



ระบบตรวจสอบคุณภาพพื้นผิวด้วยระบบวิเคราะห์ภาพ
Surface Quality Analysis by Machine Vision

อรรถวุฒิ พัฒน์วงศ์ไพบูลย์
Atthawut Phatwongpaibool

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Computer Engineering
Prince of Songkla University

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ระบบตรวจสอบคุณภาพพื้นผิวด้วยระบบวิเคราะห์ภาพ
Surface Quality Analysis by Machine Vision

อรรถวุฒิ พัฒน์วงศ์ไพบูลย์
Atthawut Phatwongpaibool

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Computer Engineering
Prince of Songkla University

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ ระบบตรวจสอบคุณภาพพื้นผิวด้วยระบบวิเคราะห์ภาพ
ผู้เขียน นายอรรถวุฒิ พัฒน์วงศ์ไพบูลย์
สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วชรินทร์ แก้วอภิชัย)

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรชัย พฤกษ์ภัทรานนท์)

.....กรรมการ
(ดร. ประกาศิต กายะสิทธิ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วชรินทร์ แก้วอภิชัย)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มี
ส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วชรินทร์ แก้วอภิษฐ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ

(นายอรรณวุฒิ พัฒนวงศ์ไพบูลย์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

(นายอรรถวุฒิ พัฒน์วงศ์ไพบูลย์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	ระบบตรวจสอบคุณภาพพื้นผิวด้วยระบบวิเคราะห์ภาพ
ผู้เขียน	นายอรรถวุฒิ พัฒน์วงศ์ไพบูลย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการตรวจสอบคุณภาพพื้นผิวด้วยระบบวิเคราะห์ภาพ ซึ่งนำมาใช้ในการตรวจสอบชิ้นงานทางทันตกรรมที่เกิดจากการซ่อมปฏิบัติของนักศึกษาทางทันตแพทย์ โดยระบบที่ได้สร้างขึ้นสามารถหาค่าความลึก ค่าความเป็นเส้นตรง และค่าความเป็นเส้นโค้ง เพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญนำค่าไปใช้ในการตัดสินใจให้คะแนนตามคุณภาพของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากการซ่อมของนักศึกษาทันตแพทย์ เช่น ชิ้นงานมีความลึกที่เกิดจากการกรอสมำเสมอมากน้อยเพียงใด หรือร่องรอยการกรอมีความถูกต้องตามรูปแบบมากน้อยเพียงใด เป็นต้น

ระบบวิเคราะห์ภาพได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากระบบพื้นฐานของเลเซอร์สแกน ประกอบกับการคำนวณหาความลึกจากความสัมพันธ์ในการตกกระทบของแสงเลเซอร์ โดยระบบสามารถสร้างแบบจำลองระนาบสามมิติเพื่อใช้ในการคำนวณหาความลึกและรูปร่างที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจากการทดลองทดสอบหาความลึกทั้งหมด 900 จุด ที่ประกอบไปด้วยความลึกในชิ้นงานที่กรอเป็นเส้นตรงและเส้นโค้งสามารถบอกความลึกได้ถูกต้องโดยมีความแม่นยำ 91.65% ของความลึกระดับที่แตกต่างกันในระดับมิลลิเมตร

Thesis Title Surface Quality Analysis by Machine Vision
Author Mr. Atthawut Phatwongpaibool
Major Program Computer Engineering
Academic Year 2015

ABSTRACT

This report presented a system for surface inspection by machine vision. Our proposed system is adapted to inspect dental plaster model in training session (PMT). Three main parameters from our proposed system; smoothness of depth, linearity, and curve, are passed to expert to scoring.

A basis laser scan system is used in our system. Intensity and angle of incidence of each laser lines scanning are applied on PMT surface to create a virtual 3D surface of PMT. Surface characteristic especially depth of curette on PMT is extracted for scoring. Experimental results form calibration, 900 difference depth points, shows the proposed system with 91.65 % accuracy.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วชิรินทร์ แก้วอภิชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้เสียสละเวลาในการให้คำปรึกษา พร้อมทั้งแนะนำแนวคิดในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงแนะนำวิธีการแก้ไขปัญหาที่เกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างลุล่วงสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.พรชัย พฤษภัทรานนต์ ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.ประกาศิต กายะสิทธิ์ ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้ความช่วยเหลือในการประสานงานด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนเพื่อใช้ในการประชุมวิชาการ

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ บุคลากร นักศึกษาปริญญาเอก และนักศึกษาปริญญาโทภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ทุกคนที่ได้ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจในการทำงานเป็นอย่างดีเสมอมา

และท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดามารดา และครอบครัวที่ส่งเสริม และสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกๆ เรื่องจนกระทั่งข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา

อรรถวุฒิ พัฒน์วงศ์ไพบูลย์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	(5)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
สารบัญ.....	(8)
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ภาพรวมของระบบ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2 ระบบพื้นฐานของเลเซอร์แสดกน.....	12
2.3 คุณสมบัติของแสงเลเซอร์.....	13
2.4 กระบวนการที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ภาพ.....	14
2.5 การตรวจสอบอ่านค่าความลึกจากการกรอพื้น.....	15
บทที่ 3 การหาความลึกของพื้นผิวและตรวจสอบลักษณะเส้นชุดเจาะ.....	16
3.1 การออกแบบสร้างระบบ.....	17

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2 การเก็บภาพถ่ายเพื่อใช้ในการประมวลผล.....	20
3.3 กระบวนการวิเคราะห์ภาพถ่าย.....	21
3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของรอยชูดเงา.....	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	40
4.1 ผลการทดลองหาความลึก.....	40
4.2 ผลการทดลองหาค่าลักษณะของเส้นและการวางตัวของเส้นบนชิ้นงาน.....	50
บทที่ 5 บทสรุป ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	62
5.1 บทสรุปของการทำวิทยานิพนธ์.....	62
5.2 ปัญหาและข้อจำกัดของระบบ.....	63
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	63
บรรณานุกรม.....	64
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบ.....	68
ภาคผนวก ข การตีพิมพ์เผยแพร่วิทยานิพนธ์.....	78
ประวัติผู้เขียน.....	84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ปัจจุบันในการศึกษาของคณะทันตแพทยีก่อนที่นักศึกษาทันตแพทย์จะสามารถลงมือปฏิบัติในการขูดเจาะฟันของผู้ป่วยจริงจำเป็นต้องผ่านเกณฑ์การทดสอบในการขูดเจาะลงบนชิ้นงานทางด้านทันตกรรม ซึ่งแบบทดสอบจะมีอยู่สองลักษณะ คือ ขูดเจาะเป็นเส้นตรง และ ขูดเจาะเป็นเส้นโค้ง โดยเกณฑ์การให้คะแนนจะถูกตัดสินให้คะแนนจากความลึกที่เกิดขึ้นของเส้นที่ถูกขูดเจาะ และร่องรอยเส้นที่ถูกขูดเจาะมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งมากน้อยเพียงใดจากผู้เชี่ยวชาญทางด้านทันตแพทย์ ซึ่งในการตรวจสอบความลึก ความเป็นเส้นตรงและความเป็นเส้นโค้งผู้ตรวจสอบต้องทำการตรวจสอบที่ละจุดของความลึกที่อยู่บนเส้นที่เกิดจากการขูดเจาะทำให้ใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบนาน จากปัญหาดังกล่าวจึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะช่วยลดภาระของผู้เชี่ยวชาญทางด้านทันตกรรมจนเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

การตรวจสอบพื้นผิวของวัตถุโดยทั่วไปจะถูกวิเคราะห์เพื่อระบุแบ่งกลุ่มและระบุลักษณะว่าเป็นแบบใด ลักษณะของพื้นผิวมีลักษณะผิวเรียบหรือผิวขรุขระมากน้อยเพียงใด โดยลักษณะเหล่านี้จะถูกนำไปเป็นข้อมูลในการแบ่งกลุ่มและชนิดต่อไป ซึ่งกระบวนการตรวจสอบและคัดแยกชนิดส่วนใหญ่ล้วนถูกระงับด้วยการตัดสินใจจากการวิเคราะห์ของมนุษย์มาเป็นเกณฑ์การตัดสินว่าพื้นผิวนั้นๆเป็นชนิดใด ซึ่งในปัจจุบันการวิเคราะห์ด้วยการใช้ผู้เชี่ยวชาญทางด้านพื้นผิวต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์และเก็บข้อมูลเป็นเวลานานเป็นการสิ้นเปลืองทรัพยากรทางด้านเวลาและแรงงาน ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการริเริ่มและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์พื้นผิววัตถุด้วยการใช้เทคนิคต่างๆทางด้านคอมพิวเตอร์มาใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิววัตถุเพื่อลดระยะเวลาและแรงงานที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิววัตถุ

เทคนิคทางด้านคอมพิวเตอร์ที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิววัตถุส่วนใหญ่ที่นิยมนำมาใช้วิเคราะห์และพัฒนามาจะเป็นเทคนิคทางด้านการประมวลผลภาพ ซึ่งเทคนิคดังกล่าวถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบลักษณะของพื้นผิวของวัตถุที่แตกต่างกันหรือเพื่อการจัดกลุ่มไม่ว่าจะ

เป็น พื้นผิวถนน พื้นผิววัสดุ ตลอดจนนำมาใช้ในการคัดแยกผลผลิตทางการเกษตร ล้วนนำเทคนิคทางด้านการประมวลผลภาพเข้ามาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิว เพื่อทำการระบุลักษณะพื้นผิวที่สนใจไปใช้ในการวิจัยและพัฒนาในงานเฉพาะด้านต่อไป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นเนื่องจากมีความต้องการจะตรวจสอบพื้นผิววัตถุชิ้นงานทางด้านทันตกรรมที่เกิดจากการขูดเจาะของนักศึกษาทันตแพทย์ว่ามีความถูกต้องในเชิงของขนาดความลึกและความราบเรียบสม่ำเสมอของร่องที่เกิดจากการขูดเจาะมากน้อยเพียงใด เมื่อเทียบกับต้นแบบที่ต้องการโดยมีแนวคิดที่จะนำเทคนิคทางด้านคอมพิวเตอร์มาใช้ ซึ่งในอนาคตอันใกล้จะนำงานวิจัยนี้ไปต่อยอดในทางการทันตกรรมเพื่อลดระยะเวลาที่ใช้ของผู้ตรวจสอบชิ้นงานและระบุศักยภาพของนักศึกษาทันตกรรมที่ลงมือทำชิ้นงานว่าทำชิ้นงานได้ถูกต้องตามแบบที่ต้องการมากหรือน้อยเพียงใด

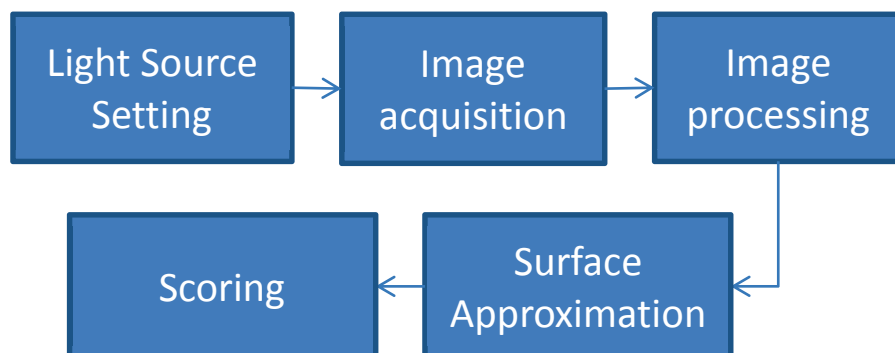
1.2 วัตถุประสงค์

1. สร้างระบบตรวจสอบคุณภาพของพื้นผิวชิ้นงานฝึกรับของนักศึกษาทันตกรรมจากภาพถ่าย
2. สร้างระบบให้คะแนนการตัดสินว่าชิ้นงานของนักศึกษาทันตกรรมนั้นผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนดหรือไม่

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถระบุได้ว่าความลึกของชิ้นงานที่เกิดจากการขูดเจาะมีขนาดถูกต้องตามที่กำหนดไว้อย่างถูกต้องแม่นยำ
2. สามารถบอกได้ว่าวัตถุชิ้นงานมีคุณภาพอยู่ในระดับใดโดยวัดจากความถูกต้องและความราบเรียบสม่ำเสมอของการขูดเจาะวัตถุชิ้นงาน

1.4 ภาพรวมของระบบ



รูปที่ 1. แสดงขั้นตอนภาพรวมของระบบ

จากรูปที่ 1. จะแสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการทำงานของระบบที่ออกแบบเพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพพื้นผิวของชิ้นงานทางทันตกรรม โดยการทำงานจะเริ่มจากการออกแบบและติดตั้งระบบ จากนั้นทำการเก็บภาพถ่ายและนำไปเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อที่จะทำการระบุความลึกจริงที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายซึ่งค่าที่ได้จะได้ค่าความลึกเพื่อให้ผู้ตรวจสอบชิ้นงานนำไปใช้ในการให้คะแนนของผู้ลงมือปฏิบัติชิ้นงานต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัย หลักการ และกระบวนการที่เกี่ยวข้องของการพัฒนา งานวิจัยโครงการนี้ ซึ่งจะกล่าวถึงข้อดีและข้อด้อยของกระบวนการที่ได้ทำการศึกษาและค้นคว้า เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสมมาประยุกต์ใช้งาน

ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้กระบวนการและวิธีการที่ใช้แสงเลเซอร์ในระบบตรวจสอบ คุณภาพพื้นผิว เนื่องจากกระบวนการตรวจสอบคุณภาพพื้นผิวที่ได้ทำการศึกษา มีผลลัพธ์ที่ดีกว่า วิธีอื่นดังที่จะนำเสนอในหัวข้อที่ 2.1 และจะกล่าวถึงหลักการติดตั้งระบบเลเซอร์สแกนในหัวข้อที่ 2.2 คุณสมบัติและการตกกระทบของแสงเลเซอร์ในหัวข้อที่ 2.3 กระบวนการที่ใช้ในการ วิเคราะห์ภาพถ่ายในหัวข้อที่ 2.4 และสุดท้ายจะนำเสนอการวัดความลึกด้วยการใช้เครื่องมือวัด ในหัวข้อที่ 2.5

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในโครงการที่ทำการวิจัยนี้จะใช้วิธีการตรวจสอบพื้นผิวด้วยการใช้ระบบ ประมวลผลภาพมาทำการตรวจสอบคุณภาพของพื้นผิวของวัตถุชิ้นงาน ดังนั้นจึงได้ศึกษาและ นำเสนอวิธีการที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพเพื่อวิเคราะห์และตรวจสอบ คุณภาพพื้นผิวโดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆดังที่จะนำเสนอต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยการใช้การประมวลผลภาพ
2. การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยการใช้การประมวลผลภาพโดยใช้การฉายแสงลงบนวัตถุ
3. การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยการใช้การประมวลผลภาพโดยใช้การฉายแสงเลเซอร์ลง บนวัตถุ

2.1.1 การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยการใช้การประมวลผลภาพ

การวิเคราะห์พื้นผิวโดยการใช้การประมวลผลภาพ วิธีการที่ใช้ในกลุ่มนี้จะทำการนำภาพถ่ายพื้นผิวของวัตถุแบบปกติที่ไม่มีการฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงใดๆลงสู่วัตถุชิ้นงานมาผ่านกระบวนการPreprocessing แล้วนำมาเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ภาพเพื่อหาคุณลักษณะเด่นของพื้นผิววัตถุที่ทำการตรวจสอบเพื่อใช้ในการจำแนกกลุ่มของพื้นผิวที่ทำการทดสอบ หรือนำไปใช้ในระบุจำเพื่อตรวจสอบแยกแยะความคล้ายของพื้นผิววัตถุดังเช่นในงานของ DONG Zhi-guo และทีมงานวิจัย [9]

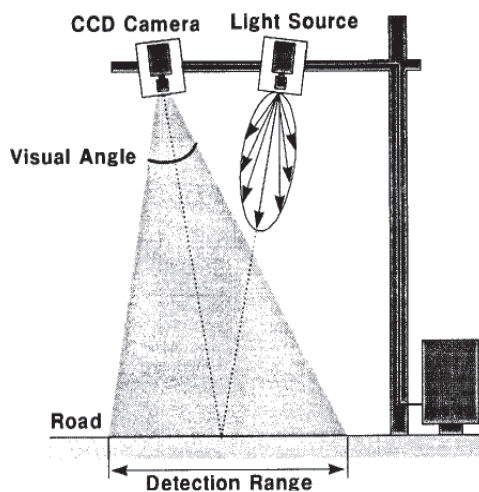
กระบวนการวิเคราะห์พื้นผิวในกลุ่มนี้สามารถแยกแยะ ระบุ และจัดกลุ่มลักษณะของพื้นผิวที่ทำการตรวจสอบได้แต่มีจุดด้อย คือการตรวจสอบในกลุ่มนี้ไม่สามารถบอกถึงรายละเอียดและความละเอียดของลักษณะของพื้นผิวที่ได้ทำการตรวจสอบได้อย่างชัดเจน กล่าวคือ วิธีการในกลุ่มนี้ไม่สามารถบอกได้ว่าพื้นผิวที่ได้ทำการตรวจสอบมีขนาดความลึกหรือขรุขระมากน้อยเพียงใด

2.1.2 การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยการใช้การประมวลผลภาพโดยการใช้การฉายแสงลงบนวัตถุ

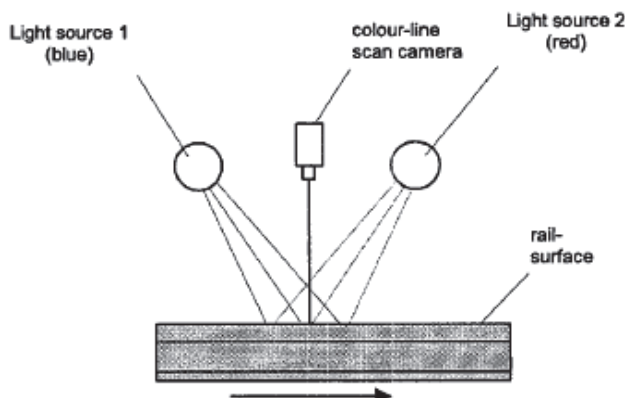
การวิเคราะห์พื้นผิวโดยการใช้การประมวลผลภาพโดยการใช้การฉายแสงลงบนวัตถุที่ต้องการทำการตรวจสอบเป็นวิธีการตรวจสอบพื้นผิวที่ใช้การประมวลผลภาพเช่นเดียวกับกลุ่มแรกโดยมีความแตกต่างกับวิธีการในกลุ่มแรกคือการฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงลงบนพื้นผิววัตถุที่ต้องการตรวจสอบหลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาผ่านกระบวนการ Preprocessing แล้วนำไปวิเคราะห์ผลซึ่งการตรวจสอบพื้นผิวด้วยวิธีการในกลุ่มนี้ จะเน้นไปทางด้านการวัดค่าความเข้มของแสงที่เกิดจากการฉายแสงให้ตกกระทบลงบนพื้นผิววัตถุแล้วสะท้อนกลับมาเข้าสู่เครื่องมือวัด (sensor) ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ CCD Camera เป็นเครื่องมือในการวัดจากนั้นนำค่าความเข้มแสงที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวในลำดับต่อไป

กระบวนการวิเคราะห์ที่พื้นผิวในกลุ่มนี้สามารถระบุเอกลักษณ์ของพื้นผิวได้ดีกว่าวิธีการใช้การประมวลผลภาพโดยไม่ใช้การฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงลงบนพื้นผิววัตถุ โดยสามารถบอกรายละเอียดของพื้นผิวได้ในระดับหนึ่งซึ่งเป็นการแก้ไขข้อด้อยของวิธีการตรวจสอบพื้นผิวในกลุ่มวิธีการแรก

ในการฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบบนพื้นผิววัตถุจะต้องทำการติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงและเครื่องมือวัดให้ทำมุมกับพื้นผิวที่นำมาใช้วิเคราะห์โดยลักษณะการติดตั้งจะมีรูปแบบที่ใกล้เคียงกันแต่ต่างกันในเรื่องขององศาของเครื่องมือวัดและจำนวนของแหล่งกำเนิดแสง จะเห็นได้จากการวิจัยของ Hiroshi FUKUI และทีมงาน [1] เป็นงานวิจัยที่ใช้วิธีการตรวจสอบพื้นผิวถนนโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงฉายลงบนพื้นผิวของถนนซึ่งในงานนี้ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2. และในผลงานงานวิจัยของ E.Deutschl และ ทีมงาน [2] เป็นงานวิจัยที่ใช้วิธีการตรวจสอบตัวอักษรบนพื้นผิวของโลหะโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงสองสีฉายลงบนพื้นผิว ให้ตกกระทบบนวัตถุที่ต้องการตรวจสอบแล้วสะท้อนกลับ เข้าสู่เครื่องมือวัด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ Colour-line scan camera เป็นตัววัดค่า



รูปที่ 2. Optical configuration [1]



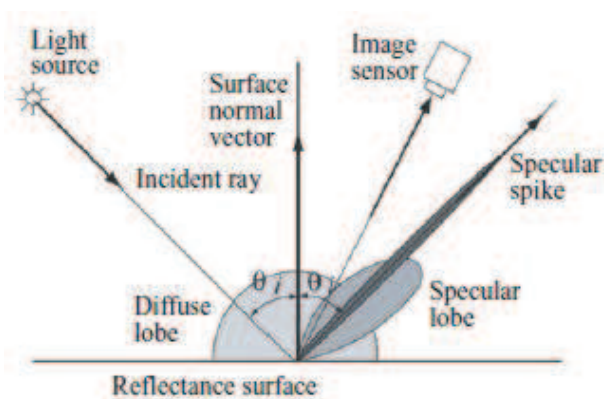
รูปที่ 3. Configure Illumination method [2]

จากรูปที่ 2. และ รูปที่ 3. จะเห็นได้ว่าการจัดวางตัวของอุปกรณ์ เพื่อตรวจสอบพื้นผิวโดยการใช้แสงฉายลงบนพื้นผิววัตถุจะมีการจัดวางตัวในลักษณะที่คล้ายคลึงกันดังที่กล่าวไว้ในข้างต้นผลลัพธ์โดยรวมคือสามารถระบุได้ว่าพื้นผิวที่ทำการตรวจสอบนั้นมีลักษณะอย่างไร

2.1.3 การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยการใช้การประมวลผลภาพโดยใช้การฉายแสงเลเซอร์ลงบนวัตถุ

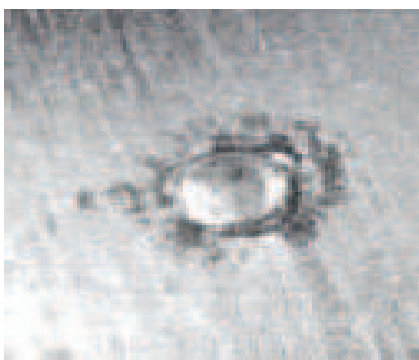
การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยการใช้การประมวลผลภาพโดยใช้การฉายแสงเลเซอร์ลงบนวัตถุ ซึ่งวิธีการในกลุ่มนี้จะเป็นการใช้แสงจากเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งแสงที่เกิดจากเลเซอร์นั้นเป็นแสงที่มีค่าความเข้มแสงสูงมากกว่าการใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบปกติ ช่วยทำให้การรบกวนจากสัญญาณแสงภายนอกระบบลดน้อยลง เป็นผลให้วิธีการดังกล่าวสามารถระบุลักษณะของพื้นผิวได้ละเอียดกว่าวิธีการตรวจสอบพื้นผิวด้วยการฉายแสงแบบปกตินั้นคือสามารถบอกลักษณะของพื้นผิวว่าขรุขระ มีร่องรอยขีดข่วนได้ในระดับมิลลิเมตร

หลักการของการฉายแสงเลเซอร์ลงบนพื้นผิวของวัตถุ เพื่อทำการตรวจสอบนั้นมีหลักการคล้ายคลึงกับการใช้การฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงแบบปกติ ที่ใช้การฉายแสงลงบนพื้นผิววัตถุแล้วรับค่าของแสงที่เกิดจากการสะท้อนกลับด้วยเครื่องมือวัด โดยการสะท้อนกลับของแสงจะมีองค์ประกอบหลักอยู่ 3 อย่าง คือ The Diffuse Lobe , The Specular Lobe และ The Specular Spike [3,4] ซึ่งองค์ประกอบทั้ง 3 อย่างเกิดจากการตกกระทบของแสงที่ฉายลงสู่วัตถุแล้วสะท้อนกลับ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.

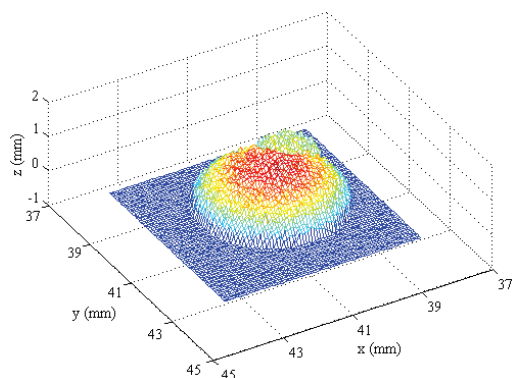


รูปที่ 4. Surface reflectance [3]

เมื่อได้วัดค่าการสะท้อนกลับของแสงหลังจากการตกกระทบแล้วในงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ใช้การฉายแสงเลเซอร์ลงบนวัตถุเช่นงานวิจัยของ Kozo Ohtan และ ทีมงาน[3] , Awei Zhou และ ทีมงาน[5] และ Ghassan A. Al-Kindi [6] จะนำค่าที่ได้ไปสร้างแบบจำลองพื้นผิวสามมิติ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองสามมิติกับลักษณะของพื้นผิว ในที่นี้จะยกตัวอย่างจากงานวิจัยของ Awei Zhou โดยมีตัวอย่างพื้นผิวของวัตถุดังที่แสดงในรูปที่ 5. และผลจากการสร้างแบบจำลองสามมิติจากค่าที่วัดได้หลังจากฉายแสงเลเซอร์ตกกระทบลงบนวัตถุดังที่แสดงในรูปที่ 6.



รูปที่ 5. Gray image with the defect [5]



รูปที่ 6. 3-D display form intensity value [5]

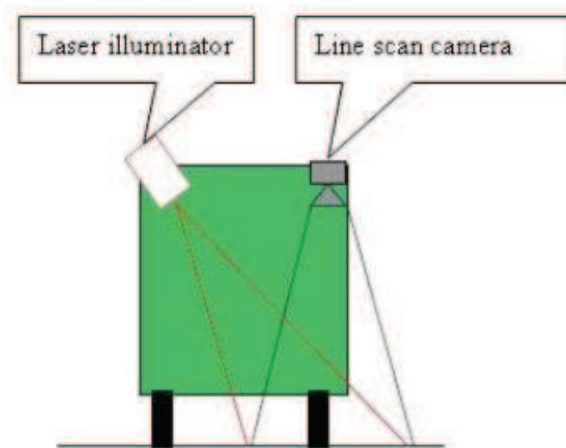
จากรูปที่ 5. และรูปที่ 6. แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามมิติที่สร้างจากค่าที่วัดในงานวิจัยของ Awei Zhou มีลักษณะใกล้เคียงกับพื้นผิวต้นแบบที่ใช้ในการทดลองซึ่งสามารถบอกได้ว่าพื้นผิวมีลักษณะแบบใดและขนาดเท่าใดบอกได้จากความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและค่าความเข้มแสง

ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวกับความเข้มแสงนั้นจากงานวิจัยของ Hisashi Hirabayashi และทีมงาน [7] ได้สรุปผลการวิจัยไว้ว่าพื้นผิวที่มีความเรียบมันวาวจะมีค่าพลังงานความเข้มแสงที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับพื้นผิวที่มีความหยาบหรือขรุขระมากกว่าในงานวิจัยของ Hisashi Hirabayashi จะแสดงความสัมพันธ์ดังที่รูปที่ 7. ที่แสดงตารางที่มีค่าลักษณะของพื้นผิว 7 ระดับตั้งแต่พื้นผิวมีลักษณะมันวาวไปจนขรุขระ ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวได้ใช้ชื่อของพื้นผิวที่ทำการทดลองเป็นตัวเลขโดยตัวเลขของชื่อของพื้นผิวมากหมายถึงพื้นผิวที่มีความราบเรียบและมันวาวมากชื่อตัวเลขน้อยหมายถึงพื้นผิวที่มีลักษณะขรุขระดังที่แสดงในรูปที่ 7.

Sample name	Number of peaks
#800	126
#600	110
#400	93.0
Un-grinding	82.6
#240	85.2
#100	74.1
Roughest	94.2

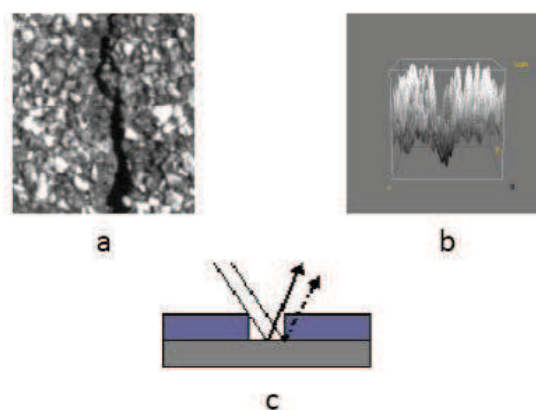
รูปที่ 7. The number of peaks [7]

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ N.T.Sy, M.Avila, S.Begot, J.C.Batrdet และ T.S. NGUYEN [13,14] แสดงถึงวิธีการตรวจสอบรอยแตกของพื้นผิวถนนด้วยวิธีการตรวจสอบการตกกระทบจากการฉายแสงเลเซอร์ลงบนพื้นผิวถนนที่ต้องการตรวจสอบและอ่านค่าด้วยกล้อง โดยสามารถแสดงระบบดังกล่าวได้ดังรูปที่ 8.



รูปที่ 8. System for acquiring of road surface [13]

จากรูปที่ 8. เป็นระบบที่ใช้ตรวจสอบรอยแตกของถนนซึ่งใช้การฉายแสงเลเซอร์ลงบนพื้นผิวถนนจากนั้นทำการเก็บภาพจากกล้องไปสู่กระบวนการวิเคราะห์ภาพถ่าย เพื่อตรวจสอบรอยแตกบนพื้นผิวถนนโดยสามารถนำข้อมูลจากการประมวลผลมาแสดงได้ดังรูปที่ 9.



รูปที่ 9. Crack on a strong texture surface (a), its 3D profile of grey level (b), model of illumination on a crack (c) [13]

จากรูปที่ 9. (c) แสดงถึงรูปแบบการสะท้อนของแสงเลเซอร์เมื่อเจอรอยแตกของพื้นผิวถนนและเมื่อนำภาพถ่ายพื้นผิวในรูปที่ 9.(a) มาทำการวิเคราะห์จะสามารถสร้างเป็นระนาบสามมิติได้ดังที่แสดงในรูปที่ 9. (b) โดยระบบนี้สามารถระบุตำแหน่งรอยแตกบนพื้นผิวถนนได้อย่างดี

จากที่ได้นำเสนอวิธีการตรวจสอบพื้นผิวด้วยการใช้ระบบประมวลผลภาพแบบต่างๆทั้ง 3 กลุ่มวิธีการในข้างต้นเราสามารถสร้างตารางเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1. ตารางเปรียบเทียบวิธีการตรวจสอบ

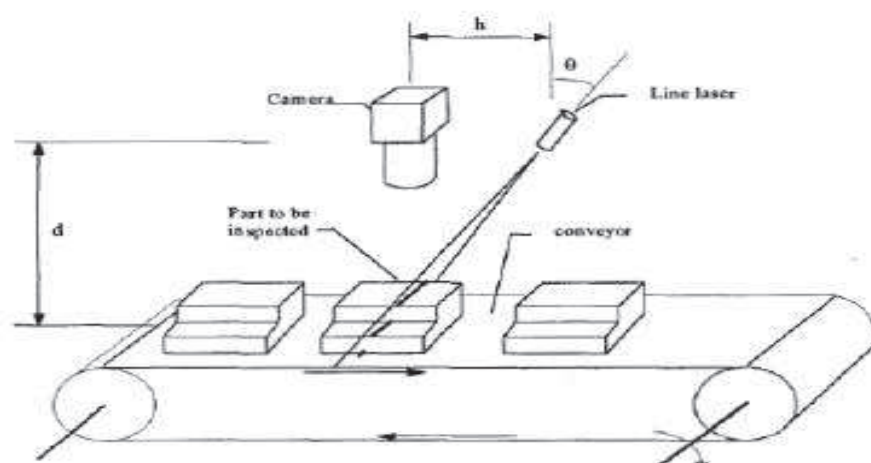
วิธีการ	ราคา	ความเร็ว	ความซับซ้อนของระบบ	ผลลัพธ์
ประมวลผลภาพปกติ	ถูก	เร็ว	ง่าย	รายละเอียดต่ำ
ประมวลผลภาพโดยใช้การฉายแสง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	รายละเอียดปานกลาง
ประมวลผลภาพโดยใช้การฉายแสงเลเซอร์	แพง	ปานกลาง	ปานกลาง	รายละเอียดสูง

จากตารางที่ 1. สามารถสรุปได้ว่าการใช้ระบบประมวลผลภาพปกติมีข้อดีในเรื่องของ ราคา ความเร็ว ความซับซ้อนของระบบ แต่ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าต่ำกว่าอีกสองวิธีการที่ใช้การฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงปกติและการใช้การฉายแสงจากเลเซอร์ซึ่งสองวิธีการนี้ระบบความซับซ้อนมากกว่าการประมวลผลภาพปกติแต่ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า โดยในการใช้การฉายแสงเลเซอร์จะมีราคาค่อนข้างสูงแต่ผลลัพธ์ที่ได้ก็ดีที่สุด

จากการศึกษางานวิจัยในการตรวจสอบพื้นผิวด้วยวิธีการต่างๆที่ได้นำเสนอและสรุปข้อดีข้อเสียแต่ละวิธีการในตอนต้นทำให้ได้แนวคิดที่จะนำวิธีการประมวลผลภาพถ่ายโดยใช้แสงเลเซอร์มาประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการนำเสนอวิธีการเพื่อใช้ในการตรวจสอบหาความลึกและลักษณะของเส้นที่เกิดจากการขูดเจาะในระดับมิลลิเมตรพร้อมทั้งต้องการรายละเอียดเพื่อสร้างระนาบสามมิติของชิ้นงานจริง ซึ่งวิธีการประมวลผลภาพถ่ายโดยใช้แสงเลเซอร์มีความเหมาะสมมากกว่าวิธีอื่นๆ

2.2 ระบบพื้นฐานของเลเซอร์สแกน

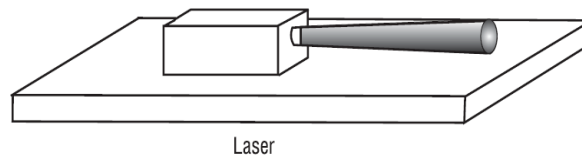
ในส่วนนี้จะนำเสนอวิธีการที่ใช้แสงจากเลเซอร์ เป็นแหล่งกำเนิดแสงซึ่งแสงที่เกิดขึ้นจากเลเซอร์ นั้นเป็นแสงที่มีค่าความเข้มแสงสูงที่เกิดจากคลื่นความถี่ของแสงในช่วงแคบๆ ทำให้เมื่อเปรียบเทียบการใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์กับการใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบปกติจะพบว่าการรบกวนจากแสงภายนอกระบบเข้ามารบกวนได้น้อยกว่า ในการติดตั้งวัตถุและอุปกรณ์ของระบบนี้โดยพื้นฐานแล้วจะทำการติดตั้งดังที่แสดงในรูปที่ 10. โดยภายในระบบจะทำการเลื่อนวัตถุที่ต้องการทำการตรวจสอบผ่านแสงเลเซอร์ แล้วทำการเก็บข้อมูลด้วยกล้องเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาหาค่าพลังงานและความเข้มแสงที่เกิดจากการสะท้อนกลับหลังจากตกกระทบลงบนวัตถุที่ต้องการตรวจสอบ



รูปที่ 10. Basic laser scanner [10]

2.3 คุณสมบัติของแสงเลเซอร์

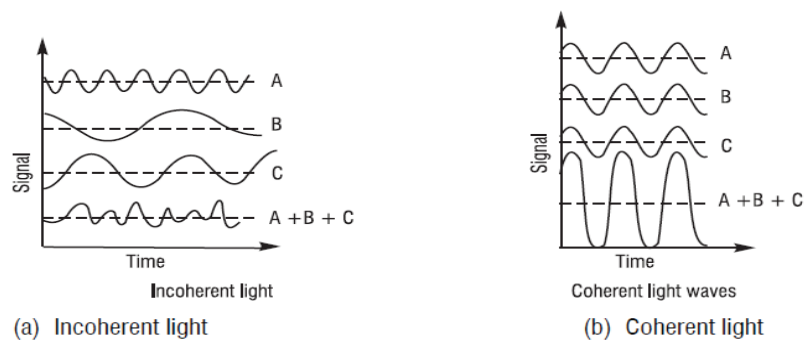
1. **Collimation** เป็นคุณสมบัติของแสงเลเซอร์ที่ลักษณะของรังสีจะเดินทางขนานกันเกือบจะเป็นเส้นตรง (highly directional beam) จึงทำให้สามารถเดินทางได้ไกลมากดังที่แสดงในรูปที่ 11.



รูปที่ 11. Concentrated directionality of laser light [12]

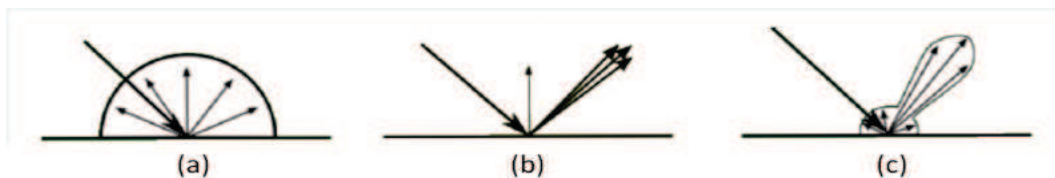
2. **Monochromaticity** เป็นคุณสมบัติของแสงเลเซอร์ที่แตกต่างจากแสงปกติคือ รังสีของแสงเลเซอร์อยู่ในช่วงความถี่ที่แคบทำให้สีของลำแสงเลเซอร์มีสีเดียวกัน

3. **Coherent light** เป็นคุณสมบัติเด่นของแสงเลเซอร์ที่แตกต่างจากแสงปกติคือ รังสีของแสงเลเซอร์จะเดินทางอยู่ในเฟสความยาวคลื่นที่เท่ากัน ดังที่แสดงในรูปที่ 12.



รูปที่ 12. Adding coherent and incoherent light waves [12]

ในการตกกระทบของแสงเลเซอร์ ลงบนพื้นผิวจะมีการสะท้อนกลับของแสงโดยมีลักษณะการเกิดการกระเจิงของแสงที่เป็นองค์ประกอบหลักๆ อยู่ 3 รูปแบบคือ Diffusal reflection, Nearly ideal specular reflection, และ Mixed diffuse and specular reflection [10] องค์ประกอบทั้ง 3 อย่างนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 13.



รูปที่ 13. (a) Diffusal reflection, (b) Nearly ideal specular reflection ,
(c) Mixed diffuse and specular reflection [10]

2.4 กระบวนการที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ภาพ

2.4.1 Preprocessing









กระบวนการนี้มีจุดมุ่งหมายในจัดเตรียมภาพถ่ายที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากระบบที่สร้างขึ้น เพื่อระบุส่วนที่สนใจ กำจัดสัญญาณรบกวน และอื่นๆซึ่งเป็นการเตรียมข้อมูลให้มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้วิเคราะห์เพื่อระบุลักษณะพื้นผิวต่อไป ซึ่งกระบวนการในการทำ Preprocessing เพื่อกำจัดข้อมูลรบกวนมีหลายวิธีเช่น การทำAveraging Filter การหาค่ากลาง การหาค่าเฉลี่ย หรือการทำGaussian Filters [8,15,16] เป็นต้น วิธีการเหล่านี้จะช่วยในการลดจำนวนข้อมูลที่รบกวนต่อการประมวลผลภาพจากภาพถ่ายทำให้ได้ภาพที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ภาพถ่าย นอกจากการกำจัดข้อมูลรบกวนแล้วในกระบวนการ Preprocessing ยังรวมไปถึงการระบุตำแหน่งวัตถุที่ต้องการบนภาพถ่ายโดยมีวิธีการอย่างง่ายที่พบบ่อยคือ การทำ Color Threshold [17-20] เป็นการใช้ค่าความแตกต่างของค่าสีเพื่อหาตำแหน่งของวัตถุที่สนใจ

2.4.2 Feature Extraction

กระบวนการนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อหาคุณสมบัติเฉพาะที่นำมาใช้ระบุวัตถุในภาพ มีลักษณะอย่างไร เป็นวงกลม เป็นเส้นตรง หรือ เป็นเส้นโค้ง ซึ่งกระบวนการตรวจสอบเหล่านี้มีกระบวนการคิดที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะของข้อมูล เช่นกระบวนการทำ Hough transform [21-23] นำมาใช้เพื่อจำแนกหาวงกลมหรือวงรีของวัตถุที่อยู่ในภาพ หรือการนำข้อมูลมาเข้าสู่กระบวนการ Fitting [24-25] โดยกระบวนการFitting เป็นวิธีคิดด้วยการคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ของกลุ่มข้อมูลเพื่อระบุว่ากลุ่มข้อมูลนั้นมีลักษณะแบบใดเป็นวงรีหรือมีความเป็นเส้นตรง เส้นโค้งมากน้อยแค่ไหนซึ่งจะถูกแสดงด้วยค่า Least Square

2.5 การตรวจสอบอ่านค่าความลึกจากการกรอฟัน

การตรวจสอบหาความลึกจากการกรอฟันของทันตกรรมในปัจจุบันนั้นทำโดยการ
ใช้เครื่องมือวัดของทันตกรรมที่มีชื่อว่า *Periodontal Probe* เป็นเครื่องมือวัดที่ใช้วัดขนาดความลึก
หรือหาระยะของร่องฟันสามารถทำได้โดยการอ่านค่ามาตราส่วน (Scale) จากตัวเครื่องมือที่ใช้วัด
ซึ่งในปัจจุบันได้มีการออกแบบพัฒนาให้มีหลากหลายรูปแบบเพื่อสะดวกในการใช้งานในลักษณะ
ต่างๆ ดังเช่นที่ยกตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 14.

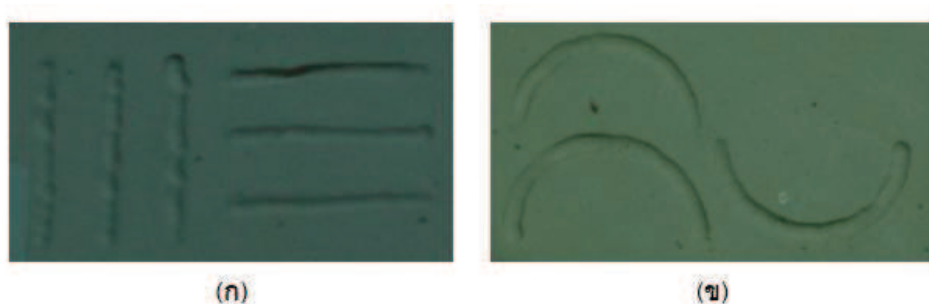
Style	PCP 12 Marquis	PCV 12 ColorVue	UNC-12 (or 15)	PQO Michigan-O	PQW Williams	P26G Glickman	P3/4 Cattoni	PGF Goldman-Fox
								
Marks	3-6-9-12	Marquis (shown) Williams style UNC 12 style	1-2-3-4-5-6-7- 8-9-10-11-12	3-6-8 (shown) or w/ Williams markings	1-2-3-5-7-8- 9-10	1-2-3-5-7-8- 9-10	3-6-9-12	1-2-3-5-7-8- 9-10

รูปที่ 14. ภาพแสดงตัวอย่างลักษณะของ Periodontal Probe [26]

บทที่ 3

การหาความลึกของพื้นผิวและตรวจสอบลักษณะเส้นขูดเจาะ

จากหัวข้อความสำคัญและที่มาของงานวิจัยที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ทำให้เกิดความคิดที่จะสร้างระบบตรวจสอบพื้นผิวเพื่อจะนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ต่อยอดในทางทันตกรรม ซึ่งปัจจุบันทางคณะทันตแพทยศาสตร์ส่วนใหญ่ได้มีการทดสอบนักศึกษาโดยการให้ฝึกหัดขูดเจาะหรือที่เรียกว่าการ “กรอ” ลงบนชิ้นงานและให้คะแนนเพื่อวัดคุณภาพก่อนจะลงมือปฏิบัติกับคนไข้จริง โดยจากข้อมูลที่ได้ไปรับมาเป็นข้อมูลตัวอย่างเพื่อนำมาทำงานวิจัย จะเป็นชิ้นงานดังรูปที่ 15.



รูปที่ 15. ภาพแสดงลักษณะของตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในทางทันตกรรม

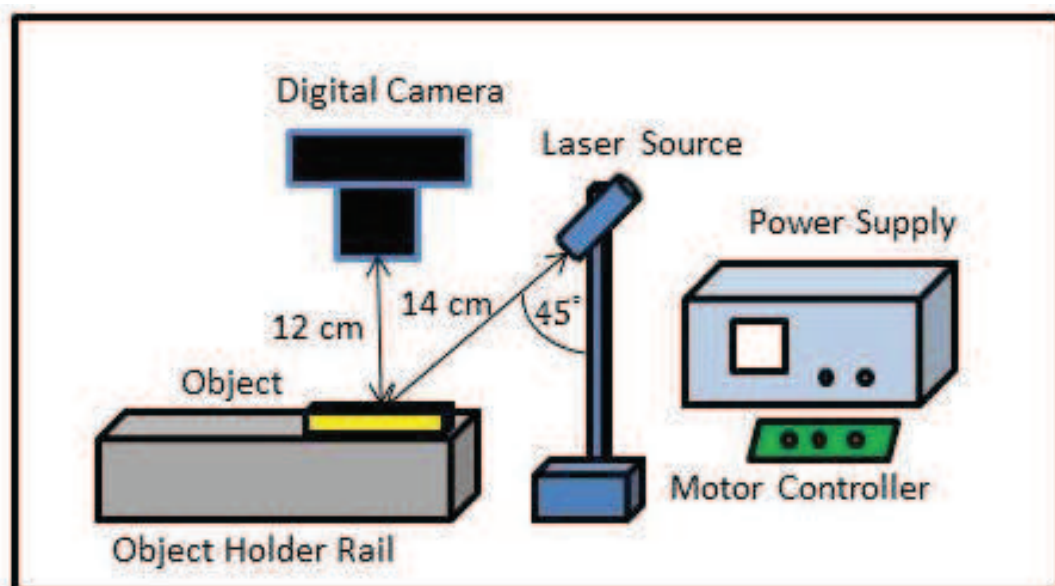
จากรูปที่ 15. จะเห็นได้ว่าลักษณะของชิ้นงานที่ใช้ในทางทันตกรรมที่ได้นำมาทดสอบนั้นมีสองลักษณะคือ ชิ้นงานที่เกิดจากการกรอเป็นเส้นตรงที่แสดงในรูปที่ 15. (ก) และ ชิ้นงานที่เกิดจากการกรอเป็นเส้นโค้งดังที่แสดงในรูปที่ 15. (ข)

หลังจากที่ได้ทำการศึกษางานวิจัยและหลักการต่างๆที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพพื้นผิวจึงตัดสินใจที่จะใช้วิธีการที่เกิดจากการตกกระทบของแสงเลเซอร์ลงบนพื้นผิวที่ต้องการเข้ามาช่วยในการเก็บภาพถ่ายเพื่อสร้างคุณลักษณะให้เกิดขึ้นบนภาพถ่าย และจะนำคุณลักษณะที่เกิดขึ้นมาใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ภาพถ่าย เพื่อบ่งบอกถึงระดับความลึกที่อยู่บนพื้นผิวชิ้นงานจริง โดยสาเหตุที่เลือกวิธีการนี้เนื่องจากวิธีการที่ได้ไปทำการศึกษาค้นคว้าวิธีการที่ใช้แสงเลเซอร์เข้ามาใช้เพื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวมีผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีอื่นดังที่ได้นำเสนอไปในบทที่ 2 แต่ในการใช้วิธีนี้นั้นระบบที่ถูกรออกแบบมาใช้ส่วนใหญ่จะมีราคาสูงเนื่องจากเป็นระบบเฉพาะด้านโดยจะใช้แสงเลเซอร์คู่กับเซนเซอร์เฉพาะทาง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการนำวิธีการดังกล่าว

มาประยุกต์ใช้โดยนำกล้องถ่ายภาพรูปดิจิทัลที่หาได้ง่ายมาใช้แทนเซนเซอร์เฉพาะทางเพื่อลดราคาต้นทุนของระบบ

3.1 การออกแบบสร้างระบบ

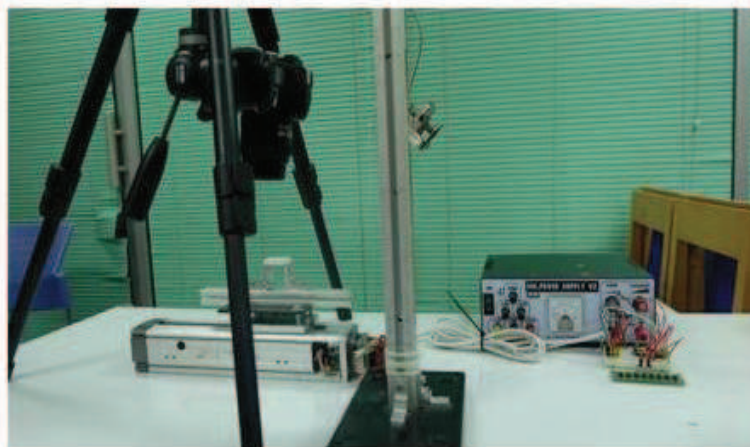
จากการศึกษาพื้นฐานทฤษฎีการทำงานของระบบเลเซอร์แอสกนเนอร์และศึกษาจากงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการตรวจสอบวัดคุณภาพพื้นผิวผนวกกับการทำการทดลองงานวิจัยขั้นต้นแล้วจึงทำให้ได้แนวคิดในการออกแบบระบบที่จะนำมาใช้ในการเก็บภาพถ่ายดังที่จะแสดงในรูปที่ 16.



รูปที่ 16. ภาพแสดงระบบที่ออกแบบ[14]

จากรูปที่ 16. ระบบที่ได้ออกแบบจะประกอบไปด้วย กล้องถ่ายภาพแบบดิจิทัล (Digital Camera) แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์(Laser Source) รางที่ใช้สำหรับเคลื่อนที่วัตถุ (Object Holder Rail) แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า(Power Supply) และตัวควบคุมมอเตอร์สำหรับรางเคลื่อนที่วัตถุ(Motor Controller)

หลังจากทำการออกแบบระบบเพื่อใช้ในการเก็บภาพพื้นผิววัตถุของที่ต้องการแล้วจึงได้ทำการติดตั้งระบบจริงดังที่แสดงในรูปที่ 17.



รูปที่ 17. ภาพแสดงระบบที่ติดตั้ง

ระบบที่ออกแบบจะทำการติดตั้งโดยการกำหนดให้กล้องถ่ายภาพดิจิทัลและแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์อยู่กับที่ไม่เคลื่อนไหวและระยะตามที่กำหนดไว้ โดยในระบบที่ออกแบบในงานวิจัยนี้ได้ใช้กล้องดิจิทัล Nikon D70 ที่มีความละเอียดของไฟล์ภาพ 6.1 ล้านพิกเซลและใช้เลนส์ 40 มิลลิเมตร และในส่วนของรางที่ใช้เคลื่อนที่วัตถุได้ออกแบบให้ถูกขับเคลื่อนโดยควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งได้เลือกใช้บอร์ดควบคุม อาดูโน่ (Arduino) เนื่องจากหาได้ง่ายอีกทั้งยังง่ายต่อการควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนและมีราคาถูก

3.1.1 กล้องที่ใช้เก็บภาพถ่ายในระบบ

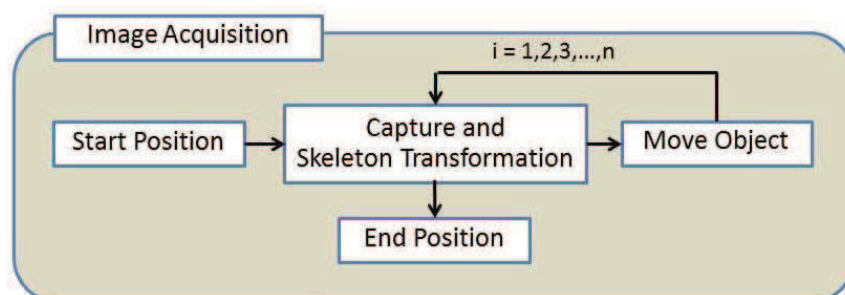
.จากระบบที่ได้ทำการออกแบบได้เลือกใช้กล้อง Nikon D70 ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นซึ่งกล้องดิจิทัลดังกล่าวสามารถเก็บภาพถ่ายได้หลายขนาดดังต่อไปนี้ 3008 x 2000, 2240 x 1488, 1504 x 1000 พิกเซล โดยในการออกแบบระบบนี้จะเก็บไฟล์ภาพที่ขนาด 3008 x 2000 พิกเซล เนื่องจากระบบที่ออกแบบเมื่อทำการติดตั้งจะทำการสอบเทียบค่าของระยะจริงต่อค่าของพิกเซลซึ่งจะทำการนำเสนอในลำดับถัดไป ดังนั้นหากทำการเปลี่ยนความละเอียดหรือขนาดของภาพจะส่งผลทำให้การคำนวณหาความลึกเปลี่ยนไปแต่สามารถแก้ไขได้โดยการทำการสอบเทียบค่าของระบบใหม่เพื่อให้ระบบสามารถคำนวณความลึกได้ถูกต้อง

3.1.2 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์และการติดตั้งในระบบ

แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่ใช้ในระบบนั้นจะเป็นแหล่งกำเนิดเลเซอร์คลาส 2 ที่มีลักษณะเป็นสีแดง สามารถให้แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 650 ± 5 nm. มีความแม่นยำในการฉายแสงเลเซอร์เป็นเส้นตรง ± 3 mm. ที่ระยะ 3 m. โดยจะทำการติดตั้งเพื่อทำการฉายแสงลงบนวัตถุที่มุม 45 องศา เนื่องจากในการติดตั้งการฉายแสงลงบนวัตถุ [27] มีผลต่อการคำนวณเพื่อหาความลึกซึ่งหากให้มุมองศาที่น้อยกว่า 45 องศาหรือเข้าใกล้มุม 0 องศา จะทำให้ความเหลื่อมล้ำของเส้นแสงเลเซอร์เมื่อตกกระทบลงบนพื้นผิวที่ถูกขูดเจาะนั้นมีค่ามากส่งผลให้การคำนวณหาความลึก ณ ตำแหน่งนั้นๆคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งความลึกจริงของวัตถุที่ถูกขูดเจาะมาก แต่หากให้มุมองศาที่มากกว่า 45 องศาหรือเข้าใกล้มุม 90 องศา นั้นจะทำให้เกิดความเหลื่อมล้ำของเส้นแสงเลเซอร์เมื่อตกกระทบลงบนพื้นผิวที่ถูกขูดเจาะนั้นมีค่าต่ำซึ่งจะส่งผลให้การคำนวณหาความลึกได้ยาก

ดังนั้นจึงได้ทำการเลือกให้มุม 45 องศา ซึ่งเป็นค่ากลางเนื่องจากค่าความเหลื่อมล้ำที่เกิดขึ้นมีเพียงพอต่อการนำไปใช้คำนวณหาความลึกอีกทั้งยังง่ายต่อการคำนวณหาความลึกที่จะนำเสนอในลำดับถัดไป

จากการออกแบบและสร้างระบบที่ใช้ในการเก็บภาพถ่ายและนำมาใช้เป็นข้อมูลในกระบวนการวิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อสร้างระนาบเสมือนจะสามารถแสดงการทำงานของระบบได้ดังที่แสดงในรูปที่ 18.

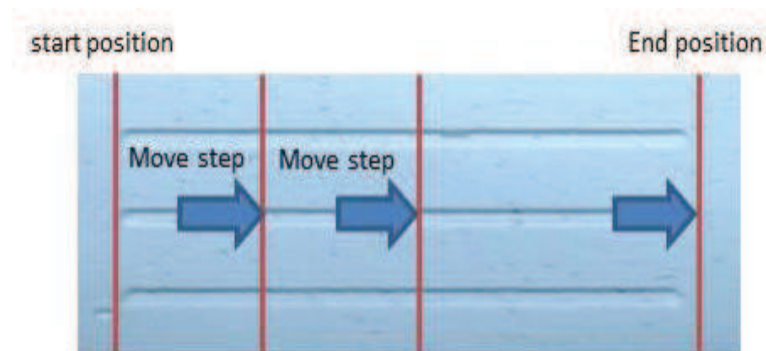


รูปที่ 18. ภาพแสดงลักษณะการทำงานของระบบ

3.2 การเก็บภาพถ่ายเพื่อใช้ในการประมวลผล

หลังจากทำการออกแบบและติดตั้งระบบเป็นที่เรียบร้อยแล้วในส่วนหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการเก็บภาพถ่ายเพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการประมวลผลภาพเพื่อหาความลึกจริงจากภาพถ่ายพื้นผิวซึ่งกระบวนการนี้เป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งในงานการสร้างภาพเสมือนของพื้นผิววัตถุที่จะทำการสร้างระนาบที่มีความกว้าง ความยาว และความลึก (3D Surface) เพื่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะรอยขูดเจาะที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานและนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความลึกจริงในลำดับถัดไป

เนื่องจากระบบที่สร้างได้นำกล้องถ่ายรูปดิจิทัลมาใช้ในการเก็บภาพถ่ายโดยระบบจะใช้เทคนิคเช่นเดียวกับเลเซอร์สแกนเนอร์ดังนั้นในการเก็บข้อมูลชิ้นงานหนึ่งชิ้นจะต้องทำการถ่ายภาพหลายภาพเพื่อให้ได้ข้อมูลมาใช้สร้างระนาบเสมือนชิ้นงานหนึ่งชิ้น ซึ่งในการเก็บข้อมูลภาพถ่ายชิ้นงานจะทำการเก็บข้อมูลโดยการถ่ายภาพหนึ่งภาพต่อการเคลื่อนที่ชิ้นงานหนึ่งครั้ง ในการเคลื่อนที่ชิ้นงานหนึ่งครั้งจะทำการเคลื่อนที่ไปด้วยระยะทาง 0.25 มิลลิเมตร เท่ากันทุกครั้งจนกระทั่งเก็บข้อมูลครบทั้งชิ้นงานโดยสามารถแสดงให้เห็นภาพได้ดังที่แสดงในรูปที่ 19.



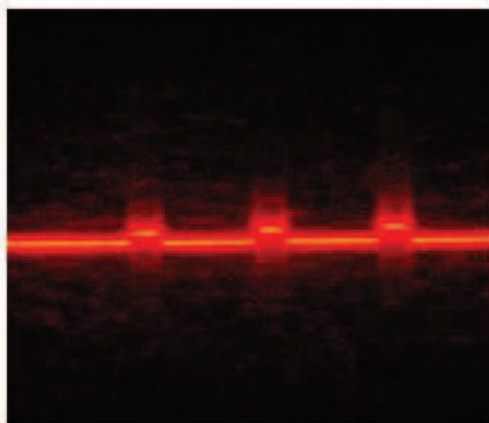
รูปที่ 19. ภาพแสดงลักษณะการเก็บข้อมูลชิ้นงาน[14]

จากรูปที่ 19. จะเป็นแสดงให้เห็นถึงการเก็บภาพถ่ายหนึ่งรูปและเคลื่อนที่ชิ้นงานไปหนึ่งครั้งจนกระทั่งครบชิ้นงาน โดยเส้นสีแดงแทนลำแสงของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์และเมื่อทำการเคลื่อนที่วัตถุชิ้นงานตำแหน่งของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบจะตกกระทบลงบนตำแหน่งพื้นผิว

ถัดไปของชิ้นงานทำการเก็บภาพถ่ายไปจนกระทั่งครบถ้วนทั้งพื้นผิวชิ้นงานจะได้ข้อมูลที่น่าไปใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ภาพ

3.3 กระบวนการวิเคราะห์ภาพถ่าย

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการนำข้อมูลที่ได้มาจากการเก็บภาพถ่ายจากระบบที่สร้างขึ้น มาทำการหาคุณลักษณะและทำการวิเคราะห์ข้อมูลในการสร้างระนาบเสมือนที่มีความสัมพันธ์กับความลึกจริงบนพื้นผิวชิ้นงานซึ่งจากการเก็บข้อมูลตามที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 3.2 เราจะได้ข้อมูลมาเพื่อใช้ในกระบวนการวิเคราะห์และสร้างระนาบเสมือนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 20.



รูปที่ 20. ภาพแสดงตัวอย่างข้อมูลที่ได้

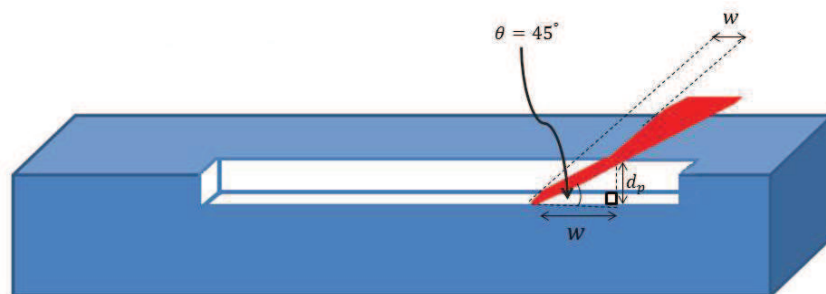
จากข้อมูลตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 20. จะนำไปใช้เป็นข้อมูลในกระบวนการวิเคราะห์ภาพถ่ายซึ่งถ้าหากสังเกตจะเห็นว่าลักษณะของเส้นสีแดงที่เกิดจากฉายแสงเลเซอร์ลงบนพื้นผิวจะมีการเปลี่ยนแปลงและมีลักษณะเหลี่ยมล้ำเมื่อตกกระทบลงบนพื้นผิวชิ้นงานที่มีการขูดเจาะ

3.3.1. การสร้างคุณลักษณะเพื่อหาความลึก

ในการสร้างคุณลักษณะของงานวิจัยที่น่าเสนอในที่นี้คือการหาความลึกจากความเหลี่ยมล้ำที่ต่างกันของเส้นแสงเลเซอร์บนชิ้นงานที่ปรากฏอยู่บนข้อมูลภาพถ่าย ซึ่งสาเหตุที่น่าเสนอวิธีการนี้เนื่องจากในการตรวจสอบชิ้นงานโดยปกติแล้วจะทำการวัดค่าพลังงานหรือค่าความเข้มแสงที่เกิดจากการกระเจิงของแสงโดยวิธีการเหล่านี้จะถูกการรบกวนจากแสง

ภายนอกทำให้การวัดค่าผิดพลาดได้ง่ายแต่วิธีการที่จะนำเสนอดังต่อไปนี้จะเป็นการสร้าง ความสัมพันธ์จากลักษณะของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบลงบนพื้นผิววัตถุและเกิดความแตกต่างของ ตำแหน่งพิกเซล(Pixel) ที่ปรากฏอยู่บนภาพถ่าย

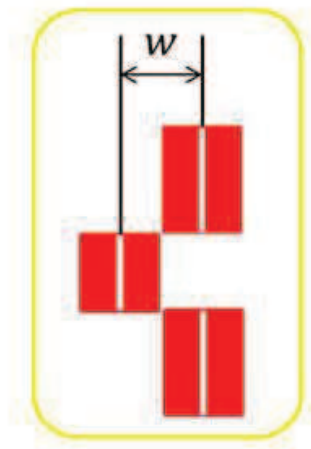
ความเหลื่อมล้ำของเส้นแสงเลเซอร์ที่ปรากฏอยู่บนภาพถ่ายเกิดจากการที่ฉายแสงเลเซอร์ใน ลักษณะที่ไม่ตั้งฉากและไม่ขนานกับพื้นผิวชิ้นงานซึ่งจากระบบที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูล ภาพถ่ายได้ทำการติดตั้งให้ทำมุม 45 องศา กับพื้นผิวชิ้นงานจึงทำให้เกิดความแตกต่างของเส้น แสงเลเซอร์ดังที่แสดงในรูปที่ 21.



รูปที่ 21. ภาพแสดงความแตกต่างของเส้นแสงเลเซอร์

จากรูปที่ 21. จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อแสงเลเซอร์ตกกระทบลงบนพื้นผิวที่มีรอยขูด เจาะจะทำให้เกิดระยะที่แตกต่างกับเส้นพื้นผิวเดิมซึ่งจากในรูปจะแสดงด้วยตัวย่อ “W” ค่าของ มุมเป็นองศาแทนด้วย θ โดยในที่นี้ใช้เป็นมุม 45 องศา และแทนความลึกของร่องที่เกิดจากการ ขูดเจาะด้วย d_p สาเหตุที่ทำการฉายแสงเลเซอร์ให้ทำมุม 45 องศา เนื่องจากเป็นมุมที่ง่ายต่อการ คำนวณหาความลึกเนื่องจากเมื่อฉายแสงทำมุม 45 องศา แล้วจะทำให้ระยะที่แตกต่างของเส้น แสงเลเซอร์(W)กับขนาดของความลึกที่เกิดจากการขูดเจาะ(d_p) มีค่าที่เท่ากันนั่นเอง

หลังจากทำการถ่ายภาพก็จะทำให้ได้ภาพถ่ายที่เป็นมุมมองสองมิติที่ไม่มีความ ลึกซึ่งจะเห็นเป็นรูปแบบมุมมองด้านบน(Top View) ดังที่แสดงในรูปที่ 21.



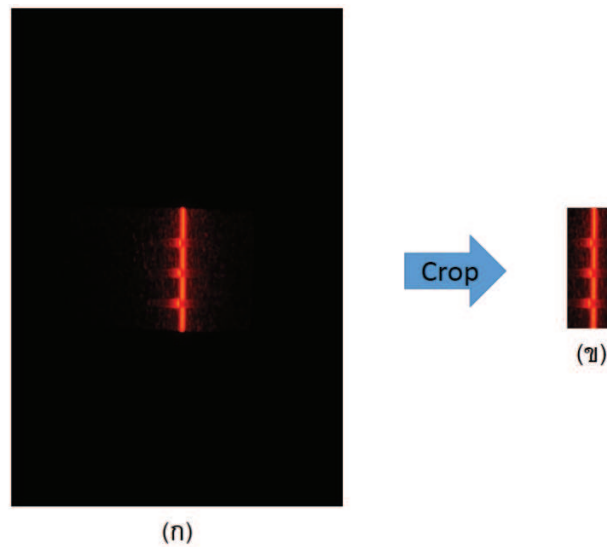
รูปที่ 22. ภาพแสดงมุมมองเส้นแสงเลเซอร์จากด้านบน

จากรูปที่ 22. จะเห็นได้ว่าเมื่อมองจากมุมบนจะเห็นเส้นของแสงเลเซอร์เกิดระยะที่แตกต่างระหว่างพื้นผิวที่ไม่ได้รับการขูดเจาะและพื้นผิวที่ถูกขูดเจาะซึ่งจะนำระยะความแตกต่างดังที่กล่าวมาใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างที่เกิดขึ้นกับความลึก

ในการหาค่าระยะที่แตกต่างกันจะทำการหาค่ากึ่งกลางเส้นของแสงเลเซอร์ที่ปรากฏอยู่บนภาพถ่ายซึ่งระยะที่เกิดขึ้นอยู่บนภาพถ่ายนั้นจะอยู่ในหน่วยของพิกเซล(Pixel) โดยจะนำภาพถ่ายเข้าสู่การประมวลผลภาพเพื่อสร้างเป็นภาพโครงกระดูก (Skeleton) ซึ่งการสร้างภาพโครงกระดูกของเส้นแสงเลเซอร์ที่ปรากฏอยู่บนพื้นผิวในข้อมูลรูปถ่ายมีวิธีการดังนี้

1.การเลือกตำแหน่งของภาพ

ในขั้นแรกจะทำการเลือกพื้นที่บนพื้นผิวที่สนใจบนภาพถ่ายที่เก็บได้ โดยทำการเลือกข้อมูลภาพในส่วนของเส้นแสงเลเซอร์ที่เป็นสีแดงแล้วตัดส่วนเกินที่ไม่ต้องการออกบางส่วนเพื่อเป็นการเพิ่มความรวดเร็วในการประมวลผลในการวิเคราะห์ภาพข้อมูลเพื่อสร้างภาพโครงกระดูก ซึ่งข้อมูลภาพที่ได้ทำการเลือกตำแหน่งแล้วจะมีขนาดเล็กกว่าภาพปกติที่จะแสดงในรูปที่ 23. (ก)และ รูปที่ 23. (ข)

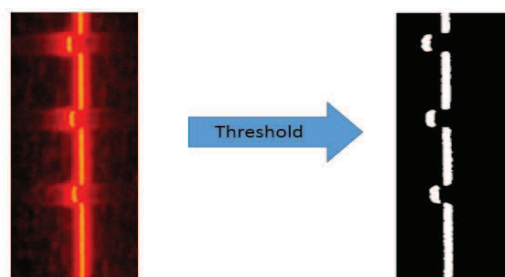


รูปที่ 23.(ก).ภาพถ่ายจากกล้องปกติ , (ข).ภาพส่วนที่ต้องการนำไปใช้

จากรูปที่ 23. จะเห็นได้ว่าภาพข้อมูลดิบที่ได้จากการเก็บภาพถ่ายด้วยกล้องจะมีขนาดที่ใหญ่กว่ามากเมื่อเทียบกับข้อมูลภาพหลังจากทำการตัดส่วนที่ไม่ต้องการออกแล้ว

2.การสร้างภาพโครงกระดูก

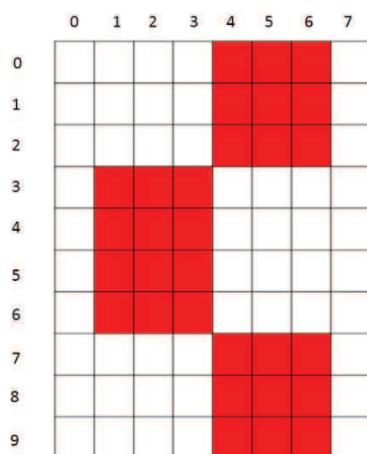
เมื่อทำการตัดส่วนข้อมูลที่ไม่ต้องการออกแล้วในขั้นแรกของการสร้างภาพโครงกระดูกนั้นจะทำการแปลงจากภาพสีเป็นภาพขาวดำโดยใช้การทำเทรชโฮลด์(Threshold) จะได้ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 24.



รูปที่ 24.ภาพแสดงผลลัพธ์เมื่อทำเทรชโฮลด์

หลังจากทำการเลือกส่วนของข้อมูลบนภาพถ่ายและแปลงเป็นภาพขาวดำแล้วจะทำการสร้างเส้นโครงกระดูกโดยการหาตำแหน่งแรกและตำแหน่งสุดท้ายของพิกเซลที่เป็นส่วนของ

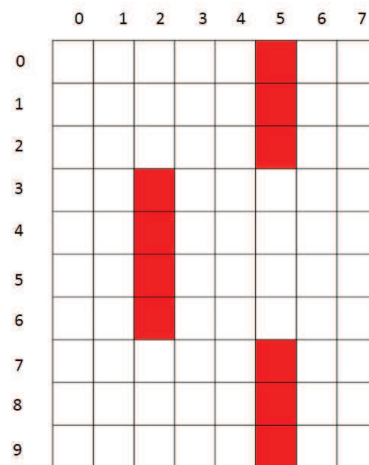
เส้นแสงเลเซอร์ในข้อมูล ซึ่งจะทำการตรวจหาตำแหน่งของข้อมูลที่เป็นเส้นแสงเลเซอร์ตำแหน่งแรกและตำแหน่งสุดท้ายของแต่ละแถวพิกเซลโดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 25.



รูปที่ 25.ภาพแสดงตำแหน่งพิกเซลของเส้นแสงเลเซอร์

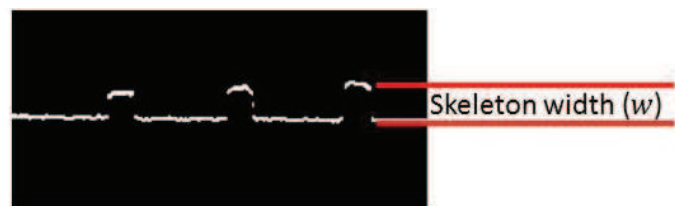
จากรูปที่ 25. จะแสดงการยกตัวอย่างให้เห็นว่าตำแหน่งของพิกเซล(Index) ที่เป็นส่วนของเส้นแสงเลเซอร์เป็นตำแหน่งแรกและตำแหน่งสุดท้าย โดยในที่นี้ตำแหน่งที่เป็นตำแหน่งแรกของแถวแรกจะอยู่ที่ตำแหน่ง(0,4) และตำแหน่งสุดท้ายของแถวแรกจะอยู่ที่ตำแหน่ง (0,6) ตำแหน่งแรกของแถวที่สองจะอยู่ที่ตำแหน่ง (1,4)และตำแหน่งสุดท้ายของแถวที่สองจะอยู่ที่ตำแหน่ง (1,6)

เมื่อได้ตำแหน่งของจุดแรกและจุดสุดท้ายของเส้นแสงเลเซอร์ในแถวพิกเซลแล้ว จะนำมาสร้างเส้นโครงกระดูกโดยการหาค่าเฉลี่ยโดยใช้ค่าจากตำแหน่งทั้งสอง ซึ่งจากที่ได้ยกตัวอย่างในข้างต้นตำแหน่งในแถวแรกคือ (0,4)และ(0,6) ตัวเลข 0 จะเป็นตัวบอกแถวดังนั้นเราจะนำตัวเลข 4และ6 ทำการหาค่าเฉลี่ย(Average) แล้วทำการเก็บค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้ไว้ ณ ตำแหน่งของแถวนั้นจนครบทุกแถวก็จะได้ข้อมูลที่ไว้ใช้ในการสร้างภาพโครงกระดูกโดยแสดงได้ดังรูปที่ 26.



รูปที่ 26. แสดงภาพโครงกระดูกที่สร้างจากการคำนวณ

ในการนำข้อมูลภาพจริงมาทำการประมวลผลตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาในขั้นต้น เพื่อสร้างภาพโครงกระดูกนั้นจะได้ภาพในลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 27.



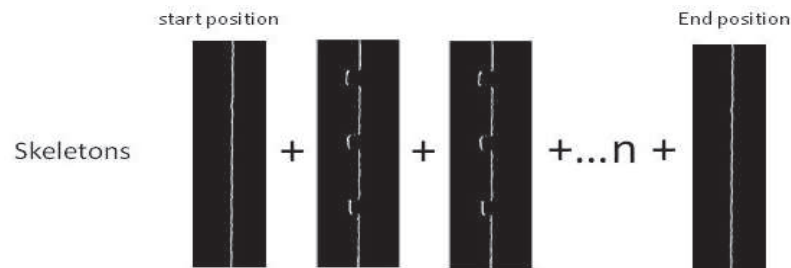
รูปที่ 27. แสดงภาพโครงกระดูกจากภาพถ่าย

จากรูปที่ 27. จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการสร้างภาพโครงกระดูกของเส้นแสงเลเซอร์ที่ได้จากข้อมูลแล้วจะเกิดระยะที่มีความแตกต่างกันของเส้นโครงกระดูก โดยค่าความแตกต่างของระยะที่เกิดขึ้นเป็นค่าความแตกต่างของตำแหน่งของพิกเซล(Pixel)และจะเรียกระยะที่เกิดขึ้นนี้ว่า "Skeleton width " และจะนำค่าความแตกต่างนี้ไปสร้างเป็นแบบจำลองระนาบสามมิติและหาความลึกจริงในลำดับถัดไป

3.3.2.การสร้างแบบจำลองระนาบสามมิติ

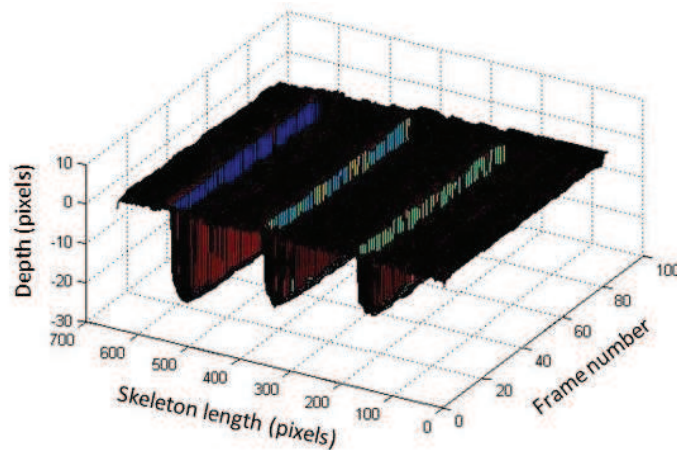
การคำนวณหาความลึกนั้นในทางเทคนิคแล้วจากภาพถ่ายปกติไม่สามารถบอกได้ถึงความลึกที่เกิดขึ้นอยู่บนตัววัตถุจริงได้เนื่องจากภาพถ่ายที่ได้เป็นสองมิติไม่มีความลึกนั่นเอง ซึ่งในหัวข้อการสร้างคุณลักษณะเพื่อหาความลึกนั้นก็ได้เส้นโครงกระดูกมาใช้ในการคำนวณ

ได้ด้วยเริ่มจากการนำเส้นโครงกระดูกที่ได้มาต่อกันเพื่อสร้างเป็นระนาบสามมิติดังที่แสดงในรูปที่ 28.



รูปที่ 28. แสดงการต่อภาพโครงกระดูก

จากรูปที่ 28. จะเป็นการต่อภาพโครงกระดูกเข้าด้วยกันเพื่อสร้างเป็นระนาบสามมิติของชิ้นงานซึ่งจะทำการต่อข้อมูลที่ได้เท่ากับจำนวนรูปที่นำมาใช้สร้างภาพโครงกระดูก และเมื่อทำการต่อภาพโครงกระดูกเข้าด้วยกันจนครบตามจำนวนก็จะได้ระนาบสามมิติที่มี ความกว้างเท่ากับจำนวนรูปถ่าย ความยาวเท่ากับความยาวของภาพโครงกระดูกที่สร้างมาจากเส้นแสงเลเซอร์ และค่าความลึกที่เกิดจากค่า Skeleton width ดังที่แสดงในรูปที่ 29.

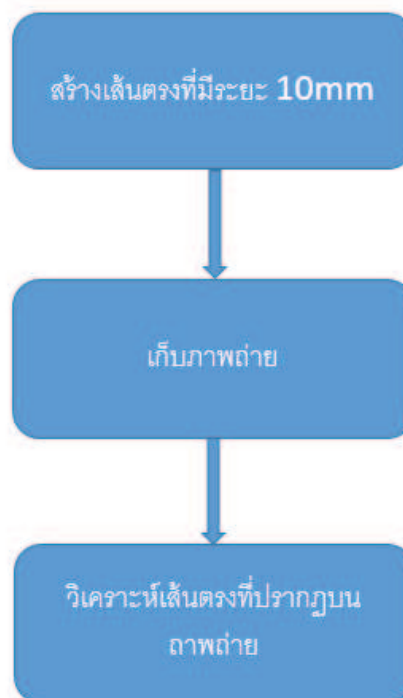


รูปที่ 29. แสดงภาพระนาบสามมิติ(3D Surface)

3.3.3. การคำนวณหาความลึกจริง

ในการเก็บภาพถ่ายด้วยกล้องดิจิตอลนั้นจะได้ข้อมูลมาเป็นข้อมูลสองมิติที่มีหน่วยเป็นพิกเซลและไม่สามารถบอกถึงความลึกได้ ดังนั้นเราจึงสร้างคุณลักษณะขึ้นมาโดยใช้

การหาความแตกต่างของฟิสิกเซลบนรูปถ่ายที่เกิดขึ้นจากการฉายแสงเลเซอร์เป็นเส้นตรงลงบนพื้นผิววัตถุและเรียกความต่างนี้ว่า Skeleton width แต่ในทางทฤษฎีแล้วระยะของฟิสิกเซลในภาพที่เกิดขึ้นไม่ได้มีค่าเท่ากับความลึกที่เกิดขึ้นจริงดังนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบค่าโดยการทำให้การวิเคราะห์ภาพถ่ายโดยใช้ทฤษฎีที่มีอยู่แล้วเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะจริงกับฟิสิกเซลที่เกิดขึ้นบนภาพถ่ายซึ่งวิธีดังกล่าวคือ การทำตารางหมากรุกเปรียบเทียบ (Standard chessboard) โดยวิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีอยู่แล้วใน Library ของโปรแกรม OpenCV ซึ่งจะเป็นการคำนวณหาจำนวนฟิสิกเซลในภาพแล้วทำการวัดค่าระยะจริงของวัตถุ สามารถอธิบายขั้นตอนการวิเคราะห์อย่างง่ายได้ดังรูปที่ 30.



รูปที่ 30. ภาพแสดงแผนผังตัวอย่างขั้นตอนการวิเคราะห์

จากรูปที่ 30. ที่แสดงขั้นตอนในการวิเคราะห์เพื่อหาจำนวนฟิสิกเซลที่สามารถนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาระยะจริงซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างการคำนวณโดยการสร้างเส้นตรงที่มีขนาดระยะจริงยาว 10 มิลลิเมตรจากนั้นนำเส้นตรงที่สร้างขึ้นไปวางในตำแหน่งที่มีระยะห่างเท่ากับระยะจริงของระบบการเก็บภาพถ่ายที่ได้ทำการออกแบบ จากนั้นทำการเก็บภาพถ่ายแล้วนำภาพถ่ายที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ว่าเส้นตรงที่มีขนาด 10 มิลลิเมตร เมื่อทำการถ่ายภาพ ณ ตำแหน่งที่

ออกแบบในระบบแล้วจะมีจำนวนพิกเซลที่ปรากฏบนภาพถ่ายที่พิกเซลซึ่งจะแสดงตัวอย่างการคำนวณหาจำนวนพิกเซลดังที่แสดงในรูปที่ 31.

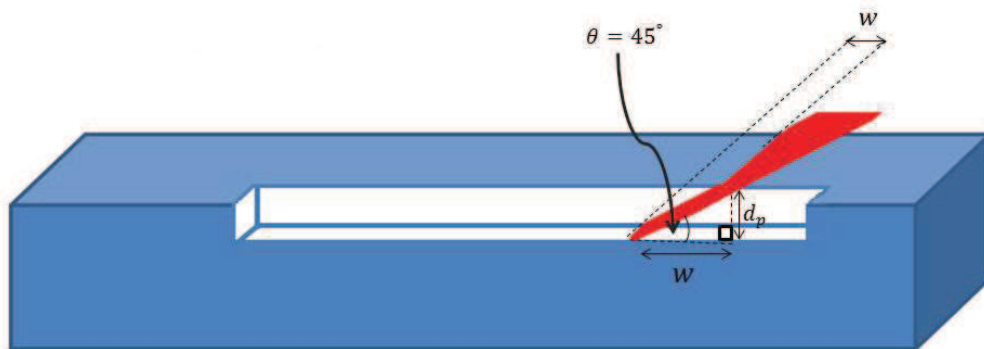


รูปที่ 31. แสดงตัวอย่างจำนวนพิกเซลตัวอย่างที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 31. เป็นการแสดงการยกตัวอย่างการเปรียบเทียบว่าเส้นตรงจริงที่มีระยะจริงเท่ากับ 10 มิลลิเมตรเมื่อทำการเก็บภาพถ่ายจะได้เส้นตรงที่เกิดขึ้นบนภาพมีขนาด 10 พิกเซล กล่าวคือ เมื่อทำการเปรียบเทียบจำนวนพิกเซลเทียบกับระยะจริงแล้วจะได้ว่าระยะที่เกิดขึ้นบนภาพถ่าย 1 พิกเซลสามารถบอกได้ว่าระยะจริงมีขนาด 1 มิลลิเมตร

ซึ่งจากการใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วย OpenCV นี้กับภาพถ่ายข้อมูลในงานวิจัยจริงที่ทำการติดตั้งระยะตามกำหนดที่ได้ทำการออกแบบในข้างต้นจะได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างพิกเซลกับระยะจริงอยู่ที่ 37 พิกเซลต่อระยะทาง 1 มิลลิเมตร

จากในข้างต้นที่ได้ทำการอธิบายถึงการออกแบบการติดตั้งฉายแสงเลเซอร์ที่ทำการติดตั้งเป็นมุม 45 องศา นั้นจะเป็นตัวบ่งบอกถึงการหาความลึกที่จะนำมาใช้ในส่วนถัดไปเพราะเนื่องจากเมื่อทำการคำนวณแล้วจำนวนพิกเซลภายในภาพถ่าย 37 พิกเซลที่เกิดจากการติดตั้งระบบตามที่ออกแบบสามารถบอกเป็นระยะจริงได้เท่ากับ 1 มิลลิเมตร ดังนั้นจากการที่ติดตั้งฉายแสงเลเซอร์เป็นมุม 45 องศา จะทำให้เกิดระยะของความลึกมีขนาดเท่ากับระยะความเหลือมล้ำของแสงเลเซอร์ที่เกิดขึ้นเมื่อตกกระทบลงบนพื้นผิวที่ทำการขูดเจาะซึ่งจะนำรูปที่ 21. มาแสดงในรูปที่ 32. เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ได้ดังนี้



รูปที่ 32. แสดงภาพอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างระยะระนาบกับความลึก

จากรูปที่ 32. จากการติดตั้งระบบได้ทำการฉายแสงเลเซอร์ด้วยมุม 45 องศา เมื่อคำนวณหาค่าระยะในแนวระนาบ (W) และระยะความลึก (d_p) จะเห็นได้ว่าค่าทั้งสองจะมีขนาดเท่ากันตามกฎตรีโกณมิติ โดยสังเกตได้ในรูปภาพที่ 32. ซึ่งเมื่อทำการเก็บภาพถ่ายจะทำให้ได้ระยะในแนวระนาบ (W) ที่มีหน่วยเป็นพิกเซลและระยะนั้นก็คือระยะ Skeleton width ดังนั้นค่าความลึกในหน่วยพิกเซลจะหาได้จากการคำนวณหา Skeleton width ดังนั้นการหาความลึกจริงจะหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$d_p = \frac{1}{d_f} W \quad (1)$$

จากสมการที่ 1 เมื่อให้

d_p คือความลึกจริงมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

W คือ Skeleton width มีหน่วยเป็นพิกเซล (Pixel)

d_f คือค่าตัวคูณ (Factor) มีค่าคงที่ ในที่นี้มีค่าเท่ากับ 37

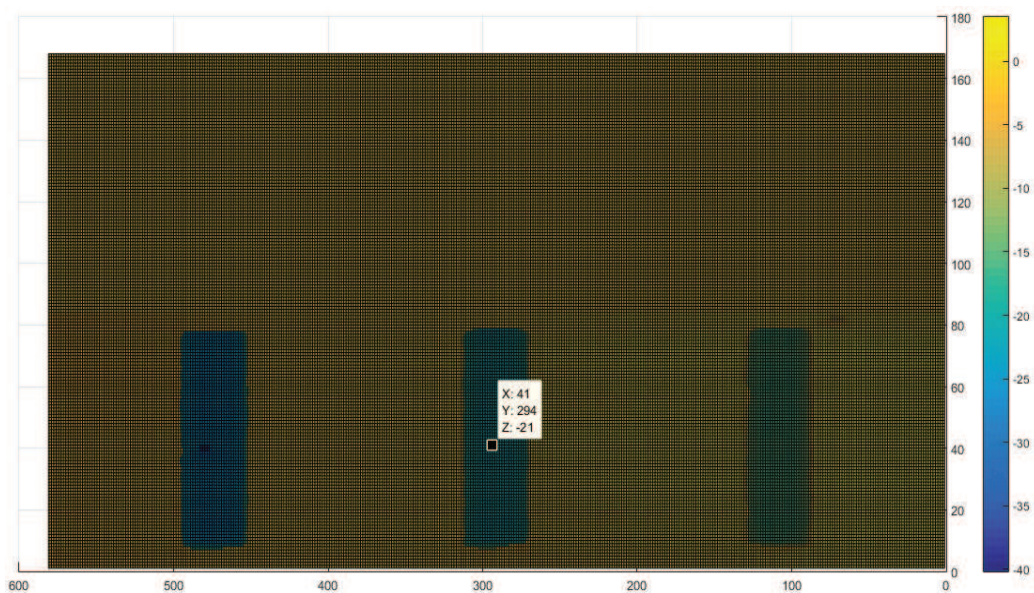
จากสมการที่ 1 เราสามารถคำนวณหาความลึกจริงได้ด้วยสมการนี้เมื่อค่า d_f มีค่าเท่ากับ 37 เนื่องจากเป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการทำ Standard chessboard เพื่อนำมาใช้ในการแปลงค่าจากหน่วยเป็นพิกเซลให้เป็นระยะจริงในหน่วยมิลลิเมตร

3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของรอยชุดเจาะ

ในการตรวจสอบความถูกต้องของการชุดเจาะชิ้นงานในงานวิจัยชิ้นนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ การตรวจสอบในเชิงความลึก และการตรวจสอบลักษณะของเส้น โดยจะนำเสนอวิธีการดังนี้

3.4.1.การตรวจสอบในเชิงความลึก

การตรวจสอบความถูกต้องของการชุดเจาะในเชิงความลึกในงานวิจัยนี้จะทำการตรวจสอบหาความลึกของชิ้นงานด้วยการสร้างระนาบสามมิติ (3D Surface) ให้กับผู้ตรวจสอบชิ้นงานเพื่อใช้ในการตัดสินใจให้คะแนนชิ้นงานจริง โดยระนาบสามมิติที่สร้างขึ้นจะบ่งบอกถึงลักษณะความลึก ณ ตำแหน่งต่างๆบนพื้นผิวชิ้นงาน อีกทั้งยังสามารถนำกลุ่มข้อมูลความลึกที่นำมาใช้สร้างระนาบสามมิติมาจัดแบ่งกลุ่มระดับความลึกเพื่อแสดงถึงความราบเรียบสม่ำเสมอของเส้นชุดเจาะ ซึ่งจะทำให้การแสดงตัวอย่างระนาบสามมิติที่ผู้ตรวจสอบชิ้นงานจะนำไปใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจให้คะแนนชิ้นงานได้ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 33.



รูปที่ 33.แสดงภาพระนาบสามมิติที่สร้างขึ้น(มุมมองบน)

จากรูปที่ 33. ในแกนแนวนอนจะเป็นตำแหน่ง Y แกนแนวตั้งจะเป็นตำแหน่ง X และค่าความลึกจะแสดงเป็นค่าในแกน Z ซึ่งระนาบสามมิติที่แสดงในรูปเกิดจากการต่อ

ข้อมูลภาพโครงกระดูกเข้าด้วยกันจะแสดงให้เห็นถึงความลึกและความสม่ำเสมอของความลึกเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจของผู้ตรวจสอบซึ่งงานนำไปใช้ในการให้คะแนนคุณภาพของชิ้นงานจริง โดยผู้ตรวจสอบชิ้นงานสามารถอ่านค่าความลึก ณ จุดต่างๆได้และสังเกตกลุ่มก้อนข้อมูลความลึกในระดับต่างๆได้ด้วยโทนสีของระนาบที่สร้างขึ้น ซึ่งถ้าหากความลึกของเส้นที่ได้ทำการขูดเจาะบนชิ้นงานมีความราบเรียบสม่ำเสมอโทนสีของระนาบที่เกิดขึ้นก็จะเป็นโทนสีเดียวกันแต่ถ้าหากมีหลายโทนสีก็จะแสดงว่าบนชิ้นงานนั้นมีหลายระดับความลึกก็จะแสดงให้เห็นว่าเส้นที่ขูดเจาะนั้นมีความสม่ำเสมอต่ำ

เราสามารถระบุตำแหน่งเพื่อเปรียบเทียบตำแหน่งความลึกบนพื้นผิวชิ้นงานจริงกับตำแหน่งความลึกบนระนาบสามมิติที่สร้างขึ้นได้ เนื่องจากระนาบสามมิตินั้นเกิดขึ้นจากการต่อภาพโครงกระดูกเข้าด้วยกันโดยภาพโครงกระดูก 1 ภาพจะเกิดจากการเก็บภาพถ่าย 1 ภาพและทำการเคลื่อนที่วัตถุเป็นระยะ 0.25 มิลลิเมตร ดังนั้นจะได้ว่าค่าความลึกที่ได้จากค่าของ Skeleton width ที่นำมาใช้สร้างความลึกของระนาบสามมิติ 1 ภาพจะบอกความลึกจริงในตำแหน่งบริเวณระยะความยาว 0.25 มิลลิเมตรของเส้นที่เกิดขึ้นจากการขูดเจาะบนชิ้นงานจริง

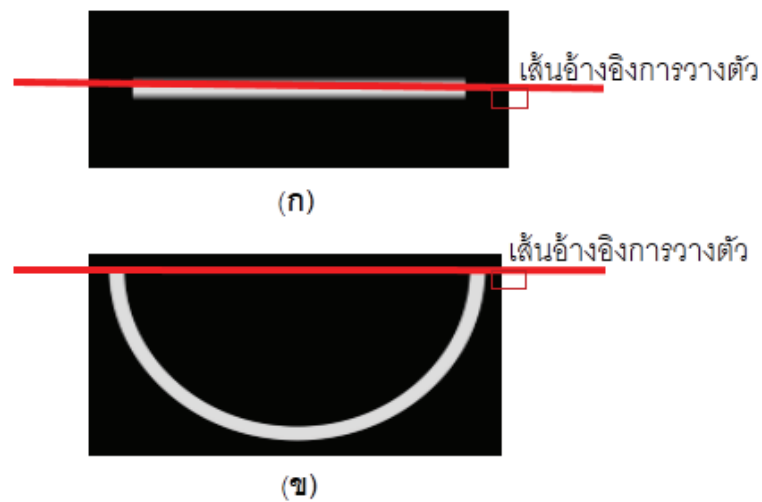
3.4.2. การตรวจสอบลักษณะของเส้น

เนื่องจากชิ้นงานที่ใช้ทดลองในงานวิจัยนี้มีอยู่ 2 ลักษณะ คือ ขูดเจาะเป็นเส้นตรงและขูดเจาะเป็นเส้นโค้งบนพื้นผิวของชิ้นงาน ดังนั้นในการตรวจสอบลักษณะของเส้นในที่นี่จะตรวจสอบโดยการหาค่าความเป็นเส้นตรงและความเป็นเส้นโค้ง และลักษณะการวางตัวของเส้นขูดเจาะบนชิ้นงาน ซึ่งต้นแบบสำหรับขูดเจาะในชิ้นงานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 34.



รูปที่ 34. แสดงภาพต้นแบบที่ใช้ในการขูดเจาะ

จากรูปที่ 34. จะแสดงให้เห็นถึงการวางตัวของเส้นต้นแบบชิ้นงานโดยรูปที่ 34 (ก). เป็นต้นแบบชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง และรูปที่ 34 (ข).เป็นต้นแบบชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ซึ่งจะใช้การวางตัวของเส้นต้นแบบเพื่อสร้างจุดอ้างอิงว่าเส้นที่ทำการขุดเจาะจริงวางตัวเหมือนต้นแบบหรือเอียงจากต้นแบบไปเท่าใดโดยสามารถสร้างเส้นอ้างอิงได้ดังที่แสดงในรูปที่ 35.



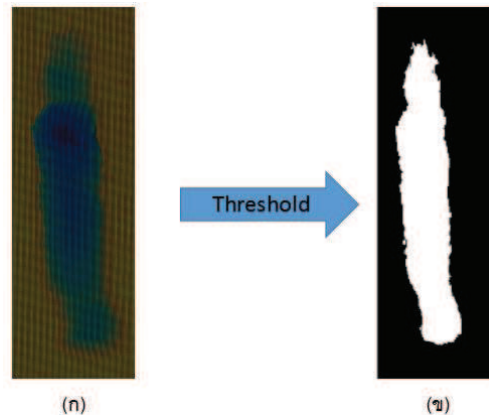
รูปที่ 35. ภาพแสดงการสร้างเส้นอ้างอิง

จากรูปที่ 35.(ก)และรูปที่ 35.(ข) จะแสดงให้เห็นถึงการสร้างเส้นอ้างอิงเพื่อใช้ในการตรวจสอบการวางตัวของชิ้นงานของเส้นต้นแบบที่เป็นเส้นตรงและเส้นโค้งตามลำดับ โดยจะสร้างเส้นอ้างอิงให้ตั้งฉากกับขอบของรูปภาพที่สร้างขึ้น โดยเราจะนำเส้นอ้างอิงนี้ไปใช้ในการตรวจสอบการวางตัวของเส้นทั้งสองรูปแบบที่เกิดจากการขุดเจาะบนชิ้นงานจริงว่าวางตัวทำมุมเท่าไรกับเส้นอ้างอิง ซึ่งจะนำเสนอการตรวจสอบลักษณะของเส้นทั้งสองรูปแบบในลำดับถัดไป

1. การตรวจสอบเส้นตรง

ในการตรวจสอบเส้นตรงนั้นขั้นตอนแรกที่ต้องดำเนินการคือ การสร้างข้อมูลรูปแบบของเส้นที่ปรากฏอยู่บนชิ้นงานจริงซึ่งสามารถทำได้ด้วยการนำระนาบสามมิติ (3D Surface) มาทำการวิเคราะห์หาส่วนที่เป็นรอยขุดเจาะแล้วนำไปสร้างเป็นภาพขาว-ดำเพื่อนำไปใช้

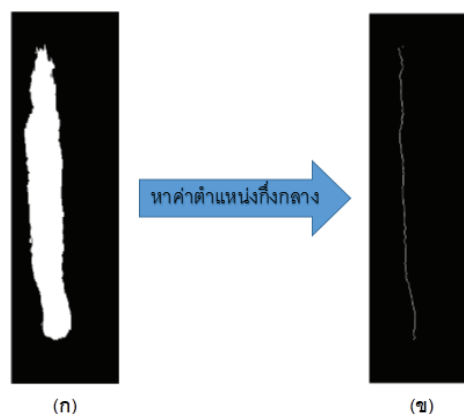
เป็นข้อมูลในการตรวจสอบหาความเป็นเส้นตรงและการวางตัวของเส้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน โดยจะยกตัวอย่างแสดงภาพขาว-ดำที่ได้จากการวิเคราะห์ระนาบสามมิติดังรูปที่ 36.



รูปที่ 36. แสดงการสร้างภาพขาว-ดำจากระนาบสามมิติ

จากรูปที่ 36. จะแสดงให้เห็นถึงการสร้างรูปขาว-ดำเพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบหาความเป็นเส้นตรงและการวางตัวของเส้นตรง ซึ่งในรูปที่ 36.(ข) คือภาพขาว-ดำที่ได้จากการสร้างด้วยการระบุตำแหน่งที่มีการขูดเจาะที่เป็นความลึกบนระนาบสามมิติในรูปที่ 36.(ก) ให้เป็นสีขาว และในส่วนของตำแหน่งที่ไม่มีการขูดเจาะให้เป็นสีดำ

เมื่อได้ภาพข้อมูลแล้วเราจะทำการหาค่ากึ่งกลางของตำแหน่งในส่วนที่เป็นสีขาวแล้วนำมาสร้างเป็นภาพใหม่เพื่อให้ได้ภาพที่มีลักษณะของเส้นที่เกิดจากการขูดเจาะสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 37.

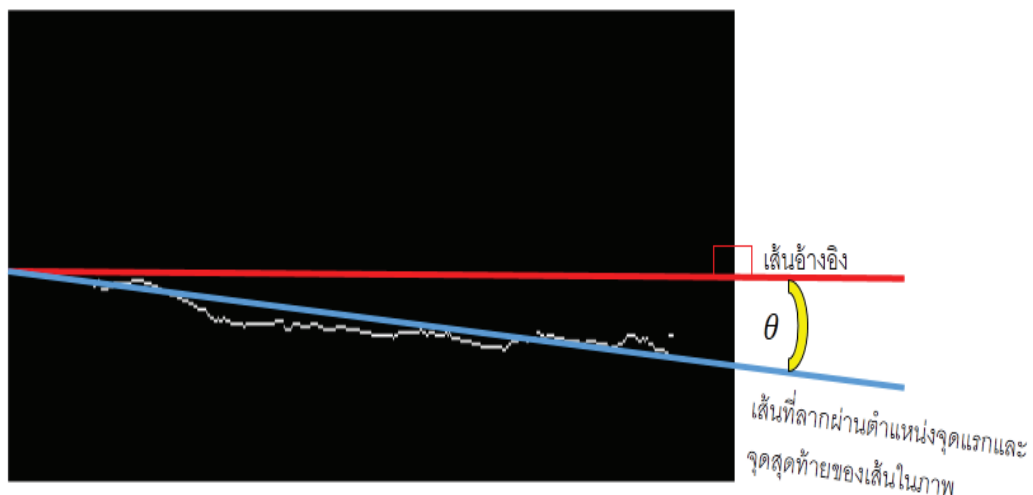


รูปที่ 37. แสดงการสร้างภาพลักษณะของเส้นที่เกิดจากการขูดเจาะ

จากรูปที่ 37. แสดงถึงการสร้างภาพลักษณะของเส้นที่เกิดจากการขูดเจาะโดยการหาค่าตำแหน่งกึ่งกลางในส่วนที่เป็นสีขาวของรูปที่ 37.(ก) ไปสร้างเป็นภาพใหม่ดังรูปที่ 37.(ข) ซึ่งภาพใหม่ที่ได้จะเป็นภาพที่บอกถึงลักษณะของเส้นที่ถูกขูดเจาะบนชิ้นงาน ซึ่งจะนำภาพใหม่ที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลในการตรวจสอบหาความเป็นเส้นตรงและการวางตัวของเส้นที่เกิดจากการขูดเจาะบนชิ้นงานจริง

- การบอกลักษณะการวางตัวของเส้นตรงที่เกิดจากการขูดเจาะ

เมื่อได้ภาพที่บอกถึงลักษณะของเส้นที่ถูกขูดเจาะแล้วเราจะนำภาพมาทำการวิเคราะห์หาค่าตำแหน่งแรกและตำแหน่งสุดท้ายที่เป็นสีขาวซึ่งอยู่ที่ต้นและปลายของเส้นในภาพและนำตำแหน่งที่ได้มาสร้างเส้นตรงที่ลากผ่านจุดทั้งสอง จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับเส้นตรงอ้างอิงดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นเพื่อหามุมองศาที่ทำกับเส้นอ้างอิงซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 38.



รูปที่ 38. แสดงมุมองศา(θ)จากการวางตัวของเส้นตรง

จากรูปที่ 38. จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการลากเส้นสีฟ้าที่ลากผ่านจุดตำแหน่งแรกและจุดตำแหน่งสุดท้ายของเส้นที่อยู่บนภาพเราจะได้เส้นที่ใช้แทนการวางตัวของเส้นในภาพโดยเมื่อนำเส้นสีฟ้าที่เกิดขึ้นมาคำนวณหามุมที่ทำกับเส้นอ้างอิง(θ)ที่เป็นเส้นสีแดงจะทำให้ทราบถึงการวางตัวของเส้นตรงที่ปรากฏอยู่ในภาพว่าทำมุมกี่องศากับขอบชิ้นงาน

- การหาค่าความเป็นเส้นตรง

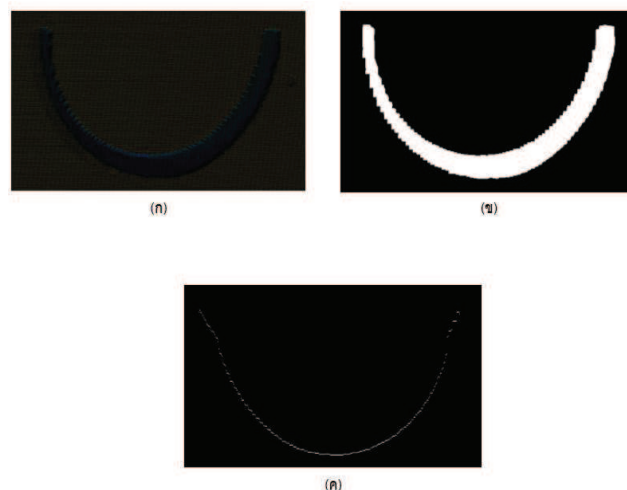
ในส่วนของการหาความเป็นเส้นตรงเราก็จะใช้ภาพที่แสดงลักษณะของเส้นที่เกิดจากการขูดเจาะมาใช้ในการวิเคราะห์เช่นเดียวกับการหาการวางตัวของเส้น โดยจะนำตำแหน่งพิกัดในส่วนที่เป็นเส้นสีขาวมาทำการหาความชันจุดต่อจุดและนำความชันไปใช้ในการหาค่า Least square error ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$Y = aX + c \quad (2)$$

จากสมการที่ 2 เป็นสมการ Linear polynomial เมื่อเรานำค่าความชันจุดต่อจุดที่หาได้มาทำการหาค่า Least square error ค่าที่ได้จะบ่งบอกถึงการกระจายตัวของข้อมูลหากการกระจายตัวน้อยก็จะเป็นเส้นตรงมาก โดยค่าที่หาได้มีค่าเข้าใกล้เท่ากับ 1 จะแสดงถึงการกระจายตัวน้อยและมีค่าความเป็นเส้นตรงมากนั่นเอง

2. การตรวจสอบเส้นโค้ง

ในการตรวจสอบเส้นโค้งนั้นขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพเพื่อสร้างภาพที่มีลักษณะของเส้นมาใช้เป็นข้อมูลในการหาความเป็นเส้นโค้งและการวางตัวของเส้นโค้งมีขั้นตอนการทำเช่นเดียวกับตรวจสอบเส้นตรงซึ่งจะได้ภาพผลลัพธ์ในแต่ละขั้นตอนดังที่แสดงในรูปที่ 39.

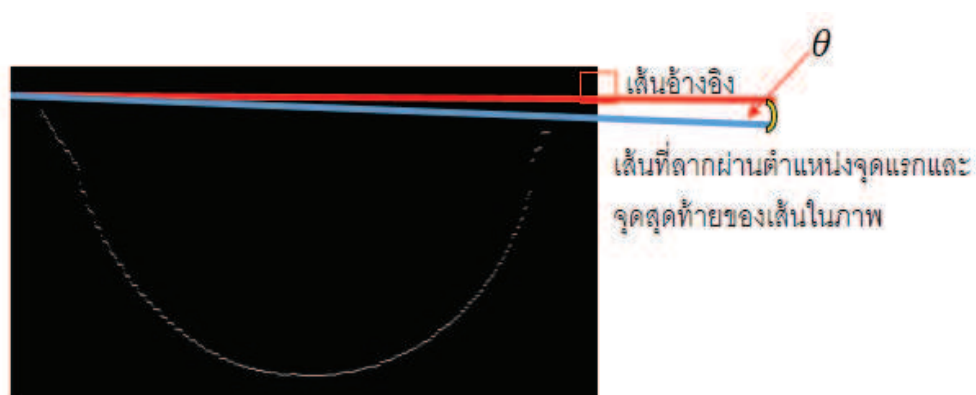


รูปที่ 39. แสดงภาพผลลัพธ์ในการสร้างภาพลักษณะของเส้นแต่ละขั้นตอน

จากรูปที่ 39. จะเป็นการแสดงภาพผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ภาพเพื่อสร้างภาพ ลักษณะเส้นที่มีการขุดเจาะโดยการทำให้การใช้การ Threshold จากรูปที่ 39.(ก) เพื่อสร้าง เป็นภาพขาว-ดำที่แทนตำแหน่งที่เป็นความลึกด้วยสีขาวที่แสดงในรูปที่ 39.(ข) และขั้นตอนสุดท้าย คือการหาค่าตำแหน่งกึ่งกลางจากรูปที่ 39.(ข) แล้วนำมาสร้างเป็นรูปที่ 39.(ค) ที่เป็นภาพบอกถึง ลักษณะของเส้นที่เกิดจากการขุดเจาะซึ่งจะนำภาพนี้ไปใช้เป็นข้อมูลในการหาค่าความเป็นเส้นโค้ง และการวางตัวของเส้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน

- การบอกลักษณะการวางตัวของเส้นโค้งที่เกิดจากการขุดเจาะ

เมื่อได้ภาพที่บอกถึงลักษณะของเส้นที่ถูกขุดเจาะแล้วเราจะนำภาพมาทำการ วิเคราะห์หาตำแหน่งแรกและตำแหน่งสุดท้ายที่เป็นสีขาวซึ่งอยู่ที่ต้นและปลายของเส้นในภาพและ นำตำแหน่งที่ได้มาสร้างเส้นตรงที่ลากผ่านจุดทั้งสอง จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับเส้นตรงอ้างอิง ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นเพื่อหามุมองศาที่ทำกับเส้นอ้างอิงซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 40.



รูปที่ 40. แสดงมุมองศา(θ)จากการวางตัวของเส้นโค้ง

จากรูปที่ 40. จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการลากเส้นสีฟ้าที่ลากผ่านจุดตำแหน่งแรกและ จุดตำแหน่งสุดท้ายของเส้นที่อยู่บนภาพเราจะได้เส้นที่ใช้แทนการวางตัวของเส้นในภาพโดยเมื่อนำเส้นสีฟ้าที่เกิดขึ้นมาคำนวณหามุม ที่ทำกับเส้นอ้างอิง(θ)ที่เป็นเส้นสีแดงจะทำให้ทราบถึงการวางตัวของเส้นโค้งที่ปรากฏอยู่ในภาพว่าทำมุมกี่องศากับขอบชิ้นงาน

- การหาค่าความเป็นเส้นโค้ง

ในส่วนของการหาความเป็นเส้นโค้งจะนำเสนอการหาความเป็นเส้นโค้งสองแบบ คือ แบบแรกเราจะใช้ภาพที่แสดงลักษณะของเส้นที่เกิดจากการขูดเจาะมาใช้ในการวิเคราะห์ เช่นเดียวกับการหาการวางตัวของเส้น โดยจะนำตำแหน่งพิกัดในส่วนที่เป็นเส้นสีขาวมาใช้ในการหาค่า Least square error ด้วยสมการดังต่อไปนี้

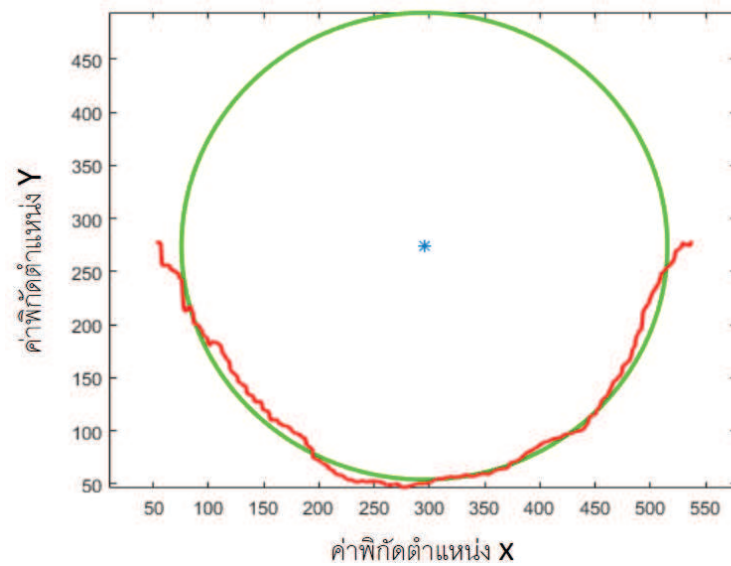
$$Y = aX^2 + bX + c \quad (3)$$

จากสมการที่ 3 เป็นสมการ Quadratic polynomial เป็นการตรวจสอบในกรณีที่เป็นเส้นโค้งมีลักษณะเป็นพาราโบลา(Parabola)โดยจากสมการดังกล่าวหาส่วนสูงและความกว้างมีค่าเท่ากันก็จะสามารถบอกถึงความโค้งของครึ่งวงกลมได้เช่นกัน ซึ่งเมื่อนำตำแหน่งพิกัดในส่วนที่เป็นเส้นสีขาวมาทำการหาค่า Least square error ค่าที่ได้จะบ่งบอกถึงการกระจายตัวของข้อมูลหากการกระจายตัวน้อยก็จะแสดงว่ามีความเป็นเส้นโค้งมาก โดยค่าที่หาได้มีค่าเข้าใกล้เท่ากับ 1 จะแสดงถึงการกระจายตัวน้อยและมีค่าความเป็นเส้นโค้งมากนั่นเอง

แบบที่สองทำการตรวจสอบความเป็นเส้นโค้งด้วยการสร้างวงกลมจำลองจากกลุ่มข้อมูลที่ได้ด้วยวิธีการ Fitting Circle ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้ได้ค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางและระยะของรัศมีด้วยการนำตำแหน่งพิกัดในส่วนที่เป็นสีขาวมาแทนค่าในสมการดังต่อไปนี้

$$R^2 = (x - a)^2 + (y - b)^2 \quad (4)$$

เมื่อสร้างวงกลมจำลองขึ้นมาแล้วทำการหาระยะที่เกิดขึ้นระหว่างจุดศูนย์กลางกับตำแหน่งค่าพิกัดจุดของส่วนที่เป็นเส้นสีขาวทุกๆจุดดังที่แสดงในภาพที่ 41. จากนั้นทำการหาค่าความแตกต่างของระยะที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับระยะของรัศมีของเส้นตรงที่สร้างขึ้นมาเพื่อเปรียบเทียบซึ่งจะนำค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นนั้นไปทำการหาค่า Least square error ด้วยสมการที่ 2. ต่อไปโดยหากค่าที่หาได้มีค่าเข้าใกล้ 1 ก็แสดงถึงการกระจายตัวน้อยและมีค่าความเป็นเส้นโค้งมาก



รูปที่ 41. แสดงการสร้างวงกลมเปรียบเทียบกับข้อมูล

จากรูปที่ 41. จุดสีฟ้าคือตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เกิดขึ้นจากการทำ Fitting circle เส้นสีเขียวคือรูปวงกลมที่สร้างขึ้นด้วยรัศมีและจุดศูนย์กลางที่ได้จากการทำ Fitting circle ด้วยค่าพิกัดของเส้นที่ต้องการตรวจสอบเพื่อนำมาใช้ในการสร้างรูปวงกลมอ้างอิง และเส้นสีแดงคือเส้นตำแหน่งพิกัดที่เป็นเส้นสีขาวในภาพขาวดำ ซึ่งจะเห็นได้ว่าจะมีความแตกต่างระหว่างตำแหน่งของวงกลมอ้างอิงกับเส้นโค้งที่เกิดจากการขูดเจาะเกิดขึ้น ดังนั้นสามารถนำค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นไปทำการหาค่าความเป็นเส้นโค้งโดยการหาค่า Least square error ได้ดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น

บทที่ 4

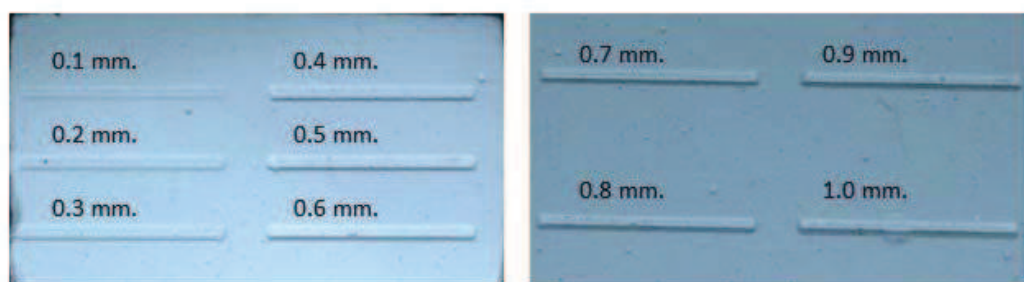
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในส่วนนี้จะเป็นการนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองใช้วิธีการหาความลึกซึ่งจะแบ่งเป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือ ผลการทดลองหาความลึกของเส้นตรง และ ผลการทดลองหาความลึกของเส้นโค้งเนื่องจากชิ้นงานที่ได้ทำการทดสอบนั้นมีการขุดเจาะสองรูปแบบ คือ มีการกรอพื้นผิวเป็นเส้นตรงและมีการกรอพื้นผิวเป็นเส้นโค้งดังที่ได้นำเสนอในข้างต้น ซึ่งผลลัพธ์จากการทดสอบได้ดังนี้

4.1 ผลการทดลองหาความลึก

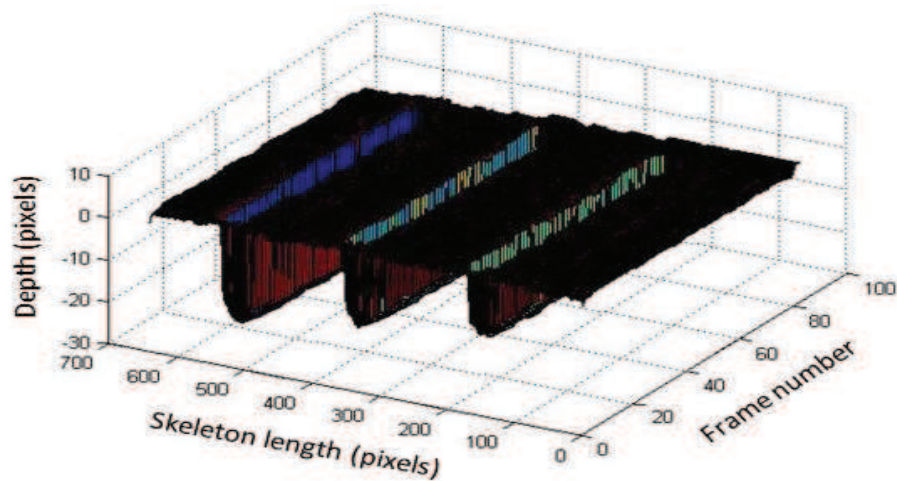
4.1.1.ผลการทดลองหาความลึกของชิ้นงานที่เป็นเส้นตรง

ในการทดสอบหาความลึกจริงของชิ้นงานที่เป็นเส้นตรงนั้นก่อนที่จะทำการนำระบบไปทดลองกับชิ้นงานจริงของทางทันตกรรมได้ทำการทดสอบหาความลึกจากชิ้นงานที่สร้างขึ้นด้วยการขุดเจาะด้วยเครื่อง CNC ซึ่งเหตุผลที่เลือกใช้เครื่อง CNC มาทำการขุดเจาะสร้างชิ้นงานนั้นเพราะสามารถขุดเจาะให้มีขนาดความลึกได้ถูกต้องแม่นยำสูง โดยชิ้นงานที่เกิดจากการขุดเจาะด้วยเครื่อง CNC ที่จะนำมาใช้ทำการทดลองจะมีความลึกอยู่ที่ 0.1 มิลลิเมตร จนถึง 1.0 มิลลิเมตร ดังที่ได้แสดงในภาพที่ 42.



รูปที่ 42. ภาพแสดงชิ้นงานเส้นตรงที่สร้างจากเครื่อง CNC

จากรูปที่ 42. เป็นชิ้นงานจากการขุดเจาะด้วยเครื่อง CNC ซึ่งจะนำไปทดสอบหาความลึกและทดลองสร้างระนาบสามมิติจากการประมวลผลภาพถ่ายตามกระบวนการที่ได้ทำการนำเสนอไว้ในข้างต้นโดยเมื่อนำข้อมูลมาสร้างระนาบสามมิติจะได้ดังรูปตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 43.



รูปที่ 43. แสดงตัวอย่างการสร้างระนาบสามมิติจากข้อมูลเส้นตรง

จากรูปที่ 43. เป็นรูประนาบสามมิติที่สร้างจากชิ้นงาน CNC ที่เส้นมีขนาดความลึกที่ 0.4 มิลลิเมตร 0.5 มิลลิเมตร และ 0.6 มิลลิเมตร ตามลำดับจากขวาไปซ้าย หลังจากสร้างระนาบสามมิติจะทำการอ่านค่าความลึกบนระนาบสามมิติที่สร้างได้จากการประมวลผลภาพถ่ายของความลึกที่อยู่บนชิ้นงาน CNC แต่ละเส้นจะได้ค่าดังที่แสดงอยู่ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2. ตารางความลึกที่อ่านจากระนาบสามมิติเปรียบเทียบกับความลึกจริง

Depth on 3D surface (Pixel)	Real Depth (mm.)
1.5	0.1
3.5	0.2
10.25	0.3
15.00	0.4
18.75	0.5

23.00	0.6
25.75	0.7
28.78	0.8
33.00	0.9
36.60	1.0

จากตารางที่ 2. แสดงให้เห็นค่าความลึกเป็นหน่วยพิกเซลที่เกิดจากการประมวลผลภาพถ่ายของชิ้นงาน CNC โดยในแต่ละระดับความลึกนั้นหากนำไปเปรียบเทียบจากหลักการที่ได้นำเสนอในข้างต้นแล้วจะต้องได้ค่าความลึกตามอุดมคติที่มีหน่วยเป็นพิกเซลดังที่แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3. ตารางความลึกในอุดมคติกับความลึกจริง

Ideal Depth (Pixel)	Real Depth (mm.)
3.7	0.1
7.4	0.2
11.1	0.3
14.8	0.4
18.5	0.5
22.2	0.6
25.9	0.7
29.6	0.8
33.3	0.9
37.0	1.0

จากค่าที่แสดงในตารางที่ 3 นั้นจะทำให้เราสามารถบอกถึงความถูกต้องของระบบที่ทำการตรวจสอบคุณภาพพื้นผิวที่ได้ออกแบบและนำไปใช้จริงนั้นมีมากน้อยเพียงใด ทำได้

โดยนำค่าความลึกในอุดมคติทางทฤษฎีที่มีหน่วยเป็นพิกเซลมาเปรียบเทียบกับความลึกที่คำนวณได้ของระบบที่ออกแบบ ซึ่งจะได้ค่าความผิดพลาดดังที่แสดงในตารางที่ 4

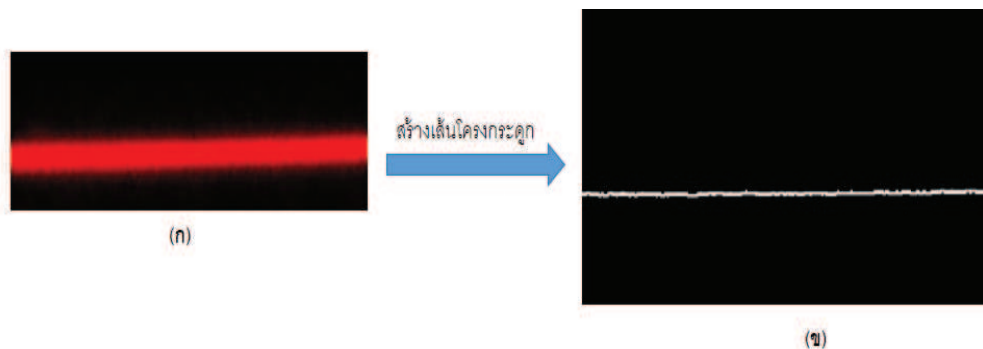
ตารางที่ 4. แสดงค่าความผิดพลาดของระบบที่เกิดขึ้น

Real Depth (mm.)	Ideal Depth (Pixel)	Depth on 3D surface (Pixel)	Error (%)
0.1	3.7	1.5	59.46
0.2	7.4	3.5	52.70
0.3	11.1	10.25	7.66
0.4	14.8	15.00	1.35
0.5	18.5	18.75	1.35
0.6	22.2	23.00	3.60
0.7	25.9	25.75	0.58
0.8	29.6	28.78	2.77
0.9	33.3	33.00	0.90
1.0	37.0	36.60	1.08

จากตารางที่ 4. จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของระบบในการตรวจสอบพื้นผิวของชิ้นงาน CNC ของเส้นตรง ที่มีระดับความลึกในช่วง 0.1 มิลลิเมตร ถึง 1.0 มิลลิเมตร ค่าระดับความลึกที่ 0.1 มิลลิเมตร และ 0.2 มิลลิเมตรค่าความผิดพลาดของระบบสูงเกินกว่า 50% เมื่อเทียบกับค่าอุดมคติทางทฤษฎี แต่ในระดับความลึกส่วนที่เหลือมีค่าความผิดพลาดที่ต่ำไม่เกิน 10 % เมื่อเทียบกับค่าอุดมคติทางทฤษฎี

โดยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการชูดเจาะชิ้นงานของเครื่อง CNC ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ ± 50 ไมครอน หรือ ± 0.05 มิลลิเมตรซึ่งเมื่อนำมาเปลี่ยนเป็นหน่วยพิกเซลจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ ± 1.9 พิกเซล นอกจากนี้ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะเกิดจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่ฉายเป็นเส้นตรงโดยจะมีค่าความคลาดเคลื่อนของการฉายแสงอยู่ดังที่ได้นำเสนอไปแล้วในบทที่ 3 โดยเมื่อนำไปทดสอบกับพื้นผิวที่ราบเรียบไม่มีร่องรอยของการชูด

เจาะ เมื่อทำการสร้างเส้นโครงกระดูกของเส้นแสงเลเซอร์ เส้นโครงกระดูกที่ได้จะไม่ตรง 100% แต่จะมีความแตกต่างของตำแหน่งพิกเซล ± 2.0 พิกเซล ดังที่แสดงในรูปที่ 44.



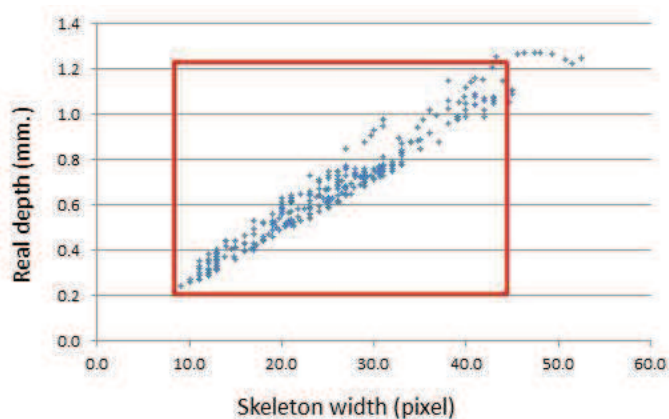
รูปที่ 44. แสดงลักษณะของเส้นแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบพื้นผิวเรียบ

จากรูปที่ 44. เมื่อฉายแสงเป็นเส้นตรงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ตกกระทบลงบนพื้นผิวที่เรียบไม่มีรอยขีดเจาะจะแสดงได้ดังรูปที่ 44 (ก). และเมื่อนำไปสร้างเส้นโครงกระดูกดังที่แสดงในรูปที่ 44 (ข). จะเห็นได้ว่าเส้นโครงกระดูกที่ได้ไม่ได้เป็นเส้นตรง 100% แต่จะมีความเหลื่อมล้ำของตำแหน่งพิกเซลในช่วง ± 2.0 พิกเซล ดังนั้นค่าเมื่อทำการรวมค่าคลาดเคลื่อนทั้งสองอย่างจะทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อนรวมอยู่ในช่วง ± 3.9 พิกเซล และหากนำมาเปรียบเทียบกับแต่ละช่วงของค่าความผิดพลาดในตารางที่ 4. จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงค่าความคลาดเคลื่อนรวมจากการขูดเจาะของเครื่อง CNC และแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ทราบถึงข้อจำกัดของระบบที่พัฒนาขึ้น คือ บอกระดับความลึกที่มีค่าน้อยในช่วงความลึกระดับ 0.1-0.2 มิลลิเมตร ได้ไม่ถูกต้องแม่นยำเนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนของการขูดเจาะชิ้นงานจากเครื่อง CNC และค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเส้นแสงเลเซอร์จึงทำให้เกิดค่าความผิดพลาดมาก ดังนั้นจึงเน้นความสนใจไปที่การหาค่าความลึกในช่วง 0.3-1.0 มิลลิเมตร

ลำดับถัดมานำระบบไปทำการทดลองตรวจสอบหาความลึกของชิ้นงานทางด้านทันตกรรม โดยจะใช้ชิ้นงานจำนวน 10 ชิ้น ที่มีระดับความลึกต่างๆบนเส้นที่เกิดจากการขูดเจาะจำนวน 450 จุด ซึ่งเราสามารถวัดค่าความลึกได้จากการอ่านค่าจากเครื่องมือวัดค่าที่มีชื่อว่า Dial

Gauge ซึ่งเมื่อเราทดสอบชิ้นงานทั้งหมดจะสามารถนำข้อมูลมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกจริงที่วัดได้กับค่าที่ได้จากการคำนวณของระบบดังในรูปที่ 45.



รูปที่ 45.กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกจริงและความลึกจากการคำนวณ

จากรูปที่ 45. เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความลึกจริง (Real depth) ที่ได้จากรัดด้วย Dial Gauge กับค่าความลึกที่คำนวณจากการประมวลผลภาพถ่าย (Skeleton width) โดยข้อมูลที่ได้ทดสอบทั้งหมด 450 จุดมีความลึกกระจายอยู่ในช่วงระดับความลึก 0.2-1.3 มิลลิเมตร ซึ่งเราสามารถแสดงรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความลึกจริงกับค่าความลึกที่คำนวณจากการประมวลผลภาพถ่ายที่มีค่าการกระจายตัวของกลุ่มข้อมูล (Least square error) เท่ากับ 0.9036 ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Y = 0.0225X + 0.074 \quad (5)$$

เมื่อ Y คือ ความลึกจริง

X คือ ความลึกที่คำนวณจากการประมวลผลภาพถ่าย

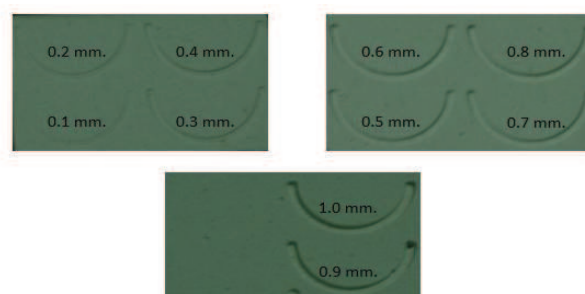
จากการทดสอบกับชิ้นงานจริงที่ถูกขูดเจาะเป็นเส้นตรงที่ระดับความลึกทั้ง 450 จุดสามารถแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของระบบเป็นช่วงระดับความลึกได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ

Real Depth (mm.)	Depth Approximation Error (%)		
	Max	Min	Average
0.2-0.3	13.0	0.0	7.0
0.3-0.4	15.0	0.0	8.0
0.4-0.5	15.0	0.0	8.0
0.5-0.6	15.0	0.0	8.0
0.6-0.7	15.0	0.0	8.0
0.7-0.8	15.0	0.0	8.0
0.8-0.9	15.0	0.0	8.0
0.9-1.0	15.0	0.0	8.0
1.0-1.1	15.0	0.0	7.0
1.1-1.2	15.0	0.1	7.0

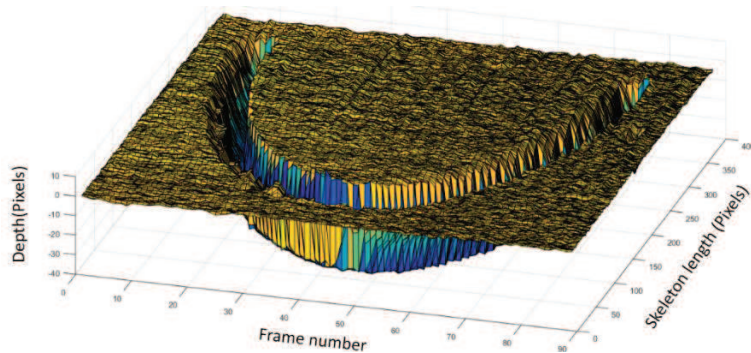
4.1.2. ผลการทดลองหาความลึกของชิ้นงานที่เป็นเส้นโค้ง

ในการทดสอบหาความลึกจริงของชิ้นงานที่เป็นเส้นโค้งนั้นก่อนที่จะทำการนำระบบไปทดลองกับชิ้นงานจริงของทางทันตกรรมได้ทำการทดสอบหาความลึกจากชิ้นงานที่สร้างขึ้นด้วยการขุดเจาะด้วยเครื่อง CNC เช่นเดียวกับการทดลองหาความลึกของชิ้นงานเส้นตรง โดยชิ้นงานที่เกิดจากการขุดเจาะด้วยเครื่อง CNC ที่จะนำมาใช้ทำการทดลองจะมีความลึกอยู่ที่ 0.1 มิลลิเมตร จนถึง 1.0 มิลลิเมตร ดังที่ได้แสดงในภาพที่ 46.



รูปที่ 46. ภาพแสดงชิ้นงานเส้นโค้งที่สร้างจากเครื่อง CNC

จากรูปที่ 46. เป็นชิ้นงานจากการขุดเจาะด้วยเครื่อง CNC ซึ่งจะไปทดสอบหาความลึกและทดลองสร้างระนาบสามมิติจากการประมวลผลภาพถ่ายตามกระบวนการที่ได้ทำการนำเสนอไว้ในข้างต้นโดยเมื่อนำข้อมูลมาสร้างระนาบสามมิติจะได้ดังรูปตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 47.



รูปที่ 47. แสดงตัวอย่างการสร้างระนาบสามมิติจากข้อมูลเส้นโค้ง

จากรูปที่ 47. เป็นรูประนาบสามมิติตัวอย่างที่เกิดจากการประมวลผลภาพถ่ายจากชิ้นงานที่สร้างจากเครื่อง CNC ที่มีความลึก 1.0 มิลลิเมตร หลังจากสร้างระนาบสามมิติจะทำการอ่านค่าความลึกบนระนาบสามมิติที่สร้างได้จากการประมวลผลภาพถ่ายของความลึกที่อยู่บนชิ้นงาน CNC แต่ละเส้นที่จะได้ค่าดังที่แสดงอยู่ในตารางที่ 6

ตารางที่ 6. ตารางความลึกที่เกิดจากการประมวลผลภาพเปรียบเทียบกับความลึกจริงของเส้นโค้ง

3D surface (Pixel)	Real Depth (mm.)
2.08	0.1
4.33	0.2
10.12	0.3
14.75	0.4
19.17	0.5
23.21	0.6
25.77	0.7
29.61	0.8

32.77	0.9
36.47	1.0

จากตารางที่ 6. แสดงให้เห็นค่าความลึกเป็นหน่วยพิกเซลที่เกิดจากการประมวลผลภาพถ่ายของชิ้นงาน CNC ซึ่งในแต่ละระดับความลึกจริง หากนำค่าที่เกิดจากการประมวลผลภาพถ่ายไปเปรียบเทียบกับค่าอุดมคติที่ได้นำเสนออยู่ในตารางที่ 3. จะสามารถบอกถึงค่าความผิดพลาดของระบบได้โดยสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.

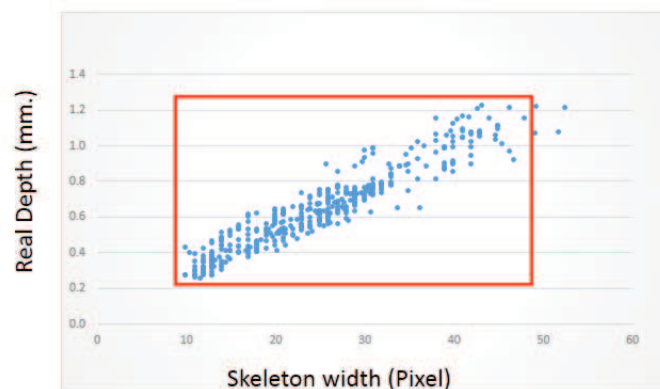
ตารางที่ 7. แสดงค่าความผิดพลาดของระบบที่เกิดขึ้น

Real Depth (mm.)	Ideal Depth (Pixel)	Depth on 3D surface (Pixel)	Error (%)
0.1	3.7	2.08	43.78
0.2	7.4	4.33	41.48
0.3	11.1	10.12	8.82
0.4	14.8	14.75	0.34
0.5	18.5	19.17	3.62
0.6	22.2	23.21	4.55
0.7	25.9	25.77	0.50
0.8	29.6	29.61	0.03
0.9	33.3	32.77	1.60
1.0	37.0	36.47	1.43

จากตารางที่ 7. จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของระบบในการตรวจสอบพื้นผิวของชิ้นงาน CNC ของเส้นโค้งที่มีระดับความลึกในช่วง 0.1 มิลลิเมตร ถึง 1.0 มิลลิเมตร ค่าระดับความลึกที่ 0.1 มิลลิเมตร และ 0.2 มิลลิเมตรค่าความผิดพลาดของระบบสูงเกินกว่า 40% เมื่อเทียบกับค่าอุดมคติทางทฤษฎี แต่ในระดับความลึกส่วนที่เหลือมีค่าความผิดพลาดที่ต่ำไม่เกิน 10% เมื่อเทียบกับค่าอุดมคติทางทฤษฎี

จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ทราบถึงข้อจำกัดของระบบที่พัฒนาขึ้น คือ บอกระดับความลึกที่มีค่าน้อยในช่วงความลึกระดับ 0.1-0.2 มิลลิเมตร ได้ไม่ถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นจึงเน้นความสนใจไปที่การหาค่าความลึกในช่วง 0.3-1.0 มิลลิเมตรเช่นเดียวกับเส้นตรง

ลำดับถัดมาจะนำระบบไปทำการทดลองตรวจสอบหาความลึกของชิ้นงานทางด้านพันตกรรม โดยจะใช้ชิ้นงานจำนวน 10 ชิ้น ที่มีระดับความลึกต่างๆบนเส้นที่เกิดจากการชุบเจาะ จำนวน 450 จุด และวัดค่าความลึกจากการอ่านค่าจากเครื่องมือวัดค่าที่มีชื่อว่า Dial Gauge เช่นเดียวกับขั้นตอนการทดลองของเส้นตรง ซึ่งเมื่อเราทดสอบชิ้นงานทั้งหมดจะสามารถนำข้อมูลมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกจริงที่วัดได้กับค่าที่ได้จากการคำนวณของระบบดังในรูปที่ 48.



รูปที่ 48.กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกจริงและความลึกจากการคำนวณ

จากรูปที่ 48. เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความลึกจริง (Real depth) ที่ได้จากวัดด้วย Dial Gauge กับค่าความลึกที่คำนวณจากการประมวลผลภาพถ่าย (Skeleton width) โดยข้อมูลที่ได้ทดสอบทั้งหมด 450 จุดมีความลึกกระจายอยู่ในช่วงระดับความลึก 0.3-1.2 มิลลิเมตร ซึ่งเราสามารถแสดงรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความลึกจริงกับค่าความลึกที่คำนวณจากการประมวลผลภาพถ่ายที่มีค่าการกระจายตัวของกลุ่มข้อมูล (Least square error) เท่ากับ 0.8970 ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Y = 0.0227X + 0.068 \quad (6)$$

เมื่อ Y คือ ความลึกจริง

X คือ ความลึกที่คำนวณจากการประมวลผลภาพถ่าย

จากการทดสอบกับชิ้นงานจริงที่ถูกขุดเจาะเป็นเส้นโค้งที่ระดับความลึกทั้ง 450 จุดสามารถแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของระบบเป็นช่วงระดับความลึกได้ดังตารางที่ 8

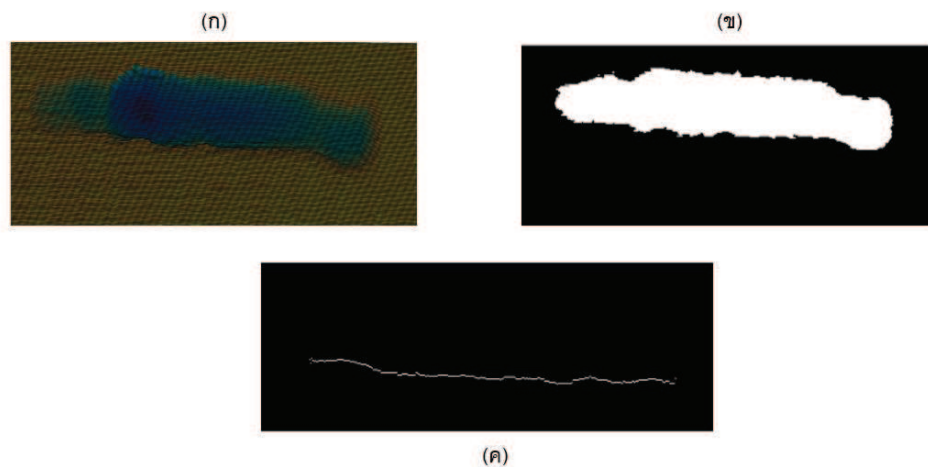
ตารางที่ 8 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ

Real Depth (mm.)	Depth Approximation Error (%)		
	Max	Min	Average
0.3-0.4	20.12	0.1	8.7
0.4-0.5	20.50	0.3	9.7
0.5-0.6	20.50	0.2	10.9
0.6-0.7	20.12	0.0	10.0
0.7-0.8	20.12	0.0	9.0
0.8-0.9	20.75	0.4	9.3
0.9-1.0	20.75	0.1	9.4
1.0-1.1	17.42	0.1	7.5
1.1-1.2	18.91	0.4	7.1

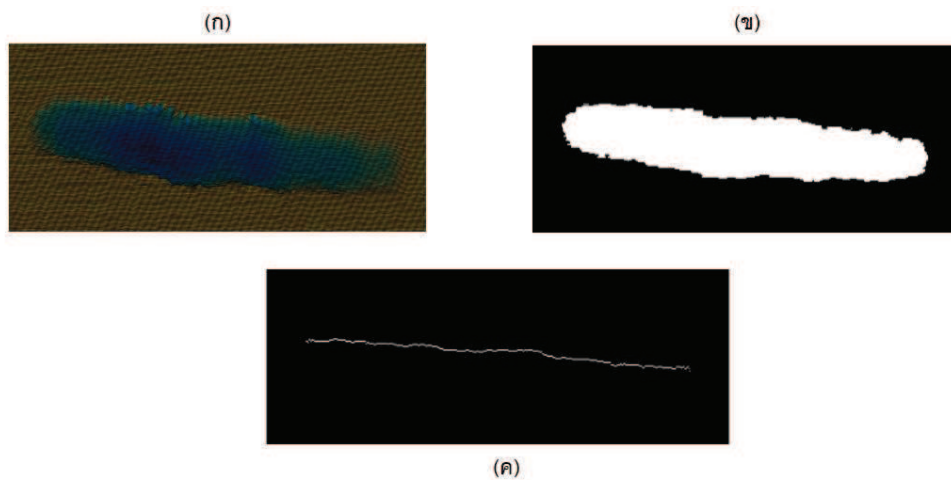
4.2 .ผลการทดลองหาค่าลักษณะของเส้นและการวางตัวของเส้นบนชิ้นงาน

4.2.1.ผลการทดลองหาการวางตัวและความเป็นเส้นตรง

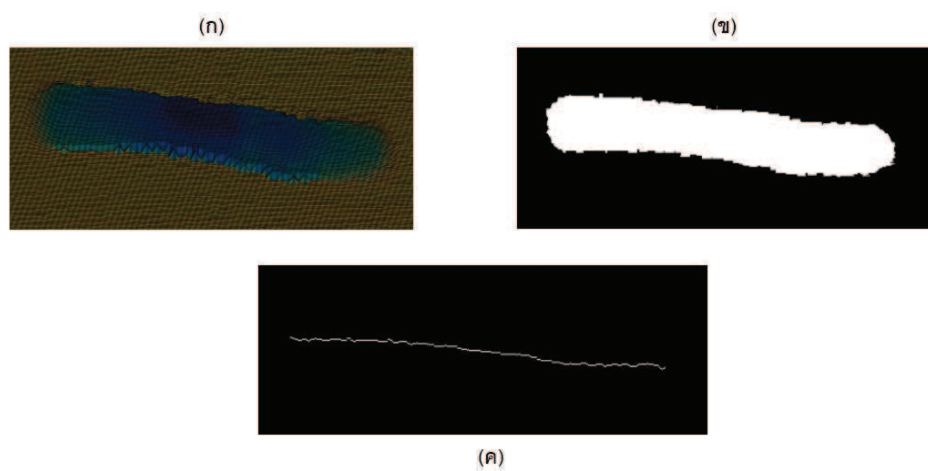
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลลัพธ์จากการประมวลผลด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอในบทที่ 3. ซึ่งจะยกตัวอย่างผลลัพธ์ ดังรูปที่ 49-58 โดยรูปแต่ละรูปจะแสดงรูประนาบสามมิติ ภาพขาวดำที่สร้างจากรูปสามมิติ และเส้นตรงที่สร้างจากค่ากึ่งกลางของภาพขาวดำ แสดงในรูป (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ ซึ่งจะแสดงผลที่เป็นค่าความเป็นเส้นตรง และมุมมองการวางตัวของเส้นตรงในตารางที่ 9.



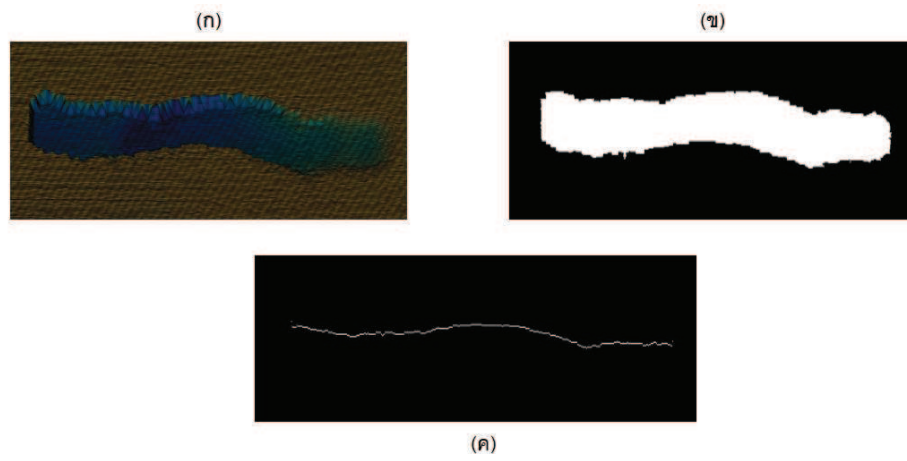
รูปที่ 49. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นตรงที่ 1



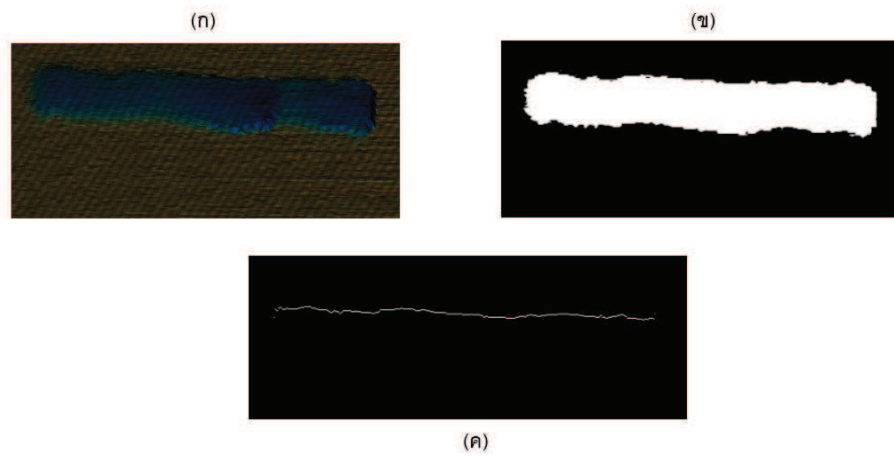
รูปที่ 50. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นตรงที่ 2



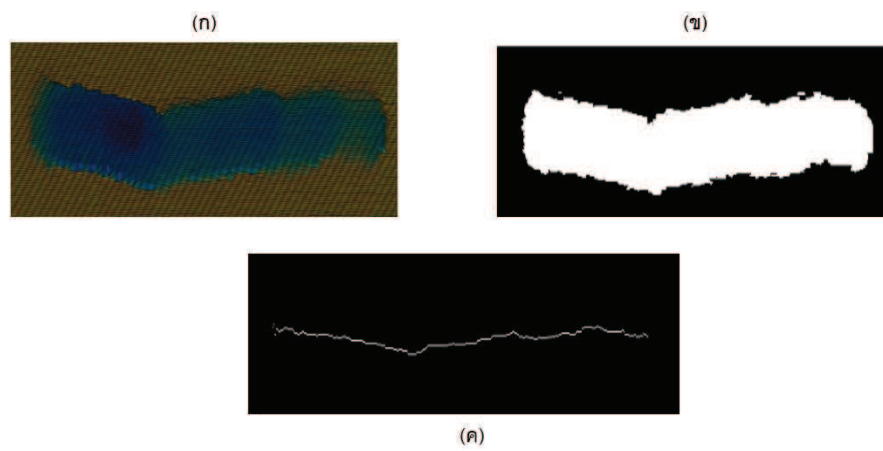
รูปที่ 51. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นตรงที่ 3



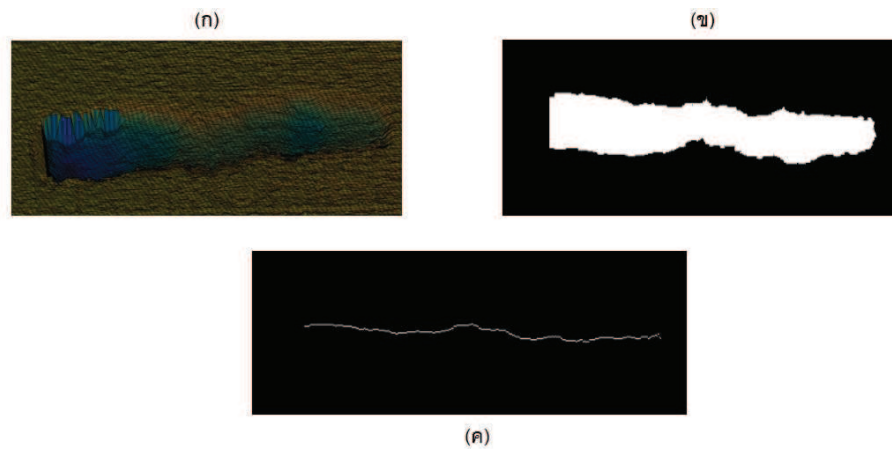
รูปที่ 52. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นตรงที่ 4



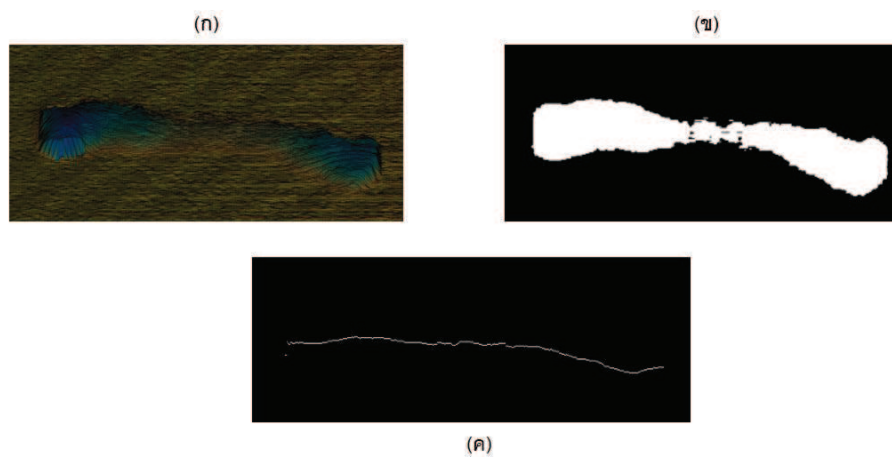
รูปที่ 53. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นตรงที่ 5



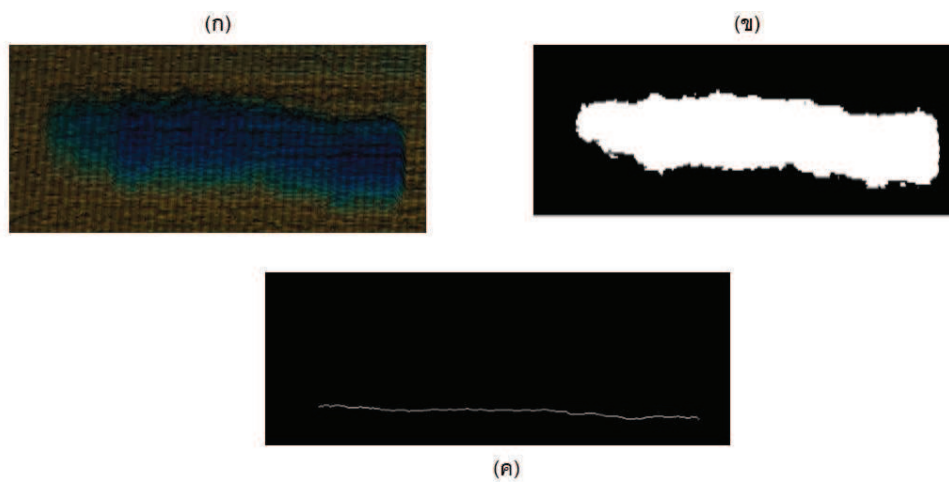
รูปที่ 54. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นตรงที่ 6



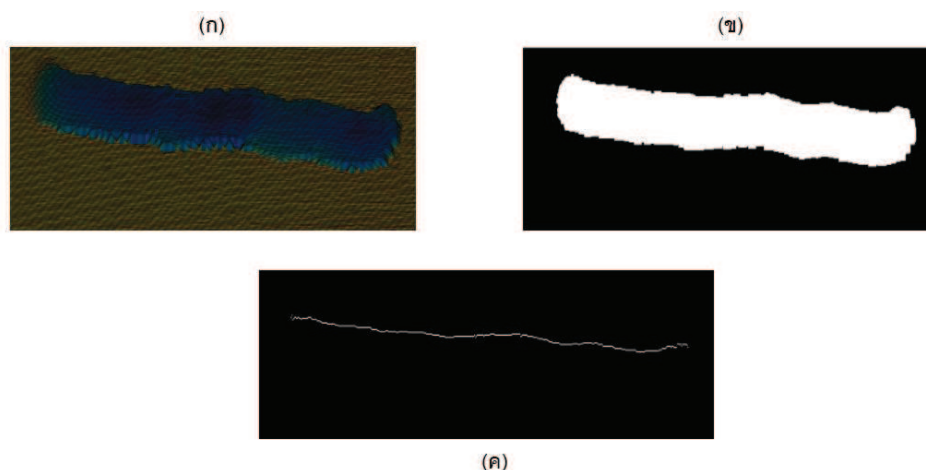
รูปที่ 55. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นตรงที่ 7



รูปที่ 56. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นตรงที่ 8



รูปที่ 57. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นตรงที่ 9



รูปที่ 58. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นตรงที่ 10

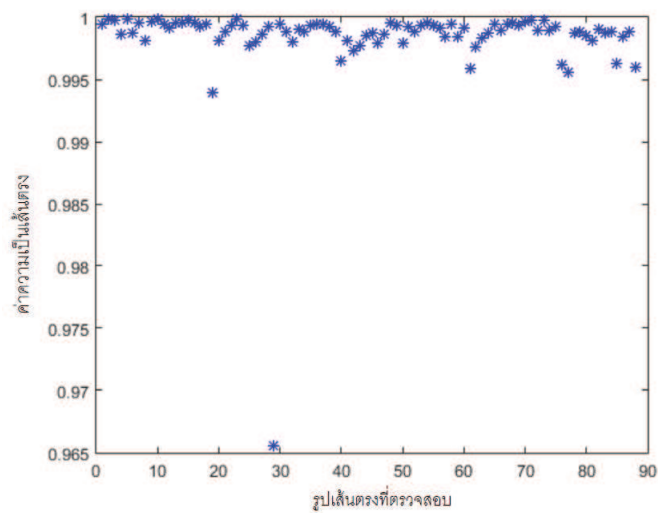
ตารางที่ 9. แสดงค่าผลลัพธ์ความเป็นเส้นตรงและมุมมองศากการวางตัวของตัวอย่าง

ตัวอย่างที่	ค่าความเป็นเส้นตรง	มุมมองศากการวางตัว
1	0.9994	-3.4
2	0.9998	-2.5
3	0.9997	-1.7
4	0.9986	-4.9
5	0.9998	-5.3
6	0.9987	-6.1
7	0.9994	-4.8
8	0.9981	-2.4
9	0.9996	-3.1
10	0.9998	-3.2

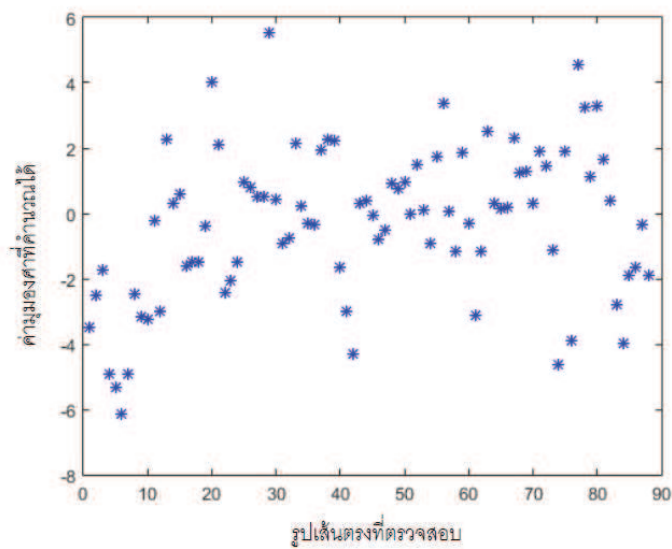
จากตารางที่ 9. ค่าความเป็นเส้นตรงทั้ง 10 ตัวอย่างชิ้นงานสามารถระบุได้ว่า โมเดลหาค่าความเป็นเส้นตรงสามารถบอกถึงความเป็นเส้นตรงของชิ้นงานได้อย่างถูกต้อง ซึ่ง หากเส้นตรงใดมีค่าความเป็นเส้นตรงเข้าใกล้เท่ากับ 1 จะแสดงให้เห็นถึงมีความเป็นเส้นตรงมาก

และจากค่ามุมมองศากการวางตัวจะสังเกตได้ว่าการวางตัวของเส้นตรงนั้นเอียงลักษณะใด ซึ่งในที่นี้
เส้นทั้ง 10 เส้นวางตัวเอียงลงล่างเมื่อเทียบกับระดับระนาบ

ในการทดลองตรวจสอบเส้นตรงจำนวน 88 เส้น สามารถแสดงข้อมูลค่าความเป็นเส้นตรงที่ทำการทดสอบเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 59. และแสดงข้อมูลมุมมองศากการวางตัวในรูปแบบที่ 60.



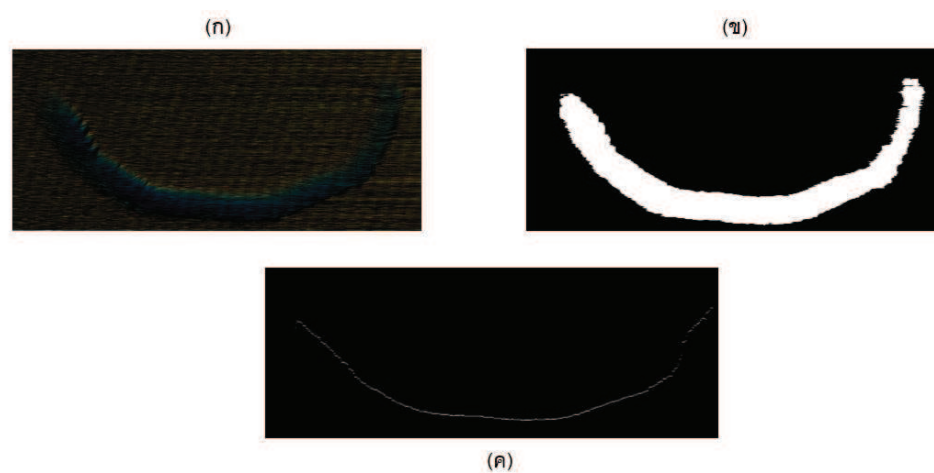
รูปที่ 59. แสดงกราฟค่าความเป็นเส้นตรงที่ได้ทดลอง



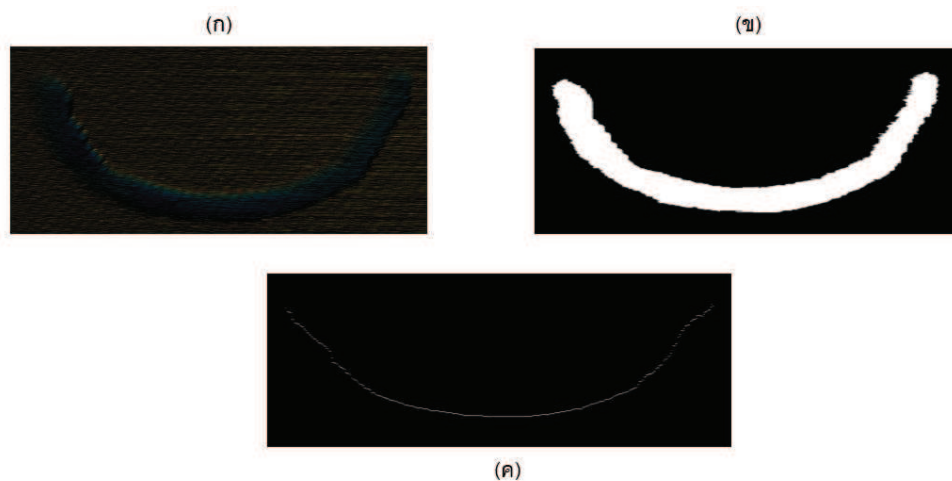
รูปที่ 60. แสดงมุมมองศากการวางตัวของเส้นตรง

4.2.2. ผลการทดลองหาการวางตัวและความเป็นเส้นโค้ง

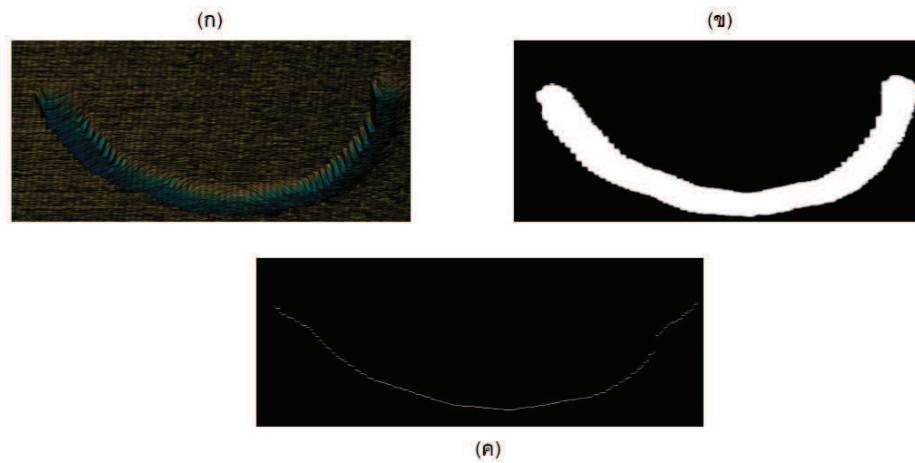
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลลัพธ์จากการประมวลผลด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอในบทที่ 3. ซึ่งจะยกตัวอย่างผลลัพธ์ ดังรูปที่ 61-70 โดยรูปแต่ละรูปจะแสดงรูประนาบสามมิติ ภาพขาวดำที่สร้างจากรูปสามมิติ และเส้นโค้งที่สร้างจากค่ากึ่งกลางของภาพขาวดำ แสดงในรูป (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ ซึ่งจะแสดงผลที่เป็นค่าความเป็นเส้นโค้ง และมุมมองศากการวางตัวของเส้นโค้งในตารางที่ 10.



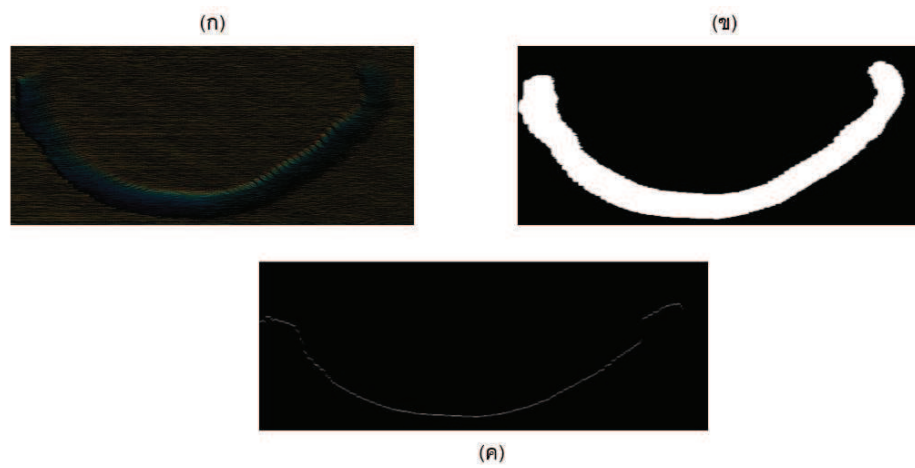
รูปที่ 61. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นโค้งที่ 1



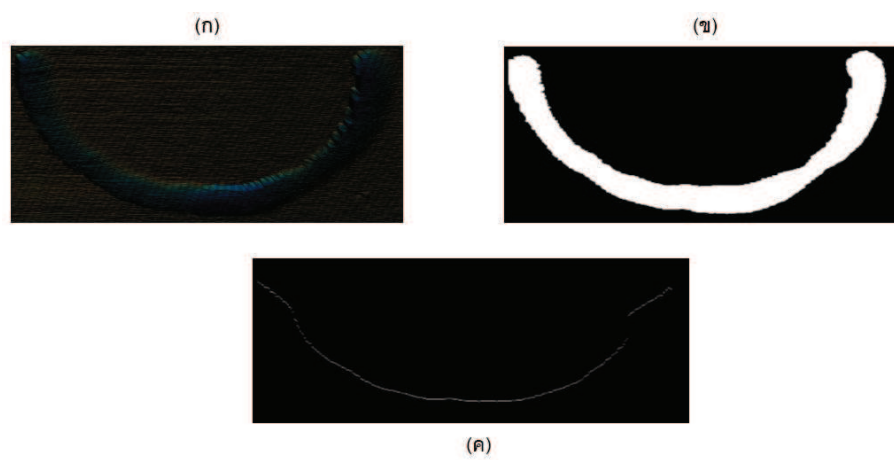
รูปที่ 62. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นโค้งที่ 2



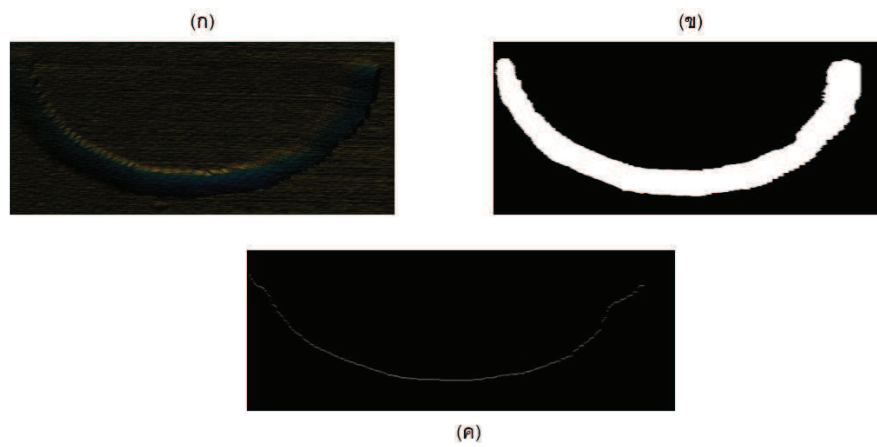
รูปที่ 63. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นโค้งที่ 3



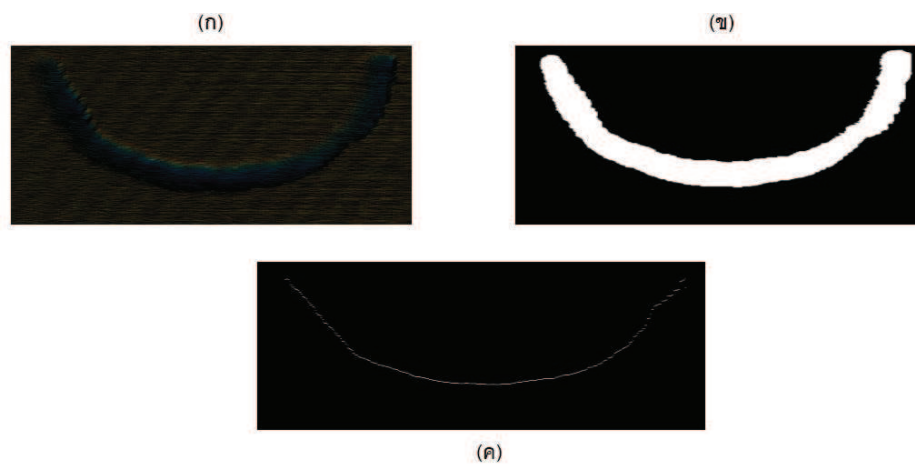
รูปที่ 64. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นโค้งที่ 4



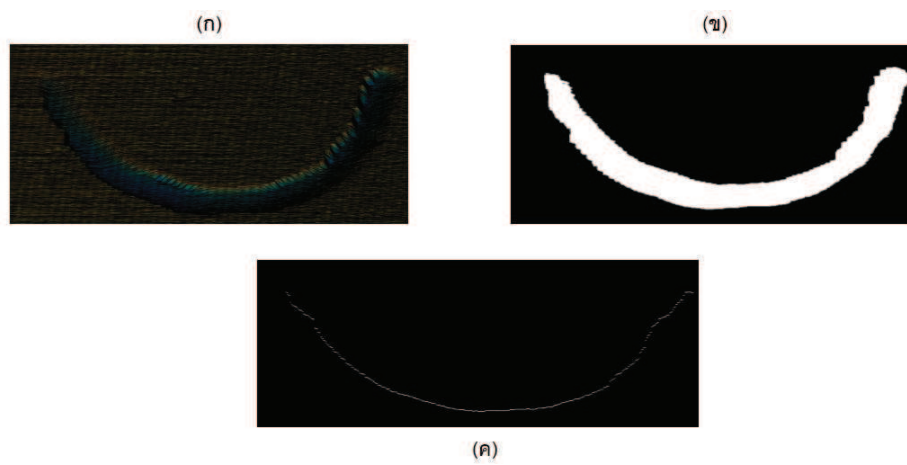
รูปที่ 65. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นโค้งที่ 5



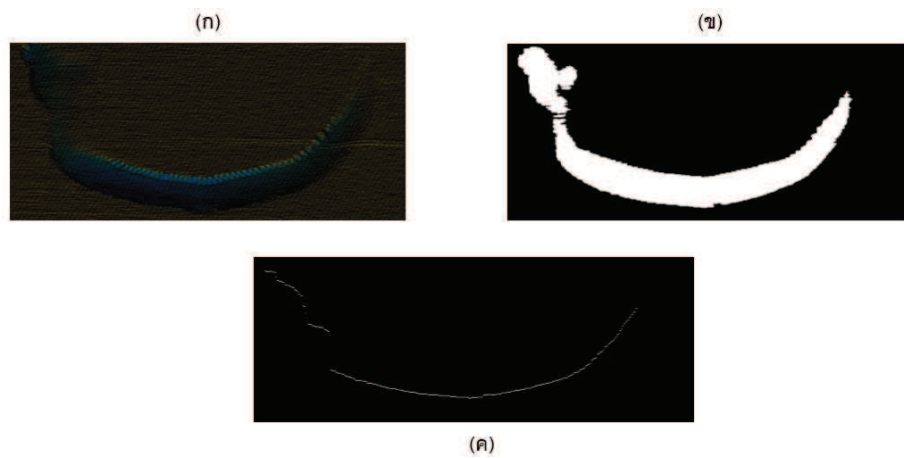
รูปที่ 66. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นโค้งที่ 6



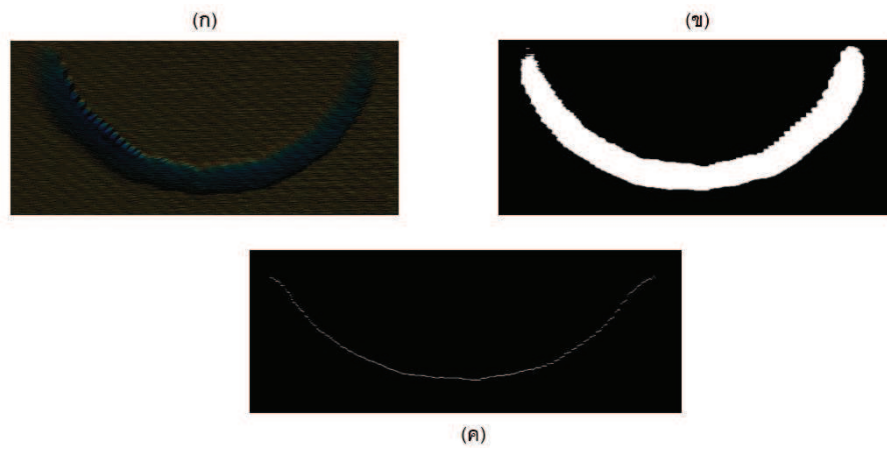
รูปที่ 67. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นโค้งที่ 7



รูปที่ 68. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นโค้งที่ 8



รูปที่ 69. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นโค้งที่ 9



รูปที่ 70. แสดงตัวอย่างผลลัพธ์เส้นโค้งที่ 10

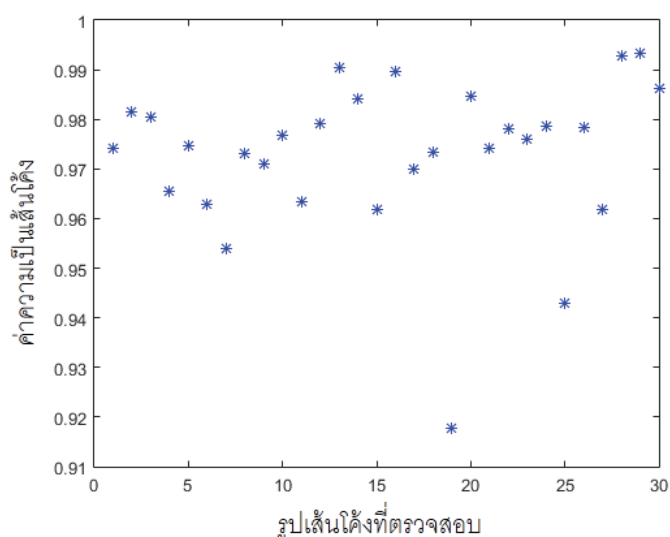
ตารางที่ 10. แสดงค่าผลลัพธ์ความเป็นเส้นโค้งและมุมมองศกการวางตัวของตัวอย่าง

ตัวอย่างที่	ค่าความเป็นเส้นโค้ง พาราโบลา	ค่าความเป็นเส้นโค้ง ครึ่งวงกลม	มุมมองศกการวางตัว
1	0.9540	0.9989	0.8
2	0.9731	0.9983	0.8
3	0.9711	0.9957	1.6
4	0.9784	0.9938	1.1
5	0.9699	0.9969	-2.7
6	0.9732	0.9978	-0.5

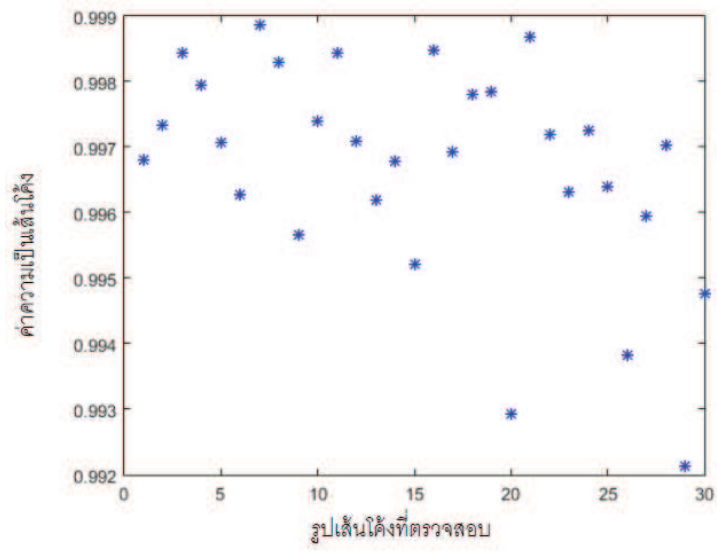
7	0.9740	0.9987	-0.1
8	0.9785	0.9973	-0.9
9	0.9430	0.9964	6.4
10	0.9897	0.9985	-3.1

จากตารางที่ 10. ค่าความเป็นเส้นโค้งทั้ง 10 ตัวอย่างซึ่งงานสามารถระบุได้ว่า โมเดลหาค่าความเป็นเส้นโค้งสามารถบอกถึงความเป็นเส้นโค้งของชิ้นงานได้อย่างถูกต้อง ซึ่งหากเส้นโค้งใดมีค่าความเป็นเส้นโค้งเข้าใกล้เท่ากับ 1 จะแสดงให้เห็นถึงมีค่าความเป็นเส้นโค้งมาก และจากค่ามุมมองศากการวางตัวจะสังเกตได้ว่าการวางตัวของเส้นโค้งนั้นเอียงลักษณะใด ซึ่งในที่นี้เส้นโค้งที่ 1 2 3 4 และ 9 วางตัวเอียงขึ้นส่วนเส้นโค้งที่ 5 6 7 8 และ 10 วางตัวเอียงลงเมื่อเทียบกับแนวระนาบ

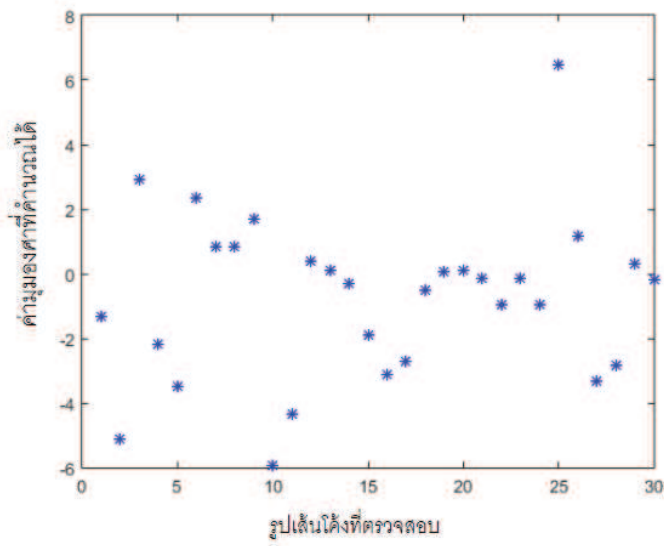
ในการทดลองตรวจสอบเส้นโค้งจำนวน 30 เส้น สามารถแสดงข้อมูลค่าความเป็นเส้นโค้งที่ทำการทดสอบแบบที่ 1 และแบบที่ 2 เป็นกราฟได้ดังรูปที่ 71. และรูปที่ 72. และแสดงข้อมูลมุมมองศากการวางตัวในรูปที่ 73.



รูปที่ 71. แสดงกราฟค่าความเป็นเส้นโค้งพาราโบลา



รูปที่ 72. แสดงกราฟค่าความเป็นเส้นโค้งครึ่งวงกลม



รูปที่ 73. แสดงมุมมองค่าการวางตัวของเส้นโค้ง

บทที่ 5


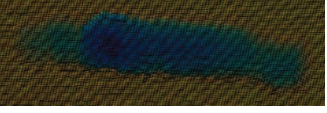

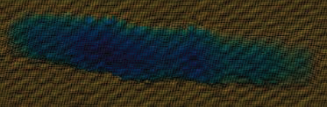
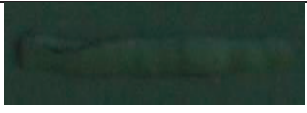
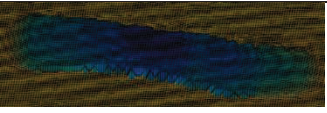
บทสรุป ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะของการดำเนินงานทำวิจัย ปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำวิทยานิพนธ์ และท้ายที่สุดจะกล่าวถึงรายละเอียดและข้อเสนอแนะแก่ผู้ที่สนใจที่จะนำวิทยานิพนธ์ชุดนี้ไปพัฒนาต่อไป

5.1 บทสรุปของการทำวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ชุดนี้เป็นการนำเสนอวิธีการตรวจสอบคุณภาพพื้นผิวด้วยระบบวิเคราะห์ภาพถ่ายที่มีความสามารถหาความลึกจากภาพถ่ายพื้นผิวซึ่งงานได้ในระดับมิลลิเมตร โดยมีจุดประสงค์หลักในการตรวจสอบหาความลึกและรูปร่างที่เกิดจากการขูดเจาะ(การกรอ) ของนักศึกษาทางทันตแพทย์ เพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญที่ทำการตรวจสอบสามารถนำค่าที่ได้จากการตรวจสอบด้วยระบบวิเคราะห์ภาพถ่ายไปใช้ประกอบการตัดสินใจในการสร้างเกณฑ์การให้คะแนนของชิ้นงานที่ลงมือปฏิบัติของนักศึกษา โดยค่าที่ได้จะประกอบไปด้วย ค่าความลึกบนชิ้นงานที่สามารถอ่านค่าได้จากระนาบสามมิติ ค่ามุมมองศากการวางตัวของร่องรอยการขูดเจาะเป็นองศา ค่าความเป็นเส้นตรง และค่าความเป็นเส้นโค้ง ดังที่แสดงตัวอย่างในตารางที่ 11.และตารางที่ 12. ซึ่งค่าต่างๆจะช่วยลดระยะเวลาและเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบชิ้นงานของผู้ให้คะแนน

ตารางที่ 11. แสดงค่าตัวอย่างที่ให้ผู้ตรวจสอบนำไปใช้(เส้นตรง)

ภาพถ่ายชิ้นงาน	ภาพสามมิติ	ค่าความเป็นเส้นตรง	ค่ามุมมององศา
		0.9994	-3.4
		0.9998	-1.7
		0.9997	-4.9

ตารางที่ 12. แสดงค่าตัวอย่างที่ให้ผู้ตรวจสอบนำไปใช้(เส้นโค้ง)

ภาพถ่ายชิ้นงาน	ภาพสามมิติ	ค่าความเป็นเส้นโค้งพาราโบลา	ค่าความเป็นเส้นโค้งครึ่งวงกลม	ค่ามุมมองศา
		0.9540	0.9989	0.8
		0.9731	0.9983	0.8
		0.9711	0.9957	1.6

5.2 ปัญหาและข้อจำกัดของระบบ

ปัญหาที่พบในการดำเนินงาน เนื่องจากการตรวจสอบวัดความลึกจริงบนพื้นผิวชิ้นงานจำเป็นต้องวัดด้วยการอ่านค่าจากเครื่องมือวัดทำให้ต้องใช้เวลามากในการตรวจสอบ เพื่อนำค่าความลึกจริงที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าที่ประมวลผลด้วยภาพถ่าย อีกทั้งระบบที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นยังมีข้อจำกัดของระบบอยู่นั้นก็คือ ข้อมูลความลึกบางส่วนในขณะที่เส้นของแสงเลเซอร์อยู่ในตำแหน่งเริ่มแรกของรอยชุดจะขาดหายไป เนื่องจากการฉายแสงเลเซอร์ที่ทำมุม 45 องศา

5.3 ข้อเสนอแนะ

ระบบที่พัฒนาในงานวิจัยนี้สามารถตรวจสอบหาความลึกได้ในระดับมิลลิเมตรซึ่งจำเป็นต้องมีการติดตั้งระบบที่ถูกต้อง เนื่องจากการติดตั้งระบบส่งผลต่อการประมวลผลหาความลึกของภาพถ่าย

บรรณานุกรม

- [1] H.Fukui, J.Takagi, Y.Murata, M.Takeuchi, 1997, "An Image Processing Method To Detect Road Surface Condition Using Optical Spatial Frequency", Intelligent Transportation System, IEEE, pp.1005-1009.
- [2] E. Deutschl, C.Gasser, A.Niel, J. Werschonig, 2004, "Defect Detection on Rail Surfaces by a Vision based System", Intelligent Vehicles Symposium University of Parma, IEEE, pp.507-511.
- [3] K.Ohtani, M.Baba, 2009, "A Laser Rangefinder with the Ability to Identify Surface Roughness and Detect the 3-D Shape of Metal Parts", ICROS-SICE International Joint Conference, IEEE, pp.3451-3456.
- [4] S.K.Nayar, K.Ikeuchi, T.Kanade, 1991, "Surface reflection physical and geometrical perspectives", Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE, Vol.13, pp.611-634.
- [5] A.Zhou, J.Guo, W.Shao, 2011, "Automated Detection of Surface Defects on Sphere Parts Using Laser and CDD Measurements", IECON 2011 -37th Annual on IEEE Industrial Electronics Society, pp.2666-2671.
- [6] G.A.Al-Kindi, 2008, "A Vision-based Approach for Surface Roughness Assessment at Micro and Nano scales", Control, Automation, Robotics and Vision, 10th International Conference, IEEE, pp.1903-1908.
- [7] H.Hirabayashi, T.Matsuo, H.Ishizawa, H.Kanai, T.Nishimatsu, 2006, "Surface Roughness Evaluation by Laser Speckle", SICE-ICASE International Joint Conference, IEEE, pp.5809-5812.
- [8] Z.Zhong-liang, Y.Jia-ju, 2010, "Study on Image Processing Technology in Imaging Laser Detection System", 2010 Symposium on Photonic and Optoelectronics, IEEE, pp.1-4.
- [9] D.Zhi-guo, D.Yong-jun, L.Yuan-zong, 2010, "Surface Roughness Measurement Based on Image Comparison", 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), Vol.5, IEEE, pp.361-364.

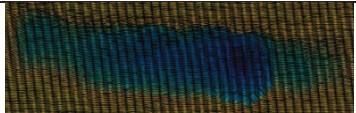

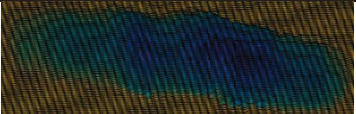

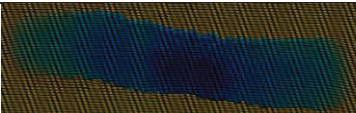

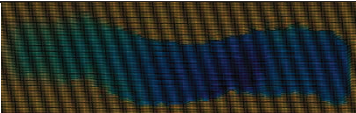

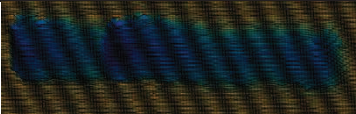

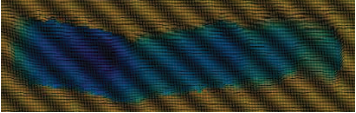

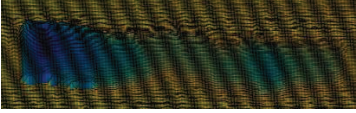

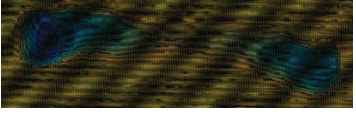

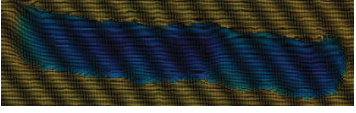

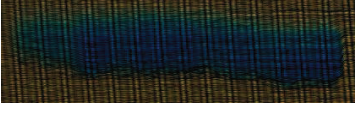

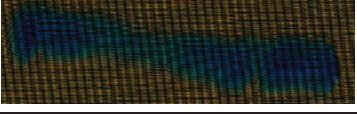
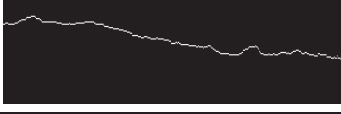
- [10] Rafael, C.Gonzalez, Richard, "Digital Image Processing Using Matlab ", Book, pp.453-455.
- [11] Mark, S.Nixon, S.Aguado, 2002, "Feature Extraction and Image Processing", Book, pp.173-198.
- [12] Fred Seeber , "Fundamentals of Photonics " Module 1.2, Book, pp.39-47.
- [13] N.T.Sy, M.Avila, S.Begot, J.C.Batrdet, 2008, " Detection of Defects in Road Surface by a Vision", MELECON 2008 The 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, IEEE, pp.847-851.
- [14] T.S.Nguyen, M.Avila, B.Stephane, 2009, "Automatic Detection and Classification of Defect on Road Pavement Using Anisotropy Measure", Signal Processing Conference 2009 17th European, IEEE, pp.617-621.
- [15] Laykin, S., et al., 2002, "Image-Processing Algorithms for Tomato Classification", Transactions of the ASAE, Vol. 45, pp.851-858.
- [16] Jun, Q., 2004, "Mobile Fruit Grading Robot - Concept and Prototype-", International ASAE Meeting,
- [17] Rennick, G., 1999, "Machine Grading and Blemish Detection in Apples", Signale Processing and Its applications, pp.567-570.
- [18] Pearson, T., 2002, "Automated Sorting of Almonds with Embedded", International ASAE Meeting,
- [19] Kim, M.S., 2001, "Hyperspectral Reflectance and Fluorescence Imaging System for Food Quality and Safety", Transaction of the ASAE, Vol., pp.721-729.
- [20] Shatadal, P. and Tan, J., 2003, "Identifying Damaged Soybeans by Color Image Analysis", American Society of Agricultural Engineers, pp.65-69.
- [21] Su, L., Oja, E., and Kultanen, P., 1990, "A New Curve Detection Method: Randomized Hough Transform (RHT)", Pattern Recognition, Letter, Vol.11, pp.331-338.

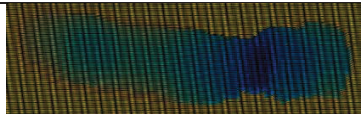

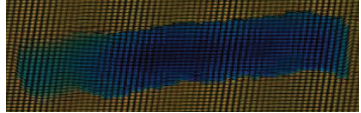

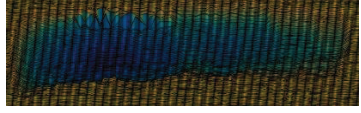

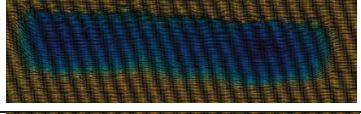

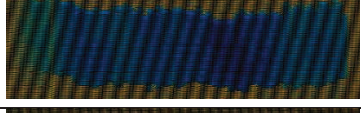

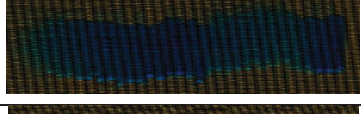

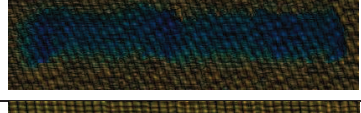

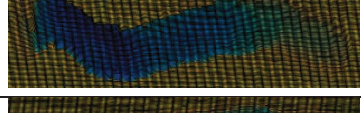
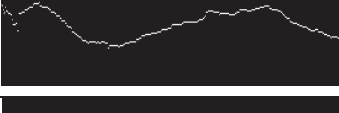
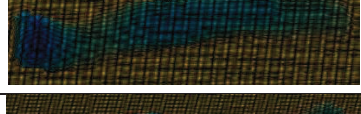
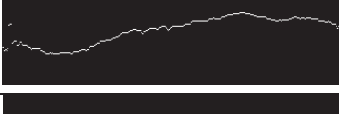


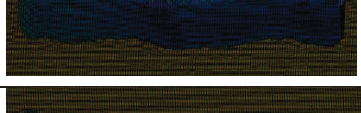

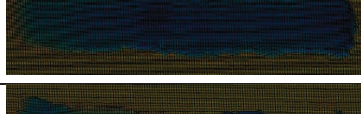

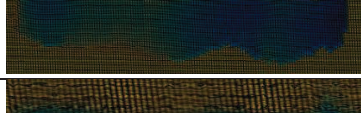

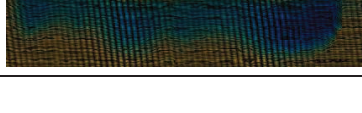

- [22] Xu, L. and Oja, E., 1993, "Randomized Hough Transform (RHT): Basic Mechanisms, Algorithms, and Computation Complexities", *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 57, pp. 111-122.
- [23] Robert, A.M., 1996, "Randomized Hough Transform: Better Ellipse Detection", *IEEE TENCON-Digital Signal Processing Applications*, pp. 409-414.
- [24] Martin, A.F. and Robert, C.B., 1981, "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography", *Communications of the ACM*, Vol. 24, pp. 381-395.
- [25] Andrew, F., Maurizio, P., and Robert, B.F., 1999, "Direct Least Square Fitting of Ellipse", *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 21, pp. 446-480.
- [26] M. C. Corporation, *How it Works: Science and Technology*. Marshall Cavendish, 2003.
- [27] Ganapathiraman, Subburengan, 2005, "Quantification of Surface Defects Using Primary Highlight In Diffuse Angle Gray Scale Images", *University of Kentucky Master's Theses*. Paper 348.

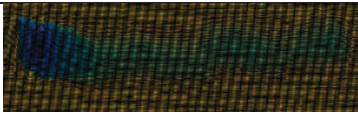

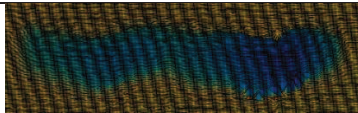

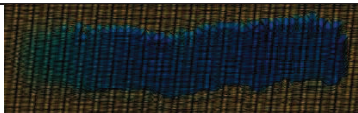

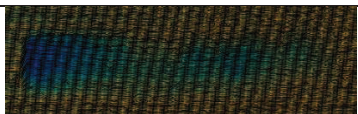

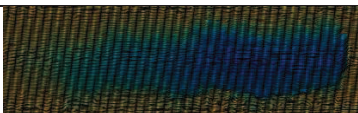

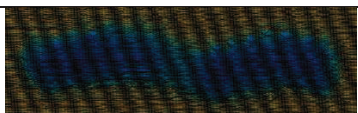
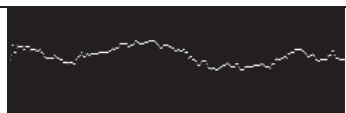
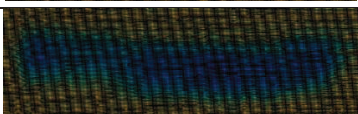

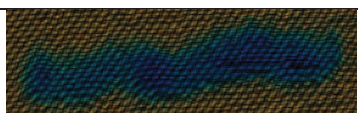

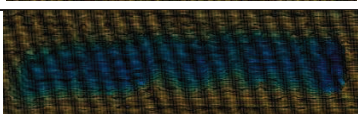
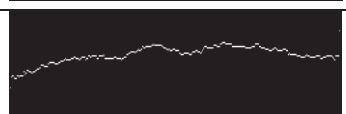
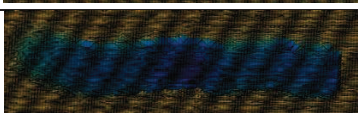
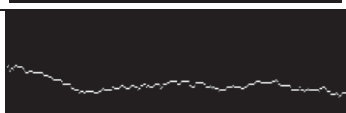
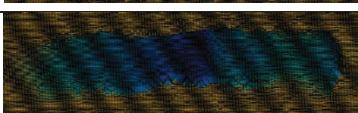

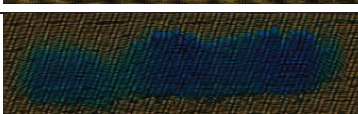
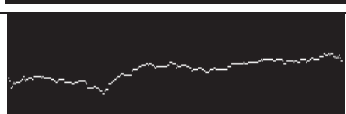
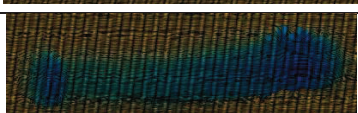
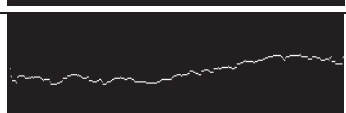
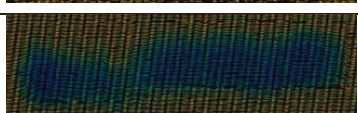
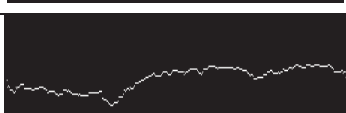
ภาคผนวก

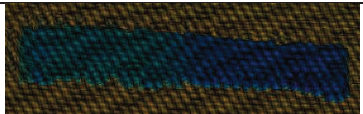

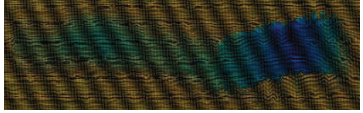

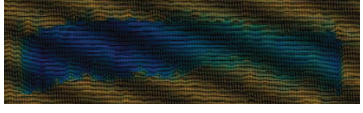

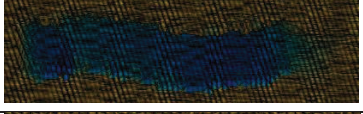

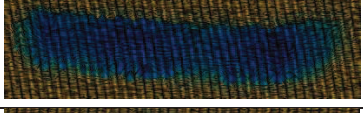

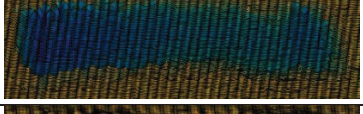

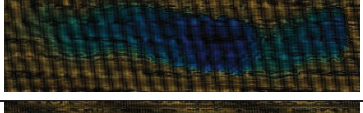

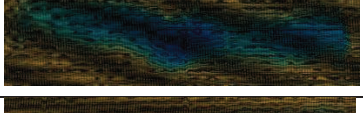

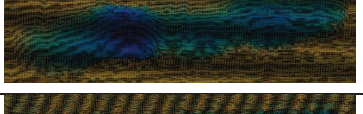

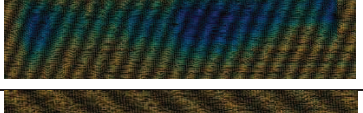

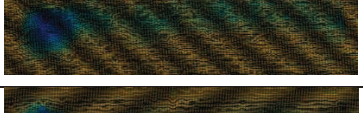

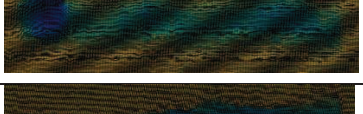



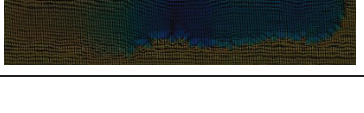

ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบ

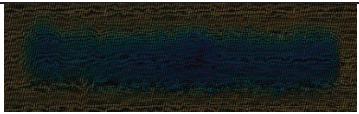

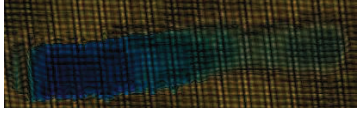

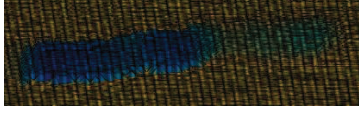

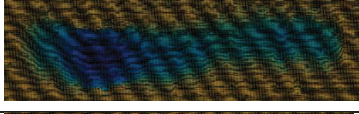
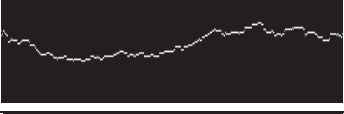
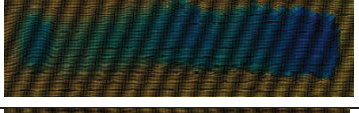

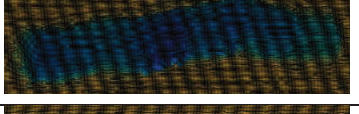
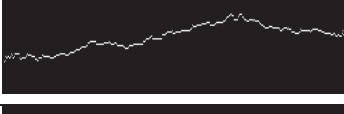
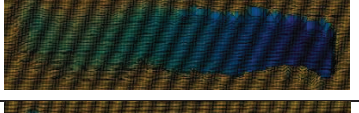

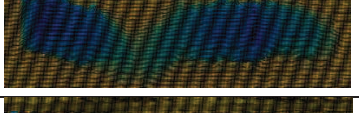
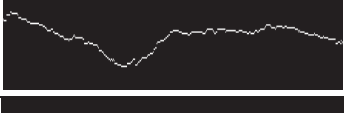
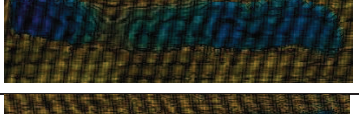

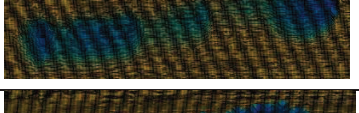

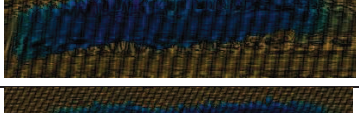

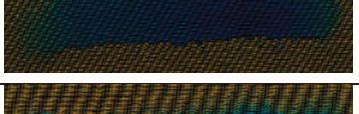

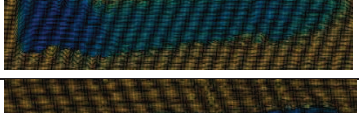

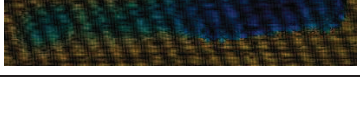

ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบเส้นตรง

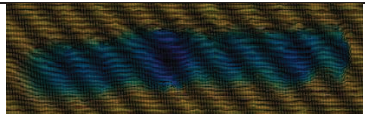

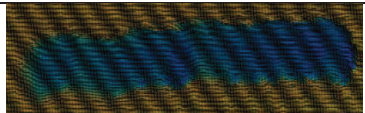

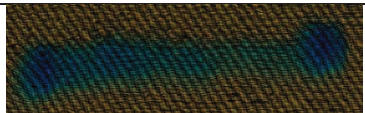

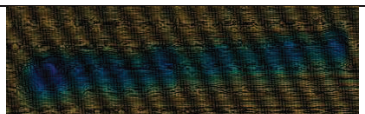

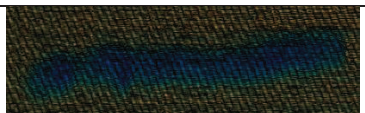

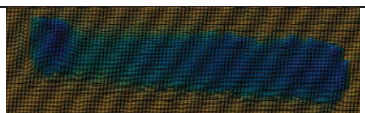

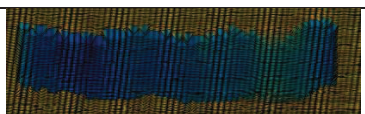

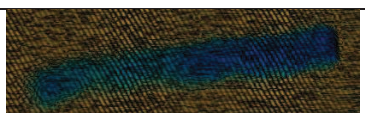

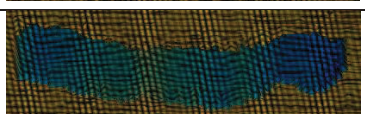

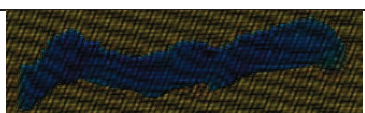
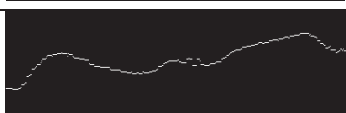
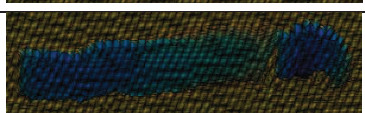
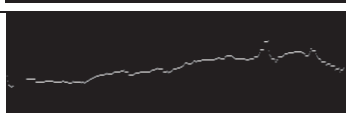
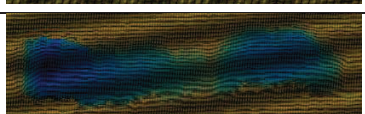

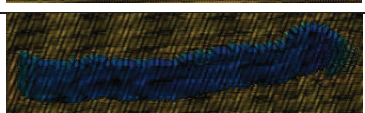
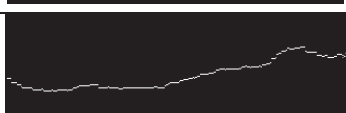
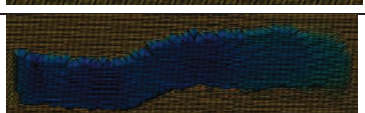
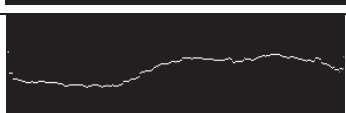
ภาพสามมิติ	ภาพโครงกระดูกของ เส้นตรง	ค่าความ เป็น เส้นตรง	ค่ามุม องศา
		0.9994	-3.4
		0.9999	-2.5
		0.9997	-1.7
		0.9987	-4.9
		0.9998	-5.3
		0.9987	-6.1
		0.9995	-4.8
		0.9981	-2.4
		0.9997	-3.1
		0.9998	-3.2
		0.9995	-0.2

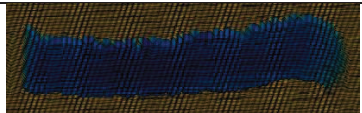

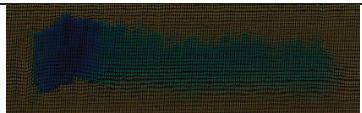

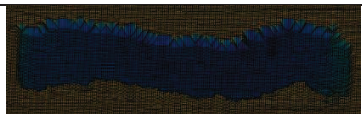



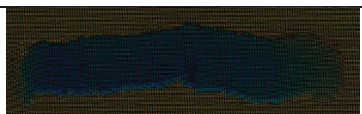

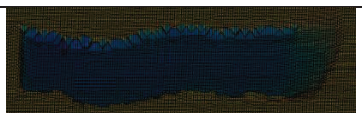

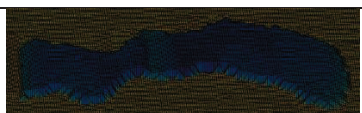

		0.9991	-3.0
		0.9996	2.2
		0.9995	0.2
		0.9997	0.5
		0.9995	-1.6
		0.9992	-1.4
		0.9994	-1.4
		0.9939	-0.3
		0.9981	4.0
		0.9989	2.1
		0.9994	-2.4
		0.9998	-2.0
		0.9994	-1.5
		0.9977	0.9

		0.9980	0.7
		0.9986	0.4
		0.9993	0.5
		0.9655	5.5
		0.9995	0.4
		0.9988	-0.9
		0.9980	-0.7
		0.9991	2.1
		0.9988	0.2
		0.9993	-0.2
		0.9994	-0.3
		0.9994	1.9
		0.9992	2.2
		0.9988	2.2

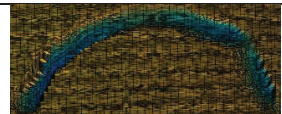

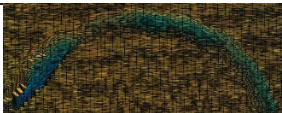

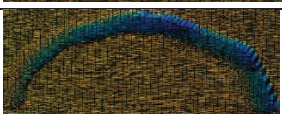

		0.9965	-1.6
		0.9981	-2.9
		0.9973	-4.3
		0.9977	0.3
		0.9985	0.3
		0.9987	-0.1
		0.9979	-0.8
		0.9986	-0.4
		0.9995	0.9
		0.9993	0.7
		0.9979	0.9
		0.9992	-0.1
		0.9988	1.4
		0.9993	0.1

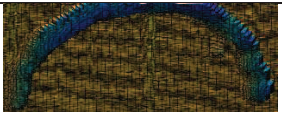

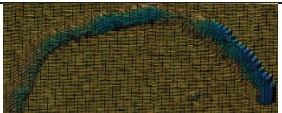

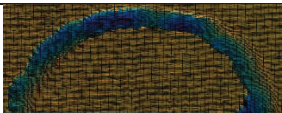

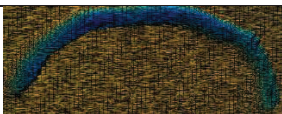

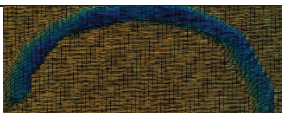

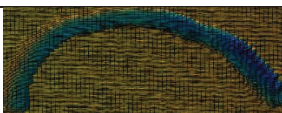

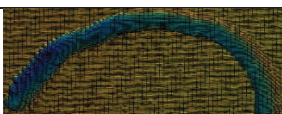

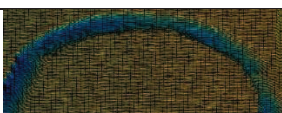

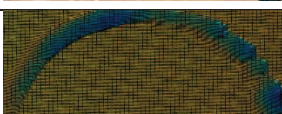
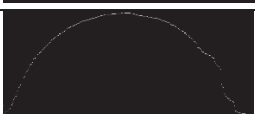
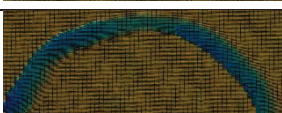
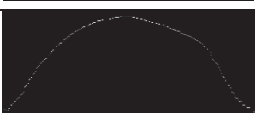
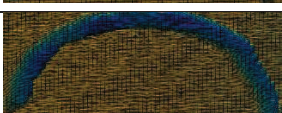

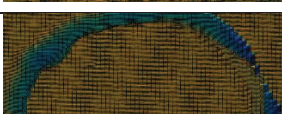

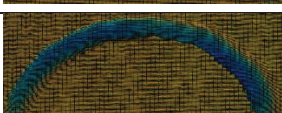

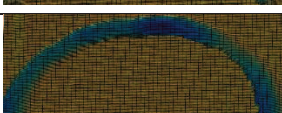

		0.9996	-0.9
		0.9993	1.7
		0.9991	3.3
		0.9984	0.1
		0.9994	-1.1
		0.9984	1.8
		0.9991	-0.3
		0.9959	-3.1
		0.9976	-1.1
		0.9983	2.4
		0.9988	0.2
		0.9994	0.1
		0.9990	0.1
		0.9995	2.2

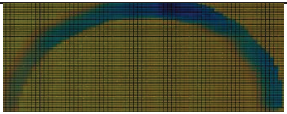

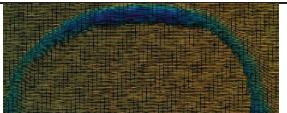

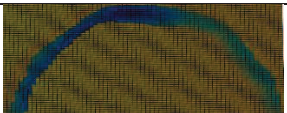

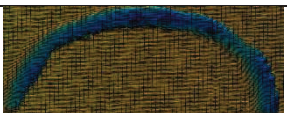

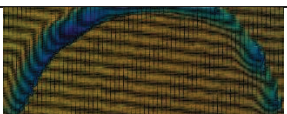

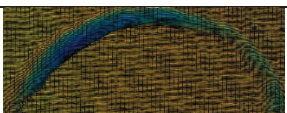

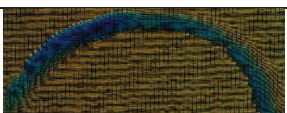

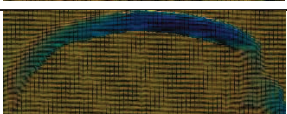

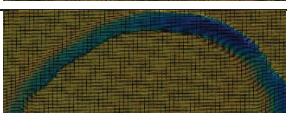
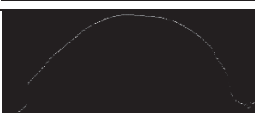
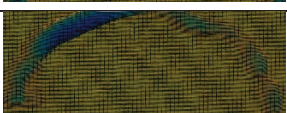
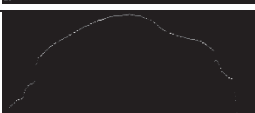
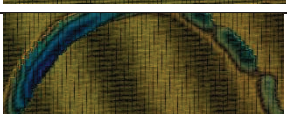
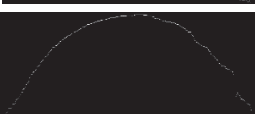
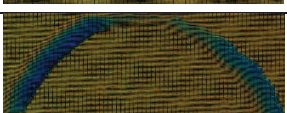

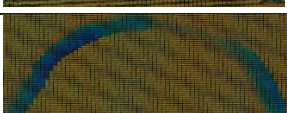

		0.9995	1.2
		0.9993	1.2
		0.9996	0.3
		0.9997	1.9
		0.9989	1.4
		0.9997	-1.1
		0.9990	-4.6
		0.9993	1.9
		0.9962	-3.8
		0.9955	4.5
		0.9987	3.2
		0.9988	1.1
		0.9985	3.2
		0.9982	1.6

		0.9991	0.3
		0.9987	-2.7
		0.9989	-3.9
		0.9963	-1.8
		0.9985	-1.6
		0.9988	-0.3
		0.9960	-1.9

ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบเส้นโค้ง

ภาพสามมิติ	ภาพโครงกระดูกของ เส้นตรง	ค่าความเป็น เส้นโค้ง พาราโบลา	ค่าความเป็น เส้นโค้งครึ่ง วงกลม	ค่ามุม องศา
		0.9741	0.9968	-1.3
		0.9815	0.9973	-6.5
		0.9804	0.9984	2.9

		0.9653	0.9979	-2.1
		0.9747	0.9970	-2.5
		0.9628	0.9962	2.3
		0.9540	0.9988	0.8
		0.9731	0.9983	0.8
		0.9711	0.9956	1.6
		0.9767	0.9973	-5.9
		0.9635	0.9984	-4.3
		0.9792	0.9970	0.4
		0.9903	0.9961	0.1
		0.9841	0.9967	-0.3
		0.9617	0.9952	-1.9
		0.9897	0.9984	-3.1
		0.9699	0.9969	-2.7

		0.9732	0.9978	-0.5
		0.9178	0.9978	9.3
		0.9847	0.9929	0.1
		0.9740	0.9986	-0.1
		0.9780	0.9971	-0.9
		0.9760	0.9963	3.5
		0.9785	0.9972	-0.9
		0.9430	0.9964	6.4
		0.9784	0.9938	1.1
		0.9617	0.9959	-3.3
		0.9927	0.9970	-2.8
		0.9931	0.9921	0.2
		0.9861	0.9947	-0.1

ภาคผนวก ข
การตีพิมพ์เผยแพร่วิทยานิพนธ์

2015 IEEE Student Symposium in Biomedical Engineering & Sciences (ISSBES)
4-4 Nov. 2015, at Shah Alam Malaysia.

A Laser Scanner and Machine Vision System for Dental Plaster Model Inspection

Arhawut Phatwongpaibool
Department of Computer Engineering
Prince of Songkla University
Thailand
5410120062@Email.psu.ac.th

Watcharin Kaewapichai
Department of Computer Engineering
Prince of Songkla University
Thailand
watcharin@coe.psu.ac.th

Abstract— In this paper, we propose a machine vision system to approximate depth of drilled dental plaster model in training process of young dentist and undergraduate dentist. The system is based on basic laser scanner and machine vision technique. The proposed system consists of two main parts: an image acquisition process using basic line laser scanner and depth measurement system based on a right and isosceles triangle. 450 laser points on each dental plaster model sample are extracted for testing. From our experimental result, our system is more effectiveness to inspect the practiced dental plaster model than manual inspection by a senior dentist. Our efficiency proposed system is 0.1 mm error in depth on measurement range 0.2 to 1.2 mm depth.

Keywords— laser beam; depth estimation; skeleton; 3D model; dental drill machine; machine vision;

I. INTRODUCTION

A dental drill is an important and basic tool for the dentist in dental treatment, remove infected and polish from teeth [1]. In skill training procedure, dental students are trained by dental plaster models with the dental drill. An inspector, senior dental, rates their skill by measuring drilled plaster models with a periodontal probe in 1 mm scale. This process takes a long time. It is subjective measurement relying on inspector's experience, physical condition, and others. An automatic surface inspection by machine vision system is role in industrial very fast. Many advantages of machine vision system are non-destructive testing, contactless, high reliability, 100% inspection, real-time working. Human vision knowledge is easily applied to the system.

Normally, surface inspection system integrates two main parts: light source system (light bulb and laser beam) and machine vision algorithms [2-10]. For the light bulb, a single light bulb for road surface inspection by using reflected surface characteristics [2], multi-color light bulbs for rail surface inspection by using color surface characteristics [3]. Laser beam is applied for high resolution and high quality applications. One or more laser colors and one or more digital cameras are applied to increase performance [4, 5], a mobile car laser scanner for road surface inspection system [6, 7], surface of metal steel inspection system which detects shiny and smooth surface of iron sheet [8,9], sphere defect detection by using 3D model [10], and others. These applications help to improve speed, precision, and accuracy of inspection system.

However, some system is complicated and expensive.

In this paper, we present a simple dental plaster model inspection system. In Section II presents inspection system prototype and image acquisition, followed by our implemented system in Section III, and finally experimental result in Section IV.

II. INSPECTION SYSTEM AND IMAGE ACQUISITION

A. Inspection System Prototype

Distinguished laser properties are very high luminance and narrow band, which is not been disturbed by other light sources and reflection patterns: diffuse, nearly ideal specular and mixed diffuse, and specular reflection [11, 12]. In our system, we design a simple system which is based on basic laser scanner ideal using a line laser beam as a light source shown in Fig. 1.

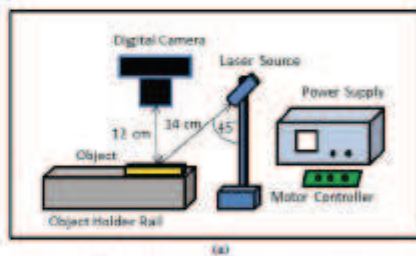


Figure 1. Inspection system setup. (a) drawing of our system, (b) system prototype

Fig. 1 shows our inspection system. A digital camera (Nikon D70, 6.1 million pixels, 40 mm lens) is installed over the object holder rail holding a dental plaster model sample and driven by stepping motor controlled by a microcontroller (0.25 mm. per step). The camera in our experiment is calibrated with a standard chessboard (OpenCV camera calibration library). The calibrated values of focal length (f_c) is 37 pixels/mm. Therefore, the right and isosceles triangle ideal are applied to our system. A line laser source is installed with 45 degrees angle as shown in Fig. 1(a). A projected laser line from the surface floor into drilled hole shows in Fig. 2, an object depth (d_o) is directly determined from skeleton width (w) with size equivalent.

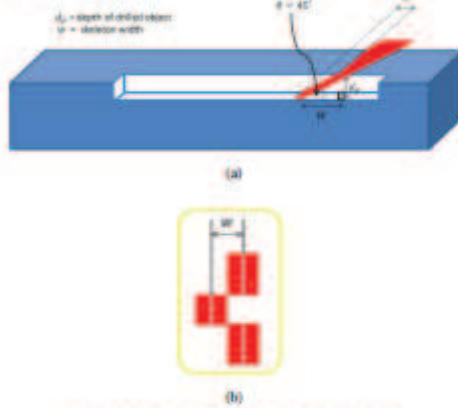


Figure 2. A projected laser line on the object surface (a) side view, (b) top view

B. Inspection System Process Overview

In image acquisition process shown in Fig. 3, a dental plaster model is moved through laser line. A captured laser image of each step movement is captured. Morphological skeletons image processing is applied to the laser image for a skeleton image creation in Capture and Transformation process.

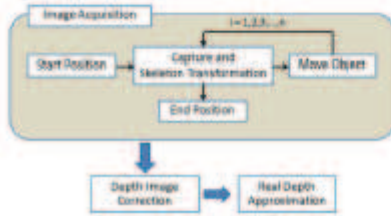


Figure 3. Image acquisition process of our inspection system

III. IMPLEMENTED SYSTEM

A. Image Acquisition

The laser beam line is projected on a set of reference drilled plaster models as shown in Fig. 4(a). A beam laser line image shown in Fig. 4(b) is captured as a step image. So the depth of drilled object can be estimate from captured surface by measuring the skeleton width (w), shown in Fig. 4(c).

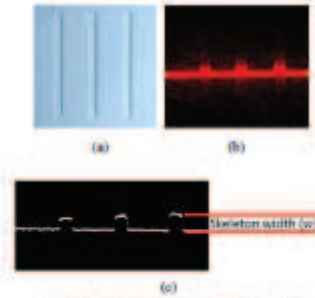


Figure 4. (a) A reference dental plaster model, (b) a laser image, (c) a skeleton image

A Series of skeleton images is assembled to create a depth image by Depth Image Correction process. We evaluate the depth model by using the reference drilled object which was drilled by using CNC machine in range 0.1 to 1 mm, as shows in Fig. 5.

The depth image will be used to approximate a relation of real depth and skeleton width (w) by Real Depth Approximation process. Skeleton width (w) is extracted from a distance between floor and peak of the skeleton. The average focal length calibrated from the skeleton width (f_s) is 36.7 pixels/mm, which is related to the focal length (f_c) with a small error (2.68%). Since the pixel difference in image space is an integer, so in this experiment the focal length which is calibrated from skeleton width and rounded up to 37 called *depth factor* (d_f). The depth of drilled object (d_o) in millimeters can be determined with a simple equation as shows in Eq. 1.

$$d_o = \frac{1}{d_f} w \quad (1)$$

where d_o is a depth of drilled object at the interest point, d_f is a depth factor (37 pixels/mm.) and w is the skeleton width.

0.1 mm.	0.4 mm.	0.7 mm.	0.9 mm.
0.2 mm.	0.5 mm.		
0.3 mm.	0.6 mm.	0.8 mm.	1.0 mm.

Figure 5. Reference drilled objects

B. Depth Image Correction

A series of skeleton step images is used to create a depth image by this process. The step skeleton images (Fig 6(b)) from start to end point are merged into a depth 3D model as shown in Fig 6(c). The dental plaster model moved step is 0.25 millimeter, shown in Fig. 6 (a) and (b). The real depth approximation model (A_p) by the reference dental plaster model will be created in next session.

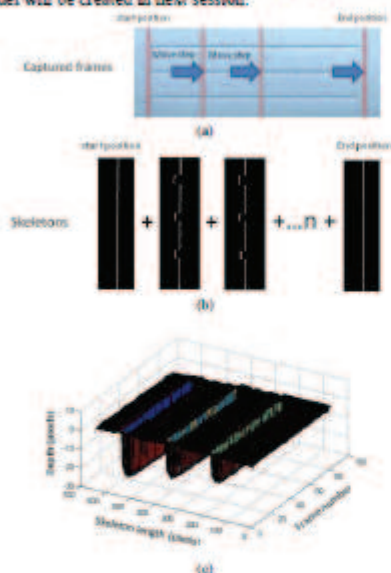


Figure 6. (a) Frame capture procedure, (b) skeletons, (c) depth image

C. Real Depth Approximation

To evaluate the performance of our inspection system, 450 difference depth points from 10 reference lines on dental plasters are extracted. A real depth approximation model (A_p) is calibrated by relation skeleton width (w) and depth measurement by dial gauge with manual measurement on the reference dental plasters, shown in Fig. 7. Noticeably, variation of skeleton width in range 0-10 and 45-60 pixels is a cause of large error. However, interested depth for young dentist practice is 0.2-1.2 mm, calibrated to skeleton width (w) 10-45 pixels. Thus, a correlation of skeleton width and real depth in this range is approximated by a linear equation $A_p = 0.0225 * w + 0.074$ with "Least square error $R^2 = 0.9036$ ".

IV. EXPERIMENTAL RESULT

The performance of our inspection system, 450 points of testing dental plaster model as shown in Fig. 8 which depth ranges 0.2-1.2 mm, are tested.

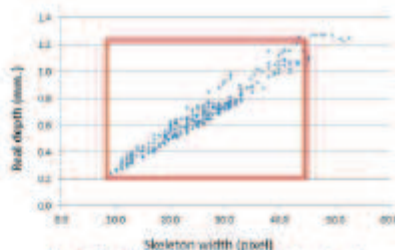


Figure 7. Correlation of skeleton width and real depth

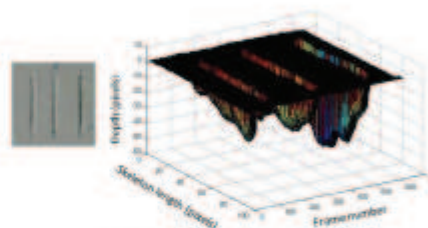


Figure 8. Dental plaster model sample and depth 3D model.

TABLE I. INSPECTION SYSTEM PERFORMANCE

Real Depth (mm.)	Depth Approximation Error (%)		
	Max	Min	Average
0.2-0.3	15.0	0.0	7.0
0.3-0.4	15.0	0.0	8.0
0.4-0.5	15.0	0.0	8.0
0.5-0.6	15.0	0.0	8.0
0.6-0.7	15.0	0.0	8.0
0.7-0.8	15.0	0.0	8.0
0.8-0.9	15.0	0.0	8.0
0.9-1.0	15.0	0.0	8.0
1.0-1.1	15.0	0.0	7.0
1.1-1.2	15.0	1.0	7.0

From Table I shows efficiency of our system. 450 testing points from the dilled dental plaster model are measured by dial gauge for "real depth measurement" and our introduced system for "depth approximation". Error rates of the real depth measurements and depth approximations are compared and shown in Table I. In term of effectiveness measurement is shown in Table II. Our introduced system works faster than an expert inspection with 3 times.

TABLE II. TIME PERFORMANCE APPROXIMATION (100 SAMPLE POINTS)

Method	Time (minutes)		
	Acquisition + Preprocessing	Depth Evaluation	Total
Expert inspection	N/A		30
Our system	8	2	10

V. CONCLUSIONS

In this paper, we introduced an automatic system to inspect dental plaster model examples for young dental practice and undergraduate dentist by basic laser scanner and machine vision techniques. The system reduces amount of verifying and scoring the practice dentals and also provide high accuracy. Future work, variation of dental practices such as smooth drilled, curve drilled, sine wave drilled, and others will be integrated to create a method to measuring and scoring model for young dental practice scoring.

ACKNOWLEDGMENT

This research is support by faculty of engineering, Prince of Songkla University (PSU). We would like to acknowledge all suggestions from all researchers at intelligent system laboratory (ISys), department of computer engineering, PSU.

REFERENCES

- [1] M. C. Corporation, *How it Works: Science and Technology*. Marshall Cavendish, 2003.
- [2] H. Fukui, J. Takagi, Y. Murata, and M. Takemichi, "An image processing method to detect road surface condition using optical spatial frequency," in *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 1997. ITSC '97, 1997*, pp. 1005-1009.
- [3] C.-S. Chen, Y.-P. Hsiang, and Ju-Ling Wu, "A Novel Laser Scanning System for 3D Range Data Acquisition," in *IEEE 1994 International Conference on Consumer Electronics, 1994. Digest of Technical Papers, 1994*, pp. 164-165.
- [4] Farooq, A., & Taabodi, B. (2010). A reliable 3D laser triangulation-based scanner with a new simple but accurate procedure for finding scanner parameters. *Journal of American Science*, 6(5), 30-45.
- [5] C.-S. Chen, Y.-P. Hsiang, and Ju-Ling Wu, "A Novel Laser Scanning System for 3D Range Data Acquisition," in *IEEE 1994 International Conference on Consumer Electronics, 1994. Digest of Technical Papers, 1994*, pp. 164-165.
- [6] N. T. Sy, M. Avila, S. Begot, and J. C. Barlet, "Detection of defects in road surface by a vision system," in *Electrotechnical Conference, 2008. MTECON 2008. The 14th IEEE Mediterranean, 2008*, pp. 847-851.
- [7] T. S. Nguyen, M. Avila, and S. Begot, "Automatic Detection and Classification of Defect on road Pavement using Anisotropy Measure," in *European Signal Processing Conference, Glasgow, United Kingdom, 2009*, pp. 617-621.
- [8] K. Ohtani and M. Baba, "A laser rangefinder with the ability to identify surface roughness and detect the 3-D shape of metal parts," in *ICCAI-SRCE, 2009, 2009*, pp. 3451-3456.
- [9] H. Hirabayashi, T. Matsuo, H. Ishizawa, H. Kanai, and T. Nishimatsu, "Surface Roughness Evaluation by Laser Speckle," in *SIPE/CASE, 2006. International Joint Conference, 2006*, pp. 5809-5812.
- [10] A. Zhou, J. Guo, and W. Shao, "Automated detection of surface defects on sphere parts using laser and CCD measurements," in *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2011*, pp. 2666-2671.
- [11] HUYNH, Cao-lung, "How to improve the laser scanning of shiny surfaces which can give unwanted reflections" CVMT 2010
- [12] E. Angelopoulos and J. Wright, "Laser Scanner Technology," *Technical Reports (CSI)*, Jan. 1999.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายอรรณวุฒิ พัฒน์วงศ์ไพบูลย์

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5410120062

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2553

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการการศึกษา)

ทุนศิษย์ก้นกุฏิ คณะวิศวกรรมศาสตร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Atthawut Phatwongpaibool, Watcharin Kaewapichai, "A Laser Scanner and Machine Vision System for Dental Plaster Model Inspection", 2015 IEEE Student Symposium in Biomedical Engineering & Sciences (ISSBES), 4 November 2015 Tower 2 Faculty of Electrical Engineering, UITM, Shah Alam, Selangor, IEEE EMBS Malaysia.