

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎี

2.1 บทนำ

เทคโนโลยีด้านยานใต้น้ำขนาดเล็กได้มีการวิวัฒนาการเรื่อยมานับตั้งแต่ ปี ค.ศ.1580 ที่ William Bourne ได้ตีพิมพ์ต้นฉบับเรือดำน้ำฉบับแรก [2] ยานใต้น้ำสามารถจำแนกตามวัตถุประสงค์การใช้งานได้ 3 ประเภท [3] ได้แก่

1) ประเภทใช้ในการสำรวจ (Observation class) ออกแบบให้มีน้ำหนักเบา เพื่อนำกล้องและเซนเซอร์ไปยังเป้าหมาย สำหรับเก็บข้อมูลตามผู้ใช้ต้องการ

2) ประเภทสำหรับการปฏิบัติงาน (Work class) มักมีโครงสร้างขนาดใหญ่ มีเครื่องมือหยิบจับ (Manipulator) มีใบพัดไฮดรอลิกส์และเครื่องมือขนาดใหญ่ เช่นงานโครงสร้างใต้น้ำขนาดใหญ่ งานหยิบยกเครื่องมือหนักใต้น้ำ

3) ประเภทใช้งานชั้นพิเศษ (Special use) ออกแบบเฉพาะสำหรับงานแต่ละงาน เช่น ยานฝังกลบสายเคเบิลใต้น้ำ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ประเภทของยานใต้น้ำ [3]

ประเทศไทยยังขาดองค์ความรู้และเทคโนโลยีด้านยานใต้น้ำ แต่ความต้องการใช้งานยานควบคุมใต้น้ำ (Remotely Operated Vehicle; ROV) กลับมีสูงขึ้น ตัวอย่างเช่น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ใช้ยานควบคุมใต้น้ำสำหรับการตรวจสอบเขื่อน บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ใช้ยานควบคุม

ได้นำในการสำรวจท่อแก๊ส [4] กองทัพเรือมีความต้องการยานใต้น้ำขนาดเล็กสำหรับฝึกปราบเรือดำน้ำและการสำรวจต่างๆ [5, 6] เป็นต้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงความก้าวหน้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีของยานใต้น้ำขนาดเล็ก ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Control) ระบบควบคุมสนามความเร็ว (Velocity Field Control; VFC) การประมาณค่าแบบลำดับการลดรูปสถานะ (Reduce – Order State Estimators) การควบคุมแบบเชิงเส้นกำลังสอง (Linear Quadratic Regulator; LQR) และการควบคุมแบบสนามความเร็วช่วยแอลคิวอาร์ควบคุมการติดตามเส้นทาง (VFC assist LQR Path Tracking Control)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีของการควบคุมอัตโนมัติได้ถูกพัฒนาในประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรปตะวันตก และประเทศรัสเซีย [7] ในสหรัฐอเมริกา ระบบป้อนกลับถูกพัฒนาขึ้นในบริษัทโทรศัพท์และบริษัทอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ผู้ที่ทำงานด้านนี้เช่น Bode, Nyquist และ Block ที่ห้องปฏิบัติการของ Bell Telephone Laboratory ซึ่งการทำงานเหล่านี้มักจะทำในโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ใช้อธิบายการทำงานของเครื่องขยายป้อนกลับ (Feedback Amplifiers) ในรูปของ Bandwidth และตัวแปรด้านความถี่อื่นๆ แตกต่างจากนักคณิตศาสตร์และวิศวกรของประเทศรัสเซียซึ่งนิยมใช้โดเมนเวลา (Time Domain) ในการอธิบายสมการเชิงอนุพันธ์ของระบบควบคุม ในช่วงนี้เองระบบควบคุมอัตโนมัติได้พัฒนาไปใช้ในกิจการด้านการทหาร เช่น ระบบควบคุมอากาศยาน ระบบควบคุมการยิง ระบบควบคุมเรดาร์ รวมทั้งเรือดำน้ำ จากนั้นมาได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จากระบบที่ทำงานอย่างง่ายจนกระทั่งมีการนำระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Control) มาประยุกต์ใช้ให้ยานใต้น้ำสามารถเคลื่อนที่ไปได้ด้วยตัวเอง ตัวอย่างของงานวิจัยในต่างประเทศมีดังนี้

ในปี ค.ศ.2003 Butcher และคณะ[8] แห่ง Virginia Polytechnic Institute and State University (VPI) ได้พัฒนายานใต้น้ำชื่อ Proteus เพื่อใช้ในแข่งขัน ซึ่งมีความยาว 2 ฟุต น้ำหนักเบา ใช้มอเตอร์กระแสตรง (dc motor) 12 โวลต์ 4 ตัว ใบพัดแบบเดียวกับเครื่องบิน สองตัวหน้าหลังทำหน้าที่ดึงยานขึ้นลงในแนวดิ่ง และสองตัวด้านข้างทำหน้าที่ผลักยานไปข้างหน้าและถอยหลัง Francis และคณะ[9] แห่งห้องปฏิบัติการเครื่องจักรกลอัจฉริยะ ณ มหาวิทยาลัยฟลอริดา (Machine Intelligence Laboratory University of Florida) ได้สร้างเรือดำน้ำอัตโนมัติชื่อ SubjuGator ใช้ในการแข่งขัน มีขนาด 24×16×14 นิ้ว น้ำหนัก 32 ปอนด์ มีจุดศูนย์ถ่วงอยู่ที่ 6/17 นิ้ว ของท่อ ใช้ชุดขับเคลื่อน (Thruster) ขนาด 80 วัตต์ 24 โวลต์ กับใบพัดขนาด 3 นิ้ว โดยออกแบบให้ดำน้ำได้ลึก 20 ฟุต ได้ติดตั้งเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ที่จำเป็นเข้าไปสำหรับการควบคุม



รูปที่ 2.2 ยานใต้น้ำ SubjuGator [9]

Kennedy และคณะ [10] นักวิจัยของมหาวิทยาลัย Victoria ได้ทำการพัฒนายานใต้น้ำอัตโนมัติ สามารถติดตามและโต้ตอบกับผู้ควบคุม สำหรับรวบรวมข้อมูลวิทยาศาสตร์ใต้น้ำ ระบบนี้ยังต้อง พัฒนาการแสดงตำแหน่งของยาน การทำนายตำแหน่งของยานเพื่อควบคุมการดำให้มีความคล่องตัว มากขึ้น Ridao และคณะ [11] แสดงการเปรียบเทียบผลระหว่างวิธีการตรวจสอบบนพื้นฐานการ ทำนายความผิดพลาดที่ความเร่งต่ำสุด (minimization of the acceleration prediction error) กับความ ผิดพลาดขั้นที่หนึ่งของความเร็วต่ำสุด (minimization of the velocity one step prediction error) ของ การตรวจสอบแบบปิด (off-line) ในรูปแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ของยาน URIS (Underwater Robotic Intelligent System) ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการทำนายความผิดพลาดที่ความเร่งต่ำสุดได้ผล ดีกว่าการทำนายจากความเร่งต่ำสุด Silvestre และคณะ [12] มุ่งพิจารณาการควบคุม UUV ในขั้นแรก เขาได้อธิบายการออกแบบการหาค่าของระบบควบคุมในแนวระนาบของยานใต้น้ำอัตโนมัติชื่อ Infante ใช้แบบแผนอัตราขยายของการควบคุมที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งตั้งค่าและตัดค่าระบบควบคุม ป้อนกลับทางออก ความเป็นเชิงเส้นทางภาคสติก ใช้การออกแบบเมตริกเชิงเส้นที่ไม่เท่ากัน (Linear Matrix Inequality; LMI) บนเทคนิคพื้นฐานตามตาราง โดยความเร็วไปข้างหน้าของยานใต้น้ำ อัตโนมัติบนพื้นฐานของ LMI การเข้าใจลักษณะของปัญหา ซึ่งไม่สามารถวัดความผิดพลาดของ สถานะได้ ประสิทธิภาพของการออกแบบระบบควบคุมเป็นลำดับขั้นของการทดสอบในทะเล Azores Feng และ Allen [13] พิจารณาการออกแบบควบคุมความเร็วจากการลด Order H-infinity ของการไป ข้างหน้าและการดำลึกอัตโนมัติ ของยานรูปร่างแบบตอร์ปิโด (Torpedo) ในห้องทดลอง AUV Subzero III ซึ่งการลดลำดับการควบคุม เป็นความต้องการจากข้อจำกัดของพื้นที่ในการคำนวณ แสดงถึงความ นุ่มนวล และประสิทธิภาพที่ยอมรับได้ จากการออกแบบระบบควบคุมด้วยการลดลำดับแบบ Order H-infinity Kim และ Yuh [14] ได้วางกรอบการพัฒนาและการทดสอบการควบคุมแบบเวลาจริง

(Real-Time) สำหรับยานใต้น้ำกึ่งอัตโนมัติ (Semi-Autonomous Underwater Vehicle; SAUVIM) การทำงานที่สัมพันธ์กันของยานกับระบบเซ็นเซอร์ (Sensor) และตัวขับ (Actuator) การซ่อมและการประกอบ รวมทั้งได้อธิบายถึงอุปกรณ์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ควบคุมยาน Loebis และคณะ [15] อธิบายระบบเครื่องมือนำทางที่ชาญฉลาดร่วมกับ Kalman Filters ปรับให้เข้ากับ Fuzzy-Logic เพื่อรวมข้อมูลจาก GPS และเซ็นเซอร์ ระบบใช้ค่าพื้นฐานของตอร์ปิโด (Torpedo) แสดงผลลัพธ์ที่มั่นใจได้ใน Fuzzy-Logic เพื่อปรับปรุงการประมาณค่าแบบง่าย ๆ และ Extended Kalman Filters ทำให้สามารถเพิ่มความแม่นยำกับ GPS (Global Position System) และ IMS (Inertial Measurement System) Kinsey และ Whitcomb [16] อธิบายการพัฒนาและทดสอบยาน DVLNAV และรวมระบบนำทางสำหรับดำน้ำ ได้พัฒนาให้สามารถวางลูกตุ้มที่เป้าหมายได้อย่างแม่นยำ Kondo และ Ura อธิบายระบบการมองเห็นใต้น้ำ ซึ่งใช้พื้นฐานจากระบบสร้างภาพ ประกอบด้วยกล้อง Colour CCD และ เลเซอร์ชี้เป้าเพื่อการติดตามวัตถุ เลเซอร์ช่วยให้ระบบการมองเห็นแบบเวลาจริง (Real-Time) และทำหน้าที่ส่งภาพไปวิเคราะห์ Omerdic และ Toal [17] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการวินิจฉัยความผิดพลาดของชุดขับเคลื่อนและปรับให้เหมาะสมรูปแบบใหม่ๆ ซึ่งใช้การรวมของ Fuzzy Logic สร้างแผนที่ขึ้นเอง และรวมกลุ่ม Fuzzy สำหรับแยกความผิดพลาด เพื่อให้ใช้พลังงานน้อยที่สุด ทั้งที่เป็นความผิดพลาดอิสระและความผิดพลาดตามเงื่อนไข มีส่วนสำคัญในการพิจารณาการทำงานของเบตเตอร์ ยังชี้ให้เห็นว่าควรทำอย่างไรถ้าชุดขับเคลื่อนทำงานผิดพลาดเพียงตัวเดียว กำหนดค่าแรงดันของชุดขับเคลื่อน ที่ใช้งานต่อไปหรือไม่ทำงาน ช่วยลดความผิดพลาด วินิจฉัยข้อผิดพลาด และแก้ไขข้อผิดพลาด Ippoliti และคณะ [18] ได้ทำการพัฒนาระบบควบคุมพีไอดี (PID Control) ยานใต้น้ำผ่านระบบควบคุมแบบผสม (Hybrid Control) การควบคุมตำแหน่งของยานใต้น้ำเพียงอย่างเดียว การควบคุมพีไอดี ที่เวลาต่างๆ อาจเป็นผลมาจากการตอบสนองที่ไม่ดี วิธีแก้ปัญหาคือใช้ฟังก์ชันของแบบแผนความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regulator; NLR) โดยการต่อกับระบบตรวจสอบจากพีไอดี ทำการตรวจหาทางที่เหมาะสมกับระบบควบคุม ใช้ตรรกศาสตร์ในการตัดสินใจจากตัวเลขที่ได้จากฟังก์ชันการทำนายข้อผิดพลาดที่ทางออก ประสิทธิภาพของการเลือกระบบควบคุมเป็นการจำลองทางตัวเลข Naeem และคณะ [19] ใช้ LQG/ LTR ควบคุมยานใต้น้ำอัตโนมัติด้วยสายเคเบิล ระบบควบคุมแบบเชิงเส้นกำลังสองของเกาส์เซียน (Linear Quadratic Gaussian; LQG) ด้วยการส่งถ่ายย้อนกลับ LQG/ LTR ที่ได้พัฒนาขึ้นซึ่งมีความคงทน (Robust) ยานใต้น้ำขับไปข้างหน้าด้วยระบบนำทางหลายแบบร่วมกัน ใช้สมการความเร็วในการนำทาง ผลลัพธ์จากการจำลองแสดงและเปรียบเทียบระหว่างวิ่งด้วยความเร็วเดียว และวิ่งที่ความเร็วแปรเปลี่ยน

สำหรับความก้าวหน้าของงานวิจัยในประเทศ ประเทศไทยเคยมีเรือดำน้ำประจำการตั้งแต่ 19 กรกฎาคม 2481 มีระวางขับน้ำ 430 ตัน จำนวน 4 ลำ และได้ปลดระวางเมื่อ 30 พฤศจิกายน 2484 หลังจากนั้นก็ไม่มียูบดำน้ำประจำการในกองทัพอีกเลย วีรวัฒน์ วงษ์ดนตรี [5] เล็งเห็นถึงศักยภาพ

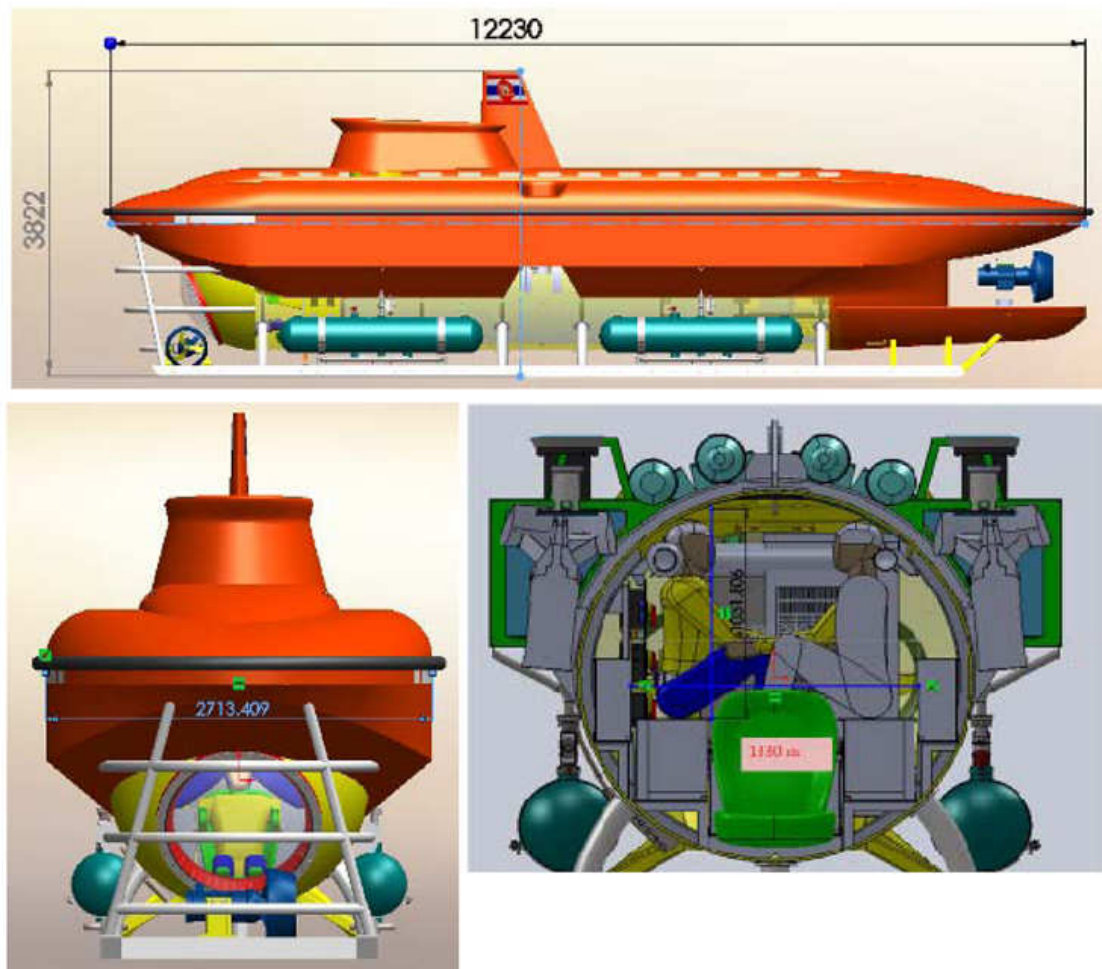
ของเรือดำน้ำ จึงได้ดำเนินโครงการวิจัยเพื่อสร้างต้นแบบยานใต้น้ำสำหรับฝึกปราบเรือดำน้ำ โดยความร่วมมือระหว่างกองทัพเรือร่วมกับภาควิชาวิศวกรรมการบินและอากาศยาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สร้างต้นแบบยานใต้น้ำเพื่อฝึกปราบเรือดำน้ำ มีความยาว 3 เมตร น้ำหนัก 200 กิโลกรัม เคลื่อนที่ด้วยพลังงานจากแบตเตอรี่ มีความเร็วประมาณ 5 น็อต ดำได้ลึกไม่ต่ำกว่า 30 เมตร นานต่อเนื่อง 90 นาที แล่นสลับพื้นปลาในแนวตั้ง เป็นวงแบบก้นหอยโดยใช้สวิทช์แรงดัน (Pressure Switch) เป็นอุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ โดยอาศัยความดันจากน้ำทะเลมาเปิด-ปิดสวิทช์เพื่อตัดต่อกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เข้ามอเตอร์ ใช้ตัวตั้งเวลา (Timer) กำหนดเวลาหยุดและลอยสู่ผิวน้ำ ส่งสัญญาณเสียงใต้น้ำในลักษณะเดียวกับเรือดำน้ำ เพื่อให้เรือพื้นผิวน้ำสามารถตรวจสอบได้ แต่จากการทดสอบพบว่าความเร็วของยานใต้น้ำไม่สามารถตรวจสอบได้และระบบเสียงทำงานอยู่ในระดับไม่น่าพอใจ



รูปที่ 2.3 ยานใต้น้ำเพื่อฝึกปราบเรือดำน้ำของกองทัพเรือ [5]

จากนั้น พงศ์สรร ถวิลประวัติ และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างยานใต้น้ำขนาดเล็ก ขึ้นใช้ภายในประเทศไทย ทำการออกแบบมิติเบื้องต้น กำหนดระบบขับเคลื่อนของยานใต้น้ำ กำหนดความแข็งแรงของโครงสร้าง ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) ได้รับความช่วยเหลือจากต่างประเทศทางด้านเกี่ยวกับวัสดุอุปกรณ์ และงานระบบที่สำคัญเพื่อใช้ในการออกแบบ กำหนดน้ำหนักของตัวเรือเบื้องต้น โดยกำหนดความต้องการของยานไว้ดังนี้คือ บรรทุกผู้โดยสารได้ 3 – 5 นาย ดำน้ำลึกได้ 50 เมตร ความเร็วใต้น้ำโดยประมาณ 5 น็อต ปฏิบัติการใต้น้ำได้ 3 – 5

ชั่วโมง โดยโครงสร้างเรือที่ได้ออกแบบไว้ยาวประมาณ 8 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 เมตร ระบาย
 จัมน้ำเมื่ออยู่ใต้น้ำประมาณ 17 ตัน ระบบขับเคลื่อนรวม 40 กิโลวัตต์ ได้กำหนดแนวทางการ
 ดำเนินการคือ ระบบโครงสร้างตัวเรือสร้างโดยคณะผู้วิจัยภายในประเทศ ระบบขับเคลื่อน (Thruster)
 รวมถึงระบบควบคุมใช้เทคโนโลยีจากต่างประเทศ ระบบไฟฟ้า ระบบบัลลาสต์ ระบบการนำร่อง
 และสื่อสาร ระบบปรับอากาศ รวมถึงระบบเตือนภัยนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ



รูปที่ 2.4 ยานใต้น้ำขนาดเล็กบรรทุกผู้โดยสารได้ 3 ถึง 5 คนของกองทัพเรือ [6]

สำหรับการวิจัยและพัฒนาด้านเรือดำน้ำของไทยในนอกเหนือจากกองทัพเรือและ
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์แล้วยังมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และสถาบัน
 เทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology; AIT) ที่ได้ทำงานวิจัยและพัฒนายานใต้น้ำ ใน
 ปี พ.ศ. 2547 กนกวรรณ กลิ่นรอง และคณะ [20] โดยมี ศโรช ไตรเมฆ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ได้ศึกษา
 ถึงการสร้างเรือดำน้ำขนาดเล็กแบบใช้ถังอับเฉาในการลอยตัวขึ้นและจมลง คำนวณความแข็งแรงด้วย
 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับเรือดำน้ำ ควบคุมการทำงานด้วยวิทยุบังคับ ในปี

เดียวกันนี้ เอกทิส อัสวมิตรเสถียรและ คณะ [21] โดยมี สโรช ไทรเมฆ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ได้วิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมการรักษาเสถียรภาพของเรือดำน้ำ โดยศึกษาถึงผลกระทบต่อการเสถียรภาพการทรงตัวของเรือดำน้ำ เสนอแนะวิธีแก้ไขโดยใช้ลักษณะทางกล คือ แยกพื้นที่ภายในถังอับเฉาเป็นส่วนๆ เพื่อลดการโคลงของเรือ และแก้ไขโดยใช้ระบบควบคุม จากเซ็นเซอร์วัดความดัน 4 ตัว ร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ทำการควบคุมการ เปิด-ปิด โซลินอยด์วาล์ว ควบคุม น้ำและอากาศในถังอับเฉาให้เป็นไปตามเงื่อนไข ในปี 2552 ทศพล แจ่มน้อย และ สโรช ไทรเมฆ [22] ได้ศึกษาการจำลองการควบคุมเสถียรภาพของระนาบ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการรักษาสมดุลของยานใต้น้ำ



รูปที่ 2.5 ระบบการควบคุมการรักษาเสถียรภาพของระนาบของยานใต้น้ำ [22]

นอกจากนี้ ชีรยุทธ ชาติชนะยืนยง และ มนุกิจ พานิชยกุล [23] ภาควิชาเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology; AIT) ได้พัฒนารถน้ำอัตโนมัติชื่อ “ชาละวัน” สร้างจากท่อ พีวีซี ขนาด 6 นิ้ว ยาว 72 เซนติเมตร ต่อใจ โร เข้มทิส เซนเซอร์วัดความดันและระบบไมโครโปรเซสเซอร์ (PC 104) ใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ และใบพัด จำนวน 6 ชุด ทำการทดสอบในถังขนาด กว้าง 2 เมตร ยาว 2 เมตร และลึก 1 เมตร เคลื่อนที่ได้เร็ว 2 ฟุตต่อวินาที ด้วยความคลาดเคลื่อน $\pm 2\%$



รูปที่ 2.6 ยานใต้น้ำ “ชาละวัน” ของสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) [23]

ในการบำรุงรักษาตามวงรอบผิวนอกเรือของเรือรบขนาดเล็ก เรือพิฆาต และเรือฟริเกต เราต้องนำเรือเข้าอู่แห้ง วิธีการนี้ใช้ต้นทุนสูงและมีความเสี่ยงที่จะให้เกิดความเสียหาย การใช้ยานใต้น้ำขนาดเล็กเข้าตรวจสอบสภาพผิวเรือก่อนเพื่อเป็นข้อพิจารณาเบื้องต้น จะช่วยลดค่าใช้จ่ายและความเสี่ยงดังกล่าว อย่างไรก็ตามแทบจะเป็นไปไม่ได้เลยที่จะใช้คนดำเนินการให้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดเนื่องจากข้อจำกัดของคนที่จะให้ได้เส้นทางการควบคุมที่ต้องการ ดังนั้นยานใต้น้ำอัตโนมัติจึงต้องได้ถูกนำเสนอวิธีการควบคุมยานใต้น้ำอัตโนมัติจะต้องมีการพัฒนา เนื่องจากวิธีการควบคุมส่วนใหญ่ถูกแสดงในรูปการควบคุมแบบเชิงเส้น (Linear) และไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเวลาและการติดตามเส้นทางโคจร (Trajectory Tracking) ซึ่งไม่ง่ายเลยที่จะทำได้บรรลุผล เนื่องจากสัญญาณรบกวนการทำงาน (Disturbances) และความไม่แน่นอน (Uncertainties) ต่างๆ ในการติดตามการโคจรให้ได้ผลแม่นยำนั้น สำหรับระบบส่วนใหญ่ทำได้ยาก เนื่องจากคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ อย่างไรก็ตามวิธีการแก้ปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบสามารถทำได้โดยใช้การควบคุมสนามความเร็ว (Velocity Field Control; VFC) เข้ามาช่วยตัวควบคุม (Controller) โดยวิธีการใช้ควบคุมสนามความเร็ว เพื่อสร้างสนามความเร็วของเส้นทาง เราสามารถหาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งระหว่าง ตำแหน่งที่ต้องการจะไปกับตำแหน่งปัจจุบันทุกๆ ช่วงเวลาหนึ่ง ขั้นตอนนี้ทำให้คล้ายกับว่าระบบมีความเป็นเชิงเส้นในทุกๆ จุดการทำงาน ดังนั้นกลยุทธ์การควบคุมเชิงเส้นใดๆ เช่น LQR สามารถใช้ได้ แม้ว่าขั้นตอนนี้จะประสบความสำเร็จเพียงการติดตามเส้นทางโคจรโดยไม่คำนึงถึงเวลา ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมาก เนื่องจากเวลาไม่ได้เป็นพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการตรวจสอบลำเรือ ในงานวิจัยนี้ได้รวมระบบการควบคุมแบบสนามความเร็ว (VFC) เข้ากับการควบคุมแบบ LQR เพื่อติดตามเส้นทางโคจรของยานใต้น้ำ ซึ่งมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.3 ระบบควบคุมในงานอุตสาหกรรม (Industrial Control System)

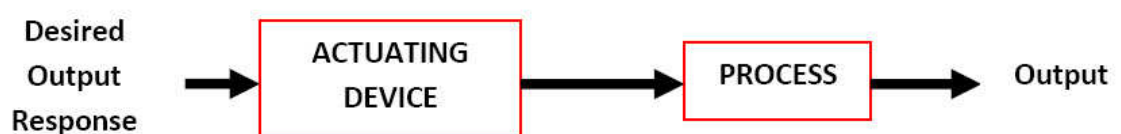
ปัจจุบันกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมได้นำเทคโนโลยีใหม่ ๆ เข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต [24] เครื่องจักรมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น สามารถทำงานได้อัตโนมัติและต่อเนื่อง ระบบการวัดคุมและระบบควบคุมถูกนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรเหล่านั้น ซึ่งก่อให้เกิดผลดีหลายประการดังนี้

- 1) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต
- 2) ช่วย ป้องกันความเสียหายของระบบ และผู้ปฏิบัติงาน
- 3) ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิต เช่น ใช้ ผู้ควบคุมงานน้อยลง
- 4) สามารถทำการผลิตได้จำนวนมากๆ และต่อเนื่อง

ระบบควบคุมสามารถจำแนกได้เป็น ระบบควบคุมแบบวงเปิด (Open-loop control systems) และระบบควบคุมป้อนกลับแบบวงปิด (Closed-loop feedback control systems) [25] ขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบและวิธีการนำไปประยุกต์ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทั้งระบบควบคุมแบบ สัญญาณทางเข้าและทางออกเดียว (single-input single-output; SISO) หรือสัญญาณควบคุมทางเข้าและทางออกหลายทาง (multiple-input multiple-output; MIMO)

1. ระบบควบคุมแบบวงเปิด (Open-loop control systems)

ระบบควบคุมแบบวงเปิด ใช้หลักการนำสัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) ไปขับอุปกรณ์ทางออกโดยตรง รูปที่ 2.7 แสดงขบวนการทำงานของระบบควบคุมแบบวงเปิด ตัวอย่างของระบบควบคุมแบบวงเปิดนี้ได้แก่ เครื่องปั้นขนมปัง เตอบ พัดลม และรถจักรยานไฟฟ้า เป็นต้น

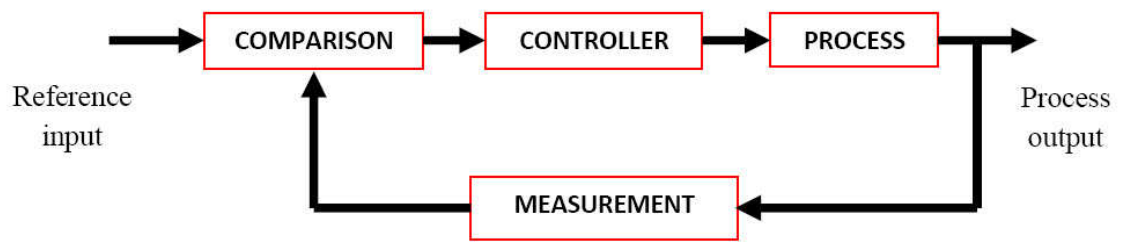


รูปที่ 2.7 ระบบควบคุมแบบวงเปิด (Open-loop control systems)

2. ระบบควบคุมป้อนกลับแบบวงปิด (Closed-loop feedback control systems)

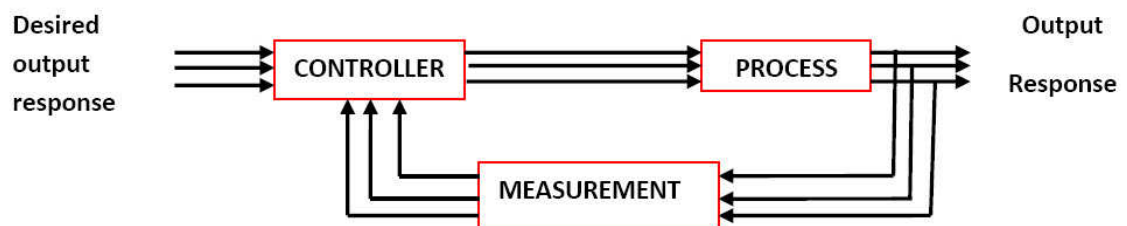
ในระบบควบคุมแบบวงปิด สัญญาณที่ทางออก (Output Signal) จะถูกป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่ทางเข้า (Reference Input) แล้วป้อนเข้าไปยังส่วนควบคุม (Controller) รูปที่ 2.8 แสดงขบวนการทำงานของระบบควบคุมป้อนกลับแบบวงปิด ตัวอย่างของระบบที่ใช้งานได้แก่ การ

ควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปรับอากาศ ระบบควบคุมความเร็วของรถยนต์ และ ระบบการทำงานของ เซอร์โวมอเตอร์ เป็นต้น



รูปที่ 2.8 ระบบควบคุมแบบวงปิด (Closed-loop control systems)

สำหรับระบบควบคุมหลายตัวแปร (Multivariable Control Systems) เมื่อเพิ่มความซับซ้อนของระบบ ควบคุม สัญญาณทางเข้าและทางออกมีหลายตัวแปรจำเป็นต้องมีวิธีการแก้ปัญหาความสัมพันธ์ของตัวแปร การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ถูกนำมาใช้ในการควบคุมนี้

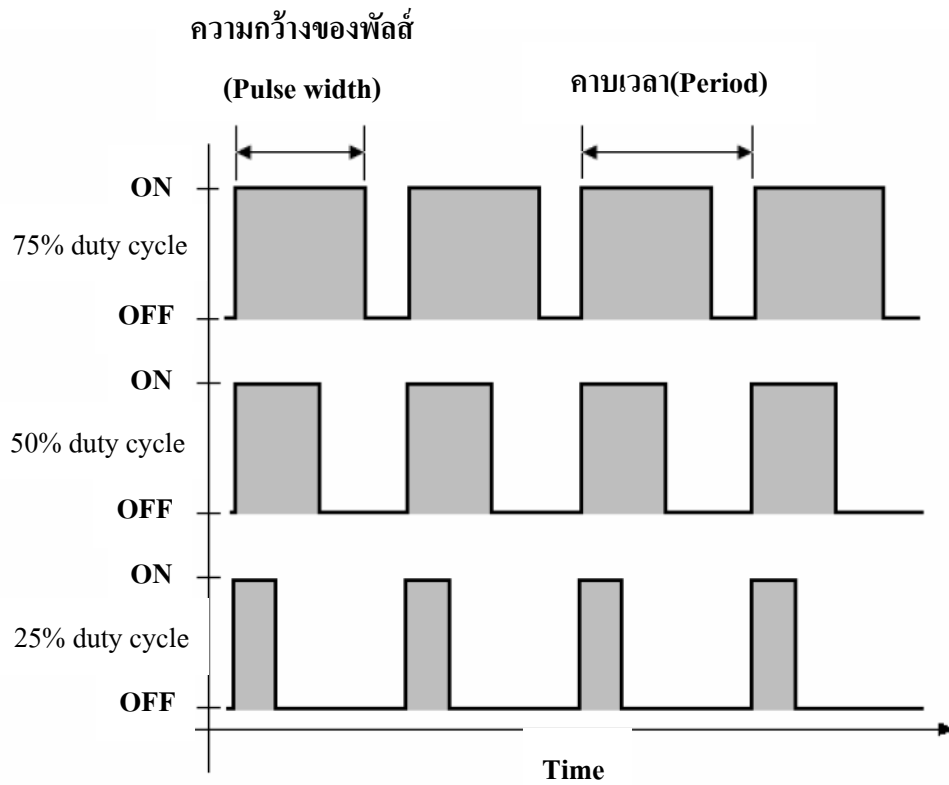


รูปที่ 2.9 ระบบควบคุมหลายตัวแปร (Multivariable Control Systems)

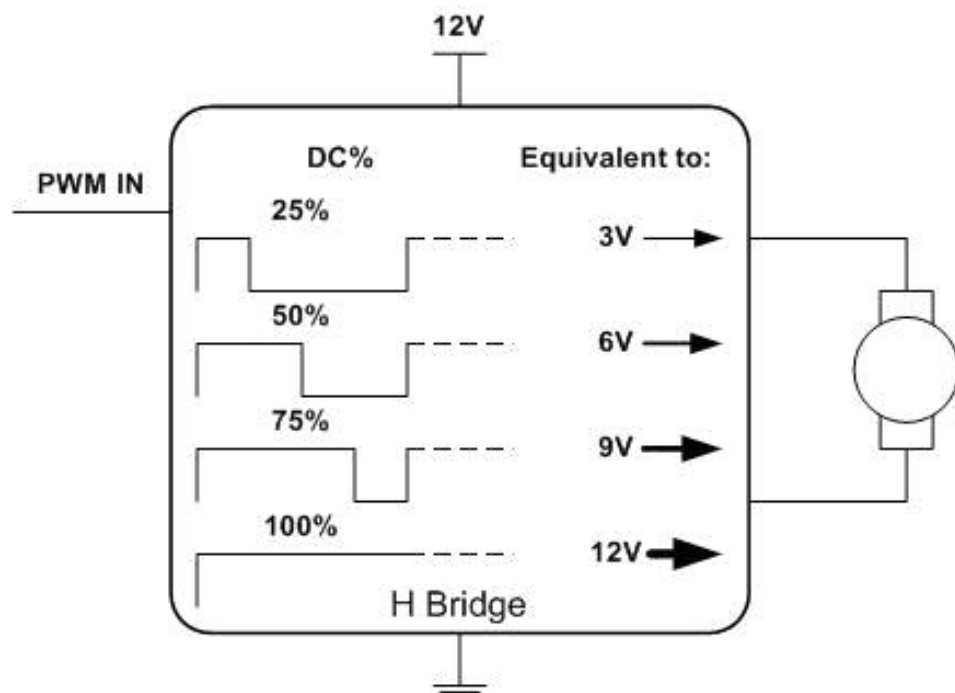
ระบบควบคุมในงานอุตสาหกรรมมักเกี่ยวข้องกับการควบคุมใน 2 ลักษณะคือ การควบคุมระบบด้วยการเปิดปิดการทำงาน และ การควบคุมด้วยสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงต่อเนื่อง [26] ตัวอย่างของการควบคุมด้วยสัญญาณต่อเนื่องที่พบได้บ่อยในงานอุตสาหกรรมได้แก่การควบคุมด้วยความกว้างพัลส์ (Pulse-Width Modulation Control; PWM) และการควบคุมแบบพีไอดี (PID Control)

2.3.1 การควบคุมด้วยความกว้างพัลส์ (Pulse-Width Modulation Control; PWM)

PWM (Pulse Width Modulation) เป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ สัญญาณ PWM ประกอบด้วยหลักการสองส่วนคือความถี่และความกว้างของสัญญาณ กำหนดสัญญาณให้มีความถี่คงที่ แต่ความกว้างของสัญญาณเปลี่ยนแปลงได้โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของคาบเวลาดังรูปที่ 2.10 ปกติสัญญาณพัลส์จะใช้ป้อนเข้าบอร์ดควบคุมความเร็วมอเตอร์ (speed control board) ดังรูปที่ 2.11



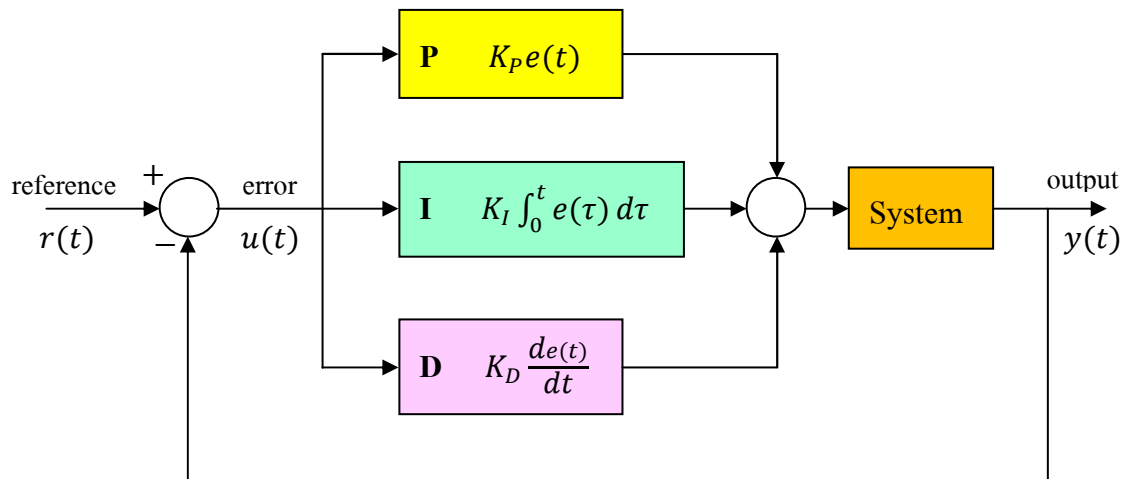
รูปที่ 2.10 การควบคุมด้วยความกว้างพัลส์ [27]



รูปที่ 2.11 การป้อนสัญญาณพัลส์เข้ากับบอร์ด H Bridge ควบคุมความเร็วมอเตอร์ [28]

2.3.2 ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Control)

ตัวควบคุมพีไอดี หรือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ เป็นตัวควบคุมที่ได้รับความนิยมและพบบ่อยในงานอุตสาหกรรมทั่วไปเพราะเป็นตัวควบคุมที่ใช้งานง่าย [29] การปรับค่าอัตราขยาย (Gain) อาศัยหลักการที่ไม่ได้ซับซ้อนมากนักก็ให้ผลตอบสนองเป็นที่ยอมรับได้และสามารถปรับแต่งการควบคุมได้ตามต้องการ ระบบควบคุมแบบพีไอดีมีตัวควบคุมย่อย 3 ส่วน คือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือตัวควบคุมพี (P), ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมไอ (I) และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์หรือตัวควบคุมดี (D) ในการควบคุมระบบทั่วไปมักใช้งานตัวควบคุมร่วมกัน เช่น การควบคุมแบบพีไอ (PI) การควบคุมแบบพีดี (PD) และการควบคุมแบบพีไอดี (PID) แผนผังระบบการทำงานของระบบควบคุมพีไอดีแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID control system) [29]

ตัวควบคุมพีไอดีมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ

$$u(t) = K_P[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt}] \quad (2.1)$$

หรือ

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.2)$$

โดยที่ $K_I = \frac{K_P}{T_I}$ และ $K_D = K_P T_D$

ความคลาดเคลื่อนเขียนได้ในรูปของ $e(t) = r(t) - y(t)$

โดย $u(t)$ คือสัญญาณควบคุมที่จะส่งไปควบคุมระบบ $y(t)$ คือสัญญาณทางออกที่วัดได้จากระบบ และ $r(t)$ คือสัญญาณอ้างอิง

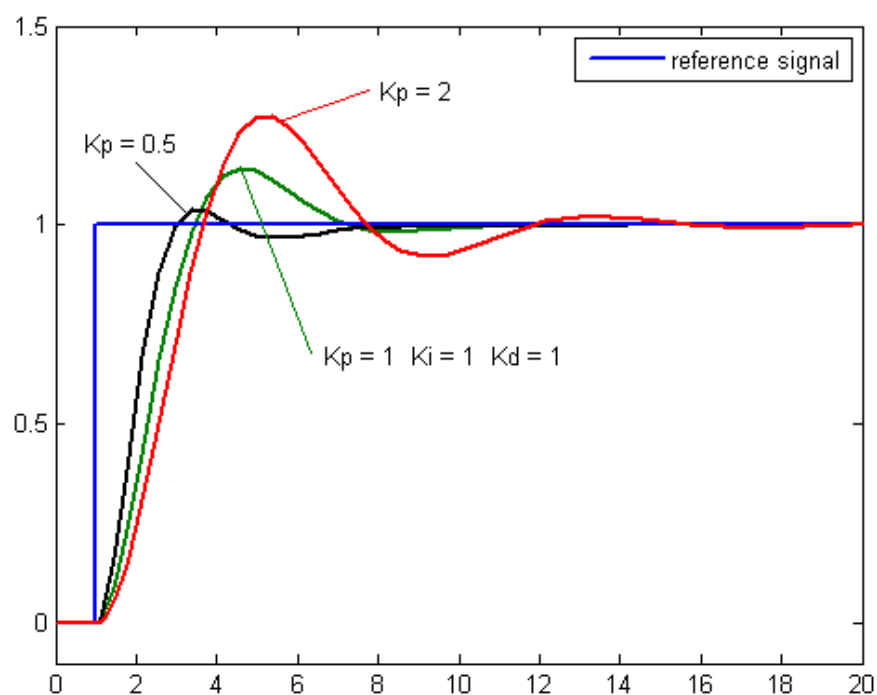
สมรรถนะและเสถียรภาพของระบบขึ้นอยู่กับค่าการปรับแต่งค่าตัวแปรของค่าอัตราขยาย (gain) K_P , K_I และ K_D โดยที่คุณสมบัติของแต่ละตัวแปรจะส่งผลกระทบต่อระบบควบคุมดังนี้

2.3.2.1 คุณสมบัติตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือแบบพี (Proportional control; P-control)

ตัวควบคุมแบบพีจะนำเอาสัญญาณค่าความผิดพลาด ($e(t)$) ระหว่างสัญญาณอ้างอิง ($r(t)$) กับสัญญาณทางออก ($y(t)$) ป้อนเข้าระบบควบคุมเพื่อควบคุมการทำงานของระบบ โดยมีอัตราขยายแบบพี (K_P) เป็นตัวกำหนดอัตราการตอบสนองของระบบ สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$u(t) = K_P e(t) \quad (2.3)$$

เมื่อปรับอัตราขยายแบบพี (K_P) ให้สูงขึ้นจะมีผลทำให้ระบบมีการตอบสนองที่รวดเร็วขึ้นการควบคุมแบบพีนี้สามารถควบคุมระบบได้ดีพอสมควร เหมาะสมกับกระบวนการที่ต้องการผลตอบสนองรวดเร็วและยอมให้เกิดความผิดพลาดขนาดคงที่ (offset) ได้ค่าหนึ่ง อย่างไรก็ตามหากในกระบวนการเกิดมีค่าความผิดพลาด ($e(t)$) มากเกินไปอาจทำให้ระบบแกว่งได้เนื่องจากระบบมีการตอบสนองที่เร็ว



รูปที่ 2.13 ผลจากการปรับอัตราขยายแบบพี (K_P) [29]

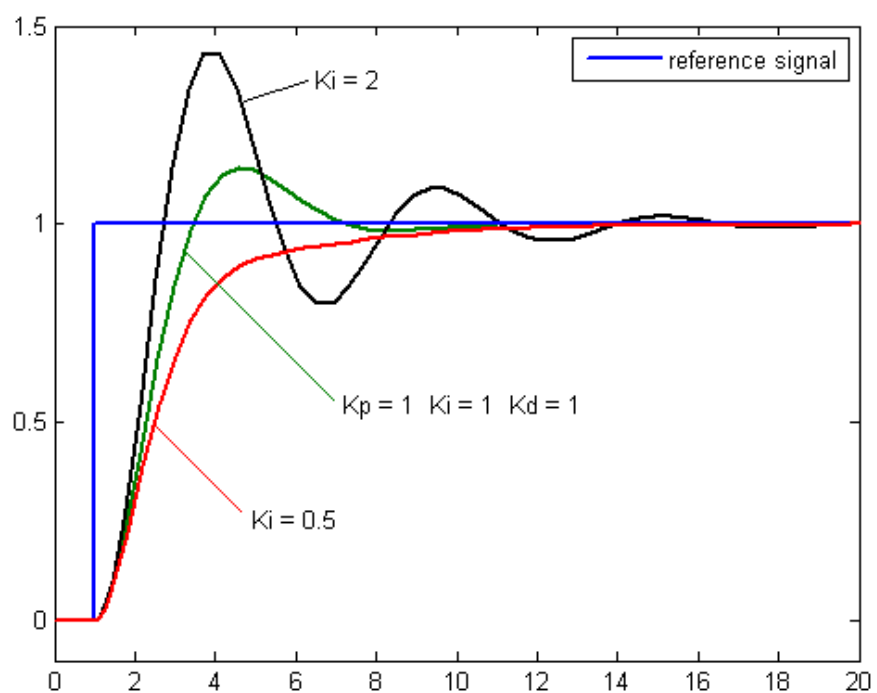
2.3.2.2 คุณสมบัติตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือแบบไอ (Integral control; I-control)

ตัวควบคุมแบบไอจะนำเอาสัญญาณค่าความผิดพลาด ($e(t)$) มาอินทิเกรตแล้วคูณด้วยอัตราขยายของตัวควบคุมแบบไอ (K_I) เขียนได้ในรูปสมการ

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.4)$$

คุณสมบัติของตัวควบคุมแบบไอต่อระบบควบคุมมีดังนี้คือ

- ช่วยลดค่าความผิดพลาดขนาดคงที่ (offset) ให้น้อยลง
- ทำหน้าที่คล้ายรีเซ็ตด้วยมือ (manual reset) เพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อน
- ทำให้เกิดการล่าช้า (capacity-like lag) ยังผลให้เกิดการหักล้างทางเวลาในตัวควบคุม จึงไม่เหมาะกับระบบที่มีค่าเวลาคงตัว (time constant) ยาวนาน
- ทำให้ช่วงเวลาในการแกว่งยาวนานขึ้นและอาจทำให้เกิดส่วนพุ่งเกิน (overshoot)



รูปที่ 2.14 ผลจากการปรับอัตราขยายแบบไอ (K_I) [29]

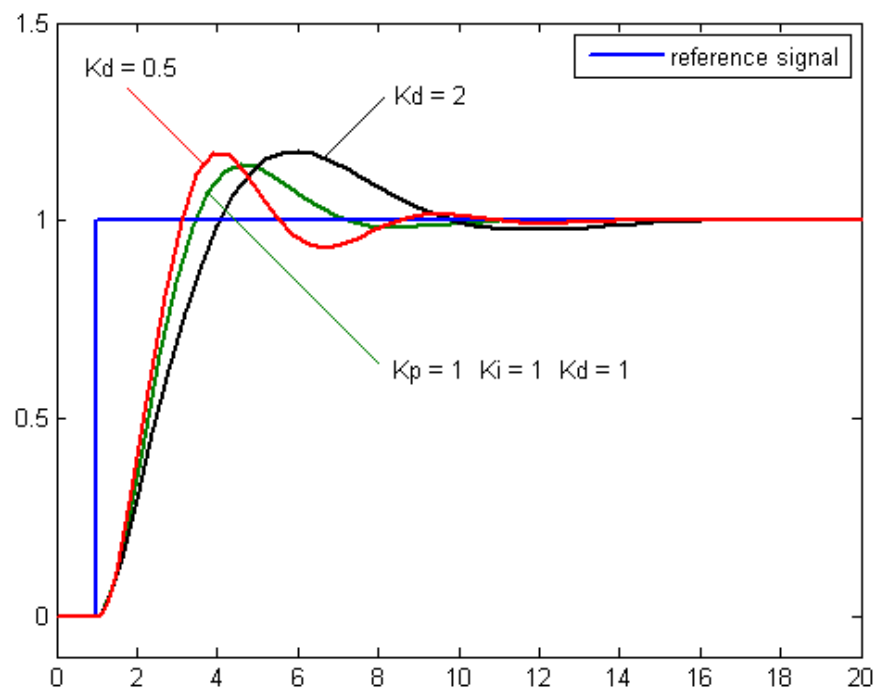
2.3.2.3 คุณสมบัติตัวควบคุมแบบอนุพันธ์หรือแบบดี (Derivative control; D-control)

ตัวควบคุมแบบดีจะนำเอาสัญญาณค่าความผิดพลาด ($e(t)$) มาหาอนุพันธ์ (derivative) แล้วคูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์ (K_D) ดังสมการ 2.5

$$u(t) = K_P e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.5)$$

ผลจากการควบคุมแบบพี (P-control) และแบบไอ (I-control) ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์สูง ตัวควบคุมแบบดี (D-control) จะมีความไวในการตอบสนองต่อค่าความผิดพลาดแม้มีค่าเพียงเล็กน้อย คุณสมบัติของตัวควบคุมแบบดีต่อระบบควบคุมมีดังนี้คือ

- เหมาะสำหรับกระบวนการที่ล่าช้าทางเวลา (time lag) มากๆ ทำให้ระบบมีการตอบสนองที่เร็วขึ้น จึงควบคุมให้ถึงจุดที่ต้องการเร็วขึ้น
- ถ้า T_D มากเกินไป ผลของตัวอนุพันธ์จะทำให้ผลตอบสนองไวขึ้น จนกระทั่งระบบอาจขาดเสถียรภาพได้
- ไม่เหมาะกับระบบที่มีตัวแปรกระบวนการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย หรือมีการล่าช้าทางเวลาน้อย เพราะจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ
- ไม่ควรใช้กับระบบที่มีสัญญาณรบกวนมาก
- ใช้ชดเชยการล่าช้าที่เกิดจากตัวควบคุมแบบไอด้วยการนำหน้า (lead) ในตัวควบคุมแบบดี
- ไม่มีผลต่อความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว
- ช่วยลดช่วงเวลาการเข้าที่ (settling time) โดยลดการแกว่งและลดผลจากการพุ่งเกิน (overshoot)



รูปที่ 2.15 ผลจากการปรับอัตราขยายแบบดี (K_D) [29]

2.3.2.4 การปรับค่าอัตราขยาย (gain) ของการควบคุมแบบพีไอดี

ถ้าระบบยังคงทำงาน ขึ้นแรกให้ตั้งค่า K_I และ K_D เป็นศูนย์ เพิ่มค่า K_P จนกระทั่งสัญญาณขาออกเกิดการแกว่ง (oscillate) แล้วตั้งค่า K_P ให้เหลือครึ่งหนึ่งของค่าที่ทำให้เกิดการแกว่งสำหรับการตอบสนองชนิด "quarter amplitude decay" แล้วเพิ่ม K_I จนกระทั่งออฟเซตถูกต้องในเวลาที่ต้องการของกระบวนการ แต่ถ้า K_I มากไปจะทำให้ไม่เสถียร สุดท้ายถ้าต้องการ ให้เพิ่มค่า K_D จนกระทั่งลูปอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แต่ถ้า K_D มากเกินไปจะเป็นเหตุให้การตอบสนองและการพุ่งเกิน (overshoot) มากเกินไป ปกติการปรับอัตราขยายของ PID ถ้าเกิดการพุ่งเกินเล็กน้อยจะช่วยให้เข้าสู่จุดที่ต้องการเร็วขึ้น แต่ในบางระบบไม่สามารถยอมให้เกิดพุ่งเกินได้ และถ้าค่า K_P น้อยเกินไปก็จะทำให้เกิดการแกว่ง ตารางที่ 2.1 แสดงผลของการปรับค่าอัตราขยาย (gain) ของตัวแปร K_P , K_I และ K_D ที่มีต่อระบบควบคุม

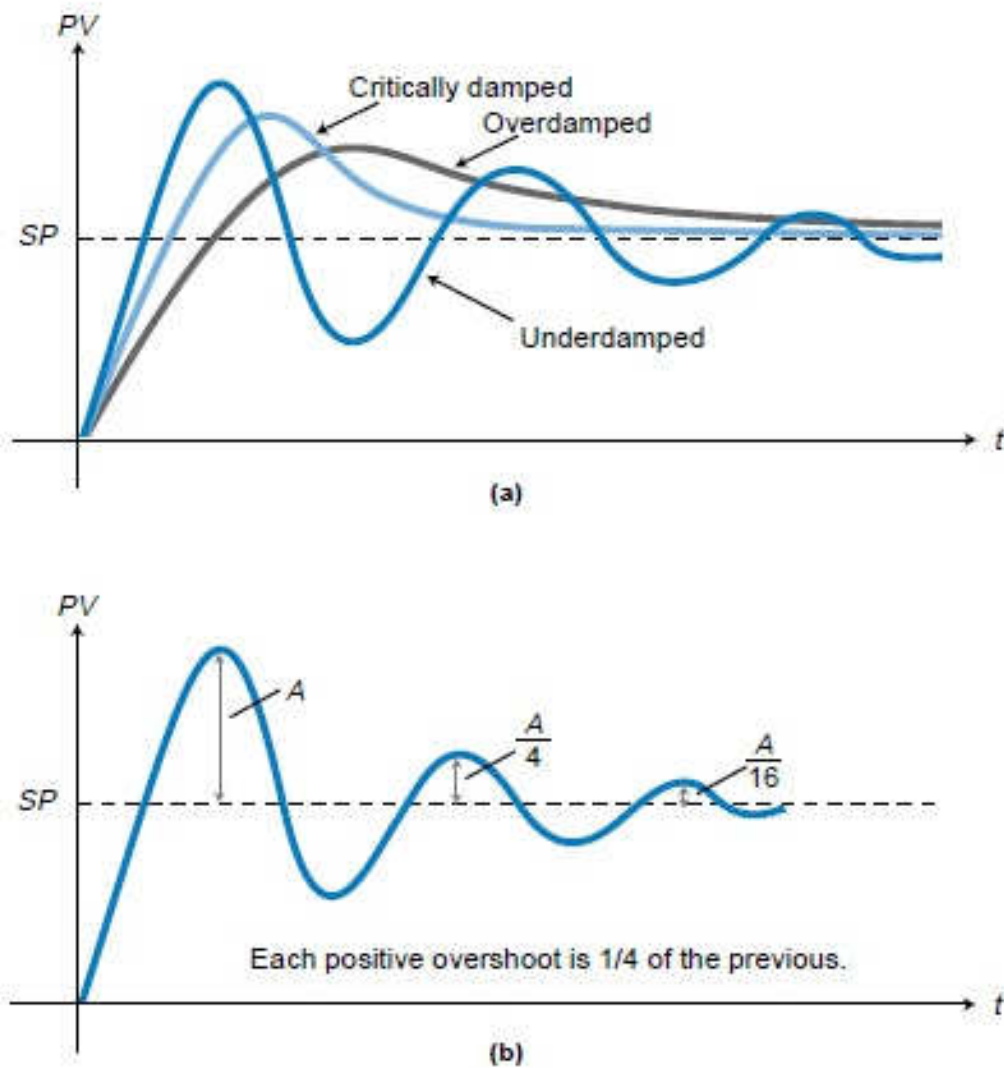
ตารางที่ 2.1 ผลของการเพิ่มค่าตัวแปรอย่างอิสระ [29]

ตัวแปร	ช่วงเวลาดำเนิน (rise time)	การพุ่งเกิน (Overshoot)	เวลาสมดุล (Setting time)	ความผิดพลาดสถานะคงตัว (Steady-state error)	เสถียรภาพ
K_P	ลด	เพิ่ม	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	ลด	ลด
K_I	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ	ลด
K_D	ลดลงเล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	ตามทฤษฎีไม่มีผล	ดีขึ้นถ้า K_D มีค่าน้อย

วิธีหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบพีไอดีตามหลักการของ ซีกเลอร์-นิโคล (Ziegler-Nichols) วิธีการนี้เสนอโดย John G. Ziegler และ Nathaniel B. Nichols ในคริสต์ทศวรรษที่ 1940 ขึ้นแรกให้ตั้งค่า K_I และ K_D เป็นศูนย์ เพิ่มอัตราขยาย P สูงสุดที่ K_C จนกระทั่งระบบเริ่มเกิดการแกว่ง นำค่า K_C และค่าคาบการแกว่ง T มาหาค่าตัวแปรที่เหลือดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมตามวิธีการของซีกเลอร์-นิโคล [29]

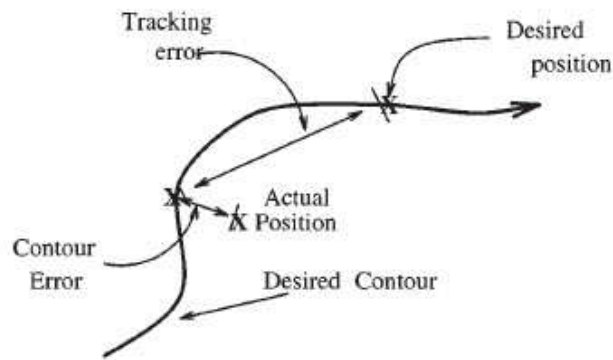
การควบคุมแบบ	K_P	K_I	K_D
P- Control	$0.5K_C$		
PI- Control	$0.45K_C$	$0.45K_C/0.83 T$	
PID- Control	$0.6K_C$	$0.6K_C/0.5 T$	$0.6K_C/0.125 T$



รูปที่ 2.16 การตอบสนองของระบบ a) Overdamped, Critically damped และ Underdamped และ b) แอมพลิจูดของการแกว่งแบบ “quarter amplitude decay” [30]

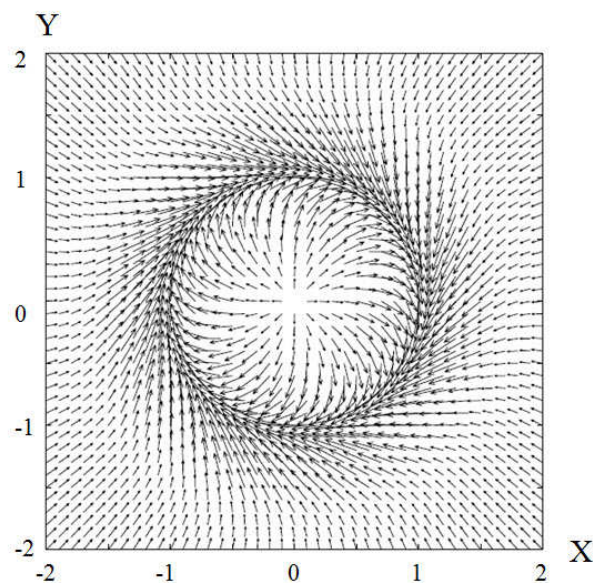
2.4 ระบบควบคุมสนามความเร็ว (Velocity Field Control; VFC)

โดยทั่วไปความคลาดเคลื่อนของการติดตามเส้นทางหมายถึงความแตกต่างระหว่างตำแหน่งที่ต้องการไป (Desired position) กับตำแหน่งจริง (Actual position) [31] การควบคุมติดตามเส้นทางโคจรถูกกำหนดเพื่อเป็นการลดความคลาดเคลื่อนในการติดตามโดยวิธีการปรับเส้นทางจริงเพื่อให้เข้าสู่เส้นทางที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.17



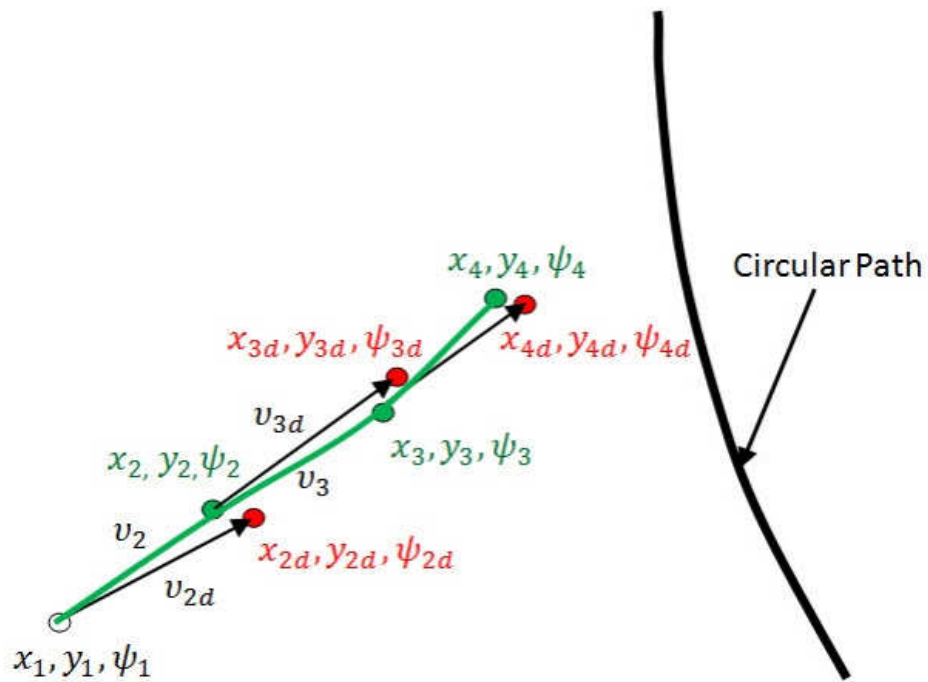
รูปที่ 2.17 ความคลาดเคลื่อนการติดตามเส้นทาง และความคลาดเคลื่อนเส้นทางเดิน [32]

สนามความเร็ว (Velocity Field) หมายถึงแผนที่ซึ่งกำหนดไปยังแต่ละจุดของเส้นทางและขนานกับเวกเตอร์ของเส้นทาง [33, 34] นิยามนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทางกล จากทุก ๆ จุดบนพื้นที่ รูปที่ 2.18 ตัวอย่างสนามความเร็วของวงกลมบนระนาบรัศมี 1 เมตร บนพื้นที่สี่เหลี่ยม 4x4 เมตร



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างสนามความเร็วสำหรับการติดตามเส้นทางวงกลม

เพื่อให้เห็นชัดเจนว่า การควบคุมแบบสนามความเร็วช่วยเหลือการควบคุมเส้นทางของยานได้น้ำอัดโนมิต้อย่างไร จากรูปที่ 2.19 เป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นว่าความคลาดเคลื่อนของสถานะ (state errors) ของการโคจรของยานได้น้ำอัดโนมิตัวด้วยการควบคุมแบบสนามความเร็ว เริ่มต้นจากจุด x_1, y_1, ψ_1 ที่ระยะเวลาหนึ่ง (dt) แผนที่ของการควบคุมสนามความเร็ว (VFC mapping) คำนวณหาตำแหน่งถัดไป $x_{2d}, y_{2d}, \psi_{2d}$ และความเร็วในการเคลื่อนที่ (v_{2d}) แต่ตำแหน่งที่แท้จริงของยานเคลื่อนที่ไปยัง x_2, y_2, ψ_2 ด้วยความเร็ว v_2 .



รูปที่ 2.19 ขั้นตอนการทำงานของการควบคุมด้วยสนามความเร็ว (VFC algorithm)

ดังนั้นความคลาดเคลื่อนของแต่ละสถานะเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned}
 x_e &= x_{2d} - x_2 \\
 y_e &= y_{2d} - y_2 \\
 \psi_e &= \psi_{2d} - \psi_2 \\
 v_e &= v_{2d} - v_2
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

จากนั้นการควบคุมแบบสนามความเร็วประมาณค่าหาตำแหน่งถัดไปเป็น $x_{3d}, y_{3d}, \psi_{3d}$ และความเร็วที่ต้องเคลื่อนที่เป็น v_{3d} ค่าความคลาดเคลื่อนสถานะ (state errors) นี้ถูกป้อนเข้าไปยังระบบควบคุมแอลคิวอาร์ (LQR control) เพื่อควบคุมการทำงานของยานได้นำอัตโนมัตินี้ ได้ตำแหน่งใหม่ที่แท้จริงของสถานะ x_3, y_3, ψ_3 และความเร็ว v_3 ถูกป้อนกลับมาเปรียบเทียบกันเป็นความคลาดเคลื่อนของสถานะ (state errors) อีกครั้ง ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบสนามความเร็วสามารถช่วยแยกการควบคุมติดตามเส้นทางโคจรให้ออกเป็นเส้นตรงเล็กๆ เสมือนเป็นเชิงเส้นบนช่วงเวลาที่แยกจากกัน (dt) เพื่อทำให้ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นเป็นเสมือนระบบเชิงเส้น

2.5 การประมาณค่าแบบลำดับการลดรูปสถานะ (Reduced-Order State Estimators)

เนื่องจากระบบของยานได้นำวัดได้เพียงสถานะทางออก (x, y และ ψ) ทำให้สถานะของตัวสังเกต (observer state) น้อยกว่าสถานะของระบบ (x, u, y, v, ψ และ r) ถือว่าเป็นลำดับการลดรูป (reduced order) ตัวประมาณค่าสถานะนำมาใช้ประมาณค่าสถานะที่ไม่สามารถวัดได้เพื่อให้ตัวสังเกตมีสถานะเต็ม (full state) และสามารถควบคุมการทำงานของระบบได้

พิจารณาระบบที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (time-invariant system) [35]

$$\dot{X} = AX + BU \quad X \in \mathbb{R}^n, U \in \mathbb{R}^n \quad (2.7)$$

$$Y = CX + DU \quad Y \in \mathbb{R}^q \quad (2.8)$$

ซึ่งเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะต่างๆ อยู่ในรูปของ

$$X = [x, u, y, v, \psi, r]^T \quad (2.9)$$

ตัวแปรของสถานะทางออกเขียนได้อยู่ในรูปเวกเตอร์ของ

$$Y = [x, y, \psi]^T \quad (2.10)$$

โดยที่ x เป็นตำแหน่งบนแกน x y เป็นตำแหน่งบนแกน y ψ เป็นมุมทิศหัวเรือเมื่อเทียบกับทิศเหนือ u เป็นความเร็วในทิศทาง x v เป็นความเร็วในทิศทาง y และ r เป็นความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ของยาน เนื่องจากสถานะของระบบยานได้นำสามารถวัดได้เพียงตำแหน่ง x, y จากกล้อง USB และทิศหัวเรือจากอุปกรณ์วัดมุม (IMU) สถานะของความเร็ว u, v และ r ไม่สามารถวัดได้ ดังนั้นระบบของยานได้นำจึงไม่เป็นระบบสถานะเต็ม (Full state) จึงทำให้ไม่สามารถควบคุมระบบได้ ตัวประมาณค่าแบบลำดับการลดรูปสถานะ (Reduced-order estimator) ถูกนำมาประมาณหาค่าสถานะความเร็วเพื่อให้ระบบสามารถควบคุมได้ด้วยตัวสังเกตของแอลคิวอาร์ (LQR observer) การออกแบบตัวสังเกตแอลคิวอาร์ที่เหมาะสม (Design an optimal LQR observer) สามารถทำได้โดยกำหนดให้

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + BU + L(Y - C\hat{X}) \quad (2.11)$$

โดยที่ $\hat{X}$ เป็นสถานะของตัวประมาณค่า และ L เป็นอัตราขยายของตัวสังเกต (observer gain) เขียนได้ในรูปของ

$$L = R_e^{-1} C P_e \quad (2.12)$$

โดยที่ R_e เป็นเมตริกซ์น้ำหนักของตัวประมาณค่า (weight estimator designed matrix) ซึ่งมีค่าเป็นบวก ($R_e = R_e^T > 0$) และ P_e เป็นผลเฉลยจากสมการพีชคณิตของริคคาติ (algebraic Riccati equation) สามารถเขียนได้เป็น

$$\dot{P}_e = A P_e + P_e A^T + Q_e - P_e C^T R_e^{-1} C P_e \quad (2.13)$$

โดยที่ Q_e เป็นเมตริกซ์น้ำหนักของตัวประมาณ มีค่าเป็นกึ่งบวก (positive semidefinite)

2.6 การควบคุมแบบเชิงเส้นกำลังสอง (Linear Quadratic Regulator; LQR)

เนื่องจากระบบควบคุมของยานได้น้ำขนาดเล็กเป็นระบบที่สัญญาณทางเข้าและทางออกหลายทาง (MIMO) จึงได้พิจารณำการควบคุมแบบแอลคิวอาร์ (LQR) มาใช้ในการควบคุมระบบ พิจารณาระบบในสมการที่ 2.6 และ 2.7 เกณฑ์สมรรถนะกำหนดได้เป็น [36]

$$J = \int_0^\infty [X^T(t) Q X(t) + U^T(t) R U(t)] dt \quad (2.14)$$

โดยที่ Q เป็นเมตริกซ์น้ำหนักที่ไม่เป็นลบ ($Q = Q^T \geq 0$) และ R เป็นเมตริกซ์น้ำหนักที่เป็นบวก ($R = R^T > 0$) แล้วค่าระบบควบคุมจะมีค่าสมรรถนะ (J) ต่ำสุด กำหนดโดยกฎการป้อนกลับสถานะเชิงเส้น (Linear state feedback control)

$$U(t) = -KX(t) \quad (2.15)$$

$$K = R^{-1} B^T P \quad (2.16)$$

โดยที่ K เป็นอัตราขยายของตัวควบคุม

ตัวควบคุมแอลคิวอาร์ (LQR controller) เป็นไปตามสมการ

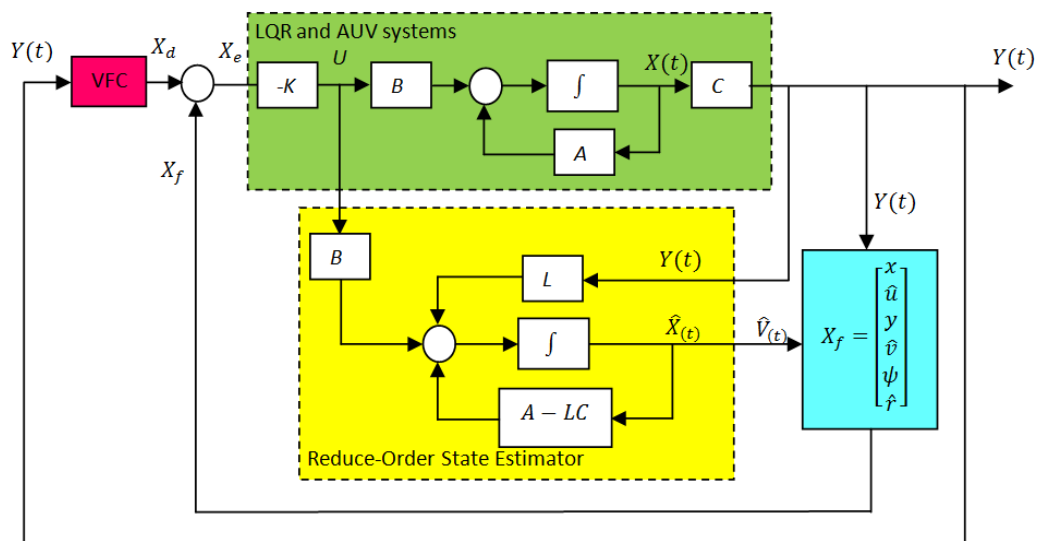
$$U(t) = -R^{-1} B^T P X(t) \quad (2.17)$$

โดยที่ $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$ มีค่าเป็นบวก positive (symmetric) semidefinite ซึ่งผลเฉลยของ “algebraic Riccati equations” เขียนได้เป็น

$$\dot{P} = PA + A^T P - Q + PBR^{-1}B^T P \quad (2.18)$$

2.7 การควบคุมแบบสนามความเร็วช่วยแอลคิวอาร์ควบคุมการติดตามเส้นทาง (VFC assist LQR Path Tracking Control)

การควบคุมแบบสนามความเร็วช่วยควบคุมการติดตามเส้นทางโครงประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนการควบคุมแบบเชิงเส้นกำลังสอง(แอลคิวอาร์ ; LQR) ส่วนประมาณค่าแบบลำดับการลดรูปสถานะ (reduce-order state estimator) และส่วนควบคุมแบบสนามความเร็ว (VFC) จากสัญญาณสถานะทางออก (output state; $Y(t)$) การควบคุมสนามความเร็วถูกประยุกต์เข้ากับการคำนวณหาตำแหน่งที่ต้องการถัดไป X_d แล้วเก็บค่าตำแหน่งที่ต้องการนี้เพื่อใช้เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่แท้จริง X_f ได้เป็นความคลาดเคลื่อนของสถานะ X_e ความคลาดเคลื่อนของสถานะนี้ถูกป้อนเข้าไปยัง LQR สำหรับควบคุมยานได้นำอัตราโนมิติตามเส้นทางที่ต้องการ เนื่องจากในระบบจริงเราสามารถวัดได้เพียงสถานะทางออก (output state ; $Y(t)$) แต่สถานะความเร็วไม่สามารถวัดได้ ดังนั้นระบบจึงไม่เป็นระบบเต็มสถานะ ตัวประมาณค่าแบบลดรูปถูกนำมาประมาณหาสถานะความเร็วของระบบ $\hat{V}(t)$ เมื่อรวมสถานะทางออก $Y(t)$ กับ สถานะความเร็ว $\hat{V}(t)$ แล้วได้สถานะเต็มของระบบ X_f ป้อนกลับเข้าไปเปรียบเทียบกับสถานะที่ต้องการ (desired state, X_d) ที่ได้จาก VFC กระบวนการข้างต้นแสดงในรูปแบบที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แผนผังสนามความเร็วช่วยแอลคิวอาร์ควบคุมการติดตามเส้นทาง (VFC assist LQR Path Tracking Control Scheme)

2.8 บทส่งท้าย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนายานได้นำขนาดเล็กสำหรับการใช้ในการดำสำรวจ จึงได้ศึกษาเอกสารวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับยานได้นำขนาดเล็กทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ ศึกษาถึงระบบการควบคุมที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม วิธีการควบคุมด้วยความกว้างพัลส์ (PWM) สำหรับใช้ควบคุมความเร็วของชุดขับเคลื่อน (Thruster) วิธีการควบคุมแบบพีไอดี (PID) และการปรับค่าอัตราขยายเพื่อให้ระบบทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ วิธีการควบคุมแบบสนามความเร็ว (VFC) ช่วยให้ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นทำงานเป็นเสมือนระบบเชิงเส้น วิธีการประมาณค่าแบบลำดับการลดรูปสถานะ ใช้สำหรับประมาณค่าตัวแปรที่ไม่สามารถวัดค่าได้ เพื่อให้ระบบควบคุมมีสถานะครบ (full state) และสามารถทำงานได้ วิธีการควบคุมแบบเชิงเส้นกำลังสองหรือแอลคิวอาร์ (LQR) ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของระบบที่มีสัญญาณควบคุมทางเข้าและทางออกหลายทาง (MIMO) และศึกษาวิธีการควบคุมแบบสนามความเร็วมาช่วยแอลคิวอาร์ควบคุมติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่ของยานได้นำขนาดเล็ก