

รายงานฉบับสมบูรณ์

Final Report

การรู้จำตัวอักษรแบบออนไลน์ On-line Character recognition

ดร. พิทักษ์ ธรรมวาริน
รศ. ดร.กนก เชนจิระพงศ์เวช
รศ. ดร.ชวลิต เบญจางคประเสริฐ
รศ. อรลภ แสงอรุณ
รศ. ดร.อรรถสิทธิ์ หล้าสกุล
รศ. ดร. ปิติเขต สุรักษา
นางสาว วันวิสา ชัชวงษ์

ห้องปฏิบัติการวิจัย ระบบส่งสัญญาณ
สำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กันยายน พ.ศ. 2551

Signal Transmission System Laboratory
Research Center for Communications and Information Technology
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

September 2008

RCH
TK
7882
.P3
ก499

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก สำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (Research Center for Communications and Information Technology: ReCCIT) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2551 วงเงินงบประมาณ 50,000 บาท



RCH

TK

๗๘๘๒

๙๓

๓๕๙๙

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 120180

วัน, เดือน, ปี..... ๑.๑๗. 2555

b. ๑๕๗๙๕๖๘
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทสรุปย่อ

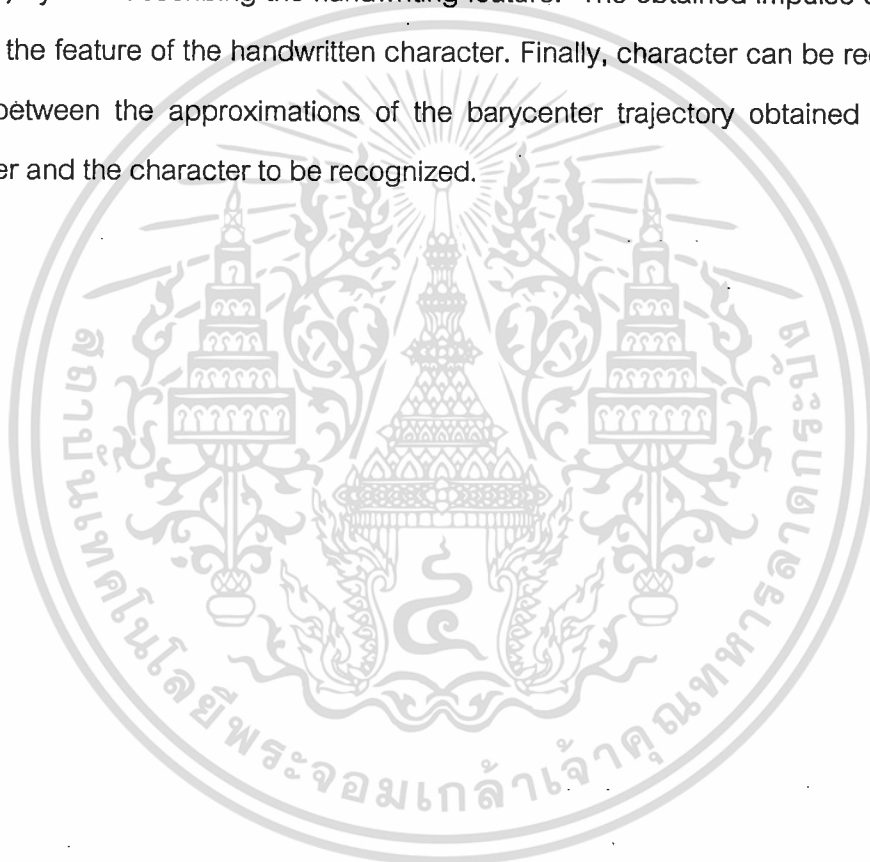
งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการรู้จำตัวอักษรแบบออนไลน์ โดยพิจารณาจากการเคลื่อนที่ของปลายปากกาขณะเขียนตัวอักษร การเคลื่อนที่ของปลายปากกาสามารถแสดงได้ด้วยวิถีโคจรและความเร็วในการเคลื่อนที่ของจุดบารีเซนเตอร์ จากนั้นเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางเวลาและความถี่ของการเคลื่อนที่ของปลายปากกา เราจะนำวิถีโคจรและความเร็วในการเคลื่อนที่ของจุดบารีเซนเตอร์มากระจายลงในอนุกรมเวฟเลข และสุดท้ายเราจะนำเอาระบบระบบผลตอบสนองของอิมพัลส์จำนวนจำกัดมาใช้ในการอธิบายคุณสมบัติในการเคลื่อนที่ของปลายปากกา โดยจะนำค่าสัมประสิทธิ์เวฟเลขที่คำนวณได้จากความเร็วและวิถีโคจรของจุดบารีเซนเตอร์มาเป็นอินพุต และเอาที่พุตของระบบตามลำดับ ค่าของผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัดที่คำนวณได้จะถูกนำมาใช้ในการรู้จำตัวอักษร โดยการคำนวณระยะแบบยุคลิดของการประมาณค่าวิถีโคจรของจุดศูนย์กลางบารีของข้อมูลอ้างอิงกับตัวอักษรที่ต้องการรู้จำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Abstract

An on-line writer dependent character recognition method based on FIR system characterizing barycenter trajectory is introduced. The barycenter is determined from the center point of script and two adjacent pen-point positions with respect to time in handwriting process. Then the velocity and trajectory of the barycenter are calculated and expanded into Fourier series. The obtained Fourier coefficients are used as the input and output of the FIR (Finite Impulse Response) system describing the handwriting feature. The obtained impulse of the FIR system is used as the feature of the handwritten character. Finally, character can be recognized by the distance between the approximations of the barycenter trajectory obtained from the reference character and the character to be recognized.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทสรุปย่อ	II
บทคัดย่อ.....	III
บทที่ 1 บทนำ(Introduction)	1
บทที่ 2 กระบวนการประมวลผลเบื้องต้น (Preprocessing)	2
2.1 การทำให้ขนาดอยู่ในมาตรฐานเดียวกัน (Normalization of Size)	2
2.2 การทำให้ตำแหน่งอยู่ในมาตรฐานเดียวกัน (Normalization of Location)	3
บทที่ 3 การดึงคุณสมบัติที่สำคัญ(Feature Extraction).....	6
บทที่ 4 การรู้จำตัวอักษร (Character Recognition).....	9
บทที่ 5 การทดลอง (Experiment).....	11
บทที่ 6 บทสรุป (Conclusion)	13
บทที่ 7 เอกสารอ้างอิง (References).....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lesson 1

INTRODUCTION

On-line character recognition translates a handwritten character into machine-editable text which is a useful tool for pen-based computer system. Many methods for on-line character recognition have been reported [1]-[4]. In those methods, the pen-point position is used to recognize the character. It is considered that using pen-point position directly is not effective to extract the feature of the handwritten character. We use the barycenter determined from the center point of script and the two adjacent pen-point positions instead of pen-point position to extract the feature of the handwritten character. In this paper, a writer dependent recognition method is investigated. The major advantage of the writer dependent method is not only easier to customize a special handwriting style for a particular writer, but also the special symbol for a particular writer can be recognized. We considered that the feature of the handwritten character can be described by two features, the barycenter trajectory and its velocity. Then they are expanded into Fourier series to reduce the fluctuation of handwriting process. Moreover, the FIR system characterizing the handwriting feature is introduced by using the Fourier coefficients of the velocity and the trajectory of the barycenter as the input and output of the system, respectively. The obtained impulse response of the FIR system is used as the feature of the handwritten character. Finally, character can be recognized by the distance between the approximations of the barycenter trajectory obtained from the reference character and the character to be recognized.

LESSON 2

PREPROCESSING

It is well known that in handwriting process, there is a mass fluctuation depending on many factors such as age, habit, psychological and mental state, physical or practical conditions in handwriting process of various writers. For instance, size, location, shape, and duration time in handwriting process of the same alphabet are never precisely the same even they were written by the same writer.

Fig.1 shows numeral 'one' written by different writers. From Fig.1, we can see that the characters are written in different sizes, locations and styles. In order to recognize the character effectively, such fluctuations of handwriting should be reduced.

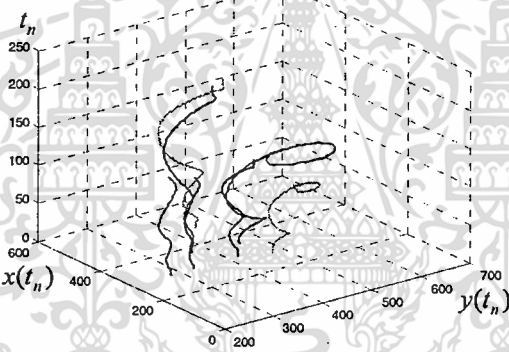


Fig. 1: Numeral 'one' written by different people.

It is assumed here that the characters are written on a graphical tablet. The horizontal and vertical components of pen-point position at a time, $t = n\tau (\equiv t_n)$, in handwriting process are denoted here as $x(t_n)$ and $y(t_n)$, respectively, where τ is a constant sampling rate. In order to reduce the fluctuation of handwriting, two kinds of normalization with respect to the size and location in handwriting process are performed as follows:

2.1 Normalization of size

The size of the script is standardized after removing the duplicated points of pen-point position. In order to make a standard size of script, the horizontal and the vertical components, $x(t_n)$ and $y(t_n)$ are normalized as

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{p}(t_n) = \frac{p(t_n) - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}}, p = (x, y), \quad (1)$$

where

$$p_{\min} = \min_{0 \leq n \leq N-1} p(t_n), p_{\max} = \max_{0 \leq n \leq N-1} p(t_n), \quad (2)$$

and N is a total number of sampled points of pen-point position.

2.2 Normalization of location

The location of the script is normalized as follows:

$$c_p = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \hat{p}(t_n), p = (x, y), \quad (3)$$

$$\tilde{p}(t_n) = \hat{p}(t_n) - c_p, n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (4)$$

where c_p is the center point of a script. The effectiveness of the preprocessing has been shown in [4]. Then in order to reduce a sensitivity of handwriting motion in handwriting process, a trajectory of the barycenter determined from the center point of a script and the two adjacent pen-point positions with respect to time in handwriting process is used. The coordinates $(r_x(t_n), r_y(t_n))$ of the barycenter shown in the Fig.2 are calculated by the following equations:

$$r_x(t_n) = \frac{\tilde{x}(t_n) + \tilde{x}(t_{n+1})}{3}, r_y(t_n) = \frac{\tilde{y}(t_n) + \tilde{y}(t_{n+1})}{3}, \quad (5)$$

$(n = 1, 2, 3, \dots, N-1),$

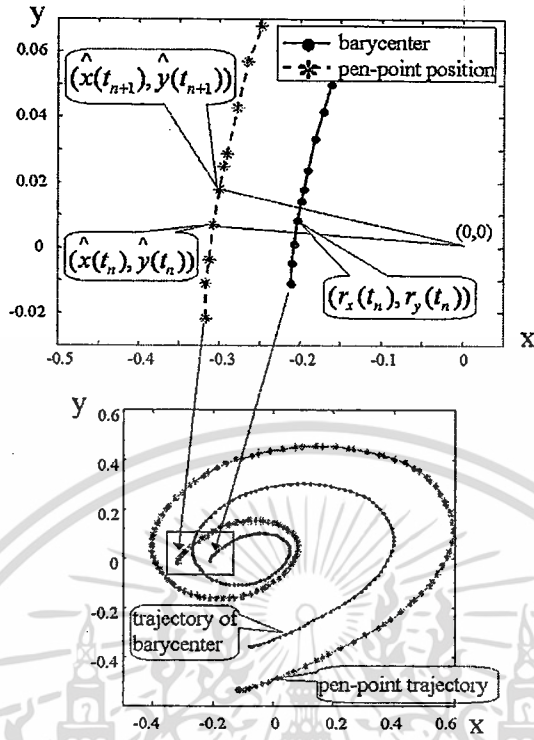


Fig. 2: Numeral 'one'.

Then the handwriting motion in the handwriting process can be described by the following equations:

$$z(t_n) = r_x(t_n) + jr_y(t_n), \quad (6)$$

$$v(t_n) = z(t_{n+1}) - z(t_n), j \equiv \sqrt{-1}, v(t_N) = 0 \quad (7)$$

where $z(t_n)$ represents the barycenter trajectory and $v(t_n)$ represents the average of the velocity between the two adjacent barycenter points. After that, we define the following equations:

$$z(t_n) = z^{(real)}(t_n) + jz^{(img)}(t_n) \quad (8)$$

$$v(t_n) = v^{(real)}(t_n) + jv^{(img)}(t_n), \quad (9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where $z(t_n)$ and $v(t_n)$ are complex valued functions which represent the trajectory and the velocity of the barycenter, respectively.

Subsequently, in order to normalize the duration time in handwriting process, a piecewise linear function (PLF) of $v(t_n)$, and $z(t_n)$ are determined by connecting the two adjacent components with a straight line. The PLF can be described as followings:

$$q(t) = \sum q(t_n)\phi_n(t), \quad t \in T_i \quad (10)$$

where

$$(q = z^{(real)}, z^{(img)}, v^{(real)}, v^{(img)}),$$

$$\phi_n(t) = \begin{cases} \frac{t-t_{n-1}}{t_n-t_{n-1}}, & t \in [t_{n-1}, t_n] \\ \frac{t_{n+1}-t}{t_{n+1}-t_n}, & t \in [t_n, t_{n+1}] \\ 0, & t \notin [t_{n-1}, t_{n+1}] \end{cases} \quad (11)$$

and T is the duration time of the handwriting process. Then the duration time T is normalized as $T = T_N$.

LESSON 3

FEATURE EXTRACTION

In this section, to extract the important feature of the characters, we assumed that $z^{(real)}(t_n)$, $z^{(img)}(t_n)$, $v^{(real)}(t_n)$, and $v^{(img)}(t_n)$ are even periodic functions of time. Then these functions are expanded into Fourier series by the following equations:

$$l(t) \cong \frac{1}{2} a_0^{(l)} + \sum_{k=1}^{K-1} a_k^{(l)} \cos(k\omega_0^{(l)} t), \quad (12)$$

where $\omega_0^{(l)} = \frac{\pi}{T_N}$, and $(l = z^{(real)}, z^{(img)}, v^{(real)}, v^{(img)})$.

The Fourier coefficients can be calculated by the following equation:

$$a_k^{(l)} = \frac{2}{T_N} \int_0^{T_N} l(t) \cos(k\omega_0 t) dt, \quad (13)$$

where $(k = 0, 1, \dots, K-1)$, K is the number of Fourier coefficients and $K \leq N$. By selecting a suitable number of the Fourier Coefficient, the fluctuation of the individual handwriting motion can be reduced. The suitable number of Fourier coefficients is determined by minimizing the mean square error in the Fourier approximation of $\hat{z}^{(real)}(t_n)$, $\hat{z}^{(img)}(t_n)$, $\hat{v}^{(real)}(t_n)$, and $\hat{v}^{(img)}(t_n)$.

The details of how to determine the number of Fourier coefficients are reported in the work [5]. To simplify the explanation, we represent again the Fourier coefficients of $v(t_n)$, and $z(t_n)$ obtained from (13) by the following equations:

$$f(k) \cong a_k^{\hat{v}^{(real)}} + ja_k^{\hat{v}^{(img)}}, \quad g(k) \cong a_k^{\hat{z}^{(real)}} + ja_k^{\hat{z}^{(img)}} \quad (14)$$

We consider that the important feature of the handwritten character can be represented by the FIR system characterizing the barycenter trajectory. The FIR system is realized by considering the Fourier coefficients of the velocity and the trajectory of the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

barycenter as the input and the output of the system respectively. It is assumed that the FIR system can be described by

$$\hat{g}(k;h) = \sum_{m=0}^M h(m)f(k-m), (k=0,1,\dots,K-1), \quad (15)$$

where $\mathbf{h}' = [h(0), h(1), h(2), \dots, h(M)]$ is the impulse response of the FIR system, M is the order of the system and $\hat{g}(k;h)$ is the approximation of the $g(k)$. The impulse response $h(m)$ can be obtained by minimizing the least-square error at M as follows:

$$E = \sum_{k=0}^{K-1} |e(k)|^2 \rightarrow \min, \quad (16)$$

$$e(k) = g(k) - \hat{g}(k;h). \quad (17)$$

TABLE I
IMPULSE RESPONSE.

	'one'	'two'	'three'	'four'
Writer A				
Writer B				
	'five'	'six'	'seven'	'eight'
Writer A				
Writer B				
	'nine'	'zero'	-	-
Writer A			-	-
Writer B			-	-

Table I shows the impulse responses of the FIR system obtained from writer A and writer B for numeral 0-9. It can be seen that the impulse responses obtained from

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงข้อมูล 120180 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

same numerals and same writer are quite similar and different from those obtained from different numerals and different writer. Therefore, it can be considered that the obtained impulse response of the FIR system can be used as the important feature of the handwritten character for a particular writer.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LESSON 4

CHARACTER RECOGNITION

It is assumed that the reference patterns of known classes for numerals 'zero', 'one', 'two', 'three',..., 'nine' are defined by $\{C_0, C_1, C_2, \dots, C_9\}$, respectively. Then an unknown character x is assigned to a class

$$C_i \in \{C_0, C_1, C_2, \dots, C_9\},$$

$$\text{if } S_{\min}(C_l, x) = \min\{S(C_l, x)\}, l = 0, 1, 2, \dots, 9, \quad (18)$$

where

$$S(C_l, x) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \|\hat{g}_{l,n}^{(ref)} - \hat{g}_{l,n}^{(x)}\|,$$

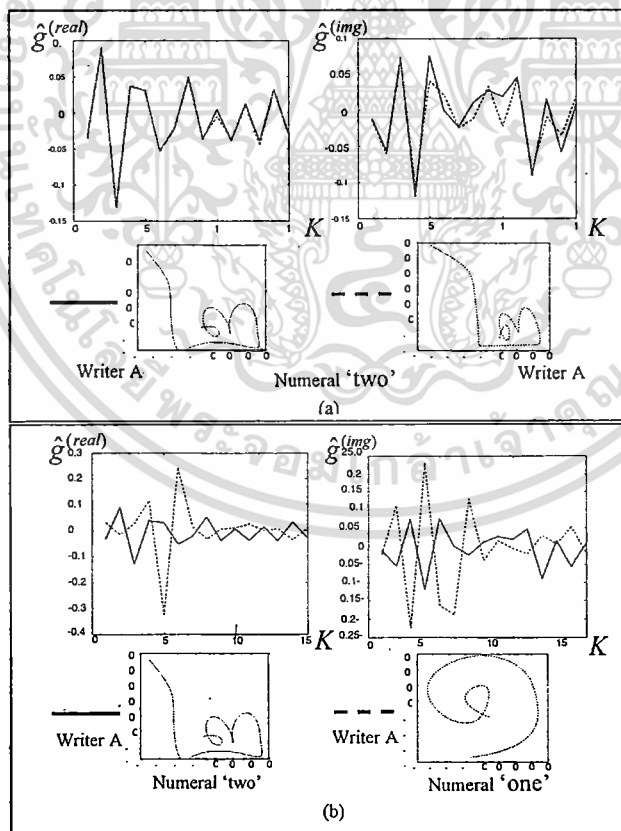


Fig. 3: The approximation of the Fourier coefficients of the Barycenter trajectory (a) obtained from same numeral and same writer (b) obtained from different numeral and same writer (c) obtained from same numeral and different writer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

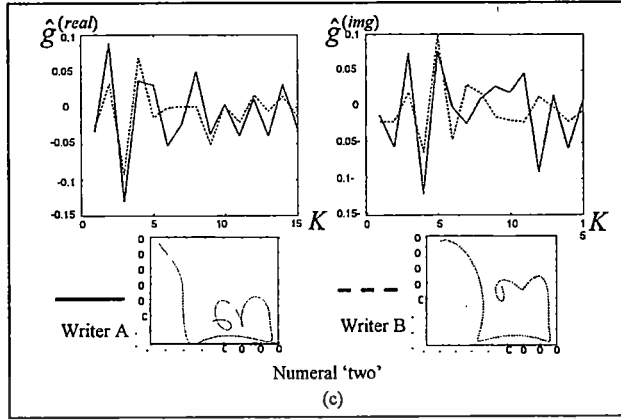


Fig. 3: The approximation of the Fourier coefficients of the Barycenter trajectory (a) obtained from same numeral and same writer (b) obtained from different numeral and same writer (c) obtained from same numeral and different writer(continued).

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{g}}_{l,n}^{(ref)} &= [\hat{g}_{l,n}^{(ref)}(0; \mathbf{h}_{l,n}), \hat{g}_{l,n}^{(ref)}(1; \mathbf{h}_{l,n}), \dots, \hat{g}_{l,n}^{(ref)}(M; \mathbf{h}_{l,n})], \\ \hat{\mathbf{g}}_{l,n}^{(x)} &= [\hat{g}_{l,n}^{(x)}(0; \mathbf{h}_{l,n}), \hat{g}_{l,n}^{(x)}(1; \mathbf{h}_{l,n}), \dots, \hat{g}_{l,n}^{(x)}(M; \mathbf{h}_{l,n})], \\ \mathbf{h}'_{l,n} &= [h_{l,n}(0), h_{l,n}(1), \dots, h_{l,n}(M)], \\ \hat{g}_{l,n}^{(ref)}(k; \mathbf{h}_{l,n}) &= \sum_{m=0}^M h_{l,n}(m) f_{l,n}^{(ref)}(k-m), \\ \hat{g}_{l,n}^{(x)}(k; \mathbf{h}_{l,n}) &= \sum_{m=0}^M h_{l,n}(m) f_l^{(x)}(k-m), (n = 1, 2, \dots, N), \end{aligned}$$

and N is total number of reference data for each class, $\mathbf{h}_{l,n}$ is an impulse response obtained from the n^{th} reference data for class C_l , $\| \cdot \|$ is Euclidean norm, $f_{l,n}^{(ref)}(k)$ is Fourier coefficients of Barycenter velocity obtained from the n^{th} reference data for class C_l , $f_l^{(x)}(k)$ is Fourier coefficients of barycenter velocity obtained from the unknown character x , and $S_{\min}(C_l, \mathbf{x})$ is the minimum Euclidean distance obtained from $S(C_l, \mathbf{x})$. Fig.3 shows the comparison of the approximations of the Fourier coefficients of the barycenter trajectory obtained from same and different numerals written by same and different writers. It can be seen from Fig.3 that the approximation obtained from same numeral and same writer are quite similar and different from those obtained from different numerals and different writers.

LESSON 5

EXPERIMENTS

Character recognition experiments were performed on a database consisting of 1500 numerals written by 10 people in one year used as the test data set and 30 numerals used as training data for one people. The examples of some numerals written by different people are shown in Fig.4. Table II shows the recognition rates using the Khmer numerals in our database.

TABLE II
RECOGNITION RATES (WRITER DEPENDENT).

Writer	Number of training data (3/numeral)	Number of numerals(15/numeral)	Recognition rates (%)
A (0-9)	30	150	98.67
B (0-9)	30	150	96.00
C (0-9)	30	150	97.33
D (0-9)	30	150	96.00
E (0-9)	30	150	96.67
F (0-9)	30	150	96.67
G (0-9)	30	150	92.67
H (0-9)	30	150	95.33
I (0-9)	30	150	97.33
J (0-9)	30	150	98.00
Average			96.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	'zero'	'one'	'two'	'three'	'four'	'five'	'six'	'seven'	'eight'	'nine'
Writer A	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Writer B	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Writer C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Fig. 4: Examples of numeral (0-9) obtained from three writers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LESSON 6

CONCLUSION

An on-line writer dependent character recognition method has been proposed. In the proposed method, the barycenter determined from the center point of the script and the two adjacent of pen-point positions, was used to reduce the sensitivity of pen-point movement in handwriting process. Then the Fourier approximations of the trajectory and velocity of the barycenter were used to reduce the fluctuation in handwriting process. Moreover, the FIR system approximating the barycenter trajectory was introduced by using the Fourier coefficients of the velocity and the trajectory of the barycenter as the input and output of the FIR system, respectively. Finally, character can be recognized by the distance between the approximations of the barycenter trajectory obtained from the reference character and the character to be recognized. The experimental results show that the proposed method is useful for on-line writer dependent character recognition.

LESSON 7

REFERENCES

- [1] R. Plamondon and Sargur N. Srihari, "On-line and Off-line handwriting recognition: A Comprehensive Survey," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.22 no.1, pp. 63-84, July 2000.
- [2] T.Matsuura and P.Thumwarin, "On-line Thai numeral recognition" IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, pp. 445-448, December 2000.
- [3] Yuichi Nakatani, Daisuke Sasaki, Youji Liguni, Member, IEEE, and Hajime Maeda, Member, IEEE, "Online Recognition of Handwritten Hiragana Character Based Upon a Complex Autoregressive Model", IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. , vol. 21 no. 1, pp. 73-76, January 1999.
- [4] P.Thumwarin, S. Khem, K.Janchitrapongvej, and T.Matsuura, "On-line character recognition for Khmer numeral based on DP Matching of Barycenter Trajectory ", ETCI-CON2007, vol.2, pg.1015-1018, May 2007.
- [5] P.Thumwarin, "On-line writer recognition for Thai based on impulse response of FIR system characterizing handwriting motion", Doctoral Thesis, Tokai University JAPAN, 2004.

<http://www.sice.or.jp/sice2008/>

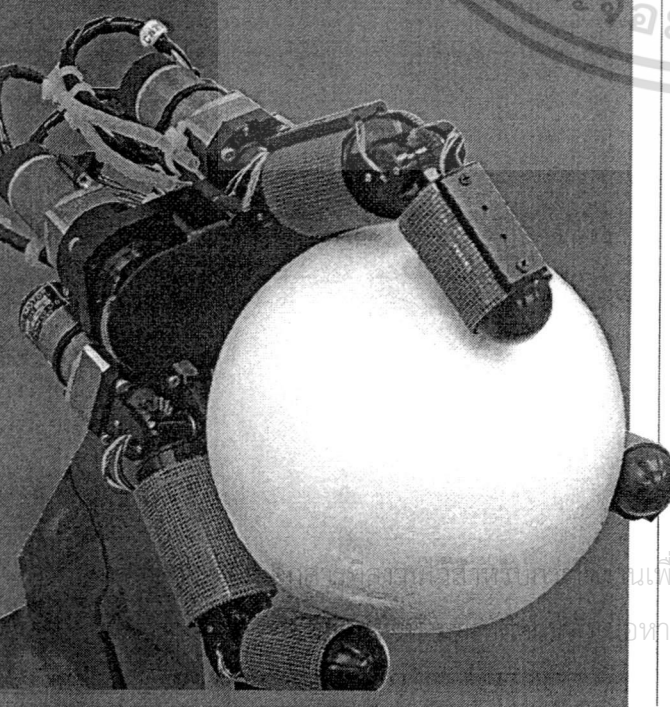
SICE Annual Conference 2008

International Conference on Instrumentation,
Control and Information Technology

Final Program and Papers

Aug-20(Wed.)~22(Fri.)

The University of Electro-Communications(UEC),
Chofu, Tokyo, JAPAN



Organized by

The Society of Instrument and Control Engineers
(SICE), Japan

Supported by

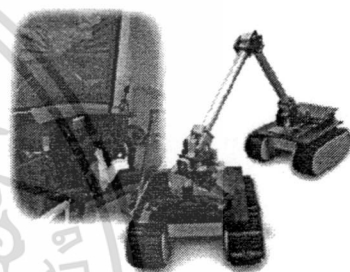
Chofu City, The Univ. of Electro-Communications,
Japan

Technically Co-Sponsored by

IEEE/IES, IEEE/RAS, IEEE/CSS, IEEE/SMC,
The Instrumentation, Systems and Automation
Society (ISA), Institute of Control, Robotics and
Systems(ICROS).

In association with

China Instrument and Control Society (CIS),
Chinese Association of Automation (CAA),
Chinese Automatic Control Society (CACs),
International Measurement Confederation
(IMEKO), IEEE Japan Council, IFAC NMO-Japan



Message

SICE2008 Committee

Plenary and Invited Talks

Program and Papers

Overview (Program at a Glance)

Session table

Presentation order

Abstracts and Final Papers

Authors Index

Interactive OS

Workshop

Special Event

Exhibition

Laboratory Tours

Welcome Reception, Banquet, Farewell Party

Information

General Information

Campus Map

SICE  UEC  IEEE  ISA  ICROS

On-Line Writer Dependent Character Recognition for Khmer based on FIR System Characterizing Handwriting Motion

Pitak Thumwarin¹, Sochenda Khem¹, Kanok Janchitraponvej¹, and Takenobu Matsuura²

¹Faculty of Engineering and Research Center for Communications and Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand

(Tel : +66-2737-3000, +66-2739-2382; E-mail: ktpitak@kmitl.ac.th, kjakanok@kmitl.ac.th)

²Department of Communications Engineering, Tokai University, Tokyo, Japan

(Tel : +81-463-58-1211; E-mail: matsuura@dt.u-tokai.ac.jp)

Abstract: We propose an on-line writer dependent Khmer recognition method based on time-frequency characteristics of handwriting motion. The handwriting motion can be described by two features, barycenter trajectory and its velocity of pen-tip movement. Then the barycenter trajectory and its velocity of the pen-tip movement are expanded into wavelet series to extract the time-frequency characteristics of the handwriting motion. After that, The fluctuation of the wavelet coefficients can be reduced by the FIR(Finite Impulse Response) Wiener filter. Moreover, the FIR system characterizing the time-frequency characteristics of the handwriting motion is introduced by using wavelet coefficients of the velocity and trajectory of the barycenter with fluctuation reduced as the input and output of the FIR system, respectively. The obtained impulse response of the FIR system is considered as the individual feature for a particular character. Finally, Khmer alphabets can be recognized by using the Euclidean distance between the impulse responses obtained from the reference alphabets and those of the alphabets to be recognized. Khmer character recognition experiments were performed on a database consisting of 6,750 of numerals and alphabets written by 17 people. As the results, the average of the recognition rate was 98.17%.

Keywords: Wiener filter, FIR, writer dependent, character recognition

1. INTRODUCTION

Many methods for on-line character recognition have been reported [1-5]. In those method, the pen-point position was used to recognize the characters. It is considered that pen-point used directly in [2] is not effective enough to extract the feature of the handwriting character. In work[4, 5], the barycenter determined from the center point of the script and two adjacent pen-point positions with respect to time in handwriting process was used to extract the feature of the handwriting character. In this paper, a writer dependent character recognition method is investigated using the barycenter instead of the pen-point position to extract the handwriting feature. The major advantage of the writer dependent method is that it is not only easier to customize special handwriting style for a particular writer, but also special symbols for a particular writer can be recognized[5]. In the work [5], the Fourier approximation was used to extract the handwriting feature for particular person. However the Fourier approximation was not enough to represent the handwriting feature for a specific person. It is considered that a person should have his/her own handwriting style in handwriting a script. In order to extract the individual handwriting feature in writing a script, it is desirable to use the time-frequency characteristics of handwriting motion. In this case, the trajectory and the velocity of the barycenter are expanded into wavelet series to extract the time-frequency of the handwriting motion. After that, the FIR(Finite Impulse response) Wiener filter is used to reduce the fluctuation of wavelet coefficients. Moreover, that FIR system is used to characterize the handwriting

system by taking the obtained approximated wavelet coefficients of the velocity and the trajectory from the FIR-wiener filter as the input and output, respectively, of another FIR system. The obtained impulse response of the FIR system are used as the individual features for a particular character of a specific writer. Finally, characters can be recognized by the Euclidean distance between the impulse response obtained from the reference characters and the characters to be recognized.

2. PREPROCESSING

It is assumed here that Khmer characters are written on a graphical tablet. The horizontal and vertical components of pen-point position at a time, $t = n\tau (\equiv t_n)$, in handwriting process are denoted here as $x(t_n)$ and $y(t_n)$, respectively, where τ is a constant sampling rate. In order to reduce the fluctuation of handwriting, three kinds of normalization with respect to the size, location, and duration time in handwriting process are performed which will be described in the following subsections.

2.1 Normalization of size

The size of the script is standardized after removing the duplicated points of pen-point position. In order to make a standard size of script, the horizontal and the vertical components, $x(t_n)$ and $y(t_n)$ are normalized as

$$\hat{p}(t_n) = \frac{p(t_n) - p_{min}}{p_{max} - p_{min}}, p = (x, y) \quad (1)$$

where

$$p_{min} = \min_{0 \leq n \leq N-1} p(t_n),$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p_{max} = \max_{0 \leq n \leq N-1} p(t_n),$$

and N is a total number of sampled points of pen-point position. The example of size normalization is shown in fig.1, and it can be seen that the fluctuation related to the size of the script can be reduced.

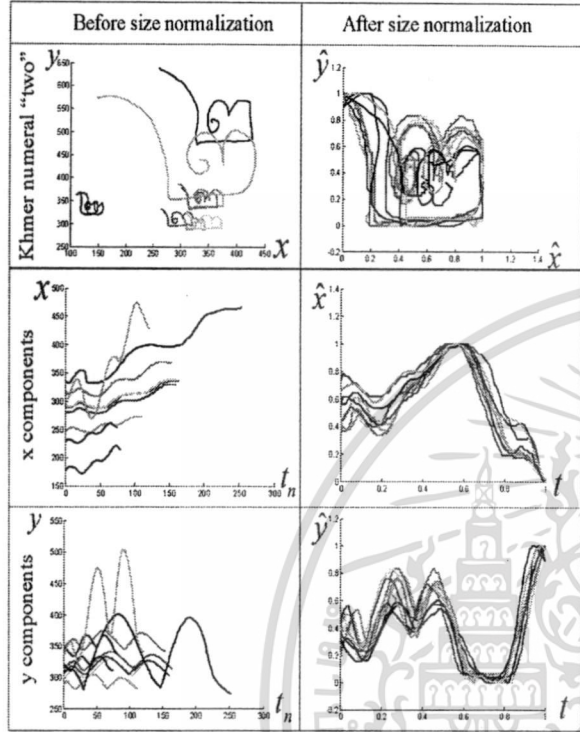


Fig. 1 Process of size normalization.

2.2 Normalization of location

The location of the script is normalized as follows:

$$c_p = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \hat{p}(t_n), p = (x, y) \quad (2)$$

$$\tilde{p}(t_n) = \hat{p}(t_n) - c_p, n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

where c_p is the center point of a script. The example of location normalization is shown in fig.2. From this figure it can be seen that the fluctuation related to location of the scripts is reduced. Then in order to reduce a sensitivity of handwriting motion in handwriting process, a trajectory of the barycenter determined from the center point of a script and the two adjacent pen-point positions with respect to time in handwriting process is used. The barycenter coordinates $(r_x(t_n), r_y(t_n))$ shown in fig.3 are calculated by the following equations:

$$r_x(t_n) = \frac{\tilde{x}(t_n) + \tilde{x}(t_{n+1})}{3}, r_y(t_n) = \frac{\tilde{y}(t_n) + \tilde{y}(t_{n+1})}{3} \quad (4)$$

where $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$. Furthermore, in order to reduce another fluctuation such as duration time in a part of handwriting process, a segmentation of handwriting process is performed. The pen-up signal is used as the segmentation point for separating a barycenter trajectory into a set of components' strokes.

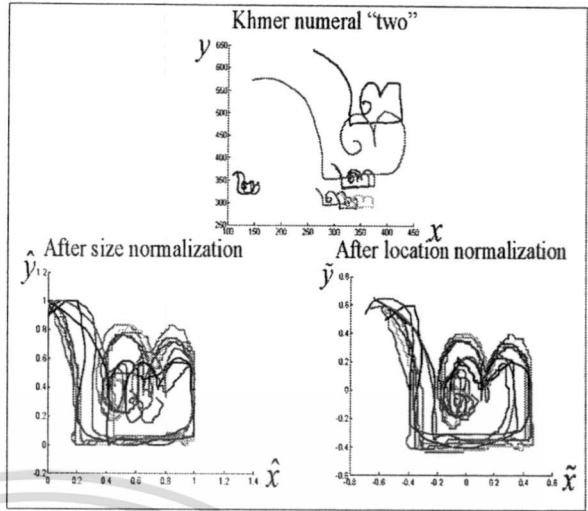


Fig. 2 Process of location normalization.

Then the handwriting motion in the handwriting process for each stroke can be described by the following equations:

$$z_i(t_n) = r_x^{(i)}(t_n) + jr_y^{(i)}(t_n), \quad (5)$$

$$v_i(t_n) = z_i(t_{n+1}) - z_i(t_n), j \equiv \sqrt{-1}, \quad (6)$$

$(i = 1, 2, \dots, N_s)$

where $z_i(t_n)$ represents the barycenter trajectory, $v_i(t_n)$ represents the average of the velocity between the two adjacent barycenter points, and N_s is the total number of strokes in the handwriting process of handwriting character after segmentation. After that, we define the following equations:

$$z_i(t_n) = z_i^{real}(t_n) + jz_i^{img}(t_n) \quad (7)$$

$$v_i(t_n) = v_i^{real}(t_n) + jv_i^{img}(t_n) \quad (8)$$

where $z_i(t_n)$ and $v_i(t_n)$ are complex valued functions which represent the trajectory and the velocity of the barycenter, respectively.

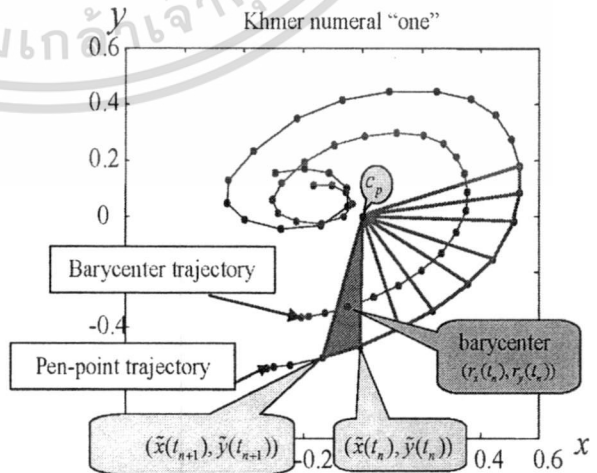


Fig. 3 Barycenter trajectory of Khmer numeral one obtained from the pen-point position.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 Normalization of duration time

Subsequently, in order to normalize the duration time in handwriting process, piecewise-linear functions (PLFs) of $v_i(t_n)$ and $z_i(t_n)$ are determined by connecting the two adjacent components with a straight line. The PLFs can be described as followings:

$$q(t) = \sum_{n=0}^{N_i-1} q(t_n)\phi_n(t), t \in T \quad (9)$$

where $q = (z_i^{real}, z_i^{img}, v_i^{real}, v_i^{img})$,

$$\phi_n(t) = \begin{cases} \frac{t-t_{n-1}}{t_n-t_{n-1}} & t \in [t_{n-1}, t_n] \\ \frac{t_{n+1}-t}{t_{n+1}-t_n} & t \in [t_n, t_{n+1}] \\ 0 & t < t_{n-1} \text{ or } t > t_{n+1} \end{cases} \quad (10)$$

and T is the duration time of the handwriting process. Then the duration time is T normalized as $T = T_N$ using (9). The example of time normalization is shown in fig.4. It is shown from fig.4 that the fluctuation related to the duration time in handwriting process is reduced.

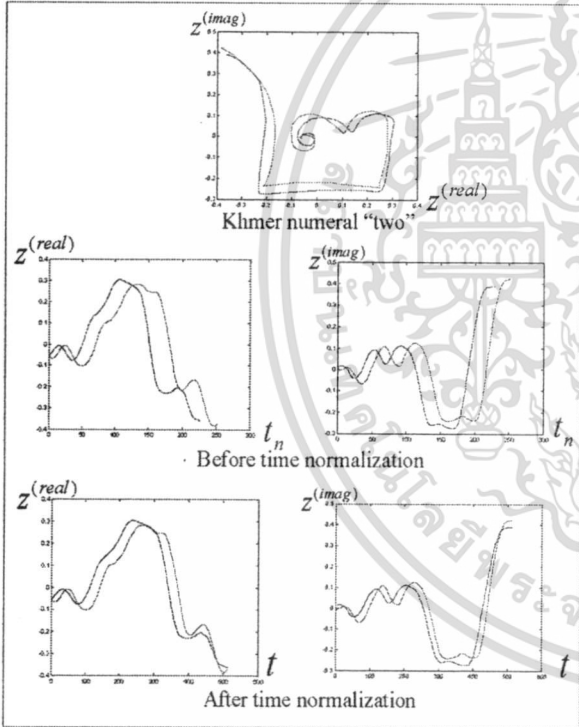


Fig. 4 Example of time normalization.

3. FEATURE EXTRACTION

In this section, in order to extract the time-frequency characteristics of the handwriting process, the $z_i(t_n)$ and $v_i(t_n)$ obtained in the preceding section are expanded into wavelet series as

$$\check{q}(t) = \sum_{k=0}^{2^{l_0}-1} c_{l_0}^{(q)}(k)\varphi_{k,l_0}(t) + \sum_{l=l_0}^{M-1} \sum_{k=0}^{2^l-1} d_l^{(q)}(k)\psi_{k,l}(t), \quad (11)$$

$q = (v_i, z_i)$, $l_0 = 0, 1, 2, \dots, L-1$

where $\psi_{k,l}(t)$ is orthonormal wavelet:

$$\psi_{k,l}(t) = 2^{l/2}\psi(2^l t - k) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \langle \psi_{k,l}, \psi_{m,n} \rangle &\equiv \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{k,l}(t)\psi_{m,n}(t)dt \\ &= \delta_{l,m}\delta_{k,n} \end{aligned} \quad (13)$$

and $\varphi_{k,l_0}(t)$ is the scaling function:

$$\varphi_{k,l_0}(t) = 2^{l_0/2}\varphi(2^{l_0}t - k), (l_0, k \in Z)$$

where Haar function is used as mother wavelet $\psi_{k,l}$, $\delta_{l,m}$ is Kronecker delta, and $c_l^{(q)}(k)$ and $d_l^{(q)}(k)$, respectively, are the approximated and the detail wavelet coefficients obtained through the inner product $d_l^{(q)}(k) = \langle q, \psi_{k,l} \rangle$, and the scaling function coefficients obtained through the inner product $c_l^{(q)}(k) = \langle q, \varphi_{k,l} \rangle$.

$$\begin{bmatrix} c_l(k) & d_l(k) & d_{l+1}(k) & d_{l+1}(k+1) & \dots & d_l(k) & \dots & d_l(2^l-1) \end{bmatrix}$$

Fig. 5 Feature vector at level l taken as the input and output of the FIR system.

To ease the explanation, we define the following functions.

$$\mathbf{c}_l^{(q)} = [c_l^{(q)}(0), c_l^{(q)}(1), \dots, c_l^{(q)}(2^l-1)]', \quad (14)$$

$$\mathbf{d}_l^{(q)} = [d_l^{(q)}(0), d_l^{(q)}(1), \dots, d_l^{(q)}(2^l-1)]', \quad (15)$$

$$\mathbf{a}_l^{(q)} = [c_{l,k}^{(q)}, d_{l,k}^{(q)}, d_{l+1,k+1}^{(q)}, \dots, d_{l+L,k+2^L-1}^{(q)}]', \quad (16)$$

$$\mathbf{a}_{L,k}^{(q)} = \mathbf{a}_{L,k}^{(q^{real})} + j\mathbf{a}_{L,k}^{(q^{img})}, q = (v_i, z_i) \quad (17)$$

$$\mathbf{a}_l^{(v_i)} = [f_l^{(i)}(1), f_l^{(i)}(2), \dots, f_l^{(i)}(N)]' \quad (18)$$

$$\mathbf{a}_l^{(z_i)} = [g_l^{(i)}(1), g_l^{(i)}(2), \dots, g_l^{(i)}(N)]' \quad (19)$$

where $\mathbf{a}_l^{(q)}$ is the feature vector of wavelet coefficients at stage l shown in Fig.5, N is a total number of element in $\mathbf{a}_l^{(q)}$, L is the number of the feature vector level, and $[\cdot]'$ means the transposition. After that, the FIR Wiener filter shown in fig.6 is applied to reduce the fluctuation of the wavelet coefficients of the barycenter and its velocity by using the following equations:

$$\hat{a}_l^{(q)}(k) = \sum_{m=0}^{M-1} w_\alpha(m)\bar{a}_l^{(q)}(k-m), q = (v_i, z_i), \quad (20)$$

where $w_\alpha(m)$ is the impulse responses of the FIR Wiener filter, M is the order of the FIR Wiener Filter. $\bar{a}_l^{(q)}(k)$, $\hat{a}_l^{(q)}(k)$ are the input and the output of the FIR Wiener filter, respectively.

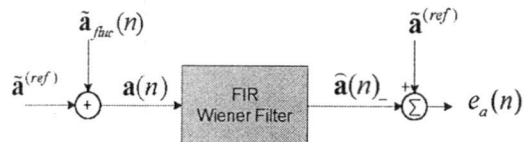


Fig. 6 FIR-Wiener filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig.7 shows that after passing the wiener filter, some fluctuation within the wavelet coefficients is reduced.

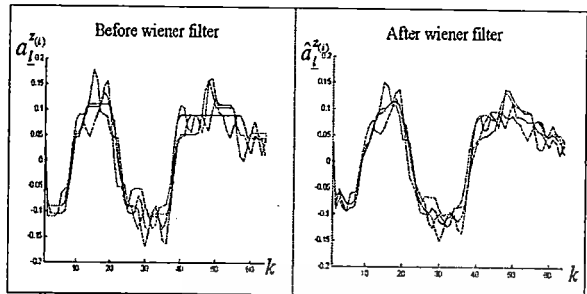


Fig. 7 Wavelets coefficients before and after wiener filter.

Let $f_l^{(i)} = a_l^{v(i)}$ and $g_l^{(i)} = a_l^{z(i)}$. We consider that a handwriting system characterizing the handwriting motion in the handwriting process is described by the dynamic features in the corresponding part of handwriting process. The system is realized by considering the wavelet coefficients f_l^i and g_l^i as the input and output of the system, respectively as can be seen in fig.8.

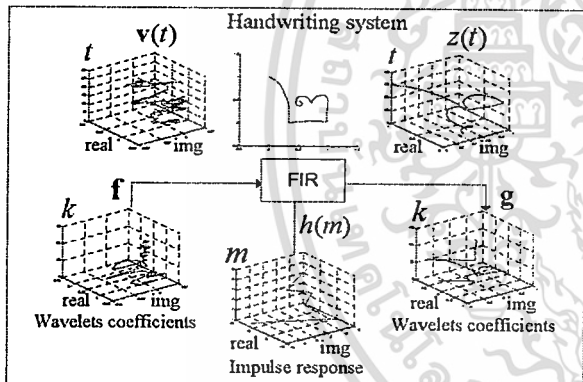


Fig. 8 FIR system representing handwriting system.

It is assumed that the system can be described by

$$\hat{g}_l^{(i)}(k; \mathbf{h}_l^{(i)}) = \sum_{m=0}^{M-1} h_l^{(i)}(m) f_l^{(i)}(k-m), \quad (21)$$

$$(k = 0, 1, 2, \dots, K_i - 1)$$

where $\mathbf{h}_l^{(i)} = [h_l^{(i)}(0), h_l^{(i)}(1), \dots, h_l^{(i)}(M-1)]'$ is the impulse response of the system, M is the order the FIR system, and $\hat{g}_l^{(i)}(k; \mathbf{h})$ is the approximation of $g_l^{(i)}(k; h)$. The impulse response can be obtained by minimizing the least-square error at M as

$$E_l^{(i)} = \sum_{k=0}^{K_i-1} |e_l^{(i)}(k)|^2 \rightarrow \min \quad (22)$$

where $e_l^{(i)}(k) = \hat{g}_l^{(i)}(k) - g_l^{(i)}(k; \mathbf{h}_l^{(i)})$.

Fig.9 shows the comparison of the impulse response obtained from same and different numerals written by

same and different writers. It can be seen from Fig.9 that the impulse responses obtained from the same numeral and the same writer are quite similar and different from those obtained from different numerals and different writers.

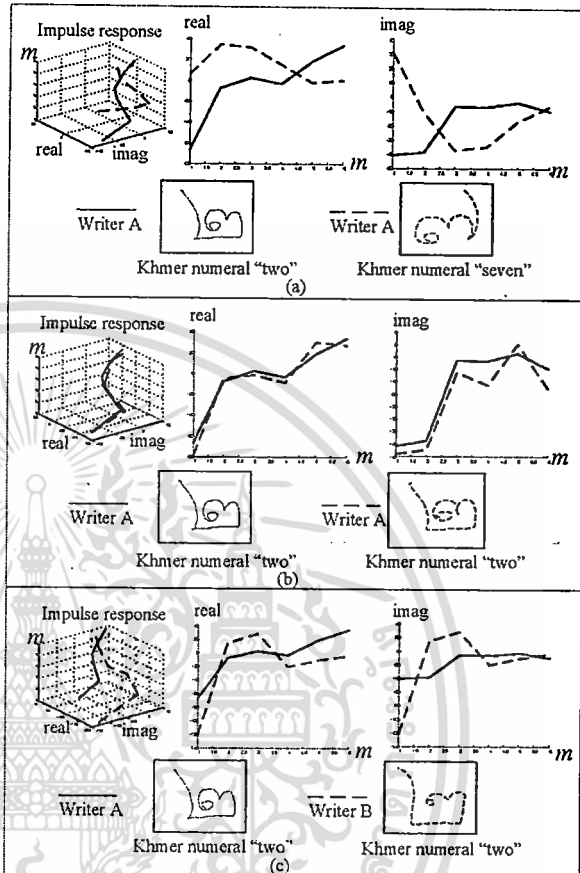


Fig. 9 (a) Impulse responses obtained from numeral "two" and "seven" written by the same writer, (b) Impulse response obtained from numeral "two" written by the same writer, (c) Impulse response obtained from numeral "two" written by different writers.

Fig.10 shows the impulse responses of the FIR system obtained from two Khmer characters. It can be seen from Fig.10 that the impulse responses of the FIR system obtained from different numerals are different. Therefore, it is considered that the impulse response can be used as the individual feature for the particular Khmer characters.

4. CHARACTER RECOGNITION

It is assumed that the reference patterns of known classes for Khmer characters are defined by $C_0, C_1, \dots, C_{N_c-1}$, respectively. Then an unknown character x is assigned to a class $C_i \in C_0, C_1, C_2, \dots, C_{N_c-1}$ if

$$S_{\min}(C_i, x) = \min S(C_l, x), (l = 0, 1, 2, \dots, N_c) \quad (23)$$

where N_c is the total number of classes, and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

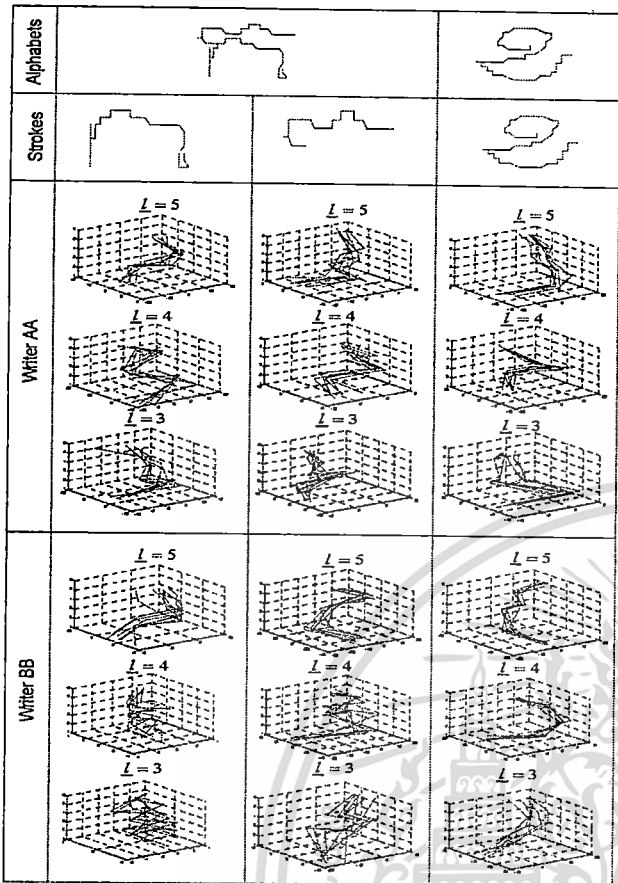


Fig. 10 Impulse responses obtained from Khmer character "kor" and numeral "khor" written by two different writers from level 3-5 of coefficients of feature vector.

$$S(C_l, x) = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^L \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{N_s} \|h_{l,n,i}^{(ref)} - h_{l,n,i}^{(x)}\|$$

$$h_{l,n,i}^{(ref)} = [h_{l,n,i}^{(ref)}(0), h_{l,n,i}^{(ref)}(1), \dots, h_{l,n,i}^{(ref)}(M-1)]$$

$$h_{l,n,i}^{(x)} = [h_{l,n,i}^{(x)}(0), h_{l,n,i}^{(x)}(1), \dots, h_{l,n,i}^{(x)}(M-1)]$$

and N is total number of reference data for each class, N_s is the number of strokes in handwriting character, $h_{l,n,i}^{(ref)}$ is an impulse response obtained from the n^{th} reference data for class C_l at the level l of the feature vector, $\|\cdot\|$ is Euclidean norm, and $S_{min}(C_l, x)$ is the minimum Euclidean distance obtained from $S(C_l, x)$.

5. EXPERIMENTS

Character recognition experiments were performed on a database consisting of two data sets. First data set consists of 1500 Khmer numerals written by 12 people in one year, and the second data set consists of 30 of 33 Khmer Alphabets written by 5 people in 8 months. The Fig.11 shows the example of Khmer character in the first and the second data set in our database. In the two experiments, 5 data were selected randomly and used as reference data for a particular character and a particular writer. Table I shows the recognition rates obtained from

the first experiment. Table II shows the recognition rates obtained from the second experiment. From Table I and Table II, the results show that the proposed method is able to recognize the character with better recognition rates in comparison with the work [5].

Writer A (0-9)	
Writer B (0-9)	
First data set	

Person AA	
Person BB	
Second data set	

Fig. 11 Example of Khmer Characters in database.

Table 1 Table of recognition rates of the first dataset

Writer	Number of training numerals (5 /numeral)	Number of numerals (15 /numeral)	Recognition rates	
			Proposed method	Method in[5]
A(0-9)	50	150	99.33	96.66
B(0-9)	50	150	100	99.33
C(0-9)	50	150	99.33	98.67
D(0-9)	50	150	98.00	90.67
E(0-9)	50	150	98.00	98.67
F(0-9)	50	150	92.66	90.66
G(0-9)	50	150	97.33	98.00
H(0-9)	50	150	99.33	95.33
I(0-9)	50	150	100	96.66
J(0-9)	50	150	100	97.33
K(0-9)	50	150	96.66	97.33
L(0-9)	50	150	100	95.33
Average			98.38	96.22

6. CONCLUSION

An on-line writer dependent character recognition method based on FIR system characterizing handwriting motion for Khmer has been proposed. In the proposed method, the barycenter determined from the center point

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2 Table of recognition rates of the second dataset

Writer (33 alphabets)	Number of Training data (5 /alphabet)	Number of alpha-bets (30 /alphabet)	Recognition rates	
			Proposed method	Method in[5].
AA	155	990	96.36	94.14
BB	155	990	95.25	79.89
CC	155	990	98.88	91.51
DD	155	990	99.79	96.66
EE	155	990	99.79	96.16
Average			97.97	91.67

- T. Matsuura, "On-line character recognition for Khmer numeral based on DP Matching of Barycenter Trajectory" *ECTI-CON2007*, May, 2007.
- [5] P. Thumwarin, S. Khem, K. Janchitrapongvej, and T. Matsuura, "On-Line Writer Dependent Character Recognition for Khmer Numeral based on FIR system characterizing Barycenter Trajectory" *ICEAST2007*, 21-23 Nov, 2007..

of the script and the two adjacent pen-point positions was used to reduce the fluctuation of pen-point movement in handwriting process. Then the handwriting motion can be described by two features, the trajectory and the velocity of the barycenter. In order to extract the time-frequency characteristic of the handwriting motion for a particular person, the trajectory and the velocity of the barycenter were expanded into wavelet series. Then the fluctuation of the obtained wavelet coefficients is reduced by passing into FIR wiener filter. Moreover, the FIR system characterizing the handwriting motion was realized by considering the approximated wavelet coefficients of the velocity and the trajectory of the barycenter from the FIR wiener filter as the input and the output of the FIR system, respectively. The obtained impulse response of the FIR system was used as the individual feature for a particular character. Finally, character can be recognized by the Euclidean distance between the impulse responses obtained from test characters and those from the characters to be recognized. The experimental results showed that the proposed method is useful for on-line writer dependent character recognition for Khmer numerals and alphabets.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank to AUN-Seed Net program for partly support in this research.

REFERENCES

- [1] R. Plamondon and Sargur N. Srihari, *On-line and Off-line handwriting recognition: A Comprehensive Survey*, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.22 no.1, pp. 63-84, July 2000.
- [2] T. Matsuura and P. Thumwarin, "On-line Thai numeral recognition" IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, pp. 445-448, December 2000.
- [3] P. Thumwarin, "On-line writer recognition for Thai based on impulse response of FIR system characterizing handwriting motion", *Doctoral Thesis, Tokai University JAPAN*, 2004.
- [4] P. Thumwarin, S. Khem, K. Janchitrapongvej, and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้