

การลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบส่งกำลังของเฮลิโอสแตท

Transmission Error Compensation for Heliostats

สุรียา อุณหจิตติ¹, สมชาย เกียรติกมลชัย², ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์¹ และ ศุภาวุฒิ จันทรานูวัฒน์^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

² ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

*อีเมลล์ supavut.c@chula.ac.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันพลังงานแสงอาทิตย์นับเป็นพลังงานทางเลือกใหม่ที่กำลังได้รับความนิยมสูง วิธีการหนึ่งที่เป็นที่สนใจคือการเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานความร้อนโดยใช้เตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูง ระบบนี้ใช้การรวมแสงเพื่อให้เกิดปริมาณความร้อนเพียงพอด้วยกระจกสะท้อนแสงอาทิตย์จำนวนมากที่สามารถเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ที่เรียกว่า เฮลิโอสแตท (Heliostat) ซึ่งจะต้องมีระบบขับเคลื่อนที่มีความแม่นยำสูง งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการลดราคาของระบบโดยการใช้ระบบควบคุมการขับเคลื่อนแบบเปิด โดยใช้สเตปเปอร์มอเตอร์เพราะไม่ต้องมีอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งที่แม้จะให้ความแม่นยำสูงก็มีราคาสูงด้วย ดังนั้นเพื่อคงความแม่นยำไว้ต้องมีวิธีการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบขับเคลื่อนของเฮลิโอสแตทนี้ ซึ่งวิธีที่ใช้ได้แก่ วิธีการวัดเพื่อจดจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงและวิธีการประมาณค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยจะนำความผิดพลาดดังกล่าวไปใช้ในการชดเชยการขับเคลื่อนภายในระบบเปิดให้มีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น ผลการทดลองจากวิธีการลดความผิดพลาดในการขับเคลื่อนทั้ง 2 วิธีนั้น วิธีการจดจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงสามารถลดความผิดพลาดสูงสุดได้จาก 0.176 องศา เหลือเพียง 0.0263 องศา หรือลดลงถึง 6.7 เท่า แต่วิธีนี้แก้ไขวิธีนี้ ต้องใช้หน่วยความจำมากเนื่องจากต้องจดจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงทุกตำแหน่งของการส่งกำลัง ในขณะที่วิธีการประมาณค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยสมการโพลีโนเมียลอันดับที่ 6 นั้นลดความผิดพลาดสูงสุดเหลือ 0.126° หรือคิดเป็น 1.4 เท่าจากค่าเดิม แต่การแก้ด้วยวิธีนี้ใช้หน่วยความจำน้อยกว่ามากเพราะใช้เพียง 1 สมการ 6 ตัวแปรในการแทนความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทุกตำแหน่งของการส่งกำลัง วิธีนี้เหมาะกับระบบที่มีความผิดพลาดที่เกิดจากพื้นเพองน้อยกว่าความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง^๑

Abstract

Solar energy has long been considered an ultimate solution to our energy needs. Solar furnace is a possible way to convert solar energy into thermal energy. To obtain high power and temperature, the system usually employs a single central receiver

and a large number of heliostats. The heliostats must be designed to achieve a high degree of targeting accuracy. To reduce cost of heliostats, open-loop positioning system based on stepping motor and gearing are used. Although, accurate but costly encoders are not used in the open-loop system, in accuracy of the system may be recovered. Two methods were proposed. In the first method, all transmission errors were recorded and used to compensate the input command of the stepper during actual positioning. With this method, transmission error can be reduced from 0.176 degree maximum to only 0.0263 degree or 6.7 times in reduction. However, large amount of onboard memory is required to store the data. On the other hand, the second method used a 6th order polynomial to represent the data compactly. As a result, the error can be reduced to 0.126 degree maximum which equals to 1.4 times reduction. The second method may be desirable if errors from gear tooth are small compared to eccentricity of the gear.

1. บทนำ

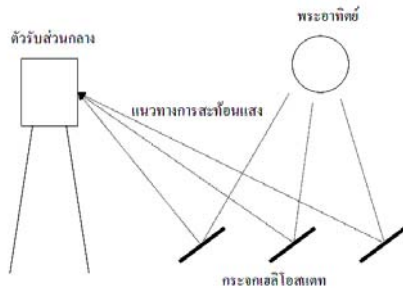
การสร้างเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงนั้น ปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างและออกแบบคือ ปริมาณพลังงานที่ต้องการ และ อุณหภูมิที่ต้องการ การรวมแสงเพื่อให้เกิดปริมาณความร้อนเพียงพอต่อความต้องการนั้น จะต้องใช้กระจกสะท้อนแสงอาทิตย์ที่สามารถเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ได้ หรือเรียกว่า เฮลิโอสแตท (Heliostat) โดยกระจกนี้จะทำหน้าที่สะท้อนแสงไปยัง ระบบตัวรับส่วนกลาง (Central receiver) เพื่อรวบรวมพลังงาน โดยในปัจจุบันสามารถรวบรวมแสงให้ได้พลังงานในระดับเมกะวัตต์ จากโครงการ Solar one และ Solar two ของกระทรวงพลังงานสหรัฐอเมริกา ดังรูปที่ 1.1

ระบบตัวรับส่วนกลางเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ โดยจะมีพื้นที่รับแสงมากและรวมแสงโดยการใช้เฮลิโอสแตทจำนวนมาก ในการสะท้อนแสงไปยังจุดรวมแสงที่จุดเดียวกันดังรูปที่ 1.2 เนื่องจากเฮลิโอสแตทกับตัวรับส่วนกลางอาจมีระยะห่างกันมาก 30 เมตรหรือมากกว่า ดังนั้น

ตัวเฮลิโอสแตทเอง จะต้องมีระบบขับเคลื่อนที่มีความแม่นยำในการเคลื่อนที่มาก ไม่เช่นนั้นแล้วแสงสะท้อนจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบไปยังตัวรับแสง จะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นมาก ยกตัวอย่างเช่น หากเฮลิโอสแตทอยู่ห่างจากตัวรับแสงส่วนกลาง 30 เมตร โดยระบบขับเคลื่อนมีความผิดพลาดเกิดขึ้นเพียง 0.1 องศา จะส่งผลให้แสงที่ตกกระทบไปยังตัวรับส่วนกลางมีความผิดพลาดถึง 5.2 เซนติเมตร



รูปที่ 1.1 ระบบรวมแสงอาทิตย์ของโครงการ Solar one



รูปที่ 1.2 แนวทางการสะท้อนแสงของระบบแบบตัวรับส่วนกลาง

โดยทั่วไปเฮลิโอสแตทจะใช้ระบบควบคุมแบบปิด (Closed-loop control system) ซึ่งจะมีอุปกรณ์ตรวจวัดมุมการหมุน หรือไม่มีก็อุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งดวงอาทิตย์ [1] โดยจะทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณย้อนกลับเพื่อใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเฮลิโอสแตทให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการอย่างแม่นยำ เป็นเหตุให้เฮลิโอสแตทแต่ละตัวมีราคาสูง แนวคิดใหม่ในการควบคุมเฮลิโอสแตทคือการใช้ระบบควบคุมแบบเปิดซึ่งข้อดีคือมีราคาถูก งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับ วิธีการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบขับเคลื่อนของเฮลิโอสแตทแบบเปิด โดยจะเริ่มศึกษาจากแบบจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบขับเคลื่อนเฮลิโอสแตท ตลอดจนความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงและวิธีการลดความผิดพลาดดังกล่าว เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบ, สร้างและควบคุมระบบขับเคลื่อนเฮลิโอสแตทให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้ระบบขับเคลื่อนราคาแพงที่มีความแม่นยำสูง

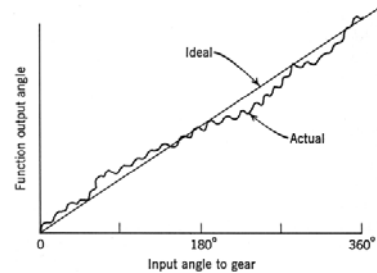
2. ทฤษฎีความคลาดเคลื่อนของเกียร์

ค่าความคลาดเคลื่อนในการส่งกำลังของเกียร์เป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ โดยเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนจากระยะห่างระหว่างฟันที่ขบกัน (backlash error) และตำแหน่งการเคลื่อนที่ผิดพลาด (position error) โดย backlash เป็นค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่เนื่องจากการหมุนกลับทิศทาง เมื่อนำเฟืองมาประกอบเข้าด้วยกันส่งผลให้มีระยะห่างระหว่างฟันเกิดขึ้น

ช่องว่างนี้จะเรียกว่า backlash ส่วน position error เกิดขึ้นเมื่อการส่งกำลังมีความผิดพลาดทั้งในส่วนของตำแหน่งและการเคลื่อนที่ ถึงแม้ว่าค่าความผิดพลาดทั้ง 2 แบบจะไม่สามารถแยกออกจากกันได้อย่างเด็ดขาด แต่ก็ยังมีความแตกต่างกัน และเกิดขึ้นจากสาเหตุที่ต่างกัน ในบทความนี้จะไม่คิดค่าความผิดพลาดที่เกิดจาก backlash โดยให้การส่งกำลังของเกียร์เป็นไปในทิศทางเดียวและใส่แรงบิดไว้เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดนี้จึงจะแสดงให้เห็นจากผลการทดลอง

2.1 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ผิดพลาด (position error)

ความผิดพลาดส่วนนี้ประกอบไปด้วยสองส่วนด้วยกันได้แก่ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (tooth-to-tooth composite error, E_{tt}) และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (Runout position error, e) ความผิดพลาดทั้งสองส่วนนี้สามารถมองให้อยู่ในรูปผลรวมของความผิดพลาด TCE (total composite error, E_{tc}) โดยจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของเกียร์ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งความผิดพลาดแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 ความคลาดเคลื่อนของเกียร์ที่เทียบกับอุดมคติ [2]

2.2 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน TTCE (tooth-to-tooth composite error)

ความผิดพลาดนี้เป็นผลรวมของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการผลิตซึ่งทำให้รูปร่างของฟันเกียร์ไม่ได้มาตรฐาน ตำแหน่งของฟันไม่ได้มาตรฐาน ความหนาของฟันไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งความผิดพลาดนี้จะมีค่าไม่แน่นอนในแต่ละฟันของเกียร์จะทำให้ค่าความผิดพลาดไม่เท่ากัน โดยความผิดพลาดส่วนนี้แทนด้วย สัญลักษณ์ E_{tt} ซึ่งสามารถหาค่าประมาณได้จากตารางที่ 2.1 [2] ตารางดังกล่าวจะแสดงความผิดพลาดของเกียร์เกรดต่างๆ โดยเกียร์เกรดยิ่งสูง ความละเอียดและราคาก็ยิ่งสูงตามไปด้วย

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (TTCE) นี้สามารถประมาณค่าให้อยู่ในรูปของ Sine Wave ได้ โดยพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันมุมได้ จากสมการ

$${}_aE_{tt} = (E_{tt}/R) \sin(\theta n) \quad (2.1)$$

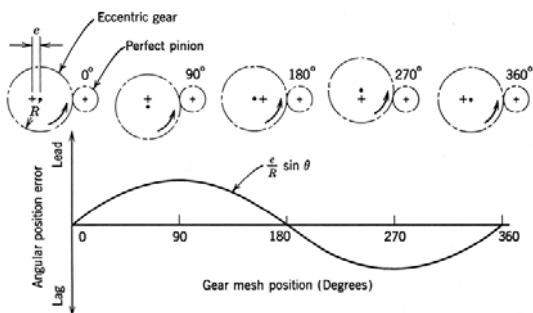
โดย ${}_aE_{tt}$ = ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันในฟังก์ชันมุม (องศา), E_{tt} = ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (นิ้ว) หาได้จากตาราง 2.1, R = รัศมี pitch ของเกียร์ (นิ้ว), θ = มุมที่หมุนไปของเกียร์ (องศา) n = จำนวนฟันของเกียร์

ตารางที่ 2.1 ความผิดพลาดของเกียร์บางเกรดตามมาตรฐานของ AGMA (American Gear Manufacturers Association) [2]

AGMA Quality No.	Number of Teeth and Pitch Diameter	Tooth-to-Tooth Composite (error)	Total Composite (Error)
5	Over 20 teeth, over 4in	0.0027	0.0072
6	Over 20 teeth, over 4in	0.0019	0.0052
7	Over 20 teeth, over 4in	0.0014	0.0037
8	Over 20 teeth, over 4in	0.0010	0.0027
...

2.3 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (Runout position error)

ในการสร้างเกียร์ จุดหมุนจริง ๆ ของเกียร์จะมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยซึ่งเป็นผลทำให้เกิดมุมการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดไป ซึ่งตำแหน่งของการหมุนของเกียร์ส่งผลให้ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 2.2 โดย e คือความคลาดเคลื่อนในการหมุนเยื้องศูนย์กลาง



รูปที่ 2.2 การวางตัวและความผิดพลาดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง [2]

$$E_{tc} = E_{tt} + e \quad (2.2)$$

$$e = E_{tc} - E_{tt} \quad (2.3)$$

โดยค่า E_{tc} และ E_{tt} สามารถหาได้จากตาราง 2.1 และสามารถคำนวณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางให้อยู่ในพิกัด มุมได้จากสมการ

$$aE_p = (e/R) \sin(\theta) \quad (2.4)$$

โดย aE_p = ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (องศา), E_{tt} = ความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (นิ้ว), R = รัศมี pitch ของเกียร์ (นิ้ว), θ = มุมที่หมุนไปของเกียร์ (องศา)

เราสามารถหาความผิดพลาดรวม (TCE) ที่เกิดขึ้นในการเคลื่อนที่ของเกียร์ให้อยู่ในพิกัดของมุมได้จากสมการ

$$aE_{tc} = aE_{tt} + aE_p \quad (2.5)$$

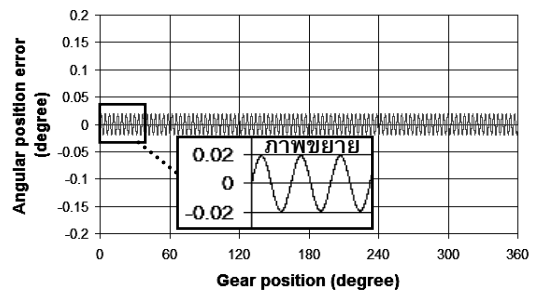
โดย aE_{tc} = ความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้น (องศา), aE_{tt} = ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (องศา), aE_p = ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (องศา)

3. การจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในเฟือง

จากสมการที่กล่าวมาเราสามารถจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ สมมุติเกียร์มีจำนวนฟันเท่ากับ 100 ฟัน และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิตซ์ 8 นิ้ว ใช้เกียร์ AGMA เบอร์ 5 จากตาราง 4.1 ค่า $E_{tt} = 0.0027$ นิ้ว

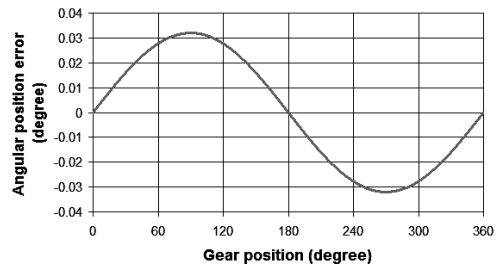
, $E_p = 0.0072$ นิ้ว จากนั้นจะทำการซึ่งสามารถคำนวณหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยรูปที่ 3.1 แสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (TTCE) ซึ่งอยู่ในช่วง $\pm 0.019^\circ$ โดยจะเป็น sine wave 100 ลูกเท่ากับจำนวนฟันเฟือง รูปที่3.2 แสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (runout error) ซึ่งอยู่ในช่วง $\pm 0.032^\circ$ รูปที่3.3 แสดงความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้น (TCE) ซึ่งอยู่ในช่วง $\pm 0.051^\circ$ ความผิดพลาดรวม (TCE) แสดงดังรูปที่3.4 เมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ในอุดมคติที่ไม่เกิดความผิดพลาด ในรูปความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้น (TCE) ถูกขยาย 500เท่าเพื่อให้เห็นผลต่างชัดเจน

Tooth-to-tooth position error (TTCE)



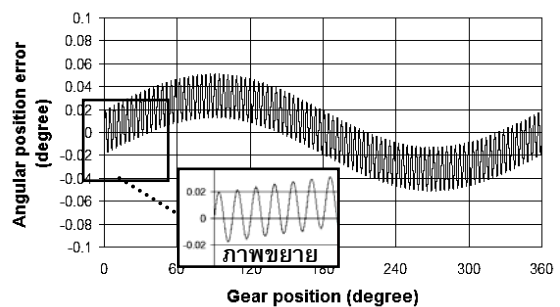
รูปที่ 3.1 การจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (TTCE)

Runout position error

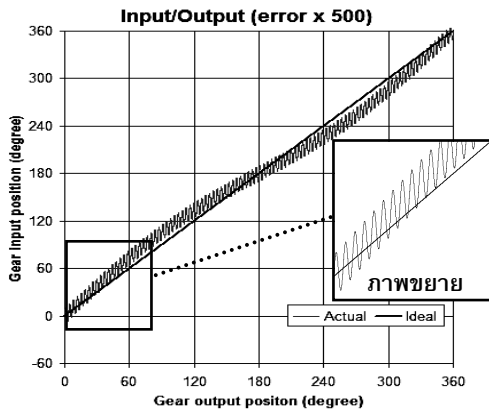


รูปที่3.2 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (runout error)

Total composite error (TCE)



รูปที่3.3 ความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้น (TCE)



รูปที่ 3.4 การจำลองการเคลื่อนที่จริงของเกียร์เทียบกับการเคลื่อนที่ในอุดมคติ โดยความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้น (TCE) 500เท่า

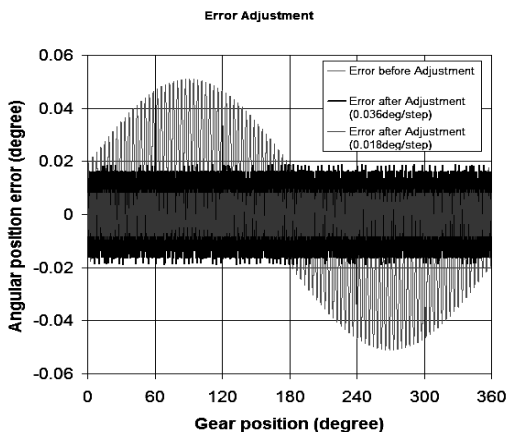
4. การแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในเฟือง

เราทำการแก้ไขความผิดพลาด โดยการทำการจดจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นไว้ก่อน แล้วเวลาขับเคลื่อนเกียร์นำเอาความผิดพลาดที่จดจำไว้มาพิจารณาด้วย[6] เพื่อบังคับไปที่ตำแหน่งที่เมื่อซดเซยความผิดพลาดแล้วจะได้ตำแหน่งที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 วิธีการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในเกียร์[3]

ผลที่ได้จากการแก้ไขความผิดพลาดด้วยวิธีนี้โดยกำหนดให้ระบบขับเคลื่อนเกียร์เป็นการขับเคลื่อนแบบลำดับขั้น มีความละเอียด 10,000 และ 20,000 ค่าต่อการหมุนเกียร์ 1 รอบ หรือมีความละเอียดในการขับเคลื่อนแต่ละลำดับขั้นมีค่า 0.036 องศา และ 0.018 องศาตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.2



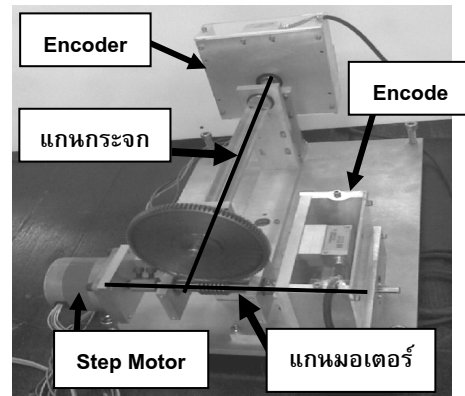
รูปที่ 4.2 ผลการจำลองความผิดพลาดหลังจากแก้ไขแล้ว

จากผลเห็นได้ว่า ความผิดพลาดลดลงจากเดิมอยู่ที่ $\pm 0.051^\circ$ เหลือเพียง $\pm 0.019^\circ$ หรือ 2.684 เท่า จากค่าเดิมสำหรับการขับเคลื่อนทีละ 0.036 องศา และเหลือ $\pm 0.008^\circ$ หรือ 6.357 เท่าจากค่าเดิม เมื่อทำการรวมบทความวิชาการ เล่มที่ 1 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22

ขับเคลื่อนทีละ 0.018 องศา จะเห็นได้ว่าระบบขับเคลื่อนที่มีความละเอียดยิ่งสูงยิ่งสามารถลดความผิดพลาดได้มากขึ้น ทั้งนี้ระบบขับเคลื่อนต้องมีความละเอียดมากกว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจึงจะสามารถแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยวิธีนี้ได้

5. การทดลอง

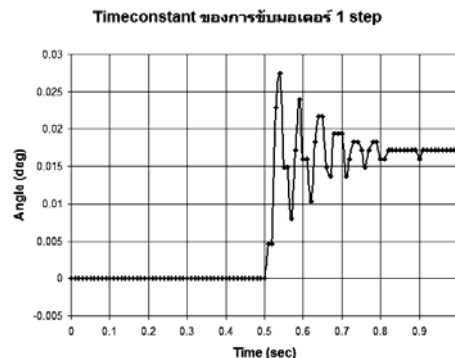
ในการทดลองใช้เฟืองหนอนอัตราทด 1: 100 ต่อเข้ากับแกนกระจก โดยตัวเฟืองมี 100 ฟัน ซึ่งติดระบบวัดมุม (encoder) ตรงแกนกระจก และติดกับแกนมอเตอร์โดยมอเตอร์มีความละเอียดในการหมุน 200 step/rev ดังรูป 5.1 ซึ่งจะทำให้มีความละเอียดในการขับเคลื่อน 20,000 step ต่อการหมุนของแกนกระจก 1 รอบ การขับเคลื่อนใช้การหมุนกระจกไปทางเดียวและมีตุ้มน้ำหนัก 200g ถ่วงไว้ผ่านพูลเลย์ $\phi 2\text{cm}$ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิด backlash ส่วน encoder มีความละเอียดอยู่ที่ 314,880 ค่าต่อการหมุน 1 รอบ หรือมีความละเอียดมากกว่าระบบขับเคลื่อน 15.7 เท่า ซึ่งก่อนเริ่มการทดสอบทุกครั้งจะทำการหาค่า Index จาก encoder ทั้ง 2 ตัวก่อน เพื่อให้การทดสอบทุกครั้งเริ่มจากตำแหน่งที่ฟันคู่เดียวกันชบกัน



รูปที่ 5.1 ระบบที่ใช้ในการทดสอบความผิดพลาดของเฟืองตัวหนอน

5.1 Settling-time ของมอเตอร์

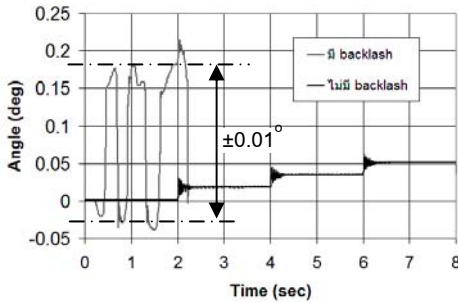
ค่า settling time ของมอเตอร์นั้นมีความจำเป็นมากเพื่อให้ทราบว่าจะต้องใช้เวลารอเท่าใด เพื่อให้ค่าที่อ่านได้จาก encoder ถึงจะนิ่ง ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไป 1 step มอเตอร์ที่ใช้มีความละเอียด 200 step/rev หรือหมุน 1.8 deg/Step โดยต่อผ่านเฟืองตัวหนอนอัตราทด 1:100 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.2 โดยมี settling time ประมาณ 0.4 sec



รูปที่ 5.2 มุมองศาที่ได้จากการเคลื่อนที่มอเตอร์ 1 step

5.2 การทดสอบ Backlash ที่เกิดขึ้นในระบบ

ในการทดลองนี้จะทำการขับมอเตอร์ 1 step ทุกๆ 2 วินาที โดยจะทำการทดลอง 2 รอบ ซึ่งรอบแรกนั้นใน 2 วินาทีแรกจะทำการขับแกนกระจกเพื่อให้เกิด backlash หลังจากนั้นจะทำการสลับแกนกระจกให้ตุ้มถ่วงดึงแกนกระจกไว้ ส่วนรอบที่ 2 จะปล่อยให้ตุ้มถ่วงดึงแกนกระจกไว้ตลอด โดยผลที่ได้แสดงในรูปที่ 5.3

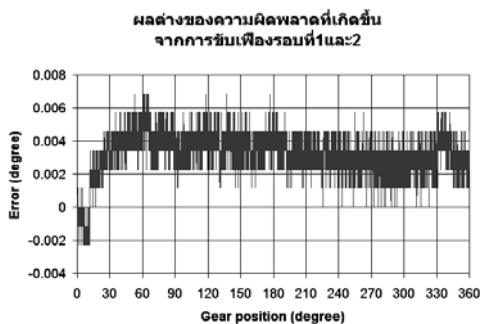


รูปที่ 5.3 ผลทดสอบ backlash ที่เกิดขึ้น

จากรูปจะเห็นว่าในช่วง 0-2 วินาทีแรกจะมีการแกว่งตัวเป็นผลจากการเกิด backlash แต่หลังจากนั้นผลจาก backlash จะหายไปเนื่องจากน้ำหนักของตุ้มถ่วงดึงแกนกระจกไว้ จากการทดลองสามารถวัด backlash ได้ประมาณ $\pm 0.01^\circ$

5.3 การทดสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆของเฟืองว่าคงที่หรือไม่

การทดสอบเป็นการหมุนเฟืองตัวหนอนไปแล้วกลับ 2 รอบเพื่อดูผลต่างของความผิดพลาดที่เกิดขึ้น เพื่อพิจารณาว่าความผิดพลาดที่เกิดจากการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอนนั้นคงที่ ณ ตำแหน่งต่างๆหรือไม่ รูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง -0.0022° ถึง 0.0065° ซึ่งยอมรับได้ เพราะการขับมอเตอร์ 1 Step จะทำให้เกิดมุมที่กระจกหมุนไป 0.018° เพราะความผิดพลาดส่วนนี้คิดเป็น 36% ของการขับมอเตอร์ 1 step

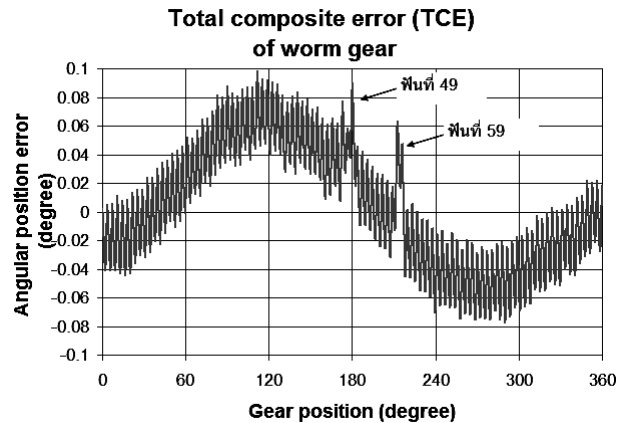


รูปที่ 5.4 ผลต่างของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการขับมอเตอร์ 2 รอบ

5.4 การวัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน

จากการทดลองเก็บค่าความผิดพลาดแสดงในรูปที่ 5.5 ซึ่งความผิดพลาดอยู่ในช่วง -0.07751° ถึง 0.09871° โดยลักษณะความผิดพลาดที่วัดได้นั้นจะเป็น sine wave ลูกเล็ก ๆ จำนวน 100 ลูกคลื่น

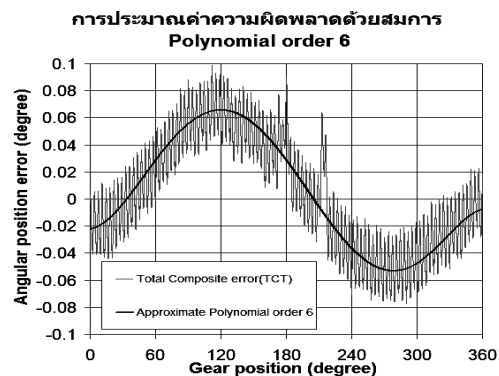
เท่ากับจำนวนฟันเฟืองตัวหนอนพอดี ซึ่งเป็นผลจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (TTCE) โดย sine wave ลูกเล็ก ๆ นี้จะขึ้นอยู่กับ sine wave ลูกใหญ่ อีกที ซึ่ง sine wave ลูกใหญ่เกิดจากความผิดพลาดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์ (runout error) โดย sinewave ลูกเล็ก ลูกที่ 49 ตรงตำแหน่งเฟืองตัวหนอนที่ 180° และ sinewave ลูกที่ 59 ตรงตำแหน่งเฟืองตัวหนอนที่ 212° นั้นจะมีค่าความผิดพลาดกระโดดออกมาจากค่าอื่นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากความผิดพลาดจากฟันเฟืองตัวหนอน ณ ตำแหน่งฟันที่ 49 และ 59 ตามลำดับ



รูปที่ 5.5 ความผิดพลาดรวมในการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน

5.5 การลดความผิดพลาดที่เกิดจากการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอนโดยใช้การประมาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยสมการ Polynomial Order 6

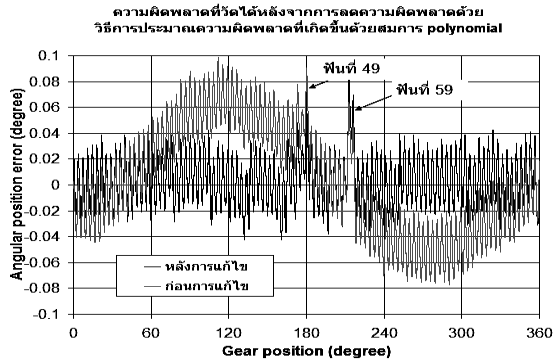
จากความผิดพลาดที่วัดได้ เพื่อให้การประมาณมีค่าที่ใกล้เคียงที่สุด จึงนำข้อมูลดังกล่าวมาจำลองด้วยสมการโพลิโนเมียลอันดับที่ 6 [4] ดังรูปที่ 5.6 เพื่อใช้ในการจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการส่งกำลังทั้งหมดให้อยู่ในรูปสมการเพียงสมการเดียว



รูปที่ 5.6 สมการโพลิโนเมียลจากความผิดพลาดที่วัดได้

วิธีการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้น สามารถทำได้โดยนำผลที่ได้จากสมการโพลิโนเมียลมาพิจารณาค่าตำแหน่งในการขับเคลื่อนที่ทำให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด โดยหลังจากทดลองขับเฟืองหนอนแล้ววัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 5.7 ซึ่งความผิดพลาดที่แก้ได้ด้วยวิธีนี้คือความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์เท่านั้น โดยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันไม่สามารถแก้ได้ด้วยวิธีนี้ ซึ่งดูได้จาก

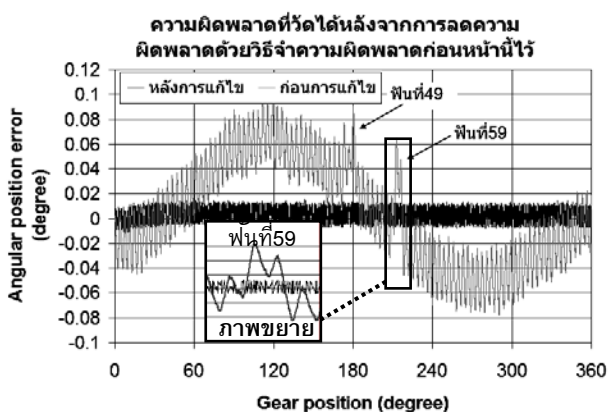
ตำแหน่งเฟืองตัวหนอน ณ มุม 212° จะเห็นค่าความผิดพลาดที่เกิดจากฟันซี่ที่ 59 ได้อย่างชัดเจน โดยความผิดพลาดที่วัดได้นั้นอยู่ในช่วง -0.04230° ถึง 0.08345° นั่นคือหลังจากการแก้ไขความผิดพลาดด้วยวิธีนี้แล้วมีความแม่นยำเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียง 1.4 เท่า



รูปที่ 5.7 ความผิดพลาดหลังจากการแก้ไขด้วยสมการโพลิโนเมียล

5.6 การลดความผิดพลาดที่เกิดจากการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอนโดยใช้การจำความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

วิธีการนี้ใช้การบันทึกความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทุกตำแหน่งการหมุนในการส่งกำลังด้วยเฟืองตัวหนอน จากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้เพื่อใช้อ้างอิงในการขับเคลื่อนให้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยจะนำความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมา พิจารณาหาจุดที่สามารถขับเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการโดยให้มีความผิดพลาดน้อยที่สุด ซึ่งหลังจากการขับเฟืองตัวหนอนสามารถวัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 5.8 ซึ่งวิธีนี้จะสามารถลดได้ทั้งความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน โดยดูได้จากตำแหน่งฟันเกียร์ที่ 59 ความผิดพลาด ณ ตำแหน่งนี้จะไม่กระโดดเหมือนวิธีที่ผ่านมา ซึ่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นหลังจากแก้ไขด้วยวิธีนี้เหลือเพียง -0.01143° ถึง 0.01486° หรือมีความแม่นยำเพิ่มขึ้นจากเดิมถึง 6.7 เท่า



รูปที่ 5.8 ความผิดพลาดหลังจากการแก้ไขด้วยการจำความผิดพลาด

6. สรุป

ในการทดลองนี้เราสามารถแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ

1. วิธีการจำความผิดพลาดไว้ทุกจุดและ
2. วิธีการประมาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยสมการโพลิโนเมียล ซึ่งสามารถดูความผิดพลาดที่

วัดได้จากตารางที่ 6.1 โดยวิธีการจำความผิดพลาดไว้ทุกจุดจะมีความแม่นยำมากกว่า เพราะสามารถแก้ความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (Runout error) และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟัน (TTCE) ได้ ในขณะที่วิธีการประมาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยสมการโพลิโนเมียลแก้ได้เฉพาะความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางเท่านั้น ซึ่งในการทดลองนี้มีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างฟันซี่ที่ 49 และ 59 มาก ทำให้ความผิดพลาดที่แก้ไขโดยวิธีนี้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้นเพียง 1.4 เท่า น้อยกว่าวิธีการจำความผิดพลาดไว้ทุกจุดที่สามารถเพิ่มความแม่นยำได้ถึง 6.7 เท่า อย่างไรก็ตามในระบบที่มีความผิดพลาดที่เกิดจากฟันน้อยกว่าความผิดพลาดที่เกิดจากจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง วิธีประมาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยสมการโพลิโนเมียลมีความเหมาะสมในการใช้งานมากกว่าเพราะสามารถลดทั้งการแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดจากฟันได้ และในการใช้งานจริงวิธีนี้มีความสะดวกกว่าเพราะเราสามารถแทนความผิดพลาดทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการส่งกำลังด้วยสมการเพียงสมการเดียวที่มี 6 ตัวแปร ซึ่งสามารถประหยัดหน่วยความจำของระบบควบคุมการขับเคลื่อนแอลิโอสแตทได้ เพราะในการสร้างเตาเผาสุริยะอุณหภูมิสูงจริงๆนั้นต้องใช้แอลิโอสแตทหลายพันตัว อีกทั้งแอลิโอสแตท 1 ตัวจำเป็นต้องใช้ระบบขับเคลื่อน 2 ชุดในการหมุนกระบอกติดตามพระอาทิตย์ ในขณะที่วิธีการจำความผิดพลาดไว้ทุกจุดต้องทำการบันทึกความผิดพลาดที่เกิดขึ้นไว้ถึง 20,000 ค่า ต่อชุดขับเคลื่อนเพียงชุดเดียว

ตารางที่ 6.1 แสดงความผิดพลาดที่วัดได้จากการทดลอง

	ค่าเดิมก่อนการแก้ไข	แก้ด้วยการประมาณค่าความผิดพลาด	แก้ด้วยการจำความผิดพลาดทุกตำแหน่ง
Maximum	0.1762°	0.126°	0.0263°
Average Absolute	0.0362°	0.0161°	0.00500°
RMS	0.0425°	0.0193°	0.00605°
ความแม่นยำ (คิดเป็นจำนวนเท่า)	1 (Max.)	1.4	6.7
	1 (Avg.)	2.3	7.2
	1 (RMS)	2.2	7

เอกสารอ้างอิง

1. Baheti, R.S., Scott, P.F., "Design of self-calibrating controllers of heliostats in a solar power plant", IEEE Transactions on Automatic Control, AC-25(6):1091-1097, December 1980
2. George W. Michalec, Precision Gearing: Theory and Practice, New York: John Wiley & Sons, 1996
3. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, "การควบคุมระบบพลศาสตร์", พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548
4. ปราโมทย์ เตชะอำไพ, "ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม", พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพมหานคร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546, หน้า 142 - 147