

# Podvozek robota ovládaný přes webové rozhraní, pro soutěž ANA Avatar XPRIZE

Jiří Šurýn

Faculty of Informatics and Management  
University of Hradec Kralove,  
Hradec Kralove, Czech Republic  
surynji1@uhk.cz

*Abstract- Robotika se v současné době velmi rychle rozvíjí. Urychlit vývoj v oblasti vzdáleně ovládaných robotů si klade za cíl i soutěž Ana Avatar XPRIZE. Tento článek se zabývá konstrukcí podvozku dálkově ovládaného robota a návrhem jeho řízení pro tuto soutěž. Pro první prototyp byl vyroben tříkolový podvozek s diferenčním řízením, u něhož byl zjištěn problém s ovladatelností. Docházelo ke samovolným změnám směru pohybu podvozku z důvodu chybného úhlu volně otočného kola vůči směru jízdy. Proto byl vyvinut stabilizační systém pohybu s Arduinem a MEMS gyroskopem, který zlepšil jeho ovladatelnost. Dále je v článku popsán návrh řídicího systému a nasazení webové aplikace která umožňuje ovládat robota přes internetové připojení a libovolný webový prohlížeč.*

**Keywords-** Robot; avatar; web control; Raspberry Pi; Arduino

## I. INTRODUCTION/ÚVOD

Ana Avatar XPRIZE je mezinárodní soutěž, mající za cíl rozvoj technologií vzdáleně ovládaných robotů.[1] Úkolem účastníků této soutěže je vyvinout a předvést porotě víceúčelového robotického avatara, s nímž netrénovaný operátor zvládne splnit zadané úkoly a bude přitom od robota vzdálený minimálně 100 kilometrů. Vítězné týmy si rozdělí celkem 10 milionů dolarů. Jednotlivá kola soutěže budou probíhat do března 2022.

Z celkem 99 registrovaných týmů z celého světa bylo vybráno komisí XPRIZE 77 týmů které se kvalifikovaly a budou se účastnit dalších kol soutěže.[2] Z české republiky se podařilo kvalifikovat pouze týmu UHK FIM.

**Tým vyvíjí avatara FIMBOT skládající se ze dvou částí:**

A) Oblek virtuální reality – Snímá pohyby operátora a přenáší je přes internet na pohyby avatara, dále je přenášen hlas operátora. Zpětně od avatara na operátora se přes internet přenáší hmatová zpětná vazba, zvuk a 3D obraz.

B) Robot – Avatar vykonává pohyby vzdáleného operátora, poskytuje hmatovou zpětnou vazbu a dále snímá 3D obraz a zvuk okolí. Avatar je připojen přes wifi síť k internetu, prostřednictvím něhož je spárován s oblekem vzdálené reality a ovládán operátorem. Pro první prototyp avatara byla vybrána kombinace humanoidního trupu, rukou a hlavy s trojkolovým podvozkem se dvěma poháněnými koly a jedním volně otočným.

V rámci vývoje vznikla potřeba vytvořit jednoduché Webové rozhraní, které bude sloužit pro administraci a základní / záložní ovládání robota. Cílem je tedy navrhnout jednoduchý systém řízení podvozku s webovým rozhraním, což tvoří jen malou ale důležitou část systému. Je mnoho způsobů, jak tento problém řešit, proto je dobré se inspirovat v už existujících projektech.

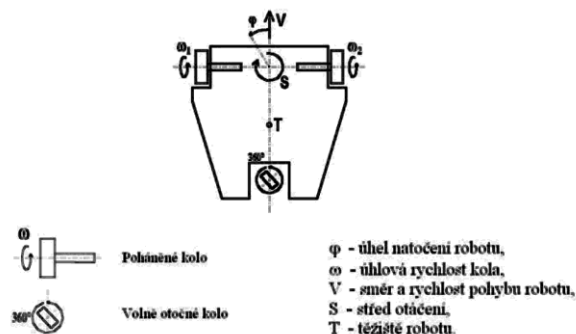
Jednoduché řízení robota s využitím Raspberry Pi a Arduina je popsáno. [3] Tento článek popisuje vzdáleně ovládaného mobilního kolového robota s řízením v reálném čase. Robot je vybaven ramenem a kamerou. Ovládání je řešeno pomocí webového rozhraní, to umožňuje ovládat robota na velkou vzdálenost přes internet pomocí libovonného webového prohlížeče.

Využitím vzdáleně ovládaného robota pro dohledové a bezpečnostní aplikace se zabývá článek, [4] opět je využito Raspberry Pi s na kterém je spuštěn server zajišťující komunikaci přes webové rozhraní. Robot je vybaven kamerou a pásovým podvozkem.

Podobný projekt [5] vzdáleně ovládaného robota opět využívá kombinaci Raspberry PI a Arduina. Používá se WIFI připojení a webové rozhraní, robot je navíc doplněn o další senzory pro monitorování prostředí.

Podobných projektů existuje celá řada, většinou se jedná o malé roboty s velmi jednoduchým webovým rozhraním, sloužícím spíše pro demonstrační účely než pro reálné nasazení. Navíc každý autor používá trochu jiné hardwarové komponenty robota a tomu odpovídá i jednoúčelově napsaný ovládací software. Nelze jednoduše mechanicky zvětšit malého robota do velikosti člověka a očekávat že bude plně funkční.

## II. PROBLEM DEFINITION/ DEFINICE PROBLÉMU



Obrázek 1. Tříkolový podvozek řízený diferenčním způsobem.[6]

„Diferenční řízení tříkolového podvozku na obrázku 1 pracuje se dvěma na sobě nezávisle poháněnými koly a jedním volně otočným nepoháněným kolem, které slouží ke stabilizaci robota. Zatočení robota je prováděno pomocí rozdílné rychlosti otáčení poháněných kol. Výhoda tohoto řízení spočívá v možnosti robota otočit se na místě, kterou může využívat ve stísněných prostorech.“[6]

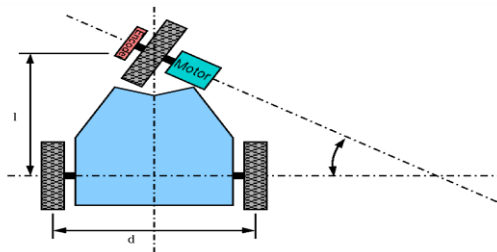


Obrázek 2. Prototyp podvozku FIMBOT ONE.

První prototyp robota je na obrázku 2. Přední poháněná kola jsou 10palcová mají vestavěné BLDC motory o výkonu 2\*350 W. Rám je vyroben ze tří hliníkových U profilů o síle 5 mm, které jsou spojeny pomocí svorníků a nosné tyče, díky tomu lze snadno nastavit těžiště robota, pomocí změny sklonu předních noh a trupu. Zadní opěrné kolo má též nastavitelný sklon. Výška robota s hlavou bude cca 150 cm, dle nastavených úhlů. Současná váha je cca 20 kg maximální nosnost podvozku je 100 kg. Místo trupu je zatím rozvaděč, pro trup hlavu a ruce se může použít projekt inMoov.

Při testování prvního prototypu podvozku, byl zjištěn problém se špatnou ovladatelností. Docházelo ke samovolným změnám směru pohybu podvozku z důvodu chybného úhlu volně otočného kola vůči směru jízdy.

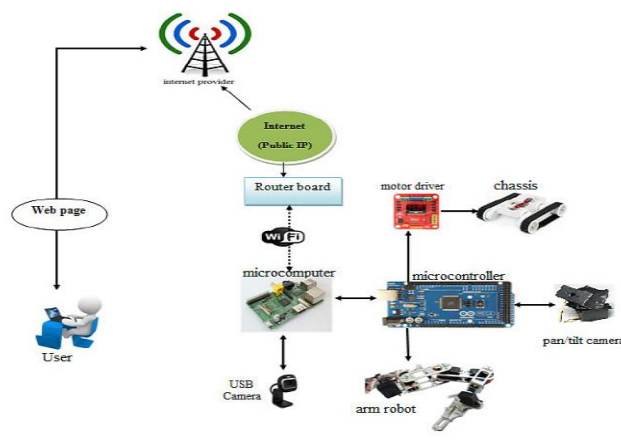
Možným řešením je změna volně otočného kola za řízené kolo obrázek 3. „Tomuto způsobu pohybu se často říká Ackermanovo řízení a zahrnuje většinu dnešních automobilů.“ [7] Nevýhodou je nutnost použití dalšího servomotoru pro řízení.



Obrázek 3. Trojkolový podvozek s říditelným kolem.[7]

Další možností je použití dvojkolového podvozku s gyroskopickou stabilizací.[8] „Tento typ podvozku má dobré manévrovací schopnosti, může se například otočit na místě.“[6] Nevýhodou dvojkolového podvozku je že se neudrží ve vzpřímené poloze po vypnutí napájení.

Řídící algoritmy robota jsou u každého typu podvozku bohužel odlišné. Proto se podle vybraného typu musí patřičně přizpůsobit návrh celého systému, ovládací elektronika, firmware řízení motoru a nižší vrstva software. Webové rozhraní robota může být navrženo jako univerzální pro více typů podvozků.



Obrázek 4. Příklad návrhu řídicího systému robota.[3]

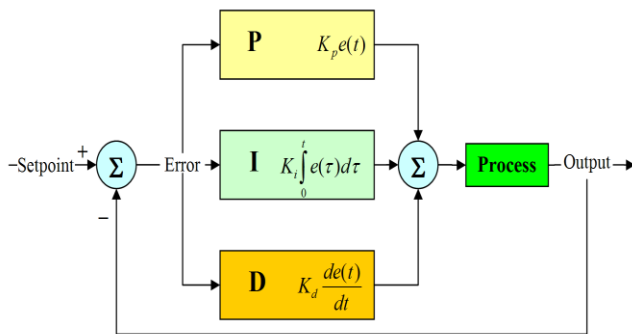
Na obrázku 4 je příklad návrhu řídicího systému robota z článku [3]. Jako hlavní řídicí počítač robota je použito Raspberry Pi s připojenou USB kamerou, nižší vrstvu tvoří mikrokontroler Arduino Mega, který má za úkol řízení motorů podvozku robotické paže a dalších periférií.

### III. NEW SOLUTION / NOVÉ ŘEŠENÍ

Pro řešení problému s ovladatelností prototypu, byla zvolena kombinace původního podvozku s volně otočným kolem a gyroskopické stabilizace směru pohybu. Je to výhodný kompromis, protože není nutno upravovat stávající mechaniku robota a přidávat drahý servomotor pro řízení.

Princip činnosti stabilizace: Mikrokontroler bude vyhodnocovat údaje z gyroskopu a při odchylce od zadaného směru pohybu provede korekci rychlosti otáčení předních kol tak aby se robot pohyboval zadaným směrem.

Tato korekce musí probíhat v reálném čase s nízkou latencí za použití PID regulátoru, jinak by mohlo docházet k rozkmitání pohybu robota v důsledku dopravníkového zpoždění.



Obrázek 5. Princip PID regulace.[9]

Na obrázku 5 je schéma spojitého PID regulátoru. Od požadované hodnoty se na vstupu regulátoru odečte chybová veličina, výsledkem je regulační odchylka.

**Regulační odchylka je vedena do tří regulátorů:**

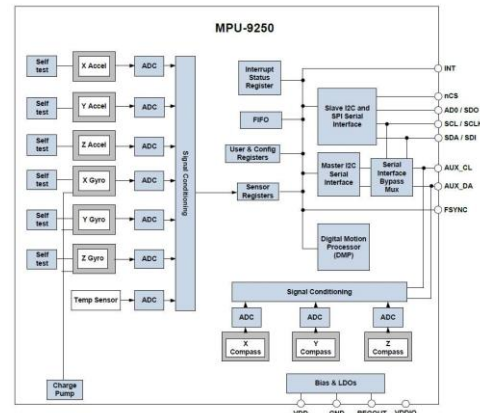
**Proporcionální regulátor** – Akční veličina je přímo úměrná regulační odchylce. Získá se pomocí násobení konstantou.

**Integrační regulátor** – Akční veličina je přímo úměrná integrálu regulační odchylky.

**Derivační regulátor** – je takový regulátor, kdy akční veličina je přímo úměrná derivaci regulační odchylky.

Na konec jsou výstupy regulátorů sečteny, výsledkem je akční veličina pro řízení daného procesu. U PID regulátoru je nutno správně nastavit velikost jednotlivých složek, tak aby regulace fungovala spolehlivě bez zákmitů.

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) gyroskop je elektronický senzor kde je na jednu křemíkovém čipu je integrován většinou 3D akcelometr, 3D gyroskop, 3D magnetometr a signálový procesor. Výsledkem jsou digitální hodnoty o, zrychlení, natočení, magnetickém poli, senzoru ve třech osách.



Obrázek 6. Devíti osý pohybový senzor MPU-9250.[10]

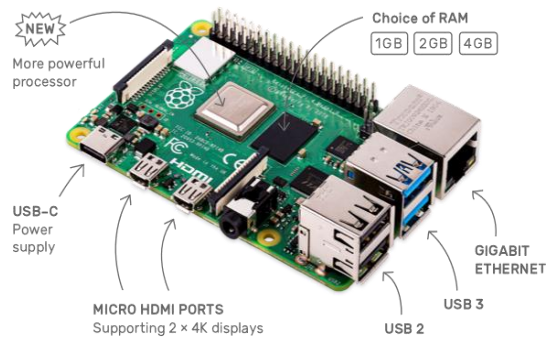
Na obrázku 6 je blokové schéma pohybového senzoru MPU-9250.[10] Tato miniaturní elektronická součástka je vyráběna v pouzdru QFN o rozměrech 3 x 3 x 1 mm.

Jako řídicí mikrokontroler bylo vybráno Arduino. Tato původně jednoduchá Open-source výuková platforma malého jednodeskového počítače se velmi rychle rozšířila. Arduino dnes existuje v mnoha typech, liší se použitým mikrokontrolérem na základní desce, původní Arduino využívaly 8bitové mikrokontrolery AVR od firmy Atmel, dnes se stále častěji používají 32bitové typy s ARM jádrem. Díky široké komunitě vývojářů, jsou k dispozici knihovny pro běžně používané součástky. Proto se Arduino výborně hodí pro rychlé sestavení a otestování prototypu zařízení. Arduino používá jazyk Wiring což je knihovna pro jazyk C++, která zjednodušuje programování, ale má nevýhodu v neefektivním využití prostředků mikrokontroleru. V licenčních podmínkách je zakázáno použití Arduino pro kritické aplikace kde by mohlo dojít vlivem chybné funkce k ohrožení zdraví nebo majetku.



Obrázek 7. Teensy 4.0 vývojová deska kompatibilní s Arduino.[11]

Na obrázku 7 je příklad alternativní vývojové DPS pro platformu Arduino. Teensy 4.0 používá výkoný 32bitový mikrokontroler ARM s jádrem Cortex M7 s taktem 600 MHz. Pro vývoj aplikací se stále může použít Arduino IDE.

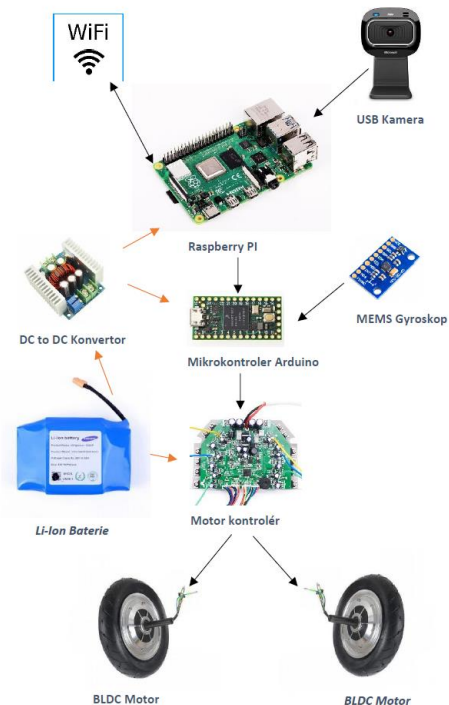


Obrázek 8. Raspberry Pi 4 model B.[12]

První model Raspberry Pi pochází z roku 2012 byl vytvořen britskou nadací Raspberry Pi Foundation s cílem podpořit výuku informatiky ve školách. Od té doby se značně rozšířil a vybudoval si silnou komunitu vývojářů.

Na obrázku 8 je poslední model z roku 2019 Raspberry Pi 4 model B. Jeho základem je 64bitový čtyřjádrový procesor Cortex-A72, s taktem 1.5GHz, který je doplněn až o 4 GB paměti RAM, a další potřebné periferie. Jako operační systém se nejčastěji používá Raspbian, který je založen na Linuxovém jádru Debian. Systém se zavádí po zapnutí napájení z SD karty.

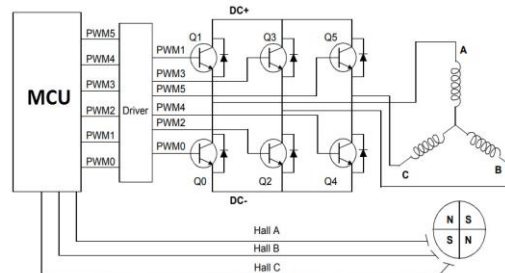
#### IV. IPLEMENTATION / IMPLEMENTACE ŘEŠENÍ



Obrázek 9. Návrh řídicího systému robota.

Řídicí systém robota z obrázku 9 je navržen jako více vrstvý. Raspberry Pi se standartní distribucí Linuxu se příliš nehodí pro reálné časové řízení, přístup periferiím je řešen jako systémové volání jádra s velkou režii. Proto se Raspberry Pi stará o vysokoúrovňové řízení. Běží na něm webový server, na kterém je spuštěna aplikace pro ovládání robota, dále stará streamování obrazu a zvuku. Přijaté zprávy pro řízení podvozku jsou posílány přes sériové asynchronní rozhraní RS232 do nižší vrstvy Arduino.

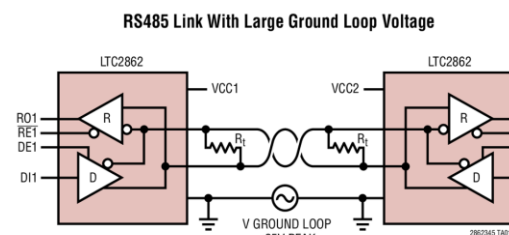
Arduino vytváří prostřední vrstvu řízení. Má možnost přímého přístupu k periferiím a přerušovacímu systému mikrokontroleru, díky tomu je možné vytvořit řízení s nízkou latencí. Přijatá zpráva se dekoduje. Z hodnot požadované rychlosti otáčení pravého a levého kola je vypočten vektor pohybu, který je porovnán v PID regulátoru s naměřenými daty z gyroskopu. Výstup regulace je odeslán přes sériový asynchronní port do nejnižší vrstvy řízení do kontroléru motoru, který ovládá dva BLDC motory.



Obrázek 10. Princip BLDC motor kontroléru.[13]

Robot je napájen z Li-on akumulátoru o napětí 36 V s vestavěnou napěťovou a proudovou ochranou. Z akumulátoru je přímo napájen kontrolér motoru a DC to DC konvertor, který snižuje napětí na 5 V pro napájení Raspberry PI a Arduino.

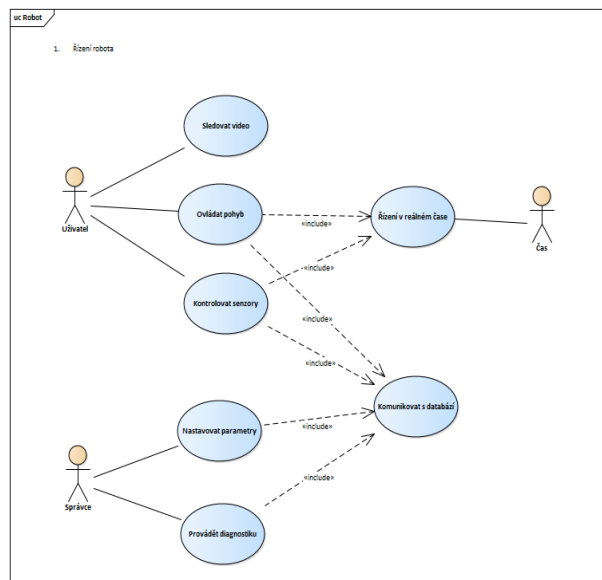
Vzhledem k výkonu motorů 2x350 W a použití šířkové modulace pro buzení vinutí motoru, vzniká na dlouhých vodičích vedoucím od baterie úbytek napětí, který má stejnosměrnou a střídavou složku. Toto rušivé napětí by mohlo způsobit poruchy komunikace mezi vzdálenými částmi robota. Problém zemních smyček. Proto je vhodné komunikaci vest přes galvanické oddělení s optočleny kdy se vzájemně oddělí výkonová a digitální zem. Další možnost je použít diferenčního způsob komunikace, kdy se rušivé napětí vzájemně vyruší. Například sběrnice RS485, RS422 nebo CAN.



Obrázek 11. Princip RS485 komunikace.[14]



## Softwarová část projektu.



Obrázek 12. Use case diagram.

Vnější pohled na systém řízení robota je na obrázku 12.

### Má tři aktéry:

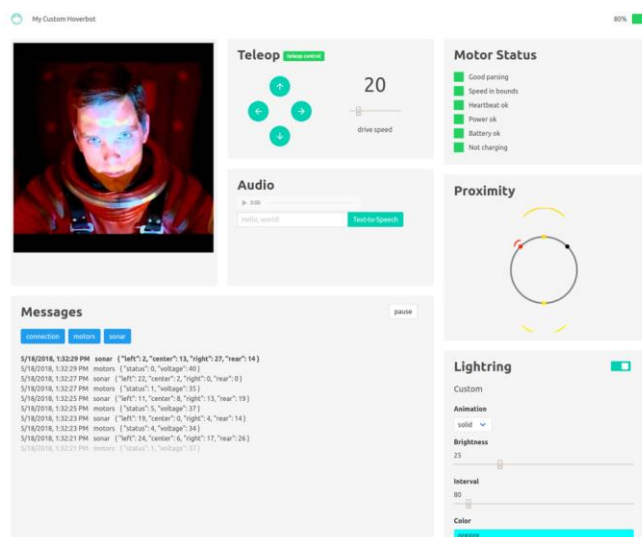
- 1) Uživatel – Ovládá pohyb robota, sleduje video, kontroluje senzory robota.
- 2) Správce – Nastavuje parametry robota, provádí jeho diagnostiku.
- 3) Čas – Provádí řízení v reálném čase.

Aktéři 1 a 2 ovládají robota z webového rozhraní prostřednictvím internetového prohlížeče. Vlastní aplikace běží na webovém serveru, který je spuštěn na Raspberry Pi, které tvoří nejvyšší vrstvu řízení. Dále je přenášen obraz a zvuk z USB kamery. Příkazy pro ovládání pohybu robota jsou předávány Arduino, které zajišťuje řízení v reálném čase aktér 3.

### Softwarové komponenty robota:

- 1) Webová aplikace pro ovládání robota.
- 2) Firmware Arduino pro řízení v reálném čase.
- 3) Firmware kontroléru BLDC motorů.

Pro první otestování podvozku robota byl použit už existující projekt: „Hoverbot a low cost, modular, hoverboard-based, open source robot“ [15]. Který byl doplněn mezivrstvou s Arduinem a MEMS gyroskopem. Pro Arduino byl napsán firmware pro zlepšení ovladatelnosti podvozku robota.



Obrázek 13. Webové rozhraní projektu: „Hoverbot a low cost, modular, hoverboard-based, open source robot“ [15]

Projekt Hoverbot je založen na komponentech hoverboardu a je doplněn o Raspberry Pi a automobilové parkovací senzory. Webová aplikace projektu je napsána v Node.js. Dále projekt využívá správce balíčků npm [16]. Pro motor kontrolér byl napsán nový firmware vycházející z projektu Hoverboard-Board-Hack. [17]

## V. TESTING OF DEVELOPED APPLICATION / TESTOVÁNÍ VYVINUTÉ APLIKACE – ŘEŠENÍ

Hlavním problémem prototypu podvozku robota byl problém se špatnou ovladatelností. Docházelo ke samovolným změnám směru pohybu podvozku z důvodu chybného úhlu volně otočného kola vůči směru jízdy.

### Způsob testování ovladatelnosti robota:

Při obrácení směru odtáčení obou pohonných kol musí robot začít couvat, změna směru pohybu o 180 stupňů.

Robot s vypnutou gyroskopickou stabilizací se vychyloval z požadovaného směru až o +/- 45 stupňů. Po zapnutí gyroskopické stabilizace byla maximální odchylka od požadovaného směru cca +/- 10 stupňů.

Po doplnění řídicí mezivrstvy gyroskopické stabilizace směru pohybu s Arduinem se ovladatelnost robota zlepšila. Tento algoritmus je potřeba vylepšit, dále je vhodné doplnit Self-Balancing funkce jako ochranu proti překlacení robota. Podvozek robota by měl být po té schopen jízdy jen po dvou předních kolech tak jako SEGWAY. Použitá zkušební webová aplikace poskytuje jen základní ovládání robota, neobsahuje zabezpečení přístupu heslem.

Přenos videa je v nízké kvalitě. Proto se bude muset vyvinout nová dokonalejší aplikace.

Dále byl otestována latence Wi-Fi komunikace mezi routerem a Raspberry Pi robota, do 20 metru byla latence komunikace cca 10mS. Při větší vzdálenosti od routeru docházelo ke ztrátám paketů, vlivem nízké úrovně signálu Wi-Fi připojení. Raspberry PI má jen velmi malou anténu integrovanou přímo na DPS. Pro komunikaci na větší vzdálenost bude nutno připojit externí anténu s větším ziskem, nebo použít směrovou anténu s rotátorem pro aromatické směrováním na základnovou stanici. Rotace antény by mohla být odvozena z pohybu robota měřeného pomocí použitého gyroskopu.

Je potřeba se zaměřit i na bezpečnost robota. Podvozek musí být doplněn o stop tlačítko, jehož aktivace způsobí bezpečné zastavení. Dále budou doplněny laserové nebo ultrazvukové senzory pro měření vzdálenosti od překážky a doplněna funkce pro automatické zastavení před překážkou. Firmware kontroléru motorů je potřeba doplnit o funkci brzdy a časovač zastavení jako ochranu proti výpadku komunikace. Komunikační protokol je vhodné zabezpečit pomocí kontrolního součtu a šifrování.

## VI. CONCLUSIONS / ZÁVĚRY

Vývoj avatara pro soutěž Ana Avatar XPRIZE je velmi složitý úkol vyžadující interdisciplinární a týmový přístup. Nestačí kombinovat už existující technologie, projekty, je nutno vyvinout vlastní řešení které splní náročné požadavky.

Malou součástí systémů avatara je tento prototyp podvozku, který se podařilo vyvinout. Problém se špatnou ovladatelností robota se lze částečně eliminovat přidáním řídicí mezivrstvy s Arduinem a MEMS gyroskopem. Firmware řízení bude dále postupně vylepšován o další funkce. Je důležité se zaměřit na bezpečnost a spolehlivost podvozku.

Dále se podařilo otestovat nasazení jednoduché webové aplikace z existujícího projektu na jehož základě bude vyvinuta dokonalejší aplikace pro řízení robota tak aby se podařilo splnit všechny požadavky.

## References / Reference

GitHub: [https://github.com/Fimbot/Web\\_control\\_robot](https://github.com/Fimbot/Web_control_robot)

- [1] „ANA Avatar XPRIZE )", *XPRIZE*. [Online]. Dostupné z: <https://avatar.xprize.org/prizes/avatar>. [Viděno: 13-led-2020].
- [2] „Prize Teams". [Online]. Dostupné z: <https://www.xprize.org/prizes/avatar/articles/aaxp-team-recognition>. [Viděno: 13-led-2020].
- [3] N. K. A. Al-Sahib a M. Z. Azeez, „Build and Interface Internet Mobile Robot using Raspberry Pi and Arduino", 2015.
- [4] M. T. Saravanakumar, D. Keerthana, D. Santhiya, J. Sneka, a D. Sowmiya, „Surveillance Robot Using Raspberry Pi-IoT", *Int. J. Electron.*, roč. 7, č. 3, s. 4, 2018.
- [5] M. Lokanath a G. Sai, „Live video monitoring robot controlled by web over internet", *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, roč. 263, s. 052027, lis. 2017, doi: 10.1088/1757-899X/263/5/052027.
- [6] M. Kubíček, „Všesměrové roboty – návrh konstrukce", *Omnidirectional robot – construction design*, čer. 2012.
- [7] „Odometrie (Robotika.cz > Guide)". [Online]. Dostupné z: <https://robotika.cz/guide/odometry/en>. [Viděno: 09-led-2020].
- [8] D. Kamen *et al.*, „Control of a personal transporter based on user position", US8830048B2, 09-zář-2014.
- [9] „PID regulátor", *Wikipedie*. 17-dub-2019.
- [10] „MPU-9250 | TDK". [Online]. Dostupné z: <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/9-axis/mpu-9250/>. [Viděno: 12-led-2020].
- [11] „PJRC Store". [Online]. Dostupné z: <https://www.pjrc.com/store/teensy40.html>. [Viděno: 12-led-2020].
- [12] „Buy a Raspberry Pi 4 Model B – Raspberry Pi". [Online]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org>. [Viděno: 12-led-2020].
- [13] „Basics of Brushless DC Motors (BLDC Motors) | Construction, Working", *Electronics Hub*, 27-zář-2019. [Online]. Dostupné z: <https://www.electronicshub.org/brushless-dc-motor-blcdc-motor/>. [Viděno: 13-led-2020].
- [14] „LTC2862 Datasheet and Product Info | Analog Devices". [Online]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/products/ltc2862.html#product-overview>. [Viděno: 13-led-2020].
- [15] „Hoverbot". [Online]. Dostupné z: <https://hackaday.io/project/158256-hoverbot>. [Viděno: 13-led-2020].
- [16] „npm | stavět úžasné věci". [Online]. Dostupné z: <https://www.npmjs.com/>. [Viděno: 13-led-2020].
- [17] NiklasFauth, *NiklasFauth/Hoverboard-Board-Hack*. 2018.