

การตรวจจับการเจาะทะลุกระดูกโดยการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ Bone-Breakthrough Detection Based on Motor Current Measurement

สมภพ เจตน์ดำรงเลิศ และ ภิญโญ พวงมะลิ*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

*ติดต่อ: pinyo@dome.eng.cmu.ac.th, 053-944146, 053-944145

บทคัดย่อ

สำหรับศัลยกรรมกระดูก (Bone Surgery) การเจาะกระดูกถือเป็นกระบวนการที่ต้องใช้ความระมัดระวังเป็นอย่างสูงเนื่องจากเนื้อเยื่อหรือเส้นประสาทอาจถูกทำให้เสียหายได้เมื่อส่วนปลายหัวเจาะทะลุเลยเข้าไปในเนื้อเยื่อหรือโพรงประสาท ในปัจจุบันการเจาะกระดูกยังเป็นกระบวนการที่ทำด้วยมือซึ่งต้องพึ่งพาประสาทสัมผัสและทักษะของศัลยแพทย์ในการควบคุมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่จำเป็นต้องทำการเจาะด้วยความแม่นยำสูง อย่างไรก็ตามการตรวจจับการเจาะทะลุกระดูกสามารถพัฒนาให้มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากขึ้นได้โดยอาศัยระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะทำให้สามารถตรวจจับการเจาะทะลุและหยุดการเจาะได้ทันทีที่การเจาะทะลุเกิดขึ้น บทความฉบับนี้นำเสนอการตรวจจับการเจาะทะลุโดยอาศัยการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนสว่าน สัญญาณที่ได้จากการวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าจะถูกนำไปใช้ในการควบคุมการเจาะแบบอัตโนมัติเพื่อหยุดการเจาะทันทีที่เกิดการเจาะทะลุ ทั้งนี้การตรวจจับการเจาะทะลุทำโดยอาศัยการประมวลผลด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จากการทดสอบเครื่องเจาะกระดูกต้นแบบพบว่าวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์ขับเคลื่อนหัวเจาะซึ่งทำให้สามารถทำการตรวจจับการเจาะทะลุได้

คำหลัก: การตรวจจับการเจาะทะลุ; การตรวจจับการผ่านทะลุ; การตรวจรู้การเจาะทะลุ

Abstract

In orthopedic surgery, drilling bones is a delicate procedure. The process of bone drilling requires high accuracy and precision since excessive protrusion can cause damages to tissues or nerves. At present, drilling procedure relies only on haptic senses and skills of surgeon. However, good accuracy and performance of breakthrough detection can be achieved by applying an electronic control scheme. This paper proposes a method of bone-breakthrough detection based on motor current measurement. The signal obtained from current measurement is used to control the drill such that it can stop the drill penetration when the protrusion occurs. Experimental tests of the drill prototype show that the newly developed electronic control system can detect changes of motor current; and thus, it can identify the breakthrough.

Keywords: Breakthrough detection; breakout detection; breakthrough sensing.

1. บทนำ

การผ่าตัดกระดูก (Bone Surgery) เป็นหนึ่งในกระบวนการสำคัญของการรักษาอาการป่วย เช่น การรักษาโรคหมอนรองกระดูกสันหลังกดทับเส้นประสาท การผ่าตัดรักษาอาการข้อเข่าเสื่อม การผ่าตัดเพื่อรักษากระดูกที่แตกหักจากอุบัติเหตุ การผ่าตัดเพื่อรักษาอาการหูตึงจากโรคหินปูนเกาะกระดูกหู (Otosclerosis) และการผ่าตัดกะโหลกศีรษะเพื่อรักษาอาการบาดเจ็บภายใน เช่น อาการเลือดคั่งในสมองหรือเนื้องอกในสมอง เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วกระบวนการผ่าตัดกระดูกจะประกอบด้วย การเจาะกระดูกเพื่อติดตั้งอุปกรณ์จับยึดกระดูกหรือเจาะโพรงกระดูกเพื่อรักษาอวัยวะที่อยู่ภายใน การเจาะกระดูกเป็นกระบวนการที่ต้องการความแม่นยำสูง เพื่อไม่ให้เนื้อเยื่อ เส้นประสาท หรืออวัยวะสำคัญที่อยู่ใต้ผิวกระดูกได้รับความเสียหายจากการเจาะเกินความหนาของเนื้อกระดูกโดยเฉพาะกรณีที่มีเนื้อเยื่อระบบประสาทหรืออวัยวะสำคัญอยู่ใกล้ผิวกระดูก เช่น กรณีของการผ่าตัดกระดูกสันหลังแบบลามิเนคโตมี (Laminectomy) ซึ่งเป็นการผ่าตัดเพื่อรักษาโรคกระดูกสันหลังกดทับเส้นประสาทด้วยการเจาะและตัดเนื้อกระดูกส่วนที่กดทับเส้นประสาทออก

การเจาะกระดูกที่มีความแม่นยำสูงนั้นต้องอาศัยศัลยแพทย์ที่มีความชำนาญรวมไปถึงเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เพื่อให้การเจาะกระดูกมีความปลอดภัยสูงสุด การพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องเจาะกระดูกสามารถทำได้โดยอาศัยเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ในการพัฒนาระบบตรวจจับการเจาะทะลุ วัตถุประสงค์หลักคือเพื่อป้องกันการเจาะเกินความหนาของเนื้อกระดูกที่อาจทำให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อเยื่อระบบประสาทหรืออวัยวะสำคัญได้กระดูก [1-7]

2. เทคนิคการตรวจจับการเจาะทะลุ

การตรวจจับการเจาะทะลุของสว่านสามารถทำได้โดยอาศัยการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทาง

กายภาพต่างๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการเจาะทะลุ ปริมาณทางกายภาพสำคัญที่สามารถนำมาใช้ตรวจจับการเจาะทะลุได้แก่ แรงต้านการเจาะตามแนวแกน (Trust Force) ภาระแรงบิด (Torque Load) และ กระแสไฟฟ้า (Electric Current) ของสว่าน [1]

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณทางกายภาพเมื่อเกิดการเจาะทะลุจะมีลักษณะเฉพาะที่แสดงถึงการเจาะทะลุ โดยทั่วไปแล้วแรงต้านการเจาะตามแนวแกน ภาระแรงบิดของสว่าน และกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ขับเคลื่อนสว่านจะเพิ่มขึ้นเมื่อสว่านเจาะเข้าสู่เนื้อวัสดุและจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดการเจาะทะลุ สำหรับสว่านไฟฟ้าการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าสามารถทำได้โดยไม่จำเป็นต้องดัดแปลงโครงสร้างของสว่านเพื่อติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมภายในตัวสว่าน แต่สามารถทำได้โดยการเชื่อมต่อ (Wiring) มอเตอร์ขับเคลื่อนสว่านเข้ากับวงจรไฟฟ้าซึ่งสามารถติดตั้งแยกจากตัวสว่าน

3. เทคนิคการตรวจจับการเจาะทะลุโดยการตรวจวัด

กระแสไฟฟ้าของสว่าน

จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของสว่านไฟฟ้าพบว่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปลายสว่านเริ่มเจาะเข้าสู่เนื้อวัสดุและลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดการเจาะทะลุ ในที่นี้หากทำการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีเฟืองทดจะพบว่า

$$\frac{d}{dt} i_a = -\frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{k_v}{L_a} \omega + \frac{V_a}{L_a} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \omega = \frac{k_t}{J} i_a - \frac{b_m}{J} \omega - \frac{1}{J} T_L \quad (2)$$

สมการ (1) และ (2) สามารถเขียนในรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ได้ดังนี้

$$I_a(s) = \frac{1}{L_a s + R_a} \cdot (V_a(s) - k_v \omega(s)) \quad (3)$$

$$\omega(s) = \frac{1}{Js + b_m} \cdot (k_t I_a(s) - T_L(s)) \quad (4)$$

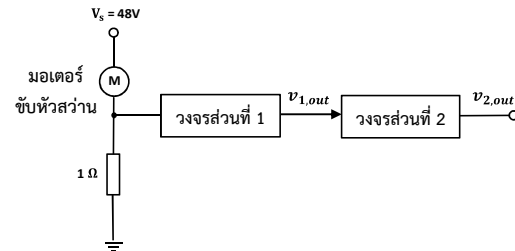
หรือ

$$I_a(s) = \frac{1}{L_a s + R_a + k_v k_t / (Js + b_m)} V_a(s) + \frac{k_v / (Js + b_m)}{L_a s + R_a + k_v k_t / (Js + b_m)} T_L(s) \quad (5)$$

เมื่อ i_a หรือ $I_a(s)$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ขดลวดอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ R_a , L_a และ V_a คือ ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และแรงดันไฟฟ้าของขดลวดอาร์เมเจอร์ k_v คือ ค่าคงที่แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back Emf Constant) ω คือ ความเร็วในการหมุนของสว่าน k_t คือ ค่าคงที่แรงบิด (Torque Constant) ของมอเตอร์ J คือ ผลรวมของโมเมนต์ความเฉื่อยของสว่านและแกนหมุน b_m คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Viscous Friction Coefficient) ของมอเตอร์ และ T_L คือ ภาระแรงบิดจากการเจาะ จากการพิจารณาสมการที่ (5) พบว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวดอาร์เมเจอร์และภาระแรงบิดของสว่าน แต่โดยทั่วไปแล้วในระหว่างการเจาะจะไม่มีการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวดอาร์เมเจอร์จึงไม่เกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับภาระแรงบิดของสว่านเท่านั้น โดยขณะที่สว่านเริ่มทำงาน ค่ากระแสไฟฟ้าจะคงที่ที่ค่าหนึ่งคือ ค่ากระแสไฟฟ้าขณะไร้ภาระแรงบิด (No Load Current) แต่เมื่อสว่านเจาะเข้าสู่เนื้อวัสดุจะเกิดภาระแรงบิดขึ้นที่ปลายสว่าน กระแสไฟฟ้าของสว่านจึงเพิ่มสูงขึ้นตามภาระแรงบิด และเมื่อการเจาะทะลุเกิดขึ้นภาระแรงบิดที่ปลายสว่านจะหายไปทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่สว่านลดลงอย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้การบ่งชี้การเจาะทะลุจึงสามารถทำได้โดยอาศัยการตรวจวัดการลดลงของกระแสไฟฟ้างี้ดกล่าวเพื่อบ่งชี้การเจาะทะลุ

4. การออกแบบวงจรตรวจวัดการเจาะทะลุ

วงจรตรวจวัดการเจาะทะลุประกอบด้วยวงจรไฟฟ้า 2 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 1 ส่วนแรกคือวงจรสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บ่งชี้ปริมาณกระแสไฟฟ้าของสว่าน วงจรส่วนนี้ทำหน้าที่สร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่แปรผันตามค่ากระแสไฟฟ้าของสว่านโดยอาศัยการตรวจวัดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับสว่าน สัญญาณขาออกของวงจรนี้ ($v_{1,out}$) ได้ถูกนำไปประมวลผลในวงจรส่วนที่ 2 ซึ่งเป็นวงจรสร้างสัญญาณบ่งชี้การเจาะทะลุ สัญญาณขาออกจากวงจรส่วนที่ 2 นี้ ($v_{2,out}$) จะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของสว่าน เพื่อให้การเจาะสิ้นสุดลง

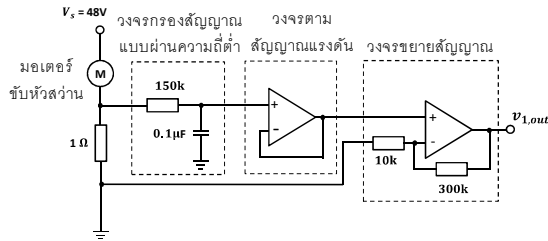


รูปที่ 1 วงจรตรวจวัดการเจาะทะลุ (ส่วนที่ 1: วงจรสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บ่งชี้ปริมาณกระแสไฟฟ้าของสว่าน และส่วนที่ 2: วงจรสร้างสัญญาณบ่งชี้การเจาะทะลุ)

4.1 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บ่งชี้ปริมาณกระแสไฟฟ้าของสว่าน

การสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บ่งชี้ปริมาณกระแสไฟฟ้าของสว่านทำโดยอาศัยการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับสว่าน สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้จะถูกนำไปลดทอนสัญญาณรบกวน (ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากกระแสไฟฟ้ารีปเปอร์ (Current Ripper) ของมอเตอร์ขั้วหัวสว่าน) ด้วยตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ (Low-Pass Filter) เนื่องจากสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าต่ำจึงมีการขยาย

สัญญาณด้วยวงจรขยายสัญญาณ (Amplifier Circuit) ซึ่งเชื่อมต่อกับตัวกรองสัญญาณผ่านวงจรตามสัญญาณแรงดัน (Voltage Follower) สัญญาณขาออก $v_{1,out}$ ที่ได้จากวงจรสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้านี้จะถูกนำไปประมวลผลต่อในวงจรสร้างสัญญาณบ่งชี้การเจาะทะลุ



รูปที่ 2 วงจรสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บ่งชี้ปริมาณกระแสไฟฟ้าของสว่าน

4.2 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณบ่งชี้การเจาะทะลุ

การบ่งชี้การเจาะทะลุโดยอาศัยการตรวจจับสนามลดลงของระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บ่งชี้ปริมาณกระแสไฟฟ้าของสว่านสามารถทำได้โดยการกำหนดค่าเทรชโฮลด์ (Threshold) ที่สูงกว่าระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขณะไร้ภาระแรงบิดและต่ำกว่าระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขณะมีภาระแรงบิด โดยเมื่อสัญญาณแรงดันไฟฟ้าลดลงจนมีระดับต่ำกว่าค่าเทรชโฮลด์ที่กำหนดไว้แสดงว่าการเจาะทะลุได้เกิดขึ้นแล้ว

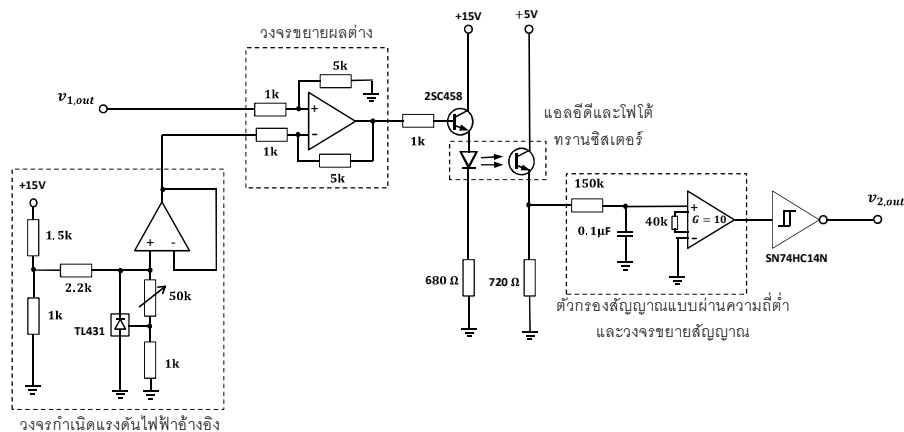
ในทางปฏิบัติการบ่งชี้การเจาะทะลุด้วยค่าเทรชโฮลด์สามารถทำได้โดยใช้ขมิทริกเกอร์ (Schmitt Trigger) ทั้งนี้ขมิทริกเกอร์สามารถเปรียบเทียบสัญญาณแบบมีช่วงฮิสเทอรีซิสโดยอาศัยเทรชโฮลด์ 2 ค่าคือ แรงดันเทรชโฮลด์ขาขึ้น (Positive-Going Threshold Voltage, V_{T+}) และ แรงดัน เทรช โฮลด์ ขาลง (Negative-Going Threshold Voltage, V_{T-}) ยกตัวอย่างเช่น สำหรับขมิทริกเกอร์ SN74HC14N แบบกลับขั้วสัญญาณ (Inverting Schmitt Trigger) นั้น ค่าแรงดันเทรชโฮลด์ขาขึ้นคือ 2.85 โวลต์และค่าแรงดันเทรชโฮลด์ขาลงคือ 2.08 โวลต์

หากสัญญาณขาเข้าขมิทริกเกอร์มีค่าต่ำกว่า V_{T-} สัญญาณขาออกจะมีลอจิกเป็น 1 (~5 โวลต์) แต่หากสัญญาณมีค่าสูงกว่า V_{T+} สัญญาณขาออกจะมีลอจิกเป็น 0 (~0 โวลต์) ในการใช้งานวงจรประมวลผลสัญญาณด้วยขมิทริกเกอร์นั้นจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสัญญาณให้เหมาะสมต่อการทำงานของขมิทริกเกอร์ด้วย โดยต้องปรับปรุงสัญญาณให้ระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขณะส่วนไร้ภาระแรงบิดภายนอก (External Torque Load) มีค่าต่ำกว่า V_{T-} และสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขณะเจาะเนื้อวัสดุมีค่าสูงกว่า V_{T+} ขมิทริกเกอร์จึงจะสามารถใช้ประมวลผลสัญญาณเพื่อบ่งชี้การเจาะทะลุได้

รูปที่ 3 แสดงส่วนประกอบของวงจรสร้างสัญญาณบ่งชี้การเจาะทะลุ จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณไฟฟ้า $v_{1,out}$ ถูกนำไปปรับค่าออฟเซต (Offset) และขยายสัญญาณให้เหมาะสมต่อการทำงานของขมิทริกเกอร์ด้วยวงจรขยายผลต่าง (Differential Amplifier Circuit) ซึ่งทำงานโดยอาศัยแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงจากวงจรกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงในการปรับออฟเซต สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรขยายผลต่างจะถูกเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณแสงเพื่อแยกการเชื่อมต่อทางไฟฟ้า (Electrical Isolation) ระหว่างมอเตอร์และขมิทริกเกอร์ การแยกการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าจะช่วยลดสัญญาณรบกวนและป้องกันการเสียหายเนื่องจากไฟกระชาก (Electric Surge) การเปลี่ยนแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสงทำได้โดยใช้แอลอีดี (LED: Light-Emitting Diode) สัญญาณแสงที่มีความเข้มมากแสดงถึงปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่ามากและสัญญาณแสงที่มีความเข้มน้อยแสดงถึงปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าน้อย การตรวจจับความเข้มของสัญญาณแสงดังกล่าวอาศัยโฟโตทรานซิสเตอร์ (Photo-Transistor: BP103) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากโฟโตทรานซิสเตอร์จะถูกส่งเข้าสู่ตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำอีกครั้งเพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนให้เหลือน้อยที่สุดแล้วจึงขยายสัญญาณ

ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการทำงานของซิมพทริกเกอร์ สัญญาณที่ถูกประมวลผลโดยซิมพทริกเกอร์จะถูก

ส่งต่อไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ควบคุมการเจาะ



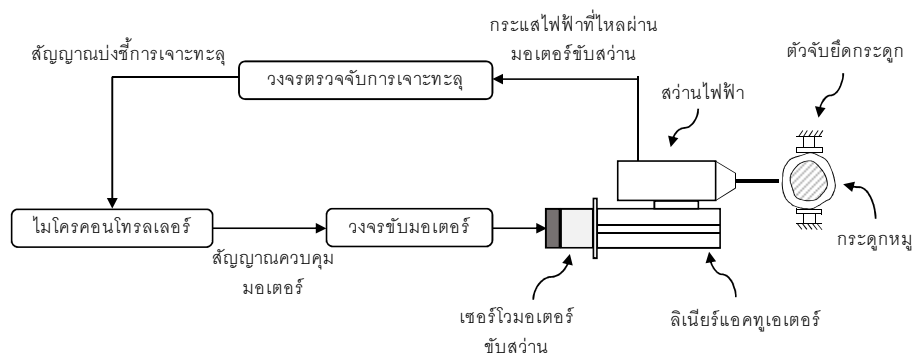
รูปที่ 3 วงจรสร้างสัญญาณบ่งชี้การเจาะทะลุ

5. การทดสอบ

5.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบการทำงานของวงจรตรวจจับการเจาะทะลุทำโดยอาศัยเครื่องเจาะต้นแบบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ แผนผังการทำงานของเครื่องเจาะต้นแบบแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งส่วนไฟฟ้าที่ใช้ดัดแปลงมาจากเครื่องเจียรในแบบพกพา (Mini-Grinder: Black & Decker RTX-1) มีหัวส่วนขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยปราศจากเฟืองทด การเคลื่อนที่ในแนวแกนของส่วนทำได้โดยอาศัยเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor: Faulhaber Schonaich 3557K024CS) ขับ

ลิเนียร์แอกทูเอเตอร์ (Linear Actuator) การควบคุมการทำงาน
ของเซอร์โวมอเตอร์ทำได้โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (STM32F407VG) ที่มีอัลกอริทึมการควบคุมตำแหน่งแบบพีไอดี (PID Position Control) ในระหว่างทำการเจาะนั้นกระดุกถูกจับยึดอยู่กับที่ด้วยตัวจับยึดกระดุกปริมาณกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ขับหัวสว่านถูกตรวจวัดและประมวลผลตลอดช่วงการเจาะตามหลักการที่อธิบายในหัวข้อที่ 4 เมื่อการเจาะทะลุเกิดขึ้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะควบคุมให้ดอกสว่านถอนออกจากรูเจาะทันที ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เนื้อเยื่อใต้ผิวหนังกระดุกได้รับความเสียหาย



รูปที่ 4 แผนผังการทำงานของเครื่องเจาะต้นแบบ

5.2 วิธีการทดสอบ

สำหรับการทดสอบในที่นี้ใช้ดอกสว่านปลายแหลม (Twist Drill Bit) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร ติดตั้งเข้ากับหัวสว่าน อัตราการป้อนหัวเจาะ (Feed Rate) กำหนดไว้ที่ 0.1 มิลลิเมตรต่อวินาที และไฟฟ้ากระแสตรงขนาดแรงดัน 48 โวลต์ถูกจ่ายให้กับมอเตอร์ขับเคลื่อนหัวสว่านซึ่งทำให้หัวสว่านหมุนด้วยความเร็วประมาณ 4100 รอบต่อวินาที กระดูกที่ใช้ในการทดสอบคือ กระดูกหมู (Porcine Femur) ซึ่งประกอบด้วยชั้นกระดูก 2 ชั้นที่แตกต่างกันคือ ผิวกระดูกชั้นนอก (Cortical Bone) ซึ่งเป็นชั้นที่มีความแข็งค่อนข้างมากและชั้นใน (Cancellous Bone) ซึ่งเป็นชั้นที่มีความอ่อนตัวอย่างมาก การตรวจจับการเจาะทะลุในการทดสอบนี้หมายถึง การตรวจจับการเจาะทะลุกระดูกชั้นนอก

สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบแสดงดังรูปที่ 5 ในระหว่างการเจาะ กระดูกหมูถูกจับยึดให้แน่นด้วยตัวจับยึดกระดูก ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ควบคุมเซอร์โวมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนหัวสว่านให้ทำการเจาะด้วยอัตรา 0.1 มิลลิเมตรต่อวินาทีและเมื่อการเจาะทะลุเกิดขึ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็ควบคุมให้ดอกสว่านถอนออกจากรูเจาะทันที

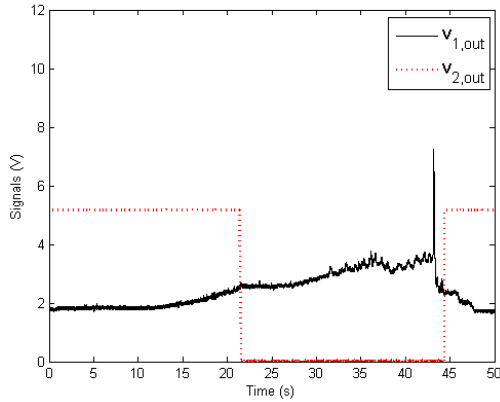


รูปที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ

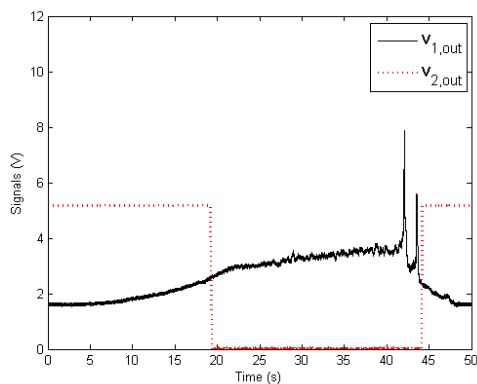
5.3 ผลการทดสอบ

รูปที่ 6(ก-ค) แสดงผลการบันทึกสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บ่งชี้ปริมาณกระแสไฟฟ้าของสว่าน ($V_{1,out}$) และสัญญาณขาออกของวงจรสร้างสัญญาณบ่งชี้การเจาะทะลุ ($V_{2,out}$) ของการเจาะ 3 ครั้ง จากกราฟจะเห็นว่า ขณะเริ่มต้น $V_{1,out}$ มีค่าน้อยส่งผลให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เข้าสู่ขมิพทริกเกอร์มีค่าต่ำกว่า V_T ดังนั้นสัญญาณขาออกของขมิพทริกเกอร์ ($V_{2,out}$) จึงมีลอจิกเป็น 1 (~5 โวลต์) ต่อมาเมื่อ $V_{1,out}$ มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เข้าสู่ขมิพทริกเกอร์มีค่าสูงกว่า V_T สัญญาณขาออกของขมิพทริกเกอร์จึงมีลอจิกเป็น 0 (~0 โวลต์) การเปลี่ยนแปลงนี้บ่งชี้ว่าดอกสว่านได้เจาะเข้าสู่เนื้อกระดูกแล้ว และเมื่อสัญญาณ $V_{1,out}$ มีค่าลดลงจนทำให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เข้าสู่ขมิพทริกเกอร์มีค่าต่ำกว่า V_T สัญญาณขาออกของขมิพทริกเกอร์จึงเปลี่ยนลอจิกเป็น 1 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาออกของขมิพทริกเกอร์จากลอจิก 0 เป็นลอจิก 1 บ่งชี้ว่าการเจาะทะลุกระดูกได้เกิดขึ้นแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงควบคุมให้ดอกสว่านถอนออกจากรูเจาะทันที (มีข้อสังเกตว่าก่อนการบ่งชี้การเจาะทะลุจะเกิดขึ้นนั้น สัญญาณ $V_{1,out}$ จะมีขนาดสูงกว่าปรกติอย่างมากซึ่งเกิดจากการที่มีรอยแตกของเนื้อกระดูกเกิดขึ้น เมื่อเนื้อกระดูกที่ปริแตกปะทะกับส่วนที่มีคมของปลายดอกสว่านที่หมุนมากระทบ แรงกระแทกที่เกิดขึ้นทำให้เกิดภาระแรงบิดที่สูงขึ้นอย่างทันทีทันใด ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ตัวสว่านสูงขึ้นอย่างมาก) รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างรูเจาะทดสอบบนกระดูกหมู จะเห็นว่าสว่านเจาะทะลุเพียงผิวกระดูกชั้นนอกเท่านั้นและไม่มีการเจาะผ่านเนื้อกระดูกชั้นในเข้าไปมากนัก ผลที่ได้ทำให้เห็นว่าเครื่องเจาะต้นแบบที่มีส่วนประกอบสำคัญคือวงจรสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บ่งชี้ปริมาณกระแสไฟฟ้าของสว่านและวงจรประมวลผลเพื่อสร้างสัญญาณบ่งชี้การเจาะทะลุนั้นสามารถเจาะกระดูกชั้นนอกได้โดยไม่ทะลุเข้าทำลายเนื้อกระดูกภายใน

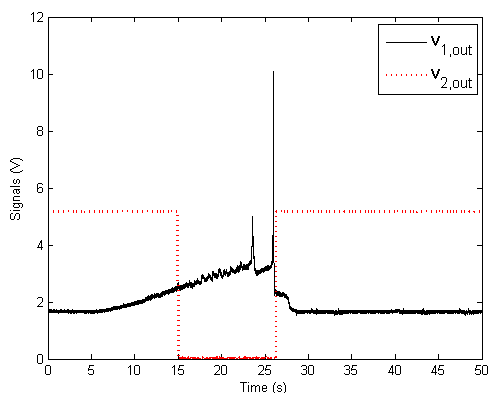
ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาเทคนิคนี้เพื่อนำไปใช้
ในกระบวนการเจาะที่ต้องการความแม่นยำสูงต่อไป



(ก)

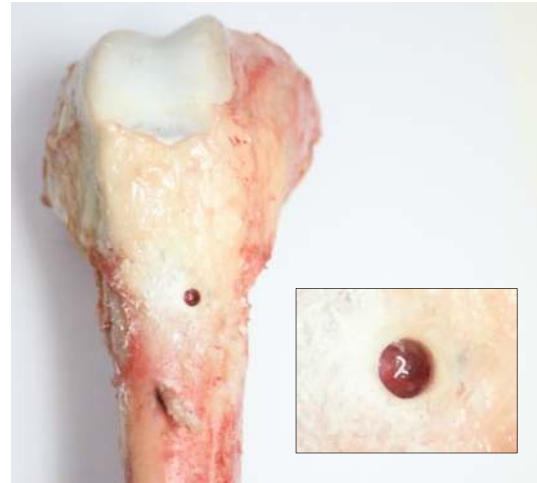


(ข)



(ค)

รูปที่ 6(ก-ค) แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บ่งชี้
ปริมาณกระแสไฟฟ้าของสว่าน ($v_{1,out}$) และสัญญาณ
ขาออกของวงจรสร้างสัญญาณบ่งชี้การเจาะทะลุ
($v_{2,out}$)



รูปที่ 7 รูเจาะบนกระดูกหมู

6.บทสรุป

จากการทดสอบเครื่องเจาะต้นแบบที่สร้างขึ้นใน
ห้องปฏิบัติการกับกระดูกหมู พบว่าการบ่งชี้การเจาะทะลุ
สามารถทำได้โดยอาศัยวงจรสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่
บ่งชี้ปริมาณกระแสไฟฟ้าของสว่านและวงจรประมวลผล
เพื่อสร้างสัญญาณบ่งชี้การเจาะทะลุ การบ่งชี้การเจาะ
ทะลุที่ต้องทำให้เครื่องเจาะสามารถทำการเจาะได้โดย
ไม่เกิดการเจาะทะลุเลยชิ้นวัสดุที่ต้องการ ผลการเจาะ
ทดสอบเบื้องต้นทำให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการ
นำเอาเทคนิคดังกล่าวไปพัฒนาเครื่องมือที่จะช่วยให้การ
เจาะมีความแม่นยำและปลอดภัย ในขั้นตอนต่อไปของ
การศึกษาวิจัยจะมีการประเมินความแม่นยำของการบ่งชี้
การเจาะทะลุ ทั้งนี้เพื่อประเมินและปรับปรุง
ประสิทธิภาพของการตรวจจับการเจาะทะลุต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ภิญโญ พวงมะลิ, พิชรพรรณ จันทรมานนท์, พัชรียา
ก้อนคำ และ พชร ตันทโอภาส (2557), การตรวจจับการ
เจาะทะลุกระดูกโดยการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าของ
มอเตอร์คู่แฝด, การประชุมวิชาการเครือข่าย
วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28,



มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น, หน้า 1031-1038.

[2] Brett, P. N., Baker, D. A., Reyes, L., Blanshred, J. (1995), An Automatic Technique for Micro-drilling a Stapedotomy in the Flexible Stapes Footplate, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, vol. 209, February 1995, pp. 255-262.

[3] Baker, D., Brett, P. N., Griffiths, M. V., and Reyes, L. (1996). A Mechatronic Drilling Tool for Ear Surgery: A Case Study of Some Design Characteristics, *Mechatronics*, vol. 6, no. 4, June 1996, pp. 461-477.

[4] Allotta, B., Belmonte, F., Bosio, L. and Dario, P. (1996), Study on a Mechatronic Tool for Drilling in the Osteosynthesis of Long Bone: Tool/Bone Interaction Modeling and Experiment, *Mechatronics*, vol. 6, no. 4, 1996, pp. 565-588.

[5] Ong, F. R. and Bouazza-Marouf, K. (1998). Drilling of Bone: a Robust Automatic Method for the Detection of Drill Bit Break-Through, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, vol. 212, January 1998, pp. 209-221.

[6] Ong, F. R. and Bouazza-Marouf, K. (1999), The Detection of Drill Bit Break-Through for the Enhancement of Safety in Mechatronics Assisted Orthopedic Drilling, *Mechatronics*, vol. 9, no. 6, September 1999, pp. 565-588.

[7] Osa, T., Abawi, C. F., Sugita N., Chikuda, H., Sugita, S., Ito, H., Moro, T., Takatori, Y., Tanaka, S. and Mitsushi, M. (2014), Autonomous Penetration Detection for Bone Cutting Tool

Using Demonstration-based Learning, paper presented in *IEEE International Conference on Robotic & Automation (IRPC)* 2014, Hong Kong, China, May 2014, pp. 290-296.