

การควบคุมแบบฟัซซีสำหรับระบบกันสะเทือนแบบบังคับโดยใช้แบบจำลองเต็มของยานพาหนะ

Fuzzy Control for Active Suspension Systems Based on a Full-Car Model

รัฐพงศ์ ปฏิภาณ¹ บุญสร้าง ดิเรกสถาพร²

¹มหาวิทยาลัยราชธานี 487 ซ.เทคโนโลยี ถ.ชยางกูร

อ.เมือง จ.อุบลราชธานี 34000 E-mail: rat_pat@hotmail.com

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

โทร 0-43202845 โทรสาร 0-43202849 E-mail: boodir@kku.ac.th

บทคัดย่อ:

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกันสะเทือนแบบบังคับของยานพาหนะที่มีองศาอิสระเท่ากับเจ็ด ได้ถูกใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาสมรรถนะของระบบในการย่นการยืดเกาะถนนที่ดีและความนุ่มนวลของการขับขี่ยานพาหนะ จากผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองพบว่า ระบบกันสะเทือนแบบบังคับที่ใช้การควบคุมแบบฟัซซีที่มีการปรับค่าฟัซซีของแรงที่ควบคุมการสั่นด้วยวิธี GA (Genetic Algorithm) จะมีสมรรถนะโดยรวมดีกว่าระบบกันสะเทือนที่ไม่มีตัวควบคุม ที่มีตัวควบคุมแบบ PID และมีตัวควบคุมแบบฟัซซีอย่างเดียว

Abstract

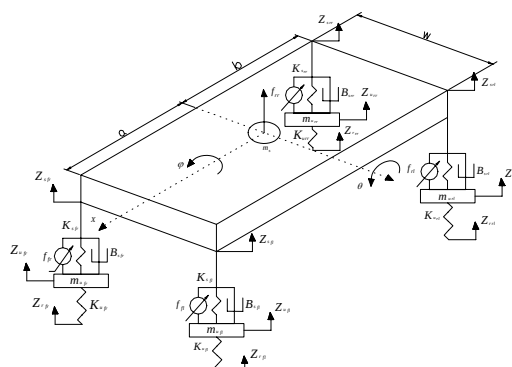
A mathematical model of vehicle active suspension systems with seven degree of freedom is employed for investigating their performance to provide good road handling and passenger comfort due to road impulse disturbance. It has been found from the simulation results that the active suspension system using fuzzy control action tuned Fuzzy membership function with GA (Genetic Algorithm) has the best performance as compared with the passive suspension, the active suspension using PID and the active suspension system using only fuzzy control action.

1. บทนำ

คุณสมบัติที่ดีของระบบกันสะเทือนของยานพาหนะคือต้องทำให้ยานพาหนะ ยึดเกาะถนนได้ดีรวมทั้งมีความนุ่มนวลในการขับขี่ สำหรับตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อระบบดังกล่าวคือ พื้นผิวถนนที่ไม่ราบเรียบซึ่งก่อให้เกิดการสั่นและการเอียงตัวของยานพาหนะ ผลกระทบเหล่านี้มีผลต่อการยึดเกาะถนนและความนุ่มนวลในการขับขี่ในระบบกันสะเทือนที่ไม่มีตัวควบคุม (passive system) ซึ่งประกอบด้วยสปริงและตัวหน่วง (damper) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์คงที่ จะ

ปรากฏว่าระบบกันสะเทือนจะไม่สามารถให้ผลที่ดีในการขับขี่ในกรณีที่สมภาวะที่พื้นผิวถนนขรุขระและเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาระบบกันสะเทือนแบบบังคับ (Active suspension) ซึ่งมีตัวควบคุมแรงที่กระทำต่อระบบนอกเหนือจากแรงที่เกิดจากสปริงและตัวหน่วง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะถนนและความนุ่มนวลในการขับขี่ บทความฉบับนี้ได้นำเสนอระบบกันสะเทือนแบบบังคับที่ใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีและมีการปรับตัวควบคุมฟัซซีด้วยวิธี GA เพื่อควบคุมตัวแปรที่มีผลกระทบต่อระบบกันสะเทือนซึ่งได้แก่ ความเร่งและมุมเอียงของตัวรถรวมทั้งการเคลื่อนที่ของแกนล้อ เพื่อเปรียบเทียบกับกรณีการใช้ตัวควบคุมแบบ PID และระบบกันสะเทือนที่ไม่มีตัวควบคุม โดยมีเงื่อนไขการออกแบบคือ ตัวรถต้องเกิดการสั่นที่มีโอเวอร์ชูต (overshoot) ไม่เกิน 5% และเวลาเข้าสู่สมดุล (settling time) น้อยกว่า 5 วินาที

2) แบบจำลองระบบกันสะเทือนแบบบังคับ



รูปที่ 1. แบบจำลองระบบกันสะเทือนแบบบังคับ

จากรูปที่ 1. สมการการเคลื่อนที่ของระบบจะหาได้โดยอาศัยกฎข้อที่สองของนิวตันดังนี้

สมการการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของตัวรถ (heave)

$$\begin{aligned}
m_s \ddot{z} = & -(2K_{sf} + 2K_{sr})z - (2B_{sf} + 2B_{sr})\dot{z} + (2aK_{sf} - 2bK_{sr})\theta \\
& + (2aB_{sf} - 2bB_{sr})\dot{\theta} + K_{sf}z_{u_{fl}} + B_{sf}\dot{z}_{u_{fl}} + K_{sf}z_{u_{fr}} + B_{sf}\dot{z}_{u_{fr}} \\
& + K_{sr}z_{u_{rl}} + B_{sr}\dot{z}_{u_{rl}} + K_{sr}z_{u_{rr}} + B_{sr}\dot{z}_{u_{rr}} + f_{fl} + f_{fr} + f_{rl} + f_{rr} \quad (2.1)
\end{aligned}$$

สมการการเคลื่อนที่ในแนวเชิงมุมของตัวรถ(pitch)

$$\begin{aligned}
I_{yy}\ddot{\theta} = & (2aK_{sf} - 2bK_{sr})z - (2aB_{sf} - 2bB_{sr})\dot{z} + (2a^2K_{sf} \\
& + 2b^2K_{sr})\theta + (2a^2B_{sf} + 2b^2B_{sr})\dot{\theta} - aK_{sf}z_{u_{fl}} - aB_{sf}\dot{z}_{u_{fl}} \\
& - aK_{sf}z_{u_{fr}} - aB_{sf}\dot{z}_{u_{fr}} + bK_{sr}z_{u_{rl}} + bB_{sr}\dot{z}_{u_{rl}} + bK_{sr}z_{u_{rr}} \\
& + bB_{sr}\dot{z}_{u_{rr}} - af_{fl} - af_{fr} + bf_{rl} + bf_{rr} \quad (2.2)
\end{aligned}$$

สมการการเคลื่อนที่ในแนวเชิงมุมของตัวรถ(roll)

$$\begin{aligned}
I_{xx}\ddot{\phi} = & -0.25w^2(2K_{sf} + 2K_{sr})\phi - 0.25w^2(2B_{sf} + 2B_{sr})\dot{\phi} \\
& + 0.5wK_{sf}z_{u_{fl}} + 0.5wB_{sf}\dot{z}_{u_{fl}} - 0.5wK_{sf}z_{u_{fr}} - 0.5wB_{sf}\dot{z}_{u_{fr}} \\
& + 0.5wK_{sr}z_{u_{rl}} + 0.5wB_{sr}\dot{z}_{u_{rl}} - 0.5wK_{sr}z_{u_{rr}} - 0.5wB_{sr}\dot{z}_{u_{rr}} \\
& + 0.5wf_{fl} - 0.5wf_{fr} + 0.5wf_{rl} - 0.5wf_{rr} \quad (2.3)
\end{aligned}$$

สมการการเคลื่อนที่ของ unsprung mass

$$\begin{aligned}
m_u \ddot{z}_{u_{fl}} = & K_{sf}z + B_{sf}\dot{z} - aK_{sf}\theta - aB_{sf}\dot{\theta} + 0.5wK_{sf}\phi + 0.5wB_{sf}\dot{\phi} \\
& - (K_{sf} + K_u)z_{u_{fl}} - B_{sf}\dot{z}_{u_{fl}} + K_uz_{r_{fl}} - f_{fl} \quad (2.4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_u \ddot{z}_{u_{fr}} = & K_{sf}z + B_{sf}\dot{z} - aK_{sf}\theta - aB_{sf}\dot{\theta} + 0.5wK_{sf}\phi + 0.5wB_{sf}\dot{\phi} \\
& - (K_{sf} + K_u)z_{u_{fr}} - B_{sf}\dot{z}_{u_{fr}} + K_uz_{r_{fr}} - f_{fr} \quad (2.5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_u \ddot{z}_{u_{rl}} = & K_{sr}z + B_{sr}\dot{z} - bK_{sr}\theta + bB_{sr}\dot{\theta} + 0.5wK_{sr}\phi \\
& + 0.5wB_{sr}\dot{\phi} - (K_{sr} + K_u)z_{u_{rl}} - B_{sr}\dot{z}_{u_{rl}} + K_uz_{r_{rl}} - f_{rl} \quad (2.6)
\end{aligned}$$

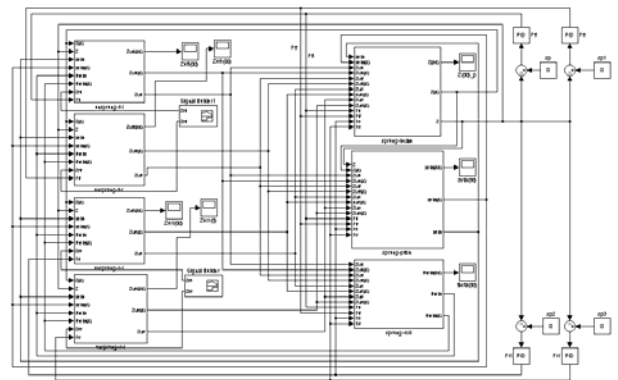
$$\begin{aligned}
m_u \ddot{z}_{u_{rr}} = & K_{sr}z + B_{sr}\dot{z} + bK_{sr}\theta + bB_{sr}\dot{\theta} - 0.5wK_{sr}\phi \\
& - 0.5wB_{sr}\dot{\phi} - (K_{sr} + K_u)z_{u_{rr}} - B_{sr}\dot{z}_{u_{rr}} + K_uz_{r_{rr}} \\
& - f_{rr} \quad (2.7)
\end{aligned}$$

สำหรับค่าของตัวแปรต่างๆในสมการ (2.1) ถึง (2.7) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

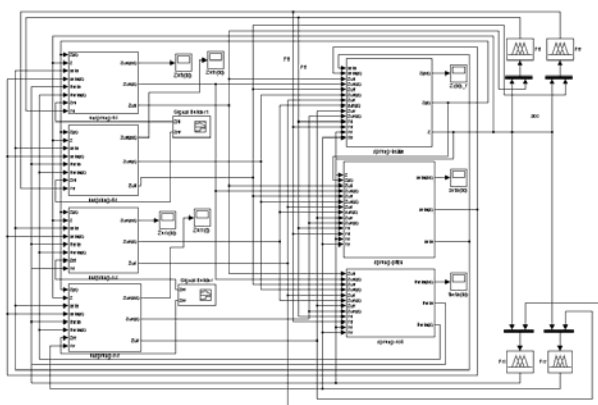
ตารางที่ 1. ค่าตัวแปรในระบบ

ตัวแปร	ความหมาย	ค่า	หน่วย
m_s	sprung mass	1500	kg
m_u	unsprung mass	59	Kg
K_{sf}, K_{sfl}, K_{sfr}	front suspension spring stiffness	35000	N/m
K_{sr}, K_{srl}, K_{srr}	rear suspension spring stiffness	38000	N/m
$K_u, K_{uf}, K_{ufr}, K_{ur}$	tire spring stiffness	190000	N/m
B_{sf}, B_{sfl}, B_{sfr}	front suspension damping	1000	N/m/s
B_{sr}, B_{srl}, B_{srr}	rear suspension damping	1100	N/m/s
I_{xx}	roll axis moment of inertia	460	kg-m ²
I_{yy}	pitch axis moment of inertia	2160	kg-m ²
a	length between front of vehicle and center of gravity of sprung mass	1.4	m
b	length between rear of vehicle and center of gravity of sprung mass	1.7	m
w	width of sprung mass	3	m

สมการการเคลื่อนที่ดังกล่าวได้ถูกนำมาเขียนให้อยู่ในรูป simulink block diagram ในกรณีการควบคุมแบบ PID และแบบฟัซซี่ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3



รูปที่ 2. Simulink block diagram for PID control action



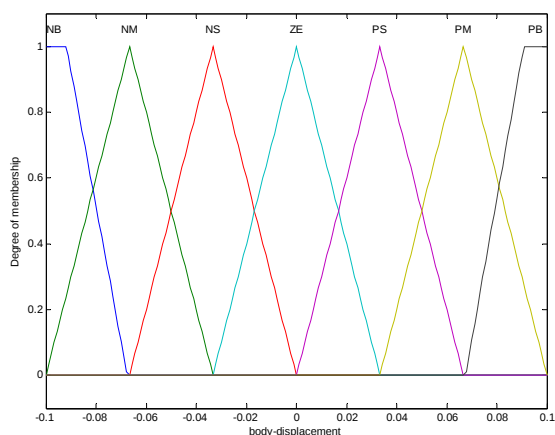
รูปที่3. Simulink block diagram for fuzzy control action

3) ตัวควบคุมฟัซซี่

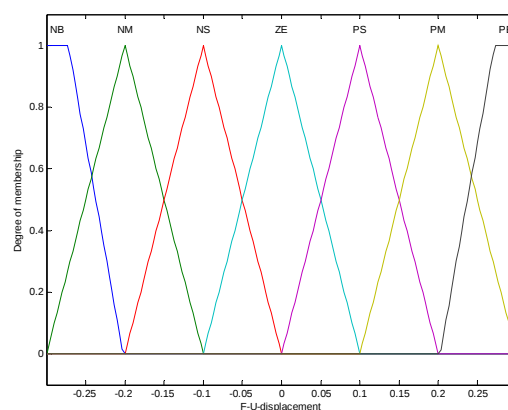
ระบบกันสะเทือนแบบบังคับในบทความนี้ประกอบด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ชนิด mamdani สี่ตัวซึ่งแยกควบคุมที่ล้อหน้าและล้อหลัง โดยแต่ละตัวมีอินพุตสองค่าคือ ระยะการเคลื่อนที่ของตัวรถ(sprung mass displacement)และระยะการเคลื่อนที่ของแกนล้อ (unsprung mass displacement) เอาท์พุทหนึ่งค่าคือ แรงควบคุม (force control) รูปร่างของ membership function ของอินพุตและเอาท์พุทเป็นแบบผสมระหว่าง แบบสามเหลี่ยมและแบบสี่เหลี่ยมคางหมู โดยตัวควบคุมในส่วนล้อหน้าทั้งสองมีค่าฟัซซี่เซตระหว่าง -0.1 ถึง 0.1 , -0.3 ถึง 0.3 , -11200 ถึง 11200 สำหรับ ระยะการเคลื่อนที่ของตัวรถ ระยะการเคลื่อนที่ของแกนล้อ และแรงควบคุมตามลำดับ และในส่วนล้อหลังทั้งสองมีค่าฟัซซี่เซตระหว่าง -0.1 ถึง 0.1 , -0.3 ถึง 0.3 , -13000 ถึง 13000 โดยมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่4 ถึง 9

ตัวควบคุมฟัซซี่ในส่วนล้อ

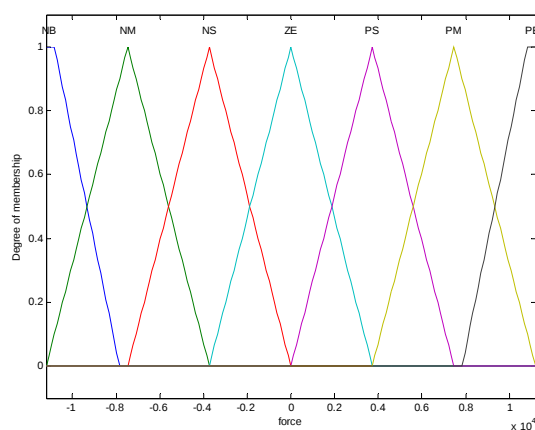
หน้า



รูปที่4. membership function ของ input ตัวที่หนึ่ง (body displacement)

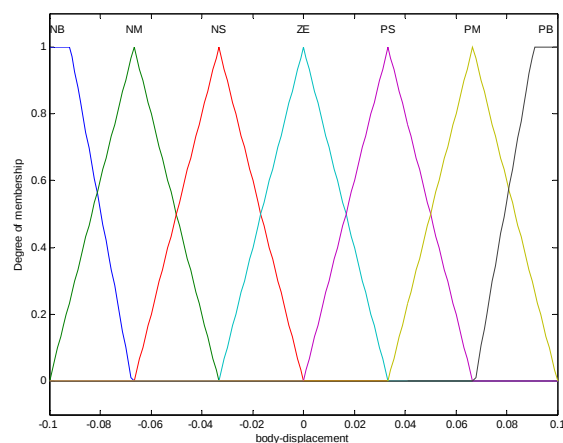


รูปที่5. membership function ของ input ตัวที่สอง(front unsprung mass displacement)

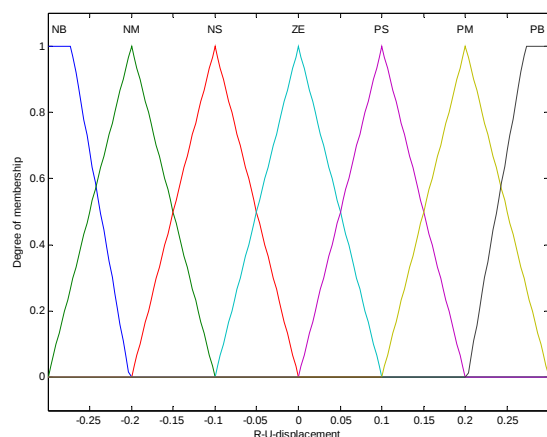


รูปที่6. membership function ของแรงควบคุม

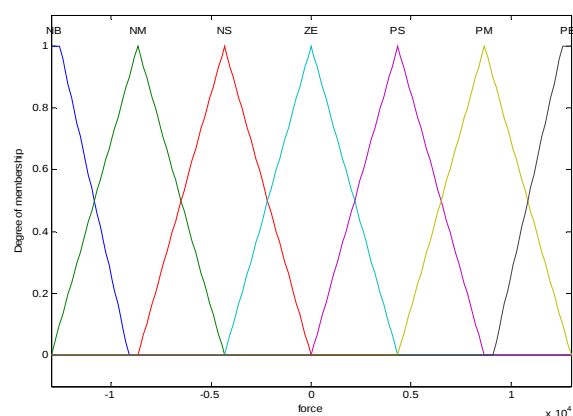
ตัวควบคุมฟัซซี่ในส่วนล้อหลัง



รูปที่7. membership function ของ input ตัวที่หนึ่ง(body displacement)



รูปที่8. membership function ของ input ตัวที่สอง(rear unsprung mass displacement)



รูปที่9. membership function ของแรงควบคุม

สำหรับกฎพื้นฐาน (Rule Base) ที่ใช้ในการควบคุมแบบฟัซซีมีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางที่2.

ตารางที่2.กฎพื้นฐาน

		body displacement						
unsprung mass displacement		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	NB	PB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE
	NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	NS
	NS	PM	PM	PS	PS	ZE	NS	NM
	ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
	PS	PM	PM	PS	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	PS	ZE	NM	NM	NB	NB
	PB	ZE	ZE	ZE	NB	NB	NB	NB

4) การปรับตัวควบคุมฟัซซีโดย GA

ตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการ GA มีรายละเอียดดังนี้

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) คือ $J = a_{\max}^2$ โดยที่

$a_{\max}$ คือความเร่งสมบูรณ์สูงสุด

ตัวแปรออกแบบ = 22

จำนวนรอบในการทำซ้ำ (generation size) = 50

จำนวนประชากร (population size) = 100

ค่าความเป็นไปได้ในการกระโดดข้าม (cross-over probability) = 0.9

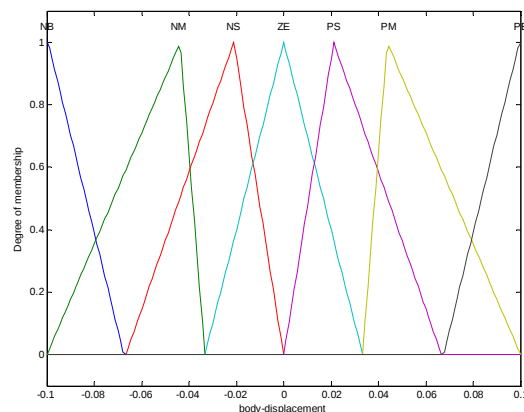
ค่าความเป็นไปได้ในการผ่าเหล่า (mutation probability) = 0.05

ค่าความเป็นไปได้ในการ translation (translation probability) = 0.01

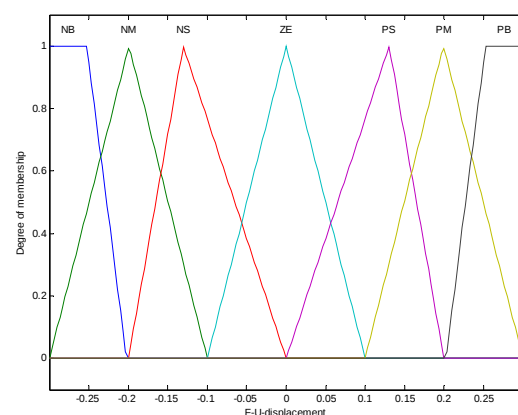
รูปร่างของฟังก์ชันระดับการเป็นสมาชิก (membership function)

หลังจากผ่านการปรับโดย GA เป็นดังนี้

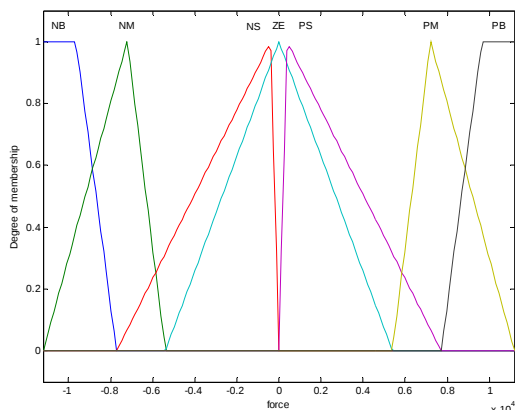
ตัวควบคุมฟัซซีในส่วนล้อหน้า



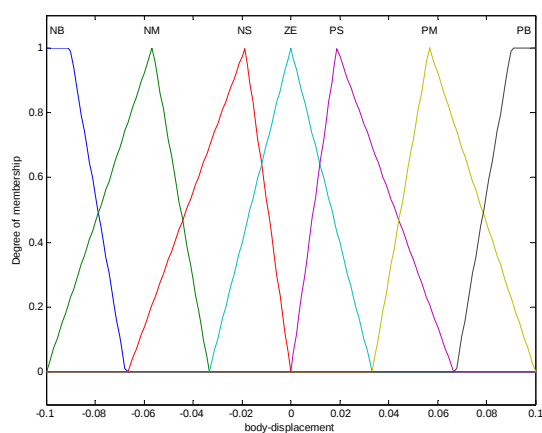
รูปที่10. membership function ของ input ตัวที่หนึ่ง(body displacement)



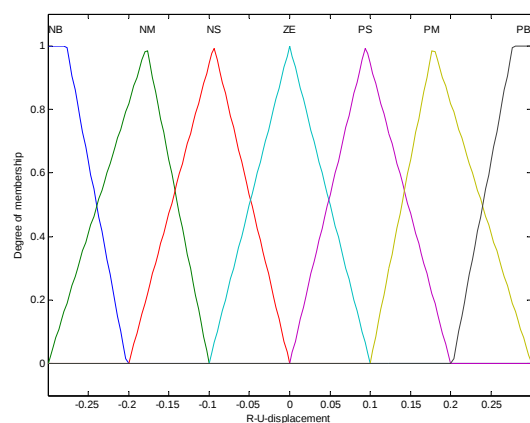
รูปที่11. membership function ของ input ตัวที่สอง(front unsprung mass displacement)



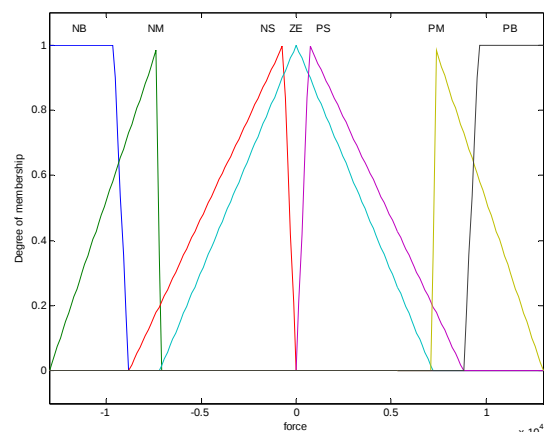
รูปที่12. membership function ของแรงควบคุม
ตัวควบคุมฟัซซีในส่วนล้อหลัง



รูปที่13. membership function ของ input ตัวที่หนึ่ง(body



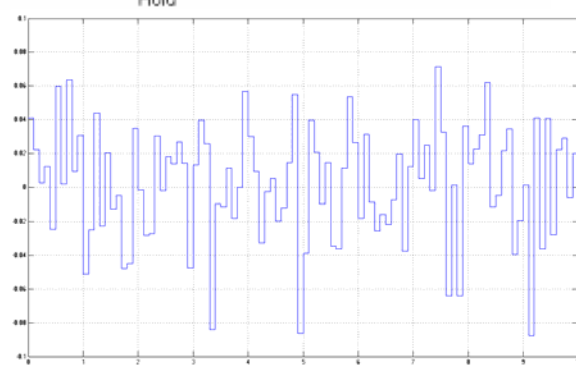
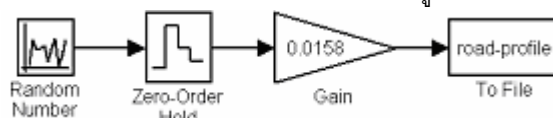
รูปที่14. membership function ของ input ตัวที่สอง(front
unsprung mass displacement)



รูปที่15. membership function ของแรงควบคุม

5) ผลตอบสนองของระบบกันสะเทือน

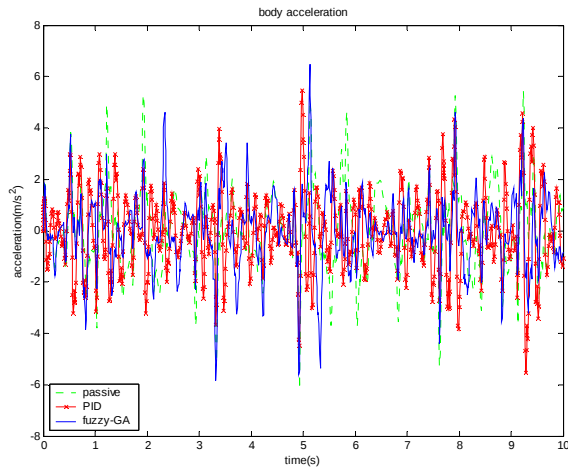
การเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบที่ไม่มีตัวควบคุม (passive) ระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PID ที่มีการปรับค่าเกณฑ์ด้วยวิธี Ziegler-Nichols Oscillation method และระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีที่มีการปรับด้วย GA โดยสมมติให้พื้นผิวถนนเป็นสัญญาณเกาส์เซียนแรนดอม (gaussian random) ซึ่งมีรายละเอียดดังรูปที่ 16 กระทำที่ล้อหน้าและล้อหลังจะได้ผลตอบสนองดังแสดงในรูปที่ 17 ถึง



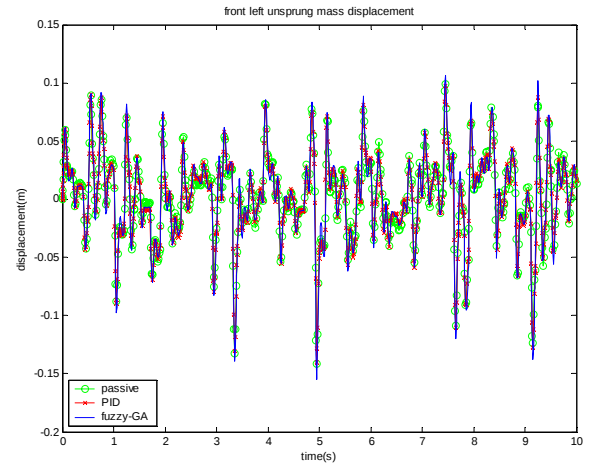
รูปที่16.แบบจำลองของพื้นผิวถนนแบบเกาส์เซียนแรนดอม

Random number มีค่า variance =5 และ Zero-order hold = 0.1s

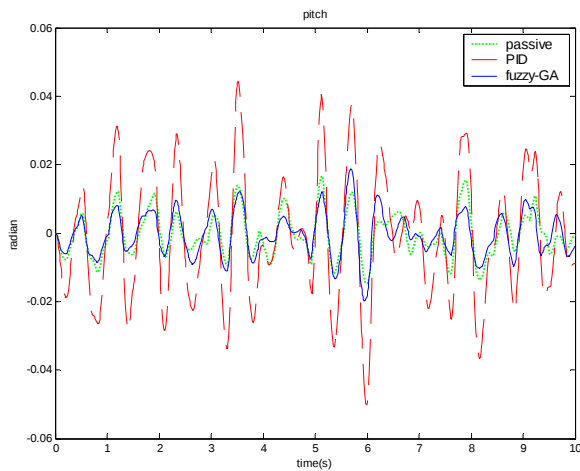
กรณีที่สัญญาณเกาส์เซียนแรนดอมกระทำที่ล้อหน้าซ้าย



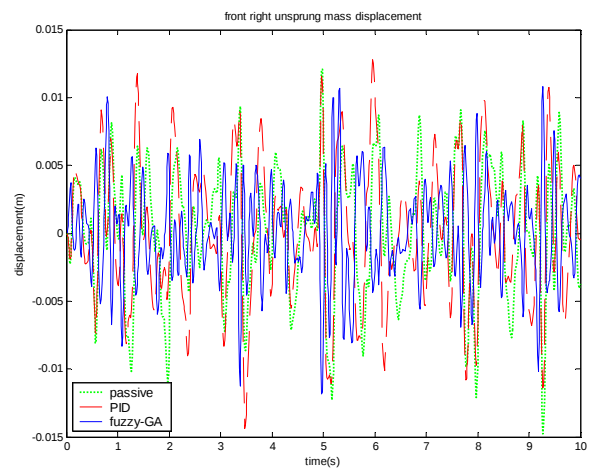
รูปที่ 17. ความเร่งของตัวรถ



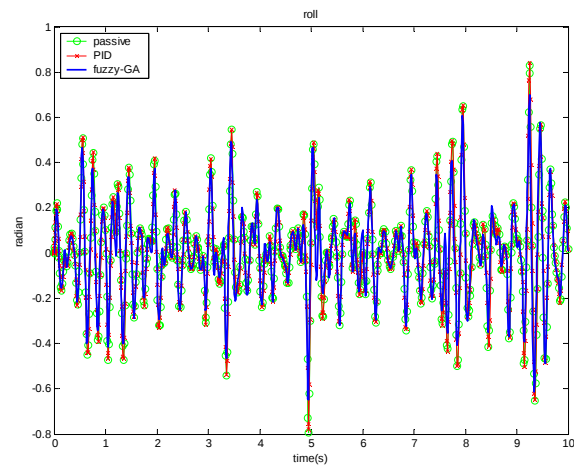
รูปที่ 19. การเคลื่อนที่ของแกนล้อหน้าซ้าย



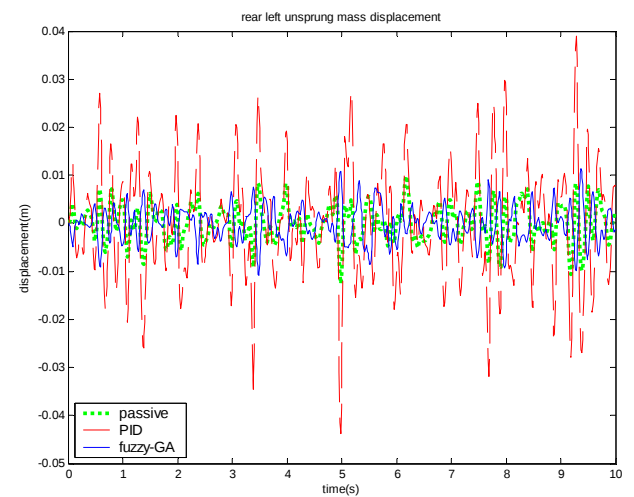
รูปที่ 18. การโคลงตัวของรถ



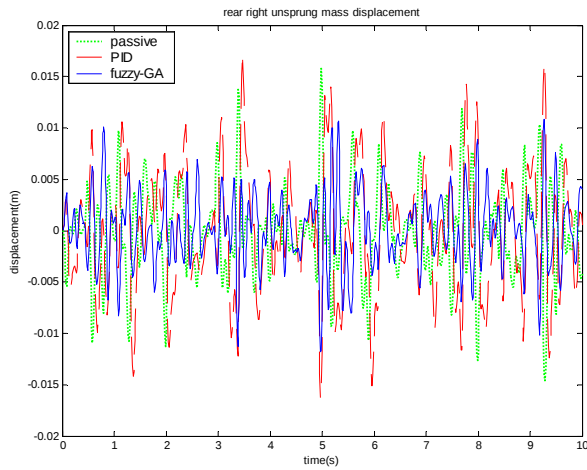
รูปที่ 20. การเคลื่อนที่ของแกนล้อหน้าขวา



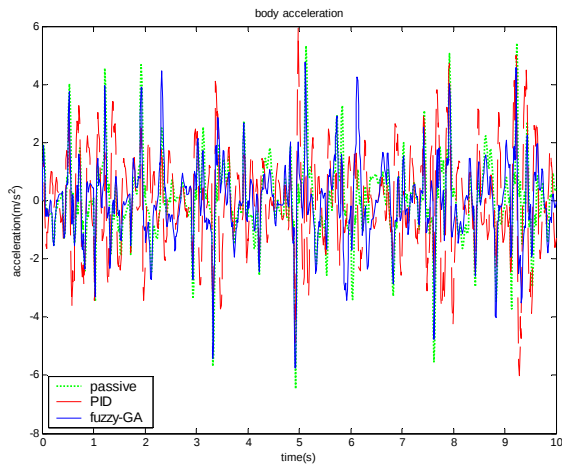
รูปที่ 18. การเอียงตัวของรถ



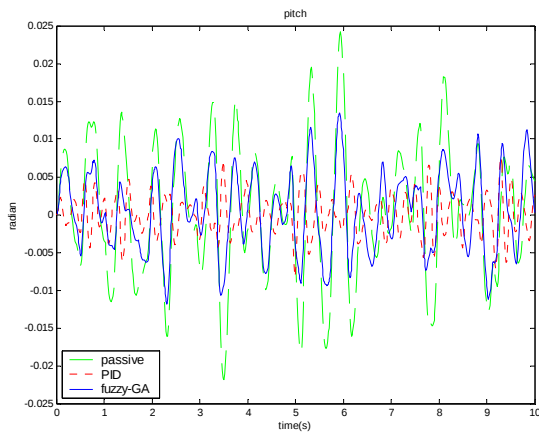
รูปที่ 21. การเคลื่อนที่ของแกนล้อหลังซ้าย



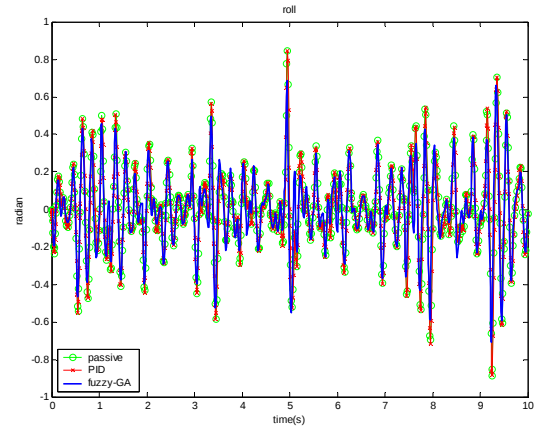
รูปที่ 22. การเคลื่อนที่ของแกนล้อหลังขวา
กรณีที่ใช้สัญญาณเกาส์เซียนแรนดอมกระทำที่ล้อหลังขวา



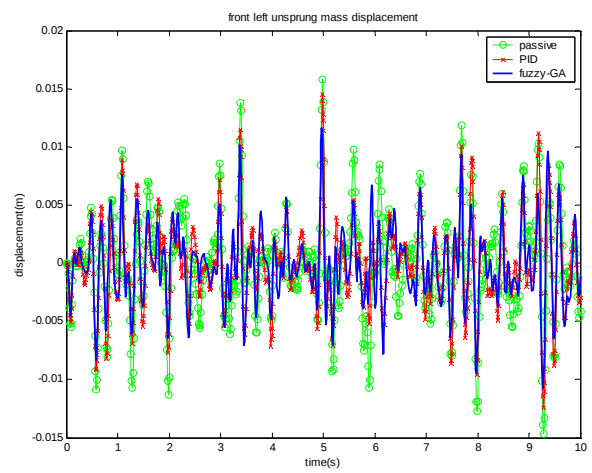
รูปที่ 23. ความเร่งของตัวรถ



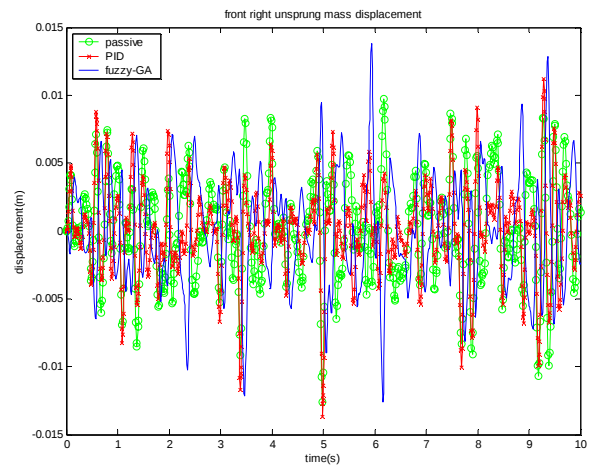
รูปที่ 24. การโคลงตัวของรถ



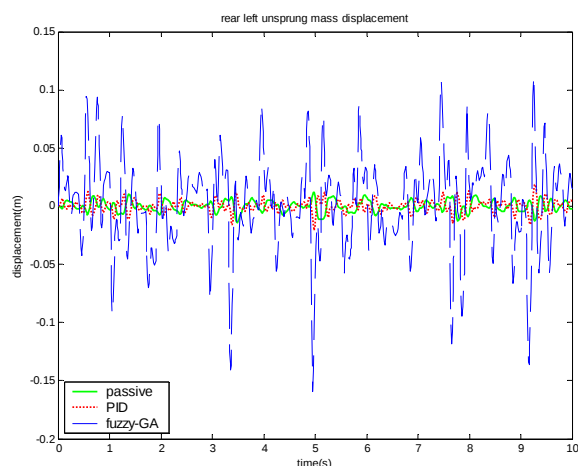
รูปที่ 25. การเอียงตัวของรถ



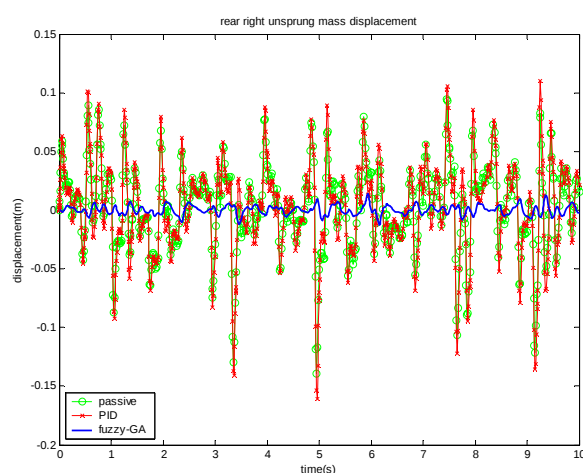
รูปที่ 26. การเคลื่อนที่ของแกนล้อหน้าซ้าย



รูปที่ 27. การเคลื่อนที่ของแกนล้อหน้าขวา



รูปที่ 28. การเคลื่อนที่ของแกนล้อหลังซ้าย



รูปที่ 29. การเคลื่อนที่ของแกนล้อหลังขวา

6)สรุป

จากการเปรียบเทียบผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองระหว่างระบบกันสะเทือนที่ไม่มีตัวควบคุม ระบบกันสะเทือนที่มีตัวควบคุมแบบ PID และระบบกันสะเทือนที่มีตัวควบคุมแบบฟัซซี่ซึ่งมีการปรับตัว GA ที่มีตัวแปรออกแบบ 22 ตัว จำนวนการทำซ้ำ 50 รอบ สรุปได้ว่า ระบบกันสะเทือนที่มีตัวควบคุมแบบฟัซซี่ที่มีการปรับตัว GA ที่มีตัวแปรออกแบบ 22 ตัว และจำนวนรอบในการทำซ้ำ 50 รอบให้ผลโดยรวมดีที่สุด ทั้งในส่วนของความนุ่มนวลในการขับขี่ ซึ่งพิจารณาได้จากความเร่งของตัวรถ และในส่วนของความยืดหยุ่นในการขับขี่ ซึ่งพิจารณาได้จากการเคลื่อนที่ของแกนล้อ การเอียงตัว และการโคลงตัวของรถ

เอกสารอ้างอิง

- [1] นนทศักดิ์ ศิริโชค. (2524). เทคนิครถยนต์สำหรับประชาชน. กรุงเทพฯ:ซีเอ็ดยูเคชั่น;2524.
- [2] สุจินต์ บุรีรัตน์. (2547). เอกสารประกอบการเรียนวิชา 165 727 Mechanical System Optimization .
- [3] Hoa Ying . (2000). fuzzy control and modeling: analytical foundations and applications. New York : IEEE.

- [4] Goldberg, D.E. (1989). Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison-Wesley .
- [5] J.Barr, L.Ray . (1996). Control of an active suspension using fuzzy logic. Youngstown state University,Youngstown,Ohio.IEEE.
- [6] J.Campos, L.Davis, F.L Lewis, S.Ikenaga, S.scully,and M.Evans. (1998). Active suspension control of Ground Vehicle Heave and pitch Motions.Automation and Robotics research Institute. The University of Texas at Arlington. <http://arri.uta.edu/acs/jcompos/research/MED 188.pdf> .
- [7] K. Hyniova, A. Stribsky and J. Honcu. (1998). FUZZY CONTROL OF MECHANICAL VIBRATING SYSTEMS. Department of Electrical Engineering, CzechTechnical. University.http://bozek.cvut.cz/groups/publications/fuzzy_control.pdf .
- [8] Masano Makaidono. (2001). Fuzzy logic for beginner.Singapore ; World Scientific.
- [9] MATH WORK.User's Guide Version 2. (1995). Fuzzy Logic Toolbox .For Use with MATLAB.
- [10] N. Al-Holou, A. Shaout. (1995). The Development of fuzzy Logic based controller for Semi-Active Suspension System. Electrical and Computer Engineering Dept.Univ. of Michigan Dearborn.Dearborn MI. IEEE.
- [11] S.Ikenaga, F.L.Lewis, J.Campos, L.Davis. Active Suspension Control of Ground Vehicle based on a full-Vehicle Model. Automation & Robotics Research institute,The University of Texas at Arlington 7300 Jack Newell Blvd,South Fort Worth,TX 76118-7115
- [12] S. Yong,Wook and W. Hyun Kwon. (1998). Genetic-based fuzzy control for half-car active suspension systems.Internation. Journal of Systems science . volume 29,number 7,page 699-710.