

ELTE Fizika Doktori Iskola II. féléves beszámoló

Fiam Regina Nóra FPYM01

Junius 2026

1. Bevezetés - lásd első félév

A jelenlegi MI-modellek – mint a transzformerek vagy a konvolúciós neurális hálózatok (CNN) – sűrű matematikai műveletekre épülnek, ahol az adatok minden neuronon átáramlanak, ami rendkívüli számítási kapacitást igényel. Ezzel szemben az agy ihlette architektúrák, például a tüskékódolású neurális hálózatok (SNN), az idegrendszer eseményvezérelt működését másolják: csak akkor „tüzelnek”, ha az információ elér egy bizonyos küszöbértéket. Ez ritkább és energiahatékonyabb adatfeldolgozást tesz lehetővé. Míg a klasszikus modellek statikus súlyokkal dolgoznak, az egyszerű struktúrák gyakran alkalmaznak plaszticitást, ahol a kapcsolatok az időbeli dinamika alapján, lokálisan alakulnak. Ez képessé teszi a modelleket a valódi időbeliség kezelésére és a folyamatos tanulásra anélkül, hogy a hosszú kontextusokban elveszne a korábban megszerzett információ.

Kutatásaim két fő területre összpontosítanak: a biológiai jellegű problémákra és a rádiós telekommunikációra. Közös pontjuk olyan gépi tanulási architektúrák fejlesztése, amelyek valamilyen módon az agyi információfeldolgozás mintáit követik. A telekommunikációban az időbeli adatok hatalmas mennyisége miatt kulcsfontosságú az egyszerű modellek energiahatékonyasága, hiszen a hálózati eszközök száma és az adatforgalom exponenciálisan növekszik.

A biológiai adatoknál szintén látható, hogy a transzformerek figyelem-mechanizmusa – mivel minden adatpontot egyszerre vet össze – óriási memóriaigényt generál. Hatékonyabb megoldást jelentenek az állapottér-modellek (SSM), amelyek az emberi munkamemóriához hasonlóan egy belső „állapotot” frissítenek ahelyett, hogy minden lépésben hatalmas mátrixokat számolnának újra. Az SSM lineáris skálázódás mellett képes kezelni akár végtelenül hosszú adatsorokat is. A módszer előnye, hogy a rögzített matematikai rétegek helyett differenciálegyenletekkel leírható, folytonos rendszert használ, amely természetesebben kezeli az időbeli összefüggéseket.

2. Az aktuális félévben elvégzett kutatások ismertetése

A PhD-képzésem második félévében folytattam a génexpressziós adatokon perturbációk predikálását gépi tanulással. Az ARC Institute által meghirdetett *Virtual Cell Challenge* versenyen Dudás Bencével és Kiss Csabával egy csapatban 10. helyezést értünk el. Ezen felül pedig azt a modellt, amelyet a versenyben alkalmaztunk, továbbfejlesztettük, és a preprintet beküldtük a 2026-os NeurIPS konferenciára conference paperként. A fejlesztett módszerünk a REGINA nevet kapta: Regularized Encoder with Latent Cycle-GAN for In-vitro Neural Cell Perturbation Approximation. Ez egy két fázisból álló architektúra, amely azt a problémát hivatott kezelni, hogy a single-cell RNA-seq adatok természetüknél fogva párosíthatatlanok. Ez azt jelenti, hogy egy sejtet nem tudunk megvizsgálni perturbáció előtt és után, hiszen a vizsgálat maga megöli a sejtet. Az első fázisban a modell azt szeretné megtanulni, hogy a génexpressziós mátrixokat egy variációs autoencoderbe küldve azoknak milyen a látens térbeli reprezentációjuk. Ezeket regularizáljuk is, hiszen később ebben a látens térben dolgozik a modell. A második fázis fő alkalmazott architektúrája a CycleGAN, amely az adatok párosíthatatlan mivoltát hivatott kezelni. Ezen felül a modell képes generalizálni még nem látott perturbációkra is egy prompting mechanizmusnak nevezett módszer segítségével.

Az Ericssonnal partnerségben, a KDP program keretén belül folytattam a csatornabecslési módszerek SSM-alapú fejlesztését, különös tekintettel a jövőbeli neuromorfikus, tüskealapú hálózatokra való konverzió lehetőségére. A csatornabecslés kiemelkedően fontos probléma a vezeték nélküli kommunikációban, mivel ennek segítségével lehet becsülni, hogy a fizikai csatorna hogyan torzította az elküldött jelet. A vevőoldalon mért jel ugyanis a csatorna hatására módosul, továbbá zajjal is terhelődik. Ugyanakkor nem ismerhetjük minden idő- vagy frekvenciapontban egyszerre az elküldött és a fogadott jelet, hiszen ebben az esetben nem maradna elegendő erőforrás a hasznos adatok továbbítására. Éppen ezért alkalmaznak úgynevezett pilotszimbólumokat: ezek olyan előre ismert jelek, amelyeknél mind a küldött, mind a fogadott érték ismert. Ezek alapján becslést lehet adni a fizikai csatorna állapotára a pilotpozíciókban, majd ezt a becslést interpolálni lehet a köztes, adatot hordozó elemekre. Kutatásom során olyan alternatív csatornabecslési módszereket vizsgálok, amelyek hosszabb temporális kontextus felhasználásával lehetővé tehetik a pilotszimbólumok ritkább elhelyezését. Ezáltal sávszélesség szabadítható fel a hasznos adatok továbbítására. Ehhez különböző neurális SSM-modelleket teszteltünk, például S4-, S5- és Mamba-alapú architektúrákat, mivel ezek kompakt, fix méretű rejtett állapoton keresztül képesek modellezni az időben változó csatornadinamikát. Ez azért különösen fontos, mert az SSM-modellek állapottermbeli, rekurrens frissítési mechanizmusa jól megfeleltethető a tüskés neurális hálózatok dinamikájának, ahol a rejtett állapot szerepét a neuronok membránpotenciálja és időbeli integrációja töltheti be. Az ilyen tüskealapú modellek természetes módon illeszkednek a neuromorfikus hardverek működéséhez, amelyek rendkívül energiahatékony számítási platformot kínálnak.

3. Tanulmányi tevékenység az aktuális félévben

- Haladó gépi tanulás labor (FIZ/3/093) – 6 kredit - jeles
- Mesterséges intelligencia technikák a robotikában (FIZ/3/101) – 6 kredit - jeles
- Irányított kutatómunka (FIZ/S1-S4/K18) – 18 kredit

4. Konferenciák az aktuális félévben

- **IV. Felsőoktatás Felsőfokon Konferencia:** Bolognai Erasmus ösztöndijamról beszámoló előadás
- **XXX. Bolyai Konferencia:** Előadás tartása
- **HUN-REN AI Symposium:** poszter
- **HUN-REN - Wigner 16th GPU Day:** Előadás tartása

5. Szakmai közéleti tevékenység

- Doktorandusz társaimmal Dudás Bence ötlete alapján elindítottuk a „Kaggle Club”-ot machine learning versenyek közös megoldására. Elsőként a *Virtual Cell Challenge*-en dolgoztunk, ahol gének perturbációinak sejtállapotokra gyakorolt hatásait akartuk megjósolni. Később ebből nőtt ki a REGINA projekt melyből poszter és konferencia előadás is született, valamint a cikkünk beküldtük.

6. Elismerések

Kooperatív Doktori Program (KDP) ösztöndíj az Ericssonnal partnerségben.