interactive simulation for immersed rigid body dynamics

研究代表者
宮田　一乗（Kazunori, Miyata）

北陸先端科学技術大学院大学・知識科学研究科・教授

研究者番号：００３０８３５５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　1,300,000円

研究成果の概要（和文）：一般的に媒体は粘性を持つために、媒体中を移動する物体は粘性や乱流の影響を受けるため、挙動が複雑に変化する。この挙動を厳密な物理シミュレーションにより実時間で求めるのは、現状ではほぼ不可能である。この課題に対し、本論文はデータ駆動のシミュレーション手法を提案し、低い計算コストで､舞い散る木の葉や水中を落下するコイン、紙飛行機の墜落など、媒体中での物体の複雑な挙動をリアルタイムで表現することに成功した。

研究成果の概要（英文）：The virtual worlds under the conventional animation techniques utilize the ideal models with no consideration of the detailed effects of the flow environments, which take account of the inertial, viscous, and turbulent features. The research aim of immersed rigid body dynamics is to simulate the motion of rigid body fully immersed or submerged inside real flows, and strongly coupled with the surrounding flows. The algorithm is built on data-driven simulation methods to simulate the rigid body dynamics with the flow effects. Our approach makes it feasible to achieve realistic simulation results, such as falling leaves, coin falling motion in water, and plying paper plane, in low computation cost.

研究分野：コンピュータグラフィックス

キーワード：コンピュータグラフィックス　アニメーション　剛体シミュレーション

１．研究開始当初の背景

(1) 流体力学に関して

物体との境界面で渦が発生する流体内の剛体力学は長年にわたり研究されているが、この研究課題に関する数々の実験と計算法に関するレビューが最近報告された。粘性流体内の剛体の不安定な挙動は、主として流体内に発生する渦の不安定性に関連しており、その挙動パターンは流体の特性を左右するパラメータに依存していることが、数々の実験結果から判明している。一方、数値計算による渦流の解析手法も多数報告されている。しかしながら、複雑な挙動パターンの分類と３次元空間内での粘性流に関する明確な知見は未だ得られていないのが現状である。また、既存のシミュレーション手法は計算負荷が高く、リアルタイムでのシミュレーションに直接応用することは極めて困難である。確率モデルを用いた手法では、分子スケールでの効率的な計算には向いているが、シミュレーションが制御しにくい（ユーザが指定した目標やパスに沿った動きを生成しにくい）という欠点を有する。

(2) コンピュータグラフィックス(CG)に関して

CG 分野における関連する研究背景として、以下の 3 つが挙げられる。

①剛体シミュレーション
　対話的な速度でのシミュレーションが十分に可能なほどに手法は成熟しているが、物体を取り囲む媒体の影響は考慮されていない。

②two-way coupling 法
　物体と媒体との相互作用を計算する手法に関しても、これまでに多数研究されているが、流体シミュレーションの計算負荷が高く、乱流の影響も考慮されていない。

③乱流の表現
　乱流の複雑なパターンの計算法は提案されているが、乱流内での剛体の挙動を解くことは未踏である。

２．研究の目的

本研究では、空気や水などの媒体中における剛体の複雑な動きのシミュレーション手法を開発することを目指す。既存手法では、乱流の影響を十分に考慮することの困難さや計算負荷などの問題から、媒体中の剛体に対する現実的な挙動を、効率的に求めることは実現できていない。また、ユーザが指定した目標地点に落下させる、所望の軌道に沿うような動きを生成するなどの意図的な制御は現状では困難である。本研究では、これらの課題を解決し、リアルタイムで、ユーザの意図に近い、複雑かつリアルな媒体内の剛体の挙動をシミュレーションすることを目的とし、アニメーション生成の新たなツールを提供することを目的とした。

３．研究の方法

本研究では、以下に示す３つの手法で媒体中の剛体の動きをリアルタイムで求めている。

(1) 運動モデルの構築

一般化されたキルヒホッフ方程式を用いて、剛体のまわりの流れからの剛体に対する力とトルクを考慮する。そして、剛体と流体との境界面で生じた乱流の影響に対して、一般化されたランジュバン方程式を用いた運動モデルを適用する。

(2) モーションパターンのクラス分類

シミュレーションのパラメータの影響を学習させ、パラメータをクラスタリングする。

(3) モーションパターンの生成

運動の軌跡の曲率に注目したモーションプランニングの手法を組み合わせ、エネルギーの最適化を行い、モーションパターンをリアルタイムで生成する。

４．研究成果

(1) 運動モデルの構築

非圧縮粘性流体における剛体運動の実時間シミュレーション手法である Langevin rigid 法を考案した。この手法では、リアルな流体における剛体運動を再現するため、一般化されたキルヒホッフ方程式を用いて、剛体のまわりの流れから作用する剛体に対する力とトルクを考慮する。本手法は、剛体と流体との境界面で生じた乱流の影響に対して一般化されたランジュバン方程式(Langevin Equation)を利用するので、Langevin rigid 法と名付け

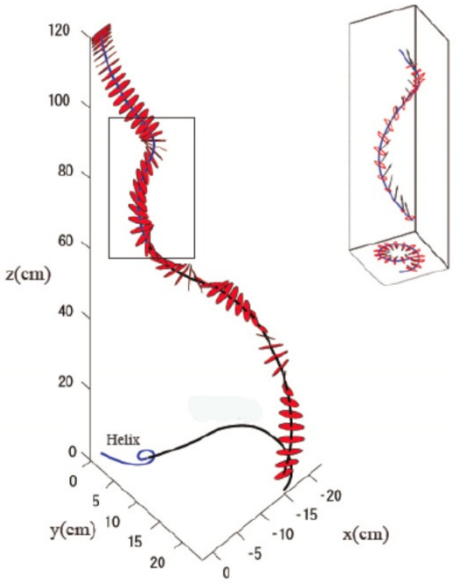

図１　紙片の落下アニメーションの生成例

右上の事例は既存手法による生成例。提案手法では境界で発生する乱流の影響を考慮しているため、既存手法より自然な印象を受けるアニメーションが表現できている。

ている。Langevin rigid 法は流体の付加質量の影響と乱流モデルによる粘性負荷を事前処理にして、ランタイムでは剛体ソルバのみを実行するため、流体における複雑な剛体の挙動を実時間でシミュレーションすることが可能である。さらに、高レイノルズ流体内における葉や紙切れなどの質量の軽い様々な形状の剛体に対して、図 1 に示すようにリアルなシミュレーションが可能になることを確認した。

(2) モーションパターンのクラス分類
構築した運動モデルに対し、パラメータ（抗力係数、揚力係数（並進、回転））を変更させて作成したアニメーションを観察し、図 2 に示す 4 種類(SD:ほぼ垂直に落下、ZZ:ジグザグ落下、AR:回転しながら落下、AZ: 回転しながらジグザク落下)に分類できることを確認した。

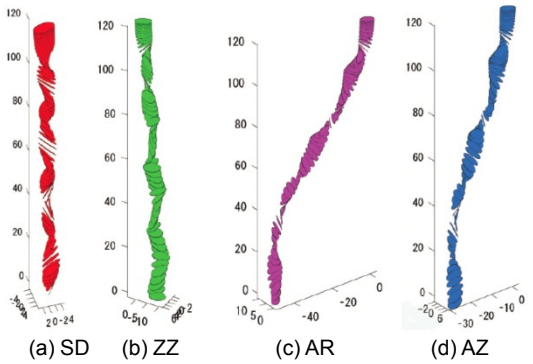

図 2　アニメーションの種類

この 4 種類のパターンを、図 3 に示すように落下方向の投影面（XY 平面が水平面に相当）に軌跡のサンプリング点をプロットして、主成分分析を行い分類する。多様な形状の物体に対して各 1000 回程度のシミュレーションを行い、シミュレーションに用いたパラメータ空間(C_D: 抗力係数, C_{L1}: 揚力係数(回転), C_{L2}: 揚力係数(並進))をクラスタリングした結果を図 4 に示す。

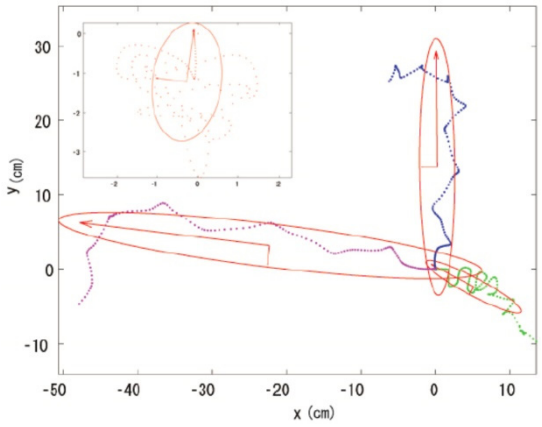

図 3　モーションパターンの分類

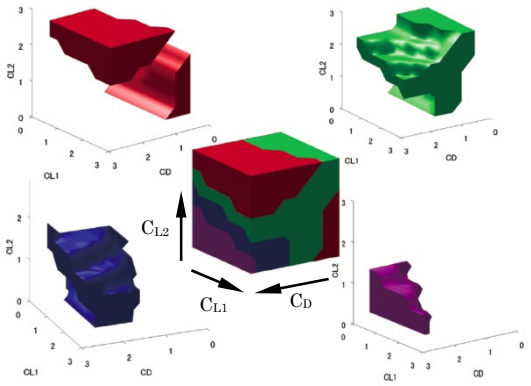

図 4 パラメータ空間での
アニメーションのクラスタリング結果

赤:SD, 緑:ZZ, 青:AZ, 紫:AR
C_D: 抗力係数,
C_{L1}: 揚力係数(回転), C_{L2}: 揚力係数(並進)

(3) モーションパターンの生成
物体は慣性力と乱流の影響を受け、分類した 4 種類のパターンを図 5 に示すグラフのように遷移しながら落下することを確認した。これはすなわち、例えば AZ のモーションパターンからは SD や AR には遷移しないことなどを意味する。

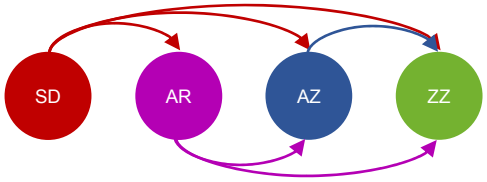

図 5 モーションパターンの遷移

モーションパターンの遷移は、軌道の曲率が極大値を持つときに起こりやすい。本手法では、軌道の曲率が極大値を持つときに、実験で求めたモーションパターンの遷移確率にしたがって遷移させる。遷移後のクラスタリングされたパラメータ空間内で、エネルギーが最適になるようなパラメータを推定し、そのパラメータを用いて次ステップのモーションを生成する。以上の手続きを繰り返すことで、一連のアニメーションを生成する。さらに、パラメータの推定を低コストで実現するために、計算モデルの簡略化を行い、最大で 50 倍ほどの高速化を実現した。

(4) 生成結果
図 6 に既存手法との比較を示す。図 6(b)と(c)の比較により、提案手法ではより自然な垂直方向の振動が表現できていることが確認できる。また、図 6(d)と(e)の比較から、提案手法では粘性力による回転および並進の揚力が表現できていることを確認できた。図 7 に実際の葉の落下現象との比較を示す。図 7(a)に示す実例では、ほぼ垂直に落下する SD モーショ

ンパターンから、回転しながら落下する AR モーションパターンへの遷移が確認できる。提案手法では、図 7(b)に示すパラメータ空間でエネルギーの最適化を行っており、右図中の赤枠で示すように葉の転回が表現できている。

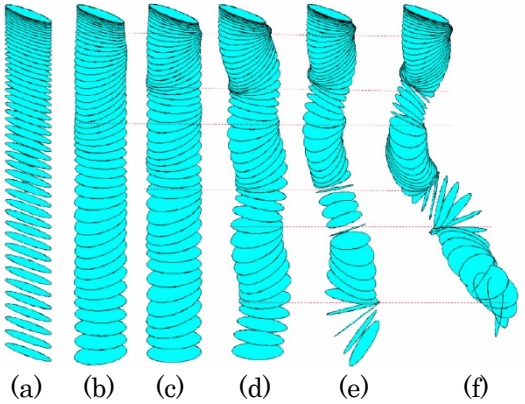

図 6 手法の比較

(a) 流体の影響を考慮しない単純な落下現象
(b) 既存手法による慣性力を考慮
(c) 提案手法による慣性力を考慮
(d) 提案手法の慣性力と既存手法の流体による粘性力を考慮
(e) 提案手法による慣性力と粘性力を考慮
(f) 提案手法による慣性力と粘性力および乱流を考慮

最後に、図 8 に樹木からの落葉の様子を表現した例を示す。提案手法では統計的な手法を用いているため、同じ初期条件でもこの例のような多様な軌跡を描くアニメーションを生成できている。

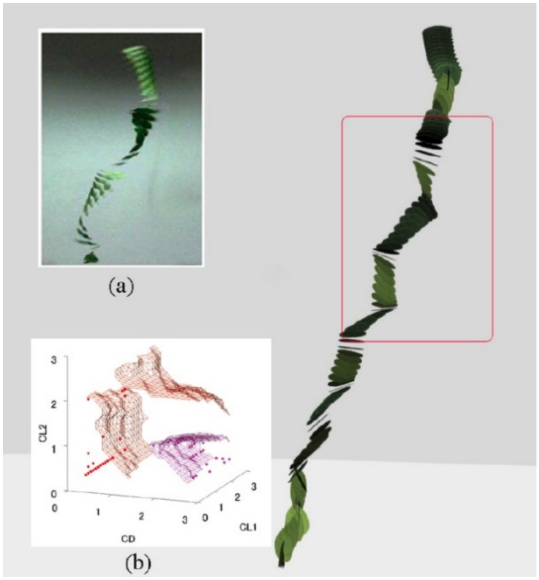

図 7 シミュレーション結果の比較

(a) 実際の落葉を高速度カメラで撮影した画像
(b) シミュレーションに用いたパラメータ空間 (SD:赤、AR:紫)

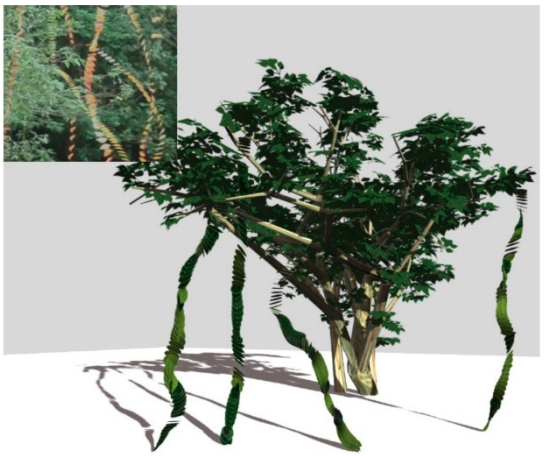

図 8 落葉のシミュレーション結果

左上の図は実際の落葉の様子を撮影した画像

以上、データ駆動のモーションプランニング手法を適用することで、媒体の影響を受ける複雑な挙動を示す剛体運動を少ない計算コストで求めることが可能となった。
提案手法はパラメータ空間の制御が可能であるため、例えば、モーションパスの概略を入力データとし、指定したパスに沿った落下アニメーションの生成が可能となる。すなわち、媒体中の剛体アニメーションの対話的なデザイン手法としての基幹技術となりうると考える。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計１件）
Haoran Xie, Zhiqiang Wang, Kazunori Miyata, and Ye Zhao, A Prior Reduced Model of Dynamical Systems, Mathematics for Industry, Springer, in press, 2015（査読有）

〔学会発表〕（計１件）
Haoran Xie, Zhiqiang Wang, Kazunori Miyata, and Ye Zhao, A Prior Reduced Model of Dynamical Systems, MEIS2014 (Mathematics Progress in Expressive Image Synthesis), 2014 年 11 月 12-14 日、九州大学・西新プラザ、福岡県福岡市（査読有）

６．研究組織

(1)研究代表者
宮田　一乗（MIYATA, KAZUNORI）
北陸先端科学技術大学院大学・知識科学研究科・教授
研究者番号：00308355