

บทที่ 3

การตรวจสอบชนิดของวัตถุ

หลังจากที่ทำการแปลงภาพที่ได้จากกล้อง CCD ให้เป็นภาพไบนารีดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เราจะนำผลที่ได้คือภาพไบนารีมาใช้ในการตรวจสอบชนิดของวัตถุตัวอย่างที่ได้ศึกษา

หลักการตรวจสอบชนิดของวัตถุ (identifying an object) ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยสองวิธีที่ใช้ร่วมกันในการแยกชนิดของวัตถุคือ วิธีแรกการเปรียบเทียบแกนหลัก (principle axis comparison) อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.1 และวิธีที่สองคือความยาวรหัส (code length) อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2 ส่วนในหัวข้อที่ 3.3 กล่าวถึงการนำวิธีทั้งสองมาประยุกต์ใช้ในงานวิทยานิพนธ์

3.1 วิธีเปรียบเทียบแกนหลัก

การเปรียบเทียบแกนหลักเป็นการนำการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักมาใช้ประโยชน์เพื่อแยกความแตกต่างของวัตถุแต่ละชนิด ซึ่งทฤษฎีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักนั้นได้ถูกเขียนขึ้นในปี ค.ศ. 1923 โดย Hotelling และในปี ค.ศ. 1964 โดย Searle [1] และได้ถูกนำไปใช้ในด้านต่างๆ การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักเป็นเทคนิคทางสถิติที่อยู่บนพื้นฐานของความแปรปรวน (variance) และความแปรปรวนร่วม (covariance) ของเซตของข้อมูล ค่าความแปรปรวนนี้เป็นการวัดการแตกกระจาย (scatter) ที่อยู่ภายในตัวแปรของเซตข้อมูล ส่วนความแปรปรวนร่วมเป็นการวัดการแตกกระจายระหว่างสองตัวแปร การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของตัวแปร x ตัว เป็นการแปลงเชิงเส้นของทุกๆ การแปรเปลี่ยนในข้อมูลเดิม x สู่อตัวแปรใหม่ y ดังสมการที่ 3-1

$$Y = C * X + B$$

(3-1)

โดยที่

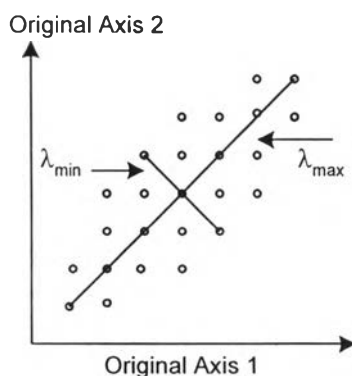
$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ Y_q \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ X_q \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdot & \cdot & C_{1p} \\ C_{21} & C_{22} & \cdot & \cdot & C_{2p} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ C_{q1} & C_{q2} & \cdot & \cdot & C_{qp} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ B_q \end{bmatrix}$$

โดยที่ $q \leq p$ และเงื่อนไขถูกกำหนดว่าการแปลงนั้นต้องสอดคล้องกับสมการที่ 3-2

$$\boxed{C^*C^T = I} \quad (3-2)$$

โดยที่ C^T เป็นทรานสโพส (transpose) ของ C และ I เป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ (identity matrix) และคุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ตัวแปรหลังการแปลง Y ต้องตั้งฉากกัน แต่ละตัวของ Y ไม่มีความสัมพันธ์กัน จุดประสงค์หลักของทฤษฎีในการแปลง คือ เพื่อเป็นการลดขนาดมิติของภาพ ทำให้ความแปรปรวนของข้อมูลหลังการแปลงมีค่าน้อยกว่าค่าความแปรปรวนของข้อมูลเดิม เมื่อนำมาใช้หาความยาวแกนหลัก และความยาวแกนรองของภาพวัตถุใดๆ โดยการลดขนาดของกลุ่มตัวแปร Y ให้เหลือเพียง 2 ค่าคือ ความยาวแกนหลักและความยาวแกนรอง จากจุดตัดของแกนทั้งสอง (maximum eigenvalue and minimum eigenvalue) ค่าทั้งสองก็สามารถเป็นลักษณะเฉพาะวัตถุแทนตัววัตถุใดๆ

3.1.1 การนำการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักมาใช้ในการเปรียบเทียบแกนหลัก



รูปที่ 3-1 แสดงแกนหลักและแกนรองของภาพ

ค่าเฉพาะ (eigenvalue) เป็นผลลัพธ์จากการวิเคราะห์หาค่าประกอบหลักซึ่งเป็นการแปลงเชิงเส้นที่อยู่ในรูปของสมการ $Y = C^*X+B$ จากการเปรียบเทียบแกนหลัก เราอาจทำการเปลี่ยนตัวแปรใหม่ให้สมการคุณลักษณะแสดงดังสมการที่ 3-3

$$D(\lambda) = \det (A-\lambda I)X = 0 \quad (3-3)$$

เมื่อ a,b,c,d คือ สมาชิกของเมตริกซ์ A ที่มีขนาด 2×2 และ I คือ เมตริกซ์เอกลักษณ์

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ Matrix } A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \sum_{(i,j) \in R} [(x_i - \bar{x}) \quad (y_j - \bar{y})] * \begin{bmatrix} (x_i - \bar{x}) \\ (y_j - \bar{y}) \end{bmatrix}$$

(x_i, y_j) คือ ตำแหน่งพิกเซลของภาพ

ดังนั้นจะได้

$$D(\lambda) = \begin{vmatrix} a-\lambda & b \\ c & d-\lambda \end{vmatrix} = 0$$

$$(a-\lambda)(d-\lambda) - bc = 0$$

$$ad - a\lambda - d\lambda + \lambda^2 - bc = 0$$

$$\lambda^2 - (a+d)\lambda + (ad-bc) = 0$$

จากสมการโพลิโนเมียลอันดับที่ 2 $a'x^2 + b'x + c' = 0$

คำตอบของสมการคือ $x = \frac{(-b' \pm \sqrt{b'^2 - 4a'c'})}{2a'}$

เพราะฉะนั้น $\lambda = \frac{((a+d) \pm \sqrt{(a+d)^2 - 4(ad-bc)})}{2}$

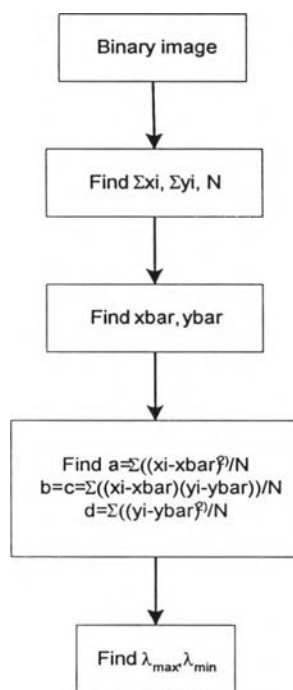
นั่นคือจะได้คำตอบที่เราต้องการคือ

$$\lambda_{\max} = \frac{(a+d) + \sqrt{(a+d)^2 - 4(ad-bc)}}{2}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{(a+d) - \sqrt{(a+d)^2 - 4(ad-bc)}}{2}$$

เมื่อ λ_{\max} และ λ_{\min} คือ ความยาวของแกนหลักและความยาวของแกนรองจากจุดตัดของแกนทั้งสองตามลำดับ

โดยที่ขั้นตอนในการหาค่าของความยาวแกนหลักและความยาวแกนรองแสดงดังรูปที่ 3-2

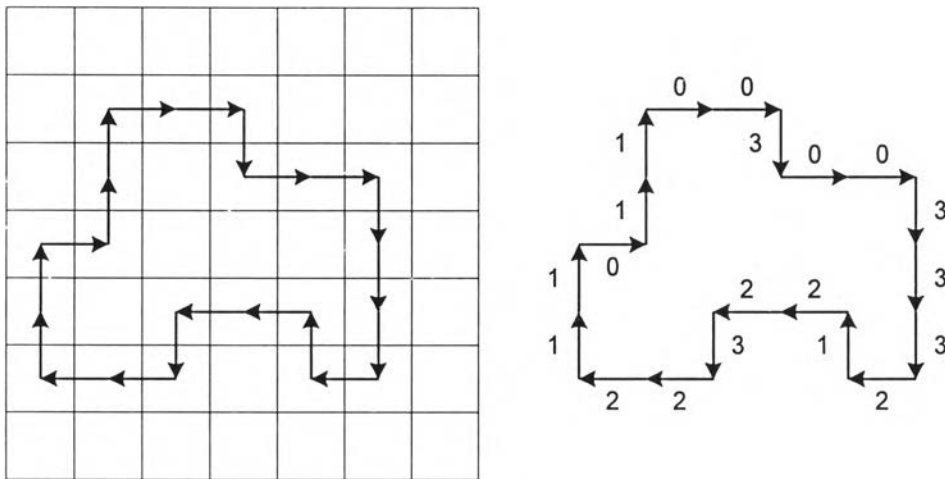


รูปที่ 3- 2 ขั้นตอนการหาค่าความยาวแกนหลักและความยาวแกนรอง

3.2 ความยาวรหัสลูกโซ่

รูปร่าง 2 มิติสามารถบรรยายได้ 2 ทางที่แตกต่างกัน วิธีแรกคือใช้ขอบเขตของวัตถุ (object boundary) และลักษณะเด่นของวัตถุ เช่น ความยาวขอบภาพ, ความโค้ง โดยวิธีนี้จะเกี่ยวข้องโดยตรงกับการตรวจขอบและเส้น ผลของวิธีนี้เรียกว่า การแสดงภายนอก (external representations) ส่วนวิธีที่ 2 จะอธิบายถึงขอบเขตของวัตถุบนระนาบภาพ (image plane) วิธีนี้

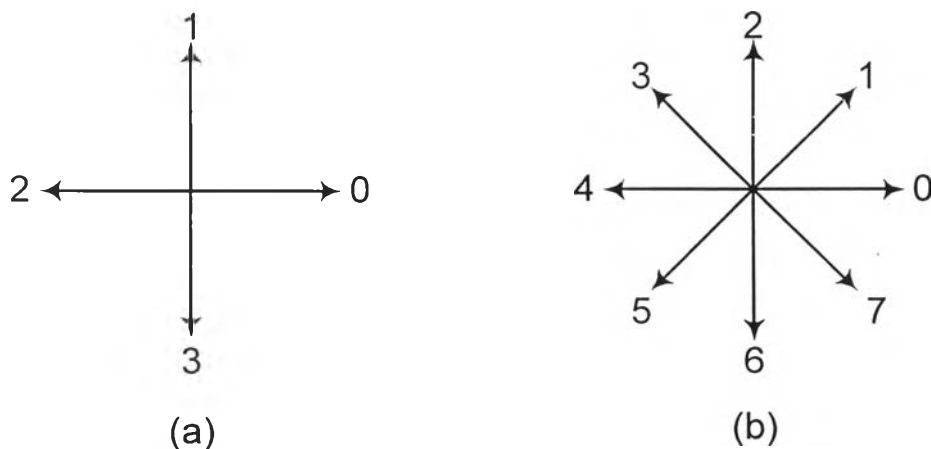
จะเชื่อมกับเทคนิคของการแบ่งแยกวัตถุ ผลที่ได้จะเรียกว่าการแสดงภายใน (internal representations) ซึ่งเทคนิคทางการแบ่งแยกวัตถุ เช่น region splitting นำไปใช้โดยตรงกับวัตถุ และลักษณะเด่นของบริเวณ เช่น พื้นที่ และ โมเมนต์ ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในการจดจำลักษณะของวัตถุ



รูปที่ 3-3 แสดงรหัสลูกโซ่ของขอบเขตภาพไบนารี

3.2.1 รหัสลูกโซ่

จุดประสงค์ของการหาขอบเขตของภาพไบนารีที่มีทางเดินต่อเนื่อง (connected path) เราจะพิจารณาทิศทางที่แสดงเป็น 4 และ 8 ทิศทาง ทิศทางที่จะพิจารณาจะประกอบด้วยจุดที่ต่อเนื่องกัน (adjacent pixels) เป็นเส้นดังรูปที่ 3-3 ถ้าเราพิจารณาเส้นทางในทิศทางตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 3-4 ทิศทางการแยกขอบเขตของรหัสลูกโซ่ (a) 4 ทิศทาง และ (b) 8 ทิศทาง

ทิศทางลูกโซ่ (chain directions) จะแสดงได้เป็นดังรูปที่ 3-4 โดยแยกเป็นลูกโซ่ที่แสดง 4 ทิศทาง และ 8 ทิศทาง การติดตามเส้นทางของขอบภาพจะอยู่ในแบบตามเข็มนาฬิกา รหัสที่แสดงทิศทางของขอบภาพเราเรียกว่ารหัสลูกโซ่ ถ้าพิจารณาตามรูปที่ 3-3 ในรูปแบบ 4 ทิศทางจะได้รหัสลูกโซ่เป็น 00300333212232211011 เมื่อจุดเริ่มต้นของการกำหนดทิศทางอยู่ที่มุมบนด้านซ้ายของขอบภาพดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่ารหัสลูกโซ่ขึ้นอยู่กับการกำหนดทิศทาง ลักษณะเช่นนี้จะไม่เป็นปัญหา เพราะรหัสลูกโซ่จะถูกพิจารณาเหมือนวงกลมในรูปแบบที่เป็นขอบเขตปิด เราสามารถนำรหัสลูกโซ่มาเปรียบเทียบกันโดยการเลื่อน (shift) แบบครบรอบ จนได้รหัสที่ตรงกัน แต่ในการประยุกต์ใช้งานการกระทำดังกล่าวต้องใช้เวลามาก จึงแก้ปัญหาโดยหาเป็นผลรวมของรหัสลูกโซ่ในแต่ละทิศทางเป็นตัวเลขตรวจสอบ และข้อจำกัดของรหัสลูกโซ่คือใช้ตรวจสอบได้ในกรณีของวัตถุที่มีลักษณะการวางตัวที่เหมือนกันเท่านั้น

3.2.2 รหัสลูกโซ่แบบความแตกต่าง

ส่วนในกรณีที่ภาพเกิดการหมุน (rotation) จะใช้รูปแบบของรหัสลูกโซ่แบบความแตกต่าง (difference chain code) เป็นส่วนที่ใช้ในการเปรียบเทียบ โดยกำหนดให้ x_1, x_2, \dots, x_N เป็นรหัสลูกโซ่ และ d_1, d_2, \dots, d_N เป็นรหัสแสดงรหัสลูกโซ่แบบความแตกต่าง โดยมีข้อกำหนดดังสมการที่ 3-5 :

$$d_i = \begin{cases} \text{diff}(x_i, x_{i-1}) & \text{if } i \neq 1 \\ \text{diff}(x_i, x_N) & \text{if } i = 1 \end{cases} \quad (3-5)$$

รหัสลูกโซ่แบบความแตกต่าง $\text{diff}(x_i, x_{i-1})$ ถูกคำนวณดังสมการที่ 3-5 มีข้อจำกัดคือใช้ได้กับวัตถุที่มีการวางตัวเป็นจำนวนเท่าของมุม 45 องศา ดังนั้นในกรณีที่วัตถุวางตัวเป็นมุมใดๆทำให้ผลของความแตกต่างของรหัสลูกโซ่แบบความแตกต่างมีค่าแตกต่างกัน โดยการนับในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาหมุนไปทางซ้ายมือ (ด้วยมุม $\pi/2$ หรือ $\pi/4$) เพื่อแยกรหัส x_i ออกจากสมาชิกก่อนหน้านี้คือ x_{i-1} สมาชิกก่อนหน้าของ x_i คือ สมาชิกตัวสุดท้าย x_N ภายใต้เงื่อนไขที่เป็นวงกลม ความแตกต่างของรหัสลูกโซ่ แสดงทิศทางที่แตกต่างกัน การหมุนของมุมบนจุด (grid) สีเหลี่ยม จะเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และทำให้ผลของรหัสลูกโซ่แบบความแตกต่างเปลี่ยนไป



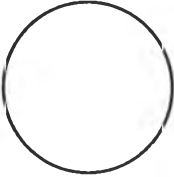
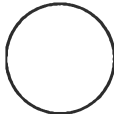


3.3 การประยุกต์ใช้ในงานวิทยานิพนธ์

วัตถุตัวอย่างที่เลือกใช้ในงานวิทยานิพนธ์แสดงดังรูปที่ 3-5 โดยขั้นตอนในการจำแนกวัตถุตัวอย่างทั้ง 6 ชนิดออกจากกัน ทำได้ดังนี้ เริ่มจากการทดลองโดยการเก็บรวบรวมข้อมูลของวัตถุทั้ง 6 ชนิด โดยข้อมูลที่ใช้ในการแยกวัตถุตัวอย่างในงานวิทยานิพนธ์นี้ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว คือ ค่าเฉพาะสูงสุด, ค่าเฉพาะต่ำสุด (maximum, minimum eigenvalue) และ รหัสลูกโซ่ (chain code) และรหัสลูกโซ่แบบความแตกต่าง (difference chain code) และความยาวโคด (codelength) ในการเก็บรวบรวมข้อมูลของวัตถุแต่ละชนิดนั้นทำได้โดยการวางวัตถุไว้ที่ตำแหน่งต่างๆ ประมาณ 11 หรือ 12 ตำแหน่ง โดยที่ 8 ตำแหน่งจะเป็นบริเวณพื้นที่โดยรอบที่กล้องตรวจจับได้และแสดงไว้ดังรูปที่ 3-6 และอีก 3 หรือ 4 ตำแหน่งจะเป็นบริเวณที่อยู่ภายในบริเวณที่กล้องตรวจจับได้

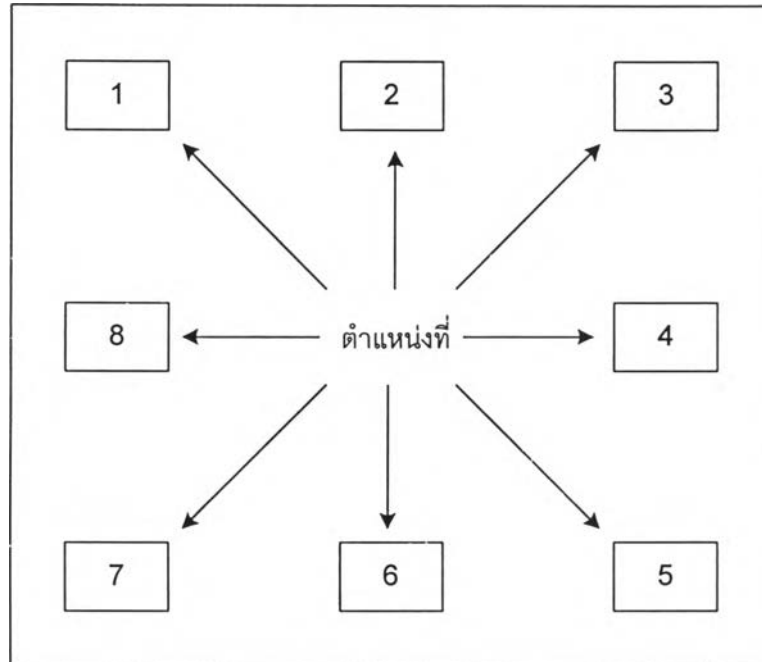
จากตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบทั้ง 11 หรือ 12 ตำแหน่ง ผลการทดลองแสดงค่าความยาวแกนหลัก, ค่าความยาวแกนรอง, ค่าความยาวโคด, ค่าของรหัสลูกโซ่และความแตกต่างของรหัสลูกโซ่ แสดงดังตารางที่ 3-1 - 3-6

จากตารางที่ 3-1 - 3-12 เราสามารถสรุปขั้นตอนในการหาค่าต่างๆในตารางทำได้ดังนี้คือ

- นำวัตถุชนิดที่หนึ่งมาทดสอบโดยการวางไว้ที่ตำแหน่ง 1 แล้วคำนวณหาค่าของ λ_{\max} , λ_{\min} , รหัสลูกโซ่, ความแตกต่างของรหัสลูกโซ่, ความยาวรหัส โดยที่ความยาวรหัสคือผลรวมของรหัสลูกโซ่ในทิศทางต่างๆ
- ทำการทดสอบในตำแหน่งต่างๆคือตำแหน่งที่ 2 ถึง ตำแหน่งที่ 12 ในลักษณะที่เหมือนกัน
- เปลี่ยนชนิดของวัตถุที่ต้องการทดสอบและทำตามข้อ 1 และ ข้อ 2 ซึ่งจะได้ผลตามตารางที่ 3-1 - 3-12
- พิจารณาตารางที่ 3-7 - 3-12 พิจารณาค่าของ λ_{\max} , λ_{\min} , ความยาวรหัส โดยการนำค่าที่น้อยที่สุดและค่าที่มากที่สุดของวัตถุชนิดเดียวกันมาใส่ในตารางที่ 3-13
- ค่าในตารางที่ 3-14 เกิดจากการนำผลที่ได้จากตารางที่ 3-13 มาทำการขยายช่วงโดยการเพิ่มค่าที่ขอบล่างและค่าที่ขอบบน

ชนิด	รูปร่างใน 2 มิติ
1. รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	
2. รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส	
3. รูปวงกลมขนาดใหญ่	
4. รูปวงกลมขนาดเล็ก	
5. รูปหัวค้อน	
6. รูปลูกศร	

รูปที่ 3-5 ภาพ 2 มิติของวัตถุตัวอย่างที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์



รูปที่ 3-6 ตำแหน่งพื้นที่โดยรอบทั้ง 8 ตำแหน่งที่ใช้ทดสอบ

ผลการทดลอง

หลังจากนำวัตถุทั้ง 6 ชนิดมาทำการทดสอบเพื่อหาช่วงที่ใช้ในการแยกวัตถุทั้ง 6 ออกจากกัน โดยนำวัตถุที่ต้องการทดสอบมาวางไว้ที่ต่าง ๆ กันโดยตำแหน่ง 8 ที่แรกเป็นตำแหน่งโดยรอบ และที่เหลืออีกประมาณ 3-4 ตำแหน่งเป็นตำแหน่งอื่นเพิ่มเติม ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3-1 ถึง 3-6

จากผลตารางที่ 3-1 ถึง 3-6 นำบทสรุปที่ได้คือความยาวแกนหลัก ความยาวแกนรอง และความยาวรัศมีมาทำการสรุปไว้ในตารางที่ 3-7 ถึง 3-12 ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับตำแหน่งนั้นๆ

และผลที่เกิดขึ้นสามารถสรุปช่วงที่มีค่ามากที่สุดและช่วงที่มีค่าน้อยสุดของแต่ละเงื่อนไขไว้ในตารางที่ 3-13 และทำการแก้ไขแต่ละช่วงให้ถูกต้องสอดคล้องกับการใช้งานจริง โดยทำการทดสอบกับจุดต่างๆเพิ่มเติม และสรุปผลที่ได้เมื่อผ่านการแก้ไขแล้วไว้ในตารางที่ 3-14

ตารางที่ 3-1 ผลการทดลองของสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ตำแหน่ง ที่	chain code								difference chain code								ความยาว รหัส	องศา
	[0]	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[0]	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]		
1	5	72	6	97	3	77	3	98	328	19	1	0	0	0	0	13	361	-0.5
2	4	74	4	99	8	65	9	98	315	24	3	0	0	0	3	16	361	1.9
3	11	67	6	101	6	72	6	96	323	24	1	0	0	0	1	16	365	1
4	11	57	10	104	3	71	4	102	315	20	6	0	0	0	3	18	362	0.5
5	5	71	10	96	5	73	8	98	326	24	1	0	0	0	3	12	366	-0.3
6	5	72	5	99	2	76	4	97	328	17	2	0	0	0	0	13	360	0.2
7	6	76	4	97	3	77	6	92	328	21	0	0	0	0	1	11	361	2.3
8	2	76	2	99	4	72	4	99	336	14	1	0	0	0	1	6	358	0.3
9	32	49	25	64	31	49	25	62	112	113	2	0	0	0	0	109	336	-18
10	27	68	22	52	28	67	22	53	143	102	0	0	0	0	0	94	339	15.5
11	48	38	38	39	49	37	38	30	53	131	0	0	0	0	0	123	307	29.4
12	57	19	44	25	57	19	44	25	124	84	2	0	0	0	0	80	290	-35.8

ตารางที่ 3-2 ผลการทดลองของสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ตำแหน่ง ที่	chain code								difference chain code								ความยาว รหัส	องศา
	[0]	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[0]	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]		
1	9	61	10	59	8	64	8	60	220	34	0	0	0	0	1	24	279	4
2	5	65	4	64	7	59	8	62	234	21	2	0	0	0	0	17	274	-0.7
3	15	55	6	70	7	61	8	60	229	29	1	0	0	0	0	23	282	0
4	8	56	8	62	5	62	5	62	231	20	2	0	0	0	1	14	268	0
5	7	53	15	63	7	61	7	71	232	30	0	0	0	0	0	22	284	0
6	6	62	5	65	5	63	5	64	239	21	1	0	0	0	1	13	275	0
7	7	63	5	65	6	63	6	63	238	24	0	0	0	0	0	16	278	0
8	5	63	5	64	5	63	5	64	242	20	0	0	0	0	0	12	274	0
9	32	28	32	30	32	29	32	29	43	104	0	0	0	0	0	96	243	27
10	28	34	28	65	28	34	28	35	40	109	0	0	0	0	0	101	250	61.6
11	44	7	45	7	45	6	45	8	167	21	2	0	0	0	0	17	207	44.8
12	20	45	20	46	21	44	20	47	105	83	0	0	0	0	0	75	263	15

ตารางที่ 3-3 ผลการทดลองของวงกลมขนาดใหญ่

ตำแหน่ง ที่	chain code								difference chain code								ความยาว รหัส	องศา
	[0]	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[0]	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]		
1	30	44	31	44	30	45	30	45	153	70	0	0	0	0	0	69	292	-
2	31	43	30	45	30	43	31	43	146	79	0	0	0	0	0	71	296	-
3	37	38	27	55	29	43	30	44	163	74	0	0	0	0	0	66	303	-
4	31	40	31	43	30	42	30	43	154	72	0	0	0	0	0	64	290	-
5	27	39	37	44	30	43	30	54	156	78	0	0	0	0	0	70	304	-
6	29	44	30	45	30	43	30	46	148	77	1	0	0	0	0	71	297	-
7	31	44	30	44	31	44	30	44	150	78	0	0	0	0	0	70	298	-
8	31	43	30	44	31	42	31	43	143	80	0	0	0	0	0	72	295	-
9	30	43	30	44	31	41	31	44	142	79	1	0	0	0	1	71	294	-
10	30	43	31	43	30	44	30	44	149	77	0	0	0	0	0	69	295	-
11	31	42	30	44	30	42	31	42	144	78	0	0	0	0	0	70	292	-
12	30	42	31	42	31	42	30	42	150	75	0	0	0	0	0	67	292	-

หมายเหตุ เครื่องหมาย - คือไม่ได้ทำการทดสอบเพราะมุมที่ได้ไม่มีผลต่อการจับ

ตารางที่ 3-4 ผลการทดลองของวงกลมขนาดเล็ก

ตำแหน่ง ที่	chain code								difference chain code								ความยาว รหัส	องศา
	[0]	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[0]	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]		
1	22	31	24	34	19	37	21	34	116	54	2	0	0	0	0	50	222	-
2	21	37	17	36	23	30	22	33	114	55	1	0	0	0	0	49	219	-
3	31	27	18	44	22	32	22	31	124	54	1	0	0	0	0	48	227	-
4	23	28	22	33	21	30	22	31	106	56	0	0	0	0	0	48	210	-
5	18	27	30	32	21	32	22	43	119	57	0	0	0	0	0	49	225	-
6	22	30	23	31	22	30	23	31	113	52	1	0	0	0	0	46	212	-
7	23	31	22	33	22	33	21	33	109	57	1	0	0	0	0	51	218	-
8	21	32	22	31	22	30	23	31	106	57	0	0	0	0	0	49	212	-
9	22	31	21	32	21	31	22	30	106	56	0	0	0	0	0	48	210	-
10	22	31	22	31	22	31	22	31	106	57	0	0	0	0	0	49	212	-
11	22	30	21	33	21	30	22	31	112	53	0	0	0	0	0	45	210	-
12	21	31	22	31	22	31	21	33	107	55	1	0	0	0	0	49	212	-

หมายเหตุ

เครื่องหมาย - คือไม่ได้ทำการทดสอบเพราะมุมที่ได้ไม่มีผลต่อการจับ

ตารางที่ 3-5 ผลการทดลองของรูปหัวค้อน

ตำแหน่ง ที่	chain code								difference chain code								ความยาว รหัส	องศา
	[0]	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[0]	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]		
1	3	45	6	148	20	15	19	152	316	50	0	0	0	0	0	42	408	0.1
2	6	146	21	15	21	143	9	42	291	59	1	0	0	0	1	51	403	-0.8
3	17	14	24	142	6	43	6	149	302	52	1	0	0	0	0	46	401	1.7
4	19	11	19	149	3	44	2	150	312	44	2	0	0	0	1	38	397	-0.4
5	16	15	20	148	3	44	4	151	317	43	2	0	0	0	0	39	401	0.6
6	25	139	8	44	8	144	20	15	292	52	6	0	0	0	3	50	403	1.1
7	21	147	4	46	3	154	15	17	325	44	1	0	0	0	1	36	407	0.9
8	3	45	2	153	18	15	17	153	329	41	1	0	0	0	0	35	406	-0.5
9	28	9	94	49	9	18	104	20	161	89	0	0	0	0	0	81	331	38.9
10	19	24	53	110	6	9	81	69	113	133	0	0	0	0	0	125	371	23
11	17	74	78	9	7	111	51	26	119	131	0	0	0	0	0	123	373	-22.4

ตารางที่ 3-6 ผลการทดลองของรูปลูกศร

ตำแหน่ง ที่	chain code								difference chain code								ความยาว รหัส	องศา
	[0]	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[0]	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]		
1	25	6	29	72	28	3	29	75	191	42	0	0	0	0	0	34	267	0.6
2	26	72	26	2	28	74	22	8	198	34	0	0	0	0	0	26	258	1.2
3	28	2	26	79	21	7	28	70	193	35	2	0	0	0	0	31	261	2.1
4	25	1	28	76	20	7	27	72	192	33	2	0	0	0	0	29	256	2.4
5	26	2	29	75	22	6	29	71	195	34	2	0	0	0	1	28	260	0.6
6	32	72	20	10	29	70	25	2	184	39	2	0	0	0	0	35	260	5.4
7	35	71	20	10	32	68	26	1	178	47	0	0	0	0	1	37	263	6.5
8	22	7	26	72	28	1	26	78	200	31	2	0	0	0	0	27	260	0.2
9	22	5	28	70	25	3	27	74	194	29	2	1	0	0	0	28	254	3.3
10	48	22	12	47	49	29	4	56	116	77	2	0	0	0	1	71	267	-32.9
11	3	38	46	48	3	31	53	41	174	47	1	0	0	0	0	41	263	43.7
12	20	57	43	11	16	66	38	12	89	90	1	0	0	0	1	82	263	-15.9

ตารางที่ 3-7 บทสรุปในกรณีของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ตำแหน่งที่	λ_{\max}	λ_{\min}	ความยาวโคด
1	906	564	361
2	915	550	361
3	1012	543	365
4	956	519	362
5	1009	550	366
6	905	555	359
7	907	571	361
8	879	545	358
9	863	528	336
10	868	528	339
11	873	527	307
12	859	528	290

ตารางที่ 3-8 บทสรุปในกรณีของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ตำแหน่งที่	λ_{\max}	λ_{\min}	ความยาวโคด
1	469	466	279
2	452	443	274
3	536	430	282
4	431	423	268
5	547	430	284
6	454	439	278
7	466	462	278
8	448	438	274
9	440	436	243
10	441	437	250
11	440	435	207
12	439	438	263

ตารางที่ 3-9 บทสรุปในกรณีของรูปวงกลมขนาดใหญ่

ตำแหน่งที่	λ_{\max}	λ_{\min}	ความยาวโคต
1	711	703	299
2	700	687	296
3	794	658	303
4	686	661	290
5	791	663	304
6	699	688	297
7	715	696	298
8	694	689	295
9	685	679	294
10	693	690	295
11	680	673	292
12	685	675	292

ตารางที่ 3-10 บทสรุปในกรณีของรูปวงกลมขนาดเล็ก

ตำแหน่งที่	λ_{\max}	λ_{\min}	ความยาวโคต
1	398	370	222
2	381	359	219
3	474	347	227
4	361	343	210
5	456	344	225
6	367	359	212
7	384	367	218
8	360	359	212
9	353	352	210
10	360	360	212
11	359	347	210
12	362	352	212

ตารางที่ 3-11 บทสรุปในกรณีของรูปหัวค้อน

ตำแหน่งที่	λ_{\max}	λ_{\min}	ความยาวโคด
1	2208	201	408
2	2136	188	403
3	2121	197	401
4	2063	178	397
5	2110	186	401
6	2132	196	403
7	2157	198	407
8	2175	187	406
9	2130	191	331
10	2141	189	371
11	2143	183	373

ตารางที่ 3-12 บทสรุปในกรณีของรูปลูกศร

ตำแหน่งที่	λ_{\max}	λ_{\min}	ความยาวโคด
1	555	267	267
2	523	251	258
3	538	251	261
4	502	229	256
5	536	245	260
6	525	254	260
7	540	260	263
8	518	242	260
9	481	236	254
10	522	246	267
11	507	251	263
12	494	250	263

ขั้นตอนการหาช่วงของค่าเฉพาะสูงสุด, ค่าเฉพาะต่ำสุด และค่าความยาวโคคที่ใช้ในการจำแนกวัตถุทั้ง 6 ชนิด สามารถสรุปช่วงต่างๆ ได้ดังตารางที่ 3-13

ตารางที่ 3-13 ช่วงที่ใช้ในการแยกวัตถุตัวอย่าง

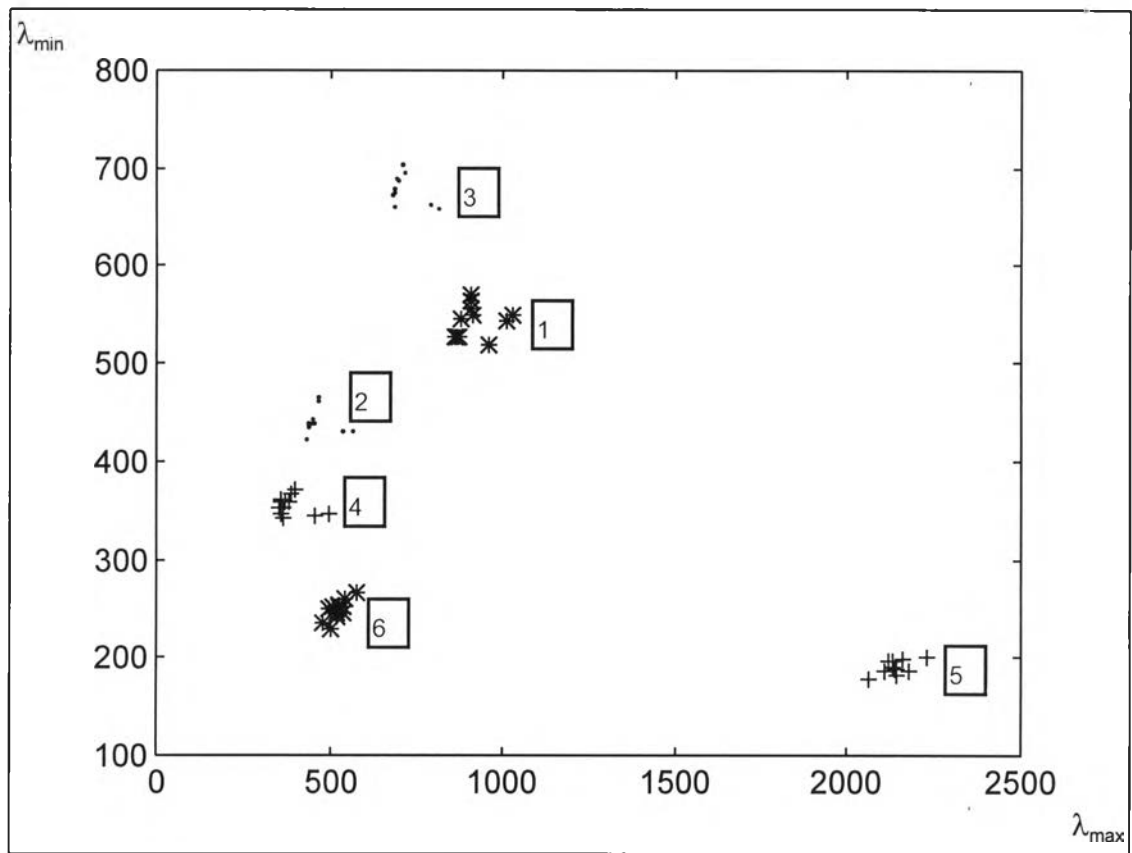
ชนิดที่	ชื่อ	λ_{\max}	λ_{\min}	ช่วงความยาวโคค
1	สีเหลืองผืนผ้า	859-1012	520-571	290-366
2	สีเหลืองจัตุรัส	431-543	423-466	207-284
3	วงกลมขนาดใหญ่	680-794	658-703	290-304
4	วงกลมขนาดเล็ก	353-474	342-370	210-227
5	หัวค้อน	2063-2175	178-201	331-408
6	ลูกศร	481-555	229-267	254-267

จากตารางที่ 3-13 ช่วงที่ได้จากการทดสอบพบว่าการกำหนดช่วงการทำงานจริง ที่ใช้ในการแยกประเภทวัตถุจะต้องบวกค่าความเผื่อให้กับขอบเขตล่างและขอบเขตบนในแต่ละช่วงด้วย ซึ่งจากการทดลองสุ่มตัวอย่างมาทำการทดสอบและแก้ไขแล้วจึงสรุปได้ดังตารางที่ 3-14

ตารางที่ 3-14 ช่วงที่ใช้จริงในการแยกประเภทวัตถุตัวอย่าง

ชนิดที่	ชื่อ	λ_{\max}	λ_{\min}	ช่วงความยาวโคค
1	สีเหลืองผืนผ้า	850-1020	515-576	285-371
2	สีเหลืองจัตุรัส	425-550	418-471	200-290
3	วงกลมขนาดใหญ่	675-800	653-708	285-310
4	วงกลมขนาดเล็ก	378-480	337-375	205-232
5	หัวค้อน	2058-2205	173-206	314-413
6	ลูกศร	476-560	224-272	249-272

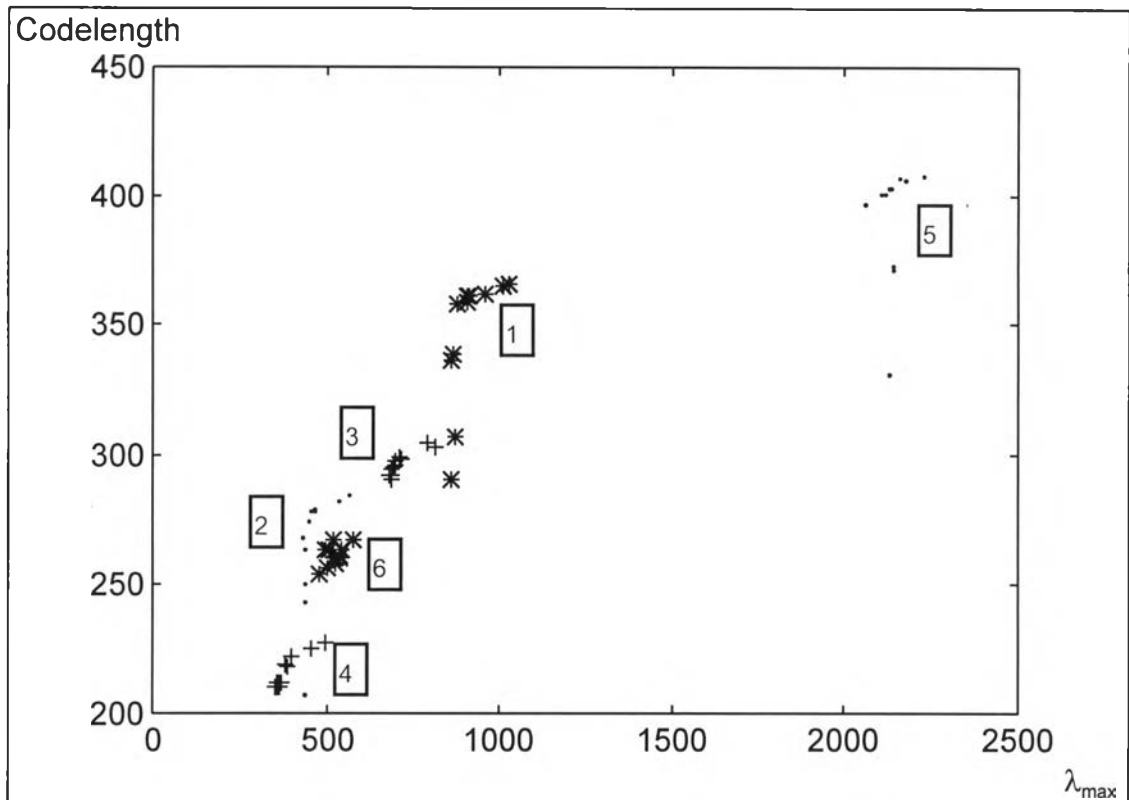
จากการทดลองขั้นตอนนี้พบว่าเวลาที่ใช้ในการแยกชนิดของวัตถุโดยวิธีทั้งสองคือวิธีหาค่าความยาวแกนหลัก, ความยาวแกนรอง และวิธีความยาวรหัส นั้นใช้เวลาประมาณ 0.11 วินาที



รูปที่ 3-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉพาะสูงสุดกับค่าเฉพาะต่ำสุด

หมายเหตุ

- หมายเลข 1 คือ รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
- หมายเลข 2 คือ รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส
- หมายเลข 3 คือ รูปวงกลมขนาดใหญ่
- หมายเลข 4 คือ รูปวงกลมขนาดเล็ก
- หมายเลข 5 คือ รูปหัวค้อน
- หมายเลข 6 คือ รูปลูกศร



รูปที่ 3-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉพาะสูงสุดกับค่าความยาวรหัส

หมายเหตุ

หมายเลข 1 คือ รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

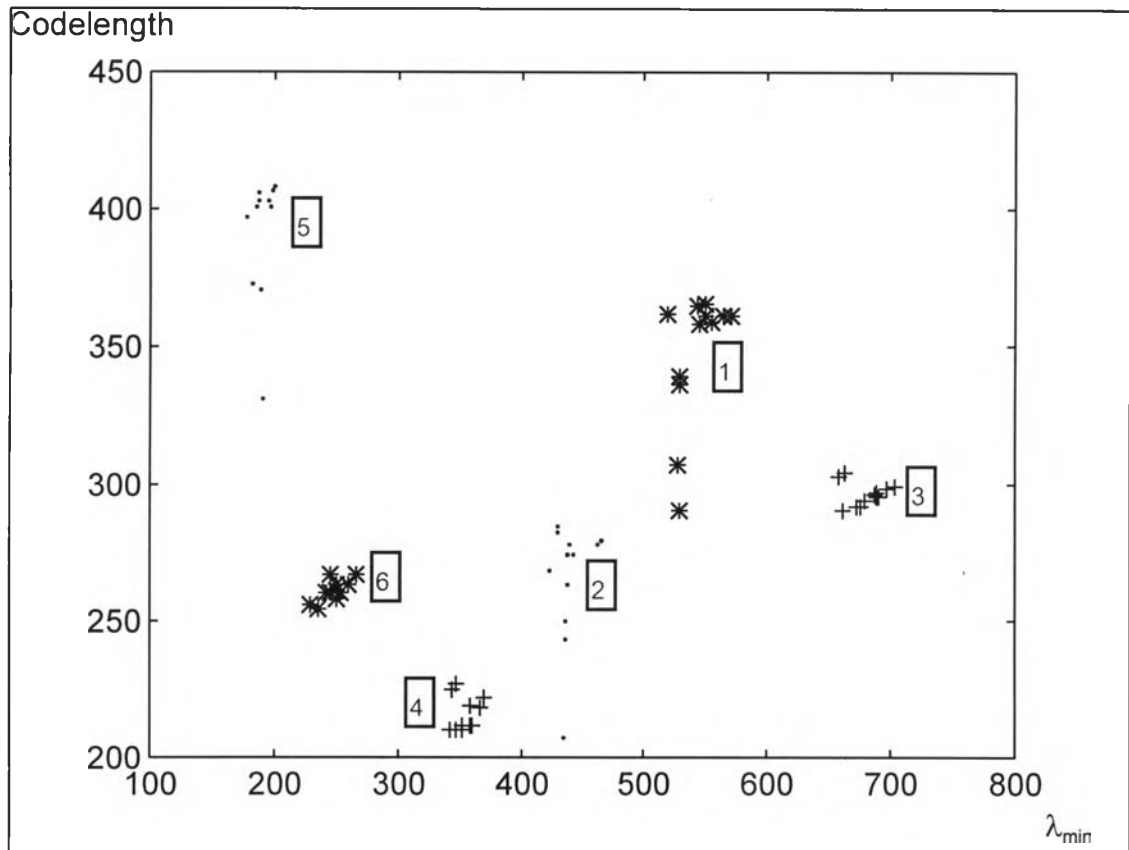
หมายเลข 2 คือ รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

หมายเลข 3 คือ รูปวงกลมขนาดใหญ่

หมายเลข 4 คือ รูปวงกลมขนาดเล็ก

หมายเลข 5 คือ รูปหัวค้อน

หมายเลข 6 คือ รูปลูกศร



รูปที่ 3-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉพาะต่ำสุดกับค่าความยาวรหัส

หมายเหตุ

- หมายเลข 1 คือ รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
- หมายเลข 2 คือ รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส
- หมายเลข 3 คือ รูปวงกลมขนาดใหญ่
- หมายเลข 4 คือ รูปวงกลมขนาดเล็ก
- หมายเลข 5 คือ รูปหัวค้อน
- หมายเลข 6 คือ รูปลูกศร