

การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ของหุ่นยนต์สำหรับทำงานร่วมกับมนุษย์ Impedance Control of Robot for Human-Robot Cooperative Task

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ* และ ประสิทธิ์พร พงศ์วาทิน¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

254 พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทร 0-2218-6448, 0-2218-6585 โทรสาร 0-2218-6583 *อีเมล Viboon.s@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอเทคนิคการควบคุมเส้นทางเดินของแขนกล ซึ่งมีความสามารถในการทำงานที่มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อม โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับที่ส่วนปลายของแขนกล ในงานวิจัยนี้จะใช้แขนกลที่มี 6 องศาอิสระ มาทำการควบคุมการทำงาน โดยจะศึกษาและพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ ต่าง ๆ ของแขนกล เช่น ฟอว์เวิร์ดไคเนแมติกส์ อินเวิร์ดไคเนแมติกส์ จาคอบีเยน และสมการพลวัตสำหรับการควบคุมการทำงานของแขนกล ในการควบคุมได้ทำการจำลองการทำงานของระบบควบคุมแบบ Inverse Dynamics Control และการควบคุมแรงทางอ้อมโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ สำหรับการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์จะทำการจำลองการทำงานโดยการปรับค่าของแรงสัมผัสที่ปลายของแขนกล และจะทำการจำลองการทำงานในพิกัด Cartesian space เท่านั้น โดยที่แรงจะถูกป้อนเข้าไปในทิศทางเดียวกันกับปลายของแขน-กล จากนั้นจะทำการบันทึกค่าระยะขจัดของปลายของแขนกลเมื่อมีแรงมากระทำ ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมที่ได้สามารถนำไปใช้ในการประเมินค่าความยืดหยุ่นของแขนกล และผลจากการจำลองนี้ได้แสดงให้เห็นว่าความยืดหยุ่นของแขนกลนั้นเป็นเชิงเส้น ซึ่งเริ่มต้นจาก 0 จนมีค่าประมาณ 2.5 มิลลิเมตร และเป็นไปตามรูปร่างของแรงสัมผัสจากภายนอกที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

Abstract

This paper proposes a technique of the trajectory control of a robot arm which can interact with an environment by attaching a sensor at the end-effector of the manipulator. The robot using in this work is a 6 degrees of freedom. We derive, in detail the: Forward kinematics, Inverse kinematics, Jacobian, as well as Dynamic model of the manipulator. Simulations are carried out based on the derived equations as: an inverse dynamics control, an indirect force control using impedance control technique. For the impedance control, only force regulation in operational space is covered. Forces are applied in the direction of the tool tip and

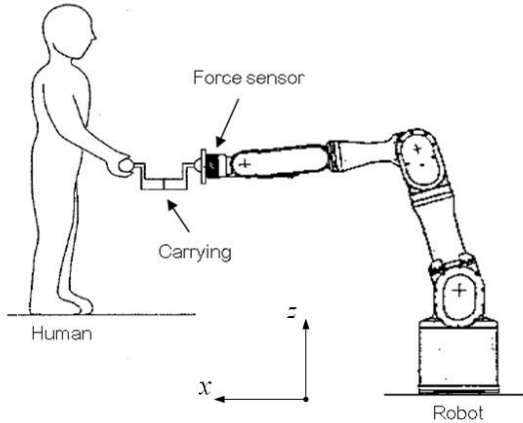
end-effector displacements are recorded and displayed. The results can be used to evaluate the compliance of the manipulator arm. And it is shown that the compliance is linear within a boundary, approximate 2.5 mm from the start contact point.

1. คำนำ

ในปัจจุบันหุ่นยนต์อุตสาหกรรมมีบทบาทในอุตสาหกรรมการผลิตอย่างมาก ยกตัวอย่างเช่นในงานที่ต้องใช้กำลังมากจำพวกการยกสัมภาระที่มีน้ำหนักมาก งานที่อาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์หรือมนุษย์ทำไม่ได้ เช่น งานที่เกี่ยวข้องกับแก๊สพิษหรือสารเคมี หรืองานที่ต้องการความแม่นยำและคุณภาพมาตรฐานสูง เช่น ในงานเชื่อมหรืองานที่ต้องทำซ้ำซากติดต่อกันเป็นเวลานานซึ่งมนุษย์จะเกิดความเหนื่อยล้า เป็นต้น โดยทั่วไปหุ่นยนต์จะมีความแม่นยำ (repeatability) ที่ดีมาก กล่าวคือหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ปลายแขนของหุ่นยนต์กลับมายังตำแหน่งและทิศทางเดิมที่ได้สอนไว้ล่วงหน้าได้ดี แต่สำหรับความถูกต้อง (accuracy) ของหุ่นยนต์นั้นยังเป็นสิ่งที่จะต้องได้รับการปรับปรุง แต่ปัจจุบันนี้เริ่มมีแนวคิดที่ว่าคนมีความยืดหยุ่นมากที่สุดส่วนหุ่นยนต์ทำงานได้แม่นยำกว่าคน จึงเริ่มมีการพัฒนาระบบที่นำหุ่นยนต์มาทำงานร่วมกับคน เพื่อช่วยให้คนทำงานได้สะดวกขึ้นหรือทำงานซึ่งเมื่อก่อนใช้คนทำงานอย่างเดียวไม่ได้ และใช้หุ่นยนต์อย่างเดียวก็ไม่ได้เหมาะสมเพราะไม่ใช้งานซ้ำ ๆ กัน ต้องการผสมผสานความสามารถในการตัดสินใจของคนร่วมกับความสามารถในการทำงานที่แม่นยำของหุ่นยนต์ ในที่นี้จะเรียกว่า Human-Robot cooperative task[1-2] ในการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์นั้น ส่วนใหญ่จะเป็นการควบคุมแรงซึ่งอยู่ในรูปของความต้านทานการเคลื่อนที่ (impedance) [3-5] ของแขนหุ่นยนต์ เพื่อให้มีความต่อเนื่องและราบเรียบในการทำงาน เช่น ถ้าเราต้องการจะยกวัตถุให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการแขนของหุ่นยนต์จะต้องมีความต้านทานการเคลื่อนที่ที่สูงเพื่อให้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์มีความแม่นยำ แต่ในการที่จะนำหุ่นยนต์และมนุษย์มาทำงานร่วมกัน จะมีปัญหาในเรื่องของเสถียรภาพเชิงสัมผัสของการควบคุมความหน่วงของการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ที่นำมาใช้ในการ

ทำงาน และการควบคุมความหวังของการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์จะมีอยู่สองชนิด คือ พื้นฐานทางด้านการควบคุมตำแหน่ง และพื้นฐานทางด้านการควบคุมแรงบิดของหุ่นยนต์[6]

ในการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ของหุ่นยนต์สำหรับทำงานร่วมกับมนุษย์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 ดังนี้



รูปที่ 1 การทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ (Human-Robot cooperative task)

2. สมการพลวัตของแขนหุ่นยนต์ (Dynamic equation)

พลศาสตร์ของแขนกล เป็นความสัมพันธ์ของแรงบิด (Torque) ที่กระทำที่จุดต่อ กับการเคลื่อนที่ของแขนกลในพิกัด Cartesian Space ซึ่ง จะ แสดง ในรูป แบบของ สมการการเคลื่อนที่ของระบบ (Equation of Motion) เพื่อความสะดวกจะแสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของแขนกลต่างๆ ให้อยู่ในสมการเดียวและสามารถเขียนสมการของการเคลื่อนที่ของแขนกลได้ในรูปแบบของสมการปริภูมิสแตต (State Space equation) ได้ดังนี้

$$\tau = B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (1)$$

เมื่อ $B(q)$ คือเมทริกซ์ของมวลของแขนกล $C(q, \dot{q})$ คือเมทริกซ์ของแรงที่หันเหเข้าสู่ศูนย์กลาง (Centripetal) กับอิทธิพลของแรงโคริออริส (Coriolis force) และ $G(q)$ คือเวกเตอร์ของแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational force)

รูปที่ 2 เป็นแขนกลต้นแบบที่ใช้ในการจำลองการทำงานของระบบควบคุมที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นแขนหุ่นยนต์ชนิด 7 ข้อต่อ ของบริษัท มิทซูบิชิรุ่น PA-10 ข้อต่อหนึ่งจะถูกล็อกไว้เพื่อให้แขนกลเป็นชนิด 6 องศาอิสระ ค่าพารามิเตอร์ของแขนหุ่นยนต์นี้จะใช้ในการจำลองการทำงานของตัวควบคุมที่ออกแบบขึ้นมา



รูปที่ 2 แขนหุ่นยนต์ต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบระบบควบคุม

3. Inverse Dynamics Control

ในการศึกษาการควบคุมการเคลื่อนที่โดยอาศัยวิธีการ Tracking Cartesian space trajectory จะกระทำในระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นของหลายตัวแปร และสามารถแสดงแผนภาพลือกของการควบคุมแบบ Inverse Dynamics Control in Cartesian Space ดังรูปที่ 3

การควบคุมวิธีนี้จะเป็นการควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายของแขนกล (end-effector) ให้มีการเคลื่อนที่ตามเส้นทางเดิน (trajectory) ที่ถูกกำหนดไว้แล้วใน Cartesian space และสามารถใช้สมการเดียวกันกับสมการที่ (1)

$$B(q)\ddot{q} + n(q, \dot{q}) = u \quad (2)$$

โดยที่

$$n(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (3)$$

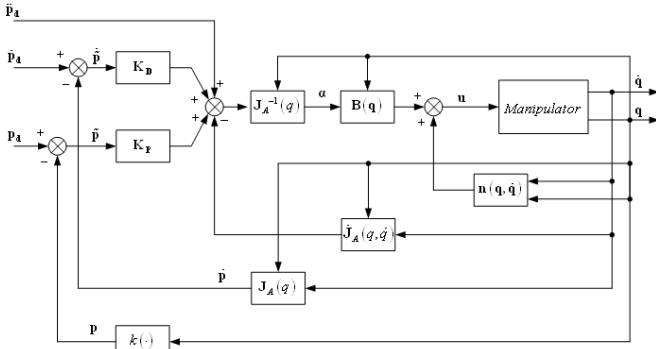
เมื่อสัญญาณควบคุมคือ

$$u = B(q)\alpha + n(q, \dot{q}) \quad (4)$$

โดยที่

$$\ddot{q} = \alpha \quad (5)$$

เมื่ออินพุตของการควบคุม α ใหม่นี้เป็นการออกแบบให้จุดปลายของแขนกลสามารถเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ได้กำหนดไว้ก่อนหน้านี้คือ $p_d(t)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาในการเคลื่อนที่ของปลายแขน โดยที่ $p_d = [x_d \ y_d \ z_d \ roll_d \ pitch_d \ yaw_d]^T$ ซึ่งค่าของ $x, y,$ และ z คือค่าของตำแหน่งของปลายแขนกล และค่าของ $roll, pitch,$ และ yaw คือค่าของการหมุนรอบแกน $x, y,$ และ z ตามลำดับ



รูปที่ 3 แผนภาพบล็อกของ Inverse Dynamics Control

และจากความสัมพันธ์ของสมการความสัมพันธ์เชิงความเร็วคือ

$$\dot{p} = J_A(q)\dot{q} \quad (6)$$

เมื่อ \dot{p} คือ ความเร็วเชิงเส้นและความเร็วเชิงมุมของตำแหน่งปลายแขนกล และ $J_A(q)$ คือ เมทริกซ์จาโคเบียนของแขนกล

เมื่อทำการ Differentiate สมการที่ (6) จะได้

$$\ddot{p} = J_A(q)\ddot{q} + \dot{J}_A(q, \dot{q})\dot{q} \quad (7)$$

ดังนั้นอินพุตของการควบคุม α สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$\alpha = J_A^{-1}(q)(\ddot{q}_d + K_D\dot{p} + K_P\tilde{p} + \dot{J}_A(q, \dot{q})\dot{q}) \quad (8)$$

โดยที่ค่าเกน K_D และ K_P เป็นเมทริกซ์ทแยงมุมและจะมีค่าเป็นบวกเสมอ และ $\tilde{p} = p_d - p$ ซึ่งทำให้ได้สมการพลวัตของระบบใหม่ที่เป็นเชิงเส้น คือ

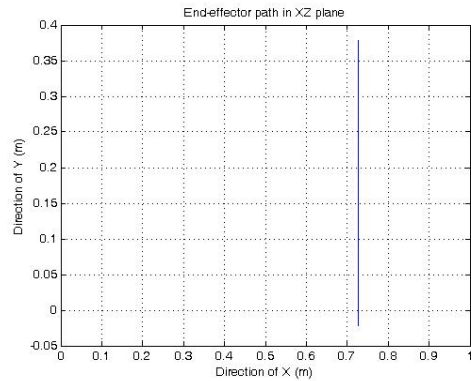
$$\ddot{q} + K_D\dot{p} + K_P\tilde{p} = 0 \quad (9)$$

จากสมการที่ (9) จะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดของระบบจะเข้าสู่ค่าศูนย์โดยที่ค่าเกน K_D และ K_P จะมีผลทำให้ระบบมีความเร็วและเสถียรภาพในการเข้าใกล้ศูนย์ได้เร็วขึ้น และสามารถปรับค่า K_D และ K_P เพื่อให้ได้ผลของค่าผิดพลาดให้น้อยที่สุดหรือตามความเหมาะสม

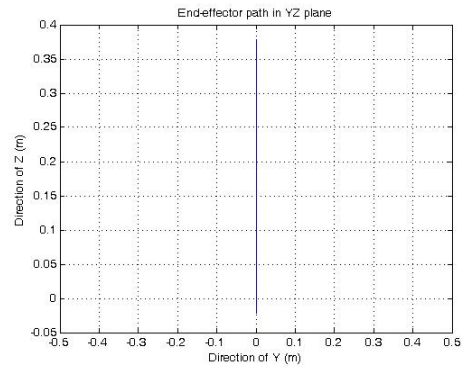
3.1 การจำลองการทำงานของ Inverse Dynamics Control

ในการจำลองการทำงานของระบบควบคุมการทำงานของแขนกลแบบ Inverse Dynamics Control จะทำการควบคุมการทำงานของแขนกลในพิกัด Cartesian space เท่านั้น และจะกำหนดค่าของตำแหน่งของปลายแขนกล โดยในการจำลองนี้จะกำหนดให้ปลายแขนมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในระนาบ YZ เป็นระยะทาง 0.4 เมตร โดยที่จะกำหนดให้แกน X และแกน Y มีค่าคงที่และมีค่าเท่ากับ 0.7276 เมตร และ 0 เมตร ตามลำดับ ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z จะเริ่มจากตำแหน่งที่แกน X มีค่าเท่ากับ 0.7276 เมตร และแกน Y มีค่าเท่ากับ 0

เมตร และแกน Z มีค่าเท่ากับ -0.0212 เมตร ไปจนถึงตำแหน่งที่แกน X มีค่าเท่ากับ 0.7276 เมตร แกน Y มีค่าเท่ากับ 0 เมตร และแกน Z มีค่าเท่ากับ 0.3788 เมตร ในเวลา 4 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5 โดยที่ความเร็วและความเร่งของปลายแขนกล สามารถหาได้จากการหาอนุพันธ์อันดับที่ 1 และที่ 2 ของสมการตำแหน่งของปลายแขนกลตามลำดับ โดยใช้เวลาในการทำงาน คือเริ่มต้นจาก 0 ถึง 4 วินาที และใช้ค่าเวลาสุ่ม (sampling) ในระบบควบคุมการทำงานเท่ากับ 0.001 วินาที



รูปที่ 4 เส้นทางเดินของปลายแขนกลในระนาบ XZ

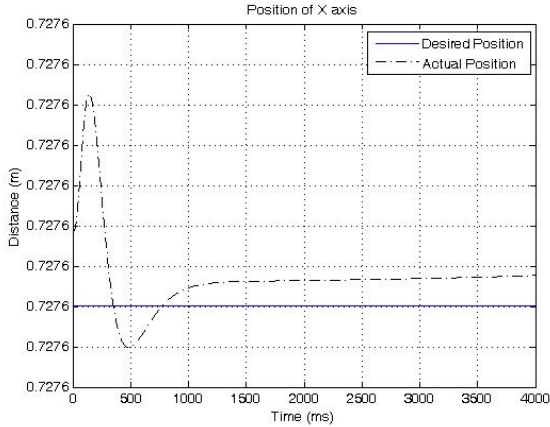


รูปที่ 5 เส้นทางเดินของปลายแขนกลในระนาบ YZ

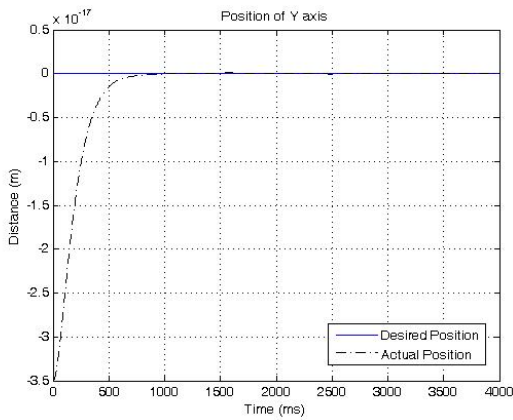
3.2 ผลการจำลองของการควบคุมแบบ Inverse Dynamics Control

ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมแบบ Inverse Dynamics Control สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5-7 โดยใช้ค่าเกน K_D เท่ากับ 20 และ K_P เท่ากับ 100 ในการ Simulation เพื่อวิเคราะห์ผลการตอบสนองของระบบ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6-8

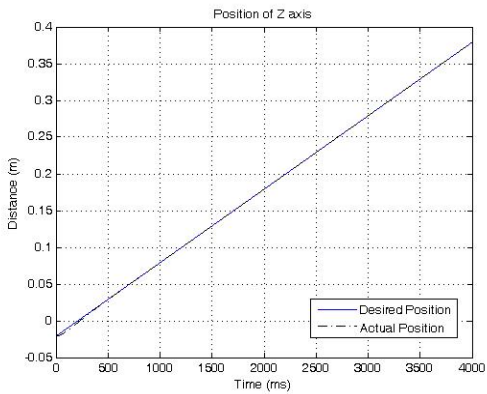
จากรูปที่ 6-8 เป็นกราฟแสดงตำแหน่งของปลายแขนกลที่เกิดขึ้น โดยที่ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุม จะเห็นได้ว่าเส้นทางเดินที่ได้จากการจำลอง สามารถ Tracking ตามเส้นทางเดินที่ได้ออกแบบไว้ แต่จะมีค่าผิดพลาดเกิดขึ้นค่อนข้างสูงในช่วงแรก โดยที่ค่าผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้นในแนวแกน X, Y, และ Z เท่ากับ $\tilde{x} = -2.5 \times 10^{-5}$ เมตร หรือ -25 ไมโครเมตร $\tilde{y} = -2.5 \times 10^{-6}$ เมตร และ $\tilde{z} = 3.5 \times 10^{-3}$ เมตร หรือ 3.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 6 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแนวแกน X



รูปที่ 7 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแนวแกน Y



รูปที่ 8 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแนวแกน Z

4. การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance Control)

ในการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์นั้นส่วนใหญ่จะเป็นการควบคุมแรงซึ่งอยู่ในรูปของความต้านทานการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์เพื่อให้มีความต่อเนื่องและราบเรียบในการทำงาน ในการวิเคราะห์การมีปฏิภิกิริยาซึ่งเกิดแก่กันและกันของแขนกล (manipulator) กับสิ่งแวดล้อม (environment) ภายใต้ปฏิภิกิริยาของ inverse dynamics control in Cartesian space ซึ่งจะอ้างอิงถึงรูปแบบทางพลวัตของแขนกลดังนี้

$$\mathbf{B}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{u} - \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{h} \quad (10)$$

เมื่อ $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ คือ เมทริกซ์จาโคเบียน \mathbf{h} คือ เวกเตอร์ของการออกแรงสัมผัสที่กระทำโดยปลายของ แขนกลบนสิ่งแวดล้อม และ \mathbf{u} คือ กฎการควบคุม ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{u} = \mathbf{B}(\mathbf{q})\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{n}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (11)$$

สมการที่ (11) คือ การจัดรูปแบบของตัวควบคุม \mathbf{u} ให้อยู่ในรูปแบบสเตต โดยที่ $\mathbf{n}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ สามารถดูได้จากสมการที่ (3) จะได้

$$\ddot{\mathbf{q}} = \boldsymbol{\alpha}$$

เมื่อ $\boldsymbol{\alpha}$ คือ อินพุตเวกเตอร์ที่ถูกตั้งขึ้นมาใหม่

การควบคุมแขนกลในขณะที่มีแรงกระทำที่ปลายของแขนกลนั้นสามารถแสดงได้โดย

$$\ddot{\mathbf{q}} = \boldsymbol{\alpha} - \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{h} \quad (12)$$

จากสมการที่ (12) นั้นจะเป็นเทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากเทอมของแรงสัมผัส สำหรับแขนกลแบบ nonredundant สามารถแสดงค่าอินพุตได้ดังนี้

$$\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{J}_A^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{M}_d^{-1} \left(\mathbf{M}_d\ddot{\mathbf{p}}_d + \mathbf{K}_D'\dot{\mathbf{p}} + \mathbf{K}_P'\mathbf{p} - \mathbf{M}_d\mathbf{J}_A(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} \right) \quad (13)$$

เมื่อ $\mathbf{J}_A(\mathbf{q})$ คือ จาโคเบียนวิเคราะห์ \mathbf{M}_d คือ เมทริกซ์ของมวล \mathbf{K}_D' คือ เมทริกซ์ของตัวหน่วง และ \mathbf{K}_P' คือ เมทริกซ์ของความแข็งแกร่ง

โดยที่ \mathbf{M}_d เป็นเมทริกซ์ทแยงมุมที่มีค่าเป็นบวก แทนค่าในสมการที่ (13) ลงในสมการที่ (12) จะได้

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_A^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{M}_d^{-1} \left(\mathbf{M}_d\ddot{\mathbf{p}}_d + \mathbf{K}_D'\dot{\mathbf{p}} + \mathbf{K}_P'\mathbf{p} - \mathbf{M}_d\mathbf{J}_A(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} \right) - \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{h} \quad (14)$$

และจากสมการอนุพันธ์อันดับที่สองของคิเนแมติกส์ที่อยู่ในรูปแบบ

$$\ddot{\mathbf{p}} = \mathbf{J}_A(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}_A(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} \quad (15)$$

ในสมการที่ (12) นั้นจาโคเบียนที่ปรากฏอยู่นั้นจะเป็น จาโคเบียนรูปร่าง แต่จาโคเบียนในสมการที่ (13) จะเป็นจาโคเบียนวิเคราะห์ ดังนั้นเราจะสร้างความสัมพันธ์ใหม่ขึ้นมาคือ

$$\mathbf{T}_A^T(\mathbf{x})\mathbf{h} = \mathbf{h}_A$$

เมื่อ T_A คือ เมทริกซ์การแปลงระหว่างสองจาโคเบียน แทนค่าสมการที่ (13) ลงในสมการที่ (12) จะได้

$$M_d \ddot{\tilde{p}} + K_D \dot{\tilde{p}} + K_P \tilde{p} = M_d B_A^{-1}(q) h_A \quad (16)$$

เมื่อ

$$B_A(q) = J_A^{-T}(q) B(q) J_A^{-1}(q) \quad (17)$$

เมื่อ $B_A(q)$ คือ เมทริกซ์ความเฉื่อยของแขนกลในพิกัด Cartesian space ซึ่งเมทริกซ์นี้จะถูกนิยามให้มีค่าเป็นบวก และค่าจาโคเบียนวิเคราะห์จะต้องเป็นแรงค์เต็ม (full rank)

สมการที่ (13) จะเป็นความสัมพันธ์ที่ถูกกำหนดขึ้นโดยทั่วไปในรูปแบบของอิมพีแดนซ์ทางกล (mechanical impedance) ระหว่างเวกเตอร์ของแรงลัพธ์ $M_d B_A^{-1}(q) h_A$ และเวกเตอร์ของระยะขจัด (\tilde{p}) ใน Cartesian ซึ่งอิมพีแดนซ์นี้สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของคุณสมบัติในระบบทางกล ของระบบมวล-สปริง-ตัวหน่วง ซึ่งสามารถระบุพฤติกรรมทางพลวัตได้โดยตรง

การปรากฏของค่า $B_A^{-1}(q)$ นั้นทำให้ระบบนั้นถูกผูกเข้าด้วยกัน และถ้าต้องการทำให้เป็นเชิงเส้น และแยกออกจากกันระหว่างการปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมนั้นจำเป็นที่จะต้องทำการวัดค่าแรงสัมผัสโดยใช้ตัวตรวจวัดที่เหมาะสมซึ่งจะถูกติดตั้งบนข้อมือของแขนกล ดังสมการ

$$u = B(q) \alpha + n(q, \dot{q}) + J^T(q) h \quad (18)$$

และ

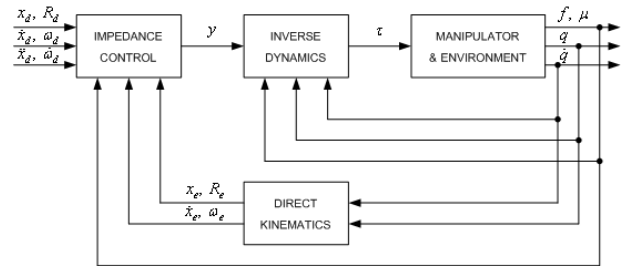
$$\alpha = J_A^{-1}(q) M_d^{-1} (M_d \ddot{p}_d + K_D \dot{\tilde{p}} + K_P \tilde{p} - M_d J_A(q, \dot{q}) \dot{q} - h_A) \quad (19)$$

จากสมมุติฐานของความคลาดเคลื่อนแบบอิสระในการวัดแรง ดังนั้นสมการของการควบคุมแขนกลแบบอิมพีแดนซ์ที่ต้องการสามารถจะเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$M_d \ddot{\tilde{p}} + K_D \dot{\tilde{p}} + K_P \tilde{p} = h_A \quad (20)$$

โดยที่ M_d คือ เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ของมวลที่ต้องการ K_D คือ เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงที่ต้องการ K_P คือ เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ของความแข็งแรงที่ต้องการ และ h_A คือ แรงสัมผัสที่กระทำที่ส่วนปลายของแขนกลจากสิ่งแวดล้อมภายนอก

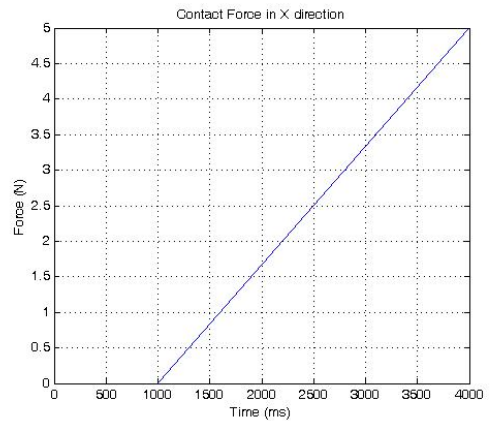
ในสมการที่ (18) เทอมของ $J^T(q) h$ จะเป็นการชดเชยอย่างแม่นยำของแรงสัมผัส และทำให้แขนกลมีความแข็งแรงขึ้นเป็นอนันต์เมื่อเทียบกับความเค้นภายนอกที่มากกระทำกับแขนกล และแผนภาพบล็อกของแขนกลในการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม สำหรับการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แผนภาพบล็อกสำหรับการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์

4.1 การจำลองการทำงานของระบบควบคุมแบบอิมพีแดนซ์

ในการจำลองการทำงานของระบบควบคุมแขนกลแบบอิมพีแดนซ์ จะกำหนดตำแหน่งของปลายแขนกลในขณะเริ่มต้นที่ไม่มีแรงสัมผัสภายนอกกระทำ โดยในการจำลองจะกำหนดให้มีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในระนาบ YZ ซึ่งจะกำหนดให้แกน X และแกน Y มีค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.7276 เมตร และ 0 เมตร ตามลำดับ และการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z จะเริ่มจากตำแหน่งที่ X มีค่าเท่ากับ 0.7276 เมตร, Y มีค่าเท่ากับ 0 เมตร, และ Z มีค่าเท่ากับ -0.0212 เมตร ไปจนถึงตำแหน่งที่ X มีค่าเท่ากับ 0.7276 เมตร, Y มีค่าเท่ากับ 0 เมตร, และ Z มีค่าเท่ากับ 0.3788 เมตร ในเวลา 4 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3-4 โดยที่ความเร็วและความเร่ง ของปลายแขนกล สามารถหาได้จากกราฟอนุพันธ์อันดับที่ 1 และที่ 2 ของสมการตำแหน่งของปลายแขนกลตามลำดับ โดยใช้เวลาในการเคลื่อนที่ คือเริ่มต้นจาก 0 ถึง 4 วินาที และใช้ค่าเวลาสุ่มของตัวควบคุมในการจำลองการทำงานมีค่าเท่ากับ 0.001 วินาที และในการทดลองนี้จะใส่ค่าของแรงสัมผัสที่กระทำที่ปลายของแขนกลในแนวแกน X ซึ่งจะมีค่าสัมผัสเริ่มต้นจากศูนย์ที่ตำแหน่งเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ไปจนถึง 1 วินาที จากนั้นจะเริ่มให้แรงสัมผัสนี้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าที่กำหนดซึ่งจะเริ่มต้นจากศูนย์ในวินาทีที่ 1 จนถึงสิ้นสุดลงตามค่าที่กำหนดในวินาทีที่ 4 โดยรูปกราฟของแรงสัมผัสนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 โดยที่แรงสัมผัสในแนวแกน Y และ Z จะกำหนดให้เท่ากับศูนย์ และแรงบิดในแนวแกน X, Y, และ Z จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์เช่นเดียวกัน

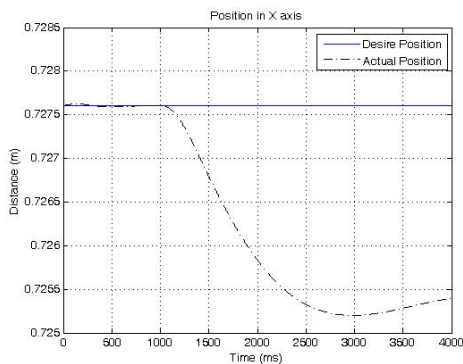


รูปที่ 10 กราฟแสดงแรงสัมผัสขนาด 5 นิวตันที่กระทำที่ปลายแขนกลสำหรับการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์

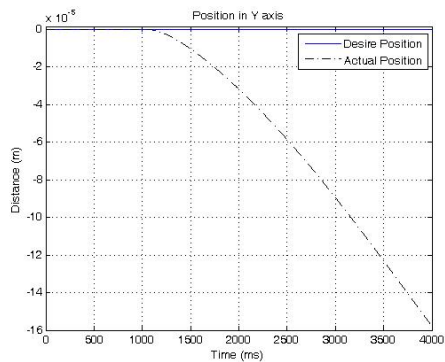
4.2 ผลการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์

ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมแบบอิมพีแดนซ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 11-13 โดยใช้ค่าเกน K_D เท่ากับ 20 และ K_P เท่ากับ 100 และแรงสัมผัสภายนอกดังแสดงในรูปที่ 10 ในการจำลองการควบคุม เพื่อวิเคราะห์ผลการตอบสนองของระบบ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 11-13

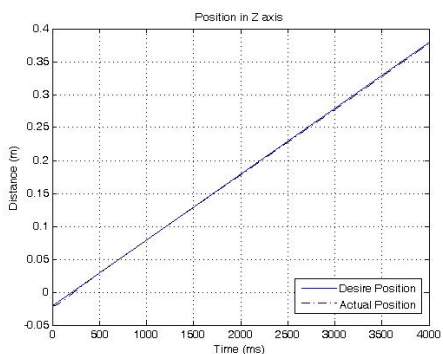
จากรูปที่ 11-13 เป็นกราฟแสดงตำแหน่ง และเบี่ยงเบนของตำแหน่ง ของปลายแขนกลที่เกิดขึ้น ในขณะที่ปลายแขนกลมีการเคลื่อนที่ตามเส้นทางเดินที่กำหนดไว้ โดยที่ผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเส้นทางเดินที่ได้จากการจำลองการทำงานมีเส้นทางเดินตามแรงสัมผัสที่กระทำที่ส่วนปลายของแขนกลตามที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 11 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแนวแกน X



รูปที่ 12 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแนวแกน Y



รูปที่ 13 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแนวแกน Z

5. สรุป

งานวิจัยฉบับนี้เป็นงานวิจัยในการออกแบบระบบควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์สำหรับการนำหุ่นยนต์อุตสาหกรรมมาใช้ในการทำงานร่วมกับมนุษย์ โดยใช้การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ ในการทดลองการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์จะเป็นการจำลองการทำงาน ของระบบควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์แบบต่างๆ คือ Inverse Dynamics Control in Cartesian Space และการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ ซึ่งในการควบคุมการทำงานจะทำการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ในพิกัด Cartesian Space และสร้างแรงสัมผัสที่กระทำกับส่วนปลายของแขนกล โดยผลของการจำลองการทำงานที่ได้มีค่าที่ดีมาก สามารถติดตามเส้นทางที่กำหนดได้ดีมาก (Tracking trajectory) และพบว่าค่าของความผิดพลาดตำแหน่งในพิกัด Cartesian Space สามารถทำให้มีค่าน้อยลงได้เมื่อมีการปรับค่าเกน K_D และ K_P แต่จะมีผลต่อการตอบสนองของแรงบิดของจุดต่อและข้อจำกัดของมอเตอร์ ในการสร้างแรงบิดให้มีการตอบสนองตามความต้องการของการเคลื่อนที่ของแขนกล สำหรับการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์จะขึ้นอยู่กับแรงสัมผัสภายนอกที่มากกระทำกับส่วนปลายของแขนกล ซึ่งในผลของการจำลองการทำงานของระบบควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ของแขนกลจะเห็นได้ว่าเป็นไปตามแนวโน้มของสมการและแรงสัมผัสภายนอกที่มากกระทำกับส่วนปลายของแขนกล

เอกสารอ้างอิง

1. T. Tsumugiwa, R. Yokogawa, K. Yoshida, Stability Analysis for Impedance Control of Robot for Human-Robot Cooperative Task System., IEEE International Conference on Intelligent Robots and System September 28 – October 2, 2004, Sendai, Japan.
2. Ikeura, H. Monden, H. Inooka, H. Cooperative Motion Control of a Robot and a Human., Robot and Human Communication, 1994. RO-MAN' 94 Nagoya, Proceedings., 3rd IEEE International Workshop on 18-20 July 1994, pp.112-117.
3. R. Ikeura, H. Inooka, Variable Impedance Control of a Robot for Cooperation with a Human., IEEE International Conference on Robots and Automation, 1995, pp.3097-3102.
4. N. Hogan, Controlling Impedance at the Man/Machine Interface., IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1989, pp.1226-1229.
5. Hogan, N. Stable Execution of Contact Tasks Using Impedance Control., Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1987.
6. T. Tsumugiwa, R. Yokogawa, K. Hara, Switching Control of Position/Torque Control for Human-Robot Cooperative Task – Human-Robot Cooperative Carrying and Peg-in-Hole Task-, IEEE International Conference on Robots and Automation, 2003, pp.1933-1939.

7. T. Tsumugiwa, R. Yokogawa, K. Hara, Measurement Method for Compliance of Vertical-Multi-Articulated Robot – Application to 7-DOF Robot PA10., IEEE International Conference on Robots and Automation, 2003, pp.2741-2746.
8. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Instruction Manual for Installation, Maintenance & Safety of PA10-7CE.
9. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. การควบคุมระบบพลศาสตร์., พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
10. Lorenzo Sciavicco, Bruno Siciliano. Modeling and Control of Robot Manipulators., The McGraw-Hill Companies, Inc., 1996.
11. John J. Craig. Introduction to Robotics Mechanics and Control, 2nd edition., Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
12. Bruno Siciliano, Luigi Villani. Robot Force Control., Kluwer Academic Publishers, 1999.
13. M.W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasager. Robot Modeling and Control., John- Wiley & Sons, Inc., 2006.
14. Bompos, Nikolaos A., Artemiadis, Panagiotis K., Oikonomopoulos, Apollon S., Kyriakopoulos, Kostas J., Modeling, Full Identification and Control of the Mitsubishi PA-10 Robot Arm., Advance intelligent mechatronics, 2007 IEEE/ASME International Conference on 4-7 Sept. 2007, pp.1-6.
15. Chalongrath Pholsiri. TASK-BASED DECISION MAKING AND CONTROL OF ROBOTIC MANIPULATORS., The University of Texas at Austin., December, 2004, pp.236-240.