แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการประมาณค่าการเคลื่อนที่ของตาสามมิติโดยใช้ภาพตาสองมิติ

Mathematical Model for 3D Eye Motion Estimation Based on 2D Eye Image

ธนานัน จันทิมา[†1], ฑีฆพันธุ์ เจริญพงษ์[†2], วิศาล มหาสิทธิวัฒน์[‡3]

[†] *สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์*

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, นครนายก

[1] Thananan.jan@gmail.com

[2] theekapun@gmail.com

[‡] *คณะแพทยศาสตร์*

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, นครนายก

[3] visan@swu.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการศึกษาการประมาณการเคลื่อนที่ของตาในระบบ 3 มิติมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้การหมุนของเมทริกซ์ในการประมาณค่าการเคลื่อนที่ในระบบ 3 มิติของตาจากภาพตาจริง 2 มิติจากกล้องอินฟาเรด ขั้นตอนการทำงานประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก 1) การสร้างแบบจำลองตา 3 มิติ 2) การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ขั้นตอนแรกแบบจำลองตา 3 มิติ ถูกสร้างขึ้นโดยใช้ไลบรารี่ OpenGL หมุน ±50 องศา รอบแกนนอนและแกนตั้ง โดยใช้ค่าความยาวของเส้นแนวนอน และแนวตั้งบนรูม่านตาเป็นตัวกำหนดการหมุน ขั้นตอนที่สองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สร้างขึ้นโดยใช้การหมุนของเมตริกซ์ในการหมุนพิกัดอ้างอิงเพื่อหาขนาดของเส้นอ้างอิงบนรูม่านตา ขนาดของเส้นอ้างอิงนี้จะนำไปเทียบกับภาพตาจริง 2 มิติ ประสิทธิภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นทดสอบโดยใช้แบบจำลองตา 3 มิติ หมุน ±50 องศา รอบแกนนอน และแกนตั้ง มีความถูกต้องของค่าการเคลื่อนที่ แกนนอน (R_{ex}) และแกนตั้ง (R_{ey}) คือ 99.53 % และ 99.29% เมื่อนำภาพตาจริง 2 มิติ มาหาค่าการเคลื่อนที่ในระบบ 3 มิติ ผลเป็นที่น่าพึงพอใจ แบบจำลองตา 3 มิติสามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับ ภาพตา 2 มิติ งานวิจัยนี้สามารถประมาณค่าการเคลื่อนที่ของตาในระบบสามมิติโดยใช้กล้องแค่หนึ่งตัวต่อตาหนึ่งข้าง ซึ่งสามารถนำไป ต่อยอดในการวินิจฉัยระดับของอาการตากระตุกได้

คำสำคัญ : การเคลื่อนที่ของตา,การหมุนของเมทริกซ์,ตากระตุก

Abstract

A challenge of current research concerning eye motion estimation in three-dimensional (3D) space is to estimate 3D eye motion from a two-dimension (2D) eye image. This paper proposed mathematic model using rotation matrix to estimate eye motion in 3D space from a 2D eye image. Eye movement is captured from two cameras mounting on an infrared binocular. A camera focuses on an eye. Data is recorded in image sequence format. This method consists of two steps: 1) formed 3D eye visual model 2) formed mathematical model. First, 3D eye visual model reconstructed from OpenGL library. Eye is rotated between ±50 degrees in two directions: yaw and pitch axis. Length of vertical and horizontal lines across the pupil are measured and used as indicator of eye rotation. Second, mathematic model is formed by using rotation matrix to rotate reference points to calculate the length of the two lines. Computational result of the two line is compared with the lengths from real eye rotation. To test the performance of proposed method, computational result will be compared with 3D eye visual model. Rotation angle is varied from ±50 degrees in yaw and pitch axis. The accuracy result of horizontal movement (R_{ex}) and vertical movement (R_{ey}) are 99.53 % and 99.29% respectively. To evaluate 3D motion of 2D real eye image, Computation result will be compared with 2D eye image and sent to rotate 3D eye visual model, the result is satisfy. Direction of 3D eye visual model is be the same as 2D eye image. The advantage of this method is that eye motion in 3D space can be estimated from only one camera. The application of this method is to interpret the level of nystagmus disease in quality term.

Keywords: Eye motion, Rotation matrix, Nystagmus

1. คำนำ

ในปัจจุบันเนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และการประมวลผลภาพ เราสามารถที่จะสร้างภาพ 3 มิติ จากภาพ 2 มิติได้ ซึ่งความแตกต่างของภาพ 2 มิติกับภาพ 3 มิติ คือ ความลึกของวัตถุ เทคโนโลยีในการสร้างภาพ 3 มิติเดิม[1,2] รับภาพ 2 มิติจากกล้อง 2 ตัว ภาพจะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย แล้วหาจุดสมนัยกันของภาพเพื่อสร้างภาพ 3 มิติ Y. Y. Huang และคณะ [3] สร้างวัตถุ 3 มิติจาก ภาพ 2 มิติ 2 ภาพโดยการตรวจจับมุมของวัตถุและใช้หลักการแรเงาในการสร้างพื้นผิวของวัตถุ แต่ไม่สามารถใช้กับวัตถุที่มีส่วนเว้าโค้งมากได้ S. Wibirama และคณะ [4] ได้ติดตามการเคลื่อนที่ของดวงตาโดยใช้กล้อง 2 ตัวติดตามการเคลื่อนที่ของรูม่านตาแล้วทำการแปลงเป็นพิกัด 3 มิติ

ข้อเสียคือต้องวัดขนาดของดวงตาก่อนทำการประมวลผล S. Dong [5] นำเสนอวิธีการสร้างภาพ 3 มิติ โดยใช้กล้อง 1 ตัวและเซ็นเซอร์ตรวจจับความเร่งในการสร้างภาพ 3 มิติ ช่วยลดปัญหาการเคลื่อนไหวของกล้องขณะจับภาพ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อยอดจากงานวิจัยเดิม[6,7,8]โดย Ch.Theekapun และคณะ นำเสนออัลกอลิทึมการตรวจจับการเคลื่อนที่ของดวงตาจากภาพตา 2 มิติโดยใช้วิธี Integrated, K-mean Clustering and Mahalanobis Distance, Shape Estimation เพื่อจำแนกรูม่านตาออกจากพื้นหลัง ข้อดีของงานวิจัยคือสามารถติดตามการเคลื่อนที่ของตาแบบ 2 มิติโดยใช้กล้องอินฟาเรดเดี่ยว[i] เพื่อให้เหมือนกับการเคลื่อนที่ของตาจริงที่ลักษณะเป็นทรงกลม มีการเคลื่อนที่แบบ 3 มิติ งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้ในการประมาณค่าการเคลื่อนที่ของตาระบบ 3 มิติ โดยใช้ภาพตา 2 มิติจากกล้องอินฟาเรดเดี่ยว

ในส่วนต่อไปจะกล่าวถึง การสร้างแบบจำลองและการคำนวณในหัวข้อที่ 2 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพในหัวข้อที่ 3 ผลการทดลองในหัวข้อที่ 4 และสรุปอภิปรายผลในหัวข้อที่ 5

2. การสร้างแบบจำลอง และการคำนวณ

2.1 การสร้างแบบจำลองตา 3 มิติ

แบบจำลองตา 3 มิติ สร้างจากไลบรารี่ OpenGL โดยการสร้างทรงกลม แล้วทำการแมพพิ้ง ภาพบิทแมพ ขนาด 512 x 256 พิกเซล ที่มีวงกลมรัศมี 64 พิกเซล อยู่ตรงกลาง มีเส้นอ้างอิง 2 เส้น ขนาด 128 พิกเซล ตั้งฉากกัน ตัดกันที่จุดศูนย์กลางวงกลมดังแสดงในรูปที่ 1 แบบจำลองตา 3 มิติที่สร้างขึ้น สามารถหมุนได้รอบแกนนอนและแกนตั้ง โดยการส่งค่า θ_x, θ_y คือค่ามุมการหมุนในแนวแกนนอนและมุมการหมุนในแนวแกนตั้ง ตามลำดับ เมื่อหมุนไปที่มุมใดๆ พิกัดของจุดปลายของเส้นอ้างอิงจะเปลี่ยนไป และขนาดของความยาวเส้นจะเปลี่ยนไป พิกัดการหมุน (0,0) เมื่อวงกลมสีดำหรือรูม่านตาอยู่ตรงกลาง หมุนไปทางขวามือ ค่า θ_x เป็นบวก หมุนไปทางซ้ายมือค่า θ_x เป็นลบ หมุนลงค่า θ_y เป็นบวก หมุนขึ้นค่า θ_y เป็นลบ

ภาพ บิทแมพ แบบจำลองตา 3 มิติ

รูปที่ 1 แสดงวิธีการแมพพิ้งรูปภาพบนทรงกลม

[i] กล้องอินฟาเรดเดี่ยว คือ กล้องอินฟาเรด 1 ตัว ต่อตา 1 ข้าง

2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการหมุนพิกัด 3 มิติใด ๆ บนแกนนอนและแกนตั้ง ด้วยการหมุนของเมทริกซ์เป็นมุม θ_x, θ_y

$$P_i = \begin{bmatrix} P_{ix} \\ P_{iy} \\ P_{iz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_x(\theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & \sin\theta_x \\ 0 & -\sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_y(\theta_y) = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$P'_i = Ry(\theta_y) * Rx(\theta_y) * P_i \quad (4)$$

โดย

P_i = พิกัดใดๆ

$R_x(\theta_x)$ = การหมุนเมทริกซ์บนแกนนอน ด้วยมุม θ_x องศา

$R_y(\theta_y)$ = การหมุนเมทริกซ์บนแกนตั้ง ด้วยมุม θ_y องศา

P'_i = พิกัดใหม่ที่หมุนพิกัดใดๆ เป็นมุม θ_x, θ_y บนแกนนอนและแกนตั้ง

2.3 การรับภาพตาจริง 2 มิติ และการประมวลผล

ภาพตาจริง 2 มิติ รับจากกล้องเว็บแคมอินฟาเรด ยี่ห้อ MD-TECH รุ่น MDC -14 ความละเอียด 10.0 ล้านพิเซล ขนาดภาพ 320x240 พิกเซล อัตราเร็วต่อเฟรม 25 เฟรมต่อวินาที ประกอบบนหน้ากากสำหรับสวมครอบดวงตาขณะถ่าย

นำภาพตาจริง 2 มิติ ผ่านอัลกอลิทึมเพื่อประมาณค่ารูปทรงวงรีของรูม่านตา [6,7,8] ซึ่งมีกระบวนการคร่าวๆ คือ กระบวนการเทรสโฮลปรับค่า, แบ่งกลุ่มข้อมูลด้วยวิธี K-means, กำจัด noise ด้วยวิธี Closing และ Filtering & Extract Blackest, กระบวนการหาระยะมาฮาลาโนบิท, การกำจัดขอบของส่วนที่ไม่ใช่ตาดำ, และเทคนิคการประมาณค่ารูปทรงวงรี ผลสุดท้ายที่ได้คือ สมการวงรีของรูม่านตา ค่าที่นำมาใช้กับการวิจัยนี้คือค่าความยาวของเส้นไมเนอร์และเมเจอร์ของวงรีของรูม่านตา

2.4 ค่าการเคลื่อนที่ 2 มิติ

ค่าการเคลื่อนที่ 2 มิติ คือค่า R_{ex} และ R_{ey} ซึ่งคำนวณได้จาก

$$R_{exi} = \frac{L_{xi}}{L_{xmax}} \, x\, 100 \quad (5)$$

$$R_{eyi} = \frac{L_{yi}}{L_{ymax}} \, x\, 100 \quad (6)$$

L_{xi} = ค่าความยาวเส้นอ้างอิงแกนนอนที่มุมการหมุน i

L_{yi} = ค่าความยาวเส้นอ้างอิงแกนตั้งที่มุมการหมุน i

L_{xmax} = ค่าความยาวของเส้นอ้างอิงแกนนอนเมื่อตาอยู่ตำแหน่ง (0,0) หรือตรงกลาง

L_{ymax} = ค่าความยาวของเส้นอ้างอิงแกนตั้งเมื่อตาอยู่ตำแหน่ง (0,0) หรือตรงกลาง

R_{exi} = ค่าร้อยละความยาวเส้นอ้างอิงแกนนอนเทียบกับความยาวสูงสุด

R_{eyi} = ค่าร้อยละความยาวเส้นอ้างอิงแกนตั้งเทียบกับความยาวสูงสุด

2.4.1 ค่าการเคลื่อนที่ 2 มิติ ของแบบจำลองตา 3 มิติ

ค่าการเคลื่อนที่ 2 มิติ ของแบบจำลองตา 3 มิติ คำนวณได้จาก การจับภาพการเคลื่อนที่ของแบบจำลองที่มุมการหมุนใด ๆ แล้วนำไปคำนวณหาค่าความยาวเส้นอ้างอิงบนวงกลมสีดำ โดยใช้โปรแกรม MATLAB

2.4.2 ค่าการเคลื่อนที่ 2 มิติ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

หาได้จากการกำหนด พิกัดอ้างอิง P_1 , P_2 , P_3, P_4 เพื่อหาความยาวเส้นอ้างอิงที่มุมการหมุนใด ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2

$$P_1 = \begin{bmatrix} r\sin(-\beta) \\ 0 \\ r\cos(-\beta) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} r\sin\beta \\ 0 \\ r\cos\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ r\sin(-\beta) \\ r\cos(-\beta) \end{bmatrix} \quad (9)$$

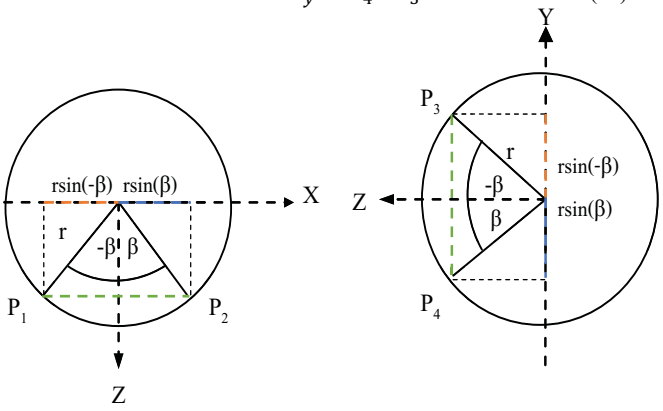
$$P_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ r\sin\beta \\ r\cos\beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

β = มุมที่พิกัดทำกับจุดศูนย์กลางทรงกลม

r= รัศมีของทรงกลม

ความยาวของเส้นอ้างอิงแนวนอน $L_x = P_2 - P_1$ (11)

ความยาวของเส้นอ้างอิงแนวตั้ง $L_y = P_4 - P_3$ (12)



1. มุมมองด้านบน 2. มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 2 แสดงการกำหนดพิกัดอ้างอิงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.4.3 ค่าการเคลื่อนที่ 2 มิติ ของภาพตาจริง 2 มิติ

ค่าการเคลื่อนที่ 2 มิติ ของภาพตาจริง 2 มิติ คือค่าความยาวเส้นเมเจอร์และเส้นไมเนอร์ของสมการวงรีที่ได้จากการประมาณค่ารูปทรงของรูม่านตา [6,7,8]

2.5 ค่าการเคลื่อนที่ 3 มิติ

ค่าการเคลื่อนที่ 3 มิติ คือค่ามุมที่หมุนรอบแกนนอน และมุมที่หมุนรอบแกนตั้ง θ_x และ θ_y

3. ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพ

ทดสอบประสิทธิภาพความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น โดยเทียบกับแบบจำลองตา 3 มิติ หมุน ±50 องศา รอบแกนนอนและแกนตั้ง ค่าที่นำมาเทียบคือค่า R_{ex} และ R_{ey} โดยเก็บค่าเป็นตารางการเคลื่อนที่ แนวนอน คือ ค่ามุมการหมุนบนแกนนอน ±50 องศา แนวตั้ง คือ ค่ามุมการหมุนบนแกนตั้ง ±50 องศา แล้วนำมาคำนวณหาค่าความถูกต้องจากสูตร

$$percent\ of\ error_i = \frac{\left|R_{emeasurement} - R_{ereference}\right|}{R_{ereference}} x\ 100 \quad (13)$$

$$Total\ accuracy = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} error_i}{N} \quad (14)$$

$R_{emeasurement}$ = ค่าการเคลื่อนที่ 2 มิติ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

$R_{ereference}$ = ค่าการเคลื่อนที่ 2 มิติ ของแบบจำลองตา 3 มิติ

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองดังนี้

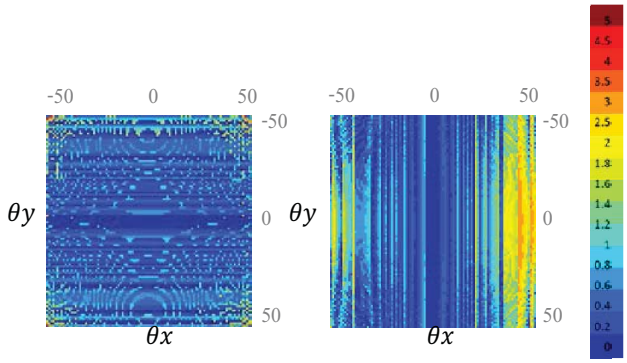
4.1 ผลการทดลอง

ผลการทดสอบประสิทธิภาพความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นขึ้น โดยเทียบกับแบบจำลองตา 3 มิติ หมุน ±50 องศา รอบแกนนอนและแกนตั้ง ค่าที่นำมาเทียบคือค่า R_{ex} และ R_{ey} จากจำนวนข้อมูล 10,201 ข้อมูล ค่าความถูกต้องของ R_{ex} และ R_{ey}คือ 99.53 % และ 99.29% ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดแสดงในรูปที่ 3 แสดงอยู่ในรูปแบบของค่าสีบอกเปอร์เซ็นความผิดพลาด

เมื่อนำภาพตาจริง 2 มิติ มาหาค่าการเคลื่อนที่ในระบบ 3 มิติ แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ผ่านแบบจำลองตา 3 มิติ ทิศทางการเคลื่อนที่ของแบบจำลองตา 3 มิติ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับภาพตาจริง 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 4

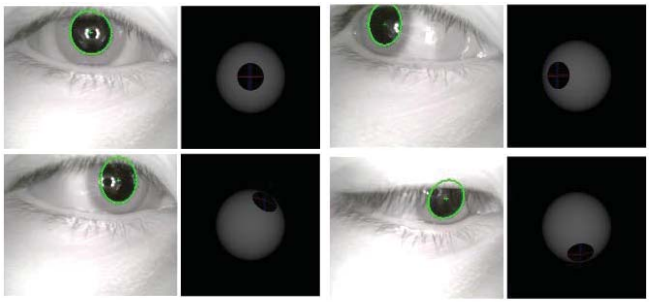
4.2 อภิปรายผลการทดลอง

จากผลการทดสอบ ถ้าตาจริงมีรูปทรงเป็น ทรงกลม แนวโน้มค่าการเคลื่อนที่ของตา จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าการเคลื่อนที่ของแบบจำลองทางคณิตศาตร์ ซึ่งค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของ R_{ex} จะเกิดมากในช่วงที่ค่ามุมการหมุนมากกว่า ±40 องศาทั้งแกนนอนและแกนตั้ง R_{ey} จะเกิดมากในช่วงมากกว่า ±40 องศาในแกนนอน และ น้อยกว่า ±10 องศา ใน



1.ค่าความผิดพลาดของ R_{ex} 2.ค่าความผิดพลาดของ R_{ey}

รูปที่ 3 แสดงค่าสีบอกเปอร์เซ็นความผิดพลาด ของ R_{ex} และ R_{ey}



รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของตาจริง 2 มิติ เทียบกับการเคลื่อนที่ของแบบจำลองตา 3 มิติ

แกนตั้ง เนื่องมาจากความผิดพลาดในการคำนวณความยาวของเส้นอ้างอิง

5. สรุปและอภิปลายผล

ในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณค่าการเคลื่อนที่ของตา 3 มิติ โดยใช้ภาพตา 2 มิติ ทดสอบประสิทธิภาพความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นโดยเทียบกับแบบจำลองตา 3 มิติ หมุน ±50 องศา รอบแกนนอนและแกนตั้ง ค่าความถูกต้องของค่า R_{ex} และ R_{ey}คือ 99.53 % และ 99.29%

เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปทดลองใช้กับภาพตาจริง 2 มิติ เพื่อหาค่าการเคลื่อนที่ในระบบ 3 มิติ แสดงผลทิศทางการเคลื่อนที่ผ่านแบบจำลองตา 3 มิติ ผลเป็นที่น่าพึงพอใจโดย ทิศทางการเคลื่อนที่ของแบบจำลองตา 3 มิติ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับภาพตาจริง 2 มิติ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเกิดจากวงรีที่มีขนาดใหญ่หรือเล็กกว่ารูม่านตาจริง ทำให้การคำนวณทิศทางผิดพลาด

งานวิจัยนี้มีข้อดีคือ สามารถประมาณค่าการเคลื่อนที่ของตา 3 มิติ โดยใช้ภาพตา 2 มิติ จากกล้องอินฟาเรดเดี่ยวและสามารถนำไปต่อยอดในการวินิจฉัยระดับของอาการตากระตุกได้

เอกสารอ้างอิง

[1] F. Tombari, S.Mattoccia., L. D. Stefano and E. Addimanda, “Classification and Evaluation of Cost Aggregation Methods for Stereo Correspondence,” IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR 2008), 2008,pp. 1-8.

[2] H. C. Longuet-Higgins, “A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections”, Nature, vol.239, 1981, pp. 133-135

[3] Y. Y. Huang, M. Y. Chen, “3D Object Model Recovery from 2D Images Utilizing Corner Detection,” 2011 International conference on system science and engineering(ICSSE 2011), Macau, China, 2011, pp. 76-81

[4] S. Wibirama, S. Tungjitkusolmun, Ch. Pimtavirooj, and K. Hamamoto, “Dual Cameras Acquisition for Three-Dimensional Eye-Motion Tracking,” 2nd Biomedical Engineering International Conference(BMEiCON 2009), Thailand, 2009, pp. 126-130

[5] S. Dong, “Vision Measurement Method with Single Camera and 3-Axis Accelerometer Sensor,” 2013 4th International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), Beijing, China, 2013, pp. 25-29

[6] Th. Charoenpong, P. Preeyanan, Ch. Theerasak and M. Visan, “Accurate Pupil Extraction Algorithm by Using Integrated Method,” 2013 5th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST2013), Thailand, 2013, pp: 32-37.

[7] Th. Charoenpong, Sr. Thewsuwan, Th. Chanwimalueng and V. Mahasithiwat, “Pupil Extraction System for Nystagmus Diagnosis by Using K-Mean Clustering and Mahalanobis Distance Technique,” 4th Int. Conf. on Knowledge and Smart Technology (KST), Thailand, 2012, pp: 24-29.

[8] Th. Charoenpong, Sr. Thewsuwan, Th. Chanwimalueng and V. Mahasithiwat, “Accuracy Improvement of Pupil Extraction by Using Shape Estimation Algorithm,” Int. Workshop on Smart Info-Media System in Asia (SISA 2012), Thailand, 2012, pp: 33-38.