

บทที่ 5 ผลการทดลอง

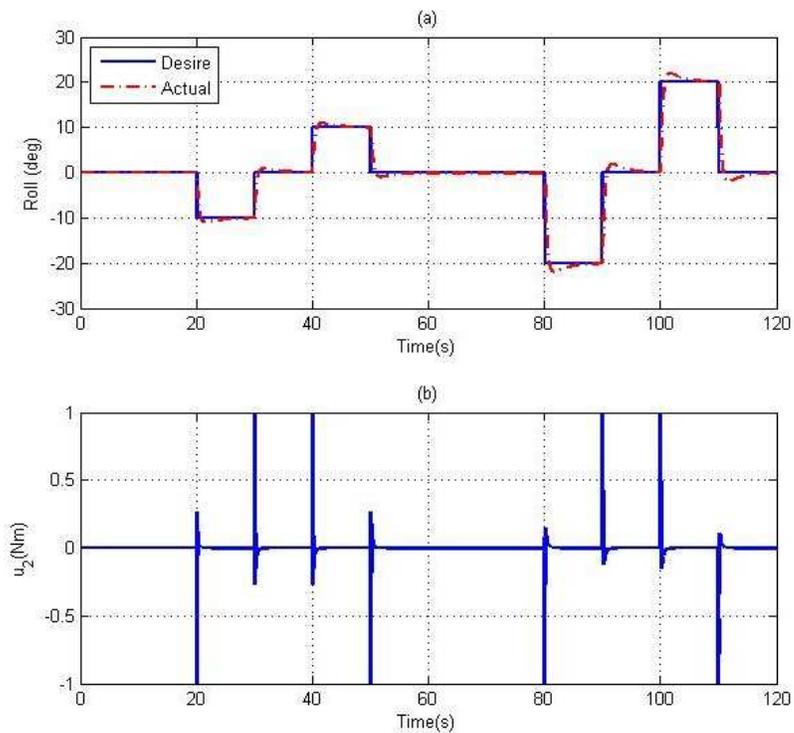
การศึกษาการออกแบบระบบควบคุมสำหรับหุ่นยนต์สี่ล้อได้นำมาทดลองการทำงานและทดลองระบบควบคุมที่ออกแบบขึ้นบนแท่นทดสอบที่กล่าวไปในบทที่ผ่านมา โดยระบบควบคุมที่ออกแบบขึ้นประกอบไปด้วยระบบควบคุมพีไอดีและระบบควบคุมแอสทิวาร์ ซึ่งในบทนี้จะนำเสนอผลการจำลองและการทดลองของระบบควบคุมที่ออกแบบขึ้น เพื่อแสดงประสิทธิภาพของระบบควบคุมแต่ละตัวว่ามีข้อดีข้อเสียและจุดใดที่ควรปรับปรุง ซึ่งเป็นข้อมูลหนึ่งที่จะทำให้เลือกใช้ระบบควบคุมที่เหมาะสม

5.1 ผลการจำลองระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

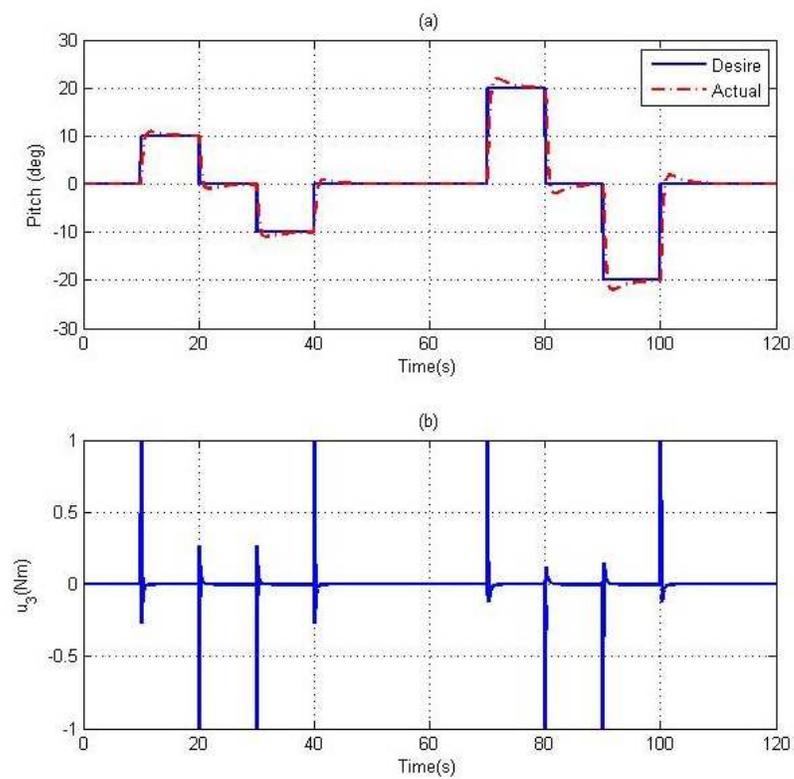
ผลการจำลองเมื่อปรับอัตราขยายของตัวควบคุมแต่ละตัวให้ผลดีที่สุดทั้งตัวควบคุมพีไอดีและตัวควบคุมแอสทิวาร์ โดยจะแสดงมุมทั้งหมดที่ต้องการควบคุมอันได้แก่มุม Roll, Pitch และ Yaw ตามลำดับ โดยป้อนสัญญาณขั้นบันได (Step Function) เป็นสัญญาณอินพุตให้กับระบบควบคุมมุม Roll และ Pitch และป้อนสัญญาณไซน์ (Sinusoidal Signal) เป็นสัญญาณอินพุตให้กับระบบควบคุมมุม Yaw ทั้งนี้เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมทั้งแบบพีไอดีและแอสทิวาร์ โดยจะแสดงผลทั้งสัญญาณเอาต์พุต $\theta(k)$ เปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง $\theta_d(k)$ และสัญญาณควบคุม $u(k)$ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณควบคุมที่ทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลง

5.1.1 ระบบควบคุมพีไอดี

การออกแบบระบบควบคุมพีไอดีได้ทำการออกแบบอัตราขยายด้วยวิธีการปรับมือ โดยอาศัยการสังเกตพฤติกรรมของระบบแล้วปรับอัตราขยาย เพื่อชดเชยค่าผิดพลาดเหล่านั้นให้มีผลดีขึ้นเป็นที่ยอมรับได้ โดยในการควบคุมมุม Roll และ Pitch จะได้อัตราขยายที่มีค่าเท่ากัน เนื่องจากมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกันอีกทั้งพารามิเตอร์ในการจำลองมีค่าเท่ากัน โดยการจำลองปรับจูนค่าอัตราขยายทำด้วยวิธีการปรับมือที่กล่าวไปในบทที่ 3 แล้วนั้นทำให้ได้ค่าอัตราขยายที่ดีที่สุดดังในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ซึ่งให้ผลการจำลองดังในรูปที่ 5.1 (a) สำหรับมุม Roll และรูปที่ 5.2 (a) สำหรับมุม Pitch ซึ่งจะเห็นว่าผลการจำลองจะกำหนดสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณขั้นบันไดที่มีการเปลี่ยนแปลงมุม ± 10 ในช่วงเวลาต่างๆ และรูปที่ 5.1 (b) และ 5.2 (b) แสดงสัญญาณควบคุมที่ทำการควบคุมมุม Roll และ Pitch ตามลำดับ จะเห็นว่าสัญญาณควบคุมจะมีการเปลี่ยนแปลงทุกๆ ครั้ง เมื่อสัญญาณอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสัญญาณควบคุมมีค่าเปลี่ยนแปลงประมาณ 1 นิวตันเมตร (Nm) เป็นแรงบิด (Torque) ที่ทำให้หุ่นยนต์สี่ล้อเปลี่ยนแปลงทิศทางในมุม Roll, Pitch และ Yaw ตามสัญญาณอ้างอิง

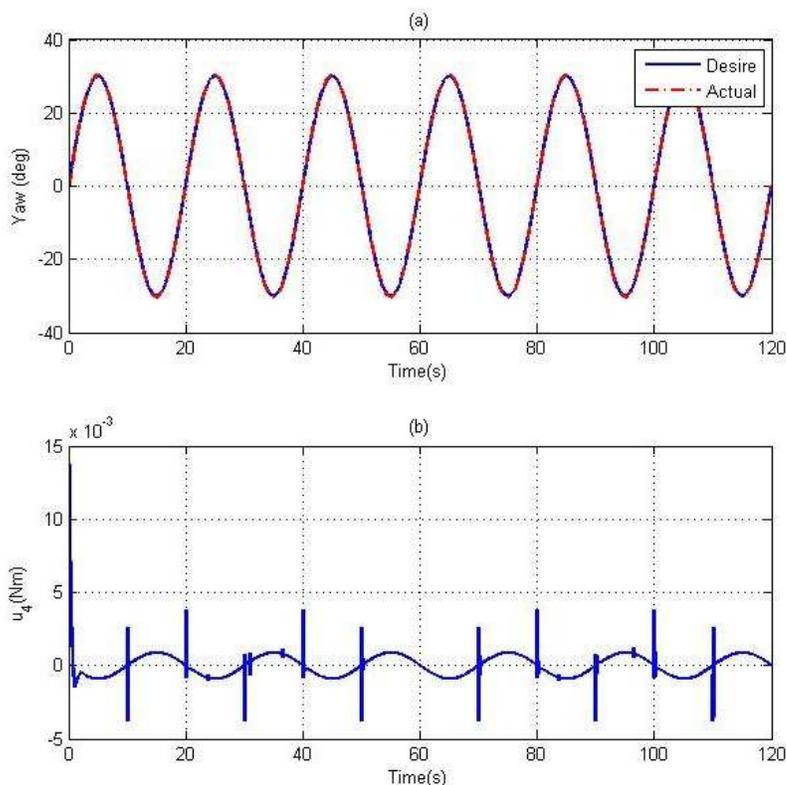


รูปที่ 5.1 ผลการจำลองระบบควบคุมพีดัดของมุม Roll



รูปที่ 5.2 ผลการจำลองระบบควบคุมพีดัดของมุม Pitch

สำหรับมุม Yaw จะมีค่าอัตราขยายที่แตกต่างกัน เพราะด้วยลักษณะการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน โดยค่าอัตราขยายแสดงดังในตารางที่ 5.1 และ 5.2 โดยการจำลองกำหนดให้สัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ เนื่องจากการเคลื่อนที่ในแบบนี้จะเป็นการเปลี่ยนทิศทางหรือเป็นการหมุนเพื่อถ่ายภาพสำรวจบริเวณโดยรอบด้วยสถานการณ์ ดังกล่าวสัญญาณอ้างอิงที่คล้ายกับสถานการณ์นี้คือสัญญาณไซน์ ซึ่งกำหนดให้มีค่าแอมพลิจูด (Amplitude) มีขนาดเท่ากับ 30 องศา ผลการจำลองแสดงดังในรูปที่ 5.3 (a) และรูปที่ 5.3 (b) แสดงสัญญาณควบคุมของมุม Yaw มีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยมากๆ สำหรับการจำลอง



รูปที่ 5.3 ผลการจำลองระบบควบคุมฟีดแบ็คของมุม Yaw

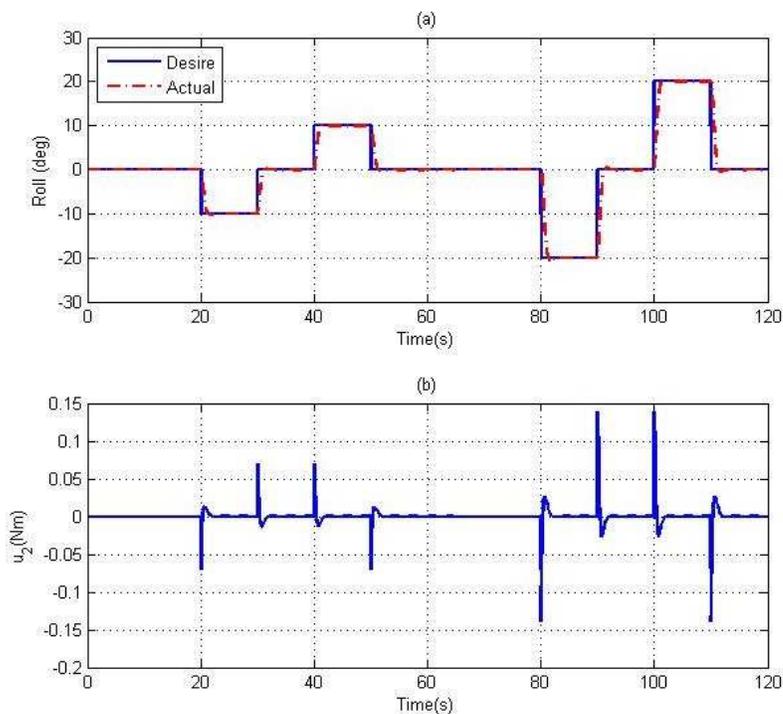
โดยประสิทธิภาพของระบบควบคุมฟีดแบ็คแสดงดังในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์การจำลองระบบควบคุมฟีดแบ็ค

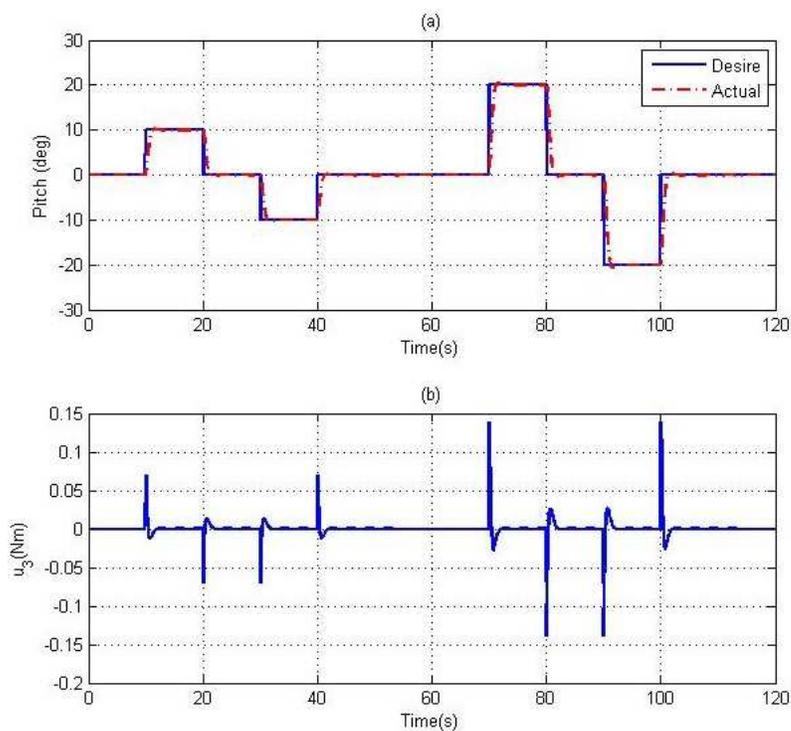
มุม	Roll	Pitch	Yaw
Overshoot	8.6969 %	8.8318 %	-
Setting Time	5.2846 วินาที	5.3181 วินาที	-
Peak	10.9029 °	10.9170 °	30.2948 °
Phase lag	-	-	0 °

5.1.2 ระบบควบคุมแอลคิวอาร์

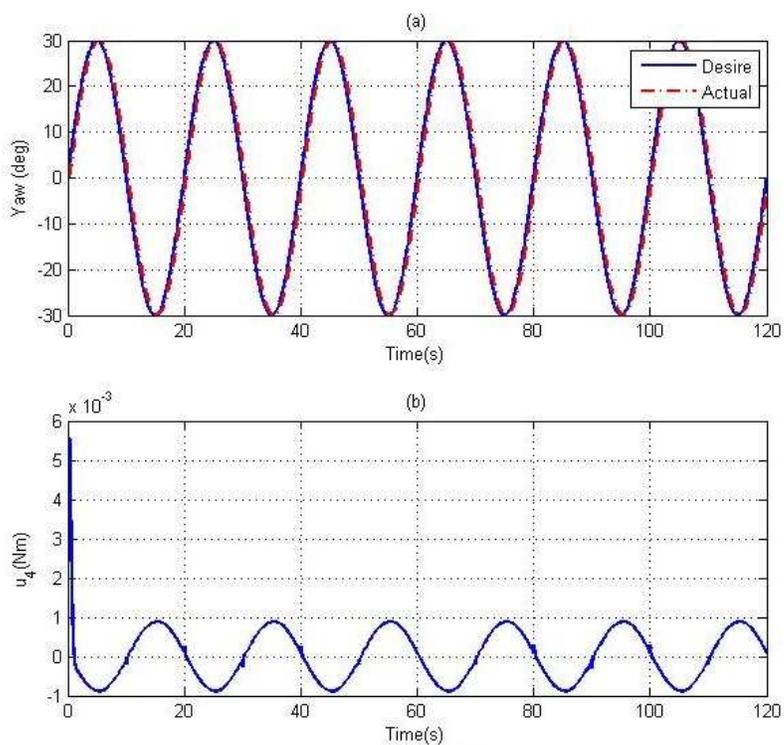
การออกแบบระบบควบคุมแอลคิวอาร์ได้ทำการออกแบบอัตราขยายตามกฎการควบคุม โดยใช้ ครรชนีสมรรถนะ โดยปรับตัวแปร Q และ R ให้มีค่าน้อยตามความต้องการ โดยสังเกตผลที่ได้ จากการจำลองและปรับให้เพิ่มหรือลดเพื่อชดเชยความผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยใช้โปรแกรมคำนวณ MATLAB แก่สมการเพื่อหาค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแอลคิวอาร์และในส่วนของอัตราขยายป้อน ไปข้างหน้า ซึ่งทำให้ได้ค่าอัตราขยายที่ดีที่สุดดังในตารางที่ 4.4 ด้วยค่า $Q = \begin{bmatrix} 25 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $R = 150$ และ เพื่อให้ผลการจำลองสามารถเปรียบเทียบกับระบบควบคุมพีไอดีได้ ฉะนั้นจะกำหนดให้สัญญาณ อินพุตเป็นสัญญาณเดียวกับสัญญาณอินพุตที่ใช้ทดลองระบบควบคุมพีไอดี ซึ่งผลการจำลองระบบ ควบคุมแอลคิวอาร์ที่ทำการควบคุมมุมทั้งหมดของหุ่นยนต์สี่ใบพัดแสดงในรูปที่ 5.4 (a) สำหรับมุม Roll, รูปที่ 5.5 (a) สำหรับมุม Pitch และรูปที่ 5.6 (a) สำหรับมุม Yaw โดยสัญญาณควบคุมมีค่าน้อย กว่าในระบบควบคุมพีไอดีในทุกมุม โดยมีค่าสูงสุดของสัญญาณควบคุมประมาณ 0.15 นิวตันเมตร



รูปที่ 5.4 ผลการจำลองระบบควบคุมแอลคิวอาร์ของมุม Roll



รูปที่ 5.5 ผลการจำลองระบบควบคุมแอกคิวอาร์ของมุม Pitch



รูปที่ 5.6 ผลการจำลองระบบควบคุมแอกคิวอาร์ของมุม Yaw

โดยประสิทธิภาพของระบบควบคุมระบบควบคุมแอลคิวอาร์แสดงดังในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการวิเคราะห์การจำลองระบบควบคุมแอลคิวอาร์

มุม	Roll	Pitch	Yaw
Overshoot	2.2849 %	2.2849 %	-
Setting Time	21.8012 วินาที	11.8 วินาที	-
Peak	10.2266 °	10.2266 °	29.9407 °
Phase lag	-	-	0.6303 °

ผลการจำลองระบบควบคุมทั้งระบบควบคุมพีไอดีและระบบควบคุมแอลคิวอาร์สามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้ โดยระบบควบคุมแอลคิวอาร์จะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำไปทดลองบนระบบจริงอาจจะมีข้อผิดพลาดจากโมเดลของระบบ ที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบควบคุมไม่เป็นไปตามการจำลองระบบ ซึ่งจะอธิบายไว้ในผลการทดลองระบบควบคุมหุ่นยนต์สี่ใบพัด

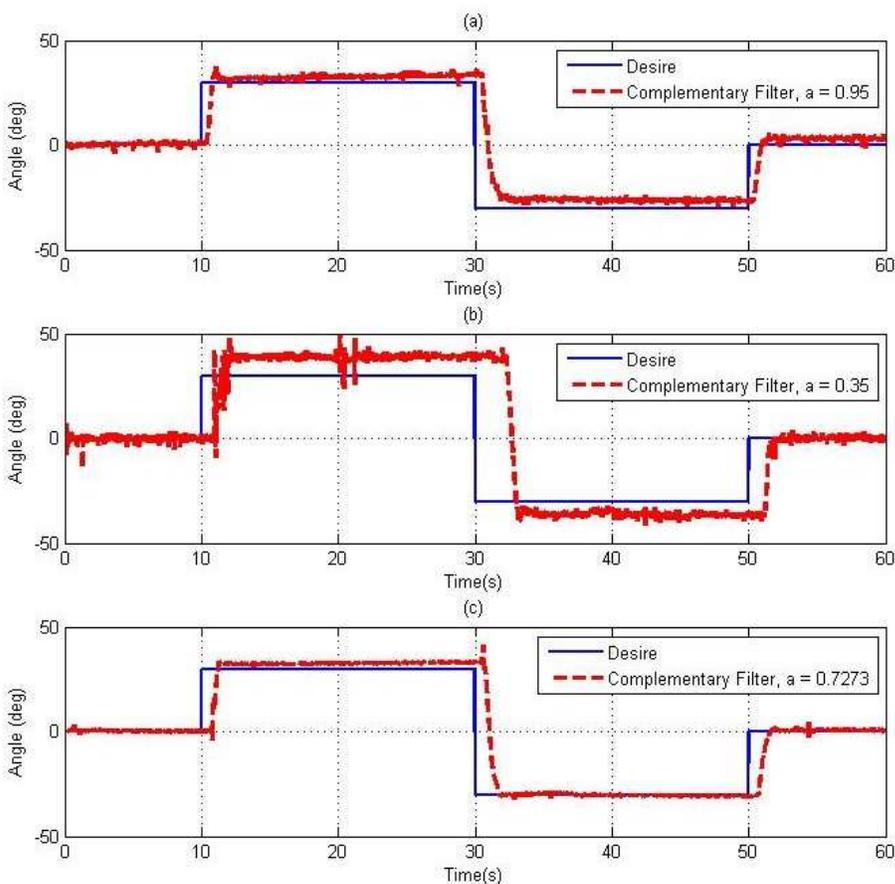
5.2 ผลการทดลองระบบควบคุมหุ่นยนต์สี่ใบพัด

5.2.1 ผลทดลองตัวกรองสัญญาณเซ็นเซอร์

การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับจำเป็นต้องมีสัญญาณจากเอาต์พุตของระบบป้อนกลับมาให้ระบบควบคุมประมวลผลใหม่ไปในรอบถัดไป ดังนั้นต้องใช้ตัวตรวจวัด วัดค่าการเอียงมุม โดยตัวตรวจวัดที่เป็นเบอร์ MPU 6050 ดังที่กล่าวไปบทที่สามนั้น ตัวตัวตรวจวัดตัวเดียวนี้เองเป็นทั้งตัวตรวจวัดความเร่งและตัวตรวจวัดความเร็วเชิงมุม ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตเมื่อแปลงค่าเป็นค่ามุมแล้วยังคงมีสัญญาณรบกวน เมื่อนำไปวัดการเอียงมุมของหุ่นยนต์สี่ใบพัดสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นอยู่มาก ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการออกแบบและทดสอบตัวกรองสัญญาณตัวตรวจวัด เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากตัวตรวจวัด โดยสัญญาณตัวตรวจวัดที่นำมาผ่านตัวกรองสัญญาณคือมุม Roll และ Pitch ซึ่งเนื่องจากเป็นมุมที่ต้องควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ ดังนั้นจำเป็นต้องการความแม่นยำสูง แต่สำหรับมุม Yaw นั้นสามารถใช้การรวมค่ามุมระหว่างตัวตรวจวัด ความเร็วเชิงมุมกับตัวตรวจวัดทิศทาง (Compass Sensor) แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบระบบควบคุมบนแท่นทดสอบทำให้การวัดค่ามุม Yaw จากตัวตรวจวัดความเร็วเชิงมุมก็เพียงพอและแม่นยำพอที่สามารถควบคุมมุม Yaw ให้เปลี่ยนทิศทางได้ถูกต้องได้ด้วยความผิดพลาดในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

1. ตัวกรองเติมเต็ม (Complementary Filter)

ในการออกแบบตัวกรองเติมเต็มตามสมการที่ 2.4 ให้กำหนดการให้ค่าน้ำหนักของสัญญาณการวัดจากตัวตรวจวัดความเร็วเชิงมุม โดยทำการวัดมุมจากตัวตรวจวัดความเร็วเชิงมุมเทียบกับไมโครเมตรเตอร์ ซึ่งเมื่อทำการทดลองโดยการปรับค่าน้ำหนักมากน้อยสลับกันระหว่างค่าน้ำหนักของตัวตรวจวัดความเร็วเชิงมุมและตัวตรวจวัดความเร่ง พบว่าหากค่าน้ำหนักของ ตัวตรวจวัดความเร็วเชิงมุมมาก ส่วนค่าน้ำหนักของตัวตรวจวัดความเร่งจะน้อย มีผลทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีความแม่นยำมากกว่าการให้น้ำหนักในแบบตัวตรวจวัดความเร่งมีค่ามาก แต่ยังคงมี Bias Drift จากการแปลงค่ามุมด้วยวิธีปริพันธ์ของตัวตรวจวัดความเร็วเชิงมุม ทำให้เมื่อประมวลผลต่อเนื่องจะทำให้ค่ามุมเพิ่มขึ้นเองจนมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ ดังในรูปที่ 5.7 (a) กำหนดให้ค่าน้ำหนักของตัวตรวจวัดความเร็วเชิงมุมมีค่ามาก



รูปที่ 5.7 สัญญาณเอาต์พุตจากตัวกรองเติมเต็ม

แต่ถ้าหากกำหนดให้ค่าน้ำหนักของ ตัวตรวจวัดความเร็วเชิงมุมค่าน้อยสัญญาณเอาต์พุตจะมีสัญญาณสั่นสะเทือนที่เป็นสัญญาณรบกวนในความถี่สูงมากดังในรูปที่ 5.7 (b) ดังนั้นต้องปรับค่าให้เหมาะสม

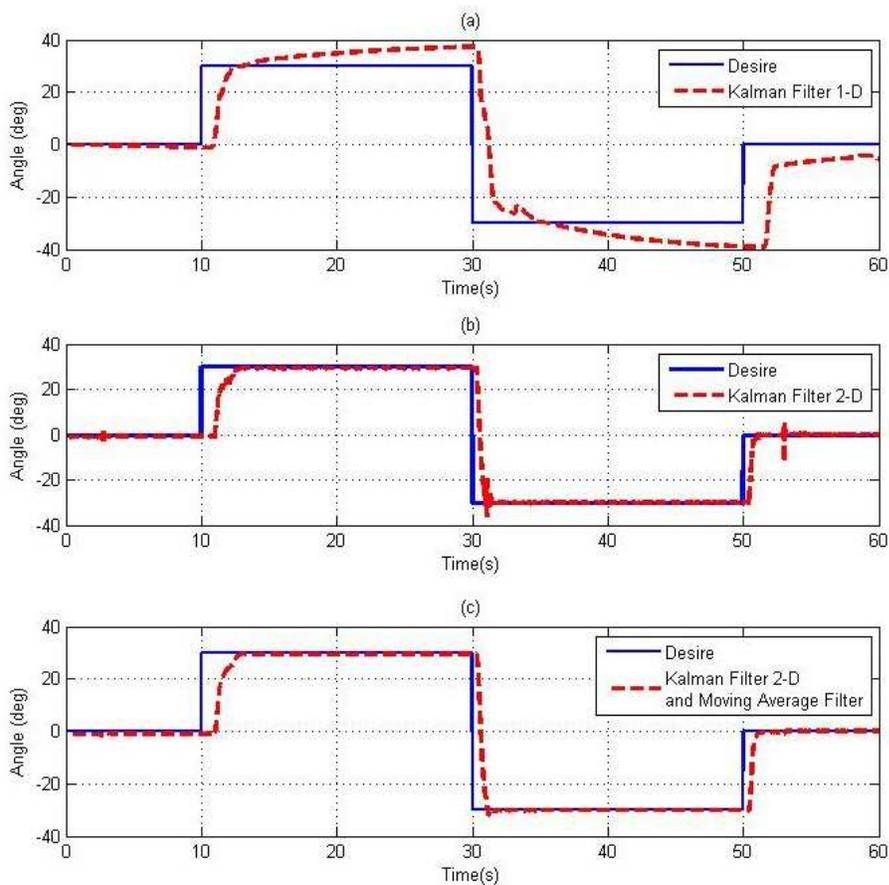
กับเบอร์ของเซ็นเซอร์เบอร์นั้นๆ ซึ่งจากการทดลองทำให้ได้ค่าน้ำหนักของตัวตรวจวัดความเร็วเชิงมุม มีค่าเท่ากับ 0.7273 ดังนั้นทำให้ค่าน้ำหนักของตัวตรวจวัดความเร่งจะมีค่าเท่ากับ 0.2727 ซึ่งได้ผล สัญญาณเอาต์พุตที่ดีที่สุดดังในรูปที่ 5.7 (c) แต่ยังมีสัญญาณรบกวนในความถี่สูงอยู่มาก อีกทั้งตัวกรอง สัญญาณแบบนี้ยังไม่สามารถกำจัดปัญหา Bias Drift ออกไปได้หมด

2. ตัวกรอง Kalman

การออกแบบตัวกรอง Kalman สามารถทำได้สองแบบคือแบบหนึ่งมิติและสองมิติในรูปปริภูมิสถานะ โดยมีสมการและตัวแปรต่างๆ ดังนี้

- การออกแบบตัวกรอง Kalman แบบหนึ่งมิติเพื่อปรับปรุงสัญญาณป้อนกลับของมุม Roll และ Pitch โดยได้คำนวณหาค่าของความแปรปรวนของเซ็นเซอร์ทั้งสอง ทำให้ได้ค่าความแปรปรวน $Q = 0.007$ สำหรับตัวตรวจวัดความเร็วเชิงมุมและค่าความแปรปรวน $R = 0.8794$ สำหรับตัวตรวจวัดความเร่งโดยใช้โปรแกรม MATLAB ผลการทดลองตัวกรองสัญญาณตัวตรวจวัดด้วยตัวกรอง Kalman แบบหนึ่งมิติแสดงดังในรูปที่ 5.8 (a) โดยทำการวัดมุมเทียบกับไม้โปรแทรกเตอร์แล้วจับเวลาจริงขณะมีการเปลี่ยนแปลงมุม ซึ่งจากผลการทดลองในรูปที่ 5.8 (a) จะเห็นได้ว่าตัวกรอง Kalman Filter แบบหนึ่งมิติยังไม่สามารถลดค่าความผิดพลาดของ Bias Drift ให้หมดไปได้

- การออกแบบตัวกรอง Kalman แบบสองมิติ เนื่องจากผลการทดลองของตัวกรอง Kalman แบบหนึ่งมิติ ยังมีค่าความผิดพลาดอยู่ ทำให้ต้องศึกษาและออกแบบตัวกรอง Kalman ในแบบสองมิติ โดยคำนวณหาค่าของความแปรปรวนของเซ็นเซอร์ทั้งสองอีกครั้งด้วยค่าความแปรปรวน $Q = \begin{bmatrix} 0.5075 & 0 \\ 0 & 0.0005 \end{bmatrix}$ และค่าความแปรปรวน $R = 0.01$ ผลการทดลองตัวกรองสัญญาณตัวตรวจวัดด้วยตัวกรอง Kalman แบบสองมิติแสดงดังในรูปที่ 5.8 (b) ซึ่งได้ทำการทดสอบเช่นเดียวกับตัวกรอง Kalman แบบหนึ่งมิติ ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นว่าสามารถลดค่าความผิดพลาดของ Bias Drift ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จากการเปรียบเทียบตัวกรองสัญญาณเซ็นเซอร์ทั้งสามแบบแล้วพบว่าตัวกรอง Kalman แบบสองมิติจะเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานสำหรับควบคุมหุ่นยนต์สี่ล้อมากที่สุด เนื่องจากตัวกรองแบบนี้สามารถกำจัดสัญญาณ Bias Drift ที่เกิดจากตัวตรวจวัดความเร็วเชิงมุมออกไปได้ แต่ยังคงมีสัญญาณสั่นสะเทือนในความถี่สูงอยู่มาก เพื่อแก้ไขปัญหานี้ผู้วิจัยได้ศึกษาตัวกรองสัญญาณ Moving Average ที่สามารถลดสัญญาณสั่นสะเทือนลงได้ด้วยรูปแบบของสมการที่ประยุกต์ใช้งานได้ง่ายดังในสมการที่ 2.11 และผลการทดลองตัวกรองสัญญาณตัวตรวจวัด Moving Average ไปใช้งานหลังจากผ่านตัวกรอง Kalman แบบสองมิติแล้วแสดงดังในรูปที่ 5.8 (c) จะเห็นว่าทำให้สัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากตัวกรองสัญญาณมีการสั่นสะเทือนน้อยลง ทำให้มีความแม่นยำมากขึ้น



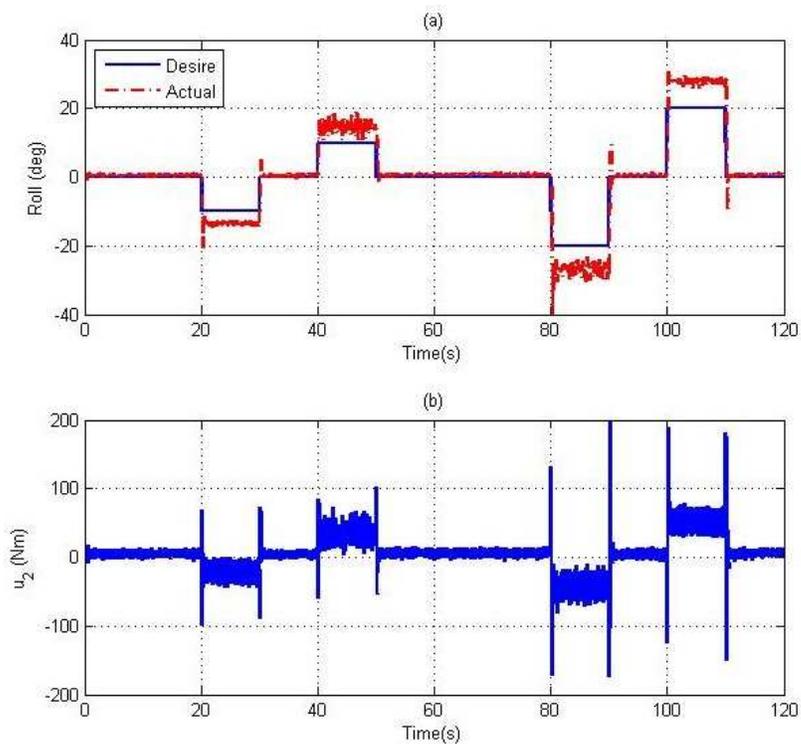
รูปที่ 5.8 ผลการทดลองตัวกรอง Kalman

5.2.2 ระบบควบคุมพีไอดี

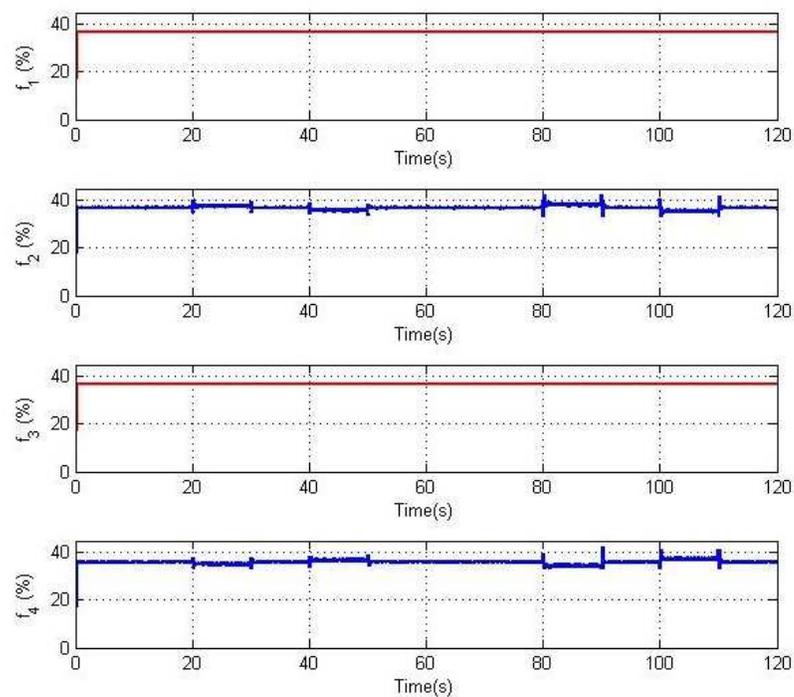
ในการทดลองระบบควบคุมพีไอดีนั้น ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการทดลองด้วยการปรับค่าอัตราขยายบนการจำลองระบบ และปรับแต่งอัตราขยายบนระบบจริง ซึ่งสามารถลดค่าความผิดพลาดลงได้ด้วยการใช้อัตราขยายจากการจำลองระบบเป็นบรรทัดฐานของการปรับแต่งบนระบบจริง

1. การทดลองปรับอัตราขยายบนการจำลองระบบ

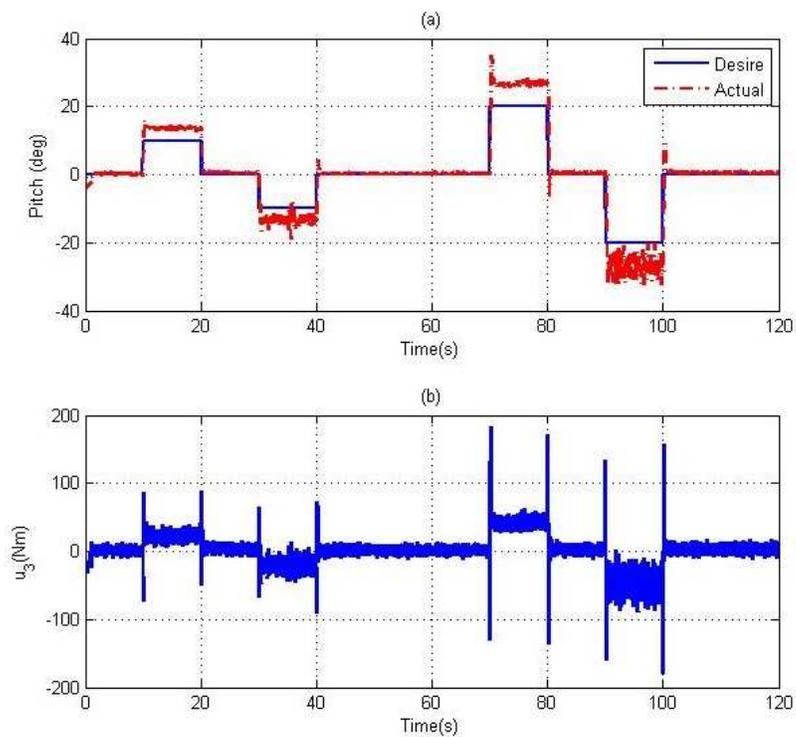
เมื่อออกแบบค่าอัตราขยายที่ให้ผลความผิดพลาดน้อยที่สุด ได้นำค่าที่ออกแบบได้ด้วยการจำลองการทำงานมาใช้กับระบบจริง ซึ่งผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 5.9 (a) , 5.11 (a) และรูปที่ 5.13 (a) เป็นมุม Roll, Pitch และ Yaw ตามลำดับ ซึ่งในการทดลองจริงค่าแรงยกของมอเตอร์แต่ละตัวที่ใช้งานแสดงดังในรูปที่ 5.10, 5.12 และรูปที่ 5.14 ตามลำดับและประสิทธิภาพของระบบควบคุมพีไอดีที่ทำการทดลองแสดงดังในตารางที่ 5.3 สำหรับสัญญาณควบคุมรูปที่ 5.9 (b), 5.11 (b) และ 5.13 (b) จะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณอ้างอิงที่เกิดขึ้น มีสัญญาณควบคุมมีค่ามากกว่าการจำลองระบบอยู่มากประมาณ 200 นิวตันเมตร



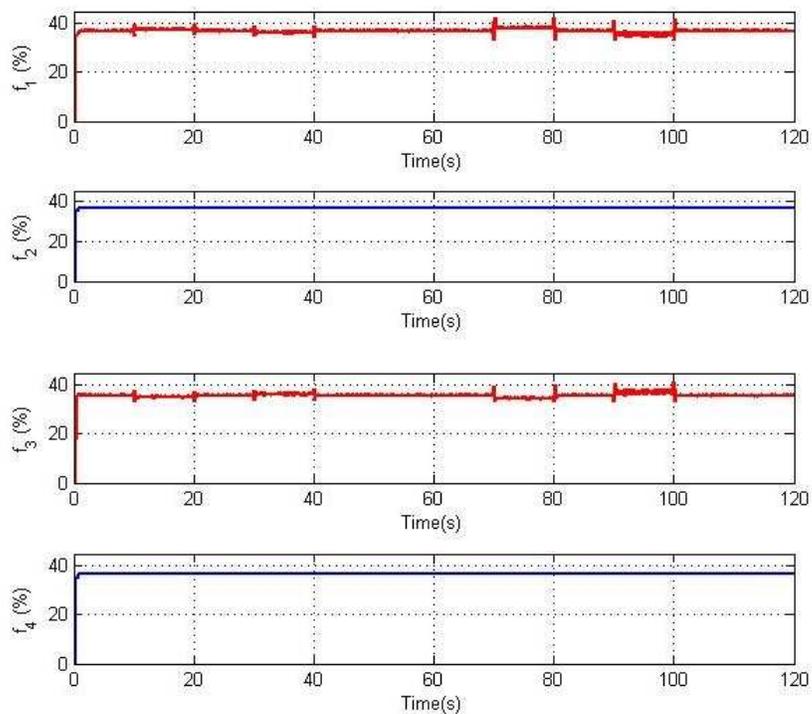
รูปที่ 5.9 ผลการทดลองระบบควบคุมพีดิจิตอลของมุม Roll
ด้วยอัตราขยายจากการจำลองระบบ



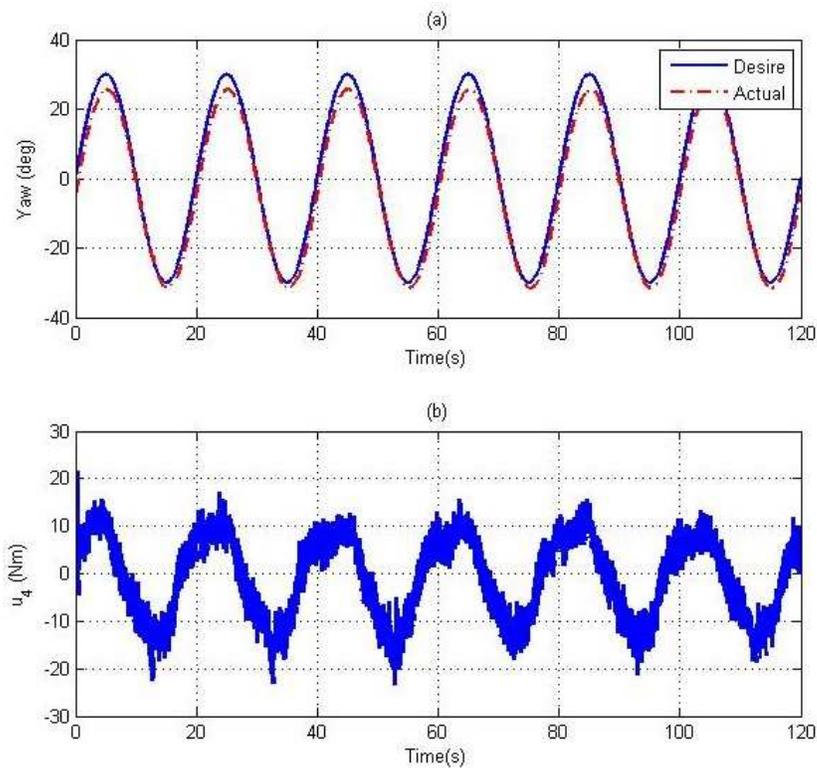
รูปที่ 5.10 แรงยกของแต่ละมอเตอร์ที่ใช้ของการควบคุมมุม Roll
ด้วยอัตราขยายจากการจำลองระบบ



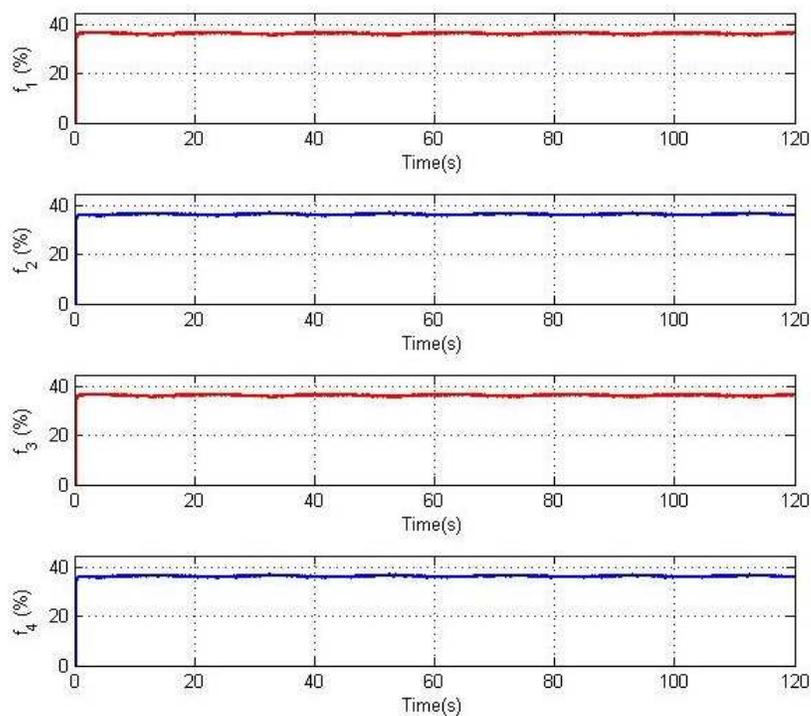
รูปที่ 5.11 ผลการทดลองระบบควบคุมพีดิจองมุม Pitch
ด้วยอัตราขยายจากการจำลองระบบ



รูปที่ 5.12 แรงยกของแต่ละมอเตอร์ที่ใช้ของการควบคุมมุม Pitch
ด้วยอัตราขยายจากการจำลองระบบ



รูปที่ 5.13 ผลการทดลองระบบควบคุมพิกัดของมุม Yaw
ด้วยอัตราขยายจากการจำลองระบบ



รูปที่ 5.14 แรงยกของแต่ละมอเตอร์ที่ใช้ของการควบคุมมุม Yaw
ด้วยอัตราขยายจากการจำลองระบบ

ตารางที่ 5.3 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองระบบควบคุมฟิโอดีด้วยอัตราขยายจากการจำลองระบบ

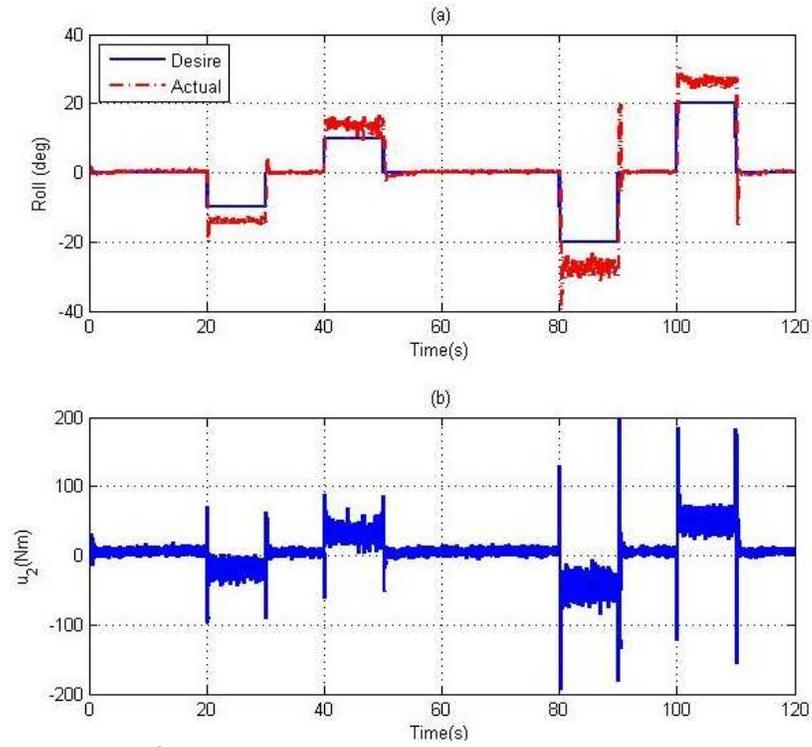
มุม	Roll	Pitch	Yaw
Overshoot	46.5695 %	46.8573 %	-
Setting Time	9.9568 วินาที	9.9485 วินาที	-
Peak	17.09 °	21.08 °	25.65 °
Phase lag	-	-	2.882 °

2. การทดลองปรับแต่งอัตราขยายบนระบบจริง

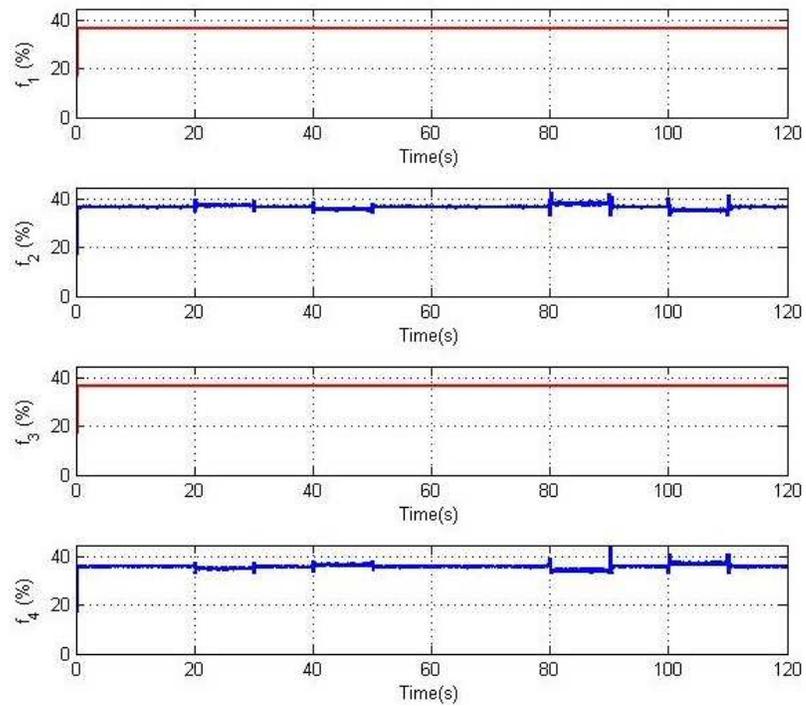
เนื่องด้วยผลการทดลองการปรับแต่งอัตราขยายบนการจำลองยังคงมีค่าความผิดพลาดอยู่ ดังนั้นเพื่อลดค่าความผิดพลาดดังกล่าวในเบื้องต้น ผู้วิจัยได้ทดลองปรับแต่งอัตราขยายบนระบบจริง โดยใช้อัตราขยายบนการจำลองระบบเป็นบรรทัดฐานของการปรับแต่ง ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาสังเกตเห็นว่าความผิดพลาดพุ่งเกินสูงและสภาวะคงตัวไม่มีค่าไม่เป็นศูนย์ทำให้ต้องเพิ่มอัตราขยายโอ เพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวเป็นศูนย์ แต่อย่างไรก็ตามก็ทำให้ระบบมีค่ามุมที่เป็นเอตต์พุ่งเกินสูงตามไปด้วย ฉะนั้นจึงปรับลดอัตราขยายพิลงเพื่อให้ค่าพุ่งเกินอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ทำให้ได้อัตราขยายดังในตารางที่ 5.4 และผลการทดลองการปรับแต่งอัตราขยายบนระบบจริงแสดงดังในรูปที่ 5.15 (a), 5.17 (a) และ 5.19 (a) สำหรับมุม Roll, Pitch และ Yaw ตามลำดับ และสำหรับรูปที่ 5.16, 5.18 และ 5.20 แสดงแรงยกของมอเตอร์แต่ละตัว โดยมีสัญญาณควบคุมดังในรูปที่ 5.15 (b), 5.17 (b) และ 5.19 (b)

ตารางที่ 5.4 ปรับแต่งอัตราขยายของตัวควบคุมทิศทาง

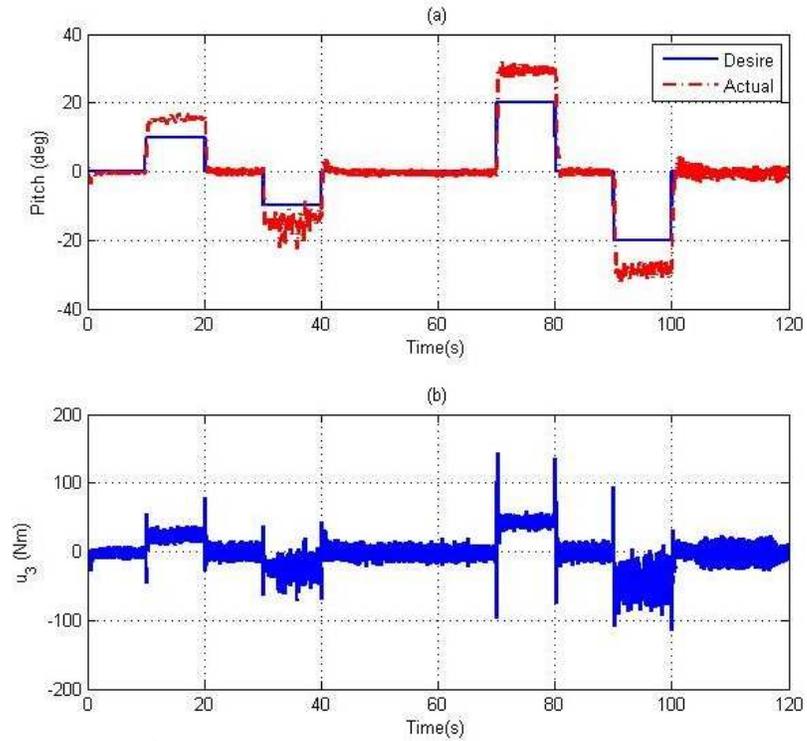
มุม	K_p	K_i	K_d
Roll	2.8	0.065	0.2
Pitch	2.0	0.055	0.2
Yaw	4	0.05	0.095



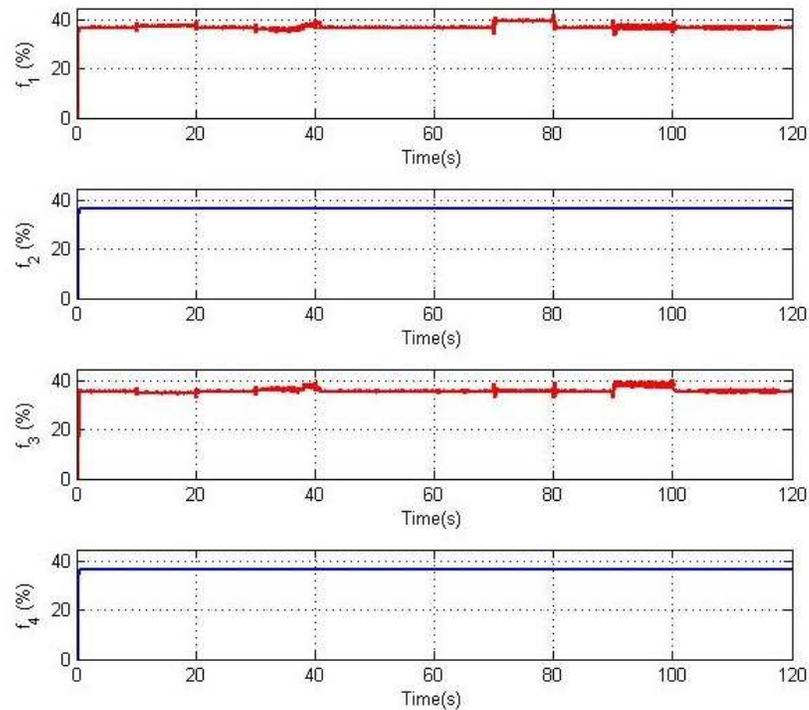
รูปที่ 5.15 ผลการทดลองระบบควบคุมฟีดแบ็คของมุม Roll ด้วยการปรับแต่งอัตราขยายบนระบบจริง



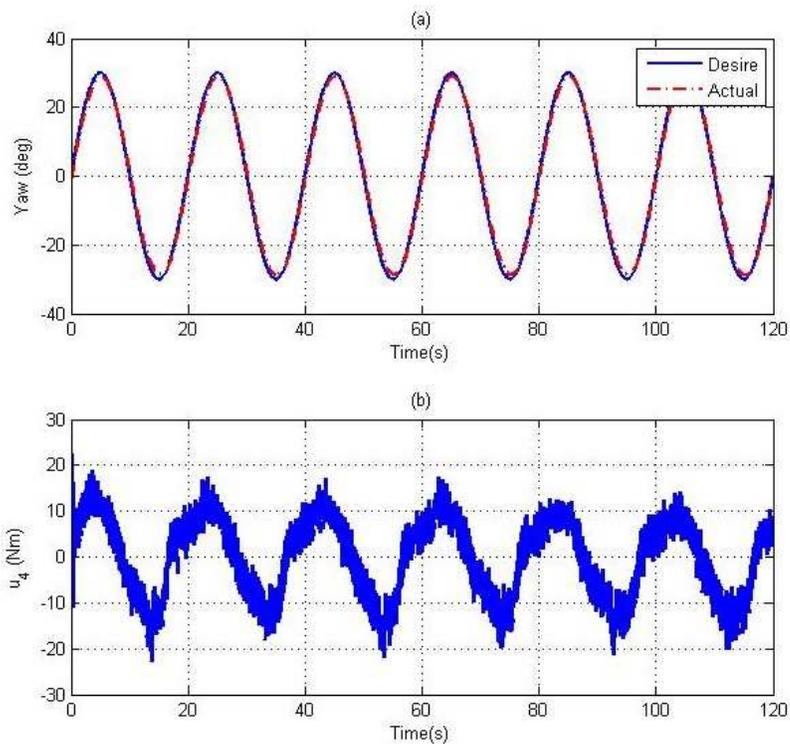
รูปที่ 5.16 แรงยกของแต่ละมอเตอร์ที่ใช้ของการควบคุมมุม Roll ด้วยการปรับแต่งอัตราขยายบนระบบจริง



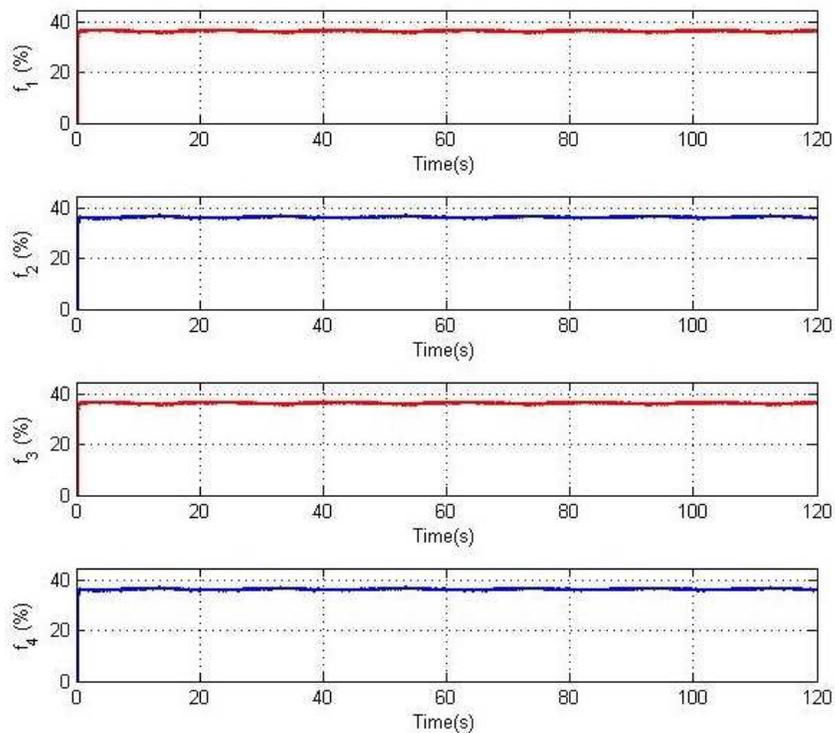
รูปที่ 5.17 ผลการทดลองระบบควบคุมพีไอดีของมุม Pitch
ด้วยการปรับอัตราขยายบนระบบจริง



รูปที่ 5.18 แรงยกของแต่ละมอเตอร์ที่ใช้ของการควบคุมมุม Pitch
ด้วยการปรับอัตราขยายบนระบบจริง



รูปที่ 5.19 ผลการทดลองระบบควบคุมพิกัดของมุม Yaw
ด้วยการปรับอัตราขยายบนระบบจริง



รูปที่ 5.20 แรงยกของแต่ละมอเตอร์ที่ใช้ของการควบคุมมุม Yaw
ด้วยการปรับอัตราขยายบนระบบจริง

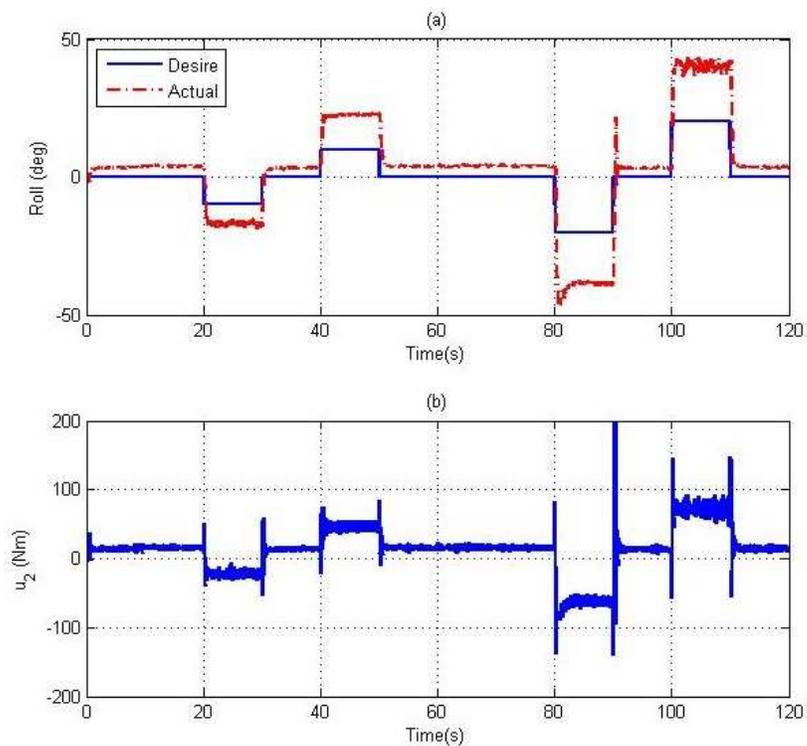
ตารางที่ 5.5 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองระบบควบคุมฟิโอดีด้วยการปรับอัตราขยายบนระบบจริง

มุม	Roll	Pitch	Yaw
Overshoot	28.5714 %	10.6125 %	-
Setting Time	9.9552 วินาที	9.9690 วินาที	-
Peak	15.4699 °	15.53 °	28.8 °
Phase lag	-	-	1.9824 °

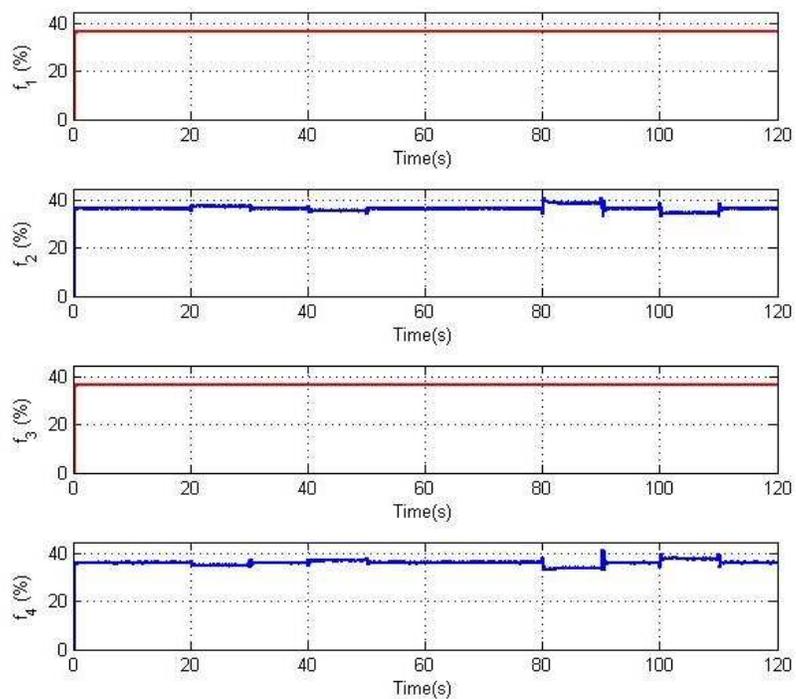
จากการทดลองระบบควบคุมฟิโอดีด้วยอัตราขยายจากการจำลองระบบ สามารถตามรอยสัญญาณอินพุตได้ แต่ยังมีค่าความผิดพลาดจากฮาร์ดแวร์และการวัดค่าจากตัวตรวจวัด โดยมีค่าพุ่งเกินสูงกว่ายอมรับได้และเวลาที่เข้าสู่สภาวะคงตัว (Setting Time) ช้ากว่าผลที่ได้จากการจำลอง ดังนั้นผู้วิจัยเห็นว่าต้องออกแบบระบบควบคุมที่มีความคงทน (Robustness) มากขึ้นสำหรับระบบนี้ แต่อย่างไรก็ตามระบบควบคุมฟิโอดีสามารถปรับปรุงให้ประสิทธิภาพของระบบควบคุมให้ดีขึ้นได้ด้วยการปรับแต่งอัตราขยายบนระบบจริง โดยใช้อัตราขยายจากการจำลองระบบเป็นบรรทัดฐานสำหรับการปรับแต่ง หากระบบมีค่าพุ่งเกินสูงได้ทำการลดอัตราขยายฟิลลงและหากเวลาที่เข้าสู่สภาวะคงตัวไม่เป็นศูนย์ให้เพิ่มอัตราขยายโอเพียงเล็กน้อย ซึ่งด้วยวิธีการดังกล่าวก็สามารถทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นด้วยข้อจำกัดของระบบควบคุมฟิโอดีผู้วิจัยเห็นว่าจำเป็นต้องออกแบบระบบควบคุมที่มีความคงทน (Robustness) มากขึ้นสำหรับระบบนี้

5.2.2 ระบบควบคุมแอลคิวอาร์

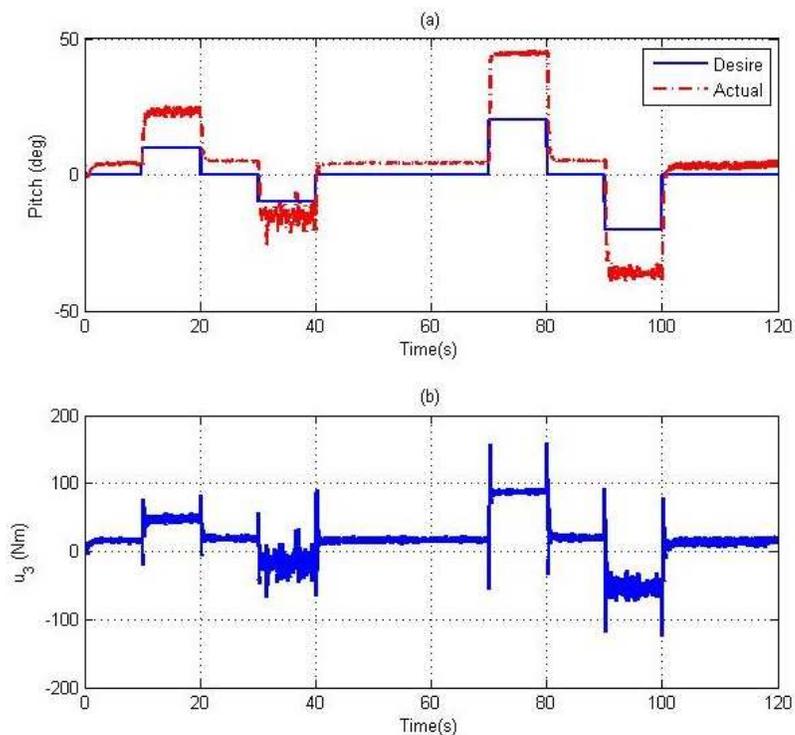
การทดลองระบบควบคุมแอลคิวอาร์ได้นำค่าที่ออกแบบได้ด้วยการจำลองการทำงานมาใช้กับระบบจริง ซึ่งผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 5.21 ,5.23 และรูปที่ 5.25 เป็นมุม Roll, Pitch และ Yaw ตามลำดับ ซึ่งในการทดลองจริงจะค่าแรงยกของมอเตอร์แต่ละตัวที่ใช้งานแสดงดังในรูปที่ 5.22, 5.24 และรูปที่ 5.26 ตามลำดับ และประสิทธิภาพของระบบควบคุมแอลคิวอาร์ ที่ทำการทดลองแสดงดังในตารางที่ 5.6



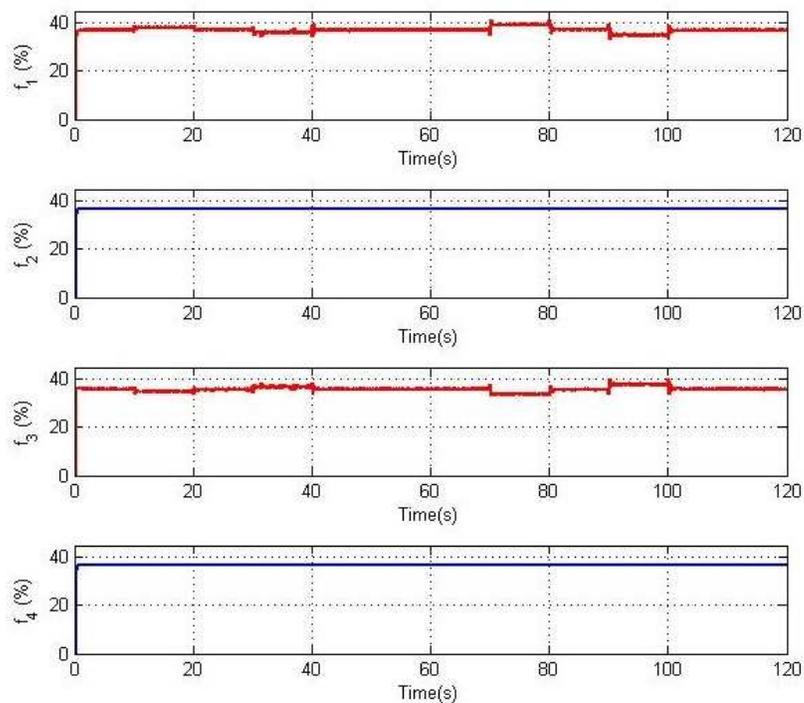
รูปที่ 5.21 ผลการทดลองระบบควบคุมแอดคิวอาร์ของมุม Roll



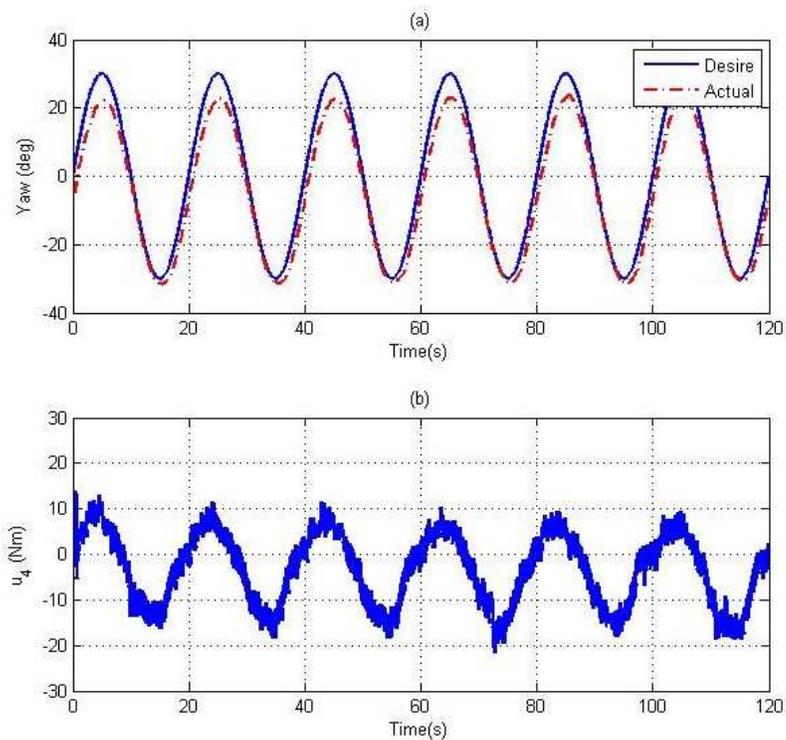
รูปที่ 5.22 แรงยกของแต่ละมอเตอร์ที่ใช้ของการควบคุมมุม Roll



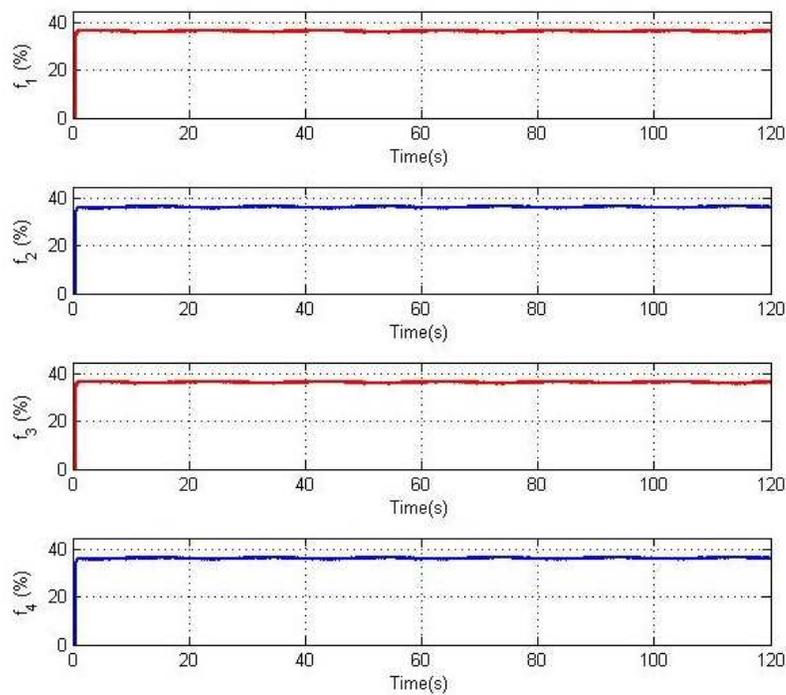
รูปที่ 5.23 ผลการทดลองระบบควบคุมแอตคิวอาร์ของมุม Pitch



รูปที่ 5.24 แรงยกของแต่ละมอเตอร์ที่ใช้ของการควบคุมมุม Pitch



รูปที่ 5.25 ผลการทดลองระบบควบคุมแอดคิวอาร์ของมุม Yaw



รูปที่ 5.26 แรงยกของแต่ละมอเตอร์ที่ใช้ของการควบคุมมุม Yaw

ตารางที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองระบบควบคุมแอลคิวอาร์

มุม	Roll	Pitch	Yaw
Overshoot	10.2797 %	14.5996 %	-
Setting Time	29.8534 วินาที	19.9252 วินาที	-
Peak	15.77 °	16.17 °	23.41 °
Phase	-	-	6.4802 °

จากผลการทดลองระบบควบคุมแอลคิวอาร์ผลปรากฏว่าระบบควบคุมแอลคิวอาร์ที่ออกแบบขึ้นมีค่าความผิดพลาดมากกว่าระบบควบคุมพีไอดี เนื่องจากระบบควบคุมแอลคิวอาร์เป็นระบบควบคุมเชิงเส้น (Linear Control System) ดังนั้นในการหาค่าอัตราขยายต้องลดรูปพลวัตของหุ่นยนต์สี่ใบพัดให้สามารถหาค่าอัตราขยายได้ให้รูปของปริภูมิสถานะ (State Space Model) ส่งผลให้พลวัตของระบบมีความผิดพลาดเพิ่มขึ้นจากเดิม อีกทั้งตัวควบคุมแอลคิวอาร์เป็นตัวควบคุมแบบ State Regulator ที่ไม่สามารถติดตามรอยสัญญาณอินพุตได้ ทำให้ผู้วิจัยต้องออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าเพิ่มเติมด้วยตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าจะทำให้ระบบถูกระทบได้ง่ายจากค่าผิดพลาดของพลวัตและการรบกวนจากภายนอก ซึ่งเป็นผลทำให้เมื่อนำค่าอัตราขยายจากการจำลองไปใช้งานจะมีความผิดพลาดเกินขึ้นสูง [17,18] ดังนั้นสำหรับแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าวควรปรับปรุงสัญญาณป้อนกลับจากตัวตรวจวัดให้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้นและสำหรับการออกแบบระบบควบคุมแอลคิวอาร์เพื่อติดตามสัญญาณอินพุตควรใช้ตัวควบคุมปริพันธ์เพราะเป็นวิธีควบคุมที่สามารถแก้ไขข้อบกพร่องของตัวควบคุมป้อนไปข้างหน้าได้ และเมื่อพิจารณาผลการทดลองของระบบควบคุมทั้งสองแล้ว