

แบบจำลองตรวจจับความฟุ้งซ่านจากไฟฟ้าคลื่นสมอง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Mind-wandering Detection Model with Electroencephalogram



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Computer Science

Department of Computer Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองตรวจจับความฟุ้งซ่านจากไฟฟ้าคลื่นสมอง
โดย	น.ส.ชุตติมณฑน์ รุ่งศิลป์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เกริก ภิรมย์โสภา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ หนูไพโรจน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริก ภิรมย์โสภา)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรพล เวทีกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเมธชา เกษมวิลาศ)

ชูดิมนทน์ รุ่งศิลป์ : แบบจำลองตรวจจับความฟุ้งซ่านจากไฟฟ้าคลื่นสมอง. (Mind-wandering Detection Model with Electroencephalogram) อ.ที่ปรึกษาหลัก :
รศ. ดร.เกริก ภิรมย์โสภา

การศึกษาเรื่องความฟุ้งซ่านได้รับความนิยมแพร่หลายเนื่องจากความฟุ้งซ่านเกี่ยวข้องกับปัญหาทางอารมณ์และสภาพจิตใจที่ไม่มีสุข การศึกษานี้จึงมีความสนใจที่จะพัฒนาแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องสำหรับฝังในอุปกรณ์พกพาที่สามารถจัดหมวดหมู่ความฟุ้งซ่าน เพื่อช่วยให้ผู้คนสามารถติดตามความคิดของตนเองได้ ในการศึกษาที่ใช้เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมองชนิดจำนวนอิเล็กโทรดน้อย เพื่อบันทึกข้อมูลสภาวะสมองที่จะใช้ในการสร้างแบบจำลองทำนาย เพราะความสะดวกและเป็นความมิตรต่อผู้ใช้งาน โดยการศึกษาส่วนใหญ่ของการเรียนรู้ของเครื่องโดยใช้สัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมองนั้นให้ผลลัพธ์ดีในระดับบุคคล แต่ในระดับกลุ่มมีเพียงบางการศึกษาที่ทำการพัฒนาแบบจำลอง ด้วยเหตุนี้จุดประสงค์ของการวิจัยนี้คือแบบจำลองระดับกลุ่มที่มีความแม่นยำสูง ดังนั้นจึงเลือกใช้การทวนสอบชนิด Leave One Participant Out Cross Validation (LOPOCV) เพื่อประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง ผลการศึกษาพบว่าการใช้เทคนิค baseline normalization ในขั้นตอนคัดเลือกคุณลักษณะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ และแบบจำลองที่ใช้คือ ซัพพอร์ตเวกเตอร์ แมชชีน ที่มีความแม่นยำของโมเดลที่ดีที่สุดเป็น 75.6 เปอร์เซ็นต์



สาขาวิชา วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6270067021 : MAJOR COMPUTER SCIENCE

KEYWORD: Mind-wandering, Electroencephalogram, Support Vector Machine,
Time-frequency analysis

Chutimon Rungsilp : Mind-wandering Detection Model with
Electroencephalogram. Advisor: Assoc. Prof. KRERK PIROMSOPA, Ph.D.

The study of mind-wandering is gaining popularity since it's linked to emotional problems and a dissatisfied mind. This project sought to develop a machine learning model for an embedded portable device that can categorize mind-wandering to assist people in keeping track of their minds. We utilize a low-channel EEG to record the brain state and build the prediction model because of its practical and user-friendly. The majority of machine learning experiments in mind-wandering using EEG exhibit good individual-level performance. In the group-level technique, only a few research develop a model. As a result, the goal of this research is to achieve a high-accuracy group-level model. So, Leave One Participant Out Cross Validation (LOPOCV) was used to assess the models' correctness. The findings of this study show that using a baseline normalization technique assists in feature extraction and improves performance. The model was built using a support vector machine (SVM), and the top model had an accuracy of 75.6 percent.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Computer Science

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์อย่างยิ่งของอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. เกริก ภริมย์โสภา ซึ่งท่านได้ให้ความรู้และคำแนะนำ และข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย จนทำให้การวิจัยในครั้งนี้สำเร็จออกมาด้วยดี

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ หนูไพโรจน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พีรพล เวทีกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุมณฑา เกษมวิลาศ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำแนะนำ ตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับชุดข้อมูลสำหรับการศึกษาจาก ศูนย์วิจัยนวัตกรรมทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งอนาคต (FIRST) ขอขอบคุณ ดร.อรรถพล วิริโยภาสที่กรุณาจัดสรรข้อมูลเพื่อใช้ในการศึกษาครั้งนี้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการศึกษา ขอขอบคุณ ดร.ก้องภพ อยู่เย็น ซึ่งท่านได้ให้ความรู้และคำแนะนำ

ท้ายที่สุด ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนเรื่อยมาจนสำเร็จการศึกษา

ชุติมณฑน์ รุ่งศิลป์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 ลำดับการจัดเตรียมเนื้อหาในวิทยานิพนธ์.....	2
1.7 ผลงานที่ตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วิธีการเข้าถึงข้อมูลความพึงชัน.....	4
2.2 การศึกษาเกี่ยวกับความพึงชัน.....	5
2.2.1 การศึกษาความพึงชันที่มีผลต่อสัญญาณคลื่นสมองในเชิงอนุกรมเวลา (time series analysis).....	6
2.2.2 การศึกษาความพึงชันที่มีผลต่อสัญญาณคลื่นสมองในเชิงเวลา-ความถี่.....	7
(time-frequency analysis).....	7
2.2.3 การศึกษาความพึงชันด้วยสัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมอง ใน machine learning.....	8
2.3 การประมาณขนาดตัวอย่าง (sample size).....	8

2.4 การวิเคราะห์เชิงเวลา-ความถี่ (time-frequency analysis).....	10
2.4.1 ที่มาสาเหตุ	10
2.4.2 วิธีการวิเคราะห์เชิงเวลา-ความถี่.....	11
2.4.3 นิยามการวิเคราะห์เชิงเวลา-ความถี่ ชนิด Morlet wavelets.....	12
2.5 การนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐาน (baseline normalization) ในการวิเคราะห์เชิงเวลา-ความถี่	13
2.5.1 การแปลงเดซิเบล (Decibel conversion).....	13
2.5.2 สัดส่วนเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงและข้อมูลฐาน (Percentage change and baseline division).....	14
2.5.3 การแปลงซี (Z-transform).....	14
2.6 แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (support vector machine).....	14
2.7 การประเมินประสิทธิผล.....	17
บทที่ 3 การวิเคราะห์ความฟุ้งซ่านด้วยไฟฟ้าคลื่นสมอง.....	21
3.1 ชุดข้อมูล	21
3.1.1 ผู้เข้าร่วมการทดลอง.....	21
3.1.2 ประชากรและตัวอย่างประชากร.....	21
3.1.3 ระเบียบวิธีการเก็บข้อมูล	22
3.1.4 โครงสร้างชุดข้อมูล	23
3.2 การทำความสะอาดข้อมูล	24
3.3 การคัดเลือกคุณลักษณะ.....	25
3.4 การสร้างแบบจำลอง และการประเมินผลแบบจำลอง	27
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	28
4.1 การศึกษาประสิทธิภาพแบบจำลองต่อตำแหน่งอิเล็กโทรด	28
4.2 การศึกษาประสิทธิภาพแบบจำลองต่อเทคนิคการนอร์มัลไลซ์ข้อมูลฐาน	29

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพแบบจำลองต่อ ขนาดหน้าต่างเวลา ตำแหน่งอิเล็กทรอนิกส์ เทคนิคการ นอร์มัลไลซ์ข้อมูลฐาน และชนิดเคอร์เนล	30
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	35
ภาคผนวก.....	38
บรรณานุกรม.....	46
ประวัติผู้เขียน.....	51



บทที่1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและที่มาและความสำคัญของปัญหา

ฟุ้งซ่าน (Mind-wandering) หรือ การมีความคิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับกิจกรรม ณ ปัจจุบันที่เป็นเป้าหมาย เป็นสิ่งที่เกิดได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน [1] ตัวอย่างเหตุการณ์เช่น ในขณะที่อ่านหนังสือหรือขับรถ มีบางช่วงเวลาที่มีความคิดเรื่องอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับสิ่งที่ทำอยู่ อย่างการคิดสิ่งที่เกิดขึ้นในอดีต สิ่งที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ความคิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับงานเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเป็นๆหายๆในระหว่างการจดจ่อกับสิ่งใดสิ่งหนึ่งอย่างต่อเนื่อง บางการศึกษาถือว่าความฟุ้งซ่าน ช่วยในการวางแผนอนาคต การแก้ไขปัญหา [2] และเพิ่มความคิดสร้างสรรค์ [3] แต่ก็มีบางการศึกษาชี้ให้เห็นว่าความฟุ้งซ่านเหนี่ยวนำให้เกิดความผิดพลาด และลดประสิทธิภาพในการทำงานต่างๆ [4] นอกจากนี้ยังมีบางหลักฐานที่สนับสนุนว่าความฟุ้งซ่านมีความสัมพันธ์กับ ความผิดปกติด้านอารมณ์ (emotional disorder) อันได้แก่ โรคนประสาท (neuroticism) ภาวะด้านชาต่อความรู้สึก (alexithymia) โรคดิสโซซิเอทีฟ (dissociative) และความซึมเศร้า (depression) [5-7] จึงเป็นที่มาของการศึกษาสภาวะฟุ้งซ่านในครั้งนี้

สำหรับสัญญาณทางชีวภาพที่ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์เกี่ยวกับความฟุ้งซ่านมีหลากหลาย มีการศึกษาที่ใช้ Functional magnetic resonance imaging (fMRI) คือ ภาพทางการแพทย์ที่วัดการทำงานของสมองที่สอดคล้องกับการไหลเวียนของเลือด พบว่า มีการทำงานที่เปลี่ยนไปในสมองระหว่าง สภาวะจดจ่อ (Focus) และ สภาวะฟุ้งซ่าน (Mind-wandering) [8] บางการศึกษาใช้ขนาดของม่านตาตรวจจับความฟุ้งซ่าน [9] นอกจากนี้สัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมอง (Electroencephalogram, EEG) [10-12] คือสัญญาณไฟฟ้าจากสมองที่ได้มาจากบริเวณหนังศีรษะ (scalp) ถูกนำมาใช้ในการศึกษาความฟุ้งซ่านด้วยเช่นกัน

การศึกษานี้จึงสนใจศึกษาความฟุ้งซ่านโดยใช้ไฟฟ้าคลื่นสมองจำนวนช่องสัญญาณน้อย (low-channel EEG) เนื่องจาก ใช้งบประมาณน้อย สามารถวัดการทำงานของสมอง (brain activity) ได้โดยตรง โดยไม่รุกราน (non-invasive) ผู้ใช้งาน เพื่อนำมาสร้างเป็นแบบจำลองที่ตรวจจับความฟุ้งซ่านโดยอัตโนมัติที่เหมาะสมกับนำไปใช้กับอุปกรณ์พกพาเคลื่อนที่ (mobile) ซึ่งอาจมีประโยชน์ในอนาคตในการช่วยให้ผู้คนที่สามารถติดตาม (monitor) ความคิดของตนเองได้ ส่งผลให้ช่วยลดโอกาสเกิดผลลัพธ์ในทางลบจากความฟุ้งซ่านดังที่กล่าวมาก่อนหน้านี้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อนำมาสร้างเป็นแบบจำลองที่ตรวจจับความฟุ้งซ่านโดยอัตโนมัติที่เหมาะสมกับนำไปใช้กับอุปกรณ์พกพาเคลื่อนที่ (mobile)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1) งานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะสภาวะฟุ้งซ่าน และสภาวะจดจ่อ ในระหว่างการทำ focus attention meditation ด้วยวิธีการจดจ่อลมหายใจและนับเลข โดยเก็บข้อมูลด้วยวิธีการ self-caught method

2) แบบจำลองนี้ศึกษาโดยใช้จากข้อมูลสัญญาณคลื่นสมองที่เก็บโดย (Viriyopase, A. 2020)

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

- 1) ทำการเตรียมข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลอง
- 2) ศึกษาการใช้ โปรแกรม ไพทอน ในการสร้างแบบจำลอง support vector machine
- 3) ออกแบบและทดลองการสร้างแบบจำลองเพื่อแยกสภาวะฟุ้งซ่าน และจดจ่อ
- 4) ทวนสอบประสิทธิภาพการทำงานของแบบจำลอง
- 5) สรุปผลงานวิจัย
- 6) เรียบเรียงและจัดทำเป็นบทความทางวิชาการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สร้างแบบจำลองจากสัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมองจำนวนช่องสัญญาณน้อยที่สามารถจำแนกความฟุ้งซ่านได้ และเหมาะสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์พกพา

1.6 ลำดับการจัดเตรียมเนื้อหาในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ลำดับเนื้อหาออกเป็น 5 บท ได้แก่ 1) บทนำ ที่อธิบายจุดประสงค์ ที่มา และขอบเขตในการศึกษา 2) ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้รวบรวมทฤษฎีและงานวิจัยที่เคยศึกษาก่อนหน้าเพื่อใช้ในการศึกษาครั้งนี้ 3) การวิเคราะห์ความฟุ้งซ่านด้วยไฟฟ้าคลื่นสมอง ในบทนี้จะบรรยายลักษณะชุดข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา การทำความสะอาดข้อมูลก่อนทำการศึกษา การสร้างคุณลักษณะจากชุดข้อมูล และ แบบจำลองและเกณฑ์การประเมินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ 4) การ

ทดลองและผลการทดลอง และ5) สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ บทสุดท้ายนี้จะสรุปผลการศึกษาที่ได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้และข้อเสนอแนะที่จะปรับปรุงการศึกษาให้พัฒนายิ่งขึ้น

1.7 ผลงานที่ตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์

ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการตีพิมพ์เป็นบทความทางวิชาการในหัวข้อเรื่อง “Mind-wandering Detection Model with Electroencephalogram” โดย ชุติมณฑน์ รุ่งศิลป์, เกริก ภิรมย์โสภา, อรรถพล วิริโยภาส และ ก้องภพ อยู่เย็น ในงานประชุมวิชาการ “18th International Conference Cognition and Exploratory Learning in Digital Age 2021” ทางออนไลน์ ระหว่างวันที่ 13 – 15 ตุลาคม 2021



บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและอธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่จะใช้ในการทำงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบด้วย 6 หัวข้อด้วยกันคือ 1) วิธีการเข้าถึงข้อมูลความฟุ้งซ่าน ซึ่งจะอธิบายเกี่ยวกับระเบียบวิธีที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล 2) การศึกษาเกี่ยวกับความฟุ้งซ่าน ซึ่งจะกล่าวถึงงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับความฟุ้งซ่าน 3) การประมาณขนาดตัวอย่าง (sample size) 4) Time-frequency analysis ด้วย Morlet Wavelet ซึ่งจะมีบทบาทในกระบวนการเตรียมข้อมูล (pre-processing data) เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงข้อมูล 5) Baseline Normalization in Time-Frequency Domain เป็นการนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐานเพื่อลดความแตกต่างของอาสาสมัครแต่ละท่าน 6) แบบจำลอง Support vector machine คือแบบจำลองที่ใช้ในการจำแนกกลุ่ม โดยรายละเอียดจะกล่าวต่อไปดังนี้

2.1 วิธีการเข้าถึงข้อมูลความฟุ้งซ่าน

การจะศึกษาความฟุ้งซ่านได้นั้น จำเป็นจะต้องเก็บข้อมูลในช่วงที่บุคคลนั้นเกิดความฟุ้งซ่าน ซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะมีโอกาสเก็บข้อมูลได้ช่วงเวลาฟุ้งซ่านที่ต้องการ ดังนั้นต้องมีวิธีการเพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลช่วงฟุ้งซ่านได้ โดยมีทั้งหมด 2 วิธีการ คือ

(1) วิธี self-caught sampling วิธีการนี้ ผู้รับการทดสอบจะต้องทำงานบางอย่างที่การทดลองกำหนดซ้ำๆ ตัวอย่างเช่น Sustained Attention to Response Task (SART) [13] และในระหว่างทำงานผู้ทำการทดลอง หากผู้ทำการทดลองความฟุ้งซ่านได้เกิดขึ้นระหว่างทำงานที่กำหนด ผู้ทำการทดลองจะต้องรายงานความคิดของพวกเขาได้ฟุ้งซ่านโดยการกดปุ่ม

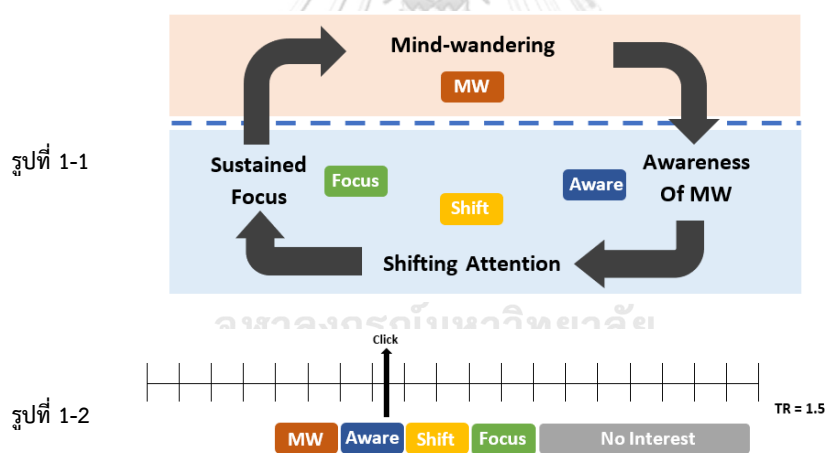
(2) วิธี probe-caught sampling วิธีการนี้ จะมีการสุ่มถามขัดจังหวะระหว่างทำกิจกรรมซ้ำๆ ขึ้น เพื่อทราบว่า 10 วินาทีก่อนทำการถามมีการฟุ้งซ่านหรือไม่ [14]

แต่อย่างไรก็ตามวิธีการ probe-caught sampling มีข้อจำกัดเนื่องจากการตระหนักถึงสภาวะความฟุ้งซ่านที่เกิดขึ้นเป็นๆหายๆ ดังนั้นในกรณีการฟุ้งซ่านและไม่สามารถตระหนักถึงความฟุ้งซ่านได้จะพลาดการรายงานไป และด้วยวิธีนี้ผู้ทำการทดลอง จะถูกสุ่มถาม ดังนั้น ถ้าระดับการเฝ้าสังเกตสภาวะของผู้ทดลองสูงจะสามารถ รายงานว่าฟุ้งซ่านได้ เช่นเดียวกันในกรณีฟุ้งซ่านช่วงที่ไม่มีการตระหนักสิ่งที่เกิดขึ้นก่อนคำถามก็ไม่สามารถตระหนักความฟุ้งซ่าน (unaware mind-wandering) ได้ [9]

การศึกษานี้จึงเลือกใช้วิธีการ self-caught sampling เนื่องจากสามารถมั่นใจได้ว่าข้อมูล ฟุ้งซ่านที่ถูกรายงานถูกต้อง โดยระเบียบวิธีการเก็บข้อมูลจะให้ทำงาน คือ การจดจ่อกับลมหายใจเข้า-ออกและนับเลข โดยจะกล่าวรายละเอียดของระเบียบวิธีการเก็บข้อมูลต่อไปในบทที่ 3

2.2 การศึกษาเกี่ยวกับความฟุ้งซ่าน

เมื่อไม่นานมานี้รายงานการศึกษาการมีอยู่ของความฟุ้งซ่านจากการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพ หลากหลายวิธีเริ่มมีจำนวนมากขึ้น Hasenkamp ศึกษาสมองโดย functional magnetic resonance imaging (fMRI) เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของระหว่างสภาวะฟุ้งซ่าน (mind-wandering state) และสภาวะสนใจจดจ่อ (attention state) ในช่วงการทำสมาธิแบบ focus-attention meditation (FA meditation) โดยให้อาสาสมัครทำสมาธิแบบจดจ่อกับลมหายใจ (breath-focused meditation) และเมื่ออาสาสมัครระลึกได้ว่าตนได้ฟุ้งซ่านให้กดปุ่มและกลับมาจดจ่อกับลมหายใจอีกครั้ง [8, 15]



รูปที่ 1-1 แสดงแบบจำลองวงจรการรับรู้ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำสมาธิแบบจดจ่อ

รูปที่ 1-2 แสดงช่วงสภาวะที่เกิดขึ้นระหว่างการคลิกเมาท์บนเส้นเวลาช่วงละ 1.5 วินาที

เมื่ออาสาสมัครพยายามจะคงอยู่กับสภาวะจดจ่อกับสิ่งใดสิ่งหนึ่ง เช่น ลมหายใจ เมื่อทำไปสัก ระยะเวลาหนึ่งก็เกิดฟุ้งซ่านขึ้น และในบางครั้งที่ฟุ้งซ่านก็กลายมาเป็นมีสติขึ้นมาได้ว่า ความคิดไม่ได้อยู่กับลมหายใจ จึงย้ายจุดสนใจกลับไปที่ลมหายใจเช่นเดิม จึงเกิดสภาวะจดจ่ออีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 1

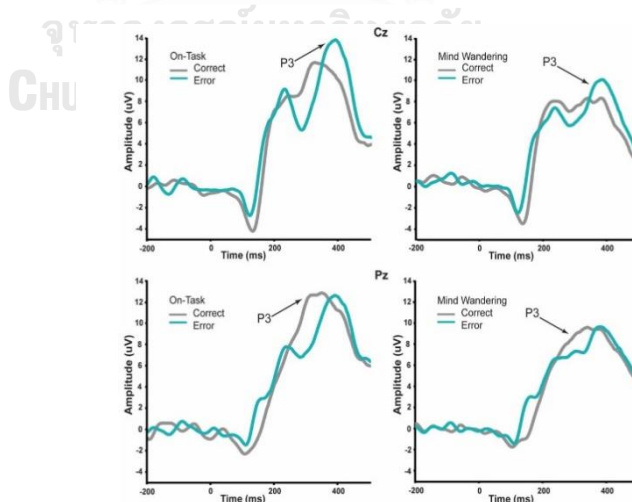
Hasenkamp อธิบายสภาวะที่เกิดขึ้นในระหว่างทำสมาธิแบบ FA แบ่งได้เป็น 4 ช่วงเวลาคือ 1) mind-wandering (MW) คือช่วงที่เกิดการฟุ้งซ่านหรือหลุดจากสภาวะจดจ่อ 2) awareness of

mind-wandering (AWARE) คือช่วงที่รู้ตัวว่าเกิดสภาวะฟุ้งซ่าน 3) shifting of attention (SHIFT) คือช่วงที่กลับมาสนใจจดจ่อลมหายใจ และ 4) sustain focus (FOCUS) คือ ช่วงที่คงสภาวะสนใจจดจ่อกับลมหายใจ วงจรนี้จะเกิดวนเรื่อย ๆ ในระหว่างที่อาสาสมัครทำสมาธิแบบ FA ดังนั้นการฝึกสมาธิแบบนี้จึงไม่ใช่การคงสภาวะการรับรู้ (cognitive state) แค่สภาวะเดียว แต่เป็นการผันผวนระหว่างสภาวะ AWARE และ SHIFT โดยมีตัวคอยเชื่อมคือ AWARE และ SHIFT เป็นการเปลี่ยนแปลงระยะสั้น

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาความฟุ้งซ่านที่มีผลต่อสัญญาณคลื่นสมอง (Electroencephalogram, EEG) และขนาดของรูม่านตา [9] สำหรับการศึกษาในคลื่นสมองจะแบ่งการศึกษาเป็น 2 แบบหลัก คือ การศึกษาในเชิงอนุกรมเวลา (time series analysis) และการศึกษาในเชิงเวลา-ความถี่ (time-frequency analysis)

2.2.1 การศึกษาความฟุ้งซ่านที่มีผลต่อสัญญาณคลื่นสมองในเชิงอนุกรมเวลา (time series analysis)

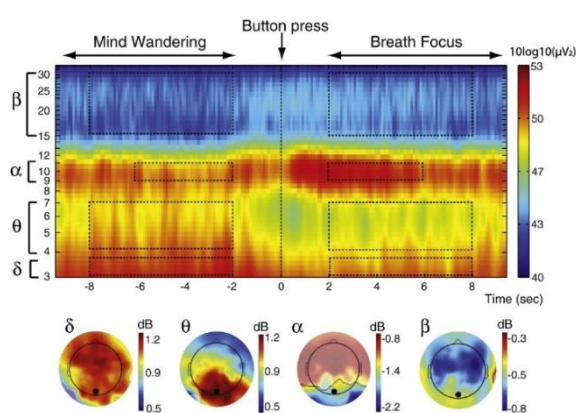
การบันทึกสัญญาณสมองที่ หลังจากมีการกระตุ้น หรือ ผลตอบสนอง เราจะเรียกช่วงข้อมูลเวลานี้ว่า Event-related potential (ERP) โดย ERP นั้นจะมีองค์ประกอบ 2 อย่าง คือ N200 (N2) และ P300 (P3) ที่จะปรากฏขึ้นหลังจากมีการรับรู้หรือผลตอบสนอง หลังมีการกระตุ้น 200 ms และ 300 ms ตามลำดับ



รูปที่ 2 รูปการณ์ศึกษาการศึกษาผลตอบสนอง P3 ที่ถูก(Correct) และผิด(Error) ในช่วงเวลาสภาวะอยู่ในกิจกรรม(On-Task) และสภาวะช่วงฟุ้งซ่าน (Mind Wandering) : พบว่าแอมพลิจูด P3 ที่ตำแหน่ง Cz และ Pz หลังจากทำการกระตุ้นจากภาพมีขนาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วงฟุ้งซ่านเทียบกับช่วงอยู่ในกิจกรรม [10]

ในปี 2008 การศึกษาของ [16] ได้ทำการศึกษาผลของของควมฟุ้งซ่านกับ P300 ทำให้ทราบว่าขนาดแอมปริจูดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เป็นหลักฐานสนับสนุนได้ดีเลยว่า เมื่อเราฟุ้งซ่านทำให้ความสนใจต่อกายลดลง เช่นเดียวกับการศึกษาของ[10] ที่แสดงให้เห็นว่าความฟุ้งซ่านมีผลทำให้ P300 ลดลงเช่นกัน

2.2.2 การศึกษาความฟุ้งซ่านที่มีผลต่อสัญญาณคลื่นสมองในเชิงเวลา-ความถี่ (time-frequency analysis)



รูปที่ 3 ภาพเวลา-ความถี่ ของช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงจากฟุ้งซ่านไปยังการจดจ่อลมหายใจที่ตำแหน่งอิเล็กโทรด Oz โดยกำหนดให้ช่วงที่ฟุ้งซ่านคือช่วงก่อนการรู้สึกตัว (กดปุ่ม) และช่วงจดจ่อกับลมหายใจกำหนดให้เกิดขึ้นหลังจากช่วงรู้สึกตัว จากแผนภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานในแต่ละความถี่ในช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป พบว่า เกิดความถี่ในช่วงความถี่ 2-3.5Hz (δ), 4-7Hz (θ) และ 15-30Hz (β) ช่วงเวลา -8 ถึง -2 วินาที ก่อน และ 2 ถึง 8 วินาทีหลังจากกดปุ่ม และเกิดความถี่ในช่วงความถี่ 9-11Hz (α) ช่วงเวลา -6 ถึง -2 วินาทีก่อน และ 6 ถึง 2 วินาทีหลังจากกดปุ่ม [11]

Braboszcz and Delorme ศึกษาสภาวะฟุ้งซ่านโดยให้อาสาสมัครทำภารกิจจดจ่อกับลมหายใจและนับเลข (breath-counting task) ทำให้ทราบผลของควมฟุ้งซ่านต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพลังงานเฉลี่ยของแต่ละช่วงแถบความถี่ คือ เทต้า (4-7Hz) เดลต้า(2-3.5Hz) มีค่าพลังงานสูงขึ้นในขณะที่ แอลฟา(9-11Hz) เบต้า(15-30Hz) มีค่าลดลง [11] Qin, Perdoni et al ศึกษาความฟุ้งซ่านโดยวิธี beamformer source image พบว่าในแต่ละอาสาสมัครเมื่อมีการรายงานว่าเกิดความฟุ้งซ่านขึ้น ค่าพลังงานคลื่นความถี่แถบแกมมาที่บริเวณ bilateral frontal-center มีค่าสูงขึ้น [17] Brandmeyer and Delorme ศึกษาความฟุ้งซ่านในนักปฏิบัติสมาธิ พบว่า ในผู้ปฏิบัติสมาธิขั้นชำนาญ คลื่นเทต้าที่บริเวณ frontal midline และ คลื่นแอลฟา ที่บริเวณ somatosensory มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ทำสมาธิ เมื่อ

เทียบกับขณะฟุ้งซ่าน [18] van Son, De Blasio et al ได้ศึกษาจากทำการหายใจนับเลข และวัดช่วงที่เกิดความฟุ้งซ่านจากการกดปุ่ม ผลปรากฏว่าค่าอัตราส่วนระหว่างพลังงานคลื่นเทต้าต่อคลื่นเบต้า มีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [19] ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับการศึกษาของ (van Son, de Rover et al [20])

2.2.3 การศึกษาความฟุ้งซ่านด้วยสัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมอง ใน machine learning

ปัจจุบันแบบจำลอง machine learning เริ่มเข้ามามีบทบาทในงานวิจัยเกี่ยวกับสัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมอง ซึ่งได้มีงานวิจัยที่ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองสำหรับแบ่งกลุ่ม (classification) ที่ใช้สำหรับสัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมอง[21] โดยผลของการศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองคุณสมบัติของแต่ละแบบจำลอง โดยแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการศึกษานี้คือ support vector machine (SVM) ชนิด linear และ rbf และนอกจากนี้ ยังมีคุณสมบัติ stable และ regularize ที่เหมาะสมกับ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุปกรณ์พกพาที่ทำงานในระบบเวลาจริง (real-time system) [22] และยังมีผลการศึกษาที่เลือกใช้แบบจำลอง SVM ในการศึกษาความฟุ้งซ่านด้วยไฟฟ้าคลื่นสมอง[12, 23-25]

แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษาแบบจำลอง SVM ที่ผ่านมาสามารถสร้างแบบจำลองได้ดีในระดับบุคคล (individual level analysis)[12, 23, 24] ซึ่งทำให้ไม่สามารถนำไปฝังในอุปกรณ์พกพาได้เนื่องจากเป็นแบบจำลองเฉพาะบุคคล มีเพียงบางงานวิจัย[25]ที่ทำการศึกษาในระดับกลุ่ม (group level analysis) โดยมีประสิทธิภาพความแม่นยำ (accuracy) ที่ต่ำกว่า 0.65 การศึกษานี้จึงเลือกสร้างแบบจำลอง SVM ในระดับกลุ่มเพื่อให้ประสิทธิภาพความแม่นยำที่สูงเพื่อให้สามารถนำไปใช้ในอุปกรณ์พกพาได้

2.3 การประมาณขนาดตัวอย่าง (sample size)

ในการศึกษาหนึ่งๆ ผู้วิจัยจะต้องออกแบบจำนวนผู้รับการทดลองที่ใช้เป็นตัวอย่าง ถ้ามีขนาดเล็กเกินไปจะไม่สามารถตอบปัญหาที่วิจัยได้ ในทางตรงกันข้ามหากมีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้เกิดความยุ่งยากและสิ้นเปลืองเงินความจำเป็น ซึ่งจุดประสงค์ของการวางแผนจำนวนตัวอย่าง (sample size planning) คือเพื่อประมาณจำนวนผู้รับการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบการศึกษา

มีสูตรการประมาณขนาดตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์การศึกษาหรือการทดลอง หลากหลายวิธี แต่จะมีขั้นตอนพื้นฐาน ดังต่อไปนี้ [26]

1) การกำหนดสมมติฐานหลัก (null hypothesis) และกำหนดสมมติฐานรอง (alternative hypothesis) เป็นชนิดหนึ่งฝั่ง (one-side) หรือสองฝั่ง (two-side)

2) การเลือกชนิดการทดสอบทางสถิติ (statistical test) ที่เหมาะสม

3) การเลือก effect size ที่เหมาะสม (และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน หากจำเป็น)

Effect size คือ ความเป็นไปได้ที่การศึกษานั้นจะสามารถตรวจจับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตัวทำนายกับตัวแปรผลลัพธ์ ในตัวอย่างที่ขึ้นกับขนาดความสัมพันธ์จริงของประชากร ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วไม่มีใครสามารถรู้ขนาดของความสัมพันธ์ที่แท้จริงได้ การจะเลือกค่า effect size ที่เหมาะสมจึงเป็นเรื่องยากที่สุดในมุมมองของการวางแผนขนาดตัวอย่าง ดังนั้นนักวิจัยควรจะใช้ข้อมูลจากการศึกษาที่ให้ข้อมูลเกี่ยวข้องการคาดประมาณ effect size ที่สมเหตุสมผล

4) การกำหนดค่า α และ β

α หรือ ค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ (level of statistical significance) คือ ค่าความน่าจะเป็นสูงสุดของการยอมรับความผิดพลาดชนิด 1 (type I error, คือการปฏิเสธสมมติฐานหลักทั้งที่ความเป็นจริงแล้วเป็นจริง)

β คือ ความน่าจะเป็นการเกิดความผิดพลาดชนิด 2 (type II error, คือการไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลักทั้งที่ความเป็นจริงแล้วเป็นเท็จ)

$1 - \beta$ (power) คือ ความน่าจะเป็นของการปฏิเสธสมมติฐานหลักที่ถูกต้องในตัวอย่าง (sample) ถ้าผลกระทบที่แท้จริง (actual effect) ในประชากรมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า effect size ที่กำหนด

ในการศึกษาส่วนใหญ่กำหนดให้ α มีค่า 0.05 และ β มีค่า 0.20 (power มีค่า 0.8) โดยค่าเหล่านี้ไม่มีกฎเกณฑ์กำหนด ในบางครั้งกำหนดค่าช่วง α ระหว่าง 0.01 ถึง 0.1 และ β ระหว่าง 0.05 ถึง 0.2

5) ใช้ตารางหรือสูตรประมาณขนาดตัวอย่าง

จากหนังสือของ [26] การเลือกสูตรที่ใช้ในการคำนวณจะต้องทราบชนิดการทดสอบทางสถิติก่อน โดยในการศึกษานี้มีตัวแปรทำนายเป็นตัวแปรต่อเนื่อง (continuous variable) และตัวแปรผลลัพธ์เป็นตัวแปรทวิภาค (dichotomous variable) ดังนั้นการ

ทดสอบสมมติฐานที่ใช้คือ การทดสอบที (t-test) และเนื่องจากการทดสอบในการศึกษานี้ ประชากรไปอิสระต่อกันจึงเป็นทดสอบชนิด *Paired t-Test* โดยสามารถคำนวณจำนวน ตัวอย่างได้ตามสมการต่อไปนี้

$$N = [(1/q_1 + 1/q_2)(Z_\alpha + Z_\beta)^2] \div (E/S)^2$$

เมื่อ N คือ จำนวนผู้รับการทดลองที่ต้องการ

q_1 คือ สัดส่วนของผู้รับการทดลองกลุ่ม 1

q_2 คือ สัดส่วนของผู้รับการทดลองกลุ่ม 2

Z_α คือ การแจกแจงปกติแบบมาตรฐาน (*Standard Normal Distribution*)

ของ α

Z_β คือ การแจกแจงปกติแบบมาตรฐาน (*Standard Normal Distribution*)

ของ β

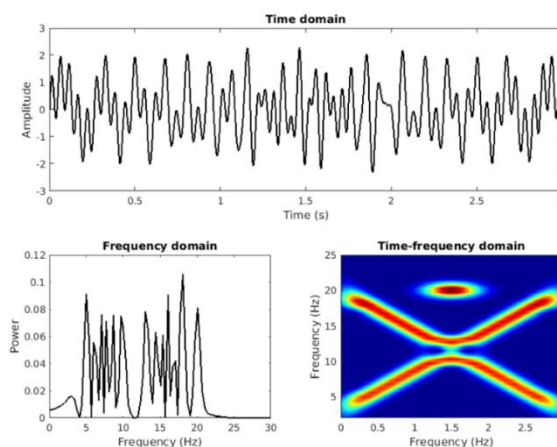
E/S คือ standard effect size ซึ่งถูกนิยามโดย effect size หาดด้วยส่วน เบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรผลลัพธ์

2.4 การวิเคราะห์เชิงเวลา-ความถี่ (time-frequency analysis)

2.4.1 ที่มาสาเหตุ

ระบบกายภาพและชีวภาพของมนุษย์โดยส่วนมากจะมีกระบวนการที่เป็นจังหวะ (rhythmic) ซึ่งข้อมูลความถี่เหล่านี้จะถูกรวมลงไปในสัญญาณอนุกรมเวลาของสัญญาณชีวภาพ การจะเตรียม ข้อมูลเพื่อให้ได้ปริมาณของข้อมูลความถี่เหล่านี้สามารถทำได้โดยวิธี การแปลงฟูรีเย (Fourier transform) และวิธีวิเคราะห์สเปกตรัม (spectrum analysis) แบบอื่นๆ

แต่อย่างไรก็ตาม การแปลงฟูรีเย (Fourier transform) ยังมีข้อด้อย เนื่องจากเหมาะกับ สัญญาณคงที่ (stationary-signal) คือ สเปกตรัมของข้อมูลสัญญาณที่คงที่ตลอดเวลา ในกรณี สัญญาณไม่คงที่ (non-stationarities signal) การใช้ time-frequency analyses จึงเป็นวิธีการที่ถูก เลือกลงใช้ เนื่องจากมีความสามารถในการคำนวณสเปกตรัมในหน้าต่างเวลาสั้น เนื่องจากสัญญาณคงที่ ในช่วงเวลาสั้นๆ สำหรับในข้อมูลอนุกรมเวลาเกี่ยวกับประสาทจะมีช่วงเวลาอยู่ในช่วงร้อย มิลลิวินาที ดังตัวอย่างด้านล่างที่แสดงการจัดการข้อมูลสัญญาณ ไม่คงที่ในสองวิธีการเพื่อประกอบ ความเข้าใจ



รูปที่ 4 แสดงภาพสัญญาณไม่คงที่ (non-stationarities) ภาพทางด้านซ้ายมือแสดงสเปกตรัมที่คำนวณโดยการแปลงฟูรีเย ซึ่งทำให้สามารถตีความข้อมูลได้ยาก ภาพขวาล่าง เป็นผลลัพธ์ที่ได้จาก time-frequency analysis ซึ่งมักจะให้ข้อมูลสำหรับการนำไปวิเคราะห์ต่อได้ดี

จากภาพตัวอย่างด้านบนจะเห็นว่าเมื่อข้อมูลเป็นสัญญาณไม่คงที่ การเลือกใช้วิธีการ time-frequency analysis จะทำให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสำหรับใช้ในการวิเคราะห์มากกว่า

2.4.2 วิธีการวิเคราะห์เชิงเวลา-ความถี่

หลายวิธีการสำหรับการทำ time-frequency-analysis แต่ส่วนใหญ่มักให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพคล้ายกัน [27] โดย 3 วิธีการที่ได้รับความนิยมได้แก่ short-time fourier transform, complex wavelet convolution และ filter-Hilbert ในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ Morlet wavelet transform ในการทำ time-frequency analysis เนื่องจากเป็นการคำนวณที่มีประสิทธิภาพและใช้การคำนวณที่น้อยกว่าวิธีการอื่นๆ [28]

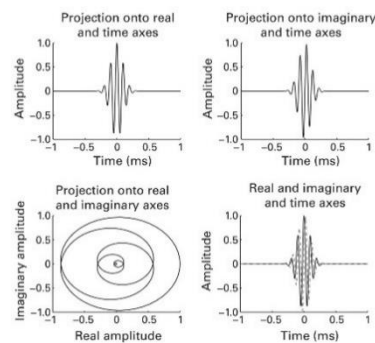
Morlet wavelet ถูกนิยามโดยสัญญาณคลื่นไซน์ (sine wave) คูณด้วยฟังก์ชันเกาส์ (gaussian function) โดยการนำมาใช้งาน time-frequency analysis นั้นจะนำ Morlet wavelet มาทำการคอนโวลูชัน (convolution) กับสัญญาณอนุกรมเวลา และได้ผลลัพธ์เป็นพลังงาน (Power) และเฟส (Phase) ในแต่ละจุดเวลา (time-point) โดยวิธีการนี้มีประโยชน์ดังต่อไปนี้

(1) Morlet wavelet มีรูปร่างเป็นเกาส์ในโดเมนความถี่ (frequency domain) ทำให้ลดปรากฏการณ์ Sharpe edge และ ripple effect ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการแปลความหมายของข้อมูลที่ผิดเพี้ยนไปว่ามีการแกว่ง (oscillation) ของข้อมูลสัญญาณเกิดขึ้น

(2) Morlet wavelet ทำให้สภาพของสเกลช่องทางต่างเวลา (temporal resolution) ยังคงเดิมมีขนาดเดียวการสัญญาณเริ่มต้น

(3) wavelet convolution มีประสิทธิภาพในการคำนวณเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ เนื่องจากมีจำนวนครั้งในการคำนวณที่น้อยกว่า ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเกี่ยวข้องกับการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการแปลงฟูริเยร์

2.4.3 นิยามการวิเคราะห์เชิงเวลา-ความถี่ ชนิด Morlet wavelets



รูปที่ 5 แสดงตัวอย่าง Complex morlet wavelet

Complex morlet wavelet (w) คือผลคูณระหว่าง complex sine wave และ Gaussian window ดังสมการต่อไปนี้

$$w = e^{2i\pi ft} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$$

เมื่อกำหนดให้ i คือ จำนวนจินตภาพ ($i = \sqrt{-1}$)

f คือ ความถี่ในหน่วยเฮิรต (Hz)

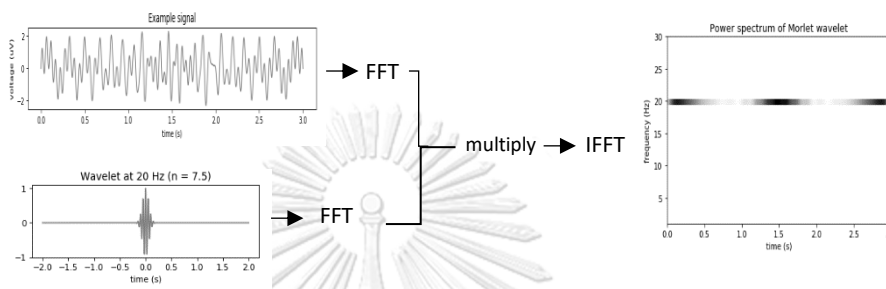
t คือ เวลาในหน่วยวินาที (s) (โดยควรกำหนดให้มีจุดศูนย์กลางที่ $t=0$ ตัวอย่างเช่น t มีค่าตั้งแต่ -2 ถึง 2)

σ คือ ความกว้างของ Gaussian โดยกำหนดได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\sigma = \frac{n}{2\pi f}$$

n คือ จำนวนรอบ (number of cycles) ซึ่งเป็นตัวกำหนดความแม่นยำของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาและความถี่

โดยพารามิเตอร์ที่จะเป็นตัวกำหนดความแม่นยำของช่วงเวลา ช่วงความถี่ที่เราสนใจ (time-frequency precision) ซึ่งจะมีทิศทางที่สวนทางกัน (คือ ถ้ามีความแม่นยำเวลาสูง ก็จะมี ความแม่นยำความถี่ลดลง ในขณะที่มีความแม่นยำเวลาต่ำ ก็จะมี ความแม่นยำความถี่สูงขึ้น) แต่ในข้อมูลทางประสาทวิทยานั้น เช่น ข้อมูลไฟฟ้าคลื่นสมอง ไฟฟ้ากล้ามเนื้อ ค่า n จะอยู่ในช่วง 2 ถึง 15 บนความถี่ระหว่าง 2 ถึง 80 เฮิร์ต โดยจะแสดงตัวอย่างการคำนวณ morlet wavelet convolution ที่หนึ่งตำแหน่งความถี่ดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างการทำ morlet wavelet convolution ที่หนึ่งความถี่

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงการแปลงเวฟเลตที่หนึ่งแถบความถี่ โดยการนำสัญญาณอนุกรมเวลาที่ต้องการแปลง ผ่านกระบวนการแปลงฟูรีเยทรานฟอร์ม คูณด้วยเวฟเลทของความถี่นั้นที่ผ่านฟูรีเยทรานฟอร์มเช่นกัน จากนั้นทำการอินเวอร์สผลคูณเพื่อให้ได้ผลลัพธ์นั่นเอง โดยการคูณในโดเมนความถี่เช่นนี้จะใช้เวลาที่รวดเร็วกว่าการทำคอนโวลูชันในโดเมนเวลานั่นเอง

2.5 การนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐาน (baseline normalization) ในการวิเคราะห์เชิงเวลา-ความถี่

เป็นวิธีการที่ช่วยแปลงในข้อมูลพลังงานอยู่ในสเกลเดียวกัน ลดปัญหาปรากฏการณ์ 1/f [29, page 217-224] และช่วยให้สามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่าง ช่วงความถี่ อิเล็กโทรด กรณีเงื่อนไขในการทดลอง และระหว่างบุคคลได้ สามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธีการ ดังต่อไปนี้

2.5.1 การแปลงเดซิเบล (Decibel conversion)

เดซิเบล (Decibel, dB) คือ อัตราส่วนระหว่าง พลังงานของแต่ละช่วงความถี่ กับ พลังงานใน ระดับ baseline ในช่วงความถี่เดียวกัน สามารถเขียนแทนด้วยสมการต่อไปนี้

$$dB_{tf} = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{activity}_{tf}}{\text{baseline}_f} \right)$$

เมื่อกำหนดให้ dB_{tf} คือ ค่าเดซิเบลในความถี่ f ที่เวลา t

$\overline{\text{baseline}}_f$ คือ ค่าเฉลี่ยของพลังงานที่ความถี่ f ของช่วงเวลา baseline ทั้งหมด

activity_{tf} คือ ค่าพลังงานที่เกิดในความถี่ f ที่เวลา t

2.5.2 สัดส่วนเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงและข้อมูลฐาน (Percentage change and baseline division)

เป็นอีกหนึ่งวิธีการ baseline normalization ที่คล้ายกับวิธีการเดซิเบล เมื่อมีเปอร์เซ็นต์เปลี่ยนแปลง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของพลังงานสัมพันธ์กับพลังงานในช่วง baseline

$$\text{prctchange}_{tf} = 100 \frac{\text{activity}_{tf} - \overline{\text{baseline}}_f}{\overline{\text{baseline}}_f}$$

เมื่อกำหนดให้ prctchange_{tf} คือ ค่าเปอร์เซ็นต์เปลี่ยนแปลง ในความถี่ f ที่เวลา t

2.5.3 การแปลงซี (Z-transform)

วิธีการนี้ต่างจากสองวิธีการแรก แต่ข้อดีเหมือนกับสองวิธีการแรก โดยวิธีการนี้จะสเกลข้อมูลพลังงานในหน่วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในช่วง baseline

$$Z_{tf} = \frac{\text{activity}_{tf} - \overline{\text{baseline}}_f}{\sqrt{n^{-1} \sum_{i=1}^n (\text{baseline}_{if} - \overline{\text{baseline}}_f)^2}}$$

เมื่อกำหนดให้ Z_{tf} คือ ค่ามาตรฐานในความถี่ f ที่เวลา t

n คือ จำนวนจุดข้อมูลในช่วง baseline

baseline_{if} คือ ค่าพลังงานที่เกิดในความถี่ f ที่เวลา t ของช่วง baseline

2.6 แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (support vector machine)

ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine, SVM) เป็นหนึ่งในวิธีการสร้างแบบจำลองที่เรียนรู้โดยมีผู้สอน (supervised learning) ที่มีความสามารถในการแบ่งกลุ่ม (classification) โดยหาสมประสิทธิ์ของสมการที่ใช้ในการสร้างเส้นแบ่งระหว่างกลุ่มที่ดีที่สุด

(optimal separating hyperplane) จากชุดข้อมูล D ที่เป็นเซตประกอบไปด้วยสมาชิกคู่อันดับ
เวกเตอร์ข้อมูลกับกลุ่มของสมาชิกตัวนั้นจำนวน n ตัวอย่าง ดังสมการ

$$D = \{(\vec{x}_i, y_i); i = 1, 2, \dots, n\}$$

เมื่อ $\vec{x}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}] \in \mathbb{R}^m$, คือเวกเตอร์คุณลักษณะตัวอย่างที่ i
 $y_i \in \{1, -1\}$, เมื่อ 1 คือตัวอย่าง i อยู่กลุ่ม 1 และ -1 คือตัวอย่าง i อยู่กลุ่ม 2
SVM จะทำการสร้างฟังก์ชันที่ใช้ในการตัดสินใจกลุ่มของข้อมูลว่าอยู่ในกลุ่มใด ดังสมการ

$$f(x) = \text{sign}(\vec{w} \cdot K(\vec{x}, \vec{z}) + b)$$

เมื่อ b คือ ค่าโน้มเอียง (bias) , \vec{w} คือเวกเตอร์น้ำหนักของแต่ละคุณลักษณะหลัง
ผ่านการแปลงเคอร์เนลฟังก์ชัน (kernel function) $K(\vec{x}, \vec{z})$ คือการแปลงจาก feature space
ปัจจุบัน ให้มีมิติที่สูงขึ้นและทำให้ชุดข้อมูลฝึกสามารถแบ่งกลุ่มได้ โดยในการศึกษาใช้ svm ชนิด
linear และ non-linear ที่มีเคอร์เนลฟังก์ชันชนิด Radial basis function (rbf)

กรณี svm ชนิด linear :

$$K(\vec{x}, \vec{z}) = \vec{x} \cdot \vec{z}$$

กรณี svm ชนิด rbf :

$$K(\vec{x}, \vec{z}) = [e^{-\gamma \|\vec{x}_1 - \vec{z}_1\|^2}, e^{-\gamma \|\vec{x}_2 - \vec{z}_2\|^2}, \dots, e^{-\gamma \|\vec{x}_u - \vec{z}_u\|^2}]$$

เมื่อ $\vec{z} = [\vec{z}_1, \vec{z}_2, \vec{z}_3, \dots, \vec{z}_u]$ คือเวกเตอร์ของเวกเตอร์จุดอ้างอิง (landmark) ที่จะช่วย
แปลงให้ \vec{x} จากมีมิติ m เป็น มิติ u หลังผ่าน kernel function

เส้นขอบ (margin) คือเส้นขนานระหว่างเส้นแบ่งทั้งสองข้างที่สัมผัสจุดที่ใกล้ที่สุด
เรียกว่า support vector โดยเส้นแบ่งที่ดีที่สุดจะต้องมีระยะระหว่างเส้นขอบขนาดใหญ่ที่สุด แต่
เนื่องจากในบางข้อมูลอาจไม่สามารถแบ่งแยกข้อมูลได้ถูกต้องทั้งชุดข้อมูลจึงมีตัวแปรยอมรับความ
ผิดพลาด ξ_i (slack variable) ดังสมการต่อไปนี้

$$\vec{w}^T \vec{x} + b \geq y - \xi_i \quad \text{เมื่อกำหนดให้ } y = 1$$

$$\vec{w}^T \vec{x} + b \leq y + \xi_i \quad \text{เมื่อกำหนดให้ } y = -1$$

เพื่อที่จะได้แบบจำลองที่มีขนาดระยะความกว้างเส้นขอบมากที่สุดและมีความผิดพลาดน้อยสุด
จึงต้องการ minimize ค่าต่อไปนี้เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ดีที่สุด

$$\text{Minimize } \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N \xi_i$$

โดยที่ $y_i(w^T K(\vec{x}, \vec{z}) + b) + \xi_i - 1 \geq 0$, $\xi_i \geq 0$, $i = 1, 2, \dots, N$

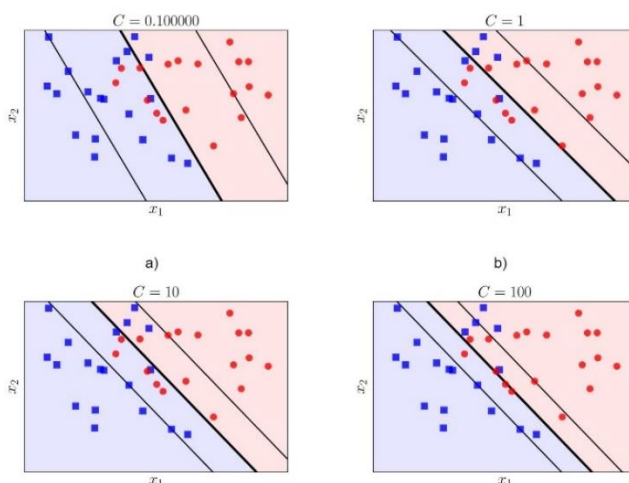
และ C เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดปริมาณที่ยอมรับได้ถ้าผิดพลาด

โดยแบบจำลอง ซัพพอร์ต เวกเตอร์ แมชชีน จะเป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยคำนึงถึงสองสิ่ง ได้แก่ 1) การสร้างขนาดเส้นขอบใหญ่ (large margin) และ 2) การตัดสินกลุ่มที่ผิดน้อย (low misclassification) แต่ปัญหาคือทั้งสองสิ่งนี้มีทิศทางที่สวนกัน คือหากเราให้เพิ่มเส้นขอบ ก็จะทำให้การทำนายกลุ่มผิดสูง ในทำนองเดียวกัน ถ้าหากเราลดขนาดเส้นขอบ ก็จะทำให้อัตราการทำนายผิดพลาด

สาเหตุที่เราต้องให้ขนาดระหว่างเส้นขอบมาก เนื่องจากถึงแม้ว่าเราจะมี การแบ่งกลุ่มผิดที่น้อยในชุดข้อมูลฝึก (training dataset) ไม่ได้หมายความว่า จะส่งผลให้มีการแบ่งกลุ่มที่ผิดน้อยในชุดข้อมูลทดสอบด้วย (validation/testing dataset) เพื่อให้ได้ผลดีต่อชุดข้อมูลทดสอบสำหรับแบบจำลอง SVM แล้วจึงควรมีขนาดระหว่างเส้นขอบที่กว้างนั่นเอง

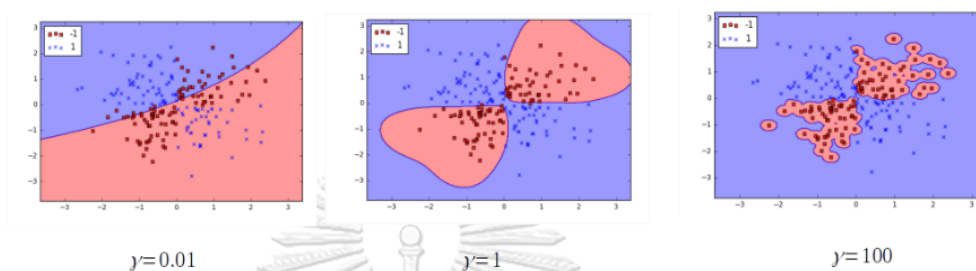
โดยพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อแบบจำลอง มีดังต่อไปนี้

- (1) พารามิเตอร์ C เป็นพารามิเตอร์ที่มีในทั้ง linear-svm และ rbf-svm โดยพารามิเตอร์นี้จะส่งผลต่อขนาดระหว่างเส้นขอบ คือ หากมีค่าสูงจะส่งผลให้มีขนาดระหว่างเส้นขอบเล็ก ในขณะที่หากค่า C ต่ำจะส่งผลให้มีขนาดระหว่างเส้นขอบที่กว้าง ซึ่งค่า C ที่เหมาะสมนั้นไม่มีกฎตายตัว ขึ้นอยู่กับชุดข้อมูลฝึก ทางที่ดีคือควรลองหลายๆค่าและเลือกค่าที่ให้ผลลัพธ์การแบ่งกลุ่มที่น้อยที่สุด



รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้พารามิเตอร์ C ค่าแตกต่างกัน [30]

- (2) พารามิเตอร์ γ เป็นพารามิเตอร์ที่มีแคใน rbf-svm โดยพารามิเตอร์นี้จะส่งผลต่อความโค้ง (curvature) ของขอบตัดสินใจ (decision boundary) หากมีค่า γ สูงจะมีความโค้งมาก ส่วน γ ต่ำจะมีความโค้งน้อย

รูปที่ 8 แสดงตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้พารามิเตอร์ γ ค่าแตกต่างกัน [31]

เพื่อให้แบบจำลองที่ดีจะมีการค้นหาพารามิเตอร์ C และ γ ของแบบจำลองที่มีความเหมาะสมโดยใช้ เทคนิคการค้นหาแบบตาราง (search grid technic) ดังแสดงตามตารางต่อไปนี้

(γ, C)

(1,1)	(1,10)	(1,100)
(10,1)	(10,10)	(10,100)
(100,1)	(100,10)	(100,100)

$\gamma \rightarrow 1,10,100$

$C \rightarrow 1,10,100$

จากตารางข้างบนแสดงสิ่งที่ เทคนิคการค้นหาแบบตาราง กระทำ ซึ่งคู่เซตที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจะถูกเลือกเพื่อนำมาใช้เป็นค่าพารามิเตอร์ C และ γ ของแบบจำลอง

2.7 การประเมินประสิทธิภาพ

การศึกษาการเรียนรู้ของเครื่องของความฟุ้งซ่านโดยไฟฟ้าคลื่นสมอง ส่วนใหญ่จะมีประสิทธิภาพสูงสำหรับแบบจำลองระดับบุคคล (individual-level analysis)[23, 24] มีเพียงบางการศึกษาที่สร้างแบบจำลองระดับกลุ่ม (group-level analysis)[25] ดังนั้นการศึกษานี้มีจุดประสงค์ที่จะสร้างแบบจำลองที่ให้ความแม่นยำ (accuracy) สูงในระดับกลุ่ม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงในการศึกษานี้สมมติฐานว่าเทคนิคการนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐานจะช่วยเพิ่มคุณภาพแบบจำลอง

เราใช้ nested loop leave-one-participant-out-cross-validation (LOPOCV) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองที่มีเงื่อนไขและพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันที่สร้างทั้งหมด โดยมีรายละเอียดที่ควรทำความเข้าใจเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

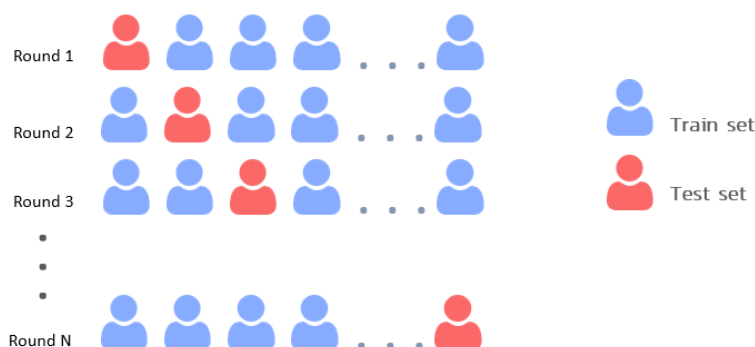
1) ความแม่นยำ (accuracy) คือ สัดส่วนระหว่างการทำนายที่ถูกต่อการทำนายทั้งหมด

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN}$$

เมื่อ TP คือทำนายตัวอย่างบวกว่าเป็นตัวอย่างบวก, TN คือ ทำนายตัวอย่างลบว่าเป็นตัวอย่างลบ, FP คือ ทำนายตัวอย่างลบว่าเป็นตัวอย่างบวก, และ FN คือทำนายตัวอย่างบวกว่าเป็นตัวอย่างลบ

2) leave-one-participant-out-cross-validation (LOPOCV) คือ การเลือกชุดข้อมูลของอาสาสมัครหนึ่งคนจากอาสาสมัครทั้งหมดเป็นชุดข้อมูลทดสอบ (test set) ในขณะที่ชุดข้อมูลที่เหลือใช้เป็นชุดข้อมูลฝึกสอน (train set) โดยกระบวนการทวนสอบจะทำซ้ำจนอาสาสมัครแต่ละคนถูกใช้เป็นชุดทดสอบหนึ่งครั้ง

leave-one-participant-out cross-validation (LOPOCV)



รูปที่ 9 แสดงกระบวนการทวนสอบชนิด LOPOCV

เนื่องจากอุปกรณ์พกพาจะมีการจำกัดทรัพยากรที่ใช้ในการคำนวณที่จำกัด ซึ่งจะส่งผลความเร็วในการใช้งาน ดังนั้นเงื่อนไขที่ควรคำนึง นอกจากประสิทธิภาพด้านความแม่นยำดังที่กล่าวมาแล้ว ยังต้องคำนึงถึงทรัพยากรเวลา เพื่อให้แบบจำลองสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้

วิธีการที่ดีในการหาความเร็วของแบบจำลองคือ ดำเนินงาน (run) ในแต่ละแถวและเวลาที่ผ่านไปแบบเฉลี่ย เนื่องจากหาค่าดำเนินงานเพียงครั้งเดียว อาจเกิดความผิดพลาดได้ (เช่นตัวอย่างในกรณี CPU หรือ GPU กำลังยุ่งทำงาน (task) บางอย่าง) ดังนั้นหากทำการเฉลี่ยจากการดำเนินงานหลายครั้งจะทำให้ความผิดพลาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่วิธีการนี้จะผลลัพธ์ของแบบจำลองที่ดำเนินการในอุปกรณ์นั้นๆ ดังนั้น การวัดความไวของแบบจำลองนั้น จะวัดปริมาณการคำนวณ (computation) และหน่วยความจำ (memory access) [32, 33] โดยมีรายละเอียด ดังนี้

(1) การคำนวณ (computation)

หนึ่งในวิธีการวัดความเร็วของแบบจำลองง่ายๆ คือนับจำนวนว่ามีการคำนวณจำนวนเท่าไร ซึ่งโดยปกติแล้วจะนับเป็น FLOPS (floating point operations per second) ซึ่งจะนับจำนวนชุดคำสั่งที่ทำได้ในหนึ่งวินาที สำหรับภาควิชาที่ใช้นี้ที่ใช้แบบจำลอง ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนจะสามารถคำนวณจำนวน FLOPS ได้ต่างจำนวนขึ้นอยู่กับชนิดของคอร์เนล

(2) หน่วยความจำ (memory access)

นอกจากจำนวนการคำนวณ อย่าง FLOPS แล้ว ยังมีส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อเวลานั้นคือ หน่วยความจำ ซึ่งโครงสร้างของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันนั้น การเข้าถึงความจำหลัก (main memory) ครั้งหนึ่ง ซ้ำกว่าการคำนวณหนึ่งครั้งประมาณ 100 เท่าหรือมากกว่า

ในการนำแบบจำลองเพื่อมาใช้ในการทำนายข้อมูลแต่ละครั้ง จะต้องมีการเข้าถึงหน่วยความจำของอุปกรณ์ ซึ่งประกอบไปด้วย

- การอ่านข้อมูลอินพุต หรือ เวกเตอร์คุณสมบัตินี้ จากหน่วยความจำหลัก (main memory)
- การคำนวณ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการอ่านค่าตัวแปรน้ำหนัก (weights) ของแบบจำลองจากหน่วยความจำหลักด้วยเช่นกัน
- เขียนผลลัพธ์จากการคำนวณกลับไปยังหน่วยความจำหลักอีกครั้ง

(3) จำนวนพารามิเตอร์

คือจำนวนพารามิเตอร์ทั้งหมดของแบบจำลอง หากมีจำนวนมากก็จะส่งผลให้จำนวนการคำนวณมากและใช้หน่วยความจำมากด้วยเช่นกัน

เมื่อกำหนดให้แบบจำลองสร้างจากชุดข้อมูล ที่มี n คุณลักษณะ และ k เวกเตอร์จุดอ้างอิง (ในกรณีที่เป็นชนิด rbf) สามารถหาปริมาณ การคำนวณ, หน่วยความจำ และจำนวนพารามิเตอร์ได้ดังต่อไปนี้

กรณี linear

- การคำนวณ = $2n$ FLOPS
- หน่วยความจำ = $2n + 2$
- จำนวนพารามิเตอร์ = $n + 1$

กรณี rbf

- การคำนวณ = $k(3n+4)$ FLOPS
- หน่วยความจำ = $k(4n+9)+3$
- จำนวนพารามิเตอร์ = $k(n+1) + 2$

บทที่ 3 การวิเคราะห์ความฟุ้งซ่านด้วยไฟฟ้าคลื่นสมอง

ในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับขั้นตอนในการวิเคราะห์ความฟุ้งซ่าน ซึ่งประกอบด้วย 5 ขั้นตอน คือ 1) ชุดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ 2) เกณฑ์ในการคัดเลือกเพื่อทำความสะอาดชุดข้อมูล 3) การสร้างคุณลักษณะเพื่อให้ได้ชุดข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลอง 4) การสร้างแบบจำลอง 5) วิธีในการประเมินผล ดังจะกล่าวรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 ชุดข้อมูล

3.1.1 ผู้เข้าร่วมการทดลอง

ข้อมูลได้จาก Viriyopase [34] โดยอาสาสมัคร สมัครเข้าร่วมการทดลองจากข้อมูลป้ายประกาศรับสมัครที่ติดในจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัยและผ่านการคัดเลือกตามเกณฑ์ ผู้ทำการสมัครจำนวน 22 ท่าน (ชาย 12 ท่าน, หญิง 10 ท่าน) มีอายุเฉลี่ย 42.64 ปี และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 7.39 ปี โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกต่อไปนี้ต่อไปนี้

- (1) มีความถนัดมือข้างขวา
- (2) มีอายุอยู่ในช่วง 18-60 ปี
- (3) มีการดื่มสุราน้อยกว่าหรือเท่ากับ 4 ครั้งในช่วงระยะเวลา 1 เดือนที่ผ่านมา, ดื่มกาแฟน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 แก้ว ใน 1 เดือนที่ผ่านมา
- (4) ผ่านการตรวจแบบทดสอบเบื้องต้นสุขภาพจิต PHQ-9 มีคะแนนการประเมิน ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 4 คะแนน
- (5) อาสาสมัครมีการยินยอมในการเข้าร่วมการทดลองเป็นลายลักษณ์อักษร

3.1.2 ประชากรและตัวอย่างประชากร

ประชากร :

ชายและหญิงสุขภาพดีถนัดมือขวาและได้ทราบเกณฑ์การคัดเลือกตัวอย่างเข้าและตัดตัวอย่างออก
ประชากรที่ศึกษา : ประชากรที่สามารถสื่อสารภาษาไทยได้คล่องแคล่ว

ตัวอย่างประชากร :

คนไทยที่สามารถข้อมูลการสมัครทางสื่อออนไลน์หรือโปสเตอร์ประกาศรับสมัคร ใน
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสามารถเข้าร่วมในสถานที่จัดการทดลองได้

จำนวนตัวอย่าง :

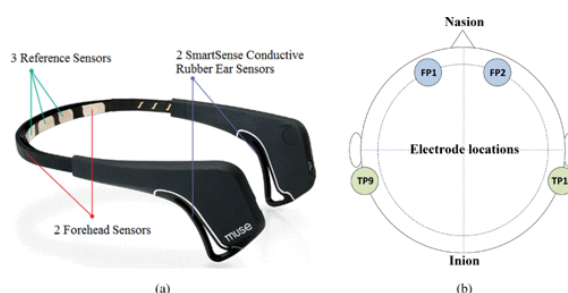
โดยสามารถคำนวณจำนวนตัวอย่างในแต่ละกลุ่มได้ดังสมการที่กล่าวในบทที่ 3 คือ

$$N = [(1/q_1 + 1/q_2)(Z_\alpha + Z_\beta)^2] \div (E/S)^2$$

การศึกษานี้ใช้ข้อมูลการศึกษาก่อนหน้าของ Braboszcz and Delorme ทำให้สามารถประมาณค่า E/S (Standardized effect size) ได้ 0.85 , กำหนดให้ $\alpha = 0.05$ ($Z_\alpha = 1.96$) และ $\beta = 0.20$ (0.84), และสัดส่วน ของผู้รับการทดลองกลุ่มหนึ่งและสองมีค่าเท่ากับ 1 เนื่องจากสองกลุ่มตัวอย่างไม่อิสระต่อกันจากชนิดการทดสอบ แบบ pair-t-test ทำให้สามารถคำนวณค่าจำนวนผู้รับการทดลองที่ต้องการได้เป็น $N = [(1/1 + 1/1)(1.96 + 0.84)^2] \div (0.85)^2 = 21.7$ แสดงว่าจะต้องมีตัวอย่างอย่างน้อย 22 คน

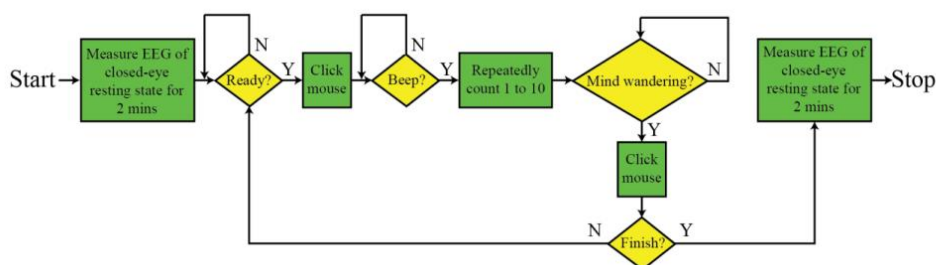
3.1.3 ระเบียบวิธีการเก็บข้อมูล

อาสาสมัครแต่ละท่านติดตั้งอุปกรณ์วัดคลื่นสมองโดย InteraXon MUSE 2016 ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมองจำนวนช่องสัญญาณน้อยที่มีการศึกษาตรวจสอบความสมเหตุสมผล (validate) ในการเลือกเป็นอุปกรณ์นี้ในเชิงการวิจัยแล้ว [35] โดยอุปกรณ์นี้มีแอคทีฟอิเล็กโทรด (active electrode) จาก silver ที่ตำแหน่ง AF7 และ AF8 , แอคทีฟอิเล็กโทรด (active electrode) จากยางซิลิโคนนำไฟฟ้า (conductive-silicone-rubber) ที่ตำแหน่ง TP9 และ TP10 อ้างอิงตำแหน่งตามระบบ UI 10-10 system [36] และอิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrode) ที่ตำแหน่ง FPz และมี CMS/DRL ที่อยู่ด้านข้างทั้งสองข้าง โดยสัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมองมีอัตราการซักร่มตัวอย่าง 256 Hz ด้วยสเกลความละเอียด 12 บิต



รูปที่ 10 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บสัญญาณคลื่นสมอง และตำแหน่งอิเล็กโทรด

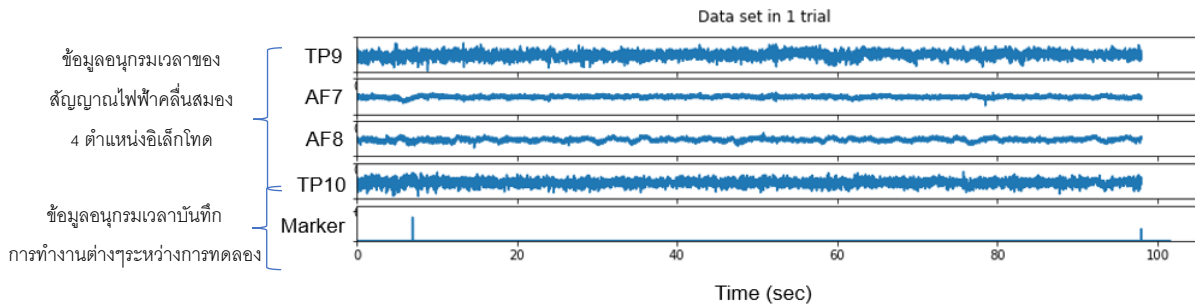
ระเบียบวิธีการเก็บข้อมูลดัดแปลงมาจากการศึกษาของ [11] โดยในอาสาสมัครแต่ละท่าน ติดตั้งอุปกรณ์วัดคลื่นสมอง และนั่งในท่าที่สบาย หลัง และอยู่ในสภาวะพัก (resting state) เป็นเวลา 2 นาที เมื่อเสร็จสิ้นจะเริ่มทำการทดลอง โดยในแต่ละรอบการทดลองเมื่ออาสาสมัครพร้อมให้อาสาสมัครทำการกดปุ่มเมาท์ หลังจากนั้นจะมีการสุ่มสัญญาณเสียงในช่วง 5-10 วินาทีหลังจากกดปุ่ม เมื่อได้ยินเสียงสัญญาณให้อาสาสมัครทำการทำสมาธิระหว่างที่มีสวิตช์อุปกรณ์ โดยจดจ่อกับลมหายใจเข้า-ออกและนับเลข 1-10 วนซ้ำ หากตระหนักได้ว่ามีความคิดอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมที่ให้อาสาสมัครทำให้อาสาสมัครทำการคลิกเมาท์เพื่อรายงานเวลาที่สิ้นสุดการทดลอง ทำการทดลองซ้ำไปเรื่อย ๆ ในระยะเวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ 11 แสดงระเบียบวิธีการเก็บข้อมูลของ viriyopase

3.1.4 โครงสร้างชุดข้อมูล

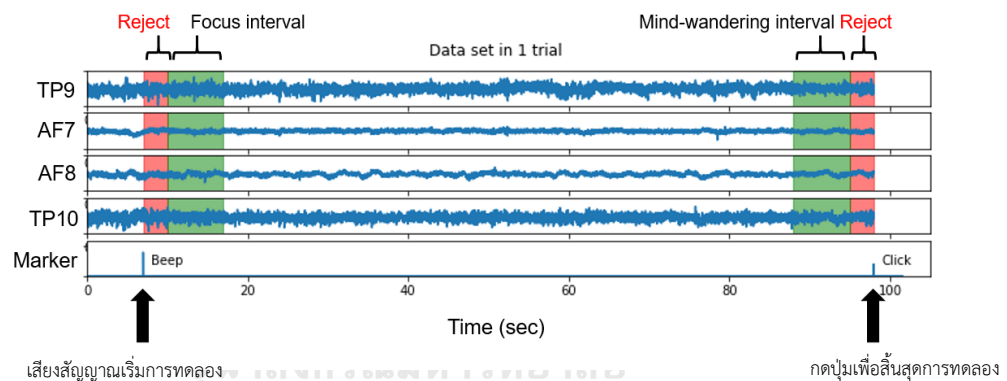
ข้อมูลของแต่ละรอบการทดลองจะประกอบไปด้วยข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าไฟฟ้าคลื่นสมองที่แต่ละตำแหน่งอิเล็กโทรดของเครื่อง Muse จำนวน 4 ตำแหน่ง ได้แก่ TP9, AF7, AF8, TP10 ดังแสดงในรูปที่ 6 ข้อมูลเป็นอนุกรมเวลา ที่มีอัตราการสุ่มซักร้อยละ 512 ตัวอย่างต่อวินาที โดยเริ่มเก็บข้อมูลตั้งแต่กดปุ่มเมาท์เพื่อเริ่มการทดลองจนถึงกดปุ่มรายงานสิ้นสุดการทดลอง ได้เป็น 4 ชุดข้อมูล อนุกรมเวลาของอิเล็กโทรดทั้ง 4 ตำแหน่ง และอีกหนึ่งชุดข้อมูลอนุกรมเวลาบันทึกจุดเวลาที่มีเสียงสัญญาณเพื่อเริ่มการทดลองและจุดเวลาที่รายงานว่าสิ้นสุดการทดลองในรอบนั้นๆ โดยชุดข้อมูลที่บันทึกจะแสดงในรูปภาพที่ 12 โดยจากอาสาสมัคร 22 ท่านมีรอบการทดลองทั้งหมด 970 (รอบการทดลองเฉลี่ยต่อบุคคล 44 รอบ , ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 7.578 รอบ)



รูปที่ 12 แสดงชุดข้อมูลที่เก็บในแต่ละการทดลอง

3.2 การทำความสะอาดข้อมูล

ในแต่ละการทดลองจะข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมองอนุกรมเวลาช่วงจذبและฟังชันของแต่ละอิเล็กโทรด 4 ตำแหน่งดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น โดยสามารถกำหนดข้อมูลอนุกรมเวลาของสองช่วงเวลาในการทำการทดลองแต่ละรอบได้ดังนี้



รูปที่ 13 แสดงการวิธีการเก็บข้อมูลช่วงจذبและช่วงฟังชัน

(1) ข้อมูลอนุกรมเวลาช่วงจذب

เลือกข้อมูลบริเวณสัญญาณหลังจากจุดเวลาที่มีเสียงสัญญาณเริ่มการทดลองช่วง 2 ถึง 10 วินาที (การตัดข้อมูลช่วง 0 ถึง 2 วินาทีหลังจากมีเสียงสัญญาณเริ่มทำการทดลอง เนื่องจากเพื่อให้มั่นใจว่าสัญญาณไฟฟ้าสมองที่ได้ไม่ปนเปื้อนด้วยสัญญาณสมองที่เกิดจากการตอบสนองหลังจากการกระตุ้นด้วยเสียงก่อนเริ่มการทดลอง [11])

(2) ข้อมูลอนุกรมเวลาช่วงฟังชัน

เลือกข้อมูลบริเวณสัญญาณนับถอยหลังจากจุดเวลาที่รายงานว่สิ้นสุดการทดลอง ช่วง 2 ถึง 10 วินาที (การตัดข้อมูลช่วง 0 ถึง 2 วินาที ก่อนการกดยาน เนื่องจากเพื่อให้

มั่นใจว่าสัญญาณไฟฟ้าสมองที่ได้ไม่เกี่ยวข้องกับการทำงานของสมองในการกดปุ่มรายงานการทดลองมาบนเบื่อน [11])

หมายเหตุ

(1) การเลือกช่วงเวลาข้อมูลอนุกรมเวลาช่วงจذب และข้อมูลอนุกรมเวลาช่วงฟุ้งซ่าน เลือกใช้ระยะเวลาวินาทีตามระเบียบวิธีการเก็บข้อมูลของ [11]

(2) ข้อมูลสัญญาณจะผ่านการกรองความถี่ช่วง 0.5 ถึง 30 Hz และตรวจสอบสัญญาณรบกวน(artifact) หากข้อมูลสัญญาณคลื่นสมองที่ได้ มีค่าgradients ที่สูงกว่า 10 $\mu\text{V}/\text{ms}$ หรือ มี absolute difference มากกว่า 100 μV ในข้อข้อมูลอนุกรมเวลาช่วงจذبหรือฟุ้งซ่าน ให้พิจารณาตัดทิ้งข้อมูลการทดลองนั้นไป [35]

(3) ช่วงข้อมูลอนุกรมเวลาช่วงจذبและฟุ้งซ่าน ที่กล่าวมาจะมีขนาดหน้าต่างเวลา 8 วินาที แต่ในการศึกษานี้ในกรณีที่มีขนาดหน้าต่าง i เท่ากับ 2, 4, และ 6 วินาที ข้อมูลอนุกรมเวลาช่วงจذب คือสัญญาณหลังจากจุดเวลาที่มีเสียงสัญญาณเริ่มการทดลองช่วง 2 ถึง $i+2$ วินาที และข้อมูลอนุกรมเวลาช่วงฟุ้งซ่าน คือ สัญญาณนับถอยหลังจากจุดเวลาที่รายงานว่าสิ้นสุดการทดลองช่วง 2 ถึง $i+2$ วินาที

ท้ายที่สุดแล้วการศึกษานี้ได้ 990 ช่วงข้อมูลจากผู้ทำการทดลอง 22 คน โดยประกอบด้วย 495 ข้อมูลอนุกรมเวลาช่วงจذب และ 495 ข้อมูลอนุกรมเวลาช่วงฟุ้งซ่าน (ค่าเฉลี่ยช่วงข้อมูลต่อบุคคลจำนวน 45 ช่วงข้อมูล ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 8.657504 ช่วงข้อมูล)

3.3 การคัดเลือกคุณลักษณะ

หลังจากชุดข้อมูลทั้งหมดผ่านกระบวนการทำความสะอาดข้อมูลเรียบร้อยแล้ว จึงนำชุดข้อมูลนั้นมาทำการคัดเลือกคุณลักษณะ โดยประกอบด้วย 2 ขั้นตอนย่อย อันได้แก่ การวิเคราะห์เชิงความถี่-เวลา เพื่อแปลงชุดข้อมูลอนุกรมเวลาให้เห็นส่วนประกอบในแต่ละความถี่ของช่วงเวลาต่างๆ และการนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐาน เพื่อลดความแตกต่างของชุดข้อมูลระหว่างบุคคล ดังจะอธิบายโดยละเอียด ดังต่อไปนี้

3.3.1 morlet wavelet transform

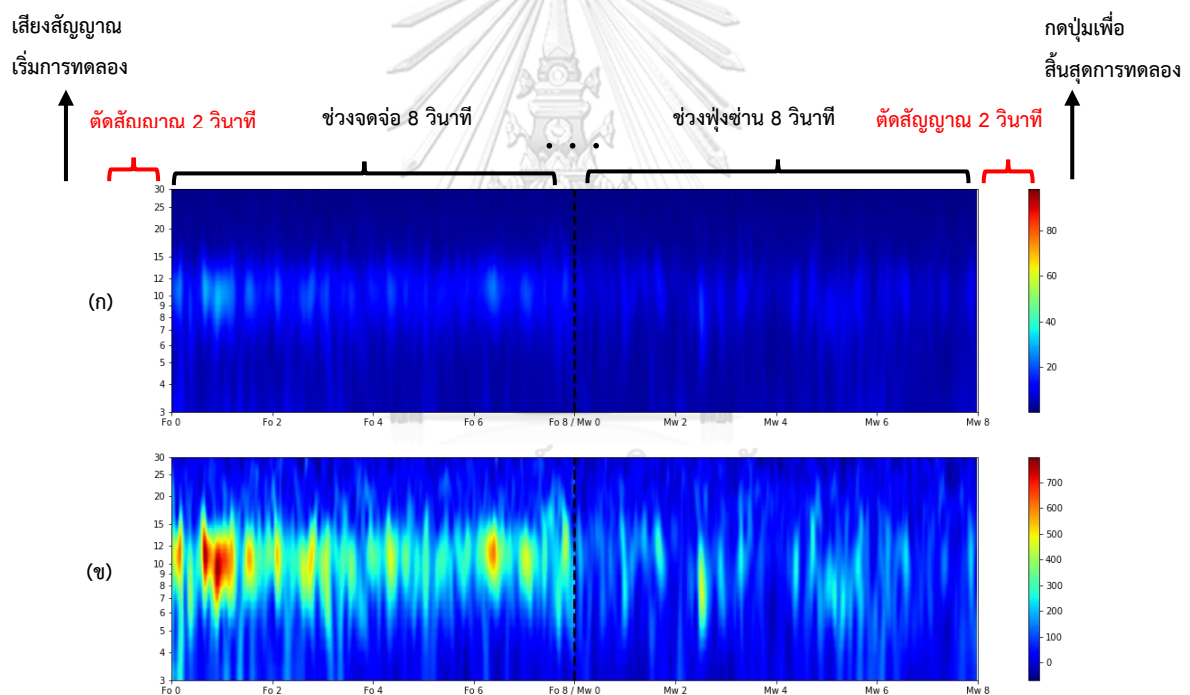
หลังจากที่ได้ข้อมูลอนุกรมเวลาผ่านการกรองความถี่และผ่านการเลือกจากคุณภาพสัญญาณแล้ว จึงนำข้อมูลทั้งหมดผ่านกระบวนการ time-frequency analysis โดย morlet wavelet transform

หมายเหตุ

ลักษณะ Morlet wavelet ที่ใช้ในแต่ละความถี่ โดยแบ่งช่วงสเกลความถี่เป็น 50 ช่วง และ จำนวนรอบเพิ่มขึ้นแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง จาก 1.5 รอบ ที่ 3 เฮิร์ต ถึง 8.0 รอบ ที่ 30 เฮิร์ต [11]

3.3.2 baseline normalization

ทำการ normalize ข้อมูลจากข้อ 3.3.1 โดย เลือกพลังงานในข้อมูลสัญญาณก่อนเริ่มการทดลองเป็น baseline ในการ normalize และในการศึกษานี้จะเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการ normalize ทั้งสามแบบดังที่กล่าวในหัวข้อทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้อง โดยขั้นตอนนี้ทำให้ลดความแตกต่างข้อมูลในแต่ละการทดลองในเรื่อง ช่วงความถี่ ตำแหน่งอิเล็กโทรด และบุคคลได้



รูปที่ 14 แสดงตัวอย่างข้อมูลทั้งหมดผ่านกระบวนการ time-frequency analysis โดย (ก) คือชุดข้อมูลที่มีการแปลง time-frequency analysis ส่วน (ข) คือชุดข้อมูลที่มีการแปลง time-frequency analysis และถูกนอร์มัลไลเซชันด้วยข้อมูลฐาน

3.3.3 power frequency band

หลังจากได้ข้อมูลพลังงานที่ผ่านการ normalize แล้ว ทำการคำนวณพลังงานเฉลี่ยแต่ละช่วงคลื่นความถี่ของอิเล็กโทรดแต่ละตำแหน่ง ได้แก่ theta (4-8 Hz), alpha (8-13 Hz), low beta (13-20 Hz), และ high beta (20-30 Hz) เพื่อเป็นคุณลักษณะของในช่วงพักชานและจดจ่อ

สุดท้ายแล้ว เราได้ชุดข้อมูลที่ประกอบด้วย 4 คุณลักษณะ (ขนาดเมตริกซ์ 4 คุณลักษณะ x 990 ข้อมูล) โดยที่ปรับเปลี่ยนตามเงื่อนไข ตำแหน่งอิเล็กทรอนิกส์ (TP9, TP10, AF7, AF8) ชนิดการนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐาน (none, log, z-score, percent) และขนาดหน้าต่างเวลา (2, 4, 6, และ 8 วินาที) ซึ่งเราจะทำการหาเงื่อนไขทำให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยจะกล่าวเกณฑ์วิธีการประเมินในหัวข้อถัดไป

3.4 การสร้างแบบจำลอง และการประเมินผลแบบจำลอง

ทำการสร้างแบบจำลองของแต่ละเงื่อนไขตามหัวข้อการศึกษา โดยจะกล่าวรายละเอียดการศึกษาในบทที่ 4 ซึ่งในแต่ละเงื่อนไขของแบบจำลองจะหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ทั้งชนิด linear และ rbf โดยในแต่ละชนิดของ kernel จะทำการค้นหาพารามิเตอร์ต่อไปนี้

- กรณี linear kernel : จะทำการค้นหาพารามิเตอร์ C ค่า 0.1 ถึง 1000 โดยสเกลเป็นลอการิทึม 21 ช่วง
- กรณี rbf kernel : จะทำการค้นหาพารามิเตอร์ C ค่า [0.1, 1, 10, 100, 1000] และพารามิเตอร์ γ ค่า [1, 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001, 1/8]

จากนั้นทำการประเมินประสิทธิภาพด้วย LOPOCV ที่ปรับเปลี่ยนเงื่อนไขและพารามิเตอร์ โดยแบ่งชุดข้อมูลตามบุคคลคือ เลือกชุดข้อมูลจากอาสาสมัครหนึ่งคนเป็นชุดทดสอบ และอีก 21 ชุดข้อมูลจากอาสาสมัครที่เหลือเป็นชุดสอนแบบจำลอง และทำวนซ้ำจนทุกอาสาสมัครได้เป็นชุดทดสอบ และหาค่าเฉลี่ยความแม่นยำ (accuracy) ของการทดสอบทุกกรอบ เพื่อใช้ศึกษาการทดลองดังกล่าวในบทถัดไป

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง

เมื่อเราได้ชุดข้อมูลจากบทที่ 3 ที่ประกอบด้วย 5 คุณลักษณะ (ขนาดเมตริกซ์ 4 คุณลักษณะ \times 990 ข้อมูล) โดยที่ปรับเปลี่ยนตามเงื่อนไข ตำแหน่งอิเล็กทรอนิกส์ (TP9, TP10, AF7, AF8) ชนิดการนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐาน (none, log, z-score, percent) และขนาดหน้าต่างเวลา (2, 4, 6, และ 8 วินาที) เราจะนำแต่ละชุดข้อมูลเหล่านี้มาสร้างแบบจำลองและเปรียบเทียบตามการศึกษา

ในบทนี้จะอธิบายผลการศึกษาและทดลองโดยจะแบ่งออกเป็น 3 การศึกษา ได้แก่ ประสิทธิภาพแบบจำลองต่อตำแหน่งอิเล็กทรอนิกส์ ประสิทธิภาพแบบจำลองต่อเทคนิคการนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐาน และประสิทธิภาพแบบจำลองต่อ ขนาดหน้าต่างเวลา ตำแหน่งอิเล็กทรอนิกส์ และเทคนิคการนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐาน โดยมีรายละเอียดของแต่ละการศึกษา ดังต่อไปนี้

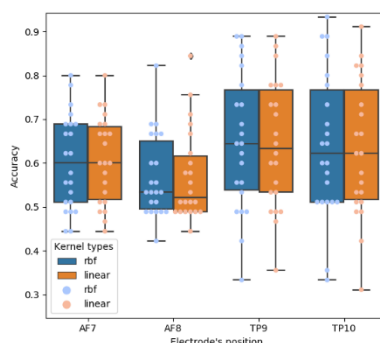
4.1 การศึกษาประสิทธิภาพแบบจำลองต่อตำแหน่งอิเล็กทรอนิกส์

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อดูเปรียบเทียบว่าตำแหน่งอิเล็กทรอนิกส์มีผลต่อประสิทธิภาพแบบจำลองหรือไม่ โดยการศึกษานี้จะเลือกใช้ชุดข้อมูลที่มีเงื่อนไขจากอิเล็กทรอนิกส์ต่างตำแหน่งกัน มีขนาดหน้าต่างเวลา 8 วินาที และชุดข้อมูลไม่ผ่านกระบวนการนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐาน โดยแต่ละเงื่อนไขจะทำการสร้างแบบจำลอง SVM ทั้ง linear และ RBF ที่มีการค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ใช้ ค่าความแม่นยำเฉลี่ย ของ LOPOCV เป็นตัวประเมิน

ตารางที่ 1 แสดงประสิทธิภาพความแม่นยำ (accuracy) แบบจำลอง ของแต่ละอิเล็กทรอนิกส์ และชนิดคอร์เนล (โดยชุดข้อมูลไม่ผ่านกระบวนการนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐาน, ขนาดหน้าต่างเวลา = 8 วินาที)

ตำแหน่งอิเล็กทรอนิกส์	% ค่าความแม่นยำ	
	linear	Rbf
AF7	60.81	60.56
AF8	57.07	56.97
TP9	63.33	64.04
TP10	64.34	64.95

จากการศึกษาพบว่า ตำแหน่งอิเล็กทรอนิกส์ TP9 และ TP10 ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าตำแหน่ง AF7 และ AF8 โดยมีค่าเฉลี่ยของค่าความแม่นยำของแบบจำลองตามตารางที่ 1 และมีการกระจายตัวของค่าความแม่นยำในแต่ละรอบการทวนสอบตามรูปที่ 15



รูปที่ 15 แสดงประสิทธิภาพความแม่นยำ (accuracy) ของการทดสอบแบบจำลอง ของแต่ละอิเล็กโทรด และชนิดเคอร์เนล (โดยชุดข้อมูลไม่ผ่านกระบวนการนอร์มัลไลซ์เช่นข้อมูลฐาน, ขนาดหน้าต่างเวลา = 8 วินาที)

4.2 การศึกษาประสิทธิภาพแบบจำลองต่อเทคนิคการนอร์มัลไลซ์ข้อมูลฐาน

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อดูเปรียบเทียบว่าการนอร์มัลไลซ์ข้อมูลฐาน มีผลต่อประสิทธิภาพแบบจำลองหรือไม่ โดยการศึกษานี้จะเลือกใช้ชุดข้อมูลที่มีเงื่อนไขจากอิเล็กโทรด ตำแหน่ง TP9 และ TP10 ที่มีขนาดหน้าต่างเวลา 8 วินาที และผ่านกระบวนการนอร์มัลไลซ์ข้อมูลฐาน ต่างๆกัน คือ

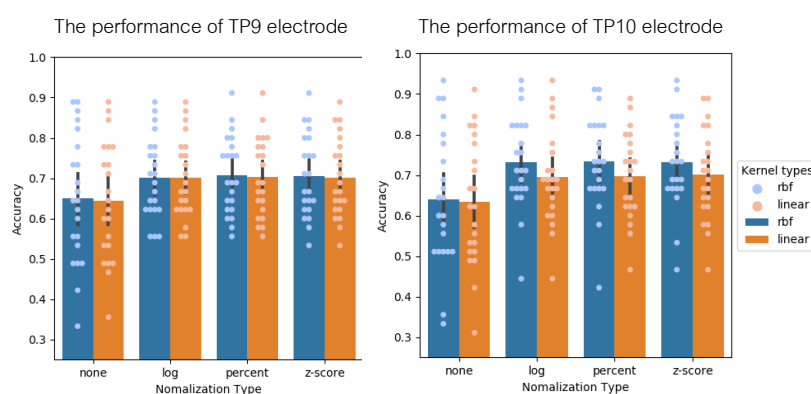
- 1) ไม่ผ่านการนอร์มัลไลซ์ข้อมูลฐาน (none)
- 2) ผ่านการนอร์มัลไลซ์ข้อมูลฐานชนิดการแปลงเดซิเบล (log)
- 3) ผ่านการนอร์มัลไลซ์ข้อมูลฐานชนิดสัดส่วนเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงและข้อมูลฐาน (percent)
- 4) ผ่านการนอร์มัลไลซ์ข้อมูลฐานชนิดการแปลงซี (z-score)

โดยแต่ละเงื่อนไขจะทำการสร้างแบบจำลอง SVM ทั้ง linear และ RBF ที่มีการค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม และใช้ค่าความแม่นยำเฉลี่ย ของ LOPOCV เป็นตัวประเมิน

ตารางที่ 2 แสดงประสิทธิภาพความแม่นยำ (accuracy) แบบจำลอง ของแต่ละชนิดนอร์มัลไลซ์ข้อมูลฐาน และชนิดเคอร์เนล (ขนาดหน้าต่างเวลา = 8 วินาที) ที่อิเล็กโทรดตำแหน่ง TP9 และ TP10

ตำแหน่งอิเล็กโทรด					
TP9			TP10		
ชนิดการนอร์มัลไลซ์ข้อมูลฐาน	% ค่าความแม่นยำ		ชนิดการนอร์มัลไลซ์ข้อมูลฐาน	% ค่าความแม่นยำ	
	linear	rbf		linear	rbf
none	64.34	64.95	none	63.33	64.04
log	70.10	70.20	log	69.49	73.23
Percent	70.40	70.81	percent	69.80	73.33
z-score	70.20	70.61	z-score	70.10	73.23

จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของแบบจำลอง SVM ทั้ง linear และ RBF ที่ได้จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อชุดข้อมูลได้ผ่านการนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐาน จึงสนับสนุนสมมติฐานข้างต้นที่เลือกใช้การนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐาน เพื่อช่วยเพิ่มคุณภาพของคุณลักษณะ (Feature) โดยตารางที่ 2 ได้แสดงค่าความแม่นยำของแบบจำลอง และรูปที่ 16 ทำให้ทราบการกระจายตัวของประสิทธิภาพของแบบจำลองในแต่ละรอบทดสอบ



รูปที่ 16 แสดงประสิทธิภาพความแม่นยำ (accuracy) ของการทดสอบแบบจำลอง ของแต่ละชนิดนอร์มัลไลซ์เซชัน และชนิดเคอร์เนล (ขนาดหน้าต่างเวลา = 8 วินาที) ภาพกราฟฝั่งซ้ายเป็นประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดตำแหน่ง TP9 และฝั่งขวาเป็นประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดตำแหน่ง TP10

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพแบบจำลองต่อ ขนาดหน้าต่างเวลา ตำแหน่งอิเล็กโทรด เทคนิคการนอร์มัลไลซ์ข้อมูลฐาน และชนิดเคอร์เนล

จากการศึกษาสองการศึกษาที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าตำแหน่งอิเล็กโทรดส่งผลต่อประสิทธิภาพของแบบจำลอง และเทคนิคการนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐาน เพื่อช่วยเพิ่มคุณภาพของคุณลักษณะ (Feature) ได้ ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีความสนใจที่จะหาแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในเงื่อนไขที่แตกต่างกันคือ

- 1) ขนาดหน้าต่างเวลา 2, 4, 6, และ 8 วินาที
- 2) ตำแหน่งอิเล็กโทรด โดยมีเงื่อนไข จำนวน 1 อิเล็กโทรด (4 แบบ), จับคู่ 2 อิเล็กโทรด (6 แบบ), และ ทุกอิเล็กโทรด (1 แบบ)
- 3) เทคนิคการนอร์มัลไลซ์ข้อมูลฐาน 3 แบบ คือ log, percent, z-score
- 4) ชนิดเคอร์เนล 2 แบบ คือ linear, rbf

จากเงื่อนไขทั้งหมดที่กล่าวมาทำให้ได้เงื่อนไขของแบบจำลองมีทั้งหมด 264 แบบ โดยแต่ละเงื่อนไขชุดข้อมูลจะมีขนาดเมทริกซ์ 990 แถว และจำนวนหลักมีขนาดแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับ

จำนวนอิเล็กทรอนิกส์ของเงื่อนไขนั้น (จำนวนหลัก = จำนวนอิเล็กทรอนิกส์ \times 4) โดยผลลัพธ์ประสิทธิภาพที่ได้อันดับสูงสุด 20 อันดับแรกของคอร์เนลทั้งสองชนิด เป็นดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3 แสดงประสิทธิภาพแบบจำลองที่มีความแม่นยำ (accuracy) สูงสุด 20 อันดับแรกสำหรับ rbf-SVM

อิเล็กทรอนิกส์	Accuracy	Precision	Recall	Auc	ชนิดนอร์มัลไลซ์ข้อมูลฐาน	C	γ	ขนาดหน้าต่าง
TP10	$\bar{x} = 0.7556$ $sd = 0.1036$	$\bar{x} = 0.7976$ $sd = 0.1320$	$\bar{x} = 0.6848$ $sd = 0.2155$	$\bar{x} = 0.7559$ $sd = 0.1025$	z-score	1000	1	4
TP9, TP10	$\bar{x} = 0.7545$ $sd = 0.1073$	$\bar{x} = 0.7924$ $sd = 0.1387$	$\bar{x} = 0.6864$ $sd = 0.2347$	$\bar{x} = 0.7557$ $sd = 0.1064$	log	100	0.125	4
AF7, TP10	$\bar{x} = 0.7515$ $sd = 0.1029$	$\bar{x} = 0.8045$ $sd = 0.1292$	$\bar{x} = 0.6843$ $sd = 0.2226$	$\bar{x} = 0.7523$ $sd = 0.1020$	log	100	1	4
TP10	$\bar{x} = 0.7475$ $sd = 0.0995$	$\bar{x} = 0.8035$ $sd = 0.1405$	$\bar{x} = 0.6673$ $sd = 0.2023$	$\bar{x} = 0.7481$ $sd = 0.0983$	percent	1000	1	4
TP10	$\bar{x} = 0.7455$ $sd = 0.0954$	$\bar{x} = 0.8084$ $sd = 0.1361$	$\bar{x} = 0.6611$ $sd = 0.1975$	$\bar{x} = 0.7460$ $sd = 0.0945$	log	1000	1	4
TP10	$\bar{x} = 0.7434$ $sd = 0.1115$	$\bar{x} = 0.8063$ $sd = 0.1484$	$\bar{x} = 0.6506$ $sd = 0.2408$	$\bar{x} = 0.7436$ $sd = 0.1108$	log	1000	1	6
TP9, TP10	$\bar{x} = 0.7424$ $sd = 0.1002$	$\bar{x} = 0.7967$ $sd = 0.1308$	$\bar{x} = 0.6701$ $sd = 0.2247$	$\bar{x} = 0.7436$ $sd = 0.0995$	percent	100	0.1	4
TP10	$\bar{x} = 0.7424$ $sd = 0.1166$	$\bar{x} = 0.7900$ $sd = 0.1733$	$\bar{x} = 0.6586$ $sd = 0.2397$	$\bar{x} = 0.7427$ $sd = 0.1157$	percent	1000	1	6
TP10	$\bar{x} = 0.7424$ $sd = 0.1078$	$\bar{x} = 0.8030$ $sd = 0.1341$	$\bar{x} = 0.6565$ $sd = 0.2490$	$\bar{x} = 0.7425$ $sd = 0.1070$	z-score	1000	1	6
all	$\bar{x} = 0.7404$ $sd = 0.0963$	$\bar{x} = 0.7851$ $sd = 0.1259$	$\bar{x} = 0.6840$ $sd = 0.2171$	$\bar{x} = 0.7413$ $sd = 0.0951$	log	100	0.125	4
TP9, TP10	$\bar{x} = 0.7384$ $sd = 0.1020$	$\bar{x} = 0.7880$ $sd = 0.1256$	$\bar{x} = 0.6842$ $sd = 0.2384$	$\bar{x} = 0.7394$ $sd = 0.1023$	log	1000	1	6
all	$\bar{x} = 0.7374$ $sd = 0.1140$	$\bar{x} = 0.7663$ $sd = 0.1473$	$\bar{x} = 0.7252$ $sd = 0.2534$	$\bar{x} = 0.7390$ $sd = 0.1115$	percent	1000	0.1	8
all	$\bar{x} = 0.7343$ $sd = 0.0997$	$\bar{x} = 0.7643$ $sd = 0.1210$	$\bar{x} = 0.7190$ $sd = 0.2179$	$\bar{x} = 0.7359$ $sd = 0.0974$	percent	1000	0.125	6
TP9	$\bar{x} = 0.7333$ $sd = 0.0904$	$\bar{x} = 0.7838$ $sd = 0.1256$	$\bar{x} = 0.6612$ $sd = 0.2060$	$\bar{x} = 0.7340$ $sd = 0.0900$	percent	100	1	4
TP10	$\bar{x} = 0.7333$ $sd = 0.1119$	$\bar{x} = 0.7851$ $sd = 0.1652$	$\bar{x} = 0.6646$ $sd = 0.2404$	$\bar{x} = 0.7333$ $sd = 0.1114$	percent	1000	1	8
TP10	$\bar{x} = 0.7323$ $sd = 0.1118$	$\bar{x} = 0.7870$ $sd = 0.1597$	$\bar{x} = 0.6607$ $sd = 0.2446$	$\bar{x} = 0.7324$ $sd = 0.1112$	log	1000	1	8
TP10	$\bar{x} = 0.7323$ $sd = 0.1100$	$\bar{x} = 0.7749$ $sd = 0.1513$	$\bar{x} = 0.6626$ $sd = 0.2541$	$\bar{x} = 0.7324$ $sd = 0.1092$	z-score	1000	1	8
all	$\bar{x} = 0.7313$	$\bar{x} = 0.7974$	$\bar{x} = 0.6864$	$\bar{x} = 0.7328$	z-score	100	0.125	8

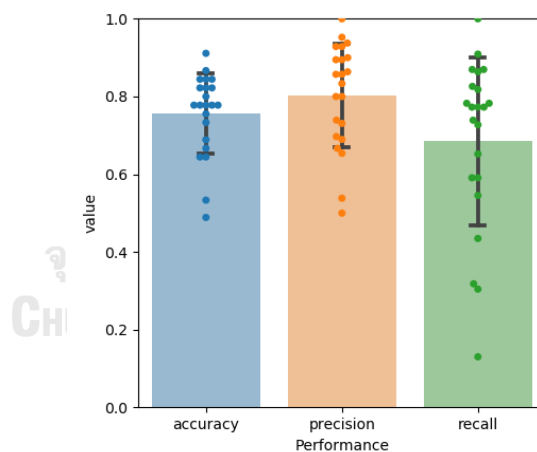
	$sd = 0.1066$	$sd = 0.1484$	$sd = 0.2425$	$sd = 0.1049$				
all	$\bar{x} = 0.7293$ $sd = 0.0849$	$\bar{x} = 0.7950$ $sd = 0.1247$	$\bar{x} = 0.6682$ $sd = 0.2100$	$\bar{x} = 0.7307$ $sd = 0.0838$	z-score	100	0.125	6
TP9	$\bar{x} = 0.7293$ $sd = 0.1063$	$\bar{x} = 0.7818$ $sd = 0.1451$	$\bar{x} = 0.6510$ $sd = 0.2264$	$\bar{x} = 0.7295$ $sd = 0.1060$	z-score	1000	0.1	4

ตารางที่ 4 แสดงประสิทธิภาพแบบจำลองที่มีความแม่นยำ (accuracy) สูงสุด 20 อันดับแรกสำหรับ linear-SVM

อิเล็กทรอนิกส์	Accuracy	Precision	Recall	Auc	ชนิดนอร์มัลไลซ์ ข้อมูลฐาน	C	ขนาด หน้าต่าง
AF7, TP9	$\bar{x} = 72.42$ $sd = 0.0944$	$\bar{x} = 76.69$ $sd = 0.1387$	$\bar{x} = 68.01$ $sd = 0.1861$	$\bar{x} = 72.42$ $sd = 0.0954$	log	39.81072	4
all	$\bar{x} = 72.32$ $sd = 0.1009$	$\bar{x} = 76.52$ $sd = 0.1558$	$\bar{x} = 68.90$ $sd = 0.2238$	$\bar{x} = 72.39$ $sd = 0.1012$	log	10	6
all	$\bar{x} = 72.22$ $sd = 0.1088$	$\bar{x} = 75.80$ $sd = 0.1460$	$\bar{x} = 68.27$ $sd = 0.2047$	$\bar{x} = 72.25$ $sd = 0.1088$	log	10	4
TP9, TP10	$\bar{x} = 71.72$ $sd = 0.0866$	$\bar{x} = 78.28$ $sd = 0.1210$	$\bar{x} = 63.14$ $sd = 0.2186$	$\bar{x} = 71.84$ $sd = 0.0861$	log	0.1	4
AF7, TP10	$\bar{x} = 71.72$ $sd = 0.1087$	$\bar{x} = 80.84$ $sd = 0.1387$	$\bar{x} = 61.94$ $sd = 0.2672$	$\bar{x} = 71.84$ $sd = 0.1084$	log	0.398107	6
TP9	$\bar{x} = 71.62$ $sd = 0.0947$	$\bar{x} = 78.77$ $sd = 0.1256$	$\bar{x} = 64.18$ $sd = 0.2334$	$\bar{x} = 71.72$ $sd = 0.0936$	log	0.398107	6
AF7, TP9	$\bar{x} = 71.62$ $sd = 0.0858$	$\bar{x} = 78.03$ $sd = 0.1353$	$\bar{x} = 64.49$ $sd = 0.2054$	$\bar{x} = 71.69$ $sd = 0.0862$	log	0.630957	6
AF7, TP10	$\bar{x} = 71.52$ $sd = 0.0896$	$\bar{x} = 79.04$ $sd = 0.1363$	$\bar{x} = 62.92$ $sd = 0.2155$	$\bar{x} = 71.63$ $sd = 0.0894$	log	0.398107	4
TP9	$\bar{x} = 71.41$ $sd = 0.1056$	$\bar{x} = 75.01$ $sd = 0.1364$	$\bar{x} = 68.41$ $sd = 0.2266$	$\bar{x} = 71.51$ $sd = 0.1048$	percent	6.309573	6
TP9	$\bar{x} = 71.41$ $sd = 0.1079$	$\bar{x} = 76.42$ $sd = 0.1387$	$\bar{x} = 63.75$ $sd = 0.2331$	$\bar{x} = 71.51$ $sd = 0.1071$	log	1000	4
TP9	$\bar{x} = 71.41$ $sd = 0.0965$	$\bar{x} = 74.91$ $sd = 0.1257$	$\bar{x} = 67.76$ $sd = 0.2001$	$\bar{x} = 71.48$ $sd = 0.0962$	percent	0.630957	4
TP9, TP10	$\bar{x} = 71.41$ $sd = 0.0955$	$\bar{x} = 78.34$ $sd = 0.1348$	$\bar{x} = 63.97$ $sd = 0.2464$	$\bar{x} = 71.56$ $sd = 0.0954$	log	0.251189	6
TP10	$\bar{x} = 71.31$ $sd = 0.1296$	$\bar{x} = 76.16$ $sd = 0.1496$	$\bar{x} = 62.34$ $sd = 0.2695$	$\bar{x} = 71.41$ $sd = 0.1287$	log	6.309573	4
all	$\bar{x} = 71.31$ $sd = 0.1223$	$\bar{x} = 75.92$ $sd = 0.1657$	$\bar{x} = 68.06$ $sd = 0.2498$	$\bar{x} = 71.33$ $sd = 0.1225$	log	10	8
TP10	$\bar{x} = 71.31$ $sd = 0.1084$	$\bar{x} = 74.21$ $sd = 0.1234$	$\bar{x} = 66.71$ $sd = 0.2399$	$\bar{x} = 71.33$ $sd = 0.1081$	z-score	0.398107	4

AF8, TP10	$\bar{x} = 71.31$ $sd = 0.1074$	$\bar{x} = 79.35$ $sd = 0.1424$	$\bar{x} = 60.69$ $sd = 0.2724$	$\bar{x} = 71.42$ $sd = 0.1079$	log	0.251189	6
TP9	$\bar{x} = 71.21$ $sd = 0.0885$	$\bar{x} = 76.28$ $sd = 0.1300$	$\bar{x} = 67.72$ $sd = 0.2195$	$\bar{x} = 71.26$ $sd = 0.0889$	z-score	0.251189	6
AF8, TP10	$\bar{x} = 71.21$ $sd = 0.0993$	$\bar{x} = 77.86$ $sd = 0.1284$	$\bar{x} = 62.36$ $sd = 0.2508$	$\bar{x} = 71.35$ $sd = 0.0989$	log	0.398107	4
AF7, TP9	$\bar{x} = 71.11$ $sd = 0.0985$	$\bar{x} = 74.95$ $sd = 0.1379$	$\bar{x} = 68.29$ $sd = 0.1867$	$\bar{x} = 71.14$ $sd = 0.0991$	percent	10	4
TP9, TP10	$\bar{x} = 70.91$ $sd = 0.0889$	$\bar{x} = 75.52$ $sd = 0.1155$	$\bar{x} = 63.91$ $sd = 0.2184$	$\bar{x} = 70.98$ $sd = 0.0887$	z-score	0.1	4

จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง SVM เคอร์เนลชนิด rbf ให้ผลลัพธ์ประสิทธิภาพดีกว่า เคอร์เนลชนิด linear โดยแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือเงื่อนไข อิเล็กโทรดหนึ่งตำแหน่ง TP10 ชนิดนอร์มัลไลซ์ข้อมูลฐาน z-score และมีขนาดหน้าต่างเท่ากับ 4 วินาที ดังแสดงในอันดับแรกของตารางที่ 4 โดยแบบจำลองนี้มีการกระจายตัวของค่าประสิทธิภาพในแต่ละรอบทวนสอบดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 แสดงประสิทธิภาพความแม่นยำ (accuracy) ของการทวนสอบแบบจำลองที่มีเงื่อนไขที่ดีที่สุด

โดยแบบจำลองเงื่อนไขที่ดีที่สุด ประสิทธิภาพ confusion matrix ดังตารางที่ 5 และหากแบ่งแยกประสิทธิภาพความแม่นยำ (accuracy) ตามเพศพบว่า เพศหญิง มีค่าเฉลี่ยที่ 74.6667 ส่วน เบี่ยงเบนมาตรฐาน 9.8982 เพศชาย มีค่าเฉลี่ย 76.2963 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 10.6703 ซึ่งเมื่อเทียบผลทดสอบ 2 sample t-test ไม่พบนัยสำคัญที่ $p < 0.01$ แสดงให้เห็นว่าเพศไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของแบบจำลอง

		กลุ่มที่แท้จริง	
		บวก	ลบ
ทำนาย	บวก	339	86
	ลบ	156	409

ตารางที่ 5 แสดง ประสิทธิภาพ confusion matrix ของแบบจำลองที่มีเงื่อนไขที่ดีที่สุด

หลังจากทำการศึกษาทั้งสามการศึกษาเพื่อให้เงื่อนไขสำหรับแบบจำลองที่ดีที่สุดแล้ว จึงสร้างแบบจำลองที่ได้จากการศึกษานี้ โดยใช้เงื่อนไขแบบจำลองที่ดีที่สุด ดังการศึกษาที่ 3 คือ เงื่อนไขอิเล็กทรอนิกส์ตำแหน่ง TP10 ชนิดนอร์มัลไลซ์ข้อมูลฐาน z-score และมีขนาดหน้าต่างเท่ากับ 4 วินาที ด้วยแบบจำลอง SVM-rbf ที่มีพารามิเตอร์ $C = 1000$ และ $\gamma = 1$ ได้ผลลัพธ์แบบจำลองที่มีจำนวนเวกเตอร์อ้างอิง 609 ตำแหน่ง (1 เวกเตอร์ มี 4 มิติ, 609 เวกเตอร์ มีขนาด 4×609) , เวกเตอร์น้ำหนัก (\vec{w}) 609 ตำแหน่ง, และ ค่าโน้มน้ำหนัก (b) 1 ตำแหน่ง โดยค่าคงที่ทั้งหมดได้ใส่ไว้ในภาคผนวก

เมื่อได้พารามิเตอร์ทั้งหมดแล้ว จึงทำการหาความเร็วของแบบจำลอง โดยวัดปริมาณการคำนวณ หน่วยความจำ และจำนวนพารามิเตอร์ทั้งหมดดังต่อไปนี้

- 1) ปริมาณการคำนวณ = $609 \times ((3 \times 4) + 4) = 9744$ FLOPS
- 2) หน่วยความจำ = $(609 \times ((4 \times 4) + 9)) + 3 = 15228$
- 3) จำนวนพารามิเตอร์ = $(609 \times (4 + 1)) + 2 = 3047$

แต่อย่างไรก็ตามหากเปรียบเทียบกับแบบจำลอง SVM-linear แล้วนั้นจะมีปริมาณการคำนวณ หน่วยความจำ และจำนวนพารามิเตอร์ที่มากกว่า เนื่องจาก SVM-linear มีปริมาณการคำนวณ 8 FLOPS, หน่วยความจำ 16 ,และ จำนวนพารามิเตอร์ 5

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแบบจำลองที่ตรวจจับความฟุ้งซ่านโดยอัตโนมัติที่เหมาะสมกับนำไปใช้กับอุปกรณ์พกพาเคลื่อนที่ (mobile) โดยใช้ข้อมูลจากสัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมอง ซึ่งชุดข้อมูลที่ได้จาก Viriyopase [34] และมีข้อมูลที่ผ่านการคัดเลือกจำนวน 990 ช่วงข้อมูลจากผู้ทำการทดลอง 22 คน โดยการศึกษาได้เลือกใช้แบบจำลองซัพพอร์ต เวกเตอร์ แมชชีนเนื่องจาก แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด[21] และเหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุปกรณ์พกพาที่ทำงานในระบบเวลาจริง (real-time system) [22] โดยการศึกษาจะหาเงื่อนไขและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพสูงสุด ด้วยหาค่าความแม่นยำ (accuracy) เฉลี่ยจากการทวนสอบวิธี LOPOCV กับชุดข้อมูลที่มีอาสาสมัคร 22 ท่าน

ในแต่ชุดข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมองจะประกอบไปด้วยสัญญาณจาก 4 ตำแหน่ง อิเล็กโทรดคือ AF7, AF8, TP9 และ TP10 ในการศึกษาจึงได้ทำการสร้างแบบจำลอง linear-SVM และ rbf-SVM จากอิเล็กโทรดทั้ง 4 ตำแหน่ง และทำเทคนิคการค้นหาแบบตารางหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของแต่ละแบบจำลอง พบว่าแบบจำลองจากอิเล็กโทรดตำแหน่ง TP9 และ TP10 ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าตำแหน่ง AF7 และ AF8 ทั้ง linear-SVM และ rbf-SVM โดย linear-SVM ความแม่นยำสูงสุดคือ 60.81, 57.07, 63.33, และ 64.34 จากแบบจำลองข้อมูลอิเล็กโทรด AF7, AF8, TP9 และ TP10 ตามลำดับ ส่วน rbf-SVM ความแม่นยำสูงสุดคือ 60.56, 56.97, 64.04, และ 64.95 จากแบบจำลองข้อมูลอิเล็กโทรด AF7, AF8, TP9 และ TP10 ตามลำดับ การศึกษาทำให้ทราบว่าตำแหน่งอิเล็กโทรดส่งผลต่อประสิทธิภาพความแม่นยำของแบบจำลอง

เนื่องจากการศึกษาสร้างแบบจำลองจากชุดข้อมูลที่ได้มาจากอาสาสมัคร 22 ท่านทำให้ข้อมูลที่ได้มีความแตกต่างระหว่าง ช่วงความถี่ อิเล็กโทรด กรณีเงื่อนไขในการทดลอง และระหว่างบุคคลได้ ในการศึกษาที่สองจึงได้ใช้เทคนิคการนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐาน (baseline normalization) ในกระบวนการคัดกรองคุณลักษณะ (feature extraction) โดยการศึกษาทำการสร้างแบบจำลองจากแบบจำลอง linear-SVM และ rbf-SVM จากอิเล็กโทรดตำแหน่ง TP10 และ TP9 โดยเปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้เทคนิคการนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐาน กับการใช้การนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐานทั้ง 3 วิธีคือ log, percent, และ z-score พบว่าการใช้การนอร์มัลไลเซชัน

ข้อมูลฐานให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการไม่ใช้การนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐานในทั้งอิเล็กทรอนิกส์สองตำแหน่งทั้งสอง ชนิดแบบจำลอง linear-SVM และ rbf-SVM

จากสองการศึกษาแรกทำให้ทราบว่าตำแหน่งอิเล็กทรอนิกส์และการนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐาน ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแบบจำลอง ในการศึกษาที่สามนี้จึงมีความสนใจที่จะหาแบบจำลองที่มี ประสิทธิภาพสูงสุดในเงื่อนไขที่แตกต่างกันคือ ขนาดหน้าต่างเวลา (2, 4, 6, และ 8 วินาที), ตำแหน่ง อิเล็กทรอนิกส์ (โดยมีเงื่อนไข จำนวน 1 อิเล็กทรอนิกส์ [4 แบบ], จับคู่ 2 อิเล็กทรอนิกส์ [6 แบบ], และ ทุก อิเล็กทรอนิกส์ [1 แบบ]), เทคนิคการนอร์มัลไลซ์ข้อมูลฐาน (3 แบบ คือ log, percent, และ z-score), และชนิดเคอร์เนล (2 แบบ คือ linear, rbf) จากการวิจัยพบว่าแบบจำลองที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดมีความแม่นยำ (accuracy) 75.56 % ด้วยเงื่อนไข ขนาดหน้าต่างเวลา 4 วินาที ชนิดการนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐานแบบการแปลงซี, ใช้อิเล็กทรอนิกส์หนึ่งตำแหน่งที่บริเวณ TP10, และเป็นแบบจำลองชนิด rbf-svm และในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาเพื่อทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพ สูงสุดพบว่าไม่มีนัยสำคัญ เมื่อทดสอบด้วย 2 sample t-test ที่ $p < 0.01$ แสดงให้เห็นว่าเพศไม่มีผล ต่อประสิทธิภาพของแบบจำลอง

จากการศึกษาทั้งหมดทำให้ได้เงื่อนไขและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสร้างแบบจำลอง สำหรับตรวจจับความฟุ้งซ่านที่มีขนาดการคำนวณ 9744 FLOPS การเข้าถึงหน่วยความจำ 15228 และจำนวนพารามิเตอร์ 3047 แต่อย่างไรก็ตามหากเปรียบเทียบกับแบบจำลอง SVM-linear แล้ว นั้นจะมีปริมาณการคำนวณ หน่วยความจำ และจำนวนพารามิเตอร์ที่มากกว่า

การศึกษานี้เป็นการศึกษาแรกที่ใช้เทคนิคการนอร์มัลไลเซชันข้อมูลฐาน (baseline normalization) ในกระบวนการคัดกรองคุณลักษณะ (feature extraction) ของการตรวจจับความ ฟุ้งซ่านด้วยสัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมองจำนวนอิเล็กทรอนิกส์น้อย โดยประโยชน์ของเทคนิคนอร์มัลไลเซชันนี้คือ ช่วยปรับปรุงคุณภาพของคุณลักษณะที่เหมาะสมการการสร้างแบบจำลองชนิดกลุ่ม (group level analysis) นอกจากนี้แบบจำลองที่สร้างจากสัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมองจำนวนอิเล็กทรอนิกส์น้อยซึ่งทำให้อุปกรณ์นี้สะดวกและใช้งานง่าย เหมาะกับนำไปใช้กับอุปกรณ์พกพาเคลื่อนที่ (mobile) ที่ซึ่งอาจมี ประโยชน์ในอนาคตในการช่วยให้ผู้คนสามารถติดตาม (monitor) ความคิดของตนเองได้ ส่งผลให้ช่วยลดโอกาสเกิดผลลัพธ์ในทางลบจากความฟุ้งซ่านได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้ว่าการศึกษานี้จะสามารถสร้างแบบจำลองชนิดกลุ่มที่ที่แสดงให้เห็นรูปแบบที่สัมพันธ์กับสัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมองต่อสภาวะความฟุ้งซ่านได้ แต่จำนวนอาสาสมัครในการศึกษานี้มีเพียง 22 ท่าน ในอนาคตหากสามารถเพิ่มจำนวนอาสาสมัครได้จะทำให้แบบจำลองมีความทั่วไป (generalize) มากขึ้น





จำนวนเวกเตอร์อ้างอิง 609 ตำแหน่ง (1 เวกเตอร์ มี 4 มิติ, 609 เวกเตอร์ มีขนาด 4×609)

คุณลักษณะที่

ค่าของแต่ละเวกเตอร์อ้างอิงในแต่ละคุณลักษณะ

1	0.451273093,0.55609479,0.498357294,0.556609198,0.470471299,0.492632354,0.528062737,0.567065705,0.590899485,0.435061864,0.415343838,0.410594313,0.465274647,0.336500663,0.493236754,0.315013502,0.242846443,0.623723971,0.187860488,0.210866452,0.263707364,0.306432599,0.181824091,0.366238616,0.425476143,0.363802376,0.32522448,0.385598054,0.22239837,0.33766476,0.292583666,0.282843686,0.354608981,0.361972667,0.341568667,0.238632748,0.262464247,0.615334248,0.444308124,0.433497421,0.158843686,0.402396246,0.397305926,0.702586625,0.813661402,0.383349376,0.407825997,0.660341869,0.285554308,0.315261614,0.44964983,0.34930436,0.484450571,0.288266267,0.342490055,0.435819978,0.389221725,0.398771136,0.432759069,0.41539301,0.647683817,0.702902752,0.694066648,0.648250196,0.656658432,0.82023233,0.77264987,0.591896724,0.630688653,0.828877114,0.608973419,0.817542148,0.355360493,0.52994494,0.460716069,0.473243109,0.553877123,0.396086181,0.296836116,0.535422091,0.515656216,0.484224141,0.458893847,0.358933439,0.612579001,0.569312643,0.818287573,0.490324532,0.548497654,0.585359611,0.443947563,0.414304444,0.403648174,0.399709381,0.50084828,0.531993746,0.396187948,0.788076434,0.76577287,0.582077597,0.717175423,0.606151859,0.622039646,0.353978622,0.286988329,0.375630828,0.753211146,0.35941069,0.759291693,0.311362798,0.618790021,0.370045864,0.2912962,0.827418012,0.271026401,0.402010355,0.471689446,0.325196278,0.371464289,0.577229821,0.382526732,0.49689162,0.445788498,0.433969493,0.591507765,0.437617723,0.350267509,0.196570753,0.362781349,0.233597631,0.128809361,0.108789075,0.071949848,0.050466705,0.353197388,0.281917893,0.2839808,0.185173161,0.584914903,0.319939936,0.283653369,0.526470507,0.361080589,0.401474185,0.36089113,0.492996708,0.366112596,5019569,0.399865322,0.379374395,0.349103819,0.334598262,0.393449366,0.307829918,0.403268344,0.163507165,0.258458308,0.030373302,0.444244537,0.581149101,0.295313951,0.365587057,0.336038842,0.372170291,0.320175822,0.388069729,0.419145998,0.387260872,0.420149216,0.327632333,0.410831231,0.382258807,0.378705057,0.417406181,0.277816835,0.347867236,0.275931064,0.454565993,0.477822834,0.503440358,0.337759892,0.259937488,0.259768775,0.239657818,0.300767425,0.405731037,0.325835335,0.428906742,0.32715426,0.320651932,0.300952928,0.377036508,0.247748999,0.351603223,0.36536915,0.623451038,0.373176588,0.37929058,0.383898602,0.36932948,0.39681138,0.300283874,0.271895111,0.316993815,0.496314507,0.322485679,0.393258921,0.395139221,0.338668424,0.375291184,0.387686283,0.31190347,0.302866147,0.486288782,0.709130349,0.377213151,0.286616158,0.778971663,0.560282814,0.542546188,0.417036283,0.923985619,0.468292869,0.35872401,0.3406509,0.5473944,0.438794279,0.372643763,0.392498982,0.523733916,0.45537643,0.402967931,0.40581105,0.343582739,0.733571487,0.376168188,0.551325636,0.412338189,0.58768146,0.4531233591,0.428553964,0.610414796,0.321825696,0.347905496,0.255681262,0.452314303,0.394348863,0.225001328,0.325051352,0.288669273,0.310390529,0.246982339,0.323039311,0.235011423,0.329384016,0.309842142,0.428417166,0.334841216,0.271786364,0.344739157,0.381025447,0.348741057,0.410590918,0.304616546,0.252919734,0.259739884,0.263297181,0.329243081,0.3189925618,0.35299237,0.276474546,0.508421512,0.451341008,0.355114725,0.458950261,0.612322424,0.636749202,0.393711156,0.32733664,0.695756267,0.411929906,0.210476315,0.396958175,0.372347691,0.371851327,0.615622083,0.526617913,0.421717376,0.418144882,0.414784262,0.33063784,0.499024229,0.517639705,0.401948195,0.554195049,0.532825007,0.415399024,0.526520259,0.505904254,0.4329619,0.499768092,0.414523534,0.23428411,0.326728192,0.395977725,0.609798106,0.401028474,0.462734976,0.387415305,0.445320835,0.308057385,0.293169994,0.379468577,0.439155688,0.317216928,0.445266583,0.331589331,0.243270952,0.237951944,0.203210714,0.340353282,0.246762909,0.216054987,0.330563811,0.225130865,0.258658733,0.290508489,0.338042323,0.370044261,0.540593378,0.272226985,0.412169307,0.424162745,0.341497961,0.245680305,0.396913362,0.350339467,0.297625345,0.326906685,0.261643073,0.327843371,0.307940986,0.297501567,0.663462634,0.692903691,0.717550861,0.769040805,0.630418575,0.660783198,0.617322916,0.647015685,0.779782361,0.700277219,0.643811927,0.767606709,0.677389557,0.65596074,0.642613123,0.611135332,0.602548882,0.255322776,0.322267377,0.288397853,0.319457526,0.329510743,0.269258446,0.28179765,0.279698645,0.294810044,0.356950582,0.301483758,0.28847285,0.398440343,0.279264284,0.734858687,0.4368553,0.445600389,0.499189689,0.437113981,0.449403324,0.530322027,0.404901291,0.457080201,0.439313247,0.438431326,0.41166987,0.435839133,0.416446826,0.385559739,0.464153719,0.413077842,0.460031083,0.47509389,0.427062816,0.399269562,0.467290709,0.444026678,0.435320793,0.662973949,0.407359937,0.5251182423,0.581704354,0.324223419,0.720617248,0.666007662,0.582840433,0.494907798,0.83802878,0.455154908,0.502092865,0.5924445921,0.407259872,0.413837869,0.57271142,0.750383432,0.627119329,0.679963987,0.757544202,0.400030078,0.383720618,0.366508491,0.209179068,0.240788764,0.432574053,0.615921443,0.239860665,0.493958983,0.235481501,0.240080017,0.342868695,0.307427614,0.24983886
---	--

9,0.283168165,0.433154474,0.313962437,0.499698147,0.223879142,0.247975542,0.357945273,0.23282394,0.250437578,0.316958522,0.36362772,0.520514827,0.509619592,0.240051498,0.316862139,0.309825573,0.273467894,0.233445168,0.51989706,0.983166371,0.222258219,0.305349933,0.246825411,0.328593104,0.388000642,0.384326172,0.464695174,0.740404882,0.648962058,0.648962058,0.71664621,0.440926565,0.409092874,0.755091983,0.31587891,0.37602249,0.301721796,0.422129096,0.392158517,0.360906917,0.386322285,0.520277176,0.373061394,0.310196699,0.280563347,0.356053343,0.280902914,0.030889606,0.269547149,0.312967047,0.333119229,0.404547541,0.255787069,0.342903181,0.683479084,0.451766938,0.581015588,0.369253345,0.321270148,0.623387187,0.5150511773,0.228845263,0.454714828,0.294823148,0.537863529,0.40792214,0.416825842,0.404348336,0.290219636,0.259646238,0.161989497,0.2117253985,0.232625963,0.258528224,0.201214652,0.307693985,0.398535308,0.28061217,0.310052906,0.2934017,0.366657235,0.256350449,0.333533369,0.253057171,0.378639776,0.334170618,0.2624119,0.532217648,0.36297586,0.283426783,0.338488074,0.443710132,0.288748819,0.363125373,0.465354174,0.304096539,0.444663625,0.310651619,0.306125269,0.278825084,0.364382643,0.474833821,0.311268209,0.399149383,0.411712664,0.563136265,0.40001681,0.734604429,0.472111516,0.435465918,0.599918473,0.500920481,0.303767731,0.501974795,0.385439108,0.349879917,0.402020889,0.586474184,0.852823774,0.673057064,0.669168498,0.349679653,0.787692128,0.402705425,0.454331299,0.492259536,0.462249089,0.659262533,0.424112764,0.411596152,0.456575333,0.540259002,0.49244294,0.371862888,0.4143038,0.36627652,0.302702172,0.33938673,0.350074427,0.410999724,0.394436284,0.255163807,0.321783519,0.28944209,0.387823694,0.225882102,0.400296774,0.068151587,0.263284311,0.415551457,0.637318483,0.332311337,0.282681919,0.359077659,0.231361744,0.292458159,0.268224518,0.220652897,0.521387302,0.696546476,0.345851413,0.2923336175
2
0.347521665,0.392755538,0.280600011,0.406901413,0.297573072,0.354080688,0.353296481,0.376909694,0.369664918,0.290076418,0.282110818,0.35312138,0.345950885,0.48990491,0.504548922,0.487265304,0.568047683,0.486121204,0.419185176,0.392892513,0.286768248,0.370422153,0.482142878,0.269399566,0.582422595,0.384169857,0.464653906,0.407718716,0.436363698,0.295031038,0.450036797,0.396430838,0.404368574,0.418046781,0.492102455,0.456371169,0.41444782,0.373650764,0.445210333,0.433075031,0.36331224,0.284766917,0.343052711,0.400537876,0.54030849,0.692456553,0.442014333,0.549870011,0.487360063,0.409060626,0.346568355,0.442400776,0.407825623,0.371829707,0.3539121,0.304701707,0.418579752,0.419104342,0.390267459,0.352596974,0.42456544,0.484850027,0.442686279,0.674625989,0.543288861,0.496771886,0.675763324,0.60999045,0.558734219,0.76964288,0.540563351,0.726687472,0.366305062,0.35557727,0.380265594,0.379979293,0.316581247,0.39190935,0.756697873,0.305843595,0.365133643,0.752567664,0.340231795,0.363122346,0.365884654,0.406519215,0.560277615,0.48063828,0.324284533,0.359827104,0.377211655,0.333433363,0.41878151,0.41878151,0.308324606,0.35074048,0.434294403,0.384938575,0.408068527,0.52141425,0.489013042,0.369754633,0.407475834,0.431643508,0.48588627,0.498692497,0.404404747,0.413601811,0.488414887,0.391786624,0.621049227,0.613876539,0.556360756,0.536716506,0.348616313,0.589255875,0.23498745,0.400370847,0.457663084,0.407065078,0.473919124,0.728069252,0.466787041,0.337219612,0.394787077,0.439313713,0.406569782,0.415809563,0.424415458,0.29282088,0.494230428,0.399995106,0.399759461,0.413248154,0.226878001,0.404330469,0.365667046,0.502190419,0.377484675,0.471754251,0.279973938,0.373943162,0.374930897,0.486982006,0.338689846,0.387470706,0.416014368,0.365957,0.575299107,0.353812775,0.419733601,0.494462428,0.333641992,0.457624485,0.449796413,0.546501878,0.335613826,0.352367483,0.207356775,0.415477273,0.400468346,0.465213373,0.391292014,0.37264094,0.451023198,0.383415769,0.28990006,0.384607356,0.387008283,0.383622424,0.31012813,0.347803482,0.437876699,0.583150867,0.262071486,0.142616179,0.289584442,0.299749504,0.388513585,0.337008593,0.324177921,0.26952256,0.16470772,0.355585807,0.072074303,0.325144171,0.378961183,0.378221019,0.544230582,0.396958445,0.441883186,0.432146174,0.551040532,0.343204124,0.509678903,0.566522286,0.672307123,0.679900321,0.54640803,0.392940969,0.420320956,0.570001335,0.686346181,0.562042129,0.364770381,0.530908794,0.519040613,0.510144791,0.442635424,0.548283713,0.397275697,0.425833522,0.42333261,0.384546687,0.404390513,0.619680728,0.487412622,0.401681832,0.609783852,0.394431008,0.350752328,0.414126604,0.587114961,0.383277979,0.203956239,0.379105814,0.381788096,0.34312139,0.357803097,0.40394863,0.420319541,0.405268809,0.347656609,0.369755155,0.251206656,0.489385628,0.256808133,0.32741764,0.458318937,0.35018712,0.301461764,0.475030913,0.383056689,0.409057063,0.469020215,0.442898058,0.433145075,0.425931147,0.356851962,0.36987144,0.251033788,0.314632691,0.301110733,0.430282702,0.31879037,0.347941485,0.493583924,0.286281665,0.308002026,0.384246796,0.52768952,0.569604844,0.57379416,0.578582685,0.392028438,0.456326114,0.403038782,0.453490275,0.400728242,0.48680414,0.375060668,0.416946329,0.616971799,0.477630601,0.46305656,0.640296212,0.645720176,0.600316995,0.453896321,0.419483476,0.509856128,0.497822156,0.263224618,0.363845656,0.506956197,0.371393361,0.378318212,0.401785405,0.411143358,0.345047248,0.426951946,0.368694685,0.358323906,0.314799567,0.258924546,0.487473754,0.385245558,0.248573169,0.34125012,0.306910339,0.410483169,0.36552943,0.395579015,0.3384906,0.443688843,0.466301193,0.452266833,0.384039519,0.435816807,0.434062189,0.301812358,0.41884277,0.478338007,0.429798424,0.407828375,0.465908773,0.465159469,0.448441908,0.36331153,0.424359781,0.409728014,0.407301133,0.452516616,0.366946733,0.437266924,0.330081004,0.291725159,0.3135108,0.402603802,0.458098696,0.431039721,0.52037489,0.451641933,0.50898465,0.32231

0248,0.420717744,0.410324382,0.309611061,0.369232621,0.464162493,0.276224709,0.459336063,0.352162442,0.324943734,0.585957635,0.597859387,0.68891113
5,0.567972706,0.444956453,0.517118007,0.577320985,0.505663381,0.814464957,0.712446125,0.590647278,0.508906605,0.729314187,0.558574381,0.446855332,0.
307266763,0.521919254,0.335128734,0.292213011,0.320264323,0.343106653,0.295170026,0.31176365,0.379117085,0.26774455,0.330421967,0.43886916,0.286003
445,0.277756003,0.415246812,0.303613391,0.576611909,0.388267589,0.391937043,0.4620116618,0.41131411,0.340370619,0.347263134,0.3850569044,0.385052275,
0.404280265,0.401171394,0.437515876,0.342906764,0.383251521,0.375602086,0.515156608,0.412586444,0.338975499,0.390573519,0.368891071,0.319520825,0.3
83852571,0.488948365,0.454685604,0.485341079,0.269757725,0.346980261,0.311042222,0.399869595,0.366307021,0.362362376,0.345124107,0.299238169,0.4618
68,0.30716074,0.276989242,0.46504749,0.279303244,0.28867204,0.45798558,0.545735513,0.630886417,0.351976612,0.518598702,0.630993817,0.465636092,0.619
707365,0.37841391,0.405939362,0.629676124,0.526465359,0.456409679,0.448167613,0.380273505,0.337708546,0.69860333,0.612224324,0.360260791,0.4288130
43,0.487102338,0.405404654,0.539412905,0.39620028,0.441662126,0.636081846,0.298171025,0.312927086,0.295682622,0.406203896,0.648072832,0.519631061,0.
01896,0.604083351,0.387405841,0.43980075,0.55458531,0.347425152,0.493995181,0.34348454,0.447358439,0.52218022,0.331463068,0.256272697,0.429217265,0.
342884,0.443700003,0.337590812,0.410836569,0.440660206,0.393319513,0.394847813,0.37707882,0.277306965,0.325831101,0.404732774,0.433788533,0.207955832,0.407210229,0.520
502214049,0.338059911,0.400431316,0.348685089,0.326230773,0.438732287,0.277306965,0.325831101,0.404732774,0.433788533,0.207955832,0.407210229,0.520
342884,0.443700003,0.337590812,0.410836569,0.440660206,0.393319513,0.394847813,0.37707882,0.277306965,0.325831101,0.404732774,0.433788533,0.207955832,0.407210229,0.520
96,0.433725804,0.425319392,0.363628397,0.4118446,0.354178969,0.341411845,0.299602632,0.354886814,0.454377832,0.387415881,0.600531189,0.442164802,0.
437481341,0.523667171,0.378175303,0.678469869,0.560087903,0.495134137,0.396274063,0.665557613,0.307774464,0.552606671,0.562151027,0.514988472,0.41
6062807,0.459686123,0.584983068,0.496858941,0.432911811,0.54515211,0.453949416,0.571177799,0.443324894,0.517104215,0.358603729,0.377160815,0.364908
368,0.273206064,0.362079717,0.343205625,0.454796993,0.342885084,0.48874277,0.419837314,0.63129105,0.550365359,0.48046987,0.476427607,0.465477177,0.3
60815503,0.489546574,0.522845894,0.53761323,0.463722126,0.512309597,0.645199539,0.532968529,0.410662916,0.38773063,0.493763383,0.354576644,0.443373
126,0.293784536,0.313348923,0.351391419,0.281606858,0.302543718,0.263149884,0.287155459,0.294094354,0.257144958,0.438443641,0.372946965,0.37692976,
0.349153541,0.377263783,0.297453971,0.457517383,0.288942203,0.386414337,0.33237457,0.328139697,0.433890781,0.491135849,0.125721238,0.497024902,0.49
5974984,0.562353736,0.505059787,0.412759596,0.427347202,0.396276547,0.461759596,0.438960565,0.352424167,0.511427724,0.536395099,0.462333559,0.423486
816

3

0.360465183,0.421009945,0.300950457,0.509336241,0.357957197,0.431195124,0.385992268,0.448420629,0.419967857,0.315421948,0.308660317,0.344782782,0.4
09244702,0.465629153,0.600796672,0.530797893,0.51212018,0.602002812,0.374950717,0.31351282,0.303942608,0.309910697,0.508760578,0.276338559,0.513757
838,0.437187563,0.444486715,0.43201653,0.452315204,0.3548933,0.408328956,0.329352316,0.439414451,0.429388044,0.484753622,0.480761932,0.393477077,0.3
10007733,0.59021288,0.521609858,0.407056822,0.234819943,0.390566606,0.416852978,0.682090364,0.801522417,0.462446214,0.575426664,0.613104068,0.39200
0929,0.330092105,0.551075221,0.440838401,0.422909175,0.365368642,0.35273782,0.530152026,0.447052435,0.415929453,0.440206432,0.49649465,0.434346875,
0.459822571,0.649408023,0.436317362,0.388941452,0.652032103,0.637196342,0.476137015,0.512421292,0.657992059,0.493477174,0.666877949,0.388676877,0.3
93280956,0.372885714,0.444324112,0.376808661,0.413550565,0.478132849,0.328956925,0.370736415,0.505125133,0.390751651,0.377917121,0.390283815,0.4676
64642,0.491296317,0.593097493,0.333105931,0.34964124,0.421304632,0.296111736,0.317530467,0.351552197,0.3196603,0.366743241,0.3359829089,0.453006573,
0.607574873,0.625567648,0.455007696,0.545331455,0.525644237,0.610786939,0.475669851,0.36481152,0.46298519,0.550130184,0.369418577,0.71570732,0.41
9504228,0.519234703,0.43533262,0.294130129,0.618652232,0.24227755,0.432865967,0.547547851,0.365398478,0.552762201,0.7830701,0.457089914,0.4576079
31,0.54390645,0.487442113,0.459991108,0.474686663,0.580092325,0.412837752,0.342617258,0.445061159,0.39047299,0.319142504,0.389776305,0.253626506,0.4
13128378,0.359075559,0.457249633,0.338238435,0.599238121,0.302099502,0.370417882,0.40378838,0.454387795,0.394001215,0.317833795,0.482393286,0.36290
704,0.356327916,0.479567902,0.388701191,0.454225231,0.445876328,0.511356175,0.408741123,0.446373895,0.333625633,0.353105501,0.361643794,0.32170921,
0.519583708,0.424964946,0.39871862,0.471785061,0.368090034,0.455741649,0.441100991,0.560598032,0.256103747,0.321509978,0.195428148,0.451190233,0.4
70079721,0.419874146,0.354358113,0.390491375,0.44903715,0.388673023,0.288650697,0.401391716,0.3899654,0.401324192,0.336342768,0.267169656,0.3142062
48,0.517521812,0.268748319,0.166963097,0.301951218,0.253675091,0.339757294,0.37171969,0.39127408,0.247504145,0.135943378,0.285859094,0.115403375,0.3
15131621,0.345018958,0.263440914,0.673426178,0.411140479,0.402239311,0.407387509,0.501875498,0.338635231,0.437043442,0.491113867,0.582047712,0.4592
47392,0.562068719,0.396437326,0.413378259,0.585310709,0.625171831,0.529722824,0.369787341,0.625267295,0.492360853,0.497213247,0.452334868,0.4979510
29,0.400066888,0.404929331,0.366474122,0.362540683,0.46884996,0.6197989,0.373602492,0.382680852,0.725397898,0.501277044,0.440561002,0.475990961,0.80
3322074,0.39285216,0.272503676,0.406778565,0.444608277,0.410843422,0.315428472,0.431904881,0.4984775,0.542796441,0.362738651,0.364271887,0.25940214

0.548190645,0.258139639,0.408049313,0.492665807,0.401072135,0.341918454,0.568301669,0.429472083,0.474059398,0.450229239,0.39739075,0.510778955,0.447547512,0.273273345,0.439445187,0.330660573,0.331679766,0.317797999,0.408550195,0.264580782,0.391617243,0.480413326,0.355702718,0.429988576,0.351047821,0.456497371,0.496660077,0.530252337,0.591105435,0.430299497,0.398395506,0.377952513,0.472638753,0.385312024,0.445148021,0.417349384,0.376078122,0.676260735,0.578983432,0.488981092,0.724575497,0.722007067,0.714713493,0.452047235,0.4088911,0.631175377,0.581250534,0.253379122,0.41752346,0.457005292,0.408884323,0.45327365,0.485639131,0.423510537,0.394598894,0.483403936,0.3728962,0.463161346,0.425853746,0.316553981,0.639040152,0.491370996,0.288235039,0.470963111,0.406015632,0.548503355,0.465343484,0.442858683,0.280271042,0.394390032,0.414452423,0.561339825,0.385832835,0.455254522,0.450696419,0.367511909,0.372896146,0.381099808,0.457697243,0.450956484,0.435898081,0.499042647,0.420839685,0.310374979,0.331469145,0.320684701,0.416266888,0.371257641,0.344400615,0.462743659,0.28294178,0.309490754,0.352749313,0.429940388,0.504761162,0.525869401,0.532849269,0.489647481,0.523533921,0.334096688,0.289884277,0.449473477,0.37902221,0.38966612,0.55109942,0.29117961,0.479065614,0.411394725,0.36837531,0.580211637,0.628340508,0.522633936,0.551916557,0.440054924,0.480802598,0.493365805,0.428624349,0.713360499,0.595488656,0.529538878,0.550573103,0.656659028,0.494511325,0.482102535,0.331882234,0.448361109,0.304195025,0.285516657,0.367216568,0.399660018,0.344156433,0.289856584,0.37868205,0.2809722,0.338125584,0.43673689,0.300620491,0.284684766,0.505129386,0.354385053,0.537995705,0.393969041,0.397590008,0.431074374,0.376935683,0.391901341,0.373392136,0.341320276,0.371590636,0.405011964,0.370444341,0.402934429,0.308214937,0.359139337,0.376430389,0.417903153,0.368981702,0.332247402,0.409369735,0.264839423,0.300410589,0.350655009,0.436775872,0.401722875,0.535366499,0.31149813,0.479602437,0.38757452,0.428250797,0.474600262,0.486758099,0.468053031,0.365349861,0.543728978,0.502216367,0.396157578,0.497229434,0.389328598,0.433297627,0.57585783,0.265121055,0.263453169,0.26222271,0.392200624,0.818668447,0.595931238,0.30646768,0.457029,0.473147272,0.363794181,0.244110176,0.508503854,1,0.300991651,0.385051922,0.434513537,0.385151162,0.445628739,0.502623703,0.620058976,0.528273749,0.482466333,0.808327006,0.368487927,0.611468895,0.399616723,0.532235701,0.681179802,0.362412952,0.283248525,0.300641762,0.459888135,0.27489224,0.435691373,0.462389704,0.380305873,0.349930346,0.320897857,0.31553073,0.354115701,0.271919849,0.561216955,0.389149311,0.2953339677,95,0.400564974,0.359663881,0.409208245,0.495219805,0.488479204,0.454232927,0.403165363,0.354115701,0.271919849,0.561216955,0.389149311,0.2953339677,0.42510323,0.369984767,0.411283545,0.384245706,0.360405877,0.353779304,0.325116602,0.264176015,0.399010228,0.40059013,0.550704477,0.363207392,0.448257306,0.579602289,0.381903245,0.561759017,0.540013786,0.530365441,0.366541046,0.699634936,0.32543346,0.63386764,0.622020308,0.491468647,0.450505836,0.420296497,0.50712941,0.478592462,0.461199204,0.477809096,0.493266017,0.600649015,0.391836499,0.524173013,0.362791572,0.379935726,0.332141039,0.217679934,0.323284093,0.265742338,0.441862892,0.362302642,0.460996131,0.437260087,0.645596102,0.556116577,0.577702871,0.546260999,0.471076961,0.366439577,0.584703605,0.539996825,0.50577332,0.528875574,0.565913232,0.765145496,0.577216887,0.463370774,0.39892479,0.675911819,0.376954366,0.468747070,0.346988553,0.358234768,0.477739964,0.297195834,0.415767323,0.339355802,0.365794974,0.330600092,0.27775897,0.428195675,0.355836556,0.373080003,0.394135013,0.465575773,0.365009354,0.456723884,0.308936436,0.447688566,0.394244637,0.356651048,0.421045383,0.554607953,0.090616686,0.419799277,0.508903585,0.616930697,0.528661014,0.381780629,0.42492056,0.396050836,0.482917427,0.461984021,0.28272852,0.586749994,0.67510955,0.510982033,0.4745580590.285152629,0.313761477,0.224060917,0.279385673,0.213388939,0.250624232,0.277693714,0.27338534,0.280512757,0.228938463,0.221465556,0.303164306,0.252392834,0.428529942,0.365641823,0.383968983,0.514226243,0.337835105,0.381318211,0.381074528,0.231248456,0.350334678,0.390206961,0.22298311,0.534307618,0.291056936,0.404658497,0.328857332,0.358238245,0.211569815,0.405772933,0.37638032,0.319320368,0.345660951,0.419816481,0.369851497,0.36279704,0.355014017,0.28513453,0.310148535,0.27924694,0.271464549,0.259799025,0.327781969,0.367387606,0.516192871,0.360209003,0.448016503,0.332723203,0.355809688,0.302715415,0.305444012,0.323506665,0.281854575,0.291473121,0.227113008,0.283355042,0.336185428,0.313280553,0.242820106,0.313335393,0.440638838,8,0.3628333464,0.584982857,0.525020609,0.486488545,0.585014458,0.555286613,0.598279773,0.50036517,0.719118024,0.485515621,0.650507662,0.295115554,0.276463015,0.325469636,0.280449327,0.229525582,0.317176183,0.812798484,0.243636158,0.304596277,0.789486882,0.255542115,0.29716048,0.29349512,0.304840731,0.515819645,0.335345347,0.268118991,0.309975767,0.290757545,0.30464633,0.406439042,0.233171983,0.315353228,0.408624089,0.340481466,0.316266511,0.386169879,0.32736875,0.258768606,0.257756663,0.3052262,0.332006145,0.435162437,0.365949106,0.318160128,0.373587264,0.344548228,0.46372084,0.639328959,0.492626985,0.516155644,0.328173584,0.47885251,0.193739852,0.317539621,0.330052771,0.36948831,0.35066285,0.579995865,0.399921796,0.209380622,0.240017967,0.340638938,0.309705662,0.31409594,0.300935819,0.365343376,0.44772115,0.343454524,0.387641195,0.363346257,0.174736711,0.33567519,0.312659401,0.451797733,0.343017755,0.318469036,0.222424415,0.317728384,0.298344808,0.431256968,0.251249634,0.370417135,0.309585254,0.310693799,0.235116679,0.304824576,0.390646807,0.275237564,0.295009096,0.286527049,0.412874178,0.326707232,0.310716161,0.473305862,0.368621595,0.374196965
--

0.520212464,0.254120496,0.372807875,0.431377609,0.2600156,0.387312,0.384959986,0.452329475,0.332825052,0.316587048,0.182411674,0.328277249,0.2944449
 691,0.42084582,0.353224539,0.303284431,0.381806372,0.320238167,0.245393217,0.31404705,0.325329084,0.312643255,0.245315193,0.343812067,0.446682833,
 0.533026893,0.21696346,0.105137222,0.236626159,0.281688934,0.358261036,0.262692057,0.21467285,0.241165405,0.156935904,0.343568154,0.0333764245,0.128
 0602638,0.340952238,0.390795919,0.378554798,0.326093403,0.397604479,0.380095492,0.495653966,0.292442798,0.475406573,0.525101344,0.623632649,0.71144
 6171,0.451273525,0.329374737,0.358994797,0.471400525,0.61732038,0.49441992,0.304655493,0.389063363,0.454615054,0.438525692,0.367433481,0.494056784,
 0.333472559,0.372362571,0.392699112,0.338213251,0.300975575,0.522803314,0.482324549,0.350795545,0.442346793,0.266109359,0.239890621,0.310810063,0.3
 60417471,0.317426784,0.129300022,0.302607184,0.28292742,0.247240753,0.323392178,0.305864073,0.256099177,0.283930622,0.315417008,0.20684
 7767,0.37622329,0.215859485,0.225930499,0.365279255,0.263714293,0.229111134,0.342593559,0.294239578,0.304574206,0.40748353,0.402121436,0.317013251,
 0.345898769,0.353285511,0.268655983,0.162106343,0.25483951,0.243665885,0.37663385,0.302834228,0.2663203,0.424701131,0.198219542,0.183729474,0.34494
 8136,0.489702576,0.526164267,0.511342478,0.480381065,0.306894423,0.421207863,0.35573965,0.399568759,0.347752903,0.436764363,0.290069,0.377327509,0.4
 83312168,0.339741383,0.374534974,0.487655383,0.497221805,0.439307363,0.384145163,0.36056669,0.354467473,0.367969194,0.228251575,0.273495579,0.45894
 6911,0.289969889,0.272433541,0.286669306,0.339195455,0.260209789,0.325008326,0.308475854,0.236896734,0.196290367,0.182497697,0.316697852,0.25880869
 6,0.184980767,0.20695998,0.197093415,0.260191467,0.246112814,0.304266145,0.32196046,0.405155775,0.425827706,0.31352002,0.322927062,0.355600298,0.355
 870034,0.213647488,0.382098223,0.464321439,0.345239693,0.317193844,0.417735164,0.371340682,0.395620857,0.339605725,0.416061197,0.401313197,0.338077
 001,0.432557693,0.32369988,0.35305364,0.307946965,0.295061904,0.24003845,0.322644299,0.35740462,0.304501207,0.43129642,0.357361138,0.420390126,0.264
 602003,0.436676342,0.32178409,0.217910711,0.298795902,0.337382544,0.223737618,0.375263287,0.260169722,0.247067597,0.49800937,0.485434788,0.68510182
 9,0.489270734,0.378507521,0.459008458,0.539548983,0.474767548,0.750353963,0.674169295,0.59652994,0.415880889,0.660743754,0.511311956,0.355044352,0.2
 43899198,0.486310839,0.302088831,0.250745483,0.240921179,0.254201073,0.218477041,0.276738272,0.320672873,0.217656155,0.27399551,0.37164227,0.232199
 692,0.230040531,0.294263941,0.224486862,0.510644919,0.324054739,0.327181194,0.40930702,0.368523468,0.255028153,0.276702602,0.379388144,0.333305492,
 0.340668675,0.357685596,0.390758865,0.310998059,0.338435327,0.316410156,0.495411851,0.375357162,0.290222771,0.317825203,0.376225526,0.281537558,0.3
 44614613,0.445139146,0.416721109,0.378291786,0.201558311,0.20997874,0.21467247,0.319685048,0.241475259,0.228093823,0.214464179,0.211218121,0.323886
 529,0.217986792,0.200180945,0.333239151,0.207587583,0.207949409,0.37125272,0.415665821,0.434079081,0.205471039,0.370385303,0.497631881,0.405041626
 0.531976457,0.33158926,0.343221752,0.578412928,0.448473478,0.400776858,0.374275366,0.340540489,0.289995259,0.794124857,0.603626258,0.306584042,0.35
 6533748,0.40157358,0.347847306,0.481484065,0.338597805,0.3778898,0.574314799,0.272225696,0.294930333,0.270381952,0.351491055,0.440328684,0.39082145
 91954,0.499742457,0.238941299,0.344460404,0.309536085,0.280002229,0.343485072,0.254782878,0.324484125,0.341341995,0.260361005,0.199397583,0.4424384
 29,0.45018517,0.324686228,0.315864454,0.223227746,0.241508679,0.425635867,0.206772958,0.281361949,0.405851926,0.31352002,0.376867763,0.201107628,0.327660391,0.
 428632602,0.401317058,0.271073423,0.347674179,0.33776,0.272467445,0.295972325,0.301887129,0.228970269,0.30906594,0.35077752,0.272661389,0.265070621
 0.371354373,0.393424159,0.277072287,0.36473853,0.294907047,0.280356899,0.236871375,0.35608007,0.417963813,0.318670709,0.537826518,0.4223866093,0.3
 62412458,0.406941248,0.316771112,0.645346684,0.485126132,0.395791192,0.352932712,0.54031269,0.248670613,0.415548671,0.436957183,0.449223127,0.32956
 4148,0.412467593,0.542204866,0.43064597,0.347624129,0.502034173,0.3584889649,0.463551771,0.406215669,0.431911453,0.299969796,0.316510094,0.328361184
 0.265192825,0.329737961,0.337953055,0.391741544,0.27719852,0.429716267,0.343375004,0.523742859,0.46079928,0.344709182,0.358404342,0.389266477,0.300
 939398,0.353664023,0.430461778,0.473507896,0.350605407,0.398813478,0.469525532,0.422085799,0.313604815,0.320172487,0.302912151,0.285215607,0.358270
 134,0.214674871,0.236376153,0.217617524,0.227883131,0.184594667,0.174465414,0.193201621,0.22536126,0.204105355,0.376349966,0.325369195,0.320451007,
 0.266527838,0.263194982,0.208811326,0.386541541,0.231322319,0.287796131,0.241826215,0.259079207,0.374129946,0.374786372,0.127997914,0.467595025,0.4
 10424576,0.440432294,0.411427124,0.367620817,0.362104,0.334512985,0.376416532,0.356014325,0.340882073,0.38451012,0.366000583,0.359741023,0.32544718
 7

บรรณานุกรม

1. Giambra, L.M., *A laboratory method for investigating influences on switching attention to task-unrelated imagery and thought*. Consciousness and cognition, 1995. **4**(1): p. 1-21.
2. Smallwood, J. and J.W. Schooler, *The science of mind wandering: empirically navigating the stream of consciousness*. Annual review of psychology, 2015. **66**: p. 487-518.
3. Shaw, G. and L. Giambra, *Task-unrelated thoughts of college students diagnosed as hyperactive in childhood*. Developmental neuropsychology, 1993. **9**(1): p. 17-30.
4. McVay, J.C., M.J. Kane, and T.R. Kwapil, *Tracking the train of thought from the laboratory into everyday life: An experience-sampling study of mind wandering across controlled and ecological contexts*. Psychonomic bulletin & review, 2009. **16**(5): p. 857-863.
5. Jensen, C.G., et al., *General inattentiveness is a long-term reliable trait independently predictive of psychological health: Danish validation studies of the Mindful Attention Awareness Scale*. Psychological Assessment, 2016. **28**(5): p. e70.
6. Baer, R.A., et al., *Using self-report assessment methods to explore facets of mindfulness*. Assessment, 2006. **13**(1): p. 27-45.
7. Watts, F.N. and R. Sharrock, *Description and measurement of concentration problems in depressed patients*. Psychological Medicine, 1985. **15**(2): p. 317-326.
8. Hasenkamp, W. and L.W. Barsalou, *Effects of meditation experience on functional connectivity of distributed brain networks*. Frontiers in human neuroscience, 2012. **6**: p. 38.
9. Pelagatti, C., P. Binda, and M. Vannucci, *A closer look at the timecourse of mind wandering: pupillary responses and behaviour*. PLoS one, 2020. **15**(4): p. e0226792.
10. Kam, J.W., et al., *Mind wandering and motor control: off-task thinking disrupts*

- the online adjustment of behavior*. *Frontiers in human neuroscience*, 2012. **6**: p. 329.
11. Braboszcz, C. and A. Delorme, *Lost in thoughts: neural markers of low alertness during mind wandering*. *Neuroimage*, 2011. **54**(4): p. 3040-3047.
 12. Dhindsa, K., et al., *Individualized pattern recognition for detecting mind wandering from EEG during live lectures*. *PloS one*, 2019. **14**(9): p. e0222276.
 13. Robertson, I.H., et al., *Oops!': performance correlates of everyday attentional failures in traumatic brain injured and normal subjects*. *Neuropsychologia*, 1997. **35**(6): p. 747-758.
 14. Smallwood, J., M. McSpadden, and J.W. Schooler, *The lights are on but no one's home: Meta-awareness and the decoupling of attention when the mind wanders*. *Psychonomic bulletin & review*, 2007. **14**(3): p. 527-533.
 15. Hasenkamp, W., et al., *Mind wandering and attention during focused meditation: a fine-grained temporal analysis of fluctuating cognitive states*. *Neuroimage*, 2012. **59**(1): p. 750-760.
 16. Smallwood, J., et al., *Going AWOL in the brain: Mind wandering reduces cortical analysis of external events*. *Journal of cognitive neuroscience*, 2008. **20**(3): p. 458-469.
 17. Qin, J., C. Perdoni, and B. He, *Dissociation of subjectively reported and behaviorally indexed mind wandering by EEG rhythmic activity*. *PloS one*, 2011. **6**(9): p. e23124.
 18. Brandmeyer, T. and A. Delorme, *Reduced mind wandering in experienced meditators and associated EEG correlates*. *Experimental brain research*, 2018. **236**(9): p. 2519-2528.
 19. van Son, D., et al., *Frontal EEG theta/beta ratio during mind wandering episodes*. *Biological Psychology*, 2019. **140**: p. 19-27.
 20. van Son, D., et al., *Electroencephalography theta/beta ratio covaries with mind wandering and functional connectivity in the executive control network*. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2019. **1452**(1): p. 52.
 21. Lotte, F., et al., *A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces*. *Journal of neural engineering*, 2007. **4**(2): p. R1.

22. Anh, V.H., et al. *A real-time model based support vector machine for emotion recognition through EEG*. in *2012 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*. 2012. IEEE.
23. Kawashima, I. and H. Kumano, *Prediction of mind-wandering with electroencephalogram and non-linear regression modeling*. *Frontiers in human neuroscience*, 2017. **11**: p. 365.
24. Jin, C.Y., J.P. Borst, and M.K. van Vugt, *Predicting task-general mind-wandering with EEG*. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 2019. **19**(4): p. 1059-1073.
25. Jin, C.Y., J.P. Borst, and M.K. van Vugt, *Distinguishing vigilance decrement and low task demands from mind-wandering: A machine learning analysis of EEG*. *European journal of neuroscience*, 2020.
26. Hulley, S.B. and S.R. Cummings, *Designing Clinical Research, 4th ed.* 2013: Wolters Kluwer Health, Inc.
27. Bruns, A., *Fourier-, Hilbert- and wavelet-based signal analysis: are they really different approaches?* *Journal of neuroscience methods*, 2004. **137**(2): p. 321-332.
28. Cohen, M.X., *A better way to define and describe Morlet wavelets for time-frequency analysis*. *NeuroImage*, 2019. **199**: p. 81-86.
29. Cohen, M.X., *Analyzing neural time series data: theory and practice*. 2014: MIT press.
30. *Support Vector Machine (SVM)*. 2021; Available from: <https://dinhanhthi.com/support-vector-machine/>.
31. Bhattacharyya, S. *Support Vector Machine: Kernel Trick; Mercer's Theorem*. 2018; Available from: <https://towardsdatascience.com/understanding-support-vector-machine-part-2-kernel-trick-mercercs-theorem-e1e6848c6c4d>.
32. Hollemans, M., *How fast is my model?* 2018.
33. He, K. and J. Sun. *Convolutional neural networks at constrained time cost*. in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2015.

34. Viriyopase, A., *Catch mind wandering by deep learning*. 2021, in preparation.
35. Krigolson, O.E., et al., *Choosing MUSE: Validation of a low-cost, portable EEG system for ERP research*. *Frontiers in neuroscience*, 2017. **11**: p. 109.
36. Jurcak, V., D. Tsuzuki, and I. Dan, *10/20, 10/10, and 10/5 systems revisited: their validity as relative head-surface-based positioning systems*. *Neuroimage*, 2007. **34**(4): p. 1600-1611.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชุตินันทน์ รุ่งศิลป์
วัน เดือน ปี เกิด	29 เมษายน 2537
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลพัทลุง
วุฒิการศึกษา	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	68 ถ.รามเมศวร์ ต.คูหาสวรรค์ อ.เมือง จ.พัทลุง 93000
ผลงานตีพิมพ์	ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการตีพิมพ์เป็นบทความทางวิชาการในหัวข้อเรื่อง “Mind-wandering Detection Model with Electroencephalogram” โดย ชุตินันทน์ รุ่งศิลป์, เกริก ภริมย์โสภา, อรรถพล วิริโยภาส และ ก้องภพ อยู่เย็น ในงานประชุมวิชาการ “18th International Conference Cognition and Exploratory Learning in Digital Age 2021” ทางออนไลน์ ระหว่างวันที่ 13 – 15 ตุลาคม 2021
รางวัลที่ได้รับ	-