

แนวคิดกำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้สำหรับควบคุมการทำงาน
ของแขนกลนำ-แขนกลตามเพื่อทำงานขนาดเล็ก
Concept of a movable virtual wall for miniature tasks operation
of a master-slave manipulator arms

นวกอร์ ดิษริยะกุล, วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330.

ติดต่อ: โทรศัพท์: 0-2218-6448, โทรสาร: 0-2218-6437

E-mail: Nawakorn.D@student.chula.ac.th, viboon.s@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแขนกลนำ-ตามที่มีการสะท้อนกลับของแรงสำหรับการทำงานขนาดเล็ก โดยทำงานร่วมกับระบบกำแพงเสมือนที่สร้างขึ้นที่แขนกลนำ เพื่อเพิ่มความแม่นยำและป้องกันการออกนอกบริเวณทำงานที่กำหนด งานวิจัยนี้เป็นการหารูปแบบกำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้ โดยตำแหน่งของกำแพงเสมือนที่เคลื่อนที่ได้ดังกล่าวสามารถคาดการณ์ (Predict) ได้จากการกำหนดรูปแบบของการเคลื่อนที่ เช่น การเคลื่อนที่ที่ความเร็วคงที่ ณ ขณะนั้น และการเคลื่อนที่ในลักษณะแบบความเฉื่อย เป็นต้น เพื่อนำมาคำนวณหาตำแหน่งของกำแพงเสมือน ผลการทดลองเบื้องต้นนี้เป็นการสร้างศักยภาพในการพัฒนาระบบกำแพงเสมือนสำหรับใช้กับแขนกลสำหรับการทำงานขนาดเล็กได้

คำหลัก: แขนกลนำ-ตาม / กำแพงเสมือน / การสะท้อนกลับของแรง

Abstract

This research work is to develop a concept of movable virtual wall for miniature tasks operation of a master-slave manipulator arm with force reflection. The purposes are to improve accuracy of the operation and preventing over travelling beyond a desired boundary. The position of a movable virtual wall can be predicted from some motion models, such as constant velocity at a current time and inertial motion. The result of this primary development of a movable virtual wall shows the possibility of further development to improve miniature tasks operation.

Keywords: Master-Slave manipulator arm / Virtual wall / Force reflection

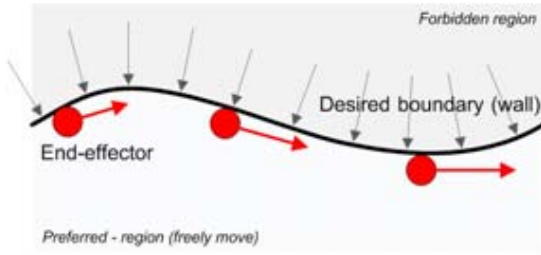
1. บทนำ

กำแพงเสมือนเป็นการสร้างกฎการควบคุมที่เชื่อมโยงการทำงานร่วมกันระหว่างคนและเครื่องจักร โดยระบบอุตสาหกรรมการผลิตมีการใช้กำแพงเสมือนเพื่อช่วยกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้อยู่ในขอบเขตในทางการทหารมีการวิจัยเพื่อใช้กำแพงเสมือนช่วยกำหนดระยะสำหรับการขุดดินเพื่อเก็บกู้วัตถุระเบิด และสำหรับระบบแขนกลนำและแขนกลตามที่มีการสะท้อนกลับของแรง กำแพงเสมือนสามารถทำให้ผู้ควบคุมที่ด้านแขนกลนำ (Master arm) ทราบได้ว่าผู้ควบคุมกำลังนำ

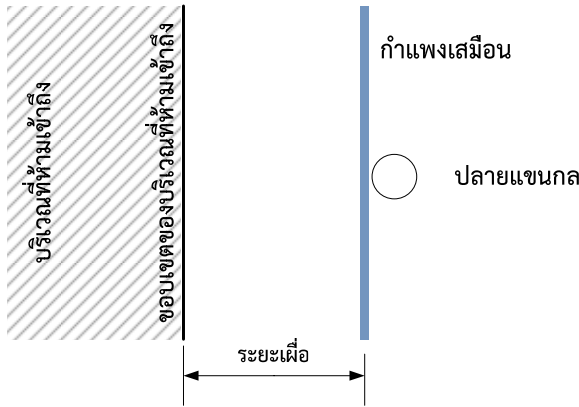
ปลายแขนหุ่นยนต์ออกนอกบริเวณที่กำหนดหรือไม่ผ่านแรงสะท้อนที่สร้างขึ้นด้านแขนกลนำ

กำแพงเสมือนที่ผ่านมากำหนดตำแหน่งของกำแพงเสมือนและขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึงเป็นตำแหน่งเดียวกันดังรูปที่ 1 ทำให้ในการทำงานจะเกิดการล้าแนวเข้าไปในบริเวณที่ห้ามเข้าถึง และทำให้เกิดความผิดพลาดในงานที่ต้องการความละเอียดมาก เช่น การผ่าตัด งานวิจัยนี้จึงเสนอแนวคิดการหารูปแบบของกำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้ โดยมีการคิดระยะเผื่อระหว่างกำแพงเสมือนและบริเวณที่ห้ามเข้าถึง เพื่อปรับ

ระยะของกำแพงเสมือนให้ทำงานก่อนถึงบริเวณที่ห้ามเข้าถึงจริงดังรูปที่ 2 โดยตำแหน่งของกำแพงเสมือนที่เคลื่อนที่ได้ดังกล่าวสามารถคาดการณ์ (Predict) โอเวอร์ชู้ตที่เกิดขึ้นได้จากการกำหนดรูปแบบของการเคลื่อนที่ เช่น การเคลื่อนที่ที่มีความเร็วคงที่ ณ ขณะนั้น และการเคลื่อนที่ในลักษณะแบบความเฉื่อย เป็นต้น เพื่อไม่ให้ปลายแขนกลเกิดการล้าไปนอกบริเวณที่กำหนด



รูปที่ 1 กำแพงเสมือน



รูปที่ 2 แนวคิดกำแพงเสมือนที่เคลื่อนที่ได้

2. กำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้

การกำหนดรูปแบบของการเคลื่อนที่เพื่อหาระยะเพื่อสำหรับโอเวอร์ชู้ตที่เกิดขึ้นมี 3 วิธี [5] คือ การเคลื่อนที่ที่มีความเร็วคงที่ การเคลื่อนที่ลักษณะความเฉื่อยของปลายแขนกล และการเคลื่อนที่โดยพิจารณาพลศาสตร์ของมือ

2.1 การเคลื่อนที่ที่มีความเร็วคงที่

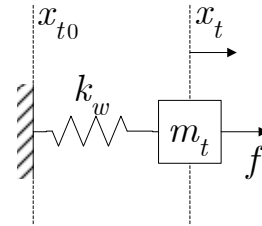
วิธีนี้เป็นการคาดการณ์ตำแหน่งโอเวอร์ชู้ตที่จะเกิดขึ้นเมื่อสมมติให้ผู้ควบคุมเคลื่อนที่ด้วยความเร็วในขณะนั้นแบบคงที่ ดังนั้นโอเวอร์ชู้ตที่เกิดขึ้นจะมีค่าดังสมการที่ (1)

$$x_{t,pre} = \dot{x}_t \Delta t \quad (1)$$

โดย Δt คือเวลาที่มนุษย์ใช้ในการตอบสนองต่อการสัมผัสมีค่า 0.12 วินาที [2]

2.2 การเคลื่อนที่ลักษณะความเฉื่อยของปลายแขนกล

พิจารณาว่าหากมีกำแพงเสมือนที่ตำแหน่งปัจจุบันของปลายแขนกล และมีแรงคงที่กระทำกับปลายแขนกล จะเกิดโอเวอร์ชู้ตเท่าใด โดยมี 2 ระบบ ตามลักษณะของกำแพงเสมือนที่กำหนด คือ กำแพงเสมือนแบบสปริงและกำแพงเสมือนแบบสปริงกับแดมป์ ดังระบบในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 3 แบบจำลองของระบบการเคลื่อนที่ลักษณะความเฉื่อยของปลายแขนกลแบบกำแพงสปริง

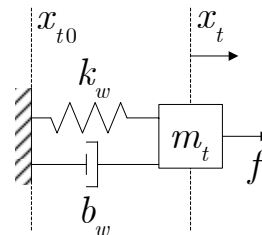
สมการของระบบในรูปที่ 3 เขียนได้ดังสมการที่ 2 และสามารถคำนวณหาโอเวอร์ชู้ตได้ดังสมการที่ 3

$$m_t \ddot{x}_t + k_w x_t = f \quad (2)$$

$$x_{t,pre} = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} + f/k_w \quad (3)$$

$$\text{โดย } \alpha = \sqrt{\frac{m_t}{k_w}} \dot{x}_{t0}$$

$$\beta = x_{t0} - f/k_w$$



รูปที่ 4 แบบจำลองของระบบการเคลื่อนที่ลักษณะความเฉื่อยของปลายแขนกลแบบกำแพงสปริงและแดมป์

สมการของระบบในรูปที่ 4 เขียนได้ดังสมการที่ 4 และสามารถคำนวณหาโอเวอร์ชู้ตได้ดังสมการที่ 5

$$m_t \ddot{x}_t + b_w \dot{x}_t + k_w x_t = f \quad (4)$$

$$x_{t,pre} = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} e^{-\frac{b_w}{2m_t} t_{max}} + \gamma \quad (5)$$

$$\text{โดย } \alpha = \frac{(2\dot{x}_{t0} m_t + b_w \beta)}{\sqrt{4m_t k_w - b_w^2}}$$

$$\beta = \frac{k_w x_{t0} - f}{k_w}$$

$$\gamma = \frac{f}{k_w}$$

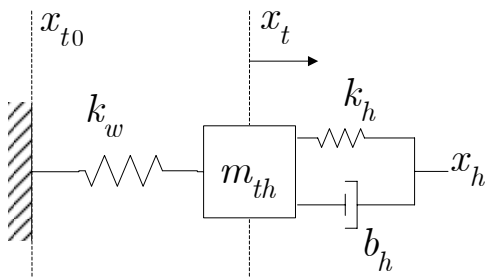
โดย m_t คือ มวลของปลายแขนกล, k_w คือ ค่าคงตัวสปริงของกำแพงเสมือน, b_w คือ แดมป์ของกำแพงเสมือน, f คือ แรงที่กระทำกับระบบ และ x_t คือ ตำแหน่งของปลายแขนกล โดยในทุกเวลาสุ่ม (Sampling Time) กำหนดให้ $x_{t0} = 0$

2.3 การเคลื่อนที่ลักษณะความเฉื่อยของปลายแขนกลและพลศาสตร์ของมือ

ในการเคลื่อนที่ของมือแรงที่แขนกระทำเป็นส่วน โดยตรงกับค่าคงตัวของแขน และส่วนต่างของตำแหน่งสมมูลเสมือนกับตำแหน่งจริงของแขน [5] และเขียนได้ดังสมการที่ 6

$$f = k_h (x_h - x_{actual}) \quad (6)$$

และ ได้วิธีนี้จะคล้ายกับวิธีที่ 2.2 แต่มีการนำพลศาสตร์ของมือมารวมเข้าในระบบด้วย สมมติให้ในแต่ละเวลาสุ่มเริ่มมีค่าคงที่ และมือกับปลายแขนกลเคลื่อนที่ไปด้วยกันดังนั้น $x_{actual} = x_t$, x_h หาจากสมการที่ 6 และ \dot{x}_h มีค่าเป็น 0 พิจารณา 2 ระบบ ตามลักษณะของกำแพงเสมือนที่กำหนด คือ กำแพงเสมือนแบบสปริงและกำแพงเสมือนแบบสปริงกับแดมป์ และเขียนแบบจำลองระบบดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ตามลำดับ



รูปที่ 5 แบบจำลองระบบการเคลื่อนที่ลักษณะความเฉื่อยของปลายแขนกลและพลศาสตร์ของมือแบบกำแพงสปริง

สมการของระบบในรูปที่ 5 เขียนได้ดังสมการที่ 7 และสามารถคำนวณหาโอเวอร์ชูตได้ดังสมการที่ 8

$$m_{th} \ddot{x}_t + b_h \dot{x}_t + k_{wh} x_t = k_h x_h + b_h \dot{x}_h \quad (7)$$

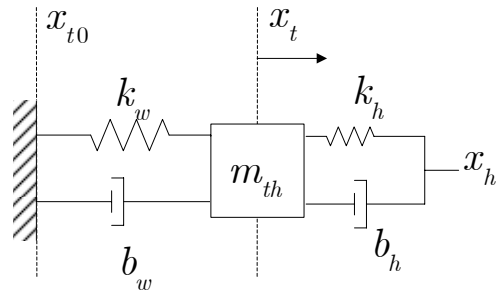
$$x_{t,pre} = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} e^{-\frac{b_h}{2m_{th}} t_{max}} + \gamma \quad (8)$$

โดย

$$\alpha = \frac{(2\dot{x}_{t0} m_{th} + b_h \beta)}{\sqrt{4m_{th} k_{wh} - b_h^2}}$$

$$\beta = \frac{k_w x_{t0} - f}{k_{wh}}$$

$$\gamma = \frac{k_h x_{t0} + f}{k_{wh}}$$



รูปที่ 6 แบบจำลองระบบการเคลื่อนที่ลักษณะความเฉื่อยของปลายแขนกลและพลศาสตร์ของมือแบบกำแพงสปริงและแดมป์

สมการของระบบในรูปที่ 6 เขียนได้ดังสมการที่ 9 และสามารถคำนวณหาโอเวอร์ชูตได้ดังสมการที่ 10

$$m_{th} \ddot{x}_t + b_{wh} \dot{x}_t + k_{wh} x_t = k_h x_h + b_h \dot{x}_h \quad (9)$$

$$x_{t,pre} = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} e^{-\frac{b_{wh}}{2m_{th}} t_{max}} + \gamma \quad (10)$$

โดย

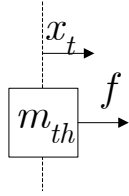
$$\alpha = \frac{(2\dot{x}_{t0} m_{th} + b_{wh} \beta)}{\sqrt{4m_{th} k_{wh} - b_{wh}^2}}$$

$$\beta = \frac{k_w x_{t0} - f}{k_{wh}}$$

$$\gamma = \frac{k_h x_{t0} + f}{k_{wh}}$$

โดย m_{th} คือ มวลของปลายแขนกลรวมกับมวลของมือ, m_h คือ มวลของมือมีค่า 0.0591 kg [5], k_{wh} คือ ผลรวมค่าคงตัวสปริงของกำแพงเสมือนและมือ, k_h คือ ค่าคงตัวสปริงของมือมีค่า 0.46072 N/mm [5], b_{wh} คือ ผลรวมแดมป์ของกำแพงเสมือนและมือ, b_h คือ แดมป์ของมือ 0.008 N.s/mm [6], x_t คือ ตำแหน่งของปลายแขนกล โดยในทุกเวลาสุ่ม (Sampling Time) กำหนดให้ $x_{t0} = 0$

ใน [5] แรงที่กระทำกับปลายแขนกล (f) ในขณะนั้นหาจากการวัดด้วยตัวตรวจรู้แรง แต่ในการทดลองนี้จะพิจารณาแบบจำลองดังรูปที่ 7 ซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ 11



รูปที่ 7 แบบจำลองของปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่อิสระ

$$f = m_{th} \ddot{x}_t \quad (11)$$

2.4 การปรับตำแหน่งของก้ำพวงเสมือน

ตำแหน่งของก้ำพวงเสมือนกำหนดตามเงื่อนไขดังสมการที่ 12

$$x_w = \begin{cases} x_t & , x_t + x_{t,pre} > x_f \\ x_f & , x_t + x_{t,pre} \leq x_f \end{cases} \quad (12)$$

2.5 แรงเนื่องจากก้ำพวงเสมือน

สามารถเขียนเป็นสมการที่ 13

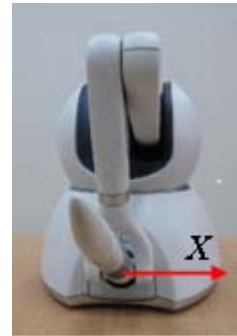
$$F = k_w \Delta x_t + b_w \dot{x}_t \quad (13)$$

โดย F คือ แรงที่ก้ำพวงเสมือนสร้างต้านการเคลื่อนที่, Δx_t คือ ส่วนต่างของตำแหน่งปลายแขนกลในขณะนั้น และตำแหน่งของก้ำพวงเสมือนในทิศทางตั้งฉากกับแนวก้ำพวงเสมือน และ \dot{x}_t คือ ความเร็วของปลายแขนกลในขณะนั้น

3. การทดลอง

การทดลองนี้เป็นการทดสอบการป้องกันการเข้าถึงพื้นที่ห้ามเข้าด้วยก้ำพวงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้เทียบกับก้ำพวงเสมือนแบบทั่วไป-ก้ำพวงเสมือนอยู่ตำแหน่งเดียวกับขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึง เนื่องจากการทำงานขนาดเล็กจะมีการเคลื่อนที่ค่อนข้างช้า ดังนั้นในการทดลองจึงให้ผู้ควบคุมจับปากกาของแขนกล Phantom Omni เคลื่อนที่ไปทางแกน X ในรูปที่ 8 อย่างช้าๆ และให้ผู้ควบคุมถอยปากกากลับเมื่อรู้สึกชนก้ำพวงเสมือน โดยทดลองกับก้ำพวงเสมือนทั้งหมด 10 รูปแบบ คือ 1 ก้ำพวงเสมือนสปริงทั่วไป 2 ก้ำพวงเสมือนสปริงเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ที่ความเร็วคงที่ 3 ก้ำพวงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ที่ลักษณะความเฉื่อยของปลายแขนกลชนิดสปริง 4 และ 5 ก้ำพวงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ที่ลักษณะความเฉื่อยของปลายแขนกลชนิดสปริงและแด้มป์ โดยมามีค่าแด้มป์

0.01 และ 0.05 N.s/mm ตามลำดับ 6 ก้ำพวงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ที่ลักษณะความเฉื่อยของปลายแขนกลและพลศาสตร์ของมือชนิดสปริง 7 และ 8 ก้ำพวงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ที่ลักษณะความเฉื่อยของปลายแขนกลและพลศาสตร์ของมือชนิดสปริงและแด้มป์ โดยมีค่าแด้มป์ 0.01 และ 0.05 N.s/mm ตามลำดับ ก้ำพวงเสมือนแบบที่ 9 และ 10 เป็นก้ำพวงเสมือนแบบข้อ 3 และ 6 ตามลำดับ แต่ในการคำนวณโอเวอร์ชูตมีการตรวจสอบเงื่อนไข คือ หาก t_{max} มีค่ามากกว่า 0.120 s ให้ใช้ $t_{max} = 0.120$ s โดยในการทดลองนี้ผู้ควบคุมทดลองก้ำพวงเสมือนรูปแบบละ 5 ครั้ง และทดลองกับค่า k_w 2 ค่า คือ $k_w = 2.0$ และ $k_w = 3.88711$ N/mm

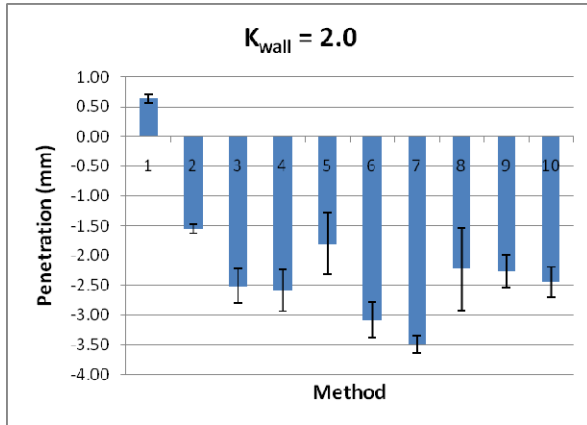


รูปที่ 8 แขนกลนำ Phantom Omni และการตั้งแกน X

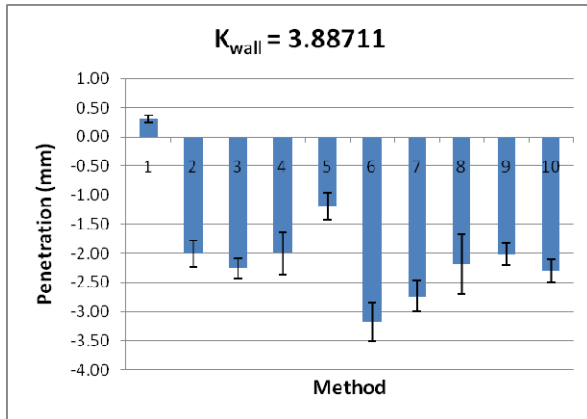
4. ผลการทดลอง

เมื่อทำการทดลองวัดตำแหน่งของปลายแขนกลที่เคลื่อนที่ทางแกน X มากที่สุด และนำมาเทียบกับตำแหน่งพื้นที่ห้ามเข้าถึง เมื่อกำหนดให้ $k_w = 2.0$ N/mm ก้ำพวงเสมือนแบบที่ 1 จะเกิดการล้ำแนวเข้าไปประมาณ 0.6 mm แบบที่ 2 ถึง 10 จะเหลือระยะประมาณ 1.5, 2.5, 2.6, 1.8, 3.1, 3.5, 2.2, 2.3 และ 2.4 mm ตามลำดับ ดังรูปที่ 9

เมื่อกำหนดให้ $k_w = 3.88711$ N/mm ก้ำพวงเสมือนแบบที่ 1 จะเกิดการล้ำแนวเข้าไปประมาณ 0.3 mm แบบที่ 2 ถึง 10 จะเหลือระยะประมาณ 2.0, 2.2, 2.0, 1.2, 3.2, 2.7, 2.2, 2.0 และ 2.3 mm ตามลำดับ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 9 ตำแหน่งของปลายแขนกลเมื่อใช้กำแพงเสมือนแบบต่างๆเทียบกับตำแหน่งของพื้นที่ห้ามเข้าถึง เมื่อ $k_w = 2.0$ N/mm



รูปที่ 10 ตำแหน่งของปลายแขนกลเมื่อใช้กำแพงเสมือนแบบต่างๆเทียบกับตำแหน่งของพื้นที่ห้ามเข้าถึง เมื่อ $k_w = 3.88711$ N/mm

5.สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่ากำแพงเสมือนสปริงทั่วไปจะเกิดการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่ห้ามเข้าถึงเสมอ และกำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้สามารถป้องกันการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่ห้ามเข้าถึงได้ การเพิ่มค่า k_w พบว่าส่วนใหญ่เคลื่อนที่เข้าใกล้พื้นที่ห้ามเข้าถึงได้มากขึ้น การเพิ่มแด้มปิ้งให้กับกำแพงเสมือนมีแนวโน้มลดระยะเพื่อได้ หากมีค่าน้อยจะใกล้เคียงกับระบบที่ไม่มีแด้มปิ้ง แต่เมื่อมากเกินไปจะเกิดการสั่นขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการศูนย์ระดับภูมิภาคเทคโนโลยีหุ่นยนต์ภายใต้โครงการเพิ่มศักยภาพด้านวิศวกรรมศาสตร์สาขา ในแผนพัฒนาวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (จุฬาฯ 100 ปี)

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Erdene Damdinsuren, Kazuhiro Kosuge, ZhiDong Wang, Yasuhisa Hirata , Virtual Elastic Wall Based Motion Control for Teleoperated Demining System, International Conference on Mechatronics & Automation, 2005.

[2] K. R. Boff and J. E. Lincoln, Engineering data compendium: Human perception and performance, volume 3, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1988.

[3] Viboon Sangveraphunsiri, Supachai Vongbunyong, Virtual Walls of the 6-DOF Master Slave System for Miniature Tasks, The 23rd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 4-7 November 2009, Chiangmai University.

[4] K. R. Boff and J. E. Lincoln, Engineering data compendium: Human perception and performance, volume 3, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1988.

[5] P. Marayong, Hye Sun Na, and A. M. Okamura. Virtual Fixture Control for Compliant Human-Machine Interfaces. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 4018 – 4024, 2007.

[6] P. Marayong, G. D. Hager, and A. M. Okamura. Effect of Hand Dynamics on Virtual Fixtures for Compliant Human-Machine Interfaces. Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems, pages 109 – 115, 2006.