



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Irányítástechnika és Informatika Tanszék

MULTIÁGENSŰ RENDSZEREK IRÁNYÍTÁSI MÓDSZEREI

Habilitációs téziszfüzet

Harmati István, PhD
egyetemi docens

Budapest, 2011. december

1. Bevezetés

1.1. Multiágensű rendszerek alkalmazásának motivációja

Az irányításelmélet és a robotika fejlődésével egyre komplexebb műszaki problémák megoldásai váltak lehetővé. Számos esetben a feladat jellege és az irányított rendszer felépítése flexibilis, finom beavatkozásokra képes intelligens beavatkozást igényel. A multiágensű rendszerek az elosztott, vagy gyengén kötött fizikai struktúrával rendelkező ágensek segítségével gyakran képesek az együttes viselkedésükkel, döntéseikkel a környezetükben végbemenő folyamatokat a tervezés során előírt specifikációknak megfelelően alakítani. Alkalmazásuk sikere abban rejlik, hogy az ágensek egy csapatként, lokálisan egymástól különböző helyeken tudnak párhuzamosan beavatkozni a környezeti folyamatokba. Természetesen az ilyen esetekben az ágenseknek össze kell hangolniuk a döntéseiket, viselkedésüket, azaz kooperálniuk kell.

A gyakorlatban sok olyan műszaki feladat van, amelyek multiágensű rendszerek kooperatív irányításával hatékonyan oldhatók meg. Az egyik legfontosabb alkalmazási terület a vezető nélküli vagy robotpilótával ellátott (földi, vízi, légi vagy űrbeli) járművek formációban való irányítása [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32] (repülőgépek kör alakú parkoló pályára állítása, hajók dokkolása, autók parkolása, navigációs műholdak előírt relatív pozícióban tartása). Multiágensű rendszerek irányítására van szükség különböző katasztrófa-helyzetekben, mentési feladatokban a járművek szervezett mozgáskoordinálásánál [33], [34], [35], [36], [37] ("randevú" megszervezése), felderítési és lokalizációs feladatok mobilis robotokkal való végrehajtásánál [38] [39], nagy alapterületű létesítményekben (gyárban, üzemekben, kórházakban) logisztikai, szállítási feladatok megoldásánál, forgalomirányítási feladatokban [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52] (városi gépjárműforgalom, autópályák forgalmának irányítása) is. Automatizált kombájnokkal történő mezőgazdasági termény-betakarítás, számos katonai felhasználás (pl. hadművelet tervezés [53], [54], [55], [56]), biztonságtechnikai alkalmazás (területbiztosítás, menekülő-üldöző szituációk [57] [58], [59] [60]) illetve játékipari alkalmazás (pl. robotfoci, számítógépes játékok) szintén a multiágensű rendszerek irányításán alapul [61], [62], [63], [64], [65]. Multiágens rendszernek tekinthetők általános értelemben azonban a többbujjas intelligens robotkezekkel történő tárgymanipuláció, illetve a lépegető robotok pályatervezése, ahol az ágensek (robot ujjai, lábai) egymáshoz viszonyított helyzete kötöttebb [66], [67], [68], [69], [70], [71]. A közeljövőben potenciális alkalmazási területek lehetnek olyan multi-kritériumú optimalizálási problémák, mint az orvosbiológiai folyamatok [19], [20], az intelligens járművek, robot manipulátorok [22] vagy intelligens épületek irányítása [17].

Az alkalmazási példákból kitűnik a multiágensű rendszerek és a robotika illetve az irányításelmélet szoros kapcsolata, hisz a legtöbb esetben az ágensek kooperációja mobilis robotok (vagy robotpilóta funkcióval ellátott járművek) megfelelő irányításával érhető el.

1.2. Multiágensű rendszerek játékelméleti osztályozása

A kommunikációs csatorna hiányában vagy korlátozott információáramlás esetén az egyes ágenseknek autonóm működésre is képesnek kell lenniük, azaz saját érzékelési és döntéshozatali képességgel kell rendelkezniük. Ilyen esetben az egységes csapatcél szerepét könnyen a saját magukra utalt ágensek egyéni céljai veszik át. Az egyéni célok pedig általános esetben konf-

liktushelyzetet generálhatnak. Matematikai nézőpontból a szituáció egy tipikusan skalárértékű optimalizálási feladat (csapatstratégia) multi-kritériumú optimalizálási problémává váló dekomponálását jelenti. A kooperatív irányítási probléma ezzel párhuzamosan egy nemkooperatív játékká fejlődik, ahol az ágensek (játékosok) egyéni döntései alapján összeállított döntéskombinációja határozza meg az új állapotot. Ezek az egyéni döntések konfliktushelyzetet eredményezhetnek, tehát bizonyos esetben a csapatjátékok is az intuitíve furcsán hangzó nemkooperatív játékokkal írhatók le. A létrejött szituációk általánosan a játékelmélet eredményeivel kezelhetők [72], [73], [74], [75], [76], [77].

A játékelmélet történetileg a kétszemélyes nulla összegű játékok fejlődésével indult, amely olyan multiágensű rendszereket írnak le, ahol a két szereplő (ágens vagy játékos) kifejezetten ellenfelei egymásnak [72]. Amennyire kedvező egy adott szituáció az egyik játékosnak (vagy általában egy csapatnak), ugyanannyira kedvezőtlen a másiknak. Nulla összegű játékok fordulnak elő tipikusan a katonai alkalmazásokban (hadműveletek tervezése, üldöző-menekülő játékok) illetve a csapatjátékokban (pl. robotfoci).

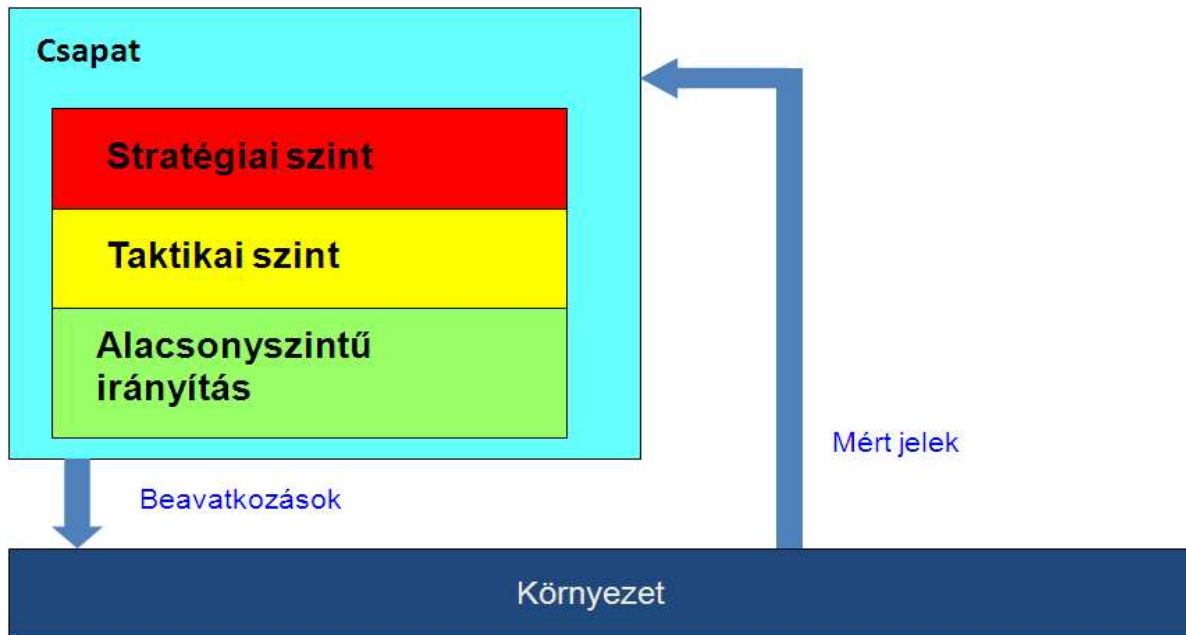
Korlátozott információáramlással jellemezhető csapatkoordináció az általánosabb, nem nulla összegű játékokkal írhatók le. Ebben az esetben nem két ellenséges csapat közötti játékról, hanem az egy csapaton belüli autonóm ágensek közötti játékról van szó. Minden ágens egyéni döntéseket hoz annak érdekében, hogy a csapaton belül a saját feladatát végre tudja hajtani. Amennyiben a játékosok egyenrangú felek, akkor az optimális megoldást a Nash-egyensúly adja. A játék természetéből kifolyólag előfordulhat azonban, hogy a játékosok között hierarchia áll fenn (vezető, követők). Ekkor az optimális stratégiát a Stackelberg-egyensúly szolgáltatja.

Valós fizikai rendszerekkel reprezentált multiágensű rendszerek játékelméleten alapuló optimális irányítása folytonos környezetben könnyen komplex feladathoz (ún. végtelen játékhoz) vezethet, amely tipikusan nem oldható meg praktikusán, hagyományos (hard - kemény) számítási módszerekkel [76], [72]. A probléma szuboptimális megoldásához vezethet azonban a játékelméleti modell egyszerűsítése, a feladat ill. döntések diszkretizálása (mátrixjátékok), illetve az irányítási architektúra dekomponálása, amelyben szerepet kapnak heurisztikus, lágy (szoft) számítási módszereken alapuló mesterséges intelligencia eszközök is.

1.3. Multiágensű rendszerek dekomponált irányítási architektúrája

Egzakt játékelméleti megoldás hiányában a multiágensű rendszerek alternatív irányítási architektúráját az 1. ábra mutatja. Az irányítás három szintre tagozódik [57]. A legfelső szinten a stratégiai módszerek helyezkednek el. Itt történik a csapat globális céljának kijelölése egy adott időintervallumban. Itt dől el az is, hogy a csapaton belüli ágenseknek egyénileg milyen feladatot kell végrehajtaniuk. Stratégiai szinten általános elv mesterséges intelligencia (lágy számítási) módszerek alkalmazása, amelyben a lehető legtöbb a priori információ illetve releváns heurisztika jelenik meg. A fuzzy rendszerek, neurális hálózatok, genetikus algoritmusok illetve rajntelligencia módszerek alkalmazása elterjedt gyakorlatnak mondható. Stratégiai szint akkor jut szerephez, ha az ágensek között létezik legalább egy minimális kommunikáció. Stratégiai szintnek felel meg pl. robotfociban az egyes játékosok közötti passzok megtervezése.

Taktikai szinten az egyes ágensek a csapatszinten rájuk kiosztott egyéni feladatokat végzik el. Ennek a szintnek kell biztosítani az intelligens viselkedést is, amennyiben az ágensek között nincs elegendő kommunikáció. A taktikai cél (lokális) végrehajtásának egyik legcélravezetőbb módja a primitívekből való építkezés. Ilyen primitív lehet az egyenes haladás, forgás vagy a



1. ábra. Dekomponált irányítási architektúra

labdába rúgás). Primitívekből felépített taktikai feladat lehet pl. robotfociban a labdavezetés, passzolás vagy kapura rúgás. A legalsó szinten található alacsonyszintű irányítás feladata az, hogy a taktikai szinten meghatározott pálya illetve akciók sorozata a megfelelő beavatkozó jelek kiadásával biztosítva legyen. Ez a szint felelős adott esetben a szabályozástechnikai specifikációk betartásáért is. A robotfoci alkalmazáson illusztrálva ezen a szinten történik a mobilis robot kerekeinek megfelelő forgatása.

2. Problémafelvetés és kutatási célok

A tézisfűzetben bemutatott eredmények a multiágensű rendszerek irányításának három, intenzíven kutatott problémakörére összpontosítanak. Bár a felvetett problémák mindegyike a multiágensű rendszerek irányításához kötődik, mindhárom terület alapvető speciális tulajdonságokkal is rendelkezik a többihez képest. A speciális tulajdonságok miatt a felvetett problémák és természetesen a megoldási módszerek is különböznek.

2.1. Rétegzett rendszer sodrásmentesítése

A rétegzett rendszerek olyan nemlineáris rendszereket takarnak, ahol az állapotegyenlet alakja függ az aktuális állapottól és azok egy-egy állapotban ugrásszerűen megváltozhatnak. Rétegzett rendszereknek tekinthetők a lépegető robotok és az intelligens robotkézzel történő tárgymanipluláció [15], [16], [18]. Mindkét esetben az állapotegyenlet alakjában bekövetkező ugrásszerű változás akkor jelenik meg, amikor a járás vagy tárgymanipluláció során kontaktuspontok jönnek létre illetve szűnnek meg. Az ilyen robotok egyúttal multiágensű rendszereknek is tekinthetők, hisz a lépegető robotok esetén a lábak összehangolt mozgástervezésére, ill. irányítására van szükség ahhoz, hogy egy lépegető robot egy kívánt konfigurációba (pozíció, orientáció, lábak

helyzete) kerüljön. Hasonló helyzet fordul elő akkor, ha egy többujjas robotkéz ujjáthelyezéssel végez tárgymanipulációt (pl. egy tárgy egy kézben történő forgatása). Ezekben az esetekben a lábak illetve az ujjak külön ágenseknek tekinthetők, de fontos megjegyezni, hogy a közös test (erős csatolás) miatt az egymáshoz képesti konfigurációjuk limitált.

Rétegzett rendszerek pályatervezése nagyobb körültekintést igényel a sima (végtelenszer differenciálható vektormezőkkal rendelkező) nemlineáris rendszereknél, mert nem áll egy időben rendelkezésre a rendszer mozgatásában résztvevő irányítási vektormezők. Az elmúlt évtizedben kidolgozott módszereknek sikerült megoldania az alapproblémát [71], [78]. A pályatervezés újabb módszereket igényel azonban, ha a rétegzett rendszerek mozgásegyenletében sodrás (drift) is jelen van. A fizikai rendszerekben ilyen eset fordul elő akkor, amikor egy lépegető robot egy lejtőn csúszik lefelé, és közben egy előírt konfigurációba (tipikusan pozíció, orientáció) kell eljutnia.

1. Kihívás *A rétegzett rendszerek mozgástervezési feladatának megoldása olyan környezetben, ahol sodrás van jelen.*

2.2. Városi forgalomirányítási módszerek

Városi jelzőlámpákkal való irányítása a multiágensű rendszerek irányításának is tekinthető. Az irányítás célja az, hogy a közlekedési hálózaton a lehető legtöbb jármű a lehető legrövidebb idő alatt haladjon át a vizsgált időtartományban.

Alapesetben a forgalom irányításába csak a keresztezésekben elhelyezett jelzőlámpák zöld jelzéseinek hosszával, azok egymáshoz képesti eltolásával lehet beavatkozni. Számos módszert javasol a szakirodalom a probléma kezelésére [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52]. Potenciális ötlet lehet az is, hogy a keresztezéseket ágenseknek (játékosoknak) tekintjük, amelyek autonóm döntések meghozatalára képesek. Ilyen megközelítés korábban nem létezett, így ennek játékelméleti alapjait le kell fektetni. A módszer potenciális előnye lehet, hogy akkor is működik, ha a központi forgalomirányítás felől a kommunikáció megszakad. Látható, hogy a városi forgalom jelzőlámpákkal való irányítása a multiágensű rendszerek egy olyan speciális esete, ahol alapesetben az ágensek nem mozognak a térben.

További kiterjesztése lehet a koncepciónak, ha nem csupán az intelligens keresztezések avatkoznak be döntéseikkel a járműforgalomba, hanem a keresztezések mellett a forgalomban intelligens járművek vesznek részt, amelyek útvonaltervezés segítségével szeretnének a közlekedési hálózaton áthaladni. Ilyen esetben a járművek szintén egy-egy ágensnek (játékosnak) tekinthetők. Nyilvánvaló, hogy a keresztezések jelzőlámpa hangolásai és a járművek útvonaltervezéséhez kapcsolódó döntések (hol, merre forduljon a jármű) együttesen alakítják ki a forgalom képét.

Kapcsolódó kutatási területet képez a megkülönböztetett járművek pályatervezése, illetve ennek integrálása a játékelméleti koncepcióba. Megkülönböztetett járművek (mentők, rendőrség, tűzoltóság, tömegközlekedési jármű, speciális jármű) megkülönböztetett figyelmet érdemelnek, amelyhez a forgalomirányítás alkalmazkodhat, akár a forgalomban résztvevő többi jármű kárára.

2. Kihívás *A városi forgalomirányítás multiágensű rendszerként való tekintése újszerű ötlet. A játékelméleten alapuló irányítási koncepció potenciális előnyökkel bír (autonóm viselkedés, forgalom optimalizálás, integrált útvonaltervezés, megkülönböztetett járművek kezelése) amely*

szükségessé teszi egy játékelméleten alapuló irányítási módszer kifejlesztését, és a különböző modellezési szintek megjelenő járulékos komponensek keretrendszerbe való integrálását.

2.3. Mobilis robotok kooperatív irányítása

Mobilis robotok kooperatív irányítása a multiágensű rendszerek fő alkalmazási területe. Számos feladat oldható meg a helyüket egymástól függetlenül változtatni képes robotokkal. A legfontosabb alkalmazásokhoz sorolhatók a formációirányítási [23], [24], [25], [26], [27] és a célpontkövetési feladatok [57] [58], [59] [60]. Egyre több alkalmazásban megjelenik az az igény, hogy az egyes feladatokat a robotokból álló csapat integráltan is képes legyen megvalósítani, akár olyan esetekben is, amikor a kommunikáció az egyes ágensek között nem lehetséges, vagy erősen korlátozott. Ilyen esetekben az ágensek viselkedésének autonóm jellegét erősíteni kell, hogy képesek legyenek individuális döntések meghozatalára is. A vázolt szituáció leírására és az optimális döntéseket előállító döntési stratégiák elvét a játékelmélet eredményei szolgáltatják. Az elméleti eredmények azonban sajnos nem teszik lehetővé a feladat praktikus megoldását a jelenlegi számítási eszközök mellett a bonyolultabb többszereplős csapatjátékok esetén.

Szükséges egy olyan eljárási rendszer kidolgozása, amely lehetővé teszi a játékelmélet eredményeinek gyakorlati alkalmazását is a csapatjátékokra. Szükséges továbbá az is, hogy a nem kooperatív játékot játszó ágensek figyelembe tudják venni a kommunikáció hiányában is azt, hogy ugyanannak a csapatnak a tagjai és az egyéni érdekek mellett a csapat stratégiai célját is szem előtt kell tartani.

3. Kihívás *A multiágensű rendszerek döntéshozatali módszereinek fejlesztése, amely különböző feladatok (pl. célpontkövetés, formációban haladás) integrált megoldására alkalmas. További célként jelenik meg egy játékelméleti koncepció és módszer kifejlesztése, amely figyelembe veszi mind az egyéni, mind a csapatcél megvalósítását az egy csapathoz tartozó autonóm ágensek döntéshozatali eljárásában.*

3. Az új tudományos eredmények

3.1. Rétegzett rendszer sodrásmentesítése

Kutatási koncepció. A rétegzett rendszerek olyan nemlineáris rendszerek, ahol a mozgásegyenlet ugrásszerűen változhat egy-egy kitüntetett állapotban. Tipikus példák a lépegető robotok, ahol a kitüntetett állapotokban új kontaktuspont jön létre vagy egy régi kontaktuspont megszűnik. Minden egyes $(1, 2, \dots, I$ indexszel azonosított) kontaktuspont kombinációban más-más sokaságon fejlődhet a rendszer konfigurációja. Ezeket a sokaságokat rétegeknek nevezik. A rétegek dimenziója annál kisebb, minél több kinematikai kényszer (kontaktuspont) van jelen. Az S_0, \dots, S_I rétegekben a mozgásegyenleteket a

$$\begin{aligned}
 S_0 : \dot{x} &= f_0 + g_{0,1}u_{0,1} + \dots + g_{0,m_0}u_{0,m_0} \\
 S_1 : \dot{x} &= f_1 + g_{1,1}u_{1,1} + \dots + g_{1,m_1}u_{1,m_1} \\
 &\vdots \\
 S_I : \dot{x} &= f_I + g_{I,1}u_{I,1} + \dots + g_{I,m_I}u_{I,m_I}
 \end{aligned} \tag{1}$$

formában lehet megadni. Az S_0 réteget alaprétegnek nevezik és speciális, mert ekkor van jelen a legtöbb kontaktuspont. A (1) kifejezésben x jelöli a rendszer állapotvektorát (konfigurációját), $g_{i,j}$ az irányítási vektormezőket, $u_{i,j}$ pedig a hozzátartozó beavatkozó jelet. Az f_0, \dots, f_I vektormezők testesítik meg az egyes rétegekben a sodrást. A rétegezett mozgástervezés dilemmájára akkor derül fény, amikor egy pályatervezési feladat keretében a rendszert az alapréteg egy kezdeti x_S állapotából a szintén alaprétegben található x_F kívánt konfigurációba kell vezetni az $u_{0,i}, i = 1, \dots, m_0$ beavatkozó jelek megfelelő megválasztásával. A feladat ugyanis tipikusan nem oldható meg sima rendszerekre kidolgozott pályatervezési algoritmusokkal [66], [67], [68], amelyek az alapréteg irányítási vektormezőit használják fel. A rétegezett mozgástervezési algoritmusok ezzel szemben képesek magasabb dimenziójú rétegek vektormezőit is felhasználni és visszavezetni a feladatot a sima pályatervezési módszerekre, amennyiben a rétegekre invariáns illetve az azok között kapcsolható vektormezők Lie zárójeli felcserélhetők [70], [71]. Az eredményül kapott állapot-trajektória a hétköznapi értelemben vett járásnak felel meg.

A hagyományos rétegezett pályatervezési módszerek két fontos hiányossága van. Egyfelől csak a kívánt konfiguráció elérését (illetve tetszőleges megközelítését) garantálhatják a kezdeti állapotból, azonban a trajektóriát nem képesek befolyásolni. Ez nyilvánvalóan káros az akadályokat tartalmazó térben. A probléma megoldására [78] ad javaslatot.

Másik hiányossága a hagyományos rétegezett pályatervezési módszereknek akkor lép fel, amikor a sodrást megtestesítő f_0, \dots, f_I vektormezők is megtalálhatók az állapotegyenletben. Ennek semlegesítése az alábbi koncepción keresztül érhető el. A hagyományos rétegezett pályatervezés folyamsorozatok mentén éri el a kívánt konfigurációt, azaz egy időpontban mindig csak egy irányítási vektormező aktív, a többi pedig a hozzájuk tartozó beavatkozó jel kinullázásával inaktív. A rétegek közötti váltás mindig az állapot-trajektória olyan ún. bázispontjaiban lehetséges, ahol az aktív vektormező és az aktuális réteg megváltozik. Két bázispont között mindig csak azonos réteghez tartozó vektormezők aktívak. A két bázispont közötti trajektória szakaszt a trajektória egy szegmensének nevezzük. Az aktív vektormezők involutív lezárása egy integrál sokaságot generál, amelynek dimenziója tipikusan egynél nagyobb és amelyen a trajektória elvben fejlődhet a két bázispont között (szemben a folyamsorozatokkal definiált egydimenziós sokasággal). A folyamsorozatokon alapuló sima pályatervezést lecserélve más módszerre (pl. Lie zárójel átlagolást használó technikára), az említett integrálsokaságon tetszőleges trajektória előírható egy rétegben. A kezdeti és végállapot között így tetszőleges dekomponált trajektória tervezhető, azaz olyan trajektória, amely minden bázisponton keresztül megy, de két szomszédos bázispont között a trajektória tetszőlegesen megválasztható az aktív réteg vektormezőivel generált integrál sokaságon. Az eredeti folyamsorozatban megválasztható az aktív vektormezők sorrendje úgy, hogy az egy réteghez tartozó vektormezők lehetőleg egymás szomszédjai legyenek a folyamsorozatokban, így a bázispontok száma, és ezzel együtt a dekomponált trajektóriára előírt korlátozások száma csökken, az akadályelkerülés pedig jó eséllyel lehetővé válik. Az aktív vektormezők sorrendjének rétegek szerinti csoportosítása azért is előnyös, mert ha az aktív vektormezők lineáris kombinációjával előállítható az aktív réteg sodrása (pontosabban annak -1-szerese), akkor a sodrás hatása semlegesíthető. A sodrás szintén semlegesíthető, ha a pályatervezésben részt vevő rétegek vektormezőivel generált disztribúciók involutív lezárásainak metszete tartalmazza a sodrást definiáló vektormezőt. A sodrás semlegesítéséhez olyan vektormezők is felhasználhatók, amelyek az eredeti folyamsorozatban nem voltak aktívak.

Látható, hogy a koncepció nem alkalmazható általános sodrás semlegesítése. Azonban az

adott rétegezett rendszer speciális kinematikai tulajdonságait figyelembe véve a semlegesíthető sodrások köre bővíthető. Az egyik fontos alkalmazási terület a lépegető robotok, azon belül is a hatlábú lépegető robot. A pályatervezés során ugyanis kihasználhatók a hatlábú robot kinematikai modelljének alábbi tulajdonságai:

- (P1) a robot pozícióját adó állapotok nem befolyásolnak más állapotok változásait,
- (P2) a robot orientációja csak a pozícióhoz tartozó állapotok változásait befolyásolja,
- (P3) a robot pozíciójának változását csak a robot orientációja befolyásolja az állapotváltozók közül,
- (P4) a robot orientációja közvetlenül befolyásolható beavatkozó jellel és nem függ semmilyen állapottól,
- (P5) a robot képes az orientációját úgy változtatni, hogy a pozíciója ne változzon,
- (P6) a robot képes egyenesvonalú mozgásra az orientációjának irányában.

Új tudományos eredmények. Az 1. tézisben mozgástervezési módszereket dolgoztam ki kinematikai modellel adott rétegezett rendszerekre, amely különböző típusú sodrások semlegesítésére alkalmas. Megmutattam, hogy ezen kívül sodrásmentesítés során kihasználhatók a rendszer speciális kinematikai tulajdonságai is.

1. tézis Mozgástervezési módszert javasoltam kinematikai modelljünkkel adott rétegezett rendszerekre, amely figyelembe veszi a rétegekben megjelenő sodrásokat is.

1.1. *Rétegezett mozgástervezési algoritmus sodrással rendelkező rendszerekre.* A kinematikai modelljével adott sodrásmentes rétegezett rendszerre létező mozgástervezési módszer általánosítását javasoltam egy új algoritmus kifejlesztésével [1], amely figyelembe veszi a rétegezett rendszerben megjelenő sodrást.

1.2. *Az algoritmus pontosságának tételszerű bizonyítása.* Megmutattam, hogy a javasolt mozgástervezési algoritmussal generált trajektória pontossága megegyezik a sodrás nélküli esetre korábban kidolgozott rétegezett mozgástervezési algoritmusok pontosságával, ha az alábbi esetek bármelyike teljesül [1]:

- a) A sodrás független a rétegektől, azaz minden rétegben $f_0 = f_1 = \dots = f_l := f$ és $f \in \bar{\Delta}_0 \cap \bar{\Delta}_1 \cap \dots \cap \bar{\Delta}_l$.
- b) A sodrás függ a dekomponált trajektória aktuális szegmensétől, de ugyanakkor eleme az aktuális trajektória szegmenshez tartozó réteg disztribúciójának, azaz $f_{\Xi(\bar{\Delta}_k)} \in \bar{\Delta}_k$, minden $k = 1, \dots, l$ esetén, ahol k a folyamsorozatban k . szegmens, $\bar{\Delta}_k$ ezen réteg vektormezőjével definiált involutív disztribúció, $\Xi(\bar{\Delta}_k)$ az involutív disztribúcióhoz tartozó réteg azonosítója.

1.3. *Sodrásmentesítési algoritmus, speciális kinematikai tulajdonságok kihasználásával.* Új, rétegezett mozgástervezési módszert javasoltam kinematikai modelljével adott hatlábú robotra, amely a robot speciális (P1 – P6) kinematikai tulajdonságait kihasználva képes az alábbi feltételeket teljesítő sodrások semlegesítésére [2]:

- 1) A sodrás csak a pozícióhoz kötődő állapotváltozókat befolyásolja,
- 2) A sodrás csak a robot pozíciójától függ,
- 3) A sodrás iránya konstans, azaz x és y koordinátákhoz tartozó sodráskomponensek aránya állandó.

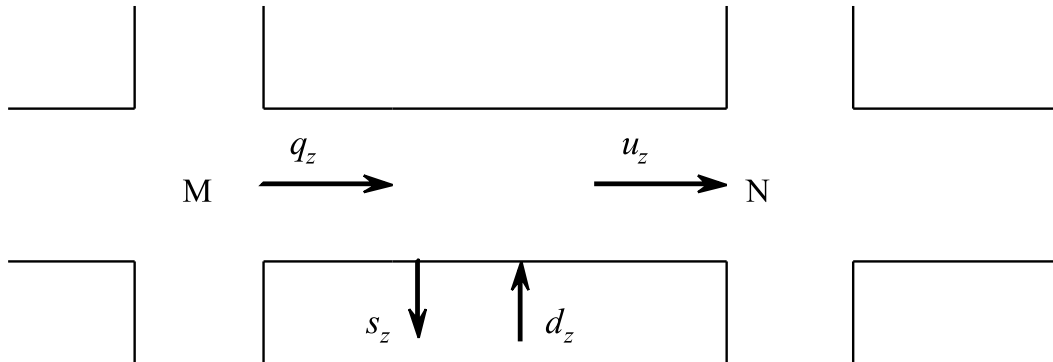
A téziseket lefedő publikációk a következők: [1], [2]. További kapcsolódó publikációk: [11], [12].

A téziseket lefedő és a kapcsolódó publikációk mindegyikében első szerzős voltam. A tézisekben hivatkozott publikációkban a saját kontribúciómól függetlenül a társszerzők (Kiss Bálint, Gincsiné Szádeczky-Kardoss Emese) is bemutatnak egy lehetséges módszert speciálisan a hatlábú robot sodrásmentesítésére [1], illetve a javasolt módszerem megvalósítására Kovács Gábor kollégám egy felügyeleti irányítási algoritmust javasolt [2].

3.2. Város forgalomirányítási módszerek

Kutatási koncepció. A technológiai fejlődés eredményeként a városi forgalomban nagy számú gépjármű jelenik meg, amelyek torlódásokat, dugókat okozhatnak. Az úthálózat, kereszteződések megfelelő strukturális kialakításával, jelzőlámpák alkalmazásával befolyásolható az átmenő forgalom nagysága. Alapvető cél a hálózat egyenletes terheltségének elérése és az, hogy egységnyi idő alatt a lehető legtöbb jármű haladjon át a hálózaton, illetve, hogy a járművek (távolságban vagy időben) a lehető legrövidebb úton ériék el a hálózatban a célként megjelölt kilépési pontot.

A közlekedési hálózat dinamikájának egyik legjobb leírását irányításelméleti szempontból a Store-and-Forward modell adja [40]. A modell alapja a kereszteződések közötti útszakaszok. Egy útszakasz sematikus felépítését és a hozzá kapcsolódó kereszteződések a 2. ábra illusztrálja. Az M és N azonosítóval rendelkező kereszteződések között található a z azonosítóval rendelkező útszakasz, amin a forgalom $M \rightarrow N$ irányú. A z útszakasz az M kereszteződés kimenő útszakaszait magában foglaló O_M halmaznak és az N kereszteződés bemenő útszakaszait magában foglaló I_N halmaznak is egy eleme.



2. ábra. Útszakasz struktúrája

Az ábrán q_z jelöli az M kereszteződésből egységnyi idő alatt a z útszakaszra kerülő járművek számát (járműfolyamot), u_z jelöli az N kereszteződésbe belépő járműfolyamot. Mindkét mennyiség függ a kereszteződések bemenő és kimenő útszakaszai között érvényes zöld jelzések hosszától, illetve $q(z)$ függ még az M forrás kereszteződés kanyarodási rátáitól illetve bemeneti szakaszain lévő forgalomtól. Az útszakasz cél és forrás forgalmának járműfolyamát s_z illetve d_z jelöli. A célforgalom tipikusan egy $t_{z,0}$ paraméterrel specifikálható: $s_z = t_{z,0}q_z$. Az utóbbi években néhány korszerű módszer ezt a modellt használta fel irányításelméleti algoritmusok (pl. PI,

LQ) alapjául a forgalom stabil egyensúlyi munkapontjában [40], [50], [51]. Természetesen a nemlineáris modellre alkalmazott lineáris irányítási módszerek korlátozottan alkalmazhatók.

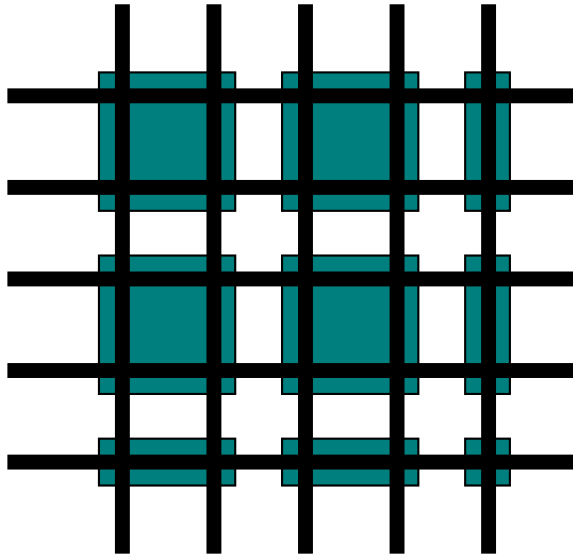
A javasolt új koncepció alapja az, hogy a kereszteződések önállóan dönteni képes autonóm ágensekként képzelhetők el. Minden kereszteződés a környezetében (elsősorban a becsatlakozó útszakaszokon) igyekszik optimalizálni a bemenő járműforgalmat az egyenletes (illetve minimális) terhelés elérése érdekében. A kereszteződések a forgalomba a bemenő és kimenő útszakaszok közötti zöld jelzések hosszának kialakításával tudnak beavatkozni. A zöldjelzések hosszának összege a zöld jelzések között található holtidőkkel együtt a kereszteződés ciklusidejét adják, amely tipikusan állandó. További döntési változó lehet a kereszteződések ciklusidejeinek kezdete között található eltolások (ofszetek) kialakítása is. Természetesen a kereszteződések döntései konfliktushelyzetet generálhatnak egymás között, hiszen egymás bemenő útszakaszait terhelik. A konfliktushelyzet a játékelmélettel jól kezelhető. A kutatási koncepcióban a hagyományos Store-and-Forward modell átalakítására került sor, amely a játékelméleti leíráshoz illeszkedik:

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T \left[(1 - t_{z,0}) \sum_{w \in I_M} t_{w,z} \frac{S_w \sum_{i \in O_M} \hat{g}_{w,i}^M}{C} - \frac{S_w \sum_{i \in O_N} \hat{g}_{w,i}^N}{C} \right], \quad z \in O_M, z \in I_N$$

Az (2) egyenlettel leírt modellben $x_z(k)$ adja a z útszakaszon a k . mintavételben található járművek számát, $t_{w,z}$ az M kereszteződés w bemenő útszakaszáról érkező forgalom z kimenő útszakaszra eső kanyarodási együtthatója, S_w a w útszakasz szaturációs járműfolyama, $\hat{g}_{w,i}^M$ ($\hat{g}_{w,i}^N$) az M (N) útkereszteződés w bemenő útszakaszáról az i kimenő útszakaszra irányuló forgalom zöld jelzésének hossza, C pedig a kereszteződés ciklusideje. A konfliktushelyzet forrása az, hogy az útszakaszon található járművek számát az útszakasz két végén található kereszteződés zöld jelzései egyaránt befolyásolják.

A zöld jelzések optimális hosszának meghatározása több kereszteződés esetén nem oldható meg praktikusán, mert a sok kereszteződés (végtelen sok) döntéskombinációja miatt a hagyományos algoritmusok nem adnak valós időben megoldást. A döntési kombinációk diszkrétizálása javíthat a problémán, bár ekkor már csak szuboptimális megoldás meghatározására van lehetőség. A zöld jelzések hossza ekkor a kanyarodási útvonalakon csak diszkrét értékeket vehetnek fel, miközben a kereszteződés ciklusidejének változatlanul kell maradnia. A véges játékrá való konvertálás sok kereszteződés esetén még durva diszkrétizáció esetén is könnyen kombinatorikai robbanáshoz vezethet. A problémátér dimenzióját tovább csökkenti, ha a szomszédos kereszteződéseket (játékosokat) különálló független csoportokra bontjuk és az egyes csoportokon belül található kereszteződések vesznek csak részt a játékban. A globális, sok játékost érintő játék helyett így több, egymással párhuzamosan lezajló, kevesebb játékost érintő játékot kell kezelni. Egy lehetséges kialakítást illusztrál a 3. ábra, ahol egy-egy csoportba maximum négy kereszteződés tartozhat.

A dekompozíció természetesen gyengíti a kiadódó megoldás optimális voltát (csak szuboptimális megoldást ad), azonban lehetővé válik a probléma kezelhetősége. A csoportok mérete a kezelhetőség megtartása mellett növelhető, ha a döntési folyamatban hierarchia kialakítására kerül sor és az egyenrangú kereszteződések helyett vezető-követő viszony alakul ki a játékosok között. Hierarchikus döntéshozás esetén a Nash-egyensúly szerepét a Stackelberg-egyensúly veszi át. Intelligens forgalomirányításban igény jelentkezik arra is, hogy a járművek közlekedési hálózatba



3. ábra. Kereszteződések csoportosítása

való belépése és kilépése között csak minimális idő teljen el. A kereszteződések zöld jelzései miatt természetesen nem feltétlen a legrövidebb útvonal adja a minimális utazási időt. Az optimális útvonal megtalálása szintén történhet játékelméleti módszerekkel. A kereszteződések mellett ekkor már az intelligens járművek is játékosoknak tekinthetők. A játékosok számának növekedése miatt a problématér dimenziója megnő, ezért érdemes a többakciós játékot döntési szintenként két metajátékos játékaként tekinteni. Az egyik metajátékoshoz a kereszteződések együttese, illetve azok döntéskombinációi tartoznak. A döntések meghozatala után kialakult környezetben (forgalomban) az intelligens járműveket reprezentáló másik metajátékos hoz döntést, amelynek során játékelmélet alapú pályatervezéssel meghatározásra kerül az egyes járművek iránya a következő mintavételben. A döntés történhet determinisztikusan (a legkisebb költséget reprezentáló útvonal választásával), vagy valószínűségi alapon (ahol a legkisebb költséggel rendelkező útvonalak kiválasztási valószínűsége nagyobb). Az ilyen döntéshozatal tipikusan hierarchikus, ahol a kereszteződések formáló metajátékos a vezető, a járművek pedig alárendelt szerepben vannak.

A koncepció kiterjeszthető megkülönböztetett jelzést használó járművek (pl. rendőrség, tűzoltóság, mentő járművek) útvonaltervezése is. Amennyiben megkülönböztetett jármű érkezik a közlekedési hálózatba, akkor annak pályatervezése prioritást élvez. A játékelméleti koncepció alkalmas a járműforgalom makroszintű és mikroszintű befolyásolására is. Makroszinten a járművek tömeges, statisztikai jellemzői vannak figyelembe véve a kereszteződések zöld jelzés hosszainak kialakítása érdekében, míg mikroszinten a járművek útvonalába egyedileg, lokálisan lehet beavatkozni. Természetesen az egyes szinteken hozott döntések egymásra hatással vannak.

Új tudományos eredmények. A 2. tézisben makroszintű és mikroszintű forgalomirányítási módszereket javasoltam a városi forgalomirányítás hatékonysága növelése érdekében. A kereszteződések zöld jelzéseinek kialakítására és a járművek pályatervezésére javasolt új módszereket egy közös játékelmélet alapú keretrendszerbe integráltam.

2. tézis Játékelmélet alapú városi forgalomirányítási módszert javasoltam kereszteződések zöld jelzés hosszainak beállítására és a közlekedési hálózatba szereplő intelligens járművek pályatervezésére.

2.1. *Városi forgalomirányítás játékelméleti modellje és keretrendszere.* A városi gépjárműforgalom modellezésére egy játékelmélet alapú keretrendszert javasoltam, amely alkalmas a gépjárműforgalom makroszintű és mikroszintű modellezésére [3], [4].

2.2. *Játékelmélet alapú irányítás a makroszintű modellen.* Játékelmélet alapú irányítási módszert javasoltam a közlekedési hálózat makroszintű modellje alapján a kereszteződések zöld jelzés hosszainak kialakítására a járműforgalom optimalizálása érdekében. Módszert javasoltam a kereszteződések csoportba rendezésére és a döntési kombinációk szisztematikus diszkrétizálására, egyszerűsítésére, amely a játékelméleti kezelhetőség megtartása mellett szuboptimális megoldást szolgáltat a járműforgalom optimális eloszlására [3], [4].

2.3. *Játékelmélet alapú irányítás a mikroszintű modellen.* Játékelmélet alapú irányítási algoritmust javasoltam járművek szuboptimális pályatervezésére a városi közlekedési hálózatban. Módszert javasoltam a pályatervezési algoritmus játékelméleti keretrendszerbe való integrálására, a mikroszintű (lokális) pályatervezés és a makroszintű forgalomirányítás összekapcsolására [5].

A téziseket lefedő publikációk a következők: [3], [4], [5].

A téziseket lefedő publikációk mindegyike egyszerűs publikációk, így az abban szereplő eredmények teljes egészében saját kontribúciók.

3.3. Mobilis robotok kooperatív irányítása

Kutatási koncepció. Multiágensű robotrendszerek alkalmazásával számos műszaki probléma oldható meg hatékonyan. Nem egyszerűen csak egy adott munkafolyamat párhuzamosításáról, gyorsabb végrehajtásáról van szó, hanem a mobilis robotok alkotta csapat alkalmas koordináció mellett olyan feladatok megoldására is képes lehet, amelyek minőségében merőben bonyolultabbak az egyes robotok által individuálisan megoldható feladatoknál. Különösen igaz ez olyan feladatoknál, ahol az ágensek egy csapatot alkotnak és egy globális cél elérése a feladat. A feladat optimális megoldására a mai eszközökkel nincs praktikus módszer, ezért a probléma kezelése tipikusan dekompozícióval történik. A feladat ily módon egyszerűbben kezelhető, de csak szuboptimális megoldás megtalálására van lehetőség. A dekompozíció során különböző irányítási szintek jelennek meg. A legfelső, stratégiai szinten a csapat globális célpontjának kijelölése, illetve ez alapján az egyes ágensek feladatainak kiosztása történik. A stratégiai szinten az esetek döntő többségében mesterséges intelligencia módszerek, egyszerűsített modellen alkalmazott játékelméleti algoritmusok és különböző heurisztikák alkalmazására kerül sor. Az egyes robotok feladatainak megoldása a taktikai szinten történik. A legtöbb esetben ez pályatervezést, mozgási primitívek láncolatának megtervezését jelenti. A legalacsonyabb szinten történik a taktikai szint által megfogalmazott pályakövetés szabályozástechnikai megvalósítása.

A feladat fenti dekompozíciója azért is lehet előnyös a gyakorlatban, mert az ágensek (mobilis robotok) központosított koordinációja kiváltható a mobilis robotok autonómmá tételével, amikor is a robotok döntéseit saját hatáskörükbe utaljuk. Az így kapott elosztott rendszer az

ágensek közötti kommunikáció hiányában is képes a feladat (szuboptimális) megoldására. A megközelítés hátránya azonban az, hogy a korlátozott információk hiányában az ágensek kooperatív irányítása nem kivitelezhető, és minden ágens a globális célból származtatott egyéni (lokális) céljának elérését tűzi ki célul azaz egyéni költségét próbálja döntéseivel minimalizálni. Játékelméleti szempontból ez azt jelenti, hogy a csapaton belüli kooperatív játék nem kooperatív játékká válik [72], [73]. Ez a megközelítés számos helyen alkalmazható, ahol mobilis robotokból álló csapatnak kell közös feladatot elvégezni limitált információk birtokában (pl. objektumok mozgatása egy gyárban, robotfoci, feltérképezési feladatok, hadműveletek tervezése) [74], [75], [76] amelyek közül eklatáns és a kutatás szempontjából egyik központi példa a síkban mozgó objektum követése mobilis robotok csapatával [57].

A hagyományos megközelítés szerint a csapat tagjai egy közös játékban vesznek részt nem kooperatív módon, amelynek eredményeként a Nash-egyensúly alapján kiadódó döntéskombináció határozza meg a játék fejlődését. A Nash-egyensúlyi stratégia olyan döntési kombinációt valósít meg, amelytől egy játékosnak sem érdemes eltérnie egyoldalúan, mert nem jár jobban (tipikusan inkább rosszabbul) a költségeit tekintve. A Nash egyensúly alkalmazásánál több probléma is felléphet. Ilyen eset, ha tiszta stratégiákban nem létezik Nash-egyensúly (kevert stratégiák terében mindig létezik Nash-egyensúly, azok számítása és megvalósítása körülményesebb, ezért sok alkalmazásban elvetik használatukat). Ebben az esetben a játékosok kénytelenek a biztonsági stratégiájukat választani, amely a legpesszimistább forgatókönyvre készül fel. Nagy dimenziójú játékokban a fő probléma akkor jelenik meg, amikor egynél több Nash-egyensúly létezik. Ez szintén nem előnyös, mert az egyensúlyi kimenetek nem felcserélhetők a játék nem kooperatív volta miatt. Ekkor az egyik egyensúly az egyik játékosnak, másik egyensúly a másik játékosnak kedvez, vagyis egyik egyensúly sem preferálható egyértelműen a másikkal szemben. Érdemes tehát egy olyan módszer kifejlesztése, amely az említett nehézségek által okozott szituációkat elkerüli. Első lépésben a Stackelberg-egyensúly alkalmazása javasolt a Nash-egyensúllyal szemben. A Stackelberg-egyensúly olyan játékot realizál, amelyben a játékosok a döntéshozatal során nem egyenrangúak, hanem közöttük hierarchia (vezetők, követők). A Stackelberg-egyensúlyt megvalósító játékban a vezető előre be tudja jelenteni a döntését, és a követő(k)nek ehhez kell alkalmazkodni a költségeik optimalizálásánál.

A Stackelberg-stratégiák egyik előnye, hogy csapatjátékokban gyakran könnyű hierarchia szintet felállítani a közös globális cél megvalósítását kitűző játékosok között. Alkalmazástól függően lehetséges koncepció lehet pl. a legnagyobb vagy a legkisebb költséggel rendelkező játékos vezetőnek való kijelölése. További előny az, hogy Stackelberg-egyensúly mindig létezik tiszta stratégiákban. Hierarchikus döntéshozatal mellett is előfordulhat azonban több Stackelberg-egyensúly létezése. Ennek egyik fő oka, hogy a vezető adott döntésére a követőknek több optimális válasza lehet. A korábbi alkalmazások nem kooperatív jelleget feltételeznek és emiatt a vezetőnek a számára legpesszimistább kimenettel kell számolni a követők döntését illetően. Egy továbbfejlesztett koncepció azonban kihasználhatja azt, hogy a játékosok ugyanannak a csapatnak a tagjai még akkor is, ha döntéseiket saját érdekükben, autonóm módon hozzák. Ebben az esetben, ha egy vezető döntésére a követőknek több optimális válasza is van (ezek csak a vezetőnél realizálódnak különböző költségként, a követők számára a költséget tekintve azonosan jó döntési alternatívákról van szó), akkor a vezető nyugodtan feltételezheti, hogy a követők a vezető számára legjobb döntéskombinációt választják. Ennek egyszerű oka az, hogy ugyanabban a csapatban játszanak és a követők a vezetőnek való kedvezéssel nem rontják saját költségeiket. A szívesség fordítva is fennállhat. Ha a vezetőnek több azonos költséggel

rendelkező optimális döntése van, ő is választhatja azt, amely a követőknek legjobb. Ez utóbbira azonban nem kell különösebben felkészülni a követőknek, hisz ők a döntésüket mindig a vezető döntésének ismeretében hozzák.

Az említett játékelméleti megközelítés egyik legfontosabb alkalmazási területe a mozgó objektum követése mobilis robot csapattal. A korábbi játékelméleti módszer [57] ebben az esetben úgy épül fel, hogy az egyes robotok költsége különböző komponensekből épül fel, amelyek súlyozott összege szolgáltatja a robot eredő költségét. Ilyen komponens az objektumok egymáshoz való közelsége, az egyes robotok távolsága a csapat tömegközéppontjától, illetve a csapat tömegközéppontjának távolsága a mozgó objektumtól. A módszer hatékonysága javítható az új egyensúlyi koncepció alapján. A hatékonyság tovább növelhető, ha egy kívánt formáció elérése is cél, és az attól való eltérés szintén költséget von maga után a robotok számára. A játékelmélet alapú célpontkövetés hátránya, hogy a korábbi módszerek az egyes költségkomponensek súlyait tapasztalati értékek alapján állították be. A súlyok hangolására mesterséges intelligencia módszerek is alkalmazhatók akár költség szint szabályozás érdekében, akár mesterséges intelligencia alapú magas szintű stratégia kidolgozásával. Ebben az esetben a játékelméleti módszerrel hozott lokális döntések a taktikai szintet valósítják meg.

Bonyolultabb, többszereplős feladatoknál (pl. robotfoci vagy a csapatszintű menekülő-üldöző játékok) a játékelméleti módszerek mellett más mesterséges intelligencia eszközökön és heurisztikák alapuló technikák is sikeres megoldáshoz vezethetnek. Ezek a megközelítések azonban feladatfüggők és a problémátér jelentős absztrakcióját igénylik a konkrét algoritmus végrehajtása előtt.

Új tudományos eredmények. A 3. tézisben olyan irányítási módszereket javasoltam mobilis robot csapat mozgáskoordinációjára, amelyek mozgó célpont követésére, ellenséges környezetben menekülő-üldöző játékok szuboptimális viselkedésére, illetve tárgymanipulációjára alkalmasak.

3. tézis Célpontkövetési módszert javasoltam, amely az irányítási architektúra taktikai szintjén megjelenő, új játékelméleti egyensúlyt alkalmazó megközelítést ötvözi a mesterséges intelligencia alapú stratégiai szinttel egy semleges környezetben. Mesterséges intelligencia és heurisztikus módszerek egy koncepcionális stratégiai keretrendszerét építettem fel ellenséges környezetben tevékenykedő mobilis robotcsapat számára, amelyek a csapatszintű menekülő-üldöző játékokban és (a robotfocival reprezentált) mobilis tárgymanipulációra alkalmazhatók.

3.1. *Szemi-kooperatív Stackelberg-egyensúly bevezetése.* A csapatkoordinációhoz jól illeszkedő szemi-kooperatív Stackelberg-egyensúly bevezetését javasoltam olyan feladatok elvégzésénél, ahol a mobilis robotok korlátozott kommunikációja (vagy egyéb okok miatt) a csapattagok egyéni költségeik alapján autonóm döntések meghozatalára vannak kényszerítve. Megmutattam, hogy a szemi-kooperatív Stackelberg-stratégia alkalmazásával a csapat vezetője semmiképp sem jár rosszabbul a nem kooperatív Stackelberg-egyensúlyhoz és a Nash-egyensúlyhoz képest [6], [9].

3.2 *Játékelmélet alapú objektum követés kiterjesztése formációirányítással.* A korábbi játékelmélet alapú objektumkövetési módszer kiterjesztésével olyan módszert javasoltam, amely képes mozgó objektum előírt formációban való követésére [6], [9]. A módszer alkalmas tetszőleges számú robotot számláló csapat formáció irányítására.

3.3 *Játékelméleti módszer integrációja fuzzy szabályozóval és stratégiával.* A mozgó objektum követésére kidolgozott módszerhez fuzzy szabályozóval, ill. magas szintű fuzzy szakértővel támogatott stratégiai szinteket javasoltam, amelyek a költségkomponensek súlyainak on-line hangolásával növelik a játékelmélet alapú taktikai szint stabilitását, konvergencia tulajdonságait és a követés robusztusságát [6], [7], [9].

3.4 *Multiágensű robotcsapat mozgáskoordinációja heurisztikus és megerősítéses tanulás alapú stratégiákkal.* Megerősítéses tanulás és heurisztika alapú magas szintű stratégia koncepcióját javasoltam multiágensű robotrendszer mozgáskoordinációjára menekülő-üldöző játékokra [10] és ellenséges környezetben végrehajtott tárgymanipulációra, amelyek sikeresen alkalmazhatók hadműveletek tervezéséhez és robotfoci játék stratégiáihoz [8].

A téziseket lefedő publikációk a következők: [6], [7], [8], [9], [10]. További kapcsolódó publikációk: [13], [14], [21].

A téziseket lefedő publikációk közül kettő egyszerezős publikáció ([6], [7]), így az abban szereplő eredmények teljes egészében saját kontribúciónak tekinthető. Ezen kívül egy publikációban első szerzőként szerepelek ahol a lengyel társszerzőm (K. Skrzypczyk) nyilatkozata alapján a megjelent eredmények 90%-a saját kontribúciónak tekinthető. A társszerzőm kontribúciója alapvetően egy korábbi publikációban ([57]) megjelentetett játékelméleti alapkoncepció lefektetése volt, amely a tézisekben tovább lett fejlesztve. A nem közvetlenül játékelméleten alapuló publikációkban ([8], [10]) közzétett magas szintű stratégiák kidolgozását Kisfaludi Péter MSc hallgatómmal és Gasztonyi Péter doktorandusz hallgatómmal közösen végeztük. Témavezetőként mindkét esetben a kutatási irányvonal kijelölését és a koncepció alapjainak kidolgozását végeztem, míg a hallgatók a részletekbe menő megvalósítást és a koncepción való csiszolásokat végezték.

4. Tudományos eredmények hasznosítása

A kidolgozott módszerek különböző mobilitással illetve mechanikai csatolással rendelkező multi-ágensű rendszerek koordinációjára alkalmasak.

A sodrásmentesítésre kidolgozott módszerek alkalmazhatók a lépegető és kerekes robotok, ill. speciális vízi járművek pályatervezésére olyan környezetben is, amelyek járulékos kihívásokkal nehezítik a robot mozgását (pl. lejtőn való mozgás, szél, sodrással rendelkező folyó). A kutatási eredmények az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok (OTKA) T 042634 és OTKA K 71762 számú projektek támogatásával a tanszéken folyó négy illetve hatlábú robotok implementációjában kerülnek felhasználásra, amelynek fejlesztése jelenleg is folyamatban van. A városi forgalomirányítás hatékonyságának növelése a fejlett országok városaiban egyre nagyobb kihívás. A játékalapú megközelítéseket alkalmazó módszerek újak tekinthetők ezen a területen. A bemutatott eredmények az Nemzeti Kutatási és Technológiai Hivatal (NKTH) RET 04/2004 számú Jármű és Járműirányítási Tudásközpont projektjén belül kerültek megvalósításra. A megvalósítás során a kidolgozott módszereknek elkészült a stand-alone applikációja is, amely lehetővé teszi az algoritmusok futtatását gyakorlatilag bármilyen elterjedt platformon és valós idejű környezetben.

Mobilis robotok kooperatív irányítása komplex és sokrétű feladat. A tudományos eredmények csak egy kisebb, de gyakorlati alkalmazásokban fontos területre fókuszálnak, amelyek aztán könnyen átültethetők hasonló problémák megoldására. A kutatási eredmények egy kanadai magyar és erdélyi egyetemek kooperációjában zajló közös projekt keretében kerültek megvalósításra az Európai Unió és Kanada kormányának támogatásával a EU-Canada Transatlantic Exchange Partnership - Control and Coordination of Multi-Agent Robotic Systems 2007-2008/002-002 számú projekt keretében. Az együttműködés során az egyetemek hallgatói és kutatói egy közös mobilis robot platform implementációját végezték el, amelynek alapján különböző feladatok (formációirányítás, területbiztosítás, feltérképezés, robotfoci játék, robothoki játék) elvégzésére alkalmas robotcsapat illetve multiágensű rendszer jött létre. A tesztkörnyezet alkalmas multiágensű problémák hardveres és szoftveres fejlesztésére. A kidolgozott eredmények a szórakoztató iparon (robotfoci/robothoki) és a katonai alkalmazásokon (hadműveletek tervezésén) túl hasznosíthatók többek között kórházakban vagy gyárakban működő szállító robotok kooperatív irányítására, dokkolási/parkolási feladatok megoldására, navigációs rendszerekben az egységek számára előírt formáció megvalósítására. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. Megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

5. Tíz válogatott publikáció

- [1] I. Harmati, B. Kiss, E. Szadeczky-Kardoss, On drift neutralization of stratified systems, in: Robot motion and Control, Lecture notes in Control and Information Sciences., Springer, 2006, pp. 85–96.
- [2] I. Harmati, G. Kovacs, On drift neutralization of six legged robot, in: H. Fujimoto, M. O. Tokhi, G. S. V. H. Mochiyama (Eds.), Emerging Trends in Mobile Robotics, World Scientific Publishing Co., Nagoya, Japan, 2010, pp. 614–621.
- [3] I. Harmati, Urban traffic control in game theoretic framework, in: Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on System Science and Simulation Engineering, No. 2, Puerto de la Cruz, Canary Islands, Spain, 2006, pp. 346–351.
- [4] I. Harmati, Game theoretic control algorithms for urban traffic network, WSEAS Transactions on systems and control 1 (2) (2006) 141–148.
- [5] I. Harmati, Urban traffic control and path planning for vehicles in game theoretic framework, Vol. 360 of LECTURE NOTES IN CONTROL AND INFORMATION SCIENCES, Springer, 2007, pp. 437–444.
- [6] I. Harmati, Multiple robot coordination for target tracking using semi-cooperative stackelberg equilibrium, in: Proceedings of the International Control Conference, 2006, pp. 1–6, iBSN: 0947649549.
- [7] I. Harmati, Multi-agent coordination for target tracking using fuzzy inference system in game theoretic framework, in: Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC), 2006, pp. 2390–2395.
- [8] P. Gasztonyi, I. Harmati, Heuristics-based high-level strategy for multi-agent systems, in: V. Kurkova, R. Neruda, J. Koutník (Eds.), Artificial Neural Networks – ICANN 2008, Lecture Notes in Computer Sciences, Springer, 2008, pp. 700–709.
- [9] I. Harmati, K. Skrzypczyk, Robot team coordination for target tracking using fuzzy logic controller in game theoretic framework, ROBOTICS AND AUTONOMOUS SYSTEMS 57 (1) (2008) 75–86.
- [10] P. Kisfaludi, I. Harmati, Military strategy planning for autonomous ground vehicles, HAD-MERNOK 6 (2) (2011) 173–191.

6. További kapcsolódó publikációk

- [11] I. Harmati, Motion planning methods for stratified systems, in: Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Mechatronics, 2006, pp. 525–530, iBSN: 0947649549.
- [12] I. Harmati, A. D. Drexler, Holonomic stratified motion planning along decomposed trajectory, INTERNATIONAL REVIEW OF AUTOMATIC CONTROL 2 (3) (2009) 268–285.
- [13] P. Gasztonyi, I. Harmati, Heuristics-based high-level strategy in multi-agent environment, in: Proceedings of International Control Conference, Manchester, UK, 2008, pp. 1–6.
- [14] A. Gyorgy, I. Harmati, Motion planning algorithm for tactical actions in robot soccer, in: Proceedings of IEEE European Control Conference, Budapest, Hungary, 2009, pp. 4445–4450.
- [15] I. Harmati, B. Lantos, S. Payandeh, Stratified motion planning concept in stair-like environment, in: Proceedings of the Fourth International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo '04), 2004, pp. 259–264.
- [16] I. Harmati, B. Lantos, S. Payandeh, On fitted stratified and semi-stratified geometric manipulation planning with fingertips relocations, The International Journal of Robotics and Automation 20 (3) (2005) 135–144.
- [17] L. Kolek, I. Harmati, Model based simulation and fuzzy control of solar heating system, in: Proceedings of the 13th IEEE/IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Miedzyzdroje, Poland, 2007, pp. 667–672.
- [18] D. A. Drexler, I. Harmati, Symbolic robot simulation software for educational purposes, in: Proceedings of IEEE European Control Conference, Budapest, Hungary, 2009, pp. 5081–5086.
- [19] L. Kovacs, P. Szalay, T. Ferenci, A. D. Drexler, J. Sapi, I. Harmati, Z. Benyo, Modeling and optimal control strategies of diseases with high public health impact, in: INES 2011 – 15th International Conference on Intelligent Engineering System, Poprad, Slovakia, 2011, pp. 23–28.
- [20] D. A. Drexler, I. Harmati, L. Kovacs, Symbolic robot simulation software for educational purposes, in: MACRo 2011 – 3d International Conference on Recent Achievements in Mechatronics, Automation, Computer Sciences and Robotics, Targu Mures, Romania, 2011, pp. 273–284.
- [21] I. Harmati, D. A. Drexler, Suboptimal robot team coordination, Chapter 7 in Optimization in computer engineering – Theory and applications, Scientific Research Publishing, 2011, pp. 101–126.
- [22] D. A. Drexler, I. Harmati, Optimization issues on the motion planning of kinematically redundant manipulators, Chapter 6 in Optimization in computer engineering – Theory and applications, Scientific Research Publishing, 2011, pp. 81–98.

7. Hivatkozások

- [23] J. Desai, J. P. Ostrowski, V. Kumar, Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 17 (6) (2001) 905–908.
- [24] J. R. T. Lawton, R. W. Beard, B. J. Young, A decentralized approach to formation maneuvers, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 19 (6) (2003) 933–941.
- [25] F. E. Schneider, D. Wildermuth, Using an extended kalman filter for relative localisation in moving robot formation, 4th International Workshop on Robot Motion and Control, 2004, pp. 85–90.
- [26] F. L. Lian, R. Murray, Real-time trajectory generation for cooperative path planning of multi vehicle systems, *IEEE Conference on Decision and Control*, 2002, pp. 3766–3769.
- [27] A. V. Savkin, Coordinated collective motion of groups of autonomous mobile robots: analysis of vicsek’s model, *IEEE Transactions on Automatic Control* 49 (6) (2004) 981–983.
- [28] J. S. Bellingham, M. Tillerson, M. Alighanbari, J. P. How, Cooperative path planning for multiple uavs in dynamic and uncertain environments, *IEEE Conference on Decision and Control*, 2002, pp. 2816–2822.
- [29] H. G. Tanner, G. J. Pappas, V. Kumar, Leader-to-formation stability, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 20 (3) (2004) 443–455.
- [30] J. Desai, J. P. Ostrowski, V. Kumar, Controlling formations of multiple mobile robots, in: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, 1998, pp. 2864–2869.
- [31] W. Kowalczyk, K. Kozłowski, Artificial potential based control for a large scale formation of mobile robots, in: *Proceedings of Forth International Workshop on Robot Motion and Control*, 2004, pp. 285–291.
- [32] M. Egerstedt, X. Hu, Formation constrained multi-agent control, *IEEE Transactions on Robotics & Automation* 17 (6) 947–951.
- [33] D. A. Anisi, J. Hamberg, X. Hu, Nearly time-optimal paths for a ground vehicle, *Journal of Control Theory and Applications*.
- [34] D. J. Balkcom, M. T. Mason, Time optimal trajectories for bounded velocity differential drive vehicles, *International Journal of Robotics Research* 21 (3) (2002) 199–217.
- [35] S. M. LaValle, D. Lin, L. J. Guibas, J.-C. Latombe, R. Motwani, Finding an unpredictable target in a workspace with obstacles, in: *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1997, pp. 737–742.
- [36] J. Peng, S. Akella, Coordinating multiple robots with kinodynamic constraints along specified paths, in: J.-D. Boissonnat, J. Burdick, K. Goldberg, S. Hutchinson (Eds.), *Algorithmic Foundations of Robotics V (WAFR 2002)*, Springer-Verlag, Berlin, 2002, pp. 221–237.

- [37] S. S. Chiddarwar, N. R. Babu, Conflict free coordinated path planning for multiple robots using a dynamic path modification sequence, *Robotics and Autonomous Systems* 59 (7-8) (2011) 508 – 518.
- [38] T. M. Cheng, A. V. Savkin, F. Javed, Decentralized control of a group of mobile robots for deployment in sweep coverage, *Robotics and Autonomous Systems* 59 (7-8) (2011) 497 – 507.
- [39] M. Juliá, Óscar Reinoso, A. Gil, M. Ballesta, L. Payá, A hybrid solution to the multi-robot integrated exploration problem, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 23 (4) (2010) 473 – 486.
- [40] C. Diakiki, Integrated control of traffic flow in corridor networks, Ph.D. thesis, Technical University of Crete, Chania, Greece (1999).
- [41] H. Ceylan, M. G. H. Bell, Traffic signal timing optimization based on genetic algorithm approach, including drivers' routing, *Transportation Research Part B*, Elsevier Ltd. 38 (2004) 329–342.
- [42] N. H. Gartner, C. Stamatiadis, Arterial based control of traffic flow in urban grid networks, *Mathematical and Computer Modeling*, Elsevier Ltd. 35 (2002) 657–671.
- [43] M. Kaczmarek, Fuzzy group model of traffic flow in street network, *Transportation Research Part C*, Elsevier Ltd. 13 (2005) 93–105.
- [44] Y. C. J. Sheu, M. Weng, Stochastic system modeling and optimal control of incident-induced traffic congestion, *Mathematical and Computer Modeling*, Elsevier Ltd. 38 (2003) 533–549.
- [45] B. Friedrich, E. Almasri, Online offset optimisation in urban networks based on cell transmission model, in: *Proceedings of the 5th European Congress on Intelligent Transport Systems and Services*, Hannover, Germany, 2005.
- [46] B. Friedrich, Traffic monitoring and control in metropolitan areas, in: *Proceedings of the 2nd International Symposium "Networks for Mobility"*, Stuttgart, Germany, 2004.
- [47] H. Haj-Salem, M. Papageorgiou, Ramp metering impact on urban corridor traffic: Field results, *Transportation Research Part A* 29A (4) (1995) 303–319.
- [48] T. Bellemans, B. D. Schutter, B. D. Moor, Model predictive control for ramp metering of motorway traffic: A case study, *Control Engineering Practice* 14 (7) (2006) 757–767.
- [49] B. Friedrich, M. Shanin, Adaptive traffic control in metropolitan areas, in: *Proceedings of the 4th International Conference on the Role of Engineering Towards a Better Environment*, No. 2, 2002, pp. 1–6.
- [50] V. Dinopoulou, C. Diakaki, M. Papageorgiou, Applications of urban traffic control strategy *tuc*, *European Journal of Operational Research* 175 (3) (2006) 1652–1665.

- [51] C. Diakaki, M. Papageorgiou, K. Aboudolas, A multivariable regulator approach to traffic-responsive network-wide signal control, *Control Engineering Practice* 10 (2) (2002) 183–195.
- [52] C. Daganzo, The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with hydrodynamic theory, *Transportation Research Part B* 28 (4) (1994) 269–287.
- [53] J. B. Cruz, M. A. Simaan, A. Gacic, Y. Liu, Moving horizon game theoretic approaches for control strategies in a military operation, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 38 (3) (2002) 989–999.
- [54] Y. Liu, M. A. Simaan, J. B. Cruz, An application of dynamic nash task assignment strategies to multi-team military air operations, *Automatica* 39 (2003) 1469–1478.
- [55] S. Lazebnik, Visibility-based pursuit evasion in three-dimensional environments, Tech. Rep. CVR TR 2001-01, Beckman Institute, University of Illinois (2001).
- [56] J.-H. Lee, S. Y. Shin, K.-Y. Chwa, Visibility-based pursuit-evasions in a polygonal room with a door, in: *Proceedings ACM Symposium on Computational Geometry*, 1999.
- [57] K. Skrzypczyk, Game theory based target following by a team of robots, in: *Proceedings of Forth International Workshop on Robot Motion and Control*, 2004, pp. 91–96.
- [58] H. Yamaguchi, A distributed motion coordination strategy for multiple nonholonomic mobile robots in cooperative hunting operations, in: *Proceeding of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*, Las Vegas, Nevada, USA, 2002, pp. 2984–2991.
- [59] H. Yamaguchi, A cooperative hunting behavior by mobile robot troops, *The International Journal of Robotics Research* 18 (8) (1999) 931–940.
- [60] H. H. González-Baños, C.-Y. Lee, J.-C. Latombe, Real-time combinatorial tracking of a target moving unpredictably among obstacles, in: *Proceedings IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2002.
- [61] K. Hwang, S. Tan, C. Chen, Cooperative strategy based on adaptive q-learning for robot soccer systems, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 12 (4).
- [62] H. L. Sng, C. H. M. G. Sen Gupta, Strategy for collaboration in robot soccer, in: *IEEE DELTA*, No. 2, 2002, pp. 347–351.
- [63] M. Bowling, Multiagent learning in the presence of agents with limitations, Ph.D. thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA (2003).
- [64] K. Jolly, K. Ravindran, R. Vijayakumar, R. S. Kumar, Intelligent decision making in multi-agent robot soccer system through compounded artificial neural networks, *Robotics and Autonomous Systems* 55 (7) (2007) 589 – 596.
- [65] R. Ros, J. L. Arcos, R. L. de Mantaras, M. Veloso, A case-based approach for coordinated action selection in robot soccer, *Artificial Intelligence* 173 (9-10) (2009) 1014 – 1039.

- [66] G. Lafferriere, H. Sussmann, Motion planning for controllable systems without drift, in: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1991, pp. 1148–1153.
- [67] F. Bullo, Nonlinear control of mechanical systems: A riemannian geometry approach, Ph.D. thesis, California Institute of Technology (1999).
- [68] F. Bullo, M. Zefran, On mechanical control systems with nonholonomic constraints and symmetries, Systems and Control Letters 45 (2) (2002) 133–143.
- [69] J. J. Collins, I. Stewart, Hexapodal gaits and coupled nonlinear oscillator models, Biological Cybernetics (68) (1993) 287–298.
- [70] B. Goodwine, J. W. Burdick, Controllability of kinematic control systems on stratified configuration spaces, IEEE Transaction on Automatic Control 46 (3) (2001) 358–368.
- [71] B. Goodwine, Control of stratified systems with robotic applications, Ph.D. thesis, California Institute of Technology (1998).
- [72] T. Basar, G. J. Olsder, Dynamic noncooperative game theory, 2nd Edition, SIAM, 1999.
- [73] J. M. Bilbao, Cooperative games on combinatorial structures, Vol. 26 of Theory and Decision Library, Series C: GAME theory, Mathematical programming and Operations research, Kluwer academic publishers, 2000.
- [74] S. M. LaValle, A game theoretic framework for robot motion planning, Ph.D. thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign (1995).
- [75] G. Owen, Game theory, 3rd Edition, Academic Press, 1995.
- [76] L. A. Petrosjan, N. A. Zenkevich, Game theory, Vol. 3 of Series on optimization, World Scientific, 1996.
- [77] T. Basar, P. Bernhard, H^∞ -Optimal control and related minimax design problems - A dynamic game approach, Systems and control: Foundations and applications, CRC Press, 1991.
- [78] I. Harmati, Stratified motion and manipulation algorithms in robotics, Ph.D. thesis, Budapest University of Technology and Economics (2004).
- [79] S. Akella, S. Hutchinson, Coordinating the motions of multiple robots with specified trajectories, in: Proceedings IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2002, pp. 624–631.
- [80] B. Aronov, M. de Berg, A. F. van der Stappen, P. Svestka, J. Vleugels, Motion planning for multiple robots, Discrete and Computational Geometry 22 (1999) 505–525.
- [81] J. Barraquand, J.-C. Latombe, Nonholonomic multibody mobile robots: Controllability and motion planning in the presence of obstacles, in: Proceedings IEEE International Conference on Robotics & Automation, 1991, pp. 2328–2335.

- [82] S. J. Buckley, Fast motion planning for multiple moving robots, in: Proceedings IEEE International Conference on Robotics & Automation, 1989, pp. 322–326.
- [83] S. Carpin, E. Pagello, On parallel RRTs for multi-robot systems, in: Proceedings 8th Conference of the Italian Association for Artificial Intelligence, 2002, pp. 834–841.
- [84] S. M. LaValle, S. A. Hutchinson, Optimal motion planning for multiple robots having independent goals, *IEEE Trans. on Robotics and Automation* 14 (6) 912–925.
- [85] Y. Wang, C. W. de Silva, A machine-learning approach to multi-robot coordination, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 21 (3) (2008) 470 – 484.