เทคนิคการวิเคราะห์และการสกัดลักษณะเด่นสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองในย่านความถี่ Mu และ Beta Rhythm ด้วยโปรแกรม BCI2000

EEG Data analysis and Feature classification of Mu and Beta Rhythm Using BCI2000 Software Platform

ธงชัย จินาพันธ์[1]
ดุสิต โพธิพันธุ์[1]
ธวัชชัย ศรีพรงาม[1]
ณัฐพร พวงเกตุ[1]

บทนำ

การสื่อสารระหว่างสมองกับคอมพิวเตอร์ (Brain–Computer Interface: BCI) คือ ระบบการสื่อสารที่ส่งผ่านข้อความหรือคำสั่งจากสมองไปสู่โลกภายนอกโดยไม่ผ่านเส้นทางปกติของสมองสู่ปลายทางของเส้นประสาทและกล้ามเนื้อ (Wolpaw & et al., 2002) ระบบการสื่อสารระหว่างสมองกับคอมพิวเตอร์ ประกอบด้วยเส้นทางการนำเข้าสัญญาณคลื่นสมองด้วยวิธีการต่างๆ การประมวลผลสัญญาณโดยการสกัดลักษณะเด่นของสัญญาณที่ต้องการแยกออกจากสัญญาณอื่นๆที่ถูกบันทึกมาด้วยกันและการแปลผลของสัญญาณเพื่อนำเอารูปแบบของสัญญาณที่ต้องการไปกำหนดเป็นคำสั่งเพื่อการสื่อสารหรือควบคุมอุปกรณ์ภายนอกและการป้อนกลับของสัญญาณเพื่อยืนยันความสำเร็จหรือล้มเหลวของคำสั่งหรือกิจกรรม (Birbaumer, 2006; Wolpaw & et al., 2002)

กระบวนการสื่อสารระหว่างสมองกับคอมพิวเตอร์เพื่อเริ่มต้นจากการการบันทึกสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมอง (Signal Acquisition) จากบริเวณส่วนต่างๆ ของสมองที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมต่างๆ ของมนุษย์ (Human Brain Function) ที่แสดงออกมาด้วยเครื่องบันทึกสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองซึ่งประกอบด้วย ขั้ววัดสัญญาณไฟฟ้าที่ถูกจัดให้ติดตั้งอยู่บนศีรษะของมนุษย์ระยะห่างของแต่ละขั้วสัญญาณถูกกำหนดด้วยระบบมาตรฐานนานาชาติ 10-20 (International 10 – 20 System) ขณะที่ความต้านทานไฟฟ้าของขั้วสัญญาณต้องไม่เกิน 5 K Ohm สัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองที่ได้จะถูกขยายให้มีความแรงขึ้น มีอัตราการสุ่มสัญญาณ เช่น 128 Hz ความละเอียดกำหนดตามความเหมาะสมที่ 8 หรือ 16 Hz มีการกรองความถี่ที่ต้องการหรือ filter เพื่อนำเอาเฉพาะสัญญาณที่ต้องการซึ่งอยู่ในย่านความถี่ 0.2 – 30 Hz. มาใช้สำหรับการวิเคราะห์ขจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการออกไปนำเอาสัญญาณที่

[1] วิทยาลัยวิทยาการวิจัยและวิทยาการปัญญา มหาวิทยาลัยบูรพา

ต้องการนำมาคัดกรองส่งเข้าสู่กระบวนการแยกคุณลักษณะของสัญญาณ (Feature Extraction) เพื่อนำเอารูปแบบของคุณลักษณะที่ต้องการของสัญญาณเข้าสู่หน่วยประมวลผล เพื่อสร้างโปรแกรมหรือคำสั่งการใช้งาน (Devices Control) โดยการนำเอาสัญญาณที่คัดเลือกแล้วมาทำการกำหนดรูปแบบของคำสั่งกระบวนการและวิธีการควบคุมอุปกรณ์ภายนอกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป (Wessel, 2006)

รูปแบบของคลื่นไฟฟ้าสมองเกิดขึ้นจากการกระตุ้นของสิ่งเร้าโดยแบ่งการกระตุ้นออกเป็นสองประเภทคือการกระตุ้นจากสิ่งเร้าที่เกิดจากปัจจัยภายนอก (Selective Attention) และ การสร้างสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองที่เกิดจากการกระตุ้นจากภายในสมอง เช่น การคิด การตัดสินใจ การเคลื่อนไหว

สำหรับการวัดหรือบันทึกสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมอง ซึ่งเกิดจากกิจกรรมที่เกิดขึ้นสร้างขึ้นเองจากจากพฤติกรรมที่แสดงออกโดยการเคลื่อนไหวส่วนต่างๆของตัวผู้ใช้งาน เช่น คลื่นไฟฟ้าสมองที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการเคลื่อนไหวที่เกิดขึ้นเมื่อสมองสั่งให้แขนและขามีการเคลื่อนไหวสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองจากบริเวณพื้นที่สมองสั่งการก็จะถูกส่งผ่านลงไปสู่ก้านสมองเส้นประสาทไปกระตุ้นกล้ามเนื้อและนำไปสู่การเคลื่อนไหวแขนและขาโดยเป็นที่รู้จักกันดีในรูปแบบของสัญญาณที่เรียกว่า Motor และSensory Motor Rhythm ซึ่งวิธีการวัดและบันทึกสัญญาณแบบไม่รุกราน (Non-Invasive EEG signal measurement) เป็นวิธีการที่นิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบันในขณะที่มนุษย์ดำเนินกิจกรรมต่างในชีวิตประจำวันนั้นพื้นที่สมองมนุษย์ในส่วนที่เรียกว่า Primary Sensory Motor Cortical Areas หรือสมองส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนไหวจะปรากฏคลื่นสมองที่ความถี่ 8–12 Hz (Mu Rhythm) (Wolpaw & Mc Farland, 2004) ซึ่งจะแตกต่างจากพื้นที่ส่วนอื่นและมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระบบประสาทสัมผัสและการเคลื่อนไหวของร่างกายซึ่งโดยปกติจะสัมพันธ์กับคลื่นความถี่สมองอีกย่านความถี่หนึ่งซึ่งมีความถี่อยู่ระหว่าง 26 – 30 Hz. เรียกว่า β rhythms คลื่นสมองในย่านความถี่ Mu และ Beta Rhythmsในสมองมนุษย์มีคุณลักษณะที่เหมาะสมในการที่จะนำมาใช้ประโยชน์สำหรับการสื่อสารและการควบคุมอุปกรณ์ภายนอกโดยที่คลื่นไฟฟ้าสมองในย่านความถี่นี้เกิดจากการเคลื่อนไหวหรือการวางแผนการเคลื่อนไหวจะส่งผลให้เกิดการลดระดับความสูงของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองในย่านความถี่ Mu-Rhythm (8 - 12 Hz.) ในบริเวณพื้นที่สมองส่วนที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนไหวหรือการวางแผนการเคลื่อนไหวซึ่งปรากฏการณ์หรือลักษณะการลดระดับลงของสัญญาณ(Amplitude) นี้เรียกว่า Event-Related De Synchronization หรือ ERD โดยจะพบสัญญาณนี้ชัดเจนที่สมองส่วนที่อยู่ด้านตรงข้ามกับร่างกายในส่วนที่จะเกิดการเคลื่อนไหวในโดยเฉพาะแขน (Pfurtscheller .et al., 2006) ในทางกลับกันสัญญาณคลื่นสมองจะกลับมาสูงขึ้นอีกครั้งหลังจากเกิดการเคลื่อนไหวร่างกายไปแล้วซึ่งพบได้ในย่านความถี่ที่เรียกว่า β-Frequency Band (26–30 Hz.) ซึ่งเรียก

ปรากฏการณ์นี้ว่า Event-Related Synchronization (ERS) หรือ Beta Rebound และที่มากไปกว่านั้นคลื่นสมองที่เกิดขึ้นจากสภาวะ ERD/ERS ไม่จำเป็นต้องเกิดการเคลื่อนไหวจริงของร่างกายโดยที่สามารถเกิดขึ้นได้ด้วยการจินตนาการการเคลื่อนไหว (Motor Imagery) ดังนั้นลักษณะเด่น ERD/RRS จึงสามารถตอบสนองต่อการสนับสนุนการพัฒนาศาสตร์ทางด้าน BCI ได้อย่างกว้างขวางโดยตั้งแต่ปี ค.ศ.1980 (Pfurtscheller et al., 2006)

ในการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองเพื่อนำเอาลักษณะเด่นของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมอง (EEG Data analysis and Feature classification) ไปใช้งานสำหรับสนับสนุนงานด้านการสื่อสารระหว่างสมองกับคอมพิวเตอร์ (Brain Computer Interface) จำเป็นต้องใช้ซอร์ฟแวร์แพล็ตฟอร์มที่มีความสามารถมีประสิทธิภาพตรงกับวัตถุประสงค์ของการใช้งานโดยความสามารถเบื้องต้นของซอร์ฟแวร์ประกอบด้วยการแสดงผลสิ่งเร้าในรูปแบบต่างๆการควบคุมและกำหนดเป้าหมายตลอดจนการป้อนกลับข้อมูลเพื่อให้ทราบผลลัพธ์จากการทดลองและคุณสมบัติที่สำคัญของซอร์ฟแวร์แต่ละแพล็ตฟอร์มคือการสนับสนุนของระบบปฏิบัติการแบบต่างๆ (Operating Systems) ขอบเขตของการใช้งาน (License) ในรูปแบบต่างๆของรูปแบบของภาษาที่ใช้ในการเขียนและแก้ไขโปรแกรมความหลากหลายในการสนับสนุนของฮาร์ดแวร์จากผู้ผลิตต่างๆโดยโดยที่ในปัจจุบันซอร์ฟแวร์แพล็ตฟอร์มที่เป็นที่นิยมสำหรับสนับสนุนงานด้านการสื่อสารระหว่างสมองกับคอมพิวเตอร์ (Brain Computer Interface) มีอยู่ด้วยกัน 7 แพล็ตฟอร์ม คือ 1) BCI2000, 2) OpenViBE, 3) TOBI Common Implementation Platform (CIP), 4) BCILAB, 5) BCI++, 6) xBCI, และ7) BF++. (Brunner c.,et. al, 2013) โดยในบทความนี้จะนำเสนอวิธีการบันทึกและเทคนิคการวิเคราะห์และการสกัดลักษณะเด่นสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองในย่านความถี่ Mu และ Beta Rhythm ด้วยโปรแกรม BCI2000 สำหรับสนับสนุนงานด้านการสื่อสารระหว่างสมองกับคอมพิวเตอร์ (Brain Computer Interface).

สัมประสิทธิ์การอธิบาย (Coefficient of determination: R^2)

สัมประสิทธิ์การอธิบาย (Coefficient of determination) แปลความหมายได้ว่าเปอร์เซ็นต์ของความแปรปรวนในตัวแปรหนึ่งสามารถอธิบายหรือทำนายได้ด้วยตัวแปรอื่นๆ สำหรับในบริบทของการสื่อสารระหว่างสมองกับคอมพิวเตอร์ (BCI) ค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดจะคำนวณจากสัญญาณที่ได้รับการวัดภายใต้เงื่อนไขการทำงานของสมองในสภาวะที่แตกต่างกันสองสภาวะ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะของคลื่นสมองที่เกิดจากการเคลื่อนไหวมือขวากับสภาวะของคลื่นสมองในขณะผ่อนคลาย มีค่าสหสัมพันธ์ r = -0.617 ดังนั้นสัมประสิทธิ์การอธิบายจะเท่ากับ r^2 = 0.381 เราจะแปลความหมายสัมประสิทธิ์การอธิบายได้ว่า 38.1% ของความแปรปรวนของคลื่นไฟฟ้าสมองในขณะผ่อนคลายสามารถอธิบายหรือทำนายได้ด้วยการเคลื่อนไหวมือขวา

โปรแกรม BCI2000 (BCI2000 Software Platform)

BCI20002 เป็นแพลตฟอร์มของซอร์ฟแวร์ถูกสร้างขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์สำหรับบันทึกและประมวลผลสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองและและประมวลผลสัญญาณไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอก สำหรับงานวิจัยด้าน Brain Computer Interface โดยโครงการ BCI2000 ได้รับการพัฒนาตั้งแต่ปี 2000 นำโดยศูนย์วิจัยและพัฒนาของ The Brain-Computer Interface R&D Program at the Wadsworth Center of the New York State Department of Health in Albany, New York, USA, และยังมีการร่วมมือกับสถาบันทางการแพทย์และจิตวิทยาพฤติกรรมชีววิทยาของมหาวิทยาลัย T¨ubingen Germany ที่สำคัญยังได้รับการสนับสนุนจากห้องปฏิบัติการจำนวนมากเช่น BrainLab at Georgia Tech in Atlanta, Georgia,and Fondazione Santa Lucia in Rome, Italy ที่มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาโครงการนี้โดย BCI2000 ยังคงอยู่ในปัจจุบันและการพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยทีมงานหลักประกอบด้วยนักวิทยาศาสตร์และนักโปรแกรมเมอร์หกคนและการสนับสนุนการพัฒนาเพิ่มขีดความสามารถของโปรแกรมจากกลุ่มผู้ใช้ซอร์ฟแวร์และความเข้ากันได้ของฮาร์ดแวร์รุ่นใหม่จากการสนับสนุนจากผู้ผลิตอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ทีมงานหลักในการพัฒนาโครงการ BCI2000 ประกอบด้วย Gerwin Schalk (Project Director and Chief Evangelist), J¨urgen Mellinger (Chief Software Engineer), Jeremy Hill (Project Coordinator), Griffin Milsap (Software and Test Engineer), Adam Wilson (User Management and Support), and Peter Brunner (Workshops and Tutorials). (Brunner c.,et. al, 2013)

การวิเคราะห์และสกัดลักษณะเด่นERD/ERSของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองด้วยโปรแกรม BCI2000

คุณสมบัติพื้นฐานของคลื่นไฟฟ้าสมองในย่าน Mu และ Beta Rhythm จะเหมือนกันสำหรับมนุษย์ทุกคนแต่รูปแบบเชิงพื้นที่และความถี่ (spatial pattern and exact frequency) ที่เกิดขึ้นจะไม่ซ้ำกันและเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวบุคคลและขึ้นอยู่กับสถานะปัจจุบันของบุคคลนั้น และเพื่อที่จะให้ระบบ BCI ที่ออกแบบไว้สามารถตอบสนองการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงต้องมีการควบคุมคุณภาพของสัญญาณเข้าที่ดีซึ่งตัวแปรสำคัญได้แก่ ความถี่และตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าทีตอบสนองต่อพฤติกรรมของผู้ใช้งานซึ่งมีวิธีการหรือเครื่องมือหลากหลายประเภทให้เลือกใช้โดย BCI 2000 เป็นเครื่องมือที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายและที่สำคัญคือไม่มีค่าใช้จ่ายโดยมีขั้นตอนและวิธีการดังนี้

1. ทำการดาวน์โหลดโปรแกรม BCI2000 จากเว็บไซต์ www.BCI2000.org โดยจะต้องสมัครสมาชิกเพื่อรับชื่อบัญชีผู้ใช้งานและรหัสผ่านก่อน

2. ทำการติดตั้งโปรแกรม BCI2000 ปฏิบัติตามคำแนะนำจากคู่มือการใช้งานจากเว็บไซต์

3. เมื่อติดตั้งโปรแกรมเรียบร้อยแล้วจะพบองค์ประกอบของระบบดังแสดงในภาพ

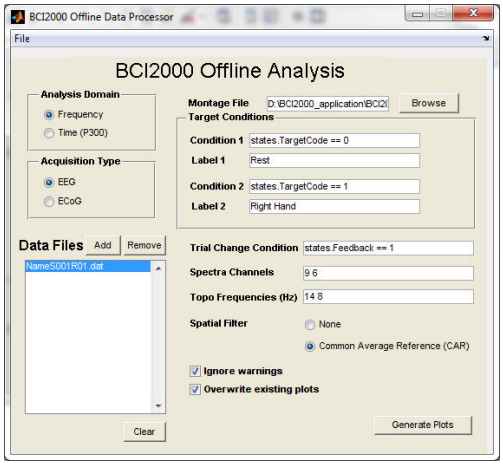
Module Name	Filename	Current Version
Operator	Operat.exe	V1.31
EEG source	e.g., DT2000.exe	V0.30
Signal Processing	e.g., ARSignalProcessing.exe	V0.30
Application	e.g., RJB.exe	V0.30

ภาพ 1 องค์ประกอบของโปรแกรม BCI2000 (Schalk et. al, 2004)

วิธีดำเนินการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองด้วยโปรแกรม BCI2000

สัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองที่นำมาเป็นตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกลักษณะเด่น ERD/ERS ที่ต้องการของอาสาสมัครแต่ละคนด้วยโปรแกรม BCI2000 โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เปิดโปรแกรม BCI 2000 Offline Analysis ซึ่งจะรันผ่านโปรแกรม Matlab จะปรากฏหน้าต่างGUI ดังภาพที่ 2



ภาพ 2 หน้าต่าง Offline Analysis ของโปรแกรม BCI 2000

2.ใส่ข้อมูลลงในช่องต่างๆของโปรแกรมให้ครบถ้วนตามรายการต่างๆต่อไปนี้

Analysis Domain: เลือก Frequency

Acquisition Type: เลือก "EEG"

Data Files: เลือก "Add" แล้วเลือกนำเข้าไฟล์ข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์ในที่นี้เลือกไฟล์"NameS001R01 .dat" ซึ่งเป็นไฟล์ที่บันทึกจากการทดลองกิจกรรมการเคลื่อนไหวมือขวา

Montage File: เลือกไฟล์ผังขั้วไฟฟ้าให้ตรงกับจำนวนขั้วสัญญาณที่สวมใส่ให้กับอาสาสมัครในที่นี้เลือกไฟล์ c:\epoc1.loc

Target Condition 1 : เลือก "states.TargetCode == 0".

Target Condition Label 1 : ใส่ Rest

Target Condition 2: Enter the value "states.TargetCode == 1".

Target Condition Label 2 : ใส่ Rest

Trial Change Condition Enter the value "states.FeedBack == 1"

Spectra Channels : ใส่ 9 6

Topo Frequencies : ใส่ 14 8

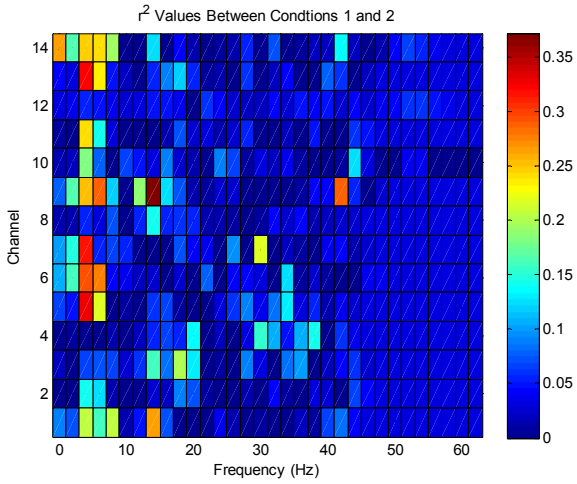
Spatial Filter : เลือก "Common Average Reference (CAR)".

Ignore Warnings : เลือกเช็คบล็อก

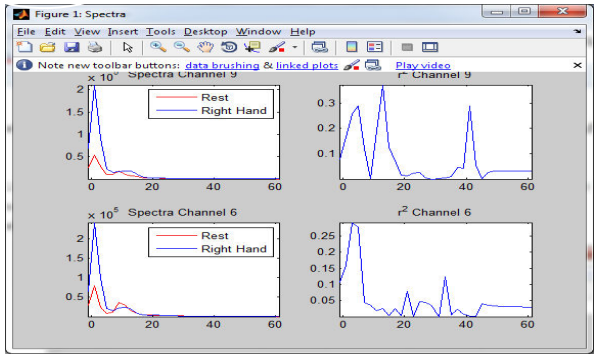
Overwrite existing plots : เลือกเช็คบล็อก แล้วคลิกที่ "Generate Plots".

โปรแกรมจะทำการคำนวณและแสดงผลข้อมูลโดยมีรายละเอียดดังนี้

3. ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าและความถี่ที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนไหวหรือกำมือขวาแสดงผลด้วยค่า R^2 โดยค่าที่เข้าใกล้1หรือสีเข้มในภาพ 3 แสดงถึงการเคลื่อนไหวมือขวาที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าและความถี่ของคลื่นไฟฟ้าสมองที่ขั้วไฟฟ้าที่จุดนี้ความสัมพันธ์กันสูงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน ส่วนภาพที่ 4 แสดงย่านความถี่และตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อการเคลื่อนไหวหรือกำมือขวาในโดเมนความถี่

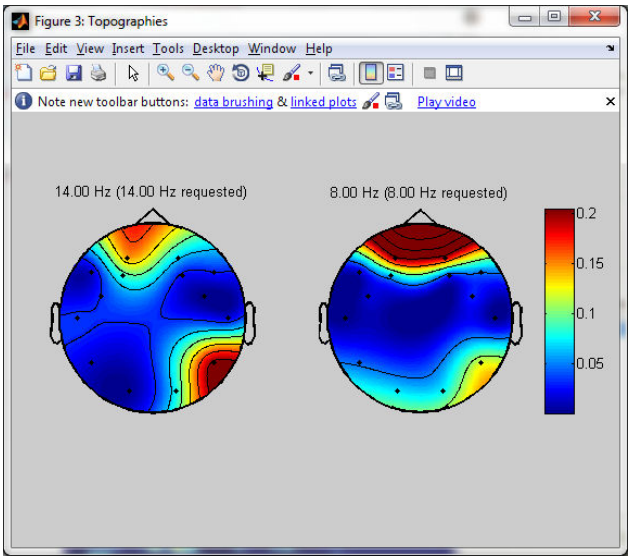


ภาพ 3 ตัวอย่างค่า R^2 ระหว่างการเคลื่อนไหวมือขวาที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าและความถี่ของคลื่นไฟฟ้าสมอง



ภาพ 4 ย่านความถี่และตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อการเคลื่อนไหวหรือกำมือขวาในโดเมนความถี่

5. เมื่อนำผลการวิเคราะห์ข้อมูลมาวิเคราะห์หาตำแหน่งบนแผนที่สมองจะพบว่าพื้นที่สมองที่ตอบสนองต่อการเคลื่อนไหวหรือกำมือขวาสำหรับการทดลองนี้ ได้แก่ บริเวณ Parietal และ Temporal Lobeดังแสดงในภาพ 5



ภาพ 5 แสดงค่า R^2 ของพื้นที่สมองในบริเวณ x ที่ตอบสนองต่อต่อการเคลื่อนไหวมือขวา (ERS) ที่ความถี่ 8Hz และ14Hz.

6. นำคุณลักษณะเด่นของสัญญาณที่ได้คือความถี่ 8Hz ที่ Channel ที่ 9 (P8) ไปออกแบบระบบเพื่อควบคุมการการทำงานของอุปกรณ์ที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า เช่น เมาส์คอมพิวเตอร์ (Computer Mouse) หรือรถเข็นไฟฟ้าต่อไป

สรุป

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มายังไม่สามารถบ่งบอกถึงลักษณะเด่นที่ชัดเจนที่สุดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การอธิบาย (Coefficient of determination) สูงทั้งในเชิงพื้นที่ (ตำแหน่งขั้วไฟฟ้า) และเชิงความถี่แต่สามารถนำมาใช้อ้างอิงในการระบุตำแหน่งและความถี่ที่ใกล้เคียงที่สุดที่ต้องการบันทึกสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองเพื่อนำไปใช้งานโดยย่านความถี่รูปจำลองการตอบสนองของสัญญาณบนพื้นที่สมอง สามารถยืนยันได้ว่าความถี่ 8 Hz.และ 14 Hz. เป็นความถี่ที่อยู่ในย่าน Mu Rhythm และตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าที่ Channel 6 และ 9 ซึ่งเป็นพื้นที่สมองในบริเวณPosterior parietal cortex ทำหน้าที่ในการวางแผนการเคลื่อนไหว (Buneo, Andersen, 2005) ด้วยวิธีการดังกล่าวจะทำให้เราสามารถจำกัดจำนวนขั้วไฟฟ้าที่ติดตั้งสำหรับใช้งานจริงและความถี่ที่ตอบสนองการเคลื่อนไหวมือขวาของอาสาสมัครแต่ละคนได้ตามตำแหน่งที่จำเป็นโดยอ้างอิงจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลข้างต้น

เอกสารอ้างอิง

Birbaumer, N., (2006). Breaking the silence: Brain–computer interfaces (BCI) for communication and motor control. Psychophysiology, 43, s. 517–532.

Brunner C., et al.(2013), BCI Software Platforms**. In Towards Practical Brain-Computer Interfaces**. Biological and Medical Physics; 2013

Buneo A.C., & Andersen A.R..,(2005), The posterior parietal cortex: Sensorimotor interface for the planning and online control of visually guided movements., Harrington Department of Bioengineering, Arizona State University, P.O. Box 879709,

Pfurtscheller, G., Brunner, C., Schl¨ogl, A., & Silva, F. L., (2006). Mu rhythm (de) synchronization and EEG single-trial classification of different motor imagery tasks. **Neuroimage** 31 (1), 153–159.

Schalk, G., Hinterberger, T., McFarland D.J. & Mellinger, J., (2004).,Software Design Document for a specific implementation of 'BCI2000'., New York State Department of HealthWadsworth Center,Laboratory of Nervous Systems Disorders,Eberhard–Karls–Universit¨at T¨ubingen Medizinische Fakult¨at Institut f¨ur Medizinische Psychologie,February 2000–July 2004

Wessel, M., (2006). Pioneering research into Brain Computer Interfaces. Delft University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics, and Computer Science,Mediametics: Man-Machine Interaction,Mekelweg 4,2628 CD Delft, The Netherlands.

Wolpaw, J.R & McFarland, D.J. (2004). Control of a two-dimensional movement signal by a noninvasive brain-computer interface in humans. Proc Natl Acad Sci USA 101:17849-17854.

Wolpaw, J.R., Birbaumerc, N., McFarland, D.J., Pfurtschellere, G., Vaughan, T.M. (2002). Brain–computer interfaces for communication and control. in Clinical Neurophysiology 113 , 767–791.