



Středoškolská technika 2025

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Dvounohý robot

Lukáš Pavlíček

**Střední průmyslová škola,
Mladá Boleslav, Havlíčkova 456, 293 80**

STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA MLADÁ BOLESLAV

DVOUNOHÝ ROBOT

Autor: Lukáš Pavlíček

Studijní obor: 18-20-M/01 Informační technologie

Vedoucí práce: Lukáš Mázl

Mladá Boleslav 2025

Obsah

Obsah	3
1 Úvod.....	5
2 Obsah práce.....	6
2.1 Návrh a konstrukce robota	6
2.1.1 Použité komponenty.....	8
2.2 Výroba a montáž	9
2.3 Webové API.....	12
2.4 Trénování robota	13
2.4.1 Parametry Markovského rozhodovacího procesu (MDP)	15
2.4.2 Systém odměn	15
3 Závěr	17
4 Přílohy.....	18
4.1 Seznam obrázků	18
4.2 Zdroje.....	19

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou ročníkovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této ročníkové práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

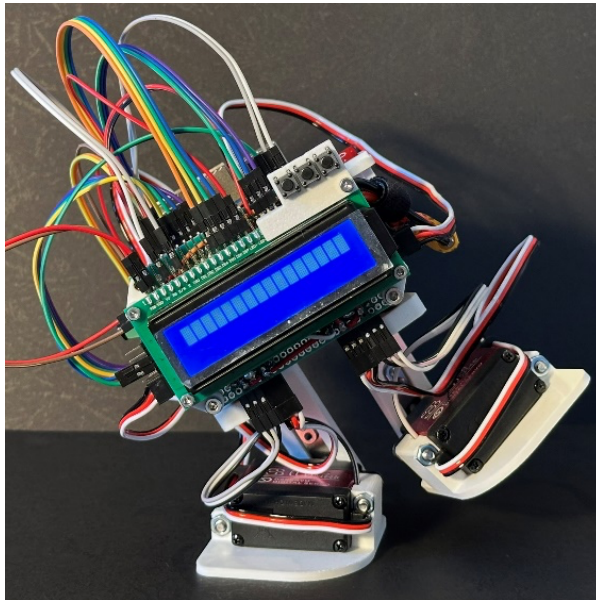
V Mladé Boleslavi dne podpis:

1 Úvod

Smyslem této ročníkové práce bylo navrhnout, vyrobit a částečně naprogramovat dvounohého robota schopného samostatného pohybu. Cílem bylo propojit znalosti z oblasti konstrukce pomocí CAD softwaru, práce s 3D tiskem, základní elektroniky, programování mikropočítače Raspberry Pi a aplikování moderních metod strojového učení, konkrétně reinforcement learningu (RL, učení posilováním).

Během práce vznikl reálný prototyp dvounohého robota, kterému předcházela návrh ve virtuálním prostředí. Byla vytvořena webová aplikace sloužící pro ovládání robota a vizualizaci senzorických dat. V další fázi byla zahájena tvorba virtuální simulace robota v prostředí Isaac Sim¹, kde probíhá trénování schopnosti samostatné chůze.

Projekt je sdílen na platformě Github². Je rozdělen do dvou repozitářů, jeden je pro webové API a druhý je na projekt pro reinforcement learning.



Obrázek 1: Robot mává

¹ NVIDIA. *Isaac Sim*. Online. 2025. Dostupné z: <https://developer.nvidia.com/isaac/sim>. [cit. 2025-04-28].

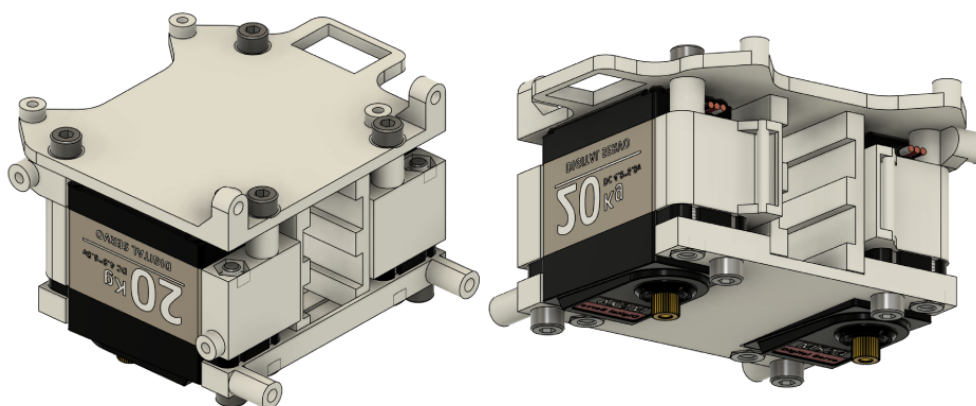
² GITHUB INC. *Github*. Online. 2025. Dostupné z: <https://github.com>. [cit. 2025-04-28].

2 Obsah práce

2.1 Návrh a konstrukce robota

V počáteční fázi projektu bylo nezbytné vytvořit podrobný návrh konstrukce robota. Pro tento účel byl využit profesionální CAD software Autodesk Fusion 360³, který umožňuje nejen přesné modelování jednotlivých komponent, ale i jejich následné seskládání do finální sestavy.

Konstrukce robota byla navržena s ohledem na jednoduchost, pevnost a minimalizaci hmotnosti. Hlava robota tvoří centrální uzel, do kterého je integrována většina elektroniky. Hlavní část tvoří robustní rám pro dva servomotory, které mezi sebou tvoří slot pro baterii, do kterého lze baterii rychle a bezpečně zasunout.



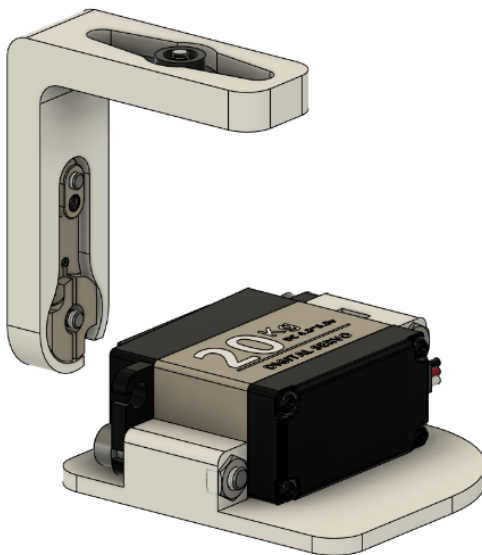
Obrázek 2: Jádru hlavy

Na toto jádro je připevněn zbytek komponent, včetně mikropočítače, baterie, měničů napětí, inerciální měřicí jednotky (IMU), LCD displeje a hlavního vypínače. Všechny tyto součástky jsou připevněny velice modulárním způsobem, který umožňuje snadnou údržbu nebo výměnu specifických komponent.

³ AUTODESK. *Fusion 360*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>. [cit. 2025-04-28].

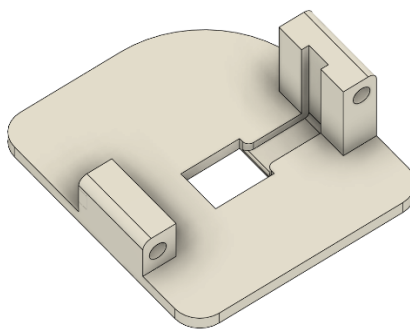


Ze servomotorů ze spodu hlavy vycházejí dvě symetrické nohy, přičemž každá noha je tvořena horní částí ve tvaru obráceného „L“ a dolní částí představující chodidlo. Tvar chodila je optimalizován pro co největší kontaktní plochu, ale také aby chodidla při chůzi spolu nekolidovaly.



Obrázek 3: Noha

Ze spoda jsou do chodidel zabudovány kapacitní senzory k detekci dotyku s podložkou.

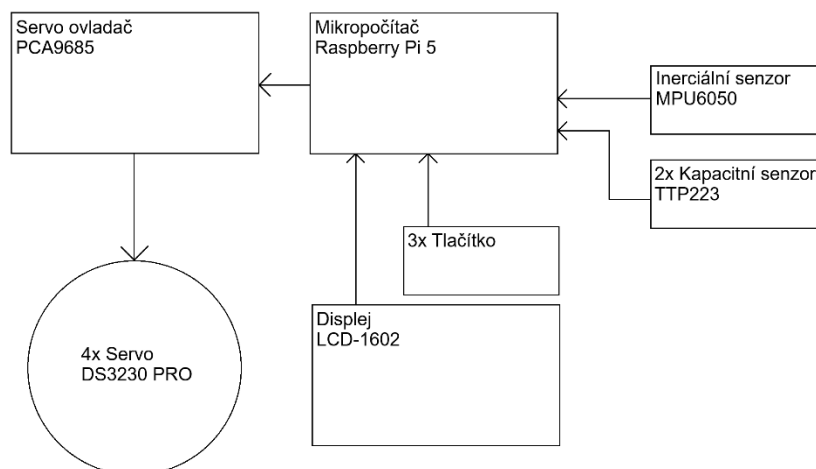


Obrázek 4: Chodidlo s otvorem pro senzor

Zvláštní pozornost byla věnována rozložení hmotnosti, aby se těžiště robota nacházelo co nejbližší k jeho středu. Tím bylo dosaženo lepší stability, což je klíčové při plánovaném trénování chůze.



2.1.1 Použité komponenty



Obrázek 5: Blokový diagram klíčových komponent

Při konstrukci robota byly pečlivě vybrány komponenty tak, aby zajistily potřebnou funkčnost, stabilitu a spolehlivost celého systému. Hlavní řídicí jednotkou je mikropočítač Raspberry Pi 5⁴, který poskytuje dostatečný výpočetní výkon pro řízení servomotorů i provoz webového rozhraní. O samotný pohyb robota se starají čtyři výkonné servomotory typu DS3230 PRO, které umožňují přesné nastavení úhlové polohy jednotlivých částí nohou.

Pro řízení servomotorů byl použit modul PCA9685, jenž umožňuje generování PWM signálů nezbytných pro jejich ovládání. Elektrickou energii zajišťuje lithium-polymerová baterie s kapacitou 1300 mAh, vybavená napětím 7,4 V a proudovou zátěží 25C, což zajišťuje dostatečný výkon pro všechny komponenty.

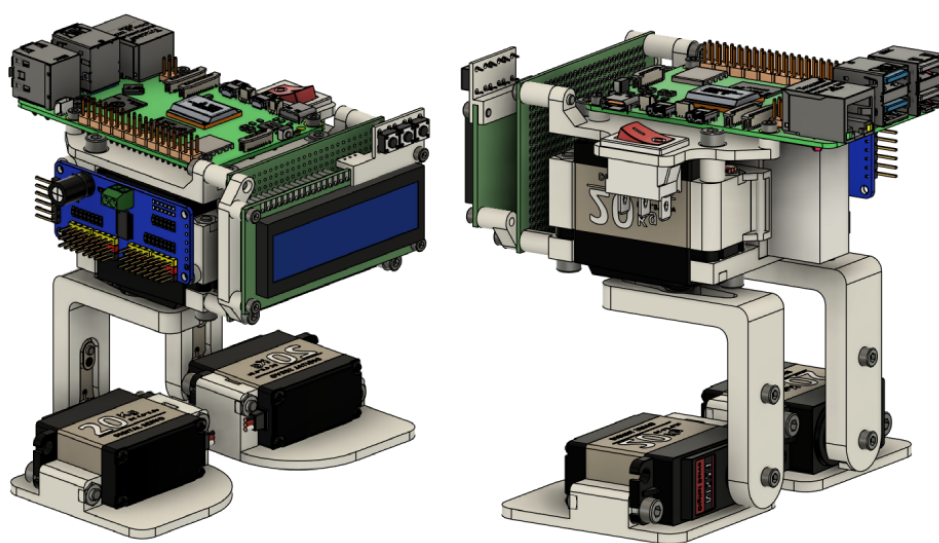
Kvůli potřebě stabilizace napájení byly nasazeny tři mikro step-down měniče, které snižují napětí z 7,4 V na stabilních 5 V. Tento krok je zásadní zejména vzhledem k nárokům servomotorů a Raspberry Pi na proudové špičky, které by mohly poškodit napájecí obvody. V rámci systému měření polohy byl integrován inerciální senzor MPU6050, schopný zaznamenávat jak lineární, tak rotační akceleraci ve třech osách.

⁴ RASPBERRY PI. *Raspberry Pi*. 5. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/>. [cit. 2025-04-28].



Pro detekci kontaktu robota se zemí byly do spodní části chodidel umístěny dva kapacitní senzory TTP223. Tyto senzory poskytují jednoduchou a rychlou informaci o dotyku, kterou lze dále využít v rámci řízení chůze. Na robotovi je zepředu dále umístěn LCD displej typu LCD-1602 a trojice malých tlačítek, které však v aktuální verzi slouží pouze jako příprava pro budoucí rozšíření ovládání.

Centrální napájení celého systému je zajištěno pomocí hlavního vypínače, který umožňuje snadné a bezpečné zapínání a vypínání robota.



Obrázek 6: Hotový model robota

2.2 Výroba a montáž

Plastové součásti byly vyrobeny pomocí 3D tiskárny BambuLab P1S⁵, a to z materiálu PLA (polylactic acid), který byl zvolen pro své příznivé mechanické vlastnosti, nízkou hmotnost a snadnou tisknutelnost. Pro přípravu tiskových dat byl použit slicovací software Bambu Studio⁶.

⁵ BAMBULAB. *Bambulab P1S*. Online. 2025. Dostupné z: https://eu.store.bambulab.com/en-cz/products/p1s?variant=48666904625500&srsId=AfmBOoplUVB_qGkr-2XFjOMI2UxqesRFba_tnNQ6vuUauKTSs-zNMV1V. [cit. 2025-04-28].

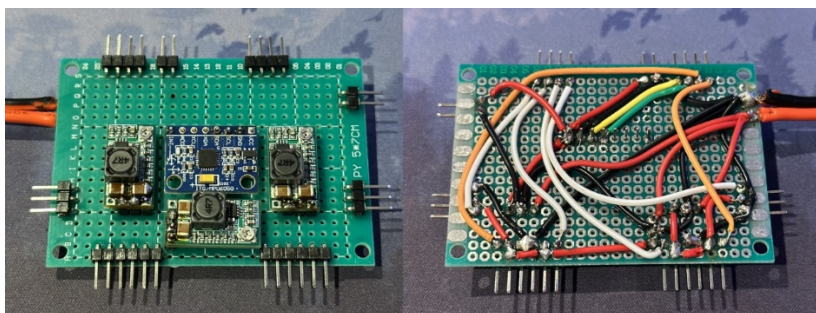
⁶ BAMBULAB. *Bambu Studio*. Online. 2025. Dostupné z: <https://bambulab.com/en/download/studio>. [cit. 2025-04-28].



Tisk byl realizován za použití standardní trysky o průměru 0,4 mm, která představuje ideální kompromis mezi rychlostí výroby a kvalitou povrchu výsledných dílů. Konstrukční prvky byly navrženy tak, aby po vytištění zapadaly přesně do sebe bez nutnosti dalších úprav, což usnadnilo následnou montáž.

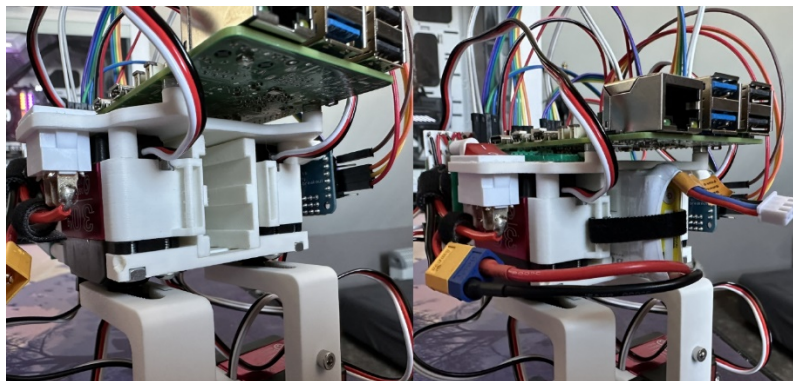
Na přední stranu hlavy byla připevněna pájecí deska, která slouží jako rozvaděč pro organizaci všech přívodů napájení a signálů do jednotlivých elektronických komponent. Na této desce byly ručně napájeny všechny potřebné součástky, včetně napájecích větví a připojovacích bodů. Pro vstupy a výstupy byly použity standardizované dupont konektory, které umožňují snadné a rychlé propojení například s GPIO piny Raspberry Pi, servomotory, řídicí jednotkou serv PCA9685 a kapacitními senzory TTP223 pomocí běžných dupont vodičů.

Na tuto desku byly instalovány tři samostatné mikro step-down měniče, z nichž každý zásobuje specifickou část systému, aby se předešlo přetížení jednotlivých větví. Jelikož inerciální měřicí jednotka by měla být umístěna co nejbližší těžiště robota, tak byla jednotka MPU6050 rovněž umístěna na přední pájecí desku.



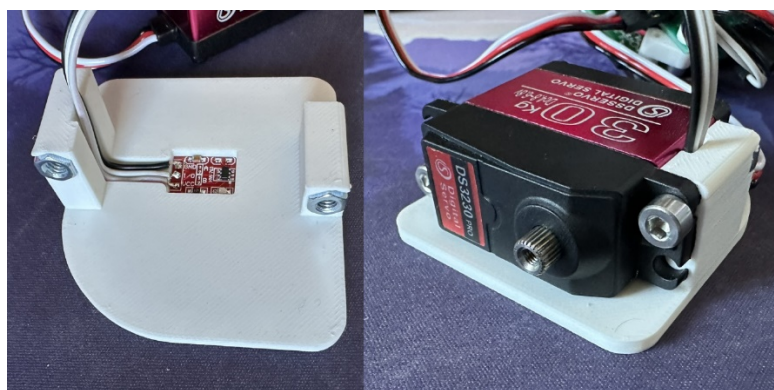
Obrázek 7: Rozváděcí jednotka

Baterie byla umístěna do centrální části hlavy robota, čímž bylo dosaženo vyváženého rozložení hmotnosti.



Obrázek 8: Slot na baterii

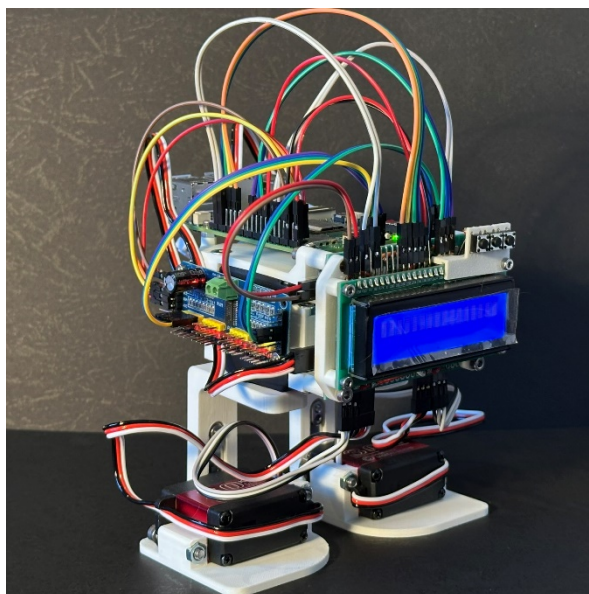
Servomotory byly instalovány na místa určená pro pohyb horní i dolní části nohou. Na spodní části každého chodidla byl umístěn kapacitní senzor TTP223, orientovaný směrem dolů, pro detekci dotyku se zemí.



Obrázek 9: Umístění senzoru k detekci dotyku

Ovládací LCD displej typu LCD-1602 a trojice tlačítek byly namontovány do připravených pozic na přední části hlavy, ačkoliv v aktuálním stavu nejsou využívány k řízení funkce robota.

Pro spojení jednotlivých částí konstrukce byly použity šrouby různých průměrů, přičemž pro upevnění největších komponent byly využity šrouby průměru M4 a pro uchycení pájecí desky (PCB) šrouby průměru M2,5. Zvláštní důraz byl kladen na správné vedení kabeláže, aby bylo minimalizováno riziko jejího poškození při pohybu robota a zároveň bylo dosaženo přehlednosti a jednoduché údržby celého systému.



Obrázek 10: Robot složen

2.3 Webové API

Pro ovládání robota a vizualizaci dat ze senzorů byla vytvořena vlastní webová aplikace, která běží přímo na mikropočítači Raspberry Pi 5. Backend aplikace byl implementován v jazyce Python⁷ s využitím frameworku Flask⁸, což umožňuje jednoduchou správu webových požadavků a poskytování dynamických dat. Frontend byl vytvořen v jazycích HTML a CSS, přičemž byl použit šablonovací systém Jinja⁹, který umožňuje dynamicky generovat obsah na straně serveru.

Aplikace byla navržena tak, aby umožnila plnou kontrolu jednotlivých servomotorů robota a zároveň poskytovala aktuální přehled o stavu senzorů. Uživatel má možnost prostřednictvím grafického rozhraní nastavovat úhly jednotlivých serv, které jsou zobrazeny jako posuvníky s aktuálním ukazatelem hodnoty v reálném čase. Tímto způsobem lze přesně a jednoduše ovládat polohu nohou robota.

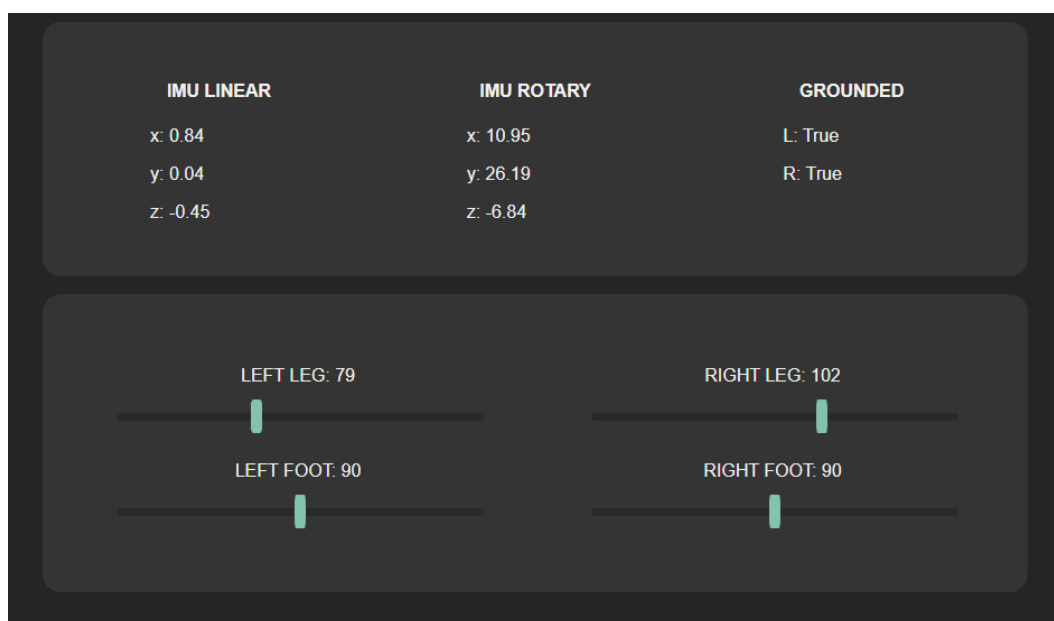
⁷ PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Python*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.python.org>. [cit. 2025-04-28].

⁸ PLETS. *Flask*. Online. 2025. Dostupné z: <https://flask.palletsprojects.com/en/stable/>. [cit. 2025-04-28].

⁹ PLETS. *Jinja*. Online. 2025. Dostupné z: <https://jinja.palletsprojects.com/en/stable/>. [cit. 2025-04-28].



Kromě ovládání motorů aplikace zobrazuje data získaná z inerciální měřicí jednotky MPU6050, konkrétně lineární akceleraci a rotační akceleraci ve všech třech osách. Dále jsou zobrazovány informace ze dvou kapacitních senzorů TTP223, které indikují, zda je chodidlo robota v kontaktu se zemí. Přehledné grafické zobrazení těchto údajů umožňuje uživateli rychle vyhodnotit stabilitu robota a jeho interakci s prostředím.



Obrázek 11: Webový ovladač

Webová aplikace je přístupná v lokální síti a je hostována přímo na Raspberry Pi bez použití externího webserveru, běžícím na vestavěném vývojovém serveru Flask. Komunikace je řešena pomocí klasických HTTP požadavků.

Pro budoucí rozvoj aplikace je plánováno doplnění funkcí pro ovládání natrénovaných politik (policy) z reinforcement learningu, stejně jako možnost zobrazovat informace přímo na LCD displeji umístěném na robotovi a ovládat některé základní funkce prostřednictvím vestavěných tlačítek.

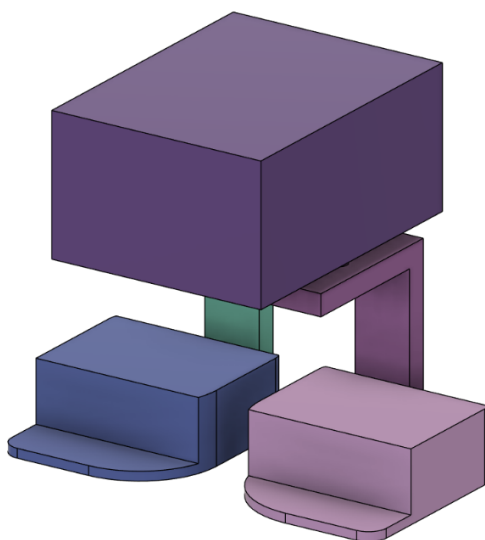
2.4 Trénování robota

Pro zajištění autonomního pohybu robota bylo rozhodnuto využít metodu strojového učení známou jako reinforcement learning (RL, učení posilováním). Jedná se o typ algoritmu,



při kterém se agent, v tomto případě robot, učí vykonávat činnosti v prostředí na základě získávání odměn za správné akce a trestů za nevhodné chování. Cílem RL je maximalizovat kumulativní odměnu v průběhu času a tím dosáhnout optimální strategie chování.

Trénink robota probíhal ve virtuálním simulátoru Isaac Sim, který umožňuje realistickou simulaci robotického chování v prostředích s fyzikálně přesnými modely. Nejprve byla vytvořena optimalizovaná virtuální kopie robota ve formátu USD (Universal Scene Description¹⁰), která zahrnovala klíčové prvky jako servomotory a inerciální měřicí jednotku. Kapacitní senzory zatím nebyly přidány. Optimalizace robota spočívá v tom, že se zachová hrubý tvar a realistické parametry, jako jsou materiál, limity serv, nebo těžiště. Ale jeho geometrie se upraví na primitivnější, aby byl výpočet kolizí a fyzické simulace co nejjednodušší.



Obrázek 12: Optimalizovaná verze robota

Pro implementaci a správu procesu učení byla využita knihovna Isaac Lab¹¹, doplněná o algoritmus Proximal Policy Optimization (PPO) z knihovny SKRL¹², která poskytuje

¹⁰ PIXAR ANIMATION STUDIOS. *Universal Scene Description*. Online. 2025. Dostupné z: <https://openusd.org/release/index.html>. [cit. 2025-04-28].

¹¹ NVIDIA. *Isaac Lab*. Online. 2025. Dostupné z: <https://developer.nvidia.com/isaac/lab>. [cit. 2025-04-28].

¹² TONI-SM. *SKRL*. Online. 2025. Dostupné z: <https://skrl.readthedocs.io/en/latest/>. [cit. 2025-04-28].



nástroje pro efektivní trénink agentů v robotických simulacích. Bylo vytvořeno vlastní tréninkové prostředí zaměřené na nácvik chůze po vodorovném hladkém povrchu.

2.4.1 Parametry Markovského rozhodovacího procesu (MDP)

Pro definici tréninkového prostředí byly stanoveny základní parametry Markovského rozhodovacího procesu (MDP), který formálně popisuje vztah mezi stavem prostředí, akcemi agenta a odměnami.

Stavová reprezentace (observace) jsou informace co učící algoritmus dostane jako vstup na začátku každého simulačního kroku. To zahrnovalo aktuální úhly všech čtyř servomotorů, poslední provedené akce a data získaná z inerciální měřicí jednotky. Konkrétně byly sledovány hodnoty lineární akcelerace a rotační akcelerace ve všech třech prostorových osách.

Akce jsou výstup učícího algoritmu a jsou to pokyny, co má robot dělat. To představovaly příkazy pro jednotlivé servomotory. Každému servu byla přiřazena hodnota odpovídající požadované změně úhlu v kladném nebo záporném směru, což umožňuje dynamické ovládání pozic nohou v průběhu každého kroku.

Epizoda je řada observací a akcí až do dosažení terminačního stavu. V tomto případě jsou terminační stavy například pád robota na bok, nebo dosažení limitu počtu kroků bez zjevného pohybu vpřed. Avšak definiční podmínky terminačních stavů jsou v současné době stále ve vývoji a nebyly dosud plně implementovány.

2.4.2 Systém odměn

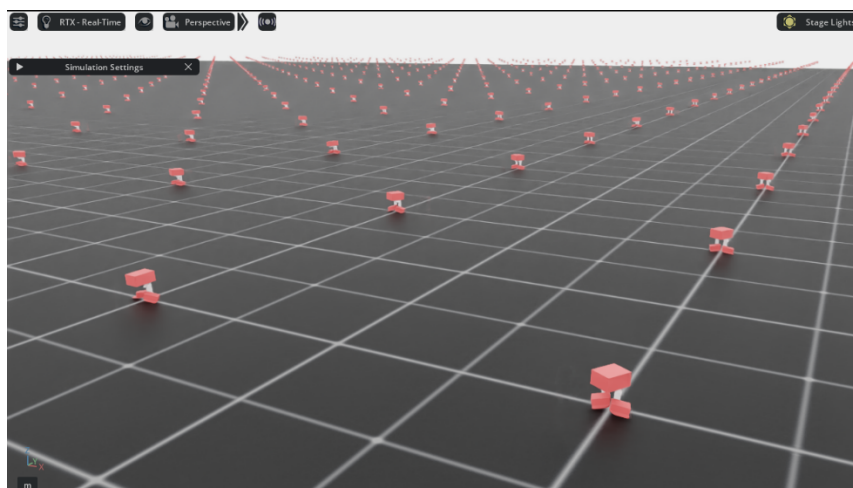
Systém odměn byl navržen s cílem podpořit robota v samostatném, stabilním a efektivním pohybu vpřed, přičemž penalizoval nežádoucí chování, jako je pád, pohyb do stran, neaktivita a trhavé pohyby.



Pozitivní odměna byla přidělena za každé dosažené zlepšení pozice ve směru vpřed, který byl v tomto prostředí reprezentován záporným směrem osy Y.

Negativní odměna byla přiřazena za příčné pohyby podél osy X, které naznačují odchylku od požadovaného směru chůze. A za velké rozdíly mezi předešlou a momentální požadovanou pozicí serv, aby se předešlo nereálným trhavým pohybům. Výrazná penalizace je za dosažení terminačního stavu.

V současné fázi projektu se ukazuje, že ačkoli robot vykazuje určité známky pohybu, stabilní chůze zatím nebyla dosažena, což naznačuje potřebu další optimalizace prostředí a odměnové funkce.



Obrázek 13: Robot v RL simulaci



3 Závěr

Cílem této ročníkové práce bylo navrhnout, vyrobit a naprogramovat dvounohého robota s možností budoucího autonomního pohybu. Byl vytvořen kompletní návrh v Autodesk Fusion 360, následovala výroba dílů pomocí 3D tisku a montáž elektronických komponent s využitím mikropočítače Raspberry Pi.

Pro ovládání robota byla vyvinuta webová aplikace umožňující řízení servomotorů a sledování senzorických dat. Dále byl vytvořen virtuální model robota v simulátoru Isaac Sim a zahájeno trénování schopnosti chůze metodou reinforcement learningu s využitím algoritmu PPO.

I když robot zatím stabilní chůze nedosáhl, byl položen základ pro další rozvoj, zahrnující doladění tréninkového prostředí, nasazení naučené politiky do reálného robota a rozšíření funkcí ovládacího rozhraní. Projekt tak vytvořil pevný základ pro budoucí autonomní řízení robota.



4 Přílohy

4.1 Seznam obrázků

Obrázek 1: Robot mává	5
Obrázek 2: Jádro hlavy	6
Obrázek 3: Noha.....	7
Obrázek 4: Chodidlo s otvorem pro senzor	7
Obrázek 5: Blokový diagram klíčových komponent.....	8
Obrázek 6: Hotový model robota	9
Obrázek 7: Rozváděcí jednotka.....	10
Obrázek 8: Slot na baterii	11
Obrázek 9: Umístění senzoru k detekci dotyku.....	11
Obrázek 10: Robot složen	12
Obrázek 11: Webový ovladač	13
Obrázek 12: Optimalizovaná verze robota	14
Obrázek 13: Robot v RL simulaci	16



4.2 Zdroje

NVIDIA. *Isaac Sim*. Online. 2025. Dostupné z: <https://developer.nvidia.com/isaac/sim>. [cit. 2025-04-28].

AUTODESK. *Fusion 360*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>. [cit. 2025-04-28].

RASPBERRY PI. *Raspberry Pi 5*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/>. [cit. 2025-04-28].

BAMBULAB. *Bambulab P1S*. Online. 2025. Dostupné z: https://eu.store.bambulab.com/en-cz/products/p1s?variant=48666904625500&srsId=AfmBOoplUVB_qGkr-2XFjOMl2UxqesRFba_tnNQ6vuUauKTsS-zNMV1V. [cit. 2025-04-28].

BAMBULAB. *Bambu Studio*. Online. 2025. Dostupné z: <https://bambulab.com/en/download/studio>. [cit. 2025-04-28].

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Python*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.python.org>. [cit. 2025-04-28].

PLLETS. *Flask*. Online. 2025. Dostupné z: <https://flask.palletsprojects.com/en/stable/>. [cit. 2025-04-28].

PLLETS. *Jinja*. Online. 2025. Dostupné z: <https://jinja.palletsprojects.com/en/stable/>. [cit. 2025-04-28].

PIXAR ANIMATION STUDIOS. *Universal Scene Description*. Online. 2025. Dostupné z: <https://openusd.org/release/index.html>. [cit. 2025-04-28].



NVIDIA. *Isaac Lab*. Online. 2025. Dostupné z: <https://developer.nvidia.com/isaac/lab>. [cit. 2025-04-28].

TONI-SM. *SKRL*. Online. 2025. Dostupné z: <https://skrl.readthedocs.io/en/latest/>. [cit. 2025-04-28].