

記憶ペンによる部分像系列から全体像を再現する方法

鍋島 伸司[†] 中村 裕紀^{††} 山本 晋一郎[†] 阿草 清滋[†]

[†]名古屋大学工学部
464-01 名古屋市千種区不老町
^{††}八洲電機株式会社
601 京都市南区吉祥院石原野上 1

概要

新しい入力デバイスとして記憶ペンを開発した。記憶ペンは通常のペンと同じ外観を持つが、書いている内容をペン自身が記憶することができる。記憶ペンはボールペンの先に小型 CCD を持ち、ペン内蔵のメモリに画像系列を取り込むことができる。CCD の視野の制約から、全体像を取り込むことはできず、部分像を取り込む。本論文では、取り込まれた部分像系列から全体像を再現するアルゴリズムについて報告する。約 50 種類の筆跡について全体像再現実験を行なったところ、約 40 種類が正しく再現できた。しかし、長い直線に関する部分像系列は再現精度を低下させた。

Reconstructing a Whole Picture from a Series of Partial Pictures

NABESHIMA Shinji[†] NAKAMURA Hiroki^{††}
YAMAMOTO Shinichirou[†] AGUSA Kiyoshi[†]

[†] School of Engineering, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-01, JAPAN

^{††}Yashima Electric Co., Ltd.

1 Ishihara Nogami, Kissyoin, Minami-ku, Kyoto, 601, JAPAN

abstract

We have developed a new input device, named MEMO-PEN. The MEMO-PEN has a capability of memorizing what it draws in itself, whereas its appearance is just an ordinal pen. It has a small CCD at the tip of a ball point pen. It can capture a series of not whole pictures but partial pictures in its memory, since the size of the CCD scope is limited. This paper shows an algorithm how to reconstruct a whole picture from a series of partial pictures. In around 50 cases, with the exception of around 10 cases of picture mainly composed of long lines, we can reconstruct correct whole picture.

1 はじめに

人間は長い間、意思、思想などの伝達手段として「紙とペン」を用いてきた。知的作業の基本は抽象的思考を具象的表現として記録、確認することであり、紙は記録、伝達、保存するためのメディアとして、ペンは筆記具として用いられている。しかし、メディアとしての紙に若干の問題がある。知的作業の初期創造段階では、メモ、スケッチなどのイメージ的筆跡が作成されるため、その整理、保存は重要である。従来から様々な整理方法が提案されているが決定的な方法はない。また、紙はかさばるため保存が困難である。現代では、計算機による創造活動への支援によって、これらの問題を解決することが望まれている。

新しいアイデアはいつどこで生まれるかわからないため、机の上の作業だけでは豊かな発想は得られない。そのため、ノート型パソコンなど携帯性を高めた計算機が現れた。しかし、代表的な入力装置であるキーボードに対して、習熟が必要であることや、小型化には限界があることが指摘されている。また、電子手帳などで用いられているペン入力 [3] は、表示用の液晶とペン入力用のデジタイザが一体化しているため、使いやすさの面からの大型化の要求と携帯性の面からの小型化の要求を同時に満たすことができない。さらに、入力時に計算機を意識することは、知的作業の妨げになることもある。

ここで、紙の利点について再検討してみる。人間は紙に書くことに慣れ親しんでいる。紙は大きさが自由であり、どこにでも存在するため場所を選ばない。また、携帯性も良く、非常に優れたメディアであることがわかる。そこで、我々は、知的作業に関する紙の利点を最大限に生かしつつ、保存、管理などの問題を計算機によって補うために、人間と紙と計算機を結ぶメディアとしてのペン（以降、記憶ペンと呼ぶ）を提案する。記憶ペンシステムは、ペン先に CCD を持ち、ペン先付近の筆跡を順次記憶するペンとそれを再現するソフトウェアから構成される。記憶ペンを用いることにより、紙の利点を損なうことなく、全ての筆跡を計算機に入力することができる。このときに、デジタイザなどの下敷が不要であるので、書かれる側の制限がないことや計算機を意識しないですむことは大きな特

徴である。もちろん、紙にかかれた筆跡を従来通りそのまま利用することも可能である。

また、スキャナが書かれた筆跡の全体を記憶するだけであるのに対して、記憶ペンは、全体像だけでなく筆跡の時系列を再現することができる。そのため、筆跡の訂正、修正作業や思考過程の再現も可能である。さらに、記録された筆跡をインクデータ [2] に変換し Pen OS[1] などに渡すことにより、文字認識などに対応することもできる。

以下、2章では記憶ペンシステムの概要について、3章では記憶ペンにより記憶された部分像系列から全体像を再現する方法について、4章では作成したツールによる全体像再現の実験について述べる。

また、筆跡を文字として説明するが、本方式は文字に依存するものではなく、一般的な図形、記号、スケッチなどにも対応可能である。また、部分像は白黒の2値画像とするが、これをカラー、あるいは多階調に拡張することは容易である。

2 記憶ペンシステム

2.1 記憶ペンの概要

書いている文字を記憶するシステムの一形態として、カメラを眼鏡などに装着し、書いている人の目の位置から記録する方式も考えられる。これは、書いている文字の全体像を撮影する方式である。

一方、記憶ペンは CCD をペン先付近に持つため、撮影できる像はペン先付近に限られ、文字の部分像しか撮影できない。しかし、十分な精度で部分像から全体像が再現できれば、記憶ペンの方が解像度、記憶容量、小型化の面で有利であると考えられる。

記憶ペンの概念を図 1 に、記憶ペンの現行試作機を図 2 に、ブロック図を図 3 に示す。記憶ペンは、ペン軸、レンズ系、CCD、圧力センサ、マイコン、記憶装置、および電源からなる。レンズ系を通して、CCD に映し出されたペン先付近の画像をマイコンで取り込み、記憶装置に記憶する。また、筆記の際、ペンにかかる圧力を圧力センサで検出し、同じくマイコンを通して記憶装置に記憶する。

記憶装置に記憶された筆跡データは、インターフェー

ス装置を介して、計算機に取り込まれ、再現ソフトウェアにより全体像が再現される。

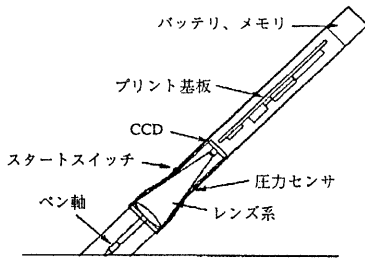


図 1: 記憶ペンの概念

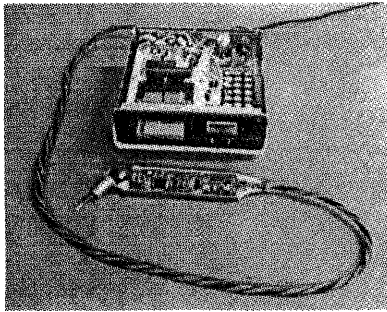


図 2: 記憶ペン現行試作機

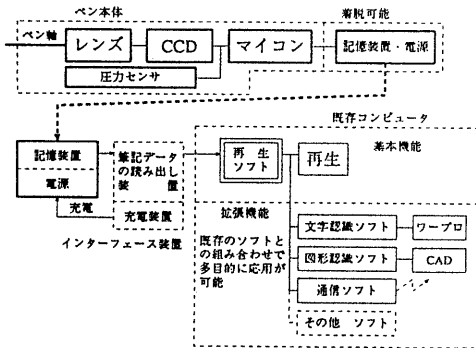


図 3: 記憶ペンのブロック図

2.2 再現ソフトウェアの概要

利用者は、一般に、記憶ペンによって書かれた全ての文字、すなわち全体像を必要とするので、記憶ペン

によって記憶された部分像系列から全体像を再現する必要がある。記憶ペンでは部分像を取り込むペン自身が移動するため、座標軸が存在せず、書かれた筆跡の絶対位置はわからない。しかし、部分像を取り込むサンプリング時間が十分小さいので、時間的に連続する部分像間には重なり合う共通な部分が存在する。この共通な部分から部分像間の相対位置を求めて、共通な部分を矛盾なく重ね合わせることにより、全体像を再現する。

記憶ペンを用いて文字を書くと、一定時間(以下、サンプリング時間と呼ぶ)ごとにペン先付近の様子が部分像として、その時の圧力センサの出力が記録される。部分像の例を図 4 に示す。

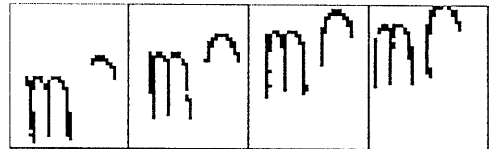


図 4: 部分像(例)

2.3 セル、アクト、シーン、ページ

再現方式を説明するのに必要な概念セル、アクト、シーン、ページについて説明する。これらは階層構造をなす。すなわち、複数のセルによってアクトが、複数のアクトによってシーンが、複数のシーンによってページが構成される。この様子を図 5 に示す。

- セル: 固定長の画素からなる部分像。
- アクト: 時間的に連続する一連のセルの重ね合わせによって構成される像。ここで、一連のセルとは、連続するセル間の位置関係が判明する限り、すなわち直前のセルに対する相対位置が判明する限り、できる限り大きくとったセルの連なりをいう。
- シーン: 位置関係が明らかな複数のアクトから構成される像。意味的なまとまりを表す。連続するセル間の位置関係が判明しない場合は、それらのセルは別々のアクトの一部となるが、それらのアクト間の位置関係が判明すれば、それらのアクトはシーンとしてまとめられる。
- ページ: 時間的に連続する一連のシーンから構成さ

れる作業のまとまりを表す像。1つのページを構成するシーンは重なりを持たない。また、ページの区切りは利用者が明示的に与える。

本稿では、セル、アクト、シーン、ページにおいて、左上を原点とし、右手方向にxが増加し、下方向にyが増加するxy直交座標系を用いる。また、各々の像において、黒である全ての画素を囲む最小の四角形をBoundingBoxと呼ぶ(以下、BBと省略する)。

セルを構成する画素は濃度としてBLACK、あるいはWHITEを取る。また、アクト、シーン、ページを構成する画素の濃度は、その画素が黒である可能性を表す非負整数である。アクト、シーン、ページにおいて、白点の濃度は0とし、初期状態では全ての画素が白点であるとする。

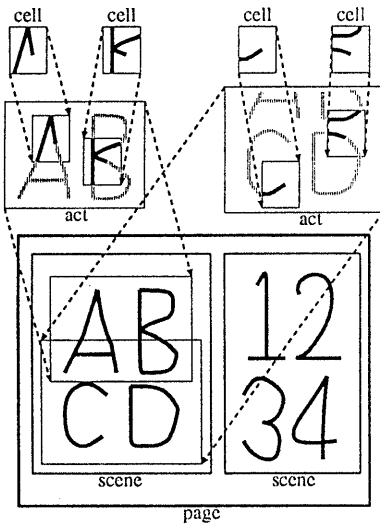


図 5: セル, アクト, シーン, ページ

3 全体像再現アルゴリズム

3.1 アクトの構築方式

3.1.1 概略

セル $cell_i$ ($0 \leq i$) をアクト act_j の適切な位置に重ね合わせることによって行う。最初のセル $cell_0$ はアクト act_0 の適当な位置に置かれる。次のセル $cell_1$ に

は、 $cell_0$ に現れている筆跡、すなわち既に act_0 に存在する筆跡(以下、共通の筆跡と呼ぶ)と、 $cell_0$ が取り込まれてから $cell_1$ が取り込まれるまでの間に書かれた新たな筆跡の両方が現れる。 $cell_1$ と act_0 の間で筆跡のマッチングを行ない、 $cell_1$ の共通な筆跡が最も矛盾なく act_0 と重なる位置 (x_1, y_1) を求め、 act_0 の位置 (x_1, y_1) に $cell_1$ を重ね合わせる。以下同様に、共通な筆跡が重ならないセル $cell_l$ が出現するまで各セル $cell_l$ の共通な筆跡が act_0 と最も矛盾なく重なる位置 (x_l, y_l) に重ね合わせる。この様子を図 6 に示す。ここで、 $cell_l$ の共通な筆跡が十分に act_j と重ならないとき、 $cell_l$ 以降のセルに関しては、新しいアクト act_{j+1} を対象にして同様の作業を行なう。

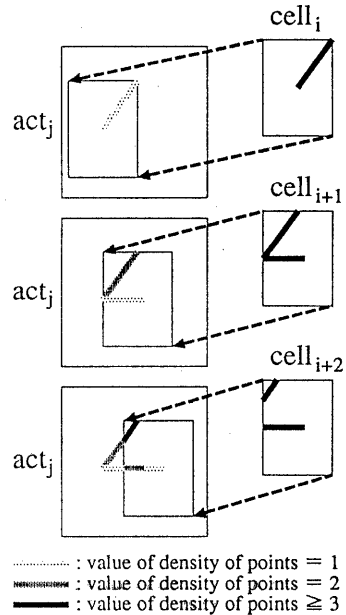


図 6: アクトの構築(例)

3.1.2 セル・アクト間マッチングのアルゴリズム

セルとアクトの間の共通な筆跡を検出するために行なわれる筆跡のマッチングについて説明する。以下では、セルとアクトを各々2次元の配列 $cell[CELL_WIDTH][CELL_HEIGHT]$ と $act[ACT_WIDTH][ACT_HEIGHT]$ を用いて表す。セル・

アクト間マッチングのアルゴリズムは、入力としてセルとアクトを取り、セルとアクトが最もよく重なるアクト上の位置 (x, y) を返す。

サンプリング時間は十分小さいので、セルとアクトの間の共通な筆跡は、直前セルが置かれた位置の近傍に現れると考えることができる。よって、マッチングを行なう領域（以下、マッチング領域と呼ぶ）は、直前のセルが重ね合わされた領域の、セルの幅、高さのそれぞれ $1/N$ だけ周囲の部分とする。図7に $N = 2$ の様子を示す。マッチング領域の全ての位置にセルを

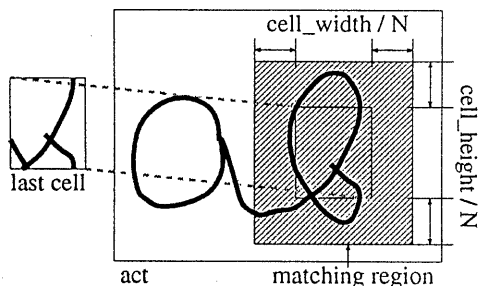


図7: マッチング領域

重ね合わせて以下の手続きを行ない、 $match$ の値が最大となる位置 (x, y) を求める。この (x, y) がセルとアクトがもっともマッチした位置である。 $match$ は以下の方法で求める。

アクト上の位置 (ax, ay) にセルを重ね合わせる。セルの左上の画素 $cell[0][0]$ はアクトの画素 $act[ax][ay]$ に対応する。セルが重ね合わされたアクトの領域において、0より大きな濃度を持つ全ての画素（これを、 $act[ax+cx][ay+cy]$ とする）に対して、その画素と対応するセルの画素 ($cell[cx][cy]$) に筆跡が書かれているか調べる。

- $cell[cx][cy]$ に筆跡が書かれている場合
 $match = match + act[ax + cx][ay + cy]$
- $cell[cx][cy]$ に筆跡が書かれていない場合
 $match = match - act[ax + cx][ay + cy]$

$match$ の求め方において、アクト内の画素の濃度値を用いているが、濃度が高いほど、その点に筆跡が書かれている可能性が高いので、濃度を $match$ に対する重みとして用いていることになる。

3.1.3 セルのアクトへの重ね合わせ

セル $cell[][]$ をアクト $act[][]$ の位置 (X, Y) に重ね合わせる方式を図8に示す。ここで、関数 $up(z)$ は、濃度 z を持つ画素に、黒点の画素を重ねた後の濃度をまた、関数 $down(z)$ は、濃度 z を持つ画素に、白点の画素を重ねた後の濃度を返す関数である。最も単純な場合は、 up として1を加算する、 $down$ として1を減算する関数を用いる。

```
for (x = 0; x < CELL_WIDTH; x++) {
  for (y = 0; y < CELL_HEIGHT; y++) {
    if (cell[x][y] == BLACK) {
      act[X+x][Y+y] = up(act[X+x][Y+y]);
    } else {
      act[X+x][Y+y] = down(act[X+x][Y+y]);
    }
  }
}
```

図8: 重ね合わせの方式

3.2 シーンの構築方式

3.2.1 概略

セルからアクトを構築するとき、セルとアクトの位置関係がわからなくなった場合、以降のセルは新しいアクトを対象にして再現を行なう。このとき、新しいアクトに以前のアクトに書かれた筆跡の一部が現れ、アクト間の位置関係が判明するときがある。このような場合、以前のアクトによって構成されたシーンとアクト間でマッチングを行ない、共通な筆跡を検出することにより、シーンにアクトを重ね合わせてシーンを構築する。シーンの構築例を図9に示す。

3.2.2 マッチング領域

アクトとシーン間の相対位置関係を求めるために、セルからアクトを構築するときと同様にマッチングを行なう。アクトには、そのアクト内で実際に書いた筆跡と以前のアクトに書かれた文字の筆跡の一部が存在する。セルからアクトを再現するときに求めたペンの位置データからペンの移動ベクトルを求めて、このアクト内で実際に書いた筆跡を除去すると、以前に書かれた筆跡が残る。以下、この筆跡を既存筆跡と呼ぶ。

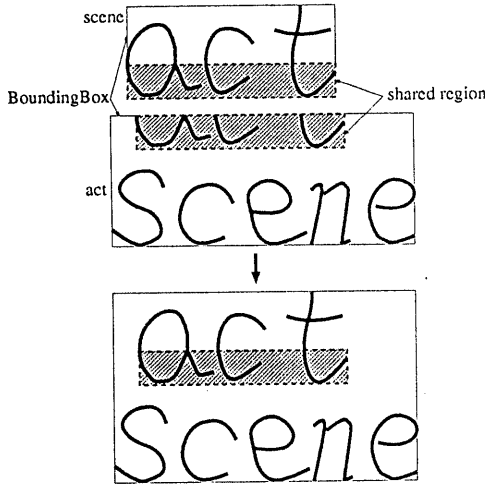


図 9: シーン構築 (例)

既存筆跡はそれまでに再現されたシーンに存在するはずである。既存筆跡を共有するシーンとアクトの位置関係を検出し、アクトとシーンを重ね合わせる。

以下のように、アクト内における既存筆跡の位置により、5種類の場合分けを行ない、マッチング領域を定義する。マッチング領域の場合分けを図10に示す。

(1) アクトの上部に既存筆跡が現れた場合、その筆跡は以前に再現されたシーンの下部の筆跡であると考えられる。よって、マッチング領域は、アクトの上部とシーンの下部にそれぞれ既存領域のBBの高さ分だけとる。同様に(2)アクトの下部、(3)左部、(4)右部に既存筆跡が現れた場合、マッチング領域はそれぞれ、アクトの下部とシーンの上部、アクトの左部とシーンの右部、アクトの右部とシーンの左部にとる。

また、(5)アクトの内部に既存筆跡が現れた場合、以前に書かれたシーンに重ねて書いたと考える。例えば、書いた文字を「×」や「=」などで訂正する場合などに代表される。この場合、既存筆跡の存在領域が限定できないので、既存筆跡はアクトのBB全域とシーンのBB全域に現れる。よって、マッチング領域はアクトのBB全域とシーンのBB全域とする。

定義したマッチング領域にしたがって、アクトとシーン間でマッチングを行なう。以前に書かれた筆跡の存在領域が複数の場合に当てはまる場合は、そのすべ

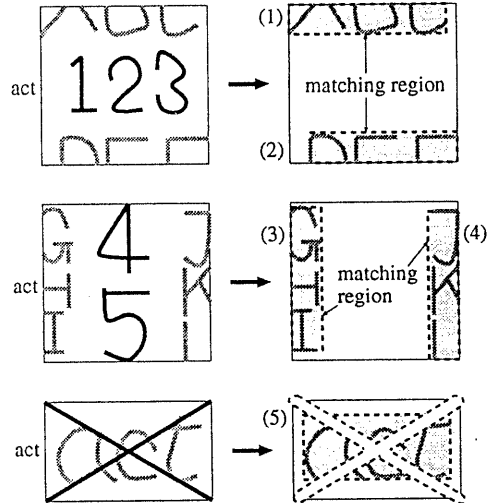


図 10: 既存筆跡の存在領域によるマッチング領域の場合分け

ての場合のマッチング領域でマッチングを行なう。

ここで、アクトとシーンの位置関係は、必ずしも正確に縦または横にならないので、マッチング領域は上下、左右に既存筆跡のBBの高さ、幅のそれぞれ2分の1だけ余分にマッチングさせる。

3.2.3 アクト・シーン間マッチング

アクトとシーンのマッチング領域においてマッチングを行ない、もっとも矛盾なくアクトとシーンを重ね合わせることができる位置を求める。この位置は、セルからアクトを構築するときと同様に、最大の $match_{sc}$ の値を与える位置とする。

act_i と $scene_j$ の間でマッチングを行なうとする。このとき、アクトとシーンのマッチング領域の全ての位置で、アクトとシーンを重ね合わせて、セル・アクト間と同様のマッチングを行ない、 $match_{sc}$ の値が最大となる位置 (x, y) を求める。最初のアクト act_0 は $scene_0$ の適当な位置に置かれる。

なお、 $match_{sc}$ の最大値が十分に大きくない場合は、 act_i は $scene_j$ の構築に使用しない。このときの、 act_i の扱いは以下の2通りが考えられる。

(1) act_i が不明瞭なアクトの場合は、この act_i を棄却

する。

(2) act_i が $scene_j$ と共通な筆跡を持たない場合は、 $scene_j$ 以前のシーンと共通な筆跡を持つ可能性がある。よって、 act_i を $scene_{j-1}$ とマッチさせる。 $scene_{j-1}$ とマッチすればそのシーンと重ね合わせ、マッチしなければ $scene_{j-2}$ と、順次マッチングを行なう。どのシーンともマッチしない場合は、いずれのシーンとも共通の筆跡を持たない、独立したアクトとみなし、新たに $scene_{j+1}$ を設けて act_i を重ね合わせる。

このようにして、全てのアクトをシーン上に再現する。しかし、アクトが複数のシーンと共通の筆跡を持ち、位置関係のわからなかったシーン間の関係が判明することがある。この場合は、アクトと複数のシーンを対応する位置で重ね合わせ、シーン番号の小さいシーンにまとめる。その他のシーンは再び空白の領域にする。

3.3 ページの構築方式

ページは、作業のまとまりを表す一連のシーンから構成される。また、相対位置関係が判明しているアクトはシーンとしてまとめられているため、シーン間の位置関係は不明である。すなわち、ページの区切りは以下の方法によって与えられる。

- 利用者が明示的に与える

記憶ペンにハードとして用意された機構、あるいはジェスチャーなどによって利用者が明示的に与える。

- 時間軸から判定する

記憶ペンの使用を開始してから、一連の作業が終了して電源を切るまで。

4 実験

本章では、3.1,3.2節で述べたアクト、シーンの構築方式の有効性を確認するために、記憶ペンにより記録されたセルからシーンを実際に再現する実験を行なった。一般には、文字を左から右へ、上から下へ改行しながら書いていくことが多いので、以下のように仮定した。

アクトの左部にシーンで再現された筆跡の右部が、またはアクトの上部にシーンの筆跡の下部が現れると

考え、アクトとシーン間のマッチング領域を、シーンの右部1セルの幅分、下部1セルの高さ分とアクトの左部1セルの幅分、上部1セルの高さ分に限定した。

4.1 再現ツールの概要および実験結果

セルからアクト、アクトからシーンを構築するアルゴリズムを検証するために、シーン再現ツールを作成した。シーン再現ツールの実行画面を図11に示す。こ

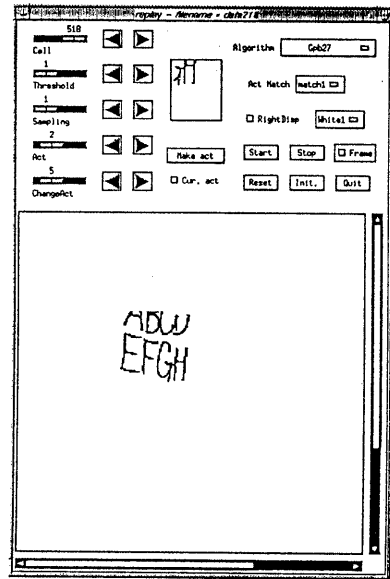


図 11: 再現ツールの実行画面

の再現ツールは、記憶ペンによって取り込まれたセルデータと圧力センサの出力を読み込み、シーンを構築する。このツールの主な機能を以下に示す。

- セルを1枚ずつアクト上に再現していき、その様子をリアルタイムに表示する。
- 複数のアクトを切替えて表示する。
- 複数のアクトからシーンを構築できる。
- アクト、シーンを濃度値で2値化し表示する。
- 複数種類の、セルからアクトの構築方法、アクトからシーンの構築方法から選択できる。

部分像を取り込むサンプリング時間を10枚/秒、文字の大きさを1~2cm、文字数を1行あたり5文字程度で1~4行で日本語、または数式、スケッチなど

約 50 種類の筆跡の部分像系列に関して再現実験を行なった。

実験の結果、約 40 種類の筆跡がほぼ正しく再現できた。比較的再現が正しく行なわれたシーンの例を図 12 に示す。シーン内の枠は各アクトの BB を示す。

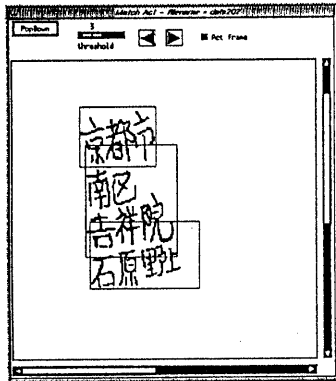


図 12: 正しく再現されたシーン (例)

4.2 問題点

ペンを浮かせた時にはペン先が紙から離れるので、セル内の筆跡は縮小されて現れる。よって、このセルとアクトは正しくマッチしないため、重ね合わせる位置を間違える可能性が高い。また、筆跡が不明瞭なセルも重ね合わせる位置を間違える可能性が高い。長い直線のように無特徴な筆跡、またはサインカーブのように周期的な筆跡は正しく再現できなかつた。セルを重ね合わせる位置を間違えてしまうと、以降のセルは前のセルを重ねた位置の周囲でパターンマッチングを行なうため、連続して間違えてしまうことがある。アクトを正しく再現できないと、さらにアクトによって構成されるシーンの再現にも大きな支障をきたす。

対策としては、ペンを浮かせたかどうかは圧力センサの出力でわかるので、ペンを浮かせたときはセルの筆跡を拡大してマッチングを行なうことが考えられる。また、不明瞭なセルかどうかをさらに正確に判断する方法を考える必要がある。

5 まとめ

知的作業に関する紙の利点を最大限に生かし、保存、管理の問題を計算機によって補うための、人間と紙と計算機を結ぶ新しいメディアとして、記憶ペンを提案した。また、記憶ペンによって記憶された筆跡の再現方法を提案し、その有効性を検証するため、シーン再現ツールを作成した。再現ツールを用いて、記憶ペンで書かれた筆跡の部分像系列から、シーンを再現する実験を行なった。

今回の実験では、文字を左から右へ、上の行から下の行へ改行しながら書くことを仮定し、マッチング領域をアクトの上部、左部、シーンの下部、右部に限定した。約 50 種類の筆跡の部分像系列に関して、再現ツールで再現実験を行なったところ、約 40 種類の筆跡についてはシーンの再現が正しく行なわれた。しかし、それ以外の筆跡については、ペンを浮かせたときにセルがアクトに正しくマッチせず、アクトが正しく再現されない場合があった。

今後の課題としては、セルからアクトへの再現精度の向上、アクトに現れる既存筆跡によってマッチング領域を決定するアルゴリズムの実現が挙げられる。

謝辞

記憶ペンの創案者である八洲電機株式会社 田口俊夫社長、記憶ペンプロジェクトチームの皆様へ深く感謝致します。また、熱心に御討論頂いた阿草研究室の皆さんに感謝致します。

参考文献

- [1] J.Kempf and A.Wilson. Supporting Mobile, Pen-Based Computing With X: Mobile Information for Hi-Tech Nomads. In *THE X RESOURCE*, pp. 203-211, 1993.
- [2] Joint work of Slate, Lotus, GO, Microsoft, Apple. *JOT: A specification for an Ink Storage and Interchange Format*, 1993.
- [3] 福永泰. ペン入力技術: 紙の操作性を目指して、情報処理, Vol. 33, No. 7, pp. 820-827, 1992.