

บทที่ 1

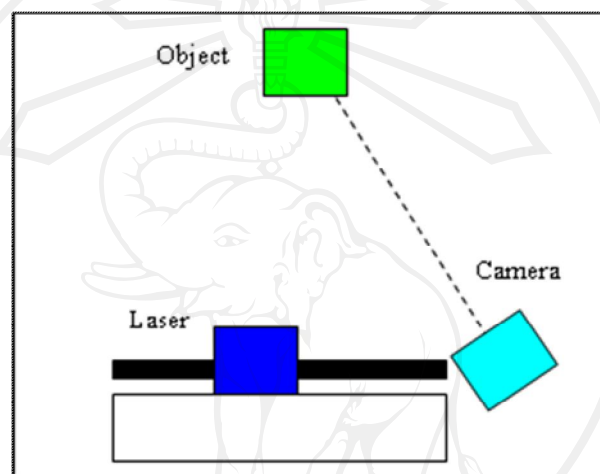
บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์ การสร้างกลไกที่หายไปในเรื่องสแกนวัตถุสามมิติโดยใช้ฟิสิกซ์พอร์เตอร์แบบดลย จากนั้นจะกล่าวถึงสรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตการวิจัย ประโยชน์ที่จะได้รับ และในส่วนท้ายสุดจะเป็นขั้นตอนการทำวิจัย

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการจำลองวัตถุใน 3 มิติหรือที่เรียกกันว่า 3D Simulation กำลังได้รับความนิยมอย่างมากในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา และมีงานวิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนากระบวนการต่าง ๆ ในการจำลองวัตถุใน 3 มิติให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งการศึกษาทางด้านฮาร์ดแวร์ อาทิ การสร้างเครื่องสแกน 3 มิติในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อให้สามารถสร้างแบบจำลองของวัตถุได้ง่าย โดยวางวัตถุในเครื่องแล้วปล่อยให้เครื่องทำการสแกนและจำลองวัตถุในคอมพิวเตอร์ และการศึกษาทางด้านซอฟต์แวร์ อาทิ กระบวนการประกอบวัตถุให้เป็นชิ้นเดียวกัน (Registration) การศึกษาเกี่ยวกับการเกิดการบังในบางส่วนของวัตถุ (Occlusion) เพื่อคำนวณและสร้างกลับพื้นผิวของวัตถุในส่วนที่ถูกบดบังนั้น การศึกษาวิธีการกระบวนการสร้างวัตถุให้สมบูรณ์ หรือการทำให้วัตถุที่จำลองขึ้นมีรูปทรงที่สมจริงมากขึ้น การจำลองวัตถุ 3 มิติสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ ได้หลากหลายด้าน เช่น ทางด้านทันตกรรม เพื่อสร้างแบบจำลองของกะโหลกศีรษะและขากรรไกรก่อนจัดฟัน หรือทำฟันปลอม ทางด้านโบราณคดี เพื่อสร้างแบบจำลองโบราณวัตถุที่เสื่อมสลายไปแล้วให้นักโบราณคดีหรือผู้สนใจได้ศึกษา ทางด้านวิทยาศาสตร์ เพื่อจำลองเหตุการณ์ต่าง ๆ เช่น การชนหรือการชนกันของวัตถุ และทางด้านความบันเทิงเพื่อสร้างเกมส์หรือภาพยนตร์ที่เสมือนจริงดังที่เห็นกันในปัจจุบัน ทั้งนี้ความรู้ทางด้านการประมวลผลภาพ ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนากระบวนการต่าง ๆ ข้างต้น อาทิเช่น การวิเคราะห์ภาพเชิงระยะ (Range Image) เพื่อนำมาคำนวณและสร้างแบบจำลองใน 3 มิติ รวมถึงความรู้ทางด้านความฉลาดทางการคำนวณ (Computational Intelligence: CI) อาทิ การใช้ทฤษฎีของเบย์ (Bayes Theorem) มาใช้ในการเพิ่มจุดสังเกต (Landmark) ในแบบจำลองเพื่อให้คอมพิวเตอร์เรียนรู้จนสามารถจำลองวัตถุได้สมบูรณ์ขึ้น

นอกจากนี้เครื่องสแกนวัตถุใน 3 มิติ เป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เพราะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้หลายแขนง แต่อย่างไรก็ตามเครื่องสแกน 3-มิติที่มีประสิทธิภาพมากนั้นมักจะมีโครงสร้างของอุปกรณ์ที่ซับซ้อนและต้นทุนสูง การผลิตเครื่องสแกนส่วนใหญ่ มักจะใช้เทคนิคของเลเซอร์สแกนมาประยุกต์ใช้ เพราะมีต้นทุนที่ต่ำกว่ามาก และโครงสร้างของอุปกรณ์ในเครื่องสแกน 3 มิติแบบเลเซอร์ไม่ค่อยซับซ้อน ซึ่งโครงสร้างหลักประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 ชิ้นดังแสดงในรูป 1.1



รูปที่ 1.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของเครื่องสแกนเลเซอร์ 3 มิติ

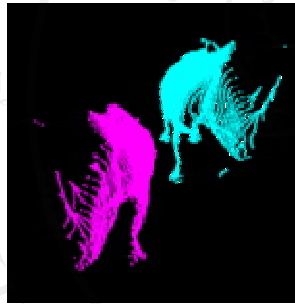


รูปที่ 1.2 ลักษณะแสงเลเซอร์ที่ฉายไปกระทบพื้นผิวของวัตถุ

จากรูป 1.1 เครื่องเลเซอร์สแกนประเภทนี้จะจะมีเลเซอร์เพื่อทำหน้าที่ฉายแสงออกไปเป็นเส้นตรงบาง ๆ ไปสัมผัสกับพื้นผิวของวัตถุดังรูปที่ 1.2 แล้วใช้กล้องถ่ายภาพเก็บเป็นวิดีโอเฟรม (VDO Frames) ของการกวาดแสงเลเซอร์บนวัตถุเลื่อนไปตามรางเลื่อนตามแนวแกนใดแกนหนึ่ง

จากนั้นนำวิดีโอที่ได้แต่ละเฟรมมาทำการประมวลผลภาพ ผลของภาพในวิดีโอเฟรมที่ออกมาจะเห็นเป็นเส้นแถบ 1 เส้น จากนั้นนำเส้นที่ได้ไปคำนวณหาพิกัด x, y และ z บนวัตถุในเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้เทคนิคหรือวิธีการประมวลผลแตกต่างกันออกไป โดยส่วนใหญ่จะเป็นการหาความเข้มของแสงในแต่ละจุดภาพ (Pixel) ของเส้นนั้น ๆ แล้วทำการกำจัดส่วนที่มีความเข้มแสงต่ำกว่าค่าที่กำหนด (Threshold) ออกไป การทำงานของเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิตินี้จะต้องอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์

เป็นที่ทราบกันว่า ข้อมูลผลลัพธ์หรือข้อมูลดิบที่ได้จากการสแกนวัตถุด้วยเครื่องสแกน 3 มิตินั้นยังไม่สามารถนำไปใช้ได้ทันที จะต้องมีการปรับปรุงหรือแก้ไขข้อมูลก่อนการนำไปใช้ ซึ่งเป็นขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.3 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการสแกนที่ละ 180 องศา

(ก) ข้อมูลที่ได้จากการสแกนที่ละ 180 องศา

(ข) แสดงพื้นผิวส่วนบนที่หายไปหลังจากผ่านกระบวนการประกอบเป็นรูปเดียวกัน

ปัญหาหลักอย่างหนึ่งที่ได้เลือกศึกษาเกี่ยวกับการจำลองรูปที่ได้จากเครื่องสแกนเลเซอร์วัตถุ 3 มิติตามที่กล่าวมานี้ก็คือ ปัญหาที่เกิดจากเครื่องสแกนแบบเลเซอร์เดี่ยว ซึ่งมีการประมวลผลผลลัพธ์จากสแกนวัตถุเป็นแบบจุดเมฆ หรือ Point Cloud มักจะพบว่า ส่วนบนของแบบจำลองพื้นผิวของวัตถุจะหายไป ทำให้การสร้างแบบจำลองไม่สมบูรณ์ ดังรูปที่ 1.3 (ข) ซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุต่อไปนี้

1. มีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณหาความลึกของภาพ (Range Imaging)
2. ในกระบวนการกรอง (Image Filtering) จะมีการกำจัดส่วนที่มีความเข้มแสงต่ำกว่าค่าที่กำหนด (Threshold) ออกไป ซึ่งอาจทำให้บางจุดบนวัตถุที่ควรจะถูกคำนวณถูกตัดทิ้ง

3. ในกระบวนการหาขอบของภาพ (Edge Detection) ส่วนของเส้นที่ไม่ถูกเลือก อาจมีบางจุดอยู่ซึ่งเมื่อไม่ถูกเลือกก็หมายถึงไม่ถูกนำมาคำนวณพิกัดบนวัตถุเช่นกัน

จากปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงเกิดขึ้น โดยผู้วิจัยจะทำการศึกษากระบวนการต่าง ๆ ในการจำลองวัตถุในคอมพิวเตอร์ โดยมีจุดประสงค์เพื่อคำนวณค่าในพิกัด x , y และ z และสร้างพื้นผิวที่หายไปของวัตถุกลับคืนมา เพื่อให้มีความคล้ายคลึงกับวัตถุจริงให้มากที่สุด และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องสแกนเลเซอร์วัตถุ 3 มิติให้สามารถจำลองวัตถุในคอมพิวเตอร์แบบอัตโนมัติได้

1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันการแข่งขันทางการพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องสแกนเป็นสิ่งหนึ่งที่นักวิจัยให้ความสำคัญ รวมถึงต้นทุนในการผลิตซึ่งมีการวิจัยโครงสร้างรวมถึงกระบวนการหลาย ๆ ส่วนเพื่อลดต้นทุนในการผลิตเครื่องสแกนลง หนึ่งในเทคนิคในการประดิษฐ์เครื่องสแกนที่มีต้นทุนต่ำคือการใช้เทคนิคเลเซอร์สแกนเนอร์ จึงมีหลายงานวิจัยมุ่งพัฒนากระบวนการของเครื่องสแกนแบบเลเซอร์ อาทิ

Gestel และคณะ [3] เป็นงานวิจัยที่ได้รับการยอมรับและมีการประยุกต์ใช้ในกลุ่มวิจัยเชิงพาณิชย์จริงเกี่ยวกับเครื่องสแกน 3 มิติแบบเลเซอร์ เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องสแกนหรือที่เรียกว่า CMMs (3D Coordinate Measuring Machines) ด้วยการวัดค่าความถูกต้องของตำแหน่ง, ความถูกต้องของมุม และโพกัสของกล้องสำหรับการสร้างภาพเชิงลึก (Rang Image) โดยผลของการสแกนหลังจากทดสอบตามกระบวนการนี้แล้ว ความผิดพลาดของการสแกนจะมีค่าประมาณ 10 ไมครอนซึ่งถือเป็นมาตรฐานของเครื่องสแกนในยุคหลัง ๆ เป็นต้นมา

Vincze และคณะ [4] ได้ประยุกต์นำเอาเครื่องสแกนแบบเลเซอร์มาใช้ในการสแกนวัตถุที่เป็นหลุม และศึกษาวิธีการในการแยกชิ้นส่วนในภาพ (Segmentation) ที่ได้จากเครื่องสแกนเพื่อหาเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุม เพื่อการผลิตชิ้นงานอีกครั้งในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งวิธีการแยกชิ้นส่วนภาพนี้จะแยกชิ้นส่วนที่เป็นวงกลมซึ่งคือหลุม ออกจากส่วนอื่น ๆ จากการคำนวณส่วนโค้งของภาพเกาส์เซียน (Gaussian Image) แต่มีความถูกต้องของการคำนวณเพียง ± 0.3 มิลลิเมตรเท่านั้น

กระบวนการในการขึ้นรูปด้วยคอมพิวเตอร์ของเครื่องสแกนแบบเลเซอร์จะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับเทคนิคการประดิษฐ์เครื่องสแกน แต่วิธีการหนึ่งที่ได้รับคามนิยมนิยมคือการกำหนดให้เลเซอร์อยู่นิ่งแล้วให้วัตถุหมุนที่ละด้านเพื่อสแกน ซึ่งการขึ้นรูปใน 3 มิติจะต้องมีการประกอบเข้าด้วยกันของแต่ละด้านที่สแกนได้หรือที่เรียกว่า Registration ตัวอย่างงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนากระบวนการ Registration มีดังนี้

Besl และ McKay [5] ได้นำเสนอวิธีการที่เรียกว่า Iterative Closest Point หรือ ICP ในการประกอบรูปทรง 3 มิติเข้าด้วยกัน หรือ Registration แต่วิธีการที่นำเสนอนี้เมื่อนำไปประยุกต์ใช้จริงแล้วพบว่าทำงานค่อนข้างช้าเพราะวิธีการนี้จะเป็นลักษณะของการวนรอบหาทุก ๆ จุดที่อยู่ใกล้ที่สุดซึ่งเป็นลักษณะการจับคู่ หรือ mapping จุดต่อจุด

Zhang [6] ได้พัฒนาวิธีการเดียวกันนี้โดยใช้การจับคู่ระหว่างจุดกับส่วนโค้ง (Curves) ที่อยู่ใกล้ที่สุดซึ่งเร็วกว่าวิธีการเดิมหลายเท่าแต่ก็ยังช้ามากสำหรับวัตถุที่มีความละเอียดสูง

Franaszek และคณะ [7] ได้พัฒนากระบวนการในการทำ Registration ใหม่ ซึ่งมีความเร็วขึ้นและใช้กันอยู่ในปัจจุบัน โดยการเสนอให้ระบบเครื่องสแกนถ่ายภาพแบบ Range Image เพื่อนำมาใช้ในการทำ Registration โดยกำหนดจุดเพียง 3 จุด แล้วใช้กระบวนการ ICP ในการหาตำแหน่งที่จะประกอบรูป แม้ว่ากระบวนการจะเร็วขึ้น แต่เมื่อคำนวณขนาดจริงเทียบกับแบบจำลองที่ประกอบได้ ก็ยังคงมีความผิดพลาดอยู่ ซึ่งกระบวนการนี้ถูกใช้ในเครื่องสแกนของ Cyberware และ David laser scan ผู้สร้างแบบจำลอง Stanford Bunny, Dragon, Horse และ Toy Car ซึ่งงานวิจัยนี้ได้้นำแบบจำลองดังกล่าวมาทำการทดลองอีกด้วย

อย่างไรก็ตามการปัญหาหลักหลังจากที่มีการประกอบรูปเข้าด้วยกันแล้ว การขึ้นรูปด้วยคอมพิวเตอร์ยังคงเกิดช่องโหว่ตรงบริเวณบนสุดของแบบจำลองซึ่งมีพื้นผิวบางจุดที่หายไป จึงมีงานวิจัยอื่น ๆ คิดค้นและปรับปรุงกระบวนการของเครื่องสแกนแบบเลเซอร์ทั้งทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ให้กระบวนการขึ้นรูปมีประสิทธิภาพและความสมบูรณ์มากขึ้น

Chen และ Li [8] แก้ปัญหาการขึ้นรูปด้วยการพัฒนาเทคนิคในการสแกนวัตถุใน 3 มิติใหม่ โดยใช้วิธีการคำนวณหามุมมองในการสแกนวัตถุรอบถัดไปออกมาเป็นสมการคณิตศาสตร์ รวมถึงการสแกนด้านบนของวัตถุ เพื่อให้ได้ผลการสแกนที่ครอบคลุมทุกพื้นผิว และป้องกันการเกิดจุดที่หายไป แต่วิธีการนี้จะต้องปรับปรุงโครงสร้างของตัวยึดเลเซอร์ให้สามารถขยับไปรอบ ๆ วัตถุได้ทุกตำแหน่ง ซึ่งต้นทุนในการผลิตเครื่องสแกนในระบบนี้จะเพิ่มขึ้นอีกด้วย

Sporring และ Jensen [9] ได้ทำการศึกษาวิธีการสร้างกลับจุดที่หายไปในการจำลองโมเดล ฟันของมนุษย์ และได้นำเสนอวิธีการสร้างกลับจุดที่หายไปโดยใช้วิธีการของเบย์ (Bayes) เพื่อหาความ น่าจะเป็น และจับคู่ (Match) ระหว่างรูปทรง (Shape) ของส่วนที่หายไปที่เป็นไปได้ กับข้อมูลที่มีอยู่ แล้ว ซึ่งวิธีการนี้ระบบที่ใช้จะต้องมีข้อมูลเปรียบเทียบมากพอและครอบคลุมทุกรูปแบบฟันของ มนุษย์

การแก้ปัญหการขึ้นรูปด้วยคอมพิวเตอร์ที่งานวิจัยนี้นำเสนอคือ การใช้ฟัซซี่ซัพพอร์ต-เวกเตอร์แมชชีนแบบถดถอย (Fuzzy Support Vector Regression: FSVR) และซัพพอร์ตเวกเตอร์-แมชชีนแบบถดถอย (Support Vector Regression: SVR) ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการทำนายผล และคาดการณ์ล่วงหน้า

Tay และ Cao [10] ได้นำเทคนิคของ SVR ไปใช้ในการทำนายข้อมูลทางการเงิน โดยใช้ ฟังก์ชันเวลาเข้ามาช่วยทำนาย เพื่อประโยชน์ต่อธุรกิจต่าง ๆ ในการบริหารและวางแผนทางการเงิน

Lin และ Wang [11] ได้นำเสนอกระบวนการของ FSVM ในเวลาต่อมาโดยใช้แนวคิดในการ กำหนดค่าความสำคัญให้กับข้อมูลในโครงสร้างของ SVR โดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี่แบบต่าง ๆ และเรียกชื่อใหม่ว่า FSVM

Sun [12] ได้นำเสนอเทคนิคแบบถดถอย (Regression) โดยใช้ FSVM เพื่อคาดการณ์เหตุการณ์ล่วงหน้าต่าง ๆ และเรียกเทคนิคนี้ว่า ฟัซซี่ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนแบบถดถอย (FSVR)

Bao และคณะ [13] ได้นำ FSVR ไปประยุกต์ใช้ในการทำนายข้อมูลการเก็บสินค้าในคลัง หรือที่เรียกว่าระบบ SCI (Stock Composition Index) ซึ่งในงานวิจัยนี้ยังนำเสนอการประยุกต์ใช้ ฟังก์ชันเคอร์เนลที่เรียกว่า เอ็กโพเนนเชียลเรเดียเบสฟังกชัน (E-RBF) เปรียบเทียบกับการใช้ ฟังก์ชันเคอร์เนลแบบ เกาส์เซียนเรเดียเบสฟังกชัน (RBF) ธรรมดา อีกทั้งได้เสนอฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี่แบบฟังก์ชันของอนุกรมเวลา ซึ่งเป็นต้นแบบโครงสร้าง FSVR ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ด้วย

โสภณ [2] ซึ่งเป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการทำนายระดับน้ำในแม่น้ำยม ได้ใช้กระบวนการของ FSVR และลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของแบบอนุกรมเวลา ไปใช้ทำนายระดับน้ำใน แม่น้ำยมว่าจะมีระดับน้ำเป็นอย่างไรเพื่อวางแผนและป้องกันอุทกภัย

Yu และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการประมาณน้ำหนักของทารกแรกเกิดเพื่อ ประโยชน์ในการวิเคราะห์โรคหรืออาการแทรกซ้อนที่อาจเกิดขึ้นจากน้ำหนักที่ผิดปกติ

โดยใช้แนวคิดของ FSVR ประยุกต์เข้ากับ Genetic Algorithm (GA) เพื่อสร้างตัวแปรที่เหมาะสมให้กับ FSVR โดยเรียกวิธีการนี้ว่า Evolutionary Fuzzy Support Vector Regression (EFSVR)

แม้ว่าจะมีการพัฒนากระบวนการในการขึ้นรูปด้วยคอมพิวเตอร์ของเครื่องสแกน 3 มิติ ทั้งที่เป็นการศึกษาทางด้านฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ สิ่งหนึ่งที่เป็นปัจจัยในการผลิตเครื่องสแกน 3 มิติ คือต้นทุนของอุปกรณ์ ซึ่งเป็นที่รู้กันดีว่าเครื่องสแกนแบบเลเซอร์เดี่ยว (Single laser) ใช้ต้นทุนต่ำ ผู้ทำวิจัยจึงมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาการขึ้นรูปที่ได้จากเครื่องสแกนเลเซอร์แบบเดี่ยว โดยได้นำเสนอวิธีการของ FSVR ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการคาดการณ์ล่วงหน้า ไปประยุกต์ใช้ในการสร้างกลับจุดที่หายไปจากจุดที่มีอยู่นั่นเอง

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อสร้างกลับจุดที่หายไปแบบอัตโนมัติในการขึ้นรูปวัตถุด้วยคอมพิวเตอร์ในกระบวนการทำงานของระบบสแกนเลเซอร์วัตถุ 3 มิติ

1.4 ขอบเขตการทำวิจัย

- 1.4.1 พัฒนาการขึ้นรูปด้วยคอมพิวเตอร์ โดยสร้างกลับจุดที่หายไปบนพื้นผิวของแบบจำลองในรูปแบบของจุดเมฆ (Point Cloud) โดยใช้แบบจำลองทั่วไปที่มีอยู่แล้ว ได้แก่ Toy-Car Engine Hood, Stanford Bunny, Horse และ Dragon และอื่น ๆ
- 1.4.2 เปรียบเทียบผลที่ได้จากฟัซซี่ซัพพอร์ตเวกเตอร์แบบถดถอย กับซัพพอร์ตเวกเตอร์แบบถดถอย
- 1.4.3 ลักษณะของข้อมูลที่ใช้ต้องเป็นลำดับของพิกัดจุดที่เรียงกันไปในแกนใดแกนหนึ่ง

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

สามารถนำวิธีการในการสร้างกลับจุดที่หายไปในการจำลองวัตถุด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้ฟัซซี่ซัพพอร์ตเวกเตอร์แบบถดถอย ไปประยุกต์ใช้กับเครื่องสแกน 3 มิติ

1.6 ขั้นตอนการทำวิจัย

- 1.6.1 ศึกษาขั้นตอนและกระบวนการของเครื่องสแกนเลเซอร์ 3 มิติ
- 1.6.2 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนากระบวนการในการจำลองวัตถุด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ 3 มิติ

- 1.6.3 ศึกษาลักษณะข้อมูลและโครงสร้างของแบบจำลองที่มีอยู่ทั่วไป (แบบจำลองจากเครื่องสแกนเลเซอร์ 3 มิติ)
- 1.6.4 ศึกษาทฤษฎีของซัพพอร์ตเวกเตอร์แบบถดถอย และฟิชชีซัพพอร์ตเวกเตอร์แบบถดถอย
- 1.6.5 เขียนโปรแกรมสร้างระบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แบบถดถอยพร้อมแก้ไขข้อผิดพลาดของโปรแกรม
- 1.6.6 เขียนโปรแกรมสร้างระบบฟิชชีซัพพอร์ตเวกเตอร์แบบถดถอยพร้อมแก้ไขข้อผิดพลาดของโปรแกรม
- 1.6.7 พิจารณาโครงสร้างของแบบจำลองและสร้างชุดฝึกสอนที่เหมาะสม
- 1.6.8 ทดลองและบันทึกผล
- 1.6.9 ปรับปรุงการทดลองและบันทึกผล
- 1.6.10 เปรียบเทียบ สรุป และวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง
- 1.6.11 จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์