

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

Brno, 2021

Bc. David Lindtner



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

SIMULACE BEZPILOTNÍCH LETADEL VE VIRTUÁLNÍM PROSTŘEDÍ

SIMULATION OF UNMANNED AIRCRAFTS IN A VIRTUAL ENVIRONMENT

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

SEMESTRAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Lindtner

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Gábrlík, Ph.D.

BRNO 2021

Semestrální práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. David Lindtner

ID: 196815

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Simulace bezpilotních letadel ve virtuálním prostředí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je simulace misí bezpilotních letadel v prostředí ROS2/Gazebo a spočívá především ve výběru a testování vhodného programového vybavení.

1. Seznamte se s frameworkem ROS2 (Robot Operating System 2) a simulačním prostředím Gazebo, naučte se je používat na systému Linux (Ubuntu).
2. Prozkoumejte open-source projekty pro řízení bezpilotních letadel nabízející integraci do simulačního prostředí.
3. Zvolené řešení zprovozněte a demonstруйте na jednoduché misi.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

PYO, YoonSeok, HanCheol CHO, RyuWoon JUNG a TaeHoon LIM. ROS Robot Programming. Republic of Korea: ROBOTIS Co., 2017. ISBN 979-11-962307-1-5.

Termín zadání: 20.9.2021

Termín odevzdání: 3.1.2022

Vedoucí práce: Ing. Petr Gábrlík, Ph.D.

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.
předseda rady studijního programu

ABSTRAKT

Abstrakt práce v originálním jazyce

KLÍČOVÁ SLOVA

Klíčová slova v originálním jazyce

ABSTRACT

Překlad abstraktu (v angličtině, pokud je originálním jazykem čeština či slovenština; v češtině či slovenštině, pokud je originálním jazykem angličtina)

KEYWORDS

Překlad klíčových slov (v angličtině, pokud je originálním jazykem čeština či slovenština; v češtině či slovenštině, pokud je originálním jazykem angličtina)

LINDTNER, David. *Simulace bezpilotních letadel ve virtuálním prostředí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2022, 25 s. Semestrální práce. Vedoucí práce: Ing. Petr Gábrlík, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Bc. David Lindtner
VUT ID autora: 196815
Typ práce: Semestrální práce
Akademický rok: 2021/22
Téma závěrečné práce: Simulace bezpilotních letadel ve virtuálním prostředí

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno
.....
podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. XXX YYY, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	12
1 Topologie dronu	13
1.1 Řídící jednotka Pixhawk	13
1.2 Palubní počítač	13
2 Software pro řízení bezpilotních letadel	14
2.1 BetaFlight	14
2.2 INAV	14
2.3 EmuFlight	14
2.4 Ardupilot	14
2.5 PX4	14
3 PX4 autopilot	15
3.1 QGround Control	15
3.1.1 Nastavení vozidel	15
3.1.2 Plánování bezpilotní mise	15
3.2 Licence	15
3.3 Vnitřní struktura PX4	16
3.4 Připojení s simulátorem Gazebo	16
3.4.1 Komunikace	16
3.5 Připojení PX4 s ROS2	16
3.5.1 ROS2 aplikace	16
3.5.2 ROS2 zprávy	16
3.5.3 MicroRTPS agent a klient	16
3.6 DDS/RTPS middleware	16
3.6.1 DDS® a ROS 2	16
3.6.2 Orientace na data (data centricity)	18
3.6.3 Globální datový prostor	18
3.6.4 Základní architektura DDS®	18
3.6.5 Quality of Service	19
3.6.6 RTPS protokol	19
3.6.7 Dynamické hledání bodů v síti	20
3.6.8 Využití DDS® v praxi	20
4 Simulace ve virtuálním prostředí	22
4.1 SITL simulace	22
4.1.1 Gazebo	22

4.1.2	Ignition	22
4.2	Instalace virtuálního prostředí	22
4.2.1	Instalace a nastavení ROS 2	22
4.2.2	Instalace PX4	22
4.2.3	Instalace simulátoru Gazebo a Ignition	22
4.3	ROS 2 misie	22
4.3.1	Offboard flight mode	22
Závěr		23
Literatura		24
Seznam symbolů a zkratk		25

Seznam obrázků

3.1	Propojení DDS [®] middlewaru s aplikací a operačním systémem	17
3.2	Základní <i>publish/subscribe</i> struktura DDS [®] komunikace	19

Seznam tabulek

Seznam výpisů

Úvod

Úvod studentské práce, např. . .

Tato práce se věnuje oblasti DSP (číslicové zpracování signálů – Digital Signal Processing), zejména jevům, které nastanou při nedodržení Nyquistovy podmínky pro *vzorkovací kmitočet* (f_{vz}).¹

Šablona je nastavena na *dvoustranný tisk*. Pokud máte nějaký závažný důvod sázet (a zejména tisknout) jednostranně, nezapomeňte si přepnout volbu `twoside` na `oneside`!

¹Tato věta je pouze ukázkou použití příkazů pro sazbu zkratk.

1 Topologie dronu

1.1 Řídící jednotka Pixhawk

1.2 Palubní počítač

2 Software pro řízení bezpilotních letadel

výběr a porovnání flight stacks

2.1 BetaFlight

2.2 INAV

2.3 EmuFlight

2.4 Ardupilot

2.5 PX4

3 PX4 autopilot

PX4 je profesionální autopilot, vyvinutý světovými vývojáři z průmyslu a akademické obce a podporovaný aktivní celosvětovou komunitou. Pohání všechny druhy vozidel od závodních a nákladních dronů až po pozemní vozidla a ponorky.

3.1 QGround Control

QGroundControl je software, který poskytuje plnou kontrolu letu a plánování mise pro jakýkoli dron s podporou MAVLink. Jeho primárním cílem je snadné použití pro profesionální uživatele a vývojáře. Veškerý kód je open source, takže je možné přispívat a dál ho vyvíjet [2]. TODO nějaké screenshoty z aplikace

3.1.1 Nastavení vozidel

Podporované typy vozidel

3.1.2 Plánování bezpilotní mise

3.2 Licence

Kód PX4 je zdarma k použití a úpravě za podmínek permissivní licence *BSD 3-clause license* [1].

Redistribuce a použití ve zdrojové a binární formě, s úpravami nebo bez nich, jsou povoleny za předpokladu, že jsou splněny následující podmínky:

1. Redistribuce zdrojového kódu musí obsahovat výše uvedenou poznámku o autorských právech, tento seznam podmínek a následující prohlášení o vyloučení odpovědnosti.
2. Redistribuce v binární formě musí reprodukovat výše uvedenou poznámku o autorských právech, tento seznam podmínek a následující prohlášení o vyloučení odpovědnosti v dokumentaci a/nebo jiných materiálech dodávaných s distribucí.
3. Jméno držitele autorských práv ani jména jeho přispěvatelů nesmí být použita k podpoře nebo propagaci produktů odvozených z tohoto software bez předchozího výslovného písemného povolení.

3.3 Vnitřní struktura PX4

3.4 Přepojení s simulátorem Gazebo

3.4.1 Komunikace

3.5 Přepojení PX4 s ROS2

3.5.1 ROS2 aplikace

3.5.2 ROS2 zprávy

3.5.3 MicroRTPS agent a klient

3.6 DDS/RTPS middleware

Služba OMG¹ Data-Distribution Service for Real-Time Systems®(DDS®) je prvním otevřeným mezinárodním middlewarovým standardem, který přímo řeší komunikaci pro *publish and subscribe* systémy v reálném čase.

DDS® představuje virtuální globální datový prostor, kde mohou aplikace sdílet informace pouhým čtením a zápisem datových objektů. Datové objekty jsou adresované pomocí definovaného názvu (*topic*) a klíče (*key*). DDS® integruje součásti systému dohromady a poskytuje datovou konektivitu s nízkou latencí, extrémní spolehlivost a škálovatelnou architekturu. Nabízí rozsáhlé řízení parametrů QoS (Quality of Service), včetně spolehlivosti, šířky pásma a limitů zdrojů [4].

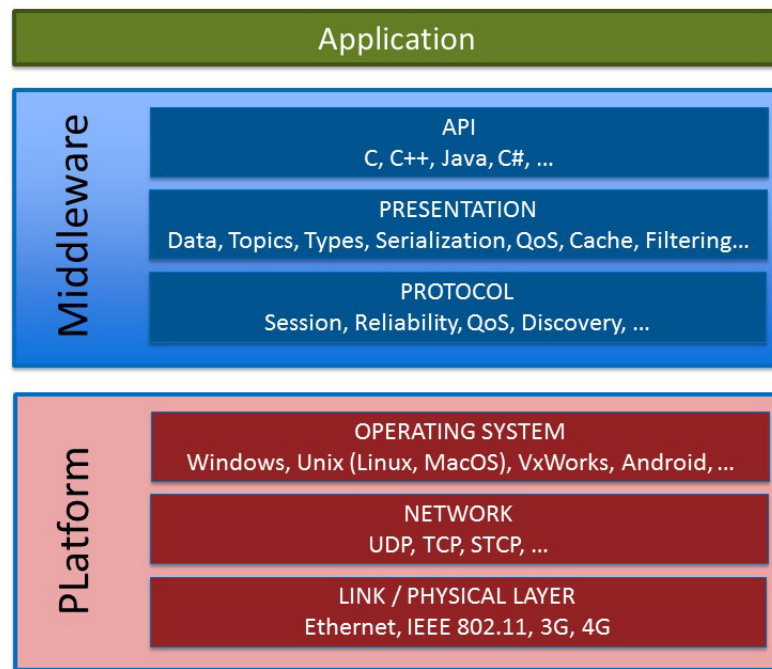
DDS® middleware komunikuje peer-to-peer a nevyžaduje, aby byla data zprostředkována serverem nebo cloudem.

Jak je zobrazeno na obr 3.1, DDS® middleware je software vrstva, která odděluje aplikaci od detailů operačního systému, síťového přenosu a nízkourovňových datových formátů. Nízkourovňové detaily, jako je formát dat v paměti, spolehlivost, protokoly, výběr přenosového kanálu, QoS, zabezpečení atd. jsou spravovány middlewarem.

3.6.1 DDS® a ROS 2

DDS® middleware je základní komunikační interface pro ROS 2. Middleware zajišťuje dynamické hledání bodů v síti, serializaci a *publish/subscribe* přenos dat. ROS

¹Object Management Group®(OMG®) je mezinárodní neziskové konsorcium pro technologické standardy s otevřeným členstvím.



Obr. 3.1: Propojení DDS® middlewaru s aplikací a operačním systémem [5].

2 skrývá velkou část složitosti DDS® pro většinu uživatelů, ale taky poskytuje přístup k základní implementaci DDS® pro uživatele, kteří potřebují vyřešit extrémní případy nebo potřebují integraci s jinými stávající DDS® systémy. [9]

ROS 2 podporuje více implementací DDS®/RTPS. Při výběru implementace middlewaru můžete zvážit mnoho faktorů, jako je licence, dostupnost platformy nebo výpočetní náročnost. Existují varianty middleware, které jsou vytvořeny pro mikrokontroléry, nebo varianty, které se zaměřují na aplikace vyžadující speciální bezpečnostní certifikace.

Podpora několika implementací DDS® middleware je důležitá pro zajištění toho, aby kódová základna ROS 2 nebyla vázána na žádnou konkrétní implementaci, protože uživatelé mohou chtít implementace přepínat v závislosti na potřebě jejich projektu. [10]

ROS 2 podporuje tyto DDS® implementace:

- RTI (Real-Time Innovations) Connnext
- Eclipse Cyclone DDS
- eProsima Fast DDS

3.6.2 Orientace na data (data centricity)

DDS[®] middleware je jeden z mála middleware, který je zaměřen na data. Orientace na data zajišťuje, že všechny zprávy obsahují správné kontextové informace, které aplikace potřebuje k pochopení dat, která přijímají.

Podstatou orientace na data je, že DDS[®] middleware má informaci o tom, jaká data ukládá, a řídí, jak tato data sdílet. Programátoři používající tradiční middleware zaměřený na zprávy musí napsat kód, který odesílá zprávy. Programátoři používající middleware orientovaný na data píše kód, který určuje, jak a kdy sdílet data a poté přímo sdílí datové hodnoty. DDS[®] přímo implementuje řízené, spravované a bezpečné sdílení dat. [5]

3.6.3 Globální datový prostor

DDS[®] aplikace má přístup k lokálnímu úložišti dat nazývanému *globální datový prostor*. *Globální datový prostor* vypadá pro aplikaci jako lokální paměť přístupná přes API (Application programming interface). DDS[®] middleware posílá zprávy k aktualizaci příslušných úložišť na vzdálených komunikačních uzlech (*nodes*).

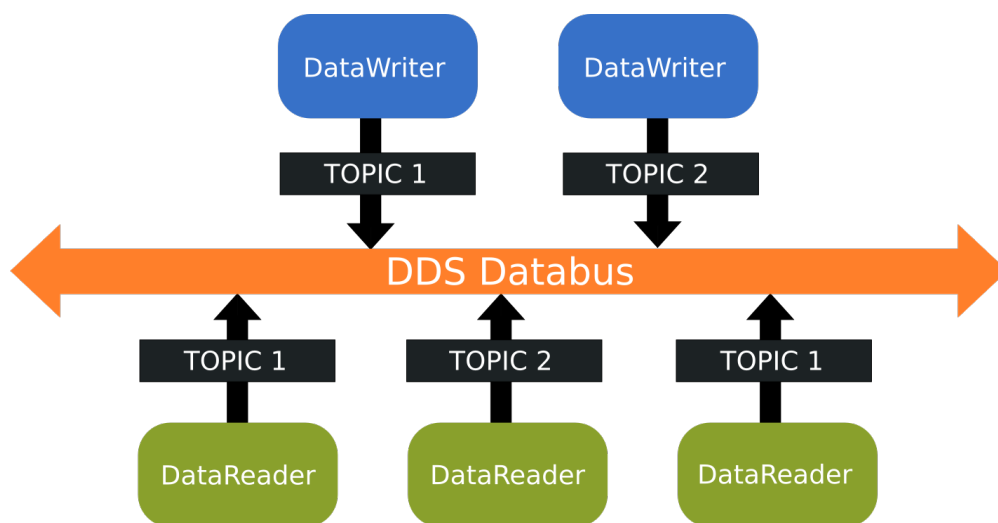
V DDS[®] aplikacích neexistuje žádné globální datové místo, kde by všechna data existovala. Každá aplikace si lokálně ukládá jen to, co potřebuje a jen tak dlouho, jak to potřebuje. [5]

DDS[®] se zabývá daty v pohybu - globální datový prostor je virtuální koncept, který je ve skutečnosti pouze souborem lokálních úložišť. Každá aplikace, téměř v jakémkoli jazyce, běžící na jakémkoli systému, vidí lokální paměť ve svém optimálním nativním formátu. Globální datový prostor sdílí data mezi vestavěnými, mobilními a cloudovými aplikacemi v rámci jakéhokoli přenosu, bez ohledu na jazyk nebo systém, a s extrémně nízkou latencí.

3.6.4 Základní architektura DDS[®]

Nejzákladnějším komunikačním vzorem podporovaným DDS[®] je model publikování/přihlášení (*Publish/Subscribe*). *Publish/Subscribe* je komunikační model, kde producenti dat publikují data a spotřebitelé dat se přihlašují k odběru dat. Tito producenti a spotřebitelé o sobě nemusí vědět předem, protože se navzájem dynamicky objevují za běhu. Data, která sdílejí, jsou popsána tématem (*topic*) a producenti a spotřebitelé odesílají a přijímají data pouze pro témata, která je zajímají. V tomto vzoru může mnoho producentů publikovat stejné téma a mnoho spotřebitelů se může přihlásit k odběru stejného tématu. Spotřebitelé dostávají data od všech producentů, se kterými sdílejí téma. Producenti odesílají data přímo Spotřebitelům, aniž by potřebovali brokera nebo centralizovanou aplikaci pro zprostředkování komunikace. [7]

Jak je zobrazeno na obrázku 3.2 v DDS[®] se objekty, které publikují data, nazývají *DataWriters* a objekty, které odebírají data, jsou *DataReaders*. *DataWriters* a *DataReaders* jsou spojeni s jedním objektem *Topic*, který tato data popisuje.



Obr. 3.2: Základní *publish/subscribe* struktura DDS[®] komunikace [7].

3.6.5 Quality of Service

V DDS[®] aplikacích je možné sdílet data s flexibilními specifikacemi kvality služeb (QoS), jako jsou spolehlivost, stav systému, živost, zabezpečení a mnohé další.

DDS[®] middleware posílá jen data, které jsou nutné pro správnou funkci systému. Pokud se zprávy nedostanou do zamýšlených cílů, middleware automaticky zvýší spolehlivost na daných datových cestách. Když se komunikační systémy změní, middleware dynamicky zjistí, kam poslat data, a informuje účastníky o změnách. Pokud je celková velikost dat obrovská, DDS[®] inteligentně filtruje a odesílá pouze data, která každý koncový bod skutečně potřebuje a tím snižuje nároky na komunikační kanál. Když je potřeba, aby byly aktualizace rychlé, DDS[®] odesílá multicastové zprávy pro aktualizaci mnoha vzdálených aplikací najednou. U aplikací kritických z hlediska zabezpečení DDS[®] řídí přístup, vyhodnocuje cesty toku dat a šifruje data za běhu. [5]

3.6.6 RTPS protokol

DDSI-RTPS[™] (DDS Interoperability Wire Protocol[™]), jinak RTPS (Real Time Publish Subscribe protocol) je protokol pro spolehlivou komunikaci *publish/subscribe* přes nespolehlivé přenosy, jako je UDP pro unicast i multicast. [3]

RTPS byl standardizován OMG (Object Management Group) jako protokol pro implementaci Data-Distribution Service® (DDS®), standard široce používaný v leteckém a obranném sektoru pro aplikace v reálném čase.

Kromě implementací RTPS zabudovaných do různých implementací DDS® existují samostatné lehké implementace RTPS (eProsima Fast RTPS).

Protokol RTPS je založen na různých modulech, které řídí výměnu informací mezi různými DDS® aplikacemi: [8]

- *Structure module* - definuje komunikační koncové body (*endpoints*) a mapuje je na jejich protějšky DDS®.
- *Message module* - definuje, které zprávy si mohou tyto koncové body vyměňovat a jak jsou sestaveny.
- *Behavior module* - definuje sadu povolených interakcí a jejich vliv na každý z koncových bodů.
- *Discovery module* - definuje sadu vestavěných koncových bodů, které umožňují automatické zjišťování.

3.6.7 Dynamické hledání bodů v síti

DDS® poskytuje dynamické zjišťování producentů a spotřebitelů dat. Dynamické hledání umožňuje rozšiřitelnost všech DDS® aplikací. To znamená, že aplikace nemusí znát nebo konfigurovat koncové body pro komunikaci, protože je automaticky za běhu zjistí DDS®.

Při dynamickém hledání bodů v síti DDS® zjistí, zda koncový bod publikuje data, odebírá data nebo obojí. Zjistí typ dat, která jsou publikována nebo odebírána. Zjistí také komunikační charakteristiky nabízené producentem a komunikační charakteristiky požadované spotřebitelem dat. Všechny tyto atributy jsou brány v úvahu při dynamickém zjišťování a párování účastníků DDS®. [5]

Účastníci DDS® komunikace mohou být na stejném počítači nebo v síti. Není potřeba znát nebo konfigurovat IP adresy nebo brát v úvahu rozdíly v architektuře strojů, takže přidání dalšího účastníka komunikace je snadné.

3.6.8 Využití DDS® v praxi

Data-Distribution Service® je základem některých průmyslových standardů: [6]

- OpenFMB (Open Field Message Bus)
- Adaptive AUTOSAR (AUTomotive Open System ARchitecture)
- MD PnP (Medical Device "Plug-and-Play")
- GVA (Generic Vehicle Architecture)
- NGVA (NATO Generic Vehicle Architecture)

- ROS2 (Robot Operating System 2)

DDS[®] má rozsáhlý seznam různých instalací, které jsou často kritické. DDS[®] byl použit v: [9]

- Bitevní lodě
- Velké inženýrské instalace, jako jsou přehrady
- Finanční systémy
- Vesmírné systémy
- Letové systémy
- Systémy vlakových rozvaděčů

4 Simulace ve virtuálním prostředí

4.1 SITL simulace

4.1.1 Gazebo

4.1.2 Ignition

4.2 Instalace virtuálního prostředí

4.2.1 Instalace a nastavení ROS 2

4.2.2 Instalace PX4

4.2.3 Instalace simulátoru Gazebo a Ignition

4.3 ROS 2 misie

4.3.1 Offboard flight mode

Závěr

Literatura

- [1] The 3-Clause BSD License: BSD-3-Clause. *Open Source Initiative* [online]. West Hollywood: Open Source Initiative, 2014 [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://opensource.org/licenses/BSD-3-Clause>
- [2] QGroundControl. *QGroundControl* [online]. san francisco: Dronecode, 2019 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <http://qgroundcontrol.com/>
- [3] The Real-time Publish-Subscribe Protocol (RTPS) DDS Interoperability Wire Protocol Specification. *Object Management Group* [online]. Milford: OMG, c2021 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://www.omg.org/spec/DDS-RTPS/2.3>
- [4] Data Distribution Service (DDS). *Object Management Group* [online]. Milford: OMG, 2018 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://www.omg.org/omg-dds-portal/>
- [5] What is DDS? *DDS Foundation: Join DDS Foundation* [online]. Milford: DDS Foundation, c1997-2021 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://www.dds-foundation.org/what-is-dds-3/>
- [6] Why choose DDS?: Industry standards build on top of DDS. *DDS Foundation: Join DDS Foundation* [online]. Milford: DDS Foundation, c1997-2021 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://www.dds-foundation.org/why-choose-dds/>
- [7] Introduction to Publish/Subscribe. *Real-Time Innovations: RTI / Intelligent, distributed and real world systems* [online]. Sunnyvale: RTI, c2020 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://community.rti.com/static/documentation/connex-dds/6.0.1/doc/manuals/connex-dds/getting_started/cpp11/intro_pubsub_cpp.html
- [8] RTPS Introduction: What is RTPS? *EProsima: The Middleware experts* [online]. Madrid: eProsima, c2013-2021 [cit. 2021-11-29]. Dostupné z: <https://www.eprosima.com/index.php/resources-all/whitepapers/rtps>
- [9] ROS on DDS: Technical Credibility of DDS. *ROS 2 Design* [online]. California: Open Source Robotics Foundation, c2021 [cit. 2021-11-29]. Dostupné z: https://design.ros2.org/articles/ros_on_dds.html
- [10] About different ROS 2 DDS/RTPS vendors: Supported RMW implementations. *ROS 2 Documentation: Foxy* [online]. California: Open Robotics, c2021 [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: <https://docs.ros.org/en/foxy/Concepts/About-Different-Middleware-Vendors.html>

Seznam symbolů a zkratek

DDS[®]	Data-Distribution Service [®]
RTPS	Real Time Publish Subscribe protocol
DDSI-RTPS[™]	DDS Interoperability Wire Protocol [™]
QoS	Quality of Service
API	Application programming interface
DSP	číslicové zpracování signálů – Digital Signal Processing
f_{vz}	vzorkovací kmitočet