

Parittaisen synkronian hajontametriikoiden vertailu simuloidussa kriittisessä neuroverkossa

Ida Kanninen

24.04.2025

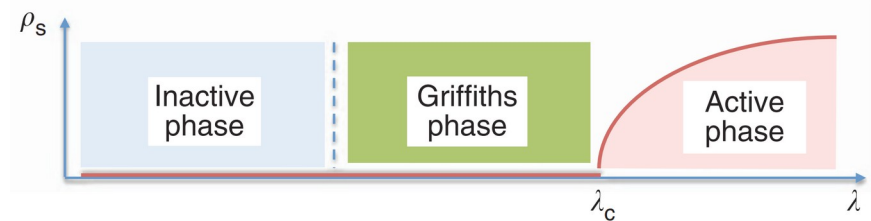
Ohjaaja: Jussi Häkkänen

Valvoja: Ville Turunen

Työn saa tallentaa ja julkistaa Aalto-yliopiston avoimilla verkkosivuilla. Muilta osin kaikki oikeudet pidätetään.

Tausta 1/2

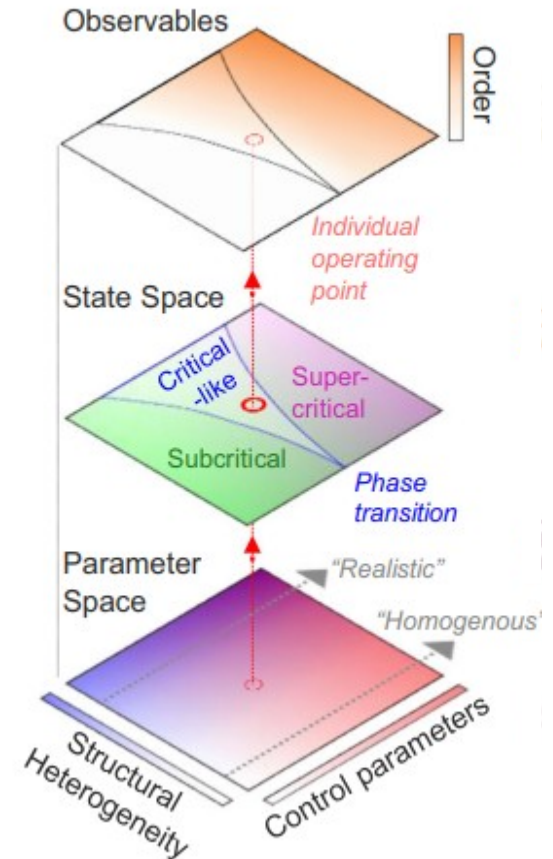
- Kriittisen aivodynamiikan **teoria**: aivot toimivat järjestyksen ja kaaoksen rajalla ns. **kriittisessä tilassa (Griffithsin faasi)**
- Faasi syntyy, kun heterogeenisen ja modulaarisen verkon “harvinaiset alueet” säilyttävät aktiivisuutta pitkään
- Aivot muodostavat tällaisen verkon
- “harvinaiset alueet” pitävät aivoja faasitransition rajalla
- Aivot ovat siten ärsykeherkät ja tehokkaat



Kuva 1. Havainnollistutus GP:stä. Moretti & Muñoz (2013).

Tausta 2/2

- Aivot operoivat faasin sisällä, faasin keskipisteessä mm. aivoalueiden välinen viestintä optimoitua
- Optimoidussa viestinnässä tärkeää vastaanottaa ja välittää vain relevantteja signaaleja
- Selektiivinen viestintä perustuu synkroniaan: vastaanottava alue herkin signaalille, jonka kanssa on koherentein
- Alueiden välisen synkronian vaihtelu mahdollistaa kohdennetun, selektiivisen viestinnän
- Distance-to-criticality tutkimus → pyrkii mittamaan aivojen etäisyyttä **kriittisimmästä** tilasta
- parittaisen synkronian hajonta yksi mahdollinen mittari



Kuva 2. Kriittisen aivodynamiikan peruseriaate. Fusca et al. (2023)

Tavoite

- Mitata aivoalueiden välisen synkronian vaihtelua erilaisilla metriikoilla (mm. Varianssi, entropia, Wassersteinin etäisyys)
- Tutkia, kuinka käytetyt metriikat ja keskiarvoinen synkronia riippuvat toisistaan
- Vertailla metriikoiden välisiä eroja esimerkiksi herkkyydessä tai kuvaavuudessa, kun kriittisyyden eri tilat tunnetaan

Rajaukset

- Synkroniadata on simuloitu hierarkkisella Kuramoto-mallilla
- Data simuloi 200 eri aivoalueen välistä synkroniaa subkriittisessä, kriittisessä ja superkriittisessä tilassa
- Datasta muodostettu symmetrinen synkroniamatriisi
- Synkronia mitattu käyttäen vaihelukkoarvoa (PLV)

$$PLV(x, y) = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e^{i(\theta_x(t) - \theta_y(t))} \right|$$

Missä $\theta_x(t)$ ja $\theta_y(t)$ ovat oskillaattoreiden x ja y vaiheet ajanhetkellä t .

Kuva 3. Vaihelukkoarvo (PLV). Formulointi pohjautuu esitystapaan
Cui, G., Li, X. & Touyama, H. 2023.

Menetelmät/työkalut

- Python (esim. NumPy, SciPy, Matplotlib): datan käsittely, laskenta, analyysit
- Synkroniadata simuloitu **hierarkkisella Kuramoto-mallilla**
 - Alueet sisältää useita oskillaattoreita, joilla oma luonnollinen taajuus, vaihe sekä kytkentä muihin
 - Eri simuloinneissa alueiden sisäisten oskillaattoreiden välistä kytkentäparametria K on säädetty

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j - \theta_i)$$

Missä θ_i on oskillaattorin i vaihe, ω_i sen luonnollinen taajuus, K kytkeytymisen voimakkuus ja N oskillaattorien lukumäärä.

Kuva 4. Kuramoto-mallin differentiaaliyhtälö yhdelle oskillaattorille. Formulointi pohjautuu esitystapaan Breakspear et al. (2010).

Datan kulku ja käsittely

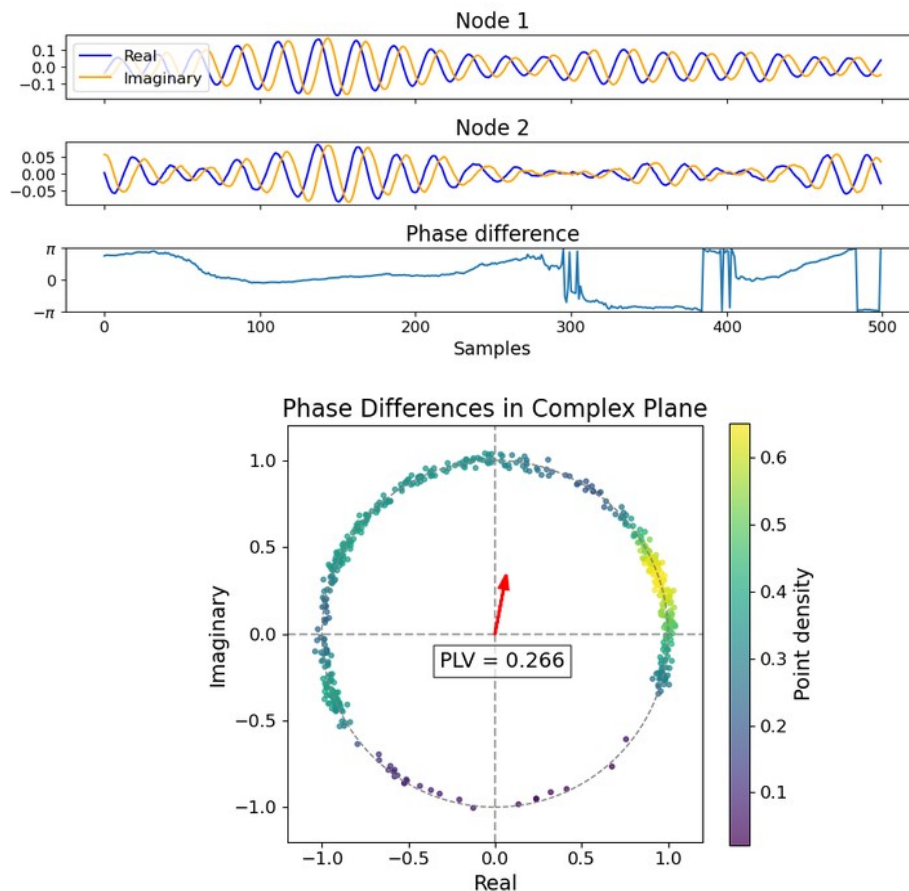
Simuloidaan data hierarkkisella Kuramoto-mallilla eri kytkentäparametrin K arvoilla

Saadaan kullekin aivoalueelle kompleksiarvoinen aikasarja

Lasketaan kullekin alueparille synkronia PLV:llä ja muodostetaan matriisi

Lasketaan eri hajontamittareita PLV-matriisin arvojen jakaumasta

Verrataan hajontamittareiden arvoja parametrin K ja PLV:n keskiarvon funktiona



Kuva 5. Aikasarja ja vaihe-erot kompleksitasossa.

Tietolähteet/ aineistot

- Moretti, P. & Muñoz, M. 2013. *Griffiths phases and the stretching of criticality in brain network*. Nature Communications, 4, 2521.
- Fusca, M., Siebenhühner, F., Wang, S.H. et al. 2023. *Brain criticality predicts individual levels of inter-areal synchronization in human electrophysiological data*. Nature Communications, 14.
- Fries, P. 2015. *Rhythms for Cognition: Communication through Coherence*. Neuron.
- Cui, G., Li, X. & Touyama, H. 2023. *Emotion recognition based on group phase locking value using convolutional neural network*. Scientific Reports, 13, 3769.
- Beggs, J.M. 2022. *The Cortex and the Critical Point: Understanding the Power of Emergence*. The MIT Press, England.
- Breakspear, M., Heitmann, S., & Daffertshofer, A. (2010). *Generative models of cortical oscillations: Neurobiological implications of the Kuramoto model*. Frontiers in Human Neuroscience, 4, 190.

Aikataulu

- Aiheeseen tutustuminen: maaliskuu 2025
- Aihe-esittely: 24.4.2025
- Mallinnus ja analysointi: huhti–toukokuu 2025
- Kirjoittaminen: touko–kesäkuu 2025
- Työn valmistuminen: kesäkuun 2025 loppuun mennessä