

A víz alatti mozgás mechanikája és idegi szabályozása (OTKA PD 72368)

Kutatási beszámoló
Várkonyi Péter

A kutatási projektben víz alatti mozgással kapcsolatos neurológiai és mechanikai kérdések vizsgálatát tűztem ki célul. Fő motivációm az volt, hogy a vizes közegben mozgó mesterséges szerkezetek robusztussága és hatékonysága rendszerint alulmúlja a hasonló mozgást végző biológiai rendszereket. Emiatt különösen hasznos az élő szervezetek mozgásának leírása, a működésüket biztosító fizikai törvényszerűségek megértése. Gyakran cél az is, hogy az élő szervezetek által inspirált működési módok később mérnöki alkotásokban is alkalmazhatóak legyenek. A felvázolt problémák megjelennek egyes egyedek mozgásával kapcsolatban is, valamint sok egyedből álló (állat-, baktérium- vagy robot-) csoportok kollektív viselkedése kapcsán. Az OTKA kutatás mindkét témakörre kiterjed.

1. Egyedi mozgás

Az egyedi mozgás mechanikájának és neurális szabályozásának megértéséhez a kutatók többnyire olyan modell állatfajokat használnak, amelyek egyszerűsége, szívóssága vagy könnyű hozzáférhetősége jó lehetőségeket biztosít a kísérletezéshez, és az így összegyűlt nagy mennyiségű adat azután kedvező feltételeket biztosít a működés modellezésére. Egy ilyen állatcsoport az állkapocs nélküli gerincesek közé tartozó *ingolák*, melyek a gerincesek közül az egyik legegyszerűbb testfelépítéssel rendelkeznek. Megnyúlt testükkel kígyózó mozgást végeznek, melyet a gerincükben található Központi Ritmusgeneráló (CPG) neuroncsoport által előállított haladóhullám irányít. Egy speciálisan felépített in vitro kísérleti módszerrel korábban sikerült azonosítani a CPG-t felépítő fontosabb neurontípusokat, és a közöttük lévő kapcsolatokat. Ennek segítségével többen készítettek számítógépes modelleket a CPG-ről, ám minél nagyobb részletességűek ezek a modellek, a viselkedésük annál kevésbé felel meg a valódi állatokból kapott mérési eredményeknek. A modellek fejlesztésének érdekében az alábbi három vizsgálatot végeztem:

1.1 a mozgás hullámhosszának stabilitása

Az ingolák ritmusgeneráló hálózatának az irodalomban javasolt egyszerűsített modelljét vizsgáltam fázis-oszcillátorokra való redukció, és a ritmikus dinamika egy perióduson keresztül való kiátlagolása révén. A modell szabad paramétereinek szisztematikus vizsgálatával megállapítottam, hogy az igazi állatokra jellemző stabil hullámhosszt csak megfelelő paraméterhangolás esetén tudja reprodukálni, tehát a modell által képviselt ritmusgenerálási mechanizmus nem kellően robusztus, a modellből lényeges elemek hiányoznak. Az eredményt [1]-ben publikáltam.

1.2 alternatív ritmusgeneráló mechanizmusok

A ritmusgeneráló hálózat egy másik, sokkal részletesebb (S. Grillner kutatócsoportja által javasolt) modelljét az egymáshoz kapcsolódó idegsejtek dinamikájának közelítése révén kis komplexitásúra redukáltam, és az előző pontban leírtakkal azzal azonos technikákkal vizsgáltam. Megállapítottam, hogy ez a modell más ritmusgenerálási mechanizmusra épül, és az előzőnél is kedvezőtlenebbül viselkedik. Ellentétben valódi

halakkal, a modell növekvő úszási sebesség esetén erősen csökkenő hullámhosszt jósol. Itt is végeztem szisztematikus vizsgálatot a modellparaméterek hatására vonatkozóan, és arra a meglepő eredményre jutottam, hogy a modell irreális viselkedését még paraméterhangolással sem lehet megszüntetni. Ez alapján nagy valószínűséggel megállapítható, hogy a kiindulópontnak használt, rendkívül részletesen kidolgozott, és sokat vizsgált CPG modell nem képes az ideghálózat működési mechanizmusait feltárni. Az eredményt [1]-ben publikáltam.

1.3. relaxációs oszcillátorok dinamikája

Az előző modell kedvezőtlen viselkedésének megértése céljából elkészítettem annak egy tovább egyszerűsített változatát, egy gyors-lassú (relaxációs) oszcillátorokból egy- illetve kétirányú csatolással felépített láncot. Ennek dinamikája gyenge csatolás esetén analitikus módszerekkel is leírható. A hálózat elemei rendkívül speciális alakú csatolási függvényekkel vannak összekapcsolva. Ezt elemezve kimutattam, hogy leggyakrabban valóban az úszó állatok dinamikájára nem jellemző viselkedést eredményez. Ugyanakkor rámutattam, hogy lehetséges ilyen rendszerekben az állatoktól elvárt robusztus mintázatok létrejötte is, és erre pontos feltételt adtam. Ezeket az eredményeket [2]-ben publikáltam.

2. Kollektív mozgás

Az egyedcsoportok közötti kölcsönhatások és kollektív viselkedésük megértésében fontos szempont, hogy melyek azok a legegyszerűbb egyedek közötti interakciók, amelyek kiváltanak egy komplex, kollektív viselkedési mintázatot, pl. összehangolt egyirányú mozgást. Ez különösen izgalmas annak fényében, hogy baktériumok, és más hasonló életformák is képesek kollektív mintázatok létrehozására, sőt rezgésekkel gerjesztett élettelen granulátumokban is kialakulnak szabályos mozgási mintázatok. A közelmúltban került a kutatások középpontjába az egyedek közötti ütközések, azaz passzív mechanikai kölcsönhatások szerepe. A projekt keretei között arra is kerestem a választ, hogy kommunikációra nem képes állatcsoportok ütközések segítségével képesek-e egy közös mozgási irányt kiválasztani, illetve hogy egyes egyedek képesek-e ilyen módon a rendelkezésükre álló jó és rossz mozgási irányokra vonatkozó információt a többiek részére átadni.

2.1 Kontakt-kölcsönhatások által előidézett kollektív mozgás

Kifejlesztettem egy modellt, mellyel síkbeli merev testekből álló halmazok súrlódásmentes ütközései és érintkezési kölcsönhatásai hatékonyan szimulálhatóak legfeljebb kb. 100 objektumra. A modell alapja a Legkisebb Kényszer Elvének kiterjesztése tökéletesen viszkózus (tehát 0 tehetetlenségű) rendszerekre. A módszer Matlab alapú implementációjának segítségével koherens halmazt alkotó mozgó síkbeli testek dinamikáját szimuláltam különböző alakú objektumok és egyedszámok mellett. A szimulációk segítségével kimutattam, hogy kis egyedszámú halmazok képesek kollektív mozgásra anélkül, hogy a mozgásirányukat aktívan szabályoznák a szomszédaik irányának figyelembevételével. Nagyobb csoportokban ez a mechanizmus nem elég hatékony, de ekkor is jelentős hatása van a passzív kölcsönhatásoknak a csoport belső struktúrájának kialakításában.

2.2 Preferált irányok kommunikációja

Az előbbi modellt kiegészítettem olyan egyedekkel, amelyek preferált mozgásirányokkal rendelkeztek. Sikerült kimutatni, hogy kisebb csoportokban már egy kisebb jól informált hányad is nagy hatékonysággal tudja a csoport egészét a kívánt helyre irányítani.

2.3 A testalak szerepe kollektív mozgás létrejöttében

A fentebb leírt szimulációkban szisztematikusan változtattam az egyedek testalakját, és kimutattam, hogy a megnyúlt testalak elsődleges fontosságú a kollektív mozgás szempontjából. Kerek egyedek esetén az egyedek mozgásiránya rendszerint negatív korrelációt mutat, azaz ilyen esetekben a mechanikai kölcsönhatások kifejezetten akadályozzák az összehangolt mozgást. A 2.1-2.3 pontokban közölt eredményeket a [3]-ban publikáltam.

2.4 Összehasonlítás kísérletekkel

Sikerült együttműködést kialakítanom az ELTE Biológiai Fizika Tanszékén Prof. Vicsek Tamás kutatócsoportjával, akik kollektív mozgással kapcsolatban végeznek magas színvonalú kísérleti és modellezési munkát. Többek között létrehoztak kvázi egy dimenziós térben mozgó úszó robotokból egy kísérleti berendezést az ütközési kölcsönhatások megfigyelésére. Kísérleteikben a 2.1-2 kérdésekre keresték a választ, valamint olyan 'fázisátmeneteket' vizsgáltak, amikor a rendszer valamely paraméterének kis megváltoztatása nagy változást okoz a rendszer globális viselkedésében. Mivel a kísérletben használt robotok száma és az elvégzett mérési adatok mennyisége limitált volt, az eredményeket hasznos volt számítógépes szimulációkkal összevetni. Ennek érdekében a 2.1 pontban leírt szimulációs módszert átalakítottam, és paramétereit a kísérletben használt robotokhoz hangoltam. Ezzel sikerült a kísérletek fontosabb megállapításait reprodukálni, és az eredmények felbontását javítani; három erősen elkülönülő „fázist” azonosítani; és az egyedszám növelésének hatását kimutatni. Eredményeinket [4]-ben közzétettük.

- [1] Várkonyi PL, Kiemel T, Hoffman K, Cohen AH, Holmes P, On the derivation and tuning of phase oscillator models for lamprey central pattern generators, *J. Comp. Neurosci.* 25 245-261. (2008)
- [2] Várkonyi PL, Holmes P, On Synchronization and Traveling Waves in Chains of Relaxation Oscillators with an Application to Lamprey CPG. *SIAM J. Appl. Dyn. Sys.* 7 766-794. (2008)
- [3] Várkonyi PL, Communication and collective consensus making in animal groups via mechanical interactions. *J. Nonlinear. Sci.* 21 387-401. (2011)
- [4] Tarcai N, Virágh Cs, Ábel D, Nagy M, Várkonyi PL, Vásárhelyi G, Vicsek T, Patterns, transitions and the role of leaders in the collective dynamics of a simple robotic flock. *J. Stat. Mech.* P04010. (2011)