

演算奏+×：加法・乗法の筆算可聴化システム

小林稜[†] 土井良文[†] 松浦昭洋[†]

東京電機大学理工学部[†]

1. はじめに

可聴化とは、入力データからその特徴やデータ間の関係性を反映した音の信号を生成することである。主に自然現象や物理データのモニタリング、波形データの表現等のために行われ、最初期のガイガーカウンタをはじめ、波形データや画像・映像データ等様々なデータの可聴化が行われている[1]。岡田ら[2]は最近、算数で学ぶ加法の筆算過程を可聴化するシステムを提案した。同システムでは、2数を入力すると、筆算における式の記述から各桁の計算過程の記述、答の確認までを、それぞれの数やアクションに割り当てられた音とリズムで可聴化し、計算式と共に提示する。しかし、3数以上の加算やその他の演算には対応していなかった。

本稿では2数以上の加算と2数の乗算を対象に、数と演算の特徴が反映し、音楽的にも一定の鑑賞に堪える筆算可聴化システムを提案する。本システムはiPad上で動作し、入力された2~5数までの加算、および2数の乗算の筆算過程をユーザの選択した音源を用いて可聴化し、筆算の計算式と共に提示する。

2. 加法と乗法の筆算の流れ

まず、今回行う加法筆算の流れを記す。

- (1) **準備フェーズ**: 計算式を横書きし、その下部に長い横線を引く(図1(i)).
- (2) **加算フェーズ**: 最下位桁から縦方向に計算を進め、加算結果を横線下に書き、必要に応じ繰り上げを行う。本計算を最上位桁まで行う(図1(ii-1), (ii-2)).
- (3) **確認フェーズ**: 計算結果を横方向に確認して終了する(図1(iii)).

なお、繰り上がる値を書く位置には様々な流儀があるが、視線の移動の容易さを考慮し、今回は横線の真下を書くこととした。加法筆算のこの3フェーズを「起承結」と感じられる可聴化を3章で行う。

次に乗法の筆算の流れを記す(図2)。

- (1) **準備フェーズ**: 式を横書きし、下部に横線を引く。
- (2) **乗算フェーズ**: 乗数(2つ目の数)の最下位桁の数を、被乗数(1つ目の数)の各桁の数に小さい桁から掛けて、結果を横線下に書き、必要に応じ繰り上げを行う。本処理を、乗数の最上位桁まで繰り返し行い、横線下の各段に記述し、最後に横線を引く。
- (3) **加算フェーズ**: (2)の結果を最下位桁から加算する。

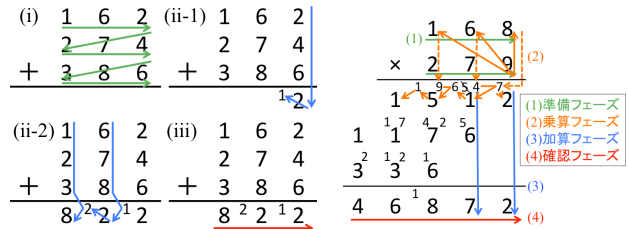


図1: 加法筆算の流れ

図2: 乗法筆算の流れ

- (4) **確認フェーズ**: 結果を横方向に確認して終了する。

乗法筆算は、加法筆算と異なり4つのフェーズを持つ。乗算フェーズでは、音の聞きやすさの面から、乗数から被乗数に向かう乗算方法を用い、加算フェーズでは、基本的に上記加法筆算の方法を用いる。乗算筆算では、これら4フェーズを「起承転結」として感じられる可聴化を行う。

3. 可聴化方法

3.1. 音の割り当て方法

文献[2]と同様、数の規則性への気付きを容易にするため、数字に次のいずれかの方法で音を割り当てる。

方法1: 0に無音(休符)を割り当て、1, 2, ..., 9にそれぞれド, レ, ..., レを昇順に割り当てる。

方法2: 0, 1, 2, ..., 9にそれぞれド, レ, ミ, ..., ミを昇順に割り当てる。

なお、繰り上がりには高音のベル等の音を与え、数以外の筆算の構成要素、つまり横線記述時や筆算終了時には、テーマに沿った音源を選んで鳴らす。

3.2. リズムの割り当て方法

3.2.1. 加法筆算の場合

n 個の非負整数 A_1, A_2, \dots, A_n ($2 \leq n \leq 5$)の加法筆算のリズムを、下記のように統一的に定める。準備として、 n 数の下位から i 桁目 ($i \geq 1$)の数をそれぞれ $A_{1,i}, A_{2,i}, \dots, A_{n,i}$ とし、 $i-1$ 桁からの繰り上がりを C_{i-1} する。 i 桁目で行われる加算は $C_{i-1} + A_{1,i} + A_{2,i} + \dots + A_{n,i}$ である。その結果の1の位の値を B_i とすると、演算結果は $10 \cdot C_i + B_i$ となる。フェーズ毎に定めるリズムの例を以下に示す。

(1) **準備フェーズ**: 各数に対応する音を1拍使って鳴らす。各行の最下位桁の数はさらに2拍程度延ばす。長い横線を引く効果音(ギロ等)を1~2拍入れる。

(2) **加算フェーズ**: 下位桁から繰り上がりがある桁とない桁で場合分けする。

(2-1) 下位桁から繰り上がりがない場合 ($C_{i-1}=0$)

n 個の数 $A_{1,i}, A_{2,i}, \dots, A_{n,i}$ は視認のみなので、それぞれに半拍与える。その桁から次桁への繰り上がりがない、つまり $C_i=0$ のとき、 B_i に $(4-0.5n)$ 拍与え、1桁全体を1小節4拍で鳴らす(図3のリズム譜1小節目)。 $C_i \neq 0$

Enzanso+ x : A Sonification System of Addition and Multiplication by Writing
 Ryo Kobayashi[†], Yoshifumi Doi[†], and Akihiro Matsuura[†]
[†]School of Science and Engineering, Tokyo Denki University
 Ishizaka, Hatoyama-cho, Hiki, Saitama, 350-0394 Japan



図3: 加法の1桁のリズム譜 ($C_{i-1}=0, n=3$ の場合)

のときは、 B_i には $n \leq 4$ のときは 1 拍、 $n=5$ のときは 0.5 拍与える ($n=5$ のときは拍数の余りがないため短くなる)。 C_i には $n \leq 4$ のときは $(2.5-0.5n)$ 拍、 $n=5$ のときは 0.5 拍与える。すると、その桁の記述にはそこまでのトータルで $0.5n+1+(2.5-0.5n)=3.5$ ($n=5$ のときは $0.5 \cdot 5+0.5+0.5=3.5$) 拍用いる。4 拍の内の残った 0.5 拍は、次桁の最初の数 $A_{1,i+1}$ を先取りして鳴らすために用いる(図3のリズム譜 2 小節目。×印は繰り上がりの 1 拍である)。なお、本節冒頭で $n \leq 5$ とした理由は、 $n \geq 6$ 以上の場合全ての数に 0.5 拍確保することができないからである。

(2-2) 下位桁から繰り上がりがある場合 ($C_{i-1} \neq 0$)

(2-1)と同様、 $A_{1,i}, A_{2,i}, \dots, A_{n,i}$ にはそれぞれ半拍与える。続いて、下位桁からの繰り上がり C_{i-1} に半拍与える。但し、(2-1)に記したように、 $A_{1,i}$ は前の小節で先取りして鳴らされているため、新たな小節冒頭は $A_{2,i}$ から始まる。このようにリズムを定めた理由は、それによって、その小節で足す数は $A_{2,i}, \dots, A_{n,i}, C_{i-1}$ の n 個で、拍数の和が (2-1)と同じ $0.5n$ となり、リズムが統一できるからである。また、 i 桁目の最初の数 $A_{1,i}$ を一つ前の小節で先取りして鳴らす手法は、音楽的に「弱起(アウフタクト)」と呼ばれ、(2-1)との質の違いを感じさせると同時に、鑑賞者を引き込む効果も持つ。続く 2 数 B_i, C_i のリズムについては、 $C_i=0$ か否かで場合分けし、(2-1)と同様の拍を与える。なお、その場合のリズム譜は、 $A_{1,i}$ を一つ前の小節で先取りして 0.5 拍で鳴らす他は、図3と同様である。

(3) **確認フェーズ**: 筆算の最後に、答の確認として、答を最上位桁の数から 1 拍ずつ鳴らし、その直後にビブラスラップ等の効果音を 1 拍鳴らして、可聴化を終了する。

3.2.2. 乗法筆算の場合

- (1) **準備フェーズ**: 加法筆算の場合と同様である。
- (2) **乗算フェーズ**: 2 数の乗算の各桁では、下位桁からの繰り上がりの有無に関わらず、乗数×被乗数を行うので、3.5 拍での弱起は用いず、各桁共通で 1 小節 4 拍用いる。数値は図2(2)に示した順に鳴らし、例えばフルに繰り上がりがある 9×6 の桁では、9, 6, 5, 4, 7, 1, 6 の順に鳴らす。拍数は $54+7=61$ で 5 が変化してできる 6 のみに 1 拍与え、それ以外の数は 0.5 拍で合計 4 拍とする(図4のリズム譜)。下位桁から繰り上がりがない場合は、その桁の乗算結果が 1 桁ならばその数に 3 拍与え、2 桁ならば 10 の位の数に 0.5 拍、1 の位の数に 2.5 拍与える(いずれも合計 4 拍)。さらなる場合分けの詳細については、本稿では紙面の都合で割愛する。



図4: 乗法の1桁のリズム譜の例

(3) **加算フェーズ**: 基本的に 3.2.1 節で述べた加法筆算のリズムを用いる。但し、各桁で加法の行数が異なるため、行数に対応した加法筆算の可聴化方法を用いる。例えば 2 桁目(図2の $1+6$)では、2 数の加法筆算のリ

ズムを用いる。但し 1 桁目のみ、1 行目の数(図2の 2)に 1 拍、答に 3 拍与える。

(4) **確認フェーズ**: 加法筆算の場合と同様である。

加法、乗法共リズムの割り当て方法には様々なバリエーションがある。例えば加法において、3.2.1 節では 4/4 拍子の場合を記したが、3 数までの加算は 3 拍 3/4 拍子での可聴化も可能である。また、今回各桁の答の拍数は 1 拍、繰り上がりの拍数は n により可変としたが、逆に繰り上がりも 0.5 拍、答の拍数を $(3-0.5n)$ とする方法もある。また、繰り上がりのある場合に弱起を用いず $A_{1,i+1}$ を 1 小節の冒頭で鳴らし、各桁で 4 拍用いることも可能である。詳細は稿を改めて発表予定である。

4. 筆算可聴化システム

本システムは Objective-C で作成され、iOS5 以上の iPad 上で動作する。

4.1. 画面構成と操作方法

本システムは電卓画面、筆算可聴化画面、設定画面を持つ。電卓画面から数値と演算の種類を入力し、 '=' を押すと可聴化画面が表示される(図5)。画面右下のスライダーによりピッチを 1/4~4 倍に変更可能である。右上の設定ボタンを押して設定画面を表示し、数と音階の対応、音源、割り当てリズム等の選択を行う。その後画面下方にある Play ボタン▶を押し、可聴化を開始する。

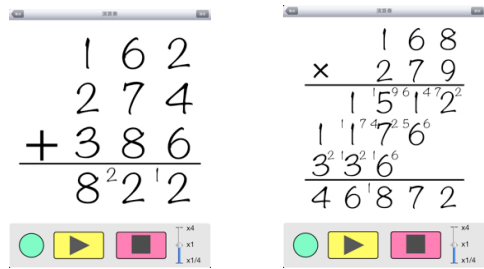


図5: 可聴化画面と加法・乗法の可聴化例

4.2. 可聴化結果の分析とまとめ

図5は加法、乗法の筆算可聴化の実行例である。これらの例も含め、2~5 数の加算と 2 数の乗算の筆算の可聴化が可能であることを確認した。可聴化による数値的特徴の読み取りでは、数字間に数列的特徴がある場合、例えば 1, 5 の後 2, 6 が鳴る場合、その特徴は、対応する音の平行移動として心地よく聞き取ることができる。繰り上がりの発生は、ベル音等による音やリズムの変化から認識でき、その発生パターンに多様性があるため、様々な数の可聴化を楽しむことができる。また、音源により様々なテーマ、世界観で楽しめることも確認した。

今後の課題として、新たなリズムや音楽要素の探究、減法・除法への拡張、筆算学習への応用が挙げられる。

参考文献

[1] T. Hermann *et al*, Sonification Hand Book, Logos Publishing House, 2011.
 [2] 岡田祥一, 松浦昭洋, 演算奏 Add: 加法の筆算可聴化システム, 映像表現・芸術科学フォーラム, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 37, No. 17, pp. 227-228, 2013.