

PATALPŲ DEZINFEKCIJAI SKIRTO AUTONOMINIO ROBOTO PROTOTIPAVIMAS TAIKANT SKAITMENINIO DVYNIŲ TECHNOLOGIJĄ

**Nerijus Pocevičius,
Saulė Janavičiūtė,
Andrius Stulgys,
Dominykas Razmadze,
Austėja Jonė Navickaitė,
Saulius Tamošauskas,
dr. Mindaugas Kurmis,**

Klaipėdos universitetas, Klaipėda, Lietuva

Anotacija

Šiame darbe pristatomas mobilaus patalpų dezinfekcijos roboto skaitmeninis dvynys. Jį sudaro Parallax Eddie platformos modelis ir specializuota UV-C eksimerinė lempa, skleidžianti 222 nm bangos ilgio tolimąją ultravioletinę spinduliuotę. Ši technologija pasirinkta dėl jos gebėjimo efektyviai naikinti įvairius mikroorganizmus. Tolimoji UV-C spinduliuotė (222 nm) yra ypač veiksminga neutralizuojant patogeninius mikroorganizmus, įskaitant virusus, tokius kaip SARS-CoV-2 (COVID-19 sukėlėjas), bakterijas ir grybelius, pažeisdama jų genetinę medžiagą (DNR/RNR) ir taip užkirsdama kelią jų dauginimuisi bei infekcijos plitimui. Roboto variklių valdymui uždarėjo ciklo režimu naudojamas Arduino Mega 2560 R3 mikrovaldiklis. Jis veikia remdamasis enkoderių grįžtamuoju ryšiu ir taiko PID greičio reguliavimą. Aukštesnio lygio procesus ROS2 aplinkoje valdo Raspberry Pi 5 mikrokompiuteris. Skaitmeninis dvynys yra realizuotas pasitelkiant detalų URDF (Universal Robot Description Format) modelį ir ros2_control sistemą (angl. framework). Sukurtos specialios ros2_control sąsajos leidžia naudoti identiškus valdymo algoritmus tiek realiai techninei įrangai, tiek jos simuliuojamam atitikmeniui Gazebo aplinkoje. Būtent tai ir įgyvendina skaitmeninio dvynio koncepciją. Galiausiai, skaitmeninio dvynio judėjimo bei odometrijos tikslumas buvo įvertintas atliekant eksperimentinius bandymus simuliacinėje erdvėje.

Raktiniai žodžiai: skaitmeninis dvynys, mobilus robotas, ROS2, tolimoji UV-C, dezinfekcija.

Įvadas

Temos aktualumas. Nepaisant to, kad COVID-19 pandemijos situacija stabilizavosi, Pasaulio sveikatos organizacijos (PSO) duomenys rodo nuolatinę SARS-CoV-2 viruso cirkuliaciją. Pavyzdžiui, naujausioje 2025 m. kovo mėn. ataskaitoje per vieno mėnesio laikotarpį (2025 m. sausio 6 d. – vasario 2 d.) visame pasaulyje buvo pranešta apie daugiau nei 147,000 naujų atvejų ir 4,500 mirčių (World Health Organization, 2025). SARS-CoV-2 viruso perdavimas gali įvykti tiesiogiai kontaktuojant su užsikrėtusiais žmonėmis arba netiesiogiai – per paviršius aplinkoje arba per daiktus, naudotus užsikrėtusio asmens (Jabłońska-Trypuć et al., 2022). Dažniausiai naudojamos priemonės infekcijų plitimui valdyti (pvz. alkoholio ar chloro pagrindu) gali neigiamai paveikti žmonių sveikatą (Hashemi et al., 2023). Mažiau išsivysčiusiose šalyse rankinė dezinfekcija dažnai yra nepatikima dėl didelio darbo krūvio, nepakankamo apmokymo ir personalo trūkumo (Patrick et al., 2024). UV-C šviesa yra veiksminga alternatyva rankiniam dezinfekavimui, gebanti sunaikinti daugiau nei 99,9 % paviršiuose esančių virusų ir taip ženkliai mažinti infekcijų riziką (Gruode et al., 2023,

Kitagawa et al., 2021). Dėl deterministinio veikimo pobūdžio UV-C sistemos gali būti automatizuotos (Demeersseman et al., 2023), užtikrinant sistemingą ir nuoseklų paviršių dezinfekavimą. Tačiau tradicinė UV-C šviesa (dažniausiai apie 254 nm) yra kenksminga gyviesiems audiniams – ji gali pažeisti odą ir akis, todėl saugumo sumetimais turi būti naudojama tik nesant žmonių (Tavares et al., 2023). Vienas iš naujausių ir perspektyviausių sprendimų yra tolimoji UV-C šviesos technologija (215–235 nm). Skirtingai nuo tradicinės UV-C šviesos, tolimoji UV-C šviesa pasižymi gebėjimu efektyviai dezinfekuoti paviršius minimaliai veikiant aplinkinių žmonių odos (Panzures, 2023) ir akių audinius (Buonanno et al., 2025). Tai atveria galimybę saugiai atlikti dezinfekciją uždarose, žmonių lankomose erdvėse. Vienas pagrindinių skaitmeninio dvynio technologijos taikymo robotikoje privalumų yra galimybė atlikti išsamų robotų valdymo algoritmų ir veikimo charakteristikų testavimą bei validavimą prieš juos diegiant realiai. Skaitmeniniai dvyniai yra labai svarbūs modeliuojant robotų veikseną. Pavyzdžiui, testuoti sudėtingas eismo sąlygas autonominiams transporto priemonėms, kaip pabrėžiama (Szalay et al., 2020) straipsnyje, kur akcentuojamas poreikis validuoti įvairius eismo scenarijus kuriant efektyvias 5G ryšiu pagrįstas autonominio vairavimo sistemas. Kuriant autonominę dezinfekavimo robotą su UV-C lempa, skaitmeninis dvynys leidžia saugiai simuliuoti ir kruopščiai testuoti lempos įjungimo bei išjungimo logiką. Tikrinama, ar lempa aktyvuojama tik nustatytose saugiose zonose, ar laikomasi reikiamo dezinfekcijos laiko ir ar sistema tinkamai reaguoja į nenumatytus įvykius, pvz., netikėtai zonoje pasirodžiusį žmogų. Toks virtualus validavimas yra labai svarbus prieš pradedant realius bandymus su potencialiai pavojinga įranga, nes užtikrina efektyvumą ir saugumą.

Tyrimo problema – Kaip sukurti ir pritaikyti skaitmeninio dvynio technologiją autonominio patalpų dezinfekcijos roboto prototipui, kad būtų galima efektyviai simuliuoti, testuoti ir optimizuoti jo veikimą bei valdymo algoritmus (įskaitant UV-C lempos saugų valdymą) virtualioje aplinkoje, prieš diegiant juos fiziniame robote, taip užtikrinant kūrimo proceso efektyvumą, saugumą ir sistemos patikimumą?

Tyrimo objektas – patalpų dezinfekcijai skirtą autonominio roboto prototipavimas naudojant skaitmeninio dvynio technologiją, apimantis paties skaitmeninio dvynio sukūrimą, jo integravimą su valdymo sistemomis (ROS2, Arduino) ir jo judėjimo bei odometrijos tikslumo vertinimą simuliacinėje aplinkoje (Gazebo).

Tyrimo tikslas. Sukurti autonominio mobiliojo roboto, skirtą patalpų dezinfekcijai, prototipą ir jo skaitmeninį dvynį; eksperimentiškai įvertinti skaitmeninio dvynio veikimą.

Tyrimo uždaviniai.

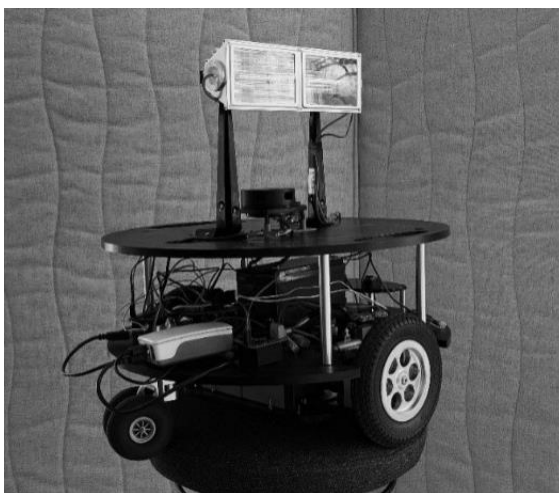
1. Suprojektuoti ir sukurti patalpų dezinfekavimo robotą ir jo skaitmeninį dvynį.
2. Sukurti fizinio roboto valdymą.
3. Sukurti realaus roboto ir jo skaitmeninio dvynio valdymo sąsają.
4. Įvertinti robotą simuliuotoje aplinkoje.

Tyrimo metodai. Mokslinės literatūros ir programinės įrangos analizė, sistemos reikalavimų formulavimas, techninės ir programinės įrangos parinkimas, sistemos projektavimas, prototipo konstravimas (įgyvendinimas), eksperimentinis testavimas ir efektyvumo vertinimas.

1. Tyrimo metodologija

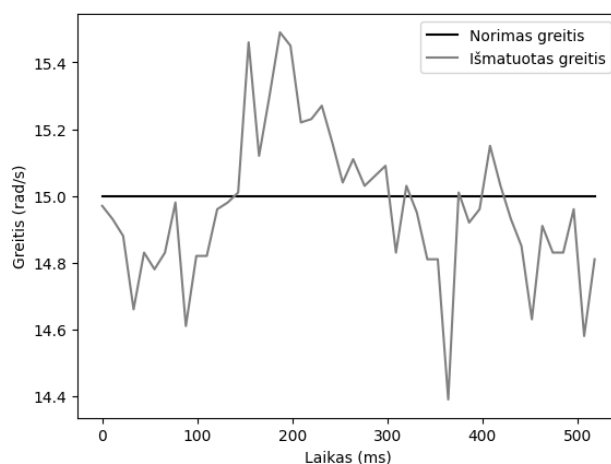
1.1. Roboto konstrukcija

Mobilaus roboto pagrindui parinkta „Parallax Eddie Robot“ platforma. Dezinfekcijai naudojama kriptono-chlorido eksimerinė lempa, skleidžianti 222 nm filtruotą bangos ilgio šviesą. Lempa yra pritvirtinta ant specialių laikiklių, sumontuotų ant viršutinio roboto platformos sluoksnio.



1 pav. Sukonstruotas dezinfekavimo robotas
Šaltinis: nuotrauka autoriaus

Įrangos valdymas yra paskirstytas į du lygius: už techninės įrangos valdymą atsakingas „Arduino Mega 2560 R3“ mikrovaldiklis. Jis tiesiogiai valdo elektrinius variklius, nuskaityto pozicijos ir greičio duomenis iš enkoderių ir kontroliuoja UV-C lempos būseną. Taip pat mikrovaldiklyje realizuoti programiniai PID valdikliai, kurie užtikrina, kad motorų greitis būtų dinamiškai palaikomas pagal nustatytą greitį, nepaisant išorinių veiksnių.

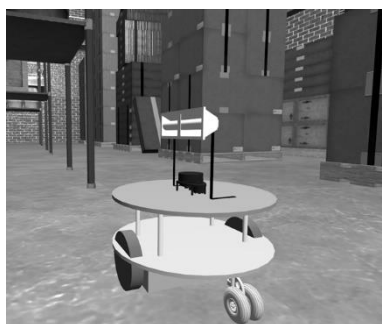


1 grafikas. Norimo kampinio greičio (15 rad/s) ir PID valdiklio implementuojamo realaus kampinio greičio palyginimas laikui (ms) einant.
Šaltinis: Autoriaus sudarytas grafikas

Ryšys su aukštesnio lygio valdikliu palaikomas per UART sąsają, leidžiančią siųsti komandas ir gauti techninės įrangos būsenos informaciją.

1.2. Roboto struktūros aprašymas naudojant URDF

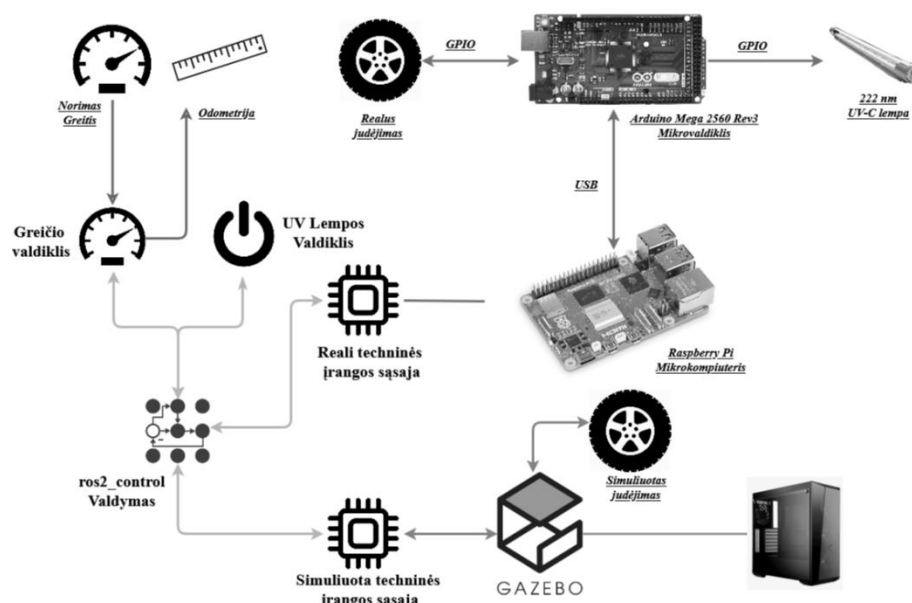
Kuriant mobilų robotą ROS 2 aplinkoje, buvo naudojamas URDF naudojamas ROS 2 platformoje ir leidžiantis standartizuotai apibrėžti roboto fizinę ir kinematinę struktūrą. URDF failuose apibrėžtos roboto dalys, jų tarpusavio jungtys, geometrinės formos (vizualiosios ir kolizijų), masės savybės, transformacijos tarp koordinačių sistemų bei roboto kinematikos. ROS2 platformoje svarbi TF2 biblioteka, kuri valdo koordinačių sistemų transformacijas laike. Nors URDF apibrėžia statinius ryšius tarp gretimų roboto dalių, TF2 sistema leidžia sekti ir skaičiuoti dinaminę padėtį ir orientaciją tarp bet kurių dviejų koordinačių sistemų visoje sistemoje (Foote (2013)). Įvairių roboto duomenų, roboto struktūros ir transformacijų atvaizdavimui naudojamas RViz2 įrankis. RViz2 yra galingas 3D vizualizavimo įrankis, skirtas būtent ROS2 sistemoms. Roboto simuliacijai yra naudojamas Gazebo simulatorius (Koenig & Howard (2004)).



2 pav. Robotas simuliuojamas Gazebo simulatoriuje sandėlio pasaulyje

Šaltinis: autoriaus sukurta iliustracija

1.3. Techninės įrangos integravimas į ROS sistemą ir jos valdymas



3 pav. Techninės įrangos integravimo į ROS sistemą naudojant ros2_control schema
Šaltinis: autoriaus sukurta iliustracija

Standartizuoti ir supaprastinti roboto aparatinės įrangos valdymą ROS 2 aplinkoje, buvo pasitelkta ros2_control sistema (Chitta et al. (2017)). Pagrindinis ros2_control tikslas yra suteikti standartizuotą būdą nuskaityti jutiklių duomenis ir siųsti valdymo komandas, nepriklausomai nuo aparatinės įrangos specifikos.

Šiame projekte realios techninės įrangos valdymui buvo sukurta specifinė ros2_control aparatinės įrangos sąsaja. Ji per UART protokolą bendrauja su Arduino Mega mikrovaldikliu: skaito ratų enkoderių duomenis bei UV lempos būseną ir siunčia komandas, kuriomis nustatomas norimas ratų greitis, arba UV lempos įjungimo bei išjungimo komandas. Gazebo simuliacijoje techninė įranga valdoma naudojant standartinę gz_ros2_control papildinį ratų ir variklių fizikai imituoti. Tiek su realia, tiek su simuliuota aparatinės įrangos sąsaja per ros2_control sistemą buvo naudojami tie patys aukšto lygio valdikliai.

1.4. Fizinės aparatinės įrangos sąsajos kūrimas

Šiame darbe buvo sukurta ros2_control architektūros techninės įrangos sąsaja skirta integruoti robotą su judėjimo ir lempos būsenomis bei jų valdymu. Techninės įrangos sąsaja apima du pagrindinius komunikacijos srautus tarp Arduino ir Raspberry Pi įrenginių: būsenos sąsaja (Arduino → Raspberry Pi) ir valdymo sąsaja (Raspberry Pi → Arduino). Šis sprendimas leidžia sinchronizuoti realaus laiko duomenų srautą tarp jutiklių ir valdiklio, išlaikant ROS2 ekosistemai būdingą lankstumą. Individualizuotas ros2_control modulis pritaikytas konkretiems roboto komponentams, užtikrinant efektyvų tiek judėjimo, tiek papildomų periferinių įrenginių valdymą vieningoje platformoje.

1.5. Simuliuotos roboto aparatinės įrangos sąsajos kūrimas

Variklių ir enkoderių elgsenai Gazebo simulatoriuje imituoti naudojamas `gz_ros2_control` komponentas. Jis `ros2_control` suteikia prieigą prie greičio komandų sąsajų, leidžia, bei būsenos sąsajų. Veikdamas kaip tiltas, `gz_ros2_control` perduoda šias greičio komandas Gazebo fizikos varikliui, kuris, atsižvelgdamas į roboto modelio masę, inerciją, trintį ir kitus dinامينius parametrus, apskaičiuoja realistišką variklių reakciją bei atnaujintą jungčių būseną. UV lempos valdymui simuliacinėje aplinkoje buvo sukurta speciali imitacinė techninės įrangos sąsaja. Jos tikslas yra aukšto lygio algoritmams suteikti galimybę sąveikauti su tariama UV lempa ir gauti būsenos atsaką nesant fizinės lempos veikimo simuliacijos. Tai leidžia UV lempos valdymo logiką testuoti bei integruoti į sudėtingesnes simuliacijos sekas (pvz., dezinfekcijos scenarijus).

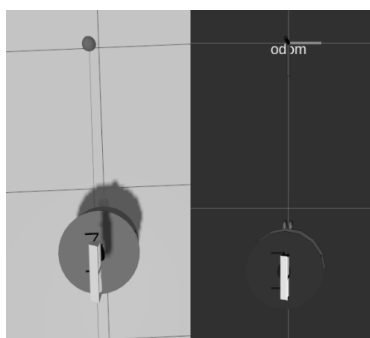
1.6. Naudojami valdikliai

Pagrindinis roboto judėjimo valdiklis yra standartinis `DiffDriveController`. Šis `ros2_control` suteiktas valdiklis priima norimus linijinius (m/s) ir kampinius greičius (rad/s), ir apskaičiuoja reikiamus greičius (rad/s) kiekvienam varikliui ir perduoda juos per aparatinės įrangos sąsają, kuri atsakinga už faktinį signalų siuntimą varikliams. Greičio valdiklis nuolat skaito faktinę ratų padėtį ir greitį iš būsenos sąsajų. Remdamasis šiais duomenimis ir roboto kinematika apibūdinta valdiklio konfigūracijoje, jis taip pat apskaičiuoja roboto odometrinis duomenis – poziciją (x, y) ir orientaciją (θ) nuo pradinio roboto taško. Tiksliam važiavimui bei odometrijos duomenų skaičiavimui reikia konfigūracijoje nurodyti teisingus (realius) parametrus, tokius kaip ratų skersmuo ir atstumas tarp ratų. UV lempos valdymą užtikrina sukurtas `ros2_control` valdiklis. Jis veikia kaip tarpininkas: priima logines įjungimo/išjungimo komandas ir siunčia jas į aparatinės įrangos sąsają. Lygiagrečiai jis stebi aparatinės sąsajos pateikiamą būseną (ar lempa buvo tikrai įjungta) ir šią informaciją perduoda atgal į ROS sistemą.

2. TYRIMO REZULTATAI IR DUOMENŲ ANALIZĖ

2.1. Sistemos pirminis įvertinimas

Pirmiausia, siekiant įsitikinti pagrindiniu sistemos veikimu bei suderinamumu tarp simuliacijos ir vizualizacijos, buvo atliktas preliminarus rankinio valdymo eksperimentas. Naudojant standartinį `teleop_twist_keyboard` ROS2 mazgą, simuliuojamam robotui Gazebo aplinkoje buvo duota komanda judėti tiesia linija pirmyn. Rezultatai buvo stebimi lygiagrečiai Gazebo simulatoriuje ir RViz2 vizualizavimo įrankyje. 9 paveikslėlyje pavaizduotas šio eksperimento rezultatas. Kairėje pusėje pateiktas Gazebo aplinkos vaizdas su roboto 3D modeliu po judėjimo komandos vykdymo, o dešinėje – RViz2 įrankio vaizdas žiūrint iš viršaus. Pastarajame matomas odometrijos koordinačių sistemos pradžios taškas ir roboto modelis, pasislinkęs tiesiai į priekį. Vizualiai palyginus abu vaizdus, matyti, kad roboto pozicija ir orientacija sutampa. Tiek Gazebo simulatoriuje, tiek RViz2 vizualizacijoje robotas pasislinkęs tiesia linija nuo pradinės pozicijos, tai patvirtina bazinį roboto valdymo bei odometrijos sistemos veikimą.



4 pav. Roboto simuliacijos (kairėje, Gazebo) ir būsenos vizualizacijos (dešinėje, RViz2) palyginimas judant tiesia linija.

Šaltinis: tyrimo metu matomas vaizdas

Po pradinio patikrinimo, norint kiekybiškai įvertinti roboto judėjimo tikslumą pagal odometrijos duomenis, buvo sukurtas specialus ROS 2 mazgas, leidžiantis robotui nustatyti konkretų greitį tiksliai apibrėžtam laiko tarpui.

2.2. Eksperimento planas

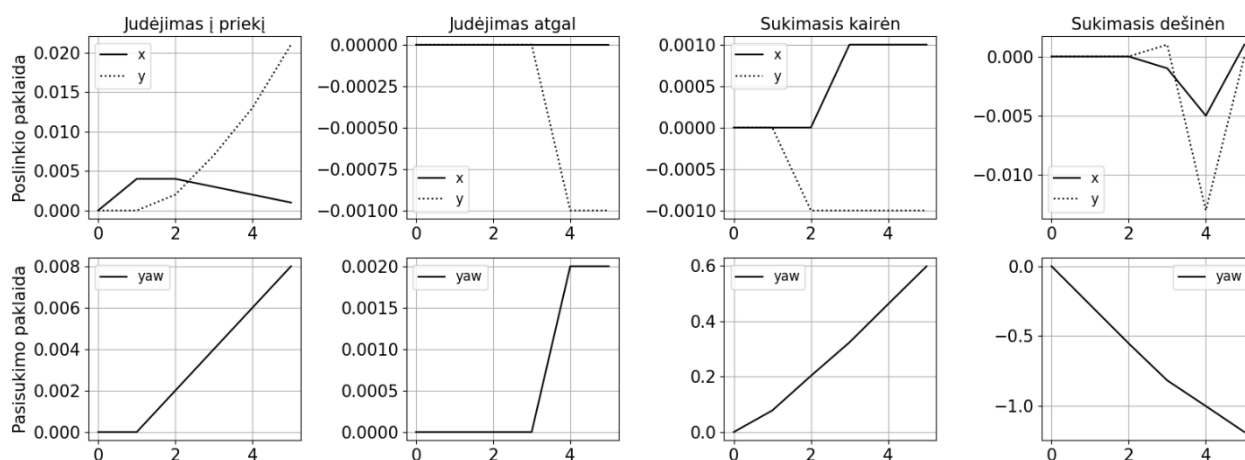
Scenarijus	Greitis ir laikas	Ideali padėtis (x,y,yaw)
Judėjimas į priekį (1m)	0,5 m/s, trukmė 2 s	(1,0; 0,0; 0,0)
Judėjimas atgal (0,5m)	-0,125 m/s, trukmė 4 s	(-0,5; 0,0; 0,0)
Sukimasis į kairę (90°)	1,570796 rad/s, trukmė 1 s	(0,0; 0,0; $\pi/2$)
Sukimasis į dešinę (180°)	-1,047198 rad/s, trukmė 3 s	(0,0; 0,0; π)

1 lentelė. Judėjimo scenarijai ir parametrai

Šaltinis: sudaryta autoriaus

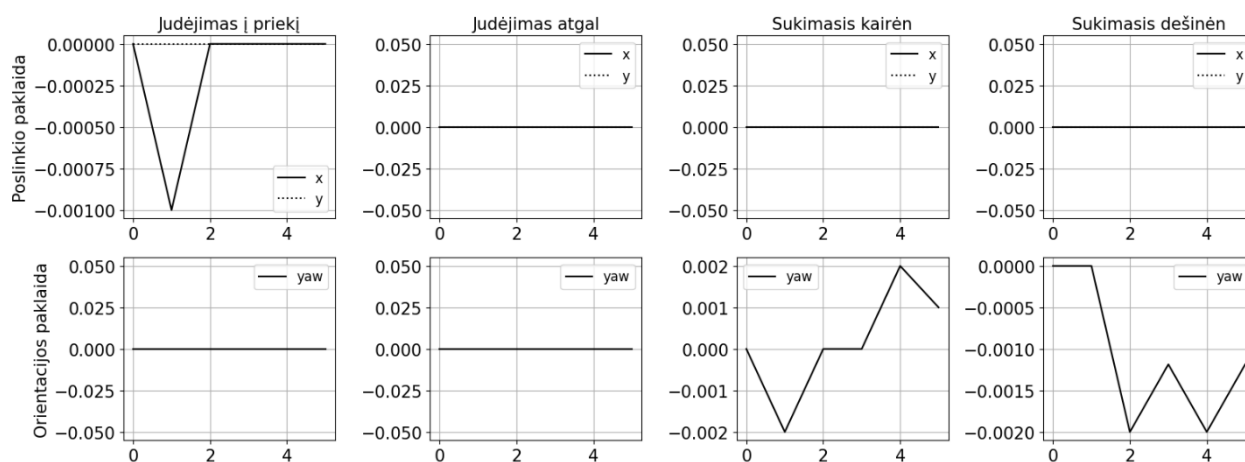
Eksperimentui enkoderiai ir roboto judėjimas simuliuojami. Šio eksperimento tikslas – įvertinti roboto judėjimo bei odometrijos tikslumą simuliuotoje aplinkoje, naudojant Gazebo simuliatorių. Buvo siekiama išmatuoti judėjimo tikslumą ir odometrijos tikslumą. Buvo suformuluoti keturi judėjimo scenarijai. Kiekvienam scenarijui buvo atlikti 5 bandymai. Jie buvo atliekami iš eilės, be roboto pozicijos ir greičio parametrų atstatymo tarp jų. Po kiekvieno bandymo buvo registruojami trijų tipų duomenys: ideali pozicija – apskaičiuota pagal užduotą greitį ir laiką, pozicija Gazebo aplinkoje – tikroji roboto padėtis simuliatoriuje, padėtis pagal odometriją – skaičiuojama TF2 pagalba. Eksperimentas vykdytas tuščioje Gazebo aplinkoje, kurioje paviršiui priskirti fizikiniai parametrai siekiant kuo idealiau imituoti idealias sąlygas. Naudotas ODE fizikos variklis, pagrindiniai parametrai: $\mu = 1,0$; $\mu_2 = 1,0$; $\text{slip1} = 0,0$; $\text{slip2} = 0,0$; $k_p = 1000000,0$; $k_d = 10,0$. Rezultatų tikslumui įtakos turi ir paties roboto parametrai: inercija, masė, geometrija, konstrukciniai ypatumai.

2.3. Rezultatai



2 grafikas. Judėjimo paklaida – matuojama pagal skirtumą tarp simulatoriuje užfiksuoto roboto lokacijos ir pasisukimo (angl. yaw) bei idealios roboto lokacijos ir pasisukimo

Šaltinis: Autoriaus sudarytas grafikas



3 grafikas. Odometrijos paklaida – matuojama pagal skirtumą tarp idealios apskaičiuotos roboto lokacijos ir pasisukimo (angl. yaw) bei odometrijos apskaičiuotos lokacijos ir pasisukimo

Šaltinis: Autoriaus sudarytas grafikas

2 lentelė. Judėjimo tikslumas (palyginimas tarp rezultatų Gazebo aplinkoje ir idealių apskaičiuotų rezultatų)

Scenarijus	x	y	yaw
Judėjimas į priekį	~5 mm paklaida, neauga ir nedidėja	min ~2 cm paklaida, nepastovi	Judant robotas sukasi
Judėjimas atgal	Nėra reikšmingos paklaidos	~1 mm paklaida	Judant robotas sukasi
Sukimasis į kairę	Robotas pajudėjo nuo pradinio taško ~1 mm	~1 mm paklaida	Didelė sukimosi paklaida
Sukimasis į dešinę	Robotas pajudėjo nuo pradinio taško ~5 mm	~1 mm paklaida	Didelė sukimosi paklaida

Šaltinis: sudaryta autoriaus

3 lentelė. Odometrijos tikslumas (palyginimas tarp idealių apskaičiuotų rezultatų ir apskaičiuotų pagal odometriją)

Scenarijus	x	y	yaw
Judėjimas į priekį	1 mm paklaida, nepastovi	Nėra reikšmingos paklaidos	Nėra reikšmingos paklaidos
Judėjimas atgal	Nėra reikšmingos paklaidos	Nėra reikšmingos paklaidos	Nėra reikšmingos paklaidos
Sukimasis į kairę	Nėra reikšmingos paklaidos	Nėra reikšmingos paklaidos	2 mm nepastovi paklaida
Sukimasis į dešinę	Nėra reikšmingos paklaidos	Nėra reikšmingos paklaidos	2 mm nepastovi paklaida

Šaltinis: sudaryta autoriaus

Išvados

1. Sėkmingai suprojektuotas ir virtualiai bei realiai sukonstruotas mobilus dezinfekavimo robotas, integruojant „Parallax Eddie Robot“ platformą ir 222 nm UV-C eksimerinę lempą, naudojant URDF ir Xacro ROS 2 įrankius.

2. Realizuota dviejų lygių valdymo architektūra, paskirstant žemo lygio užduotis (variklių valdymas su PID, enkoderių nuskaitymas, lempos būsenos kontrolė) Arduino Mega mikrovaldikliui, o aukšto lygio logiką ir algoritmus – Raspberry Pi 5 minikompiuteriui su ROS 2 sistema. Apibrėžtas aiškus UART komunikacijos protokolas tarp abiejų lygių.

3. Pritaikyta ros2_control sistema standartizuotam aparatinės įrangos integravimui ir valdymui, sukurtos specifinės sąsajos tiek realiai techninei įrangai (bendravimui su Arduino), tiek simuliuojamai įrangai Gazebo aplinkoje (gz_ros2_control ir imitacinė UV lempos sąsaja). Taip sukurta galimybė valdymo algoritmus perkelti tarp simuliacijos ir realios sistemos.

4. Įvykdžius eksperimentinius bandymus simuliuotoje aplinkoje su idealia trintimi, įvertintas roboto judėjimo ir odometrijos skaičiavimo tikslumas. Tiesiaiegiame judėjime

reikšmingų padėties paklaidų nėra, tačiau robotas sukasi ir per laiką gali susidaryti didelė orientacijos paklaida. Robotui sukantis pastebėta, kad robotas pajuda iš pradinės lokacijos ir kad yra didelė sukimosi paklaida. Odometrijos duomenys skiriasi nuo realių, tačiau beveik nesiskiria nuo idealių, o tai reiškia kad nesutapimai atsiranda dėl masės, inercijos ir geometrijos roboto simuliacijoje. Dėl šių paklaidų roboto judėjimo tikslumas gali būti nepatikimas ilgai veikiant, ypač jei judėjime yra posūkių. Kad sumažinti šias paklaidas galima integruoti papildomą lokalizaciją naudojant jutiklius kaip LiDAR ar IMU.

Literatūra

1. Buonanno, M., et al. (2025). Wavelength-dependent DNA damage induced by single wavelengths of UV-C radiation (215 to 255 nm) in a human cornea model. *Scientific Reports*, 15(1), 252. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84196-4>
2. Chitta, S., et al. (2017). ros_control: A generic and simple control framework for ROS. *Journal of Open Source Software*, 2(20), 456. <https://doi.org/10.21105/joss.00456>
3. Demeersseman, N., Saegeman, V., Cossey, V., Devriese, H., & Schuermans, A. (2023). Shedding a light on ultraviolet-C technologies in the hospital environment. *Journal of Hospital Infection*, 132, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2022.12.009>
4. Foote, T. (2013, April). Tf: The transform library. *IEEE Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/TePRA.2013.6556373>
5. Gruode, J., et al. (2023). RT-qPCR-based assessment of the efficacy of 222 nm UVC irradiation in reducing SARS-CoV-2 surface contamination. *Sensors*, 23(13), 6129. <https://doi.org/10.3390/s23136129>
6. Hashemi, F., et al. (2023). A comprehensive health effects assessment of the use of sanitizers and disinfectants during COVID-19 pandemic: A global survey. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(28), 72368–72388. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27197-6>
7. Jabłońska-Trypuć, A., et al. (2022). Inanimate surfaces as a source of hospital infections caused by fungi, bacteria and viruses with particular emphasis on SARS-CoV-2. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13), 8121. <https://doi.org/10.3390/ijerph19138121>
8. Kaigom, E., & Rosmann, J. (2021). Value-driven robotic digital twins in cyber–physical applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(5), 3609–3619. <https://doi.org/10.1109/tii.2020.3011062>
9. Kitagawa, H., Nomura, T., Nazmul, T., Omori, K., Shigemoto, N., Sakaguchi, T., & Ohge, H. (2021). Effectiveness of 222-nm ultraviolet light on disinfecting SARS-CoV-2 surface contamination. *American Journal of Infection Control*, 49(3), 299–301. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2020.08.022>
10. Koenig, N., & Howard, A. (2004). Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator. *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 3, 2149–2154. <https://doi.org/10.1109/IROS.2004.1389727>
11. Panzures, A. (2023). 222-nm UVC light as a skin-safe solution to antimicrobial resistance in acute hospital settings with a particular focus on methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* and surgical site infections: A review. *Journal of Applied Microbiology*, 134(3), lxad046. <https://doi.org/10.1093/jambio/lxad046>
12. Patrick, M., et al. (2024). Environmental cleaning barriers and mitigation measures identified through two initiatives in four countries, 2018–2023: A commentary. *Antimicrobial Resistance & Infection Control*, 13(1), 134. <https://doi.org/10.1186/s13756-024-01491-5>

13. Szalay, Z., Ficzer, D., Tihanyi, V., Magyar, F., Soós, G., & Varga, P. (2020). 5G-enabled autonomous driving demonstration with a V2X scenario-in-the-loop approach. *Sensors*, 20(24), 7344. <https://doi.org/10.3390/s20247344>
14. Tavares, R. S. N., et al. (2023). Different biological effects of exposure to far-UVC (222 nm) and near-UVC (254 nm) irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 243, 112713. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2023.112713>
15. World Health Organization. (2025). *COVID-19 epidemiological update – 14 March 2025*. <https://www.who.int/publications/m/item/covid-19-epidemiological-update-edition-177>

PROTOTYPING OF AN AUTONOMOUS ROBOT FOR ROOM DISINFECTION USING DIGITAL TWIN TECHNOLOGY

Nerijus Pocevičius, Saulė Janavičiūtė, Andrius Stulgys, Dominykas Razmadze, Austėja Jonė Navickaitė, Saulius Tamošauskas, dr. Mindaugas Kurmis

Summary

This paper presents the design and implementation of a digital twin of an autonomous mobile robot intended for UV-C surface disinfection. The prototype is based on the Parallax Eddie platform and equipped with a krypton-chloride (KrCl) excimer lamp emitting filtered UV-C radiation at 222 nm, offering a safer alternative to traditional UV-C solutions. The robot features a dual-level control architecture combining an Arduino Mega 2560 microcontroller for low-level hardware operations and a Raspberry Pi 5 computer running the ROS2 (Robot Operating System 2) framework for high-level system management and logic execution. The digital twin, realized through a detailed URDF/Xacro model and integrated with the `ros2_control` framework, allows for seamless interaction between the physical robot and its simulated counterpart in the Gazebo environment. This architecture enables the hardware abstraction layer to switch fluidly between real hardware (via UART communication with Arduino) and simulation (using `gz_ros2_control` and mock lamp interfaces), fulfilling the concept of a fully operational digital twin. One of the primary motivations for developing such a system is the critical need for safe and efficient disinfection solutions in environments such as hospitals, warehouses, and public facilities. The digital twin enables robust simulation and validation of the robot's control logic—particularly the activation and deactivation of the UV-C lamp—under safe, repeatable, and scalable virtual conditions. For instance, the system can test whether the UV-C lamp is correctly turned on only in predefined safe zones, whether the disinfection duration meets required parameters, and how the system reacts to the unexpected presence of humans. The study highlights the broader relevance of digital twins in robotics by referencing various industrial applications, including autonomous vehicle validation in complex traffic scenarios and human-robot collaborative production lines. These examples underscore the adaptability, safety, and iterative improvement enabled by digital twins, particularly when implemented in ROS2 environments. To construct the robot, a modular and scalable approach was used. The robot's physical model is defined using URDF, extended with Xacro macros to allow easier maintenance and component updates. Components such as the UV-C lamp mount, wheels, and sensors are described in separate files, which can be included or excluded depending on the use case. The ROS2 ecosystem, specifically its TF2 library and RViz2 visualization tool, is used to manage and monitor the coordinate frames and dynamic transformations of

the robot parts in real time. Simulations are carried out in the Gazebo simulator, which offers realistic physics modeling. The robot's behavior—including its locomotion and interaction with virtual environments—is tested within custom SDF-described scenarios. The simulation setup allows detailed testing of odometry accuracy, control responses, and lamp behavior before real-world deployment. Low-level commands and sensor data are handled by Arduino via a set of UART-based commands, enabling control of motor speed using PID controllers and querying lamp power status. High-level commands, such as movement planning and environment mapping, are processed on the Raspberry Pi under ROS2. Experimental results demonstrate precise motion control, as shown by comparisons of desired and actual angular velocities in real-time plots. The originality of this work lies in its specialized focus on disinfection tasks rather than general-purpose navigation or manipulation. By integrating specific equipment such as a UV-C excimer lamp into the robot's control logic and digital model, the system supports comprehensive simulation and safety testing before physical trials. This research contributes to the field by offering a replicable framework for developing task-specific autonomous systems using digital twins, emphasizing safety, efficiency, and modularity.

Keywords: digital twin, autonomous robot, ROS2, Far-UVC, disinfection.