

形状変化を想定した物体の 発音モデルに関する一検討

岡野 真一[†] 青野 裕司[†] 片寄 晴弘^{††} 井口 征士[†]

[†]大阪大学大学院基礎工学研究科

^{††}(財)イメージ情報科学研究所

E-mail: okano@inolab.sys.es.osaka-u.ac.jp

本研究では、物理モデルに基づいた雨音の生成を目指している。以前より、一粒の雨滴が落下した際に発する音のサンプルを利用した、雨音全体を生成するためのモデル制作に取り組んできた。今回は、一粒の雨滴の音自身、特に傘の上に落下したときの音を物理モデルによって生成することを試みている。雨滴および傘といった個々の物体のモデルは質点・バネ・ダンパ系で構築している。特に、発音課程で雨滴に見られるような過渡的な崩壊を、バネ・ダンパの切断モデルによって表現することを試みている。雨滴の挙動・振動を特徴づける要素としては、雨滴の大きさ、落下速度、表面張力、空気抵抗があり、また傘は、傘の布地部分を2次元膜モデルとして近似を行っている。最終的な音情報は単一の質点の座標の連続的なシーケンスとして抽出することにより出力している。

A Consideration of The Sound Model of A Object Assumed The Change of Its Shape

Shin'ichi Okano[†] Yushi Aono[†] Haruhiro Katayose^{††} Seiji Inokuchi[†]

[†]Graduate School of Engineering Science, Osaka University

^{††}Laboratories of Image Information Science and Technology

E-mail: okano@inolab.sys.es.osaka-u.ac.jp

The aim of this research is the produce of the rain sound using the techniques of physics based modelling. We have experimentally developed the framework model that produces rain sounds, though it uses sampling sounds of waterdrops. In this paper, we try to produce the sound of single rain drop falling on an umbrella by use of its physical model. A physical object, which is modelling rain drops and an umbrella, is assemblies of masses linked to others by springs and dampers. The modelling techniques we proposed can express transitional disintegration. The disintegration is caused by the breaks of the spring-damper links. Factors that fix the motion and vibration of the rain drops are size, speed, surface tension, and air resistance. The umbrella is an approximation to a membrane model. The sound finally acquired is received as a sequence of successive positions of single mass.

1.はじめに

音響系において、立体音響技術は音の定位や原音場の再現という意味である種の成功をおさめている。そして従来からドラマ等で状況を鮮明化させるために用いられてきたSound Effect (SE) 技術もまたリアリティーを高める技術である。しかしSEは経験や勘に裏打ちされた技術を要するので、利用するには専門家を介さなければならないことや、状況に応じたものを作るのに大きな手間がかかるといった問題がある。

一方、自然界の物理のモデリングに基づく手法は、パラメータを操作するだけで良いという点で広くユーザに開かれているといえるし、パラメータ間の内挿の効果もあるが、この手法は計算機の計算量が莫大であるため、今まではハードウェア面の限界もあり長く敬遠されていた。しかしここ数年のハードウェアとコンピュータ技術の格段の進歩によって、計算速度にもめどが付きつつある。

本稿では雨音という自然環境の音を、モデルにもとづいた手法を用いて生成することを目標とする。

2.研究の概要

我々が普段耳にする雨の音は、雨を構成する無数の雨滴が地面などに落下した際に発する音の集合であると考えられる。つまり一つ一つの雨滴の音を実際の雨滴の時間的空間的落下分布にもとづいて出力すれば、全体として雨音になるだろうと思われる。そこで本研究は、(1) 一粒の雨滴の音を生成するモデル部、(2) 実際の雨滴の落下分布にもとづいて(1)の音を出力させるモデル部からなるシステムを構成している (Fig.1)。

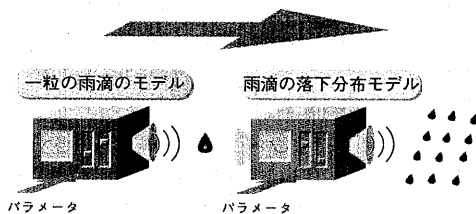


Fig.1 システム構成

今回は(1)のモデルに重点をおいて説明する。なお(2)については2.2節でも概要を説明しているが、より詳しい内容は[1]を参照していただきたい。

2.1 一粒の雨滴の音のモデル

「びちゃっ」や「ぼちゃん」などの擬音語で表現される一粒の雨滴の音が発せられるまでには、だいたい次のような物理的課程を経ている。

特に雨滴の動作に着目すると、ある終末速度で上空から落下してきた雨滴が落下先にある物体と衝突する。ここでは簡単のためその落下対象物を固体とすると、雨滴はその落下対象物から衝撃を受け、跳ね返る。しかし雨滴はその衝撃力に耐えきれず、様々な大きさの小雨滴に分裂していく。跳ね返ったその小雨滴たちは万有引力に引かれて再び落下しはじめ、物体と衝突し跳ね返る。その時小雨滴の中には衝突の衝撃に耐えきれず、さらに分裂していくものがでてくる。こうした衝突・跳ね返りを繰り返しながら、やがて運動のエネルギーを失い、物体上で静止する。

こうした雨滴の挙動を落下対象物の側から見れば、分裂後の小雨滴を考慮すると、結果的に落下対象物は多数の雨滴に励起されていることになり、それによって振動が生じている。

こうした中で、音に直接的に影響していると考えられるのは落下対象物の振動である。これは雨滴の落下対象物が変われば衝突の音も大きく変わることからも容易に想像できる。

逆に雨滴が音に与える影響を考えた場合、重要なのは分裂の仕方である。これは雨滴自身の大きさや落下対象物体の形状などにより、ある種のランダム性をもって複雑に変化する。この分裂の仕方の違いが、落下対象物体を励起させるタイミングの違いとなり、ひいては音のニュアンスの違いとなって現れると考えられる。

つまり雨滴を分裂を考慮した一種の励起物体、落下対象物を振動物体としてとらえる。

これらを扱うために、本研究では質点・バネ・ダンパ系モデルを用いてモデル化を行う。つまり雨滴および落下対象物体のモデルを複数の質点、バネ、ダンパを組み合わせて構築し、シミュレーションを行う (Fig.2)。その際雨滴は条件に応じて分裂する仕組みになっている。そしてシミュレー

ション結果から音情報を抽出し、出力する。この手法の具体的な内容については後述する。

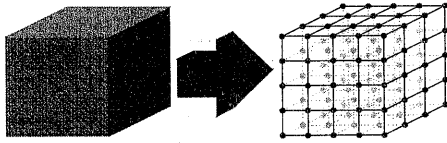


Fig.2 質点・バネ・ダンパ系モデル

2.2 雨音のモデル

実際の雨滴の落下分布にもとづいて一粒の雨滴の音を出力させるモデルである。これは以前、一粒の雨滴の音にサンプリング音を利用して実現させている[1]。簡単に概要を説明すると、雨音の大きさや音色に影響していると考えられる雨量、雨滴の落下対象物、風、音の遠近感などをパラメータ化し、その値に応じて、使用される一粒の雨滴の音の種類が変化、結果として出力される雨音に反映される。特に雨滴の量や大きさは雨量に大きく左右され、両者の関係は実際の気象観測データに基づいて記述されている。

3. 物体モデル

3.1 雨滴モデル

上述のような雨滴の分裂の仕方に直接的に影響を与えるものに、雨滴の運動エネルギー（雨滴の大きさ、落下速度）、球形を維持しようとする表面張力がまず挙げられる。また自由運動時の液滴の挙動として見ると、液滴が非常に小さいときはほぼ完全球を保っているが、大きくなるとFig.3のように変形してくる[2]。

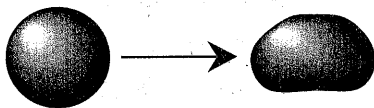


Fig.3 自由運動時の雨滴の形状

この形は運動エネルギーと表面張力との釣合によって定まり、内部循環流の影響は小さい。液滴がさらに大きくなると、液滴は水平軸の周りに対象でなくなり振動が始まる。振動液滴は外部流体中を

一直線上に自由運動せず、表面上を動くある種のさざ波やパルスを伴う一連の振動により蛇行する。この液滴の形状と運動の仕方が落下対象物との衝突に微妙に変化を与えると考えられる。つまり落下中に受ける空気抵抗も分裂の仕方にも間接的に影響していると言える。

以上、雨滴の分裂の仕方の要因についてまとめると、

- ・雨滴の運動エネルギー（大きさ、落下速度）
- ・表面張力
- ・落下中に受ける空気抵抗

これらを雨滴の挙動を特徴づける要素としてモデル中で扱う。

3.2 落下対象物モデル

落下対象物には傘を選び、傘の布地部分のモデル化を行う。これは、

- ・膜として近似するので比較的モデル化しやすい
- ・傘に降る雨滴の音が雨としてイメージしやすい[3]

などの理由による。

膜の振動に影響を与える要素は膜の密度（単位面積当たりの質量）、張力、粘性率であるので、これらを傘モデルを特徴づける要素として扱う。

4. シミュレーション手法

4.1 質点・バネ・ダンパモデル

質点、バネ、ダンパを組にした要素によって構成される、有限要素的なアプローチである。

これの代表的なものにCORDIS-ANIMAがあげられ[4][5]、本研究でもこのシステムの基本アルゴリズムを採用している。

このCORDIS-ANIMAを利用して雨のモデルを構築した例が発表されている[5]。

これは水面上に落下する雨滴を再現したものである。Fig.4に示すように雨滴の一群を、質点・バネ・ダンパがセットになったもので構成される"comb"と呼ばれるものの上に落下させる。combに

到達した雨滴はcombの隙間を通り抜けるか、または衝突する。衝突した雨滴は跳ね返り、後は同じ繰り返しである。このシミュレーションの間、衝突の起こった時間と場所、衝突の強さ等が記録され、あとで楽器の励起入力情報として利用される。

この例の目的と本研究の今回の目的は異なるので一概には比較できないが、雨滴を1個の質点だけで表現しており、1粒の雨滴の音に対するアプローチとしては本研究の方がより厳密である。

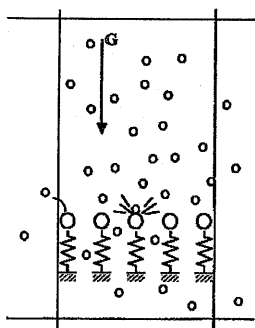


Fig.4 CORDIS-ANIMAによるRainモデル

本研究のシステムの基本アルゴリズムのいくつかを整理すると

- ・質点要素：パラメータとして質量 m [kg]、空間座標 x を持つ。システムの慣性にあたる部分を表現し、周囲の環境から加えられる力 F から、ニュートンの第二法則で特徴づけられる空間座標値を返す。

$$F = m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$$

- ・リンク要素：バネとダンパが一組になったもので、パラメータとして弾性率 k [N/m]、粘性率 z [Ns/m]、自然長 l_0 [m]を持つ。与えられた空間座標値から力 F を返す。

$$F_1 = -F_2 = -k((x_1 - l_1^0) - (x_2 - l_2^0)) - z \left(\frac{\partial x_1}{\partial t} - \frac{\partial x_2}{\partial t} \right)$$

つまり質点要素の出力がリンク要素の入力となり、リンク要素の出力が質点要素の入力となる

(Fig.5)。

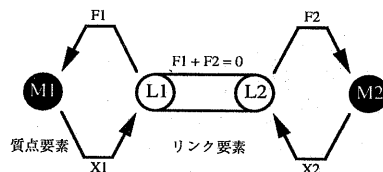


Fig.5 入出力関係

よって

- ・質点要素とリンク要素は交互に接続される。
- ・1つの質点要素に複数のリンク要素を接続できる。その時、その質点に与えられる力は、各リンク要素からの力の和で表される。
- ・質点要素には衝突により受ける力および落下中の空気抵抗が、外部からの力として入力される。
- ・接続された各要素を単位時間ごとに計算し、モデル全体の挙動をシミュレートする。

これらをもとに雨滴および落下対象物体をモデル化する。

4.2. モデル構築手法

質点要素とリンク要素を組み合わせるモデルを構築していくが、各要素の配置の仕方によっては dispersion error という問題が起こる。これは振動の伝搬速度におけるエラーを指す[6]。例えばFig.6のように直線的な配置になった場合、振動の周波数およびその伝搬方向によって伝搬速度が微妙に異なる。

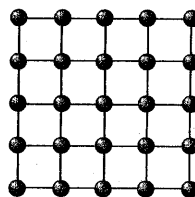


Fig.6 直線的な配置の例

この問題を避けるため、本研究では2DモデルではFig.7のような形状、3DモデルではFig.8のような

形状を基本にモデル構築を行う。

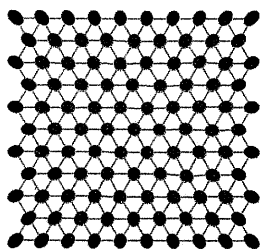


Fig.7 2Dモデル

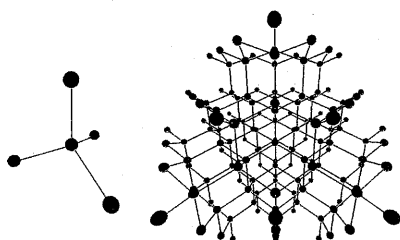


Fig.8 3Dモデル

4.3. 衝突

雨滴と落下対象物との衝突は、各々を構成する質点の中の1つ同士が衝突したものの集まりであると考えられる。しかし、雨滴の質点がFig.9のように傘モデルの面上に落ちる可能性がある。この場合、その衝突地点に最も近い質点と衝突処理を行う。

次に実際の衝突処理について説明する。単一質点同士の衝突なので、内部状態の変化を伴わないため弾性衝突として扱う。

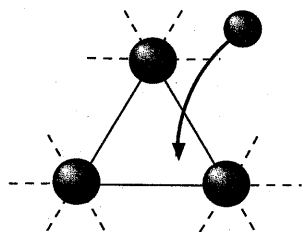


Fig.9 衝突の例

ここで質量がそれぞれ m_1 , m_2 である2つの質点1, 2の衝突を考える。

衝突前の2質点の速度を v_1 , v_2 とし、衝突後の2質点の速度を v'_1 , v'_2 とする。衝突の際の摩擦はないものとする。運動エネルギー保存の法則および運動量保存の法則により、 v'_1 , v'_2 が求められる。

つまりこの衝突の間、質点には速度が v_1 から v'_1 に変化させる力 f_1 が、また v_2 から v'_2 に変化させる力 f_2 が加えられたことになる。ここで $f_1 = -f_2$ である。

そこで衝突の間の力積 $f_1 \cdot \Delta T$, $f_2 \cdot \Delta T$ をそれぞれ求めると、

$$\begin{aligned} f_1 \cdot \Delta T &= m_1(v'_1 - v_1) \\ f_2 \cdot \Delta T &= m_2(v'_2 - v_2) \end{aligned}$$

よって

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{m_1(v'_1 - v_1)}{\Delta T} \\ f_2 &= \frac{m_2(v'_2 - v_2)}{\Delta T} \end{aligned}$$

これを質点1, 2に対する外部から受ける力として入力する。

4.4. 崩壊

本研究では崩壊現象を次のように単純化して表現する。質点要素同士を結ぶリンク要素がシミュレーション中にある閾値を越える負荷を受けたとき、そのリンク要素は切断される。こうしてモデルに1ヶ所でも亀裂が生じれば、モデルは2つに分裂・再構築される。その際モデルを構成する質量数は保存される。分裂後のモデルも同様にシミュレートする。

リンク要素の切断の閾値は、水の表面張力とする。

4.5. 空気抵抗

速度に比例する力 $-cv$ (c : 比例定数) を、質点に対する外部から受ける力として入力する。

5. シミュレーション

5.1. モデルの構築

5.1.1 雨滴モデル

3.1節でも述べたように、雨滴の挙動を特徴づける要素は(1)大きさ(2)落下速度(3)表面張力(4)空気抵抗である。このうち、(3)は実際の物性値で与えられ、(2)は(4)によってある決まった終末速度に到達することが確認されている[7]。残る(1)は、モデル構築の際の質点要素の数と関係する。今回のシステムでは、質点要素数を、この雨滴の大きさ、すなわち体積と1対1でスケーリングさせている。具体的には次のように行う。

霧雨など極めて弱い雨を除いた通常の雨の場合、直径が約1.0~5.0[mm]の雨滴が大半を占める[7]。したがって雨滴の最小単位を直径1.0[mm]とし、これ以上の分裂は無視すると考え、モデルを構成する質点の数も1にする。これを基準に、例えば直径5.0[mm]の雨滴の場合は体積が約125倍となるので、約125の質点で構成される計算となる。

以上のようにして、今回はまず直径5.0[mm]の雨滴のモデルを構築した。

また、シミュレーションで必要となる各物性値は次のとおりである。

水の表面張力： 7.49×10^{-2} [N/m]
 粘性率： 1.52×10^{-3} [Ns/m]
 空気抵抗係数： 1.77×10^{-8} [kg/s]

5.1.2 傘モデル

傘の布地の一面一面は、Fig.10のように外側のへりに当たる1辺を除いた辺が傘の骨によって固定されている。



Fig.10 傘

このような構造上の特徴をふまえ、Fig.11のようにモデルの1辺だけを自由に振動できるようにし、

その他の辺を固定する。またモデルを構成する質点の数は、面の振動をシミュレートするのに必要な数だけ用意する。今回は約50の質点要素を用いた。

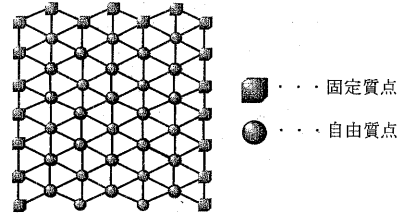


Fig.11 傘のモデル

シミュレーションで必要となる各物性値は、傘の布地が一般的なナイロン製の場合

質量： 1.20×10^{-1} [kg]
 張力： 0.12×10^{10} [N/m]
 摩擦係数： 2.31×10^{-1} [Ns/m]

となる。

5.2. シミュレーション

5.1節で述べたモデル仕様でシミュレーションを行った結果、雨滴の分裂については、衝突時のものや、自身の振動によるものがシミュレートできていることが確認された。

音情報は、単一の質点の座標の連続的なシーケンスとして抽出し、出力している。なお作成した音はウェブ^{*1}で試聴できるようになっている。

6. まとめ

一粒の雨滴のモデルを構築し、音の生成を試みたが、シミュレーションをとおして多くの課題が見られた。1つは、多くの近似を行ったため、実際の物体の挙動や振動に対する誤差が少ないとは言えないことである。モデルの精巧さと計算量とが比例関係にあるという問題もあるが、より忠実なモデル構築が今後必要であるのは確かである。また音情報も今回は単一の質点の座標を連続的な

*1 URL:<http://www-inolab.sys.es.osaka-u.ac.jp/~okano/index.html>

シーケンスとして抽出している。これは非常に局所的な情報であり、モデルによって生成される音を真に表していない。モデルの振動情報を音情報に変換するシステムの追加も今後の課題である。

また雨滴、傘を特徴づけるパラメータの値には、それぞれ水、ナイロンの物性値を用いた。これをモデルの基本形として、次はそのパラメータ値を変えた場合にどう変化するかという興味がある。例えばナイロンではなくビニール製の傘、あるいは牛乳や重油からなる雨滴といった現実にはあり得ないような物性値を用いた場合である。そこで生成される音は、現実的で予測のつくものと、非現実的でまったく新しいものと大きく分かれるであろう。前者の場合は忠実なシミュレータとしての役割を果たしており、逆に後者の場合、コンピュータ・ミュージックの視点から見れば新素材の音を作成するための道具とも言うことができる。いずれにしろ、今後この方向でも研究を進めていく必要があると言える。

最後に、今回提案した雨滴および落下対象物のモデル化手法は大きな近似がなされているが、雨滴のような非常に複雑な物体を表すための1つの考え方を示せたことになにかしらの意味があったと思われる。

参考文献

- [1]岡野真一, 片寄晴弘, 井口征士: 雨滴の落下分布モデルに基づく雨音の生成, 情報処理学会研究報告, Vol.97, No.67, pp.97-72 (1997)
- [2]化学工学協会編: 気泡・液滴工学, 日刊工業新聞社 (1969)
- [3]岡野真一, 片寄晴弘, 井口征士: 雨滴の落下分布モデルに基づく雨音の生成, 特別研究報告 (1997)
- [4]Claude Cadoz, Annie Luciani, Jean-Loup Florens: Physical Models for Music and Animated Image. The use of CORDIS-ANIMA in "ESQUISSES", ICMC Proceedings 1994, pp.11-18 (1994)
- [5]Eric INCERTI, Claude CADOZ: TOPOLOGY, GEOMETRY, MATTER OF VIBRATING STRUCTURES SIMULATED WITH CORDIS-ANIMA. SOUNDSYNTHESISMETHODS, ICMC Proceedings 1995, pp.96-103 (1995)
- [6]Scott A. Van Duyne, Julius O. Simth III: The 3D

Tetrahedral Digital Waveguide Mesh with Musical Applications, ICMC Proceedings 1996, pp.9-16 (1996)

[7]高橋喜彦: 降水の物理学, 地人書館 (1957)