บทที่ 7

บทสรุป

7.1 บทสรุป

งานวิจันนี้นำเสนอมุมมองใหม่ในการควบคุมระบบทางกลที่มีความสลับซับซ้อนมาก วิธีที่นำเสนอนำหลักการหาค่าสุดขีดมาดัดแปลงใช้ในการควบคุมระบบพลศาสตร์จริงโดยปรับแต่งการลู่เข้าเพื่อให้มีลักษณะเรียบเพื่อให้เหมาะสมกับระบบพลศาสตร์จริง โดยจะเรียกการควบคุมแบบนี้ว่า **การควบคุมแบบเรียนรู้** วิธีการควบคุมจะอาศัยการปรับค่าและเรียนรู้ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น และนำข้อมูลนี้ไปใช้ควบคุมให้พารามิเตอร์ควบคุมลู่เข้าสู่เป้าหมายตามต้องการ เทคนิคนี้ต้องการการคำนวณประมวลผลมากกว่าการควบคุมแบบคลาสสิกหรือแบบพีไอดี แต่การประมวลผลก็ไม่ใช่ปัญหาสำคัญในยุคนี้ซึ่งคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงมากและมีราคาไม่แพงนัก จุดเด่นของวิธีการก็คือตัวควบคุมจะมีโครงสร้างที่ง่ายแม้ว่าระบบจะมีความสลับซับซ้อนมาก โครงสร้างที่ง่ายและไม่มีพารามิเตอร์ของระบบอยู่ในตอนต้นทำให้ตัวควบคุมสามารถจัดการกับความสลับซับซ้อนของระบบได้ดี ทั้งนี้เนื่องจากตัวควบคุมจะเรียนรู้ปัจจัยต่างๆ ทั้งหมดและนำมาคิดควบคุมระบบอย่างถูกต้อง

เมื่อเปรียบเทียบวิธีการนี้กับวิธีการที่นิยมใช้ในปัจจุบัน จะพบว่าวิธีการควบคุมระบบไม่เชิงเส้นในปัจจุบันมักจะต้องมีสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบอยู่ในตัวควบคุมในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง ในทางทฤษฎี ถ้าสมการของระบบนี้มีความแม่นยำมาก การควบคุมก็จะเป็นไปตามที่ต้องการ แต่ในทางปฏิบัติ การหาสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบ (ที่มีความสลับซับซ้อนมาก) ที่แม่นยำไม่ใช่เรื่องง่าย โดยเฉพาะกับระบบทางกลที่เกี่ยวข้องกับแรงเสียดทานรูปแบบต่างๆ หรือระบบที่มีพารามิเตอร์จำนวนมาก สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่แม่นยำอาจทำให้ผลลัพธ์การควบคุมต่างไปจากที่ออกแบบมาก แนวทางหนึ่งในการจัดการกับปัญหานี้ก็คือการออกแบบระบบปรับเทียบเพื่อทำการปรับเทียบสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบอย่างอัตโนมัติเพื่อให้ได้สมการของระบบที่แม่นยำ อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ก็มีจุดอ่อนตรงที่วิธีการนี้มักต้องมีโครงสร้างของระบบอย่างถูกต้อง และตัววิธีการเองก็มีความยุ่งยากซับซ้อนและทำงานได้เฉพาะกับระบบที่ออกแบบไว้

เป้าหมายของงานวิจัยคือออกแบบวิธีการควบคุมที่สามารถควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพและแรงของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมได้พร้อมกัน หุ่นยนต์เป็นระบบทางกลที่มีความสลับซับซ้อนมาก ประกอบด้วยพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์มากมายซึ่งรวมถึงความยาวของแขนต่างๆ และ

ประเภทของข้อต่อ และมีความอิสระมาก นอกจากนี้ หุ่นยนต์จะเกี่ยวข้องกับแรงเสียดทานและอาจมีความไม่พอดีของเฟืองที่ใช้ในการขับข้อต่อ และสนามแรงโน้มถ่วงยังทำให้เกิดความไม่เชิงเส้นเพิ่มขึ้นไปอีก ระบบกล้องดิจิตัลเองก็มีความไม่เชิงเส้นเนื่องจากธรรมชาติในการบันทึกภาพและกล้องยังมีพารามิเตอร์ต่างๆ อีกมาก รวมถึงความยาวโฟกัส และตำแหน่งของกล้องเทียบกับตัวหุ่นยนต์ ความซับซ้อนและไม่เชิงเส้นของระบบทำให้วิธีการควบคุมที่มีพื้นฐานอยู่บนสมการทางคณิตศาสตร์ที่สลับซับซ้อนเป็นไปได้ยาก

วิทยานิพนธ์นี้ควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพและแรงของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมพร้อมกัน โดยใช้วิธีการควบคุมแบบเรียนรู้ และได้แสดงถึงจุดเด่นต่างๆ ของวิธีการอย่างละเอียดผ่านทางการทดลองและการจำลองในบทที่สามและบทที่ห้า ซึ่งนอกจากจะมีโครงสร้างที่ง่ายและสามารถจัดการกับระบบที่มีความสลับซับซ้อนและมีความอิสระมากได้ดีแล้ว การควบคุมแบบเรียนรู้ยังสามารถรวมการควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพและการควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัลได้อย่างเป็นธรรมชาติ การควบคุมจะไม่มีรอยต่อระหว่างพารามิเตอร์รูปภาพและแรงเนื่องจากทั้งสองอย่างนี้จะได้รับการพิจารณาเหมือนกันในการควบคุม และด้วยโครงสร้างที่ไม่มีพารามิเตอร์ของระบบอยู่ ทำให้สามารถใช้วิธีการนี้กับหุ่นยนต์แบบใดก็ได้

การควบคุมแรงและรูปภาพพร้อมกันจะทำให้หุ่นยนต์มีศักยภาพในการทำงานใกล้เคียงกับมนุษย์ ทั้งนี้เนื่องจากมนุษย์ใช้ดวงตาและมือในการทำงานทั่วไป และเมื่อมองถึงการทำงานของมนุษย์จะเห็นว่า เราไม่ทราบสมการทางคณิตศาสตร์ของตัวเราอย่างแม่นยำ เราไม่ทราบความยาวของแขนและข้อมือและไม่ทราบความยาวโฟกัสของเลนส์ตา และพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ก็อาจเปลี่ยนค่าไปเมื่ออายุมากขึ้น แต่เราก็สามารถทำงานต่างๆ ได้อย่างถูกต้องโดยอาศัยประสบการณ์ที่ผ่านมาในอดีต การควบคุมแบบเรียนรู้เป็นแนวคิดเบื้องต้นที่จะสร้างการควบคุมที่มีการทำงานคล้ายกับมนุษย์ ซึ่งจะทำงานได้โดยไม่จำเป็นต้องทราบสมการของระบบอย่างแม่นยำก่อนล่วงหน้า แต่จะอาศัยการเรียนรู้เพื่อทำงานให้ได้ตามเป้าหมายที่ต้องการ วิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้จงใจจะให้มีโครงสร้างการเรียนรู้ที่ง่ายที่สุด เพื่อจะแสดงให้เห็นศักยภาพของการควบคุมด้วยวิธีการนี้อย่างชัดเจน อาจปรับวิธีการให้มีเสถียรภาพมากขึ้นหรือทำงานได้เร็วขึ้นโดยอาศัยความจำของตัวควบคุมเข้ามาช่วย และอาจมีเทคนิคการเรียนรู้แบบอื่นเข้ามาเสริมเพื่อให้การเรียนรู้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ตัวควบคุมในการทดลองและการจำลองต่างๆ ในบทที่สามและบทที่ห้าจะเหมือนกันทั้งหมด จะต่างกันก็เฉพาะความยาวช่วงก้าวเดินเท่านั้น ซึ่งสามารถสรุปจากผลการทดลองได้ว่าวิธีการควบคุมมีความยืดหยุ่นสูงมาก สามารถทำงานได้กับหุ่นยนต์หลายๆ ประเภท และ/หรือมีเป้าหมายแตกต่างกัน ตัวควบคุมนอกจากจะยืดหยุ่นต่อพารามิเตอร์ของระบบแล้ว ยังยืดหยุ่นต่อลักษณะของระบบด้วย

งานวิจัยนี้คาดว่าจะเป็นพื้นฐานของวิธีการควบคุมที่สำคัญในอนาคต ซึ่งตัวควบคุมจะมีความยืดหยุ่นสูง ทำงานได้เอนกประสงค์ และใช้การประมวลผลและความจำมาก และที่สำคัญจะมีการทำงานใกล้เคียงกับมนุษย์มากขึ้น ซึ่งจะเป็นรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมระบบที่มีความสลับซับซ้อนมาก มีความอิสระมาก และประกอบไปด้วยพารามิเตอร์จำนวนมาก จุดเด่นของวิธีการยังจะทำให้เกิดการพัฒนาวิธีการควบคุมตามแนวคิดนี้ซึ่งจะกล่าวถึงอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป

7.2 งานวิจัยต่อเนื่อง

การควบคุมแบบเรียนรู้เปลี่ยนมุมมองในการควบคุม การศึกษานี้ได้แสดงถึงศักยภาพต่างๆ ของวิธีการนี้ อย่างไรก็ตาม วิธีการที่ใช้เป็นแบบพื้นฐานเท่านั้น และสามารถทำการศึกษาต่อเนื่องเพื่อพัฒนาให้วิธีการมีศักยภาพมากขึ้นไปอีก ตัวอย่างเช่น

การปรับช่วงก้าวเดินอัตโนมัติ

ในการศึกษานี้ เน้นที่การหาวิธีการในการควบคุมแรงและพารามิเตอร์รูปภาพพร้อมกัน วิธีการที่นำเสนอแม้ว่าจะทำงานได้ดี แต่ยังอาจปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นไปอีก การทดลองทั้งหมดจะใช้ช่วงก้าวเดินที่มีค่าคงที่ ซึ่งเป็นผลทำให้สามารถควบคุมความแม่นยำของจาโคเบียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะเป็นผลทำให้เข้าใจพฤติกรรมได้อย่างลึกซึ้ง เมื่อต้องการให้การลู่เข้าเป็นไปเร็วขึ้น อาจใช้ช่วงก้าวเดินที่มีค่าไม่คงที่ แต่ปรับเปลี่ยนตามค่าความผิดพลาดที่เหลืออยู่ ให้พิจารณาขณะที่ความผิดพลาดมีค่ามาก อาจไม่ต้องการจาโคเบียนที่มีความแม่นยำมากนักในตำแหน่งนี้ ช่วงก้าวเดินที่มีค่ามากจะทำให้ระบบควบคุมปรับตำแหน่งข้อต่อแขนกลมาก และการลู่เข้าจะเร็ว เมื่อความผิดพลาดมีค่าลดลง ก็ต้องการให้ช่วงก้าวเดินมีค่าลดลงตามเพื่อที่จะทำให้จาโคเบียนมีความแม่นยำมากขึ้น และระบบควบคุมปรับตำแหน่งข้อต่อหุ่นยนต์เพื่อนำหุ่นยนต์เข้าสู่เป้าหมายได้อย่างแม่นยำ การศึกษาได้นำแนวคิดนี้ใช้ในการจำลองควบคุมในการจำลองในบทที่ห้า อย่างไรก็ตาม จะไม่ขอกล่าวถึงประสิทธิภาพในการควบคุมโดยทำการปรับความยาวช่วงก้าวเดินอย่างอัตโนมัติ แนวคิดนี้จะเหมือนกันกับการนำหลักการควบคุมแบบสัดส่วนมาดัดแปลงใช้กับการควบคุมแบบเรียนรู้ และอาจนำแนวคิดอื่นของทฤษฎีการควบคุมมาดัดแปลงใช้งานร่วมกันกับการควบคุมแบบเรียนรู้เพื่อให้การลู่เข้ามีประสิทธิภาพสูงขึ้น

การพัฒนาการเรียนรู้ให้มีอันดับที่สูงขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้ใช้เทคนิคการเรียนรู้ที่เป็นอันดับหนึ่ง เป็นผลทำให้ทิศทางในการลู่เข้าเป็นทิศที่ชันที่สุด (Steepest Gradient) อย่างไรก็ตาม ทิศทางนี้อาจไม่ใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดในการปรับตำแหน่งข้อต่อเพื่อให้หุ่นยนต์เดินสู่เป้าหมาย การใช้เทคนิคการเรียนรู้ในอันดับที่สูงขึ้นอาจทำให้ทางเดินจริงสั้นลง

การควบคุมแบบผสมแบบอื่น ๆ

การควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและพารามิเตอร์รูปภาพในวิทยานิพนธ์นี้ใช้การควบคุมแบบเรียนรู้ เทคนิคนี้จะทำการเรียนรู้ระบบและพยายามปรับตำแหน่งข้อต่อเพื่อให้หุ่นยนต์เดินเข้าสู่เป้าหมาย การเรียนรู้ไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์วัด ทำให้สามารถใช้วิธีการนี้กับอุปกรณ์วัดใดก็ได้ และอาจใช้ข้อมูลจากอุปกรณ์วัดแบบผสม เป็นผลทำให้สามารถนำวิธีการนี้ไปใช้ในการควบคุมอย่างอื่นเช่น การควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง การควบคุมแบบผสมระหว่างพารามิเตอร์รูปภาพ และตำแหน่ง การควบคุมแบบผสมระหว่างแรง พารามิเตอร์รูปภาพ และตำแหน่ง เป็นต้น

การทดสอบวิธีการควบคุมแบบเรียนรู้กับระบบกลอื่น ๆ

การควบคุมแบบเรียนรู้เหมาะสมกับระบบพลศาสตร์ที่มีความสลับซับซ้อนมาก ๆ และเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์จำนวนมาก และอาจมีความอิสระของระบบมากกว่าหนึ่ง หุ่นยนต์เป็นตัวอย่างหนึ่งของระบบที่กล่าวมานี้ อาจนำเทคนิคการควบคุมแบบเรียนรู้นี้ไปใช้กับระบบพลศาสตร์อื่นเช่นการควบคุมการบินอัตโนมัติของเครื่องบินหรือดาวเทียม เป็นต้น

การหลอมข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจรู้

เทคนิคการควบคุมแบบผสมแบบที่ใช้ในปัจจุบันจะใช้วิธีแยกแกนในการควบคุม ตัวอย่างเช่นการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งก็จะแยกแกนควบคุมแรงกับแกนควบคุมตำแหน่งอย่างชัดเจน วิธีการควบคุมแรงและตำแหน่งจะเป็นอิสระจากกัน ทำให้สามารถเข้าใจการควบคุมได้ง่าย วิธีการนี้แม้ว่าจะทำงานได้ แต่ก็มีข้อเสียคือได้ตัดข้อมูลแรงและตำแหน่งในทิศทางที่ไม่ได้ควบคุมทิ้งไป โดยปกติเซนเซอร์วัดแรงจะวัดข้อมูลแรงทั้งสามแกน และเซนเซอร์วัดตำแหน่งก็จะทราบข้อมูลตำแหน่งในทั้งสามแกน ถ้าควบคุมแรงในหนึ่งแกนและควบคุมตำแหน่งในอีกสองแกนที่เหลือด้วยวิธีการแยกแกนควบคุม ข้อมูลแรงและตำแหน่งในแกนที่ควบคุมตำแหน่งและแรงตามลำดับจะไม่ได้นำมาคิดในการควบคุม การควบคุมแบบเรียนรู้ไม่ได้ใช้

การแยกแกนควบคุมและแกนในการควบคุมแรงและตำแหน่งไม่จำเป็นต้องตั้งฉากกัน ทำให้สามารถนำข้อมูลแรงและตำแหน่งทั้งสามแกนมาคิดพร้อมกันได้ ด้วยวิธีการที่เหมาะสม การควบคุมแบบผสมจะมีประสิทธิภาพขึ้นจากการหลอมข้อมูลจากอุปกรณ์วัดต่างๆ

การพัฒนาประสบการณ์เพื่อช่วยในการเรียนรู้

การควบคุมแบบเรียนรู้ในวิทยานิพนธ์เน้นการทำงานแบบพื้นฐาน อาจเพิ่มขีดความสามารถของการควบคุมขึ้นไปอีกโดยการนำเอาประสบการณ์ของหุ่นยนต์มาร่วมคิดในการควบคุม ประสบการณ์จะเป็นข้อมูลเสริมเพื่อให้การควบคุมมีประสิทธิภาพขึ้น เร็วขึ้น และ/หรือ มีเสถียรภาพมากขึ้น

การศึกษาถึงพฤติกรรมของการควบคุมแบบเรียนรู้

การควบคุมแบบเรียนรู้จะมีวิธีการควบคุมที่คล้ายกับมนุษย์มากกว่าการควบคุมแบบคลาสสิค โครงสร้างการควบคุมมีลักษณะที่ง่าย แต่ก็จะเข้าใจพฤติกรรมของการควบคุมได้ยาก การศึกษาพฤติกรรมของการควบคุมจะเหมือนกับการศึกษาจิตวิทยาของมนุษย์ซึ่งเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยาก แต่ก็สามารถใช้เป็นแนวทางในการหาเสถียรภาพของการควบคุมแบบนี้ได้