

データ埋め込みペンによる機械可読な手書きパターン

田中 一弘[†] 内田 誠一[†] 岩村 雅一^{††} 大町真一郎^{†††} 黄瀬 浩一^{††}

[†]九州大学大学院システム情報科学研究院 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1

^{††}大阪府立大学大学院工学研究科 〒599-8531 大阪府堺市学園町 1-1

^{†††}東北大学大学院工学研究科 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: [†]{tanaka,uchida}@human.is.kyushu-u.ac.jp, ^{††}{masa,kise}@cs.osakafu-u.ac.jp,

^{†††}machi@aso.ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 本論文では、紙とペンによる手書きパターンを情報埋め込み技術により機能拡張する方法について述べる。具体的には、機械可読な情報を手書きパターンにリアルタイムに埋め込む機能を具備したペンを考え、これにより手書きパターンを、タグ、バーコード、サイバー空間とのリンクとして利用することを考える。本論文では、ペンのハードウェア仕様、ならびに情報埋め込み・抽出手段、応用先について述べる。また特に、情報抽出の際の中心的問題となる筆順復元について詳述する。

キーワード 情報埋め込み、手書きパターン、筆順復元、不可視インク

Machine-Readable Handwriting Patterns by Data-Embedding Pen

Kazuhiro TANAKA[†], Seiichi UCHIDA[†], Masakazu IWAMURA^{††}, Shinichiro OMACHI^{†††}, and Koichi KISE^{††}

[†] Faculty of Info. Science and Electrical Eng., Kyushu University, Fukuoka-shi, 812-8581 Japan

^{††} Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University, Sakai-shi, Osaka, 599-8531 Japan

^{†††} Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai-shi, 980-8579 Japan

E-mail: [†]{tanaka,uchida}@human.is.kyushu-u.ac.jp, ^{††}{masa,kise}@cs.osakafu-u.ac.jp,

^{†††}machi@aso.ecei.tohoku.ac.jp

Abstract In order to use handwritings as a universal man-machine interface, we assume a pen device — data-embedding pen — which can embed digital data into a handwriting by invisible ink in a real-time manner. This paper discusses the system design, application, and required technologies around the data-embedding pen. Especially, a novel stroke recovery algorithm is proposed for retrieving the embedded data along writing order. In the algorithm, embedded data is used to help the recovery. A simulation experiment showed that the algorithm can attain high accuracy on the stroke recovery and the data retrieval.

Key words data embedding, handwritings, stroke recovery, invisible ink

1. ま え が き

本研究では、情報埋め込み技術を用いることで、紙とペンで生成される手書きパターンの価値を、飛躍的に高めることを目標としている。具体的には、紙上の手書きパターンという非電子的メディアについて、その電子的管理（具体的には検索やID付け）や、人間と機械もしくは人間とサイバー空間を結びユニバーサルインターフェースしての活用を目指す。

情報埋め込みは独特のペン — データ埋め込みペン — を介して筆記時にリアルタイムに行なわれる。具体的には、運筆に従ってペン先から黒インクを出すだけでなく、ペン先付近のノ

ズルからデータを表現するインクを間欠的に噴射する。この噴射のパターンを制御することで、多様なデータの埋め込みを実現する。データを表現するインクとして、黒インクとは区別可能なもの、例えば不可視インクを用いる。これは、埋め込みデータの分離抽出を容易にするためである。

紙とペンによる手書きパターンの電子的利用に関しては、あまり類例がない。電子タブレット上での手書きパターンを計算機に入力することは広く行なわれているが、手書き時に計算機が必要であり、その自由度は著しく低い。アノトペンは、紙上での運筆情報を小型カメラ内蔵のペンで捕捉する最近の技術であるが、使用する紙も特殊なものに限定される。サインを対象

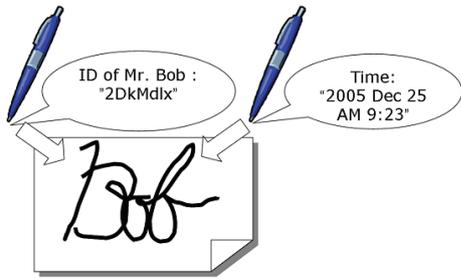


図 1 利用例 1: 署名への筆記者・筆記時刻埋め込み

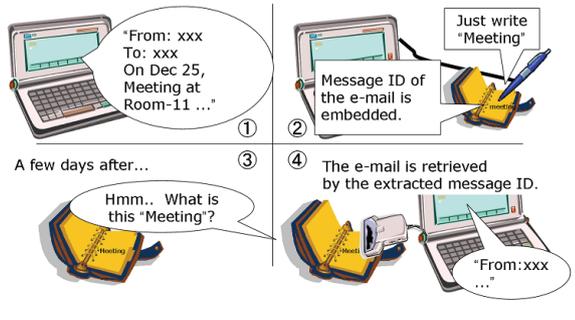


図 2 利用例 2: 手書きとサイバー空間とのリンク

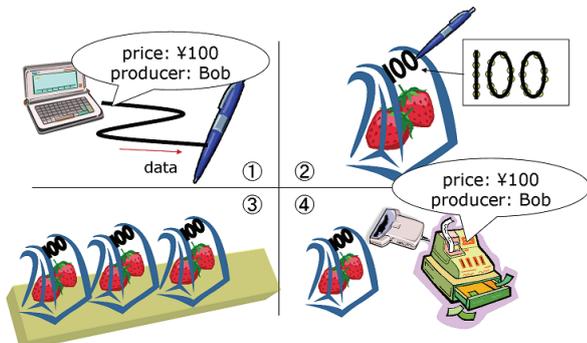


図 3 利用例 3: 手書きバーコード

とした個人同定技術も広い意味では手書きパターンの電子的管理であるが、サインの形状だけを頼りに筆記者を同定するには限界がある。本研究は、紙とペンという手書きの自由度をそのままに、これら従来法の持つ欠点を回避しようものと考えている。

以下、2. では、データ埋め込みペンについて、その構造、利用例、ならびに情報埋め込み、情報抽出などの技術的課題を概観する。3. では、技術的課題の一つである情報抽出に関して詳細を述べる。具体的には、情報抽出のための筆順復元問題について、基本アルゴリズムを論じた後に、データ埋め込みペン特有の能力を利用して、その筆順復元精度を向上する方法を提案する。4. では、3. の筆順復元方法のシミュレーション実験結果を示す。5. と 6. では、それぞれ今後の課題とまとめについて述べる。

2. データ埋め込みペン

2.1 用途

1. でも述べたが、手書きパターンに様々なデータが埋め込めるようになると、手書きパターンを電子的に管理したり、マン

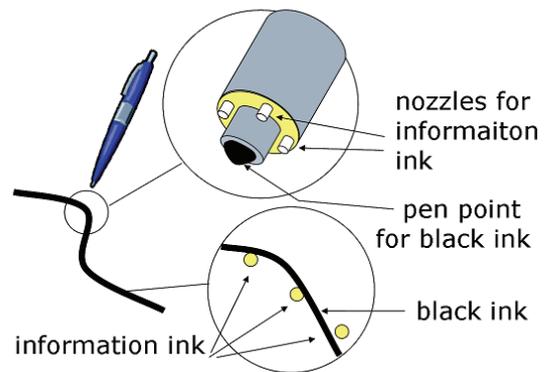


図 4 データ埋め込みペンのハードウェア

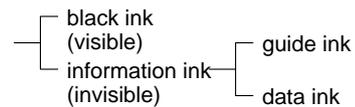


図 5 データ埋め込みペンで用いられるインク

マシンインタフェースとして活用できるようになる。データ埋め込みペンのこうした使用例を図 1-3 に示す。

図 1 は、データ埋め込みペンにより手書きパターンを電子的に管理する例である。例えば、本ペンが埋め込みデータとして、常に個人 ID を出力するようにしておけば、あるサインの筆記者を筆記パターンではなく ID により確実に同定できる。

図 2 は、手書きパターンとサイバー空間のリンクに関する使用例である。メモ帳の「会議」という手書き文字列に、その会議の詳細を述べた電子メールの ID を埋め込んでおけば、ユーザはその手書き文字列をインタフェースとして、サイバー空間内に存在する電子メールにアクセスすることが可能となる。

図 3 は、データ埋め込みペンによる手書きバーコードの実現である。価格や生産者などを手書きパターンに埋め込んでおくことで、通常のバーコードと同様の使用が可能になる。最大の特徴は人間可読性である。すなわち、従来のバーコードが人間には可読ではなかったのに対し、手書きバーコードは、手書きパターンとして文字を用いることで、人間にも可読になる。なお、この手書きバーコードにより、市場を流通する物品とサイバー空間の手書きによるリンクが可能になる。例えば、ある物品の梱包表面に、ID や生産者、生産日時といった情報を埋め込んだ手書きパターンを書き込んでおく。その結果、その物品には手書きパターンを介してそれらの情報が付与されたことになり、従って電子的に管理され得ることになる。これは「手書きによる ID タグ」と言える。

2.2 ペンのハードウェア

本研究では、図 4 に示すデータ埋め込みペンの開発を目指している。このペンはその先端部から少なくとも 2 種類のインクを出す(図 5)。ひとつは通常の筆記具と同様の黒インクであり、他のひとつはデータを埋め込むためのインク(情報インク)である。黒インクはボールペンと同様、紙に接することで塗布される。情報インクはインクジェットプリンタと同様、紙と接す

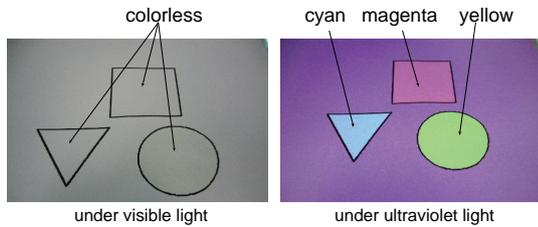


図 6 不可視インク

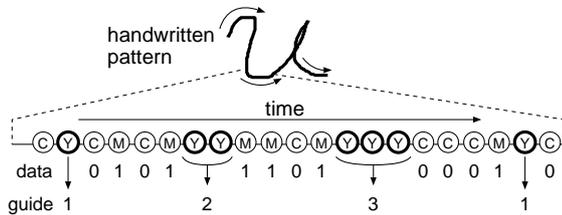


図 7 情報インクの噴射パターンの例．C,M,Y は不可視インクの発光時の色 (Cyan/Magenta/Yellow) を表す．

ることなくノズルから噴射されるものとする．この情報インクの噴射は間欠的なものとする．2.4 にて詳述されるように、その噴射パターンを以ってデータを表現する．筆記後、ハンドヘルドスキャナやカメラにより情報インクの噴射パターンを読み取ることで、埋め込んだ情報を復元する．

2.3 不可視インク

情報インクには通常のカラーインクを用いてもよいが、不可視インク [1] を用いることも考えられる．不可視インクは、可視光下では無色透明であり、その名の通り目に見えないが、ブラックライト等により紫外線を照射することで可視光域で蛍光発光する (図 6)．その発光時の色には、可視インクと同様、CMY の 3 原色がある．さらにそれらの混色も可能である．不可視インクを用いることで、手書きパターンの見た目に影響しない情報埋め込みが可能である．

2.4 情報埋め込み

2.4.1 データインクとガイドインク

前述のようにデータ埋め込みは情報インクの噴射パターンを制御することで実現される．図 5 に示すように情報インクは、データインクとガイドインクに区別される．データインクは埋め込むデータを表現する．一方、ガイドインクはデータの読み取り順序、すなわち手書きパターンの筆記方向を表現する．データインクとガイドインクは、発光色によって区別されるようにしておく．なお、他にも噴射半径の大小や噴射形状による区別も考えられる．

2.4.2 埋め込みフォーマット

図 7 は、情報インクの噴射パターン of the most simple example. Data ink uses C (Cyan) and M (Magenta), and guide ink uses Y (Yellow) for distinction. In one data ink dot, 1-bit data is expressed. In the same figure, $C \rightarrow 0$, $M \rightarrow 1$ is shown. Guide ink is N -bit data ink sequence (in this paper $N = 4$) as a section and is sprayed. 1~3 dots are grouped, and it repeats like 1 dot 2 dots 3 dots 1 dot 2 dots ...

上述のようにガイドインクの役割はストロークの筆記方向の表現である．すなわち、ガイドインクが 1 個 2 個 3 個となる方向は正しく、逆に 3 個 2 個 1 個となる方向は間違っていると判断できる．

2.5 情報抽出

2.5.1 情報インク抽出

情報抽出には、手書きパターンを撮影した画像から、シアン、マゼンダ、イエローのインクドットを抽出する必要がある．情報インクが黒インクストローク付近に存在するという知識は利用できるであろう．なお、不可視インク利用時には紫外線照射下での撮影・抽出が必要になる．

2.5.2 筆順復元

情報インクドットが抽出された後、それらを筆記順序に従って並べなおす必要がある．情報インクは黒インクの筆記に従って噴射されたものであるから、その並べなおしの問題は、黒インクによる手書きパターンの筆記順序を復元する問題と等価である．この点については次章以降で具体的な方法を示す．

2.5.3 信頼できないデータの削除および補完

もし完全な筆順復元が可能だったとしても、すべての情報インクが抽出できるわけではない．すなわち、2 度書き部分や交点においては、2 つのストロークに付随する情報インクが混在してしまい、正しい抽出は困難である．よって、筆順復元時に 2 度書き部を同定し、その部分の情報インクについては削除する必要がある．さらに削除した部分を補完する必要がある．この補完のためには、(i) 埋め込みデータをあらかじめ誤り訂正符号により符号化した後にデータインクとして表現する、もしくは (ii) 同じ情報を繰り返してストローク内に埋め込む、といった対処が必要となる．

3. 情報インクを援用した筆順復元

本章では情報抽出のための具体的な筆順復元法について論ずる．筆記順序情報が失われた画像としての手書きパターンからの筆順復元は、ストロークリカバリとも呼ばれ、手書き文字認識の分野において検討されている．筆順復元の問題は、結果 (画像) を見て入力 (筆順) を推定するという逆問題であり、一般には困難である．そこで従来の筆順復元法の多くは、ヒューリスティクスを利用するなどの様々な工夫により問題を解き易くしている．3.1 では、こうした筆順復元法の一つとして加藤らの手法 [2], [3] (以下、基本アルゴリズムと呼ぶ) を紹介する．しかし、そうした工夫があっても、黒インクだけを手掛かりとした筆順復元には本質的に限界がある．そこで本研究では情報埋め込みペン特有の情報インクを積極的に活用することで解決を図る．その具体的な方法については、3.3 で述べる．

なお、基本とする筆順復元法として文献 [2], [3] 以外のアルゴリズムも利用できる．実際、文献 [6] では、動的計画法 (DP) に基づく最適経路探索型の筆順復元法に対して、情報インクの援用が検討されている．

3.1 基本アルゴリズム [2], [3]

基本アルゴリズムは図 8 に示すように幾つかの処理を段階的に実行するように構成されている．以下ではそれら各処理につ

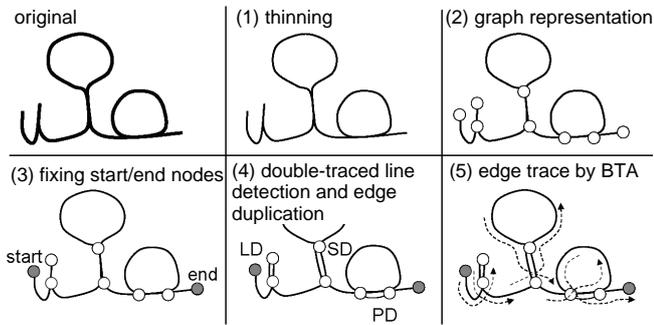


図 8 基本アルゴリズムの流れ

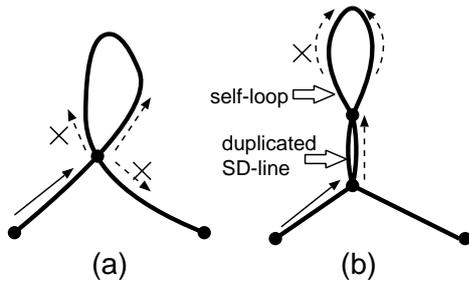


図 9 Basic Trace Algorithm の戦略

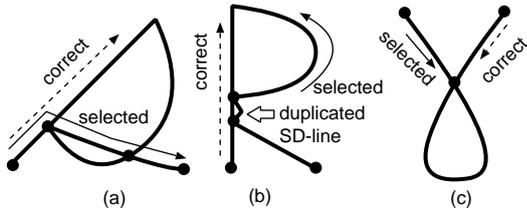


図 10 基本アルゴリズムの限界

いて述べる。

3.1.1 手書きパターンのグラフ表現

基本アルゴリズムでは、1画で書かれた手書きパターン（黒インクによるパターン）をまず細線化し、その後グラフ表現する。グラフ表現においては、ストロークの交点もしくは端点がグラフのノードになり、2つの交/端点間のストロークがエッジになる。1つのエッジには、2度書き部分に対応している可能性もある。

3.1.2 始端・終端の決定

次数1のノードのうちの2つを、それぞれ始端（書き始め）、終端（書き終わり）として選択する。この選択すべきノードは自明ではない。例えば“d”の頂点のように、始・終端でなくとも次数1のノードは存在しうる。また始・終端両者の区別も不可能である。文献[2],[3]では、 $M P_2$ 通り (M は次数1のノード数) のすべての場合について、総当り的に以下の処理による筆順復元を試み、それらの中で最も妥当な結果を（曲率変化の少なかったものを）選択することを推奨している。

3.1.3 2度書き部分の検出

完全な筆順復元のためには、2度書き部分に対応するエッジを検出する必要がある。2度書き部分はLDライン、SDライン、PDラインの3種類に大別される（図8参照）。(i) LDラインは始点と終点以外の次数1のノードと次数3のノードには

さまれた辺、(ii) SDラインは自己ループのある次数3の節点と他の次数3の節点にはさまれた辺、(iii) PDライン: ある次数3の節点と他の次数3の節点にはさまれる辺が2本あるときの短いほうの辺、として定義されている。これらいずれの2度書き部分も奇数次数のノードを手がかりとして検出できる。

こうして検出されたエッジは、筆順復元の際に2回通るべきエッジである。したがって、次のBTAアルゴリズムを適用する前に、あらかじめ二重化しておく。

3.1.4 Basic Trace Algorithm (BTA) による筆順復元

BTAとは、グラフ上のすべてのエッジを通る道、すなわち筆順復元結果を与えるアルゴリズムである。こうした道は必ず存在する。なぜなら、2度書き部エッジの2重化により、始・終端以外のノードはすべて偶数次数になっているためである。こうしたグラフは半オイラーグラフと呼ばれ、グラフのすべてのエッジを1度だけ通る道を持つことが知られている。

BTAでは、始端から終端に到達するまで、偶数次数ノードでのエッジ選択を繰り返すことで、上述の道を見つける。そのエッジ選択の戦略は、図9(a)のように、今来たエッジを除くエッジ（次数4なら3つのエッジ）のうち、真ん中のエッジを採用するというものである。すなわち交差では直進するという戦略である。また、SDラインの自己ループに対応するエッジについては本質的に方向不定であるため、常に図9(b)の方向を採用する。他にPDラインについても固有の戦略があるが[3]、ここでは略する。

3.2 基本アルゴリズムの限界

基本アルゴリズムは、多くの場合において妥当な結果を与える。しかしながら、次のような問題点もある。

(1) 交差直進戦略の限界（図10(a)）: 偶数次数のノードでは中央のエッジを選択するという戦略（図9(a)）が、正しくない場合がある。

(2) 部分的な筆記方向の不定性（図10(b)）: SDラインの自己ループの筆記方向決定戦略（図9(b)）が正しくない場合がある。

(3) 全体的な筆記方向の不定性（図10(c)）: 始・終端を間違えると、全く逆の筆記方向が求まる。ところがこの両端の本質的な区別は不可能である。

最近、加藤らの方法に対する幾つかの改良が提案されている[4],[5]。例えば、文献[5]では3度以上の重ね書きを許すための改良がなされている。また文献[4],[5]では次数6以上のノードに対する対処法が提案されている。しかし、繰り返し述べているように、こうした対処法を用いても、筆順復元問題の本質的な曖昧性を解消することはできない。

3.3 情報インクの援用による高精度化

本論文では、情報インクを援用することで、前節の問題点を緩和する方法を提案する。まず問題(1)に対しては、偶数次数のノードに来たとき、現在のエッジにおける情報インクのパターン系列を観察し、それと連結可能なパターン系列を持つエッジを後続候補の中から選ばせよ。この連結可能性は、ガイドインクの数の規則性（1個 2個 3個 1個 2個...）や、連続するデータインクの数に常に N 個であることから判



図 11 筆順復元の結果例

定される。問題(2)に対しては、自己ループ部分の筆記方向をその部分のガイドインクから判定すればよい。問題(3)も同様に各エッジにおける筆記方向をガイドインクから判別すればよい。このように、データ埋め込みペン特有の能力を利用して、筆順復元精度を向上できる。

4. シミュレーション実験

本章では、筆順復元のシミュレーション実験の結果について述べる。特に、3.3 で述べたような情報インクによる高精度化の可能性に着目しながら、筆順復元能力ならびに情報抽出成功率を評価する。

4.1 実験試料

本実験では、実際の紙の上の手書きパターンおよび情報インクではなく、タブレットを介して得られたオンラインパターンを元のデータとする。このオンラインパターンを画像化したものを、筆順復元アルゴリズムのテストデータとして利用した。元々オンラインパターンなので、筆順復元の正解データは既知とできる。

実験資料として、6名の筆者による英語アルファベットの大・小文字全52文字種のデータ、計312パターンを利用した。上述のように筆記にはタブレットを用いた。大きさは文字種によって様々であるが、平均的には250×250画素程度であった。

シミュレーション実験ということで、すべての情報インク位置を既知とした。具体的には、オンラインパターンの筆点に沿って n 画素間隔で1ドットのデータインクもしくはガイドインクが埋め込まれていると想定した。データインク、ガイドインクの埋め込みフォーマットは2.4.2の通りである。このときのデータ埋め込み量は、ストロークを構成する画素の数を N とすると、 $(12N)/(18n)$ bitである。例えば、 $N = 750$ 、 $n = 10$ の場合、50bitの埋め込みが可能である。

4.2 実験結果

4.2.1 筆順復元結果

前出の312パターンすべてに細線化を行ない、さらにグラフ表現した。本実験では画像化の際にストローク幅を1としたが、それでもストローク交差等の存在により、細線化の必要があった。9パターンについては、細線化ならびにクラスタ化の

悪影響により、基本アルゴリズムでは想定されていない次数5のノードが発生したため、以下の実験ではこれらを除外した。したがって、以下では303個の手書きパターンを用いている。

始・終端は既知として、筆順復元を行い、その結果を目視することで筆順復元成功率を求めた。情報インクを利用しない場合、すなわち基本アルゴリズムでは、303個のうち293(96.7%)の文字パターンの筆順復元に成功していた。一方、情報インクを援用した場合、成功率の向上が見られた。具体的には、筆順復元が成功したパターン数は、インク間隔 $n = 3, 5, 7, 9$ についてそれぞれ296(97.7%)、296(97.7%)、299(98.7%)、298(98.3%)となった。このことから、情報インクを援用することの効果がわかる。

図11は、筆順復元結果例である。全7パターンのうち、左の3つは基本アルゴリズムでも成功したパターン、右の4つは本手法でのみ成功したパターンである。後者のうち最初の3つは図10(a)に示した交差直進戦略の失敗を、残る1つは図10(b)に示した自己ループの筆記方向決定戦略の失敗を、それぞれ情報インクの利用で成功に転じた例である。

なお今回は、基本アルゴリズムでも正解が得られやすい問題設定となっている。これは、(i)書き始め書き終わりを既知としており、全体的な筆記方向の不定性がない、(ii)ストロークは基本的に太さ1であり、そのため2度書き部が少ない、また(iii)1画パターンのみを対象としている、という理由による。これらを考慮すると、実際の問題においては、情報インクを援用する本手法の有用性はさらに増加するものと期待される。

4.2.2 情報抽出成功率

埋め込まれた情報は、復元された筆順に従って情報インクを読み取ることで抽出される。今回のシミュレーション実験において、情報抽出の失敗要因は、次の2種類に分類される。

- 2重書き部および交差部：筆記2回分の情報インクが混在するため、データを読み誤る。

- 筆順復元の失敗：誤って逆の筆記方向が復元されると、その部分のデータを読み誤る。

第1の要因は現インクフォーマットでは不可避である。一方、第2の要因は筆順復元の精度を向上させることで、小さくできる。なお実際問題においては以上に加え、画像からの情報イン

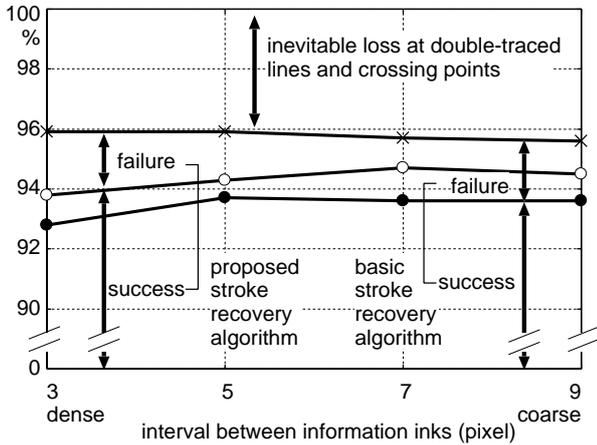


図 12 情報抽出成功抽出率

クドットの検出ミスも失敗要因になる。

図 12 に、情報インクが n 画素間隔で噴射されたときの、情報抽出率を示す。ここで情報抽出成功率とは、全情報インクドットのうちで、上の 2 種類の失敗部分に含まれなかったものの割合である。この図から、94~95%程度の情報インクが正しく抽出できることがわかる。また、情報インクを援用した本手法のほうが、基本アルゴリズムよりも情報抽出精度は高いと言える。なお、全データのうちおよそ 4% は 2 度書き部や交差部にあり復元できないこともわかる。すなわち 4% のデータが欠損することとなる。その補完は今後の課題の一つである。

5. 今後の課題

データ埋め込みペンの開発が最終目標ではあるが、それ以前に以下のような検討課題が残されている。

- カメラで撮影した手書きパターンを用いた各種検討: プリンタを使って筆記パターンを作成し、それをカメラで撮影した画像を対象として情報インク抽出等の各種検討を行なう。具体的には、不可視インクをカートリッジに装填したインクジェットプリンタでパターンを作成し、それを用いて、情報インクのドットの大きさ(噴射半径)や間隔の検討や、ドット抽出の際のしきい値設定に関する検討を行なう。ストロークの太さの影響や、紙の性質に依存した「にじみ」や「はじき」への耐性についても検討する必要がある。

- 埋め込みフォーマット: 2 度書き等により欠損したデータの補完すなわち誤り訂正を可能とするようなフォーマット(データ符号化)が必要である。さらに、2 度書き部の情報インクを分離できるような符号化や、ガイドインクを必要としないフォーマットすなわち符号化されたデータからそのデータの方向が同定できるような符号化についても検討すべきと思われる。

- 多画パターンへの拡張: 今回の筆順復元アルゴリズムは、1 画パターンのみを扱う手法であった。今後は複数画からなるパターンを対象とした、画分解ならびに各画の筆順復元を行なうアルゴリズムを構築する。

- 埋め込みの高密度化: 図 7 の噴射パターンは、一定時間間隔で CMY のいずれか 1 つのインクを 1 点噴射する単純な

例であるが、より高度な噴射パターンも可能である。例えば、CMY の組み合わせ (CM/CY/MY/CMY) を一度に噴射させ、それらに異なった意味を持たせることも可能である。

6. むすび

手書きパターンにリアルタイムに情報を埋め込むことが可能なペン—データ埋め込みペン—について、想定しているハードウェア、情報埋め込み・抽出手段、応用先について述べた。さらに情報抽出の際の中心的問題になる筆順復元について、情報が埋め込みされているという本手書きパターン特有の状況を利用することで、従来の黒インク単独の場合より、精度の高い筆順復元が可能であることを示した。

謝辞: 不可視インクの利用については、大日本塗料株式会社スペシャルティ事業部の須川哲夫様、シンロイヒ株式会社技術部の新倉誠司様、良質設計株式会社の渡邊健二様、株式会社ダイコーの大野裕史様にご協力賜りました。ここに深く感謝致します。また本研究の一部は、H17 年度公益信託マイクロソフト知的財産研究助成基金研究助成によった。

文 献

- [1] 須川哲夫, 中津克隆, 城田常雄, “インビジブルインクの開発,” 大日本塗料株式会社 DNT コーティング技報, no. 4, pp.42-44, 2004.
- [2] 加藤美治, 保原 信, “手書き文字の筆順復元,” 情報処理学会第 56 回全国大会, 1P-4, 1998.
- [3] Y. Kato and M. Yasuhara, “Recovery of drawing order from single-stroke handwriting images,” IEEE Trans. Pat. Anal. Mach. Intell., vol. 22, no. 9, pp.938-949, 2000.
- [4] Y. Qiao, M. Nishihara, and M. Yasuhara, “A novel approach to recover writing order from single stroke offline handwritten images,” Proc. ICDAR, vol. 1 of 2, pp. 227-231, 2005.
- [5] L. Rousseau, É. Anquetil, and J. Camillerapp, “Recovery of a drawing order from off-line isolated letters dedicated to on-line recognition,” Proc. ICDAR, vol. 2 of 2, pp. 1121-1125, 2005.
- [6] 田中一弘, 内田誠一, 岩村雅一, 大町真一郎, 黄瀬浩一, “ペン型デバイスによる手書きパターンへの情報埋め込みと情報抽出—情報抽出のためのストロークリカバリに関する一検討—,” 電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, 13-2P-11, 2005.