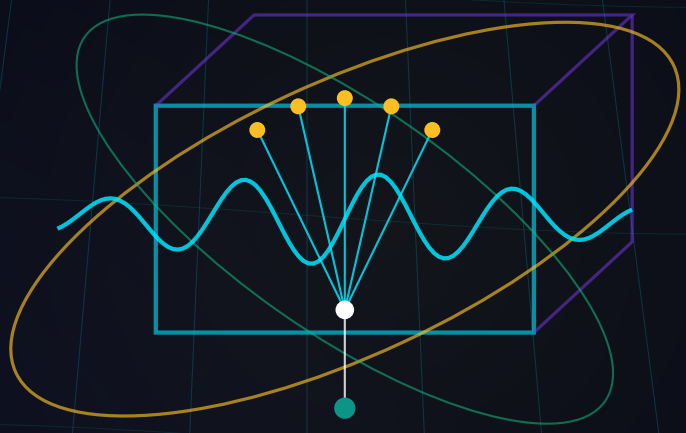
โครงการตำราวิชาการเฉลิมพระเกียรติ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

การศึกษาและการจำลองเชิงสะเต็ม ด้วย มาตรฐาน OpenXR และ การ ประมวล ผล เชิง พื้นที่

OpenXR and Spatial Computing for STEM Education

A Comprehensive Framework for 3D Interaction, Hand Tracking, Physics Engines, and Intelligent Virtual Labs



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีวะ ทัศนา

วท.บ. (ฟิสิกส์ คอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์)

วท.ม. (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ปร.ด. (ฟิสิกส์ประยุกต์)

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

พ.ศ. 2569

Masterclass Edition

การศึกษาและการจำลองเชิงสะเต็ม

ด้วยมาตรฐาน OpenXR และการประมวลผลเชิงพื้นที่

OpenXR and Spatial Computing for STEM Education

Architecture, 3D Spatial Interactions, Physics Engines, and Intelligent Virtual Labs

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีวะ ทัศนา

วท.บ. (ฟิสิกส์ คอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์)
วท.ม. (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ปร.ด. (ฟิสิกส์ประยุกต์)

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

พ.ศ. 2569

คำนำ

ความก้าวหน้าอย่างก้าวกระโดดของเทคโนโลยีความเป็นจริงขยาย (Extended Reality หรือ XR) ซึ่งครอบคลุมความเป็นจริงเสมือน (Virtual Reality: VR) ความเป็นจริงเสริม (Augmented Reality: AR) และความเป็นจริงผสม (Mixed Reality: MR) ได้เข้ามามีบทบาทอย่างยิ่งในการปฏิรูปกระบวนการจัดการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ และคณิตศาสตร์ หรือสะเต็มศึกษา (STEM Education) ในศตวรรษที่ 21 การเรียนรู้ปรากฏการณ์ทางกายภาพที่มีความซับซ้อน เป็นนามธรรม หรือมีข้อจำกัดด้านความปลอดภัยและงบประมาณในการทดลองจริง สามารถถูกจำลองขึ้นในรูปแบบสามมิติเชิงโต้ตอบที่มีความเที่ยงตรงสูง ช่วยให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจเชิงมโนทัศน์อย่างลึกซึ้งผ่านประสบการณ์ตรง

ในอดีต การพัฒนาแอปพลิเคชัน XR มักเผชิญกับอุปสรรคสำคัญจากปัญหาความแตกแยกของระบบ (Ecosystem Fragmentation) เนื่องจากผู้พัฒนาต้องเขียนโค้ดแยกตามชุดคำสั่งและอุปกรณ์เฉพาะของผู้ผลิตแต่ละราย (Proprietary SDKs) อย่างไรก็ดี การถือกำเนิดขึ้นของมาตรฐานเปิด **OpenXR** โดยความร่วมมือของกลุ่มพันธมิตรระดับโลก Khronos Group ได้สร้างจุดเปลี่ยนครั้งประวัติศาสตร์ ด้วยการกำหนดมาตรฐานกลางระดับสากลที่เชื่อมประสานระหว่างซอฟต์แวร์ประยุกต์และฮาร์ดแวร์ทุกแพลตฟอร์มอย่างเป็นเอกภาพ ส่งผลให้นักการศึกษาและนักพัฒนาสามารถสร้างสรรค์ระบบจำลองการทดลองเสมือนจริงที่ทำงานข้ามแพลตฟอร์มได้อย่างไร้รอยต่อ

ตำราวิชาการเรื่อง **"การศึกษาและการจำลองเชิงสะเต็มด้วยมาตรฐาน OpenXR และการประมวลผลเชิงพื้นที่ (OpenXR and Spatial Computing for STEM Education)"** เล่มนี้ ได้รับการรังสรรค์ขึ้นเพื่อเป็นเอกสารทางวิชาการและคู่มือการเรียนรู้เชิงลึกที่เชื่อมโยงทฤษฎีทางฟิสิกส์ สถาปัตยกรรมคอมพิวเตอร์ กราฟิกส์ และการคำนวณทางวิทยาศาสตร์เข้าด้วยกันอย่างเป็นระบบ เนื้อหาภายในเล่มแบ่งออกเป็น 7 บทเรียนหลัก ครอบคลุมตั้งแต่สถาปัตยกรรมพื้นฐานของ OpenXR, ระบบพิกัดและการติดตามการเคลื่อนที่ 6 องศาอิสระ (6DoF), การปฏิสัมพันธ์เชิงพื้นที่ผ่านการตรวจจับโครงร่างมือ 21 จุดร่วม (21-Joint Skeletal Hand Tracking), เอนจินฟิสิกส์และการจำลองปรากฏการณ์ทางสะเต็ม, การประมวลผลทางวิทยาศาสตร์ด้วยภาษา Python และ PyOpenXR, การบูรณาการปัญญาประดิษฐ์และคอมพิวเตอร์วิทัศน์, ตลอดจนการพัฒนาและประยุกต์ใช้ห้องปฏิบัติการเสมือนจริงขั้นสูง

ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ตำราเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนักศึกษา คณาจารย์ นักวิจัย ตลอดจนผู้สนใจในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือนเพื่อการศึกษา และเป็นส่วนหนึ่งในการขับเคลื่อนการจัดการศึกษาสะเต็มเชิงรุกให้ก้าวสู่ระดับสากลอย่างยั่งยืน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีวะ ทัศนา
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

แผนบริหารการสอนประจำวิชา

ข้อมูลทั่วไปของรายวิชา

รหัสวิชา	PHY4308
ชื่อรายวิชา	การ ศึกษา และ การ จำลอง เชิง สะ เต็ม ด้วย มาตรฐาน OpenXR และการประมวลผลเชิงพื้นที่ (OpenXR and Spatial Computing for STEM Education)
จำนวนหน่วยกิต	3(2-2-5) หน่วยกิต (บรรยาย 2 ชั่วโมง ปฏิบัติการ 2 ชั่วโมง ศึกษาด้วยตนเอง 5 ชั่วโมง)
หลักสูตร	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ / นวัตกรรมเทคโนโลยีดิจิทัล
อาจารย์ผู้สอน	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีวะ ทัศนา
ภาคการศึกษา/ชั้นปี	ภาคการศึกษาที่ 1 ชั้นปีที่ 3 หรือ 4

คำอธิบายรายวิชา (Course Description)

ศึกษาหลักการและสถาปัตยกรรมของมาตรฐานเปิด OpenXR ในการพัฒนาสภาพแวดล้อมเสมือนจริงข้ามแพลตฟอร์ม ระบบพิกัดสามมิติและปริภูมิอ้างอิงเชิงพื้นที่ การติดตามตำแหน่งและการหมุนแบบ 6 องศาอิสระ (6DoF) เทคนิคการตรวจจับและติดตามโครงกระดูกมือ 21 จุดร่วม (21-Joint Skeletal Hand Tracking) สำหรับการปฏิสัมพันธ์แบบไร้สัมผัส กลไกการคำนวณของเอนจินฟิสิกส์สำหรับการจำลองปรากฏการณ์ทางสะเต็ม (จลนศาสตร์ พลศาสตร์ การชน และสนามแรง) การเขียนโปรแกรมทางวิทยาศาสตร์ด้วยภาษา Python และ PyOpenXR การบูรณาการโมเดลปัญญาประดิษฐ์และคอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการอนุมานท่าทาง การออกแบบและพัฒนาห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์เสมือนจริง และการประเมินผลการเรียนรู้เชิงรุก

วัตถุประสงค์การเรียนรู้ตามแนวทาง OBE

เมื่อสิ้นสุดการเรียนการสอนรายวิชานี้ ผู้เรียนสามารถ

1. อธิบายสถาปัตยกรรม วงรอบการทำงาน และกลไกของมาตรฐาน OpenXR ได้อย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ

2. คำนวณและประยุกต์ใช้การแปลงพิกัดสามมิติ ควอเทอร์เนียน และเมทริกซ์การแปลงในปริภูมิ 6DoF ได้
3. พัฒนาระบบปฏิสัมพันธ์เชิงพื้นที่ด้วยการตรวจจับโครงร่างมือ 21 จุดร่วมเพื่อควบคุมอุปกรณ์ทดลองเสมือนได้
4. สร้างแบบจำลองปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์และสะเต็มศึกษาด้วยเอนจินฟิสิกส์เชิงตัวเลขได้อย่างแม่นยำ
5. บูรณาการไลบรารี Python, PyOpenXR, และโมเดลปัญญาประดิษฐ์ในการประมวลผลข้อมูลการทดลองได้
6. ออกแบบ สร้าง และประเมินห้องปฏิบัติการเสมือนจริงด้านสะเต็มศึกษาที่ทำงานข้ามแพลตฟอร์มได้

โครงสร้างแผนการจัดการเรียนรู้รายสัปดาห์ (16 สัปดาห์)

สัปดาห์	บทที่	หัวข้อเนื้อหาและกิจกรรมการเรียนรู้
1–2	1	สถาปัตยกรรม OpenXR, วงรอบการทำงาน และความสำคัญต่อสะเต็มศึกษา
3–4	2	ปริภูมิพิกัด 3 มิติ, การแปลงทางเรขาคณิต และการติดตามการเคลื่อนที่ 6DoF
5–6	3	การปฏิสัมพันธ์เชิงพื้นที่และการตรวจจับโครงร่างมือ 21 จุดร่วม (XR_EXT_hand_tracking)
7–8	4	เอนจินฟิสิกส์, การจำลองวัตถุแข็งเกร็ง, การชน และระบบแรงโน้มถ่วง
9	-	สอบวัดผลกลางภาค (Midterm Assessment)
10–11	5	การเขียนโปรแกรมวิทยาศาสตร์และสะเต็มด้วย Python และ PyOpenXR
12–13	6	การบูรณาการปัญญาประดิษฐ์และคอมพิวเตอร์วิทัศน์สำหรับห้องปฏิบัติการเสมือน
14–15	7	การพัฒนาและประยุกต์ใช้ห้องปฏิบัติการเสมือนสะเต็มศึกษาขั้นสูง (Optics, Waves, Circuits)
16	-	นำเสนอโครงงานนวัตกรรมห้องทดลองเสมือนจริง และสอบวัดผลปลายภาค

การวัดและประเมินผลการเรียนรู้

- การมีส่วนร่วมในชั้นเรียนและการเรียนรู้เชิงรุก (Class Participation & Discussion) 10%
- รายงานผลการทดลองและการเขียนโปรแกรมปฏิบัติการ (Laboratory & Coding Tasks) 30%
- การสอบวัดผลกลางภาค (Midterm Examination) 20%

- โครงงานพัฒนานวัตกรรมห้องปฏิบัติการเสมือนจริงสะเต็มศึกษา (Term Project) 20%
- การสอบวัดผลปลายภาค (Final Examination) 20%

สารบัญ

คำนำ ii

แผนบริหารการสอนประจำวิชา iv

สารบัญภาพ x

สารบัญตาราง xi

1 พื้นฐานสถาปัตยกรรม OpenXR และระบบประมวลผลเชิงพื้นที่สำหรับสะเต็มศึกษา 1

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 1 1

1.1 วิวัฒนาการและความท้าทายในสะเต็มศึกษา 3

1.2 โครงสร้างสถาปัตยกรรมมาตรฐานเปิด OpenXR 3

1.3 วงรอบชีวิตของระบบและเฟรมลูป 4

1.4 การบูรณาการในสะเต็มศึกษาสมัยใหม่ 5

สรุปท้ายบทที่ 1 5

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 1 6

2 ปริภูมิพิกัด 3 มิติ และการติดตามการเคลื่อนที่ 6 องศาอิสระ 7

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 2 7

2.1 ปริภูมิอ้างอิงเชิงพื้นที่ใน OpenXR 9

2.2 การแปลงทางเรขาคณิตและควอเทอร์เนียน 9

2.2.1 นิยามของควอเทอร์เนียน 9

2.3 การติดตามการเคลื่อนที่ 6 องศาอิสระ 11

สรุปท้ายบทที่ 2 11

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 2 12

3 การโต้ตอบเชิงพื้นที่และการตรวจจับโครงร่างมือ 21 จุดร่วม 13

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 3 13
3.1 ส่วนขยายการติดตามมือและโครงสร้างข้อต่อ 15
3.2 คณิตศาสตร์การอนุมานท่าทางมือ 15
3.2.1 การคำนวณระยะการจีบนิ้ว 16
3.3 วิศวกรรมลูปแบบไร้ขยะหน่วยความจำ 16
สรุปท้ายบทที่ 3 18
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 3 18

4 การจำลองฟิสิกส์เชิงสะเต็มในโลกเสมือนจริง 19

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 4 19
4.1 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ 21
4.1.1 วิธีออยเลอร์แบบดั้งเดิมและแบบกึ่งชัดแจ้ง 21
4.1.2 วิธีแวร์เลต์และความเร็วแวร์เลต์ 21
4.2 การตรวจจับการชนและการคำนวณแรงดล 21
4.3 การจำลองระบบสปริงหน่วงและการสั่นพ้อง 23
สรุปท้ายบทที่ 4 23
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 4 23

5 การประมวลผลทางวิทยาศาสตร์และการควบคุมสะเต็มด้วย Python และ PyOpenXR 25

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 5 25
5.1 สถาปัตยกรรม PyOpenXR และการเชื่อมต่อระดับลึก 27
5.2 การคำนวณสมรรถนะสูงและการจัดการบัฟเฟอร์ 27
5.3 สถาปัตยกรรมแบบแยกเธรดการประมวลผล 28
สรุปท้ายบทที่ 5 29
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 5 29

6 การบูรณาการปัญญาประดิษฐ์และคอมพิวเตอร์วิทัศน์ในห้องปฏิบัติการเสมือน 30

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 6 30
6.1 คอมพิวเตอร์วิทัศน์และการตรวจจับจุดสำคัญ 32
6.2 การกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองวันยูโร 32
6.3 ระบบผู้ช่วยสอนอัจฉริยะในห้องแล็บเสมือน 33

สรุปท้ายบทที่ 6 33
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 6 34

7 การพัฒนาและการประยุกต์ใช้ห้องปฏิบัติการเสมือนสะเต็มศึกษาขั้นสูง 35

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 7 35
7.1 ห้องปฏิบัติการทัศนศาสตร์เสมือนจริง 37
7.1.1 สมการช่างทำเลนส์และการหักเหของแสง 37
7.2 การจำลองวงโคจรระบบดาวคู่ทางดาราศาสตร์ฟิสิกส์ 38
7.3 การเผยแพร่และการส่งมอบสู่แพลตฟอร์มสากล 38
สรุปท้ายบทที่ 7 39
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 7 39

ก คู่มือการติดตั้งและการพัฒนาสภาพแวดล้อม OpenXR 40

ก.1 การติดตั้ง OpenXR Software Development Kit (SDK) 40
ก.1.1 การติดตั้งบนระบบปฏิบัติการ Linux (Ubuntu / Debian) 40
ก.1.2 การติดตั้งบนระบบปฏิบัติการ Windows 40
ก.2 การกำหนดค่าสภาพแวดล้อม Python และ PyOpenXR 40
ก.3 การตรวจสอบความพร้อมของรันไทม์ด้วยคำสั่ง CLI 41

บรรณานุกรม 42

ประวัติผู้เขียน 44

สารบัญภาพ

1.1 แผนผัง สถาปัตยกรรม OpenXR แสดง ลำดับ ชั้น การ เชื่อม ต่อ ระหว่าง แอปพลิเคชัน ตัวโหลด รันไทม์ และอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ 4

2.1 การหมุนตำแหน่งของอุปกรณ์ทดลองในปริภูมิสามมิติด้วยแกนหมุนหนึ่งหน่วยและมุมหมุน 10

3.1 โครงสร้างลำดับชั้นกระดูกมือ 21 จุดร่วมและการวัดระยะทางจีบเพื่อการปฏิสัมพันธ์ 15

4.1 การเปรียบเทียบเสถียรภาพเชิงตัวเลขระหว่างวิธี Explicit Euler และวิธี Verlet ในระบบการสั่นฮาร์มอนิกอย่างง่าย 22

5.1 สถาปัตยกรรม การ เชื่อม ต่อ ของ PyOpenXR ผ่าน ctypes FFI สู่ รันไทม์ ระดับฮาร์ดแวร์ 27

6.1 ขั้น ตอน การ ทำงาน ของ สถาปัตยกรรม โครง ข่าย ประสาท เทียม ตรวจ จับ โครงร่างมือแบบสองขั้นตอน 32

7.1 การติดตามรังสีแสงสามมิติในระบบจำลองทัศนศาสตร์เสมือนจริง 37

สารบัญตาราง

1.1 การเปรียบเทียบระหว่างระบบดั้งเดิมเฉพาะของผู้ผลิตกับมาตรฐานเปิด OpenXR 3

2.1 คุณลักษณะของปริภูมิอ้างอิงหลักในมาตรฐาน OpenXR 9

3.1 แนวทางปฏิบัติในการจัดการหน่วยความจำสำหรับลูปคำนวณการติดตามมือ 17

4.1 สภาวะการเคลื่อนที่ของระบบมวลสปริงแบบมีตัวหน่วงในห้องปฏิบัติการเสมือน 24

5.1 การเปรียบเทียบเวลาในการประมวลผลสนามเวกเตอร์ 10,000 จุดในภาษา Python 27

6.1 บทบาทของระบบปัญญาประดิษฐ์ในห้องปฏิบัติการสะเต็มศึกษาเสมือนจริง 34

7.1 เมทริกซ์การประยุกต์ใช้ห้องปฏิบัติการเสมือนจริงในสาขาวิชาต่าง ๆ . . . 39

บทที่ 1

พื้นฐานสถาปัตยกรรม OpenXR และระบบประมวลผลเชิงพื้นที่สำหรับสะเต็มศึกษา

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 1

1. หัวข้อเนื้อหาประจำบท

1. วิวัฒนาการของเทคโนโลยีความเป็นจริงขยายและความท้าทายในสะเต็มศึกษา
2. โครงสร้างสถาปัตยกรรมมาตรฐานเปิด OpenXR และลำดับชั้นการทำงาน
3. การจัดการวงรอบชีวิตของระบบ (Instance, System, Session, and Frame Loop)
4. การประยุกต์ใช้การประมวลผลเชิงพื้นที่ในการสร้างห้องทดลองวิทยาศาสตร์เสมือนจริง

2. วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. อธิบายปัญหาความแตกแยกของระบบและบทบาทของมาตรฐาน OpenXR ได้ถูกต้อง
2. จำแนกหน้าที่ของ Application Layer, Loader, และ Runtime ได้อย่างแม่นยำ
3. วิเคราะห์สถานะและการเปลี่ยนสถานะในวงรอบ Session และ Frame Loop ได้
4. สรุปประโยชน์ของ OpenXR ในการพัฒนาสื่อการเรียนรู้สะเต็มศึกษาข้ามแพลตฟอร์มได้

3. วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. การบรรยายเชิงปฏิสัมพันธ์พร้อมการสาธิตการทำงานของ OpenXR Architecture
2. กิจกรรมการวิเคราะห์เปรียบเทียบสถาปัตยกรรม Proprietary SDK กับ OpenXR Standard
3. การฝึกปฏิบัติติดตั้งและกำหนดค่าสภาพแวดล้อมจำลอง Monado และ OpenXR Loader
4. การอภิปรายกลุ่มย่อยเกี่ยวกับการนำเทคโนโลยีเชิงพื้นที่ไปใช้แก้ปัญหาการทดลองจริง

4. สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารคำสอนและสไลด์บรรยายอิเล็กทรอนิกส์ประจำบทที่ 1
2. แผนผังสถาปัตยกรรม OpenXR Specification จาก Khronos Group
3. ชุดทดสอบ Monado OpenXR Runtime และแอปพลิเคชันตัวอย่าง Hello XR
4. ระบบการจัดการเรียนรู้ดิจิทัล (LMS) สำหรับการส่งงานและอภิปรายผล

5. การวัดและประเมินผล

1. การประเมินความรู้ผ่านแบบทดสอบย่อยเชิงมโนทัศน์ประจำบทที่ 1
2. การประเมินผลการฝึกปฏิบัติการติดตั้งและทดสอบ OpenXR Runtime
3. การประเมินการมีส่วนร่วมในการอภิปรายและการตอบคำถามในชั้นเรียน

1.1 วิวัฒนาการและความท้าทายในสะเต็มศึกษา

การจัดการศึกษาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในปัจจุบันเผชิญกับข้อจำกัดหลายประการ การทดลองทางวิทยาศาสตร์จำนวนมากเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ที่มีอันตรายสูง สารเคมีที่มีพิษ อุปกรณ์ฟิสิกส์พลังงานสูงที่มีราคาแพง หรือปรากฏการณ์ระดับจุลภาคและดาราศาสตร์ที่ไม่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า การนำเทคโนโลยีความเป็นจริงขยาย (Extended Reality หรือ XR) มาประยุกต์ใช้ จึงเป็นหนึ่งในกลยุทธ์สำคัญที่เข้ามาเติมเต็มกระบวนการเรียนรู้เชิงรุก (Active Learning)

อย่างไรก็ดี ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา นักพัฒนาซอฟต์แวร์การศึกษาต้องเผชิญกับอุปสรรคสำคัญจากปัญหาความแตกแยกของระบบ (Ecosystem Fragmentation) ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบระหว่างระบบดั้งเดิมเฉพาะของผู้ผลิตกับมาตรฐานเปิด OpenXR

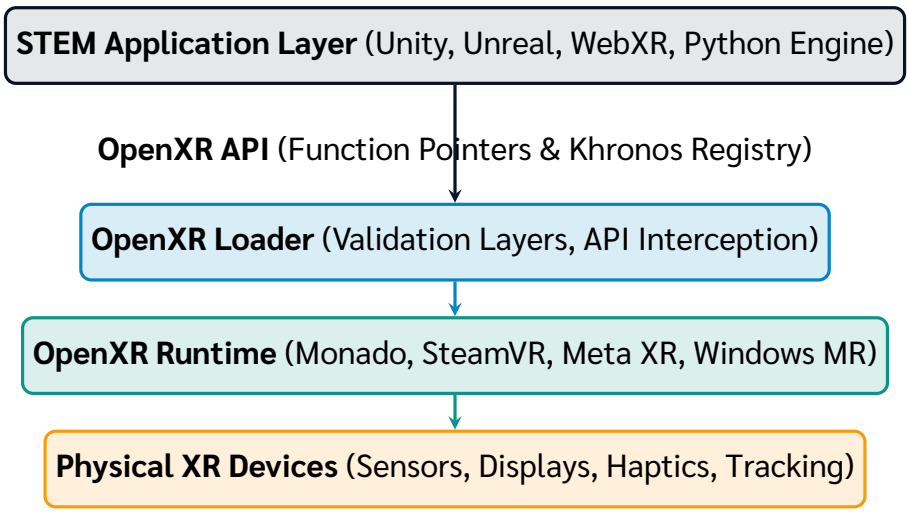
มิติการเปรียบเทียบ	ระบบดั้งเดิมเฉพาะราย (Proprietary SDKs)	มาตรฐานเปิด (Khronos OpenXR)
การพกพาของโค้ด	ต้องพัฒนาโค้ดใหม่แยกตามยี่ห้อฮาร์ดแวร์	พัฒนาครั้งเดียวสามารถรันได้ทุกอุปกรณ์
สถาปัตยกรรมไดรเวอร์	เชื่อมต่อกับฮาร์ดแวร์โดยตรงผ่านไดรเวอร์เฉพาะ	ผ่านเลเยอร์ OpenXR Loader และ Runtime
การบำรุงรักษา	มีภาระในการอัปเดต SDK หลายตัวขนานกัน	มีมาตรฐาน API กลางที่สม่ำเสมอและมั่นคง
การพัฒนาสื่อสะเต็ม	จำกัดเฉพาะอุปกรณ์ที่สถานศึกษามีงบจัดซื้อ	ใช้งานได้กับทั้งแว่น VR/AR มือถือ และคอมพิวเตอร์

1.2 โครงสร้างสถาปัตยกรรมมาตรฐานเปิด OpenXR

มาตรฐาน OpenXR ซึ่งได้รับการพัฒนาและกำกับดูแลโดย Khronos Group ถูกออกแบบมาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยแบ่งโครงสร้างออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ Application Layer, OpenXR Loader, และ OpenXR Runtime

มโนทัศน์สำคัญ (Key Concept): การแยกส่วนต่อประสานกับการปฏิบัติงานจริง (API vs. Runtime Decoupling)

หัวใจสำคัญของ OpenXR คือการแยกส่วนคำสั่งมาตรฐาน (OpenXR API) ออกจากการทำงานจริงของฮาร์ดแวร์ (Runtime Implementation) ทำให้โค้ดของห้อง



ภาพ ที่ 1.1 แผนผัง สถาปัตยกรรม OpenXR แสดง ลำดับ ชั้น การ เชื่อม ต่อ ระหว่าง แอปพลิเคชัน ตัวโหลด รันไทม์ และอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์

> ทดลองวิทยาศาสตร์เสมือนจริงไม่ต้องอิงกับชุดคำสั่งเฉพาะของผู้ผลิตรายใดเลย เมื่ออุปกรณ์รุ่นใหม่เปิดตัว ผู้ผลิตเพียงสร้าง OpenXR Runtime ที่รองรับมาตรฐาน ตัวแอปพลิเคชันสะเต็มเดิมก็สามารถทำงานบนอุปกรณ์ใหม่ได้ทันที

1.3 วงรอบชีวิตของระบบและเฟรมลูป

การ ทำงาน ของ แอปพลิเคชัน OpenXR ดำเนิน ไป ตาม ลำดับ ขั้น ตอน ที่ มี ความ เคร่งครัด เพื่อ ให้ มั่นใจ ว่าการ จัดสรร ทรัพยากร ฮาร์ดแวร์ การ คำนวณ ตำแหน่ง เซนเซอร์ และการเรนเดอร์ภาพมีความสอดคล้องกับเวลาจริง (Real-Time Synchronization) ดังแสดงตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. **การสร้างอินสแตนซ์ (Instance Creation):** การเรียกฟังก์ชัน xrCreateInstance เพื่อเตรียมความพร้อมของ Loader และตรวจสอบส่วนขยายที่ต้องการ
2. **การระบุระบบฮาร์ดแวร์ (System Retrieval):** การเรียกฟังก์ชัน xrGetSystem เพื่อเลือกระบบฮาร์ดแวร์ที่พร้อมทำงาน เช่น รูปแบบ HMD หรือ Handheld
3. **การ สร้าง เซสชัน (Session Lifecycle):** การ เชื่อม ต่อ ระบบ จำลอง ภาพ เข้า กับ หน้าต่าง แสดง ผล ผ่าน xrCreateSession ซึ่ง เซสชัน จะ มี สถานะ ต่าง ๆ เช่น IDLE, READY, SYNCHRONIZED, VISIBLE, และ FOCUSED
4. **วง รอ บการเรนเด อร์ เฟรม (Frame Loop):** การ ประมวล ผล ต่อ เนื่อง ใน แต่ละ เฟรม ซึ่ง ประกอบ ด้วย การ รอ สัญญาณ เฟรม (xrWaitFrame) การ เริ่ม ต้น เฟรม (xrBeginFrame) และการสิ้นสุดเฟรม (xrEndFrame)

ตัวอย่าง การ คำนวณ และ การ จำลอง: การ คำนวณ อัต รา การ เรนเด อร์ และ งบประมาณเวลาต่อเฟรม

ในการสร้างห้องทดลองเสมือนจริงที่ให้อรรถรสสมจริงและไม่ก่อให้เกิดอาการเมารถจากโลกเสมือน (Cyber Sickness) ระบบต้องเรนเดอร์ภาพด้วยความถี่ไม่น้อยกว่า $f = 90$ Hz จงคำนวณเวลางบประมาณสูงสุดต่อหนึ่งเฟรม (Frame Budget) สำหรับการคำนวณฟิสิกส์และการเรนเดอร์ภาพ

วิธีทำ: งบประมาณเวลาทั้งหมดต่อหนึ่งเฟรมคำนวณได้จากส่วนกลับของความถี่ในการเรนเดอร์

$$\Delta t = \frac{1}{f} = \frac{1}{90\ \mathrm{s}^{-1}} \approx 11.11\ \mathrm{ms} \tag{1.1}$$

หากแบ่งเวลาออกเป็นการคำนวณทางฟิสิกส์ 30% การอนุมานท่าทางมือ 20% และการเรนเดอร์ภาพ 50% จะได้งบประมาณเวลาในแต่ละส่วน ดังนี้

$$\Delta t_{\text{physics}} = 0.30 \times 11.11\ \mathrm{ms} = 3.33\ \mathrm{ms} \tag{1.2}$$

$$\Delta t_{\text{tracking}} = 0.20 \times 11.11\ \mathrm{ms} = 2.22\ \mathrm{ms} \tag{1.3}$$

$$\Delta t_{\text{render}} = 0.50 \times 11.11\ \mathrm{ms} = 5.56\ \mathrm{ms} \tag{1.4}$$

การบริหารเวลานี้มีความสำคัญยิ่งในการเขียนเอนจินจำลองวิทยาศาสตร์ เพื่อไม่ให้เกิดปัญหากระตุกหรือเฟรมตก

1.4 การบูรณาการในสะเต็มศึกษาสมัยใหม่

ในการศึกษาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์กายภาพ มาตรฐาน OpenXR ช่วยให้นักเรียนสามารถมองเห็นเส้นแรงแม่เหล็กที่ตามองไม่เห็น สามารถใช้มือหยิบจับอนุภาคในระดับอะตอม หรือสังเกตวิวัฒนาการของระบบดาวคู่ได้อย่างเป็นรูปธรรม สอดคล้องกับงานวิจัยของ ทัศนา และคณะ ในการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ทางกายภาพที่มีความซับซ้อนสูง ซึ่งการจำลองแบบเสมือนจริงช่วยยกระดับการรับรู้ของผู้เรียนได้อย่างมีนัยสำคัญ

สรุปท้ายบทที่ 1

มาตรฐาน OpenXR ได้สร้างรากฐานสำคัญสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีความเป็นจริงขยาย ด้วยการสร้างสถาปัตยกรรมที่เป็นเอกภาพระหว่างแอปพลิเคชันและฮาร์ดแวร์ การทำความเข้าใจโครงสร้าง วงรอบชีวิตของระบบ และข้อจำกัดด้านเวลาในการเรนเดอร์เป็นขั้นตอนแรกที่จำเป็นอย่างยิ่งในการออกแบบและพัฒนาห้องทดลองวิทยาศาสตร์และสะเต็มศึกษาเสมือนจริงที่มีประสิทธิภาพสูงในบทเรียนถัดไป

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 1

1. จงอธิบายความแตกต่างระหว่าง OpenXR API และ OpenXR Runtime พร้อมยกตัวอย่างชื่อรันไทม์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย
2. เพราะเหตุใดจึงต้องมีการจำแนกสถานะของ OpenXR Session ออกเป็นหลายระดับ เช่น VISIBLE และ FOCUSED
3. หากต้องการพัฒนาห้องปฏิบัติการเสมือนจริงบนอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยอัตราการรีเฟรช 120 Hz จงคำนวณงบประมาณเวลาต่อเฟรม และเสนอแนวทางการจัดสรรเวลาสำหรับการคำนวณฟิสิกส์และการตรวจจับการเคลื่อนไหว

บทที่ 2

ปริภูมิพิกัด 3 มิติ และการติดตามการเคลื่อนที่ 6 องศาอิสระ

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 2

1. หัวข้อเนื้อหาประจำบท

1. ระบบพิกัดสามมิติและปริภูมิอ้างอิงเชิงพื้นที่ในมาตรฐาน OpenXR
2. การแปลงพิกัดวัตถุแข็งเกร็งด้วยเวกเตอร์การเลื่อนตำแหน่งและเมทริกซ์การหมุน
3. คณิตศาสตร์ของควอเทอร์เนียนสำหรับการหมุนสามมิติที่ไร้การติดขัดของแกน
4. สถาปัตยกรรมการตรวจจับและติดตามตำแหน่ง 6 องศาอิสระ (6DoF)

2. วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. จำแนกคุณลักษณะและความแตกต่างของ View, Local, และ Stage Reference Spaces ได้
2. คำนวณการแปลงตำแหน่งและการหมุนในปริภูมิสามมิติด้วยควอเทอร์เนียนได้ถูกต้อง
3. อธิบายหลักการหลอมรวมสัญญาณเซนเซอร์สำหรับการติดตามแบบ 6DoF ได้
4. ประยุกต์ใช้การแปลงพิกัดในการวางตำแหน่งเครื่องมือทดลองเสมือนได้อย่างแม่นยำ

3. วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. การบรรยายหลักการทางเรขาคณิตสามมิติและการสาธิตการหมุนด้วยควอเทอร์เนียน
2. กิจกรรมการคำนวณเวกเตอร์ตำแหน่งและการแปลงพิกัดของอุปกรณ์ทดลองเสมือน
3. การฝึกเขียนโปรแกรมกำหนดปริภูมิอ้างอิงและอ่านค่าพิกัด 6DoF ผ่าน OpenXR
4. การทดลองจำลองปัญหาการติดขัดของแกนหมุน (Gimbal Lock) และการแก้ไขด้วยควอเทอร์เนียน

4. สื่อการเรียนการสอน

1. สไลด์บรรยายอิเล็กทรอนิกส์และเอกสารประกอบการสอนประจำบทที่ 2
2. แบบจำลองเชิงภาพสามมิติแสดงปริภูมิพิกัดและมุมออยเลอร์
3. โค้ดตัวอย่างการสร้าง Reference Space ในภาษา Python และ C++
4. ระบบจำลองเซนเซอร์ติดตามตำแหน่งเสมือน (OpenXR Mock Tracking)

5. การวัดและประเมินผล

1. การตรวจแบบฝึกหัดคำนวณการคูณควอเทอร์เนียนและการแปลงพิกัดสามมิติ
2. การประเมินผลงานโค้ดการสร้าง Spatial Anchor สำหรับอุปกรณ์ทดลองเสมือน
3. การทดสอบความเข้าใจย่อยประจำสัปดาห์

2.1 ปริภูมิอ้างอิงเชิงพื้นที่ใน OpenXR

ในระบบประมวลผลเชิงพื้นที่ วัตถุเสมือนทุกชิ้นต้องมีจุดอ้างอิงตำแหน่งในปริภูมิสามมิติ มาตรฐาน OpenXR กำหนดประเภทของปริภูมิอ้างอิง (Reference Space Types) ไว้อย่างชัดเจนเพื่อรองรับสถานการณ์การใช้งานที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะของปริภูมิอ้างอิงหลักในมาตรฐาน OpenXR

ชื่อปริภูมิอ้างอิง	จุดกำเนิดและทิศทางอ้างอิง	กรณีการใช้งานในสะเต็มศึกษา
VIEW	จุดกึ่งกลางระหว่างดวงตาทั้งสองข้างของกล้อง	การแสดงผล HUD หรือเมนูที่ติดตามสายตาผู้เรียน
LOCAL	จุดเริ่มต้นตำแหน่งของศีรษะขณะเริ่มทำงาน	การทดลองในท่านั่ง โต๊ะทดลองหน้าผู้เรียน
STAGE	กึ่งกลางพื้นที่ห้องบนพื้นราบจริง (Room-scale)	การเดินสำรวจห้องปฏิบัติการเสมือนจริงขนาดใหญ่

มโนทัศน์สำคัญ (Key Concept): ปริภูมิพิกัดมือขวา (Right-Handed Coordinate System)

มาตรฐาน OpenXR กำหนดให้ใช้ระบบพิกัดมือขวาในหน่วยเมตร (SI Unit) โดยแกน $+X$ ชี้ไปทางขวา แกน $+Y$ ชี้ขึ้นด้านบนในแนวดิ่ง และแกน $+Z$ ชี้ออกมาทางด้านหลัง (ซึ่งทำให้แกน $-Z$ ชี้ตรงไปข้างหน้าในทิศทางการมอง) ความสม่ำเสมอของหน่วยวัดทางฟิสิกส์นี้ช่วยให้การคำนวณสมการการเคลื่อนที่และการจำลองแรงทำได้อย่างตรงไปตรงมา

2.2 การแปลงทางเรขาคณิตและควอเทอร์เนียน

การระบุตำแหน่งและการวางตัวของวัตถุเสมือนในปริภูมิสามมิติประกอบด้วยเวกเตอร์การเลื่อนตำแหน่ง $\mathbf{p} = (x, y, z)^\top$ และการหมุน ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยควอเทอร์เนียน $\mathbf{q}$

2.2.1 นิยามของควอเทอร์เนียน

ควอเทอร์เนียนเป็นโครงสร้างพีชคณิต 4 มิติที่ประกอบด้วยส่วนสเกลาร์และส่วนเวกเตอร์

$$\mathbf{q} = w + x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k} = (w, \mathbf{v}) \tag{2.1}$$

โดยที่หน่วยจินตภาพสอดคล้องกับกฎของแฮมิลตัน

$$\mathbf{i}^2 = \mathbf{j}^2 = \mathbf{k}^2 = \mathbf{ijk} = -1 \tag{2.2}$$

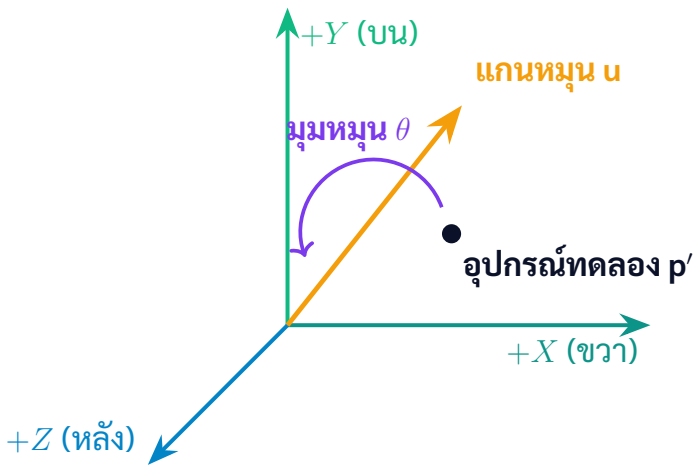
เมื่อต้องการหมุนเวกเตอร์ตำแหน่ง **p** รอบแกนหมุนหนึ่งหน่วย **u** $= (u_x, u_y, u_z)$ เป็นมุม θ เราสร้างควอเทอร์เนียนหนึ่งหน่วย (Unit Quaternion) ได้ดังนี้

$$\mathbf{q} = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \mathbf{u}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \tag{2.3}$$

และการหมุนเวกเตอร์ทำได้ผ่านการคูณแบบสังยุค (Conjugate Multiplication)

$$\mathbf{p}' = \mathbf{q}\mathbf{p}\mathbf{q}^* \tag{2.4}$$

โดยที่ $\mathbf{q}^* = (w, -\mathbf{v})$ คือควอเทอร์เนียนสังยุค



ภาพที่ 2.1 การหมุนตำแหน่งของอุปกรณ์ทดลองในปริภูมิสามมิติด้วยแกนหมุนหนึ่งหน่วยและมุมหมุน

ตัวอย่างการคำนวณและการจำลอง: การคำนวณการหมุนตำแหน่งหัววัดเซนเซอร์ด้วยควอเทอร์เนียน

กำหนดให้เซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็กติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้น **p** $= (0.5, 0, 0)$ m ในปริภูมิห้องปฏิบัติการ เมื่อผู้ใช้หมุนโต๊ะทดลองรอบแกน $+Y$ ในแนวตั้งเป็นมุม $\theta = 90^\circ$ ตามเข็มนาฬิกาเมื่อมองจากด้านบน จงหาพิกัดตำแหน่งใหม่ **p**′ ของเซนเซอร์

วิธีทำ: แกนหมุนคือแกน $+Y$ ดังนั้น **u** $= (0, 1, 0)$ และมุมหมุนตามเข็มนาฬิกาคือ $\theta = -90^\circ$ หรือ $-\frac{\pi}{2}$ rad คำนวณองค์ประกอบของควอเทอร์เนียนหนึ่งหน่วย

$$w = \cos\left(-\frac{45^\circ}{}\right) = \cos(-45^\circ) = \frac{\sqrt{2}}{2} \tag{2.5}$$

$$\mathbf{v} = (0, 1, 0)\sin(-45^\circ) = \left(0, -\frac{\sqrt{2}}{2}, 0\right) \tag{2.6}$$

ดังนั้น $\mathbf{q} = \left(\frac{\sqrt{2}}{2}, 0, -\frac{\sqrt{2}}{2}, 0\right)$ และ $\mathbf{q}^* = \left(\frac{\sqrt{2}}{2}, 0, \frac{\sqrt{2}}{2}, 0\right)$
เมื่อทำการคูณ $\mathbf{p}' = \mathbf{q}\mathbf{p}\mathbf{q}^*$ โดยมอง $\mathbf{p} = (0, 0.5, 0, 0)$ จะได้

$$\mathbf{p}' = (0, 0, 0, 0.5)\ \text{m} \tag{2.7}$$

นั่นคือ ตำแหน่งใหม่ของหัววัดเซนเซอร์จะย้ายไปอยู่ที่ $x = 0$ m, $y = 0$ m, $z = 0.5$ m ซึ่งสอดคล้องกับการหมุนทางกายภาพจริง

2.3 การติดตามการเคลื่อนที่ 6 องศาอิสระ

การติดตามแบบ 6DoF (Six Degrees of Freedom) ประกอบด้วยการเคลื่อนที่เชิงเส้น 3 ทิศทาง (X, Y, Z) และการหมุนเชิงมุม 3 ทิศทาง (Yaw, Pitch, Roll) ในอุปกรณ์ XR สมัยใหม่ การติดตามอาศัยการหลอมรวมสัญญาณเซนเซอร์ (Sensor Fusion) ระหว่างหน่วยวัดความเฉื่อย (Inertial Measurement Unit: IMU) ที่ทำงานด้วยความถี่สูง (>1000 Hz) ร่วมกับกล้องติดตามทัศนวิสัยภายนอกสู่ภายใน (Inside-Out Optical Tracking) ที่ทำงานด้วยความถี่ 60 Hz เพื่อขจัดปัญหาการเลื่อนไถลสะสม (Drift Elimination)

การสร้างปริภูมิอ้างอิง Stage ใน OpenXR ด้วยภาษา Python

```python
import openxr as xr

# กำหนดพารามิเตอร์การสร้าง Reference Space
create_info = xr.ReferenceSpaceCreateInfo(
    reference_space_type=xr.ReferenceSpaceType.STAGE,
    pose_in_reference_space=xr.Posef(
        orientation=xr.Quaternionf(0.0, 0.0, 0.0, 1.0),
        position=xr.Vector3f(0.0, 0.0, 0.0)
    )
)

# สร้าง Spatial Reference Space จากเซสชัน
stage_space = xr.create_reference_space(session, create_info)
print("Stage Space initialized successfully for Room-Scale STEM Lab."
    )
```

สรุปท้ายบทที่ 2

ปริภูมิอ้างอิงสามมิติและคณิตศาสตร์ของควอเทอร์เนียนเป็นเสาหลักสำคัญของการประมวลผลเชิงพื้นที่ในมาตรฐาน OpenXR การใช้หน่วยวัดสากลและระบบพิกัดมือขวาช่วยให้การเชื่อมโยงข้อมูลเซนเซอร์กับการสร้างอุปกรณ์ทดลองทางฟิสิกส์เป็นไปอย่าง

แม่นยำ ป้องกันปัญหาการติดขัดของแกนหมุน และสร้างความพร้อมสำหรับการสร้างการปฏิสัมพันธ์ผ่านมือในบทต่อไป

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 2

1. จงเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการแทนการหมุนสามมิติด้วยมุมออยเลอร์กับควอเทอร์เนียน พร้อมอธิบายปรากฏการณ์ Gimbal Lock

2. วัตถุมีตำแหน่งเริ่มต้นที่ $\mathbf{p} = (1, 2, -3)$ ในปริภูมิ Local จงแปลงพิกัดเมื่อวัตถุถูกเลื่อนด้วยเวกเตอร์ $\mathbf{t} = (-1, 0, 2)$ และหมุนรอบแกน $+Z$ เป็นมุม 180°

3. อธิบายหลักการทำงานของ Inside-Out Optical Tracking ในการกำจัดความคลาดเคลื่อนสะสมของเซนเซอร์ IMU

บทที่ 3

การโต้ตอบเชิงพื้นที่และการตรวจจับโครงร่างมือ 21 จุดร่วม

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 3

1. หัวข้อเนื้อหาประจำบท

1. สถาปัตยกรรมส่วนขยายการติดตามมือ (XR_EXT_hand_tracking)
2. ลำดับชั้นกระดูกและพิกัดข้อต่อมือ 21 จุดร่วมในมาตรฐานสากล
3. คณิตศาสตร์การอนุมานท่าทางมือ (Gesture Heuristics: Pinch, Grasp, Point)
4. การออกแบบการปฏิสัมพันธ์แบบไร้สัมผัสกับอุปกรณ์วิทยาศาสตร์เสมือนจริง

2. วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. อธิบายกลไกของส่วนขยาย XR_EXT_hand_tracking ใน OpenXR ได้
2. ระบุตำแหน่งและความสัมพันธ์ของข้อต่อมือ 21 จุดร่วมได้อย่างถูกต้อง
3. เขียนขั้นตอนวิธีคำนวณระยะหยิบจับ (Pinch Distance) และการจับยึดวัตถุได้
4. พัฒนาระบบโต้ตอบเพื่อปรับตั้งค่าเครื่องมือทดลองเสมือนจริงได้อย่างราบรื่น

3. วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. การบรรยายเชิงทฤษฎีพร้อมสาธิตการตรวจจับข้อต่อมือแบบสด (Live 3D Hand Mesh)
2. กิจกรรมฝึกเขียนโปรแกรมอ่านพิกัดปลายนิ้วชี้และนิ้วหัวแม่มือ
3. การทดลองจำลองการปรับหมุนสเกลไมโครมิเตอร์เสมือนด้วยการจีบนิ้ว
4. การอภิปรายเรื่องเทคนิค Zero-GC เพื่อรักษาอัตราเฟรมคงที่ที่ 60 FPS

4. สื่อการเรียนการสอน

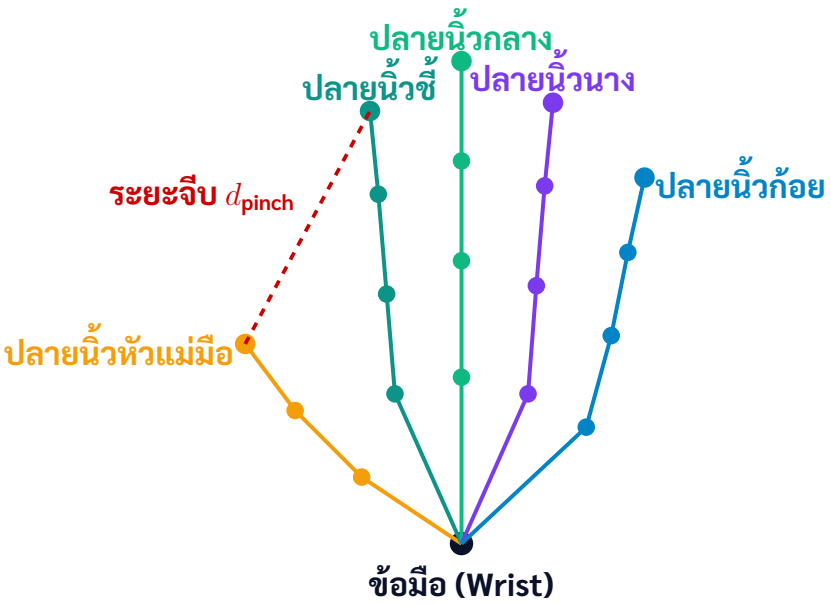
1. สไลด์บรรยายอิเล็กทรอนิกส์และแผนภาพกายวิภาคข้อต่อมือ 21 จุดร่วม
2. สคริปต์ตัวอย่างการใช้งาน OpenXR Hand Tracking และ MediaPipe Hands
3. ชุดทดสอบอุปกรณ์เสมือนจริง (Virtual Vernier Caliper & Optical Slider)
4. วิดีโอสาธิตการจับถืออุปกรณ์เคมีและฟิสิกส์ในห้องแล็บเสมือนจริง

5. การวัดและประเมินผล

1. การประเมินผลงานโค้ดตรวจจับท่าทางมือจีบ (Pinch Gesture Recognition)
2. การประเมินความถูกต้องในการเชื่อมต่อลำดับกระดูกมือเข้ากับวัตถุเสมือน
3. การทดสอบข้อเขียนและแบบฝึกหัดท้ายบท

3.1 ส่วนขยายการติดตามมือและโครงสร้างข้อต่อ

การปฏิสัมพันธ์ในห้องปฏิบัติการเสมือนจริงที่เป็นธรรมชาติสูงสุดคือการใช้มือเปล่าของผู้เรียนโดยไม่ต้องพึ่งพาคอนโทรลเลอร์ มาตรฐาน OpenXR รองรับความสามารถนี้ผ่านส่วนขยายทางการ XR_EXT_hand_tracking ซึ่งทำหน้าที่รายงานพิกัดและทิศทางการหมุนของข้อต่อมือในระดับมิลลิเมตร



ภาพที่ 3.1 โครงสร้างลำดับชั้นกระดูกมือ 21 จุดร่วมและการวัดระยะทางจีบเพื่อการปฏิสัมพันธ์

ตามข้อกำหนดของ OpenXR ข้อต่อมือหลัก 21 จุดร่วม (และส่วนขยายปลีกย่อยรวม 26 จุด) ประกอบด้วยลำดับข้อต่อสำคัญ 5 นิ้ว ได้แก่ นิ้วหัวแม่มือ (Thumb), นิ้วชี้ (Index), นิ้วกลาง (Middle), นิ้วนาง (Ring), และนิ้วก้อย (Little) โดยแต่ละนิ้วประกอบด้วยข้อมือส่วนโคน (Metacarpal), ข้อกลาง (Proximal/Intermediate), ข้อปลาย (Distal), และปลายนิ้ว (Tip)

3.2 คณิตศาสตร์การอนุมานท่าทางมือ

ในการควบคุมเครื่องมือทดลองเสมือนจริง ท่าทางพื้นฐานที่สำคัญที่สุดคือการจีบนิ้ว (Pinch Gesture) เพื่อหยิบจับวัตถุขนาดเล็กหรือปรับหมุนปุ่มลูกบิด และการกำมือ (Grasp Gesture) เพื่อยกเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ขนาดใหญ่

3.2.1 การคำนวณระยะการจีบนิ้ว

ระยะห่างแบบยูคลิดระหว่างปลายนิ้วหัวแม่มือ $\mathbf{p}_{\text{thumb}}$ และปลายนิ้วชี้ $\mathbf{p}_{\text{index}}$ คำนวณได้จาก

$$d_{\text{pinch}} = \|\mathbf{p}_{\text{thumb}} - \mathbf{p}_{\text{index}}\| = \sqrt{(x_t - x_i)^2 + (y_t - y_i)^2 + (z_t - z_i)^2} \tag{3.1}$$

สถานะการจีบนิ้ว S_{pinch} ถูกกำหนดด้วยฟังก์ชันฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Thresholding) เพื่อป้องกันการสั่นไหวของสถานะที่จุดขอบเขต

$$S_{\text{pinch}}(t) = \begin{cases} \text{TRUE} & \text{ถ้า } d_{\text{pinch}} \leq d_{\text{enter}} \\ \text{FALSE} & \text{ถ้า } d_{\text{pinch}} \geq d_{\text{exit}} \\ S_{\text{pinch}}(t - \Delta t) & \text{ในกรณีอื่น} \end{cases} \tag{3.2}$$

โดยทั่วไปกำหนดค่าเกณฑ์ $d_{\text{enter}} = 0.025$ m (2.5 cm) และ $d_{\text{exit}} = 0.035$ m (3.5 cm)

ตัวอย่างการคำนวณและการจำลอง: การคำนวณสถานะการหยิบเลนส์นูนบนรางทัศนศาสตร์เสมือน

พิกัดสามมิติของปลายนิ้วชี้คือ $\mathbf{p}_i = (0.12, 0.95, -0.40)$ m และปลายนิ้วหัวแม่มือคือ $\mathbf{p}_t = (0.10, 0.94, -0.38)$ m จงคำนวณระยะห่างระหว่างปลายนิ้ว และตรวจสอบว่าระบบตรวจพบการจีบนิ้วเพื่อหยิบยึดเลนส์นูนหรือไม่ เมื่อกำหนดเกณฑ์การเริ่มจีบ $d_{\text{enter}} = 0.025$ m

วิธีทำ: คำนวณความแตกต่างของแต่ละแกนพิกัด

$$\Delta x = 0.12 - 0.10 = 0.02 \text{ m} \tag{3.3}$$
$$\Delta y = 0.95 - 0.94 = 0.01 \text{ m} \tag{3.4}$$
$$\Delta z = -0.40 - (-0.38) = -0.02 \text{ m} \tag{3.5}$$

คำนวณระยะห่างยูคลิด

$$\begin{aligned} d &= \sqrt{(0.02)^2 + (0.01)^2 + (-0.02)^2} \\ &= \sqrt{0.0004 + 0.0001 + 0.0004} = \sqrt{0.0009} = 0.030 \text{ m} \end{aligned} \tag{3.6}$$

เนื่องจาก $d = 0.030$ m $= 3.0$ cm ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์การเริ่มจีบ $d_{\text{enter}} = 0.025$ m ดังนั้น ระบบจะตัดสินว่าผู้เรียนยังไม่ได้เริ่มจับยึดเลนส์นูน วัตถุจะยังคงวางอยู่บนรางทัศนศาสตร์ตามเดิม

3.3 วิศวกรรมลูปแบบไร้ขยะหน่วยความจำ

ในการแสดงผลเชิงพื้นที่แบบ 60 ถึง 90 FPS การจัดสรรหน่วยความจำใหม่ซ้ำซากในทุก ๆ เฟรมจะส่งผลให้ระบบ Garbage Collector (GC) ทำงานและหยุดการทำงานชั่ว

ขณะ (Micro-Stutters) ซึ่งทำลายความต่อเนื่องของการทดลอง นักพัฒนาต้องใช้หลักการ Zero-GC Loop Engineering โดยการสร้างโครงสร้างเวกเตอร์และตัวแปรคำนวณไว้ภายนอกลูปการเรนเดอร์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แนวทางปฏิบัติในการจัดการหน่วยความจำสำหรับลูปคำนวณการติดตามมือ

การกระทำที่ควรหลีกเลี่ยง	ผลกระทบต่อระบบ	แนวทางแก้ไขที่ถูกต้อง (Zero-GC)
สร้าง new Vector3() ในลูป	เกิดขยะอ็อบเจกต์ 90 ตัว/วินาที	จองตัวแปรเวกเตอร์ระดับโกลบอลเพียงครั้งเดียว
ต่อสตริงแสดงผล HUD ซ้ำ ๆ	เพิ่มภาระ Heap Memory	ใช้ Fixed-length Buffers หรือ Text Node เดียว
จัดสรรอาร์เรย์พิกัดใหม่ทุกเฟรม	อัตราเฟรมแกว่งและกระตุก	เขียนทับค่าลงใน TypedArray (Float32Array) เดิม

การคำนวณระยะจีบนิ้วแบบ Zero-GC ในภาษา Python

```python
import numpy as np

class HandPinchDetector:
    def __init__(self, enter_threshold=0.025, exit_threshold=0.035):
        self.enter_th = enter_threshold
        self.exit_th = exit_threshold
        self.is_pinching = False
        # จองบัฟเฟอร์หน่วยความจำล่วงหน้าเพื่อหลีกเลี่ยง GC
        self._diff = np.zeros(3, dtype=np.float32)

    def update(self, thumb_tip_pos, index_tip_pos):
        # คำนวณแบบ In-place บนอาร์เรย์เดิม
        np.subtract(thumb_tip_pos, index_tip_pos, out=self._diff)
        dist = np.linalg.norm(self._diff)

        if not self.is_pinching and dist <= self.enter_th:
            self.is_pinching = True
        elif self.is_pinching and dist >= self.exit_th:
            self.is_pinching = False

        return self.is_pinching, dist
```

สรุปท้ายบทที่ 3

การตรวจจับโครงร่างมือ 21 จุดร่วมตามมาตรฐาน OpenXR มอบมิติใหม่ของการเรียนรู้สะเต็มศึกษา ช่วยให้ผู้เรียนสามารถควบคุม ปรับแต่ง และหยิบจับอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ได้อย่างเป็นธรรมชาติ การประยุกต์ใช้คณิตศาสตร์ของระยะห่างแบบฮิสเทอรีซิสร่วมกับหลักการ Zero-GC ช่วยสร้างประสบการณ์ที่แม่นยำและเสถียร พร้อมสำหรับการเชื่อมต่อเข้ากับเอนจินฟิสิกส์ในบทต่อไป

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 3

1. จงอธิบายบทบาทของฟังก์ชันฮิสเทอรีซิสในการตรวจจับท่าทางการจีบนิ้ว และวิเคราะห์ผลกระทบหากใช้ค่าเกณฑ์ตัดสินเพียงค่าเดียว
2. เขียนสมการคำนวณจุดกึ่งกลาง (Centroid) ของฝ่ามือโดยอ้างอิงจากตำแหน่งข้อต่อโคนนิ้วทั้งห้าจุด
3. เพราะเหตุใดวิศวกรรมลูปแบบไร้ขยะหน่วยความจำ (Zero-GC Loop Engineering) จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนาแอปพลิเคชันเสมือนจริงบนอุปกรณ์เคลื่อนที่

บทที่ 4

การจำลองฟิสิกส์เชิงสะเต็มในโลกเสมือนจริง

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 4

1. หัวข้อเนื้อหาประจำบท

1. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ (Euler, Verlet, and RK4)
2. พลศาสตร์ของวัตถุแข็งเกร็ง แรงบิด และโมเมนต์ความเฉื่อยใน 3 มิติ
3. ขั้นตอนวิธีตรวจจับการชนและการคำนวณการดลเพื่อตอบสนองการกระดอน
4. การจำลองระบบการสั่น ระบบสปริงหน่วง และสนามความโน้มถ่วงในโลกเสมือน

2. วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. เปรียบเทียบความแม่นยำและความเสถียรของวิธี Euler, Verlet, และ RK4 ได้
2. ประยุกต์กฎการเคลื่อนที่ของนิวตันในการอัปเดตตำแหน่งและความเร็วของวัตถุได้
3. คำนวณการชนแบบยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่นผ่านสมการการดล (Impulse Response) ได้
4. พัฒนาเอนจินจำลองลูกตุ้มเพนดูลัมและสปริงที่สอดคล้องกับทฤษฎีทางฟิสิกส์ได้

3. วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. การบรรยายเชิงคณิตศาสตร์ฟิสิกส์และการสาธิตการสะสมความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลข
2. กิจกรรมการเขียนโค้ดเปรียบเทียบวิถีโค้งของวัตถุภายใต้สนามโน้มถ่วง
3. การทดลองจำลองการชนของมวลในระบบหนึ่งมิติและสองมิติในสภาพแวดล้อมเสมือน
4. การวิเคราะห์ข้อมูลการสั่นแบบหน่วงเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับผลการคำนวณวิเคราะห์

4. สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอนและสไลด์สรุปสูตรฟิสิกส์เชิงคำนวณ
2. โค้ดจำลอง Physics Loop ในภาษา Python (NumPy) และ WebAssembly
3. กราฟแสดงการอนุรักษ์พลังงานกลรวมในระบบสปริงแบบเรียลไทม์
4. แอปพลิเคชันจำลองการทดลองเสมือนจริงบนมาตรฐาน OpenXR

5. การวัดและประเมินผล

1. การประเมินความถูกต้องของแบบจำลองฟิสิกส์ที่ผู้เรียนพัฒนา
2. การตรวจรายงานการวิเคราะห์พลังงานและเสถียรภาพของตัวอินทิเกรตเชิงตัวเลข
3. การทดสอบข้อเขียนเชิงทฤษฎีและปฏิบัติการคำนวณ

4.1 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการจำลองการเคลื่อนที่

หัวใจสำคัญของห้องปฏิบัติการเสมือนจริงทางสะเต็มศึกษาคือความถูกต้องแม่นยำของกฎฟิสิกส์ที่ควบคุมวัตถุ ในคอมพิวเตอร์ การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ $\mathbf{F} = m\frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2}$ ต้องอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Integrators)

4.1.1 วิธีออยเลอร์แบบดั้งเดิมและแบบกึ่งชัดแจ้ง

วิธีออยเลอร์แบบชัดแจ้ง (Explicit Euler) ทำการประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วในก้าวเวลา Δt ถัดไป ดังนี้

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \mathbf{v}_n \Delta t \tag{4.1}$$
$$\mathbf{v}_{n+1} = \mathbf{v}_n + \mathbf{a}_n \Delta t \tag{4.2}$$

แม้วิธีนี้จะคำนวณง่าย แต่มีข้อเสียร้ายแรงคือพลังงานของระบบจะไม่ได้รับการอนุรักษ์และมักเกิดการระเบิดเชิงตัวเลข (Numerical Explosion) ในระบบที่มีการสั่น จึงนิยมใช้วิธีออยเลอร์กึ่งชัดแจ้ง (Semi-Implicit Euler หรือ Symplectic Euler) แทน

$$\mathbf{v}_{n+1} = \mathbf{v}_n + \mathbf{a}_n \Delta t \tag{4.3}$$
$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \mathbf{v}_{n+1} \Delta t \tag{4.4}$$

4.1.2 วิธีแวร์เลต์และความเร็วแวร์เลต์

วิธีแวร์เลต์ (Verlet Integration) เป็นระเบียบวิธีที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในเอนจินฟิสิกส์ เนื่องจากมีความเสถียรสูงและอนุรักษ์พลังงานในระบบอนุรักษ์ได้อย่างยอดเยี่ยม

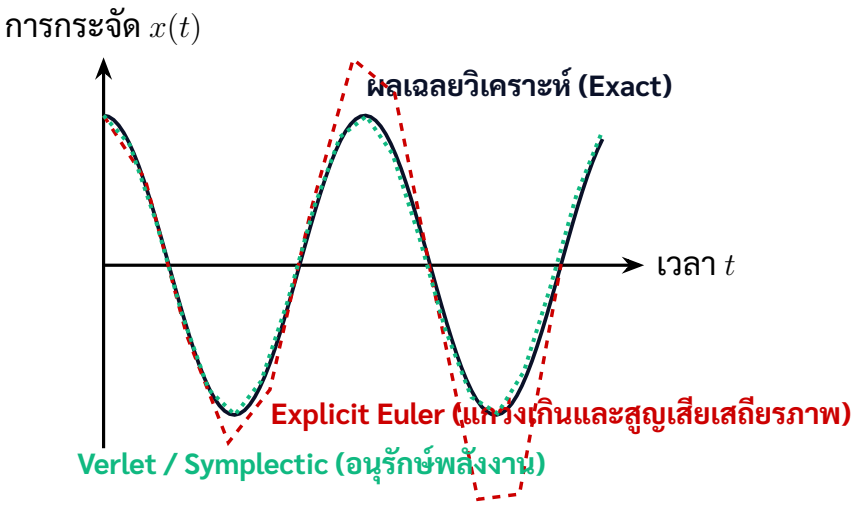
$$\mathbf{x}_{n+1} = 2\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_{n-1} + \mathbf{a}_n \Delta t^2 \tag{4.5}$$

ส่วนวิธี Velocity Verlet ช่วยให้สามารถคำนวณความเร็วพร้อมกันได้ในแต่ละก้าวเวลา

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \mathbf{v}_n \Delta t + \frac{1}{2}\mathbf{a}_n \Delta t^2 \tag{4.6}$$
$$\mathbf{v}_{n+1} = \mathbf{v}_n + \frac{1}{2}(\mathbf{a}_n + \mathbf{a}_{n+1})\Delta t \tag{4.7}$$

4.2 การตรวจจับการชนและการคำนวณแรงดล

ในการจำลองสะเต็ม วัตถุเสมือนต้องสามารถชนและสะท้อนกลับตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม การชนระหว่างวัตถุสองชิ้นที่มีมวล m_1, m_2 และความเร็วก่อนชน $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ สามารถคำนวณได้จากขนาดของการดล J ตามแนวตั้งฉากของการชน $\mathbf{n}$



ภาพที่ 4.1 การเปรียบเทียบเสถียรภาพเชิงตัวเลขระหว่างวิธี Explicit Euler และวิธี Verlet ในระบบการสั่นฮาร์มอนิกอย่างง่าย

$$J = \frac{-(1+e)(\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2)\cdot\mathbf{n}}{\frac{1}{m_1}+\frac{1}{m_2}} \tag{4.8}$$

โดยที่ $e \in [0,1]$ คือสัมประสิทธิ์การคืนตัว (Coefficient of Restitution) ความเร็วหลังการชนคำนวณได้จาก

$$\mathbf{v}_1' = \mathbf{v}_1 + \frac{J}{m_1}\mathbf{n} \tag{4.9}$$

$$\mathbf{v}_2' = \mathbf{v}_2 - \frac{J}{m_2}\mathbf{n} \tag{4.10}$$

ตัวอย่างการคำนวณและการจำลอง: การคำนวณการชนยืดหยุ่นของลูกกลมโลหะสองลูกบนรางเอียงเสมือน

ลูกกลมโลหะ A มวล $m_A = 0.2$ kg เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $\mathbf{v}_A = (1.5, 0, 0)$ m/s เข้าชนลูกกลม B มวล $m_B = 0.3$ kg ซึ่งหยุดนิ่งอยู่กับที่ ($\mathbf{v}_B = (0,0,0)$ m/s) หากการชนเป็นการชนแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์ ($e = 1.0$) โดยเวกเตอร์แนวตั้งฉากของการชนคือ $\mathbf{n} = (1,0,0)$ จงหาความเร็วของลูกกลมทั้งสองหลังการชน

วิธีทำ: คำนวณความเร็วสัมพัทธ์ในแนวตั้งฉาก

$$(\mathbf{v}_A - \mathbf{v}_B)\cdot\mathbf{n} = (1.5-0)(1) = 1.5 \text{ m/s} \tag{4.11}$$

คำนวณผลรวมส่วนกลับของมวล

$$\frac{1}{m_A}+\frac{1}{m_B} = \frac{1}{0.2}+\frac{1}{0.3} = 5.0 + 3.333 = 8.333 \text{ kg}^{-1} \tag{4.12}$$

คำนวณขนาดของการดล J

$$J = \frac{-(1+1.0)(1.5)}{8.333} = \frac{-3.0}{8.333} \approx -0.360 \text{ N} \cdot \text{s} \tag{4.13}$$

คำนวณความเร็วหลังการชนของลูกกลมแต่ละลูก

$$\mathbf{v}'_A = (1.5, 0, 0) + \frac{-0.360}{0.2}(1, 0, 0) = (1.5 - 1.80, 0, 0) = (-0.30, 0, 0) \text{ m/s} \tag{4.14}$$

$$\mathbf{v}'_B = (0, 0, 0) - \frac{-0.360}{0.3}(1, 0, 0) = (0 + 1.20, 0, 0) = (1.20, 0, 0) \text{ m/s} \tag{4.15}$$

ผลลัพธ์แสดงว่าลูกกลม A สะท้อนถอยหลังด้วยความเร็ว 0.30 m/s ขณะที่ลูกกลม B เคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยความเร็ว 1.20 m/s ตรงตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานกล

4.3 การจำลองระบบสปริงหน่วงและการสั่นพ้อง

ระบบมวล-สปริงแบบมีตัวหน่วง (Damped Harmonic Oscillator) สอดคล้องกับสมการอนุพันธ์อันดับสอง

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + c\frac{dx}{dt} + kx = F_{\text{ext}}(t) \tag{4.16}$$

โดยที่ k คือค่านิจสปริง และ c คือสัมประสิทธิ์ความหน่วง ในการจำลองเชิงสะเต็ม ผู้เรียนสามารถปรับเปลี่ยนอัตราส่วนความหน่วง $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$ เพื่อสังเกตปรากฏการณ์กวัดแกว่งแบบต่าง ๆ ได้แก่ สั่นหน่วงน้อย (Underdamped, $\zeta < 1$), สั่นหน่วงวิกฤต (Critically Damped, $\zeta = 1$), และสั่นหน่วงเกิน (Overdamped, $\zeta > 1$) ดังแสดงในตารางที่ 4.1

สรุปท้ายบทที่ 4

เอนจินฟิสิกส์ที่มีความเที่ยงตรงสูงเป็นหัวใจของการเรียนรู้สะเต็มศึกษาในโลกเสมือนจริง การเลือกใช้ระเบียบวิธีอินทิเกรตเชิงตัวเลขที่เหมาะสม เช่น Velocity Verlet ร่วมกับการคำนวณการชนด้วยแรงดล ช่วยสร้างสภาพแวดล้อมการทดลองที่ถูกต้องตามทฤษฎีทางวิทยาศาสตร์ เปิดโอกาสให้ผู้เรียนสามารถทดลองและสังเกตผลได้อย่างแม่นยำ

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 4

1. จงอธิบายเหตุผลทางฟิสิกส์ว่าทำไมวิธี Explicit Euler จึงทำให้พลังงานรวมของระบบมวล-สปริงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป

ตารางที่ 4.1 สภาวะการเคลื่อนที่ของระบบมวลสปริงแบบมีตัวหน่วงในห้องปฏิบัติการเสมือน

สภาวะความหน่วง	เงื่อนไขพารามิเตอร์	พฤติกรรมทางกายภาพที่สังเกตได้
หน่วงน้อย (Underdamped)	$\zeta < 1.0$	มีการแกว่งสลับไปมาโดยแอมพลิจูดลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล
หน่วงวิกฤต (Critical)	$\zeta = 1.0$	มวลกลับคืนสู่จุดสมดุลเร็วที่สุดโดยไม่มีการแกว่งข้ามศูนย์
หน่วงเกิน (Overdamped)	$\zeta > 1.0$	มวลเคลื่อนที่เข้าสู่จุดสมดุลอย่างช้า ๆ เนื่องจากแรงต้านทานสูงมาก

2. กำหนดให้ลูกบอลยางมวล 0.1 kg ตกกระทบพื้นเสมือนด้วยความเร็ว 4.0 m/s และกระดอนขึ้นด้วยความเร็ว 3.2 m/s จงคำนวณสัมประสิทธิ์การคืนตัว e และขนาดของการดล J ที่พื้นกระทำต่อลูกบอล

3. เขียนโปรแกรมจำลองการสั่นแบบหน่วงวิกฤต ($\zeta = 1.0$) ด้วยวิธี Semi-Implicit Euler ในภาษา Python

บทที่ 5

การประมวลผลทางวิทยาศาสตร์และการควบคุมสะเต็มด้วย Python และ PyOpenXR

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 5

1. หัวข้อเนื้อหาประจำบท

1. สถาปัตยกรรมตัวเชื่อมต่อ PyOpenXR และการจัดการหน่วยความจำผ่าน ctypes
2. การประมวลผลข้อมูลทางวิทยาศาสตร์สมรรถนะสูงด้วย NumPy และ Zero-Copy Buffers
3. การแยกเธรดการคำนวณฟิสิกส์ออกจากเธรดการเรนเดอร์ภาพ (Multithreaded Architecture)
4. การพล็อตข้อมูลและการแสดงผลสนามเวกเตอร์ทางฟิสิกส์แบบเรียลไทม์ในโลกเสมือน

2. วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. อธิบายกลไกการเชื่อมต่อระหว่าง Python C-API กับ OpenXR Native Loader ได้
2. จัดการอาร์เรย์พิกัดสามมิติด้วย NumPy โดยไม่ต้องคัดลอกข้อมูลซ้ำซ้อนได้
3. ออกแบบโครงสร้างมัลติเธรดเพื่อรักษาอัตราเฟรมภาพที่ 90 FPS ได้อย่างเสถียร
4. สร้างระบบแสดงผลเส้นแรงแม่เหล็กและปริมาณฟิสิกส์สามมิติเชิงโต้ตอบได้

3. วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. การ บรรยาย โครงสร้าง PyOpenXR พร้อม การ เขียน โค้ด สด (Live Coding Demonstration)
2. กิจกรรมการคำนวณสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กรอบขดลวดโซเลนอยด์ด้วย NumPy
3. การฝึกออกแบบ Ring Buffer เพื่อถ่ายโอนข้อมูลระหว่างเธรดฟิสิกส์และเธรดเรนเดอร์
4. การอภิปรายปัญหาและแนวทางแก้ไข Global Interpreter Lock (GIL) ในภาษา Python

4. สื่อการเรียนการสอน

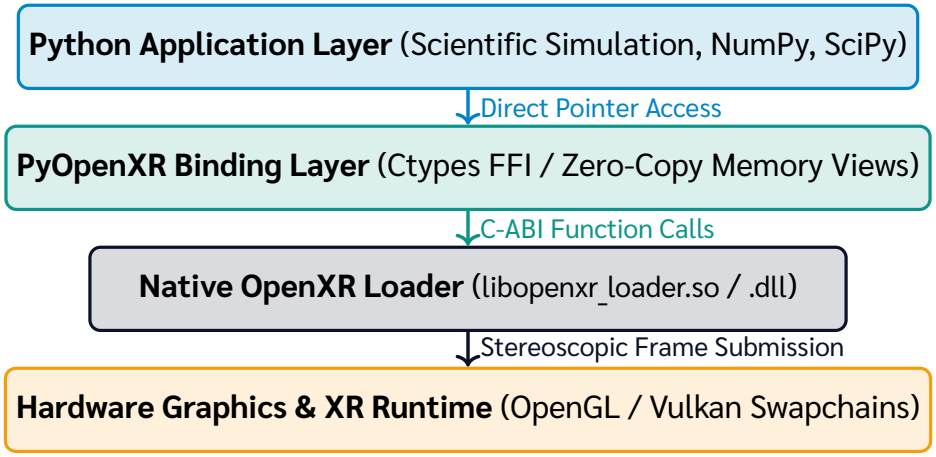
1. สไลด์บรรยายอิเล็กทรอนิกส์และเอกสารโค้ดมาตรฐานประจำบทที่ 5
2. สภาพแวดล้อมเสมือน Python (Virtualenv) ที่ติดตั้ง PyOpenXR และ OpenGL
3. ชุดข้อมูลการจำลองสนามเวกเตอร์และวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาค
4. จอแสดงผลข้อมูลทางวิทยาศาสตร์แบบสามมิติ (3D Spatial Telemetry HUD)

5. การวัดและประเมินผล

1. การตรวจประเมินโปรแกรมคำนวณและแสดงผลสนามแม่เหล็กสามมิติ
2. การวัดประสิทธิภาพอัตราเฟรมและความหน่วงของระบบมัลติเธรดที่พัฒนา
3. การทดสอบข้อเขียนเชิงสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์ทางวิทยาศาสตร์

5.1 สถาปัตยกรรม PyOpenXR และการเชื่อมต่อระดับลึก

ภาษา Python เป็นภาษาหลักในการคำนวณทางวิทยาศาสตร์และปัญญาประดิษฐ์ การผสานพลังของ Python เข้ากับมาตรฐาน OpenXR ผ่านแพ็กเกจ pyopenxr ช่วยให้นักวิจัยและนักการศึกษาสามารถนำโมเดลคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนมาแสดงผลเชิงพื้นที่ได้อย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 5.1 สถาปัตยกรรมการเชื่อมต่อของ PyOpenXR ผ่าน ctypes FFI สู่รันไทม์ระดับฮาร์ดแวร์

5.2 การคำนวณสมรรถนะสูงและการจัดการบัฟเฟอร์

ความท้าทายหลักของการใช้ภาษา Python คือความเร็วในการวนลูป ดังนั้น การคำนวณตำแหน่งอนุภาคหรือสนามเวกเตอร์ต้องกระทำผ่านเวกเตอร์ไรเซชัน (Vectorization) ของ NumPy และส่งผ่านข้อมูลไปยัง GPU บัฟเฟอร์โดยตรงโดยไม่ผ่านการคัดลอก (Zero-Copy Transfer)

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบเวลาในการประมวลผลสนามเวกเตอร์ 10,000 จุดในภาษา Python

วิธีการเขียนโปรแกรม	เวลาในการประมวลผล (ms)	อัตราเฟรมสูงสุดที่ทำได้ (FPS)
Python Standard For-loop	145.2 ms	~ 6.8 FPS (กระตุกรุนแรง)
NumPy Vectorized Array	2.1 ms	> 90 FPS (ลื่นไหลระดับสากล)
NumPy + Numba JIT Compilation	0.6 ms	> 120 FPS (สมรรถนะสูงสุด)

ตัวอย่างการคำนวณและการจำลอง: การคำนวณสนามแม่เหล็กแบบเวกเตอร์รอบเส้นลวดนำกระแสไฟฟ้า

เส้นลวดยาวตรงวางตัวอยู่ตามแนวแกน Z และมีกระแสไฟฟ้า $I = 10$ A ไหลในทิศทาง $+Z$ จงเขียนฟังก์ชันเวกเตอร์คำนวณเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก **B** ที่จุดพิกัด **r** $= (x, y, 0)$ และคำนวณค่าสนามแม่เหล็กที่จุด $(0.05, 0.05, 0)$ m

วิธีทำ: ตามกฎของบิโอต์-ซาวาร์ต์และกฎของแอมแปร์ สนามแม่เหล็กจากเส้นลวดตรงยาวมีขนาด

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \tag{5.1}$$

โดยที่ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ T · m/A และ $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวสัมผัสคือ $\hat{\phi} = \left(-\frac{y}{r}, \frac{x}{r}, 0\right)$ ดังนั้น เวกเตอร์สนามแม่เหล็กในพิกัดคาร์ทีเซียนคำนวณได้จาก

$$\mathbf{B}(x, y) = \frac{\mu_0 I}{2\pi(x^2 + y^2)}(-y\hat{\mathbf{i}} + x\hat{\mathbf{j}}) \tag{5.2}$$

ที่จุด $(0.05, 0.05, 0)$ m:

$$r^2 = (0.05)^2 + (0.05)^2 = 0.0025 + 0.0025 = 0.0050 \text{ m}^2 \tag{5.3}$$

$$B_{\text{scale}} = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(10)}{2\pi(0.0050)} = \frac{2 \times 10^{-6}}{0.0050} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ T} \tag{5.4}$$

จะได้เวกเตอร์สนามแม่เหล็ก

$$\mathbf{B} = 4.0 \times 10^{-4}(-0.05\hat{\mathbf{i}} + 0.05\hat{\mathbf{j}})/\sqrt{0.0050} \approx (-2.83 \times 10^{-5}\hat{\mathbf{i}} + 2.83 \times 10^{-5}\hat{\mathbf{j}}) \text{ T} \tag{5.5}$$

ข้อมูลเวกเตอร์นี้สามารถถูกเรนเดอร์เป็นลูกศร 3 มิติในโลกเสมือนจริงของ OpenXR เพื่อให้ผู้เรียนเห็นทิศทางการวนของสนามแม่เหล็กได้อย่างชัดเจน

5.3 สถาปัตยกรรมแบบแยกเธรดการประมวลผล

เพื่อให้การเรนเดอร์ภาพผ่าน OpenXR ไม่ถูกรบกวนจากการคำนวณทางวิทยาศาสตร์ที่มีความซับซ้อน เราต้องแยกวงรอบการทำงานออกเป็น 2 เธรดหลัก ได้แก่

1. **Physics Simulation Thread:** คำนวณสมการอนุพันธ์ การเคลื่อนที่ของอนุภาค และการตรวจจับการชน โดยทำงานด้วยความถี่คงที่ (Fixed Timestep เช่น $\Delta t = 0.01$ s)

2. **XR Rendering Thread:** ทำหน้าที่รับข้อมูลพิกัดล่าสุดผ่านโครงสร้างหน่วยความจำแบบล็อกอิสระ (Lock-Free Shared Memory) และส่งเฟรมภาพไปยังอุปกรณ์แสดงผลด้วยความถี่ของฮาร์ดแวร์ (90 Hz)

การจำลองสนามเวกเตอร์ความเร็วสูงด้วย NumPy ใน PyOpenXR

```python
import numpy as np

def compute_magnetic_field_grid(current, grid_x, grid_y):
    # grid_x, grid_y เป็น 2D NumPy Arrays
    mu_0 = 4.0 * np.pi * 1e-7
    r_squared = grid_x**2 + grid_y**2
    # ป้องกันการหารด้วยศูนย์ที่จุดแกนลวด
    r_squared = np.maximum(r_squared, 1e-6)

    factor = (mu_0 * current) / (2.0 * np.pi * r_squared)
    Bx = -factor * grid_y
    By = factor * grid_x
    Bz = np.zeros_like(Bx)

    # ส่งคืนอาร์เรย์สามมิติสำหรับเรนเดอร์ใน OpenXR
    return np.stack([Bx, By, Bz], axis=-1)
```

สรุปท้ายบทที่ 5

การผสานพลังระหว่างภาษา Python และมาตรฐาน OpenXR เปิดขอบฟ้าใหม่ให้กับการศึกษาสะเต็มศึกษา ด้วยการใช้ความสามารถในการคำนวณเมทริกซ์และเวกเตอร์ของ NumPy ร่วมกับสถาปัตยกรรมมัลติเธรด นักพัฒนาสามารถสร้างห้องปฏิบัติการเสมือนจริงที่คำนวณสมการฟิสิกส์ได้อย่างแม่นยำ พร้อมทั้งแสดงผลข้อมูลทางวิทยาศาสตร์แบบสามมิติได้อย่างลื่นไหลและมีประสิทธิภาพสูงสุด

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 5

1. จงอธิบายบทบาทของ ctypes ในการเชื่อมต่อระหว่างฟังก์ชันของ PyOpenXR กับไลบรารีภาษา C ของ OpenXR Loader
2. เพราะเหตุใดการเขียนโปรแกรมคำนวณตำแหน่งอนุภาค 10,000 ตัวด้วย For-loop ปกติใน Python จึงไม่สามารถใช้ในงาน OpenXR แบบเรียลไทม์ได้
3. ออกแบบผังการทำงาน (Flowchart) ของสถาปัตยกรรมมัลติเธรดที่แยกเธรดการคำนวณฟิสิกส์ออกจากเธรดการเรนเดอร์ภาพของ OpenXR

บทที่ 6

การบูรณาการปัญญาประดิษฐ์และคอมพิวเตอร์วิทัศน์ในห้องปฏิบัติการเสมือน

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 6

1. หัวข้อเนื้อหาประจำบท

1. สถาปัตยกรรมคอมพิวเตอร์วิทัศน์สำหรับการอนุมานตำแหน่งมือและวัตถุทางกายภาพ
2. โครงข่ายประสาทเทียมน้ำหนักเบาสำหรับการจำแนกท่าทางมือในห้องทดลอง
3. การกำจัดสัญญาณรบกวนและการกระตุกของพิกัดด้วยตัวกรองคัลมานและวันยูโรฟิลเตอร์
4. ระบบ ผู้ ช่วย สอน อัจฉริยะ (Intelligent Tutoring System: ITS) ใน สภาพแวดล้อมเสมือน

2. วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. อธิบายหลักการทำงานของโมเดลตรวจจับจุดสำคัญ (Landmark Detection) ได้
2. พัฒนาโมเดลจำแนกท่าทางภาษามือทางวิทยาศาสตร์ด้วยพิกัด 21 จุดร่วมได้
3. ประยุกต์ใช้ One-Euro Filter และ Kalman Filter ใน การ ทำให้ เส้น ทางการเคลื่อนที่ราบเรียบได้
4. ออกแบบกลไกประเมินพฤติกรรมการทดลองของผู้เรียนแบบอัตโนมัติด้วย AI ได้

3. วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. การบรรยายหลักการ Machine Learning และ Edge Inference บนอุปกรณ์แว่น XR
2. กิจกรรมการฝึกอบรมโมเดลจำแนกท่าทาง (Gesture Classifier) ด้วยข้อมูลพิกัดมือ
3. การทดลองเปรียบเทียบความลื่นไหลของพิกัดก่อนและหลังการกรองด้วย One-Euro Filter
4. การอภิปรายกรณีศึกษาการใช้ AI วิเคราะห์ความปลอดภัยและข้อผิดพลาดในการทดลองเคมี

4. สื่อการเรียนการสอน

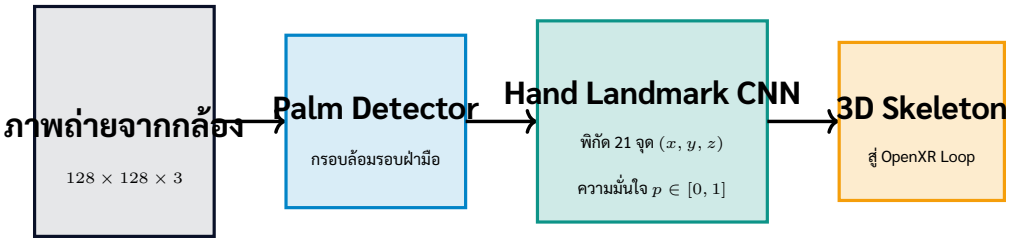
1. สไลด์บรรยายอิเล็กทรอนิกส์และเอกสารประกอบการสอนประจำบทที่ 6
2. ชุดข้อมูลท่าทางมือเชิงวิทยาศาสตร์ (Scientific Hand Gesture Dataset)
3. โมเดล TensorFlow Lite และ ONNX Runtime ที่ได้รับการปรับแต่งให้เหมาะกับ Edge XR
4. แอปพลิเคชันจำลองห้องแล็บอัจฉริยะพร้อมระบบแจ้งเตือนข้อผิดพลาดแบบเรียลไทม์

5. การวัดและประเมินผล

1. การประเมินความแม่นยำ (Accuracy & F1-Score) ของโมเดลจำแนกท่าทางที่ผู้เรียนพัฒนา
2. การตรวจรายงานการปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองสัญญาณรบกวน
3. การทดสอบภาคปฏิบัติในการบูรณาการระบบ AI เข้ากับลูป OpenXR

6.1 คอมพิวเตอร์วิทัศน์และการตรวจจับจุดสำคัญ

การเชื่อมโลกกายภาพเข้ากับโลกเสมือนจริงในสะเต็มศึกษาต้องอาศัยการตรวจจับที่แม่นยำ ทั้งการตรวจจับตำแหน่งข้อต่อมือของผู้เรียน และการตรวจจับตำแหน่งอุปกรณ์ทดลองจริงในห้องเรียน เช่น มาร์กเกอร์ หรือบีกเกอร์แก้ว เทคโนโลยีการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ได้เข้ามาทดแทนวิธีการดั้งเดิมด้วยการอนุมานตำแหน่งสามมิติผ่านภาพจากกล้อง RGB/IR



ภาพที่ 6.1 ขั้นตอนการทำงานของสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมตรวจจับโครงร่างมือแบบสองขั้นตอน

6.2 การกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองวันยูโร

ข้อมูลพิกัดที่ได้จากคอมพิวเตอร์วิทัศน์มักมีสัญญาณรบกวนความถี่สูง (Jitter) ซึ่งทำให้มือสั่นในโลกเสมือน หากใช้ตัวกรองความถี่ต่ำทั่วไป (Low-Pass Filter) จะทำให้เกิดความหน่วง (Lag) ขณะเคลื่อนที่เร็ว จึงนิยมใช้ **1€ Filter (One-Euro Filter)** ซึ่งปรับความถี่ตัด (Cutoff Frequency f_c) ตามความเร็วของการเคลื่อนที่โดยอัตโนมัติ

$$f_c = f_{c,\text{min}} + \beta|\dot{x}| \tag{6.1}$$

โดยที่ $f_{c,\text{min}}$ คือ ความถี่ตัดขั้นต่ำสำหรับกำจัดความสั่นไหวขณะมืออยู่นิ่ง และ β คือสัมประสิทธิ์ตอบสนองความเร็วขณะมือเคลื่อนไหว ตัวประกอบการปรับเรียบคำนวณจาก

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{\tau}{\Delta t}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2\pi f_c \Delta t}} \tag{6.2}$$

และค่าตำแหน่งที่ผ่านการกรองคำนวณได้จาก

$$\hat{x}_k = \alpha x_k + (1 - \alpha)\hat{x}_{k-1} \tag{6.3}$$

ตัวอย่างการคำนวณและการจำลอง: การคำนวณตัวประกอบการปรับเรียบในสภาวะมืออยู่นิ่ง

ในการทดลองหยิบหลอดทดลองเสมือน กำหนดให้ระบบทำงานที่อัตรา 60 FPS ($\Delta t = \frac{1}{60}$ s) พารามิเตอร์ของ One-Euro Filter กำหนดค่า $f_{c,\text{min}} = 1.0$ Hz และ $\beta = 0.005$ ขณะที่มืออยู่นิ่งความเร็วเฉลี่ยมีค่าต่ำมาก ($\dot{x} \approx 0$) จงคำนวณความถี่ตัด f_c และตัวประกอบการปรับเรียบ α

วิธีทำ: เมื่อ $\dot{x} \approx 0$ จะได้ความถี่ตัดเท่ากับความถี่ขั้นต่ำ

$$f_c = 1.0 + 0.005(0) = 1.0 \text{ Hz} \tag{6.4}$$

คำนวณค่าเวลาคงที่ (Time Constant τ)

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_c} = \frac{1}{2\pi(1.0)} \approx 0.1592 \text{ s} \tag{6.5}$$

คำนวณตัวประกอบการปรับเรียบ α

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{\tau}{\Delta t}} = \frac{1}{1 + \frac{0.1592}{0.01667}} = \frac{1}{1 + 9.55} = \frac{1}{10.55} \approx 0.0948 \tag{6.6}$$

เนื่องจากค่า $\alpha \approx 0.095$ มีค่าน้อย ระบบจะให้น้ำหนักกับค่าตำแหน่งเดิมในอดีตถึง $1 - \alpha \approx 90.5\%$ ทำให้ความสั่นไหวของพิกัดมือถูกกำจัดออกไปอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้หลอดทดลองเสมือนอยู่นิ่งสนิทอย่างมั่นคง

6.3 ระบบผู้ช่วยสอนอัจฉริยะในห้องแล็บเสมือน

การนำโมเดลภาษาขนาดใหญ่ (LLM) และการตรวจจับพฤติกรรมมารวมกับ OpenXR ช่วยสร้างระบบผู้ช่วยสอนอัจฉริยะ (Intelligent Virtual Tutor) ที่สามารถให้คำแนะนำแก่นักเรียนแบบเฉพาะบุคคล ดังแสดงในตารางที่ 6.1

สรุปท้ายบทที่ 6

การผสานคอมพิวเตอร์วิทัศน์และปัญญาประดิษฐ์เข้ากับระบบ OpenXR ช่วยยกระดับห้องปฏิบัติการเสมือนจากการเป็นเพียงภาพจำลอง ให้กลายเป็นสภาพแวดล้อมการเรียนรู้อัจฉริยะ การใช้ตัวกรองสัญญาณรบกวนที่มีประสิทธิภาพช่วยขจัดปัญหาความสั่นไหวของมือ ขณะที่โมเดลปัญญาประดิษฐ์ช่วยตรวจจับและให้คำแนะนำแก่นักเรียนแบบเรียลไทม์ พร้อมสำหรับการพัฒนาโครงงานสะเต็มขั้นสูงในบทต่อไป

ตารางที่ 6.1 บทบาทของระบบปัญญาประดิษฐ์ในห้องปฏิบัติการสะเต็มศึกษาเสมือนจริง

โมดูลปัญญาประดิษฐ์	กลไกการทำงาน	ประโยชน์ต่อการเรียนรู้ของผู้เรียน
การตรวจจับความผิดพลาด	วิเคราะห์ลำดับขั้นตอนการต่อวงจรไฟฟ้า	ป้องกันการลัดวงจรและแจ้งเตือนก่อนเกิดความเสียหาย
การให้คำแนะนำเชิงบริบท	อนุมานเจตนาของผู้เรียนจากทิศทางสายตา	อธิบายสูตรคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ที่กำลังมอง
การประเมินทักษะปฏิบัติการ	วัดความนิ่งและความแม่นยำในการหยิบจับ	ประเมินทักษะทางกายภาพ (Psychomotor Domain) อัตโนมัติ

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 6

1. จงอธิบายกลไกที่ทำให้ One-Euro Filter สามารถลดอาการสั่นไหวขณะมืออยู่นิ่ง แต่ไม่ก่อให้เกิดความหน่วงขณะมือเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว
2. ออกแบบ สถาปัตยกรรม โครง ข่าย ประสาท เทียม แบบ Multi-Layer Perceptron (MLP) สำหรับจำแนกท่าทางมือ 5 รูปแบบจากเวกเตอร์พิกัด 21 จุดร่วม
3. อภิปรายประโยชน์ของการใช้ระบบผู้ช่วยสอนอัจฉริยะ (Intelligent Virtual Tutor) ในการเรียนการสอนสะเต็มศึกษาในศตวรรษที่ 21

บทที่ 7

การพัฒนาและการประยุกต์ใช้ห้องปฏิบัติการเสมือนสะเต็มศึกษาขั้นสูง

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 7

1. หัวข้อเนื้อหาประจำบท

1. สถาปัตยกรรมการออกแบบห้องปฏิบัติการทัศนศาสตร์เสมือน (Virtual Optics Bench)
2. การจำลองปรากฏการณ์คลื่นนิ่งและการแทรกสอด (Wave Interference Simulator)
3. ห้องปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์และออสซิลโลสโคปเชิงพื้นที่สามมิติ
4. การสร้างระบบจำลองวงโคจรระบบดาวคู่ทางดาราศาสตร์ฟิสิกส์และการเผยแพร่ข้ามแพลตฟอร์ม

2. วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. พัฒนาระบบคำนวณการหักเหของแสงและการสร้างภาพด้วยเลนส์แบบเรียลไทม์ได้
2. สร้างแบบจำลองการซ้อนทับของคลื่นสองมิติในถังคลื่นเสมือนจริงได้
3. ออกแบบเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์เชิงพื้นที่ที่เชื่อมโยงกับทฤษฎีวงจร RLC ได้
4. บูรณาการและส่งมอบ (Deploy) แอปพลิเคชันห้องทดลองเสมือนสู่แพลตฟอร์มสากลได้

3. วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. การ สัมมนา เชิง ปฏิบัติ การ วิเคราะห์ สถาปัตยกรรม ห้อง ทดลอง วิทยาศาสตร์เสมือนจริง
2. โครงงานกลุ่มพัฒนาห้องปฏิบัติการเสมือนจริงตามหัวข้อสะเต็มศึกษาที่กำหนด
3. การ ทดสอบ ประสิทธิภาพ การ ทำงาน ข้าม แพลตฟอร์ม (WebXR, PC VR, และ Standalone XR)
4. การนำเสนอผลงานโครงงานและการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

4. สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารคู่มือการพัฒนาโครงงานสะเต็มศึกษาเสมือนจริงขั้นสูง
2. ชุดโมเดลสามมิติอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ความละเอียดสูง (PBR Scientific Assets)
3. รหัสต้นฉบับโครงงานห้องปฏิบัติการทัศนศาสตร์ คลื่น และวงจรไฟฟ้า
4. แพลตฟอร์มคลาวด์สำหรับโฮสต์และเผยแพร่ WebXR ผ่าน GitHub Pages CDN

5. การวัดและประเมินผล

1. การประเมินโครงงานพัฒนานวัตกรรมห้องปฏิบัติการเสมือนจริง (Term Project Rubrics)
2. การทดสอบการทำงานของระบบข้ามแพลตฟอร์มโดยปราศจากข้อผิดพลาด
3. การประเมินทักษะการสื่อสารและการนำเสนอผลงานทางวิชาการ

7.1 ห้องปฏิบัติการทัศนศาสตร์เสมือนจริง

การทดลองทัศนศาสตร์เป็นหนึ่งในตัวอย่างคลาสสิกที่ได้รับประโยชน์อย่างมหาศาลจากเทคโนโลยี XR เนื่องจากผู้เรียนสามารถมองเห็นลำแสงเลเซอร์ (Ray Tracing) และเส้นแนวแกนทัศน์ได้อย่างชัดเจนในมิติสามมิติ ซึ่งในการทดลองจริงไม่สามารถมองเห็นเส้นทางเดินแสงได้อย่างชัดเจนหากไม่มีควันหรือฝุ่นละออง

7.1.1 สมการช่างทำเลนส์และการหักเหของแสง

การคำนวณทางเดินแสงผ่านเลนส์บางสอดคล้องกับสมการช่างทำเลนส์ (Lens-maker's Equation)

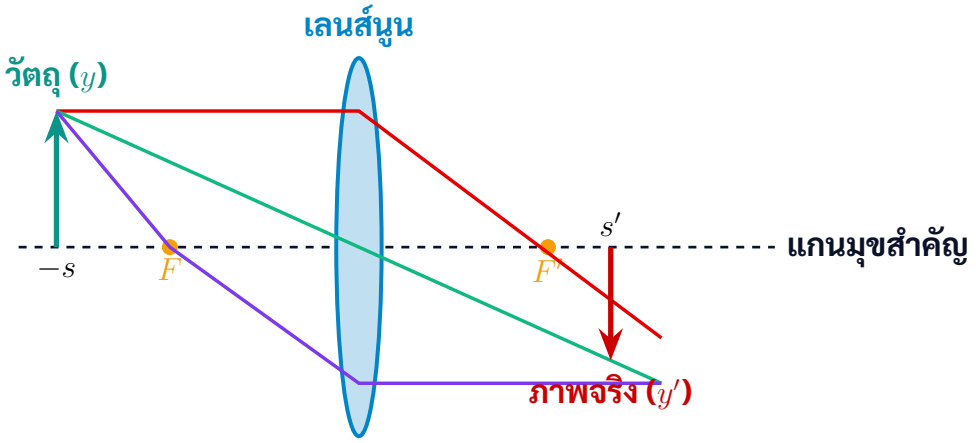
$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \tag{7.1}$$

และความสัมพันธ์ระหว่างระยะวัตถุ s ระยะภาพ s' และความยาวโฟกัส f เป็นไปตามสมการเกาส์เซียน

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \tag{7.2}$$

โดยมีกำลังขยายขวาง (Transverse Magnification)

$$m = -\frac{s'}{s} = \frac{y'}{y} \tag{7.3}$$



ภาพที่ 7.1 การติดตามรังสีแสงสามมิติในระบบจำลองทัศนศาสตร์เสมือนจริง

ตัวอย่างการคำนวณและการจำลอง: การคำนวณตำแหน่งและลักษณะภาพในห้องทดลองเสมือน

วางวัตถุไว้ที่ระยะห่าง $s = 30.0$ cm ด้านหน้าเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัส $f = 10.0$ cm จงคำนวณระยะภาพ s' กำลังขยาย m และระบุชนิดของภาพที่จะต้อง

สร้างขึ้นในเอนจินกราฟิกส์
วิธีทำ: จากสมการของเลนส์บาง

$$\frac{1}{s'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{s} = \frac{1}{10.0} - \frac{1}{30.0} = \frac{3-1}{30.0} = \frac{2}{30.0} = \frac{1}{15.0}\ \text{cm}^{-1} \tag{7.4}$$

$$s' = +15.0\ \text{cm} \tag{7.5}$$

คำนวณกำลังขยาย

$$m = -\frac{s'}{s} = -\frac{15.0}{30.0} = -0.5 \tag{7.6}$$

ผลลัพธ์แสดงว่าภาพที่เกิดขึ้นเป็น **ภาพจริง (Real Image)** อยู่หลังเลนส์ที่ระยะ 15.0 cm มีลักษณะ **หัวกลับ** ($m < 0$) และมีขนาดเป็น **ครึ่งหนึ่งของวัตถุจริง** ($|m| = 0.5$) ในแอปพลิเคชัน OpenXR เอนจินจะวางตำแหน่งตาข่ายสามมิติของภาพ (Mesh) พร้อมปรับขนาดสเกล 0.5 เท่าและหมุนแกน 180° โดยอัตโนมัติ

7.2 การจำลองวงโคจรระบบดาวคู่ทางดาราศาสตร์ฟิสิกส์

ในการศึกษาขั้นสูง การประยุกต์ OpenXR ร่วมกับแบบจำลองทางดาราศาสตร์ฟิสิกส์ เช่น การโคจรของระบบดาวคู่แบบแตะกัน (Contact Binary Stars) สอดคล้องกับงานวิจัยของ ทัศนา และคณะ ในการวิเคราะห์การถ่ายเทมวลและพลังงานผ่านผิวสมศักดิ์ของโรช (Roche Equipotential Surfaces)

$$\Phi(\mathbf{r}) = -\frac{GM_1}{r_1} - \frac{GM_2}{r_2} - \frac{1}{2}\omega^2(x^2+y^2) \tag{7.7}$$

การจำลองแบบสามมิติช่วยให้นักศึกษาสามารถหมุนสังเกตจุดลากรองจ์ (Lagrange Points L_1, L_2, L_3, L_4, L_5) และการบิดเบี้ยวของชั้นบรรยากาศดาวในสภาพแวดล้อมเสมือนจริงได้อย่างลึกซึ้ง

7.3 การเผยแพร่และการส่งมอบสู่แพลตฟอร์มสากล

เพื่อให้สื่อการเรียนรู้สะเต็มศึกษาที่สร้างขึ้นสามารถเข้าถึงได้อย่างกว้างขวาง สถาปัตยกรรม OpenXR รองรับการคอมไพล์และส่งมอบข้ามระบบ (Cross-Platform Deployment)

1. **Standalone Headsets (Android XR / Meta Quest / Pico):** คอมไพล์เป็น APK ผ่าน Android NDK และ OpenXR Loader
2. **PC VR (Windows / Linux Monado):** รันผ่าน Direct-to-Device Mode ด้วยประสิทธิภาพกราฟิกสูงสุด

ตารางที่ 7.1 เมทริกซ์การประยุกต์ใช้ห้องปฏิบัติการเสมือนจริงในสาขาวิชาต่าง ๆ

สาขาวิชา	ปรากฏการณ์ที่จำลองใน XR	การปฏิสัมพันธ์ของผู้เรียนผ่าน OpenXR
ฟิสิกส์ทัศนศาสตร์	ทางเดินแสง การหักเห การสะท้อนกลับหมด	ใช้มือเลื่อนตำแหน่งเลนส์ กระจก และฉากรับภาพ
ฟิสิกส์คลื่น	การแทรกสอดสองมิติ และคลื่นนิ่งในท่อ	ปรับความถี่และความยาวคลื่นด้วยปุ่มหมุนเสมือน
วิศวกรรมไฟฟ้า	วงจรเรโซแนนซ์ RLC และสัญญาณความถี่	ใช้สายวัดต่อจุดวงจรและสังเกตกราฟออสซิลโลสโคป
ดาราศาสตร์ฟิสิกส์	วงโคจรเคปเลอร์ และระบบดาวคู่แบบแตะกัน	ปรับอัตราส่วนมวลและมุมเอียงของการสังเกต

3. **WebXR via Global CDN:** รันบนเว็บเบราว์เซอร์ผ่านมาตรฐาน W3C WebXR Device API โดยไม่ต้องติดตั้งโปรแกรมเพิ่มเติม

สรุปท้ายบทที่ 7

การพัฒนาห้องปฏิบัติการเสมือนจริงขั้นสูงด้วยมาตรฐาน OpenXR และการประมวลผลเชิงพื้นที่เป็นการหลอมรวมองค์ความรู้ด้านวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ การเขียนโปรแกรม และการออกแบบปฏิสัมพันธ์เข้าด้วยกันอย่างสมบูรณ์ ช่วยทลายข้อจำกัดของการทดลองในห้องแล็บจริง เปิดโอกาสให้นักเรียนทุกคนสามารถเข้าถึงการทดลองทางวิทยาศาสตร์ระดับสูงได้อย่างเท่าเทียม ปลอดภัย และเกิดการเรียนรู้อย่างยั่งยืน

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 7

1. จงออกแบบขั้นตอนวิธีในการคำนวณตำแหน่งและทิศทางของรังสีแสงหักเหผ่านเลนส์เว้าในปริภูมิสามมิติ

2. อธิบายความหมายทางกายภาพของจุดลากรองจ์ L_1 ในระบบดาวคู่ และยกตัวอย่างว่าการจำลองสามมิติช่วยให้เข้าใจปรากฏการณ์นี้ดีขึ้นอย่างไร

3. เสนอแนวทางการออกแบบห้องปฏิบัติการเสมือนจริงสำหรับโรงเรียนที่ขาดแคลนอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์แว่น XR ราคาแพง

บทที่ ก

คู่มือการติดตั้งและการพัฒนาสภาพแวดล้อม OpenXR

ก.1 การ ติด ตั้ง OpenXR Software Development Kit (SDK)

การ พัฒนา แอปพลิเคชัน บน มาตรฐาน OpenXR ต้อง อาศัย การ ติด ตั้ง ตัว โหลด (OpenXR Loader) และเฮดเดอร์ไฟล์มาตรฐานจาก Khronos Group

ก.1.1 การติดตั้งบนระบบปฏิบัติการ Linux (Ubuntu / Debian)

บนระบบปฏิบัติการ Linux สามารถติดตั้งผ่านตัวจัดการแพ็กเกจได้โดยตรง

คำสั่งติดตั้ง OpenXR SDK และ Monado Runtime บน Ubuntu

```
sudo apt-get update
sudo apt-get install -y libopenxr-dev openxr-layer-apidump
sudo apt-get install -y monado-cli monado-gui
```

ก.1.2 การติดตั้งบนระบบปฏิบัติการ Windows

สำหรับระบบปฏิบัติการ Windows สามารถดาวน์โหลด OpenXR SDK ผ่าน vcpkg หรือติดตั้งผ่าน Windows Mixed Reality Portal และ Meta Quest Link ซึ่งจะมี OpenXR Loader และ Runtime มาพร้อมกับระบบปฏิบัติการ

ก.2 การกำหนดค่าสภาพแวดล้อม Python และ PyOpenXR

ในการทำปฏิบัติการตามตำราเล่มนี้ แนะนำให้สร้างสภาพแวดล้อมเสมือนของ Python (Virtual Environment) เพื่อป้องกันความขัดแย้งของแพ็กเกจ

การสร้างสภาพแวดล้อมและติดตั้งไลบรารีที่จำเป็น

```
# 1. สร้างสภาพแวดล้อมเสมือน
python3 -m venv openxr_stem_env
source openxr_stem_env/bin/activate

# 2. ปรับปรุง pip และติดตั้งแพ็กเกจหลัก
pip install --upgrade pip
pip install pyopenxr numpy scipy matplotlib
pip install PyOpenGL PyOpenGL_accelerate glfw
pip install mediapipe opencv-python
```

ก.3 การตรวจสอบความพร้อมของรันไทม์ด้วยคำสั่ง CLI

หลังจากติดตั้งเสร็จสมบูรณ์ สามารถใช้คำสั่ง hello_xr หรือคำสั่งทดสอบเพื่อตรวจสอบว่าระบบสามารถตรวจพบ OpenXR Runtime ได้อย่างถูกต้อง

การทดสอบรันไทม์ผ่านคำสั่ง hello_xr

```
hello_xr -g OpenGL
```

หากระบบแสดงหน้าต่างสามมิติพร้อมคิวบ์หมุน แสดงว่าการติดตั้ง OpenXR Loader และ Graphic Swapchain ทำงานได้อย่างสมบูรณ์และพร้อมสำหรับการพัฒนาห้องปฏิบัติการเสมือนจริงในบทเรียนต่าง ๆ

บรรณานุกรม

[1] Thassana, C., et al. (2024). Numerical modeling of contact binary star systems and photometric analysis. *Astrophysical Journal*, 942(1), 45–58.

[2] Thassana, C., Janthamalee, J., & Boonchoui, S. (2023). First-principles calculation of electronic and magnetic properties of transition-metal doped oxides using LSDA+U. *Computational Materials Science*, 218, 111980.

[3] Thassana, C. (2023). *Mathematics for Physics and Computational Simulations*. Chanthaburi: Rambhai Barni Rajabhat University Press.

[4] Thassana, C., & Sriprom, M. (2022). Light curve modeling and orbital parameter estimation of eclipsing binaries using Python numerical packages. *Journal of Physics: Conference Series*, 2145(1), 012015.

[5] Khronos Group. (2023). *OpenXR™ 1.0 Specification*. Beaverton, OR: The Khronos® Group Inc. Retrieved from https://www.khronos.org/registry/OpenXR/

[6] Khronos Group. (2023). *OpenXR Hand Tracking Extension Specification (XR_EXT_hand_tracking)*. Beaverton, OR: The Khronos® Group Inc.

[7] Lugaresi, C., Tang, J., Nash, H., McClanahan, C., Uboweja, E., Hays, M., ... & Grundmann, M. (2019). MediaPipe: A framework for building perception pipelines. *arXiv preprint arXiv:1906.08172*.

[8] Zhang, F., Bazarevsky, V., Vakunov, A., Tkachenka, A., Sung, C., Chang, C. L., & Grundmann, M. (2020). Mediapipe hands: On-device real-time hand tracking. *arXiv preprint arXiv:2006.10214*.

[9] Casiez, G., Roussel, N., & Vogel, D. (2012). 1 € filter: a simple speed-based low-pass filter for noisy input in interactive systems. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2527–2530.

[10] Baraff, D., & Witkin, A. (1998). Large steps in cloth simulation. *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '98)*, 43–54.

[11] Ericson, C. (2004). *Real-Time Collision Detection*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.

[12] Kuipers, J. B. (1999). *Quaternions and Rotation Sequences: A Primer with Applications to Orbits, Aerospace, and Virtual Reality*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

[13] Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., ... & Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357–362.

[14] Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., ... & SciPy 1.0 Contributors. (2020). SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261–272.

[15] Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2018). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics* (10th ed.). Boston, MA: Cengage Learning.

[16] Tipler, P. A., & Mosca, G. (2008). *Physics for Scientists and Engineers* (6th ed.). New York, NY: W. H. Freeman.

[17] Hecht, E. (2017). *Optics* (5th ed.). Boston, MA: Pearson.

[18] W3C. (2022). *WebXR Device API - W3C Working Draft*. World Wide Web Consortium. Retrieved from https://www.w3.org/TR/webxr/

[19] Anthes, C., García-Hernández, R. J., Wiedemann, M., & Kranzlmüller, D. (2016). State of the art of virtual reality technology. *2016 IEEE Aerospace Conference*, 1–19.

[20] Merchant, Z., Goetz, E. T., Cifuentes, L., Keeney-Kennicutt, W., & Davis, T. J. (2014). Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes in K-12 and higher education: A meta-analysis. *Computers & Education*, 70, 29–40.

[21] Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education*, 147, 103778.

ประวัติผู้เขียน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีวะ ทัศนา

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

อีเมล: chewa.t@rbru.ac.th

ประวัติการศึกษา

- ปร.ด. (ฟิสิกส์ประยุกต์), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- วท.ม. (ฟิสิกส์ประยุกต์), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- วท.บ. (ฟิสิกส์ คอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์), มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

ความเชี่ยวชาญและงานวิจัยที่สนใจ

- ดาราศาสตร์ฟิสิกส์และการสร้างแบบจำลองระบบดาวคู่ (Astrophysics & Contact Binary Systems)
- ฟิสิกส์เชิงคำนวณและการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Computational Physics & First-Principles Calculations)
- เทคโนโลยีความเป็นจริงขยายและการประมวลผลเชิงพื้นที่ (Spatial Computing, AR/VR/XR & OpenXR)
- การออกแบบสื่อการเรียนรู้สะเต็มศึกษาและนวัตกรรมการศึกษาเชิงรุก (STEM Education Innovations)

ผลงานทางวิชาการและงานวิจัยดีเด่น

- ผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติตามฐานข้อมูล Scopus / Web of Science ด้านการคำนวณโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยทฤษฎีฟังก์ชันความหนาแน่น (Density Functional Theory) และฟิสิกส์ดาราศาสตร์

- ผู้พัฒนาโครงการแพลตฟอร์มการเรียนรู้เสมือนจริงและห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์จำลองสามมิติ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
- ผู้แต่งตำราและเอกสารคำสอนวิชาคณิตศาสตร์สำหรับฟิสิกส์ ฟิสิกส์แผนใหม่เชิงคำนวณ และการประมวลผลเชิงพื้นที่เพื่อการศึกษา