

## 雨滴の落下分布モデルに基づく雨音の生成

岡野 真一<sup>†</sup>, 片寄 晴弘<sup>††</sup>, 井口 征士<sup>†</sup>

<sup>†</sup>大阪大学大学院基礎工学研究科

<sup>††</sup>イメージ情報科学研究所

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

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

本研究はモデルにもとづく雨音の生成を目標とし、そのためには(1)一粒の雨滴の音のモデル(2)雨滴の落下分布モデルを作成する必要があると考えている。本稿では(1)についてはサンプル音で代用するものとし、(2)のモデルを構築して雨音の生成を行った様子を紹介する。またそれについての考察も述べる。アプリケーションの構築には、Silicon GraphicsのIRIX(OSF/Motif, AudioLib等)を利用し、音の生成から出力までを1台でリアルタイムに行えるよう設計している。このモデルは気象学のデータに基づいており、雨量等が変化したときの雨音を生成することが可能である。

### Generating a Sound of Rain based on Distributive Model of Raindrops

Shin-ichi Okano<sup>†</sup>, Haruhiro Katayose<sup>††</sup>, Seiji Inokuchi<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering Science, Osaka University

<sup>††</sup> Laboratories of Image Information Science and Technology

The purpose of this research is to generate a sound of rain based on the model of rain. In achieving it, we need to establish two models. One is the model of a sound of a raindrop, and the other is that of raindrops' distributions in the rain. In this paper we establish the latter model and generate a sound of rain in real time using samples of a sound of a raindrop. We made the application using IRIX (OSF/Motif, AudioLib, and etc...) on SGI workstation. Because this model is based on data of weather observation, we can get sounds varying with changing rainfalls.

#### 1. はじめに

最近の科学技術で、社会的にも取り上げられているものに Virtual Reality (VR) がある。その中で、各種メディアのリアリティー (現実感) をより向上させることを目的とした Augmented Reality という領域がある。Augmented Reality の要素としては、演出として捉えられることの多い経験や勘に基づいたものと、自然界の物理をモデリングしたものとに大別される。

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 は先に述べたような経験や勘に基づいた演出という領域に含まれるものであるため、SE を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。

その点モデルに基づく手法は、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、モデルの計算をリアルタイムでめどがきつつある。

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リアルタイムに生成することを目標とする。

## 2. 雨のモデル

我々が普段耳にする雨の音は、雨を構成する個々の雨滴が地面などに落下した際に発する音の集まり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落下分布にもとづいて足し合わせていけば全体として雨音になるだろうと思われる。このような考えから、本研究では雨音を生成するために大きく二つのモデルを構築する必要があると考えている。

- (1) 一粒の雨滴の音のモデル
- (2) 雨滴の空間的・時間的落下分布

(1)は、様々な状況下にたいして雨滴が地面と衝突して音を発していく様子をいかに記述するかが課題となる。(2)では、単位時間当たりにおける雨滴の量を決定し、それを時間的・空間的にどう配置すればよいか、それらが様々な状況下においてどう変化するのが問題となる。

今回は(1)についてはサンプル音を用いるものとし、(2)のモデルを構築する。すなわち Granular Sampling により雨音の生成のシミュレーションを行うことにした。

気象学分野における雨のモデルの代表的なものに降水量を予測するための数値予報モデルがある[1]。これは物理法則を使用して対象とする物理量の将来の値を求めようとするものであるが、そのモデルの内容は雨滴レベルでの雨の降っている様子までは記述できていない。これは一粒一粒の雨滴を記述できるほどの分解能をもつモデルの構築は実際上困難であるという理由によるものである。

しかしながら大気中を落下している雨滴の量については、マーシャルとバルマー (Marshall and Palmer, 1948) が経験的(観測的)に式で近似を行っている[1]。

観測事実によれば、雨滴の粒度分布(ある直径に対する単位体積中に含まれる雨滴の個数)は次の形式で表される。

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D} \quad (2.1)$$

ここで、マーシャルとバルマーは上式の $\Lambda$ を $R$ (降水量)のみの関数として表し、観測事実から

$$\Lambda(R) = 41R^{-0.21} \quad (2.2)$$

であることを示している。また Fig 2.1 は上式の成り立つことを示した観測データである。

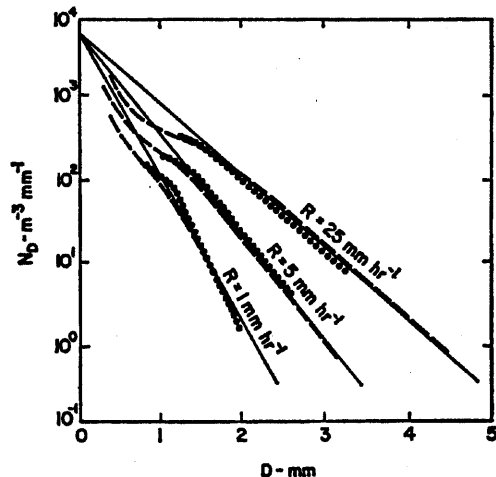


Fig 2.1 式(2.1)の $\Lambda$ が $R$ のみの関数式(2.2)であることを示す観測例

この粒度分布はマーシャル・バルマー分布とよばれ、レーダーで降水を観測する際に用いられている。

よって今回は、このマーシャル・バルマー分布から各雨量にたいして単位時間当たりにおける雨滴の数を求め、後述するように空間的には雨滴の数を一様に、時間的にはランダムに配置させるというようなモデル構築を行った。次に実際にモデルを記述していく過程について説明する。

### 2.1 一粒の雨滴の音のサンプルについて

一粒の雨滴の音のサンプリングに考慮すべき事柄として主に以下のことがあげられる。

- (1) 一粒の雨滴の音は、その雨滴の大きさによってそれぞれ異なる。
- (2) 同じ大きさの雨滴でも、水面の状態などにより常に音の質や大きさが均一であるということはない。
- (3) 一粒の雨滴の音は、その落ちる対象物によっても大きく異なる。
- (4) 雨滴の終速度の問題

(1)は、大きさの異なる雨滴の音同士の主に大小関係や波形の形などについて意味している。これらは雨滴の大きさによって明らかに異なってくると考えられ、そしてそれは単純に比例関係にあるものでもないと思われる。そこで本研究では雨滴の大きさに応じてそれぞれ音のサンプルを用意し、雨音生成に用いることにした。

実際の雨滴の大きさは最小で0.5～1.0mm、最大でも5.0mmである[2]。本研究では扱う雨滴の大きさを1.0～5.0mmとする。実際の降雨時にはその範囲内のあらゆる大きさの雨滴が降っていると思われる。それらの音をサンプルとしてすべて準備するのは非常に困難である。よって本研究では雨滴の大きさを暫定的に1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0mmの5段階にわけた。そして音のサンプルを作成するときには、それぞれの大きさの水滴を再現し、その音のサンプリングを行った。

(2)は、同じ環境のもとで同じ大きさの雨滴が降っても、その時々によって音の大小が違ってくることを意味している。本研究では一つのある大きさの雨滴に対し、複数の異なる音のサンプルを用意した。今回は各大きさの雨滴に対し、最も音が大きい時のもの、最も小さい時のもの、平均的な時のもの、の3段階に分け、それぞれサンプルとして作成した。

(3)は雨滴の落ちる対象物体が変わると、その音の質や大小が大きく異なってくることを意味する。そこで本研究では我々の暮らす環境の中で雨滴の落ちる対象物体として非常に一般的であると思われる傘、土、コンクリート、水、トタン屋根の5つを選び、それぞれについてサンプルを用意した。

(4)は実際に音をサンプリングするときを生じた問題である。実際の雨においては雨滴はある終速度で落下し、その速度は雨滴の大きさによってそれぞれ異なる[2]。雨滴の音は、雨滴が落下する対象物体と衝突したときの雨滴の速度、つまりはその雨滴のもつエネルギーに依存するので、音をサンプリングするときは、雨滴を真似て作った水滴の速度が実際の雨滴の終速度に達するよう配慮しなければならない。そのためには、対象物体から充分離れた高さからその水滴を落下させる必要がある。その高さは約十数mである。しかし今回その条件を満たす無響室・防音室がなく、ごく一般的な防音室内でサンプリングを行った。そのため

終速度に達していない雨滴の音をサンプリングしたことになり、これは雨音生成の際に大きな影響を及ぼすと思われる。本研究では各大きさの雨滴のサンプルにたいし、それぞれ適当な重み付けを行うことで対処した。

## 2.2 雨滴落下分布モデルの設計

まずモデルの設計において重要となるのは主に次の3つであると考えられる。

- (1) 空間の広がりに対する雨の取り扱い
- (2) 雨滴の時間的分布
- (3) パラメータの設定

### (1) 空間の広がりに対する雨の取り扱い

実際の雨は、人の大きさから考えれば無限といっても良いほど広域にわたってふっており、その中に含まれる雨滴の数も無数にある。また、空間を考えた上で大切な事項の一つに音の減衰がある。音は遠くへ伝搬していくほど、途中の空気の状態や障害物による影響をより多く受け、指数関数的に減衰していく。そしてこれは音の周波数が高いほど顕著である[3]。

雨滴の音の足し合わせの段階において、雨滴を無限に広い空間に一粒一粒落としていき、それぞれの音に現実と同様の減衰処理(ラウドネス補正)を行ったものを集めていくことで全体の雨音が生成できると考えられる。それには音の生成に至るまでの経緯に絡む複雑な自然環境を正確に一つ一つ記述していくこと必要があるが、実際はそれだけでは表し得ないような状況も多く含まれており、困難である。よってモデルの構築の際には雨音を生成する際に以下に示すことを簡略化して考える必要性があると思われる。

- ・空間
  - ・足し合わせる雨滴の量
  - ・雨滴の音に対するラウドネス補正の実現方法
- そこで本研究では感覚的ではあるが以下に述べるような方法で簡略化する。

まず空間を大きく3段階に分ける。一つは雨音を聞いている人を含む周囲の空間を想定し、他の二つは順に人から距離おいていった所を想定する。このようにして空間をより小さくして扱う。

次に雨滴の量は、それぞれの空間内に降る雨滴の数を単位面積上に降る雨滴の数とすることで簡略化した。

そしてラウドネス補正であるが、雨滴の一粒一

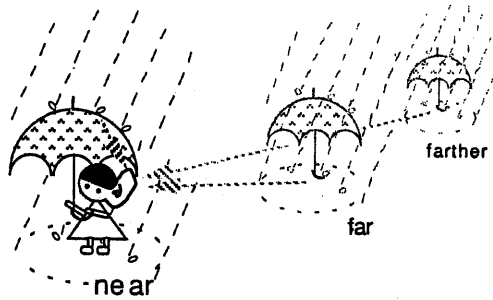


Fig 2.2.1 空間概念図

粒に対して処理していたのでは計算が追いつかないので、まず Fig 2.2.1 中の人から距離をおいている二つの空間にたいしそれぞれ、一度サンプル音を足し合わせたものに一括して処理を行うことで簡略化する。

そしてラウドネス補正自体の問題であるが、実際の音の減衰過程には様々な状況が複雑に絡んでおり、その1つ1つを正確に記述することは困難であるので、以下の示す方法で簡略化する。

音は高い周波数成分ほど早く減衰するので、人の耳に届いたときには結果的に低い周波数成分よりも多くカットされている。これを一種のローパス・フィルタと考え、それぞれの空間ごとでサンプルを重ね合わせて作成した音にまず平滑化処理を行う。次に音の減衰の効果を出すため作成した波形の振幅を空間ごとに異なる重みで圧縮する。どの程度平滑化や圧縮をすればよいかは、2.3で述べるようにモデル全体の構築の際に決定する。

このようにして3つの空間でそれぞれ音を作成し、最後に足し合わせるという方法で雨音を生成する。

### (2) 雨滴の落下の時間的分布

実際の雨において、雨滴は周期的というよりもむしろランダム的に降っていると思われる。雨量が決まれば単位時間当たりに降る雨滴の数が求められるので、まず雨滴の落下間隔の平均時間を求める。そして今回は、その平均時間にしたがう正規分布にもとづいて、個々の雨滴同士の落下間隔をランダムに決定した。

### (3) パラメータの設定

雨音に大きく影響するものとして、主に3つがあげられると思われる。

- ・ 1時間当たりの雨量

- ・ 風
- ・ 雨滴の落下の対象物体

よって今回はこれらをパラメータとしてモデルに設定する。次に個々のパラメータが音の作成過程で具体的にどう影響するかを考える。

- ・ 1時間当たりの雨量

雨量を変化させると単位時間当たりに降る雨滴の数が変化する。すなわち雨滴の落下の時間的分布が変わることになる。よって音の作成過程の中で具体的に変化するのは(2)で述べたように雨滴の落下間隔の平均時間である。

- ・ 風

実際の雨の中で、風が吹いているときと吹かないとき、また風の強弱によって音が瞬時的ではあるが大きく変化する。そこで雨音に対する風の影響を次の2つで表現した。1つは落下する雨滴の数の瞬時的な変化である。これは雨滴が風に流されて、瞬時的に雨滴の時間的分布が疎または密になるということを踏まえている。これは1時間当たりの雨量の変化の時と同じ処理になる。2つめは雨の音の全体的な大きさの変化である。

- ・ 雨滴の落下の対象物体

(1)で述べた3つの空間ごとに、使用するサンプルの種類をリアルタイムで変更できるようにした。

## 2.3 モデルの作成

モデルを構築する上で、モデル内にある種々の係数は本来、実際の物理特性を正確にモデル化することで必然的に決まるものであるが、自然環境の中にはそういった記述の足し合わせだけでは求められない複雑な状況をも含んでいる。そういう意味では、モデルの基本的な骨組みまではある程度まで作り上げるが、そこからさらに各種係数を定めるには、実際の自然環境のある一つのパターンをもとに求めることも必要である。その手法で一度モデルを構築すれば、その後は様々な状況における音が作成できるようになり、それが本研究の目的でもある。

今回は実際の雨の音（録音）を、主に聴覚系で解析しながら以下に示す係数の値を求め、モデルを構築した。

- ・ 一粒の雨滴の音のサンプルに対する重み係数
- ・ ラウドネス補正の処理の度合い
- ・ 各空間ごとの音を足し合わせる際の重み係数

### 3. アプリケーションの設計

実際に計算機上で雨のモデルを構築し音の生成を行うアプリケーションを作成した。アプリケーションの主な設計方針をあげると

- (1) 簡単なパラメータ操作
- (2) リアルタイム処理
- (3) シンプルなシステム設計

である。

#### (1) 簡単なパラメータ操作

モデルに設定したパラメータをユーザが簡単に扱えるようにすることは重要である。2.2 (3) で述べたようにモデルには実際の物理量に対応したパラメータが複数設定されている。これによりモデルの状態を多様に変化させることが可能なのであるが、これらを自由かつ簡単に扱えるようユーザに提供する必要がある。

今回のアプリケーションでは OSF/Motif を利用した GUI (Graphical User Interface) を採用し、各物理量に対応したスライダ状のオブジェクトをもつシンプルなウィンドウを設計した (Fig 3.1)。

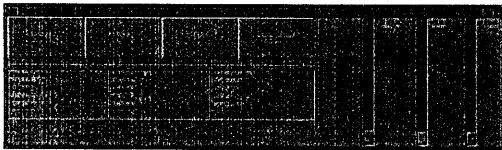


Fig 3.1 メイン・ウィンドウ

ユーザはそのウィンドウ内のオブジェクトを動かすだけでそれに連動する複数のパラメータを設定・変更できる。これによりパラメータのコントロール性を高めている。

#### (2) リアルタイム処理

音生成をリアルタイム処理化することによる利点は多い。

- ・パラメータを設定してからの出力が即座に得られるので、一つの音を作成するのにかかる時間的負担がない。
- ・各々のパラメータの値が音にもたらす効果を調べていくことが非常に簡単になる。よってユーザが様々な音を実験的に探っていく際の労力が軽減される。
- ・各パラメータはリアルタイムに設定変更を行えるので、例えば雨が降り始めてから本降りに至るまでのように音を連続的に変化させることが

可能となる。

つまり、リアルタイム処理にすることで、ユーザとアプリケーションとの間のインタラクティブ性が高まるといえる。

次の節でリアルタイム処理をふまえた実際のアプリケーションの設計について説明する。

#### (3) シンプルなシステム設計

今回のシステム設計の方針は、特別なハードウェアを用いずに、ソフトウェアだけで処理可能にするということにある。本研究の音の生成アルゴリズムのもとともいえる Granular Sampling を用いて音を生成する場合、特にリアルタイム処理を行おうとすると、多くは DSP (Digital Signal Processor) など特別なハードウェアを必要としてしまう[4]。本アプリケーションは生成する雨音のもととなる Grain にサンプルそのものを使い、音の生成から出力までを 1 台の workstation (WS) で行えるように設計した。

WS には SGI OCTANE を使用し、サウンド系の処理には OCTANE に標準で装備されているツールを利用している。Fig 3.2 にアプリケーションの概要を示す。

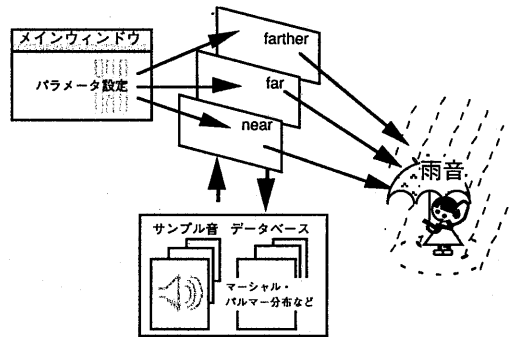


Fig 3.2 アプリケーション概念図

Fig 3.2 に示すように、各処理ごとにプロセスを割り当てている。メインプロセスである GUI プロセスでユーザが設定したパラメータ値は直ちにその子プロセスに渡される。各々の子プロセスはそのパラメータ値に応じて種々の係数を変更し、音を生成していく。また、今回はリアルタイム処理を目標にしているため、プログラム内の計算量を少しでも軽減するため、

- ・雨滴の音のサンプルファイルおよびマーシャ

ル・バルマー分布などの定数はデータベースとして予めメモリにロードしておき、必要に応じてアクセスする。

各プロセスで作成した雨音を最終的に足し合わせるという処理は、再生の際にシステムのサウンドドライバ内で処理させ、プログラム内では行わないようにした。

また今回は UNIX システム内の時計で実際の時間の経過をチェックしながら、それに合わせて雨音を作成していくという処理を行っている。

以上によりアプリケーションを作成し、実際に雨音を生成した。

#### 4. 音の評価

本稿では、実際の雨の音を基準にしてモデルを構築し、そこから様々な状況における雨音の生成を行うアプリケーションを作成した。その一連の音が本当に雨らしいのかどうかを評価する前に、一つ問題点をあげると、モデル構築の基準となった本物の雨音が本当の雨音なのか、ということである。つまり、今回基準となった音には、実際に雨が降っている中で録音をした音を用いているので、その音は録音機器や録音時の周囲の雑音などにより、純粋な雨音のみをサンプリングしたとは言いがたいものになっていた。そのため、作成した音と本物の雨音とを数値的に評価するには、特に今回は困難であり、また「雨らしさ」というものが具体的にどういった数字で現れるのか未知な部分もあったため、今回は聴覚系の評価を中心に行った。また、本研究で作成した雨音のいくつかを表題の URL においてるので、是非一度試聴していただきたい。それに対する評価も頂ければ幸いである。

ここでは作成した雨音を試聴してもらった複数の人から頂いた評価の中から、いくつかを紹介する。

- (1) 作成した雨音を試聴してもらった際、同じ音でもスピーカーからの音量を大にしたときと小にしたときでは、大半が後者の方が雨らしいと答えた。この結果から人は実際の雨音を、耳に残らないほどの小さな音であると認識していると思われる。
- (2) 作成した雨音と、その音に晴れた日の街頭で録音した音を足し合わせたものとを聞き比べたとき、大半が後者の方が雨らしいと答えた。

(3) 作成した雨音には、水っばさがほとんどない、すなわち水がはねる音がないと指摘された。

(4) 実際の雨の音を録音したものと、その時とほぼ同じ雨量（約 3 mm/h）の設定で作成した音（街頭の音有り）とを聞いてもらい、どちらが本物かを当ててもらったところ、正解数は約半分強だった。この結果より、今回作成した雨音は演出されていない、より本物に近い音になっているといえる。

今後も聴覚系による評価を続けていく一方で、どのように数字で評価を行うか検討する必要がある。そのためには、本物の雨を表す特徴が、例えば周波数領域等でどういった部分に現れるのかについても調べていく必要がある。

#### 5. おわりに

今回は雨滴の空間的・時間的落下分布モデルを構築し、それにもとづいた雨音の生成について紹介した。また、モデルに設定したパラメータをリアルタイムで変更できるようにしたこと、異なる状況間を連続的に変化する音も生成可能であることも示した。しかしながらモデルの記述やリアルタイム処理の方法などにまだ改良の余地が残されていると思われる。特に雨音全体の質を決定づけると言っても良い一粒の雨滴の音については、今回はサンプル音で代用したが、やはりその音自身についても研究していく必要がある。よって今後は雨滴の落下分布モデルの改良を行いながらも、一粒の雨滴の音のモデルの構築を中心に考えていきたい。

#### 参考文献

- [1] 二宮洗三：雨とメソ・システム，東京堂出版，pp.44 - 47，pp.190 - 213（1981）
- [2] 高橋喜彦：降水の物理学，地人書館，pp.3 - 6，（1957）
- [3] 小橋豊：音と音波，裳華堂，pp.124 - 133（1969）
- [4] Timothy Bartoo, David Murphy, Russel Ovens, Barry Truax : GRANULATION AND TIME-SHIFTING OF SAMPLED SOUND IN REAL-TIME WITH A QUAD AUDIO COMPUTER SYSTEM, ICMC Proceedings, pp.335 - 337（1994）