

หุ่นยนต์โคบอทแบบขนาน Parallel Cobot

วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ และ ธนโชติ ชีพสุมล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพมหานคร 10330, โทร 0-2218-6610-1, โทรสาร 0-2252-8889, E-Mail : fmewwn@kankrow.eng.chula.ac.th

Wittaya Wannasuphopsrit and Tanachote Cheepsumol
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Bangkok 10330, Thailand, Tel (662)0-2218-6610-1, Fax : 0-2252-8889

บทคัดย่อ

โคบอท(Cobot) หรือ COlaborative roBOT เป็นแนวความคิดเชิงวิทยาการหุ่นยนต์ในการที่จะทำให้หุ่นยนต์สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้โดยปลอดภัย การทำงานของระบบหุ่นยนต์โดยทั่วไปจะเป็นการทำงานในระบบแอคทีฟ(Active System) เมื่อทำงานโดยตรงกับมนุษย์แล้วจะออกแรงกระทำกับผู้ใช้โดยตรงซึ่งจะทำให้เกิดอันตรายได้ โคบอทเป็นการทำงานในระบบพาสซีฟ(Passive System) การทำงานแบบนี้นอกจากจะทำให้เกิดความปลอดภัยในการทำงานแล้วยังนำความสามารถของทั้งมนุษย์และหุ่นยนต์มาใช้ร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย การทำงานดังกล่าว โคบอทต้องใช้อุปกรณ์การส่งถ่ายกำลังที่ปรับอัตราส่วนได้อย่างต่อเนื่องหรือ ซี วี ที (CVT-Continuously Variable Transmission) โดยต่อพ่วง ซี วี ที เข้ากับข้อต่อของโคบอท การต่อพ่วง ซี วี ที นั้นมี 2 ลักษณะคือ การต่อพ่วงแบบอนุกรมและแบบขนาน การต่อพ่วงแบบขนานนั้นมีข้อดีคือ สามารถจัดปัญหา Singularity ของ ซี วี ที ได้ และยังสามารถใส่กำลังผ่านเข้าไปให้กับโคบอทได้อีกด้วย งานวิจัยฉบับนี้จะเป็นการศึกษาถึงการทำงานของโคบอทแบบขนาน โดยอธิบายถึงตัวอย่างโคบอทที่ออกแบบไว้ การเชื่อมต่อโคบอทแบบขนาน เสาขการทำงานของโคบอท ระบบควบคุมโคบอทซึ่งเป็นการควบคุมโดยให้อินพุตของระบบแปรตามตำแหน่งของโคบอทซึ่งต่างจากระบบควบคุมทั่วไปที่อินพุตของระบบแปรตามเวลาและการใส่กำลังให้กับโคบอท

Abstract

Cobot or Collaborative Robot is a novel robotics concept designed for directly and safely cooperates with human operator. A Cobot is a passive system. (Also can make it active if wanted). Unlike a conventional robot that requires power interact directly with human, Cobots utilize CVTs (continuous variable transmissions) impose nonholonomic constraints on their joints. There are two methods of connecting CVTs: parallel and serial connections. Parallel connection eliminate singularity and enable

power to transmit to the system. In this paper we describe a parallel cobot, CVT connection, cobot framework and powering the cobot.

1.บทนำ (Introduction)

การทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมในปัจจุบันนั้น เป็นการทำงานในระบบแอคทีฟ(Active System) กล่าวคือหุ่นยนต์จะมีการออกแรงกระทำที่ปลายแขน ระบบดังกล่าวอาจจะไม่ปลอดภัยสำหรับมนุษย์ในกรณีที่ต้องทำงานร่วมกับหุ่นยนต์ ความปลอดภัยในการทำงานของมนุษย์ร่วมกับหุ่นยนต์นี้เองที่เป็นที่มาของแนวความคิดเกี่ยวกับโคบอท แนวความคิดนี้ได้นำเอาข้อได้เปรียบของมนุษย์เช่น การแก้ปัญหาเฉพาะหน้า การรู้จักการใช้ประสาทสัมผัสทั้ง 5 และข้อได้เปรียบของหุ่นยนต์เช่น ความแม่นยำหรือ ความคงที่ในการทำงาน มาผสมผสานกัน

โคบอทจะทำงานในระบบพาสซีฟ(Passive System) กล่าวคือโคบอทจะไม่สร้างแรงกระทำโดยตรงต่อมนุษย์ แต่จะทำเพียงกำหนดทิศทางของมนุษย์ไปสู่เป้าหมาย เช่นถ้าต้องการให้เกิดการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง โคบอทก็จะสร้างกำแพงเสมือน(Virtual wall) เป็นเส้นตรงขึ้นมา จะทำให้มนุษย์รู้สึกว่ามีกำแพงอยู่จริง จึงสามารถทำงานโดยการไถลไปตามกำแพงได้ ซึ่งจะทำให้เกิดทั้งความรวดเร็วและแม่นยำในการทำงาน

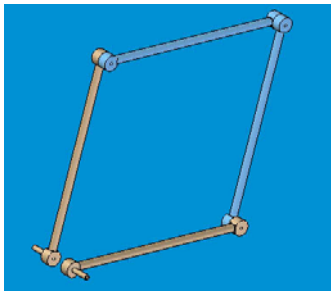
หลักการทำงานของโคบอทคือ การเปลี่ยนทิศทางของแรงของผู้ใช้ให้เป็นไปตามเส้นทางที่โคบอทออกแบบไว้ การควบคุมทิศทางดังกล่าวสามารถทำได้โดยการควบคุมอัตราส่วนของความเร็วในแต่ละแกนของโคบอท การทำงานของโคบอทสามารถทำได้ 2 แบบคือ 1.แบบอิสระ โคบอทจะยอมให้ผู้ใช้เคลื่อนโคบอทได้อย่างอิสระโดยการปรับเปลี่ยนการเคลื่อนที่ของโคบอทให้เป็นไปตามการเคลื่อนที่ของผู้ใช้ และ 2. แบบบังคับ โคบอทจะบังคับเส้นทางให้ผู้ใช้เคลื่อนที่ ถ้าผู้ใช้งานเคลื่อนก็จะต้องเคลื่อนไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้ หลักการทำงานโดยละเอียดสามารถดูได้ใน [1]

อุปกรณ์ที่ควบคุมอัตราส่วนความเร็วของโคบอทที่มีโครงสร้างแบบข้อต่อหมุนก็คือ CVT ตัว CVT จะทำหน้าที่ควบคุมอัตราส่วนความเร็วเชิงมุมของแต่ละข้อต่อ อัตราส่วนดังกล่าวสามารถแปลงเป็นอัตราส่วนของความเร็วเชิงเส้นที่ปลายแขนโคบอทได้ โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป สำหรับตัวอย่างและหลักการทำงานของ CVT นั้นสามารถหาดูได้ใน [2]

งานวิจัยชิ้นนี้ จะกล่าวถึงการเชื่อมต่อ CVT เข้ากับโคบอท โดยจะเน้นรายละเอียดในการเชื่อมต่อแบบขนาน การใส่กำลังให้กับโคบอท และการควบคุมโคบอทซึ่งต่างจากการควบคุมหุ่นยนต์ทั่วไป โดยที่การควบคุมโดยทั่วไป สัญญาณการควบคุมจะสัมพันธ์กับเวลา แต่การควบคุมโคบอทนั้น สัญญาณควบคุมจะสัมพันธ์กับตำแหน่งของโคบอท

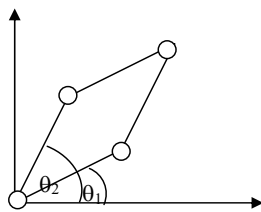
2. ลักษณะของโคบอทแบบขนาน

โคบอทที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้มีการออกแบบโดยมีลักษณะเป็น bar 4 bars โดยลักษณะการวางตัวของทั้ง 4 bar จะวางตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยมด้านขนานดังรูป



รูปที่ 1 ลักษณะของโคบอทที่ออกแบบไว้

การออกแบบดังกล่าวจะทำให้โคบอทสามารถเคลื่อนที่ได้ 2 มิติในระนาบตั้งฉากกับพื้นดิน



รูปที่ 2 Diagram ของหุ่น

สำหรับการออกแบบ CVT จะออกแบบโดยใช้หลักการเดียวกับ [2] แต่จะมีขนาดเล็กกว่า ลักษณะของ CVT ที่ออกแบบไว้เป็นไปดังรูป



รูปที่ 3 CVT ที่ออกแบบไว้เบื้องต้น

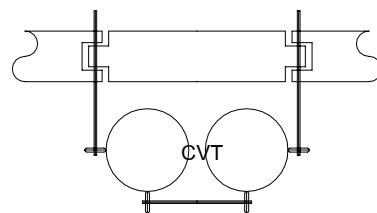
3. การเชื่อมต่อ CVT (CVT Connecting)

การต่อ CVT เข้ากับโคบอทนั้นสามารถทำได้ 2 ลักษณะคือ 1. แบบอนุกรม และ 2. แบบขนาน การต่อแบบอนุกรมนั้นเป็นการเชื่อมต่อ CVT เข้ากับข้อต่อที่ต้องการควบคุมอัตราส่วนต่อกันโดยตรงการต่อแบบนี้ เครือข่ายการต่อทำโดยการต่อ CVT แต่ละตัว เข้ากับข้อต่อที่ละคู่จนได้อัตราส่วนระหว่างความเร็วเชิงมุมของทุกข้อต่อ ดังนั้นถ้าโคบอทมีข้อต่ออยู่ n ข้อ ก็จะต้องใช้ CVT ทั้งหมด $n-1$ ตัว ส่วนการต่อแบบขนานนั้นจะมีข้อต่อกลางอยู่ โดยการต่อเชื่อมโครงข่ายของ CVT นั้นจะเป็นการต่อเชื่อมระหว่างข้อต่อแต่ละตัวกับข้อต่อกลาง ความเร็วของข้อต่อกลาง ω_0 จะสัมพันธ์กับความเร็วของแต่ละข้อต่อ ω_i ดังสมการ

$$\omega_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (1)$$

โดยที่ T_i คืออัตราส่วนความเร็วระหว่างข้อต่อแต่ละข้อกับข้อต่อกลางที่ CVT แต่ละตัวสร้างขึ้นมา

ในกรณีการต่อเครือข่ายแบบขนานนั้นจำนวน CVT ที่ใช้กับข้อต่อ n ข้อ จะมีจำนวน n จำนวน ซึ่งจะมากกว่าในกรณีการต่อแบบอนุกรมอยู่ 1 ตัว ข้อดีของการต่อเครือข่ายแบบขนานคือ เป็นการกำจัด singularities ของ CVT แต่ละตัว กล่าวคือในขณะที่ต้องการให้อัตราส่วนความเร็วของ 2 ข้อต่อเข้าใกล้กันนั้น CVT ไม่สามารถสร้างอัตราส่วนขนาดดังกล่าวได้ การใช้ข้อต่อกลางจะไม่ทำให้เกิดอัตราส่วนดังกล่าว[4] จึงป้องกันการเกิดปัญหา singularity ได้ นอกจากนี้ข้อดีของการต่อเครือข่ายแบบขนานอีกอย่างคือทำให้ใส่กำลังให้กับโคบอทได้ด้วย



รูปที่ 4 การต่อ CVT 2 ตัวแบบขนาน

4. กรอบการทำงานของโคบอท (Cobot's Framework)

ในการควบคุมโคบอทนั้นจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ไปสู่เลขต่าง ๆ เลขที่เกี่ยวกับการทำงานของโคบอทแบ่งได้เป็น 4 ประเภทคือ 1.Configuration space (C_T) บอกถึงตำแหน่งของปลายแขนโคบอท 2.Joint Space (C_J) บอกถึงตำแหน่งของแต่ละข้อต่อของโคบอท 3.Coupling Space ($\sum_i$)บอกถึงความสัมพันธ์ของตำแหน่งของข้อต่อ 2 ข้อต่อซึ่งคำนวณพื้นที่ของพื้นที่สัมพันธ์กันโดยผ่านกลไกของ CVT และ 4.Steering Space (Φ)บอกถึงมุมที่ CVT ต้อง Steer ไป รายละเอียดของแต่ละ space เป็นดังนี้

4.1 Configuration Space (C_T)

เช่นเดียวกับระบบหุ่นยนต์ทั่วไป C_T ก็คือเซตของการเคลื่อนที่ของปลายแขนของโคบอทนั่นเอง โดยถ้าเป็นการเคลื่อนที่ของโคบอทที่ออกแบบไว้ใน 2 มิติ อาจแทนเวกเตอร์การเคลื่อนที่ได้โดยเวกเตอร์ $R = [x \ y]^T$ เวกเตอร์ที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ซึ่งบอกถึงทิศทางความเร็วของ R คือ $\vec{T}$ และเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ซึ่งจะบอกถึงความโค้งของ R คือ $\kappa\vec{N}$ จะเห็นได้ว่าหลักการควบคุมโคบอทก็คือการควบคุมเวกเตอร์ $\vec{T}$ ให้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้นั่นเอง

4.2 Joint Space (C_J)

C_J คือเซตของการเคลื่อนที่ที่บอกลักษณะการเคลื่อนที่ของข้อต่อแต่ละข้อต่อซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวโคบอทเอง ถ้าเป็นโคบอทที่ออกแบบไว้จะได้ว่าเวกเตอร์การเคลื่อนที่ใน C_J คือ $q = [\theta_1 \ \theta_2]^T$ ความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์การเคลื่อนที่ใน C_J, q กับ เวกเตอร์การเคลื่อนที่ใน C_T, R ดังนี้

$$q = L(R) \quad (2)$$

โดยที่ L ก็คือ Inverse Kinematics นั่นเอง

เวกเตอร์สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ใน $C_J, \vec{T}_J$ และเวกเตอร์ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ใน $C_J, \kappa_J\vec{N}_J$ มีความสัมพันธ์กับ $\vec{T}$ และ $\kappa\vec{N}$ ดังสมการ

$$T_J = \frac{JT}{|JT|} \quad (3)$$

$$\kappa_J N_J = \frac{[I - T_J T_J^T]}{|JT|^2} [T^T H_{ii} T + J \kappa N] \quad (4)$$

โดยที่ $J = \frac{\partial L}{\partial R}$ คือ Jacobian Matrix นั่นเอง และ

$H_{ii} = \frac{\partial J_{(i,k)}}{\partial R}$ คือ Hessian Matrix นั่นเอง

4.3 Coupling Space (Σ_i)

Σ_i เป็นเซตการทำงาน 2 มิติที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของข้อต่อ 2 ข้อต่อ นั่นคือเป็นการมอง C_J ให้เป็น 2 มิติที่ละคู่ นั่นเอง จะเห็นได้ว่า Σ_i เป็นเซตการทำงานที่ให้ค่าอัตราส่วนระหว่างความเร็วเชิงมุมของแต่ละข้อต่อเพื่อไปใช้ควบคุมการทำงานของ CVT นั่นเอง เวกเตอร์การเคลื่อนที่ใน Σ_i, r_i สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์กับ q ได้ดังนี้

$$r_i = M_i(q) \quad (5)$$

โดยความสัมพันธ์ M ในที่นี้จะเพียงการเขียน q ให้เป็นคู่ๆ ออกมาที่ละคู่ๆ นั่นเอง แต่ในกรณีที่มีการข้อต่อเชื่อมกับ CVT มีการทดรอบเกิดขึ้น จะต้องมีการอัตราทดคูณเข้ากับข้อต่อที่ทำการทดรอบด้วย

เวกเตอร์สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ใน $\Sigma_i, \vec{r}_i$ และเวกเตอร์ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ใน $\Sigma_i, \kappa_i\vec{n}_i$ มีความสัมพันธ์กับ $\vec{T}_J$ และ $\kappa_J\vec{N}_J$ ดังสมการ

$$t_i = \frac{D_i T_J}{|D_i T_J|} \quad (6)$$

$$\kappa_i n_i = \frac{[I - t_i t_i^T]}{|D_i T_J|^2} [D_i \kappa_J N_J] \quad (7)$$

$$\text{โดยที่ } D_i = \frac{\partial M_i}{\partial q}$$

ในกรณีการต่อแบบขนานนั้นจะเห็นได้ว่าสมาชิกหนึ่งใน r_i จะเป็นตำแหน่งของข้อต่อกลางซึ่งดูเหมือนว่าจะไม่เป็นการจับคู่ระหว่างสมาชิกใน C_J แต่ถ้าดูจากสมการ (1) จะทำให้ทราบได้ว่าตำแหน่งของข้อต่อกลางนี้มีความสัมพันธ์กับผลรวมของตำแหน่งของข้อต่อทุกข้อต่อ

4.4 Steering Space (Φ)

Φ_i เป็นเซตการทำงาน 1 มิติที่บอกถึงตำแหน่งของมุมที่ CVT จะต้องปรับเพื่อให้การเคลื่อนที่ในเซตต่างๆเป็นไปตามที่กำหนด ความสัมพันธ์ระหว่าง Φ_i กับ Σ_i จะขึ้นอยู่กับลักษณะของตัว CVT ในกรณีของ CVT แบบหมุนที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะได้ว่าค่าอัตราส่วนความเร็วที่ CVT สร้างออกมา[4]คือ

$$T(\Phi) = \frac{\omega_{2i}}{\omega_{1i}} = \frac{\sin(\Phi) - \sqrt{2} \cos(\Phi)}{\sin(\Phi) + \sqrt{2} \cos(\Phi)} \quad (8)$$

จะได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Φ_i กับ Σ_i หาได้ดังนี้

$$\vec{r}_i = \begin{bmatrix} \frac{\sin(\Phi_i) - \sqrt{2} \cos(\Phi_i)}{\sqrt{(2 + 2 \cos^2(\Phi_i))}} \\ \frac{\sin(\Phi_i) + \sqrt{2} \cos(\Phi_i)}{\sqrt{(2 + 2 \cos^2(\Phi_i))}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{1i} \\ t_{2i} \end{bmatrix} \quad (9)$$

สำหรับการต่อแบบขนานนั้น จะเกิดปัญหาอยู่อย่างหนึ่งคือการที่มีการใช้ CVT เกินความจำเป็นมา 1 ตัว ซึ่งจะทำให้มีสมการ constraint เกินมา 1 สมการ วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวทำได้โดยการกำหนดค่าอัตราส่วนของ CVT ขึ้นมา 1 ค่า จากนั้นจะสามารถทำการแก้สมการหาอัตราส่วนของ CVT ที่เหลือได้

เซตการทำงานที่ได้กล่าวถึงนี้เป็นเซตการทำงานสำหรับกรณีทั่วไป อย่างไรก็ตามอาจมีโคบอทบางลักษณะที่เซตการทำงานซ้ำกัน เช่นในกรณีที่โคบอทมีลักษณะเป็น x-y Table จะพบว่า C_J และ C_T เป็นเซตเดียวกัน การหาการเคลื่อนที่ในเซตต่างๆจึงลดลง

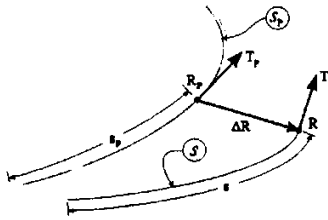
ในการแปลงจาก Φ ไปสู่ C_T จะเป็น Forward Kinematicธรรมดาซึ่งจะสามารถหาผลการแปลงในรูปทั่วไปได้ในกรณีที่โคบอทมี

ลักษณะโครงสร้างแบบอนุกรมเช่นโคบอทที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังนั้นในส่วนนี้จึงไม่ขอกล่าวถึงมากนัก

เมื่อหาการเคลื่อนที่ในสเปซการทำงานต่างๆได้แล้ว จะสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของโคบอท โดยการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ของ CVT ได้

5.การควบคุมโคบอท (Cobot Control)

เนื่องจากระบบการทำงานของโคบอทเป็นแบบไม่เชิงเส้น ดังนั้นการควบคุมจะใช้วิธี Input-Output Linearizations ในการควบคุม แต่ Parameters ที่ใช้ในการควบคุมจะขึ้นอยู่กับตำแหน่ง ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา รายละเอียดในการควบคุมเป็นดังนี้



รูปที่ 5 เส้นทางเคลื่อนที่ของโคบอทที่มาจาก [3]

ในการควบคุมจะต้องมีเส้นทางที่กำหนดไว้ซึ่งก็คือ S_p ดังรูป เส้นทางเคลื่อนที่ของโคบอทคือ S ดังนั้นเป้าหมายการควบคุมก็คือ ทำให้ $S \equiv S_p$ นั่นเอง

ในการเคลื่อนที่ขณะใดๆ โคบอทจะเคลื่อนที่อยู่บนเส้นทาง S เป็นระยะ s โดยมีเวกเตอร์สัมผัสและตั้งฉากคือ $\vec{T}$ และ $\kappa \vec{N}$ ตามลำดับ ในเส้นทาง S_p เส้นทางที่สัมผัสกับ s คือ s_p ซึ่งไม่สามารถวัดได้ แต่จะหาได้จากสมการการควบคุม เมื่อทราบค่าของ s_p ก็จะสามารถหาเวกเตอร์การเคลื่อนที่สัมผัสบน S_p , R_p และเวกเตอร์สัมผัสและตั้งฉาก $\vec{T}_p$ และ $\kappa_p \vec{N}_p$ ได้ เมื่อทราบเวกเตอร์การเคลื่อนที่บน S_p ก็สามารถปรับเวกเตอร์การเคลื่อนที่บน S ให้เคลื่อนเข้าหา S_p จน $S \equiv S_p$ ได้ สมการการควบคุมเป็นดังนี้

กำหนดให้ State ของระบบคือ เวกเตอร์ความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ ดังนี้

$$X = \begin{bmatrix} R(s) - R_p(s_p) \\ R'(s) - R'_p(s_p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta R \\ \Delta R' \end{bmatrix} \quad (10)$$

และกำหนดให้ Output ของระบบคือความผิดพลาดของการเคลื่อนที่

$$Y = \Delta R \quad (11)$$

จะสามารถหาพลวัตของระบบได้ดังนี้

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} T(s) - T_p(s_p)s'_p \\ \kappa N - s''_p T_p(s_p) - (s'_p)^2 \kappa_p N_p(s_p) \end{bmatrix} \quad (12)$$

โดยวิธี Feedback Linearization จะได้ว่า Control Law ของระบบเป็นดังนี้

$$U = M^{-1}(v - b) \quad (13)$$

$$\text{โดยที่} \quad M = (I - TT^T - T_p T_p^T) \quad (14)$$

$$\text{และ} \quad b = -(s''_p)^2 \kappa_p N_p \quad (15)$$

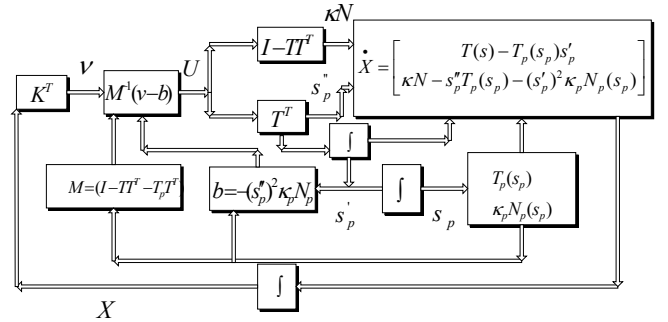
จะเห็นได้ว่า U ออกแบบมาเพื่อเปลี่ยนผลของความไม่เชิงเส้นของพลวัตให้เป็นเชิงเส้น จากนั้น V จึงทำหน้าที่ควบคุมระบบที่เปลี่ยนเป็นเชิงเส้นแล้วให้ Output หรือความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เข้าสู่ 0 นั่นเอง

จาก Control Law ที่ออกแบบไว้จะได้ว่า U สามารถแยกเป็น 2 แนว คือแนวขนานกับ $\vec{T}$ และแนวตั้งฉากกับ $\vec{T}$ ได้ดังสมการ

$$\text{แนวขนาน} \quad s''_p = T^T U \quad (16)$$

$$\text{แนวตั้งฉาก} \quad \kappa N = (I - TT^T) U \quad (17)$$

จากสมการ (16) จะสามารถหา s_p ได้ซึ่งจะทำให้หาค่าไปใช้ต่อได้ โดยสรุปแล้วสามารถเขียนเป็น Block Diagram สำหรับการควบคุมได้ดังนี้



รูปที่ 6 Block Diagram สำหรับการควบคุมโคบอท

6.การใส่กำลังให้กับโคบอท (Powering Cobot)

ในกรณีที่เป็นการต่อโครงข่ายแบบขนานนั้น จะสามารถใส่กำลังให้กับข้อต่อกลางได้ ขณะที่ไม่ได้ใส่กำลังนั้น ข้อต่อกลางจะหมุนอิสระ โดยความเร็วของข้อต่อกลางคือ[5]

$$\omega_0 = \frac{T^T J(R)u}{T^T T} \quad (18)$$

โดยที่ u คือขนาดของความเร็วที่ปลายของโคบอทซึ่งเป็นความเร็วที่มนุษย์สร้างขึ้นมาเอง T คือเวกเตอร์ของ Transmission ratio ของแต่ละ CVT หรือเท่ากับ $[T_1 \ T_2]^T$ ในกรณีโคบอทในงานวิจัยนี้

ในกรณีที่ใส่กำลังให้กับข้อต่อกลางนั้น ข้อต่อกลางจะมีทั้งกำลังและความเร็วเกิดขึ้น ความเร็วนี้จะไม่ตรงกับความเร็วในสมการ (18) อีกต่อไป ซึ่งจะทำให้ความเร็วที่ปลายโคบอทนั้นไม่ใช่ความเร็วที่มนุษย์สร้างแต่จะมีความเร็วดังนี้

$$V_{xyz} = J^{-1}(R) \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} \omega_0 \quad (19)$$

และแรงที่ปลายโคบอทจะไม่เป็นไปตามที่ผู้ใช้ออกแบบ แต่จะเป็นไปตามสมการดังนี้

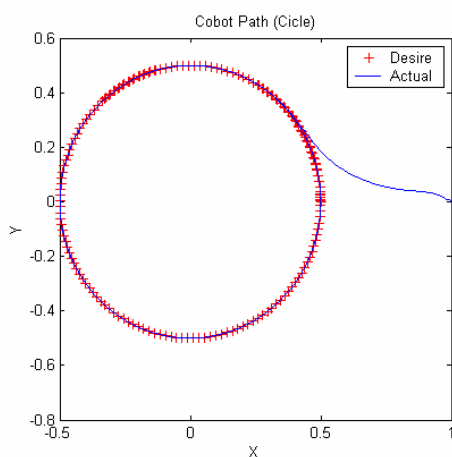
$$F_{xy} = J^T \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} \\ \frac{1}{T_2} \end{bmatrix} \tau_0 \quad (20)$$

F_{xy} คือแรงที่ปลายแขนของโคบอทและ τ_0 เป็นแรงบิดที่ข้อต่อกลางสร้างขึ้นมา

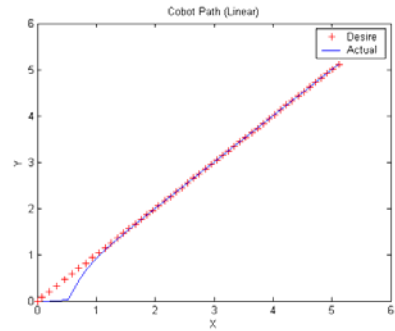
จะเห็นได้ว่าการใส่กำลังให้กับโคบอทในทิศทางการเคลื่อนที่เท่านั้น แต่ในทิศทางตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ยังคงความเป็น *passive* อยู่ การใส่กำลังก็มีข้อดีคือสามารถเพิ่มแรงซึ่งจะช่วยเสริมการทำงานของมนุษย์ให้ไม่ต้องออกแรงมาก ช่วยลดความเสี่ยงความเสียหาย ความเร่งและความหน่วงทรงมวล นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของโคบอทได้อีกด้วย งานวิจัยนี้ได้นำข้อได้เปรียบดังกล่าวมาใช้ในการชดเชยแรงโน้มถ่วงของระบบซึ่งจากแบบที่ออกแบบไว้จะเห็นได้ว่าโคบอทจะต้องมีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ดังนั้นผู้ใช้จะต้องรับภาระของแรงโน้มถ่วงจากน้ำหนักที่โคบอทรับไว้ การใส่กำลังจะทำให้ผู้ใช้สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นโดยไม่ต้องคำนึงถึงผลของน้ำหนัก นอกจากนี้ในกรณีที่ไม่มีการเคลื่อนที่ โคบอทยังสามารถตั้งอยู่ในรูปแบบเดิมได้อีกด้วย

7. ผลการทดลอง (Simulating Result)

ในส่วนนี้จะเป็นการนำเสนอผลการทดลอง โดยการจำลองทางเดินของโคบอท 2 แบบ คือ วงกลมและเส้นตรงทำมุม 45 องศา กับแนวระนาบ รูปที่ 7 และ 8 นำเสนอเส้นทางเดินของโคบอทแบบวงกลมและแบบเส้นตรงตามลำดับ โดยกำหนดให้มีความผิดพลาดของตำแหน่งในตอนเริ่มต้น จากนั้นจึงทำการควบคุมให้โคบอทวิ่งเข้าสู่เส้นทางที่ออกแบบไว้ จากรูปทั้ง 2 จะเห็นได้ว่าเส้นทางเดินของโคบอทซึ่งแสดงด้วยเส้นทึบจะวิ่งเข้าหาเส้นทางที่ออกแบบไว้ซึ่งแสดงเครื่องหมาย +

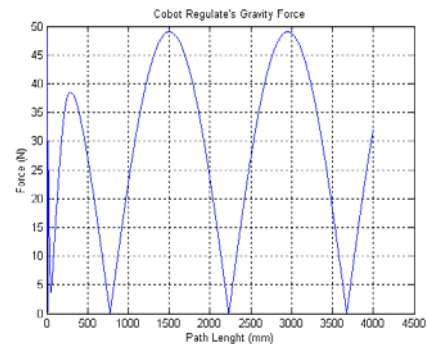


รูปที่ 7 เส้นทางเดินของโคบอทแบบวงกลม



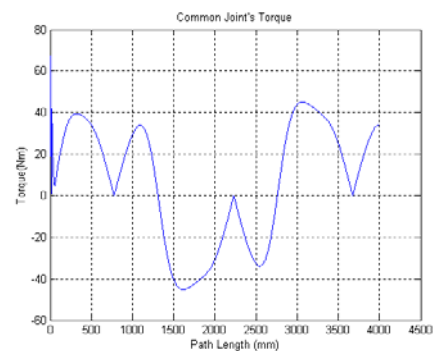
รูปที่ 8 เส้นทางเดินของโคบอทแบบเส้นตรง

ในการทำงานของโคบอทนั้น โคบอทจะต้านทานแรงที่กระทำในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ ในกรณีที่มีแรงกระทำในแนวนอนกับการเคลื่อนที่ มนุษย์จะต้องแบกรับภาระนั้นไว้ ดังเช่นในรูปที่ 9 แสดง ภาระที่มนุษย์ต้องรับไว้เนื่องจากน้ำหนัก โดยกำหนดให้ภาระดังกล่าวมีค่าสูงสุด 5 กิโลกรัมและการเคลื่อนที่เป็นแบบสถิต เส้นทางที่เคลื่อนที่เป็นดังรูปที่ 7 จะเห็นว่าเมื่อตำแหน่งของโคบอท อยู่ด้านบนสุดและล่างสุดของวงกลม มนุษย์จะไม่ต้องรับภาระจากแรงโน้มถ่วงเนื่องจากมีการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับแรงโน้มถ่วง และในตำแหน่งอื่นๆ ภาระดังกล่าวจะมีค่าเปลี่ยนไปตามทิศทางการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูป



รูปที่ 9 แรงโน้มถ่วงที่มนุษย์ต้องรับภาระไว้ในกรณีการเคลื่อนที่แบบวงกลม

รูปที่ 10 แสดงค่าแรงบิดที่ข้อต่อกลางต้องกระทำเพื่อให้ภาระในรูปที่ 9 เป็นมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 10 แรงบิดที่ข้อต่อกลางบิดเพื่อชดเชยแรงโน้มถ่วงที่มนุษย์ต้องรับภาระ

8.สรุป (Conclude)

งานวิจัยชิ้นนี้ได้กล่าวถึงการเชื่อมต่อ CVT เข้ากับโคบอท จำนวน CVT ที่ใช้ในการเชื่อมต่อทั้งในแบบขนาน การใส่กำลังให้กับโคบอท นอกจากนี้ยังได้อธิบายวิธีการควบคุมโคบอทซึ่งเป็นแบบไม่เชิงเส้นแปรตามค่าตำแหน่งไม่ใช่เวลาและในวงรอบการควบคุมยังต้องหาค่าความยาวของเส้นทางที่กำหนดไว้ s_p ไปพร้อมๆกันอีกด้วย โดยก่อนหน้านี้ก็ได้กล่าวถึงการแปลงการเคลื่อนที่ไปสู่เลขต่างๆเพื่อที่จะสามารถควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของโคบอทให้ปลายโคบอทเคลื่อนที่ตามที่ต้องการได้

9.เอกสารอ้างอิง (Reference)

- [1] วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ และ ธนโชติ ชีพสุมล “ ,Cobot แบบแขนกล” ,การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15 พค.2544
- [2] วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ และ ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข “ ,การออกแบบและควบคุม ISVT” ,การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15 พค.2544
- [3] R. B. Gilliespie, .J.E. Colgate, M.A. Peshkin, “A General Framework for Cobot Control,” IEEE Trans. Robot. Automat., Vol.17, pp.391-401, Aug. 2001.
- [4] R. B. Gilliespie, .J.E. Colgate, W. Wannasuphoprasit, C. Moore, J. Santos-Munne, A. Lorenz, P. Akella, M.A. Peshkin, “Cobot architecture,” IEEE Trans. Robot. Automat., Vol.17, pp.377-391, Aug. 2001.
- [5] J.E. Colgate, C. Moore, M.A. Peshkin, “A Three Revolute Cobot Using CVTs in Parallel,” ASME Preceeding of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition
- [6] J. J. Slotine and W. Li ,”Applied Nonlinear Control” ,Prentice Hall ,1991