

การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดำน้ำแบบอัตโนมัติโดยใช้ระบบควบคุมแบบ PID และ SMC

Automated Motion Control of Underwater Robot Using PID and SMC Control

ธนพงศ์ ทองโชติ^{1*} และ ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์²Thanapong Tongchote^{1*} and Pradya Prempraneerach²

¹นักศึกษานิเทศศาสตร์ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอลำลูกหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110
²อาจารย์ที่ปรึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอลำลูกหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

*Corresponding author Email: thanapongt@t@gmail.com

บทคัดย่อ

การออกแบบระบบควบคุมโดยใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ดำน้ำแบบ VideoRayIII นั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาพที่มีความแปรปรวนเช่น กระแสน้ำ นอกจากนั้นระบบควบคุมต้องสามารถลดค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ตามความเร็วที่กำหนดให้มีค่าน้อยที่สุดในงานวิจัยนี้ สำหรับการเคลื่อนที่ในระนาบ x,y นั้นใช้ระบบควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative (PID) ส่วนในการควบคุมความลึกหรือการเคลื่อนที่ในแกน z จะทำการเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแบบ Sliding Mode Control (SMC) และ PID โดยใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ดำน้ำ VideoRayIII และจะทำการหาค่า Parameter ที่ดีที่สุดในการควบคุมตำแหน่งและความเร็วของทั้ง 2 แบบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพจากผลการจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ดำน้ำ ระบบควบคุมแบบ SMC จะให้ผลตอบสนองที่เร็วและไม่เกิด overshoot เมื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบ PID แต่ในกรณีที่มีการแปรปรวนของค่าพารามิเตอร์อุทกพลศาสตร์ M_{33} , Z_w และ Z_{ww} ที่เพิ่มขึ้นพร้อมกันระบบควบคุมแบบ PID และ SMC จะมีผลตอบสนองที่ช้าลง ระบบควบคุมแบบ SMC จะมีค่าความผิดพลาดที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการหักล้างของเทอมที่มีค่าอุทกพลศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นนั้นไม่ถูกหักล้างอย่างสมบูรณ์ต่างจากระบบควบคุมแบบ PID ยังสามารถควบคุมความลึกในระดับที่กำหนดได้อย่างแม่นยำนอกจากนั้นได้จำลองการเคลื่อนที่ใน 3 มิติโดยใช้การควบคุมทั้งในระนาบและความลึกพร้อมกันเพื่อควบคุมแรงในแกน x และ z และโมเมนต์รอบแกน z ทำให้หุ่นยนต์ดำน้ำเคลื่อนที่ตามเส้นทางใน 3 มิติ

คำสำคัญ: หุ่นยนต์ดำน้ำ การควบคุมความลึก ระบบควบคุมแบบสไลด์คั้งโหมด

Abstract

The objective of this research is to design a control system capable of operating a dynamic model of a VideoRay underwater robot effectively in an uncertain environment such as undersea with a strong current. Furthermore, the control system must exhibit a small tracking error when given specified paths. In this research, a Proportional Integral Derivative (PID) controller controls the horizontal motion in the xy plane and a comparison between the PID control and the Sliding Mode Control (SMC) is examined for vertical motion or depth control. The depth control dynamic simulation results show that the PID controller had less steady-state errors than the SMC controller, but the tracking response of the SMC controller was much faster with a similar thrust magnitude. When multi-hydrodynamic parameters like M_{33} , Z_w and Z_{ww} were uncertain, the PID and SMC controllers exhibited poor performance and slow response. The SMC controller could not reduce the tracking error to zero because of the non-perfect cancellation of the nonlinear hydrodynamic terms, but the PID controller was still able to maintain the same depth level. Moreover, motion in 3D requires simultaneously controlling the horizontal motion and depth. Therefore, force in x,y directions and the moment around the z axis must be generated by the controller to enable the 3D motion of the underwater robot to be controlled.

Keywords: underwater robot, depth control, sliding mode control

1. บทนำ

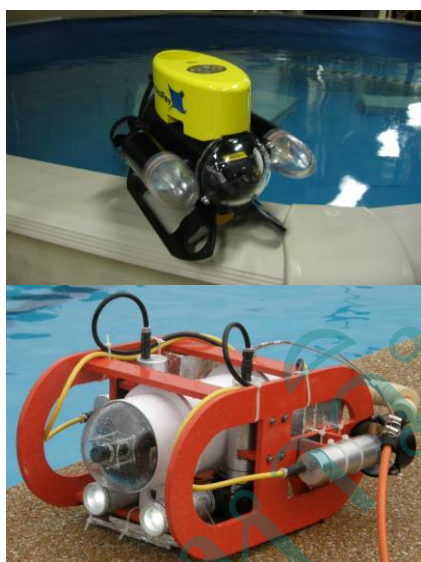
ปัจจุบันเรือดำน้ำถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เราสร้างเรือดำน้ำขนาดเล็กที่สามารถดำน้ำในระดับที่ลึกมากเพื่อทำงานเฉพาะกิจ เช่น การสำรวจซากเรือโบราณ การวางสายเคเบิลใต้น้ำ การหาร่องรอยของแผ่นดินไหวและการศึกษาเกี่ยวกับสิ่งมีชีวิตใต้ทะเล ซึ่งทำให้มนุษย์เราสามารถจะเข้าถึงโลกใต้ทะเลที่เราไม่เคยสัมผัสมาก่อนหุ่นยนต์ใต้น้ำVideoRayIII (Wang, 2006) ในรูปที่ 1(บน) ได้ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ในระดับแนวนอนและในแนวแกนตั้งแยกกันอย่างอิสระเพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายโดยการติดตั้งเซนเซอร์ต่างๆ เช่น เซนเซอร์วัดคุณภาพน้ำ หรือ

เซนเซอร์คลื่นเสียง Timpitak and Prempraneerach (2012) ได้ออกแบบหุ่นยนต์ดำน้ำขับเคลื่อนด้วยสี่ใบพัดและควบคุมบังคับทิศทางโดยใช้จอยสติ๊กแบบมีสายควบคุมการเคลื่อนที่ หุ่นยนต์จะถูกควบคุมด้วยระบบไมโคร คอนโทรลเลอร์ พร้อมกับใช้เซ็นเซอร์วัดความดัน วัดความเร็ว และวัดมุมเอียง นอกจากนี้ภายในหุ่นยนต์ยังมีกล้องวิดีโอติดอยู่ ทำให้สามารถส่งภาพขึ้นมาที่จอมอนิเตอร์เพื่อให้ผู้ควบคุมที่อยู่บนบกทราบถึงสภาพ แวดล้อมใต้น้ำและองศาการหันเห ทั้งนี้ หุ่นยนต์ดำน้ำสามารถใช้ทำการสำรวจได้ทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม โดยมีระบบการควบคุมระดับความลึกให้คงที่ ได้ในระดับความลึกที่ไม่เกิน 10 เมตร

Tang et al. (2010) จำลองการควบคุมความลึกของหุ่นAUV ด้วยวิธีการ Optimal Integral Sliding Mode Controller (ISMC) ผลการทดลองแสดงให้เห็น

ว่า การควบคุมความลึกแบบ ISMC คอบสนองได้ไว และมีเปอร์เซ็นต์ของ overshoot ที่น้อยกว่าการควบคุมความลึกแบบ PID แต่การควบคุมแบบ PID จะสามารถควบคุมpitch angle ได้ดีกว่า

Liu and Gong (2008) ได้จำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดำน้ำที่มีการขับเคลื่อนในแนวตั้งด้วยสองใบพัดที่ติดตั้งในแนวตั้งและขับเคลื่อน ไปด้าน หน้าและบังคับการหันเหด้วยอีกสองใบพัดที่ติดตั้งในแนวนอน โดยใช้การควบคุมแบบ SMC และ ทำการทดสอบการเคลื่อนที่ในสระว่ายน้ำ



รูปที่ 1 หุ่นยนต์ดำน้ำ VideoRay III (WaiWang, 2006) (บน) และหุ่นยนต์ ดำน้ำควบคุมระยะไกล (ภักพงศ์, 2011) (ล่าง)

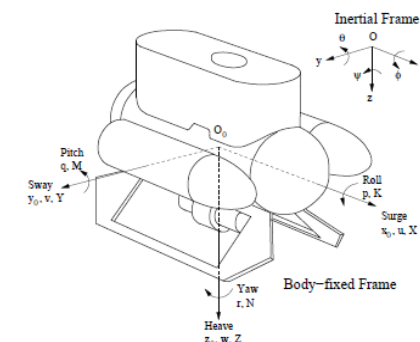
Jantapremjit (2011) ได้นำเสนอวิธีการการควบคุมแบบสไลด์โหมดสำหรับหุ่นยนต์ดำน้ำแบบ AUV ที่มีประสิทธิภาพและมีค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่น้อยนอกจากนั้น Jantapremjit (2011) ได้ออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์ดำน้ำควบคุมระยะไกลด้วยระบบขับเคลื่อน 4 ชุดดังแสดงในรูปที่ 1 (ล่าง) ผู้ควบคุมจะใช้จอยสติ๊กกำหนดการเคลื่อนที่ได้ 3 แบบคือ เคลื่อนที่ขึ้น-ลงตามแนวตั้ง เดินหน้า-ถอยหลัง หันซ้าย-หันขวาโดยมีชุด

คอนโทรลเลอร์สำหรับการควบคุมและรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์คือเซ็นเซอร์วัดความดันความเร่งและมุมเอียงและเข็มทิศอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งมีกล้องวิดีโอที่สามารถรับภาพได้น้ำมายังผู้ใช้งานเพื่อเก็บข้อมูล และมีระบบแสงสว่างสำหรับงานในที่มืด โดยหุ่นยนต์น้ำหนักประมาณ 15 กิโลกรัม

2. วัตถุประสงค์

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ในระนาบ xy โดยจะใช้เทคนิคการควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative Control (PID) ส่วนระบบควบคุมระดับความลึกในแนวแกน z จะใช้สองเทคนิคการควบคุมแบบ Sliding Mold Control (SMC) และ PID เพื่อทำการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างสองเทคนิคโดยจะใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ได้น้ำ VideoRay III และจะหาคำอธิบายายที่ดีที่สุดของระบบควบคุมทั้งสองแบบแล้วจึงทำการทดสอบระบบควบคุมทั้งสองแบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางอุทกพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ดำน้ำและทดสอบการควบคุมใน 3 มิติ เมื่อใช้การควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวระนาบแบบ PID

3. สมการพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ดำน้ำ และ ระบบควบคุม



รูปที่ 2 การตั้งแกนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดำน้ำ VideoRay III (Wang, 2006)

ศึกษาพลศาสตร์ของหุ่นยนต์คาน้ำ สำหรับการเคลื่อนที่เมื่อมี 6 องศาอิสระในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์คาน้ำ VideoRayIII ที่ขับเคลื่อนด้วยใบพัดสามใบ ทางด้านท้ายมีสองใบพัดวางขนานกับแนวนอนเพื่อใช้เดินหน้าหรือถอยหลัง และ บังคับการหันเหส่วนอีกหนึ่งใบพัดในแนวตั้ง เพื่อใช้ในการเคลื่อนขึ้นหรือลงโดยจะทำการศึกษาสมการพลศาสตร์เพื่อนำมาใช้ออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์คาน้ำVideoRayIII ที่มีขนาดความกว้าง 0.35 เมตร ยาว 0.36 เมตร และ สูง 0.23 เมตรในรูปที่ 2 แสดงการตั้งแกนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์คาน้ำ VideoRayIII ในแนวเชิงเส้นและเชิงมุมใน 6 องศาอิสระโดยมีจุดศูนย์กลางมวลของหุ่นยนต์อยู่ที่พิกัด O_0 เมื่อเทียบกับระบบพิกัดเฉื่อยในกรอบอ้างอิง O

สมการพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์คาน้ำได้ถูกพัฒนาและนำเสนอในหลายรูปแบบในการศึกษานี้เราจะพิจารณาสมการพลศาสตร์แบบหกองศาอิสระจาก Fossen (1994) ดังในสมการที่ (1) และ (2)

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (1)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (2)$$

เมื่อเวกเตอร์ $v = [u, v, w, p, q, r]^T$, $\eta = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$, $\tau = [X, Y, Z, K, M, N]^T$ โดยที่เวกเตอร์ v ประกอบด้วยความเร็วเชิงเส้น (u, v, w) และ ความเร็วเชิงมุม (p, q, r) ในแนวแกนอ้างอิงเมื่อเทียบกับระบบพิกัด O_0 ส่วนเวกเตอร์ η ประกอบด้วยตำแหน่ง (x, y, z) และองศาการหมุน (φ, θ, ψ) รอบแกนอ้างอิงเมื่อเทียบกับระบบพิกัด O_0 และส่วนเวกเตอร์ τ คือแรงในแนวเชิงเส้น (X, Y, Z) และโมเมนต์ในแนวเชิงมุม (K, M, N) ที่กระทำรอบแนวแกนอ้างอิงเมื่อเทียบกับระบบพิกัด O_0 โดยที่เมทริกซ์ $J(\eta)$ คือเมทริกซ์จาโคเบียน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นกับความเร็วเชิงมุม, $M =$

$M_{RB} + M_A$ คือเมทริกซ์ความเฉื่อย (Inertia) รวมกับมวลรวมของน้ำ $M_A C(v) = C(v)_{RB} + C(v)_A$ คือเมทริกซ์ของความเร่งแบบคอริโอลิส (Coriolis) รวมทั้งแรงเหวี่ยงเพิ่มของน้ำ, $D(v) = D_{quad}(v) + D_{lin}(v)$ คือเมทริกซ์ของความหน่วง (Damping), และ $g(\eta)$ คือเวกเตอร์ของแรงโน้มถ่วงในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการควบคุมแยกกันอิสระในแต่ละแนวแกนเพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมโดยใช้สมมติฐานที่ว่า

1) แรงลอยตัวกับน้ำหนักของหุ่นยนต์จะต้องสมดุลกันเสมอซึ่งจะทำให้หุ่นยนต์อยู่ในจุดสมดุลที่มีมุม roll(ϕ, p) และ pitch(θ, q) มีค่าเท่ากับศูนย์

2) ผลกระทบที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์คาน้ำคือคลื่น แรงลอยตัว และโมเมนต์การหันเห

3.1 ศึกษาสมการแบบจำลองการเคลื่อนที่ในระนาบแนวนอน

ในส่วนแรกจะศึกษาการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์คาน้ำ VideoRayIII ในระนาบแนวนอน เมื่อพิจารณาความเร็วของการเคลื่อนที่ที่หน้าหรือหลัง (u) และ ความเร็วของการเคลื่อนที่ซ้ายหรือขวา (v) และการหมุนรอบแกน Z (r) ที่ประกอบด้วยสมการดังนี้

$$m_{11}\dot{u} = -m_{22}vr + X_u u + X_{u|u}|u| + X \quad (3)$$

$$m_{22}\dot{v} = -m_{11}ur + Y_v v + Y_{v|v}|v| \quad (4)$$

$$I_r \dot{r} = N_r r + N_{r|r}|r| + N \quad (5)$$

เมื่อ m_{11} คือความเฉื่อยในแนวแกน X , m_{22} คือความเฉื่อยในแนวแกน Y , I คือโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน Z , $X_u, X_{u|u}$ คือค่าสัมประสิทธิ์อุทกพลศาสตร์ในสมการเชิงเส้นและกำลังสองทิศทางที่พุ่งไปข้างหน้าปะทะคลื่นแรง, และ $Y_v, Y_{v|v}$ คือค่าสัมประสิทธิ์อุทกพลศาสตร์ในสมการเชิงเส้นและกำลังสองทิศทางด้านข้างและ X คือแรงภายนอกที่กระทำที่เกิดขึ้นมาจากแรงคลื่นที่เข้าปะทะทางด้านหน้า และ N คือแรงบิด

ภายนอกที่กระทำกับหุ่นยนต์รอบแกน Z โดยค่าคุณสมบัติต่างของหุ่นยนต์ VideoRay ในแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ทางด้านล่างนี้

ตารางที่ 1 คุณสมบัติต่างของหุ่นยนต์ VideoRayIII

Parameter	Value	Units	Description
L	0.36	M	Vehicle Length
W	0.35	M	Vehicle Width
H	0.23	M	Vehicle Height
I_{xx}	0.02275	kg.m ²	Moment of Inertia
I_{yy}	0.02391	kg.m ²	Moment of Inertia
I_{zz}	0.02532	kg.m ²	Moment of Inertia
F_{tf}	36	N	Thrust Force

ตารางที่ 2 (ต่อ) คุณสมบัติต่างของหุ่นยนต์ VideoRayIII

Added Mass	X_u	Y_v	Z_w	K_p	M_q	M_r
Analytical	1.94	6.05	3.95	3.26×10^{-2}	1.75×10^{-2}	3.21×10^{-2}
Linear drag coefficient	X_u	Y_v	Z_w	K_p	M_q	N_r
Analytical	2.30	8.01	5.81	0.0009	0.0012	0.0048
Quadratic drag coefficient	$X_u u $	$Y_v v $	$Z_w w $	$K_p p $	$M_q q $	$N_r r $
Analytical	8.28	23.69	20.52	0.0048	0.0069	0.0089

3.2 ศึกษาสมการแบบจำลองการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง

ในส่วนที่สองจะศึกษาการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์คาน้ำ VideoRayIII ในระนาบแนวตั้งเมื่อพิจารณาความเร็วของการเคลื่อนที่ขึ้นหรือลง(ในแนวแกน z) มีสมการดังนี้

$$m_{33}\dot{w} = Z_w w + Z_w |w| |w| + Z \quad (6)$$

เมื่อ m_{33} คือความเฉื่อยในแนวแกน (z), Z_w คือค่าสัมประสิทธิ์ทางอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics) ในสมการเชิงเส้น $Z_w |w|$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ อุทกพลศาสตร์ ในทิศทางลอยตัวกำลังสอง, Z คือแรงยกตัวจากภายนอกที่กระทำกับหุ่นยนต์

3.3 ระบบควบคุมหุ่นยนต์คาน้ำ

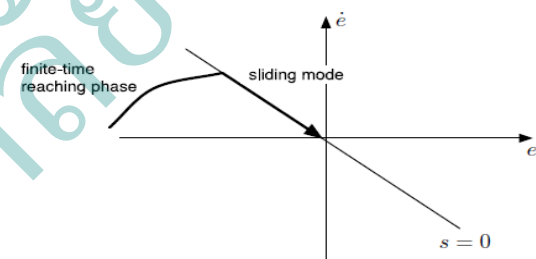
3.3.1 การควบคุมแบบ PID เป็นการรวมการควบคุมแบบสัดส่วน ร่วมกับแบบอินทิกรัล และร่วมกับแบบอนุพันธ์เข้าด้วยกัน โดยมีสัญญาณผิดพลาดเป็นอินพุต

ในการขับเคลื่อน $e(t)$ และ สัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุม $u(t)$ เพื่อใช้บังคับแรงผลักดันจากมอเตอร์ ดังสมการที่ (7)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (7)$$

โดยที่ K_p เป็นอัตราขยายเชิงสัดส่วน, K_i เป็นอัตราขยายเชิงอินทิกรัล, และ K_d เป็นอัตราขยายเชิงอนุพันธ์

3.3.2 การการควบคุมแบบ SMC หลักการของวิธีการควบคุมแบบสไลด์คือ การควบคุมผลรวมตัวแปรค่าผิดพลาด ($s = \dot{e} + \lambda e$) ให้เคลื่อนที่เข้าสู่ระนาบสไลด์ (Sliding Plane) เมื่อตัวแปรค่าผิดพลาดเข้าสู่ระนาบสไลด์ และถูกควบคุมให้เคลื่อนที่อยู่บนระนาบสไลด์ในทิศทางเข้าสู่ศูนย์ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟแสดงการเคลื่อนที่แบบสไลด์

สมการเคลื่อนที่ในแนวตั้งในสมการที่ (6) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสองซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$m\ddot{\eta} + d_1\dot{\eta} + d_2|\dot{\eta}| = \tau \quad (8)$$

เมื่อ m, d_1 และ d_2 คือตัวแปรที่ไม่ค่าที่แน่นอน ดังนั้นในการออกแบบกฎการควบคุม (Control Law) จะใช้ Lyapunov Function (V) ซึ่งจะมีเงื่อนไขของเสถียรภาพของระบบ ก็ต่อเมื่อ 1. $V > 0$ เสมอ และ 2. $\dot{V} \leq 0$ เสมอดังนั้นถ้าพิจารณา Lyapunov Function เป็น $V = \frac{1}{2} m s^2$ โดยที่ $V = \frac{1}{2} m s^2 > 0$ เสมอและเพื่อให้เงื่อนไข $\dot{V} = m s \dot{s}$ เป็นจริงจะจัดรูปแบบสมการที่ (8) ใหม่และอนุพันธ์ของผลรวมค่าความผิดพลาด s แล้วจะได้กฎการควบคุม ดังนี้

$$\tau = m\ddot{\eta}_r + \hat{d}_1\dot{\eta} + \hat{d}_2|\dot{\eta}|\dot{\eta}_r - K_d s - K_{sgn}(s) \quad (9)$$

เมื่อ K_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของความหน่วง (Damping coefficient) ($K_d > 0$), K = ค่าอัตราขยายของการสวิตช์ (switching gain), $\hat{m}$ = ค่าประมาณของ m , $\hat{d}_1$ = ค่าประมาณของ d_1 , $\hat{d}_2$ = ค่าประมาณของ d_2 และ

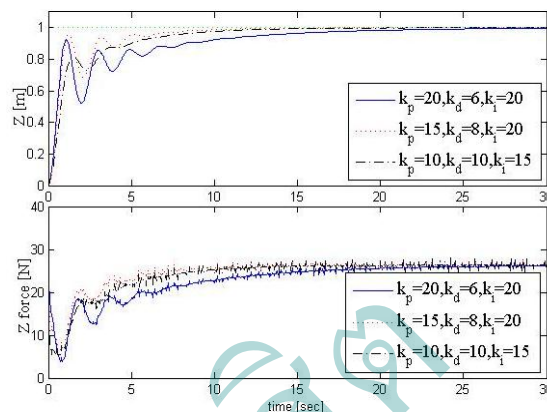
$$\text{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & \text{if } s > 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ -1 & \text{กรณีอื่นๆ} \end{cases}$$

นอกจากนั้นค่าความคลาดเคลื่อน (e) ในการเคลื่อนที่ตามตัวแปรอ้างอิงที่กำหนด (η_d) เป็น $e = \eta - \eta_d$ แล้ว $\dot{e} = \dot{\eta} - \dot{\eta}_d$ เมื่อกำหนดให้ $\dot{\eta}_r = \dot{\eta}_d - \lambda e$

4. ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์

4.1 ระบบควบคุมระดับความลึกแบบ PID

ในระบบควบคุมแบบ PID มีอัตราขยายด้วยกันสามตัวหลัก คือ k_p , k_d , และ k_i จึงได้ทำการปรับค่าตัวแปรอัตราขยายเพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ในแกน Z หรือ ควบคุมระดับความลึก ขั้นแรกได้ทำการทดลองปรับอัตราขยายแบบสัดส่วน (k_p) ให้เพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 15 และ 20 ตามลำดับซึ่งจะช่วยให้ได้ผลตอบสนองที่ไวขึ้นแต่ก็ทำให้ overshoot ที่สูงขึ้นเช่นกัน ลำดับที่สองได้ทำการทดลองปรับอัตราขยายแบบอนุพันธ์ (k_d) ให้เพิ่มขึ้นจาก 6 เป็น 8 และ 10 เมื่อให้ค่า $k_p=15$ การเพิ่มค่า k_d นั้นจะทำให้ผลตอบสนองช้าลงแต่จะสามารถลดผลตอบสนองที่เป็น overshoot ลำดับที่สามได้ทำการทดลองปรับอัตราขยายแบบปริพันธ์ (k_i) ให้เพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 15 และ 20 เมื่อให้ค่า $k_p=15$ และ $k_d=8$ นั้นจะช่วยขจัดความผิดพลาดในช่วงคงที่ตอนท้าย (steady-state error) เมื่อได้ปรับอัตราขยายที่เหมาะสมจะสามารถช่วยลดผลตอบสนองที่เป็น overshoot และมีค่าความผิดพลาดตอนท้ายเป็นศูนย์

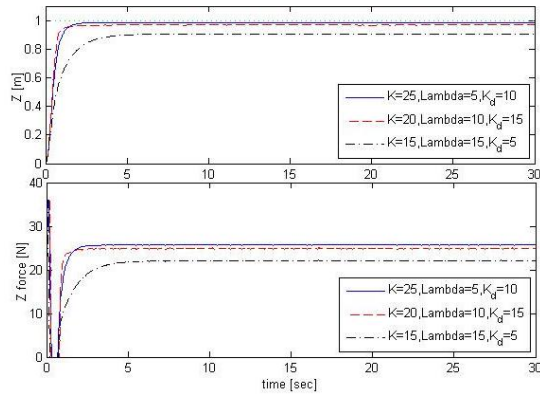


รูปที่ 4 ผลตอบสนองต่อคำสั่งแบบ step เมื่อปรับค่าอัตราขยาย k_i , k_p และ k_d

จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราขยายที่เหมาะสมที่นำมาเลือกใช้ในการควบคุมความลึกแบบ PID คือ $k_p=15$, $k_d=8$ และ $k_i=20$ ซึ่งมีผลตอบสนองไวและ overshoot น้อย

4.2 ระบบควบคุมระดับความลึกแบบ SMC

เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุดในการเคลื่อนที่ในแกน z สำหรับการควบคุมแบบ SMC จะทำการปรับค่าอัตราขยายขั้นแรก ปรับค่าอัตราขยาย $K=15$ 20 และ 25 ตามลำดับ ขั้นที่สองปรับค่าอัตราขยาย $\lambda=5$ 10 และ 15 โดยเลือกค่า $K=25$ ที่ดีที่สุดขั้นที่สามปรับค่าอัตราขยาย $k_d=5$ 10 และ 15 โดยเลือกค่า $K=25$, $\lambda=5$ ที่ดีที่สุดจากรูปที่ 5 จะแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราขยายที่เหมาะสมในการทดลองคือ $K=25$, $\lambda=5$ และ $k_d=10$ ซึ่งตอบสนองไวที่สุด และ ไม่มี overshoot



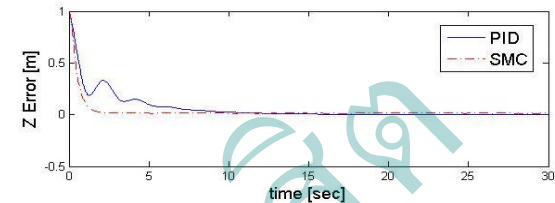
รูปที่ 5 ผลตอบสนองต่อคำสั่งแบบ step เมื่อปรับค่าอัตราขยาย K , λ และ k_d

ผลอัตราขยายของการสวิตช์ (K) ให้สูงขึ้นจะช่วยทำให้ผลตอบสนองไวขึ้นและเข้าสู่ค่าสั่งได้รวดเร็วและยังจะช่วยลดค่าความผิดพลาดในช่วงท้ายให้น้อยลงการเพิ่มค่า λ ช่วยให้ผลตอบสนองที่ไวขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่จะมีผลทำให้คลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ในแกน z น้อยลงแต่แรงที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน z ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 27N ดังนั้นต้องเลือกอัตราขยายให้เหมาะสมแต่สังเกตได้ว่าแรงของระบบควบคุมแบบ PID และ SMC ยิ่งมากจะสามารถทำให้ผลตอบสนองที่ไวขึ้นแต่ในการออกแบบนั้นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการทดลองดังนั้นในแบบจำลองทางพลศาสตร์ของ VideoRayIII จึงได้ใส่ฟังก์ชัน Saturation ของแรงผลักจากใบพัดไว้ไม่เกิน ± 36 N ซึ่งได้ระบุในคุณสมบัติของใบพัดขับเคลื่อน

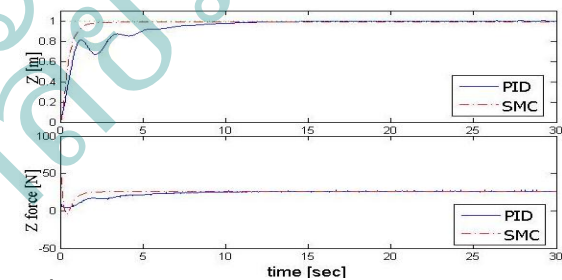
4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการควบคุมระดับความลึกแบบ PID กับแบบ SMC ในส่วนของเวลาที่ให้ค่าความผิดพลาดเข้าใกล้ศูนย์

ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม ที่มีช่วงการรบกวนระหว่าง ± 0.001 m มากระทำกับ ตำแหน่งของหุ่นดำน้ำในแนวแกน Z ดังนั้นควบคุมแบบ PID

ที่มีค่า $k_p = 15$, $k_d = 8$, และ $k_i = 20$ จากหัวข้อ 4.1 และการควบคุมแบบ SMC ที่มีค่า $K = 25$ และ $\lambda = 5$ จากหัวข้อ 4.2 เมื่อหุ่นดำน้ำถูกสั่งให้เคลื่อนที่ถึงลงไปใต้น้ำ 1 เมตรอย่างฉับพลัน



รูปที่ 6 เปรียบเทียบเวลาที่ให้ค่าความผิดพลาด ของการเคลื่อนที่ในแกน z เข้าใกล้ศูนย์ สำหรับระบบควบคุมแบบ PID และแบบ SMC



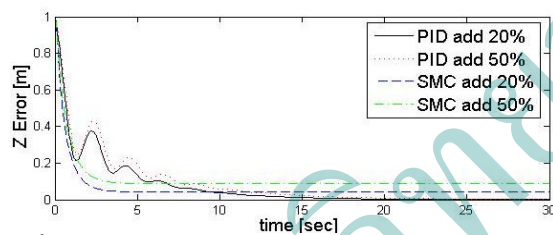
รูปที่ 7 เปรียบเทียบการควบคุมตำแหน่งในแนวแกน Z แบบ PID กับแบบ SMC เมื่อระดับความลึกนั้นถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวน เช่น กระแสน้ำ

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบ SMC จะตอบสนองเร็วและไม่เกิด overshoot เมื่อเทียบกับการควบคุมแบบ PID ส่งผลทำให้ค่าความผิดพลาดของระดับความลึกเข้าใกล้ศูนย์ได้ไวที่สุดแม้จะมีสัญญาณรบกวนมากจะทำดังในรูปที่ 7

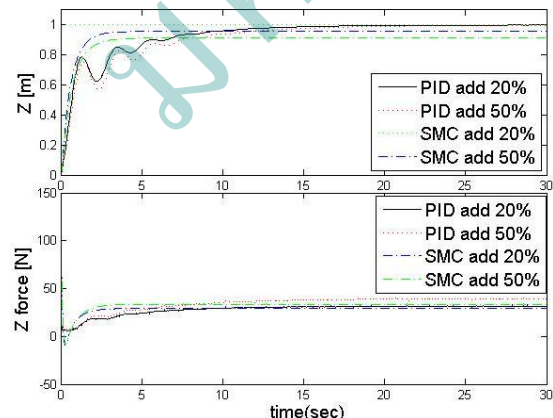
4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุมแบบ PID และ SMC ต่อผลการแปรปรวนของพารามิเตอร์ M_{33} และ Z_w และ Z_{ww} เป็นปริมาณ +20% และ +50% จากค่าประมาณ

เมื่อค่าพารามิเตอร์ของมวลและค่าสัมประสิทธิ์อุทกพลศาสตร์เพิ่มขึ้นจากค่าประมาณที่ใช้ในสมการ (9) เป็น 20% และ 50% เมื่อหุ่นดำน้ำถูกสั่ง

ให้เคลื่อนที่ลึกลงไปในน้ำ 1 เมตรอย่างฉับพลันจะทำให้ผลตอบสนองของการเคลื่อนที่ช้าลงและจะเกิด overshoot มากขึ้นสำหรับระบบควบคุมแบบ PID ซึ่งจะทำให้เข้าใกล้ศูนย์ได้ช้าลง สำหรับระบบควบคุมแบบ SMC ก็จะมีผลตอบสนองที่ช้าลงและจะมีค่าความผิดพลาดของระดับความลึกในช่วงท้ายที่ไม่เป็นศูนย์ เนื่องจากทอมที่มีพจน์อุทกพลศาสตร์ในกฎการควบคุมซึ่งเป็นแบบไม่เชิงเส้นจะไม่หักล้างกับระบบพลศาสตร์ของหุ่นดำน้ำให้หมดไปได้แต่ข้อดีคือจะไม่เกิด overshoot ในการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 จะแสดงให้เห็นว่า ระบบควบคุมแบบ PID สามารถที่จะควบคุมความลึกที่ 1 เมตรได้ ระบบควบคุมแบบ SMC จะไม่สามารถทำความลึกที่ 1 เมตรได้



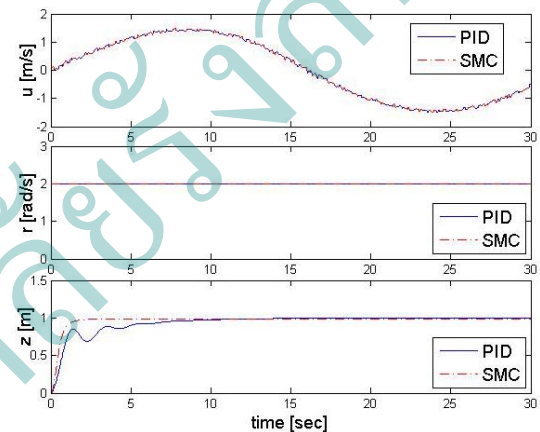
รูปที่ 8 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาด ของการเคลื่อนที่ในแกน z เข้าใกล้ศูนย์ เมื่อใช้การควบคุมแบบ PID และ SMC เมื่อพารามิเตอร์ M_{33} , Z_w และ Z_{ww} นั้นเพิ่มขึ้นพร้อมกัน 20% และ 50% จากค่าประมาณ



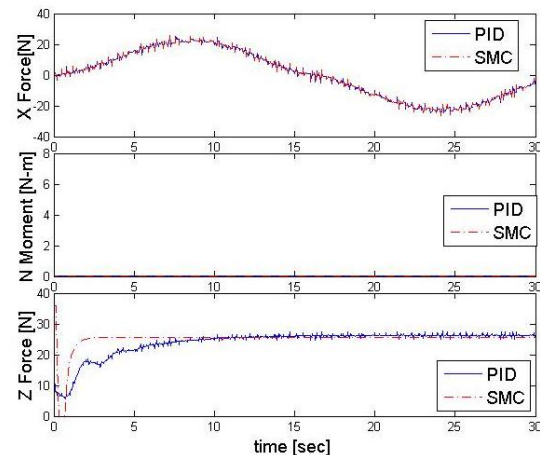
รูปที่ 9 เปรียบเทียบการควบคุมตำแหน่งในแนวแกน Z แบบ PID กับแบบ SMC เมื่อพารามิเตอร์ M_{33} , Z_w และ Z_{ww} นั้นเพิ่มขึ้นพร้อมกัน 20% และ 50% จากค่าประมาณ

4.5 การเปรียบเทียบระหว่าง การควบคุมแบบ PID กับ การควบคุมแบบ SMC ในการเคลื่อนที่แบบ 3 มิติ

เมื่อกำหนดให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน x หรือ u เป็นแบบแกว่งกลับไปมาแบบฟังก์ชัน sine และอัตราการหมุนเป็นแบบคงที่ 2 rad/s และ หุ่นดำน้ำถูกสั่งให้เคลื่อนที่ลึกลงไปในน้ำ 1 เมตรอย่างฉับพลันและให้ค่าอัตราขยายเหมือนกับในหัวข้อที่ 4.4 ถ้าหุ่นยนต์ดำน้ำเริ่มเคลื่อนที่จากหยุดนิ่ง



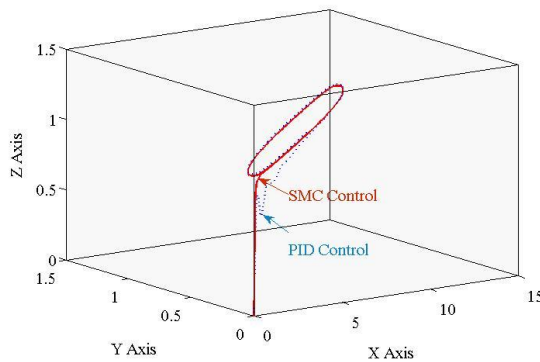
รูปที่ 10 ความเร็วในแนวแกน x (u), ความเร็วเชิงมุม (r) และการเคลื่อนที่ในแนวแกน z (w) จากการควบคุมแบบ PID และ SMC



รูปที่ 11 แรงในแกน x โมเมนต์รอบแกน z (N) และแรงในแกน z จากการควบคุมแบบ PID และ SMC

ผลที่ได้ดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11 การเคลื่อนที่ในระนาบ xy จะเคลื่อนที่หมุนวนเหมือนวงรีและส่วนการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง จะเคลื่อนที่ไปยังระดับความลึก

1 เมตร ภายในเวลา 10 วินาที เมื่อถูกควบคุมด้วยระบบการควบคุมแบบ PID และแบบ SMC



รูปที่ 12 การเคลื่อนที่ใน 3 มิติ เมื่อใช้ระบบควบคุมระดับความลึกแบบ PID และ SMC

จากรูปที่ 12 จะแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ควบคุมด้วยระบบควบคุม PID และ SMC สามารถรักษาระดับความลึกได้คงที่ 1 เมตร และจะเคลื่อนที่หมุนวนเป็นวงรีเนื่องมาจากมีค่าความเร็วเชิงมุมที่คงที่ $r = 2 \text{ rad/s}$ และ การเคลื่อนที่ในแกน X นั้นจะส่ายไป-มา โดยจะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ทั้งในระนาบ xy และระดับความลึกมีค่าน้อยมาก โดยที่ระบบควบคุมแบบ SMC จะให้ผลตอบสนองในการเคลื่อนที่ในแนวแกน z ที่ไวและแรงขับเคลื่อนจากระบบควบคุมทั้งสองแบบมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

5. บทสรุป

เมื่อเปรียบเทียบการควบคุมแบบ PID และ SMC จะเห็นว่าระบบควบคุมแบบ SMC มีผลตอบสนองที่เร็วและไม่เกิด overshoot เมื่อเทียบกับระบบควบคุมแบบ PID แม้ว่าจะมีสัญญาณรบกวนจากภายนอกที่มากระทำกับสัญญาณป้อนกลับแต่ในกรณีที่ไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ทางอุทกพลศาสตร์ที่แน่นอน เช่น M_{33} , Z_w และ Z_{ww} พร้อมกันหลายๆตัวระบบควบคุมแบบ PID และ SMC จะมีผลตอบสนองที่ช้าลง แต่

สำหรับระบบควบคุมแบบ SMC มีค่าความผิดพลาดที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการหักล้างของเทอมแบบไม่เชิงเส้นที่มาจากพจน์ที่มีค่าอุทกพลศาสตร์นั้น ไม่ถูกหักล้างอย่างสมบูรณ์ แม้ว่าจะปรับอัตราขยายดีที่สุดในเชิงต่างจากระบบควบคุมแบบ PID ที่ยังสามารถควบคุมความลึกในระดับที่กำหนดได้อย่างแม่นยำ หรือ ระบบควบคุมแบบ PID นั้นจะไม่ไวต่อตัวแปรที่ไม่รู้ค่านอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ใน 3 มิติที่เกิดขึ้นได้จากการควบคุมแรงในแกน x และ z และ โมเมนต์รอบแกน z ไปพร้อมกันโดยระบบควบคุมทั้งสองแบบมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ในอนาคตจะนำระบบควบคุมทั้งแบบ SMC และ PID ไปประยุกต์ใช้งานกับหุ่นยนต์ดำน้ำจริงต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- Jantapremjit, P. (2011). "Design and Development of a Remotely Operated Vehicle", paper presented in The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering 19-21 October, 2011, Krabi, Thailand.
- Timpitak, S. and Prempraneerach, P. (2012). "Remotely Operated Vehicle with Depth Control" paper presented in the 3rd TSME International Conference on Mechanical Engineering 24-27 October 2012, Chiang Rai Thailand.
- Liu H., Gong, Z.(2008). "Upper Bound Adaptive Learning of Neural Network for the Sliding Mode Control of Underwater Robot" ICACTE '08. International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering, 20-22 Dec.2008, Phuket Thailand.

- Fossen, T. I. (1994). Book “Guidance and Control of Ocean Vehicles”, ISBN: 0 471 94113 1 , John Wiley & Sons, New York.
- Wang, W. (2006). Autonomous of a Differential Thrust Micro ROV. Master’s thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada 2006.
- Tang, Z. D. , Zhou J., Bian, X., and Jia, H. (2010). Simulation of optimal Integral sliding mode controller for the depth control of AUV. Proceedings of the 2010, IEEE International Conference on Information and Automation June 20 - 23, Harbin, China.