

บทที่ 4

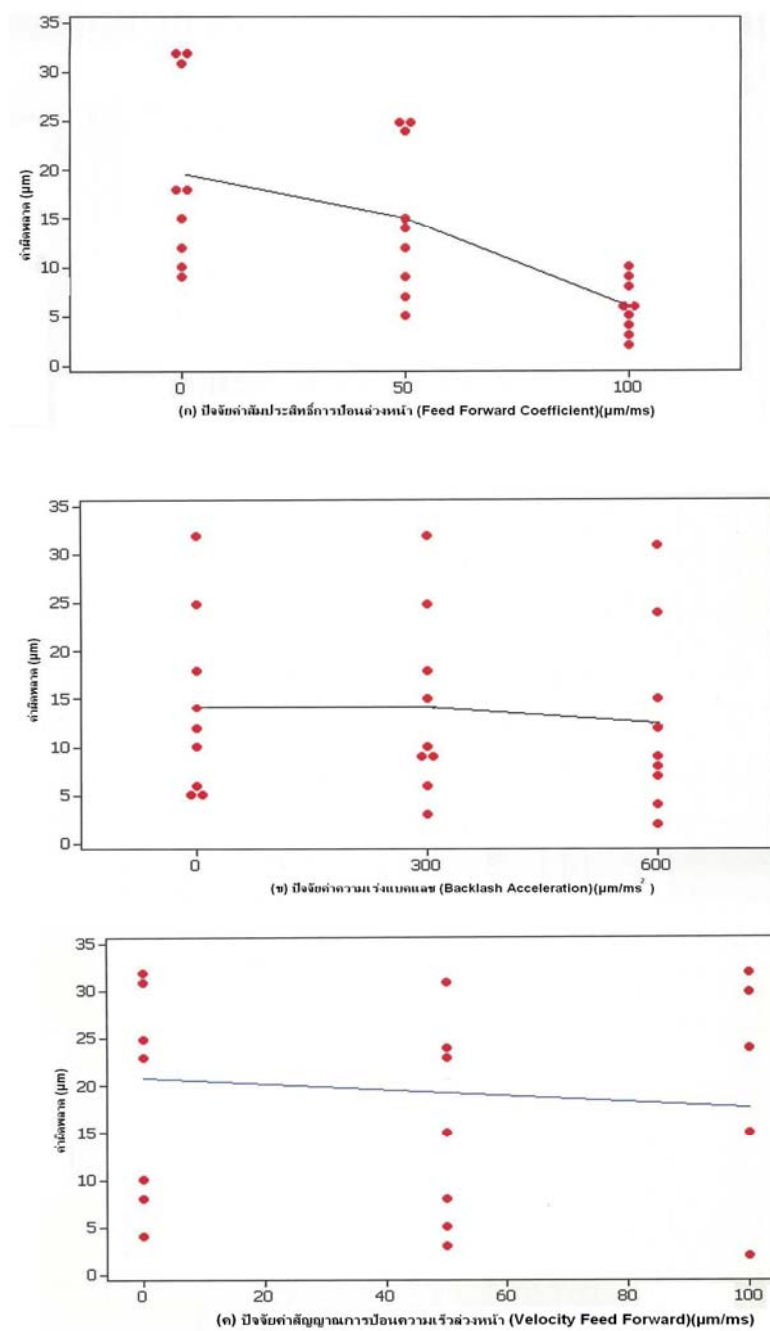
การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะทำการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ในบทที่ 3 ด้วยวิธีการทางสถิติ โดยทำการวิเคราะห์ค่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงาน ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่เกี่ยวข้องและวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Regression)

4.1 การวิเคราะห์ปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า, ปัจจัยค่าความเร่งแบบแลช และปัจจัยค่าสัญญาณการป้อนความเร็วล่วงหน้า

จากการวิเคราะห์การทดสอบความแปรปรวน ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองที่คาดหวังนั้นคือค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของโต๊ะวางชิ้นงาน ในการทดลองได้ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ตารางผลการทดลองจะแสดงในภาคผนวก ซึ่งสามารถวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของแต่ละปัจจัยได้ทางสถิติ จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของปัจจัยต่างๆ กับค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ดังแสดงในกราฟภาพที่ 4.1

จากกราฟภาพที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงค่าปัจจัยแต่ละค่าที่เกี่ยวข้องกับค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงาน โดยแกนนอนแสดงค่าแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมได้แก่ ปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้ามีหน่วยเป็นไมโครเมตรต่อมิลลิวินาที, ปัจจัยค่าความเร่งแบบแลช มีหน่วยเป็นไมโครเมตรต่อมิลลิวินาที² และปัจจัยค่าสัญญาณการป้อนความเร็วล่วงหน้า มีหน่วยเป็นไมโครเมตรต่อมิลลิวินาที ตามลำดับ ส่วนแกนตั้งแสดงค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเคลื่อนที่เป็นวงกลมมีหน่วยเป็นไมโครเมตร จุดที่แสดงบนกราฟคือค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงานที่เกิดจากปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความผิดพลาด ส่วนเส้นบนกราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงานที่เกิดจากปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความผิดพลาด



ภาพที่ 4.1

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยต่างๆ กับความผิดพลาดในการเคลื่อนที่
ของโต๊ะในแกน X และแกน Y ในขั้นตอนที่ 1

จากกราฟภาพที่ 4.1 (ก) พบว่า ปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้ายิ่งมีค่ามากจะทำให้ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของไต้ะวางขึ้นงานมีค่าน้อย

จากกราฟภาพที่ 4.2 (ข) พบว่า ปัจจัยค่าความเร่งแบบแลชมีค่าต่างๆ กันจะมีผลต่อค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของไต้ะวางขึ้นงาน ทำให้ไม่สามารถที่จะปรับค่าปัจจัยค่าความเร่งแบบแลช นี้ได้ในการลดค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของไต้ะวางขึ้นงาน

จากกราฟภาพที่ 4.3 (ค) พบว่า ปัจจัยค่าสัญญาณการป้อนความเร็วล่วงหน้า มีผลต่อการปรับค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของไต้ะวางขึ้นงาน

จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าปัจจัยในแต่ละค่าโดยวิธีทางสถิติ เพื่อที่จะหาค่าความสัมพันธ์ของปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า, ปัจจัยค่าความเร่งแบบแลช และปัจจัยค่าสัญญาณการป้อนความเร็วล่วงหน้า ทางวิธีทางสถิติโดยจะตั้งสมมติฐานและออกแบบการทดลอง เพื่อที่ได้ผลลัพธ์ของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่เป็นวงกลม

เมื่อกำหนดให้ผลตอบสนองที่คาดหวัง y_{ijk} คือ ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดขึ้นขณะมีการเคลื่อนที่ของไต้ะ มีค่าเท่ากับผลรวมของผลตอบสนองเฉลี่ย (μ) ดังแสดงในสมการที่ 4.1 [3]

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + e_{ijk} \quad \text{สมการที่ 4.1}$$

โดย μ คือ ผลตอบสนองเฉลี่ย ในที่นี้คือค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของไต้ะ

τ_i คือ ผลกระทบอันเกิดจากระดับที่ i ของปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า

β_j คือ ผลกระทบอันเกิดจากระดับที่ j ของปัจจัยค่าความเร่งแบบแลช

γ_k คือ ผลกระทบอันเกิดจากระดับที่ k ของปัจจัยค่าสัญญาณการป้อนความเร็วล่วงหน้า

$(\tau\beta)_{ij}$ คือ ผลกระทบของความสัมพันธ์ระหว่าง τ_i และ β_j

$(\tau\gamma)_{ik}$ คือ ผลกระทบของความสัมพันธ์ระหว่าง τ_i และ γ_k

$(\beta\gamma)_{jk}$ คือ ผลกระทบของความสัมพันธ์ระหว่าง β_j และ γ_k

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ คือ ผลกระทบของความสัมพันธ์ระหว่าง τ_i , β_j และ γ_k

เมื่อ i, j, k , คือ ระดับของปัจจัย มีค่าตั้งแต่ 1-3

จากสมการที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ปัจจัยแต่ละปัจจัยหรือปัจจัยรวมอาจจะมีผลต่อค่าผลตอบแทนที่คาดหวัง ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบสมมติฐานโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ 3^3 ที่ความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$)

โดย สมมติฐานหลัก H_0 : ผลกระทบของปัจจัยที่กำหนดไม่มีผลต่อผลตอบแทนที่คาดหวัง

สมมติฐานรอง H_1 : ผลกระทบของปัจจัยที่กำหนดอย่างน้อยหนึ่งค่ามีผลกระทบต่อผลตอบแทนที่คาดหวัง

ถ้าค่าความน่าจะเป็น (P) มีค่ามากกว่า α จะทำการยอมรับสมมติฐานหลัก นั่นคือผลกระทบที่สมมติฐานนั้นไม่มีผลต่อค่าที่ได้จากการวัด แต่ถ้าค่า P มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ α จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก นั่นคือ ผลกระทบที่สมมติฐานนั้นมีผลต่อค่าที่ได้จากการวัด

การกำหนดค่าสมมติฐานจากปัจจัยทั้งสาม เป็นดังนี้

ปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0, \exists \tau$$

ปัจจัยค่าความเร่งแบบแคช

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

ปัจจัยค่าสัญญาณการป้อนความเร็วล่วงหน้า

$$H_0 : \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0$$

$$H_1 : \gamma_k \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

ปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า และปัจจัยค่าความเร่งแบบแคช

$$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ ทุกๆค่าของ } i, j$$

$$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

ปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า และปัจจัยค่าสัญญาณการป้อนความเร็วล่วงหน้า

$$H_0 : (\tau\gamma)_{ik} = 0 \text{ ทุกๆค่าของ } i, k$$

$$H_1 : (\tau\gamma)_{ik} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

ปัจจัยค่าความเร่งแบคแลช และปัจจัยค่าสัญญาณการป้อนความเร็วล่วงหน้า

$$H_0 : (\beta\gamma)_{jk} = 0 \text{ ทุกๆค่าของ } j, k$$

$$H_1 : (\beta\gamma)_{jk} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

ปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า และปัจจัยค่าสัญญาณการป้อนความเร็วล่วงหน้า

$$H_0 : (\tau\beta\gamma)_{ijk} = 0 \text{ ทุกๆค่าของ } i, j, k$$

$$H_1 : (\tau\beta\gamma)_{ijk} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

Analysis of Variance for Error, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Feed Forward Coefficient	1	854.22	328.53	328.53	54.67	0.000
Backlash Acceleration	1	12.50	1.45	1.45	0.24	0.629
Velocity Feed Forward	1	997.56	363.60	363.60	60.50	0.000
Feed Forward Coefficient* Backlash Acceleration	1	0.00	0.07	0.07	0.01	0.912
Feed Forward Coefficient* Velocity Feed Forward	1	184.08	69.01	69.01	11.48	0.003
Backlash Acceleration* Velocity Feed Forward	1	0.00	0.07	0.07	0.01	0.912
Feed Forward Coefficient* Backlash Acceleration* Velocity Feed Forward	1	0.12	0.12	0.12	0.02	0.887
Error	19	114.18	114.18	6.01		
Total	26	2162.67				

S = 2.45143 R-Sq = 94.72% R-Sq(adj) = 92.78%

ภาพที่ 4.2

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า(Feed Forward), ปัจจัยค่าความเร่งแบคแลช (Backlash Acceleration) และปัจจัยค่าสัญญาณการป้อนความเร็วล่วงหน้า (Velocity Feed Forward)

จากภาพที่ 4.2 จะได้ว่าค่าความน่าจะเป็น P ของปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า, ปัจจัยค่าความเร่งแบคแลช, ปัจจัยค่าสัญญาณการป้อนความเร็วล่วงหน้า, ค่า P ของค่าความสัมพันธ์ร่วมระหว่างค่าปัจจัยต่างๆ ถ้าค่า P มีค่าน้อยกว่า α (0.05) จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) แสดงว่าปัจจัยที่พิจารณามีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ถ้าค่า P มีค่ามากกว่า α (0.05) จะยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) แสดงว่าปัจจัยที่พิจารณาไม่มีผลกระทบทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลเกี่ยวพันกันคือ ปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า และปัจจัย

ค่าสัญญาณการป้อนความเร็วล่วงหน้า จึงสามารถนำมาวิเคราะห์ร่วมกับปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า ซึ่งส่งสัญญาณออกมาทั้งคู่ในการตรวจสอบค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมได้ จึงสรุปได้ว่าปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า, ปัจจัยค่าสัญญาณการป้อนความเร็วล่วงหน้า รวมทั้งปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า และปัจจัยค่าสัญญาณการป้อนความเร็วล่วงหน้ามีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมดังแสดงผลสรุปในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1

การสรุปค่าปัจจัยต่างๆ ที่มีและไม่มีผลต่อค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงานในขั้นตอนที่ 1

ปัจจัย	มีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงาน (ปฏิเสธ H_0)	ไม่มีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงาน (ยอมรับ H_0)	ค่าความน่าจะเป็น P ของปัจจัยต่างๆ
Feed Forward	✓		0.000
Backlash Acceleration		✓	0.629
Velocity Feed Forward	✓		0.000
Feed Forward * Backlash Acceleration		✓	0.912
Feed Forward * Velocity Feed Forward	✓		0.003
Backlash Acceleration * Velocity Feed Forward		✓	0.912
Feed Forward * Backlash Acceleration* Velocity Feed Forward		✓	0.887

จากการวิเคราะห์การทดสอบความแปรปรวนข้างต้นทำให้ทราบถึงปัจจัยและปัจจัยร่วมที่มีผลกระทบต่อผลตอบแทนที่คาดหวังนั้นคือค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของโต๊ะ หลังจากนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุคูณ ซึ่งพบว่า

$$y = \mu_0 + \mu_1 X_1 + \mu_2 X_2 + \mu_3 X_3 + \mu_{12} X_1 X_2 + \mu_{13} X_1 X_3 + \mu_{23} X_2 X_3 + \mu_{123} X_1 X_2 X_3 + e$$

สมการที่ 4.2

โดย X_1 คือ ค่าของปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า

X_2 คือ ค่าของปัจจัยค่าความเร่งแบบแลช

X_3 คือ ค่าของปัจจัยค่าสัญญาณการป้อนความเร็วล่วงหน้า

μ_0 คือ สัมประสิทธิ์ผลกระทบเฉลี่ยของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงาน

μ_1 คือ สัมประสิทธิ์ผลกระทบของปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า

μ_2 คือ สัมประสิทธิ์ผลกระทบของปัจจัยค่าความเร่งแบบแลช

μ_3 คือ สัมประสิทธิ์ผลกระทบของปัจจัยค่าสัญญาณการป้อนความเร็วล่วงหน้า

จากสมการที่ 4.2 นำค่าปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องมาทำการทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุคูณเพื่อที่ตรวจสอบความสัมพันธ์ในแต่ละปัจจัย และทำการวิเคราะห์และทำนายค่าความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นจากการที่มีค่าปัจจัยต่างๆ ที่ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.3

Regression Analysis: Response versus Feed Forward, Backlash Acc, Velocity Feed Forward

The regression equation is

Error = 32.514 - 0.214Feed Forward - 0.00236Backlash Acceleration- 0.225Velocity Feed-0.000008Feed Forward*Backlash Acceleration +0.00152Feed Forward*Velocity Feed- 0.000008Backlash Acceleration*Velocity Feed + 0.0 Feed Forward*Backlash Acceleration*Velocity Feed

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	32.514	1.865	17.43	0.000
Feed Forward	-0.21361	0.02889	-7.39	0.000
Backlash Acc	-0.002361	0.004815	-0.49	0.629
Velocity Fee	-0.22472	0.02889	-7.78	0.000
Feed Forward*Backlash Acc	-0.000008	0.000075	-0.11	0.912
Feed Forward*Velocity Fee	0.001517	0.000448	3.39	0.003
Backlash Acc*Velocity Fee	-0.000008	0.000075	-0.11	0.912
Feed Forward*Backlash Acc*Velocity Fee	0.000000	0.000001	0.14	0.887

ภาพที่ 4.3

ผลการวิเคราะห์การทดสอบสมการเชิงเส้นพหุคูณของปัจจัย Feed Forward, Backlash Acceleration และ Velocity Feed Forward

จากภาพที่ 4.3 สามารถเขียนสมการเชิงเส้นพหุคูณออกได้ดังสมการที่ 4.3 คือ

$$y = 32.514 - 0.214 X_1 - 0.00236 X_2 - 0.225 X_3 + 0.00152 X_1 X_3 \quad \text{สมการที่ 4.3}$$

เมื่อได้สมการเชิงเส้นพหุคูณดังแสดงข้างต้นแล้ว สามารถแทนค่าปัจจัยต่างๆ ลงในสมการที่ได้ และสามารถได้ผลลัพธ์ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2

การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดที่ได้จากสมการและจากการทดลองในขั้นตอนที่ 1

ปัจจัย ค่าสัมประสิทธิ์ การป้อนล่วงหน้า (เปอร์เซ็นต์)	ปัจจัย ค่าความเร่งแบบเฉื่อย (ไมโครเมตรต่อ มิลลิวินาที ²)	ปัจจัย ค่าสัญญาณการ ป้อนความเร็ว ล่วงหน้า (เปอร์เซ็นต์)	ค่าความ ผิดพลาด จากสมการ (ไมโครเมตร)	ค่าความ ผิดพลาดจาก การทดลอง (ไมโครเมตร)
0	0	0	32.514	32
25	150	15	24.005	24
40	300	40	16.678	17
50	600	100	5.498	7
75	500	75	6.959	7
100	600	100	2.398	2

จากตารางที่ 4.2 เป็นการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมที่เกิดจากสมการเชิงเส้นพหุคูณและค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมที่เกิดจากการทดลองซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถนำสมการเชิงเส้นพหุคูณไปใช้ในการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากแต่ละปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงานได้ ซึ่งจะพบว่าปัจจัย Backlash Acceleration มีความสัมพันธ์แบบผกผันกับค่าปัจจัย Feed Forward [12]

จากการวิเคราะห์ในภาพที่ 4.2 และ 4.3 แสดงค่าปัจจัยที่มีผลและไม่มีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงาน

ดังนั้น การวิเคราะห์หาค่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมจะเลือกปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งมาใช้ จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยค่าความเร่งแบบแลชไม่มีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลม เนื่องจากต้องการยืนยันว่าปัจจัยค่าความเร่งแบบแลชนั้นไม่มีผลกระทบกับค่าความผิดพลาดจริงๆ จึงขอนำปัจจัยค่าความเร่งแบบแลชมาทำการทดลองซ้ำเพื่อความมั่นใจ

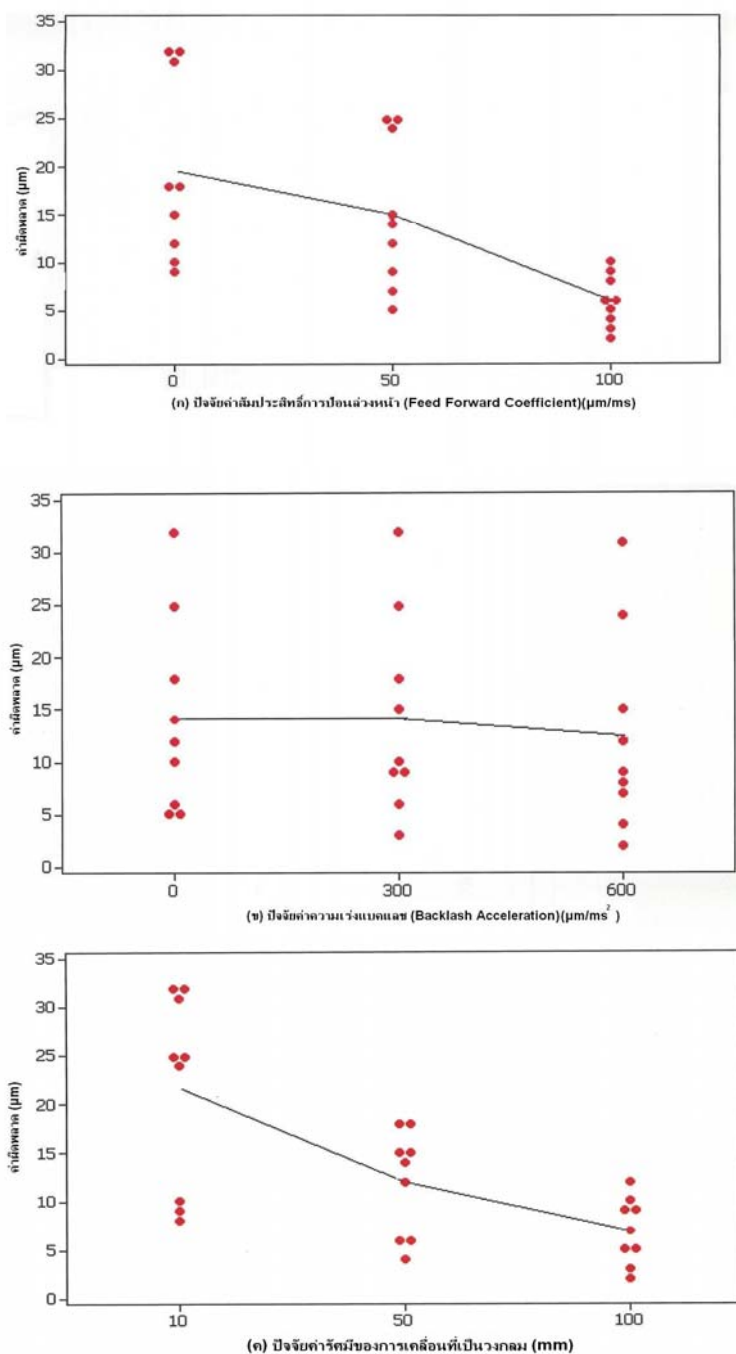
การวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนที่ 2 จะนำปัจจัยค่ารัศมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลมเข้ามาทำการวิเคราะห์ร่วม โดยจะเลือกปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า มาทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 2 ต่อไปนี้หัวข้อที่ 4.2

4.2 การวิเคราะห์ปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า, ปัจจัยค่าความเร่งแบบแลช และปัจจัยค่ารัศมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงาน

ทำการหาปัจจัยและปัจจัยร่วมที่มีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของโต๊ะ แสดงความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของโต๊ะวางชิ้นงานกับค่าปัจจัยต่างๆ ในกราฟที่ 4.4 จุดที่แสดงบนกราฟคือค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงานที่เกิดจากปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความผิดพลาด ส่วนเส้นบนกราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงานที่เกิดจากปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความผิดพลาด ค่าความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าความผิดพลาดจะมีแนวโน้มเดียวกันกับที่กล่าวมาแล้ว ในกรณีปัจจัยค่ารัศมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลม ถ้ามีความมากจะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมน้อย แต่ถ้ารัศมีมีค่าน้อยจะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมมาก

ผลกระทบของปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า, ปัจจัยค่าความเร่งแบบแลช และปัจจัยค่ารัศมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงาน ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบได้จากกราฟซึ่งแสดงปัจจัยต่างๆ ในแต่ละปัจจัยกับค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงาน โดยค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงานจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้าและปัจจัยค่ารัศมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลมมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนปัจจัยค่าความเร่งแบบแลช ไม่มีผลต่อค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลม โดยสังเกตจากกราฟภาพที่ 4.4 (ข) พบว่าเส้นกราฟค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมไม่มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยน เมื่อค่าปัจจัยค่าความเร่งแบบแลช มีการเปลี่ยนค่าเป็นค่าต่างๆ

ดังนั้นจึงแสดงการเปรียบเทียบแต่ละปัจจัยกับค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงานดังกราฟภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยต่างๆ กับความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของโต๊ะในแกน X และแกน Y ในขั้นตอนที่ 2

เมื่อกำหนดให้ผลตอบสนองที่คาดหวัง y_{ijk} คือค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดขึ้นขณะมีการเคลื่อนที่ของโต๊ะ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของผลตอบสนองเฉลี่ยกับผลกระทบของค่าของปัจจัยและความสัมพันธ์ของปัจจัย ดังแสดงในสมการที่ 4.4

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \lambda_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\lambda)_{ik} + (\beta\lambda)_{jk} + (\tau\beta\lambda)_{ijk} + e_{ijk} \quad \text{สมการที่ 4.4}$$

โดย μ คือ ผลตอบสนองเฉลี่ย ในที่นี้คือค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของโต๊ะ

τ_i คือ ผลกระทบอันเกิดจากระดับที่ i ของปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า

β_j คือ ผลกระทบอันเกิดจากระดับที่ j ของปัจจัยค่าความเร่งแบบเฉย

λ_k คือ ผลกระทบอันเกิดจากระดับที่ k ของปัจจัยวิธีของการเคลื่อนที่ของโต๊ะ

$(\tau\beta)_{ij}$ คือ ผลกระทบของความสัมพันธ์ระหว่าง τ_i และ β_j

$(\tau\lambda)_{ik}$ คือ ผลกระทบของความสัมพันธ์ระหว่าง τ_i และ λ_k

$(\beta\lambda)_{jk}$ คือ ผลกระทบของความสัมพันธ์ระหว่าง β_j และ λ_k

$(\tau\beta\lambda)_{ijk}$ คือ ผลกระทบของความสัมพันธ์ระหว่าง τ_i , β_j และ λ_k

เมื่อ i, j, k คือ ระดับของปัจจัย มีค่าตั้งแต่ 1-3

จากสมการที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าปัจจัยแต่ละปัจจัยหรือปัจจัยรวมอาจจะมีผลต่อค่าผลตอบสนองที่คาดหวัง ดังนั้น จึงต้องทำการทดสอบสมมติฐานโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ 3^3 ที่ความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$)

โดย สมมติฐานหลัก H_0 : ผลกระทบของปัจจัยที่กำหนดไม่มีผลต่อผลตอบสนองที่คาดหวัง

สมมติฐานรอง H_1 : ผลกระทบของปัจจัยที่กำหนดอย่างน้อยหนึ่งค่ามีผลกระทบต่อ

ผลตอบสนองที่คาดหวัง

ถ้าค่าความน่าจะเป็น (P) มีค่ามากกว่า α จะทำการยอมรับสมมติฐานหลัก นั่นคือผลกระทบที่สมมติฐานนั้นไม่มีผลต่อค่าที่ได้จากการวัด แต่ถ้าค่า (P) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ α จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก นั่นคือ ผลกระทบที่สมมติฐานนั้นมีผลต่อค่าที่ได้จากการวัด

การกำหนดค่าสมมติฐานจากปัจจัยทั้งสาม เป็นดังนี้

ปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0, \exists \tau$$

ปัจจัยค่าความเร่งแบบแลตซ์

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

ปัจจัยรัศมีของการเคลื่อนที่ของโต๊ะ

$$H_0 : \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0$$

$$H_1 : \lambda_k \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

ปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า และปัจจัยค่าความเร่งแบบแลตซ์

$$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ ทุกๆค่าของ } i, j$$

$$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

ปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า และปัจจัยรัศมีของการเคลื่อนที่ของโต๊ะ

$$H_0 : (\tau\lambda)_{ik} = 0 \text{ ทุกๆค่าของ } i, k$$

$$H_1 : (\tau\lambda)_{ik} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

ปัจจัยค่าความเร่งแบบแลตซ์ และปัจจัยรัศมีของการเคลื่อนที่ของโต๊ะ

$$H_0 : (\beta\lambda)_{jk} = 0 \text{ ทุกๆค่าของ } j, k$$

$$H_1 : (\beta\lambda)_{jk} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

ปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า, ปัจจัยค่าความเร่งแบบแลตซ์ และปัจจัยรัศมีของการเคลื่อนที่ของโต๊ะ

$$H_0 : (\tau\beta\lambda)_{ijk} = 0 \text{ ทุกๆค่าของ } i, j, k$$

$$H_1 : (\tau\beta\lambda)_{ijk} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

Analysis of Variance for Error, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Feed Forward	1	854.22	297.33	297.33	38.32	0.000
Backlash Acceleration	1	12.50	1.22	1.22	0.16	0.696
Radius	1	970.54	354.89	354.89	45.74	0.000
Feed Forward*Backlash Acceleration	1	0.00	0.07	0.07	0.01	0.927
Feed Forward*Radius	1	177.88	67.11	67.11	8.65	0.008
Backlash Acceleration*Radius	1	0.00	0.04	0.04	0.01	0.943
Feed Forward*Backlash Acceleration*Radius	1	0.10	0.10	0.10	0.01	0.912
Error	19	147.43	147.43	7.76		
Total	26	2162.67				

S = 2.78555 R-Sq = 93.18% R-Sq(adj) = 90.67%

ภาพที่ 4.5

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย Feed Forward, Backlash Acceleration
และรัศมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์ปัจจัยทั้ง 3 คือ รัศมีการเคลื่อนที่, ค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า และความเร่งแบบแลช พบว่ามีเพียงกรณีรัศมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลม และค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า มีความสัมพันธ์กันและมีผลกระทบกับความผิดพลาดของการเคลื่อนที่เป็นวงกลม จึงนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ทางสถิติ พบว่าค่าทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กัน โดยมีผลกระทบต่อความผิดพลาดของการเคลื่อนที่เป็นวงกลม ดังนั้น จึงต้องพิจารณาในการวิเคราะห์ผลกระทบในการลดความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลม

จากภาพที่ 4.5 จะได้ว่าค่า P ของปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า, ปัจจัยค่าความเร่งแบบแลช, ปัจจัยรัศมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลม ค่า P ของค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยต่างๆ ถ้าค่า P มีค่าน้อยกว่า α (0.05) จึงจะปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) แสดงว่าปัจจัยมีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลเกี่ยวพันกัน คือ ค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้าและรัศมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลม จึงสามารถนำมาวิเคราะห์ร่วมกับปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า ซึ่งส่งสัญญาณออกมาทั้งคู่ในการตรวจสอบค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมได้ จึงสรุปได้ว่าปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า, ปัจจัยรัศมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลม รวมทั้งปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้าและปัจจัยรัศมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลม มีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมดังแสดงผลสรุปในตารางที่ 4.3

จากการวิเคราะห์การทดสอบความแปรปรวนข้างต้นทำให้ทราบถึงปัจจัยและปัจจัยร่วมที่มีผลกระทบต่อผลตอบแทนที่คาดหวังนั้นคือค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของไต่ะ หลังจากนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุคูณเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความไม่แน่นอนในการวัดและหาค่าของปัจจัยและระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะได้ดังสมการที่ 4.5

$$y = \mu_0 + \mu_1 X_1 + \mu_2 X_2 + \mu_3 X_3 + \mu_{12} X_1 X_2 + \mu_{13} X_1 X_3 + \mu_{23} X_2 X_3 + \mu_{123} X_1 X_2 X_3 + e \quad \text{สมการที่ 4.5}$$

- โดย
- X_1 คือ ค่าของปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า
 - X_2 คือ ค่าของปัจจัยค่าความเร่งแบบแคลช
 - X_3 คือ ค่าของปัจจัยรัศมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของไต่ะวางขึ้นงาน
 - μ_0 คือ สัมประสิทธิ์ผลกระทบเฉลี่ยของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดในเคลื่อนที่เป็นวงกลมของไต่ะวางขึ้นงาน
 - μ_1 คือ สัมประสิทธิ์ผลกระทบของปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า
 - μ_2 คือ สัมประสิทธิ์ผลกระทบของปัจจัยค่าความเร่งแบบแคลช
 - μ_3 คือ สัมประสิทธิ์ผลกระทบของปัจจัยรัศมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของไต่ะวางขึ้นงาน

ตารางที่ 4.3

การสรุปค่าปัจจัยต่างๆ ที่มีและไม่มีผลต่อค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวาง
ชิ้นงานในขั้นตอนที่ 2

ปัจจัย	มีผลกระทบต่อค่าความ ผิดพลาดของการ เคลื่อนที่เป็นวงกลมของ โต๊ะวางชิ้นงาน (ปฏิเสธ H_0)	ไม่มีผลกระทบต่อค่า ความผิดพลาดของการ เคลื่อนที่เป็นวงกลมของ โต๊ะวางชิ้นงาน (ยอมรับ H_0)	ค่าความน่าจะเป็น P ของปัจจัยต่างๆ
Feed Forward	✓		0.000
Backlash Acceleration		✓	0.696
รัศมีการเคลื่อนที่เป็น วงกลม	✓		0.000
Feed Forward * Backlash Acceleration		✓	0.927
Feed Forward * รัศมีการเคลื่อนที่เป็น วงกลม	✓		0.008
Backlash Acceleration* รัศมีการเคลื่อนที่เป็น วงกลม		✓	0.943
Feed Forward * Backlash Acceleration* รัศมีการเคลื่อนที่เป็น วงกลม		✓	0.912

จากสมการที่ 4.5 นำค่าปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องมาทำการทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้น
พหุคูณเพื่อที่ตรวจสอบความสัมพันธ์ในแต่ละปัจจัย และทำการวิเคราะห์และทำนายค่าความผิดพลาดที่
จะเกิดขึ้นจากการที่มีค่าปัจจัยต่างๆ ที่ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.6

Regression Analysis: Response versus Feed Forward, Backlash Acc, Radius

The regression equation is

$$\text{Error} = 34.407 - 0.226 \text{Feed Forward} - 0.00241 \text{Backlash Acceleration} - 0.246 \text{Radius} \\ - 0.000009 \text{Feed Forward} * \text{Backlash Acceleration} + 0.00166 \text{Feed Forward} * \text{Radius} \\ - 0.000007 \text{Backlash Acceleration} * \text{Radius} + 0.0 \text{Feed Forward} * \text{Backlash} \\ \text{Acceleration} * \text{Radius}$$

Term	Coefficient	SE Coefficient	T	P
Constant	34.407	2.359	14.59	0.000
Feed Forward	-0.22623	0.03655	-6.19	0.000
Backlash Acceleration	-0.002413	0.006091	-0.40	0.696
Radius	-0.24617	0.03640	-6.76	0.000
Feed Forward*Backlash Acceleration	-0.000009	0.000094	-0.09	0.927
Feed Forward*Radius	0.001658	0.000564	2.94	0.008
Backlash Acceleration*Radius	-0.000007	0.000094	-0.07	0.943
Feed Forward*Backlash Acceleration*Radius	0.000000	0.000001	0.11	0.912

ภาพที่ 4.6

ผลการวิเคราะห์การทดสอบสมการเชิงเส้นพหุคูณของปัจจัย Feed Forward, Backlash Acceleration และรัศมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงาน

จากภาพที่ 4.6 สามารถเขียนสมการเชิงเส้นพหุคูณออกได้เป็นดังสมการที่ 4.6 คือ

$$y = 34.407 - 0.226 X_1 - 0.00241 X_2 - 0.246 X_3 + 0.00166 X_1 X_3 \quad \text{สมการที่ 4.6}$$

เมื่อได้สมการเชิงเส้นพหุคูณดังแสดงข้างต้นแล้ว สามารถแทนค่าปัจจัยต่างๆ ลงในสมการที่ได้ และสามารถได้ผลลัพธ์ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4

การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดที่ได้จากสมการและจากการทดลองในขั้นตอนที่ 2

ปัจจัย ค่าสัมประสิทธิ์ การป้อนล่วงหน้า (เปอร์เซ็นต์)	ปัจจัย ค่าความเร่งแบบเฉย (ไมโครเมตรต่อ มิลลิวินาที ²)	ปัจจัยค่ารัศมีการ เคลื่อนที่เป็น วงกลม (มิลลิเมตร)	ค่าความ ผิดพลาดจาก สมการ (ไมโครเมตร)	ค่าความ ผิดพลาดจาก การทดลอง (ไมโครเมตร)
0	0	10	31.947	32
25	150	15	25.328	25
40	300	40	17.460	18
50	600	50	13.993	14
75	500	75	7.140	8
100	600	100	2.361	2

จากตารางที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมที่เกิดจากสมการเชิงเส้นพหุคูณและค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมที่เกิดจากการทดลอง ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกัน

นอกจากนี้สมการเชิงเส้นพหุคูณสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากแต่จะปัจจัยได้ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการให้โต๊ะเคลื่อนที่ในลักษณะเป็นวงกลมซึ่งมีรัศมี (X_3) เท่ากับ 10 มิลลิเมตร และกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า (X_1) มีค่าเท่ากับ 10% และค่าความเร่งแบบแลช (X_2) มีค่าเท่ากับ $300 \mu\text{m}/\text{ms}^2$ สามารถประมาณค่าความผิดพลาดโดยนำไปแทนค่าในสมการที่ 4.6 ดังนี้

$$y = 34.407 - 0.226 X_1 - 0.00241 X_2 - 0.246 X_3 + 0.00166 X_1 X_3$$

$$y = 34.407 - 0.226(10) - 0.00241(300) - 0.246(10) + 0.00166(10)(10) \\ = 29.130 \text{ ไมโครเมตร}$$

จากการแทนค่าจะได้ค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากับ 29.130 ไมโครเมตร ซึ่งยังมีค่าสูง ถ้าต้องการปรับลดค่าความผิดพลาดลงโดยยังกำหนดให้วงกลมมีรัศมีเท่าเดิมคือเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และค่าความเร่งแบบแลชมีค่าเท่ากับ $300 \mu\text{m}/\text{ms}^2$ แต่กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเท่ากับ 100% เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 4.6 จะได้ค่าความผิดพลาดเท่ากับ 10.284 ไมโครเมตร ดังแสดงในสมการด้านล่าง

$$y = 34.407 - 0.226(100) - 0.00241(300) - 0.246(10) + 0.00166(100)(10) \\ = 10.284 \text{ ไมโครเมตร}$$

จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดมีค่าลดลงจากเดิม ทำให้สามารถที่จะใช้ประโยชน์จากสมการเชิงเส้นพหุคูณในการนำไปกำหนดค่าปัจจัยต่างๆ ได้ หรือในกรณีที่ต้องการให้โต๊ะเคลื่อนที่ในลักษณะวงกลมที่มีรัศมี 10 มิลลิเมตร และต้องการกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเท่ากับ 100% โดยต้องการให้ค่าความผิดพลาด (y) มีค่าประมาณ 10 ไมโครเมตร ก็สามารถที่จะคำนวณหาค่าของความเร่งแบบแลชได้โดยการแทนที่ในสมการที่ 4.6 ซึ่งจะได้ว่าถ้าต้องการให้ได้ค่าความผิดพลาดตามที่กำหนด ต้องตั้งค่าความเร่งแบบแลชให้มีค่าเท่ากับ $420 \mu\text{m}/\text{ms}^2$

จากตัวอย่างที่กล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าสมการพหุคูณสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการปรับลดค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงานได้ โดยการแทนค่าปัจจัยต่างๆ ลงในสมการ

4.3 สรุปการวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองของปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของโต๊ะวางชิ้นงานข้างต้น สรุปได้ว่าปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า, ปัจจัยค่าสัญญาณการป้อนความเร็วล่วงหน้า และปัจจัยค่ารัศมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงานมีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลม โดยที่ปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า และปัจจัยค่าสัญญาณการป้อนความเร็วล่วงหน้า มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน จึงลดปัจจัยเหลือเพียงปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้า ปัจจัยเดียวในการวิเคราะห์ร่วมกับปัจจัยอื่นต่อไป คือปัจจัย ค่าความเร่งแบบแคช และปัจจัยค่ารัศมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลม จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ เช่นการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน สามารถแสดงปัจจัยใดหรือปัจจัยร่วมใดมีผลต่อค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลม ส่วนการวิเคราะห์สมการเชิงเส้นพหุคูณจะแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของแต่ละปัจจัยว่ามีผลกระทบกับค่าความผิดพลาดมากน้อยเพียงใดและสามารถทำนายค่าความผิดพลาดจากปัจจัยที่กำหนดได้จากการแทนค่าปัจจัยต่างๆ ในสมการเชิงเส้นพหุคูณ ซึ่งผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองจริง จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ เป็นไปในทางเดียวกัน คือปัจจัยค่าความเร่งแบบแคช ไม่มีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงาน ส่วนปัจจัยปัจจัยค่าสัมประสิทธิ์การป้อนล่วงหน้าปัจจัยค่าสัญญาณการป้อนความเร็วล่วงหน้า และปัจจัยค่ารัศมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงาน และปัจจัยร่วมของปัจจัยเหล่านี้มีผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะวางชิ้นงาน