

## อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดอย่างต่อเนื่องแบบไม่จำกัด

### Infinitely Stepless Variable Transmission

วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ ภาณุ บุญวัฒน์โนภาส ภูพิงค์ แท้ปิติกุล ยงยุทธ กุลสรวุฑ ภาวิต สุวจิตตานนท์  
ห้องปฏิบัติการ สหวิทยาการมนุษย์และหุ่นยนต์  
ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330  
โทร 0-2218-6610-1 โทรสาร 0-2252-8889 E-mail: witaya.w@eng.chula.ac.th

Witaya Wannasuphprasit , Panu Boonwattanopas , Phuping Taepeetikul , Yongyoot Kulsarawut , Parvit Suvachittanont  
Human Robotics Laboratory  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University  
Payathai Rd. Patumwan Bangkok Thailand 10330  
Tel (66)2 218-6610-1, Fax (66)2 252-8889 E-mail: witaya.w@eng.chula.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษา ออกแบบ พัฒนา และควบคุม อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดอย่างต่อเนื่องแบบไม่จำกัด Double ISVT : Double Infinitely Stepless Variable Transmission ซึ่งเป็นระบบถ่ายกำลังที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราทดได้อย่างต่อเนื่องและมีช่วงอัตราทดจาก  $-\infty$  ถึง  $\infty$  ISVT นั้นเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการทำงานวิจัยขั้นสูงที่จะทำต่อเนื่องจากโครงการวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย Haptic Interface, Passive Robots, รวมถึงการทำงานของมนุษย์กับหุ่นยนต์ (Cobot) บทความนี้จะกล่าวถึงระบบส่งกำลังแบบต่อเนื่องแบบอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงหลักการทำงาน และอธิบายถึงหลักการทำงาน การออกแบบ และการสร้างประกอบของ ISVT แบบทรงกลม ซึ่งได้สร้างต้นแบบจนแล้วเสร็จ ในส่วนสุดท้ายได้ทำการทดลองกับต้นแบบ ISVT และนำเสนอผลการทดลอง วิเคราะห์ผลและสรุปผลของงานวิจัย

#### Abstract

This paper presents design and development of a double – ISVT (Infinitely Stepless Variable Transmission). The mechanism enables users to adjust transmission ratio form  $-\infty$  to  $\infty$ . A ISVT is a key element for research area of Haptic Interface, Passive Robots, and Collaborative Robot (Cobot). We reviewed and compared several types of CVTs. In addition we present the design and construction of the double ISVT prototype. Then, we performed transmission experiment. The results, discussion, and future work are provided.

#### 1. บทนำ

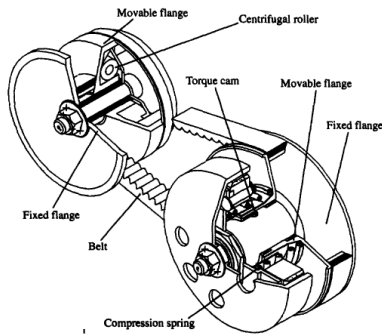
ในปัจจุบันระบบทางกล (เช่น หุ่นยนต์อุตสาหกรรม) ได้มีการนำระบบส่งกำลัง (transmission) มาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ อย่างมาก แต่อัตราทดที่ได้จากระบบส่งกำลัง ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนั้นจะมีข้อจำกัดในด้านของอัตราทด (transmission ratio) เป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น อัตราทดคงที่เช่นเกียร์ทดในเครื่องจักร หรืออัตราทดปรับได้แบบขั้นบันไดในเกียร์รถยนต์ และอัตราทดปรับค่าได้อย่างต่อเนื่องเช่น CVT (Continuous Variable Transmission)

จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้ คือการพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับปรับเปลี่ยนอัตราทดจาก  $-\infty$  ถึง  $\infty$  ซึ่งหมายความว่า อุปกรณ์นี้สามารถปรับอัตราทดให้ Output มีค่าบวก (เมื่อเทียบกับ Input) และมีค่าลบ ซึ่งสามารถที่จะนำไปใช้ใน งานวิจัยระดับสูงเช่น หุ่นยนต์ Cobot [7,8,9]

#### 2. ตัวอย่างการศึกษา CVT

ปัจจุบัน CVT ก็มีใช้กันอยู่หลากหลายชนิด ซึ่งตัวอย่างของ CVT ที่ได้ศึกษามาพอสังเขปมีดังต่อไปนี้

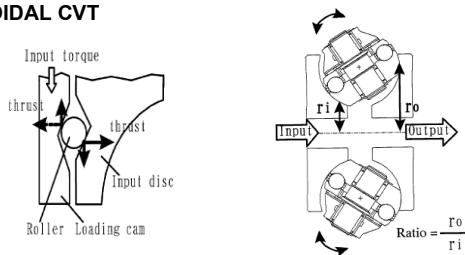
## 2.1 RUBBER V-BELT CVT



รูปที่ 1 Rubber V-Belt CVT [1]

ตัว RUBBER V-BELT CVT [1] นั้นประกอบด้วย Pulley ตัวขับเคลื่อนและตัวตาม ซึ่ง Pulley จะประกอบไปด้วยขอบที่อยู่หนึ่งกับขอบที่เคลื่อนที่ได้ โดยการเคลื่อนที่ของขอบ Pulley นั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรัศมีของตัว Pulley ซึ่งสายพานยางจะวางอยู่บน Pulley เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของขอบ Pulley ทั้งสองที่สัมพันธ์กัน ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนอัตราทดได้ โดยอัตราทดคือ อัตราส่วนระหว่าง รัศมี Pulley ตัวตาม กับ Pulley ตัวขับเคลื่อนนั่นเอง

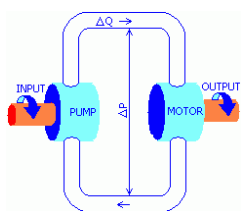
## 2.2 TOROIDAL CVT



รูปที่ 2 Toroidal CVT [2]

Toroidal CVT [2] นี้จะแบ่งเป็น Half-Toroidal CVT และ Full-Toroidal CVT ขึ้นอยู่กับ ลักษณะทางกายภาพของ variator หลักการทำงานของ Half-Toroidal CVT จะใช้ตัว Loading Cam เปลี่ยนแรงหมุน (Torque) ให้เป็นแรงในแนวแกน (Thrust) Input และ Output Disc ที่รับแรงมาจาก Loading Cam และ Power Roller 2 ลูก ที่อยู่ระหว่าง Disc ทั้งสอง ก็จะส่งแรงขับเคลื่อนโดยจะอาศัยจากน้ำมันชนิดพิเศษ ที่สามารถสร้างแรงต้านการเฉือนได้อย่างมาก ก่อให้เกิดแรงดันสูงในการส่งถ่ายกำลังของ CVT นี้ (โดยปราศจากการสัมผัสระหว่างโลหะกับโลหะ) วิธีการเปลี่ยนอัตราทดของ Half-Toroidal CVT นี้ทำโดยการบิดตัว Power Roller รอบแกนหมุน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรัศมีของจุดสัมผัสระหว่าง Power Roller กับ Input และ Output Disc ดังภาพ โดยอัตราทอนั้นคือ อัตราส่วนระหว่าง  $r_o$  กับ  $r_i$

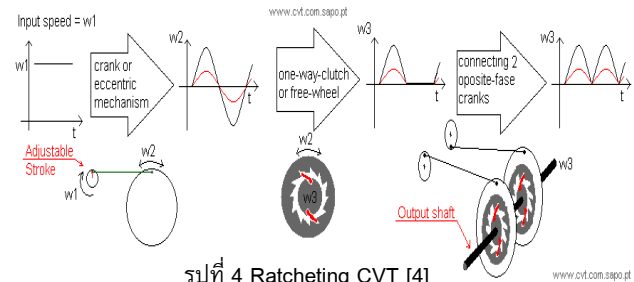
## 2.3 HYDROSTATIC CVT



รูปที่ 3 Hydrostatic CVT [3]

Hydrostatic CVT [3] นี้ประกอบไปด้วย hydrostatic pump และ hydrostatic motor เป็นอุปกรณ์หลัก หลักการทำงานของ Hydrostatic CVT คือ input จะทำการขับ pump เพื่อเป็นการส่งถ่ายพลังงานไปยังของไหล โดยของไหลจะมีแรงดันเพิ่มขึ้นไปหมุนตัว motor เพื่อไปขับ output ต่อไป โดยจะมีตัว variable displacement unit เพื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราทดอีกตัวหนึ่งหรือเป็นตัวเดียวกับ Motor เลยก็ได้ โดยอัตราทอนั้นก็คือผลต่างของแรงดันที่เกิดขึ้นนั่นเอง

## 2.4 RATCHETING CVT



รูปที่ 4 Ratcheting CVT [4]

Ratcheting CVT [4] มีอีกชื่อหนึ่งว่า Crank-CVT, Variable-Stroke CVT จะทำงานโดยการเปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุนไปเป็นการเคลื่อนที่แบบกลิ้งไปกลิ้งมา แล้วทำการเรียงการเคลื่อนที่ ให้กลิ้งไปเป็นแบบหมุนตามเดิม โดยในขั้นแรก กลไกจะสร้างการเคลื่อนที่กลิ้งไปกลิ้งมาจากการเคลื่อนที่แบบหมุน ต่อมาการเคลื่อนที่กลิ้งไปกลิ้งมาก็จะถูกเรียงด้วยกลไกเช่น one-way-clutch (or free-wheel) เพื่อที่จะเรียงการเคลื่อนที่กลิ้งไปเป็นแบบหมุนตามเดิม เพื่อที่จะให้การเคลื่อนที่ราบเรียบต้องใช้ several out-of-phase cranks [4] ด้วย

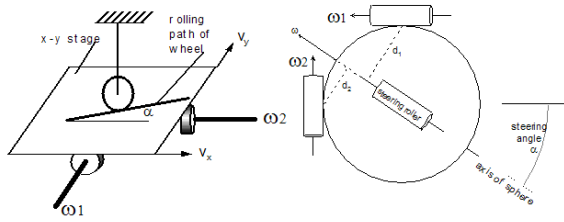
เมื่อทำการศึกษา CVT ชนิดต่างๆข้างต้นแล้ว ก็นำมาวิเคราะห์สรุป ข้อดี ข้อเสียของแต่ละชนิดดังในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงถึงข้อดี ข้อเสียของ CVT แบบต่างๆ

| ชนิดของ CVT          | ข้อดี                                                                                                   | ข้อเสีย                                                          |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 1. RUBBER V-BELT CVT | ไม่เกิดการกระตุกเมื่อเปลี่ยนความเร็ว<br>มีความต่อเนื่องในการเป็นอัตราทด<br>ใช้งานง่าย ไม่ยุ่งยาก        | มีขีดจำกัดในการเปลี่ยนอัตราทด                                    |
| 2.Toroidal CVT       | ไม่เกิดการกระตุกเมื่อเปลี่ยนความเร็ว<br>มีความต่อเนื่องในการเป็นอัตราทด<br>มีขนาดเล็ก ส่งกำลังได้สูงสุด | มีขีดจำกัดในการเปลี่ยนอัตราทด                                    |
| 3. Hydrostatic CVT   | ไม่เกิดการกระตุกเมื่อเปลี่ยนความเร็ว<br>มีความต่อเนื่องในการเป็นอัตราทด                                 | มีขีดจำกัดในการเปลี่ยนอัตราทด<br>ระบบมีประสิทธิภาพเพียง 60 – 80% |
| 4. Ratcheting CVT    | ไม่เกิดการกระตุกเมื่อเปลี่ยนความเร็ว<br>มีความต่อเนื่องในการเป็นอัตราทด                                 | มีขีดจำกัดในการเปลี่ยนอัตราทด<br>กำลังที่ได้ออกมาไม่สม่ำเสมอ     |

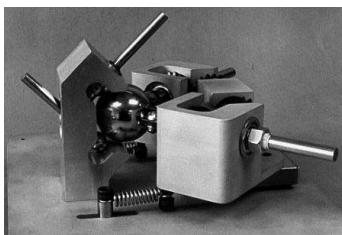
จากการพิจารณาแล้วสรุปว่าไม่มีชนิดใดเหมาะสมที่จะนำมาทำเป็น ISVT ที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราทดได้อย่างต่อเนื่องและมีช่วงอัตราทดจาก  $-\infty$  ถึง  $\infty$  เนื่องจาก CVT ในแต่ละชนิด มีขีดจำกัดในการเปลี่ยนอัตราทดซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของงานวิจัยชิ้นนี้ ดังนั้นจึงต้องศึกษาหาวิธีการที่จะสามารถปรับเปลี่ยนอัตราทดให้ได้ตามที่ต้องการจากการศึกษาหาข้อมูลและวิธีทดลองจน ทฤษฎีต่างๆ โดยท้ายสุดคณะวิจัยได้เลือกที่จะพัฒนาอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดอย่างต่อเนื่องที่มีคุณสมบัติดังกล่าวโดยใช้ Spherical CVT ดังรายละเอียดที่แสดงในหัวข้อถัดไป

### 3. Spherical CVT : หลักการทำงาน



รูปที่ 5 หลักการของ Spherical CVT [5]

พิจารณารูปที่ 5 (ซ้าย) ถ้านำเอา wheel มาใช้เป็น CVT ระหว่างแผ่นระนาบ x-y ความเร็วของแผ่นระนาบ  $V_y$  และ  $V_x$  จะถูกควบคุมเป็นอัตราส่วนด้วยมุม  $\alpha$  (steering angle) ของล้อโดยที่  $V_y / V_x = \tan(\alpha)$  ในขณะเดียวกันถ้าใช้กลไกที่เปลี่ยนความเร็วเชิงเส้น  $V_x$  และ  $V_y$  ให้เป็นความเร็วเชิงมุม  $w_1$  และ  $w_2$  ดังรูปที่ 5 (ซ้าย) เราจะได้ CVT ที่ปรับอัตราทดของความเร็วเชิงมุมได้อย่างต่อเนื่องตั้งแต่  $-\infty$  ถึง  $\infty$  ถ้ามีวงแผ่นระนาบ x-y ให้เป็นทรงกลมจะได้ CVT เป็นทรงกลม ดังที่แสดงในรูปที่ 5 (ขวา) ทรงกลมจะหมุนรอบแกนหมุนที่ผ่านจุดศูนย์กลางของตนเองและแกนหมุนของทรงกลมก็จะขนานกับ แกนของ steering rollers ถ้าเราเปลี่ยนมุม steering angle ( $\alpha$ ) แกนของ steering rollers (ซึ่งทำหน้าที่เหมือนกับ wheel ในรูปซ้าย) ก็จะเปลี่ยนไปตามมีผลทำให้ระยะ  $d_1$  และ  $d_2$  (ระยะระหว่างแกนหมุนของทรงกลมกับจุดสัมผัสของล้อขับ  $w_1$  และ ล้อขับ  $w_2$ ) เปลี่ยนไป มีผลทำให้อัตราทดเปลี่ยนไปเช่นกัน โดยที่อัตราทด  $w_1/w_2$  เท่ากับ  $d_1/d_2$  เราเรียก CVT ประเภทนี้ว่า Spherical CVT สิ่งที่สำคัญในการทำงานของ Spherical CVT ชนิดนี้คือจุดศูนย์กลางของทรงกลมต้องอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของ CVT เสมอ ดังรูปที่ 6 ที่ Moore [5] ได้ออกแบบ Spherical CVT โดยใช้ทรงกลมโลหะมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.5 นิ้ว และ metal rollers 4 ตัว (minimum constraints) ในการควบคุมจุดศูนย์กลางของทรงกลมโลหะและเรียกว่า Tetrahedral CVT

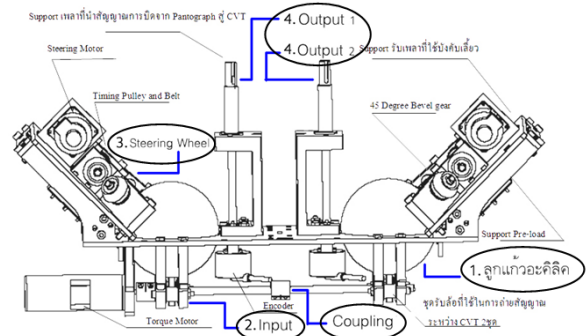


รูปที่ 6 Tetrahedral CVT [5]

### 4. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ ISVT

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณ ออกแบบ และสร้างชุด อุปกรณ์ ISVT ที่ได้ใช้หลักการเดียวกันกับ Tetrahedral CVT ขึ้นมา วัตถุประสงค์อีกประการหนึ่งของงานวิจัยนี้คือ สามารถนำต้นแบบ ISVT นี้ไปใช้ในงานวิจัยที่มีการพัฒนาทางด้านหุ่นยนต์โคบอทต่อไปได้ ซึ่งเป็นส่วนที่จะส่งกำลังระหว่างข้อต่อของหุ่นยนต์โคบอท โดยการออกแบบอุปกรณ์นั้นจะประกอบด้วยการนำ Tetrahedral CVT 2 ชุดมาทำงานด้วยกัน เพื่อเพิ่มวิธีการเชื่อมต่อในการส่งถ่ายกำลัง ที่เรียกว่า Double CVT ที่มีลักษณะเหมือนกับการนำ Tetrahedral CVT 2 ชุดมาต่อเข้าด้วยกัน

โดยมีแกนสมมาตรอยู่ตรงกึ่งกลางของอุปกรณ์ เพื่อ ที่จะสามารถต่อแขนกลกับทาง Output ออกไปเป็น Five bar linkage เป็น Pentagraph สำหรับงานวิจัยระดับสูงต่อไป โดยอุปกรณ์ที่ออกแบบขึ้นมาแสดงดังในรูปที่ 7



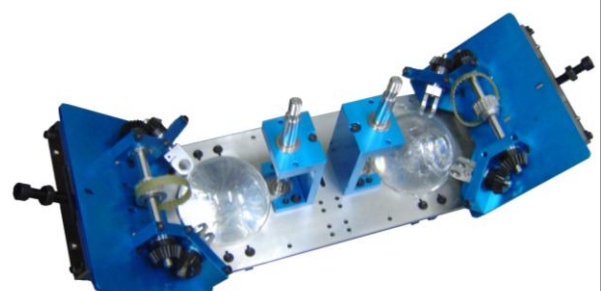
รูปที่ 7 ถึงรายละเอียดต่างๆของอุปกรณ์ ISVT

ชุดอุปกรณ์หลักๆของ ISVT คือ

1. ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ทำจากอะลูมิเนียมที่มีความกลมเที่ยงตรงสูง
2. ชุด Input ที่ประกอบด้วย Torque motor ที่ใช้สำหรับส่งกำลังให้กับ ISVT และล้อยูลิเทนสำหรับใช้หมุนลูกแก้วอะลูมิเนียม
3. ชุดปรับเปลี่ยนอัตราทด (Steering Wheel) ที่ประกอบด้วย Steering motor ที่ใช้สำหรับปรับมุมของล้อปรับอัตราทดและล้อยูลิเทนสำหรับปรับแกนหมุนของลูกแก้วอะลูมิเนียม
4. ชุด Output ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 2 ชุด ประกอบด้วยล้อยูลิเทนสำหรับรับอัตราทดจากลูกแก้วอะลูมิเนียม และเพลา Output สำหรับ ต่ออุปกรณ์นำอัตราทดที่ส่งออกจาก ISVT ไปใช้งาน

อุปกรณ์ ISVT ที่ออกแบบนี้แต่ละข้างของ Double ISVT สามารถทำงานร่วมกันหรือแยกกันอย่างอิสระได้โดยปลดตัว Coupling ที่ต่ออยู่ที่ชุด Input ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 7 ส่วนชุด Steering Wheel นั้นทั้งสองข้างใช้ motor ควบคุมอิสระต่อกัน เพียงสั่งการให้ motor หมุนไปเป็นมุมที่เท่ากันหรือต่างกัน ก็สามารถกำหนดให้ Output ทั้งสองข้างของ ISVT มีอัตราทดที่เท่ากันหรือต่างกัน

หลังจากที่ได้ทำการประเมินและวิเคราะห์การออกแบบ (Design review) ต่อมาจึงทำการสร้างแบบ (Drawing) และกำหนดรายละเอียดต่างๆของอุปกรณ์ ISVT ทำการขึ้นรูป จัดซื้ออุปกรณ์ และประกอบอุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 รูปต้นแบบจริงของอุปกรณ์ส่งถ่ายความเร็วแบบปรับอัตราทดได้ต่อเนื่อง Double ISVT

ส่วนประกอบต่างๆของอุปกรณ์ ISVT นี้ขึ้นรูปด้วยเครื่อง CNC เนื่องจากต้องการความเที่ยงตรงสูง โดยแผ่นฐาน (Base) นั้นทำมาจาก Stainless Steel เพื่อความแข็งแรง เพลตต่างๆที่ใช้ ทำมาจาก เหล็กกล้า ส่วนประกอบขึ้นรูปอื่นๆใช้ อลูมิเนียม เป็นวัสดุหลัก ลูกแก้วที่ใช้ทำมาจาก อะคลิคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และลูกล้อที่ใช้ทำ โดยการเคลือบยูรีเทนที่ความแข็ง CHA80 ลงบนแกนล้อที่ทำจากเหล็ก

หลักการทำงานของ ISVT คือ เราทำการใส่ Input เข้าไปทาง Torque motor เพื่อให้ลูกทรงกลมอะคลิคหมุน แล้วทำการปรับมุมของ ชุดบังคับเลี้ยว (Steering wheel) ไปเป็นมุม ( $\alpha$ ) ต่างๆ ส่งผลให้แกน หมุนของลูกแก้วเปลี่ยนไป ทำให้ได้ความเร็วที่ออกทาง Output นั้นมีค่า ต่างๆกันออกไป ดังนั้นเราจึงสามารถกำหนดอัตราส่วนการทดรอบ ระหว่าง input wheel และ out put wheel โดยการปรับเปลี่ยนมุมของคู่ ล้อบังคับเลี้ยว ( $\alpha$ ) นั้นเอง

ข้อดีของระบบการขับเคลื่อนที่ใช้ในอุปกรณ์ ISVT คือ มีความ ต่อเนื่องระหว่างการเปลี่ยนความเร็ว แต่มีข้อเสียคือ การถ่ายทอดกำลัง ขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส แต่อย่างไรก็ตามข้อเสีย ดังกล่าวมิได้เป็นข้อจำกัดในการออกแบบเพราะในภายหลังสามารถ พิจารณาใช้วัสดุที่มีความความเสียดทานและคงทนสูง

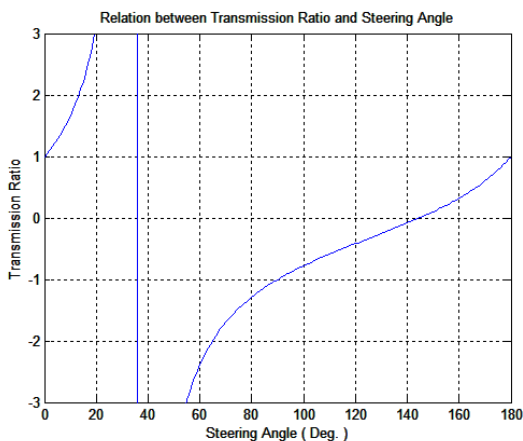
## 5. การวิเคราะห์ทางทฤษฎี

จากการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตระหว่างอัตราทดกับ ตำแหน่งแกนหมุนของ Steering shaft [6] สามารถเขียนความสัมพันธ์ ได้เป็นสมการ

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

เมื่อ T = อัตราทด ;  $\theta$  = Steering Angle

จากสมการที่ (1) จะเห็นได้ว่ามุมของลูกล้อชุด Steering Angle ( $\theta$ ) กับอัตราทด (T) มีความสัมพันธ์ต่อกันโดยตรง ดังนั้นเมื่อ  $0 \leq \theta \leq 2\pi$  จะทำให้อัตราทรมีค่าอยู่ในช่วง  $-\infty$  ถึง  $\infty$  ดังนั้นจะเห็น ได้ว่าในทางทฤษฎีระบบ ISVT นี้สามารถที่จะให้ผลลัพธ์เป็นไปตาม ความต้องการ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราทด (T) และ Steering Angle ( $\theta$ ) แสดงเป็นกราฟในรูปที่ 9



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ T กับ  $\theta$

จะเห็นว่า เมื่อทำการเปลี่ยนค่า Steering Angle ( $\theta$ ) เริ่มจาก 0 ไปถึง 180 องศา อัตราทด (T) ก็เกิดการเปลี่ยนแปลงไปในช่วง  $-\infty$  ถึง  $\infty$  ตามที่ต้องการ

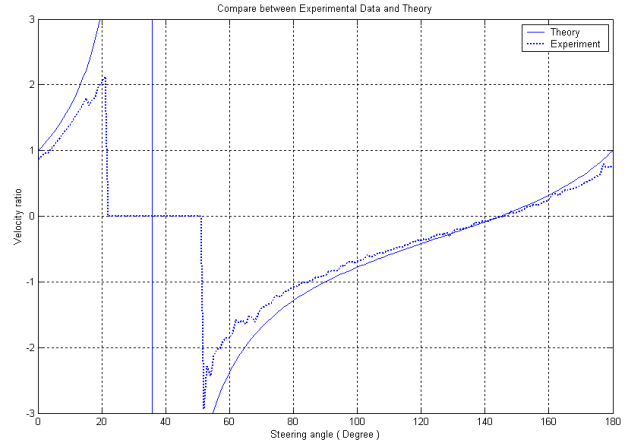
## 6. การทดลองหาอัตราทดของอุปกรณ์ ISVT

เมื่อได้สร้างตัวอุปกรณ์แล้ว การควบคุมชิ้นอุปกรณ์นี้โดยเราเลือก ใช้โปรแกรม Visual C++ ซึ่งโดยเราทำการออกคำสั่งผ่านคอมพิวเตอร์ เพื่อควบคุมการทำงานของชุด CVT ผ่าน Card ควบคุม (Spil PCI Controller)

วิธีการทดลองหาอัตราทดของอุปกรณ์ ISVT ทำโดยกำหนดมุม ของ Steering wheel ( $\alpha$ ) โดยเริ่มที่ค่า 0 องศา แล้วทำการใส่ Input เข้าไปที่ความเร็วค่าหนึ่งแล้วทำการวัดค่าความเร็วที่ได้ออกมาจาก Output แล้วนำมาหาอัตราทด แล้วบันทึกค่าอัตราทดเอาไว้ แล้วลอง เปลี่ยนความเร็ว Input เป็นค่าต่างๆหลายๆค่า เพื่อนำมาหาอัตราทด เฉลี่ยที่ตำแหน่ง Steering wheel ( $\alpha$ ) หนึ่งๆ ต่อมาก็ทำการปรับเพิ่มค่า Steering wheel ( $\alpha$ ) จาก 0 องศา แล้วทำการหาอัตราทดเฉลี่ย ที่แต่ละองศา โดยการเปลี่ยนความเร็ว Input หลายๆค่า แล้วทำการบันทึก ค่าเอาไว้จนครบ 180 องศา

## 7. ผลการทดลอง

จากการทดลอง เราได้ทำการบันทึกค่าต่าง ๆ คือ Velocity ของ Input, Output และ Steering angle หลังจากนั้นนำค่าต่าง ๆ มาทำการ พล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับผลทาง ทฤษฎี ในรูปที่ 10



รูปที่ 10 กราฟการเปรียบเทียบทฤษฎีกับผลการทดลอง

## 8. สรุปและการวิเคราะห์ผล

ช่วงที่ได้ผลการทดลองใกล้เคียงกับทางทฤษฎี คือที่มุม Steer มี ค่าอยู่ในช่วง 0-15 และ 70-180 องศา ซึ่งค่า Maximum velocity ratio ที่ชุดอุปกรณ์ CVT สร้างได้จะมีค่าประมาณ  $\pm 1.8$  ซึ่งค่าผิดพลาดที่ เกิดขึ้นเล็กน้อยอาจเกิดจากผลของการสลิประหว่างล้อ Input, Output กับลูกทรงกลม ทำให้ค่า Velocity ratio มีค่าน้อยกว่าทางทฤษฎีอยู่ เล็กน้อย

ช่วงที่ได้ค่าผิดพลาดจากทางทฤษฎี คือที่มุม Steer มีค่าอยู่ใน ช่วง 16- 21 และ 52-69 องศา ที่มีค่าน้อยกว่าทางทฤษฎีและช่วงที่ ไม่สามารถวัดค่าได้ คือที่มุม Steer มีค่าอยู่ในช่วง 22-51 องศา มีผล

เนื่องจาก ข้อจำกัดของอุปกรณ์ต้นแบบซึ่งได้แก่ มอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเล็กเกินไป มีกระแสไฟฟ้าจำกัด ส่งผลให้ Torque ที่สร้างขึ้นได้มีขนาดเล็กไม่เพียงพอต่อการขับเคลื่อน CVT ทำงาน และล้อยที่ทำจากพอลิยูรีเทนที่มีความแข็งแรงน้อยเกินไปทำให้จุดสัมผัสระหว่างลูกทรงกลมและล้อยต่าง ๆ มีลักษณะเป็นพื้นที่ไม่ได้เป็นจุดตามทฤษฎี ซึ่งส่งผลให้จุดตัดของแกนการหมุนทั้ง 3 ไม่เป็นเส้นแต่เป็นระนาบๆหนึ่ง ทำให้แกนการหมุนของลูกทรงกลมไม่คงที่เปลี่ยนแปลงไปบนระนาบดังกล่าว ทำให้ ณ ช่วงมุม Steer ที่กล่าวมา ค่า Velocity ratio จึงมีค่าผิดพลาดไปจากทฤษฎีตามที่กล่าวมาข้างต้น

### 9.การวิจัยในอนาคต

การวิจัยในอนาคตข้างหน้าของอุปกรณ์ ISVT นี้จะเป็นการพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ให้สูงขึ้น ข้อจำกัดของอุปกรณ์ ISVT น้อยอยู่ การส่งกำลังด้วยแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวทรงกลมกับล้อยูรีเทน ที่ยังมีค่าน้อยอยู่ และเกิดการลื่นไถลระหว่างผิวสัมผัสดังกล่าว คณะวิจัยได้เตรียมที่จะพัฒนาในส่วนนี้ โดยการออกแบบล้อยูรีเทนให้มีความแข็งแรงที่สูงขึ้น พร้อมกับเพิ่มแรงกดขณะใช้งาน (Preload) ให้สูงขึ้น แต่ไม่ถึงกับทำให้รูปทรงของล้อยูรีเทนที่ผิวสัมผัสเกิดการเปลี่ยนรูปไป ซึ่งถ้าสามารถพัฒนาตามที่กล่าวมาจะทำให้ อุปกรณ์ ISVT มีอัตราทดที่ใกล้เคียงกับทางทฤษฎีมากยิ่งขึ้น พร้อมกับสามารถส่งถ่ายกำลังออกจากตัวอุปกรณ์ ISVT ที่มีค่าที่สูงขึ้นได้อีกด้วย

อุปกรณ์ ISVT ที่คณะวิจัยได้ทำการพัฒนาขึ้นสามารถนำไปต่อเชื่อมกับ Five bar linkage เป็น Pentograph manipulator ซึ่งจะใช้การปรับเปลี่ยนอัตราทดของอุปกรณ์ ISVT ในการควบคุมมุมของข้อต่อ (Joint) ทั้งสองเพื่อให้ปลายแกนกล (Tool tip) ของ Pentograph มีทิศทางเคลื่อนที่ที่ต้องการ ระบบนี้สามารถเป็นได้ทั้ง Active และ Passive สำหรับระบบ Active ชุดควบคุมจะสั่งให้ Torque motor ส่งกำลังไปที่ ISVT ถ้าตัดการของ Torque motor ระบบก็จะเป็น Passive โดยจะควบคุมทิศทางของ Tool tip ได้ด้วยการควบคุมอัตราทดระหว่างข้อต่อ โดยการปรับค่ามุม steering ของ ISVT นั้นเอง

### เอกสารอ้างอิง

- [1] T. F. CHEN, D. W. LEE and C. K. SUNG, "AN EXPERIMENTAL STUDY ON TRANSMISSION EFFICIENCY OF A RUBBER V-BELT CVT", Mech. Mach. Theory , 1998, Vol. 33, No. 4, pp. 351-363
- [2] Haruhito Mori, Tsutomu Yamazaki, Katsuya Kobayashi, Toshifumi Hibi "A study on the layout and ratio change characteristics of a dual-cavity half-toroidal CVT", JSAE Review 22, 2001, pp 299-303
- [3] <http://cvt.com.sapo.pt/hydrostatic/hydrostatic.htm>
- [4] <http://cvt.com.sapo.pt/ratcheting/ratcheting.htm>
- [5] C. Moore, "Continuously Variable Transmission for Serial Link Cobot Architectures", Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, March 1997.

- [6] ภาณุ บุญวัฒน์โนภาส , ภูพิงค์ แตบิตกุล , ยงยุทธ กุลสรารุช , "การพัฒนาอุปกรณ์ CVT สำหรับระบบสร้างความรู้สึกเสมือนจริง" ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2004
- [7] Peshkin, M.A, Colgate, J.E, Wannasupphoprasit, W., Moore, C.A, Gillespie, R.B and Akella, P. 2001. Cobot architecture, IEEE Transactions on Robotics and Automation. vol. 17, no. 4, August 2001, pp. 377-390.
- [8] Wannasupphoprasit, W. and Chanphat, S. 2002. "A study and develop of fluid cobot" , Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE2002). New Orleans, Louisiana
- [9] วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ และ ธนโชติ ชีพสุมล, "หุ่นยนต์โคบอทแบบขนาน", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, 2546