

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

ในการทดลองการควบคุมระยะไกลด้วยหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนแรกเป็นการควบคุมระหว่างหุ่นยนต์เอบีบี (ABB) และหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า ว่าหุ่นยนต์เอบีบีสามารถเคลื่อนที่ตามหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าได้หรือไม่ โดยการทดลองในส่วนแรกหุ่นยนต์เอบีบีจะไม่มีการกวดำตรและจะไม่มีการใช้การประมวลผลภาพเข้ามาใช้งาน การทดลองในส่วนแรกจะอ่านค่าพารามิเตอร์จากหน้าจอโปรแกรมของหุ่นยนต์ทั้งสองตัว และในส่วนที่สองจะมีความใกล้เคียงกับส่วนแรก คือ การควบคุมระหว่างหุ่นยนต์เอบีบีและหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า ซึ่งในการทดลองครั้งนี้จะให้หุ่นยนต์เอบีบีมีการกวดำตรเพื่อให้เกิดแรงดันที่ตัวหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า ซึ่งในการทดลองครั้งนี้จะต้องใช้โปรแกรมประมวลผลภาพเข้ามาใช้เพื่อแยกวัตถุทั้งสองที่มีค่าความเข้มต่างกัน

4.1 ผลการทดลองควบคุมระยะไกลโดยใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าแบบไม่มีการกวดำตร

ในการทดลองนี้เป็นการควบคุมหุ่นยนต์เอบีบีผ่านทางหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า โดยให้หุ่นยนต์เอบีบีเคลื่อนที่ตามตำแหน่งของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า โดยนำองศาของเซอร์โวมอเตอร์ มาคำนวณในสมการจลศาสตร์เคลื่อนที่ไปข้างหน้า (Forward Kinematics) แปลงออกมาเป็นตำแหน่ง XYZ ส่งไปยังหุ่นยนต์เอบีบี ซึ่งในการทดลองจะเป็นการทดลองที่ยังไม่มีวัตถุเข้ามาเกี่ยวข้องจึงไม่จำเป็นต้องใช้ระบบประมวลผลภาพ



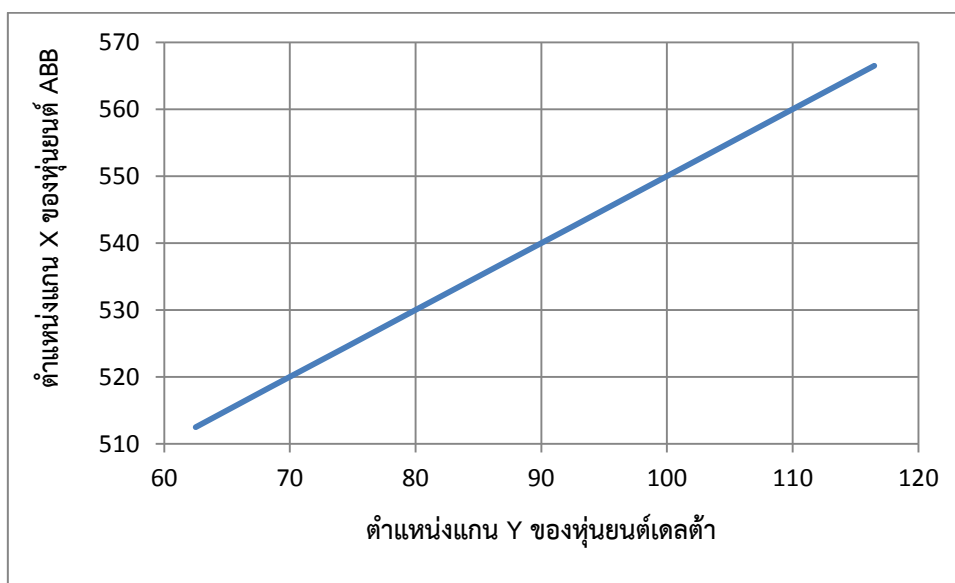
ภาพที่ 4-1 การควบคุมระยะไกลโดยใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าแบบไม่มีการกวดำตร

ตารางที่ 4-1 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกน แบบเดลต้าและหุ่นยนต์เอบีปี

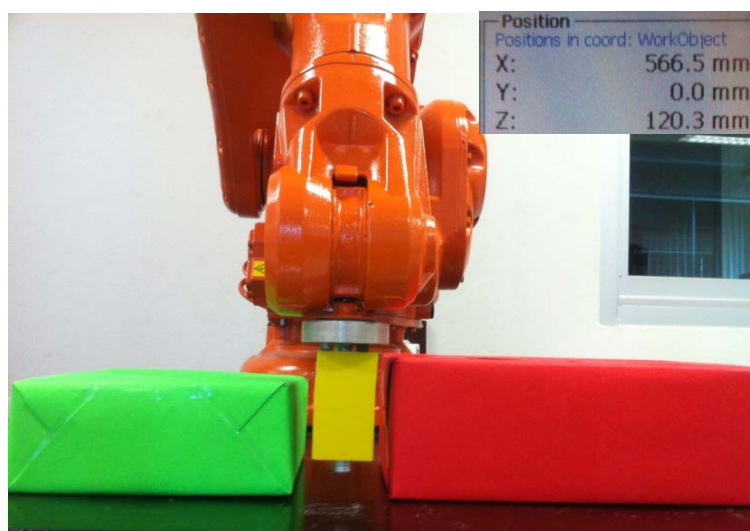
M1	$\Theta M2$	$\Theta M3$	X_{DELTA}	Y_{DELTA}	Z_{DELTA}	X_{ABB}	Y_{ABB}	Z_{ABB}
57.588	33.775	33.775	0	116.5	-513.46	566.5	0	120.3
56.379	33.725	33.725	0	110.5	-513.46	560.5	0	120.3
55.188	33.702	33.702	0	104.5	-513.46	554.5	0	120.3
54.017	33.706	33.706	0	98.5	-513.46	548.5	0	120.3
52.863	33.736	33.736	0	92.5	-513.46	542.5	0	120.3
51.728	33.793	33.793	0	86.5	-513.46	536.5	0	120.3
50.611	33.876	33.876	0	80.5	-513.46	530.5	0	120.3
49.513	33.984	33.984	0	74.5	-513.46	524.5	0	120.3
48.432	34.118	34.118	0	68.5	-513.46	518.5	0	120.3
47.37	34.277	34.277	0	62.5	-513.46	512.5	0	120.3

จากตารางที่ 4-1 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าและหุ่นยนต์เอบีปี ซึ่งผู้ใช้งานเคลื่อนที่เฉพาะในแนวแกน Y (Y_{DELTA}) เท่านั้น ในส่วนของแกน X (X_{DELTA}), Z (Z_{DELTA}) ให้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด เมื่อผู้ใช้งานเคลื่อนที่หุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าทำให้หุ่นยนต์เอบีปี มีการเคลื่อนที่ตาม สามารถสังเกตได้จากค่าตำแหน่งของหุ่นยนต์ทั้งสองประเภทที่เปลี่ยนไป แต่ในการเขียนโปรแกรมได้กำหนดไว้ว่า แกน X ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าเท่ากับแกน Y หุ่นยนต์เอบีปี (X_{DELTA} เท่ากับ Y_{ABB}) แกน Y ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าเท่ากับแกน X ของหุ่นยนต์เอบีปี (Y_{DELTA} เท่ากับ X_{ABB}) และแกน Z ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าเท่ากับแกน Z ของหุ่นยนต์ ABB (Z_{DELTA} เท่ากับ Z_{AB}) ทำให้ในการทดลองครั้งนี้ตำแหน่งของหุ่นยนต์เอบีปี มีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะในแนวแกน X ในส่วนของแนวแกน Y, Z มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และค่าตำแหน่งที่เปลี่ยนไปของหุ่นยนต์เอบีปี จะสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า ซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพที่ 4-2 ที่เปรียบเทียบตำแหน่งระหว่างหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าในแกน Y และหุ่นยนต์เอบีปีในแกน X และภาพที่ 4-3 ที่แสดงตำแหน่งของหุ่นยนต์เอบีปี ก่อนมีการเคลื่อนที่ตามการควบคุมของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า ซึ่งจะแสดงค่าตำแหน่งไว้ที่มุมขวาบนของภาพ และเมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 4-4 ซึ่งแสดงตำแหน่งของหุ่นยนต์เอบีปี เมื่อมีการเคลื่อนที่ตามการควบคุมของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะในแนวแกน

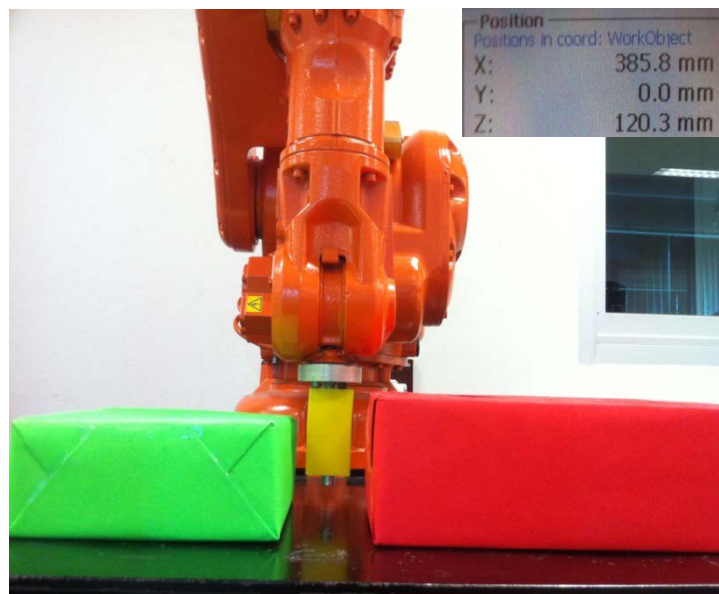
X ของหุ่นยนต์เอบีบี ซึ่งนั่นหมายถึง หุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลด้าก็จะเปลี่ยนแปลงเฉพาะในแนวแกน Y เพราะหุ่นยนต์ทั้งสองจะเคลื่อนที่สัมพันธ์และทำงานตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ข้างต้น



ภาพที่ 4-2 การเปรียบเทียบตำแหน่งระหว่างหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลด้าในแกน X และหุ่นยนต์เอบีบีในแกน Y



ภาพที่ 4-3 ตำแหน่งหุ่นยนต์ก่อนการเคลื่อนที่เฉพาะในแนวแกน X ของหุ่นยนต์เอบีบี

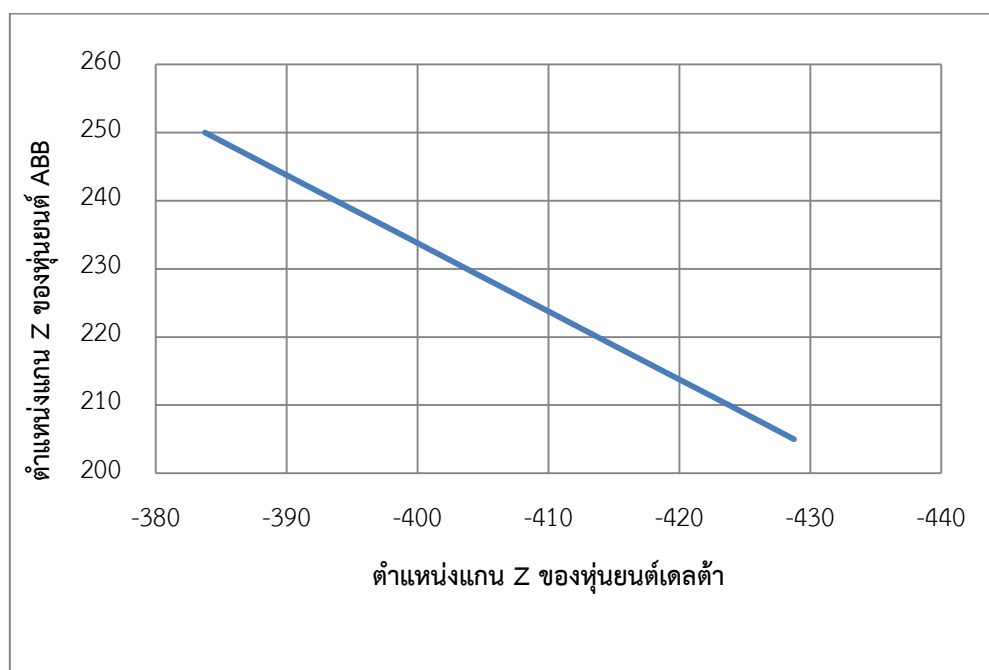


ภาพที่ 4-4 ตำแหน่งหุ่นยนต์หลังการเคลื่อนที่เฉพาะในแนวแกน X ของหุ่นยนต์เอบีบี

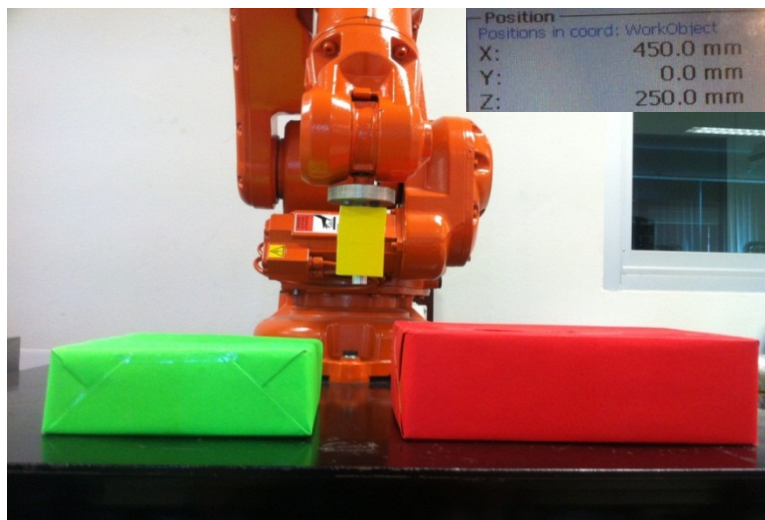
ตารางที่ 4-2 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกน แบบเดลต้าและหุ่นยนต์เอบีบี

θ_{M1}	θ_{M2}	θ_{M3}	X_{Δ}	Y_{Δ}	Z_{Δ}	X_{ABB}	Y_{ABB}	Z_{ABB}
0	0	0	0	0	-383.76	450	0	250
1.5784	1.5784	1.5784	0	0	-388.76	450	0	245
3.1323	3.1323	3.1323	0	0	-393.76	450	0	240
4.6638	4.6638	4.6638	0	0	-398.76	450	0	235
6.1752	6.1752	6.1752	0	0	-403.76	450	0	230
7.6683	7.6683	7.6683	0	0	-408.76	450	0	225
9.1451	9.1451	9.1451	0	0	-413.76	450	0	220
10.6072	10.6072	10.6072	0	0	-418.76	450	0	215
12.0562	12.0562	12.0562	0	0	-423.76	450	0	210
13.4938	13.4938	13.4938	0	0	-428.76	450	0	205

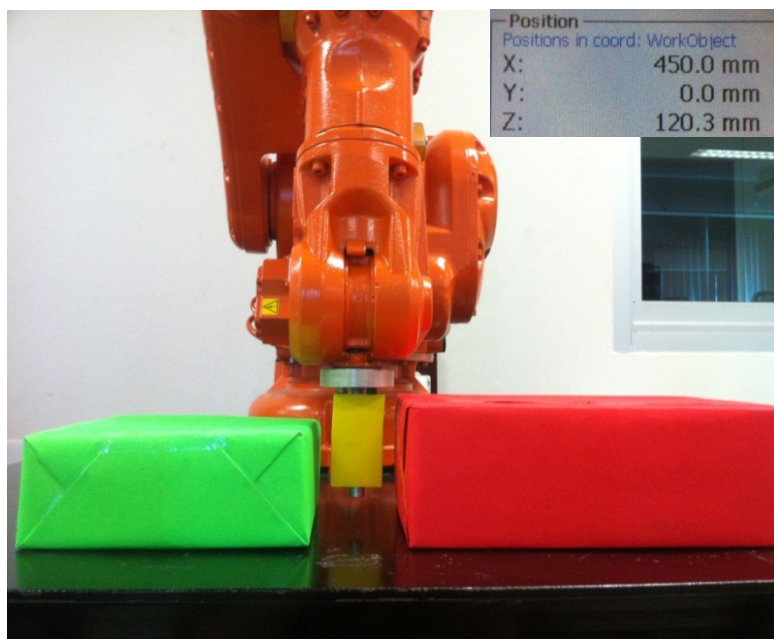
จากตารางที่ 4-2 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า ซึ่งผู้ใช้งานเคลื่อนที่เฉพาะในแนวแกน Z เท่านั้น ในส่วนของแกน X,Y ให้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด เมื่อผู้ใช้งานเคลื่อนที่หุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า ทำให้หุ่นยนต์เอบีปีมีการเคลื่อนที่ตามสามารถสังเกตได้จากค่าตำแหน่งของหุ่นยนต์ทั้งสองประเภทที่เปลี่ยนไป การทดลองครั้งนี้ตำแหน่งของหุ่นยนต์เอบีปีมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะในแนวแกน Z ในส่วนของแนวแกน X , Y มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และค่าตำแหน่งที่เปลี่ยนไปของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวมีความใกล้เคียงกันมาก และค่าตำแหน่งที่เปลี่ยนไปของหุ่นยนต์ เอบีปี จะสัมพันธ์กันกับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า ซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพที่ 4-5 ที่เปรียบเทียบตำแหน่งระหว่างหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าในแกน Z และหุ่นยนต์ เอบีปี ในแกน Z และภาพที่ 4-6 ที่แสดงตำแหน่งของหุ่นยนต์เอบีปี ก่อนมีการเคลื่อนที่ตามการควบคุมของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า ซึ่งจะแสดงค่าตำแหน่งไว้ที่มุมขวาบนของภาพ และเมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 4-7 ซึ่งแสดงตำแหน่งของหุ่นยนต์เอบีปี เมื่อมีการเคลื่อนที่ตามการควบคุมของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะในแนวแกน X ของหุ่นยนต์เอบีปี ซึ่งหมายถึง หุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าก็จะเปลี่ยนแปลงเฉพาะในแนวแกน Y



ภาพที่ 4-5 การเปรียบเทียบตำแหน่งระหว่างหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าในแกน Z และหุ่นยนต์เอบีปีในแกน Z



ภาพที่ 4-6 ตำแหน่งหุ่นยนต์ก่อนการเคลื่อนที่เฉพาะในแนวแกน Z ของหุ่นยนต์เอบีปี



ภาพที่ 4-7 ตำแหน่งหุ่นยนต์หลังการเคลื่อนที่เฉพาะในแนวแกน Z ของหุ่นยนต์เอบีปี

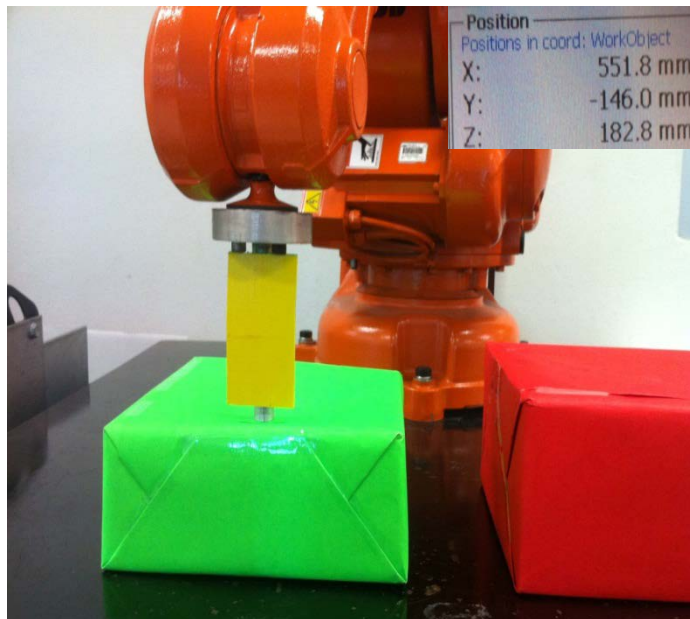
จากการทดลองทั้งสองครั้งซึ่งในแต่ละครั้งผู้ใช้งานจะเคลื่อนที่เฉพาะแกนใดแกนหนึ่งเท่านั้น ในส่วนแกนที่เหลือจะพยายามให้มีการเปลี่ยนน้อย เมื่อนำตำแหน่งของทุกแกนมาเปรียบเทียบกับกันจะเห็นว่าค่าตำแหน่งในแกนมีสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทั้งสองตัว ซึ่งทำให้เห็นว่าสามารถควบคุมหุ่นยนต์ที่มีความแตกต่างกันให้สามารถทำงานสัมพันธ์กันได้ และเป็นการเคลื่อนที่แบบที่ไม่มีกรกดันวัตถุจึงทำให้ไม่เกิดแรงต้านที่หุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า

4.2 ผลการทดลองควบคุมระยะไกลโดยใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกน แบบเดลต้า แบบการกวดวัตถุ



ภาพที่ 4-8 การควบคุมระยะไกลโดยใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าแบบมีการกวดวัตถุ

จากภาพที่ 4-8 เป็นการแสดงให้เห็นถึงการควบคุมระยะไกลโดยมีการกวดวัตถุ ซึ่งวัตถุทั้งสองมีค่าความแข็งที่ต่างกัน โดยที่กำหนดค่าความแข็งไว้ที่ตัวโปรแกรม เนื่องจากหุ่นยนต์เอบีบี ไม่สามารถส่งแรงต้านกลับมาได้ จึงมีการกำหนดค่าความแข็งขึ้นมาและใช้สีที่แตกต่างกันเพื่อใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ มาใช้ในการแยกประเภทของวัตถุ โดยการทดลองนี้เมื่อผู้ใช้งานบังคับหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า หุ่นยนต์เอบีบี จะต้องเคลื่อนที่ตามการควบคุม เมื่อควบคุมให้หุ่นยนต์เอบีบี ไปกดลงบนวัตถุสีแดงซึ่งกำหนดให้วัตถุนี้มีค่าความแข็งมาก จะทำให้เกิดแรงต้านที่ตัวหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า สูงหรือผู้ใช้งานต้องออกแรงกดเพิ่มขึ้น จากนั้นทำการเปลี่ยนให้หุ่นยนต์เอบีบีไปกดลงบนวัตถุสีเขียว ซึ่งกำหนดให้วัตถุนี้มีค่าความแข็งน้อย จะทำให้เกิดแรงต้านน้อยกว่ากล่องสีแดง หรือผู้ใช้งานออกแรงเพียงเล็กน้อยก็สามารถกดลงไปบนกล่องสีเขียวได้ลึกกว่าสีแดง ซึ่งได้ทำการทดลอง ในการกวดวัตถุดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4-9 หุ่นยนต์เอบีบียกวัตถุที่มีค่าความแข็งต่ำในตำแหน่งที่หนึ่ง

จากภาพที่ 4-9 ในการทดลองครั้งนี้เป็นการควบคุมระยะโดยใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบ เดลต้า ซึ่งเข้ามาควบคุมหุ่นยนต์ เอบีบี เพื่อยกวัตถุ โดยแบ่งวัตถุเป็นสองชนิด คือ วัตถุที่มีค่าความ แข็งต่ำ และวัตถุที่มีค่าความแข็งสูง ซึ่งจะแบ่งการกดและไม่เข้าตำแหน่งเดิมเพื่อสังเกตแรงดันที่เกิด ขึ้นกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า เนื่องจากในโครงงานไม่ได้มีการวัดแรงบิดออกมา โดยตรง แต่ไปการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าไปในชุดขับเคลื่อนเซอร์โวมอเตอร์ซึ่งจะทำให้แรงบิดเปลี่ยนแปลงตาม แรงดันที่เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากชุดขับเคลื่อนเซอร์โวมอเตอร์เป็นรุ่น HF-SP52(B) ซึ่งมีค่าแรงบิดสูงสุดที่ มอเตอร์จะทำได้ (Maximum Torque) อยู่ที่ 7.16 นิวตันเมตร (Nm) และสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้า ให้กับ Analog Torque Limit สูงสุดเท่ากับ 8 โวลต์จึงจะได้ค่าแรงบิดสูงสุดจึงสามารถคิดเป็น สมการอย่างง่ายดังนี้

$$\text{Maximum torque} = \text{Analog Torque Limit} \quad 4-1$$

$$7.16 \text{ นิวตันเมตร} = 8 \text{ โวลต์}$$

ตัวอย่าง $T_{\text{DELTA}} = 1.3$ โวลต์ จะได้แรงบิดกี่นิวตันเมตร ดังนั้นจึงทำการเทียบจากสมการดังนี้

$$8 \text{ โวลต์} = 7.16 \text{ นิวตันเมตร}$$

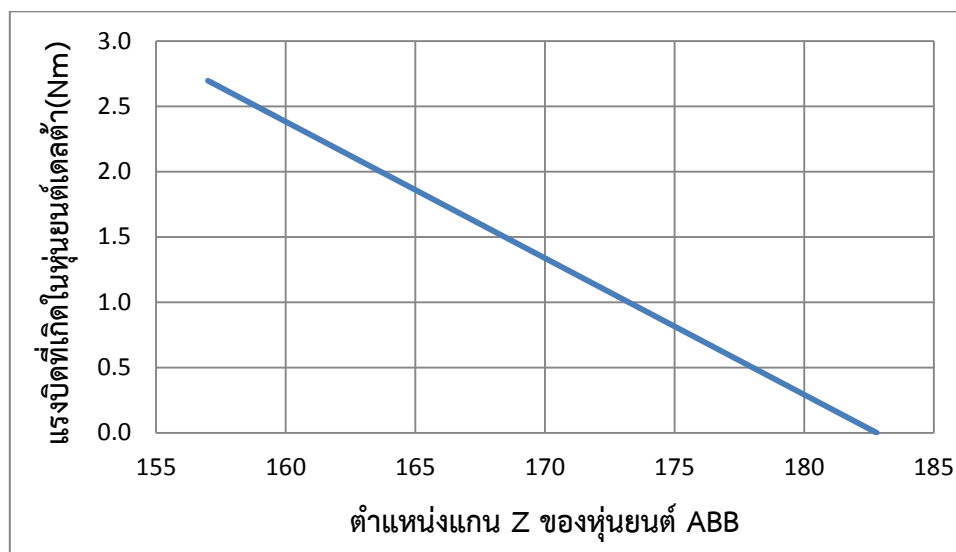
$$1.3 \text{ โวลต์} = X \text{ นิวตันเมตร}$$

$$X = \frac{1.3 \times 7.16}{8} = 1.1635 \text{ โวลต์}$$

ตารางที่ 4-3 การเปรียบเทียบระหว่างแรงต้านของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า (T_{DELTA}) และความลึกของหุ่นยนต์เอบีบี (Z_{ABB})

Xabb	Yabb	Zabb	V (V)	T (Nm)
551.8	-146	182.8	0.0	0.0
551.8	-146	181	0.2	0.2
551.8	-146	179	0.4	0.4
551.8	-146	177	0.7	0.6
551.8	-146	175	0.9	0.8
551.8	-146	173	1.1	1.0
551.8	-146	171	1.4	1.2
551.8	-146	169	1.6	1.4
551.8	-146	167	1.8	1.7
551.8	-146	165	2.1	1.9
551.8	-146	163	2.3	2.1
551.8	-146	161	2.5	2.3
551.8	-146	159	2.8	2.5
551.8	-146	157	3.0	2.7

จากตารางที่ 4-3 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างแรงต้านของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า (T_{DELTA}) และความลึกของหุ่นยนต์เอบีบี (Z_{ABB}) เพื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลงของแรงต้านในตัวหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าที่สัมพันธ์กับความลึกของหุ่นยนต์หุ่นยนต์ เมื่อกดลงบนวัตถุที่มีค่าความแข็งต่ำ ซึ่งจากค่าในตารางที่ 4-3 ตำแหน่งแกน Z ของหุ่นยนต์เอบีบี (Z_{ABB}) เท่ากับ 182.8 มิลลิเมตร จะเกิดแรงต้าน (T_{DELTA}) เท่ากับ 0 นิวตันเมตร เนื่องจากหุ่นยนต์เอบีบียังไม่เริ่มกดวัตถุและเมื่อหุ่นยนต์เอบีบีเคลื่อนที่ไปจนกระทั่งตำแหน่งแกน Z อยู่ที่ 157 มิลลิเมตร จะเกิดแรงต้าน 2.7 นิวตันเมตร เพราะหุ่นยนต์เอบีบี มีการกดลงไปบนวัตถุซึ่งเป็นวัตถุที่มีค่าความแข็งต่ำ



ภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านและตำแหน่งการกดวัตถุ

ภาพที่ 4-10 จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของแรงกดและตำแหน่งของแกน Z ในหุ่นยนต์เอบีบี ตั้งแต่ก่อนกดวัตถุจนถึงกดลงบนวัตถุ ที่ตำแหน่งแกน Z ของหุ่นยนต์เอบีบี มีค่า 182.8 มิลลิเมตร จะไม่เกิดแรงบิดในหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลด้า และเมื่อตำแหน่งของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลด้าลดลง จะทำให้เกิดแรงบิดในหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลด้า ซึ่งสามารถสังเกตการณ์ได้จากภาพที่ 4-11 จะเป็นภาพแสดงก่อนการกดวัตถุ และภาพที่ 4-12 เป็นภาพขณะกำลังกดวัตถุ โดยที่ตำแหน่งของแกน Z เปลี่ยนแปลงไป 25.8 มิลลิเมตร ทำให้เกิดแรงต้านสูงสุด 2.7 นิวตันเมตร ที่วัตถุค่าความแข็งต่ำ



ภาพที่ 4-11 ตำแหน่งหุ่นยนต์ก่อนการกดวัตถุที่มีค่าความแข็งต่ำตำแหน่งที่หนึ่ง

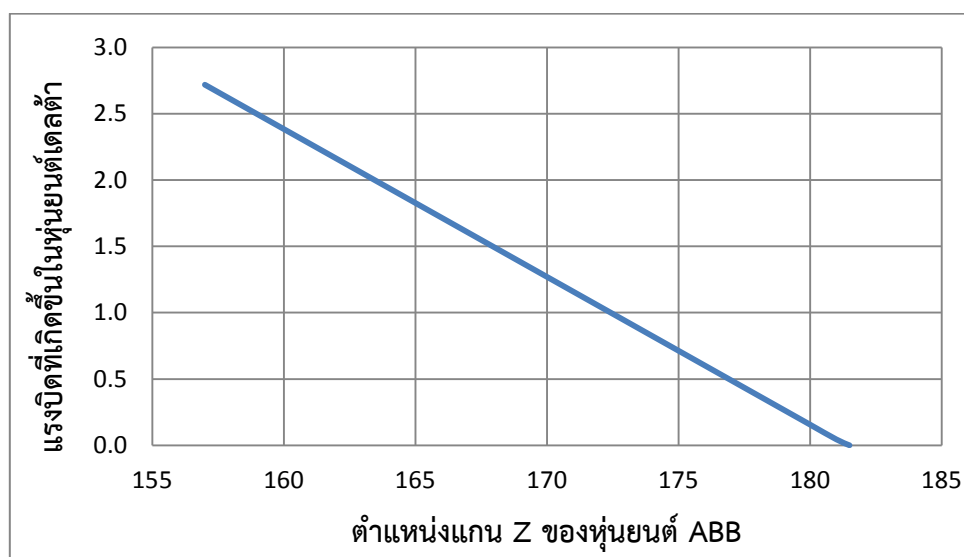


ภาพที่ 4-12 ตำแหน่งหุ่นยนต์ขณะกดวัตถุที่มีค่าความแข็งต่ำตำแหน่งที่หนึ่ง

ตารางที่ 4-4 การเปรียบเทียบระหว่างแรงต้านของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า (T_{DELTA}) และความลึกของหุ่นยนต์ เอบีบี (Z_{ABB})

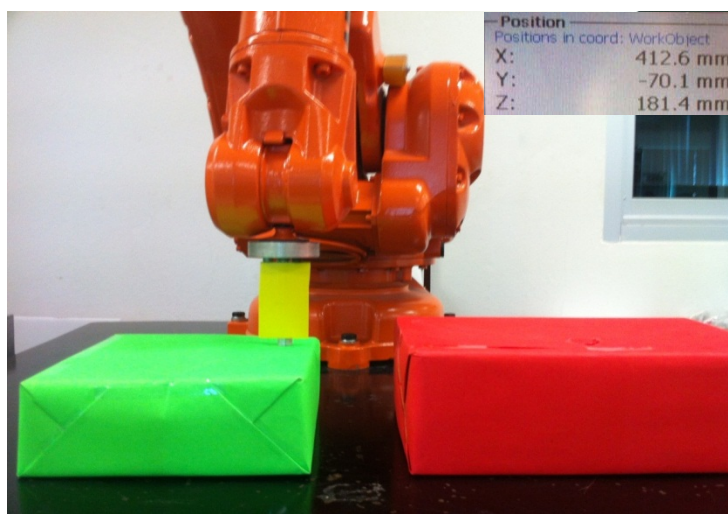
Xabb	Yabb	Zabb	V (V)	T (Nm)
412.6	-70.1	181.5	0.0	0.0
412.6	-70.1	181	0.0	0.0
412.6	-70.1	179	0.3	0.3
412.6	-70.1	177	0.5	0.5
412.6	-70.1	175	0.8	0.7
412.6	-70.1	173	1.0	0.9
412.6	-70.1	171	1.3	1.2
412.6	-70.1	169	1.5	1.4
412.6	-70.1	167	1.8	1.6
412.6	-70.1	165	2.0	1.8
412.6	-70.1	163	2.3	2.0
412.6	-70.1	161	2.5	2.3
412.6	-70.1	159	2.8	2.5
412.6	-70.1	157	3.0	2.7

จากตารางที่ 4-3 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างแรงต้านของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าและความลึกของหุ่นยนต์เอบีบี เพื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลงของแรงต้านในตัวหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าที่สัมพันธ์กับความลึกของหุ่นยนต์เอบีบี ซึ่งเป็นการทดลองกวดำที่มีค่าความแข็งต่ำเป็นครั้งที่สอง ซึ่งจะเปลี่ยนตำแหน่งสำหรับการกวดำ จากค่าในตารางที่ 4-3 ตำแหน่งแกน Z ของหุ่นยนต์เอบีบี เท่ากับ 181.5 มิลลิเมตร จะเกิดแรงต้านในหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า เท่ากับ 0 นิวตันเมตร เนื่องจากหุ่นยนต์เอบีบี ยังไม่เริ่มกวดำและเมื่อหุ่นยนต์เอบีบี เคลื่อนที่ไปจนกระทั่งตำแหน่งแกน Z อยู่ที่ 157 มิลลิเมตร จะเกิดแรงต้าน 2.7 นิวตันเมตร เพราะหุ่นยนต์เอบีบีมีการกดลงไปบนวัตถุ

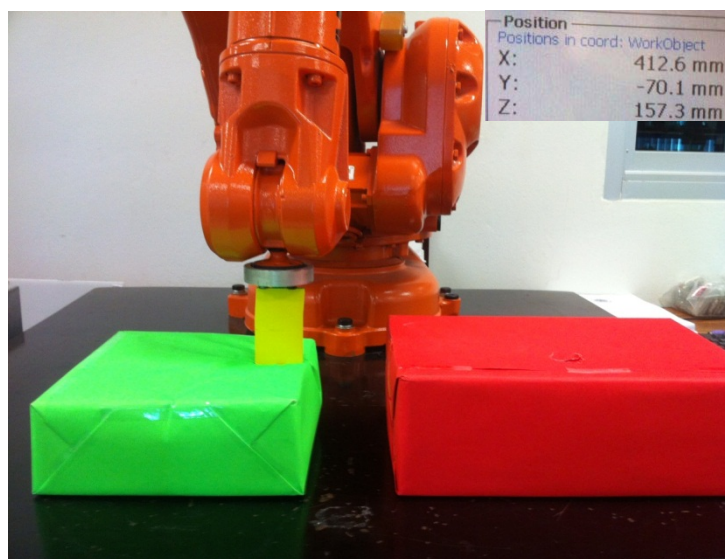


ภาพที่ 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านและตำแหน่งการกวดำ

ภาพที่ 4-13 จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของแรงกดและตำแหน่งของแกน Z ในหุ่นยนต์เอบีบี ตั้งแต่ก่อนกวดำจนไปถึงกดลงบนวัตถุ ที่ตำแหน่งแกน Z ของหุ่นยนต์เอบีบี มีค่า 181.5 มิลลิเมตร จะไม่เกิดแรงบิดในหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าและเมื่อตำแหน่งของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าลดลง จะทำให้เกิดแรงบิดในหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า ซึ่งสามารถสังเกตการณ์ได้จากภาพที่ 4-14 จะเป็นภาพแสดงก่อนการกวดำ และภาพที่ 4-15 เป็นภาพขณะกำลังกวดำ โดยที่ตำแหน่งของแกน Z เปลี่ยนแปลงไป 24.5 มิลลิเมตร และเกิดแรงต้านสูงสุด 2.7 นิวตันเมตร ที่วัตถุค่าความแข็งต่ำ



ภาพที่ 4-14 ตำแหน่งหุ่นยนต์ก่อนกดวัตถุที่มีค่าความแข็งต่ำตำแหน่งที่สอง

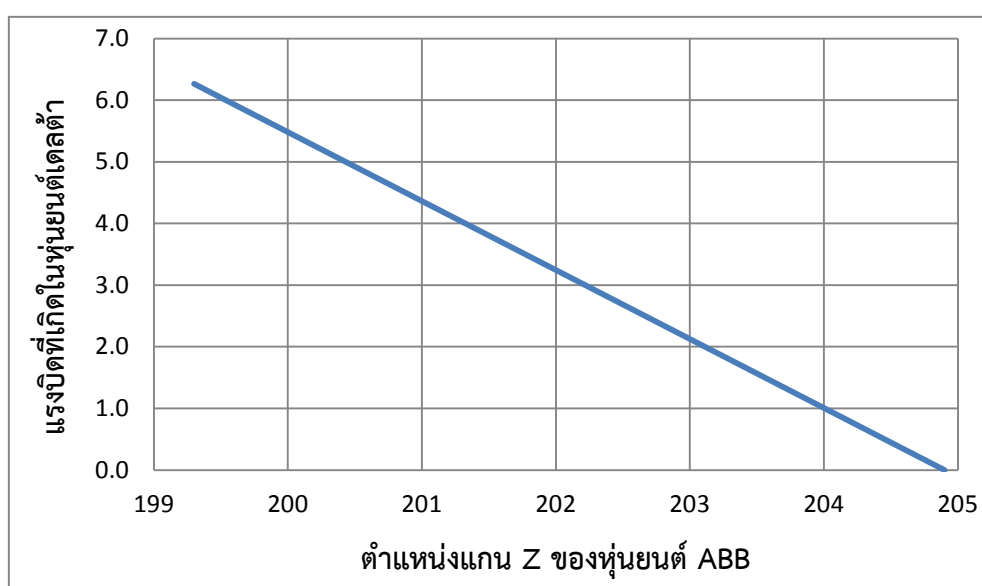


ภาพที่ 4-15 ตำแหน่งหุ่นยนต์ขณะกดวัตถุที่มีค่าความแข็งต่ำตำแหน่งที่สอง

ตารางที่ 4-5 การเปรียบเทียบระหว่างแรงต้านของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า (T_{DELTA}) และความลึกของหุ่นยนต์ เอบีบี (Z_{ABB})

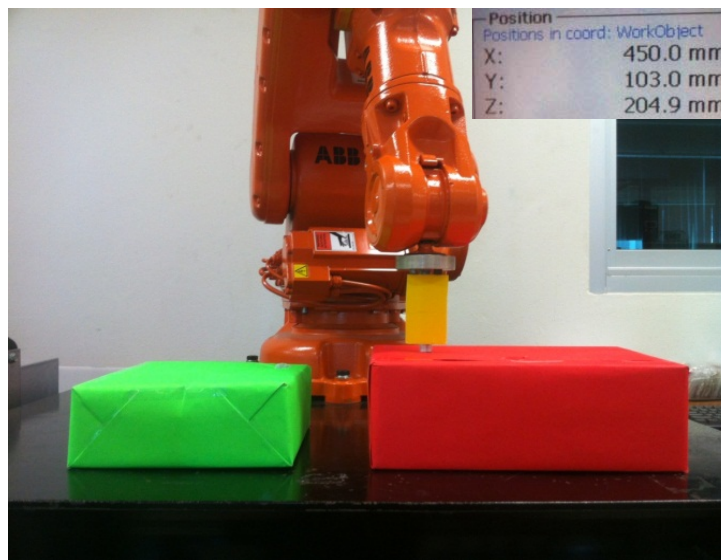
Xabb	Yabb	Zabb	V (V)	T (Nm)
450	103	204.9	0.0	0.0
450	103	204.1	1.0	0.9
450	103	203.9	1.3	1.1
450	103	203.7	1.5	1.3
450	103	203.5	1.8	1.6
450	103	203.3	2.0	1.8
450	103	203.1	2.3	2.0
450	103	202.9	2.5	2.2
450	103	202.7	2.8	2.5
450	103	202.5	3.0	2.7
450	103	202.3	3.3	2.9
450	103	202.1	3.5	3.1
450	103	201.9	3.8	3.4
450	103	201.7	4.0	3.6
450	103	201.5	4.3	3.8
450	103	201.3	4.5	4.0
450	103	201.1	4.8	4.3
450	103	200.9	5.0	4.5
450	103	200.7	5.3	4.7
450	103	200.5	5.5	4.9
450	103	200.3	5.8	5.1
450	103	200.1	6.0	5.4
450	103	199.9	6.3	5.6
450	103	199.7	6.5	5.8
450	103	199.5	6.8	6.0
450	103	199.3	7.0	6.3

จากตารางที่ 4-4 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างแรงบิดของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า และความลึกของหุ่นยนต์เอบีบี เพื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลงที่จะมีผลกับวัตถุที่มีค่าความแข็งสูง ซึ่งเป็นการทดลองกวดวัตถุที่มีค่าความแข็งสูงจากค่าในตารางที่ 4-4 ตำแหน่งแกน Z ของหุ่นยนต์เอบีบี เท่ากับ 204.9 มิลลิเมตร จะเกิดแรงบิดในหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า เท่ากับ 0 นิวตันเมตร เนื่องจากหุ่นยนต์เอบีบี ยังไม่เริ่มกวดวัตถุและเมื่อหุ่นยนต์เอบีบี เคลื่อนที่ไปจนกระทั่งตำแหน่งแกน Z อยู่ที่ 199.3 มิลลิเมตร จะเกิดแรงบิด 6.3 นิวตันเมตร เพราะหุ่นยนต์เอบีบีมีการกดลงไปบนวัตถุ

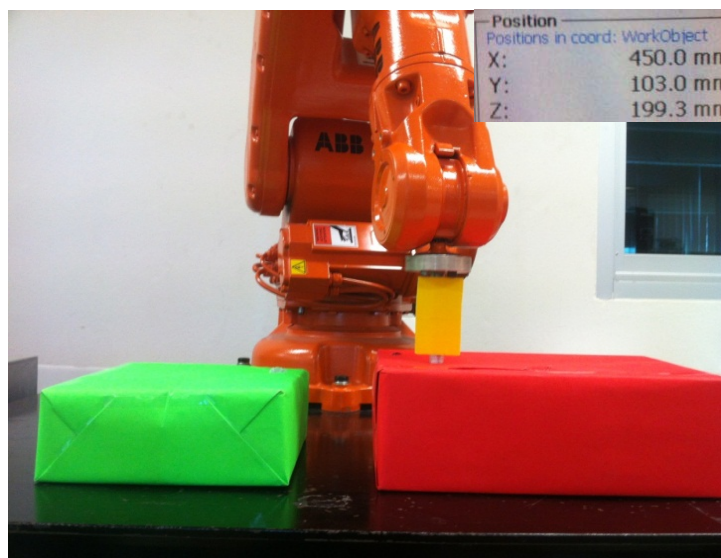


ภาพที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านและตำแหน่งการกวดวัตถุ

ภาพที่ 4-16 จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของแรงกดและตำแหน่งของแกน Z ในหุ่นยนต์เอบีบี ตั้งแต่ก่อนกวดวัตถุจนถึงกดลงบนวัตถุ ที่ตำแหน่งแกน Z ของหุ่นยนต์เอบีบี มีค่า 204.9 มิลลิเมตร จะไม่เกิดแรงบิดในหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า และเมื่อตำแหน่งของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าลดลง จะทำให้เกิดแรงบิดในหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า ซึ่งสามารถสังเกตการณ์ได้จากภาพที่ 4-17 จะเป็นภาพแสดงก่อนการกวดวัตถุ และภาพที่ 4-18 เป็นภาพขณะกำลังกวดวัตถุ โดยที่ตำแหน่งของแกน Z เปลี่ยนแปลงไป 5.6 มิลลิเมตร และเกิดแรงต้านสูงสุด 6.3 นิวตันเมตรที่วัตถุค่าความแข็งสูง ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ทำให้เห็นว่า การกวดวัตถุที่มีค่าความแข็งสูง ตำแหน่งแกน Z ของหุ่นยนต์เอบีบี เปลี่ยนแปลงไปค่อนข้างน้อยแต่ ทำให้เกิดแรงบิดที่สูงกว่าวัตถุที่มีค่าความแข็งต่ำอยู่มาก



ภาพที่ 4-17 ตำแหน่งหุ่นยนต์ก่อนกดวัตถุที่มีค่าความแข็งสูงตำแหน่งที่หนึ่ง

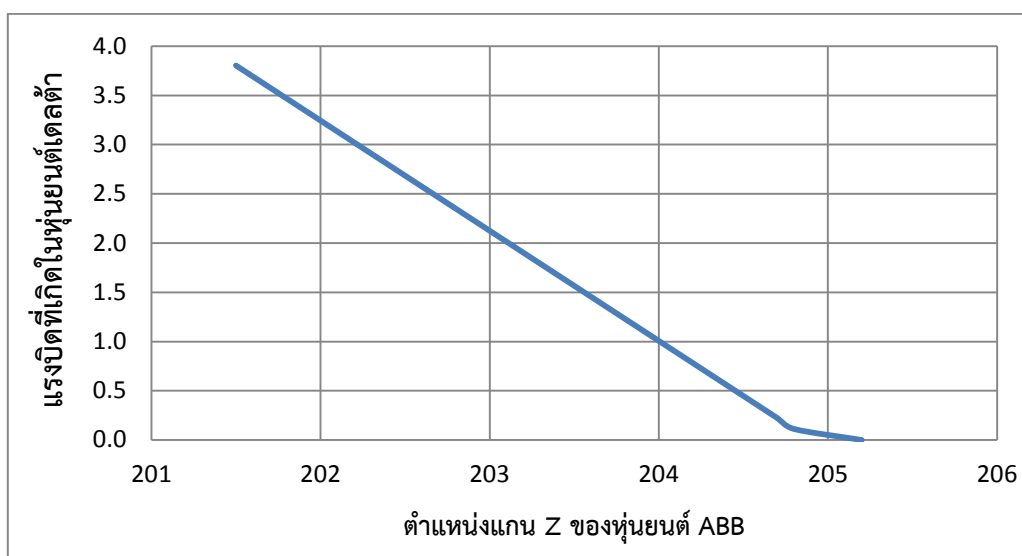


ภาพที่ 4-18 ตำแหน่งหุ่นยนต์ขณะกดวัตถุที่มีค่าความแข็งสูงตำแหน่งที่หนึ่ง

ตารางที่ 4-6 การเปรียบเทียบระหว่างแรงต้านของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า (T_{DELTA}) และความถี่ของหุ่นยนต์ เอบีบี (Z_{ABB})

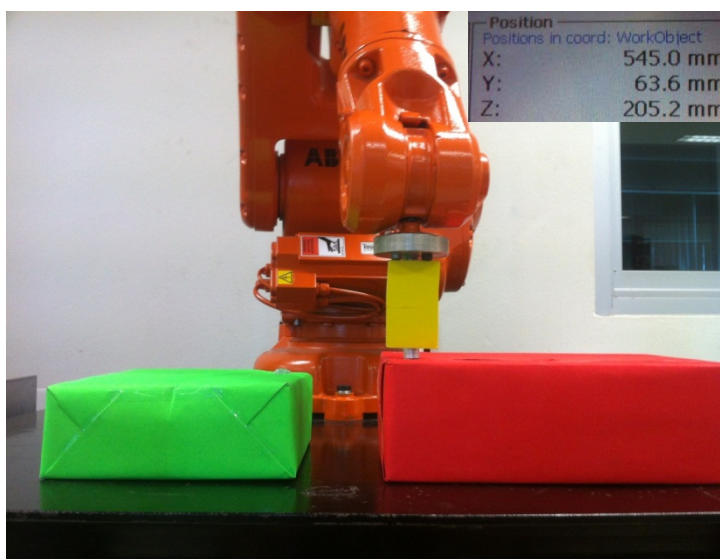
Xabb	Yabb	Zabb	V (V)	T (Nm)
545	63.6	205.2	0.0	0.0
545	63.6	204	1.1	1.0
545	63.6	203.9	1.3	1.1
545	63.6	203.8	1.4	1.2
545	63.6	203.7	1.5	1.3
545	63.6	203.6	1.6	1.5
545	63.6	203.5	1.8	1.6
545	63.6	203.4	1.9	1.7
545	63.6	203.3	2.0	1.8
545	63.6	203.2	2.1	1.9
545	63.6	203.1	2.3	2.0
545	63.6	203	2.4	2.1
545	63.6	202.9	2.5	2.2
545	63.6	202.8	2.6	2.3
545	63.6	202.7	2.8	2.5
545	63.6	202.6	2.9	2.6
545	63.6	202.5	3.0	2.7
545	63.6	202.4	3.1	2.8
545	63.6	202.3	3.3	2.9
545	63.6	202.2	3.4	3.0
545	63.6	202.1	3.5	3.1
545	63.6	202	3.6	3.2
545	63.6	201.9	3.8	3.4
545	63.6	201.8	3.9	3.5
545	63.6	201.7	4.0	3.6
545	63.6	201.6	4.1	3.7
545	63.6	201.5	4.3	3.8

จากตารางที่ 4-5 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างแรงบิดของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าและความลึกของหุ่นยนต์เอบีบี เพื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลงที่จะมีผลกับวัตถุที่มีค่าความแข็งสูง ซึ่งเป็นการทดลองกวดวัตถุที่มีค่าความแข็งสูงเป็นครั้งที่สอง จากค่าในตารางที่ 4-5 ตำแหน่งแกน Z ของหุ่นยนต์เอบีบีเท่ากับ 205.2 มิลลิเมตร จะเกิดแรงบิดในหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า เท่ากับ 0 นิวตันเมตร เนื่องจากหุ่นยนต์เอบีบียังไม่เริ่มกวดวัตถุและเมื่อหุ่นยนต์เอบีบีเคลื่อนที่ไปจนกระทั่งตำแหน่งแกน Z อยู่ที่ 201.5 มิลลิเมตร จะเกิดแรงบิด 3.8 นิวตันเมตร เพราะหุ่นยนต์เอบีบีมีการกดลงไปบนวัตถุ

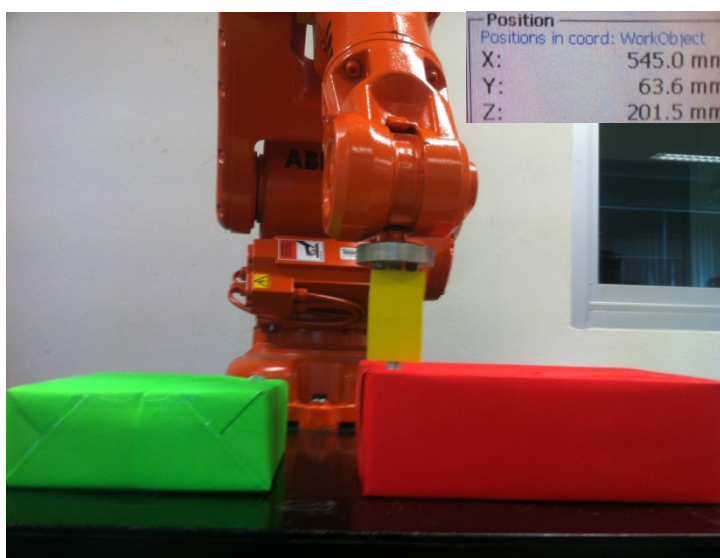


ภาพที่ 4-19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านและตำแหน่งการกวดวัตถุ

ภาพที่ 4-19 จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของแรงกดและตำแหน่งของแกน Z ในหุ่นยนต์เอบีบี ตั้งแต่ก่อนกวดวัตถุจนถึงกดลงบนวัตถุที่ตำแหน่งแกน Z ของหุ่นยนต์เอบีบี มีค่า 205.2 มิลลิเมตร จะไม่เกิดแรงบิดในหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า และเมื่อตำแหน่งของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้าลดลง จะทำให้เกิดแรงบิดในหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 3 แกนแบบเดลต้า ซึ่งสามารถสังเกตการณ์ได้จากภาพที่ 4-20 จะเป็นภาพแสดงก่อนการกวดวัตถุ และภาพที่ 4-21 เป็นภาพขณะกำลังกวดวัตถุ โดยที่ตำแหน่งของแกน Z เปลี่ยนแปลงไป 3.7 มิลลิเมตร และเกิดแรงบิดสูงสุด 3.8 นิวตันเมตร ที่วัตถุค่าความแข็งสูง ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ทำให้เห็นว่าการกวดวัตถุที่มีค่าความแข็งสูง ตำแหน่งแกน Z ของหุ่นยนต์เอบีบี จะกดลงน้อยกว่าครั้งแรกเพื่อให้เห็นค่าแรงบิดที่แตกต่างกันเนื่องจากตำแหน่งแกน Z ของหุ่นยนต์เอบีบีที่ไม่เท่ากัน



ภาพที่ 4-20 ตำแหน่งหุ่นยนต์ก่อนกดวัตถุที่มีค่าความแข็งสูงตำแหน่งที่สอง



ภาพที่ 4-21 ตำแหน่งหุ่นยนต์ขณะกดวัตถุที่มีค่าความแข็งสูงตำแหน่งที่สอง

จากการทดลองที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่าวัตถุที่มีค่าความแข็งต่ำจะสามารถกดลงไปได้ลึกกว่า และจะเกิดแรงบิดที่น้อยกว่า ซึ่งจะแตกต่างกับวัตถุที่มีค่าความแข็งสูงที่จะสามารถกดลงไปได้น้อย แต่จะทำให้เกิดแรงบิดที่สูงกว่า ไม่ว่าจะกดตำแหน่งใดของวัตถุ