เทคโนโลยีวิศวกรรมย้อนรอยเพื่อการออกแบบและขึ้นรูป

ณัฐพล จันทร์พาณิชย์*

บทคัดย่อ

ในโลกแห่งการแข่งขันทางธุรกิจในปัจจุบัน ผลิตภัณฑ์จำเป็นต้องมีความสวยงามและเป็นที่ดึงดูดใจของผู้ซื้อ ดังนั้นรูปทรงของผลิตภัณฑ์จึงมีแนวโน้มเป็นทรงอิสระและซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งการออกแบบด้วยวิธีปกติที่เรียกกันว่า “วิศวกรรมก้าวหน้า” นั้นอาจมีความยุ่งยากและใช้เวลานาน ดังนั้น เพื่อความสะดวกในการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงซับซ้อนให้ประสบความสำเร็จ นักออกแบบอาจจำเป็นต้องถ่ายทอดความคิดเชิงศิลปะผ่านการงานปั้น ซึ่งการนำผลงานปั้นไปใช้เพื่อพัฒนาต่อให้สำเร็จเป็นผลิตภัณฑ์นั้นจำเป็นต้องเปลี่ยนงานปั้นเป็นแบบ CAD กระบวนการดังกล่าวนี้เรียกว่า “วิศวกรรมย้อนรอย” บทบาทของเทคโนโลยีวิศวกรรมย้อนรอยในภาคอุตสาหกรรมมีเพิ่มมากขึ้น จึงมีความจำเป็นที่ผู้ทำงานเกี่ยวกับอุตสาหกรรมการผลิตและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้องทราบกระบวนการ อุปกรณ์และหลักการเลือกใช้ ตลอดจนลักษณะการประยุกต์ใช้งาน เพื่อให้สามารถนำเทคโนโลยีไปใช้ในการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยรายละเอียดทั้งหมดได้ถูกรวบรวมอยู่ในบทความนี้

คำสำคัญ : วิศวกรรมย้อนรอย, ผลิตภัณฑ์รูปทรงอิสระ, การออกแบบ, การขึ้นรูป

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

* ผู้ติดต่อ, อีเมล์: sfengnpc@src.ku.ac.th รับเมื่อ 23 มิถุนายน 2557 ตอบรับเมื่อ 15 กันยายน 2557

Reverse Engineering Technologies for Design and Manufacturing

Nattapon Chantarapanich*

Abstract

In the competitive world of business, products are required to be magnificent and attractive to the customer. Thus, product shapes tend to be freeform and be more complex in textures. The design such freeform product based on conventional design process is sometime difficult and time consuming. An alternative method which can eliminate those constrains is to convey ideas through artistic sculpture, before digitizing it to create CAD model using reverse engineering technique. Then, the obtained CAD model is used to finish product design. With the increasing of interest in reverse engineering used in industrial sector, it is imperative that engineers have to understand the concept of reverse engineering, including equipments selection, and its applications, in order to be able to apply the technology efficiently. All necessary details are provided in this article.

Keywords : Reverse Engineering, Freeform Feature, Design, Manufacturing

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Si Racha, Kasetsart University

* Corresponding author, E-mail: sfengnpc@src.ku.ac.th Received 23 June 2014, Accepted 15 September 2014

1. บทนำ

สภาวะการแข่งขันทางธุรกิจที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน ส่งผลให้ผู้ประกอบการต้องดำเนินกลยุทธ์เพื่อให้สามารถรักษาความสามารถในการแข่งขัน และเกิดการพัฒนาอย่างพลวัต หนึ่งในวิธีการที่ผู้ประกอบการมักใช้คือ การสร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่า ซึ่งต้องอาศัยองค์ความรู้ด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีรูปลักษณ์สวยงาม และสามารถดึงดูดใจลูกค้า ส่งผลให้แนวโน้มลักษณะผลิตภัณฑ์เป็นรูปทรงอิสระ (Freeform Feature) และมีความซับซ้อน จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ มาใช้เพื่อช่วยให้การออกแบบผลิตภัณฑ์นั้นสะดวกขึ้น ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบ หรือ "CAD" นับเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลายในสถานประกอบการที่ดำเนินงานด้านการออกแบบและผลิตชิ้นส่วน

จุดเด่นของ CAD คือ ผู้ออกแบบสามารถนำกรอบแนวคิดรูปทรงชิ้นงาน (Concept/Idea) หรือจากภาพร่าง (Sketch) มาแปลงให้เป็นแบบจำลองสามมิติ (3D Model) ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยไม่ต้องขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่จับต้องได้ (Physical Prototype) เสียก่อน นอกจากนี้ CAD ยังช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถแก้ไขหรือปรับปรุงรูปทรงของชิ้นงานได้อย่างสะดวก รวมถึงตรวจสอบความถูกต้องของแบบก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น การขึ้นรูปด้วยเครื่องซีเอ็นซี (CNC) การฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ และการขึ้นรูปแบบชั้น (Layer Manufacturing / Rapid Prototyping) เป็นต้น โดยกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นนั้นอาจเรียกว่า "วิศวกรรมก้าวหน้า" (Forward Engineering)

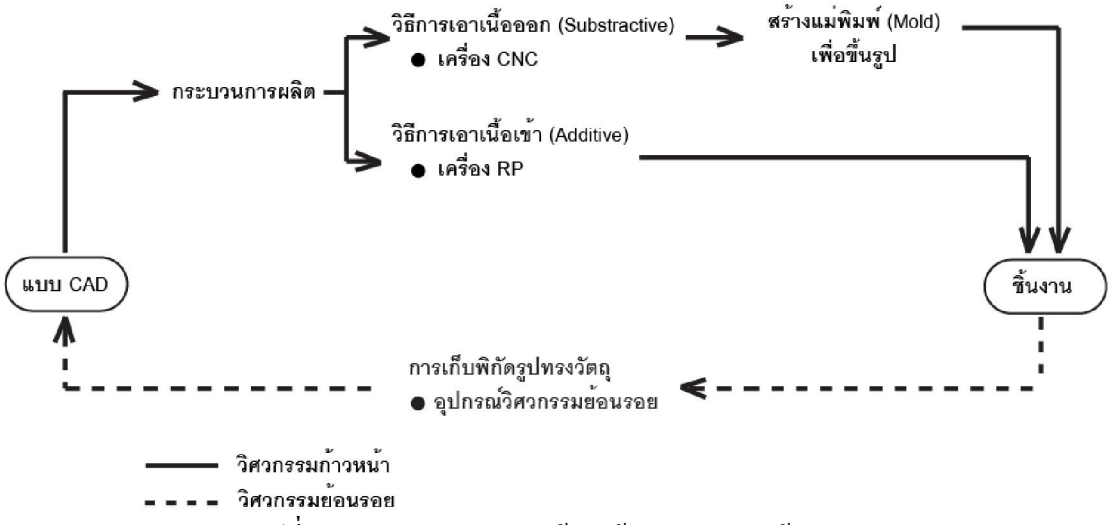
แต่บ่อยครั้งที่การออกแบบชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูงด้วยกระบวนการวิศวกรรมก้าวหน้า ซึ่งเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองสามมิตินั้นค่อนข้างยาก เพื่อให้กระบวนการออกแบบสะดวกขึ้น วิธีการที่สะดวกวิธีหนึ่งคือ การนำแนวคิดรูปทรงผลิตภัณฑ์มาถ่ายทอดออกมาเป็นต้นแบบ ด้วยการปั้นวัสดุประเภทดินเหนียวให้เป็นรูปทรง (Clay Model) อย่างคร่าวของผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะเก็บข้อมูลลักษณะพื้นผิวของงานปั้นดังกล่าวให้อยู่ในรูปแบบของแบบ CAD ในคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ออกแบบเป็นผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์ต่อไป

การสร้างแบบจำลองสามมิติที่มีการอ้างอิงลักษณะรูปทรงและขนาดจากชิ้นงานกายภาพที่จับต้องได้ดังได้กล่าวไปนั้น มีกระบวนการที่สวนทางกับวิศวกรรมก้าวหน้า ซึ่งโดยทั่วไป มักถูกเรียกว่า "วิศวกรรมย้อนรอย" (Reverse Engineering) การใช้วิศวกรรมย้อนรอยในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์พบได้ในอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น การออกแบบรูปทรงตัวถังรถยนต์ เป็นต้น เพื่อให้เห็นภาพกระบวนการวิศวกรรมก้าวหน้าและย้อนรอย รูปที่ 1 ได้แสดงกระบวนการทั้งสองไว้โดยคร่าว

จากที่กล่าวมาข้างต้น อาจสามารถให้คำจำกัดโดยสังเขปของวิศวกรรมย้อนรอยได้ว่า เป็นกระบวนการทางวิศวกรรมที่สร้างแบบของชิ้นงานให้มีรูปร่างและคุณสมบัติเหมือนกับวัตถุต้นแบบ โดยอาศัยการตรวจสอบข้อมูลเชิงเทคนิคที่เกี่ยวข้อง

วิศวกรรมย้อนรอยสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายประเภท เช่น

- การสร้างผลิตภัณฑ์จากชิ้นส่วนที่ไม่มีแบบ CAD หรือไม่มีข้อมูลทางขนาดเพียงพอที่สามารถใช้อ้างอิง เช่น การศึกษาถึงข้อดีข้อเสียแนวคิดการออกแบบ หรือพัฒนาต่อยอด รูปร่างผลิตภัณฑ์ของคู่แข่งทางธุรกิจ [1]



รูปที่ 1 กระบวนการวิศวกรรมก้าวหน้าและวิศวกรรมย้อนรอย

- การตรวจสอบชิ้นงานเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิต [2]

- การสร้างชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนซึ่งยากต่อการวัดขนาดได้ละเอียดในทุกจุด เช่น ส่วนของร่างกายมนุษย์ และงานศิลปะโบราณ เป็นต้น [3]

2. อุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอย

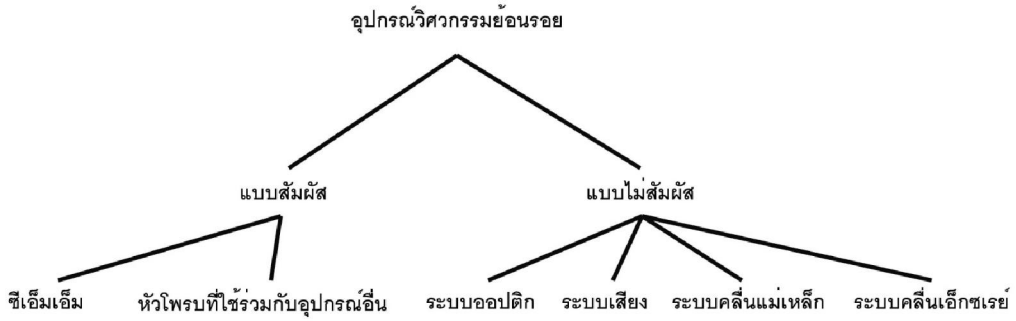
อุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอยเป็นสิ่งที่ใช้สำหรับการเปลี่ยนวัตถุมาเป็นแบบ CAD ในคอมพิวเตอร์ โดยมีหน้าที่เป็นเครื่องมือวัดเชิงมิติของวัตถุ ในกรณีที่ลักษณะชิ้นงานไม่มีความซับซ้อนและต้องการ แบบ CAD ที่มีความเที่ยงตรงไม่สูงนัก การใช้เครื่องมือวัดเชิงมิติอย่างง่าย เช่น ไม้บรรทัด หรือเวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Calipers) ก็จัดเป็นอุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอยอย่างง่ายเพื่อใช้เก็บข้อมูล ในทางกลับกัน หากชิ้นงานมีความซับซ้อน การใช้เครื่องมือวัดมิติอย่างง่ายในการวัดขนาดจึงเป็นเรื่องยากและอาจไม่สามารถทำได้ จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีเทคโนโลยีวัดเชิงมิติที่สูงขึ้น เพื่อช่วยในวัดให้สะดวกขึ้น อุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอยอาจจำแนกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือแบบสัมผัส (Contact) และไม่สัมผัส (Non-contact) ดังแสดงในรูปที่ 2

อุปกรณ์แบบสัมผัสมีลักษณะที่สำคัญ คือการใช้ส่วนหนึ่งของอุปกรณ์เข้าสัมผัสโดยตรงกับวัตถุ เช่น หัวโพรบ (Probe) เป็นต้น ส่วนอุปกรณ์แบบไม่สัมผัสจะใช้สื่อกลาง เช่น แสง เสียง คลื่นแม่เหล็ก และรังสีเอกซเรย์ เพื่อช่วยในการวัดลักษณะพื้นผิวโดยไม่มีส่วนใดของอุปกรณ์สัมผัสโดยตรงกับวัตถุ ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละประเภทที่สำคัญๆ มีดังต่อไปนี้

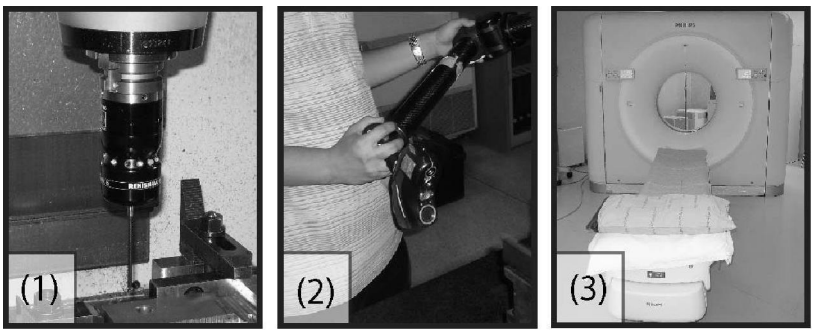
2.1 อุปกรณ์แบบสัมผัส

ซีเอ็มเอ็ม (CMM) เป็นตัวย่อในภาษาอังกฤษ มาจากคำว่า Coordinate Measuring Machine หรือเครื่องวัดพิกัดพื้นผิว ซีเอ็มเอ็มเป็นเครื่องมือที่เก็บข้อมูลพื้นผิวของวัตถุโดยใช้หัวโพรบสัมผัสกับวัตถุ (แต่ในบางกรณีหัวโพรบอาจใช้ร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ ได้เช่นกัน) การสัมผัส

แต่ละครั้งหัวโพรบจะส่งสัญญาณกลับไปยังชุดควบคุมและประมวลผลเพื่อแสดงตำแหน่งพิกัดคาร์ทีเซียนที่จุดสัมผัส [4] การใช้งานซีเอ็มเอ็มสามารถควบคุมแบบไม่อัตโนมัติ (Manual Mode) หรือสร้างโปรแกรมให้เดินสัมผัสพื้นผิวแบบอัตโนมัติ (Automatic Mode) จุดเด่นของการใช้ซีเอ็มเอ็มในงานวิศวกรรมย้อนรอยคือ ความแม่นยำของพิกัดข้อมูลที่วัดได้ และไม่มีชุดพิกัดข้อมูลรบกวน (Noise) [5] ที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บพิกัด



รูปที่ 2 การแบ่งประเภทอุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอย



รูปที่ 3 อุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอย (1) หัวโพรบสำหรับอุปกรณ์แบบสัมผัส (2) อุปกรณ์แบบไม่สัมผัสระบบออปติก และ (3) อุปกรณ์แบบไม่สัมผัสระบบคลื่นเอกซเรย์ (ซีทีสแกนเนอร์)

ซีเอ็มเอ็มใช้เวลาค่อนข้างนานในการเก็บพิกัดข้อมูล ดังนั้นจึงอาจไม่เหมาะสมกับการใช้งานเพื่อเก็บพิกัดวัตถุขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนสูง โดยค่าความผิดพลาดหลักๆ ในการวัดด้วยซีเอ็มเอ็มจะเกิดจากกลไกการเคลื่อนที่ของตัวเครื่อง

สิ่งหนึ่งที่ควรระวังในการใช้งานซีเอ็มเอ็ม คือ การนำไปใช้เก็บพิกัดวัตถุที่มีพื้นผิวนุ่ม และเสียรูปทรงได้ง่าย (Deformable Materials) ซึ่งจะทำให้ตำแหน่งสัมผัสของโพรบนั้นไม่ได้อยู่บนพื้นผิวที่แท้จริงของวัตถุ [1, 6] ซีเอ็มเอ็มมักใช้เพื่อตรวจสอบคุณภาพทางมิติของวัตถุเพื่อให้เป็นไปตามลักษณะที่กำหนดในแบบวิศวกรรม

2.2 อุปกรณ์แบบไม่สัมผัส

อุปกรณ์แบบไม่สัมผัสได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองต่อการเก็บพิกัดรูปทรงของชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูงในระยะเวลาอันสั้น [7] โดยนำสื่อกลางประเภทต่างๆ มาช่วยวัดมิติของวัตถุดังได้กล่าวไปข้างต้น โดยอุปกรณ์แบบไม่สัมผัสแต่ละประเภทมีรายละเอียดหลักการทำงาน ดังนี้

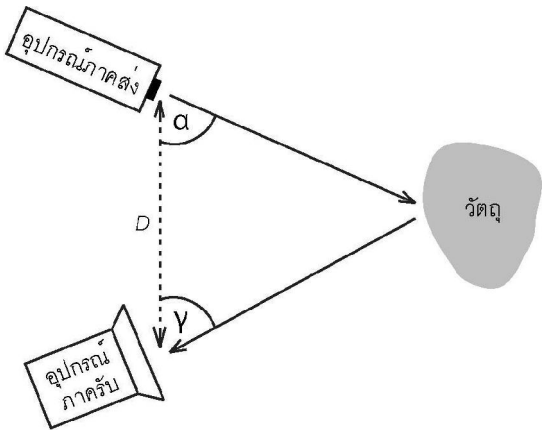
2.3.1 ระบบออปติก (Optical System)

อุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอยระบบออปติกนับเป็นระบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันโดยใช้แสงเป็นสื่อในการวัดทางมิติ โดยในตัวอุปกรณ์จะส่งสัญญาณแสงออกไปยังชิ้นงาน แสงที่สะท้อนกลับจากชิ้นงานจะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ภาครับสัญญาณ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการสร้างเป็นกลุ่มพิกัดจุดเพื่อใช้สร้างแบบ CAD ต่อไป อุปกรณ์วิศวกรรมย้อยรอยระบบออปติกมีข้อได้เปรียบในเรื่องของระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บพิกัดพื้นผิวที่น้อยกว่าอุปกรณ์แบบสัมผัส

การเก็บพิกัดพื้นผิวที่มีลักษณะมันเงาสะท้อนแสงหรือมีสีทึบ นับเป็นอุปสรรคสำคัญของการใช้งานอุปกรณ์ประเภทนี้ วิธีแก้ไขวิธีหนึ่งสามารถทำได้โดยพ่นแป้งเคลือบไว้ แต่ต้องระวังให้ชั้นแป้งนั้นไม่หนาจนเกินไปเพื่อให้ค่าที่ได้จากการเก็บพิกัดมีความผิดพลาดน้อยที่สุด [8]

การทำงานของอุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอยระบบออปติก [5] สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ

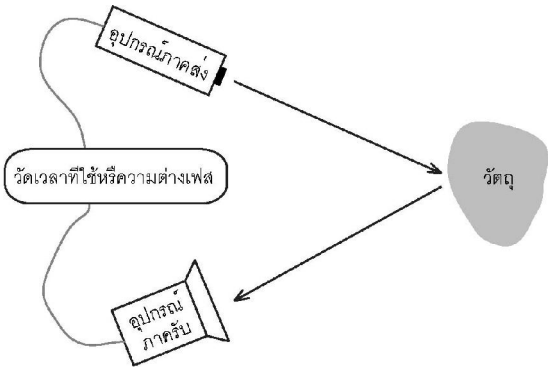
- *หลักการทำงานแบบ Triangulation* ใช้ระยะทางและมุมระหว่างภาครับและภาคส่งสัญญาณเพื่อคำนวณหาตำแหน่งพิกัด ดังแสดงในรูปที่ 4 การเก็บพิกัดพื้นผิววัตถุด้วยหลักการนี้สามารถทำได้เร็ว ความแม่นยำของตำแหน่งข้อมูลพื้นผิววัตถุขึ้นอยู่กับปัจจัยเรื่องความละเอียดของเซนเซอร์ภาครับสัญญาณ และระยะทางระหว่างวัตถุและตัวอุปกรณ์



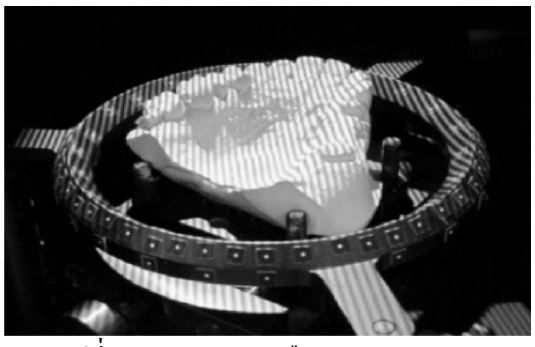
รูปที่ 4 หลักการทำงานแบบ Triangulation

- *หลักการทำงานแบบ Ranging* ใช้ระยะเวลาที่แสงเดินทางจากภาคส่งสู่ภาครับสัญญาณ หรือความแตกต่างของเฟสคลื่นที่ตรวจจับได้ระหว่างที่ตำแหน่งภาคส่งกับภาครับ ในการคำนวณระยะทางระหว่างอุปกรณ์ และวัตถุ เพื่อแสดงผลเป็นตำแหน่งพิกัดพื้นผิวของวัตถุดังแสดงในรูปที่ 5 โดยความแม่นยำของตำแหน่งข้อมูลพื้นผิววัตถุขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ในการวัดเวลา และคำนวณความแตกต่างของเฟสคลื่น

- *หลักการทำงานแบบ Structure Light* ใช้วิธีฉายชุดแถบมืด-สว่าง (Fringe Pattern) ลงบนวัตถุ จากนั้นกล้องที่เป็นภาครับสัญญาณจะบันทึกภาพไว้ ดังแสดงในรูปที่ 6 เพื่อใช้ในการคำนวณหากลุ่มพิกัดจุดของพื้นผิวโดยใช้สมการ Optical Transformation [9] โดยความแม่นยำของตำแหน่งข้อมูลพื้นผิววัตถุขึ้นอยู่กับความละเอียดของกล้อง



รูปที่ 5 หลักการทำงานแบบ Ranging



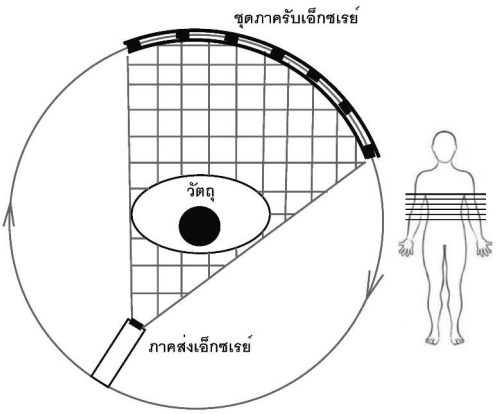
รูปที่ 6 การฉายชุดแถบมืด-สว่างลงบนวัตถุ

2.3.2 ระบบคลื่นแม่เหล็ก (Magnetic System)

อุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอยระบบคลื่นแม่เหล็กจะสร้างสนามแม่เหล็กความเข้มสูงเพื่อส่งไปยังวัตถุ อะตอมที่อยู่ภายในวัสดุจะถูกกระตุ้นเพื่อให้มีการจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบ เมื่อสิ้นสุดการกระตุ้นอะตอมจะปล่อยสัญญาณของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาและถูกบันทึกเพื่อนำมาสร้างเป็นภาพระนาบ การที่คลื่นแม่เหล็กสามารถทะลุเข้าไปภายในวัตถุได้นั้นทำให้สามารถเก็บพิกัดได้ทั้งบริเวณผิววัตถุและรูปทรงภายในวัตถุ ลักษณะงานที่ใช้อุปกรณ์ระบบคลื่นแม่เหล็กจะเป็นการสร้างแบบจำลองสามมิติของอวัยวะในร่างกายมนุษย์เพื่อช่วยให้แพทย์สามารถวินิจฉัยความผิดปกติได้สะดวก [10] โดยมีชื่อเรียกอย่างเป็นทางการว่า "เครื่องสร้างภาพด้วยเรโซแนนซ์แม่เหล็ก (Magnetic Resonance Imaging Machine)" หรือเครื่องเอ็มอาร์ไอ

2.3 ระบบคลื่นเอ็กซเรย์ (X-ray System)

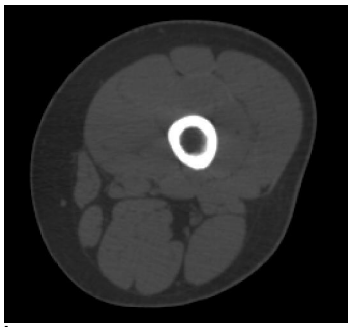
อุปกรณ์วิศวกรรมย้อยรอยประเภทนี้จะส่งคลื่นเอกซเรย์จากภาคส่งทะลุวัตถุไปยังภาครับที่อยู่ตรงข้ามกัน [11] อุปกรณ์วิศวกรรมย้อยรอยระบบคลื่นเอ็กซเรย์มักใช้ในโรงพยาบาลเพื่อใช้สร้างแบบจำลองสามมิติทางการแพทย์ โดยถูกเรียกว่าเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ หรือ “ซีทีสแกนเนอร์” (CT Scanner) จุดเด่นข้อมูลอุปกรณ์ประเภทนี้ คือ การได้ข้อมูลทั้งในส่วนของพื้นผิวและรูปทรงภายในวัตถุ [12] เช่นเดียวกับอุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอยระบบคลื่นแม่เหล็ก กระบวนการการเก็บพิกัดของวัตถุจะทำเก็บข้อมูลภาพตัดขวางเป็นช่วงตลอดวัตถุ เสมือนการตัดวัตถุที่เก็บพิกัดเป็นแผ่นบางหลายๆ แผ่น แล้วถ่ายภาพเก็บไว้ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 การทำงานของซีทีสแกนเนอร์

ภาพข้อมูลในแต่ละชั้นจะประกอบด้วยตำแหน่งและค่าเฮาวน์ฟิลด์ (Hounsfield Unit, HU) โดยค่าเฮาวน์ฟิลด์ที่ภาครับสัญญาณรับได้จะมากน้อยขึ้นกับความหนาแน่นของวัตถุ ค่าเฮาวน์ฟิลด์สูงเมื่อวัตถุมีความหนาแน่นมากและค่าเฮาวน์ฟิลด์ต่ำเมื่อวัตถุมีความหนาแน่นน้อย โดยตารางที่ 1 แสดงค่าเฮาวน์ฟิลด์ของวัสดุบางประเภท

รูปที่ 8 เป็นภาพช่วงขาที่ได้จากเครื่องซีทีสแกนเนอร์ซึ่งจะเห็นว่า กระดูกเป็นส่วนที่สว่างกว่าส่วนอื่นๆ แสดงถึงความหนาแน่นสูงกว่าส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อและกล้ามเนื้อรอบข้าง ส่วนบริเวณสีดำเป็นส่วนที่มีค่าความหนาแน่นต่ำที่สุด ซึ่งในกรณีนี้คือ อากาศ



รูปที่ 8 ภาพจากข้อมูลจากเครื่องซีทีสแกนเนอร์

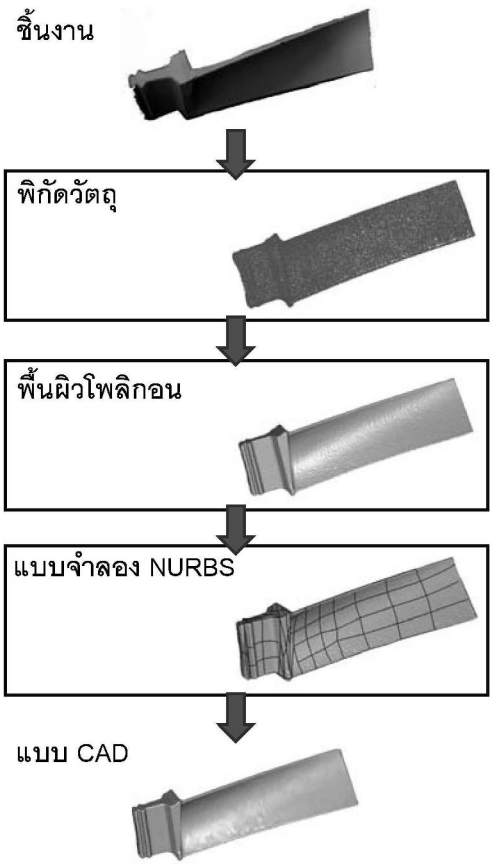
จากระบบของอุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอยทั้งหมดข้างต้น พิกัดข้อมูลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ กลุ่มพิกัดจุด และภาพภาพตัดขวางของวัตถุ ซึ่งกระบวนการสร้างแบบ CAD จากพิกัดข้อมูลทั้งสองแบบดังอธิบายในหัวข้อถัดไป

3. กระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย

การสร้างแบบ CAD จากวัตถุด้วยกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9 ซึ่งประกอบด้วยส่วน 3 ขั้นตอนหลัก โดยในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดโดยสังเขปดังนี้

ตารางที่ 1 ค่าเฮาวน์ฟิลด์ของวัสดุบางประเภท [13]

วัสดุ	ค่าเฮาวน์ฟิลด์
อากาศ	-1000
ไขมัน	-90 ถึง -70
น้ำ	0
เนื้อเยื่อ	+20 ถึง +35
กระดูกชั้นแคนเซลลัส (Cancellous)	+700
กระดูกชั้นคอร์เทกซ์ (Cortex)	+3000



รูปที่ 9 กระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย

3.1 ขั้นตอนที่ 1 การเก็บพิกัดวัตถุ (Data Acquisition)

ในขั้นตอนนี้เป็นการเลือกใช้ระบบอุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอยที่เหมาะสมกับลักษณะงาน และเตรียมเครื่องมือวิศวกรรมย้อนรอยให้พร้อมกับการใช้งาน ซึ่งอาจมีการปรับเทียบค่าการวัดทางมิติของอุปกรณ์ (Calibration) เพื่อให้ตำแหน่งพิกัดของวัตถุที่ได้มามีความเที่ยงตรง [14] ในส่วนของวัตถุที่นำมาเก็บพิกัดควรต้องจัดวางให้อยู่ในทิศทางและตำแหน่งที่สะดวกต่อการปฏิบัติงาน และให้พิกัดวัตถุที่ได้มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด ยกตัวอย่างเช่น เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จะมีการเก็บพิกัดแบบชั้น ซึ่งค่าความแม่นยำในระนาบตามขวางของวัตถุ (ภาพตัดขวาง) จะมีมากกว่าด้านยาวของวัตถุ (ตามแกนการเก็บพิกัด) ดังนั้นจึงควรให้วัตถุวางในแนวที่ระยะตามแกนการเก็บพิกัดน้อยที่สุด เป็นต้น [14] นอกจากนี้วัตถุยังควรถูกวางในลักษณะที่ผู้ปฏิบัติงานสามารถเก็บพิกัดได้ทั้งหมดในคราวเดียวเพื่อลดค่าความผิดพลาดเนื่องจากการประกอบพื้นผิวแบบจำลองวัตถุในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

หากจำเป็นแบ่งวัตถุสำหรับการเก็บพิกัดนั้นออกเป็นหลายส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัตถุที่มีขนาดใหญ่หรือซับซ้อน เช่น ฝากระโปรงหน้ารถยนต์ หรือใบกังหันก๊าซ (Turbine Blade) เป็นต้น ผู้ปฏิบัติงานควรต้องกำหนดจุดอ้างอิงร่วมเพื่อให้สามารถรวมข้อมูลพิกัดเหล่านั้นเพื่อเป็นสร้างเป็นแบบจำลองสามมิติที่สมบูรณ์ในภายหลังได้

เมื่อจัดเตรียมทั้งในส่วนของอุปกรณ์ และวัตถุแล้วจึงเริ่มเก็บพิกัดของวัตถุเพื่อบันทึกข้อมูลในรูปแบบไฟล์ที่สามารถใช้ในขั้นตอนที่ 2 ต่อไปได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วไฟล์ RAW จะใช้บันทึกข้อมูลกลุ่มพิกัดจุด และไฟล์ DICOM จะใช้บันทึกชุดภาพภาพตัดขวางของวัตถุที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ และเครื่องเอ็มอาร์ไอ

3.2 ขั้นตอนที่ 2 การสร้างผิวโพลิกอนที่สมบูรณ์ (Polygon Surface Construction)

กระบวนหลักในขั้นตอนนี้คือ คือ การคัดกรองกลุ่มกลุ่มพิกัดที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 และการปรับแต่งผิวโพลิกอนให้สมบูรณ์ โดยกระบวนการในขั้นตอนนี้นิยมใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรมย้อนรอย (Computer Aided Reverse Engineering) หรือ CARE เข้ามาช่วยเพื่อให้ความคล่องตัวในการทำงาน

อนึ่ง คำว่าพื้นผิวโพลิกอนที่กล่าวถึง เป็นลักษณะของรูปทรงสามเหลี่ยมเรียงต่อกันโดยอ้างอิงจากกลุ่มพิกัดข้อมูลที่เก็บจากอุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอยประเภทต่างๆ

วิธีการสร้างโพลิกอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 กลุ่มพิกัดจุดคาเทเซียน

ข้อมูลกลุ่มพิกัดจุดจะถูกตรวจสอบเพื่อขจัดข้อมูลพิกัดที่ไม่ต้องการออก เช่น หากวัตถุตั้งอยู่บนโต๊ะขณะทำการเก็บพิกัดด้วยอุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอยแบบไม่สัมผัส อาจทำให้มีกลุ่มพิกัดของโต๊ะติดมาด้วย ดังนั้นจึงต้องตัดกลุ่มพิกัดของโต๊ะออกให้เหลือเฉพาะส่วนที่เป็นวัตถุเพียงอย่างเดียว จากนั้นจึงทำการปรับลดจำนวนกลุ่มพิกัดลงด้วยวิธีทางสถิติต่างๆ [15] ก่อนที่จะสร้างเป็นพื้นผิวโพลิกอน

3.2.2 ชุดภาพตัดขวางของวัตถุ

ชุดภาพตัดขวางของวัตถุจะประกอบด้วยพิกัดและค่าเฮาวน์ฟิลด์ซึ่งบ่งบอกถึงค่าความหนาแน่นของวัตถุ การคัดกรองข้อมูลสำหรับข้อมูลประเภทนี้จึงเป็นการเลือก

ค่าเฮาวน์ฟิลด์ที่เหมาะสม (Threshold) ในแต่ละภาพตัดขวาง เมื่อนำส่วนที่มีค่าเฮาวน์ฟิลด์ในแต่ละภาพมาเรียงต่อจะสามารถนำมาสร้างเป็นพื้นผิวโพลิกอนได้

พื้นผิวโพลิกอนที่สร้างมาจะนำปรับแต่งผิวโพลิกอนให้มีความสมบูรณ์ เช่น การอุดรูรั่วบนพื้นผิวโพลิกอน (Filling Hole) การปรับพื้นผิวโพลิกอนให้มีความเรียบ (Smoothing) และการปรับความละเอียดของโพลิกอน เป็นต้น [16] ในการปรับแต่งผิวโพลิกอนนี้อาจรวมถึงการออกแบบต่อเติมพื้นผิวโพลิกอนที่ได้มาให้เป็นรูปทรงสำเร็จที่สามารถนำไปผลิตได้เลย ในกรณีที่วัตถุถูกจัดแบ่งพื้นที่การเก็บพิกัดเป็นหลายส่วน พื้นผิวโพลิกอนแต่ละส่วนจะนำมารวมกันในขั้นตอนนี้

พื้นผิวโพลิกอนที่สมบูรณ์มักถูกจัดเก็บในรูปแบบของไฟล์ StereoLithography (STL) หรือเรียกย่อๆ ว่า ไฟล์เอสทีแอล เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนถัดไป อย่างไรก็ดี ในกรณีที่อุปกรณ์เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตรองรับการอ่านไฟล์เอสทีแอล เช่น เครื่องขึ้นต้นแบบรวดเร็ว (RP Machine) ไฟล์เอสทีแอลที่ได้จากขั้นตอนนี้สามารถนำไปใช้ได้ทันที

3.3 ขั้นตอนที่ 3 การประมาณรูปทรงเราขาคณิตเพื่อสร้างแบบ CAD

ในขั้นตอนนี้ เนบส์ (Non-uniform rational basis spline, NURBS) ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สำหรับแทนของพื้นผิวที่มีความซับซ้อนได้ดี [17] จะถูกสร้างขึ้นบนพื้นผิวโพลิกอน เพื่อประมาณเป็นรูปทรงเรขาคณิตปฐมฐาน (Primitive Geometry) สำหรับสร้างแบบ CAD โดยคุณภาพของแบบ CAD จะขึ้นกับ 2 ปัจจัยคือ รูปแบบของตาข่ายเส้นเนบส์ (Patch Layout) และจำนวนจุดควบคุม (Control Point) รูปทรงลักษณะพื้นผิว CAD (ในแนวเวกเตอร์ U และ V) คุณภาพของ CAD จะดีขึ้นกับจำนวนตาข่ายเนบส์และจำนวนจุดควบคุมที่เหมาะสม หากมีปริมาณทั้งสองปัจจัยน้อยเกินไปจะทำให้แบบ CAD แตกต่างจากพื้นผิวโพลิกอนค่อนข้างมาก ถ้าปริมาณทั้งสองปัจจัยมากถึงแม้ว่าจะทำให้คุณภาพแบบ CAD ดีขึ้น แต่ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณเพื่อสร้างแบบ CAD จะมากขึ้นตามไปด้วย รวมถึงไฟล์ข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ตามไปด้วย แบบ CAD ที่ได้ในขั้นตอนนี้สามารถใช้สำหรับพัฒนาออกแบบรูปทรงในอนาคต นำไปผลิตด้วยเครื่องจักรต่างๆ หรือออกแบบแม่พิมพ์เพื่อผลิตปริมาณมาก

อย่างไรก็ดี สิ่งสำคัญที่สุดในการสร้างแบบ CAD จากกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอยคือ ความถูกต้องแบบ CAD ซึ่งควรมีการสอบกลับโดยนำแบบ CAD ที่ได้มาเทียบกับข้อมูลพิกัดของวัตถุดั้งต้น เพื่อให้มั่นใจว่ามีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

4. การเลือกใช้อุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอย

การใช้อุปกรณ์วิศวกรรมย้อยรอยในลักษณะงานต่างๆ ขึ้นกับปัจจัยหลายด้าน แต่ในบทความนี้จะเสนอแนวทางการเลือกใช้งานทั่วไปที่เข้าใจได้ง่าย ดังต่อไปนี้

4.1 ลักษณะรูปทรงวัตถุ

วัตถุที่มีโครงสร้างภายในอยู่ลึกจากระดับผิววัตถุ และจำเป็นต้องเก็บพิกัดควรใช้อุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอยที่ส่งสื่อกลางทะลุเข้าไปในวัตถุได้ อย่างเช่น เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์

4.2 ลักษณะเนื้อวัตถุ

ดังที่กล่าวไปข้างต้น การใช้งานอุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอยแบบสัมผัสอาจมีปัญหาในการเก็บพิกัดวัตถุที่เนื้อวัสดุที่สามารถเสียรูปได้ จึงควรใช้อุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอยแบบไม่สัมผัสแทน

4.3 ความแม่นยำ

หากต้องการความแม่นยำสูงในการเก็บพิกัดวัตถุ ควรเลือกใช้อุปกรณ์ประเภทสัมผัส แต่ในกรณีที่มีค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้กำหนดมาให้ อาจเลือกใช้อุปกรณ์ประเภทไม่สัมผัส แต่ต้องเลือกรุ่นที่มีคุณลักษณะ (Specification) ความละเอียดของอุปกรณ์ที่สูงกว่าค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้

4.4 ลักษณะพื้นผิว

อุปกรณ์ย้อนรอยแบบที่ส่งตัวกลางทะลุเข้าไปในวัตถุสามารถเก็บพิกัดวัตถุที่มีผิวที่มันวาวได้ แต่ถ้าต้องการใช้งานอุปกรณ์วิศวกรรมย้อยรอยระบบออปติกควรเคลือบด้วยแป้งชั้นบางๆ เสียก่อน

4.5 ขนาดของวัตถุ

วัตถุที่มีขนาดใหญ่ควรใช้อุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอยระบบออปติกเนื่องจากสามารถเก็บพิกัดข้อมูลครอบคลุมพื้นที่ได้มากในแต่ละครั้ง หากการเก็บพิกัดนั้นต้องแบ่งออกเป็นหลายส่วนก็จะช่วยลดจำนวนส่วนของวัตถุที่ถูกแบ่งออกได้

4.6 ความซับซ้อนของพื้นผิว

ในกรณีที่พื้นผิวมีความซับซ้อนซึ่งประกอบด้วยหลุมลึกที่ปากแคบ ควรเลือกใช้อุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอยระบบออปติกและหัวโพรบติดตั้งอยู่ โดยระบบออปติกจะช่วยเก็บข้อมูลพิกัดพื้นผิววัตถุทั่วไป ในขณะที่หัวโพรบจะช่วยเก็บข้อมูลพิกัดที่แสงเข้าไม่ถึง

5. การประยุกต์ใช้วิศวกรรมย้อนรอย

5.1 การสร้างอะไหล่ทดแทน

เมื่อผลิตภัณฑ์หรือชิ้นงานผ่านการใช้งานย่อมเกิดความเสียหายขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องสั่งอะไหล่จากผู้ผลิตมาใช้งานทดแทน แต่บ่อยครั้งที่เกิดปัญหา เช่น ผู้ผลิตยกเลิกสายการผลิตชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถจัดซื้อชิ้นส่วนได้ หรือชิ้นส่วนอาจมีราคาสูง ใช้เวลาค่อนข้างนานในการจัดซื้อ และไม่คุ้มค่าในทางธุรกิจ [18] ดังนั้นบทบาทหนึ่งของวิศวกรรมย้อนรอย คือการสร้างชิ้นงานใหม่โดยอ้างอิงจากชิ้นงานที่เกิดความเสียหาย

หลักการทั่วไปของการสร้างอะไหล่ทดแทนเริ่มจากการนำชิ้นงานที่เกิดความเสียหายมาเก็บพิกัดวัตถุเพื่อใช้สร้างแบบจำลองพื้นผิว ก่อนที่จะนำแบบจำลองพื้นผิวดังกล่าวนี้ไปปรับปรุงรูปทรงในโปรแกรม CAD ให้มีความคล้ายคลึงกับชิ้นงานที่ไม่มีการเสียหายมากที่สุดแบบ CAD ที่ผ่านการปรับปรุงนั้นจะนำไปใช้สร้างชิ้นส่วนด้วยกรรมวิธีการผลิตรูปแบบต่างๆ [18-20] ข้อสำคัญที่ควรให้ความสนใจของการสร้างอะไหล่ทดแทน คือความสมมาตรของชิ้นงาน ยกตัวอย่างเช่น เทอร์ไบน์ ซึ่งการออกแบบจำเป็นต้องพยายามรักษาความสมดุลไว้ อันเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาการหมุนที่ไม่สมดุล (Unbalance Rotation)

นอกจากการให้ความสำคัญด้านรูปทรงแล้ว ยังควรตรวจสอบวัสดุของชิ้นงานด้วย เพื่อใช้ประกอบเป็นข้อมูลในการเลือกวัสดุที่ใช้ผลิตได้อย่างถูกต้อง อันเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้ชิ้นส่วนทดแทนที่ผลิตขึ้นสามารถทำงานได้ตรงตามวัตถุประสงค์เดิมได้อย่างสมบูรณ์ [21]

5.2 การตรวจสอบผลิตภัณฑ์

เนื่องจากการประกันคุณภาพได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในระบบการผลิต จึงจำเป็นต้องตรวจสอบผลิตภัณฑ์หรือชิ้นงานภายหลังจากการขึ้นรูปเพื่อคัดกรองของเสีย และใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตให้ดีขึ้น

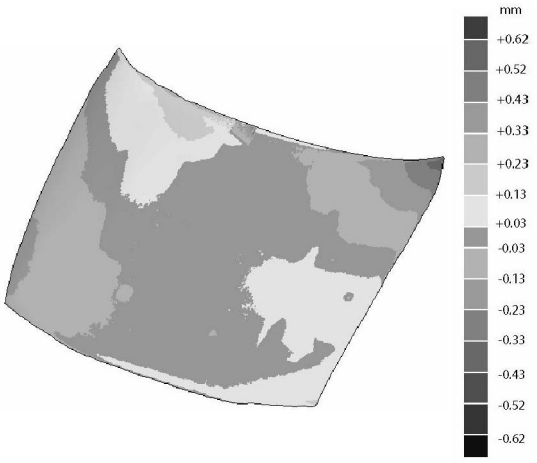
การตรวจสอบชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีวิศวกรรมย้อนรอยที่พบมากในงานอุตสาหกรรมคือ ซีเอ็มเอ็ม โดยวัดค่าทางมิติที่สำคัญๆ ที่ตกลงกันระหว่างผู้ผลิตและลูกค้า ซึ่งถูกระบุไว้ในแบบวิศวกรรม (Drawing) ด้วยสัญลักษณ์ GD&T (Geometric Dimensioning & Tolerancing) ประเภทต่างๆ ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานด้านการตรวจสอบผลิตภัณฑ์จะทราบวิธีการใช้อุปกรณ์อย่างเดียวไม่ได้ จำเป็นจะต้องศึกษาสัญลักษณ์ GD&T ให้เข้าใจอย่างถูกต้องด้วย

การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานข้างต้น อาจไม่จำเป็นต้องตรวจสอบภายหลังการผลิตเสมอไป แต่อาจกระทำขณะชิ้นงานยังอยู่ในขั้นตอนของกระบวนการผลิตได้เช่นกัน เช่น การนำหัวโพรบมาติดตั้งกับหัวจับในเครื่องกัดซีเอ็นซีเพื่อให้สามารถทราบถึงความผิดพลาดได้ทันที ทั้งนี้ เพื่อลดค่าความผิดพลาดในเรื่องการตั้งศูนย์ชิ้นงานใหม่ในเครื่องซีเอ็นซีเมื่อต้องทำการแก้ไข [22]

สำหรับอุปกรณ์แบบไม่สัมผัสนั้น มักใช้การตรวจสอบพื้นผิวชิ้นงานเป็นบริเวณกว้าง กลุ่มพิกัดที่วัดได้จากชิ้นงานจะนำมาเทียบกับแบบ CAD ที่ออกแบบไว้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรมย้อนรอย ผลที่แสดงออกมาจะอยู่ในรูปกราฟฟิกแถบสีที่บ่งชี้ถึงค่าความแตกต่างมากน้อยในแต่ละบริเวณ [3] ดังแสดงในรูปที่ 10

5.3 งานการแพทย์

ในงานการแพทย์ วิศวกรรมย้อยรอยมีบทบาทสำคัญในการสร้างแบบจำลองสามมิติที่ช่วยให้แพทย์สามารถวินิจฉัยความผิดปกติ หรือออกแบบวัตถุที่ฝังในกาย (Implant) เพื่อแก้ไขความผิดปกตินั้น ภาพตัดขวางของผู้ป่วยที่ได้เครื่องเอกซ์เรยคอมพิวเตอร์จะถูกนำมาใช้เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองสามมิติ โดยเลือกค่าเฮาวน์ฟิลด์ที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถแยกส่วนอวัยวะที่ต้องการวินิจฉัยออกมาสร้างเป็นแบบจำลองสามมิติได้ แบบจำลองสามมิติที่ได้มาอาจนำมาวางแผนเพื่อเตรียมการหรือซักซ้อมความเข้าใจสำหรับแพทย์เพื่อแก้ไขความผิดปกติ เช่น การแก้ไขความผิดปกติอาการแขนโก่ง [23] ในบางกรณีแบบจำลองที่ได้อาจนำใช้แบบวัตถุที่ฝังในกายเพื่อรักษาความผิดปกตินั้น เช่น การออกแบบกะโหลกศีรษะเทียมเพื่อปิดช่องว่างของกะโหลก เป็นต้น [24]



รูปที่ 10 ตัวอย่างกราฟฟิกแถบสีแสดงความแตกต่างระหว่างกลุ่มพิกัดที่วัดได้จากชิ้นงานและแบบ CAD

6. สรุปผล

วิศวกรรมย้อนรอย เป็นการสร้างแบบของวัตถุให้มีรูปร่างและคุณสมบัติเหมือนกับต้นแบบเพื่อใช้ในการผลิต พัฒนาต่อยอด หรือตรวจสอบ รวมถึงทดแทนการนำเข้าผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง กระบวนการวิศวกรรมย้อนรอยประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

(1) การเก็บพิกัดวัตถุ

(2) การสร้างผิวโพลิกอนที่สมบูรณ์

(3) การสร้างแบบจำลองสามมิติ

อุปกรณ์วิศวกรรมย้อยรอยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ แบบอุปกรณ์แบบสัมผัส และแบบไม่สัมผัส

อุปกรณ์แบบสัมผัสใช้ส่วนใดส่วนหนึ่งของอุปกรณ์สัมผัสกับวัตถุที่ต้องการเก็บพิกัดโดยตรง จึงทำให้มีข้อดีด้านความแม่นยำในการเก็บพิกัด ส่วนอุปกรณ์แบบไม่สัมผัสใช้สื่อคลื่นประเภทต่างๆ เข้าช่วยเก็บพิกัดของวัตถุ โดยไม่มีการสัมผัสกับวัตถุโดยตรง ข้อดีของอุปกรณ์ประเภทนี้คือ ความสะดวกรวดเร็วในการเก็บพิกัด และความสามารถในการเก็บพิกัดวัตถุที่มีโครงสร้างอยู่ลึกลงไปจากผิววัตถุได้

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพแบบจำลองสามมิติที่ได้ นอกเหนือจากการปรับแต่งพื้นผิวในโปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้ว คือการใช้อุปกรณ์วิศวกรรมย้อนรอยที่เหมาะสม โดยการเลือกใช้ ควรคำนึงถึงปัจจัยเรื่องลักษณะรูปทรง ลักษณะเนื้อวัตถุ ความแม่นยำที่ต้องการ ลักษณะพื้นผิว ขนาดและความซับซ้อนของพื้นผิววัตถุ

อนึ่ง เทคโนโลยีวิศวกรรมย้อนรอยที่นำเสนอในบทความนี้ เน้นเสนอการสร้างรูปทรงสามมิติ CAD ให้เหมือนชิ้นงานต้นแบบ ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้ในการทำงานด้านการออกแบบและขึ้นรูป นอกเหนือจากมุมมองเรื่องของรูปทรงแล้ว เทคโนโลยีวิศวกรรมย้อนรอยอาจรวมถึงมุมมองส่วนอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น การศึกษาด้านวัสดุศาสตร์ (Materials Science) ที่ให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์หาองค์ประกอบวัสดุของชิ้นงานต้นแบบ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับสร้างชิ้นงานชิ้นใหม่ ที่มีคุณสมบัติทางวัสดุเหมือนกับชิ้นงานต้นแบบ

ปัจจุบัน เทคโนโลยีวิศวกรรมย้อยรอยได้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม ทั้งในส่วนของการสร้างอะไหล่ทดแทน การตรวจสอบผลิตภัณฑ์ และการสร้างภาพสามมิติทางการแพทย์ ดังนั้น ข้อควรระวังสำคัญที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมย้อนรอย คือ จริยธรรมการนำวิศวกรรมย้อนรอยมาใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเก็บพิกัดรูปทรงผลิตภัณฑ์ หรือชิ้นงานที่มีการจดทะเบียนทรัพย์สินทางปัญญา ซึ่งอาจเป็นการละเมิดสิทธิทางกฎหมาย หรือทรัพย์สินทางปัญญาได้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] M. Sokovic and J. Kopac, “RE (Reverse Engineering) Phase by Rapid Product Development”, Journal of Materials Processing Technology 175, 2006, pp. 398–403.

[2] M. Pieraccini, G. Guidi and C. Atzeni, “3D digitizing of cultural heritage”, Journal of Cultural Heritage 2, 2001, pp. 63–70.

[3] H. Zhao, J.-P. Kruth, N. Van Gestel, B. Boeckmans and P. Bleys, “Automated dimensional inspection planning using the combination of laser scanner and tactile probe”, Measurement 45, 2012, pp. 1057–1066.

[4] D. Page, A. Koschan, and M. Abidi, "Methodologies and Techniques for Reverse Engineering–The Potential for Automation with 3-D Laser Scanners", In: V. Raja and K.J. Fernandes (Eds.), "Reverse Engineering: an Industrial Perspective", Springer, 2008.

[5] T. Varady, R.R. Martin and J. Cox, "Reverse Engineering of Geometric Models-An Introduction", Computer-Aided Design 29, 1997, pp. 255-268.

[6] N. Chantarapanich, K. Srisathitt and P. Khumpleewong, "Reverse Engineering for Mould Design and Inspection", Mould and Die Journal 25, 2013, pp. 25-30. (in-Thai)

[7] S.C. Parka and M. Chang, "Reverse engineering with a structured light system", Computers and Industrial Engineering 57, 2009, pp. 1377–1384

[8] S. Rodkwan, N. Chantarapanich, C. Chanden-duang, K. Sengpanich and S. Wanchat, "An Investigation on the Application of Optical and Laser Techniques used in 3D Scanner for Reverse Engineering Application", Proceeding of the 20th Mechanical Engineering Network of Thailand, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2006. (in-Thai)

[9] K. Galanulis, C. Reich, J. Thesing and D. Winter, "Optical Digitizing by ATOS for Press Parts and Tools", Available: http://www.gom. com/fileadmin/user_upload/industries/pressparts_ en.pdf, 25 December 2013.

[10] S. Koo, G.E. Gold and T.P. Andriacch, "Considerations in Measuring Cartilage Thickness influencing reproducibility and accuracy", Osteoarthritis and Cartilage 18, 2005, pp. 782-789.

[11] G.N. Hounsfield, Computed Medical Imaging, Science 210, 1980, pp. 22-28.

[12] S. Adler, "Reverse Engineering Employing CT for CAD/CAM Application", 3D Scanning Technologies Magazine 1, 2008, pp. 8-14.

[13] S. Rooppakhun, N. Chantarapanich and K. Sitthiseripratip, "Advanced Medical Imaging and Reverse Engineering Technologies in Craniometric Study", In: D.N. Vieira (Ed.), "Forensic Medicine - From Old Problems to New Challenges", InTech, 2011.

[14] B.R. Berbero and E.S. Ureta, "Comparative Study of Different Digitization Techniques and their Accuracy", Computer-Aided Design 43, 2011, pp. 188-206.

[15] H.-P. Xu, X.-F. Yao and Y. Tian, "Filtering of Scattered 3D Data Points in Reverse Engineering", Proceedings of the 5th International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Dalian, China, 2006.

[16] D.T. Pham and L.C. Hieu, "Reverse Engineering–Hardware and Software", In: V. Raja and K.J. Fernandes (Eds.), "Reverse Engineering: an Industrial Perspective", Springer, 2008.

[17] L. Xinmin, L. Zhongqin, H. Tian, and Z. Ziping, "A study of a reverse engineering system based on vision sensor for free-form surfaces", Computers and Industrial Engineering 40, 2001, pp. 215-227.

[18] M. Dúbravčík and Š. Kender, "Application of reverse engineering techniques in mechanics system services", Procedia Engineering 48, 2012, pp. 96-104.

[19] E. Bagci, "Reverse engineering applications for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing: Three case studies", Advances in Engineering Software 40, 2009, pp. 407–418.

[20] N. Chantarapanich, C. Raksiri, S. Chianrabutra, and S. Rodkwan, "An Application of Reverse Engineering for 3D modeling of the Fan Turbine", Conference Proceeding of the 19th Mechanical Engineering Network of Thailand, Phuket, Thailand, 2005. (in-Thai)

[21] D.K. Pal, B. Ravi, L.S. Bhargava, and U. Chandrasekhar, "Computer-Aided Reverse Engineering for Rapid Replacement Parts: A Case Study", Defense Science Journal 56, 2006 pp. 225-238.

[22] National Metal and Materials Technology Center, "Reverse engineering: the creation of new products and replacement parts", Technology Promotion Association (Thailand-Japan), 2002. (in-Thai)

[23] S. Rianmora, C. Raksiri, S. Rodkwan, K. Eiamsa-ard, "Development of rubber mould inline process and offline process inspection by touch probe", Conference Proceedings of the Annual Technical Conference, 2007, pp. 1078-1082.

[24] B. Mahaisavariya, K. Sitthiseripratip, P. Oris and T. Tongdee, "Rapid prototyping model for surgical planning of corrective osteotomy for cubitus varus: Report of two cases", Injury Extra 37, 2006, pp. 176-180.

[25] A. Müller, K. G. Krishnan, E. Uhl and G. Mast, "The application of rapid prototyping techniques in cranial reconstruction and preoperative planning in neurosurgery", The Journal of craniofacial surgery 14, 2003, pp. 899-914.