数理解析研究所講究録
229巻 1975年 122-133

時系列パターンの
セグメンテーション・フリーな認識

電総研　磯道義典

§1. はしがき

時系列パターン──特に聴覚パターン──の処理においてアナログ的かつ並列的な処理が有効であろうと考えられる。そこで本稿では時系列パターンの識別のための、アナログ的かつ並列的な処理方式を導入することとする。この方式は阿部の提案した Penalty Automaton(1) の並列化されたものである。Penalty Automaton においても知られているようにこの新しい処理方式は動的計画法と密接な関係を持っている。こうした処理方式の出現によってこれまで単なる計算技法であると考えられていた動的計画法に新しい意味が持たせられたことになる。

この新しい処理方式を適用することによって迫江－千葉の時間正規化(2)を実時間で実行しつつ、しかもセグメンテーション・フリーに識別を実行するシステムを構成することが出来た。

§2. Max-type の Parallel Machine

基本素子を多数配列して情報の処理を行なう Parallel Machine に関する研究が最近活発となってきている。本節ではある特殊なクラスの Parallel Machine を導入し議論してゆくこととする。

[定義]

1. K は有限集合(素子)
2. Σ は有限または無限の集合(入力元)
3. R_0 は実数の部分集合で2項演算 $\otimes$ について閉じている。
4. h^+ は K から R_0 への写像(初期興奮値)
5. h は $K\times\Sigma$ から R_0 への写像(基礎興奮値)
6. ρ は $K\times K\times\Sigma$ から R_0 への写像(興奮伝達率関数)
7. O は K の部分集合(出力素子)

以上7個の記号により以下のような逐次過程として記述されるシステムを Max-$\otimes$ Parallel Machine と云う。

任意入力元列 $\{x^{(n)}\}_{n=1}^{\infty}$ ($x^{(n)}\in\Sigma$) に対して時刻 n での各素子の興奮値 $f_{\xi}^{(n)}\in R_0$ ($\xi\in K$) および出力 $g^{(n)}$ を次のように与える。

時刻0

$$f_{\xi}^{(0)} = h_{\xi}^{+} \qquad (\xi\in K)$$

時刻 n ($n \geqq 1$)

$$f_q^{(n)} = Max\{h_q(x^{(n)}),\ \underset{q' \in K}{Max}\ f_{q'}^{(n-1)} \otimes \rho_{q'q}(x^{(n)})\}$$

($q \in K$)

$$g^{(n)} = \underset{q \in \Theta}{Max}\ f_q^{(n-1)}$$

この Machine を受理型機械として考える時にはある実数 $\theta \in R_0$ に対して出力 $g^{(n)}$ が θ 以上の時を受理状態と定め，それ以外の時を非受理状態と定めるものとする。

〔注〕h^{+}, h, ρ がすべて一価関数の時 Machine は決定性であるといい，多価のものが含まれている時非決定性であるという。

上述の定義において Max 演算をすべて Min 演算で置きかえたものを Min−⊗ Parallel Machine という。ただし受理状態は $g^{(n)} \leqq \theta$ によって定義される。

Parallel Machine 中実際的意味を持つものは以下のようなものである。

$$\text{Max-type}\begin{cases}\text{Max-Sum p.m.}\\ \text{Max-Prod. p.m.}\\ \text{Max-Min p.m.}\end{cases}$$

$$\text{Min-type}\begin{cases}\text{Min-Sum p.m.}\\ \text{Min-Prod. p.m.}\\ \text{Min-Max p.m.}\end{cases}$$

〔注〕 Max-Prod. p.m., Max-Min p.m., Min-Sum p.m. そして Min-Max p.m. はそれぞれ Santos の Max-Prod. Automaton(3), Fuzzy Automaton, 阿部の Penalty Automaton(1) および Optimistic Fuzzy Automaton を並列 Machine 化したものにほぼ対応する。

また Max-Sum p.m. と Min-Sum p.m. の混合形を $\left\{\begin{matrix}\text{max}\\\text{min}\end{matrix}\right\}$-Sum p.m., Max-Prod. p.m. と Min-Prod. p.m. の混合形を $\left\{\begin{matrix}\text{Max}\\\text{min}\end{matrix}\right\}$-Prod. p.m. と呼ぶ。以上8つの Parallel Machine の間には $x \longrightarrow -x,\ x^{-1},\ \exp\{x\},\ \log x$ の変換によって同型になるものが存在する。ただし R_0 のとり方によってそのあり方が異なるのでそれらもあわせ記述することとする。その同型対応は以下のようになる。

〔定理1〕

$$\underset{[0,1]}{\text{Max-Min}} \cong \underset{[0,\infty]}{\text{Min-Max}} \cong \underset{[-\infty,\infty]}{\text{Min-Max}}$$

$$\cong \underset{[-\infty,\infty]}{\text{Max-Min}} \cong \underset{[0,\infty]}{\text{Max-Min}} \cong \underset{[0,1]}{\text{Min-Max}}$$

$$\underset{[0,\infty]}{\text{Min-Sum}} \cong \underset{[0,1]}{\text{Max-Prod.}} \cong \underset{[1,\infty]}{\text{Min-Prod.}}$$

$$\underset{[0,\infty]}{\text{Max-Sum}} \cong \underset{[0,1]}{\text{Min-Prod}} \cong \underset{[1,\infty]}{\text{Max-Prod}}$$

$$\underset{[0,\infty]}{\text{Max-Prod.}} \cong \underset{[0,\infty]}{\text{Min-Prod.}} \cong \underset{[-\infty,\infty]}{\text{Min-Sum}} \cong \underset{[-\infty,\infty]}{\text{Max-Sum}}$$

$$\underset{[-\infty,\infty]}{\text{Max-Prod.}} \cong \underset{[-\infty,\infty]}{\begin{Bmatrix}\text{Max}\\ \text{Min}\end{Bmatrix}\text{-Prod.}} \cong \underset{[0,\infty]}{\begin{Bmatrix}\text{Max}\\ \text{Min}\end{Bmatrix}\text{-Prod.}} \cong \underset{[-\infty,\infty]}{\begin{Bmatrix}\text{Max}\\ \text{Min}\end{Bmatrix}\text{-Sum}}$$

本節の以下の部分では入力元集合Σは有限であると考える。

［定理２］

$\underset{\{0,1\}}{\text{Max-Min p.m.}}$, $\underset{\{0,1\}}{\text{Min-Max p.m.}}$, $\underset{\{0,1\}}{\text{Max-Prod. p.m.}}$, $\underset{\{0,\infty\}}{\text{Min-Sum p.m.}}$ はそれぞれ Finite Automaton とみなすことが出来る。また逆に Finite Automaton は上述各形式で表現しなおすことが可能である。

［定理３］(4)

Max-Min Parallel Machine (Min-Max p.m.) は $R_0=[0, 1]$, $[0, \infty]$, $[-\infty, \infty]$ の各場合においてその受理する系列集合は正規言語である。

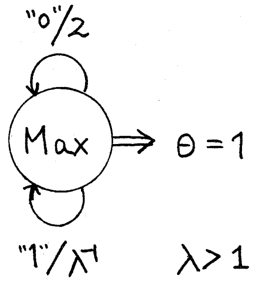
［定理４］(1)

Max-Prod. Parallel Machine は $R_0=[0, 1]$ (Min-Sum p.m. は $R_0=[0, \infty]$) においてその受理する系列集合は正規言語である。

［定理５］

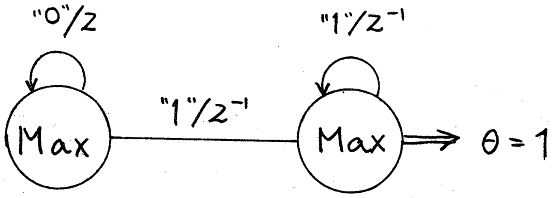
Max-Prod. Parallel Machine は $R_0=[0, \infty]$ (Min-Sum p.m. は $R_0=[-\infty, \infty]$) において $\aleph_1$ 濃度の異なる言語族を定める。すなわち上述形式の Machine が受理する言語の中には帰納的に可算ではないものが存在する。

《略証》右図に示された Max-Prod. p.m. は "0" の個数が n で "1" の個数が m である時 $n/m \geq \log\lambda/\log 2$ ならば受理する Machine である。ところで $\log\lambda/\log 2$ は数値として $(0, \infty)$ を連続に埋めつくす上，$\lambda' > \lambda > 1$ は真に異なる言語を決定する（$L_{\lambda'} \subsetneqq L_{\lambda}$）。それゆえ $\aleph_1$ 濃度となる。

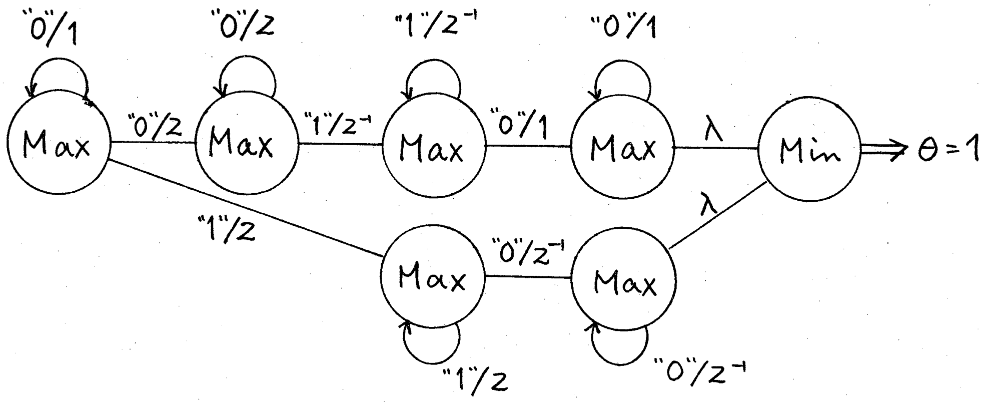


以下 Max-Prod. p.m. の典型的な例をあげてみよう。

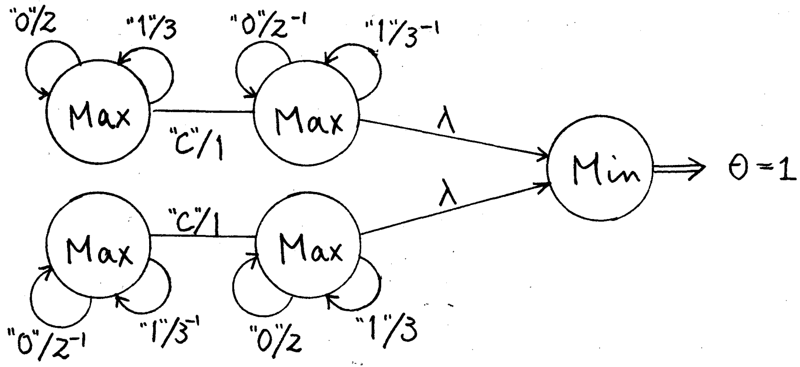
［例1］　c.f.l.　$\{0^n 1^m : n \geq m \geq 1\}$



［例2］　C.S.L.　$\{0^n 1^m 0^l : n \geq m \geq l \geq 1\}$



［例3］　C.S.L.　$\{R_1 C R_2 : R_1, R_2 \in \{0 \vee 1\}^*$，$R_1$ の "0" および "1" の個数と R_2 の "0" および "1" の個数は等しい$\}$



以上の例から次のことが予想される。(1)各素子は順序を区別しない1つの連(Run)を識別できる。(2)各素子は複数個の記号についても各記号の個数を計数出来る。このことから次のような予想(Conjecture)が浮かび上がってくる。

〔予想〕

Max-Prod. Parallel Machine は $R_0=[0,\infty]$, $[-\infty,\infty]$ のどちらのもとにおいても決定性 c.f.l. $\{\omega c \omega^R : \omega \in \{\Sigma - c\}^*\}$ を認識できない。

§3. 時系列パターンの認識方式

次に Parallel Machine による時系列パターンのセグメンテーション・フリーな認識問題を考察することとする。音声認識等に関していえば特徴抽出後の処理と考えておいて十分であるから、特徴は特徴ベクトルの連続した時系列として与えられるものとする。まずnを時刻として特徴の時系列を $\{x^{(n)}\}_{n=1}^{\infty}$ と表示することとしよう。

また各カテゴリーの標準時系列を $\{y_k^{(1)}, y_k^{(2)}, \cdots\cdots, y_k^{(M_k)}\}_{k=1}^{K}$ と記述することとする。ここでKは識別すべきカテゴリー数である。また特徴ベクトルの空間Eには次の関係をみたす類似度関数 s が定義されているものと仮定する。

(1)　$0 \leqq s(x, y) \leqq 1$,　$s(x, x) = 1$

(2)　$s(x, y) = s(y \cdot x)$

(3)　$s(x, y) \cdot s(y, z) \leqq s(x, z)$

入力時系列 $\{x^{(n)}\}_{n=1}^{\infty}$ に対して次のような逐次過程を Max-Prod. 型の認識システムと云う。

時刻 0

$$B_k^{(0)}(0) = 1 \qquad (1 \leqq k \leqq K)$$

$$B_k^{(0)}(m) = 0 \qquad (1 \leqq m \leqq M_k,\ 1 \leqq k \leqq K)$$

時刻 n

$$B_k^{(n)}(0) = 1 \qquad (1 \leqq k \leqq K)$$

$$B_k^{(n)}(m) \qquad (1 \leqq m \leqq M_k,\ 1 \leqq k \leqq K)$$

$$= \mathrm{Max} \begin{cases} B_k^{(n-1)}(m-2)\, s(x^{(n)}, y_k^{(m-1)})\, s(x^{(n)}, y_k^{(m)})\, \alpha_1 \\ B_k^{(n-1)}(m-1)\, s(x^{(n)}, y_k^{(m)}) \\ B_k^{(n-2)}(m-1)\, s(x^{(n-1)}, y_k^{(m)})\, s(x^{(n)}, y_k^{(m)})\, \alpha_2 \end{cases}$$

$$B_*^{(n)} = \mathop{\mathrm{Max}}_{k} B_k^{(n-1)}(M_k)$$

$$D^{(n)} = \mathrm{Arg}\,\mathop{\mathrm{Max}}_{k} B_k^{(n-1)}(M_k)$$

ただし　$0 < \alpha_1,\ \alpha_2 \leqq 1$

ここで各時刻において $B_*^{(n)}$ と $D^{(n)}$ が出力される。これらの出力をもとにしてセグメンテーションと識別を同時に実行することは可能である。ここで

$$C_k^{(n)}(m) = B_k^{(n-1)}(m-1) \wedge (x^{(n)}, y_k^{(m)}) \quad (1 \leq m \leq M_k)$$

を導入して考えれば上述システムは出力 $D^{(n)}$ を除き完全な Max－Prod Parallel Machine であることが納得されるであろう。また $B_k^{(n)}(0) = 1$ は基礎興奮値のみの形で与えられている。そこで以下ではこの部分を境界条件型の拘束と呼ぶこととする。

このシステムの動作の大略の意味について説明しておく。まず各時刻において三つの値の最大値を $B_k^{(n)}(m)$ に入れているのは次の理由による。第一の値は入力パターンが標準パターンに対して時間が1/2に縮小されているものと仮定してみた場合の局所的類似度である。第二の値は入力パターンと標準パターンが同じ時間長であると仮定した場合の局所的類似度である。さらに第三の値は入力パターンが標準パターンに対して時間が2倍に伸長しているものと仮定した場合の局所的類似度である。このように各素子での計算はパターン全体のうちのある局所的部分について入力と標準の局所的マッチングを実行しているわけである。このような局所的類似度の積み上げとして大局的類似度が計算されるわけである。

次に各時刻において $B_k^{(n)}(0)$ を1とおいていることについて説明する。これはシステムの持っている標準パターンに対して入力のあらゆるセグメントとも類似度計算が出来るようにするために導入されたものである。この境界条件型拘束と並列処理能力とによって連続時系列パターンを実時間でセグメンテーション・フリーに認識できることとなったのである。

次の逐次過程を Max−Min 型の認識システムと云う。

時刻 0

$$B_k^{(0)}(0) = 1 \qquad (1 \leq k \leq K)$$

$$B_k^{(0)}(m) = 0 \qquad (1 \leq m \leq M_k,\ 1 \leq k \leq K)$$

時刻 n

$$B_k^{(n)}(0) = 1 \qquad (1 \leq k \leq K)$$

$$B_k^{(n)}(m) \qquad (1 \leq m \leq M_k,\ 1 \leq k \leq K)$$

$$= \mathrm{Max}\begin{cases} \mathrm{Min}\{B_k^{(n-1)}(m-2),\ s(x^{(n)}, y_k^{(m-1)})\alpha_1,\ s(x^{(n)}, y_k^{(m)})\} \\ \mathrm{Min}\{B_k^{(n-1)}(m-1),\ s(x^{(n)}, y_k^{(m)})\} \\ \mathrm{Min}\{B_k^{(n-2)}(m-1),\ s(x^{(n-1)}, y_k^{(m)})\alpha_2,\ s(x^{(n)}, y_k^{(m)})\} \end{cases}$$

$$B_*^{(n)} = \mathop{\mathrm{Max}}_{k}\ B_k^{(n-1)}(M_k)$$

$$D^{(n)} = \mathrm{Arg}\ \mathop{\mathrm{Max}}_{k}\ B_k^{(n-1)}(M_k)$$

ここで種々の条件等は Max−Prod 型の場合と同一である。

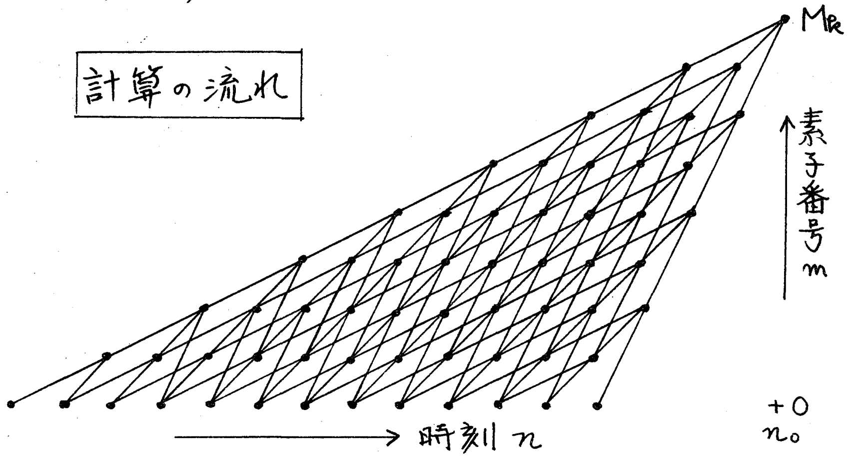
最後に動的計画法との関係を述べておこう。Max−Prod 型で説明するが Max−Min 型でも同様である。システムは時

不変（time invariant）であるから特定の時刻 n_0 での値 $B_k^{(n_0)}(M_k)$ がいかなる量であるかを知れば任意の時刻におけるその値も理解されたことになる。システムを記述する逐次過程を繰り返し代入することによって次の関係をうる。

$$B_k^{(n_0)}(M_k)=\max_{C\in G}\prod_{l=1}^{K_C} U_k((n_l,m_l),(n_{l-1},m_{l-1}))$$

$$U_k((n',m'),(n,m)) = \begin{cases} s(x^{(n)},y_k^{(m-1)})\,s(x^{(n)},y_k^{(m)})\,\alpha_1 & (n'=n-1,m'=m-2)\\ s(x^{(n)},y_k^{(m)}) & (n'=n-1,m'=m-1)\\ s(x^{(n-1)},y_k^{(m)})\,s(x^{(n)},y_k^{(m)})\,\alpha_2 & (n'=n-2,m'=m-1)\end{cases}$$

ただし $C=\{(n_l,m_l)\}_{l=0}^{K_C}$, $m_0=M_k$, $m_{K_C}=0$ また G は下図において点 (n_0,M_k) を通る左下がりのパスの全体である。



結局考察中のシステムは上述最大化問題を時刻 n を段階（Stage）にとりながら動的計画法で解いていることとなる。

§4. むすび

本稿では新しい Parallel Machine を導入し，このMachine

のいくつかの性質を論ずるとともに，このMachineが時系列の認識にとって有効であることを示した。その有効性とは時系列パターンのセグメンテーション・フリーかつ実時間の認識を可能にしたことにある。この特質を招来させた根源は(1)同時並列進行性（一種の並列処理形態）および(2)境界条件型の拘束（非同時性）の導入にある。これらを合わせたものが時系列パターンの認識において重要な意味を持ってくることが示されたわけである。

［謝辞］本研究に関連して言語処理研究室の鳥居宏次氏から種々有益なコメントをいただいた。記して感謝したい。

［文献］

(1) 阿部圭一：記号系列パターンを識別するあるオートマトンの構成法について，電通学会研究会資料 PRL 74-5 (1974)

(2) 迫江，千葉：動的計画法を利用した音声の時間正規化に基づく連続単語認識，音響学会誌 27，P.483 (1971)

(3) E.S. Santos : Maximin Automata, Information and Control 13，P.363 (1968)

(4) 水本，豊田，田中：Fuzzyオートマトンに関する2,3の考察，電通学会論文誌 52-C，P.385 (1969)

(5) 磯道義典：時系列パターンのセグメンテーションフリーな認識システム，電通学会研究会資料 PRL 74-22 (1974)