

Posudek oponenta závěrečné studentské práce

Název práce: Automatické předjíždění autonomního auta F1/10

Student: Jan Lindauer

Typ práce: bakalářská práce

Oponent: doc. Ing. Zdeněk Hurák, Ph.D. hurak@fel.cvut.cz

Pracoviště oponenta: Katedra řídicí techniky FEL ČVUT v Praze

1 Zadání

Zadaným cílem bakalářské práce studenta Jana Lindauera bylo navrhnout a implementovat rozšíření stávajícího plánovače trajektorie (používaného týmem vedoucího práce) pro závodní autonomní auta F1/10, které by umožnilo předjíždění auta soupeře. Dílčími cíly bylo vyřešení úlohy odhadování pohybového stavu auta soupeře, plánování trajektorie pro předjíždění a nakonec zpětnovazební vedení auta po takto naplánované trajektorii.

V úplnosti jde nepochybně o zadání velmi náročné, vlastně naprosto mimořádně náročné, jistě adekvátní i pro práci diplomovou či dokonce dizertační. Přesto však i pro účely bakalářské práce bylo zadání adekvátní, neboť student zjevně nezačínal na zelené louce a jistě využíval zkušenost akumulovanou a technologie již vyvinuté ve skupině vedoucího práce.

2 Hodnocení

Že byly všechny dílčí cíle – a tím i cíl celkový – splněny v dostatečné míře je prokázáno jako numerickými simulacemi, tak i pomocí experimentů s reálnými auty F1/10 na závodní dráze. Nedostatky identifikované při takovém ověřování byly důkladně popsány a cesta k jejich nápravě v závěru stručně navržena. Konstatuji tedy, že **zadání práce bylo splněno**, a to v rozsahu a kvalitě, který umožňovala časová dotace na bakalářskou práci (a vlastně i skutečnost, že jde o bakalářskou a nikoliv diplomovou či dizertační práci). **Moc pěkná bakalářská práce!**

Současně s veškerým uznáním (projeveným dále ve formě vysokého hodnocení) nelze popřít, že kvůli velkému rozsahu se jednotlivým dílčím cílům nedostalo při řešení až takové pozornosti, jaké by si zasluhovaly z hlediska kompletního vyřešení. Vždyť na úlohy typu lokalizace pohyblivých objektů, plánování trajektorie či zpětnovazební řízení po trajektorii vznikají v rámci studijního programu *Kybernetika a robotika* (ale i jiných, zejména *Otevřená informatika*) studentské práce dedikované jen těmto dílčím úlohám, a to včetně těch orientovaných na automobilovou oblast. Toto není v žádném případě kritika samotné práce, jen popis kontextu. A možná tip pro efektivnější posouzení výkonu týmu F1/10.

Rovněž textová zpráva o tomto řešení je pečlivě zpracována. Dílčí výhrady či návrhy uvádím níže. Je jich hodně, ale vyjadřují spíše mé přesvědčení, že v tomto případě se může ta moje časová investice do předávání rad a zkušeností mít snad ještě i větší smysl než jindy.

Celkově tedy **práci hodnotím stupněm A, výborně.**

3 Komentáře, připomínky, návrhy

Přestože se mi práce velmi líbila, dovolím si uvést několik komentářů a návrhů, a to jak k obsahu tak i formě. Nejsou uspořádány podle důležitosti, ale spíše v pořadí, jak jsem na ně při procházení práce narážel. **Při obhajobě se jistě číst nemusí.** Otázky, ke kterým by se student měl vyjádřit u obhajoby, uvádím na závěr.

1. Přestože autor/student správně v úvodu textu vysvětluje rozdíl mezi pojmy *trajektorie* a *cesta* (angl. path), při jejich používání v textu není úplně konzistentní: na Obr. 6.1 až 6.6 systematicky zobrazené křivky nazývá trajektoriemi, přestože jsou tyto zobrazeny bez časové parametrizace, tedy jde o cesty a nikoliv o trajektorie. S dlouholetým pozorováním, že mezi těmito dvěma klíčovými koncepty běžně nerozlišují ani mnozí autoři odborných článků, což vede k mnoha nedorozuměním, bych se přimlouval za pečlivější rozlišování mezi těmito dvěma pojmy. Jinak se v té odborné komunitě za chvíli vážně nedomluvíme.
2. Zajímavou terminologickou výzvou pro autora (ale zjevně i jeho předchůdce v sérii prací věnovaných tomuto tématu) je pojmenování dotyčného vozidla. Jde o *auto* nebo *model auta*? (Nebo snad dokonce ještě o něco jiného?) V kapitole 2 je dokonce celá (kratičká) podkapitola nazvaná *Model auta*. Přitom ale dále v textu, například hned v popisku k Obr. 2.1 píše o *autě* a nikoliv *modelu auta*. Problém je v tom, že zároveň totiž slovo *model* používá autor v textu i v jiném významu, konkrétně v podkapitole 2.4 nazvané *Kinematický model* (ale i jinde) pro matematický popis. I zde by práci jistě slušela větší konzistence. Přesně rozumím tomu terminologickému souběhu, kdy pro komunitu RC modelářů je modelem onen kus hardwaru a softwaru, což má vyjádřit, že nejde o „opravdové auto“, zatímco v branži řídicích systémů je modelem téměř výhradně rozuměn onen matematický popis. Je to problém, uznávám, ale asi neřešitelný. Konzistence je důležitá. Sám bych se přimlouval za rezervování pojmu *model* pro matematický popis.
3. Nadále už jen *řídicí* systém, moc prosím. Viz <https://prirucka.ujc.cas.cz/?id=750>.
4. Přestože samotný hardware i systémový software auta je jistě popsán v pracích studentských předchůdců, stručné představení i v této práci by jistě na škodu nebylo. Jsem dalek výzev k umělému natahování délky textu, nicméně pro člověka neznalého použité technologie může být nepohodlné, že vlastně neví, co všechno se na daném autě F1/10 dá řídit a měřit a případně v jakém rozsahu. Základní systémový pohled/přehled. Aspoň jen tento základní vysokoúrovňový přehled v rozsahu jedné strany (z toho polovinu zabere velké blokové schéma) v práci měl být uveden. Snad by se takový přehled mohl objevit aspoň v prezentaci.
5. Jako poměrně nepřehledné vnímám zavedení důležitých veličin a parametrů v sekci 2.5. Některé jsou zavedeny v tabulce 2.2, některé v následujícím textu, a ještě jiné v obrázku 2.2. Jednotnější prezentace by byla pro čtenáře jistě pohodlnější. V tabulce se zmiňuje referenční bod (x,y), proč ale není ukázán (i) v obrázku? Jiné veličiny z tabulky tam jsou. Podobně je v textu pod tabulkou zmíněna veličina θ_p , ale proč není taky v přehledové tabulce spolu s veličinou θ , když ta druhá zmíněná tam je? A zdaleka nejlepší by bylo, kdyby obě byly znázorněny i v tom obrázku, když jiné úhly tam jsou.
6. Související s předchozím je, že v textu vlastně není uvedeno, orientace **čeho** že je to θ_p . Asi cesty (z kontextu „... kde θ_p je orientace a c_p je křivost cesty...“), ale není to jisté a vlastně ani tak není jasné, co se tím myslí.
7. Když už jsme u toho θ_p , tak jedna typografická poznámka. Na první pohled možná hnidopišská, ale ve skutečnosti jde o dobrý tip, domnívám se. Ten dolní (či horní) “index” u veličin mívá dvojí význam. Buď jde o nějakou zkratku, která má autorovi rozšířit počet jmen a čtenáři pomoci rychle rozpoznat význam dotyčné veličiny. A nebo jde doslova o index, tedy může nabývat různých hodnot, a pomocí nich teprve je vlastně indexována ta samotná veličina, tedy když napíšeme θ_p , tak konkrétní instancí takové veličiny může být θ_1 , θ_2 či θ_9 . Aby se tyto dvě situace odlišily, je běžnou konvencí (i standardizovanou v ISO 80000-2:2019 Quantities and units — Part 2: Mathematics, jistě existuje i nějaký český ekvivalent) používat v tom druhé případě kurzívu. Naopak v tom první

případě se ten dolní index sází “vzpřímeným” fontem. Odhaduji, že ve zmíněném θ_p nereprezentuje p nějakou proměnnou nýbrž zkratku pro *path*, a tak bych spíše sázel θ_p . Zatím to skutečně vypadá jako hnidopišství, ale o kus důležitější to začne být v případě použití více symbolů coby dolní index, například jinde v textu použitý *ref* v δ_{ref} . Proč bych neměl interpretovat ono *ref* coby $r \times e \times f$ a začít se tedy pít po tom, jak je definovaná proměnná r , jak e a jak f ? Vyhnout těmto nejasnostem se dá zápisem δ_{ref} . Pravdou je, že tuto zvyklost ba dokonce standard nedodržují ani mnozí akademici (dost možná ve starých textech ani já, uznávám).

8. Anglické pojmy v českém textu. Nejsem v tomto nijaký národovecký purista a často si skutečně nemůžeme pomoci a ten anglický termín použijeme i v českém textu, protože český ekvivalent neexistuje, nicméně mi přijde zbytečné to dělat, když je český termín k dispozici. A takových situací je v textu několik. Namátkou *slip angle* v tabulce 2.2 na str. 4, pro který je u aut zavedeným termínem *úhel skluzu* či *úhel vybočení*. Nebo *lattice* na straně 12, místo kterého lze pohodlně použít *mřížka*. Na stejné straně *Potential fields*: proč ne *potenciálová pole*? Či *Optimal Control*, což není nic jiného, než *optimální řízení* (mimochodem, uvádět optimální řízení jako *metodu* nedává smysl, vždyť to popisuje spíše celý obor či disciplínu). Opravdu v tomto nejde o nějaké zraněné obrozenecké cítění, jen spíše mám zkušenost, že nadužívání anglických termínů často prozrazuje neporozumění tomu základnímu konceptu, pro který tak musí být použit cizí výraz. A nebo obráceně: když už člověk zná ten výraz ve svém jazyce, velmi často to podpoří i jeho porozumění samotnému konceptu (a jindy zase ne, to je taky realita).
9. Občas vynechaná interpunkce *po* nebo *mezi* rovnicemi. Připomenu, že i rovnice jsou součástí textu. Autor to zjevně ví a většinou dodržuje, občas zapomene.
10. Při zjednodušení kinematického modelu pro gradientní plánovač (v sekci 3.1 na straně 6) je před sadou rovnic (1) uvedeno, že jsou uplatněny vztahy pro malé úhly. Toto je však uvedeno bez jakéhokoliv komentáře ohledně oprávněnosti takového předpokladu. Možná oprávněný je, možná ne. Čtenář neví. Jakých hodnot může nabývat úhel δ natočení kol? U „velkých“ aut klidně i $\pm 30^\circ$. Ani u zde použitého F1/10 to nebudou jen malé jednotky stupňů, pro které typicky ty vztahy pro malé úhly používáme, ne? Vede mě to k obecné připomínce a radě: v inženýrských textech (na rozdíl od ryze matematických článků) musíme veškeré předpoklady zdůvodnit. Coby inženýři si nemůžeme dovolit říct: „necht’ je úhel δ malý (a pro velké úhly necht’ to vyřeší jiný).“
11. V odvození diskrétní verze kinematického modelu v sadě rovnic (3) mám nejasnost. Zatímco první čtyři rovnice zjevně využívají tu nejjednodušší diskretizaci dopřednou Eulerovou metodou, poslední rovnice $\dot{c} = \varepsilon$ je diskretizovaná nějak zvláště. Pokud by byla diskretizována rovněž dopřednou Eulerovou metodou, dostali bychom z

$$\frac{c_{k+1} - c_k}{\Delta t} = \varepsilon_k$$

výslednou rovnici pro vývoj koeficient c

$$c_{k+1} = c_k + \Delta t \varepsilon_k.$$

Oproti tomu v textu uvedená rovnice

$$\varepsilon_{k+1} = \frac{c_k - c_{k-1}}{\Delta t}$$

by vedla na

$$c_k = c_{k-1} + \Delta t \varepsilon_{k+1},$$

tedy po přeznačení

$$c_{k+1} = c_k + \Delta t \varepsilon_{k+2},$$

což je docela zásadní nesoulad.

Jakkoliv i původní dopředná Eulerova metoda je pouze aproximací, existují výsledky pro analýzu takto získaných iterativních algoritmů. Ty pro v práci zvolenou aproximaci nemusí být k dispozici a simulační algoritmus může být těžko analyzovatelný a garantovatelný. Jaký byl tedy důvod pro tuto volbu?

12. Na konci strany 6 je zmiňován přechod z globálního souřadného systému do souřadného systému auta. Autor argumentuje, že se pak při dodatečném předpokladu konstantní rychlosti ve směru osy x zjednoduší jedna z rovnic. Ukazuje se tady (ale nejen tady), že ta absence pečlivého (a nebo vlastně jakéhokoli) grafického znázornění všech v práci využívaných souřadných systémů nese své hořké ovoce. Přiznávám se totiž, že vlastně ani nevím, jak by měl být ten souřadný systém vozu přesně definován (jen umístěním nebo i orientací?). Do toho pak později v práci ještě přijde i zmínka a souřadnicovém systému spojeném s dráhou. Ve směru které osy x je pak konstantní v_x ? Zmatení čtenáře je dokonáno.
13. Při odvozování či spíše popisování již odvozeného gradientního plánovače v sekci 3.2 je na začátku uveden *předpoklad* konstantní rychlosti ve směru osy x (připomínám onu nejasnost z předchozího bodu, ke kterému souřadnému systému x že se to autor odkazuje). I zde se před autorem vyskytla příležitost diskutovat *oprávněnost* předpokladu. A nevyužil ji. Později v textu se k přílišné restriktivnosti tohoto předpokladu sice vyjadřuje, nicméně taková diskuze by se i s ohledem na čtenáře měla objevit už zde.
14. Ještě k předchozímu bodu: stejně by aspoň nějaké stručné vysvětlení zasluhovalo ono tvrzení o vynechání „první rovnice“ z kinematického modelu (na začátku strany 7). Na stejném místě by možná byl užitečný i komentář k označení $\dot{c}(= \varepsilon)$ za *vstup* u , zatímco samotné c figuruje mezi stavy ve vektoru \mathbf{x} . Obojí jsou geometrickými charakteristikami křivky, tak není úplně intuitivní vnímat jednu z těch charakteristik coby vstup a druhou coby stav. Nepochybně to souvisí s rozhraním k podřízenému palubnímu regulátoru rychlosti/í, ale bylo by užitečné zde mít i jen stručné zdůvodnění pro tuto formulaci, protože skutečně není úplně běžná.
15. Není chyba ve stanovení váhovacích koeficientů w na konci strany 7? Jestli ten zápis dobře interpretuji, tak při řazení veličin ve stavovém vektoru $\mathbf{x} = [y, \theta, c]^T$ a volbě koeficientů $w_{3i+2} = 1$ by spíše ta kritériální funkce měla obsahovat jednotlivé θ_k a ne c_k , ne? Předpokládám, že indexování začíná od 1.
16. V poznámce č.3 pod čarou autor zmiňuje, že jím použitá metoda řešení optimalizačního problému funguje pouze za předpokladu regularity. Jsme opět u oblíbeného tématu předpokladů: platí tedy ten předpoklad regularity v tomto případě nebo ne? Vždycky ano? Nebo jen někdy? Co když většinou ne? Nevíme, autor se k tomu nijak nevyjadřuje, pouze předpokládá.
17. Malá rada pro uživatele LaTeXu: na straně 8 by autor jistě rád vysázel i vektor Lagrangeových multiplikátorů tučně: *boldsymbol* je přítel pro situace, kdy je potřeba vysázet tučně řecké písmeno.
18. Mnohé obrázky mají popisky (legendy, osy) v angličtině. Nevnímám to jako zásadní prohřešek, ale zároveň nestojí moc mít toto v pořádku, jen je holt potřeba si zdrojové kódy pro generování obrázků ukládat. V některých případech ale ty anglické popisky nejde lehce namapovat na zavedené pojmy. Například prostřední obrázek v superobrázku 3.1 — co přesně je *yaw*? Já to vím, ale ví to určitě i ostatní čtenáři?
19. Jednotku zrychlení v odborném textu jen málokdo zapisuje jako $\frac{m}{s^2}$. Spíše v jednom řádku pomocí mocnin nebo zlomkové čáry. Tedy m/s^2 nebo lépe $m\,s^{-2}$. Viz ISO 80000-1:2009/Cor 1:2011 Quantities and units — Part 1: General — Technical Corrigendum 1 (opět, v češtině bude nepochybně existovat odpovídající norma). Pro uživatele LaTeXu tip: balíček *siunitx*.
20. (Nejspíše) kolize značení. Na samém začátku práce, na straně 4, je zmíněn úhel θ_r coby rozdíl $\theta_p - \theta$. Později v práci, na straně 23, je ale po značení θ_r rozuměna referenční hodnota. Asi netřeba dodávat, že toto je skutečně mimořádně matoucí, protože vyznat se potom v článku, který úhel θ je který a k čemu vztažený je opravdu velmi náročné. Opět narážíme na to, že grafické vyjádření by bylo více než užitečné. Snad se objeví v prezentaci.
21. Označení „Sledovač z autonomního slalomu“ je poměrně zvláštní. Rozumíme si mezi sebou, že jde o „sledovač, který použili kolegové v rámci nějaké jejich slalomové akce z Panamerou“, ale spíše bych se při označování metod publikovaných v literatuře držel toho, kdo metodu vymyslel. Je to přesnější i slušnější. Pokud jí dotyčný sám nedal nějaké jméno a pokud značení pouhým odkazem

na publikaci, pak by kupříkladu dobrým řešením mohlo být označení podle jména školy či města. V tomto případě třebaš Ljubljanský algoritmus. Nebo podle počátečních písmen jmen autorů. Běžná praxe, viz třebaš BFGS algoritmus pro optimalizaci, Youla-Kučera parametrizace stabilizujících regulátorů, LuGre (Lund, Grenoble) model tření.

22. V návaznosti na předchozí: opravdu je potřeba si začít trénovat tu pečlivost i obezřetnost při práci se zdroji. V tomto případě onen zdroj [25], ze kterého je vzat algoritmus pro sledování trajektorie, a který je v seznamu literatury uveden jako Gorazd Karer, Mitja Kolbe, Janez Leskovec, Vito Logar a Prof Matko. Robot ballet. In: 2021. https://www.researchgate.net/publication/228418464_Robot_ballet, je ve skutečnosti již z roku 2003. A publikován byl na nějaké (spíše neznámé) mezinárodní studentské konferenci. Verze článku nabízená přes ResearchGate není nikterak datovaná, ani v sobě nemá jakýkoliv údaj o tom, kde vlastně byl článek publikován. Nevylučuji, že může obsahovat skvělý nápad, ale přiznávám se, že bych se hodně divil, kdyby ve skutečnosti nebyl publikován (už) i někde jinde, kde mu mezinárodní odborná komunita věnoval více kritické pozornosti. Dobré myšlenky a výsledky si většinou tu cestu do dobrých časopisů a na dobré konference najdou. Není to sice rozpoznávací znak, ale u takových se pak dá očekávat, že bude mít článek trvalý záznam na webu (číslo DOI), viz konference a časopisy odborných společností IEEE, IFAC, ASME, SAE, SIAM, a další.
23. Teprve v sekci 5.3 je uvedeno jakési celkové blokové schéma. Jednak jsem coby čtenář takové schéma očekával spíše už někde na začátku práce, ale současně i k formě tohoto schématu mám výhrady. Ještě užitečnější by totiž bylo, kdyby explicitně ukazovalo, odkud kam tečou jaká data. Takto pouze nepojmenované šipky ukazují, že „z IMU jde něco do IMU Data Preprocessing“, ale co přesně, to už uvedeno není. Jen translační akcelerace? Nebo i úhlové rychlosti? Nebo právě i jejich fúzí získané pozice a orientace? Sám pro jednom přečtení práce si už na konci ani neuvědomuji, jestli jsem tuto informaci dostal v textu, ale ať už ano nebo ne, přehledné blokové schéma zřetelně veškeré referenční i rušivé vstupy, měřené signály i případně jejich zatížení šumy, a nakonec hlavně výstupy z regulátorů, to všechno je skvěle vidět v jednom blokovém diagramu. Včetně vizualizace uzavření regulačních smyček (v předloženém obrázku vlastně ani není vidět, že je blok nazvaný *Trajectory follower* zpětnovazebním regulátorem). Toto je systém ještě zvládnutelné složitosti, takže do jednoho obrázku by se to jistě vlezlo. Možná by autor mohl zvážit, zda si takové schéma nepřipravil do své prezentace.
24. Být autorem, tak možná přehodnotím vztah k používání slova *díky* v souvislosti s uváděním příčiny negativních jevů. Tedy v sekci 6.1 bych asi nenapsal „díky zpoždění“, ale třebaš „v důsledku zpoždění“ nebo „kvůli zpoždění“. To *díky* má v sobě až příliš vděčný tón, a tady není být za co vděčný, ne? Ale uznávám, že je to osobní předsudek.

4 Otázky k obhajobě

V závislosti na čase by student by mohl odpovědět třebaš i jen na dvě otázky. Není zásadní, aby odpověděl na všechny:

1. V textu se objevuje poměrně matoucí vyjádření: v sekci 4.2.1 o implementaci lokálního plánovače autor píše „Vstupem gradientního plánovače je posloupnost (konfigurace) průjezdních bodů. . . “. Hned v následující větě však píše „Pro plánování cesty s více průjezdními body nepoužívám možnost přímého zadání více průjezdních bodů na vstup gradientního plánovače“. Přiznávám, nerozumím. Prosím o vysvětlení, jak to tedy je s počtem zadávaných průjezdních bodů v implementovaném algoritmu.
2. Jeden ze závěrů, ke kterým autor v práci dochází, je skutečnost, že algoritmus plánování trajektorie založený na optimalizaci nad kinematickým modelem často přináší ve výsledku jen velmi malé zlepšení oproti algoritmu založenému na „pouhém“ hledání vhodných Beziérových křivek, který kinematiku auta nijak nezohledňuje. Coby hlavní důvod autor uvádí vyšší výpočetní nároky prvního algoritmu vedoucí na vyšší latenci při řešení v reálném čase. Jenže i kdyby tam to zpoždění nebylo, proč by vlastně to řešení založené na gradientním plánovači popsané v kapitole 3 mělo být vůbec

lepší? Skutečnost, že je založeno na „nějaké“ optimalizaci přece sama o sobě nezaručuje, že výsledek bude skutečně optimální (tedy česky nejlepší) z pohledu zabezpečení předjetí auta. Je to vždy otázka formulace kritéria optimality. Jak lze vlastně volbu kritéria optimality $L(x)$ v (bohužel) neočíslovaném vztahu na straně 7 zdůvodnit? Často bývá volba těchto kvadratických kritérií tak trochu vnučena, protože pro tento typ úloh existují numerické řešiče. Bývá ale vhodné tu formulaci problému aspoň dočasně oddělit od následného řešení – jak by tedy vypadalo to nejvíce prakticky užitečné kritérium optimality, když bychom se nemuseli zatěžovat starostmi, že následné numerické řešení bude obtížné?

3. Navazuje na předchozí otázku: autor v Obr. 4.4. ukazuje, že v některých situacích je Beziérová křivka až tak zakřivená, že auto by takovou trať nebylo schopno projet. Oproti tomu cesta vytvořená gradientním plánovačem takovým neduhem netvrdí. Jakým způsobem ale toto bylo garantováno pomocí gradientního plánovače? Vždyť v dané optimalizační úloze žádná omezení na zrychlení či rychlosti zahrnuta nebyla. Je tedy skutečně možné garantovat, že gradientní plánovač bude vždy poskytovat cesty, potažmo trajektorie, které auto zvládne projet?
4. Poté, co autor ve třetí kapitole formuluje úlohu plánování v globálním souřadném systému a pro tuto popisuje řešení, tak pak v sekci 3.5 předkládá formulaci problému plánování v souřadnicovém systému cesty, avšak to s upozorněním, že k samotnému řešení se již v práci nedostal. V samotném závěru pak zmiňuje, že jedním z možných vylepšení práce by byl právě přechod k tomuto souřadnému systému. Přiznám se, že mi vlastně není jasné, proč s tímto souřadným systémem nezačal. Není snad i přirozenější? Ta nutnost předpokládat rovnoměrný pohyb auta ve směru osy x působí jako velmi omezující. Co bylo tedy důvodem, proč autor nezačal rovnou se souřadným systémem spojeným s cestou? Byla to větší náročnost? Nebo že pro tu předchozí variantu již existovaly nějaké předběžné výsledky? Ta reparametrizace modelu vozidla či mobilního robota do souřadného systému cesty je poměrně standardním krokem.

4. června 2021