

漢字を正しくきれいに書くことを学ぶための学習システム

古積 拓見^{†1} 稲谷 壮一郎^{†2} 蔡 文杰^{†3} 中川 正樹^{†1}

あらまし 文字を正しくきれいに書くためには筆順やとめと払い、はねなどの字形を評価する必要がある。現在、字形を評価する漢字学習システムがいくつか開発されてきた。しかし、既存のシステムでは、きれいな字を書くことを主目的としているものが多く、筆順間違いの学習者への指導や、とめと払いの評価を行うものは少ない。そこで、本稿ではこれらの評価を可能にし、評価項目に重みを付けることでユーザのレベルに合わせた指導を行うシステムを開発する。

A Learning System to Learn to Write Kanji Characters Correctly and Neatly

TAKUMI KOSEKI^{†1}, MASAKI NAKAGAWA^{†1}, WENJIE CAI^{†2},
SOICHIRO INATANI^{†3}

1. はじめに

文部科学省によって小学校指導要領の漢字は 1006 字種が定められており、小学校 6 年間でこれらの読み方、字形、筆順、用法を学習する。しかし、授業時間内にこれらすべてを指導することは難しく、筆順やとめと払い、はねなどの字形の学習は、辞書や漢字ドリルを利用した授業時間外での自主学習に依るところが大きい。そのため、字形や筆順に関しては児童の学習方法および理解度に依存してしまう。ここで、図 1 に筆順と字形の誤りを示す。このような問題を解決する方法として、PC を利用した書写学習システムの利用が考えられ、ドリル等のテキスト教材では困難な筆記時の筆順の評価や記入文字の評価を行うことが可能となる。

これまでに、漢字の書き方を学ぶためのシステムの提案は多くある。山崎らはいち早く PC を利用した書写学習システムの研究に取り組み、これまでに多くのシステムを発表してきた。1987 年に筆記速度分析を導入した書写 CAI システム^[1]を発表し、字形と筆記速度の関係を分析することで、屈曲点やはねの指導を可能にした。1989 年には書写技

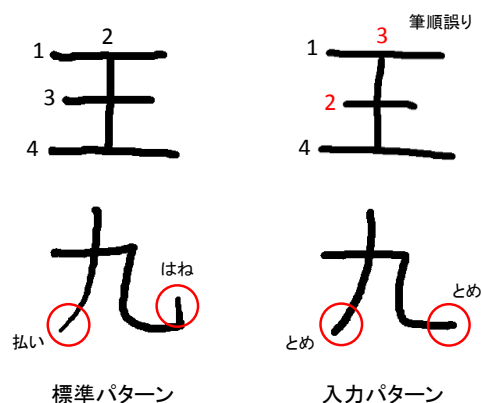


図1. 誤り例“王”，“九”

能知識を組み込んだ CAI システム^[2]を開発している。書き方の技能知識を明示的に表現し、この知識をもとに、入力文字の誤り部分を特定することで、学習者への適切な指導を可能にした。

このほかに、大人がきれいな字を書くためのシステムや外国人が正しく漢字を書くためのシステム^[3]、障害者向けのシステム^[4]も発表されている。

しかし、教育向けの筆順やとめと払い、はねを評価する書写学習システムが実用化されることは少なかった。

近年は Apple 社から発売された iPhone や iPad をはじめ、多くのタブレット端末が発売され、爆発的な勢いで普及している。現在は、教育の ICT 化も進み、授業へのタブレッ

^{†1} 東京農工大学大学院
Graduate School of Engineering, Tokyo University of
Agriculture and Technology

^{†2} 東京農工大学
Tokyo University of Agriculture and Technology

^{†3} アイラボ株式会社
ILABO CO.,LTD

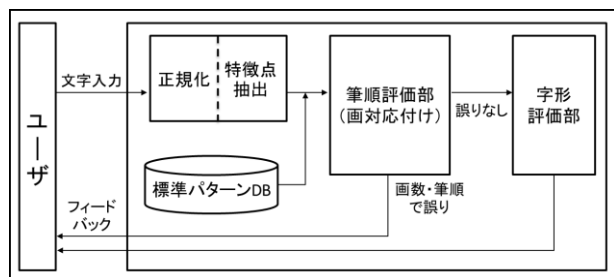


図2. システムの流れ

ト端末の導入や、塾や通信講座でタブレット端末を利用した教材の提供がなされている^{[5][6]}。今後は更なる導入が予想され、タブレットを利用した教育コンテンツの需要が高まることも予想される。

本稿では、教育現場での普及が進んでいるタブレット端末を利用した筆順、とめと払い、はねなどの字形の自動評価手法を提案し、学習者が正しくきれいな書き方を自習できる書写学習支援システムを提示する。本システムでは、標準パターンを用意し、学習者の入力文字パターンと比較することによって評価を行う。

2. システム概要

2.1. 概説

教育漢字 1006 字種に対し各 1 文字ずつ標準パターンを用意する。この標準パターンは、正しい筆順と画数で書かれた時系列筆点列パターンを特徴抽出したものである。入力パターンも同様のパターンである。

システムは主に筆順評価部、字形評価部、およびユーザーインターフェースによって構成される（図 2 参照）。本システムは、正しく書くことを優先的に指導するため、画数誤りおよび筆順誤りが検出された場合には、正しい筆画での書き方を学習者に指導し、字形評価は行わないこととする。

2.2. 正規化

字形の評価を行う際、入力された文字の大きさや書いた位置に評価が左右されないように大きさと位置の正規化を行う。大きさは文字パターンの外接矩形の縦横比を維持したまま 240×240 の正方形にスケール変換する。この外接矩形の中心が 240×240 の正方形の中心に合うように位置変換を行う。

2.3. 特徴点抽出

一般的な字形評価やオンライン文字認識システムでは、文字パターンに対して特徴点抽出処理が行われる。これによって扱う筆点の数が大きく減少するため、処理時間の削減が可能となる。また、手ぶれ等のノイズを除去することができる。特徴点抽出処理は次の通りである（図 3 参照）。

- (1) ストロークの始点と終点を特徴点とする。
- (2) 隣り合う特徴点間を結んだ直線から距離が閾値以上で最も速い筆点を特徴点とする。

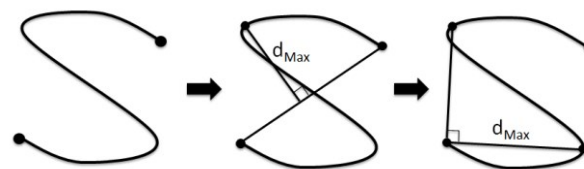


図3. 特徴点抽出

- (3) この処理を特徴点が取れなくなるまで繰り返す。

3. 筆順判定

正しく文字を書く上で筆順を指導することが必要になる。本システムでは、入力パターンと標準パターン間でストロークの 1 対 1 対応付けを行う。対応付けの結果、入力パターンと標準パターン間で 1 画目から順に対応付けられる場合、筆順誤りがないと判断し、それ以外の場合に筆順誤りをユーザーに指摘し、正しい筆順を指導する。

3.1. ストローク間相違度

ストローク間相違度の評価には DP マッチング（Dynamic Programming）を利用する。ここでは標準ストロークの局所特徴点と入力ストロークの局所特徴点との距離を評価基準とし、その評価値の合計を最小とするような最適対応点を探索する手法である。

DP マッチングを用いて局所特徴点の対応付けを行い、標準パターンのストローク A_i と入力パターンのストローク B_k 間のストローク間相違度を算出する。

3.2. キューブサーチによるストローク対応付け

児童への指導として筆順評価には迫江らの提案したキューブサーチ^{[7][8]}を用いる。キューブサーチ法は標準パターンと入力パターン間のストローク対応を定義する全単射を N 次元キューブグラフ上の初期ノード $0=(00...0)$ から最終ノード $2^N=(11...1)$ に至る最適経路問題として定式化する。図 4 には 4 次元のキューブグラフを表す。

図 4 に示すように、入力ストロークの第 k 画と標準パターンの第 1 画の相違度を

$$\delta(k, l) = D(A_k, B_l) \quad (1)$$

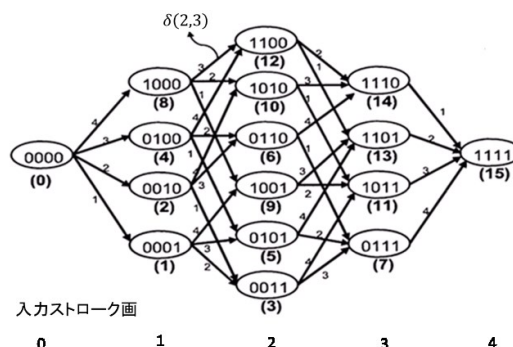


図4. キューブサーチ (N=4)

と示す. $k-1$ 段から k 段への遷移で各ノードの第1ビットが $0 \rightarrow 1$ と反転するエッジのコストとして $\delta(k, l)$ が付随する. ストローク間相違度の総和が最小となる経路を最適なストローク対応と定義する.

キューブサーチではこの問題を DP によって計算する. 計算量は $O(2^N)$ となる. DP の漸化式は次のようになる.

$$G(n) = \min_m [G(m) + \delta(k, l)] \quad (2)$$

ここで m は第 $k-1$ 段のノード, n は第 k 段のノード, G はノードの累積スコアである.

3.3. ビームサーチ

キューブサーチによる画対応付けでは, 文字の画数が多い場合, 膨大な計算量がかかってしまう. 今回扱う教育漢字における最大画数 20 画の文字では, 必要なストローク間距離の個数は 5.2×10^6 となり, 対応付けに時間がかかってしまう. この問題を解決するために, ビームサーチを導入する. つまり, 各段における最小コストを調べて最適解となる可能性の低いノードを以後の探索から排除するという枝刈り処理を行う.

枝刈りの閾値は第 k 段での累積スコア $G(n)$ の最小値に余裕定数 λ を加えた値とする. 詳細については文献[7]を参照されたい.

4. 字形評価

4.1. 特徴点対応付け

本稿ではストロークの長短比や傾きを評価する際に, この特徴点を基にパターン間の比較を行う. そのために, 抽出された特徴点について, 対応するストローク間で対応付けを行う必要がある.

一般的に DP マッチングを用いた対応付けが提案されている. しかし, DP マッチング方式では, 複数に対応する特徴点が抽出されてしまうため 1 対 1 に対応付ける処理が必要になる. これに対し, 沢本ら[9]は対応付け処理とともに未対応点も定まり, 類似度の高い特徴点同士を対応付けることができる. 本稿では沢本らの手法を利用する.

初めに, 対応付け処理に利用する特徴量について述べる. ここで, 標準パターンの各特徴点の特徴量を $te(\theta_{te}, \alpha_{te}, \phi_{te}, \gamma_{te})$, 入力パターンの特徴点の特徴量を $stu(\theta_{stu}, \alpha_{stu}, \phi_{stu}, \gamma_{stu})$ とする. 各特徴量を次に示す (図 5 参照).

- 方向特徴 θ : 水平軸を基準とした次の特徴点までの傾き
- 方向特徴 α : 特徴点の移動方向の変化量
- 方向特徴 ϕ : 文字の重心から特徴点までの傾き
- 距離特徴 γ : 文字の重心から特徴点までの距離

ここで, 文字の重心は文字パターン画像の黒ピクセル集合の重心である. そして, 上記で求めた特徴量から式(3)に

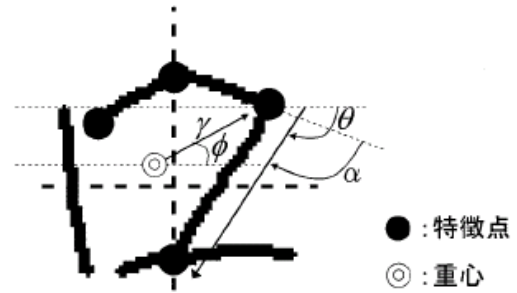


図5. 特徴点の対応付け

従って類似度を求める. この類似度を基に, 対応ストローク同士で次の処理を行い, 特徴点の対応付けを行う.

類似度 $S =$

$$\left| \frac{\theta_{te} - \theta_{stu}}{\theta_{te}} \right| + \left| \frac{\alpha_{te} - \alpha_{stu}}{\alpha_{te}} \right| + \left| \frac{\phi_{te} - \phi_{stu}}{\phi_{te}} \right| + \left| \frac{\gamma_{te} - \gamma_{stu}}{\gamma_{te}} \right| \quad (3)$$

- (1) 標準ストロークと入力ストロークの始点同士を対応付ける.
- (2) ストローク形状が標準ストロークと入力ストロークともに, はねであれば終点同士を対応付ける. 一方だけがはねであれば, それぞれの終点の筆線方向を調べ, その差が閾値未満であれば, 終点同士を対応付ける. 閾値以上差がある場合は, はねのあるストローク側の終点の 1 つ前の特徴点ともう一方のストロークの終点を対応付ける.
- (3) 標準ストロークの次の特徴点に一番類似している特徴点を学習者ストロークの未対応特徴点の中から見つけ出す.
- (4) 入力ストロークの特徴点に一番類似している特徴点を標準ストロークの未対応特徴点の中から見つけ出す.
- (5) 手順(3)と手順(4)で得られた特徴点が共通であれば, これらの特徴点を対応付ける. 共通でなければ, 手順(3)で得られた標準ストロークの特徴点を未対応点とする.
- (6) 手順(3)～手順(5)を終点にくるまで繰り返す

4.2. とめと払い

対応するストローク間でとめと払いが異なる場合, その箇所を指摘する. 一般的に, とめのストロークの場合, ストロークの終わり付近では筆記速度は遅くなる. 払いの場合, 終わり付近で筆記速度はあまり落ちず, 筆圧は段々弱くなっていく傾向がある. そこで, 本稿では, 一定時間ごとに取得される筆点の筆点間距離を調べることで, ペン先の速度を計算し, また, 筆圧の変化を調べることでとめと払いを判断する.

4.3. はね

はねについての評価を行う. 判定方法は, 1 つのストロ

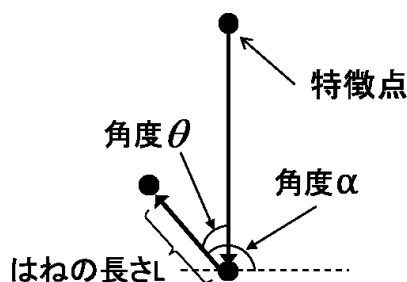


図6. はねの評価

ークを構成する特徴点のうち、終わりの3つの特徴点のなす角度 θ と、終わりの2つの特徴点を結ぶ線分の長さ L およびその水平から角度 α がそれぞれ閾値以内であればはねと判定する（図6参照）。このとき、どれか1つでも閾値を超えてしまうと、単純にはねでないとして判定することになる。ただし、これだけでは、ユーザがはねを意識して書いたが良くない書き方をしていたのか、あるいは、そもそも書いていなかったのか、という違いがわからない。これらを同じ間違いとして扱ってしまうと、ユーザに適切な指導を行うことができなくなってしまう。はねを書いていないユーザには、はねを書くような指導を行い、書き方が良くないユーザに対しては、どこが良くなかったかを指導する必要がある。そのため、「はねが書けている」、「はねは書いているが、書き方が良くない」、「はねを書いていない」の3つに分けて指導を行う（図7参照）。

4.4. 接続と交差

任意の文字パターンにおける2線分間には、「接続」、「交差」、「接続なし」のどれかの関係が当てはまる。ここで、標準パターンと入力パターン間に対応する特徴点における特徴点間線分の接続関係が異なる場合に、その箇所を指摘することで正しい接続関係をユーザに指導する。

接続関係は、次のように判定する。

交差：ある特徴点間の線分に対し、別の特徴点間線分が交差している。

接続：ある特徴点間線分 L に対し、任意の特徴点 P_n が閾値以内の距離にある場合、線分 L は特徴点 P_n が属する線分と接続関係にある。

接続なし：「交差」、「接続」どちらの条件にも当てはまらない。

4.5. ストロークの傾き

きれいな字を書く上でストロークの傾きは重要な要素である。そのため、標準パターンと大きく異なる角度で書かれたストロークをユーザに指摘する必要がある。判定は、入力パターンの特徴点間線分の角度と、対応する標準パターンの特徴点間線分の角度を調べ、閾値以上異なる場合に、この箇所を指摘する。

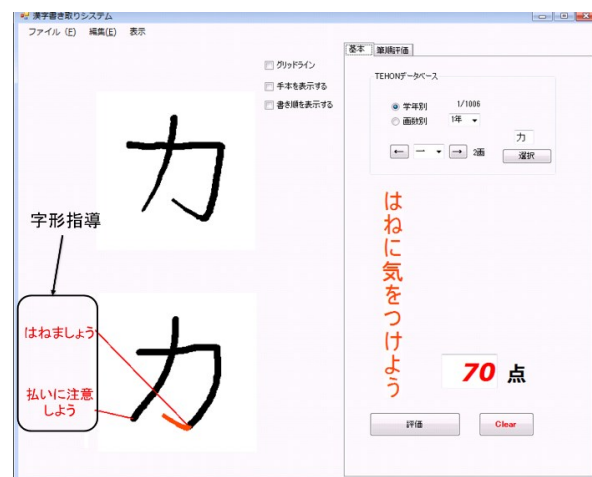


図7. 字形評価画面（はねと払いの指導例）

4.6. ストローク長の比

ストロークの長さは字のバランスに大きな影響を与える。ある1つのストロークの長さだけ標準パターンと大きく異なるような場合、バランスが悪くなり汚い字になってしまう。傾きの評価と同様に対応する特徴点間の線分と他の線分との長さの比を調べ、標準パターンと大きく異なる箇所を指摘する。

5. 実装

5.1. 学習用インタフェース

上記で述べた手法にしたがって、手書き漢字学習システムを開発した（図8参照）。システムにおいては、標準パターンを薄く表示させる「なぞり機能」、次に書くべきストロークを赤く表示させる「筆順補助機能」、キャンパスの中心を通る縦横の点線を表示する「グリッドライン表示機能」を選択することができる。また、手本表示領域をタッチすると手本の筆記をアニメーション再生することができる（図9参照）。

本システムでは、各評価項目に重みを付ける。具体的には、文字のきれいさよりも正しく書けているかを優先的に

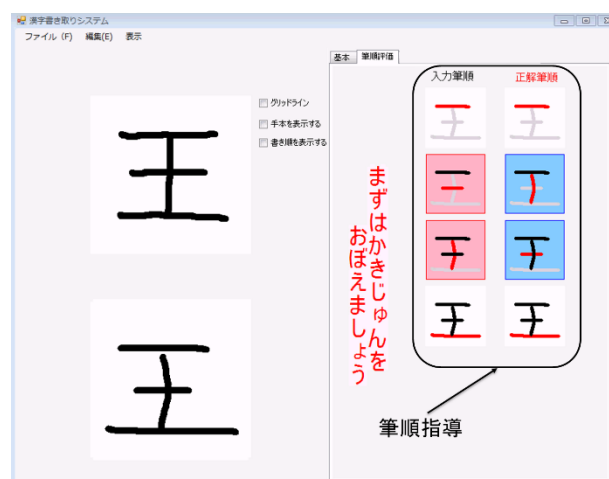


図8. 評価画面（筆順誤りの指導例）

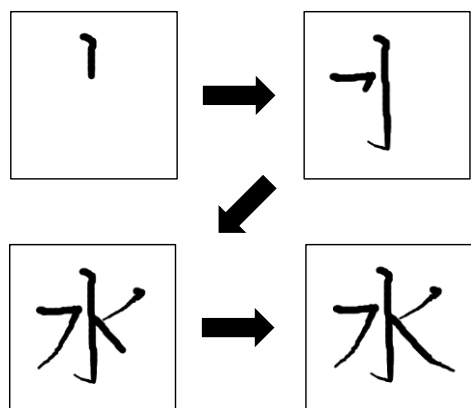


図9. 標準パターンアニメーション再生

指導することが重要であると考え、筆順指導を優先する。筆順が正しい場合、とめと払い、はねなどの字形の評価に移行する。ここでは、標準パターンと異なる箇所をユーザへ指摘する。本システムは各項目における標準パターンとの差の大きさに応じて、スコアを設定し100点からこのスコアを引いた値を入力文字の点数として、画面上に表示する。また、本システムでは筆順の次にとめと払い、はねを優先的に評価するため、字形項目よりもスコアは大きめに設定している。指摘箇所が多く存在する場合、すべてを画面上に表示してしまえば見づらくなり、ユーザは何から直せばよいかかわからない。そのため、このスコアの高い項目から順に最大4つの指導を行うこととした。

5.2. 手本の設定

学習者ではなく、システム提供者が利用する機能として、手本の設定を行うことができる。

本システムでは、教育漢字1006字種に対し、各1パターンずつ標準パターンを登録しているが、これとは別に標準パターンを登録することができる。新しい標準パターンが登録された場合、その標準パターンに基づいて筆順と字形の評価を行う（図10参照）。

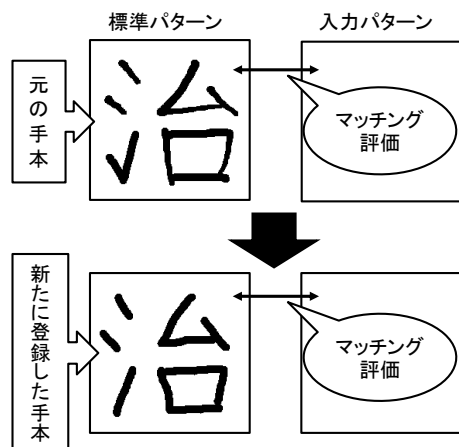


図10. 手本の設定

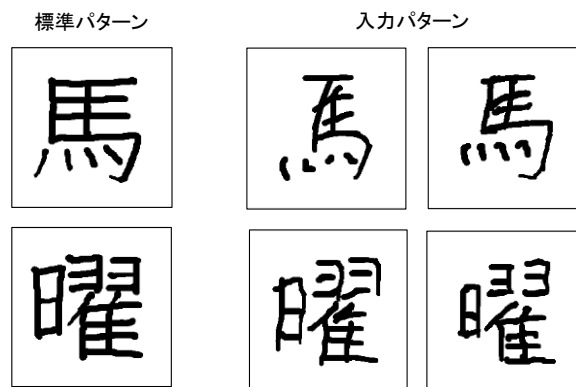


図11. 文字パターン例“馬”，“曜”

本システムが標準で手本として用いているパターンは、一人の国語科教師が、ペンデバイスによって正しい筆順と画数で筆記したものを用いている。

6. 評価実験

6.1. 実験概要

本稿の提案手法の有効性を証明するため、評価実験を行い、筆順判定機能の処理時間、精度を計測した。本実験は筆順誤りが多いとされる文字を中心に教育漢字の中から32文字を抽出し、各50パターン用意した。キューブサーチでは、ビームサーチの余裕定数によって枝刈りが行われるため、この値によって探索時間と精度が変化してしまう。本実験では、処理時間を考慮した上、教育漢字の中で最大画の20画に対して、平均探索時間が0.1秒～数秒となる100, 200, 300, 400と制限なしの5つの場合に分けて余裕定数を設定し、評価を行った。手本として利用する標準パターンと入力パターンの例を図11に示す。

6.2. 実験結果

各余裕定数におけるストローク対応率と平均探索時間を表1に示す。10画未満の場合、枝刈りによる探索時間への影響が小さいため、10画以上の文字種に対しての平均探索時間と最大画数である20画の場合の平均探索時間をまとめる。32字種、合計1600パターンに対して筆順判定を行い、処理時間1秒以下で98.5%の正面对応を実現し、本提案システムの有効性と実用性が確認された。

また、本実験ではビームサーチによる対応精度への影響を分析した。図12には余裕定数を設定し、枝刈りを行った場合に誤った対応付けがなされた2つの入力パターン例“波”を示す。ここで、この2入力パターンは余裕定数による探索の制限を行わなかった場合、正しく対応付けされている。図12から1画目が誤って対応付けされていることがわかる。原因としては、1画目となるべきストロークの方向特徴が入力パターンと標準パターンとで異なっていることが考えられる。その結果、これらのストロークについて、方向特徴による相違度が大きくなり、標準パターン

表 1. 余裕定数による画対応率と平均探索時間

余裕定数	正画対応率 [%]	探索時間[sec] (10~20 画)	探索時間[sec] (20 画)
100	96.7	0.011	0.037
200	97.7	0.053	0.195
300	98.5	0.168	0.824
400	99.1	0.488	2.800
制限なし	99.5	23.100	126.670

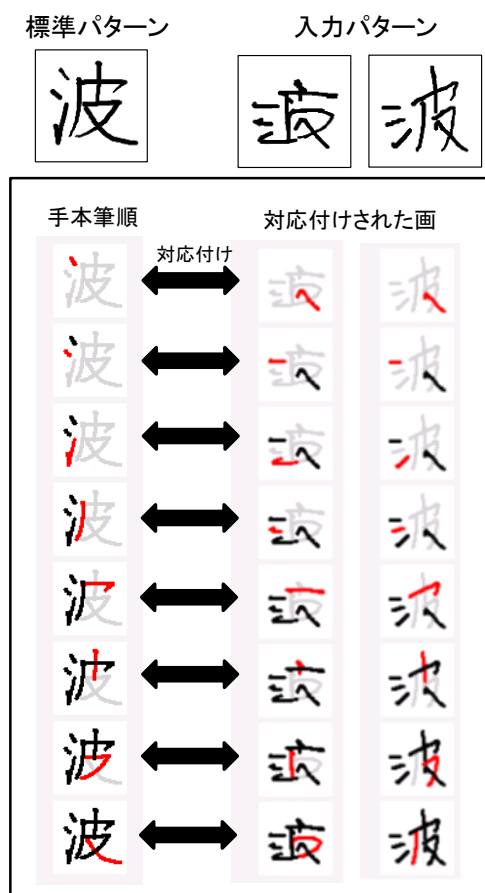


図12. 誤対応付けになった文字例“波”

の1画目が、入力パターンの1画目よりも相違度の小さい8画目と対応付けされてしまった。枝刈りしなかった場合には正しく対応付けされていることから、ビームサーチによって本来最適経路となるノードの累積スコアが閾値を超えてしまい、ノードが探索途中で排除されてしまったためと考えられる。

6.3. 考察

実験によって、ビームサーチの余裕定数の設定によって

ストローク対応付け精度への影響が分かった。10画以下であれば余裕定数による制限をしなくても探索時間に大きな差は出ない。そのため、画数に合わせて、余裕定数を動的に変化させることで、小画数のときに最適探索経路が枝刈りされる問題を避け、大画数のときに枝刈りによって高速化でき、全体の正画対応率と処理速度を上げることができると考えられる。

また、本実験で扱った入力パターンに関して、ほとんどの筆順誤りは部首構造内で起こっていることがわかった。ここで、キューブサーチでは、部首構造を利用した手法が提案されている^[10]。これは、筆順誤りは部首構造の中で起こるものが大半であり、部首の途中から別の部首に遷移するという誤りが極めてまれであることを利用する。これにより、各部首構造内のキューブグラフと構造間のキューブグラフに分離することができ、探索空間が圧縮され、対応付け精度の向上と探索時間の軽減を実現することができる(図13参照)。本実験で扱った入力パターンに関しても、筆順誤りには同様の傾向がみられることから、この手法を利用することで、対応付け精度と探索時間の向上が期待できる。

7. まとめ

本システムは、手書き漢字学習支援システムとして、画のとめと払い、はね、接続、交差、角度、長さなどの字形情報に着目し、手本文字となる標準パターンのストロークとの差を評価して、ユーザを指導した。また、手本文字の書体によって評価量も変化し、様々な字体の練習に役に立つと考えられる。

本稿では、筆順評価機能の処理時間と画対応付けの精度を評価した。その結果、処理時間1秒以下で正画対応率98.5%を達成した。

今後の改良としては、文字構造の利用による、筆順判定の処理軽減と精度向上^[10]および指導項目の追加を行う。また、本システムの対象ユーザである小学生を対象とした評価実験を行い、システムとしての有効性と実用性の評価を行い、システムの機能強化とインタフェース改良を行う。

参考文献

- [1] 山崎敏範, 山本雅弘, 井口征士: 筆記速度分析を導入した書写CAIシステム, 電子通信学会論文誌 Vol.J79-D, No.11, pp.2071-2076(1987)
- [2] 山本雅弘, 山崎敏範, 井口征士: 書写技能知識を組み込んだCAIシステム, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J72-D-II, No.9, pp.1493-1500(1989)
- [3] 藤田真一, 林俊成, 成田誠之助: 外国人対象のペン入力漢字書き取り指導システムの試作, 日本教育工学会論文誌 25(2), p.129-138(2001)

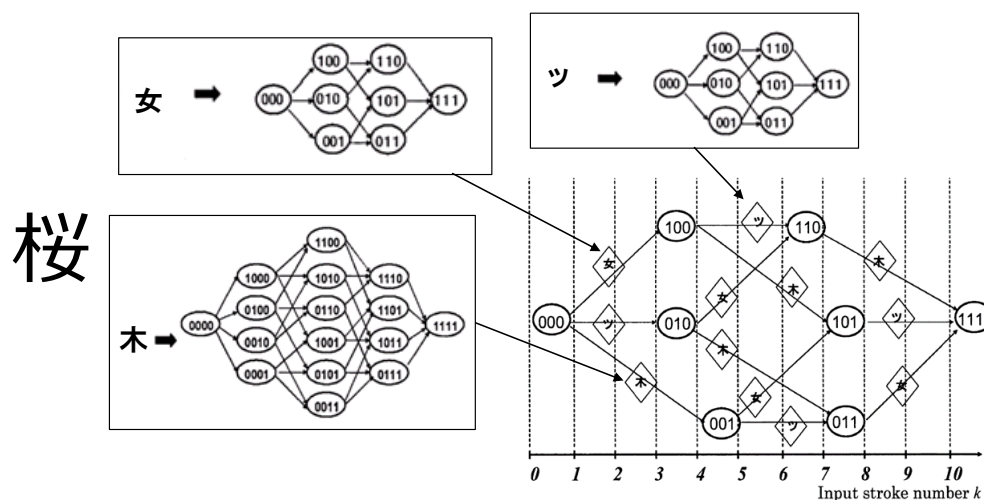


図13. 部首構造を利用したキューブサーチ例”桜”

- [4] 大城英名, 氏間和仁: ロービジョン用教育漢字筆順学習ソフトウェアの開発とその試用, 秋田大学教育文化学部教育実践研究紀要 第26号, p.66-73(2003)
- [5] 財団法人 コンピュータ教育開発センター: ICT を活用した授業の効果等の調査 報告書(2008)
- [6] 進研ゼミ小学講座, <http://sho.benesse.co.jp/s/touch/>
- [7] 迫江博昭, 慎重弼: 筆順フリーなオンライン文字認識のための画対応サーチアルゴリズム, 九州大学大学院システム情報科学研究科報告, vol.2,no.1, pp.99-104(1997)
- [8] 古性淑子, 内田誠一, 迫江博昭: 筆順・続け書き判定機能付き漢字学習システム, Forum on Information Technology, pp.397-398 (2003)
- [9] 沢本拓也, 村中徳明, 徳丸正孝, 今西茂: ペン習字学習支援システムの構築 -文字の特徴抽出と対応付け-, 信学技報 ET2009-66, pp.89-94(2009)
- [10] 蔡文杰, 内田誠一, 迫江博昭: 部首単位標準パターンとキューブサーチに基づく筆順フリーなオンライン文字認識アルゴリズム, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J88 D-II, No.7, pp.1187-1195(2005)