



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Jakub Matišák

Autoreferát dizertačnej práce

**PLATFORMA PRE VIRTUÁLNE
LABORATÓRIUM MECHATRONICKÝCH
SYSTÉMOV**

na získanie akademického titulu

(„doktor“ („philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)

v doktorandskom študijnom programe: Mechatronické systémy

v študijnom odbore: Kybernetika

forma štúdia: denná

Miesto a dátum: Bratislava, 08.06.2022

Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Ústav automobilovej mechatroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19, Bratislava

Predkladateľ:

Ing. Jakub Matišák
Ústav automobilovej mechatroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19, Bratislava

Školiteľ:

Doc. Ing. Katarína Žáková, PhD.
Ústav automobilovej mechatroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19, Bratislava

Oponenti:

doc. Ing. Ján Vachálek, PhD.
Ústav automatizácie, merania a aplikovanej
informatiky
Strojnícka fakulta STU v Bratislave
Námestie slobody 17
812 31 Bratislava 1

Ing. Ivana Budinská, PhD.
Ústav informatiky
Slovenská akadémia vied
Dúbravská cesta 9
845 07 Bratislava 45



Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa
o h na Fakulte elektrotechniky a informatiky,
Slovenská technická univerzita, Ilkovičova 3, 812 19, Bratislava
v miestnosti

Prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan fakulty
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky

ABSTRAKT

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Študijný program: Mechatronické systémy
Študijný odbor: Kybernetika
Autor: Ing. Jakub Matišák
Dizertačná práca: Platforma pre virtuálne laboratórium mechatronických systémov
Vedúci záverečnej práce: Doc. Ing. Katarína Žáková, PhD.
Miesto a rok predloženia práce: Bratislava 2022

V súčasnosti môžeme pozorovať trend digitalizácie a simulácie procesov takmer v každej pracovnej oblasti. Postupne sa mení aj vývoj v oblasti experimentovania, viac sa využívajú virtuálne laboratóriá, ktoré sa stávajú komplexnejšie a realističejšie. Celý ekosystém vyžaduje nielen správu experimentov a ich používateľov, ale mal by zabezpečovať aj funkcionality pre rozšírenie a správu simulačných rozhraní, 3D modelov a riadiacich algoritmov. Cieľom práce je preto návrh modulárneho systému, ktorý toto umožní. Využitím modulárnej architektúry sme vytvorili ekosystém, ktorý umožňuje integráciu viacerých typov experimentov, ktorých správanie je doplnené o vizualizáciu pomocou 3D modelu a grafu. Základný modul aplikácie tvorí rozhranie, ktoré slúži ako interface pre jednotlivé pripojené simulačné moduly. Disponuje vlastným GUI s možnosťou prihlásenia pre jednotlivých používateľov a prístup ku dátam je umožnený aj pomocou REST rozhrania. Pomocou aplikácie sme integrovali vizualizácie vo viacerých formách: využívame simulácie 3D modelov prostredníctvom webovej aplikácie, doplnenú o hologram a rozhodli sme sa využiť čoraz obľúbenejšiu rozšírenú realitu. Vizualizácie budú demonštrované na portfóliu 3D experimentov, pričom viaceré z nich máme v našom laboratóriu aj ako skutočné zariadenia.

Kľúčové slová: virtuálne laboratórium, web, rozšírená realita, AR, 3D vizualizácie, riadenie modelov mechatronických zariadení, hologram

ABSTRACT

SLOVAK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN BRATISLAVA
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY

Study programme: Mechatronic Systems
Study field: Cybernetics
Author: Ing. Jakub Matišák
Dissertation thesis: Platform for Virtual Laboratory of Mechatronic Systems
Supervisor: Doc. Ing. Katarína Žáková, PhD.
Place and year of submission: Bratislava 2022

Nowadays the trend of digitalization and process simulation is spreading through every work area. The development of experimentation is changing gradually, the virtual labs are widely used and they are becoming more complex and realistic. Besides the user and experiment management, the new ecosystem needs the functionality for simulation interface, 3D models and algorithm control. The aim of the work is to design the modular system, which can provide the mentioned functionality. Using the modular architecture, it was created the ecosystem, providing the integration for various types of experiments. Their behavior is supplemented by visualization using 3D models and graphs. The basic module of the application is an interface for connected simulation modules. The graphical interface for log in is available for registered users and data are accessible through the REST API. The application supports several forms of visualization. It was implemented the simulation of 3D models using web application extended by holograms using popular augmented reality. Visualizations will be demonstrated on a portfolio of 3D experiments and several of them are physical devices stored inside the lab.

Keywords: virtual laboratory, web, augmented reality, AR, 3D visualization, control of mechatronic devices models, hologram

Obsah

1	Analýza súčasného stavu	2
1.1	Projekty virtuálnych laboratórií vo svete	2
2	Požiadavky na virtuálne laboratórium	4
2.1	Zostavovanie experimentu	5
3	Architektúra virtuálneho laboratória	6
3.1	Moduly virtuálneho laboratória	6
4	Simulačné prostredia a spracovanie dát	8
5	Rozhranie pre virtuálne laboratórium	9
5.1	Zložky experimentu	9
6	Pripojenie simulačného prostredia	12
6.1	Scilab modul	13
7	OVL API ako REST služba	15
8	Zobrazenie experimentov pomocou rôznych foriem vizualizácie	16
8.1	Experimenty	16
8.2	Rozhranie pre vkladanie 3D modelov	16
8.3	Vizualizácia experimentov v prostredí webu	17
8.4	Simulácia experimentov	18
8.4.1	Webové rozhranie	18
8.4.2	Rozšírená realita pre smartfóny a tablety	19
8.4.3	Holografická technológia	21
9	Potenciálne možnosti vylepšenia	22
	Publikácie autora	25
	Účasť na projektoch	27
	Literatúra	28

Úvod

V súčasnosti môžeme pozorovať trend digitalizácie [1] a simulácie vybavenia takmer v každom pracovnom segmente. Trendom je vytvárať aplikácie, vďaka ktorým bude možné lepšie porozumieť danej oblasti a získavať v nej hlbšie vedomosti (napr: medicína [2], tréning zamestnancov [3] alebo archeológia [4]). V technických oblastiach sa jedná napr. o zjednodušovanie návrhov zariadení, pochopenie špecifikácií, uľahčenie prototypovania zariadení alebo zlacnenie výrobného procesu. Toto sú len niektoré z mnohých využití digitalizácie hardvéru. Digitalizácia nám umožňuje čeliť skutočným situáciám skôr ako k nim dôjde, učiť sa z nich, pozerať sa na problémy z inej perspektívy, reagovať na ne oveľa rýchlejšie a nakoniec aj šetriť náklady. V situáciách, kedy by sme si potrebovali testovať zariadenie, no jeho zakúpenie alebo konštrukcia je nákladná, prichádza ako možná alternatíva práve jeho digitálny model. Pomocou počítačovej grafiky vieme simulovať správanie modelov zariadení bez dodatočných nákladov a bez pocitu, že by sme nesprávnou manipuláciou a nastavením mohli dané zariadenie poškodiť, alebo sami sebe ublížiť. Vo svete existuje viacero inštitúcií, či už sú to univerzity alebo firmy, ktoré sa snažia začať, pracovať a simulovať znalosti z rôznych oblastí [5]. Predložená štúdia [6] tvrdí, že 58% študentov sa zhodlo na tom, že simulácie a virtuálne laboratóriá, sú pre nich pohodlnejšie ako klasická výučba.

V práci si predstavíme online portál, v ktorom sú prezentované virtuálne modely mechatronických zariadení. Portál umožňuje jednoducho voľne pracovať s prednastavenými experimentami, ale aj odhadovať si vlastné riadiace štruktúry pre jednotlivé modely. Taktiež bude disponovať unikátnou architektúrou, ktorá umožní nahrávať nové experimenty do rozhrania a bude poskytovať možnosť simulácie experimentov tak, aby bolo možné rozšíriť simulačné vlastnosti laboratória. Laboratórium bude k dispozícii prostredníctvom webovej stránky a bude rozšírené aj o formu vizualizácie využitím hologramu. V poslednej dobe sa však mnoho inštitúcií špecializovalo na virtuálnu a rozšírenú realitu. Keďže smartfóny sa postupne stali každodennou súčasťou našich životov a má ich dnes takmer každý, prichádzame s myšlienkou portálu aj pomocou rozšírenej reality pre smartfóny ako najdostupnejším vhodným riešením.

1 Analýza súčasného stavu

Online laboratórium je portál, ktorý umožňuje záujemcom realizovať simuláciu a riadenie zariadení prostredníctvom online aplikácie. Pri online laboratóriách je vhodné rozlišovať vzdialené a virtuálne online laboratórium.

Vzdialené laboratóriá umožňujú vzdialený prístup k reálnym zariadeniam prostredníctvom internetu. Takéto zariadenie môžeme ovládať alebo riadiť, no fyzicky sa môžu nachádzať aj v podmienkach, ktoré sú pre používateľa sťažené alebo sa nachádzajú ďaleko. Zariadenie má používateľom definované vstupné veličiny, ktoré je možné pred jeho spustením do prevádzky, ale aj priebežne, modifikovať. Počas behu zariadenia dostávame výstupné hodnoty o jeho stave bez nutnosti fyzickej interakcie.

Virtuálne laboratóriá umožňujú vytvárať simulácie experimentov bez priamej nutnosti existencie skutočného fyzického hardvéru. Všetky procesy sa dejú vďaka simuláciám, ktoré sú vizualizované zväčša prostredníctvom virtuálnych modelov. Simuláciu správania takýchto zariadení na 3D modeloch môžeme realizovať prakticky bez nákladov na použité zariadenia.

V práci sa budeme zaoberať hlavne druhou skupinou experimentov, teda **virtuálnymi experimentami**.

1.1 Projekty virtuálnych laboratórií vo svete

Vo svete existuje viacero typov virtuálnych laboratórií a je možné rozdeliť ich podľa platforiem, na ktorých sa tieto modely používajú virtuálne laboratóriá ako natívne desktopové aplikácie, ako webové aplikácie, vo virtuálnej realite a v rozšírenej realite.

Virtuálne laboratóriá ako natívne a webové aplikácie Tieto typy experimentov sme spojili do jednej skupiny, pretože vo virtuálnych laboratóriách tohto typu sa vyskytujú 2D a 3D modely so zameraním na rôzne účely simulácií. Platformám pre 2D modely venovali autori a inštitúcie v [7], [8], [9], [10], [11], [12] a [13].

Takéto modely sú vhodnejšie pri aplikáciách, ktoré sú postavené na skladaní blokov, jednoduchých modelov či schém zapojenia elektronických obvodov. Pre naše navrhované laboratórium chceme viac reálnu a priestorovú grafiku, preto sa zameriame na 3D modely a platformy postavené na 3D. Platformám pre 3D modely

sa autori venovali viac v [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22] a [23]

Je možné skonštatovať, že existujúce riešenia nepokrývajú komplexné riešenie pre účely riadenia virtuálnych experimentov. Jedná sa buď o samostatne fungujúce 3D modely, o laboratóriá, ktoré sú zamerané viac na riadenie vzdialených zariadení, kde sa 3D model používa na vizualizáciu výsledkov, alebo o platformy zamerané na konkrétny experiment.

Virtuálne laboratóriá vo virtuálnej a rozšírenej realite

V poslednom čase prišlo k celosvetovému nárastu vizualizácií systémov nielen pre aplikácie súvisiace s webovým a natívnym desktopovým rozhraním. Z tohto dôvodu narastá aj počet laboratórií, ktoré sa venujú práve laboratóriám vo virtuálnej a rozšírenej realite. Takýmto aplikáciám sa autori venovali v [24], [25], [26], [26], [27], [3], [28], [29], [30], [31], [32], [33]. Za jednu z foriem 3D vizualizácie formou rozšírenej reality môžeme považovať aj **hologram**: [34], [35] a [36].

Rozšírená realita pre smartfóny Jedná sa o pomerne nový trend nastolený veľkými technologickými spoločnosťami, ktorý má však veľký potenciál. Takéto laboratóriá môžeme nájsť v [37], [38], [2], [2] a [39].

Súčasná existujúca riešenia virtuálnych laboratórií sú zamerané predovšetkým na jednotlivé experimenty. Portály, ktoré dnes existujú sa zaoberajú viac vzdialenými experimentami a virtuálnymi experimentami sa zaberajú viac v 2D grafike. Tiež sa viac venujú problematike konkrétneho experimentu.

Podľa našich znalostí, neexistuje jednotný portál ani systém, ktorý by unifikovaným spôsobom zastrešoval viacero 3D experimentov, či už prostredníctvom webovej aplikácie, alebo v rozšírenej realite. Taktiež pravdepodobne neexistuje portál, ktorý by poskytoval systém simulácie prostredníctvom viacerých simulačných platforiem, alebo systém, ktorý by umožnil prepojenie viacerých typov aplikácií pomocou jednotného simulačného rozhrania. Výhodou zjednoteného portálu virtuálneho laboratória by bola možnosť integrácie 3D modelov a simulačných prostredí tak, aby jeden systém umožňoval správu nad všetkým.

2 Požiadavky na virtuálne laboratórium

V práci sa chceme zamerať na vytvorenie zjednoteného portálu virtuálneho laboratória, ktorý pomocou zjednotenej architektúry umožní: **simuláciu a správu experimentov a rôzne formy vizualizácie na 3D modeloch.**

Portál, by existoval v dvoch formách a to ako **webová aplikácia**, doplnená o **hologram** a tiež ako **aplikácia s využitím rozšírenej reality pre mobilné zariadenia**. Portál by umožňoval nahrávanie vlastných riadiacich štruktúr, prostredníctvom ktorých by bolo možné meniť správanie zariadení. Výstup z takejto riadiacej štruktúry by bol riešený unifikovaným spôsobom a preto by bolo jednoduché vložiť nové, rozdielne štruktúry. Umožňoval by tiež meniť parametre v už nahratých regulačných štruktúrach. Zabezpečili by sme tak možnosť testovania nových konfigurácií. Simulácia dát potrebných na funkčnosť takejto aplikácie bude prebiehať pomocou externého modulu. Prístup ku údajom by zastrešovala vytvorená REST API.

Ďalším dôležitým bodom je **pridávanie nových 3D modelov**, ktoré bude možné riadiť. Bude potrebné navrhnúť program tak, aby bolo možné pridať model bez nutnosti odstávky celého systému. Každý 3D model by teda fungoval ako malá časť rozhrania inak zjednoteného portálu.

Portál virtuálneho laboratória je vytvorený pre účely simulácií v oblasti automatického riadenia. Jeho hlavným cieľom je poskytnúť používateľom možnosť overenia si vlastného návrhu nastavenia regulátorov rôznych mechatronických systémov. Aplikáciu sme rozdelili:

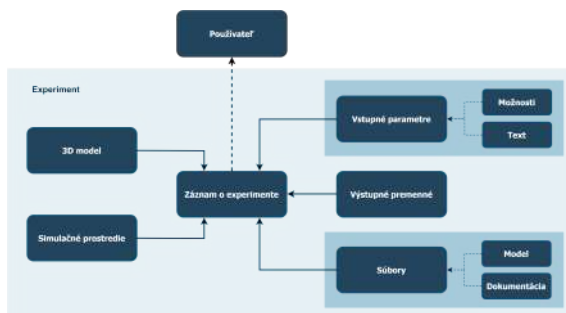
- **Simulačná časť aplikácie (OVL API)** zabezpečuje prístup ku simuláciám správania sa mechatronických zariadení prostredníctvom online aplikačného rozhrania.
- **Zobrazovacia časť aplikácie (OVL LAB)** umožňuje zobrazenie dát na 3D modeli alebo inej grafickej reprezentácie dát. Dátový výstup je v unifikovanom JSON objekte, preto je možné ho využiť pomocou rôznych koncových aplikácií. V aplikácií realizujeme:
 - *zobrazenie pomocou web rozhrania*, klasická webová aplikáciu nevyžaduje žiadnu inštaláciu zo strany používateľa

teľa a je pohodlné ju používať. Používateľ potrebuje iba webový prehliadač, preto je aj najlepším riešením, ktoré môže byť použité pre čo najširšie spektrum používateľov.

- *zobrazenie pomocou hologramu, ako rozšírenie webovej aplikácie,*
- *zobrazenie pomocou AR pre smartfóny, AR pre smartfóny s ďalšími informáciami má obrovský potenciál poskytnúť študentom lepšie a ľahšie pochopenie zložitých informácií [40].*

2.1 Zostavovanie experimentu

Pre vytvorenie našej aplikácie sme potrebovali zdefinovať pojem *experiment*. Každý experiment je v aplikácii charakterizovaný komplexným záznamom, ktorý obsahuje všetky informácie a súčasti, ktoré sú potrebné ku simulácii. Môžeme teda hovoriť o metadátach, ktoré sú nutné k funkčnosti simulácie jednotlivých modelov. Pod pojmom experiment rozumieme teda komplexný záznam, ktorý ukladá informácie o matematickom modeli, simulačnom prostredí a 3D modeli a slúži na riadenie určitého typu zariadenia. Na obr. 1 môžeme vidieť jeho jednotlivé časti:



Obr. 1: Definícia experimentu a jeho súčastí v systéme OVL

Každý experiment musí patriť nejakému používateľovi systému. Priradenie sa robí automaticky pri tvorbe experimentu, keďže každý používateľ, ktorý vytvára experiment, musí byť prihlásený.

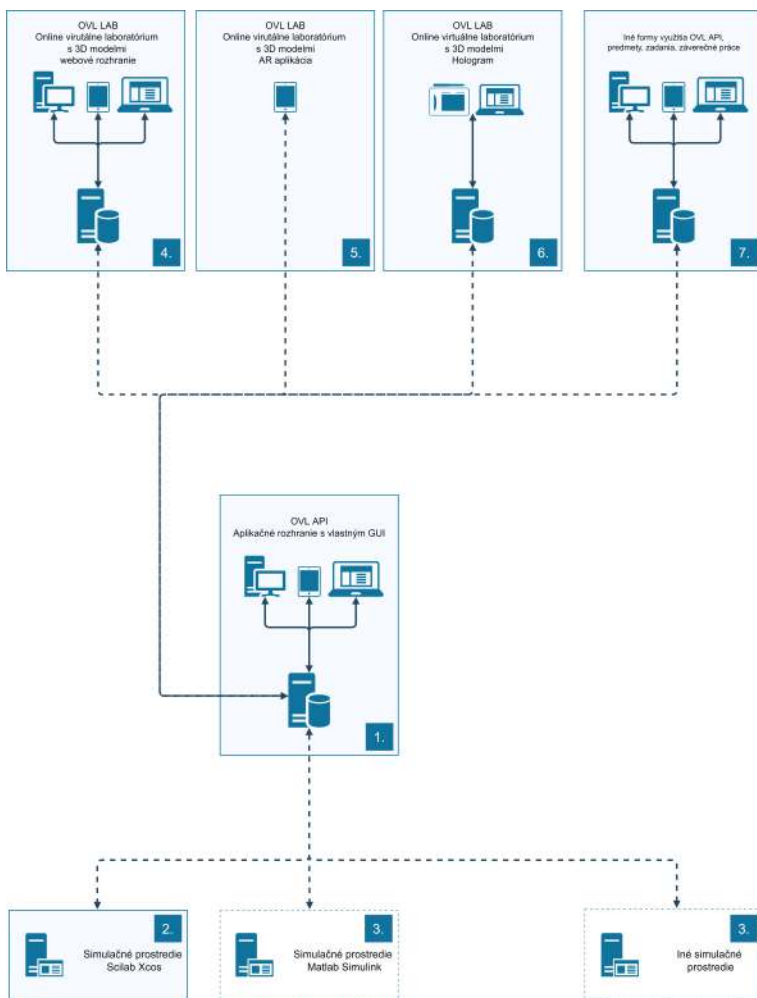
3 Architektúra virtuálneho laboratória

Pre splnenie požiadaviek bolo potrebné navrhnuť modulárny systém pre správu simulácií. Kvôli čo najväčšej udržateľnosti sme systém rozdelili na viacero samostatných modulov. Niektoré moduly fungujú úplne samostatne, iné sa spoliehajú na predispozíciu vo forme iného modulu. Spolu tvoria komplexnú aplikáciu virtuálneho laboratória.

3.1 Moduly virtuálneho laboratória

Základný princíp prepojenia aplikácie môžeme vidieť na obr. 2. *Jadro aplikácie (1.)* predstavuje modul s vlastnou databázou, GUI a REST rozhraním. Pomocou REST rozhrania aplikácia umožňuje obojstrannú komunikáciu medzi simulačnými modulmi a vizualizáciou. Rovnako tak zabezpečíme jednoduchú integráciu pre samostatne *naprogramované moduly (2., 3.)*, ktoré umožňujú simulovať správanie mechatronických systémov. Aktuálne pripojené simulačné prostredie je modul *Scilab Xcos (2.)* a aplikácia počíta s tým, že v budúcnosti bude pripojená *Alternatíva (3.)*, napr.: MATLAB/Simulink.

Údaje zo simulácie sú využívané koncovými aplikáciami (4., 5., 6., 7.), ktoré okrem zobrazenia výstupov umožňujú zadávať aj vlastné vstupné parametre. Pripojené aplikácie: *Webové virtuálne laboratórium (4.)*, *AR virtuálne laboratórium (5.)*, *Holografická simulácia (6.)*, *Alternatívne pripojenia (7.)*.



Obr. 2: Všeobecná modulárna architektúra aplikácie OVL

4 Simulačné prostredia a spracovanie dát

Jedným z cieľom práce je zabezpečiť unifikovanú architektúru pre integráciu simulačných modulov. Cieľom teda je nielen vybrať jedno konkrétne riešenie, ale navrhnúť systém a architektúru, ktorý umožní implementovať viacero riešení.

Dostupné simulačné prostredia

Na trhu existuje niekoľko simulačných prostredí, medzi najväčšie patria: *MATLAB/Simulink*, *Scilab/Xcos*, *OpenModelica/OMEdit*, *LabVIEW* alebo *Octave*. Všetky umožňujú modelovať a simulovať správanie lineárnych a nelineárnych systémov. Výhodou je, ak systém poskytuje grafický editor pre tvorbu **blokových diagramov**.

Po preskúmaní všetkých možností sme pre náš simulačný modul vyberali medzi bezplatnými riešeniami. Voľbou pre implementáciu simulačného modulu sa stal Scilab/Xcos najmä pre jeho veľkú podobnosť s komerčne používaným MATLAB/Simulinkom. Umožňuje simulovanie pomocou blokovej schémy a prostredie je pomerne intuitívne a jednoduché na použitie.

Možnosti spracovania modelov v laboratóriu

Každé prostredie má vlastný prístup k spracovaniu dát v konzole. Výstup pre používateľa by sme chceli zjednotiť tak, aby používateľ definoval len vstup a výstup a nemusel by riešiť osobitne konkrétny prístup.

Pokiaľ by sa jednalo o prostredie, ktoré nepodporuje blokové programovanie (Octave,...), výstup by bol zjednotený za pomoci priameho mapovania výsledkov z konzoly na výstup a potom na JSON. OVL API umožní nahrávanie rozličných typov súborov a podľa priradeného simulačného prostredia ku experimentu k nemu bude aj priradený. Tento proces prebehne automaticky bez vedomia používateľa. V našej aplikácii bol integrovaný modul, ktorý spracováva schémy typu .zcos pre Scilab/Xcos.

5 Rozhranie pre virtuálne laboratórium

Pre lepšiu používateľskú interakciu s virtuálnym laboratóriom sme vytvorili rozhranie, pomocou ktorého je možné vytvárať jednotlivé experimenty a zabezpečiť aj ich jednoduchú správu. Každý experiment a jeho súčasti je možné pomocou menu **zobraziť**, **klonovať**, **editovať** a **vymazať**.

5.1 Zložky experimentu

Celkovo aplikácia umožňuje interagovať s experimentom a všetkými jeho jednotlivými zložkami (obr. 3) pomocou rozhrania.



Obr. 3: Experiment a jeho jednotlivé zložky

Informácie o experimente

Tieto informácie tvoria základ celého experimentu a vieme vďaka nim povedať, aký 3D model experiment používa a v akom simulačnom prostredí prebehne simulácia.

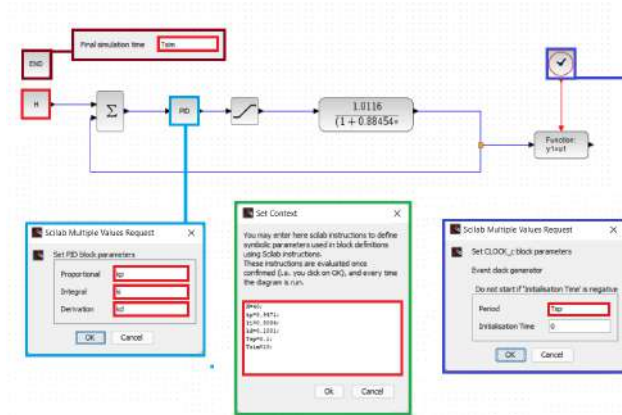
Vlastníctvo experimentu

V sekcii vlastníctvo experimentu je možné manažovať správu experimentu v oblasti administrácie práv.

Vstupné parametre experimentu

Sekcia obsahuje dáta o jednotlivých parametroch v modeli, ktorý budeme simulovať tak, aby bolo možné meniť tieto parametre. Zmenou parametrov bude možné ovplyvňovať priebeh simulácie. Parametre sú zadefinované ako riadky tabuľky. Každý riadok v tabuľke predstavuje jeden vstupný parameter, ktorý bude neskôr nastaviteľný používateľom. Ako je vidieť, každý parameter je charakterizovaný viacerými atribútmi:

- **Vstupný parameter** je označenie pre vstup, pomocou ktorého sa upravuje a nastavuje hodnota parametra v súbore, ktorý budeme simulovať. V module Scilab sa viaže na kontext v blokovej schéme (obr. 4) označený zelenou farbou. Kontext je zoznam parametrov, ktoré sa spracujú v blokovej schéme Scilabu.



Obr. 4: Bloková schéma s využitím PID regulátora pre mechatronický experiment

- **Zobrazený parameter** Popis parametra v čitateľnejšej forme. Zobrazuje sa na FE v klientských aplikáciách. Je vytvorený

preto, aby bolo možné parametre zložitejšie pomenovať a popísať. Napr. namiesto H sa bude zobrazovať *Požadovaná výška [cm]*.

- **Typ** *Nastavenie typu*

Aplikácia rozpoznáva dva typy vstupov:

- *text* umožňuje vložiť ľubovoľnú hodnotu.
- *select* umožňuje vložiť iba niektoré hodnoty ako možnosti.

- **Skupina** slúži ako definícia vstupu a má informatívny charakter, pod ktorým vieme zgrupovať vstupné parametre. Túto vlastnosť vieme využiť na FE a zoradiť tak parametre v skupinách.

- **Hodnota** Preddefinovaná hodnota jednotlivých parametrov. Ak bola položka **Typ** nastavená na *select* je umožnené nastaviť dva atribúty - jednu ako *hodnotu* a druhú ako *text*.

Pri odosielaní blokovej schémy na jej spracovanie v simulačnom prostredí je v systéme umožnené meniť parametre iba pre nami zadané vstupné parametre.

Výstupné premenné experimentov

Výstupy sú potrebné na mapovanie jednotlivých dát do zjednotenej formy rozhrania. Tento prístup bol zvolený vzhľadom na to, že každé simulačné prostredie má vo svojej výstupnej konzole definovanú formu dát, ktoré nie je možné upraviť na požadovaný tvar na strane prostredia.

Dokumentácia

Sekcia obsahuje podporné súbory ku experimentu. Najdôležitejšou časťou je *Schéma simulácie*, kde použijeme zodpovedajúci formát súboru s blokovou schémou. Vložená schéma sa pri spracovaní automaticky odošle na spracovanie do simulačného prostredia. Ďalšie funkcionality boli pridané vzhľadom na jednoduchšiu integráciu klientskych aplikácií a jedná sa o dokumentáciu (textovú aj fotografickú) celého riešenia experimentu. Funkcionalita je vytvorená s dôrazom na to, aby sa všetky súbory dali nastaviť ako prístupné / neprístupné pre verejnosť.

6 Pripojenie simulačného prostredia

Pohyb 3D modelu zariadenia dokážeme zabezpečiť výstupnými dátami z regulačnej schémy. **Rozdiel** v regulačných algoritmoch môžeme pozorovať v niekoľkých oblastiach:

- simulačný súbor je / nie je zapísaný pomocou blokov,
- počet a zápis jednotlivých parametrov (blokov) v regulačnej schéme je rozdielny,
- počet a tvar zápisu výstupov do konzoly simulačného prostredia je rozdielny.

Všetky simulačné prostredia majú spoločnú jednu vlastnosť. **Spustenie simulácie dynamického systému je možné realizovať príkazom spusteného pomocou príkazového riadku.** Tento princíp vieme využiť a komunikáciu so simulačným prostrediami vieme zapúzdriť do samostatných objektov.

Záznam o simulačnom prostredí V aplikácií v časti *Simulačné prostredia* je možné nalistovať zoznam dostupných simulačných prostredí, podľa nami zadaných parametrov. Pre integráciu modulu do OVL API je dôležité, aby boli dané parametre správne vytvorené a na danej URL bola spustená služba. Pokiaľ vieme, kde beží kompatibilná služba (napr. Scilab web služba) a máme oprávnenie ju používať, je jednoduché sa ku nej pripojiť. Takáto služba má však podľa predpokladu svoje vlastné rozhranie, ktoré poskytuje dáta prostredníctvom HTTP komunikácie. Odpoveď potrebujeme iba zjednotiť do rovnakej formy.

Do OVL API, časť *Nastavenia* bol integrovaný online editor kódu vytvorený pomocou knižnice CodeMirror tak, aby integrácie nových simulačných rozhraní mohli prebiehať priamo v prehliadači pomocou Administrátorského prístupu.

Keď máme uložený záznam o simulačnom prostredí, tak je v OVL API rozhraní možné vygenerovať *Objekt* podľa zadaných parametrov. Proces sa deje na pozadí a z pripraveného demo súboru v serverovom úložisku vytvorí kópiu. Obsahom súboru je preddefinovaný algoritmus, ktorý predstavuje základ spracovania a mapovania dát z rozhrania. Súbor si následne vieme otvoriť v rozhraní

využití aplikácie CodeMirror a do pripravených metód dopísať potrebný kód, ktorý prepojí naše rozhranie s externou webovou simulačnou službou.

- **Metóda *process*** predstavuje spracovávanie dát, teda skompletizuje vstupné parametre formulára pre spracovanie experimentu (parameter `$request`). Namapuje ich na požadovaný vstup web služby simulačného prostredia a podľa požiadaviek ich odošle. Ako odpoveď sa predpokladá akákoľvek forma dát, ktorú nám služba poskytne, keďže dopredu nevieme predpokladať, akú službu budeme integrovať.
- **Metóda *mapData*** spracuje poskytnuté výsledky a prepojí ich so zadanými výstupnými premennými, ktoré je v databáze pre volaný experiment. Urobíme tak mapovanie dát do JSON formátu.

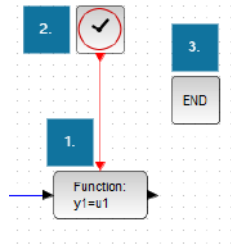
Výsledkom je unifikovaný tvar dát naprieč volanými simulačnými rozhraniami a vďaka tomu je možné simulovať správanie 3D modelov. Ak teda budeme pre jedno mechatronické zariadenie mať aj viac pridelených simulačných prostredí na spracovanie, tak v konečnom dôsledku uvidíme len jednotný typ dát na konci procesu.

6.1 Scilab modul

Scilab modul pracuje samostatne ako webová služba, ku ktorej je možné pristúpiť pomocou HTTP volaní. Scilab služba vyžaduje blokovú schému a tá sa v nej následne spracuje. Odpoveďou je surový tvar dát, ktorý sa spracuje v metóde *mapData*. Výsledkom je priradenie kľúča ku hodnote podľa databázy.

Nastavenie schémy pre modul Keďže potrebujeme vykresľovať výstupné premenné do konzoly, museli sme použiť skupinu blokov (obr. 5), pomocou ktorých vieme zapisovať výstupné premenné priamo do konzoly tak, aby sme vedeli nastaviť ich poradie, počet a periódu vzorkovania.

Schéma musí vždy obsahovať nasledujúce 3 bloky (obr. 5):



Obr. 5: Blok na výstup do konzoly Scilab prostredia

1. *scifunc_block* je programovateľný blok, ktorý využívame na zápis výstupných premenných do konzoly.

Parametre, ktoré potrebujeme nastaviť:

- **input port sizes** reprezentuje počet vstupných portov, teda počet výstupov premenných, ktoré potrebujeme zobrazit' v konzole.
 - **output port sizes** reprezentuje počet výstupných portov. Výstupné inštrukcie sa ďalej zobrazia pomocou príkazu do konzoly.
 - **input event port sizes** reprezentuje počet portov vstupných udalostí. Nastavíme na [1], aby sme mohli pripojiť blok *CLOCK_c*.
2. *CLOCK_c block* reprezentuje hodiny, ktoré sa starajú o spustenie a trvanie simulácie. Umožňujú nastaviť *Čas začiatku simulácie*, teda čas od ktorého sa budú zapisovať výsledky do konzoly a *periódu vzorkovania* jednotlivých výsledkov.
 3. *END block* umožňuje nastaviť celkový čas simulácie.

Všetky ostatné bloky môžu byť ľubovoľne zvolené a ovplyvňované ako parametre simulácie.

7 OVL API ako REST služba

Pre laboratórium sme vytvorili službu založenú na pravidlách REST, vďaka ktorej môžeme odosielať a získavať všetky potrebné dáta len pomocou volania z klientskej služby. Pre využívanie takejto služby je samozrejme potrebné sa zaregistrovať v aplikácii.

Celá API dokumentácia je dostupná priamo v aplikácii OVL API po kliknutí na profilové menu. Poskytuje možnosť otestovania získavania a odosielania dát z end-pointov priamo v dokumentácií. Na vytvorenie rozsiahlej dokumentácie sme využili knižnicu Scribe. Dokumentácia je prehľadne rozdelená do štyroch sekcií a obsahuje:

1. Zoznam všetkých metód na prácu s OVL API, ktoré sú rozdelené do skupín podľa typu.
2. Názov a stručný popis metódy. Metóda je označená ako *requires authentication*. Všetky takto označené metódy vyžadujú prihlásenie pomocou tokenu.
3. Priamo v tejto časti je možné otestovať správanie po zadaní potrebných vstupných parametrov do formulára:
 - *Authorization header* - autorizačná hlavička, zadáva sa v tvare *Bearer {sem vložíme token}*
 - *ID* - identifikátor, podľa ktorého dopytuje experiment
4. Demo HTTP požiadavky pre jazyky JavaScript a PHP.
5. Odpoveď zo servera po spracovaní požiadavky.

Pre každú metódu sa vstupné parametre menia. Autentifikácia sa vyžaduje pre všetky metódy s výnimkou verejných experimentov, ktoré sú pripojené do OVL API a boli takto nastavené Administrátorom.

Po prijatí HTTP odpovede získame JSON objekt. Každý JSON, s ktorým pracujeme (najmä experiment) sa skladá z množstva údajov, ktoré sú v databáze previazané cudzími kľúčmi. REST API obsahuje viacero sekcií rozdelených do niekoľkých skupín. O jednotlivých dátach, ktoré sa zobrazia, rozhoduje rola, ktorá je udelená používateľovi. Pre administrátora neplatia obmedzenia a môže požadovať aj informácie o experimentoch, ktorých nie je vlastníkom.

8 Zobrazenie experimentov pomocou rôznych foriem vizualizácie

Kapitola predstavuje koncové body celej architektúry vytvoreného ekosystému. Tieto body reprezentujú grafické zobrazenie experimentov v klientských aplikáciách, ktoré boli pripojené do OVL API rozhrania. Vo virtuálnom laboratóriu uvažujeme o rôznych formách vizualizácie.

8.1 Experimenty

Základom experimentovania je 3D model mechatronického zariadenia, na ktorom zobrazujeme simulačné dáta jednotlivých zostavených experimentov. Pre každý experiment uvažujeme zjednodušený matematický model daného zariadenia zvyčajne podľa jeho skutočnej predlohy.

Portfólio experimentov sme postupne zväčšovali na základe vytváraných experimentov. Väčšina prezentovaných modelov bola inšpirovaná reálnymi zariadeniami, ktoré buď máme v laboratóriu, alebo sa používajú v iných inštitúciách. Aktuálne virtuálne laboratórium OVL LAB obsahuje nasledovné modely: Termoopto-mechanická sústava (TOM1A), Towercoptéra, Hydraulická sústava, Reakčné kyvadlo, 3DOF helikoptéra, Furutovo kyvadlo a Inverzné kyvadlo na vozíku.

8.2 Rozhranie pre vkladanie 3D modelov

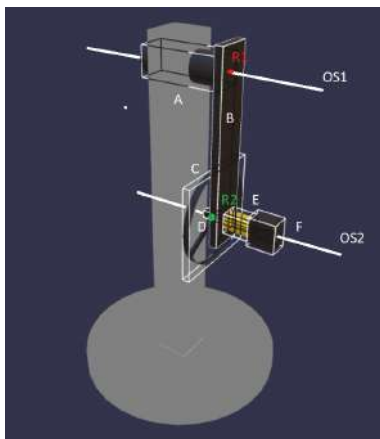
Vzhľadom na to, že projekt virtuálneho laboratória počíta so zvyšovaním počtu 3D modelov, tak pred integráciou bolo potrebné navrhnuť architektúru, ktorá by zjednotila spôsob pridávania experimentov do laboratória a umožnila ich jednoduché pridávanie aj v budúcnosti. Takýto systém umožňuje pridanie experimentu administrátorovi a je mu umožnené generovať skripty pre 3D modely na základe vstupov v OVL API.

Po prihlásení v časti *Nastavenia* sa otvorí jednoduché rozhranie, pomocou ktorého je možné vkladať 3D modely a generovať skripty podľa preddefinovaných súborov. Takýmto spôsobom je možné jednoducho integrovať nové 3D modely do laboratória.

8.3 Vizualizácia experimentov v prostredí webu

Pre zovšeobecnenie prístupu k 3D modelom je potrebné poznať ich vlastnosti. Každý experiment má iné uloženie komponentov v priestore. Vďaka štandardom, ktoré sa využívajú v modelovacích nástrojoch vieme, že každý objekt bude mať svoju polohu (x,y,z) , mierku (x,y,z) a bod rotácie (r) .

Pri modelovaní a simulovaní zariadení bude mať každý komponent inú veľkosť, iný tvar, inú os či smer pohybu. Čo je však pre pohyb najdôležitejšie vedieť, je počet komponentov v skupine, ktorými chceme pohybovať. Na obr. 6 máme znázornené rameno kyvadla. Nepohyblivé časti sme zašedili. Cieľom má byť pohyb celého ramena okolo osi - $OS1$ (musia sa podľa nej otočiť všetky označené komponenty - $ABCDEF$). Avšak zároveň musí nezávisle rotovať komponent - vrtuľa (C) okolo druhej osi - $OS2$. Vytvárame teda dva rotačné pohyby a musíme podľa toho spojiť objekty do skupiny. Každý takejto skupine vieme v modelovacom nástroji nastaviť bod otáčania - na ramene je to bod $R1$ (podľa tohto bodu sa potom pohybuje celá skupina), na vrtuli je to $R2$. Objekt C sa potom pohybuje v skupine a rovnako mu vieme nastaviť aj svoj vlastný pohyb. Takéto pohyby vieme robiť nielen okolo rotačnej osi, aj v smere osí x, y, z .



Obr. 6: Pohyblivé časti rotačného kyvadla

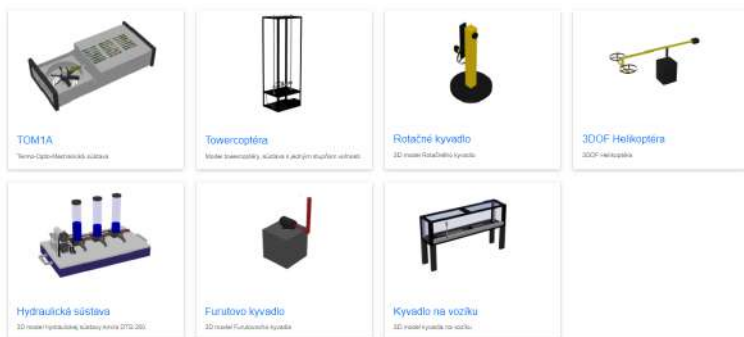
Pre každý experiment existuje unikátny pohyb, ktorý musíme vziať do úvahy. Avšak všetky uvažované experimenty obsahujú základné pohyby a tie sú rovnaké: rotácia objektu okolo svojej osi, pohyb objektu po priamke, rotácia objektu okolo cudzej osi, viacero objektov, ktoré sa v skupine pohybujú okolo osi / po priamke a zmena veľkosti objektu (*scale*). Z modelovacieho prostredia sme exportovali model vo formáte .GLB. Tento formát lokalizuje všetky prvky 3D scény vrátane materiálov, hierarchie uzlov a kamier v jednom komprimovanom súbore [41].

8.4 Simulácia experimentov

Každá scéna, do ktorej načítavame 3D model v základe pozostáva z kamery, svetla, ovládania a 3D modelu. Scéna je spustená v nekonečnej slučke a priemerne sa renderuje 60 snímok za sekundu v závislosti od rýchlosti používateľského počítača.

8.4.1 Webové rozhranie

Na simuláciu experimentov v prostredí webu využívame dostupné experimenty [7] spolu s ich regulačnými schémami, ktoré máme k dispozícii v databáze. Používateľ má na výber z portfólia experimentov, kde pri každom experimente sa automaticky stiahne zoznam dostupných regulačných schém spolu s ich predvolenými parametrami, na základe ktorých sa vygeneruje formulár.



Obr. 7: OVL LAB - portfólio experimentov

Do vytvoreného formulára sa vyplnia prednastavené hodnoty regulátora v otvorenom experimente. Tieto hodnoty je možné meniť tak, aby bolo možné testovať nové konfigurácie regulačných štruktúr. Po odoslaní formulára zbehnú séria krokov: Aplikácia automaticky urobí validáciu vstupných parametrov a odošle dáta a súbor s riadiacou štruktúrou prostredníctvom HTTP POST do modulu Scilab. Scilab modul urobí simuláciu riadiacej štruktúry v prostredí Scilab/Xcos. Simulácia prebieha vyvolaním metódy z konzoly, do ktorej spustíme príkaz na otvorenie Scilab/Xcos s parametrami. Následne sa zavolá terminálový príkaz, ktorý spustí simuláciu. Ako výsledok simulácie sa do konzoly vypíšu dáta, ktoré sú odoslané ako HTTP odpoveď vo forme *raw data*. Ďalej aplikácia automaticky získa záznamy o výstupných premenných z databázy a výstupné premenné vo formáte *raw data* sa na základe prijatých záznamov namapujú do *JSON* objektu. Výsledok sa vo formáte *JSONu* odošle na stranu klienta. Prebehne vykresľovanie simulácie 3D modelu mechatornického zariadenia, pričom využívame knižnicu *Babylon.js* a zobrazia sa dáta na grafe.

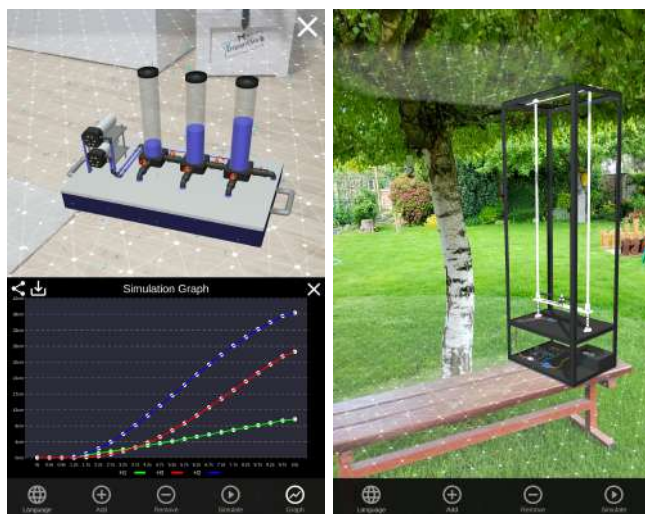
8.4.2 Rozšírená realita pre smartfóny a tablety

Ako jednu z možností zobrazovania 3D modelov sme sa rozhodli preskúmať možnosti využitia rozšírenej reality. Pre našu platformu sme sa rozhodli vybrať Google ARCore kvôli podpore širokého portfólia zariadení. Taktiež k výberu prispeli aj výsledky testov, ktoré autori predstavili v [42], kde stanovili porovnávacie kritériá pre platformy ARKit a ARCore, vyvinuli testovacie aplikácie a vykonali porovnávacie testy.

Po technickej stránke platforma ARCore využíva tri hlavné princípy definované spoločnosťou Google [43]: *sledovanie pohybu*, *environmentálne porozumenie*, *odhad svetla*.

Podobne ako pri webovom laboratóriu sme do aplikácie pripojili OVL API, odkiaľ sme schopní získať potrebné dáta o experimentoch, ktoré pripojíme k 3D modelom. Výsledok vieme zobrazovať na 3D modeli veľmi podobným spôsobom ako keď sme využívali web knižnicu *Babylon.js*. a využívame metódy *Vector3*. Do metódy sa vkladajú hodnoty, ktoré sme získali simuláciou. Rovnako sme tieto hodnoty doplnili aj do grafu, ktorý vieme zobrazovať čas behu experimentu.

Výsledkom je aplikácia, ktorá je základom pre virtuálne laboratórium v rozšírenej realite postavená na platforme ARCore. Ako vidíme na obr. 8 aplikáciu je možné spustiť prakticky kdekoľvek, kde by sme chceli experimentovať a jediné čo potrebujeme, je pripojenie na internet a rovná plocha, na ktorú postavíme virtuálny 3D model.

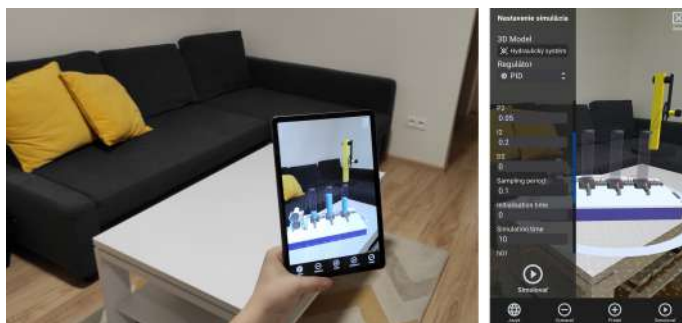


(a) Hydraulická sústava

(b) Towercoptéra

Obr. 8: 3D modely prostredníctvom ARCore

Integrácia OVL API do aplikácie s využitím technológie AR Foundation nastala ako ďalšia iterácia vo vývoji, keď sme sa rozhodli pristúpiť k miernej zmene technológie z ARCore na AR Foundation. AR Foundation v podstate implementuje Google ARCore a Apple ARKit, čím umožňuje spojenie oboch platforiem do jedného celku a umožňuje vytvoriť aplikácie pre prostredia iOS a Android. Pôvodnú aplikáciu sme preto prestavali, aby zostala aktuálna a na modulárnej architektúre sme vytvorili novú aplikáciu [44]. V aplikácii je možné simulovať viacero experimentov a je doplnená o interaktívne nápovedy spolu s dokumentáciou. Na obr. 9 môžeme vidieť simulácie hydraulickej sústavy v tejto aplikácii.

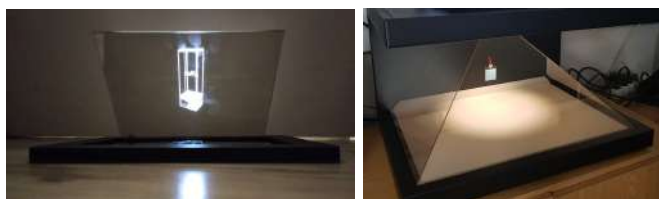


Obr. 9: Aplikácia s využitím AR Foundation

8.4.3 Holografická technológia

Ako jednu z ďalších možností vizualizácie 3D objektov, ktorú je možné pripojiť ako koncové zariadenie do OVL API, sme sa rozhodli preskúmať aktuálne holografické riešenia.

Pre účely simulácie mechatronických zariadení na holograme sme si zvolili zariadenie Holho Naked 10" a zariadenie Dreamoc HD3.2 a integrovali sme ich do portálu laboratória. Systém umožní spúšťať simuláciu vzdialene a dá sa aplikovať univerzálne. Klient-ska časť, s ktorou interaguje používateľ, pozostáva z dvoch webových stránok (jedna slúži ako pohľad v holograme (**view**) a druhá slúži na definovanie parametrov simulácie a ovládanie (**control**)). V riadiacom okne sa vykreslí príslušný graf a v zobrazovacom 3D model. Následne sa dáta zobrazujú v opakovanej slučke. Relácia musí byť spustená v holografickom zariadení, aby bol dosiahnutý požadovaný efekt vizualizácie. Výsledok sme zobrazili na obr. 10



(a) Holografická Towercoptéra

(b) Holografické Furutovo kyvadlo

Obr. 10: Hologramy

9 Potenciálne možnosti vylepšenia

Ekosystém je plne funkčný a pripravený na použitie, avšak vzhľadom na rýchly rozvoj webového programovania, najmä v posledných rokoch, by bolo možné do budúcnosti zohľadniť niekoľko návrhov na jeho vylepšenia.

Implementácia Front-Endu pomocou frameworku

Aplikáciu by bolo možné vylepšiť o reaktívne zobrazenie klientskej časti aplikácie využitím niektorého z JavaScriptových frameworkov, ako napr. React, alebo Vue. Reaktívne správanie a nesporné výhody reaktívnych frameworkov (napr. komponenty, či podmienené renderovanie komponentov) by zjednodušili beh aplikácie a zefektívnili generovanie front-endových častí aplikácie. Všetky knižnice by mohli byť implementované pomocou NPM, čím by sme zjednodušili ich budúce použitie.

Integrácia 3D modelov do OVL LAB pomocou NME

V rámci zjednodušenia integrácie 3D modelov experimentov do prostredia, by bolo možné zjednodušiť proces tvorby scény pomocou Node Material Editor-a. Systém umožňuje tvorbu scény pomocou tzv. *low code* riešenia, teda riešenia s minimálnym množstvom kódu, využitím grafického rozhrania - spájaním uzlov a implementácie vlastných blokov.

AR s využitím Cloud Anchors API

Ako ďalšie rozširovanie modulu AR by bolo možné využiť tzv. Google Anchors for AR. Jedná sa o cloudové riešenie zdieľania obrazu v AR, pomocou ktorého by bolo možné riadiť experimenty na jednom zariadení a zdieľať tento obraz na iné zariadenia v miestnosti. Vďaka *anchors* (kotvám) je možné obraz ukotviť v priestore a pomocou virtuálnej miestnosti môžu k obrazu prísť iní používatelia na svojich zariadeniach.

AR ako digitálne dvojča

V budúcnosti by bolo možné interagovať vďaka 3D modelu v smart zariadení s jeho skutočnou predlohou. Mohli by sme nastavovať parametre simulácie priamo na zariadení (napr. hydraulická sústava - natočenie ventilov) a získané dáta priamo reprezentovať na 3D modeli. Prepojenie by bolo možné realizovať v spolupráci so spomínaným portálom vzdialených experimentov [45].

Záver

Pri vytváraní analýzy súčasného stavu virtuálnych laboratórií sme zhodnotili aktuálny stav používaných laboratórií a individuálnych experimentov vo svete. Zhodnotili sme jednotlivé spôsoby realizácie, riešenia, ich využiteľnosť a navrhli sme systém, ktorý by umožňoval riešiť problémy súvisiace s ovládaním a simuláciou virtuálnych experimentov online.

Pri navrhovaní ekosystému online laboratória sme sa snažili navzájom oddeliť jednotlivé celky a vytvoriť modulárnu architektúru riešenia. Aplikáciu sme preto rozdelili na viacero častí tak, aby jednotlivé časti mohli fungovať samostatne. Vďaka vytvorenej architektúre sme zabezpečili jednoduchšiu rozšriteľnosť a integráciu do ďalších systémov.

Základný modul aplikácie tvorí rozhranie, ktoré slúži ako interface pre jednotlivé pripojené simulačné moduly. Disponuje vlastným GUI s možnosťou prihlásenia pre jednotlivých používateľov. Vývojársky prístup k dátam je umožnený aj pomocou REST rozhrania. Do aplikácie sme integrovali modul využívajúci simulačné prostredie Scilab Xcos. Architektúra uvažuje nad jednoduchým rozšírením o ďalšie prostredia. Výhodou systému je, že pomocou rozhrania umožňuje nahrávať nové regulačné štruktúry pre simuláciu experimentov.

Využitím oddelenej architektúry bolo možné vytvoriť ekosystém, ktorý umožňuje integráciu a pripojenie viacerých modulov v podobe koncových aplikácií. Virtuálne laboratórium formou webu umožňuje zobrazenie viacerých typov experimentov, ktorých správanie je doplnené o vizualizáciu pomocou 3D modelu. Pre existujúce 3D modely je možné vytvárať nové regulačné štruktúry a konfigurácie, ktoré si môžu používatelia sami vytvárať. V aplikácii je taktiež pomocou rozhrania umožnené pridávanie nových 3D modelov experimentov spolu s obslužným skriptom zabezpečujúcim jeho vizualizáciu a priebeh na grafe. Celý proces je pritom možné implementovať priamo v aplikácii online.

Zobrazené formy vizualizácie vybraných experimentov boli realizované aj pomocou holografických zariadení a formou rozšírenej reality pre smartfóny využitím technológie ARCore a ARFoundation. Experimentovanie pomocou nových foriem vizualizácie umožňuje prijateľnejší používateľský zážitok a realistickejšie zobraze-

nie, čím zabezpečí používateľovi lepší pohľad na experiment.

Časti aplikácie boli priebežne testované počas štúdia autora práce. Modul OVL API bol už viacnásobne otestovaný, keď ho okrem iného využívali aj študenti pri vývoji záverečných prác ([46], [47] a [48]). Vďaka ich pripomienkovaniu jednotlivých častí aplikácie bolo možné integrovať ďalšie požiadavky na rozhranie, ktoré prispeli k rozšíreniu funkcionality aplikácie (implementácia skrytých vstupov, rozdelenie vstupov premenných, prístup ku dokumentom). Zabezpečili sme tým prijateľnejšie rozhranie a zjednodušili aplikáciu. Navyiac doplnením aplikácie o interaktívnu dokumentáciu všetci noví používatelia takmer okamžite vedia so simulacným rozhraním pracovať.

Ciele práce boli splnené a plnom rozsahu, pričom architektúra riešenia umožňuje jednoduché rozširovanie portfólia experimentov a možností simulácie v budúcnosti.

Prínosy dizertačnej práce sa dajú zhrnúť do nasledovných bodov:

- vytvorili sme unifikovanú architektúru virtuálneho laboratória pre implementáciu moderných metód a štruktúr riadenia virtuálnych mechatronických experimentov,
- navrhli sme ekosystém, ktorý umožňuje zostavenie virtuálnych experimentov a integráciu:
 - 3D modelov mechatronických systémov,
 - rôznych simulačných prostredí.
- zovšeobecnil sme návrh modulárnej architektúry systému s uvažovaním rôznych foriem vizualizácie:
 - prostredníctvom webstránky,
 - pomocou rozšírenej reality,
 - využitím hologramu.

Uvedené body boli verifikované vytvorením interaktívneho portálu virtuálnych experimentov, kde jednotlivé časti sú implementačne zjednotené pomocou navrhnutého aplikačného rozhrania.

Publikácie autora

- [A1] J. Matišák a K. Žáková, “Online Tool for Creating Simple Models of Mechanical Systems,” v *ICETA 2018 - 16th IEEE International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications, Proceedings*, (Starý Smokovec, Slovakia), s. 355–360, Danvers : IEEE, 2018. 10.1109/ICETA.2018.8572249.
- [A2] J. Matišák, D. Rosinová, P. Ťapák, a K. Žáková, “PID Control of Towercopter System,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 27, s. 288–292, 2019. 10.1016/j.ifacol.2019.12.675.
- [A3] J. Matišák, M. Rábek, a K. Žáková, “Use of holographic technology in online experimentation,” v *Proceedings of the 2019 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, FedCSIS 2019*, (Leipzig, Germany), s. 921–924, IEEE, Sep. 2019. 10.15439/2019F179.
- [A4] R. Leskovský, E. Kučera, O. Haffner, J. Matišák, D. Rosinová, a E. Stark, “A Contribution to Workplace Ergonomics Evaluation Using Multimedia Tools and Virtual Reality,” v *Proceedings of the 2019 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, (Leipzig, Germany), 2019. 10.15439/2019f292.
- [A5] E. Kučera, O. Haffner, R. Leskovský, J. Matišák, a P. Drahoš, “The Use of Modern Multimedia Trends for Popularization of Mechatronics by Presenting Its Present and Future Application,” v *Communication Papers of the 2019 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, (Leipzig, Germany), Piscataway: IEEE, 2019. 10.15439/2019f182.
- [A6] J. Matišák, “Virtual Experiment Visualization Using Holographic Device,” v *ELITECH '19*, (Bratislava, Slovakia), Spektrum STU, 2019.
- [A7] M. Podroužek, J. Matišák, a K. Žáková, “3D Model of the Thermo-Opto-Mechanical Plant for Use in Control Education,” v *Proceedings of the 30th International Conference on Cybernetics and Informatics, K&I 2020*, (Velké Karlovice, Czech Republic), Január 2020.

- [A8] E. Kučera, O. Haffner, R. Leskovský, J. Matišák, P. Drahoš, a E. Stark, “Popularization of Mechatronics by Fan Film Inspired by Avengers: Infinity War ,” v *Proceedings of the 30th International Conference on Cybernetics and Informatics, K&I 2020*, (Velké Karlovice, Czech Republic), Január 2020.
- [A9] J. Matišák, M. Rábek, a K. Žáková, “Online Control Education Using 3D Holographic Visualisation,” *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, s. 42–47, Október 2020. 10.14313/JAMRIS/3-2020/32.
- [A10] P. Ľapák a J. Matišák, “Laboratórny model lietajúceho stroja s jedným stupňom voľnosti,” Úžitkový vzor č. 8947, Dátum o zápise ÚV : 2.12.2020, Vestník ÚPV SR č. 12/2020, Banská Bystrica : Úrad priemyselného vlastníctva SR, 2020. 6 s.
- [A11] J. Matišák a K. Žáková, “The Control of Holographic 3D Towercopter Model,” *In proceedings of 21st IFAC World Congress 2020. Amsterdam: Elsevier (IFAC-PapersOnLine 53, Issue 2)*, s. 17536–17541, Január 2020. 10.1016/j.ifacol.2020.12.2665.
- [A12] J. Matišák a K. Žáková, “3D Visualization Methods in Online Control Experimentation,” *In proceedings of 21st IFAC World Congress 2020. Amsterdam: Elsevier (IFAC-PapersOnLine 53, Issue 2)*, s. 17234–17239, Január 2020. 10.1016/j.ifacol.2020.12.1762.
- [A13] M. Pohančenič, J. Matišák, a K. Žáková, “The use of AR-Core technology for online control simulations,” v *Proceedings of the 2020 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, FedCSIS 2020*, (Sofia, Bulgaria), s. 649–652, IEEE, September 2020.

Účasť na projektoch

- [B1] “Budovanie laboratória mechatroniky na báze smart technológií,” 2021–2023. Garant: Doc. Ing. Katarína Žáková, PhD., KEGA.
- [B2] “Riadenie a modelovanie mechatronických systémov v emobilite,” 2019–2022. Garant: prof. Ing. Mikuláš Huba, PhD., VEGA.
- [B3] “Holografická technológia a rozšírená realita v online experimentovaní,” 2019. Garant: Ing. Jakub Matišák, projekt Tatra Banka E-talent.
- [B4] “3D vizualizačné metódy v online experimentovaní,” 2020–2021. Garant: Ing. Jakub Matišák, projekt Mladý výskumník.
- [B5] “Platforma pre online laboratórium na riadenie mechatronických systémov,” 2021–2022. Garant: Ing. Jakub Matišák, projekt Mladý výskumník.

Literatúra

- [1] Brit-Maren Block, “Digitalization in engineering education research and practice,” v *IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON*, vol. 2018-April, s. 1024–1028, IEEE Computer Society, 2018. DOI: 10.1109/EDUCON.2018.8363342.
- [2] Nurul Shuhadah Rosni, Zahidah Abd Kadir, Megat Norulazmi Megat Mohamed Noor, Zaidatul Husna Abdul Rahman a Nurulain Abu Bakar, “Development of mobile markerless augmented reality for cardiovascular system in anatomy and physiology courses in physiotherapy education,” v *Proceedings of the 2020 14th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication, IMCOM 2020*, keywords = *ARCore, anatomy and physiology, augmented reality, cardiovascular system, markerless AR, physiotherapy education*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Január 2020. DOI: 10.1109/IMCOM48794.2020.9001692.
- [3] R. Sekizuka, K. Koizumi, S. Saiki, Y. Yamazaki, T. Tsuji, a Y. Kurita, “A virtual training system of a hydraulic excavator using a remote controlled excavator with augmented reality,” v *SII 2017 - 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, (Taipei, Taiwan), s. 893–898, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Február 2018. DOI: 10.1109/SII.2017.8279336.
- [4] N. Dell’Unto, A. M. Leander, M. Dellepiane, M. Callieri, D. Ferdani, a S. Lindgren, “Digital reconstruction and visualization in archaeology: Case-study drawn from the work of the swedish pompeii project,” *Proceedings of the Digital Heritage 2013 - Federating the 19th Int’l VSMM, 10th Eurographics GCH, and 2nd UNESCO Memory of the World Conferences, Plus Special Sessions fromCAA, Arqueologica 2.0 et al.*, vol. 1, s. 621–628, 2013. DOI: 10.1109/DIGITALHERITAGE.2013.6743804.
- [5] J. Lebień a M. Szwoch, “Virtual sightseeing in Immersive 3D Visualization Lab - IEEE Conference Publication,” v *2016 Fe-*

- derated *Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*, (Gdansk, Poland), s. 1641–1645, IEEE, 2016.
- [6] D. Moud, S. Tuli, S. Bijawat, M. Bhardwaj, a S. Sharma, “An analysis to find effective teaching methodology in engineering education,” v *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference in MOOC, Innovation and Technology in Education, MITE 2013*, s. 185–189, IEEE Computer Society, 2013. DOI: 10.1109/MITE.2013.6756331.
- [7] F. Esquembre, “Easy Java Simulations: A software tool to create scientific simulations in Java,” *Computer Physics Communications*, vol. 156, no. 2, s. 199–204, 2004. DOI: 10.1016/S0010-4655(03)00440-5.
- [8] J. Saenz, F. Esquembre, F. J. Garcia, L. De La Torre, a S. Dormido, “An Architecture to use Easy Java-Javascript Simulations in New Devices,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 29, s. 129–133, 2015. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.11.225.
- [9] P. Balda, M. Schlegel, a M. Štětina, “Advanced control algorithms + Simulink compatibility + Real-time OS = REX,” v *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, vol. 16, s. 121–126, 2005. DOI: 10.3182/20050703-6-cz-1902.02293.
- [10] Q. Ma a Y. Yu, “The design and implementation of web-based virtual experiment platform for control courses,” v *ITME 2011 - Proceedings: 2011 IEEE International Symposium on IT in Medicine and Education*, vol. 1, s. 625–628, IEEE, Január 2011. DOI: 10.1109/ITIME.2011.6130916.
- [11] E. V. Morozova, K. A. Kulikov, a S. S. Lazebnikov, “The Laboratory Stand Simulation for Programming Microprocessor Devices,” v *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)*, s. 125–128, 2019. DOI: 10.1109/EIconRus.2019.8657118.
- [12] N. Evstatieva, B. Evstatiev, a D. Trifonov, “2D Virtual Laboratory for Teaching BCD to Seven-Segment Decoders in Logic Design Classes,” v *2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, s. 66–69, 2019. DOI: 10.1109/SIITME47687.2019.8990769.

- [13] J. Matišák a K. Žáková, “Online Tool for Creating Simple Models of Mechanical Systems,” v *ICETA 2018 - 16th IEEE International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications, Proceedings*, (Starý Smokovec), s. 355–360, Danvers : IEEE, 2018. DOI: 10.1109/ICETA.2018.8572249.
- [14] Z. Lei, W. Hu, H. Zhou, L. Zhong, a X. Gao, “DC motor control in a 3D real-time virtual laboratory environment,” v *Proceedings of 2015 12th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation, REV 2015*, (Bangkok, Thailand), s. 18–23, IEEE, 2015. DOI: 10.1109/REV.2015.7087257.
- [15] W. Hu, Z. Lei, H. Zhou, G. P. Liu, Q. Deng, D. Zhou, a Z. W. Liu, “Plug-in free web-based 3-D interactive laboratory for control engineering education,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 5, s. 3808–3818, 2017. DOI: 10.1109/TIE.2016.2645141.
- [16] Z. Lei, H. Zhou, W. Hu, a G. P. Liu, “Unified and Flexible Online Experimental Framework for Control Engineering Education,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, s. 1–1, 2021. DOI: 10.1109/TIE.2021.3053903.
- [17] O. Severa, M. Goubej, a J. Konigsmarkova, “Unified framework for generation of 3D web visualization for mechatronic systems Performance evaluation of iterated extended Kalman filter with variable step-length Jindich Havlík and Ondej Straka-Noise Covariance Matrices Estimation for Systems with Time-Varying Availability of Sensors Constrained time-optimal control of double-integrator system and its application in MPC Unified framework for generation of 3D web visualization for mechatronic systems,” *Journal of Physics: Conference Series*, 2015. DOI: 10.1088/1742-6596/659/1/012053.
- [18] J. Čerkala, A. Jadlovská, a Štefan Szűrös, “3D Visualization of Mechatronic Sytems using OpenGL,” v *Proceedings of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics of the Technical University of Košice*, s. 351–356, FEI TUKE, Košice, 2015.
- [19] R. Morales-Menendez, R. A. Ramírez-Mendoza, a A. J. V. Guevara, “Virtual/Remote Labs for Automation Tea-

- ching: a Cost Effective Approach,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 9, s. 266 – 271, 2019. 12th IFAC Symposium on Advances in Control Education ACE 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.219>.
- [20] V. J. Sarac, D. I. Minovski, a G. G. Stefanov, “Virtual Laboratories - an Innovative Concept in Teaching of Electrical Engineering,” v *2020 24th International Conference on Information Technology (IT)*, s. 1–4, 2020. DOI: 10.1109/IT48810.2020.9070519.
- [21] M. Hók a K. Žáková, “Interactive three dimensional presentation of Segway laboratory model,” v *Proceedings of ICETA 2016 - 14th IEEE International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications, Proceedings ICETA 2016*, s. 377–380, IEEE, 2016. DOI: 10.1109/ICETA.2016.7802064.
- [22] M. Králik a K. Žáková, “Interactive WebGL Model of Hydraulic Plant,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 29, s. 146–151, 2015. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.11.228.
- [23] P. Bisták, “3D Three-Tank remote laboratory based on matlab and websockets,” v *Proceedings of the 2019 5th Experiment at International Conference, exp.at 2019*, (Madeira, Portugal), s. 85–89, IEEE, 2019. DOI: 10.1109/EXPAT.2019.8876585.
- [24] P. Sudhaman, P. Surendiren, S. S. Meeran, a P. C. Kishoreraja, “Augmented reality in automation using virtual 3D models,” v *2012 3rd International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies, ICCCNT 2012*, (Coimbatore, India), IEEE, 2012. DOI: 10.1109/ICCCNT.2012.6396043.
- [25] H. Chen, K. Feng, C. Mo, S. Cheng, Z. Guo, a Y. Huang, “Application of augmented reality in engineering graphics education,” v *ITME 2011 - Proceedings: 2011 IEEE International Symposium on IT in Medicine and Education*, vol. 2, s. 362–365, IEEE, 2011. DOI: 10.1109/ITiME.2011.6132125.
- [26] W. Hu, Q. Ye, H. Zhou, Z. Lei, a S. Guan, “View of VR Interactive Feature of HTML5-based WebVR Control Laboratory by Using Head-mounted Display,” *International Journal*

- of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*, vol. 14, s. 20–33, Marec 2018. DOI: 10.3991/IJOE.V14I03.8112.
- [27] D. R. Dela Cruz a D. M. M. Mendoza, “Design and Development of Virtual Laboratory: A Solution to the Problem of Laboratory Setup and Management of Pneumatic Courses in Bulacan State University College of Engineering,” v *2018 IEEE Games, Entertainment, Media Conference, GEM 2018*, (Galway, Ireland), s. 20–23, IEEE, 2018. DOI: 10.1109/GEM.2018.8516467.
- [28] M. Kostoláni, J. Murín, a Š. Kozák, “Intelligent predictive maintenance control using augmented reality,” v *Proceedings of the 2019 22nd International Conference on Process Control, PC 2019*, (Štrbské Pleso, Slovakia), s. 131–135, IEEE, 2019. DOI: 10.1109/PC.2019.8815042.
- [29] V. Paelke, “Augmented reality in the smart factory: Supporting workers in an industry 4.0. environment,” v *19th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2014*, (Barcelona, Spain), IEEE, 2014. DOI: 10.1109/ETFA.2014.7005252.
- [30] E. Kučera, O. Haffner, a R. Leskovský, “Interactive and virtual / Mixed reality applications for mechatronics education developed in unity engine,” v *Proceedings of the 29th International Conference on Cybernetics and Informatics, K and I 2018*, (Lazy pod Makytou, Slovakia), s. 1–5, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. DOI: 10.1109/CYBERI.2018.8337533.
- [31] D. P. Maloney, T. L. O’Kuma, C. J. Hieggelke, a A. Van Heuvelen, “Surveying students’ conceptual knowledge of electricity and magnetism,” *American Journal of Physics*, vol. 69, no. S1, s. S12–S23, 2001. DOI: 10.1119/1.1371296.
- [32] M. T. Valdez, C. M. Ferreira, a F. P. M. Barbosa, “3D virtual laboratory for teaching circuit theory - A virtual learning environment (VLE),” v *Proceedings - 2016 51st International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2016*, (Coimbra, Portugal), Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. DOI: 10.1109/UPEC.2016.8114126.

- [33] C. Mateo-Segura, “A new Augmented-Reality platform for Electromagnetic Education,” v *Proceedings of the 2018 20th International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, ICEAA 2018*, (Cartagena des Indias, Colombia), s. 174–177, IEEE, November 2018. DOI: 10.1109/ICEAA.2018.8520476.
- [34] V. Cozzolino, O. Moroz, a A. Y. Ding, “The virtual factory: Hologram-enabled control and monitoring of industrial iot devices,” v *Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality, AIVR 2018*, (Taichung, Taiwan), s. 120–123, IEEE, 2018. DOI: 10.1109/AIVR.2018.00024.
- [35] W. Wang, X. Zhu, K. Chan, a P. Tsang, “Digital Holographic System for Automotive Augmented Reality Head-Up-Display,” v *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 2018-June, s. 1327–1330, IEEE, August 2018. DOI: 10.1109/ISIE.2018.8433601.
- [36] J. Matišák, M. Rábek, a K. Žáková, “Use of holographic technology in online experimentation,” v *Proceedings of the 2019 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, FedCSIS 2019*, (Leipzig, Germany), s. 921–924, IEEE, September 2019. DOI: 10.15439/2019F179.
- [37] M. T. Abhishek, P. S. Aswin, N. C. Akhil, A. Souban, S. K. Muhammedali, a A. Vial, “Virtual Lab Using Markerless Augmented Reality,” v *Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering, TALE 2018*, s. 1150–1153, IEEE, 2018. DOI: 10.1109/TALE.2018.8615245.
- [38] A. Kokkas a G. C. Vosniakos, “An Augmented Reality approach to factory layout design embedding operation simulation,” *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, vol. 13, no. 3, s. 1061–1071, 2019. DOI: 10.1007/s12008-019-00567-6.
- [39] M. Podroužek, “Vzdialené laboratórium pre hydraulický systém s vizualizáciou v rozšírenej realite,” Diplomová práca, FEI STU, Bratislava, 64 s., 2021.

- [40] M. Pohančenič, J. Matišák, a K. Žáková, “The use of AR-Core technology for online control simulations,” v *Proceedings of the 2020 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, FedCSIS 2020*, (Sofia, Bulgaria), s. 649–652, IEEE, September 2020.
- [41] “What is a glb file? learn how to use glb files formats | visao - glb file - what is a glb file - glb files.” visao.ca, <https://visao.ca/what-is-glb-file/>. navštívené: 05. 01. 2022.
- [42] P. Nowacki a M. Woda, “Capabilities of ARCore and ARKit Platforms for AR/VR Applications,” v *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 987, (Brunów, Poland), s. 358–370, Springer Verlag, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-19501-4_36.
- [43] Google Developers, “ARCore overview | Google Developers.” <https://developers.google.com/ar/discover>. navštívené: 03. 01. 2020.
- [44] M. Pohančenič, “Platforma pre virtuálne laboratórium mechatronických systémov v rozšírenej realite,” Bakalárska práca, FEI STU, Bratislava, 81 s., 2022.
- [45] M. Rábek, *Univerzálne rozhranie pre zdieľanie vzdialene riadených experimentov*. Dizertačná práca, FEI STU, Bratislava, 80 s., 2019.
- [46] P. Andrejko, “Interaktívny WebGL model mechatronického systému,” Bakalárska práca, FEI STU, Bratislava, 61 s., 2021.
- [47] G. Stoklas, “Interaktívny 3D model hydraulického systému s využitím technológie ARCore,” Bakalárska práca, FEI STU, Bratislava, 58 s., 2021.
- [48] D. Zrinji, “3D Model of Mechatronic Device Using Augmented Reality,” Bakalárska práca, FEI STU, Bratislava, 49 s., 2021.