การหาข้อมูลเชิงเวลาจากภาพอักษรลายมือภาษาไทย

RECOVERY OF TEMPORAL INFORMATION FROM STATIC IMAGE OF THAI HANDWRITING

ก่อ กิตติกรณ์

KOR KITTIKORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2719-9

การหาข้อมูลเชิงเวลาจากภาพอักษรลายมือภาษาไทย

RECOVERY OF TEMPORAL INFORMATION FROM STATIC IMAGE OF THAI HANDWRITING

ก่อ กิตติกรณ์

KOR KITTIKORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2719-9

RECOVERY OF TEMPORAL INFORMATION FROM STATIC IMAGE OF THAI HANDWRITING

KOR KITTIKORN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN COMPUTER ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2006

ISBN 974-15-2719-9

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาข้อมูลเชิงเวลาจากภาพอักษรลายมือภาษาไทย
นักศึกษา	นาย ก่อ กิตติกรณ์
รหัสนักศึกษา	44061621
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. บุญธีร์ เครือตราชู

บทคัดย่อ

มีงานวิจัยจำนวนมากที่ใช้ลำดับทิศทางการเขียนตัวอักษรในการรู้จำตัวอักษร แต่ข้อมูลตัวอักษรอาจได้มาจากภาพลายมือ ซึ่งไม่มีข้อมูลลำดับการเขียน เพื่อให้การรู้จำตัวอักษรที่ใช้ข้อมูลลำดับการเขียนยังสามารถรู้จำตัวอักษรได้ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแนวทางการดึงลำดับทิศทางจากภาพลายมือเขียนภาษาไทย โดยได้พัฒนาอัลกอริธึมสำหรับการสร้างโครงร่าง ซึ่งปรับปรุงมาจาก Medial Axis Transform และนำเส้นโครงร่างมาจัดเรียงกันตามแนวการเขียนหลักของตัวอักษร พร้อมทั้งเชื่อมแนวการเขียนหลักแต่ละแนวเข้าด้วยกัน โดยพิจารณาจากข้อมูลระยะห่างและทิศทางระหว่างจุดปลายในแต่ละแนว จึงได้เป็นลำดับทิศทางการเขียนของภาพตัวอักษร ในขั้นสุดท้ายทำการตรวจสอบลักษณะการม้วนหัว เพื่อกำหนดจุดเริ่มต้นให้กับลำดับการเขียน ได้ทำการทดสอบวิธีหาลำดับการเขียนที่นำเสนอกับภาพอักษรภาษาไทยจำนวน 880 ตัว จากผู้เขียน 20 คน ได้ผลการหาลำดับถูกต้อง 78.636 เปอร์เซ็นต์

Thesis Title	Recovery of Temporal Information from Static Image of Thai handwriting
Student	Mr. Kor Kittikorn
Student ID	44061621
Degree	Master of engineering
Program	Computer engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Boontee Kruatrachue

ABSTRACT

This research concentrates on the extraction of the Temporal Information from a Thai handwritten static image. The proposed algorithm starts from skeletonization using customized Medial Axis Transform. Ordering the skeleton lines into sequence according to the stoke direction and then connect each stoke direction together by considering the distance and direction between stokes. Finally the start and end point is defined using head of Thai character detection. As a result, the temporal Information of handwritten image will be constructed as a sequence of points in skeleton from the start point to the end point. The proposed method has been tested with 880 handwritten images and can correctly retrieve handwritten sequence at 78.636 percents.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้เนื่องจากกำลังใจ จากคุณพ่อ คุณแม่ คุณปู่ คุณย่าและญาติพี่น้อง ที่คอยให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง เสมอมา อีกทั้งคำแนะนำและแนวคิด ที่เป็นเสมือนทิศทางในการดำเนินงานวิจัยจนบรรลุตามเป้าหมายของ รศ.ดร. บุญธีร์ เครือตราชู ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าขอสำนึกในพระคุณและกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ คุณพงษ์ศักดิ์ อัชชะกุลวิสุทธิ์ หุ้นส่วน และคุณเรืองไกร รังสิพล ผู้อำนวยการบริษัทฯไพร้ซวอเตอร์เฮาส์คูเปอร์สที่ให้การสนับสนุนการเรียนต่อในระดับปริญญาโทอย่างเต็มที่

ข้าพเจ้าขอกราบขอบคุณ ผู้มีพระคุณตลอดชีวิตของข้าพเจ้า คุณครูและอาจารย์ทุกท่าน ที่ประสิทธิประสาทความรู้และวิชาการ รวมทั้งคำสั่งสอนและอบรมให้ข้าพเจ้าตั้งไว้ซึ่งความมีสติอยู่ตลอดเวลา

ขอขอบคุณอาจารย์อัครเดช วัชระภูพงษ์ น้องๆ ห้องวิจัยไอแซก ที่ช่วยอำนวยความสะดวกต่างๆ นานา และขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคน ที่ได้ให้ทั้งแรงกาย แรงใจและแรงวาจา ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใดข้าพเจ้าขอน้อมรับไว้เพียงผู้เดียว

ก่อ กิตติกรณ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VII

สารบัญรูป VIII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 1

1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย 2

1.4 ขอบเขตการวิจัย 2

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา 2

1.6 รายละเอียดในแต่ละบท 3

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาลำดับทิศทางการเขียนในต่างประเทศ 4

2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาลำดับทิศทางการเขียนในภาษาไทย 9

2.2 ลักษณะการเขียนตัวอักษรภาษาไทย 9

2.2.1 นิยามของตัวอักษรในภาษาไทย 9

2.2.2 วิเคราะห์ลักษณะการเขียนลายมือภาษาไทย 13

2.3 การประยุกต์ในวิทยานิพนธ์ 15

2.3.1 ตัวอย่างการประยุกต์กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 17

2.3.2 แนวคิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ 17

บทที่ 3 รายละเอียดของแนวคิดและอัลกอริธึม 19

3.1 อัลกอริธึมการสร้างโครงร่าง 20

3.1.1 คำจำกัดความ 20

3.1.2 การประยุกต์ 22

สารบัญ (ต่อ)

3.2 อัลกอริธึมการดึงลำดับทิศทางการเขียน 25
3.2.1 คำจำกัดความ 26
3.2.2 หลักการเรียงลำดับจุดกลาง 26
3.2.3 หลักการเรียงลำดับเส้นโครงร่าง 29
3.2.4 หลักการเรียงลำดับแนวการเขียนหลักแต่ละช่วง 36
3.3 อัลกอริธึมในการตรวจสอบตำแหน่งเริ่มต้น 42
3.3.1 การตรวจสอบการเขียนหัวของตัวอักษร 43
3.3.2 การตรวจสอบตำแหน่งเริ่มต้นของตัวอักษร 52

บทที่ 4 การทดลองและการวิเคราะห์ 57
4.1 เครื่องมือที่ใช้ทำการทดลอง 57
4.2 ที่มาของข้อมูลสำหรับการทดลอง 57
4.3 การวัดผลการทดลอง 57
4.3.1 การวัดผลการทดลองหาลำดับทิศทางของอักษรลายมือ 57
4.3.2 การวัดผลการทดลองกำหนดจุดเริ่มต้นของลำดับการเขียนอักษรลายมือ 62
4.4 การทดลอง 64
4.4.1 การทดลองหาลำดับทิศทางของอักษรลายมือ 64
4.4.2 การทดลองกำหนดจุดเริ่มต้นของลำดับการเขียน 68
4.5 วิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากวัสดุที่ใช้เขียน 68
4.6 การทดสอบอัลกอริธึมกับภาพอักษรที่มีการรบกวน 70
4.7 วิเคราะห์ข้อผิดพลาดจากผลการทดลองและแนวทางการแก้ไข 73
4.7.1 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากข้อบกพร่องของอัลกอริธึม 73
4.7.2 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากลักษณะตัวอักษร 80
4.7.3 สรุปผลความผิดพลาดที่เกิดขึ้น 84
4.8 การวิเคราะห์อัลกอริธึมที่ได้นำเสนอเปรียบเทียบกับแนวคิดอื่น 88

บทที่ 5 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ 96
5.1 สรุปการวิจัย 96
5.2 แนวทางการพัฒนาต่อ 96

สารบัญ (ต่อ)

เอกสารอ้างอิง 98

ภาคผนวก ก. อักษรลายมือที่ใช้ในการทดลอง 100
ภาคผนวก ข. งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ 111
ภาคผนวก ค. ลำดับการเขียนตัวอักษรไทยตามมาตรฐานโครงสร้าง 119
ภาคผนวก ง. ผลการทดลองกับตัวอักษรอ้างอิง 151
ภาคผนวก จ. การพิจารณาจุดเริ่มต้นเชิงตำแหน่งของอักษรอ้างอิง 155
ภาคผนวก ฉ. แบบทดสอบการเขียน 158

ประวัติผู้เขียน 163

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 ผลการทดลองกับอักษรทดสอบ 67
4.2 ผลการทดลองกำหนดจุดเริ่มต้นของลำดับการเขียน 68
4.3 แสดงรายละเอียดของผลการทดลองในแต่ละตัวอักษร 85
4.4 แสดงลักษณะลำดับการเขียนที่ไม่เหมาะสม 87

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ปัญหาการลากเส้นซ้ำ การลากเส้นวน และการลากหลายเส้น 1

2.1 ตัวอย่างแสดงการนำเงื่อนไขมาประยุกต์ใช้ในลายมือในภาษาไทย 5

2.2 แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้กฎเพื่อดึงลักษณะการเขียนที่เป็นธรรมชาติ 5

2.3 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้ จะกำหนดจุดวิกฤตเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบลายมือชื่อ 6

2.4 โครงร่างตัวอักษรที่ถูกแสดงบนกราฟ 7

2.5 โครงร่างในลักษณะส่วนประกอบต่างๆ ของกราฟ 7

2.6 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัย [8] 8

2.7 แสดงผลลัพธ์ตามขั้นตอนต่างๆ สำหรับดึงลำดับการลากเส้นของลายมือในภาษาจีน 8

2.8 ตัวอย่างผลลัพธ์การแยกตัวอักษรที่ได้จากงานวิจัย 9

2.9 รูปลายมือที่ใกล้เคียงกับมาตรฐานโครงสร้าง 14

2.10 ลักษณะลายมือที่เขียนผิดไปจากมาตรฐานโครงสร้าง 14

2.11 ลักษณะลายมือที่เขียนต่อเนื่องเป็นคำ 15

2.12 ลักษณะลายมือที่ไม่เขียนหัวตัวอักษร 15

2.13 ลักษณะการเขียนที่เหลื่อมกันภายในตัวอักษร 15

2.14 แสดงเส้นปลอมที่เกิดจากกระบวนการขึ้นโครงร่างในวิจัยส่วนใหญ่ 16

2.15 ลักษณะการเกิดเส้นปลอมในตัวอักษรไทย 16

2.16 โครงร่างตัวอักษรแสดงในลักษณะส่วนประกอบต่างๆ ของกราฟ 17

2.17 แนวการเขียนหลักบนส่วนต่างๆ ของโครงสร้างอักษร ล. ลิง 18

3.1 แผนผังกระบวนการทำงานตามแนวคิดที่ได้นำเสนอ 19

3.2 โครงร่างของภาพสองมิติที่กำหนดโดยจุดศูนย์กลางของวงกลมที่รัศมีสัมผัสขอบของภาพ 21

3.3 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการทำโครงร่างของตัวอักษร จ. จาน แบบแกนกลาง การแปลงแกนกลาง และแบบแกนกลางที่จะประยุกต์ใช้ในงานวิจัย ตามลำดับ 22

3.4 แนวคิดในการสร้างโครงร่าง 22

3.5 แสดงการคำนวณจุดดำที่เรียงต่อกันในทิศ 7 23

3.6 แสดงหน้าต่าง 3x3 ที่ใช้การกำหนดตำแหน่งในทิศต่างๆ และทิศทางที่แสดงในรหัสลูกโซ่ 23

3.7 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างโครงร่าง พร้อมกับแสดงวงกลมปิดที่สามารถใส่เข้าไปภายในตัวอักษร 25

3.8 โครงร่างของตัวอักษรเขียนแบบต่างๆ 25

3.9 แสดงตำแหน่งจุดข้างเคียงของ P_i 26

สารบัญรูป (ต่อ)

3.10 แสดงลักษณะที่เป็นไปได้ทั้งหมดของจุดดำที่เป็นจุดสิ้นสุด หรือ T(P) = 1 26
3.11 แสดงการเลือกทางเดินของกฎเลือกจุดภาพที่มีจุดข้างเคียงน้อยกว่าก่อน 27
3.12 แสดงโครงสร้างข้อมูลเบื้องต้นในการประยุกต์เข้ากับแนวคิดการเรียงจุดกลาง 27
3.13 แสดงแนวเรียงจุดข้างเคียงที่ข้ามแนวการเขียนหลัก 28
3.14 แสดงลำดับการเขียนที่ถูกต้อง ภายหลังจากแยกส่วนโครงร่างที่ผิดปกติออกจากกัน 29
3.15 แสดงบริเวณแนวการเขียนหลักบนตัวอักษร 30
3.16 แสดงโครงร่างบนแนวการเขียนหลัก 30
3.17 แสดงโครงสร้างข้อมูลเบื้องต้นในการประยุกต์เข้า กับแนวคิดการเรียงจุดเริ่มต้นและจุดปลาย ในแนวการเขียนหลักแนวเดียวกัน 31
3.18 เส้นเชื่อมสีดำ แสดงการเรียงลำดับของส่วนของเส้นโครงร่างในแนวการเขียนต่างๆ 32
3.19 ตัวอย่างที่ได้จากแนวคิดในการเรียงเส้นโครงร่างตามแนวการเขียนหลักของภาพลายมือ 32
3.20 แสดงความผิดพลาดจากลักษณะที่ไม่สอดคล้องกันระหว่างค่าจุดกลางและทิศของแนวการ เขียนหลัก 33
3.21 แสดงการจัดเรียงเส้นโครงร่างโดยไม่พิจารณาเส้นที่มีขนาดเล็ก 33
3.22 การเรียงลำดับเส้นโครงร่างภายในแนวการเขียนหลักที่ไม่ต่อเนื่อง 34
3.23 แสดงผลลำดับการเขียนที่ถูกต้อง โดยการปรับปรุงตามแนวทางแก้ไข 34
3.24 การเรียงลำดับเส้นโครงร่างภายในแนวการเขียนหลักที่ต่อเนื่องผิดปกติ 35
3.25 แสดงขนาดวงกลมของจุดกลางในตัวอักษรที่มีแนวการเขียนหลักที่ต่อเนื่องผิดปกติ 36
3.26 แสดงจุดสิ้นสุดของแนวการเขียนหลักแต่ละช่วงที่อยู่ในบริเวณเดียวกัน 37
3.28 ผลลัพธ์ที่ได้จากการเรียงลำดับแนวการเขียนหลักแนวต่างๆ เข้าด้วยกัน 38
3.29 ลำดับแนวการเขียนหลักแนวต่างๆ โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทิศทาง 38
3.30 ขั้นตอนในการพิจารณาเรียงจุดต้นจุดปลายที่เหลืออยู่บนแนวการเขียนหลัก 39
3.31 ขั้นตอนในการพิจารณาเรียงจุดต้นจุดปลายที่เหลืออยู่บนแนวการเขียนหลัก 40
3.32 แผนผังการทำงานของการดึงลำดับทิศทางการเขียน 41
3.33 (ต่อ) แผนผังการทำงานของการดึงลำดับทิศทางการเขียน 42
3.34 แผนผังการทำงานในการตรวจสอบตำแหน่งเริ่มต้นและหัวของตัวอักษร 43
3.35 หมายเลขอ้างอิงตามรหัสลูกโซ่ 44
3.36 การเปลี่ยนแปลงแนวการเขียนหลักที่เป็นไปตามลำดับทิศทางการม้วนหัวตัวอักษร 45
3.37 แผนผังพิจารณาการเปลี่ยนแปลงแนวการเขียนหลักที่แสดงการม้วนหัวทวนเข็มนาฬิกา 46

สารบัญรูป (ต่อ)

3.38 แผนผังพิจารณาการเปลี่ยนแปลงแนวการเขียนหลักที่แสดงการม้วนหัวตามเข็มนาฬิกา 47
3.39 แนวการเขียนหลักของตัวอักษร พ. พาน ที่แสดงถึงการม้วนหัว 48
3.40 แนวการเขียนหลักของตัวอักษร ช. ช้าง ที่แสดงถึงการม้วนหัว 49
3.41 แนวการเขียนหลักของตัวอักษร ฆ. ระฆัง ที่แสดงถึงการม้วนหัว 50
3.42 การเขียนเส้นโค้งของตัวอักษร ซึ่งอาจตรวจสอบเป็นลักษณะการม้วนหัว 51
3.43 ตัวอักษรที่ไม่มีการม้วนหัวตัวอักษร 51
3.44 รูปลายมือที่ไม่เขียนหัวตัวอักษร 51
3.45 รูปลายมือที่ใช้การเขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัวตัวอักษร 52
3.46 รูปอักษรลายมือที่ตรวจสอบพบลักษณะการม้วนหัวมากกว่าหนึ่งตำแหน่ง 52
3.47 ขอบเขตพื้นที่ของตำแหน่งบนตัวอักษร สำหรับกำหนดจุดเริ่มต้นของลำดับการเขียน 53
3.48 การกำหนดจุดเริ่มต้นเชิงตำแหน่ง 54
3.49 ข้อบกพร่องของการกำหนดจุดเริ่มต้นโดยพิจารณาเชิงตำแหน่ง 55
3.50 จุดสิ้นสุดของลำดับการเขียนมาอยู่ในพื้นที่การพิจารณาเชิงตำแหน่งเดียวกัน 55
3.51 ลักษณะการกำหนดจุดเริ่มต้นที่ผิดพลาดจากการพิจารณาเชิงตำแหน่ง 56
4.1 ลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ถูกต้อง ตัวอย่างที่ 1 58
4.2 ลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ถูกต้อง ตัวอย่างที่ 2 58
4.3 ลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ไม่เหมาะสม ตัวอย่างที่ 1 59
4.4 ลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ไม่เหมาะสม ตัวอย่างที่ 2 59
4.5 ลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ไม่เหมาะสม ตัวอย่างที่ 3 60
4.6 ลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ไม่ถูกต้อง ตัวอย่างที่ 1 60
4.7 ลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ไม่ถูกต้อง ตัวอย่างที่ 2 61
4.8 ลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ไม่ถูกต้อง ตัวอย่างที่ 3 61
4.9 ลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ไม่ถูกต้อง ตัวอย่างที่ 4 62
4.10 รูปแบบของการกำหนดจุดเริ่มต้นที่ถูกต้อง 63
4.11 รูปแบบของการกำหนดจุดเริ่มต้นผิดพลาดเนื่องจากอัลกอริธึม 63
4.12 รูปแบบของการกำหนดจุดเริ่มต้นผิดพลาดลำดับทิศทางการเขียนอักษรลายมือ 64
4.13 รูปแบบของข้อยกเว้นการกำหนดจุดเริ่มต้น 64
4.14 รูปแบบที่ถูกต้องของลำดับการเขียนจากภาพลายมือ 65
4.15 ตัวอย่างรูปแบบที่ไม่เหมาะสมของลำดับการเขียนจากภาพลายมือ 66

สารบัญรูป (ต่อ)

4.16 ตัวอย่างรูปแบบที่ไม่ถูกต้องของลำดับการเขียนจากภาพลายมือ 67
4.17 แสดงรูปลายมือที่เขียนโดยปากกาลูกลื่นที่มีหัวขนาดเล็ก 69
4.18 แสดงรูปลายมือที่เขียนโดยดินสอไม้ที่มีหัวขนาดใหญ่ 69
4.19 ภาพลายมือที่เขียนด้วยวัสดุที่แตกต่างกัน 70
4.20 ลักษณะการรบกวนที่เกิดจากความเข้มในชุดอักษรที่ไม่สม่ำเสมอกัน 70
4.21 ลักษณะการรบกวนที่เกิดขึ้น เนื่องจากความเข้มของชุดภาพลายมือที่ไม่สม่ำเสมอ 70
4.22 ผลลัพธ์ของลำดับทิศทางบนภาพลายมือที่มีการรบกวน 70
4.23 ลำดับทิศทางการเขียนของภาพอักษรที่มีการรบกวนภายใน 70
4.24 ผลของลำดับทิศทางการเขียนหลังจากการประยุกต์ใช้การกรองข้อมูลภาพแบบมัธยฐาน 73
4.25 แสดงจุดโครงร่างที่ได้จากอัลกอริธึมแบบปกติ (ซ้าย) และแบบที่ได้กำหนดให้มีความยืดหยุ่นของการพิจารณาระยะไปยังขอบในทิศทางที่เหลือ (ขวา) 73
4.26 ลำดับการเขียนตัว จ. จาน ที่ผิดพลาด เนื่องจากข้อบกพร่องของอัลกอริธึมสร้างโครงร่าง 74
4.27 การเรียงเส้นโครงร่างที่ผิดพลาด โดยไม่ตรวจสอบการเรียงจุดกลางเป็นเส้นโครงร่างที่ผิดปกติ 75
4.28 การเรียงเส้นโครงร่างที่ถูกต้อง เมื่อมีการตรวจสอบและแก้ไขการเรียงจุดกลางเป็นเส้นโครงร่างที่ผิดปกติ 75
4.29 การเรียงเส้นโครงร่างที่ผิดพลาด ทำให้เกิดลำดับการเขียนที่ไม่เป็นธรรมชาติ 76
4.30 ลำดับการเขียนโดยมีตรวจสอบและแก้ไขการเรียงจุดกลางเป็นเส้นโครงร่างที่ผิดปกติ 76
4.31 แสดงแนวการเขียนหลักที่ต่อเนื่องผิดปกติ จากลักษณะการเขียนตัวอักษรที่ชิดกัน 77
4.32 ตัวอักษร ซ. โซ่ มีโครงร่างในการเขียนตัวอักษรที่ชิดกัน 78
4.33 การเรียงลำดับแนวการเขียนหลักแต่ละช่วงที่ผิดพลาดเนื่องจากการเขียนซ้อนทับกัน 78
4.34 การเรียงลำดับแนวการเขียนหลักโดยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทิศทางที่ผิดพลาด 79
4.35 การเหลื่อมภายในตัวอักษรส่งผลให้ลำดับการลากเส้นบริเวณหัวของอักษร ด เด็ก หายไป 80
4.36 การเหลื่อมของอักษร ฒ. ผู้เฒ่า ทำให้การเรียงเส้นโครงร่างผิดเพี้ยนไป 80
4.37 การลากเส้นย้อนทับของตัว ท. ทหาร ทำให้ลำดับการเขียนผิดพลาด 81
4.38 การแยกส่วนประกอบที่เขียนซ้อนทับกัน โดยการพิจารณาความเข้มที่ภาพตั้งต้น 81
4.39 ลักษณะการเหลื่อมที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการเรียงเส้นโครงร่างภายในแนวการเขียนหลัก 82
4.40 ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการรบกวนแบบ Salt and Pepper ภายในภาพลายมือ 82
4.41 ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการรบกวนบริเวณขอบภาพ 83

สารบัญรูป (ต่อ)

4.42 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากตัวอักษรที่มีความลาดเอียง 83
4.43 ตัวอย่างผลที่ได้จากการปรับความเอียงของภาพตัวอักษร 84
4.44 ลำดับทิศทางการเขียนของตัวอักษร ค. ควาย จากการประยุกต์เงื่อนไขที่ต่างกัน 88
4.45 ลำดับทิศทางการเขียนของตัวอักษร บ. ใบไม้ จากการประยุกต์เงื่อนไขที่ต่างกัน 89
4.46 แสดงลำดับการเขียนบริเวณที่มีการลากเส้นย้อนรอยเดิม 89
4.47 เงื่อนไขในการกำหนดจุดเริ่มต้นที่แตกต่างกันในแต่ละภาษา 90
4.48 ลำดับทิศทางการเขียนของตัวอักษร ร. เรือ จากการประยุกต์เงื่อนไขที่ต่างกัน 91
4.49 การกำหนดจุดตั้งต้นให้กับตัวอักษรที่มีการเขียนเป็นวงปิด 91
4.50 ลักษณะเส้นโครงร่างที่ได้ของตัวอักษร ช. ช้าง 92
4.51 เปรียบเทียบลำดับการเขียนของตัว ช. ช้าง 92
4.52 เปรียบเทียบลำดับการเขียนของตัว ฆ. ฆวด 93
4.53 ลำดับการเขียนของตัวอักษรที่แตกต่างกัน 94
4.54 ลำดับการเขียนที่ผิดพลาดอันเนื่องมาจากการซ้อนทับกันของตัวอักษร 95

บทที่ 1
บทนำ

ลำดับการเขียนตัวอักษรลายมือ เป็นคุณลักษณะสำคัญที่ถูกใช้ในการเพิ่มความแม่นยำให้กับระบบรู้จำตัวอักษรลายมือเขียน ดังจะเห็นได้จากการพัฒนาระบบรู้จำแบบผสมที่พยายามดึงคุณลักษณะเด่นจำเพาะของข้อมูลทั้งแบบออนไลน์และออฟไลน์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแนวคิดและกระบวนวิธี ในการดึงข้อมูลเชิงลำดับเวลาจากภาพอักษรลายมือเขียนภาษาไทย

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การดึงคุณลักษณะเด่นเป็นกระบวนการสำคัญของระบบรู้จำตัวอักษรลายมือเขียน โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณลักษณะเชิงตำแหน่งและเวลา ที่บ่งบอกถึงลำดับและทิศทางของการเขียน ซึ่งช่วยแก้ปัญหาความกำกวมของลายมือในประเภทต่างๆ เช่น การลากเส้นซ้ำ (Retraced Stoke) การลากเส้นวน (Loop) การลากหลายเส้น (Multiple Stoke) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งเป็นประเด็นปัญหาในงานวิจัยเกี่ยวกับระบบรู้จำแบบออฟไลน์อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และเป็นที่มาของงานวิจัยที่พยายามดึงข้อมูลเชิงลำดับเวลาให้กับอินพุตรูปภาพลายมือ ([1], [3], [5], [6], [8], [10]) โดยแต่ละงานวิจัยได้นำเสนอรูปแบบที่สอดคล้องกับโครงสร้าง ลักษณะและธรรมชาติของการเขียนในแต่ละภาษา เช่น ตัวอักษรภาษาจีน [10] มีการใช้โครงสร้างการลากเส้น (Stoke) เป็นลักษณะเด่นในการดึงข้อมูลเชิงลำดับการเขียน ซึ่งได้ผลดีกว่าการใช้คุณลักษณะเชิงตำแหน่งแบบต่างๆ ด้วยเหตุผลอันเนื่องมาจากโครงสร้างของภาษาจีนประกอบไปด้วยเส้นลากสลับกันไปมา (理, 中) และในอักษรภาษาอังกฤษ นำเสนอรูปแบบอัลกอริธึมที่สามารถตรวจสอบลักษณะของการลากเส้นซ้ำ (เช่น B, n) การลากเส้นวนชนิดต่างๆ (เช่น α) เป็นต้น สำหรับตัวอักษรภาษาไทยมีโครงสร้างแตกต่างจากภาษาอื่นๆ (จีนและอังกฤษ) ค่อนข้างมากและยังไม่มีงานวิจัยในลักษณะดังกล่าว จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนางานวิจัยนี้

รูปที่ 1.1 ปัญหาการลากเส้นซ้ำ การลากเส้นวน และการลากหลายเส้น

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เสนอแนวคิดใหม่ในการหาลำดับทิศทางการเขียนอักษรลายมือในภาษาไทย
2. พัฒนาโปรแกรมประยุกต์เพื่อทดลองและพิสูจน์แนวคิดที่ได้นำเสนอ

3. วิเคราะห์ข้อบกพร่องของอัลกอริธึมและเสนอแนวทางการปรับปรุงแก้ไข

1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องส่วนใหญ่ นำเสนอแนวคิดที่สอดคล้องหรือสามารถแก้ไขปัญหาตามลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันไปในแต่ละภาษา สำหรับงานวิจัยนี้ ได้พัฒนาแนวคิดในการหาลำดับทิศของภาพลายมือขึ้นมาใหม่ และจากการพิจารณาโครงสร้างอักษรภาษาไทยพบว่ามีความแตกต่างจากภาษาอื่นๆ อย่างชัดเจน และสามารถแบ่งออกเป็นส่วนประกอบต่างๆ ได้ จึงเป็นที่มาของการพัฒนาอัลกอริธึมในการเรียงลำดับการเขียนไปตามส่วนประกอบของตัวอักษร โดยใช้แนวการเขียนหลักเป็นเงื่อนไขในการแยกส่วนประกอบต่างๆ ออกจากกัน นอกจากนี้ยังได้นำเสนออัลกอริธึมในการสร้างโครงร่างซึ่งปรับปรุงเพิ่มเติมจาก MAT (Medial Axis Transform) โดยการพิจารณาจุดศูนย์กลางของวงกลมปิดที่สามารถบรรจุลงในภาพลายมือพร้อมกับมีส่วนสัมผัสขอบภาพลายมือในทิศตรงกันข้าม นำมาเรียงเป็นเส้นโครงร่างหรือเส้นของจุดแกนกลาง แล้วจึงนำเส้นโครงร่างมาจัดลำดับตามแนวการเขียนหลักของตัวอักษร และนำแนวการเขียนช่วงต่างๆ มาเชื่อมกัน หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อกำหนดการม้วนหัวหรือตำแหน่งเริ่มต้นของลำดับการเขียนตัวอักษรดังกล่าวเป็นขั้นตอนสุดท้าย

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการพัฒนาแนวคิดในการดึงข้อมูลลำดับทิศทางการเขียนของตัวอักษรลายมือที่เป็นอักษรโดด เฉพาะตัวพยัญชนะในภาษาไทยเท่านั้น และวิเคราะห์ถึงข้อผิดพลาดของอัลกอริธึมต่อลักษณะตัวอักษรแบบต่างๆ

การรวบรวมข้อมูลเพื่อการทดลองทำโดยใช้แบบทดสอบการเขียน นำมาผ่านกระบวนการปรับภาพให้เหมาะสมและลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาลำดับทิศทางการเขียนอักษรลายมือในภาษาอื่นๆ
2. ศึกษาลักษณะโครงสร้างการเขียนตัวอักษรภาษาไทย
3. เก็บรวมรวบข้อมูลภาพลายมือ
4. พัฒนาอัลกอริธึมในขั้นตอนต่างๆ ร่วมกับการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ เพื่อใช้ในการพิสูจน์แนวคิดแต่ละขั้นตอน
5. ทำการทดลอง วิเคราะห์ผลที่ได้และนำเสนอแนวทางแก้ไขข้อผิดพลาด
6. สรุปผลงานวิจัยและแนวทางการพัฒนาต่อในอนาคต พร้อมจัดทำเอกสารประกอบวิทยานิพนธ์

1.6 รายละเอียดในแต่ละบท

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 5 บท ซึ่งประกอบด้วยเนื้อหา ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา จุดประสงค์ของการศึกษา ขอบของเขตของงานวิจัย ขั้นตอนของการศึกษา และรายละเอียดของแต่ละบท

บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและลักษณะโครงสร้างตัวอักษรภาษาไทย

บทที่ 3 กล่าวถึงอัลกอริธึมของกระบวนการต่างๆ ในรายละเอียด

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองและการวิเคราะห์

บทที่ 5 กล่าวถึงผลสรุปงานวิจัยและแนวทางการพัฒนาต่อ

บทที่ 2
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้ กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องประกอบกับแนวคิดและทฤษฎีในแต่ละงานวิจัย เพื่อให้เห็นถึงข้อแตกต่างและนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาลำดับทิศทางการเขียนในต่างประเทศ

2.1.1.1 Recovery of Temporal Information from Static Images of Handwriting [1]

งานวิจัยนี้ เป็นความพยายามในช่วงเริ่มแรกของการรวมรวบข้อมูลเชิงลำดับเวลาขึ้นมาจากรูปภาพลายมือภาษาอังกฤษ โดยแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับระบบรู้จำลายมือ ประกอบด้วย

- ตำแหน่งที่แม่นยำของการลากเส้นในฟังก์ชันของเวลา (รวมถึงการลากเส้นที่ซ้อนทับกัน)
- ทิศทางของการลากเส้นในฟังก์ชันของเวลา
- ลักษณะที่ชัดเจนของการลากเส้นทั้งหมด เช่น การลากขึ้น ลากลง เป็นต้น
- ความสัมพันธ์ของเวลาระหว่างเส้นที่ลากแต่ละครั้ง

ในบางกรณี อาจรวมถึง แรงกด ความเร็ว และอัตราเร่งของการลากเส้นในเชิงของตำแหน่งและเวลา นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงตัวแปรที่สำคัญบนข้อมูลแบบออฟไลน์ ซึ่งช่วยในการดึงข้อมูลเชิงลำดับเวลา ได้แก่

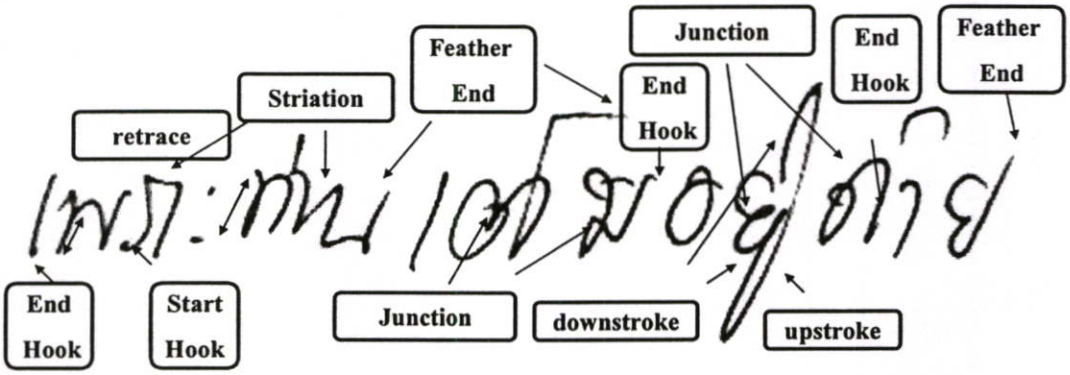
- การเปลี่ยนแปลงความเข้มของเส้น
- การเปลี่ยนแปลงความกว้างของการลากเส้น
- ความแตกต่างของเส้นที่จุดเริ่มและจุดสิ้นสุด
- ลักษณะเด่นที่บ่งบอกถึงอุปกรณ์การเขียนที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้ ยังได้มีการสรุปถึงปัญหาที่มีความกำกวมอีกหลายๆ แบบที่ต้องหาแนวทางแก้ไข เช่น การลากเส้นซ้ำ (Retraced Stoke) การลากเส้นวน (Loop) การลากหลายเส้น (Multiple Stoke) เป็นต้น โดยมีสาเหตุจากการที่ข้อมูลรายละเอียดถูกลดทอน หรือหายไปในขั้นตอนการทำโครงร่าง ทั้งนี้ สามารถแสดงคุณลักษณะสำคัญเชิงลำดับเวลาการเขียนออกมาในเงื่อนไขแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

เงื่อนไขทั่วไป เป็นเงื่อนไขตามสมมติฐานทั่วไปของการเขียน ได้แก่ ตำแหน่งสัมพัทธ์ (Relative positive) แรงกระทำและความต่อเนื่อง

เงื่อนไขในบางบริเวณ เป็นเงื่อนไขในบริเวณการลากเส้นที่พิจารณา ซึ่งบ่งชี้ถึงลักษณะที่สอดคล้องกันในแต่ละบริเวณการเขียน เช่น การลากเส้นวนแบบตามเข็มหรือทวนเข็มนาฬิกา การลากขึ้นหรือลากลง เป็นต้น และคุณลักษณะของการลากเส้นแต่ละเส้น เช่น ความกว้างของเส้น เพื่อแสดงลักษณะของการลากเส้นซ้ำ

เงื่อนไขภายในเส้นที่ลาก เป็นเงื่อนไขที่แสดงถึงรายละเอียดย่อยภายในเส้นที่ลาก เช่น ตัวแปรความเข้มของหมึก สามารถใช้ระบุจุดสิ้นสุด หรือจุดที่เส้นตัดกันได้ เป็นต้น



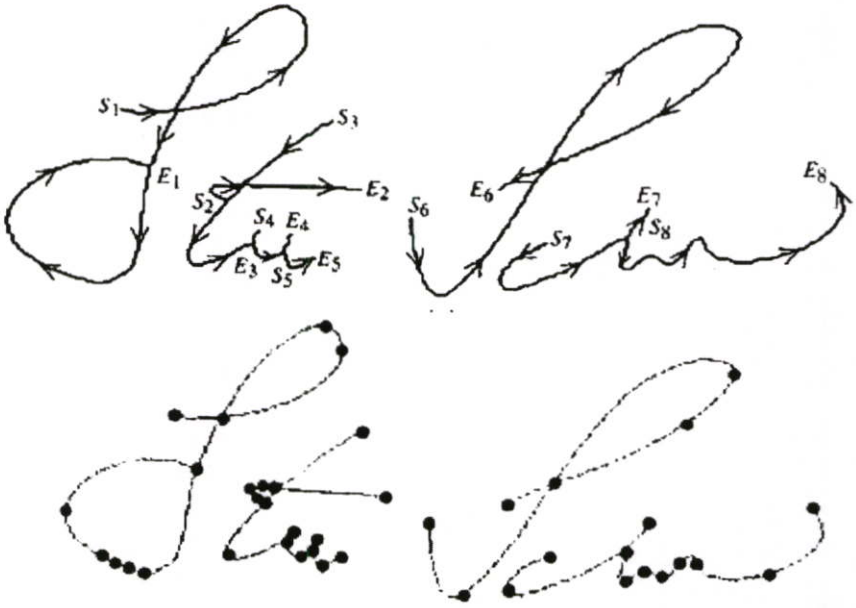
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างแสดงการนำเงื่อนไขมาประยุกต์ใช้ในลายมือในภาษาไทย

2.1.1.2 Offline Tracing and Representation of Signatures [3]

งานวิจัยนี้ เสนอแนวทางการรู้จำและตรวจสอบลายมือชื่อ ที่มีรูปแบบของปัญหาเกี่ยวกับลักษณะการเขียนที่ผิดจากโครงสร้างตัวอักษรทั่วไป และมีการเขียนต่อเนื่องได้หลายทิศทาง โดยใช้วิธีการค้นหาแบบศึกษาสำนึก (Heuristic search) ซึ่งกำหนดกฎการเลือกเส้นทางไว้หลายๆ รูปแบบตามธรรมชาติและลักษณะการเขียนลายมือ และพัฒนาต่อยอดมาจากงานวิจัย [15] เช่น กฎภายในเส้นลาก บน-ล่าง-ซ้าย-ขวา จากรูปที่ 2.2 ลำดับการเขียนจาก E1 ไปยัง E2 เป็นลำดับที่ผิดไปจากธรรมชาติของการเขียน จึงใช้กฎดังกล่าวเป็นเงื่อนไขในการเปลี่ยนลำดับการลากเส้นให้ถูกต้อง

รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้กฎเพื่อดึงลักษณะการเขียนที่เป็นธรรมชาติ

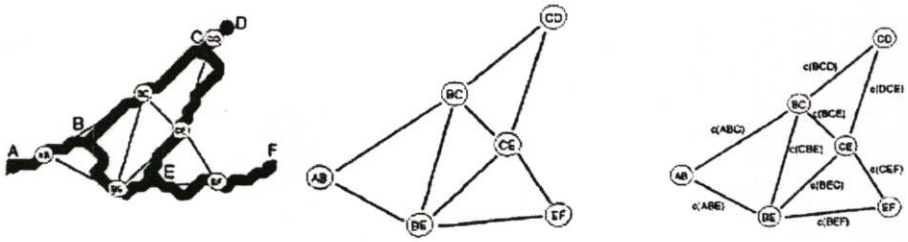
นอกจากนั้น งานวิจัยนี้ได้กำหนดนิยามตำแหน่งสำหรับใช้เป็นจุดวิกฤต เพื่อเปรียบเทียบและตรวจสอบภาพลายมือชื่อ เช่น จุดสิ้นสุด จุดตัด และจุดเชื่อม เป็นตำแหน่งจุดวิกฤตพื้นฐานบนลำดับการเขียนของลายมือ เป็นต้น



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้ จะกำหนดจุดวิกฤตเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบลายมือชื่อ

2.1.1.3 Recovering Writing Traces in Off-Line Handwriting Recognition: Using a Global Optimization Technique [5]

งานวิจัยนี้ นำเสนอแนวทางการดึงลำดับการเขียน โดยแสดงให้อยู่ในรูปแบบของโนดและเส้นขอบบนกราฟ มีจุดประสงค์คือ เพื่อนำข้อมูลเชิงลำดับเวลาที่ได้ไปประมวลผลต่อโดยใช้แบบจำลองฮิตเดนมาร์คอฟ (Hidden Markov Model: HMM) ซึ่งมีแนวความคิดโดยสรุป คือ หลังจากที่ได้โครงร่างตามแนวคิดในงานวิจัย [11] [12] แล้ว จึงนำมากำหนดเป็นส่วนประกอบต่างๆ บนทฤษฎีกราฟ โดยตั้งสมมติฐานว่า เส้นทางของโนดแต่ละโนดสมดุลกันเท่ากับค่า C และกำหนดจุดต้นและจุดปลายให้ หลังจากนั้นหาเส้นทางเดินของแฮมิลโทเนียน (Hamiltonian Path) ที่มีระยะของเส้นน้อยที่สุด (ค่า C น้อยที่สุด) บนกราฟดังกล่าว ซึ่งจะขัดแย้งกับความเป็นจริงที่ว่า การเขียนของมนุษย์มักจะมีการลากเส้นซ้ำรอยเดิมมากกว่าหนึ่งครั้ง จึงได้เปลี่ยนให้ใกล้เคียงกับลักษณะการเขียนของมนุษย์มากที่สุด คือให้หาเส้นทางที่สั้นที่สุดของทางเดินแฮมิลโทเนียน ที่ต้องผ่านทุกโนดอย่างน้อยหนึ่งครั้ง โดยใช้อัลกอริธึมของไดค์สตรา (Dijkstra's algorithm) หลังจากนั้นปรับปรุงเพื่อให้หาเส้นทางเดินแบบมีจุดต้นและจุดปลายได้แทนที่จะเป็นแบบวงรอบจุดใดจุดหนึ่ง เพื่อให้ได้เส้นทางการเขียนบนกราฟดังกล่าว

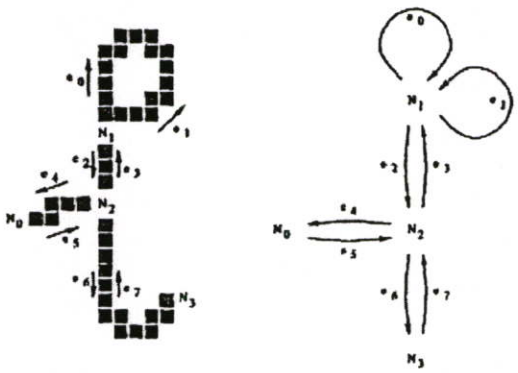


รูปที่ 2.4 โครงร่างตัวอักษรที่ถูกแสดงบนกราฟ

จุดเด่นของแนวทางนี้ คือ สามารถดึงเส้นทางการเขียนแบบซ้ำทางเดิมกันได้ ส่วนจุดด้อยคือความซับซ้อนในการคำนวณค่อนข้างสูงซึ่งเป็นปัญหาแบบเอ็นพี (NP-Problem) และควรเพิ่มเติมตัวแปรน้ำหนักระหว่างโนด โดยคำนวณจากมุมที่แตกต่างกันบนแต่ละโนด ซึ่งในจุดนี้ต้องเปลี่ยนอัลกอริธึมในการทำโครงร่าง

2.1.1.4 Recovery of temporal information of cursively handwritten words for on-line recognition [6]

งานวิจัยนี้ ได้นำเสนออัลกอริธึมในการดึงข้อมูลเชิงเวลาของลายมือที่เขียนต่อเนื่องกันเป็นคำ หลังจากผ่านกระบวนการก่อนหน้าแล้ว โครงร่างที่ได้จะถูกแสดงในลักษณะส่วนประกอบต่างๆ ของกราฟดังรูป



รูปที่ 2.5 โครงร่างในลักษณะส่วนประกอบต่างๆ ของกราฟ

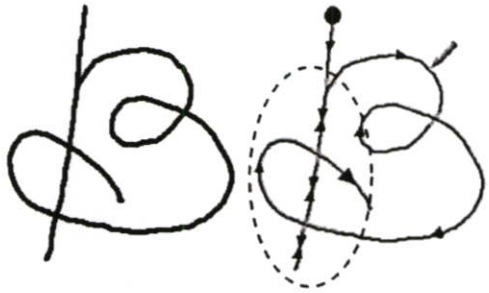
ต่อจากนั้น จึงกำหนดเกณฑ์ความน่าจะเป็น หรือโอกาสของการเกิดรูปแบบการเขียนต่างๆ กันของทั้งกลุ่มคำ หรือแต่ละตัวอักษร ได้แก่

- ทิศทางของการเขียน
- เส้นทางที่สั้นที่สุด
- หลักเกณฑ์ของความต่อเนื่อง
- ทิศทางของการม้วนหัวหรือขมวด

ซึ่งถูกกำหนดเป็นฟังก์ชัน ที่จะมีค่าน้อย ถ้าการเลือกทางเดินเป็นธรรมชาติ และมีค่ามาก หากเป็นลักษณะทางเดินที่ผิดจากปกติ หลังจากนั้นจึงใช้การค้นหาบนกราฟแบบเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดก่อน

2.1.1.5 Recovery of Drawing Order from Single-Stroke Handwriting Images [8]

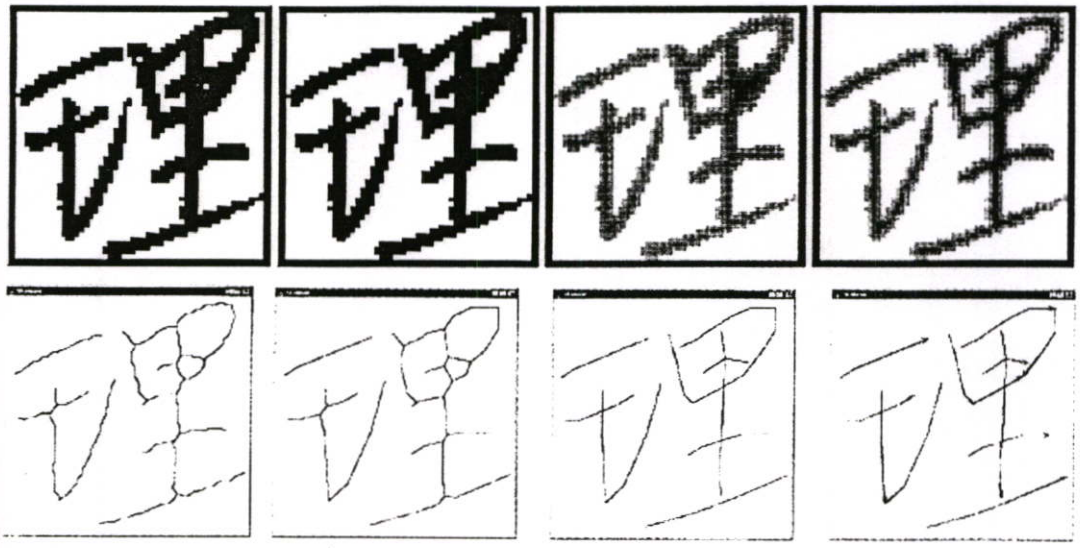
งานวิจัยนี้มีลักษณะคล้ายกับ [5] แต่ใช้วิธีการหาเส้นทางเดินของออยเลอร์เลียนแทน ซึ่งมีข้อดีกว่าแบบทางเดินของแฮมิลโทเนียน คือ ไม่จำเป็นต้องมีการคำนวณเกี่ยวกับมุม ส่วนข้อเสียคือ ไม่สามารถหาเส้นทางที่มีการซ้อนทับแบบสมบูรณ์ได้ (PD – line) และมีการคำนวณที่ซับซ้อน



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัย [8]

2.1.1.6 Analysis of Stroke Structures of Handwritten Chinese Characters [10]

งานวิจัยในภาษาจีนที่พิจารณาโครงสร้างการลากเส้น (Stoke) เป็นลักษณะเด่นแทนการใช้ลักษณะเชิงตำแหน่ง ด้วยเหตุผลอันเนื่องมาจากโครงสร้างของตัวอักษรภาษาจีนประกอบไปด้วยเส้นลากตัดไปตัดมา นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการสร้างโครงร่างแบบใหม่โดยปรับปรุงมาจากการแปลงระยะทางแบบยูคลิด (Euclidean distance transformation) เพื่อช่วยแก้ไขและซ่อมแซมความผิดพลาดของรูปลายมือในภาษาจีนได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งมีการเก็บรายละเอียดข้อมูลบริเวณขอบของตัวอักษรไว้อย่างครบถ้วน เพื่อนำมาใช้ในการกำหนดลำดับการลากเส้นต่อไป



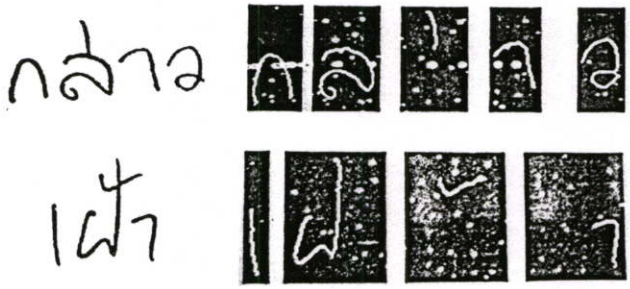
รูปที่ 2.7 แสดงผลลัพธ์ตามขั้นตอนต่างๆ สำหรับดึงลำดับการลากเส้นของลายมือในภาษาจีน

กระบวนการที่สำคัญในงานวิจัยนี้คือ การแก้ไขโครงร่างที่ได้ให้อยู่ในรูปของเส้นตรง เพื่อแสดงถึงการลากเส้นที่ถูกต้อง แล้วจึงใช้กฎเกี่ยวกับทิศทางการเขียนในอักษรจีน กำหนดลำดับและทิศทางการลากเส้น

2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาลำดับทิศทางการเขียนในภาษาไทย

2.1.2.1 การแยกตัวอักษรลายมือเขียนภาษาไทยแบบออฟไลน์โดยใช้การแกะรอยเส้น [17]

งานวิจัยเกี่ยวกับลายมือภาษาไทยที่มีลักษณะใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้มากที่สุด ซึ่งนำเสนอแนวคิดในการแยกตัวอักษรโดยใช้การแกะรอยเส้นตัวอักษร ที่ได้จากกระบวนการขึ้นโครงร่างแบบทวูพาส (General Two-pass Thinning Algorithm) [13] [14] เส้นที่ได้นำมาแกะรอย โดยกำหนดกฎเลือกทางเดินของจุดในกรณีต่างๆ ไว้ 6 รูปแบบ เช่น กฎการแกะรอยเส้นทางที่มีความต่อเนื่องของเส้นมากที่สุด หรือกฎที่ใช้สำหรับตัวอักษรที่ไม่มีจุดเริ่มและจุดจบ เป็นต้น



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างผลลัพธ์การแยกตัวอักษรที่ได้จากงานวิจัย

2.2 ลักษณะการเขียนตัวอักษรภาษาไทย

จากการศึกษามาตรฐานโครงสร้างตัวอักษรไทย [18] ซึ่งได้กำหนดนิยามและลักษณะการเขียนตัวอักษรไทยทั้งหมดไว้ สามารถแบ่งออกได้เป็น

ตัวแบบหลัก เป็นรูปแบบที่ถูกต้องสมบูรณ์ตามหลักเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้

ตัวแบบเลือก เป็นรูปแบบที่ต่างกับตัวแบบหลักบ้าง แต่ก็เป็นแบบที่ใช้กันทั่วไป และถือว่าเป็นแบบที่ถูกต้องเช่นเดียวกัน

ตัวแบบแปร เป็นรูปแบบที่ใช้กันอยู่ แต่ไม่อาจจัดเข้าหลักเกณฑ์ตามที่กำหนดไว้ใน [18] ได้ เช่น ตัวประดิษฐ์ ตัวหวัด ตัวหวัดแกมบรรจง

2.2.1 นิยามของตัวอักษรในภาษาไทย

การเขียนตัวอักษร ให้เขียนลำตัวหลักก่อนแล้วจึงเขียนเชิง หรือหางหรือไส้

การเขียนตัวอักษรทุกตัว ให้เริ่มเขียนที่ต้นตัวอักษร แล้วลากเส้นติดต่อกันไปจนจบที่ปลายตัวอักษร ซึ่งมีการลากเส้นโดยไม่ยกมือหนึ่งครั้ง (Single stoke) ตัวอักษรบางตัวที่มีเส้นไม่ติดต่อกัน ให้เขียนโดยมีต้นตัวอักษรและปลายตัวอักษรในส่วนลำตัวหลักก่อน แล้วจึงเขียนต้นตัวอักษรและปลายตัวอักษรในส่วนของเชิง หรือหาง หรือไส้

เส้นดิ่ง คือ เส้นตรงที่ลากจากทางด้านบนลงมาด้านล่างของตัวอักษรตามแนวดิ่ง ให้มีลักษณะตั้งฉากกับแนวเส้นตรงที่อยู่ในแนวระดับ ดังแบบ

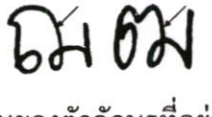
เส้นตั้ง คือ เส้นตรงที่ลากจากทางด้านล่างขึ้นไปทางด้านบนของตัวอักษรตามแนวดิ่ง ให้มีลักษณะตั้งฉากกับแนวเส้นตรงที่อยู่ในแนวระดับ ดังแบบ

เส้นเดี่ยว คือ เส้นในแนวดิ่งหรือแนวตั้งที่มีเพียงเส้นเดียวในตัวอักษรตัวหนึ่งๆ ดังแบบ

เส้นหน้า คือ เส้นในแนวดิ่งหรือแนวตั้งที่อยู่ด้านหน้าตัวอักษร ดังแบบ

เส้นหลัง คือ เส้นในแนวดิ่งหรือแนวตั้งที่อยู่ด้านหลังตัวอักษร ดังแบบ

เส้นกลาง คือ เส้นในแนวดิ่งที่อยู่ระหว่างเส้นหน้ากันเส้นหลัง ดังแบบ



เส้นบน คือ เส้นในแนวระดับของตัวอักษรที่อยู่ระดับแนวบนสุดของส่วนที่เป็นลำตัวตัวอักษร แบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ เส้นบนโค้ง เส้นบนเหลี่ยม และเส้นบนหยัก ดังแบบตามลำดับ

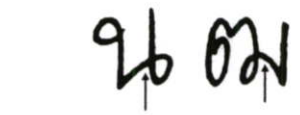
เส้นล่าง คือ เส้นในแนวระดับของตัวอักษรที่อยู่ระดับแนวล่างสุดของส่วนที่เป็นลำตัวตัวอักษร แบ่งเป็น 5 แบบ คือ

เส้นล่างตรง คือ เส้นล่างที่เป็นแบบตรง ดังแบบ

เส้นล่างโค้งคว่ำ คือ เส้นล่างที่เป็นเส้นโค้งขึ้นบนเล็กน้อย ดังแบบ

เส้นล่างโค้งหงาย คือ เส้นล่างที่เป็นเส้นโค้งลงล่างเล็กน้อย ดังแบบ

เส้นล่างเอียง คือ เส้นล่างที่เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งที่เอียงทำมุมแคบ ๆ กับแนวเส้นตรงที่อยู่ในแนวระดับ แบ่งเป็น 2 แบบ คือ เส้นล่างเอียงขึ้น และเส้นล่างเอียงลง ดังแบบตามลำดับ

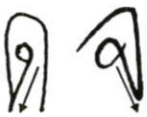


เส้นล่างลอย คือ เส้นที่ลากเชื่อมโยงจากส่วนหัวล่างด้านที่อยู่ชิดหรือใกล้กับด้านหน้าตัวอักษรขึ้นไปทางด้านบน จนมีระดับสูงประมาณสามส่วนสี่ของส่วนสูงของลำตัวอักษร แล้วหักเป็นมุมหรือโค้งกลับลงมาด้านหลังจดกับเส้นหลังของตัวอักษรที่ระดับล่างสุดของเส้นหลัง มี 4 แบบคือ เส้นล่างลอยหน้าตรง เส้นล่างลอยหน้าโค้ง เส้นล่างลอยหน้าตรงเหลี่ยม และเส้นลอบหน้าตรงโค้ง ดังแบบ ตามลำดับ

เส้นทแยง คือ เส้นที่ลากจากทางด้านล่างหรือทางด้านบนตัวอักษรเฉียงขึ้นหรือเฉียงลงไปทางด้านเส้นหน้าหรือเส้นหลัง แบ่งออกเป็น 3 แบบ ดังนี้

เส้นทแยงขึ้น คือ เส้นที่ลากจากด้านล่างของตัวอักษรเฉียงขึ้นไปทางด้านหน้าหรือด้านหลัง แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ เส้นทแยงขึ้นหน้า และเส้นทแยงขึ้นหลัง ดังแบบตามลำดับ

เส้นทแยงลง คือ เส้นที่ลากจากด้านบนของตัวอักษรเฉียงลงมาด้านหน้าหรือด้านหลัง แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ เส้นทแยงลงหน้า และเส้นทแยงลงหลัง ดังแบบ ตามลำดับ

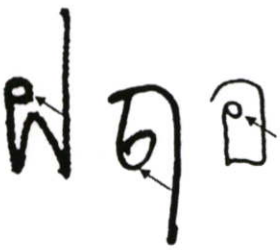


เส้นทแยงขึ้นลง คือ เส้นทแยงขึ้นและเส้นทแยงลงที่เขียนและเส้นทแยงลงที่เขียนติดต่อกันไป มี 2 แบบ คือ เส้นทแยงขึ้นลงต่ำ และเส้นทแยงขึ้นลงสูง ดังแบบ ตามลำดับ

หัวตัวอักษร ที่เป็นไปตามโครงสร้างมาตรฐานเรียกว่า **หัวกลม** มีลักษณะกลม โปร่ง ส่วนโปร่งของหัวมีขนาดกว้างกว่าหรือเท่ากับความหนาของเส้น แบ่งออกเป็นแบบต่างๆ ดังนี้

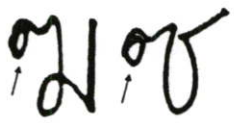
หัวหน้า คือ หัวกลมที่หันไปทางด้านหน้าของตัวอักษร และมีเส้นเชื่อมโยงอยู่ด้านหลังของหัว แบ่งเป็นแบบต่างๆ คือ หัวหน้าบน หัวหน้าล่าง และหัวหน้ากลาง ดังแบบตามลำดับ

หัวหลัง คือ หัวกลมที่หันไปทางด้านหลังของตัวอักษรและมีเส้นเชื่อมโยงอยู่ด้านหน้าของหัว แบ่งออกเป็นแบบต่างๆ คือ หัวหลังบน หัวหลังล่าง หัวหลังกลาง ดังแบบตามลำดับ

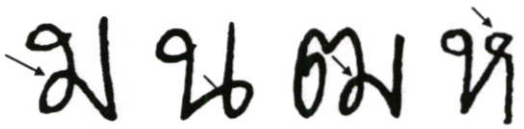


หัวขมวดหน้าบน คือ หัวกลมที่ด้านบนของหัวอยู่ต่ำกว่าแนวบนสุดของลำตัวอักษรเล็กน้อย มีเส้นโค้งเชื่อมโยงจากด้านหน้าของหัวล้อมเป็นวงไปจนถึงด้านหลัง ดังแบบ

หัวหยักหน้าบน คือ หัวขมวดหน้าบนที่ทำเป็นหยักช่วงกึ่งกลางด้านบนสุดของเส้นโค้งที่ล้อมหัวกลมของหัวขมวดหน้าบน ด้านบนของส่วนโค้งทั้ง 2 ช่วง จะเป็นแนวบนสุดของลำตัวอักษร ดังแบบ



ขมวด คือ เส้นที่ม้วนไขว้เป็นวงของอักษร มี 4 แบบ ดังนี้ ขมวดหน้า ขมวดหลัง ขมวดกลาง และขมวดบน ดังแบบ ตามลำดับ



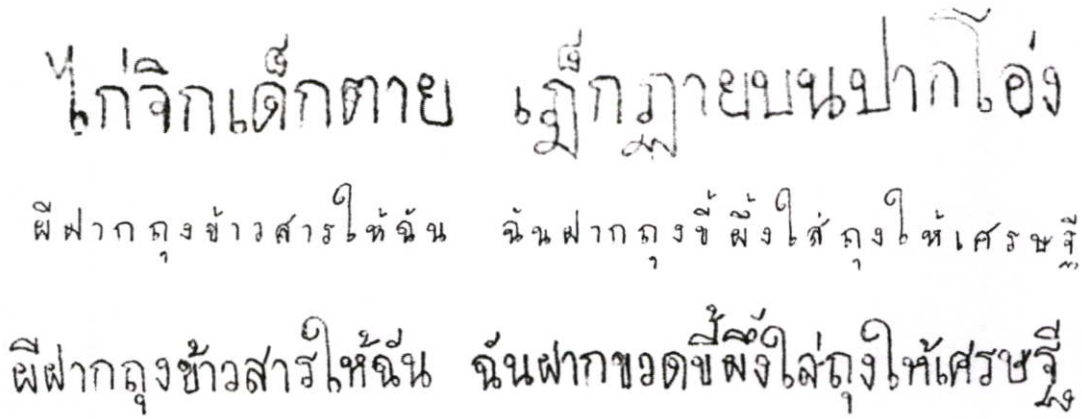
เส้นซ้อน คือ เส้นโค้งที่มีลักษณะคล้ายเส้นโค้งคว่ำ 2 เส้น ซ้อนกัน โดยให้เส้นโค้งเส้นล่างเชื่อมโยงจากเส้นเดี่ยวหรือเส้นหลัง เฉียงขึ้นไปยังด้านหน้า และหักกลับลากเส้นโค้งเส้นบนเป็นเส้นโค้งสั้นๆ ซ้อนอยู่เหนือเส้นโค้งเส้นล่างไปทางด้านหลัง ปลายเส้นโค้งวกกลับมีลักษณะเหมือนเส้นโค้งหงายขึ้นไปจดด้านหลังตัวอักษร ดังแบบ

2.2.2 วิเคราะห์ลักษณะการเขียนลายมือภาษาไทย

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลการเขียนโดยใช้แบบทดสอบ (ภาคผนวก ก) จากผู้ทดสอบจำนวน 40 คน นำมาวิเคราะห์ลักษณะการเขียนเปรียบเทียบกับโครงสร้างตามมาตรฐานของอักษรไทย

2.2.2.1 ลักษณะลายมือที่สอดคล้องกับมาตรฐานโครงสร้างอักษรไทย

เป็นอักษรลายมือที่มีใกล้เคียงกับหลักเกณฑ์ที่กำหนดตามโครงสร้างมาตรฐานของตัวแบบหลักและตัวแบบเลือก คือมีส่วนประกอบของตัวอักษรครบถ้วน ตามที่ระบุไว้ ถึงแม้ว่าอักษรบางตัวมีการใช้เส้นโค้ง แทนเส้นหน้าหรือเส้นหลัง แต่ก็ถือว่าเป็นตัวแบบเลือก



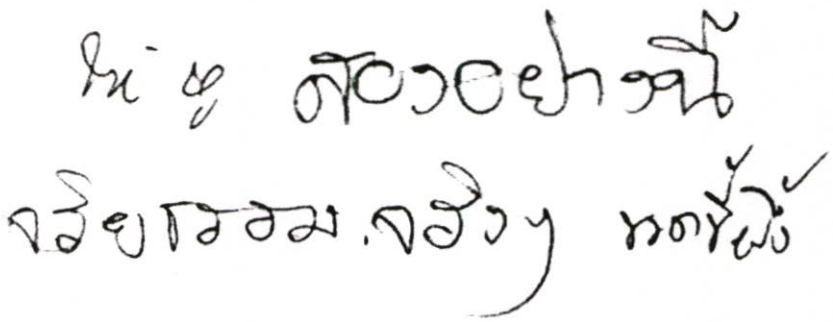
รูปที่ 2.9 รูปลายมือที่ใกล้เคียงกับมาตรฐานโครงสร้าง

2.2.2.2 ลักษณะลายมือที่ผิดไปจากมาตรฐานโครงสร้างอักษรไทย

เป็นอักษรลายมือที่มีลักษณะไม่ถูกต้องตามมาตรฐานโครงสร้างอักษรไทย สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน ซึ่งพอสรุปเป็นลักษณะต่างๆ ได้ดังนี้

การเขียนที่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างตามมาตรฐาน

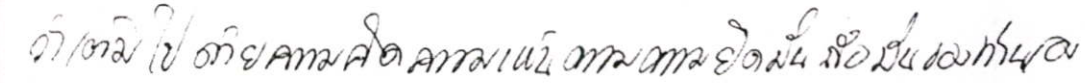
การเขียนลักษณะลายมือที่เป็นตัวประดิษฐ์ คือ ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่ไม่ถูกต้องตามโครงสร้างมาตรฐานมีการดัดแปลงขึ้นมาตามลักษณะการเขียนของแต่ละบุคคล เช่น ตัว ร เรือ เขียนเป็นขมวดตวัดแทนการใช้ เส้นซ้อน ตัว อ. อ่าง ที่เขียนเป็นวงกลม หรือตัว ข. ไข่ ที่ใช้การเขียนขมวดแทนเส้นหน้า เส้นล่างและเส้นหลัง เป็นต้น



รูปที่ 2.10 ลักษณะลายมือที่เขียนผิดไปจากมาตรฐานโครงสร้าง

การเขียนต่อเนื่องกันระหว่างตัวอักษร

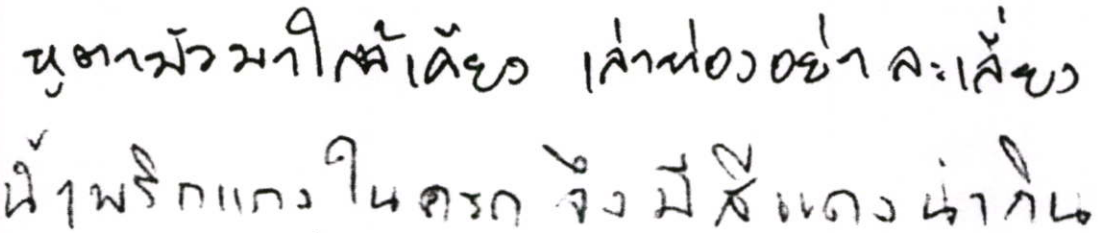
โดยปกติการเขียนในภาษาไทย เป็นการเขียนทีละตัวอักษร ลักษณะการเขียนแบบต่อเนื่องจึงทำให้เกิดการเขียนส่วนต่างๆ ที่ไม่ครบถ้วน ความเอียงของตัวอักษรที่ผิดปกติ ขนาดของอักษรที่ไม่เท่ากัน หรือการลากเส้นย้อนรอยเดิม ซึ่งเป็นลักษณะการเขียนที่ไม่มีในตัวอักษรภาษาไทย



รูปที่ 2.11 ลักษณะลายมือที่เขียนต่อเนื่องเป็นคำ

การเขียนแบบไม่ม้วนหัวตัวอักษรหรือไม่เขียนหัวตัวอักษร

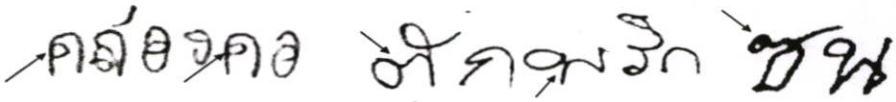
ภาพลายมือที่ไม่ถูกต้องส่วนใหญ่ (ประเมินจากแบบทดสอบการเขียน) จะเป็นลักษณะการไม่เขียนหัวตัวอักษรหรือไม่ม้วนหัวให้เป็นหัวกลม ซึ่งใช้เส้นหักแนวสั้นๆ แทนการเขียนหัวและทิศทางของหัว ลักษณะลายมือที่ไม่ถูกต้องตามโครงสร้างมาตรฐานแบบนี้ อาจรวมไปถึงการเขียนขมวดแบบต่างที่ไม่ชัดเจนด้วย ซึ่งในโครงสร้างภาษาไทย หัวตัวอักษรเป็นลักษณะเด่นที่สำคัญในการแยกความแตกต่างในอักษรที่คล้ายกัน เช่น ตัว ด. เด็ก กับตัว ค. ควาย ตัว ภ. สำเภา กับ ตัว ถ. ถุง เป็นต้น



รูปที่ 2.12 ลักษณะลายมือที่ไม่เขียนหัวตัวอักษร

การเขียนเหลื่อมกันภายในตัวอักษร

การเขียนลักษณะนี้ส่งผลให้ ส่วนประกอบต่างๆ ของตัวอักษร ไม่ชัดเจนหรือสูญหายไปเนื่องจากการซ้อนทับ ตัวอย่างเช่น ตัว ค. ควาย (รูปที่ 2.13 ซ้าย) การเขียนเหลื่อมกันทำให้ส่วนเส้นทแยงลงของตัวอักษรหายไป หรือ ตัว พ. พาน (รูปที่ 2.13 กลาง) การลากเส้นซ้ำทางเดิมทำให้เส้นทแยงขึ้นของตัวอักษรหายไป ส่วนมากจะเกิดในตัวอักษรที่มีหัวกลางหรือหัวหยัก



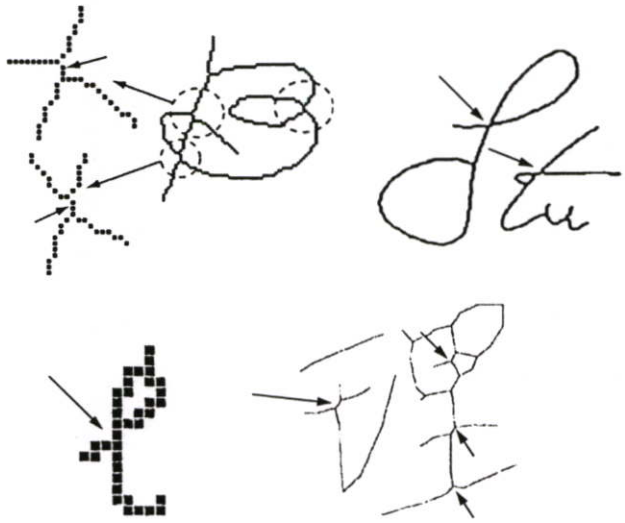
รูปที่ 2.13 ลักษณะการเขียนที่เหลื่อมกันภายในตัวอักษร

2.3 การประยุกต์ในวิทยานิพนธ์

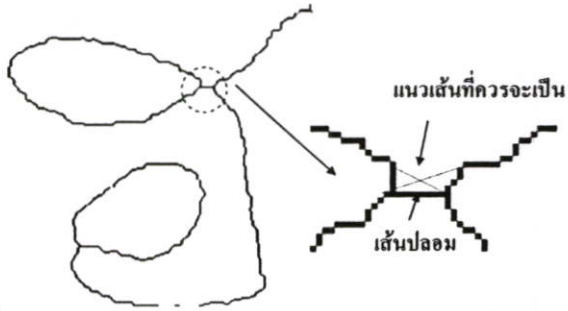
จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต สามารถสรุปขั้นตอนการทำงานได้เป็นสองส่วน คือ การสร้างโครงร่างจากรูปภาพลายมือ และการดึงข้อมูลเชิงลำดับเวลาจากโครงร่างที่ได้ ปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัยสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเด็น คือ รายละเอียดสำคัญบางอย่างถูก

ลดทอนและข้อผิดพลาดที่เกิดในระหว่างการสร้างโครงร่าง และปัญหาการเรียงลำดับจุดโครงร่างของตัวอักษรตามโครงสร้างหรือลักษณะการเขียนในแต่ละภาษา

ปัญหาอย่างหนึ่งที่เกิดในกระบวนการสร้างโครงร่างของงานวิจัยส่วนใหญ่ [3], [6], [8], [10], [17] คือ การเกิดเส้นปลอม ซึ่งเป็นเส้นที่ไม่ปรากฏในรูปลายมือจริง แต่จะปรากฏอยู่ในแนวของโครงร่าง โดยทั่วไปมีเพียงระยะสั้น ทำให้เกิดความลำบากในการตามรอยของการลากเส้นหรือการหาลำดับการเขียน ดังรูปที่ 2.14 โดยในแต่ละงานวิจัย ต้องมีกระบวนการแก้ไขเส้นปลอมก่อน จึงนำเส้นโครงสร้างที่ได้ไปดำเนินการตามขั้นตอนต่อไป มีเพียงในงานวิจัย [6] ที่ไม่ได้กล่าวถึงประเด็นนี้ ทั้งๆ ที่การกำจัดเส้นปลอมออกไป จะทำให้จำนวนโนดบนกราฟที่ใช้การค้นหาตามฟังก์ชันที่กำหนดไว้ลดลง และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของแนวคิดดังกล่าว



รูปที่ 2.14 แสดงเส้นปลอมที่เกิดจากกระบวนการขึ้นโครงร่างในวิจัยส่วนใหญ่

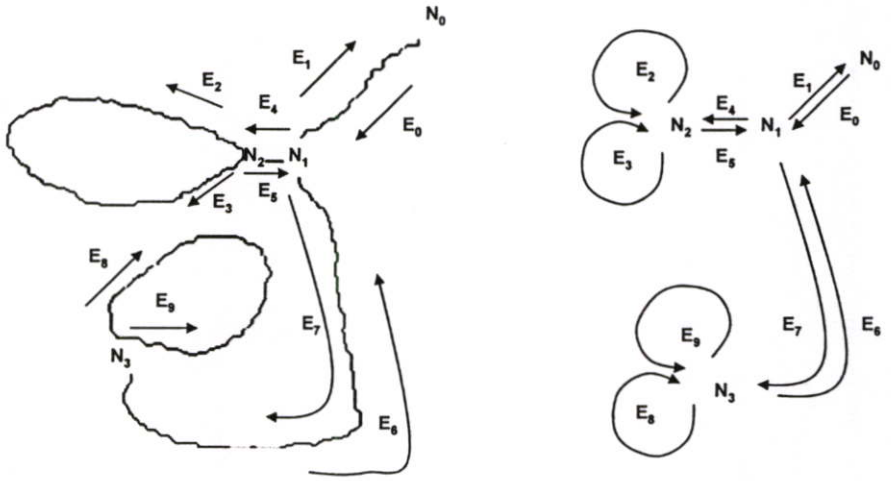


รูปที่ 2.15 ลักษณะการเกิดเส้นปลอมในตัวอักษรไทย

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เห็นได้ว่ารูปแบบของการดึงลำดับทิศทางสามารถแบ่งออกได้เป็นสองแนวทางหลักๆ คือ การค้นหาแบบฮิวริสติก [1], [3], [10], [17] และการค้นหาตามทฤษฎีของกราฟ [5], [8] หรืออาจใช้ทั้งสองแบบประยุกต์เข้าด้วยกัน [6]

2.3.1 ตัวอย่างการประยุกต์กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทดลองนำขั้นตอนต่างๆ ในงานวิจัย [6] มาทดสอบกับตัวอักษรไทยภายหลังผ่านกระบวนการก่อนหน้า (ปรับความเอียง ตัดอักษร และสร้างโครงร่าง) โครงร่างที่ได้จะถูกนำมาแสดงในลักษณะส่วนประกอบต่างๆ ของกราฟดังรูป โดยจุดตัดจะแทนด้วยโนด (node) ส่วนของเส้นโครงร่างแต่ละส่วนจะแทนด้วยเส้นขอบ (edge) ในทิศทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด



รูปที่ 2.16 โครงร่างตัวอักษรแสดงในลักษณะส่วนประกอบต่างๆ ของกราฟ

หลังจากนั้น นำเงื่อนไขเกี่ยวกับทิศทางและความต่อเนื่องในการเขียน เส้นทางที่สั้นที่สุด และทิศทางการม้วนหัวหรือขมวดในภาษาไทย มาสร้างเป็นฟังก์ชันเพื่อใช้กำหนดค่าน้ำหนักบนเส้นทางเดินของกราฟ ซึ่งจะมีค่าน้อยหากการเลือกทางเดินเป็นธรรมชาติ และมีค่ามากหากเป็นลักษณะทางเดินที่ผิดจากปกติ แล้วใช้การค้นหาบนกราฟแบบเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดก่อน (Best-first Search) เพื่อดึงลำดับการเขียนออกมา ดังนั้น ลำดับการเขียนที่ได้คือ ทางเดินบนกราฟ $E_0\,E_4\,E_2\,E_6\,E_7\,E_8$

ข้อสังเกตในงานวิจัยดังกล่าว คือ ไม่มีการอธิบายถึงวิธีแก้ไขเส้นปลอมที่เกิดจากอัลกอริธึมสร้างโครงร่างแบบทั่วไป จึงอาจทำให้เกิดกรณีผิดพลาดในการกำหนดน้ำหนักให้กับเส้นทาง E_2 และ E_3 เนื่องจากเส้นปลอมที่เกิดขึ้นเป็นการทดทอนรายละเอียดที่แสดงถึงความต่อเนื่องของการลากเส้น

2.3.2 แนวคิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

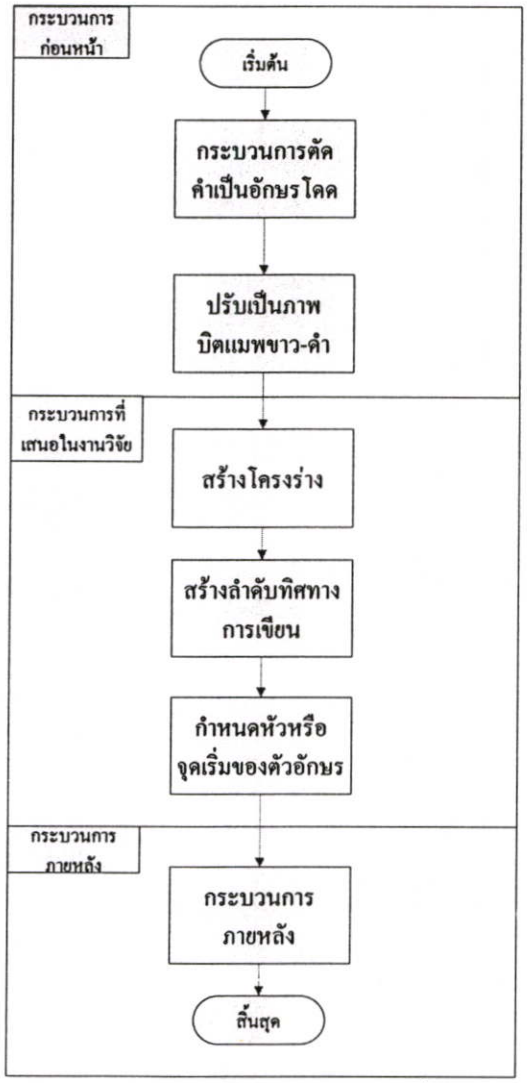
ตัวอักษรภาษาไทยมีโครงสร้างต่างจากในภาษาอื่นๆ ค่อนข้างมาก งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนออัลกอริธึมอีกรูปแบบหนึ่ง ที่แตกต่างจากแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัยในข้างต้น โดยการปรับปรุงอัลกอริธึมแบบแกนกลางที่ใช้สร้างโครงร่างในงานวิจัยส่วนใหญ่ เพื่อลดกรณีที่ทำให้เกิดเส้นปลอม แล้วเชื่อมจุดโครงร่างเหล่านั้น พิจารณาจากโครงสร้างตัวอักษร ที่สามารถแบ่ง

ออกเป็นส่วนต่างๆ ได้ ซึ่งแต่ละส่วนจะมีทิศทางและแนวการลากเส้นเชื่อมกันที่ชัดเจน จึงเป็นที่มาของแนวคิดในงานวิจัยสำหรับการดึงข้อมูลลำดับทิศทางของการเขียน ไปตามแนวการเขียนหลักบนตัวอักษร ที่เป็นรูปแบบพื้นฐานที่สามารถแยกส่วนประกอบต่างๆ ของตัวอักษรออกมา ซึ่งได้กล่าวรายละเอียดในบทต่อไป

รูปที่ 2.17 แนวการเขียนหลักบนส่วนต่างๆ ของโครงสร้างอักษร ล. ลิง

บทที่ 3
รายละเอียดของแนวคิดและอัลกอริธึม

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงแนวคิดและอัลกอริธึมที่พัฒนาขึ้นในเชิงรายละเอียด ซึ่งได้เพิ่มเติมแนวคิดในการขึ้นโครงร่างแบบแกนกลาง (Medial Axis) [16] และนำเสนอแนวทางในการเรียงจุดกลางที่ได้ให้เป็นเส้นโครงร่างก่อน แล้วจึงนำเส้นโครงร่างแต่ละเส้นมาจัดลำดับ โดยพิจารณาจากแนวการเขียนหลักบนตัวอักษรในภาษาไทย ที่สามารถแยกเป็นส่วนประกอบต่างๆ ได้อย่างชัดเจน จากนั้นจึงจัดเรียงแนวการเขียนหลักเข้าด้วยกัน จนเป็นลำดับการเขียนของภาพลายมือ และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อกำหนดการม้วนหัวหรือตำแหน่งเริ่มต้นของการเขียนตัวอักษร ซึ่งสามารถแสดงกระบวนการทำงานตามที่ได้นำเสนอดังรูป ที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังกระบวนการทำงานตามแนวคิดที่ได้นำเสนอ

3.1 อัลกอริธึมการสร้างโครงร่าง

การสร้างโครงร่างเป็นกระบวนการลดทอนขอบเขตส่วนใหญ่ของภาพไปเป็นโครงร่างแบบบาง ซึ่งยังคงรักษาขนาดและแนวเชื่อมต่อบนบริเวณภาพเดิมไว้อย่างครบถ้วน

3.1.1 คำจำกัดความ

คำจำกัดความ 1 กำหนดให้ $\Re^n$ หมายถึงเซตของจุดบนระนาบ n มิติ และ Ω เป็นสับเซตของ $\Re^2$ กล่าวได้ว่าวงกลมปิดจะมีขนาดใหญ่ที่สุดที่สามารถบรรจุลงใน Ω ถ้าวงกลมดังกล่าวไม่เป็นสับเซตแท้ (proper subset) กับวงกลมปิดอื่นๆ ที่บรรจุใน Ω

คำจำกัดความ 2 ให้แกนกลาง (Medial Axis) หรือโครงร่างของเซต Ω แทนด้วย $MA(\Omega)$ โดย MA เป็นสับเซตของ Ω ใน $\Re^2$ เป็นตำแหน่งของจุดที่เป็นจุดศูนย์กลางทั้งหมดของวงกลมที่มีขนาดใหญ่ที่สุดใน Ω เรียงต่อกัน ฟังก์ชันรัศมีของ MA ใน Ω เป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง มีค่าเป็นเป็นจำนวนจริง กำหนดอยู่ใน $MA(\Omega)$ โดยที่ค่าในแต่ละจุดบนแกนกลางจะเท่ากับรัศมีของวงกลมที่ใหญ่ที่สุด MAT ของ Ω ก็คือ MA ที่ประกอบด้วยฟังก์ชันรัศมีของวงกลม ณ ตำแหน่งจุดนั้นๆ

จากคำจำกัดความของแกนกลาง สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเซตได้ดังนี้

ถ้ากำหนดให้ $B_r(p)$ เป็นวงกลมที่มีรัศมี r มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ตำแหน่ง p และ $D(\Omega)$ คือเซตของวงกลมทั้งหมดใน Ω สามารถเขียนแสดงได้ดังนี้

$$D(\Omega) = \{B_r(p) \mid B_r(p) \subset \Omega\}$$

พิจารณา Ω เป็นรูปลายมือ เซตของวงกลมที่สามารถเอาบรรจุใน Ω ตามสมมติฐานในข้างต้น รวมถึงวงกลมที่มีขนาดรัศมีเป็นศูนย์หรือเป็นเพียงจุดภาพ และเพื่อหาแกนกลางของภาพ จะพิจารณาวงกลมปิดที่มีขนาดใหญ่ที่สุด

กำหนดให้ $CORE(\Omega)$ เป็นเซตของวงกลมปิดที่มีขนาดใหญ่ที่สุดใน $D(\Omega)$ โดย

$$CORE(\Omega) = \{B_r(p) \in D(\Omega) \mid B_s(q) \in D(\Omega) \text{ และ } B_r(p) \subset B_s(q) \text{ implies } B_r(p) = B_s(q)\}$$

ดังนั้นแกนกลางของโดเมน Ω ก็คือจุดศูนย์กลางวงกลมปิดใน $CORE(\Omega)$

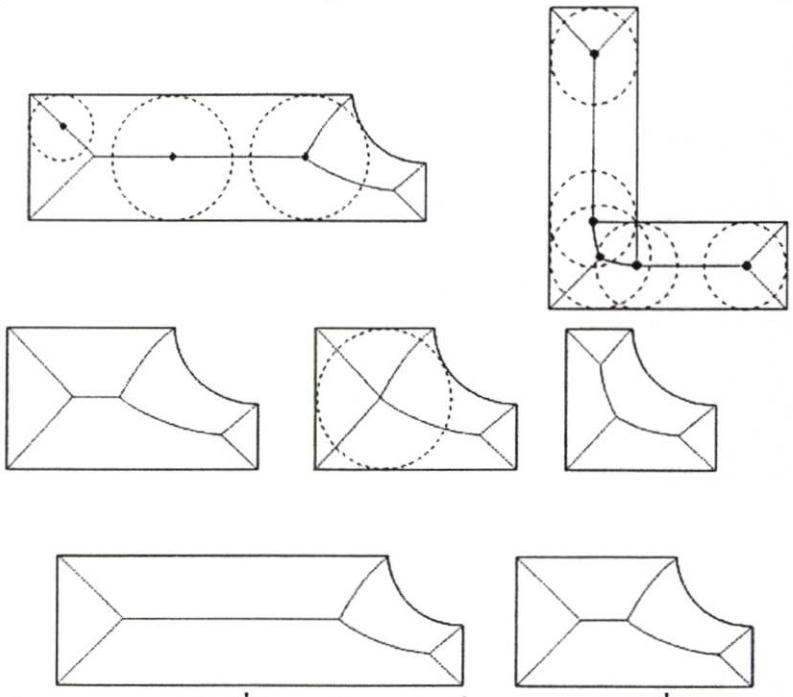
$$MA(\Omega) = \{ p \in \Omega \mid B_r(p) \in CORE(\Omega)\}$$

MAT ของโดเมน Ω เป็นเซตของคู่ลำดับของจุดศูนย์กลางและรัศมีของวงกลมปิด

$$MAT(\Omega) = \{(p,r) \in \Omega \times (\Re^2 \cup \{0\}) \mid B_r(p) \in CORE(\Omega)\}$$

จากคำจำกัดความข้างต้น สามารถเขียนคำอธิบายเชิงบรรยายได้ว่า แกนกลางของภาพบนระนาบสองมิติ คือ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของวงกลมปิดที่มีขนาดใหญ่ที่สุดที่สามารถสัมผัสขอบภาพของวัตถุมากกว่าเท่ากับสองด้านเรียงต่อกัน ดังรูปที่ 3.2 (คำอธิบายดังกล่าวเป็นหนึ่งในอัลกอริธึมที่ใช้ในการหาเซตของแกนกลางตามนิยาม)

ส่วนการแปลงแกนกลาง (Medial Axis Transform: MAT) เป็นกระบวนการลดขนาดของภาพวัตถุให้เหลือเฉพาะแกนกลาง โดยพิจารณาจากฟังก์ชันรัศมีของวงกลม (ระยะทางจุดกลางไปยังขอบวัตถุที่ใกล้ที่สุด) ซึ่งความหมายของ MAT และการสร้างโครงร่างสามารถใช้สับเปลี่ยนกันได้แต่จะมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย โครงร่างนั้นจะเป็นภาพขาวดำที่แสดงถึงโครงวัตถุ ส่วน MAT เป็นภาพโทนสีเทา โดยแต่ละจุดภาพบนโครงร่างจะกำหนดด้วยความเข้มสี ซึ่งแสดงถึงระยะทางจากจุดนั้น ไปยังขอบภาพของวัตถุตั้งต้น



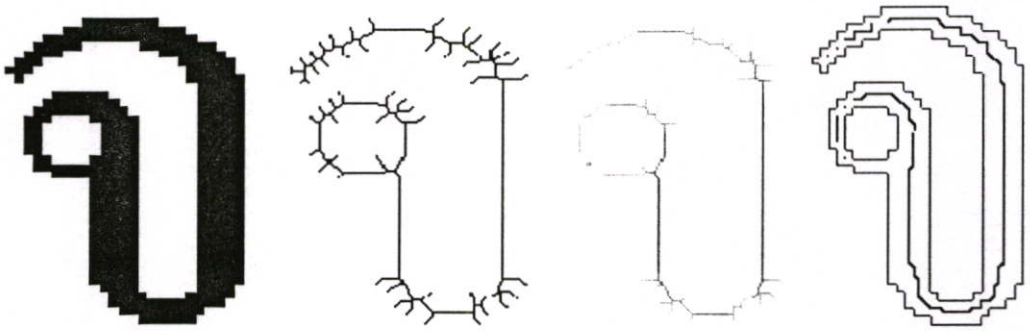
รูปที่ 3.2 โครงร่างของภาพสองมิติที่กำหนดโดยจุดศูนย์กลางของวงกลมที่รัศมีสัมผัสขอบของภาพ

ในการประยุกต์ใช้แนวคิด MAT เพื่อสร้างโครงร่างนั้นมีการพัฒนาเป็นอัลกอริธึมในหลายๆ แบบ ขึ้นอยู่กับการนำไปประยุกต์ใช้ตามประเภทของงาน เพื่อให้ได้เซตของจุดภาพที่ใกล้เคียงกับคำจำกัดความของแกนกลาง

ในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงแนวคิดของ MA โดยหากพิจารณาจากประเด็นเกี่ยวกับลักษณะทั่วไปของลายมือ คือเป็นเส้นที่มีความหนาขึ้นอยู่กับขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้เขียน ถูกลากเป็นเส้นตามแนวของการเขียนในภาษาต่างๆ จึงได้เพิ่มเติมในเรื่องของทิศทางของการเขียน นอกเหนือจากการเลือกวงกลมที่มีขนาดใหญ่ที่สุดแล้ว ให้พิจารณารัศมีของวงกลมในทิศทางที่ตรงข้ามกัน เพื่อให้สามารถระบุได้ว่าเป็นแกนกลางในทิศใด หรือการเขียนบริเวณดังกล่าวกำลังไปในทิศทางใด โดยเลือกเฉพาะจุดศูนย์กลางวงกลมปิดที่ใหญ่ที่สุดที่สัมผัสขอบภาพของวัตถุในทิศตรงกัน

บทเสริม 1 กำหนดให้ $\partial(\Omega)$ เป็นเซตขอบบนโดเมน Ω และ L(p) เป็นเส้นตรงที่ลากผ่านจุด p โดยจุดเริ่มต้นและจุดปลายจะต้องเป็นสมาชิกใน $\partial(\Omega)$ การหาแกนกลางที่กำหนดขึ้นในงานวิจัยนี้จะหาได้จาก

$$MA'(\Omega) = \{ p \in \Omega \mid B_r(p) \in CORE(\Omega) \text{ and } L(p) \subset B_r(p) \text{ implies } L(p) \cup B_r(p) = B_r(p) \}$$



รูปที่ 3.3 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการทำโครงร่างของตัวอักษร จ. จาน แบบแกนกลาง การแปลงแกนกลางและแบบแกนกลางที่จะประยุกต์ใช้ในงานวิจัย ตามลำดับ

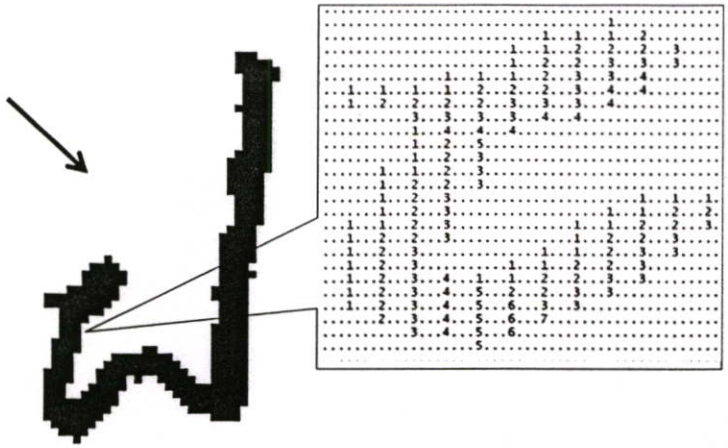
3.1.2 การประยุกต์

จากคำจำกัดความแกนกลางของวัตถุ สามารถพัฒนาอัลกอริธึมเพื่อแสดงจุดโครงร่างของภาพตัวอักษรได้คือ การคำนวณค่ากึ่งกลางในทิศทางต่างๆ กัน ทั้ง 8 ทิศ (ตะวันออก – ตะวันตก, เหนือ - ใต้, ตะวันออกเฉียงเหนือ - ตะวันตกเฉียงใต้, ตะวันออกเฉียงใต้ – ตะวันตกเฉียงเหนือ) โดยพิจารณาเลือกเฉพาะจุดกึ่งกลาง ที่เมื่อนำระยะของการเท่ากัน มาเป็นจุดศูนย์กลางสำหรับวาดเป็นวงกลมแล้ว รัศมีของวงกลมดังกล่าว ต้องมีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับระยะจากจุดดังกล่าวไปยังขอบของตัวอักษรในทิศที่เหลืออยู่ 6 ทิศ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.3 ซึ่งมีขั้นตอนในรายละเอียดของการหาจุดกลางของรูปภาพอักษร ดังนี้

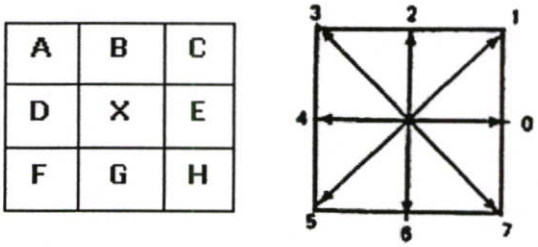
รูปที่ 3.4 แนวคิดในการสร้างโครงร่าง

1. อินพุตที่รับเข้ามาเป็นภาพแบบบิตแมพแบบขาว-ดำ โดยอยู่ภายใต้สมมติฐานว่า มีการทำการลดการรบกวน ปรับความเอียงของภาพตัวอักษร และมีการแบ่งส่วนเป็นตัวอักษรโดดอย่างสมบูรณ์

2. สแกนภาพจากบนลงล่าง จากซ้ายไปขวา เพื่อเก็บค่าจำนวนจุดดำที่เรียงต่อกันตามทิศ 4 5 6 7 อ้างอิงตามรหัสลูกโซ่ (รูปที่ 3.6) และจากขวาไปซ้าย ล่างขึ้นบน เก็บค่าจุดดำที่เรียงต่อกันตามทิศ 0 1 2 3 (ดังอย่างในรูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 แสดงการคำนวณจุดดำที่เรียงต่อกันในทิศ 7



รูปที่ 3.6 แสดงหน้าต่าง 3x3 ที่ใช้การกำหนดตำแหน่งในทิศต่างๆ และทิศทางที่แสดงในรหัสลูกโซ่

From Figure 3.6 X is current pixel and A-H is neighbor pixel in each direction

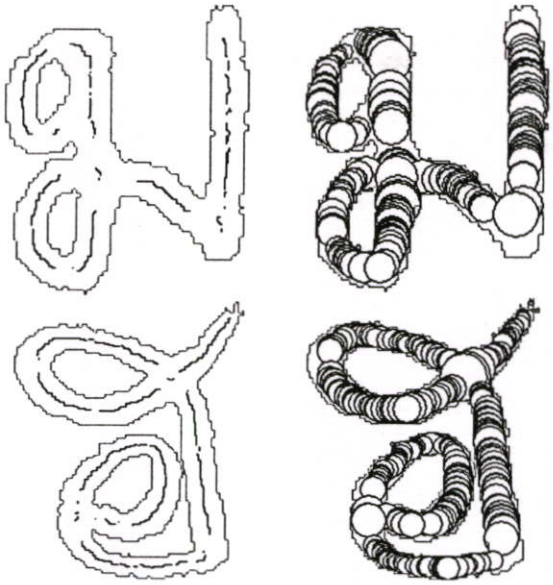
1. Scan bitmap from top left to bottom right
2. if Pixel X is white color { black_pixel_count_all_direction on X = 0 }
3. if Pixel X is black color
4. {
5. black_pixel_count_7 (direction 7) on X = black_pixel_count_7 on A +1
6. black_pixel_count_0 (direction 0) on X = black_pixel_count_0 on D +1
7. black_pixel_count_6 (direction 6) on X = black_pixel_count_6 on B +1
8. black_pixel_count_5 (direction 5) on X = black_pixel_count_5 on C +1
9. }
10. Scan bitmap from down right to from to top left
11. if Pixel X is white color { black_pixel_count_all_direction on X = 0 }
12. if Pixel X is black color
13. {
14. black_pixel_count_1 (direction 1) on X = black_pixel_count_1 on F +1
15. black_pixel_count_4 (direction 4) on X = black_pixel_count_4 on E +1

```
16.                 black_pixel_count_2 (direction 2)  on X = black_pixel_count_2 on G +1
17.                 black_pixel_count_3 (direction 3)  on X = black_pixel_count_3 on H +1
18.             }
```

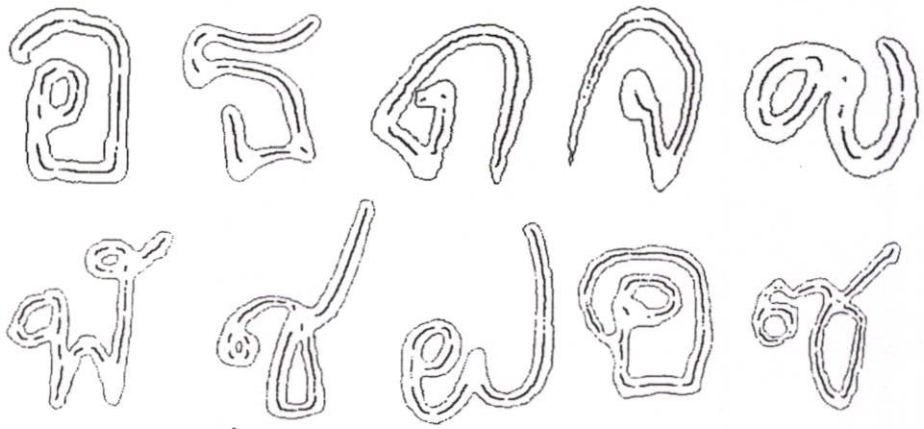
3.สแกนภาพอีกครั้งหนึ่ง เพื่อหาจุดกึ่งกลางของลายเส้นตัวอักษร ในทิศต่างๆ โดยให้รัศมีของตำแหน่งทิศตรงข้ามที่เท่ากันมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับรัศมีในทิศทางที่เหลืออยู่ และต้องมีการกำหนดรัศมีขั้นต่ำ เพื่อป้องการวิ่งเข้ามุมของจุดกลาง

```
1.  Scan bitmap from top left to down right
2.      {
3.          if (|X.black_pixel_count_4 - X.black_pixel_count_0 | < threshold)
            & (X.black_pixel_count_4 > min_R)
            & (X.black_pixel_count_4 <= X.black_pixel_count_other_direction)
4.              Set_Medial_Point(X)
5.          if (|X.black_pixel_count_2 -  X.black_pixel_count_6| < threshold)
            & (X.black_pixel_count_2 > min_R)
            & (X.black_pixel_count_2 <= X.black_pixel_count_other_direction)
6.              Set_Medial_Point(X)
7.          if (|X.black_pixel_count_7 - X.black_pixel_count_3| < threshold)
            & (X.black_pixel_count_7 > min_R)
            & (X.black_pixel_count_7 <= X.black_pixel_count_other_direction)
8.              Set_Medial_Point(X)
9.          if  (|X.black_pixel_count_1 - X.black_pixel_count 5 |< threshold)
            & (X.black_pixel_count_1 > min_R)
            & (X.black_pixel_count_1 <= X.black_pixel_count_other_direction)
10.             Set_Medial_Point(X)
11.         }
```

4.จุดศูนย์กลางวงกลมที่ได้แต่ละจุดจะมีทิศทางกำหนดและเรียงต่อกันได้เป็นโครงร่างของตัวอักษรดังกล่าว



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างโครงร่าง พร้อมกับแสดงวงกลมปิดที่สามารถใส่เข้าไปภายในตัวอักษร



รูปที่ 3.8 โครงร่างของตัวอักษรเขียนแบบต่างๆ

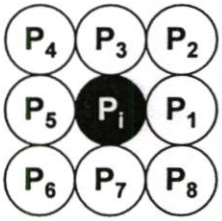
3.2 อัลกอริธึมการดึงลำดับทิศทางการเขียน

ลำดับการเขียนสามารถหาได้จากการเรียงลำดับจุดกลางที่ได้ จากขั้นตอนสร้างโครงร่าง โดยเริ่มจากจุดเริ่มต้นไล่เรียงไปยังจุดปลาย จนครบจุดกลางทุกจุด จะได้เป็นเส้นของโครงร่างหลายๆ เส้นภายในรูปลายมือ หลังจากนั้นจึงนำเส้นเหล่านี้มาจัดเรียงกันใหม่ โดยพิจารณาจากแนวการเขียนหลักของตัวอักษรที่อยู่ในช่วงเดียวกัน แล้วจึงเรียงแนวการเขียนหลักแต่ละช่วงเข้าด้วยกันเป็นขั้นตอนสุดท้าย

3.2.1 คำจำกัดความ

คำจำกัดความ 1 จุดกลางคือ เซตของจุดที่เป็นจุดศูนย์กลางวงกลม ที่มีทิศตรงข้ามกันเท่ากัน และมีขนาดรัศมีไม่เกินระยะไปยังขอบของภาพลายมือ ในทิศทางที่เหลืออยู่อีก 6 ทิศ (เมื่อพิจารณาทิศตามรหัสลูกโซ่)

คำจำกัดความ 2 ฟังก์ชันต่อเนื่อง (Transition Function) ในส่วนประกอบของรูปลายมือแต่ละจุดภาพ P ของโครงร่างจะมีฟังก์ชันต่อเนื่อง T(P) อยู่ด้วยเสมอ โดยฟังก์ชัน T(P) ถูกใช้เพื่อพิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างจุด P และจุดภาพบริเวณข้างเคียงทั้ง 8 ทิศ ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งฟังก์ชันต่อเนื่องที่กำหนดขึ้นจะพิจารณาเป็นแนวกลุ่มจุดข้างเคียง ได้แก่ $P_8P_1P_2$, $P_2P_3P_4$, $P_4P_5P_6$, $P_6P_7P_8$



รูปที่ 3.9 แสดงตำแหน่งจุดข้างเคียงของ P_i

คำจำกัดความ 3- จุดสิ้นสุด (Terminate Point) คือจุด P ที่มี T(P) = 1 ดังรูป

รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะที่เป็นไปได้ทั้งหมดของจุดดำที่เป็นจุดสิ้นสุด หรือ T(P) = 1

คำจำกัดความ 4 – เส้นกลางหรือเส้นโครงร่าง คือ เซตของจุดกลางที่มี T(P) >= 1 เรียงต่อกัน โดยจะมีจุดสิ้นสุด 2 จุดที่มี T(P) = 1

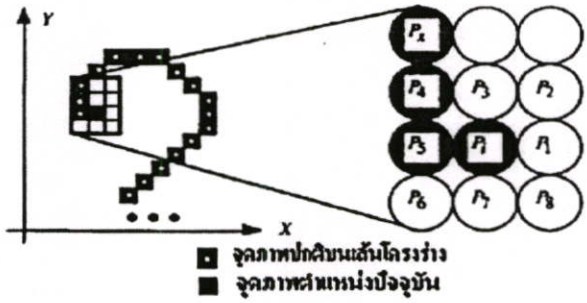
คำจำกัดความ 5 – เส้นลาก (stoke) คือ กลุ่มของจุดภาพต่อเนื่อง ที่แสดงเส้นทางการเขียนของรูปลายมือ โดยที่ไม่ยกปากกา ในการเขียนตามธรรมชาติอาจจะประกอบด้วยการลากเส้นหลายๆ เส้น และ ภายในเส้นลาก อาจจะประกอบไปด้วยแนวการเขียนหลักหลายๆ ช่วง

คำจำกัดความ 6 – แนวการเขียนหลัก คือ แนวที่บ่งชี้ถึงทิศทางของเส้นลาก ณ จุดใดๆ ที่มีผลรวมของจำนวนจุดภาพในทิศนั้นๆ มากที่สุด

3.2.2 หลักการเรียงลำดับจุดกลาง

จากจุดบนโครงร่างที่ได้ นำจุดที่มีจุดข้างเคียงมาเรียงเป็นเส้นโดยจัดเก็บบนโครงสร้างข้อมูล โดยใช้อัลกอริธึม **เลือกจุดภาพที่มีจุดข้างเคียงน้อยกว่าก่อน** (Fewer-Untraced-Neighbors-First) [3] จากรูปข้างล่างจุดเริ่ม Pi มีจุดข้างเคียง คือ P4 และ P5 จุดภาพที่มีจุดข้างเคียงน้อยกว่าจะมี

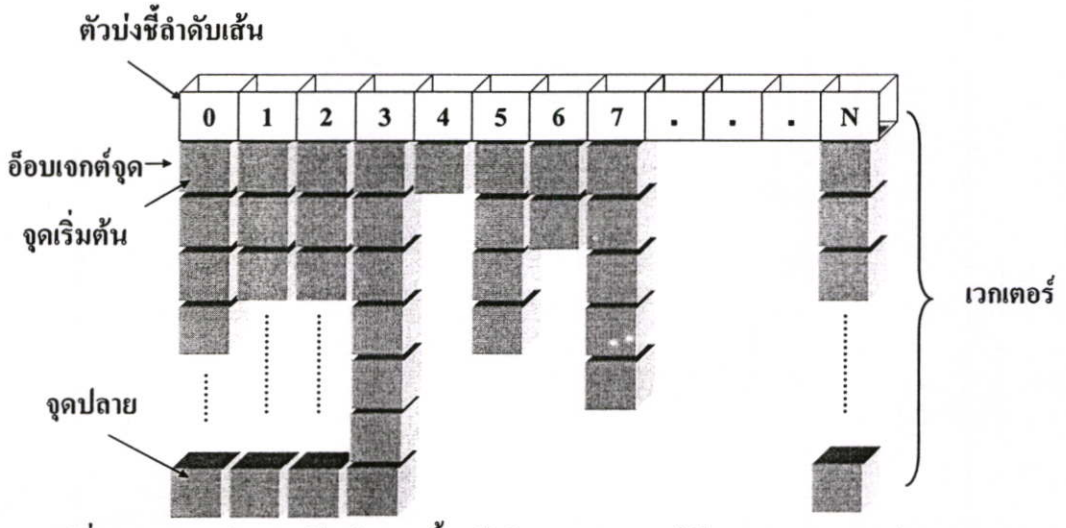
ความสำคัญสูงกว่าในการเลือกทางเดิน ดังนั้นจึงเลือก P5 เป็นจุดต่อไปเนื่องจากมีจุดข้างเคียงหนึ่งจุด (P4) ในขณะที่ P4 มีสองจุด (P5 และ Px)



รูปที่ 3.11 แสดงการเลือกทางเดินของกฎเลือกจุดภาพที่มีจุดข้างเคียงน้อยกว่าก่อน

ซึ่งมีแนวคิดดังนี้ สแกนหาจุดกลางที่เป็นจุดสิ้นสุดตามคำจำกัดความ 3 เป็นจุดตั้งต้นก่อน แล้วเรียงต่อจุดข้างเคียงตามอัลกอริธึมในข้างต้น โดยใส่ไว้ในโครงสร้างข้อมูลเวคเตอร์ และทำเครื่องหมายว่าเป็นจุดกลางที่ถูกเรียงไปแล้ว จนกระทั่งเจอจุดสิ้นสุดอีกจุดหนึ่งเป็นจุดปลาย แล้วก็กลับมาหาจุดกลางที่เป็นจุดสิ้นสุดอีกจุดหนึ่ง ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งครบทุกจุด จึงได้จุดกลางเรียงต่อกันเป็นส่วนของเส้นโครงร่างและจุดโครงร่าง จัดเก็บอยู่ในโครงสร้างข้อมูล แต่ส่วนของเส้นโครงร่างต่างๆ ยังไม่ถูกเรียงต่อกันอย่างถูกต้องตามลำดับ

เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนมากขึ้น จึงได้นำเสนอลักษณะโครงสร้างข้อมูลที่ใช้ เพื่อเรียงลำดับจุดกลางจากคำอธิบายได้ข้างบน โดยมีลักษณะเป็นอาเรย์ 1 มิติของเวกเตอร์ แต่ละเวกเตอร์ก็คือแต่ละเส้นของจุดกลางหรือเส้นโครงร่าง ซึ่งภายในเวกเตอร์จะเป็นอ็อบเจกต์จุดที่เป็นจุดกลางเรียงต่อกัน อ็อบเจกต์จุดจะเก็บข้อมูลรายละเอียดสำคัญของจุดไว้ เช่น ตำแหน่ง ความยาว ทิศทางของการเท่ากัน ตำแหน่งแนวการเขียนหลัก เป็นต้น

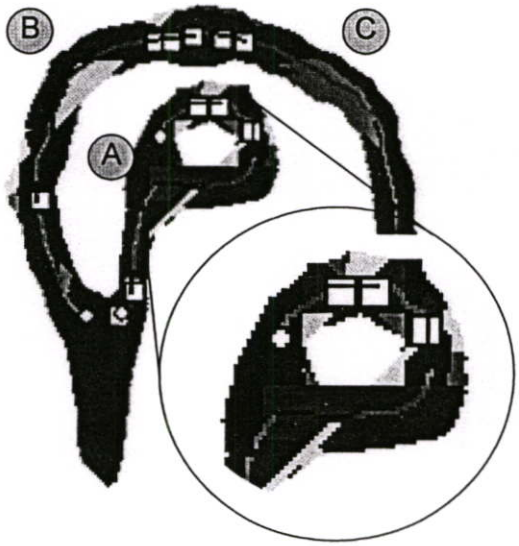


รูปที่ 3.12 แสดงโครงสร้างข้อมูลเบื้องต้นในการประยุกต์เข้ากับแนวคิดการเรียงจุดกลาง

นอกจากแนวคิดที่ได้นำเสนอไป ยังเสนอแนวคิดสำหรับตรวจสอบลักษณะที่ผิดปกติ เพื่อป้องกันและแก้ไขความผิดพลาดที่อาจส่งผลในขั้นตอนต่อไป ดังนี้

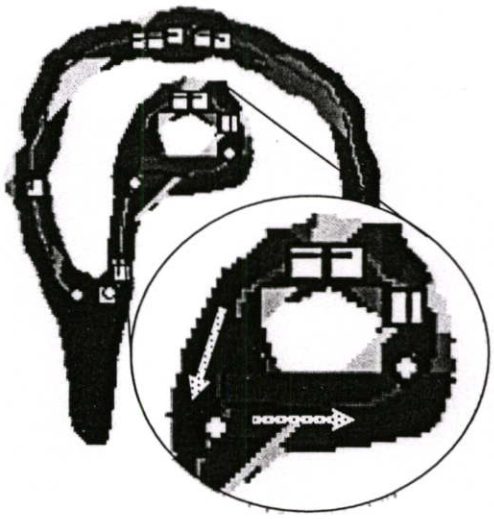
ตรวจสอบการเรียงลำดับจุดกลางที่มีจุดข้างเคียงข้ามแนวการเขียนหลักผิดปกติ

ระหว่างการเรียงจุดกลางที่มีจุดข้างเคียง อาจเกิดกรณีการเรียงจุดข้ามแนวการเขียนหลักที่ผิดปกติ ซึ่งส่งผลความผิดพลาดต่อการเรียงลำดับเส้นโครงร่างได้ จึงเพิ่มส่วนการตรวจสอบสำหรับการเรียงจุดเป็นเส้นโครงร่างที่มีการเปลี่ยนแนวการเขียนหลัก และมีความยาวในช่วงที่เปลี่ยนแนวการเขียนหลักไปเพียงเล็กน้อย ให้พิจารณาแยกเส้นโครงร่างดังกล่าวออกเป็นสองเส้น ตามแนวการเขียนหลักแต่ละแนว



รูปที่ 3.13 แสดงแนวเรียงจุดข้างเคียงที่ข้ามแนวการเขียนหลัก

จากรูปที่ 3.13 จะเห็นว่าบริเวณ A มีการเรียงจุดข้างเคียงเป็นเส้นโครงร่างที่ผิดปกติ คือ ระหว่างที่เรียงจุดในแนวการเขียนแนวดิ่งอยู่ ส่วนที่เรียงข้ามไปยังแนวราบในช่วงสั้นๆ ซึ่งพิจารณาแนวเส้นโครงร่างทั้งสองแนวออกจากกัน ในขณะที่บริเวณ B และ C เป็นการเรียงจุดข้างเคียงข้ามแนวการเขียนหลักที่ปกติเนื่องจากระยะของเส้นโครงร่างที่ถูกเรียงข้ามไปยังสุดสิ้นสุด มีขนาดยาว



รูปที่ 3.14 แสดงลำดับการเขียนที่ถูกต้อง ภายหลังจากแยกส่วนโครงร่างที่ผิดปกติออกจากกัน

3.2.3 หลักการเรียงลำดับเส้นโครงร่าง

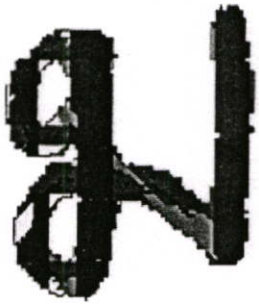
พิจารณาจากจุดต้นและจุดปลายของเส้นโครงร่าง มีแนวทิศทางการเขียนตัวอักษรที่เป็นไปได้สี่แนว (แนวดิ่ง แนวนอน แนวเฉียงซ้าย แนวเฉียงขวา) ซึ่งแนวการเขียนนี้สามารถหาได้จากการนำค่าจุดดำที่เรียงต่อกันในทิศตรงข้ามมาบวกกัน และเลือกทิศที่มีค่ามากที่สุดเป็นแนวการเขียนหลักของจุดนี้ หากนำจุดโครงร่างมาแบ่งตามแนวทิศของการเขียนหลัก จะได้เป็นจุดของเส้นโครงร่างที่อยู่บนแนวทิศทั้งสี่ทิศ จากนั้นจึงทำการเรียงจุดในแนวทิศเดียวกันเข้าด้วยกัน โดยถ้าเป็นจุดต้นให้หาจุดปลาย แต่ถ้าเป็นจุดปลาย ต้องไปต่อกับจุดต้นที่ใกล้ที่สุดภายในแนวการเขียนหลักที่ต่อเนื่องกัน โดยสามารถแยกแนวการเขียนหลักทิศเดียวแต่คนละช่วงการเขียนได้ด้วยการพิจารณาจากระยะห่างจากขอบจากจุดนั้นๆ

ในเบื้องต้น ต้องทำการหาว่าจุดสิ้นสุด(จุดต้น จุดปลาย) บนเส้นโครงร่าง แต่ละจุดที่กำหนดไว้ในขั้นตอน 3.2.2 นั้นอยู่ในแนวการเขียนหลักแนวใดก่อน ซึ่งมีแนวคิดดังนี้ ณ จุดที่เป็นจุดสิ้นสุด นำระยะห่างจากขอบในทิศตรงข้ามกันมารวมกัน จะได้เป็นค่าในแนวดิ่ง แนวนอน แนวเฉียงซ้าย แนวเฉียงขวา แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบกัน แนวที่มีค่ามากที่สุดจะเป็นแนวการเขียนหลักของจุดดังกล่าว โดยอัลกอริธึม ดังรูปที่ 3.16 แสดงแนวการเขียนหลักของจุดทั้งตัวอักษร เพื่อให้เห็นภาพชัดเจน แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ค่าดังกล่าวถูกคำนวณเฉพาะจุดสิ้นสุดหรือจุดที่ต้องการพิจารณาเท่านั้น

From Figure 3.6 Give X is present state and A-H is previous state for each direction

```
1.  Scan bitmap from top to down from left to right
2.  {
3.      Dir1= X.black_pixel_count_E  + X.black_pixel_count_W  // East – West
4.      Dir2= X.black_pixel_count_N  + X.black_pixel_count_S  // North – South
5.      Dir3= X.black_pixel_count_NW + X.black_pixel_count_SE // NW – SE
6.      Dir4= X.black_pixel_count_SW + X.black_pixel_count_NE // SW – NE
7.      if (Dir1 is Max ) SetPixel (x,y) = Red
8.      if (Dir2 is Max ) SetPixel (x,y) = Blue
9.      if (Dir3 is Max ) SetPixel (x,y) = Green
10.     if (Dir4 is Max ) SetPixel (x,y) = Yellow
11. }
```

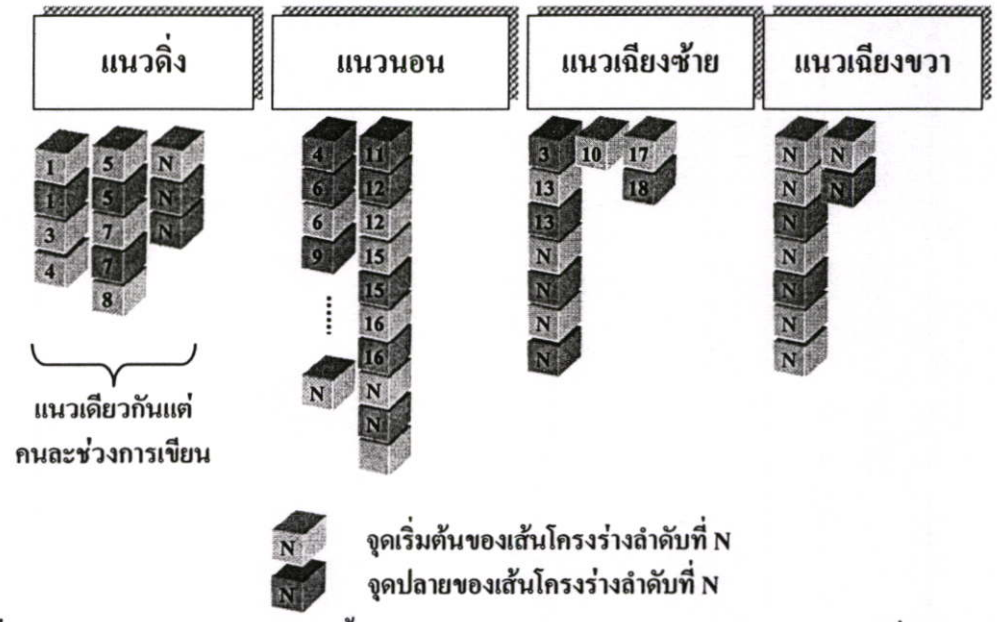
รูปที่ 3.15 แสดงบริเวณแนวการเขียนหลักบนตัวอักษร



รูปที่ 3.16 แสดงโครงร่างบนแนวการเขียนหลัก

เมื่อได้ข้อมูลดังกล่าว ให้แยกจุดสิ้นสุดที่อยู่บนแนวการเขียนทั้งสี่แนวเก็บไว้ในโครงสร้างข้อมูลเวกเตอร์ (ดังรูปที่ 3.17) แล้วพิจารณาทีละแนว ดังนี้ แนวดิ่งนำจุดต้นและจุดปลาย (จุดสิ้นสุด) มาเรียงใหม่ตามค่าในแกน y ดังนั้น จุดสิ้นสุดจุดแรกจึงเป็นจุดที่อยู่ส่วนบนสุดของภาพ หลังจากนั้นให้เลื่อนไปยังจุดสิ้นสุดอีกจุดที่อยู่บนส่วนของเส้นโครงร่างเดียวกัน (จุดต้น → จุดปลาย, จุดปลาย → จุดต้น) ถ้าไม่สามารถเลื่อนไปยังจุดสิ้นสุดอีกจุดได้ เนื่องจากอีกจุดอยู่คนละแนวการเขียนหรือจุดต้นและจุดปลายเป็นจุดเดียวกัน ให้ใช้จุดดังกล่าวเป็นจุดตั้งต้น แล้วตรวจสอบ

จุดในลำดับถัดไป ว่าอยู่ในช่วงของแนวการเขียนคนละช่วงกันหรือไม่ โดยตรวจสอบจากระยะทางไปยังขอบบนจุดดังกล่าว ในทิศ 0 2 4 6 (ดังตัวอย่างในรูป 3.18 แนวการเขียนหลักแนวดิ่งแบ่งได้ออกเป็น 4 ช่วง) หากอยู่ในช่วงเดียวกันก็ให้เลื่อนไปยังจุดต่อไป แต่ถ้าอยู่คนละช่วงให้ดึงจุดนั้นออกไปใส่ไว้ในอีกเวกเตอร์หนึ่ง ทำซ้ำขั้นตอนดังกล่าวไปเรื่อยๆ จนกระทั่งข้อมูลในเวกเตอร์ทุกเวกเตอร์ถูกจัดเรียงลำดับอย่างครบถ้วน



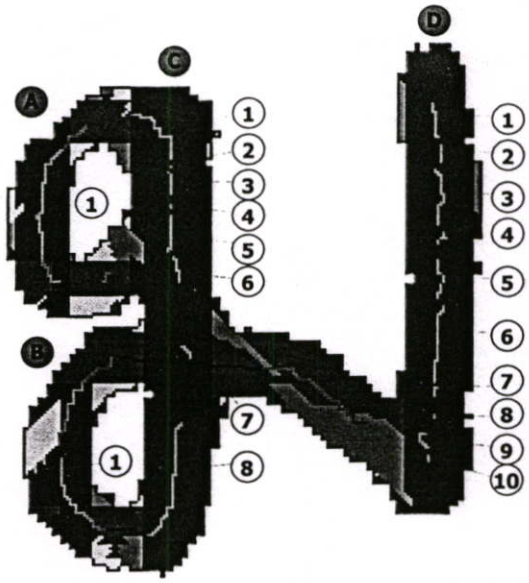
รูปที่ 3.17 แสดงโครงสร้างข้อมูลเบื้องต้นในการประยุกต์เข้า กับแนวคิดการเรียงจุดเริ่มต้นและจุดปลาย ในแนวการเขียนหลักแนวเดียวกัน

ทำลักษณะเดียวกันกับบริเวณแนวการเขียนหลักที่เหลืออยู่ โดยแนวดิ่งให้จัดเรียงจุดในแนวแกน X ใช้ระยะห่างจากขอบในทิศ 0 2 4 6 แยกแนวการเขียนคนละช่วง ส่วนในแนวเฉียงซ้ายและเฉียงขวา สามารถจัดเรียงข้อมูลในแนวแกน X หรือ Y ก็ได้แกนใดแกนหนึ่ง โดยพิจารณาความแตกต่างของช่วงการเขียนได้โดยใช้ค่าในทิศ 1 3 4 7

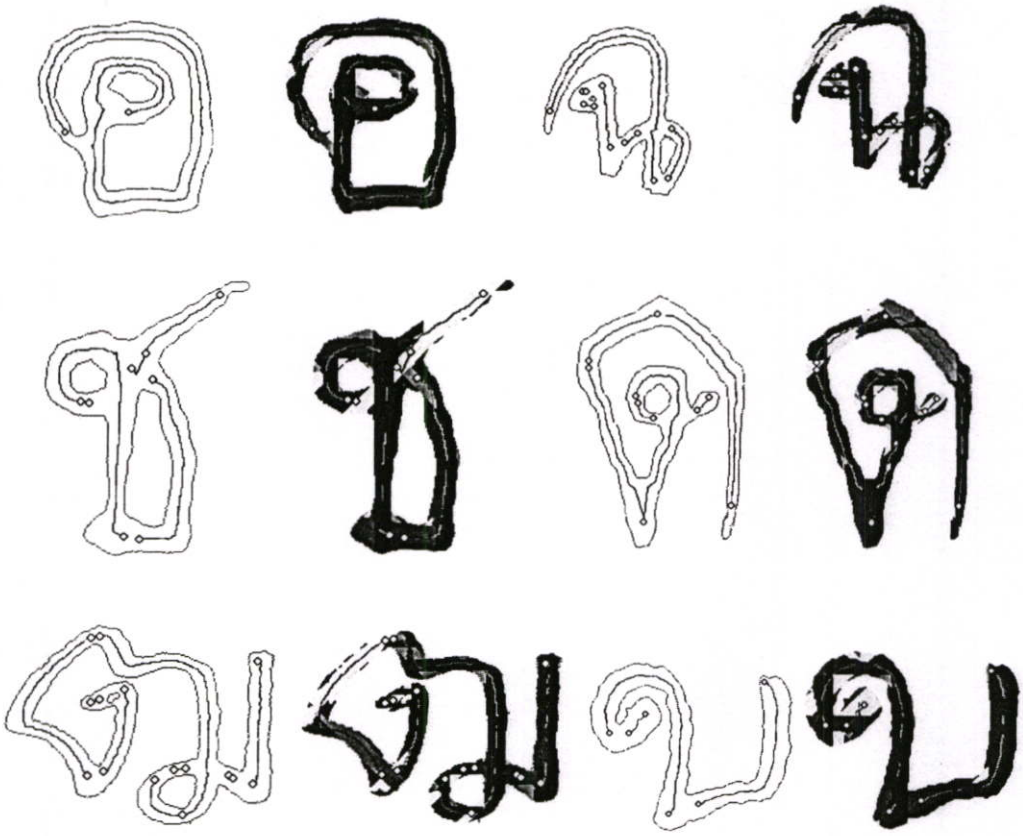
จากรูปที่ 3.18 จะเห็นได้ว่าในแนวการเขียนหลักแนวดิ่งของตัวอักษร ม. ม้า แบ่งออกได้ 4 แนวการลากเส้น (A B C และ D) เมื่อนำจุดต้นและจุดปลายมาเรียงต่อกัน ตามแนวแกน Y จะเป็นการเรียงลำดับจุด จากบนไปล่างได้ และแยกแนวการเขียนแต่ละช่วงออกโดยตรวจสอบว่าอยู่ในช่วงของแนวการเขียนคนละช่วงกันหรือไม่ โดยตรวจสอบจากระยะทางไปยังขอบบนจุดดังกล่าว ในทิศ 0 2 4 6 ทำให้ได้เป็นลำดับของเส้นโครงร่างบนช่วงการเขียนที่ต่างกัน

เพื่อให้การตรวจสอบความถูกต้องทำได้โดยง่าย อัลกอริธึมที่แสดงในรูปที่ 3.18 จึงเป็นการลากเส้นเชื่อมกันระหว่างเส้นโครงร่างแต่ละเส้น โดยในทางปฏิบัติ ข้อมูลจุดต่างๆ จะถูกจัดเรียงลำดับภายในโครงสร้างข้อมูล และมีการทำเครื่องหมายไว้ว่าจุดใดเป็นจุดต้น จุดปลายของแนว

การเขียนแต่ละช่วง ดังรูปที่ 3.18 แนวการเขียนหลักแนวดิ่ง Ⓓ มีจุดต้นเป็นจุดต้นของเส้นโครงร่าง ① และมีจุดปลายเป็นจุดปลายของเส้นโครงร่าง ⑩

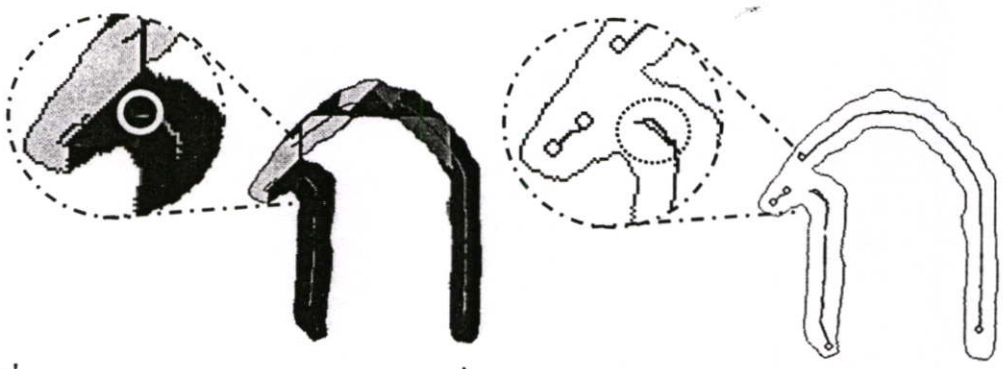


รูปที่ 3.18 เส้นเชื่อมสีดำ แสดงการเรียงลำดับของส่วนของเส้นโครงร่างในแนวการเขียนต่างๆ



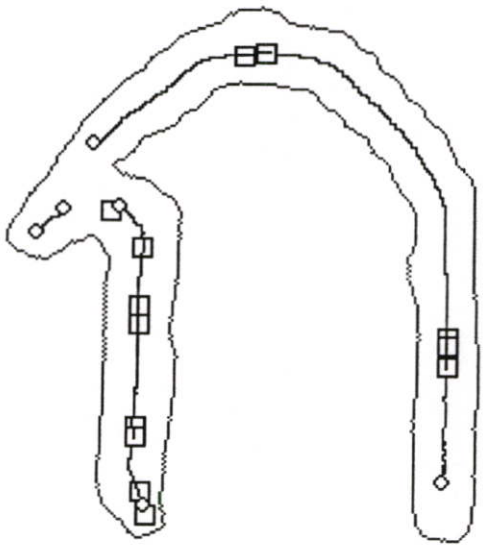
รูปที่ 3.19 ตัวอย่างที่ได้จากแนวคิดในการเรียงเส้นโครงร่างตามแนวการเขียนหลักของภาพลายมือ

จากขั้นตอนนี้ เห็นได้ว่ามีเส้นโครงร่างที่มีขนาดสั้นเกิดขึ้นอยู่บ้าง ซึ่งในบางกรณีอาจทำให้อัลกอริธึมในการเรียงลำดับผิดจากการเขียนจริงๆ ส่วนใหญ่เกิดจากหลายกรณีประกอบกันเช่น บริเวณที่มีการเปลี่ยนทิศทางการเขียนในช่วงสั้น ทำให้เกิดจุดกลางบริเวณดังกล่าวเป็นจุดกลางในทิศที่ไม่สอดคล้องกับแนวการเขียนหลัก ดังเช่นรูปที่ 3.20 (ซ้าย) บริเวณจะงอยหน้าของอักษร ก. ไก่ ทำให้การเรียงลำดับเส้นโครงร่างผิดไปจากความเป็นจริง ดังรูปที่ 3.20 (ขวา)



รูปที่ 3.20 แสดงความผิดพลาดจากลักษณะที่ไม่สอดคล้องกันระหว่างค่าจุดกลางและทิศของแนวการเขียนหลัก

แนวทางการปรับปรุงข้อผิดพลาดในส่วนนี้คือ กำหนดให้ละทิ้งเส้นโครงร่างที่มีความยาวน้อยกว่าค่าต่ำสุด (ซึ่งพิจารณาตามขนาดเส้นลากของตัวอักษรลายมือ) ในขั้นตอนการเรียงเส้นโครงร่างบนแนวการเขียนหลักช่วงเดียวกัน ซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 3.21 ซึ่งบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมแทนเส้นโครงร่างที่ถูกตัดทิ้งออกไป นอกจากนี้การปรับปรุงยังช่วยให้เส้นที่ได้มีทิศทางที่ชัดเจนขึ้นด้วย



รูปที่ 3.21 แสดงการจัดเรียงเส้นโครงร่างโดยไม่พิจารณาเส้นที่มีขนาดเล็ก

ในการเรียงเส้นโครงร่างบนแนวการเขียนหลักช่วงเดียวกัน จะมีกรณีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ในลักษณะต่างๆ ซึ่งได้นำเสนอพร้อมแนวทางแก้ไขไว้ดังต่อไปนี้

3.2.3.1 การเรียงลำดับเส้นโครงร่างภายในช่วงการเขียนหลักที่ไม่ต่อเนื่องกัน

ตามปกติลักษณะของการเรียงจุดเริ่มต้นหรือจุดสิ้นสุดภายในแนวการเขียนหลักนั้น จะมีการเรียงข้ามไปยังแนวที่ไม่ต่อเนื่องกัน แต่ยังถือว่าอยู่ในช่วงการเขียนเดียวกัน ซึ่งเกิดขึ้นบนบริเวณที่มีขมวดแบบต่างๆ อย่างเช่น ตัว ม ม้า ตัว น หนู และตัว ฉ ฉิ่ง เป็นต้น แต่ในกรณีผิดพลาดจะเกิดจาก การเปลี่ยนทิศทางของการเขียนในลักษณะหักมุม (แนวเฉียงซ้าย แนวเฉียงขวา) ทำให้แนวการเขียนหลักของตัวอักษรไม่ต่อเนื่องกันเป็นช่วงแคบ และทำให้เกิดการเรียงเส้นโครงร่างที่ไม่เหมาะสมขึ้นได้ จึงทำให้ลำดับการเขียนผิดเพี้ยนไปได้ในบริเวณดังกล่าว ดังรูปที่ 3.22

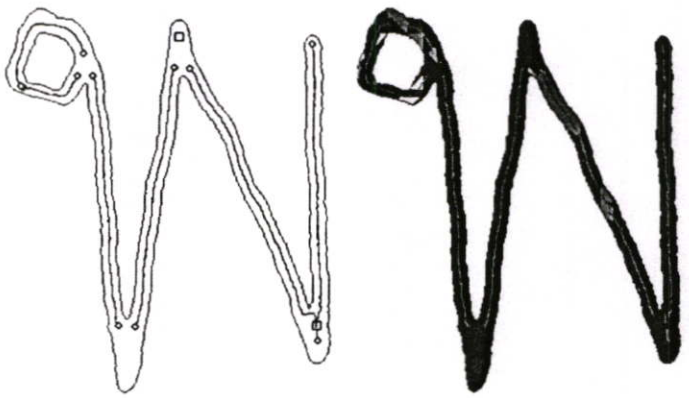
รูปที่ 3.22 การเรียงลำดับเส้นโครงร่างภายในแนวการเขียนหลักที่ไม่ต่อเนื่อง

การปรับปรุงแก้ไขในส่วนการเรียงลำดับเส้นโครงร่างตามแนวการเขียนหลักให้เพิ่มขั้นตอนการตรวจสอบความต่อเนื่องของแนวการเขียนหลัก แทนที่จะพิจารณาเพียงแต่ช่วงเดียวกันเพียงเงื่อนไขเดียว ซึ่งช่วยแก้ไขกรณีความผิดพลาดดังกล่าว

รูปที่ 3.23 แสดงผลลำดับการเขียนที่ถูกต้อง โดยการปรับปรุงตามแนวทางแก้ไข

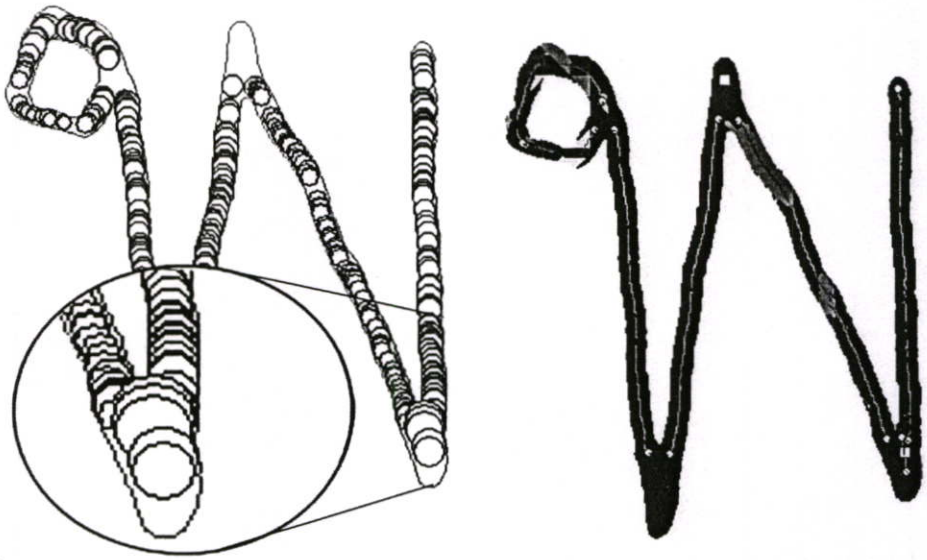
3.2.3.2 การเรียงลำดับเส้นโครงร่างภายในแนวการเขียนหลักที่ต่อเนื่องผิดปกติ

เกิดในกรณีแนวการเขียนหลักทิศเดียวกันแต่อยู่บนละช่วงการเขียน มาเชื่อมต่อกันทำให้การตรวจสอบแนวการเขียนหลักคนละช่วง ตามแนวคิดที่ได้นำเสนอไป มีข้อผิดพลาดในการแยกความแตกต่าง ซึ่งเกิดในตัวอักษรที่มีเส้นทแยงกับเส้นดิ่งหรือเส้นตั้งต่อกัน เช่น ตัว จ. จาน ตัว พ. พาน ตัว ฟ. ฟัน เป็นต้น ตามปกติ เส้นโครงร่างในบริเวณดังกล่าวจะเป็นความผิดพลาดเพียงเล็กน้อย แต่หากประกอบกับลักษณะการเขียนที่เอียงด้วย ทำให้เส้นดังกล่าวถูกนำมาพิจารณาเชื่อมในแนวการเขียนหลักได้ ดังนั้น ลำดับการเขียนบริเวณดังกล่าว จึงมีโอกาสผิดเพี้ยนไปได้ จากรูปที่ 3.23 สังเกตได้ว่า บริเวณเส้นทแยงลงเชื่อมกับเส้นหลังของตัว พ. พาน ถูกพิจารณาเป็นแนวการเขียนหลักช่วงเดียวกัน ทำให้อัลกอริธึมการจัดเรียงผิดพลาด



รูปที่ 3.24 การเรียงลำดับเส้นโครงร่างภายในแนวการเขียนหลักที่ต่อเนื่องผิดปกติ

โดยการพิจารณาขนาดวงกลมหรือระยะการเท่ากันในทิศตรงข้ามของจุดกลาง เพื่อตรวจสอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของวงกลมที่ผิดปกติ ประกอบกับพิจารณาทิศตรงข้ามของระยะที่เท่ากันระหว่างสองจุดสิ้นสุดบนแต่ละเส้นโครงร่างว่าเป็นทิศเดียวกันหรือไม่ เพื่อแยกความแตกต่างในลักษณะที่เกิดขึ้นได้ หรืออาจใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยขนาดของวงกลมบนเส้นโครงร่างแต่ละเส้น ในตรวจสอบการเรียงลำดับเส้นโครงร่างบนแนวการเขียนหลักที่ผิดปกติก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.24 ขณะที่เรียงจุดต้นหรือจุดปลายบนเส้นโครงร่างบริเวณเส้นทแยงลงเชื่อมต่อกันกับเส้นหลังของตัว พ. พาน ซึ่งอยู่ในแนวการเขียนหลักแนวดิ่งเหมือนกัน เห็นได้ว่าวงกลมส่วนดังกล่าวจะมีขนาดใหญ่กว่าวงกลมข้างเคียง เนื่องจากเป็นระยะรัศมีของทิศตรงข้ามกันในแนวเฉียง ซึ่งบริเวณเส้นหลังเป็นระยะรัศมีของทิศตรงข้ามกันในแนวนอน ทำให้สามารถแยกความแตกต่างของแนวการเขียนหลักบนบริเวณดังกล่าวได้ ดังรูปที่ 3.25 (ขวา)



รูปที่ 3.25 แสดงขนาดวงกลมของจุดกลางในตัวอักษรที่มีแนวการเขียนหลักที่ต่อเนื่องผิดปกติ

3.2.4 หลักการเรียงลำดับแนวการเขียนหลักแต่ละช่วง

ภายหลังจากที่เส้นโครงร่างภายในแนวการเขียนหลักถูกเรียงลำดับกันแล้ว จึงเชื่อมแนวการเขียนแต่ละแนวเข้าด้วยกัน โดยพิจารณาจากระยะห่างของจุดปลายแต่ละแนวเป็นหลัก ตามสมการการหาระยะทางระหว่างจุดสองจุดบนระนาบสองมิติ ซึ่งในตอนนี้จุดปลายที่เหลือจะมีจำนวนน้อยแล้ว จึงไม่ทำให้เกิดความซ้ำซ้อนในการคำนวณมากเกินความจำเป็น นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาเงื่อนไขเพิ่มเติมอีก สำหรับกรณีที่มีจุดสิ้นสุดของแนวการเขียนแต่ละแนว อยู่ในบริเวณเดียวกันมากกว่าสองจุดขึ้นไป โดยให้ใช้การตรวจสอบขนาดการเปลี่ยนแปลงทิศทางแทน เพื่อจะเรียงลำดับแนวการเขียนหลักตามทิศทางตามธรรมชาติ อีกทั้งต้องพิจารณาเรื่องการลากเส้นเชื่อมแนวการเขียนหลักที่ผิดปกติ เช่น การลากเส้นออกไปนอกขอบของภาพตัวอักษร หรือการเชื่อมไปยังจุดสิ้นสุดอีกจุดในแนวการเขียนหลักช่วงเดียวกัน

ในเชิงอัลกอริธึมมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ หาระยะทางระหว่างจุดสิ้นสุดของแต่ละแนวการเขียนหลักของตัวอักษร โดยใช้สมการการคำนวณระยะทางระหว่างจุดบนระนาบสองมิติ

$$\text{ระยะทางระหว่างจุด } P_1 \text{ และ } P_2 = \sqrt{(X_1-X_2)^2 + (Y_1-Y_2)^2}$$

เลือกจุดที่มีระยะห่างระหว่างจุดใกล้ที่สุดที่มีค่ามากที่สุดเป็นจุดตั้งต้น (ในบางกรณีจุดตั้งต้นดังกล่าว อาจเป็นจุดที่ไม่มีระยะระหว่างจุดเลย เนื่องจากเป็นระยะที่ต้องลากตัดผ่านขอบตัวอักษรไปยังแนวการเขียนหลักแนวอื่นๆ หรือเป็นระยะระหว่างจุดบนแนวการเขียนหลักช่วงเดียวกัน) หลังจากนั้นเลื่อนไปยังตำแหน่งจุดสิ้นสุดถัดไปบนแนวการเขียนหลักช่วงเดียวกัน พิจารณาระยะห่างที่สั้นที่สุดระหว่างจุดสิ้นสุดบนแนวการเขียนหลักแต่ละช่วงในการเชื่อมต่อแนว

การเขียนแต่ละแนวเข้าด้วยกัน หากระยะระหว่างจุดใกล้เคียงกัน หรืออยู่ในช่วงค่าคงที่ที่กำหนดไว้ แสดงว่ามีจุดสิ้นสุดของแต่ละแนวการเขียนหลักมีมากกว่าสองจุดอยู่ในบริเวณดังกล่าว จึงให้พิจารณาขนาดของการเปลี่ยนแปลงทิศทางแทน โดยสามารถหาเวกเตอร์ของจุดสิ้นจุดได้ ด้วยการดึงค่าตำแหน่ง X และ Y ของจุดที่อยู่ภายในเส้นโครงร่างเดียวกันย้อนกลับไประยะหนึ่ง (กำหนดให้เป็นตัวแปร ซึ่งปรับเปลี่ยนค่าได้) เพื่อคำนวณเวกเตอร์บริเวณจุดปลายของแนวการเขียนหลักแต่ละแนว

$$\textit{เวกเตอร์บริเวณจุดสิ้นสุดของแนวการเขียนหลัก} = (X_T - X_L)i + (Y_T - Y_L)j$$

X_T = ตำแหน่ง X ของจุดสิ้นสุด

X_L = ตำแหน่ง X ของจุดที่ย้อนกลับไประยะหนึ่งภายในเส้นโครงร่างเดียวกัน

Y_T = ตำแหน่ง Y ของจุดสิ้นสุด

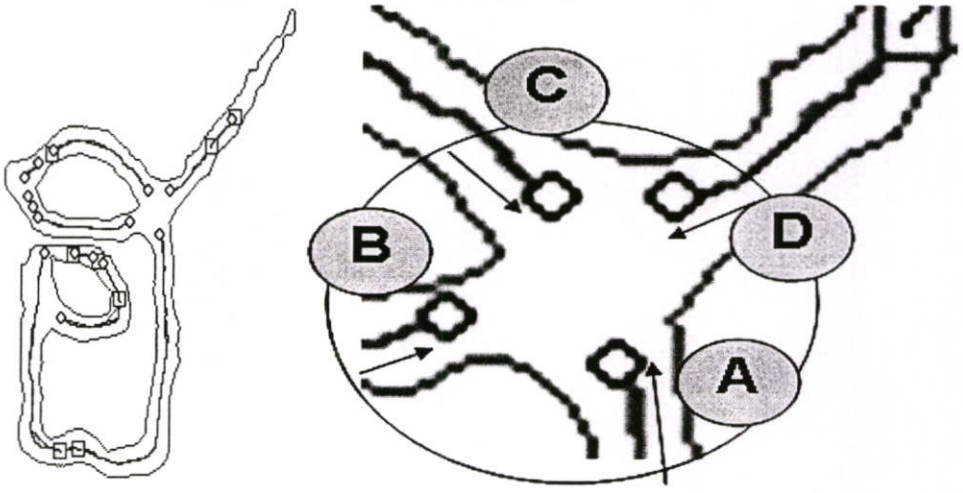
Y_L = ตำแหน่ง Y ของจุดที่ย้อนกลับไประยะหนึ่งภายในเส้นโครงร่างเดียวกัน

เรียงจุดสิ้นสุดที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของเวกเตอร์ไปยังจุดถัดไปน้อยที่สุดเข้าด้วยกัน โดยสามารถหาขนาดของมุมที่เปลี่ยนแปลงระหว่างสองเวกเตอร์ด้วยสมการ

$$\text{มุมที่เปลี่ยนแปลง} = \cos^{-1} \frac{Vin \bullet Vout}{\|Vin\|\|Vout\|}$$

Vin = เวกเตอร์ของจุดสิ้นสุดที่กำลังพิจารณา

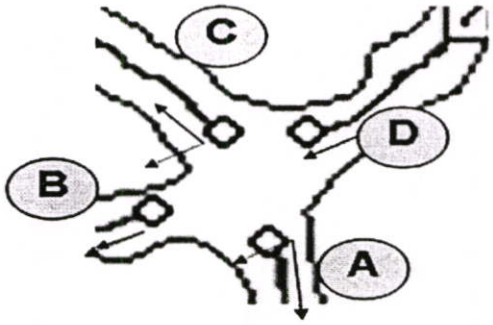
$Vout$ = เวกเตอร์กลับทิศของจุดสิ้นสุดถัดไป



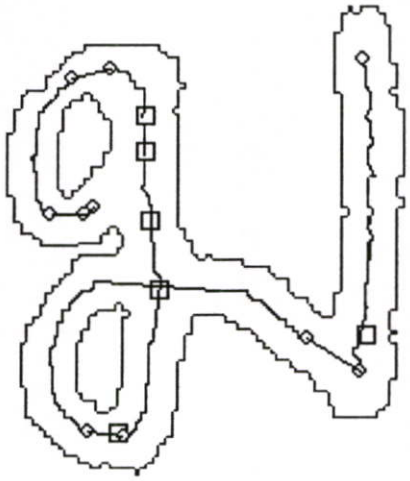
รูปที่ 3.26 แสดงจุดสิ้นสุดของแนวการเขียนหลักแต่ละช่วงที่อยู่ในบริเวณเดียวกัน

จากรูปที่ 3.26 จะเห็นได้ว่าบริเวณจุดตัดของหางขมวดตวัดบนตัว ฮ. นกฮูก มีจุดสิ้นสุดของแต่ละแนวการเขียนหลักมากกว่าสองตำแหน่งที่มีระยะห่างใกล้เคียงกัน จึงใช้การตรวจสอบทิศทางแทน บนรูปที่ 3.27 จุด D คือจุดที่กำลังพิจารณาจุดถัดไป A B และ C ในบริเวณดังกล่าว โดยการ

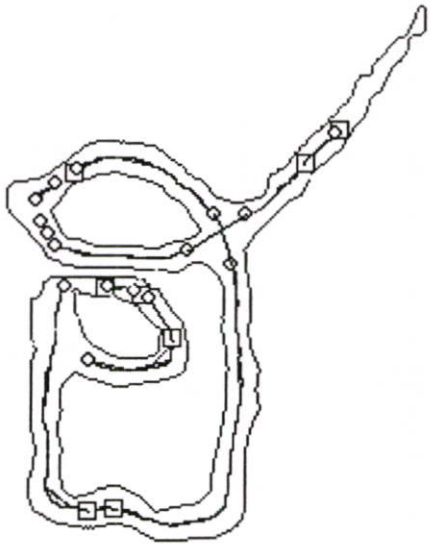
เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงมุมของเวกเตอร์ D กับเวกเตอร์กลับทิศของ A B และ C จะให้ได้ว่า เวกเตอร์ B มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางน้อยที่สุด ดังนั้นจุดสิ้นสุดบนแนวการเขียนหลัก D จึงเชื่อมกับจุดสิ้นสุดบนแนวการเขียนหลัก B



รูปที่ 3.27 แสดงเวกเตอร์บริเวณจุดสิ้นสุดของแนวการเขียนหลักแต่ละช่วง



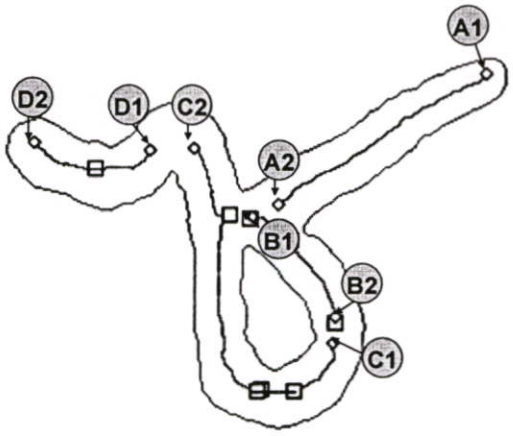
รูปที่ 3.28 ผลลัพธ์ที่ได้จากการเรียงลำดับแนวการเขียนหลักแนวต่างๆ เข้าด้วยกัน



รูปที่ 3.29 ลำดับแนวการเขียนหลักแนวต่างๆ โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทิศทาง

3.2.4.1 ตัวอย่างขั้นตอนของอัลกอริธึมในการเรียงลำดับแนวการเขียนหลัก

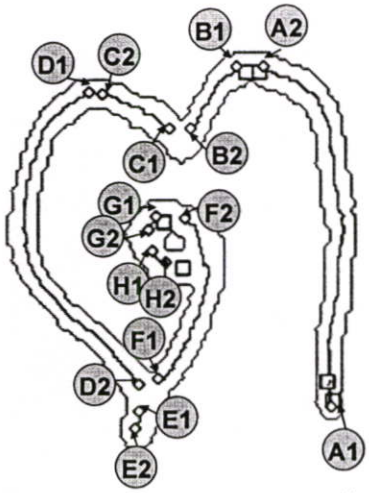
จากรูปที่ 3.30 ภายหลังจากผ่านขั้นตอนในการเรียงเส้นโครงร่างบนแนวการเขียนหลักช่วงเดียวกัน จุดต้นและจุดปลายที่เหลืออยู่บนแนวการเขียนแต่ละแนวจะถูกนำมาพิจารณาระยะทางบนระนาบสองมิติไปยังจุดสิ้นสุดอื่นๆ บนแต่ละช่วงแนวการเขียน จากรูปจุด A1 เป็นจุดที่มีระยะไปจุดสิ้นสุดอื่นๆ มากที่สุด (ระยะจาก A1 ไปยัง B1) จึงถูกพิจารณาเป็นจุดตั้งต้น แล้วเลื่อนไปยังจุดสิ้นสุดอีกตำแหน่งที่อยู่บนแนวการเขียนเดียวกัน (A2) จากจุด A2 พิจารณาเรียงต่อจุดสิ้นสุดถัดไปที่มีระยะห่างน้อยที่สุด ได้แก่จุด B1 จากจุด B1 เลื่อนไปยังจุด B2 แล้วเชื่อมต่อไปยังจุดที่มีระยะห่างน้อยที่สุด ทำตามขั้นตอนดังกล่าวไปจนครบ จึงได้ลำดับการเขียนของตัวอักษร เป็น A1 A2 B1 B2 C1 C2 D1 D2 หรือ D2 D1 C2 C1 B2 B1 A2 A1 ในกรณีพิจารณาเพียงลำดับของเส้นที่เรียงต่อกัน



รูปที่ 3.30 ขั้นตอนในการพิจารณาเรียงจุดต้นจุดปลายที่เหลืออยู่บนแนวการเขียนหลัก

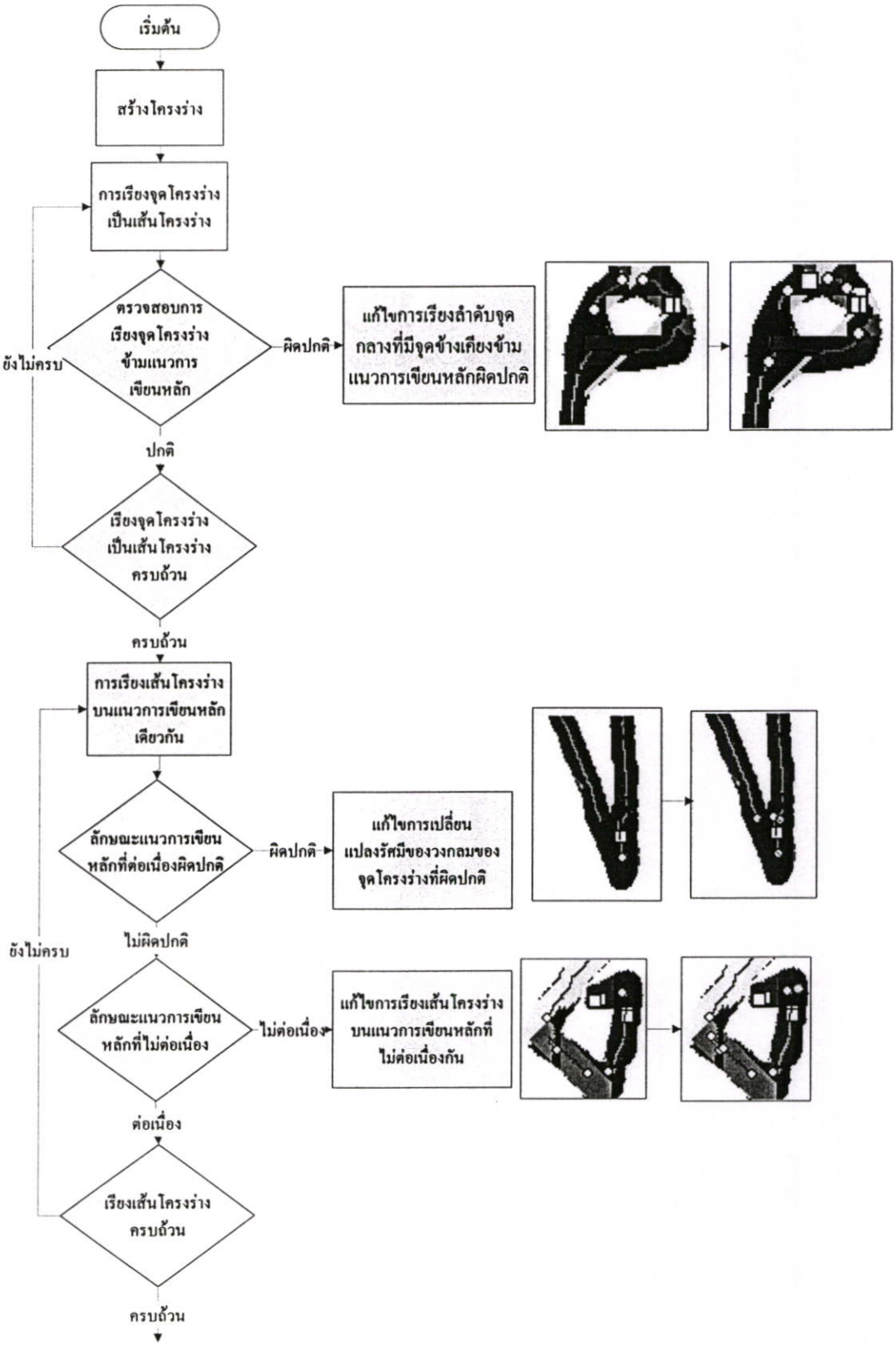
อีกตัวอย่างในรูปที่ 3.31 จุด A1 เป็นจุดตั้งต้น เนื่องจากจุดที่ไม่สามารถเชื่อมต่อไปยังจุดอื่นๆ บนแนวการเขียนที่ต่างกันได้ โดยการพิจารณาระยะจากขอบ ณ ตำแหน่งจุดดังกล่าว เพื่อตรวจสอบขอบของภาพอักษรลายมือ การเรียงจุดจะดำเนินไปตามขั้นตอนของการพิจารณาระยะห่างที่สั้นที่สุดระหว่างจุดสิ้นสุดของแนวการเขียนแต่ละช่วง จนเกิดกรณีที่ระยะห่างระหว่างจุดมีระยะใกล้เคียงกัน ซึ่งกำหนดไว้ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ (ขึ้นอยู่กับขนาดของภาพและเส้นลาก) หรือมีระยะสั้นกว่าค่าต่ำสุด (10 เปอร์เซ็นต์ของผลรวมความยาวของเส้นโครงร่างในขั้นตอน 3.2.2) สำหรับการตรวจสอบว่าจุดทั้งหมดที่กำลังพิจารณาอยู่ในบริเวณเดียวกัน นั้นคือ การเรียงแนวการเขียนระหว่าง D2 กับ F1 หรือ E1 โดยระยะห่างใกล้เคียงกันคือ 11.71 และ 14 หน่วย ตามลำดับ จะถูกพิจารณาว่าอยู่ในบริเวณเดียวกัน จึงใช้การตรวจสอบทิศทางที่เป็นธรรมชาติ ในการเรียงลำดับแนวการเขียน จากรูปที่ 3.31 เวกเตอร์บริเวณจุด F1 มีการเปลี่ยนแปลงจากเวกเตอร์ ณ จุด D2 เท่ากับ 85.89 องศา และ เวกเตอร์ที่จุด E1 มีการเปลี่ยนแปลงจากเวกเตอร์ เท่ากับ 60.42 องศา ดังนั้น จุด E1

จะถูกเรียงต่อจากจุด D2 เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางน้อยที่สุดหรือมีทิศทางเป็นธรรมชาติ จึงได้ลำดับการเรียงแนวการเขียนหลักเป็นดังนี้ A2 B1 B2 C1 C2 D1 D2 E1 E2 F1 F2 G1 G2 H1 H2 หรือ H2 H1 G2 G1 F2 F1 E2 E1 D2 D1 C2 C1 B2 B1 A2 A1 ในกรณีพิจารณาเพียงลำดับของเส้นที่เรียงต่อกัน

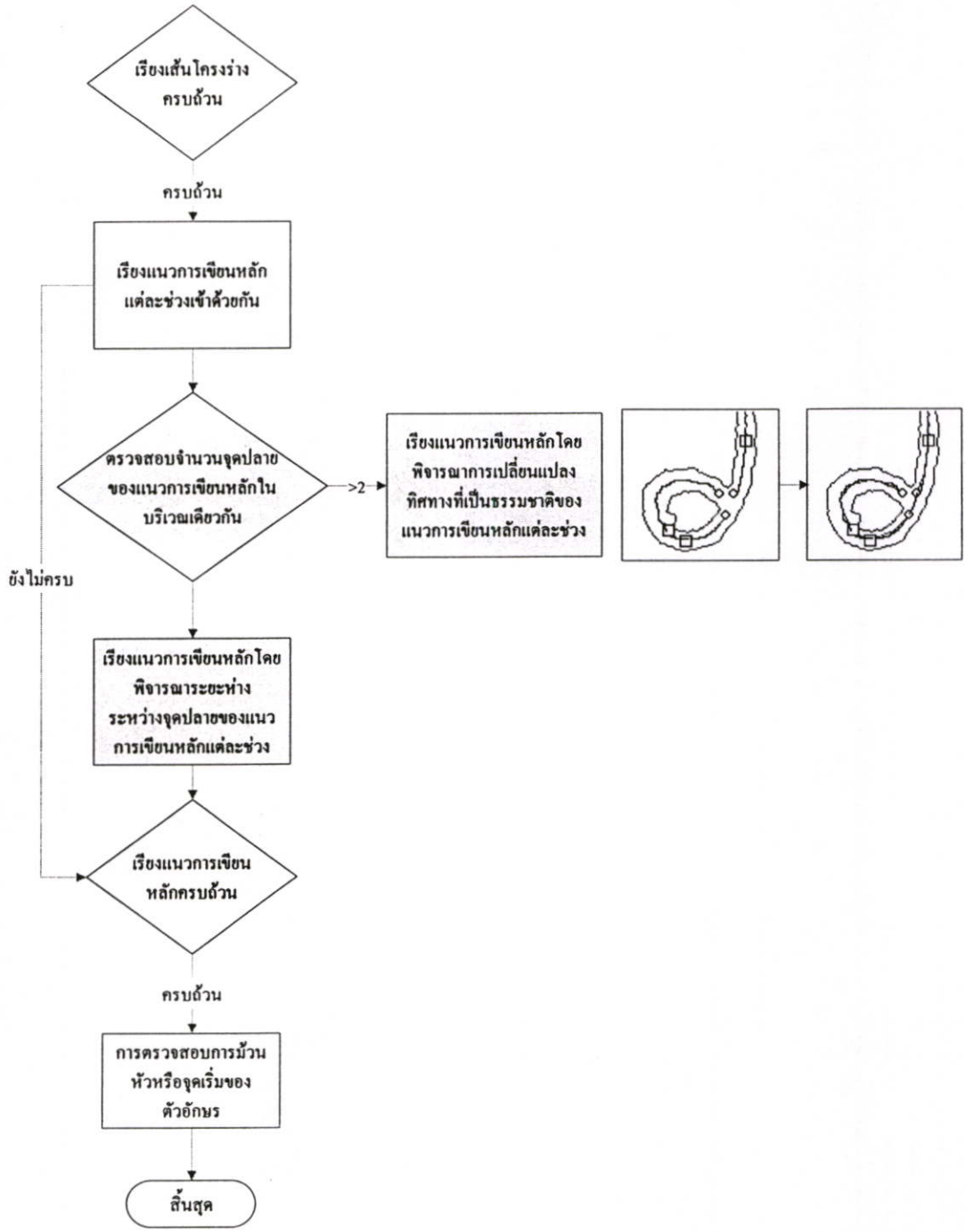


รูปที่ 3.31 ขั้นตอนในการพิจารณาเรียงจุดต้นจุดปลายที่เหลืออยู่บนแนวการเขียนหลัก

จากขั้นตอนและตัวอย่างที่ได้นำเสนอไปทั้งหมดในส่วนของการดึงลำดับทิศทางการเขียน สามารถสรุปการขั้นตอนของอัลกอริธึม ได้ดังรูปที่ 3.32 ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลลัพธ์สุดท้ายนั้นไม่ได้บ่งชี้ถึงตำแหน่งเริ่มต้นที่ถูกต้องของตัวอักษรดังกล่าว แต่เป็นเพียงข้อมูลลำดับการเขียนก่อนหลังของส่วนประกอบต่างๆ ตามโครงสร้างตัวอักษรจากภาพลายมือ โดยที่ลำดับการเขียนที่เรียงต่อกันนั้น จะมีองค์ประกอบหรือมีรูปแบบที่สามารถใช้ในการระบุเป็นตำแหน่งเริ่มต้นของการเขียนได้ ซึ่งได้นำเสนอแนวคิดดังกล่าวในกระบวนการต่อไป



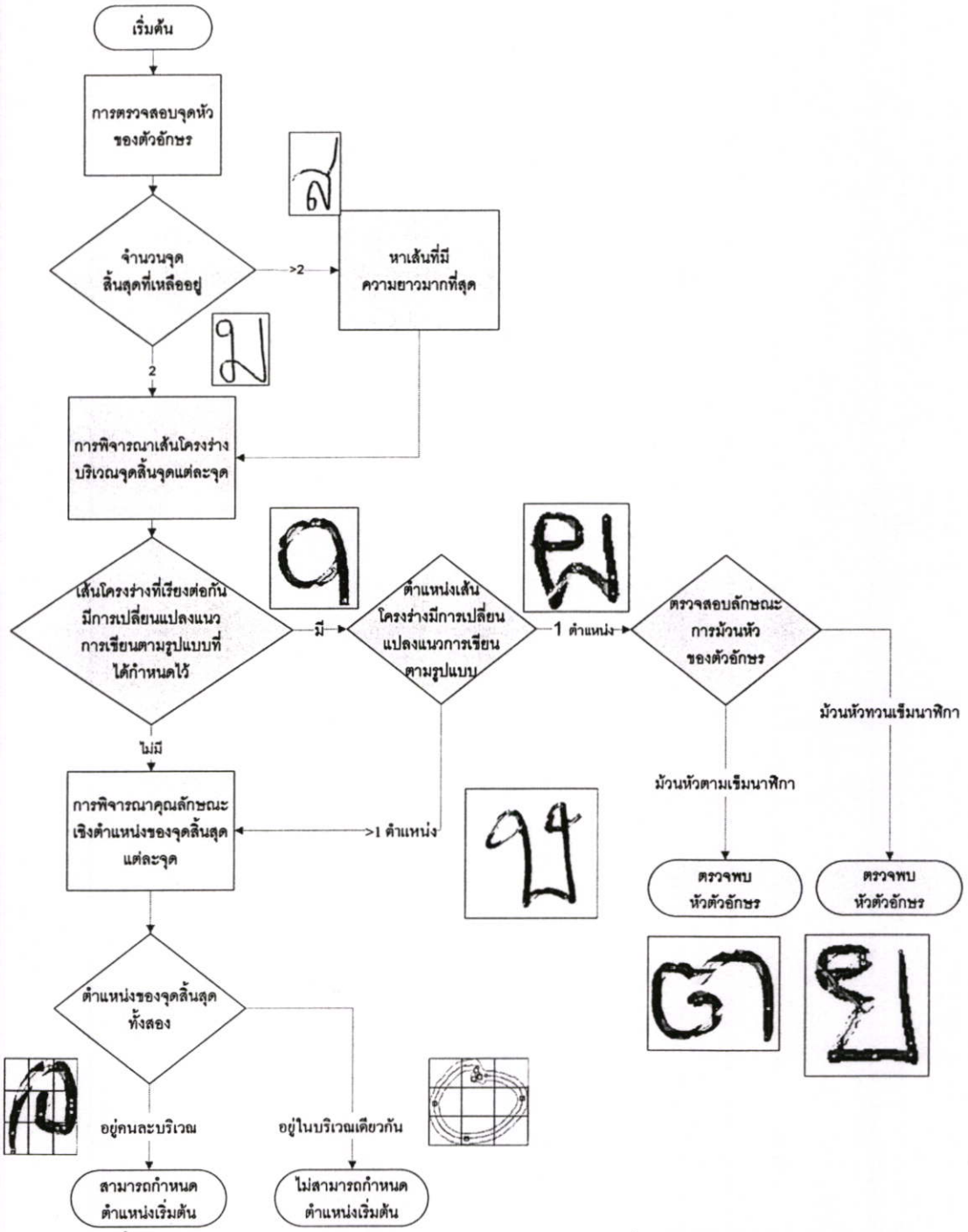
รูปที่ 3.32 แผนผังการทำงานของการดึงลำดับทิศทางการเขียน



รูปที่ 3.33 (ต่อ)

3.3 อัลกอริธึมในการตรวจสอบตำแหน่งเริ่มต้น

ภายหลังจากได้ข้อมูลเชิงลำดับการเขียนของตัวอักษร ซึ่งจัดเก็บในโครงสร้างข้อมูล จะนำรายละเอียดเพิ่มต่างๆ ที่เก็บไว้ในโครงสร้างข้อมูลดังกล่าว มาประกอบการพิจารณาเชิงตำแหน่ง เพื่อตรวจสอบลักษณะที่เป็นการม้วนหัวหรือตำแหน่งเริ่มต้นของตัวอักษร มีขั้นตอนการทำงานดังแผนผังรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 แผนผังการทำงานในการตรวจสอบตำแหน่งเริ่มต้นและหัวของตัวอักษร

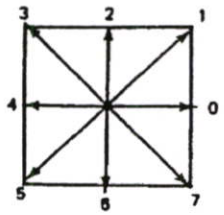
3.3.1 การตรวจสอบการเขียนหัวของตัวอักษร

หากพิจารณาโครงสร้างข้อมูลจากขั้นตอนสุดท้ายของการดึงลำดับทิศทางการเขียน เป็นกรณีการลากเส้นโดยไม่ได้ยกปากกา เราจะได้จุดสิ้นสุดบนแนวการเขียนหลักที่เหลืออยู่สองจุดและได้จุดสิ้นสุดมากกว่าสองจุด ในกรณีที่มีการลากเส้นแบบยกปากกามากกว่าหนึ่งครั้ง ซึ่งตาม

โครงสร้างมาตรฐานตัวอักษรภาษาไทย การลำดับการเขียนที่ถูกต้อง เริ่มจากหัวเขียนส่วนประกอบต่างๆ ให้ครบถ้วนก่อนแล้วจึงเขียนหาง ไส้ เชิง ดังนั้นหากเป็นกรณีที่เป็นการลากเส้นแบบยกปากกามากกว่าหนึ่งครั้ง จึงต้องหาเส้นลากที่เป็นโครงหลักของตัวอักษรก่อน โดยจะพิจารณาเส้นลากที่มีขนาดหรือความยาวเส้นโครงร่าง บนแนวการเขียนหลักรวมกันมากที่สุดเป็นโครงสร้างหลักของตัวอักษรดังกล่าว

จากนั้นหาจุดเริ่มต้นของลำดับการเขียนที่สอดคล้องกับมาตรฐานโครงสร้างตัวอักษรไทย โดยวิเคราะห์รูปแบบการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือความยาวเส้นโครงร่าง บนแนวการเขียนหลักแต่ละแนวที่เรียงต่อกัน เพื่อตรวจสอบคุณลักษณะของการม้วนหัวของตัวอักษร ซึ่งมีเงื่อนไขที่จะต้องตรวจสอบดังต่อไปนี้

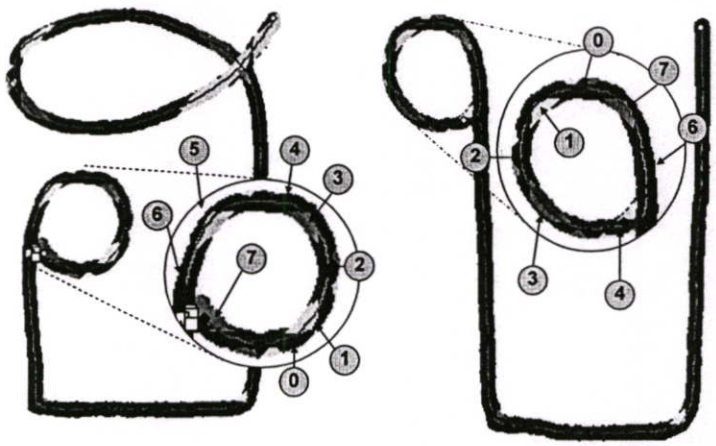
- ขนาดของเส้นโครงร่างบนแนวการเขียนแต่ละแนวจะมีความยาวไม่เกินไปกว่า 1 ส่วนใน 10 ส่วนของความยาวเส้นโครงร่างหลักของตัวอักษรนั้น (ซึ่งเป็นตัวแปรที่กำหนดความโค้งหรือขนาดของการม้วนหัว)
- มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงแนวการเขียนหลัก ตรงตามรูปแบบที่กำหนดดังนี้
  - การม้วนหัวตามเข็มนาฬิกา ควรมีลักษณะของแนวการเขียนหลักเรียงไปตามทิศ 6 5 4 3 2 1 0 7 อ้างอิงตามรหัสลูกโซ่ (รูปที่ 3.35) โดยจะพิจารณาลำดับทิศทางของตัวอักษรที่ลากผ่านแนวการเขียนดังกล่าวตามลำดับ และไม่จำเป็นต้องครบทุกลำดับหรือเป็นลำดับที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งได้กำหนดเป็นตัวแปรความสมบูรณ์ของการม้วนหัวตัวอักษร คือ จำนวนทิศทางการที่เปลี่ยนแปลงแนวการเขียนที่เป็นลำดับของเส้นโครงร่างที่ถูกเรียงไว้ ในขั้นตอน 3.2
  - การม้วนหัวทวนเข็มนาฬิกา ควรมีลักษณะของแนวการเขียนหลักเรียงไปตามทิศ 2 3 4 5 6 7 0 1 7 อ้างอิงตามรหัสลูกโซ่ (รูปที่ 3.35) โดยมีการพิจารณาเช่นเดียวกับการการม้วนหัวตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 3.35 หมายเลขอ้างอิงตามรหัสลูกโซ่

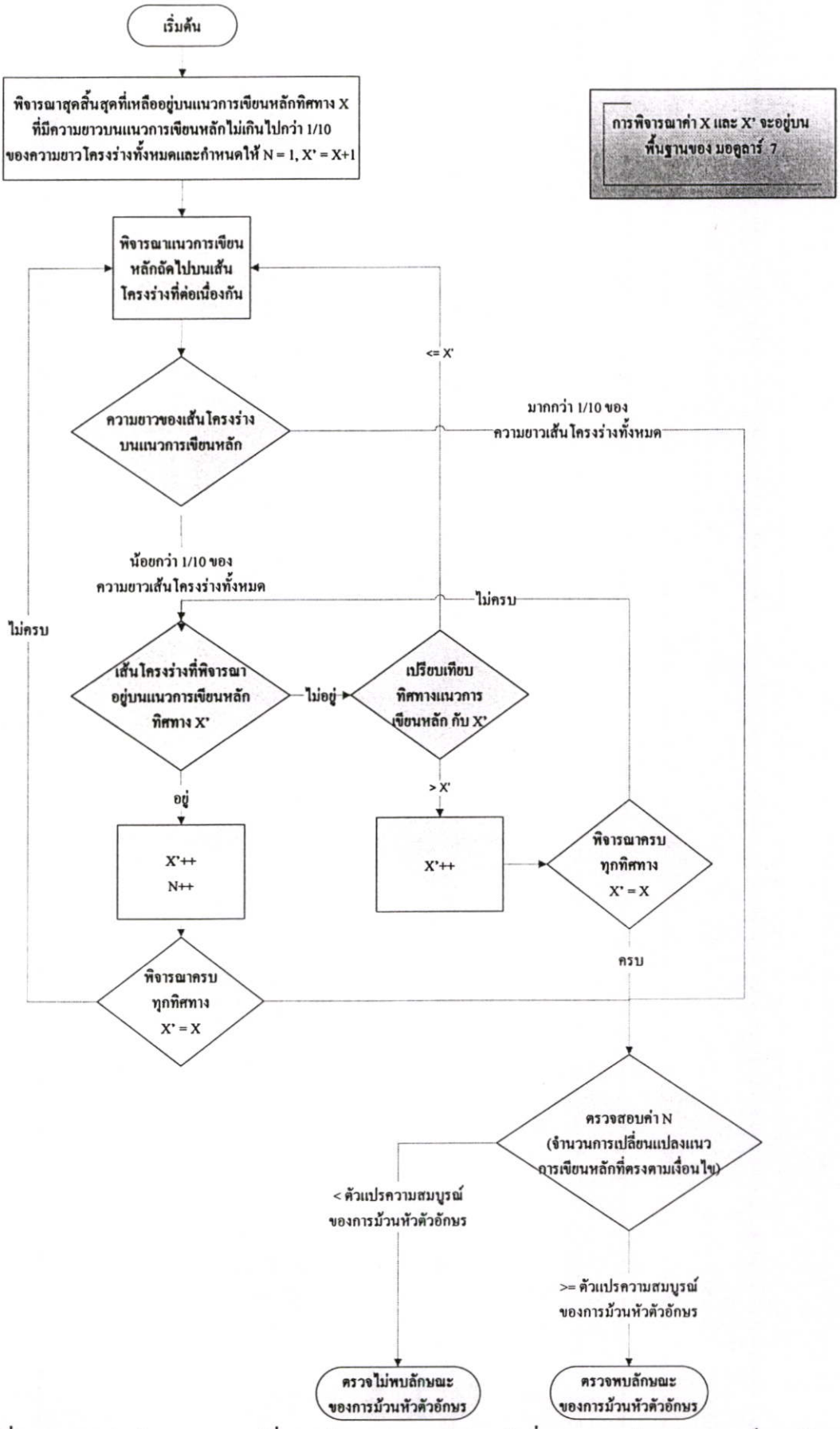
เงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ สามารถสรุปเป็นคำอธิบายได้ดังนี้ คือ ระบบจะตรวจสอบเริ่มจากจุดสิ้นสุดบนแนวการเขียนหลักที่เหลืออยู่ โดยการพิจารณาลำดับการเขียนที่ได้ว่า มีความยาวเท่าไรและมีการลากผ่านแนวการเขียนหลักใดบ้าง ซึ่งข้อมูลในส่วนนี้ได้ถูกตรวจสอบและจัดเก็บไว้ในโครงสร้างฐานข้อมูลในขั้นตอน 3.2.2 หลักการเรียงลำดับจุดกลาง (การตรวจสอบการเรียงลำดับจุด

กลางที่มีจุดข้างเคียงข้ามแนวการเขียนหลักผิดปกติ) จึงทำให้ทราบถึงตำแหน่งที่เส้นโครงร่างกำลังจะเปลี่ยนแปลงแนวการเขียนหลัก และทำให้ตรวจสอบความยาวของเส้นโครงร่างบนแนวการเขียนที่แยกออกจากกันได้ง่าย หลังจากนั้นจึงพิจารณาลำดับของการเปลี่ยนแปลงแนวการเขียน โดยนำแนวการเขียนหลักของจุดสิ้นสุดเป็นแนวตั้งต้น สมมติให้เท่ากับทิศ x อ้างอิงตามรหัสลูกโซ่ มาพิจารณาแนวการเขียนหลักของเส้นโครงร่างที่เนื่อง ตามการม้วนหัวตามเข็มนาฬิกาจะพิจารณาการแนวการเขียนในทิศ x-1 และทิศ x+1 ในการม้วนทวนเข็มนาฬิกา จนกระทั่งพบเงื่อนไขที่เส้นโครงร่างบนแนวการเขียนหลักมีความยาวเกินกว่าหนึ่งในสิบส่วนของความยาวทั้งหมดของตัวอักษร จึงนำจำนวนแนวการเขียนหลักที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทาง เป็นไปตามรูปแบบลำดับที่กำหนดไว้ มาพิจารณากับตัวแปรที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสมบูรณ์ในการม้วนหัวตัวอักษร (ในการทดสอบจะกำหนดให้เท่ากับ 3) หากสอดคล้องกันก็จะแสดงจุดสิ้นสุดของแนวการเขียนที่เหลืออยู่ เป็นจุดเริ่มต้นของตัวอักษร ซึ่งได้แสดงขั้นตอนการทำงานดังแผนผังรูปที่ 3.37 และ 3.38

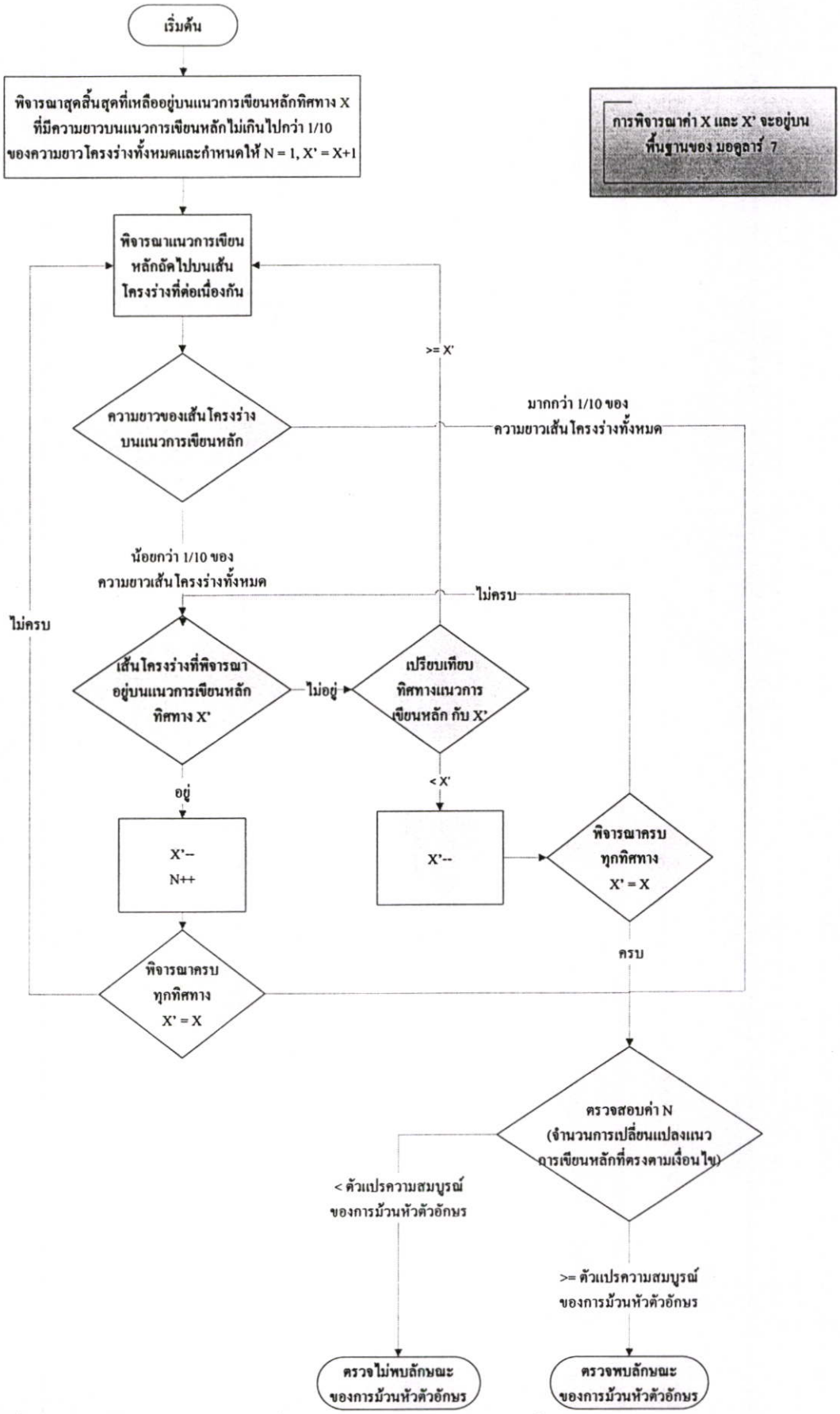


รูปที่ 3.36 การเปลี่ยนแปลงแนวการเขียนหลักที่เป็นไปตามลำดับทิศทางการม้วนหัวตัวอักษร

จากรูปที่ 3.36 (ซ้าย) ขั้นตอนการหาจุดเริ่มต้น ตัวอักษร ฮ. นกฮูก เริ่มจากจุดสิ้นสุดของแนวการเขียนหลักที่เหลืออยู่ ซึ่งอยู่บนแนวการเขียนหลักในแนวราบ มีทิศทางตามรหัสลูกโซ่เท่ากับ 7 และขนาดของเส้นโครงร่างที่อยู่บนแนวเขียนหลักนี้มีขนาดสั้นกว่าหนึ่งในสิบส่วนของความยาวเส้นโครงร่างทั้งหมด พิจารณาที่เส้นโครงร่างบนแนวการเขียนหลักถัดไป ตามเงื่อนไขที่กำหนด ได้ส่วนของเส้นโครงร่างที่ตรงตามเงื่อนไขและอยู่บนแนวการเขียนหลักในทิศทางที่เรียงลำดับ (x'+1) ได้ 0 1 2 3 4 5 จนกระทั่งมาถึงส่วนของเส้นโครงร่างที่อยู่บนแนวการเขียนทิศทาง 6 ซึ่งมีเส้นโครงร่างยาวกว่าหนึ่งในสิบส่วนของความยาวเส้นโครงร่างทั้งหมด จึงหยุดการพิจารณา แล้วจึงตรวจสอบจำนวนการเปลี่ยนแปลงแนวการเขียนหลักที่สอดคล้องกับเงื่อนไขเทียบกับตัวแปรความสมบูรณ์ในการม้วนหัวตัวอักษรโดยจะกำหนดให้เท่ากับ 3 ซึ่งในรูปลายมือ ฮ. นกฮูก จุดสิ้นสุดที่กำลังพิจารณามีการเปลี่ยนแปลงแนวการเขียนหลักที่สอดคล้องกับเงื่อนไข 7 แนว จึงแสดงถึงลำดับทิศทางของม้วนหัวทวนเข็มนาฬิกาที่สมบูรณ์

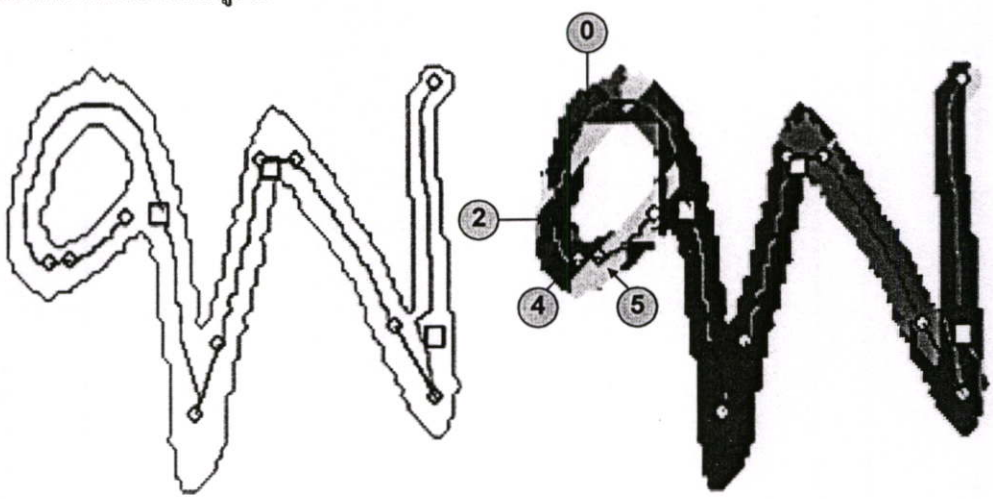


รูปที่ 3.37 แผนผังพิจารณาการเปลี่ยนแปลงแนวการเขียนหลักที่แสดงการม้วนหัวทวนเข็มนาฬิกา



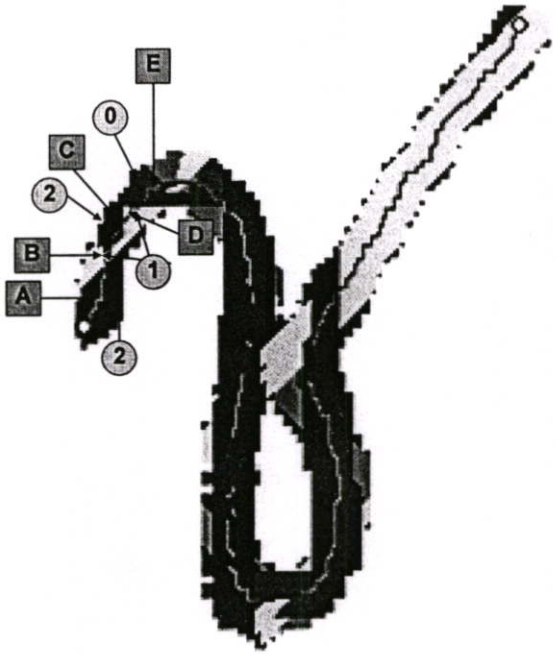
รูปที่ 3.38 แผนผังพิจารณาการเปลี่ยนแปลงแนวการเขียนหลักที่แสดงการม้วนหัวตามเข็มนาฬิกา

ในรูปที่ 3.36 (ขวา) ขั้นตอนการหาจุดเริ่มต้น ตัวอักษร บ. ใบไม้ เริ่มจากจุดสิ้นสุดของแนวการเขียนหลักที่เหลืออยู่ ซึ่งในแนวราบมีทิศทางตามรหัสลูกโซ่เท่ากับ 4 และขนาดของเส้นโครงร่างที่อยู่บนแนวเขียนหลักนี้ มีขนาดสั้นกว่าหนึ่งในสิบส่วนของความยาวเส้นโครงร่างทั้งหมด พิจารณาที่เส้นโครงร่างบนแนวการเขียนหลักถัดไป ได้ส่วนของเส้นโครงร่างที่อยู่บนแนวการเขียนหลักทิศทาง 3 (x'=x-1) และมีความยาวของเส้นโครงร่างไม่เกินหนึ่งในสิบส่วนของความยาวเส้นโครงร่างทั้งหมด จึงนับว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงแนวการเขียนที่ตรงตามเงื่อนไข (N=N+1) แล้วพิจารณาเส้นโครงร่างบนแนวการเขียนหลักถัดไป เพื่อตรวจสอบข้อมูลลำดับการเขียนนั้นๆ ยังคงสอดคล้องกับเงื่อนไข อีกหรือไม่ จนกระทั่งมาถึงส่วนโครงร่างที่อยู่บนแนวการเขียน 8 จึงมาพิจารณาจำนวนการเปลี่ยนแปลงแนวการเขียนหลักที่สอดคล้องกับเงื่อนไข ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6 ดังนั้นลำดับโครงร่างที่เรียงอยู่ที่จุดสิ้นสุดดังกล่าวนี้ แสดงถึงลำดับทิศทางของม้วนหัวตัวอักษรตามเข็มนาฬิกาที่ค่อนข้างสมบูรณ์



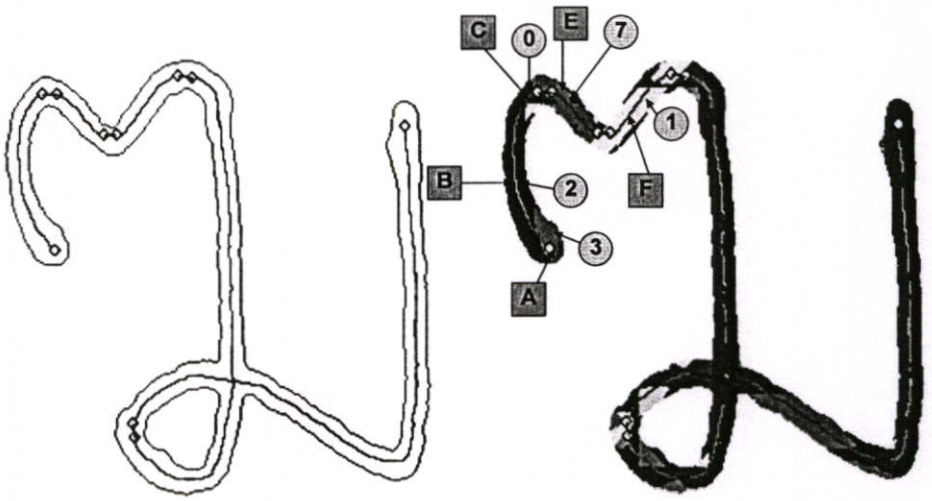
รูปที่ 3.39 แนวการเขียนหลักของตัวอักษร พ. พาน ที่แสดงถึงการม้วนหัว

ในตัวอย่างต่อมาแสดงให้เห็นรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงแนวการเขียนหลัก ในทิศทางที่ไม่ต้องเรียงลำดับกัน แต่สามารถแสดงถึงลักษณะของการม้วนหัวตัวอักษร ในรูปที่ 3.39 ตัวอักษร พ. พาน จุดสิ้นสุดของแนวการเขียนหลักที่เหลืออยู่ ซึ่งในแนวเฉียงขวามีทิศทางตามรหัสลูกโซ่เท่ากับ 5 พิจารณาเส้นโครงร่างต่อเนื่องซึ่งอยู่เป็นแนวการเขียนหลักทิศทาง 4 (x'=x-1) ข้ามไปเส้นโครงร่างบนแนวการเขียนหลักถัดไป ซึ่งอยู่บนในทิศทาง 2 (< x'-1) จึงปรับทิศทางที่พิจารณาลดลงหนึ่งขั้น (x'=x'-1) ทำให้แนวการเขียนหลักสอดคล้องกับเงื่อนไข (N=N+1) แล้วพิจารณาโครงร่างที่ต่อเนื่องบนแนวการเขียนหลักถัดไปซึ่งอยู่ในทิศทาง 0 (<x'-1) จึงปรับทิศทางลดลงอีกหนึ่งขั้น (x'=x'-1) ทำให้แนวการเขียนหลักสอดคล้องกับเงื่อนไข (N=N+1) จนมาถึงโครงร่างที่อยู่บนแนวการเขียน 6 เส้นโครงร่างมีความยาวเกินกว่าเงื่อนไข จึงพิจารณาค่า N เท่ากับ 4



รูปที่ 3.40 แนวการเขียนหลักของตัวอักษร ช. ช้าง ที่แสดงถึงการม้วนหัว

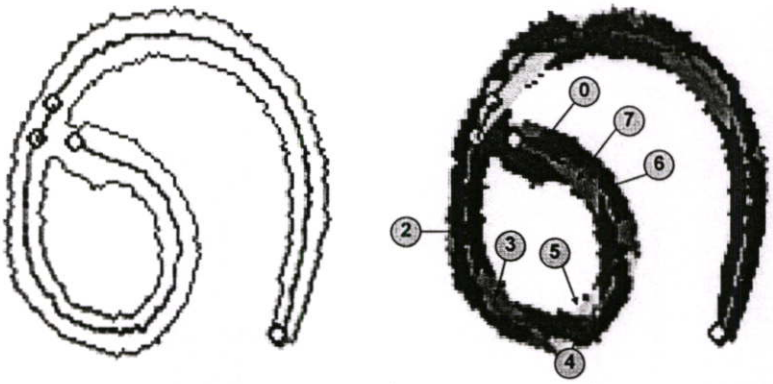
ในรูปที่ 3.40 จุดสิ้นสุดของโครงร่าง A ของตัวอักษร ช. ช้าง ที่อยู่บนแนวการเขียนหลัก ทิศทาง 2 (x) มีทิศแนวการเขียนหลักบนเส้นโครงร่างที่ต่อเนื่อง (B) เท่ากับ 1 (x'=x-1) แต่กรณีที่เส้นโครงร่างถัดไป (C) บนแนวการเขียนหลักมีค่ามากกว่าทิศเดิมที่เส้นโครงร่างผ่านมาแล้ว ก็จะข้ามไปพิจารณาเส้นโครงร่างถัดไป (D) ซึ่งมีค่าทิศเท่ากันกับค่าแนวการเขียนที่พิจารณาผ่านไปแล้ว จึงข้ามไปยังเส้นโครงร่างถัดไปอีก (E) ที่อยู่บนแนวการเขียนหลักทิศ 0 (x'= x'-1) ซึ่งสอดคล้องกันตามเงื่อนไข และเมื่อข้ามไปยังเส้นโครงร่างถัดไป ก็จะหยุดขั้นตอนการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทิศทางเนื่องจากมีความยาวของเส้นโครงร่างเกินกว่าที่กำหนดไว้ แล้วพิจารณาจำนวนของการเปลี่ยนแปลงแนวการเขียนหลักที่สอดคล้องกับเงื่อนไขซึ่งเท่ากับ 4 ดังนั้นเส้นโครงร่าง A ที่เรียงต่อกันไปจึงแสดงถึงลำดับทิศทางของการม้วนหัวตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 3.41 แนวการเขียนหลักของตัวอักษร ฆ. ระฆัง ที่แสดงถึงการม้วนหัว

ในรูปที่ 3.41 เริ่มที่เส้นโครงร่าง A บนแนวการเขียนหลักทิศทาง 3 (x) เรียงต่อด้วยเส้นโครงร่าง B บนแนวการเขียนหลักทิศทาง 2 (x'=x-1) หลังนั้นข้ามไปยังโครงร่าง C ที่บนแนวการเขียนหลักทิศทาง 0 ซึ่งน้อยกว่า x' จึงทำการปรับทางทิศทางลง เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงทิศทางสอดคล้องกับเงื่อนไข แล้วจึงข้ามไปยังโครงร่าง E ซึ่งอยู่บนแนวการเขียนหลักทิศทาง 7 (x'=x'-1) หลังจากนั้นโครงร่าง F บนอยู่ทิศทาง 1 ซึ่งน้อยกว่า x' จึงทำการปรับทางทิศทางลงเรื่อยๆ จนกระทั่ง x=x' ซึ่งหมายความว่า การเปลี่ยนแปลงทิศทางของแนวการเขียนหลัก ได้ถูกพิจารณามาครบทิศทางที่แสดงถึงลักษณะที่เป็นการเขียนวงกลมหรือการม้วนหัว จึงหยุดการพิจารณา แล้วตรวจสอบจำนวนการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแนวการเขียนที่สอดคล้องกับเงื่อนไข ซึ่งเท่ากับ 4 ดังนั้น เส้นโครงร่าง A ที่เรียงต่อกันไปจึงแสดงถึงลำดับทิศทางของการม้วนหัวตามเข็มนาฬิกา

ในบางกรณีแนวคิดที่ได้นำเสนอในการตรวจการเปลี่ยนแปลงทิศทางของเส้นโครงร่างเพื่อใช้ในการตรวจสอบการม้วนหัวของตัวอักษร นั้นอาจจะแสดงลักษณะของการเขียนเส้นโค้ง ณ ตำแหน่งจุดสิ้นสุด ซึ่งไม่ได้แสดงถึงการม้วนหัวตัวอักษรเสมอไป ตรงจุดนี้จะเห็นได้ว่า ค่าความสมบูรณ์ในการม้วนหัวตัวอักษรและความยาวของเส้นโครงร่างบนแนวการเขียนหลักที่พิจารณา จะเป็นตัวแปรสำคัญในการแยกการม้วนตัวที่ยอมรับได้กับลักษณะการเขียนตัวอักษรเป็นเส้นโค้ง จากรูปที่ 3.42 การเปลี่ยนแปลงทิศทางของแนวการเขียนหลัก 0 7 6 5 4 3 2 1 ของลำดับเส้นโครงร่างอาจจะแสดงถึงการเขียนที่เป็นเส้นโค้งของตัวอักษร ในกรณีไม่พิจารณาความยาวของเส้นโครงร่างบนแนวการเขียนหลัก



รูปที่ 3.42 การเขียนเส้นโค้งของตัวอักษร ซึ่งอาจตรวจสอบเป็นลักษณะการม้วนหัว

จากแนวคิดที่ได้นำเสนอในข้างต้น จะพบกรณีที่ไม่สามารถตรวจการม้วนหัวเพื่อหาจุดเริ่มต้นของการลำดับการเขียนได้คือ ตัวอักษรที่ไม่มีหัว (รูปที่ 3.43) อักษรที่ไม่เขียนม้วนหัวตัวอักษร (รูปที่ 3.44) หรือใช้การเขียนเส้นกิ่งแทนหัวตัวอักษร (รูปที่ 3.45) หรืออาจเกิดความกำกวมในกรณีการตรวจสอบพบลักษณะการม้วนหัวมากกว่าหนึ่งตำแหน่ง (รูปที่ 3.46) ซึ่งทั้งหมดนี้ทั้งหมดนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์เชิงตำแหน่งเพื่อหาจุดเริ่มต้นในขั้นตอนต่อไป

รูปที่ 3.43 ตัวอักษรที่ไม่มีการม้วนหัวตัวอักษร

รูปที่ 3.44 รูปลายมือที่ไม่เขียนหัวตัวอักษร

รูปที่ 3.45 รูปลายมือที่ใช้การเขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัวตัวอักษร

รูปที่ 3.46 รูปอักษรลายมือที่ตรวจสอบพบลักษณะการม้วนหัวมากกว่าหนึ่งตำแหน่ง

3.3.2 การตรวจสอบตำแหน่งเริ่มต้นของตัวอักษร

การทำงานในขั้นตอนนี้ จะดำเนินการก็ต่อเมื่อไม่สามารถตรวจสอบรูปแบบของการม้วนหัวตัวอักษรจากลำดับการเขียนที่ได้ในขั้นต้น จากลำดับการเขียนอ้างอิง สามารถสรุปตำแหน่งของจุดเริ่มต้นเชิงตำแหน่งได้ดังนี้

ตัวอักษรที่มีจุดเริ่มต้นบริเวณชานหน้า (ด้านซ้าย) ของตัวอักษร ทั้งหมด 33 ตัว แบ่งออกได้เป็น ชานหน้าบน 19 ตัว (*ข ฃ ฆ ช ซ ฌ ท น บ ป ผ ฝ พ ฟ ฑ ม ย ษ ห ฬ*) ชานหน้าล่าง 10 ตัว (*ก ญ ฎ ฏ ถ ณ ภ ล ส*) และชานหน้ากลาง 4 ตัว (*ฉ ธ อ ฮ*)

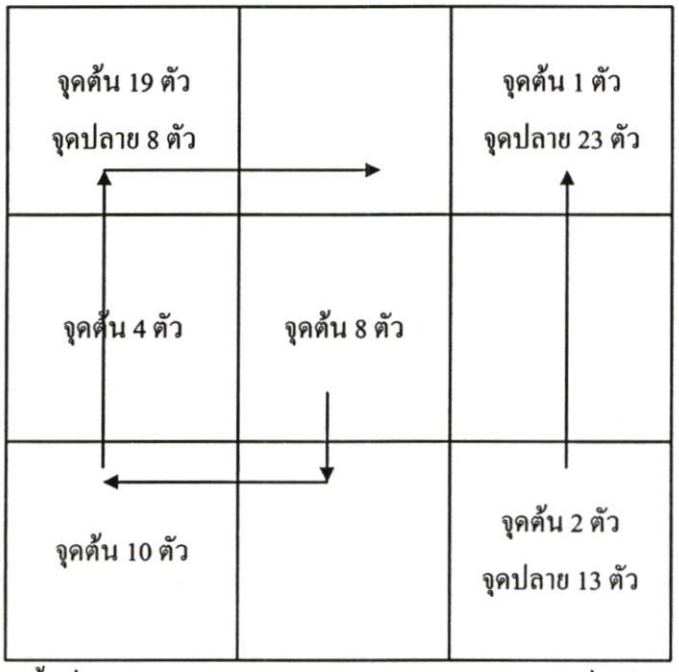
ตัวอักษรที่มีจุดเริ่มต้นบริเวณกึ่งกลางของตัวอักษรทั้งหมด8 ตัว (*ค ฅ ฆ ฐ ฒ ด ต ศ*)

ตัวอักษรที่มีจุดเริ่มต้นบริเวณชานหลัง (ด้านขวา) ของตัวอักษรทั้งหมด 3 ตัว (*ง ร ว*)

ตัวอักษรที่มีจุดปลายบริเวณชานหน้าของตัวอักษรทั้งหมด 8 ตัว (*ง จ ฉ ล ส ว อ*)

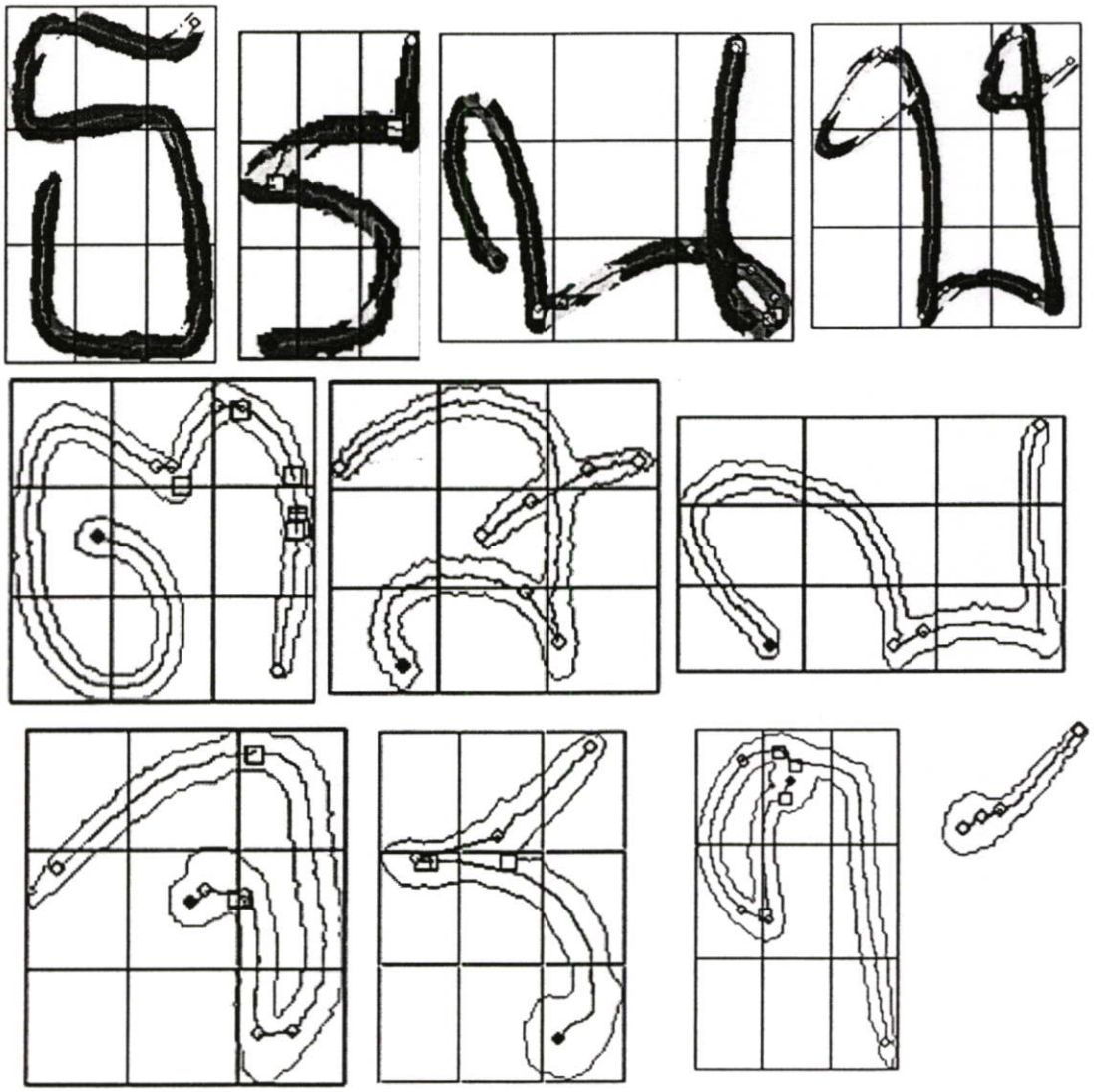
ตัวอักษรที่มีจุดปลายบริเวณชานหลังของตัวอักษร ทั้งหมด 36 ตัว แบ่งออกได้เป็น ชานหลังบน 23 ตัว (*ข ฃ ฆ ช ซ ฌ ญ ฐ ฒ ธ น บ ป ผ ฝ พ ฟ ม ย ษ ห ฮ*) 13 ชานหลังล่าง (*ก ค ฅ ฎ ฏ ด ต ถ ท ฑ ภ ศ ห*)

จากข้อมูลดังกล่าวนำมาพิจารณาจุดเริ่มต้นและจุดปลายของตัวอักษรทั้งหมด เพื่อวิเคราะห์ลำดับของจุดเริ่มต้นเชิงตำแหน่งของตัวอักษร (ภาคผนวก จ) โดยมีหลักเบื้องต้นดังนี้ การตรวจสอบจุดเริ่มต้นจะพิจารณาจากบริเวณของตัวอักษรที่เป็นจุดเริ่มต้น โดยไม่มีโอกาสเป็นจุดปลายก่อน ประกอบกับบริเวณที่จุดปลายโดยที่มีโอกาสต่ำที่จะเป็นจุดเริ่มต้น หลังจากนั้นก็นำมาแสดงเป็นลำดับขอบเขตพื้นที่ของตำแหน่งบนตัวอักษร สำหรับกำหนดจุดสิ้นสุดของลำดับการเขียนที่ได้เป็นจุดเริ่มต้น ดังรูปที่ 3.47



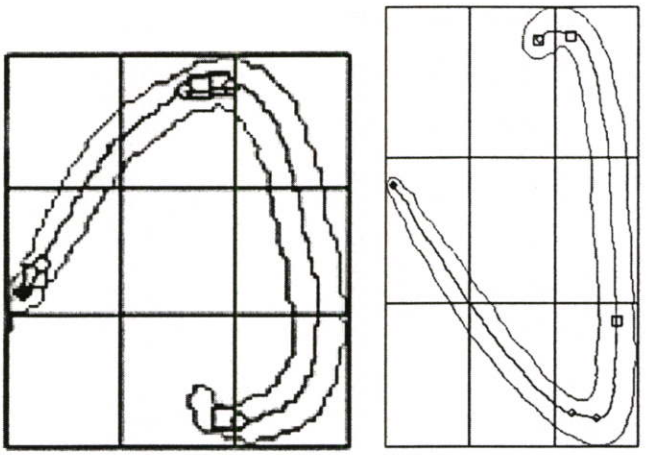
รูปที่ 3.47 ขอบเขตพื้นที่ของตำแหน่งบนตัวอักษร สำหรับกำหนดจุดเริ่มต้นของลำดับการเขียน

โดยมีแนวคิดดังต่อไปนี้คือ วัดความกว้างและความยาวของตัวอักษรแล้วนำมาแบ่งเป็นพื้นที่สามส่วนๆ ละเท่ากัน จึงได้เป็นพื้นที่ 9 ส่วน หลังจากนั้นจึงพิจารณาจุดสิ้นสุดที่เหลืออยู่บนแนวการเขียนหลักว่า จุดใดอยู่ในลำดับพื้นที่ที่มีโอกาสเป็นจุดเริ่มต้นของตัวอักษรมากที่สุด ดังตัวอย่าง (จุดวงกลมทึบจะแสดงถึงจุดเริ่มต้นของลำดับทิศทางการเขียนของภาพลายมือ)

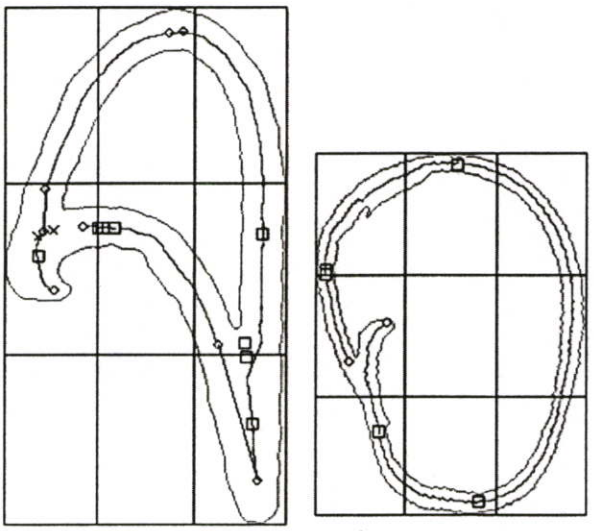


รูปที่ 3.48 การกำหนดจุดเริ่มต้นเชิงตำแหน่ง

จากแนวคิดดังกล่าวจะมีบกพร่องที่หลีกเลี่ยงไม่ได้สองรูปแบบคือ การกำหนดจุดเริ่มต้นที่ผิดพลาดในตัวอักษร ง ว ที่ไม่สามารถตรวจสอบลักษณะการม้วนหัวตัวอักษรได้ หรือการเขียนอักษรซึ่งมีจุดเริ่มต้นที่ชานหลังและมีจุดปลายที่ชานหน้า ดังรูปที่ 3.49 และจุดสิ้นสุดของลำดับการเขียนมาอยู่ในพื้นที่การพิจารณาเชิงตำแหน่งเดียวกัน ทำให้ไม่สามารถกำหนดจุดเริ่มต้นได้ ดังรูปที่ 3.50

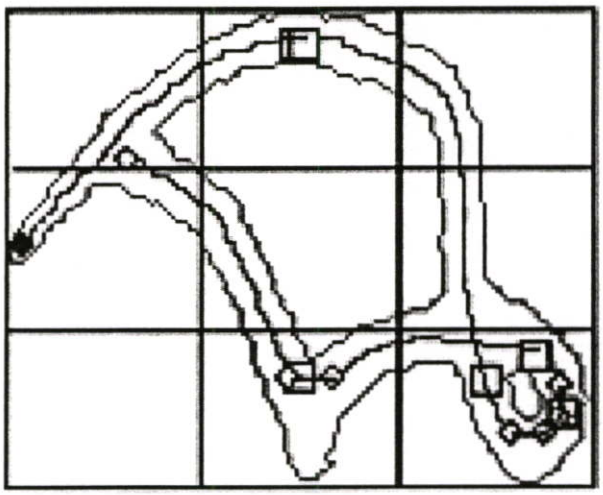


รูปที่ 3.49 ข้อบกพร่องของการกำหนดจุดเริ่มต้นโดยพิจารณาเชิงตำแหน่ง



รูปที่ 3.50 จุดสิ้นสุดของลำดับการเขียนมาอยู่ในพื้นที่การพิจารณาเชิงตำแหน่งเดียวกัน

แนวคิดในการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นให้กับลำดับทิศทางของการเขียนที่ได้นำเสนอ จะเกิดความผิดพลาดในลักษณะการเขียนตัวอักษรที่มีจุดเริ่มและจุดปลาย อยู่ในชานหน้าเหมือนกัน เช่น ฉ. ฉิ่ง จุดเริ่มต้นควรจะอยู่ในแนวชานหน้ากลาง และจุดปลายของโค้งบนควรจะอยู่ในแนวชานหน้าบน แต่ด้วยลักษณะการเขียนที่หวัดและเอียง ทำให้จุดต้นและจุดปลายอยู่ผิดตำแหน่ง ส่งผลให้การกำหนดจุดเริ่มต้นให้กับลำดับทิศทางการเขียนตัวอักษรดังกล่าวไม่ถูกต้อง



รูปที่ 3.51 ลักษณะการกำหนดจุดเริ่มต้นที่ผิดพลาดจากการพิจารณาเชิงตำแหน่ง

บทที่ 4
การทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้กล่าววิธีการทดลอง ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง โดยผลการทดลองในการหาลำดับจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ ถูกต้อง ไม่เหมาะสมและไม่ถูกต้อง ซึ่งได้กำหนดตัวอย่างของลำดับแต่ละประเภทของตัวอักษร พร้อมทั้งแสดงให้เห็นถึงลักษณะของข้อมูลภาพลายมือที่ทำให้เกิดปัญหา พร้อมทั้งแสดงถึงข้อบกพร่องของอัลกอริธึม แนวทางสำหรับแก้ไขและการพัฒนาต่อในอนาคต

4.1 เครื่องมือที่ใช้ทำการทดลอง

- เครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก ใช้หน่วยประมวลผลกลางรุ่น Intel Centrino ความเร็ว 1.8 กิกะเฮิร์ท (GHz) หน่วยความจำหลัก 1 กิกะไบต์ (GBytes)
- โปรแกรม Scilab ใช้งานร่วมกัน Scilab Image Processing Toolbox
- โปรแกรมประยุกต์สำหรับการหาลำดับทิศทางของการเขียนตัวอักษรลายมือภาษาไทยที่พัฒนาด้วยภาษา C++

4.2 ที่มาของข้อมูลสำหรับการทดลอง

- อักษรโดดจากแบบทดสอบการเขียน (ภาคผนวก ฉ) 44 ตัวอักษร จากผู้ทดสอบที่แตกต่างกัน 20 คน (44x20 = 880 ตัวอักษร)
- ลดสัญญาณรบกวนบนภาพ แก้ไขความเอียงของตัวอักษร และปรับตัวอักษรให้มีขนาดเหมาะสม
- ปรับภาพให้เป็นภาพบิตแมพขาว-ดำ

4.3 การวัดผลการทดลอง

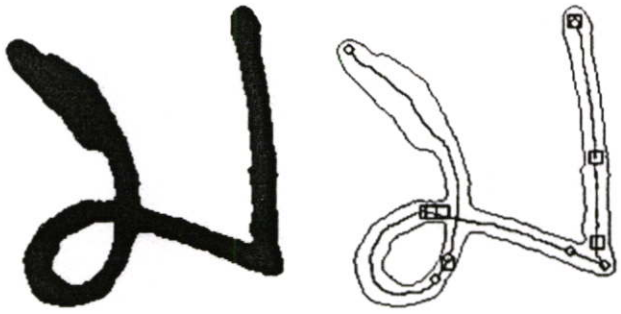
4.3.1 การวัดผลการทดลองหาลำดับทิศทางของอักษรลายมือ

การวัดผลของการทดลอง แบ่งผลลัพธ์ของลำดับการเขียนที่ได้มาจากภาพลายมือออกเป็นสามประเภทโดยอ้างอิงจากลำดับการเขียนตัวอักษรไทยตามมาตรฐานโครงสร้าง (ภาคผนวก ฉ) คือ

4.3.1.1 รูปแบบที่ถูกต้องของการหาลำดับทิศทางการเขียน

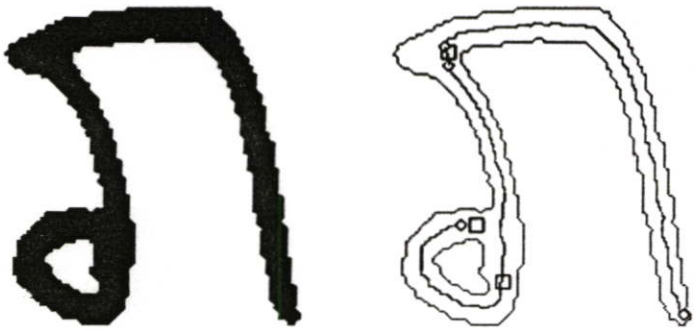
รูปแบบที่ถูกต้อง คือ ลักษณะการดึงลำดับการลากเส้นของภาพอักษรลายมือ ที่แสดงถึงโครงสร้างหลักตรงตามตัวอักษรในแบบหลัก แบบตัวเลือก หรือแบบประดิษฐ์ โดยลำดับและ

ทิศทางของส่วนประกอบบนตัวอักษร จะต้องตรงตามลำดับการเขียนอักษรแบบหลักหรือแบบตัวเลือก เท่านั้น ตัวอย่างเช่น



รูปที่ 4.1 ลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ถูกต้อง ตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่างที่ 1: ลำดับการเขียนของอักษร ม. ม้า ถึงแม้ว่าลำดับการเขียนที่เกิดขึ้นจริงจะมีการลากเส้นซ้อนทับกันบริเวณหัวตัวอักษร แต่ลำดับที่ได้ยังสามารถแสดงถึงส่วนประกอบของตัวอักษร ม. ม้า ในแบบประดิษฐ์ได้ (คือการไม่ม้วนหัวตัวอักษร) และมีลำดับและทิศทางของส่วนประกอบสอดคล้องกับลำดับทิศทางในตัวอักษรแบบหลัก



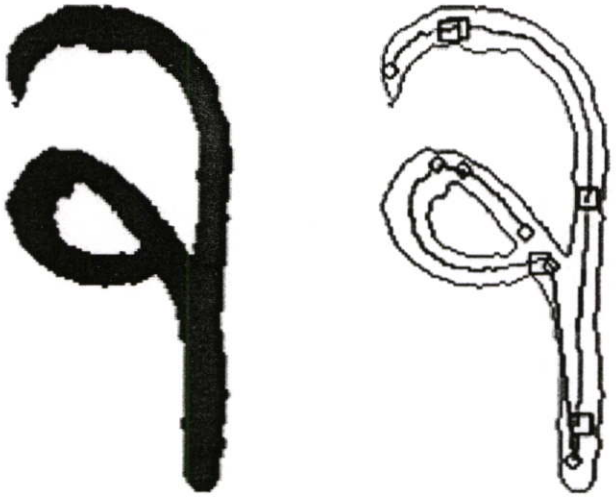
รูปที่ 4.2 ลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ถูกต้อง ตัวอย่างที่ 2

ตัวอย่างที่ 2: ถึงแม้ว่าลำดับการเขียนที่เกิดขึ้นจริงของอักษร ภ. สำเภา จะมีการลากเส้นเพื่อเขียนเป็นจะงอยของตัวอักษร แต่ลำดับที่ได้ไม่ได้แสดงลำดับในบริเวณดังกล่าว แต่ยังสามารถแสดงถึงส่วนประกอบของตัวอักษร ภ. สำเภา. ในแบบประดิษฐ์ได้ และมีลำดับและทิศทางของส่วนประกอบสอดคล้องกับลำดับทิศทางในตัวอักษรแบบหลัก

4.3.1.2 รูปแบบที่ไม่เหมาะสม ของการหาลำดับทิศทางการเขียน

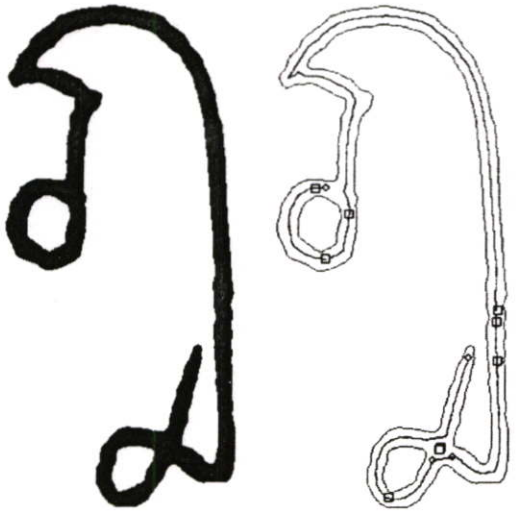
รูปแบบที่ไม่เหมาะสม คือ ลักษณะการดึงลำดับการลากเส้นของภาพอักษรลายมือ ที่แสดงถึงโครงสร้างหลักตรงตามตัวอักษรในแบบหลัก แบบตัวเลือก หรือแบบประดิษฐ์ โดยลำดับของส่วนประกอบบนตัวอักษรจะต้องตรงตามลำดับการเขียนอักษรแบบหลักหรือแบบตัวเลือก แต่มี

ทิศทางของส่วนประกอบตามโครงสร้างผิดไปจากทิศทางที่ถูกต้อง อ้างอิงจากตัวอักษรในแบบหลัก หรือแบบตัวเลือก เท่านั้น ซึ่งจะแสดงถึงรูปแบบการเขียนที่ไม่เป็นธรรมชาติ ยกตัวอย่างเช่น



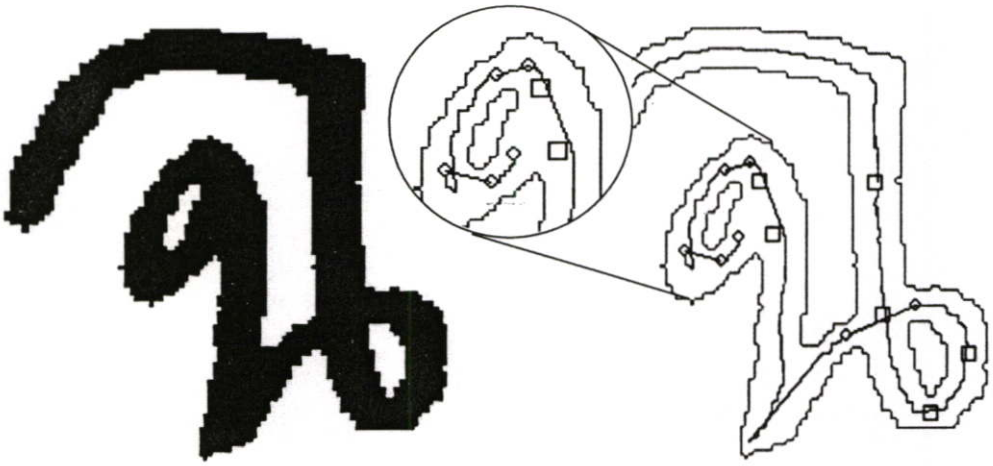
รูปที่ 4.3 ลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ไม่เหมาะสม ตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่างที่ 1: ลำดับการเขียนของอักษร จ. จาน ลำดับการเขียนที่ได้จะแสดงถึงโครงสร้างสอดคล้องกับตัวอักษรในแบบหลัก แบบตัวเลือก หรือแบบประดิษฐ์ (หัวตัวอักษร เส้นทแยงลงหลัง เส้นตั้ง และเส้นโค้งบน) และมีลำดับของการเรียงส่วนต่างๆ ถูกต้อง แต่มีทิศทางของลำดับการเขียนที่หัวตัวอักษรผิดไปจากทิศทางที่ถูกต้อง คือ การม้วนหัวตามเข็มนาฬิกา ดังนั้นลำดับการเขียนของอักษร จ. จาน จึงเป็นรูปแบบที่ไม่เหมาะสม



รูปที่ 4.4 ลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ไม่เหมาะสม ตัวอย่างที่ 2

ตัวอย่างที่ 2: ลำดับการเขียนของอักษร ฎ. ชฎา ที่ได้จะแสดงถึงโครงสร้างสอดคล้องกับตัวอักษรในแบบหลัก แบบตัวเลือก หรือแบบประดิษฐ์ และมีลำดับของการเรียงส่วนต่างๆ ถูกต้อง แต่มีทิศทางของลำดับการเขียนที่หางล่างขมวดตวัดผิดไปจากทิศทางที่ถูกต้อง คือ ดังนั้นลำดับการเขียนของอักษร ฎ. ชฎา จึงเป็นรูปแบบที่ไม่เหมาะสม

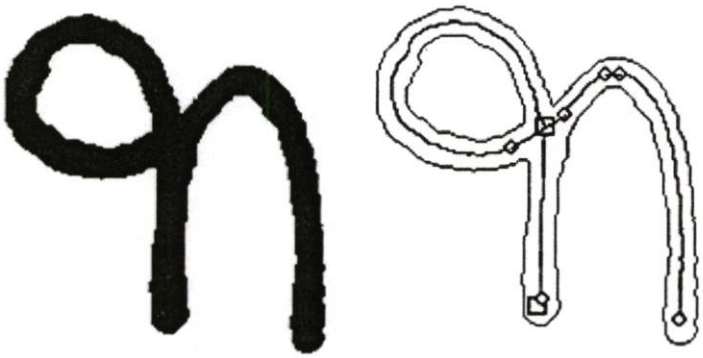


รูปที่ 4.5 ลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ไม่เหมาะสม ตัวอย่างที่ 3

ตัวอย่างที่ 3: ลำดับการเขียนของอักษร ฉ. ฉิ่ง ที่ได้จะแสดงถึงโครงสร้างสอดคล้องกับตัวอักษรในแบบหลัก แบบตัวเลือก หรือแบบประดิษฐ์ และมีลำดับของการเรียงส่วนต่างๆ ถูกต้อง แต่มีทิศทางของลำดับการเขียนที่บริเวณหัวตัวอักษรที่ไม่เป็นธรรมชาติ ทำให้ลำดับทิศทางที่ได้จากภาพลายมือ ฉ. ฉิ่ง เป็นรูปแบบที่ไม่เหมาะสม

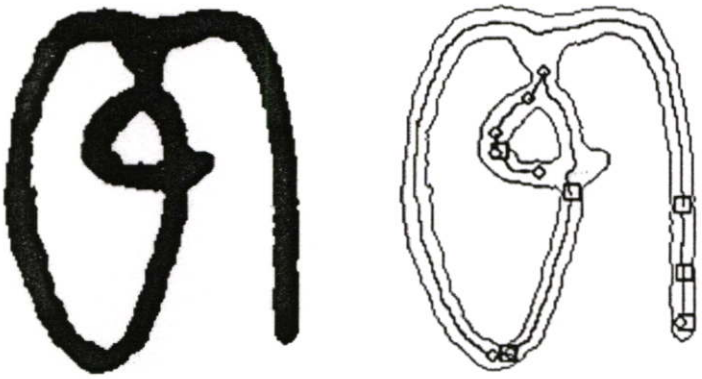
4.3.1.3 รูปแบบที่ไม่ถูกต้องของการหาลำดับทิศทางการเขียน

รูปแบบที่ไม่ถูกต้อง คือ ลักษณะการดึงลำดับการลากเส้นของภาพอักษรลายมือ ที่มีโครงสร้างไม่สอดคล้องกับโครงสร้างหลักตามตัวอักษรในแบบหลัก แบบตัวเลือก และแบบประดิษฐ์ หรือมีลำดับส่วนประกอบบนตัวอักษร คลาดเคลื่อนจากลำดับการเขียนอักษรแบบหลักหรือแบบตัวเลือก ดังตัวอย่าง



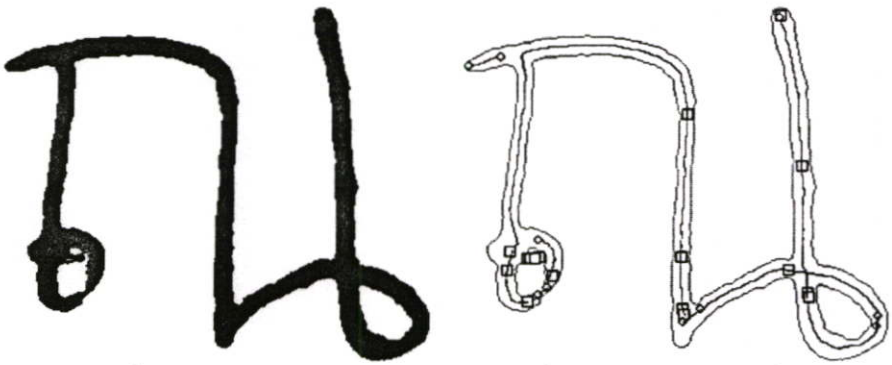
รูปที่ 4.6 ลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ไม่ถูกต้อง ตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่างที่ 1: ลำดับการเขียนของอักษร ท. ทหาร มีการเชื่อมต่อกันบริเวณจุดเริ่มต้นของหัวตัวอักษรและเส้นทแยงขึ้นเฉียง ทำให้ลำดับและทิศทางไม่สอดคล้องกับการเขียนอักษรแบบหลักหรือแบบตัวเลือก ถึงแม้ว่าจะมีส่วนประกอบครบถ้วนตรงตามตัวอักษรในแบบหลัก แบบตัวเลือก หรือแบบประดิษฐ์



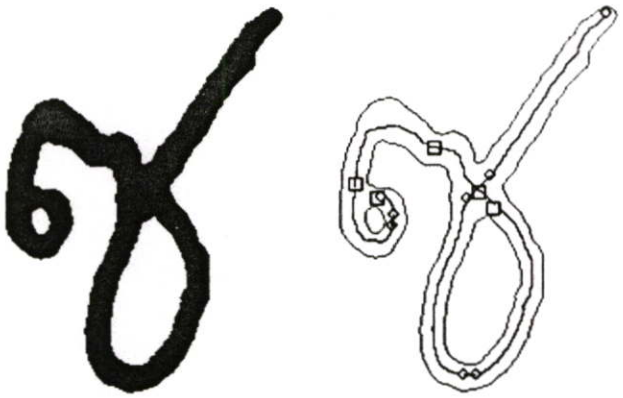
รูปที่ 4.7 ลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ไม่ถูกต้อง ตัวอย่างที่ 2

ตัวอย่างที่ 2: ลำดับการเขียนของอักษร ต. เต่า มีการเหลื่อมซ้อนกันบริเวณหัวตัวอักษรและบริเวณขมวดหยักด้านบนของตัวอักษร ทำให้ส่วนขมวดหยักที่เป็นส่วนสำคัญของโครงสร้างสูญหายไป ซึ่งทำให้มีส่วนประกอบไม่ตรงตามตัวอักษรในแบบหลัก แบบตัวเลือก หรือแบบประดิษฐ์ ถึงแม้ว่าลำดับและทิศทางการเขียนในส่วนอื่นๆ จะถูกต้อง



รูปที่ 4.8 ลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ไม่ถูกต้อง ตัวอย่างที่ 3

ตัวอย่างที่ 3: ลำดับการเขียนของอักษร ณ. เณร มีการลากเส้นย้อนรอยเดิมบริเวณจะงอย ซึ่งทำให้ส่วนดังกล่าว มีการเรียงลำดับส่วนประกอบผิดไปจาก ลำดับและทิศทางการเขียนอักษรแบบหลักหรือแบบตัวเลือก ซึ่งลำดับการเขียนที่เกิดขึ้นจะถูกพิจารณาเป็นการเขียนแบบยกปากกามากว่าหนึ่งครั้ง จึงเป็นลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ไม่ถูกต้อง



รูปที่ 4.9 ลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ไม่ถูกต้อง ตัวอย่างที่ 4

ตัวอย่างที่ 4: ลำดับและทิศทางการเขียนของอักษร ช. ช้าง (หัวตัวอักษร เส้นดิ่งหลัง เส้นล่าง เส้นตั้งหน้า และหางบน) ไม่สอดคล้องกับลำดับการเขียนอักษรแบบหลักหรือแบบตัวเลือก คือ หัวตัวอักษร เส้นดิ่งหน้า เส้นล่าง เส้นตั้งหลังและหางบน จึงถือว่าเป็นลำดับการเขียนของภาพลายมือที่ไม่ถูกต้อง

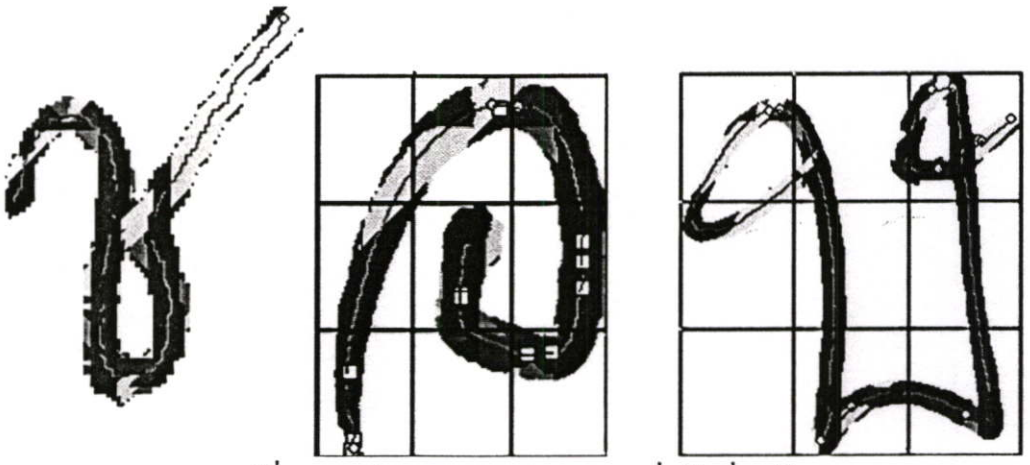
4.3.2 การวัดผลการทดลองกำหนดจุดเริ่มต้นของลำดับการเขียนอักษรลายมือ

สำหรับการวัดการทดลองในส่วนนี้ เป็นขั้นตอนที่ต่อเนื่องจากการหาลำดับทิศทางของภาพลายมือ ซึ่งจะนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ในสองลักษณะ จึงได้แบ่งผลของการทดสอบออกเป็นลักษณะดังนี้

จุดเริ่มต้นถูกต้อง คือ สามารถกำหนดจุดสิ้นสุดของลำดับทิศทางการเขียนอักษรได้อย่างถูกต้อง ตรงตามที่ได้กำหนดไว้ในลำดับการเขียนตัวอักษรแบบหลัก หรือแบบตัวเลือก ซึ่งสามารถแบ่งอีก 3 กรณี คือ

- การพิจารณาการม้วนหัวอักษร สามารถตรวจสอบรูปแบบการเปลี่ยนแปลงแนวการเขียนหลัก ที่สอดคล้องกับลักษณะการม้วนหัวตัวอักษร ซึ่งตรงกับลำดับการเขียนตัวอักษรแบบหลัก คือ เริ่มจากหัวตัวอักษรก่อนเสมอ ดังรูปที่ 4.10 (ซ้าย)
- การพิจารณาเชิงตำแหน่ง สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาตำแหน่งที่น่าจะเป็นจุดเริ่มต้นของลำดับการเขียนของจุดสิ้นสุดบนแนวการเขียนหลักที่เหลืออยู่ ซึ่งถูกพิจารณาเมื่อไม่สามารถตรวจสอบลักษณะการม้วนหัวตัวอักษรได้ ดังรูปที่ 4.10 (กลาง)
- การพิจารณาเชิงตำแหน่ง เนื่องจากความกำกวมในการพิจารณาการม้วนหัวอักษร เป็นกรณีที่พิจารณาการม้วนหัวอักษรได้มากกว่าหนึ่งตำแหน่ง ส่งผลทำให้เกิดความกำกวม

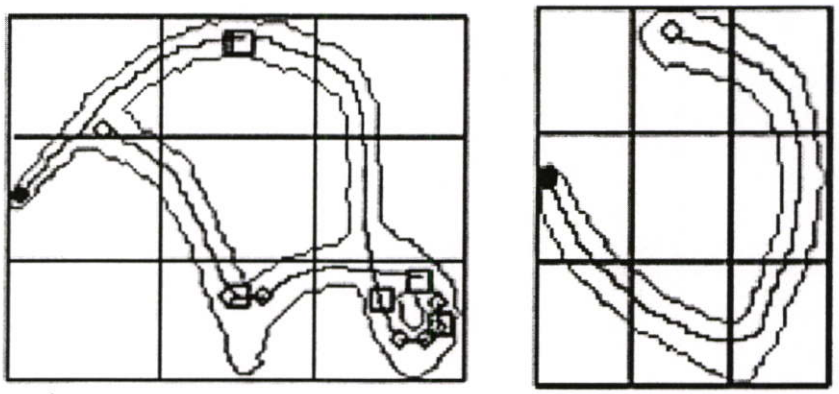
ในการเลือกจุดเริ่มต้นที่เหมาะสม ซึ่งต้องใช้การพิจารณาเชิงตำแหน่งในการกำหนด ดังรูปที่ 4.10 (ขวา)



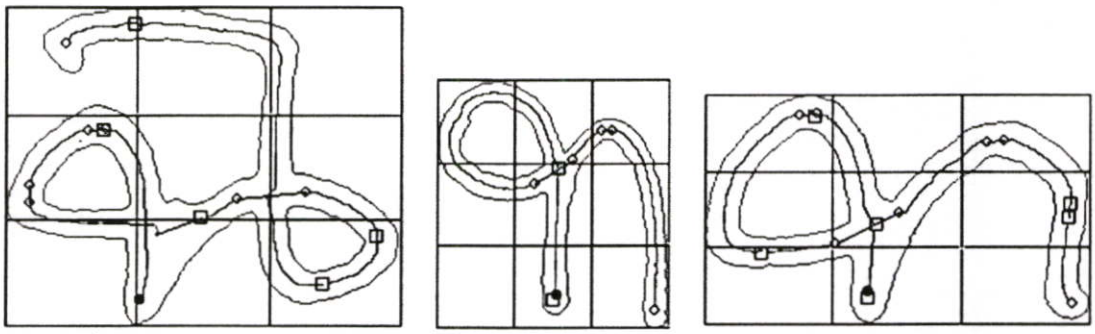
รูปที่ 4.10 รูปแบบของการกำหนดจุดเริ่มต้นที่ถูกต้อง

จุดเริ่มต้นผิดพลาด คือ การกำหนดจุดสิ้นสุดของลำดับทิศทางการเขียนอักษรที่ผิดพลาด ไม่ตรงตามที่ได้กำหนดไว้ในลำดับการเขียนตัวอักษรแบบหลักหรือแบบตัวเลือก ซึ่งสามารถแบ่งอีก 2 กรณี คือ

- ความผิดพลาดเนื่องจากอัลกอริธึม กรณีนี้ลำดับการเขียนที่ได้มีตำแหน่งจุดสิ้นสุดบนแนวการเขียนหลักถูกต้องมาอักษรแบบหลักและแบบตัวเลือก (รูปแบบที่ถูกต้องหรือรูปแบบที่ไม่เหมาะสม) แต่เงื่อนไขในกำหนดจุดเริ่มต้นที่ได้นำเสนอมีข้อผิดพลาดทำให้การกำหนดตำแหน่งผิดไปจากความเป็นจริงของตัวอักษรนั้นๆ ดังรูปที่ 4.11
- ความผิดพลาดเนื่องลำดับทิศทางการเขียนอักษรลายมือ เนื่องจากลำดับการเขียนที่ได้เป็นรูปแบบที่ไม่ได้ถูกต้อง ซึ่งเป็นสาเหตุให้การกำหนดจุดเริ่มต้นมีข้อผิดพลาด ทั้งในแง่ของการพิจารณาการม้วนหัวและการพิจารณาเชิงตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.12

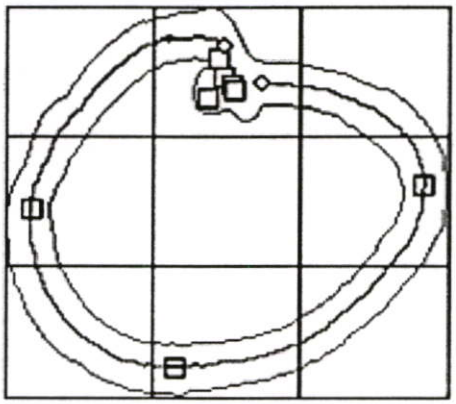


รูปที่ 4.11 รูปแบบของการกำหนดจุดเริ่มต้นผิดพลาดเนื่องจากอัลกอริธึม



รูปที่ 4.12 รูปแบบของการกำหนดจุดเริ่มต้นผิดพลาดลำดับทิศทางการเขียนอักษรลายมือ

ข้อยกเว้นการกำหนดจุดเริ่มต้น เนื่องจากเกิดกรณีที่ไม่สามารถดำเนินขั้นตอนภายในอัลกอริธึมที่นำเสนอได้ ระบบจึงไม่สามารถกำหนดจุดเริ่มต้นให้กับลำดับทิศทางของอักษรลายมือ เช่น กรณีที่ไม่มีการหัวอักษรและจุดสิ้นสุดของแนวการเขียนหลักทั้งสอง อยู่ในบริเวณเดียวกันในการพิจารณาเชิงตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 รูปแบบของข้อยกเว้นการกำหนดจุดเริ่มต้น

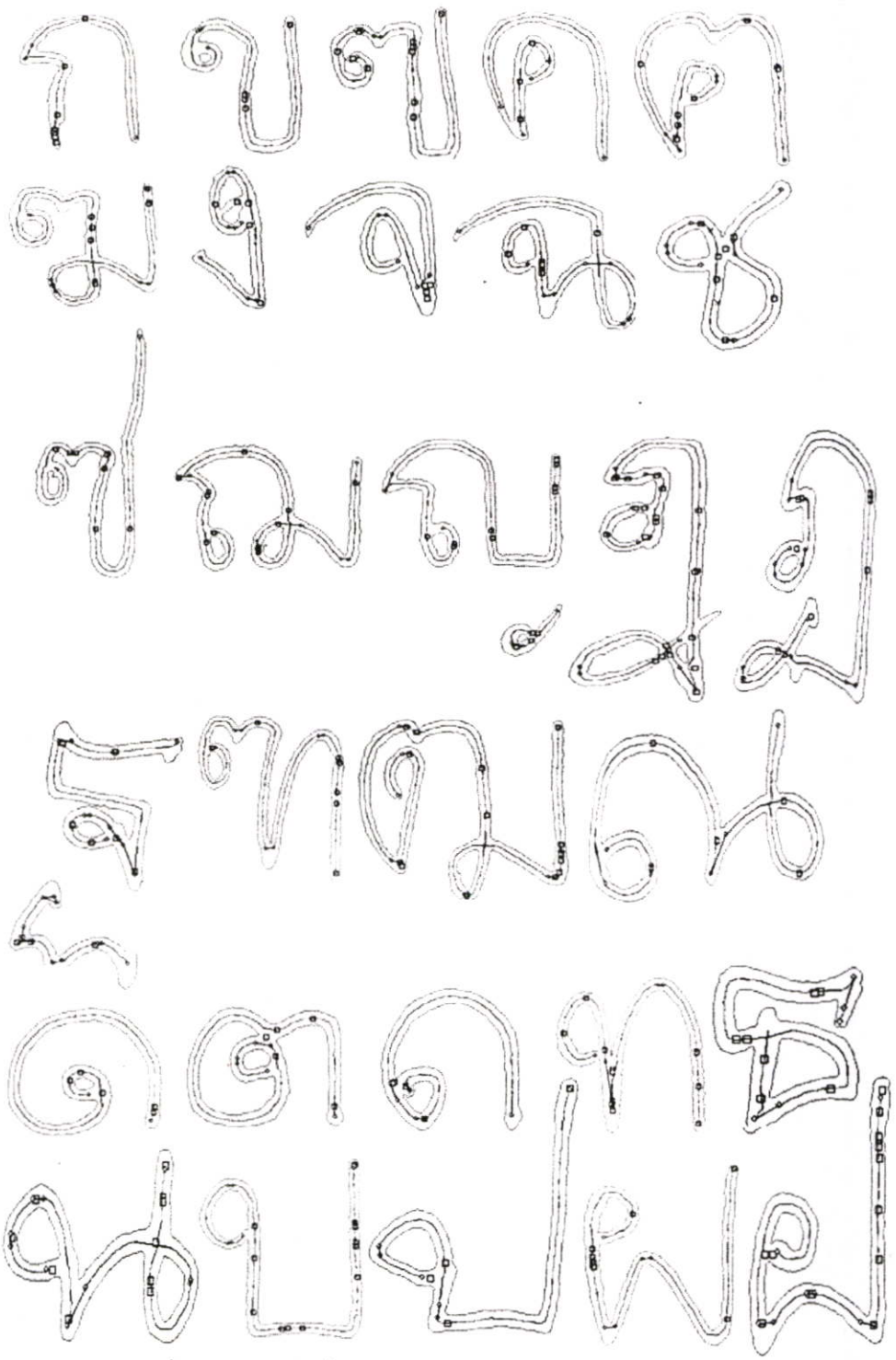
4.4 การทดลอง

จากการทดลองกับภาพลายมือของผู้ทดสอบ 20 คน พร้อมทำการเลือกสุ่มทดสอบกับลายมือหวัดจากแบบทดสอบการเขียน เฉพาะตัวอักษรที่น่าจะทำให้เกิดข้อผิดพลาดเพื่อใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงอัลกอริธึมต่อไป โดยได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน คือ การทดลองสำหรับดึงลำดับทิศทางการเขียนจากภาพลายมือ และการทดลองกำหนดจุดเริ่มต้นหรือการตรวจสอบการม้วนหัวตัวอักษร

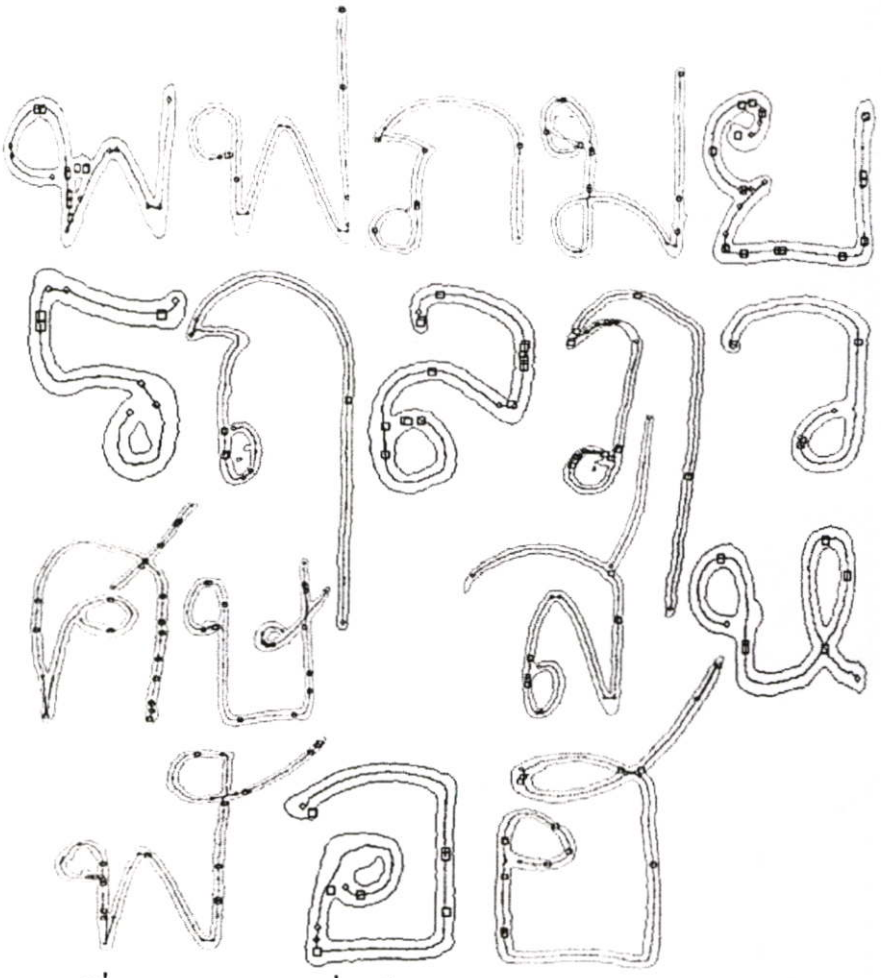
4.4.1 การทดลองหาลำดับทิศทางของอักษรลายมือ

ในการทดลองส่วนแรกนั้น สามารถสรุปตัวอย่างลักษณะที่เกิดขึ้นไว้ดังรูปทางด้านล่าง (เครื่องหมาย: □ = เส้นโครงร่างที่ไม่พิจารณาเนื่องจากสั้น, ○ จุดสิ้นสุดที่เหลืออยู่จากการ

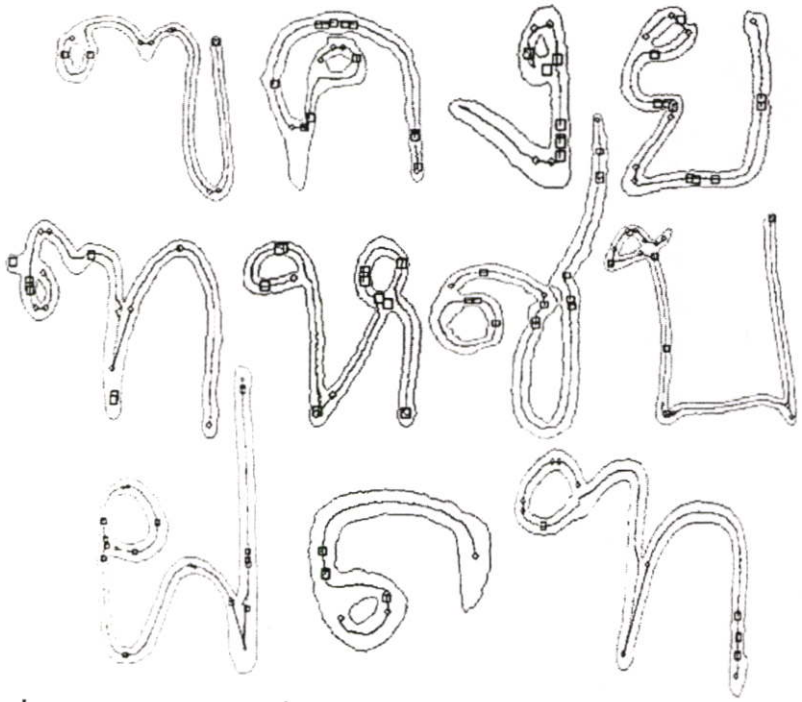
เรียงลำดับเส้นโครงร่าง) โดยผลการทดลองตามตารางที่ 4.1 จะแบ่งได้เป็นสามรูปแบบตามลักษณะการวัดผลในหัวข้อข้างต้น



รูปที่ 4.14 รูปแบบที่ถูกต้องของลำดับการเขียนจากภาพลายมือ



รูปที่ 4.14 (ต่อ) รูปแบบที่ถูกต้องของลำดับการเขียนจากภาพลายมือ



รูปที่ 4.15 ตัวอย่างรูปแบบที่ไม่เหมาะสมของลำดับการเขียนจากภาพลายมือ

รูปที่ 4.16 ตัวอย่างรูปแบบที่ไม่ถูกต้องของลำดับการเขียนจากภาพลายมือ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองกับอักษรทดสอบ

	ถูกต้อง	ไม่เหมาะสม	ไม่ถูกต้อง
อักษรทดสอบ 880 ตัว	78.636%	7.841%	13.750%

* หมายเหตุ: ตัวอักษรบางตัวเกิดทั้งรูปแบบที่ไม่เหมาะสมและไม่ถูกต้อง

4.4.2 การทดลองกำหนดจุดเริ่มต้นของลำดับการเขียน

การทดลองกำหนดจุดเริ่มต้นของลำดับการเขียน จะวิเคราะห์จากผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนการหาลำดับทิศทางของอักษรลายมือ เพื่อกำหนดจุดเริ่มต้นให้กับจุดสิ้นสุดของแนวการเขียนหลัก ซึ่งใช้ตรวจสอบลักษณะการม้วนหัวตัวอักษร และการพิจารณาเชิงตำแหน่งในการวิเคราะห์ โดยผลการทดลองตามตารางที่ 4.2 จะแบ่งได้เป็นลักษณะการวัดผลตามที่ได้อธิบายไว้ในข้างต้น

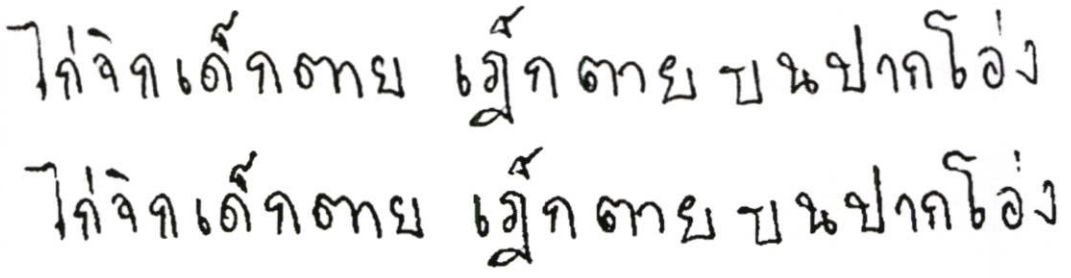
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองกำหนดจุดเริ่มต้นของลำดับการเขียน

	จุดเริ่มต้นถูกต้อง			จุดเริ่มต้นไม่ถูกต้อง		ข้อยกเว้นการกำหนดจุดเริ่มต้น
	พิจารณาเชิงตำแหน่ง	พิจารณาการม้วนหัว	พิจาณาเชิงตำแหน่งเนื่องจากความกำกวม	ข้อผิดพลาดของอัลกอริธึม	ลำดับการเขียน - ไม่ถูกต้อง	
อักษรทดสอบ 880 ตัว	59.773 %	30.114 %	0.909 %	2.727 %	6.023 %	0.455 %

4.5 วิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากวัสดุที่ใช้เขียน

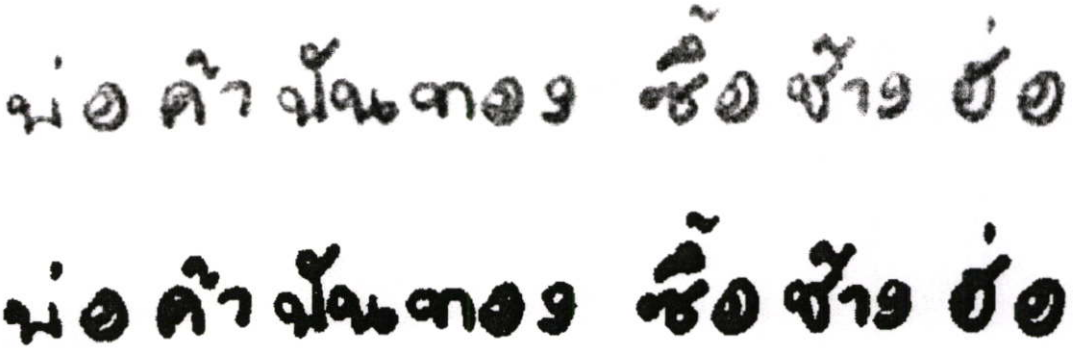
จากการให้บุคคลเดียวกันเขียนแบบทดสอบ (ภาคผนวก ฉ. เฉพาะหน้าแรก) โดยใช้วัสดุที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย ดินสอไม้ ดินสอกด และปากกาแบบต่างๆ ซึ่งกำหนดให้มีขนาดของหัวแตกต่างกันสองแบบ คือหัวใหญ่และหัวเล็ก นำผลที่ได้มาพิจารณาลักษณะของตัวอักษรลายมือที่เกิดขึ้น ความเข้มของเส้นที่ลาก โดยไม่ได้คำนึงถึงความเร็วในการลากเส้น ภายในสมมติฐานที่ว่าบุคคลเดียวกันเขียนตัวอักษรชุดเดียวกัน น่าจะมีแรงกดและลักษณะการเขียนไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งพอสรุปประเด็นได้ดังนี้

- ภาพลายมือที่เขียนโดยใช้ปากกาหัวขนาดเล็ก ทำให้ลายเส้นมีขนาดความกว้างเพียงเล็กน้อย ซึ่งทำให้เกิดการรบกวนบริเวณขอบของตัวอักษรได้ง่าย



รูปที่ 4.17 แสดงรูปลายมือที่เขียนโดยปากกาลูกลื่นที่มีหัวขนาดเล็ก

- ภาพลายมือที่เขียนโดยใช้ปากกาหัวขนาดใหญ่ ทำให้ลายเส้นมีขนาดความกว้างพอสมควร มีผลต่อการรบกวนบริเวณขอบเพียงเล็กน้อย แต่ลายเส้นมักซ้อนหรือติดกัน ทำให้รายละเอียดของตัวอักษรบางอย่างหายไป หรือผิดปกติ อย่างเช่น บริเวณหัวหรือขมวดของตัวอักษร โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากประกอบกับลักษณะการเขียนอักษรขนาดเล็กด้วยแล้ว ทำให้เกิดปัญหาในกระบวนการต่างๆ ของระบบได้



รูปที่ 4.18 แสดงรูปลายมือที่เขียนโดยดินสอไม้ที่มีหัวขนาดใหญ่

ความแตกต่างของภาพลายมือโดยใช้อุปกรณ์การเขียนแต่ละประเภท ซึ่งพอสรุปได้เพียงกว้างๆ เท่านั้น เนื่องจากไม่ได้พิจารณาประเด็นเกี่ยวกับคุณภาพของอุปกรณ์

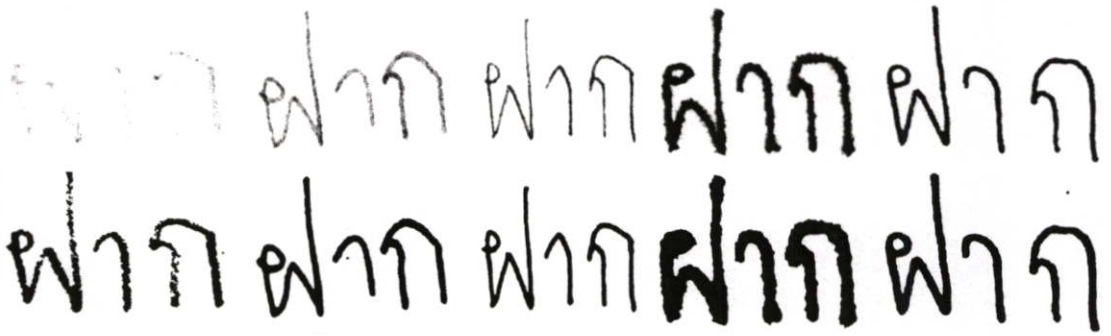
ดินสอไม้ ทำให้รูปลายมือมีความเข้มไม่คงที่ตามการพื้นที่สัมผัสกับกระดาษ โดยเฉพาะหัวดินสอที่มีขนาดใหญ่จะทำให้ความเข้มและความกว้างของเส้นที่ลากเปลี่ยนแปลงได้ง่าย

ดินสอกด ส่วนใหญ่จะให้เส้นที่ความเข้มและความกว้างสม่ำเสมอกว่าการใช้ดินสอไม้

ปากกาลูกลื่น เส้นของตัวอักษรมีความเข้มไม่คงที่ในบริเวณที่มีการเปลี่ยนทิศทางแนวการเขียน โดยเฉพาะปากกาที่มีขนาดหัวใหญ่

ปากกาโรลเลอร์ มีความเข้มของเส้นค่อนข้างคงที่ อาจมีการซึมของหมึกบริเวณที่จรดปากกา ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณภาพของปากกาและชนิดของกระดาษด้วย

ปากกาหมึกเจล มีความเข้มของเส้นคงที่ มีความกว้างสม่ำเสมอตลอดเส้นตัวอักษร



รูปที่ 4.19 ภาพลายมือที่เขียนด้วยวัสดุที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.19 แสดงภาพลายมือที่ถูกเขียนโดยวัสดุที่แตกต่างกัน ได้แก่ ดินสอไม้ ดินสอกด ปากกาลูกลื่น ปากโรลเลอร์ และปากกาหมึกเจล ตามลำดับ พร้อมกับแสดงผลที่จากการปรับภาพเป็นภาพขาว-ดำ โดยปรับความเข้มและความสว่างที่ระดับเดียวกัน

ตัวแปรที่สำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้เขียนที่อาจส่งผลกระทบต่อการทดลอง ภายใต้ลักษณะการเขียนตัวอักษรขนาดเล็ก คือ อุปกรณ์ที่มีหัวขนาดใหญ่หรือดินสอไม้ที่จะเพิ่มโอกาสทำให้การเขียนตัวอักษรซ้อนทับกัน ทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบได้ เนื่องจากกระบวนการก่อนหน้าสำหรับงานวิจัยนี้ ไม่ได้พิจารณาถึงความเข้มของภาพลายมือ ซึ่งจะได้กล่าวเพิ่มเติมในหัวข้อถัดไป

4.6 การทดสอบอัลกอริธึมกับภาพอักษรที่มีการรบกวน

ในการทดลองที่ผ่านมา ตัวอักษรทดสอบแต่ละชุด จะมีการปรับภาพเป็นขาว-ดำ โดยการปรับความเข้มและความสว่างที่ระดับเดียวกันเท่านั้น ทำให้ชุดอักษรที่ถูกเขียนด้วยอุปกรณ์ที่มีความเข้มไม่คงที่ เช่น ดินสอไม้ ทำให้เกิดการรบกวนบริเวณขอบสำหรับภาพลายมือที่มีความเข้มไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.20 ในการทดสอบนี้จึงนำรูปลายมือที่มีการรบกวนที่เกิดขึ้นลักษณะต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่ส่งผลต่ออัลกอริธึมที่นำเสนอ นอกจากนี้จะรวมไปถึงการทดสอบการรบกวนประเภทอื่นๆ อีกด้วย

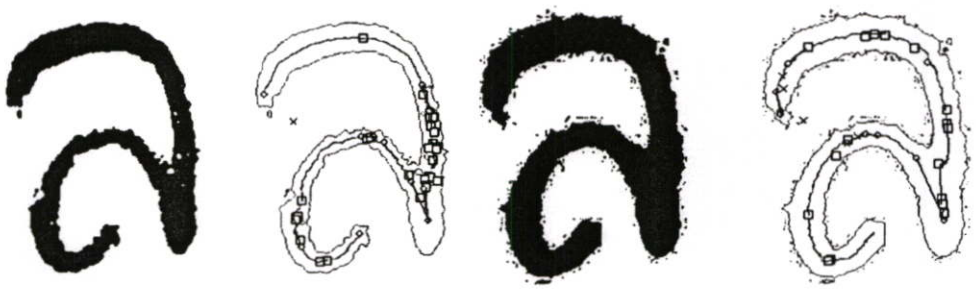
รูปที่ 4.20 ลักษณะการรบกวนที่เกิดจากความเข้มในชุดอักษรที่ไม่สม่ำเสมอกัน

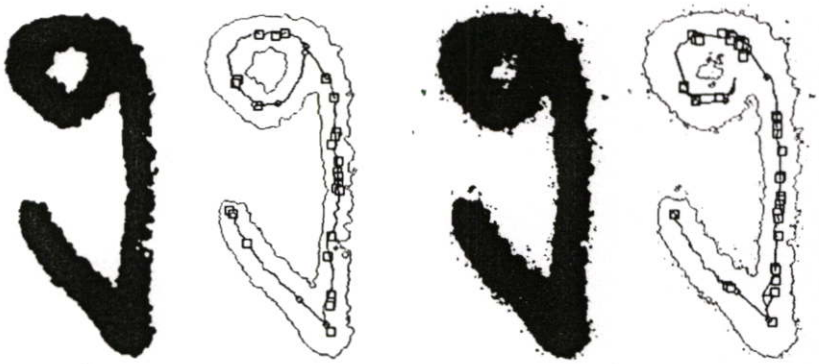
4.6.1 การรบกวนบริเวณขอบภาพ

การรบกวนบริเวณขอบภาพ ปัญหาส่วนใหญ่จะเกิดจากกระบวนการปรับภาพเป็นขาว-ดำ โดยการปรับความเข้มและความสว่างของชุดภาพอักษรลายมือ ในกรณีที่อักษรมีความเข้มไม่สม่ำเสมอ ตัวอย่างเช่น รูปที่ 4.20 (ซ้าย) ภาพลายมืออักษร ล. ลิง ที่ถูกเขียนด้วยดินสอไม้ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีโอกาสสูง ในการทำให้เกิดภาพที่มีความเข้มไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการปรับภาพเป็นขาว-ดำ จะทำให้เกิดการบกวนบริเวณขอบภาพได้สองลักษณะ คือ การกร่อนบริเวณขอบภาพ (รูปที่ 4.21 B2) เนื่องจากบริเวณ A2 มีความเข้มน้อย A1 ถ้าเป็นกรณีอยู่ในชุดภาพลายมือชุดเดียวกัน ที่มีการปรับความเข้มให้พอดีกับ A1 ก็ทำให้เกิดการรบกวนแบบที่เกิดขึ้นใน B2 อีกลักษณะคือ มีกลุ่มจุดภาพเพิ่มบริเวณขอบ (รูปที่ 4.21 C1) ถ้าชุดภาพลายมือมีการปรับความเข้มและความสว่างให้พอดีกับ A2 ก็ทำให้เกิดการรบกวนบริเวณขอบภาพแบบที่เกิดขึ้นใน C1

รูปที่ 4.21 ลักษณะการรบกวนที่เกิดขึ้น เนื่องจากความเข้มของชุดภาพลายมือที่ไม่สม่ำเสมอ

การรบกวนในลักษณะนี้ส่งผลต่ออัลกอริธึมที่ได้นำเสนอ ขึ้นอยู่กับระดับของการรบกวน เนื่องจากการรบกวนมีผลกระทบโดยตรงต่อการพิจารณาระยะไปยังขอบในทิศทางต่างๆ ณ ตำแหน่งจุดกลางใดๆ โดยทั่วไปทำเกิดการประมวลผลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นโครงร่างจะมีลักษณะไม่ต่อเนื่องและเป็นเส้นสั้น ซึ่งทำให้ลำดับการเขียนที่ได้มีทิศทางไม่สอดคล้องกับแนวการเขียน แต่หากการรบกวนทำให้แนวการเขียนหลักที่ใช้ในการเรียงเส้นโครงร่างผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริงของการเขียนตัวอักษร จะทำให้เกิดความผิดพลาดของการเรียงเส้นโครงร่างในแนวการเขียนหลักดังกล่าว ส่งผลให้ลำดับที่ได้ไม่ถูกต้อง





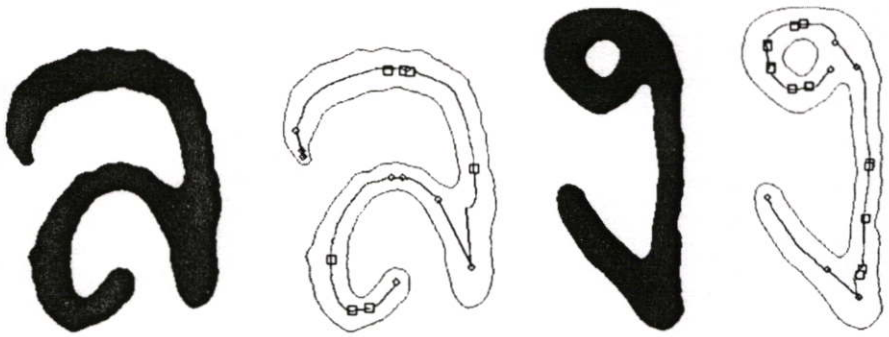
รูปที่ 4.22 ผลลัพธ์ของลำดับทิศทางบนภาพลายมือที่มีการรบกวน

4.6.2 การรบกวนในบริเวณภาพ

การรบกวนในภาพอักษรจะส่งผลโดยตรง เนื่องจากวิธีคิดในอัลกอริธึม จะพิจารณาจุดกลางด้วยการพิจารณาจุดภาพดำที่เรียงต่อกันในทิศทางต่างๆ ซึ่งการรบกวนลักษณะนี้จะทำให้การจุดกลางที่ได้ ไม่สอดคล้องกับแนวการเขียนของตัวอักษรจริงๆ และยังทำให้การเรียงเส้นโครงร่างในแนวการเขียนหลักช่วงเดียวกันผิดปกติได้

รูปที่ 4.23 ลำดับทิศทางการเขียนของภาพอักษรที่มีการรบกวนภายใน

แนวการแก้ไขต่อการรบกวนที่เกิดขึ้นของภาพอักษรลายมือ ในบางส่วนการละทิ้งเส้นที่มีขนาดสั้นหรือการตรวจสอบความผิดปกติในขั้นตอนต่างๆ ของอัลกอริธึมที่ได้นำเสนอไว้ สามารถแก้ไขปัญหาได้ในระดับหนึ่ง (รูปที่ 4.23 ขวา) แต่ยังมีโอกาสที่จะเกิดข้อผิดพลาดได้สูง ดังนั้นแนวทางที่ถูกต้องและเหมาะสมที่สุดสำหรับการแก้ไข คือประยุกต์ใช้การกรองข้อมูลภาพแบบต่างๆ เพื่อกำจัดการรบกวนออกจากภาพลายมือ แล้วจึงผ่านเข้าสู่กระบวนการของระบบ จากรูปที่ 4.24 ได้ประยุกต์ใช้การกรองข้อมูลภาพแบบมัธยฐาน เพื่อกำจัดการรบกวนบริเวณขอบภาพออก ทำให้ลำดับการเขียนที่ได้ถูกต้อง



รูปที่ 4.24 ผลของลำดับทิศทางการเขียนหลังจากการประยุกต์ใช้การกรองข้อมูลภาพแบบมัธยฐาน

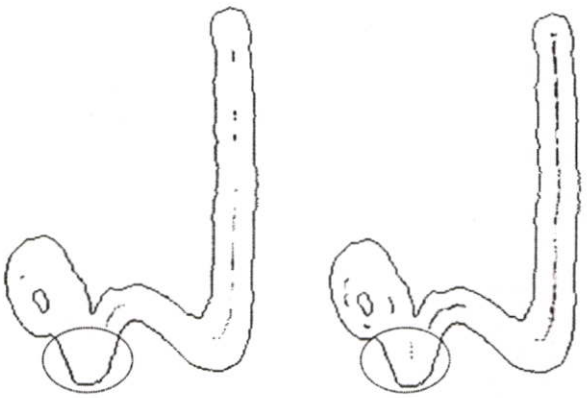
4.7 วิเคราะห์ข้อผิดพลาดจากผลการทดลองและแนวทางการแก้ไข

จากผลการทดลองในข้างต้น นำมาวิเคราะห์ถึงลักษณะและสาเหตุของความผิดพลาดที่เกิดขึ้น อาจจะแบ่งออกได้เป็น 2 แนวทาง คือ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากข้อบกพร่องของอัลกอริธึมและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากลักษณะการเขียนตัวอักษร

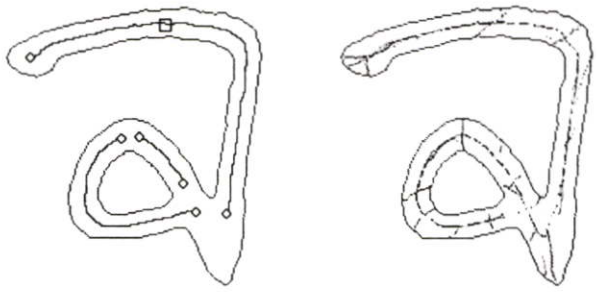
4.7.1 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากข้อบกพร่องของอัลกอริธึม

4.7.1.1 อัลกอริธึมสร้างโครงร่าง

เนื่องจากอัลกอริธึมไม่สามารถสร้างจุดกลางในแนวเส้นลากที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นมุมแคบและมีระยะสั้น ซึ่งจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้ง่ายในตัวอักษรที่มีเส้นทแยงขึ้นหลัง (ตัว ท ทหาร, ตัว ฑ มณโฑ และ ตัว ห หีบ) หรือเส้นทแยงขึ้นลง (ตัว ผ ผึ้ง, ตัว ฝ ฝา, ตัว พ พาน, ตัว ฟ ฟัน และตัว ฬ จุฬา) ส่งผลให้การเรียงลำดับเส้นโครงร่าง บางส่วนสูญหายและไม่เป็นไปตามการเขียนที่เกิดขึ้นจริง



รูปที่ 4.25 แสดงจุดโครงร่างที่ได้จากอัลกอริธึมแบบปกติ (ซ้าย) และแบบที่ได้กำหนดให้มีความยืดหยุ่นของการพิจารณาระยะไปยังขอบในทิศทางที่เหลือ (ขวา)



รูปที่ 4.26 ลำดับการเขียนตัว จ. จาน ที่ผิดพลาด เนื่องจากข้อบกพร่องของอัลกอริธึมสร้างโครงร่าง

ผลกระทบที่เกิดขึ้น อาจส่งผลให้ลำดับการเขียนที่ได้ไม่เหมาะสมหรือผิดไปจากความเป็นจริง ตัวอย่างเช่น อักษร จ. จาน ดังรูปที่ 4.26 แนวเส้นทแยงลงและเส้นชานหลังทำมุมแคบและเป็นช่วงสั้นๆ หากพิจารณาบริเวณดังกล่าว (รูปที่ 4.26 ขวา) จะเห็นได้ว่าระยะของการเท่ากันในทิศตรงข้ามกัน จะเป็นทิศของแนวนอนและแนวเฉียงขวา ซึ่งไม่สามารถใส่วงกลมลงไปได้ ทำให้ลำดับการเขียนที่ได้ผิดพลาดไปคล้ายกับลำดับการเขียนของตัว ว. แหวน

แนวทางการแก้ไข คือการกำหนดค่าความยืดหยุ่นให้กับการเปรียบเทียบรัศมีของวงกลมที่ทิศทางที่เหลืออีก 6 ทิศ โดยพิจารณาเป็นเปอร์เซ็นต์ของความยาวรัศมีที่สามารถเกินระยะไปยังขอบในแต่ละทิศได้ (รูปที่ 4.26 ขวา) แต่การแก้ไขในลักษณะนี้อาจส่งผลต่ออัลกอริธึมในการเรียงจุดโครงร่างต่อได้ จึงควรปรับปรุงให้โปรแกรมประยุกต์หรืออัลกอริธึมสามารถปรับค่าความยืดหยุ่นดังกล่าวในบริเวณที่เหมาะสม

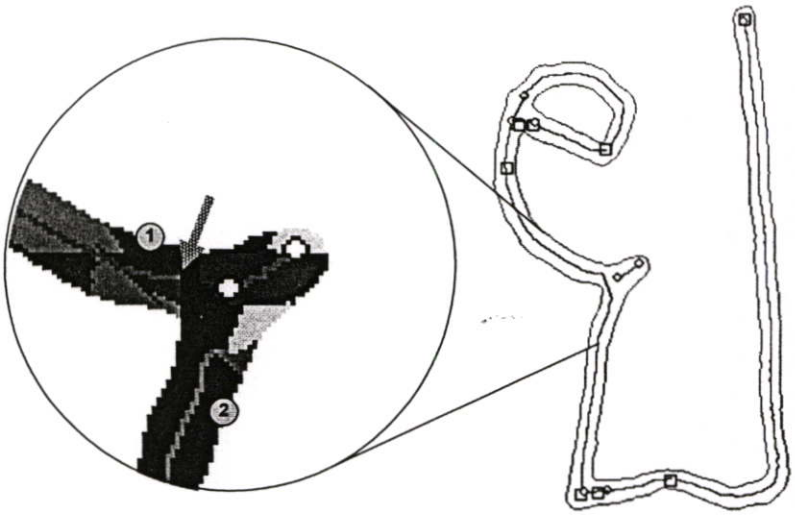
4.7.1.2 อัลกอริธึมของการเรียงลำดับเส้นโครงร่าง

ในการเรียงลำดับเส้นโครงร่างตามแนวการเขียน หรือการจัดเรียงจุดต้นจุดปลายของเส้นโครงร่างโดยการพิจารณาจากแนวการเขียนหลักช่วงเดียว ถึงแม้ว่าอัลกอริธึมได้เพิ่มส่วนที่ตรวจสอบและแก้ไขลักษณะปัญหาที่เกิด แต่ก็ยังมีกรณีที่ไม่สามารถตรวจสอบและแก้ไขได้ ซึ่งสรุปเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

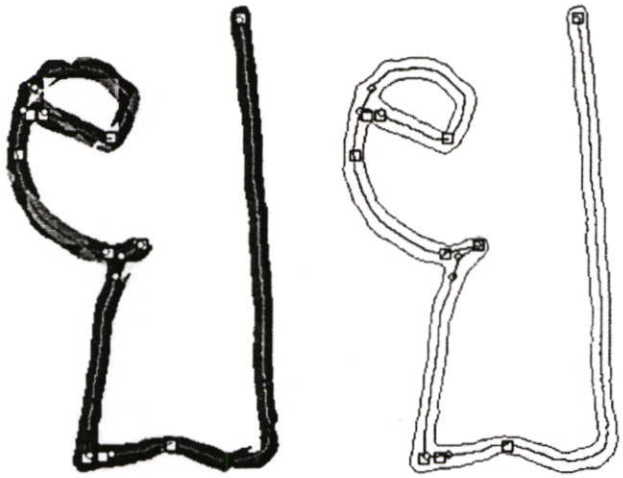
- **การเรียงลำดับเส้นโครงร่างไม่เป็นธรรมชาติ**

หากดำเนินการเรียงลำดับเส้นโครงร่างบนแนวการเขียนหลักช่วงเดียวกัน โดยไม่ตรวจสอบการเรียงลำดับจุดกลางที่มีจุดข้างเคียงข้ามแนวการเขียนหลักผิดปกติ ในขั้นตอน 3.2.2 จะทำเกิดความผิดพลาดในการเรียงลำดับเส้นโครงร่างที่ไม่เป็นธรรมชาติ ได้ในลักษณะดังรูปที่ 4.27 บริเวณหยักของตัว ย. ยักษ์ จะเห็นได้ว่าจุดโครงร่างเรียงบนแนวการเขียนหลัก ① เรียงข้ามไปยังแนว ② เพียงช่วงสั้นๆ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้การเรียงลำดับทิศทางการเขียนของตัวอักษร ย. ยักษ์ ผิดไปจากที่ควร หากเส้นโครงร่างดังกล่าวได้ผ่านการตรวจสอบและแก้ไขความผิดปกติของการ

เรียงลำดับจุดกลางที่มีจุดข้างเคียงข้ามแนวการเขียนหลัก จะทำให้การจัดเรียงเส้นโครงร่าง บริเวณดังกล่าวถูกต้องดังรูปที่ 4.28

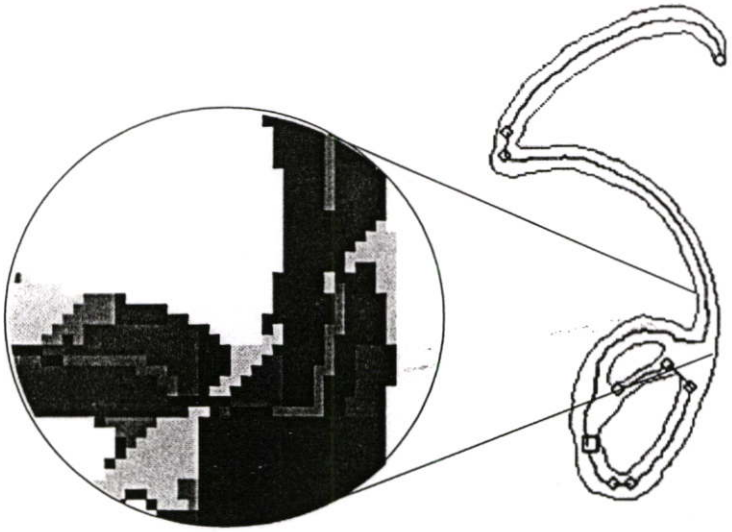


รูปที่ 4.27 การเรียงเส้นโครงร่างที่ผิดพลาด โดยไม่ตรวจสอบการเรียงจุดกลางเป็นเส้นโครงร่างที่ผิดปกติ

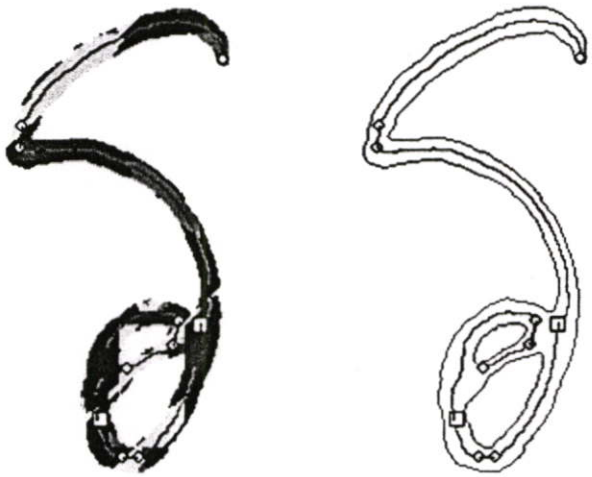


รูปที่ 4.28 การเรียงเส้นโครงร่างที่ถูกต้อง เมื่อมีการตรวจสอบและแก้ไขการเรียงจุดกลางเป็นเส้นโครงร่างที่ผิดปกติ

อีกตัวอย่างในรูปที่ 4.29 จะเป็นกรณีส่วนใหญ่ที่พบลักษณะของการเรียงลำดับเส้นโครงร่างไม่เป็นธรรมชาติหรือการม้วนหัวผิดทิศทาง สาเหตุของปัญหาจะใกล้เคียงกันก็คือ การเรียงตัวของแนวเส้นโครงร่างจะข้ามแนวการเขียนหลักไปช่วงสั้นๆ ซึ่งส่งผลให้การพิจารณาการเรียงลำดับของเส้นโครงร่างบนแนวการเขียนหลักมีข้อผิดพลาด



รูปที่ 4.29 การเรียงเส้นโครงร่างที่ผิดพลาด ทำให้เกิดลำดับการเขียนที่ไม่เป็นธรรมชาติ



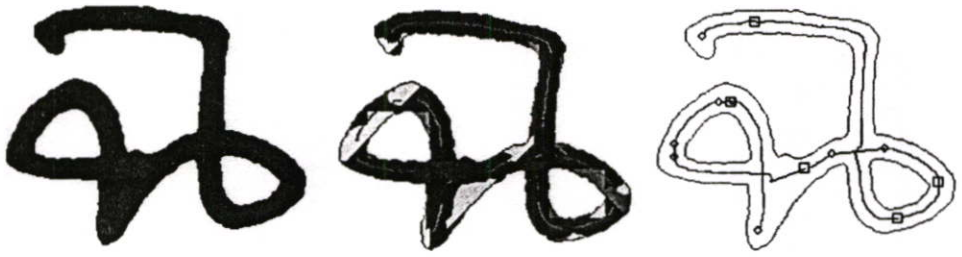
รูปที่ 4.30 ลำดับการเขียนโดยมีตรวจสอบและแก้ไขการเรียงจุดกลางเป็นเส้นโครงร่างที่ผิดปกติ

ซึ่งจากการวิเคราะห์รายละเอียดในข้างต้น แสดงให้เห็นว่าขั้นตอนอัลกอริธึมสำหรับการเรียงเส้นโครงร่างที่อยู่แนวการการเขียนหลักช่วงเดียวกัน ยังขาดตรวจสอบความสัมพันธ์ของเส้นโครงร่างหรือจุดปลายของเส้นโครงร่างกับแนวการเขียนหลัก ที่เส้นโครงร่างนั้นวางตัวอยู่ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาลักษณะดังกล่าวได้ แนวทางการตรวจสอบและแก้ไขที่นำเสนอเป็นเพียงการ ปรับปรุงในส่วนขั้นตอนการเรียงจุดกลางให้เป็นเส้นโครงร่าง จึงยังไม่ได้เป็นการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอัลกอริธึมในขั้นตอนนี้ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญของระบบ

แนวทางการแก้ไข วิธีคิดในอัลกอริธึมที่นำเสนอ จะพิจารณาเฉพาะจุดที่เป็นสุดสิ้นของเส้นโครงร่างที่กำลังจัดเรียงเท่านั้น ซึ่งหากจุดดังกล่าวอยู่บนแนวการเขียนที่ไม่ได้แสดงถึงทิศทางหรือแนวการเขียนส่วนใหญ่ของเส้นโครงร่างทั้งเส้น จะทำให้มีโอกาสที่เส้นโครงร่างจะถูกจัดเรียงไปคนละทิศทางกับโครงสร้างของตัวอักษร ส่งผลให้เกิดลักษณะการเขียนที่ไม่ถูกต้อง แนวทางการแก้ไขที่เหมาะสมคือ ให้มีการตรวจสอบการเรียงเส้นโครงร่าง โดยนอกจากพิจารณาแนวการเขียนหลักแนวเดียวกันแล้ว ให้พิจารณาทิศทางในภาพรวมของเส้นโครงร่างดังกล่าวด้วย

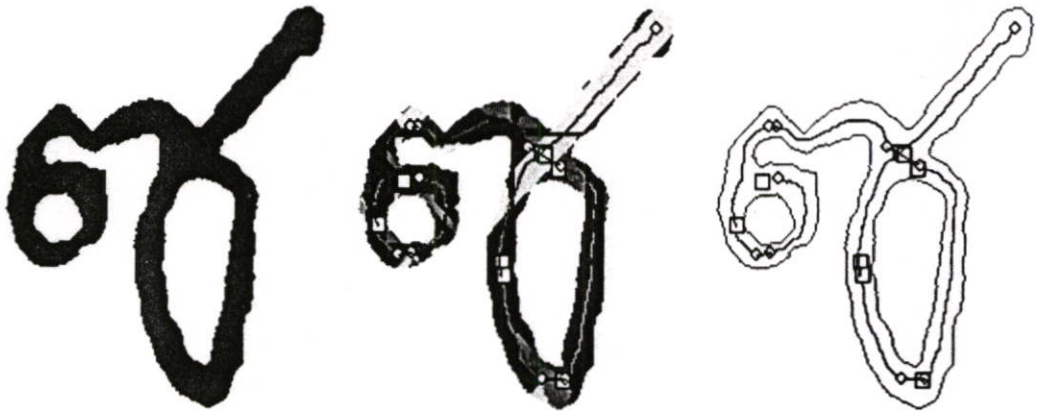
• การเรียงลำดับเส้นโครงร่างบนแนวการเขียนที่ต่อเนื่องผิดปกติ

เกิดจากการเขียนอักษรลายมือที่ชิดกัน หรือเหลื่อมกันในตัวอักษรเดียวกัน ทำให้แนวการเขียนหลักบนภาพลายมือถูกพิจารณาเป็นช่วงเดียวกัน ส่งผลให้ลำดับการเขียนผิดจากความจริง ดังเช่นรูปที่4.31 แนวเส้นเริ่มของหัวตัวอักษร เส้นดิ่งและเส้นล่างเอียงขึ้นบนตัว ฉ. ฉิ่ง ถูกเขียนชิดกัน อัลกอริธึมจึงพิจาณาเป็นแนวการเขียนหลักในแนวนอน ทำให้การจัดเรียงเส้นโครงร่างผิดพลาด



รูปที่ 4.31 แสดงแนวการเขียนหลักที่ต่อเนื่องผิดปกติ จากลักษณะการเขียนตัวอักษรที่ชิดกัน

รูปแบบที่ทำให้เกิดความผิดพลาดอีกรูปแบบ คือ โครงสร้างการเขียนตัวอักษรบางตัว (ช. ช้าง, ซ. โซ่ และ ธ. ธง) ทำให้เกิดการเชื่อมต่อของแนวการเขียนซึ่งเป็นของคนละส่วนประกอบกันได้ เช่น ตัวอักษร ซ. โซ่ มีโครงร่างในการเขียนตัวอักษรที่ชิดกันบริเวณหัวหยักและส่วนที่ลากขึ้นไปเป็นหางบน จึงมีโอกาสเกิดแนวการเขียนที่ต่อเนื่องผิดปกติได้สูง ดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 ตัวอักษร ซ. โซ่ มีโครงร่างในการเขียนตัวอักษรที่ชิดกัน

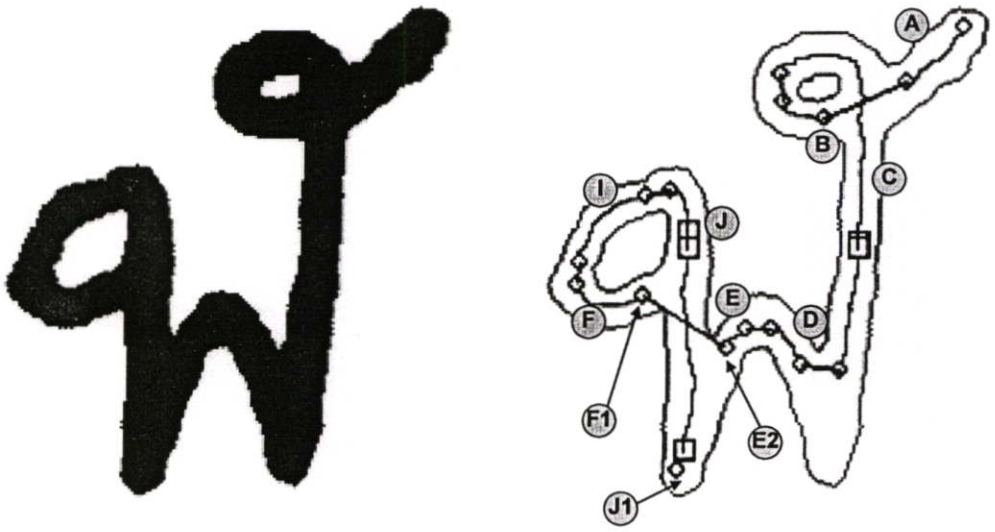
แนวทางแก้ไข ต้องเพิ่มเติมการตรวจสอบลักษณะตัวอักษรดังกล่าว ในกระบวนการก่อนหน้า เพื่อแยกความแตกต่างของแนวการเขียนแต่ละช่วงออกจากกัน

4.7.1.3 อัลกอริธึมของการเรียงลำดับแนวการเขียนหลักแต่ละช่วง

การเรียงแนวการเขียนหลักแต่ละช่วงเข้าด้วยกัน โดยการพิจารณาระยะและทิศทางของจุดสิ้นสุดของแต่ละแนวการเขียน จะพบความผิดพลาดส่วนมากในลักษณะการเขียนอักษรที่เหลื่อมซ้อนทับกัน แต่จะเป็นคนละรูปแบบกรณีแนวการเขียนหลักที่ต่อเนื่องผิดปกติ ดังรูปที่ 4.33 ตัวอักษร ซ. โซ่ ที่มีซ้อนทับกันบริเวณเส้นดิ่งและเส้นที่ลากขึ้นไปเป็นหางบนและทำให้ส่วนหัวหยักเชื่อมกับการลากหางบน ซึ่งทั้งสามส่วนนี้อยู่บนแนวการเขียนหลักคนละช่วงกัน เมื่อทำการเรียงแนวการเขียนหลัก โดยจะเริ่มที่จุดสิ้นสุด A1 ข้ามมาที่จุดสิ้นสุด A2 บนแนวการเขียนช่วงเดียวกัน พิจารณาระยะจากระหว่างจุด B1 และจุด C1 ซึ่งมีระยะใกล้เคียงกัน จึงใช้การพิจารณาทิศทางแทน แต่การเขียนตัวอักษรที่เชื่อมต่อกันบริเวณส่วน A และ B จะทำให้การเปลี่ยนแปลงทิศทางระหว่างส่วนดังกล่าวน้อยกว่า ทิศทางจาก A และ C ทำให้การเรียงลำดับแนวการเขียนหลักของตัวอักษรไม่ถูกต้อง

รูปที่ 4.33 การเรียงลำดับแนวการเขียนหลักแต่ละช่วงที่ผิดพลาดเนื่องจากการเขียนซ้อนทับกัน

อีกกรณีจะเป็นข้อบกพร่องในส่วนเรียงแนวการเขียนหลักโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทิศทางที่น้อยที่สุด ซึ่งอาจจะเกิดข้อผิดพลาดในการเรียงจุดสิ้นสุดของแนวการเขียนข้ามไปยังแนวการเขียนที่ไม่เกี่ยวข้องกัน มักจะเกิดในการเขียนตัวอักษรขนาดเล็ก ที่มีแนวการเขียนเป็นช่วงสั้นๆ ดังรูปที่ 4.34 ตัวอักษร พ. จุฬา ในขั้นตอนเรียงลำดับแนวการเขียน จะเริ่มที่แนวการเขียน A ก่อน ทำตามขั้นตอนไปเรื่อยๆ จนถึงแนวการเขียน E ที่จุด E2 ซึ่งมีระยะระหว่างจุด F1 กับ J1 ใกล้เคียงกัน จึงตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทิศทางเวกเตอร์บนแต่ละจุดแทน โดยการเปลี่ยนแปลงทิศทางของเวกเตอร์ระหว่างจุด E2 และจุด F1 มีค่าน้อยกว่า ทำให้เชื่อมแนวการเขียนกับจุด F1 แต่หากพิจารณาแนวการเขียน F เป็นส่วนโครงสร้างของตัวอักษรที่ไม่ได้ต่อเนื่องกับแนวการเขียน E เลย เพียงแต่ระยะระหว่างจุดทั้งสองไม่ได้ลากตัดขอบภาพตั้งต้นของตัวอักษรเลย ซึ่งทำให้อัลกอริธึมพิจารณาเป็นแนวการเขียนที่ต่อเนื่องกัน



รูปที่ 4.34 การเรียงลำดับแนวการเขียนหลักโดยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทิศทางที่ผิดพลาด

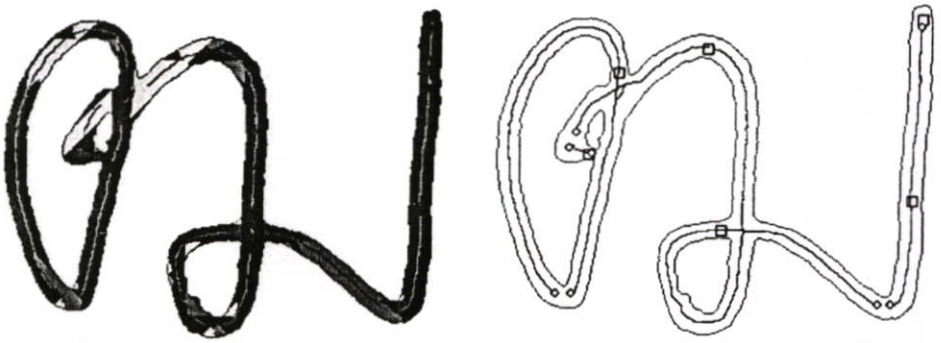
แนวทางแก้ไข จากตัวอย่างรูปที่ 4.34 การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทิศทางจะพิจารณาระหว่างเวกเตอร์ที่วิ่งเข้าหาและเวกเตอร์ที่วิ่งออกจากจุดสิ้นสุดบนแนวการเขียนคนละช่วงกัน โดยไม่ได้พิจารณาถึงทิศทางของเวกเตอร์วิ่งเชื่อมระหว่างจุดทั้งสอง (เวกเตอร์ระหว่าง E2 และ F1 กับเวกเตอร์ระหว่าง E2 และ J1) ซึ่งจะทำให้เกิดกรณีผิดพลาดดังกล่าว ดังนั้นแนวจากการแก้ไขที่เหมาะสมคือ เพิ่มเติมการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทิศทางระหว่างทางเดินของจุดสิ้นสุดของแนวการเขียนและเพิ่มความรัดกุมให้กับการตรวจสอบจุดที่อยู่บนแนวการเขียนที่ไม่ต่อเนื่องกัน โดยอาจใช้ระยะไปยังขอบภาพในทิศต่างๆ เช่นเดียวกันกับที่ใช้พิจารณาแนวการเขียนหลักแนวเดียวกันแต่คนละช่วงการเขียนในหัวข้อ 3.2.3

4.7.2 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากลักษณะตัวอักษร

4.7.2.1 ภาพลายมือที่มีลักษณะซ้อนทับหรือเหลื่อมกันภายในตัว

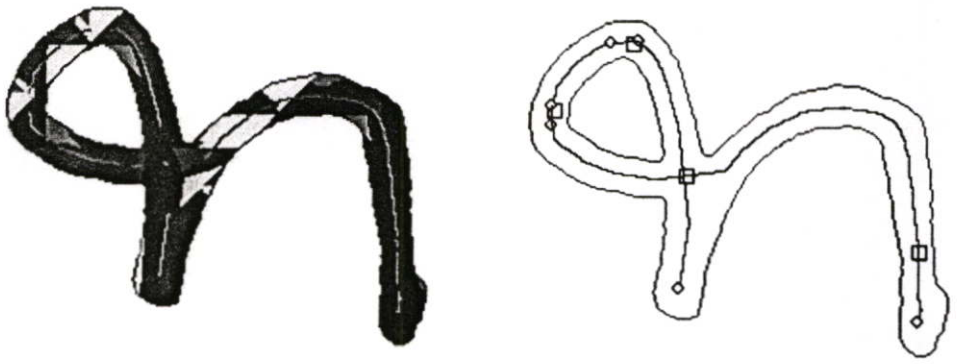
หากภาพลายมือมีลักษณะการซ้อนทับหรือเหลื่อมกันภายในตัว ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในตัวอักษรที่มีหัวกลางและมีเส้นหน้า (เช่น ตัว ค ควาย, ตัว ด เด็ก, ตัว ต เต่า, ตัว ฒ ผู้เฒ่า เป็นต้น) ซึ่งเกิดได้หลายกรณีประกอบกันได้แก่ การเขียนตัวอักษรขนาดเล็ก และหัวของอุปกรณ์ที่ใช้เขียนมีขนาดใหญ่ หากการซ้อนทับนั้น ทำให้แนวการเขียนหลักเปลี่ยนไป หรือไปเชื่อมต่อเข้ากับแนวการเขียนหลักเดียวแต่ควรอยู่คนละช่วง ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องต่ออัลกอริธึมในลักษณะเดียวกันกับการเรียงลำดับเส้นโครงร่างภายในแนวการเขียนหลักที่ต่อเนื่องผิดปกติ (4.7.1.2) และความผิดพลาดของเรียงลำดับแนวการเขียนหลักแต่ละช่วง (4.7.1.3) ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น ทำให้ข้อมูลการลากเส้นบางส่วนหายไป (รูปที่ 4.35) หรือ ลำดับการเรียงต่อเส้นโครงร่างผิดเพี้ยนไปจากความจริง (รูปที่ 4.36)

รูปที่ 4.35 การเหลื่อมภายในตัวอักษรส่งผลให้ลำดับการลากเส้นบริเวณหัวของอักษร ด เด็ก หายไป



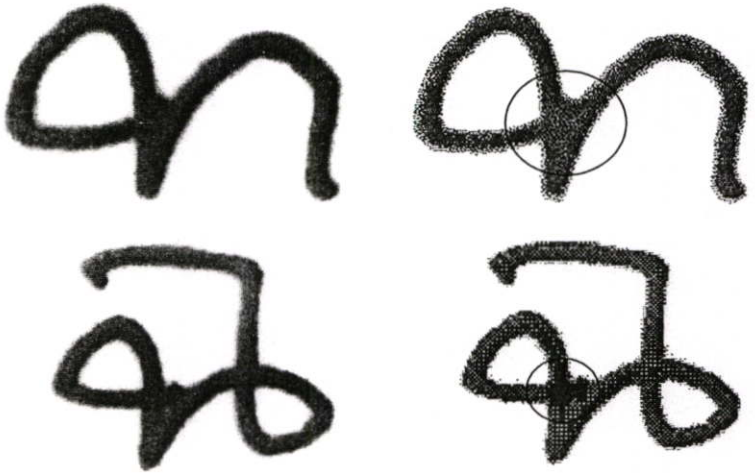
รูปที่ 4.36 การเหลื่อมของอักษร ฒ. ผู้เฒ่า ทำให้การเรียงเส้นโครงร่างผิดเพี้ยนไป

จากรูปที่ 4.36 ส่วนหัวของตัว ฒ ผู้เฒ่า เหลื่อมกับเส้นบนหยัก ส่งผลให้แนวการเขียนในบริเวณดังกล่าวถูกเชื่อมต่อกันเป็นแนวดิ่งทั้งหมดทำให้ การเรียงเส้นโครงร่างผิดไปจากความเป็นจริง อีกกรณีในรูปที่ 4.37 เส้นทแยงขึ้นในตัว ท ทหาร มีการลากเส้นตรงย้อนทับเส้นหน้า ขึ้นไปจนถึงจุดม้วนหัว ส่งผลคือแนวการเขียนบริเวณดังกล่าวกับเส้นทแยงขึ้นที่ลากมาจากด้านล่างถูกพิจารณาว่าเป็นแนวเดียวกัน ทำให้จุดต้นบริเวณหัวหายไป



รูปที่ 4.37 การลากเส้นย้อนทับของตัว ท. ทหาร ทำให้ลำดับการเขียนผิดพลาด

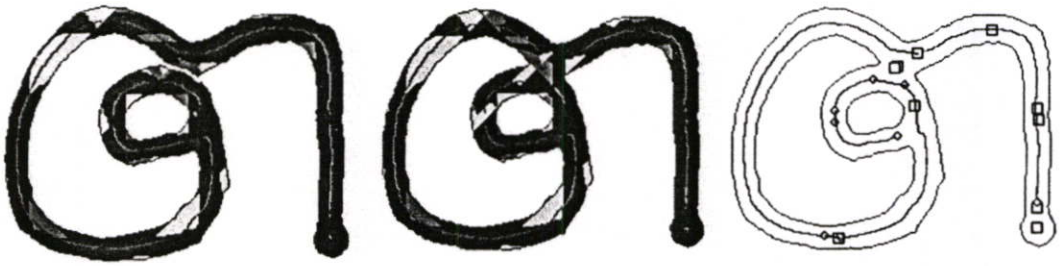
แนวทางการแก้ไข หากการเหลื่อมไปเชื่อมต่อแนวการเขียนหลักแนวเดียวกัน ที่อยู่คนละช่วงเข้าด้วยกัน แนวทางการแก้ไขบนพื้นฐานของอัลกอริธึมที่นำเสนอจะทำได้ลำบาก แต่ถ้าพิจารณาทั้งระบบแล้ว ขั้นตอนกระบวนการก่อนหน้า ไม่ได้พิจารณาข้อมูลในเรื่องความเข้มของภาพลายมือ ก่อนที่จะแปลงเป็นภาพขาว-ดำ ตรงจุดนี้หากประยุกต์แนวคิดจากงานวิจัย [1] ในการแก้ไข จะให้สามารถแยกความแตกต่าง ณ บริเวณจุดที่มีการเหลื่อมกันได้



รูปที่ 4.38 การแยกส่วนประกอบที่เขียนซ้อนทับกัน โดยการพิจารณาความเข้มที่ภาพตั้งต้น

สำหรับกรณีที่การเหลื่อมไปแทรกแนวการเขียนหลักเดิมเพียงเล็กน้อย อาจใช้การกำหนดความยาวเส้นโครงร่างที่สั้นที่สุดที่จะนำมาพิจารณา หรือการตรวจสอบแนวการเขียนหลักที่ต่อเนื่องกันช่วยแก้ไขปัญหาในส่วนนี้ได้ ตัวอย่างดังรูปที่ 4.39 บริเวณหัวหน้ากลางของตัว ต เต่า ซึ่งเป็นแนวดิ่งและแนวนอนไปแทรกบริเวณเส้นโค้งบนหยัก ที่เป็นแนวการเขียนหลักในแนวนอน ทำ

ให้เกิดแนวดิ่งเป็นช่วงสั้นและเกิดจุดกลางขึ้นมาในบริเวณดังกล่าว ซึ่งเป็นเส้นโครงร่างที่จะไม่นำมาพิจารณา ทำให้การเชื่อมต่อแนวการเขียนยังคงดำเนินต่อไปในแต่แนว โดยไม่รบกวนซึ่งกันและกัน

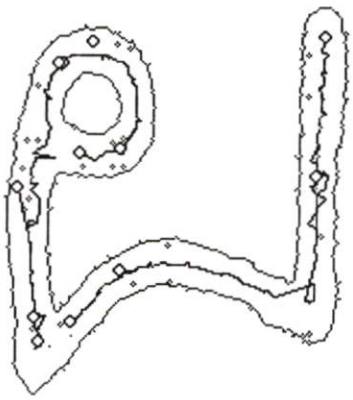


รูปที่ 4.39 ลักษณะการเหลื่อมที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการเรียงเส้นโครงร่างภายในแนวการเขียนหลัก

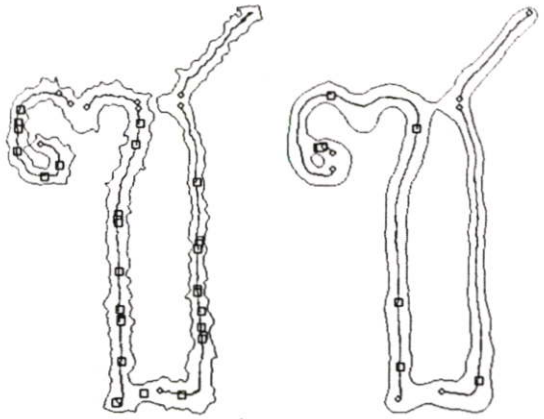
4.7.2.2 ภาพลายมือที่มีการรบกวนแบบต่างๆ

เนื่องจากอัลกอริธึมที่ใช้สร้างโครงร่างคำนวณหาค่ากลางโดยพิจารณาจากจุดภาพดำที่เรียงต่อกัน ไม่ได้เป็นลักษณะการกัดเซาะจากขอบของวัตถุ ทำให้การรบกวนแบบต่างๆ ที่เกิดภายในภาพส่งผลโดยตรงต่อลักษณะของจุดโครงร่างที่ได้ และทำให้การลำดับการเรียงจุดที่ได้ ผิดไปจากลำดับการเขียนจริงๆ (รูปที่ 4.40) ส่วนการรบกวนบริเวณขอบภาพจะส่งผลกระทบเพียงเล็กน้อยคือลำดับเส้นที่เรียงต่อกันจะไม่ค่อยเรียบ ดังรูปที่ 4.41 ตัว ซ. โซ่ (ขวา) มีการรบกวนบริเวณขอบภาพเนื่องจากหมึกที่ซึมออกมาจากวัสดุที่ใช้เขียน สังเกตเส้นโครงร่างที่ได้จะเป็นช่วงสั้น ส่วนตัว ซ.โซ่ (ขวา) มีการปรับขอบให้เรียบ จะทำให้เส้นโครงร่างที่ได้มีช่วงยากกว่า ลำดับการเขียนที่ได้เรียบกว่าแบบแรกเล็กน้อย

แนวทางการแก้ไข เลือกฟิลเตอร์ลดสัญญาณรบกวน ให้เหมาะสมกับประเภทของการรบกวนที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.40 ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการรบกวนแบบ Salt and Pepper ภายในภาพลายมือ



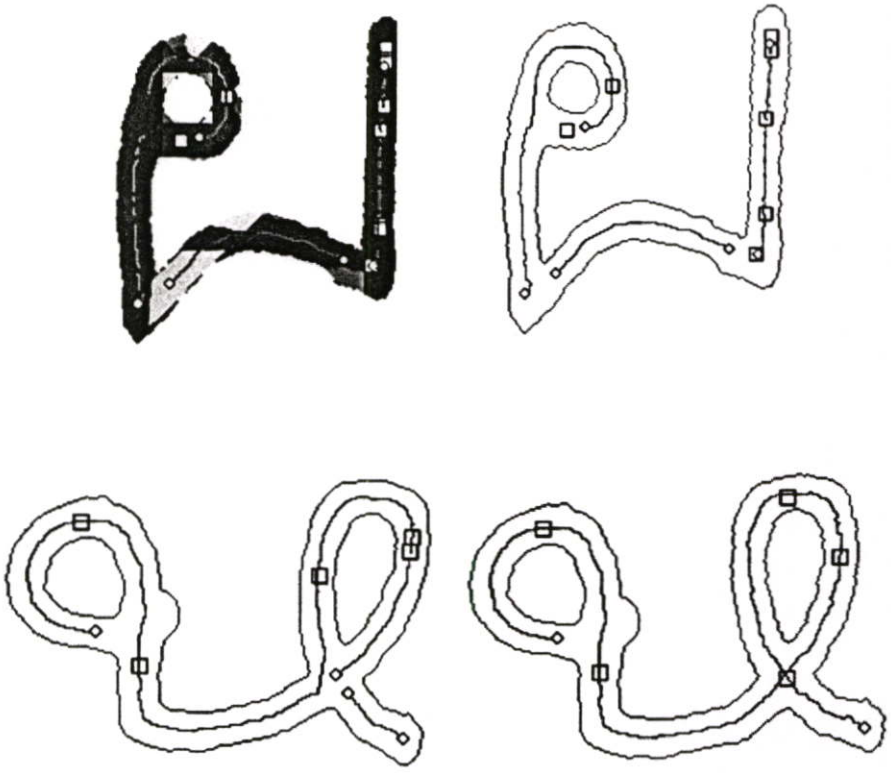
รูปที่ 4.41 ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการรบกวนบริเวณขอบภาพ

4.7.2.3 ภาพลายมือที่มีลักษณะตัวอักษรเอียง

การเขียนตัวอักษรเอียงในบริเวณที่มีจุดตัดและจุดเชื่อมนั้นส่งผลให้ แนวการเขียนหลักของตัวอักษรผิดปกติ ซึ่งทำให้การเรียงเส้นโครงร่าง ภายในแนวการเขียนหลักแนวเดียวกันผิดพลาด ดังรูปที่ 4.42 เส้นโครงร่างบริเวณเส้นดิ่งหน้าของตัว ผ. ผึ้ง ลากเข้าไปในบริเวณแนวการเขียนหลักแนวนอน ซึ่งเป็นแนวของการม้วนหัวตัวอักษร ทำให้เส้นดังกล่าวไปเชื่อมกันการม้วนหัว ทำให้ลำดับการเขียนผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง

รูปที่ 4.42 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากตัวอักษรที่มีความลาดเอียง

แนวทางแก้ไข คือ ปรับความลาดเอียงของตัวอักษร แต่โดยอัลกอริธึมการแก้ความเอียงที่ใช้ในระบบรู้จำลายมือส่วนมาก เป็นการบิดภาพตัวอักษรที่เอียงไปในทิศทางเดียวกันทั้งตัว ให้อยู่ในแนวตั้ง แต่ในความเป็นจริงของการเขียนตัวอักษรภาษาไทย ภายในหนึ่งตัวอักษรอาจมีรูปแบบการเอียงหลายทิศทางที่ต่างกัน บนแต่ละส่วนประกอบของโครงร่างตัวอักษร เช่น เส้นหน้าเอียงแนวหนึ่ง ขมวดตวัดเอียงอีกแนวหนึ่ง ซึ่งควรปรับปรุงอัลกอริธึมนี้ ให้มีความเหมาะสมกับการเขียนอักษรไทยอีกด้วย



รูปที่ 4.43 ตัวอย่างผลที่ได้จากการปรับความเอียงของภาพตัวอักษร

4.7.3 สรุปผลความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อผิดพลาดของอัลกอริธึมดังแสดงในข้างต้น นำมาแจกแจงเชิงรายละเอียดในแต่ละตัวอักษร เพื่อวิเคราะห์ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นลักษณะต่างๆ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงรายละเอียดของผลการทดลองในแต่ละตัวอักษร

	ถูกต้อง	ไม่เหมาะสม	ไม่ถูกต้อง	ลักษณะปัญหาของตัวอักษรที่ไม่เหมาะสม				ลักษณะปัญหาของตัวอักษรที่ไม่ถูกต้อง			
				ตัวอักษรที่มีการซ้อนทับกันภายใน	ความผิดพลาดของอัลกอริธึมสร้างโครงร่าง	ความผิดพลาดของอัลกอริธึมเรียงลำดับเส้นโครงร่าง	ความผิดพลาดของอัลกอริธึมเชื่อมต่อบริเวณแนวการเขียนหลัก	ตัวอักษรที่มีการซ้อนทับกันภายใน	ความผิดพลาดของอัลกอริธึมสร้างโครงร่าง	ความผิดพลาดของอัลกอริธึมเรียงลำดับเส้นโครงร่าง	ความผิดพลาดของอัลกอริธึมเชื่อมต่อบริเวณแนวการเขียนหลัก
ก	0.95	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ข	0.90	0.10	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00
ฃ	0.75	0.10	0.15	0.00	0.00	0.05	0.05	0.10	0.10	0.05	0.00
ค	0.90	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00
ฅ	0.55	0.15	0.30	0.00	0.00	0.15	0.05	0.30	0.00	0.00	0.05
ฆ	0.75	0.15	0.10	0.00	0.00	0.15	0.00	0.10	0.00	0.05	0.00
ง	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.20
จ	0.80	0.15	0.05	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.05	0.15	0.10
ฉ	0.65	0.25	0.15	0.05	0.10	0.05	0.00	0.20	0.00	0.10	0.05
ช	0.60	0.05	0.35	0.00	0.00	0.05	0.00	0.15	0.00	0.05	0.00
ซ	0.60	0.15	0.30	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ฌ	0.75	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.10	0.05
ญ	0.90	0.05	0.05	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.05	0.10
ฎ	0.85	0.15	0.00	0.00	0.00	0.10	0.05	0.00	0.00	0.00	0.10
ฏ	0.55	0.25	0.20	0.05	0.05	0.10	0.05	0.05	0.00	0.10	0.05
ฐ	0.40	0.20	0.45	0.10	0.05	0.10	0.00	0.35	0.05	0.05	0.00
ฑ	0.55	0.30	0.15	0.10	0.00	0.20	0.05	0.00	0.10	0.00	0.00
ฒ	0.65	0.05	0.30	0.05	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00
ณ	0.85	0.10	0.05	0.00	0.10	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
ด	0.95	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.15	0.10
ต	0.75	0.05	0.20	0.05	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00
ถ	0.95	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00
ท	0.45	0.10	0.40	0.00	0.00	0.05	0.05	0.35	0.00	0.05	0.00

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

	ถูกต้อง	ไม่เหมาะสม	ไม่ถูกต้อง	ลักษณะปัญหาของตัวอักษรที่ไม่เหมาะสม				ลักษณะปัญหาของตัวอักษรที่ไม่ถูกต้อง			
				ตัวอักษรที่มีการซ้อนทับกันภายใน	ความผิดพลาดของอัลกอริธึมสร้างโครงร่าง	ความผิดพลาดของอัลกอริธึมเรียงลำดับเส้นโครงร่าง	ความผิดพลาดของอัลกอริธึมเชื่อมต่อบริเวณแนวการเขียนหลัก	ตัวอักษรที่มีการซ้อนทับกันภายใน	ความผิดพลาดของอัลกอริธึมสร้างโครงร่าง	ความผิดพลาดของอัลกอริธึมเรียงลำดับเส้นโครงร่าง	ความผิดพลาดของอัลกอริธึมเชื่อมต่อบริเวณแนวการเขียนหลัก
ธ	0.80	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.05	0.05
น	0.95	0.05	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
บ	0.95	0.05	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ป	0.95	0.05	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ผ	0.90	0.05	0.05	0.00	0.00	0.05	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
ฝ	0.95	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
พ	0.85	0.05	0.10	0.00	0.00	0.05	0.00	0.05	0.05	0.00	0.05
ฟ	0.85	0.05	0.10	0.00	0.00	0.05	0.00	0.10	0.10	0.00	0.00
ภ	0.90	0.00	0.10	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00
ม	0.90	0.05	0.05	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
ย	0.90	0.10	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ร	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ล	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ว	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ศ	0.45	0.15	0.40	0.05	0.00	0.15	0.00	0.15	0.00	0.20	0.20
ษ	0.85	0.05	0.10	0.00	0.05	0.05	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05
ส	0.60	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.30	0.10
ห	0.70	0.25	0.05	0.00	0.05	0.15	0.00	0.05	0.00	0.10	0.00
ฬ	0.50	0.10	0.40	0.00	0.05	0.00	0.00	0.35	0.00	0.10	0.10
อ	0.95	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
ฮ	0.60	0.10	0.30	0.00	0.00	0.10	0.00	0.10	0.00	0.15	0.10
	0.786	0.078	0.138	0.116	0.145	0.696	0.087	0.595	0.083	0.339	0.256

จากสาเหตุความผิดพลาดที่ทำให้เกิดลำดับการเขียนที่ไม่เหมาะสม นำมาพิจารณาเพิ่มเติม โดยแสดงให้เห็นถึงลักษณะลำดับการเขียนที่ไม่เหมาะสม ที่เป็นผลมาจากข้อบกพร่องของอัลกอริธึมในแต่ละขั้นตอน (ตาราง 4.4) เพื่อหาแนวทางแก้ไขที่เหมาะสมต่อไป

ตารางที่ 4.4 แสดงลักษณะลำดับการเขียนที่ไม่เหมาะสม

ลำดับการเขียนที่ไม่เหมาะสม ของตัวอักษร 69 ตัว	ความผิดพลาดของอัลกอริธึมสร้างโครงร่าง	ความผิดพลาดของอัลกอริธึมเรียงลำดับเส้นโครงร่าง	ความผิดพลาดของอัลกอริธึมเชื่อมต่อบริเวณแนวการเขียนหลัก
ม้วนหัวหรือขมวดผิดทิศทาง (39.13 %)	-	31.88 %	7.25 %
ม้วนหัวหรือขมวดเป็นวงปิด (4.34 %)	-	2.98 %	1.45 %
ไม่มีลำดับการเขียนบริเวณหัวหรือขมวดของตัวอักษร (11.59 %)	11.59 %	-	-
ลำดับเส้นลากไม่เป็นธรรมชาติ อื่นๆ (49.24 %)	2.90 %	36.23 %	0 %

*** หมายเหตุ:** ลำดับการเขียนที่ไม่เหมาะสมบนตัวอักษร 1 ตัว อาจเกิดได้ในหลายลักษณะ

จากข้อมูลในตารางข้างต้น เห็นได้ว่าลำดับการเขียนที่ไม่เหมาะสมส่วนใหญ่ เป็นลักษณะการม้วนหัวผิดหรือขมวดที่ทิศทาง และเกิดจากความผิดพลาดของอัลกอริธึมในการจัดเรียงเส้นโครงร่างบนแนวการเขียนหลัก จึงสรุปได้ว่า เงื่อนไขแนวการเขียนหลักช่วงเดียวกันเพียงอย่างเดียวนั้น ยังไม่เหมาะสม ดังที่ได้อธิบายในรายละเอียดถึงข้อบกพร่องของอัลกอริธึมดังกล่าว พร้อมกับเสนอแนวทางแก้ไข คือ เพิ่มเติมเงื่อนไขของความต่อเนื่องของแนวการเขียนหลัก การละทิ้งเส้นโครงร่างที่จะทำให้เกิดความผิดพลาด การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดของวงกลมที่ผิดปกติ เป็นต้น

ส่วนอัลกอริธึมในการจัดเรียงแนวการเขียนหลักแต่ละช่วงเข้าด้วยกัน ยังมีข้อบกพร่องในการตรวจสอบจุดที่อยู่บนแนวการเขียนที่ไม่ต่อเนื่องกัน และการเปลี่ยนแปลงทิศทางระหว่างทางเดินของจุดสิ้นสุดของแนวการเขียน ในส่วนของอัลกอริธึมสร้างโครงร่างนั้น ถึงแม้ข้อบกพร่องจะส่งผลกระทบเล็กน้อย แต่เป็นส่วนที่ค่อนข้างสำคัญสำหรับโครงสร้างในภาษาไทย หากพิจารณาถึงผลสืบเนื่องไปยังการนำลำดับทิศทางการเขียนที่ได้ไปใช้กับระบบรู้จำลายมือแบบออนไลน์ ข้อมูลการลากเส้นที่สูญหายไป เช่น บริเวณการม้วนหัวอักษรเป็นส่วนทึบ จะเป็นตัวตัดสินความแม่นยำของระบบในตัวอักษรที่คล้ายกัน ซึ่งจากลำดับการเขียนที่ไม่เหมาะสมทั้งหมดนี้ นอกจาก

การแก้ไขและปรับปรุงดังที่นำเสนอไปแล้ว ควรเพิ่มเติมกระบวนการภายหลัง (Post-processing) เพื่อตรวจสอบความผิดพลาดที่ยังหลงเหลืออยู่ในลักษณะต่างๆ และใช้ปรับลำดับภาพที่ได้ให้มีความเหมาะสมและสอดคล้องกับการนำไปใช้งานต่อไป

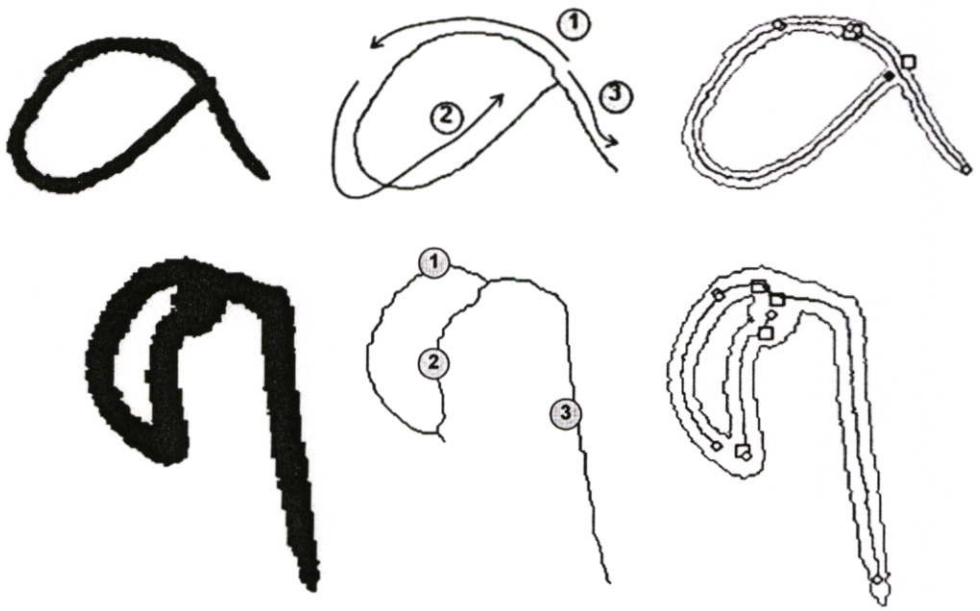
ในประเด็นลำดับการเขียนที่ไม่ถูกต้องนั้น เกิดจากกรณีการเขียนตัวอักษรที่มีการซ้อนหรือเหลื่อมกันระหว่างส่วนประกอบโครงสร้างของตัวอักษรนั้น ซึ่งระบบที่นำเสนอยังมีจุดอ่อนในขั้นตอนของกระบวนการก่อนหน้า เนื่องจากไม่มีการพิจารณาความเข้มของภาพตั้งต้น เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการแก้ปัญหากรณีเกิดความผิดพลาดดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

4.8 การวิเคราะห์อัลกอริธึมที่ได้นำเสนอเปรียบเทียบกับแนวคิดอื่น

ความพยายามในการดึงข้อมูลเชิงเวลา หรือลำดับทิศทางในอักษรลายมือ มีหลากหลายแนวคิด โดยแต่ละแนวคิดก็มีจุดเด่นซึ่งถูกพัฒนาเพื่อรองรับลักษณะที่แตกต่างกันออกไปตามโครงสร้างและรูปแบบการเขียนในแต่ละภาษา ในส่วนนี้จึงได้ทดสอบเชิงวิเคราะห์อัลกอริธึมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ เปรียบเทียบกับแนวคิดอื่น ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้องานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (2.1) โดยอ้างอิงจากอักษรลายมือในภาษาไทย ซึ่งสามารถสรุปข้อแตกต่างได้ดังนี้

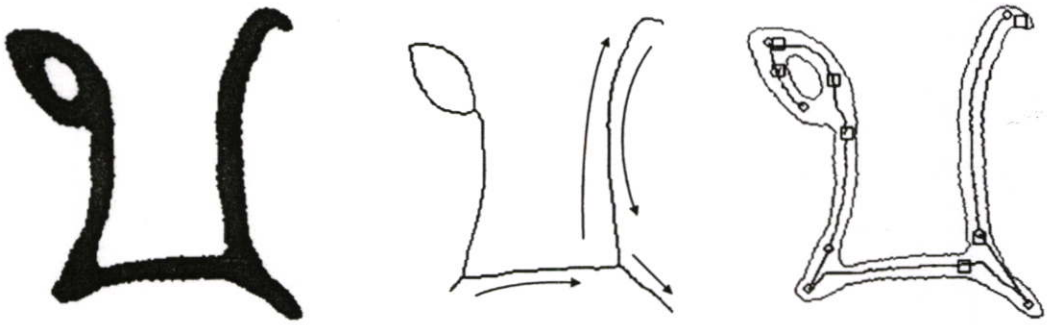
เงื่อนไขสำหรับการดึงลำดับการเขียนของตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละภาษา

ตัวอักษรในภาษาที่แตกต่างกัน อาจมีโครงสร้างคล้ายคลึงกัน แต่มีลำดับทิศทางการเขียนที่ไม่เหมือนกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะของลายมือเขียน ดังนั้นแนวคิดที่ประยุกต์เข้ากับภาษาใดภาษาหนึ่งอาจทำให้เกิดกรณี การดึงลำดับทิศทางที่คลาดเคลื่อนจากลำดับการเขียนในภาษาอื่นๆ ดังตัวอย่าง



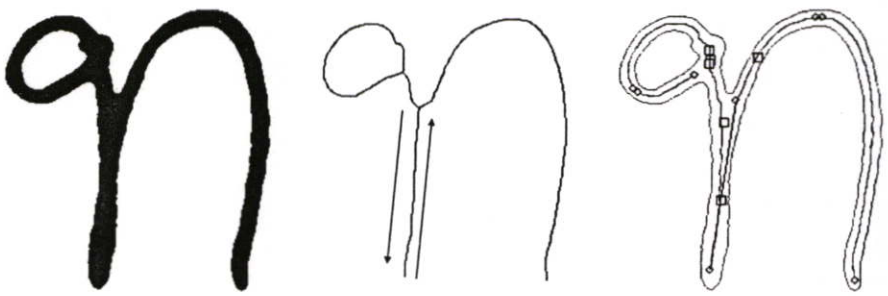
รูปที่ 4.44 ลำดับทิศทางการเขียนของตัวอักษร ค. ควาย จากการประยุกต์เงื่อนไขที่ต่างกัน

ตัวอย่างที่ 1: ตัวอักษร a ในภาษาอังกฤษมีลักษณะเหมือนกันตัวอักษร ค. ควาย ที่เป็นรูปแบบประดิษฐ์ (รูปที่ 4.44: ซ้าย) โดยในงายวิจัย [3] มีการประยุกต์ใช้เงื่อนไขพิเศษ ในกรณีที่พบจุดเชื่อมในลักษณะดังกล่าวเพื่อให้ได้ลำดับการเขียนของตัวอักษร a ดังรูปที่ 4.44 (กลาง) ในขณะที่ตัวอักษร ค. ควาย ที่ถูกต้อง เป็นดังรูปที่ 4.44 (ขวา)



รูปที่ 4.45 ลำดับทิศทางการเขียนของตัวอักษร บ. ใบไม้ จากการประยุกต์เงื่อนไขที่ต่างกัน

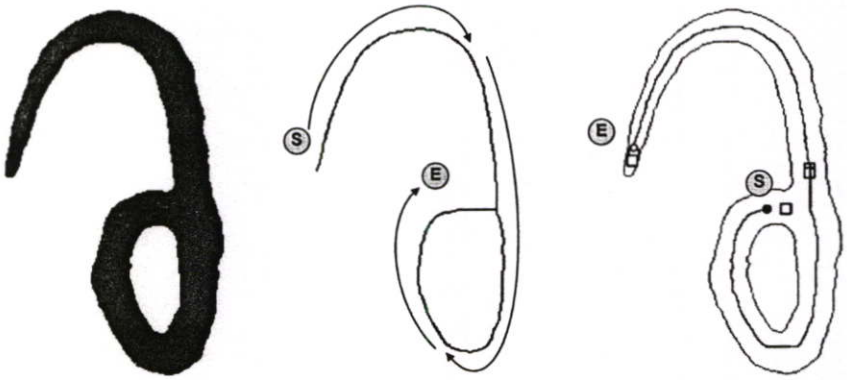
ตัวอย่างที่ 2: ตัวอักษร u ในภาษาอังกฤษ จะมีการลากเส้นย้อนรอยเดิมบริเวณ ท้ายของตัวอักษร ในงานวิจัย [3] ได้กำหนดเงื่อนไขสำหรับดึงลำดับทิศทางของตัวอักษร โดยพิจารณาถึงต่อเนื่องในตัวอักษรเขียนในภาษาอังกฤษ ทำให้มีลำดับการเขียนที่ได้ดังรูปที่ 4.45 (กลาง) หากพิจารณาตัวอักษรไทย จะไม่มีการลากเส้นย้อนรอยเดิมตามโครงสร้างมาตรฐาน จึงเป็นเหตุผลให้อัลกอริธึมที่นำเสนอไม่สามารถดึงลำดับหรือแสดงการลากเส้นย้อนรอยเดิม ดังนั้นถึงแม้เส้นทางการลากของตัวอักษรจะเป็นลักษณะของการลากเส้นย้อนรอยเดิม แต่อัลกอริธึมที่นำเสนอจะแสดงเป็นลำดับของเส้นที่เรียงต่อกันเท่านั้น ดังรูปที่ 4.46 ตัว ท. ทหาร ที่มีการลากเส้นย้อนรอยเดิมบริเวณเส้นหน้าดิ่งและเส้นทแยงเฉียงขึ้น ซึ่งแนวคิดในงานวิจัย [3] ได้ลำดับการเขียนบริเวณดังกล่าวที่แสดงถึงการลากเส้นย้อนรอย (รูปที่ 4.46 กลาง) แต่ในขณะที่แนวคิดที่นำเสนอจะได้ลำดับที่เรียงต่อกัน โดยไม่ได้แสดงถึงลักษณะการลากเส้นย้อนรอย (รูปที่ 4.46 ขวา)



รูปที่ 4.46 แสดงลำดับการเขียนบริเวณที่มีการลากเส้นย้อนรอยเดิม

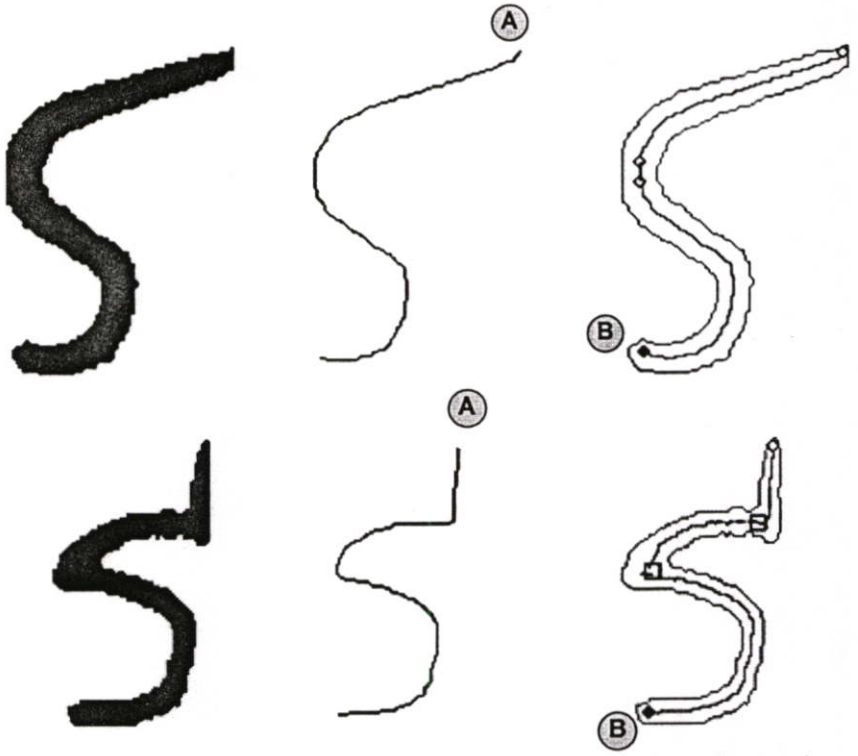
เงื่อนไขในการกำหนดจุดเริ่มต้นที่แตกต่างกันในแต่ละภาษา

ความแตกต่างของลักษณะการเขียนระหว่างอักษรไทยและอังกฤษ ทำให้เงื่อนไขในการกำหนดตำแหน่งที่เป็นจุดเริ่มต้นต่างกัน สิ่งที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดสอบงานวิจัยในภาษาอังกฤษกับอักษรลายมือภาษาไทยคือ งานวิจัยในอักษรภาษาอังกฤษส่วนใหญ่ มีการพิจารณาต่อเนื่องเป็นคำ เนื่องจากโครงสร้างการลายมือเขียนได้ออกแบบให้สามารถเขียนได้ต่อเนื่องกัน การกำหนดจุดเริ่มต้นจึงเป็นประเด็นที่งานวิจัย [3] ไม่ได้กล่าวถึง ทำให้เกิดกรณีความแตกต่างกับแนวคิดที่ได้นำเสนอพอสรุปได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้



รูปที่ 4.47 เงื่อนไขในการกำหนดจุดเริ่มต้นที่แตกต่างกันในแต่ละภาษา

ตัวอย่างที่ 1: ในงานวิจัย [3] การกำหนดจุดเริ่มต้นให้กับลำดับทิศทางที่ดึงออกมาจากโครงร่าง จะใช้เงื่อนไข บน-ล่าง-ซ้าย-ขวา สำหรับการพิจาณาลำดับทิศทางแบบย้อนกลับ ถ้าลำดับที่ได้มีทิศทางสอดคล้องกับเงื่อนไข คือจากบนไปล่าง และจากซ้ายไปขวา ทำให้มีค่าความถูกต้องในการกำหนดจุดเริ่มต้นมากกว่า จึงเปลี่ยนลำดับการเขียนใหม่ ในจุดนี้ทำให้เกิดความความผิดพลาดในการประยุกต์ใช้กับอักษรไทย ที่มีจุดเริ่มต้นโดยการพิจารณาที่หัวหรือการม้วนหัวตัวอักษรก่อน ดังเช่นรูปที่ 4.47 หากพิจาณาเงื่อนไข บน-ล่าง-ซ้าย-ขวา ทำให้การกำหนดจุดเริ่มต้นของลำดับการเขียนผิดพลาดไป



รูปที่ 4.48 ลำดับทิศทางการเขียนของตัวอักษร ร. เรือ จากการประยุกต์เงื่อนไขที่ต่างกัน

ตัวอย่างที่ 2: ตัวอักษร s ในภาษาอังกฤษมีลักษณะเหมือนกันตัวอักษร ร. เรือ ที่เป็นรูปแบบประดิษฐ์ที่ไม่เขียนหัว (รูปที่ 4.48: ซ้าย) ซึ่งทั้งสองอักษรมีจุดเริ่มต้นของลำดับทิศทางที่ต่างกัน โดยการเลือกตำแหน่งเริ่มต้นของลำดับการเขียนในงานวิจัย [3] จะเริ่มที่จุด A ในขณะที่ตัวอักษร ร. เรือ ควรจะมีจุดเริ่มต้นที่จุด B

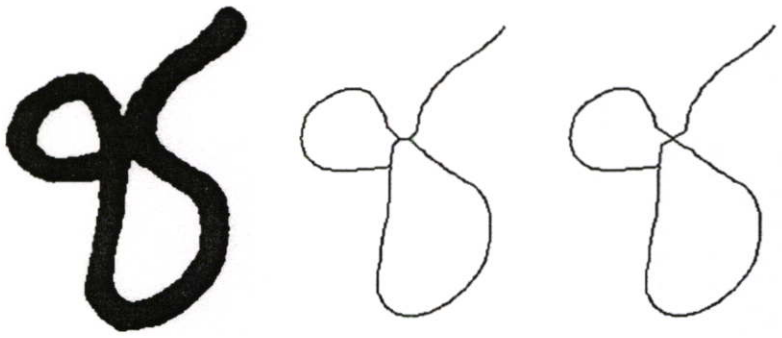
รูปที่ 4.49 การกำหนดจุดตั้งต้นให้กับตัวอักษรที่มีการเขียนเป็นวงปิด

ตัวอย่างที่ 3: ตามปกติอักษรภาพเมื่อผ่านกระบวนการสร้างโครงร่าง จะต้องมีการกำหนดจุดตั้งต้นให้กับอัลกอริธึมหนึ่งจุด ในการดึงลำดับการเขียนของตัวอักษรนั้นๆ แต่อาจเกิดกรณีที่

โครงร่างที่ได้ เชื่อมต่อกันเป็นวงปิด ดังรูป รูปที่ 4.49 (กลาง) ซึ่งในงานวิจัย [3] ไม่ได้กล่าวถึงการแก้ปัญหาในลักษณะดังกล่าวไว้ จึงทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการพิจารณาจุดเริ่มต้นของลำดับการเขียน ส่วนในอัลกอริธึมที่ได้นำเสนอ เส้นโครงร่างมีการขาดช่วงในส่วนที่เป็นจุดเชื่อมและจุดตัด ทำให้เกิดจุดในการพิจารณาหาจุดเริ่มต้นได้

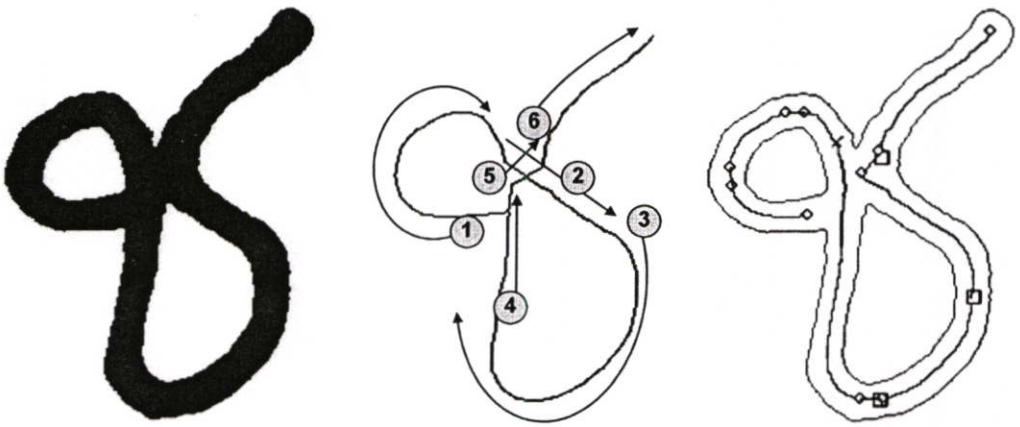
วิธีการแก้ไขข้อผิดพลาดที่ไม่สอดคล้องกันกับลักษณะของแต่ละภาษา

ในแต่ละภาษาก็มีรูปแบบการเขียนที่แตกต่างกันออกไป ทำให้เกิดลักษณะความผิดพลาดของภาพอักษรลายมือที่ไม่เหมือนกัน ดังนั้นแนวทางการแก้ไขข้อผิดพลาดในงานวิจัย [3] จึงไม่สอดคล้องกับภาพอักษรลายมือในภาษาไทยทั้งหมด ดังเช่น

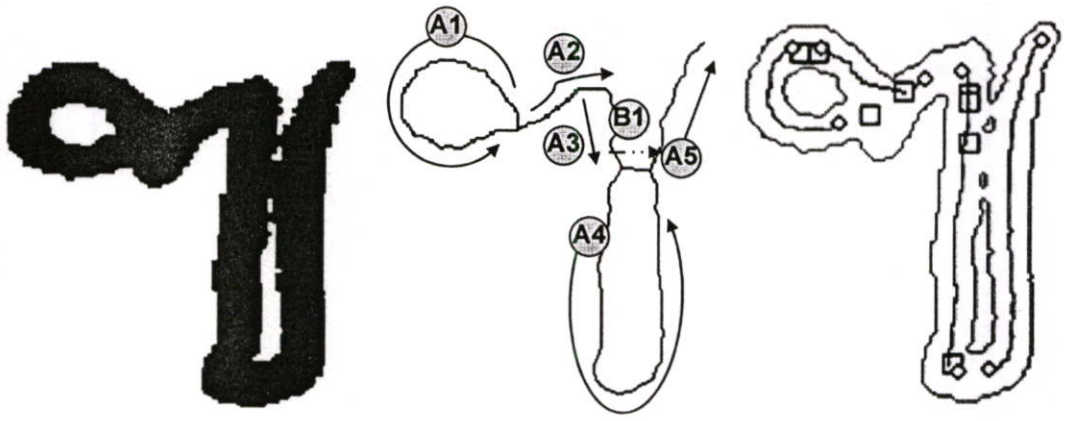


รูปที่ 4.50 ลักษณะเส้นโครงร่างที่ได้ของตัวอักษร ช. ช้าง

ตัวอย่างที่ 1: ตัวอักษร ช. ช้าง ดังรูปที่ 4.50 (ซ้าย) มีส่วนเหลื่อมบริเวณเส้นดิ่งหน้าและหางของตัวอักษร เมื่อผ่านกระบวนการสร้างโครงร่างจะเกิดลักษณะที่เหมือนเส้นปลอมเกิดขึ้น (รูปที่ 4.50: กลาง) โดยกระบวนการแก้ไขเส้นปลอม จะพิจารณาจุดเชื่อมดังกล่าว เสมือนการจุดตัดกันของแนวการเขียน จึงได้โครงร่างผ่านจากแก้ไขเป็นดังรูปที่ 4.51 (ซ้าย) ทำให้ลำดับการเขียนจากรูปลายมือที่ได้ผิด (รูปที่ 4.51: กลาง) ไปจากลำดับการเขียนของตัว ช. ช้าง ที่ถูกต้อง (รูปที่ 4.51: ขวา)



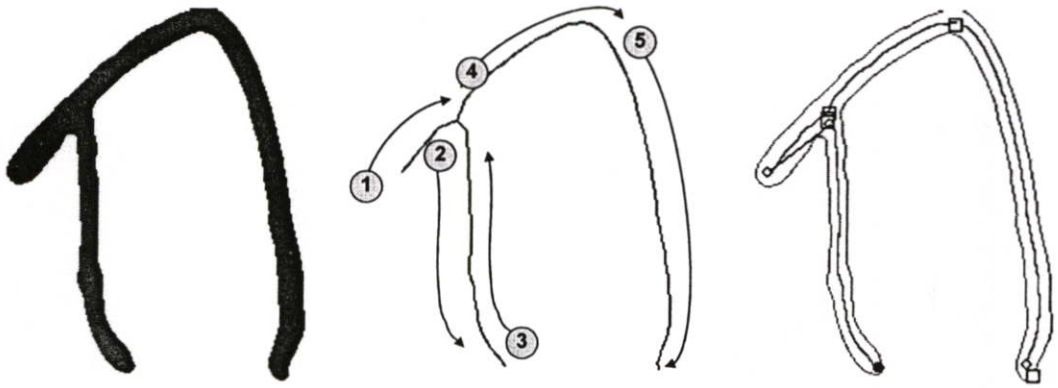
รูปที่ 4.51 เปรียบเทียบลำดับการเขียนของตัว ช. ช้าง

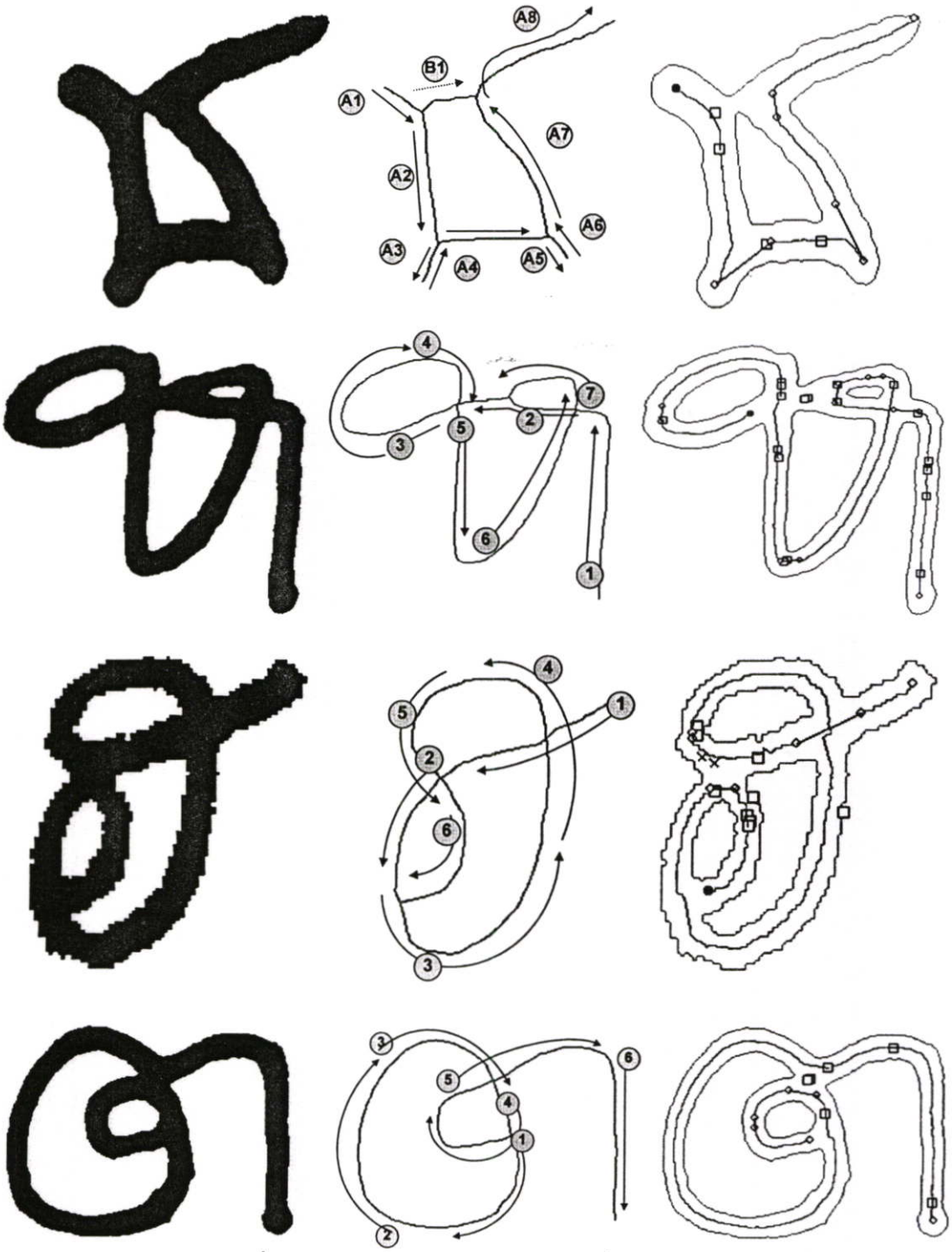


รูปที่ 4.52 เปรียบเทียบลำดับการเขียนของตัว ฃ. ขวด

ตัวอย่างที่ 2: ตัวอักษร ฃ. ขวด ดังรูปที่ 4.52 (ซ้าย) มีการเหลื่อมกันบริเวณเส้นดิ่งและเส้นตั้ง และบริเวณดังกล่าว กระบวนการงานวิจัยที่ [3] ไม่สามารถตรวจสอบและแก้ไขความผิดพลาดดังกล่าวได้ ส่งผลให้เงื่อนไขสำหรับการหาลำดับทิศทางพิจารณาบริเวณดังกล่าวเป็นการลากเส้นแบบยกมือ

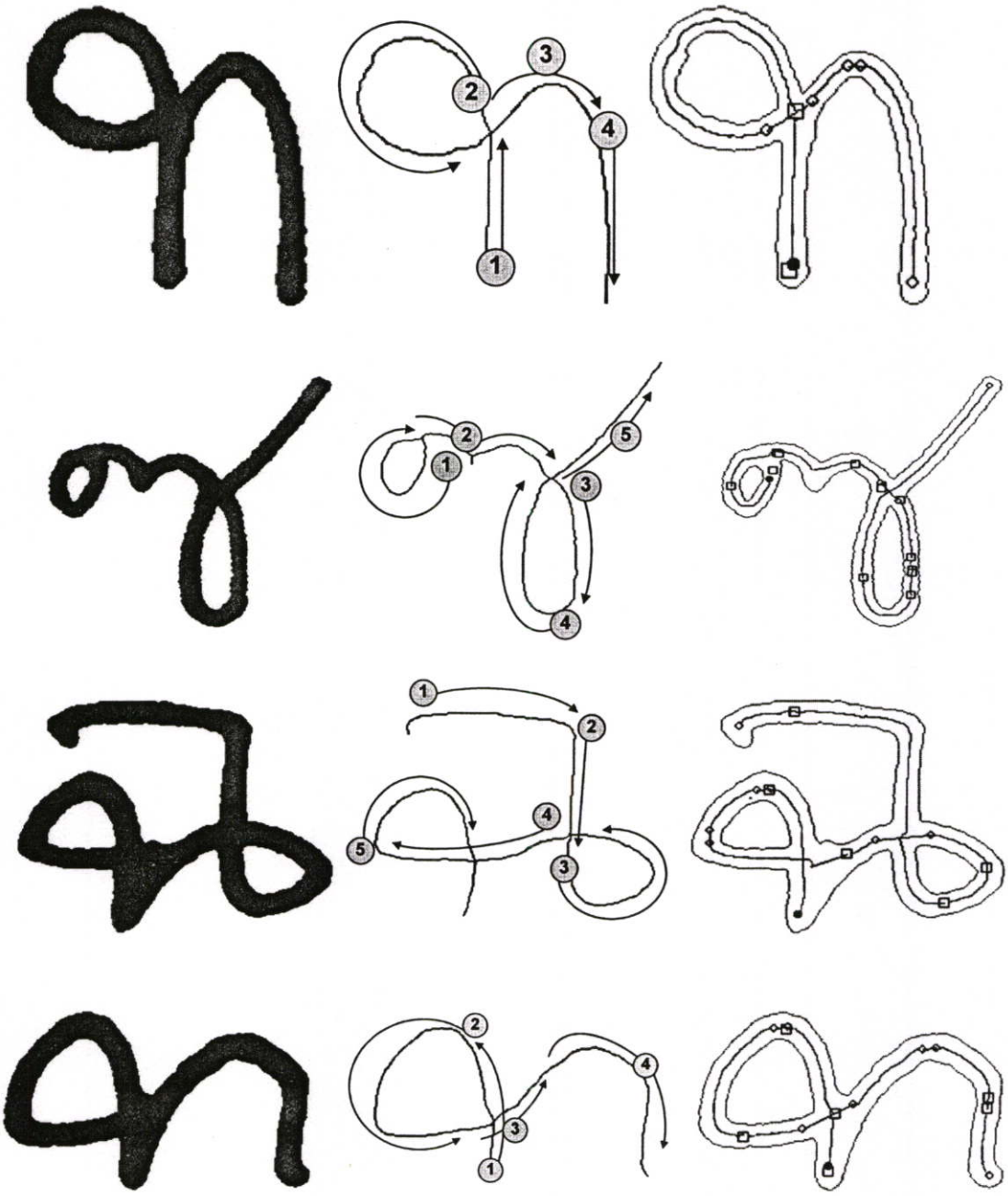
ในข้างต้นได้แสดงถึงข้อผิดพลาดและปัญหาที่อาจเกิดขึ้น เมื่อนำแนวคิดที่ถูกพัฒนาให้สอดคล้องกับโครงสร้างและลักษณะการเขียนในภาษาหนึ่ง นำมาประยุกต์ใช้ในอีกภาษาหนึ่ง โดยไม่ได้มีโครงสร้างภาษาที่เกี่ยวข้องกันเลย ส่วนมากลักษณะอักษรไทยที่ส่งผลกระทบโดยตรงกับแนวคิดในการดึงลำดับทิศทางในอักษรภาษาอังกฤษ คือ การเขียนแยกที่ละตัวอักษรและการเขียนซ้อนทับกันภายในตัวอักษร โดยได้ทดสอบเชิงวิเคราะห์ลักษณะตัวอักษรไทยที่น่าจะส่งผลกระทบเพิ่มเติมและได้แสดงดังรูปที่ 4.53





รูปที่ 4.53 ลำดับการเขียนของตัวอักษรที่แตกต่างกัน

นอกจากข้อแตกต่างที่ได้นำเสนอไป แนวคิดในงานวิจัยอื่นๆ ก็ประสบกับปัญหาบนอักษรไทยในรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน อันเนื่องมาจากการเขียนตัวอักษรที่ซ้อนทับหรือเหลื่อมกันภายในตัวอักษร ทำให้ส่วนประกอบตัวอักษรคนละส่วน ถูกพิจารณาเป็นส่วนที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งส่งผลให้ลำดับการเขียนไม่เหมาะสมและไม่ถูกต้อง



รูปที่ 4.54 ลำดับการเขียนที่ผิดพลาดอันเนื่องมาจากการซ้อนทับกันของตัวอักษร

บทที่ 5
สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การหาลำดับทิศทางของตัวอักษร เป็นการดึงข้อมูลเชิงลำดับเวลามาจากภาพลายมือ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ในการเชื่อมต่อเข้ากับระบบรู้จำลายมือแบบออนไลน์ หรือใช้เป็นการสกัดคุณลักษณะเด่นวิธีหนึ่งในระบบรู้จำแบบออฟไลน์ ซึ่งช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือและความแม่นยำให้กับระบบ วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแนวคิดใหม่สำหรับการดึงลำดับทิศทางการเขียนที่สอดคล้องกันโครงสร้างตัวอักษรไทย

5.1 สรุปการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษามาตรฐานโครงสร้างตัวอักษรไทย โดยชี้ให้เห็นถึงลักษณะเด่นสำคัญที่แตกต่างกับภาษาอื่นๆ คือ ตัวอักษรสามารถแบ่งเป็นส่วนประกอบที่มีแนวการลากเส้นและทิศทางที่ชัดเจน จึงได้พัฒนาอัลกอริธึมที่สอดคล้องกันแนวความคิดดังกล่าว สามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนที่แยกหน้าที่กันอย่างชัดเจน และกำหนดโครงสร้างข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับเก็บข้อมูลและการอ้างอิงในแต่ละส่วน ขั้นตอนแรกคือ การสร้างโครงร่างซึ่งปรับปรุงมาจากอัลกอริธึมแบบแกนกลาง เพื่อใช้กับลักษณะการลากเส้นและไม่ทำให้เกิดเส้นปลอม ขั้นตอนที่สองคือ การนำจุดกลางที่ได้มาเรียงให้เป็นเส้นโครงร่าง และนำเส้นแต่ละเส้นมาจัดลำดับโดยพิจารณาเงื่อนไขตามแนวการเขียนหลักแต่ละช่วง ในขั้นตอนต่อมา หลังจากนั้นจึงเชื่อมแนวการเขียนส่วนต่างๆ ประกอบกลับเข้าไปเป็นลำดับการเขียนของภาพลายมือ แล้วจึงตรวจสอบตำแหน่งที่เป็นจุดเริ่มต้นหรือลักษณะของการม้วนหัวตัวอักษรเป็นขั้นตอนสุดท้าย

วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอแนวคิดที่แตกต่างกับงานวิจัยอื่นๆ ในลักษณะเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างและรูปแบบการเขียนในตัวอักษรภาษาไทย และสามารถลดปัญหาการที่เกิดขึ้นในการสร้างโครงร่างของภาพลายมือที่มีการเหลื่อมกันได้ อีกทั้งมีเงื่อนไขรองรับกับอักษรไทย ในการดึงข้อมูลเชิงลำดับเวลาและการตรวจสอบการม้วนหัวหรือการกำหนดจุดเริ่มต้นให้กับลำดับการเขียน ข้อบกพร่องส่วนใหญ่ของระบบเกิดขึ้นจากลักษณะการเขียนที่มีการซ้อนทับภายในตัวอักษรซึ่งส่วนใหญ่เป็นการเขียนตัวเล็ก ส่งผลให้ส่วนต่างๆ บนตัวอักษรไม่ครบถ้วนและไม่ชัดเจน

5.2 แนวทางการพัฒนาต่อ

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ สำหรับการประยุกต์แนวคิดที่นำเสนอ ในการดึงลำดับการเขียนอักษรลายมือภาษาไทย ซึ่งทำให้เกิดประเด็นการศึกษาและพัฒนาต่อในหลายๆ ส่วน ดังนี้

- การปรับปรุงเงื่อนไขแนวการเขียนหลักที่ใช้ ให้มีการพิจารณาความสัมพันธ์กับข้อมูลจากขั้นตอนอื่นๆ ด้วย เช่น ทิศทางของจุดกลาง ความผิดปกติของขนาดวงกลมที่ใช้เป็นจุดกลางหรือขนาดเฉลี่ยของวงลมบนเป็นเส้นโครงร่าง เป็นต้น เพื่อใช้ตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้น
- ปรับปรุงขั้นตอนในกระบวนการก่อนหน้าให้มีการพิจารณาความเข้มบนรูปภาพมือ เพื่อตรวจสอบและแก้ไขลักษณะการเขียนที่ผิดปกติและมีผลกระทบต่อระบบ
- เพิ่มกระบวนการภายหลัง เพื่อปรับปรุงลำดับทิศทางการเขียนที่ได้เหมาะสมและสอดคล้องกับการประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆ
- นำวิธีการที่ได้นำเสนอพัฒนาเป็นระบบผสม โดยใช้ลำดับการเขียนเป็นตัวเชื่อมระบบแบบออฟไลน์และออนไลน์เข้าด้วยกัน

เอกสารอ้างอิง

[1] D. S. Doermann and A. Rosenfeld, "Recovery of Temporal Information from Static Images of Handwriting", Computer Vision and Pattern Recognition, Urbana, pp. 162-168 (1992)

[2] G. Boccignone, A. Chianese, L. P. Cordella and A. Marcelli, "Recovering Dynamic Information from Static Handwriting" Pattern recognition, Vol. 26, No. 3, pp. 409-418, 1993.

[3] S. Lee and J. C. Pan, "Offline Tracing and Representation of Signatures" IEEE Transactions on Systems, MAN, and Cybernetics. Vol. 22, No. 4, July/August 1992

[4] Andrew W. Senior, A. J. Robinson, "An Off-Line Cursive Handwriting Recognition System" IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. 20, No. 3, March 1998, pp. 309 - 321

[5] S. Jager "Recovering Writing Traces in Off-Line Handwriting Recognition: Using a Global Optimization Technique" Proceedings of ICPR 1996

[6] H. Bunke, R. Ammann, G. Kaufmann, T. M. HA, M. Schenkel, R. Seiler and F. Eggimann "Recovery of temporal information of cursively handwritten words for on-line recognition" Proc. Fourth Int'l Conf. Document Analysis and Recognition, 1997, pp. 931-935.

[7] P.M. Lallican, C. Viard-Gaudin, S. Knerr, "From Off-Line to On-Line Handwriting Recognition" Proc 7th International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition, 2000, pp. 303–312

[8] Y. Kato and M.o Yasuhara, "Recovery of Drawing Order from Single-Stroke Handwriting Images" IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 9, September2000

[9] R. Plamondon and C. M. Privitera "The Segmentation of Cursive Handwriting: An Approach Based on Off-Line Recovery of the Motor-Temporal Information" IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 8, No. 1, January 1999

[10] H-H Chang and H. Yan, "Analysis of Stroke Structures of Handwritten Chinese Characters" IEEE Transactions on Systems, MAN, and Cybernetics — Part B: Cybernetics, Vol. 29, No. 1, February 1999 pp. 47 – 61

[11] C. Cox, P. Coueignoux, B. Blesser, and M. Eden "Skeletons: A link between theoretical and physical letter descriptions" Pattern Recognition, 15(1):1122, 1982.

[12] P. Kwok, "A thinning algorithm by contour generation" Communications of the ACM, number 11, pages 1314-1324, 1988.

[13] I .pitas, "Digital Image Processing Algorithm and applications" , Prentice Hall pp. 331-336.

[14] Jain, A.K., "Fundamentals of Digital Image Processing", Englewood Cliffs Prentice Hall pp 381-389.

[15] S. Lee and J.C. Pan. "Tracing and representation of human line drawings." in Proc. Int. Conf Syst. Man Cyhern.. 1989, pp. 1055-1061.

[16] H. Blum. "A transformation for extracting new descriptors of shape" Models for the Perception of Speech and Visual Form, pages 362–381, 1967.

[17] สิทธา ไชยเขตต์ "การแยกตัวอักษรลายมือเขียนภาษาไทยแบบออฟไลน์โดยการแกะรอยเส้น" วิทยานิพนธ์ ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี

[18] มาตรฐานโครงสร้างตัวอักษรภาษาไทย ฉบับราชบัณฑิตยสถาน

ภาคผนวก ก.

อักษรลายมือที่ใช้ในการทดลอง

ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห ฬ
อ ฮ
ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห ฬ
อ ฮ

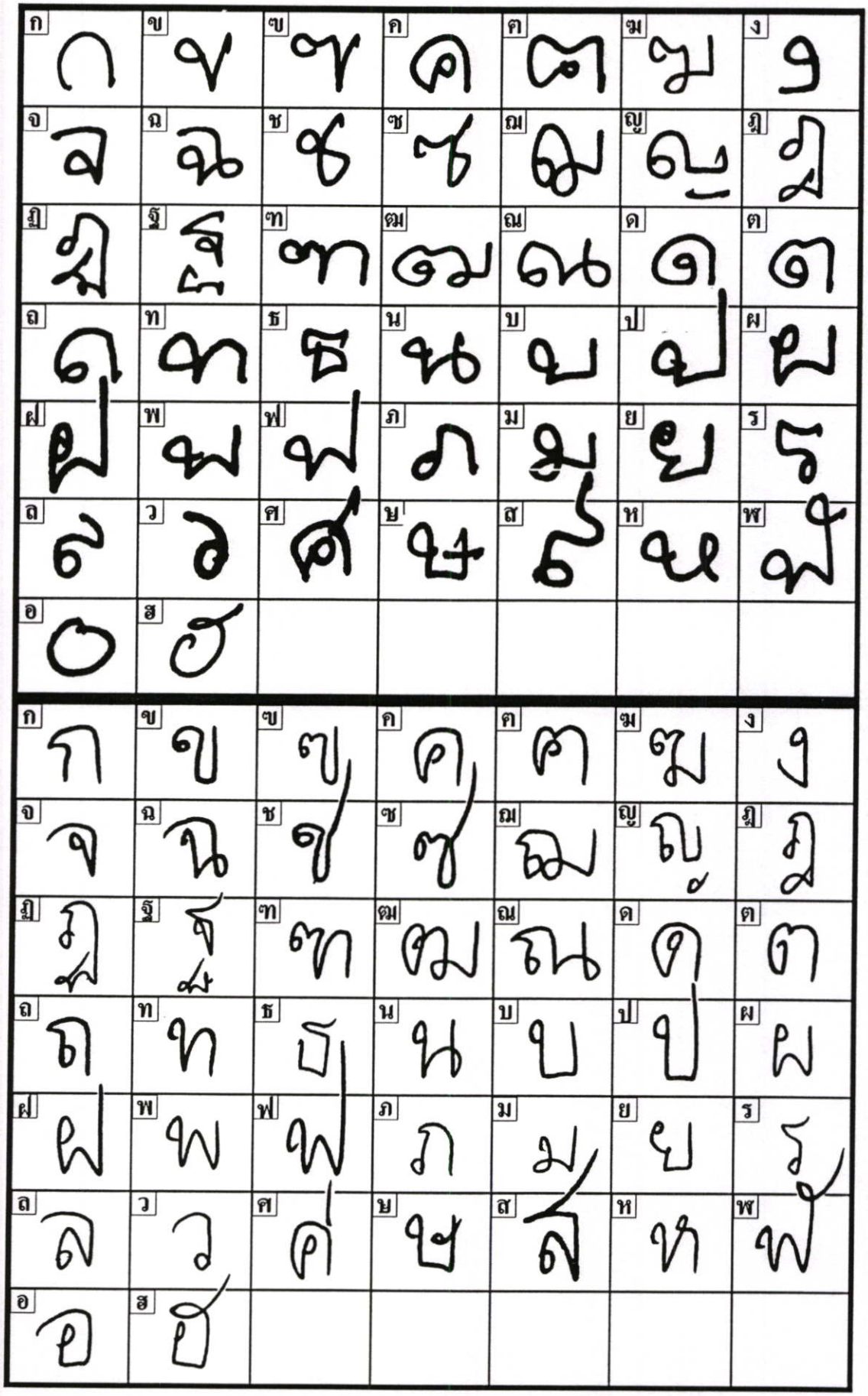
ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห ฬ
อ ฮ
ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห ฬ
อ ฮ

ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห ฬ
อ ฮ
ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห ฬ
อ ฮ

ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห พ
อ ฮ
ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห พ
อ ฮ

ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห ฬ
อ ฮ
ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห ฬ
อ ฮ

ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห ฬ
อ ฮ
ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห ฬ
อ ฮ


ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห พ
อ ฮ
ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห พ
อ ฮ

ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห ฬ
อ ฮ
ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห ฬ
อ ฮ

ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห ฬ
อ ฮ
ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห ฬ
อ ฮ

ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห ฬ
อ ฮ
ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง
จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ
ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต
ถ ท ธ น บ ป ผ
ฝ พ ฟ ภ ม ย ร
ล ว ศ ษ ส ห ฬ
อ ฮ

ภาคผนวก ข.

งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

ISSN 0125-1724

วิศวกรรมสาร

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG JOURNAL OF ENGINEERING

Volume 23 Number 1 March 2006

1. Direction Sequence Construction for Offline Thai Handwriting 1
K. Kittikorn and B. Kruatrachue

2. Synthesis of Wood-Liked Composites from PVC-Leather Dust and Bagasse Fiber 7
P. Nakpipat and D. Boonsinkamchai

3. Design of Low-Voltage Current Feed-back Amplifier 14
M. Suklueng S. Wisetphanichkij and K. Dejhan

4. A Digitally Programmable OTA-C Biquad Filter 20
S. Sukarnna M. Kumngern P. Prommee K. Dejhan K. Angkeaw and J. Chanwutitum

5. The Study of Electrical Characterization and Optical Response of Diamond Films 26
S. Kittisontirak and W. Thitiroungrung

6. Homojunction Photodiode Between N-type Diamond/P-type Diamond Structure 32
S. Kittisontirak and W. Thitiroungrung

7. DSC-Controlled Utility Grid Connected DC-AC Converter with Power Factor Correction 38
W. Choorak and V. Kinnares

8. A Study Of Broken Rotor Bar Detection in Induction Motors Using Nuron Network 44
K. Sa-ardyong C. Manop V. Kinnares and S. Leeraktepol

9. A Four Wheel Drived Electric Car 50
S. Sawatnavin and P. Praisuwanna

10. Field-Oriented Control For a Variable-Speed Wind Turbine Generator 56
Y. Pattanadisai and M. Leelajindakrairerk

11. Analysis of Additional Losses due to Harmonic Voltages in an Induction Motor Fed by PWM H-Bridge Multilevel Inverter Drive 62
C. Aimsaard and V. Kinnares

12. Power System Reliability Analysis Considering Protection Failures of Zone-3 68
P. Tienthong and M. Leelajindakrairerk

13. A Switched Mode Half-bridge Converter with Improvement of Unbalanced Voltage Between Split Capacitors 74
C. Chantaro and V. Kinnares

14. Design and Analysis of a Front-End AC-DC Switched Mode Converter for a DC Electric Welder with Primary Current Control of High Frequency Transformer 80
P. Wannakran P. Praisuwanna and V. Kinnares

Direction Sequence Construction for Offline Thai Handwriting

Kor Kittikorn, Boontee Kruatrachue

Computer Engineering Department, Faculty of Engineering, KMITL Bangkok 10520, Thailand

Abstract

This research concentrates on the online feature extraction of sequence of pen tracing from off-line character bitmap image. The proposed algorithm starts from skeletonization using Medial Axis Transform then orders the points in the skeleton simulating pen tracing in writing a character. The middle points can be ordered by starting from clustering the middle points according to their writing directions. After that, ordering the points within the same cluster and finally ordering un-order points across cluster. The proposed algorithm is tested with samples off-line handwritten from ten persons with promising results. The correct and in-correct samples are demonstrated.

1. Introduction

The feature extraction is a significant process of handwriting recognition system particularly the temporal information features which indicate the sequence and the direction of handwriting. This approach helps to solve the ambiguous problem in some handwriting style, for instance, retraced stroke, loop and multiple strokes. As shown in Fig. 1, the aforementioned problem is considered as an unavoidable issue in the research that related to the off-line handwriting recognition system. In addition, it has become an inception of the research that attempts to extract the feature of time sequence of the input that received from an image of handwriting character [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Each research represents the tracing sequence of handwriting that aligned with the structure, characteristic and nature of the handwriting in each language. For instance, in Chinese character [7], the approach is to apply the structure of stroke as a feature in extracting the tracing sequence. The result of this kind of approach is better than applying the geometrical feature due to the structure of Chinese language, which mostly consists of multiple and complex crossing strokes. In English language, most of research presents the algorithm which is able to examine the retraced stroke (such as ,) and different kinds of drawing loop (such as). However, it is important to note that the development for this kind of research is rarely available in Thai language. Therefore, this is the rational for conducting this research.

Fig. 1: The problem of retraced stroke, loop and multiple strokes

2. Implementation

Most researchers have constructed pen tracing in two steps. The first step is to construct the skeleton from handwriting character image. The second step is to order the sequence of points in the skeleton. Accordingly, the typical problems founded can be divided into two types according to their construction steps. The first type of problem is the quality of skeletonization process. The points from the skeleton may not lie in the centre of pen tracing (artifact line). The second type is the recovering of the natural ordering from the skeleton points. In order to tackle with these problems, this research presents the modified Medial Axis Transform (MAT) [1] skeleton algorithm. From our experiment the skeleton point from the modified MAT are more inline with the centre of handwritten stroke. We also propose a re-constructing pen tracing algorithm that contains three sub-processes. First step is to perform the order of the adjacent skeleton points into medial line (Fig. 2A). After that, the medial line will be ordered into the continuous stroke direction (Fig. 2B). The final step is to order continuous stroke directions into single tracing line[1] (Fig. 2C). Consequently, the tracing sequence of skeleton

[1]This research tackles single stroke handwritten only.

points (medial points) in handwriting will be constructed.

Fig. 2: Steps of re-constructing pen tracing algorithm

3. Skeletonization Algorithm

The skeletonization algorithm is based on searching the medial point in each opposite direction which has equal distance to the rim of a character as shown in Fig 3. The distance to the rim in other directions has to be greater than the previous distance. Hence, at the medial point, we can draw a circle with radius that equals to the distance to the rim of opposite direction and fit within character stroke (solid circle).

The detailed steps of searching the medial point of an image of character are as follows.

Fig. 3: Skeletonization Algorithm

1) The input is an isolated character bitmap image of black and white pixels (already performed slant, noise, and distortion correction).
2) Scan the image from top-left to bottom-right. Collect the value of black pixels to the rim in direction 4, 5, 6, 7 (referred to chain code Fig 5.) and continue scanning from bottom-right to top-left. Collect the values of black pixel according to direction 0, 1, 2, 3 respectively.

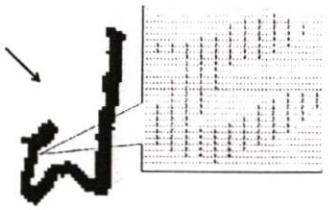


Fig. 4: Value of black pixels to the rim in direction 7

A	B	C
D	X	E
F	G	H

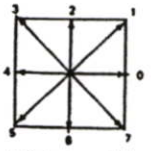


Fig. 5: The window 3x3 that used for determine the position in each direction and the direction presented in chain code

From Fig. 5. X is current pixel and A-H is neighbor pixel in each direction

```
Scan bitmap from top left to bottom right
 if Pixel X is white color
     {black_pixel_count_all_direction on X = 0}
 if Pixel X is black color {
     black_pixel_count_7 (dir 7) on X =
     black_pixel_count_7 on A +1
     black_pixel_count_0 (dir 0) on X =
     black_pixel_count_0 on D +1
     black_pixel_count_6 (dir 6) on X =
     black_pixel_count_6 on B +1
     black_pixel_count_5 (dir 5) on X =
     black_pixel_count_5 on C +1 }
Scan bitmap from bottom right to from to top left
 if Pixel X is white color
     { black_pixel_count_all_direction on X = 0 }
 if Pixel X is black color {
     black_pixel_count_1 (dir 1) on X =
     black_pixel_count_1 on F +1
     black_pixel_count_4 (dir 4) on X =
     black_pixel_count_4 on E +1
     black_pixel_count_2 (dir 2) on X =
     black_pixel_count_2 on G +1
     black_pixel_count_3 (dir 3) on X =
     black_pixel_count_3 on H +1 }
```

3) Scan the image again for the medial point. The medial point will contain value of black pixels to the rim which equals in the opposite directions and that value is less than (or equal to) the value in other directions.

```
Scan bitmap from top left to bottom right
  if (|X.black_pixel_count_4 -
  X.black_pixel_count_0 | < threshold)
  & (X.black_pixel_count_4 > min_R)
  & (X.black_pixel_count_4 <=
  X.black_pixel_count_other_direction)
    Set_Medial_Point(X)
  if (|X.black_pixel_count_2 -
  X.black_pixel_count_6| < threshold)
  & (X.black_pixel_count_2 > min_R)
  & (X.black_pixel_count_2 <=
  X.black_pixel_count_other_direction)
    Set_Medial_Point(X)
  if (|X.black_pixel_count_7 -
  X.black_pixel_count_3| < threshold)
  & (X.black_pixel_count_7 > min_R)
  & (X.black_pixel_count_7 <=
  X.black_pixel_count_other_direction)
    Set_Medial_Point(X)
  if (|X.black_pixel_count_1 -
  X.black_pixel_count 5 |< threshold)
  & (X.black_pixel_count_1 > min_R)
  & (X.black_pixel_count_1 <=
  X.black_pixel_count_other_direction)
    Set_Medial_Point(X)
```

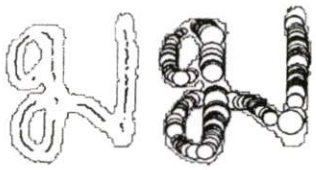


Fig. 6: The result from skeletonization

4) Set the stroke direction of each medial point in step 3. The stroke direction at the point is the direction which has the longest line from one rim to the opposite rim and passes that point.

```
Scan bitmap from top left to bottom right
  { Dir1= X.black_pixel_count_0 +
  X.black_pixel_count_4
  Dir2= X.black_pixel_count_2 +
  X.black_pixel_count_6
  Dir3= X.black_pixel_count_3 +
  X.black_pixel_count_7
  Dir4= X.black_pixel_count_5 +
  X.black_pixel_count_1
   if (Dir1 is Max ) SetPixel (x,y) = Red
   if (Dir2 is Max ) SetPixel (x,y) = Blue
   if (Dir3 is Max ) SetPixel (x,y) = Green
   if (Dir4 is Max ) SetPixel (x,y) = Yellow }
```

Fig. 7: shows the medial points on stroke direction

4. Pen Tracing Sequence constructions

The pen tracing sequence can be obtained from the ordering of medial points in the previous step. This tracing will launch from the start medial point through all medial points and end in the last medial point. This ordering process has to simulate the natural drawing of a character along and between each direction in a stroke. Hence, we have to divide a stroke into a sequence of drawing directions (stoke direction) then order the medial points within each direction first, followed by ordering the medial point between directions.

4.1 Ordering of Connected Medial Point

Before clustering medial points according to their stroke directions and ordering them, we can order each medial point based on its neighbors. Since the medial point is adjacent the pen tracing from one point has to pass its adjacent neighbor before passing to the other unconnected medial points. Therefore in this step we need to order the adjacent medial points into a "medial line" with "start" and "end" medial points.

From the bitmap image, we scan from the top-left to find the start medial point and then locate the next medial point from its neighbor by using Fewer-Untraced-Neighbors-First algorithm [3]. This process will be continued until there is no connected medial point exists and we can pattern the medial line with start and end points. The detailed start point identification algorithm can be founded in [3] and illustrated in Fig.8. After that, we continue scanning the image until there is no start medial point left.

From this step, we obtain one or more medial lines with start and end medial points and or single medial point without any adjacent neighbor. The medial points within the medial line have already been ordered. Therefore, the remained medial points (which are un-ordered) are the start, end and single medial points which will be ordered in the next step.

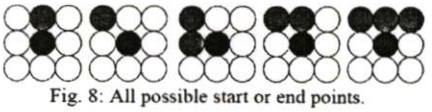


Fig. 8: All possible start or end points.

4.2 Ordering of start, end and single medial point within the same stoke direction

The start, end and single medial points are clustered due to their stroke direction as shown in different shade in Fig 9. In this step, those points within each cluster are ordered.

The details of this step are: Firstly, the medial points in each cluster are in ascending order due to their Y coordinate value for vertical stroke direction (X for other directions). Secondly, pick the first medial point in the cluster. If that point is the start or end medial point, the next point will be their end or start pair. Those pair points must be in the same cluster. Otherwise, locate the next medial point from the next point in the cluster (order by Y value). This next point must be located in the same continuous stroke direction. Since the point in the same cluster has the same stroke direction, they may not have been ordered because they are separated by other stoke direction (C, D) or they may not connected (A, B) as shown in Fig 9. In order to detect the continuous of the stroke direction we use X value in CD case and Y value in AB case (Y value of the next medial point must be less than the rim point in Y direction of the previous point). In case that the next point is not in the same continuous stroke direction, picking up the next point in the cluster and then check the continuous of the stroke direction again.

After finish this step all the medial point within the same continuous stroke direction will be ordered except the start and end point of each continuous stroke direction. As shown in Fig 9, the start of medial line 1 and end of medial line 10 of continuous stroke direction D and others are left to be ordered in the next step.

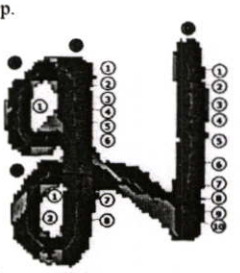


Fig.9: Show medial line ordering in vertical

4.3 Ordering of the start, end and isolated medial point in different stroke directions

This step performs ordering of medial points from different continuous stroke directions. The unordered medial points are ordered to the next nearest unordered point using Euclidean distance and considering connected line between two points will not cross the edge of character. At the end of this step, all medial points generated from skeletonization will be completely in order.

Fig. 10: ordering of continuous stroke directions

5. Experiment Results and Discussion

The pen tracing results from bitmap image of the proposed algorithm are shown below. (Notation: □ = ignored short medial line, ○ = rest start, end medial point)

Fig. 11: Output of ฉ character

Fig. 12: Output of ঝ character.

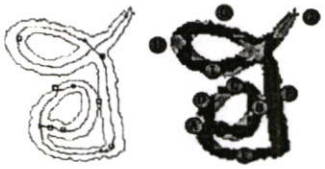


Fig. 13: Output of ঞ character

Fig. 14: Incorrect output of ণ character

Fig. 15: Incorrect output of ষ character

From our experiment, testing inputs are 3680 isolated characters were collected from 40 different writers (46x2x40 = 3680). The tracing construction rates are shown below.

	Correct (%)	Unnatural (%)	Incorrect (%)
3680 Isolated Characters	72.61	13.91	13.48

Table 1: Tracing sequence constructions rate

And we can identify the causes of incorrect tracing construction that are shown in Table 2.

	Incorrect tracing at stroke contact point (%)	Incorrect tracing across stroke direction (%)	Incorrect tracing within stroke direction (%)
496 incorrect characters	67.74	14.52	19.35

Table 2: Causes of incorrect tracing

The incorrect pen tracing results can be summarized into the follow cases along with suggestions to resolve them.

Smooth Skeleton (Fig 16)

The proposed skeletonization algorithm can not generate medial point of short narrow angle pen tracing (sharp turn, as shown in Fig 16). Those medial points are filtered out.

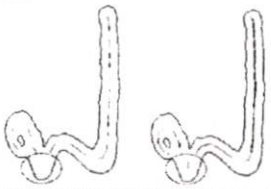


Fig. 16: Normal Skeleton (left) Skeleton using 30% variant value (right)

Suggestion: Apply variant value for comparing equal distance (radius of circle) to the rim in other remained 6 directions.

Unnatural pen tracing across stroke direction

The failure occurred when there are more than 2 starting or end points with in the same area. The algorithm connects to a wrong point as shown in Fig 17.

Fig 17: Incorrect stoke direction ordering

Suggestion: Use direction clues instead of shortest distance in case of there more than 2 un-order point in same area.

Incorrect tracing at stroke contact point

As shown in Fig 18, the vertical stroke is longer incorrectly due to joining of two different vertical strokes. The connected strokes can occur in many directions at the joining point.

Fig 18: Incorrect ordering on Inner overlap character

Suggestion: Locate the joining point first using the approach presented in [2]. Then segment the joining stroke.

7. Conclusion

This research proposes the alternative methods for re-constructing pen tracing sequence from an image of Thai handwriting. The algorithm starts from locating medial points in the skeleton of handwritten and then ordered those points to create pen tracing. The algorithm performs correctly in most cases.

8. Reference

[1] H. Blum, "A transformation for extracting new descriptors of shape", Models for the Perception of Speech and Visual Form, pages 362–381, 1967.

[2] D. S. Doermann and A. Rosenfeld, "Recovery of Temporal Information from Static Images of Handwriting", in Proc. CVPR'92, 1992, pp. 162-168.

[3] S. Lee and J. C. Pan, "Offline Tracing and Representation of Signatures" IEEE Trans. Syst., Man. and Cybern., Vol. 22, No. 4, Jul./Aug. 1992.

[4] S. Jager, "Recovering Writing Traces in Off-Line Handwriting Recognition: Using a Global Optimization Technique" in Proc. ICPR'96, pp. 150-154, 1996.

[5] H. Bunke, R. Ammann, G. Kaufmann, T. M. HA, M. Schenkel, R. Seiler and F. Eggimann "Recovery of temporal information of cursively handwritten words for on-line recognition" Proc. Fourth Int'l Conf. Document Analysis and Recognition, pp. 931-935, 1997

[6] Y. Kato and M. Yasuhara, "Recovery of Drawing Order from Single-Stroke Handwriting Images" IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol. 22, No. 9, pp 938-949, Sept. 2000.

[7] H-H. Chang and H. Yan, "Analysis of Stroke Structures of Handwritten Chinese Characters" IEEE Trans. Syst., Man., and Cybern. — Part B: Cybern., Vol. 29, No. 1, pp. 47 - 61. Feb. 1999.

ภาคผนวก ค.

ลำดับการเขียนตัวอักษรไทยตามมาตรฐานโครงสร้าง

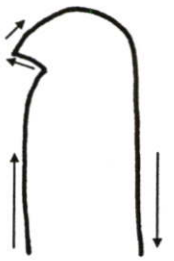
ลำดับการเขียนตัวอักษรไทยตามมาตรฐานโครงสร้าง

โดยอ้างอิงจากมาตรฐานโครงสร้างอักษรไทย [18] ในตัวแบบหลักและแบบเลือก และพิจารณาตัวแบบประดิษฐ์จากแบบทดสอบการเขียนลายมือ (ภาคผนวก ฉ) โดยได้แบ่งกลุ่มลำดับการเขียนตัวอักษรตามลักษณะโครงสร้างดังต่อไปนี้

กลุ่มโครงสร้างแบบตัว ก ไก่ ได้แก่ พยัญชนะ ก ถ ภ ฎ ฏ

ตัว ก ไก่

แบบหลัก เริ่มต้นที่ฐานหน้า ลากเส้นหน้าเป็นเส้นตั้งขึ้นไปจนถึง 3 ใน 4 ส่วนของขนาดตัวอักษรทำเป็นจะงอยโค้ง แล้วลากเส้นบนโค้งไปยังเส้นหลังซึ่งเป็นเส้นดิ่งลงมาจดฐาน ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ก ไก่ ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

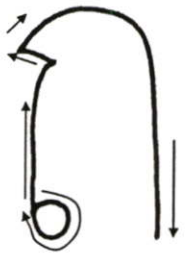
- จะงอยตรง
- มีกิ่งที่จะงอย
- เส้นบนเหลี่ยม

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ก ไก่ ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่มีจะงอย
- เส้นหน้าหรือเส้นหลังโค้ง

ตัว ถ ถุง

แบบหลัก มีโครงสร้างเหมือนตัว ก ไก่ แบบหลัก แต่เริ่มต้นเป็นหัวหลังล่าง และที่ด้านหน้าของหัวเชื่อมโยงกับเส้นหน้าที่เป็นเส้นตั้ง ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ตัว ถ ถุง ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

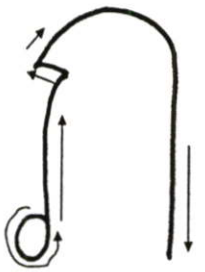
- จะงอยตรง
- มีกิ่งที่จะงอย
- เส้นบนเหลี่ยม

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ถ ถุง ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่มีจะงอย
- เส้นหน้าหรือเส้นหลังโค้ง
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว

ตัว ภ สำเภา

แบบหลัก มีโครงสร้างเหมือนตัว ก ไก่ แบบหลัก แต่เริ่มต้นเป็นหัวหน้าล่าง และที่ด้านหลังของหัวเชื่อมโยงกับเส้นหน้าที่เป็นเส้นตั้ง ปลายของจะงอยอยู่ห่างจากเส้นชานหน้าเล็กน้อย ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ภ สำเภาที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- ปลายของจะงอยจดเส้นชานหน้า
- มีกิ่งที่จะงอย
- จะงอยตรง
- เส้นบนเหลี่ยม

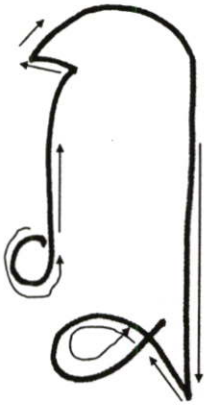
แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ภ สำเภา ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่มีจะงอย
- ปลายของจะงอยยาวเกินเส้นชานหน้า

- เส้นหน้าหรือเส้นหลังโค้ง
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว

ตัว ฎ ชฎา

แบบหลัก มีโครงสร้างเหมือนตัว ภ สำเภา แบบหลัก คือ แต่ที่เส้นหลังจะลากเลยฐานตัวอักษร ทำเป็นหางล่างขมวดตวัด ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ฎ ชฎา ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

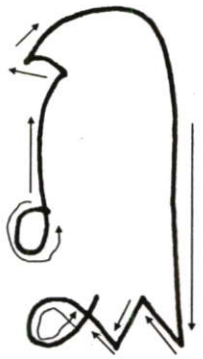
- ปลายของจะงอยจดเส้นชานหน้า
- มีกิ่งที่จะงอย
- จะงอยตรง
- เส้นบนเหลี่ยม

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ฎ ชฎา ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่มีจะงอย
- ปลายของจะงอยยาวเกินเส้นชานหน้า
- เส้นหน้าหรือเส้นหลังโค้ง
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว

ตัว ฏ ปฏัก

แบบหลัก มีโครงสร้างเหมือนตัว ภ สำเภา แบบหลัก คือ แต่ที่เส้นหลังจะลากเลยฐานตัวอักษร ทำเป็นหางล่างหยักขมวดตวัด ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ฏ ปฏัก ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- ปลายของจะงอยจดเส้นชานหน้า
- มีกิ่งที่จะงอย
- จะงอยตรง
- เส้นบนเหลี่ยม

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ฏ ปฏัก ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่มีจะงอย
- ปลายของจะงอยยาวเกินเส้นชานหน้า
- เส้นหน้าหรือเส้นหลังโค้ง
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว

กลุ่มโครงสร้างแบบตัว ข ไข่ ได้แก่ พยัญชนะ ข ฃ ช ซ

ตัว ข ไข่

แบบหลัก เริ่มต้นที่หัวขมวดหักหน้าบน ลากเส้นหน้าเป็นเส้นดิ่งเชื่อมโยงกับเส้นโค้งที่ต่อจากเส้นโค้งที่ล้อมหัวกลมลงมาจดเส้นฐาน ลากเส้นล่างตรงเชื่อมกันเส้นหลังเป็นเส้นตั้งไปจดแนวเดียวกับระดับหัวของตัวอักษร ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว ข ไข่ ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- หัวขมวดตรงหน้าบน
- มีกิ่งนอนที่ด้านหน้า
- เส้นล่างโค้งหงาย

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ข ไข่ ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- เขียนหัวกลมแทนหัวขมวด
- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้าหรือเส้นหลังโค้ง

ตัว ฃ ฃวด

แบบหลัก มีโครงสร้างเหมือนตัว ข ไข่ แบบหลัก แต่เริ่มต้นหัวหยักโค้งหน้าบน ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว ฃ ฃวด ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- หัวหยักตรงโค้งหน้าบน
- หัวหยักหักเหลี่ยมหน้าบน
- หัวหยักตรงเหลี่ยมหน้าบน
- มีกิ่งนอนที่ด้านหน้าของเส้นล่าง
- เส้นล่างโค้งหงาย

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ฃ ฃวด ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- เขียนหัวกลมแทนหัวขมวด
- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้าหรือเส้นหลังโค้ง

ตัว ช ช้าง

แบบหลัก มีโครงสร้างเหมือนตัว ข ไข่ แบบหลัก แต่ในช่วงเส้นตั้งหลังส่วนท้าย ให้ลากเป็นเส้นโค้งคล้ายเส้นโค้งคว่ำเฉียงขึ้นไปทางด้านเส้นชานหน้าจดกับส่วนของเส้นโค้ง ที่ล้อมหัวกลมของหัวขมวดหักหน้าบน แล้วทำเป็นหางบนปัดที่จดส่วนหัว ปลายหางเฉียงขึ้นไปทางด้านบน ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว ช ช้าง ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- หัวขมวดตรงหน้าบน
- มีกิ่งนอนที่ด้านหน้า
- เส้นล่างโค้งหงาย
- หางบนปัดไม่จดส่วนหัว

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ช ช้างที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- เขียนหัวกลมแทนหัวขมวด
- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้าหรือเส้นหลังโค้ง

ตัว ซ โซ่

แบบหลัก มีโครงสร้างเหมือนตัว ข ขวด แบบหลัก แต่ในช่วงเส้นตั้งหลังส่วนท้าย ให้ลากเป็นเส้นโค้งคล้ายเส้นโค้งคว่ำเฉียงขึ้นไปทางด้านเส้นชานหน้าจดกับส่วนของเส้นโค้ง ที่ล้อมหัวกลมของหัวขมวดหักหน้าบน แล้วทำเป็นหางบนปัดที่จดส่วนหัว ปลายหางเฉียงขึ้นไปทางด้านบน ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว ซ โซ่ ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- หัวหยักตรงโค้งหน้าบน
- หัวหยักหักเหลี่ยมหน้าบน
- หัวหยักตรงเหลี่ยมหน้าบน
- มีกิ่งนอนที่ด้านหน้าของเส้นล่าง
- เส้นล่างโค้งหงาย
- หางบนปัดไม่จดส่วนหัว

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ซ โซ่ ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- เขียนหัวกลมแทนหัวขมวด
- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้าหรือเส้นหลังโค้ง

กลุ่มโครงสร้างแบบตัว ค ควาย ได้แก่ พยัญชนะ ค ฅ ฆ ต ศ

ตัว ค ควาย

แบบหลัก เริ่มต้นเป็นหัวหลังกลางเอนหลัง ที่ด้านหน้าของหัวลากเส้นทแยง ลงหน้าซึ่งโค้งเล็กน้อยเชื่อมโยงลงมาด้านหน้าจดกับฐาน ลากเส้นหน้าเป็นเส้นตั้งขึ้นไปแล้วลากเส้นบนโค้งเชื่อมกับเส้นดิ่งด้านหลังลากลงมาจดฐานของตัวอักษร ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว ค ควาย ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

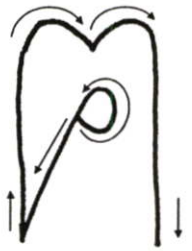
- เส้นทแยงลงหน้าที่ต่อจากหัวจดเส้นหน้าเหนือบริเวณฐานเล็กน้อย
- หัวกลางตรงที่มีเส้นหน้าเป็นเส้นโค้งหน้าและอยู่ชิดเส้นชานหน้า
- เส้นบนเหลี่ยม

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ค ควาย ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้าหรือเส้นหลังโค้ง

ตัว ต ตน

แบบหลัก มีโครงสร้างเหมือนตัว ค ควาย แบบหลัก แต่มีเส้นบนเป็นเส้นบนหยักโค้งที่ด้านบนสุดของเส้นโค้ง ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ต ตน ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- เส้นทแยงลงหน้าที่ต่อจากหัวจดเส้นหน้าเหนือบริเวณฐานเล็กน้อย
- หัวกลางตรงที่มีเส้นหน้าเป็นเส้นโค้งหน้าและอยู่ชิดเส้นชานหน้า
- เส้นบนหยักเหลี่ยม

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ต ตน ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้าหรือเส้นหลังโค้ง

ตัว ด เด็ก

แบบหลัก มีโครงสร้างเหมือนตัว ค ควาย แบบหลัก แต่เริ่มต้นเป็นหัวหน้ากลางเอนหลัง ที่ด้านหลังของหัวลากเป็นเส้นทแยงลงหน้ามาด้านหน้าจดฐาน ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว ด เด็ก ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- เส้นทแยงลงหน้าที่ต่อจากหัวจดเส้นหน้าเหนือบริเวณฐานเล็กน้อย
- หัวกลางตรงที่มีเส้นหน้าเป็นเส้นโค้งหน้าและอยู่ชิดเส้นชานหน้า
- เส้นบนเหลี่ยม

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ด เด็ก ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้าหรือเส้นหลังโค้ง

ตัว ต เต่า

แบบหลัก มีโครงสร้างเหมือนตัว ด เด็ก แบบหลัก แต่มีเส้นบนเป็นเส้นบนหยักโค้งที่ด้านบนสุดของเส้นโค้ง ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว ต เต่า ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- เส้นทแยงลงหน้าที่ต่อจากหัวจดเส้นหน้าเหนือบริเวณฐานเล็กน้อย
- หัวกลางตรงที่มีเส้นหน้าเป็นเส้นโค้งหน้าและอยู่ชิดเส้นชานหน้า
- เส้นบนหยักเหลี่ยม

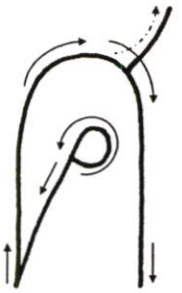
แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ต เต่า ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม

- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้าหรือเส้นหลังโค้ง

ตัว ศ ศาลา

แบบหลัก มีโครงสร้างเหมือนตัว ค ควาย แบบหลัก แต่มีหางบนเติมที่มีลักษณะคล้ายเส้นโค้งหลังอยู่ที่เส้นบนโค้ง ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ศ ศาลา ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- เส้นทแยงลงหน้าที่ต่อจากหัวจดเส้นหน้าเหนือบริเวณฐานเล็กน้อย
- หัวกลางตรงที่มีเส้นหน้าเป็นเส้นโค้งหน้าและอยู่ชิดเส้นชานหน้า
- ต้นตัวอักษรของหางบนเติมอยู่เลยบนโค้งลงมา
- เส้นบนเหลี่ยม

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ศ ศาลา ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้าหรือเส้นหลังโค้ง

กลุ่มโครงสร้างแบบตัว บ ใบไม้ ได้แก่ พยัญชนะ บ ป ษ

ตัว บ ใบไม้

แบบหลัก เริ่มต้นเป็นหัวหน้าบน ที่ด้านหลังของหัวลากเส้นหน้าเป็นเส้นดิ่ง เชื่อมโยงลงมาจดฐาน ลากเส้นล่างตรงที่ไปจดแนวหลังแล้วลากเส้นตั้งขึ้นไปจดระดับเดียวกับหัว ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว บ ใบไม้ ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

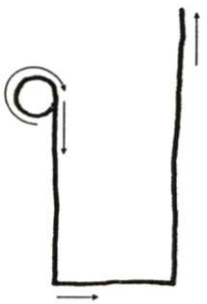
- มีกิ่งนอนที่ด้านหน้าเส้นล่าง
- เส้นล่างโค้งคว่ำ

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว บ ใบไม้ ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้าหรือเส้นหลังโค้ง

ตัว ป ปลา

แบบหลัก มีโครงสร้างเหมือนตัว บ ใบไม้ แบบหลัก แต่ที่เส้นหลังลากเลยขึ้นไป ทำเป็นหางบนตรง ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ป ปลา ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- มีกิ่งนอนที่ด้านหน้าเส้นล่าง
- เส้นล่างโค้งคว่ำ

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ป ปลา ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

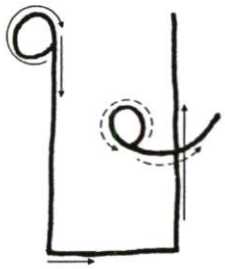
- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้าหรือเส้นหลังโค้ง

ตัว ษ ฤาษี

แบบหลัก แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

ลำตัว มีโครงสร้างเหมือนตัว บ ใบไม้ แบบหลัก

ไส้ เริ่มต้นเป็นหัวบน มีเส้นโค้งหงายเชื่อมโยงจากทางด้านล่างของหัวไปตัดเส้นของส่วนที่เป็นลำตัว ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ษ ฤาษี ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- มีกิ่งนอนที่ด้านหน้าเส้นล่าง
- เส้นล่างโค้งคว่ำ

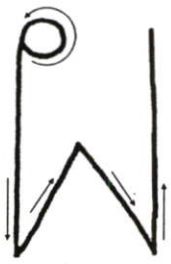
แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ษ ฤาษี ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้าหรือเส้นหลังโค้ง
- เขียนไส้เป็นเหมือนขมวดตวัดต่อจากการเขียนลำตัวโดยไม่ยกปากกา

กลุ่มโครงสร้างแบบตัว ผ ผึ้ง ได้แก่ พยัญชนะ ผ ฝ

ตัว ผ ผึ้ง

แบบหลัก เริ่มต้นเป็นหัวหลังบน ที่ด้านหน้าของหัวลากเส้นตั้งลงมาที่ฐาน ลากเส้นทแยงขึ้นลงต่ำที่ส่วนสูงสุดของเส้นทแยงขึ้นหลังอยู่บริเวณประมาณระดับกึ่งกลางของเส้นดิ่ง ปลายของเส้นทแยงลงหลังเชื่อมโยงกับเส้นตั้งลากขึ้นไประดับเดียวกับหัว ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ผ ผึ้ง ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

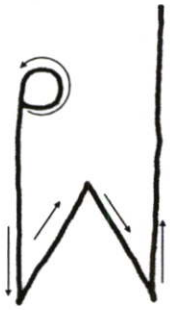
- ด้านหน้าของหัวกลมอยู่ชิดเส้นชานหน้าและเส้นหน้าเป็นเส้นดิ่ง

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ผ ผึ้ง ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้า เส้นหลัง หรือเส้นทแยงขึ้นลงโค้ง
- ใช้การเขียนหัวขมวดแทนเส้นทแยงขึ้นลง

ตัว ฝ ฝา

แบบหลัก มีโครงสร้างเหมือนตัว ผ ผึ้ง แบบหลัก แต่เส้นตั้งยาวเลยแนวระดับของหัวขึ้นไปทำเป็นหางบน ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ฝ ฝา ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- ด้านหน้าของหัวกลมอยู่ชิดเส้นชานหน้าและเส้นหน้าเป็นเส้นดิ่ง

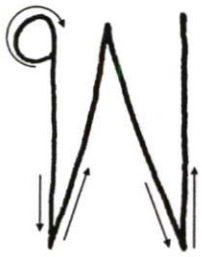
แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ฝ ฝา ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้า เส้นหลัง หรือเส้นทแยงขึ้นลงโค้ง
- ใช้การเขียนหัวขมวดแทนเส้นทแยงขึ้นลง

กลุ่มโครงสร้างแบบตัว พ พาน ได้แก่ พยัญชนะ พ ฟ ฬ

ตัว พ พาน

แบบหลัก เริ่มต้นเป็นหัวหน้าบน ที่ด้านหลังของหัวลากเส้นหน้าเป็นเส้นดิ่งเชื่อมโยงลงมาจดฐาน ลากเส้นทแยงขึ้นลงสูง ให้ส่วนที่สูงที่สุดของเส้นทแยงขึ้นหลังจดระดับเดียวกับหัว และปลายของเส้นทแยงลงหลังจดเส้นหลังที่ลากเป็นเส้นตั้งขึ้นไปจดแนวหัวของตัวอักษร ดังแบบ



แบบเลือก ไม่มี

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว พ พาน ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้า เส้นหลัง หรือเส้นทแยงขึ้นลงโค้ง
- ใช้การเขียนหัวขมวดแทนเส้นทแยงขึ้นลง

ตัว ฟ ฟัน

แบบหลัก มีโครงสร้างเหมือนตัว พ พาน แบบหลัก แต่เส้นตั้งยาวเลยแนวระดับของหัวขึ้นทำเป็นหางบน ดังแบบ

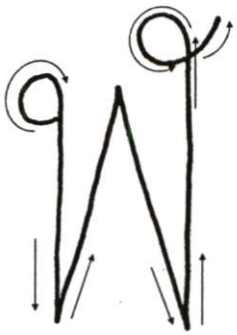
แบบเลือก ไม่มี

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ฟ ฟัน ลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้า เส้นหลัง หรือเส้นทแยงขึ้นลงโค้ง
- ใช้การเขียนหัวขมวดแทนเส้นทแยงขึ้นลง

ตัว พ จุฬา

แบบหลัก มีโครงสร้างเหมือนตัว พ พาน แบบหลัก แต่เส้นตั้งยาวเลยแนวระดับของหัวขึ้นทำเป็นหางบนตวัด ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว พ จุฬา ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- ด้านล่างสุดของขมวดอยู่ใต้เส้นหลักลงมา
- ด้านล่างสุดของขมวดอยู่เหนือเส้นหลักขึ้นไป แต่ไม่เกินช่วงว่างสระบน

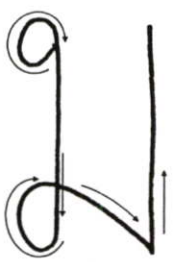
แบบประดิษฐ์ คือ ตัว พ จุฬา ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้า เส้นหลัง หรือเส้นทแยงขึ้นลงโค้ง
- ใช้การเขียนหัวขมวดแทนเส้นทแยงขึ้นลง

กลุ่มโครงสร้างแบบตัว ม ม้า ได้แก่ พยัญชนะ ม ฆ

ตัว ม ม้า

แบบหลัก เริ่มต้นเป็นหัวหลังบน ที่ด้านหลังของหัวลากเส้นหน้าเป็นเส้นดิ่งเชื่อมโยงลงมาทำเป็นขมวดหน้าตรง ให้ด้านล่างสุดของขมวดอยู่บริเวณฐาน ด้านบนสุดของขมวดลากเส้นล่างเอียงลงไปจดแนวหลังซึ่งเป็นเส้นตั้งขึ้นไปจดระดับเดียวกับหัวอักษร ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ม ม้า ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- ขมวดหน้าหลบ

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ม ม้า ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้า เส้นหลัง หรือเส้นเอียงลงโค้ง

ตัว ฆ ระฆัง

แบบหลัก มีโครงสร้างเหมือนตัว ม ม้า แบบหลัก แต่เริ่มต้นเป็นหัวหยักหักโค้งหน้าบนที่มีด้านหน้าสุดของเส้นโค้งที่ล้อมหัวกลม ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว ฆ ระฆัง ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- หัวหยักตรงโค้งหน้าบน
- หัวหยักหักเหลี่ยมหน้าบน
- หัวหยักตรงเหลี่ยมหน้าบน
- ขมวดหน้าหลบ

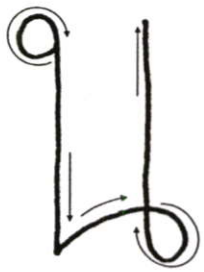
แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ฆ ระฆัง ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้า เส้นหลัง หรือเส้นเอียงลงโค้ง

โครงสร้างแบบตัว น หนู

ตัว น หนู

แบบหลัก เริ่มต้นเป็นหัวหน้าบน ที่ด้านหลังของหัวลากเส้นหน้าเป็นเส้นดิ่งเชื่อมโยงลงมาจดฐาน แล้วลากเส้นล่างเอียงขึ้นไปทำเป็นขมวดหลังตรง ลากเส้นหลังเป็นตั้งขึ้นไปจดระดับเดียวกับหัวอักษร ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว น หนู ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- ขมวดหลังหลบ

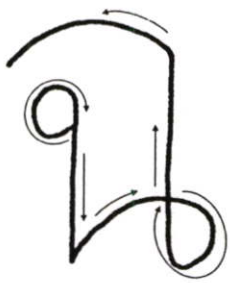
แบบประดิษฐ์ คือ ตัว น หนู ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้า เส้นหลัง หรือเส้นเอียงขึ้นโค้ง

โครงสร้างแบบตัว ฉ ฉิ่ง

ตัว ฉ ฉิ่ง

แบบหลัก เริ่มต้นเป็นหัวหน้ากลางตรง ที่ด้านหลังของหัวลากเส้นหน้าเป็นเส้นดิ่งเชื่อมโยงลงมาจดฐาน ลากเส้นล่างเอียงขึ้นไป ทำเป็นขมวดหลังตรง แล้วลากเส้นหลังเป็นเส้นตั้งขึ้นไปเชื่อมกับเส้นบนโค้ง ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ฉ ฉิ่ง ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- ขมวดหลังหลบ

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ฉ ฉิ่ง ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้า เส้นหลัง หรือเส้นเอียงขึ้นโค้ง

โครงสร้างแบบตัว จ จาน

ตัว จ จาน

แบบหลัก เริ่มต้นเป็นหัวหน้ากลางเอนหน้า ที่ด้านหลังของหัวลากเส้นทแยงลงหลังที่โค้งเชื่อมโยงลงมาจดฐาน ลากเส้นเดี่ยวเป็นเส้นตั้งขึ้นไป แล้วลากเส้นบนโค้ง ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว จ จาน ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- หัวหน้ากลางตรงที่มีเส้นหลังเป็นเส้นโค้งหลังและอยู่ชิดเส้นชานหลัง
- เส้นบนเหลี่ยม

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว จ จาน ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นเดี่ยวโค้ง

โครงสร้างแบบตัว ฐ ฐาน

ตัว ฐ ฐาน

แบบหลัก ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

ลำตัว เริ่มต้นเป็นหัวหน้ากลางเอนหน้า ที่ด้านหลังของหัวลากเส้นทแยงลงหลังที่เส้นโค้งเชื่อมโยงลงมาจดฐาน ลากเส้นเดี่ยวเป็นเส้นตั้งขึ้นไป แล้วลากเส้นซ้อน ดังแบบ

เชิง เริ่มต้นเป็นหัวหน้าบน ที่ด้านหลังของหัวลากเส้นเดี่ยวเป็นเส้นตั้งเชื่อมโยงลงมาแล้วลากเส้นทแยงขึ้นหน้าและเส้นทแยงลงหลังช่วงสั้น แล้วลากเส้นโค้งเล็กน้อยทำเป็นขมวดคล้ายขมวดหน้าตรง และตวัดหางขึ้นไปเล็กน้อย ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว ฐ ฐาน ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- หัวหน้ากลางตรงที่มีเส้นหลังเป็นเส้นโค้งหลัง.
- เส้นซ้อนเหลี่ยม

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ฐ ฐาน ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นเดี่ยวหรือเส้นซ้อนโค้ง

โครงสร้างแบบตัว ง งู

ตัว ง งู

แบบหลัก เริ่มต้นเป็นหัวหน้าบน ที่ด้านหลังของหัวลากเส้นเดี่ยวเป็นเส้นดิ่งเชื่อมโยงลงมาจดฐาน ลากเส้นทแยงขึ้นหน้าไปจดด้านหน้า ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว ง งู ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- มุมที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นเดี่ยวกับเส้นทแยงขึ้นหน้าเป็นมุมมน

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ง งู ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นเดี่ยวหรือเส้นทแยงขึ้นโค้ง

กลุ่มโครงสร้างแบบตัว ท ทหาร ได้แก่ พยัญชนะ ท ฑ

ตัว ท ทหาร

แบบหลัก เริ่มต้นเป็นหัวหน้าบน ที่ด้านหลังของหัวลากเส้นหน้าเป็นเส้นดิ่งเชื่อมโยงลงมาจดฐาน ลากเส้นตรงย้อนทับเส้นหน้าขึ้นไปเล็กน้อย ลากเส้นทแยงขึ้นหลังไปจนเกือบถึงระดับเดียวกับหัว ลากเส้นบนโค้งไปจดเส้นหลัง แล้วลากเส้นดิ่งลงมาจดฐาน ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว ท ทหาร ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- เส้นทแยงขึ้นหลังเริ่มจากเส้นฐานไม่ย้อนทับเส้นหน้า
- เส้นบนเหลี่ยม

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ท ทหาร ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้า เส้นหลัง หรือเส้นทแยงขึ้นโค้ง

ตัว ฑ มณโฑ

แบบหลัก มีโครงสร้างเหมือนตัว ท ทหาร แบบหลัก แต่เริ่มต้นเป็นหัวหยักหักโค้งหน้าบน ให้ด้านหน้าสุดของเส้นโค้งที่ล้อมหัวกลมอยู่ชิดเส้นชาน ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว ฑ มณโฑ ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- หัวหยักตรงโค้งหน้าบน
- หัวหยักหักเหลี่ยมหน้าบน
- หัวหยักตรงเหลี่ยมหน้าบน
- เส้นทแยงขึ้นหลังเริ่มจากเส้นฐานไม่ย้อนทับเส้นหน้า
- เส้นบนเหลี่ยม

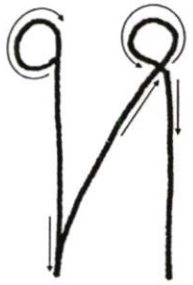
แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ฑ มณโฑ ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้า เส้นหลัง หรือเส้นทแยงขึ้นโค้ง

โครงสร้างแบบตัว ห หีบ

ตัว ห หีบ

แบบหลัก เริ่มต้นเป็นหัวหน้าบน ที่ด้านหลังของหัวลากเส้นหน้าเป็นเส้นดิ่งเชื่อมโยงลงมาจดฐาน ลากเส้นทแยงขึ้นหลังซึ่งโค้งเล็กน้อยขึ้นไปทางด้านหลังทำเป็นขมวดบน แล้วลากเส้นหลังเป็นเส้นดิ่งลงมาจดฐาน ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ห หีบ ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- เส้นทแยงขึ้นหลังที่แยกจากเส้นหน้าย้อนทับเส้นหน้าขึ้นมาเล็กน้อย

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ห หีบ ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้า เส้นหลัง หรือเส้นทแยงขึ้นโค้ง

โครงสร้างแบบตัว ธ ธง

ตัว ธ ธง

แบบหลัก เริ่มต้นลากเส้นหน้าเป็นเส้นดิ่งลงมาจดฐาน ลากเส้นล่างตรงไปเชื่อมกับเส้นหลังที่เป็นเส้นตั้งขึ้นไป แล้วลากเส้นซ้อน ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว ธ ธง ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- มีกิ่งนอนที่หน้าเส้นล่าง
- เส้นล่างโค้งหงาย
- เส้นหลังอยู่ชิดเส้นชานหลัง
- เส้นซ้อนไม่จดกับต้นตัวอักษร
- เส้นซ้อนเหลี่ยม

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ธ ธง ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- เส้นหน้า เส้นหลัง เส้นล่างหรือเส้นซ้อนโค้ง

โครงสร้างแบบตัว ร เรือ

ตัว ร เรือ

แบบหลัก เริ่มต้นเป็นหัวหน้าล่าง ที่ด้านหลังของหัวลากเส้นเดี่ยวเป็นเส้นตั้งเชื่อมโยงขึ้นไป ลากเป็นเส้นซ้อน ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว ร เรือ ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- เส้นเดี่ยวอยู่ชิดเส้นชานหลัง
- เส้นซ้อนเหลี่ยม

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ร เรือ ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นเดี่ยวหรือเส้นซ้อนโค้ง

โครงสร้างแบบตัว ย ยักษ์

ตัว ย ยักษ์

แบบหลัก เริ่มต้นเป็นหัวหลังบน ที่ด้านหน้าสุดของหัว ลากเส้นหน้าเป็นเส้นโค้งคล้ายเส้นโค้งหน้าเชื่อมโยง โดยให้ด้านหน้าของเส้นโค้งอยู่ชิดด้านหน้า ปลายเส้นโค้งเข้าไปทางเส้นชานหลัง แล้วลากเส้นโค้งคว่ำเฉียงลงมาจดด้านหน้า ลากเส้นดิ่งต่อลงไปจดฐาน ลากเส้นล่างตรงไปจดด้านหลัง ลากเส้นหลังเป็นเส้นตั้งขึ้นไปจดแนวระดับเดียวกับหัวอักษร ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว ย ยักษ์ มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- ส่วนปลายของหยักยาวไม่ถึงแนวด้านหลังสุดของหัวหลังบน
- เส้นหน้าส่วนที่อยู่ใต้หยัก ห่างจากเส้นชานหน้าเล็กน้อย

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ย ยักษ์ มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้า เส้นล่างหรือเส้นหลังโค้ง
- ใช้เส้นหน้าโค้ง และเขียนเส้นตรงแทนหยักด้านหน้า

กลุ่มโครงสร้างแบบตัว ล ลิง ได้แก่ พยัญชนะ ล ส

ตัว ล ลิง

แบบหลัก เริ่มต้นเป็นหัวหลังล่าง ที่ด้านหน้าของหัวลากเส้นล่างลอยหน้าตรง แล้วหักโค้งเฉียงลงไปจดฐาน ลากเส้นเดี่ยวเป็นเส้นตั้งขึ้นไป ลากเส้นบนโค้งไปจดด้านหน้า ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว ล ลิง ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

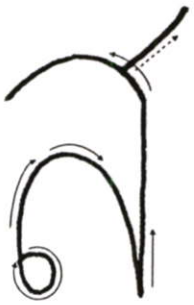
- หัวตัวอักษรอยู่ชิดเส้นชานหน้า
- เส้นล่างลอยจดเส้นเดี่ยวอยู่เหนือเส้นฐาน
- เส้นล่างลอยหน้าโค้ง
- เส้นล่างลอยหน้าตรงเหลี่ยม
- เส้นล่างลอยหน้าโค้งเหลี่ยม
- เส้นบนเหลี่ยม

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ล ลิง ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นเดี่ยวโค้ง

ตัว ส เสือ

แบบหลัก มีโครงสร้างเหมือนตัว ล ลิง แบบหลัก แต่มีหางบนเติมที่มีลักษณะคล้ายเส้นโค้งหลังอยู่ที่เส้นบนโค้ง ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ส เสือ ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- หัวตัวอักษรอยู่ชิดเส้นชานหน้า
- เส้นล่างลอยจดเส้นเดี่ยวอยู่เหนือเส้นฐาน
- เส้นล่างลอยหน้าโค้ง
- เส้นล่างลอยหน้าตรงเหลี่ยม
- เส้นล่างลอยหน้าโค้งเหลี่ยม
- ต้นตัวอักษรของหางบนเติมอยู่เลยเส้นบนลงมา
- หางบนเติมเป็นเส้นตรงเฉียงขึ้น

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ส เสือ ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นเดี่ยวโค้ง
- ใช้การเขียนหางบนม้วนตวัด แบบตัว ฮ นกฮูก แทนการเขียนหางบน

กลุ่มโครงสร้างแบบตัว อ อ่าง ได้แก่ พยัญชนะ อ ฮ

ตัว อ อ่าง

แบบหลัก เริ่มต้นเป็นหัวหลังกลางตรง ที่ด้านหน้าของหัวลากเส้นหน้าเป็นเส้นดิ่งเชื่อมโยงลงมาจดฐาน ลากเส้นล่างตรงไปจดเส้นชานหลังแล้ว ลากเส้นตั้งขึ้นไป ลากเส้นบนโค้งไปจดด้านหน้า ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว อ อ่าง ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

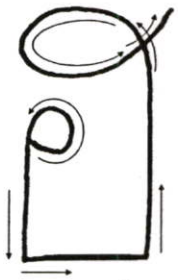
- หัวตัวอักษรอยู่ชิดเส้นชานหน้า
- เส้นล่างโค้งหงาย
- เส้นบนเหลี่ยม

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว อ อ่าง ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้า เส้นล่างหรือเส้นหลังโค้ง

ตัว ฮ นกฮูก

แบบหลัก มีโครงสร้างเหมือนตัว อ อ่าง แบบหลัก ที่ปลายตัวอักษรซึ่งเป็นเส้นบนโค้งทำเป็นหางบนม้วนตวัด ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ฮ นกฮูก ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- หัวตัวอักษรไม่ชิดเส้นชานหน้า
- เส้นล่างโค้งหงาย
- เส้นบนเหลี่ยม
- ปลายของหางบนม้วนตวัดจดเส้นหลัก

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ฮ นกฮูก ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้า เส้นล่างหรือเส้นหลังโค้ง
- ใช้การเขียนหางบน แบบตัว ส เสือ แทนการเขียนหางบนม้วนตวัด

โครงสร้างแบบตัว ว แหวน

ตัว ว แหวน

แบบหลัก เริ่มต้นเป็นหัวหน้าล่าง ที่ด้านหลังของหัวลากเส้นเดี่ยวเป็นเส้นตั้ง แล้วลากเส้นบนโค้งไปจดด้านหน้า ดังแบบ

แบบเลือก คือ ตัว ว แหวน มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- เส้นบนเหลี่ยม

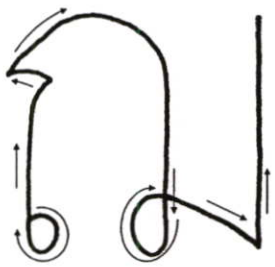
แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ว แหวน มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นเดี่ยวโค้ง

กลุ่มโครงสร้างแบบผสม ได้แก่ พยัญชนะ ฌ ญ ณ ฒ

ตัว ฌ เฌอ

แบบหลัก เป็นโครงสร้างแบบผสม คือ ช่วงครึ่งหน้าเป็นโครงสร้างของตัว ถ ถุง แบบหลัก คือ ช่วงครึ่งหลังเป็นโครงสร้างของตัว ม ม้า แบบหลัก โดยให้เส้นหลังของ ถ ถุง ส่วนลำตัวบนต่อกับเส้นหน้าของ ม ม้า ส่วนลำตัวล่างกลายเป็นเส้นกลางของ ฌ เฌอ ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ฌ เฌอ ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- จะงอยตรง
- มีกิ่งที่จะงอย
- เส้นบนเหลี่ยม
- ขมวดกลางหลบ

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ฌ เฌอ ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

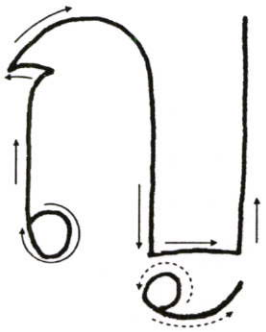
- ไม่มีจะงอย
- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้า เส้นกลางหรือเส้นหลังโค้ง

ตัว ญ หญิง

แบบหลัก ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

ส่วนลำตัว เป็นโครงสร้างแบบผสม คือ ช่วงครึ่งหน้าเป็นโครงสร้างของตัว ถ ถุง แบบหลัก คือ ช่วงครึ่งหลังเป็นโครงสร้างของตัว บ ใบไม้ แบบหลัก โดยให้เส้นหลังของ ถ ถุง ส่วนลำตัวบนต่อกับเส้นหน้าของ บ ใบไม้ ส่วนลำตัวล่างกลายเป็นเส้นกลางของ ญ หญิง

ส่วนเชิง เริ่มต้นเป็นหัวบน ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ญ หญิง ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

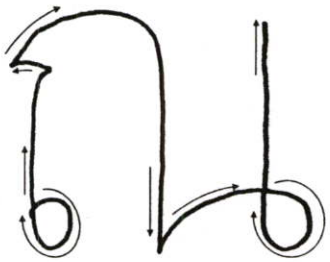
- จะงอยตรง
- มีกิ่งที่จะงอย
- เส้นบนเหลี่ยม
- มีกิ่งนอนที่ด้านหน้าเส้นล่าง
- เส้นล่างโค้งคว่ำ
- เส้นบนเหลี่ยมและมีเชิงมีเส้นที่เชื่อมโยงกับหัวบนหักเป็นมุม

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ญ หญิง ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่มีจะงอย
- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้า เส้นกลางหรือเส้นหลังโค้ง

ตัว ณ เณร

แบบหลัก เป็นโครงสร้างแบบผสม คือ ช่วงครึ่งหน้าเป็นโครงสร้างของตัว ถ ถุง แบบหลัก คือ ช่วงครึ่งหลังเป็นโครงสร้างของตัว น หนู แบบหลัก โดยให้เส้นหลังของ ถ ถุง ส่วนลำตัวบนต่อกับเส้นหน้าของ น หนู ส่วนลำตัวล่างกลายเป็นเส้นกลางของ ณ เณร ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ณ เณร ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

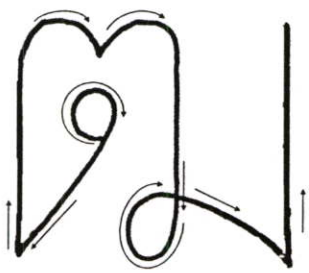
- จะงอยตรง
- มีกิ่งที่จะงอย
- เส้นบนเหลี่ยม
- ขมวดหลังหลบ

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ณ เณร ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่มีจะงอย
- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้า เส้นกลางหรือเส้นหลังโค้ง

ตัว ฒ ผู้เฒ่า

แบบหลัก เป็นโครงสร้างแบบผสม คือ ช่วงครึ่งหน้าเป็นโครงสร้างของตัว ต เต่า แบบหลัก คือ ช่วงครึ่งหลังเป็นโครงสร้างของตัว ม ม้า แบบหลัก โดยให้เส้นหลังของ ต เต่า ส่วนลำตัวบนต่อกับเส้นหน้าของ ม ม้า ส่วนลำตัวล่างกลายเป็นเส้นกลางของ ฒ ผู้เฒ่า ดังแบบ



แบบเลือก คือ ตัว ฒ ผู้เฒ่า ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักเฉพาะลักษณะดังต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- เส้นทแยงลงหน้าที่เชื่อมโยงมาจากหัวมาจดเส้นชานหน้า

- หัวหน้ากลางตรงที่มีเส้นหน้าเป็นเส้นโค้งหน้าและอยู่ชิดเส้นหน้าชาน
- เส้นบนหยักเหลี่ยม
- ขมวดกลางหลบ

แบบประดิษฐ์ คือ ตัว ฒ ผู้เฒ่า ที่มีลักษณะต่างไปจากแบบหลักและแบบเลือก โดยพิจารณาจากลักษณะการเขียนลายมือ

- ไม่เขียนหัวกลม
- เขียนเส้นกิ่งแทนการม้วนหัว
- เส้นหน้า เส้นกลางหรือเส้นหลังโค้ง

ภาคผนวก ง

ผลการทดลองกับตัวอักษรอ้างอิง

การทดสอบกับตัวอักษรอ้างอิง

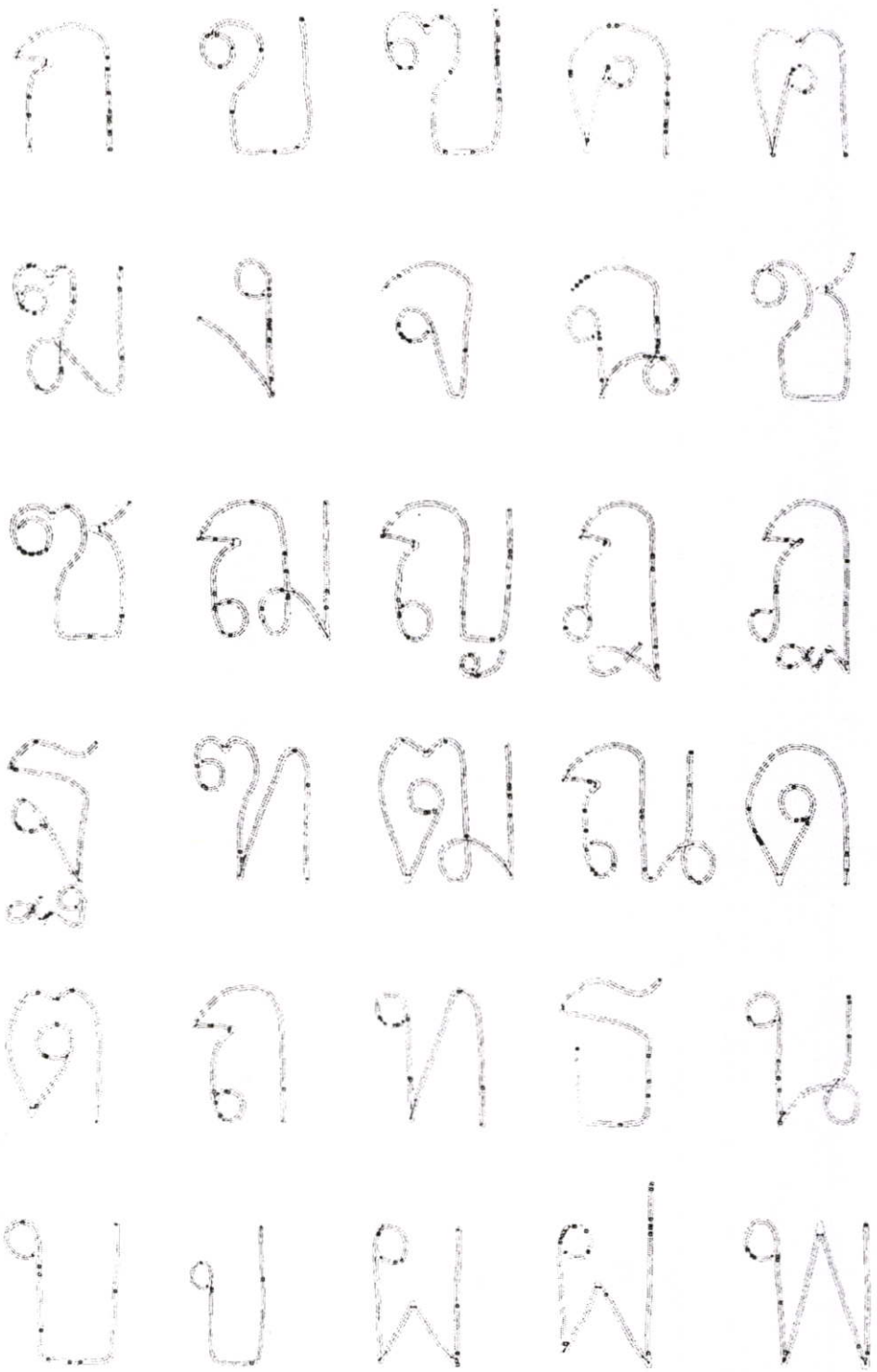
ตัวอักษรอ้างอิงถูกเขียนขึ้นให้ถูกต้องตามลักษณะการเขียนและโครงสร้างที่ระบุไว้ในมาตรฐานโครงสร้างอักษรไทย [18] โดยผลการทดลองตามอัลกอริธึมที่นำเสนอทั้งในส่วนการดึงข้อมูลเชิงลำดับเวลาและการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นให้ลำดับการเขียน ได้ผลการทดลองเป็นดังนี้

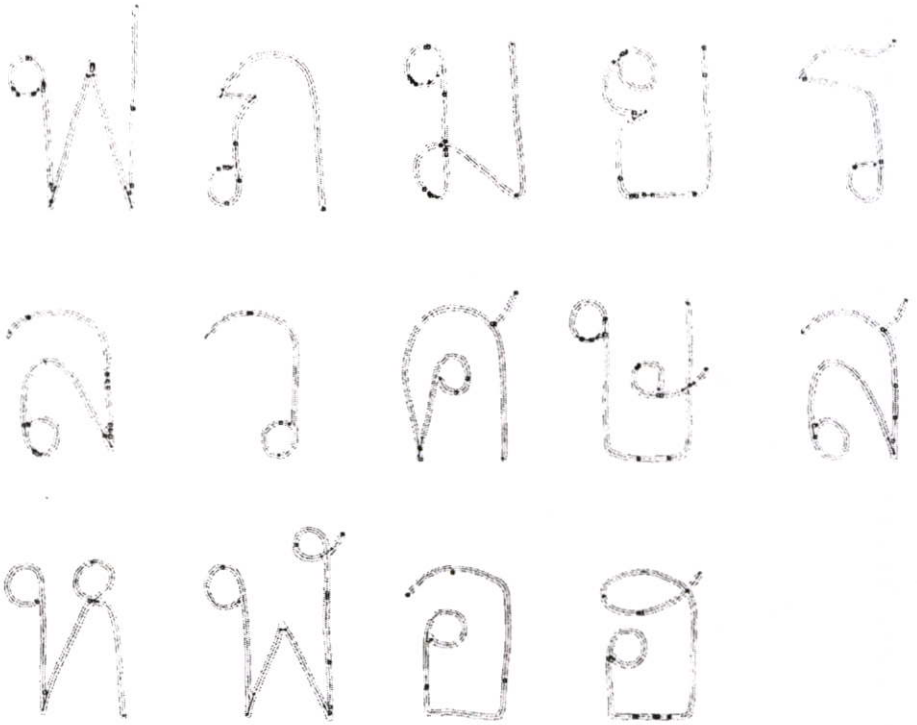
ตารางที่ 1 ผลการทดลองดึงข้อมูลเชิงลำดับเวลาจากตัวอักษรอ้างอิง

	ถูกต้อง	ไม่เหมาะสม	ไม่ถูกต้อง
อักษรอ้างอิง 44 ตัว	100.00 %	0 %	0 %

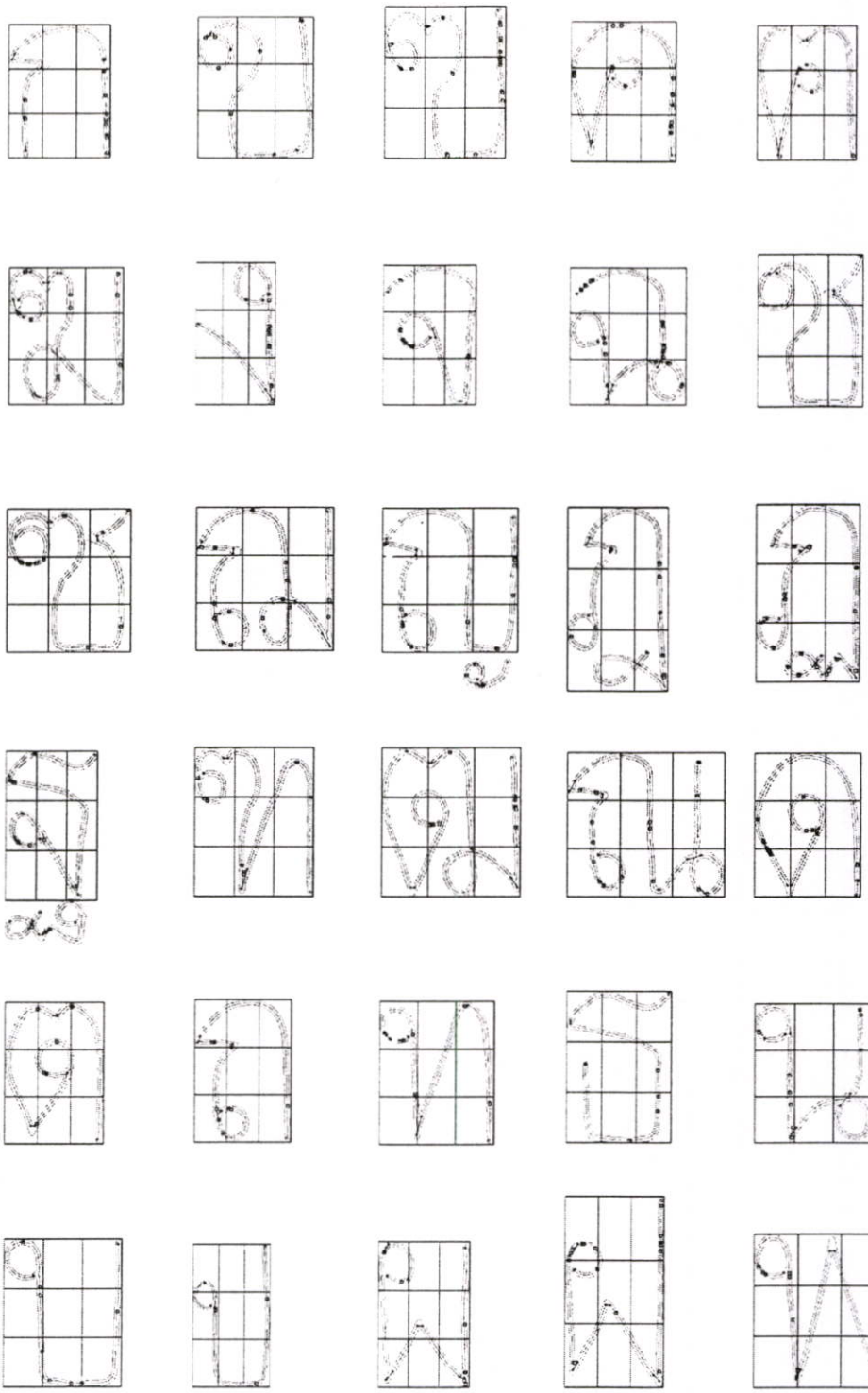
ตารางที่ 2 ผลการทดลองกำหนดจุดเริ่มต้นหรือการม้วนหัวของลำดับการเขียนตัวอักษรอ้างอิง

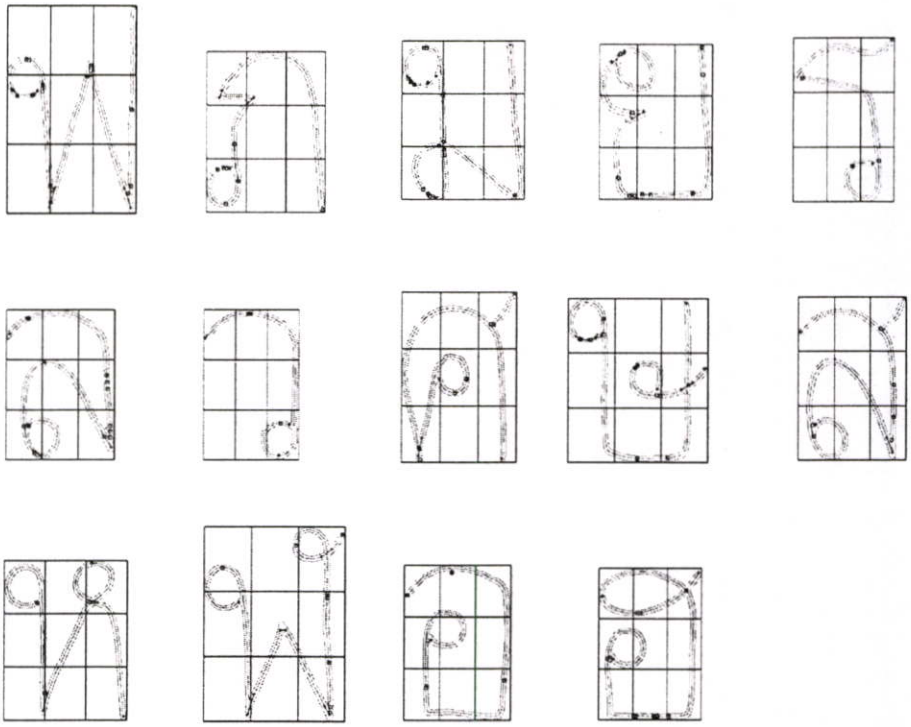
	จุดเริ่มต้นถูกต้อง			จุดเริ่มต้นไม่ถูกต้อง		ข้อยกเว้นการกำหนดจุดเริ่มต้น
	พิจารณาเชิงตำแหน่ง	พิจารณาการม้วนหัว	พิจาณาเชิงตำแหน่ง เนื่องจากความกำกวม	ข้อผิดพลาดของอัลกอริธึม	ลำดับการเขียนไม่ถูกต้อง	
อักษรอ้างอิง 44 ตัว	4.55 % (2)	90.91 % (40)	2.27 % (1)	2.27 % (1)	0 %	0 %





ภาคผนวก จ.
การพิจารณาจุดเริ่มต้นเชิงตำแหน่งของอักษรอ้างอิง





ภาคผนวก ฉ.

แบบทดสอบการเขียน

กรุณาเขียนตัวอักษร ก ถึง ฮ ด้วยตัวบรรจงและเว้นระยะห่างระหว่างตัวอักษร

ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต ถ ท

ธ น บ ป ผ ฝ พ ฟ ภ ม ย ร ฤ ล ฦ ว ศ ษ ส ห ฬ อ ฮ

กรุณาเขียนตัวอักษร ก ถึง ฮ ด้วยลายมือเขียนและเว้นระยะห่างระหว่างตัวอักษร

ก ข ฃ ค ฅ ฆ ง จ ฉ ช ซ ฌ ญ ฎ ฏ ฐ ฑ ฒ ณ ด ต ถ ท

ธ น บ ป ผ ฝ พ ฟ ภ ม ย ร ฤ ล ฦ ว ศ ษ ส ห ฬ อ ฮ

กรุณาเขียนประโยคดังต่อไปนี้ ด้วยลายมือเขียนและตัวบรรจง

- **ไก่จิกเด็กตาย เด็กฎายบนปากโอ่ง**

ลายมือเขียน

ไก่จิกเด็กตาย เด็กฎายบนปากโอ่ง

ตัวบรรจง

ไก่จิกเด็กตาย เด็กฎายบนปากโอ่ง

- **ผีฝากถุงข้าวสารให้ฉัน ฉันฝากขวดขี้ผึ้งใส่ถุงให้เศรษฐี**

ลายมือเขียน

ผีฝากถุงข้าวสารให้ฉัน ฉันฝากขวดขี้ผึ้งใส่ถุงให้เศรษฐี

ตัวบรรจง

ผีฝากถุงข้าวสารให้ฉัน ฉันฝากขวดขี้ผึ้งใส่ถุงให้เศรษฐี

- **งูใหญ่นอนอยู่ ณ ริมวัดโบสถ์โลก**

ลายมือเขียน

งูใหญ่นอนอยู่ ณ ริมวัดโบสถ์โลก

ตัวบรรจง

งูใหญ่นอนอยู่ ณ ริมวัดโบสถ์โลก

- **พ่อค้าฝันทองซื้อช้างช่อ**

ลายมือเขียน

พ่อค้าฝันทองซื้อช้างช่อ

ตัวบรรจง

พ่อค้าฝันทองซื้อช้างช่อ

45

วันหนึ่งม้าแก่ นอนแผ่ชูคอ เด็กสิบคนรอ ขอขี่ทุกวัน บ้างว่าแก่ไป จะไม่ขี่มัน
เก้าคนพากัน อยู่บ้านพอใจ มีเด็กหนึ่งคน ชนจะขี่ม้า เอาไม้ตีขา ให้พาวิ่งไป
ม้าลุกเด็กแย่ ล้มแผ่ลงไป ม้าวิ่งไม่ได้ ล้มทับเด็กชน

ตัวบรรจง

วันหนึ่งม้าแก่ นอนแผ่ชูคอ เด็กสิบคนรอ ขอขี่ทุกวัน บ้างว่าแก่ไป จะไม่ขี่มัน
เก้าคนพากัน อยู่บ้านพอใจ มีเด็กหนึ่งคน ชนจะขี่ม้า เอาไม้ตีขา ให้พาวิ่งไป
ม้าลุกเด็กแย่ ล้มแผ่ลงไป ม้าวิ่งไม่ได้ ล้มทับเด็กชน

ผู้ใหญ่หาผ้าใหม่ ให้สะใภ้ใช้คล้องคอ ใฝ่ใจเอาใส่ห่อ มิหลงใหลใครขอดู
จะใคร่ลงเรือใบ ดูน้ำใสและปลาปู สิ่งใดอยู่ในตู้ มิใช่อยู่ได้ดั่งเดียว
บ้าใบ้ถือใยบัว หูตาม้วมาใกล้เคียง เล่าท่องอย่าละเลี่ยง ชี่สิบม้วนจำจงดี

ลายมือเขียน

ผู้ใหญ่หาผ้าใหม่ ให้สะใภ้ใช้คล้องคอ ใฝ่ใจเอาใส่ห่อ มิหลงใหลใครขอดู
จะใคร่ลงเรือใบ ดูน้ำใสและปลาปู สิ่งใดอยู่ในตู้ มิใช่อยู่ได้ดั่งเดียว
บ้าใบ้ถือใยบัว หูตาม้วมาใกล้เคียง เล่าท่องอย่าละเลี่ยง ชี่สิบม้วนจำจงดี

ตัวบรรจง

ผู้ใหญ่หาผ้าใหม่ ให้สะใภ้ใช้คล้องคอ ใฝ่ใจเอาใส่ห่อ มิหลงใหลใครขอดู
จะใคร่ลงเรือใบ ดูน้ำใสและปลาปู สิ่งใดอยู่ในตู้ มิใช่อยู่ได้ดั่งเดียว
บ้าใบ้ถือใยบัว หูตาม้วมาใกล้เคียง เล่าท่องอย่าละเลี่ยง ชี่สิบม้วนจำจงดี

๖๕

กรุณาคัดลอกด้วยลายมือของนักเรียน

ที่มา: หนังสือเรียนภาษาไทย ชั้นประถมศึกษาปีที่ ๒ เล่ม ๑
กรมวิชาการ กระทรวงศึกษาธิการ

เมื่อแม่และมานีกลับจากตลาดก็เข้าครัว ในครัวมีเตา มีหุ้งใส่กับข้าวอยู่ข้างฝา ของทุกอย่างสะอาด เพราะแม่ทำอาหารอยู่เสมอ มานีชอบดูแม่ทำกับข้าว เพราะอยากทำกับข้าวเก่งเหมือนแม่ จึงช่วยแม่ล้างผัก หม้อ กะทะ และช่วยตักน้ำ บางทีก็พัดไฟในเตาให้ มานะกับพ่อกำลังทำงานอยู่ในสวนหลังบ้าน พ่อปลูกผักหลายอย่าง มานะช่วยตักน้ำรดผัก พ่อปลูกพริกและมะเขือด้วย มานะชอบดูดอกมะเขือสีม่วง พ่อเก็บพริกไปให้แม่เก็บไว้ทำกับข้าว เวลาจะแกง แม่เลือกใช้แต่พริกแห้งสีแดง น้ำพริกแกงในครกจึงมีสีแดงน่ากิน แม่ชอบแกงปลาใส่มะเขือ ถ้าในสวนมีหญ้ารกมาก ต้นไม้จะไม่งาม พ่อต้องเอาหญ้าออกเสมอ พ่อสอนให้มานะรู้จักใช้จอบและเสียมทำสวน มานะใช้เสียมแซะกอหญ้าให้ราก[illegible] กระโดดออกมาจากริมรั้ว มานะไม่กล้วคางคก จึงนั่งพักใต้ต้นไม้ พอทำกับข้าวเสร็จแล้ว แม่ให้มานีไปบอกพ่อกับมานะมากินข้าว พ่อกับมานะขอไปอาบน้ำก่อน เมื่อกำลังกินข้าวอยู่ พ่อบอกกับแม่ว่า มานะช่วยทำงานได้มาก ช่วยปลูกผัก ตักน้ำรดผัก และแซะรากหญ้า แม่บอกว่า ถ้าปลูกผักได้มากๆ แม่กับมานีจะเอาไปขายที่ตลาด มานะเล่าให้มานีฟังว่า เขาไปช่วยพ่อทำงานในสวนพบคางคกหลายตัว แล้วเขาก็ทำท่ากระโดดเหมือนคางคก แม่บอกว่าอย่าเล่นเวลากินข้าว

เมื่อแม่และมานีกลับจากตลาดก็เข้าครัว ในครัวมีเตา มีหุ้งใส่กับข้าวอยู่ข้างฝา ของทุกอย่างสะอาด เพราะแม่ทำอาหารอยู่เสมอ มานีชอบดูแม่ทำกับข้าว เพราะอยากทำกับข้าวเก่งเหมือนแม่ จึงช่วยแม่ล้างผัก หม้อ กะทะ และช่วยตักน้ำ บางทีก็พัดไฟในเตาให้ มานะกับพ่อกำลังทำงานอยู่ในสวนหลังบ้าน พ่อปลูกผักหลายอย่าง มานะช่วยตักน้ำรดผัก พ่อปลูกพริกและมะเขือด้วย มานะชอบดูดอกมะเขือสีม่วง พ่อเก็บพริกไปให้แม่เก็บไว้ทำกับข้าว เวลาจะแกง แม่เลือกใช้แต่พริกแห้งสีแดง น้ำพริกแกงในครกจึงมีสีแดงน่ากิน แม่ชอบแกงปลาใส่มะเขือ ถ้าในสวนมีหญ้ารกมาก ต้นไม้จะไม่งาม พ่อต้องเอาหญ้าออกเสมอ พ่อสอนให้มานะรู้จักใช้จอบและเสียมทำสวน มานะใช้เสียมแซะกอหญ้าให้ราก[illegible] กระโดดออกมาจากริมรั้ว มานะไม่กล้วคางคก จึงนั่งพักใต้ต้นไม้ พอทำกับข้าวเสร็จแล้ว แม่ให้มานีไปบอกพ่อกับมานะมากินข้าว พ่อกับมานะขอไปอาบน้ำก่อน เมื่อกำลังกินข้าวอยู่ พ่อบอกกับแม่ว่า มานะช่วยทำงานได้มาก ช่วยปลูกผัก ตักน้ำรดผัก และแซะรากหญ้า แม่บอกว่า ถ้าปลูกผักได้มากๆ แม่กับมานีจะเอาไปขายที่ตลาด มานะเล่าให้มานีฟังว่า เขาไปช่วยพ่อทำงานในสวนพบคางคกหลายตัว แล้วเขาก็ทำท่ากระโดดเหมือนคางคก แม่บอกว่าอย่าเล่นเวลากินข้าว

อาจารย์แห่งนิกายเซ็นชื่อ น้ำจิน เป็นผู้มีชื่อเสียงทั่วประเทศ และโยเฟสเซอร์คนหนึ่ง เป็นโปรเฟสเซอร์ที่มีชื่อเสียงทั่วประเทศเช่นเดียวกัน เรื่องของศาสตราจารย์ทางพุทธศาสนาของท่านนี้ ในการต้อนรับ ท่านอาจารย์น้ำจิน ได้รินน้ำชาลงในถ้วย จนจะล้นแล้วก็ยังรินต่อ โยเฟสเซอร์ นองดูด้วยความฉงน ทนดูไม่ได้ก็พูดโพล่งออกไปว่า " ท่านจะใส่มันลงไปทำไมล่ะ " ประโยคนี้ก็แสดงว่าโมโห ท่านอาจารย์ น้ำจิน จึงตอบว่า " สิ่งท่านก็เหมือนกันมาหาผมจะใส่อะไรลงไปได้อย่างไร เพราะท่านเต็มอยู่ด้วย opinions และ speculations ของท่านเอง " คือว่าเต็มไปด้วยความคิดตามความรู้สึกนึกคิดของท่านเอง และมีอีโก้ของท่านเองตามแบบของท่านเอง สองอย่างนี้แหละมันทำให้เข้าใจพุทธศาสนาอย่างเพี้ยน ไม่ได้เรียนว่า ด้วยว่ามันล้น

ท่านครูอาจารย์ทั้งหลาย จะเตือนสติเด็กของเราให้รู้สึกนึกคิด เรื่องอะไรล้น อะไรไม่ล้น ได้อย่างไร จะใช้ช่วยกันหาหนทาง ในครั้งโบราณ ในยุคสมัยใดที่เคยกระแสของกระแสถึงพวกพราหมณ์ที่เป็นทิศาปาโมกข์ ต้องเอาเหล็กมาคีเป็นเขี้ยวลัก ตาคต้องไว้เรื่องด้วยกลัวท้องจะแตก เพราะว่าล้น นั่นเป็นเรื่องที่มีความหมายอย่างไร ก็ลองคิดดู พวกเราอาจล้น หรือ อัดยุ่งต้องวิชาท่านองนั้น จนอะไรใส่ลงไปอีกไม่ได้ ส่วนที่ว่างกายจึงเอาไว้ได้ ก็คงเป็นส่วนที่มีประโยชน์ ฉะนั้นจริยธรรมแท้ ๆ ไม่มีวันล้น ว่างที่ล้นนั้น มันเป็นของปรุงแต่งจิต ไม่ใช่ตัวจิตแท้ มันล้นได้มากมาย แต่ถึงกระนั้นเราก็ยังไม่รู้ว่าจิตแท้คืออะไร จะไรคงจะเป็นจิตแท้ และอะไรเป็นสิ่งที่ไม่ใช่จิตแท้ คือ ความคิดปรุงแต่ง ซึ่งจะต้องไขปัญหาไปเรื่อย นี่แหละจึงต้องมาให้พบสิ่งที่เรียกว่าจิตจริง ๆ กันเสียสักที ก็คุยเหนื่อยนานี

ในที่สุดท่านจะพบตัวธรรมะอย่างสูง ที่ควรแก่นามที่จะเรียกว่าจิตแท้ หรือจิตเดิมแท้ ซึ่งข้อนั้นได้แก่ ภาวะแห่งความว่าง จิตที่ประกอบด้วยภาวะแห่งความว่างจาก " ตัวกู-ของกู " นั้น แหละคือจิตแท้ ถ้าว่างแล้วมันจะเอาอะไรล้น นี่เพราะเนื่องจากไม่รู้จักว่างอะไรเป็นอะไร จึงเป็นกันแต่เรื่องล้น คือส่วนที่เกิน คือเกินต้องการ ไม่ต้องเอามาใส่ใจ ไม่ต้องเอามาสนใจ เขาคิดว่าเขาไม่ต้องเกี่ยวกับศาสนาหรือธรรมะเลย เขาก็เลิกมาได้ พ่อแง่ฉันเงินในเทใช้ ให้เขาเล่าเรียน เรียนเสร็จแล้วก็ทำราชการ เป็นข้าราชการ ไม่ได้ไม่ต้องมีความเกี่ยวข้องกับศาสนาเลย ฉะนั้นเขาจึงรักศาสนาหรือธรรมะออกไปในฐานะเป็นส่วนล้น คือไม่จำเป็น นี่แหละเขาจึงส่วนล้นให้กับศาสนาอย่างนี้ คนชั้นนี้จะต้องรู้ในลักษณะที่ล้นเหมือน โยเฟสเซอร์คนนั้น ท้ออาจารย์น้ำจินจะต้องจนน้ำชาใส่ของน้ำ หรือว่าจนน้ำชาไหล โดยท่านองนั้นทั้งนั้น เราลืมหมดเข้าใจสิคล้น ความเข้าใจอันนั้นจึงไม่เต็ม มันล้นออกมาจึงเป็น เป็นรูปของมิจฉาทิฏฐิ เพราะเราเห็นว่าน้ำนั้นอะไร ๆ ของเราเต็มเปี่ยมแล้ว ส่วนที่เป็นของภายนอกเป็นจริยธรรมนี่ เข้าไม่ลู่ออกหลุดไป ของคิดดูให้ดีเถอะว่า นี่แหละคือมูลเหตุที่ทำให้จริยธรรมธรรมะ และพังทลาย ถ้าเราสังเกตที่ ที่จะต้องผลุงส่วนนั้นแล้วจะต้องสนใจเรื่องนี้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายก่อ กิตติกรณ์

วันเดือนปีเกิด วันที่ 21 พฤศจิกายน 2522

ที่อยู่ 232/7 หมู่บ้านสัมมากร รามคำแหง 110 แขวงสะพานสูง เขตสะพานสูง กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2544 จบการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์) จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง