

## 類似メロディー区間検出による音楽時系列検索の高速化

西村 拓一† 滝田 順子‡ 後藤 真孝\* 岡 隆一†

† 新情報処理開発機構

〒 305-0032 茨城県つくば市竹園 1-6-1 つくば三井ビル 13F

TEL:0298-53-1686, E-mail:nishi@rwcp.or.jp

‡ (株) 数理システム

\* 電子技術総合研究所 / 科学技術振興事業団さきがけ研究 21 「情報と知」領域

あらまし 我々は、音楽音響信号から得られる時系列データベースから、鼻歌のメロディーに類似した区間を検索する研究を行っている。しかし、データベース内に類似したメロディーが複数箇所に存在する場合には、各区間に対する比較計算が複数回生じる。そこで、メロディーが類似している区間をあらかじめ検出し、類似区間を統合した時系列ネットワークをデータベースとすることで、検索時の計算量を低減する。既に、時間伸縮を許容して類似区間検出可能な RIFCDP が提案されているが、移調したメロディーを同一視できない。そこで、音高変化に応じて局所パスを変更するモデル依存傾斜制限型 RIFCDP (mpRIFCDP) と呼ぶ手法を提案する。本稿では、基礎実験により mpRIFCDP の性能を確かめる。

キーワード 時系列パターン検索, 音楽検索, 類似区間検出

## Speedup of a Time-sequence Retrieval Method For Musical Audio Signals by Integrating Similar Melodic Intervals

Takuichi Nishimura†, Junko Takita‡, Masataka Goto\* and Ryuichi Oka†

† Real World Computing Partnership

Tsukuba Mitsui Building 13F, 1-6-1 Takezono Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0032, Japan

PHONE:+81-298-53-1686, E-mail:nishi@rwcp.or.jp

‡ Mathematical Systems Inc.

\* Electrotechnical Laboratory / "Information and Human Activity", PRESTO, JST

**Abstract** We have developed a music retrieval system that takes a humming query and finds similar audio intervals (segments) in a music audio database. Because our previous time-sequence matching method was not efficient for a database containing several similar intervals, we organize the database into an efficient network by integrating similar intervals. For this purpose we propose a model-driven path RIFCDP (mpRIFCDP), which is an improved version of the conventional RIFCDP for finding similar intervals considering temporal warps. While the conventional RIFCDP was not able to deal with a transposed melody, our mpRIFCDP can appropriately find intervals similar to such a melody by considering multiple possibilities of transpositions. Test results show the effectiveness of the proposed method.

**key words** Time-Sequence Pattern Retrieval, Music Retrieval, Similar Interval Retrieval

## 1 まえがき

近年、計算機、ネットワーク技術などの進歩に伴い、画像、音楽、映像などのコンテンツを個人が容易に利用できるようになってきている。そのため、キーボードやマウスではなく音声やジェスチャなどの、より自然なインタフェースによるコンテンツ検索技術への期待が高まっている。

このような状況を踏まえ、本稿では、人の自然な鼻歌や口笛によって音楽データの検索を実現する課題を取り上げる。既に、蔭山ら [1]、園田ら [2]、西原ら [3] は、鼻歌によって楽曲の曲名を検索する方式を提案している。これらの方式では、データベース作成においてメロディーの正確な音符系列を用いることで、多量の曲数から高速な検索を実現している。

一方、我々は、音楽音響信号のデータベースから鼻歌と類似した区間を検索する研究を行っている。[5] まず、音楽音響信号をフレーム（本実装では 64ms）ごとに分析し、音高ごとにメロディーの確信度を求めた時系列（本稿では、音高確信度時系列と呼ぶ）を作成する。鼻歌についてのみ、音高確信度時系列から各フレームごとに最も確信度の高い音高を取り出した音高時系列を作成し、さらに時間的な音高変化を求めた音程（音高差）時系列を求めて、これをモデルとする。そして、音楽の音高確信度時系列とモデル（鼻歌の音程時系列）とをモデル依存傾斜制限型連続 DP (Model-driven Path Continuous DP : mpCDP) と呼ぶ手法によって比較し、データベース中の任意の位置の類似区間を検索する。この mpCDP は、一定範囲の時間伸縮を許容して、参照パターンに類似した部分区間を入力系列中から検出可能な連続 DP (Continuous Dynamic Programming) [6] を拡張した手法であり、メロディーの移調に対応できるように連続 DP を改良してある。（ここで、各種連続 DP においては、鼻歌などの検索入力であるクエリから得られる時系列パターンを参照パターン、データベースから得られる時系列パターンを入力パターンと呼ぶものとする。）

しかし、データベース内に類似したメロディーが複数箇所に存在する場合には、各区間に対する比較計算が複数回生じる。例えば、通常の楽曲では、数回同じメロディーが出現する。また、

データベース中に、同じ曲でありながら個人がカラオケで歌った音楽音響信号と TV 映像から録音した音楽音響信号とが同時に含まれることも考えられる。そこで、メロディーが類似している区間をあらかじめ検出し、類似区間を統合した時系列ネットワークをデータベースとすることで、検索時の計算量を低減する。このためには、テンポの違いと音高の違いを許容した類似メロディー区間検索手法が必要である。

既に、2つの時系列データ間について、任意の位置における類似した区間（類似区間）対を検出することを可能とする、Reference Interval-free 連続 DP (RIFCDP) [7] が提案されている。この手法は、連続 DP に対して、参照パターン中の部分区間と入力パターンの部分区間とを比較できるようにしたものである。この RIFCDP は、音楽音響信号中の類似したメロディー区間の検出を可能とする。しかし、全体的に音高が異なる場合は類似したメロディーであっても検出できない。

そこで、本稿では、モデル依存傾斜制限型の RIFCDP (Model-driven Path RIFCDP : mpRIFCDP) と呼ぶ手法を提案し、類似メロディーの検出を目指す。これは、RIFCDP において mpCDP を導入するものであり、参照パターンの音高確信度時系から抽出した音程時系列のモデルと、入力パターンの音高確信度時系そのものを用いた RIFCDP である。ただし、参照、入力とも同じ音楽音響信号から作成する。

また、メロディー抽出がより困難な音楽データに関しては、参照パターンも音高確信度時系列とし、これを音高軸方向にシフトした複数のテンプレートを用いるマルチテンプレート RIFCDP を導入する。これは、局所類似度演算量が mpRIFCDP より多いものの、クエリのメロディーを 1 音高に決定できない場合に効果的である。

本論文の構成は、2 節にて、提案手法の説明上必要な従来の各種連続 DP について述べ、3 節にてモデル依存傾斜制限型 RIFCDP を提案し、その概念や特徴を説明する。4 節では、マルチテンプレート RIFCDP の実現方法を示し、5 節にてデータベースの圧縮法および検索法について述べる。さらに、6 節にて本手法の基礎評価を行い、7 節でまとめる。

## 2 従来の各種連続 DP について

図1に連続DP, RIFCDP, mpCDPおよび今回提案のmpRIFCDPの位置付けを示した。連続DPは、従来の時間単調型の動的計画法(DP)を改良し、参照パターンと類似した入力パターン中の部分区間を切り出す機能を付加したものである。また、RIFCDPは、連続DPにおいて参照パターン中の部分区間の切り出しも可能とした方法で、二つの時系列中の類似した部分区間を検出できる。さらに、mpCDPは、鼻歌による音楽検索システムにて提案した手法であり、連続DPの入力パターンを2次元化し、参照パターンの変化と類似した変化パターンを入力パターン中から検出する。本稿にて提案するmpRIFCDPは、RIFCDPおよびmpCDPの両性質を併せ持つ。以下、従来法について概説する。

### 2.1 連続 DP

連続DP[6]は、図1(a)下部分に示すように、 $T$ フレームの特徴ベクトルからなる参照パターン $R_\tau$  ( $1 \leq \tau \leq T$ )と入力パターン $I_t$  ( $0 \leq t < \infty$ )との累積類似度を入力軸方向に連続して求める。ただし、入力、参照の時間軸を $t, \tau$ と区別した。累積類似度は、以下の手順で漸化的に求める。まず、 $I_t$ と $R_\tau$ との局所類似度を $d(t, \tau)$ と表記する。次に、図1(d)に示すような3個のパスについて、類似度が最も高いパスを選択して累積類似度 $S(t, \tau)$ を更新する。漸化式 ( $1 \leq t$ ):

$$S(t, \tau) = \max \begin{cases} S(t-2, \tau-1) + 2 \cdot d(t-1, \tau) \\ \quad + d(t, \tau) \\ S(t-1, \tau-1) + 3 \cdot d(t, \tau) \\ S(t-1, \tau-2) + 3 \cdot d(t, \tau-1) \\ \quad + 3 \cdot d(t, \tau). \end{cases} \quad (2 \leq \tau \leq T) \quad (1)$$

図1(d)中の各格子点近傍の数字は、局所類似度に対する重みであるが、どのパスを通っても参照軸方向に1フレーム上がるごとに3の重みがかかるため、累積類似度 $S(t, T)$ を重みの和 $3T$ で割れば正規化できる。

次に、図1(a)中央部に示すように、累積類似

度 $S(t, T)$ の入力軸 $t$ における極大点を求め、これを終端とする入力中の類似区間を参照パターンの類似区間として切り出す。

つまり、局所的なパスの選択処理を、参照、入力平面内の格子点すべてに対して左下から順次行うことで、最大の累積類似度およびそのときの最適パスを求めている。参照パターン全体との累積類似度 $S(t, T)$ は、 $\frac{1}{2} \sim 2$ 倍の時間伸縮を許した入力と参照パターンとの最大の累積類似度となっている。

### 2.2 RIFCDP

RIFCDPは、参照、入力平面の各格子点において(1)連続DPの計算、(2)累積類似度履歴などのコピー及び更新、(3)部分区間の累積類似度計算、(4)類似区間融合を行なっている。これを、図1(b)を用いて順に説明する。まず、検出したい類似区間の最小フレーム数と最大フレーム数を予め予備実験により決定しておく。

#### (1) 連続 DP の計算

連続DPにより点 $(t, \tau)$ を終点とする最適パスを求める。ただし、これは参照パターン $1 \sim \tau$ と入力との最適パスである。

(2) 累積類似度履歴などのコピー及び更新点 $(t, \tau)$ を終点とする最適パス上の累積類似度および入力時刻を保持し、それぞれのコピーおよび更新を行なう。

#### (3) 部分区間の累積類似度計算

まず、点 $(t, \tau)$ を終点とする最適パス上の部分区間の累積類似度を、終点の累積類似度から始点の累積類似度を引いたものを部分区間のフレーム数で割って求める。さらに、図1(b)右図のように、点 $(t, \tau)$ を終点とする部分区間のフレーム数を検索したい類似区間の最小フレーム数から最大フレーム数まで変化させ、累積類似度が最大となりかつ一定しきい値以上の部分区間を類似区間とする。

#### (4) 類似区間融合

既に得られた類似区間と処理(3)で得られた区間とをマージする。

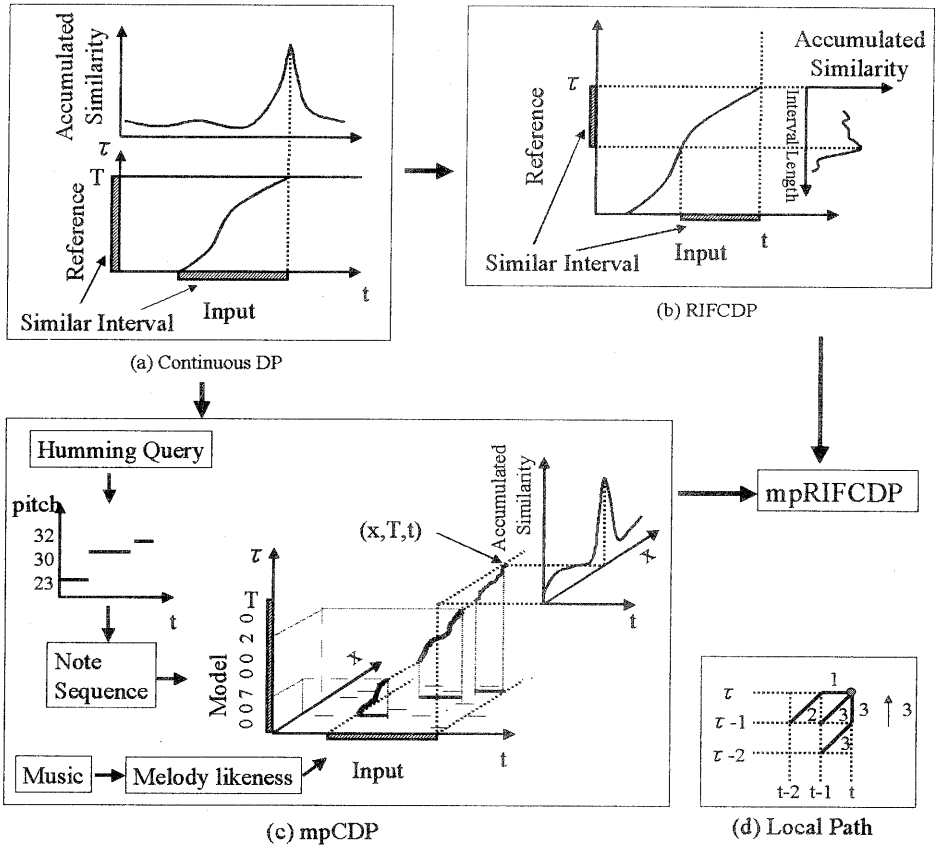


図 1: 各種連続 DP

### 2.3 モデル依存傾斜制限型連続 DP

モデル依存傾斜制限型連続 DP(mpCDP) は、鼻歌から得られた音程時系列をモデルとし、音楽音響信号から得られた音高確信度時系列を入力パターンとして検索を行う。mpCDP は、クエリから比較的安定した音程時系列を抽出できることを仮定している。

図 1(c) を用いて説明する。まず、鼻歌から各フレームにおける音高時系列を求め、この時間差分である音程時系列を mpCDP のモデルとする。音楽からは音高確信度時系列を求め、通常この確信度を mpCDP の局所類似度とする。局所パスは、連続 DP と同様に時間伸縮を許容する。しかし、モデルと同じ音高変化パターンを検出するために、モデルの音程に従って音高軸方向へ局所パスをシフトさせる。

上記操作を漸行的に行うことにより図 1(c) 右上のように、点  $(t, T, x)$  (音高軸を  $x$  とする) を終点とする累積類似度が参照パターン終点に対応する入力の音高において極大となる。

## 3 モデル依存傾斜制限型 RIFCDP

### 3.1 概念

モデル依存傾斜制限型 RIFCDP(mpRIFCDP) では、mpCDP における音高の異なるメロディーを検索できる機能および RIFCDP の持つ参照パターンの部分区間を自由とする機能を併せ持つ。従って、RIFCDP において連続 DP の代わりに mpCDP を採用すればよい。

まず、RIFCDP と同様に、検出したい類似区

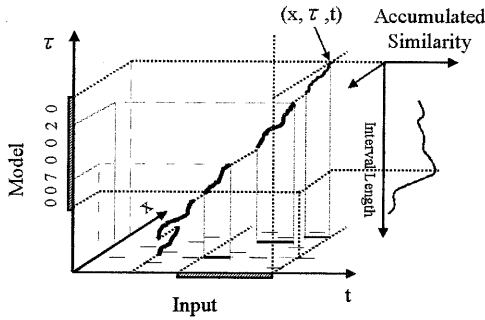


図 2: mpRIFCDP

間の最小フレーム数と最大フレーム数を予め決定しておく。次に、mpCDPを行い、図2右方のように、 $(x, \tau, t)$ を終点とする部分区間の累積類似度を求める。このとき、部分区間長を最小フレーム数から最大フレーム数まで変化させて累積類似度が最大となりかつ一定しきい値以上の部分区間を類似区間と決定する。mpRIFCDPは、mpCDPと同様にクエリから比較的安定した音程時系列を抽出できることを仮定している。

### 3.2 定式化

まず、メロディーの基本周波数が、最低周波数  $f_b$  [Hz] (本実装では 110Hz) から最高周波数  $2^{X/12} f_b$  [Hz] ( $X = 36$ ) の帯域にあるものと仮定し、入力 of 音楽音響信号から周波数  $2^{x/12} f_b$  [Hz] の音がメロディーである確信度を求めた、フレーム数  $K$  の長さの音高確信度時系列を、 $I_t(x)$  ( $t = 1, \dots, K, x = 1, \dots, X, 0 \leq I_t(x) \leq 1$ ) と記述する。以下、 $x$  を音高番号 (Note number) と呼ぶ。音高確信度時系列は、後藤の手法 [4] のような、各音高が優勢な度合いを推定可能な手法によって求めることができる。本実装では、後藤の手法から着想を得た手法 [5] を用いた。

同様に、参照の音楽音響信号についても  $R_\tau(x)$  ( $\tau = 1, \dots, T_0, x = 1, \dots, X, 0 \leq R_\tau(x) \leq 1$ ) を求める。このとき、参照パターンから音程時系列  $r(\tau)$  ( $\tau = 1, \dots, T$ ) (モデル) を以下のように抽出する。

まず、各時刻における最もメロディーである

確信度の大きい音高番号時系列  $x_\tau$  を求める。

$$x_\tau = \arg \max_{1 \leq x \leq X} R_{\tau+\tau_{min}}(x) \cdot (\tau = 0, \dots, T) \quad (2)$$

ただし、 $T = \tau_{max} - \tau_{min}$  とし、 $\tau_{min}, \tau_{max}$  は、 $\max_{1 \leq x \leq X} R_\tau(x)$  が確信度のしきい値  $\epsilon_q$  を上回る最も小さい  $\tau$  および最も大きい  $\tau$  とする。つまり、音高確信度時系列から確信度がしきい値以下の両端をカットして音高番号時系列を作成する。ここで、確信度時系列  $R'(\tau)$  を  $R'(\tau) = R_{\tau+\tau_{min}}(x_{\tau+\tau_{min}})$  と定義する。

次に、現時刻  $\tau$  以前に確信度がしきい値  $\epsilon_q$  を上回った最も現時刻に近い時刻  $\tau'$  を求める。

$$\tau' = \max_{\tau^* < \tau} \{ \tau^* \mid R'(\tau^*) > \epsilon_q \} \quad (3)$$

これらの記号を用いてモデル  $r(\tau)$  ( $\tau = 1, \dots, T$ ) を、以下の式で求める。

$$r(\tau) = \begin{cases} x_\tau - x_{\tau'}, & \text{if } R'(\tau) > \epsilon_q \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

つまり、確信度がしきい値  $\epsilon_q$  以下の場合は 0, そうでない場合は、現時刻以前にあるしきい値  $\epsilon_q$  以上の確信度を持つ最も近い音との音程としている。

このとき、局所類似度  $d(x, \tau, t)$ 、累積類似度  $S(x, \tau, t)$  を次の (5) ~ (7) で定義する。

$$d(x, \tau, t) = \begin{cases} I_t(x), & \text{if } R'(\tau) > \epsilon_q \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$S(x, 1, t) = 3d(x, 1, t); \quad (6)$$

$$S(x, \tau, t) = \max \begin{cases} S(x - r(\tau), \tau - 1, t - 2) \\ \quad + 2d(x, \tau, t - 1) + d(x, \tau, t) \\ S(x - r(\tau), \tau - 1, t - 1) \\ \quad + 3d(x, \tau, t) \\ S(x - r(\tau) - r(\tau - 1), \tau - 2, t - 1) \\ \quad + 3d(x - r(\tau), \tau - 1, t) + 3d(x, \tau, t) \end{cases} \quad (7)$$

ただし、境界条件は以下で与える。

$$d(x, \tau, t) = S(x, \tau, t) = 0. \quad (x \leq 0 \text{ or } \tau \leq 0 \text{ or } t \leq 0)$$

この局所類似度を求めるときの連続 DP との違いは、局所パスを音高番号  $x$  軸方向にモデル  $r(\tau)$  だけシフトして累積類似度の最大値を求める点である。

次に、RIFCDPと同様に、累積類似度が最も高くなる点  $(x, \tau, t)$  を終点とする部分区間を求める。さらに、この部分区間の類似度が  $x = 1, \dots, X$  にて最大となる部分区間を選択する。最後に、この部分区間と既に得られた類似区間とをマージする。

#### 4 マルチテンプレート RIFCDP

クエリから安定した音程時系列を抽出できない場合、音程時系列を求めて mpRIFCDP を行うことは得策でない。このような事態は、メロディーの音量が比較的小さい場合や複数音のメロディーが存在する場合などに生じる。そこで、クエリから抽出する参照パターンも音高確信度時系列とし、これを音高軸方向にシフトした複数のテンプレートを用いるマルチテンプレート RIFCDP を導入する。

3.2 節と同様に入力パターンの音高確信度時系列を、 $I_t(x)$  参照パターンの音高確信度時系列を  $R_\tau(x)$  としたとき、

参照パターンの音高番号を  $x_s$  シフトした RIFCDP の局所類似度  $d(t, \tau)$  を、例えば次式で定義する。

$$d(t, \tau) = \frac{\sum_{x=x_1}^{x_2} \{R_\tau(x+x_s) \cdot I_t(x)\}}{\sum_{x=x_1}^{x_2} \{R_\tau(x+x_s)^2\} \sum_{x=x_1}^{x_2} \{I_t(x)^2\}} \quad (8)$$

ただし、 $x_1 = \max(0, x_s), x_2 = \min(X+x_s, X-x_s)$  とする。

マルチテンプレート RIFCDP は、ノイズなどにより安定したメロディーが求まらない場合に mpRIFCDP に比べて有利であるが、局所類似度演算での計算量が増大する。

ちなみに、従来の mpCDP を用いた鼻歌検索システムでも、マルチテンプレート RIFCDP と同様に、参照パターンを音高確信度時系列とし、これを音高軸方向にシフトした複数のテンプレートを用いたマルチテンプレート連続 DP を導入することで、安定したメロディーが求まらないクエリーにて有利となる。

#### 5 データベース圧縮による検索

本節では、類似区間が得られたときに逐次データベースを圧縮して時系列ネットワーク表

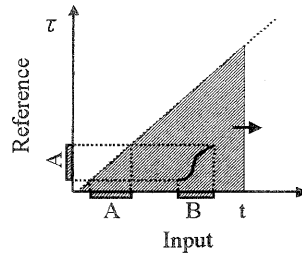


図 3: 順次類似区間検出

Reference と Input は同じ時系列データ

現にする方法 [8] および、このデータベースからの検索手法について説明する。

(1) データベースの各フレームをノードとし、これらを時間順に並べ、隣同士のノードを順次連結する右向き有向アークを作成する。

(2) 図 4(a) のように、データベースの始端から順次類似区間検出を行い、初めて部分区間 A と部分区間 B が類似区間として検出されたとする。この順次類似区間検出は、図 3 のように、 $\tau < t$  となる領域を  $t$  軸正方向に順次 RIFCDP を行えばよい。

(3) 図 4(b) のように区間 A の終端フレームから区間 B の終端フレームの次のフレームへアークを作成する。また、区間 B の始端フレームの前にフレームから区間 A の始端フレームへのアークを作成する。

(4) 図 4(c) のように区間 A と区間 B を統合して区間 A' のみとする。このとき、区間 B の左右のノードは、アークで結ばない。また、区間 A, B の情報は、各フレームの平均、分散、各アークの通過回数など必要情報を区間 A' に保持する。

(5) 続きのデータベースに関して、既に作成したネットワークモデルとの類似区間を調べ、処理 (2) ~ (4) を繰り返す。各種 RIFCDP では、ネットワーク中のアークのつながりを時間軸として局所パスを生成すれば、ネットワーク中の類似区間検出が可能である。

(6) 上記の処理により、データベースのネットワーク化が終了後、mpCDP または mpRIFCDP により、クエリと類似した任意の位置の類似区間をネットワーク中から検索する。このとき、

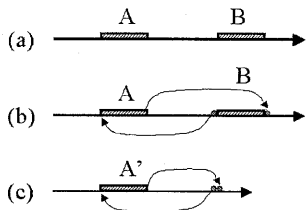


図 4: ネットワークモデル作成手順

各種 RIFCDP と同様にネットワーク中のアーキのつながりを時間軸として局所パスを生成すればよい。

## 6 基礎実験

### 6.1 実験方法

本節では、人工データと人の鼻歌データの2種の実験データを用いた実験を行い、mpRIFCDPの基礎的な評価を行う。

図5、図6に人工データの参照パターンを音高系列に変換したものおよび入力パターンを示す。横軸は時間軸、縦軸は音高番号である。参照パターン中の部分区間Aと類似した音高変化がデータベース中に3箇所挿入してある。これらは、時間方向の伸縮や移調を伴っている。

また、鼻歌データとして、「かえるの歌」を次の4フレーズ歌って録音した。

(第1フレーズ) かえるのうたが

(第2フレーズ) きこえてくるよ

(第3フレーズ) がががが

(第4フレーズ) げげげげげげげががが

この鼻歌から音高確信度時系列を求め [5]、参照、入力パターンを作成した。正解区間は、楽譜より以下のように作成した。

正解 A) 第1フレーズ-第2フレーズ (音高の違う同一メロディーライン)

正解 B) 第1フレーズ-第4フレーズ (同一メロディーライン)

正解 C) 第2フレーズ-第4フレーズ (音高の違う同一メロディーライン)

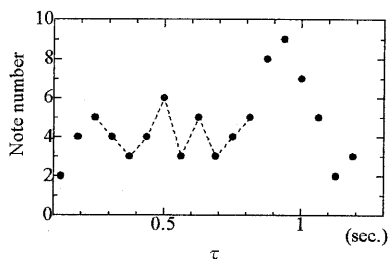


図 5: 人工データの参照パターンを音高系列に変換したもの

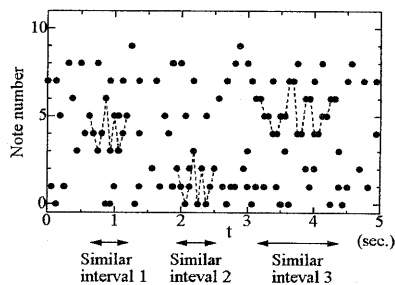


図 6: 人工データの入力パターン

### 6.2 実験結果

人工データによる結果を図7に示す。参照パターンの部分区間と類似した入力中の部分区間3箇所をすべて検出している。これらの類似区間は、時間方向の伸縮および音高のシフト (移調) があるものである。従って、mpRIFCDPにより類似したメロディーの部分区間を検出できることを示せた。

かえるの歌を歌った鼻歌による実験結果を、図8に示す。正解区間とほぼ同じ個所に類似区間を検出していることが分かる。これにより、mpRIFCDPが人間の鼻歌にも適用できることを示した。

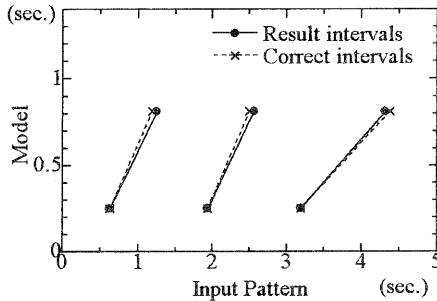


図 7: 人工データ中の類似メロディー区間検出結果

## 7 むすび

本稿では、音楽音響信号データベース中の類似区間検出法として mpRIFCDP を提案し、基礎実験により本手法の有効性を確かめた。また、類似区間検出により、検索の高速化を行う手法を提案した。

今後は、CD 音楽を用いた提案手法の評価実験と検索システムの実現により本手法の効果を確かめる。

また、mpRIFCDP を mpCDP と同様に鼻歌による音楽検索へ適用し、鼻歌の前後にノイズが含まれたり複数の鼻歌が含まれるクエリに関しても、クエリの部分区間と類似した区間をデータベース中から検索することも課題である。

さらに、mpRIFCDP およびマルチテンプレート RIFCDP を、音楽だけでなく、会話から得られる音高時系列、動画像や各種センサから得られる時系列など類似した変化パターンの時系列検索課題に適用していく。

## 参考文献

- [1] 藤山哲也, 高島洋典, “ハミング歌唱を手掛かりとするメロディ検索”, 信学論 (D-II), vol.J77-D-II, no.8, pp.1543-1551, 1994.
- [2] 園田智也, 後藤真孝, 村岡洋一, “WWW 上での歌声による曲検索システム”, 信学論 (D-II),

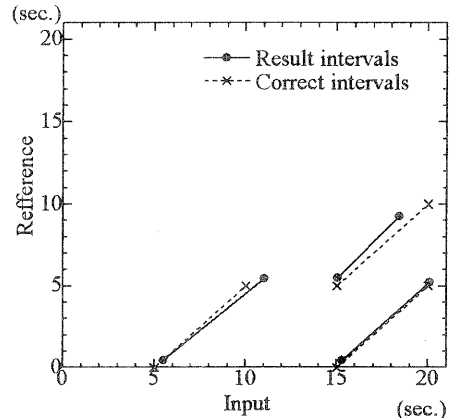


図 8: 「かえるの歌」中の類似メロディー区間検出結果

vol.J82-D-II, no.4, pp.721-731, 1999.

- [3] 西原祐一, 梅田昌義, 紺谷精一, 山室雅司, 福本誠, “大規模音楽 DB に対する高速ハミング検索方式”, ADBS, Tokyo, pp.117-124, 1998.
- [4] 後藤 真孝, “音楽音響信号を対象としたメロディーとベースの音高推定”, 信学論 (D-II), Vol.J84-D-II, no.1, pp.12-22, 2001.
- [5] 橋口博樹, 西村拓一, 張健新, 高橋裕信, 岡隆一, “モデル依存の傾斜制限型をもつ連続 DP によるハミングを用いた楽曲信号のスポッティング検索”, 信学技報, PRMU-2000-66, pp.35-40, 2000.
- [6] 岡隆一, “連続 DP を用いた連続音声認識”, 音響学会音声研資料, S78-20, pp.145-152, 1978.
- [7] 伊藤慶明, 木山次郎, 小島浩, 関進, 岡隆一, “時系列標準パターンの任意区間によるスポッティングのための Reference Interval-free 連続 DP(RIFCDP)”, 信学論 (D-II), J79-D-II, no.9, pp.1474-1483, 1996.
- [8] 西村 拓一, 岡 隆一, “Non-monotonic 連続 DP によるスポッティングに基づく移動ロボットの時系列画像を用いた大局的位置の推定”, 信学技報, PRMU97-146, pp.133-140, 1997.