

การตรวจจับการเจาะทะลุกระดูกโดยการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์คู่แฝด Bone-Breakthrough Detection Using Current Measurement of Twin Motors

ปิยโย พวงมะลิ*, พิชรพรรณ จันทรมานนท์, พิชรียา ก้อนคำ และ พชร ตันโทภาส

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

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

บทคัดย่อ

ในการผ่าตัดกระดูก (bone surgery) การเจาะกระดูกโดยไม่ทำลายเนื้อเยื่อใต้พื้นผิวกระดูกเป็นกระบวนการที่สำคัญอย่างยิ่งโดยเฉพาะในกรณีที่มีเนื้อเยื่อสำคัญใต้ผิวกระดูก เช่น เนื้อเยื่อสมองใต้กระดูกกะโหลกศีรษะหรือเนื้อเยื่อระบบประสาทในโพรงกระดูกสันหลัง เป็นต้น เพื่อเป็นการเพิ่มความปลอดภัยในการผ่าตัด บทความฉบับนี้จึงนำเสนอการออกแบบเครื่องเจาะกระดูกที่มีขีดความสามารถในการตรวจจับการเจาะทะลุสำหรับหลีกเลี่ยงการเจาะทำลายเนื้อเยื่อที่สำคัญ การตรวจจับการเจาะทะลุอาศัยเทคนิคการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์สองตัวที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ โดยมอเตอร์ตัวหนึ่งเป็นมอเตอร์ที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนส่วนมอเตอร์อีกตัวหนึ่งเป็นมอเตอร์อ้างอิงซึ่งใช้เป็นตัวเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณบ่งชี้การเจาะทะลุ การสร้างสัญญาณบ่งชี้การเจาะทะลุอาศัยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญ คือ ตัวขยายสัญญาณ ตัวกรองสัญญาณ และสมิททริกเกอร์ จากการทดสอบเครื่องเจาะกระดูกต้นแบบในห้องปฏิบัติการกับวัตถุ 2 ชนิด คือ แผ่นไม้อัดและกระดูกหมู พบว่าเครื่องเจาะต้นแบบสามารถตรวจจับการเจาะทะลุและใช้สัญญาณบ่งชี้การเจาะทะลุในการป้องกันการเจาะเกินพื้นผิววัตถุสำหรับการเจาะกระดูกแบบอัตโนมัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำหลัก: การตรวจจับการเจาะทะลุ; การตรวจจับการผ่านทะลุ; การตรวจรู้การเจาะทะลุ

Abstract

In bone surgery, drilling a bone without causing damages to tissues underneath the bone surface is a critical procedure. This is especially important for precise surgical operations such as skull and spine drilling since neural tissue damages must be minimized. To enhance safety of drilling, this paper proposes a design of a surgical bone drill which is capable of performing breakthrough detection to avoid over drilling. The technique applied in this invention is current measurement of two identical motors—one is for powering the drill and the other is as a reference for generating breakthrough sensing signal. The electronics used for producing the signal include amplifiers, filters, and a Schmitt trigger. Experimental tests of a drill prototype with samples of a wooden plate and a piece of porcine bone showed that the prototype could effectively detect the breakthrough. It could avoid over drilling in automatic bone drilling procedures.

Keywords: Breakthrough detection; breakout detection; breakthrough sensing.

DRC-16

1. บทนำ

การผ่าตัดกระดูก (bone surgery) เป็นหนึ่งในการผ่าตัดที่มีความสำคัญเนื่องจากกระดูกเป็นส่วนโครงสร้างของร่างกายที่มักจะเสียหายจากอุบัติเหตุ การผ่าตัดกระดูกมีหลายรูปแบบ เช่น การผ่าตัดกระดูกที่กดทับเส้นประสาท การผ่าตัดข้อกระดูกที่เสื่อมสภาพ การผ่าตัดกระดูกสันหลังที่คดงอ หรือแม้กระทั่งการผ่าตัดกะโหลกศีรษะเพื่อแก้ไขอาการบาดเจ็บในสมอง เช่น อาการเลือดคั่งในสมอง เป็นต้น ส่วนการผ่าตัดกระดูกที่พบบ่อย ได้แก่ การผ่าตัดเพื่อต่อกระดูกที่เกิดการแตกหักจากอุบัติเหตุ ในกรณีนี้ ศัลยแพทย์มักจะต้องการผ่าตัดเพื่อเจาะยึดกระดูกให้คืนสภาพดั้งเดิม แต่เนื่องจากกระดูกเป็นของแข็งที่ยากต่อการตัดและเจาะ ดังนั้นการผ่าตัดกระดูกจึงจำเป็นต้องอาศัยแพทย์ที่มีประสบการณ์และเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพ

โดยทั่วไปแล้วเครื่องมือที่ใช้สำหรับเจาะกระดูกคือ ส่วนที่ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะ ซึ่งในปัจจุบันส่วนที่ใช้ในทางการแพทย์มีทั้งแบบที่ทำงานโดยอาศัยแรงดันลม (pneumatic surgical drill) และแบบที่ทำงานด้วยไฟฟ้า (electric surgical drill) ส่วนทั้งสองแบบจำเป็นต้องมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการทำงานสูง ทั้งนี้เพื่อให้ศัลยแพทย์สามารถทำการผ่าตัดได้อย่างแม่นยำเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการผ่าตัด [1] สำหรับการผ่าตัดที่เสี่ยงต่อการเกิดอันตรายสูง เช่น การผ่าตัดเพื่อเจาะกะโหลกศีรษะหรือการผ่าตัดเพื่อเจาะกระดูกสันหลังนั้น หากมีความผิดพลาดเกิดขึ้นอาจทำให้เนื้อสมองหรือเส้นประสาทถูกทำลายและมีผลทำให้ผู้ป่วยสูญเสียการทำงานของอวัยวะต่าง ๆ จนอาจเป็นอัมพาตและเสียชีวิตได้ นับว่าศัลยแพทย์ต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมากในการใช้เครื่องมือผ่าตัดใกล้อวัยวะสำคัญ

ปัจจุบันเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ได้ก้าวหน้าไปมาก ทำให้สามารถพัฒนาเครื่องมือเจาะกระดูกที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น [2-6] โครงการนี้เป็นอีกโครงการ

หนึ่งที่มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์เพื่อพัฒนาระบบตรวจจับการเจาะทะลุของส่วในทางการแพทย์ ทั้งนี้การใช้เครื่องมือที่มีระบบตรวจจับการเจาะทะลุสามารถลดความเสี่ยงต่อการเจาะทะลุเกินความหนาของเนื้อกระดูกที่อาจทำให้น้ำเยื่อใต้พื้นผิวกระดูกเกิดความเสียหายร้ายแรงได้

2. เทคนิคการตรวจจับการเจาะทะลุของส่ว

การตรวจจับการเจาะทะลุของส่วสามารถทำได้โดยอาศัยการวัดปริมาณทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงขณะเกิดการเจาะทะลุ ปริมาณทางกายภาพที่สำคัญได้แก่ ความเร็วในการหมุนของส่ว แรงต้านตามแนวแกนของส่ว และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์ขับเคลื่อนส่ว

เนื่องจากขณะทำการเจาะวัตถุจะเกิดการแรงบิด (torque load) จากการเอนกัตตเนื้อวัตถุที่ปลายส่ว ซึ่งการแรงบิดที่มากขึ้นมีผลทำให้ความเร็วในการหมุนของส่วลดลง ในทางตรงกันข้ามเมื่อการแรงบิดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ (เมื่อปลายส่วกำลังเจาะทะลุเนื้อวัตถุ) ความเร็วในการหมุนของส่วจะเพิ่มสูงขึ้นจากเดิมอย่างมาก หากสามารถตรวจวัดความเร็วในการหมุนที่เปลี่ยนไปของส่วก็จะสามารถตรวจจับการเจาะทะลุเนื้อวัตถุของส่วได้ โดยปกติแล้วการตรวจวัดความเร็วในการหมุนของส่วสามารถทำได้โดยอาศัยอุปกรณ์พื้นฐาน เช่น แทคโคมิเตอร์ (tachometer) หรืออินครีเมนทอลเอ็นโค้ดเดอร์ (incremental encoder)

นอกจากการแรงบิดจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นขณะทำการเจาะวัตถุแล้ว แรงต้านตามแนวแกนของส่วก็มีการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้สามารถตรวจจับการเจาะทะลุได้อีกด้วย ทั้งนี้ขณะทำการเจาะวัตถุ ปลายส่วจะถูกดันให้เคลื่อนที่เข้าสู่เนื้อวัตถุด้วยแรงกดตามแนวแกนที่มีค่ามาก ยิ่งออกแรงกดมากแรงต้านตามแนวแกนก็จะยิ่งมีค่ามากตามไปด้วย แต่เมื่อเกิดการเจาะทะลุแล้ว แรงต้านตามแนวแกนจะลดลงอย่างทันทีทันใด ดังนั้นจึงทำให้สามารถตรวจจับการเจาะ

DRC-16

ทะลุวัตถุได้โดยการตรวจวัดแรงต้านตามแนวแกนด้วย โหลดเซลล์ (load cell) หรือเซนเซอร์วัดแรง (force sensor) [3-6]

แม้ว่าการตรวจจับการเจาะทะลุโดยอาศัยการตรวจวัดความเร็วในการหมุนของมอเตอร์จะทำให้ง่าย หากมีการติดตั้งแทคโคมิเตอร์หรืออินคริเมนทอลเอ็นโค้ดเดอร์ที่ตัวสว่าน แต่การตรวจวัดการเจาะทะลุโดยอาศัยการตรวจวัดแรงต้านตามแนวแกนก็ถือว่าดีมากกว่าหลายประการเนื่องจากหลังเกิดการเจาะทะลุแล้วการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการหมุนจะช้ากว่า การเปลี่ยนแปลงแรงต้านตามแนวแกน ทั้งนี้เป็นผลมาจากความเฉื่อยของสว่าน ยิ่งแกนการหมุน (rotor) ของสว่านมีขนาดใหญ่ ความเฉื่อยก็จะยิ่งส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการหมุนของสว่าน มากจนอาจทำให้การตรวจจับการเจาะทะลุไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร อย่างไรก็ตามการตรวจจับการเจาะทะลุโดยการตรวจวัดแรงต้านตามแนวแกนก็มีข้อเสีย กล่าวคือโหลดเซลล์หรือเซนเซอร์วัดแรงสำหรับตรวจวัดแรงต้านตามแนวแกนเป็นอุปกรณ์ที่ค่อนข้างอ่อนไหวต่อการรบกวนเนื่องจากการสั่นสะเทือน (mechanical vibration) ซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดในการตรวจจับการเจาะทะลุได้หากการประมวลผลสัญญาณการตรวจวัดไม่ดีพอ

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า หากใช้สว่านไฟฟ้าทำการเจาะวัตถุจะทำให้สามารถใช้กระแสไฟฟ้าเป็นทางเลือกหนึ่งในการบ่งชี้การเจาะทะลุได้ นั่นคือขณะที่สว่านทำการเจาะวัตถุ ภาระแรงบิดจะเกิดขึ้นที่ปลายสว่านซึ่งมีผลทำให้มอเตอร์ขับเคลื่อนสว่านดึงกระแสไฟฟ้ามากขึ้นตามอัตราที่แปรผันไปตามภาระแรงบิด แต่เมื่อการเจาะทะลุเกิดขึ้น ภาระแรงบิดจะลดลงอย่างรวดเร็วและทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์ลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน ดังนั้นจึงสามารถอาศัยการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเป็นตัวบ่งชี้การเจาะทะลุวัตถุได้ ตัวชี้วัดอย่างง่ายสำหรับบ่งชี้การเจาะทะลุคือ ค่ากระแสไฟฟ้าขั้นต่ำที่กำหนดให้เป็นค่าที่สูงกว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่สภาวะไร้ภาระแรงบิด (no load) เล็กน้อย เมื่อกระแสไฟฟ้า

ลดลงจนถึงค่าขั้นต่ำดังกล่าว (ซึ่งมักจะเป็นไปอย่างรวดเร็วเมื่อการเจาะทะลุเกิดขึ้น) ก็แสดงว่าการเจาะทะลุเกิดขึ้นแล้ว

3. เทคนิคการตรวจวัดการเจาะทะลุด้วยการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์คู่แฝด

การตรวจจับการเจาะทะลุโดยอาศัยการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าเป็นวิธีการที่ค่อนข้างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากกระแสไฟฟ้ามีการตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อภาระแรงบิดที่เปลี่ยนไป นอกจากนั้นการตรวจวัดกระแสไฟฟ้ายังสามารถทำได้ง่ายโดยไม่จำเป็นต้องดัดแปลงโครงสร้างและส่วนประกอบเชิงกลของตัวสว่านเพื่อติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม แต่สามารถทำได้โดยใช้วงจรไฟฟ้าที่ติดตั้งห่างไปจากตัวสว่าน แม้จะมีข้อดีหลายประการ แต่การวัดกระแสไฟฟ้าโดยตรงก็มีข้อจำกัดต่อการนำไปใช้สำหรับบ่งชี้การเจาะทะลุ กล่าวคือไม่ใช่กระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่มีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับภาระแรงบิดที่เปลี่ยนไป จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ขับเคลื่อนสว่านโดยปราศจากเฟืองทดพบว่า

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

(1)

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

สมการ (1) และ (2) มีรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) คือ

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

(3)

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

(4)

หรือ

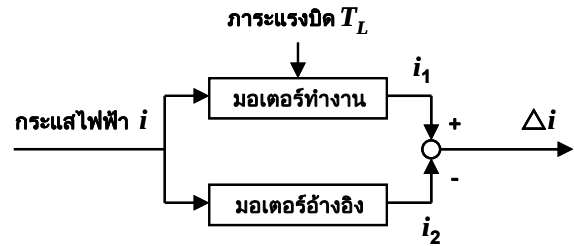
$$I_a(s) = \frac{1}{L_a s + R_a + k_v k_t / (J s + b_m)} V_a(s)$$

DRC-16

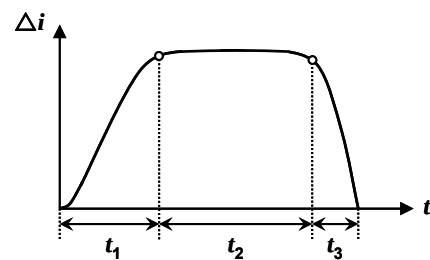
$$+ \frac{k_v / (Js + b_m)}{L_a s + R_a + k_v k_t / (Js + b_m)} T_L(s) \quad (5)$$

เมื่อ i_a หรือ $I_a(s)$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ R_a , L_a , และ V_a คือ ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และแรงดันไฟฟ้าของขดลวดอาร์มาเจอร์ k_v คือ ค่าคงที่แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (back emf constant) ω คือ ความเร็วในการหมุนของส่ว k_t คือ ค่าคงที่แรงบิด (torque constant) ของมอเตอร์ J คือ ผลรวมของโมเมนต์ความเฉื่อยของส่วและแกนหมุน b_m คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (viscous friction coefficient) ของมอเตอร์ และ T_L คือ ภาระแรงบิดจากการเจาะ สมการ (5) ทำให้ทราบได้ว่ากระแสไฟฟ้าบางส่วนเปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าซึ่งมักจะถูกปรับเปลี่ยนเพื่อปรับความเร็วในการหมุนของส่ว กระแสไฟฟ้าส่วนนี้จะต้องถูกหักออกไปจึงจะเหลือเฉพาะกระแสไฟฟ้าส่วนที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงภาระแรงบิดที่เกิดจากการเจาะ

รูปที่ 1 แสดงการหาค่ากระแสไฟฟ้าเฉพาะส่วนที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงภาระแรงบิดโดยอาศัยการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้ากับมอเตอร์ที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการกับมอเตอร์ขับเคลื่อนส่ว มอเตอร์ตัวที่ใช้เปรียบเทียบเรียกว่า “มอเตอร์อ้างอิง (reference motor)” ส่วนมอเตอร์ขับเคลื่อนส่วนั้นเรียกว่า “มอเตอร์ทำงาน (operating motor)” เนื่องจากมอเตอร์ทั้งสองตัวมีคุณลักษณะเหมือนกันทุกประการ ดังนั้นจึงเรียกมอเตอร์ทั้งสองว่า “มอเตอร์คู่แฝด (twin motors)” กระแสไฟฟ้าที่เป็นผลต่างของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์คู่แฝด (i_1 และ i_2) คือ กระแสไฟฟ้าส่วนต่าง Δi ซึ่งแปรผันค่าไปตามภาระแรงบิดที่เกิดจากการเจาะวัตถุ Δi สามารถนำไปใช้เป็นตัวชี้วัดการเจาะทะลุได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยเมื่อเกิดการเจาะทะลุ ภาระแรงบิดจากการเจาะจะลดลงอย่างมากซึ่งทำให้ Δi ลดลงอย่างมากเช่นกัน และหาก Δi ลดต่ำลงจนเป็นศูนย์แสดงว่าการเจาะทะลุได้เกิดขึ้นแล้วโดยสมบูรณ์



รูปที่ 1 แผนผังการเปรียบเทียบเพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าส่วนต่างที่ตอบสนองต่อภาระแรงบิดจากการเจาะวัตถุ



รูปที่ 2 กราฟคุณลักษณะของกระแสไฟฟ้าส่วนต่าง Δi ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา t (t_1 คือ ช่วงเวลาที่ปลายแหลมของดอกส่วเริ่มเจาะเข้าสู่เนื้อวัตถุ t_2 คือ ช่วงเวลาที่ส่วเจาะวัตถุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ และ t_3 คือ ช่วงเวลาที่ปลายดอกส่วทะลุออกจากเนื้อวัตถุ)

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าส่วนต่าง Δi ตลอดช่วงเวลากการเจาะวัตถุ t ทำให้ได้กราฟคุณลักษณะ (characteristic curve) ของการเจาะที่บ่งชี้การเจาะทะลุของดอกส่วปลายแหลม (twist drill bit) ดังรูปที่ 2

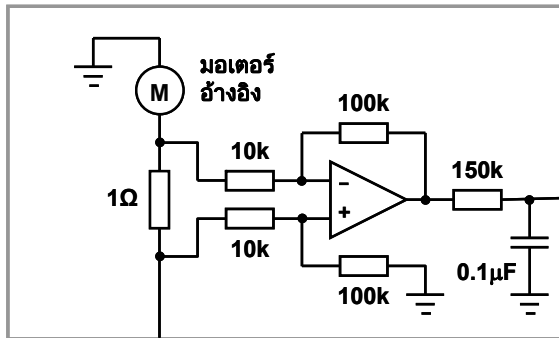
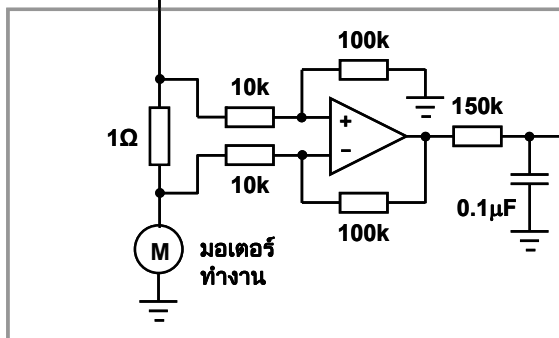
4. การออกแบบวงจรตรวจจับการเจาะทะลุ

4.1 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณอนาล็อก

ในทางปฏิบัติ การเปรียบเทียบเพื่อหากระแสไฟฟ้าส่วนต่าง Δi จะไม่ทำโดยตรงแต่จะทำได้โดยอาศัยตัวขยายผลต่าง (differential amplifier) ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า i_1 และ i_2 ของมอเตอร์คู่แฝดซึ่งไหลผ่านตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับมอเตอร์แต่ละตัวดังรูปที่ 3

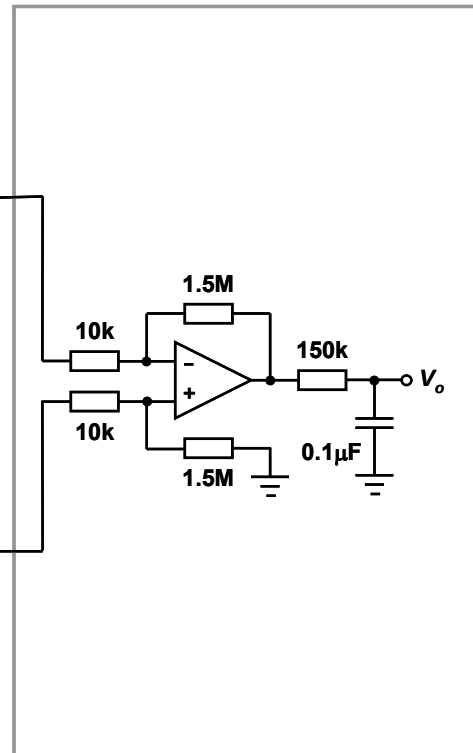
DRC-16

ส่วนสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์อ้างอิง

 $V_s = 30V$ 

ส่วนสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ทำงาน

ส่วนขยายผลต่างของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณอนาล็อกที่อาศัยตัวขยายผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์คู่แฝด

จากรูปที่ 3 วงจรส่วนแรกทำหน้าที่สร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์คู่แฝด วงจรส่วนนี้ประกอบด้วยตัวต้านทานซึ่งต่ออนุกรมกับมอเตอร์ ตัวขยายสัญญาณขั้นต้น (preamplifier) และตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ (low-pass filter) สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากวงจรส่วนนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบเพื่อหาผลต่างด้วยวงจรขยายผลต่าง (differential amplifier circuit) และกรองสัญญาณอีกครั้ง จะเห็นว่าการขยายสัญญาณและการกรองสัญญาณมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการสร้างสัญญาณไฟฟ้าขาออก (V_o) ที่จะนำไปใช้ในการบ่งชี้การเจาะทะลุ ทุกๆ ครั้งที่ขยายสัญญาณจะมีการกรองสัญญาณเพื่อลดทอนสัญญาณรบกวน (noise)

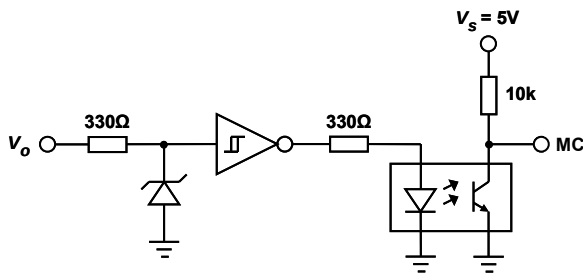
4.2 วงจรสร้างสัญญาณดิจิตอลบ่งชี้การเจาะทะลุ

เมื่อทำการเจาะวัตถุจนกระทั่งส่วนปลายส่วนเริ่มจะทะลุวัตถุ สิ่งที่เกิดขึ้นได้จากการเปลี่ยนแปลงของ

สัญญาณขาออก (output signal, V_o) ซึ่งได้จากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณอนาล็อกคือ สัญญาณขาออกจะเริ่มลดลง (สอดคล้องกับการลดลงของภาระแรงบิด T_L และกระแสไฟฟ้าส่วนต่าง Δi) หากมีการตั้งค่าสำหรับตัดสินว่าการเจาะทะลุได้เกิดขึ้นแล้วเมื่อสัญญาณขาออกลดต่ำลงจนถึงค่าดังกล่าวก็จะทำให้การเจาะทะลุถูกบ่งชี้ได้โดยอัตโนมัติ การบ่งชี้การเจาะทะลุดังที่กล่าวมาสามารถทำได้โดยมีประสิทธิภาพโดยอาศัยขมิทริกเกอร์ (Schmitt trigger)

รูปที่ 4 แสดงวงจรสร้างสัญญาณบ่งชี้การเจาะทะลุซึ่งประกอบด้วยขมิทริกเกอร์แบบกลับขั้วสัญญาณ (inverting Schmitt trigger) ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานซึ่งอยู่ระหว่างซีเนอร์ไดโอด (zener diode) และออปโตคัปเปิลเลอร์ (optocoupler) ซีเนอร์ไดโอดที่ฝั่งขาเข้า (input) ของขมิทริกเกอร์ซึ่งต่อใช้งานร่วมกับตัวต้านทานอีกตัวหนึ่งเป็นส่วนย่อยของวงจรที่ทำหน้าที่

DRC-16



รูปที่ 4 วงจรสร้างสัญญาณป้องกันการเจาะทะลุ (MC: ไมโครคอนโทรลเลอร์)

จำกัดแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (input voltage limiter) ไม่ให้เกินระดับ 5 โวลต์ที่ขมิททริกเกอร์จะทำงานได้ ส่วนออปโตคัปเปิลเลอร์ (optocoupler) ซึ่งต่อใช้งานร่วมกับตัวต้านทานที่ฝั่งขาออกของขมิททริกเกอร์เป็นตัวเชื่อมต่อสัญญาณเชิงแสงที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณป้องกันการเจาะทะลุจากขมิททริกเกอร์ไปยังพอร์ตขาเข้า (input port) อันหนึ่งของไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรสร้างสัญญาณป้องกันการเจาะทะลุนี้จะรับสัญญาณอนาล็อกจากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณมาทำการตรวจสอบว่าสัญญาณมีระดับแรงดันลดลงถึงระดับแรงดันเทรชโฮลด์ซาลง (negative-going threshold voltage, V_{T-}) แล้วหรือไม่ หากสัญญาณยังมีระดับแรงดันสูงกว่า V_{T-} พอร์ตขาเข้าของไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีสถานะลอจิกดิจิทัลเป็น 1 แต่หากสัญญาณมีระดับแรงดันต่ำกว่า V_{T-} พอร์ตขาเข้าของไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีสถานะเป็น 0 เมื่อกำหนดการตั้งค่าอินเทอร์รัปต์ (interrupt) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ให้เป็นแบบ “ทำงาน (enable)” และหลังจากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงสถานะที่พอร์ตขาเข้าจาก 1 เป็น 0 (falling-edge-triggered interrupt) ก็จะทำให้สามารถสั่งการให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตอบสนองต่อการเจาะทะลุได้

มีข้อสังเกตว่าขมิททริกเกอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณดิจิทัลจากการเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณขาเข้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าเทรชโฮลด์สองค่า (positive-going threshold voltage, V_{T+} และ negative-going

threshold voltage, V_{T-}) ซึ่งทำให้เกิดการเปรียบเทียบแบบมีช่วงฮิสเตอร์ซิส หากสัญญาณขาเข้ามีการเปลี่ยนแปลงไม่เกินช่วงฮิสเตอร์ซิส สัญญาณดิจิทัลขาออก (digital output signal) จะไม่มีการเปลี่ยนค่าการทำงาน ด้วยคุณลักษณะเช่นนี้ทำให้การตรวจจับการเจาะทะลุไม่อ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวน ดังนั้นจึงทำให้การตรวจจับการเจาะทะลุมีประสิทธิภาพมาก

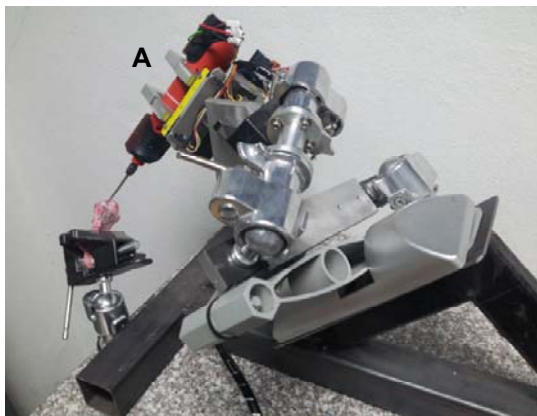
5. การทดสอบ

5.1 เครื่องเจาะต้นแบบสำหรับการทดสอบ

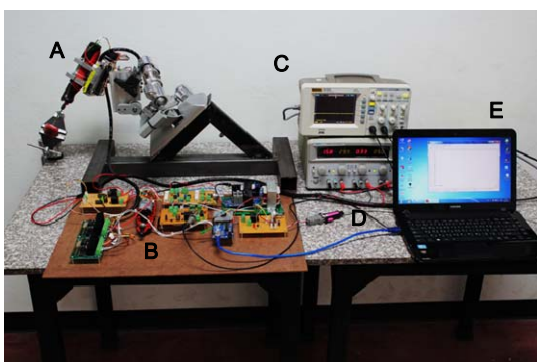
การทดสอบการตรวจจับการเจาะทะลุเบื้องต้นอาศัยเครื่องเจาะต้นแบบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ เครื่องต้นแบบมีโครงสร้างเป็นกลไกที่ติดตั้งส่วนไฟฟ้าไว้ที่ส่วนปลาย ตำแหน่งและแนวการวางตัวของส่วนสามารถปรับเปลี่ยนและล็อกให้มั่นคงขณะทำงานได้ การขับเคลื่อนส่วนให้เคลื่อนที่ในแนวตรงตามแนวแกนของส่วนทำได้โดยอาศัยบอลสกรู (ball screw) ที่มีสตัปเปอร์มอเตอร์ (Vexta PH533-A) เป็นตัวขับเคลื่อน การควบคุมสตัปเปอร์มอเตอร์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino UNO R3) สร้างสัญญาณการควบคุมแบบครึ่งขั้น (half step) เพื่อควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านการเชื่อมต่อแบบยูนิโพลาร์ (unipolar) ทั้งนี้อัตราเร็วในการเจาะ (feed rate) สามารถตั้งค่าได้ด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งมีการสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านพอร์ตอนุกรม (serial communication port)

สำหรับส่วนสองตัวที่นำมาประกอบเป็นเครื่องเจาะต้นแบบ (ทั้งส่วนทำงานและส่วนอ้างอิง) คือ ส่วนไฟฟ้าที่ตัดแปลงมาจากเครื่องเจียรในแบบพกพาขนาดเล็ก (mini-grinder: Black & Decker RTX-1) แกนหมุนของส่วนขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยปราศจากเฟืองทด ส่วนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับการเจาะทะลุ (ตามคำอธิบายในหัวข้อที่ 4) มีการติดตั้งให้ทำงานโดยอาศัยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และเพื่อความสะดวกในการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟฟ้าต่างๆ ระหว่างการทดสอบ จึงมีการติดตั้งดิจิทัล

DRC-16



(ก)



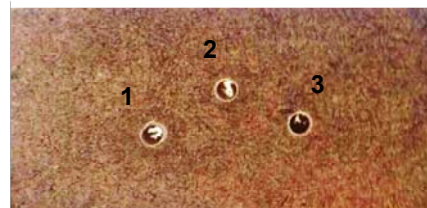
(ข)

รูปที่ 5 เครื่องเจาะต้นแบบ (ก) ส่วนไฟฟ้าและอุปกรณ์จับยึด (ข) ส่วนประกอบเชิงกลและไฟฟ้า (A: ส่วนไฟฟ้า, B: วงจรอิเล็กทรอนิกส์, C: ดิจิตอลออสซิลโลสโคป, D: อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า และ E: คอมพิวเตอร์)

ออสซิลโลสโคป (digital oscilloscope) ไว้กับเครื่องเจาะต้นแบบด้วย รูปที่ 5 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องเจาะต้นแบบขณะทำการทดสอบ

5.2 การทดสอบการตรวจจับการเจาะทะลุแผ่นไม้

ในเบื้องต้น การทดสอบการตรวจจับการเจาะทะลุของเครื่องเจาะต้นแบบใช้วัตถุทดสอบที่มีรูปร่างและความหนาแน่นอนเพื่อความสะดวกในการสังเกตการเจาะทะลุ วัตถุที่เลือกใช้ได้แก่แผ่นไม้อัดที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร ขณะทำการทดสอบแผ่นไม้อัดถูกเจาะด้วยดอกสว่านปลายแหลม (twist drill bit) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตร ความเร็วการหมุนของสว่านคือ 2300 รอบต่อนาทีซึ่งได้จากการจ่าย



รูปที่ 6 รูเจาะบนแผ่นไม้อัด

กระแสไฟฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ขนาด 30 โวลต์เข้าสู่มอเตอร์คู่แฝด ทั้งนี้อัตราเร็วในการเจาะกำหนดไว้ที่ 0.1 มิลลิเมตรต่อวินาที นอกจากนี้ที่ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์มีการตั้งโปรแกรมเพื่อควบคุมให้สแต็ปเปอร์มอเตอร์หมุนกลับทิศหลังจากที่ได้รับสัญญาณบ่งชี้การเจาะทะลุจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะทำให้สว่านเคลื่อนตัวออกจากรูเจาะหลังจากที่การเจาะทะลุเกิดขึ้นแล้ว

จากการทดสอบพบว่า วงจรอิเล็กทรอนิกส์สามารถตรวจจับการเจาะทะลุได้และหลังจากที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับสัญญาณบ่งชี้การเจาะทะลุจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์แล้ว สว่านได้เคลื่อนตัวออกจากรูเจาะโดยอัตโนมัติ ลักษณะรูเจาะที่เกิดจากการทดสอบ 3 ครั้งที่มีบริเวณกึ่งกลางของแผ่นไม้อัดแสดงดังรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าในรูเจาะยังมีเศษเนื้อไม้บางส่วนค้างติดอยู่ ซึ่งแสดงว่าสว่านไม่ได้เคลื่อนที่เกินความหนาของแผ่นไม้ไปมากนัก เฉพาะปลายแหลมบางส่วนของดอกสว่านเท่านั้นที่เคลื่อนที่เกินพื้นผิวด้านหลังของแผ่นไม้อัดไปเล็กน้อย

5.3 การทดสอบการตรวจจับการเจาะทะลุกระดูก

การทดสอบถัดมาเป็นการทดสอบการเจาะทะลุกระดูกที่มีความแข็ง โดยอุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งดอกสว่านที่ใช้ในการทดสอบเป็นชุดเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบการเจาะแผ่นไม้อัด ค่าความเร็วในการหมุนของสว่านและอัตราเร็วในการเจาะถูกตั้งค่าไว้เช่นเดียวกับกรณีของการเจาะแผ่นไม้อัด ส่วนวัตถุที่ใช้ในการทดสอบเป็นกระดูกซี่โครงหมู (porcine rib) กระดูกซี่โครงหมูมีลักษณะที่เหมาะสมต่อการทดสอบ กล่าวคือเป็นกระดูกขนาดเล็กที่ผิวกระดูกภายนอก (cortical bone) และเนื้อกระดูกภายใน (cancellous

DRC-16

bone) มีการแยกชั้นกันอย่างชัดเจน โดยชั้นกระดูกภายนอกมีความแข็งค่อนข้างมาก ส่วนชั้นกระดูกภายในมีความอ่อนตัวค่อนข้างสูง

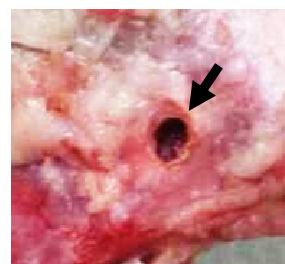
จากการทดสอบพบว่า การตรวจจับการเจาะทะลุสามารถทำได้ดีเช่นเดียวกับกรณีการเจาะแผ่นไม้อัด กล่าวคือวงจรรีเลย์ทรอนิกส์สามารถตรวจจับการเจาะทะลุเมื่อปลายสว่านกำลังทะลุชั้นกระดูกภายนอกที่มีความแข็งสูง ลักษณะของรูเจาะที่เกิดจากการทดสอบนี้แสดงดังรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่ารูเจาะเผยให้เห็นเนื้อกระดูกภายในที่มีสีแดงเข้ม

6. บทสรุป

จากการศึกษาการตรวจจับการเจาะทะลุวัตถุต่างๆ ที่นำมาทดสอบทำให้พบว่าเทคนิคการตรวจจับการเจาะทะลุด้วยการเปรียบเทียบสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ทำงานและมอเตอร์อ้างอิงเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพ การเปรียบเทียบและประมวลผลสัญญาณเพื่อป้องกันการเจาะทะลุสามารถทำได้โดยอาศัยวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ส่วนประกอบหลักที่ทำหน้าที่สำคัญในวงจรดังกล่าวได้แก่ ตัวขยายสัญญาณ ตัวกรองสัญญาณ และซิมิทริกเกอร์ ในการทดสอบเบื้องต้นพบว่าอุปกรณ์เหล่านี้สามารถตรวจจับการเจาะทะลุวัตถุตัวอย่างซึ่งได้แก่แผ่นไม้อัดและกระดูกหมูได้ ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานในทาง การแพทย์ อย่างไรก็ตามในอนาคตยังจำเป็นต้องมีการทดสอบเครื่องเจาะต้นแบบกับวัตถุอีกหลายชนิดเพื่อรวบรวมเป็นข้อมูลในการพัฒนาก่อนที่จะมีการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Bertollo, N. and Walsh, W. R. (2011), Drilling of Bone: Practicality, Limitations and Complications Associated with Surgical Drill-Bits, *Biomechanics in Applications*, September 2011, pp. 53-82.



รูปที่ 7 รูเจาะบนกระดูกหมู

[2] 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(4), June 1996, pp. 461-477.

[3] Allotta, B., Giuseppe, G., and Rinaldi, L., A. (1997), Handheld Drilling Tool for Orthopedic Surgery, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 2(4), December 1997, pp. 218-229.

[4] Ong, F. R. and Bouazza-Marouf, K. (1999), The Detection of Drill Bit Break-Through for the Enhancement of Safety in Mechatronics Assisted Orthopaedic Drilling, *Mechatronics*, vol. 9(6), September 1999, pp. 565-588.

[5] Lee, W., Shih, C., and Lee, S (2004), Force Control and Breakthrough Detection of a Bone-Drilling System, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 9(1), March 2004, pp. 20-29.

[6] Lee, W. and Shih, C. (2006), Control and Breakthrough Detection of a Three-Axis Robotic Bone Drilling System, *Mechatronics*, vol. 16(2), March 2006, pp. 73-84.

[7] Brett, P. N., Taylor, R. P., Coulson, C., and Griffiths, M. V. (2007), A Surgical Robot for Cochleostomy, paper presented in the 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS, Lyon, France, August 2007, pp. 1229-1232.

DRC-16