

未知の遅延・位相差を伴う軌跡群の同時検出

高橋, 伸弥

九州大学大学院システム情報科学府知能システム学専攻 : 博士後期課程

迫江, 博昭

九州大学大学院システム情報科学府知能システム学専攻

<https://doi.org/10.15017/1498356>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 3 (2), pp.191-196, 1998-06-22. 九州大学大学院システム情報科学研究所

バージョン :

権利関係 :

未知の遅延・位相差を伴う軌跡群の同時検出

高橋伸弥*・迫江博昭**

Simultaneous Tracking of Multiple Trajectories with Unknown Delay

Shin'ya TAKAHASHI and Hiroaki SAKOE

(Received June 22, 1998)

Abstract: We investigate an algorithm to extract multiple trajectories with unknown delay in a noisy image. Individual target trajectories and their mutual relation are described in terms of a finite state automaton to form a model of trajectories. The algorithm analyzes the image searching for the optimum trajectories with delay according to this model using dynamic programming. An acceleration technique with beam search is also investigated. The effectiveness of the proposed algorithm is demonstrated by applying it to test images.

Keywords: Multiple trajectories, FSA model, Unknown delay, Unknown phase, Dynamic programming, Beam search

1. はじめに

画像からの軌跡の検出は、各種医用画像処理²⁾³⁾、各種図面の自動認識⁴⁾⁵⁾等、多くの分野で問題となっている。本研究では、このような画像中に含まれる、時間あるいはそれに代わるインデックスで順序づけられた連続な時間関数信号を対象とする。ここで、信号が複数個存在する場合、この信号を多元信号軌跡と呼び、対象とする信号が1本の場合は単元信号軌跡と呼ぶ。

多元信号軌跡においては、それぞれの軌跡の性質だけではなく軌跡相互間の関係を考慮することで、より高精度な検出が可能となる。筆者らは、この考え方に基づいて、複数の信号軌跡を雑音画像中から検出するアルゴリズムを提案した¹⁾。

しかし、このアルゴリズムでは複数の軌跡の同時刻における特徴を用いるために、時間軸方向のずれに対応できないという問題点があった。例えば、線形システムのステップ応答を撮影した画像における入出力信号間に生じる遅延や、心臓エコーによる心臓壁運動のトラッキング画像³⁾における位相のずれには対応できない。

そこで本論文では、文献1)で提案したアルゴリズムを拡張し、未知の遅延・位相差(以下、両者とも「遅延」と呼ぶ)を伴う軌跡群を検出するアルゴリズムを提案する。このアルゴリズムでは、0遅延状態での個々の軌跡の振舞いと軌跡間の相互関係を出力記号とする有限状態オートマトン(以下FSA)を用いて、軌跡群をモデル化する。このモデルをもとに、遅延量を最適化パラメータに含め

た探索問題を動的計画法(以下DP)により計算し、最もモデルに一致する軌跡群を検出する。

以下、準備として、文献1)で提案した遅延のない軌跡群の検出アルゴリズムを説明した後、これを遅延を伴う軌跡群の検出アルゴリズムに拡張する。さらに、ビームサーチを用いた計算量の低減を検討する。テスト画像を用いた実験を行い、アルゴリズムの有効性を確認した。また、ビームサーチにより約2桁の高速化を実現した。

2. 多元信号軌跡

Fig.1に多元信号軌跡の例を示す。この例は2本の正弦曲線に雑音を重畳したものである。画素を量子化単位として横方向に時間軸 t ($t = 0, 1, \dots, T$) を配し、縦軸に位置座標 x ($0 \leq x \leq X$) を想定する。 $a(x, t)$ は時刻 t 、位置 x における濃度値である。この画像中の k 本の軌跡 $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t))$ が求める多元信号軌跡である。以下では、 $x_i \leq x_{i+1}$ とし、軌跡の位置関係が入れ替わることはないものとする。

このように、2次元図形であって、



Fig.1 An example of image with multiple trajectories.

平成10年6月22日受付

* 知能システム学専攻博士後期課程

** 知能システム学専攻

- (1) いずれかの方向に時間軸(t)が展開できる
- (2) 時間軸に直交するような x 軸をとり、位置(x, t)での濃度値 $a(x, t)$ で表現される
- (3) 濃い点の連続した軌跡として時間信号 $x(t)$ が含まれている

という条件を満たす画像を対象とする。この画像中に軌跡として含まれる信号を信号軌跡と呼ぶ。信号が複数ありうることを明示する場合「多元」を付ける。以下では、説明の簡略化のため2本の軌跡すなわち2元の場合について記述し、4.3節で k 元信号軌跡への一般化を検討する。

3. 遅延のない軌跡群の検出

遅延を伴う軌跡群を検出する方法を説明する前に、その準備として文献1)で提案した方法について説明する。

3.1 多元信号軌跡のモデル化

まず、検出対象となる多元信号軌跡のモデル化を行う。2本の軌跡の時刻 t における位置 $(x_1, t), (x_2, t)$ に対して、個々の局所的特徴とそれらの軌跡間の関係を基本動作として定義する。次に、この基本動作を出力とするFSAによって2本の軌跡をモデル化する。このFSAの各出力記号が実際の画像信号との接点となる。FSAは、Table-1によって定義される。

ここで、個々の軌跡の局所的特徴を単元基本動作、2本の軌跡間の関係を2元基本動作と呼ぶことにする。Table-2に、単元基本動作の例を示す。表中の制約条件は、隣接する時刻での x 座標である $x = x(t)$ と $y = x(t-1)$ との間の関係を与える。 Δ は検出対象とする軌跡の最大傾斜である(5.1節以降の実験では $\Delta = 2$ とした)。またTable-3は2元基本動作を示し、2本の軌跡の隣接する時刻における x 座標 $x_1 = x_1(t), x_2 = x_2(t)$ と $y_1 = x_1(t-1), y_2 = x_2(t-1)$ との間の関係を与える。

多元軌跡の各時刻での性質は、単元としての制約と2元としての制約の積集合として与えられる。多元の場合の基本動作の記号に対する意味付けは、軌跡の元数 k 、単元基本動作指定 (Table-2)、2元基本動作指定 (Table-3) の組で行われる。Table-4に、単元、2元基本動作の記述 (辞書) の例を示す。表中の“-”は、基本動作を特に指定しない場合、もしくは他の基本動作により自明である場合を意味する。

Table 1 FSA definition.

FSA= $(Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$	
Q :	a finite set of states, $\{p\}$
Σ :	a finite set of output symbols, $\{n\}$ (a symbol n corresponds to a basic feature.)
δ :	the state transition rules, $(\delta(p, n) = q$ means $p \xrightarrow{n} q$, where $p, q \in Q, n \in \Sigma)$
q_0 :	the initial state, $q_0 \in Q$
F :	the set of final states, $\{f\} \subseteq Q$

Table 2 Examples of the basic features of a single trajectory.

	basic feature of a single trajectory	constraint conditions
$r1$	continuous (default)	$x - \Delta \leq y \leq x + \Delta$ ($\Delta \geq 0$)
$r2$	vertical	$y < x - \Delta, x + \Delta < y$
$r3$	horizontal	$y = x$
$r4$	monotonically increasing	$x - \Delta \leq y \leq x$
$r5$	monotonically decreasing	$x \leq y \leq x + \Delta$

Table 3 Examples of the basic features between two trajectories.

	basic feature between two trajectories	constraint conditions
$s \neq$	separate	blank exists between x_1 and x_2
$s =$	parallel	$y_1 - y_2 = x_1 - x_2$
$s <$	widening	$y_1 - y_2 < x_1 - x_2$
$s >$	narrowing	$y_1 - y_2 > x_1 - x_2$
$s \leq$	parallel or widening	$y_1 - y_2 \leq x_1 - x_2$
$s \geq$	parallel or narrowing	$y_1 - y_2 \geq x_1 - x_2$
$s \approx$	approximately parallel	$x_1 - 1 \leq y_1 \leq x_1 + 1$ $x_2 - 1 \leq y_2 \leq x_2 + 1$

以上に定義した記号を出力とするFSAにより、全時間領域の軌跡群をモデル化する。例としてFig.2に2本の平行な台形波のFSAを示す。出力記号にはTable-4の記号を用いている。このFSAによって出力される記号列は $\{c^*b^*d^*b^*\}^*$ で、“単調減少”、“水平”、“単調増加”、“水平”を繰り返す“平行”な2本の軌跡を生成する。

3.2 遅延のない場合の軌跡の検出アルゴリズム

以上のモデルを対象画像に当てはめ、軌跡上の濃度値の総和が最大となる軌跡群をDPにより探索する。時刻 t で軌跡が座標値 x_1, x_2 をとり、かつFSAが状態 q である可能性を評価するための探索空間 $(x_1, x_2, t | q)$ を考える。いま、状態間の遷移が状態遷移規則 $\delta(p, n) = q$ によって行われるとする ($p, q \in Q, n \in \Sigma$)。

(1)式のDP漸化式によって各状態での軌跡を評価し、 $t = 0$ の初期状態 q_0 から $t = T$ の最終状態 $f \in F$ まで至る

Table 4 An example of the symbol dictionary.

symbol (<i>n</i>)	the number of trajectories, <i>k</i>	basic feature of the trajectory <i>x</i> ₁	basic feature of the trajectory <i>x</i> ₂	basic feature between trajectories <i>x</i> ₁ and <i>x</i> ₂
(<i>a</i>)	2	<i>r</i> 5	<i>r</i> 3	—
(<i>b</i>)	2	<i>r</i> 3	<i>r</i> 3	—
(<i>c</i>)	2	<i>r</i> 5	<i>r</i> 5	<i>s</i> =
(<i>d</i>)	2	<i>r</i> 4	<i>r</i> 4	<i>s</i> =

Symbols (*a*)-(*d*) stand for the following local behaviors of trajectories: (*a*) The trajectory 1 is monotonically decreasing and the trajectory 2 is horizontal; (*b*) The trajectories 1 and 2 are horizontal; (*c*) The trajectories 1 and 2 are monotonically decreasing and are parallel with each other; (*d*) The trajectories 1 and 2 are monotonically increasing and are parallel with each other.

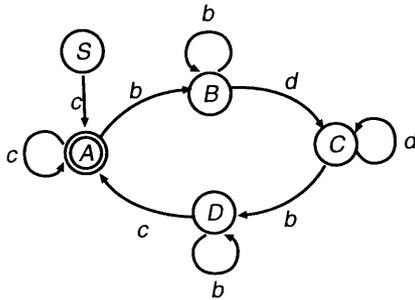


Fig.2 An FSA model for two parallel trapezoidal waves. (S: initial state, A: final state)

経路のうち最大の累積濃度値 $g(x_1, x_2, T | f)$ を与える経路を見つける。

$$g(x_1, x_2, t | q) = a(x_1, x_2, t) + \max_p \max_{y_1, y_2} [g(y_1, y_2, t-1 | p)] \quad (1)$$

$\delta(p, n) = q$

$$a(x_1, x_2, t) = a(x_1, t) + a(x_2, t) \quad (2)$$

ここで、 $g(x_1, x_2, t | q)$ は、状態 q の 2 本の軌跡が $(x_1, t), (x_2, t)$ を通るとしたときの累積濃度値を記憶する。 (x_1, x_2) において、与えられた状態遷移規則の出力記号 n (すなわち基本動作) の制約に従うような (y_1, y_2) の集合に対して(1)式を計算することで、軌跡群がこの時刻で状態 q にあることの可能性が評価される。

4. 遅延を伴う軌跡群の検出

2 本の軌跡の間に遅延が存在する場合の検出方法を考える。例として **Fig.3** に、遅延により位相ずれが生じた 2 本の正弦曲線を示す。遅延がある場合には、(2)式による同時刻 t での軌跡群評価が意味をなさないため、文献1)のアルゴリズムでは対応できない。

そこで、前節の FSA を 0 位相状態すなわち遅延のない状態でのモデルとして用意し、そのモデルで与えられた基本動作を入力画像内の時刻をずらした 2 点に対して評価することで、未知の遅延に対応する。例えば **Fig.3** の軌跡

は、2 本の軌跡を平行な正弦曲線と同様のモデルで表し、これの軌跡 x_2 に遅延が生じたものとみなす。具体的には、軌跡 x_1 に対する軌跡 x_2 の遅延を d として、 $a(x_1, t)$ と $a(x_2, t+d)$ とを対応させ、この 2 本の軌跡の間で基本動作を評価する。この d を新たに探索パラメータに含め、最適な対応を示す軌跡群を検出する。

4.1 遅延を伴う軌跡群の検出アルゴリズム

遅延によるずれ幅の探索範囲を $-D \leq d \leq D$ とし、 $0 \leq t \leq T$ の軌跡 x_1 と、 $d \leq t \leq T+d$ の軌跡 x_2 を検出することを考える。入力画像のサイズは、 $X \times (T+D)$ とする。**Fig.4** に遅延の探索範囲と入力画像の関係を示す。探索の結果、最もモデルに一致する遅延とその軌跡が決定される。例えば **Fig.4** では、 $d \leq t \leq T$ の範囲で軌跡を検出する。

4.1.1 解析テーブル

まず、与えられた FSA モデルの各状態 q に対応して、次のような解析テーブルを定義しておく。

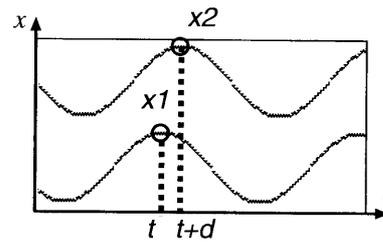


Fig.3 An example of two trajectories with delay d .

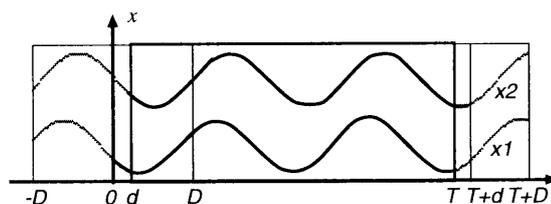


Fig.4 The relation between an input image and its delay search range.

- $g(x_1, x_2, t, d | q)$: 状態遷移に対応する2本の軌跡の解析に用い、状態 q の軌跡が時刻 t および時刻 $t+d$ でそれぞれ (x_1, x_2) を通るとしたときの、その時刻までの最大累積濃度値を記憶する。
- $bp(x_1, x_2, t, d | q)$: 状態 q の軌跡が時刻 t および時刻 $t+d$ でそれぞれ (x_1, x_2) を通るとしたときの、時刻 $t-1, t-1+d$ における最適な位置と状態 p を格納する。

4.1.2 初期設定

まず以下のように初期設定を行う。

$$g(x_1, x_2, 0, d | p) = \begin{cases} 0 & p = q_0 \\ -\infty & p \neq q_0 \end{cases} \quad (3)$$

4.1.3 各 t における処理

$1 \leq t \leq T$ の各時刻 t で、各状態 q において(4)式を評価する。状態 p から状態 q へ遷移する各 x_1, x_2 に対して、 p, y_1, y_2 をパラメータとして

$$g(x_1, x_2, t, d | q) = a(x_1, x_2, t, d) + \max_{\delta(p, n)=q} \max_{y_1, y_2} [g(y_1, y_2, t-1, d | p)] \quad (4)$$

を計算し、上式の最適なパラメータ (p, y_1, y_2) をバックポインタとして $bp(x_1, x_2, t, d | q)$ に格納する。ここで、

$$a(x_1, x_2, t, d) = a(x_1, t) + a(x_2, t+d) \quad (5)$$

とする。

4.1.4 軌跡の生成

$t = T$ までの処理が終了した時点で、

$$(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{d}, \hat{f}) = \operatorname{argmax}_{x_1, x_2, d, f \in F} [g(x_1, x_2, T, d | f)] \quad (6)$$

によって、最終状態 f で最大累積濃度値を与える d と軌跡の終端 (\hat{x}_1, \hat{x}_2) を決定する。最終的に(6)式で得た点 $(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{d}, \hat{f})$ から $bp(x_1, x_2, t, d | p)$ を参照してバックトラックすることにより、求める軌跡を生成する。

4.2 ビームサーチによるアルゴリズムの高速化

計算時間を低減するための方法として、4.1節のアルゴリズムにビームサーチを導入する。ビームサーチは、最適経路として可能性の低いものは以後の計算から除外するという枝刈りを行い、残ったビーム内の点だけを計算することで、計算量の低減をはかる方法である。

枝刈りを行う具体的な基準として、各時刻 $t-1$ で $g_{max} = \max [g(x_1, x_2, t-1, d | q)]$ を求め、時刻 t でのしきい値を $\theta(t) = g_{max} - \lambda$ (λ : 余裕分を与える定数)とす

る。 $g(x_1, x_2, t, d | q)$ が $\theta(t)$ 未満の状態 $(x_1, x_2, t, d | q)$ に続く軌跡の探索を打ち切る。ここで、余裕定数 λ を小さくしすぎると、最適な経路が中途段階で枝刈りされてしまう可能性がある。最適な λ の値は対象画像の品質や与えられるモデルによって異なるため、実験的に求める必要がある。

4.3 アルゴリズムの k 元軌跡検出への一般化

前節のアルゴリズムを、 k 本の軌跡を検出するアルゴリズムに一般化する。 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ に対して、各軌跡の遅延を $\mathbf{d} = (0, d_2, \dots, d_k)$ と表現する。ここで、 d_l ($2 \leq l \leq k$)は軌跡 x_1 に対する軌跡 x_l の遅延である。この時、(4)式に対応してDP漸化式は、 $p, \mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_k)$ をパラメータとして、

$$g(\mathbf{x}, t, \mathbf{d} | q) = a(\mathbf{x}, t, \mathbf{d}) + \max_{\delta(p, \mathbf{n})=q} \max_{\mathbf{y}} [g(\mathbf{y}, t-1, \mathbf{d} | p)] \quad (7)$$

となる。ただし

$$a(\mathbf{x}, t, \mathbf{d}) = \sum_{l=1}^k a(x_l, t + d_l) \quad (8)$$

この場合も前節で説明したビームサーチを一般化して適用することで、計算量の低減が可能である。

5. 実験

以下の実験では、入力画像は256階調の濃淡画像である。実験には、CPU: Alpha 21164A (500MHz) (SPECint95: 15.4, SPECfp95: 21.1)の計算機を使用した。

5.1 遅延を伴う2元軌跡の検出

Fig.5(a)を入力画像として、遅延を伴う2元軌跡の検出実験を行った。この画像は人工的に生成した2値(0, 255)、線幅1の2本の正弦軌跡(遅延 $d=7$)を含んだ原画像にランダム雑音を重畳したものである(SN比3.1 [dB])。入力画像はサイズ 64×256 であり、この中に $T=200$ の軌跡を検出する。入力画像のSN比は、次式で計算した。

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{255^2}{\text{雑音の平均電力}} \quad [\text{dB}] \quad (9)$$

モデルには正弦曲線の台形波近似として、Table-4, Fig.2に示したFSAを使用した。

まず、提案アルゴリズムによる遅延検出の妥当性を確認するために、 $-50 \leq d \leq 50$ の範囲の遅延 d に対する累

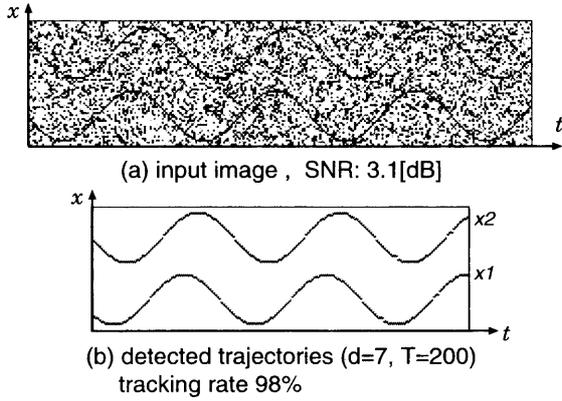


Fig.5 An input image including two trajectories with delay and the detected trajectories.

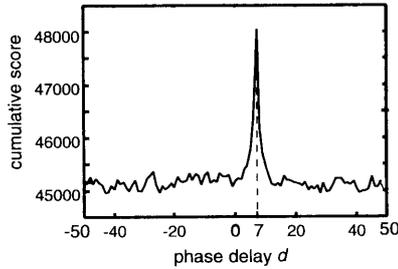


Fig.6 The cumulative score at each delay.

積濃度値の変化を調べた。ビームサーチは行わずに、すべての d に対して $t = T$ の最終状態まで評価を行った。

Fig.6に実験結果を示す。横軸は遅延、縦軸は累積濃度値である。最大の累積濃度値を示す $d = 7$ の時にモデルと最も一致する軌跡が検出されたことを示している。Fig.5(b)に、軌跡の検出結果を示す。当然、(6)式で $d = 7$ が決定される。ここで、検出率(tracking rate)は入力画像中の真の軌跡と検出結果との一致の割合を表す。

以上の結果から、最適な対応を与える遅延で最も高い累積濃度値を示し、遅延を伴う軌跡を検出できることが確認できた。

5.2 ビームサーチによる高速化の効果

次に、ビームサーチによる高速化の効果について実験を行った。入力画像はFig.5(a)を使用し、 $T = 200$ の軌跡の検出を行った。使用したモデルは、5.1節と同様である。

Fig.7は、遅延の探索範囲を変化させた時の実行時間の変化を示したものである。縦軸に実行時間を対数スケールで、横軸に遅延の探索範囲 D を示す。グラフ横軸の各 D に対して、 $-D + 7 \leq d \leq D + 7$ ($0 \leq D \leq 40$) の範囲で探索を行った。実線はビームサーチを使用した場合の実行時間、破線はビームサーチを使用しなかった場合の実

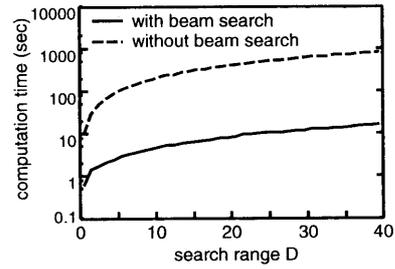


Fig.7 The beam search effect.

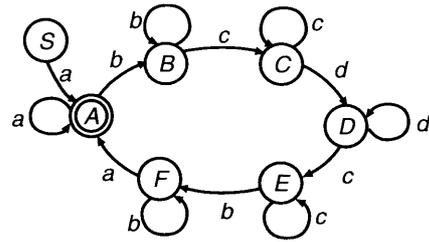


Fig.8 An FSA model for three sinusoidal waves (triangular wave approximation). (S: initial state, A: final state)

行時間である。余裕定数は、 $\lambda = 40$ とした。これは、Fig.5(a)の入力画像に対して、 $-33 \leq d \leq 47$ の範囲であらかじめ実験を行い、最適な λ の値を求めておいたものである。この λ により、どの探索範囲の場合でも累積濃度値の低下を招くことなく、最適な遅延とその軌跡が検出することができた。

グラフから、4.2節で示したビームサーチにより計算量の低減効果が得られていることがわかる。実行時間は探索範囲幅 D に対して線形に増加している。結果として、約 2 桁の高速化が実現された。

5.3 遅延を伴う 3 元軌跡の検出

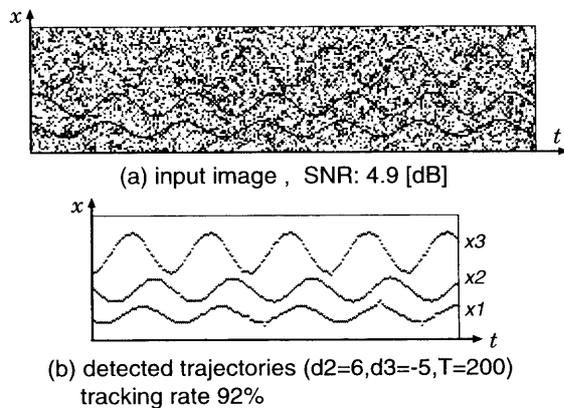
(7)式において $k = 3$ として、遅延を伴う 3 元軌跡の検出実験を行った。Fig.9(a)の入力画像(サイズ 64×256) から、 $T = 200$ の軌跡を検出する。この画像は、周期が等しく振幅が異なる 3 本の正弦曲線(遅延 $d_2 = 6, d_3 = -5$)にランダム雑音を重畳したものである(SN 比 4.9 [dB])。モデルには、Table-5の各記号を出力記号とするFig.8のFSAを用いた。表中の 2 元動作 1 および 2 は、それぞれ x_1 と x_2 の間の関係と x_2 と x_3 の間の関係を示している。ここでは、振幅が x_3, x_2, x_1 の順に減衰する 3 本の正弦曲線を想定して、モデル化を行った。このFSAモデルによって生成される出力記号列は、 $\{a^*b^*c^*d^*e^*b^*\}^*$ である。これは、3 本とも“単調減少”かつ“間隔拡大”、“単調減少”かつ“ほぼ平行”、“単調増加”かつ“間隔縮小”、“単調増加”かつ“ほぼ平行”を繰り返す軌跡群を生成する。

$d_1 = 0, 1 \leq d_2 \leq 10, -10 \leq d_3 \leq -1$ を遅延の探索範

Table 5 The symbol dictionary for detection of three sinusoidal curves (triangular wave approximation).

symbol (n)	the number of the trajectories k	basic feature of the trajectory x_1	basic feature of the trajectory x_2	the basic feature of the trajectory x_3	basic feature between x_1 and x_2	basic feature between x_2 and x_3
(a)	3	$r5$	$r5$	$r5$	s_{\geq}	s_{\geq}
(b)	3	$r5$	$r5$	$r5$	s_{\approx}	s_{\approx}
(c)	3	$r4$	$r4$	$r4$	s_{\approx}	s_{\approx}
(d)	3	$r4$	$r4$	$r4$	s_{\leq}	s_{\leq}

Symbols (a)-(d) stand for the following local behaviors of trajectories: (a) The trajectories 1,2 and 3 are monotonically decreasing and are parallel or narrowing with each other; (b) The trajectory 1,2 and 3 are monotonically decreasing and are approximately parallel with each other; (c) The trajectory 1,2 and 3 are monotonically increasing and are approximately parallel with each other; (d) The trajectory 1,2 and 3 are monotonically increasing and are parallel or widening with each other.

**Fig.9** An input image including three trajectories with delay and the detected trajectories.

図として設定し、ビームサーチに用いる余裕定数を $\lambda = 60$ として軌跡の検出を行い、モデルと最適な対応をとる軌跡群と、その最適な遅延量 $d_2 = 6, d_3 = -5$ を得た。Fig.9(b)に検出された軌跡を示す。ビームサーチを行わない場合の計算時間は 1.4×10^5 秒に対し、ビームサーチを行った場合の計算時間は 5.2×10^2 秒となり、約 2 桁の高速化となった。

5.1節の2元軌跡の検出結果と比較して検出率の低下が見られるが、これは、5.1節で使用した2元基本動作 $s_{=}$ (平行) の制約条件に対し、Table-5で定義した2元基本動作の制約条件が緩くなっていることが原因であると考えられる。また、今回の実験で使用したモデルは、台形波、もしくは三角波を表す近似モデルであり、正弦曲線を表現するには近似が不十分であると言える。厳密に正弦曲線を表すためには、モデルを文脈自由文法にレベルアップする必要がある。

6. む す び

本論文では、未知の遅延・位相差を伴う複数の軌跡を雑音画像中から検出するアルゴリズムに関して検討した。このアルゴリズムは、0位相状態すなわち遅延による位置ずれの無い場合の軌跡群をFSAでモデル化し、そのモデルに最も一致する軌跡群とその遅延量を検出するものである。遅延量を最適化パラメータに含めた探索問題を動的計画法で計算することにより、未知の遅延を伴う軌跡群の検出を可能とした。テスト画像を用いた実験を行い、提案アルゴリズムによって遅延を伴う軌跡群を検出できることを確認した。またビームサーチの導入により約2桁の高速化を実現した。

謝辞

本研究は文献1)の査読過程において匿名の査読者より出された質問をきっかけとして行ったものである。なお本研究は文部省科学研究費補助金 (No.08680402) の一部として行われた。

参 考 文 献

- 1) 高橋伸弥, 迫江博昭, “雑音画像中の多元信号軌跡の解析”, 信学論, vol. 11, no. J80-DII, pp.3011-3019, Nov. 1997.
- 2) H. Yamada, C. Merritt and T. Kasvand, “Recognition of kidney glomerulus by dynamic programming matching method”, IEEE Trans. PAMI vol. 10, no.5, pp.731-737, 1988.
- 3) 佐藤宏明, 金井活, 中鉢憲賢, “ダイナミックプログラミングを用いた心臓壁面運動のトラッキングによる心臓壁の微小な振動計測”, 音響誌, vol. 1, no. 50, pp.11-21, 1994.
- 4) U. Montanari, “On the Optimal Detection of Curves in Noisy Pictures”, Comm. ACM vol. 14, pp. 335-345, May 1971.
- 5) H. Ney, “Dynamic programming as a technique for pattern recognition”, Proc. ICPR'82, pp. 1119-1125, 1982.