

## บทที่ 5

### ระบบแขนกลและการแปลงพิกัด

บทนี้กล่าวถึงรายละเอียดต่างๆที่สำคัญดังนี้ คือ ส่วนแรกจะกล่าวถึงรายละเอียดของแขนกลที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ และในส่วนที่สองกล่าวถึงการแปลงพิกัดที่ได้จากบทที่ 4 ให้เป็นตำแหน่งที่สอดคล้องกับพิกัดของแขนกล และในส่วนสุดท้ายกล่าวถึงการนำทฤษฎีที่ได้ไปประยุกต์ใช้งาน

#### 5.1 องค์ประกอบของระบบแขนกล

ระบบแขนกลประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักๆสามส่วน คือ แขนกล (manipulator), ตัวควบคุม (controller) และแหล่งต้นกำลัง (power supply)

ระบบแขนกลเป็นชุดของกลไกและข้อต่อต่างๆที่สามารถเคลื่อนที่ในทิศทางของการดำเนินงาน ซึ่งมันจะจำลองการเคลื่อนที่ของมือ, ข้อมือและนิ้วมือของมนุษย์เป็นรูปแบบในการเคลื่อนที่

##### 5.1.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของแขนกล

โครงสร้างโดยทั่วไปของแขนกลประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังนี้

1. ข้อต่อ (joint) คือ จุดที่สามารถหมุนหรือเลื่อนไปมาได้
2. ก้าน (link) คือส่วนที่เชื่อมต่อข้อต่อ ก้านจะเป็นส่วนรับภาระที่หุ่นยนต์ต้องทำเปรียบเสมือนลำแขนของเรา
3. ข้อมือ (wrist) จะติดที่ปลายแขน จะประกอบไปด้วยระยะพิช (pitch) คือระยะทางขึ้นลงของข้อมือ และ โรล (roll) คือการหมุนของข้อมือ
4. อุปกรณ์ส่วนปลาย (end effector) หรือ ปากจับ (gripper)
5. หัวไหล่ (shoulder) ดูรูปที่ภาคผนวก ก.

หน่วยควบคุมของระบบแขนกลหรืออีกนัยหนึ่งคือสมองของระบบแขนกลที่ใช้เก็บข้อมูลและออกคำสั่งให้แก่ตัวแขนกล โดยหน่วยควบคุมนี้อาจเป็นได้ทั้งแบบปกติและแบบซับซ้อน ซึ่งในระบบที่เป็นรูปแบบแล้วจะสามารถเก็บชุดคำสั่งและการประมวลผลงานได้มากกว่าหนึ่งรูปแบบ การทำ

งานในขั้นแรกของระบบการผลิต จะถูกนำเข้าไปในหน่วยควบคุมซึ่งจะจัดระบบการเคลื่อนไหวของแขนกลตามลำดับและตำแหน่งที่ต้องการ ขั้นที่สองหน่วยควบคุมจะเก็บข้อมูลของลำดับและตำแหน่งการทำงานไว้ในหน่วยความจำ และขั้นที่สามมันจะเข้าประสานงานกับระบบการผลิตโดยมีระบบการป้อนกลับ (feedback) เข้าร่วมด้วยเกือบทุกขบวนการ ความสามารถของส่วนควบคุมจะมีตั้งแต่ตัวจัดลำดับธรรมดาไปจนถึงวงจรตรรกทางด้านนิวแมติก (pneumatic) หรือทางด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์, ไมโครโปรเซสเซอร์ (microprocessor) ต่างๆ แม้กระทั่งคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (minicomputer) ตำแหน่งการติดตั้งของส่วนควบคุมอาจประกอบไว้ที่แขนกลหรือห้องควบคุมพิเศษอื่นๆได้ตามความเหมาะสม

แขนกลที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้เป็นแขนกลของบริษัท ESHED ROBOTEC, Israel. รุ่น SCORBOT-ER Vplus ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก.

## 5.2 การแปลงพิกัด

หลังจากที่ได้รายละเอียดของภาพ คือสามารถหาชนิดของวัตถุ, หาจุดเซ็นทรอยด์ และการวางตัวแล้ว ขั้นตอนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งคือ การนำค่าที่ได้แปลงเป็นค่าที่สอดคล้องกับแขนกลเพื่อสั่งให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังวัตถุได้อย่างถูกต้อง ซึ่งวิธีที่จะได้กล่าวถึงมี 2 วิธีคือ

### 5.2.1 วิธีการแปลงเพอร์สเปคทีฟ

วิธีการแปลงเพอร์สเปคทีฟดูในภาคผนวก ข.

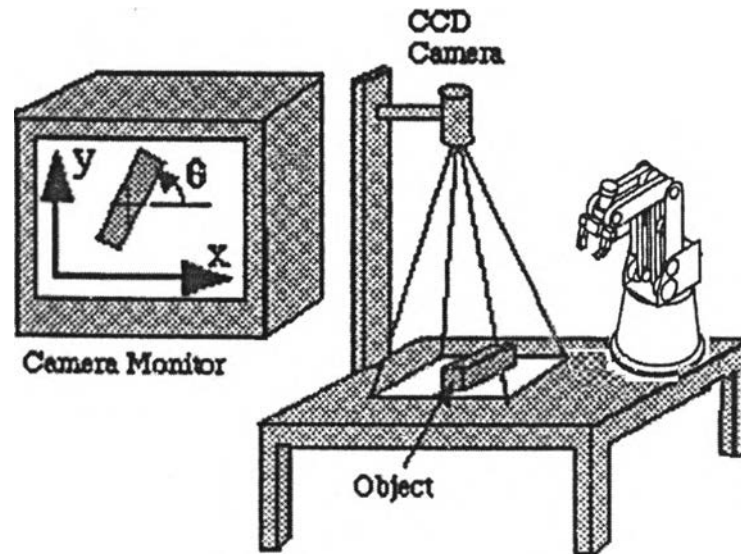
### 5.2.2 วิธีพื้นฐาน

จากปัญหาอันเกิดจากการบิดเบือนของเลนส์จึงทำให้ตำแหน่งของวัตถุที่อ้างอิงที่ฐานของแขนกลเกิดการผิดพลาด ดังนั้นการแก้ปัญหาดังกล่าวทำได้หลายวิธี โดยเลือกวิธีการหาค่าเมตริกซ์ที่ใช้ในการแปลงค่าจากพิกัดหนึ่งไปยังอีกพิกัดหนึ่ง

พื้นฐานของวิธีนี้เกี่ยวข้องกับพิกัดของระบบ 2 ระบบคือ (1)ระบบพิกัดของกล้อง (camera coordinate system) เกี่ยวข้องกับตำแหน่งและการวางตัวของวัตถุที่ถูกตรวจจับโดยกล้อง (2)ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน\*\* (cartesian coordinate system) เป็นส่วนที่ใช้ในการสั่งงานแขนกล

\* คือ ตำแหน่งของจุดเซ็นทรอยด์เป็นตำแหน่งที่อ้างอิงที่ระบบพิกัดของกล้อง

\*\* คือ ตำแหน่งของวัตถุเป็นตำแหน่งที่อ้างอิงที่พิกัดของแขนกล้อง



รูปที่ 5-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระบบกล้องและระบบแขนกล [16]

จากรูปที่ 5-1 หลังจากที่ผ่านมาขั้นตอนเพื่อหาชนิด, ตำแหน่ง และการวางตัวของภาพ ซึ่งได้กล่าวไว้สิ่งที่เราได้คือ ตำแหน่งของจุดเซ็นทรอยด์  $(x_c, y_c)$  และการวางตัว  $(\theta)$  ของภาพ ซึ่งอ้างอิงกับระบบพิกัดของกล้อง

จากรูปที่ 5-1 ค่าในแนวแกน Z เป็นค่าที่เรารู้และกำหนดให้กับแขนกล ดังนั้นหมายความว่าเราเพียงกำหนดตำแหน่ง  $(X_b, Y_b)$  และการวางตัว  $(\Theta)$  ของวัตถุในระบบพิกัดของแขนกลเพื่อที่จะโปรแกรมให้แขนกลเคลื่อนที่ไปจับวัตถุได้อย่างอัตโนมัติ

ปัญหาพื้นฐานคือการหาความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดทั้งสองคือระบบพิกัดของกล้อง  $(x_c, y_c, \theta)$  เป็นระบบพิกัดแขนกล  $(X_b, Y_b, \Theta)$  สมมติว่าความสัมพันธ์ระหว่างการแปลงของพิกัดทั้งสองแสดงด้วยความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5-1) และ (5-2)

$$\begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_\pi \\ y_\pi \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

$$\Theta = \theta + \gamma + \Theta_\pi \quad (5-2)$$

พิจารณาการแปลงในสมการที่ (5-1) ประกอบด้วยส่วนการเลื่อน (translation) ส่วนของการหมุน (rotation) ส่วนการแปลงของสมการที่ (5-2) มีพื้นฐานที่ว่า การวางตัวไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่ง

จากสมการที่ (5-1) เราสามารถหาค่าพารามิเตอร์ (calibration parameters) ทั้ง 6 ได้โดยการรวบรวมข้อมูลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดของกล้อง  $(x,y)^{(i)}$  กับระบบพิกัดเซนเซอร์  $(X,Y)^{(i)}$  โดยที่  $i = 1,2,\dots,n$  ให้เพียงพอสำหรับการคำนวณหาพารามิเตอร์ทั้ง 6 คือ  $k_{xx}, k_{xy}, k_{yx}, k_{yy}, x_{\pi}, y_{\pi}$

จากสมการที่ (5-1) สามารถแปลงให้อยู่ในรูปแบบเอกพันธ์ (homogeneous form) ดังสมการที่ (5-3)

$$\begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & x_{\pi} \\ k_{yx} & k_{yy} & y_{\pi} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

โดยที่  $K$  คือส่วนของเมตริกซ์หมุน (rotation matrix) และ  $x_{\pi}, y_{\pi}$  คือ เมตริกซ์เลื่อน (translation matrix) จากสมการที่ (5-3) สามารถแทนให้อยู่ในรูปที่เกี่ยวข้องกับการรวบรวมข้อมูล ดังสมการที่ (5-4)

$$\begin{bmatrix} R^{(1)} & R^{(2)} & \dots & R^{(n)} \end{bmatrix} = K * \begin{bmatrix} C^{(1)} & C^{(2)} & \dots & C^{(n)} \end{bmatrix} \quad (5-4)$$

โดยที่

$$K = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & x_{\pi} \\ k_{yx} & k_{yy} & y_{\pi} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-5)$$

$$R^{(i)} = \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ 1 \end{bmatrix}^{(i)} \quad \text{และ} \quad C^{(i)} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix}^{(i)} \quad \text{โดยที่ } i = 1,2,\dots,n$$

ในการหาค่าพารามิเตอร์  $K$  สามารถทำได้โดยวิธี ผลบวกของค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด (sum of the squared errors) โดยที่ค่าผิดพลาดเกิดขึ้นระหว่างค่าในระบบพิกัดของกล้องกับระบบพิกัดของแขนกล ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก.

ดังนั้นค่า 
$$K = R * C^+ \quad (5-6)$$

โดยที่ค่า 
$$C^+ = C^T * (C * C^T)^{-1} \quad (5-7)$$

และเรียก  $C^+ = \text{pseudoinverse of } C$

การกำหนดเครื่องหมาย  $+$  และค่าของมุมออฟเซต (offset angle,  $\Theta_r$ ) ในสมการที่ (5-2) ทำได้โดยการกำหนดข้อมูลตัวอย่างที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\theta$ ,  $\Theta$  ผลที่ได้คือค่าของมุมออฟเซต, เครื่องหมาย ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าของมุมออฟเซตจะมีค่าเป็นศูนย์

### 5.3 ผลการประยุกต์ใช้งาน

#### 5.3.1 กรณีวิธีการแปลงเพอร์สเปคทีฟ

ผลการทดลองกรณีของการแปลงเพอร์สเปคทีฟแสดงในภาคผนวก ข.

#### 5.3.2 วิธีพื้นฐาน

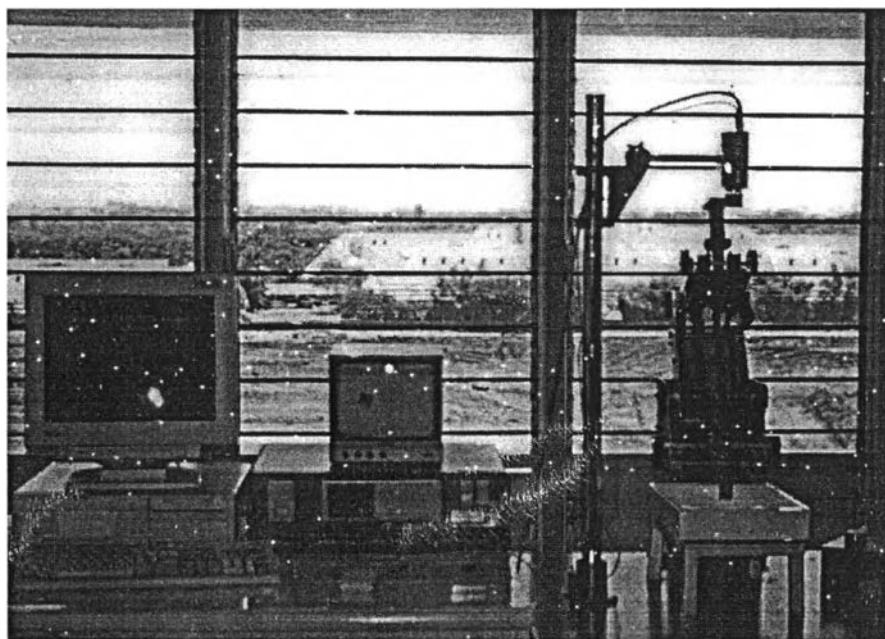
จากรูปที่ 5-1 ค่าพิกัดในแนวแกน  $Z$  เป็นค่าที่รู้ ขั้นตอนที่สำคัญคือการกำหนดตำแหน่ง  $(X, Y)$  และ มุมเอียง  $\Theta$  ของวัตถุในระบบโคออดิเนตคาร์ทีเซียนอ้างอิงพื้นฐานของแขนกล โดยคำสั่งที่สั่งให้แขนกลเคลื่อนที่ไปจับวัตถุ ค่าต่างๆที่ต้องรู้คือ  $(X, Y, Z)$  และ มุมเอียง  $\Theta$

สิ่งที่สำคัญสำหรับการหาค่า  $k_{xx}, k_{xy}, k_{yx}, k_{yy}, x_\pi, y_\pi$  คือ การกำหนดคู่ข้อมูลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $(x, y)'$  กับ  $(X, Y)'$ ,  $i=1, \dots, n$  โดยที่  $n$  มีค่าอย่างน้อยที่ทำให้สามารถกำหนด  $k_{xx}, k_{xy}, k_{yx}, k_{yy}, x_\pi, y_\pi$  แสดงดังตารางที่ 5-1

โดยที่สามารถหาเมตริกซ์ที่ใช้ในการแปลง คือเมตริกซ์ K ได้ดังสมการที่ 5-8

$$K = \begin{bmatrix} 0.0243 & -0.3559 & 454.81 \\ 0.3355 & -0.0195 & 53.136 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-8)$$

เมื่อนำค่า K ได้ ทำการทดสอบและผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5-1



รูปที่ 5-2 แสดงภาพของระบบหุ่นยนต์ซึ่งประกอบด้วย ESHED Robotec กับ ระบบการมอง

หลังจากที่เราสามารถหาเมตริกซ์ที่ใช้ในการแปลงจากพิกัดของกล้องให้เป็นพิกัดของแขนกลได้แล้วขั้นตอนต่อมาคือการหามุมที่ต้องสั่งให้ปากจับของแขนกลบิด ซึ่งจากการทดลองพบว่านอกเหนือจากปัญหาอันเกิดจากการวางตัวของแขนกลแล้วในกรณีของแขนกลชนิด articulate robot arm ยังมีปัญหาอันเกิดจากตำแหน่งที่ตั้งของวัตถุตั้งได้กล่าวในภายหลัง

จากปัญหาที่ได้กล่าวมาแล้วในกรณีของการหามุมที่ใช้ในการสั่งแขนกลเคลื่อนที่ไปจับ จึงประกอบด้วยมุมซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. มุมที่ขึ้นกับตำแหน่งที่ตั้งของวัตถุ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของแขนกลในงานวิทยานิพนธ์รอบฐานเป็นแบบการเคลื่อนที่แบบวงกลมดังรูปที่ 5-3

ตารางที่ 5-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $(x, y)'$  กับ  $(X, Y)'$

ตำแหน่งที่	$X_b(\text{mm})$	$Y_b(\text{mm})$	$Z_b(\text{mm})$	Pitch	Roll	$x_c(\text{pixel})$	$y_c(\text{pixel})$
1	306.4	-91.7	210.5	-86	20.3	408	445
2	301.4	-37.8	207.7	-84.9	10.5	244	445
3	299.2	21.5	213.7	-83.8	-3.3	70	442
4	365.9	23.7	209.0	-83.4	-3.4	72	257
5	436.6	28.3	211.5	-83.9	-3.4	74	58
6	440.0	-29.6	215.2	-88.9	-3.4	240	54
7	442.8	-78.7	214.3	-82.9	13.8	388	62
8	364.1	-85.7	212.7	-83.9	16.0	400	281
9	360.0	-36.0	208.8	-83.7	7.7	247	283
10	421.0	-58.3	212.0	-83.6	9.1	327	117
11	331.0	-63.5	208.4	-83.6	12.1	325	373
12	327.1	-4.1	212.3	-84.5	2.3	147	367
13	400.1	-0.5	212.7	-84.6	2.2	152	164

#### หมายเหตุ

$-X_b(\text{mm}), Y_b(\text{mm}), Z_b(\text{mm})$  คือ ตำแหน่งของวัตถุที่อ้างอิงที่ฐานของแขนกล

$-x_c, y_c$  คือ ตำแหน่งของจุดเซ็นทรอยด์ของภาพ

ดังนั้นเมื่อวัตถุวางที่ตำแหน่งที่ต่างกันก็จะส่งผลทำให้ค่าของมุมชนิดนี้มีค่าแตกต่างกัน  
จากรูปที่ 5-2 สามารถคำนวณหามุมเนื่องจากตำแหน่งของวัตถุได้ดังสมการที่ 5-9

$$y = \tan^{-1}\left(\frac{x}{y}\right)$$

(5-9)

ตารางที่ 5-2 แสดงผลที่ได้จากการทดลองโดยวิธีพื้นฐาน

ตำแหน่ง ที่	Xb(mm) จริง	Yb(mm) จริง	Xb(mm) ทดลอง	Yb(mm) ทดลอง	$x_c$ (pixel)	$y_c$ (pixel)	error of X	error of Y
1	306.4	-91.7	305.9	-92.4	408	445	0.5	0.7
2	301.4	-37.8	302.3	-37.3	244	445	0.9	0.3
3	299.2	21.5	299.1	21.0	70	442	0.1	0.5
4	365.9	23.7	365.0	23.9	72	257	0.9	0.2
5	436.6	28.3	435.9	27.1	74	58	0.7	1.2
6	440.0	-29.6	441.4	-28.4	240	54	1.4	1.2
7	442.8	-78.7	442.1	-78.2	388	62	0.7	0.5
8	364.1	-85.7	364.4	-86.5	400	281	0.3	0.8
9	360.0	-36.0	360.0	-35.2	247	283	0	0.8
10	421.0	-58.3	421.1	-58.8	327	117	0.1	0.5
11	331.0	-63.5	329.9	-63.1	325	373	1.1	0.4
12	327.1	-4.1	327.7	-3.3	147	367	0.6	0.8
13	400.1	-0.5	400.1	-1.0	152	164	0	0.5
14	421.3	-16.9	421.1	-14.7	196	108	0.2	2.2
15	439.1	-71.8	437.5	-68.3	358	73	1.6	3.5
16	366.0	-74.1	361.2	-71.2	354	287	4.8	2.9
17	308.2	-96.5	301.0	-93.3	410	460	7.2	3.2
18	313.5	-54.8	306.3	-52.3	289	437	7.2	2.5
19	367.4	-31.3	362.1	-29.0	229	276	5.3	2.3
20	416.2	-60.9	413.5	-57.9	323	138	2.7	4.92

หมายเหตุ

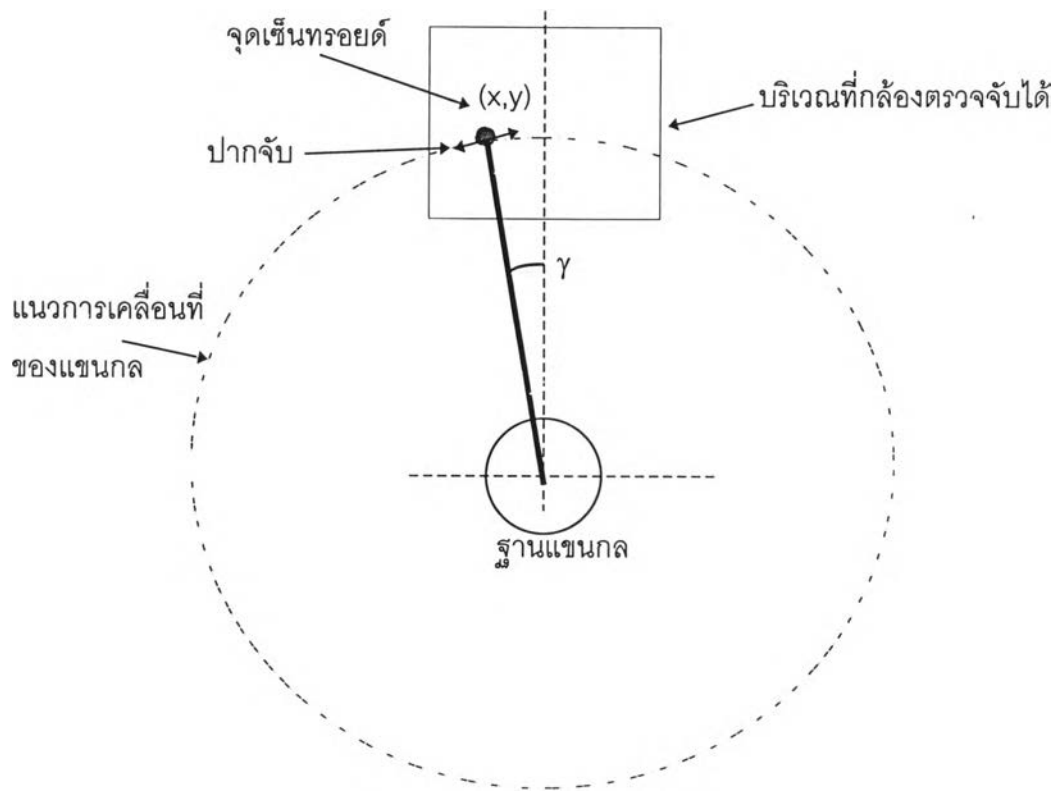
- $X_b$ (mm)จริง,  $Y_b$ (mm)จริง คือตำแหน่งที่ตั้งของวัตถุจริงที่อ้างอิงที่ฐานของแขนกล

- $X_b$ (mm)ทดลอง,  $Y_b$ (mm)ทดลอง คือตำแหน่งที่ตั้งของวัตถุที่ได้จากการทดลองที่อ้างอิงที่ฐานของแขนกล

- $x_c, y_c$  คือ ตำแหน่งของจุดเซ็นทรอยด์ของภาพของวัตถุ



-error of X,error of Y คือ ค่าผิดพลาดในแนวแกน X และ Y



รูปที่ 5-3 มุมเนื่องจากตำแหน่งที่ตั้งของวัตถุ

2. มุมที่เกิดจากการวางตัวของวัตถุ เป็นมุมที่แกนหลักกระทำแกน x และสามารถคำนวณได้จากสูตรที่ได้กล่าวมาแล้ว

เมื่อสามารถคำนวณหาค่ามุมทั้งสองได้แล้วผลรวมของมุมที่ใช้ในการสั่งให้แขนกลมีค่าดังสมการที่ 5-10 โดยที่  $\Theta_{\pi}$  มีค่าเท่ากับศูนย์

$$\Theta = \theta + \gamma$$

(5-10)

$\Theta$  คือ ผลรวมของมุมที่เกิดจากมุมทั้งสองประเภท เพื่อใช้ในการสั่งปากจับให้หมุน

$\theta$  คือ มุมเอียงเนื่องจากการวางตัวของภาพวัตถุ

$\gamma$  คือ มุมเนื่องจากตำแหน่งของวัตถุ

จากสมการที่ 5-10 ผลรวมของมุมที่เกิดขึ้นจากการทดลองแสดงดังตารางที่ 5-3

ตารางที่ 5-3 ผลการทดลองของมุมที่เกิดขึ้น

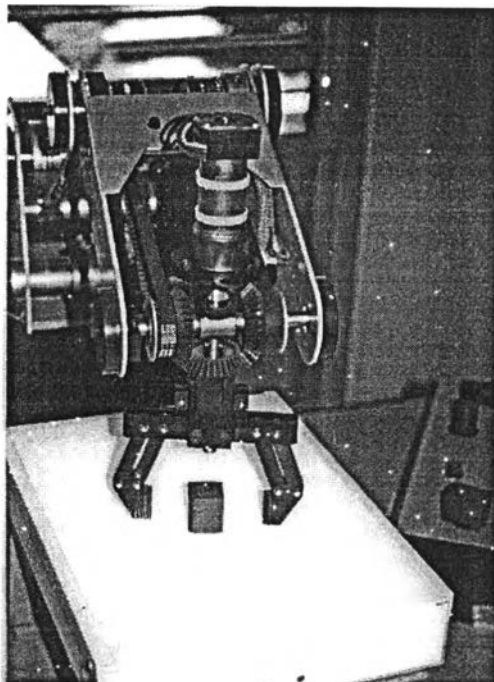
ตำแหน่งที่	มุมจริง (องศา)	มุม $\gamma$ (องศา)	มุม $\theta$ (องศา)	มุม $\Theta$ (องศา)	ค่ามุมที่ ผิดพลาด
1	34.7	2.00	24.92	26.9	7.8
2	46.1	8.88	32.12	41.01	5.1
3	64	11.15	46.23	57.39	6.61
4	3.5	-1.13	0.0	-1.13	4.63
5	20.3	9.70	3.87	13.57	6.73
6	33.1	4.59	21.93	26.52	6.58
7	61.6	7.97	47.03	55.01	6.59
8	36.2	12.12	17.12	29.24	6.96
9	10	-0.63	5.46	4.83	5.17
10	1.5	-1.92	0	-1.92	3.42

#### หมายเหตุ

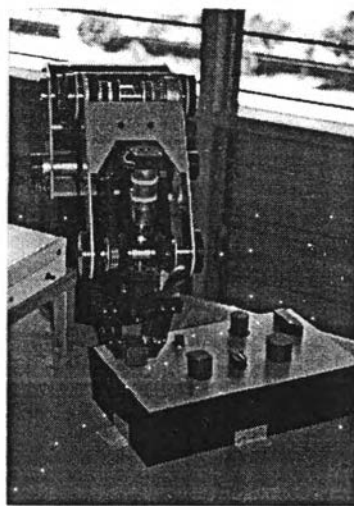
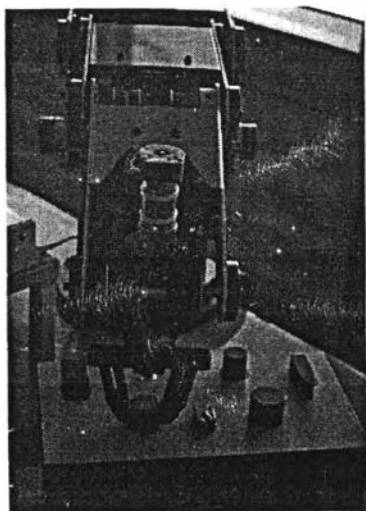
- มุมจริง คือ มุมที่เกิดขึ้นจริงที่สอดคล้องกับการบิดของปากจับ
- ค่าผิดพลาดของมุม คือ ค่าสมบูรณ์ของความแตกต่างระหว่างมุมจริงกับผลรวมของมุมที่ได้เนื่องจากการทดลอง

หลังจากที่เราสามารถทำการทดลองเพื่อหาค่าต่างๆที่ใช้ในการสั่งให้แขนกลเคลื่อนที่ ซึ่งผลการทดลองเวลาที่ใช้ในการคำนวณกรณีที่ทำการวิเคราะห์หาตำแหน่งของจุดเซ็นทรอยด์และทำการแปลงตำแหน่งที่ได้ให้เป็นตำแหน่งของวัตถุที่อ้างอิงที่ฐานของแขนกลนั้นใช้เวลาประมาณ 0.06 วินาที ส่วนในขั้นตอนการสั่งให้แขนกลเคลื่อนที่ไปจับวัตถุจะขึ้นอยู่กับความเร็วของแขนกลที่ใช้

ภาพการเคลื่อนที่ไปจับวัตถุโดยแขนกลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5-4 ถึง 5-6



รูปที่ 5-4 ภาพการเคลื่อนที่ไปจับวัตถุที่ตรวจจับได้



ภาพ 5-5 และ 5-6 ภาพการเคลื่อนนำวัตถุที่จับได้ไปวางไว้ที่ตำแหน่งต่างๆ