

Title	コンピュータグラフィックスにおける媒体中の剛体運動シミュレーション
Author(s)	謝, 浩然
Citation	
Issue Date	2015-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/12755">http://hdl.handle.net/10119/12755</a>
Rights	
Description	Supervisor:宮田一乗, 知識科学研究科, 博士

氏 名	謝 浩然
学 位 の 種 類	博士(知識科学)
学 位 記 番 号	博知第 164 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 27 年 3 月 20 日
論 文 題 目	Immersed Rigid Body Dynamics in Computer Graphics (コンピュータグラフィックスにおける媒体中の剛体運動シミュレーション)
論 文 審 査 委 員	主査 宮田 一乗 北陸先端科学技術大学院大学 教授 Ho Bao Tu 同 教授 吉田 武稔 同 教授 HUYNH, Nam Van 同 准教授 森島 繁生 早稲田大学 教授

## 論文の内容の要旨

This dissertation proposes a new topic, immersed rigid body dynamics, into the real-time computer graphics community. It is clearly different from the other traditional topics in computer graphics that 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. This dissertation presents a family of algorithms for real-time simulations of immersed rigid body dynamics in computer animation. These algorithms are built on data-driven simulation methods to simulate the rigid body dynamics with the flow effects in computer environment. These approaches make it feasible to achieve realistic simulation results in low computation cost. In addition, a promising prior reduced model of dynamical systems is introduced for the parameter identification into computer animation.

The first contribution is a graph-based framework for synthesizing the motions of immersed rigid body, which are commonly lightweight. This framework is a first try to combine the motion graph technique in character animation field with the physics-based simulations. The typical motion patterns of immersed rigid-body dynamics are extracted in a phase diagram and verified from thousands of physical experiments to construct a precomputed trajectory database and the transition probabilities in Markov-chain model of the motion graph. Finally, an improved noise-based algorithm is proposed for integrating the wind field with the simulation results.

The second contribution is a stochastic model of immersed rigid body dynamics. This model first utilizes energy transport model of the surrounding turbulent flow to approximate the energy distributions due to the rigid body motions. Then, the proposed turbulent model is successfully introduced into a generalized Kirchhoff representation of the rigid body dynamics with Langevin model in a stochastic Wiener process.

The proposed model adopts a new approach combining the precomputed simulation data of turbulent energy and the runtime simulations of rigid body solvers.

The third contribution focuses on a pattern-driven framework for immersed rigid body dynamics. This simulation framework first classifies the influences of parameter spaces of viscous force coefficients in a data training process, and then proposes a curvature-based motion planning method to represent the unsteady dynamics due to the vortex shedding. The proposed methods learn the knowledge of parameter subspaces of the rigid body dynamics from numerical experiments in a new dynamical model, which clarifies the viscous forces from the surrounding flow into three components and reveals the relationships among the force coefficients, the Reynolds number, and angle of attack of the body. In addition, the proposed framework combines the motion graph technique from the graph-based framework and the energy optimization in motion synthesis from the stochastic model.

Finally, a novel reduced model of dynamical systems is constructed, which can accelerate the parameter estimation of physical parameters in a dynamical model with low computation cost. In contrast to the conventional reduced order models, the proposed model is a prior meta-model of dynamical systems based on the separated representation in large domains including initial conditions, boundary conditions, and physical parameters. The proposed model does not depend on the preprocessed snapshots of the solutions from dynamics solvers. This model is successfully applied to the weakly coupled and nonlinear problems. The improvement of the proposed reduced model in strongly nonlinear problem, such as immersed rigid body dynamics, is worth being anticipated.

**Keywords:**

Data-driven Simulation, Motion Pattern, Reduced Model, Flow Effects, Computer Graphics

## 論文審査の結果の要旨

コンピュータグラフィックスの基礎技術として、物体形状を定義するモデリング、モデリングされた形状を画像データとして可視化するレンダリング、そして、物体の動作を表現するアニメーションの3つが挙げられる。本論文は、剛体のアニメーションに関する研究であり、特に水や空気などの媒体中での物体の複雑な振る舞いの表現を試みたものである。

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の影響を受け、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、低い計算コストで媒体中の剛体の運動を求めることに成功した。

本論文では、以下に示す4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) グラフベース手法：キャラクタアニメーションで用いるモーショングラフによるアニメーション生成法を物理ベースアニメーションに適用した。モーシオンパターンをあらかじめ

抽出しデータベースに蓄え、マルコフチェーンモデルを用いてモーショングラフを生成する。

(2) 統計モデル手法：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統計モデルを適用する。

(3) パターン駆動法：上記の(1)と(2)の手法の組み合わせ手法である。粘性力のパラメータの影響を学習させてパラメータをクラス分けし、運動の軌跡の曲率に注目したモーシオンプランニングの手法と組み合わせて、エネルギーの最適化を行って動きを生成する。

(4) モデルの簡略化：媒体中の物体の動作に対する物理パラメータの推定を低コストで実現する手法を提案する。

本手法を用いることで、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を可能にした。このような複雑な動きに対して、既存手法では実時間でかつ自然な振る舞いに見えるような生成は極めて困難であった。以上、本論文は、媒体中の剛体アニメーションをリアルタイムで生成する手法を提案したものであり、学術的に貢献するところが大きい。よって博士（知識科学）の学位論文として十分価値あるものと認めた。