

การวิเคราะห์และการจำลองการส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิลในระบบหุ่นยนต์ Analysis and Modeling of the Cable Transmission System in Robots

พงศ์แสน พิทักษ์วัชร

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

E-mail: phongsaeen.p@chula.ac.th โทรศัพท์: 02-218-6632 โทรสาร: 02-252-2889

บทคัดย่อ

การส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิลเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากมี backlash noise และการสูญเสียที่ต่ำ อีกทั้งการสร้างและการดัดแปลงยังสามารถทำได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับการส่งผ่านกำลังด้วยรูปแบบอื่นๆ ทว่าข้อจำกัดที่สำคัญของวิธีการนี้ได้แก่ เคเบิลไม่สามารถส่งผ่านแรงกดได้ และแรงเสียดทานในการส่งกำลังที่เกิดขึ้นอันหลีกเลี่ยงไม่ได้ เพื่อให้การควบคุมระบบหุ่นยนต์ที่ใช้เคเบิลส่งกำลังเป็นไปดังต้องการ เราจึงทำการวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองการส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิล

เราจะเริ่มต้นด้วยการพิจารณาการส่งผ่านกำลังในกรณีอุดมคติ ซึ่งไม่มีการสูญเสียกำลังเกิดขึ้นเลย หลังจากนั้นก็จะพิจารณาผลกระทบจากความยืดหยุ่นของเคเบิล และแรงเสียดทานระหว่างผิวของเคเบิลกับลูกรอกที่มีต่อการส่งกำลังนี้ จากการวิเคราะห์พบว่าความยืดหยุ่นทำให้การขับเคลื่อนไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ และแรงเสียดทานทำให้ประสิทธิภาพของการส่งกำลังต่ำกว่า 100% แบบจำลองทางพลศาสตร์ที่คำนึงถึงผลต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วจะได้รับการพัฒนาขึ้นด้วยระเบียบวิธี bond graph ผลสรุปและแบบจำลองที่ได้จะนำไปใช้ในการออกแบบ จำลอง และควบคุมระบบหุ่นยนต์ที่ส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิลต่อไป

คำหลัก: การส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิล แบบจำลองทางพลศาสตร์ bond graph

Abstract

Mechanical power transmission via cable and pulley system is a way to transmit the motion and force efficiently. This is mainly due to low backlash, low noise, and the low power loss. Further, the implementation and modification can be performed easily compared to other methods of transmission. Nevertheless, the major limitation is that the cable cannot resist the compression load and the developed friction cannot be completely eliminated. For the purpose of advanced control of the robotic system employing this type of power transmission, we analyze and develop a mathematical model of the cable transmission system.

First, the perfect transmission system that has no power loss will be considered. Then, the effects of the cable compliance and the friction between the cable and the pulley groove's surface on the transmission will be considered. From the analysis, the cable compliance distorts the actual motion of the transmission system from the desired one. Also, the friction reduces the efficiency of this transmission. Finally, with the use of the bond graph approach, a dynamical model incorporating these effects will be

developed. The results and the model will be use to design, model, and control the cable-driven robotic system.

Keywords: Cable-driven power transmission system, dynamical model, bond graph

1. บทนำ

แนวโน้มในการวิจัยหุ่นยนต์ในปัจจุบันได้เน้นไปยังหุ่นยนต์บริการ (service robots) มากขึ้น โครงสร้างทางกลของหุ่นยนต์ให้บริการนั้นมีมากมาย ขึ้นอยู่กับงานที่ให้บริการเป็นสำคัญ หนึ่งในโครงสร้างที่ได้รับความนิยมก็คือ โครงสร้างคล้ายมนุษย์ (anthropomorphic structure) เนื่องจากมีแขนกลติดตั้งอยู่บนฐานที่เคลื่อนที่ ทำให้สามารถทำงานที่หลากหลายได้ เช่นการเสิร์ฟอาหาร

เกณฑ์ที่สำคัญในการออกแบบหุ่นยนต์ประเภทนี้คือน้ำหนักที่เบา และระบบขับเคลื่อนที่แข็งแกร่งในระหว่างการเคลื่อนที่ แต่ระบบขับเคลื่อนเดียวกันนี้จะต้องมีความยืดหยุ่นเมื่อสัมผัสกับสิ่งกีดขวางเพื่อป้องกันอันตรายแก่หุ่นยนต์และสิ่งแวดล้อม ระบบส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิลและลูกรอกสามารถตอบสนองความต้องการเหล่านี้ได้ ยิ่งไปกว่านั้นการสร้างและการดัดแปลงการส่งกำลังให้เป็นไปตามความต้องการยังสามารถทำได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับการส่งผ่านกำลังด้วยรูปแบบอื่นๆ เช่นเราสามารถสร้างระบบเคเบิลและลูกรอกที่มีอัตราทดแม่นยำตามที่ต้องการได้อย่างง่ายดาย แต่หากเราใช้ระบบเฟือง เราจะต้องทำการออกแบบฟันเฟือง ต้องมีเครื่องกัดเฟือง และอาจจะไม่ได้อัตราทดที่เป็นไปตามต้องการ

ระบบส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิลและลูกรอกที่ออกแบบมาอย่างเหมาะสม จะมี backlash ที่ต่ำ ทำให้ระบบรวมมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น นอกจากนี้ noise และการสั่นสะเทือนในการเคลื่อนที่ก็จะต่ำกว่า เพราะระบบมีการสัมผัสแบบผิวที่น้อยกว่า อีกทั้งการสูญเสียกำลังก็ค่อนข้างต่ำหากเลือกใช้วัสดุในการสร้างและการออกแบบที่เหมาะสม โดยรวมแล้วระบบส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิลและลูกรอกจะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับการใช้ระบบอื่นๆ [1]

บทความนี้จะเสนอการวิเคราะห์และการจำลองการส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิล โดยเราจะพิจารณาหน่วยย่อยพื้นฐานที่มีรอกสองตัว ซึ่งกำลังทางกลถูกส่งจากรอกต้นกำลัง (powered pulley) ผ่านไปยังรอกภาระ (loaded pulley) ด้วยเคเบิลที่พันระหว่างรอกสองตัวนี้ ในหัวข้อย่อยที่ 2 เราจะเริ่มต้นด้วยแบบจำลองที่ง่ายที่สุดของการส่งผ่านกำลังแบบอุดมคติก่อน หลังจากนั้น จะพิจารณาผลกระทบจากความยืดหยุ่นของเคเบิลและแรงเสียดทานระหว่างผิวของเคเบิลกับลูกรอก ผลกระทบเหล่านี้อธิบายได้ด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ที่กระทำกับองศาการหมุนที่เบี่ยงเบนไปของรอก และสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและขาออก ดังแสดงในหัวข้อย่อยที่ 3

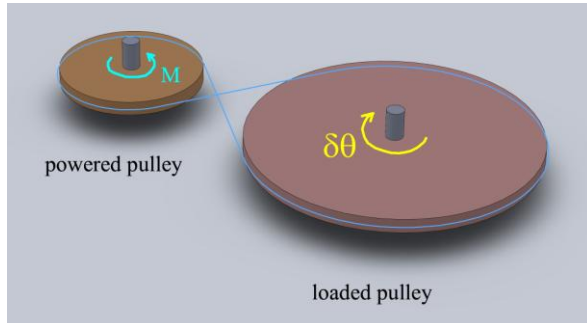
หัวข้อย่อยที่ 4 จะนำเสนอการที่ได้จากหัวข้อย่อยที่แล้วไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของหน่วยย่อยพื้นฐานของการส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิล ในครั้งนี้ เราจะคำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากโมเมนต์ความเฉื่อยของลูกรอกและแรงเสียดทานในตับลูกปืนด้วย ในหัวข้อย่อยที่ 5 ระบบตัวอย่างที่มีค่าพารามิเตอร์มาตรฐานจะถูกยกขึ้นมาศึกษาผลตอบสนอง หัวข้อย่อยที่ 6 จะสรุปผลการศึกษาเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบ จำลอง และควบคุมระบบหุ่นยนต์ต่อไป

2. หน่วยย่อยพื้นฐานของการส่งผ่านกำลังด้วย

เคเบิล และแบบจำลองอุดมคติ

ในระบบการส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิลนั้นจะมีหน่วยย่อยพื้นฐานอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งองค์ประกอบหลักของหน่วยย่อยได้แก่รอกสองตัวและเคเบิล รอกตัวหนึ่งเป็นตัวต้นกำลัง (powered pulley) ซึ่งถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์อีกทอดหนึ่ง รอกอีกตัวหนึ่งเป็นรอกภาระ (loaded pulley) ทำหน้าที่ส่งกำลังต่อไปยังกลไกอื่นๆ รอกทั้งสองตัวถูกติดตั้งอยู่บนฐานร่วม (carrier) กำลังกลจากรอกต้นกำลังจะถูกส่งผ่านเคเบิลที่พันรอบระหว่างรอกสองตัวนี้ โดยทั่วไปแล้ว

เคเบิลจะต้องพันระหว่างรอกในลักษณะที่ทำให้เกิดลูป (loop) เนื่องจากเคเบิลไม่สามารถส่งผ่านแรงกดได้



รูปที่ 1 หน่วยย่อยพื้นฐาน
ของการส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิล

กำหนดสัญลักษณ์ของพารามิเตอร์ในระบบดังนี้ $r_i, r_o, \theta_i, \theta_o$ คือรัศมีและองศาการหมุนของรอกต้นกำลัง และของรอกภาระตามลำดับ τ_i และ τ_o คือทอร์กที่ทำให้รอกต้นกำลังและทอร์กจากรอกภาระที่ส่งผ่านไปยังกลไก จากสมมติฐานที่สำคัญได้แก่ เคเบิลไม่มีการลื่นไถล (no slip) และเคเบิลไม่มีความยืดหยุ่นตามแนวเส้น (rigid cable) กอปรกับข้อจำกัดทางคิเนแมติกส์ (kinematics constraint) ของการหมุนของลูกรอกที่เชื่อมต่อกันด้วยเคเบิล เราจะได้ความสัมพันธ์

$$\dot{\theta}_o = \frac{r_i}{r_o} \dot{\theta}_i \quad (1)$$

ด้วยสมมติฐานที่สำคัญอีกข้อหนึ่งคือไม่มีการสูญเสียกำลังเกิดขึ้น หรือกำลังขาเข้าเท่ากับกำลังขาออก เมื่อเราไม่คำนึงถึงพลศาสตร์ของระบบ เราจะได้ความสัมพันธ์เกี่ยวกับทอร์กดังนี้

$$\tau_o = \frac{r_o}{r_i} \tau_i \quad (2)$$

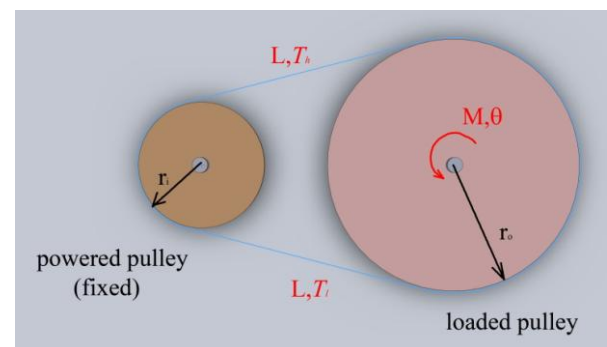
สองสมการข้างต้นอธิบายการส่งผ่านกำลังเมื่อระบบเป็นระบบบอดี้ตามข้อสมมติฐานที่กล่าวมา ซึ่งในทางปฏิบัติจะไม่เป็นเช่นนั้น ในหัวข้อย่อยต่อไป เราจะพิจารณาระบบที่มีคุณลักษณะที่ใกล้เคียงกับระบบจริงมากขึ้น

3. ระบบที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น

การจำลองระบบจริงอย่างแม่นยำนั้นนับเป็นงานที่ท้าทาย และในบางครั้งอาจจะทำให้ไม่สามารถเข้าใจพื้นฐานของพลศาสตร์ของระบบนั้นๆได้ ระบบจริงของหน่วยย่อยพื้นฐานในการส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิลนั้นไม่ได้เป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ด้วยปัจจัยต่างๆมากมาย เช่นเคเบิลไม่ได้อยู่ในแนวระนาบเดียวกัน ความหนืดของเคเบิล หรือความผิดพลาดทางเรขาคณิตในแต่ละชิ้นส่วนและในการประกอบ ทว่าในงานวิจัยนี้ เราจะคำนึงถึงปัจจัยที่สำคัญของความยืดหยุ่นของเคเบิลและแรงเสียดทานระหว่างผิวของเคเบิลกับลูกรอกเท่านั้น

3.1 ความยืดหยุ่น (Compliance)

พิจารณาหน่วยย่อยพื้นฐานในการส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิลดังแสดงในรูปที่ 2 ระบบนี้จะถูกกระทำให้เกิดแรงตึงในเคเบิลเริ่มต้น (pretension) เท่ากับ T_0 หลังจากนั้น รอกต้นกำลังจะถูกทำให้ไม่หมุน ในขณะที่รอกภาระจะถูกโมเมนต์ M กระทำ เราจะทำการวิเคราะห์หาองศาการหมุนของรอกภาระที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2 พารามิเตอร์ของหน่วยย่อยพื้นฐาน
สำหรับหาค่าความยืดหยุ่น

เพื่อที่จะรักษาสมดุลของรอกภาระ โมเมนต์ M จะทำให้แรงตึงในเคเบิลเปลี่ยนเป็นแรงตึงที่มากขึ้น T_h และแรงตึงที่น้อยลง T_l ดังแสดงในรูป โดยที่

$$M = (T_h - T_l) r_o \quad (3)$$

เมื่อหารสมการนี้ด้วย $r_o T_0$ เราจะได้ความสัมพันธ์ในรูปแบบที่ไร้หน่วย (dimensionless equation)

$$m = t_h - t_l \quad (4)$$

โดยที่ $t_h = T_h / T_0$ $t_l = T_l / T_0$ และ $m = M / r_o T_0$
แรงดึงที่เปลี่ยนไปจะทำให้เกิดการยืดหรือหดตัว
ของเคเบิลในส่วนที่รับแรงดึงที่เพิ่มขึ้นและต่ำกว่า
ตามลำดับ ซึ่งจะต้องทำให้ความยาวโดยรวมนั้นไม่
เปลี่ยนแปลง การยืดหรือหดตัวทำให้ออกภาระหมุน
ด้วยสมมติฐานว่าไม่มีการลื่นไถลเกิดขึ้น จากการ
วิเคราะห์ใน [2] ความสัมพันธ์ระหว่างองศาการหมุน
 θ ของรอกภาระที่เกิดขึ้นกับโมเมนต์สถิต M เป็นไป
ดังสมการ

$$\theta = \frac{T_0}{EA\mu_{\text{eff}}} \left[\left(\frac{me^m}{e^m - 1} - 1 \right) (1 + GF) - \log \frac{me^m}{e^m - 1} \right] \quad (5)$$

โดยที่ E และ A คือค่ายังโมดูลัสและพื้นที่หน้าตัดของ
เคเบิล μ_{eff} คือ effective coefficient of friction ซึ่ง
คำนวณโดย

$$\mu_{\text{eff}} = \left(\frac{1}{\mu_{r_o}} + \frac{r_i}{r_o} \frac{1}{\mu_{r_i}} \right)^{-1} \quad (6)$$

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างรอกต้นกำลังและ
รอกภาระกับเคเบิลคือ μ_{r_i} และ μ_{r_o} และ

$$GF = \frac{L\mu_{\text{eff}}}{r_o} \quad (7)$$

คือ geometry friction number ที่จะกำหนดลักษณะ
การตอบสนองของระบบต่อโมเมนต์ที่กระทำ L เป็น
ความยาวของเคเบิลส่วนที่ไม่ได้พันรอบลูกรอก อนึ่ง
สมการที่ (5) นี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า ค่า GF มีค่า
น้อยมาก

3.2 ประสิทธิภาพ (Efficiency)

ขณะที่ระบบส่งผ่านกำลังทำงานอยู่ ณ สภาวะ
สมดุลทางพลศาสตร์ (dynamic equilibrium) โมเมนต์
ความเร็วเชิงมุมและแรงดึงในเคเบิลจะคงที่ ทว่าแรง
ดึงจะมีค่าไม่เท่ากันตลอดทั้งเส้น ดังแสดงในสมการที่
(3) เคเบิลจะเกิดการยืดเมื่อแรงดึงเปลี่ยนจากต่ำไป
หาสูง ในทางกลับกันเคเบิลจะเกิดการหดเมื่อแรงดึง
เปลี่ยนจากสูงไปหาต่ำ ดังนั้นที่รอกทั้งสองตัวจะมีการ
ลื่นไถลของเคเบิลบนผิวรอกอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิด
การสูญเสียกำลังงานและระบบส่งผ่านกำลังมี
ประสิทธิภาพน้อยกว่า 100%

กำลังงานที่สูญเสีย P_l เท่ากับผลรวมของกำลัง
งานย่อยที่กระทำโดยแรงเสียดทาน ณ แต่ละตำแหน่ง
กำลังงานย่อยคำนวณได้จากผลคูณของแรงเสียดทาน
กับอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาของการยืดหด
ของเคเบิล ณ จุดนั้น

$$dP_l(\theta) = F_{fr}(\theta) \frac{d\delta(\theta)}{dt} \quad (8)$$

อินทิเกรตกำลังงานย่อยตามองศาที่เคเบิลเกิดการลื่น
ไถลกับรอกทั้งสองตัวจะได้กำลังงานที่สูญเสียทั้งหมด
เท่ากับ

$$P_l = \frac{2(T_h - T_l)}{2EA + T_h - T_l} P_{in} \quad (9)$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพในการส่งผ่านกำลังจึงเป็น

$$\eta = 1 - \frac{M}{r_o EA} \quad (10)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{T_h - T_l}{2EA} \ll 1$$

4. แบบจำลองทางพลศาสตร์ของหน่วยย่อย

พื้นฐานของการส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิล

หัวข้อย่อยที่กล่าวถึงผลของการใช้เคเบิลใน
การส่งผ่านกำลัง อย่างไรก็ตาม หน่วยย่อยพื้นฐานยัง
มีองค์ประกอบอื่นๆที่ส่งผลต่อพลศาสตร์ของระบบ
หรืออีกนัยหนึ่งคือทำให้ระบบจริงเบี่ยงเบนจากระบบ
อุดมคติมากขึ้น องค์ประกอบหลักๆที่ส่งผลกระทบ
ได้แก่โมเมนต์ความเฉื่อยของลูกรอก และแรงเสียด
ทานในตลับลูกปืน

โมเมนต์ความเฉื่อยเป็นสิ่งบ่งชี้ว่าพลังงานจะถูก
กักตุนและนำมาใช้ในภายหลัง รูปทรงของรอก
โดยทั่วไปสามารถประมาณได้ว่าเป็นรูปทรงแผ่นกลม
ดังนั้นโมเมนต์ความเฉื่อยของลูกรอกรอบแกนหมุนจึง
เป็น

$$I = \frac{1}{2} \rho \pi r^4 h \quad (11)$$

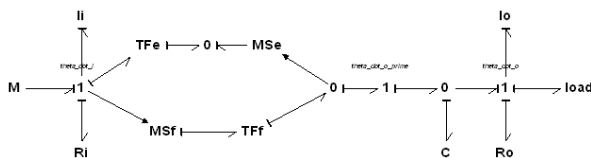
โดยที่ ρ r และ h คือความหนาแน่น รัศมี และความ
หนาของลูกรอก

แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างคู่สัมผัสที่เคลื่อนที่
สัมพัทธ์กันเป็นสิ่งบ่งชี้ว่ามีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้น
สำหรับหน่วยย่อยนี้ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนอกเหนือ

ที่ผิวร่องของรอกกับเคเบิลแล้ว ก็คือแรงเสียดทานใน
ตลับลูกปืน สำหรับลูกปืนมาตรฐานแบบร่องลึกที่มีซี่ล
ซึ่งใช้ในงานส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิล โซ่ หรือสายพาน
นั้น โมเมนต์ของความเสียดทาน M_{fr} วัดในหน่วยนิว
ตันมิลลิเมตรสามารถคำนวณได้โดย [3]

$$M_{fr} = 35812.5 \frac{Hd}{nr} \quad (12)$$

เมื่อ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลาที่สวมเข้ากับ
ลูกปืนในหน่วยมิลลิเมตร r คือรัศมีของรอกวัดใน
หน่วยมิลลิเมตร n คือความเร็วในการหมุนของรอก
เป็นรอบต่อนาที และ H คือกำลังงานที่ส่งผ่านใน
หน่วยกิโลวัตต์



รูปที่ 3 แผนภาพ bond graph ของหน่วยย่อยพื้นฐาน
ในการส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิล

ต่อไปนี้จะได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทาง
พลศาสตร์ที่คำนึงถึงผลต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วได้แก่
ความยืดหยุ่นของเคเบิล โมเมนต์ความเฉื่อยของ
ลูกรอก และพลังงานที่สูญเสียระหว่างเคเบิลกับรอก
และในลูกปืน เราจะใช้ระเบียบวิธี bond graph [4] ซึ่ง
เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการพัฒนาแบบจำลองของระบบที่มี
ความซับซ้อน เนื่องจากมีความง่ายและเป็นระบบ
มากกว่าการเขียนสมการของแบบจำลองโดยตรง

รูปที่ 3 แสดงแบบจำลอง bond graph ของหน่วย
ย่อยพื้นฐานในการส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิล (ดูรูปที่ 2)
 I_i และ I_o คือโมเมนต์ความเฉื่อยของรอกต้นกำลังและ
รอกภาระคำนวณได้จากสมการที่ (11) C แสดงถึง
ความยืดหยุ่นของระบบต่อโมเมนต์ภาระที่กระทำตัง
สมการที่ (5) R_i และ R_o แสดงถึงการสูญเสียพลังงาน
ในลูกปืนตามสมการที่ (12) TF_r และ TF_e แสดงถึง
อัตราทดของการส่งผ่านความเร็วเชิงมุมและโมเมนต์
ระหว่างรอกต้นกำลังกับรอกภาระ ซึ่งเป็นไปตาม

สมการที่ (1) และ (2) แต่ได้คำนึงถึงผลของการ
สูญเสียพลังงานระหว่างเคเบิลกับรอกตังสมการที่ (10)
ด้วย

5. ระบบตัวอย่าง

ต่อไปนี้ ระบบตัวอย่างที่มีค่าพารามิเตอร์
มาตรฐานจะถูกยกขึ้นมาเพื่อศึกษาผลตอบสนอง โดย
เราจะกำหนดให้รอกต้นกำลังและรอกภาระมีเส้นผ่าน
ศูนย์กลางเป็น 50 และ 100 มิลลิเมตร ความหนาของ
ตัวรอกทั้งสองเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ทำจากอลูมิเนียม ที่
จุดศูนย์กลางของรอกเจาะรูสำหรับลูกปืนแบบร่องลึก
(deep groove ball bearing) ซึ่งสวมเข้ากับเพลลา
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ส่วนเคเบิลที่
ใช้ทำมาจากเหล็กกล้า (steel) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง
เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร ประเมินว่าสัมประสิทธิ์ความ
เสียดทานจลน์ระหว่างผิวรอกกับเคเบิลเป็น 0.15

ในการสร้างหน่วยย่อยพื้นฐานในการส่งผ่านกำลัง
ด้วยเคเบิล เรากำหนดให้ระยะห่างระหว่างจุด
ศูนย์กลางของรอกทั้งสองตัวเป็น 100 มิลลิเมตร และ
ก่อนที่จะทำการส่งผ่านกำลัง เราจะสร้างแรงตึงเริ่มต้น
ในเคเบิลให้เท่ากับ 100 นิวตัน และประมาณ
ประสิทธิภาพของการส่งผ่านกำลังของระบบโดยรวม
เป็น 0.7

รูปที่ 4 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงขององศาและ
ความเร็วเชิงมุมของรอกทั้งสองเมื่อให้โมเมนต์ดล
(impulse moment) ขนาด 20 นิวตันมิลลิเมตรแก่รอก
ต้นกำลังเป็นเวลา 10 มิลลิวินาที เมื่อรอกต้นกำลัง
ได้รับโมเมนต์ก็จะหมุนด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น พร้อม
กับส่งกำลังผ่านเคเบิลไปยังรอกภาระซึ่งก็จะหมุนด้วย
ความเร็วที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ต่างกันด้วยอัตราทด 1:2
เมื่อไม่มีโมเมนต์กระทำแล้ว รอกทั้งสองจะหมุนด้วย
ความเร็วที่ลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากการสูญเสีย
พลังงานที่เคเบิลกับผิวรอกและที่ลูกปืน จนกระทั่งหยุด
หมุนเมื่อพลังงานที่สะสมไว้ถูกใช้จนหมด

จากการทดลองเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆของ
ระบบ พบว่าประสิทธิภาพที่ลดลงจะทำให้ความเร็วใน
การหมุนลดลง และแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นในลูกปืนจะ
ทำให้ระบบหยุดหมุนเร็วขึ้น

6. บทสรุป

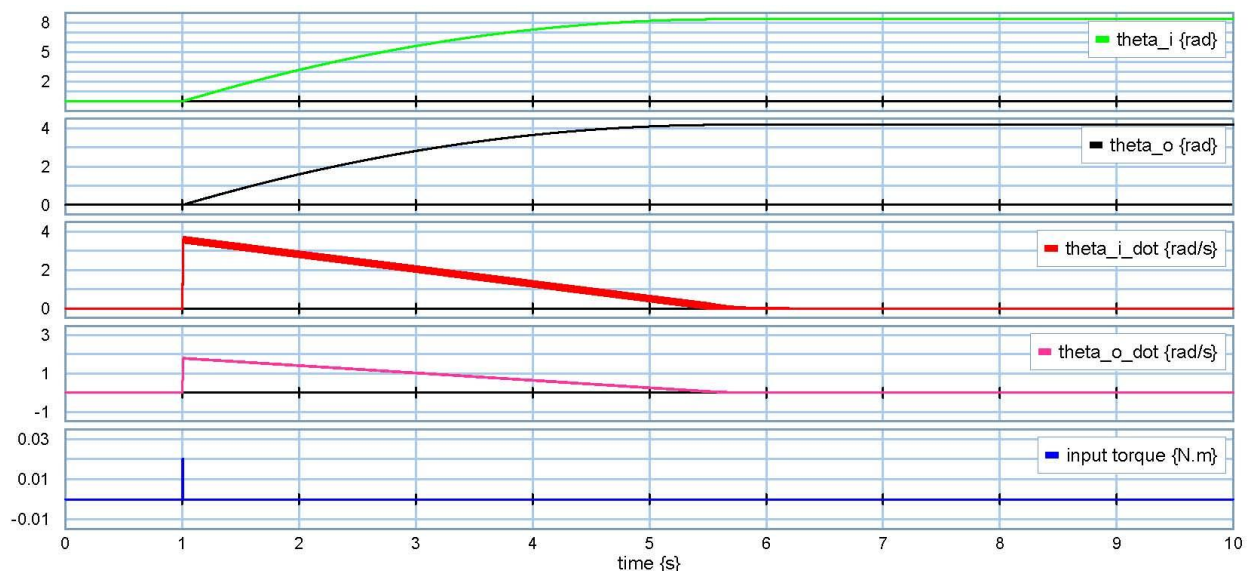
งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองของการส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิลโดยหน่วยย่อยพื้นฐาน ผลทางพลศาสตร์ของความยืดหยุ่นของเคเบิล โมเมนต์ความเฉื่อยของลูกรอก และพลังงานที่สูญเสียระหว่างเคเบิลกับรอกและในลูกปืนถูกนำมาพิจารณาในการพัฒนาแบบจำลอง เราทำการตรวจสอบแบบจำลองเบื้องต้นโดยการยกระบบตัวอย่างขึ้นมาศึกษาผลตอบสนองซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของระบบจริง สำหรับงานในอนาคต เราจะทำการสร้างต้นแบบเพื่อตรวจสอบแบบจำลองในรายละเอียด และสอบวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นอกจากนี้แล้วเราจะนำผลสรุปและแบบจำลองที่ได้ไปใช้ในการออกแบบ จำลอง และควบคุมระบบหุ่นยนต์ที่ส่งผ่านกำลังด้วยเคเบิลอีกด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้รับการสนับสนุนด้านงบประมาณบางส่วนจากทุนส่งเสริมการวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ ทุนพัฒนาอาจารย์ใหม่ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Schempf, H., *Comparative Design, Modeling, and Control Analysis of Robotic Transmission*, Ph.D. Dissertation, MIT, 1990.
- [2] Snow, E. R., *The Load/Deflection Behavior of Pretensioned Cable/Pulley Transmission Mechanisms*, M.S. Thesis, MIT, 1993.
- [3] Nippon System Kaihatsu, *NSK Rolling Bearings Catalog*, CAT. No. E1102e, 2007.
- [4] Karnopp, D. C., Margolis, D. L., and Rosenberg, R. C., *System Dynamics: Modeling and Simulation of Mechatronic Systems*, John Wiley & Sons, 2006.



รูปที่ 4 กราฟการเปลี่ยนแปลงขององศาและความเร็วเชิงมุมของรอก
เมื่อมีโมเมนต์ดล (impulse moment) มากระทำ