

# Kognitív mesterséges intelligencia módszerek alkalmazása robotok és járművek irányítástechnikájában

## KIVONAT

Napjaink robotjai és autonóm járművei jelentős kihívásoknak néznek elébe, ami az emberi szereplőkkel való biztonságos interakciókat jelenti. Mivel a robotok különböző területeken válnak egyre elterjedtebbé, az emberi interakció is egyre gyakoribb és potenciálisan veszélyesebb. Jelen kutatás célja egyrészt feltérképezni az ember-robot interakciók egy részhalmozát (használati eset pl. exoskeletonok) és ennek modellezésére egy megoldást találni. Ez felvezeti a kutatás fő célját, ami a robotok irányítástechnikája, azon belül is a mozgástervezés problémáira lehetséges válaszok kínálása. A nehéz interakció és bővíthetőség napjaink népszerű mozgástervező megoldásainak egy jellemző problémája. A kutatás egy interaktív, elosztott mozgástervező keretrendszerrel kínál, ami könnyen bővíthető új algoritmusokkal és különböző környezetrepresentációs megoldásokkal. Az inspirációt egyrészt a megerősítéses tanulás, másrészt a kognitív pszichológia konnektionista modelljei adták. A tanulmányban végezetül egy használati eseten keresztül kerül bővebb bemutatásra a keretrendszer alkalmazhatósága, amelyet a biztonságos megerősítéses tanulás ihletett.

## 1. BEVEZETÉS

Napjainkban a mobil robotok egyre gyakoribb szereplők társadalmi és ipari kontextusban egyaránt. Az autonóm járművek elterjedése egy tipikus példája ennek, amelyek felfoghatók a mobil robotok egy speciális eseteként, irányítástechnikai szempontból nem-holonóm eszközökként. Emellett a kisebb mobil robotok más ipari és hétköznapi területeken való alkalmazása is egyre gyakoribb. Használatuk alapvetően monoton vagy veszélyes feladatok automatizálására irányul. A mobil robotok egyre széleskörűbb elterjedése ugyanakkor az emberi szereplőkkel való interakció során gyakrabban is alakulnak ki veszélyes helyzetek. Általánosságban elmondható, hogy a működési környezet nem determinisztikus és sztochasztikus jellegű, az emberi szereplők viselkedése nehezen jelezhető előre. A robotok működése felé támasztott követelmények szigorúnak mondhatók: hibás működés esetén jelentős kárt okozhatnak az emberi egészségben vagy a tárgyakban.

---

[1] SZE, Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, Informatikai tudományok.

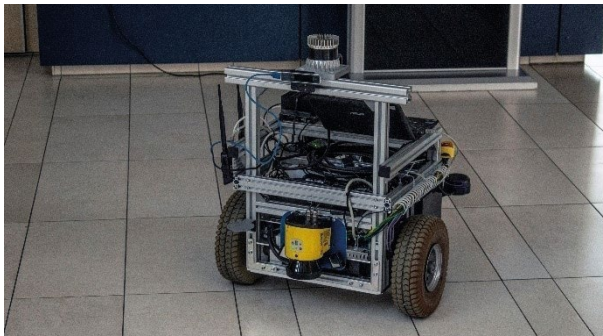
Kutatásom célja ennek a kontextusnak és problémakörnek a mélyebb vizsgálata, az egyes problémák felfedezése és azokra lehetséges válaszok nyújtása elsősorban a mozgástervezés témakörére fókuszálva. A kutatásom során igyekeztem a problémákra könnyen továbbfejleszhető, mesterséges intelligencia módszereket is alkalmazó módszereket elkészíteni. Egyik fontos pont, a szereplők közötti interakció modellezése, illetve a viselkedésnek egy tanulható modelljének megadása. Érintőlegesen érintem az érzékenységvizsgálat és az exoskeletonok témakörét, amely szintén teret ad más irányítástechnikai módszerek alkalmazásának mobil robotikában.

## 2. ESZKÖZTÁR BEMUTATÁSA

A kutatáshoz elengedhetetlen korszerű eszköztár megléte és lehetőség szerint az eszközök fizikai megléte, ami teret engedhet jelenlegi és későbbi kutatásokhoz is. A kutatásomhoz rendelkezésre álltak az *Automatizálási Tanszék* eszközei és helyiségei. A kutatásomat egyrészt valós robotokon, másrészt szimulációk segítségével végeztem. Utóbbi a robot fizikai manifesztációjától függetlenül, pl. akár veszélyes szituációk tesztelésére használható. A szimulációhoz elsősorban a robotikai kutatásokban elterjedt nyílt-forráskódú Gazebo<sup>2</sup> szimulátort használtam. Előnye más szimulátorokhoz képest a szinterek és robotok könnyű konfigurálhatósága, melyek definíciójához a *Simulator Description Format*-ot (SDF) használja, amik programozottan is létrehozhatók. Erre alapozva a kutatáshoz használt robotok kinematikai és szenzor-aktuátor modelljének és az egyes szinterek leírásához készült egy Eclipse-alapú eszközcsoomag.

A kutatásom egyik mellékes terméke a Széchenyi István Egyetemen egy új robotikával foglalkozó laboratórium berendezése. A jövőben ez a labor adhat ott-hont korszerű oktatásnak és további kutatások szintere lehet.

1. ábra: Kutatásokhoz használt egyik robotplatform



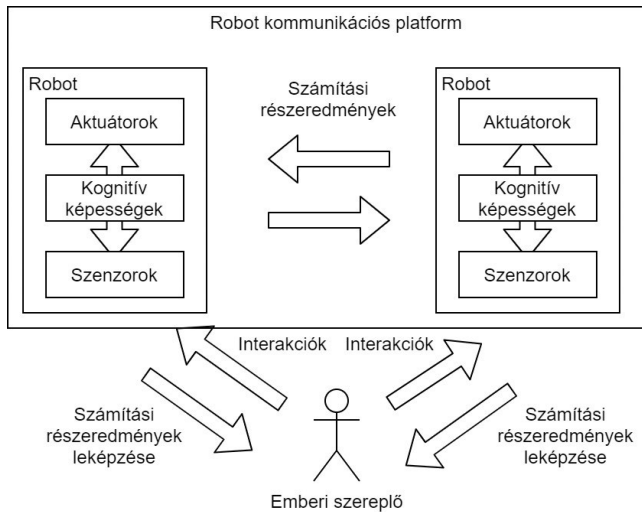
---

[2] KOENIG, NATHAN: *Design and Use Paradigms for Gazebo, An Open-Source Multi-Robot Simulator*, előadás az IROS 2004 konferencián.

### 3. ROBOTOK KOGNITÍV INFOKOMMUNIKÁCIÓS KONTEXTUSBAN

Kutatásom egyik fontos alapköve, hogy a robotokat kognitív entitásként kezeltem, a kognitív infokommunikáció<sup>3</sup> definícióira alapozva (1. ábra). Kutatásomban azzal a feltételezéssel éltem, hogy a robotok más robotokkal inter-kognitív, az emberekkel pedig intra-kognitív kommunikációs csatornán kommunikálnak. A robotok kognitív képességeinek vizsgálata már régóta kutatott dolog,<sup>4</sup> viszont a kognitív infokommunikáció szempontjából a robotok vizsgálata viszonylag egy képlékeny és újszerű dolognak mondható. Jelen kutatás szempontjából ugyanakkor fontos az egyes szereplők közötti kommunikáció jellegét rögzíteni, amivel összefoglaló kép kapható az egyes szereplők (relatív) kognitív képességeinek különbözőségéből és egymás közötti interakció változékonyságából fakadó problémák áthidalására.

2. ábra: Robotok beágyazása kognitív infokommunikációs kontextusban



Feltételezhető, hogy az egyes robotok megegyező kommunikációs keretrendszere (pl. Robot Operating System<sup>5</sup>) építkezve kommunikálnak egymással, számítási kapacitásukban jelentős eltérés nincs, az esetleges implementációs eltérések pedig könnyedén áthidalhatók. Az egyes kognitív képességek könnyen skálázhatók és a számítások részeredménye közvetlenül feldolgozható. Emiatt a kommunikáció összességében inter-kognitív csatornán történik.

[3] BARANYI, Péter: *Cognitive Infocommunications*, Springer Publishing Company, 2015.

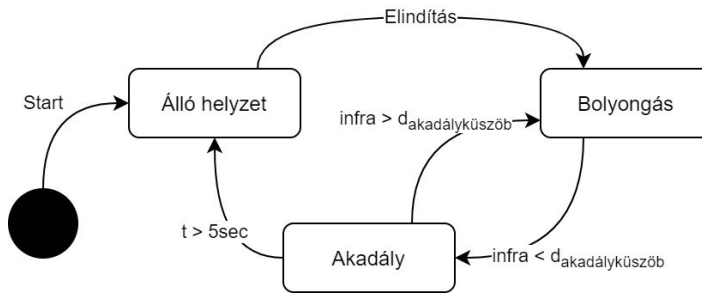
[4] MANORU, ASADA: Cognitive Developmental Robotics: A Survey, in: *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, 2009, 12–34.

[5] QUIGLEY, MORGAN: *ROS: an open-source Robot Operating System*, előadás az ICRA 2009 konferencián.

Más a helyzet azonban az ember-robot kapcsolat esetében: az ember közvetlenül nem fér hozzá a robot kognitív képességeihez, különböző felhasználói interfészeken és vezérlőkön keresztül lehetséges csak a beavatkozás és az állapot visszajelzés. Ebben az esetben szükséges leképezni a robot (rész)számításainak eredményét az ember számára értelmezhető formára. Emiatt a kommunikáció intra-kognitív csatornán történik.

Mindkettő csatorna esetében a robotok szoftverét ki lehet egészíteni olyan réteggel, amelyik az interakciót finomítja tovább. A szereplők interakcióin túl ez egy olyan lehetőséggel is kecsegtet, hogy a rendszer alkotóelemeinek futásidejű ellenőrzését is lehetővé teheti az egyes komponensek által kialakított jelzésrendszer alapján. A modellezésre a hibrid-dinamikus rendszer<sup>6</sup> formalizmust választottam, ami elterjedt irányítástechnika (különösképpen vezérlők szintetizálásában), verifikáció<sup>7</sup> és ember-gép interakció tématerületében egyaránt. A formalizmus alapfelvetése, hogy a diszkrét és folytonos jellemzőket kombinálja a modell definíciójában, a beavatkozás gerjesztéssel vagy diszkrét eseménnyel történhet meg. A hibrid-állapotgép (pl. 2. ábra) egy elterjedt, mérnöki szemszögből közérthető nézet. Az emberi szereplő egy ilyen rendszerben legegyszerűbben diszkrét jelzésekkel (pl. egy felhasználói felületen történt interakciósorozattal) avatkozhat be, az eseményeket és az állapotváltozásokat pedig könnyedén nyomon tudja követni a közölt viselkedésmo­dell alapján.

3. ábra: Egyszerű hibrid rendszer állapotgép nézete (EV3 viselkedésmo­dell)



Az itt elért kutatásokat egy Python-alapú szoftveres könyvtárral demonstrálom, ami ROS2-re építkezik, egy példa viselkedésmo­dellt pedig Lego Mindstorms EV3 roboton demonstrálható. Végső cél egy olyan illékony mo­dell megadása, ami tanítható és így tetszőleges szereplő viselkedése megtanulható egy másik fél számára.

[6] RAJEEV, ALUR: The algorithmic analysis of hybridsystems, 1995, in: *Theoretical Computer Science*, Vol. 138., 3–34.

[7] CHEN, XIN: *Decomposed Reachability Analysis for Nonlinear Systems*, előadás az RTSS 2016 konferencián.

#### 4. REAKTÍV GRÁF-ALAPÚ ELOSZTOTT MODELL MOZGÁSTERVEZÉSRE

A kutatásom egyik legnagyobb részét a mozgástervezés újragondolása jelentette. Népszerű mozgástervező keretrendszerek (pl. *move\_base*, *navigation2*<sup>8</sup>) bizonyos jellemző problémákkal rendelkeznek, amelyek elsősorban az interakciót és bővíthetőséget érintik (ezekre bizonyos kiküszöbölő megoldások születtek, pl. *move\_base\_flex*<sup>9</sup>). Jelenlegi rendszerekkel alapvetően nehéz az interakció és futásidejű verifikáció az alapvető utasításokon (pl. új célpont megadása) túl. Az újonnan javasolt architektúrában ezek javítására teszünk egy kísérletet. A struktúrát a kognitív pszichológiában elterjedt konnekcionista architektúrák és az autonóm járműveknél népszerű *Autoware*<sup>10</sup> keretrendszer adott inspirációt. Ez például abban nyilvánul meg, hogy a pályakövetés (pl. MPC, DWA) kerüljön teljes leválasztásra, és a környezetreprezentáció is lazán csatolt rész legyen.

Az architektúra egy példánya speciális futó programok gráf-alapú összeköttetéseként épül fel (ld. 3. ábra). Ezek a speciális programok feladatukat tekintve feloszthatók:

- Észlelő csomópontokra, amelyek a bejövő szenzoros adatokból építenek fel egy határolt környezetreprezentációt (pl. rács, kvadrofa) és szűrt leképezését kimenetként szolgáltatják más szereplők számára. Az észlelő csomópontok emellett egy politópot is szolgáltatnak, amivel egy geometria környezetreprezentációba való tartozása számítható. Az észlelő csomópontok emellett vizsgálják a környezet változásait és vezérjeleket indukálnak a rendszerben, így egyfajta monitorozási feladatot is ellátnak.
- Mozgástervező csomópontokra, amelyek egy megadott mozgástervező algoritmust (pl. A\*, RRT) implementálnak. A csomópont bemenete egy trajektória (ami állhat egy megadott célpontból is) és egy meghatározott környezetreprezentáció kimenete. A mozgástervező csomópont az észlelő csomópont által indukált vezérjelek alapján reagálnak, vagy változtatják meg a végső kimeneti trajektóriát. A mozgástervező csomópont a bemenő környezetreprezentáció által biztosított határpolitóp alapján állapítja meg, a trajektória kezdő és végpontját, amire értelmezni kell a finomítás folyamatát.
- Kiemelt irányító csomópont, ami vezérli a mozgástervező csomópontokat az észlelő csomópontok jelzései alapján. Az irányító csomópont képes explicit leállítani vagy újraindítani egy mozgástervező csomópontot: a bemenő pályát folyamatosan finomítani. Az irányító szerepét az emberi szereplő vezérjeleken átveheti.

---

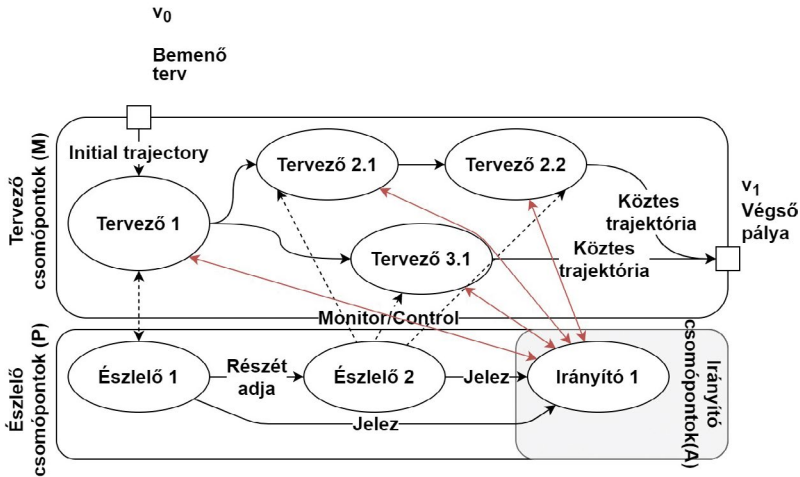
[8] MACENSKI, STEVE: *The Marathon 2: A Navigation System*, 2020.

[9] PÜTZ, SEBASTIAN: *Move Base Flex: A Highly Flexible Navigation Framework for Mobile Robots*, előadás az IROS 2018 konferencián.

[10] SHINPEI, KATO: *Autowareon Board: Enabling Autonomous Vehicles with Embedded Systems*, előadás az ICCPS 2018 konferencián.

- Rendszerszinten két kiemelt pontja van a rendszernek: a fő bemeneti pont, ahol a felhasználó egy célpontot vagy egy kiinduló trajektóriát ad meg a mozgástervezőnek. A második kiemelt pont a fő kimenet, ami a végső finomított trajektória, potenciálisan több mozgástervező csomópont által folyamatosan finomításra került.

4. ábra: Mozgástervező architektúra áttekintése



Feltételezzük, hogy a robot pillanatnyi helyzete és sebessége minden csomópont számára elérhető. A gráf-alapú modellben irányított élként definiálhatjuk az egyes csomópontok közötti kapcsolatokat. A mozgástervező csomópontok egy tetszőleges részhalmaza kapcsolatban állhatnak egymással, ha egy mozgástervező csomópont által finomított pályát egy másik csomópont felhasznál bemenetként. A környezetrepresentáció csomópontok akkor vannak összekötésben egy mozgástervező csomóponttal, ha a mozgástervező felhasználja az adott környezetrepresentáció egy (szűrt) nézetét a bemeneti pálya finomítására. Környezetrepresentációk egymással akkor állnak összekötésben, ha az egyik reprezentáció a részhalmaza a forrásnak. Munkám során a környezetrepresentációt egy Fuzzy-szignatúrákon alapuló környezetrepresentációs módszer segítségével teszteltem, a közismert foglaltsági rács-alapú<sup>11</sup> megközelítés mellett.

Az architektúra egy érdekes lehetőséget is felvet, ami a mozgásmodellek (viselkedések) definiálását illeti. Az irányító által engedélyezett csomópontok a rendszer kezdeti pontjától kezdve a végpontig egy utat definiálnak. Egyértelmű, hogy egy időben több ilyen út is található lesz, viszont kiköthető, hogy

[11] THRUN, SEBASTIAN: *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*, 2005, The MIT Press.

csak egy útvonalat használunk fel a végső trajektória előállítására. Az irányító csomópont feladata adott pillanatban az optimális viselkedésmo­dell kiválasztása a környezet dinamikája alapján.

A mozgástervező csomópontok egy minimális (hibrid-rendszeres) viselkedésmo­dellt legalább biztosítanak: ezzel kölcsönhatásban vezérlőjeleken keresztül állítható le, vagy indítható újra a pálya finomítása. Egy mozgástervező csomópont alapvetően lehet relé állapotban (vagyis közvetíti az eredetileg kapott trajektóriát), finomíthatja a trajektóriát (amennyiben egy erre irányuló jelzést kap). Nem elégséges (pl. nem akadálymentes) trajektória esetén a csomópont végrehajtja a hozzáköthető vészforgatókönyvet. Ezalatt várakozik, míg az adott viselkedés-úton egy korábbi csomópont egy elégséges trajektóriát állít elő. Összes­ségében így alapvetően egyszerűbb algoritmusokból építkezve lehetőség nyílik komplexebb környezetekben való navigálás megoldása.

## 5. PÉLDA HASZNÁLATI ESET MOZGÁSTERVEZÉSRE

A következő használati eset a bemutatott architektúra alkotóelemeire építkezik, bizonyos inspirációt a biztonságos megerősítéses tanulás adott. A céleszköz egy mobil robot. Az architektúra példány felépítését a 4. ábra mutatja. Alapfelvetés, hogy a mobil egyrészt egy globális útvonalat tervez Hybrid A<sup>\*12</sup> segítségével. A detektálható akadályokat kvadrofaként indexeli. Az indexelt reprezentációt Voronoi diagram és rács-alapú nézetként is szűrni lehet további szereplőknek. A robot közvetlenül megfigyelhető környezetében kétféle lehetőség áll fenn a trajektória finomítására:

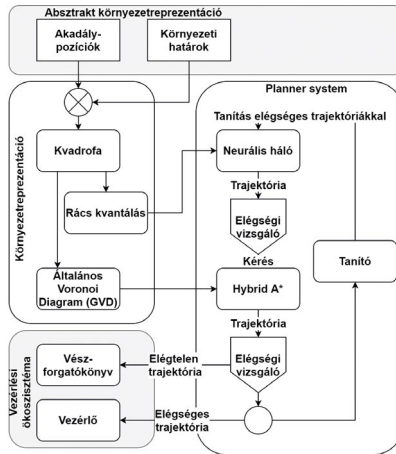
- A robot megpróbálkozik egy már korábban megtanult trajektória felhasználásával a környezetrepresentáció egy nézetét felhasználva.
- Amennyiben nincs elégséges megtanult pálya, Hybrid A\* segítségével lokálisan tervez egy új pályát.

Abban az esetben, ha nem adható meg egy végrehajtható trajektória, a robot a vészforgatókönyvet hajtja végre (vö. megáll). A használati eset során az egyik legkritikusabb pont az eredményül kapott pálya elégségi vizsgálata (pl. akadálymentesség), illetve a pálya tanulása a neurális hálózatokon keresztül (RNN-alapú architektúra).

---

[12] DOLGOV, DMITRI: *Practical Search Techniques in Path Planning for Autonomous Driving*, előadás az AAAI 2008 workshopon.

5. ábra: Mozgástervező architektúra használati esete



## 6. EXOSKELETONOK INTERAKCIÓINAK VIZSGÁLATA

Kutatásom során az exoskeletonokat célszerűnek találtam megvizsgálni, hiszen az ember-gép interakció itt kifejezetten kritikus. Emellett az exoskeletonok komplex robotoknak számítanak, a szakterület szimbiózisban van a humanoid robotok tématerületével. Az interakció lekötése alapvetően nehéz kérdés, hiszen az eszköznek alapvetően proprioceptív szenzorokra (pl. erőszensorok) hagyatkozva kell beavatkoznia. A szakirodalmat kutatva arra a megállapításra jutottam, hogy egyértelműen pontos módszer nem létezik az emberi mozgás előrejelzésére, az exoskeleton és az azt használó ember irányítástechnikai modellje határozza meg a követés pontosságát. A használt módszerek alapvetően Control Lyapunov Function (CLF) szabályozásra épülnek,<sup>13</sup> amelyet kritikus pontokon (pl. térd, boka) valós-idejű passzív szabályozókkal egészítenek ki.

## 7. FUZZY-ALAPÚ ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLAT

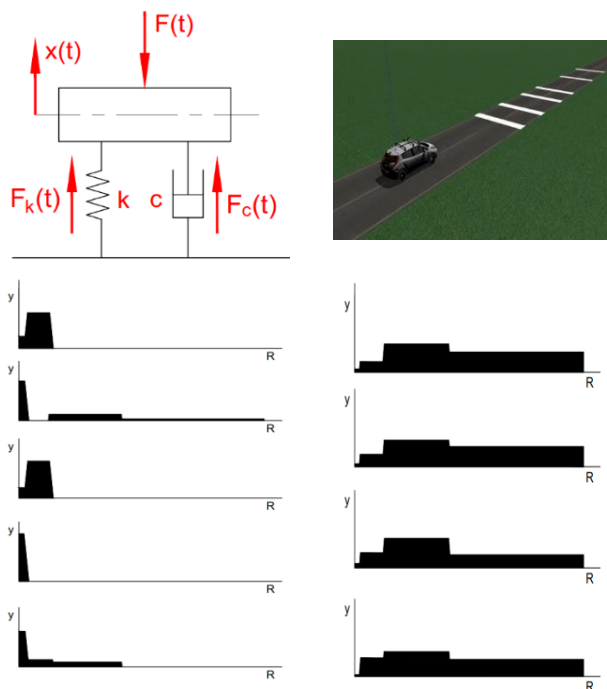
A rendszerek Fuzzy-alapú érzékenységvizsgálatával elvégzett kutatások némi-képp előkészítője az irányítástechnikai modellek elosztott szemantikai modelljének kezelésére. A kutatás során egy rendszermodellre alapozunk, egyes paraméterek hatását vizsgáljuk a rendszer egy kimeneti változójára. A használt érzékenységi módszer one-at-a-time (OAT) módszer, vagyis egyszerre csak egy paraméter kerül változtatásra. A fejlesztés egy Duffing típusú rezgőrendszer szimulációjával kezdődött el. Élesben az érzékenység vizsgálatra egy járműnek a függesztett modelljét használtuk szimulációban, amivel elsősorban a módszer

[13] GEHLHAR, RACHEL: *Data-driven Characterization of Human Interaction for Model-based Control of Powered Prostheses*, előadás az IROS 2020 konferencián.



használhatóságát bizonyítottuk. Az érzékenységvizsgálat folyamán a Duffing-típusú rezgőrendszer esetében azt az eredményt kaptuk, hogy a csillapítási tényező a legérzékenyebb paraméter, mivel ennek volt a legmagasabb az értéke a „nagyon érzékeny” Fuzzy halmazban. A jármű felfüggesztése esetén megkaptuk, hogy a tömeg nagyon érzékeny paraméternek számít, ha a kimeneti változó a felfüggesztés függőleges irányú elmozdulása (5. ábra).

6. ábra: Fuzzy érzékenység vizsgálat (jármű, Duffing-rezgőrendszer), érzékenység kategóriák jelölése Fuzzy halmazokkal



## 8. KONKLÚZIÓ

A kutatás megvizsgálta a robotok mozgástervezésének és interakcióinak aktuális képességét. A jelenleg elérhető módszerekkel szemben az új felkínált architektúra az egyes szereplők közötti interakciót állítja fókuszba kezelhetőségi és verifikációs céllal. Emellett bemutat egy használati esetet, ami demonstrálja az architektúrával elérhető lehetőségeket, akár egy komplex mesterséges intelligencia-alapú módszer beillesztésével. A kutatásom során érintettem más kutatási területeket is, például az érzékenységvizsgálatot és az exoskeletonok tématerületét, amelyek egyrészt az irányítástechnika komplexebb módszertanába, másrészt az interakciós aspektus elmélyülésében segítettek.

A munka még sok kutatási lehetőséget rejt magában. Az egyik az architektúra kiterjesztése további használati esetekre, akár jobban hangsúlyozva az autonóm járművek tématerületét. Épp az érzékenységvizsgálatból fakadó elvégzett kutatások inspirálhatják azt, hogy a környezetrepresentáció mellett az irányítástechnikai modell is leválasztható legyen és szemantikai értelmet nyerhessen a robot szabályozási modellje egy közelítő modellre (pl. TP-transzformáció) építkezve. Ezt a szemantikát bizonyos pályatervező algoritmusok megfelelően alkalmazhatják a kifejtési heurisztikában (pl. Hybrid A\*).

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- BARANYI, PÉTER: *Cognitive Infocommunications*, Springer Publishing Company, 2015.
- CHEN, XIN: *Decomposed Reachability Analysis for Nonlinear Systems*, előadás az RTSS 2016 konferencián.
- DOLGOV, DMITRI: *Practical Search Techniques in Path Planning for Autonomous Driving*, előadás az AAAI 2008 workshopon.
- GEHLHAR, RACHEL: *Data-driven Characterization of Human Interaction for Model-based Control of Powered Prostheses*, előadás az IROS 2020 konferencián.
- KOENIG, NATHAN: *Design and Use Paradigms for Gazebo, An Open-Source Multi-Robot Simulator*, előadás az IROS 2004 konferencián.
- MACENSKI, STEVE: *The Marathon 2: A Navigation System*, 2020.
- MANORU, ASADA: Cognitive Developmental Robotics: A Survey, in: *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, 2009, 12–34.
- PÜTZ, SEBASTIAN: *Move Base Flex: A Highly Flexible Navigation Framework for Mobile Robots*, előadás az IROS 2018 konferencián.
- QUIGLEY, MORGAN: *ROS: an open-source Robot Operating System*, előadás az ICRA 2009 konferencián.
- RAJEEV, ALUR: The algorithmic analysis of hybrid systems, 1995, in: *Theoretical Computer Science*, Vol. 138., 3–34.
- SHINPEI, KATO: *Autowareon Board: Enabling Autonomous Vehicles with Embedded Systems*, előadás az ICCPS 2018 konferencián.
- THRUN, SEBASTIAN: *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*, 2005, The MIT Press.