

การควบคุมแบบย้อนกลับของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิดสามแกนหมุน
FEEDBACK CONTROL OF A THREE-AXIS INDUSTRIAL MANIPULATOR ARM

โดย ศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และคณะ

บทคัดย่อ

การควบคุมตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเป็นหัวใจของการออกแบบระบบควบคุมทั้งหมด โดยจะพิจารณาการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนในลักษณะจุดต่อจุดหรือ Point-to-Point เป็นหลัก ระบบควบคุมแบบย้อนกลับหรือแบบปิดที่จะนำมาควบคุมการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจะเป็นระบบควบคุมชนิด พี ไอ ดี (PID, Proportional-Integral-Derivative) การออกแบบระบบควบคุมนี้จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ได้ทำการปรับให้เป็นเชิงเส้นแล้ว (Linearization) และการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อก็อิสระ ไม่มีผลต่อกัน (Decoupling) ภายใต้เงื่อนไขที่ว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมนั้นไม่เร็วจนเกินไป ซึ่งทำให้แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเหวี่ยงกึ่งกลางและแรงคอริโอลิส (Centrifugal Force and Coriolis Force) มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงเฉื่อยของระบบ (Inertia Force of the System) หุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่สร้างขึ้นนี้เป็นชนิดสามข้อต่อแบบโพลาร์โคออดิเนต (Polar Coordinate) ข้อต่อเป็นชนิดหมุน (Revolute Joint) แต่ละข้อต่อขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร โดยติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้วัดตำแหน่งของข้อต่อเป็นแบบ Potentiometer และอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วของการหมุนของมอเตอร์ (Tachometer) คอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับควบคุมเป็นไมโครคอมพิวเตอร์ชนิด 16 บิต โดยระบบควบคุมแบบปิดที่ออกแบบไว้จะอยู่ในรูปของโปรแกรมที่ทำงานอยู่บนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์นี้ เครื่องคอมพิวเตอร์นี้สามารถทราบถึงตำแหน่งและความเร็วของการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมโดยรับสัญญาณจากอุปกรณ์วัดตำแหน่งและอุปกรณ์วัดความเร็วซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อก (analog) แล้วแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล (digital) ก่อนที่จะส่งเข้าไปยังคอมพิวเตอร์

คำนำ

ในปัจุบันนี้การนำเอาคอมพิวเตอร์มาควบคุมระบบกลไกต่าง ๆ ที่นำมาใช้กับกระบวนการผลิตนั้นเริ่มแพร่หลายมากขึ้น โดยเฉพาะประเทศอุตสาหกรรม จุดประสงค์ของการนำเอาคอมพิวเตอร์เข้ามาควบคุมนั้นก็ต้องการงานที่ละเอียด แม่นยำ มีการผิดพลาดน้อยที่สุด และสามารถผลิตในปริมาณมาก โดยให้คุณภาพของชิ้นงานที่ผลิตนั้นมีความสม่ำเสมอ

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมเป็นตัวอย่างหนึ่งของการพัฒนาระบบกลไกที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ในต่างประเทศที่มีเทคโนโลยีสูงหรือประเทศอุตสาหกรรมต่าง ๆ นั้น ได้นำเอาหุ่นยนต์อุตสาหกรรมมาใช้ในกระบวนการผลิต ก็ด้วยเหตุผลที่ว่า ความแม่นยำของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมในการผลิตและประกอบชิ้นงานมีความแม่นยำสูง ทำให้ชิ้นงานที่ได้ออกมานั้นมีคุณภาพสูง ซึ่งในงานบางอย่างการดำเนินงานด้วยมือไม่สามารถทำได้ละเอียดเท่า การทำงานในสภาพแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน เช่นบริเวณที่มีความร้อนสูง บริเวณที่อากาศเป็นพิษ ต่าง ๆ เหล่านี้ ล้วนเป็นข้อพิจารณาในการที่จะนำหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเข้ามาใช้แทนที่การทำงานของมนุษย์

ในการสร้างหุ่นยนต์อุตสาหกรรมนั้น ปัญหาที่ต้องคำนึงถึงให้มากก็คือปัญหาเนื่องมาจากความหยุ่นตัวของโครงสร้าง (Flexibility Structure) ของหุ่นยนต์ ผลกระทบเนื่องจากการหยุ่นตัวนั้นจะก่อให้เกิดปัญหาทางด้านการควบคุมได้ การแก้ปัญหานี้ก็โดยสร้างหุ่นยนต์ให้มีมวลมากเพื่อจะได้มีความทรงรูปสูง (Rigidity) ด้วยเหตุนี้หุ่นยนต์ในปัจจุบันจึงต้องใช้กำลังขับเคลื่อนเพื่อเอาชนะมวลที่มากเกินไปจนความต้องการ ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและมีรูปร่างเกะกะอยู่

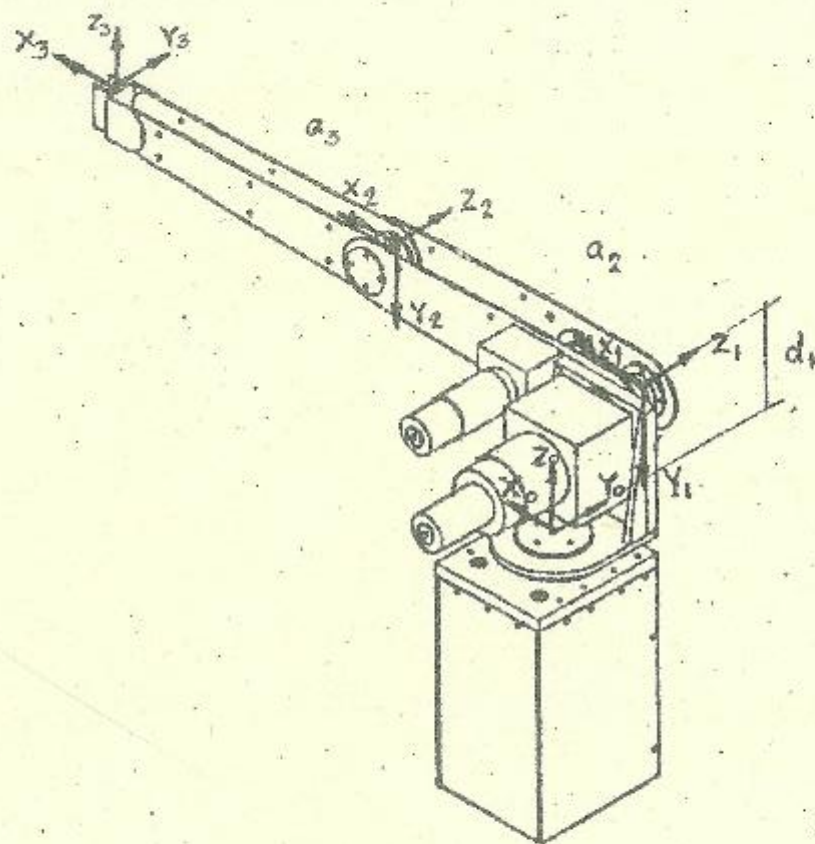
จุดประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ก็เพื่อที่จะพัฒนาระบบควบคุมแบบย้อนกลับหรือแบบปิด (Close-loop Control) ซึ่งสามารถที่จะควบคุมตำแหน่ง ทิศทาง และความเร็วของการเคลื่อนที่ในระบบแกนพิกัด (Polar Coordinate) การควบคุมนี้จะสั่งผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่ควบคุมหุ่นยนต์นั้น แทนหุ่นยนต์ที่สร้างจะทำด้วยอสมิเนียม เพราะต้องการให้น้ำหนักเบาในขณะที่ยวกันก็มีความแข็งแรงด้วย แต่ละข้อต่อเคลื่อนที่ด้วยแรงที่ขับเคลื่อนจากมอเตอร์กระแสตรงโดยผ่านชุดเฟืองทดที่ต่อเข้ากับข้อต่อต่าง ๆ ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

ในการออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับ เพื่อนำมาควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ อุตสาหกรรมที่สร้างขึ้นนั้น สิ่งที่สำคัญและขาดไม่ได้เลยก็คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Dynamic Model) ซึ่งใช้แทนระบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม การหาแบบจำลองที่ถูกต้องและเที่ยงตรงนั้นก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างกล่าวคือนับตั้งแต่การสร้างหุ่นยนต์ ถ้ามีสื่อในการสร้างหุ่นยนต์นั้นขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่ให้ก็มีมาตรฐานเพียงพอ ก็จะ สามารถลดความยุ่งยากในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลงไปได้มาก ตัวประกอบที่ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีความยุ่งยากสลับซับซ้อนมากขึ้นก็คือ ความเสียดทานที่ข้อต่อต่าง ๆ, Backlash, ความหยุ่นตัวของโครงสร้าง (Flexibility Structure) ของหุ่นยนต์เอง เป็นต้น ถ้าสามารถจัดการเหล่านี้ได้ก็จะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีความยุ่งยากน้อยลง แต่ก็ยังมีความสลับซับซ้อนอยู่เนื่องจากว่า หุ่นยนต์อุตสาหกรรมนั้นมีหลายข้อต่อ และในการเคลื่อนที่แต่ละครั้งข้อต่อต่าง ๆ อาจจะมีการเคลื่อนที่พร้อม ๆ กันด้วย จึงทำให้เกิดผลกระทบจากข้อต่อหนึ่งไปยังอีกข้อต่อหนึ่ง (Couple) ซึ่งผลกระทบนี้จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ ถ้าความเร็วในการเคลื่อนที่ไม่สูงมากผลกระทบนี้จะน้อยลงและอาจจะละทิ้งได้ ในการคิดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่ถ้าการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อสูงผลกระทบนี้ก็จะมีความสำคัญทำให้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นต้องคำนึงถึงค่านี้ด้วย การออกแบบระบบควบคุมที่ทำการศึกษาในที่นี้จะพิจารณาทั้งสองกรณี แต่เนื่องจากการควบคุมนี้ใช้เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุม การควบคุมที่ออกแบบโดยยึดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่คำนึงถึงผลกระทบระหว่างข้อต่อนั้นไม่สามารถใช้ควบคุมแบบ real time ได้ เพราะเหตุที่เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์นี้มีขีดจำกัดในการคิดคำนวณ ดังนั้นจึงใช้วิธีการออกแบบโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ตัดแปลงให้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น (Linear Model) และเป็นแบบที่ไม่มีผลกระทบระหว่างแขน (Decouple) แต่ผลของการทดสอบกับระบบจริงก็ได้ผลดีพอสมควร ดังจะกล่าวต่อไป แต่จะทำการจำลองการเคลื่อนที่บนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์โดยใช้แบบจำลองที่เป็นระบบจริงซึ่งเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Model) และในแบบจำลองนี้ก็มีผลกระทบระหว่างแขน (Coupling) เมื่อมีการเคลื่อนที่ด้วย

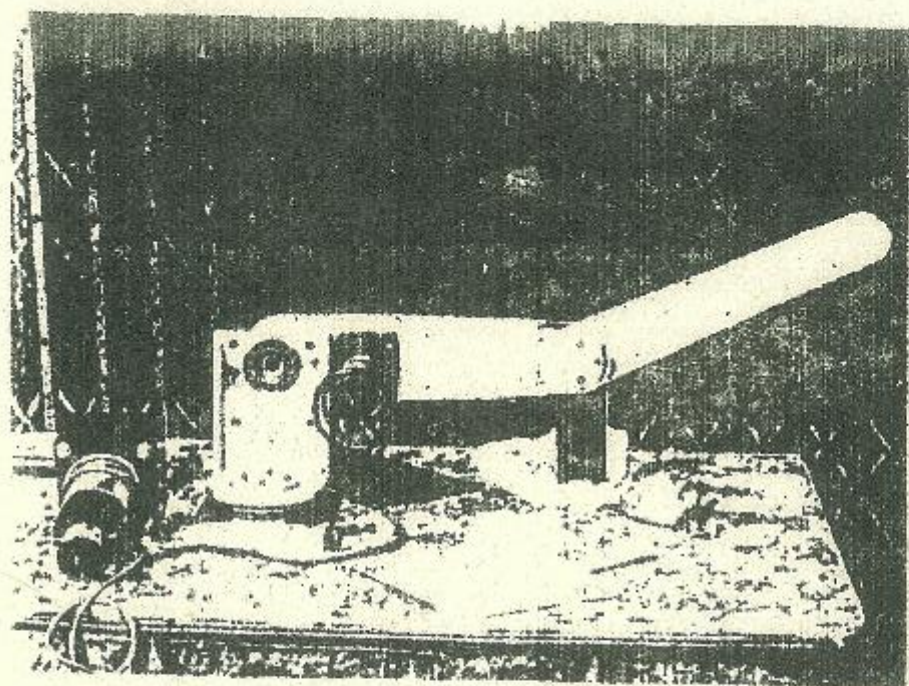
การควบคุมแบบป้อนกลับที่ศึกษานี้จะเป็นการควบคุมแบบป้อนกลับ พี ดี ดี (PID Proportional-Integral-Derivative) การออกแบบระบบควบคุมนี้จะสมมติว่าการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อนั้น ไม่มีผลกระทบต่อกัน

รูปที่ 1 เป็นรูปแบบของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ได้ทำการสร้างขึ้นเพื่อการศึกษา เป็นหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิดสามข้อต่อแบบ Revolute Joint ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร มอเตอร์นี้จะขับเคลื่อนแขนข้อต่อโดยผ่านชุดเฟืองทดซึ่งต่อเข้าระหว่างแกนมอเตอร์กับตัวแขน ตรงที่ข้อต่อหรือข้อต่อที่สามนั้นจะถูกขับเคลื่อนด้วย

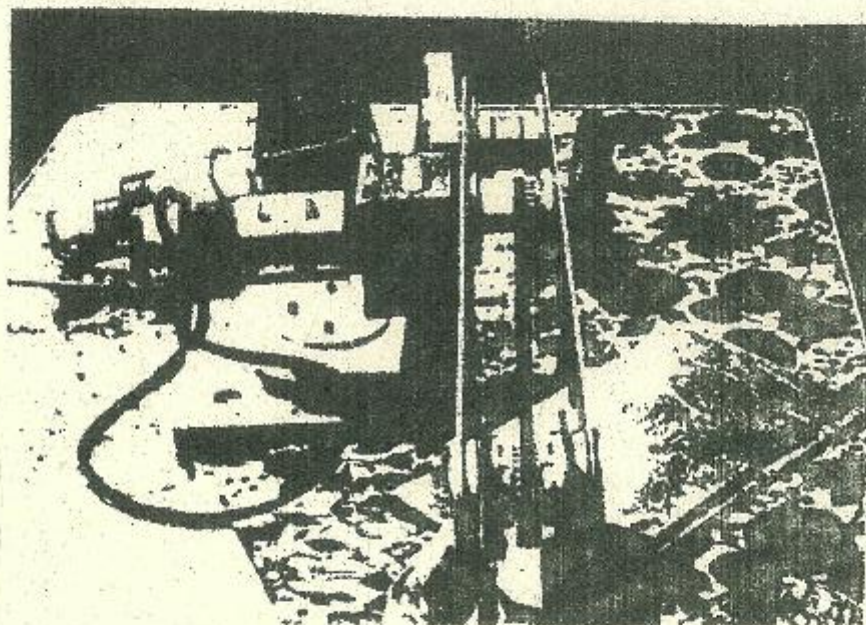


Joint	α_i	a_i	d_i	$\cos \alpha_i$	$\sin \alpha_i$
1	-90	0.0	0.040	0	-1
2	0	0.40	-0.017	1	0
3	90	0.43	0.066	0	1

รูปที่ 1. การตั้งแกนของ CUMC ROBOT



รูปที่ 2



รูปที่ 3 แชนพุ่มยนต์สุดสาครรวมที่สร้างขึ้นพร้อมส่วนประกอบอื่น ๆ

โมเดลซึ่งอยู่ใกล้กับปลายแขนที่หนึ่งหรือข้อต่อที่สองดังแสดงในรูป โดยมีสายพานตัวขึ้นไปขึ้นอีกทอดหนึ่ง

เมื่อทราบว่าหุ่นยนต์มีรูปแบบดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 ก็เริ่มทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยให้วิธีการของ Lagrange's Equation เพื่อหาสมการการเคลื่อนที่ (Dynamics Equation) ซึ่งจะอยู่ในรูปของ Non-linear Differential Equations ดังนี้

$$F_i = \sum_{j=1}^6 D_{i,j} \ddot{q}_j + Ia_i \ddot{q}_i + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 D_{i,j,k} \dot{q}_j \dot{q}_k + D_i \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } D_{i,j} &= \sum_{p=\max(i,j)}^6 \text{Trace} \left[\frac{\partial^2 I_{e,p}}{\partial \dot{q}_i \partial \dot{q}_j} \right] \\ D_{i,j,k} &= \sum_{p=\max(i,j,k)}^6 \text{Trace} \left[\frac{\partial^2 I_{e,p}}{\partial \dot{q}_i \partial \dot{q}_j \partial \dot{q}_k} \right] \\ D_i &= \sum_{p=i}^6 -m_p g^T \frac{\partial T_p}{\partial \dot{q}_i} \end{aligned}$$

$$J_i = \begin{vmatrix} (-I_{xx} + I_{yy} + I_{zz})/2 & I_{ixy} & I_{ixz} & m_i X_i \\ I_{ixy} & (I_{xx} - I_{yy} + I_{zz})/2 & I_{iyz} & m_i Y_i \\ I_{ixz} & I_{iyz} & (I_{xx} + I_{yy} - I_{zz})/2 & m_i Z_i \\ m_i X_i & m_i Y_i & m_i Z_i & m_i \end{vmatrix}$$

สมการที่ 1 นี้เป็นสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่มี n ลิงค์ (link) โดยที่ $D_{i,i}$ เป็นเทอมอินเนอร์เชีย (Inertia term) ของข้อต่อ i, $D_{i,j}$ เป็นผลกระทบของอินเนอร์เชียระหว่างข้อต่อ i และ j, $D_{i,j,j}$ เป็นแรงเหวี่ยงที่ข้อต่อ i เกิดจากความเร็วของข้อต่อ j, $D_{i,j,k}$ เป็นแรงคอริโอลิสที่ข้อต่อ i เกิดจากความเร็วของข้อต่อ j และข้อต่อ k และ D_i แทนแรงดึงดูดของโลกที่กระทำต่อข้อต่อ i การเคลื่อนที่ของลิงค์ของแขนกลที่ความเร็วต่ำ เทอมของแรงคอริโอลิสจะมีขนาดน้อยเมื่อเทียบกับแรงรวมของระบบ ความสัมพันธ์ไดนามิกตามวิธีของลากรางจ์ที่ได้นี้ยังไม่ได้รวมถึงผลจากความฝืดของการเคลื่อนที่ และน้ำหนักที่แขนกลต้องยกในการทำงาน การหาความสัมพันธ์ไดนามิกของแขนกลโดยตรงจากสมการที่ 1 สามารถทำได้โดยอาศัยการสร้างแกนให้กับระบบแขน กลตามวิธีการของ Denavit & Hartenberg แล้วหาอนุพันธ์อันดับที่ 1 และ 2 ของทรานสฟอร์มเมตริกโดยตรงมาแทนลงในสมการที่ 1 เพื่อหา $D_{i,i}$, $D_{i,j}$ และ $D_{i,j,k}$ ให้กับสมการที่ 1 เป็นวิธีการหาค่าค่อนข้างตรง ๆ ซึ่งต้องใช้เวลามากและมี

โอกาสผิดพลาดได้ง่าย เมื่อพิจารณาการทำงานสโพล์เมตริกและการหาอนุพันธ์ของทรานสฟอร์เมตริก สามารถสร้างเมตริก Q มาช่วยให้การหาความสัมพันธ์ไดนามิกตามรูปแบบสมการที่ 1 ซึ่งทำให้สะดวกขึ้นและลดความผิดพลาดลงได้ (ดูหนังสืออ้างอิง 1)

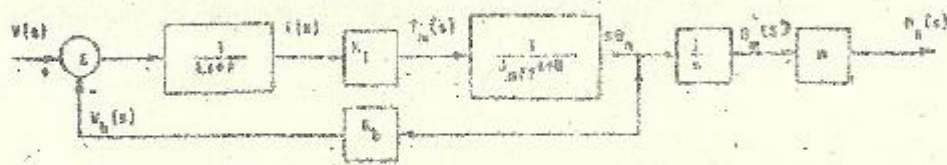
แบบจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบเชิงเส้น

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมดังแสดงไว้ในสมการที่ 1 นั้น เป็นสมการไม่เชิงเส้นและมีความยุ่งยากซับซ้อนมาก ไม่เหมาะสำหรับนำมาออกแบบระบบควบคุมแบบปิด เมื่อตั้งเกณฑ์ที่ว่า การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์จะมีความเร็ว ไม่สูงนัก เทอม ที่เป็นแรงเช่นตึงฝืด และ แรงคอสิโลสิส ก็จะมีค่าน้อยมาก ประกอบกับสมมติฐานที่ว่ามวลของข้อต่อหนึ่งเมื่อมีการเคลื่อนที่จะมีผลกระทบน้อยกับการเคลื่อนที่ของมวลของข้อต่อหนึ่ง ก็จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแต่ละข้อต่ออิสระต่อกัน เหมือนกับการควบคุมแต่ละแขนแยกอิสระจากกันเอง แบบจำลองในการนี้จึงค่อนข้างง่ายและใช้ในการออกแบบระบบควบคุมแบบปิดชนิด พี ไอ ดี นี้

ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ส่วนมาก เป็นการควบคุมชุดขับเคลื่อนให้เคลื่อนที่ไหลไปหยุดในตำแหน่งที่กำหนด และยึดตำแหน่งนี้ไว้จนกว่าจะได้รับคำสั่งบังคับการเคลื่อนที่ใหม่ หรือเป็นการควบคุมชุดขับเคลื่อนให้เคลื่อนที่ไหลไปตามระยะตำแหน่งที่กำหนดให้ โดยอาศัยระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (feed back control) ซึ่งสามารถรักษาความแม่นยำของการเคลื่อนที่ได้ดี เพราะมีการตรวจสอบผลการเคลื่อนที่กับคำสั่งบอกตำแหน่งของการเคลื่อนที่ สำหรับตัวขับเคลื่อนไหลนั้น จะเห็นว่าเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง (D.C. Servomotor) มีความเหมาะสมกับการขับเคลื่อนแกนของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก เพราะมีคุณสมบัติที่ดีในการบังคับความเร็ว มีความเป็นเชิงเส้นดีในช่วงการทำงานที่กว้าง ให้แรงบิด และมีประสิทธิภาพสูง

เซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง (ต่อไปนี้จะเรียกว่ามอเตอร์) ที่ใช้กับงานหุ่นยนต์เป็นมอเตอร์ที่ถูกพัฒนาให้โพลาร์โมเมนต์ของอาเมเจอร์มีค่าน้อย มีสเตเตอร์เป็นชนิดแม่เหล็กถาวรที่มีขนาดเล็ก และการควบคุมมอเตอร์ควบคุมที่อาเมเจอร์ แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นมักถูกชดเชยกำลังเพิ่มขึ้นเท่ากับอัตราทดของชุดเฟืองทดเมื่อส่งไปถึงข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ แต่ชุดเฟืองทอนี้ก็จะทำให้ค่าโพลาร์โมเมนต์เฉลี่ยของมอเตอร์เมื่อนิยามาที่ข้อต่อของแขน มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นกำลังสองของอัตราทดของเฟืองทอดังกล่าว ซึ่งสมการการเคลื่อนที่ของระบบที่ประกอบด้วยมอเตอร์ ภาระ และชุดเฟืองทด สามารถเขียนอยู่ในรูปของ s-domain ได้ดังแสดงในรูปที่ และสมการที่

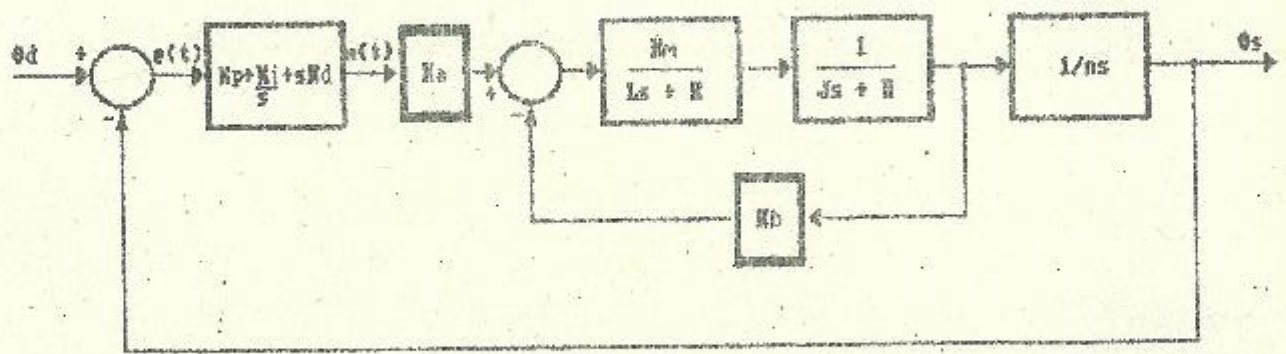
$$\Theta_n(s)/V_n(s) = K_1 / s [L J_{eff} s^2 + (R J_{eff} + L B_{eff}) s + (R B_{eff} + K_1 K_p)] \quad (12)$$



รูปที่ 4 มอเตอร์บล็อกไดโอนแกรม

การออกแบบระบบควบคุม

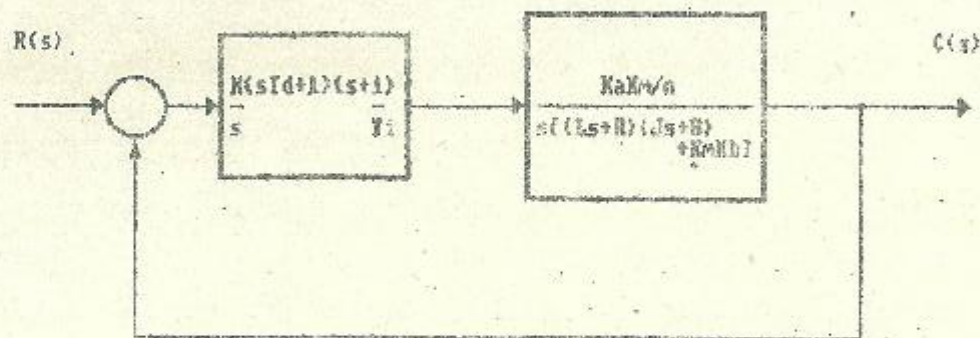
คุณลักษณะที่ต้องการของระบบควบคุมคือ 1. ต้องการให้ระบบมีความเที่ยงตรงที่สภาวะคงตัว (steady-state accuracy) เป็นที่น่าพอใจ 2. ให้ผลตอบสนองได้รวดเร็ว 3. มีการเรดดูเลทที่ตึกลวคือสามารถปรับตัวได้ดี เมื่อมีสิ่งรบกวนต่อระบบ และ 4. ระบบจะต้องมีเสถียรภาพตลอดการเคลื่อนที่ เพื่อให้ระบบมีคุณลักษณะตามจุดมุ่งหมาย จึงเพื่อกำหนดการควบคุมแบบ พี ไอ ดี จุดมุ่งหมายหลักของการออกแบบก็คือ ต้องการให้ระบบมีความคลาดเคลื่อนคงตัวน้อยที่สุด โดยทั่วไปแล้วความคลาดเคลื่อนคงตัวของระบบจะลดลงเมื่อเกน K_p มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมจะทำการเลือกค่า K_p ให้มีค่ามากที่สุด แต่เนื่องจากว่าค่า K_p นี้ถ้ามีค่ามากเกินไปแล้ว ในตอนที่สร้างจริงตัวแอมพลิไฟเออร์ (Amplifier) ก็ต้องมีค่าเกนสูงมาก ๆ ซึ่งอาจจะทำให้มีเสถียรภาพน้อยลง โดยทั่วไปแล้วการเลือกค่า K_p จะดูที่ค่าเกนมาร์จิน (gain margin) ของระบบเป็นส่วนใหญ่ ส่วนการเลือกค่า K_d และ K_i ก็จะคำนึงถึงค่าเฟสมาร์จิน (phase margin) เป็นหลัก เมื่อรวมทั้งค่า K_p , K_d และ K_i เข้าไปด้วยกันในระบบควบคุม ก็จะทำให้ระบบมีคุณลักษณะที่ดีครบ 4 ประการข้างต้น การเพิ่ม K_p และ K_i เข้าไปในระบบควบคุมนั้นจะเป็นการทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น ในขณะที่ขั้วคันก็ไม่ทำให้ความเที่ยงตรงของระบบด้อยลงไป จากรูปที่ 5 นำมาจัดบล็อกไดโอนแกรมของระบบแล้วเขียนใหม่ โดยจัดเป็นตัวควบคุม พี ไอ ดี อยู่ในลักษณะของคาโนนิคัล (Canonical Relization form) ได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมการควบคุม พี ไอ ดี กับมอเตอร์ของแขนกล

โดยที่

- $m(t)$ = สัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุมพี ไอ ดี ที่เวลา t
- $e(t)$ = ค่าสัญญาณแตกต่างระหว่างจุดอ้างอิงกับค่าที่วัดได้ที่เวลา t
- K_p = ค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบ พี
- K_i = ค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบ ไอ
- K_d = ค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบ ดี
- K_a = อัตราขยายของเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์
- K_m = ค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์
- K_b = ค่าคงที่แรงดันย้อนกลับ
- L = ค่าอินดักแทนซ์ของมอเตอร์
- R = ค่าความต้านทานของมอเตอร์
- J = โมเมนต์แรงเฉื่อยของมอเตอร์และโหลด
- B = สัมประสิทธิ์วิสคอสันดัมปิ้งของมอเตอร์และโหลด
- N = อัตราทดของชุดเฟืองทด



รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม พี ไอ ดี ของมอเตอร์

จากบล็อกของตัวควบคุมในรูปที่ 6 กำหนดให้

$$K_p = K(1+T_d/T_1) \quad (13)$$

$$K_i = K/T_1 \quad (14)$$

$$K_d = K \cdot T_d \quad (15)$$

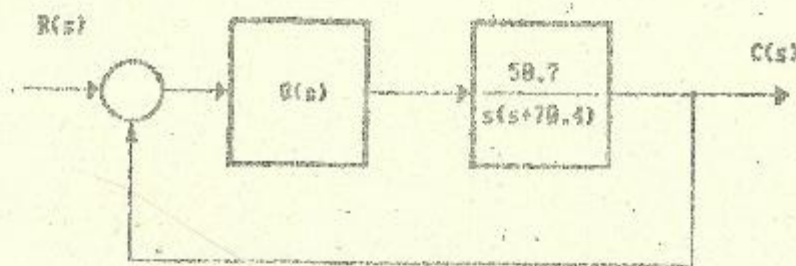
ขั้นตอนในการออกแบบระบบควบคุม

1. พล็อตกราฟไบโอดี (Bode) ค่าการตอบสนองความถี่ลูปเปิดระบบมอเตอร์กับโหลด เพื่อหาคอนเนอร์ฟรีควเอนซี (corner frequency)
2. เลือกค่า $1/T_d$ ให้มีค่าใกล้เคียงกับคอนเนอร์ฟรีควเอนซีของระบบมอเตอร์ในข้อ 1
3. เลือกค่า $1/T_1$ ให้มีค่าน้อยกว่า $1/T_d$ ประมาณ 20 เท่า
4. พล็อตกราฟไบโอดี (Bode) ค่าการตอบสนองความถี่ลูปเปิดของตัวควบคุมและของทั้งระบบ เพื่อพิจารณาเฟสมาร์จิน (Phase Margin) และเกนมาร์จิน (Gain Margin) โดยเฟสมาร์จินของทั้งระบบควรมีค่ามากกว่า 45 องศาขึ้นไป เพื่อให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพพอสมควร
5. การปรับค่าเฟสมาร์จินรวมของทั้งระบบตามข้อ 4 ปรับจากค่า T_1 หรือ T_d ได้ แต่ควรปรับที่ T_1 เพื่อให้ $1/T_d$ ยังคงอยู่บริเวณคอนเนอร์ฟรีควเอนซีเช่นเดิม
6. จากรูปกราฟไบโอดี (Bode) ให้เลือกค่า K_p เพื่อให้ระบบมีค่าเกนมาร์จินที่พอประมาณ
7. ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบจากพล็อตองศาการหาคำรูดเตอร์วิสต์

(Pole of Characteristic equation)

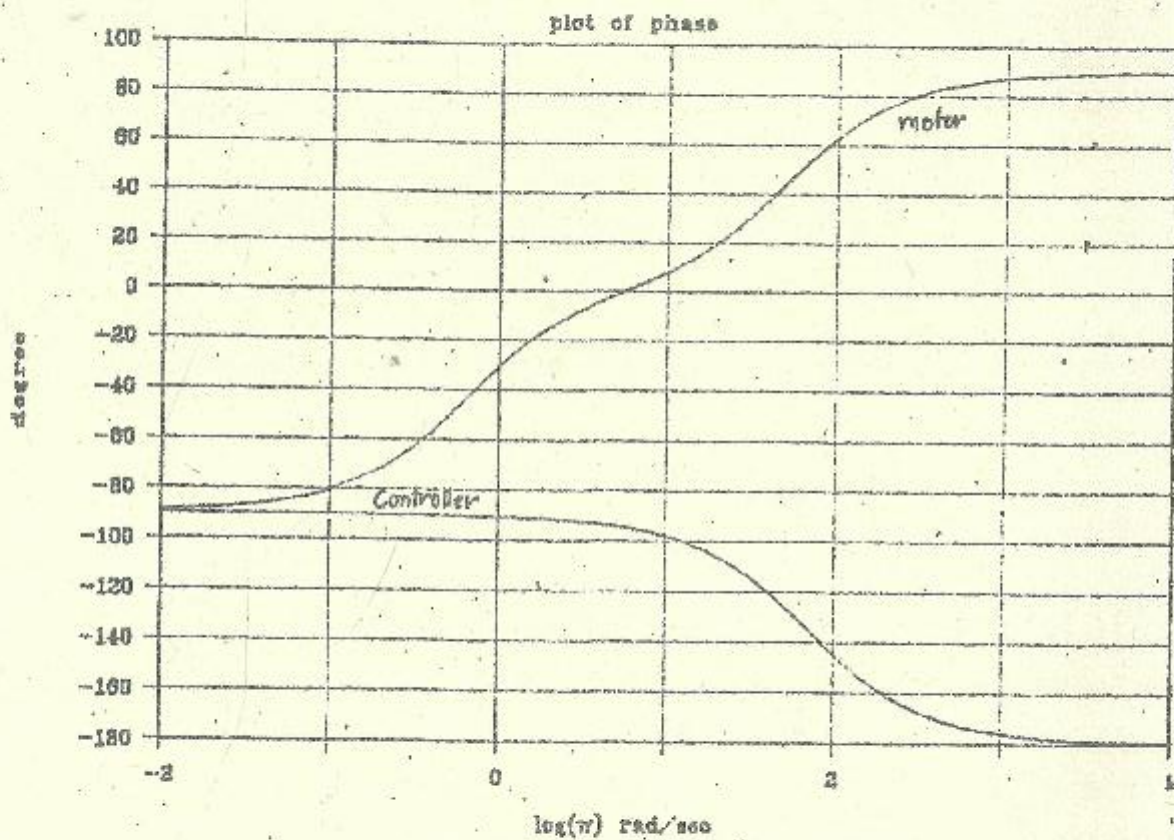
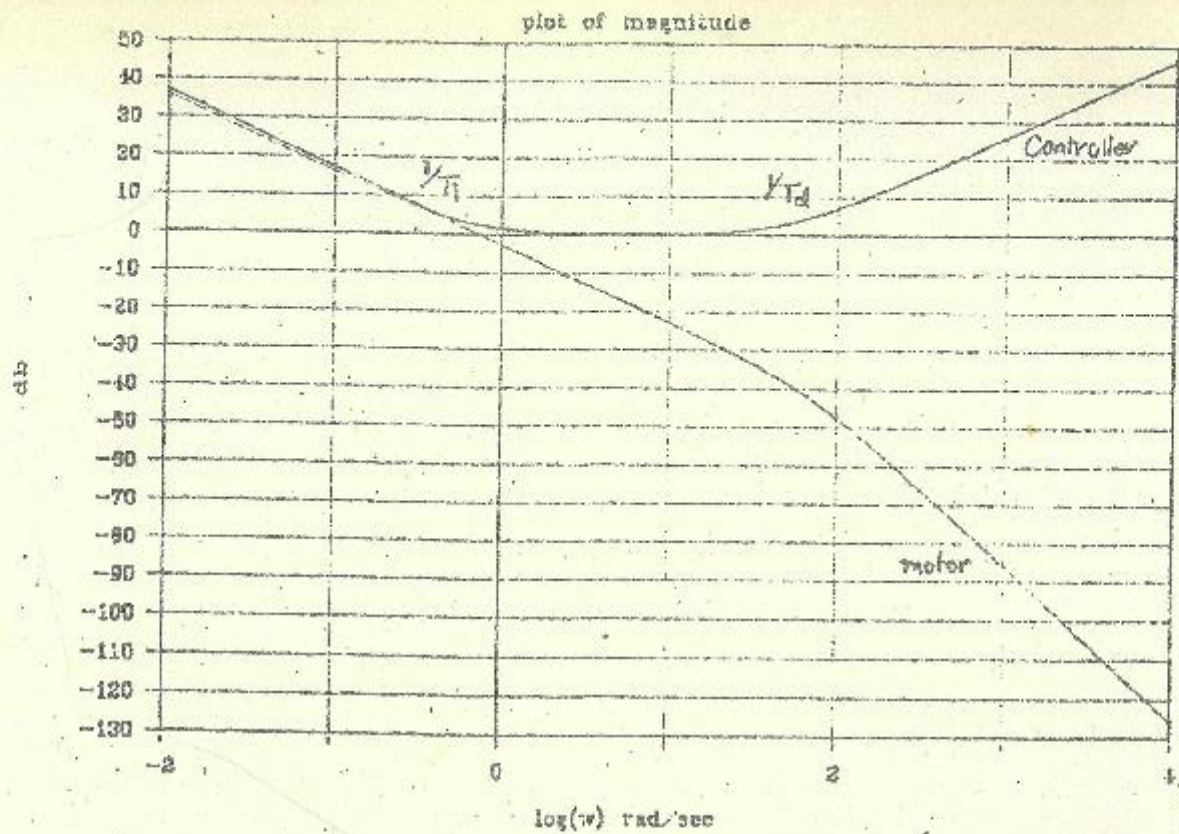
8. ทดสอบค่าตัวควบคุม พี โล ดี ที่ได้ตามสมการที่ 13-15 กับระบบจริง
9. การปรับปรุงเสถียรภาพของระบบให้ดีขึ้น ถ้าได้ปรับค่าเฟสมาร์จินของระบบตามข้อ 4 ให้มีค่าเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 6 เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างเข้าไปในระบบแล้วก็จะได้รูปบล็อกไดโแกรมดังแสดงไว้ในรูปที่ 7 โดสที่ลินเนอร์เขียนส่วนที่มีผลต่อระบบมากที่สุดคืออินเนอร์เนื่องจากขอเตอร์ทั้งนี้เนื่องจากหุดเปิดงกตที่อัตราครอบงำสูงนั่นเอง

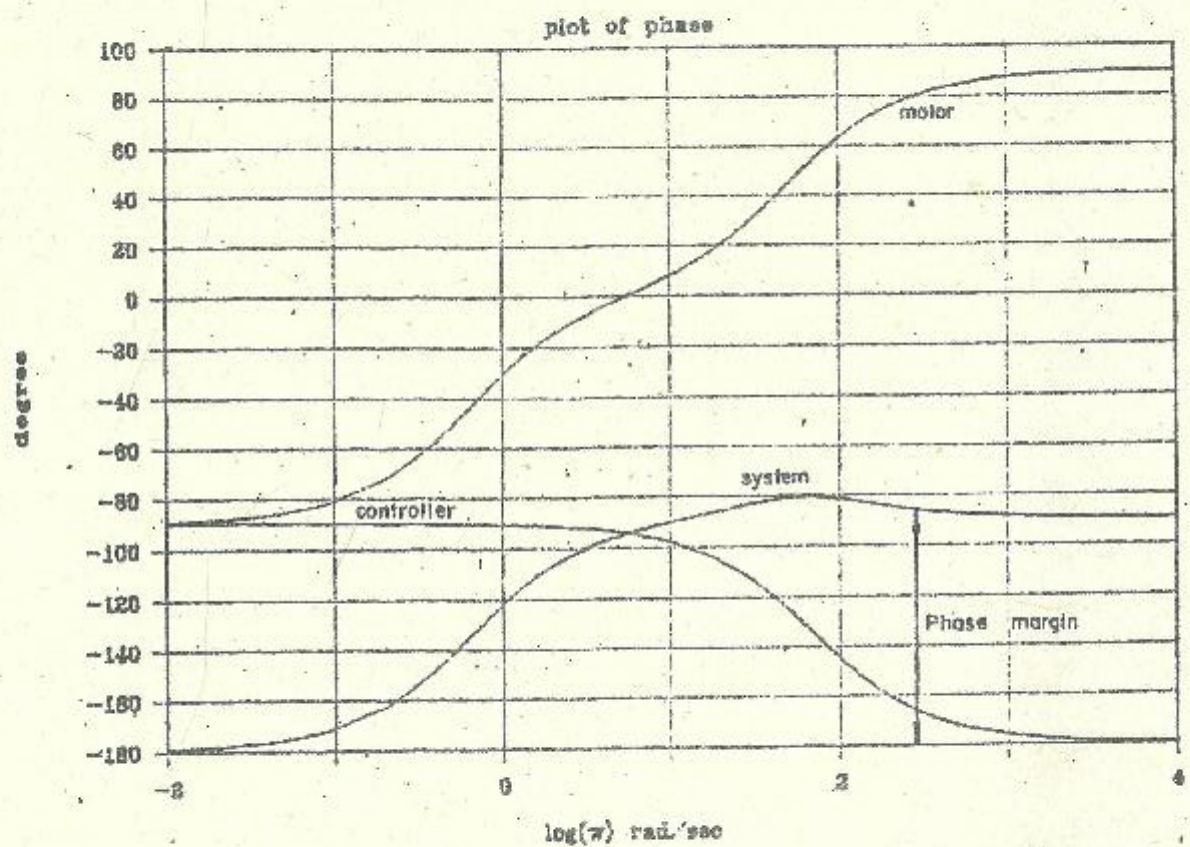
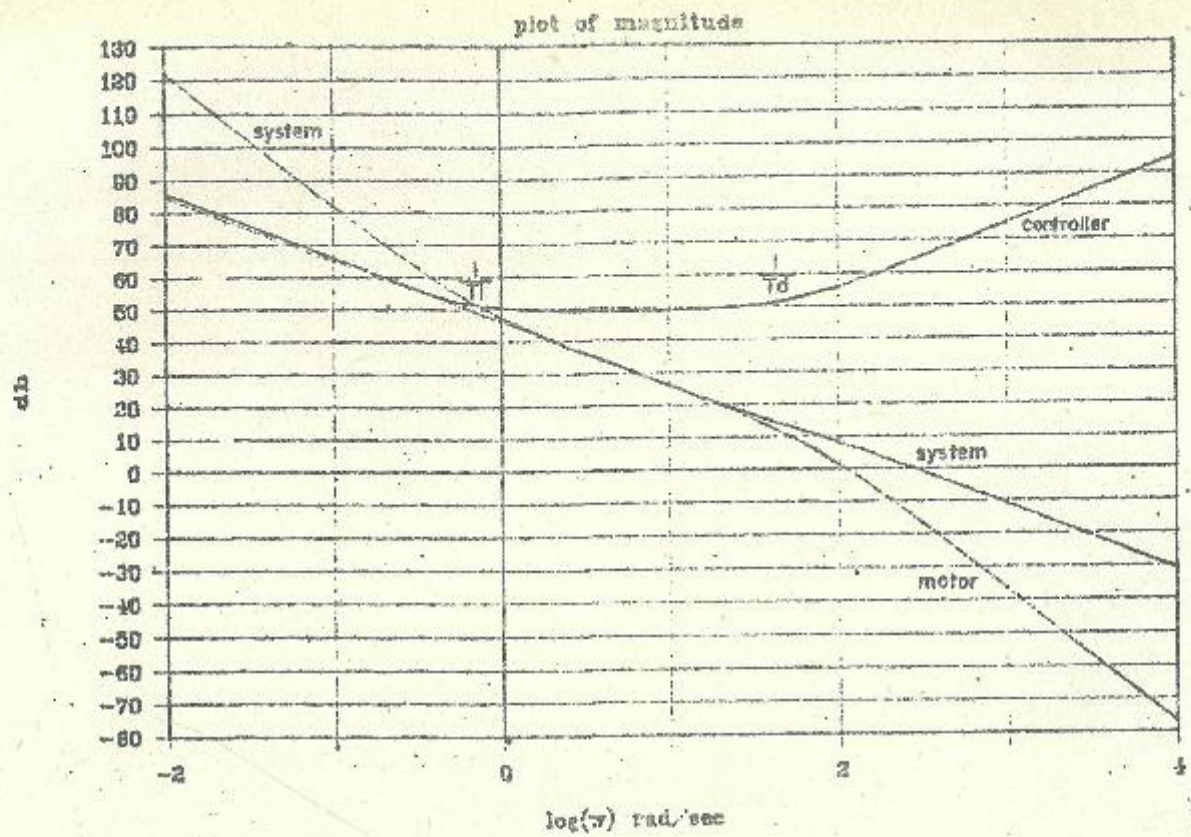


รูปที่ 7 บล็อกไดโแกรมของระบบการควบคุมแบบ พี โล ดี ของขอเตอร์ในแกนฐาน

การหาค่า K_p และ K_u จะพิจารณาจาก การตอบสนองความถี่ (frequency response) ของ ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันเปิด (open loop transfer function) ของระบบ $G(s)$ และของระบบควบคุม พี โล ดี ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 Bode Plot ของแกนข้อต่อของแขนกล



รูปที่ ๑ โพลพลอตของระบบควบคุมกันข้อผิดพลาดของขนกล

จากรูปที่ 8 พบว่าการตอบสนองความถี่แบบเปิด (open loop frequency response) ของระบบควบคุมแบบ นี้ ใกล้เคียง มีคอนเนอร์เฟรควเอนซีที่ $1/T_u$ และ $1/T_d$ และมีมุมเฟส (Phase angle) อยู่ระหว่าง -90 ถึง 90 องศา จากที่กล่าวมาแล้วว่า การออกแบบจะเลือกให้ $1/T_u$ มีค่าใกล้เคียงกับคอนเนอร์เฟรควเอนซีของระบบและระบบควรมีเฟสมาร์จินไม่น้อยกว่า 45 องศา ดังนั้นจากรูป 8 เลือกค่า $1/T_u$ ให้เท่ากับ 50 เรเดียน/วินาที และ $1/T_d$ เท่ากับ 0.625 ซึ่งให้ค่าของเฟสมาร์จินของทั้งระบบมีค่า 90 องศา เกนมาร์จินเป็น ∞ ซึ่งหมายความว่าค่าเกนมาร์จินสามารถเลือกให้มีค่าสูงได้ แต่ที่ต้องคำนึงถึงตอนสร้างจริงดังกล่าวมาแล้ว ฉะนั้นจึงเลือกค่า K_p เพื่อให้โพล (pole) ของระบบอยู่ทางด้านซ้ายมือของแกนจินตภาพ (Imaginary Axis) ของเอสเพลน (S-Plane) ในขณะเดียวกันก็เลือกให้การตอบสนองของระบบเป็นชนิด Overdamp นั่นก็คือ poles ทั้งหมดอยู่บน Real Axis ทางด้านซ้ายมือของ S-Plane เมื่อตรวจสอบค่าโพล (poles) ของทรานสเฟรฟังก์ชันของระบบ จะได้ค่าโพล (pole) ที่ -85.151 , -21.1 และ -0.3387 เมื่อค่า K มีค่าประมาณ 280 ซึ่งแสดงว่าระบบมีเสถียรภาพและมีการตอบสนอง (Response) เป็นแบบโอเวอร์แดมป์ (Overdamp)

จากสมการที่ 13-15 แทนค่า T_u และ T_d จะได้ค่าเกน K_p , K_i , K_d ดังนี้

K_p	=	280.5
K_i	=	173.1
K_d	=	5.5

จากรูปที่ 8 กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์แกนหัวไหล่ได้ดังนี้

K_a	=	12	โวลต์/โวลต์
K_m	=	0.191	นิวตันเมตร/แอมป์
K_b	=	0.191	โวลต์/(เรเดียน/วินาที)
n	=	90	
R	=	1.8	โอห์ม
B	=	4.58×10^{-5}	กิโลกรัมเมตร ² /วินาที
J	=	3.49×10^{-4}	กิโลกรัมเมตร ² /วินาที
$G(s)$	=	$40.54/s(s+58.23)$	
K	=	576	

เลือก T_u , T_d ให้มีค่าเท่ากับ 0.02 และ 2 ซึ่งจะทำให้ระบบมีเฟสมาร์จิน 70 องศา และได้ค่าเกนดังนี้

$$\begin{aligned}K_p &= 581.8 \\K_i &= 288 \\K_d &= 11.5\end{aligned}$$

และในทำนองเดียวกันได้ค่าเกนของแกนฐานเป็น

$$\begin{aligned}K_p &= 323.6 \\K_i &= 174 \\K_d &= 6.2\end{aligned}$$

จากรายละเอียดการออกแบบข้างต้นสามารถสรุปผลการเลือกค่าตัวควบคุมของแขนกลทั้ง 3 แกนได้ดังตารางรูปที่ 10

	แกนฐาน	แกนหัวไหล่	แกนข้อศอก
I design (Kg.m ²)	1.80	2.40	0.15
J design (motor side)	3.94×10^{-4}	3.57×10^{-4}	3.95×10^{-6}
e_{ss} (design) rad	0.005	0.005	0.005
Phase margin	90	70	90
System pole	-101.71, -42.4	-75.41, -51.42	-85.15, -21.1
	-0.075	-0.441	-0.338
K_p	323.6	581.8	280.5
K_i	174	288	173.1
K_d	6.2	11.5	5.5

รูปที่ 10. ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมของแขนกลสามแกน

การจำลองการเคลื่อนที่หุ่นยนต์อุตสาหกรรมบนเครื่องคอมพิวเตอร์

การจำลองแบบด้วยคณิตศาสตร์แทนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมหรือระบบแขนกล 3 แกนทั้งระบบ ต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของทั้งสามส่วนที่ได้กล่าวแล้ว มาสร้างความสัมพันธ์ดังรูปที่ 12

$$G(s) = 1.262 * K / [s(s + 70.25)] \quad (8)$$

จากความสัมพันธ์ของ static velocity error coefficient

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} s * G(s) \quad (9)$$

$$K_v = \text{output velocity} / \text{FVE} \quad (10)$$

กำหนดให้

$G(s)$ = ทรานสเฟอว์ฟังก์ชันของระบบที่ถูกควบคุม

K_v = static velocity error coefficient

FVE = ค่าผิดพลาดของตำแหน่งที่สภาวะสิ้นสุด
(Final Value Error)

ถ้ากำหนดให้ค่า Output Velocity มีค่าเท่ากับ 0.015 ม/ส และค่าผิดพลาดของตำแหน่งที่สภาวะสิ้นสุดให้มีค่าเท่ากับ 1 มิลลิเมตร จากสมการที่ 10 จะได้ค่า K_v ดังแสดงไว้ในสมการที่ 11

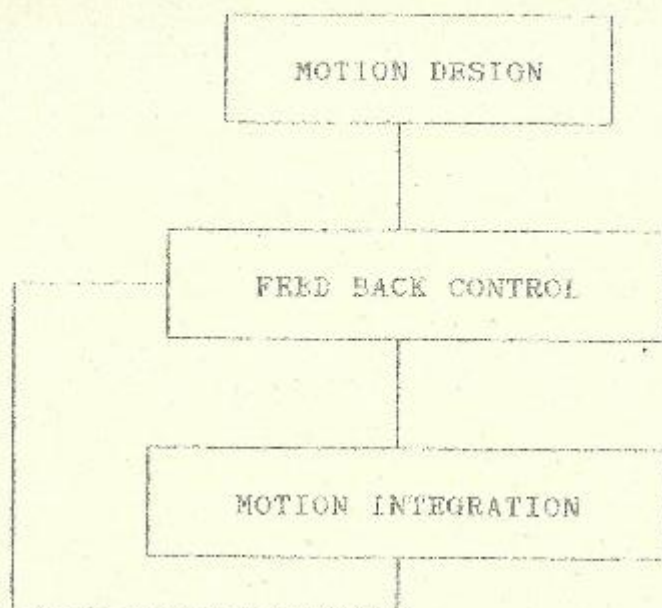
$$\begin{aligned} K_v &= 0.015 / 0.001 \\ K_v &= 15 \quad \text{sec}^{-1} \end{aligned} \quad (11)$$

แทนค่า K_v จากสมการที่ 11 และค่า $G(s)$ จากสมการที่ 8 ลงในสมการที่ 9 จะได้ค่าเกน K ที่ให้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่สภาวะสิ้นสุดที่ความเร็วเอาต์พุตตามที่ต้องการ

$$\begin{aligned} 15 &= \lim_{s \rightarrow 0} s * 1.262 * K / [s(s + 70.25)] \\ K &= 15 * 70.25 / 1.262 \\ K &= 835 \end{aligned} \quad (12)$$

ในการหาค่า K_p และ K_v จะออกแบบโดยพิจารณาจาก Frequency-response ของ open-loop transfer function โดยพิจารณาจาก Open-loop transfer function ของระบบควบคุม พี โด ดี และ open-loop transfer function ของระบบ $G(s)$ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 9

จากรูปที่ 9 จะเห็นว่า Open-loop frequency-response ของระบบควบคุม

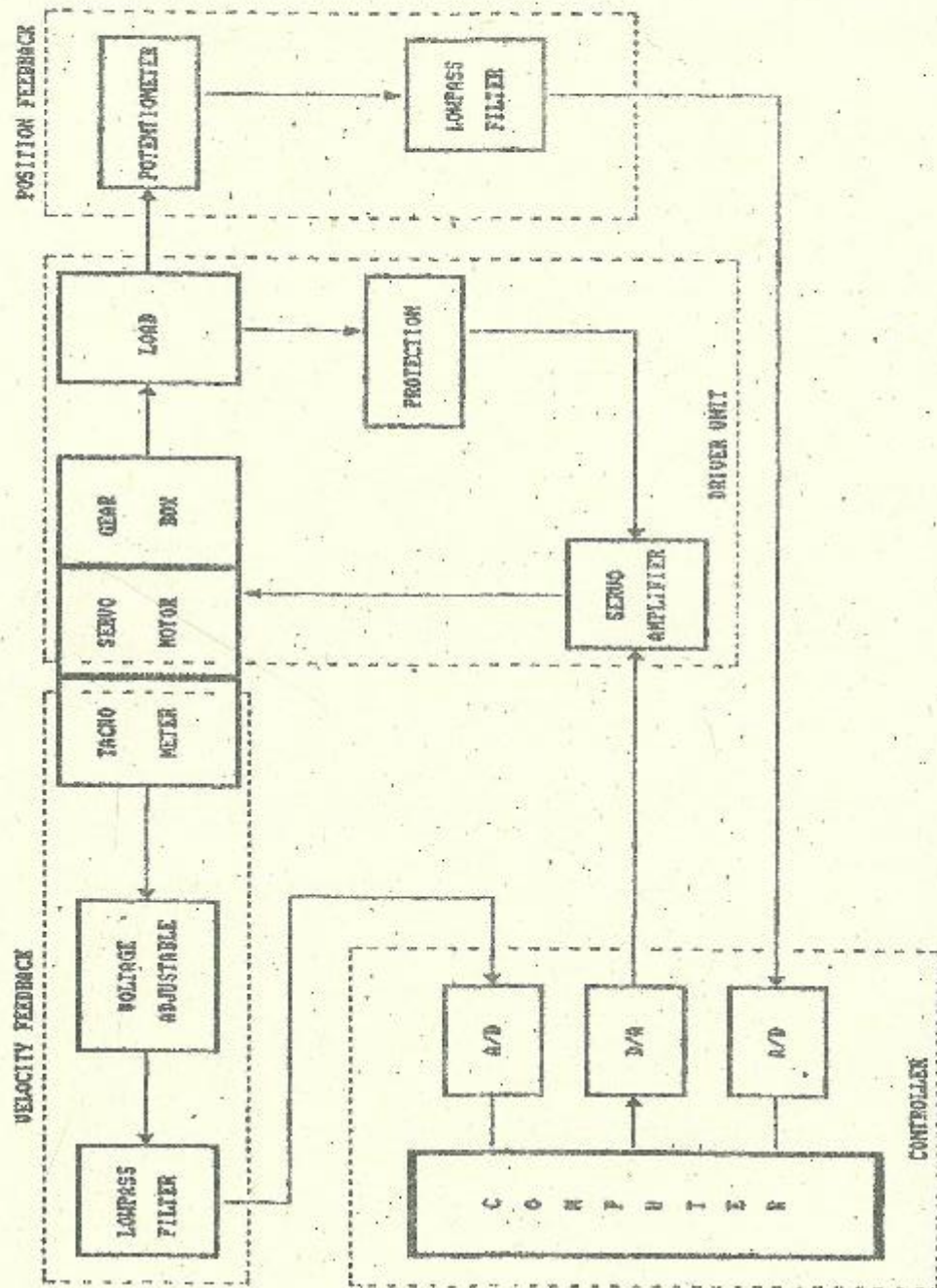


รูป 12 การจำลองแบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

การเชื่อมโยงระบบหุ่นกลกับคอมพิวเตอร์

ระบบหุ่นกลที่ใช้สำหรับการทดลองนี้สามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วนคือ 1. ส่วนกลไกประกอบด้วย โครงสร้างของแขนกลทั้งสามแกน มอเตอร์ชุดขับเพลา และชุดเฟืองทดเพื่อลดความเร็วและขยายแรงบิด 2. ส่วนควบคุมประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณอนาล็อก ทรานซิสเตอร์วัดสัญญาณตำแหน่งและความเร็วเพื่อป้อนกลับไปสู่ระบบควบคุม และอุปกรณ์ขยายสัญญาณควบคุม ซึ่งมีการเชื่อมโยงกันดังรูปที่ 16 โดยที่การควบคุมเริ่มจากคอมพิวเตอร์รับคำสั่งเป้าหมายการเคลื่อนที่นำมาสร้างอนุกรมสัญญาณอ้างอิงซึ่งให้เป็นสัญญาณคำสั่งตำแหน่ง สัญญาณอ้างอิงที่สร้างไว้จะนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณที่วัดตำแหน่งจริงของข้อต่อที่รับกลับผ่านทาง A/D (Analog to Digital Converter) เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมส่งที่จะส่งผ่านทาง D/A (Digital to Analog Converter) ไปเข้าชุดขยายสัญญาณ (Servo amplify) สัญญาณที่ออกจากชุดขยายสัญญาณนี้จะถูกส่งต่อไปขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อหมุนกลไกของแขนกลเป็นอংশนี้เรื่อยไปจนถึงเป้าหมายที่ตั้งลงการ ขณะที่ข้อต่อต่าง ๆ ของแขนกลหมุนนั้นตำแหน่งขณะใดขณะหนึ่งก็สามารถ รู้ได้โดยอ่านค่าที่ตัวเซ็นเซอร์ที่วัดตำแหน่งและความเร็ว สัญญาณของชุดป้อนกลับนี้จะส่งผ่านชุดกรองสัญญาณรบกวนก่อนที่จะส่งกลับเข้า A/D นอกจากนี้แขนกลได้ติดตั้งสวิทช์หยุด (Limit Switches) การทำงานของชุดขยายสัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์ เพื่อป้องกันไม่ให้คนแขนกลเคลื่อนที่เกินขอบเขตจนได้รับความเสียหาย ในรูปที่แสดงข้างต้นนั้นเป็นการเชื่อมโยงแขนกลกับระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

ส่วนแชนกัลที่ใช้ในการทดสอบจะมี 3 แชนกัล ใช้คอมมิวเตอรืเพียงชุดเดียวควบคุม แต่ใช้อุปกรณ์อื่น ๆ ดังรูปเป็นจำนวน 3 ชุดเมื่อเป็นระบบเต็ม ทั้งสามชุดจะเคลื่อนที่ไปด้วยแรงบิดที่ส่งออกจากชุดสายสัญญาณ โดยที่แรงบิดนี้จะเปลี่ยนไปตามเวลาในการสุ่ม (sampling rate) โดยจะปฏิบัติตามขั้นตอนการควบคุมของแชนกัลแกนเดี่ยว จนกระทั่งแชนของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งซึ่งส่งควบคุมโดยสัญญาณวิทยุที่สร้างขึ้นนั้น ในช่วงเวลาการสุ่มนั้นคอมมิวเตอรืจะทำการคำนวณ แรงบิดทั้งสามของแชนแต่ละชุด เมื่อได้แรงบิดแล้วจึงส่งออกไปยังชุดสายสัญญาณที่เดียว โดยผ่านชุดแปลงสัญญาณจาก D/A

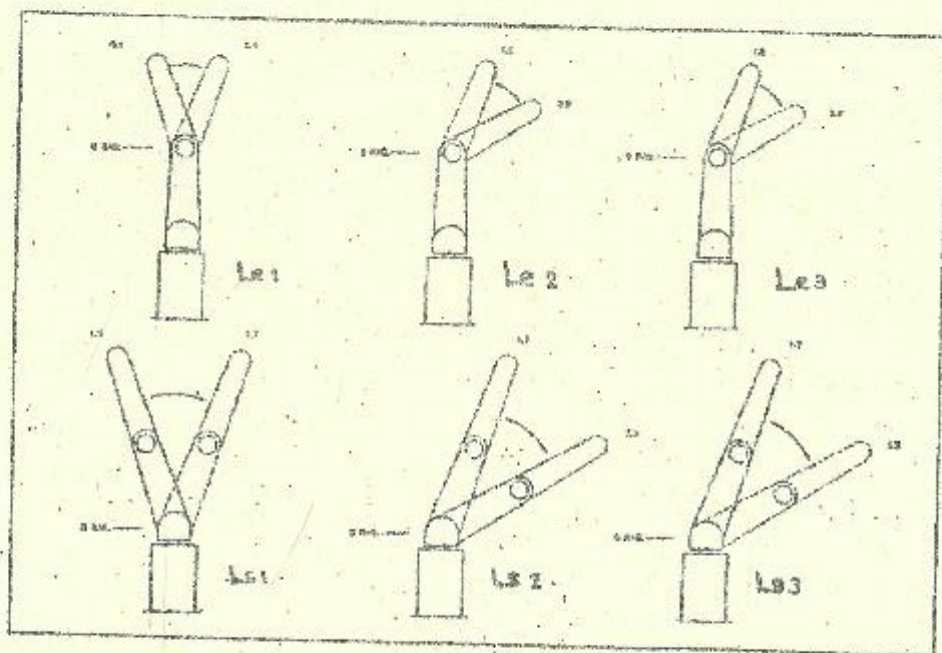


รูปที่ 16 การเชื่อมโยธาแบบควบคุมแรงกด

การทดสอบการเคลื่อนที่ของขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

การทดสอบแบบกลตามโครงการนี้ ก็เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพของการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการควบคุม สิ่งที่จะแสดงถึงประสิทธิภาพในการทำงานของระบบขนกลได้มี 2 ประการคือ 1. ความสามารถในการเคลื่อนที่ หมายถึงการเคลื่อนที่และหยุดในตำแหน่งที่ต้องการได้คล่องแคล่วของขนกล โดยมีความเร็วและอัตราเร่งของการเคลื่อนที่ที่เหมาะสม โดยไม่เกิดการสั่น (oscillate) 2. ความสามารถในการรับภาระน้ำหนักสิ่งของที่ต้องเคลื่อนย้ายไปด้วย ตัวแปรค่าในการทดสอบมี 3 ตัวคือ อัตราเร่งของการเคลื่อนที่, มุมของการเคลื่อนที่ และ การกระจากน้ำหนักในการเคลื่อนที่ไปด้วย จะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของขนกลนั้น เป็นการเคลื่อนที่ในแนวราบ ผลกระทบเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลกจึงไม่มีผลโดยตรงกับการเคลื่อนที่ การทดสอบจะทดสอบในช่วงการเคลื่อนที่เพียงช่วงเดียว ส่วนแกนหัวไหล่และแกนข้อศอกจะเห็นว่าความโน้มถ่วงของโลกจะมีผลโดยตรงกับแรงบิดที่ใช้ขับเคลื่อนข้อต่อ โดยจะเป็นการเพิ่มหรือลดภาระให้ระบบ ดังนั้นการทดสอบจึงจะให้มีการเคลื่อนที่ 3 ลักษณะดังแสดงในรูปที่ 17

1. เคลื่อนที่ผ่านแนวตั้ง
2. เคลื่อนที่ในทิศทางด้านแรงโน้มถ่วงเข้าหาแนวตั้ง
3. เคลื่อนที่จากแนวตั้งไปในทิศทางตามแรงโน้มถ่วงโลก



รูปที่ 17 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ในการทดสอบแบบกล
ในการทดสอบจะเก็บผลของตำแหน่ง และความเร็วที่เกิดขึ้นจริง นำมาเปรียบเทียบกับจุด

อ้างอิงที่กำหนด เพื่อค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง ในการทดสอบด้วยควบคุมทองแทน
ต่าง ๆ มีค่าดังนี้

แกนฐาน $K_p = 328.6$, $K_i = 174$, $K_d = 6.2$
 แกนหัวไหล่ $K_p = 581.8$, $K_i = 238$, $K_d = 11.5$
 แกนข้อศอก $K_p = 280.5$, $K_i = 173$, $K_d = 5.5$

ใช้คาบเวลาในการสุ่มค่า 10 มิลลิวินาที ได้ผลการทดลองดังนี้

1. การทดสอบกับตัวแปรการเคลื่อนที่ เป็นการแสดงผลความคลาดเคลื่อนของ
ตำแหน่งของการเคลื่อนที่ที่อัตราเร่ง 0.1 , 0.25 , 0.5 และ 1 เรเดียน/วินาที² มี
ความเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่ไม่เกิน 0.5 เรเดียน/วินาที² และมีตำแหน่งเริ่มต้นและ
ตำแหน่งเป้าหมายดังกล่าวข้างต้น โดยได้ทำการทดลองควบคุมแขนกลเป็น 2 ลักษณะคือ

- 1.1 ทดสอบด้วยการควบคุมแขนกลให้มีการเคลื่อนที่เพียงครั้งละ 1 แกน
- 1.2 การทดสอบด้วยการควบคุมแขนกลให้มีการเคลื่อนที่พร้อมกันทั้ง 3

แกน

ซึ่งผลได้แสดงไว้ในตารางที่ 18

ค่าความผิดพลาดสูงสุดของการเคลื่อนที่ (เรเดียน)						
แกนฐาน	แกนหัวไหล่			แกนข้อศอก		
	$1\sigma_1$	$1\sigma_2$	$1\sigma_3$	$1\sigma_1$	$1\sigma_2$	$1\sigma_3$
	(1.9-1.9)	(1.2-1.7)	(2.2-1.7)	(1.7-2.2)	(0.9-1.4)	(2.0-1.5)
	(1.5-2.0)					(1.5-2.0)
0.014	0.012			0.012		
0.020		0.016		0.012		
-0.020			0.010	0.010		
-0.010			0.012		0.010	
-0.020			0.014			-0.013
๙๙ 0.001	0.002			0.001		
๙๙ 0.001			0.002			0.001

๙ ช่วงของการเคลื่อนที่ (จาก-ถึง) เรเดียน
 ๙๙ ผลการทดสอบกับแบบจำลอง

รูปที่ 18 ตารางแสดงผลการควบคุมแขนกลแบบเคลื่อนที่พร้อมกันทั้ง 3 แกน
 จากตารางรูปที่ 18 จะเห็นว่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ มีค่าสูงกว่าการเคลื่อนที่

แบบแกนเดี่ยว ทั้งนี้เพราะการเคลื่อนที่แบบนี้จะมีผลการรบกวนจากแรงภายนอกเนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของแกนที่ต่อกัน การทดสอบด้วยวิธีนี้ผลการทดสอบกับแบบจำลองที่ได้แสดงไว้ในตารางมีความผิดพลาดน้อยมาก เนื่องจากในแบบจำลองไม่มีผลความคลาดเคลื่อนจากแนคแลชของชุดเนื่องทด

2. การทดสอบกับตัวแปรน้ำหนัก ทดสอบที่อัตราเร่งการเคลื่อนที่ 0.25 เรเดียน/วินาที² ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนหัวโหลเป็นแบบ $1s_1$ การเคลื่อนที่ของแกนข้อศอกเป็นแบบ $1e_1$ ได้ผลการทดลองดังแสดงไว้ในตารางในรูปที่ 19

น้ำหนัก (กก.)	ค่าความผิดพลาดสูงสุดของการเคลื่อนที่ (เรเดียน)		
	แกนฐาน	แกนหัวโหล $1s_1$	แกนข้อศอก $1e_1$
1	0.014	-0.016	-0.010
2	-0.020	-0.020	-0.018
3	0.020	-0.020	-0.020
* 8	0.017	0.018	-0.012

* ผลการทดสอบกับแบบจำลอง

รูปที่ 19 ตารางแสดงผลการควบคุมแขนกลเมื่อมีการปรับค่าน้ำหนัก

สรุป

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการออกแบบระบบควบคุมแบบย้อนกลับหรือแบบปิดการหุ่นยนต์อุตสาหกรรม โดยการออกแบบระบบควบคุมได้ใช้วิธีการออกแบบเป็น พี ไอ ดี โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นสมการเชิงเส้น และเป็นระบบที่ไม่มีผลกระทบระหว่างข้อต่อเมื่อมีการเคลื่อนที่ ภายใต้เงื่อนไขที่ว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ไม่สูงเกินไปนัก ซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ปัญหาของความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่อยู่ที่อุปกรณ์ต่าง ๆ มากกว่าเช่นชุดเฟืองทดที่ใช้มีคำว่า backlash มากพอสมควรซึ่งทำให้สมการการเคลื่อนที่เป็นสมการแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งทำให้ยากต่อการควบคุมตำแหน่งให้แม่นยำมากกว่านี้ อุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องก็ได้แก่ชุดขยายสัญญาณที่ควบคุมมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งตัดแปลงมาจากเครื่องขยายเสียงธรรมดาที่หาซื้อได้ตามท้องตลาด ความเป็นเชิงเส้นของชุดขยายสัญญาณนี้ก็มีช่วงจำกัด ถ้าอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้มีมาตรฐานกว่านี้ก็เชื่อว่าการควบคุมจะเป็นไปได้ดียิ่งขึ้น ในกรณีที่หุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่เร็วมากระบบควบคุมแบบนี้อาจจะไม่เหมาะ เพราะจะมีผลกระทบระหว่างข้อต่อมากเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่สูง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมก็ต้องรวมผลกระทบนี้เข้าไปด้วยเพื่อให้มีความแม่นยำมากขึ้น กรณีที่โหลดเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ก็เป็นอีกอย่างหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเพราะการ

ออกแบบนี้ออกแบบโดยให้โหลดมีค่าคงที่ แต่เนื่องจากว่าระบบควบคุมนี้มีความไวในช่วง
หนึ่งที่สามารถรับเมื่อมีโหลดเปลี่ยนแปลง ถ้าโหลดเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง ระบบควบคุม
ที่จะใช้ก็ต้องเป็นระบบควบคุมขั้นสูงขึ้นไปกว่านี้ เป็นระบบควบคุมชนิดปรับในตัวเองหรือ
Adaptive Control เป็นต้น

1. ผ.ศ. ดร. ชัยโรจน์ คุณนันทิกิจ, ผ.ศ. ดร. วิบูลย์ นสงวาระวัฒน์ศิริ, "การควบคุมแบบป้อนกลับของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิดสามแกนหมุน" รายงานฉบับสมบูรณ์, เงินทุนคณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี 2531,
2. Paul, Richard P. "ROBOT MANIPULATORS: MATHEMATICS, PROGRAMMING, AND CONTROL", Cambridge, Ma: MIT, 1981
3. Voram Koren, "ROBOTIC FOR ENGINEERS", New York, McGraw-Hill, 1985