# บทที่ 4

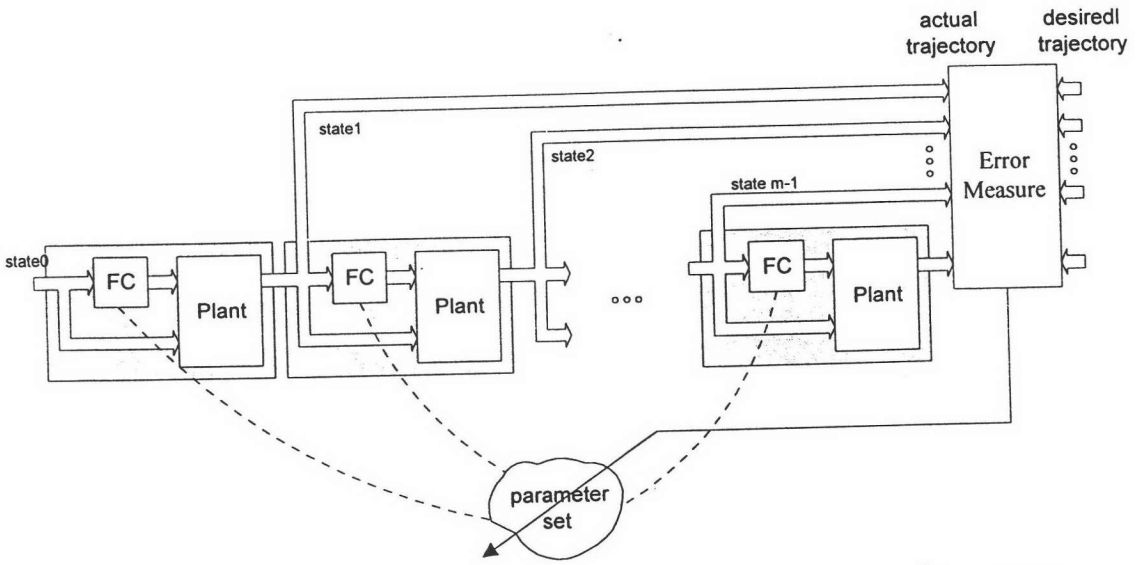
# การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัว

ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 1 ได้มีการทดสอบใช้การควบคุมแบบฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวกับกระบวนการหลายอย่างซึ่งประสบความสำเร็จในด้านการควบคุมและยังมีคุณสมบัติการทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบ ในบทนี้จะทำการทดสอบตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ควบคุมก้านที่ตั้งอยู่บนรถให้ตั้งตรง ซึ่งใช้การสร้างแบบจำลองชนิดที่ไม่เป็นเชิงเส้นขึ้นเพื่อจำลองระบบ และกำหนดให้มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นกับระบบและมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดชนิดขาวแบบเกาส์และสีแบบเกาส์ ส่วนแรกจะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้การเรียนรู้เพื่อปรับตัวควบคุมแบบข่ายงานระบบประสาทและทำการทดสอบตัวควบคุมที่ได้กับระบบจำลองเพื่อศึกษาการลดผลของสัญญาณรบกวน หลังจากนั้นทำการเปลี่ยนวิธีการเรียนรู้ตัวควบคุมฟัซซีเป็นวิธีกำลังสองน้อยสุดเชิงตั้งฉาก

## การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาท

ก่อนที่จะทำการออกแบบตัวควบคุมชนิดที่มีการปรับตัว จะต้องทำการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีเพื่อเป็นตัวควบคุมเริ่มต้นที่จะทำการปรับและเขียนให้อยู่ในรูปของเน็ตเวอร์กฟัซซีที่มีการปรับตัว (Adaptive Network Fuzzy Inference System : ANFIS) หลังจากนั้นจึงทำการปรับตัวควบคุมโดยใช้วิธีการของข่ายงานระบบประสาท ซึ่งข้อมูลในการเรียนรู้ได้จากคู่สัญญาณเข้าและออกที่กำหนด

เนื่องจากในการปรับตัวควบคุม จำเป็นจะต้องมีแบบอย่างที่ต้องการให้ตัวควบคุมเรียนรู้ ซึ่งแบบอย่างนี้สามารถเขียนอยู่ในรูปของคู่สัญญาณเข้าและออกที่ต้องการ โดยปกติแล้วตัวควบคุมจะมีสัญญาณเข้าเป็นค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าเป้าหมาย (Set point) และตัวแปรสถานะของกระบวนการ ส่วนสัญญาณออกเป็นสัญญาณควบคุม ในความเป็นจริงแล้วเราจะไม่ทราบสัญญาณควบคุมที่ทำให้กระบวนการมีผลตอบที่ดีได้ แต่เนื่องจากเราสามารถกำหนดลักษณะของผลตอบของกระบวนการที่ต้องการได้และเนื่องจากค่าเป้าหมายของการควบคุมก้านที่ตั้งอยู่บนรถให้ตั้งตรงจะกำหนดเป็นศูนย์ทั้งหมด ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ จึงกำหนดให้ข้อมูลในการเรียนรู้เป็นคู่สัญญาณเข้า/ออกระหว่างตัวแปรสถานะของกระบวนการและผลตอบของกระบวนการที่ต้องการและเปลี่ยนรูปแบบการปรับตัวควบคุมใหม่ โดยเขียนเป็นแผนภาพกรอบได้ดังรูปที่ 4.1




**รูปที่ 4.1** แสดงแผนภาพกรอบของโครงสร้างการปรับตัวของตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัว

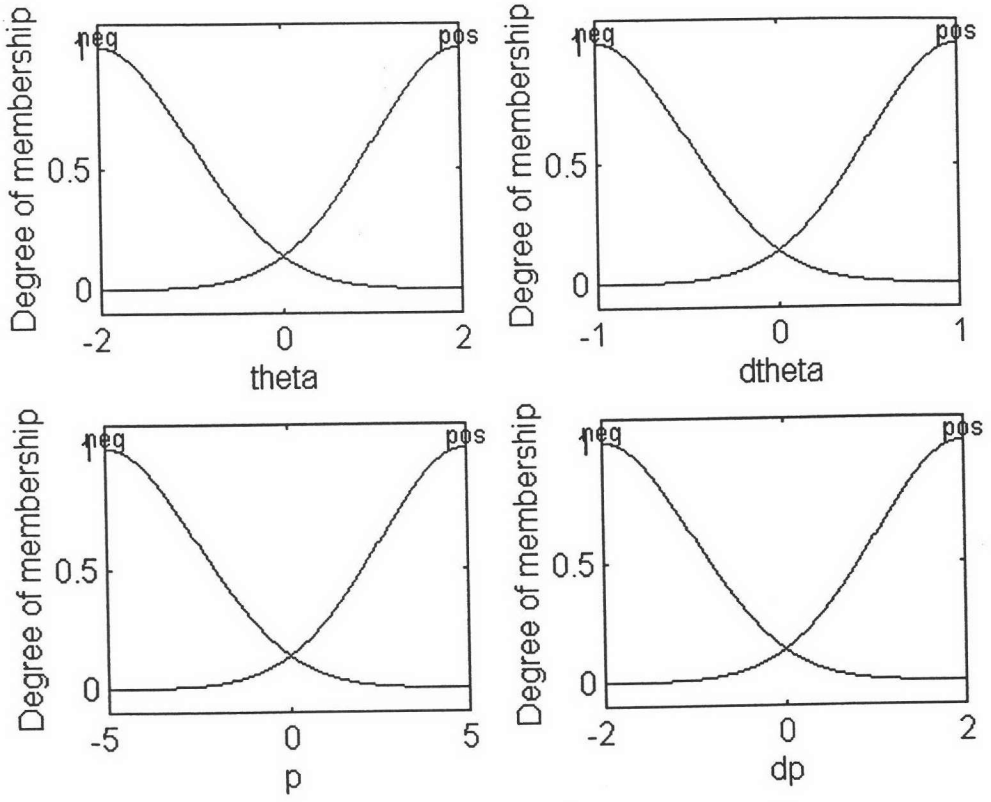
เนื่องจากตัวแปรสำคัญที่ต้องการควบคุมของการตั้งก้านที่อยู่บนรถให้ตรงมีสองตัวคือมุมของก้าน($\theta$) และตำแหน่งรถ($p$) ซึ่งต้องการควบคุมก้านให้อยู่ที่ศูนย์องศาและตำแหน่งรถให้อยู่ที่จุดกำเนิดอ้างอิงจุดหนึ่งซึ่งกำหนดเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงกำหนดให้สัญญาณเข้ามี 4 ตัวคือ มุมของก้าน ($\theta$) ความเร็วเชิงมุมของก้าน($\dot{\theta}$) ตำแหน่งรถ ($p$) และความเร็วรถ ($\dot{p}$) ส่วนสัญญาณออกกำหนดโดยรูปแบบของผลตอบที่ต้องการซึ่งในที่นี้กำหนดให้เป็นดังสมการ (4.1)

$$\begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ p \\ \dot{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

กำหนดฟังก์ชันภาวะสมาชิกเริ่มต้นของสัญญาณเข้าแต่ละตัวให้มีลักษณะเหมือนกัน คือเป็นฟังก์ชันที่มีการแจกแจงแบบเกาส์เซียนดังสมการ (4.2) โดยกำหนดให้มีพารามิเตอร์ที่สามารถปรับได้สองตัวคือ variace($\sigma$) และจุดศูนย์กลางของฟังก์ชัน($c$)

$$f(x;\sigma,c) = e^{\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}} \tag{4.2}$$

ฟังก์ชันภาวะสมาชิกประกอบไปด้วยตัวแปรภาษา 2 ตัวคือ Negative(Neg) มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ค่าต่ำสุดของสัญญาณเข้า และ Positive(Pos) มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ค่ามากสุดของสัญญาณเข้าดังรูป 4.2 กำหนดให้มุมของก้าน (theta) ความเร็วเชิงมุมของก้าน (dtheta) ตำแหน่งรถ (p) และความเร็วรถ (dp) มีฟังก์ชันภาวะสมาชิกอยู่ในช่วง -2 เรเดียน ถึง 2 เรเดียน -1 เรเดียนต่อวินาที ถึง 1 เรเดียนต่อวินาที -5 เมตร ถึง 5 เมตร และ -2 เมตรต่อวินาที ถึง 2 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ




**รูปที่ 4.2** ฟังก์ชันภาวะสมาชิกเริ่มต้นของสัญญาณเข้า

เนื่องจากตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทในการเรียนรู้ต้องมีการคำนวณในแต่ละรอบมาก และเนื่องจากตัวควบคุมฟัซซียังสามารถควบคุมระบบได้ดีเมื่อดึงกฎที่ใช้ในการควบคุมออกไม่มากกว่า 50% [Brown, Martin and Harris, Chris] ดังนั้นจึงกำหนดให้กฎเริ่มต้นให้มีจำนวนเท่ากับ 4 กฎและมีน้ำหนักของกฎเท่ากันทุกกฎคือเท่ากับ 1 โดยแบ่งกฎออกเป็น 2 กลุ่มคือกฎที่มีตัวแปรภาษาในส่วนเงื่อนไขเป็นมุมของก้านและความเร็วเชิงมุม และกฎที่มีตัวแปรภาษาในส่วนเงื่อนไขเป็นตำแหน่งรถและความเร็วของรถ เขียนอยู่ในรูปของกฎฟัซซีแบบซูเกโนะได้ดังนี้

กลุ่มที่ 1

If (theta is neg) and (dtheta is neg) then (u is f1)

If (theta is pos) and (dtheta is neg) then (u is f2)

กลุ่มที่ 2

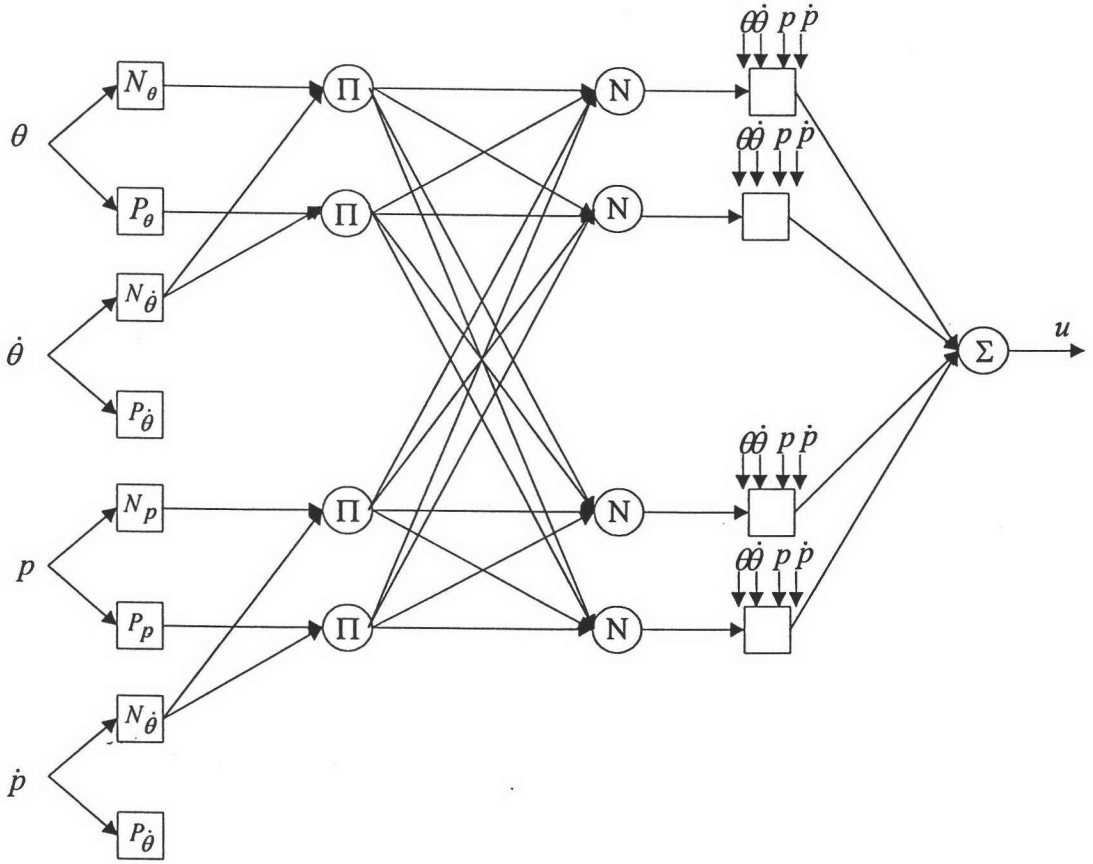
If (p is neg) and (dp is neg) then (u is f3)

If (p is pos) and (dp is neg) then (u is f4)

โดยที่ $f_i = k_i\theta + l_i\dot{\theta} + m_i p + n_i \dot{p} + o_i \quad ; \quad i = 1,\ldots,4$ ซึ่งกำหนดให้พารามิเตอร์เริ่มต้นทุกตัวมีค่าเท่ากับศูนย์

กำหนดให้ระบบฟัซซีใช้วิธีการเลือกค่าน้อยสุดสำหรับตัวดำเนินการ “และ” และเลือกค่ามากสุดสำหรับตัวดำเนินการ “หรือ” และกำหนดให้มีการดีฟัซซิฟิเคชันแบบค่าเฉลี่ย

เนื่องจากการใช้ข่ายงานระบบประสาทในการเรียนรู้จะต้องทำการแปลงระบบฟัซซีให้อยู่ในรูปของเครือข่ายที่สามารถปรับพารามิเตอร์ได้ดังกล่าวในบทที่ 2 จากระบบฟัซซีที่กำหนดข้างต้นสามารถเขียนอยู่ในรูปของเครือข่ายดังรูปที่ 4.3




**รูปที่ 4.3** แสดงข่ายงานระบบประสาทที่เขียนขึ้นแทนระบบฟัซซีของตัวควบคุม

จากรูป 4.3 จะเห็นได้ว่าในชั้นที่ 1 มีจำนวนปมเท่ากับ 8 ปม ซึ่งในแต่ละปมจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการปรับสองตัวคือ $\sigma$ และ $c$ ดังสมการ (4.2) เพราะฉะนั้นในชั้นที่ 1 มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 16 ตัว ซึ่งพารามิเตอร์ในชั้นนี้เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ส่วนในชั้นที่ 4 มีจำนวนปมเท่ากับจำนวนกฎคือ 4 ปมซึ่งในแต่ละปมจะมีพารามิเตอร์ที่เป็นเชิงเส้นเท่ากับ 5 ตัวคือ $k_i$, $l_i$, $m_i$, $n_i$ และ $o_i$ ดังนั้นในชั้นที่ 5 มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 20 ตัว

ข่ายงานระบบประสาทที่ได้จากการแปลงระบบฟัซซีที่กำหนดมีจำนวนชั้น 5 ชั้น และมีจำนวนปมเท่ากับ 8, 4, 4, 4 และ 1 ในชั้น 1 ถึง 5 ตามลำดับ มีพารามิเตอร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นในชั้นที่ 1 ทั้งหมด 16 ตัวและพารามิเตอร์ที่เป็นเชิงเส้นในชั้น 4 ทั้งหมด 20 ตัว รวมทั้งหมดมีพารามิเตอร์ที่ต้องปรับ 36 ตัว

ทำการเรียนรู้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของข่ายงานระบบประสาทที่ได้ โดยกำหนดให้มุมของก้านและตำแหน่งรถที่ต้องการมีค่าเป็นศูนย์ตลอดทุกช่วงเวลา และทำการเรียนรู้ซึ่งใช้การปรับค่าพารามิเตอร์คล้ายกับวิธีสตีปเปสท์เดสเซ็นต์ (Steepest descent) คือทำการหาความชัน (Gradient) ของดรรชนีสมรรถนะ (Performance index) แล้วจึงทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ไปในทางตรงกันข้ามด้วยระยะการก้าวค่าหนึ่ง

กำหนดให้ดรรชนีสมรรถนะเป็นดังสมการ (4.3) ซึ่งมีรูปแบบของสมการเหมือนกับการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของตัวชดเชยในบทที่ 3 และกำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) Q และ R มีค่าเหมือนกับกรณีของตัวชดเชยคือ R = 0.01 และ Q = diag{0.3 , 0.3 , 0.15 , 0.15}

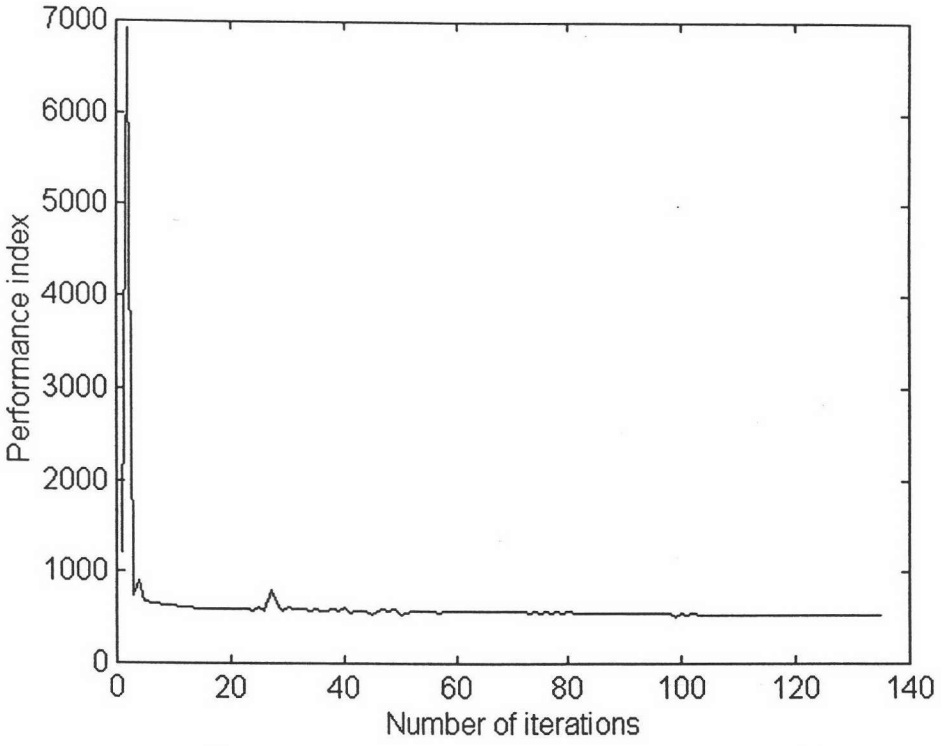
$$J = \sum_{k=1}^{t_s} (e_k^T Q e_k + u_k{}^T R u_k) \tag{4.3}$$

โดยที่ e เป็นผลรวมที่เวลาต่าง ๆ ของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างแนววิถีของตัวแปรสถานะที่ออกจากระบบจริง (Actual trajectory) และแนววิถีของตัวแปรสถานะที่กำหนดขึ้น (Desire trajectory) และ u เป็นผลรวมของสัญญาณควบคุมที่เวลาต่าง ๆ

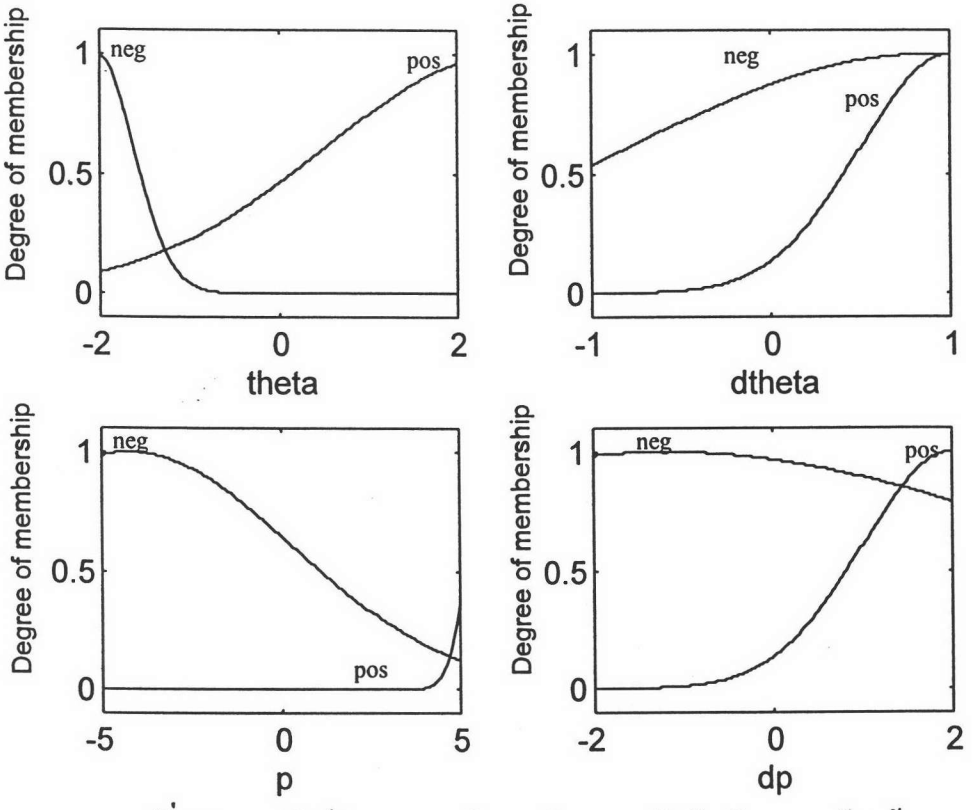
กำหนดเงื่อนไขการจบการคำนวณ (Terminating criteria) ดังนี้คือ เมื่อผลต่างของดรรชนีสมรรถนะ (J) ในรอบการคำนวณซ้ำ (Iteration) ที่ t และ t-1 มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.000001 ส่วนระยะการก้าวในแต่ละรอบการคำนวณซ้ำกำหนดให้มีค่าลดลงทุกรอบการคำนวณซ้ำด้วยอัตรา 0.99 เท่าของระยะการก้าวเดิม และเมื่อค่าของดรรชนีสมรรถนะในแต่ละรอบการคำนวณซ้ำลดลงติดต่อกัน 4 ครั้งจะเพิ่มระยะการก้าวขึ้นด้วยอัตรา 1.15 เท่าของระยะการก้าวเดิม

ใช้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมฟัซซีที่กำหนดข้างต้น และกำหนดระยะการก้าวเริ่มต้นเท่ากับ 1 ทำการฝึกตัวควบคุม จนกระทั่งเป็นไปตามเงื่อนไขการจบการคำนวณ ได้ค่าของดรรชนีสมรรถนะเท่ากับ 539.2432 รูปที่ 4.4 แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะในแต่ละรอบการทำซ้ำ รูปที่ 4.5 แสดงฟังก์ชันภาวะสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีหลังจากการเรียนรู้โดยใช้ข่ายงานระบบประสาท และฟังก์ชันในส่วนของผล (Consequence) เป็นดังสมการ (4.4)

$$\left.\begin{aligned} f_1 &= 0.4529\theta - 0.2297\dot{\theta} - 0.5121p - 0.05997\dot{p} - 0.03779 \\ f_2 &= -3.344\theta + 0.2001\dot{\theta} - 8.6p - 8.211\dot{p} - 8.767 \\ f_3 &= 1.418\theta - 6.073\dot{\theta} - 8.86p - 10.63\dot{p} + 7.567 \\ f_4 &= -1.216\theta - 4.025\dot{\theta} - 0.7467p - 1.107\dot{p} - 0.02334 \end{aligned}\right\} \tag{4.4}$$

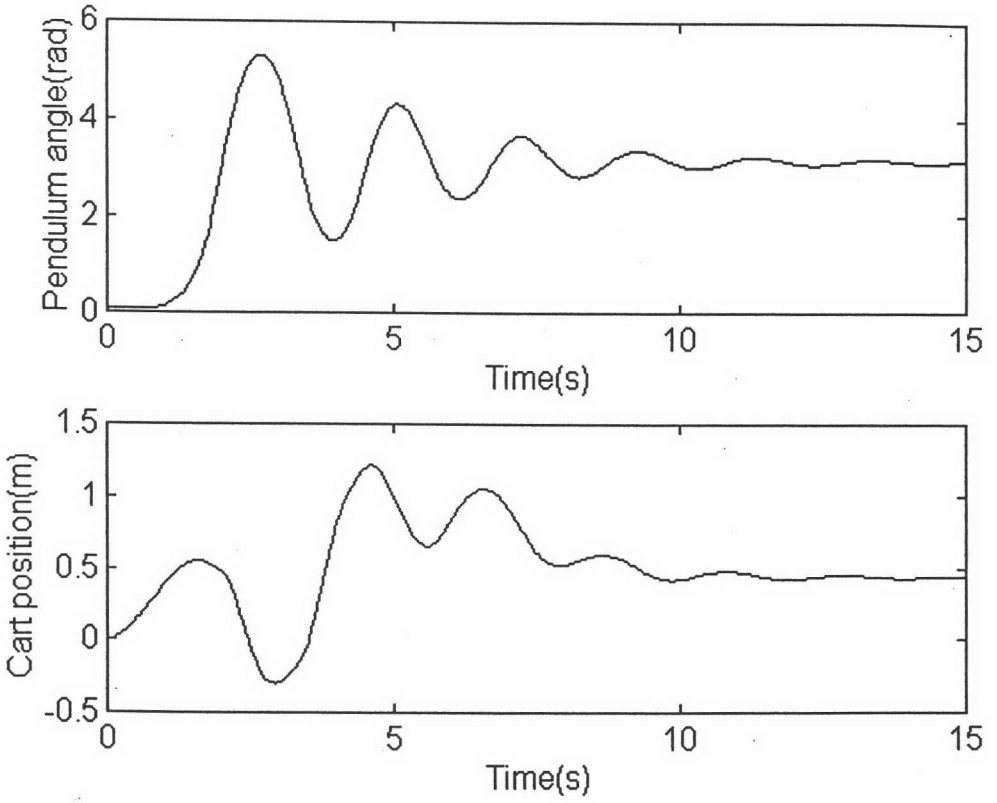



**รูปที่ 4.4** แสดงค่าของครรชนีสมรรถนะในแต่ละรอบการทำซ้ำ




**รูปที่ 4.5** แสดงฟังก์ชันภาวะสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีหลังจากการเรียนรู้โดยใช้ข่ายงานระบบประสาท

นำตัวควบคุมที่ได้ไปใช้ในการควบคุมก้านที่ตั้งอยู่บนรถให้ตั้งตรงโดยใช้ระบบจำลองแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและกำหนดให้มุมเริ่มต้นของก้านเท่ากับ 0.1 เรเดียนต่อวินาที และกำหนดขอบเขตของสัญญาณควบคุมให้อยู่ในช่วง -15 นิวตัน ถึง 15 นิวตัน รูปที่ 4.6 แสดงมุมของก้านและตำแหน่งรถ เมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้การเรียนรู้แบบข่ายงานระบบประสาท



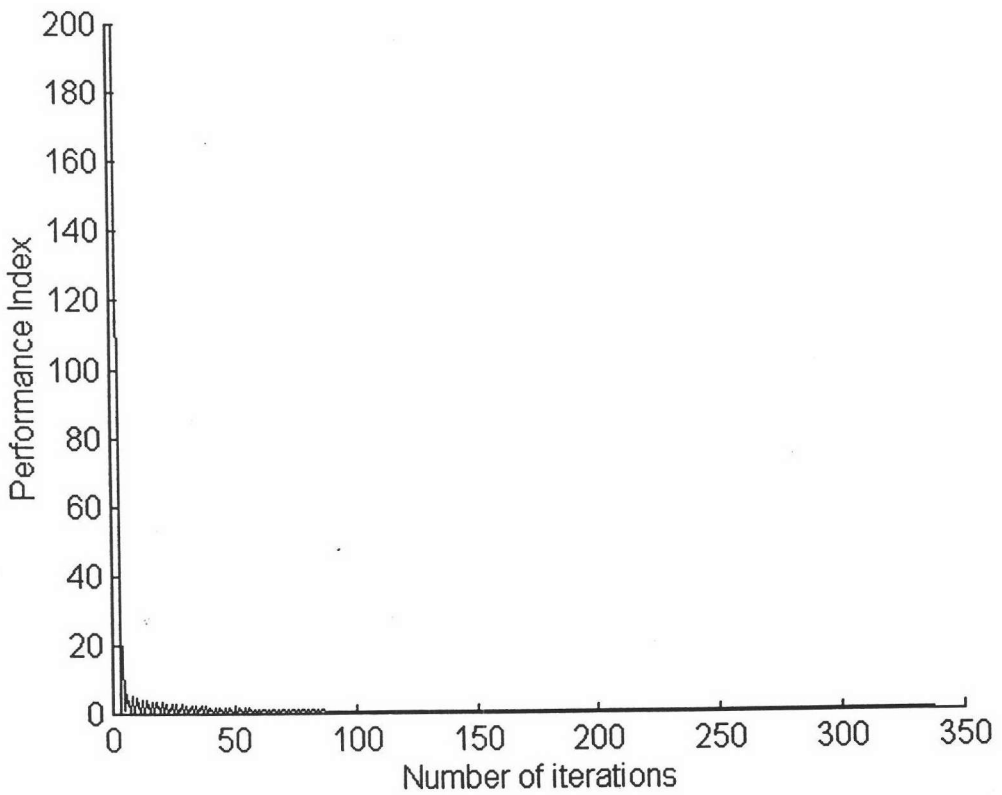

**รูปที่ 4.6** แสดงมุมของก้านและตำแหน่งรถเมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้การเรียนรู้แบบข่ายงานระบบประสาท

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่ามุมของก้านไม่ตั้งตรงและตำแหน่งรถไม่เข้าสู่ตำแหน่งศูนย์ แต่เนื่องจากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าของดรรชนีสมรรถนะเข้าสู่ค่า ๆ หนึ่ง คือ 539.2432 นั่นคือการเรียนรู้ของตัวควบคุมเข้าสู่จุดที่เหมาะสม (Optimum point) แล้ว ซึ่งในที่นี้เป็นจุดที่มีค่าต่ำสุด (minimum point) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าจุดต่ำสุดจุดนี้เป็นจุดต่ำสุดในวงแคบ (Local minimum) ทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลหลาย ๆ ค่าพบว่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมลู่เข้าสู่จุดต่ำสุดในวงแคบจุดเดียวกัน

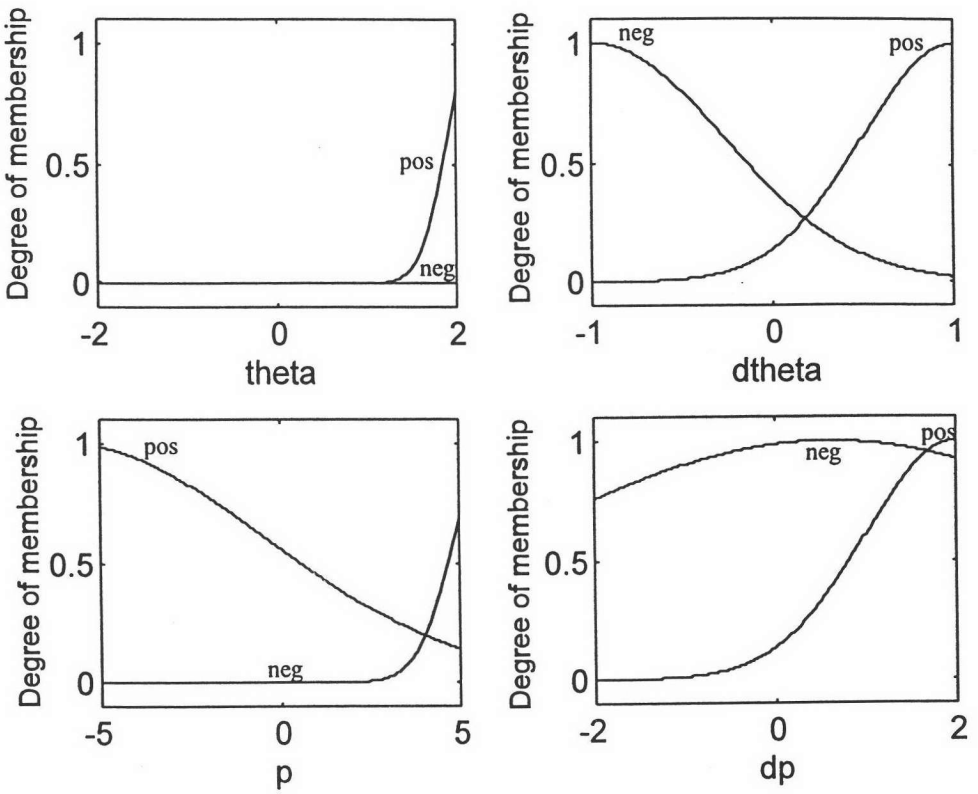
เนื่องจากตัวชดเชยในบทที่ 3 สามารถควบคุมก้านไม้ที่ตั้งอยู่บนรถให้ตั้งตรงได้และพารามิเตอร์ของตัวชดเชยเป็นค่าอัตราขยายที่คูณอยู่กับตัวแปรสถานะและเนื่องจากพารามิเตอร์ในส่วนผลของตัวควบคุมฟัซซีเป็นอัตราขยายที่คูณอยู่กับตัวแปรสถานะ ดังนั้นจึงเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นในส่วนของผลของตัวควบคุมฟัซซีดังสมการ (4.5)

$$\left.\begin{aligned} f_1 &= 0\theta + 0\dot{\theta} + 0p + 0\dot{p} + 0 \\ f_2 &= 0\theta + 0\dot{\theta} + 0p + 0\dot{p} + 0 \\ f_3 &= 0\theta + 0\dot{\theta} + 0p + 0\dot{p} + 0 \\ f_4 &= 135.1\theta + 41.9\dot{\theta} + 3.48p + 8.0183\dot{p} + 0 \end{aligned}\right\} \quad (4.5)$$

ใช้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมฟัซซีที่กำหนดใหม่ข้างต้น และกำหนดระยะการก้าวเริ่มต้นเท่ากับ 1 ทำการฝึกตัวควบคุม จนกระทั่งเป็นไปตามเงื่อนไขการจบการคำนวณ ได้ค่าของดรรชนีสมรรถนะเท่ากับ 0.5223 รูปที่ 4.7 แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะในแต่ละรอบการทำซ้ำ รูปที่ 4.8 แสดงฟังก์ชันภาวะสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีหลังจากการเรียนรู้โดยใช้ข่ายงานระบบประสาท และฟังก์ชันในส่วนของผล (Consequence) เป็นดังสมการ (4.6)




**รูปที่ 4.7** แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะในแต่ละรอบการทำซ้ำ

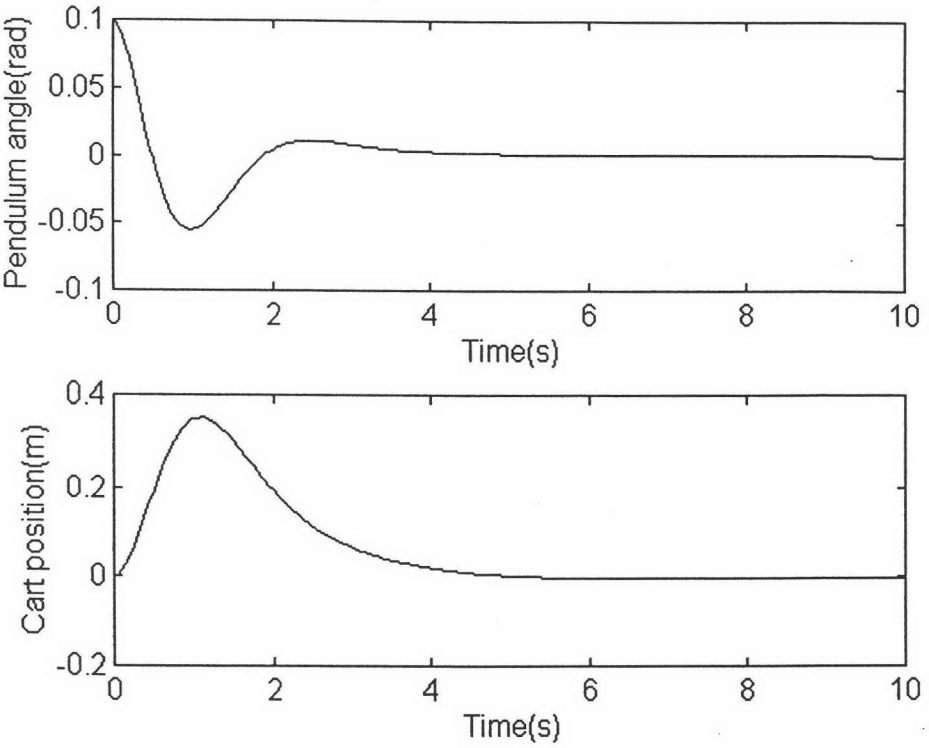



**รูปที่ 4.8** แสดงฟังก์ชันภาวะสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีหลังจากการเรียนรู้โดยใช้ข่ายงานระบบประสาท

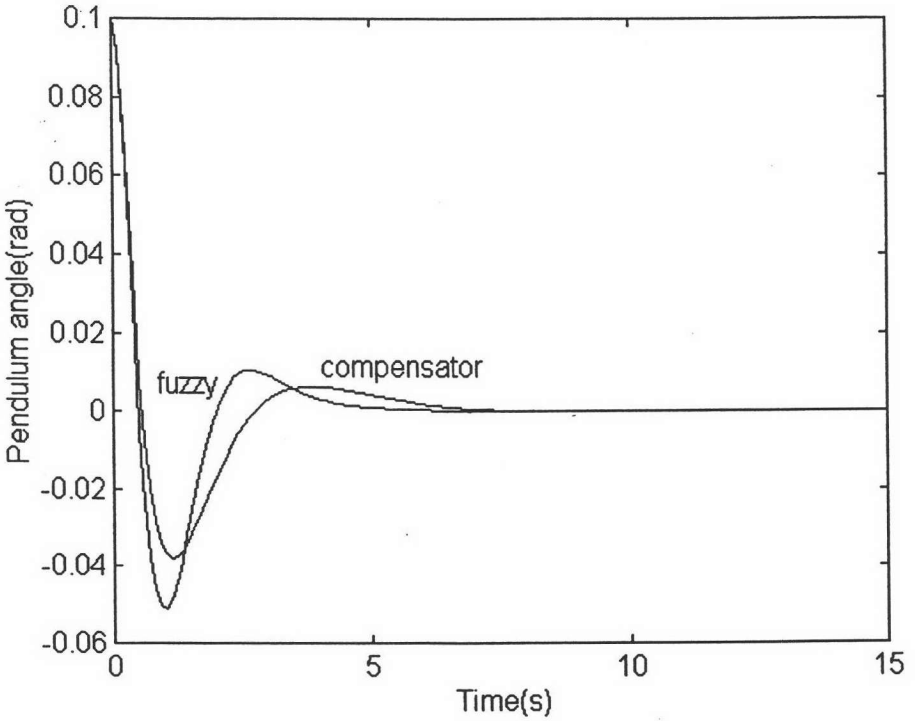
$$\left.\begin{aligned} f_1 &= 0.01244\theta + 0.0004039\dot{\theta} - 0.2889p - 0.05112\dot{p} + 0.2457 \\ f_2 &= -0.1235\theta + 0.01124\dot{\theta} - 0.2776p - 0.03456\dot{p} + 0.01281 \\ f_3 &= -1.174\theta - 0.4325\dot{\theta} - 0.2381p - 0.4695\dot{p} + 0.01613 \\ f_4 &= 149.1\theta + 40.94\dot{\theta} + 6.248p + 12.39\dot{p} + 0.0274 \end{aligned}\right\} \quad (4.6)$$

นำตัวควบคุมที่ได้ไปใช้ในการควบคุมก้านที่ตั้งอยู่บนรถให้ตั้งตรงโดยใช้ระบบจำลองแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและกำหนดให้มุมเริ่มต้นของก้านเท่ากับ 0.1 เรเดียนต่อวินาที และกำหนดขอบเขตของสัญญาณควบคุมให้อยู่ในช่วง -15 นิวตัน ถึง 15 นิวตัน รูปที่ 4.9 แสดงมุมของก้านและตำแหน่งรถ เมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้การเรียนรู้แบบข่ายงานระบบประสาท

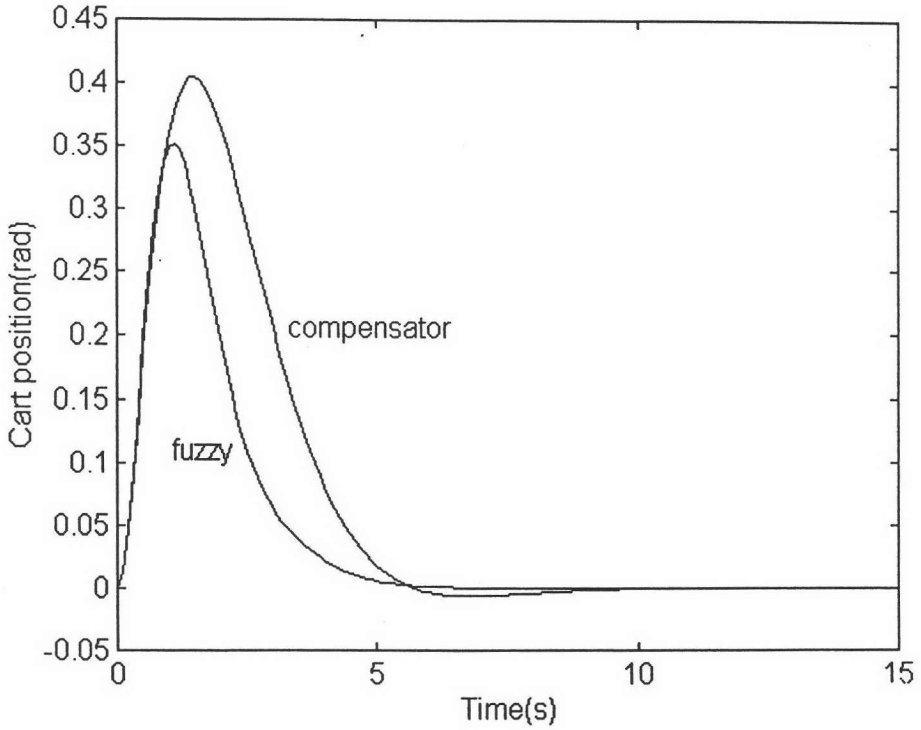
จากรูป 4.9 ตัวควบคุมฟัซซีสามารถควบคุมมุมของก้านให้ตั้งตรง และควบคุมตำแหน่งรถให้อยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ได้ นำผลของการควบคุมมุมของก้านและตำแหน่งรถของตัวชดเชยและตัวควบคุมฟัซซีมาเปรียบเทียบในรูปเดียวกันดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 จะเห็นได้ว่าทั้งมุมของก้านและตำแหน่งรถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว (Steady state) ได้เร็วกว่าเมื่อใช้ตัวชดเชย ทั้งนี้เนื่องจากตัวควบคุมฟัซซีมีความไม่เป็นเชิงเส้นทำให้การปรับค่าพารามิเตอร์ซึ่งมีทั้งพารามิเตอร์ที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นให้เหมาะสมกับการควบคุมก้านและตำแหน่งรถซึ่งเป็นระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นได้ดีกว่าตัวชดเชยซึ่งเป็นตัวควบคุมที่เป็นเชิงเส้น




**รูปที่ 4.9** แสดงมุมของก้านและตำแหน่งรถเมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัว โดยใช้การเรียนรู้แบบข่ายงานระบบประสาท




**รูปที่ 4.10** การเปรียบเทียบมุมของก้านเมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้การเรียนรู้แบบข่ายงานระบบประสาทและตัวชดเชย




**รูปที่ 4.11** การเปรียบเทียบตำแหน่งรถเมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้การเรียนรู้แบบข่ายงานระบบประสาทและตัวชดเชย

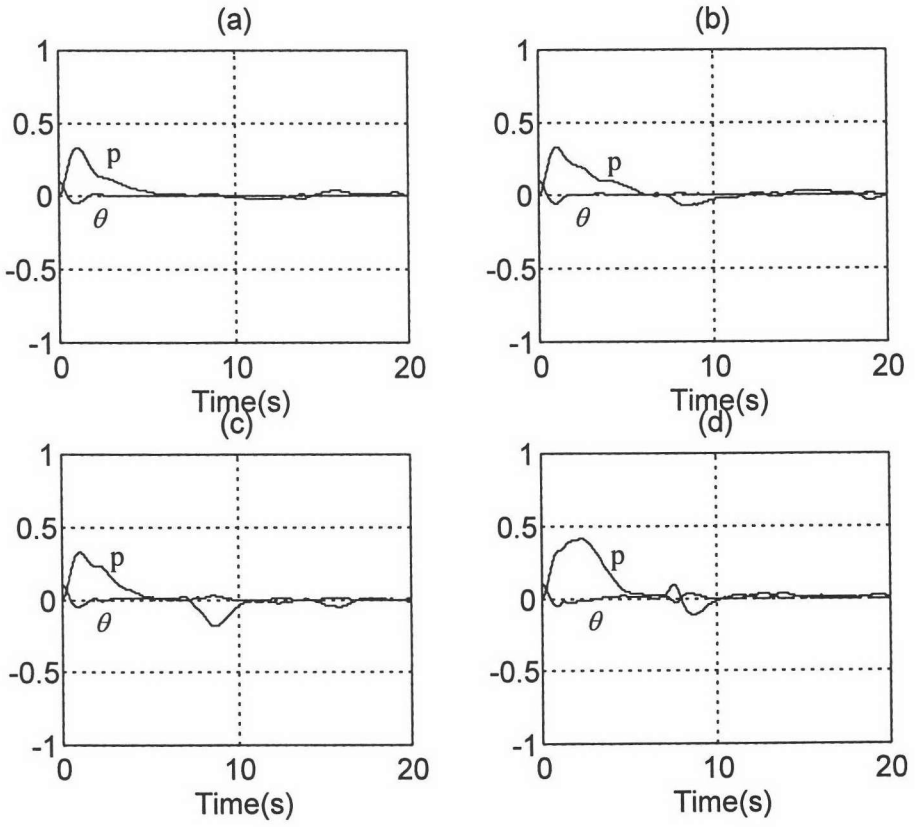
จากการเปรียบเทียบผลของการควบคุมก้านที่ตั้งอยู่บนรถให้ตั้งตรง โดยใช้ตัวชดเชยและตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้การเรียนรู้แบบข่ายงานระบบประสาทที่ค่ามุมเริ่มต้นของก้านเท่ากับ 0.1 เรเดียน พบว่าตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้การเรียนรู้แบบข่ายงานระบบประสาทสามารถควบคุมมุมของก้านและตำแหน่งรถให้เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้เร็วกว่าการใช้ตัวชดเชย

## ผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบและความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดขาวแบบเกาส์ที่มีต่อตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาท

จากตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวที่ได้จากการเรียนรู้ โดยใช้ข่ายงานระบบประสาทข้างต้นนำมาทำการเรียนรู้ต่อ โดยรวมความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดและสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบชนิดขาวแบบเกาส์เข้ากับระบบด้วยเพื่อฝึกให้ตัวควบคุมเรียนรู้การลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเนื่องจากตัวควบคุมสามารถควบคุมระบบได้ดีแล้ว จึงทำการปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเพียงเล็กน้อย คือกำหนดให้อัตราการเรียนรู้เริ่มต้นเท่ากับ 0.1 และใช้เกณฑ์ในการปรับเปลี่ยนอัตราการเรียนรู้ดังกล่าวข้างต้น นำผลที่ได้จากการเรียนรู้ครั้งที่ 40 และครั้งที่ 100 มาทดสอบการลดผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดและสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบ โดยเปลี่ยนค่าความแปรปรวนหลาย ๆ ค่า กำหนดให้เงื่อนไขเริ่มต้นของก้านเท่ากับ 0.1 เรเดียน

**1. ผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านและความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัด**

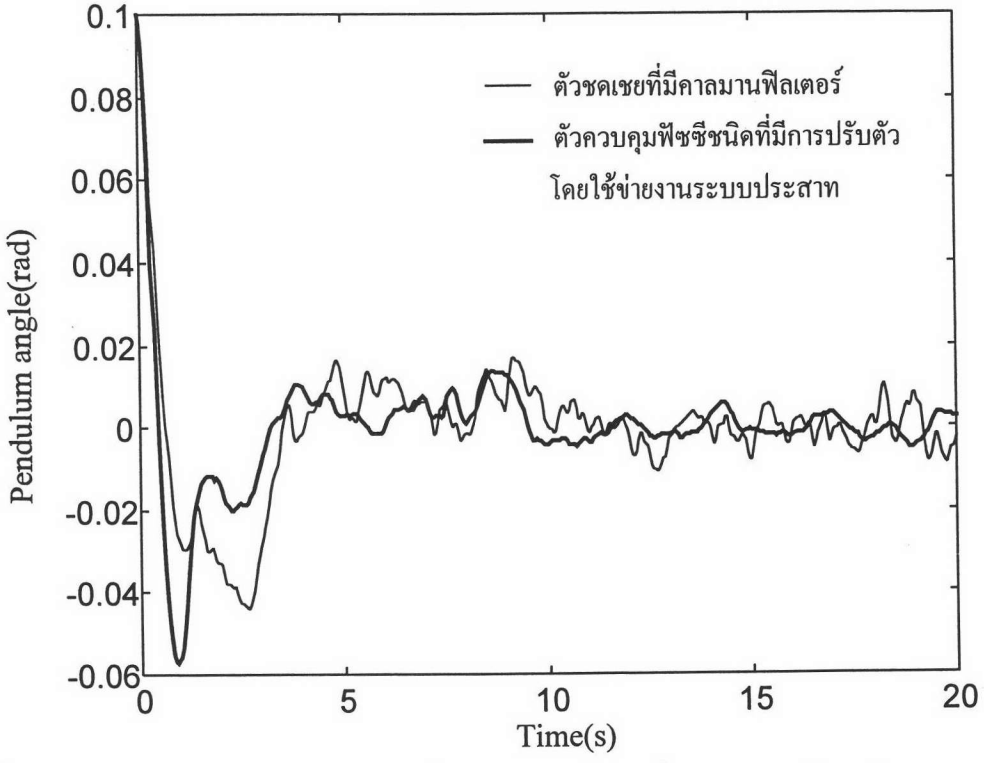
กำหนดให้ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดมุมของก้านและตำแหน่งรถมีค่าเท่ากับ 0.005 เรเดียนกำลังสอง และ 0.0005 เมตรกำลังสอง ตามลำดับ และสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านมีค่าเท่ากับ 0.1 นิวตันกำลังสอง 0.2 นิวตันกำลังสอง 0.4 นิวตันกำลังสอง และ 0.5 นิวตันกำลังสองตามลำดับ ทำการฝึกตัวควบคุมโดยจำลองสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดที่มีค่าความแปรปรวนดังกล่าวข้างต้นทีละค่า และทดสอบตัวควบคุมโดยใช้สัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดที่ค่านั้นทำการฝึกตัวควบคุมจนถึงครั้งที่ 40 นำตัวควบคุมที่ได้มาทดสอบได้ผลดังรูปที่ 4.12




**รูปที่ 4.12** มุมของก้านและตำแหน่งรถเมื่อมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดและการรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดขาวแบบเกาส์โดยมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ (a) 0.1 $N^2$ (b) 0.2 $N^2$ (c) 0.4 $N^2$ (d) 0.5 $N^2$

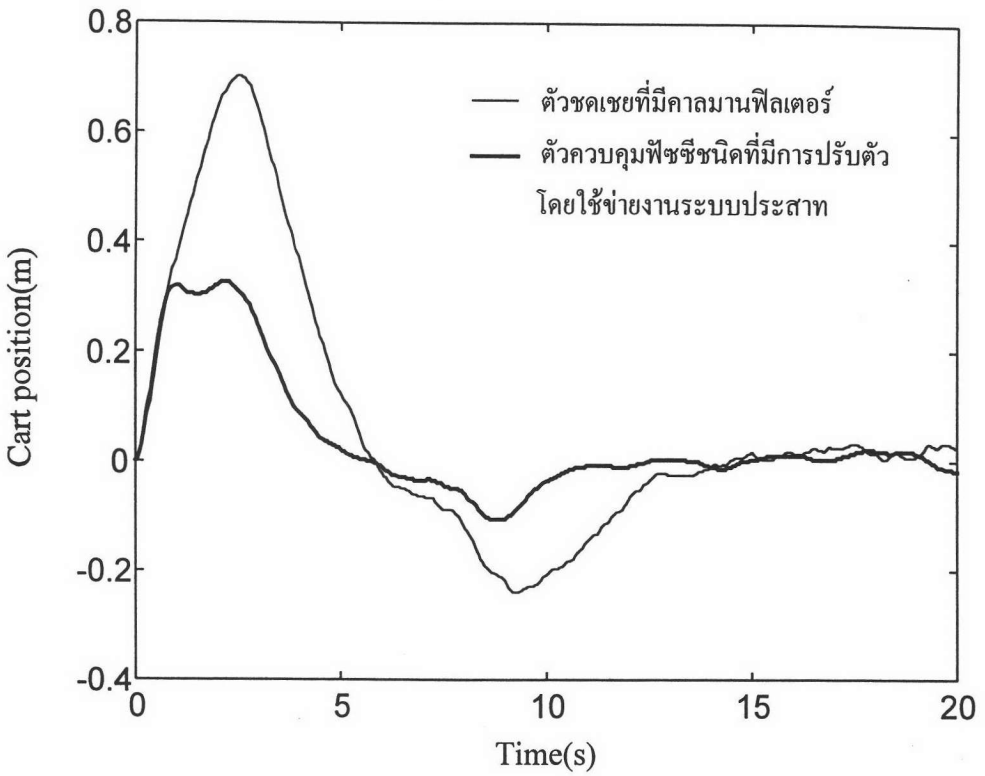
จากรูปที่ 4.12 ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้การเรียนรู้เพื่อปรับตัวควบคุมแบบข่ายงานระบบประสาทสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนได้ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวชดเชยที่ไม่มีตัวกรองคาลมาน เมื่อความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนมีค่ามากขึ้นระบบยังคงสามารถควบคุมได้และมีผลน้อยกว่าเมื่อใช้ตัวชดเชยที่ไม่มีตัวกรองคาลมาน ทำการเปรียบเทียบการลดผลของสัญญาณรบกวนของตัวกรองคาลมานและตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้การเรียนรู้แบบข่ายงานระบบประสาทโดยใช้สัญญาณรบกวนที่ชุดเดียวกันป้อนเข้าสู่ระบบ แต่เนื่องจากประสิทธิภาพการลดผลของสัญญาณรบกวน

ของตัวกรองคาลมานจะลดลงเมื่อใช้กับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและกำหนดค่าความแปรปรวนในการออกแบบไม่ตรงกับค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนที่เข้าสู่ระบบจริง จึงทำการทดสอบตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมานกับระบบที่เป็นเชิงเส้นและกำหนดค่าความแปรปรวนในการออกแบบให้ตรงกับค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนที่เข้าสู่ระบบจริงและทดสอบตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้การเปรียบเทียบเป็นไปอย่างเหมาะสม ได้ผลดังรูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบมุมของก้านเมื่อสัญญาณรบกวนมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.2 นิวตันกำลังสอง เมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทและตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมาน และรูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งรถโดยที่สัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.2 นิวตันกำลังสอง เมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทและตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมาน




**รูปที่ 4.13** แสดงการเปรียบเทียบมุมของก้านเมื่อมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดขาวแบบเกาส์ มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.2 นิวตันกำลังสอง

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทสามารถลดผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดและสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านได้ดีกว่าตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมาน แต่ประสิทธิภาพการลดผลของสัญญาณรบกวนของตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทและตัวกรองคาลมานใกล้เคียงกัน ดังนั้นในกรณีศึกษาผลของสัญญาณรบกวนต่อ ๆ ไป จะทำการเปรียบเทียบการลดผลของสัญญาณรบกวนของตัวควบคุมทั้ง




**รูปที่ 4.14** แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งรถเมื่อมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดขาวแบบเกาส์มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.2 นิวตันกำลังสอง

สองโดยใช้ข้อมูลเชิงตัวเลขเพิ่มเติม โดยการคำนวณหาผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างมุมของก้าน(หรือตำแหน่งรถ)เมื่อไม่มีสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบและความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดและมุมของก้าน(หรือตำแหน่งรถ)เมื่อมีสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบและมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดดังสมการที่ (4.7)

$$J = \sum_{k=1}^{t_s} (x_d^2(k) - x_a^2(k)) \tag{4.7}$$

โดยที่ $x_d(k)$ คือมุมของก้าน(หรือตำแหน่งรถ)เมื่อไม่มีสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบและความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัด $x_a(k)$ คือมุมของก้าน(หรือตำแหน่งรถ)เมื่อมีสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบและความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัด และ $t_s$ คือเวลาสุดท้าย

กำหนดให้ $J_t$ คือผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างมุมของก้านเมื่อไม่มีสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบและความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัด และมุมของก้านเมื่อมีสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบและมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัด และ $J_p$ คือผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งรถเมื่อไม่มีสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบและความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัด และตำแหน่งรถเมื่อมีสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบและมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัด

ป้อนสัญญาณรบกวนเข้าสู่ระบบเหมือนกรณีข้างต้น เปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนที่มีต่อตัวควบคุม 3 ชนิดคือตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทที่มีการปรับตัวจนถึงครั้งที่ 40 และครั้งที่ 100 และตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมาน โดยทำการศึกษาที่ค่าความแปรปรวนต่าง ๆ ซึ่งในแต่ละค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนจะทำการทดสอบ 10 ครั้งแล้วทำการหาค่าเฉลี่ยได้ผลดังตารางที่ ก.1 ก.2 ก.3 และ ก.4 (ภาคผนวก ก.)

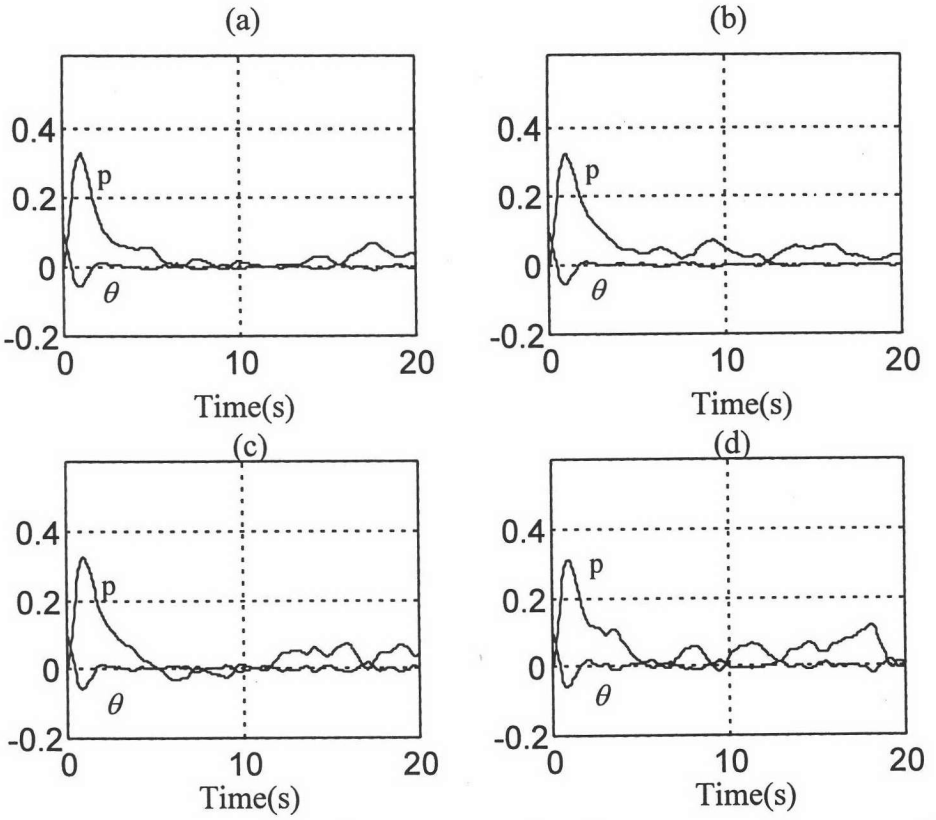
จากตาราง ก.1 ก.2 และ ก.3 เมื่อสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.1 0.2 และ 0.4 นิวตันกำลังสอง จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวหลังจากผ่านการปรับตัวเป็นครั้งที่ 100 สามารถลดผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านได้ดีที่สุด ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวหลังจากผ่านการปรับตัวเป็นครั้งที่ 40 สามารถลดผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านได้รองลงมา และตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมานสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านได้น้อยที่สุด ในกรณีที่สัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.5 นิวตันกำลังสอง ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับก้านได้น้อยกว่าตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมาน แต่สามารถลดผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับรถได้ดีกว่าตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมาน ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากมุมของก้านและตำแหน่งรถเมื่อไม่มีสัญญาณรบกวน ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 จะเห็นว่ามุมของก้านเมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวจะมีการพุ่งเกิน (Overshoot) มากกว่าเมื่อใช้ตัวชดเชยจึงทำให้ค่า $J_t$ และ $J_p$ มีค่ามากขึ้นในช่วงที่มีสัญญาณรบกวนขนาดใหญ่ส่วนตำแหน่งรถเมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวจะมีการพุ่งเกินน้อยกว่าเมื่อใช้ตัวชดเชย จึงทำให้ค่า $J_t$ และ $J_p$ เมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวมีค่าน้อยกว่าเมื่อใช้ตัวชดเชย

ในความเป็นจริงแล้วสัญญาณรบกวนที่เข้าสู่ระบบมีความแปรปรวนเปลี่ยนไปตามเวลา ซึ่งไม่สามารถบอกค่าที่แน่นอนได้จึงทำการทดสอบตัวควบคุมทั้ง 3 ชนิด ซึ่งออกแบบหรือเรียนรู้กับสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดที่มีความแปรปรวนเท่ากับ 0.2 นิวตันกำลังสอง กำหนดให้ความแปรปรวนที่ใช้ในการทดสอบเป็น 0.1 0.2 และ 0.4 นิวตันกำลังสอง ได้ผลดังตาราง ก.5 ก.6 และ ก.7 (ภาคผนวก ก.)

จากตารางที่ ก.5 ก.6 และ ก.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับที่กำหนดไว้ในการออกแบบตัวกรองคาลมานหรือใช้ในการเรียนรู้ของตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาท ตัวกรองคาลมานและตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทนี้ยังคงสามารถลดผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดและสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดได้ดี แต่เมื่อค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดมีค่ามากขึ้นคุณสมบัติในการลดผลของสัญญาณรบกวนของตัวกรองคาลมานลดลง ในขณะที่ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทยังคงสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดได้ใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้สัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดที่มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.4 นิวตันกำลังสอง ป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อใช้ในการเรียนรู้โดยตรง (เปรียบเทียบตารางที่ ก.3 และ ก.7)

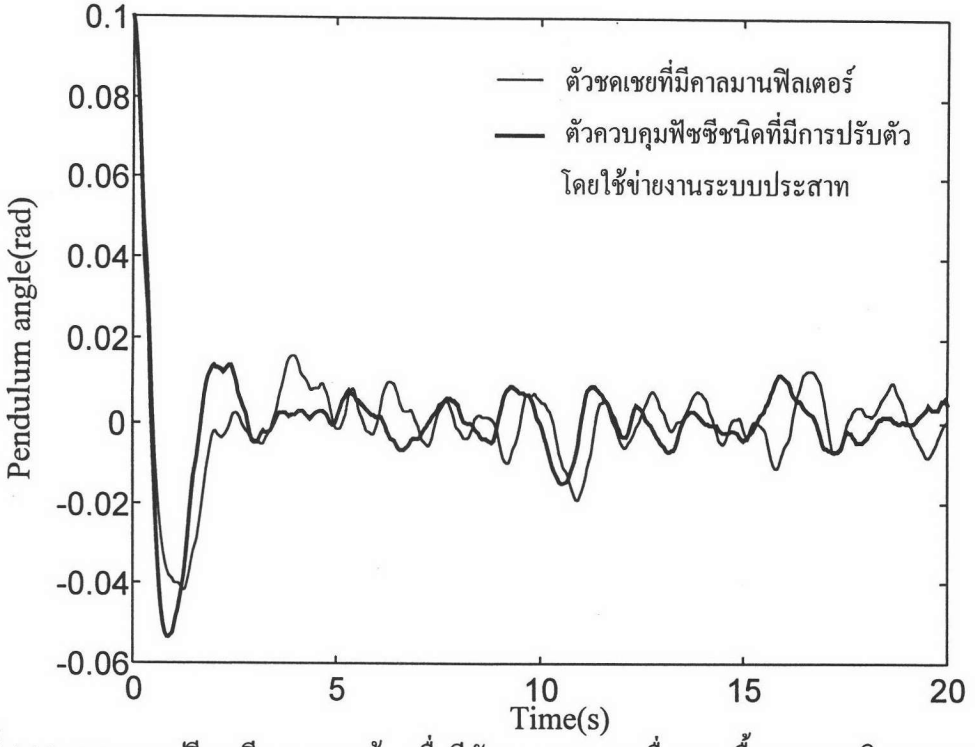
## 2. ผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระและความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัด

ทำการทดสอบเช่นเดียวกับกรณีที่มีสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้าน แต่เปลี่ยนให้สัญญาณรบกวนเกิดขึ้นจากลักษณะพื้นขรุขระและมีการรบกวนตลอดเวลา โดยมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.1 0.5 1.0 และ 1.5 นิวตันกำลังสอง กำหนดให้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวเรียนรู้การลดผลสัญญาณรบกวนที่มีค่าความแปรปรวนเท่ากับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจริงกับระบบได้ผลดังรูปที่ 4.15

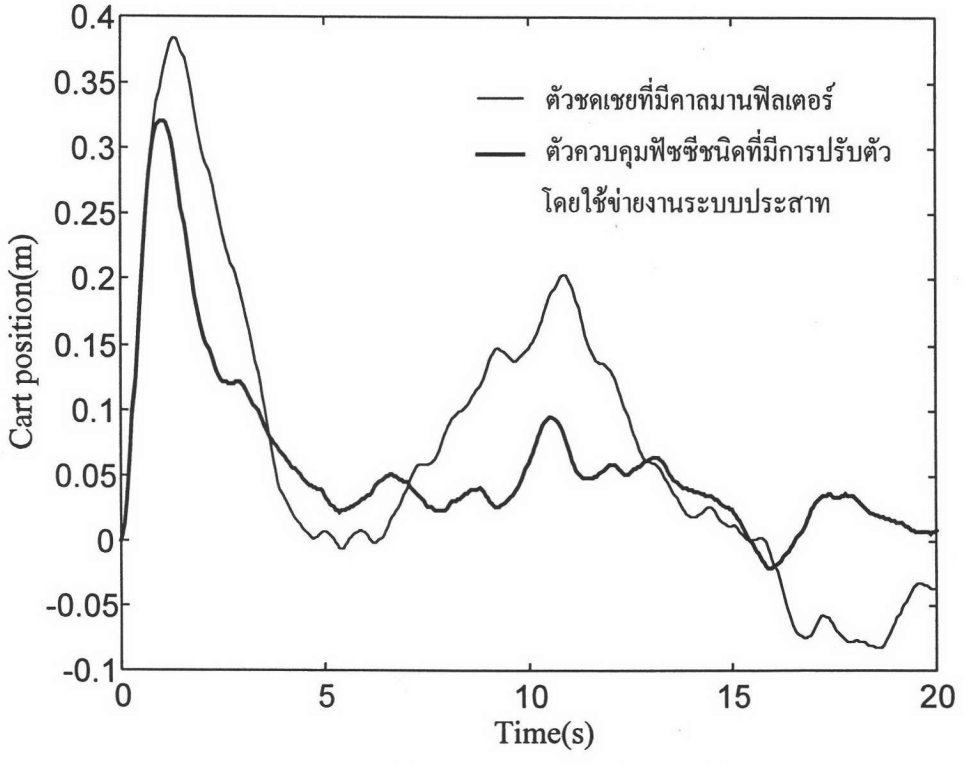



**รูปที่ 4.15** มุมของก้านและตำแหน่งรถเมื่อมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดและการรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระชนิดขาวแบบเกาส์โดยมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ(a) 0.1 $N^2$ (b) 0.5 $N^2$ (c) 1.0 $N^2$ (d) 1.5 $N^2$

จากรูปที่ 4.15 ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนได้ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวชดเชยที่ไม่มีตัวกรองคาลมาน เมื่อความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนมีค่ามากขึ้นระบบยังคงสามารถควบคุมได้และมีผลน้อยกว่าเมื่อใช้ตัวชดเชยที่ไม่มีตัวกรองคาลมาน ทำการเปรียบเทียบการลดผลของสัญญาณรบกวนของตัวกรองคาลมานและตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัว และใช้สัญญาณรบกวนชุดเดียวกันป้อนเข้าสู่ระบบได้ผลดังรูปที่ 4.16 เปรียบเทียบมุมของก้านเมื่อสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.5 นิวตันกำลังสอง เมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวและตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมาน และรูปที่ 4.17 เปรียบเทียบตำแหน่งรถโดยที่สัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.5 นิวตันกำลังสอง เมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวและตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมาน




**รูปที่ 4.16** แสดงการเปรียบเทียบมุมของก้านเมื่อมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระชนิดขาวแบบเกาส์มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.5 นิวตันกำลังสอง




**รูปที่ 4.17** แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งรถเมื่อมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระชนิดขาวแบบเกาส์มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.5 นิวตันกำลังสอง

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวสามารถลดผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดและสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านได้ดีกว่าตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมาน ทำการเปรียบเทียบการลดผลของสัญญาณรบกวนของตัวควบคุมทั้งสองโดยใช้ข้อมูลเชิงตัวเลขเพิ่มเติมดังตารางที่ ก.8 ก.9 ก.10 และ ก.11 (ภาคผนวก ก.)

พิจารณาตารางที่ ก.8 ก.9 ก.10 และ ก.11 เปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวหลังจากทำการปรับครั้งที่ 40 และครั้งที่ 100 พบว่าตัวควบคุมทั้งสองสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระและความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดได้ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากการเรียนรู้ของตัวควบคุมเข้าสู่จุดเหมาะสมที่สุดแล้วเมื่อทำการเรียนรู้ถึงครั้งที่ 40 เมื่อค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระเท่ากับ 0.1 0.5 และ 1 นิวตันกำลังสอง ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวทั้งสองตัวสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระได้ดีกว่าตัวกรองคาลมาน ส่วนในกรณีที่ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระมีค่าเท่ากับ 1.5 นิวตันกำลังสอง พบว่าตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวทั้งสองสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับก้านได้น้อยกว่าตัวกรองคาลมาน แต่ยังคงสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับตำแหน่งรถได้ดีกว่าตัวกรองคาลมาน ทั้งนี้เนื่องจากพิสัยของเสถียรภาพของตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัว

ทำการทดสอบตัวควบคุมทั้ง 3 ชนิด ซึ่งทำการออกแบบหรือเรียนรู้กับสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระที่มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.5 นิวตันกำลังสอง โดยกำหนดให้ค่าความแปรปรวนที่ใช้ในการทดสอบเป็น 0.1 0.5 และ 1 นิวตันกำลังสอง ได้ผลดังตาราง ก.12 ก.13 และ ก.14 (ภาคผนวก ก.)

จากตารางที่ ก.12 ก.13 และ ก.14 จะเห็นได้ว่าเมื่อความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับที่กำหนดไว้ในการออกแบบตัวกรองคาลมานหรือใช้ในการเรียนรู้ของตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัว ตัวกรองคาลมานและตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวยังคงสามารถลดผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดและสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระได้ดี แต่เมื่อความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระมีค่ามากขึ้นคุณสมบัติในการลดผลของสัญญาณรบกวนของตัวกรองคาลมานลดลง ในขณะที่ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวยังคงสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระได้ใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้สัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระที่มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.4 นิวตันกำลังสอง ป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อใช้ในการเรียนรู้โดยตรง

## ผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบชนิดสีแบบเกาส์และความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดขาวแบบเกาส์ที่มีต่อตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัว

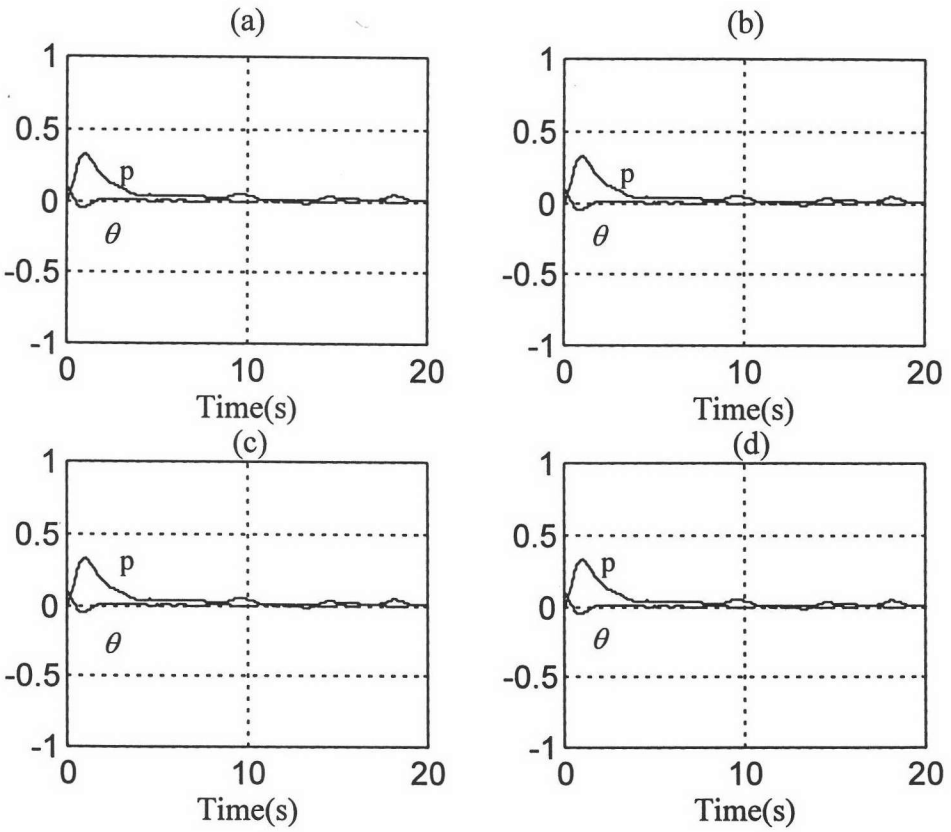
จากตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวที่ได้จากการเรียนรู้โดยใช้ข่ายงานระบบประสาทข้างต้นนำมาทำการเรียนรู้ต่อ โดยรวมความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดขาวแบบเกาส์และสัญญาณ

รบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบชนิดสีแบบเกาส์ด้วยเพื่อฝึกให้ตัวควบคุมเรียนรู้การลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น นำตัวควบคุมที่ได้มาทดสอบกับสัญญาณรบกวนเหมือนในกรณีที่สัญญาณรบกวนเป็นชนิดขาวแบบเกาส์ แต่เปลี่ยนสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเนื่องจากระบบเป็นชนิดสีแบบเกาส์

**1. ผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านและความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัด**

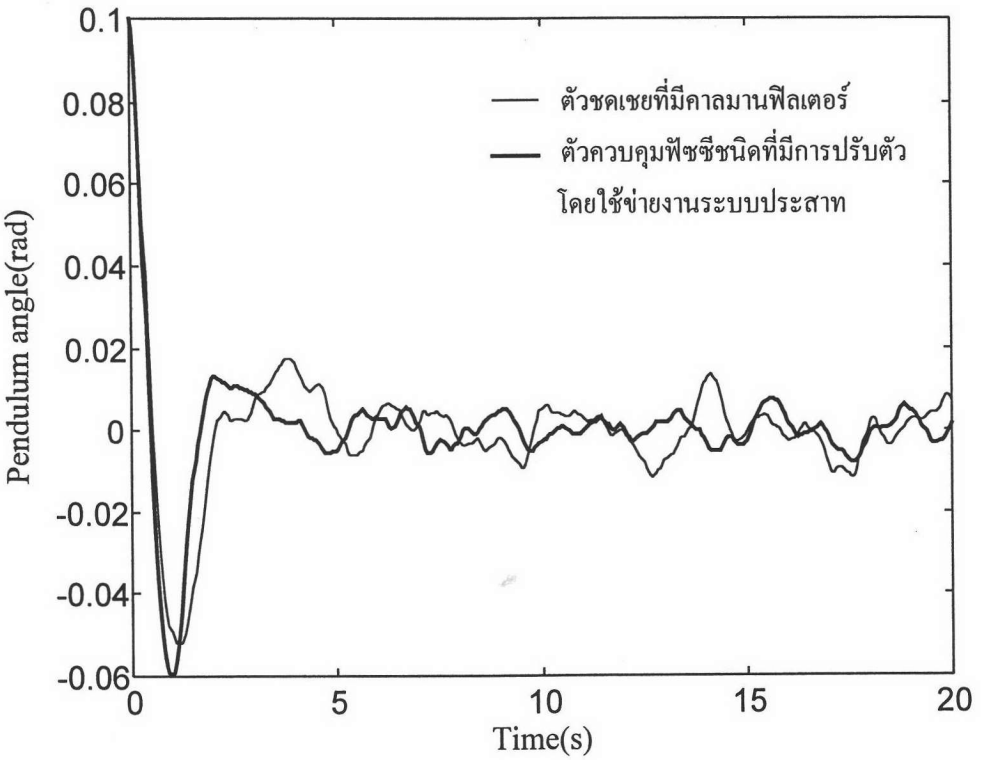
ป้อนสัญญาณรบกวนเหมือนกับกรณีที่เป็นชนิดขาวแบบเกาส์แต่เปลี่ยนเป็นสัญญาณรบกวนชนิดสีแบบเกาส์แทน ทำการฝึกตัวควบคุมโดยจำลองสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดที่มีค่าความแปรปรวนทีละค่า และทดสอบตัวควบคุมโดยใช้สัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดที่ค่านั้น ได้ผลดังรูปที่ 4.18

จากรูปที่ 4.18 ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้การเรียนรู้แบบข่ายงานระบบประสาทสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดชนิดขาวแบบเกาส์ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวชดเชยที่ไม่มีตัวกรองคาลมาน เมื่อความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนมีค่ามากขึ้นระบบยังคงสามารถควบคุมได้และมีผลน้อยกว่าเมื่อใช้ตัวชดเชยที่ไม่มีตัวกรองคาลมาน และน้อยกว่ากรณีที่สัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดเป็นชนิดขาวแบบเกาส์ ทำการเปรียบเทียบการลดผลของสัญญาณรบกวนของตัวกรองคาลมานและตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาท และใช้สัญญาณรบกวน



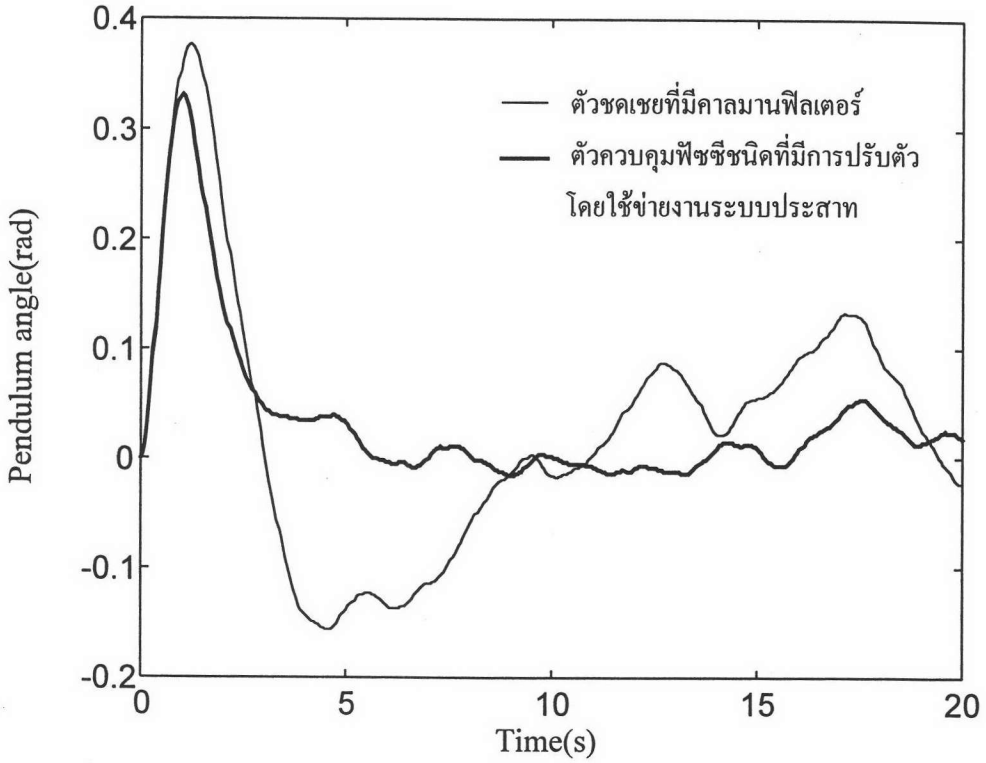

**รูปที่ 4.18** แสดงมุมของก้านและตำแหน่งรถเมื่อมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดและการรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดสีแบบเกาส์โดยมีความแปรปรวนเท่ากับ( a) 0.1 $N^2$ (b) 0.2 $N^2$ (c) 0.4 $N^2$ (d) 0.5 $N^2$

เนื่องจากลมพัดที่มีความแปรปรวนเท่ากับ 0.2 นิวตันกำลังสองชุดเดียวกันป้อนเข้าสู่ระบบ ได้ผลดังรูปที่ 4.19 เปรียบเทียบมุมของก้านเมื่อสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดสีแบบเกาส์มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.2 นิวตันกำลังสอง เมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทและตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมาน และรูปที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งรถโดยที่สัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดสีแบบเกาส์มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.2 นิวตันกำลังสอง เมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทและตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมาน




**รูปที่ 4.19** แสดงการเปรียบเทียบมุมของก้านเมื่อมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดสีแบบเกาส์มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.2 นิวตันกำลังสอง

จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทสามารถลดผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดและสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดสีแบบเกาส์ได้ดีกว่าตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมาน ทำการเปรียนเทียบการลดผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดสีแบบเกาส์ของตัวควบคุมทั้งสองโดยใช้ข้อมูลเชิงตัวเลขเพิ่มเติม ได้ผลดังตารางที่ ก.15 ก.16 ก.17 และ ก.18




**รูปที่ 4.20** แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งรถเมื่อมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดสีแบบเกาส์มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.2 นิวตันกำลังสอง

จากตารางที่ ก.15 ก.16 ก.17 และ ก.18 เมื่อเทียบกับกรณีที่สัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านเป็นชนิดขาวแบบเกาส์ พบว่าตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดสีแบบเกาส์ได้ดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณรบกวนชนิดสีแบบเกาส์ที่เวลาต่าง ๆ กันมีสหสัมพันธ์กัน (Correlate) จึงทำให้สัญญาณรบกวนที่เข้าสู่ระบบมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทจึงสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมานพบว่าตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดสีแบบเกาส์ได้ดีกว่าตัวกรองคาลมาน ทุก ๆ ค่าความแปรปรวนที่ทำการทดสอบ

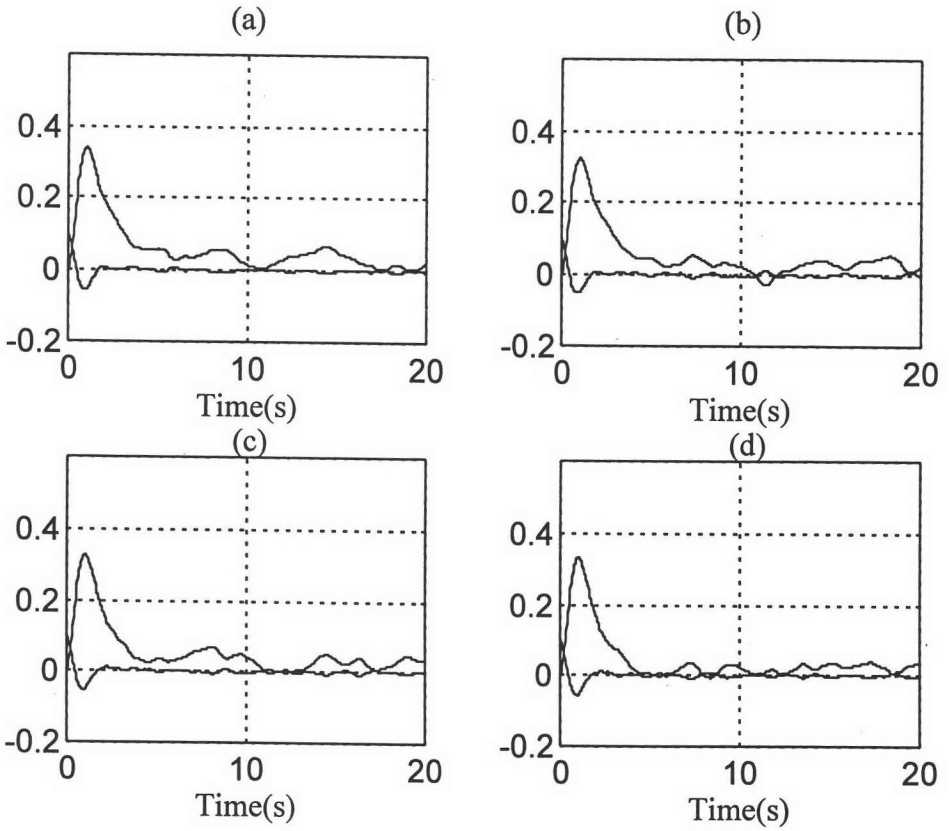
ทำการทดสอบตัวควบคุมทั้งสามชนิด ซึ่งทำการออกแบบหรือเรียนรู้กับสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดสีแบบเกาส์ที่มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.2 นิวตันกำลังสอง โดยกำหนดให้ค่าความแปรปรวนที่ใช้ในการทดสอบเป็น 0.1 นิวตันกำลังสอง 0.2 นิวตันกำลังสอง และ 0.4 นิวตันกำลังสอง ได้ผลดังตาราง ก.19 ก.20 และ ก.21

จากตารางที่ ก.19 ก.20 และ ก.21 จะเห็นได้ว่าเมื่อความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับที่กำหนดไว้ในการออกแบบตัวกรองคาลมานหรือใช้ในการเรียนรู้ของตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาท ตัวกรองคาลมานและตัวควบคุม

ฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทนี้ยังคงสามารถลดผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดและสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านได้ดี แต่เมื่อค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านมีค่ามากขึ้นคุณสมบัติในการลดผลของสัญญาณรบกวนของตัวกรองคาลมานลดลง ในขณะที่ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวยังคงสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านได้ใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้สัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านที่มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.2 นิวตันกำลังสอง ป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อใช้ในการเรียนรู้โดยตรง (เปรียบเทียบตารางที่ ก.17 และ ก.21)

**2. ผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระและความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัด**

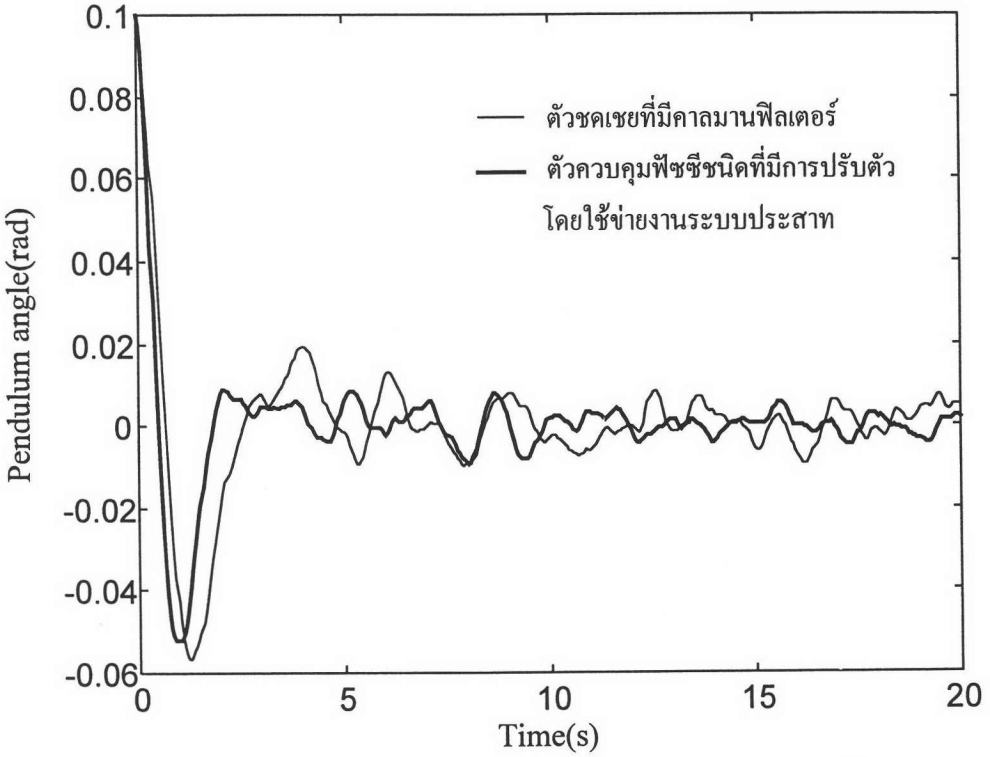
ทำการทดสอบเช่นเดียวกับกรณีที่มีสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้าน แต่กำหนดให้สัญญาณรบกวนเกิดขึ้นจากลักษณะพื้นที่ขรุขระและมีการรบกวนตลอดเวลาชนิดสีแบบเกาส์ ซึ่งเรียนรู้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวให้กำหนดค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนตามสัญญาณรบกวนที่เข้าสู่ระบบจริง ได้ผลดังรูปที่ 4.21




**รูปที่ 4.21** แสดงมุมของก้านและตำแหน่งรถเมื่อมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดและการรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระชนิดสีแบบเกาส์โดยมีความแปรปรวนเท่ากับ( a) 0.1 $N^2$ (b) 0.5 $N^2$ (c) 1.0 $N^2$ (d) 1.5 $N^2$

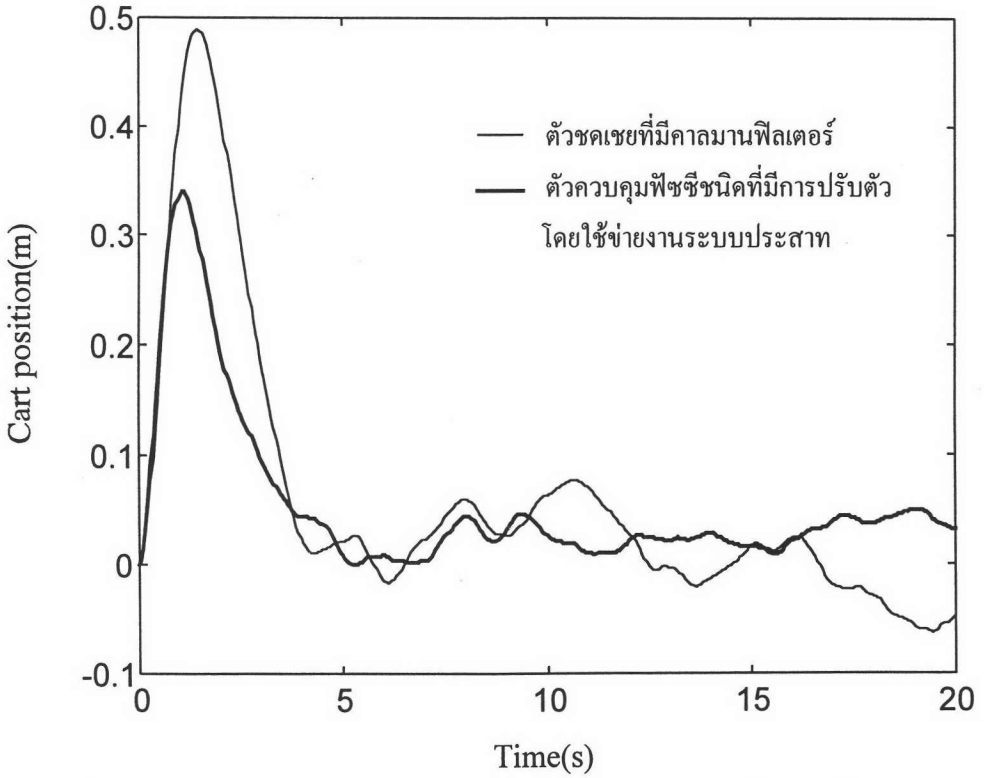
จากรูปที่ 4.21 ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้การเรียนรู้แบบข่ายงานระบบประสาทสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนได้ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวชดเชยที่ไม่มีตัวกรองคาลมาน เมื่อ

ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนมีค่ามากขึ้นระบบยังคงสามารถควบคุมได้และมีผลน้อยกว่าเมื่อใช้ตัวชดเชยที่ไม่มีตัวกรองคาลมาน ทำการเปรียบเทียบการลดผลของสัญญาณรบกวนของตัวกรองคาลมานและตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้การเรียนรู้แบบข่ายงานระบบประสาทโดยใช้สัญญาณรบกวนชุดเดียวกันป้อนเข้าสู่ระบบได้ผลดังรูปที่ 4.22 แสดงการเปรียบเทียบมุมของก้านเมื่อสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระชนิดสีแบบเกาส์มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.5 นิวตันกำลังสอง เมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทและตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมาน และรูปที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งรถโดยที่สัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระชนิดสีแบบเกาส์มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.5 นิวตันกำลังสอง เมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทและตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมาน




**รูปที่ 4.22** แสดงการเปรียบเทียบมุมของก้านเมื่อมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระชนิดสีแบบเกาส์มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.5 นิวตันกำลังสอง

จากรูปที่ 4.22 และ 4.23 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทสามารถลดผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดและสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพื้นขรุขระได้ดีกว่าตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมาน ทำการเปรียบเทียบการลดผลของสัญญาณรบกวนของตัวควบคุมทั้งสองโดยใช้ข้อมูลเชิงตัวเลขเพิ่มเติมดังตารางที่ ก.22 ก.23 ก.24 และ ก.25 (ภาคผนวก ก.)




**รูปที่ 4.23** แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งรถเมื่อมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระชนิดสีแบบเกาส์มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.5 นิวตันกำลังสอง

จากตารางที่ ก.22 ก.23 ก.24 และ ก.25 เมื่อเทียบกับกรณีที่สัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระเป็นชนิดขาวแบบเกาส์ พบว่าตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระชนิดสีแบบเกาส์ได้ดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณรบกวนชนิดสีแบบเกาส์ที่เวลาต่าง ๆ กันมีสหสัมพันธ์กัน (Correlate) จึงทำให้สัญญาณรบกวนที่เข้าสู่ระบบมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทจึงสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนได้ดี จากตารางผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระมีผลต่อมุมของก้านน้อยทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระไม่มีเปลี่ยนแปลงค่าอย่างรวดเร็วจึงทำให้ก้านมีการแกว่งน้อย เมื่อเทียบกับกรณีที่สัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระเป็นชนิดขาวแบบเกาส์เมื่อเปรียบเทียบกับตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมานพบว่า ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดสีแบบเกาส์ได้ดีกว่าตัวกรองคาลมาน ทุก ๆ ค่าความแปรปรวนที่ทำการทดสอบ

ทำการทดสอบตัวควบคุมทั้งสามชนิด ซึ่งทำการออกแบบหรือเรียนรู้กับสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระที่มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.5 นิวตันกำลังสอง โดยกำหนดให้ค่าความแปรปรวนที่ใช้ในการทดสอบเป็น 0.1 นิวตันกำลังสอง 0.5 นิวตันกำลังสอง และ 1 นิวตันกำลังสอง ได้ผลดังตาราง ก. 26 ก.27 และ ก.28

จากตารางที่ ก.26 ก.27 และ ก.28 จะเห็นได้ว่าเมื่อความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระมีน้อยกว่าหรือเท่ากับที่กำหนดไว้ในการออกแบบตัวกรองคาลมานหรือใช้ในการเรียนรู้ของตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัว ตัวกรองคาลมานและตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวยังสามารถลดผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดและสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระได้ดี แต่เมื่อความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระมีค่ามากขึ้น คุณสมบัติในการลดผลสัญญาณรบกวนของตัวกรองคาลมานลดลง ในขณะที่ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวยังคงสามารถลดผลสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระได้ใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้สัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระที่มีความแปรปรวน 0.5 นิวตันกำลังสอง ป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อใช้ในการเรียนรู้โดยตรง (ตารางที่ ก.24 และ ก.28)

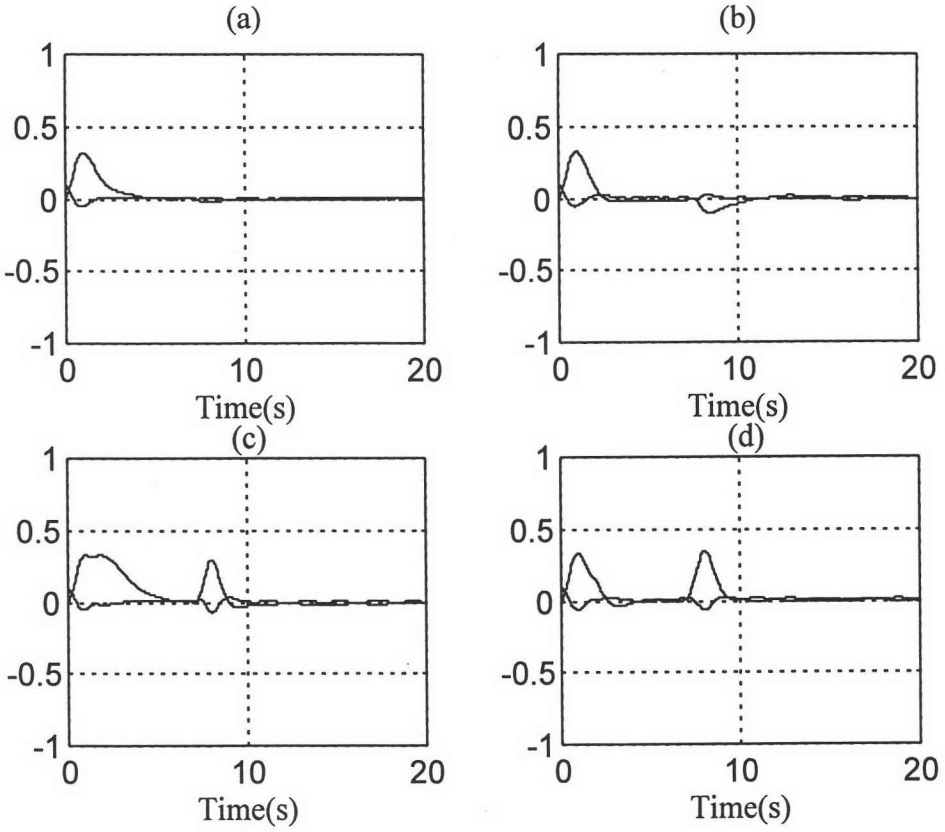
## ผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบชนิดขาวแบบเกาส์และความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์ที่มีต่อตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัว

นำตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวข้างต้นมาทำการเรียนรู้ต่อ โดยรวมความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์และสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบชนิดขาวแบบเกาส์ด้วยเพื่อฝึกให้ตัวควบคุมเรียนรู้การลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น นำตัวควบคุมที่ได้มาทดสอบกับสัญญาณรบกวนเหมือนในกรณีที่สัญญาณรบกวนเป็นชนิดขาวแบบเกาส์ แต่เปลี่ยนสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเนื่องจากระบบเป็นชนิดสีแบบเกาส์

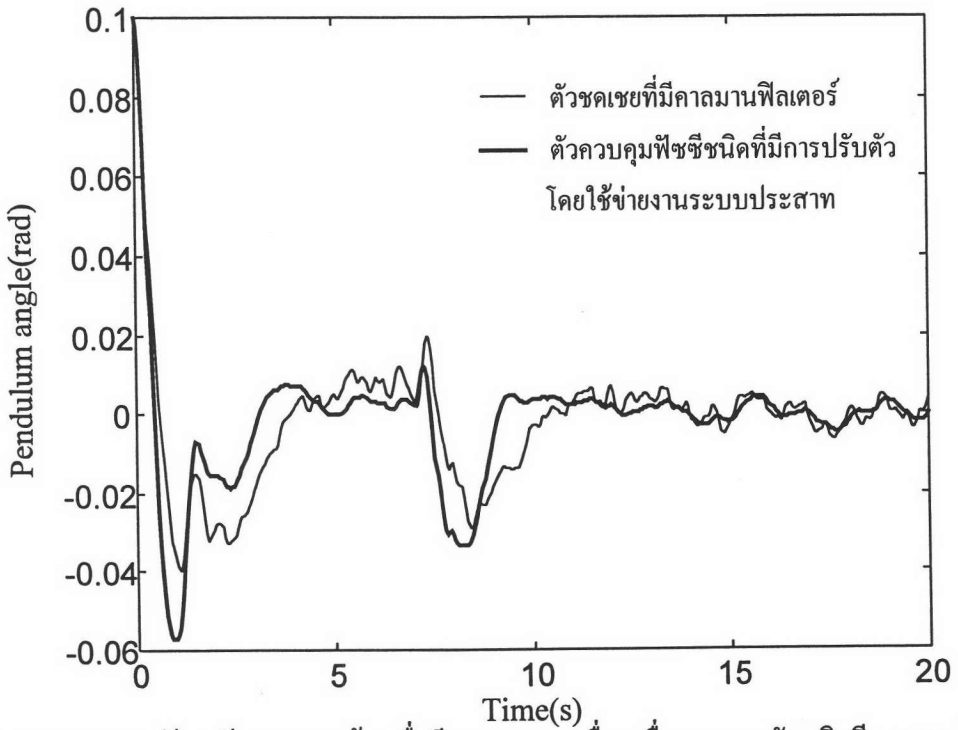
### 1. ผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านและความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัด

ป้อนสัญญาณรบกวนเหมือนกับกรณีที่ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดเป็นชนิดขาวแบบเกาส์แต่เปลี่ยนเป็นชนิดสีแบบเกาส์แทน ทำการฝึกตัวควบคุมโดยจำลองสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดที่มีค่าความแปรปรวนทีละค่าและทดสอบตัวควบคุมโดยใช้สัญญาณรบกวนที่ค่านั้น ได้ผลดังรูปที่ 4.24

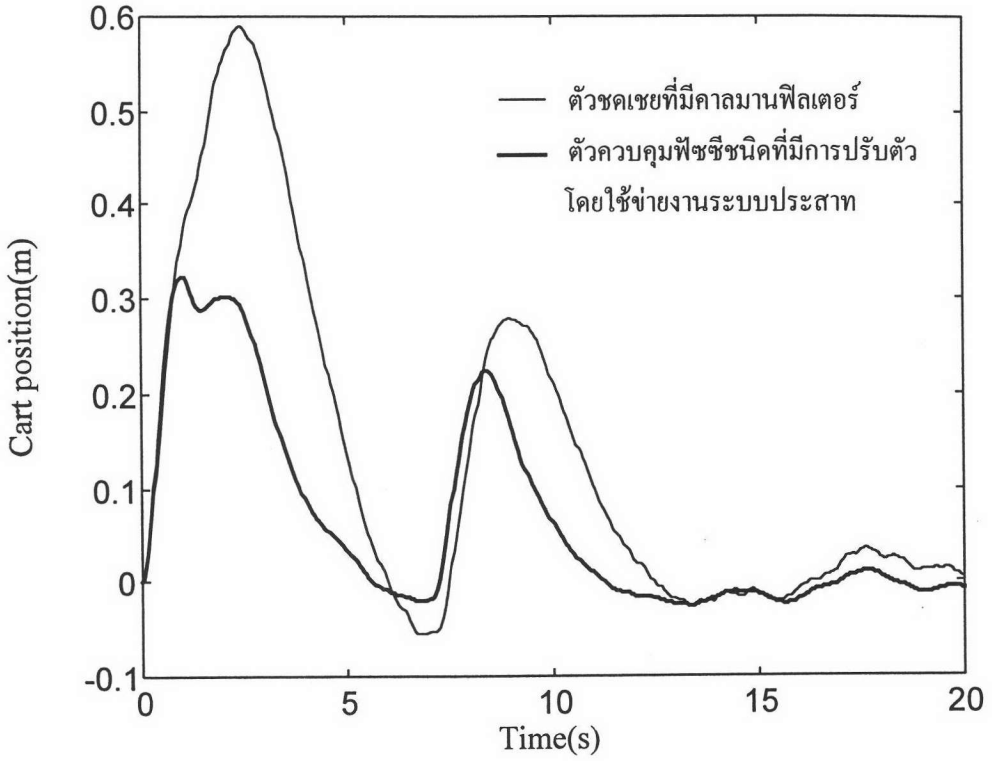
จากรูปที่ 4.24 ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวสามารถลดผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์ได้ดี และสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดชนิดขาวแบบเกาส์ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวชดเชยที่ไม่มีตัวกรองคาลมาน เมื่อความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนมีค่ามากขึ้นระบบยังคงสามารถควบคุมได้และมีผลน้อยกว่าเมื่อใช้ตัวชดเชยที่ไม่มีตัวกรองคาลมาน ทำการเปรียบเทียบการลดผลของสัญญาณรบกวนของตัวกรองคาลมานและตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัว โดยใช้สัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดที่มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.2 นิวตันกำลังสอง ชุดเดียวกันป้อนเข้าสู่ระบบ ได้ผลดังรูปที่ 4.25 เปรียบเทียบมุมของก้านเมื่อมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์และมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดขาวแบบเกาส์มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.2 นิวตันกำลังสอง และรูปที่ 4.26 เปรียบเทียบตำแหน่งรถโดยที่มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์และมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดขาวแบบเกาส์มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.2 นิวตันกำลังสอง




**รูปที่ 4.24** แสดงมุมของก้านและตำแหน่งรถเมื่อมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์และการรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านโดยมีความแปรปรวนเท่ากับ( a) 0.1 $N^2$ (b) 0.2 $N^2$ (c) 0.4 $N^2$ (d) 0.5 $N^2$




**รูปที่ 4.25** แสดงการเปรียบเทียบมุมของก้านเมื่อมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์และมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดขาวแบบเกาส์มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.2 นิวตันกำลังสอง




**รูปที่ 4.26** แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งรถเมื่อมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์และมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดขาวแบบเกาส์มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.2 นิวตันกำลังสอง

จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทสามารถลดผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์และสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดขาวแบบเกาส์ได้ดีกว่าตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมาน ทำการเปรียบเทียบการลดผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์และสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดขาวแบบเกาส์ของตัวควบคุมทั้งสองโดยใช้ข้อมูลเชิงตัวเลขเพิ่มเติม ได้ผลดังตารางที่ ก.29 ก.30 ก.31 และ ก.32 (ภาคผนวก ก.)

จากตาราง ก.29 ก.30 และ ก.31 เมื่อความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดเป็นชนิดสีแบบเกาส์และมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านชนิดขาวแบบเกาส์ จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทสามารถลดผลความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดและสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านได้ดีกว่าตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมาน ส่วนในกรณีที่สัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.5 นิวตันกำลังสอง ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับก้านได้น้อยกว่าตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมานแต่สามารถลดผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับตำแหน่งรถได้ดีกว่าตัวกรองคาลมาน ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากมุมของก้านและตำแหน่งรถเมื่อไม่มีสัญญาณรบกวน ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 จะเห็นว่ามุมของก้านเมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทจะมีการพุ่งเกิน (Overshoot) มากกว่าเมื่อใช้ตัว

ชดเชย จึงทำให้ค่า $J_t$ และ $J_p$ มีค่ามากขึ้นในช่วงที่มีสัญญาณรบกวนขนาดใหญ่ ส่วนตำแหน่งรถเมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทจะมีการพุ่งเกินน้อยกว่าเมื่อใช้ตัวชดเชย จึงทำให้ค่า $J_t$ และ $J_p$ เมื่อใช้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวมีค่าน้อยกว่าเมื่อใช้ตัวชดเชย

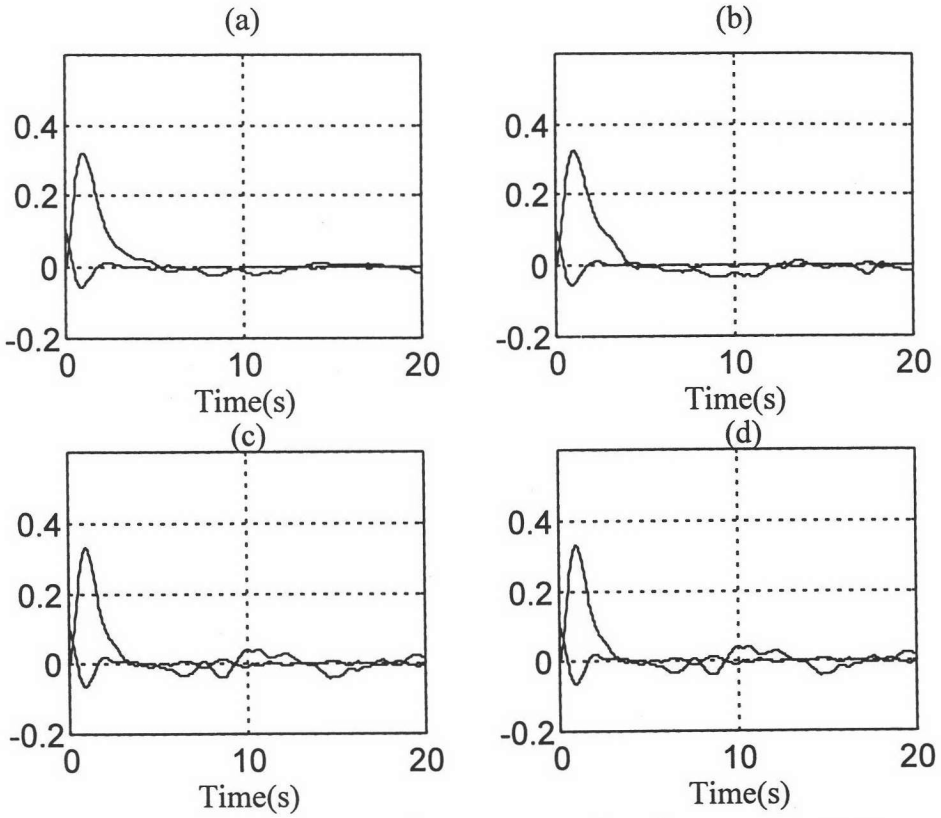
ทำการทดสอบตัวควบคุมทั้ง 3 ชนิด ซึ่งทำการออกแบบหรือเรียนรู้กับสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านที่ค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.2 นิวตันกำลังสอง โดยกำหนดให้ค่าความแปรปรวนที่ใช้ในการทดสอบเป็น 0.1 0.2 และ 0.4 นิวตันกำลังสอง ได้ผลดังตาราง ก.33 ก.34 และ ก.35 (ภาคผนวก ก.)

จากตารางที่ ก.33 ก.34 และ ก.35 จะเห็นได้ว่าเมื่อความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับที่กำหนดไว้ในการออกแบบตัวกรองคาลมานหรือใช้ในการเรียนรู้ของตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาท ตัวกรองคาลมานและตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทนี้ยังคงสามารถลดผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดและสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้านได้ดี แต่เมื่อค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดมีค่ามากขึ้นคุณสมบัติในการลดผลของสัญญาณรบกวนของตัวกรองคาลมานลดลง ในขณะที่ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทยังคงสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดได้ใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้สัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดที่มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.4 นิวตันกำลังสอง ป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อใช้ในการเรียนรู้โดยตรง (ตารางที่ ก.31 และ ก.35)

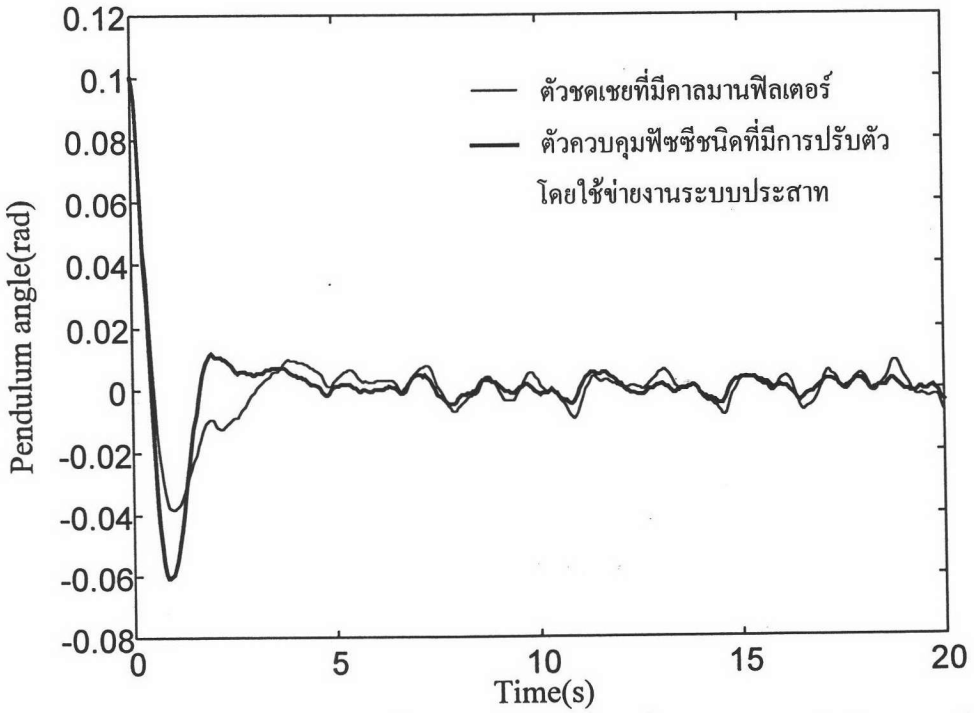
**2. ผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระและความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัด**

ทำการทดสอบเช่นเดียวกับกรณีที่มีสัญญาณรบกวนเนื่องจากลมพัดก้าน แต่เปลี่ยนให้สัญญาณรบกวนเกิดขึ้นจากลักษณะพื้นขรุขระ และมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์ กำหนดให้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทเรียนรู้การลดผลของสัญญาณรบกวนที่มีค่าความแปรปรวนเท่ากับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจริงกับระบบได้ผลดังรูปที่ 4.27

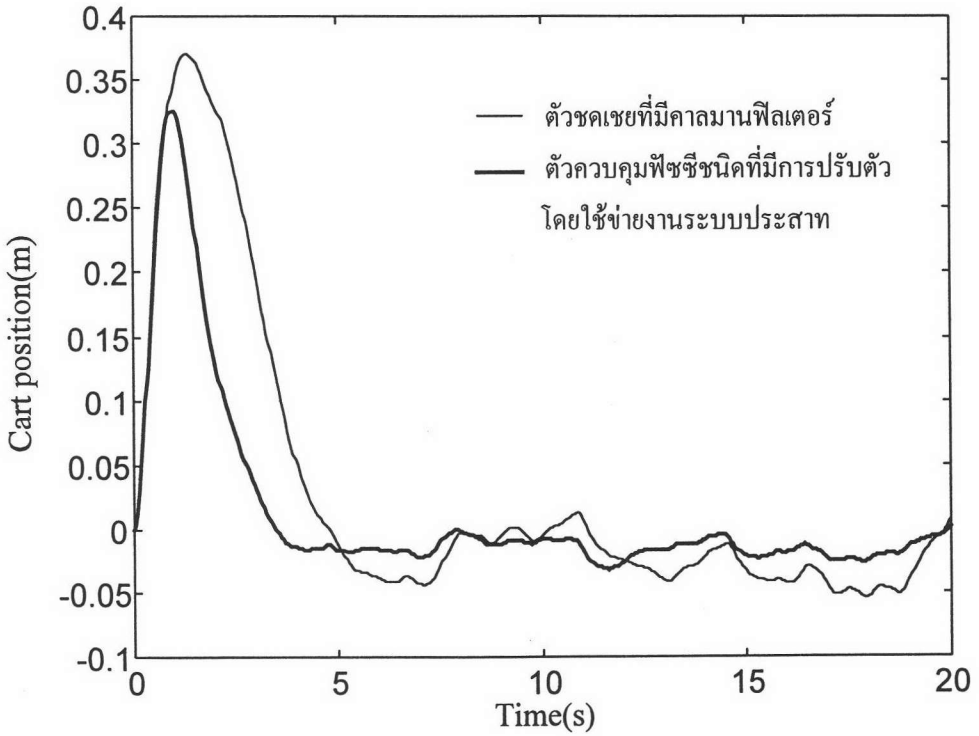
จากรูปที่ 4.29 ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนได้ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวชดเชยที่ไม่มีตัวกรองคาลมาน เมื่อความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนมีค่ามากขึ้นระบบยังคงสามารถควบคุมได้และมีผลน้อยกว่าเมื่อใช้ตัวชดเชยที่ไม่มีตัวกรองคาลมาน ทำการเปรียบเทียบการลดผลของสัญญาณรบกวนของตัวกรองคาลมานและตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัว โดยใช้สัญญาณรบกวนชุดเดียวกันป้อนเข้าสู่ระบบได้ผลดังรูปที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบมุมของก้านเมื่อมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์และมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระชนิดขาวแบบเกาส์ที่มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.5 นิวตันกำลังสอง และรูปที่ 4.29 แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งรถโดยที่มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์และมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระชนิดขาวแบบเกาส์ที่มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.5 นิวตันกำลังสอง




**รูปที่ 4.27** แสดงมุมของก้านและตำแหน่งรถเมื่อมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์และการรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระโดยมีความแปรปรวนเท่ากับ( a) 0.1 $N^2$ (b) 0.5 $N^2$ (c) 1.0 $N^2$ (d) 1.5 $N^2$




**รูปที่ 4.28** แสดงการเปรียบเทียบมุมของก้านเมื่อมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์และมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระชนิดขาวแบบเกาส์มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.5 นิวตันกำลังสอง




**รูปที่ 4.29** แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งรถเมื่อมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์และมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระชนิดขาวแบบเกาส์มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.5 นิวตันกำลังสอง

จากรูปที่ 4.28 และ 4.29 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทสามารถลดผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์และสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระชนิดขาวแบบเกาส์ได้ดีกว่าตัวชดเชยที่มีตัวกรองคาลมาน ทำการเปรียบเทียบการลดผลของสัญญาณรบกวนของตัวควบคุมทั้งสองโดยใช้ข้อมูลเชิงตัวเลขเพิ่มเติม ดังตารางที่ ก.36 ก.37 ก.38 และ ก.39 (ภาคผนวก ก.)

พิจารณาตารางที่ ก.36 ก.37 ก.38 และ ก.39 ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทสามารถลดผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์และสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระชนิดขาวแบบเกาส์ได้ดีกว่าตัวกรองคาลมาน ทุกค่าความแปรปรวนที่ทดสอบ

ทำการทดสอบตัวควบคุมทั้งสามชนิด ซึ่งทำการออกแบบหรือเรียนรู้กับสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระชนิดขาวแบบเกาส์ที่มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.5 นิวตันกำลังสอง และมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์ โดยกำหนดให้ค่าความแปรปรวนที่ใช้ในการทดสอบเป็น 0.1 นิวตันกำลังสอง 0.5 นิวตันกำลังสอง และ 1 นิวตันกำลังสอง ได้ผลดังตาราง ก.40 ก.41 และ ก.42 (ภาคผนวก ก.)

จากตารางที่ ก.40 ก.41 และ ก.42 จะเห็นได้ว่าเมื่อความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับที่กำหนดไว้ในการออกแบบตัวกรองคาลมานหรือใช้ในการเรียนรู้ของตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาท ตัวกรองคาลมานและตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทนี้ยังคงสามารถลดผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชนิดสีแบบเกาส์และสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระชนิดขาวแบบเกาส์ได้ดี แต่เมื่อค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระชนิดขาวแบบเกาส์มีค่ามากขึ้นคุณสมบัติในการลดผลของสัญญาณรบกวนของตัวกรองคาลมานลดลง ในขณะที่ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวยังคงสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระได้ใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้สัญญาณรบกวนเนื่องจากพื้นขรุขระที่มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.4 นิวตันกำลังสอง ป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อใช้ในการเรียนรู้โดยตรง (เปรียบเทียบตารางที่ ก.38 และ ก.42)

## การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดเชิงตั้งฉาก

จากการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดเชิงตั้งฉาก ดังกล่าวในบทที่ 2 กำหนดให้ข้อมูลในการเรียนรู้ได้มาจากทางเดินของตัวแปรสถานะเมื่อใช้ตัวชดเชยชนิดล้ำหน้าเป็นตัวควบคุมในช่วงเวลา 0 ถึง 20 วินาที ซึ่งมีจำนวนข้อมูลทั้งหมดเท่ากับ 400 ชุด ทำการเรียนรู้ตัวควบคุมโดยเลือกข้อมูลชุดที่มีความสำคัญตามวิธีการของการปรับตัวควบคุมให้มีข้อมูลสุดท้ายทั้งหมด 20 ชุด 30 ชุด และ 40 ชุด(ซึ่งหมายความว่าตัวควบคุมที่ได้จะมีจำนวนกฎเท่ากับ 20 30 และ 40 กฎตามลำดับ) หลังจากนั้นนำตัวควบคุมทั้งสามมาควบคุมก้านที่ตั้งอยู่บนรถให้ตั้งตรงพบว่าตัวควบคุมทั้งสามสามารถควบคุมก้านไม้ได้ในช่วงเวลาช่วงสั้นหลังจากนั้นระบบขาดเสถียรภาพคือก้านไม้ตก แต่ทั้งนี้ตัวควบคุมฟัซซีที่มีจำนวนชุดข้อมูลสุดท้ายมากที่สุดคือ 40 ชุดสามารถควบคุมก้านได้นานกว่า

จากผลของการควบคุมข้างต้น เมื่อพิจารณาจากวิธีการออกแบบตัวควบคุมพบว่า ขั้นตอนแรกต้องกำหนดฟังก์ชันภาวะสมาชิกจากข้อมูลการเรียนรู้ ซึ่งมีลักษณะสมมาตรและกระจายทั่วทั้งช่วงของสัญญาณเข้า หลังจากนั้นจึงดึงข้อมูลบางชุดออก ซึ่งในขั้นตอนนี้เองทำให้บางช่วงของสัญญาณเข้าไม่มีค่าความเป็นสมาชิกสำหรับทุก ๆ เซตฟัซซี จึงทำให้ส่วนผลของกฎฟัซซีถูกคูณด้วยจำนวนศูนย์ สัญญาณควบคุมจึงมีค่าเป็นศูนย์ในช่วงสัญญาณเข้าดังกล่าว จึงทำให้ตัวควบคุมขาดเสถียรภาพในการควบคุมในช่วงสัญญาณเข้าเหล่านั้น

ทำการทดสอบเพิ่มเติมโดยเพิ่มจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้เป็น 2400 ชุด และกำหนดให้จำนวนข้อมูลชุดสุดท้ายมีทั้งหมด 1000 1200 และ 1500 ชุด พบว่าตัวควบคุมฟัซซียังคงควบคุมก้านที่ตั้งอยู่บนรถให้ตั้งตรงไม่ได้ ซึ่งหมายความว่าการเพิ่มจำนวนข้อมูลในการเรียนรู้ไม่สามารถทำให้ตัวควบคุมมีเสถียรภาพในการควบคุมได้ นั่นคือยังคงมีช่วงสัญญาณเข้าบางช่วงที่ไม่มีค่าความเป็นสมาชิกในทุก ๆ เซต

ฟัซซี แต่ช่วงสัญญาณเข้าที่ไม่มีค่าความเป็นสมาชิกทุก ๆ เซตฟัซซี มีจำนวนลดลง แต่ทั้งนี้การเพิ่มจำนวนของข้อมูลสุดท้ายในการเรียนรู้เป็นการเพิ่มจำนวนกฎที่ใช้ในการควบคุมด้วย ซึ่งการคำนวณสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมที่มีจำนวนกฎมาก ๆ อาจทำให้ตัวควบคุมไม่สามารถคำนวณสัญญาณควบคุมได้ทันในช่วงเวลาชักตัวอย่างอีกด้วย

จากปัญหาในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีสำหรับควบคุมก้านไม้ที่ตั้งอยู่บนรถให้ตั้งตรงสองประการคือ เสถียรภาพในการควบคุมของตัวควบคุมที่ไม่สามารถกำหนดได้ชัดเจน และจำนวนกฎของตัวควบคุมที่มากจนทำให้การคำนวณสัญญาณควบคุมใช้เวลานาน ในวิทยานิพนธ์นี้จึงไม่ทำการทดสอบการลดผลของสัญญาณรบกวนของตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดเชิงตั้งฉาก

## สรุป

จากการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาท และนำมาใช้ควบคุมก้านที่ตั้งอยู่บนรถให้ตั้งตรงพบว่าสามารถออกแบบตัวควบคุมที่ทำให้ระบบเสถียรและสามารถควบคุมก้านและตำแหน่งรถให้อยู่ในตำแหน่งที่กำหนดได้ แต่ทั้งนี้ในการออกแบบตัวควบคุมต้องมีการเลือกค่าเริ่มต้น เช่น ฟังก์ชันภาวะสมาชิก ค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันในส่วนผลของกฎ และค่าถ่วงน้ำหนักของครรชนีสมรรถนะ ซึ่งการเลือกค่าเริ่มต้นเหล่านี้ไม่มีกฎเกณฑ์ในการเลือกที่ชัดเจนจึงทำให้ที่ค่าเริ่มต้นบางค่าของการเรียนรู้ของตัวควบคุมไม่เข้าสู่จุดเหมาะสมที่สุดในวงกว้าง

จากการทดสอบการลดผลของสัญญาณรบกวนชนิดต่าง ๆ และที่ค่าความแปรปรวนต่าง ๆ กัน พบว่าตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบและความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดทั้งชนิดขาวแบบเกาส์ และชนิดสีแบบเกาส์ได้ และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวกรองคาลมานพบว่าตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าตัวกรองคาลมาน นอกจากนี้ตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทยังสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนที่มีค่าความแปรปรวนไม่ตรงกับที่ตัวควบคุมเคยเรียนรู้มาก่อนได้ดี ในขณะที่ความสามารถในการลดผลของสัญญาณรบกวนของตัวกรองคาลมานลดลงเมื่อค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนที่เข้าสู่ระบบมีค่าไม่ตรงกับค่าความแปรปรวนที่ใช้ในการออกแบบตัวกรองคาลมาน

จากการทดสอบในเชิงตัวเลขเมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทหลังจากผ่านการเรียนรู้ครั้งที่ 40 และ 100 พบว่าตัวควบคุมฟัซซีชนิดที่มีการปรับตัวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาทหลังจากการเรียนรู้ครั้งที่ 100 สามารถลดผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดและสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบได้ดีกว่าตัวควบคุมหลังจากที่ทำการเรียนรู้ครั้งที่ 40 นั่นคือการเรียนรู้ของตัวควบคุมมีแนวโน้มที่จะลดผลของสัญญาณรบกวนมากขึ้นเมื่อมีการเรียนรู้มากขึ้น