



# HEXAPOD ROBOT CLOSED LOOP CONTROL

<นายบอลตัน อาทิตย์ เดวิส, 66340500029>

<นายภูมิภัทร งามเผือก, 66340500043>

<นายศุภวิชญ์ แก้วปิ่น, 66340500055>

## บทคัดย่อ

โปรเจกต์นี้ได้ทำการศึกษา Simulation การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์หกขา (Hexapod) จำนวน 18 DoF (6 ขา ขาละ 3 DoF) ใน Gazebo ด้วย Gait Planning แบบ Tripod โดยเริ่มต้นจากการสั่งการเคลื่อนที่ของหุ่นด้วยตำแหน่งกลางลำตัวหุ่นยนต์ในระบบพิกัด Cartesian ผ่าน Trajectory Function โดยกำหนดให้ Task space เป็น ตำแหน่งกลางลำตัวของหุ่น Hexapod จากนั้นนำค่านั้นเข้าสมการ Inverse Kinematics ซึ่งได้รับค่า Configuration space ซึ่งก็คือตำแหน่งในแต่ละ Joint ของขา Hexapod หลังจากนั้นให้ทำการออกแบบ trajectory function สำหรับการสร้าง Path การเคลื่อนที่ของ End effector ของปลายขา หลังจากนั้นให้นำตำแหน่ง end effector ของปลายขาเข้าสมการ Forward Kinematic เพื่อแปลงเป็น Task space สำหรับการรับรู้ตำแหน่งปัจจุบันของตัวหุ่นยนต์

**คำสำคัญ :** Tripod Gait planning, Cubic Trajectory, Forward Kinematics, Inverse Kinematics, Hexapod robot

## 1. บทนำ (Introduction)

หุ่นยนต์หกขา (Hexapod Robot) เป็นหุ่นยนต์ที่มีความมั่นคงสูงและสามารถเคลื่อนที่ได้ดีบนพื้นผิวที่ไม่เรียบ โครงการนี้จึงมุ่งศึกษาการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์หกขาจำนวน 18 องศาอิสระ (18 DoF) ด้วยวิธี Gait Planning แบบ Tripod เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเดินได้อย่างต่อเนื่องและมั่นคง โดยเริ่มจากการกำหนดตำแหน่งลำตัวใน Task Space ผ่าน Trajectory Function แล้วใช้ Inverse Kinematics และ Forward Kinematics ในการคำนวณตำแหน่งของขาและลำตัว การศึกษาจะช่วยเพิ่มความเข้าใจในการออกแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์หลายขาแบบ Hexapod

### 1.1 จุดประสงค์โครงการ

- 1) เพื่อศึกษารูปแบบการเดินของหุ่นยนต์ Hexapod ด้วย Gait Planning แบบ Tripod
- 2) เพื่อศึกษาสถานะ Static Equilibrium ของหุ่นยนต์ Hexapod
- 3) ออกแบบระบบ Closed Loop Control สำหรับสั่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ Hexapod

## 1.2 ขอบเขต

หุ่นยนต์ Hexapod สามารถเดินไปข้างหน้าเป็นเส้นตรงได้โดยใช้องค์ความรู้ดังนี้

- 1) Gait Planning
  - ออกแบบและใช้ Tripod Gait สำหรับการเดินตรง (Straight Gait) ด้วยความเร็วสูงสุด 0.1 m/s
- 2) Trajectory Planning
  - Swing : ยกเท้า-กวาดไปข้างหน้า ใช้ Half Sine Curve เพื่อลงพื้น
  - Stance: วางเท้า-ดันพื้น ใช้ Path แนวนอน
- 3) Hexapod Kinematics
  - สามารถสร้างสมการ Forward Kinematics ผ่าน DH-Parameters
  - สามารถสร้าง Inverse Kinematics ผ่าน Robotics toolbox
- 4) Static Equilibrium
  - หา Joint Effort ในท่า Home Position
- 5) Simulation and Integration
  - จำลองบน Ros2 + Gazebo (Ignition) ด้วยรูปทรง Hexateuthis (ขา 6 ขา สมมาตรรอบลำตัว)
  - บันทึก Log (ตำแหน่ง/ความเร็ว/แรงบิด) พร้อม Visualization ผ่าน Plot Juggler

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

### 2.1 Project Background Study [1]

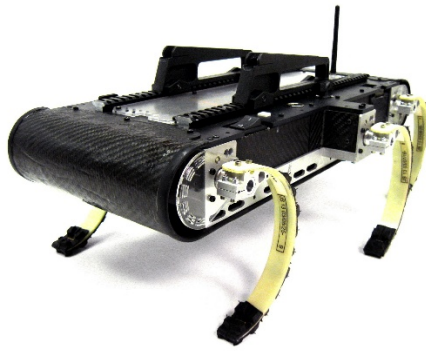
#### 2.1.1 Hexapod Robot

หุ่นยนต์ที่เดินด้วยขาได้ (Legged walking robots) กลายเป็นเป้าหมายหลักของการศึกษาและการวิจัยจำนวนมาก เนื่องจากบทบาทสำคัญของหุ่นยนต์ชนิดนี้คือการจำลองลักษณะของสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติ โดยหุ่นยนต์หกขา (Hexapod) ซึ่งเป็นหุ่นยนต์หลายขา มีศักยภาพที่เหนือกว่าหุ่นยนต์แบบล้อหรือแบบตีนตะขาบ เนื่องจากหุ่นยนต์ที่มีขาสามารถปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมภายนอกที่ซับซ้อน และสามารถทำงานในพื้นที่ที่อันตรายหรือเข้าถึงได้ยากได้ ในขณะที่หุ่นยนต์แบบล้อหรือแบบตีนตะขาบจะทำงานได้ดีเฉพาะเมื่อสิ่งกีดขวางมีความสูงไม่เกินครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางล้อเท่านั้น นอกจากนี้ หุ่นยนต์ที่มีขายังสามารถหาตำแหน่งยึดเกาะที่มั่นคงบนพื้นผิวที่ลาดชันได้ในระดับท้องถิ่น ทำให้สามารถปีนพื้นที่ที่มีมุมชันมากได้อีกด้วย



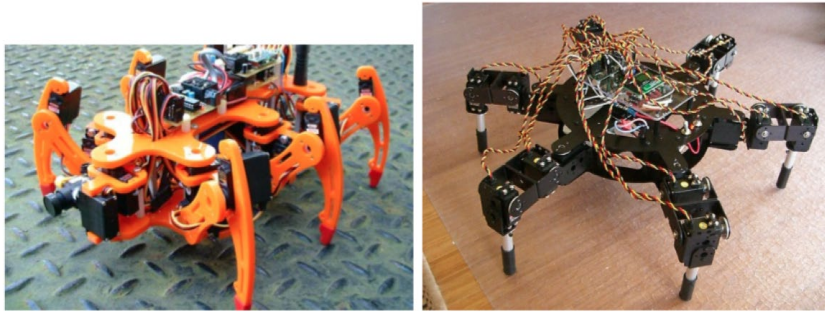
รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างลักษณะของหุ่นยนต์ Hexapod

โดยหุ่นยนต์ประเภทนี้มีการออกแบบรูปร่างที่หลากหลาย แต่แบบที่แพร่หลายที่สุดในอินเทอร์เน็ตและงานวิจัยคือแบบ RHex ซึ่งมีโครงสร้างที่เรียบง่ายแต่มีประสิทธิภาพสูง และสามารถเคลื่อนที่บนพื้นผิวขรุขระด้วยความเร็วสูงได้ อย่างไรก็ตาม ปัญหาหลักของการออกแบบหุ่นยนต์ RHex คือ ไม่สามารถหมุนรอบตัวเองได้ แม้ว่าจะสามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าหรือถอยหลังได้อย่างราบรื่นและรวดเร็วในเส้นตรงก็ตาม



รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างลักษณะของหุ่นยนต์ RHex

อีกรูปแบบของหุ่นยนต์ Hexapod ก็คือ Eggshell ส่วนอีกแบบหนึ่งคือ Hexateuthis ซึ่งมีโครงสร้างแบบวงกลม โดยขาทั้งหมดถูกจัดวางแบบสมมาตรรอบลำตัว โดยการออกแบบที่มีความสมมาตรเช่นนี้ช่วยให้หุ่นยนต์มีความยืดหยุ่นในการเคลื่อนไหวและการหมุนตัว มากกว่ารูปแบบอื่น ๆ โดยใน Project นี้เลือกหุ่นยนต์ Hexapod แบบ Hexateuthis ในการจำลองบน Simulation

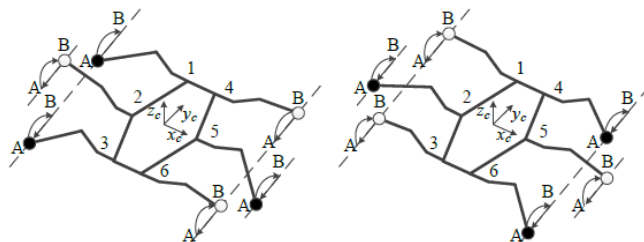


รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างลักษณะของหุ่นยนต์ Egghead (ซ้าย) และ Hexateuthis (ขวา)

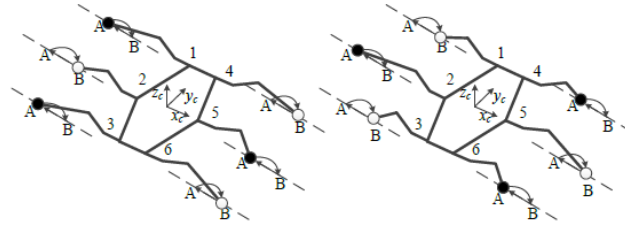
## 2.2 LITERATURE REVIEW

### 2.2.1 Hexapod Robot Foot Trajectory and Gait Planning [2]

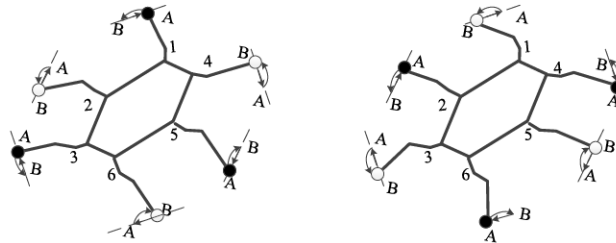
Foot Trajectory คือ เส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายขาหุ่นยนต์ (End Effector ของขา) ในระหว่างที่หุ่นยนต์เดิน โดยในหุ่นยนต์หกขา (Hexapod) ปลายขาแต่ละขาคงจะต้องเคลื่อนที่ในลักษณะที่ไม่รบกวนกันและยังคงรักษาความมั่นคงของลำตัวได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้แสดง Gait ใน 3 ลักษณะ ได้แก่ Straight gait, Transverse gait และ Swivel gait โดยใน Project นี้เลือก Straight gait ในการกำหนดรูปแบบการเดินของหุ่นยนต์ Hexapod



รูปที่ 4 แสดงรูปแบบการเดินแบบ Straight gait

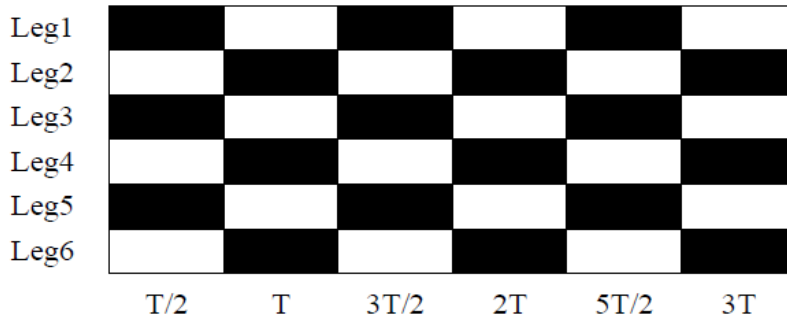


รูปที่ 5 แสดงรูปแบบการเดินแบบ Transverse gait



รูปที่ 6 แสดงรูปแบบการเดินแบบ Swivel gait

โดยในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบ trajectory ของขาแบ่งเป็น 2 ช่วงหลักคือช่วงที่ stance gait อยู่สามขาเสมอ และอีกสามขาจะอยู่ในช่วงที่ swing state เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ กลุ่มขาทั้งสองจะสลับหน้าที่กันไปมา โดย Leg1, Leg3, Leg5 จะอยู่ในเฟสเดียวกัน ส่วนขา Leg2, Leg4, Leg6 จะอยู่ในเฟสเดียวกันเช่นกัน โดยมีความต่างเฟสระหว่างสองกลุ่มเท่ากับ  $\pi$  rad



รูปที่ 7 แสดงรูปแบบการเดินแบบ Swivel gait

#### 2.2.1.1 Swing Phase (ช่วงยกขาไปข้างหน้า)

เป็นช่วงที่ปลายขาถูกยกจากพื้นและเคลื่อนจากด้านหลังไปด้านหน้า ใช้ เส้นโค้งไซน์ครึ่งรอบ (Half-cycle Sinusoidal Curve) เพื่อให้ขาเคลื่อนอย่างราบรื่นโดยไม่กระแทกพื้น โดยมีสมการการเคลื่อนที่ของปลายขาดังนี้

$$\vec{q} = \begin{cases} x = x_0 + L \cos(\theta) \\ y = y_0 + L \sin(\theta) + gain_1 \\ z = z_0 + gain_2 \cos(\pi \frac{k}{n}) \end{cases}$$

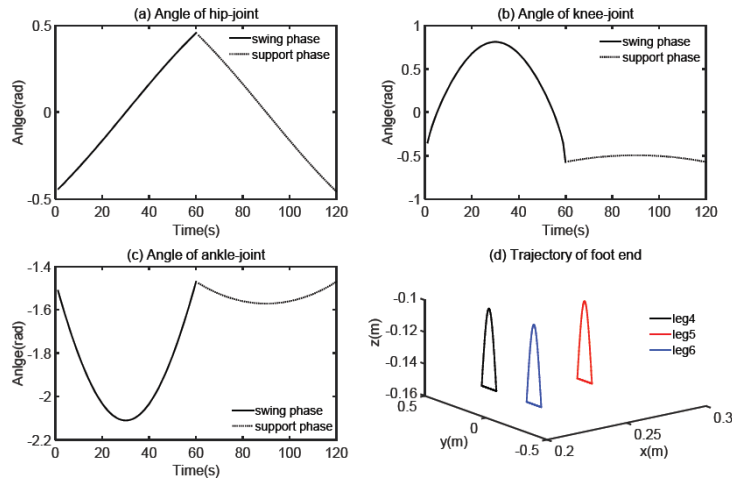
#### 2.2.1.2 Stance Phase (ช่วงวางขาและดันพื้น)

เป็นช่วงที่ปลายขาสัมผัสพื้นและดันพื้นเพื่อให้ลำตัวเคลื่อนไปข้างหน้า โดยใช้เส้นตรงแนวนอน (horizontal line) เป็นฟังก์ชันการเคลื่อนที่ ทำให้การดันพื้นเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และป้องกันการกระแทกหรือสูญเสียสมดุล โดยมีสมการการเคลื่อนที่ของปลายขาดังนี้

$$\vec{q} = \begin{cases} x = x_0 + L \cos(\theta) \\ y = y_0 + L \sin(\theta) + \text{gain}_1 \\ z = z_0 \end{cases}$$

โดยที่

$x, y, z$	คือ ตำแหน่งของปลายขา (Foot End) ในระบบพิกัดของลำตัวหุ่นยนต์ในแกน $x, y, z$
$x_0, y_0, z_0$	คือ ค่าตำแหน่งเริ่มต้นของปลายขาก่อนเริ่มเคลื่อนที่ (Initial Position) ในแกน $x, y, z$
$L$	คือ ระยะก้าวของขา (Step Length) หรือระยะที่ปลายขาเคลื่อนในแนวราบระหว่าง Swing และ Stance
$\theta$	คือ มุมของการเคลื่อนที่ในแนวราบ (Angle of leg swing around body)
$k$	คือ Sampling Index ใช้ระบุลำดับของจุดในหนึ่งรอบของการเคลื่อนไหวของขา
$n$	คือ จำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมดในหนึ่งรอบการเดิน (Number of Sampling Points)
$\text{gain}_1, \text{gain}_2$	คือ ค่า offset ที่ถูกเลือกจากการจำลองการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์จริง เพื่อให้รูปเส้นทางการยกและวางขาของ หุ่นยนต์สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพและไม่ชนพื้นหรือยกสูงเกินไป



รูปที่ 8 มุมของข้อต่อและวิถีการเคลื่อนที่ของปลายเท้าของขาขวาในท่าการเดินตรง

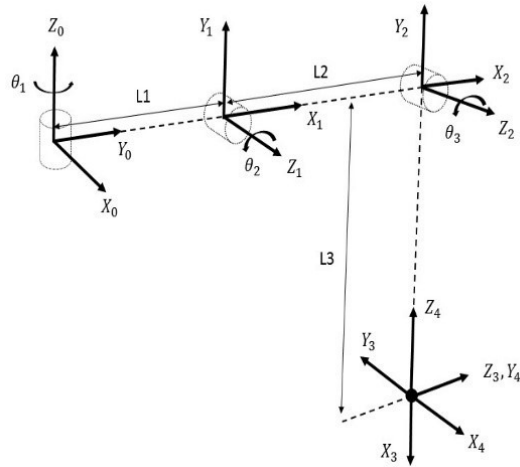
## 2.2.2 Hexapod Robot Foot Kinematic

### 2.2.2.1 Forward Kinematics (FK)

Forward Kinematic ถูกนำมาใช้เพื่อหา Position และ Orientation ของแต่ละ joint ที่กำหนด สมการที่ได้ถูกนำไปใช้โดย footstep planner เพื่อคำนวณ workspace ของขาหุ่นยนต์ และใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งปลายแขนกลที่เป็นไปได้โดยมีการใช้ DH เพื่อ Forward Kinematic ของแต่ละ joint ใน Hexapod Robot โดยมีสมการ DH parameter ที่ใช้ในการหาตามสมการที่

$$H_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

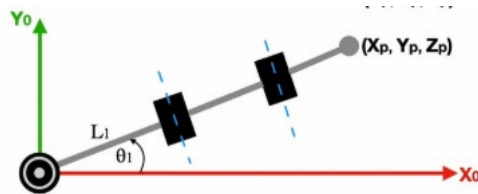
โดยขาแต่ละข้างจะมีหน้าตา link และ joint ตามรูปด้านล่าง



รูปแสดง 10 Frame ต่าง ๆ ของขา Hexapod

### 2.2.2.2 Inverse Kinematic (IK)

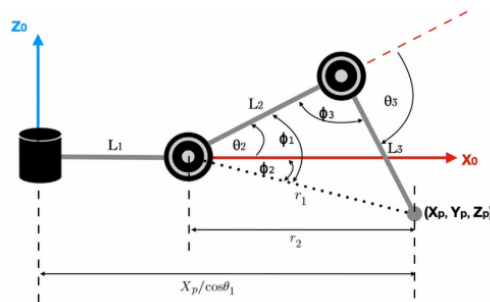
เมื่อระบบหุ่นยนต์มีความซับซ้อนมากขึ้น เราต้องการให้หุ่นยนต์สามารถทำการคำนวณได้ด้วยตัวเองให้มากที่สุด เพราะความสามารถในการคำนวณของมนุษย์มีจำกัด ในลักษณะเดียวกันการคำนวณมุมการหมุนของข้อต่อทั้งหกขาเพื่อให้ Hexapod Robot เคลื่อนที่จากตำแหน่ง A ไปยังตำแหน่ง B ถือเป็นงานที่ยุ้งยาก ดังนั้นหุ่นยนต์จึงต้องสามารถคำนวณมุมเหล่านี้ได้ และมีความสามารถในการควบคุม End Effector ของแต่ละขาให้เคลื่อนไปยังพิกัดที่กำหนดได้อย่างแม่นยำ จึงมีการนำ Inverse Kinematic เข้ามาใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 11 แสดงภาพมุมมองจากด้านบนของขาหุ่นยนต์หนึ่งขา

โดยมีการกำหนดพิกัดของ End effector คือ  $(x_p, y_p, z_p)$  และมุมการหมุนรอบแกน Z คือ  $\theta_1$  และจุด origin ถูกกำหนดให้เป็นจุดศูนย์กลางของข้อต่อที่ 1 ซึ่งเป็นไปตามกฎแกน Z ในทางเรขาคณิต มุม  $\theta_1$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{Y_p}{X_p}\right)$$



รูปที่ 12 แสดงภาพมุมมองจากด้านข้างของขาหุ่นยนต์หนึ่งขา

ระยะจาก Joint 2 ถึง End Effector

$$r_1 = \sqrt{X_p^2 + Y_p^2} - L_1$$

ระยะจาก Origin ถึง End Effector

$$r_2 = \sqrt{r_1^2 + Z_p^2}$$

มุมระหว่าง  $L_1$  และ  $r_1$

$$\phi_1 = \text{atan2}(Z_p, r_1)$$

มุมเอียงระหว่าง  $L_2$  และ  $L_3$

$$\phi_3 = \arccos\left(\frac{L_2^2 + L_3^2 - r_1^2}{2L_2L_3}\right)$$

มุมระหว่าง  $X_0$  และ  $r_1$

$$\phi_3 = \arccos\left(\frac{L_2^2 + r_2^2 - L_3^2}{2L_2r_2}\right)$$

### 2.2.2.3 Forward Velocity Kinematic และ Inverse Velocity Kinematic

มีจุดเชื่อมระหว่างการหาตำแหน่งของ FK คือเมทริกซ์ JACOBIAN (J) โดยมีสมการหลักคือ

$$v = J(\theta)\dot{\theta}$$

โดย  $J(\theta)$  คือเมทริกซ์  $3 \times 3$  ที่ได้จากอนุพันธ์ของ FK

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial \theta_1} & \frac{\partial X}{\partial \theta_2} & \frac{\partial X}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial Y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial Z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Z}{\partial \theta_3} \end{bmatrix}$$

การหา Forward Velocity Kinematic หากเราทราบความเร็วของมอเตอร์ที่แต่ละ joint เราสามารถหาความเร็วที่ปลายขาได้จากสมการที่

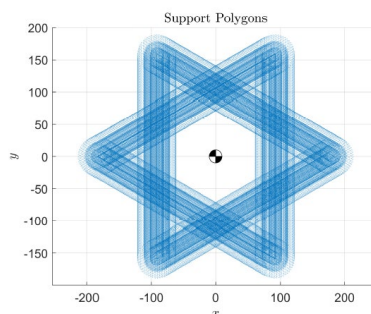
$$v = J(\theta)\dot{\theta}$$

การหา Inverse Velocity Kinematic หากเราทราบความเร็วที่ต้องการของตำแหน่งปลายขา เราสามารถหาความเร็วที่ต้องการของแต่ละ joint ได้จากสมการที่

$$\dot{\theta} = J^{-1}(\theta)v$$

### 2.2.3 Stability and Support Polygons [3]

ในขณะที่หุ่นยนต์เดินแบบ Tripod Gait จะมีสามขาสัมผัสพื้นเสมอ ทำให้เกิด รูปสามเหลี่ยมของการพุงตัว (Triangular Support Polygon) ถ้า Center of Mass (CoM) ของหุ่นอยู่ภายในรูปสามเหลี่ยมที่เกิดจากสามขานั้น หุ่นยนต์จะอยู่ในสภาวะที่มั่นคง แต่ถ้า CoM ออกนอกขอบเขต Support Polygon หุ่นจะมีแนวโน้มล้ม หรือเสียการทรงตัว

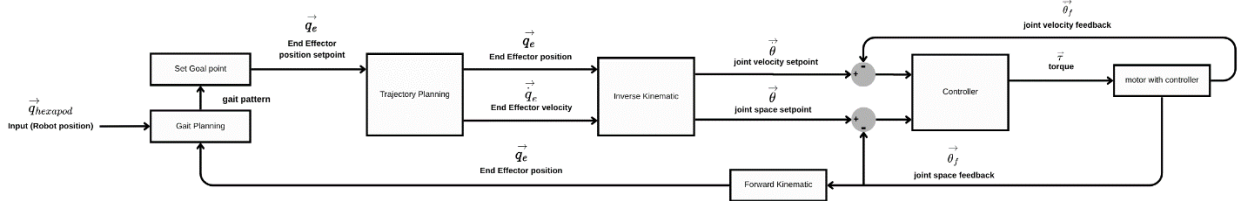


รูปที่ 13 แสดงตัวอย่างเส้นรอบรูปของ Support Polygons โดย blue polygons แสดงถึงกลุ่มของขาที่กำลัง support phase อยู่ในแต่ละช่วงเวลา ส่วน วงกลมตรงกลาง แสดงตำแหน่งของ จุดศูนย์กลางมวล (Center of Mass; CoM)

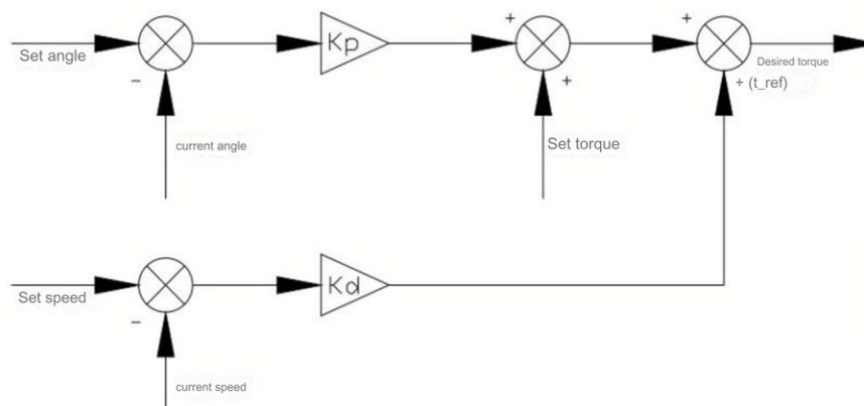
### 3. เนื้อหาในรายวิชาที่เกี่ยวข้อง

- 1) Transformation in coordinate frame
- 2) Forward Kinematics
- 3) Inverse Kinematics
- 4) Differential Kinematics
- 5) Static Equilibrium
- 6) Trajectory Generation

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



รูปที่ 14 System Diagram ของโครงงาน



รูปที่ 15 System Diagram ของ Controller

จาก System Diagram ข้างต้น สามารถแบ่ง Function ที่สำคัญดังนี้

- 1) Gait Planning and Set Goal Point: เป็น Function สำหรับการระบุ Gait Pattern ของหุ่นยนต์ Hexapod โดยมี Input เป็น Robot position ในระบบพิกัด Cartesian และมี Output เป็น Path การเคลื่อนที่ของ End effector ของขาหุ่นยนต์ Hexapod ณ Gait Pattern นั้น ๆ
- 2) Trajectory Planning: เป็น Function สำหรับการสร้าง Trajectory โดยมี Input เป็น Path ที่ได้มาจาก Function Gait Planning และมี Output เป็น End effector position และ End effector velocity ใน 1 หน่วยเวลา
- 3) Inverse Kinematics: เป็น Function สำหรับการแปลง Task space (ในที่นี้คือ End effect ของขาหุ่นยนต์ Hexapod) ให้เป็น Configuration space ซึ่งก็คือ joint space position และ joint space velocity ของขาหุ่นยนต์ Hexapod สำหรับเป็น Setpoint ให้ Controller
- 4) Controller: เป็น Function สำหรับสั่งให้ขาหุ่นยนต์ Hexapod เคลื่อนที่ตาม Setpoint ที่กำหนดไว้ โดยมี Input เป็น joint position setpoint ผ่าน Proportional Gain จะได้ Torque รวมกับ Torque ที่ได้จาก Input ที่เป็น joint velocity setpoint ผ่าน Derivative Gain ซึ่งจะ Output เป็น Desired Torque
- 5) Forward Kinematics: เป็น Function สำหรับการแปลง Configuration space (ในที่นี้คือ joint space ของขาหุ่นยนต์ Hexapod) ให้เป็น Task space ซึ่งก็คือ End effector position และ End effector velocity ของขาหุ่นยนต์ Hexapod สำหรับเป็น Feedback ให้ Gait Planning ในการตัดสินใจเลือก Gait pattern



5. ผลการศึกษาที่คาดหวัง

- 1) สามารถออกแบบและพัฒนาโครงสร้างระบบควบคุมแบบวงปิด (Closed-loop Control System) สำหรับการสั่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์หกขาได้อย่างมีประสิทธิภาพใน ros2
- 2) สามารถเข้าใจหลักการและรูปแบบการเดินของหุ่นยนต์หกขา (Hexapod) ด้วยวิธี Straight Gait Planning แบบ Tripod ได้อย่างถูกต้อง
- 3) สามารถจำลองการเคลื่อนที่ได้ในเชิงคณิตศาสตร์และโปรแกรมจำลองใน Gazebo
- 4) สามารถวิเคราะห์และประเมิน Static Equilibrium ของหุ่นยนต์ Hexapod เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถทรงตัวได้ในระหว่างการเคลื่อนที่
- 5) เข้าใจสมการ Forward Kinematics ของขาหุ่นยนต์ Hexapod

6. รายละเอียดโครงการ

ลำดับ	การดำเนินงาน	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5	สัปดาห์ที่ 6
1	ค้นคว้าข้อมูลการควบคุมหุ่นยนต์ Hexapod						
2	จัดทำ Proposal						
3	ออกแบบระบบ Closed loop control ใน Ros2						
4	สั่งหุ่นยนต์ Hexapod ในท่า Home position ด้วย Torque control						
5	สั่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ Hexapod และบันทึกผล						
6	จัดทำ Final Report และส่งงาน						

7. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] Abdelrahman Sayed, “Design and Control of an 18 DOF Hexapod Multi-agent Swarm for Search and Rescue Missions”, 2020.

[2] JIANBO SUN, JIE REN, YINGLIAN JIN, BINRUI WANG, DIJIAN CHEN, “HEXAPOD ROBOT KINEMATICS MODELING AND TRIPOD GAIT DESIGN BASED ON THE FOOT END TRAJECTORY”, 2017

[3] Lizarraga, J.A.; Garnica, J.A.; Ruiz-Leon, J.; Munoz-Gomez, G.; Alanis, A.Y. Advances in the Kinematics of Hexapod Robots: An Innovative Approach to Inverse Kinematics and Omnidirectional Movement. Appl. Sci. 2024.

[4] GUREL, CANBERK SUAT. HEXAPOD MODELLING, PATH PLANNING AND CONTROL. 2017.