

## I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

<b>Název práce:</b>	<b>Prediktivní řízení pro robota SK80</b>
<b>Jméno autora:</b>	<b>Petr Brož</b>
<b>Typ práce:</b>	diplomová
<b>Fakulta/ústav:</b>	Fakulta elektrotechnická (FEL)
<b>Katedra/ústav:</b>	Katedra řídicí techniky
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. Loi Do
<b>Pracoviště vedoucího práce:</b>	Katedra řídicí techniky

## II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

<b>Zadání</b>	<b>náročnější</b>
Zadání hodnotím jako náročnější, jelikož vyžaduje návrh pokročilých metod řízení dynamických systémů. Navíc je cílem práce nasazení regulátoru i na hardware, dvounohého kolového balancujícího robota SK80 [skejto]. Práce tedy vyžaduje nejen ověření navrženého regulátoru na matematickém modelu, ale i reálném systému.	
<b>Splnění zadání</b>	<b>splněno</b>
Práce splňuje všechny body zadání. Student úspěšně navrhl a implementoval prediktivní regulátor pro robota SK80. Navržený regulátor dokáže plně nahradit existující LQR řízení: zvládá stabilizovat robota v nestabilní poloze a současně přijímat uživatelské požadavky prostřednictvím ovladače, což umožňuje s robotem jezdit v prostoru. Student důkladně vyhodnotil kvalitu navrženého řízení na simulacích, navrhl a provedl mnoho experimentů. Nakonec provedl i srovnání nového regulátoru s LQR řízením.	
<b>Aktivita a samostatnost při zpracování práce</b>	<b>A - výborně</b>
Student usilovně pracoval na práci celý semestr. Průběh práce jsme pravidelně konzultovali. Jestliže během své práce narazil na nějaký problém, měl ho vždy na konzultacích dobře zformulovaný a snažil se pro něho hledat vhodná řešení.	
<b>Odborná úroveň</b>	<b>A - výborně</b>
Práce má vysokou odbornou úroveň. Nejen, že student přímo využil pokročilé metody z optimálního řízení, ale šel i nad rámec klasické metody lineárního MPC a vyzkoušel současnou state-of-the-art metodu, Koopman MPC. Svůj postup student dobře a jasně v práci popsal. Podrobně a kriticky diskutuje kvalitu navržených regulátorů. Věnuje se i popisu možných budoucích vylepšení jeho práce.	
<b>Formální a jazyková úroveň, rozsah práce</b>	<b>B - velmi dobře</b>
Práce je psaná velice květnatou angličtinou, bez výrazných gramatických nebo stylistických chyb. Rozsah práce odpovídá diplomové práci. Typograficky i graficky je práce z většiny zdařilá, některým částem textu by nicméně prospělo více revizí. Matematické zápisy jsou ale fakticky správné. Až na pár nepřesných vyjádření a nesprávně využitých termínů student používá správnou terminologii. Dle mého názoru tyto nepřesnosti ale nijak zásadně neovlivňují celkovou srozumitelnost textu.	
<b>Výběr zdrojů, korektnost citací</b>	<b>C - dobře</b>
Metody, které student v práci využil, jsou řádně odcitovány. Student jasně oddělil svoji práci od předchozích prací, na nichž stavěl. Avšak, u diplomové práce bych očekával více referencí např. na jiné související a podobné práce. Stejně tak i při popisu použitých metod mohl student využitou teorii uvést do širšího kontextu skrze reference. Některým citacím chybí kompletní bibliografické údaje.	

#### **Další komentáře a hodnocení**

Kromě splnění bodů zadání práce, se student v semestru předcházející diplomové práci také významně podílel na rozšíření softwaru robota. Jako velice náročné vnímám to, že se student nejprve musel v relativně krátkém čase seznámit s cizím kódem a již existující softwarovou architekturou a do tohoto kódu pak doplnil části nezbytné pro jeho práci. Dbát přitom musel i na čitelnost kódu, jelikož už i přímo v minulém semestru byly rozšířené části využity v rámci jiné diplomové práce, stejně tak budou nadále využívány i v budoucnu. To vše zvládl student bez větších obtíží.

### **III. CELKOVÉ HODNOCENÍ A NÁVRH KLASIFIKACE**

Hlavním cílem práce bylo navrhnout prediktivní řízení pro dvounohého kolového robota SK80. Student tento úkol splnil, přičemž prokázal schopnost samostatné a systematické práce při řešení komplexní úlohy. Využil přitom mnoho znalostí, které získal během svého magisterského studia. Navíc si osvojil relativně novou a teoreticky složitou metodu prediktivního řízení (Koopman MPC), která přesahovala rámec jeho studia. Studentem navržený řídicí systém byl úspěšně implementován na reálném robotovi a dokázal plně nahradit dosavadní LQR řízení.

Jediné znatelné nedostatky práce jsou ve výběru zdrojů, korektnosti citací, a formálním popisu postupu. Tyto nedostatky přisuzuji spíše nepozorné kontrole textu, respektive menšímu množství revizí textu, než že by byly způsobené neznalostí studenta. Nedostatky jsou zároveň dostatečně vyvážené studentovými výsledky.

V neposlední řadě se student zasloužil i o vylepšení robota SK80, který se často využívá při propagaci fakulty (Dny otevřených dveří), nebo, jako v tomto případě, jako i platforma pro závěrečné práce.

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **A - výborně**.

Datum: 16.1.2024

Podpis:

## I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

<b>Název práce:</b>	<b>Prediktivní řízení pro robota SK80</b>
<b>Jméno autora:</b>	<b>Bc. Petr Brož</b>
<b>Typ práce:</b>	magisterská
<b>Fakulta/ústav:</b>	Fakulta elektrotechnická
<b>Katedra/ústav:</b>	Katedra řídicí techniky
<b>Oponent práce:</b>	Ing. Jan Filip
<b>Pracoviště opONENTA práce:</b>	ISEE inc., Cambridge, Massachusetts

## II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

<b>Zadání</b>	<b>náročné</b>
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>	
Práce se zabývá návrhem prediktivního řídicího systému pro robota SK80 s cílem stabilizovat robota stojícího na dvou nohách opatřených koly a umožnit operátorovi dálkové ovládání pohybu. Zadání je komplexní a zahrnuje výběr vhodného schématu prediktivního řízení, návrh řízení, ověření s pomocí simulačního modelu, integraci do existujícího softwaru robotické platformy, nasazení na robota a porovnání výsledků s předchozí metodou řízení. Zadání považuji za náročné, neboť vyžaduje kombinaci teoretických znalostí pro návrh řízení pokročilými metodami, inženýrských dovedností pro nasazení na existující platformě a značné úsilí pro experimentální ověření výsledného systému.	
<b>Splnění zadání</b>	<b>splněno</b>
<i>Posuďte, zda předložená závěrečná práce splňuje zadání. V komentáři případně uveďte body zadání, které nebyly zcela splněny, nebo zda je práce oproti zadání rozšířena. Nebylo-li zadání zcela splněno, pokuste se posoudit závažnost, dopady a případně i příčiny jednotlivých nedostatků.</i>	
Zadání práce bylo splněno ve všech bodech. Diplomant navrhl prediktivní řídicí systém a ověřil jeho funkčnost v simulaci. Značné úsilí bylo věnováno i celkové úpravě softwaru platformy, aby bylo možné výpočetně náročnější metody řízení na platformě nasadit. Tímto krokem diplomant vylepšil dosavadní stav platformy a umožnil realizovat podobné experimenty i v rámci dalších studentských prací. Vlastní řídicí systém je funkční a subjektivně zlepšil dosavadní pohybové schopnosti robota. Nad rámec svého zadání diplomant navrhl a ověřil i další prediktivní řídicí systém využívající lineární prediktor navržený s pomocí Koopmanova operátoru.	
<b>Zvolený postup řešení</b>	<b>správný</b>
<i>Posuďte, zda student zvolil správný postup nebo metody řešení.</i>	
Zvolené postupy řešení jsou správné, využívají doporučené odborné literatury a dosáhly požadovaných výsledků. Práce je přehledně strukturována. Rozdělení kapitol a podkapitol je systematické a umožňuje čtenáři vývoj práce snadno sledovat. Jednotlivé kroky jsou dobře zdokumentované a reprodukovatelné. Oceňuji, že jsou zdokumentovány i ponaučení získaná při návrhu prediktoru v rozšířeném stavovém prostoru, která slouží pro budoucí zlepšení.	
<b>Odborná úroveň</b>	<b>B - velmi dobře</b>
<i>Posuďte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.</i>	
Práce má dobrou odbornou úroveň a demonstruje schopnosti diplomanta úspěšně vyřešit komplexní inženýrský problém za využití znalostí získaných studiem. V práci bych ocenil vyšší využití odborné literatury, například pro úvodní průzkum a porovnání metod řízení, které jsou využívány na jiných podobných platformách (např. Ascento, ANYmal, Handle), nebo diskuzi očekávaných výsledků, které by zvolená metoda řízení měla přinést vůči původnímu řešení.	

**Formální a jazyková úroveň, rozsah práce**

**C - dobře**

*Posuďte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posuďte typografickou a jazykovou stránku.*

Po formální a jazykové stránce má práce dobrou úroveň. Oceňuji, že je práce napsaná v anglickém jazyce, text je čtivý a sazba úhledná. Text bohužel obsahuje i menší množství drobných nepřesností: překlepů, záměn symbolů (např.  $x$  na straně 12), nebo znaménka (Rovnice 3.1). Zobrazení porovnávaných časových průběhů by mohlo být přehlednější: např. porovnáváním odezvy systému na kratším časovém úseku či s menším počtem změn referenčního signálu, kde by základní rozdíly v akčním zásahu a druhotných kmitech odezvy byly lépe patrné. Plocha věnovaná obrázkům by také mohla být využita efektivněji (např. strany 26-28). Na obrázku 5.1 by navíc bylo vhodné uvést i odezvu, kterou jednotlivé modely mají aproximovat.

**Výběr zdrojů, korektnost citací**

**C - dobře**

*Vyjádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posuďte, zda student využil všechny relevantní zdroje. Ověřte, zda jsou všechny převzaté prvky řádně odlišeny od vlastních výsledků a úvah, zda nedošlo k porušení citační etiky a zda jsou bibliografické citace úplné a v souladu s citačními zvyklostmi a normami.*

Práce využívá relativně nízký počet zdrojů, což je v kontrastu s komplexností řešeného problému. Bylo by vhodné využít literaturu pro získání širšího přehledu o metodách řízení využívaných na podobných platformách a nejprve diskutovat jejich výhody a omezení vůči počátečnímu řešení, které se práce snaží nahradit. Toto by následně pomohlo práci lépe zasadit do širšího kontextu, zdůvodnit cíle nového řídicího systému, nastavit si objektivní kritéria pro porovnání s předchozím řešením a lépe tak zhodnotit přínosy práce. Nicméně využití zdrojů je pro vyřešení problému postačující. Vlastní přínosy práce jsou v textu jasně odděleny a citace jsou v souladu s normami.

**Další komentáře a hodnocení**

*Vyjádřete se k úrovni dosažených hlavních výsledků závěrečné práce, např. k úrovni teoretických výsledků, nebo k úrovni a funkčnosti technického nebo programového vytvořeného řešení, publikačním výstupům, experimentální zručnosti apod.*

Cíl práce byl úspěšně splněn, bylo navrženo správné a funkční řešení. Diplomant věnoval i značné úsilí samotnému vylepšení softwaru platformy, čímž umožnil realizaci dalších studentských prací. Práce celkově splňuje zadaná kritéria, ale k vyššímu hodnocení ji z mého pohledu bohužel chybí hlubší analýza počátečního stavu a přípravná část pro výběr a vyhodnocování mezi jednotlivými metodami řízení.

**III. CELKOVÉ HODNOCENÍ, OTÁZKY K OBHAJOBĚ, NÁVRH KLASIFIKACE**

*Shrňte aspekty závěrečné práce, které nejvíce ovlivnily Vaše celkové hodnocení. Uved'te případné otázky, které by měl student zodpovědět při obhajobě závěrečné práce před komisí.*

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **C - dobře**.

**Otázky:**

Kritéria ladění odezvy prediktivního řídicího systému

- Jaká kritéria jste sledoval při ladění odezvy prediktivního řídicího systému? Mohl byste specifikovat, které veličiny jste primárně porovnával a jaké odezvy jste se u nich snažil dosáhnout (například z hlediska překmitu, doby ustálení a dalších klíčových parametrů odezvy systému).

Srovnání MPC a LQR Řízení

- Jak se liší MPC řešení navržené v kapitole 4 oproti LQR řízení při práci v rozsahu odchylek sledování bez aktivních omezení akčního zásahu?

Datum: 29. 1. 2024

Podpis: