

1. Információ elméleti alapok és idegrendszeri kód

Diszkrét állapotú, diszkrét idejű rendszerek dinamikáját leíró elméleti keretünket továbbfejlesztettük., ezzel egyidejűleg a véges Galois testek feletti Lie algebrák új családját fedeztük fel, illetve az ilyen Boole-Lie algebrák szerkezetét is meghatároztuk. A kifejlesztett módszer segítségével párhuzam vonható a folytonos- és diszkrét dinamikai rendszereket leíró differenciál-formalizmusok között. Eredményeinket iteratív dinamikák jellemzésére alkalmaztuk.

A neuronhálózatok aktivitásának információelméleti módszerekkel vizsgálva levezettük, hogy milyen feltételeknek szükséges teljesülnie ahhoz, hogy egy biológiailag reális rendszer a Bayes-típusú dekódolást megközelítő optimális dekódolást valósítson meg. Azt találtuk, hogy az egyes stimulusokhoz tartozó neurális válasz-klaszterek akár nagy mértékben is átfedőek lehetnek, valamint, hogy a szinaptikus súlyok Hebb-típusú tanulással való módosulása nem vezet megfelelő eredményre.

Hasonló vizsgálatok során megmutattuk, hogy a neuronok populációs válaszainak kísérleti körülmények között leírt konstans metrikus tartalma általában következik az egyedi sejtek válaszait jellemző paraméterek homogenitásából, az egyes agyrégiók közötti metrikus tartalom-különbségek pedig ezen paraméterek agyrégiók közötti heterogenitásával magyarázhatóak. Azt is kimutattuk, hogy ez a mechanizmus nem elegendő a kísérleti eredmények magyarázatához, és valószínűsítjük, hogy az adatoknak az egyszerű modell által jóslattól való időnkénti eltérését a sejtek közötti zaj- és jel-korrelációk magyarázzák.

Megvizsgáltuk az ioncsatorna zajok hatását a sejtek tüzelési mintázataira, Hodgkin-Huxley modellkeretben. Megmutattuk, hogy a sejt rezonátorként viselkedik. Az ionáramok fluktuációit Hurst kitevőkkel jellemeztük. Az ioncsatornazaj szórásának függvényében a ionáramok fluktuációinak természete változik, alacsony zaj esetén antiperzisztens, a zaj indukált spontán tüzelési küszöb közelében Markovi jellegű, fölötté újra antiperzisztens jellegű. Eredményeink azt is sejtetik, hogy az irodalomban fellelhető, a neuronokat gerjeszthetőségük alapján két csoportra való osztályozása valószínűleg nem olyan éles, és a zaj a két csoport közti határokat elmossa.

2. Új mérés elemzési eljárások és algoritmusokat

Az adatbányászatban többféle módszert használhatunk arra, hogy eldöntsük mely adatok tartoznak egy csoportba. Eképpen tudunk struktúrát felismerni ismeretlen, adott esetben nagy adathalmazok esetén. A korreláción alapuló távolságvizsgálat hátránya, hogy lineáris kapcsolatot tételez fel a jelenségek között. A korreláción alapuló módszerekkel ellentétben a kölcsönös információ (illetve információs metrikán) alapuló adatstrukturálás teljesen általános kapcsolatok kimutatására is alkalmas, viszont ahhoz, hogy a strukturálást megbízhatóan el is tudjuk végezni, elvileg végtelen adathalmazzal kellene dolgoznunk. A gyakorlatban ezért figyelembe kell venni a minta véges voltát, és a kölcsönös entrópia meghatározásánál meg kell adni a megfelelő korrekciós tagokat is. A minta méretének inverz hatványai szerint sorfejtve meghatároztuk a korrekciós tagokat, amelyek pontosabbá teszik az együttes entrópiabecslését, ezáltal a kölcsönös információ becslését, ezzel pedig az adatstrukturálást. A módszer aránylag kis minták esetén is jó irányba módosítja a kölcsönös entrópia becslését a relatív frekvenciákból kiindulva.

A vizuális információ feldolgozása és manipulatív képességek ötvözése fontos a neurális alapú robotok tervezésében. Hogy mélyrehatóbban megértsük az információ feldolgozás szerkezeti alapjait, illetve a szerkezetben rejlő szerveződési törvényszerűségeket, új adatbányászati módszereket fejlesztettünk ki. Az emberszabásúak agykérgi anatómiájának adatai publikus adatbázisban férhetők hozzá: www.cocomac.org. Mivel a neuroanatómiai adatok természetes módon irányított gráfot definiálnak, gráfelméleti módszerekkel elemeztük a meglévő kísérleti adatokat. Kitérített részstruktúrákat találtunk, melyek azonosításával ismert funkcióikra új fény vetült. Az irodalomban ismert centralitás-mértékek bizonyos csomópontok fontosságára utalnak. Az "edge-betweenness"-t leszámítva élfontosságról sokkal kevesebbet tud az irodalom, nekünk sikerült olyan élhez rendelhető mértéket definiálnunk, mely mérték az él funkciójáról ad információt, miközben a hálózat teljes szerkezetét figyelembe veszi. Az újonnan bevezetett módszereket felhasználva a látási és a tapintási ingereket feldolgozó pályarendszerekben azonosítottuk a két különböző modalitású információ integrációjáért felelős területeket és körvonaloztuk azok szerepét a multimodális információ feldolgozásban. feltártuk a vakok Braille-

olvasásban kulcsfontosságú szerepet betöltő pályarendszereket, illetve részstruktúrákat. A módszerünk és eredményeink alapvető fontosságú információt szolgáltatnak a neuro-robotikának, mert egy már működő, multimodális ingereket valós időben feldolgozni képes rendszerbe adnak betekintést.

Új eljárást illetve matematikai algoritmust dolgoztunk ki multimikroelektrodás mérések elemzésére. Ezek az elektrodarendszerek sok pontban mérik az elektromos potenciált az agykéregben. Az idegsejtek működéséről azonban lényegesen több információhoz juthatunk, ha az idegsejtek membránján folyó áramokat ismernénk, ez azonban a Poisson-egyenlet inverz feladatának megoldását kívánja meg, ami speciális kényszerfeltételek nélkül nem megoldható. Ezért olyan kényszerfeltételrendszert dolgoztunk ki, ami egyrészt illeszkedik az idegsejtek élettani és morfológiai tulajdonságaihoz másrészt biztosítja az inverz feladat egyértelmű megoldhatóságát. Megmutattuk, hogy módszerünkkel az idegsejtek membránáramai, amiket eddig csak intracelluláris mérésekkel lehetett mérni, jól meghatározhatóak extracelluláris mérések alapján és megbecsülhető a sejtek távolsága az elektródától. A módszer továbbfejlesztve alkalmas lehet az idegsejtek bemeneti áramainak meghatározására.

3. Hálózat szerkezet és funkció összefüggése

A fizikai rendszereket lehet és igen népszerű vizsgálni napjainkban gráfelméleti módszerekkel. Bár a matematikai fogalmak régen léteznek, a szükséges adathalmaz és feldolgozási kapacitás csak a XX. század végére vált elérhetővé. A hálózatok szerkezete és funkciói közötti összefüggés kérdése természetes módon adódik a biológiai rendszerek körében. A kifejlesztett matematikai módszereket nem csak agyi struktúrák, de egyéb biológiai illetve társadalmi hálózat esetében is alkalmaztuk. Vizsgálataink a csoportos viselkedés szabályai és a kapcsolatrendszer szerkezetének kölcsönhatását célozták.

A "kisebbségi játék" (minority game) nevű játékelméleti modellt kiterjesztettük hierarchikus rendszerekre. Szimulációinkkal a rendszer hatékonyságát vizsgáltuk a globális és a lokális érdekek erőségének függvényében. Meghatároztuk azokat a lokális paramétereket, melyeknél a rendszer globális hatékonysága maximális.

A társadalmi – ill. Társas - hálózatok szerkezetének kialakulását a növekvő hálózatok egy matematikai modelljében elemeztük. Felállítottuk az alakuló szociológiai hálózatok általános, tulajdonság alapú matematikai modelljét és elkészítettük annak számítógépes implementációját. Egzakt és közelítő analitikus számításokkal meghatároztuk a rendszer, mint nem összefüggő, egyszerű, irányítatlan gráf csomópontjainak éleloszlását és a kialakuló rész-gráfok méretének eloszlását. A közelítő analitikus számításokat numerikus szimulációkkal támasztottuk alá. A paraméterek függvényében, generátor függvény technikát alkalmazva végtelen rendű fázisátalakulást találtuk, és kiszámítottuk a hozzá tartozó kritikus paramétereket. Megmutattuk, hogy a csomópontok éleloszlása exponenciális eloszlást mutat. Megmutattuk továbbá, hogy a kritikus pontban a rész-gráfok méreteloszlása hatvány függvényt követ, míg egyéb tartományokban exponenciális eloszlást. A közelítő analitikus számításokat numerikus szimulációkkal támasztottuk alá.

4. Hangforrás lokalizáció neurobiológiai implementációjának és az agytörzsi neurális kód vizsgálata modellezési eszközökkel

A biológiai rendszerek rendkívüli hatékonysággal képesek a hangforrások lokalizálására, ami azért is figyelemre méltó, mert ezt teljesítményt a hang frekvenciákhoz képest lassú számítási elemek felhasználásával éri el. Megvizsgáltuk a nagy frekvenciákú hangok térbeli forrásának meghatározását agytörzsi és középagyi szinten.

Megépítettük a laterális superior olive (LSO) agytörzsi hallórendszeri mag neuronjainak matematikai modelljét és ezek viselkedését, dinamikai és kódolási tulajdonságait vizsgáltuk. Az élettani mérések szerint az LSO neuronok bemenete olyan kimenetté transzformálódik, ami a két fül között mérhető hang intenzitás különbséget (interaurális intenzitás differencia, IID) tüzelési frekvenciájával kódolja. Kísérletes farmakológiai munkák hiperpolarizáció aktiválta **h**-típusú és **inwardly rectifying outward KIR'** áramokat találtak az LSO sejtek membránján.

Megállapítottuk, hogy a **h** áram szélesíti, míg a **KIR** áram szűkíti a dinamikus tartomány szélességét. Megvizsgáltuk továbbá, hogy e két hiperpolarizáció aktiválta áram hogyan befolyásolja a frekvencia-injektált áram függvény monotonitását, az első tüzelés latenciáját és a küszöb alatti membrán-oszcillációt. Részletes fázistér

bifurkációs analízist végeztünk a modelleken és megállapítottuk, hogy az *in vivo* kísérletekben észlelt nem-monoton IID-tüzelési frekvencia függvény jól korrelál a szimulációs jóslatainkkal. A két-rekeszes modell szimulációk azt sugallják, hogy a **h** és **KIR** konduktanciák különböző neuronális szegmenseken helyezkednek el, mert ez a térbeli konfiguráció jól megmagyaráz *in vivo* fiziológiai eredményeket. Ezekről a vizsgálatokról azt reméljük, hogy hangforráslokalizációra alkalmas algoritmusokat, sőt hardveres implementáció építésére alkalmas stratégiákat tanulhatunk.

5. Oszcillációs komputáció a hippocampusban

Kidolgoztuk a tájékozódáshoz szükséges, ennek referenciajeleként viselkedő hippocampális theta oszcilláció anatómiai és élettani adatokkal alátámasztott modelljét. Megvizsgáltuk, hogy a theta oszcilláció létrejöttében milyen szerepet játszanak a különféle hippocampális interneuron típusok, illetve, hogy külső theta generátorok hogyan befolyásolják a hippocampális theta ritmust. Szintetikus EEG számítással és a sejttypusok populáció szintű analízisével a kísérletekkel egyező tüzelési fázis eloszlást találtunk. Csoportunk megalkotta a hippocampusban található, a téri emlékezetben fontos un. helysejtek kettős frekvencia-időzítés kódjának - a szakirodalomban ezidáig egyetlen - olyan biológiailag reális modelljét, amely a sejtek aktivitás mintázatainak fázis-precesszióként ismert tulajdonságát a kísérletekkel összhangban magyarázni képes. A hippocampusz egy absztrakt modelljében megmutattuk, hogy ezen agyterület kétféle feltételezett funkciója, a - főként állatkísérletekben bizonyított - kognitív térkép tárolása magasszintű tájékozódási műveletek végrehajtásához és az embereknél ismert működés, az epizódikus memórianyomok tárolása, nem mond ellent egymásnak: a két funkciót képes lehet ugyanaz az a neuronhálózat egyidőben ellátni.

Hippocampális modellünkben megmutattuk, hogy a tájékozódás során fontos szerepet játszó hely sejtek kísérletileg megfigyelt fázis és frekvencia kódját egységes keretbe lehet foglalni, ha feltesszük, hogy a hippocampusz a többi agyterülettől idő szerint derivált, sebességfüggő bemeneteket kap. Majd olyan neurális hálózatot készítettünk, amely tisztán előrecsatolt kapcsolatokkal képes létrehozni az időderiváltat, anélkül hogy feltételezné az ingerületátvitel nagyfokú időbeli pontosságát, illetve a specifikus

egy-sejt-az-egy-sejthez típusú kapcsolatokat. Ez egy robusztus algoritmus, amely sok egyedi, de viszonylag pontatlan elem együttműködésén alapul, ezért kitűnően alkalmazható zajos környezetben.

Hippokampális helysejtek biofizikai modelljének kidolgozásával egy olyan mechanizmust mutattunk meg, mely a szenzoros bemenetek zajossága mellett is képes párhuzamos fázis és ráta kódot generálni. Megmutattuk továbbá azt, hogy az aktív csatornákkal ellátott dendritikus kompartment fázis-válasz görbéje ideális az inherens zaj kikuszobolesere. Kétrekeszes, aktív áramokat tartalmazó hippokampális piramissejt-modellen a perzisztens aktivitás kialakulását modelleztük. Az idegsejtek tranziens ingerlés hatására létrejövő tartósan megnövekedett tüzelési aktivitása modellünkben a dendritek által megvalósított hosszútávú integráció eredményeképpen jön létre. Ingerlés hatására a dendritikus akciós potenciáloknak a hippokampális theta oszcillációhoz viszonyított fázisa megváltozik, a szomatikus tüzelési frekvencia megnő. A stimulust követő perzisztens aktivitás a nyugalmi fázisba való lassú visszatérés során valósul meg. Mivel a tüzelési frekvencia a dendritikus fázis függvénye, a modell időben változó frekvenciájú perzisztens tüzelési aktivitást valósít meg, amelyet az eddig javasolt egysejt-modellek nem voltak képesek reprodukálni. A kidolgozott mechanizmus képessé tehető arra, hogy a 2 dimenziós környezetben jelentkező pozíció-azonosítási problémákat is kezelni tudja a szimulált ágens.

6. KIV modell: felderítés és navigáció

Részt vettünk a kortiko-hippokampális kör, kaotikus dinamikán alapuló neuronhálózati modelljének felépítésében. Nemzetközi együttműködés keretében, a híres Freeman-féle kaotikus dinamikára vezető neurálodinamikai modellkeretbe, a hippokampális információfeldolgozásról szerzett ismeretekből kiindulva megerősítéses tanulási szabályt építettünk be. A tanulási szabály implementációjához feltétlenül szükség volt egy, a hippokampális theta oszcillációval analóg folyamat beépítésére, amely a periódikusan váltja a rendszer input vezérelt illetve autonóm dinamikai üzemmódját. A létrehozott hippokampusz modellt a KIV modellrendszerbe integráltuk. A KIV modell a K modellek negyedik generációját és hierarchia szintjét képviseli, melyben az elsődleges szenzoros kéreg és a hippokampális formáció kölcsönhatását

lehet vizsgálni. A modellünkben a hippocampusz integrálja a test térbeli irányáról és mozgásáról rendelkezésre álló proprioceptív információkat míg a lokális szenzoros ingerek alapján az agykéreg határozza meg a lehetséges pozíciókat. E két önálló rendszer kölcsönhatásából alakul ki a térbeli tájékozódás. A szimulált környezetben, mozgó ágens, illetve a valódi környezetben, pl T labirintusban mozgó aibo kutya felderítő fázisában megerősítéses tanulással alakítja ki a környezet reprezentációját melyet aztán felhasznál a megfelelő cselekvés kiválasztásánál. Mind a szimulált környezetben mozgó szimulált ágens, mind a valódi környezetben mozgó valódi robot esetében demonstráltuk modellünk hatékonyságát a felderítés és a navigáció terén.

7. Robotfutball-csapat építése

Viselkedési formák leírására alkalmas nyelvet terveztünk. Ebben a nyelvben probléma specifikus primitív műveletek elő- és utófeltételes leírásából kiindulva, meghatározott konstrukciókkal hierarchikusan építhetünk fel bonyolultabb viselkedési mintákat. Megadtuk a robotfutball primitív műveleteit, ezekből bonyolultabb, magasabb szintű műveleteket építettünk fel.

A teljes robotfutball közösség számára edző programot készítettünk , amelynek segítségével adott játéksituációk állíthatók be, elemezhetők és így a játékosok hatékonyan tesztelhetők és taníthatók. A program bővíthető, új játéksituációk XML formátumban adhatók meg, amelyek grafikus felületen is létrehozhatók. A közösségben népszerű (zárt forráskódú) TeamAssistant program játéksituációkat leíró nyelvét saját edzőnk nyelvére lefordító programot készítettünk. Ezen kívül az edző program képes felismerni játék során történt adott eseményeket, mint például kapuralövés, ellentámadás, és sikeresen használtuk az ellenfelek taktikájának felismerésére

A pályázati munka folytatása

Az OTKA támogatás keretében végzett munka a neuro-robotika területén kezdeti sikereket már hozott, de természetesen még igen sok feladat vár megoldásra. Az eddigi

munkánk eredményeinek elismeréseképpen meghívást kaptunk egy 10 európai egyetemből, kutatóintézetből illetve vállalatból álló pályázati konzorciumba. Az Európai Unió FP6 pályázati keretprogramjában kiírt Information Society Technology (IST) pályázatra, neuro-robotika témában benyújtott tervezetünket elfogadták. A **ICEA Integrating Cognition Emotion and Autonomy** című IST-4-027819-IP számú pályázat során az RMKI 4 évalatt várhatóan 204000 EUR támogatást fog kapni. A 2006 január 1-én elindult munka célja egy olyan önálló robot létrehozása, amely valós körülmények között, a valódi élőlények rugalmasságával és alkalmazkodó képességével képes megoldani az „életben maradáshoz” szükséges feladatokat, azaz képes önállóan navigálni, energiaforrást felderíteni és használni, veszélyeket elkerülni stb.

A feladat megoldásához a mintát az evolúciósan rendkívül sikeres, élettanilag pedig igen sokat tanulmányozott rágcsálók agyának szerkezete illetve az ott megjelenő döntéshozatali mechanizmusok nyújtják. Az RMKI feladata a térbeli tájékozódásért felelős agyterület, a hippocampusz modelljének kidolgozása és az általános modellkeretbe integrálása..