

บทที่ 7

การทดลอง

ในการนำหุ่นยนต์ไปใช้งานนั้น ความถูกต้องแม่นยำเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งซึ่งแสดงถึงสมรรถภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติ ดังนั้น ในโครงการวิจัยนี้จึงจะทำการทดลองความถูกต้องแม่นยำ โดยจะวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างตำแหน่งของแขนกลที่เคลื่อนที่นำ (MASTER ARM) และแขนกลที่เคลื่อนที่ตาม (SLAVE ARM) โดยมีความต้องการให้แขนกลที่เคลื่อนที่ตามเคลื่อนที่ตามการเคลื่อนที่ของแขนกลที่เคลื่อนที่นำในเวลาจริงโดยที่ไม่เกิดการแกว่ง (OSCILLATION) ดังนั้น จึงให้ $\zeta = 1$ ตลอดการทดลอง

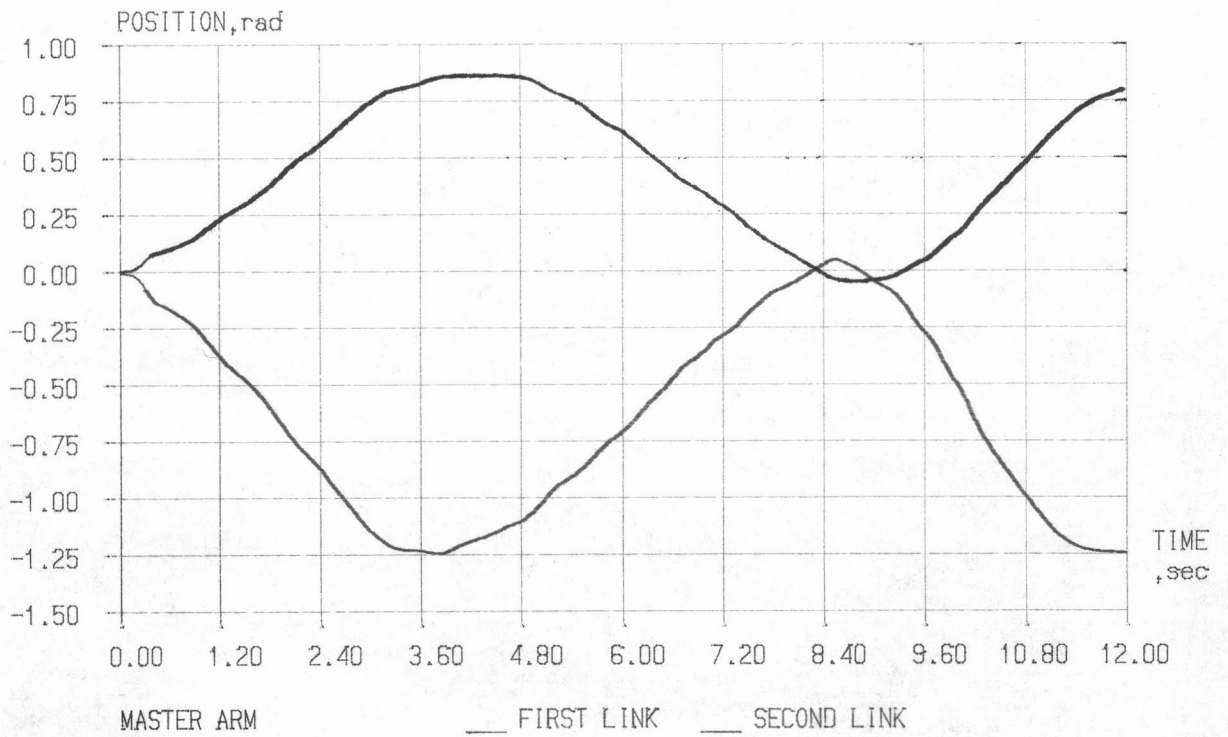
การทำการทดลอง จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

1. การทำการทดลองโดยใช้ข้อมูลอ้างอิงแบบออฟไลน์ (OFF-LINE) การทำการทดลองในกรณีนี้ จะกระทำโดยการเก็บข้อมูลตำแหน่งและความเร็วของแขนกลที่เคลื่อนที่นำ (MASTER ARM) เก็บเอาไว้ในแฟ้มข้อมูลก่อน เมื่อต้องการจะทำการควบคุมแขนกลก็จะอ่านแฟ้มข้อมูลอ้างอิงเหล่านั้นเข้ามาเพื่อใช้ในการควบคุมแขนกลที่เคลื่อนที่ตาม (SLAVE ARM) ต่อไป การทำการทดลองเช่นนี้ทำให้สามารถใช้แฟ้มข้อมูลอ้างอิงเดิมในการควบคุมแขนกลที่เคลื่อนที่ตามได้หลายครั้งตามต้องการ ทำให้สามารถทำการเปรียบเทียบผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ค่าเกนหรือคาบเวลาในการลุ่มของระบบได้ สำหรับในกรณีนี้จะใช้ข้อมูลอ้างอิงในการทำการทดลองตามรูปที่ 7.1 ซึ่งได้มาจากแขนกลที่เคลื่อนที่นำ การทดลองจะกระทำ 3 ครั้งสำหรับแต่ละชุดของพารามิเตอร์ แล้วนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดของตำแหน่งที่มากที่สุด และเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของตำแหน่งที่มากที่สุด เมื่อเทียบกับทางเดินทั้งหมดของแต่ละข้อต่อของแขนกล สำหรับค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในการทดลองนำมาจากบทที่ 3 บทที่ 4 และภาคผนวก พอสรุปได้ดังตารางที่ 7.1

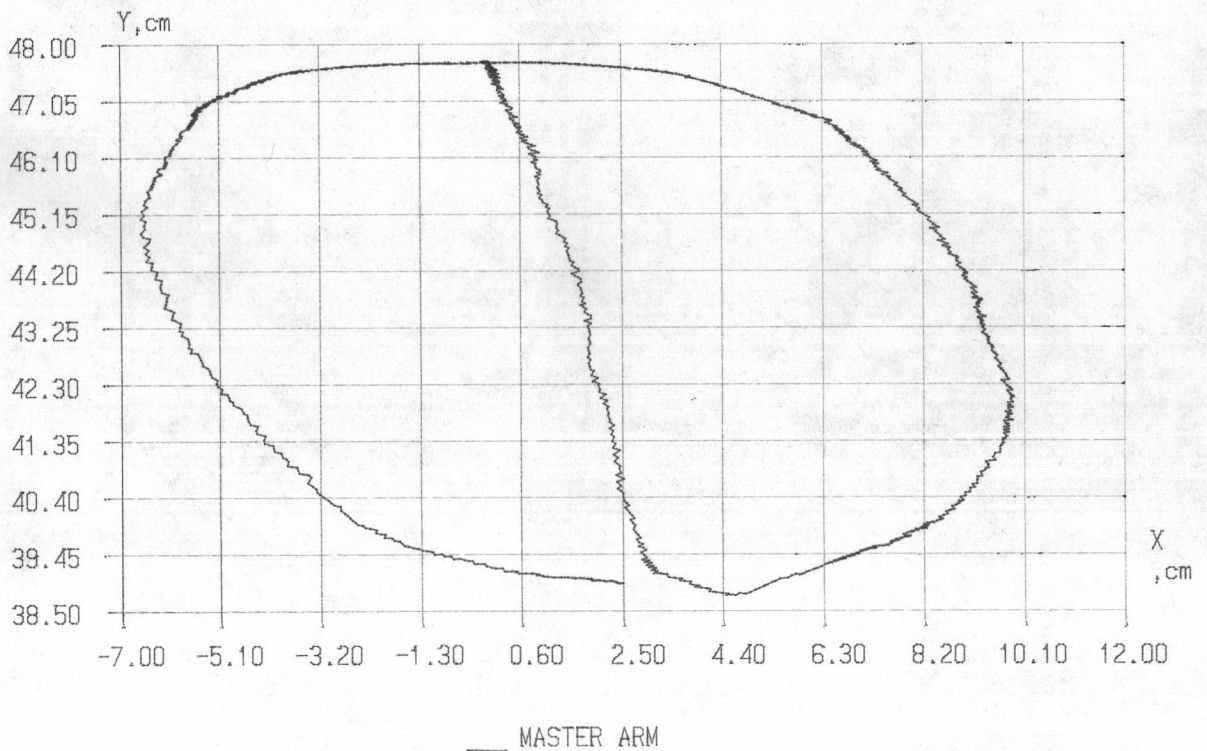
การทำการทดลองในกรณีนี้ จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

- 1.1 การทดลองหาค่าเกน การทดลองในส่วนนี้จะทำการทดลองควบคุมแขนกลด้วยค่าเกน (K) ค่าต่างๆ เพื่อหาค่าเกนที่ทำให้เกิดความผิดพลาดที่มากที่สุด (MAXIMUM ERROR) น้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับทางเดินทั้งหมดของแต่ละข้อต่อของแขนกล จากการทดลองกับระบบจริงพบว่า เวลาที่น้อยที่สุดสำหรับใช้ในการควบคุมครบรอบ คือ 3 msec

Graph between POSITION vs TIME of MASTER ARM



Graph of PATH of MASTER ARM



รูปที่ 7.1 แสดงตำแหน่งและทางเดินบนระนาบ X-Y ของข้อมูลอ้างอิงที่ใช้ทดลองควบคุมแบบออฟไลน์

ตารางที่ 7.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ข้อต่อที่ 1	ข้อต่อที่ 2
I_{M1} (N-m-s ²)	5.496320	0.130176
D_{M1} (N-m-s)	4.419873	1.726513
L_1 (cm.)	27.7	20.0
a_{33}	$-D_{M1}/I_{M1}$	
a_{44}		$-D_{M2}/I_{M2}$
k_{11}	$I_{M1}\omega_1^2$	
k_{22}		$I_{M2}\omega_2^2$
k_{13}	$I_{M1}(2\zeta_1\omega_1 + a_{33})$	
k_{24}		$I_{M2}(2\zeta_2\omega_2 + a_{44})$

ตารางที่ 7.2 ผลการทดลองการหาค่าแกน

C A S E	ข้อต่อที่ 1					ข้อต่อที่ 2				
	ω_1 (rad/s)	k_{11}	k_{13}	MAX. ERROR		ω_2 (rad/s)	k_{22}	k_{24}	MAX. ERROR	
				(rad)	*				(rad)	*
1	20.90	2400	225.29	0.0221	2.43	67.89	600	15.95	0.0382	2.95
2	22.57	2800	243.69	0.0187	2.05	78.39	800	18.68	0.0319	2.46
3	24.13	3200	260.82	0.0176	1.93	87.65	1000	21.09	0.0269	2.08
4	25.59	3600	276.91	0.0164	1.80	96.01	1200	23.27	0.0258	1.99

* เปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของตำแหน่งที่มากที่สุด

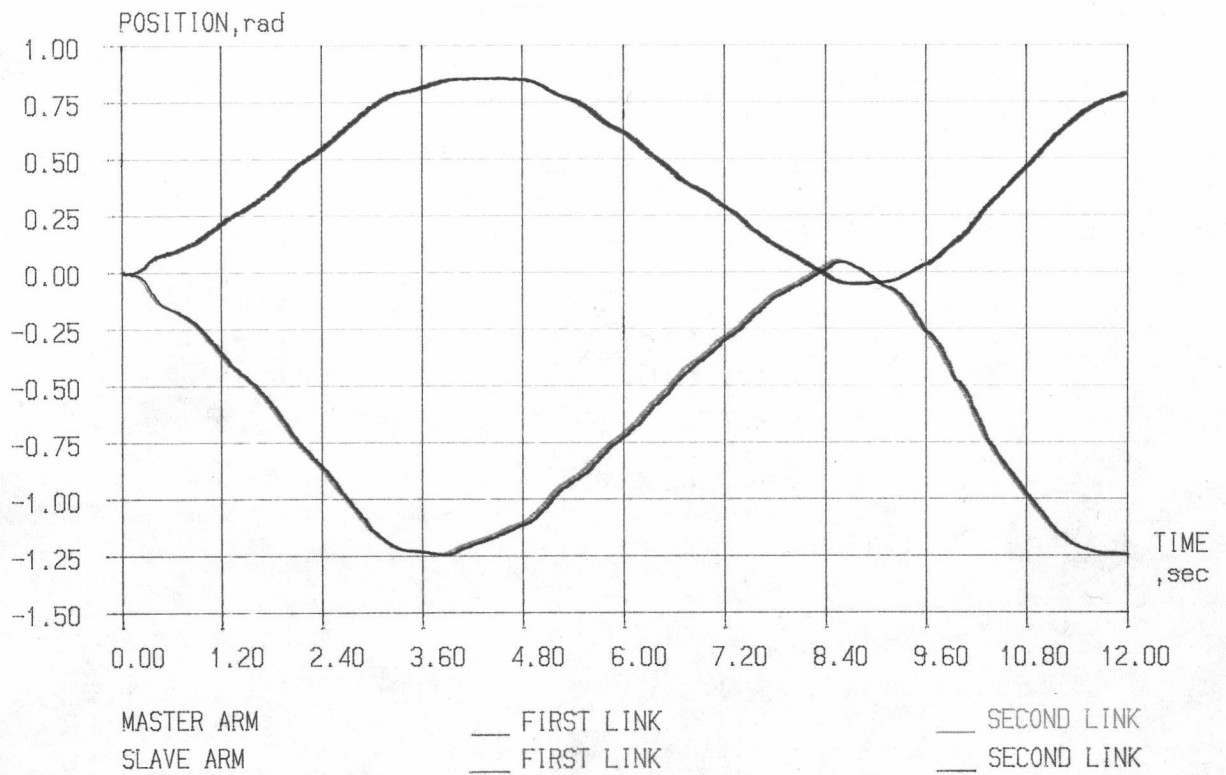
เมื่อเทียบกับความยาวของทางเดินทั้งหมดของแต่ละข้อต่อของแกนกล

แต่ในกรณีนี้ การทดลองจะกระทำที่คาบเวลาในการสุม $T = 10 \text{ msec}$ ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 7.2

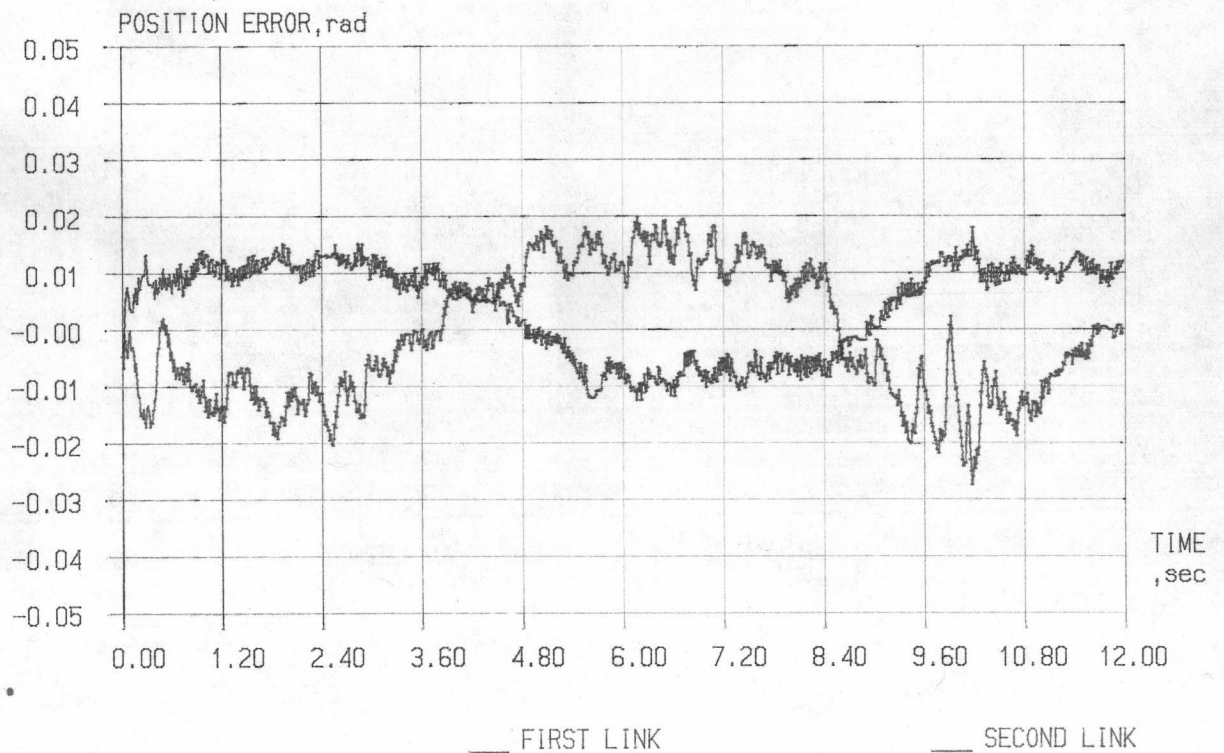
ผลการทดลองสำหรับกรณีที่ 4 คือ ให้ข้อต่อที่ 1 มี $\omega_1 = 25.59 \text{ rad/s}$ และข้อต่อที่ 2 มี $\omega_2 = 96.01 \text{ rad/s}$ แสดงได้ดังรูปที่ 7.2 สำหรับตำแหน่งและความผิดพลาดของตำแหน่ง รูปที่ 7.3 สำหรับความเร็วและความผิดพลาดของความเร็ว รูปที่ 7.4 สำหรับแรงบิดและทางเดินบนระนาบ X-Y

จากผลการทดลองจะพบว่า เมื่อเพิ่มค่าเกน (K) จะทำให้ระบบแขนกลเกิดความผิดพลาดของตำแหน่งน้อยลง แต่อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มค่าเกนมากเกินไปอาจทำให้ระบบแขนกลเกิดการแกว่ง (OSCILLATION) และไม่มีเสถียรภาพ (UNSTABLE) ได้ (ดูการวิเคราะห์ในบทที่ 6) นอกจากนี้จะพบว่า ความผิดพลาดของตำแหน่งของข้อต่อที่ 2 มีมากกว่าความผิดพลาดของตำแหน่งของข้อต่อที่ 1 แม้ว่าจะใช้ค่าความถี่ธรรมชาติ (ω) ที่สูงกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะว่าชุดเกียร์ทดอาร์โมนิคไดรฟ์ของข้อต่อที่ 2 มีความหลวม (BACKLASH) อยู่ $0.0064-0.0073 \text{ rad}$ ในขณะที่ข้อต่อที่ 1 มีความหลวม (BACKLASH) น้อยใกล้เคียงศูนย์ สำหรับรูปที่แสดงทางเดินบนระนาบ X-Y นั้น จะพบว่า มีบางช่วงที่เกิดความผิดพลาดไปมาก ทั้งนี้ก็เป็นเพราะ ในช่วงนั้นเป็นช่วงที่ความผิดพลาดของแต่ละข้อต่อมีทิศทางที่เสริมกัน และความผิดพลาดดังกล่าวจะมากขึ้นตามขนาดของความยาวของแต่ละข้อต่อของแขนกล

Graph between POSITION vs TIME for BOTH LINK

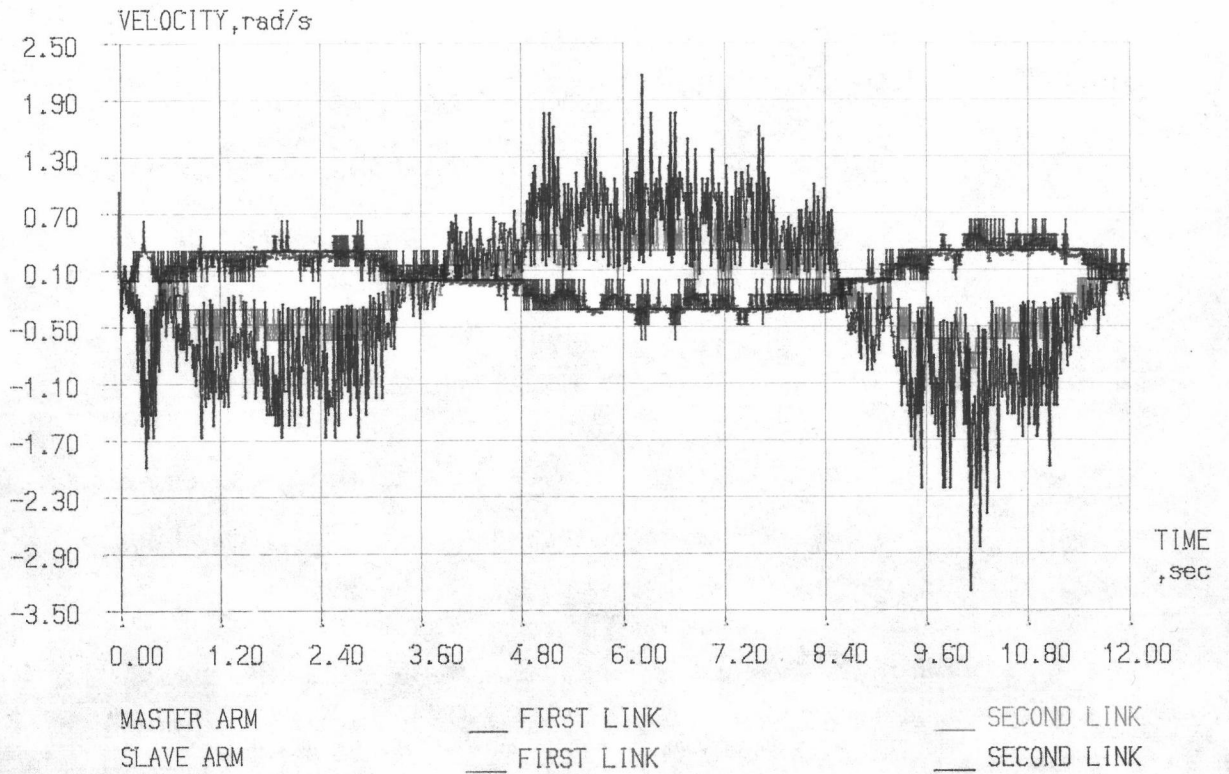


Graph between POSITION ERROR vs TIME for BOTH LINK

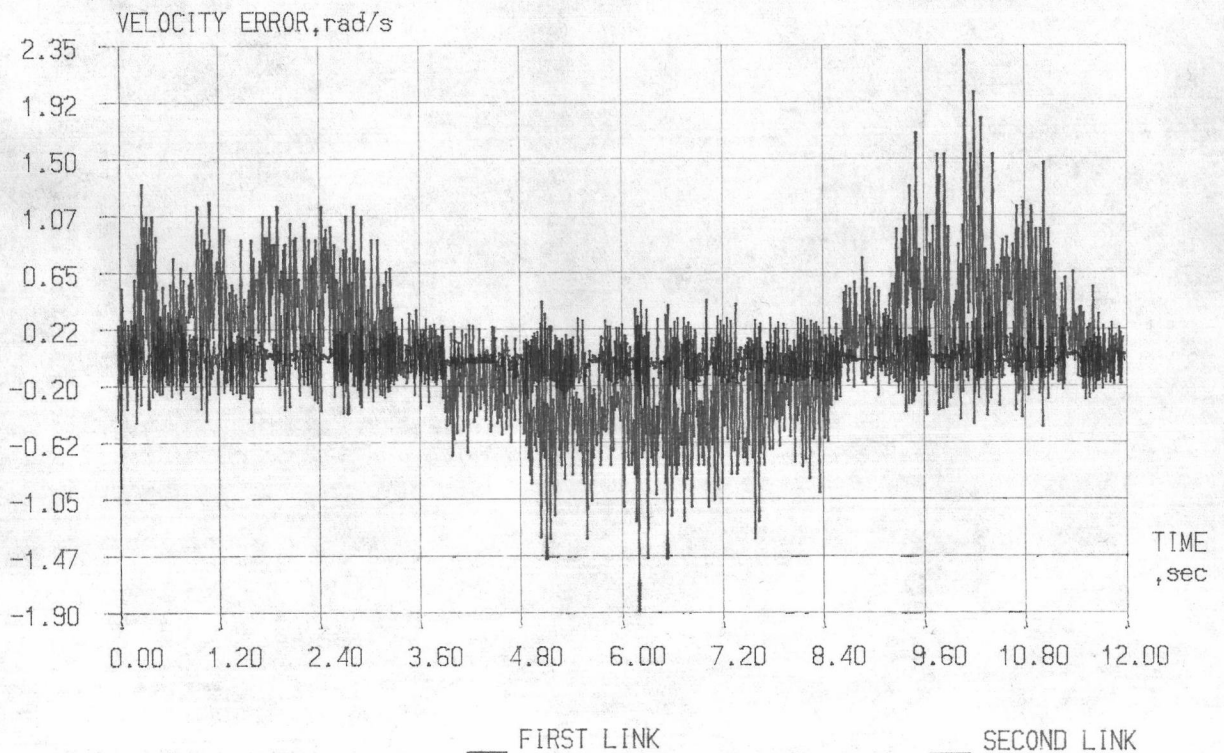


รูปที่ 7.2 แสดงตำแหน่งและความผิดพลาดของตำแหน่งในการทดลองหาค่าเกณฑ์ 4

Graph between VELOCITY vs TIME for BOTH LINK

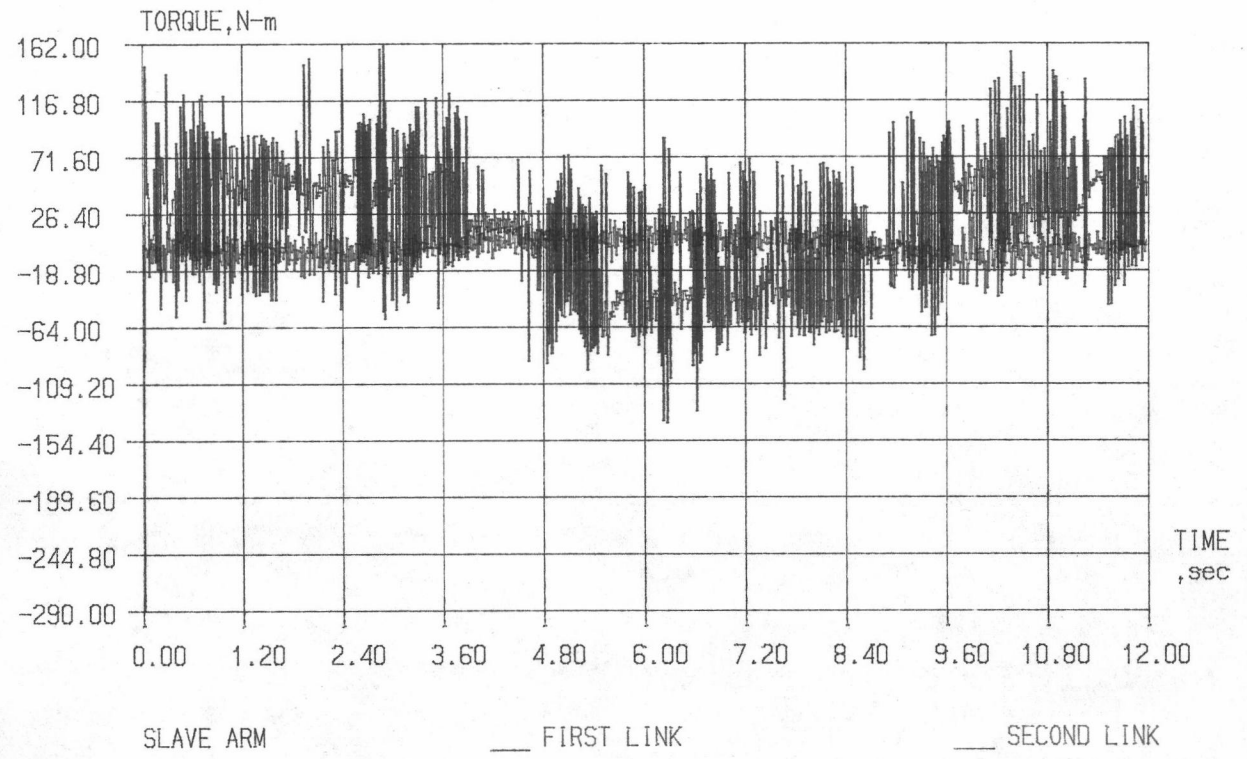


Graph between VELOCITY ERROR vs TIME for BOTH LINK

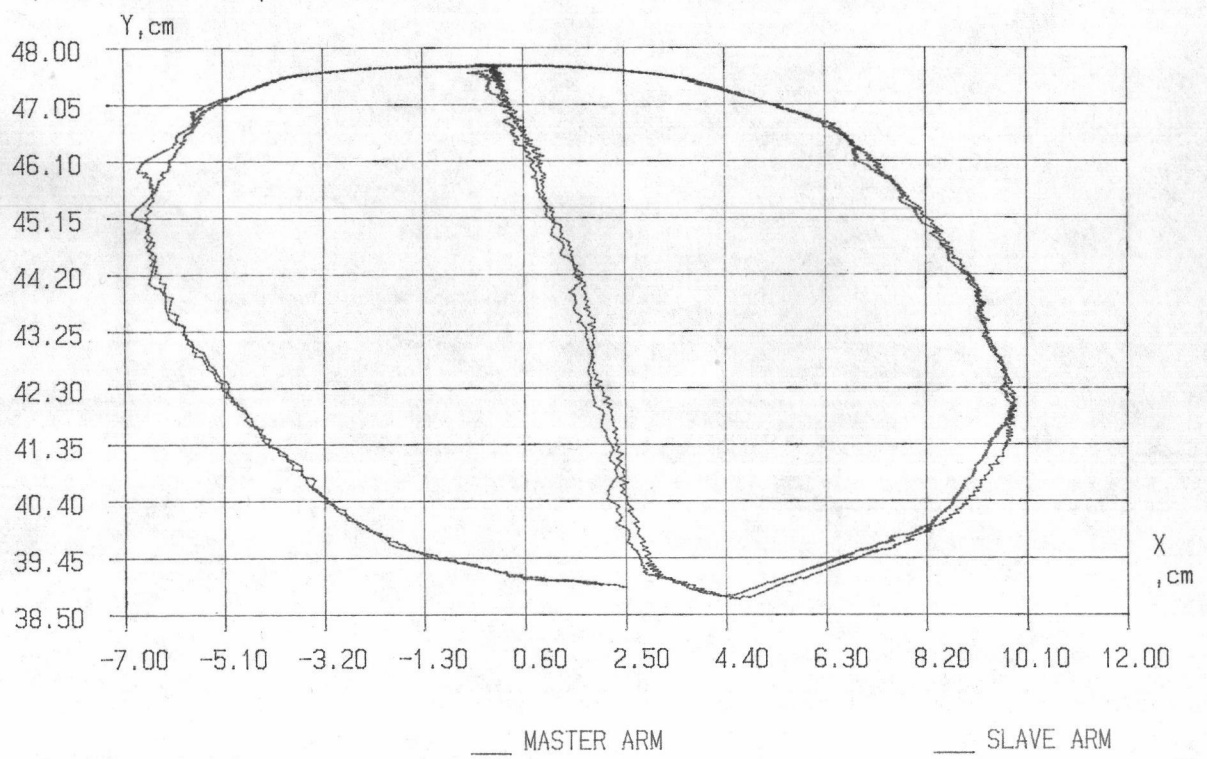


รูปที่ 7.3 แสดงความเร็วและความผิดพลาดของความเร็วในการทดลองหาค่าเกิน กรณีที่ 4

Graph between TORQUE vs TIME for BOTH LINK



Graph of PATH between MASTER ARM vs SLAVE ARM



รูปที่ 7.4 แสดงแรงบิดและทางเดินบนระนาบ X-Y ในการทดลองหาค่าเกณฑ์ 4

1.2 การทดลองเปลี่ยนคาบเวลาในการสุม การทดลองในส่วนนี้จะทำการทดลองควบคุมแขนกลโดยใช้ค่าเกนกรณีที่ 4 ของหัวข้อที่ 1.1 โดยให้คาบเวลาในการสุม (T) มีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยจะทดลองที่ $T = 10 \text{ msec}$, $T = 20 \text{ msec}$ และ $T = 30 \text{ msec}$ การทดลองได้ผลดังแสดงในตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 ผลการทดลองเปลี่ยนคาบเวลาในการสุม

T (msec)	ข้อต่อที่ 1		ข้อต่อที่ 2	
	MAX.ERROR		MAX.ERROR	
	(rad)	(%) [*]	(rad)	(%) [*]
10	0.0164	1.80	0.0258	1.99
20	0.0186	2.04	0.0310	2.39
30	0.0320	3.52	0.0351	2.71

* เปอร์เซนต์ของความผิดพลาดของตำแหน่งที่มากที่สุด

เมื่อเทียบกับความยาวของทางเดินทั้งหมดของแต่ละข้อต่อของแขนกล

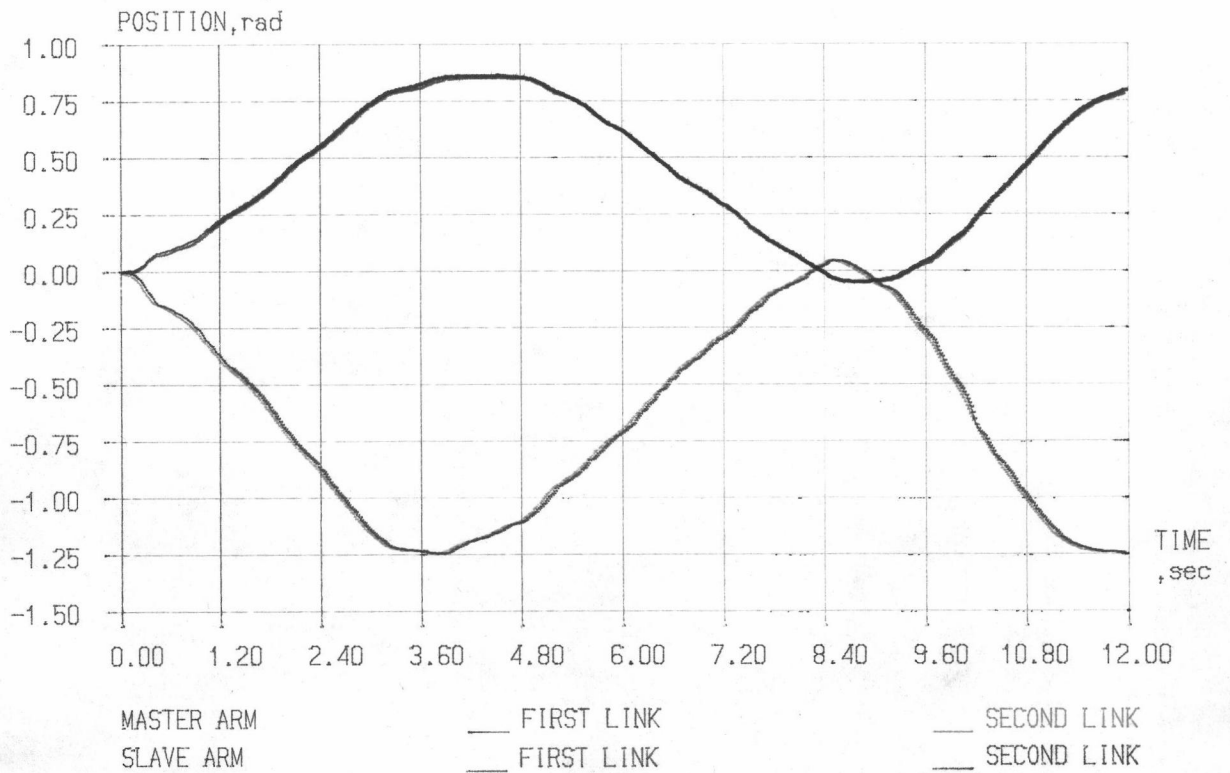
ผลการทดลองสำหรับคาบเวลาในการสุม $T = 20 \text{ msec}$ แสดงได้ดังรูปที่ 7.5

สำหรับตำแหน่งและทางเดินบนระนาบ X-Y

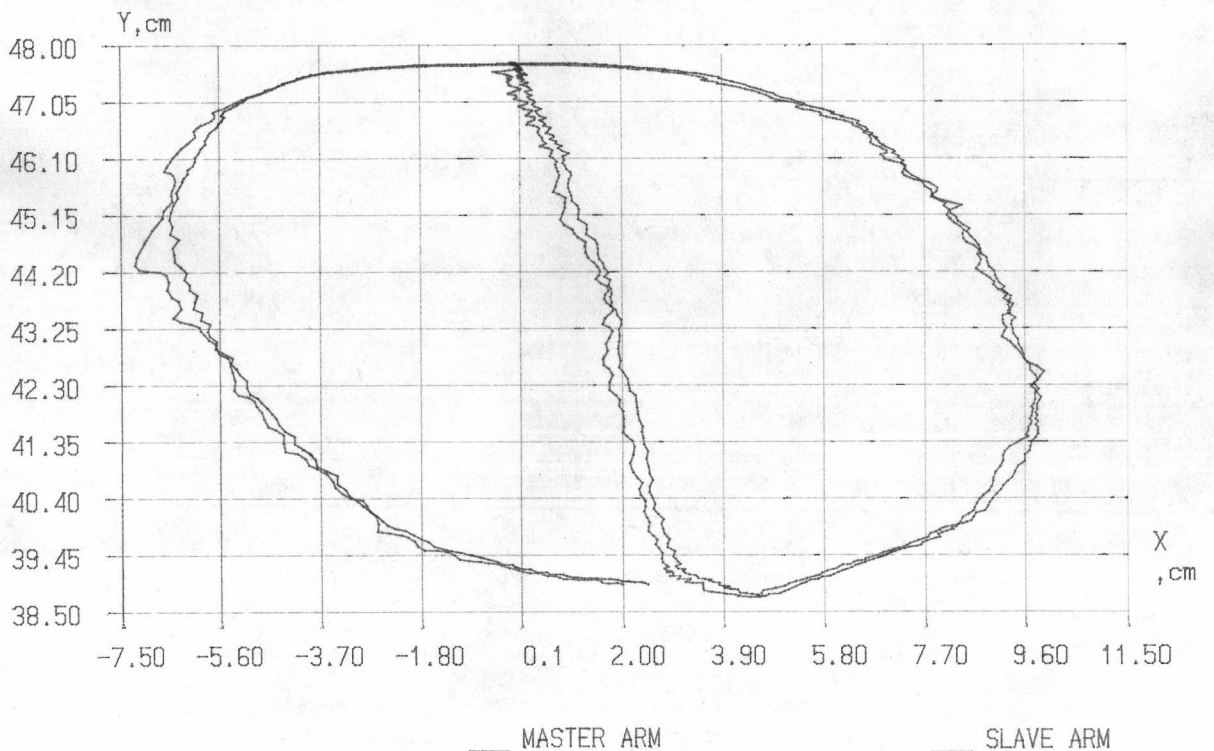
จากผลการทดลองจะพบว่า เมื่อเพิ่มคาบเวลาในการสุม (T) จะทำให้ระบบแขนกลเกิดความผิดพลาดของตำแหน่งมากขึ้น แต่หากเพิ่มคาบเวลาในการสุมมากเกินไปจะทำให้ระบบแขนกลเกิดการแกว่ง (OSCILLATION) และไม่มีเสถียรภาพ (UNSTABLE) ได้ (ดูการวิเคราะห์ในบทที่ 6) จากการทดลองพบว่า ระบบแขนกลจะไม่มีเสถียรภาพที่ $T = 40 \text{ msec}$

2. การทำการทดลองโดยใช้ข้อมูลอ้างอิงแบบออนไลน์ (ON-LINE) การทำการทดลองในกรณีนี้ จะกระทำโดยการอ่านข้อมูลตำแหน่งและความเร็วของแขนกลที่เคลื่อนที่นำ (MASTER ARM) แล้วส่งไปควบคุมแขนกลที่เคลื่อนที่ตาม (SLAVE ARM) ในเวลาจริงทันทีโดยใช้ค่าเกนกรณีที่ 4 ของหัวข้อที่ 1.1 และใช้คาบเวลาในการสุม $T = 10 \text{ msec}$ การทำการ

Graph between POSITION vs TIME for BOTH LINK



Graph of PATH between MASTER ARM vs SLAVE ARM



รูปที่ 7.5 แสดงตำแหน่งและทางเดินบนระนาบ X-Y ในการทดลองเปลี่ยนคาบเวลาในการสุม
 โดยใช้ $T = 20 \text{ msec}$

ทดลองในกรณีนี้ ใช้เพื่อทดสอบการควบคุมตำแหน่งของระบบควบคุมอัตโนมัติให้แขนกลเคลื่อนที่ตามกันในทันที ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 ผลการทดลองควบคุมแบบออนไลน์

C A S E	FIG.	ข้อต่อที่ 1		ข้อต่อที่ 2	
		MAX. ERROR		MAX. ERROR	
		(rad)	(%) *	(rad)	(%) *
1	7.6	0.0150	2.10	0.0212	2.11
2	7.7	0.0127	1.90	0.0187	1.88
3	7.8	0.0135	1.75	0.0266	2.37
4	7.9	0.0168	2.41	0.0173	1.60

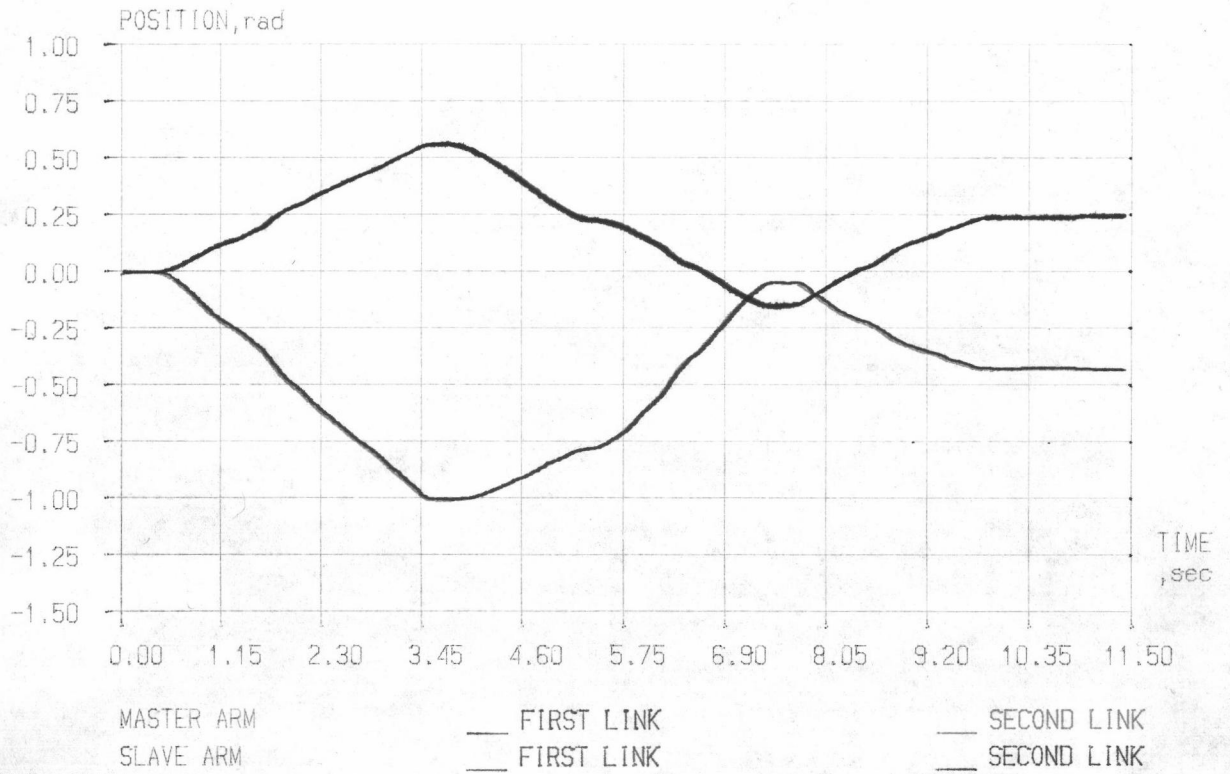
* เปอร์เซนต์ของความผิดพลาดของตำแหน่งที่มากที่สุด

เมื่อเทียบกับความยาวของทางเดินทั้งหมดของแต่ละข้อต่อของแขนกล

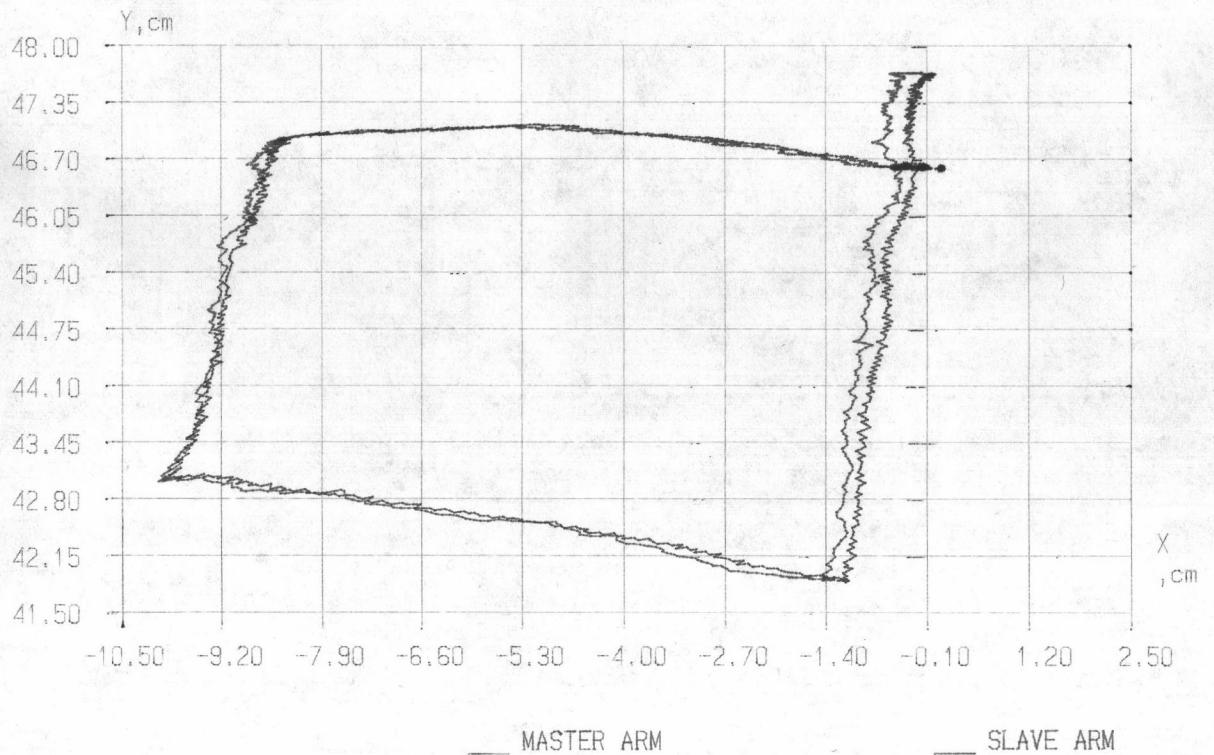
ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 7.6, รูปที่ 7.7, รูปที่ 7.8, และ รูปที่ 7.9 สำหรับตำแหน่งและทางเดินบนระนาบ X-Y

จากผลการทดลองจะพบว่า ระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถควบคุมแขนกลที่เคลื่อนที่ตามให้เคลื่อนที่ตามการเคลื่อนที่ของแขนกลที่เคลื่อนที่นำได้ในเวลาจริงทันที โดยมีความผิดพลาดของตำแหน่งเกิดขึ้นอยู่ในขนาดที่ใกล้เคียงกับการใช้ข้อมูลอ้างอิงแบบออฟไลน์ ทั้งนี้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเมื่อคิดเป็นเปอร์เซนต์แล้วมีค่ามากกว่าปกติเพราะความยาวของทางเดินทั้งหมดของแต่ละข้อต่อของแขนกลสำหรับการทดลองในแต่ละกรณีไม่เท่ากัน ในส่วนของทางเดินบนระนาบ X-Y หรือเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนกลจะพบว่า มีบางช่วงที่เกิดความผิดพลาดไปมาก ทั้งนี้ก็เป็นเพราะว่า ในช่วงนั้นเป็นช่วงที่ความผิดพลาดของแต่ละข้อต่อมีทิศทางที่เสริมซึ่งกันและกัน และความผิดพลาดดังกล่าวจะมากขึ้นตามความยาวของแขนกลแต่ละข้อต่อ เพราะหากแขนกลมีความยาวมาก ถึงแม้ว่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่พิจารณาที่ข้อต่อจะน้อยแต่ความผิดพลาดของตำแหน่งเมื่อพิจารณาที่ปลายแขนกลจะมากขึ้นตามขนาดของความยาวของแขนกล

Graph between POSITION vs TIME for BOTH LINK

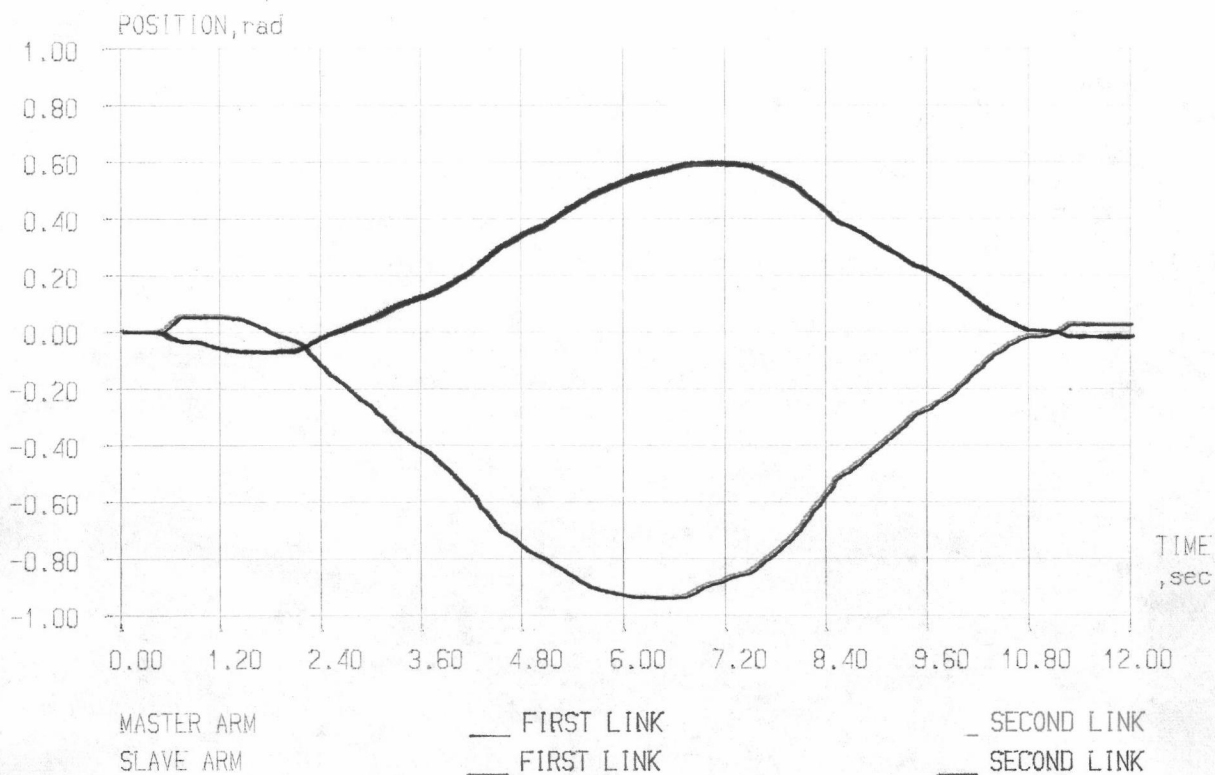


Graph of PATH between MASTER ARM vs SLAVE ARM

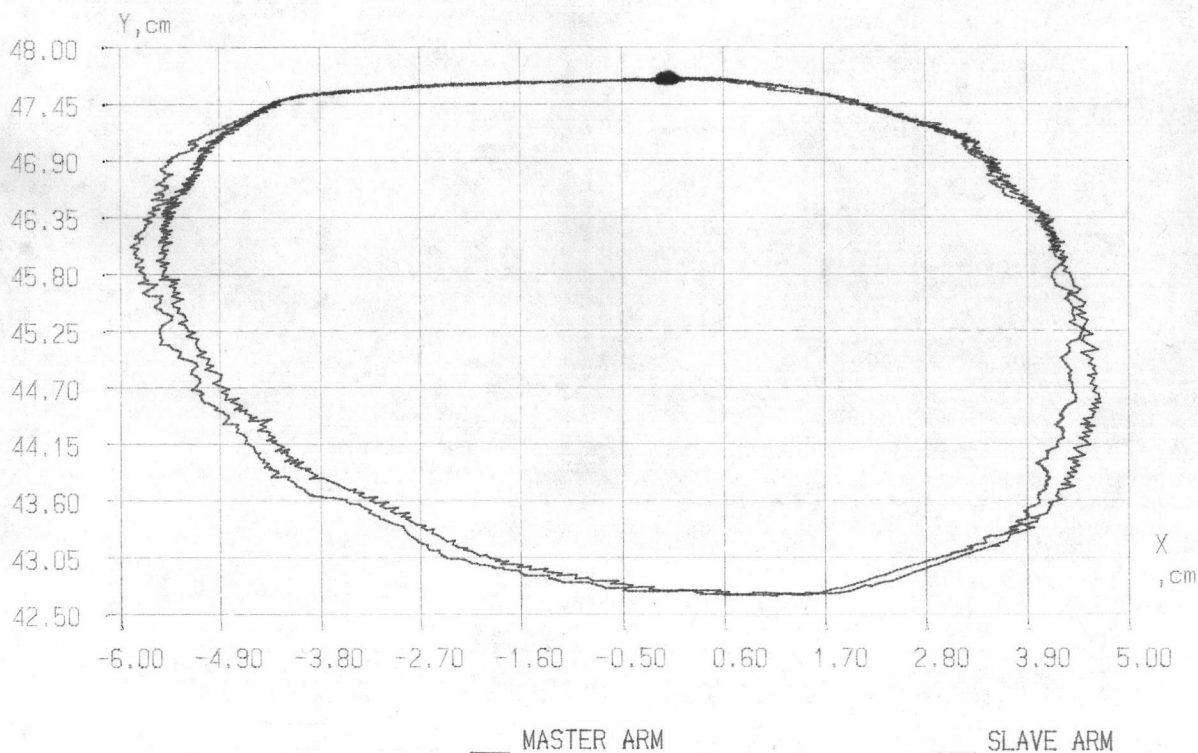


รูปที่ 7.6 แสดงตำแหน่งและทางเดินบนระนาบ X-Y ในการทดลองควบคุมแบบออนไลน์ กรณีที่ 1

Graph between POSITION vs TIME for BOTH LINK

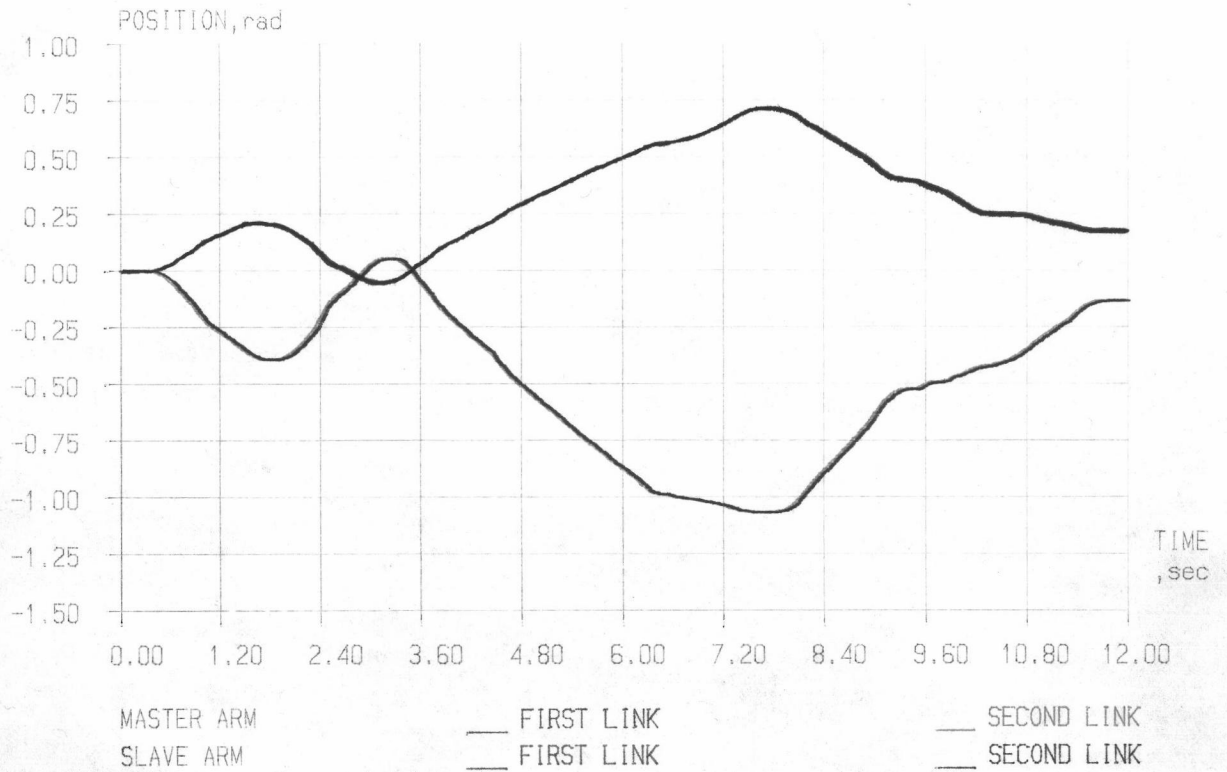


Graph of PATH between MASTER ARM vs SLAVE ARM

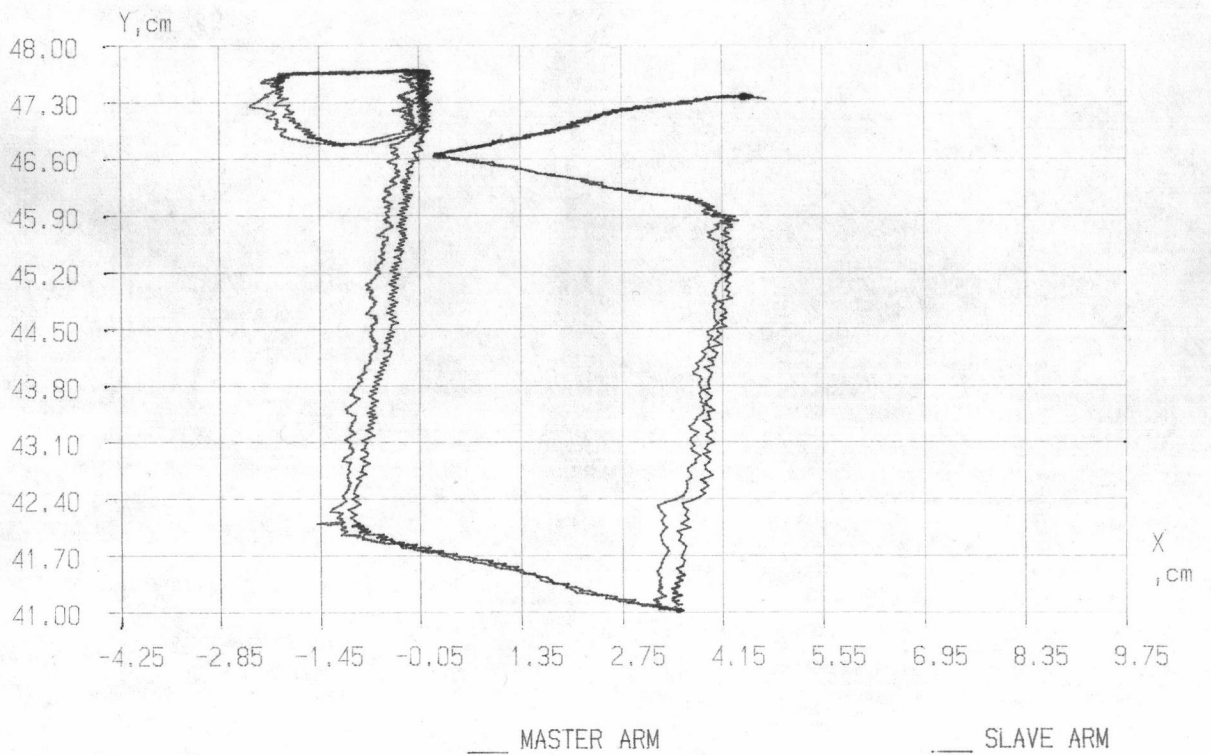


รูปที่ 7.7 แสดงตำแหน่งและทางเดินบนระนาบ X-Y ในการทดลองควบคุมแบบออนไลน์ กรณีที่ 2

Graph between POSITION vs TIME for BOTH LINK

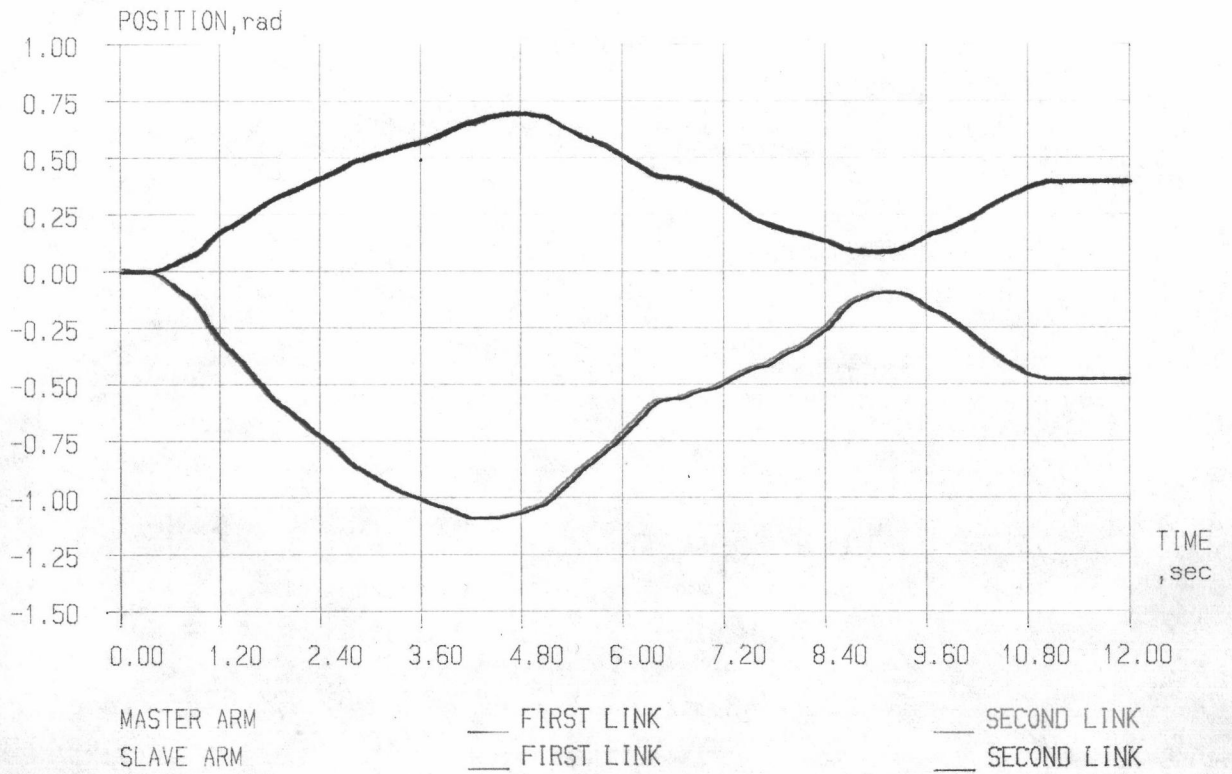


Graph of PATH between MASTER ARM vs SLAVE ARM

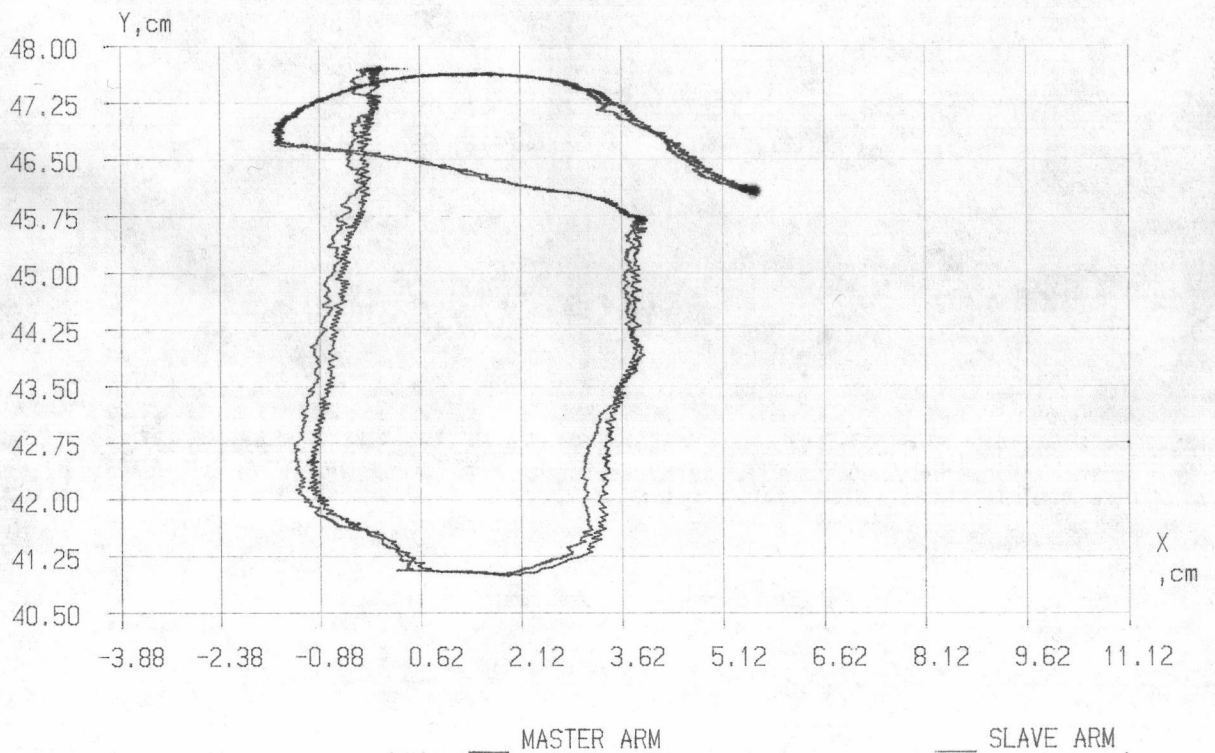


รูปที่ 7.8 แสดงตำแหน่งและทางเดินบนระนาบ X-Y ในการทดลองควบคุมแบบออนไลน์ กรณีที่ 3

Graph between POSITION vs TIME for BOTH LINK



Graph of PATH between MASTER ARM vs SLAVE ARM



รูปที่ 7.9 แสดงตำแหน่งและทางเดินบนระนาบ X-Y ในการทดลองควบคุมแบบออนไลน์ กรณีที่ 4