

การควบคุมยานใต้น้ำขนาดเล็กด้วยอุปกรณ์รับภาพเพื่อการสำรวจท่อใต้น้ำ (เบื้องต้น)

Vision guided control a small submarine for survey the pipeline

दनัย เผ่าพุทธธรรม¹ และ สโรจ ไทรเมฆ²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม (FIBO)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 ถ.ประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

¹E-mail: mai24166@hotmail.com

Danai Phaoharuhan¹ and Saroj Saimek²

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, ²Institute of Field roBOTics (FIBO),

^{1,2}King Mongkut's University of Technology Thonburi. 126 Pracha-u-tit Rd. Bangmod Tungkru Bangkok 10140

¹E-mail: mai24166@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาาระบบนำร่องด้วยอุปกรณ์รับภาพของยานใต้น้ำแบบอัตโนมัติ (AUV) รวมทั้งออกแบบอัลกอริทึมในการควบคุมการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำเพื่อสำรวจผิวนอกของท่อใต้น้ำ โดยขั้นตอนการประมวลผลภาพการเคลื่อนที่ จะนำภาพที่รับได้มาแยกค่าสีแดง-เขียว-น้ำเงิน (RGB) ในแต่ละพิกเซล แล้วทำการหาระยะห่างและมุมระหว่างแนวท่อใต้น้ำกับการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ ซึ่งผลทดสอบการเคลื่อนที่เข้าหาท่อใต้น้ำเบื้องต้น จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำสามารถเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายได้ แต่ยังมีเคลื่อนที่เลยแนวท่อใต้น้ำ แต่ยังมีผลผิดพลาดในการติดตามท่อใต้น้ำ

Abstract

This research studied a vision guided system and proposed a control algorithm for exploring an underwater pipeline using an autonomous underwater vehicle (AUV). After receiving an image, individual pixel is separated into red-green-blue (RGB) color to locate the pipeline. We then calculated for displacement and orientation of the pipeline with respect to the AUV. Preliminary experimental results showed that the AUV could move to the pipeline; however, overshooting and error of the motion were presented.

1. บทนำ

ปัจจุบันงานวิจัยด้านยานใต้น้ำเป็นที่แพร่หลายมากขึ้น เช่น ยานใต้น้ำที่สามารถประจุพลังงานไฟฟ้าได้เองผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ [1], ยานใต้น้ำอัตโนมัติสำหรับเดินทางระยะไกลโดยใช้ระบบบอกพิกัด (Global Positioning System) [1], [2] ในการนำร่อง ซึ่งทำให้ยานใต้น้ำมีความสามารถสูงขึ้น โดยเฉพาะประเทศไทยมีพื้นที่ชายฝั่งมาก ในอนาคตยานใต้น้ำสำหรับสำรวจและท่อที่เกี่ยวข้องมีความสำคัญมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นยานใต้น้ำสำหรับนำเที่ยวชมแนวปะการัง, ยานใต้น้ำสำรวจพื้นฟูแนวปะการัง หรือใช้ในการตรวจสอบท่อส่งและเคเบิลใต้น้ำ โดยมีแนวคิดจากงานวิจัยการสำรวจท่อใต้น้ำโดยใช้ระบบนำร่องด้วยอุปกรณ์รับภาพ [7] ซึ่งทำการกระบวนจำลองการวิเคราะห์ภาพ (Image processing) เพื่อหาเส้นทางเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ แล้วจำลองการเคลื่อนที่ (Simulation) ด้วยระบบควบคุมฟuzzy logic (Fuzzy logic) จึงมีแนวคิดที่จะนำแนวทางจากการวิจัยนี้มาพัฒนาและทดสอบการทำงานจริง

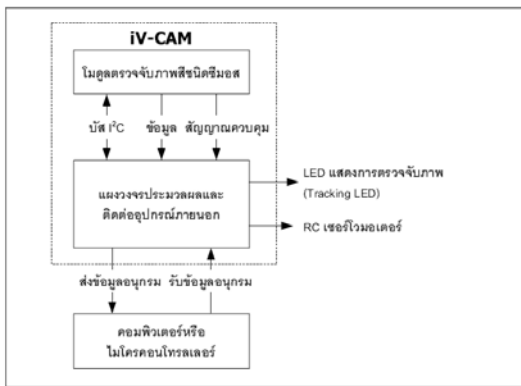
โดยงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ ซึ่งจะเน้นในส่วนของควบคุมยานใต้น้ำเพื่อสำรวจและติดตามท่อใต้น้ำแบบอัตโนมัติ โดยใช้อุปกรณ์รับภาพในการหาตำแหน่งที่ต้องการติดตามและทำการติดตาม ซึ่งจะทำการทดสอบวิเคราะห์การเคลื่อนที่ในแบบ 2 มิติ โดยใช้โมเดลยานใต้น้ำแบบอินเตอร์แอคชูเอเตอร์ (Underactuator) มีขนาดกว้างยาวสูง เท่ากับ 22x30x11 เซนติเมตร และมีใบพัด (Thruster) 2 ใบ และใช้ปีก (Elevator) ใน

การดำขึ้น-ลง แล้วกำหนดสถานะเริ่มแรกให้ยานใต้น้ำเคลื่อนที่ขนานกับท่อใต้น้ำ แล้วทำการเลี้ยวเข้าหาท่อใต้น้ำเพื่อเคลื่อนที่ติดตามท่อใต้น้ำ

และเค้าโครงของบทความนี้จะประกอบไปด้วย หัวข้อที่ 2 จะกล่าวถึง การใช้งานโมดูลรับภาพ IV-CAM และข้อมูลกล้องรับภาพของโมดูล, หัวข้อที่ 3 กล่าวถึงแนวคิดในการออกแบบอัลกอริทึม (Algorithm) ในการควบคุมยานใต้น้ำ, หัวข้อที่ 4 เป็นขั้นตอนการทดสอบและผลการทดสอบ และสุดท้ายเป็นส่วนของการสรุปผลการทดสอบและวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดสอบ

2. ระบบนำร่องยานใต้น้ำโดยใช้โมดูลรับภาพ

การควบคุมสั่งงานยานใต้น้ำจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ในการสั่งงาน โดยใช้ระบบป้อนกลับ (Feedback system) จากโมดูลรับภาพ IV-CAM ตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบการติดต่อสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับโมดูลตรวจจําภาพ IV-CAM

ข้อมูลที่โมดูล IV-CAM ส่งออกมาเป็นชุดข้อมูลตามโหมดที่ไมโครคอนโทรลเลอร์สั่งงานและในงานวิจัยนี้จะสั่งงานด้วยโหมด TC หรือโหมด tracking เพื่อติดตามวัตถุที่มีสีตามคำสั่งที่ส่งไป ซึ่งมีโครงสร้างชุดข้อมูลคำสั่งเป็น

$$TC \ r1 \ r2 \ g1 \ g2 \ b1 \ b2$$

ซึ่งคำสั่งที่ส่งให้แก่โมดูลมีความหมายว่า ให้โมดูลค้นหาและติดตามตำแหน่งพิกเซล (Pixels) โดยการแยกค่าสีแดง-เขียว-น้ำเงิน (RGB) แต่ละพิกเซลในภาพที่รับ เพื่อค้นหาพิกเซลที่มีช่วงสีแดงระหว่าง $r1$ ถึง $r2$ สีเขียวระหว่าง $g1$ ถึง $g2$ และสีน้ำเงินระหว่าง $b1$ ถึง $b2$ แล้วส่งข้อมูลที่โมดูลรับภาพประมวลผลได้กลับไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยชุดข้อมูลมีโครงสร้างดังนี้

$$M \ mx \ my \ x1 \ y1 \ x2 \ y2 \ pixels \ confidence$$

โดยที่ mx - พิกัดกึ่งกลางของพื้นที่ที่ตรวจจําในแนวระนาบ

my - พิกัดกึ่งกลางของพื้นที่ที่ตรวจจําในแนวตั้ง

$x1$ - พิกัดมุมซ้ายในแนวระนาบของพื้นที่ที่ตรวจจํา

$y1$ - พิกัดมุมซ้ายในแนวตั้งของพื้นที่ที่ตรวจจํา

$x2$ - พิกัดมุมขวาในแนวระนาบของพื้นที่ที่ตรวจจํา

$y2$ - พิกัดมุมขวาในแนวตั้งของพื้นที่ที่ตรวจจํา

$pixels$ - จำนวนพิกเซลของพื้นที่ที่ตรวจจํา

$confidence$ - ข้อมูลของพื้นที่ที่ตรวจจําแสดงถึง

คุณภาพของภาพ

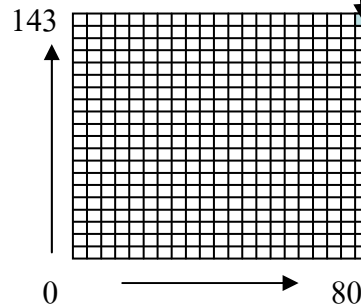
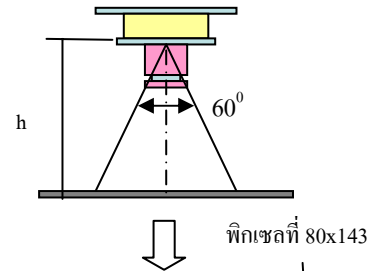
ข้อมูลที่ถูกส่งออกมาจากโมดูล IV-CAM เป็นแบบอนุกรมเป็นตัวแปรอักษร (String) ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงต้องทำการแปลงค่าที่ได้ให้เป็นตัวแปรคณิตศาสตร์ (Float) ก่อนจะนำค่าที่ได้มาคำนวณทางคณิตศาสตร์หาพิกัดของวัตถุที่ต้องการเทียบกับพิกัดกึ่งกลางของภาพซึ่งเป็นตำแหน่งของโมดูลรับภาพ และควบคุมยานใต้น้ำให้เคลื่อนที่เข้าหาวัตถุ ซึ่งจะทำการทดสอบต่อไป

และในส่วนข้อมูลกล้องรับภาพของโมดูล IV-CAM ตัวกล้องมีองศารับภาพประมาณ 60° และมีจำนวนพิกเซล 80×143 ตามรูปที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อกล้องห่างจากวัตถุที่ตรวจจําเท่ากับ h แล้ว ดังนั้นความกว้างของพิกเซลในแกน (w)

$$w = \frac{2h \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{p} \quad (1)$$

โดยที่ p คือ ความละเอียดในแต่ละแกน (แกนตั้งละเอียด 143 พิกเซล และแกนนอนละเอียด 80 พิกเซล)

α คือ องศารับภาพของกล้อง (Angle view)

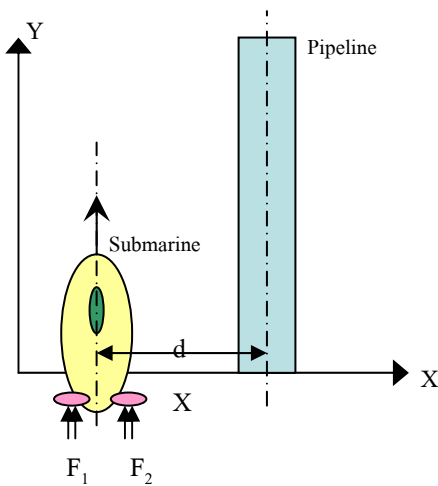


รูปที่ 2 ภาพแสดงการรับภาพของโมดูลรับภาพ IV-CAM

3. อัลกอริทึมในการควบคุมการเคลื่อนที่

โมเดลยานใต้น้ำที่ใช้ในงานวิจัยจะมีใบพัด (Thruster) 2 ตัว ในการเคลื่อนที่ไปด้านหน้า และใช้ปั๊ม (Elevator) ในการดำขึ้น-ลง ตามรูปที่ 3 ซึ่งมีจำนวนตัวต้นกำลัง (Actuator) น้อยกว่าจำนวนองศาอิสระ (Degree of freedom) จึงมีแนวความคิดในเบื้องต้นที่จะสร้างอัลกอริทึมสำหรับใช้ในการควบคุมยานใต้น้ำให้สามารถติดตามท่อใต้น้ำซึ่งใช้โมดูลรับภาพ IV-CAM เป็นเซนเซอร์ตรวจจําและหาตำแหน่งการวางตัวของท่อใต้น้ำ ซึ่งหลักขณะการวางตัวของแนวท่อหน้าโดยนำค่า $x1, x2, y1, y2$ ซึ่งเป็นพิกัดบนขอบท่อทั้งสอง

ฝั่งในภาพที่ได้ และนำพิกัดที่ได้มาสร้างเป็นสมการเส้นตรงแล้วหาความชันของแนวท่อใต้น้ำ (m) เพื่อหาลักษณะการวางตัวของท่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ หลังจากนั้นจะอัลกอริทึมที่ออกแบบจะควบคุมยานใต้น้ำเพื่อเคลื่อนที่ติดตามและสำรวจท่อใต้น้ำแบบอัตโนมัติ โดยในเบื้องต้นเพื่อให้ง่ายต่อการควบคุม จึงสมมติให้องศาอิสระ (Degree of freedom) แต่ละแกนเป็นอิสระต่อกัน แล้วทำการควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional control) ให้ลดระยะห่างจากเป้าหมายที่ละแนวแกน โดยให้ความสำคัญกับแต่ละแนวแกนต่างกันไป และเมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ในระนาบ X-Y ตามรูปที่ 3 (โดยสมมติให้ยานใต้น้ำรักษาระดับความลึกให้คงที่และท่อใต้น้ำอยู่ใต้น้ำที่ความลึกคงที่เช่นเดียวกัน) และเซนเซอร์ที่ใช้ในการควบคุมมีเพียงโมดูลรับภาพ เพื่อใช้บอกพิกัดของตัวยานกับวัตถุที่ต้องการติดตาม



รูปที่ 3 การเคลื่อนที่เข้าหาวัตถุเป้าหมายในระนาบ X-Y

และตั้งแกน (Orientation) ตามรูปที่ 3 และให้สภาวะเริ่มต้นของยานใต้น้ำ เคลื่อนที่ขนานกับแนวของท่อใต้น้ำ แล้วใช้ข้อมูลที่ได้จากโมดูลรับภาพตามรูปที่ 4 ทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) จากพิก เซลของภาพ โดยที่

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D)} = x_2 - x_1$$

$$\Delta X = cx - mx$$

$$\Delta Y = cy - my$$

เพื่อที่จะนำมาหามุมที่ยานใต้น้ำทำกับท่อใต้น้ำ โดยการหาสมการของขอบท่อทั้งสองฝั่งจากสมการเส้นตรง

$$y = mx + c$$

แล้วนำมาหาความชันของแนวท่อใต้น้ำจากสมการ

$$m = \sqrt{\frac{(y_1 - y_2) - m(x_1 - x_2)}{D}} \quad (2)$$

โดยที่ D - เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

Δx - ระยะระหว่างยานใต้น้ำถึงท่อใต้น้ำในแนวระนาบ

Δy - ระยะระหว่างยานใต้น้ำถึงท่อใต้น้ำในแนวตั้ง

cx - พิกัดของยานใต้น้ำในแนวระนาบ

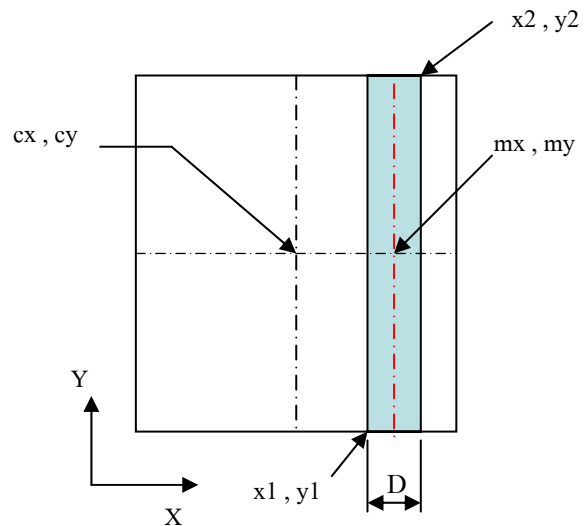
cy - พิกัดของยานใต้น้ำในแนวตั้ง

m - ความชันของท่อใต้น้ำ

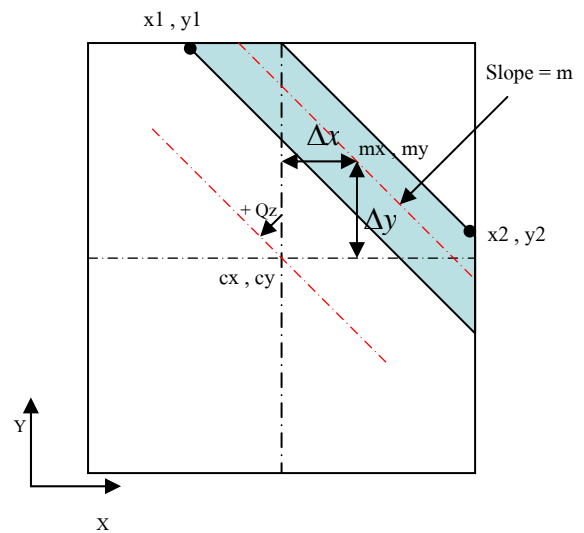
เมื่อหาความชันของท่อ ($m = \frac{y}{x}$) ได้แล้วจะทำการหามุมของ θ_z

ซึ่งเป็นมุมระหว่างแกน Y กับแนวท่อใต้น้ำตั้งรูปที่ 5 โดยทำมุมทวนเข็มนาฬิกามีค่าเป็นบวก และตามเข็มนาฬิกามีค่าเป็นลบ จาก

$$\theta_z = \tan^{-1}\left(-\frac{1}{m}\right) \quad (3)$$



รูปที่ 4 ภาพที่ได้ขณะยานใต้น้ำเคลื่อนที่ขนานกับท่อใต้น้ำ



รูปที่ 5 ภาพที่ได้ขณะยานใต้น้ำเคลื่อนที่ทำมุมกับท่อใต้น้ำ

เมื่อทราบมุม θ_z ที่เกิดขึ้นและระยะห่างระหว่างจากยานใต้น้ำกับท่อใต้น้ำในขณะนั้นแล้ว จะนำค่าเหล่านี้ไปเขียนอัลกอริทึมในโปรแกรมสำหรับควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยการปรับค่าแบบเชิงสัดส่วน (Proportional) ซึ่งจะปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ทำงานตามสมการ (4)

$$V_{input} = K_1\Delta x + K_2\Delta y + K_3\theta_z \quad (4)$$

โดยที่ V_{input} - แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ใบพัด

K_1 - ตัวขยายแรงดันหรือค่าเกน (Gain) จากผลของระยะห่างในแกน X

K_2 - ตัวขยายแรงดันหรือค่าเกน (Gain) 2 จากผลของระยะห่างในแกน y

K_3 - ตัวขยายแรงดันหรือค่าเกน (Gain) 2 จากผลของระยะห่างของการหมุนรอบแกน Z

ซึ่งค่าเกน (Gain) นั้นจะต้องถูกปรับค่าให้เหมาะสม โดยใช้การทดสอบ และค่าแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 8.4 โวลท์

4. การทดสอบการเคลื่อนที่เข้าหาท่อใต้น้ำ

4.1 วัตถุประสงค์การทดสอบ

การทดสอบจะกำหนดให้สภาวะเริ่มต้นของยานใต้น้ำมีการเคลื่อนที่ขนานกับแนวท่อใต้น้ำ เพื่อสังเกตการณ์การเคลื่อนที่และพิกัดของยานใต้น้ำเข้าหาท่อใต้น้ำ รวมถึงศึกษาผลของอัลกอริทึมที่ใช้

4.2 การกำหนดพารามิเตอร์

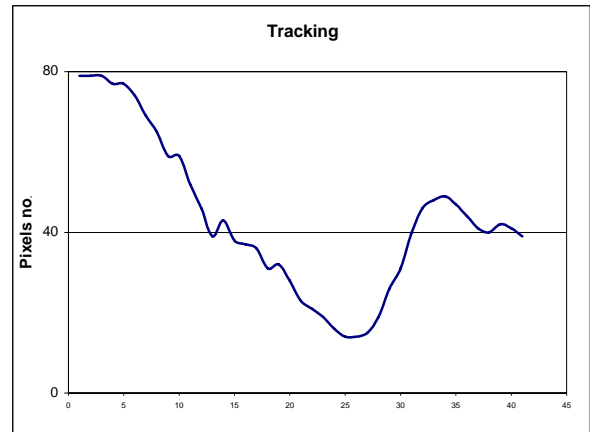
ในสภาวะเริ่มต้นท่อใต้น้ำอยู่ลึก 40 เซนติเมตร และยานใต้น้ำอยู่ที่ผิวน้ำ โดยการทดสอบจะกำหนดให้ระยะระหว่างยานใต้น้ำและท่อใต้น้ำมีระยะห่างต่าง ๆ กันไป โดยพิกัดของยานใต้น้ำ ณ จุดเริ่มต้น มีพิกัดตามตารางที่ 1 หลังจากนั้นปล่อยให้ยานใต้น้ำเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายอย่างอัตโนมัติ จากอัลกอริทึมที่ออกแบบจะต้องสมมติค่า K_1 , K_2 และ K_3 โดยจะเห็นได้ว่าระยะห่างของยานใต้น้ำกับท่อใต้น้ำสูงสุดที่อัลกอริทึมสามารถทำงานได้คือ 21.09 เซนติเมตร (คำนวณได้จากสมการที่ 1) และจากอัลกอริทึมการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำจะมีความเร็วในทั้งแกน X และ Y จึงยังไม่ทราบค่าสูงสุดของ θ_z ที่เกิดขึ้น จึงสมมติให้มุม θ_z มีค่าน้อยมาก ในเบื้องต้นจึงกำหนดให้ $K_3 = 0$ และ $K_1 = 1, K_2 = 1$ โดยจะสังเกตผลที่เกิดขึ้นเพื่อหาค่าที่เหมาะสมต่อไป

และการตั้งแกนในภาพผลการทดสอบ แกนตั้งของผลการทดสอบเป็นพิกัดของค่ากึ่งกลางพื้นที่สี่ในแนวแกน Y ตามรูปที่ 3 มีหน่วยเป็นพิกเซล (Pixels) และแกนนอนเป็นเวลา ซึ่งจะได้ผลการทดสอบตามรูปที่ 6 ถึง 8

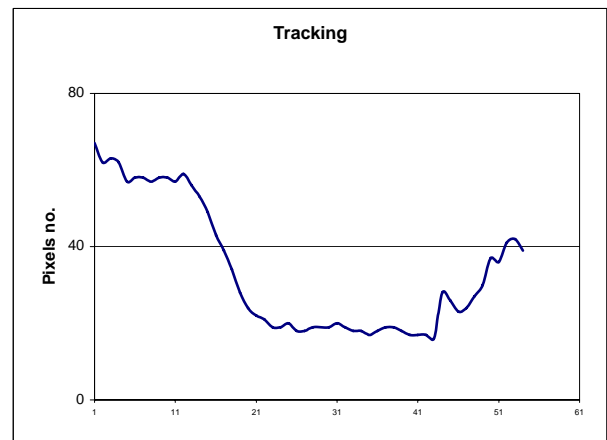
4.3 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่เข้าหาท่อใต้น้ำ

ตารางที่ 1 ตารางแสดงพิกัดเริ่มต้นระหว่างยานใต้น้ำกับท่อใต้น้ำ โดยท่อใต้น้ำอยู่พิกเซลที่ 40 (แกน Y ของรูปที่ 6-8)

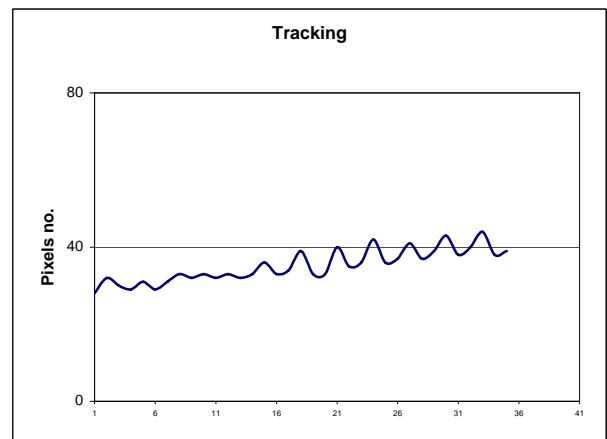
	พิกัดเริ่มต้นของยานใต้น้ำ (x,y)	ระยะห่างระหว่างยานใต้น้ำกับท่อใต้น้ำ (cm.)
ผลการทดลองที่ 1	(0,79)	20.52
ผลการทดลองที่ 2	(0,67)	15.59
ผลการทดลองที่ 3	(0,28)	1.15



รูปที่ 6 ผลการทดสอบที่ 1 ให้ยานใต้น้ำอยู่พิกเซลที่ 79



รูปที่ 7 ผลการทดสอบที่ 2 ให้ยานใต้น้ำอยู่พิกเซลที่ 67



รูปที่ 8 ผลการทดสอบที่ 3 ให้ยานใต้น้ำอยู่พิกเซลที่ 28

การทดสอบที่ 1 และ 2 ตำแหน่งของยานใต้น้ำอยู่พิกเซลที่ 79 และ 67 ตามลำดับ แล้วทำการเคลื่อนที่เข้าหาแนวท่อใต้น้ำที่พิกเซล 40 อย่างอัตโนมัติ ซึ่งเป็นการทดสอบพยายามให้ยานใต้น้ำห่างจากท่อใต้น้ำมากที่สุด และในการทดสอบที่ 3 จะกำหนดให้ยานใต้น้ำอยู่ใกล้กับแนวท่อใต้น้ำ มีพิกัดที่พิกเซล 28 แล้วสังเกตการณ์การเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ ซึ่งจะเห็นว่า ยานใต้น้ำขณะเคลื่อนที่เข้าหา

ท่อใต้น้ำ พิกัดที่ได้จากโมดูลรับภาพมีค่าแกว่งไปมาและมีการเคลื่อนที่เลยแนวท่อใต้น้ำที่พิกเซล 40 ซึ่งสาเหตุที่เกิดขึ้นจะกล่าวในการวิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

5. การวิเคราะห์ปัญหาและสรุปผลการทดสอบ

5.1 การวิเคราะห์ปัญหา

จากผลการทดสอบส่วนที่น่าสนใจมี 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ลักษณะการเคลื่อนที่เข้าหาท่อใต้น้ำ ในผลการทดสอบที่ 1 และ 2 มีความคล้ายคลึงกัน คือ เคลื่อนที่เข้าหาท่อใต้น้ำเร็วกว่าอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับผลการทดสอบที่ 3 เนื่องจากอัลกอริทึมใช้การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional) โดยนำค่าระยะห่างในแกน X และ Y เป็นอินพุตของอัลกอริทึม

ส่วนที่ 2 ขณะที่ยานใต้น้ำเคลื่อนที่ถึงท่อใต้น้ำ ผลการทดสอบจะพบว่า ยานใต้น้ำเคลื่อนที่เลยแนวท่อใต้น้ำออกไปในทิศทางเดิม โดยไม่ได้ปรับทิศทางเคลื่อนที่ให้อยู่แนวเดียวกับแนวท่อใต้น้ำ เนื่องจากยานใต้น้ำยังมีความเฉื่อย (Inertia) อยู่จึงทำให้เคลื่อนที่เลยออกไป และจากอัลกอริทึมที่กำหนดให้ $K_3 = 0$ ทำให้เห็นว่า θ_z มีผลต่อการติดตามท่อใต้น้ำ โดยจากผลการทดสอบที่ 1 และ 2 ยานใต้น้ำทำมุม θ_z มากกว่า ทำให้ยานใต้น้ำใช้เวลาและระยะทางวกกลับเข้าหาท่อใต้น้ำมากกว่าการทดสอบที่ 3

ส่วนที่ 3 จะสังเกตเห็นค่าที่ได้จากโมดูลกล้องมีค่าแกว่งเล็กน้อยตลอดการเคลื่อนที่โดยเฉพาะการทดสอบที่ 3 ที่การแกว่งเกิดขึ้นมาก ในส่วนนี้เกิดขึ้นจากยานใต้น้ำมีการโคลงจากคลื่นและความคลาดสี่ของเลนส์กล้องและสภาพแสงขณะทดสอบ

5.2 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบจะเห็นได้ชัดเจนนว่ายานใต้น้ำสามารถที่จะเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายได้ แต่ยังมีคามผิดพลาดในการติดตามเนื่องมาจากแรงจากใบพัดที่ควบคุมการเคลื่อนที่ยังไม่เพียงพอที่จะควบคุมผลของความเฉื่อยและอัลกอริทึมยังมีความผิดพลาดนอกจากนั้นคุณภาพของกล้องที่ใช้ยังมีข้อจำกัดอยู่ จึงจะต้องพัฒนาและแก้ไขต่อไป เพื่อที่จะเป็นระบบที่สามารถนำไปใช้จริงได้ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Richard Blidberg, Autonomous Undersea Systems Institute, "Solar Powered Autonomous Undersea Vehicles", <http://www.ausi.org/publications/SeaTechSolar.pdf>
- [2] AUV Lab at MIT Sea grant, <http://auvlab.mit.edu>
- [3] Kevin J. Walchko, David Novick, and Michael C. Nechyba, University of Florida, Gainesville, FL, 32611-6200, "Development of a Sliding Mode Control System with Extended Kalman Filter Estimation for Subjugator"
- [4] Jose Paulo V. S. da Cunha, Member, IEEE, Ramon R. Costa, and Liu Hsu, Member, IEEE, "Design of a High Performance Variable Structure Position Control of ROV's"
- [5] Anthony Rowe, Charles Rosenberg, Illah Nourbakhsh, "A second Generation Low Cost Embedded Color vision System"
- [6] Y. R. Petillot, S.R. Reed and J.M. Bell, Oceans Systems Laboratory, Heriot Wan University School of EPS, "Real Time AUV Pipeline Detection and Tracking Using Side Scan Sonar and Multi-Beam Echosounder"
- [7] Chua Kia & Mohd Rizal Arshad, Underwater Robotics Research Group (URRG), School of Electrical and Electronics Engineering, University Sains Malaysia, Penang, Malaysia,
- [8] Thor I Fossen, JOHN WILEY & SONS, "Guidance and Control of Ocean Vehicles"