

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการค้นคืนภาพ

Image Retrieval Fundamentals



ประภาพร กุลลิมรัตน์ชัย

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงสาระสำคัญสำหรับงานวิจัยด้านการค้นคืนภาพ อันประกอบด้วยความรู้เบื้องต้นของศาสตร์ที่เกี่ยวกับภาพดิจิทัล โครงสร้างของระบบค้นคืนภาพ การจำแนกคุณลักษณะสำคัญของภาพ การพิจารณาความเหมือนกันของภาพ การเปรียบเทียบความแตกต่างของภาพ เครื่องมือประเมินสำหรับวัดประสิทธิภาพของระบบค้นคืนภาพ ได้แก่ การวัดค่าความถูกต้องและความแม่นยำของระบบ

คำสำคัญ: การประมวลผลภาพ, การค้นคืนภาพ, การเรียกคืน และ ความแม่นยำ

Abstract

This paper reviews important issues in image retrieval research. These issues are the basic science of digital imaging, image retrieval structure and discriminate features and methods to compare and differentiate images for image retrieval system. Tools for evaluating efficiency of an image retrieval system, such as precision and recall, and also discussed.

Keyword: Image processing, Image retrieval, Recall and Precision

ความนำ

ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีที่เพิ่มขึ้น ทำให้การใช้ประโยชน์จากการประมวลผลภาพได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตของเรามากยิ่งขึ้น อาทิเช่น งานประมวลผลภาพถ่ายดาวเทียมสำรวจทรัพยากรธรรมชาติ งานด้าน

การแพทย์เพื่อวิเคราะห์ภาพถ่ายภายในร่างกายของมนุษย์ เช่น เครื่อง Magnetic Resonance Imaging (MRI) งานทางด้านสัตวแพทย์เพื่อวิเคราะห์โรคและอาการของสัตว์ งานทางด้านอุตสาหกรรม เช่น การประมวลผลภาพเพื่อการวินิจฉัยความเสียหายบนผิวงานฮาร์ดดิสก์ที่เป็นผลมาจากกระบวนการผลิต เป็นต้น

บทความนี้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการค้นคืนภาพ การพิจารณาความถูกต้องแม่นยำของระบบการค้นคืนภาพ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของศาสตร์ทางด้านการประมวลผลภาพ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณขึ้นของข้อมูลอย่างมหาศาล ทำให้ผู้ใช้ประสบปัญหาในการค้นคืนภาพที่ตรงกับความต้องการ จึงเกิดความต้องการระบบที่จะสามารถทำหน้าที่ในการค้นคืนภาพให้ตรงตามความต้องการของผู้ใช้ได้ ในงานวิจัยที่เกี่ยวกับระบบการค้นคืนภาพจากฐานข้อมูลโดยทั่วไปคือการค้นคืนภาพแบบอิงเนื้อหา (content based image retrieval, CBIR) ระบบค้นคืนภาพแบบอิงเนื้อหาจะใช้ภาพคำถาม (query image) ในการสืบค้นคืนภาพ โดยเมื่อกำหนดภาพคำถามที่ต้องการให้กับระบบแล้ว ระบบจะคัดแยกคุณลักษณะสำคัญของภาพคำถามออกมาจากนั้นจะนำคุณลักษณะสำคัญที่ได้ไปเปรียบเทียบกับคุณลักษณะสำคัญของภาพแต่ละภาพที่เก็บไว้ในฐานข้อมูล หากภาพใดมีคุณลักษณะสำคัญที่เหมือนหรือใกล้เคียงกับภาพคำถามก็จะถูกแสดงเป็นผลลัพธ์ของการค้นหาให้แก่ผู้ใช้

ศาสตร์ด้านภาพดิจิทัล

เทคโนโลยีด้านภาพดิจิทัลอาจแบ่งได้เป็น 3 ศาสตร์หลัก (อาร์มิก, 2555) คือ ศาสตร์ด้านการประมวลผลภาพ ด้านคอมพิวเตอร์วิทัศน์ และด้านคอมพิวเตอร์กราฟิกส์ สามารถอธิบายโดยสังเขปได้ดังนี้

1. การประมวลผลภาพ (image processing)

เป็นศาสตร์ด้านการปรับปรุงคุณภาพของรูปภาพที่รับเข้ามาให้ดีขึ้นสำหรับการใช้งานแต่ละด้าน เช่น ปรับภาพให้มีความคมชัดขึ้น (sharpening) ปรับภาพให้มีความสว่างมากขึ้น (brightening) การปรับค่าความต่างของสีภายในภาพให้มีความเหมาะสม (balance contrast) การกำจัดสัญญาณรบกวนภายในภาพ (reduce noise) การหาขอบภาพ (edging) เทคนิคเหล่านี้เป็นการปรับปรุงคุณภาพของภาพ (image enhancement) เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันไป

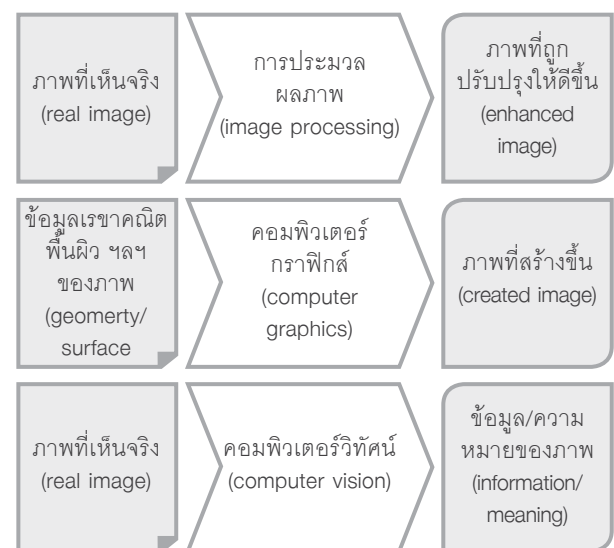
2. คอมพิวเตอร์วิทัศน์ (computer vision)

เป็นกระบวนการที่กระทำกับภาพดิจิทัล แต่ผลลัพธ์ที่ได้จากคอมพิวเตอร์วิทัศน์ส่วนใหญ่แล้วจะอยู่ในรูปแบบของข้อมูลที่มีความหมายไม่ใช่รูปภาพ เช่น รูปแบบไฟล์ข้อความ (text file) หรืออาจกล่าวได้ว่าเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์วิทัศน์เป็นการเปลี่ยนข้อมูลภาพให้กลายเป็นข้อมูลที่มีความหมาย เพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถเข้าใจรูปภาพได้ใกล้เคียงมนุษย์มากที่สุด

3. คอมพิวเตอร์กราฟิกส์ (computer graphics)

เป็นเทคนิคกระบวนการรับข้อมูลเชิงเรขาคณิตเข้ามาเพื่อสร้างเป็นภาพ เช่น ข้อมูลจากพิกัดจุดต่าง ๆ หรือโครงรูปทรงทางเรขาคณิต (polygonal shape) ลักษณะพื้นหน้า (surface) นำข้อมูลเหล่านี้มารวมกันแล้วสร้างเป็นภาพที่เสมือนจริงขึ้นมา

สรุปความแตกต่างของศาสตร์ทั้งสามดังภาพ 1



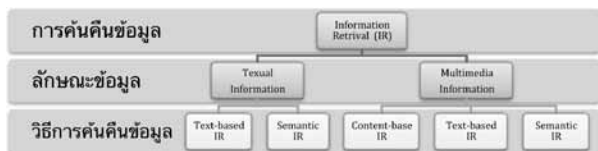
ภาพ 1 ความแตกต่างของศาสตร์ด้านการประมวลผลภาพคอมพิวเตอร์วิทัศน์ และ คอมพิวเตอร์กราฟิกส์

โครงสร้างของระบบค้นคืนภาพ

โดยหลักแล้วระบบค้นคืนมี 2 รูปแบบ คือ (1) การค้นคืนข้อมูลโดยใช้คำสำคัญ (text-based information retrieval) ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น การค้นหาคำสำคัญผ่าน Google และ (2) การค้นคืน

โดยใช้คุณลักษณะสำคัญ หรือ การค้นคืนโดยใช้คอนเทนต์เบส (content-based information retrieval) วิธีการคือ ผู้ใช้ทำการใส่ภาพต้นแบบเข้าไปในระบบ และระบบจะทำการค้นหาภาพในฐานข้อมูลที่มีลักษณะเหมือนภาพต้นแบบขึ้นมา หลักการหาความเหมือนอาจจะพิจารณาจากค่าสี พื้นผิว รูปทรง หรือพิจารณาจากหลาย ๆ ค่าร่วมกัน

นอกเหนือจากการค้นคืน 2 รูปแบบนี้แล้ว ยังมีผู้พัฒนาให้ระบบค้นคืนที่มีความฉลาดมากขึ้นเพื่อให้สามารถเข้าใจความหมายที่แท้จริงของข้อมูลได้ วิธีการนี้เรียกว่า การค้นคืนข้อมูลเชิงความหมาย (semantic-based search) (Kesorn, 2011) ภาพรวมของระบบค้นคืนข้อมูล แสดงดังภาพ 2



ภาพ 2 ลักษณะพื้นฐานของการค้นคืนข้อมูล

คุณลักษณะสำคัญของภาพ

มีผู้ให้ความหมายการค้นคืนภาพแบบอิงเนื้อหาไว้ว่า “ระบบการค้นคืนภาพแบบอิงเนื้อหา เป็นระบบที่สร้างขึ้นเพื่อให้เกิดการใช้ข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผล ซึ่งได้แก่การช่วยเหลือผู้ใช้งานให้สามารถค้นคืนภาพได้ตรงตามความต้องการแม้จะไม่คุ้นเคยกับการใช้ฐานข้อมูลก็ตาม” (Gudivada & Raghavan, 1995) โดยทั่วไประบบการค้นคืนภาพแบบอิงเนื้อหานี้ถูกพัฒนาให้สามารถทำดัชนีจากภาพที่ผู้ใช้ป้อนเข้ามาเป็นอินพุตของระบบได้โดยอัตโนมัติ (automatic indexing) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์และแยกคุณลักษณะเด่นของภาพนั้น คุณลักษณะต่างๆ ของภาพที่ใช้ในการคัดแยกภาพได้แก่ การใช้สี พื้นผิว และรูปร่างของวัตถุที่ปรากฏในภาพ

1. คุณลักษณะสี

คุณลักษณะสี (color feature) ถือเป็นคุณลักษณะที่มนุษย์มองเห็นได้เด่นชัดที่สุด (Arnheim, 1974)

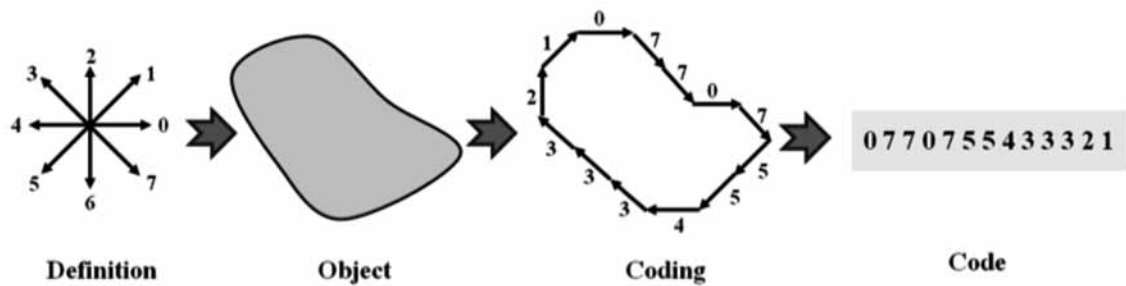
แบบจำลองสีคือโครงสร้างที่กำหนดขึ้นเพื่อจัดระบบสีให้เป็นระเบียบ โดยมีสเกลลอกระยะเพื่อช่วยให้จำแนกและควบคุมการเปลี่ยนแปลงสีให้ง่ายขึ้น และถูกสร้างขึ้นเพื่อช่วยในการกำหนดสีให้เป็นไปตามมาตรฐานเดียวกัน ซึ่งแบบจำลองสีที่ใช้ในปัจจุบันได้สร้างขึ้นมาเพื่อรองรับอุปกรณ์หรือโปรแกรมประยุกต์ต่างๆ โดยแบบจำลองสีที่นิยมใช้ได้แก่ แบบจำลองสี RGB ซึ่งเป็นรูปแบบสำหรับใช้ในงานแสดงผลทางมอนิเตอร์ กล้องถ่ายภาพ เป็นต้น แบบจำลองสี CMY และ CMYK เป็นรูปแบบที่ใช้ในงานพิมพ์ และแบบจำลองสี HSV เป็นแบบจำลองสีที่สามารถแยกองค์ประกอบสีออกจากค่าความเข้มแสงได้ และแบบจำลองสีแบบ HSV ยังใกล้เคียงกับการรับรู้และแปลความหมายสีของมนุษย์มากที่สุด

2. คุณลักษณะพื้นผิว (texture feature)

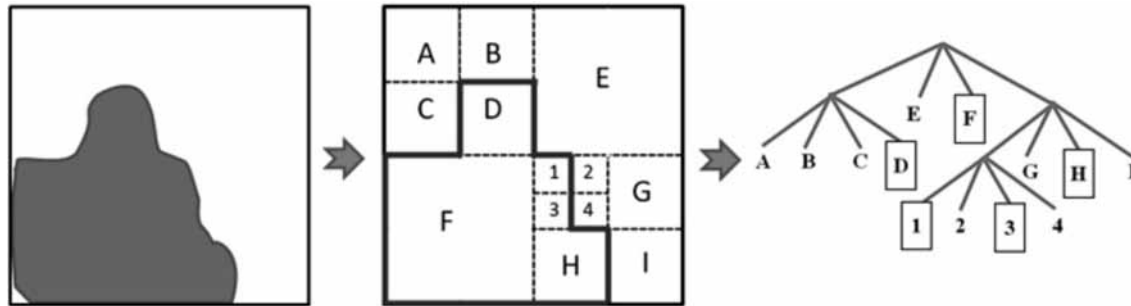
มีผู้ให้นิยามคุณลักษณะพื้นผิวที่ต่างกันออกไปโดย Parker (Parker, 1997) กล่าวว่าลักษณะเด่นของการเป็นพื้นผิว คือการมีรูปแบบที่ซ้ำกันในบริเวณหนึ่งๆ อย่างไรก็ตามแม้ว่าพื้นผิวนั้นจะเป็นพื้นผิวสี แต่ในการวิเคราะห์พื้นผิวจะเน้นการกำกับพื้นผิวที่เป็นระดับสีเทาเท่านั้น Tamura และคณะ (Tamura, Mori & Yamawaki, 1987) ได้ค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างการรับรู้ทางการมองเห็นของมนุษย์ และคำนวณหาความแตกต่างระหว่างพื้นผิว 6 คุณลักษณะ ได้แก่ ความหยาบ (coarseness) ความตรงกันข้าม (contrast) ทิศทาง (directionality) ความเหมือนกันของเส้น (line-likeness) ความสม่ำเสมอ (regularity) และความขรุขระ (roughness)

3. คุณลักษณะรูปร่าง (shape feature)

วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปร่างของวัตถุที่ปรากฏในภาพนั้น มีการใช้อยู่ 2 วิธี (Watt & Policarpo, 1998) วิธีแรกคือแบบขอบเขต (boundary-based) และวิธีที่สองคือแบบบริเวณ (region-based) ซึ่งทั้งสองวิธีนี้จะให้หลักการเข้ารหัสภาพ (image coding scheme) เพื่อแทนเนื้อหาของภาพ หลักการวิเคราะห์รูปร่างของทั้งสองวิธีแสดงดังภาพ 3



(ก) แบบขอบเขต (Boundary-Based)

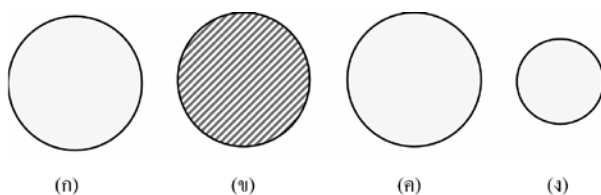


(ข) แบบบริเวณ (Region-Based)

ภาพ 3 การเข้ารหัสของวัตถุในภาพ

การเปรียบเทียบความแตกต่างของภาพ

ค่าความเหมือน (similarity) และค่าความไม่เหมือน (dissimilarity) แสดงดังภาพ 4 มีภาพวงกลมอยู่ทั้งหมด 4 ภาพ จะเห็นว่าภาพ (ก) เหมือนกับ ภาพ (ค) โดยภาพ (ก), (ข) และ (ค) เป็นภาพที่มีขนาดเท่า ๆ กัน ขณะที่ (ก), (ค) และ (ง) เป็นภาพที่มีสีเดียวกัน ดังนั้นจะพบว่าขนาดและสี เป็นลักษณะหนึ่งที่ใช้ในการวัดค่าความเหมือนของภาพได้ แต่ค่าความเหมือนนั้นวัดได้ยาก โดยค่าความเหมือนเป็นปริมาณที่สะท้อนถึงกำลัง (strength) ของความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุ (object) 2 วัตถุ หรือคุณลักษณะ (feature) 2 คุณลักษณะ ถ้ากำหนดให้ค่าความเหมือนของวัตถุ i กับวัตถุ j คือ S_{ij} เราจะสามารถวัดค่าความเหมือนด้วยวิธีต่าง ๆ ได้หลากหลายวิธี ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่มีอยู่



ภาพ 4 ตัวอย่างภาพวงกลม

สำหรับค่าความแตกต่าง (distance) นั้นใช้เพื่อวัดค่าความไม่เหมือน (dissimilarity) ซึ่งเป็นการวัดความแตกต่างกันระหว่างสองสิ่งที่จะควรจะเหมือนกัน (discrepancy) โดยอาศัยคุณลักษณะของสิ่งนั้น นอกจากนี้ค่าความไม่เหมือนยังสามารถใช้เพื่อวัดความผิดปกติระหว่างวัตถุสองวัตถุ หรือภาพสองภาพได้อีกด้วย สำหรับวิธีวัดค่าความเหมือนและค่าความต่างนั้นมีด้วยกันหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีลักษณะเฉพาะของแต่ละวิธี

งานวิจัยของ Chen และคณะ (Chaur-Chin Chen, 2005) ทำการตรวจสอบเครื่องมือวัดระยะห่างสามรูปแบบคือ Euclidean, Mahalanobis และ Chord ซึ่งแสดงดังต่อไปนี้

1. Euclidean Distance เป็นการวัดระยะห่างระหว่าง $x, y \in R^d$ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\delta_1(x, y) = \|x - y\|_2 = \sqrt{\sum_{j=1}^d (x_j - y_j)^2} \quad (1)$$

2. Mahalanobis Distance เป็นการวัดระยะห่างระหว่างสองเวกเตอร์คือ x และ y ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\delta_2(x, y) = \sqrt{(x - y)' s^{-1} (x - y)} \quad (2)$$

3. Chord Distance เป็นการวัดระยะห่างระหว่างสองเวกเตอร์คือ x และ y เพื่อวัดระยะห่างระหว่างเวกเตอร์ x และ y ที่ฉายไปยังพื้นที่หนึ่งหน่วยซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\delta_3(x, y) = \left\| \frac{x}{r} - \frac{y}{s} \right\|_2 \quad (3)$$

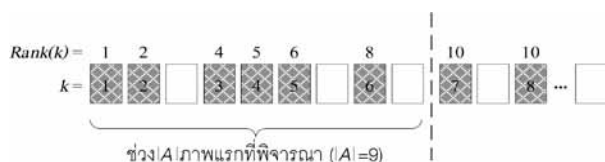
การวัดประสิทธิภาพของระบบค้นคืนภาพ

การวัดประสิทธิภาพของระบบการค้นคืนภาพด้วยวิธี ANMRR ซึ่งเป็นวิธีการประเมินประสิทธิภาพการค้นคืนภาพของแต่ละระบบ และวิธีวัดด้วยการเรียกคืนและความแม่นยำ (recall and precision) เพื่อช่วยวิเคราะห์แนวโน้มผลของการค้นคืนให้ชัดเจนยิ่งขึ้น

ในการวัดประสิทธิภาพของระบบ เริ่มจากการเลือกชุดของภาพซึ่งประกอบด้วยภาพคำถาม (query image) และกลุ่มภาพที่ถูกต้อง (ground truth images) ซึ่งหมายถึงกลุ่มของภาพที่คล้ายกันกับภาพคำถามนั้นไว้ล่วงหน้า

1. ค่าเฉลี่ยของการปรับปรุงตำแหน่งของการค้นคืนให้อยู่ในช่วงปกติ (ANMRR)

เครื่องวัดประสิทธิภาพของการค้นคืนภาพนี้คือค่าเฉลี่ยของการปรับปรุงตำแหน่งของการค้นคืนให้อยู่ในช่วงปกติ (average normalized modified retrieval rank, ANMRR) (Manjunath, Jens-Rainer, Vasudevan & Yamada, 2001) ค่าของ NMRR และ ANMRR ที่เข้าใกล้ศูนย์เป็นค่าที่บอกว่าวิธีการนั้นเป็นวิธีที่ดีที่สุด



ภาพ 5 ตัวอย่างการวัดประสิทธิภาพด้วยวิธี ANMRR

จากภาพ 5 แสดงตัวอย่างการกำหนดค่าให้กับตัวแปรต่างๆ โดยสมมติให้รูปสี่เหลี่ยมแต่ละรูปแทนภาพผลลัพธ์จากการค้นคืนโดยเรียงเป็นลำดับจากซ้ายไปขวา

รูปสี่เหลี่ยมสีเข้มคือ Ground Truth Image ซึ่งเป็นภาพที่คล้ายกันกับภาพคำถาม q ซึ่งในตัวอย่างนี้มีจำนวน 8 ภาพ นั่นคือ $NG(q) = 8$ และเราจะได้ $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ และ 8 ตามลำดับ

และสมมติให้ช่วง $|A|$ ภาพแรกที่จะพิจารณา คือ $|A| = 9$ จะทำให้เราได้ตำแหน่งของ Ground Truth Image หรือ $Rank(k) = 1, 2, 4, 5, 6, 8, 10$ และ 10 ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าตำแหน่งของ Ground Truth Image 2 ภาพสุดท้ายเกินจากช่วง $|A|$ จึงคิดค่าตำแหน่งเท่ากับ $|A| + 1$

จากค่าตัวแปรต่างๆ สามารถหาค่า ANMRR ได้ โดยขั้นตอนแรกหาค่าเฉลี่ยของตำแหน่ง $AVR(q)$ สำหรับภาพคำถาม q ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$AVR(q) = \sum_{k=1}^{NG(q)} \frac{Rank(k)}{NG(q)} \quad (4)$$

จากนั้นทำการปรับปรุงวิธีคำนวณค่าตำแหน่งของการค้นคืนได้ดังสมการ

$$MRR(q) = AVR(q) - 0.5 - \frac{NG(q)}{2} \quad (5)$$

ตำแหน่งของการค้นคืนที่ได้ปรับปรุงแล้วนี้จะมีค่า MRR เป็น 0 เมื่อการค้นคืนสามารถทำได้ยอดเยี่ยม นั่นคือ Ground Truth Image ทั้งหมดอยู่ในตำแหน่งบนสุดของการค้นคืน

จากนั้นทำการปรับปรุงค่าตำแหน่งของการค้นคืนให้อยู่ในช่วงปกติ (normalized) ดังสมการ

$$NMRR(q) = \frac{MRR(q)}{|A| + 0.5 - 0.5 * NG(q)} \quad (6)$$

ขั้นสุดท้ายคือการคำนวณค่าเฉลี่ยของ $MMRR$ ของภาพคำถามทั้งหมด ดังสมการ

$$ANMRR = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q NMRR(q) \quad (7)$$

ซึ่งค่าที่ใช้เป็นเครื่องวัดประสิทธิภาพของการค้นคืนภาพคือ ค่าเฉลี่ยของการปรับปรุงตำแหน่งของการค้นคืนให้อยู่ในช่วงปกติ

โดยกำหนดให้

$|A|$ คือ จำนวนของภาพผลลัพธ์ $|A|$ ภาพแรก
ที่พิจารณา

GTM คือ จำนวนของ Ground Truth Image ที่
มากที่สุดของชุดภาพที่ทำการทดลอง

q คือ ภาพคำถาม q

$NG(q)$ คือ จำนวนของ Ground Truth Image
ของภาพคำถาม q

k คือ Ground Truth Image ภาพที่ k

$Rank(k)$ คือ ตำแหน่งของ Ground Truth Image
ภาพที่ k ที่ถูกค้นคืนอยู่ในช่วง $|A|$ ภาพแรก

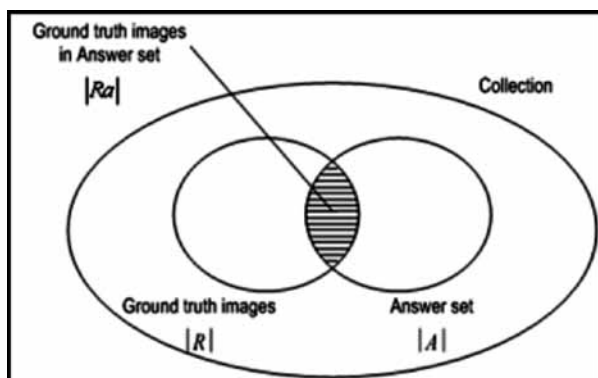
Q คือ จำนวนของภาพคำถามทั้งหมด

2. การเรียกคืนและความแม่นยำ (recall and precision)

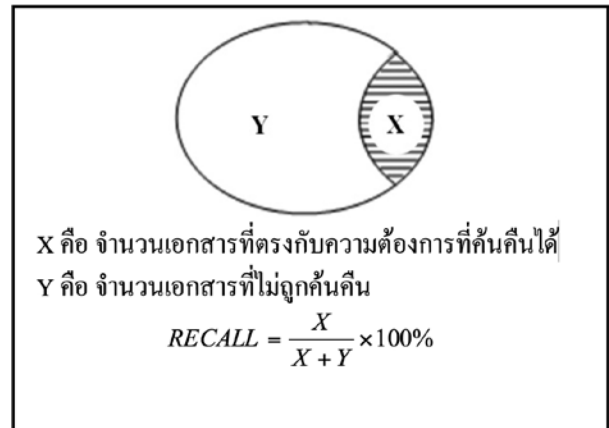
การวัดประสิทธิภาพของระบบค้นคืนอีกวิธีหนึ่ง
ที่นิยมใช้คือ การวัดค่าการเรียกคืนและความแม่นยำ
(Baeza-Yates & Ribeiro-Neto, 1999) การเรียกคืน
คืออัตราส่วนของการค้นพบเอกสารที่ถูกต้องจาก
จำนวนเอกสารที่ถูกต้องทั้งหมด และความแม่นยำคือ
อัตราส่วนของการค้นพบเอกสารที่ถูกต้องจากจำนวน
เอกสารทั้งหมดที่ทำการค้นคืน ดังนั้นสามารถเขียน
ให้อยู่ในรูปสมการได้ดังสมการ (8) และ (9) และสามารถ
แสดงในรูปแบบของแผนภาพได้ดังภาพ 6-ภาพ 8

$$\text{Recall} = \frac{\text{Ground truth images in Answer set}}{\text{Ground truth images}} \quad (8)$$

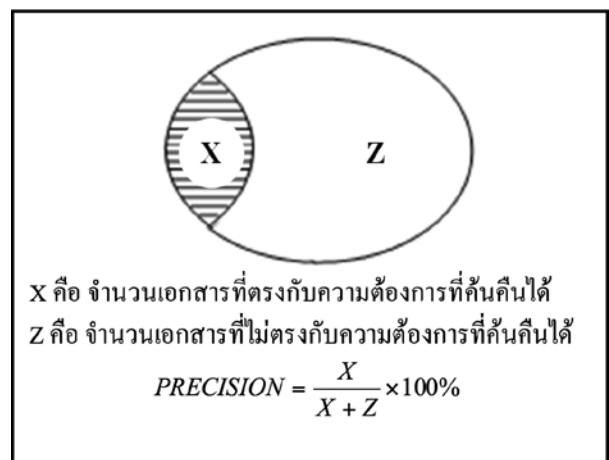
$$\text{Precision} = \frac{\text{Ground truth images in Answer set}}{\text{Answerset}} \quad (9)$$



ภาพ 6 แผนภาพการค้นคืนเอกสาร



ภาพ 7 แผนภาพของการเรียกคืน



ภาพ 8 แผนภาพของความแม่นยำ

จะเห็นว่าค่า Recall คืออัตราส่วนของจำนวน
Ground Truth Images ที่อยู่ในเซตของผลลัพธ์ต่อจำนวน
Ground Truth Images ทั้งหมด ส่วนค่า Precision คือ
อัตราส่วนของจำนวน Ground Truth Images ที่อยู่ในเซต
ของผลลัพธ์ต่อจำนวนภาพผลลัพธ์ทั้งหมด

บทสรุป

จากที่ได้นำเสนอมาทั้งหมด บทความนี้ได้
รวบรวมและเรียบเรียงเนื้อหาที่เป็นสาระสำคัญสำหรับ
งานวิจัยด้านการประมวลผลภาพ ตั้งแต่ความรู้เบื้องต้น
เกี่ยวกับเทคโนโลยีของภาพดิจิทัล คุณลักษณะสำคัญ
ของภาพ การพิจารณาความเหมือนความต่างของภาพ
ไปจนถึงวิธีการวัดประสิทธิภาพของระบบการค้นคืนภาพ
ผู้เขียนคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าบทความนี้จะมีประโยชน์
สำหรับนักศึกษา และผู้ทำวิจัยทางด้านการประมวลผล
ภาพต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- ไกรศักดิ์ เกสร. (2554). การค้นหาข้อมูลเชิงความหมาย: แนวคิดใหม่ของโปรแกรมการค้นหา และแนวทางการพัฒนาในอนาคต. *วารสารวไลยอลงกรณ์ปริทัศน์*, 1(2), 1-16.
- ประภาพร กุลลัมรัตน์ชัย. (2555). การค้นคืนภาพโดยการพิจารณาน้ำหนักการกระจายของสี ด้วยการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน สำหรับฮิสโตแกรมสีในแบบจำลองสี HSV. *EAU Heritage Jornal วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย*, 6(2), 101-109.
- เยาวเรศ ศิริสถิตย์กุล. (2555). การประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพกับภาพจากกล้องจุลทรรศน์. *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.*, 40(4), 1089-1100.
- ระพีพรรณ พิริยะกุล. (2556). การสืบค้นภาพโดยอาศัยความหมายของสีในภาษาไทย. *วารสารการจัดการ คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี*, 6(1), 1-12.
- อาคม ทิพย์มณี และคณะ. (2010). เทคนิคการประมวลผลภาพและการตรวจจับคุณลักษณะสำคัญเพื่อการวินิจฉัยความเสียหายบนผิวงานฮาร์ดดิสก์. *JOURNAL OF INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 1(1), 54-62.
- อาร์มย์ กาวิวงศ์. (2555). บทบาทของเทคโนโลยีการประมวลผลภาพดิจิทัลต่องานทางด้านสัตวแพทย์. *เชียงใหม่สัตวแพทยสาร*, 10(3), 203-217.
- Arnheim, R. (1974). *Art and Visual Perception: A Psychology of the Creative Eye*. The new version (The expanded and revised edition of the original publication of 1954). Berkeley: University of California Pres.
- Manjunath, B. S., Ohm, J., Vasudevan, V. V., & Yamada, A. (2001). Color and Texture Descriptors. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*. 11(6), 703-715.
- Baeza-Yates, R. & Ribeiro-Neto, B. (1999). *Modern Information Retrieval*. United State: Addison- Wesley.
- Castleman, K. R. (1998). *Digital Image Processing*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Chen, C., & Chu, H. (2005). Similarity Measurement between Images. *Proceedings of 29th Annual International Computer Software and Application Conference*, 1, 41-42.
- Kesorn, K. (2011). Visual content representation using semantically similar visual words. *Expert systems with applications*, 38(9), 11472-11481.
- Parker, J. R. (1997). *Algorithms for image processing and computer vision*. John Wiley and Son.
- Tamura, H., Mori, S., & Yamawaki, T. (1987). Texture feature corresponding to visual perception. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 8(6), 460-472.
- Gudivada, V., Raghavan, V. (1995). Content-Based Image Retrieval Systems. *IEEE Computer*, 28(9), 18-22.
- Watt, A., Policarpo, F. (1998). *Computer Image*. Harlow: Addison Wesley Longman.

