

การจำลองการทำงานของแผ่นเคลื่อนไหว 6 องศาอิสระ ที่ขับเคลื่อนด้วยไฮดรอลิก

Simulation of 6-DOF Hydraulic Driven Motion Platforms

สุทธิวัฒน์ ประชาชนะชัย¹ และ สุวัฒน์ กุลธนปรีดา²

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถ. พิบูลสงคราม บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทรศัพท์ 0-29132500 ต่อ 8308 โทรสาร 0-5870026

Sutthiwat Prachachanachai¹ and Suwat Kuntanapreeda²

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok,

Pibulsongkram Road, Bangsue, Bangkok 10800. Tel 0-29132500 ext. 8308, Fax. 0-5870026

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์ของแผ่นเคลื่อนไหว 6 องศาอิสระ รูปแบบแขนกลโครงสร้างขนานที่เรียกว่า Stewart Platform ในบทความนี้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการทำงานประกอบด้วยส่วนต่างๆ คือ ส่วน Washout Filter, สมการจลนศาสตร์ผกผัน, ตัวควบคุม, ระบบไฮดรอลิก และสมการพลวัตของแผ่นเคลื่อนไหว ผลลัพธ์การจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแผ่นเคลื่อนไหวโดยรวมเป็นที่น่าพอใจ และสามารถนำไปประโยชน์สำหรับการออกแบบเครื่องจำลองจริง เช่น เครื่องจำลองการขับรถยนต์ และเครื่องฝึกหัดนักบิน เป็นต้น โดยเฉพาะช่วยในการกำหนดขนาดชิ้นส่วนของแผ่นเคลื่อนไหว การเลือกอุปกรณ์ไฮดรอลิกที่เหมาะสม และการออกแบบตัวควบคุม

คำหลัก แผ่นเคลื่อนไหว, ระบบไฮดรอลิก, เครื่องจำลอง

Abstract

This paper presents the computer simulations of a 6 DOF hydraulic driven motion platform. The platform is a parallel robot known as Stewart Platform. In this paper the simulation program consists of Washout Filters, Inverse Kinematics, Controller, and Hydraulic System subprograms. The simulation results of the dynamic behavior of the platform are satisfactory and could be utilized for design actual simulator such as a flight simulator and a

driving simulator. It could be particularly used for sizing the platform, selecting hydraulic components, and design controllers.

Keywords: Motion platform, Hydraulic system, Simulator

1. บทนำ

จุดประสงค์หลักของเครื่องจำลองการขับยานพาหนะ เช่น เครื่องฝึกหัดนักบิน (Flight Simulator), เครื่องจำลองการขับรถยนต์ (Driving Simulator) และเครื่องเล่นในสวนสนุกต่างๆ เพื่อสร้างสภาวะให้ผู้ขับที่มีความรู้สึกเหมือนหรือใกล้เคียงการขับที่พาหนะจริงมากที่สุด โดยเฉพาะการนำเครื่องจำลองการขับรถยนต์มาใช้งานนั้นไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะใช้เพื่อฝึกหัดขับเท่านั้น แต่สามารถนำไปใช้งานในเชิงวิศวกรรมได้อย่างมากมาย โดยเฉพาะใช้ในการออกแบบรถยนต์ [1-2] และใช้ในด้านวิศวกรรมความปลอดภัย (เช่น ศึกษาพฤติกรรมหรือผลตอบสนองของผู้ขับรถยนต์ในสภาวะต่างๆ และช่วยในการออกแบบระบบจราจร เป็นต้น) [3]

ลักษณะการทำงานของเครื่องจำลองสามารถแบ่งออกเป็นหลายระดับด้วยกัน เครื่องจำลองระดับง่ายที่สุดจะเป็นกลุ่มเครื่องเล่นในสวนสนุก ซึ่งเครื่องจำลองจะดำเนินการจำลองสถานการณ์ที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า โดยที่ผู้ขับจะเป็นเสมือนผู้โดยสารเท่านั้น ไม่สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับเครื่องจำลองได้เลย ในส่วนของความสมจริงนั้น ระดับง่ายสุดเป็นการจำลองเฉพาะในส่วนของภาพและเสียงเท่านั้น ผู้ขับที่รับรู้การจำลองการ

¹ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ

² อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ

เคลื่อนไหวด้วยประสาทสัมผัสทางตาและหู เครื่องจำลองในระดับที่มีความสมจริงมากและเป็นที่ใช้กันทั่วไปสำหรับการฝึกหัดการขับซึ่งเป็นเครื่องจำลองที่มีการปฏิสัมพันธ์กับผู้ขับ และสามารถจำลองทั้งที่เป็นภาพ-เสียงและการเคลื่อนไหว ซึ่งจะทำให้ผู้ขับที่สามารถรับรู้การเคลื่อนไหวก่อนที่สมจริงมากขึ้น โดยเฉพาะการรับรู้ถึงแรงหรือความเร่งที่มากระทำกับผู้ขับอื่นเกิดจากการเคลื่อนไหวของตัวพาหนะ อุปกรณ์หลักที่ใช้สร้างการเคลื่อนไหวให้กับเครื่องจำลองเรียกว่า แผ่นเคลื่อนไหว (Motion Platform) ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของหุ่นยนต์โครงสร้างขนานที่รู้จักกันดีในชื่อ Stewart Platform แบบ 6 องศาอิสระ (DOF)

บทความวิจัยนี้นำเสนอการใช้คอมพิวเตอร์จำลองการทำงานของแผ่นเคลื่อนไหว 6 DOF ที่ขับเคลื่อนด้วยไฮดรอลิก สำหรับใช้เป็นเครื่องจำลองการขับเครื่องบิน และเป็นงานวิจัยที่ต่อเนื่องจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ได้ศึกษามาแล้วบางส่วน [4-5] ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมจำลองการทำงานจะเป็นประโยชน์สำหรับการออกแบบเครื่องจำลองจริงต่อไปในอนาคต

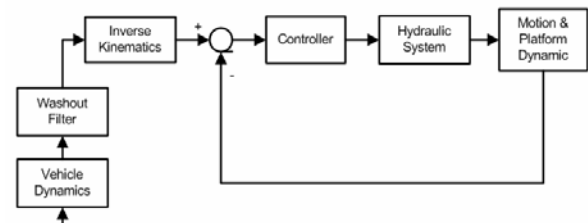
2. หลักการทำงาน

การทำงานของเครื่องจำลองการขับเครื่องบิน มีหลักการทำงานดังแสดงในรูปที่ 1 เริ่มจากผู้ขับที่ทำาการควบคุมรถโดยใช้พวงมาลัย, คันเร่ง และเบรค จากนั้นก็จะถูกแปลงเป็นความเร่งของรถยนต์ในทิศทาง x-y-z และ roll-pitch-yaw โดยสมการพลศาสตร์ของรถยนต์ ความเร่งนี้เองที่ทำให้ผู้ขับได้รู้สึกถึงการเคลื่อนที่ของรถยนต์ แต่ตัวเครื่องจำลองเองก็มีขอบเขตการเคลื่อนไหวที่จำกัด จึงต้องใช้เทคนิคของการให้แผ่นเคลื่อนไหวเคลื่อนที่ออกไประยะเวลาหนึ่งเพื่อสร้างความเร่งเริ่มต้น จากนั้นจึงถอยหลังคืนกลับมาอยู่ที่จุดศูนย์กลางเดิมอย่างช้าๆ โดยที่ไม่ทำให้ผู้ขับรู้สึกตัวและทำการเอียงแผ่นเคลื่อนไหวเพื่อให้ความเร่งของแรงโน้มถ่วงมาชดเชยในขณะเดียวกัน ซึ่งลำดับการทำงานนี้กระทำโดย Washout Filter และให้ค่าผลลัพธ์ออกมาเป็นการเคลื่อนที่ในทิศทาง x-y-z และ roll-pitch-yaw ของแผ่นเคลื่อนไหวของตัวเครื่องจำลอง จากนั้นจึงแปลงค่าเป็นความยาวของแกนขับทั้งหก โดยสมการจลนศาสตร์ผกผัน เพื่อใช้เป็นคำสั่งในการเคลื่อนที่แกนขับไฮดรอลิก ซึ่งความแม่นยำของการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมอัตโนมัติด้วยตัวควบคุม โดยผลลัพธ์ของตัวควบคุมจะเป็นกระแสไฟฟ้าป้อนให้กับเซอร์วาล์วของระบบไฮดรอลิก

ในการจำลองการทำงานบนคอมพิวเตอร์นี้ ตัวเครื่องจำลองจะถูกแทนที่ด้วยสมการคณิตศาสตร์ของระบบไฮดรอลิกและสมการพลวัตของแผ่นเคลื่อนไหว ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 4 ต่อไป

3. การออกแบบระบบ

การออกแบบระบบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การหาขนาดของโครงสร้าง การหาขนาดและเลือกใช้อุปกรณ์ไฮดรอลิกที่สอดคล้องตามคู่มือสินค้า และการหาตัวแปรของ Washout filter



รูปที่ 1 หลักการทำงานของเครื่องจำลองการขับเครื่องบิน

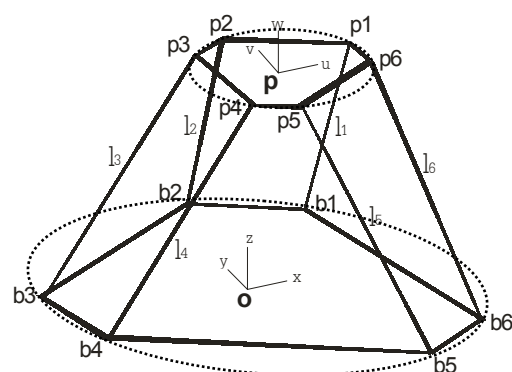
3.1 การหาขนาดโครงสร้าง

โครงสร้างของเครื่องจำลองการขับเครื่องบินที่จะออกแบบในบทความนี้อ้างอิงถึงขอบเขตการเคลื่อนไหวตามมาตรฐาน MIL-STD-1558 ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 1 สำหรับขนาดของห้องโดยสารให้มีขนาด กxยxส เท่ากับ 2x3x2 ม โดยมีมวลเมื่อรวมกับผู้ขับที่ด้วยคือ 750 กก

ตารางที่ 1 ค่าขอบเขตการเคลื่อนไหวตาม MIL-STD-1558

	Surge(x)	Sway(y)	Heave(z)	Roll	Pitch	yaw
Displacement	±250mm	±250mm	±250mm	±20°	±25°	±20°
Velocity	±0.6m/s	±0.6m/s	±0.6m/s	±20°/s	±20°/s	±20°/s
Acceleration	±0.6g	±0.6g	±0.6g	±60°/s ²	±60°/s ²	±60°/s ²

การกำหนดขนาดของโครงสร้างยังต้องคำนึงถึงขนาดความกว้างของแผ่นฐานที่จะต้องรองรับการเคลื่อนไหวของห้องโดยสาร และมุมหกเหลี่ยมที่มากพอสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์เชื่อมต่อกับแกนขับด้วย ดังนั้นจากข้อมูลเหล่านี้นำมาวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมผ่านสมการจลนศาสตร์ผกผัน ทำให้ได้ขนาดของโครงสร้างแขนกลคือ แผ่นฐานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 ม และแผ่นเคลื่อนไหวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 ม โดยความสูงของแผ่นเคลื่อนไหวเริ่มต้นที่ 1.7 ม ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างของแขนกลแบบ Stewart

3.2 อุปกรณ์ไฮดรอลิก

การใช้แกนขับทั้งหกเป็นแบบไฮดรอลิกจึงต้องมีอุปกรณ์ต่างๆ ที่มาทำงานร่วมกันเป็นระบบ โดยที่เป็นหลักได้แก่ แกนขับ, วาล์วควบคุมทิศทาง, วาล์วควบคุมความดัน, ถังสะสมความดัน และปั๊ม ซึ่งใน

บทความนี้การหาขนาดและเลือกใช้อุปกรณ์จะอ้างอิงกับคู่มือสินค้า [6] เป็นหลัก

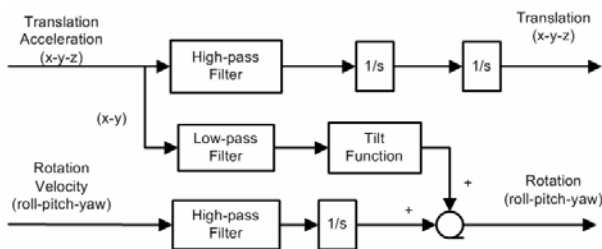
การหาเลือกแกนขับจะต้องคำนึงถึงสองอย่าง คือ ความยาวและความสามารถในการรับแรง โดยแรงที่กระทำกับแกนขับจะต้องพิจารณาทั้งแรงจากมวลทั้งหมดบนแผ่นเคลื่อนไหว และแรงเนื่องจากความเฉื่อยของการเคลื่อนที่ ซึ่งแรงรวมทั้งหมดสามารถหาได้จากการจำลองบนคอมพิวเตอร์ของสมการพลศาสตร์ของแผ่นเคลื่อนไหวที่สภาวะการเคลื่อนที่ต่างๆ และทำการเปรียบเทียบจากคู่มือสินค้า ผลลัพธ์การพิจารณาได้เลือกใช้แกนขับเป็นแบบ Single Rod ใช้งานที่ 160-250 บาร์ ขนาดกระบอกสูบ 50 มม ขนาดลูกสูบ 36 มม มีระยะชัก 1 ม จาก 1.445-2.445 ม โดยสามารถรับแรงได้สูงสุด 10800 นิวตัน

ในส่วนของวาล์วควบคุมทิศทางที่ทำหน้าที่สับเปลี่ยนช่องทางไหลของน้ำมันพร้อมกับปรับความกว้างของช่องทางไหลเพื่อควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบไปในตัวด้วยนั้น ต้องคำนึงถึงความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนที่ของแกนขับ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการจาโคเบียน และทำการเปรียบเทียบจากคู่มือสินค้า ผลลัพธ์ได้เลือกใช้เซอร์โววาล์วแบบ 4/3 ให้อัตราการไหลมากที่สุด 100 ลิตรต่ออนาที ที่สภาวะแรงดันตกคร่อมที่วาล์ว 30 บาร์

วาล์วควบคุมความดัน, ถังสะสมความดัน และปั๊ม เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญของระบบ โดยทำหน้าที่สร้างแรงดันและรักษาแรงดันที่จะส่งไปยังวาล์วไม่ให้สูงหรือต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ ซึ่งสามารถเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสมจากคู่มือสินค้าได้เลย

3.3. การออกแบบ Washout Filter

จากที่กล่าวมาแล้วถึงหลักการของเครื่องจำลองที่มี Washout Filter เป็นตัวจัดลำดับการเคลื่อนไหว ซึ่งมีแผนผังการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3 [7] โดยค่าอินพุต คือค่าความเร็วและความเร็วเชิงมุมของรถยนต์ที่ต้องการจะจำลอง โดยในบทความนี้การหาค่า Transfer Functions ของ Filters จะกระทำโดยวิธี trial-error ด้วยการจำลองบนคอมพิวเตอร์ จนได้ผลตอบสนองเป็นที่น่าพอใจ



รูปที่ 3 แผนผังการทำงานของ Washout Filter

พิจารณาจากรูปที่ 3 ความเร่งของการเคลื่อนที่ของรถยนต์ในทิศทาง x-y-z จะผ่าน High-pass Filter เพื่อแยกส่วนของความเร่งที่มีการเปลี่ยนแปลงเร็ว เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนแผ่นเคลื่อนไหวโดยตรง แต่ Filter นี้ต้องมีคุณสมบัติ Zero Position Steady State ซึ่งหมายความว่าเมื่อค่าแรงไม่มีการเปลี่ยนแปลง ค่าตำแหน่งจะมีค่าเป็นศูนย์ เพื่อให้ตัวแผ่น

ถอยกลับมาที่ตำแหน่งศูนย์ และจะต้องเป็นถอยกลับอย่างช้าๆ โดยที่ผู้ขับไม่รู้สึกรู้สิดำ ตารางที่ 2 แสดงค่า threshold ที่ผู้ขับที่ไม่สามารถรับรู้ได้ ซึ่งในที่นี้ได้ออกแบบให้ Transfer Function ของ High-pass Filter เป็น

$$\frac{s^3}{s^3 + 7s^2 + 17s + 15}$$

ในขณะที่เดียวกันความเร่งในทิศทาง x-y จะผ่าน Low-pass Filter แยกส่วนของความเร่งที่มีการเปลี่ยนแปลงช้า (ความถี่ต่ำ) โดยในที่นี้ออกแบบให้ Low-pass Filter มี Transfer Function เป็น

$$\frac{1.28}{s^2 + 1.6s + 1.28}$$

ซึ่งความเร่งที่มีการเปลี่ยนแปลงช้านี้ จะถูกจำลองโดยการสร้างมุมเอียง pitch และ roll ของตัวแผ่น โดยใช้ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลกช่วยในการจำลองทิศทางของความเร่งลัพธ์ เช่น ในกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยความเร่ง 9.81 m/s^2 เท่ากับค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก แผ่นเคลื่อนไหวเอียงมุม pitch เท่ากับ 45 องศา เป็นต้น สมการการหาค่ามุมเอียงแสดงในสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ค่าความเร่งถอยกลับที่ทำให้ผู้ขับไม่รู้สึกรู้สิดำ

	Surge(x)	Sway(y)	Heave(z)	Roll	Pitch	Yaw
threshold	0.17 m/s^2	0.17 m/s^2	0.28 m/s^2	$10^\circ/\text{s}^2$	$10^\circ/\text{s}^2$	$10^\circ/\text{s}^2$

$$\beta = -a \tan\left(\frac{a_x}{g}\right) \quad (1)$$

$$\alpha = a \tan\left[\frac{a_y}{(a_x^2 + g^2)^{1/2}}\right] \quad (2)$$

ในส่วนของความเร่งเชิงมุมตามทิศทาง Roll-Pitch-Yaw ที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของรถยนต์โดยทั่วไปมีค่าน้อยมาก ในขณะที่ผู้ขับจะรับรู้ถึงความเคลื่อนไหวจากความเร่งเชิงมุมที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ ดีกว่า ดังนั้นจะนำเฉพาะค่าความเร่งเชิงมุมมาใช้ในการจำลองเท่านั้น โดยออกแบบให้ High-pass Filter มี Transfer Function เป็น

$$\frac{s^2}{s^2 + 2s + 2}$$

4. แบบจำลองคณิตศาสตร์

จากแผนผังการทำงานของเครื่องจำลองรถยนต์ที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 2 หัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการย่อยของการหาสมการคณิตศาสตร์ของแต่ละส่วน แต่จะไม่กล่าวลึกในรายละเอียด โดยรายละเอียดนั้น ผู้สนใจสามารถศึกษาเพิ่มเติมจากเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องได้โดยตรง

4.1 สมการจลนศาสตร์ผกผัน [4-5]

สมการจลนศาสตร์ผกผันทำหน้าที่แปลงจากค่าการวางตัวของแผ่นเคลื่อนไหว ($q = [x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ \psi]$) ให้ไปเป็นความยาวที่สัมพันธ์กันของแกนขับทั้งหก (l_i) พิจารณาจากโครงสร้างของเครื่องจำลองที่แสดงในรูปที่ 2 สามารถสรุปโดยย่อได้ดังนี้

กำหนดที่แผ่นฐานมี O เป็นจุดศูนย์กลางของเฟรม {B} โดยมี b_i เป็นจุดเชื่อมต่อกับแกนขับทั้งหก และที่แผ่นเคลื่อนไหวยมี p เป็นจุดศูนย์กลางของเฟรม {P} โดยมี p_i เป็นจุดเชื่อมต่อกับแกนขับทั้งหกเช่นกัน การหาความยาวของแกนขับจะต้องนำค่า p_i ไปแสดงในเฟรม {B} ได้โดย $p_i = {}^B R_p \cdot p_i$ ซึ่ง ${}^B R_p$ เป็นเมตริกซ์การหมุนจาก {P} ไป {B} ดังนั้นเวกเตอร์ของความยาวแกนขับจะได้ว่า

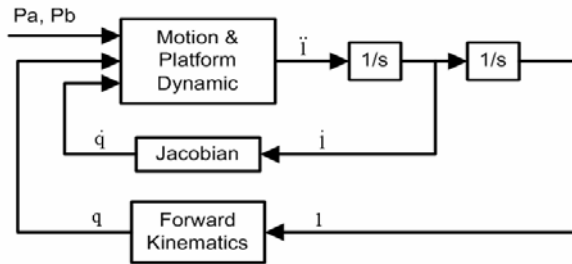
$$s_i = p + p_i - b_i \quad (3)$$

แล้วนำมาหาความยาวของแกนขับจะได้ว่า

$$l_i = |s_i| = \sqrt{s_{ix}^2 + s_{iy}^2 + s_{iz}^2} \quad (4)$$

4.2 สมการการเคลื่อนที่และพลศาสตร์ของแผ่นเคลื่อนไหวย [8]

พิจารณาจากแผนผังในรูปที่ 4 จะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของแกนขับนั้นขึ้นอยู่กับแรงดันในกระบอกสูบทั้งสองข้างและแรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของห้องโดยสาร ดังนั้นจึงมีหลายส่วนที่ประกอบเข้าด้วยกันได้แยกกันอธิบายดังนี้



รูปที่ 4 แผนผังของสมการการเคลื่อนที่และพลศาสตร์ของแผ่นเคลื่อนไหวย

4.2.1 สมการจลนศาสตร์ตรง

สมการจลนศาสตร์ตรงทำการแปลงจากค่าความยาวของแต่ละแกนขับ (l_i) ไปเป็นค่าการวางตัวของแผ่นเคลื่อนไหวย ($q = [x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ \psi]^T$) ซึ่งในกรณีนี้ไม่สามารถหา closed form solution ได้ ดังนั้นต้องใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข Newton-Raphson เพื่อหาค่าออกมา โดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ (3) และ (4) ดังนี้

$$\Delta l_i = \frac{dL}{ds} \frac{ds}{dq} \Delta q \quad (5)$$

4.2.2 สมการจาโคเบียน

สมการจาโคเบียนเป็นการแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วในการเคลื่อนที่ของแกนขับ ($\dot{l}_i$) กับความเร็วของค่าการวางตัวของแผ่นเคลื่อนไหวย ($\dot{q}$) และความสัมพันธ์ของความเร็วในการเคลื่อนที่ของแกนขับ ($\dot{l}_i$) กับความเร็วของค่าการวางตัวของแผ่นเคลื่อนไหวย ($\dot{q}$) ซึ่งแสดงโดยย่อได้ดังนี้

จากสมการที่ (3) เขียนใหม่ว่า

$$b_i + l_i u_i = p + p_i \quad (6)$$

โดยที่ u_i เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของ s_i หลังจากนั้นจึงทำการหาอนุพันธ์แล้ว dot ด้วย u_i จะได้ว่า

$$\dot{l}_i = [J] \dot{q} \quad (7)$$

โดยที่เมตริกซ์จาโคเบียน

$$[J] = [u_i^T \ (p_i \times u_i)^T]$$

สำหรับความสัมพันธ์ของความเร่ง สามารถหาได้จากการหาอนุพันธ์ของสมการที่ (7) จะได้ว่า

$$\ddot{l}_i = [J] \ddot{q} + \dot{j} \quad (8)$$

โดยที่

$$\dot{j} = (\omega \times u_i) \cdot v_p + \{p_i \times (\omega \times u_i) + (\omega \times p_i) \times u_i\} \cdot \omega_p$$

4.2.3 สมการพลศาสตร์ของแผ่นเคลื่อนไหวย

การที่ห้องโดยสารของเครื่องจำลองเคลื่อนที่ไปมาทำให้เกิดแรงที่กระทำกับแกนขับเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งแรงนี้สามารถหาได้โดยใช้หลักการของ d'Alembert ที่ว่าผลลัพท์ของแรงที่เกิดจากการเคลื่อนไหวยในชั่วขณะหนึ่งมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งมีสมการหลักดังนี้

$$\delta l^T \tau + \delta q^T F_p + \sum_i \delta q_i^T F_i = 0 \quad (9)$$

โดยที่ F_p เป็นผลรวมของแรงที่แผ่นเคลื่อนไหวย F_i เป็นผลรวมของแรงที่แกนลูกสูบและกระบอกสูบ และ $\delta(\cdot)$ เป็นค่าการเคลื่อนที่เสมือนของตัวแปรนั้น โดยผลลัพท์ของสมการจะได้เป็นเวกเตอร์ของแรง τ ที่กระทำกับแกนขับแต่ละแกน

4.2.4 สมการการเคลื่อนที่ของแกนขับ

แรงที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของแกนขับไฮดรอลิกมีอยู่ด้วยกันสามแรง คือแรงจากแรงดันน้ำมันทั้งสองด้าน และแรงจากการเคลื่อนที่ของห้องโดยสาร ซึ่งเขียนเป็นสมการการเคลื่อนที่ของแกนขับได้ดังนี้

$$P_A A_1 - P_B A_2 - \tau = 0 \quad (10)$$

จากสมการที่(9) ค่า τ เป็นฟังก์ชันของ $\dot{q}, \dot{q}, \dot{q}$ ดังนั้นเพื่อต้องการหาความเร่งของแกนขับจึงต้องแทนค่า $\ddot{q}$ ด้วย $[J]^{-1} \ddot{l} - \dot{j}$ จากสมการที่ (8) เพื่อนำไปใช้ในสมการพลศาสตร์ของแผ่นเคลื่อนไหวย แล้วจึงนำมาหาความเร่งของแกนขับด้วยสมการที่ (10) ตามลำดับ

4.3 สมการไฮดรอลิก [9]

การทำงานของแกนขับไฮดรอลิกในรูปที่ 5 เริ่มจากมีแรงดันน้ำมันของระบบ P_s และแรงดันน้ำมันไหลกลับถึง P_e อยู่ที่วาล์วควบคุมทิศทางสัญญาณไฟ (control command) ที่ส่งมาจากตัวควบคุมจะทำให้สปูลวาล์วเคลื่อนที่ไปมาเพื่อเปลี่ยนทิศทางและขนาดของช่องทางไหลของน้ำมัน

ดังนั้นอัตราการไหลผ่านวาล์วสามารถแสดงด้วยสมการ Bernoulli ดังนี้

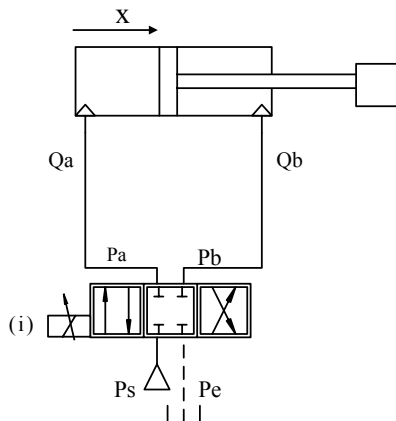
$$Q = c_q a \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (11)$$

โดยที่ c_q เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล, a เป็นพื้นที่หน้าตัดของช่องทางไหลที่เกิดจากการเลื่อนของสปูลวาล์ว, ρ เป็นถ.พ.ของน้ำมัน

และ ΔP เป็นแรงดันตกคร่อมที่วาล์ว จากนั้นจึงพิจารณาถึงแรงดันที่เกิดขึ้นในระบบท่อโดยใช้สมการของการไหลต่อเนื่องจะได้ว่า

$$Q = A\dot{x} + \frac{V}{\beta}\dot{P} \quad (12)$$

โดยที่ $A\dot{x}$ คืออัตราการไหลที่เกิดจากความเร็วของลูกสูบ และ $\frac{V}{\beta}\dot{P}$ คืออัตราการไหลที่เกิดจากการอัดตัวของน้ำมันในระบบท่อ ซึ่งเมื่อทราบค่า $\dot{P}$ แล้วทำการอินทิเกรตจะได้ค่าแรงดันในระบบท่อ แต่ละด้านเพื่อนำไปคำนวณการเคลื่อนที่ของแกนขับต่อไป



รูปที่ 5 แผนผังของระบบไฮดรอลิก

4.4 สมการตัวควบคุม [10]

จากค่าที่แตกต่างกันของความยาวแกนขับที่ได้จากการคำนวณเพื่อจำลองการเคลื่อนที่กับความยาวของแกนขับจริงนำมาเป็นอินพุตให้กับตัวควบคุมแบบ PID เพื่อคำนวณสัญญาณไฟส่งไปควบคุมการเคลื่อนที่ให้กับแกนสปีดของเซอร์โววาล์ว ซึ่งมีสมการของตัวควบคุมคือ

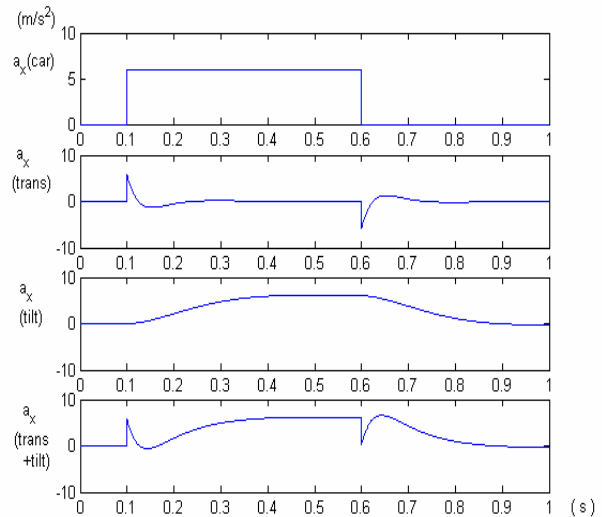
$$G(s) = K_p + K_i/s + K_d s \quad (13)$$

เมื่อ K_p , K_i และ K_d คือค่าพารามิเตอร์ขั้นต้น, อินทิเกรตและดิฟเฟอเรนเชียลตามลำดับ อย่างไรก็ตามในที่นี้เลือกใช้เฉพาะ PI โดยหาค่า K_p และ K_i เริ่มต้นจากวิธี Ziegler-Nichol จากนั้นทำการปรับแต่งค่า K_p และ K_i เพื่อระบบมีผลตอบสนองในสถานะต่างๆ ตามที่ต้องการ ขั้นตอนทั้งหมดกระทำโดยการจำลองบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งสุดท้ายได้ค่า K_p และ K_i เท่ากับ 10 และ 5 ตามลำดับ

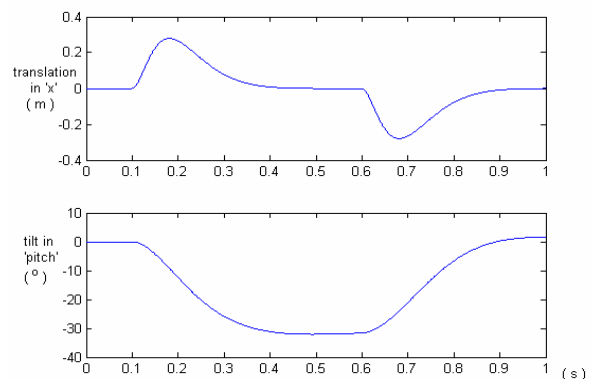
5. ผลลัพธ์การจำลอง

กำหนดให้รถยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง 0.6g แบบสลับตามรูปที่ 6 (ก) ผลลัพธ์จาก High-pass และ Low-pass Filter แสดงในรูป 6 (ข) และ 6 (ค) ตามลำดับ ซึ่งเมื่อรวมความเร่งของทั้งสองทางแล้ว จะได้ผลลัพธ์ในรูป 6 (ง) ก็จะได้ค่าที่ใกล้เคียงกับความเร่งของรถยนต์ที่ต้องการ จากนั้นสามารถนำมาคำนวณหาระยะการเคลื่อนที่ของแผ่นเคลื่อนไหวโดยการ integrate ค่าความเร่ง 2 ครั้ง และหาค่ามุมการเอียงด้วยสมการ (1) และ (2) ดังแสดงผลลัพธ์ในรูปที่ 7 (ก) และ (ข) ซึ่งค่านี้ถูกเปลี่ยนให้เป็นความยาวของแกนขับทั้งหมดที่ต้องการโดยสมการจลนศาสตร์ผกผัน รูปที่ 8

แสดงค่าความยาวของแกนขับที่ต้องการเทียบกับความยาวที่เกิดการเคลื่อนที่จริงภายใต้การควบคุมของตัวควบคุม PI โดยในกรณีนี้ความยาวของแกนขับมีเท่ากันสามคู่ที่ตรงข้ามกัน และพบว่าการเคลื่อนที่ของแกนขับมีความใกล้เคียงกับค่าความยาวที่ต้องการในระดับที่น่าพอใจ อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาในหลายกรณี พบว่าในบางกรณีที่มีการเคลื่อนที่มากขึ้น ผลตอบสนองยังไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากความเป็น Nonlinear ของระบบ ดังนั้นอาจจะต้องมีการออกแบบตัวควบคุมใหม่



รูปที่ 6 (ก, บนสุด) ค่าความเร่งของรถยนต์ในแนวแกน x (ข) ค่าความเร่งที่ผ่าน High-pass Filter (ค) ค่าความเร่งที่ผ่าน Low-pass Filter (ง, ล่างสุด) ค่าความเร่งรวมที่ผ่าน Filter ทั้งสอง

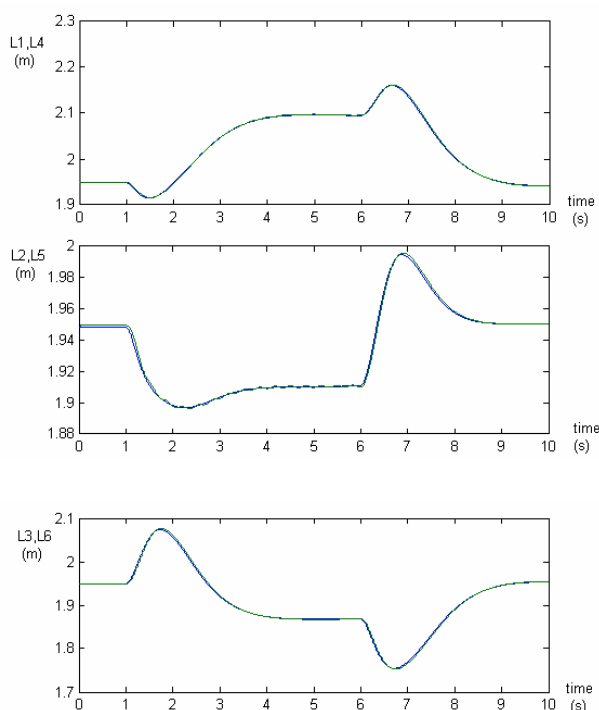


รูปที่ 7 (ก) ระยะการเคลื่อนที่ของแผ่นเคลื่อนไหวในแนวแกน x (ข) มุมการเอียงแนว Pitch ของแผ่นเคลื่อนไหว

6. สรุป

บทความนี้ได้พัฒนาโปรแกรมจำลองการทำงานของแผ่นเคลื่อนไหว 6 องศาอิสระที่ขับเคลื่อนด้วยไฮดรอลิก ซึ่งโปรแกรมจำลองนี้มีประโยชน์สำหรับการออกแบบเครื่องจำลองจริงต่อไปในอนาคต โดยในบทความนี้ได้นำแผ่นเคลื่อนไหวมาประยุกต์ใช้กับเครื่องจำลองการขับที่

และได้ทดลองใช้กับกรณีที่ยารถยนต์เคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยความเร่ง 0.6g ซึ่งผลของความยาวแกนขับและระยะการเคลื่อนที่ยังอยู่ในช่วงที่ได้ ออกแบบไว้ และผลลัพธ์การจำลองให้ผลสอดคล้องกับลักษณะของ เครื่องจำลองตามที่ต้องการ โดยที่แผ่นเคลื่อนไหวยังจะเคลื่อนที่ออกเพื่อ สร้างความเร่งเริ่มต้น แล้วจึงถอยกลับมายู่ที่จุดศูนย์กลางเดิมอย่างช้าๆ ในขณะที่เดียวกันก็จะเอียงแผ่นเคลื่อนไหวยเป็นมุมที่เหมาะสม เพื่อใช้ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงมาชดเชยแทน ผลลัพธ์โดยรวมเป็นที่น่า พึงพอใจ อย่างไรก็ตามผลตอบสนองในบางกรณียังไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งผลมา จากความเป็น Nonlinear ของระบบ ดังนั้นอาจจะต้องมีการนำ Adaptive Filters มาเป็น Washout Filter และตัวควบคุมอาจจะต้องเป็น แบบ Adaptive Controller เป็นต้น เพื่อให้ระบบสามารถปรับตัวแปร ตามความ Nonlinear ของระบบได้



รูปที่ 8 ความยาวที่ต้องการของแกนขับทั้งหกเทียบกับความยาวที่เคลื่อน ที่จริงภายใต้การควบคุมของตัวควบคุม PI

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Drosdol and F. Panik, "The Daimler-Benz Driving Simulator: A Tool for Vehicle Development," SAE Paper 850334, 1985.
- [2] G. Bertollini, "The General Motor Driving Simulator," SAE Paper 940176, 1994.
- [3] J. Freeman, "The Iowa Driving Simulator: An Implementation and Application Overview," SAE Paper 950174, 1995.
- [4] สันติภาพ เชิดชูศิลป์ และ สุวัฒน์ กุลธนปรีดา, "การศึกษาด้วยการ จำลองเพื่อการออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนไหวยของรถยนต์," การประชุมวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1, 2543.
- [5] สันติภาพ เชิดชูศิลป์, ชัยวัฒน์ โพธิ์ปรีสุทธิ์ และ สุวัฒน์ กุลธนปรีดา, "การพัฒนาฐานการเคลื่อนไหวยขนาดย่อส่วนของเครื่องจำลองการ ขับรถยนต์," การประชุมวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2, 2544.
- [6] atos spa "Electrohydraulics", 1997.
- [7] Motionbase (Holdings) Ltd "Guide to the Motionbase motion cueing algorithms", 2000.
- [8] Lung-Wen Tsai, Robot analysis, John-Wiley, 1999.
- [9] J. Watton, Fluid power system, Prentic-Hall, 1989
- [10] N.S. Nise, Control Systems Engineering, Addison-Wesley, 1995.