การออกแบบและควบคุม ISVT

Infinitely Stepless Variable Transmission

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

Witaya Wannasuphoprasit and Sirisak Sirikasemsuk
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Bangkok 10330, Thailand, Tel : (662)0-2218-6610-1, Fax : 0-2252-8889

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันระบบทางกล (เช่น หุ่นยนต์อุตสาหกรรม) ได้มีการนำระบบส่งถ่ายกำลัง (transmission) มาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ อย่างมาก แต่อัตราทดที่ได้จากระบบส่งถ่ายกำลัง ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนั้นจะมีข้อจำกัดในด้านของอัตราทด (transmission ratio) เป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น อัตราทดคงที่เช่นเกียร์ทดในเครื่องจักร หรืออัตราทดปรับได้แบบขั้นบันไดในเกียร์รถยนต์ และอัตราทดปรับค่าได้อย่างต่อเนื่องเช่น belt-drive CVT (*Continuous Variable Transmission*) แต่อัตราทดอยู่ในช่วงที่จำกัด ในบทความนี้ขอนำเสนอการศึกษา ออกแบบ พัฒนา และควบคุม *ISVT: Infinitely Stepless Variable Transmission* ซึ่งเป็นระบบถ่ายกำลังที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราทดได้อย่างต่อเนื่องและมีช่วงอัตราทดจาก $-\infty$ ถึง ∞ ISVT นั้นเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการทำงานวิจัยขั้นสูงที่จะทำต่อเนื่องจากผลงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย Haptic Interface, Passive Robots, รวมถึงการทำงานของมนุษย์กับหุ่นยนต์.

Abstract

Transmissions are necessary elements in mechanical systems such as robots. A transmission ratio is selected to optimize power transfer efficiency. Most of transmissions have a fix transmission ratio. Sometimes we do need to optimized power transfer for several conditions. An adjustable step-ratio transmission such as car transmissions can be used for that purpose. In this work we design and develop a transmission that can adjust its ratio continuously from $-\infty$ ถึง ∞ called *ISVT: Infinitely Stepless Variable Transmission*. The ISVT is an essential element in a novel class of human-robot interaction devices called *Cobot: Collaborative Robot*.

1. บทนำ

ระบบส่งกำลังในปัจจุบันเช่นระบบส่งกำลังในรถยนต์หรือในอุปกรณ์ทางกล โดยมากจะมีอัตราทดคงที่ค่าหนึ่ง แต่การใช้งานบางอย่างต้องการอัตราทดที่มีมากกว่าหนึ่งค่า ทำให้เกิดระบบส่งกำลังแบบปรับเปลี่ยนค่าอัตราทดได้ เช่นระบบเกียร์ในรถยนต์ แต่การปรับเปลี่ยนอัตราทดก็ยังเป็นแบบขั้นบันได (เกียร์หนึ่งไปเกียร์สองเป็นต้น) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งถ่ายกำลังจึงได้มีการพัฒนาระบบส่งกำลังที่มีการปรับอัตราทดแบบต่อเนื่องขึ้น

ในงานวิจัยชิ้นนี้ เป็นการออกแบบ และพัฒนาระบบส่งกำลังแบบปรับอัตราทดต่อเนื่องโดยมีช่วงอัตราทดจาก $-\infty$ ถึง ∞ ที่เรียกว่า *ISVT: Infinitely Stepless Variable Transmission* ซึ่งใช้หลักการของแรงเสียดทานซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

ในส่วนแรกจะพูดถึงระบบส่งกำลังแบบต่อเนื่องแบบอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นหลักการทำงาน จากนั้นจึงเป็นการอธิบายถึงหลักการทำงานของ *ISVT* แบบต่างๆ

ในหัวข้อที่ 3 จะอธิบายถึงการออกแบบ ISVT รวมทั้ง Kinematics ของ ISVT ท้ายสุดจะกล่าวถึงการใช้งานของ ISVT ในงานวิจัยด้านการทำงานร่วมกันของหุ่นยนต์กับมนุษย์ Cobots: Collaborative Robots.

2. ทฤษฎีของ CVTs

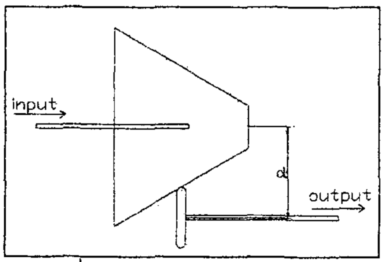
อุปกรณ์ส่งถ่ายกำลัง (transmission) นั้นได้มีการพัฒนามานานกว่าร้อยปี แต่อุปกรณ์ชนิดนี้ก็ยังถูกจำกัดอย่างมากส่วนใหญ่จะถูกออกแบบมาให้อัตราทดที่เช่นเกียร์ทดในเครื่องจักร อย่างไรก็ตามมีงานหลายประเภทที่ต้องการใช้อัตราทดที่ปรับได้เช่น ในรถยนต์นั่งทั่วไปที่เกียร์มีอัตราทดจำกัดอยู่แค่ 3-6 อัตราเท่านั้นและอัตราทดมีการปรับเป็นแบบขั้นบันไดไม่ต่อเนื่อง

อุปกรณ์ส่งถ่ายกำลัง อีกประเภทหนึ่งซึ่งจะมีลักษณะของการเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง เรียกว่า CVT: *Continuous Variable Transmission* CVT ส่วนมากมีข้อจำกัดอยู่ที่อัตราทดที่ได้จากการปรับเปลี่ยนจะมีช่วงจำกัดและส่วนใหญ่จะไม่สามารถให้อัตรา

ทดที่เป็นลบได้ สำหรับอุปกรณ์ส่งถ่ายกำลังแบบต่อเนื่องนี้ได้มีหลักการมากมายดังจะแสดงต่อไป

2.1 Cone Friction CVT

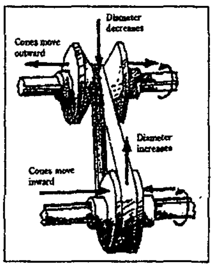
CVT แบบ Cone friction นี้จะใช้หลักการที่ค่อนข้างง่ายซึ่งหลักการในการปรับเปลี่ยนอัตราทดในแบบนี้จะใช้วิธีเปลี่ยนระยะห่างศูนย์กลางของเพลา input กับเพลา output (ระยะ d) โดยให้ล้อและกรวยสัมผัสกันตลอดเวลาดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งวิธีนี้มีข้อเสียก็คือเมื่อต้องการเปลี่ยนอัตราทดระยะห่างระหว่างเพลาทั้งสอง (ระยะ d) จะต้องเปลี่ยนแปลงตลอด และช่วงของอัตราทดที่ได้ยังมีค่าจำกัด



รูปที่ 1 CVT แบบ *Cone friction*

2.2 V-belt CVT

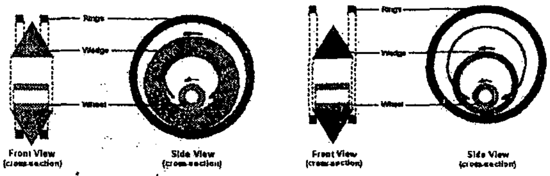
หลักการในการเปลี่ยนอัตราทดของแบบ V-belt จะใช้วิธีเปลี่ยนความกว้างของพู่เล่ เพื่อที่จะทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางเปลี่ยนขนาดดังแสดงในรูปที่ 2 ดังนั้นจากวิธีการที่สามารถเปลี่ยนขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางได้นี้ส่งผลให้สามารถที่จะเปลี่ยนอัตราทดได้ แต่การเปลี่ยนอัตราทดวิธีนี้นั้นช่วงของอัตราทดที่ได้ก็ยังมีขนาดจำกัดอยู่ อย่างไรก็ตาม CVT แบบ V-belt นี้ในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย



รูปที่ 2 CVT แบบ V-belt. Source from [10]

2.3 DECC Drive CVT [9]

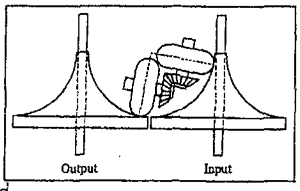
อุปกรณ์การเปลี่ยนความเร็วแบบ DECC (The Double-Eccentric Continuously Variable Transmission) จะใช้วิธีการเปลี่ยนอัตราทดโดยการปรับระยะห่างของวงแหวนทำให้ effective radius ของ wedge เปลี่ยนไปดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3 โดยที่ล้อ (wheel) จะโคจรรอบวงแหวน(ring)และในขณะเดียวกันจะขับ wedge ให้โคจรรอบวงแหวนด้วยความเร็วเชิงมุมที่ต่างกัน อัตราส่วนความเร็วเชิงมุมของวงโคจรทั้งสองขึ้นอยู่กับระยะห่างของวงแหวน



รูปที่ 3 DECC Drive CVT Source from [9]

2.4 แบบ Beltless CVT

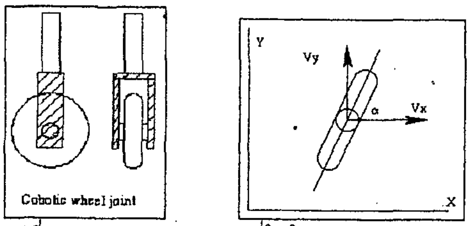
Beltless CVT เป็นรูปแบบของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความเร็วอีกแบบหนึ่ง ที่ได้ใช้ลูกล้อมาช่วยในการปรับเปลี่ยนอัตราทด วิธีการในการเปลี่ยนอัตราทดวิธีนี้จะใช้วิธีเปลี่ยนตำแหน่งของลูกล้อไปบนกรวยสองอันดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งใน CVT แบบ Beltless แบบนี้นั้นแม้ว่าจะคล้ายกับแบบ ISVT ของงานวิจัยชิ้นนี้แต่ก็ยังมีข้อเสียก็คือช่วงที่ได้จากอัตราทดแบบนี้จะมีขนาดจำกัดและไม่สามารถปรับให้มีอัตราทดที่เป็นลบได้



รูปที่ 4 Beltless CVT Source from [10]

2.5 Wheel CVT

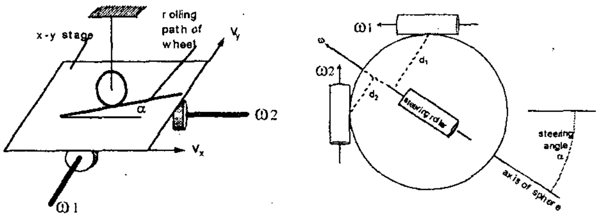
ล้อ (Wheel) คือ CVT ที่มีมานานที่สุดนอกจากนั้น ล้อยังเป็น CVT Mechanism ที่มนุษย์มองข้ามมาช้านาน Wheel เป็น CVT ที่กำหนดอัตราทดระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน x และ ในแนวแกน y โดยที่อัตราทดปรับได้อย่างต่อเนื่องตั้งแต่ $-\infty$ ถึง ∞ อัตราทดของ V_y และ V_x เท่ากับ tan (α)



รูปที่ 5 Wheel Joint CVT ที่ใช้ใน Cobots: Source from [1]

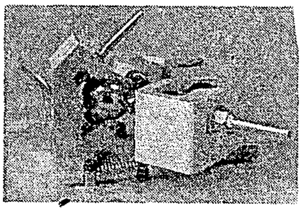
Wheel CVT นั้นเป็น กลไกที่ง่ายต่อการใช้งาน ในปี 1995 Wannasuphoprasit [1,2,3,4] ได้นำเอา Wheel CVT ใช้ในการออกแบบสร้างอุปกรณ์ Haptic Interface ที่ทำให้เป็นระบบ passive ที่ไม่ dissipate energy ได้เป็นครั้งแรกและต่อมาได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเป็น *Cobots : Collaborative Robots*

2.6 Spherical CVT



รูปที่ 6 หลักการของ Spherical CVT [6]

พิจารณารูปที่ 6 (ซ้าย) ถ้าเรานำเอา wheel มาใช้เป็น CVT ระหว่างแผ่นระนาบ x-y ความเร็วของแผ่นระนาบ V_y และ V_x จะถูกควบคุมเป็นอัตราส่วนด้วยมุม α (steering angle) ของล้อโดยที่ V_y / V_x = tan (α) ในขณะเดียวกันถ้าเราใช้กลไกที่เปลี่ยนความเร็วเชิงเส้น V_x และ V_y ให้เป็นความเร็วเชิงมุม ω_1 และ ω_2 ดังรูปที่6 (ซ้าย) เราจะได้ CVT ที่ปรับอัตราทดของความเร็วเชิงมุมได้อย่างต่อเนื่องตั้งแต่ $-\infty$ ถึง ∞ ถ้าเราม้วนแผ่นระนาบ x-y ให้เป็นทรงกลมจะได้ CVT เป็นทรงกลม ดังที่แสดงในรูป 6 (ขวา) ทรงกลมจะหมุนรอบแกนหมุนที่ผ่านจุดศูนย์กลางของตนเองและแกนหมุนของทรงกลมก็จะขนานกับ แกนของsteering rollers ถ้าเราเปลี่ยนมุม steering angle (α) แกนของsteering rollers ก็จะเปลี่ยนไปตามมีผลทำให้ระยะ d_1 และ d_2 (ระยะระหว่างแกนหมุนของทรงกลมกับจุดสัมผัสของล้อขับ ω_1 และล้อขับ ω_2)เปลี่อนไป และดังนั้นทำให้อัตราทดเปลี่ยนไปเช่นกัน โดยที่อัตราทด ω_1 / ω_2 เท่ากับ d_1 / d_2 เราเรียก CVT ประเภทนี้ว่า Spherical CVT สิ่งที่สำคัญในการทำงานของ Spherical CVT ชนิดนี้คือจุดศูนย์กลางของทรงกลมต้องอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของ CVT เสมอ. Moore [6] ได้ออกแบบ Spherical CVT โดยใช้ ทรงกลมโลหะมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด1.5นิ้ว และ metal rollers 4 ตัว (minimum constrains) ในการควบคุมจุดศูนย์กลางของทรงกลมโลหะ และเรียกว่า tetrahedral CVT (รูปที่7)



รูปที่ 7 Tetrahedral CVT: Source from [6]

3. การออกแบบ High power ISVT:

Infinitely Stepless Variable Transmission

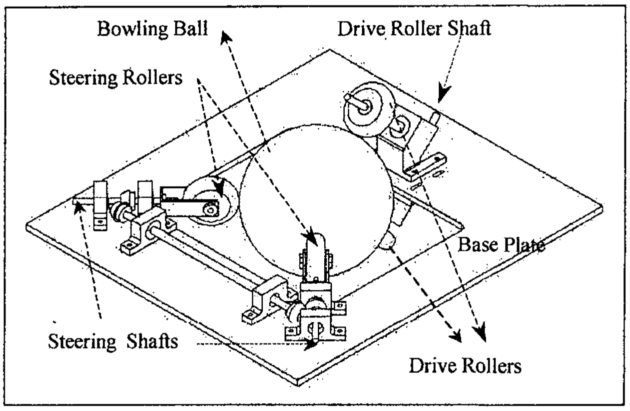
จุดประสงค์ในการออกแบบและสร้าง ISVT ของผู้วิจัยคือ 1) ต้องการสร้าง ISVT ที่มีขนาดและส่งกำลังได้สูง 2) ต้องการใช้ต้นแบบนี้ในการศึกษาและทดลองหาค่าและความสัมพันธ์ของ parameters ต่างๆที่สำคัญเช่น กำลังสูงสุดที่รับได้, สัมประสิทฺ ธิแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวและrollers, แรง preload, ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายกำลัง 3) เพื่อนำเอา ISVT ไปใช้ในงานประยุกต์ต่างๆ และงานวิจัยทางด้านการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ เช่น Cobots.

คณะผู้วิจัยต้องการออกแบบ ISVT ที่ปรับอัตราทดของความเร็วเชิงมุมเพราะนำมาใช้ได้กับงานหลายประเภท รวมทั้งการใช้งานในแขนกลของCobot [8] จากการ reviews CVT ลักษณะต่างๆในข้างต้นพบว่า Tetrahedral CVT เป็นโครงสร้างที่ง่ายและเหมาะสมและต้องการอุปกรณ์หลักแค่ ทรงกลม และ rollers 4 ตัวเท่านั้น

วัสดุที่ใช้ใน Tetrahedral CVT จะเป็นโลหะเหล็ก ซึ่งจะส่งผลให้กำลังงานของ CVT นี้มีขนาดที่น้อยมากเนื่องจากแรงเสียดทานที่ได้จากลูกล้อที่เป็นเหล็กสัมผัสกับลูกทรงกลมที่ทำมาจากโลหะเช่นกันจะมีค่าน้อย ดังนั้นเมื่อถ้าเราต้องการทำให้ CVT แบบนี้มีกำลังงานสูงขึ้น จะเป็นไปได้ค่อนข้างยากอันเนื่องมาจากข้อจำกัดต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

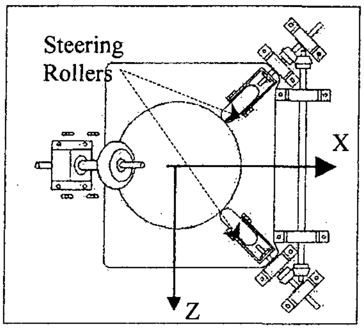
เนื่องจากมีความต้องการจะทำการออกแบบและพัฒนา ISVT เพื่อที่จะนำมาทำการศึกษา ดังนั้นเราจึงจำเป็นที่จะต้องเพิ่มขนาดของทรงกลม เพื่อที่จะทำให้เกิดความสะดวกและง่ายแก่การที่จะทำการศึกษาอย่างไรก็ตาม ในการสร้าง ISVT ให้มีขนาดใหญ่ ถ้าเราใช้วัสดุที่เป็นเหล็กทั้งลูกล้อและลูกทรงกลมจะส่งผลให้น้ำหนักของ ISVT มีน้ำหนักสูงมากและในขั้นตอนการสร้างจะมีปัญหายุ่งยากมาก และการหาทรงกลมวัสดุอื่นๆที่มีขนาดใหญ่และมีความเที่ยงตรงไม่ใช่เรื่องง่ายนัก อย่างไรก็ตาม ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการเลือกลูกทรงกลมเป็นลูกโบว์ลิ่งที่ยังไม่เจาะรู มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลูกโบว์ลิ่งขนาด 8.5 นิ้ว น้ำหนักเท่ากับ 8 ปอนด์ ผิวของลูกโบว์ลิ่งทำจากโพลีเอสเตอร์และมีพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอ และเลือกลูกล้อ roller เป็นลูกล้อ Roller blade ที่ทำจากโพลียูรีเทรน มี Profile เป็นแบบ Tapered Radius เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 72 มม. Durometer เท่ากับ 84A ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทั้งสองนั้นจะมีอัตราส่วนประมาณ 1 ต่อ 3 ซึ่งเป็นขนาดที่มีความเหมาะสมเป็นอย่างมาก [6] จากเอกสารอ้างอิง[8] ได้ทำการทดลองหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต(μ_S) ของล้อที่มีลักษณะเช่นเดียวกับลูกล้อที่ทางคณะผู้วิจัยเลือกใช้กับพื้นผิวที่วัสดุเป็นกระจก ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยชิ้นนี้มีค่าเท่ากับ 0.5973 ดังนั้นจากผิวของอุปกรณ์ทั้งสองนั้นที่ทำจากโพลียูรีเทรนและโพลีเอสเตอร์ทำให้เราสามารถพอที่จะทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตว่ามีมากพอเพียง (โดยจะทำการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต(μ_S)หลังจากการสร้างต้นแบบแล้ว) และที่สำคัญอุปกรณ์ทั้งสองนั้นเป็นอุปกรณ์ที่สามารถหาซื้อได้ง่ายในเมืองไทย

การเพิ่มขนาดของลูกทรงกลมให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและจากการที่ได้เพิ่มขนาดของลูกทรงกลมให้ใหญ่ขึ้นนี้ส่งผลให้เกิดน้ำหนักของลูกทรงกลมให้เพิ่มขึ้นไปด้วย ทำให้ไม่สามารถที่จะละเลยน้ำหนักและความเฉื่อยเชิงมุมของลูกทรงกลม



รูปที่8 High Power ISVT: Infinitely Stepless Variable Transmission

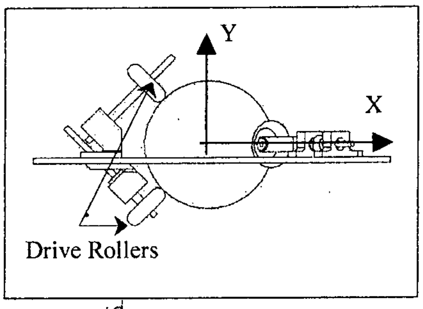
จากข้อมูลในหัวข้อต่างๆ ข้างต้นทำให้เราสามารถที่จะออกแบบรายละเอียดปลีกย่อยต่างๆ ได้ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 ซึ่งในรูปนี้เป็นรูปที่ได้จาก wireframe ในโปรแกรม CAD ที่พร้อมจะสร้างได้จริง ขนาดของระบบ ISVT ที่ได้ทำการออกแบบไว้นี้จะมีขนาดประมาณ ความกว้างเท่ากับ 540 มม. ความยาวเท่ากับ 600 มม. และความสูงมีค่าเท่ากับ 290 มม. มีฐานที่อยู่ในตำแหน่งเกือบจะกึ่งกลางของลูกโบว์ลิ่งเหตุผลที่ออกแบบไว้เช่นนี้เนื่องจากเพื่อต้องการออกแบบให้ส่วนประกอบต่างๆ ของโครงสร้างมีน้ำหนักที่น้อยที่สุดและง่ายต่อการสร้างและประกอบ ISVT ที่ออกแบบไว้นั้นประกอบไปด้วยทรงกลมลูกโบว์ลิ่ง และลูกล้อจำนวน 2 ชุด ชุดแรกเรียกว่า steering rollers และชุดที่สองเรียกว่า drive rollers.



รูปที่ 9 Top View ของ ISVT

Steering rollers สามารถที่จะปรับแกนหมุนของลูกล้อได้โดยการหมุนของ steering shafts ล้อชุดนี้มีหน้าที่เป็นตัวปรับทิศทางแกนหมุนของลูกทรงกลม ซึ่งปรับได้ด้วยการบิดมุมของ steering shafts

ลูกล้อทั้งสองล้อในชุด steering นี้จะต่อถึงกันด้วยเฟืองดอกจอกและหมุนสัมพันธ์กันโดยทั้งสองล้อจะหมุนด้วยองศาเท่ากันแต่มีทิศทางการหมุนที่สวนกัน



รูปที่ 10 Side View ของ ISVT

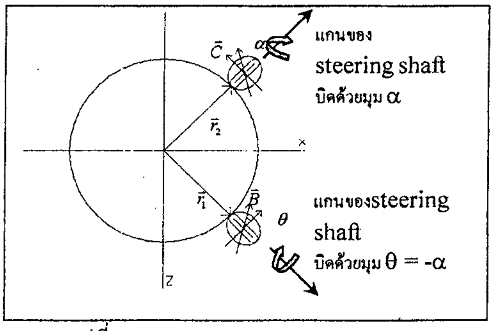
ชุดที่สองคือ Drive Rollers นั้นเป็นชุดที่จะนำไปต่ออุปกรณ์ภายนอกมีลูกล้อจำนวน 2 ลูกเช่นเดียวกัน โดยที่ทั้งสองลูกนี้นั้นมีความเร็วเชิงมุมที่สัมพันธ์กันตามอัตราทดที่เกิดขึ้น นอกจากนี้หน้าที่อีกประการหนึ่งของ Drive Rollers คือควบคุมตำแหน่งจุดศูนย์กลางของทรงกลม ให้อยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน และเนื่องจากแกนหมุนของลูกล้อทั้ง 2-ลูกในชุดนี้อยู่บนระนาบเดียวกัน ส่งผลให้แกนหมุนของลูกทรงกลมโดนบังคับให้ต้องอยู่ในระนาบเดียวกันนี้ด้วย

4. Kinematics ของ High Power ISVT

ในหัวข้อนี้เราจะทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราทดกับตำแหน่งแกนหมุนของ Steering shaft ในอันดับแรกเราลองพิจารณาว่าถ้ามีลูกล้อลูกหนึ่งสัมผัสกับลูกทรงกลมและแกนหมุนของลูกล้อนี้อยู่ในระนาบ x-y จาก rolling constraint จะได้ว่าแกนหมุนของลูกทรงกลมจะต้องอยู่ในระนาบ x y หรือบนระนาบเดียวกันกับแกนหมุนของลูกล้อลูกนี้ด้วย

เนื่องจากชุด Drive Roller อยู่ในระนาบ x y และมีตำแหน่งดังรูปที่ 10 ดังนั้นสมการของแกนหมุนของลูกทรงกลมจะมีสมการดังนี้

$$y = mx\ ,\quad z = 0 \qquad (1)$$



รูปที่ 11 Steering rollers ของ ISVT

จากรูปที่ 11 เราจะเห็นได้ว่าชุด Steering Roller จะทำให้เกิดระนาบที่แกนหมุนของลูกทรงกลมได้อีกสองระนาบ ซึ่งระนาบที่เกิดนี้จะมีความสัมพันธ์กับมุมของแกนหมุนของชุด Steering

Rollers ที่ทำมุม θ และ α เนื่องจาก $\vec{r}_1$ และ $\vec{r}_2$ ทำมุม 45 องศากับแกน x

$$\vec{r}_1 = \vec{i} + \vec{k} \qquad (2)$$

เราทำการกำหนดให้ $\vec{B} = x_1\vec{i} + y_1\vec{j} + z_1\vec{k}$ (คือ vector ที่อยู่ในเส้นตรงเดียวกันกับแกนของsteering roller) และจาก $\vec{B}\cdot\vec{r}_1 = 0$ ดังนั้นเราจะได้

$$\vec{B} = x_1\vec{i} + y_1\vec{j} - x_1\vec{k} \qquad (3)$$

$$\left\|\vec{B}\right\| = \sqrt{2x_1^2 + y_1^2} \qquad (4)$$

จากคุณสมบัติผลคูณสเกลาร์ของเวกเตอร์ $\vec{r}_2$ และ $\vec{B}$ จะได้

$$\vec{B}\cdot\left(\vec{i} - \vec{k}\right) = \left\|\vec{B}\right\| \times \sqrt{2} \times \cos\theta$$

$$2x_1 = \sqrt{2x_1^2 + y_1^2} \times \sqrt{2}\cos\theta$$

$$\cos\theta = \frac{2x_1}{\sqrt{4x_1^2 + 2y_1^2}} \quad , \quad \theta = \cos^{-1}\left(\frac{2x_1}{\sqrt{4x_1^2 + 2y_1^2}}\right)$$

$$\cos^2\theta = \frac{4x_1^2}{4x_1^2 + 2y_1^2} = \frac{2x_1^2}{2x_1^2 + y_1^2}$$

ทำให้เราสามารถที่จะทำการหาความสัมพันธ์ของ θ กับ x_1 และ y_1 ได้ดังนี้

$$\frac{y_1}{x_1} = \sqrt{2}\tan\theta \qquad (5)$$

นำสมการที่ (5) แทนลงในสมการที่ (3) จะได้

$$\vec{B} = x_1\vec{i} + \left(\sqrt{2}\tan\theta\right)x_1\vec{j} - x_1\vec{k} \qquad (6)$$

เนื่องจากค่า x_1 เป็นสเกลาร์ เพื่อความสะดวกในการ จึงทำการกำหนดให้ค่า x_1 เท่ากับ 1 ดังนั้นจะได้สมการ

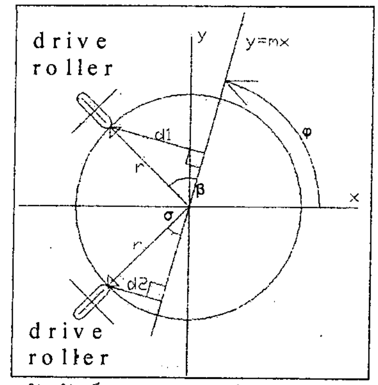
$$\vec{B} = \vec{i} + \left(\sqrt{2}\tan\theta\right)\vec{j} - \vec{k} \qquad (7)$$

ระนาบที่เกิดจาก Steering Roller จะหาได้จากจุดดังต่อไปนี้ $(0,0,0),(1,0,1),\left(1,\sqrt{2}\tan\theta,-1\right)$ เพราะฉะนั้นสมการของระนาบคือ

$$x - \frac{\sqrt{2}}{\tan\theta}y - z = 0 \qquad (8)$$

เราสามารถที่จะหาเส้นตรงที่เกิดจากการตัดกันของ ระนาบของ Drive Roller และระนาบของ Steering Roller ซึ่งเส้นตรงที่ได้ก็คือแกนหมุนของลูกทรงกลมนั่นเอง ดังนั้นเราจะสามารถหาสมการเส้นตรงจากสมการที่ (1) และสมการที่ (8) ได้ดังนี้

$$m = \frac{\tan\theta}{\sqrt{2}} \quad \text{เมื่อ} \quad 0 \le \theta \le 2\pi \qquad (9)$$



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชันของแกนหมุนกับอัตราทด

จากสมการที่ (1) เราสามารถเขียนอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังนี้

$$m = \tan\varphi \ , \ \varphi = \tan^{-1}(m) \qquad (10)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\theta}{\sqrt{2}}\right) \qquad (11)$$

สมการที่ (11) นี้แสดงให้เห็นว่าลักษณะการวางลูกล้อแบบ tetrahedral ส่งผลให้แกนหมุนของลูกทรงกลมที่อยู่บนระนาบ x y นั้นสามารถที่จะอยู่ในตำแหน่งมุมที่ทำกับแกน x ใดก็ได้

เพราะฉะนั้นจากรูปที่ 12 เราจะสามารถที่จะเขียนอยู่ในรูปได้ $\beta = 45° + (90 - \varphi) = 135° - \varphi$ และ $\sigma = (\varphi - 45°)$ ดังนั้นเราจะสามารถที่จะหาค่าระยะห่าง d_1, d_2 ได้ดังนี้

$$d_1 = r\cos(\varphi - 45°) \qquad (12)$$

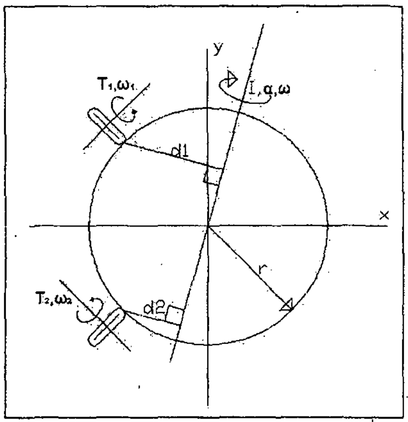
$$d_2 = r\sin(\varphi - 45°) \qquad (13)$$

จากสมการที่ (12) และสมการ (13) เราสามารถที่จะหาอัตราทด (T) ได้ดังนี้

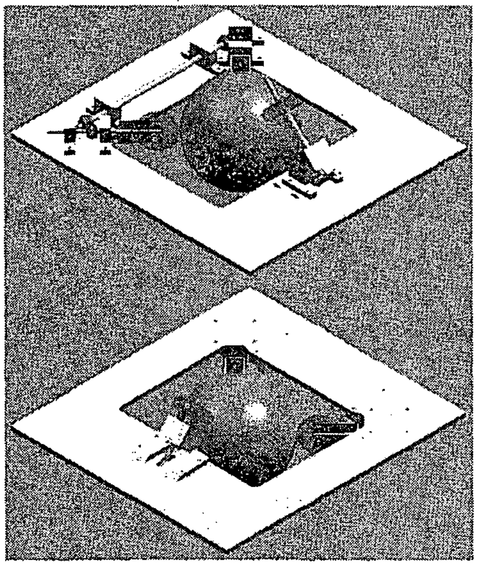
$$T \equiv \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{d_2}{d_1} = \tan(\varphi - 45°) \qquad (14)$$

$$T = \tan\left[\tan^{-1}\left(\frac{\tan\theta}{\sqrt{2}}\right) - 45°\right] \qquad (15)$$

จากสมการที่ (15) จะเห็นได้ว่ามุมของลูกล้อชุด Steering Roller กับอัตราทดมีความสัมพันธ์ต่อกันโดยตรง ดังนั้นเมื่อ $0 \le \theta \le 2\pi$ จะทำให้อัตราทดมีค่าอยู่ในช่วง $-\infty$ ถึง ∞ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในทางทฤษฎีระบบ ISVT นี้สามารถที่จะให้ผลลัพธ์เป็นไปตามความต้องการ



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของสมการของการเคลื่อนที่



รูปที่ 14 High Power ISVT ที่กำลังดำเนินการสร้าง

5. สรุป

บทความได้แสดงให้ทราบถึงลักษณะความสำคัญของระบบส่งกำลังแบบต่อเนื่องโดยใช้หลักการของแรงเสียดทานซึ่งก็ได้มีการออกแบบไว้อย่างชัดเจนหลายลักษณะ คณะผู้วิจัยได้ออกแบบ High Power ISVT หรือระบบส่งกำลังแบบต่อเนื่องที่มีค่าอัตราทดที่ปรับได้อย่างต่อเนื่องตั้งแต่ $-\infty$ ถึง ∞ โดยเน้นที่การสร้างต้นแบบส่งกำลังได้สูงมีขนาดใหญ่เพียงพอที่ใช้ในการศึกษาและทดลอง งานวิจัยนี้เป็นแค่ส่วนหนึ่งในการทำงานวิจัยระดับสูงที่คณะผู้วิจัยเตรียมการดำเนินการ

6. งานวิจัยต่อเนื่อง

อุปกรณ์ ISVT ที่ทำการออกแบบไว้นี้ กำลังอยู่ในระหว่างขั้นตอนการสร้าง ดังนั้นเมื่อทางคณะผู้วิจัยได้ทำการสร้างเสร็จ จะนำ ISVT ที่ได้นี้ไปทำการศึกษา และทดสอบในลักษณะต่าง ๆเช่น เมื่อทำการวางอุปกรณ์ ISVT ในลักษณะต่าง ๆ จะก่อให้เกิดผลอย่างไร ทดสอบหาค่ากำลังงานที่ได้จะมีค่าเท่าใด ประสิทธิภาพโดยรวม ของ ISVT รวมทั้งการดัดแปลงการออกแบบเมื่อนำไปใช้งาน รวมทั้งการพัฒนาวัสดุที่ใช้งานเช่นทรงกลมที่ใช้ลูกโบว์ลิ่งในปัจจุบันสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้โดยการใช้ทรงกลมกลวง (Hollow Precision Balls) ซึ่งจะทำให้ลดความเฉื่อยเชิงมุมได้

งานวิจัยต่อเนื่องที่คณะผู้วิจัยเตรียมการดำเนินการไว้ส่วนหนึ่งคือการใช้ ISVT ในอุปกรณ์หุ่นยนต์สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้อย่างปลอดภัย หรือ Cobots: *Collaborative Robots* [1,2,3,8].

Cobot: Collaborative Robot คือหุ่นยนต์ที่ทำงานร่วมกับมนุษย์ ที่ถูกออกแบบมาเพื่อทำงานกับมนุษย์โดยตรงใน workspace เดียวกัน Cobot เป็นอุปกรณ์เชิง Robotics ที่มีพฤติกรรมเป็น intrinsically passive ทำให้มีความปลอดภัยเมื่อทำงานร่วมกับมนุษย์

สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับงานวิจัยของ Cobot และ รายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ Cobotic Haptic Interface ดูงานวิจัยของ Wannasuphoprasit [1,2,3], Colgate [4], Peshkin [5], และ Moore [6]

เอกสารอ้างอิง

[1] Wannasuphoprasit, W., (1999), "Cobots: Collaborative Robots", Ph.D. Dissertation, Northwestern University

[2] Wannasuphoprasit, W., Akella, P., Peshkin, M. A. and Colgate, J. E., (1998),"Cobots, A Novel Material Handling Technology," 98-WA/MH-2, Presented at the ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Anaheim, California.

[3] W. Wannasuphoprasit, R.B. Gillespie, J.E. Colgate, M.A. Peshkin, "Cobot Control", Proceeding of the IEEE 1997 International Conference on Robotics & Automation, pp. 3571-3576, 1997.

[4] Colgate, J.E., Peshkin, M.A. and Wannasuphoprasit, W., (1996), "Nonholonomic Haptic Display," IEEE International Conference on .Robotics and Automation. Minneapolis, pp. 539-544.

[5] M. Peshkin, J.E. Colgate, P. Akella, W. Wannasuphoprasit, B. Gillespie, C. Moore, "Cobot architecture", to be published in the IEEE Transactions on Robotics and Automation.

[6] C. Moore, "Continuously Variable Transmission for Serial Link Cobot Architectures", Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, March 1997.

[7] G. Bachman, "An Experimental Investigation of the Cobot Wheel Contact Patch", Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, March 1997

[8] วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์ และ ธนโชติ ชีพสุมล "Serial-Link Cobot" ,การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15 พศ.2544

[9] www.deccdrive.com

[10] Noru Gogovitza, W.L. Cleghorn, Adrienne Chee Hing, Christopher Daniel, "Beltless Continuous Variable Transmission", U of Toronto, Canada