



## การพัฒนาระบบจำลองและควบคุม Rotary Single Inverted Pendulum โดยใช้ ใน Ros2 และ Gazebo

นายภูมิภัทร งามเผือก 66340500043

### บทคัดย่อ

โครงงานนี้นำเสนอการพัฒนาระบบจำลอง (Simulation) และการควบคุมสำหรับ **Single Inverted Pendulum** โดยใช้ ROS2 (Robot Operating System 2) และ Gazebo ระบบนี้ประกอบด้วยแขนหมุน (Rotating Arm) และลูกตุ้มกลับขึ้นเดียว ซึ่งเป็นระบบ **Underactuated** ที่มีความท้าทายในการควบคุม โครงงานพัฒนาอัลกอริทึมการควบคุมแบบ **Two-Stage Control** : (1) **Energy-Based Swing-Up Controller** ที่ใช้หลักการควบคุมพลังงานเพื่อยกลูกตุ้มจากตำแหน่งห้อยลงมาขึ้นไปยังตำแหน่งตั้งตรง พร้อมกลไก Kick Mechanism และ Energy Regulation และ (2) **LQR Stabilization Controller** ร่วมกับ **Feedforward Gravity Compensation** เพื่อรักษาลูกตุ้มให้อยู่ในตำแหน่งตั้งตรงได้อย่างเสถียร ระบบมีการ **Mode Switching** อัตโนมัติและ **Setpoint Tracking** เพื่อป้องกันการดริฟท์ การสร้างระบบจำลองที่แม่นยำโดยใช้ URDF (Unified Robot Description Format) พร้อมกับพารามิเตอร์ทางกายภาพที่ถูกต้อง ทำให้สามารถทดสอบและปรับแต่งอัลกอริทึมการควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่าน **ros2\_control framework** ก่อนนำไปใช้กับระบบจริง

**คำสำคัญ:** Single Inverted Pendulum, Energy-Based Swing-Up, LQR Control, ROS2, Gazebo Simulation, URDF, ros2\_control, Underactuated System

## 1. บทนำ (Introduction)

### 1.1 จุดประสงค์โครงการ

- 1) เพื่อพัฒนาระบบจำลองแบบสมบูรณ์ของ Single Inverted Pendulum ใน Ros2 และ Gazebo โดยสร้าง Urdf Model ที่ประกอบด้วยแขนหมุน (Rotating Arm) และลูกตุ้มกลับ 1 ชั้น พร้อมกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพที่ถูกต้องครบถ้วน ได้แก่ มวล (Mass), ศูนย์ถ่วงมวล (Center Of Mass), Inertia Tensor, และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction Coefficients) เพื่อให้การจำลองมีความแม่นยำใกล้เคียงกับระบบจริงเพื่อกออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมโดยใช้ Ros2 Framework โดยใช้ Ros2\_Control สำหรับการควบคุมข้อต่อ (Joint Control) และพัฒนา Controller Nodes ที่สามารถทำให้ลูกตุ้มกลับทั้งสองชั้นอยู่ในตำแหน่งตั้งตรงได้อย่างเสถียร รวมถึงการทำ Swing-Up Control
- 2) เพื่อกออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมแบบ Two-Stage Control โดยใช้ Ros2 Framework:
  - 2.1) Energy-Based Swing-Up Controller ที่ใช้หลักการควบคุมพลังงาน (Energy Control) พร้อม Kick Mechanism เพื่อยกลูกตุ้มจากตำแหน่งห้อยลงมา ( $\alpha = 0 \text{ rad}$ ) ขึ้นไปยังตำแหน่งตั้งตรง ( $\alpha = \pi \text{ rad}$ ) และมีกลไก Energy Regulation เพื่อลดการแกว่งเกินเมื่อใกล้ตำแหน่งเป้าหมาย
  - 2.2) LQR Stabilization Controller เพื่อรักษาลูกตุ้มให้อยู่ในตำแหน่งตั้งตรงได้อย่างเสถียร ( $\alpha = \pi \text{ rad}$ )

## 1.2 ขอบเขต

### 1) ขอบเขตด้านการจำลอง (SIMULATION):

- สร้าง URDF Model ของ Rotary Single Inverted Pendulum ที่มีแขนหมุน (Rotating Arm) และลูกตุ้มกลับ 1 ชั้น
- กำหนดคุณสมบัติทางกายภาพทั้งหมดรวมถึง Full Inertia Tensor, มวล, ศูนย์กลางมวล, และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
- ตั้งค่า Gazebo Plugins สำหรับ Physics Engine และ Sensor Simulation
- ใช้ Ros2\_Control Framework สำหรับ Hardware Interface

### 2) ขอบเขตด้านการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์:

- พัฒนาโมเดลพลวัตโดยใช้ Euler-Lagrange Equation
- ประมาณค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพจาก Cad Model ด้วยโปรแกรม Solidwork2024

### 3) ขอบเขตด้านการควบคุมใน Ros2:

- ใช้ Joint State Controller, Joint Trajectory Controller หรือ Custom Controllers
- ทดสอบเทคนิคการควบคุมต่างๆ เช่น LQR, Energy-based Control
- สื่อสารระหว่าง Controllers ผ่าน Ros2

### 4) การวัดผลและประเมินผล:

- วัดประสิทธิภาพจากความสามารถในการรักษาตำแหน่งที่ตั้งตรงของลูกตุ้มใน Gazebo

## 2. ทบทวนวรรณกรรม และ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

### 2.1 Background Study

#### 1) ระบบ Inverted Pendulum ใน Ros และ Gazebo

ระบบ Inverted Pendulum เป็น Benchmark ที่ได้รับความนิยมในการศึกษาทฤษฎีการควบคุมและการจำลองระบบใน Ros/Gazebo การพัฒนาระบบจำลองที่แม่นยำต้องอาศัยความเข้าใจใน Urdf (Unified Robot Description Format) ซึ่งเป็นมาตรฐานในการอธิบายโครงสร้างหุ่นยนต์ใน Ros รวมถึงการตั้งค่า Inertial Properties ที่ถูกต้อง

#### 2) Ros2 และ Ros2\_Control Framework

Ros2 เป็น Middleware สำหรับพัฒนาระบบหุ่นยนต์ที่มีความสามารถในการทำงานแบบ Real-Time มากกว่า Ros1 โดย Ros2\_Control เป็น Framework สำหรับจัดการการควบคุมฮาร์ดแวร์และการจำลองในลักษณะเดียวกัน ทำให้สามารถพัฒนา Controller ที่ใช้ได้ทั้งในการจำลองและระบบจริง

### 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 1) งานวิจัยที่ 1: Cazzolato (2011) - On The Dynamics Of The Furuta Pendulum

งานวิจัยของ Cazzolato และ Prime วิเคราะห์พลวัตแบบสมบูรณ์ของระบบ Furuta Pendulum (Single Rotary Inverted Pendulum) โดยพิจารณา Full Inertia Tensor ทั้ง 3 แกนหลัก งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า:

1. งานวิจัยส่วนใหญ่จะละเลย Inertia Tensor: มากกว่า 90% ของงานวิจัยที่สำรวจพิจารณา Moment Of Inertia เพียงแกนเดียวหรือละเลยทั้งหมด ซึ่งทำให้โมเดลไม่สมจริง
2. ผลกระทบของ Additional Inertia Terms: เมื่อทดสอบด้วย 10v Step Input พบว่าระบบที่มี  $J_{2yy} = J_{2zz} = J_2$  มีพฤติกรรมแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากระบบที่ละเลย  $J_{2yy}$  ดังนี้:
  - ลูกตุ้มเคลื่อนไปสู่แนวนอนเร็วกว่า
  - ความถี่ธรรมชาติของลูกตุ้มสูงขึ้นเนื่องจาก CENTRIFUGAL FORCES
  - ความแตกต่างชัดเจนมากขึ้นเมื่อความเร็วเชิงมุมสูง

3. การตรวจสอบความถูกต้อง: ผู้วิจัยใช้ทั้ง Lagrangian Formulation และ Iterative Newton-Euler Approach และตรวจสอบด้วย Matlab Symbolic Toolbox และ Simmechanics เพื่อยืนยันความถูกต้อง

**การประยุกต์ใช้กับโครงการ:** ผลการวิจัยนี้เน้นย้ำถึงความสำคัญของการใช้ Full Inertia Tensor ในการจำลอง Gazebo โดยเฉพาะเมื่อต้องการความแม่นยำสูงสำหรับ Aggressive Controllers

## 2) งานวิจัยที่ 2: K. J. Åström และ K. Furuta (2000) - Swinging up a pendulum by energy control

งานวิจัยนี้เน้นที่แนวคิดทางทฤษฎีของการ Energy Control (การควบคุมพลังงาน) ซึ่งเป็นกลยุทธ์ที่ทนทานสำหรับการแกว่งขึ้นของลูกตุ้มกลับหัว

**แนวคิดหลัก (Energy Control) :**

- เป้าหมายคือการควบคุมลูกตุ้มในลักษณะที่ทำให้ พลังงานของลูกตุ้มถูกผลักดันไปสู่ค่าพลังงานที่สอดคล้องกับตำแหน่งที่ตั้งตรง (ซึ่งสะดวกในการกำหนดให้เป็นศูนย์).
- อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงาน ( $\frac{dE}{dt}$ ) สามารถควบคุมได้ง่าย เนื่องจากอัตรานี้มีความสัมพันธ์กับความเร็วเชิงมุมของลูกตุ้ม และอัตราเร่งของจุดหมุน (U)
- กลยุทธ์ที่ใช้คือรูปแบบ Bang-Bang ที่เรียบง่าย โดยควบคุมทิศทางของอัตราเร่งของจุดหมุน (U) เพื่อเพิ่มพลังงานให้กับระบบ.
- ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการแกว่งขึ้น:
- พฤติกรรมของการแกว่งขึ้นขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่ไม่มีมิติที่สำคัญคือ N ซึ่งเป็นอัตราส่วนของอัตราเร่งสูงสุดของจุดหมุน ( $U_{Max}$ ) ต่ออัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (g)

**พฤติกรรมการสวิทช์ขึ้นอยู่กัค่า N:**

- **Single-Swing Double-Switch:** หากอัตราเร่งที่ใช้ได้มีขนาดใหญ่เพียงพอ ( $N > 2$  หรือ  $U > 2g$ ), ลูกตุ้มสามารถแกว่งขึ้นถึงตำแหน่งที่ตั้งตรงได้ในการแกว่งเพียงครั้งเดียว โดยมีการสวิทช์แรงควบคุมสองครั้ง (จากศูนย์เป็นสูงสุดและกลับสู่ศูนย์)
- **Single-Swing Triple-Switch:** หากอัตราเร่งอยู่ระหว่าง  $4g/3$  ถึง  $2g$  ( $4/3 < N < 2$ ), ยังสามารถแกว่งขึ้นได้ในหนึ่งครั้ง แต่สัญญาณควบคุมจะต้องมีการสวิทช์ถึงสามครั้งเพื่อเพิ่มพลังงานสูงสุด
- **Multi-Swing Behaviour:** หากอัตราเร่งสูงสุดน้อยกว่า  $4g/3$  จำเป็นต้องใช้การแกว่งหลายครั้ง (multi-swing) เพื่อสะสมพลังงานให้เพียงพอ (เช่น หาก  $N = 0.25$  ต้องใช้ห้าครั้ง)

**ข้อดีเมื่อเทียบกับการควบคุมเวลาต่ำสุด (Minimum Time Control):**

- กลยุทธ์การควบคุมพลังงานนี้ให้อิทธิพลต่อการเข้าสู่ตำแหน่งที่ตั้งตรงที่ นุ่มนวลกว่า และ ทนทานกว่า
- กลยุทธ์เวลาต่ำสุดมีความอ่อนไหวสูง เนื่องจากมีแนวโน้มที่จะเกิด Energy Overshoot (พลังงานเกินเป้าหมาย) ซึ่งเพิ่มขึ้นตามค่า N (เช่น อาจเกิน 200% สำหรับ  $N = 5$ ). การควบคุมพลังงานที่ปราศจากการโอเวอร์ชูตจึงเป็นแนวทางปฏิบัติที่ดีและทนทานกว่าสำหรับการจับลูกตุ้มในตำแหน่งที่ตั้งตรง

## 3) งานวิจัยที่ 3: Minh Park, Yeoun-Jae Kim และ Ju-Jang Lee (2011) - Swing-Up And LQR Stabilization Of A Rotary Inverted Pendulum

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้กับระบบ ลูกตุ้มกลับหัวแบบหมุน (Rotary Inverted Pendulum) ซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรงที่หมุนแขนแข็ง (Rotating Arm) และมีลูกตุ้มห้อยอยู่

**เป้าหมายและการควบคุมหลัก:**

### 1. การแกว่งขึ้น (Swing-Up Strategy)

ผู้วิจัยเสนอ Modified Bang-Bang Control เพื่อให้ลูกตุ้มแกว่งขึ้นได้อย่างรวดเร็วและปลอดภัย

- กลยุทธ์พื้นฐาน: คือการใช้แรงบิดสูงสุด 90% ในทิศทางตรงกันข้ามกับความเร็วของลูกตุ้ม เมื่อลูกตุ้มเคลื่อนที่เข้าใกล้พื้น
- การปรับปรุง (Modification): มีการเพิ่ม Weighting Factor เพื่อกำหนดช่วงการทำงานของตัวควบคุมการแกว่งขึ้น. ปัจจัยนี้มีความสำคัญเพื่อป้องกันไม่ให้อัตราการหมุนเร็วเกินไปจนอาจทำให้มอเตอร์ทำงานผิดปกติ หากความเร็วของลูกตุ้มสูงมาก (เช่น เร็วกว่า 900 องศา/วินาที) ตัวควบคุมจะค่อย ๆ ปิดการทำงานของมอเตอร์

### 2. การรักษาเสถียรภาพ (LQR Stabilization)

เมื่อตัวควบคุมการแกว่งขึ้นนำลูกตุ้มเข้าสู่ช่วงการทำงานที่กำหนด (ระหว่าง  $-30$  องศาถึง  $30$  องศา จากตำแหน่งตั้งตรง) ตัวควบคุม LQR (Linear Quadratic Regulator) จะเข้ามารับช่วงต่อเพื่อรักษาเสถียรภาพ. LQR ถูกใช้เพื่อลดฟังก์ชันเป้าหมายที่ต้องการให้มุมลูกตุ้ม ( $A$ ) และมุมแขนหมุน ( $\theta$ ) เข้าสู่ตำแหน่งที่ต้องการโดยเร็วที่สุด

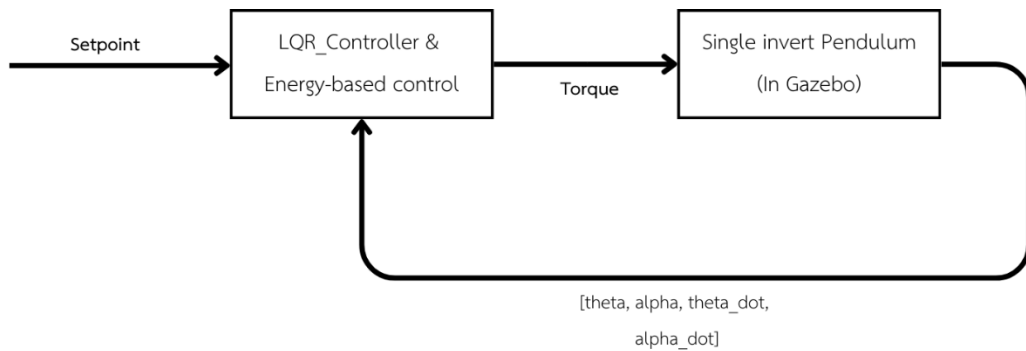
**ผลลัพธ์ที่สำคัญ:**

- ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบผสมผสานนี้สามารถทำให้ระบบลูกตุ้มกลับหัวมีเสถียรภาพได้ภายในเวลาน้อยกว่า  $3.0$  วินาที ไม่ว่าจะเริ่มต้นจากจุดใดก็ตาม.
- ระบบแสดงให้เห็นถึง ความทนทานต่อการรบกวน (Robustness) สูง โดยแม้ว่าคณะผู้จัดทำจะใส่ Disturbance ที่ทำให้ลูกตุ้มล้มลงไปด้วยด้านล่าง ตัวควบคุมก็สามารถกู้คืนตำแหน่งกลับสู่ตำแหน่งตั้งตรงได้อย่างรวดเร็ว

### 3. เนื้อหาในรายวิชาที่เกี่ยวข้อง

- 1) Ros2
  - Nodes, Topics, Services, Actions
  - Launch Files และ Parameters
  - Publisher/Subscriber Pattern
  - Service Clients/Servers
- 2) Urdf และ Robot Modeling
  - การสร้าง Urdf Files (Links, Joints)
  - Inertial Properties และ Collision Geometries
  - Xacro Macros สำหรับ Parameterization
  - การ Visualize ใน Rviz2
- 3) Gazebo Simulation
  - Gazebo Physics Engine และการตั้งค่า
  - Gazebo Plugins (Sensor Plugins, Model Plugins)
  - Integration ระหว่าง Ros2 และ Gazebo
  - Ros2\_Control Framework
  - Hardware Interface และ Controller Manager
  - Joint State Broadcaster
  - Position/Velocity/Effort Controllers
  - Custom Controller Development
- 4) Control Theory
  - Stability Analysis
- 5) Classical Mechanics
  - Lagrangian Formulation

### 4. System Diagram / System Overview (Function and Argument)



ภาพแสดง Control Diagram ของระบบ

## 1) LQR Controller

LQR (Linear Quadratic Regulator) เป็นเทคนิคการควบคุมแบบ optimal ที่ออกแบบโดยการลดค่า Cost function ซึ่งสมดุลระหว่าง state error และ control effort โดยใช้หลักการ linearization รอบจุดสมดุล (Upright position) เพื่อสร้าง Linear model แล้วหา feedback gain  $K$  ที่ optimal ผ่านการแก้ Algebraic Riccati Equation ซึ่งในโครงการนี้ใช้เป็น Feedback Controller หลักในการควบคุม Single Inverted Pendulum โดยรับ state จาก Plant ใน Gazebo เพื่อทำให้ลูกตุ้มอยู่ในตำแหน่งตั้งตรง ( $\alpha = \pi \text{ rad}$ ) และลดการแกว่งของแขนหมุน ( $\theta \approx 0$ ) เมื่อมี Disturbance เกิดขึ้น LQR จะสร้าง Corrective action ที่เหมาะสมโดยอัตโนมัติ

### Input:

- ตำแหน่งของ Rotary ( $\theta$ ) [rad]
- ตำแหน่งของลูกตุ้ม Pendulum ลำดับที่ 1 ( $\alpha$ ) [rad]
- ความเร็วของ Rotary ( $\dot{\theta}$ ) [rad/s]
- ความเร็วของลูกตุ้ม Pendulum ลำดับที่ 1 ( $\dot{\alpha}$ ) [rad/s]

### Output:

- Effort ที่ให้กับ Revolute joint ซึ่งได้จาก LQR Controller (Torque) [N/m]

## 2) Energy-Based Control

### 1. หลักการทำงาน (Principle)

เนื่องจากระบบ Rotary Inverted Pendulum เป็นระบบ Underactuated ที่ไม่สามารถส่งแรงบิดไปควบคุมลูกตุ้ม (Pendulum Link) โดยตรงได้ การทำให้ลูกตุ้มเคลื่อนที่จากตำแหน่งห้อยลง ( $\alpha = 0 \text{ rad}$ ) ไปยังตำแหน่งตั้งตรง ( $\alpha = \pi \text{ rad}$ ) จึงต้องอาศัยหลักการควบคุมพลังงาน (Energy-Based Control) เป้าหมายหลักของตัวควบคุมนี้คือการควบคุมพลังงานรวมของระบบ (Total Energy) ให้เข้าสู่สภาวะพลังงานศักย์สูงสุดที่ตำแหน่งตั้งตรง เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการเปลี่ยนโหมดไปใช้ตัวควบคุมแบบ LQR เพื่อรักษาเสถียรภาพต่อไป

### 2. การวิเคราะห์พลังงานของระบบ (Energy Analysis)

เพื่อให้ลูกตุ้มสามารถเหวี่ยงขึ้นไปยังตำแหน่งตั้งตรงได้ พลังงานรวมของลูกตุ้ม ( $E$ ) ณ ขณะนั้น จะต้องเท่ากับพลังงานศักย์ที่ตำแหน่งยอด (Upright Position) พอดี กำหนดให้ระดับพลังงานอ้างอิงเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งห้อยลงต่ำสุด พลังงานรวมของระบบสามารถเขียนสมการได้ดังนี้:

$$E = \frac{1}{2}I\omega^2 + mgl(1 - \cos \alpha)$$

โดยที่

$E$	คือ	พลังงานรวมของลูกตุ้ม (J)
$I$	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของลูกตุ้ม ( $\text{Nm}^2$ )
$\omega$	คือ	ความเร็วเชิงมุมของลูกตุ้ม (rad/s)
$m$	คือ	มวลของลูกตุ้ม (kg)

$g$	คือ	ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก ( $m/s^2$ )
$l$	คือ	ระยะจากจุดหมุนถึงจุดศูนย์กลางมวล (m)
$\alpha$	คือ	มุมของลูกตุ้ม (rad)

### 3. พลังงานเป้าหมาย (Target Energy)

เป้าหมายของการควบคุมคือการทำให้ลูกตุ้มหยุดนิ่งที่ตำแหน่งที่ตั้งตรง ( $\alpha = \pi \text{ rad}$ ,  $\omega = 0 \text{ rad/s}$ ) ดังนั้น พลังงานเป้าหมาย ( $E_{ref}$ ) ที่ต้องการโดยอ้างอิงจากตำแหน่งที่ลูกตุ้มอยู่ในตำแหน่งสมดุลที่ล่างที่สุด ( $\alpha = 0 \text{ rad}$ ,  $\omega = 0 \text{ rad/s}$ ) คือ:

$$E_{ref} = 2mgl$$

ฟังก์ชันความคลาดเคลื่อนของพลังงาน จึงนิยามได้ว่า:

$$J = E - E_{ref}$$

### 4. กลไก Kick Mechanism และการเปลี่ยนโหมด (Mode Switching Strategy)

เพื่อให้การควบคุมครอบคลุมทุกย่านการทำงาน โครงการงานนี้ได้ออกแบบอัลกอริทึมแบบ Two-Stage Control ดังนี้:

- **Kick Mechanism:** เนื่องจากที่ตำแหน่งเริ่มต้น ( $\alpha = 0 \text{ rad}$ ,  $\omega = 0 \text{ rad/s}$ ) ซึ่งจะต้องเผชิญกับ Static Friction ซึ่งส่งผลให้ลูกตุ้มไม่เกิดการเคลื่อนที่จึงต้องใช้วิธี Kick Mechanism เพื่อให้สามารถผลักตุ้มสามารถเริ่มเคลื่อนที่ได้
- **Swing-Up Control** เมื่อลูกตุ้มเริ่มขยับ ระบบจะใช้กฎการควบคุมพลังงาน (สมการข้างต้น) เพื่อเลี้ยงลูกตุ้มให้เหวี่ยงขึ้นจนเข้าใกล้จุดยอด
- **Stabilization Switching** เมื่อสถานะของลูกตุ้มเข้าสู่เงื่อนไข ( $|\alpha - \pi| < 0.1 \text{ rad}$ ) และ ( $|\omega| < 1 \text{ rad/s}$ ) ระบบจะทำการเปลี่ยนโหมดไปใช้ LQR Controller แทนที่ เพื่อดึงลูกตุ้มเข้าสู่จุดสมดุลและรักษาเสถียรภาพ

Input:

- ตำแหน่งของ Rotary (theta) [rad]
- ตำแหน่งของลูกตุ้ม Pendulum ลำดับที่ 1 (alpha) [rad]
- ความเร็วของ Rotary (theta\_dot) [rad/s]
- ความเร็วของลูกตุ้ม Pendulum ลำดับที่ 1 (alpha\_dot) [rad/s]

Output:

- Effort ที่ให้กับ Revolute joint [N/m]

### 3) Single Inverted Pendulum (In Gazebo)

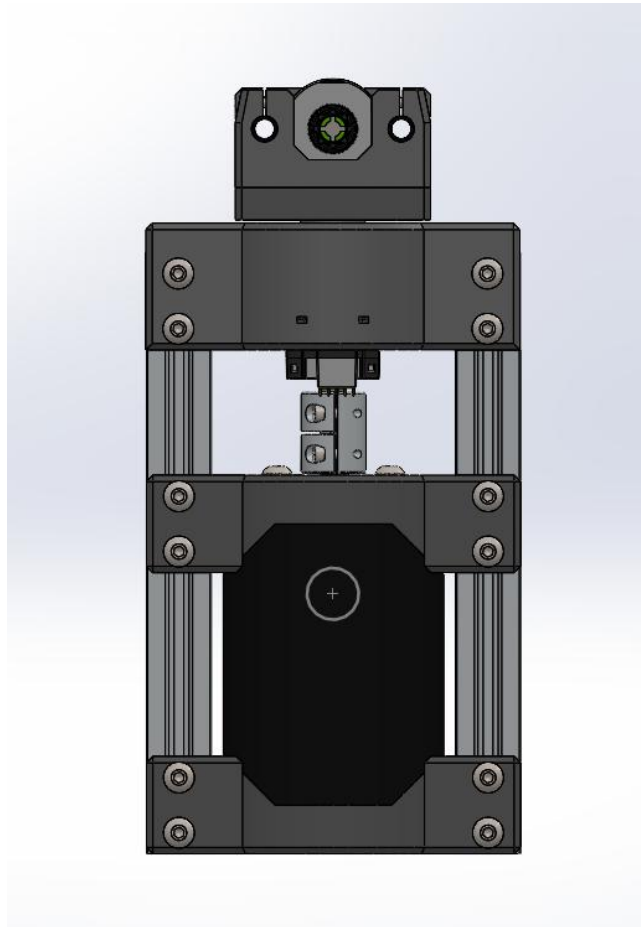
ทำหน้าที่เป็น Plant (ระบบที่ถูกควบคุม) ในสภาพแวดล้อม Ros2 รับ Effort จาก Controller แล้วคำนวณ Response ของระบบตาม Physics Laws จากนั้น Sensor จะวัดค่า State เพื่อส่งให้กับ LQR Controller และ Energy-Based Control

Input:

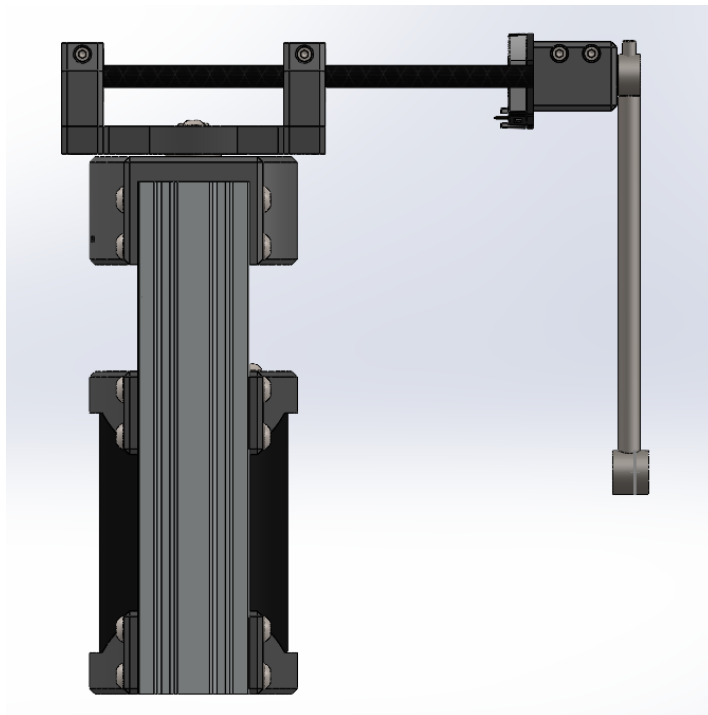
- Effort ที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ (Torque) [N/m]

Output:

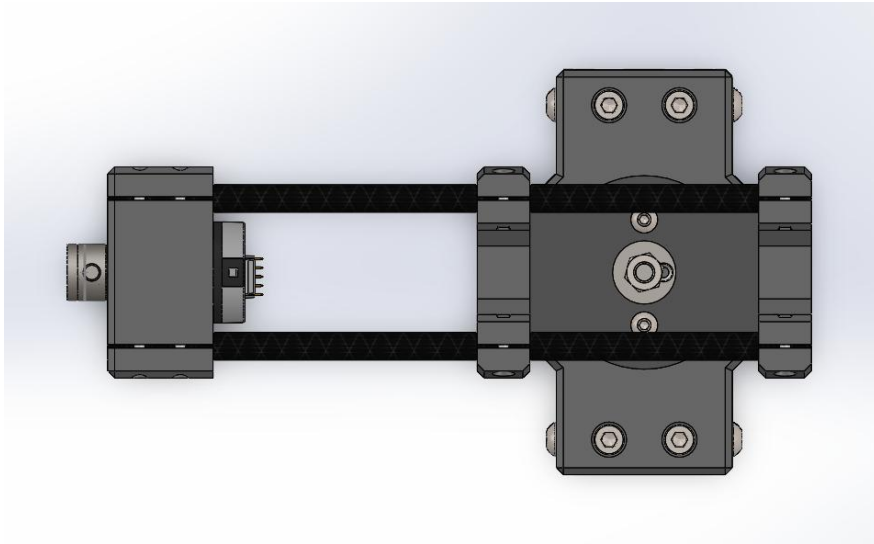
- ตำแหน่งของ Rotary (Theta) [rad]
- ตำแหน่งของลูกตุ้ม Pendulum ลำดับที่ 1 (alpha) [rad]
- ความเร็วของ Rotary (theta\_dot) [rad/s]
- ความเร็วของลูกตุ้ม Pendulum ลำดับที่ 1 (alpha\_dot) [rad/s]



ภาพแสดงตัวอย่าง Front View ของ Rotary Double Inverted Pendulum



ภาพแสดงตัวอย่าง Side View ของ Rotary Double Inverted Pendulum



ภาพแสดงตัวอย่าง Top View ของ Rotary Double Inverted Pendulum

หมายเหตุ: Cad ของ Rotary Double Inverted Pendulum สามารถเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสม

## 5. ผลการศึกษาที่คาดหวัง

- 1) ระบบจำลองแบบสมบูรณ์ใน Ros2 และ Gazebo
  - Urdf Model ของ Rotary Single Inverted Pendulum ที่
  - Ros2 Package ที่สามารถ Launch และทำงานได้ครบถ้วน
  - Visualization ใน Rviz2 แบบ Real-Time
- 2) ระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพผ่าน Ros2\_Control
  - Swing-Up Controller โดยใช้ Energy-Based Control สำหรับยกลูกตุ้มจากตำแหน่งเริ่มต้น
  - สามารถทำให้ลูกตุ้มอยู่ในตำแหน่งที่ตั้งตรงได้อย่างเสถียรใน Gazebo ได้นานกว่า 5 วินาที

## 6. รายละเอียดโครงการ

ลำดับ	การดำเนินงาน	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5	สัปดาห์ที่ 6
1	ศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง						
2	สร้าง Mathematic model และ Dynamic model						
3	พัฒนา URDF model และทดสอบใน RViz2						
4	Setup Gazebo simulation และ ros2_control						



5	พัฒนา LQR Controller และ Energy-based Control						
6	ทดสอบและ Fine-tune Controller ใน Gazebo						
7	เปรียบเทียบผลลัพธ์และวิเคราะห์ข้อมูล						

## 7. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Åström, K. J., & Furuta, K. (2000). Swinging up a pendulum by energy control. *Automatica*, 36(2), 287-295.
- [2] Cazzolato, B. S., & Prime, Z. (2011). On the dynamics of the Furuta pendulum. *Journal of Control Science and Engineering*, 2011, Article 528341. <https://doi.org/10.1155/2011/528341>
- [3] Park, M., Kim, Y.-J., & Lee, J.-J. (2011). Swing-up and LQR stabilization of a rotary inverted pendulum. *Artificial Life and Robotics*, 16(1), 94-97.