สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีพื้นฐาน

3.1 นำเรื่อง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีหลักที่ใช้เป็นพื้นฐานในการจำลองควบคุม และขับควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robot ที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและอุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่งพิกัดใน 3 มิติ (Fastrak®) เพื่อควบคุมแรงและตำแหน่งให้แขนหุ่นยนต์สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อม ในการควบคุมเส้นทางเดินเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางสามารถพิจารณาการควบคุมออกเป็น 2 แบบหลัก คือ การขับควบคุมบนแกนอ้างอิงแบบตัวแปรข้อต่อ (Joint-based Control Scheme) และการขับควบคุมบนแกนอ้างอิงแบบตัวแปรเชิงเส้น (Cartesian-based Control Scheme) ในส่วนที่เป็นการควบคุมแรงสัมผัสที่ปลายแขนของหุ่นยนต์ โดยนำข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ติดตั้งมาพิจารณาเพื่อทำการควบคุมแรงซึ่งสามารถจำแนกการควบคุมเป็น 2 แบบ คือ การควบคุมแรงทางตรงและการควบคุมแรงทางอ้อม ซึ่งในการทดลองได้ทำการควบคุมแรงทางอ้อมผ่านทางการควบคุมตำแหน่ง โดยอาศัยข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและอุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่งพิกัดใน 3 มิติ (Fastrak®) ทำการพิจารณาปรับลดค่าความผิดพลาดของตัวแปรควบคุมให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าที่ตรงตามเป้าหมาย ซึ่งในการขับหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปตามที่ต้องการมีตัวแปรควบคุมมากกว่า 1 ตัว จึงพิจารณาสร้างเป็นความสัมพันธ์จาโคเบียนของหุ่นยนต์ เนื่องจากในการทดลองต้องการควบคุมทั้งแรงและตำแหน่งไปพร้อมๆกัน ทำให้การหาจาโคเบียนจากสมการทางคณิตศาสตร์ทำได้ยาก จึงได้ทำการแก้ไขโดยการประมาณจาโคเบียนแบบเวลาจริง (Estimated Online Jacobian) ในขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ และใช้เทคนิคระเบียบวิธีเกรเดียนโปรเจคชันเพื่อจำลองควบคุมหุ่นยนต์หลบหลีกสิ่งกีดขวาง

3.2 การควบคุมติดตามเส้นทางเดิน (Trajectory Following Control) [19,20]

การควบคุมทางเดินของปลายแขนกลสามารถพิจารณาการควบคุมออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ การขับควบคุมบนแกนอ้างอิงแบบตัวแปรข้อต่อ (Joint-based Control Scheme) และการขับควบคุมบนแกนอ้างอิงแบบตัวแปรเชิงเส้น (Cartesian-based Control Scheme) ดังต่อไปนี้

3.2.1 **การขับควบคุมบนแกนอ้างอิงแบบข้อต่อ** (Joint-based Control Scheme)

เป็นการควบคุมทางเดินบนแกนอ้างอิงแบบตัวแปรข้อต่อ ซึ่งส่วนใหญ่จะกำหนดการเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุดเริ่มต้นไปยังเป้าหมายในรูปแบบแกนอ้างอิงแบบตัวแปรเชิงเส้น (Cartesian Space) $(x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d)$ จึงจำเป็นต้องแปลงให้อยู่ในรูปของแกนอ้างอิงแบบตัวแปรข้อต่อ (Joint Space) โดยอาศัยคุณสมบัติดังนี้

$$\theta_d = Inversekine(x_d) \qquad (3.1)$$

$$\dot{\theta}_d = J^{-1}(\theta)\dot{x}_d \qquad (3.2)$$

$$\ddot{\theta}_d = \dot{J}^{-1}(\theta)\dot{x}_d + J^{-1}(\theta)\ddot{x}_d \qquad (3.3)$$

โดยที่

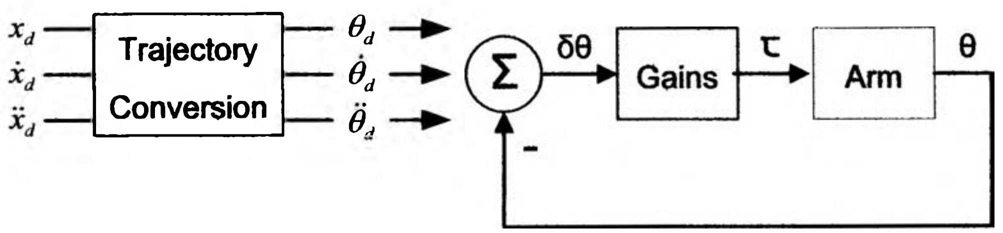
$Inversekine$ คือ สมการการแปลงย้อนกลับของแขนกล

J^{-1} คือ ค่าผกผันของจาโคเบียน

$x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d$ คือ ค่าต่างๆที่ต้องการในแกนอ้างอิงแบบตัวแปรเชิงเส้น (Cartesian Space)

$\theta_d, \dot{\theta}_d, \ddot{\theta}_d$ คือ ค่าต่างๆที่ต้องการในแกนอ้างอิงแบบตัวแปรข้อต่อ (Joint Space)

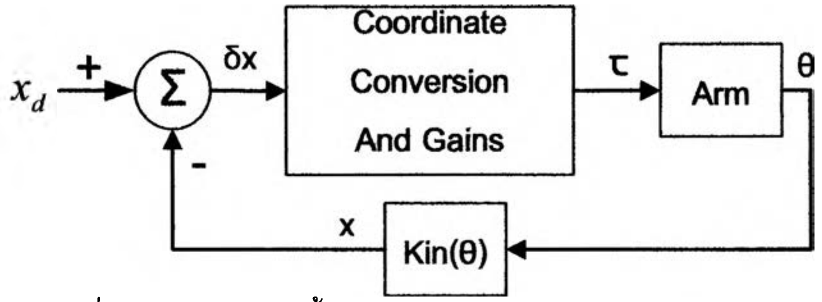
หลังจากที่ทำการแปลงให้อยู่ในรูปของแกนอ้างอิงแบบตัวแปรข้อต่อ (Joint Space) แล้ว นำค่าที่ได้ไปใช้ในการควบคุมข้อต่อเพื่อให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการในแกนอ้างอิงแบบตัวแปรเชิงเส้น (Cartesian Space) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรควบคุมพื้นฐานบนแกนอ้างอิงแบบตัวแปรข้อต่อ (Joint-based Control Scheme)

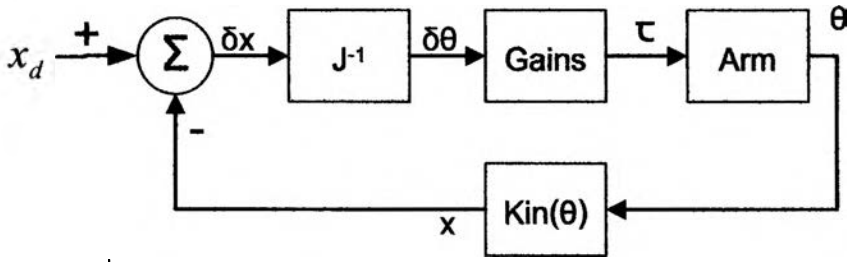
3.2.2 การขับควบคุมบนแกนอ้างอิงแบบตัวแปรเชิงเส้น (Cartesian-based Control Scheme)

การควบคุมทางเดินเชิงเส้นโดยการอ้างอิงแบบตัวแปรเชิงเส้น (Cartesian Space) สามารถควบคุมโดยการใช้การแปลงพิกัดแกนอ้างอิง (Coordinate Conversion) และค่าเกนควบคุมภายในวงจรเพื่อขับข้อต่อไปยังตำแหน่งที่ต้องการ รวมทั้งจลน์ศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Kinematics) แปลงข้อมูลกลับมาควบคุมความผิดพลาดของตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรควบคุมพื้นฐานบนแกนอ้างอิงแบบตัวแปรเชิงเส้น (Cartesian-based Control Scheme)

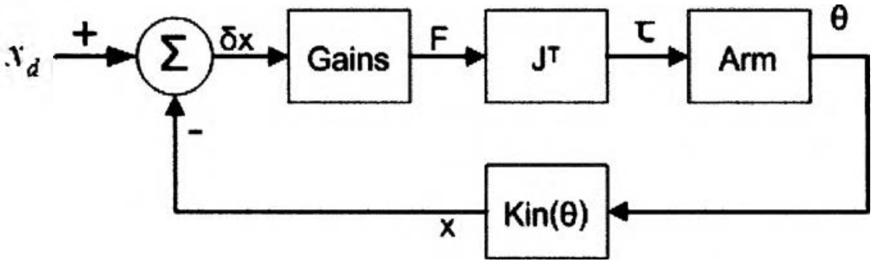
จากรูปที่ 3.2 พบว่า Coordinate Conversion and Gains ที่ใช้ประกอบการควบคุมในวงจรนั้นมีมากมายหลายลักษณะ ในที่นี้ขอยกตัวอย่างการใช้ค่าผกผันของจาโคเบียน (Inverse Jacobian) ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรควบคุมโดยใช้ Inverse Jacobian ในการควบคุมแบบ Cartesian-based Control Scheme

จากรูปที่ 3.3 การควบคุมโดยใช้ค่าผกผันของจาโคเบียน เป็นการควบคุมโดยอาศัยหลักการแปลงระยะทางในรูปเชิงเส้น (X) เป็นในรูปเชิงมุม (θ) จากนั้นใช้ค่าเกน (Gains) ในการขยายสัญญาณเป็นแรงบิด เพื่อส่งไปขับข้อต่างๆ ให้ได้ตำแหน่งตามที่ต้องการ โดยส่งข้อมูลป้อนกลับเพื่อลดค่าความผิดพลาด

ตัวอย่างการควบคุมอีกลักษณะ คือ การควบคุมโดยใช้ทรานส์โพสของจาโคเบียน (Transpose Jacobian) ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรควบคุมโดยใช้ Transpose Jacobian ในการควบคุม แบบ Cartesian-based Control Scheme

จากรูปที่ 3.4 โดยการนำเอาสัญญาณตำแหน่งเชิงเส้นมาขยายผ่านค่าเกน จะสามารถหาแรงเชิงเส้นที่จะใช้ในการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ จากนั้นใช้ทรานส์โพสของจาโคเบียนแปลงให้อยู่ในรูปแรงขับที่ข้อต่างๆ โดยส่งข้อมูลป้อนกลับเพื่อลดค่าความผิดพลาด

3.3 การควบคุมแรงของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

3.3.1 การควบคุมแรงทางตรง (Explicit Force Control)

การควบคุมแรงทางตรงจะอาศัยการเปรียบเทียบแรงที่ต้องการกับแรงที่เกิดขึ้นจริง และนำค่าความแตกต่างนี้ไปคำนวณหาสัญญาณที่เหมาะสมในการขับข้อต่อแขนกล เราอาจใช้ค่าแรงที่ต้องการป้อนชดเชย (Feed forward) และบวกเข้ากับสัญญาณที่จะไปขับแขนกล การควบคุมแรงทางตรงโดยทั่วไปจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการควบคุมทางอ้อมเนื่องจากแรงที่วัดได้จะให้ข้อมูลตำแหน่งที่มีความละเอียดมากกว่าอุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่งมาก

3.3.2 การควบคุมแรงทางอ้อม (Implicit Force Control)

การควบคุมแรงทางอ้อมจะอาศัยการควบคุมแรงที่ต้องการผ่านทางการควบคุมตำแหน่ง อาจเรียกว่า การควบคุมความยืดหยุ่น (Impedance) หรือการควบคุมความแข็ง (Stiffness) โดยจะแบ่งการควบคุมตำแหน่งอยู่ชั้นใน และการควบคุมแรงอยู่ชั้นนอก การควบคุมแบบนี้จะเพิ่มเสถียรภาพของระบบขึ้นเนื่องจากการควบคุมตำแหน่งจะกรองสัญญาณความถี่สูงออก

3.3.2.1 การควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัล (Integral Control)

การควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัลจะอินทิเกรทค่าความผิดพลาดของแรงและนำมาขยายพร้อมป้อนกลับเพื่อควบคุมระบบ การใช้อินทิกรัลกับค่าที่ผิดพลาดจะทำให้ความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวหมดไป และอินทิกรัลนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกรองความถี่สูง จึงทำให้การสั่นของแรงถูกตัดทิ้งออกไป โดยจะทำให้ระบบควบคุมทำงานได้ดีมากขึ้น ซึ่งการควบคุมแบบดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการทดลองขับหุ่นยนต์ CRS Robot เพื่อควบคุมแรงสัมผัส จะมีกฎการควบคุมดังสมการที่ 3.4 และ 3.5

การควบคุมแรง

$$x_c = J^T \int K_{fi}(f_c - f_m)dt \qquad (3.4)$$

การควบคุมตำแหน่ง

$$\tau = K_p(x_c - x_m) + K_i \int (x_c - x_m)dt + K_v(\dot{x}_c - \dot{x}_m) + g \qquad (3.5)$$

โดยที่ τ คือ ค่าแรงบิดที่ใช้ในการขับข้อต่อแขนกล

J คือ จาโคเบียนของแขนกล

K_{fi} คือ ค่าเกนของการควบคุมแบบอินทิกรัล

f_c คือ ค่าแรงที่ต้องการ

f_m คือ แรงที่เกิดขึ้นจริง

K_v คือ ค่าเกนของความหน่วง

K_p คือ ค่าเกนของตัวควบคุมแบบสัดส่วน

K_i คือ ค่าเกนของตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

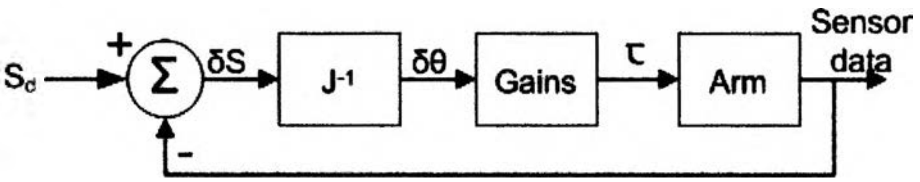
X_m คือ ตำแหน่งของข้อต่อแขนกล

X_c คือ ตำแหน่งอ้างอิงของข้อต่อแขนกล

g คือ ค่าชดเชยแรงบิดจากแรงโน้มถ่วง

3.4 การขับควบคุมจากสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจรู้ (Sensor-based Servoing Algorithm) [20]

การควบคุมหุ่นยนต์โดยอาศัยข้อมูลป้อนกลับจากอุปกรณ์ตรวจรู้นั้น เป็นการนำข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจรู้ที่ติดตั้งตำแหน่งปลายแขนกล มาใช้ในการพิจารณาป้อนกลับเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ การควบคุมด้วยวิธีดังกล่าวจะใช้ค่าสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจรู้ที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง เพื่อหาสัญญาณความผิดพลาดของข้อมูลปลายแขนกลซึ่งอยู่บนแกนอ้างอิงแบบเชิงเส้น จากนั้นทำการแปลงเป็นค่าความผิดพลาดบนแกนอ้างอิงแบบตัวแปรข้อต่อผ่านทางค่าผกผันของจาโคเบียน เพื่อหาสัญญาณควบคุมตำแหน่งของข้อต่อไปใช้ในการขับควบคุมผ่านทางระบบควบคุมตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรควบคุมโดยใช้ Inverse Jacobian ในการควบคุม
แบบ Sensor-based Servoing

3.5 จาโคเบียน (Jacobian) [19]

Jacobian คือ อนุพันธ์ที่อยู่ในรูป Multidimensional Form ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่มีฟังก์ชันอยู่ 3 ฟังก์ชันโดยที่ทั้งหมดเป็นฟังก์ชันของ 3 ตัวแปร แสดงในสมการที่ 3.6

$$\begin{aligned} y_1 &= f_1(x_1, x_2, x_3) \\ y_2 &= f_2(x_1, x_2, x_3) \\ y_3 &= f_3(x_1, x_2, x_3) \end{aligned} \tag{3.6}$$

อนุพันธ์ของ y_i ที่เป็นฟังก์ชันของ x_i สามารถเขียนโดยใช้กฎลูกโซ่ได้อยู่ในรูปสมการที่ 3.7

$$\delta y_1 = \frac{\partial f_1}{\partial x_1}\delta x_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2}\delta x_2 + \frac{\partial f_1}{\partial x_3}\delta x_3$$

$$\delta y_2 = \frac{\partial f_2}{\partial x_1}\delta x_1 + \frac{\partial f_2}{\partial x_2}\delta x_2 + \frac{\partial f_2}{\partial x_3}\delta x_3$$

$$\delta y_3 = \frac{\partial f_3}{\partial x_1}\delta x_1 + \frac{\partial f_3}{\partial x_2}\delta x_2 + \frac{\partial f_3}{\partial x_3}\delta x_3 \tag{3.7}$$

ซึ่งสามารถเขียนในรูปเวคเตอร์ได้ในรูปสมการที่ 3.8

$$\delta Y = \frac{\delta F}{\delta X}\delta X \tag{3.8}$$

โดยอนุพันธ์ย่อย $\frac{\delta F}{\delta X}$ ที่เป็นเมตริกซ์ขนาด 3 x 3 ก็คือ Jacobian นั่นเอง โดยถ้าฟังก์ชัน $f_i(x)$ ไม่เป็นเส้นตรงอนุพันธ์ย่อยก็จะเป็นฟังก์ชันของ x_i ดังนั้น Jacobian จึงอยู่ในรูป J(x) ซึ่งแสดงให้เป็นถึงความไม่สม่ำเสมอของ Jacobian

3.6 การประมาณจาโคเบียนออนไลน์ (Online Estimation of Jacobian) [20]

การเรียกชื่อ Jacobian สามารถจำแนกได้ตามตัวแปรที่ถูกควบคุม (ตัวแปรควบคุม) ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ตัวแปรควบคุม คือ ตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ เราจะเรียกจาโคเบียนนี้ว่า “Robot Jacobian" ในกรณีที่ตัวแปรควบคุมเป็นแรงก็จะเรียกว่า "Force Jacobian" และถ้าตัวแปรควบคุมเป็นรูปภาพที่ได้ข้อมูลจากกล้อง เราจะเรียกว่า “Image Jacobian"

การได้มาซึ่ง Robot Jacobian และ Force Jacobian ได้แสดงไว้ในงานของ J.J.Craig, [19] เนื่องจากในการทดลองต้องการควบคุมทั้งแรงและตำแหน่งไปพร้อมๆกันทำให้การหา Jacobian จากสมการทางคณิตศาสตร์โดยตรงทำได้ยากกว่ากรณีที่กล่าวถึงตอนแรกมาก เพราะประกอบไปด้วยตัวแปรหลายตัว ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ Estimated Online Jacobian ดังที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

Jacobian สามารถหาได้จากข้อมูลที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงองศาการหมุนของแต่ละข้อต่อของแขนกลใน Joint Space ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรควบคุมใน Control Space ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ข้อมูลตำแหน่งที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้เป็นตัวแปรควบคุม ดังนั้น Control Space จึงเท่ากับ Cartesian Space และเนื่องจากข้อมูลเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปทุกครั้งที่หุ่นยนต์มีการเคลื่อนไหว ดังนั้น Jacobian ที่เราได้จึงเป็นเมตริกซ์ที่มีสมาชิกเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆตามการเคลื่อนไหวแต่ละครั้งของหุ่นยนต์ จึงขอเรียกจาโคเบียนดังกล่าวใหม่ว่า “Estimated Online Jacobian (EOJ)" Jacobian ทำได้อย่างง่ายดาย รายละเอียดของการหา EOJ สามารถศึกษารายละเอียดในเอกสารอ้างอิง [20,22]

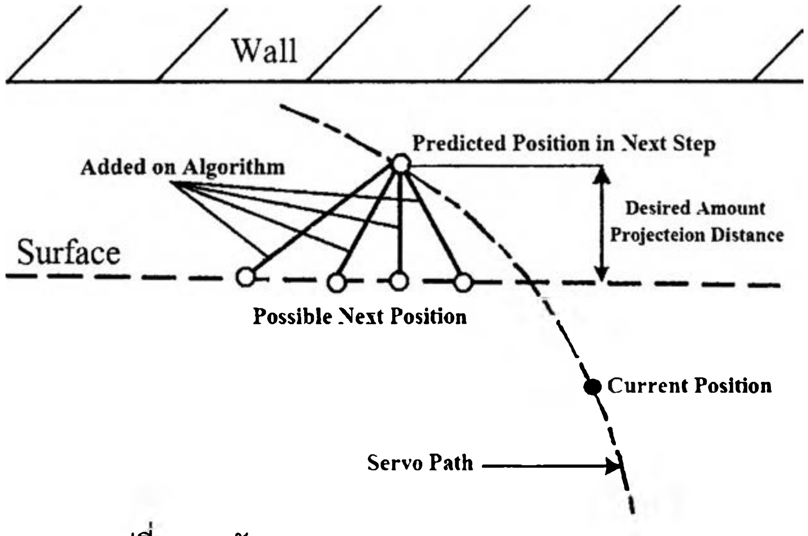
หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.7 **เทคนิคการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง** (Collision Avoidance Technique) [21,22]

การขับควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ด้วยการอาศัยข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจรู้ติดตั้งที่ปลายแขนหุ่นยนต์ ทำให้หุ่นยนต์สามารถรับรู้สถานะของสิ่งแวดล้อม โดยถ้ามีสิ่งกีดขวางอยู่ในบริเวณหรือทับเส้นทางเดินของปลายแขนหุ่นยนต์ อุปกรณ์ตรวจรู้สามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางที่เข้ามาในระยะเงื่อนไขที่กำหนดขึ้น จากนั้นทำการหลบหลีกสิ่งกีดขวางด้วยเทคนิคในการปรับแก้เส้นทางเดินของหุ่นยนต์ใหม่โดยอาศัยข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจรู้ดังกล่าว และเงื่อนไขการปรับแก้ไขเส้นทางเดินประกอบ เพื่อทำการหาค่าความผิดพลาดป้อนกลับเข้าไปในระบบควบคุมของหุ่นยนต์ โดยเทคนิคการหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่ใช้ในการจำลองควบคุมในวิทยานิพนธ์นี้ คือ Gradient Projection Method ซึ่งมีข้อดี คือ ไม่ต้องทำการแบ่งหรือลดตัวแปรควบคุม และสามารถใช้งานร่วมกับ ระบบควบคุมต่างๆ ได้โดยตรง จึงขอทำการอธิบายเฉพาะวิธี Gradient Projection ซึ่งนำมาใช้ในการจำลองควบคุมหุ่นยนต์แบบ 2-Link Planar Arm และ Articulated Robot

3.7.1 **ระเบียบวิธีเกรเดียนโปรเจคชัน** (Gradient Projection Method) [20,22]

ในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางด้วยวิธี Gradient Projection Method เป็นการปรับแก้ไขเส้นทางเดินบนแกนอ้างอิงแบบข้อต่อ ซึ่งจะนำข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่ง มาใช้พิจารณาประกอบกับเงื่อนไขของสิ่งกีดขวาง เพื่อทำการปรับแก้ไขเส้นทางเดินของหุ่นยนต์ที่ล่วงล้ำเข้าไปในสิ่งกีดขวาง โดยนำเส้นทางเดินของหุ่นยนต์ดังกล่าวนั้นทำการหาภาพฉายของตำแหน่งเส้นทางใหม่ที่เกิดบนระนาบที่ขนานกับสิ่งกีดขวางดังแสดงในรูปที่ 3.6 เพื่อทำการสร้างเส้นทางเดินบนแกนอ้างอิงแบบข้อต่อใหม่ให้มีค่าน้อยที่สุด สามารถศึกษารายละเอียดในเอกสารอ้างอิง [20,22]



รูปที่ 3.6 หลักการของ Gradient Projection Method