

การใช้วิศวกรรมย้อนรอยในการสร้างตัวถังรถต้นแบบ

An Application of Reverse Engineering for 3D modeling of the Prototype Racing Car

กรวิศว์ นราเดช¹ กุลนรินทร์ กุลทอง² พงศ์เทพ ขำแข³ ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ^{4*}
^{1,2,3}สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าเครื่องกลการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
⁴ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
50 ถนนพหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
โทรศัพท์ 0-2942-8567 ต่อ 302 *Email: fengssr@ku.ac.th

Korawit Naradech¹ Kulnarin Kulthong² Pongthep Khumkae³ Supasit Rodkwan^{4*}
^{1,2,3}Electromechanic Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University
⁴Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University
50 Phaholyothin Road, Ladyaw, Jatujak, Bangkok, Thailand 10900
Tel. 0-2942-8567-70 Ext. 302 *Email: fengssr@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันกระบวนการผลิตชิ้นงานโดยทั่วไปจะเป็นในรูปแบบวิศวกรรมตามรอย (Forward Engineering) กล่าวคือต้องมีการออกแบบและสร้างแบบสามมิติ (3D Modeling) ด้วยโปรแกรม CAD (Computer Aided Design) จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์และผลิตออกมาเป็นชิ้นงานจริง ซึ่งในบางครั้งการทำชิ้นงานที่ซับซ้อนมากๆ เช่น พื้นผิวตัวถังของยานพาหนะ นั้นจะใช้เวลาในการสร้างแบบสามมิติค่อนข้างนาน ดังนั้นจึงมีการนำเทคโนโลยีวิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering) ซึ่งเป็นการทำกลับกันกับการทำวิศวกรรมตามรอย คือมีการนำต้นแบบของผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น งานปั้นดินเหนียว ชิ้นงานจริงที่มีอยู่แล้ว จากนั้นจึงทำการหาจุดพิกัดต่างๆ ของชิ้นงาน เพื่อนำไปสร้างพื้นผิวสามมิติ และแปลงกลับไปเป็นแบบสามมิติที่สมบูรณ์ต่อไป

โครงการนี้เป็นการศึกษาและนำเอาเทคนิควิศวกรรมย้อนรอยเข้าโดยใช้อุปกรณ์เก็บค่าพิกัดสามมิติแบบระบบลำแสงเลเซอร์ (Laser Scanner) เข้าไปช่วยในการออกแบบและวิจัยพัฒนาตัวถังรถ เพื่อช่วยลดต้นทุนและเวลาในการออกแบบและผลิต รวมถึงเป็นการส่งเสริมให้มีการนำองค์ความรู้ใหม่และเตรียมความพร้อมให้กับผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมยานยนต์เพื่อรองรับการขยายตัวของอุตสาหกรรมนี้ในประเทศต่อไป

คำหลัก: วิศวกรรมตามรอย วิศวกรรมย้อนรอย คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ

Abstract

In general the manufacturing of products usually relies on the Forward Engineering (FE) methodology where products are manufactured using 3D models created by CAD (Computer Aided Design). Nevertheless, for some applications where the complex geometry or shape of the model exists, the new technology called Reverse Engineering (RE) is utilized. In RE, the prototyped model is used to obtain the measured coordinates for creating the surface and; subsequently, the solid models.

In this paper, an investigation on applying the RE technique using laser scanner type RE system on a racing car model was performed to assist in the further design and development steps on a car body so the cost and production time of car manufacturing are reduced. This research is a part of preparation of Research and Development (R&D) support for Thailand automotive industry in the near future.

Keywords: Forward Engineering, Reverse Engineering, Computer Aided Design

1. บทนำ

ในปัจจุบันการผลิตและพัฒนาผลิตภัณฑ์โดยใช้กระบวนการทางวิศวกรรมย้อนรอยในประเทศไทยนั้นยังไม่มีเป็นที่นิยมแพร่หลาย อันเนื่องมาจากเป็นศาสตร์ใหม่ที่ยังมีผู้รู้และผู้ถ่ายทอดเป็นจำนวนน้อยอยู่ ทั้งยังอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ในกระบวนการทำ มีราคาค่อนข้างสูง

แต่ในต่างประเทศนั้นขั้นตอนการทำวิศวกรรมย้อนรอยกำลังเป็นที่นิยม มีผู้สนใจศึกษาศาสตร์ทางด้านนี้เป็นจำนวนมาก และนำมาประยุกต์ใช้ในหลากหลายจุดประสงค์ยกตัวอย่างเช่น การนำวิศวกรรมย้อนรอยมาใช้ในวงการแพทย์โดยการสร้างข้อต่อหัวเข้าเทียมเพื่อใช้ในการผ่าตัดอวัยวะเทียมให้กับผู้ป่วยที่มีปัญหาทางด้านหัวเข้า เนื่องจากข้อต่อหัวเข้ามีพื้นผิวสลับซับซ้อนมากดังนั้นการสร้างผิว โดยใช้โปรแกรม CAD ทั่วไปจะใช้เวลานานกว่าและยังมี ความผิดพลาดมากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้โปรแกรมทางวิศวกรรมย้อนรอย (Lin และ Wang, 2003)

วิศวกรรมย้อนรอยในวงการอุตสาหกรรมยานยนต์ถูกนำไปใช้ในหลายรูปแบบเช่น การสร้างรูปทรงและผิวของรถยนต์ด้วยกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอยเพื่อนำไปวิเคราะห์หาจุดบกพร่องของตัวถังรถยนต์เมื่อเกิดการชนโดยใช้โปรแกรมประเภทระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งการวิเคราะห์การชนยังสามารถกระทำเพียงแค่บางส่วนของรถยนต์ได้ เช่น เลือกวิเคราะห์การชนเฉพาะประตูรถยนต์เพราะว่าเป็นจุดที่มีความสำคัญที่สุดเนื่องจากเป็นบริเวณที่ใกล้กับผู้โดยสารมากที่สุดในการณีที่เกิดการชนขึ้นที่ด้านข้าง (Cheng และคณะ, 2001) จากที่กล่าวมาสามารถแสดงให้เห็นว่าการใช้วิศวกรรมย้อนรอยได้ว่าเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบวัดความแข็งแรงของรถยนต์เมื่อเทียบกับวิธีการเดิมคือการทดสอบการชนโดยใช้รถยนต์จริง การใช้วิศวกรรมย้อนรอยร่วมกับการสร้างชิ้นงานต้นแบบ (Rapid Prototyping) เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของการนำเอาวิศวกรรมย้อนรอยมาใช้ในอุตสาหกรรมโดยส่วนใหญ่จะเป็นการสร้างชิ้นงานต้นแบบที่มีขนาดเล็กกว่าชิ้นงานที่นำมาสแกน เมื่อสแกนได้กลุ่มจุดแล้วนำไปผ่านโปรแกรมทางวิศวกรรมย้อนรอยจะได้พื้นผิวซึ่งสามารถนำไปเข้าเครื่อง Rapid Prototyping Machine ในรูปแบบของไฟล์ STL เพื่อทำการสร้างชิ้นงานต้นแบบที่มีขนาดย่อลงจากชิ้นงานเริ่มต้นเช่นการสร้างชิ้นงานต้นแบบเป็นรถยนต์ที่ผ่านการทำวิศวกรรมย้อนรอยมาแล้ว (Sansoni และ Docchio, 2004) สาเหตุของข้อผิดพลาดในงานวิศวกรรมย้อนรอยเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการทำงานถ้าสามารถทราบถึงสาเหตุของความผิดพลาดได้ก็จะสามารถป้องกันความผิดพลาดไม่ให้เกิดขึ้นได้เช่นกัน (Giri และ Jouaneh, 2003) ยิ่งถ้ามีความคลาดเคลื่อนทางชิ้นงานเกิดขึ้นน้อยเท่าไรก็หมายความว่าชิ้นงานนั้นๆเมื่อนำไปเข้าโปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์ในงานต่างๆผลลัพธ์ที่ได้ก็จะมีค่าใกล้เคียงความจริงมากที่สุดเนื่องจากความผิดพลาดในชิ้นงานที่นำมาวิเคราะห์มีค่าน้อย

2. อุปกรณ์

2.1 หัวสแกนเก็บค่าพิกัดสามมิติแบบระบบลำแสง เลเซอร์ 3D Laser Scanner ยี่ห้อ Kreon รุ่น KZ 50 ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงหัวสแกน 3D Laser Scanner

2.2 แขนสแกน (Portable Arm) ยี่ห้อ Cimcore รุ่น 3000i ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงแขนสแกน (Portable Arm)

3. วิธีการทดลอง

วิธีการใช้วิศวกรรมย้อนรอย เพื่อสร้างแบบสามมิติสามารถสรุปได้ดังนี้

3.1 นำต้นแบบจำลองที่ปั้นจากดินเหนียว (Clay Model) มาทำการสแกนชิ้นงานด้วยอุปกรณ์เก็บค่าพิกัดสามมิติแบบระบบลำแสงเลเซอร์ (3D Laser Scanner) เพื่อบันทึกและแสดงผลในรูปแบบของกลุ่มพิกัดจุด (Clouds of Points)

3.2 นำกลุ่มพิกัดจุดที่ได้มาคัดแยกเอาเฉพาะกลุ่มพิกัดที่เป็นองค์ประกอบของชิ้นงานจริง (Final Clean Clouds)

3.3 นำกลุ่มพิกัดที่ได้มาทำการสร้างพื้นผิว (Surface Reconstruction) โดยใช้หลักการเชื่อมจุดต่อจุดเข้าด้วยกัน จะทำให้ได้โครงร่างพื้นผิวของชิ้นงาน

3.4 นำโครงร่างพื้นผิวที่ได้มาทำการปรับแต่งให้อยู่ในรูปแบบสามมิติ (3D Modeling) พร้อมทั้งจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์หิ้วยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่อไป

4. ผลการทดลอง

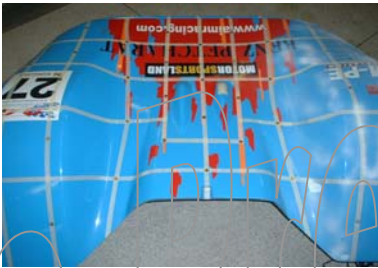
ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 วางแผนและเตรียมการ เนื่องจากชิ้นงานที่จะทำการสแกนมีขนาดใหญ่ จึงต้องมีการเตรียมสถานที่ทำการสแกนโดยใช้ห้องที่มีขนาดกว้างเพียงพอ และทำการติดตั้งเครื่อง 3D Laser Scanner โดยพยายามจัดวางตำแหน่งให้เหมาะสมกับการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3



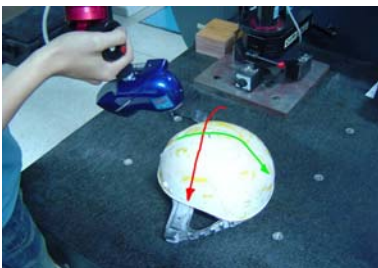
รูปที่ 3 แสดงการจัดเตรียมพื้นที่ทำงาน

ตัวถังรถแข่งที่ต้องการสแกนมีขนาดใหญ่มากเกินขอบเขตของเครื่อง 3D Laser Scanner จะสามารถสแกนได้ภายในครั้งเดียว และเกินขีดความสามารถของคอมพิวเตอร์ที่สามารถแสดงผลได้ จึงนำเทคนิคแบ่งพื้นที่การสแกน จากพื้นที่ใหญ่ให้เป็นพื้นที่ย่อยแล้วจึงนำแต่ละส่วนมาประกอบรวมกัน โดยมีจุดอ้างอิง (Reference Point) เป็นตัวช่วยกำหนดตำแหน่ง เรียกว่าวิธีการนี้ว่า Mapping Surface ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงชิ้นงานที่ทำการ Mapping Surface

4.2 นำต้นแบบจำลองมาทำการสแกนชิ้นงาน เพื่อบันทึกผลในรูปแบบของกลุ่มพิกัดจุด โดยใช้โปรแกรม Polygonia ทำการปรับค่าตัวแปร (Parameter) ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสแกนให้เหมาะสมกับชิ้นงาน ต่อจากนั้นทำการสแกนชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 5 จนได้จำนวนจุดพอเหมาะ กับลักษณะงาน นำจุดที่ได้มาทำการกรอง (Filtering) ลดจำนวนจุดที่ไม่จำเป็นต่อการใช้งานออกไป

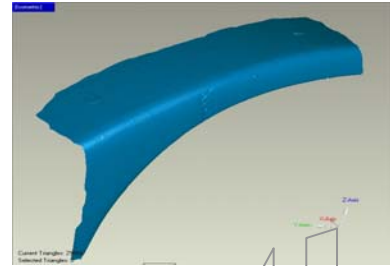


รูปที่ 5 แสดงการสแกนชิ้นงาน

เมื่อเสร็จแล้วทำการแปลงกลุ่มพิกัดให้อยู่ในรูปแบบของไฟล์ .cwk เพื่อไปทำการตัดแยกกลุ่มพิกัดที่เป็นองค์ประกอบของชิ้นงานจริง

4.3 นำกลุ่มพิกัดจุดมาตัดแยกเอาเฉพาะกลุ่มพิกัดที่เป็นองค์ประกอบของชิ้นงานจริงด้วยโปรแกรม Geomagic ในขั้นตอนนี้จะประกอบไปด้วยสองขั้นตอนย่อยคือ

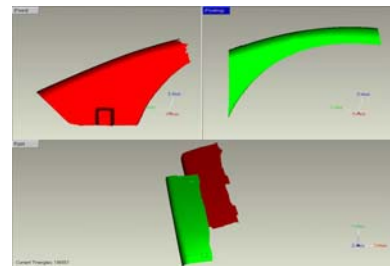
4.3.1 การปรับแต่งและดูแนวโน้มของกลุ่มพิกัดก่อนจะทำการสร้างพื้นผิวที่แท้จริง โดยใช้คำสั่ง Uniform Sample ลดจำนวนกลุ่มพิกัดให้ได้จำนวนตามที่ต้องการ จากนั้นจึงทำการ Wrap ชิ้นงานเพื่อดูแนวโน้มของพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 6



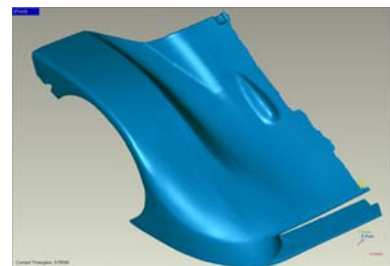
รูปที่ 6 แสดงชิ้นงานที่ทำการ Wrap

ทำการตกแต่งพื้นผิวของชิ้นงานที่ Wrap ให้มีรูปร่างตามที่ต้องการด้วยคำสั่ง Clean, Reduced Noise, Sandpapers และ Fill Holes

4.3.2 นำชิ้นงานย่อยที่ผ่านการตกแต่งมาประกอบรวมกันเป็นชิ้นงานจริงทั้งสามส่วนคือ ส่วนหน้า ส่วนกลางและ ส่วนหลังโดยใช้คำสั่ง Manual Registration, Global registration และ Merge ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 7 แสดงชิ้นงานย่อยที่นำมาประกอบกัน



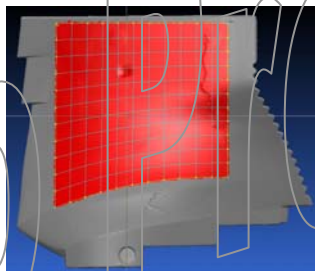
รูปที่ 8 แสดงชิ้นงานส่วนหน้าทำการประกอบสมบูรณ์

นำชิ้นงานทั้งสามส่วนมาประกอบรวมกันให้สมบูรณ์
ดังแสดงในรูปที่ 9

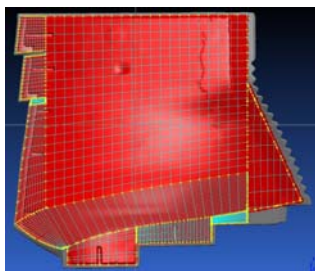


รูปที่ 9 แสดงชิ้นงานทั้ง 3 ส่วนที่ประกอบกันเรียบร้อยแล้ว

4.4 นักลุ่มพิกัดมาทำการสร้างพื้นผิวเพื่อทำให้ได้โครงร่าง
พื้นผิวของชิ้นงาน โดยใช้โปรแกรม CopyCAD โดยทำการสร้างพื้นผิว
ย่อยเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมด้วยหลักการเชื่อมจุดต่อจุดเข้าด้วยกันใน
ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 10 และทำการสร้างพื้นผิวย่อย
ให้เต็มชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 10 แสดงการสร้างพื้นผิวย่อยที่เริ่มสร้างบนชิ้นงาน



รูปที่ 11 แสดงพื้นผิวย่อยซึ่งสร้างเต็มชิ้นงานอย่าง
สมบูรณ์

4.5 นำโครงร่างพื้นผิวมาทำการปรับแต่งให้พร้อมที่จะนำไปใช้ใน
การวิเคราะห์ห้วงและพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่อไป

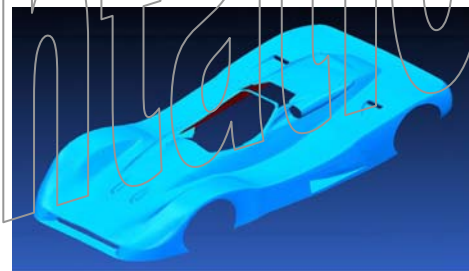
โดยตกแต่ง Surface ที่สร้างมาจาก CopyCAD โดยใช้ Function
ในโปรแกรม Power Shape ซึ่งใช้วิธีดังต่อไปนี้ Stitch Surface,

Append Surface, Append Curved และ Composite Curve ดังแสดง
ในรูปที่ 12



รูปที่ 12 แสดงพื้นผิวของชิ้นงานที่สมบูรณ์

ทำการ Mirror ชิ้นงานโดยสร้าง Datum Plane เพื่อใช้เป็น
ตำแหน่งอ้างอิง เมื่อตกแต่งเสร็จสมบูรณ์แล้วจะได้พื้นผิวของชิ้นงานที่
เสร็จสมบูรณ์พร้อมนำไปใช้งานต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 แสดงชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์

5. อภิปรายผลและสรุปผลการทดลอง

เนื่องจากการทำวิศวกรรมย้อนรอยในประเทศไทยนั้นนับว่าเป็น
ศาสตร์แขนงใหม่ บุคลากรที่มีความรู้ความสามารถในศาสตร์นี้มี
ค่อนข้างน้อย ทำให้การทำโครงการครั้งนี้มีอุปสรรคทางด้านข้อมูลใน
กระบวนการต่างๆ การทำโครงการในครั้งนี้จึงเปรียบเสมือนการลอง
ผิด/ลองถูก เพื่อที่จะทำชิ้นงานขนาดใหญ่ด้วยกรรมวิธีวิศวกรรมย้อน
รอยขึ้นมา ผลที่ได้นับว่าเป็นที่น่าพึงพอใจในระดับหนึ่ง เพราะสามารถ
ทำตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งเอาไว้ได้ จากการทำโครงการที่ผ่านมา
สามารถสรุปผลได้ดังนี้

งานวิศวกรรมย้อนรอยเหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่ซับซ้อนมีส่วน
โค้งและเว้ามากซึ่งไม่สามารถหาค่าของขนาดที่แน่นอนได้หรือใช้ในการ
คัดลอกชิ้นงานออกมาเพื่อทำการเรียนรู้และพัฒนาชิ้นงานนั้นต่อไป
(Copy & Development) ซึ่งเหมาะสมกับประเทศที่กำลังพัฒนาเช่น
ประเทศไทย เป็นต้น แต่สำหรับชิ้นงานที่ไม่ซับซ้อนมากนัก และเรา
รู้ขนาดที่แน่นอนอยู่แล้ว ควรใช้วิธีการสร้างไฟล์ CAD ด้วยวิธีการ
วิศวกรรมตามรอย ทั้งนี้เพราะจะช่วยประหยัดเวลาและสามารถหา
ขนาดที่แน่นอนได้ดีกว่า

การทำวิศวกรรมตามรอยนั้นจะประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่าการทำวิศวกรรมย้อนรอยถ้าใช้เวลาที่เท่ากันในการทำงาน แต่ข้อได้เปรียบของวิศวกรรมย้อนรอยอยู่ที่เวลาในการทำชิ้นงาน ถ้าเป็นชิ้นงานชนิดเดียวกันการทำวิศวกรรมย้อนรอยจะใช้เวลาเร็วกว่า และมีความคลาดเคลื่อนไปจากชิ้นงานต้นแบบน้อยกว่า วิธีวัดแล้วนำไปเขียน CAD แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพิจารณาชิ้นงานให้เหมาะสมกับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่เรามีใช้งานด้วย

แต่ข้อเสียของการใช้วิศวกรรมย้อนรอยคือ กระบวนการทำให้ความซับซ้อนสูง ต้องมีการปรับแต่งค่าตัวแปรต่างๆมาก ซึ่งต้องใช้ประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน ถ้าปรับแต่งค่า ค่าตัวแปร ผิดต้อง จะทำให้ผลที่ได้ออกมาไม่คุณภาพในระดับเดียวกับการเขียน CAD อีกทั้งยังประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการสร้างชิ้นงานจริงออกมาได้อีกมาก แต่ถ้าผู้ใช้ขาดประสบการณ์ และปรับแต่งค่าตัวแปรไม่ถูกต้องจะทำให้ไฟล์ CAD ที่ได้ออกมาไม่สามารถนำไปใช้งานจริงได้ อีกทั้งยังเสียเวลาและค่าใช้จ่ายอีกด้วย

การทำงานในโครงการนี้ได้แบ่งตัวถังรถยนต์ต้นแบบออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนหน้า ส่วนกลาง ส่วนหลัง และในชิ้นส่วนแต่ละชิ้นได้แบ่งเป็นส่วนย่อยๆอีกโดยประมาณเพื่อให้ง่ายต่อการสแกนชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ไม่สามารถสแกนภายในครั้งเดียวได้ จากนั้นนำชิ้นส่วนย่อยมาประกอบกันโดยใช้เหรียญเป็นตัวอ้างอิง ซึ่งตัวอ้างอิงนี้มีความสำคัญมากถ้ามีตำแหน่งและจำนวนไม่เพียงพอแล้วจะทำให้ในขั้นตอนประกอบนี้เกิดความคลาดเคลื่อนมาก การนำวิศวกรรมย้อนรอยมาใช้ควรใช้กับชิ้นงานที่สามารถสแกนตัวงานได้ทั้งหมดภายในครั้งเดียว มิฉะนั้นจะทำให้การประกอบกันยังถ้ามีจำนวนชิ้นส่วนย่อยมาก ความคลาดเคลื่อนจะสูงมากไม่สามารถนำไปใช้งานจริงได้ ดังนั้นสามารถที่จะสรุปได้ว่ากรรมวิธีวิศวกรรมย้อนรอยถ้ามีการประยุกต์ใช้ให้ถูกจะสามารถช่วยบริษัทลดเวลาในการค้นคว้าวิจัยและผลิตตัวถังรถและลดค่าใช้จ่ายในการผลิต โดยการเก็บข้อมูลไฟล์ CAD ของตัวถังเอาไว้เพื่อในอนาคตสามารถนำข้อมูลไฟล์ CAD นี้มาอ้างอิงเพื่อทำการปรับปรุงพัฒนาเป็นตัวถังรุ่นใหม่ต่อไป และสามารถสร้างแนวทางในการทำวิศวกรรมย้อนรอยให้กับอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆรวมถึงการค้นคว้าวิจัยต่อผู้ที่สนใจต่อไป นับเป็นนวัตกรรมใหม่ที่จะช่วยให้เราสามารถสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการพัฒนาทางวิศวกรรมด้านต่างๆ เช่น ด้านพลศาสตร์ของอากาศ การออกแบบชิ้นส่วน ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

- สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม โครงการโครงการอุตสาหกรรมสำหรับปริญญาตรีประจำปี 2547 สำหรับทุน IRPUS ที่ให้โอกาสคณะผู้วิจัยในการทำโครงการวิจัยนี้

- บริษัท เอ็ม เรซซิ่ง มอเตอร์สปอร์ต จำกัด สำหรับตัวถังรถ และความร่วมมือในการทำโครงการ

- บริษัท Delcam (Thailand) Co., Ltd. สำหรับคำแนะนำและเทคนิคในการสร้างพื้นผิว (Surface) โดยใช้ โปรแกรม CopyCAD

- คุณ กัมปนาท อ่วมกุล แผนกเครื่องมือวัด สำหรับอุปกรณ์ในการทำวิศวกรรมย้อนรอย สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIPT)

- คุณ สุชาติา เจริญโมรา แผนกวิศวกรรม สำหรับการถ่ายทอดความรู้และการประสานงานในการทำวิศวกรรมย้อนรอย สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIPT)

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Giri, D.; Jouaneh, M. Error sources in a 3-D reverse engineering process. Precision Engineering. 2004, 28, pp. 242-251.
- [2] Sansoni, G.; Docchio F. Three-dimensional optical measurements and reverse engineering for automotive applications. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2004, 20, pp. 359-367
- [3] Lin, Y. -P.; Wang, C. -T. Reverse engineering in CAD model reconstruction of customized artificial joint. Medical Engineering & Physics. 2005, 27, pp. 189-193.
- [4] Cheng, Z.Q.; Thacker J.G.; Pilkey W.D.; Reagan S.W.; Sieveka E.M. Experiences in reverse-engineering of a finite element automobile crash model. Finite Elements in Analysis and Design. 2001, 37, pp. 843-860.