



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Irányítástechnika és Informatika Tanszék

Gincsainé Szádeczky-Kardoss Emese

**Nemlineáris anholonom mechatronikai rendszerek
valósídejű mozgástervezése időskálázás használatával**

**Real-Time Motion Planning for Nonlinear
Nonholonomic Mechatronic Systems Using Time-Scaling**

Tézisfüzet

Témavezető:
dr. Kiss Bálint

Budapest, 2009. június 30.

1. Bevezetés, célkitűzések

A mechanika egyre nagyobb integrációja figyelhető meg a digitális elektronikával illetve az informatikával. Az integráció a hardver elemek és az információ-vezérelt szoftver funkciók között valósul meg, az így keletkezett összetett rendszert gyakran nevezik mechatronikai rendszernek. Ilyen rendszerek tervezésekor össze kell hangolni az alap mechanikai struktúrát az érzékelő és beavatkozó szervekkel, az automatikus információ feldolgozást a rendszer átfogó irányításával [Ise08].

Ha adott egy általános cél, egy alkalmas akciósorozatot kell tervezni az érzékelt információk felhasználásával, mely referenciaként szolgálhat. Ezen referencia számítását szokás trajektória-tervezésnek, esetleg mozgástervezésnek [Lat91, LaV06] nevezni. Ha meghatároztuk a kívánt működést, egy szabályozó algoritmust használhatunk ennek pontos megvalósítására. Mobilis robotok esetén az érzékelés, a mozgástervezés és a tervezett pálya követését biztosító szabályozás alkotja a navigációs feladatot.

Az autonóm robotok navigációjának fontos része a mozgástervezés. Számos rendszert illetve robotot fejlesztenek ki úgy, hogy azok emberi irányítás nélkül tudjanak mozogni, működni, ezért ezeknek a rendszereknek képesnek kell lenniük arra, hogy megtervezzék saját mozgásukat.

A tervezési feladat megoldása során szükség lehet számos információra. Ismerni kell a rendszer tulajdonságait (pl. a robot mozgásegyenletét), a környezetét, vagy fel kell azt térképezni a működés során. A feladat olyan mozgás megtervezése két adott konfiguráció között, mely kielégíti a felmerülő kényszereket (pl. ütközések elkerülése, maximális beavatkozó jelek). A mozgás meghatározható a pálya geometriájának számításával, továbbá egy sebességprofil hozzárendelésével, mely megadja a referencia pálya időeloszlását.

Az ideális mozgástervező algoritmusra igazak a következő állítások:

- Mindig megtalálja a megoldást, ha létezik.
- Ha több megoldás is van, akkor ezek közül egy adott szempontból optimálisat választ (pl. a legrövidebb pályát vagy a legkisebb energiaigényűt).
- Meg tudja állapítani azt, ha nincs megoldás.
- Megvalósítható pályát tervez, azaz megfelel minden kényszernek.
- Valós időben végzi a referencia pálya számítását.

A fenti felsorolás tartalmaz egymást kizáró tulajdonságokat, főleg akkor, ha nemlineáris és/vagy anholonom rendszer mozgástervezési feladatát kell megoldani [Dul98, Blo03]. (Akkor nevezünk anholonomnak egy mechanikai rendszert, ha egy adott konfigurációban a lehetséges elmozdulások iránya oly módon korlátozott, hogy ezt a korlátozást nem lehet felírni a

konfigurációt meghatározó változók algebrai kifejezéseként. Anholonom rendszerek tipikus példája az autó kinematikus modelje, hiszen az orientációja határozza meg, hogy merre mehet tovább egy autó.) Ha olyan optimális megoldást keresünk, mely kielégíti az összes felmerülő kényszert, általában hosszú számítási időre kell számítanunk. Ha kisebb számítási igényű tervezési algoritmust választunk, előfordulhat, hogy olyan megoldást ad, mely nem felel meg az összes feltételnek, vagy bonyolult feladatok esetén nem is talál megoldást.

A gyakorlati alkalmazások és a fent említett nehézségek miatt a mozgástervezés napjainkban is egy szívesen kutatott terület. A gyakorlatban alkalmazzák az eredményeit. Például napjaink egyik kedvelt alkalmazási területe az intelligens járműirányítás.

Fő céloom az volt, hogy hatékony, valós időben számítható mozgástervezési módszereket adjak konkrét, alkalmazási szempontból lényeges problémákra.

A kutatást – részben – egy gyakorlati probléma motiválta: egy személyautó intelligens irányítását kellett valós időben megvalósítani. A jármű tulajdonságai miatt irányult a figyelmem a nemlineáris, anholonom rendszerekre. Két fő feladatot kellett megoldani: valós időben használható mozgástervezési módszert kellett fejleszteni anholonom rendszerekhez, továbbá olyan szabályozási algoritmust kellett kidolgozni, amely biztosítja a megtervezett pálya pontos követését.

1.1. Mozgástervezési feladat

A mozgástervezési feladat precíz megfogalmazása [LaV06] alapján a következő:

- Adott a munkatér \mathcal{W} (pl. $\mathcal{W} \subseteq \mathbb{R}^2$ vagy $\mathcal{W} \subseteq \mathbb{R}^3$).
- Akadályok vannak a munkatérben. A munkatér azon részhalmazát, melyet az akadályok elfoglalnak $\mathcal{O} \subset \mathcal{W}$ -val jelöljük.
- A \mathcal{W} munkatérben egy merev robot vagy m darab robot szegmens mozog. \mathcal{A} illetve $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2 \dots \mathcal{A}_m$ jelöli azon halmazokat \mathcal{W} -ben, melyeket a robot illetve a szegmensek elfoglalnak. (\mathcal{A} és \mathcal{A}_i véges, zárt és összefüggő.)
- A robot konfigurációja változókkal írható le. Ezen változók lehetséges értékei feszítik ki a robot \mathcal{C} konfigurációs terét. Az $\mathcal{A} : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{W}$ leképezés \mathcal{C} egy adott konfigurációjához megadja a robot által a munkatérben elfoglalt pontok halmazát. (Egy síkban mozgó robot esetén választható $\mathcal{C} \subseteq SE(2)$. $SE(2)$ a speciális euklideszi csoportot jelöli a síkban.) Jelölje \mathcal{C}_{obs} (akadály-régió) \mathcal{O} képét az \mathcal{A} inverz leképezése esetén. Ezáltal a szabad régió \mathcal{C}_{free} definiálható $\mathcal{C}_{free} = \mathcal{C} \setminus \mathcal{C}_{obs}$.
- A robot mozgását $\dot{c} = f(c, u)$ alakú kinematikai egyenlet írja le, ahol $c \in \mathcal{C}$ a robot konfigurációja, és u az alkalmazott beavatkozó jel.

- Két konfiguráció távolságát egy távolság metrika adja meg: $\mathcal{D} : \mathcal{C} \times \mathcal{C} \rightarrow [0, \infty)$.
- A mozgás egy kezdeti konfigurációból indul: $c_I \in \mathcal{C}_{free}$.
- Adott továbbá a cél konfiguráció vagy a cél régió: $c_G \in \mathcal{C}_{free}$ illetve $\mathcal{C}_G \subset \mathcal{C}_{free}$.
- Egy folytonos $\Gamma : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{C}$ pályát trajektóriának hívunk, ha

$$\Gamma = \{ \Gamma(t) | \forall t_i \in [0, T_f], \Gamma(t_i) \in \mathcal{C}_{free} \ \& \ \Gamma(0) = c_I \ \& \ \Gamma(T_f) = c_G \ \text{(vagy } \Gamma(T_f) \in \mathcal{C}_G) \ \& \ \exists u, \frac{d\Gamma(t)}{dt} = f(\Gamma(t), u) \},$$

ahol T_f a mozgás idejét jelöli, és u az alkalmazott beavatkozó jel.

- Γ nem létezik, ha a kezdeti és a cél konfiguráció nem köthető össze.
- Egyéb kényszerek is előfordulhatnak, mint például
 - Beavatkozó jel korlátossága (pl. $u_{min} \leq u \leq u_{max}$)
 - Geometriai kényszerek (pl. $h_i(c) \neq 0$)
 - Anholonom kényszerek (pl. $h_j(c, \dot{c}) = 0$)
 - Kinodinamikai kényszerek (pl. $h_k(c, \dot{c}, \ddot{c}) \leq 0$)
- Megvalósíhatónak hívjuk a $\Gamma(t)$ trajektóriát, ha kielégíti ezen kényszereket.

Egyes gyakran előforduló mozgástervezési problémák (pl. euklideszi metrika alapján legrövidebb út keresése két pont között három dimenziós térben síklapú akadályok esetén, vagy a két dimenziós mozgástervezési probléma dinamikus környezetben korlátos sebesség esetén) NP-teljesek [CR87]. Ezért érdemes csak konkrét rendszerosztályokkal foglalkozni, vagy kisebb számítási igényű, valószínűségi alapú megoldást adni a mozgástervezési feladatra.

1.2. Kutatási módszerek

A kutatást egy gyakorlati alkalmazás motiválta. Egy személyautóhoz kellett mozgástervező algoritmust készíteni, majd a referencia trajektória követését biztosító szabályozó megtervezése volt a feladat.

A kutatás részben az Elektromos Jármű és Járműirányítási Tudásközpont keretein belül zajlott. Itt alkalmam volt arra, hogy együtt dolgozhassak ipari partnerekkel (főként a ThyssenKrupp Presta Hungary Kft.-vel).

A kutatás több fázisból állt. Az irodalom tanulmányozása után saját módszereket fejlesztettem ki. Az algoritmusok hatékonyságát elméleti módszerekkel illetve szimulációval és valós alkalmazásban vizsgáltam.

Az irodalom feldolgozásával kezdődött a kutatás. Ennek rövid összefoglalója megtalálható a disszertációmban. Számos módszert tanulmányoztam, összegyűjtöttem az előnyeiket, hátrányaikat, elsősorban a valósidejű megvalósíthatóság szempontjából. Az volt a célom, hogy – különböző követelményeket kielégítő – referencia mozgást tervezek valósidőben általános anholonom rendszerekhez illetve speciálisan jármű-szerű mobilis robotokhoz a meglévő módszerek továbbfejlesztésével vagy új algoritmusok megalkotásával. A tervezés során kihasználtam az irodalomban fellelhető előnyös megoldásokat.

A megtervezett módszereket a szabályozástechnika illetve a matematika eszközeivel elemeztem. Például a számítási igényt, rendszer tulajdonságokat (pl. irányíthatóság, stabilitás) vizsgáltam.

Az elkészült algoritmusokat mind implementáltam. Hatékonyságukat szimulációkkal vizsgáltam. Az implementáláshoz a MATLAB/Simulink környezetet választottam. Ahhoz, hogy valós alkalmazásokban is ki tudjam próbálni a módszereimet a dSPACE cég gyors prototípus tervező környezetét (AutoBox és ControlDesk) használtam az ipari partner igényének megfelelően.

Az eredményeim jelentős részét valós rendszeren is tesztelni tudtam. A teszt jármű egy kereskedelmi forgalomban is kapható Ford Focus típusú autó volt, melyet elektronikus kormányrendszerrel (EPAS – Electronic Power Assist Steering) egészítettek ki. Az implementált algoritmusok a járműbe szerelt AutoBox-on futottak, mely össze volt kötve az autó CAN (Controller Area Network) buszával.

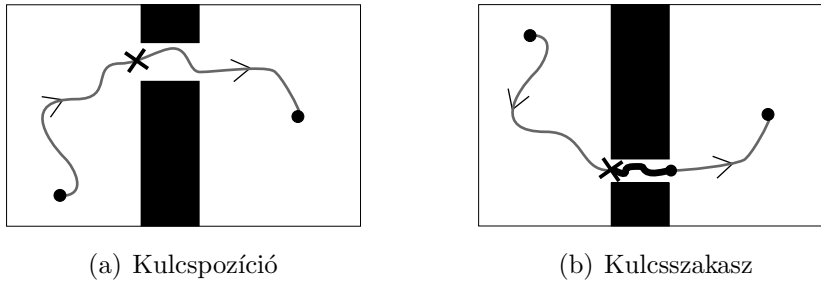
2. Az új tudományos eredmények összefoglalása

2.1. Valószínűségi alapú mozgástervező módszerek anholonom mechatronikai rendszerekhez

A szakirodalom a valósidejű pályatervezésre (mozgástervezésre) – többek között – különböző valószínűségi alapú módszereket ajánl. Ezek az algoritmusok a robot konfigurációs térben egy gráfot építenek, melynek pontjait sztochasztikus módszerekkel választják ki. A mozgás megtervezése így megoldható egy gráfelméleti útkereséssel.

A téziscsoport a Rapidly Exploring Random Tree (RRT) [LaV98] elnevezésű algoritmussal foglalkozik. Ezt a valószínűségi alapú algoritmust kifejezetten anholonom robotok mozgástervezésére találták ki. Először azt vizsgáltam, hogy az RRT algoritmus használható-e olyan rendszer mozgástervezéséhez, ahol a konfigurációs tér részsokaságokra osztható, melyeken eltérőek a mozgásegyenletek. Az ilyen rendszert rétegzett rendszernek hívják [Goo97] (pl. a járó robotok).

Speciális esetekben (pl. áthaladás egy szűk átjárón vagy folyosón) gond lehet az RRT algoritmus konvergenciájával. Ezért módosítottam az eredeti algoritmust, a tervezés során



(a) Kulcspozíció

(b) Kulcsszakasz

1. ábra. Szűk átjáró kulcspozícióval illetve kulcsszakasszal

kulcspozíciókat illetve kulcsszakaszokat használok fel (ld. 1. ábra).

Kidolgoztam az RRT egy másik verzióját is, mely a referencia pálya időeloszlását módosítja mozgó akadályok esetén. Ha előre ismerjük az akadályok mozgását, időskálázással megváltoztatható a referenciához tartozó sebességprofil oly módon, hogy a robot ne ütközzön neki az akadályoknak (ld. 2 ábra).

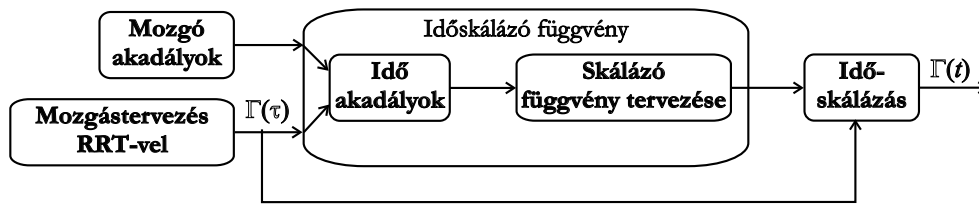
1. Téziscsoport. *A valószínűségi alapú RRT algoritmus alapján új módszereket dolgoztam ki, melyek lehetővé teszik a mozgástervezési feladat hatékony megoldását mozgó akadályok és/vagy rétegzett rendszerek esetén.*

Kapcsolódó publikációk: [1, 8–10, 13]

1.1. Tézis. *Az RRT algoritmus alapján a konfigurációs térben kulcspozíciók és kulcsszakaszok bevezetésével új valószínűségi alapú mozgástervező algoritmust dolgoztam ki anholonom mechatronikai rendszerekhez. Megmutattam, hogy a kulcspozíciók és kulcsszakaszok bevezetése nem rontja az RRT algoritmus konvergenciáját, és léteznek olyan összetett környezetek, melyekben az általam kidolgozott módszer megtalálja a kívánt utat annak ellenére, hogy a hasonló paraméterekkel rendelkező RRT algoritmussal ez nem lehetséges. A kulcspozíciók és kulcsszakaszok olyan bonyolult térrészekben növelik az RRT algoritmus hatékonyságát, ahol az ismert akadályok sűrűn helyezkednek el. Részletes értékelést és összehasonlítást adtam az RRT és az általam kidolgozott algoritmus számításigényéről.*

Kapcsolódó publikációk: [8, 9]

1.2. Tézis. *A rétegzett konfigurációs térrel rendelkező anholonom rendszerek esetén megmutattam, hogy az 1.1 tézisben megadott mozgástervező algoritmus megfelelő változtatásokkal használható az alaprétegben adott mozgástervezési feladat megoldására. A módosítás abban áll, hogy olyan elemi elmozdulás-primitíveket és hozzájuk tartozó beavatkozó jeleket definiálok, amelyek a konfigurációs tér alaprétegének két pontját kötik össze (áthaladva valamely felsőbb réteg pontjain). Megmutattam, hogy az általam kidolgozott algoritmusra rétegzett rendszerek esetén is teljesülnek az 1.1 tézisben ismertetett tulajdonságok (konvergencia, számításigény).*



2. ábra. RRT alapú mozgástervezés dinamikus környezetben időskálázás használatával

Kapcsolódó publikációk: [1, 10]

1.3. Tézis. *Az RRT algoritmus alapján dinamikus (ismert mozgású akadályokat tartalmazó) környezetben is használható mozgástervező eljárást dolgoztam ki. A pálya befutásához szükséges időt és a maximális beavatkozó jeleket is figyelembe vevő távolság kvázimetrikát definiáltam, amely olyan módszerek esetén használható, mikor az algoritmus csak egy keresési fát épít. Megmutattam, hogy ez a kvázimetrika teljesíti a háromszög egyenlőtlenséget. Több keresési fát építő algoritmusok esetén a mozgástervezési feladatra időskálázáson alapuló megoldást adtam, ahol a korlátos beavatkozó jelek befolyásolják az időskálázó függvény megválasztását.*

Kapcsolódó publikációk: [13]

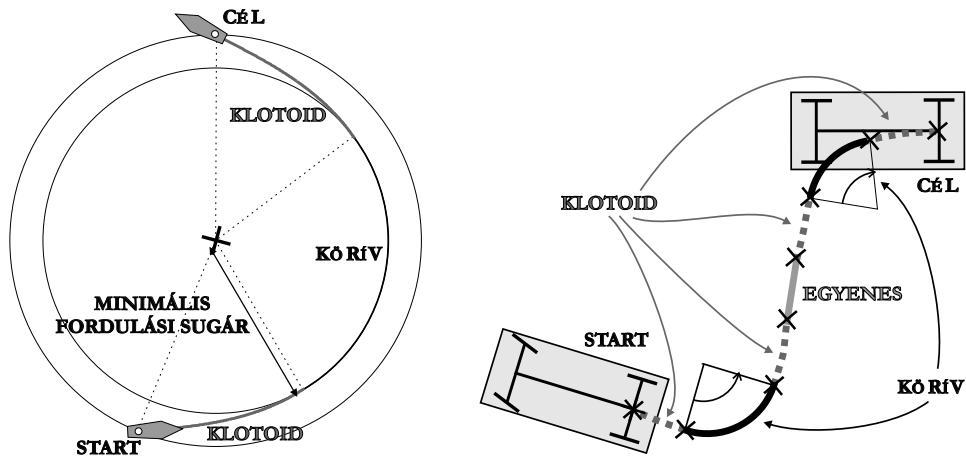
2.2. Folytonos görbületű pályageometria tervezése speciális (jármű-szerű) anholonom robotokhoz

Az előző téziscsoport egy általános, tetszőleges anholonom rendszer esetén alkalmazható mozgástervezési megoldást tárgyalt. Ezzel szemben most az a feladat, hogy hatékonyabb algoritmust adjunk egy konkrét rendszerosztályra, nevezetesen a jármű-szerű robotokra.

A cél olyan mozgástervezési módszer megalkotása, mely olyan trajektóriát számít valós időben, ami kielégíti a jármű-szerű robotokra jellemző kényszereket (pl. minimális fordulási sugár, folytonos görbület).

A megoldáshoz az irodalomban fellelhető folytonos görbületű kormányzásból [FS04] indultam ki. Ez a módszer klotoid íveket használ, így a robotnak nem kell megállnia ahhoz, hogy elforgassa az első kerekeit. Az algoritmus nem enged meg tetszőleges kezdeti és cél görbületet, ezeknek nullának kell lennie (ld. 3(a). ábra).

Ebben a téziscsoportban azt vizsgálom, hogy miként lehet tetszőleges kezdeti és cél konfiguráció (azaz nem nulla kezdeti és cél görbület esetén is) megoldani a pályatervezési feladatot. A feladat egy megvalósítható trajektória számítása, mely kielégíti a kerekeken guruló, jármű-szerű robotok kinetikus mozgásegyenletét, továbbá egyes változók korlátait (felső korlát a görbület illetve annak deriváltja esetén) is figyelembe veszi. (Az 3(b). ábrán egy ilyen pálya látható.)



(a) CC-kormányzás. A kezdeti és a cél görbület nulla. (b) Pálya párhuzamos parkoláshoz nem nulla kezdeti görbülettel

3. ábra. Folytonos görbületű pálya

Továbbá megvizsgáltam azt is, hogy miként módosítható valós időben a pálya időfüggése úgy, hogy a geometriája változatlan maradjon. Az itt használt időskálázással csökkenthető az algoritmus számítási igénye.

2. Téziscsoport. *Valós időben számítható megoldást adtam a folytonos görbületű pályatervezési problémára kerekeken guruló jármű-szerű mobilis robotok esetén tetszőleges kezdeti és cél konfigurációk között.*

Kapcsolódó publikációk: [12, 14, 15, 18, 19]

2.1. Tézis. *Új, alacsony szintű tervezési módszert dolgoztam ki kerekeken guruló mobilis robotokhoz, amellyel folytonos görbületű pályák számítása lehetséges tetszőleges konfigurációk között, a kezdeti- és véggörbületek akár nem nulla előírt értékei mellett. A módszer figyelembe veszi a maximális görbületet és görbület változási sebességet. Definiáltam az algoritmus által használt pályatervezési primitíveket: egyenes, körív, általános klotoid ív. Megadtam a primitívek geometriáját leíró egyenleteket. A klotoid íven történő mozgás számításához Fresnel integrálokat kell használni. Megadtam a primitívekből összerakható egyszerű folytonos görbületű pályákat, és megmutattam, hogy ezekkel megoldható az alacsony szintű pályatervezési probléma magas szintű algoritmusok (pl. Probabilistic RoadMap) számára.*

Kapcsolódó publikációk: [14, 15, 18, 19]

2.2. Tézis. *A 2.1 tézisben bemutatott folytonos görbületű pályatervezési algoritmushoz kidolgoztam egy, a Fresnel integrálok táblázatos közelítésén alapuló, valós idejű számítási módszert. Megmutattam, hogy egyetlen klotoid ív előzetes kiszámítása után a teljes pálya geometriája*

meghatározható egyszerű elemi és trigonometrikus műveletekkel. A Fresnel integrálok értékeit tartalmazó táblázatban szereplő bejegyzések számának függvényében felső korlátot adtam a valósídejű implementáció számítási hibájára. Megmutattam, hogy a kis számítási igény érdekében kezdetben konstansnak választott referencia sebesség idő-skálázással módosítható.

Kapcsolódó publikációk: [12, 15]

2.3. Rögzített geometriájú pályák időfüggésének tervezése időskálázással

Számos algoritmus előbb megtervezi a pálya geometriáját, majd csak ezután számítja ki a hozzá tartozó sebességprofil, mert így gyorsabban elvégezhető a tervezés. Amennyiben a pálya geometriájának számítása során nem került megállapításra annak időfüggése, vagy annak módosítása szükséges a pályakövetés során, akkor egy olyan módszert kell használni, amely a pálya geometriájának módosítása nélkül kiszámítja, vagy módosítja annak időfüggését. Erre a feladatra használható az időskálázás [Hol84, DN90].

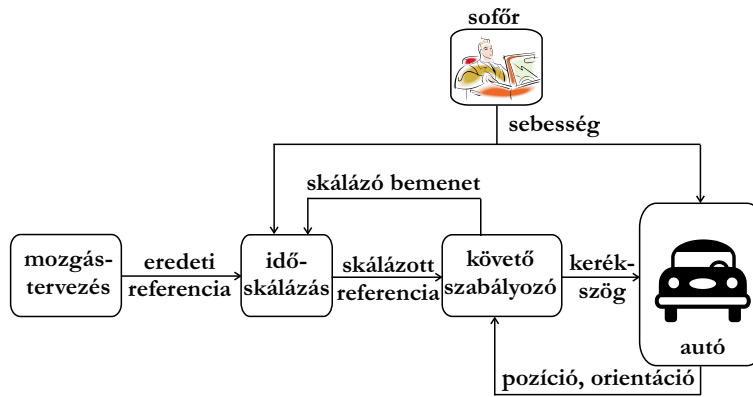
Ez a téziscsoport az időskálázás egy új típusát mutatja be. A tárgyalt algoritmusok a zártkörű viselkedés alapján módosítják az időskálázó függvényt. Az első módszer a pályakövetés hibája alapján gyorsítja vagy lassítja a referenciát.

A másik algoritmus során az időskálázás segítségével transzformációt végzünk a rendszeren. A módosított rendszerre teljesülhetnek olyan hasznos tulajdonságok, melyet a szabályozó tervezés során ki lehet használni. A kifejlesztett módszerrel pályakövetést biztosító szabályozót terveztem egy olyan járműhöz, melynek két bemenete (a sebesség és a kormánykerék szöge) közül csak az egyiket (a kormánykerék szögét) lehet a szabályozóval befolyásolni, míg a másikat a vezető szabadon megválaszthatja (ld. 4. ábra).

3. Téziscsoport. *Új módszereket adtam a referencia pálya időeloszlásának módosítására, melyek a rendszer zártkörű viselkedése és/vagy valamilyen külső forrásból származó jel alapján határozzák meg az időskálázó függvényt. Megmutattam, hogy az időskálázással transzformált rendszer a szabályozó-tervezés szempontjából előnyös tulajdonságokkal (pl. differenciálisan sima, következésképp állapotvisszacsatolással linearizálható) bírhat.*

Kapcsolódó publikációk: [2–6, 11, 14, 16, 18]

3.1. Tézis. *Új adaptív módszert dolgoztam ki, amely valósidőben, a pályamenti hiba alapján módosítja valamely adott geometriájú referencia pálya sebességprofilját. Különböző módszereket adtam az időskálázó függvény választására ("szakaszonként konstans", "konstans-lineáris" illetve hiperbolikus időskálázó függvény). Megmutattam, hogy a kidolgozott módszer a zártkörű irányítás során is felhasználható, a követési hiba függvényében igény szerint gyorsíthatja vagy lassíthatja a referencia pálya befutásának sebességét. A*



4. ábra. Szabályozási kör időskálázással

kerekeken guruló mobilis robot kinematikai modelljén megmutattam, hogy a referencia pálya időskálázása nem változtatja meg a pályamenti linearizált hibarendszer irányíthatóságát.

Kapcsolódó publikációk: [2, 11, 16]

3.2. Tézis. Definiáltam az időskálázáson alapuló transzformációk egy új osztályát, amely a rendszer állapotai mellett egy új skálázó bemenet alapján határozza meg a régi és a transzformált rendszer ideje közötti összefüggést. A skálázó bemenetet a zártkörű működést biztosító szabályozó állíthatja elő a pályamenti hiba alapján, továbbá felhasználható a referencia pálya sebességprofiljának módosítására. Megmutattam, hogy az ebbe az osztályba tartozó transzformáció segítségével az egy-bemenetű kinematikai járműmodell állapotvisszacsatolással linearizálható alakra hozható, azaz differenciálisan simává tehető.

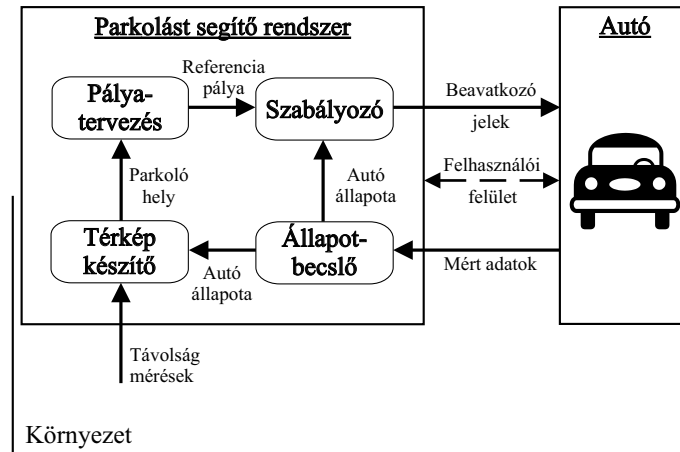
Kapcsolódó publikációk: [3–6]

3.3. Tézis. Az egy-bemenetű kinematikai járműmodell esetén megmutattam, hogy a 3.2 tézisben definiált transzformáció alkalmazásával pályamenti stabilitást biztosító szabályozó tervezhető. Megadtam a szabályozó egyenleteit, amelyek számításához szükség van a jármű sebességének deriváltjaira. Megmutattam, hogy a hibamodell linearizálásával kiküszöbölhető a jármű sebességeihez tartozó deriváltak felhasználása, továbbra is biztosítva a pályamenti lokális stabilitást.

Kapcsolódó publikációk: [3–5, 14, 18]

3. Alkalmazás

Eredményeim egy része felhasználásra került egy automata parkolást segítő rendszer fejlesztésekor [19] az Elektronikus Jármű és Járműirányítási Tudásközpontban, a ThyssenKrupp Presta Hungaryval együttműködve. A cél olyan intelligens rendszer létrehozása volt, amely



5. ábra. Automata parkolást segítő rendszer elemei

segítséget nyújt a vezetőnek a parkolási manőver során. A rendszer képes arra, hogy parkolóhelyet keressen, és a kormánykerék irányításával megkönnyítse a parkolási folyamatot. A jármű pedáljait (gáz, fék, tengelykapcsoló) a vezető kezeli, ezáltal az autó sebességét is a vezető választhatja meg.

A rendszer számos részfeladatot old meg, melyeket különböző alrendszerek valósítanak meg [17] (ld. 5. ábra).

A jármű ABS (Anti-lock Braking System) érzékelői mérik a kerekek elmozdulását. Ezekből az adatokból egy becslő kiszámolja az autó aktuális pozícióját és orientációját egy fix világ-koordináta-rendszerben. A térkép készítő és a szabályozó modul is felhasználja az így becsült állapotot. További információra is szükség van ahhoz, hogy a környezetről egy térképet lehessen rajzolni. Ultrahangos érzékelők használhatók arra, hogy a környező akadályok távolsága mérhető legyen a járműtől. A távolságmérések segítségével elkészíthető egy térkép. Ezen a térképen kell megkeresni a szabad parkoló helyet [7].

Ha van megfelelő hely, akkor a pályatervező alrendszer kiszámol egy referencia pályát, mely a jármű jelenlegi helyzetét összeköti a kívánt cél pozícióval. A tervezés során számos kényszert kell figyelembe venni (pl. akadály elkerülés, korlátos beavatkozó jelek, anholonom kényszerek). Ezért a 2.1.–2.2. tézisekben bemutatott folytonos görbületű pályatervező módszer került alkalmazásra.

Végül szükség van egy szabályozóra, mely biztosítja a referencia pálya pontos követését. Mivel a jármű sebességét a vezető határozza meg, és a szabályozó csak a kormánykerék szögét módosítja, ezért a 3.2.–3.3. tézisekben ismertetett módszer volt alkalmazható.

A parkolást segítő rendszer elemei külön-külön, majd a megfelelőeket összekapcsolva szimulációban és valós környezetben is tesztelésre került. A kifejlesztett módszerek megfelelően működtek. A teljes rendszer integrációja és végső tesztelése még folyamatban van.

4. Összefoglalás

A disszertációm mechatronikai rendszerek mozgástervezésével foglalkozik. A konkrét cél az volt, hogy valós időben számítható megoldást adjak nemlineáris anholonom rendszerek (pl. jármű-szerű robotok) esetén.

Az időskálázást a különböző módszerekben eltérő megfontolásokból használtam. Először egy valószínűségi alapú mozgástervezés során alkalmaztam az időskálázást, ahol mozgó akadályokat kellett kikerülni (ld. 1.3. tézis). Majd a számítási igény csökkentése érdekében arra használtam, hogy a tervezési feladatot két részre osszam: pálya geometria- és sebességprofil tervezésre (ld. 2.1–2.2. tézis).

Több olyan módszert is adtam, mely a rendszer zártkörű viselkedése alapján módosítja az időskálázó függvényt. Az időskálázást befolyásolhatja akár a pálya követésének hibája és/vagy valamilyen külső forrásból származó jel (ld. 3.1.–3.3. tézis).

A kifejlesztett algoritmusokat implementáltam, szimulációval is ellenőriztem működésüket. Eredményeim egy része felhasználásra kerül egy autóiipari alkalmazás fejlesztése keretében.

Az értekezés témakörében készült publikációk

- [1] I. Harmati, B. Kiss, and E. Szádeczky-Kardoss. On drift neutralization of stratified systems. In *Lecture Notes in Control and Information Sciences, Robot Motion and Control: Recent Developments*, volume 335, pages 85–96. Springer, 2006.
- [2] B. Kiss and E. Szádeczky-Kardoss. Control of a 2-dof positioning robot with time scaling. In *Proceedings of the microCAD 2005 International Scientific Conference, Section I*, pages 17–22, 2005.
- [3] B. Kiss and E. Szádeczky-Kardoss. On-line time-scaling control of a kinematic car with one input. In *Proceedings of the 15th Mediterranean Control Conference*, 2007.
- [4] B. Kiss and E. Szádeczky-Kardoss. Tracking control of the orbitally flat kinematic car with a new time-scaling input. In *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, pages 1969–1974, 2007.
- [5] B. Kiss and E. Szádeczky-Kardoss. Tracking control of wheeled mobile robots with a single steering input. In *Proceedings of the 4th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics; Signal Processing, System Modeling and Control*, pages 86–93, 2007.
- [6] B. Kiss and E. Szádeczky-Kardoss. Time-scaling in the control of mechatronic systems. In *New Developments in Robotics, Automation and Control*, pages 411–426. In-Tech, 2008.
- [7] S. Oroszi and E. Szádeczky-Kardoss. Map construction and parking lot identification algorithm for autonomous parking system. In *Proceedings of the International Carpathian Control Conference*, pages 512–515, 2007.
- [8] E. Szádeczky-Kardoss. Using the probabilistic roadmap method for nonholonomic systems. In *Proceedings of the microCAD 2006 International Scientific Conference, Section I*, pages 31–36, 2006.
- [9] E. Szádeczky-Kardoss and B. Kiss. Extension of the rapidly exploring random tree algorithm with key configurations for nonholonomic motion planning. In *Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on Mechatronics*, pages 363–368, 2006.
- [10] E. Szádeczky-Kardoss and B. Kiss. Probabilistic path planning for stratified systems using key configurations for the rapidly exploring random tree algorithm. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, pages 671–678, 2006.

- [11] E. Szádeczky-Kardoss and B. Kiss. Tracking error based on-line trajectory time scaling. In *Proceedings of the 10th International Conference on Intelligent Engineering Systems*, pages 80–85, 2006.
- [12] E. Szádeczky-Kardoss and B. Kiss. Continuous-curvature turns in motion planning for car like mobile robots. In *Proceedings of the International Carpathian Control Conference*, pages 684–687, 2007.
- [13] E. Szádeczky-Kardoss and B. Kiss. Motion planning in dynamic environments with the rapidly exploring random tree method. *International Review of Automatic Control*, 1(1):109–117, 2008.
- [14] E. Szádeczky-Kardoss and B. Kiss. Path planning and tracking control for an automatic parking assist system. In *Springer Tracts in Advanced Robotics: European Robotic Symposium*, volume 44, pages 175–184. Springer, 2008.
- [15] E. Szádeczky-Kardoss and B. Kiss. Continuous-curvature paths for mobile robots. *Periodica Polytechnica – Electrical Engineering*, accepted for publication, 2009.
- [16] E. Szádeczky-Kardoss and B. Kiss. On-line trajectory time-scaling to reduce tracking error. In *Intelligent Engineering Systems and Computational Cybernetics*, pages 3–14. Springer, 2009.
- [17] E. Szádeczky-Kardoss, B. Kiss, and I. Wahl. Design of a semi-autonomous parking assist system. In *Proceedings of the European Control Conference*, 2009. accepted for publication.
- [18] E. Szádeczky-Kardoss, B. Kiss, and I. Wahl. Pályakövető szabályozás automatikus parkolás-segítő rendszerhez. *Elektronikai Technológia, Mikrotechnika*, accepted for publication, 2009.
- [19] I. Wahl, E. Szádeczky-Kardoss, and B. Kiss. Automatikus parkolássegítő rendszer. *A jövő járműve, Járműipari innováció*, 1(1-2):91–93, 2006.

A tézisfüzetben hivatkozott irodalom

- [Blo03] A. M. Bloch. *Nonholonomic Mechanics and Control*. Springer, New York, 2003.
- [CR87] J. Canny and J. Reif. New lower bound techniques for robot motion planning problems. In *Proceedings of the 28th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, pages 49–60, 1987.
- [DN90] O. Dahl and L. Nielsen. Torque-Limited Path Following by On-Line Trajectory Time Scaling. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 6(5):554–561, 1990.
- [Dul98] I. Duleba. *Algorithms of Motion Planning for Nonholonomic Robots*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1998.
- [FS04] Thierry Fraichard and Alexis Scheuer. From Reeds and Shepp’s to continuous-curvature paths. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20:1025–1035, 2004.
- [Goo97] B. Goodwine. *Control of Stratified Systems with Robotic Applications*. PhD thesis, California Institute of Technology, 1997.
- [Hol84] J. M. Hollerbach. Dynamic scaling of manipulator trajectories. *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 106(1):102–106, 1984.
- [Ise08] Rolf Isermann. Mechatronic systems – innovative products with embedded control. *Control Engineering Practice*, 16:14–29, 2008.
- [Lat91] J-C. Latombe. *Robot Motion Planning*. Kluwer, Boston, 1991.
- [LaV98] S. M. LaValle. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning. Technical report, Computer Science Dept., Iowa State University, 1998.
- [LaV06] S. M. LaValle. *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, 2006.