

การทดสอบการควบคุมแบบไฮบริดด้วยแรงแบบอิมพลีซิฟสำหรับแขนกล

Implementation of The Hybrid Control with An Implicit Force for a Manipulator

รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ บรร ปญญาวรวัจน์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Email: fmevsv@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีการนำเอาระบบควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งมาใช้กับแขนกลจุฬา 2 ซึ่งเป็นแขนกลที่ได้พัฒนาขึ้นในห้องทดลอง ซึ่งระบบควบคุมแรงที่ใช้กันไม่เพียงแต่ใช้ระบบควบคุมแรงแบบอิมพลีซิฟเท่านั้น แต่ยังได้ทำการทดลองเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิฟอีกด้วย ซึ่งวิธีการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิฟนี้จะเป็นการเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบดังจะเห็นได้จากผลการทดลอง นอกจากนี้ระบบควบคุมแบบอิมพลีซิฟที่ใช้นั้นยังได้นำเอาวิธีการหาค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์มาใช้ด้วย

การทดลองนั้นทำกับวัตถุแวดล้อมหลายชนิด เช่น แผ่นเหล็กที่แข็งเกร็ง วัตถุอ่อนตัว แผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว และวัตถุที่พื้นผิวไม่ต่อเนื่อง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อควบคุมแรงและตำแหน่งของแขนกลที่กระทำกับวัตถุอ่อนตัวหรือหยุ่นตัวได้นั้น การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิฟจะให้ผลตอบสนองของแรงที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิฟ นอกจากนั้นเมื่อควบคุมแรงและตำแหน่งของแขนกลที่กระทำกับวัตถุที่พื้นผิวไม่ต่อเนื่องนั้น การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิฟยังสามารถรักษาเสถียรภาพของการสัมผัสระหว่างแขนกลและวัตถุได้ดีกว่าการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิฟอีกด้วย

Abstract

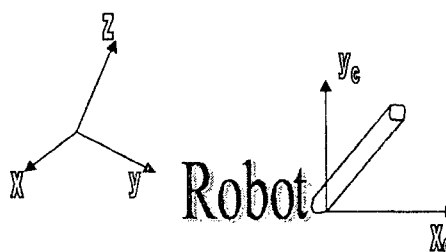
This thesis is to study the implementation techniques of Hybrid force/position control for a manipulator arm, the Chula II. The Chula II, the five-axis SCARA type robot, is developed in the Laboratory. Not only Implicit Force control is carried out in this thesis, the Explicit Force control is also used as the reference for comparison. The

identification of the stiffness between manipulator and environment is included in the Implicit Force control technique. This method will improve the system's stability as shown in the experiments.

The experiments have been done with various types of environment, such as rigid steel plate, soft material, flexible steel plate and discontinuous surface. The results shown that the implicit force control gives better force response performance compare to the explicit force control for soft material and flexible steel plate. And the implicit force control can maintain the contact stability while moving on the discontinuous surface in contrast to the explicit force control.

1 บทนำ

การใช้งานแขนหุ่นยนต์ในงานที่ซับซ้อนนั้น บ่อยครั้งที่ไม่เพียงแต่ต้องควบคุมตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ แต่ต้องควบคุมแรงที่กระทำกับปลายแขนหุ่นยนต์ด้วย เช่นรูปที่ 2.1 แสดงการใช้แขนกลเพื่อจับชอล์กเขียนกระดานดำ จะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบตำแหน่งเพียงอย่างเดียวมันไม่เพียงพอสำหรับการควบคุมแขนกล เนื่องจากถ้าตำแหน่งของปลายแขนกลผิดพลาดจะทำให้ชอล์กหัก หรือชอล์กไม่สัมผัสกับกระดานดำ ดังนั้นการเขียนอักษรลงบนกระดานดำจึงต้องควบคุมตำแหน่งบนระนาบของกระดานดำ ในขณะที่ควบคุมแรงในแนวตั้งฉากกับกระดานดำ



รูปที่ 1.1 แสดงรูปของ Compliant Frame

ตามรูปที่ 1.1 นั้น เฟรม xyz คือเฟรมที่กำหนดตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์เทียบกับแกนอ้างอิงใดๆ (a fixed reference) ส่วนเฟรม $x_c y_c z_c$ คือ คอมไพลันท์เฟรม (Compliant Frame) หรือระบบโคออร์ดิเนตบนวัตถุที่แขนหุ่นยนต์กระทำ ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง โดยแต่ละแกนของเฟรมสามารถควบคุมตำแหน่ง (Position Control) หรือ ควบคุมแรง (Force Control) แบบใดแบบหนึ่งเท่านั้น จากรูปที่ 1.1 ขณะที่ปลายขอลังยังไม่สัมผัสกระดานดำนั้น ปลายแขนกลสามารถเคลื่อนที่โดยมีระดับความเป็นอิสระหรือ degree of freedom (d.o.f.) เท่ากับ 6 โดยที่ 3 d.o.f. แรกเป็นการกำหนดตำแหน่งหรือ position และอีก 3 d.o.f. ที่เหลือเป็นการกำหนดทิศทาง (orientation) แต่เมื่อเป็นการควบคุมแรง (force) หรือแรงบิด (torque) แล้วค่าระดับความอิสระนี้จะเท่ากับ 0 แต่ขณะที่ปลายขอลังเริ่มสัมผัสกับกระดานดำนั้น ค่าระดับความอิสระของการควบคุมแบบตำแหน่งจะลดลงไปในทิศทางของแกน z (z-direction) แต่ค่าระดับความอิสระของการควบคุมแบบแรงจะเกิดขึ้นในทิศทางของแกน z และถ้าสมมติว่าปลายขอลังถูกยึดติดแน่นกับกระดานดำ ค่าระดับความอิสระของการควบคุมแรงกับแรงบิดจะเท่ากับ 6 แต่ค่าระดับความอิสระของการควบคุมตำแหน่งกับทิศทางจะมีค่าเป็นศูนย์ ในที่นี้เรียกเฟรม $x_c y_c z_c$ ว่า คอมไพลันท์เฟรม

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างการควบคุมตำแหน่ง และการควบคุมแรง นั้นสามารถแทนในรูปแบบของเงื่อนไขบังคับโดยธรรมชาติ (Natural constraints) และเงื่อนไขบังคับเทียม (Artificial constraints) [อ้างอิง 1] ได้ โดยจากตัวอย่างข้างต้น กระดานดำทำให้เกิดเงื่อนไขบังคับโดยธรรมชาติของตำแหน่งในทิศทางของแกน z และถ้าแรงเสียดทานระหว่างขอลังและกระดานดำเป็นศูนย์ ก็จะทำให้เกิดเงื่อนไขบังคับโดยธรรมชาติของแรงในทิศทาง xy ส่วนตัวอักษรที่เขียนนั้นเป็นเงื่อนไขบังคับเทียมของตำแหน่งในทิศ xy และ เงื่อนไขบังคับเทียมของแรงจะเกิดในทิศ z ซึ่งเห็นได้ว่าในแต่ละระดับของความอิสระนั้นไม่สามารถควบคุมทั้งแรงและตำแหน่งได้ในเวลาเดียวกัน

1.1 การควบคุมแบบเอกซ์พลิชิต

นักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาการควบคุมแรงที่กระทำกับแขนกลในขณะที่แขนกลเคลื่อนที่ เช่น M.H. Raibert and J.J. Craig ([1], 1981) ได้ศึกษาเรื่อง "Hybrid position/force control of manipulators" หลักการของ Raibert และ Craig คือ จะแบ่งการควบคุมเป็น 2 ส่วนแยก

จากกัน โดยส่วนแรกเป็นส่วนควบคุมตำแหน่งปลายแขนกลในแนวสัมผัสกับวัตถุ ส่วนที่สองเป็นส่วนควบคุมแรงที่กระทำกับปลายแขนกลในแนวตั้งฉากกับวัตถุ ซึ่งแนวคิดนี้มาจาก Paul, R., และ Shimano, B. ([7], 1976) ที่ได้ศึกษาเรื่อง "Compliance and Control" ไว้

วิธีการควบคุมของ M.H. Raibert และ J.J. Craig นั้นจะแยกทิศทางของการควบคุมโดยอาศัย เวกเตอร์เลือกทิศ (Selection Vector) $\sigma = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z]$ ซึ่งนิยามไว้ว่าถ้าเงื่อนไขบังคับโดยธรรมชาติของตำแหน่งเกิดขึ้นในทิศใด ให้ค่า σ_i ของทิศนั้นเป็นศูนย์ ดังนั้นจากตัวอย่างข้างต้นสามารถเขียนเวกเตอร์เลือกทิศได้ดังนี้

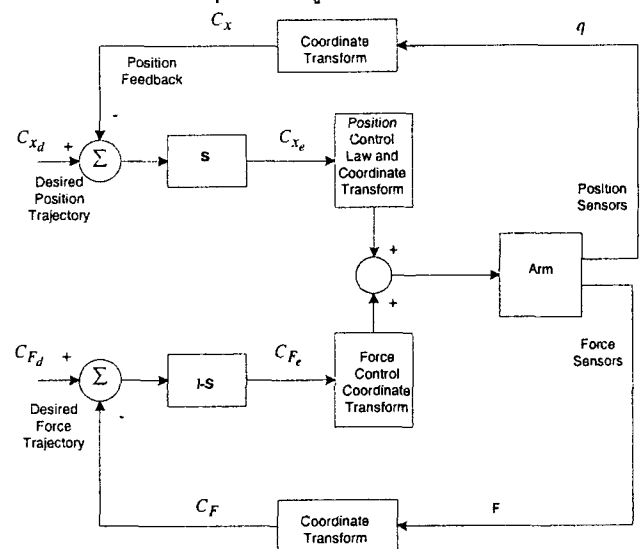
$$\sigma = [1 \ 1 \ 0] \quad (1.1)$$

คอมไพลันท์เซเลกชันเมตริก (Compliant selection matrix)

นิยามโดย $S = \text{diag}[\sigma]$ นั่นคือ

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

ซึ่งคอมไพลันท์เซเลกชันเมตริก นี้จะช่วยในการแยกทิศทางการควบคุมโดยสามารถเขียนแผนภาพบล็อก (Block Diagram) ของการควบคุมได้ตามรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แสดงแผนภาพบล็อกของการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง

จากรูปที่ 1.2 ซึ่งแสดงแผนภาพบล็อกของการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง ของ Craig และ Raibert จะเห็นได้ว่า วงรอบ (Loop) ด้านบนเป็นการควบคุมตำแหน่ง ส่วนวงรอบด้านล่างเป็นการควบคุมแรง สำหรับการควบคุมตำแหน่งนั้นทำโดยวัดตำแหน่งของแขนกลออกมาเพื่อนำมาลบกับตำแหน่งของแขนกลที่ต้องการ แล้วนำไปคูณกับ

เมตริกซ์ S ซึ่งเป็นเมตริกซ์เลือกทิศของการควบคุมตำแหน่ง หลังจากนั้นจะส่งค่าไปยังตัวควบคุมตำแหน่งต่อไป ส่วนวงรอบที่ควบคุมแรงนั้น จะวัดแรงที่กระทำกับปลายแขนหุ่นยนต์เพื่อมาลบจากแรงที่ต้องการให้แขนหุ่นยนต์สัมผัสกับวัตถุ กลายเป็นค่าความผิดพลาดของแรง แล้วนำมาคูณกับเมตริกซ์ $I-S$ ซึ่งเป็นเมตริกซ์ที่เลือกทิศควบคุมแรง หลังจากนั้นจึงส่งค่าไปยังตัวควบคุมแรง ซึ่งจะคำนวณหาค่าสัญญาณควบคุมที่ใช้สำหรับควบคุมแขนหุ่นยนต์ต่อไป วิธีการควบคุมแรงที่ใช้เรียกว่า "การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิต (Explicit Force Control)" ซึ่งเป็น การควบคุมแรงโดยตรง

1.2 การควบคุมแรงแบบอิมพลิต

ต่อมาผู้เสนอว่าการจะควบคุมแรงนั้นสามารถควบคุมผ่านตัวควบคุมตำแหน่งได้ ซึ่งเรียกการควบคุมแรงแบบนี้ว่า "การควบคุมแรงแบบอิมพลิต (Implicit Force Control)" เช่น N. Hogan ([2], 1985) ได้ศึกษาเรื่อง "Impedance Control; An approach to manipulation" ซึ่งวิธีควบคุมแบบอิมพิแดนซ์นี้เป็นวิธีการหนึ่งของการควบคุมแรงแบบอิมพลิต โดยมีหลักการดังนี้

จากสมการการเคลื่อนที่ของแขนกล

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + d(\dot{q}) = \tau - \tau_e \quad (1.3)$$

โดยที่

$q, \dot{q}, \ddot{q}$ แทน เวกเตอร์ ($n \times 1$) ของมุมรอยต่อ, ความเร็ว และความเร่งของรอยต่อ ตามลำดับ

$M(q)$ แทน เวกเตอร์ ($n \times 1$) ของเมตริกซ์ความเฉื่อย (inertia matrix) ที่เป็นโพซิทีฟ เดฟิไนท์ เมตริกซ์ (Positive definite matrix)

$C(q, \dot{q})\dot{q}$ แทน เวกเตอร์ ($n \times 1$) ของแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal) และแรงคอริโอลิส (Coriolis)

$g(q)$ แทน ผลของแรงโน้มถ่วงโลก

$d(\dot{q})$ แทน ผลของแรงเสียดทานที่กระทำกับรอยต่อ

$\tau_e = J^T(q) \cdot f_e$ แทน เวกเตอร์ ($n \times 1$) ของ เจเนอรัลไลซ์ จอยน์ ทอร์ก (generalized joint torques) ที่เกิดจาก แขนกลกระทำกับวัตถุแวดล้อม

f_e แทน แรงที่แขนกลสัมผัสกับวัตถุแวดล้อมซึ่งวัดได้จาก อุปกรณ์วัดแรง

J แทน จาคอบีเยนเมตริกซ์ (Jacobian Matrix) ซึ่งใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของปลาย แขนกลกับความเร็วของรอยต่อแต่ละรอยต่อ

การควบคุมแรงแบบอิมพิแดนซ์ (Impedance control) เป็นการควบคุมที่ไม่ได้พยายามควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่หรือแรงตามลำพัง แต่พยายามสร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ตามสมการ

$$M_d \ddot{x}_v - B_d (\dot{x}_v - \dot{x}) - K_d (x_v - x) = -f_e \quad (1.4)$$

โดยที่

M_d แทน ค่าความเฉื่อย (Inertia) ของการตอบสนองที่ต้องการ
 B_d แทน ค่าความหน่วง (damping) ของการตอบสนองที่ต้องการ

K_d แทน ค่าความแข็งตึง (Stiffness) ของการตอบสนองของระบบ

x_v แทน ค่าตำแหน่งอ้างอิงที่ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ไปถึง

x แทน ค่าตำแหน่งของปลายแขนกล ณ ปัจจุบัน

$\dot{x}_v$ แทน ค่าความเร็วของแขนกลที่ต้องการ

$\dot{x}$ แทน ค่าความเร็วของตำแหน่งปลายแขนกล ณ ปัจจุบัน

$\ddot{x}_v$ แทน ค่าความเร่งของตำแหน่งปลายแขนกลที่ต้องการ

สำหรับตำแหน่งอ้างอิงที่ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ไปถึงนั้น Seul Jung และ T.C. Hsia (1995) ได้ศึกษาไว้ในเรื่อง "On neural network application to robust impedance control of robots manipulators" ซึ่งได้กล่าวไว้ว่า ตำแหน่งที่ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ไปถึงสามารถหาจากค่าของแรงที่ต้องการให้แขนกลกดและค่าตำแหน่งของวัตถุแวดล้อมตามสมการ

$$x_v = x_e + \frac{f_d}{k_d} \quad \text{if } f_e = 0 \quad (1.5)$$

$$x_v = x_e + f_d \cdot \frac{k_d \cdot (x - x_e) + f_e}{k_d \cdot f_e} \quad \text{if } f_e \neq 0 \quad (1.6)$$

โดยที่

x_e แทน ค่าตำแหน่งของวัตถุแวดล้อม

f_d แทน ค่าของแรงที่ต้องการให้แขนกลกด

เมื่อได้ตำแหน่งที่สั่งให้แขนกลกดแล้ว ต่อมาจะคำนวณหาค่าสัญญาณอินพุต (Input) ที่ใส่เข้าไปในระบบ ซึ่งจากที่ R.Volpe และ P.Khosla ได้ศึกษาไว้ในเรื่อง "The equivalence of second order impedance control and proportional gain explicit force control" จะได้ว่าค่าสัญญาณอินพุต (Input) ที่ใส่เข้าไปในระบบเพื่อให้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและแรงเป็นไปตามสมการที่ (2.4) จะมีค่าตามสมการข้างล่างนี้

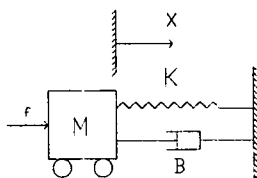
$$\tau = M(q)\ddot{q}_i + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + d(\dot{q}) + \tau_e \quad (1.7)$$

$$\ddot{q}_i = J^{-1}(q)[\ddot{x}_i - \dot{J}(q)\dot{q}] \quad (1.8)$$

$$\ddot{x}_i = M_d^{-1}[B_d \cdot \dot{e}_v + K_d \cdot e_v - f_e] \quad (1.9)$$

โดยที่ $\dot{e}_v, e_v$ แทนค่าความผิดพลาดของความเร็วปลายแขนกลในระบบพิกัดฉาก (Cartesian Coordinate) ซึ่งสมการที่ (1.7) เป็นกฎการควบคุมแขนกลโดยใช้พลวัตแบบย้อนกลับ (manipulator inverse dynamics control law) ส่วนสมการที่ (1.8) เป็นการเปลี่ยนจากความเร่งของปลายแขนกลที่ต้องการในพิกัดฉาก เป็นพิกัดรอยต่อของแขนกล (Joint Coordinate) (ซึ่งรายละเอียดดูได้จากหัวข้อเรื่อง "Resolve Acceleration Control of Manipulator") และสมการที่ (1.9) แทนความเร่งของหุ่นที่ต้องการสำหรับตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์

จากการควบคุมผลระหว่างการควบคุมตำแหน่งและการควบคุมแรงแบบต่าง ๆ ที่มีผู้ศึกษามาก่อนหน้านี้ จะเห็นได้ว่าความแตกต่างระหว่างการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิทกับการควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์ เช่น การควบคุมอิมพีแดนซ์ ที่เห็นได้ชัดคือ การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิทเป็นการควบคุมแรงโดยตรงทำให้ผลตอบสนองของการควบคุมแรงแบบนั้นค่อนข้างเร็ว แต่การควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์มีเสถียรภาพมากกว่า เนื่องจากการควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์นั้นไม่ควบคุมแรงโดยตรงแต่จะคำนวณค่าตำแหน่งหรือความเร็วของปลายแขนกลเพื่อให้แขนกลกดวัตถุแล้วเกิดแรงกระทำกับปลายแขนกลตามที่ต้องการขึ้นมาก่อน หลังจากนั้นจึงส่งเข้าไปยังตัวควบคุมตำแหน่งเพื่อควบคุมแขนหุ่นยนต์ต่อไป ซึ่งการควบคุมแรงผ่านตัวควบคุมตำแหน่งนี้ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพดีกว่า เนื่องจากการควบคุมตำแหน่งมีลักษณะเป็นตัวกรองผ่านต่ำ (low pass filter) ซึ่งทำให้แขนกลมีเสถียรภาพดีถึงแม้ว่าจะควบคุมแรงในทิศทางใด ๆ ขณะที่ไม่สัมผัสกับวัตถุแวดล้อม ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากกรณีของระบบมวลกับสปริงและตัวหน่วงตามรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 แสดงรูปของแบบจำลองของระบบมวล, สปริงและตัวหน่วง

จากรูปที่ 1.3 สมการการเคลื่อนที่ของระบบคือ

$$f = M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx \quad (1.10)$$

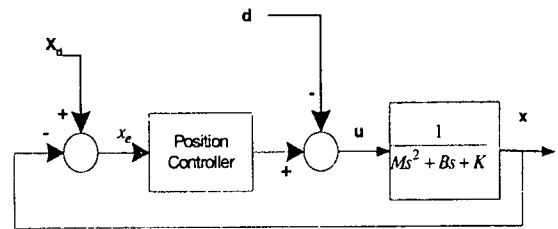
แทนสมการของแขนกลขณะสัมผัสกับวัตถุแวดล้อม

โดยที่ M, B, K แทน มวล, สัมประสิทธิ์ความหน่วง และค่าความแข็งตึงของสปริงตามลำดับ, f แทน แรงที่ใส่เข้าไปในระบบ

เมื่อทำการควบคุมตำแหน่งหรือความเร็วของมวล M โดยมีสื่อบรรณจากภายนอกเข้ามา เช่น แรงเสียดทาน เป็นต้น ทำให้สมการที่ (1.10) เปลี่ยนไปเป็นสมการที่ (1.11)

$$f + d = M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx \quad (1.11)$$

โดย d แทนแรงที่มาจากสื่อบรรณภายนอก (disturbance) ถ้าทำการควบคุมระบบตามสมการที่ (1.11) จะสามารถเขียนเป็นแผนภาพบล็อกได้ดังรูป 1.4



รูปที่ 1.4 แสดงแผนภาพบล็อกของการควบคุมตำแหน่งของแบบจำลองแขนกลขณะสัมผัสกับวัตถุ

เมื่อเขียนสมการของตำแหน่งโดยให้ G_c แทนฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ของตัวควบคุมตำแหน่งจะได้ว่า

$$x(s) = \frac{(x_d(s) \cdot G_c(s)) - d(s)}{Ms^2 + Bs + K + G_c(s)} \quad (1.12)$$

จะเห็นได้ว่าถ้าระบบควบคุมมีสื่อบรรณภายนอก d เข้ามาในระบบ การควบคุมตำแหน่งจะทำให้สื่อบรรณภายนอกนี้ผ่านตัวกรองผ่านต่ำซึ่งทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น และนอกจากนั้นถ้าใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิทเวลาที่ควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกับวัตถุในตอนเริ่มแรกนั้นต้องควบคุมตำแหน่งของแขนกลก่อน เมื่อแขนกลเริ่มสัมผัสวัตถุก็จะเปลี่ยนการควบคุมแบบตำแหน่งเป็นการควบคุมแบบแรงแทน แต่การควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์นั้นเป็นการควบคุมแรงโดยผ่านการควบคุมตำแหน่ง ทำให้ไม่ต้องเปลี่ยนรูปแบบการควบคุมจากการควบคุมตำแหน่งเป็นการควบคุมแรงในช่วงที่แขนกลเข้าสัมผัสวัตถุ ซึ่งต่างจากกรณีของการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท

นอกจากนั้นการควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์ยังเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั่วไปได้ง่าย

กว่า เนื่องจากว่าคำสั่งที่สั่งงานหุ่นยนต์อุตสาหกรรมโดยทั่วไปเป็นคำสั่งตำแหน่งให้หุ่นเคลื่อนที่ ดังนั้นถ้าควบคุมแรง โดยผ่านการควบคุมตำแหน่งของแขนกล จึงสามารถส่งคำสั่งไปยังแขนกลได้ทันที ในการวิจัยนี้จึงได้พยายามใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิตมาใช้ในการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งของแขนกล

2. ปัญหาของการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งของแขนกลโดยใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิต

ปัญหาของการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งทั้งแบบที่ใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิตและการควบคุมแรงแบบอิมพลิตคือปัญหาในการหาลักษณะรูปร่างของวัตถุที่แน่นอน ดังนั้นจึงมีผู้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแรง (Force sensor) เพื่อหารูปร่างของวัตถุขณะที่ทำการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง เช่น Tsuneo Yoshikawa และ Akiko Sudou ([5], 1990) ได้ศึกษาเรื่อง "Dynamic hybrid position/force control of robot manipulators: Online estimation of unknown constraint" ซึ่งใช้ข้อมูลของแรงมาหาเวกเตอร์ของพื้นผิว ทำให้สามารถทราบทิศทางในการควบคุมตำแหน่งและทิศทางการควบคุมแรง

นอกจากนี้ ปัญหาหลักของการควบคุมแบบผสมระหว่างการควบคุมแรงและตำแหน่งโดยใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิตก็คือคำสั่งตำแหน่งให้แขนกลกด ถ้าใช้ตำแหน่งจากสมการที่ (1.5) และ (1.6) มาใช้คำนวณแรงบิดของมอเตอร์ในแต่ละรอยต่อตามสมการที่ (1.7) จะต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ค่อนข้างแม่นยำ เช่น ค่ามวลหรือค่าแรงเสียดทาน ถ้าค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวที่หามาได้มีความแม่นยำจะทำให้ค่าตำแหน่งที่คำนวณเพื่อให้เกิดแรงตามต้องการดังกล่าวมีความแม่นยำตามไปด้วย ทำให้สามารถควบคุมแรงได้ตามต้องการ

3 การควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งของแขนกลด้วยแรงแบบอิมพลิต

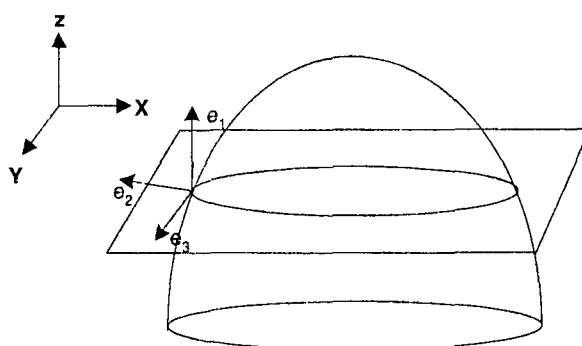
จากที่ได้ศึกษามาข้างต้นจึงมีแนวคิดที่จะนำการควบคุมแรงแบบอิมพลิตมาประยุกต์ใช้กับการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง ซึ่งเรียกว่าการควบคุมแบบไฮบริดด้วยแรงแบบอิมพลิตสำหรับแขนกล (Hybrid Control with An Implicit Force for A Manipulator Arm)

โดยที่มีการหาค่าพารามิเตอร์ความแข็งตึง (Stiffness) แบบออนไลน์ (online) เพื่อนำมาคำนวณหาคำสั่งตำแหน่งที่ให้แขนกลกดแบบออนไลน์ด้วย ซึ่งถึงแม้ว่าไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่แม่นยำ ก็สามารถควบคุมให้แรงที่แขนกลสัมผัสวัตถุเข้าสู่ค่าที่ต้องการได้เร็ว โดยแนวคิดนี้มาจาก Dragan M. Stokic and Miodir K. Vukobratovic ([6], 1991) ซึ่งได้ศึกษาเรื่อง "An adaptive hybrid control scheme for manipulation robots with implicit force control" ไว้

วิธีนี้เป็นการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งด้วยแรงแบบอิมพลิตสำหรับแขนกล โดยแรงแบบอิมพลิตที่ใช้คือการควบคุมแรงผ่านการควบคุมตำแหน่ง ซึ่งมีการคำนวณหาค่า ความแข็งตึงแบบออนไลน์ เพื่อให้การควบคุมแรงมีประสิทธิภาพมากขึ้น วิธีการนี้สามารถสรุปเป็นขั้นตอนของการทำงานดังนี้

- 1) หาทิศทางที่จะควบคุมแรงและตำแหน่ง โดยมีหลักการดังนี้

จากที่ Tsuneo Yoshikawa และ Akiko Sudou ([5], 1990) ได้ศึกษาเรื่อง "Dynamic hybrid position/force control of robot manipulators: Online estimation of unknown constraint" ไว้ นั้น เราจะนำข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงมาหารูปร่างของวัตถุ โดยพิจารณาตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงทิศทางที่จะควบคุมแรงและตำแหน่ง

จากรูปที่ 3.1 จุดประสงค์คือต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ไปบน plane Q โดยที่ควบคุมแรงในทิศตั้งฉากกับผิววัตถุ ชั้นแรกจะวัดแรงจากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงที่ปลายแขนกล หลังจากนั้นจะหาทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวชิ้นงานจากสูตร

$$e_3 = \frac{f}{\|f\|} \quad (1.13)$$

โดยที่ f แทนแรงที่แขนกลสัมผัสกับวัตถุแวดล้อม, e_3 แทนเวกเตอร์หนึ่งหน่วยซึ่งมีทิศเดียวกับแรงที่แขนกลสัมผัสกับวัตถุแวดล้อม หลังจากนั้นจะหาทิศทางที่ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่จาก

$$e_2 = \frac{w \times e_3}{\|w \times e_3\|} \quad (1.14)$$

$$e_1 = \frac{e_2 \times e_3}{\|e_2 \times e_3\|} \quad (1.15)$$

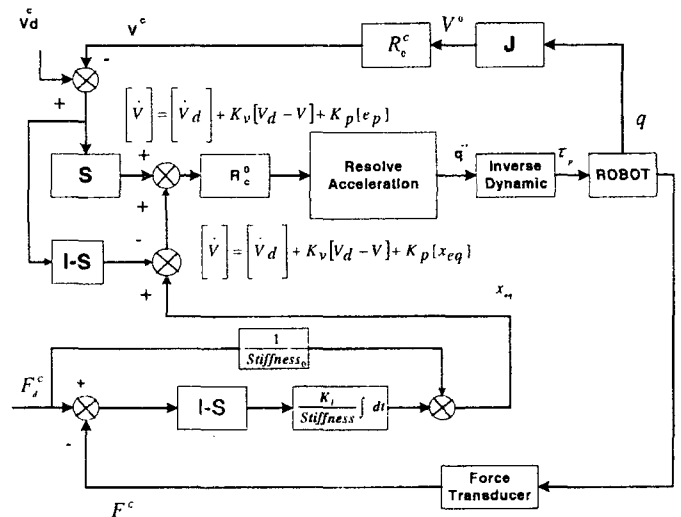
โดยที่ e_1 แทนเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่มีทิศตั้งฉากกับ
ระนาบ Q

$$\begin{aligned} Stiffness &= Stiffness_0 & ; i = 1 \\ Stiffness &= \frac{F_e}{x} & ; i > 1 \end{aligned} \quad (1.16)$$

3) ต่อมาจะหาระยะที่สั่งให้แขนกลกดจากสมการที่(1.17)

$$x = \frac{F_d}{Stiffness_0} + \int K_i \frac{(F_d - F_e)}{Stiffness} dt \quad (1.17)$$

4) เมื่อคำนวณค่าระยะที่จะกดแล้วจะนำไปเป็นสัญญาณคำสั่งสำหรับตัวควบคุมตำแหน่งในแนวตั้งฉากกับวัตถุต่อไป และนำกลับไปใช้ในสมการที่ (1.16) เพื่อหาค่า Stiffness ใน Loop การคำนวณต่อไปอีกด้วย ระบบดังกล่าวสามารถเขียนเป็นแผนภาพบล็อกได้ดังรูปที่ 3.2



4. Resolve Acceleration Control of Manipulator

การควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งนั้น เป็นการควบคุมแบบแรงและตำแหน่งไปพร้อม ๆ กัน โดยแยกการควบคุมแรงและตำแหน่งออกจากกันตามทิศทางของคอมไพล์อันท์เฟรม เมื่อจะควบคุมตำแหน่งในทิศทางใด ๆ ของคอมไพล์อันท์เฟรมในวิธีโรลเลอร์แอสซีเลชันนั้นต้องคำนวณหาความเร่งของแขนกลในทิศทางนั้น ๆ ของคอมไพล์อันท์เฟรมก่อน หลังจากนั้นจึงแปลงให้มาอยู่ในรูปของความเร่งในแต่ละรอยต่อนี้

$$\ddot{P}_c = \ddot{P}_{cd} + K_v \cdot (\dot{P}_{cd} - \dot{P}_c) + K_p \cdot (E_p) \quad (1.18)$$

$\ddot{P}_c$ = ความเร่งของปลายแขนกลในคอมไพลันท์เฟรม

$\dot{P}_{cd}$ = ความเร่งของปลายแขนกลในคอมไพลันท์เฟรมที่
ต้องการ

$\dot{P}_{cd}$ = ความเร็วของปลายแขนกลในคอมไพล์อันท์เฟรมที่
ต้องการ

$\dot{P}_c$ = ความเร็วของปลายแขนกลในคอมไพล์อันท์เฟรม

E_n = ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งปลายแขนกล

K_v, K_n = ค่าเกณฑ์ของความเร็วและค่าเกณฑ์ของตำแหน่ง

ค่าความเร่งที่คำนวณได้นั้นจะอยู่ในรูปทาส์คสเปซ (Task Space) จึงต้องแปลงให้อยู่ในรูปของจอยน์สเปซ (Joint Space) ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\ddot{q} = J^{-1} \{ R_0^{c-1} (\ddot{P}_c - \dot{R}_0^c \dot{P} - J\dot{q}) \} \quad (1.19)$$

โดยที่

$\ddot{q}$ = ความเร่งที่คำนวณได้ของรอยต่อ

J = จาร์โคเบียนเมตริกซ์

R_0^c = เมตริกซ์การแปลง จากเฟรม 0 ไปยังเฟรม c

$\ddot{P}_c$ = ความเร่งของปลายแขนกลที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.18)

$\dot{P}$ = ความเร็วของปลายแขนกลในเฟรม 0

$\dot{q}$ = ความเร็วของรอยต่อ

เมื่อคำนวณความเร่งของแต่ละรอยต่อได้แล้ว ต่อไปจะคำนวณแรงบิดที่ใส่เข้าไปในรอยต่อจากสมการพลวัตของแขนกล

$$\tau = H(q) \cdot \ddot{q} + C(\dot{q}, q) + G(q) - J^T \cdot F \quad (1.20)$$

โดยที่

$H(q)$ = เมตริกซ์ความเฉื่อย

$C(\dot{q}, q)$ = แรงหนีศูนย์กลาง และแรงโคริโอลิส

$G(q)$ = แรงโน้มถ่วง

τ = แรงเจเนอเรตไลซ์ที่ใส่เข้าไปในระบบ (Input Generalize Force)

F = แรงที่กระทำกับปลายแขนกล

เมื่อแทนค่าความเร่งของแต่ละรอยต่อจากสมการที่ (1.19) ลงไปในสมการ (1.20) ทำให้ได้ว่า

$$\tau_{input} = H(q)J^{-1} \{ R_0^{c-1} (\ddot{P}_c - \dot{R}_0^c \dot{P} - J\dot{q}) \} + C(\dot{q}, q) + G(q) - J^T F \quad (1.21)$$

ซึ่งเมื่อใส่แรงบิดตามสมการที่ (1.21) ไปยังรอยต่อแต่ละรอยของแขนกลแล้วจะทำให้

$$\ddot{e}_p + k_v \dot{e}_p + k_p e_p = 0 \quad (1.22)$$

นั่นคือค่าความผิดพลาดของตำแหน่งจะลู่เข้าสู่ศูนย์ ทำให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งที่ต้องการได้ในที่สุด

5. การทดลอง

ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองนำเอาเทคนิคระบบควบคุมแรงและตำแหน่งที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 มาประยุกต์ทดลองใช้ (Implementation) กับระบบแขนหุ่นยนต์จุฬา 2 โดยที่ในการทดลองนั้นแบ่งเป็นการทดลองแบบต่างๆดังนี้

5.1 ทำการทดลองเพื่อนำการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตไปใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตึง (Stiffness) แบบออนไลน์กับแบบที่ให้ค่าความแข็งตึงคงที่

5.2 ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิต และการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์ เมื่อต้องการให้แขนกลกดวัตถุชนิดต่างๆกันดังนี้

5.2.1 วัตถุที่อ่อนตัว ซึ่งในที่นี้ใช้แผ่นโฟมในการทดลอง

5.2.2 แผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว

5.2.3 แผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัวโดยคำสั่งแรงที่ให้แขนกลกระทำมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได (Step Change)

5.2.4 วัตถุแข็งที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity)

5.3 การทดลองควบคุมแรงและตำแหน่ง โดยควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแขนกลและควบคุมแรงในพื้นที่ผิวระนาบ xy หรือระนาบที่ประกอบด้วยแกนที่ 1 และแกนที่ 2 ของแขนกล

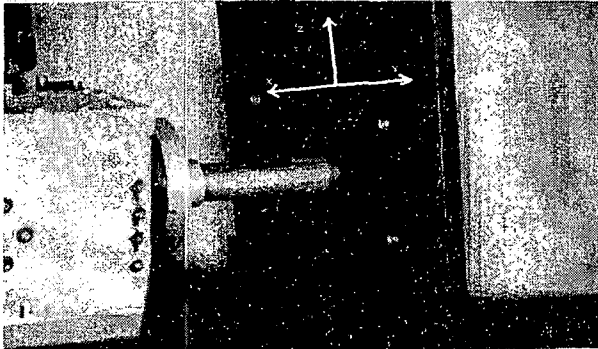
5.1 การทดลองนำการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตไปใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ

การทดลองนี้เป็นการทดลองควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งของแขนกลที่กระทำกับผืนหนัง ตามรูปที่ 5.1 โดยการทดลองเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง

- 1) การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิต ที่ให้ค่าความแข็งตึงคงที่ ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 5×10^4 นิวตัน/เมตร
- 2) การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณการค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์

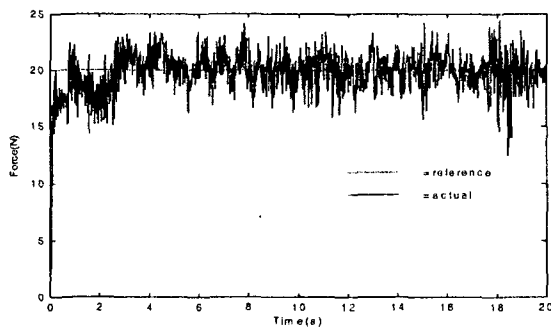
พิจารณารูป 5.1 แกน X คือแกนที่ตั้งฉากกับพื้นผิว แกน Y คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวระนาบ แกน Z คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวตั้ง การทดลองเริ่มจากแขนกลอยู่ห่างจากวัตถุประมาณ 1 ซม. หลังจากนั้นแขนกลจะเคลื่อนที่เข้ากดผืนหนังในแนวแกน X ด้วยแรงกด 20 นิวตัน, 25 นิวตัน, 30 นิวตัน ตามลำดับ หลังจากนั้นแขนกลจะเคลื่อนที่ไปตามผืนหนังเป็นเส้นตรงโดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็นระยะทาง 80 มม. ตามแนวแกน Y พร้อมกับกดผืนหนังด้วยแรงที่กำหนด โดยการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตนั้นจะใช้ค่าเกนของอินทิกรัลเท่ากับ 0.8 ส่วนค่า *Stiffness* มีค่า 5000 N/m

สำหรับค่า K_p และค่า K_v ของการควบคุมแบบ Resolve Acceleration (ซึ่งจะกล่าวต่อไป) มีค่าเท่ากับ 1300 และ 50 ตามลำดับ ส่วนค่า K_f สำหรับการหาค่าตำแหน่งกอนั้นมีค่าเท่ากับ 0.8

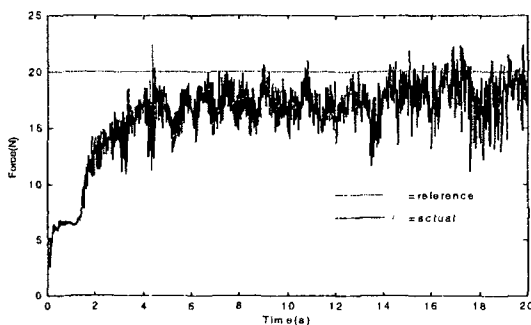


รูปที่ 5.1 แสดงรูปของแกนกลกำลังเคลื่อนที่อยู่บนผนังแบน

Force Response

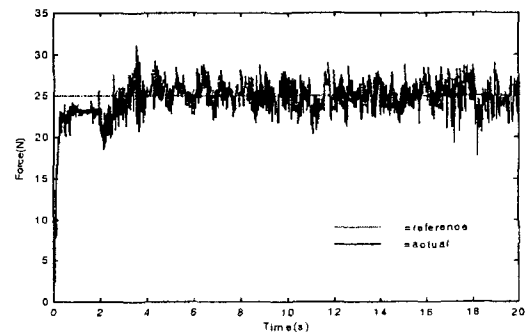


รูปที่ 5.2 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแกนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะทาง 80 มม. บนผนังแบน ด้วยขนาดแรงกด 20 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบอิมพลีซิทที่มีการหาค่าความแข็งดึงแบบออนไลน์

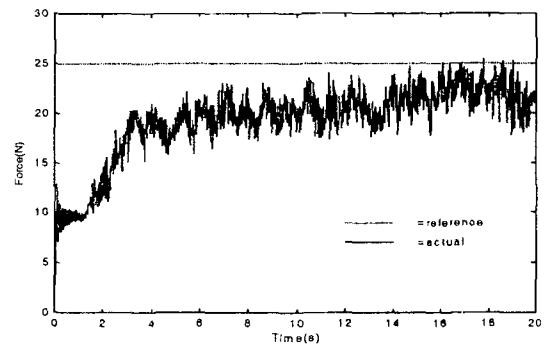


รูปที่ 5.3 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแกนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะทาง 80 มม. บนผนังแบนด้วยขนาดแรงกด 20 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบอิมพลีซิทที่ให้ค่าความแข็งดึงคงที่ จะเห็นได้ว่า ตอนเริ่มต้นแกนกลวิ่งเข้ากวดัตถ์ด้วยแรงที่น้อยกว่าค่าที่ต้องการ เนื่องจากตำแหน่งที่ต้องการให้แกนกลกดตอนเริ่มต้นไม่ทำให้เกิดแรงตามต้องการ หลังจากนั้นผลของค่าอินทิกรัลจะทำให้แรงกดค่อย ๆ เพิ่มขึ้นสู่ค่าที่ต้องการ แต่การควบคุมแบบอิมพลีซิทที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งดึงแบบออนไลน์นั้น เมื่อเวลา

ผ่านไป 3 วินาที แรงกดก็จะลู่เข้าสู่ค่าที่นั้น เมื่อเวลาผ่านไป 20 วินาที แรงกดจึงลู่เข้าสู่ค่าที่ต้องการ



รูปที่ 5.4 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแกนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะทาง 80 มม. บนผนังแบน ด้วยขนาดแรงกด 25 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบอิมพลีซิทที่มีการหาค่าความแข็งดึงแบบออนไลน์



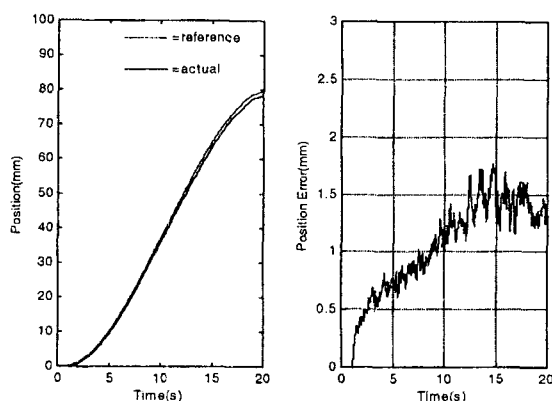
รูปที่ 5.5 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแกนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะทาง 80 มม. บนผนังแบนด้วยขนาดแรงกด 25 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบอิมพลีซิทที่ให้ค่าความแข็งดึงคงที่

ถ้าเพิ่มแรงที่กดเพิ่มขึ้นเป็น 25 N และ 30 N ผลที่ได้จะมีลักษณะใกล้เคียงกันกับเมื่อใช้แรง 20 N โดยตอนเริ่มต้นแกนกลวิ่งเข้ากวดัตถ์ด้วยแรงที่น้อยกว่าค่าที่ต้องการ เนื่องจากตำแหน่งที่ต้องการให้แกนกลกดตอนเริ่มต้นไม่ทำให้เกิดแรงตามต้องการ โดยวิธีที่หาค่าความแข็งดึงแบบออนไลน์นั้นจะมีแรงกดเริ่มต้นประมาณ 15 N แต่วิธีที่ให้ค่าความแข็งดึงคงที่นั้นจะมีแรงกดเริ่มต้นประมาณ 10 N หลังจากนั้นผลของค่าอินทิกรัลจะทำให้แรงกดค่อย ๆ เพิ่มขึ้นสู่ค่าที่ต้องการ แต่การควบคุมแบบอิมพลีซิทที่มีการหาค่าหรือประมาณค่า Stiffness แบบออนไลน์นั้น เมื่อเวลาผ่านไป 3 วินาที แรงกดก็จะลู่เข้าสู่ค่าที่กำหนด เมื่อเวลาผ่านไป 20 วินาที แรงกดจึงลู่เข้าสู่ค่าที่ต้องการ ส่วนที่ผลตอบสนองของแรงไม่เรียบเนื่องมาจากกวดัตถ์ที่ไม่เรียบ ทำให้ผลตอบสนองของแรงไม่เรียบเท่าที่ควร

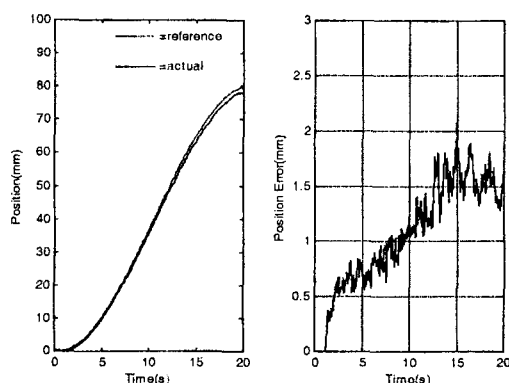
และจากการทดลองกดย่าง จะได้ผลสรุปว่าเมื่อใช้การควบคุมแบบอิมพลีซิทที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งดึงของระบบแบบออนไลน์ จะทำให้ค่าระยะที่สั่งให้แกนกลกวดัตถ์ลู่เข้าสู่ค่าที่สถานะอยู่ตัวเร็วกว่าแบบที่ให้ค่าความแข็งดึงคงที่ ซึ่งเป็นผลให้ผลการตอบสนองของแรงเร็วกว่าด้วย

โดยมีค่าเวลาเข้าที่ (Settling Time) ประมาณ 3 วินาที ส่วนในกรณีที่ให้ค่าความแข็งตึงคงที่มีค่าเวลาเข้าที่มากกว่า 20 วินาที เมื่อทดลองกดด้วยแรง 20 นิวตัน (ผลมีลักษณะเช่นเดียวกับเมื่อใช้แรง 25 นิวตัน และ 30 นิวตัน)

Position Response



รูปที่ 5.4 แสดงค่าการเคลื่อนที่และความผิดพลาดของตำแหน่งของปลายแขนกลบนผนังแบนเป็นระยะ 80 มม. มีแรงกดขนาด 20 นิวตัน การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทที่ให้ค่าความแข็งตึงคงที่



รูปที่ 5.5 แสดงค่าการเคลื่อนที่และความผิดพลาดของตำแหน่งของปลายแขนกลบนผนังแบนเป็นระยะ 80 มม. มีแรงกดขนาด 20 นิวตัน การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทที่มีการหาค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์

จากรูปที่ 5.4 - 5.5 แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงของปลายแขนกลบนผนังแบนโดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็นระยะทาง 80 มม. โดยมีแรงกดคือ 20 นิวตัน (และ 25 นิวตัน, 30 นิวตัน) การทดลองนี้ทำในสองกรณีกล่าวคือ 1) กำหนดค่าความแข็งตึงให้มีค่าคงที่ 2) มีการ คำนวณหาหรือประมาณการค่าความแข็งตึงในลักษณะแบบออนไลน์

จากการทดลองพบว่า การควบคุมตำแหน่งของแขนกลทั้ง 2 วิธีนั้นให้ผลดีไม่ต่างกัน โดยที่ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งปลายแขนกลมีค่าไม่เกิน 2.5 มม.

5.2 การทดลองเปรียบเทียบการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิทกับการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท

5.2.1 การทดลองควบคุมแรงและตำแหน่งกับวัตถุอ่อนตัว

การทดลองนี้เป็นการทดลองควบคุมแรงที่แขนกลกระทำกับวัตถุอ่อนตัว ซึ่งในที่นี้ใช้โฟม ตามรูปที่ 5.6 เป็นวัตถุให้แขนกลกด โดยเป็นการทดลองเปรียบเทียบระหว่าง

- 1) การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท
- 2) การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์

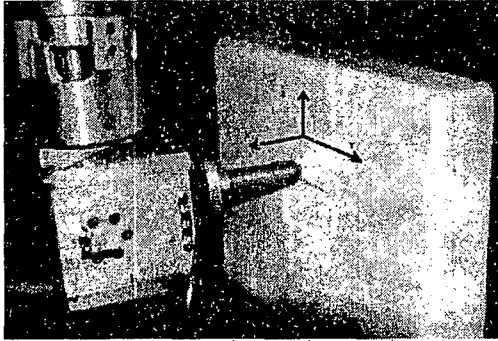
เพื่อศึกษาความแตกต่างของผลตอบสนองของแรงที่แขนกลกดวัตถุและผลตอบสนองของตำแหน่งปลายแขนกล พิจารณารูป 5.26 แกน X คือแกนที่ตั้งฉากกับพื้นผิว แกน Y คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวระนาบ แกน Z คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวตั้ง

การทดลองเริ่มจากให้แขนกลอยู่ห่างจากโฟมประมาณ 1 ซม. แล้วควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าไปกดวัตถุตามแนวแกน X แล้วเคลื่อนที่ไปบนผิววัตถุเป็นแนวเส้นตรงตามแนวแกน Y โดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็นระยะทาง 90 มม. พร้อมกับกดวัตถุด้วยแรงขนาด 5 นิวตัน, 10 นิวตัน ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.7 - 5.10 เป็นการทดลองการควบคุมแรงที่ปลายแขนกลที่กระทำกับวัตถุอ่อนตัว โดยเคลื่อนที่บนวัตถุอ่อนตัวเป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม. พร้อมกับกดวัตถุอ่อนตัวด้วยแรงกด เท่ากับ 5 นิวตัน, 10 นิวตัน ตามลำดับ การทดลองนี้ทำการเปรียบเทียบระหว่าง การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท และการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์ ซึ่งพบว่า เมื่อควบคุมแรงโดยใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทแล้วผลตอบสนองของแรงเรียบกว่าแบบการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท โดยที่ค่าความผิดพลาดของแรงเมื่อใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท มีค่าไม่เกิน 7 นิวตัน ส่วนการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท มีค่าความผิดพลาดของแรงไม่เกิน 3 นิวตัน ทั้งนี้เนื่องจาก ระหว่างที่แขนกลกดวัตถุนั้น วัตถุมีการอ่อนตัวซึ่งการควบคุมตำแหน่งทำให้วัตถุที่ถูกกดสั้นน้อยกว่าการควบคุมแรง

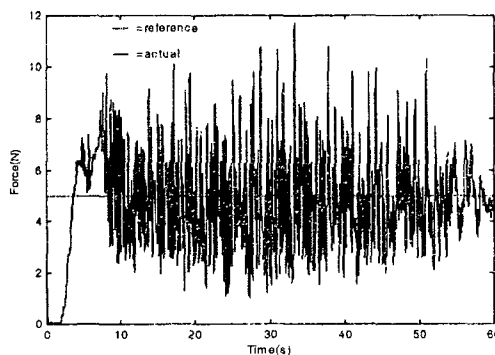
จากรูปที่ 5.11 - 5.12 แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงของปลายแขนกลบนผิววัตถุอ่อนตัวโดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็นระยะทาง 90 มม. โดยมีแรงกดคือ 5 นิวตัน (ได้ทำการทดสอบที่แรง 10 นิวตันด้วย) การทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิทกับการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทที่มีการหาค่า

หรือประมาณค่าความแข็งดึงแบบออนไลน์ ซึ่งพบว่าผลตอบสนองของตำแหน่งจากการควบคุมทั้ง 2 วิธีไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากการยุบตัวของวัตถุอ่อนตัวมีค่าค่อนข้างน้อย ซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนที่ของแขนกลในแนวสัมผัสกับวัตถุน้อยตามไปด้วย ทำให้การเคลื่อนที่ของแขนกลค่อนข้างเรียบ โดยที่มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 3 มม.

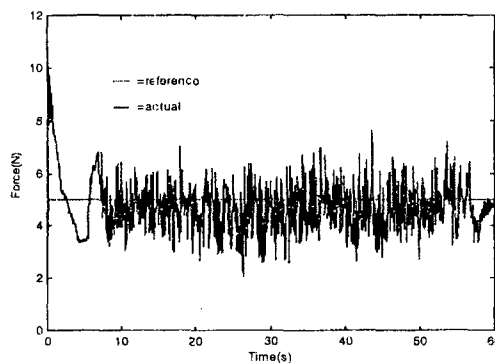


รูปที่ 5.6 แสดงแขนกลขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่มีความอ่อนตัว

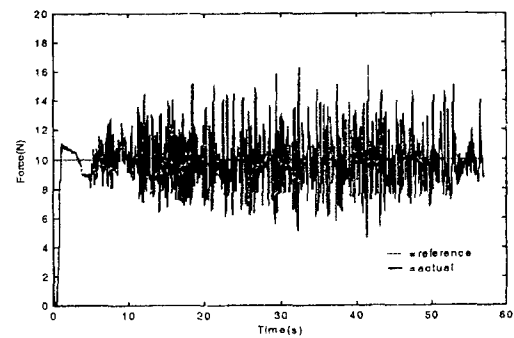
Force Response



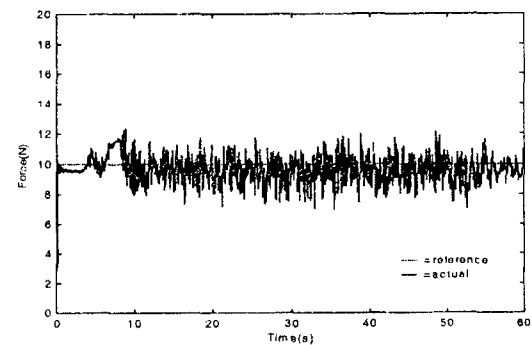
รูปที่ 5.7 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม.บนผิววัตถุอ่อนตัว ขนาดแรง 5 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบเอกซ์พลลิซิท



รูปที่ 5.8 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม.บนผิววัตถุอ่อนตัว ขนาดแรง 5 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบอิมพลลิซิท

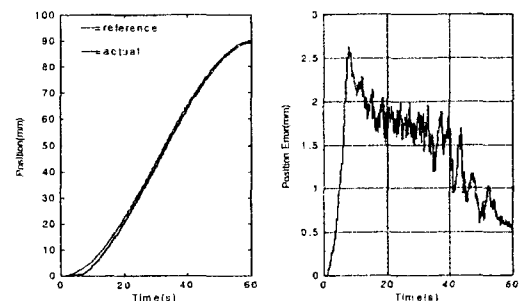


รูปที่ 5.9 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม.บนผิววัตถุอ่อนตัว ขนาดแรง 10 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบเอกซ์พลลิซิท

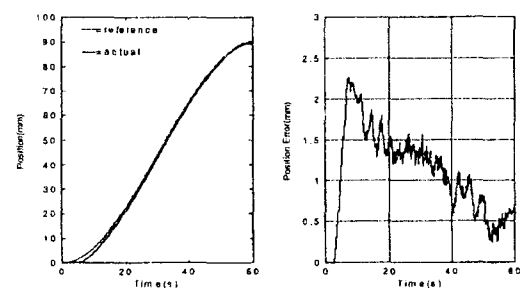


รูปที่ 5.10 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม.บนผิววัตถุอ่อนตัว ขนาดแรง 10 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบอิมพลลิซิท

Position Response



รูปที่ 5.11 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม.บนผิววัตถุอ่อนตัว ขนาดแรง 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท



รูปที่ 5.12 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม.บนผิววัตถุอ่อนตัว ขนาดแรง 5 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบอิมพลลิซิท

การทดลองควบคุมแรงและตำแหน่งกับผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว

การทดลองนี้เป็นการทดลองควบคุมแรงที่แขนกลกระทำกับผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว โดยยึดปลายด้านหนึ่งไว้ ซึ่งในที่นี้ใช้ฝาครอบของคอมพิวเตอร์ ตามรูปที่ 5.35 เป็นวัตถุให้แขนกลกด การทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบระหว่าง

- 1) การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิช
- 2) การควบคุมแรงแบบอิมพลลิชที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งดิงแบบออนไลน์

พิจารณารูป 5.13 แกน X คือแกนที่ตั้งฉากกับพื้นผิว แกน Y คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวระนาบ แกน Z คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวตั้ง

การทดลองเริ่มจากให้แขนกลอยู่ห่างจากวัตถุประมาณ 1 ซม. แล้วควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าไปกดวัตถุตามแนวแกน X ด้วยแรงที่กำหนดคือ 5 นิวตัน, (ได้ทำการทดลองที่ 10 นิวตัน และ 15 นิวตันด้วย) หลังจากนั้นจะให้แขนกลกดไปบนผิววัตถุพร้อมกับเคลื่อนที่ไปบนผิววัตถุเป็นเส้นตรงตามแนวแกน Y โดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็นระยะทาง 90 มม. เพื่อที่จะศึกษาความแตกต่างของการควบคุมทั้ง 2 แบบ ที่มีต่อแรงกดและการเคลื่อนที่ของแขนกล

รูปที่ 5.14-5.15 เป็นการทดลองควบคุมแรงที่ปลายแขนกลกระทำกับผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว โดยกำหนดแรงกดให้มีค่าเท่ากับ 5 นิวตัน (ทดลองกับแรง 10 นิวตัน และ 15 นิวตันด้วย) พร้อมกับเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะทาง 90 มม. โดยการทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบระหว่าง การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิชกับการควบคุมแรงแบบอิมพลลิชที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งดิงแบบออนไลน์ พบว่าเมื่อควบคุมแรงที่แขนกลกดผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัวโดยใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลลิช ผลตอบสนองของแรงเรียบกว่าแบบการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิช เนื่องจากขณะที่แขนกลเคลื่อนที่บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัวนั้น แขนกลมีการสั่นในแนวตั้งฉากกับวัตถุ ทำให้การควบคุมตำแหน่งนั้นให้ผลดีกว่าการควบคุมแรง

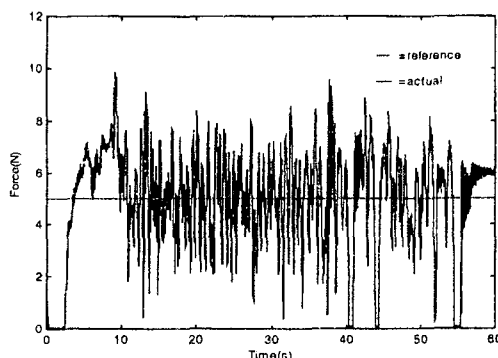
รูปที่ 5.16 – 5.17 เป็นผลการเคลื่อนที่ของแขนกลเป็นเส้นตรงโดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็นระยะทาง 90 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว ขณะที่ถูกด้วยแรง 5 นิวตัน (ทดลองกับแรง 10 นิวตัน และ 15

นิวตันด้วย) โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิชและการควบคุมแรงแบบอิมพลลิชที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งดิงแบบออนไลน์ ผลปรากฏว่าเมื่อใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิชนั้น ผลตอบสนองของตำแหน่งปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัวไม่เรียบนัก เนื่องจากขณะที่เคลื่อนที่นั้น ผนังแผ่นเหล็กมีการหยุ่นตัวสูง ทำให้ปลายแขนกลสั่นในแนวตั้งฉากกับวัตถุ ซึ่งมีผลกับตำแหน่งของแขนกลในแนวสัมผัสกับวัตถุด้วย ในขณะที่การควบคุมแรงแบบอิมพลลิชนั้น วัตถุมีการสั่นในแนวตั้งฉากกับวัตถุน้อย ทำให้ผลตอบสนองของตำแหน่งในแนวสัมผัสกับวัตถุค่อนข้างเรียบตามไปด้วย

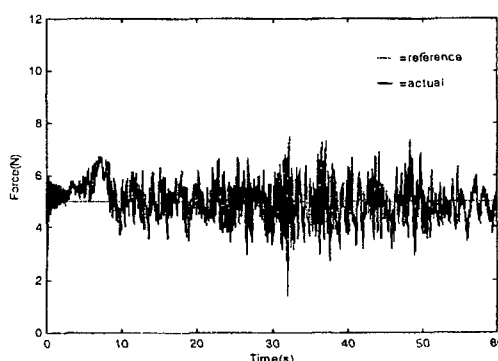


รูปที่ 5.13 แขนกลขณะที่เคลื่อนที่บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว

Force Response

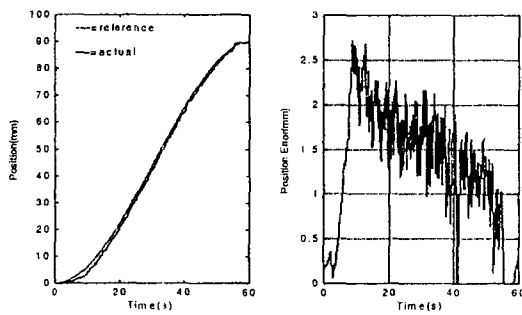


รูปที่ 5.14 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม.บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว โดยกดด้วยแรง 5 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบเอกซ์พลลิช

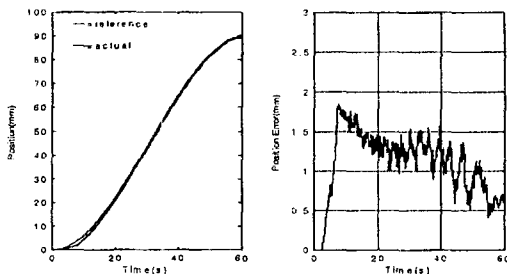


รูปที่ 5.15 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม.บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว โดยกดด้วยแรง 5 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบอิมพลลิช

Position Response



รูปที่ 5.16 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืด โดยกวดัดด้วยแรง 5 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท



รูปที่ 5.17 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืด โดยกวดัดด้วยแรง 5 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท

การทดลองควบคุมแรงและตำแหน่งกับผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดด้วยแรงที่กระทำมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได (Step Change)

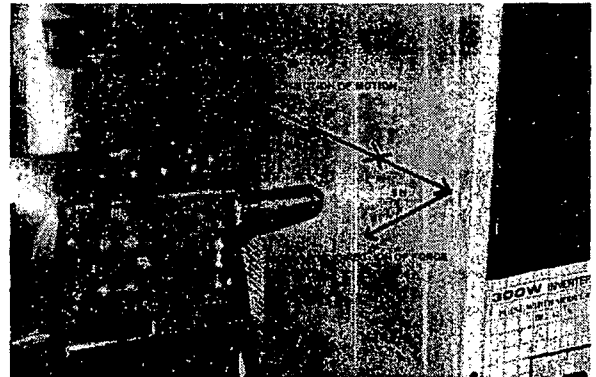
การทดลองนี้เป็นการทดลองควบคุมแรงที่แขนกลกระทำกับผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืด โดยยึดปลายด้านหนึ่งไว้ เหมือนในหัวข้อ 5.3 แต่ทำการทดลองนี้ คำสั่งแรงมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได โดยทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่าง

- 1) การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท
- 2) การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์

พิจารณารูปที่ 5.48 แกน X คือแกนที่ตั้งฉากกับพื้นผิว แกน Y คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวระนาบ แกน Z คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวตั้ง

การทดลองเริ่มจากให้แขนกลอยู่ห่างจากวัตถุประมาณ 1 ซม. แล้วควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าไปกวดัดวัตถุตามแนวแกน X ด้วยแรงที่กำหนดคือ 15 นิวตัน (ทดลองกับ 20 นิวตัน ด้วย) หลังจากนั้นก็จะให้แขนกลกดไปบนผิววัตถุ พร้อมกับเคลื่อนที่ไปบนผิววัตถุเป็นเส้นตรงตามแนวแกน Y โดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็น

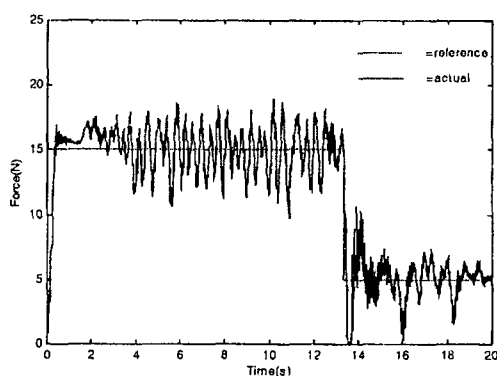
ระยะทาง 60 มม. หลังจากนั้นคำสั่งแรงจะมีการเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตัน เป็น 5 นิวตัน (และจาก 20 นิวตัน เป็น 10 นิวตัน) (การเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได) และจะควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่ต่อไปอีก 20 มม. ตามรูปที่ 5.18 เพื่อศึกษาผลตอบสนองของแรงที่แขนกลกวดัด และเคลื่อนที่ของปลายแขนกล



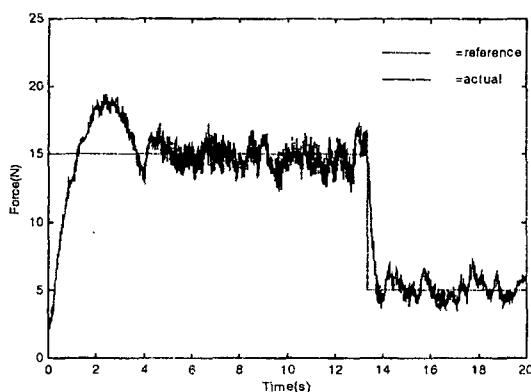
รูปที่ 5.18 แสดงแขนกลขณะเคลื่อนที่บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืด โดยแรงที่สัมผัสมีการเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะขั้นบันได (Step Change)

รูปที่ 5.19 – 5.20 เป็นการทดลองควบคุมแรงที่ปลายแขนกลที่กระทำกับผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืด ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท และการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์ โดยกำหนดแรงกดให้มีค่าเท่ากับ 15 นิวตัน (หรือ 20 นิวตัน) พร้อมกับเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะทาง 60 มม. พบว่าผลตอบสนองของแรงซึ่งควบคุมด้วยวิธีการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทเร็วกว่าการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท หลังจากนั้นคำสั่งแรงมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้น โดยเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตัน เป็น 5 นิวตัน (หรือจาก 20 นิวตัน เป็น 10 นิวตัน) พบว่าเมื่อใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท ผลตอบสนองของแรงขณะที่คำสั่งแรงมีการเปลี่ยนแปลงมีโอเวอร์ชูต (Overshoot) น้อยกว่าการควบคุมโดยใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท โดยเฉพาะเมื่อคำสั่งแรงเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตัน เป็น 5 นิวตันนั้น เมื่อใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท แขนกลได้หลุดออกจากวัตถุแล้วกลับเข้ากวดัดวัตถุใหม่ซึ่งทำให้เกิดโอเวอร์ชูตขึ้นมาก ในขณะที่การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทนั้นไม่ทำให้แขนกลหลุดจากวัตถุ ผลตอบสนองของแรงจึงไม่เกิดโอเวอร์ชูต

Force Response



รูปที่ 5.19 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยาบตัว โดยแรงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตันเป็น 5 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบเอกซ์พลลิซิท

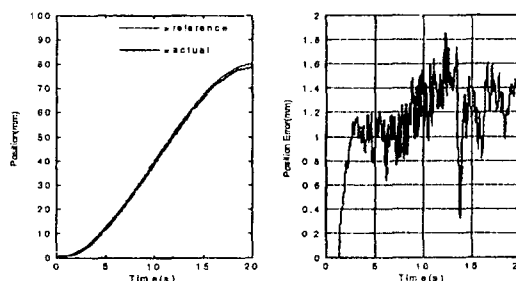


รูปที่ 5.20 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยาบตัว โดยแรงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตัน เป็น 5 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบอิมพลลิซิท

จากรูปที่ 5.21 – 5.22 เป็นผลการเคลื่อนที่ของแขนกลบนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยาบตัว โดยคำสั่งแรงที่แขนกลกวัดวัดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตัน เป็น 5 นิวตัน โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิทและ การควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิทที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์ ผลปรากฏว่า เมื่อใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิทนั้น ผลตอบสนองของตำแหน่งปลายแขนกลขณะที่คำสั่งแรงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตัน เป็น 5 นิวตันนั้นเกิดการสั่นมาก เนื่องจากแขนกลหลุดออกจากผิววัตถุแล้วกลับเข้ากวัดวัดใหม่ ในขณะที่การควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิทนั้น แขนกลไม่หลุดจากผิววัตถุ ทำให้ผลตอบสนองของตำแหน่งปลายแขนกลค่อนข้างเรียบ (สำหรับกรณีของคำสั่งแรงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 นิวตัน เป็น 10 นิวตันนั้น ทั้งการควบคุมแรง

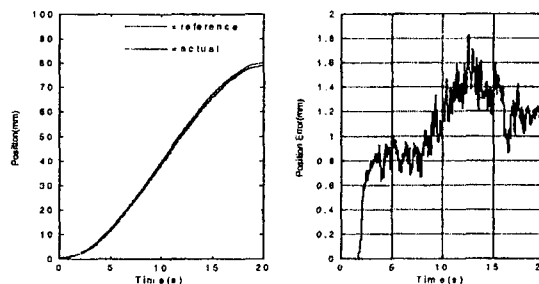
แบบเอกซ์พลลิซิท และการควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิท ให้ผลที่ไม่ต่างกัน) เนื่องจากคำสั่งแรงที่ให้แขนกลกวัดวัดมีค่ามาก วัตถุที่แขนกลกดจึงไม่มีการสั่นมากนัก ตำแหน่งของแขนกลในแนวสัมผัสกับวัตถุจึงค่อนข้างเรียบตามไปด้วย

Position Response



รูปที่ 5.21 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยาบตัว โดยแรงกวัดวัดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตัน เป็น 5 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท

ซิท



รูปที่ 5.22 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยาบตัว โดยแรงกวัดวัดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตัน เป็น 5 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบอิมพลลิซิท

การทดลองควบคุมแรงและตำแหน่งกับวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง

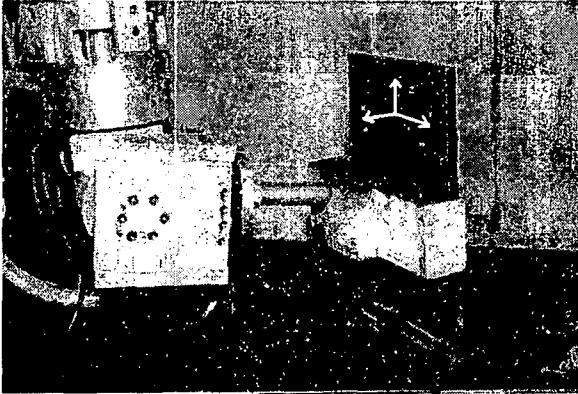
การทดลองนี้เป็นการทดลองควบคุมแรงที่แขนกลกระทำกับวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง ตามรูปที่ 5.23 การทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบระหว่าง

- 1) การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท
- 2) การควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิทที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์

พิจารณารูป 5.23 แกน X คือแกนที่ตั้งฉากกับพื้นผิว แกน Y คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวระนาบ แกน Z คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวดิ่ง

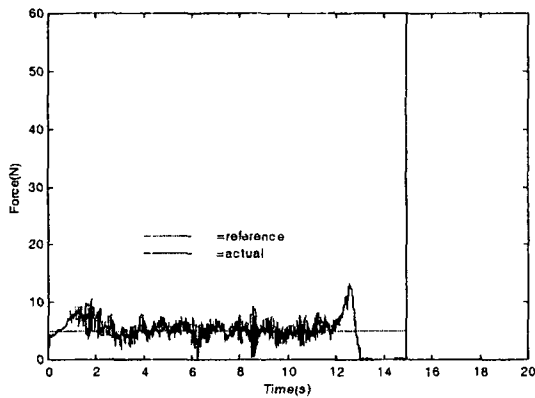
การทดลองเริ่มจากแขนกลอยู่ห่างจากวัตถุประมาณ 1 ซม. หลังจากนั้นแขนกลจะเคลื่อนที่เข้ากวัดวัดตามแนวแกน X ด้วยแรงกด 5 นิวตัน, 10 นิวตัน, 15 นิวตัน ตามลำดับ พร้อมกับเคลื่อนที่ไปบนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง โดยมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนวแกน Y และพยายามควบคุมให้แรงที่แขน

กลกดวัตถุเป็นตามที่ต้องการ ซึ่งการทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงข้อดีของการควบคุมแบบอิมพลีซิทเมื่อพารามิเตอร์ของการควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

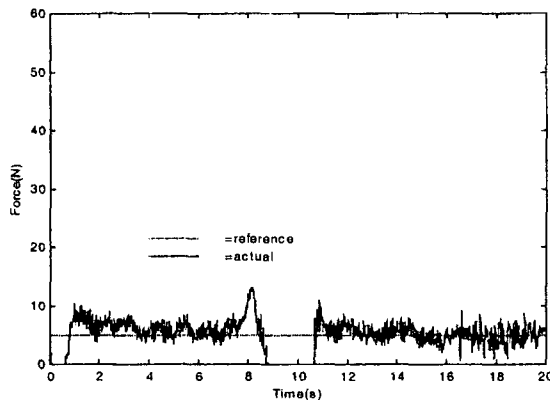


รูปที่ 5.23 แสดงแกนกลขณะเคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง

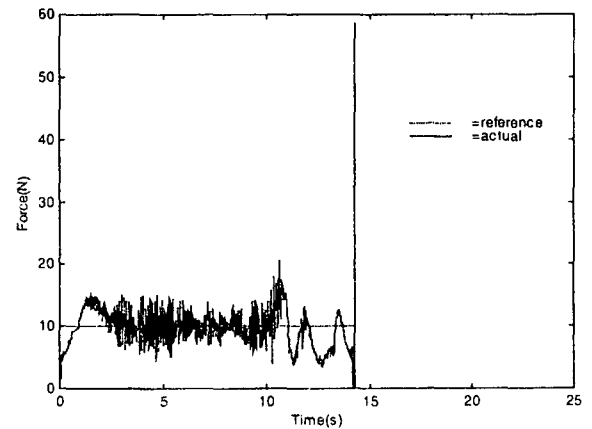
Force Response



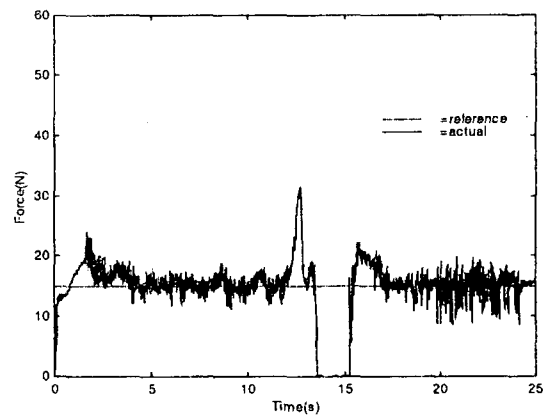
รูปที่ 5.24 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแกนกล ขณะเคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 5 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบเอกซ์พลีซิท



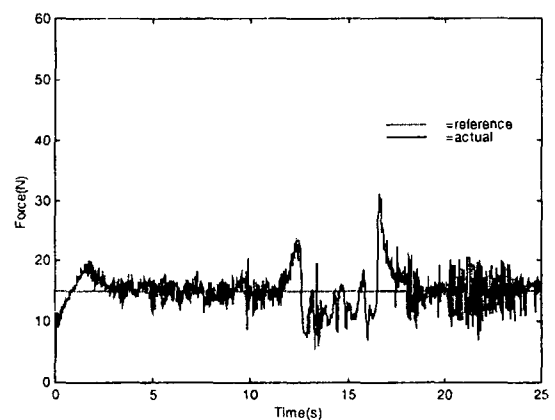
รูปที่ 5.25 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแกนกล ขณะเคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 5 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบอิมพลีซิท



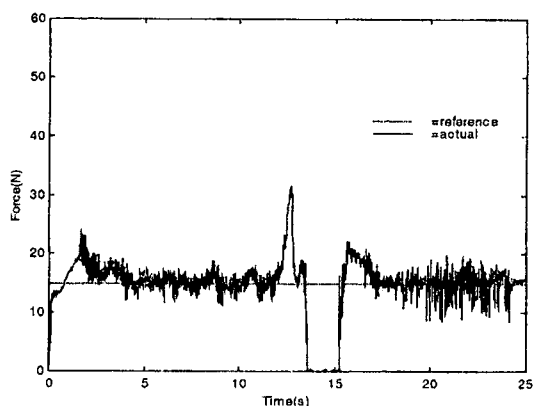
รูปที่ 5.26 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแกนกลขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 10 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบเอกซ์พลีซิท



รูปที่ 5.27 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแกนกลขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท



รูปที่ 5.28 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแกนกลขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 15 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบเอกซ์พลีซิท

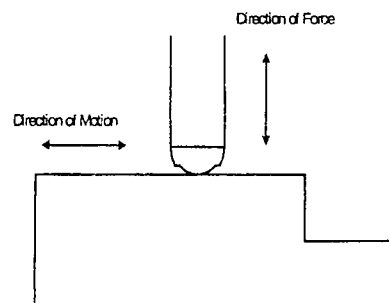


รูปที่ 5.29 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกล ขณะเคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 15 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบอิมพลิชิต

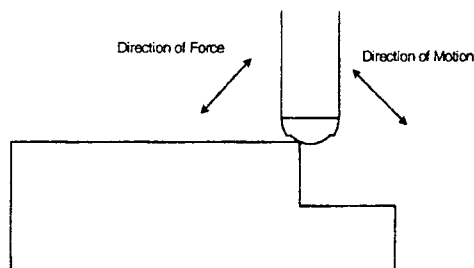
จากรูปที่ 5.24 – 5.29 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงที่แขนกลกดขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง โดยทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิตและการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิต

ก่อนอื่นต้องพิจารณารูปร่างของอุปกรณ์วัดแรงที่ใช้ก่อน ตามรูปที่ 5.30 แสดงถึงรูปร่างของแท่งวัดแรงที่ยึดกับอุปกรณ์วัดแรงขณะเคลื่อนที่บนวัตถุ ในการทดลองนั้น เริ่มแรกแขนกลห่างจากผิววัตถุประมาณ 1 ซม. หลังจากนั้น แขนกลจะเคลื่อนที่เข้าหาวัตถุด้วยแรงที่กำหนด คือ 5 นิวตัน, 10 นิวตัน, 15 นิวตัน ตามลำดับ และเคลื่อนที่ไปบนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง ขณะที่แขนกลเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณซึ่งพื้นผิวต่อเนื่องนั้น ผลตอบสนองของแรงเมื่อใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิตและการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตให้ผลไม่ต่างกันนัก แต่เมื่อแขนกลเคลื่อนที่ถึงจุดที่เป็นดังรูปที่ 5.31 ทิศทางของแรงที่กระทำกับแขนกลมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทำให้แรงที่แขนกลกดวัตถุมีค่ามากขึ้น เช่น รูปที่ 5.25 ช่วงวินาทีที่ 8 ซึ่งพบว่าแรงกดมีค่ามากขึ้น หลังจากนั้นพอปลายแขนกลเคลื่อนที่มาอยู่ที่ตำแหน่งตามรูปที่ 5.32 ทิศทางของการควบคุมตำแหน่งและการควบคุมแรงเปลี่ยนไปอย่างกะทันหัน ถ้าคำสั่งแรงมีค่าน้อยก็ทำให้ปลายแขนกลหลุดออกจากผิว ตามรูปที่ 5.25 ซึ่งคำสั่งแรงที่ให้แขนกลกดวัตถุมีค่า 5 นิวตัน ซึ่งตัวควบคุมจะสั่งให้แขนกลกดวัตถุเข้าไปใหม่ ซึ่งการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิตจะทำให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าหาพื้นผิวด้วยความเร่งจนชนพื้นผิวด้วยแรงเกินกว่าที่กำหนด (50 นิวตัน) จึงทำให้ระบบเกิดความไม่เสถียรภาพขึ้น ดังเช่นรูปที่ 5.24, 5.26 แต่ถ้าคำสั่งแรงมีค่ามากถึง 15 นิวตัน ดังรูปที่ 5.30 แขนกลจะไม่หลุดออกจากพื้นผิว เนื่องจากคำสั่ง

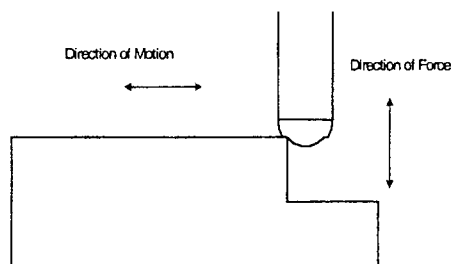
แรงมีค่ามาก ทำให้ระบบยังคงมีเสถียรภาพในขณะที่การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตนั้น ถึงแม้ปลายแขนกลจะหลุดออกจากผิว แต่ก็หลุดห่างออกมาไม่มาก และตัวควบคุมจะสั่งให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่เข้าหาวัตถุด้วยความเร็วค่อนข้างคงที่เนื่องจากเป็นการควบคุมตำแหน่ง ทำให้ปลายแขนกลเริ่มสัมผัสพื้นผิวใหม่ด้วยแรงที่ไม่เกินจากที่ต้องการมากนัก ตามรูปที่ 5.25, 5.27, 5.29



รูปที่ 5.30 ปลายแขนกลที่เคลื่อนที่อยู่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง

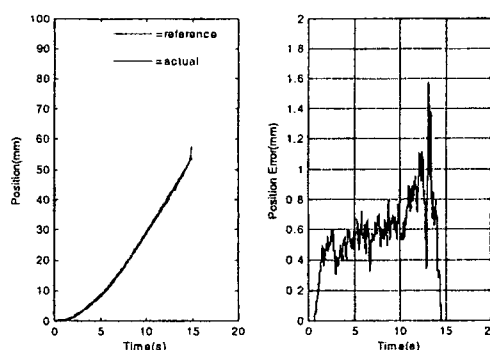


รูปที่ 5.31 ปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่ใกล้ถึงจุดที่ไม่ต่อเนื่อง

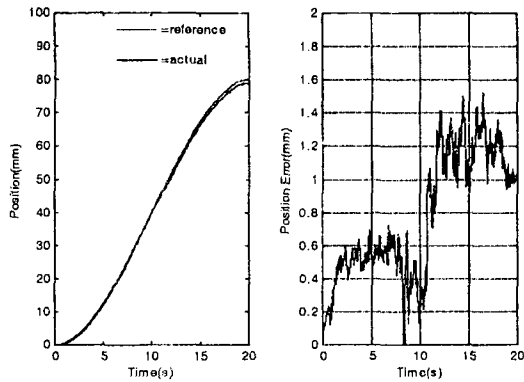


รูปที่ 5.32 ปลายแขนกลขณะที่ทิศทางของการควบคุมแรงและการควบคุมตำแหน่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน

Position Response

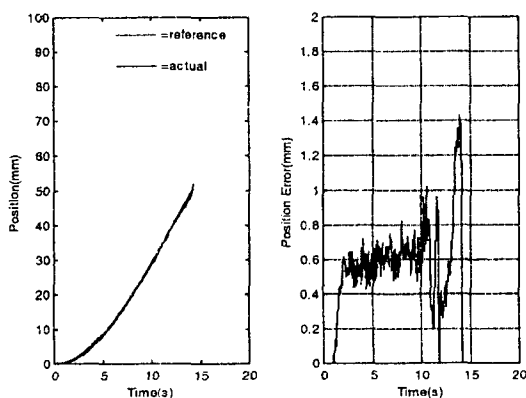


รูปที่ 5.33 แสดงค่าตำแหน่งของแขนกล ขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 5 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบเอกซ์พลิชิต

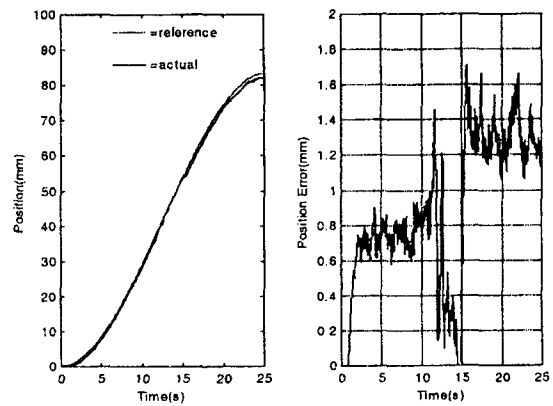


รูปที่ 5.34 แสดงตำแหน่งของแขนกล ขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิต

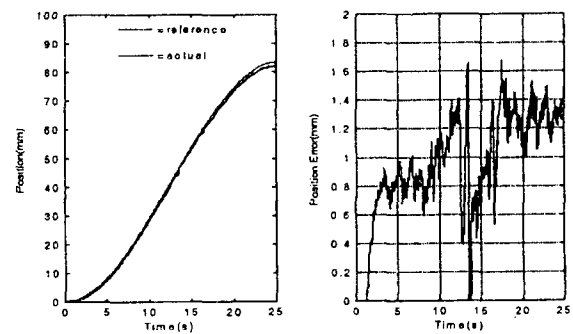
จากรูปที่ 5.33 – 5.38 เป็นผลตอบสนองของตำแหน่งปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงโดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็นระยะทาง 80 มม. บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องโดยแรงที่แขนกลกดมีค่า 5 นิวตัน, 10 นิวตัน, 15 นิวตัน ตามลำดับ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิต และการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งดิงแบบออนไลน์ ซึ่งผลปรากฏว่า เมื่อแขนกลเคลื่อนที่ถึงจุดที่พื้นผิวไม่ต่อเนื่อง ถ้าคำสั่งแรงที่ต้องการให้แขนกลกดวัตถุมีค่า 5 นิวตัน, 10 นิวตัน การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิตทำให้เกิดความไม่เสถียรภาพขึ้น การควบคุมตำแหน่งก็ไม่เสถียรภาพตามไปด้วย แต่ถ้าคำสั่งแรงที่ต้องการให้แขนกลกดวัตถุมีค่า 15 นิวตัน นั้น การควบคุมแรงยังคงมีเสถียรภาพอยู่ ทำให้การควบคุมตำแหน่งก็ยังคงมีเสถียรภาพอยู่ด้วย ส่วนการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตนั้น ระบบยังคงเสถียรภาพไม่ว่าคำสั่งแรงที่ต้องการให้แขนกลกดวัตถุมีค่าเท่าไรก็ตาม



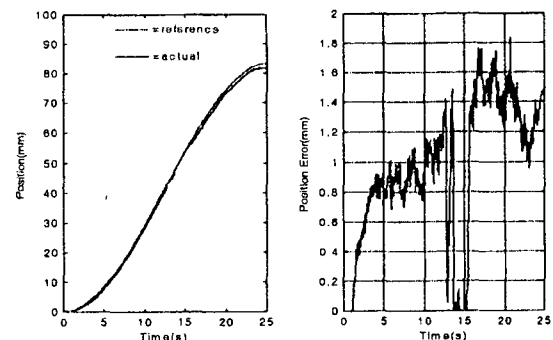
รูปที่ 5.35 แสดงตำแหน่งของแขนกล ขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 10 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบเอกซ์พลิชิต



รูปที่ 5.36 แสดงตำแหน่งของแขนกล ขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 10 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบอิมพลิชิต



รูปที่ 5.37 แสดงตำแหน่งของแขนกล ขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 15 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบเอกซ์พลิชิต



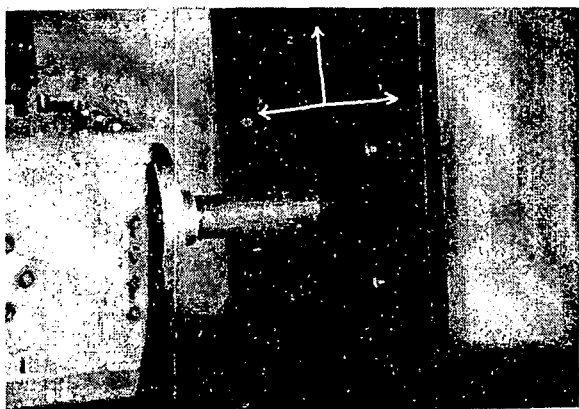
รูปที่ 5.38 แสดงตำแหน่งของแขนกล ขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 15 นิวตัน การควบคุมแรงเป็นแบบอิมพลิชิต

5.3 การทดลองควบคุมแรงกับหนึ่งแบนโดยควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแขนกล และควบคุมแรงในพื้นที่ระนาบ x - y หรือแกน 1, 2 ของแขนกล

การทดลองนี้เป็นการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง โดยควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 และควบคุมแรงในพื้นที่ระนาบ x - y หรือแกน 1, 2 ซึ่งต่างจาก

การทดลองก่อนหน้านี้ เนื่องจากแต่ละข้อต่อของแขนกลนั้น จะควบคุมแรงหรือควบคุมตำแหน่งเท่านั้น ตามรูปที่ 5.39 โดยที่แกน 1, 2 ของแขนกลจะควบคุมแรง ส่วนแกน 3 ของแขนกลจะควบคุมตำแหน่ง สำหรับการควบคุมแรงนั้น ใช้วิธีควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท

การทดลองเริ่มจากให้แขนกลอยู่ห่างจากวัตถุประมาณ 1 ซม. แล้วควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าไปกวดวัตถุเริ่มต้น ด้วยแรง 5 นิวตัน, 10 นิวตัน, 15 นิวตัน ตามลำดับ แล้ว แขนกลจะเริ่มเคลื่อนที่โดยที่แกนที่ 3 จะเคลื่อนที่ขึ้นตาม พื้นผิวโดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็นระยะทาง 80 มม. ส่วนแกน 1, 2 จะกดพื้นผิวด้วยแรงที่กำหนด โดยไม่เคลื่อนที่



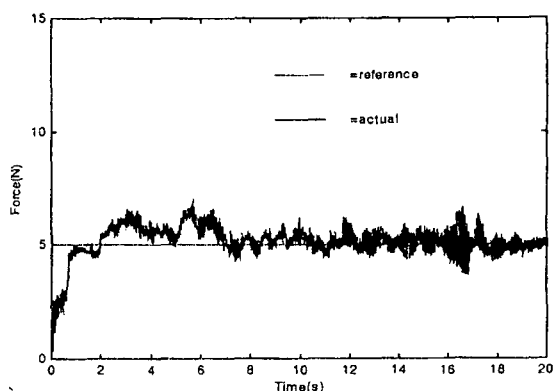
รูปที่ 5.39 แสดงแขนกลเคลื่อนที่บนผนังแบน โดยควบคุมตำแหน่ง ในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแขนกล และควบคุมแรงในพื้นที่ผิว ระนาบ x - y หรือแกน 1, 2 ของแขนกล

รูปที่ 5.40 เป็นการทดลองควบคุมแรงที่ปลายแขนกล กระทำกับผนังแบน โดยควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแขนกล และควบคุมแรงในพื้นที่ผิวระนาบ x - y หรือแกน 1, 2 ของแขนกล ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบ เอกซ์พลลิซิท ผลปรากฏว่า ผลตอบสนองของแรงที่ปลาย แขนกลกระทำกับผนังแบนนั้นค่อนข้างเรียบ ทั้งนี้เนื่องจาก แขนกลแกนที่ 1, 2 ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมแรงไม่ได้เคลื่อนที่ มีเพียงแกนที่ 3 ซึ่งควบคุมตำแหน่งที่เคลื่อนที่ สำหรับค่า ความผิดพลาดของแรงนั้นมีค่าประมาณไม่เกิน 2 นิวตัน

จากรูปที่ 5.41 เป็นผลตอบสนองของตำแหน่งปลาย แขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในแนวแกน Z บนผนัง แบนโดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็นระยะทาง 80 มม. ซึ่งพบว่า การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลค่อนข้างเรียบและมีค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยไม่ถึง 1 มม. ซึ่ง เนื่องมาจากการที่แขนกลไม่สั่นในขณะที่ควบคุม ทำให้ ตำแหน่งของปลายแขนกลค่อนข้างเรียบตามไปด้วยนั่นเอง

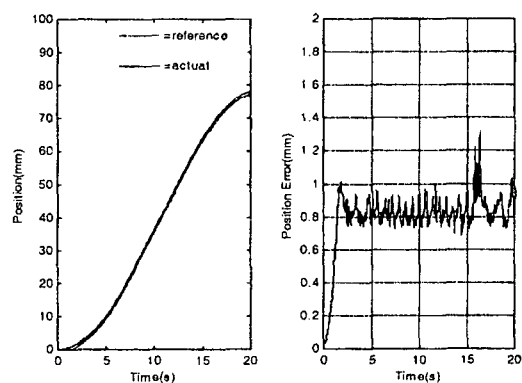
นั่นคือถ้าทำการควบคุมเพียงตำแหน่งหรือแรงเพียงอย่างเดียว ในแต่ละข้อต่อของแขนกล ผลตอบสนองที่ได้ออกมาค่อนข้าง เรียบกว่าแบบที่ต้องควบคุมทั้งแรงและตำแหน่งไปพร้อมๆกัน ในแต่ละข้อต่อของแขนกล

Force Response



รูปที่ 5.40 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่บนผนัง แบน ขนาดแรง 5 นิวตัน ควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแขนกล และควบคุมแรงในพื้นที่ผิวระนาบ x - y หรือแกน 1, 2 ของ แขนกล

Position Response



รูปที่ 5.41 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลบนผนังแบน มีแรงสัมผัส 5 นิวตัน โดยควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแขนกล และ ควบคุมแรงในพื้นที่ผิวระนาบ x - y หรือแกน 1, 2 ของแขนกล

6. สรุปผลการวิจัย

การทดลองเรื่องการควบคุมแบบไฮบริดด้วยแรงแบบอิม พลลิซิทสำหรับแขนกลนี้ ใช้หุ่นยนต์जूषा 2 เป็นหุ่นทดลอง โดย ที่ปลายหุ่นยนต์มีอุปกรณ์ตรวจวัดแรงติดอยู่ ส่วนตัวควบคุมนั้น ใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุม ซึ่งโปรแกรมควบคุมนั้นเขียน ขึ้นโดยใช้ภาษา C โดยมีความถี่ในการสุ่มข้อมูล 100 เฮิรตซ์ ซึ่งการทดลองนี้พยายามนำเอาการควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิท มาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพ เมื่อได้การควบคุมแรงแบบอิมพลลิ ซิทที่มีประสิทธิภาพแล้วก็นำมาเปรียบเทียบกับ การควบคุม แรงแบบเอกซ์พลลิซิทว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร โดยทดลอง

ให้แขนกลกดพร้อมกับเคลื่อนที่บนชิ้นงานชนิดและรูปร่างต่าง ๆ กัน

จากการทดลองนำการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตมาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพนั้น ได้ทำการทดลองโดยใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งดิงแบบออนไลน์มาเปรียบเทียบกับการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่ให้ค่าความแข็งดิงคงที่ เพื่อศึกษาความแตกต่าง ซึ่งผลการทดลองปรากฏว่า การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งดิงแบบออนไลน์ให้การตอบสนองของแรงที่เร็วกว่าการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่ให้ค่าความแข็งดิงคงที่ ส่วนการเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิตและการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตนั้น พบว่าในกรณีที่เป็นชิ้นงานที่มีผิวแข็งและต่อเนื่อง วิธีการควบคุมทั้ง 2 แบบให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน แต่ในกรณีที่ทำกับชิ้นงานที่มีความหยาบผิว, อ่อนตัวหรือรูปร่างไม่ต่อเนื่องนั้นให้ผลที่ต่างกัน โดยสามารถสรุปเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1. ปัญหาหลักของการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตคือ ปัญหาการหาค่าระยะที่สั่งให้แขนกลกดเพื่อให้ได้แรงตามที่ต้องการ ซึ่งจากการทดลองพบว่า การหาค่าความแข็งดิงแบบออนไลน์นั้น ค่าระยะที่สั่งให้แขนกลกดเพื่อให้ได้แรงตามที่ต้องการลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสมเร็วกว่าแบบที่ให้ค่าความแข็งดิงคงที่ ซึ่งทำให้แรงที่สัมผัสลู่เข้าสู่ค่าที่ต้องการเร็วกว่าด้วย
2. สำหรับชิ้นงานที่มีความอ่อนตัวซึ่งในการทดลอง ได้ใช้โฟมเป็นวัตถุให้แขนกลกด ผลปรากฏว่า การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิตและการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งดิงแบบออนไลน์ให้ผลต่างกัน โดยการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตให้ผลตอบสนองของแรงที่เร็วกว่า เนื่องจากระหว่างที่แขนกลกดลงในบนผิวชิ้นงานและเคลื่อนที่ไปตามผิวชิ้นงานนั้น ปลายแขนกลมีการเคลื่อนที่ในทิศตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน ซึ่งถ้าควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกล มีผลให้ผลตอบสนองแรงดีกว่าการควบคุมแรงที่กระทำกับปลายแขนกล
3. สำหรับการทดลองควบคุมผสมระหว่างแรงและตำแหน่งของแขนกลบนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยาบตัวนั้น ผลตอบสนองของแรงเมื่อควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิตและควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตให้ผลต่างกัน โดยการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตให้ผลตอบ

สนองของแรงที่เร็วกว่า เช่นเดียวกับการทดลองกับชิ้นงานที่มีความอ่อนตัว ซึ่งถ้าสังเกตที่ผนังแผ่นเหล็กระหว่างที่แขนกลเคลื่อนที่อยู่ นั้น พบว่าการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิตทำให้ผนังแผ่นเหล็กสั่นมากกว่าการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิต

4. สำหรับการทดลองควบคุมผสมระหว่างแรงและตำแหน่งของแขนกลบนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยาบตัว โดยค่าแรงที่กระทำมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได (Step Change) นั้น ผลตอบสนองของแรงเมื่อควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิตและควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตให้ผลต่างกัน โดยขณะที่แรงมีการเปลี่ยนแปลงนั้น ผลตอบสนองของแรงเมื่อควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตไม่เกิดโอเวอร์ชูตมาก เหมือนกับการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิต ซึ่งช่วงที่คำสั่งแรงมีการเปลี่ยนแปลงนั้นถ้าคำสั่งแรงมีค่าน้อยแล้ว การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิตมีผลให้ปลายแขนกลหลุดออกจากวัตถุได้ เนื่องจากระบบไวต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์

5. การควบคุมแบบอิมพลิชิตมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบต่ำกว่าการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิต ดังที่ได้จากการทดลองให้แขนกลกดและเคลื่อนที่บนชิ้นงานที่มีผิวแข็งแต่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง พบว่าขณะที่แขนกลเคลื่อนที่ไปบนผิวต่อเนื่อง ทั้งการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิตและการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตนั้นให้ผลเหมือนกัน แต่ขณะที่แขนกลเคลื่อนที่ไปพบกับช่วงที่รูปร่างวัตถุไม่ต่อเนื่อง ทิศทางของการควบคุมแรงและการควบคุมตำแหน่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทำให้แขนกลหลุดออกจากผิว ซึ่งการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิตนั้นทำให้แขนหลุดออกมาห่างจากผิวมาก และกลับเข้ากระแทกผิววัตถุด้วยความแรง ทำให้ระบบไม่เสถียรภาพ ในขณะที่การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตนั้น แขนกลหลุดออกจากผิวไม่มากนัก และกลับเข้าสัมผัสใหม่ด้วยความเร็วค่อนข้างคงที่ ทำให้ไม่เกิดโอเวอร์ชูตของแรงมากนัก ระบบจึงมีเสถียรภาพ

6. เมื่อทำการทดลองโดยแยกแกนอิสระ โดยให้แกนที่ 3 ของแขนกล หรือแกน Z ควบคุมตำแหน่ง ส่วนแกน 1, 2 ของแขนกล หรือแกน X, Y ควบคุมแรง ผลตอบสนองของแรงเร็วกว่าการควบคุมแรงและตำแหน่งในแนวแกน X, Y เนื่องจากแต่ละแกนนั้นควบคุมเพียงแค่แรงหรือไม่ก็ตำแหน่งเท่านั้น ซึ่งจากการทดลองนี้ทำให้สรุปได้ว่า การแยกแกนควบคุมตำแหน่งและควบคุมแรงออก

จากกันโดยเด็ดขาด ทำให้ผลตอบสนองของแรงที่แขนกลสัมผัสกับวัตถุดีกว่าการที่การควบคุมแรงและการควบคุมตำแหน่งอยู่ในแกนเดียวกัน

7. สำหรับการควบคุมตำแหน่งนั้นพบว่าถ้าชิ้นงานไม่มีการอ่อนตัวหรือหยุนตัว และวัตถุมีรูปร่างต่อเนื่องแล้ว การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิทและการควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิทให้ผลไม่ต่างกัน นั่นคือปลายแขนกลสามารถเคลื่อนที่ไปตามทิศทางที่ต้องการได้อย่างดี โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 3 มม. แต่ถ้าวัตถุที่แขนกลกดมีการอ่อนตัว, หยุนตัวมาก การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิทมีผลให้แขนกลกดวัตถุแล้วทำให้วัตถุสั่นมาก ทำให้แขนกลมีการสั่นในแนวตั้งฉากกับวัตถุมาก ซึ่งมีผลให้การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลในแนวสัมผัสกับวัตถุไม่เรียบตามไปด้วย ในขณะที่การควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิทบนวัตถุที่มีการอ่อนตัวหรือหยุนตัวนั้น วัตถุที่ถูกกดไม่มีการสั่นมากนัก ทำให้แขนกลมีการสั่นในแนวตั้งฉากกับวัตถุน้อย ซึ่งมีผลให้การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลในแนวสัมผัสกับวัตถุค่อนข้างเรียบตามไปด้วย

จากการทดลองเห็นได้ว่าข้อดีของการนำวิธีควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิท เมื่อเปรียบเทียบกับควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท ในการนำมาใช้กับการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งคือ ในกรณีที่วัตถุที่สัมผัสมีความอ่อนตัวนั้น ระบบจะมีผลตอบสนองของแรงและเสถียรภาพดีกว่าเมื่อพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และในความเป็นจริงแล้ว คำสั่งที่ใช้ควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมโดยทั่วไปเป็นคำสั่งของตำแหน่ง ดังนั้นวิธีการควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิทนี้ จึงนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่ายกว่าวิธีการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- 1) ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ, วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, การควบคุมแขนกลแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง, เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลครั้งที่ 11, 1997

ภาษาอังกฤษ

- 1) M. Raibert and J. Craig. Hybrid position/force control of manipulators. Journal of Dynamic

Systems, Measurement, and Control. Vol. 102, June 1981. : pp.126-133.

- 2) H. Hogan. Impedance Control; An Approach to Manipulation:Part I-Theory; Part II-Implementation; Part III- Applications. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. Vol. 107, March 1985. : pp.1-24
- 3) Seul Jung และ T.C. Hsia. On neural network application to robust impedance control of robots manipulators. in Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Vol.1,May 1995. : pp. 869-874
- 4) Luh, J.Y.S., Walker, M.W. and Paul, R.P.C..Resolved Acceleration Control of Mechanical Manipulations. I.E.E.E. Trans. Automatic Control,25,3(1980b)
- 5) Tsuneo Yoshikawa and Akiko Sudou. Dynamic Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators:On-Line Estimation of Unknown Constraint. I.E.E.E. Trans. On Robotics and automation. Vol. 9,April 1993.
- 6) Dragan M. Stokic and Miomir K. Vukobratovic. An adaptive hybrid control scheme for manipulation robots with implicit force control. I.E.E.E. International Conference on Advanced Robotics. Vol. 2 , 1991. :pp. 1505-1508
- 7) Paul, R.,and Shimano,B.. Compliance and Control. Joint Automatic Control Conference. San Francisco,1976.
- 8) John J. Craig. Introduction to Robotics mechanics and control. :Silma,Inc., 1989.