VR 技術を用いた書道学習支援システムとその学習効果

正 員 村中 徳明* 非会員 山本 隆史*
正 員 今西 茂*

A Calligraphy Mastering Support System Using Virtual Reality Technology and its Learning Effects

Noriaki Muranaka*, Member, Takafumi Yamamoto*, Non-member, Shigeru Imanishi*, Member

The virtual reality is one in the intelligence information carrier technology. As the application to the education field of the virtual reality, we examine a support system for the calligraphy mastering. The purpose of this system is to realize the model where the information during writing progress can be real time displayed. As a result, we can learn calligraphy casually without being limited to the place and the time. We use 3-D computer graphics (CG) for the virtual image to decrease memory capacity and we examine about the learning effect of this system.

We can not get the sense of the writing brush from the tablet pen of the conventional system. Therefore, we developed the writing brush type input device which is near the sense of the writing brush. Moreover, we developed the automatic animation generation processing used 3-D CG. The practice person can experience the subtle writing progress of calligraphy from the eye of calligraphy teacher using this animation. We are using a semitransparent screen and a half mirror instead of HMD to use in general VR. Practice persons improve at the short time by learning their writing brush forming die input pen synchronous with virtual writing brush.

キーワード : 書道, バーチャルリアリティ, ハーフミラー, タブレット, 3次元 CG

Keywords : calligraphy, virtual reality, half mirror, tablet, 3-D CG

1. はじめに

「バーチャルリアリティ」(Virtual Reality : 以下, VR)という言葉自体は今日では決して新しいものではないが, その技術はまだまだ発展途上であり, 多くの企業・研究機関において, その技術・応用についてさまざまな研究・論議がなされている^{(1)~(3)}。また, 近年のパーソナルコンピュータ (Personal Computer : 以下, PC) の著しい性能の向上と低価格化により, PC が各家庭に浸透してきている。この観点からも, VR が日常的な生活のなかで利用されるための基盤が整いつつあると言える。日常的なものとしては教育分野もまたその一例である^{(4) (5)}。教育哲学者ジャン・ピアジェは学習について「学習を知る究極的な近道は, 人生そのものを知ることである」⁽⁶⁾, といった言葉を残しており, これこそが VR の真価を遺憾なく発揮する分野であると考えられる。教育分野については近年, 優れた CAI なども登

場してきてはいるが, 実際の教育現場においては, やはりテキストを中心に指導が行われているのが現状である。

一方, 書道の学習においては, 一般に書道上級者によって書かれた手本を見ながら, あるいは半紙と下敷きとの間に挟んでなぞり書きをするが, この手本は既に書き終えた結果であり, 最も学ばなくてはならないその途中過程である運筆の情報の多くが失われてしまっている。これを補うために, 書道教室などでは指導者が模範を示したり, 学習者と一緒に筆を持って指導を行っている。学習者がこの途中の運筆の情報を, リアルタイムに得られる手本が存在すれば, 指導者なしでも充分高い学習効果が期待できる^{(7) (8)}。

また, バーチャルレッスンの応用として, ハブティック提示装置 (ロボットアーム) と視覚ディスプレイを用いたバーチャル習字システム⁽⁹⁾が報告されている。しかし, このシステムは位置情報あるいは力情報を強制的に学習させるには, 効果があると思われるが, 視線が筆先でなくディスプレイに向いてしまうという問題点がある。そこで本論文では, 視線を筆先付近に向けるため, 仮想の世界である「仮想空間」と現実の世界である「現実空間」との融合, すな

* 関西大学工学部
〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35
Faculty of Engineering, Kansai University
3-3-35 Yamate-cho, Suita 564-8680

わち、調和させるVR技術を用いた書道学習支援システムの構築を検討する⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。仮想像には、メモリ容量を減少させるため3次元コンピュータグラフィックス (Computer Graphics: 以下, CG) を用い、このシステムの学習効果について検討する。

2. システム構成

〈2・1〉 システムのハードウェア構成 現在の VR システムの多くは、入力デバイスとして複数のセンサーなどを体に装着する必要がある、身体束縛によるある種の緊張感が伴い、決して自然な状態とはいえない。また VR でよく用いられる表示用デバイスとしては、HMD (Head Mounted Display) があるが、HMD を利用した場合、仮想空間としての臨場感が高まるものの、日常生活空間からは隔絶されていると言える。本研究は日常的な生活の一部である「学習」を扱うため、単に臨場感の追求だけではなく、生活場面との融合にも重点を置いている。そのため、HMD などを用いず、センサー類やケーブル類を極力排除した身軽なシステムを構成している⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

本システムにおけるハードウェアの構成を図1に示す。図1は、タブレット、毛筆型入力デバイス、コントロールボックス、A/Dインターフェース、パーソナルコンピュータ、ダウンスキャンコンバータ、プロジェクタ、スクリーン、半透明ミラーなどで構成されている。このシステムの特徴は現実空間と仮想空間の調和（融合）を実現していること。不自然で煩わしいHMDやデータグローブを用いない自然で身軽なシステムであること。手軽に手に入るパーソナルコンピュータを中心としたシステムであることなどがあげられる。書道の動作手本となる運筆のデータは、指導者あるいは上級者が入力デバイスを用いて入力する。このデータには、入力時の入力デバイスの座標・傾きの方向や角度・筆圧といった情報が含まれ、パケットデータとしてタブレットドライバ・Windows システムを経由してアプリケーションプログラムへ送られる。学習時には、この情報を基に VR 動画を自動生成し、ファイルにする。このフ

ファイルに基づいた VR 書道映像をフレーム画像表示用コンピュータで作成する。ここで作成された動画は、液晶プロジェクタから半透明スクリーンに投影され、ハーフミラーを用いた仮想像と実像の融合システムで、学習の手本となる。

〈2・2〉 毛筆型入力デバイスの開発 入力デバイスは、入力時に違和感があると、採集したデータにも影響が生じると思われる。そこで、入力時に違和感を感じないで、自然に正確な情報がサンプリングできる入力デバイスを開発する。

開発する入力デバイスは、できるだけ毛筆の感覚に近づける必要があり、従来用いていたタブレットペンの筆圧センサーのように筆先の圧力に頼らない方法で、筆先の微妙な加減を検出する必要がある。

そこで、図2のような毛筆型入力デバイス、すなわち、筆の毛の中に見えないようにタブレットポインタ（タブレットペンの一部）、筆の柄の内部に筆先の部分にほとんど力を加えることなく変位できる可変抵抗素子を用いた接触式の変位センサー等を埋め込み、視覚的・触感的に一般の筆と変わらないように工夫している。タブレットセンサー部の情報（筆の座標・傾きの方向・角度）⁽⁷⁾⁽⁸⁾ はシリアルポートを通じて、圧力センサー部の情報（筆圧）は図3のコントロールBOXを経由して、A/Dインターフェースを通じて、PCに入力される。

当研究で利用している市販の WACOM UD-1212II では静電誘導方式が採用されている。タブレットから定期的（約 15ms 毎）に送り出されるパケット情報は、図4に示すよう

(a) Exploded view

(b) Photograph

図1 システム構成図

Fig. 1. A layout of the system.

図2 毛筆型入力デバイス

Fig. 2. A writing brush type input device.

図3 コントロールBOX
Fig. 3. A control box.

図4 タブレット情報
Fig. 4. The tablet information.

なその瞬間ごとのタブレットペンの状態・位置情報を含んでいる。タブレットパケット構造体の構成を以下に示す。

```
PACKET{
    pkX, pkY          // 座標 (0-10000)
    pkNormalPressure  // 筆圧 (0-255)
    pkOrientation{
        orAzimuth.    // 傾き方向 (0-3600)
        orAltitude    // 傾き角度 (0-900)
    }
}
```

可変抵抗素子を用いた接触式の変位センサーLP-30FPのカタログ特性を以下に示す。

【LP-30FPの特性】

有効ストローク	30 mm
全抵抗値	1 k Ω
直線性	$\pm 1\%$
フリクシヨン	40 gf 以下
質量	20 g

図5 センサーの線形性
Fig. 5. The linearity of the sensor.

特性から判断した場合、筆に必要なストローク 25mm も十分に満たしており、直線性の精度もかなり正確である。つまり、現在目標としているデバイスに必要な条件をほぼすべて満たしていることになる。このセンサー全体に動作用の電圧を加え、変位による出力値を測定した。測定結果を図5に示す。

測定結果から言えることは、線形性（直線性）についてはほぼカタログ通りであり、十分な精度をもっていることが実証できた。しかし、変位の最初の部分には、変位に関わらず出力値が全く変化しない領域が存在している。この部分は、センサーの誤動作を防ぐためにもうけられた「あそび」の領域であり、この部分に関しては、変位を測定することはできない。変位の初期部分といえ、筆がわずかに半紙にふれた状態であり、この部分こそが墨跡における微妙な表現に非常に重要な部分でもある。そこで、あらかじめセンサーが少し（3mm 程度）変位した状態に維持し、この状態を変位0と解釈することにより、初期状態から変位を採取することが可能となった。また、一度変位させると、自重だけでは、変位が戻らないことが判明したので、スプリングを取り付けることにより、自重を補った。ただし、スプリングを取り付けた場合、入力時には筆先の変位に対する反発力が生じるため、入力の感触の悪化は避けられない。そこで、市販のスプリングからの類推や、製造業者の意見などを総合的に判断した結果、線径 0.3mm、巻径 4mm というスプリングの製造パラメータを決定し、最小限の反発力を持ったスプリングを採用した。

〈2・3〉 仮想環境と実環境との融合 図1に示すように、動画生成用コンピュータによって生成された手本動画は、45度の角度に設置されたハーフミラーに反射されて学習者の視界にはいる。このとき、反射面がハーフミラーであることから、その下にある学習者自身の手などをみることができる。これによって、仮想の書道映像と現実の実映像とがあたかも同一環境（空間）に存在するかに感じることができる。

学習者は、この仮想の手本像に自分の手を重ね合わせるようにして運筆の練習を行う。図6は実際の実験システムと

図6 実験システムと学習風景

Fig. 6. The experiment system and the learning scenery.

図7 ハーフミラーに映った仮想映像と実像

Fig. 7. The virtual and real images on the half mirror.

学習風景である。図7に、実際に学習者の視点から見本システムの映像を示す。

3. VR 動画の作成

〈3・1〉 動画再生システム 本研究においては、手本となる動画の生成が重要なポイントである。この映像によって、練習者は書道の「はね」「ため」「とめ」「はらい」などの微妙な筆運びを、指導者と同じ視線から体感することが可能となる。ここで強調したいことは、指導者の実演を横などから眺めたとき、その映像の角度は実際の練習時と異なるということである。これでは、いざ実際に自分で書いてみようとしたときに戸惑うことが容易に推測できる。

前システムでの動画には、書道上級者の実際の情報風景をビデオカメラで撮影し、手と筆の部分だけを切り出した図8のような16階調のグレースケールの取り込みパターンを用いていた。これは、あらかじめ代表的な取り込みパ

図8 フレーム画像（従来システム）

Fig. 8. The frame image (conventional system).

ーンを準備しておき、それらの中から各フレームに最適なものを選択して、画面の必要な部分に貼り付ける手法である⁽⁷⁾⁽⁸⁾。この方法によって、データの冗長度が削減され、効率化がはかられていた。しかし、画質の向上の検討において、いくつかの問題点がある。

【問題点1】 表現力の向上のために、取り込みパターンをカラー化し、更に解像度を上げた場合、取り込みパターンの容量は膨大化する。また、高速に動画を表示するため、メインメモリ上に画像データを格納しているの、動画再生には大量のメモリが必要である。

【問題点2】 取り込みパターンの数を削減することにより、必要とされるメモリをかなり削減できるがその反面、準備パターン数の減少は、運筆の微妙な部分の再現性を著しく低下する。従って、採取情報から緻密で正確な映像を作るには限界が存在する。

【解決法】 上記の問題点を解決するためには、取り込みパターンに依存しない新しい動画の生成方法が必要である。そこで、新しい動画生成方式として、3次元CGを用いる⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

〈3・2〉 3次元CGを用いた動画の自動生成 3次元CGを用いた動画の自動生成処理を図9に示す。動画生成において、まず手本となる筆の動きが必要となる。本提案システムにおいては、毛筆入力デバイスを用いてそのデータを入力する。入力された動きのデータはリアルタイムに処理され、パーソナルコンピュータの固定ディスク装置に保存される。動画出力用DATAファイルを読み込み、内部の手本情報をもとに筆や半紙といった「オブジェクトレイヤー」と書道文字を構成する「墨跡レイヤー」をそれぞれメモリ内オフスクリーン・バッファ内で合成し、動画の各フレームを作成する。以上の処理はそれぞれ独立した、専用のアプリケーションソフトウェアで行われる。

3次元CG化に伴い、さまざまなメリットが生じる。

- (i) フレーム数などに関係なく各フレームを動的に生成するためのメモリ領域だけを確保すればよい。
- (ii) 筆の座標や筆圧などの情報を基に、動画を合成することから、手本を忠実に再現できる。
- (iii) 画像生成用アルゴリズムの変更だけで、画質の向上などに対応可能である。

また、以下の理由から3次元CG用APIとしてはSGIのOpenGLを採用する。

図 9 動画自動生成処理

Fig. 9. The automatic animation generation processing.

- (iv) リアルタイムの画像生成を考慮に入れた設計であり、高速描画が可能である。
- (v) マルチプラットフォームに対応している。
- (vi) ダブルバッファリングをサポートしている。
- (vii) 対応のハードウェアが比較的安価で入手可能である。

〈3・3〉 レイヤー構成 本システム動画において、各フレームを構成する静止画の生成時、そのモデリング・座標計算のフェーズで「レイヤー」と呼ばれる概念を導入している。レイヤーの概念はアニメーションなどに用いられるセル画のイメージに類似している。最終的に、各レイヤーは OpenGL のデプスバッファを用いたレンダリングにより、隠面処理などの処理を含め 3 次元的に合成され、一枚の静止画となる。

レイヤーの概念を用いることにより、画像を構成するそれぞれの要素ごとに最適なモデリングのアルゴリズムで処理できる。現在用いているレイヤーの構成は図 10 に示すように、半紙・筆などの物体を表現することを目的とした「オブジェクトレイヤー」と半紙上の墨跡を処理することを目的とした「墨跡レイヤー」の二つから構成されている。

【オブジェクトレイヤー】 オブジェクトレイヤーは仮想空間を構成する物体を処理するためのレイヤーであり、処理対象となるすべての物体は完全に 3 次元の座標を持つため、座標計算を含むすべての処理を 3 次元レベルで処理する。モデリングには、サーフェースモデルを利用している。

図 10 レイヤー構造

Fig. 10. A layer structure.

図 11 筆の構成とモデリング

Fig. 11. The composition and model of brush.

図 12 筆の傾きと位置

Fig. 12. The inclination and position of brush.

まず、筆の構成に着目すると、筆先の部分は図 11 に示すように腰・腹・穂先といった名称で呼ばれ、実際に筆先に筆圧を加えた場合、腹の部分の中央から大きく湾曲していることがわかる。そこで、この特性に着目して、腹の中央を目印にして、円筒と円錐で近似表現する。円筒と円錐部分との割合は筆圧に応じて自動的に変化させる。

筆先を紙面に押し付けたときの筆毛の傾き具合の表現もリアリティにおける重要な要素である。今回採用した表現は、筆先を紙面に押し付けたときの筆の傾きを θ としたとき、図 12 (a) に示すように、筆先の傾きは $\theta/5$ となるように設定している。これは実際の画像を見ながら、調整して最適と思われる値を導出したものである。筆の上下の位置は、パケット情報には含まれていないため、筆圧の値に比例して上下に移動するように処理している。なお筆の位置

図 13 墨跡のモデリング

Fig. 13. Handwriting model.

は、図 12 (b)に示すように、タブレットで検出したポイントが筆の円筒の延長上に来るように配置している。

【墨跡レイヤー】 墨跡レイヤーは半紙上の墨跡の処理専用のレイヤーである。墨跡自体は2次元的なものであるから、モデリングを含めた処理の大部分は2次元的に処理する。しかし、最終的にレイヤーの合成時には、3次元的に処理される必要があるため、モデリング処理の最終段階で半紙面からわずかに離れた高さ情報を付加し、3次元化している。

墨跡の再現とは、筆先の部分がなぞった跡の再現であるから、毛筆型入力デバイスの座標と筆圧の情報を基に再現している。モデリングの方法としては、図 13 示すように、1 フレーム間（約 15ms）に動いた分の軌跡 1 つの四角形で近似している。図 13 はイメージ画像のため、かなり角張っているが、15ms という時間は非常に短く、分割数も十分あるので、実際の生成文字は滑らかな曲線として再現される。

近似に用いられている四角形の構造を図 14 に示す。ある時点における筆先の位置を P_n 、その次の時点での位置を P_{n+1} とすると、この区間における移動量は次式で与えられる。

$$\vec{V} = P_{n+1} - P_n \quad \text{.....(1)}$$

このベクトルを単位ベクトル化すると次式となる。

$$\vec{v} = \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|} \quad \text{.....(2)}$$

更に、このベクトルに対する左右の直交ベクトルを求め、墨跡の幅に相当する $W(m)$ を乗じてから、点 P_n の座標に加えると次式となる。

$$P_L = P_n + W(m) \begin{pmatrix} \cos(90^\circ) & -\sin(90^\circ) \\ \sin(90^\circ) & \cos(90^\circ) \end{pmatrix} \vec{v} \quad \text{.....(3)}$$

$$P_R = P_n + W(m) \begin{pmatrix} \cos(-90^\circ) & -\sin(-90^\circ) \\ \sin(-90^\circ) & \cos(-90^\circ) \end{pmatrix} \vec{v} \quad \text{.....(4)}$$

図 14 墨跡の詳細

Fig. 14. The detailed view of handwriting.

ここで、式中の $W(m)$ は線の太さ（0～12 [ドット]）を表していて、筆圧（ m : 0～255 [ステップ]、図 5 より、1 ステップは $(982-15)/256$ (Ω) または $(30-3)/256$ (mm)）によって求まる関数であり、「墨跡表現関数」と呼んでいる。生成される墨跡を決定するには $W(m)$ を特定する必要があるため、最適な $W(m)$ を検討する。関数 $W(m)$ で表現される筆圧と墨跡との関係は使用する筆などによって左右されるものであるが、ここでは、同一者による実際の墨跡とタブレットからの墨跡がなるべく一致することを目標に調整を行う。

まず、標準的な関数として $W(m) = m/25$ で再現した墨跡 1 を図 15 に示す。この墨跡 1 から筆圧の弱い部分において細くなり過ぎていくことが分かる。これより、筆圧の細い部分を強調するように $W(m)$ を調整する必要がある。そこで、新たに

$$W(m) = \frac{\sqrt{m}}{2}$$

で再現した墨跡 2 を図 16 に示す。この墨跡 2 は筆圧の弱い部分の太さが強調され、実際の手本の文字にかなり近づいたものとなっている。従って、この墨跡表現関数を採用し、動画の生成に用いている。

両関数の特性比較するために、図 15 および図 16 の墨跡の太さー筆圧特性を図 17 に示す。

〈3・4〉 墨跡アルゴリズム この墨跡表現アルゴリズムの特徴は、筆の移動ベクトルなど、再生時に変化しない部分を動画再生直前に一括処理し、算出しておくことにより、再生中の演算処理が非常に軽減できることである。また、筆圧ー墨跡の太さの分を筆の移動ベクトル抽出部分と分離しているため、墨跡表現関数を利用する筆ごとに变化させることにより、形状の異なる筆に対しても、筆パラメータを用いて柔軟に対応することができる。

〈3・5〉 各要素と画像との関連 手本として採取された各種情報と、画像との関連を以下の図 18 に示す。図 18 の上側が採取した運筆情報の各要素であり、下側が画像を構成するレイヤーの各要素である。図中の矢印によって互いの関連性を示している。

図 15 墨跡 1

Fig. 15. Calligraphy 1.

図 16 墨跡 2

Fig. 16. Calligraphy 2.

図 17 墨跡の太さ－筆圧特性

Fig. 17. Relationship between thickness and strength.

〈3・6〉 システムのソフトウェア構成 本動画生成システムのソフトウェアは図 19 に示すようなアーキテクチャを採用している。この特徴は、描画内容を決めるアルゴリズムは Image Generator、フレームの制御には Movie Player といったそれぞれの機能をもった抽象的な仮想デバ

図 18 各要素と画像の関連

Fig. 18. The relation between each element and the image.

図 19 ソフトウェアアーキテクチャ

Fig. 19. Software Architecture.

イスの概念を導入することにより、通常の映像機器と同様に動画を制御する直感的なインターフェースを実現している。

〈3・7〉 各種映像モード 前述の動画の 3 次元 CG 化に伴うメリットの具体的な実例として、いくつかの視点の切り替えによる映像化を行い、学習の場面に応じて使い分けている。本節では、各種の映像モードについて述べる。

〔通常視点モード〕 このモードは、図 20 のように実際に書道を学習している視点から映像化したものである。このモードで書道上級者の運筆をディスプレイ画面上で見ることにより、イメージトレーニングなどに利用できると考える。このモードの映像は本システム中の PC だけを準備すればよいので、手軽に利用することができ、簡易再生的に用いることができる。

〔墨跡確認モード〕 このモードは図 21 のように墨跡の確認を目的としたモードである。半紙面を真上から見た視点で映像化している。

〔プロジェクタ投影モード〕 このモードは本システムにおいて、プロジェクタから投影される映像のモードである。これは、学習者がハーフミラーに投影された映像を見

図 20 イメージトレーニングモード
Fig. 20. Image training mode.

図 22 上級者による手本のトレース
Fig. 22. The trace of the model by advanced person.

図 21 文字確認モード
Fig. 21. Character confirmation mode.

図 23 上級者の合成墨跡
Fig. 23. The synthetic calligraphy by advanced person.

たとき、上下・左右に反転するため、あらかじめ上下・左右に反転させた映像を作り出している。

4. システム評価

〈4・1〉 合成墨跡の評価 図 22 のように、図 23 (a) の手本を書道上級者によってなどって入力し、書き終えた合成墨跡が図 23 (b)であり、手本の文字に負けないほど力強く、運筆を忠実に表現できていると考えられる。

また、図 24 (1)～(12)は、図 22 の入力時に得られた上級者の筆圧、運筆データを映像化したものであり、筆の傾きや紙から離れた様子 ((8)) など筆の動きが忠実に表示されている。

〈4・2〉 学習効果の検証 本書道学習支援システムの学習効果を検証するために、実験データの採取を行った。対象者は学校などにおける授業程度の経験しか持たない初心者 of 学生 10 名で、実験手順は以下のとおりである。

まず、図 22 のようにタブレット上に印刷した手本の文字をセットし、その上をなぞる (トレースする) ことによって、運筆のデータを採取する。筆になれるための 2～3 回入力練習を行って、この段階で採取したデータを学習前の

評価文字とする。続いて、システムを用いた学習として、図 25 のように上級者から採取した手本動画をプロジェクタにより映し出し、ハーフミラーに反射させて、その仮想の手に透過した学習者の手を合わせて微妙な筆運びの学習を数分間行った後、もう一度、手本の文字をセットしその上をなぞってもらい、運筆のデータを採取する。この段階で採取したデータを学習後の評価文字とする。

以上の手順で採取した運筆のデータを、動画再生と同一のアルゴリズムで処理して、評価用の文字を生成する。

〔学習前後の文字比較〕 初心者の学習結果例を図 26 (a)～(f)に示す。この学習結果の文字比較において、データの採取時には手本をセットしておき、それをなぞることにより、データを採取していることから、文字のバランスや形状に対する学習評価を行うには最適とはいえないが、書道のなかでも特に重要と思われる「止め」「ため」「払い」といった部分における筆圧を含む運筆に関しては、初筆の部分や力の入れ加減などに上達が見られる。基本的に、穂先が線の上側になるように運筆する側筆は、筆圧を変えない限り線の太さは均一で抑揚は少なくなる。一方、穂先を

図 24 上級者による手本動画

Fig. 24. The model animation by advanced person.

図 25 初心者による運筆学習

Fig. 25. The learning of the writing progress by beginners.

紙面に対して垂直に運筆する直筆は、穂の動きが自由になるため線の細太が自然とつき抑揚が大きくなる。また、筆の上下運動によって抑揚が生じる。「払い」や「はね」など方向転換が必要になる部分では、筆の上下運動を巧みにつけないと、滑らかな収筆がしにくく、整った字形にすることが難しくなる⁽¹²⁾。

図 26 (e)の学習前では、筆の上下運動を意識せずに行っているため、気の抜けたいびつな形になっているが、学習後は徐々に線が細くなり、伸びやかで生き生きとした「はね」になっていて、整った三角形になっている。この結果からも、本システムを用いることにより、筆の上下運動を体得していることが分かる。更に、図 26 (f)は殆ど漢字が書けな

図 26 初心者の学習結果例 (前後)

Fig. 26. The learning result example by beginners (before and after) .

(a) Advanced person

(b) Beginner

図 27 習熟度による筆の傾き傾向

Fig. 27. The inclination tendency of brush by the degree of acquirement.

いブータンからの留学生であり、筆圧や「はね」等の上達のはっきりと分かる。数分という限られた時間の学習効果としては満足のいく結果と思われる。

〔運筆学習の検証〕 図 27 (a), (b)のように習熟度による筆の傾きに傾向があるのが分かった。上級者の筆は真っ直ぐ立っていて、初心者の筆は右に寝ていることが多い。また、楷書の右払いは、起筆から徐々に筆圧を強め、いったん筆圧を止めて穂先を開いてから右方向に払うのが基本であり、開いた穂先のまま払うと、太くてしっかりした右払になる。すなわち、払うときの筆の傾け方がポイントである⁽¹³⁾。

図 28 (a)のように、払う直前まで筆を起筆側へやや倒し気味にして運筆し、収筆でも筆を起筆側へ倒すようにして筆を抜く。これを図 28 (b)のように、逆に収筆の進行方向へ筆を倒してしまうと、払いにくくなる。

図 28 筆の傾きと収筆

Fig. 28. The inclination of brush and the finish of writing.

図 29 初心者の運筆学習結果（前後）

Fig. 29. The learning results of the writing progress by beginners (before and after).

学習結果から、図 29 (a), (b)のように学習者の一部に筆の傾きの改善がみられる。

【従来のシステムとの比較】 従来の動画システム^{(7) (8)}は、図 9 のように 8 ミリビデオで撮影した上級者の実写画像からグレー16 階調のフレーム画像を得て、リアルな手本画像が作成できたが、描画速度が遅いため粗悪な動画となっていた。更に、全フレーム画像を管理・処理することは、メモリーの関係上、困難であった。また、筆はタブレットペンをそのまま使用したので、堅い反発力があり、硬筆（ペン）のような感覚が感じられ、入力時の違和感から、採集したデータにも影響があると思われる。墨跡については、図 30 のようにパケットデータ内の筆圧を読み込み、筆の動きに合せた円と三角形の塗りつぶし画像の組み合わせで表現していたので、つなぎ目などが不十分であった。実際に練習者の視点から従来システムの手本を見た映像を図 31 に示す。ただし、墨跡を決定する重要な情報であるタブレットペン（筆）の方位と傾きのデータは全く未使用であった。

一方、本動画システムは、上記の問題点に注目し、毛筆感覚の筆ペンの開発、3次元CG画像によるVR画像、ペン方位・角度の利用による墨跡の改善により、リアリティの向上をはかったので、比較をするまでもなく、本動画システムが従来システムより優れていることがわかる。また、他のシステムの視線が筆先でなくディスプレイに向いてしまうという問題点についても、手本の文字と書法を同時に見ながら効率よく練習することが可能となった。

また、本システムの目的は、途中の運筆の情報を、リアルタイムに得られる手本を実現することであり、従来の書道教室を否定したり、優劣をつけるものではなく、書道教室の開講時間や人間関係などを気にせず、身軽に誰でも何

図 30 墨跡の合成（従来システム）

Fig. 30. The synthesis of calligraphy (conventional system).

図 31 ハーフミラーに映った仮想像（従来システム）

Fig. 31. The virtual image on the half mirror (conventional system).

時でも何処でも、書道の学習をしたいときに支援するシステムの構築である。従って、書道教室とほぼ同等の成果が得られれば良いと考えている。また、書道講師の補助員（助手ロボット）として、教室での共存も可能であると考えられる。

5. むすび

本書道学習支援システムは、毛筆に近い毛筆型入力デバイスを用いることにより、違和感の少ないデータ採取が可能となり、正確な手本となる動画の生成法が確立できた。また、仮想の手本をもとに1人で筆圧・運筆まで学習可能である。実験結果の評価としては、初筆の部分や払いといった部分において、筆圧の加減に上達が見られる。限られた短時間の学習効果としては満足のいく結果が得られた。今後の課題は、システムの省スペース化、動画生成アルゴリズムの改良、従来の手本（墨跡）からの動画生成、「にじみ」や「かすれ」の表現、書道学習に必要な機能面の拡張、システムによる学習者の文字の自動評価などがあげられる。動画の3次元CG化については、ほぼ目標（リアルな動き）が達成でき、その有効性についても、検証できた

と考える。しかしながら、動画の細部における表現については、暫定的な側面もいくつか含まれているため、今後も引き続いて改善していく必要がある。また、膨大な動画文字見本のすべて（常用漢字だけでも 1,945 字）を蓄えておくのではなく、基本ストロークに分類し、基本ストロークを組み合わせ、動画生成を行うためのデータベース化を試みている。更に、3次元 CG 化を生かした機能などの充実についても今後検討していく必要性がある。一方、画像以外の部分においては、より筆に近い入力デバイスの開発などが要求される。

謝 辞

本研究の一部は、平成 14、15 年度の関西大学学術フロンティアセンターの研究費の交付を受けている。
(平成 15 年 1 月 23 日受付、平成 15 年 7 月 24 日再受付)

文 献

- (1) 岩田洋夫・野村淳二・鈴木 元・谷江和雄・甘利治雄・横井茂樹・岩谷 徹・坂根巖夫：人工現実感生成技術とその応用バーチャル・リアリティ，朝倉書店（1992）
- (2) 廣瀬通孝：バーチャル・リアリティ，産業図（1993）
- (3) 原島 博・広瀬通孝・下条信輔：仮想現実学への序論，共立出版（1996）
- (4) 廣瀬通孝：「人工現実感の教育」，計測と制御，Vol.31，No.12，pp.1218-1223（1992-12）
- (5) G. Otsuka, K. Sodeyama, T. Yoshida, N. Muranaka, and S. Imanishi : “A Construction of a Piano Training System based on Virtual Reality”, *T. IEE Japan*, Vol.116-C, No.11, pp.1288-1294（1996-11）（in Japanese）
大塚元太・袖山和久・吉田知史・村中徳明・今西 茂：「VR を用いたピアノ教育支援システムの構築」，電学論 C，**116**，11，pp.1288-1294（1996-11）
- (6) カール E ロフラー：「ヴァーチャル・リアリティー産業と文化のアンソロジー」，技術評論社（1993）
- (7) T. Yoshida, N. Muranaka, and S. Imanishi : “A Construction of Educational Application System for Calligraphy Master based on Virtual Reality”, *T. IEE Japan*, Vol.117-C, No.11, pp.1629-1634（1997-11）（in Japanese）
吉田知史・村中徳明・今西 茂：「バーチャル・リアリティを用いた書道習得のための教育的応用システムの構築」，電学論 C，**117**，11，pp.1629-1634（1997-11）
- (8) 吉田知史・村中徳明・今西 茂：「バーチャル・リアリティを用いた書道習得のための教育的応用システムの構築Ⅲ」，平成 9 年電気学会関西連大，G12-13（1997）
- (9) K. Henmi and T. Yoshikawa : “Virtual Lesson and Its Application to Virtual Calligraphy System”，*TVRSJ*, Vol.3, No.1, pp.13-19（1998-3）（in Japanese）

逸見和之・吉川恒夫：「バーチャルレッスンの概念とそのバーチャル習字システムへの応用」，バーチャルリアリティ学論，**3**，1，pp.13-19（1998-3）

- (10) T. Yamamoto, Y. Tanaka, S. Tobgyal, N. Muranaka, and S. Imanishi : “A Virtual Reality Aided Calligraphy Mastering System”，*IMPS'98*, I-1.01, pp.3-4（1998-10）（in Japanese）
山本隆史・田中康博・Sonam Tobgyal・村中徳明・今西 茂：「バーチャルリアリティを用いた書道学習支援システムの構築」，*IMPS'98*, I-1.01, pp.3-4（1998-10）
- (11) 山本隆史・田中君江・徳丸正孝・村中徳明・今西 茂：「VR を用いた書道学習支援システムにおける学習効果」，平成 11 年電気学会関西連大，G18-8（1999）
- (12) 貞政少登：プロに学ぶ書のテクニック⑨ 抑揚，可成屋（2002）
- (13) 有岡郷隆：プロに学ぶ書のテクニック⑩ 収筆，可成屋（2002）

村 中 徳 明

（正員）1949 年 12 月 17 生まれ。1972 年 3 月関西大学工学部電子工学科卒業。1974 年 3 月同大学大学院工学研究科修士課程電気工学専攻修了。同年同大学工学部電子工学科助手。専任講師を経て，現在同大学助教授。主に，多

値・ファジィ論理回路，VR 技術の応用，画像情報処理に関する研究に従事。工学博士。電子情報通信学会，情報処理学会，システム制御情報学会，日本ファジィ学会，映像情報メディア学会，日本感性工学会，IEEE 各会員。

山 本 隆 史

（非会員）1974 年 11 月 12 日生まれ。1998 年 3 月関西大学工学部電子工学科卒業。1999 年 8 月同大学大学院工学研究科博士課程前期課程電子工学専攻在学中，死去。在学中，主に，VR 技術及びセンサー技術の応用，画像情報処理等のプログラム開発についての研究に従事。元電子情報通信学会会員。

今 西 茂

（正員）1934 年 4 月 22 日生まれ。1958 年 3 月大阪市立大学理工学部電気工学科卒業。1960 年 3 月同大学大学院理工学研究科修士課程電気工学専攻修了。同年関西大学工学部助手。専任講師及び助教授を経て，現在，電子工学科教授。主に，論理回路，符号化回路，ファジィ論理回路，マルチマイクロプロセッサシステムなどの研究に従事。著書「電子計算機基礎論」，「マイコンインターフェイスのための電子回路」，訳書「デジタル回路入門」：（以上分担）。工学博士。電子情報通信学会，情報処理学会，システム制御情報学会，映像情報メディア学会，IEEE 各会員。