

NeuroML: Dekodierung und Steuerung neuronaler Kulturen

Forschungspipeline der Dissertation für einen lernenden Regler im geschlossenen Regelkreis zwischen Neuronenkultur und Computer.

Zeitraum: 08/2026 – heute

Promotion an der Polytechnischen Peter-der-Große-Universität St. Petersburg, 1.2.1 Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen, seit 09/2026

Rolle: Autor der Forschung und des Codes

AUSGANGSLAGE

Eine Neuronenkultur auf einem Multielektroden-Array wird über einen Computer stimuliert und abgeleitet. In üblichen Aufbauten entscheidet ein Schwellenwertdetektor, wann stimuliert wird. Untersucht wird, ob ein lernender Regler diesen Detektor ersetzen kann, ohne das Zeitbudget des Regelkreises von 50 ms zu überschreiten.

LÖSUNG

- Eine Adapterschicht überführt jede Datenquelle in ein einheitliches Aufzeichnungsformat. Offene Datensätze, der Simulator und später Labordaten werden über einen Adapter und eine Konfiguration angebunden.
- 26 Merkmalsextraktoren, teils offline, teils online. Für jedes Online-Merkmal ist die Latenz gemessen.
- Simulator mit bekannter Ground Truth, damit Decoder vor dem Einsatz an echten Kulturen geprüft werden können.
- Jede Zahl erhält ein Konfidenzintervall, das Kriterium wird vor der Messung festgelegt. Bei weniger als fünf Kulturen werden keine Schlüsse gezogen.
- Reproduzierbarkeit über explizite Seeds und Konfigurationen, jeder Lauf in Docker.

ERGEBNISSE

- Spike-Rekonstruktion aus Calcium-Imaging auf echten Daten (CASCADE): Korrelation 0,549 [0,517; 0,610], klassisches Verfahren 0,067.
- Dekodierung des Reizes aus der Antwort im Simulator: F1 0,754 [0,703; 0,805].
- Der gesamte Regelkreis hält das Budget von 50 ms bei bis zu 128 Kanälen ein.
- Pong mit einem Kulturmodell (12 Kulturen, je 3000 Schritte): 21,2 verfehlte Bälle pro 1000 ohne Plastizität, 32,1 bei unbeweglichem Schläger. Mit STDP-Plastizität wurde das Spiel bei 11 von 12 Kulturen schlechter.
- Burst-Unterdrückung in Abhängigkeit von der Stimulationsfrequenz nach Wagenaar et al. (2005) reproduziert. Die verbleibende Abweichung ist auf eine prüfbare Hypothese zur Geometrie des Kulturmodells eingegrenzt.
- Über 700 Tests. Negative Ergebnisse sind im selben Umfang dokumentiert wie positive.

TECHNOLOGIEN

Python · NumPy · SciPy · scikit-learn · Brian2 · Spiking Neural Networks · Closed-Loop-Steuerung · Docker