



การพัฒนาระบบจำลองและควบคุม Rotary Single Inverted Pendulum โดยใช้ใน Ros2 และ Gazebo

นายอุมิภัทร งามเพ็อก 66340500043	<p>บทคัดย่อ</p> <p>โครงการนี้นำเสนอการพัฒนาระบบจำลอง (Simulation) และการควบคุมสำหรับ Single Inverted Pendulum โดยใช้ ROS2 (Robot Operating System 2) และ Gazebo ระบบบีบีรักรอบด้วยแขนหมุน (Rotating Arm) และลูกศูนย์กลางลับชั้นเดียว ซึ่งเป็นระบบ Underactuated ที่มีความท้าทายในการควบคุม โครงการพัฒนาอัลกอริทึมการควบคุมแบบ Two-Stage Control : (1) Energy-Based Swing-Up Controller ที่ใช้หลักการควบคุม พลังงานเพื่อยกลูกศูนย์กลางจากตำแหน่งห้อยลงมาขึ้นไปยังตำแหน่งตั้งตรง พร้อมกลไก Kick Mechanism และ Energy Regulation และ (2) LQR Stabilization Controller ร่วมกับ Feedforward Gravity Compensation เพื่อรักษาลูกศูนย์กลางให้อยู่ในตำแหน่งตั้งตรงได้อย่างเสถียร ระบบมีการ Mode Switching อัตโนมัติและ Setpoint Tracking เพื่อป้องกันการริฟท์ การสร้างระบบจำลองที่แม่นยำโดยใช้ URDF (Unified Robot Description Format) พร้อมกับพารามิเตอร์ทางกายภาพที่ถูกต้อง ทำให้สามารถทดสอบและปรับแต่งอัลกอริทึมการควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่าน ros2_control framework ก่อนนำไปใช้กับระบบจริง</p> <p>คำสำคัญ: Single Inverted Pendulum, Energy-Based Swing-Up, LQR Control, ROS2, Gazebo Simulation, URDF, ros2_control, Underactuated System</p>
----------------------------------	--

1. บทนำ (Introduction)

1.1 จุดประสงค์โครงการ

- เพื่อพัฒนาระบบจำลองแบบสมบูรณ์ของ Single Inverted Pendulum ใน Ros2 และ Gazebo โดยสร้าง Urdf Model ที่ประกอบด้วยแขนหมุน (Rotating Arm) และลูกศูนย์กลางลับ 1 ชั้น พร้อมกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพที่ถูกต้องครบถ้วน ได้แก่ มวล (Mass), ศูนย์กลางมวล (Center Of Mass), Inertia Tensor, และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction Coefficients) เพื่อให้การจำลองมีความแม่นยำใกล้เคียงกับระบบจริงเพื่อออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมโดยใช้ Ros2 Framework โดยใช้ Ros2_Control สำหรับการควบคุมข้อต่อ (Joint Control) และพัฒนา Controller Nodes ที่สามารถทำให้ลูกศูนย์กลางลับทั้งสองชั้นอยู่ในตำแหน่งตั้งตรงได้อย่างเสถียร รวมถึงการทำ Swing-Up Control
- เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมแบบ Two-Stage Control โดยใช้ Ros2 Framework:
 - Energy-Based Swing-Up Controller ที่ใช้หลักการควบคุมพลังงาน (Energy Control) พร้อม Kick Mechanism เพื่อยกลูกศูนย์กลางจากตำแหน่งห้อยลงมา ($\alpha = 0 \text{ rad}$) ขึ้นไปยังตำแหน่งตั้งตรง ($\alpha = \pi \text{ rad}$) และมีกลไก Energy Regulation เพื่อลดการแกว่งเกินเมื่อใกล้ตำแหน่งเป้าหมาย
 - LQR Stabilization Controller เพื่อรักษาลูกศูนย์กลางให้อยู่ในตำแหน่งตั้งตรงได้อย่างเสถียร ($\alpha = \pi \text{ rad}$)

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:

- พัฒนาโมเดลเพล็อกต์โดยใช้ 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:

- วัดประสิทธิภาพจากความสามารถในการรักษาตำแหน่งตั้งตระหง่านของลูกตุ้มใน Gazebo

2. บททวนวรรณกรรม 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) ซึ่งเป็นมาตรฐานในการอธิบายโครงสร้างทุนยนต์ใน Ros รวมถึงการตั้งค่า Inertial Properties ที่ถูกต้อง

2) Ros2 และ Ros2_Control Framework

Ros2 เป็น Middleware สำหรับพัฒนาระบบทุนยนต์ที่มีความสามารถในการทำงานแบบ 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 งานวิจัยนี้ให้เห็นว่า:

1. งานวิจัยส่วนใหญ่จะละเอียด Inertia Tensor: มากกว่า 90% ของงานวิจัยที่สำรวจพิจารณา Moment Of Inertia เพียงแกนเดียวหรือ ละเลยทั้งหมด ซึ่งทำให้ไม่เคลื่อนไหวจริง

2. ผลกระทบของ Additional Inertia Terms: เมื่อทดสอบด้วย 10v Step Input พบร่วมระบบที่มี $J_{2yy} = J_{2zz} = J_2$ มีพฤติกรรมแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากระบบที่ละเลย J_{2yy} ดังนี้:

- ลูกตุ้มเคลื่อนไปสู่แนวอนเร็วกว่า
- ความถี่共振ของลูกตุ้มสูงขึ้นเนื่องจาก CENTRIFUGAL FORCES
- ความแตกต่างชัดเจนมากขึ้นเมื่อความเร็วเชิงมุมสูง

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

การประยุกต์ใช้กับโครงงาน: 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) ซึ่งเป็นกลยุทธ์ที่ทันทนาสำหรับการแก่วงขึ้นของลูกตุ้มกลั้งหัว

แนวคิดหลัก (Energy Control) :

- เป้าหมายคือการควบคุมลูกตุ้มในลักษณะที่ทำให้ พลังงานของลูกตุ้มถูกปลั๊กดันไปสู่ค่าพลังงานที่สอดคล้องกับตำแหน่งตั้งตรง (ซึ่งสะดวกในการกำหนดให้เป็นศูนย์).
- อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงาน ($\frac{dE}{dt}$) สามารถควบคุมได้ง่าย เนื่องจากอัตราที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วเชิงบวกของลูกตุ้ม และอัตราเร่งของจุดหมุน (U)
- กลยุทธ์ที่ใช้คือรูปแบบ Bang-Bang ที่เรียบง่าย โดยควบคุมทิศทางของอัตราเร่งของจุดหมุน (U) เพื่อเพิ่มพลังงานให้กับระบบ.
- ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการแก่วงขึ้น:
 - พฤติกรรมการแก่วงขึ้นขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่ไม่รวมที่สำคัญคือ N ซึ่งเป็นอัตราส่วนของอัตราเร่งสูงสุดของจุดหมุน (U_Max) ต่ออัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (g)

พฤติกรรมการสวิตช์ขึ้นอยู่กับค่า N:

- Single-Swing Double-Switch: หากอัตราเร่งที่ใช้ได้มีขนาดใหญ่พิยพห (N > 2 หรือ U > 2g), ลูกตุ้มสามารถแก่วงขึ้นถึงตำแหน่งตั้งตรงได้โดยการแก่วงเพียงครั้งเดียว โดยมีการสวิตช์แรงควบคุมสองครั้ง (จากศูนย์เป็นสูงสุดและกลับสู่ศูนย์)
- Single-Swing Triple-Switch: หากอัตราเร่งอยู่ระหว่าง $4\sqrt{3}/3$ ถึง $2g$ ($4/3 < N < 2$), ยังสามารถแก่วงขึ้นได้ในหนึ่งครั้ง แต่สัญญาณควบคุมจะต้องมีการสวิตช์ถึงสามครั้งเพื่อเพิ่มพลังงานสูงสุด
- Multi-Swing Behaviour: หากอัตราเร่งสูงสุดน้อยกว่า $4g/3$ จำเป็นต้องใช้การแก่วงหลายครั้ง (multi-swing) เพื่อสะสมพลังงานให้เพียงพอ (เช่น หาก $N = 0.25$ ต้องใช้ห้าครั้ง)

ข้อตีเสื่อเทียบกับการควบคุมเวลาต่ำสุด (Minimum Time Control):

- กลยุทธ์การควบคุมพลังงานนี้ให้การเข้าสู่ตำแหน่งตั้งตรงที่นุ่มนวลกว่า และ ทนทานกว่า
- กลยุทธ์เวลาต่ำสุดจะมีความอ่อนไหวสูง เนื่องจากมีแนวโน้มที่จะเกิด Energy Overshoot (พลังงานเกินเป้าหมาย) ซึ่งเพิ่มขึ้นตามค่า N (เช่น อาจเกิน 200% สำหรับ $N = 5$). การควบคุมพลังงานที่ปราศจากการโอเวอร์ชูตจึงเป็นแนวทางปฏิบัติที่ดีและทนทานกว่าสำหรับการจับลูกตุ้มในตำแหน่งตั้งตรง

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

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้กับระบบ ลูกตุ้มกลั้งหัวแบบหมุน (Rotary Inverted Pendulum) ซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์กระแสนครองที่หมุนแขนแข็ง (Rotating Arm) และมีลูกตุ้มห้อยอยู่

เป้าหมายและการควบคุมหลัก:

1. การแก่วงขึ้น (Swing-Up Strategy)

ผู้วิจัยเสนอ Modified Bang-Bang Control เพื่อให้ลูกตุ้มแก่วงขึ้นได้อย่างรวดเร็วและปลอดภัย

- กลยุทธ์พื้นฐาน: คือการใช้แรงบิดสูงสุด 90% ในทิศทางตรงกันข้ามกับความเร็วของลูกตุ้ม เมื่อลูกตุ้มเคลื่อนที่เข้าใกล้พื้น
- การปรับปรุง (Modification): มีการเพิ่ม Weighting Factor เพื่อกำหนดช่วงการทำงานของตัวควบคุมการแก่วงขึ้น. ปัจจัยนี้มีความสำคัญเพื่อป้องกันไม่ให้ลูกตุ้มหมุนเร็วเกินไปจนอาจทำให้มอเตอร์ทำงานผิดปกติ หากความเร็วของลูกตุ้มสูงมาก (เช่น เร็วกว่า 900 องศา/วินาที) ตัวควบคุมจะค่อยๆ ปิดการทำงานของมอเตอร์

2. การรักษาเสถียรภาพ (LQR Stabilization)

เมื่อตัวควบคุมการแก้ไขขั้นนำลูกศรุตม์เข้าสู่ช่วงการทำงานที่กำหนด (ระหว่าง -30 องศาถึง 30 องศา จากตำแหน่งตั้งตระหง่าน) ตัวควบคุม LQR (Linear Quadratic Regulator) จะเข้ามารับช่วงต่อเพื่อรักษาเสถียรภาพ. LQR ถูกใช้เพื่อลดฟังก์ชันเป้าหมายที่ต้องการให้imum ลูกศรุต (A) และมุ่งมั่น (θ) เข้าสู่ตำแหน่งที่ต้องการโดยเร็วที่สุด

ผลลัพธ์ที่สำคัญ:

- ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบผสมผานนี้สามารถทำให้ระบบลูกศรุตม์กลับหัวมีเสถียรภาพได้ภายในเวลาไม่เกิน 3.0 วินาที ไม่จำเป็นต้นจากจุดเดิม.
- ระบบแสดงให้เห็นถึง ความทนทานต่อการรบกวน (Robustness) สูง โดยแม้ว่าค่าณผู้จัดทำจะใส่ Disturbance ที่ทำให้ลูกศรุตม์ล้มลงไปด้านล่าง ตัวควบคุมนี้สามารถกลับหัวมีเสถียรภาพได้อย่างรวดเร็ว

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

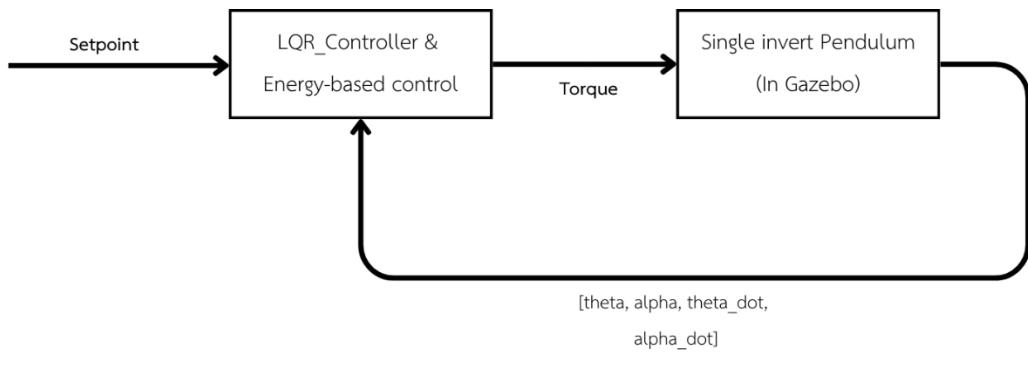
4) Control Theory

- 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 ($\alpha = \pi \text{ rad}$) และลดการแก้ไขของแขนหมุน (theta ≈ 0) เมื่อมี Disturbance เกิดขึ้น LQR จะสร้าง Corrective action ที่เหมาะสมโดยอัตโนมัติ

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 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) เป้าหมายหลักของด้วยควบคุมนี้คือการควบคุมพลังงานรวมของระบบ (Total Energy) ให้ลูกเข้าสู่ระบบพลังงานศักย์สูงสุดที่ตำแหน่งตั้งตรง เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการเปลี่ยนโหมดไปยังตำแหน่งตั้งตรง 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 (Nm ²)
ω	คือ	ความเร็วเชิงมุมของลูกตุ้ม (rad/s)
m	คือ	มวลของลูกตุ้ม (kg)

g	คือ	ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)
l	คือ	ระยะจากจุดหมุนถึงจุดศูนย์กลางมวล (m)
α	คือ	มุมของลูกตุ้ม (rad)

3. พลังงานเป้าหมาย (Target Energy)

เป้าหมายของการควบคุมคือการทำให้ลูกตุ้มหยุดนิ่งที่ตำแหน่งตั้งตระ (α = π rad, ω = 0 rad/s) ดังนั้น พลังงานเป้าหมาย (E_{ref}) ที่ต้องการโดยอ้างอิงจากตำแหน่งที่ลูกตุ้มอยู่ในตั้งแหน่งสมดุลที่ล่างที่สุด (α = 0 rad, ω = 0 rad/s) คือ:

$$E_{ref} = 2mgl$$

พิจารณาความคลาดเคลื่อนของพลังงาน จึงนิยามได้ว่า:

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

4. กลไก Kick Mechanism และการเปลี่ยนโหมด (Mode Switching Strategy)

เพื่อให้การควบคุมครอบคลุมทุกช่วงการทำงาน โครงการนี้ได้ออกแบบอัลกอริทึมแบบ Two-Stage Control ดังนี้:

- **Kick Mechanism:** เนื่องจากที่ตำแหน่งเริ่มต้น ($\alpha = 0 rad, \omega = 0 rad/s$) ซึ่งจะต้องเผชิญกับ Static Friction ซึ่งส่งผลให้ลูกตุ้มไม่เกิดการเคลื่อนที่จึงห้องใช้วิธี Kick Mechanism เพื่อให้สามารถลูกตุ้มสามารถเริ่มเคลื่อนที่ได้
- **Swing-Up Control** เมื่อลูกตุ้มเริ่มขยับ ระบบจะใช้กฎการควบคุมพลังงาน (สมการข้างต้น) เพื่อเลี้ยงลูกตุ้มให้หวัดขึ้นจนเข้าใกล้จุดยอด
- **Stabilization Switching** เมื่อสถานะของลูกตุ้มเข้าสู่เงื่อนไข ($|\alpha - \pi| < 0.1 rad$) และ ($|\omega| < 1 rad$) ระบบจะทำการเปลี่ยนโหมดไปใช้ LQR Controller ทันที เพื่อสิ้นลูกตุ้มเข้าสู่จุดสมดุลและรักษาเสถียรภาพ

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)

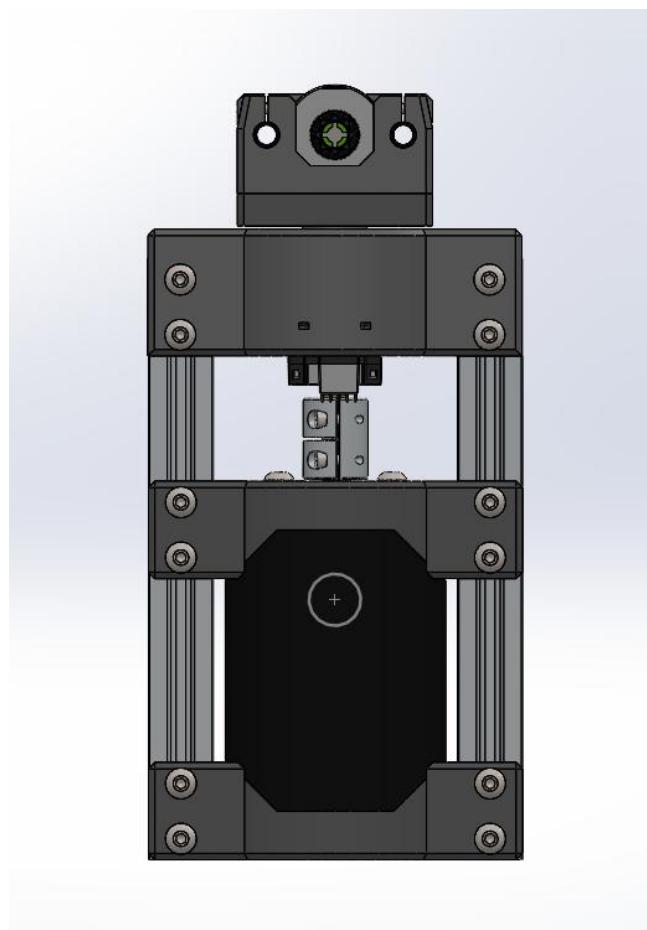
ทำหน้าที่เป็น Plant (ระบบที่ลูกควบคุม) ในสภาพแวดล้อม Ros2 รับ Effort จาก Controller และคำนวณ Response ของระบบตาม Physics Laws จากนั้น Sensor จะตัด State เพื่อส่งให้กับ LQR Controller และ Energy-Based Control

Input:

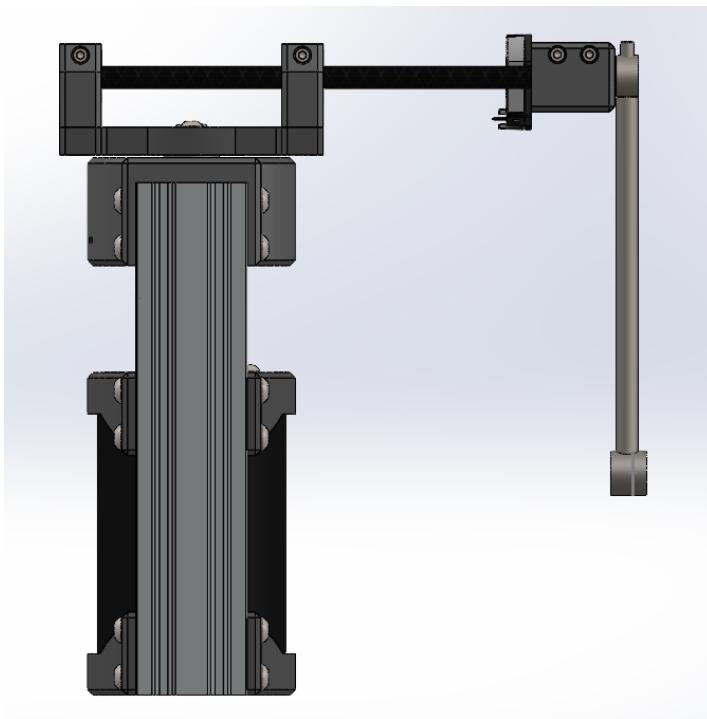
- Effort ที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ (Torque) [N/m]

Output:

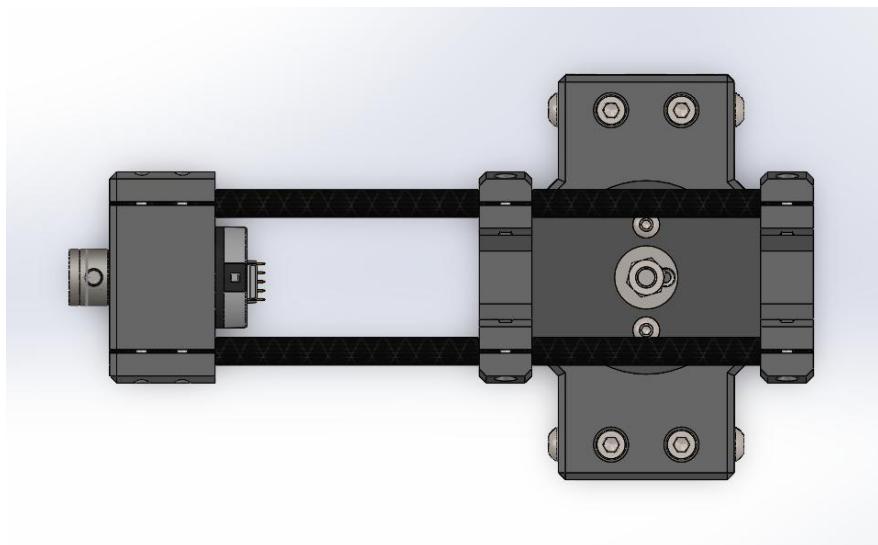
- ตำแหน่งของ Rotary (Theta) [rad]
- ตำแหน่งของลูกตุ้ม Pendulum ลำดับที่ 1 (alpha) [rad]
- ความเร็วของ Rotary (theta_dot) [rad/s]
- ความเร็วของลูกตุ้ม Pendulum ลำดับที่ 1 (alpha_dot) [rad/s]



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) ระบบจำลองแบบสมมุติใน 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 สำหรับยกตุ้มจากตำแหน่งเริ่มต้น
- สามารถทำให้ลูกตุ้มอยู่ในตำแหน่งตั้งตระหง่านได้อย่างเสถียรใน 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.