บทที่ 3

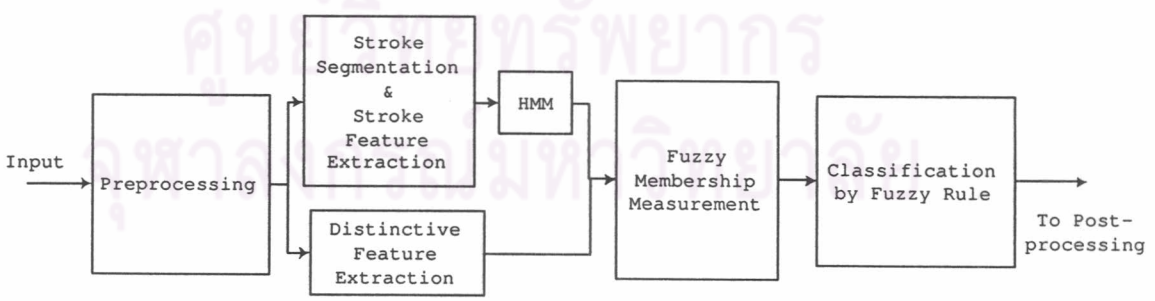
การรู้จำตัวอักษรลายมือเขียนภาษาไทยแบบออนไลน์ด้วยแบบจำลองฮิดเดนมาร์คอฟและฟัซซีโลจิก

ในบทนี้จะกล่าวถึงการรู้จำตัวอักษรภาษาไทยแบบออนไลน์ที่ใช้ข้อมูลจากแบบจำลองฮิดเดนมาร์คอฟ และลักษณะบ่งความต่างของตัวอักษรมาตัดสินใจด้วยฟัซซีโลจิก สามารถแสดงแผนภาพการทำงานได้ดังรูปที่ 3.1

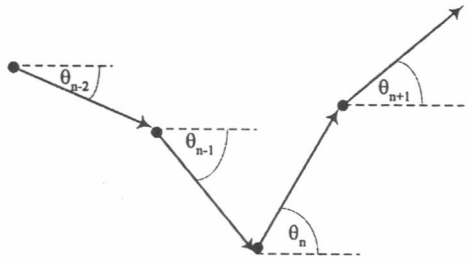
สำหรับการทำงานของแบบจำลองฮิดเดนมาร์คอฟ และลักษณะบ่งความต่างที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ ผลลัพธ์ของทั้งสองกระบวนการจะถูกวัดเพื่อสร้างตัวแปรฟัซซีซึ่งได้แสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 3.3 ตัวแปรฟัซซีที่วัดมาจากลักษณะบ่งความต่าง และแบบจำลองฮิดเดนมาร์คอฟจะนำมาตรวจสอบกับชุดกฎทางฟัซซี และตัดสินใจเลือกตัวอักษรที่เป็นคำตอบของระบบ การสร้างชุดกฎทางฟัซซี และการตัดสินใจจะกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.4 สำหรับกรณีวรรณยุกต์เอกที่มีเพียงเส้นตรงเส้นเดียวนั้นไม่สามารถฝึกฝนแบบจำลองฮิดเดนมาร์คอฟได้ทำให้ต้องคัดแยกออกไปก่อนที่จะเข้าระบบรู้จำ หากพบลายมือเขียนที่อยู่ระดับบนและมีเพียงเส้นตรงเพียงเส้นเดียวซึ่งอยู่ในแนวตั้ง (ไม่สามารถแบ่งเป็นเส้นย่อยได้) จะตัดสินใจตอบเป็นวรรณยุกต์เอก หากอยู่ในแนวนอนจะตัดสินใจเป็น ‘ ่ ’

3.1 การทำงานของแบบจำลองฮิดเดนมาร์คอฟในระบบรู้จำตัวอักษร

ในกระบวนการนี้ข้อมูลของตัวอักษรที่ได้มาจากกระบวนการก่อนหน้าจะนำมาแบ่งออกเป็นเส้นย่อยหลายๆ เส้น และสกัดค่าคุณลักษณะสำคัญของแต่ละเส้นย่อยเพื่อเป็นข้อมูลเข้าสำหรับแบบจำลอง



รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานระบบรู้จำตัวอักษรลายมือเขียนภาษาไทยแบบออนไลน์ด้วยแบบจำลองฮิดเดนมาร์คอฟและฟัซซีโลจิก



รูปที่ 3.2 มุมที่พบว่าเป็นมุมแหลม

ฮิดเดนมาร์คอฟ ข้อมูลออกจากแบบจำลองฮิดเดนมาร์คอฟเป็นความน่าจะเป็นภายหลัง $(P(\mathbf{O}|\lambda))$ ของทุกๆ ตัวอักษร เมื่อ $\mathbf{O}$ คือลำดับสังเกต (Observation Sequence) ที่ประกอบไปด้วยเวกเตอร์ของคุณลักษณะสำคัญจากแต่ละเส้นย่อย และ λ คือแบบจำลองของตัวอักษรนั้นๆ

3.1.1 การแบ่งส่วนของเส้น (Line Segmentation)

ข้อมูลตัวอักษรที่ได้รับมาจะถูกแบ่งออกเป็นเส้นย่อย จุดที่แบ่งเส้นรวมออกจากกันเป็นเส้นย่อยจะมีลักษณะตามข้อกำหนดข้อใดข้อหนึ่งต่อไปนี้

- เมื่อจุดที่พิจารณาเป็นมุมแหลม พิจารณาจุดที่ n ตามรูปที่ 3.2 จะถือว่าเป็นจุดที่มีมุมแหลมเมื่อ

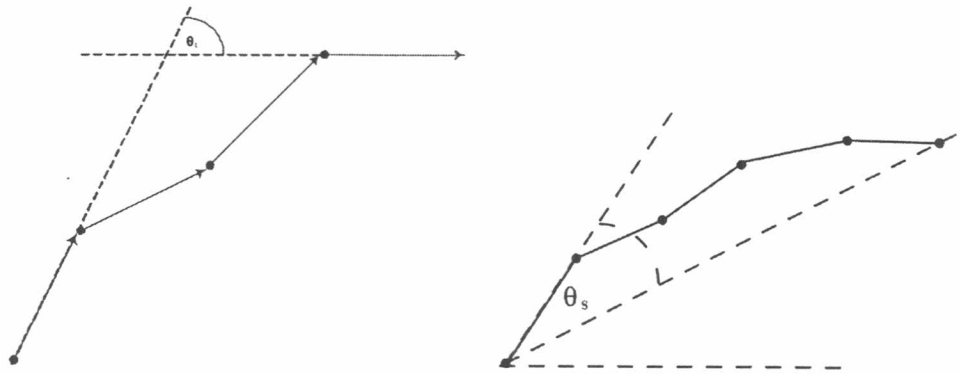
$$|\theta_{n-2} + \theta_{n-1} - \theta_n - \theta_{n+1}| > \theta_T \tag{3.1}$$

  เมื่อ θ_T เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง จากการทดลองใน [23] พบว่า $\theta_T = \pi/3$ เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวอักษรภาษาอังกฤษ และเมื่อนำมาใช้ในภาษาไทยก็พบว่าใช้ได้ดี

- เมื่อจุดที่พิจารณาเป็นจุดที่มีเส้นสัมผัสทำมุมกับเส้นสัมผัสของจุดเริ่มแรกของเส้นย่อย θ_t เกินค่ามุมที่กำหนดไว้ $\theta_{threshold,t}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.3ก

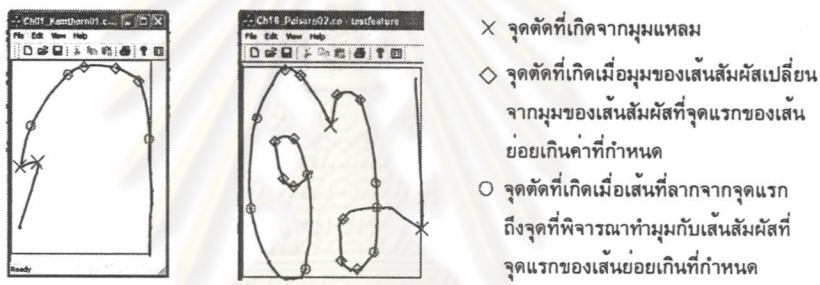
- เมื่อเส้นที่ลากจากจุดแรกของเส้นย่อยถึงจุดที่พิจารณาทำมุม θ_s กับเส้นสัมผัสที่จุดแรกของเส้นย่อย เกินค่ามุมที่กำหนดไว้ $\theta_{threshold,s}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.3ข

การแบ่งส่วนของเส้นด้วยกรรมวิธีดังที่กล่าวมาเมื่อทดลองใช้กับตัวอักษรในภาษาไทยพบว่าใช้งานได้ดี ดังแสดงให้เห็นได้ในตัวอย่างตัวอักษรในรูปที่ 3.4



(ก) (ข)

รูปที่ 3.3 (ก) มุมระหว่างเส้นสัมผัสของจุดที่พิจารณากับเส้นสัมผัสของจุดแรกของเส้นย่อย θ_t (ข) มุมระหว่างเส้นที่ลากจากจุดแรกของเส้นย่อยถึงจุดที่พิจารณากับเส้นสัมผัสที่จุดแรกของเส้นย่อย θ_s



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างลายมือเขียนที่ถูกแบ่งส่วนของเส้นตามข้อกำหนดต่างๆ

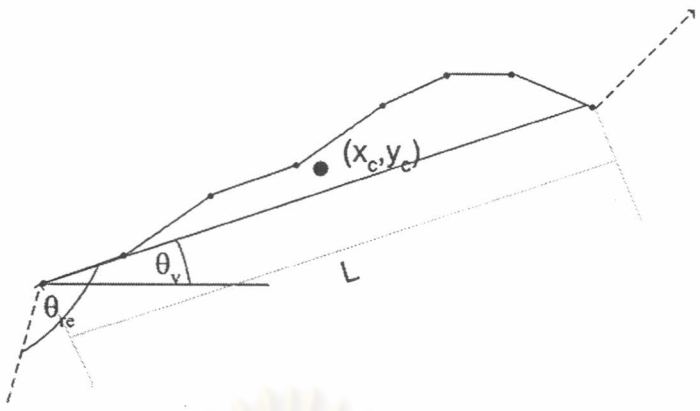
3.1.2 การสกัดคุณลักษณะสำคัญ (Feature Extraction)

หลังจากการแบ่งส่วนของเส้นจะนำแต่ละเส้นมาสกัดคุณลักษณะสำคัญเพื่อนำไปเป็นเวคเตอร์ของคุณลักษณะ และนำไปเป็นลำดับที่ไปพิจารณาในแบบจำลองฮิดเดนมาร์คอฟต่อไป ในวิทยานิพนธ์นี้ประมาณค่าเส้นย่อยเป็นเส้นตรงเส้นหนึ่งประกอบไปด้วยคุณลักษณะ 4 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และสามารถอธิบายคุณลักษณะของเส้นย่อย i ได้ดังนี้

1. <u>ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเส้นย่อย</u> สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$x_{C,i} = \left(\sum_{n=1}^{N} x_{i,n}\right)/N \tag{3.2}$$

$$y_{C,i} = \left(\sum_{n=1}^{N} y_{i,n}\right)/N \tag{3.3}$$



รูปที่ 3.5 คุณลักษณะของเส้นย่อย

เมื่อเส้นย่อยนี้ประกอบไปด้วย N จุด $(x_{i,1}, y_{i,1})$, $(x_{i,2}, y_{i,2})$, ..., $(x_{i,N}, y_{i,N})$.

2. มุมของเส้นที่ลากจากจุดต้นไปถึงจุดปลายของเส้นย่อยเมื่อเทียบกับเส้นแนวนอน $(\theta_{v,i})$

3. มุมระหว่างเส้นย่อยที่พิจารณากับเส้นย่อยก่อนหน้า $(\theta_{re,i})$

4. ความยาวของเส้นย่อย (L_i)

3.1.3 แบบจำลองฮิดเดนมาร์คอฟกับการรู้จำตัวอักษร

การนำแบบจำลองฮิดเดนมาร์คอฟมาใช้ในการรู้จำต้องมีการฝึกฝนแบบจำลองสำหรับตัวอักษรแต่ละตัวด้วยชุดฝึกฝนก่อน เมื่อนำมาใช้ในการรู้จำข้อมูลออกของแบบจำลองคือความน่าจะเป็นภายหลัง $P(\mathbf{O}|\lambda_i)$ ของทุกๆ แบบจำลอง ในระบบรู้จำตัวอักษรด้วยการใช้แบบจำลองฮิดเดนมาร์คอฟจะเลือกตัวอักษรที่มีแบบจำลองที่ให้ค่า $P(\mathbf{O}|\lambda)$ สูงสุด สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่ตัดสินใจด้วยกระบวนการดังที่กล่าวมาโดยทันที เนื่องจากคำตอบที่ได้จากแบบจำลองฮิดเดนมาร์คอฟมีการตัดสินใจผิดพลาดเป็นตัวอักษรที่มีลักษณะคล้ายกันค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงนำเอา $P(\mathbf{O}|\lambda_i)$ ไปตัดสินใจโดยใช้ลักษณะบ่งความต่างเข้ามาร่วมตัดสินใจด้วยซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.2 ลักษณะบ่งความต่าง

ลักษณะบ่งความต่างที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เจาะจงเฉพาะลักษณะบ่งความต่างที่แยกกลุ่มของตัวอักษรที่การรู้จำด้วยแบบจำลองฮิดเดนมาร์คอฟตัดสินใจผิดพลาดบ่อย โดยมีด้วยกัน 6 ลักษณะคือ

1. อัตราส่วนความกว้างต่อความสูง เป็นลักษณะบ่งความต่างที่แยกแยะตัวอักษรในคู่หรือกลุ่มที่มีลักษณะของตัวอักษรแตกต่างกันเพียงแค่ความกว้างของตัวอักษร เช่น (‘ข’ กับ ‘บ’) และ (‘ช’ กับ ‘ป’) เป็นต้น

2. หัว ในภาษาไทยลักษณะของช่วงเริ่มต้นตัวอักษรหรือเรียกว่าหัวนั้นแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือหัวแบบที่มีทิศทางการเขียนตามเข็มนาฬิกา หัวแบบที่มีทิศทางการเขียนทวนเข็มนาฬิกา และไม่มีหัว บางกลุ่มของตัวอักษรในภาษาไทยแตกต่างกันแค่ลักษณะของหัว เช่น (‘ก’ ‘ถ’ กับ ‘ภ’) หรือ (‘ค’ กับ‘ด’) เป็นต้น

3. ตำแหน่งจุดต้นและจุดปลาย เนื่องจากมีตัวอักษรบางคู่ที่แบบจำลองฮิดเดนมาร์คอฟมีอัตราการรู้จำที่ต่ำมีความแตกต่างกันที่ตำแหน่งจุดต้นกับจุดปลายของตัวอักษร เช่น (‘ฒ’ กับ‘ฆ’) (‘ถ’ กับ‘ฌ’) (‘น’ กับ‘ณ’) เป็นต้น

4. รอยหยัก เป็นลักษณะบ่งความต่างที่แยกตัวอักษรในคู่หรือกลุ่มที่มีลักษณะของตัวอักษรแตกต่างกันเพียงแค่รอยหยักของตัวอักษร เช่น (‘ด’ กับ ‘ต’) (‘ฏ’ กับ ‘ฏ’) (‘ม’ กับ ‘ฆ’) เป็นต้น

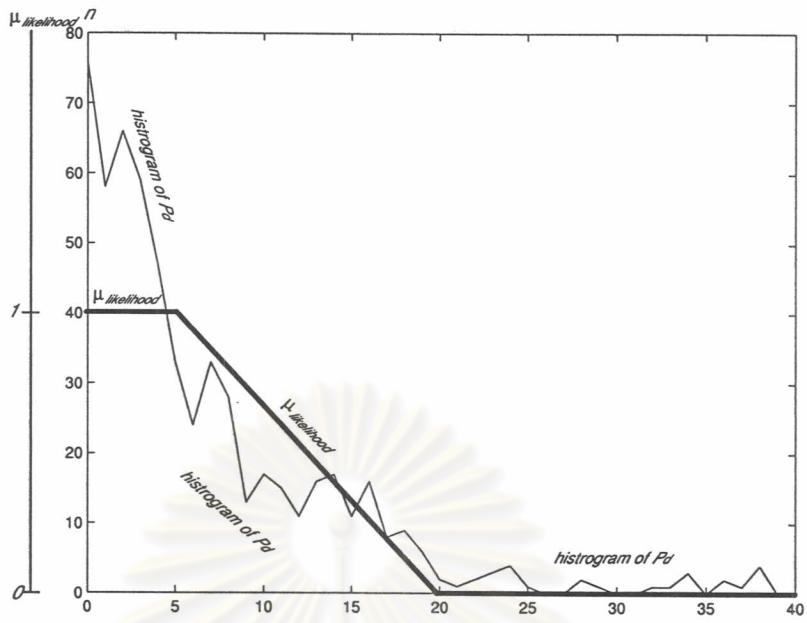
5. จุดตัด เป็นจุดที่มีเส้นสองเส้นลากมาทับกันบนตัวอักษร ใช้แยกกลุ่มตัวอักษรที่คล้ายคลึงกันแต่แตกต่างที่มีหรือไม่มีจุดตัดตรงตำแหน่งหนึ่งบนตัวอักษร เช่น (‘ฟ’ กับ ‘ฬ’) (‘บ’ กับ ‘ม’) เป็นต้น

6. จำนวนขีดด้านท้าย สระ ‘ะ’ ‘า’ และ ‘ำ’ ใช้จำนวนขีดด้านท้ายของตัวอักษรเป็นการบอกความแตกต่างของตัวอักษรแต่ละตัว

สำหรับการตรวจจับและวัดค่าลักษณะบ่งความต่างนั้นจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

3.3 การวัดทางฟัซซี

ข้อมูลออกจากแบบจำลองฮิดเดนมาร์คอฟ และลักษณะบ่งความต่างจะนำมาวัดเพื่อให้ได้ตัวแปรฟัซซีด้วยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสม หลังจากนั้นก็นำตัวแปรเหล่านี้มาทดสอบกับกฎทางฟัซซีในการตัดสินใจขั้นสุดท้าย โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกฟัซซี (Fuzzy Membership Function) ที่ใช้วัดปริมาณต่างๆ ได้จากการประมาณค่าของฟังก์ชันความหนาแน่นของปริมาณนั้นที่คำนวณมาจากชุดข้อมูลตัวอย่าง



รูปที่ 3.6 ภาพแท่งความถี่ P_d ของตัวอักษรที่พิจารณาจากข้อมูลฝึกฝนในกรณีที่ P_d ไม่ได้มีค่ามากที่สุด และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรฟัซซี $\mu_{likelihood,i}$

3.3.1 การวัดความน่าจะเป็นภายหลังของแบบจำลองฮิดเดนมาร์คอฟ

ตัวแปรฟัซซี $\mu_{likelihood,i}$ แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างความน่าจะเป็นภายหลังของแบบจำลองตัวที่มีค่ามากที่สุดกับความน่าจะเป็นภายหลังของแบบจำลองตัวอื่นๆ โดยสามารถแสดงได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\mu_{likelihood,i} = \begin{cases} 1 & 0 \leq P_{d,i} \leq 5 \\ 1 - \frac{P_{d,i}-5}{15} & 5 < P_{d,i} \leq 20 \\ 0 & P_{d,i} > 20 \end{cases} \tag{3.4}$$

เมื่อ $P_{d,i} = \max(\ln(P(\mathbf{O}|\mathbf{M}_j))) - \ln(P(\mathbf{O}|\mathbf{M}_i)); i, j = 1, 2, \ldots, N;\ i \neq j;$ และ N คือจำนวนคลาสของตัวอักษร

สมการที่ 3.4 นั้นได้มาจากการพิจารณาภาพแท่งความถี่ P_d ของตัวอักษรที่พิจารณาจากข้อมูลฝึกฝนในกรณีที่ P_d ไม่ได้มีค่ามากที่สุด และประมาณค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก สามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.6

ตัวแปรฟัซซี $\mu_{likelihood,i}$ นั้นมีความสำคัญในการให้ระดับความสำคัญกับคลาสของตัวอักษรที่

มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ซึ่งมีโอกาสรู้จำผิดพลาดได้บ่อย ทำให้แยกกลุ่มของตัวอักษรที่น่าจะเป็นคำตอบออกมา เพื่อนำไปประกอบกับข้อมูลจากลักษณะบ่งความต่างในการตัดสินใจขั้นสุดท้ายอีกครั้งหนึ่ง

3.3.2 การวัดลักษณะบ่งความต่าง

ในส่วนนี้จะนำเสนอถึงการคำนวณค่าตัวแปรฟัซซีจากลักษณะบ่งความต่างที่ปรากฏอยู่ในตัวอักษรภาษาไทย

3.3.2.1 อัตราส่วนความกว้างต่อความสูง

ตัวอักษรภาษาไทยสามารถจัดกลุ่มตัวอักษรตามความกว้างได้ 3 ประเภท คือ กว้าง (ความกว้างของกรอบตัวอักษรที่วัดตามแนวนอนมีมากกว่าความสูงของกรอบตัวอักษรที่วัดในแนวตั้ง) สี่เหลี่ยมจัตุรัส (ถ้าความกว้างพอๆ กับความสูง) และ แคบ (เมื่อความกว้างมีค่าน้อยกว่าความสูง) ดังนั้นตัวแปรทางฟัซซีของอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงจึงมี 3 ตัวคือ μ_{wide} μ_{square} และ μ_{square} สามารถคำนวณได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\mu_{wide} = \begin{cases} 1 & (w/h) \geq 1.4 \\ 2.5 \times (w/h) - 2.5 & 1.0 \leq (w/h) < 1.4 \\ 0 & (w/h) < 1.0 \end{cases} \quad (3.5ก)$$

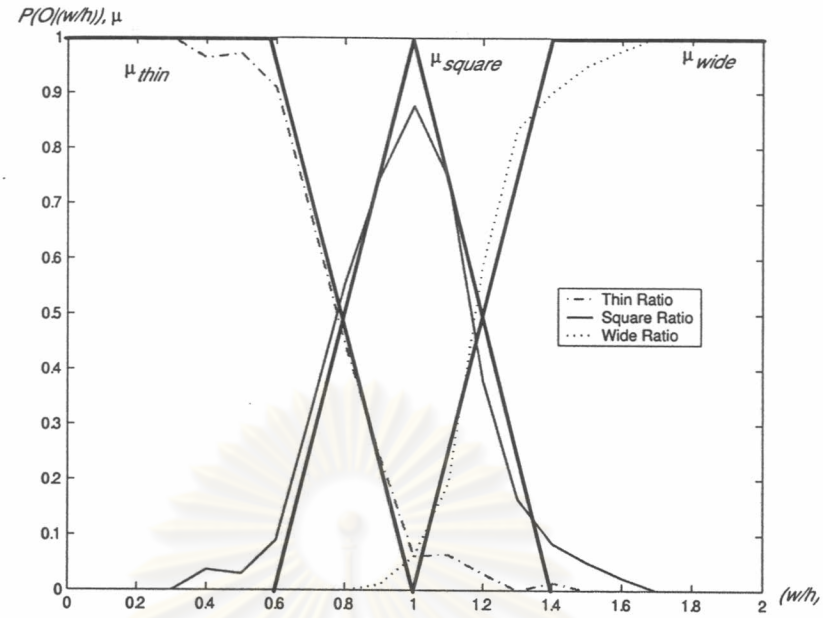
$$\mu_{square} = \begin{cases} 2.5 \times (w/h) - 1.5 & 0.6 \leq (w/h) \leq 1.0 \\ 3.5 - 2.5 \times (w/h) & 1.0 < (w/h) \leq 1.4 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.5ข)$$

$$\mu_{thin} = \begin{cases} 1 & (w/h) \leq 0.6 \\ 2.5 - 2.5 \times (w/h) & 0.6 < (w/h) \leq 1.0 \\ 0 & (w/h) > 1.0 \end{cases} \quad (3.5ค)$$

เมื่อ w คือความกว้างของกรอบตัวอักษร และ h คือความสูงของกรอบตัวอักษร

โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรฟัซซีแต่ละตัวนั้นได้มาจากการสร้างสี่เหลี่ยมคางหมู หรือสามเหลี่ยม ที่ใกล้เคียงกับความน่าจะเป็น $P(O|(w/h))$ ซึ่งได้มาจากตัวอักษรในชุดฝึกฝน 6 ตัวอักษรด้วยกัน โดยแบ่งออกได้เป็น 3 คลาส คือ ตัวอักษรแคบใช้ข้อมูลของ 'ข' และ 'ช' ตัวอักษรสี่เหลี่ยมจัตุรัสใช้ข้อมูลของ 'บ' และ 'ป' ตัวอักษรกว้างใช้ข้อมูลของ 'ณ' และ 'ฒ' ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 ความน่าจะเป็น $P(O|(w/h))$ ของชุดข้อมูลตัวอักษรแคบ จตุรัส และกว้าง และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรฟัซซีความกว้างตัวอักษร

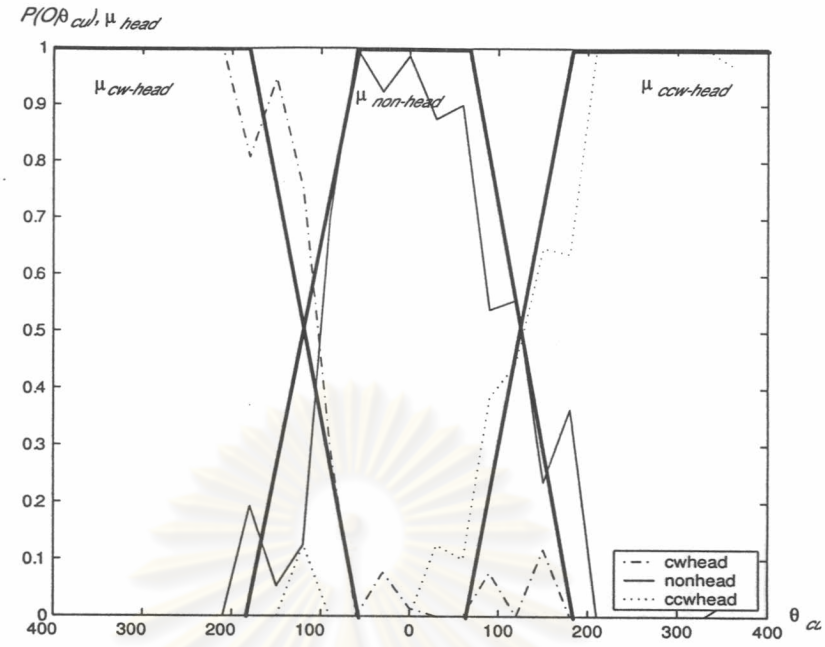
3.3.2.2 หัวตัวอักษร

การสร้างตัวแปรฟัซซีของหัวตัวอักษรจะเริ่มจากการแบ่งส่วนตัวอักษรออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนหัว และส่วนตัว โดยจะเลือกจุดที่ตัดระหว่างส่วนหัวกับตัวออกจากกันเมื่อเราพบจุดใดจุดหนึ่งดังต่อไปนี้ก่อน

- จุดสุดท้ายก่อนจะพบเส้นตรงที่ยาวกว่าค่าที่กำหนดไว้ τ_L
- จุดแรกที่ไกลกว่าจุดเริ่มต้นเกินระยะที่กำหนดไว้ τ_D

จากการทดสอบการแบ่งส่วนหัว เมื่อใช้ค่าที่กำหนดทั้งสองตัวเป็น $\frac{1}{2}$ ของความสูงตัวอักษรสามารถตัดได้ถูกต้องร้อยละ 88.44 เมื่อใช้ค่าที่กำหนดทั้งสองตัวเป็น $\frac{1}{3}$ ของความสูงตัวอักษรสามารถตัดได้ถูกต้องร้อยละ 94.00 และเมื่อใช้ค่าที่กำหนดทั้งสองตัวเป็น $\frac{1}{4}$ ของความสูงตัวอักษรสามารถตัดได้ถูกต้องร้อยละ 90.22 ดังนั้นจึงเลือกค่าคงที่ทั้งสองให้เท่ากับ $\frac{1}{3}$ ของความสูงตัวอักษรที่มีการตัดหัวที่ถูกต้องสูงที่สุด

เนื่องจากหัวในตัวอักษรภาษาไทยพบได้ 3 แบบดังที่ได้กล่าวไปแล้วจึงสร้างตัวแปรฟัซซี 3 ตัวที่อธิบายถึงลักษณะของหัวตัวอักษร $\mu_{cw-head}$ แสดงถึงความเป็นตัวอักษรที่มีทิศทางการเขียนหัว



รูปที่ 3.8 กราฟความน่าจะเป็นภายหลัง $P(O|\theta_{cu})$ ที่ได้จากชุดข้อมูลฝึกฝน และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทั้ง 3 แบบ

ตามเข็มนาฬิกา $\mu_{cw-head}$ แสดงถึงความเป็นตัวอักษรที่มีทิศทางการเขียนหัวทวนเข็มนาฬิกา และ $\mu_{cw-head}$ แสดงถึงความเป็นตัวอักษรที่ไม่มีหัว

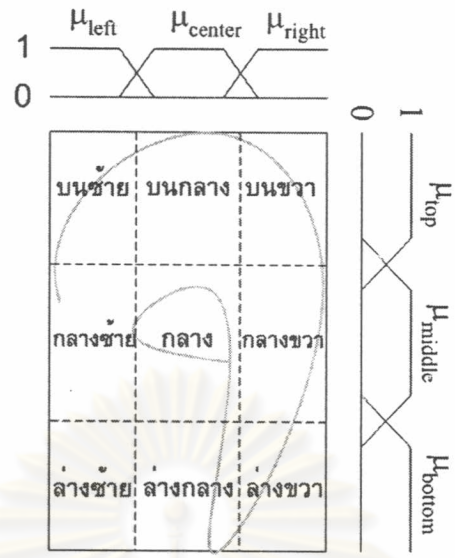
$$\mu_{cw-head} = \begin{cases} 0 & \theta_{cu} > -\frac{\pi}{3} \\ -\frac{3}{2\pi}(\theta_{cu} + \frac{\pi}{3}) & -\pi < \theta_{cu} \leq -\frac{\pi}{3} \\ 1 & \theta_{cu} \leq -\pi \end{cases} \quad (3.6ก)$$

$$\mu_{ccw-head} = \begin{cases} 0 & \theta_{cu} < \frac{\pi}{3} \\ \frac{3}{2\pi}(\theta_{cu} - \frac{\pi}{3}) & \frac{\pi}{3} \leq \theta_{cu} < \pi \\ 1 & \theta_{cu} \geq \pi \end{cases} \quad (3.6ข)$$

$$\mu_{non-head} = \max(1 - \mu_{cw-head}, 1 - \mu_{cw-head}) \quad (3.6ค)$$

โดยที่ θ_{cu} คือผลรวมของมุม θ_{re} ของทุกเส้นย่อยในส่วนหัวตัวอักษร

สำหรับสมการที่ 3.6 ได้มาจากการใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมูที่ใกล้เคียงกับกราฟความน่าจะเป็น $P(O|\theta_{cu})$ คำนวณจากชุดข้อมูลฝึกฝนของตัวอักษรที่ไม่มีหัว ('ก' 'ธ') หัววน



รูปที่ 3.9 พื้นที่ย่อยแสดงตำแหน่งของตัวอักษร

ตามเข็มนาฬิกา ('ถ' 'โ') และหัววนทวนเข็มนาฬิกา ('ภ' 'ร') ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.8

3.3.2.3 ตำแหน่งจุดต้นและจุดปลายของตัวอักษร

การบอกถึงตำแหน่งของจุดบนตัวอักษรเราจะแบ่งพื้นที่ของตัวอักษรออกเป็น 9 พื้นที่ย่อยโดยใช้ตามงานวิจัยของนายอิทธิพันธ์ [10] โดยแบ่งได้ดังรูปที่ 3.9 พื้นที่ทั้ง 9 ช่อง สามารถแสดงได้โดยตัวแปรตามแนวนอน 3 ตัว คือ ตัวแปรซ้าย (μ_{left}) ตัวแปรกลาง (μ_{center}) และตัวแปรขวา (μ_{right}) ร่วมด้วยตัวแปรตามแถวตั้ง 3 ตัวคือ ตัวแปรแถวบน (μ_{top}) ตัวแถวกลาง (μ_{middle}) และตัวแปรแถวล่าง (μ_{bottom}) ดังสมการต่อไปนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\mu_{left}(x,y) = \begin{cases} 1 & x < w/4 \\ \frac{5w/12 - x}{w/6} & w/4 \le x < 5w/12 \\ 0 & x \ge 5w/12, \end{cases} \quad (3.7ก)$$

$$\mu_{right}(x,y) = \begin{cases} 0 & x < 7w/12 \\ \frac{x - 7w/12}{w/6} & 7w/12 \le x < 3w/4 \\ 1 & x \ge 3w/4, \end{cases} \quad (3.7ข)$$

$$\mu_{center}(x,y) = \min(1 - \mu_{left}(x,y), 1 - \mu_{right}(x,y)) \quad (3.7ค)$$

$$\mu_{top}(x,y) = \begin{cases} 0 & y < 7h/12 \\ \frac{y - 7h/12}{h/6} & 7h/12 \le y < 3h/4 \\ 1 & y \ge 3h/4 \end{cases} \quad (3.8ก)$$

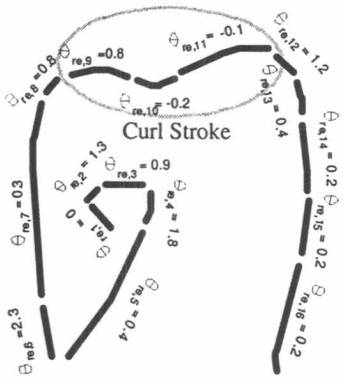
$$\mu_{bottom}(x,y) = \begin{cases} 1 & y < h/4 \\ \frac{5h/12 - y}{h/6} & h/4 \le y < 5h/12 \\ 0 & y \ge 5h/12 \end{cases} \quad (3.8ข)$$

$$\mu_{middle}(x,y) = \min(1 - \mu_{top}(x,y), 1 - \mu_{bottom}(x,y)) \quad (3.8ค)$$

เมื่อ w คือความกว้างของกรอบตัวอักษร และ h คือความสูงของกรอบตัวอักษร โดยจุดที่สนใจเพื่อนำไปตั้งชุดกฎทางฟัซซีคือจุดต้นและจุดปลายของตัวอักษร สมการที่ (3.7) และ (3.8) ยังถูกนำไปใช้กับการอ้างอิงตำแหน่งของลักษณะบ่งความต่างอื่นๆ ทั้งตำแหน่งของรอยหยัก และ ตำแหน่งของจุดตัดบนตัวอักษร โดยจะกล่าวต่อไปในหัวข้อของลักษณะบ่งความต่างนั้นๆ

3.3.2.4 รอยหยัก

สำหรับการตรวจจับรอยหยักจากข้อมูลตัวอักษรแบบออนไลน์ จะพิจารณาถึงส่วนของเส้นที่มีลักษณะคดเคี้ยวหรือเรียกว่าเส้นคดก่อน แล้วนำไปพิจารณาถึงความเป็นรอยหยักด้วยทิศทางและตำแหน่งของเส้นคดนั้นในภายหลัง พิจารณาถึงลำดับของเส้นย่อยที่มีมุมระหว่างเส้นย่อย ($\theta_{re,i}$) มีเครื่องหมาย



รูปที่ 3.10 ลายมือเขียนของตัวอักษร 'ต'

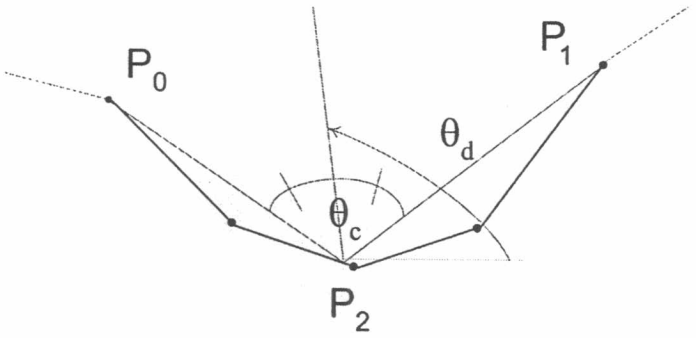
ตรงกันข้ามกับเส้นย่อยที่อยู่ก่อนและหลังลำดับนั้น 1 ลำดับ ลำดับของเส้นย่อยที่มีคุณสมบัติดังที่กล่าวไปนั้นกับเส้นย่อยก่อนหน้านั้น 1 ลำดับถือว่าเป็นลำดับของเส้นคดในตัวอักษร

ตัวอย่าง ตามรูปที่ 3.10 ลายมือเขียนของตัวอักษร 'ต' โดยถูกแบ่งออกได้เป็น 16 เส้นย่อยด้วยกระบวนการแบ่งเส้นตามหัวข้อ 3.1.1 พบว่าเส้นย่อยที่ 10 (S_{10}) และเส้นย่อยที่ 11 (S_{11}) เป็นเส้นย่อยที่มีมุมระหว่างเส้นย่อยเป็นลบ ขณะที่เส้นย่อยที่ 9 และเส้นย่อยที่ 12 มีมุมระหว่างเส้นย่อยเป็นบวก ดังนั้นเส้นคดนี้จึงประกอบไปด้วยเส้นย่อยที่ 10 และเส้นย่อยที่ 11 และเส้นย่อยก่อนหน้าอีก 1 เส้นคือเส้นย่อยที่ 9 ลำดับของเส้นคดนี้จึงเป็น (S_9, S_{10}, S_{11})

รอยหยักที่สามารถพบได้บนตัวอักษรภาษาไทยนั้นมี 3 รูปแบบคือ

1. รอยหยักด้านบนตัวอักษร พบได้ในตัวอักษร 'ข' 'ค' 'ฒ' 'ฆ' 'ช' 'ฑ' 'ฒ' และ 'ต'
2. รอยหยักด้านล่างตัวอักษร พบได้ในตัวอักษร 'ฏ' 'ฐ' 'ผ' 'ฝ' 'พ' 'ฟ' และ 'ฬ'
3. รอยหยักด้านซ้ายใน ตัวอักษร 'ย'

การอธิบายถึงรอยหยักแต่ละแบบจะใช้คุณลักษณะของเส้นคด 5 แบบ ดังรูปที่ 3.11 ประกอบไปด้วย P_0 คือจุดต้นของเส้นคด P_1 คือจุดปลายของเส้นคด P_3 คือจุดบนเส้นคดที่ที่ทำให้มุม $\widehat{P_0P_2P_1}$ (หรือเรียกว่ามุมรอยหยัก θ_c) มีค่าน้อยที่สุด ทิศทางของรอยหยักจะอธิบายได้โดยมุม θ_d ซึ่งเป็นมุมระหว่างเส้นที่แบ่งครึ่งมุม θ_c เทียบกับเส้นแนวนอน จากคุณลักษณะของรอยหยักทั้ง 5 สามารถนำมาสร้างตัวแปรฟัซซีที่แสดงถึงทิศทาง (μ_d) ตำแหน่ง (μ_p) และความแหลม (μ_s) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรแสดงความแหลมได้มาจากการประมาณกราฟความน่าจะเป็น $P(O|\theta_c)$ ของเส้นคดที่เป็นรอยหยักบนตัวอักษร กับเส้นคดอื่นๆที่พบบนตัวอักษรในชุดฝึกฝน ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 คุณลักษณะของเส้นคด

โดยตัวแปรที่แสดงทิศทางของรอยหยักจะมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของทิศทั้ง 4 ทิศ โดยแบ่งมุมตั้งแต่ 0 ถึง 2π ออกเป็นสี่ส่วนเท่าๆ กันดังแสดงในรูปที่ 3.13

ตัวแปรฟัซซีทั้ง 3 ตัวนั้นจะเป็นส่วนประกอบของตัวแปรฟัซซีที่แสดงถึงความเป็นรอยหยักแต่ละแบบดังนี้

1. ตัวแปรฟัซซีของรอยหยักด้านบน (μ_{tnotch}):

$$\mu_s = \begin{cases} 1 & 0 < \theta_c < 2\pi/3 \\ \frac{6}{\pi}(5\pi/6 - \theta_c) & 2\pi/3 \le \theta_c \le 5\pi/6 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.9ก)$$

$$\mu_d = \begin{cases} 1 & \pi/3 < \theta_d < 2\pi/3 \\ \frac{6}{\pi}(\theta_d - \pi/6) & \pi/6 \le \theta_d \le \pi/3 \\ \frac{6}{\pi}(5\pi/6 - \theta_d) & 2\pi/3 \le \theta_d \le 5\pi/6 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.9ข)$$

$$\mu_p = \min(\mu_{top}(P_0), \mu_{top}(P_1), \mu_{top}(P_2)) \quad (3.9ค)$$

จะได้

$$\mu_{tnotch} = \min(\mu_s, \mu_d, \mu_p) \quad (3.9ง)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ตัวแปรฟัซซีของรอยหยักด้านล่าง (μ_{bnotch}): μ_s คำนวณได้เช่นเดียวกับ (3.9ก)

$$\mu_d = \begin{cases} 1 & 4\pi/3 < \theta_d < 5\pi/3 \\ \frac{6}{\pi}(11\pi/6 - \theta_c) & 5\pi/3 \leq \theta_d \leq 11\pi/6 \\ \frac{6}{\pi}(\theta_d - 7\pi/6) & 7\pi/6 \leq \theta_d \leq 4\pi/3 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3.10ก}$$

$$\mu_p = \min(\mu_{bottom}(P_0), \mu_{bottom}(P_1)) \tag{3.10ข}$$

จะได้

$$\mu_{bnotch} = \min(\mu_s, \mu_d, \mu_p) \tag{3.10ค}$$

3. ตัวแปรฟัซซีของรอยหยักด้านซ้าย (μ_{lnotch}): μ_s คำนวณได้เช่นเดียวกับ (3.9ก)

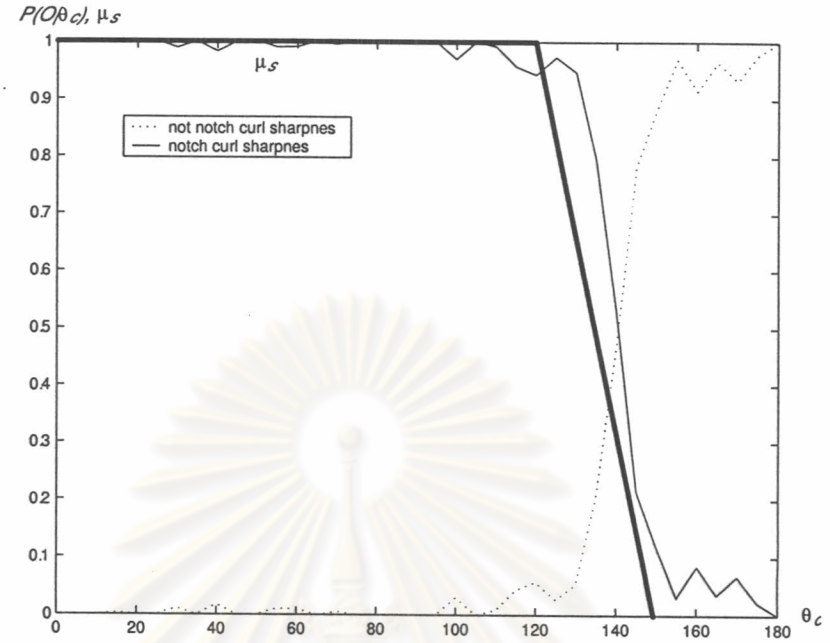
$$\mu_d = \begin{cases} 1 & 5\pi/6 < \theta_d < 7\pi/6 \\ \frac{6}{\pi}(\theta_c - 2\pi/3) & 2\pi/3 \leq \theta_d \leq 5\pi/6 \\ \frac{6}{\pi}(4\pi/3 - \theta_d) & 7\pi/6 \leq \theta_d \leq 4\pi/3 \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \tag{3.11ก}$$

$$\mu_p = \min(\mu_{left}(P_0), \mu_{left}(P_1)) \tag{3.11ข}$$

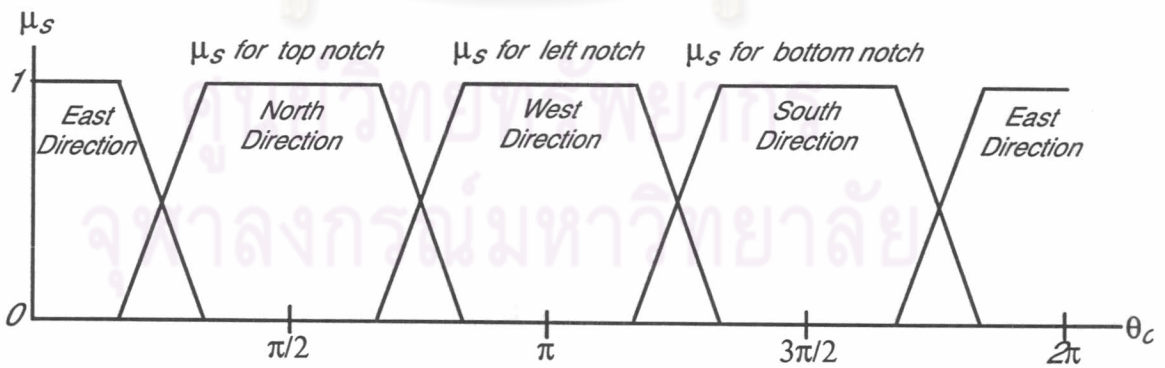
จะได้

$$\mu_{lnotch} = \min(\mu_s, \mu_d, \mu_p) \tag{3.11ค}$$

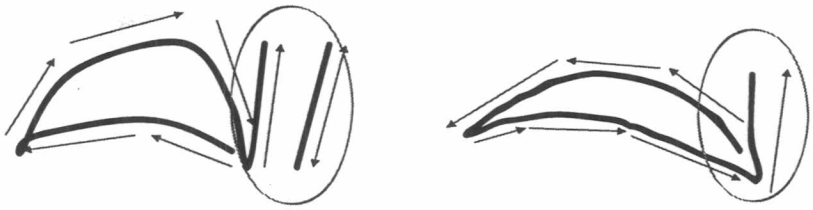
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.12 กราฟความน่าจะเป็น $P(O|\theta_c)$ ของเส้นคดที่เป็นรอยหยักบนตัวอักษร กับเส้นคดอื่นๆที่พบบนตัวอักษรในชุดฝึกฝน และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความแหลมรอยหยักในตัวอักษรที่มีรอยหยัก



รูปที่ 3.13 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรแสดงทิศทาง



รูปที่ 3.14 รูปแสดงลักษณะการเขียนสระระดับบนที่มีขีดด้านท้าย

3.3.2.5 ตำแหน่งจุดตัด

จุดตัดในตัวอักษรเกิดจากเส้นย่อย 2 เส้นตัดกันที่จุดหนึ่ง (x_c, y_c) ตำแหน่งของจุดตัดจะนำไปสร้างตัวแปรฟัซซีด้วยการวัดฟัซซีของตำแหน่งบนตัวอักษรตามสมการที่ (3.7) และ (3.8) โดยจะได้ตัวแปรที่แสดงถึงการมีจุดตัดบนแต่ละตำแหน่งของตัวอักษรดังนี้

$$\mu_{cross@left} = \mu_{left}(x_c, y_c) \quad (3.12ก)$$

$$\mu_{cross@center} = \mu_{center}(x_c, y_c) \quad (3.12ข)$$

$$\mu_{cross@right} = \mu_{right}(x_c, y_c) \quad (3.12ค)$$

$$\mu_{cross@top} = \mu_{top}(x_c, y_c) \quad (3.12ง)$$

$$\mu_{cross@middle} = \mu_{middle}(x_c, y_c) \quad (3.12จ)$$

$$\mu_{cross@bottom} = \mu_{bottom}(x_c, y_c) \quad (3.12ฉ)$$

3.3.2.6 จำนวนขีดด้านท้าย

คุณลักษณะนี้จะใช้กับตัวอักษรระดับบนเท่านั้น โดยจะนับจำนวนเส้นตรงแนวตั้งที่อยู่ด้านปลายของตัวอักษร กำหนดให้ μ_{vl} เป็นตัวแปรฟัซซีที่แสดงถึงความเป็นเส้นตรงแนวตั้ง เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการเขียนตามรูปที่ 3.14 พบว่าขีดด้านท้ายตัวอักษรเมื่อยังไม่มีการยกปากกามาก่อนจะเป็นเส้นที่มีทิศทางการเขียนขึ้นด้านบน หรือมีมุมของเส้นย่อยนั้น $(\theta_{v,i})$ ใกล้กับ 90 องศา ในกรณีที่พบการยกปากกาไปแล้วจะมีทิศทางการเขียนขีดขึ้นหรือลงก็ได้ ดังนั้น $\mu_{vl,i}$ ของเส้นย่อยที่ i สามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

1. ในกรณีที่ไม่พบการยกปากกามาก่อน

$$\mu_{vl,i} = \begin{cases} 1 & \pi/3 < \theta_{v,i} < 2\pi/3 \\ \frac{12}{\pi}(\theta_{v,i} - \pi/4) & \pi/4 \leq \theta_{v,i} \leq \pi/3 \\ \frac{12}{\pi}(3\pi/4 - \theta_{v,i}) & 2\pi/3 \leq \theta_{v,i} \leq 3\pi/4 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3.13}$$

2. ในกรณีที่พบการยกปากกาแล้วอย่างน้อย 1 ครั้ง

$$\mu_{vl,i} = \begin{cases} 1 & \pi/3 < |\theta_{v,i}| < 2\pi/3 \\ \frac{12}{\pi}(|\theta_{v,i}| - \pi/4) & \pi/4 \leq |\theta_{v,i}| \leq \pi/3 \\ \frac{12}{\pi}(3\pi/4 - |\theta_{v,i}|) & 2\pi/3 \leq |\theta_{v,i}| \leq 3\pi/4 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3.14}$$

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกด้านบนได้มาจากการพิจารณาถึงมุมเส้นย่อยที่สามารถเกิดขึ้นได้ในเส้นขีดท้ายจากตัวอักษรที่ใช้ฝึกฝน สามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.15

กำหนดให้ $\mu_{el,i}$ คือตัวแปรฟัซซีที่แสดงถึงความเป็นเส้นตรงแนวตั้ง อยู่ด้านท้ายของตัวอักษร และมีปลายข้างหนึ่งของเส้นย่อยอยู่ด้านบนของตัวอักษร สามารถหาได้ดังนี้

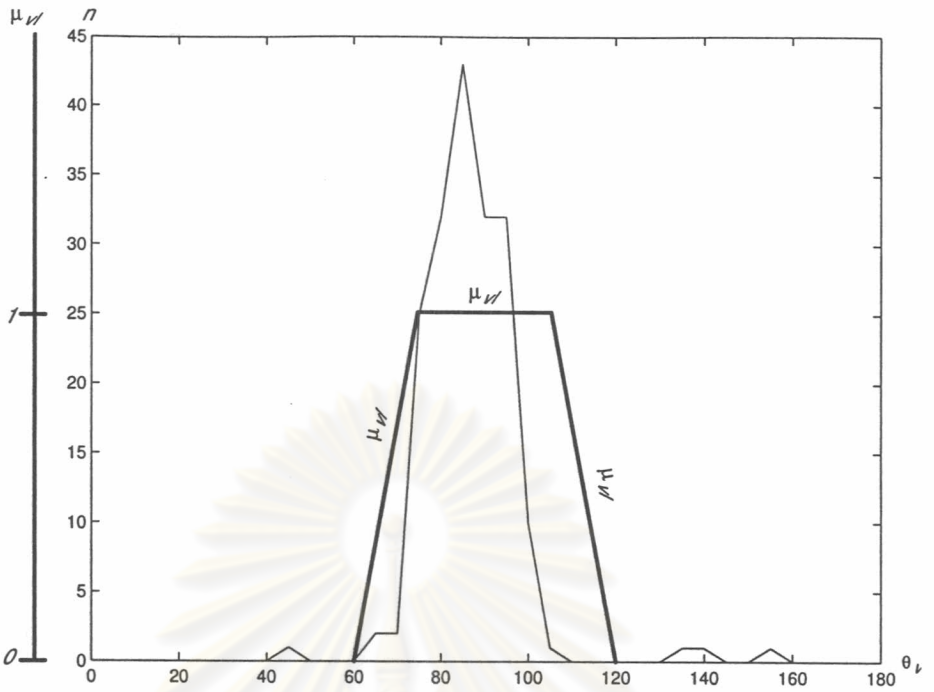
$$\mu_{el,i} = \mu_{vl,i} \cap \mu_{right}(x_{C,i}, y_{C,i}) \cap (\mu_{top}(x_{S,i}, y_{S,i}) \cup \mu_{top}(x_{E,i}, y_{E,i})) \tag{3.15}$$

เมื่อ $(x_{C,i}, y_{C,i})$ คือตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเส้นย่อยที่ i $(x_{S,i}, y_{S,i})$ คือตำแหน่งจุดเริ่มต้นของเส้นย่อยที่ i $(x_{E,i}, y_{E,i})$ คือตำแหน่งจุดปลายของเส้นย่อยที่ i หลังจากที่คำนวณ $\mu_{el,i}$ ครบทุกเส้นย่อยแล้วจะหาค่า $\mu_{el,i}$ ที่มากที่สุด และมากเป็นอันดับ 2 แทนค่าด้วตัวแปร $\mu_{el,max1}$ และ $\mu_{el,max2}$ ตามลำดับ จากนั้นตัวแปรฟัซซีที่แสดงถึงการมีขีดด้านท้าย 1 ขีด μ_{one-el} ตัวแปรฟัซซีที่แสดงถึงการมีขีดด้านท้าย 2 ขีด μ_{two-el} และ ตัวแปรฟัซซีที่แสดงถึงการไม่มีขีดด้านท้าย μ_{non-el} สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\mu_{one-el} = \mu_{el,max1} \cap \bar{\mu}_{el,max2} \tag{3.16ก}$$

$$\mu_{two-el} = \mu_{el,max1} \cap \mu_{el,max2} \tag{3.16ข}$$

$$\mu_{non-el} = \bar{\mu}_{el,max1} \tag{3.16ค}$$



รูปที่ 3.15 กราฟความถี่ของมุมเส้นย่อยของขีดท้ายตัวอักษร และฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

3.4 ชุดกฎทางฟัซซี

ในวิทยานิพนธ์นี้ ชุดกฎทางฟัซซีมีจุดประสงค์เพื่อจะแยกแยะตัวอักษรที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งการรู้จำด้วยแบบจำลองฮิดเดนมาร์คอฟให้อัตราการรู้จำไม่เป็นที่พอใจ โดยทั่วไปผลตอบที่ผิดพลาดจะได้คำตอบเป็นตัวอักษรที่ลักษณะคล้ายคลึงกับตัวอักษรที่ถูกต้อง และคลาสตัวอักษรที่ถูกต้องจะมีค่าความน่าจะเป็นภายหลังใกล้กับความน่าจะเป็นภายหลังที่สูงสุด ($\mu_{likihood} \approx 1$) การตั้งกฎทางฟัซซีสำหรับตัวอักษรแต่ละตัว จะพิจารณาจากลักษณะบ่งความต่าง ซึ่งสามารถจำแนกตัวอักษรที่คล้ายคลึงกันออกจากกันได้

ตัวอย่าง การตั้งชุดกฎทางฟัซซีสำหรับกลุ่มตัวอักษรที่คล้ายคลึงกัน 'ค' 'ด' และ 'ต'

- การตั้งกฎสำหรับ 'ค' ตัวอักษร 'ค' คล้ายกับตัวอักษร 'ด' มีลักษณะต่างกันตรงทิศทางของการเขียนหัวตรงกันข้าม โดย 'ค' มีลักษณะการเขียนหัวแบบทวนเข็มนาฬิกา จึงสามารถตั้งกฎทางฟัซซีสำหรับตัวอักษร 'ค' ดังนี้

$$\begin{aligned} R_{\text{ค}} &= \mu_{likelihood,\text{'ค'}} \cap \mu_{ccw-head} \\ &= \min(\mu_{likelihood,\text{'ค'}}, \mu_{ccw-head}) \end{aligned} \tag{3.17}$$

- การตั้งกฎสำหรับ 'ด' ตัวอักษร 'ด' คล้ายกับตัวอักษร 'ค' แต่ต่างกันตรงที่ทิศทางการเขียนหัว คล้ายกับ 'ต' เพียงแต่ 'ด' นั้นไม่มีรอยหยักทางด้านบนของตัวอักษรดังนั้นสามารถตั้งกฎได้ดังนี้

$$
\begin{aligned}
R_{\text{ต}} &= \mu_{likelihood,\text{ต}} \cap \mu_{cw-head} \cap \bar{\mu}_{tnotch} \\
&= \min(\mu_{likelihood,\text{ต}}, \mu_{cw-head}, 1 - \mu_{tnotch})
\end{aligned}
\tag{3.18}
$$

- การตั้งกฎสำหรับ 'ต' คล้ายคลึงกับตัวอักษร 'ด' และ 'ฒ' แตกต่างกันตรงที่ 'ต' นั้นมีรอยหยักที่ด้านบน และตำแหน่งของจุดปลายอยู่ด้านล่าง กฎทางฟัซซีสำหรับ 'ต' จึงเป็นดังนี้

$$
\begin{aligned}
R_{\text{ต}} &= \mu_{likelihood,\text{ต}} \cap \mu_{tnotch} \cap \mu_{bottom}(x_e, y_e) \\
&= \min(\mu_{likelihood,\text{ต}}, \mu_{tnotch}, \mu_{bottom}(x_e, y_e))
\end{aligned}
\tag{3.19}
$$

เมื่อ (x_e, y_e) เป็นพิกัดจุดปลายของตัวอักษร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย