



**Fakulta elektrotechniky
a informatiky**

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie

Predmet : **Fuzzy systémy**

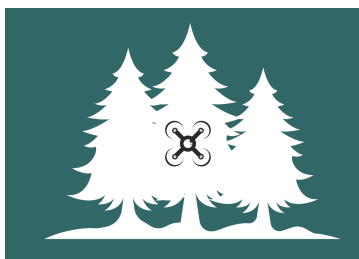


KKUI
Katedra kybernetiky
a umelej inteligencie

Zadanie - pracovná skupina č. 11.

Adaptive Second-Order Strictly Negative Imaginary Controllers Based on the Interval Type-2 Fuzzy Self-Tuning Systems for a Hovering Quadrotor With Uncertainties

Quadcopter, adaptive, SNI, T2FS



Spracovali:

Nikita Shalashkov, Aleksandr Shadrin, Nikita Kalashnikov

Obsah

1	Úvod	2
2	Popis problematiky	2
2.1	SNI	2
2.2	Interval Type-2 Fuzzy Systems	3
3	Návrh riešenia	4
3.1	Quadrotor UAV	4
3.2	Type-2 Fuzzy Takagi-Sugeno Controller	5
3.3	Strictly Negative Imaginary Controller	5
4	Experimenty a ich vyhodnotenie	6
5	Záver	7

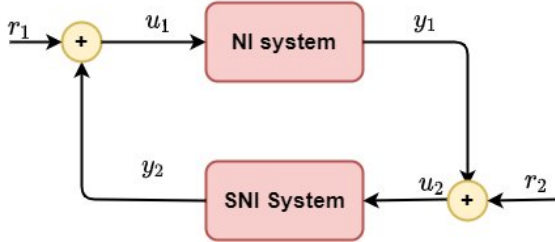
1 Úvod

Hlavným cieľom článku je vyvinúť regulátory, ktoré zabezpečia robustnosť a dobrú výkonnosť riadiaceho systému pri zmene dynamiky manipulátora v reálnom čase.

2 Popis problematiky

Hlavnou problematikou článku je stabilizácia riadenia drona pri neustále meniacom sa ťažisku. Na tento účel bol v článku predstavený SNI spôsob, ktorý umožňuje dosiahnuť stabilné a vyvážené zavesenie drona v letovom režime. SNI je nová technika adaptívneho riadenia, založená na regulátore druhého rádu so striktne negatívnymi imaginárnymi číslami v kombinácii s "the interval type-2 fuzzy self-tuning mechanism". Pre uľahčenie mechaniky regulátora SNI bola použitá intervalová Type-2 Takagi-Sugeno fuzzy sústava, ktorá dokáže zohľadniť vplyv neistoty.

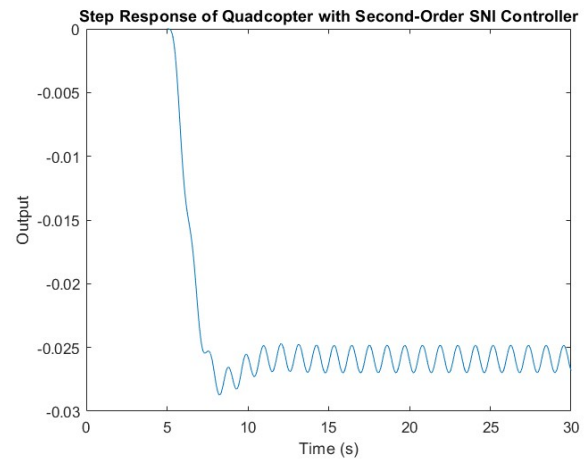
2.1 SNI



Obr. 1: Vzorka implementácie negatívneho imaginárneho systému a negatívneho prísneho imaginárneho systému

Teória záporných imaginárnych systémov bola predstavená v publikácii od Lanzona a Petersena [2]. Môžeme pochopiť vlastnosti záporných imaginárnych systémov, ak

si zoberieme prípad jedno-vstupového jedno-výstupového systému (SISO). Záporná imaginárna vlastnosť je definovaná podľa vlastností imaginárnej časti frekvenčnej odozvy $G(j\omega)$, ktorá vyžaduje, aby platila podmienka $j(P(j\omega) - P^*(j\omega)) \geq 0$ pre všetky $\omega \in (0, \infty)$. Grobne povedané, SNI systémy sú stabilné systémy, ktoré majú fázový oneskorený signál medzi 0 a $-\pi$ pre všetky $\omega > 0$. Inými slovami, Nyquistov diagram by mal ležať pod reálnou osou, keď sa frekvencia mení v otvorenom intervale $(0, \infty)$. Toto je podobné pozitívnym reálnym systémom, kde musí byť Nyquistov diagram obmedzený na pravú polovicu komplexnej roviny [1].



Obr. 2: Odpoveď na krok kvadroptéry s regulátorom druhého rádu typu SNI

Definícia: [2] Matica prenosovej funkcie $N(s)$ je SNI, ak sú splnené nasledujúce podmienky:

1. $N(s)$ nemá pól v oblasti $Re[s] \geq 0$.
2. Pre všetky $\omega > 0$ platí $j(N(j\omega) - N^*(j\omega)) > 0$.

SNI sa tiež používa v regulátoroch s uzavretou slučkou.

Pojem riadenie s uzavretou slučkou vždy zahŕňa použitie spätnoväzbovej regulačnej

činnosti, aby sa znížili akékoľvek chyby v systéme, a jeho „spätná väzba“, ktorá rozlišuje hlavné rozdiely medzi systémom s otvorenou slučkou a systémom s uzavretou slučkou. Výstup teda závisí od spätnoväzbovej dráhy, ktorá môže byť vo všeobecnosti veľmi presná a v rámci elektronických riadiacich systémov a obvodov sa spätnoväzbové riadenie používa častejšie ako riadenie s otvorenou slučkou alebo dopredné riadenie.

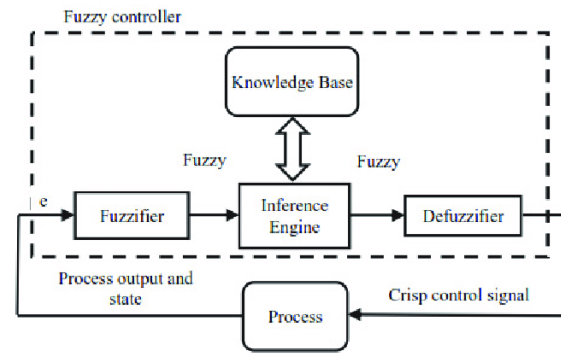
Systémy s uzavretou slučkou majú mnoho výhod oproti systémom s otvorenou slučkou. Primárnou výhodou systému spätnej väzby s uzavretou slučkou je jeho schopnosť znížiť citlivosť systému na vonkajšie poruchy, napríklad otvorenie dvierok sušičky, čo dáva systému robustnejšie ovládanie, pretože akékoľvek zmeny v signále spätnej väzby budú mať za následok kompenzáciu ovládača.

Potom môžeme definovať hlavné charakteristiky riadenia s uzavretou slučkou ako:

- Znížiť chyby automatickým nastavením vstupov systému.
- Na zlepšenie stability nestabilného systému.
- Zvýšiť alebo znížiť citlivosť systému.
- Zvýšiť odolnosť voči vonkajším poruchám procesu.
- Produkovat' spoľahlivý a opakovateľný výkon.

2.2 Interval Type-2 Fuzzy Systems

Fuzzy regulátor alebo model používa fuzzy pravidlá, ktoré sú jazykovými *if – then* vyhláseniami, pozostávajúcimi z fuzzy množín, fuzzy logiky a fuzzy inferencie, na vyjadrenie zložitých procesov bez použitia



Obr. 3: Schéma intervalového systému Fuzzy Logic

zložitých modelov [4]. Tieto pravidlá obsahujú odborné vedomosti o riadení/modelovaní a reprezentujú skúsenosti pri spojení fuzzy premenných pomocou jazykových termínov. Obrázok 2 opisuje celkovú architektúru Fuzzy Logic riadenia.

Spoločná štruktúra fuzzy pravidla je:

$$\begin{aligned} &\text{IF } (\zeta_1 \text{ is } \mu_1) \text{ and/or } (\zeta_2 \text{ is } \mu_2) \\ &\quad \dots \text{ and/or } (\zeta_n \text{ is } \mu_n) \\ &\quad \text{THEN } \varphi \text{ is } \mu, \end{aligned}$$

kde $\mu_i, \forall i = 1, \dots, n$, je fuzzy množina i -tého vstupu a n je celkový počet fuzzy pravidiel. $\zeta = (\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n)$ predstavuje vstupný vektor, φ označuje výstupnú premennú získanú z procesu defuzzifikácie a μ označuje fuzzy konsekvant ponúkaný odborníkom.

Základné operátory 'a/alebo/nie' kombinujú podmienky vstupných premenných, ktoré sú splnené. Na základe stupeňa zhody medzi fuzzy vstupom a pravidlami je definovaná sila spustenia w_i pravidla i v závislosti na danom vstupnom rozsahu. Sugeno (TS) fuzzy inference, ktorá je najčastejšie používaná, pracuje s výstupnými členskými funkciami typu singleton, ktoré sú buď konštantné alebo lineárne funkcie vstupných hodnôt. Defuzzifikácia procesu pre Sugeno systém je

Mamdani	Sugeno
Output membership function	No output membership function
Crisp result obtained through defuzzification of rules' consequent	No defuzzification: crisp result is obtained using weighted average of the rules' consequent
Non-continuous output surface	Continuous output surface
MISO (Multiple Input Single Output) and MIMO (Multiple Input Multiple Output) systems	Only MISO systems
Expressive power and interpretable rule consequents	Loss of interpretability
Less flexibility in system design	More flexibility in system design

Obr. 4: Porovnanie medzi sugeno a mamdani

výpočtovo efektívnejšia ako u systému Mamdani, pretože používa vážený priemer všetkých výstupov pravidiel na výpočet výstupu.

3 Návrh riešenia

Úlohu sme nedokázali úplne vyriešiť, pretože sa ukázala byť veľmi zložitou a náročnou. Avšak, podarilo sa nám implementovať Type-2 Fuzzy intervalový systém a Quadrotor UAV (autonómne lietajúce zariadenie), a otestovať SNI kontrolér s pomocou krokového signálu od quadrotora.

3.1 Quadrotor UAV

Kvadrokoptéra známa aj ako kvadrotor je viacrotorové bezpilotné lietadlo (UAV). Kvadrokoptéry patria do kategórie UAV s vertikálnym vzletom a pristátím (VTOL). Kvadrokoptéra má štyri rotory v tvare štvorca v rovnakej vzdialenosti od ťažiska vozidla. Rýchlosť rotorov je ovládaná tak, aby vykonávala rôzne manévry, vznášanie, vzlet a

pristávanie.

Pohybové rovnice:

$$\begin{aligned}\ddot{z} &= g - u_1/m * \cos(\phi) \\ \ddot{y} &= u_1/m * \sin(\phi) \\ \ddot{\phi} &= u_2/I_{xx}\end{aligned}$$

Kde $m = 0.2kg$ a $I_{xx} = 0.1units$

Control Design:

REFERENCE TRAJECTORY (INPUT)

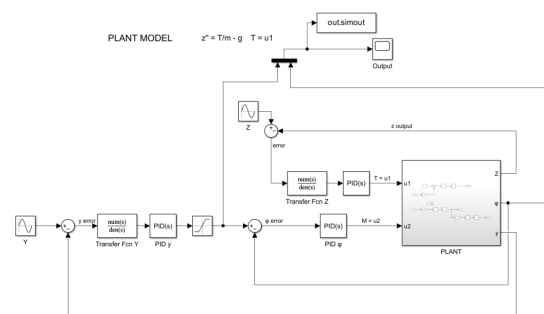
$$z = 5 \cdot \sin(t) \quad y = 0.5 \cdot \sin(0.5t)$$

Obr. 5: Quadrotor inputs

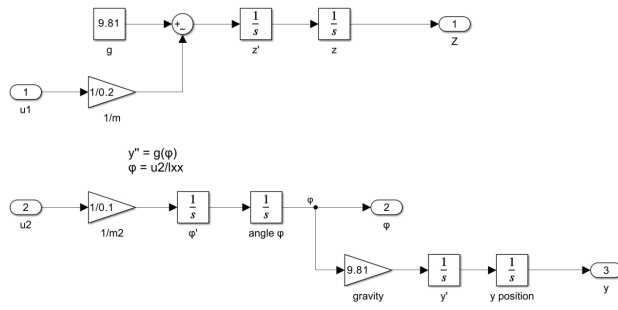
3-DOF system (y, z, ϕ) two control variables;

Controller input $u_1 \rightarrow \ddot{z} \rightarrow \dot{z} \rightarrow z, loop$
Controller input $u_2 \rightarrow \ddot{\phi} \rightarrow \dot{\phi} \rightarrow \phi, loop$
 $\rightarrow \ddot{y} \rightarrow \dot{y} \rightarrow y, loop$

Simulink implementation:



Obr. 6: Simulation system s SNI transfer functions



Obr. 7: Quadrotor PLANT Subsystem

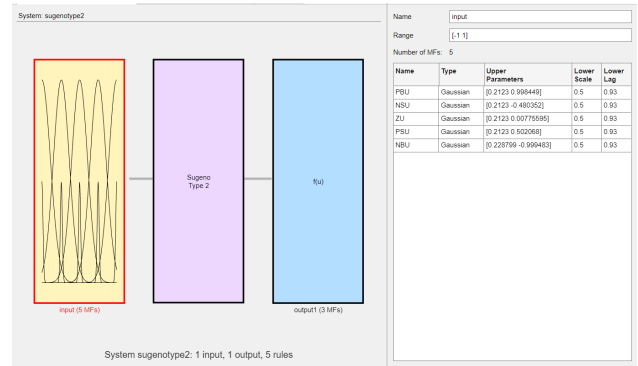
3.2 Type-2 Fuzzy Takagi-Sugeno Controller

Na implementáciu tohto regulátora sme použili Fuzzy Logic Designer.

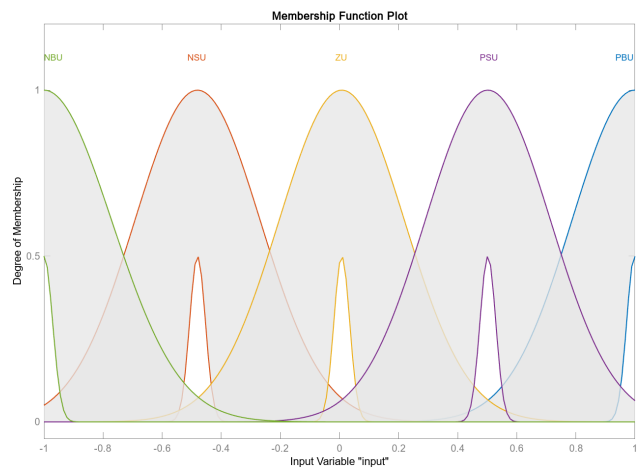
Návrhár fuzzy logiky je softvérový nástroj používaný na navrhovanie a implementáciu systémov fuzzy logiky. Fuzzy logika je matematický rámec, ktorý sa zaoberá neistotou a nepresnosťou, často používaný v riadiacich systémoch, rozhodovacích procesoch a umelej inteligencii.

Softvér na návrh fuzzy logiky umožňuje používateľom vytvárať a simulovať systémy fuzzy logiky bez toho, aby museli písať kód. Zvyčajne obsahuje grafické rozhranie, ktoré umožňuje používateľom definovať premenné, funkcie členstva, pravidlá a výstupy systému. Softvér môže tiež vykonávať simulácie a analýzy správania systému pri rôznych vstupných podmienkach.

Softvér pre návrhárov fuzzy logiky sa bežne používa v oblastiach, ako je riadiace inžinierstvo, robotika a umelá inteligencia, kde systémy potrebujú robiť rozhodnutia na základe neistých alebo nejednoznačných údajov. O rozdieloch medzi Fuzzy Logic Type-1 a Type-2 si môžete prečítať tu [5]. Stručne povedané, fuzzy logika typu 1 používa na vyjadrenie neistoty jasné funkcie príslušnosti, zatiaľ čo fuzzy logika typu 2



Obr. 8: T2F Takagi-Sugeno schema v Fuzzy Logic Designer

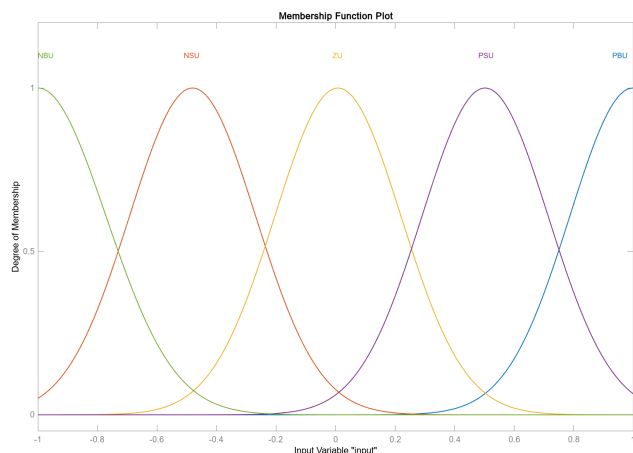


Obr. 9: T2F Takagi-Sugeno membership funkcií

umožňuje vyšší stupeň reprezentácie neistoty pomocou fuzzy množín. Intervaly fuzzy logiky typu 2 sú špecifickým typom fuzzy logiky typu 2, ktoré predstavujú neistotu pomocou intervalov.

3.3 Strictly Negative Imaginary Controller

Náš kód definuje a simuluje striktné negatívny imaginárny (SNI) ovládač druhého rádu pre kvadrokoptéru. Regulátor SNI je typ riadia-



Obr. 10: T1F Takagi-Sugeno membership funkcií

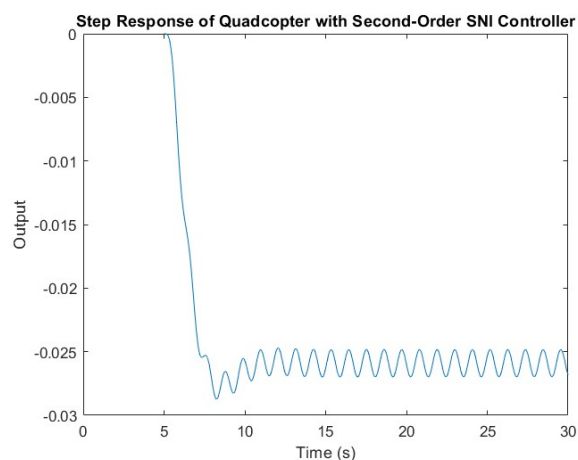
ceho systému, ktorý zabezpečuje, že systém s uzavretou slučkou je stabilný, robustný a má dobré vlastnosti na potlačenie rušenia. Regulátor SNI má tri parametre: delta, xi a ω_n , čo sú jednosmerné zosilnenie, pomer tlmenia a vlastná frekvencia.

Kód potom definuje prenosovú funkciu ovládača SNI a prenosovú funkciu kvadrokoptéry. Tri prenosové funkcie, menovite sys_z , sys_x , sys_y , sú definované tak, aby reprezentovali dynamiku závodu pozdĺž osi z, osi x a osi y.

Prenosová funkcia v uzavretej slučke pre kvadrokoptéru s ovládačom SNI je potom definovaná spätnou väzbou produktu prenosovej funkcie zariadenia a prenosovej funkcie ovládača SNI. Je definovaný čas simulácie a vstupný signál a systém je simulovaný pomocou funkcie `lsim`.

Výsledný výstup je potom vynesенý tak, aby ukázal krokovú odozvu kvadrokoptéry s ovládačom SNI. Definuje sa aj názov, xlabel a ylabel grafu.

Regulátor SNI je čisto imaginárny regulátor, čo znamená, že zavádza iba fázový posun v riadiacom signáli, čo z neho robí atraktívnu



Obr. 11: Odpoveď na krok kvadrokoptéry s regulátorom druhého rádu typu SNI

možnosť pre aplikácie, ktoré vyžadujú fázovo citlivé riadenie.

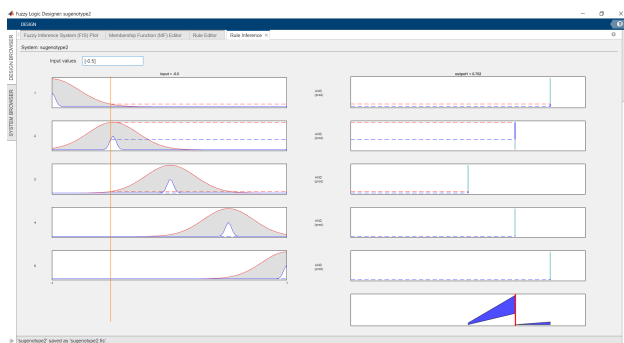
Ukázalo sa, že regulátor SNI je účinný pri dosahovaní vlastností stability, robustnosti a rušenia v rôznych systémoch. Ukázalo sa tiež, že má dobrý výkon v riadiacich systémoch s neistou dynamikou, čo z neho robí atraktívnu možnosť pre aplikácie, ktoré vyžadujú robustné riadenie.

4 Experimenty a ich vyhodnotenie

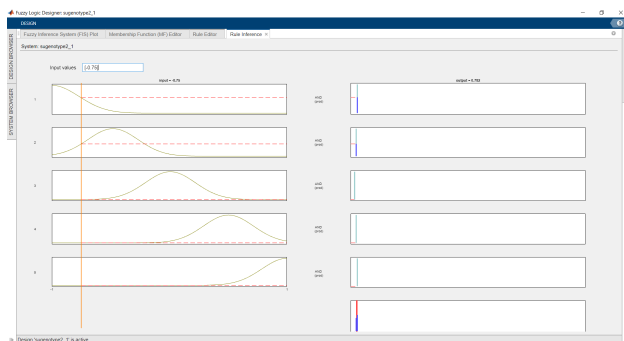
Po niekoľkých experimentoch s implementáciou kvadrotora (snažili sme sa pripojiť k systému Fuzzy Logic Controller; pripojené prenosové funkcie SNI, pre funkciu kroku sme použili blok Saturation)

Toto sú tiež naše membership funkcie s nasledujúcimi vstupmi: 1.

Výsledkom tohto procesu odvodzovania je súbor váh alebo stupňov aktivácie, jeden pre každé pravidlo. Tieto váhy predstavujú relatívnu dôležitosť alebo príspevok každého pravidla ku konečnému výstupu fuzzy



Obr. 12: Vyvodenie systémových pravidiel Type-2 Fuzzy



Obr. 13: Vyvodenie systémových pravidiel Type-1 Fuzzy

systému.

Analýzou váh alebo stupňov aktivácie fuzzy pravidiel môžeme získať prehľad o tom, ako sa fuzzy systém rozhoduje a ktoré pravidlá majú najväčší vplyv na výstup. To nám môže pomôcť pochopiť správanie systému a identifikovať oblasti, v ktorých môžu byť potrebné zlepšenia alebo úpravy.

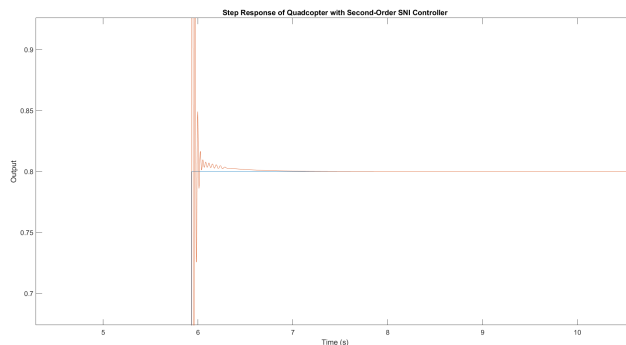
Navyše, analýzou samotných fuzzy pravidiel môžeme získať prehľad o základných vzťahoch medzi vstupnými a výstupnými premennými, čo nám môže pomôcť lepšie pochopiť problémovú doménu a potenciálne viesť k vývoju efektívnejších fuzzy systémov.

Výsledky simulácie nášho kvadrotora v Simulinku umožnili identifikovať slabé stránky

Tabuľka 1: Vstupné hodnoty pre fuzzy intervalové ovládače Takagi-Sugeno typu 1 a typu 2

n	$T2F$	$T1f$
1.	-1	-1
2.	0.75	0.75
3.	-0.5	-0.5
4.	-0.25	0.25
5.	0	0
6.	0.25	0.25
7.	0.5	0.5
8.	0.75	0.75
9.	1	1

nášho návrhu a navrhnúť zlepšenia.:



Obr. 14: Výsledky simulácie nášho kvadrotora v Simulinku

Na obr. 14 môžeme vidieť, že náš kvadrotor sa po zmene hodnoty kroku pomaly, ale stabilizuje. Pre tieto výsledky je to už celkom dobré, aj keď sme nepripojili fuzzy interval typu 2 k našim prenosovým funkciám SNI.

5 Záver

V tejto štúdii sme skúmali návrh a implementáciu striktné negatívnych imaginárnych ovládačov pre vznášajúci sa kvadrotor s neistotami. Náš prístup je založený na

fuzzy systémoch intervalového typu 2, ktoré umožňujú regulátoru prispôbiť sa zmenám dynamiky a neistôt systému. Prostredníctvom výsledkov simulácie sme preukázali účinnosť navrhovaného prístupu pri zlepšovaní stability a výkonu vznášajúceho sa kvadrotora. Konkrétne, prísne negatívne imaginárne ovládače preukázali vynikajúcu odolnosť voči neistotám a poruchám, ako aj lepšie sledovanie a odmietnutie vonkajších porúch. Naše výsledky naznačujú, že fuzzy systémy intervalového typu 2 môžu slúžiť ako sľubný nástroj pre návrh robustných a adaptívnych regulátorov pre vznášajúce sa kvadrotory a iné vzdušné systémy. Je možné vykonať ďalší výskum, aby sa preskúmala použiteľnosť navrhovaného prístupu na iné typy kvadrotorov a leteckých dopravných prostriedkov, ako aj jeho rozšírenie na ďalšie problémy riadenia s neistotou.

based on the interval type-2 fuzzy systems for a hovering quadrotor with uncertainties. "IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 25(1):11–20, 2020.

- [5] Oscar Castillo, Leticia Amador-Angulo, Juan R. Castro, Mario Garcia-Valdez, A comparative study of type-1 fuzzy logic systems, interval type-2 fuzzy logic systems and generalized type-2 fuzzy logic systems in control problems, Information Sciences, Volume 354, 2016, Pages 257-274

Literatúra

- [1] Tran, Vu Phi, Matthew Garratt, and Ian R. Petersen. "Distributed Obstacle and Multi-Robot Collision Avoidance in Uncertain Environments." arXiv, November 15, 2018.
- [2] I. R. Petersen and A. Lanzon. "Feedback control of negative-imaginary systems." IEEE Control Systems Magazine, 30(5):54–72, 2010.
- [3] A. Lanzon and I. R. Petersen. "Stability robustness of a feedback interconnection of systems with negative imaginary frequency response." IEEE Transactions on Automatic Control, 2008.
- [4] V. P. Tran, F. Santoso, M. A. Garratt, and I. R. Petersen. "Adaptive second order Strictly Negative Imaginary controllers