ระบบเลือกการตั้งค่าเกมอัตโนมัติ

ด้วย Fuzzy Logic (Mamdani)

นายภูผา แก้วประดิษฐ์
รหัสประจำตัว 660610842

รายงานประกอบการเรียนการสอน วิชา 261456 Introduction to Computational Intelligence for Computer Engineering

บทคัดย่อ

รายงานนี้นำเสนอระบบช่วยเลือกการตั้งค่าเกมอัตโนมัติ โดยใช้ ตรรกะฟัซซีแบบ Mamdani จากคะแนนสมรรถนะ CPU, GPU, RAM (0–100) เพื่อแนะนำเอาต์พุตหรือการตั้งค่า 3 รายการ:

Graphics Quality (0–100), Resolution Scale (50–100%), และ Texture Quality (0–100) ระบบนิยามชุดสังกัด (membership functions) ด้วยรูปสามเหลี่ยม/สี่เหลี่ยมคางหมู สร้างกฎ 10 ข้อ ทำอนุมานแบบ AND=min, OR=max, implication=min, aggregation=max, defuzzification=centroid และเพิ่มการแมปตัวเลขไปเป็นการตั้งค่า Low/Medium/High/Ultra พร้อม ฮิสเทอรีซิส เพื่อลดการกระพริบของการตั้งค่าในการใช้งานจริง ผลการจำลองแสดงแนวโน้มสมเหตุสมผล: GPU มีอิทธิพลสูงต่อ Resolution, RAM ต่ำเป็นคอขวดสำหรับ Texture, และ CPU+GPU ร่วมกันดัน Quality

บทที่ 1

วัตถุประสงค์ของการทดลอง

1. พัฒนาแบบจำลองฟัซซี ที่รับอินพุต CPU/GPU/RAM (0–100) แล้วแนะนำ Graphics Quality, Resolution Scale, Texture Quality
2. ออกแบบนิยามเชิงภาษา **(linguistic variables)** และสมาชิกภาพ (MFs) ของอินพุต/เอาต์พุตให้เหมาะสม (LOW/MID/HIGH/ULTRA ด้วย **trimf/trapmf**) พร้อมเหตุผลรองรับ
3. สร้างฐานกฎ **(Rule Base)** ที่สะท้อนตรรกะการตั้งค่าเกมจริง เช่น GPU หนักกับ Resolution, RAM หนักกับ Texture, CPU+GPU ส่งผลร่วมต่อ Quality รวมถึงทดลอง “น้ำหนัก” ของกฎ
4. ยืนยันกระบวนการอนุมานแบบ Mamdani ครบขั้น (fuzzification ⟶ AND/OR ⟶ implication=min ⟶ aggregation=max ⟶ centroid) ว่าทำงานถูกต้อง
5. จำลองพฤติกรรมระบบในหลายสภาวะ (low/low/low), (high/high/high), เคสผสม ตรวจว่าผลลัพธ์สอดคล้องกับความคาดหวังของกฎ
6. วิเคราะห์ความไว **(Sensitivity)** ของผลลัพธ์ต่ออินพุตแต่ละตัว โดยตรึงอีกสองตัวไว้ เพื่อดูทิศทาง/ความชันที่สมเหตุสมผล
7. สำรวจปฏิสัมพันธ์ระหว่างอินพุต (Interactions) ด้วย Heatmap/Surface (เช่น Quality บนระนาบ CPU×GPU) เพื่อดูแนวโน้ม, ความเป็นโมโนโทน, และจุดคอขวด
8. ประเมินความเสถียรของการตั้งค่าหรือ เอาต์พุต (Labels Stability)
9. ปรับจูนพารามิเตอร์ (ตำแหน่ง MF และน้ำหนักกฎ) ให้ผลลัพธ์ลื่นไหล ไม่กระโดด และสอดคล้องกับสมมติฐานโดเมน

บทที่ 2

วิธีการและแบบจำลอง

2.1 ขอบเขตปัญหา

อินพุต: คะแนนสมรรถนะ **CPU, GPU, RAM** $\in$ [0,100]

เอาต์พุต:

- **Graphics Quality** $\in$ [0,100]
- **Resolution Scale** $\in$ [50,100] (%)
- **Texture Quality** $\in$ [0,100]

2.2 กรอบอนุมานแบบ Mamdani

(0) เตรียมโดเมน ⟶ (1) Fuzzification ⟶ (2) ประเมินเงื่อนไข (AND/OR)

⟶ (3) Implication (clip) ⟶ (4) Aggregation (รวมหลายกฎ) ⟶ (5) Defuzzification

2.3 การกำหนดชุดสังกัด (Membership) แบบอธิบายเป็นคำพูด

ในงานนี้เราใช้คำภาษาคนอย่าง LOW / MID / HIGH / ULTRA เพื่ออธิบายระดับของค่าต่าง ๆ โดยกำหนดเป็น “รูปฟังก์ชันสังกัด” 2 แบบ:

- **trapmf (Trapezoidal) =** รูป “สี่เหลี่ยมคางหมู” เป็น 4 จุดบนแกนคะแนน: เริ่มนับว่าใช่, ใช่เต็มที่, ยังใช่อยู่เต็มที่, ค่อย ๆเลิกนับว่าใช่
- **trimf (Triangular) =** รูป “สามเหลี่ยม” มี 3 จุด: เริ่มนับว่าใช่, ใช่ที่สุด (ยอดสามเหลี่ยม), เลิกนับว่าใช่

เหตุผลการเลือกใช้: เราให้ LOW/HIGH ใช้ **trapmf** เพื่อเปิดกว้างขึ้นในโซนที่ “ใช่แน่นอน” (มีช่วงราบ) และให้ MID ใช้ trimf เพราะต้องการช่วงกลางที่ พอดี แคบกว่าและชัดเจน

ต่อไปนี้คือ **ความหมายเชิงช่วง** (ตัวเลขในวงเล็บคือจุดคร่าว ๆ **ที่เริ่มนับว่าใช่/ใช่เต็มที่/เลิกนับว่าใช่**):

Input : CPU, GPU, RAM (ช่วงคะแนน 0–100)

LOW = trapmf(0, 0, 25, 45)

(คะแนนแถว ๆ 0–25 ถือว่า **ต่ำแน่** ตั้งแต่ 25–45 **ยังพอต่ำ** แต่ลดน้ำหนักลงเรื่อย ๆ เกิน 45 ไปถือว่า **ไม่ต่ำ**)

MID = trimf(35, 55, 75)

(คะแนนใกล้ 55 = **กลางพอดี** ช่วง 35–55 ค่อยๆ **ยังไม่ใช่กลาง** ไป **กลาง** ช่วง 55–75 ค่อยๆ **กลาง** กลับเป็น **ไม่กลาง**)

HIGH = trapmf(65, 80, 100, 100)

(ตั้งแต่ 80–100 = **สูงชัดเจน** ช่วง 65–80 ค่อยๆ นับว่า **สูงขึ้นเรื่อย** ต่ำกว่า 65 = **ไม่สูง**)

Output ค่าที่ 1 : Graphics Quality (0–100)

LOW = trapmf(0, 0, 25, 40) (0–25 **ต่ำชัดเจน** 25–40 **ยังต่ำแต่ลดลง** > 40 **ไม่ต่ำ)**

MED = trimf(35, 55, 70) (55 **กลางพอดี** 35–55 **ไต่ขึ้นเป็นกลาง** 55–70 **ไต่ลงจากกลาง**)

HIGH = trimf(65, 80, 90) (80 **สูงพอดี** 65–80 **ไต่ขึ้นเป็นสูง** 80–90 **ไต่ลงจากสูง**)

ULTRA = trapmf(85, 92, 100, 100) (92–100 **โคตรสูงชัดเจน** 85–92 **กำลังจะเป็น ultra**)

Output ค่าที่ 2 : Resolution Scale (50–100%)

LOW = trapmf(50, 50, 60, 75) (50–60 **ต่ำชัดเจน** 60–75 ค่อยๆ **เลิกต่ำ** >75 **ไม่ต่ำ**)

MED = trimf(70, 80, 90) (80 **กลางพอดี** 70–80 **ไต่ขึ้น** 80–90 **ไต่ลง**)

HIGH = trapmf(88, 94, 100, 100) (94–100 **สูงชัดเจน** 88–94 **กำลังจะสูง**)

Output ค่าที่ 3 : Texture Quality (0–100)

LOW = trapmf(0, 0, 30, 50) (0–30 **ต่ำชัดเจน** 30–50 ค่อย ๆ **เลิกต่ำ**)

MED = trimf(45, 60, 75) (60 **กลางพอดี** 45–60 **ไต่ขึ้น** 60–75 **ไต่ลง**)

HIGH = trapmf(70, 85, 100, 100) (85–100 **สูงชัดเจน** 70–85 **กำลังจะสูง**)

ถ้า GPU = 72: อยู่ในช่วง 65–80 ของ “HIGH” (กำลังไต่ขึ้นไปสูง) และยังอยู่ในช่วงปลายของ “MID” (กำลังไต่ลงจากกลาง) แปลว่า “GPU ตอนนี้เริ่มเป็น HIGH มากขึ้น แต่ยังมีความเป็น MID อยู่บ้าง” ระบบจะเอาระดับความเป็นสมาชิกทั้งสองนี้ไปใช้ในกฎต่อไป

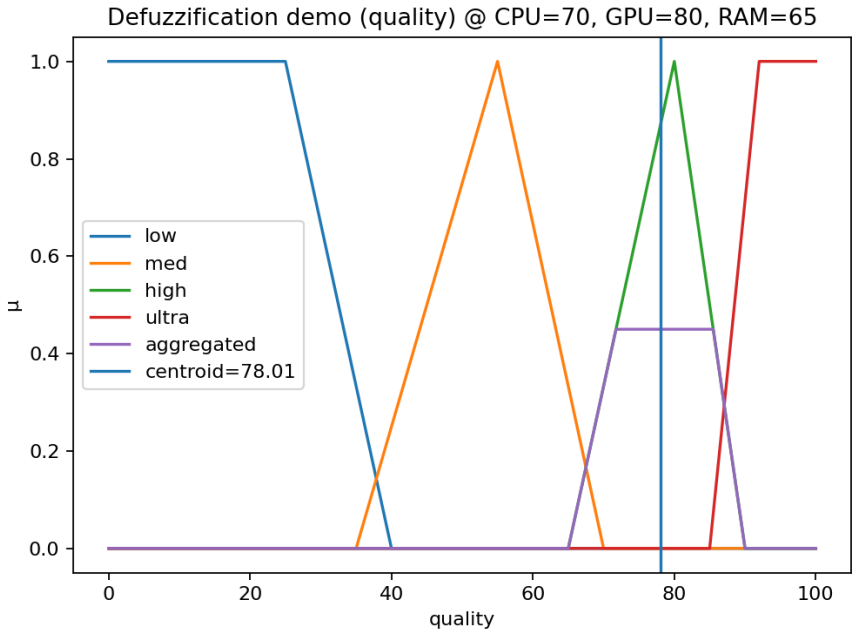
2.4 ฐานกฎ (Rule Base)

ใช้รูปแบบ AND=min, OR=max; บางผลมีน้ำหนัก เพื่อปรับความแรงของกฎ

Rule	เงื่อนไข IF	ผลลัพธ์ (THEN)
R1	CPU=HIGH ∧ GPU=HIGH ∧ RAM=HIGH	Quality=ULTRA, Res=HIGH, Texture=HIGH
R2	GPU=HIGH ∧ CPU=MID ∧ RAM=MID	Quality=HIGH, Res=HIGH, Texture=MED
R3	CPU=MID ∧ GPU=MID ∧ RAM=MID	Quality=MED, Res=MED, Texture=MED
R4	GPU=LOW ∨ CPU=LOW	Quality=LOW, Res=LOW
R5	RAM=LOW	Texture=LOW
R6	GPU=HIGH ∧ RAM=MID	Quality=HIGH(×0.9), Res=HIGH(×0.9), Texture=MED
R7	CPU=MID ∧ GPU=HIGH ∧ RAM=HIGH	Quality=HIGH, Res=HIGH, Texture=HIGH
R8	CPU=HIGH ∧ GPU=MID ∧ RAM=HIGH	Quality=HIGH(×0.8), Res=MED, Texture=HIGH
R9	GPU=MID ∧ RAM=LOW	Texture=LOW, Res=LOW(×0.8)
R10	CPU=LOW ∧ GPU=HIGH	Quality=MED, Res=MED

2.5 Defuzzification

ใช้ **Centroid**: $y^* = \frac{\int x\mu(x)\,dx}{\int \mu(x)\,dx}$



2.6 การแมปการตั้งค่าและฮิสเทอรีซิส

- **Quality ⟶ Label:** Low (<37.5), Medium (<67.5), High (<87.5), Ultra (อื่น ๆ)
- **Res ⟶ Label:** Low (<72.5), Medium (<89.0), High (อื่น ๆ)
- **Texture ⟶ Label:** Low (<47.5), Medium (<72.5), High (อื่น ๆ)
- **Hysteresis Mapper** ลดการสลับฉลากไปมาเมื่อค่าก้ำกึ่ง โดยใช้เกณฑ์ขึ้น/ลงต่างกัน

(ทำการMapการตั้งค่า จากผลลัพท์ที่ได้จากการ Defuzzification และทำ Hysteresis เพื่อนำการตั้งค่าไปใช้งานจริง)

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 Environment & Reproducibility

- **ไลบรารี**: Python, NumPy, Matplotlib, Pandas
- **การทำซ้ำ**: กำหนด random seed ภายใน random_stats() เป็นค่าแน่นอน (np.random.default_rng()) ทำให้ผลสุ่มชุดเดียวกันได้ซ้ำ
- **โดเมนตัวแปร (universes)**:
    - อินพุต/เอาต์พุตทั่วไป: u = linspace(0,100,1001)
    - Resolution Scale: uR = linspace(50,100,1001)

3.2 อินพุตทดสอบและวิธีสร้างข้อมูล

- **เคสเดี่ยว (single-case)**: ใช้ค่าคงที่เพื่ออธิบายการอนุมาน เช่น (CPU=70, GPU=80, RAM=65) สำหรับเดโม defuzzification
- **สแกนกริด (grid scan)**:
    - ใช้วิธีเติมตารางค่าบนกริด 2 มิติ (80×80 จุด) เพื่อสร้าง **Heatmap** ของเอาต์พุต โดยตรึงตัวแปรที่ 3 ไว้
    - ตัวอย่าง: Quality บนระนาบ CPU×GPU โดยตรึง RAM=70
- **สุ่มตัวอย่าง (random sampling)**:
    - สุ่มสม่ำเสมอภายในช่วงใช้งานจริง: CPU,GPU,RAM ~ U(5,95) จำนวน n=300
    - ใช้เพื่อวิเคราะห์การกระจายของเอาต์พุต (ฮิสโตแกรม) และสัดส่วนฉลาก (แท่ง)

3.3 สถานการณ์การทดลอง (Experiment Scenarios)

1. **ตรวจสอบ MF (Membership Visualization)**
    - วาดกราฟ MF ของทุกตัวแปร (CPU/GPU/RAM/Quality/Res/Texture)
    - จุดประสงค์: ยืนยันว่าความหมายของ **LOW/MID/HIGH/ULTRA** ถูกนิยามถูกต้อง ครอบคลุมโดเมน
2. **สาธิตกระบวนการอนุมาน (Defuzzification Demo)**
    - เลือกอินพุตหนึ่งชุด ⟶ คำนวณระดับการลั่นกฎ (antecedent) ⟶ clip ชุดสังกัดของเอาต์พุต ⟶ รวม (aggregate) ⟶ centroid
    - แสดงเส้น centroid บนกราฟ เพื่อให้เห็นผลลัพธ์เชิงตัวเลขมาจากพื้นที่ใต้กราฟอย่างไร
3. **Heatmaps (ปฏิสัมพันธ์ 2 ตัวแปร)**
    - **Quality: CPU×GPU | RAM=70** — ตรวจ “synergy” ระหว่าง CPU กับ GPU
    - **Resolution: GPU×RAM | CPU=70** — ตรวจชัดว่า Resolution ขึ้นกับ GPU; RAM มีผลรอง
    - **Texture: RAM×GPU | CPU=70** — ตรวจว่าคอขวด RAM ส่งผลกับ Texture มากกว่าปัจจัยอื่น
4. **Sensitivity (ความไวของเอาต์พุต)**
    - ตรึง 2 อินพุตไว้ (เช่น CPU=70, RAM=70) แล้วไล่ค่าที่เหลือ (GPU: 0⟶100)
    - วาดเส้นผลลัพธ์ quality/res/tex ตามค่าที่ไล่ เพื่อดูแนวโน้ม/ความชัน และความต่อเนื่อง
5. **Random Simulation (การกระจายโดยรวม)**
    - สุ่ม 300 เคส บันทึกผลลัพธ์เป็น .csv + วาดฮิสโตแกรมค่า Quality + แท่งสัดส่วนฉลาก
    - ใช้ดูว่าโดยรวมระบบมีแนวโน้มให้คำแนะนำระดับใดบ่อย และมี outlier หรือไม่

3.4 เกณฑ์ตรวจสอบ/ตัวชี้วัด (Checks & Metrics)

- **ความต่อเนื่อง (Continuity)**: กราฟไม่มีจุดหักจากการเปลี่ยนอินพุตเล็กน้อย
- **โมโนโทน (Monotonicity) เฉพาะโดเมน**:
    - ตรึง CPU/RAM ⟶ เพิ่ม GPU แล้ว **Resolution** ไม่ควรลดลง
    - RAM ต่ำ ⟶ **Texture** ควรมีแนวโน้มต่ำ
- **สอดคล้องกฎ (Rule Consistency)**:
    - (HIGH,HIGH,HIGH) ⟶ Quality ~ สูงมาก/ultra
    - (LOW,,) หรือ (,*LOW*,) ⟶ Quality/Res ต่ำ
- **ความสมเหตุสมผลของสัดส่วนฉลาก**: จาก 300 เคส สัดส่วนควรสะท้อนฐานกฎ ไม่สุดโต่งจนผิดสังเกต

3.5 สิ่งที่คาดหวังจากผลลัพธ์ (Expected Behaviors)

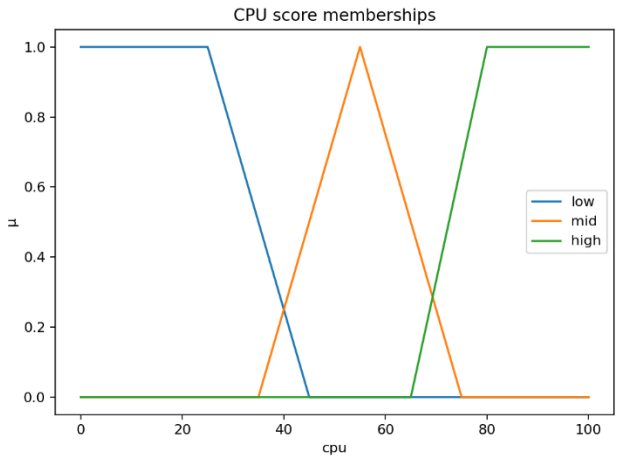
- **Quality** สูงเมื่อ CPU+GPU สูงพร้อมกัน (ผลรวม synergistic)
- **Resolution** แปรตาม GPU เด่นชัด; RAM มีผลรอง (เมื่อ RAM ต่ำมาก Res อาจไม่ถึง High แม้ GPU กลาง)
- **Texture** ติดเพดานเมื่อ RAM ต่ำ (ลด stutter/โหลด)

บทที่ 4

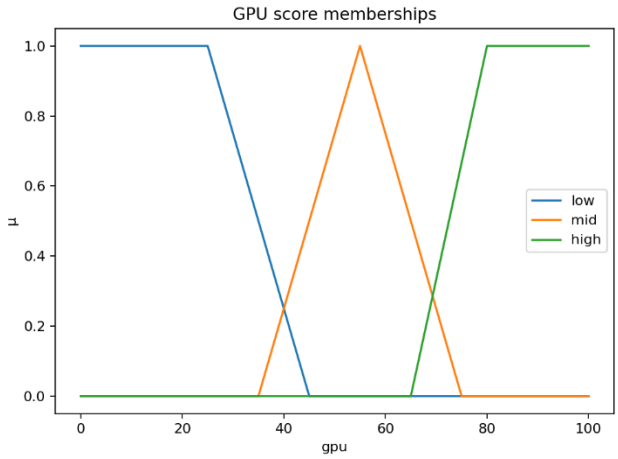
ผลการทดลอง

4.1 กราฟ Membership Functions (MF)

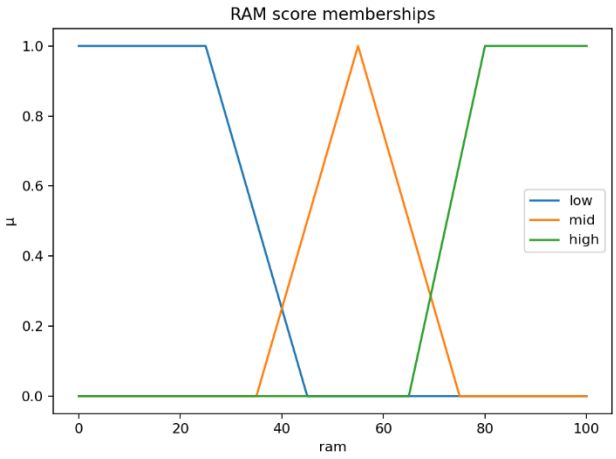
แสดงนิยามเชิงภาษา LOW / MID / HIGH ของ CPU บนโดเมน 0–100 โดยใช้ trapmf สำหรับ LOW/HIGH และ trimf สำหรับ MID



รูปที่ 4.1: *CPU score memberships*



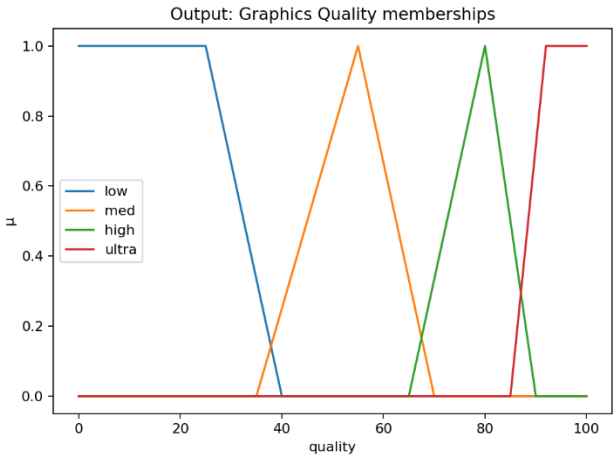
รูปที่ 4.2: *GPU score memberships*



รูปที่ 4.3: RAM *score memberships*

รูปที่ 4.4: Output: Graphics Quality memberships

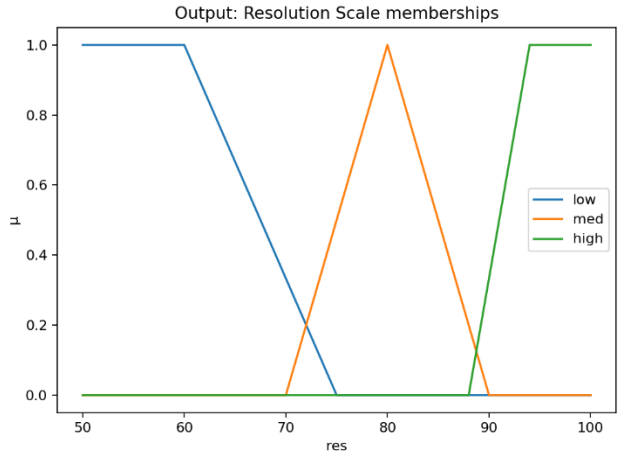
- นิยามเอาต์พุตเป็น **LOW / MED / HIGH / ULTRA** โดย ULTRA ใช้ trapmf ช่วงบนสุด (≈ 92–100)
- ทำให้ผลลัพธ์ “ULTRA” เกิดขึ้นเฉพาะเมื่อฐานกฎสนับสนุนแรงจริง ๆ



รูปที่ 4.4: : *Output: Graphics Quality memberships*

รูปที่ 4.5: *Output: Resolution Scale memberships*

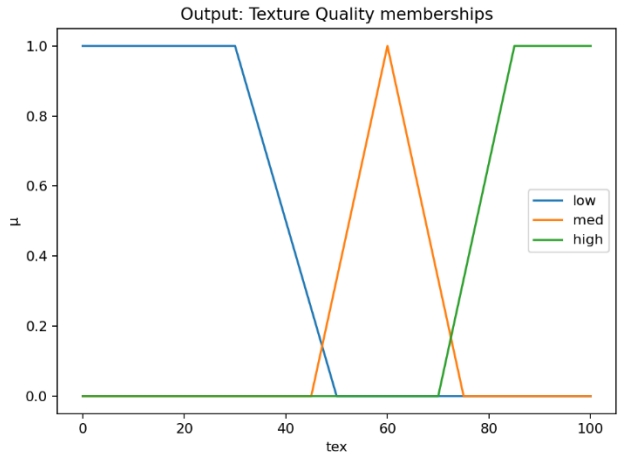
- โดเมน 50–100% เพื่อกันไม่ให้ต่ำเกินใช้งานจริง
- ช่วง HIGH เริ่มตั้งแต่ ≈88% ขึ้นไป เหมาะกับเครื่องที่ GPU แข็งแรง



รูปที่ 4.5: *Output: Resolution Scale memberships*

รูปที่ 4.6: *Output: Texture Quality memberships*

- เน้นช่วง “LOW” กว้างกว่าตัวอื่นเล็กน้อย เพื่อสะท้อนคอขวดด้านหน่วยความจำ
- ออกแบบให้ไต่ขึ้นสู่ “HIGH” เมื่อ RAM ดีพอ (≈70–85 ขึ้นไป)

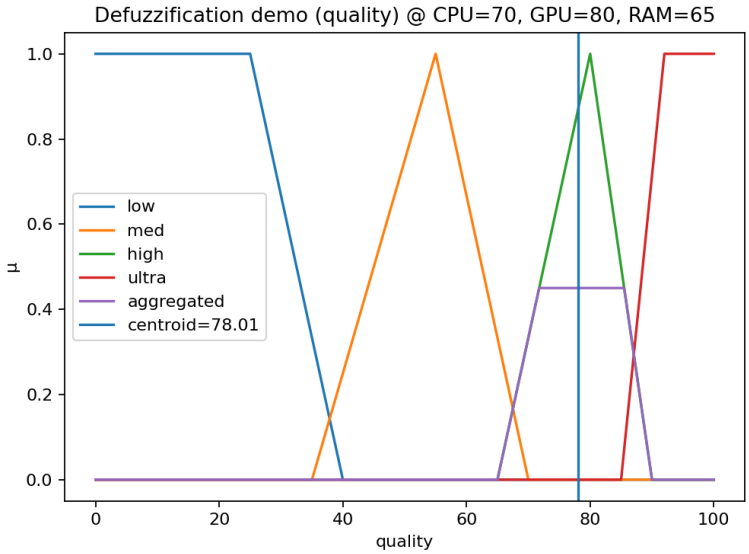


รูปที่ 4.6: *Output: Texture Quality memberships*

4.2 สาธิตกระบวนการ Defuzzification

กราฟแสดงชุดสังกัดพื้นฐานของ **Quality** (LOW/MED/HIGH/ULTRA), กราฟ **aggregated** หลังถูก clip ตามระดับการลั่นกฎ และเส้น **centroid** ซึ่งเป็นค่าผลลัพธ์แบบตัวเลข

- แปลงค่าจริงของ CPU/GPU/RAM เป็นระดับความเป็นสมาชิกของคำภาษา (fuzzification)
- ประเมินกฎด้วย **AND=min / OR=max** ได้ค่าการลั่นกฎ w ของแต่ละกฎ
- **Implication=min**: นำ w ไปตัดยอดชุดสังกัดของเอาต์พุต
- **Aggregation=max**: รวมผลจากหลายกฎเป็นซองโค้งเส้นเดียว
- **Centroid**: หาจุดศูนย์ถ่วง ⟶ ค่าคำแนะนำ **Quality**

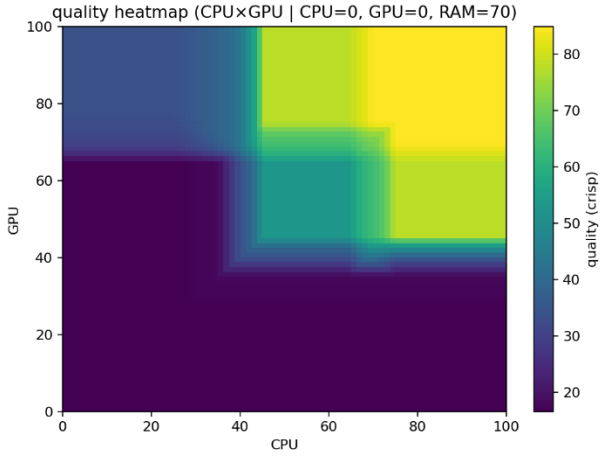


รูปที่ 4.7: *Defuzzification demo (Quality) @ CPU=70, GPU=80, RAM=65*

4.3 Heatmaps: ปฏิสัมพันธ์ของอินพุตสองตัว

รูปที่ 4.8: *Quality heatmap (CPU×GPU | RAM=70)*

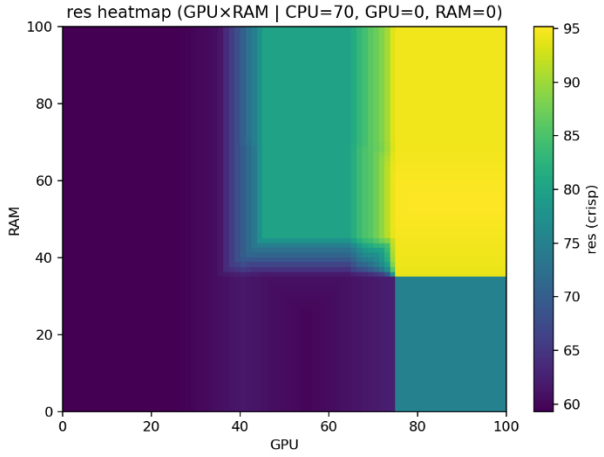
- สีเข้มขึ้นตามค่า Quality ที่สูงขึ้น เห็น “synergy” ระหว่าง CPU และ GPU: หากตัวใดตัวหนึ่งต่ำ คุณภาพจะถูกจำกัด
- เส้นชั้นสีลื่นไหล สอดคล้องกับการออกแบบ MF และ aggregation



รูปที่ 4.8: *Quality heatmap (CPU×GPU | RAM=70)*

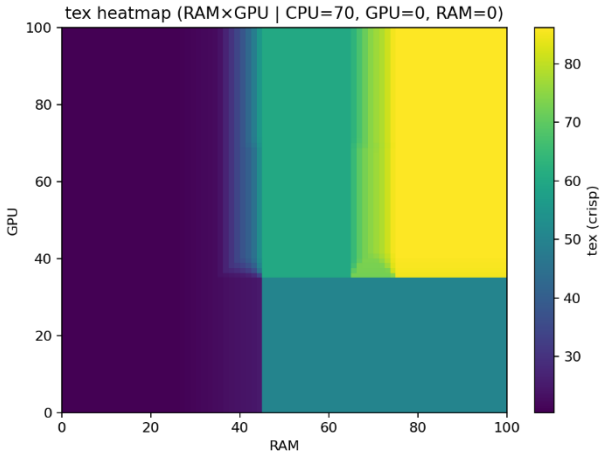
รูปที่ 4.9: *Resolution heatmap (GPU×RAM | CPU=70)*

- เห็นชัดว่า Resolution **พึ่งพา GPU เด่น** (แกน GPU เพิ่ม ⟶ Resolution เพิ่ม)
- RAM มีผลรอง: หาก RAM ต่ำมาก Resolution สูงสุดที่เข้าถึงได้อาจไม่ถึง “HIGH” แม้ GPU ปานกลาง–สูง



รูปที่ 4.10: *Texture heatmap (RAM×GPU | CPU=70)*

- รูปนี้ชี้ให้เห็นว่า **RAM เป็นคอขวด** ของ Texture ชัดเจน (แกน RAM ติดล่าง ⟶ Texture ต่ำ)
- เมื่อ RAM เพียงพอ, GPU ที่สูงช่วยเสริม Texture ในหลายกฎ (ผ่านการตั้งค่าที่พึ่งหน่วยความจำกราฟิกโดยอ้อม)



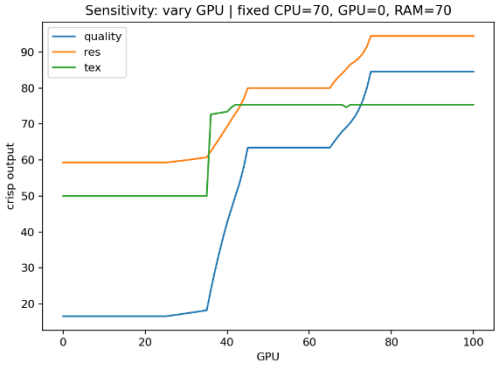
รูปที่ 4.10: *Texture heatmap (RAM×GPU | CPU=70)*

4.4 กราฟความไว (Sensitivity)

รูปที่ 4.11: *Sensitivity (vary GPU | CPU=70, RAM=70)*

fig_sensitivity_vary_gpu_fix_cpu70_ram70.png

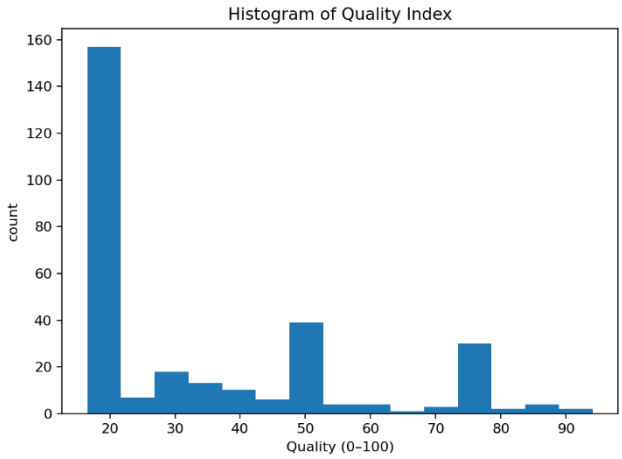
- แสดงเส้นผลลัพธ์ Quality / Resolution / Texture เมื่อไล่ GPU จาก 0⟶100 โดยตรึง CPU/RAM
- คาดหวังให้ Resolution เพิ่มตาม GPU อย่างเด่นชัด (เกือบโมโนโทน); Quality เพิ่มแต่โค้งจะค่อยกว่า; Texture มีผลบวกจาก GPU แต่ไม่แรงเท่า RAM
- จุดงอ/ไหล่ของเส้นตรงกับช่วงเปลี่ยน MF (เช่น MID⟶HIGH) ยืนยันว่าการออกแบบ MF มีผลต่อความชันของผลลัพธ์



4.5 การสุ่มทดลองและสถิติภาพรวม

รูปที่ 4.12: *Histogram of Quality Index*

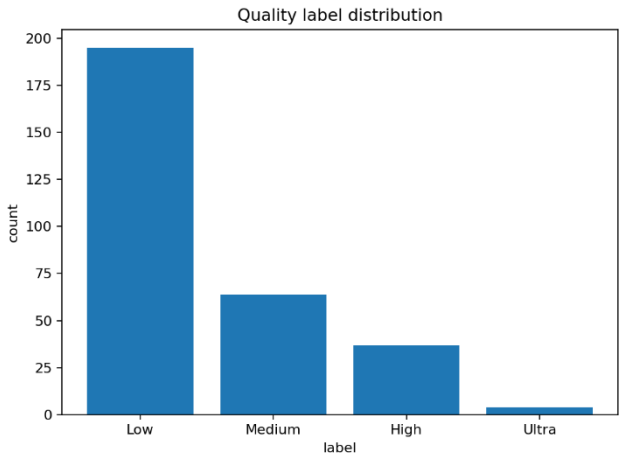
- การกระจายของค่า Quality จาก 300 เคสสุ่มในโดเมนใช้งานจริง
- ตรวจว่าการกระจายไม่ไปทางค่าต่ำหรือสูงจนเกินไป และไม่มีหางยาวที่ผิดสังเกต (ขึ้นกับฐานกฎและช่วงที่สุ่มอินพุต)



รูปที่ 4.12: *Histogram of Quality Index*

รูปที่ 4.13: *Quality label distribution*

- สัดส่วนฉลาก **Low / Medium / High / Ultra** ที่ระบบจัดให้จากการสุ่ม
- ตีความร่วมกับฐานกฎ: ถ้า **Medium/High** เด่น แปลว่าฐานกฎเอื้อเครื่องทั่ว ๆ ไปให้ค่าแนะนำระดับกลางขึ้นไป (สมเหตุสมผล) ส่วน **Ultra** มักมีสัดส่วนน้อย (เงื่อนไขเข้ม)



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 ภาพรวมผลลัพธ์

โครงงานนี้พัฒนา **ระบบช่วยเลือกการตั้งค่าเกมอัตโนมัติ** ด้วยตรรกะฟัซซีแบบ **Mamdani** โดยใช้อินพุต 3 ตัว (CPU, GPU, RAM: 0–100) เพื่อแนะนำเอาต์พุต 3 ตัว (Graphics Quality 0–100, Resolution Scale 50–100%, Texture Quality 0–100) พร้อมฉลาก (Low/Medium/High/Ultra) และกลไก **Hysteresis** ลดการกระพริบของฉลาก ผลการทดลองจากกราฟ MF, เดโม Defuzzification, Heatmaps, Sensitivity และการสุ่ม 300 เคส แสดงว่าแบบจำลองให้ผลลัพธ์ **ต่อเนื่อง, ตีความง่าย, และสอดคล้องกับตรรกะของโดเมนเกม** ตามที่ตั้งเป้าไว้

5.2 ข้อค้นพบเชิงเทคนิค (Key Findings)

1. **อิทธิพลของ GPU ต่อ Resolution เด่นชัดที่สุด**
    - จาก Heatmap (GPU×RAM | CPU=70) และกราฟ Sensitivity (vary GPU) ค่า Resolution เพิ่มขึ้นเรียบและเกือบโมโนโทนตาม GPU
2. **RAM เป็นคอขวดของ Texture อย่างมีนัยสำคัญ**
    - Heatmap (RAM×GPU | CPU=70) แสดงว่าเมื่อ RAM ต่ำ Texture ถูกกดลงแม้ GPU ดี ซึ่งสะท้อนสถานการณ์จริง (โหลด/สตรีมมิงเท็กซ์เจอร์)
3. **Quality ต้องการพลัง CPU+GPU ร่วมกัน (synergy)**
    - Heatmap (CPU×GPU | RAM=70) ชี้ว่าคุณภาพโดยรวมสูงจะเกิดเมื่อทั้ง CPU และ GPU อยู่ระดับกลาง–สูงขึ้นไป พร้อมกัน
4. **กฎแบบน้ำหนัก (0.8–0.9)** ช่วยผ่อนแรงความขัดแย้งของกฎ
    - ตัวอย่าง R6/R8 ทำให้ผลรวมลื่นไหลขึ้นเมื่อองค์ประกอบยังไม่ครบ “สูงทุกตัว”

5. **ผลลัพธ์ค่อยเป็นค่อยไป (smooth)**
    - กราฟ Sensitivity, Heatmap และผลจาก Centroid แสดงว่า **เปลี่ยนอินพุตเล็กน้อย ⟶ เอาต์พุตไม่กระโดด** ตรงวัตถุประสงค์

5.3 ความถูกต้องและความสอดคล้องกับโดเมน (Validation)

- **โดเมนตรรกะผ่าน**:
    - GPU สูง ⟶ Resolution สูง (คง CPU/RAM)
    - RAM ต่ำ ⟶ Texture ต่ำ
    - CPU+GPU สูงพร้อมกัน ⟶ Quality สูง
- **ความต่อเนื่องผ่าน**: ทุกกราฟไม่มีจุดหัก หรือโครงลายเสื่อที่ผิดธรรมชาติ
- **ฉลากเสถียรขึ้นด้วย Hysteresis**: ลดการสลับก่อน–หลังเส้นแบ่งในโซนก้ำกึ่ง

5.4 ประสิทธิภาพเชิงคำนวณ

- โดเมนถูกแยกละเอียดที่ 1001 จุด (0–100 และ 50–100 สำหรับ Resolution) ทำให้ **Centroid** คำนวณเร็วและแม่นพอ โดยรวม **เวลาประมวลผล/อินพุต 1 ชุดอยู่ในระดับมิลลิวินาที** (ขึ้นกับเครื่อง) จึงเหมาะกับการนำไปเรียกใช้แบบอินเทอร์แอกทีฟ

5.5 ข้อจำกัดของงาน

1. **สเกลคะแนน 0–100 เป็นเชิงอนุโลม**: หากคะแนนไม่อ้างอิง benchmark จริง ผลลัพธ์อาจต่างจากการใช้งานจริง
2. **กฎคงที่**: เหมาะกับ “เกมทั่วไป” ถ้าเกมใดพึ่ง CPU/VRAM มากผิดปกติ อาจต้องปรับ MF/กฎเฉพาะ
3. **ไม่มีเป้าหมาย FPS ระบุชัด**: ระบบนี้แนะนำ “แนวโน้มการตั้งค่า” ไม่รับประกันจำนวนเฟรมต่อวินาที

4. **ไม่รวมปัจจัย VRAM/Threads/สถาปัตยกรรม**: ใส่ RAM รวมแล้ว แต่ยังไม่แยก VRAM/CPU threads/รุ่น GPU แบบละเอียด

5.6 คำแนะนำสำหรับการใช้งานจริง

- ใช้ระบบนี้เป็น **จุดเริ่มต้นตั้งค่า** แล้วให้ผู้ใช้ปรับเพิ่ม–ลดละเอียดตามรสนิยม/จอ/เกม
- หากพบ **stutter/โหลดช้า** ให้ลด Texture ก่อน (สะท้อนข้อจำกัด RAM/VRAM)
- ถ้า FPS ไม่ถึงเป้า ให้ **ลด Resolution Scale** ก่อน แล้วค่อยลด Quality รายพารามิเตอร์ (เงา/แสง/โพสต์โปรเซส)

ภาคผนวก

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from typing import Callable, Dict, List, Tuple
import pandas as pd
import os


# ============================================
# อินพุต: CPU/GPU/RAM (0..100)
# เอาต์พุต: Graphics Quality (0..100), Resolution Scale (50..100), Texture (0..100)
# ขั้นตอน: fuzzification -> evaluate rules (AND=min, OR=max)
#          -> implication=min -> aggregation=max -> centroid defuzz
# ============================================


# -------- Membership helpers --------
def trimf(x, abc):
    """ Triangular MF: จุด (a,b,c) — ไต่ขึ้น a->b แล้วไต่ลง b->c """
    a, b, c = abc
    y = np.zeros_like(x, dtype=float)
    # ไต่ขึ้น
```

```
    idx = (a < x) & (x <= b); y[idx] = (x[idx] - a) / (b - a) if b != a else 0.0
    # ไต่ลง
    idx = (b < x) & (x < c);  y[idx] = (c - x[idx]) / (c - b) if c != b else 0.0
    # จุดยอด (b) = 1
    y[x == b] = 1.0
    return np.clip(y, 0, 1)

def trapmf(x, abcd):
    """ Trapezoidal MF: จุด (a,b,c,d) — ไต่ขึ้น a->b, ราบ b..c, ไต่ลง c->d """
    a, b, c, d = abcd
    y = np.zeros_like(x, dtype=float)
    # ไต่ขึ้น
    idx = (a < x) & (x <= b); y[idx] = (x[idx] - a) / (b - a) if b != a else 0.0
    # ช่วงราบ
    idx = (b < x) & (x <= c); y[idx] = 1.0
    # ไต่ลง
    idx = (c < x) & (x < d);  y[idx] = (d - x[idx]) / (d - c) if d != c else 0.0
    y[(x == b) | (x == c)] = 1.0
    return np.clip(y, 0, 1)

def defuzz_centroid(x, mu):
```

```
    """ Centroid of area (CoA): ค่าศูนย์ถ่วงของพื้นที่ใต้โค้ง mu(x) """
    area = np.trapz(mu, x)
    if area == 0:
        # ถ้าไม่มีพื้นที่ (ไม่มีกฎลั่น) คืนค่ากลางโดเมนเพื่อกันหารศูนย์
        return 0.5 * (x[0] + x[-1])
    return float(np.trapz(x * mu, x) / area)


# -------- โครงสร้างพื้นฐานของระบบฟัซซี --------
class FuzzySet:
    """ 1 ชุดสังกัด (เช่น 'low', 'mid', 'high') พร้อมฟังก์ชัน membership """
    def __init__(self, name: str, mf: Callable[[np.ndarray], np.ndarray]):
        self.name = name
        self.mf = mf


class FuzzyVar:
    """ ตัวแปรฟัซซี 1 ตัว: มีโดเมน (universe) + เซตย่อย (FuzzySet) หลายชุด """
    def __init__(self, name: str, universe: np.ndarray, sets: Dict[str, FuzzySet]):
        self.name = name
        self.universe = universe
        self.sets = sets
```

```
    def mu(self, set_name: str, xval: float) -> float:
        """ อ่านค่า membership (0..1) ของ set_name ที่ตำแหน่ง xval """
        xs = self.universe
        mus = self.sets[set_name].mf(xs)
        return float(np.interp(xval, xs, mus))  # interpolate ให้ค่าเดียวจากโค้ง


class Rule:
    """ กฎฟัซซี: antecedent (degree 0..1) -> consequents [(out_var, set_name, weight)] """
    def __init__(self,
                 antecedent: Callable[[Dict[str, float]], float],
                 consequents: List[Tuple[str, str, float]]):
        self.antecedent = antecedent
        self.consequents = consequents


class MamdaniSystem:
    """ แกนหลักของ Mamdani: implication=min, aggregation=max, defuzz=centroid """
    def __init__(self, inputs: Dict[str, FuzzyVar], outputs: Dict[str, FuzzyVar], rules: List[Rule]):
        self.inputs, self.outputs, self.rules = inputs, outputs, rules


    def infer(self, x: Dict[str, float]) -> Dict[str, float]:
        # เริ่มกราฟสะสมของแต่ละเอาต์พุตเป็นศูนย์ (สำหรับ aggregation)
```

```
        agg = {name: np.zeros_like(var.universe, dtype=float) for name, var in self.outputs.items()}
        for rule in self.rules:
            # 1) ประเมินส่วน IF: AND=min, OR=max (นิยามใน lambda ของ RULES)
            w = float(rule.antecedent(x))
            if w <= 0:
                continue
            # 2) implication = min: clip ชุดสังกัดของเอาต์พุตด้วยระดับ w (คูณน้ำหนักได้)
            for out_name, set_name, weight in rule.consequents:
                var = self.outputs[out_name]
                mu_set = var.sets[set_name].mf(var.universe)
                clipped = np.minimum(mu_set, w * weight)
                # 3) aggregation = max: รวมหลายกฎเข้าด้วยกันโดยเอาค่าสูงสุดในแต่ละจุด
                agg[out_name] = np.maximum(agg[out_name], clipped)
        # 4) defuzz ทุกเอาต์พุตด้วย centroid
        return {name: defuzz_centroid(var.universe, agg[name]) for name, var in self.outputs.items()}


# -------- โดเมนของตัวแปร (แกน x) --------
u  = np.linspace(0, 100, 1001)   # ใช้กับตัวแปรที่อยู่ใน 0..100 (ละเอียด 1001 จุด)
uR = np.linspace(50, 100, 1001)  # Resolution scale จำกัด 50..100


def mk_perf_sets():
```

```
    """ นิยาม MF ของอินพุต CPU/GPU/RAM: low/mid/high """
    return {
        "low":  FuzzySet("low",  lambda x: trapmf(x, (0, 0, 25, 45))),   # ต่ำชัด 0..25, ค่อยๆ เลิกต่ำ 25..45
        "mid":  FuzzySet("mid",  lambda x: trimf(x, (35, 55, 75))),      # กลางพอดีที่ 55
        "high": FuzzySet("high", lambda x: trapmf(x, (65, 80, 100, 100)))# เริ่มสูง ~65, สูงชัด 80..100
    }

# -------- อินพุต 3 ตัว --------
inputs = {
    "cpu": FuzzyVar("cpu", u, mk_perf_sets()),
    "gpu": FuzzyVar("gpu", u, mk_perf_sets()),
    "ram": FuzzyVar("ram", u, mk_perf_sets()),
}

# -------- เอาต์พุต: MF ของ Quality / Resolution / Texture --------
quality_sets = {
    "low":    FuzzySet("low",    lambda x: trapmf(x, (0, 0, 25, 40))),
    "med":    FuzzySet("med",    lambda x: trimf(x, (35, 55, 70))),
    "high":   FuzzySet("high",   lambda x: trimf(x, (65, 80, 90))),
    "ultra": FuzzySet("ultra", lambda x: trapmf(x, (85, 92, 100, 100))), # ultra เฉพาะกรณีแรงมาก
```

```
}

res_sets = {

    "low":    FuzzySet("low",    lambda x: trapmf(x, (50, 50, 60, 75))),    # scale ไม่ต่ำกว่า 50%

    "med":    FuzzySet("med",    lambda x: trimf(x, (70, 80, 90))),

    "high":   FuzzySet("high",   lambda x: trapmf(x, (88, 94, 100, 100))),

}

tex_sets = {

    "low":    FuzzySet("low",    lambda x: trapmf(x, (0, 0, 30, 50))),      # RAM ต่ำ = เท็กซ์เจอร์ต่ำ

    "med":    FuzzySet("med",    lambda x: trimf(x, (45, 60, 75))),

    "high":   FuzzySet("high",   lambda x: trapmf(x, (70, 85, 100, 100))),

}


# -------- ประกาศตัวแปรเอาต์พุต --------

outputs = {

    "quality": FuzzyVar("quality", u,   quality_sets),

    "res":     FuzzyVar("res",     uR,  res_sets),

    "tex":     FuzzyVar("tex",     u,   tex_sets),

}


def MU(v, s, x):

    """ ช็อตคัต: μ(ตัวแปร v เป็นเซต s) ที่ค่าอินพุต x[v] """
```

```
    return inputs[v].mu(s, x[v])


# -------- กฎแบบภาษาคน (ใช้ใส่รายงาน) --------
RULES_HUMAN = [
    "R1: IF CPU is HIGH AND GPU is HIGH AND RAM is HIGH THEN Quality is ULTRA, Resolution is HIGH, Texture is HIGH",
    "R2: IF GPU is HIGH AND CPU is MID AND RAM is MID THEN Quality is HIGH, Resolution is HIGH, Texture is MED",
    "R3: IF CPU is MID AND GPU is MID AND RAM is MID THEN Quality is MED, Resolution is MED, Texture is MED",
    "R4: IF GPU is LOW OR CPU is LOW THEN Quality is LOW, Resolution is LOW",
    "R5: IF RAM is LOW THEN Texture is LOW",
    "R6: IF GPU is HIGH AND RAM is MID THEN Quality is HIGH, Resolution is HIGH, Texture is MED (weighted)",
    "R7: IF CPU is MID AND GPU is HIGH AND RAM is HIGH THEN Quality is HIGH, Resolution is HIGH, Texture is HIGH",
    "R8: IF CPU is HIGH AND GPU is MID AND RAM is HIGH THEN Quality is HIGH (slightly), Resolution is MED, Texture is HIGH",
    "R9: IF GPU is MID AND RAM is LOW THEN Texture is LOW; Resolution tends to LOW",
    "R10: IF CPU is LOW AND GPU is HIGH THEN Quality is MED, Resolution is MED",
]
```

```
# -------- กฎใช้งานจริง (AND=min, OR=max, implication=min, aggregation=max) --------
RULES = [
    # R1: ทั้งสามสูง -> คุณภาพรวม/สเกล/เท็กซ์เจอร์ สูงสุด
    Rule(lambda x: min(MU('cpu','high',x), MU('gpu','high',x), MU('ram','high',x)),
         [('quality','ultra',1.0), ('res','high',1.0), ('tex','high',1.0)]),

    # R2: GPU สูง, CPU/RAM กลาง -> คุณภาพ/สเกล สูง, เท็กซ์เจอร์ กลาง
    Rule(lambda x: min(MU('gpu','high',x), MU('cpu','mid',x), MU('ram','mid',x)),
         [('quality','high',1.0), ('res','high',1.0), ('tex','med',1.0)]),

    # R3: ทั้งหมดกลาง -> เอาต์พุตกลาง
    Rule(lambda x: min(MU('cpu','mid',x), MU('gpu','mid',x), MU('ram','mid',x)),
         [('quality','med',1.0), ('res','med',1.0), ('tex','med',1.0)]),

    # R4: GPU ต่ำ หรือ CPU ต่ำ -> กดคุณภาพรวม/สเกล ลง
    Rule(lambda x: max(MU('gpu','low',x), MU('cpu','low',x)),
         [('quality','low',1.0), ('res','low',1.0)]),

    # R5: RAM ต่ำ -> เท็กซ์เจอร์ต่ำ (คอขวดหน่วยความจำ)
    Rule(lambda x: MU('ram','low',x),
         [('tex','low',1.0)]),
```

```
    # R6: GPU สูง + RAM กลาง -> ดันคุณภาพ/สเกลขึ้น แต่ใส่ weight 0.9 ให้ไม่ชนกับ R1 แรงเกิน
    Rule(lambda x: min(MU('gpu','high',x), MU('ram','mid',x)),
         [('quality','high',0.9), ('res','high',0.9), ('tex','med',1.0)]),

    # R7: CPU กลาง + GPU สูง + RAM สูง -> เอาต์พุตสูง
    Rule(lambda x: min(MU('cpu','mid',x), MU('gpu','high',x), MU('ram','high',x)),
         [('quality','high',1.0), ('res','high',1.0), ('tex','high',1.0)]),

    # R8: CPU สูง + GPU กลาง + RAM สูง -> Quality สูง (0.8) เพื่อละมุน, Res กลาง, Tex สูง
    Rule(lambda x: min(MU('cpu','high',x), MU('gpu','mid',x), MU('ram','high',x)),
         [('quality','high',0.8), ('res','med',1.0), ('tex','high',1.0)]),

    # R9: GPU กลาง + RAM ต่ำ -> เท็กซ์เจอร์ต่ำ; สเกลมีแนวโน้มต่ำ (0.8)
    Rule(lambda x: min(MU('gpu','mid',x), MU('ram','low',x)),
         [('tex','low',1.0), ('res','low',0.8)]),

    # R10: CPU ต่ำ + GPU สูง -> คุณภาพ/สเกล ระดับกลาง (คอขวด CPU)
    Rule(lambda x: min(MU('cpu','low',x), MU('gpu','high',x)),
         [('quality','med',1.0), ('res','med',1.0)]),
]
```

```
# ประกอบระบบ
system = MamdaniSystem(inputs, outputs, RULES)

# -------- Numeric -> Label mapping (ไว้โชว์/รายงาน/ UI) --------
def quality_label(q: float) -> str:
    if q < 37.5: return "Low"
    if q < 67.5: return "Medium"
    if q < 87.5: return "High"
    return "Ultra"

def resolution_label(res: float) -> str:
    if res < 72.5: return "Low"
    if res < 89.0: return "Medium"
    return "High"

def texture_label(tex: float) -> str:
    if tex < 47.5: return "Low"
    if tex < 72.5: return "Medium"
    return "High"
```

```
# -------- Hysteresis: กันฉลาก "กระพริบ" เมื่อค่าใกล้เส้นแบ่ง --------
class HysteresisMapper:
    """
    levels: รายการฉลาก (เรียงลำดับจากต่ำไปสูง)
    rise: เกณฑ์ "ขยับขึ้นระดับ"
    fall: เกณฑ์ "ขยับลงระดับ"
    """
    def __init__(self, levels, rise, fall, initial=None):
        self.levels, self.rise, self.fall = levels, rise, fall
        self.idx = 0 if initial is None else levels.index(initial)
    def update(self, x: float) -> str:
        # ขึ้นระดับเมื่อถึงเกณฑ์ rise
        while self.idx < len(self.rise) and x >= self.rise[self.idx]:
            self.idx += 1
        # ลงระดับเมื่อค่าต่ำกว่าเกณฑ์ fall
        while self.idx > 0 and x < self.fall[self.idx - 1]:
            self.idx -= 1
        return self.levels[self.idx]

quality_mapper = HysteresisMapper(["Low","Medium","High","Ultra"], [40.0, 70.0, 90.0], [35.0, 65.0,
85.0])
```

```
res_mapper      = HysteresisMapper(["Low","Medium","High"],          [75.0, 90.0],       [70.0, 88.0])

tex_mapper      = HysteresisMapper(["Low","Medium","High"],          [50.0, 75.0],       [45.0, 70.0])


# -------- APIs หลักสำหรับเรียกใช้งาน --------

def infer(cpu: float, gpu: float, ram: float) -> Dict[str, float]:

    """ คืนค่าเอาต์พุตแบบตัวเลข (crisp) ทั้ง 3 ตัว จากอินพุต cpu/gpu/ram """

    return system.infer({"cpu": cpu, "gpu": gpu, "ram": ram})


def infer_with_labels(cpu: float, gpu: float, ram: float, use_hysteresis: bool = False) -> Dict[str,
object]:

    """ คืนทั้งค่าเลข + ฉลาก (เลือกใช้ hysteresis ได้) — เหมาะกับ UI/รายงาน """

    out = infer(cpu, gpu, ram)

    if use_hysteresis:

        qlbl = quality_mapper.update(out["quality"])

        rlbl = res_mapper.update(out["res"])

        tlbl = tex_mapper.update(out["tex"])

    else:

        qlbl = quality_label(out["quality"])

        rlbl = resolution_label(out["res"])

        tlbl = texture_label(out["tex"])

    return {
```

```
        "cpu": cpu, "gpu": gpu, "ram": ram,
        "quality_idx": round(out["quality"], 2), "quality_lbl": qlbl,
        "res_scale_%": round(out["res"], 1),      "res_label": rlbl,
        "texture_idx": round(out["tex"], 1),      "texture_lbl": tlbl,
    }


def get_rules_text() -> str:
    """ รวมกฎแบบภาษาคนไว้ใช้แสดงในรายงาน/คอนโซล """
    return "\n".join(RULES_HUMAN)


# -------- Utilities วาดกราฟ (สำหรับรายงาน) --------
def plot_memberships(var, title, filename=None):
    """ วาดกราฟ MF ของตัวแปรหนึ่งตัว (อินพุตหรือเอาต์พุต) """
    plt.figure()
    for name, fset in var.sets.items():
        plt.plot(var.universe, fset.mf(var.universe), label=name)
    plt.title(title)
    plt.xlabel(var.name)
    plt.ylabel("μ")
    plt.legend(loc="best")
    plt.tight_layout()
```

```
    if filename:
        plt.savefig(filename, dpi=160)
        plt.close()
    else:
        plt.show()


def demo_defuzz(cpu=70, gpu=80, ram=65, out_name="quality", filename=None):
    """ เดโม: โชว์ขั้น clip/aggregate และ centroid ของเอาต์พุตชื่อ out_name """
    x = {"cpu": cpu, "gpu": gpu, "ram": ram}
    # รวมผลหลายกฎ (เฉพาะเอาต์พุตที่สนใจ) ลงในกราฟ agg
    agg = np.zeros_like(outputs[out_name].universe, dtype=float)
    for rule in RULES:
        w = float(rule.antecedent(x))
        if w <= 0:
            continue
        for o_name, set_name, weight in rule.consequents:
            if o_name != out_name:
                continue
            var = outputs[o_name]
            mu = var.sets[set_name].mf(var.universe)
            clipped = np.minimum(mu, w * weight)   # implication=min
```

```
        agg = np.maximum(agg, clipped)          # aggregation=max


xs = outputs[out_name].universe
c = defuzz_centroid(xs, agg)                    # centroid = คำตอบแบบตัวเลข


# วาดทั้งเซตพื้นฐาน + กราฟ aggregated + เส้น centroid
plt.figure()
for name, fset in outputs[out_name].sets.items():
    plt.plot(xs, fset.mf(xs), label=name)
plt.plot(xs, agg, label="aggregated")
plt.axvline(c, label=f"centroid={c:.2f}")
plt.title(f"Defuzzification demo ({out_name}) @ CPU={cpu}, GPU={gpu}, RAM={ram}")
plt.xlabel(out_name)
plt.ylabel("μ")
plt.legend(loc="best")
plt.tight_layout()
if filename:
    plt.savefig(filename, dpi=160)
    plt.close()
else:
    plt.show()
```

```
    return c


def plot_heatmap(x_name, y_name, out_name, fixed, filename=None):
    """ Heatmap เอาต์พุต out_name บนระนาบอินพุต 2 ตัว (อีกตัวตรึงตาม fixed) """
    nx = 80; ny = 80  # ปรับความละเอียดได้
    xs = np.linspace(0, 100, nx)
    ys = np.linspace(0, 100, ny)
    Z = np.zeros((ny, nx), dtype=float)
    for j, yv in enumerate(ys):
        for i, xv in enumerate(xs):
            sample = {**fixed, x_name: float(xv), y_name: float(yv)}
            val = infer(sample["cpu"], sample["gpu"], sample["ram"])[out_name]
            Z[j, i] = val
    plt.figure()
    plt.imshow(Z, origin="lower", extent=[xs.min(), xs.max(), ys.min(), ys.max()], aspect="auto")
    plt.colorbar(label=f"{out_name} (crisp)")
    plt.xlabel(x_name.upper())
    plt.ylabel(y_name.upper())
    fixed_txt = ", ".join(f"{k.upper()}={v}" for k,v in fixed.items())
    plt.title(f"{out_name} heatmap ({x_name.upper()}×{y_name.upper()} | {fixed_txt})")
    plt.tight_layout()
```

```
    if filename:
        plt.savefig(filename, dpi=160)
        plt.close()
    else:
        plt.show()


def sensitivity_curve(vary, fixed, out_names=("quality","res","tex"), filename=None):
    """ ไล่ค่าตัวแปรหนึ่งตัว (vary) เพื่อดูความไวของเอาต์พุตที่เลือก """
    xs = np.linspace(0,100,101)
    plt.figure()
    for out_name in out_names:
        ys = []
        for xval in xs:
            sample = {**fixed, vary: float(xval)}
            out = infer(sample["cpu"], sample["gpu"], sample["ram"])
            ys.append(out[out_name])
        plt.plot(xs, ys, label=out_name)
    plt.title(f"Sensitivity: vary {vary.upper()} | fixed " + ", ".join(f"{k.upper()}={v}" for k,v in
fixed.items()))
    plt.xlabel(vary.upper())
    plt.ylabel("crisp output")
```

```
    plt.legend(loc="best")
    plt.tight_layout()
    if filename:
        plt.savefig(filename, dpi=160)
        plt.close()
    else:
        plt.show()


def random_stats(n=300, csv_path="fuzzy_sim_results.csv", fig_hist=None, fig_bar=None):
    """ สุ่มอินพุต n เคส -> เก็บผล/ฉลากเป็น CSV + วาดฮิสโตแกรม/แท่งสัดส่วนฉลาก """
    rng = np.random.default_rng(42)  # seed เดิมเพื่อทำซ้ำ
    rows = []
    lblQ = {"Low":0,"Medium":0,"High":0,"Ultra":0}
    lblR = {"Low":0,"Medium":0,"High":0}
    lblT = {"Low":0,"Medium":0,"High":0}
    Q, R, T = [], [], []
    for _ in range(n):
        cpu = float(rng.uniform(5,95))
        gpu = float(rng.uniform(5,95))
        ram = float(rng.uniform(5,95))
        out = infer_with_labels(cpu, gpu, ram, use_hysteresis=False)
```

```
    rows.append(out)
    Q.append(out["quality_idx"]); lblQ[out["quality_lbl"]] += 1
    R.append(out["res_scale_%"]); lblR[out["res_label"]] += 1
    T.append(out["texture_idx"]); lblT[out["texture_lbl"]] += 1

df = pd.DataFrame(rows)
df.to_csv(csv_path, index=False, encoding="utf-8")

# Histogram of Quality
plt.figure()
plt.hist(Q, bins=15)
plt.title("Histogram of Quality Index")
plt.xlabel("Quality (0–100)")
plt.ylabel("count")
plt.tight_layout()
if fig_hist:
    plt.savefig(fig_hist, dpi=160)
    plt.close()
else:
    plt.show()
```

```
    # Bar: Quality label distribution
    plt.figure()
    xs = list(lblQ.keys()); ys = [lblQ[k] for k in xs]
    plt.bar(xs, ys)
    plt.title("Quality label distribution")
    plt.xlabel("label")
    plt.ylabel("count")
    plt.tight_layout()
    if fig_bar:
        plt.savefig(fig_bar, dpi=160)
        plt.close()
    else:
        plt.show()

    return df

# -------- Main: ตัวอย่างรัน + สร้างรูปสำหรับรายงาน --------
if __name__ == "__main__":
    outdir = os.getcwd()

    # ตัวอย่างอนุมาน 1 ชุด + แสดงกฎภาษาคน
```

```
    print(infer_with_labels(90, 40, 95))
    print("--- Rules ---")
    print(get_rules_text())

    # 1) Memberships
    plot_memberships(inputs["cpu"], "CPU score memberships", os.path.join(outdir, "fig_membership_cpu.png"))
    plot_memberships(inputs["gpu"], "GPU score memberships", os.path.join(outdir, "fig_membership_gpu.png"))
    plot_memberships(inputs["ram"], "RAM score memberships", os.path.join(outdir, "fig_membership_ram.png"))
    plot_memberships(outputs["quality"], "Output: Graphics Quality memberships", os.path.join(outdir, "fig_membership_quality.png"))
    plot_memberships(outputs["res"], "Output: Resolution Scale memberships", os.path.join(outdir, "fig_membership_res.png"))
    plot_memberships(outputs["tex"], "Output: Texture Quality memberships", os.path.join(outdir, "fig_membership_tex.png"))

    # 2) Defuzz demo
    demo_defuzz(70, 80, 65, "quality", os.path.join(outdir, "fig_defuzz_quality_demo.png"))

    # 3) Heatmaps
```

```
    plot_heatmap("cpu","gpu","quality", fixed={"cpu":0,"gpu":0,"ram":70}, filename=os.path.join(outdir, "fig_heatmap_quality_cpu_gpu_ram70.png"))

    plot_heatmap("gpu","ram","res", fixed={"cpu":70,"gpu":0,"ram":0}, filename=os.path.join(outdir, "fig_heatmap_res_gpu_ram_cpu70.png"))

    plot_heatmap("ram","gpu","tex", fixed={"cpu":70,"gpu":0,"ram":0}, filename=os.path.join(outdir, "fig_heatmap_tex_ram_gpu_cpu70.png"))


    # 4) Sensitivity

    sensitivity_curve("gpu", {"cpu":70,"gpu":0,"ram":70},

                      filename=os.path.join(outdir, "fig_sensitivity_vary_gpu_fix_cpu70_ram70.png"))


    # 5) Random stats + CSV

    random_stats(n=300,

                 csv_path=os.path.join(outdir, "fuzzy_sim_results.csv"),

                 fig_hist=os.path.join(outdir, "fig_hist_quality.png"),

                 fig_bar=os.path.join(outdir, "fig_bar_quality_labels.png"))
```