

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

Leo Tišljarić, Dominik Cvetek

**Mjerenje potrošnje energije malog električnog vozila s obzirom
na konfiguraciju terena u svrhu optimiziranja rute vozila**

Zagreb, 2016.

Ovaj rad izrađen je na Fakultetu prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu na Zavodu za inteligentne transportne sustave na katedri za Primijenjeno računarstvo pod vodstvom izv. prof. dr.sc. Tončija Carića i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2015/2016.

Sadržaj

1	UVOD	1
2	ELEKTRIČNA VOZILA	3
2.1	Autonomna vozila	3
2.2	Osvrt na dosadašnja istraživanja	4
2.3	Opći i specifični ciljevi istraživanja	5
3	LABORATORIJSKE POSTAVKE MJERENJA.....	6
3.1	Arduino Due razvojna platforma.....	6
3.2	Pioneer 3 AT model električnog autonomnog vozila	7
3.3	Hall-ova sonda ASC 715.....	10
3.4	Akumulator	14
4	POTROŠNJA ENERGIJE ELEKTRIČNOG VOZILA NA TERENU S NAGIBOM.....	16
4.1	Sile na kosini	17
4.2	Zamjena rada potencijalne energije radom sile trenja klizanja.....	19
5	POSTUPAK MJERENJA I REZULTATI	23
5.1	Opis postupka mjerenja	23
5.2	Rezultati i točnost simulacije nagiba	27
6	PROBLEM PRONALASKA ENERGETSKI OPTIMALNE RUTE S OBZIROM NA OGRANIČENJE KAPACITETA AKUMULATORA	29
6.1	Teorija grafova	29
6.2	Definiranje parametara za težinu cestovnih segmenata	30
6.3	Dijkstrin algoritam za izračun energetski optimalne rute	31
6.4	Primjena Dijkstrinog algoritma na nasumično generiranoj cestovnoj prometnoj mreži	33
7	RASPRAVA	37
7.1	Prihvatljivost mjerenih rezultata	37
7.2	Primjena modificiranog Dijkstrinog algoritma.....	37

8	ZAKLJUČCI	39
9	ZAHVALE	41
	POPIS LITERATURE	42
	SAŽETAK.....	45
	SUMMARY	46
	ŽIVOTOPIS AUTORA	47
	POPIS SLIKA	48
	POPIS TABLICA.....	48
	PRILOZI.....	49

1 Uvod

Električni pogon dobiva sve značajniju ulogu u autoindustriji, a poboljšanja autonomije električnih vozila doprinijeti će sve većoj upotrebi električnog pogona, ne samo u autoindustriji, nego i u globalnoj ekonomskoj slici.

U zaštitu okoliša ulažu se veliki napori i novac, a električni automobili ne proizvode štetne plinove i sigurni su za okoliš. Sve je veća potražnja javnosti za smanjenjem emisije štetnih plinova i zaštitom okoliša. Glavna prednost električnog automobila pred konvencionalnim nulta je emisija štetnih plinova. Ovisnost o naftnim derivatima u prometu potaknula je korištenje alternativnih izvora energije, gdje izrazito veliku primjenu nalaze električna vozila. Onečišćenja mogu nastati jedino pri proizvodnji električne energije [1] što je još jedan od razloga ulaganja u korištenje obnovljivih izvora energije. Vrijedi napomenuti da su onečišćenja pri proizvodnji električne energije uglavnom izvan gradova i područja gušće naseljenosti, što implicira na očuvanje kvalitete zraka u gradovima. Elektromotori imaju znatno veću iskoristivost od benzinskih i dizelskih, znatno su jednostavnije konstrukcije što drastično smanjuje mogućnost kvara te potrebe zbrinjavanja zamijenjenih dijelova. Na električnom vozilu nema potrebe za promjenom motornog ulja koje predstavlja veliku potencijalnu opasnost za onečišćenje okoliša [2]. Električna vozila su tiha, stoga se u današnje vrijeme uglavnom primjenjuju u prostorijama koje zahtijevaju nisku razinu buke, primjerice u bolnicama, skladišnim prostorima i sl. [3]. Problem buke u gradovima moguće je reducirati korištenjem električnih vozila koja proizvode samo buku uzrokovanu kotrljanjem pneumatika po podlozi [1].

Zbog navedenih razloga broj električnih vozila u svakodnevnoj upotrebi će se povećavati, čime će rasti potražnja za optimiziranjem potrošnje energije budući da su električna vozila značajno ograničena autonomnošću koju mogu postići. Iz tog razloga u svrhu ovog istraživanja mjerena je potrebna energija za svladavanje različite konfiguracije terena, usmjerena pronalasku parametara za optimizacijski algoritam koji bi odabrao energetski optimalnu rutu u svrhu smanjenja potrošnje energije vozila.

U prvom dijelu rada definiran je problem i predmet istraživanja te opisana struktura rada.

U drugom poglavlju opisana su električna i autonomna vozila te je dan osvrt na dosadašnja istraživanja u području energetske optimizacije ruta električnog vozila. Opisani su opći i specifični ciljevi ovog istraživanja.

U trećem poglavlju opisane su specifikacije, karakteristike i princip rada mjerne opreme korištene pri izradi ovoga rada. Također, opisani su i načini mjerenja potrebnih parametara u laboratorijskim uvjetima, postupci kalibriranja i pripreme mjerne opreme za rad u stvarnim (terenskim) uvjetima.

U četvrtom poglavlju opisano je ponašanje vozila pri kretanju po terenu s nagibom. Pojašnjena je metodologija koja se koristila u svrhu izračuna parametara za simulaciju nagiba.

U petom poglavlju opisani su razlozi mjerenja, prikazani su rezultati mjerenja potrošnje energije tablično i s grafikonima.

U šestom poglavlju prikazana je metodologija izračuna težina bridova potrebnih za implementaciju Dijkstrinog algoritma te je modificirana osnovna verzija istog algoritma kako bi se računala energetski optimalna ruta.

U sedmom poglavlju dan je kritički osvrt na rezultate mjerenja i mogućnosti primjene modificiranog Dijkstrinog algoritma prikazanog u petom poglavlju.

U posljednjem poglavlju dan je zaključak rada te mogućnosti budućih istraživanja u ovome području.

2 Električna vozila

Električna vozila za pogon koriste električnu energiju koja je spremjena u akumulatoru. Energija potrebna za domet električnih vozila uvelike ovisi o kapacitetu ugrađenih akumulatora. Primjerice tvrtka Tesla Motors proizvela je električni automobil Model S s akumulatorom kapaciteta 40 kWh, 60 kWh i 85 kWh (autonomija do 450 km). Hibridna vozila imaju kapacitet akumulatora približno od 3 do 5 kWh, s električnom autonomijom od 60 do 70 km [4]. Akumulator predstavlja još uvijek najveći nedostatak ove vrste vozila zbog ograničenog kapaciteta i vremena potrebnog za punjenje što potvrđuje istraživanje [5].

Vozila s unutarnjim izgaranjem mogu biti napunjeni gorivom vrlo brzo i punjenje je moguće na široko rasprostranjenoj mreži punionica. Električna vozila imaju manji maksimalni domet po punjenju u odnosu na automobile koja pokreću fosilna goriva, a punjenje traje znatno duže. Mnogi proizvođači označili su električna vozila na tržištu kao „dnevno vozilo“, pogodno za gradske izlete i druga kratka putovanja.

2.1 Autonomna vozila

Autonomna vozila predmet su istraživanja već duži period. Vojska u mnogim državama ulaže sredstva u razvoj autonomne transportne tehnologije koja bi donijela mnoge prednosti na bojnopolju. Kako bi potaknuli razvoj, organiziraju se utrke autonomnih električnih vozila popraćene novčanim nagradama, u kojima u najvećem dijelu sudjeluju sveučilišta u suradnji s autoindustrijskim kompanijama [6]. Mnoga istraživanja provode se s naglaskom na upravljačkim funkcijama i algoritmima koja će olakšati upravljanje ili ga preuzeti u potpunosti, omogućavajući time putniku da nakon unosa željene destinacije neometano uživa u prijevozu. Primjer automobila s takvim performansama je Nissan IDS inteligentni sustav upravljanja (engl. Intelligent Driving System Concept) koji je predstavljen na sajmu automobila u Tokiju 2015. Uzimajući u obzir čovjeka kao uzročnika nastanka prometne nesreće, zbog vožnje u alkoholiziranom stanju, umora, nedovoljne pažnje na cestama i slično jasno je da se razvojem autonomnih vozila povećava i sigurnost prometa, osobito cestovnog [7].

U Sjedinjenim Američkim Državama 2013. godine NHTSA (engl. National Highway Traffic Safety Administration) klasificirala je razine autonomije cestovnih motornih vozila. Danas se ona primjenjuje u cijelom svijetu i postala je svojevrsan referentni faktor za kategorizaciju

razine autonomije pojedinih cestovnih vozila. Razina autonomije svakog vozila može se podijeliti u pet kategorija. NHTSA definira pet stupnjeva autonomije, počevši od razine 0 do razine 4. Nulta razina autonomije je ne autonomna razina, vozač u potpunosti kontrolira upravljanje vozilom. Vozačeva kontrola podrazumijeva upravljanje kočnicama, upravljačem, papučicom pogonske snage u svakom trenutku. Prva razina autonomije uključuje jednu ili više specifičnih upravljačkih funkcija. Takvi primjeri uključuju elektronsku kontrolu stabilnosti ESP (engl. Electronic Stability Control), sustave protiv blokiranja kotača ABS (engl. Anti-lock Braking System), sustave za poboljšanje stražnje preglednosti (engl. Blind Spot Information System). Druga razina uključuje autonomiju za barem dvije primarne kontrolne funkcije vozila, koje rade kooperativno kako bi vozača oslobodile od upravljanja tim funkcijama. Primjer je sustav za adaptivnu prilagodbu brzine (engl. Adaptive Control Speed) u kombinaciji sa sustavom praćenja (ne prelaska) bijele kolničke trake LWDS (engl. Lane Departure Warning System). Vozila koja posjeduju treću razinu autonomije su sposobna od vozača preuzeti potpunu kontrolu nad svim sigurnosnim funkcijama vozila u određenim kritičnim trenucima, u takvim situacijama od vozača se očekuje gotovo potpuno oslanjanje na autonomno vozilo. Zbog toga vozač mora biti u mogućnosti za povremenu kontrolu, ali s dovoljno vremena za siguran prijelaz na njegovo upravljanje. Na primjer, vozilo će upravljati vožnjom, no ako sustav nema dostatnu podršku senzora koji mu omogućuju upravljanje preuzeti će je vozač. Google automobil primjer je ove razine, „polu-autonomnog” vozila. Četvrta razina podrazumijeva potpuno autonomno vozilo: vozilo je dizajnirano za provedbu svih kritičnih operacija i prati uvjete na prometnici tijekom čitave vožnje [8]. Ovakav oblik vožnje zahtjeva od vozača unos željene rute ili destinacije, ali ne zahtjeva nikakve ostale sposobnosti za upravljanje vozilom niti u jednom trenutku vožnje. Ovakva vozila sposobna su prometovati i bez prisutnosti ljudi.

2.2 Osvrt na dosadašnja istraživanja

Istraživanja, [5], [9], [10], [11] i [12] bave se tematikom optimiziranja potrošnje energije električnih i hibridnih vozila. Istraživanje, [5] predlaže optimizaciju izradom profila brzina koji bi smanjili potrošnju električne energije. U [12] prikazuju se energetske optimalne rute s dodatnim uvjetom da vozilo neće stići na odredište, već da mora stati na punionicu. Istraživanja [9], [10] i [11] predlažu primjenu Dijkstrinog algoritma za rješavanje problema energetske optimalne rute, no navode kako se problem optimizacije potrošnje energije ne može riješiti klasičnim Dijkstrinim algoritmom. Razlog tomu je što za funkcioniranje Dijkstrinog algoritma

energetske težine pridodane grafu ne smiju biti negativne vrijednosti, koje bi se pojavile zbog regenerativnog kočenja. U ovome radu optimizirala se potrošnja mobilnog robota koji nema opciju regenerativnog kočenja pa se to ograničenje nije uzelo u obzir. Također u istraživanju [9] se u proračun potrošnje energije uzelo u obzir i zagušenje prometne mreže, energetski se optimizirala ruta i po pitanju koliko vozilo troši zbog stanikreni vožnje. U istraživanju [10] takvo ograničenje zanemaruje se i algoritam se primjenjuje na težinskom grafu koji posjeduje samo zračne udaljenosti. Na takav način postavljen je i graf u ovome radu.

2.3 Opći i specifični ciljevi istraživanja

Problem nedovoljnog kapaciteta akumulatora uzrokuje smanjenje dometa mobilnog robota. Iz tog razloga predmet istraživanja ovoga rada je mjerenje potrošnje energije elektromotora mobilnog robota pri različitim opterećenjima odnosno različitim nagibima terena. Mjerenja električne energije i trenutnog napona akumulatora vršena su pomoću Arduino platforme, u laboratorijskim uvjetima i na terenu. Također, predložena je optimizacija potrošnje električne energije primjenom Dijkstrinog algoritma. Navedeno bi se postiglo preusmjeravanjem mobilnog robota na energetski optimalnu rutu, uzimajući u obzir ograničenje kapaciteta akumulatora. Ograničenje kapaciteta akumulatora definirano je na način da vozilo ne smije ostati bez energije na cestovnom segmentu, već mora odabrati rutu kojom može sigurno nastaviti putovanje bez zaustavljanja.

Opći cilj istraživanja prikaz je mogućnosti optimizacije potrošnje energije mobilnog robota radi povećanja njegove autonomije.

Specifični cilj istraživanja je definirati postupak simulacije nagiba terena radi lakšeg mjerenja potrošnje energije mobilnog robota te modifikacija Dijkstrinog algoritma za računanje energetski optimalne rute sa ograničenjem kapaciteta akumulatora. Isti će na temelju podataka o potrebnoj snazi za savladavanje rute, brzini vozila te duljini rute računati energetski optimalnu rutu.

3 Laboratorijske postavke mjerenja

Mjerenje potrošnje mobilnog robota provedeno je u prostorijama laboratorija Fakulteta prometnih znanosti, a koristila se oprema čije se specifikacije, karakteristike i princip rada opisuju u nastavku.

3.1 Arduino Due razvojna platforma

Arduino razvojna platforma je platforma otvorenog kôda koja služi za razvoj i testiranje elektroničkih sklopova. Sastoji se od Arduino Due razvojne pločice i Arduino programske razvojne okoline. Razvojna pločica sadrži mikrokontroler *AT91SAM3X8* radnog napona 3,3 V, 54 ulazno/izlaznih pinova, izlaze s 5 V i 3,3 V, USB priključak za napajanje i povezivanje s računalom, tipku za ponovno pokretanje (engl. Reset) te priključak za napajanje istosmjernim (DC, engl. Direct Current) naponskim izvorom. Osnovne tehničke karakteristike razvojne pločice navedene su u Tablici 1. Programska razvojna okolina koristi C/C++ programski jezik, a kôd za upravljanje mikrokontrolerom naziva se skica (engl. sketch) [13].

Tablica 1. *Karakteristike Arduino Due razvojne pločice* [13]

Mikroprocesor:	AT91SAM3X8E
Radni napon:	3,3 V
Napon napajanja (preporučeno):	7-12 V
Napon napajanja (ograničenje):	6-16 V
Broj digitalnih ulazno/izlaznih pinova:	54
Broj analognih ulaznih pinova:	12
Broj analognih izlaznih pinova:	2
Maksimalna istosmjerna izlazna struja na svim ulazno/izlaznim pinovima:	130 mA
Maksimalna istosmjerna struja na pinu 3,3V:	800 mA
Maksimalna istosmjerna struja na pinu 5V:	800 mA
Flash memorija:	512 KB
SRAM:	96 KB
Takt sata:	84 MHz
Dužina:	101,50 mm
Širina:	53,3 mm
Težina:	36 g

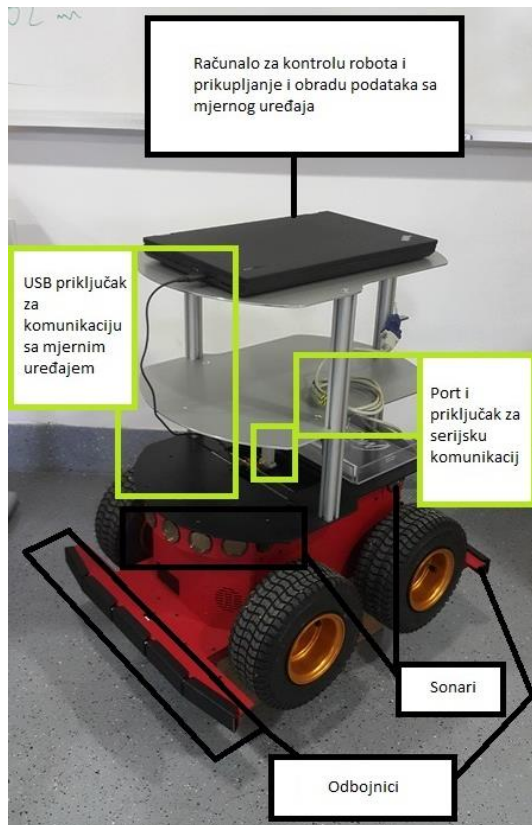
3.2 Pioneer 3 AT model električnog autonomnog vozila

U ovom radu umanjeni prikaz autonomnog električnog vozila mobilni je robot Pioneer 3-AT. Mobilni robot Pioneer 3-AT¹, ili skraćeno P3-AT, potječe iz porodice malih i inteligentnih robota, koji imaju pogon na dva ili četiri kotača. Arhitekturu Pioneer skupine robota razvio je dr.sc. Kurt Konolige sa sveučilišta Stanford. Pioneer istraživački roboti nalaze se među svjetski najpopularnijim inteligentnim robotima za edukaciju i istraživanje. Pioneer roboti prilagodljivi su i nadogradivi, pogodni za rad u laboratoriju i na otvorenom [14].

3.2.1 Fizičke karakteristike

Glavni dijelovi P3-AT mobilnog robota su: kućište, nos, konzola, paluba, pogonski kotači, mreža sonara, razni priključci te kontrolne lampice. Konzola i paluba čine dio robota, u koji se mogu ugraditi različiti uređaji ili osjetila robota. Unutar aluminijskog kućišta nalaze se akumulator, pogonski motori, elektronika i druge standardne komponente poput prednjih i stražnjih sonara i odbojnika [15]. Na Slici 1. prikazane su osnovne fizičke komponente. Za kontrolu mobilnog robota zadužen je 32-bitni mikrokontroler tvrtke *Renesas SH2 – 7144 RISC* s *ARCOS* [16] (engl. Advanced Robot Control and Operations Software) programskim paketom (engl. firmware) kao i Pioneer SDK (engl. Software Development Kit) napredni razvojni programski paket. Akumulatori/baterije mogu pogoniti robota 2 do 4 h bez dodatnih pribora i osjetila. 8 prednjih i 8 stražnjih sonara ugrađenih na robota moguće je koristiti kao cjelinu ili pojedinačno te s njima detektirati objekte koji su udaljeni od 15 cm do 7 m. Maksimalna brzina robota iznosi 0.75 m/s, a nosivosti je do 40 kg ovisno o terenu na kojem se nalazi [16]. Za mjerenje brzine razvijene na kotačima robot koristi dva enkodera, jedan za lijevi i jedan za desni kotač. Kako bi se kompenzirale pogreške u mjerenju uzrokovane proklizavanjem kotača moguće je korigirati enkodere s obzirom na krajnju točku.

¹ Korišteni mobilni robot Pioneer 3-AT nabavljen je iz tri projekta Sveučilišta u Zagrebu: Optimizacija ruta malih električnih vozila uz kriterij najmanje potrošnje energije, Optimalna navigacija malih električnih vozila u unutarnjim prostorima, Optimiranje ruta flote vozila primjenom više-agentskih optimizacijskih algoritama i stvarno-vremenskih prometnih podataka, 2013-ZUID-2



Slika 1. Fizičke komponente Pioneer 3-AT mobilnog robota

Osjetila robota proširuju se daleko više od uobičajenog korištenjem lidara, ugrađenim ispravljačem za pogreške pri proklizavanju, GPS-om, odbojnicima, računalnim vidom, robotskom rukom itd. [14]. Za pokretanje koristi četiri elektromotora koji zupčastim remenom prenose snagu na kotače. S obzirom na os simetrije robota dva elektromotora pogone lijevu stranu robota, a dva desnu. Od dva elektromotora jedan je glavni i na sebi ima enkoder, a drugi je sporedni. Tablica 2. prikazuje ostale specifikacije Pioneer platforme.

Prijenosno računalo koje se koristilo za upravljanje mobilnim robotom i procesiranje podataka je Lenovo ThinkPad T540 sa 8 GB RAM memorije, 64-bitnim i7 procesorom četvrte generacije, grafičkom karticom GeForce GT730M te Windows 7 operativnim sustavom².

² Korišteno prijenosno računalo nabavljeno je u projektu SORDITO - Sustav za optimizaciju ruta u dinamičkom transportnom okruženju RC.2.2.08-0022, koji je sufinanciran sredstvima Europske unije iz Europskog fonda za regionalni razvoj

Tablica 2. *Specifikacije mobilnog robota Pioneer 3-AT* [16]

Težina (bez akumulatora i dodatne opreme):	14 kg
Težina (s aluminijskim stalkom i prijenosnim računalom):	33 kg
Nosivost (laboratorij):	40 kg
Maksimalna brzina:	0,75 m/s
Maksimalni iznos nagiba terena:	40%
Vrijeme trajanja rada:	2-3 h
Vrijeme punjenja baterija:	6 h
Broj baterija:	3
Kapacitet svake baterije:	9 Ah
Nazivni napon baterije:	12 V
Vrsta baterije:	Olovne baterije

3.2.2 Programaska podrška

Programaska podrška sastoji se od niza programa koji omogućuju komunikaciju s robotom putem napisane biblioteke naredbi. Predstavlja svojevrsan jezik koji omogućuje davanje naredbi kojima se upravlja robotom te dolazi s kompletnom programskom podrškom prilagođenom za njega. MobileRobots programaska platforma uključuje Pioneer SDK, kompletni set programa i datoteka koji omogućavaju razvoj željenih projekata.

3.2.3 Osnovna podrška

ARIA (engl. Advanced Robot Interface for Applications) pruža programsku podršku za kontrolu, komunikaciju s robotom i primanje podataka. Uključuje otvorenu infrastrukturu u obliku biblioteka klasa pisanih u C++, Python i Java programskim jezicima. MobileSim otvoreni je simulator koji omogućuje otklanjanje pogrešaka i eksperimentiranje s ARIA ili drugim programima koje podržava MobileRobots platforma. MobileEyes grafičko korisničko sučelje za daljinsko upravljanje i nadgledanje robota. Mapper 3-Basic alat za kreiranje i montažu karte za potrebe ARIA, MobileSima i navigacijskih programa. SONARNL pruža aproksimaciju željenih parametara na temelju sonara za lokalizaciju i navigaciju robota [17].

3.3 Hall-ova sonda ASC 715

U sklopu ovoga rada izrađen je sklop za mjerenje struje i napona u obliku štita³ za razvojnu platformu Arduino Due. Na Slici 2. prikazan je mjerni uređaj s Hall-ovom sondom u PCB (engl. Printed Circuit Board) prikazu. U nastavku se opisuje princip rada sonde i opis izrade sklopa za mjerenje struje i napona.

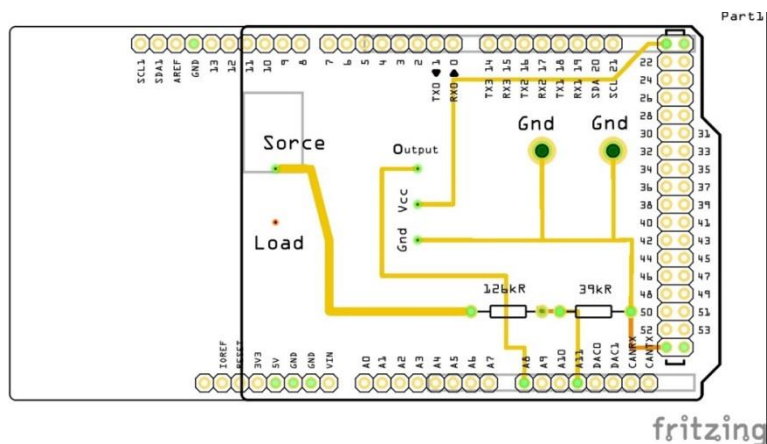
3.3.1 Princip rada Hall-ove sonde

Sonda ACS 715 radi na principu Hall-ovog efekta te posjeduje linearnu strujno-naponsku karakteristiku. Hall-ova sonda magnetski je senzor koji je dizajniran za mjerenje gustoću magnetskog polja oko sonde. Magnetsko polje ima dvije važne karakteristike, a to su gustoća magnetskog toka i polaritet (sjeverni ili južni pol). Kada gustoća magnetskog toka prijeđe definirani prag, senzor to detektira i proizvodi napon koji se naziva Hall-ov napon [18]. Pojednostavljeno, struja koja prolazi kroz sondu stvara inducirano magnetsko polje čija gustoća određuje iznos napona na izlazu [19]. Hall-ova sonda može se koristiti za mjerenje brzine, pozicije, struje, u sustavu za aktiviranje zračnih jastuka i drugim sustavima [18].

3.3.2 Izrada sklopa za mjerenje struje i napona

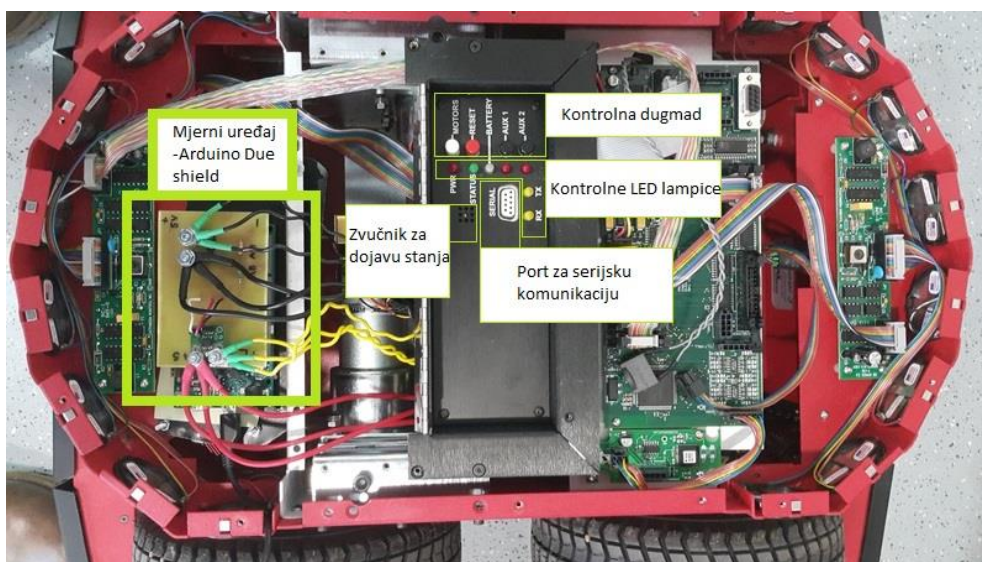
Za izradu sklopa koristio se programski alat Fritzing. Fritzing je besplatan program za izradu elektroničkih komponenti te sadrži fizički i simulacijski prikaz spajanja na testnu ploču, shematski prikaz i PCB prikaz [20].

³ engl. Shield - ovakav izraz koristi se za nadogradnje na osnovnu Arduino razvojnu platformu, ustvari se radi o pločici spojenoj direktno na ulazno-izlazne pinove Arduino razvojne platforme



Slika 2. Arduino Due štit

Na pin Izvor (engl. Source) dovodi se pozitivni (+) pol s izvora napajanja. Na pin Trošilo (engl. Load) dovodi se pozitivni (+) pol koji predstavlja trošilo. U ovom slučaju trošilo je mobilni robot, odnosno njegova potrošnja energije za kretanje i snalaženje u prostoru. Na pin GND dovode se negativni (-) polovi s trošila, izvora napajanja i sonde. Sonda se napaja preko pina Vcc s 5 V koje crpi iz Arduino mikrokontrolera. Pin koji predstavlja izlaz sa sonde naziva se Izlaz (engl. Output). Sklop je izveden tako da mjeri promjenu napona i struje s vremenom uzorkovanja od jedne sekunde i deset milisekundi. Mjerenje struje vrši Hallova sonda dok promjenu napona detektiramo naponskim djelilom. Na Slici 3. prikazan je sklop za mjerenje koji je ugrađen u robota.



Slika 3. Ugrađeni sklop za mjerenje struje i napona

Izlazni pin sa sonde spojen je na Arduinov analogni pin broj 8. Na tome se pinu očitava izlazni napon sa sonde, koji se u algoritmu za izračun struje preračunava u struju koju mobilni robot koristi za pokretanje, koja se računa izrazom:

$$I_{Robota} = \frac{(U_{Očitano} - 500)}{133} \quad (1)$$

gdje je:

I_{Robota} [A] - struja koju robot troši pri kretanju

$U_{Očitano}$ [mV] - napon na izlazu sa sonde

Prolaskom struje od izvora prema trošilu silnice magnetskog polja izazivaju rast napona na izlaznom pinu sonde. Iznos od 500 mV predstavlja pomak (engl. Offset), odnosno vrijednost na izlaznom pinu sonde u praznom hodu (dok nije spojena na trošilo). Sonda mjeri struju na način da napon od 133 mV na izlaznom pinu predstavlja 1 A struje koja prolazi kroz sondu. Ova pretvorba tvornički je definirana [21]. Izraz (1) dijeli se sa 133 kako bi se očitani napon pretvorio u struju koja prolazi između napajanja i trošila.

Zbog točnosti mjerenja, sukcesivno se računa aritmetička sredina od 10 očitanih vrijednosti u proteklih 10 milisekundi te se takvih 11 aritmetičkih sredina upisuje u polje. Nakon toga medijan filtrom izvlači se srednja vrijednost sortiranih aritmetičkih sredina. Dio algoritma koji izvršava navedeno, prikazan je Slikom 4.


```

void loop(){
  for(int j=0;j<10;j++){
    // prva for petlja služi za računanje prosjeka 10 učitanih vrijednosti i spremanje u polje

    float citanjeIzlazSonda=0;
    // postavljanje varijable u 0 kako bi se za svaku iteraciju zbrajala slijedeća očitavanja

    for(int i=0;i<11;i++)
    { // druga petnja služi za zbrajanje očitavanja sa sonde

      citanjeIzlazSonda=citanjeIzlazSonda+analogRead(PinIzlazSonda);
      delay(10);
    }
    prosjekIzlazSonda=citanjeIzlazSonda/10; // prosječna vrijednost 10 čitanja sa izlaza sonde
    poljeIzlazSonda[j]=prosjekIzlazSonda; // u polje se upisuje 11 prosječnih vrijednosti izlaza sa sonde
  }
  sort(poljeIzlazSonda,10); // sortiranje izlaza sa sonde od najmanje do najveće vrijednosti
  sredina=poljeIzlazSonda[5]; // 5. mjesto u polju je sredina svih sortiranih prosječnih izlaza sa sonde

  citanjeBaterija=analogRead(PinBaterija);
  NaponBaterije=citanjeBaterija*3.3/1023*((R1+R2)/R2); // vrijednost napona baterije

  struja=(500-(3300*sredina/1023))*1000/133; // vrijednost struje u mA

  Serial.print("NaponBaterije (V): ");
  Serial.print(NaponBaterije);
  Serial.print(" ");

  Serial.print("Struja (mA): ");
  Serial.println(struja);
}

```

Slika 4. Dio algoritma koji realizira plutajuću sredinu i medijan filter

Sklop za mjerenje mjeri razinu napona akumulatora tako da se preko naponskog djelila sastavljenog od otpornika $R_1 = 118 \text{ k}\Omega$ i $R_2 = 38,7 \text{ k}\Omega$ snižava napon na $3,3 \text{ V}$ jer je to operativni napon Arduino Due platforme. Napon akumulatora u algoritmu računa se sljedećim izrazom:

$$U_{AKU} = \frac{U_{ARD} \cdot (R_1 + R_2)}{R_2} \quad (2)$$

gdje je:

U_{AKU} [V] - napon akumulatora

U_{ARD} [V] - očitani napon na pinu Arduino platforme

R_1 i R_2 [Ω] - vrijednost otpornika u naponskom djelilu

3.3.3 Kalibracija mjernog uređaja

Izrađeni mjerni uređaj prije ugrađivanja i implementacije u mobilnog robota i mjerenja testiran je metodom usporedbe s pouzdanim mjernim uređajem. Za mjerenje struje i napona korišten je multimetar tvrtke Jameco Electronics model *DT – 830B* čije su specifikacije prikazane u prilogu 1 na kraju rada. Prije ugrađivanja u mobilnog robot usporedba mjerenja navedenog multimetra i mjernog uređaja provedena je simuliranim opterećenjem s otpornikom *CGS HSA50* [22] otpora $1,5 \Omega$ i snage $50 W$. Nakon što su postignuti točni rezultati mjerni uređaj ugrađen je na P3-AT mobilni robot. Pad napona s dva otpornika naponskog dijelila na mjernom uređaju opisanih u poglavlju 2.3.2, je uspoređen s navedenim multimetrom i voltmetrom ugrađenim u P3-AT mobilni robot.

3.4 Akumulator

Elektrokemijski akumulatori su uređaji koji pretvaraju električnu energiju u kemijsku za vrijeme punjenja i kemijsku energiju u električnu za vrijeme pražnjenja, putem elektrokemijske reakcije. Primjeri elektrokemijskih akumulatora su olovni akumulatori, akumulatori zasnovani na niklu te akumulatori zasnovani na litiju, [23], [24]. Akumulator se sastoji od nekoliko ćelija koje su međusobno povezane. Akumulatorska (baterijska) ćelija sastoji se od dvije elektrode (anode i katode) i elektrolita u kojega su uronjene i u pravilu proizvodi napon od $2 V$.

Akumulator je određen kapacitetom u amper satima te nazivnim naponom. Kapacitet se definira kao broj amper sati koji se dobije kod pražnjenja akumulatora od stanja napunjenosti do stanja potpune ispražnjenosti, [25]. Pri početku pražnjenja ima veći napon od nazivnog napona koji je definirao proizvođač. Početni napon ubrzo padne na približnu vrijednost definiranog napona koji lagano pada do vrijednost na kojoj uređaj prepoznaje da je akumulator u potpunosti ispražnjen. Raspon napona od potpune napunjenosti do potpune ispražnjenosti je približno $2 V$. Robot posjeduje tri olovna akumulatora kapaciteta $9 Ah$ tvrtke Werker nazivnog napona $12 V$.

Ciklusi punjenja i pražnjenja, starenje, temperatura te dugo skladištenje imaju velik utjecaj na ukupan kapacitet akumulatora. Poznavanje akumulatorskih parametara može pomoći pri produljenju vijeka trajanja ili optimizaciji rute vozila [26].

Stanje napunjenosti akumulatora (engl. State of Charge - SOC) definira se kao dostupni naboj pohranjen u akumulatoru u odnosu na naboj potpuno ispražnjenog akumulatora. Procjena ovog parametra važna je zbog optimalnog upravljanja sustavom napajanja električnog vozila. SOC poprima vrijednosti u intervalu (0,1) [24]. SOC je definiran kao:

$$SOC(\tau) = SOC(t_0) - \frac{1}{K_{pnom}} \int_{t_0}^{\tau} i(\tau) d(\tau) \quad (3)$$

gdje je:

$SOC(t_0)$ - početno stanje napunjenosti akumulatora

K_{pnom} [Ah] - normalni kapacitet potpuno napunjenog akumulatora

$i(\tau)$ [A] - struja pražnjenja

Stanje napunjenosti akumulatora robota testirano je i rezultati pokusa prikazani su u poglavlju 4.1.1.

4 Potrošnja energije električnog vozila na terenu s nagibom

Poznavanjem ponašanja potrošnje energije akumulatora električnog vozila može se predvidjeti kojim će intenzitetom vozilo trošiti energiju koju ima na raspolaganju. Vozilo treba svladati nekoliko otpora, no u ovome radu, proučavamo otpor koji vozilo svladava utjecajem terena pod nagibom. Potrošnja energije vozeći se terenom bez nagiba i s nagibom nije jednaka. Pretpostavka u radu jest da je potrebno značajno više energije za svladavanje terena s nagibom.

Energija je sposobnost tijela ili sustava da obavlja rad; ako tijelo obavlja rad energija se smanjuje. U suprotnom, ako okolina obavlja rad na tijelu energija se povećava. Energija i rad imaju iste mjerne jedinice, no postoji potreba za dvjema fizičkim veličinama jer se energija definira kao stanje sustava dok se rad definira kao promjena stanja sustava [27]. Rad se definira sljedećim izrazom:

$$W = \int_{s_1}^{s_2} F \cdot ds , \quad (4)$$

$$t_1, s_1 \rightarrow E_1 \Rightarrow W_{1-2} \Rightarrow E_2 \rightarrow t_2, s_2 [J]$$

gdje je:

$W [J]$ – rad

$F [N]$ – sila

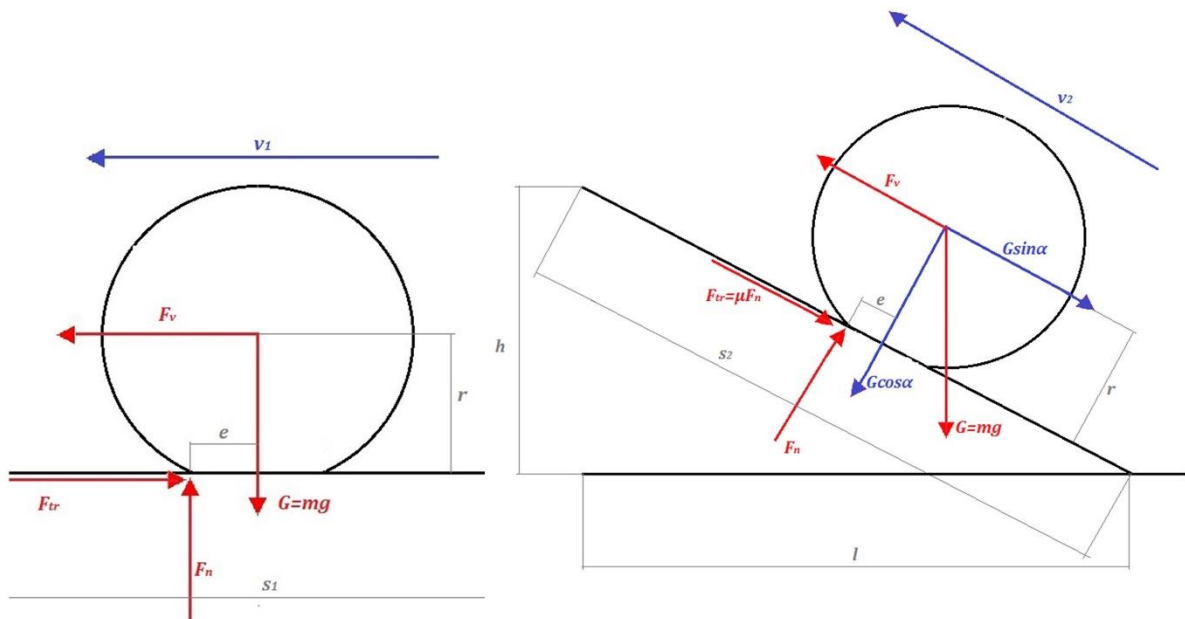
$s [m]$ – put

4.1 Sile na kosini

Kako bi se mogla mjeriti potrošnja energije mobilnog robota potrebno je poznavati djelovanje sila na vozilo. Poznavanje sila kada se vozilo kreće uz nagib terena i kada se kreće po terenu bez nagiba, nužno je zbog saznanja gdje se uložena energija gubi [28]. Slika 5. prikazuje sile koje se javljaju na terenu s nagibom i na terenu bez nagiba.

Slučaj 1: Kretanje vozila po terenu bez nagiba

Slučaj 2: Kretanje vozila po terenu s nagibom



Slika 5. Sile na terenu s i bez nagiba

Da bi se vozilo kretalo mora postojati neka pogonska sila F_v kojoj se opiru sile trenja F_{tr} , sila otpora zraka te komponenta gravitacijske sile $G \sin \alpha$ koja djeluje na kosini. Iz momentnog pravila, ako se postavi oko središta kotača dobiju se izrazi za silu trenja kotrljanja na terenu bez nagiba [28] :

$$F_{tr_{kot1}} = \frac{e}{r} \cdot m \cdot g \quad (5)$$

i silu trenja kotrljanja na terenu s nagibom:

$$F_{tr_{kot_2}} = \frac{e}{r} \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

gdje je:

$F_{tr_{kot_1}}, F_{tr_{kot_2}}$ [N] - sila trenja kotrljanja

e [mm] - koeficijent trenja kotrljanja

r [mm] - polumjer kotača

m [kg] - masa vozila

α [°] - kut nagiba terena

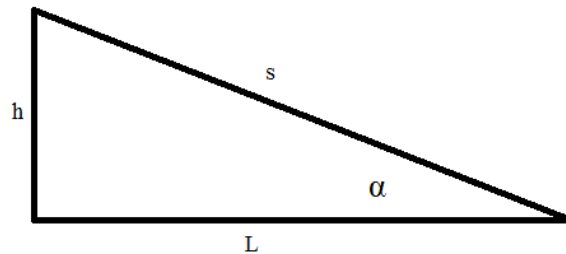
g [m/s^2] - ubrzanje sile teže

Postotak nagiba terena omjer je duljine L pravokutnog trokuta i visine h [29], dok s predstavlja put koji je vozilo prešlo. Odnosi su prikazani Slikom 6. Postotak nagiba odgovara sljedećem izrazu:

$$\operatorname{tg} \alpha = p \quad (7)$$

gdje je:

p [%] - postotak nagiba terena



Slika 6. Trokut potreban za izvod postotka nagiba terena

4.2 Zamjena rada potencijalne energije radom sile trenja klizanja

Usporedit će se rad koji robot uloži kako bi se kretao po terenu s nagibom (9) i rad koji mobilni robot uloži kako bi se kretao po terenu bez nagiba (8). Rad i energija koji mobilni robot ulaže za kretanje po terenu s nagibom i bez nagiba izvodi se iz zakona kinetičke energije [9]:

$$E_{k_2} - E_{k_1} = W_{r_1} - W_{tr_{kot_1}} - W_{otp_1} \quad (8)$$

rad koji mobilni robot ulaže za kretanje po terenu s nagibom:

$$E_{k_2} - E_{k_1} = W_{r_2} - W_{tr_{kot_2}} - W_{otp_2} - W_p \quad (9)$$

gdje je:

W_{r_1}, W_{r_2} [J] - rad koji ulaže mobilni robot

W_p [J] - rad potencijalne energije (rad koji se ulaže za svladavanje visine)

W_{otp_1}, W_{otp_2} [J] - rad koji se ulaže zbog djelovanja otpora zraka

$W_{tr_{kot_1}}, W_{tr_{kot_2}}$ [J] - rad koji se ulaže zbog djelovanja trenja kotrljanja

E_{k_1} [J] - kinetička energija s početnom brzinom

E_{k_2} [J] - kinetička energija s krajnjom brzinom

Mjerenje potrošnje mobilnog robota na nagibu u stvarnom okruženju je zahtjevno. Moguće poteškoće su nabava rampe za simulaciju uzbrdice u laboratoriju, traženje adekvatne uzbrdice u prirodi i slično. Zbog navedenog u sklopu ovog rada izrađen je simulator terena s nagibom. Na mobilni robot priključena su kolica pri kretanju terenom bez nagiba. Kolica s dodatnom težinom klizila su po tlu i svojim radom otpora, prouzrokovanim trenjem klizanja, zamijenila rad koji robot ulaže kako bi svladao potencijalnu energiju (W_p). Na Slici 7. prikazan je eksperiment simulacije terena s nagibom.



Slika 7. Prikaz eksperimenta simulacije uzbrdice

Dodavanjem kolica zakon kinetičke energije, za kretanje vozila po terenu bez nagiba glasi:

$$E_{k_2} - E_{k_1} = W_{r_1} - W_{trkot_1} - W_{otp_1} - W_k \quad (10)$$

gdje je:

W_k [J]- rad otpora sile trenja klizanja kolica

Uvjeti u kojima se izvodio eksperiment su:

$$\begin{aligned} v_1 &= v_2 = konst. \\ s_1 &= s_2 \\ W_{r_1} &= W_{r_2} \\ W_{trkot_1} &\neq W_{trkot_2} \\ W_{otp_1} &= W_{otp_2} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

gdje je:

v_1 [m/s], s_1 [m]- brzina i put na terenu bez nagiba

v_2 [m/s], s_2 [m]- brzina i put na terenu s nagibom

Za vrijeme eksperimenta izjednačen je rad mobilnog robota kada se vozi na nagibu i kada se vozi po terenu bez nagiba, no s dodatnim kolicima. Brzine su bile jednake te je zanemaren otpor zraka zbog malih brzina kretanja mobilnog robota. Visina h izražava se kao:

$$h = s \cdot \cos \alpha \quad (12)$$

gdje je:

h [m] – visina terena

s [m] – duljina puta (hipotenuza trokuta na slici 6.)

Budući da su brzine jednake pa nema promijene kinetičke energije izrazi (10) i (9) su izjednačeni. Sređivanjem izraza dobije jednadžba kojom je moguće proračunati količinu tereta koju je potrebno dodati na kolica kako bi se simulirao nagib određenog postotka:

$$m_v \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot s + \frac{e}{r} \cdot m_v \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot s = \frac{e}{r} \cdot (m_v + m_k) \cdot g \cdot s + \mu \cdot m_k \cdot g \cdot s \quad (13)$$

gdje je:

m_v [kg]- masa vozila

m_k [kg]- masa kolica

iz čega proizlazi:

$$m_v \cdot \sin \alpha + \frac{e}{r} \cdot m_v \cdot \cos \alpha = \frac{e}{r} \cdot (m_v + m_k) + \mu \cdot m_k \quad (14)$$

Iz (5), (6) i (13) trenje kotrljanja na nagibu manje u odnosu na trenje kotrljanja na terenu bez nagiba zbog kosinus komponente gravitacijske sile. Uzmu li se u obzir uvjeti eksperimenta iz (11) i prethodna tvrdnja, korištenjem izraza (9) i (10) dobije se omjer veličina:

$$\frac{W_{tr_{kot1}}}{W_{tr_{kot2}}} = \frac{W_k}{W_p} \quad (15)$$

Konačno, iz navedenih izraza dolazi se do formule za potrebnu težinu kolica koja mobilni robot vuče kako bi simuliralo nagib terena u postocima p %: ($\alpha = \tan^{-1}(p)$)(7):

$$m_k = \frac{m_v \cdot \sin \tan^{-1} p \cdot \cos \tan^{-1} p}{\mu} \quad (16)$$

5 Postupak mjerenja i rezultati

Izrađenim sklopom za mjerenje struje i napona koji je opisan u drugom poglavlju, mjereno je stanje napunjenosti akumulatora i potrošnja energije mobilnog robota. U ovome poglavlju bit će prikazane metode mjerenja, analiza mjerenih veličina i rezultata.

5.1 Opis postupka mjerenja

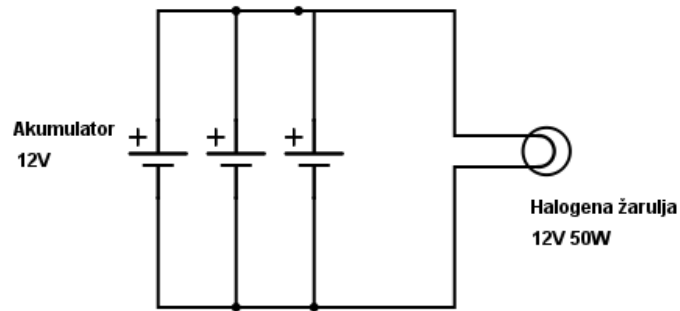
Mjerenja su provedena kako bi se utvrdila stanja napunjenosti akumulatora mobilnog robota te potrošnja energije mobilnog robota.

Prvi razlog mjerenja važan je zbog uvjeta izrečenog u uvodnom poglavlju vezanog za ograničenje kapaciteta energije akumulatora. Poznavanjem stanja napunjenosti akumulatora (*SOC*) algoritam za odabir energetski optimalne rute ima u vidu maksimalni doseg kojeg je mobilni robot u stanju postići.

Drugi razlog mjerenja bitan je zbog nužnosti poznavanja potrošnje energije mobilnog robota na pojedinoj prometnici. Mjerenjima se pokazalo kolika je potrošnja vozila na terenu s nagibom i na terenu bez nagiba te kolika je potrošnja energije na simuliranom nagibu (ravnom terenu s dodanom težinom kolica koja su bila priključena na robota). Dana su odstupanja simulacijskog mjerenja u odnosu na mjerenja na stvarnom terenu i time su opravdani rezultati simulacije.

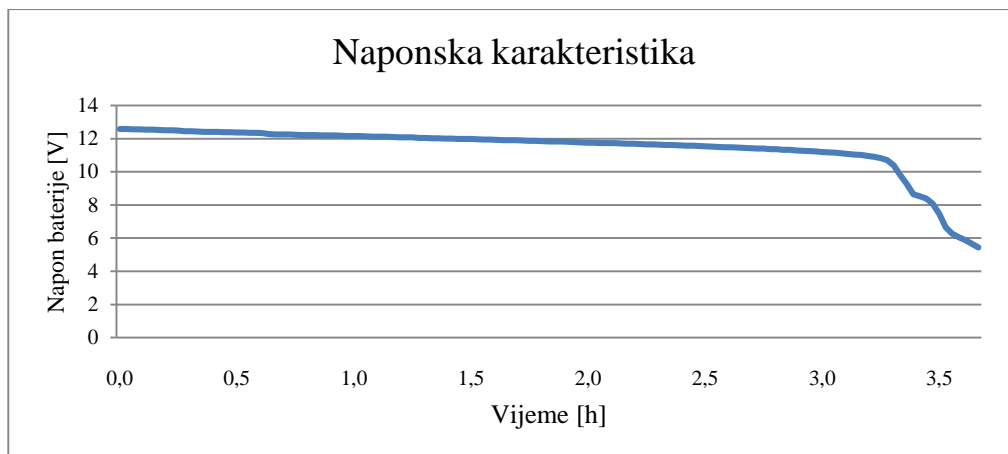
5.1.1 Pokus iscrpljenja akumulatora

Pokus iscrpljenja izrađen je kako bi se moglo odrediti trenutno stanje napunjenosti akumulatora. Parametar stanja napunjenosti važan je zbog toga što se iz njega iščitava koliki postotak kapaciteta akumulatora je ostao na raspolaganju mobilnom robotu za korištenje. Pokus se izvodio s tri akumulatora koji pogone mobilnog robota. Spojeni su na halogenu žarulju snage 50 W. Pokus je vršen sve dok se akumulatori nisu ispraznili. Shema spoja prikazana je Slikom 8.



Slika 8. Shema pokusa iscrpljenja akumulatora

Bilježenje struje i napona izvodilo se mjernim sklopom izvedenim Arduino razvojnom platformom opisanim u poglavlju 2.3.2. Slika 9. prikazuje naponsku karakteristiku koja je dobivena ovim mjerenjem.



Slika 9. Rezultati pokusa iscrpljenja baterije

Po izrazu (3) za računanje stanja baterije, utvrđeno je da je maksimalno stanje napunjenosti akumulatora robota 0,55 odnosno 55 %. Mobilni robot ima definirani napon sigurnosnog gašenja u iznosu od 10,5 V [16] s obzirom na to utvrđeno je da je maksimalno stanje napunjenosti akumulatora 15%. Odnosno, mobilnom robotu je na raspolaganju 15 % ukupnog kapaciteta akumulatora.

5.1.2 Mjerenje potrošnje mobilnog robota

Koristeći mjernu opremu opisanu u prethodnim poglavljima, vršeno je mjerenje snage mobilnog robota koja je potrebna za savladavanje različitih konfiguracija terena. Kao što je već navedeno u poglavlju 3., pretpostavka je da vozilo treba više snage za svladavanje nekog terena s nagibom, nego terena bez nagiba (položen u ravnini). Ova pretpostavka je praktično dokazana s više mjerenja koja su vršena na terenu položenim u ravnini i na nagibima od 10% i 20%. Lokacije mjerenja prikazane su Slikama 10 i 11.



Slika 10. Lokacija mjerenja na nagibu od 10%



Slika 11. Lokacija mjerenja na nagibu od 20%

Udaljenost s koju je mobilni robot prešao mjerena je odometrom ugrađenim u mobilnog robota, a visina h laserskim mjerjačem udaljenosti čije su specifikacije prikazane u prilogu 2. Postotak nagiba izračunat je izrazima (7) i (12).

Mjerenja su ponovljena četiri puta kako bi se utvrdilo odstupanja mjerenja. Tablica 3 prikazuje rezultate mjerenja i odstupanja u kojoj se snaga, kao i u cijelom radu, računa izrazom:

$$\bar{P} = \bar{I}_{pr} \cdot \bar{U}_{bat} \quad (17)$$

gdje je:

\bar{P} [W] – snaga potrebna za svladavanje jedne sekunde nekog puta

\bar{I}_{pr} [A] – prosječna struja pražnjenja

\bar{U}_{bat} [V] – napon baterije

Tablica 3. *Rezultati mjerenja potrošnje robota na različitim nagibima terena*

Postotak nagiba:	Brzina [m/s]:	Struja [A]:	Snaga [W]:
10 %	0,1	1,36 ± 0,3%	17,29 ± 0,3%
	0,4	2,51 ± 0,5%	31,86 ± 0,6%
	0,7	3,69 ± 0,3%	46,65 ± 0,3%
20 %	0,1	2,81 ± 1,2%	35,41 ± 1,2%
	0,4	4,88 ± 1,2%	60,94 ± 0,9%
	0,7	7,20 ± 1,3%	88,47 ± 1,3%

Laboratorijsko mjerenje se izvodilo u Laboratoriju za tehnička vještačenja Fakulteta prometnih znanosti, a terensko mjerenje unutar Sveučilišnog kampusa Borongaj, kod Kliničkog bolničkog centra Dubrava te na Trgu Dragutina Domjanića u Sesvetama. Princip mjerenja struje i napona opisan je u poglavlju 3.3.

5.2 Rezultati i točnost simulacije nagiba

Izraz (16) dokazan je u izvršenim mjerenjima. Kako bi ovaj izraz vrijedio, morao se izjednačiti rad koji mobilni robot ulaže za kretanje po terenu s nagibom i rad koji mobilni robot ulaže za vuču kolica po terenu bez nagiba. Navedeno se ostvarilo dodavanjem težine na kolica koja je vukao mobilni robot na terenu bez nagiba, sve dok se struja koju mobilni robot troši nije izjednačila sa strujom koju mobilni robot troši na stvarnoj uzbrdici. Samim time izjednačila se potrošnja energije mobilnog robota na stvarnoj uzbrdici bez dodatnog tereta i na ravnom terenu s priključenim kolicima. Iz izraza (16) slijedi koeficijent trenja klizanja:

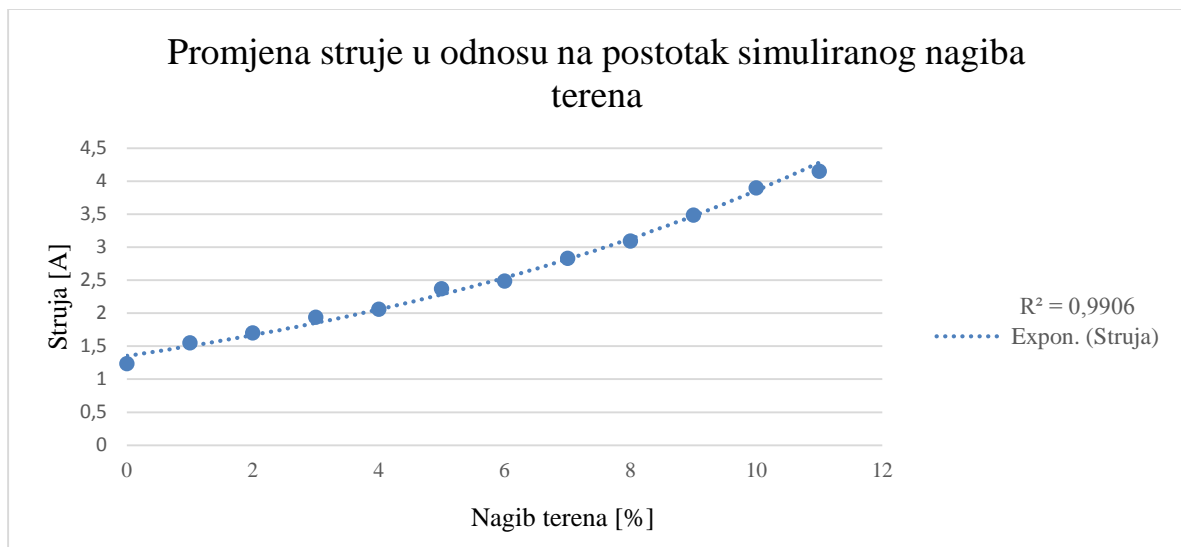
$$\mu = \frac{m_v \cdot \sin \tan^{-1} p \cdot \cos \tan^{-1} p}{m_k} \quad (18)$$

Nakon izračunatog koeficijenta trenja klizanja koji iznosi 0,62, isti se koristio u daljnjem mjerenju za simulaciju nagiba terena od 10 % i 20 % pri brzini od 0,7 m/s. Rezultati mjerenja prikazani su Tablicom 4. Koeficijent trenja klizanja približno se podudara s literaturom [30], [31], [32].

Tablica 4. *Usporedba potrošnje robota Pioneer 3-AT kada se kreće terenom nagiba od 10 % i 20 % i nagibom simuliranim s kolicima*

Nagib terena:	Parametri:	Mjereno na stvarnom nagibu bez tereta kolica	Simulirano s kolicima na terenu bez nagiba	Odstupanja simuliranog u odnosu na stvarno
10%	Struja [A]:	3,69 ± 0,3%	3,89 ± 1,3%	5,5 %
	Snaga [W]:	46,65 ± 0,3%	45,56 ± 1,6%	2,34 %
20%	Struja [A]:	7,2 ± 1,1%	7,4 ± 5%	2,78 %
	Snaga [W]:	88,47 ± 1,3%	91,36 ± 5,8%	3,27 %

Kako odstupanja simulacije nagiba i mjerenja nagiba na stvarnom terenu ne prelaze više od 6 %, napravljena su mjerenja od 0 % do 10 % s korakom od 1 %, kako bi se kasnije potrebni podaci karakteristične potrošnje energije mogli iskoristiti u algoritmu optimizacije. Rezultati su prikazani na Slici 12, a u prilogu 3. detaljnije su prikazani rezultati svakog mjerenja. Mjerenjem je utvrđeno da je potrošnja vozila kada se spušta niz nagib približno jednaka potrošnji kada vozilo vozi terenom bez nagiba.



Slika 12. Promjena struje u odnosu na postotak nagiba terena pri brzini od 0,7 m/s

6 Problem pronalaska energetski optimalne rute s obzirom na ograničenje kapaciteta akumulatora

Mjerenja i rezultati opisani u prethodnim poglavljima iskoristiti će se u implementaciji Dijkstrinog algoritma za računanje energetski optimalne rute. Pri tome će algoritam u svakoj iteraciji voditi računa o stanju napunjenosti akumulatora. Dijkstrin algoritam služi za pronalazak najkraćeg puta u usmjerenom grafu s nenegativnim vrijednostima bridova. Poznajući princip rada ovog algoritma, može ga se modificirati kako bi algoritam računao energetski optimalnu rutu. Kako bi se ovaj algoritam mogao implementirati na cestovnu prometnu mrežu potrebno ga je prikazati pomoću usmjerenog težinskog grafa. Za izvršavanje algoritma nije potrebno predočiti stvarne udaljenosti u prostoru već je tim relacijama bitno pridodati vrijednosti između točaka na grafu (težine). Upravo ova činjenica olakšava prikaz cestovne prometne mreže. U nastavku se opisuje kako se cestovni segmenti prikazuju grafom. Definiraju se težine cestovnih segmenata koje će biti pridodane težinskome grafu. Opisuje se kako je Dijkstrin algoritam moguće modificirati za izračun energetski optimalne rute između dvije točke u cestovnoj prometnoj mreži.

6.1 Teorija grafova

Grafovi su jedna od osnovnih i najčešće primjenjivanih matematičkih struktura. Grafovima se kvalitetno mogu prikazati i modelirati neke pojave i situacije. Graf je definiran s dva skupa: vrhovi V (engl. Vertex) i bridovi E (engl. Edges). Odnosno graf je uređeni par $G = (V, E)$ gdje je $\emptyset = V = V(G)$ skup vrhova na grafu, a $E = E(G)$ je skup bridova na grafu disjunktan sa skupom V , gdje svaki brid $e \in E$ spaja dva vrha $v \in V$. Mreža prometnica može se opisati grafom [33]. Vrhovi grafa (čvorovi) mogu predstavljati raskrižja, lokacije korisnika, lokacija skladišta ili lokacije punionica, odnosno polazišne ili odredišne točke, a bridovi predstavljaju cestovne segmente prometne mreže. Svakom bridu pridružena je njemu svojstvena težina $t \in (v_i, v_j): V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ (npr. cijena prijevoza, vrijeme potrebno za prolazak, potrošnja energije). U ovom radu težina će predstavljati utrošenu energiju za svladavanje brida tj. cestovnog segmenta. Uz težine bridova poznate su duljine bridova $s \in (v_i, v_j): (V \times V) \rightarrow \mathbb{R}^+$ te brzina $v_{brzina} \in (v_i, v_j): (V \times V) \rightarrow \mathbb{R}_0^+$. Optimalni put s_{v_1, v_2, \dots, v_k} jest onaj čiji je zbroj težina najmanji, gdje su v_1, v_2, \dots, v_k vrhovi grafa kroz koje vozilo treba proći [9].

6.2 Definiranje parametara za težinu cestovnih segmenata

Težina brida na grafu definirana je kao utrošena energija za savladavanje određenog puta. Snaga koja je potrebna mobilnom robotu za kretanje između dva vrha na grafu računa se prema izrazu (17). Mobilni robot kretao se konstantnom brzinom po ruti i prešao zadani put u vremenu t . Energija se definira izrazom:

$$E = P \cdot t \quad (19)$$

Sređivanjem izraza (19) uzimajući u obzir da je brzina konstantna te da je udaljenost jedina veličina koja se učitava, dobije se sljedeća funkcija:

$$E(s) = \frac{P \cdot s}{v} \quad (20)$$

gdje je:

$E(s)$ [J] - funkcija težine koja se pridodaje grafu (energija)

s [m] - prijeđeni put (duljina rute ili brida)

v [m/s] - brzina mobilnog robota

Udaljenosti se mogu učitati pomoću pomagala koja služe za navigaciju i pozicioniranje [34] npr. globalni pozicijski sustavi [35]. Poznate veličine U, l, v, t dobivene su mjerenjem na testnom poligonu što je prikazano u prethodnim poglavljima. Energetski optimalna brzina je ona brzina na kojoj mobilni robot troši najmanje energije. Brzina iznosi $0,7 \text{ m/s}$, a ujedno radi o maksimalnoj brzini kojom su se izvodila mjerenja. Ukoliko se u izraz (19) uvrste vrijednosti iz Tablice 3 i promatra isti prijeđeni put (u ovom slučaju računato je sa 100 m) za svaku brzinu, utoliko se dobije optimalna brzina mobilnog robota. Tablica 5 dokazuje tu tvrdnju.

Tablica 5. *Potrošnja energije s obzirom na brzinu kretanja mobilnog robota na putu od 100*

m

Nagib terena:	Brzina [m/s]:	Snaga [W]:	Energija [kJ]
10 %	0,1	17,29 ± 0,3%	17,290
	0,4	31,86 ± 0,6%	7,565
	0,7	46,65 ± 0,3%	6,664
20 %	0,1	35,41 ± 1,2%	35,41
	0,4	60,94 ± 0,9%	15,235
	0,7	88,47 ± 1,3%	12,638

6.3 Dijkstra algoritam za izračun energetske optimalne rute

Problem pronalaska energetske optimalne rute unutar prometne cestovne mreže može se riješiti primjenom neke od metoda za pronalazak najkraćeg puta na grafu [36].

Da bi riješio problem pronalaska optimalnog (najkraćeg) puta između dva grada, nizozemski matematičar Edsger Dijkstra, dizajnirao je algoritam koji je nazvan po njemu. Algoritam je dizajniran tako da pronalazi najkraće putove od zadanog vrha do svih ostalih vrhova i za rezultat ispisuje najkraću rutu [37]. Pseudo kod algoritma prikazan je Slikom 13. [38], a modificirao se tako da se težinama na bridove grafa uz duljine cestovnog segmenta pridodaje i utrošak energije.

```

1: procedure DIJKSTRA( $V, E, s$ )
2:   for all  $u \in V$  do
3:      $d[u] \leftarrow \infty$ 
4:      $p[u] \leftarrow null$ 
5:   end for
6:    $d[s] \leftarrow 0$ 
7:    $Q \leftarrow V$ 
8:    $S \leftarrow \emptyset$ 
9:   while  $|Q| > 0$  do
10:     $u \leftarrow IzvuciNajboljeg(Q)$ 
11:     $S \leftarrow S \cup \{u\}$ 
12:     $A \leftarrow LukoviSaPocetkomUCvoru(E, u)$ 
13:    for all  $luk(u, v) \in A$  do
14:      if  $d[v] > d[u] + Trosak(u, v)$  then
15:         $d[v] \leftarrow d[u] + Trosak(u, v)$ 
16:         $p[v] \leftarrow u$ 
17:      end if
18:    end for
19:  end while
20: end procedure

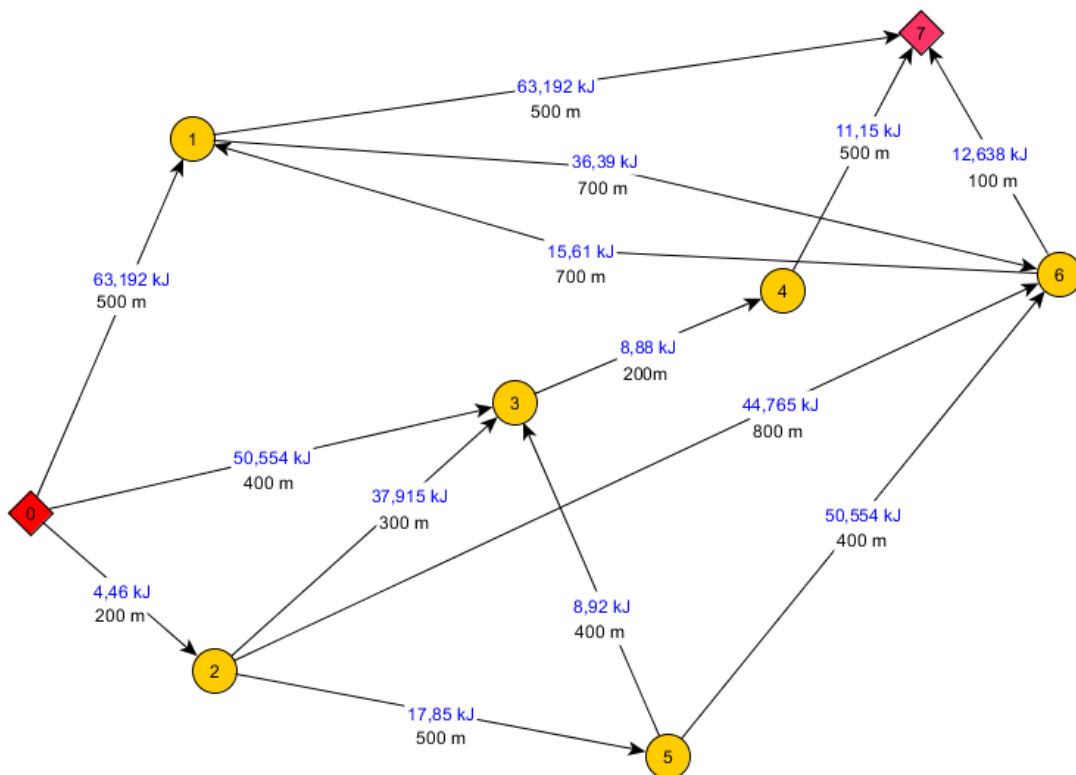
```

Slika 13. Pseudo kod Dijkstrinog algoritma [38]

Ovim postupkom Dijkstrin će algoritam dati za rezultat energetski optimalnu rutu. Dodatno, pomoću Dijkstrinog algoritma na grafu kojem težine predstavljaju udaljenosti između vrhova izračunat će se najkraća ruta. te usporediti s energetski optimalnom rutom. Algoritam funkcionira na sljedeći način. Za svaki vrh (čvor) $u \in V$ vodi se evidencija o trenutno najkraćem poznatom putu koji od izvorišta s vodi do njega. Pohranjuje se ukupna duljina puta (težina), a u varijablu p čvor koji mu na tom putu prethodi. Za početak za sve čvorove vrijednosti varijable p postavljene su u *null*. Vrijednost varijable d se postavlja u nulu samo izvorišnom čvoru, dok se svim ostalim čvorovima postavlja u ∞ . U iteracijama koriste se dva skupa čvorova, skup Q koji postavlja red čekanja za obradu i koji u početku sadrži sve čvorove, te skup S koji će sadržavati obrađene čvorove, odnosno na početku, dok nije obrađen nijedan čvor, je prazan. U svakoj iteraciji glavne petlje, iz skupa reda čekanja Q izvlači se čvor u koji ima najmanju vrijednost varijable d (najmanju udaljenost; u prvoj iteraciji to je izvorišni čvor s) i ubacuje se u skup obrađenih čvorova S . U sljedećem koraku izdvajaju se svi lukovi (u, v) kojima je početak u čvoru u , te se provodi postupak relaksacije na završetcima lukova. Ako je duljina trenutno najkraćeg poznatog puta između izvorišta s do čvora u uvećanog za duljinu luka (u, v) znači da je pronađen kraći put do čvora v preko čvora u te da je potrebno ažurirati varijable d i p za čvor v . Postupak se ponavlja sve dok ima neobrađenih čvorova. Nakon ovog postupka najkraća ruta može se rekonstruirati preko varijable p [38].

6.4 Primjena Dijkstrinog algoritma na nasumično generiranoj cestovnoj prometnoj mreži

Opisani Dijkstrin algoritam implementiran je na zamišljenom primjeru nasumično generirane prometne cestovne mreže koji je ilustriran Slikom 14. Na slici prikazana je cestovna mreža s prometnicama koje su određene svojom dužinom, potrošnjom energije i nagibom terena. Parametri dužine prometnog cestovnog segmenta, postotak nagiba terena, snaga potrebna za savladavanje takvog puta, postotak napunjenosti akumulatora potreban za savladavanje pojedine rute te dobivene težine prikazani su Tablicom 5.



Slika 14. Prometna mreža prikazana kao nepotpuni težinski usmjereni graf

Tablica 6. Parametri prometne mreže iz primjera prikazanog slikom 14.

Bridovi:	Duljina prometnog segmenta:	Postotak nagiba [%]:	Snaga [W]:	Potreban SOC za savladavanje puta [%]:	Težina E(s)[kJ]:
0-1	500	20	88,47	5,29	63,19
0-2	200	0	15,61	0,36	4,46
0-3	400	20	88,47	4,23	50,54
1-6	700	7	36,39	2,91	36,39
1-7	500	20	88,47	5,29	63,19
2-3	300	20	88,47	3,17	37,92,
2-5	500	3	24,99	1,43	17,85
2-6	800	8	39,17	3,63	44,77
3-4	200	6	31,08	0,73	8,88
4-7	500	0	15,61	0,91	11,15
5-3	400	0	15,61	0,72	8,92
5-6	400	20	88,47	4,23	50,55,
6-1	700	0	15,61	1,28	15,61
6-7	100	20	88,47	1,06	12,64

Dijkstrin algoritam korišten za implementaciju napisan je u programskom jeziku C# od strane asistenata Prometnog fakulteta u Zagrebu [39]. Originalni algoritam računao je samo najkraću rutu na cestovnoj mreži koja se definira upisom podataka u tekstualnu datoteku. Algoritam je izveden sa tri klase. Brid, Vrh i Dijkstra. Klasa vrh definira broj vrha, prethodni vrh te trenutnu težinu kada algoritam dođe do toga vrha. Klasa Brid definira brid sa dvije točke, početnim i završnim vrhom te težine svakog brida. U klasi Dijkstra definirano je funkcioniranje istoimenog algoritma te ispis rezultata na konzolu. Takav algoritam modificirao se na način da se uz najkraću rutu računa, energetska optimalna ruta i postotak akumulatora koji se troši zbog vožnje po određenoj ruti. Modificiranje se izvršilo metodom pod nazivom *Ukupno*, prikazanom Slikom 15., koja nakon što je Dijkstrinim algoritmom izračunata energetska optimalna ruta, računa duljinu i SOC potrebne za savladavanje te rute. Taj postupak se ponavlja i za računanje najkraće rute, jedina je razlika što se Dijkstrinim algoritmom računa najkraća ruta, a izrađenom metodom računa se ukupna energija i SOC potrebni za savladavanje najkraće rute.

```

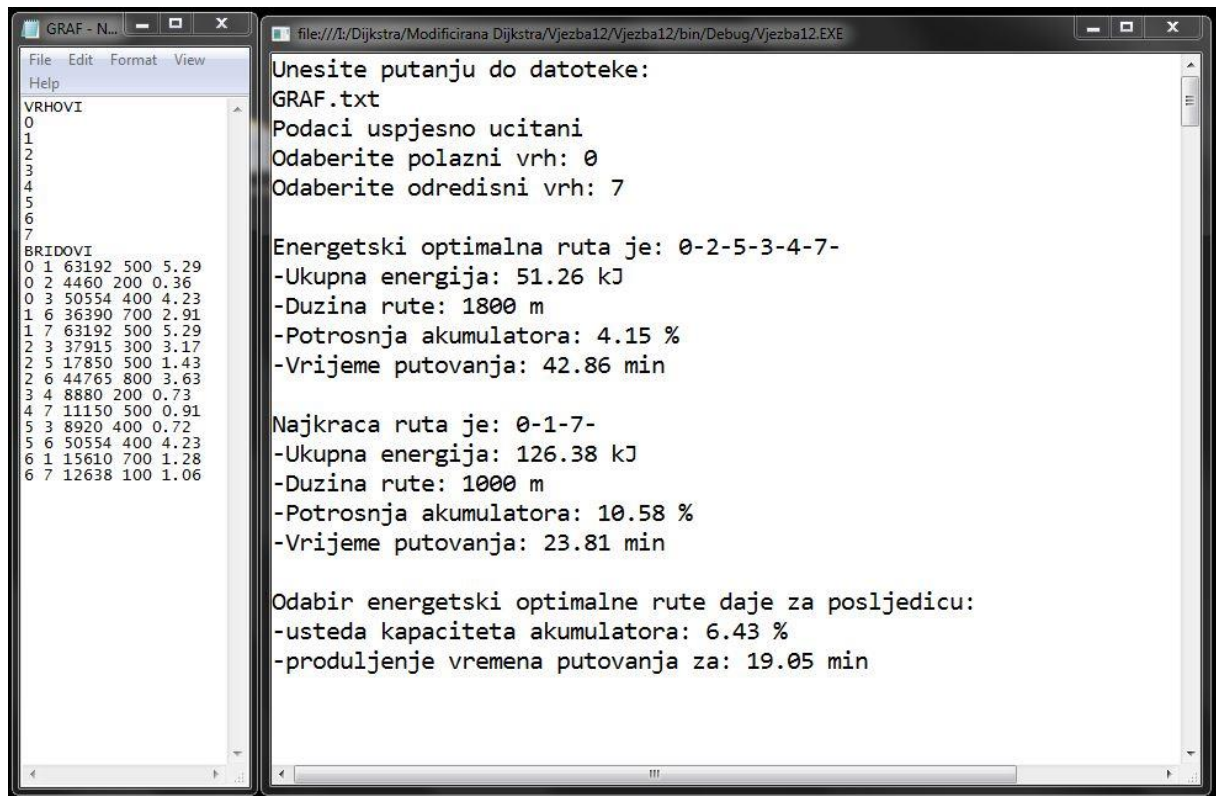
private double Ukupno(List<Vrh> Lista, string izbor)
{
    double tezina = 0;
    double vrstaRacuna = 0;
    for (int i = 0; i < Lista.Count; i++)
    {
        foreach (Brid brid in Bridovi)
        {
            if (izbor == "energija")
                vrstaRacuna = brid.Energija;
            else if (izbor == "soc")
                vrstaRacuna = brid.Soc;
            else
                vrstaRacuna = brid.Duljina;

            if (brid.Od == Lista[i] && brid.Do == Lista[i + 1])
            {
                tezina = tezina + vrstaRacuna;
            }
        }
    }
    return tezina;
}

```

Slika 15. Metoda Ukupno

Metoda prima dva parametra, listu tipa *Vrh* i niz znakova koji određuje funkciju metode. U listu su nakon izvršavanja Dijkstrinog algoritma, upisani brojevi vrhova koji predstavljaju rutu (najkraća ili energetska optimalna). Nakon učitane liste, u ovisnosti o parametru *izbor* metoda će izvršiti jednu od definiranih funkcija, izračun potrošnje energije najkraće rute, duljinu energetska optimalne rute ili SOC potreban za savladavanje te rute. Nakon izvršavanja metode, najkraća i energetska optimalna ruta uspoređuju se po potrošnji kapaciteta akumulatora koji je potreban za savladavanje pojedine rute te vremenu putovanja. Rad ovako modificiranog algoritma prikazan je Slikom 16.



Slika 16. Prikaz rada modificiranog Dijkstrinog algoritma

Za ovaj primjer energetska optimalna ruta je $s_{0,2,5,3,4,7}$ ukupna udaljenost rute je 1800 m. Najkraća ruta je $s_{0,1,7}$ čija je udaljenost 1000 m. Energetska optimalnom rutom potrebno je približno 43 min, dok je za najkraći put potrebno 24 min. Ovaj primjer zorno prikazuje da je vozilu energetska optimalnije voziti rutom koja ima manji nagib terena, iako je u ovom slučaju duža. Najkraći put ne mora biti i energetska optimalan, iako i to može biti slučaj. Najkraću rutu može se izabirati ako se radi o kraćim relacijama koje neće primorati vozilo na punjenje. Radi li se o duljim relacijama pogodnije je birati energetska optimalne rute i izbjeći punjenje ili savladati rutu uz što manje punjenja. Punjenje elektrokemijskih akumulatora vremenski je zahtjevno te vrijeme koje se „zaradi“ vožnjom najkraćom rutom višestruko se izgubi potrebnim vremenom punjenja [12]. Uzmemo li u obzir vrijeme punjenja mobilnog robota do 6 h očita je navedena tvrdnja. Osvrnemo li se na doseg današnje tehnologije u tom aspektu. Primjerice super punjači tvrtke Tesla snage 120 kWh pune akumulator 40 min do 80 % kapaciteta. Dok je 75 min potrebno je za punjenje do maksimalnog kapaciteta akumulatora [40].

7 Rasprava

U poglavlju Rasprava sagledane su činjenice o prihvatljivosti mjerenih rezultata, te primjeni modificiranog Dijkstrinog algoritma u sustavima za navigaciju vozila.

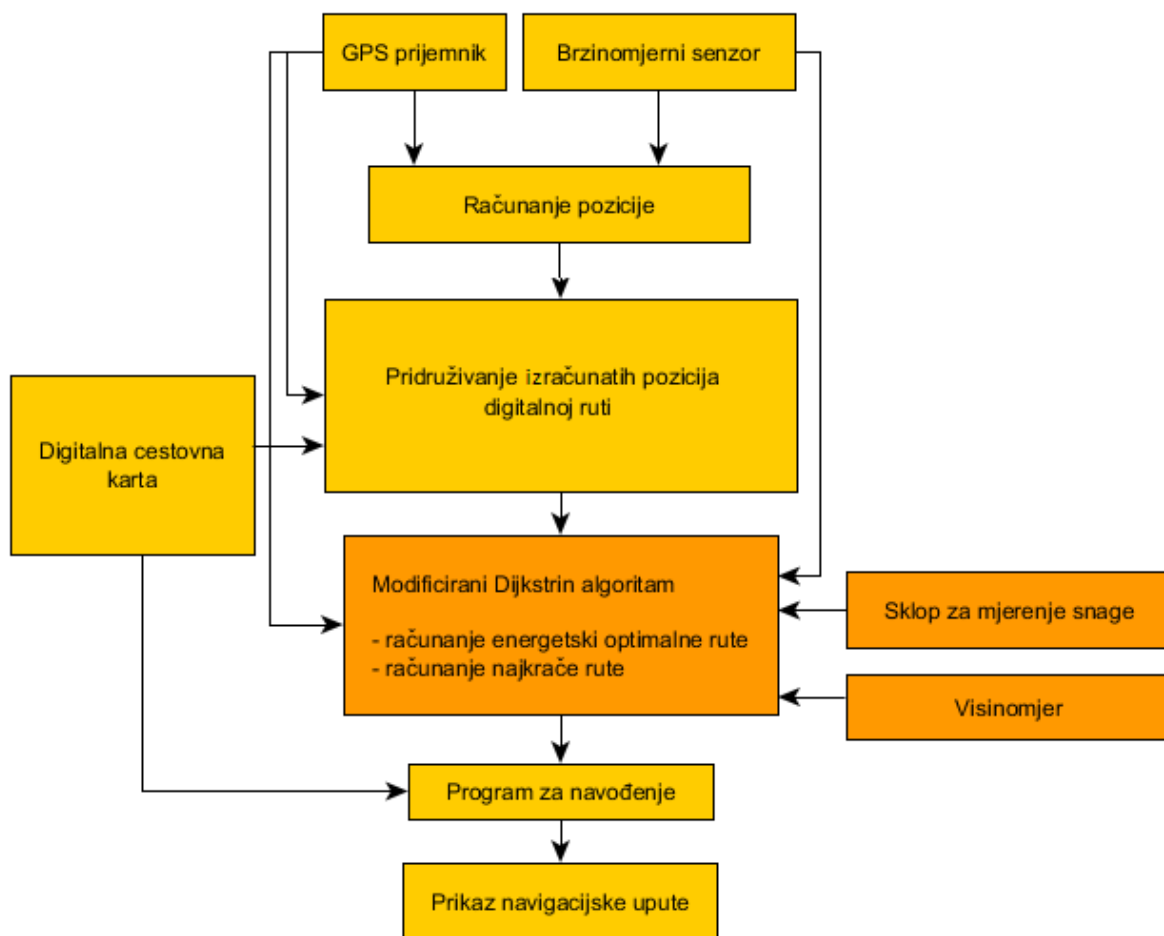
7.1 Prihvatljivost mjerenih rezultata

Mjerenje potrošnje energije vozila izvodilo se s istraživačkim mobilnim robotom Pioneer 3-AT. Mobilni robot ima karakteristike električnog vozila no, on predstavlja njegov umanjeni prikaz. U radu je zbog malih brzina koje mobilni robot razvija zanemaren otpor zraka koji kod većih dimenzija električnih vozila i većih brzina koje vozila mogu razvijati, mijenjaju pristup problemu. Metoda simulacije terena priključivanjem dodatnog tereta na kolica koja vuče vozilo, zbog dimenzija i težine kolica nije primjenjiva kod električnih vozila u stvarnoj veličini.

7.2 Primjena modificiranog Dijkstrinog algoritma

Implementacija modificiranog Dijkstrinog algoritma omogućuje da mobilni robot u stvarnom vremenu optimalno iskoristi kapacitet akumulatora koji mu je na raspolaganju. S obzirom na problem ne dovoljnog kapaciteta akumulatora kod električnih vozila, razvoj ovakvih i sličnih algoritama [10] doprinosi optimalnoj potrošnji kapaciteta akumulatora električnih vozila.

Ovakav algoritam moguće je primijeniti na navigacijskom sustavu [9] koji bi vozaču mogao predložiti odabir više ruta, odnosno predložiti energetski isplativiji pravac kretanja, ako vozilo nema dovoljan kapacitet akumulatora za završetak rute. Skica takvog sustava prikazana je Slikom 16.



Slika 17. Model navigacijskog sustava uz dodatak modificiranog Dijkstrinog algoritma

Kod potpuno autonomnih vozila algoritmi ovog tipa pronalaze značajniju primjenu jer vozač ne odlučuje o ruti kojom će se vozilo kretati.

8 Zaključci

Smanjenje potrošnje energije i sprječavanje energetske gubitaka imaju sve veću važnost za Europsku Uniju (EU). Čelnici EU-a postavili su 2007. cilj smanjenja godišnje potrošnje energije u Uniji za 20 % do 2020. Provode se mjere za energetske učinkovitost sa ciljem postizanja održive opskrbe energijom, smanjenje emisije stakleničkih plinova, poboljšanje sigurnosti opskrbe i smanjenje troškova uvoza, ali i za promicanje konkurentnosti europskih gospodarstava.

Mobilni robot P3-AT posjeduje senzore za snalaženje u prostoru i pozicioniranje. Pogodan je mikro prikaz potpunog autonomnog električnog vozila. Problematika koja se javlja pri upotrebi mobilnog robota također je uvelike prisutna i kod svih potpuno autonomnih vozila.

Spremnici energije predstavljaju problem u razvoju tehnologije električnih vozila. Što je veća potreba za energijom time se povećava masa spremnika energije. Ako je cilj povećati doseg električnog automobila, mogu mu se dodati spremnici energije, no to utječe na masu vozila i time se ne čini značajni pomak. Predloženo u ovome radu jest korištenje određenih algoritama kako bi se izabrala energetske optimalna ruta, s ciljem smanjenja potrošnje energije.

U radu je razrađena ideja o optimalnom iskorištavanju dostupne energije, odnosno autonomno vozilo s obzirom na željene destinacije može odrediti njemu energetske optimalni put.

U sklopu istraživanja prikupljeni su podaci o potrošnji mobilnog električnog robota Pioneer 3-AT koji su se koristili za implementaciju algoritma za odabir optimalne rute, a koji se mogu koristiti i u druge istraživačke svrhe. Za potrebe takvog mjerenja izradio se sklop za mjerenje struje i napona pomoću Hallove sonde i Arduino razvojne platforme. Shema sklopa i način izvedbe prikazani su u radu i mogu se koristiti u daljnjim istraživanjima.

Predložen je način simulacije terena s nagibom u svrhu mjerenja potrošnje energije malog električnog vozila te su mjerenja izvedena s tim ciljem. Ona dokazuju matematički model, a samim time simulaciju i njene rezultate. Simulirano je kretanje po uzbrdici priključivanjem kolica specifične mase na malo autonomno električno vozilo. Simulacija je rezultirala greškom koja ne premašuje 6 % uspoređujući sa stvarno izmjerenim.

Korištenjem izmjerenih podataka o potrošnji energije pokazao se način modifikacije Dijkstrinog algoritma kako bi računao energetske optimalnu rutu te mogućnosti implementacije

istog u navigacijski sustav vozila. Izmjereni podaci o potrošnji energije malog autonomnog električnog vozila korišteni su u izračunu težina bridova na grafu korištenih kao ulazni podatak u Dijkstrin algoritam.

Daljnja istraživanja usmjerena su na implementaciju algoritma za snalaženje potpuno autonomnog vozila u prostoru. Pritom će se koristiti prethodno navedeni Dijkstrin algoritam kako bi se smanjila potrošnja energije te će se mobilni robot opremiti pametnim računalom, laserom i kamerom, iskoristiti fuziju podataka sa senzora za bolje snalaženje u prostoru

Osim toga vodilo bi se računa o obnovljivim izvorima energije te bi se tako na nosač od P3-AT mogle ugraditi solarne ploče koje bi obnavljale energiju akumulatora. Razvijenim algoritmom bi se gubitak energije nastojao bi se minimizirati, te bi se primjenom solarnih ploča povećala autonomija vozila. Provelo bi se istraživanje vezanom za potpuno autonomnu vožnju i minimiziranje grešaka dodavanjem podataka senzora i implementacijom metoda za ispravljanje grešaka. Moguća su istraživanja usmjerena k povezivanju autonomnih letjelica s malim električnim vozilom, s ciljem skeniranja prostora pomoću letjelice te navođenje autonomnog vozila.

9 Zahvale

Zahvaljujemo našem mentoru izv. prof. dr.sc Tončiju Cariću na trudu i mnoštvu razumijevanja i pomoći pri izradi ovog rada, zahvaljujemo se doc. dr.sc. Eduardu Ivanjku na brojnim savjetima i usmjerenjima pri izradi ovog rada. Zahvale doc. dr.sc Davoru Sumporu, doc. dr.sc. Mariu Muštri na trudu i volji za pregledavanjem naših mehaničkih izvoda i brojnim drugim savjetima. Zahvaljujemo se i mag.ing. Tomislavu Erdeliću na iskustvenim savjetima i riječima podrške koji puno znače mlađim kolegama, prijatelju i studentu Fakulteta elektrotehnike i računarstva u Zagrebu Matiji Milišiću zahvaljujemo na pomoći pri implementaciji određenih algoritama za mobilnog robota te svim studentima i zaposlenicima Fakulteta prometnih znanosti koji su svojim stručnim savjetima pomogli u izradi ovoga rada. Zahvaljujemo se Mariji Pinturić i Andrei Pernek koje su vrijedno lektorirale naš rad. Na kraju zahvaljujemo i našim djevojkama Kristini Dimitrov i Klari Kulišić koje su imale razumijevanja pri našem više mjesecom izbivanju radi dovršetka ovog rada.

Popis literature

- [1] Golubić, J.: *Promet i okoliš*, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1999.
- [2] Cvitanović, V., Ćurković, T., Robić, M., Tirić, S., Vidić, L.: "O električnim automobilima i preradi klasičnog automobila u električni, projekt "Europe Electric Car", Škola za cestovni promet, Zagreb, 2014.
- [3] Glavaš, H., Antunović, M., Keser, T.: *Cestovna vozila na električni pogon*, Dvadesetšesti skup o prometnim sustavima s međunarodnim sudjelovanjem Automatizacija u prometu, Zagreb, 2006.
- [4] Stojkov, M., Gašparović, D., Pelin, D., Glavaš, H.: *Električni automobil - povijest razvoja i sastavni dijelovi*, Plin 2014., 12. skup o prirodnom plinu, toplini i vodi, Osijek, 2014.
- [5] Carlos, F., Vicente, M., Joshue, P., David, G., Fawzi, N.: *Optimal energy consumption algorithm based on speed reference generation for urban electric vehicles*, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Seoul, 2016.
- [6] Opačić, A.: *Autonomna vozila - automobili budućnosti*, Ekscentar, svez. 10, pp. 114-115, 2007.
- [7] http://www.mup.hr/UserDocsImages/PU_PG/AKCIJE/aim.pdf, pristupljeno: 20.2.2016.
- [8] N.H.T.S. Administration: *Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles*, Wasington, 2013.
- [9] Jurik, T., Cela, A., Hamouche, R., Natowicz, R., Reama, A., Niculescu I., Julien, J.: *Energy Optimal Real-Time Navigation System*, IEEE Inteligent transport system magazine, pp. 66-79, 2014.
- [10] Sachenbacher, M., Leucker, M., i Artmeier, A.: *Efficient Energy-Optimal Routing for Electric Vehicles*, Proceedings of the Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence, San Francisco, 2011.
- [11] Eisner, J., Funke, S., Storandt, S.: *Optimal Route Planning for Electric Vehicles in Large Networks*, Proceedings of the Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence, San Fancisco, 2011.
- [12] Sweda, T., Kalbjan, D.: *Finding minimum-cost paths for electric vehicles*, Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, Greenville, SC, 2012.
- [13] <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue>, pristupljeno: 26.3.2016
- [14] <http://www.mobilerobots.com/ResearchRobots/P3AT.aspx>, pristupljeno: 28.12.2015.

- [15] Erdelić, T.: Lokalizacija mobilnog robota Pioneer 3-DX pomiću kinect senzora, Završni rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2010.
- [16] Operativni priručnik za Pioneer robote, Mobile Robots Inc., Amherst, 2006.
- [17] <http://www.mobilerobots.com/Software.aspx>, pristupljeno: 12.2.2016.
- [18] <http://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>, pristupljeno: 15.2.2016
- [19] Ramsden, E.: Hall-effect sensors: theory and applications, Elsevier, Oxford, 2006.
- [20] <http://fritzing.org/home/>, pristupljeno: 15.2.2016.
- [21] Specifikacija proizvoda ACS715, Allegro MicroSystems, Worcester, 2006.
- [22] <http://www.farnell.com/datasheets/1498243.pdf>, pristupljeno: 15.2.2016.
- [23] Guzzella, L., Sciarretta, A.: Vehicle Propulsion Systems Introduction to Modeling and Optimization, Springer, Berlin, 2007.
- [24] Kujundžić, G.: Estimacija stanja i parametara VRLA baterije nelinearnim Kalmanovim filtrom, Rad za KDI, Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2015.
- [25] Eshani, M., Gao, Y., Gay, S., Emadi, A.: Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles, CRC Press, Boca Canton, 2005.
- [26] Husain, I.: Electric and hybrid vehicles- Design Fundamentals, CRC Press, Boca Canton, 2003.
- [27] Cindro, N.: Fizika 1, Školska knjiga, Zagreb, 1975.
- [28] Jurum-Kipke, J.: Mehanika u prometnom inženjerstvu, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2001.
- [29] Pisačić, K.: Osnove inženjerskog proračuna, Skripta, Sveučilište Sjever, Koprivnica, 2014.
- [30] Alvarez, L., Jingang, Y., Horowitz, R., Olmos, L.: Dynamic Friction Model-Based Tire-Road Friction Estimation and Emergency Braking Control, ASME, svez. 127, pp. 22-32, 2005.
- [31] Novosel, D.: Analiza materijala valjka za mjerenje kočne sile, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2015.
- [32] Persson, B., Tartaglino, U., Albohr, O., Tosatti, E.: Rubber friction on wet and dry road surfaces: the sealing effect, Phys. Rev. B 71, 035428, 2005.

- [33] Goldemac, A., Mimica, A., Vučićić, T.: Od koenigsberških mostova do kineskog poštara, *Math.e*, svez. 21, 2004.
- [34] Drane C., Rizos, C.: *Positioning Systems in Intelligent Transportation Systems*, Norwood, Artech House, 1998.
- [35] Zhao, Y.: *Vehicle Location and Navigation Systems*, Norwood, Artech House, 1997.
- [36] Živković, M.: *Primjena informacijsko komunikacijskih tehnologija za optimizaciju rute električnog vozila s ciljem povećanja njegove autonomije*, Diplomski rad, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2015.
- [37] Dijkstra, E.W.: A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische mathematik*, svez. 1, pp. 269-271, 1959.
- [38] Galić, A.: *Metaheurističke metode rješavanja problema usmjeravanja vozila s vremenskim prozorima*, Diplomski rad, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2012.
- [39] Galić, A., Mario, B., Fosin, J.: *Laboratorijske vježbe, Algoritmi i programiranje*, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2010.
- [40] <https://www.teslamotors.com/models-charging#/ontheego>, pristupljeno: 20.2.2016.

Sažetak

Leo Tišljarić
Dominik Cvetek

MJERENJE POTROŠNJE ENERGIJE MALOG ELEKTRIČNOG VOZILA S OBZIROM NA KONFIGURACIJU TERENA U SVRHU OPTIMIZIRANJA RUTE VOZILA

U ovom istraživanju prikazan je način modifikacije Dijkstrinog algoritma u svrhu izračuna energetske optimalne rute. Istaknut je značaj poznavanja parametra stanja napunjenosti akumulatora te kako se kapacitet akumulatora troši u odnosu na konfiguraciju terena po kojemu vozi mobilni robot. Predložen je način simulacije terena sa različitim postotkom nagiba dodavanjem kolica za simulaciju. Na kraju su prikazana provedena terenska mjerenja sa mobilnim robotom, dokazan je izraz za težinu simulacijskih kolica i time opravdani rezultati simulacije.

Ključne riječi: mobilni robot, Pioneer 3-AT, simulacija konfiguracije terena, Dijkstrin algoritam, energetska optimalna ruta

Summary

Leo Tišljarić
Dominik Cvetek

MEASUREMENT OF ENERGY CONSUMPTION OF A SMALL ELECTRIC VEHICLE WITH RESPECT TO CONFIGURATION OF THE TERRAIN TO OPTIMIZE VEHICLE ROUTES

This research carries out the modified Dijkstra algorithm for the calculation of energy optimal routes. The importance of knowing the battery parameters like charge level and consumption of capacity in relation to the configuration of the terrain are described. We proposed a method of simulating the terrain with different percentage of gradient adding charts for simulation. At the end, there were carried out measurements with the mobile robot demonstrated the expression for the weight simulation carts and thus justified the simulation results.

Key words: mobile robot, Pioneer 3-AT, simulating the terrain with different gradient, Dijkstra algorithm, energy optimal routes

Životopis autora

Leo Tišljarić rođen je 29. rujna 1994. godine u Zagrebu, Hrvatska. Godine 2013. završio je svoje srednjoškolsko obrazovanje u Tehničkoj školi Ruđera Boškovića u Zagrebu, program Tehničar za računarstvo. Nakon završene srednje škole upisuje preddiplomski studij Inteligentni transportni sustavi i logistika na Fakultetu prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, smjer Inteligentni transportni sustavi.

Dominik Cvetek rođen je 08. prosinca 1992. godine u Zagrebu, Hrvatska. Godine 2011. završio je svoje srednjoškolsko obrazovanje u Školi za cestovni promet u Zagrebu, program Tehničar za cestovni promet. Nakon završene srednje škole upisuje preddiplomski studij Inteligentni transportni sustavi i logistika na Fakultetu prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, smjer Inteligentni transportni sustavi.

Popis slika

Slika 1. *Fizičke komponente Pioneer 3-AT mobilnog robota*

Slika 2. *Arduino Due štit*

Slika 3. *Ugrađeni sklop za mjerenje struje i napona*

Slika 4. *Dio algoritma koji realizira plutajuću sredinu i medijan filter*

Slika 5. *Sile na terenu s i bez nagiba*

Slika 6. *Trokut potreban za izvod postotka nagiba terena*

Slika 7. *Prikaz eksperimenta simulacije uzbrdice*

Slika 8. *Shema pokusa iscrpljenja akumulatora*

Slika 9. *Rezultati pokusa iscrpljenja baterije*

Slika 10. *Lokacija mjerenja na nagibu od 10%*

Slika 11. *Lokacija mjerenja na nagibu od 20%*

Slika 12. *Promjena struje u odnosu na postotak nagiba terena pri brzini od 0,7 m/s*

Slika 13. *Pseudo kod Dijkstrinog algoritma*

Slika 14. *Prometna mreža prikazana kao nepotpuni težinski usmjereni graf*

Slika 15. *Metoda Ukupno*

Slika 16. *Prikaz rada modificiranog Dijkstrinog algoritma*

Slika 17. *Model navigacijskog sustava uz dodatak modificiranog Dijkstrinog algoritma*

Popis tablica

Tablica 1. *Karakteristike Arduino Due razvojne pločice*

Tablica 2. *Specifikacije mobilnog robota Pioneer 3-AT*

Tablica 3. *Rezultati mjerenja potrošnje robota na različitim nagibima terena*

Tablica 4. *Usporedba potrošnje robota Pioneer 3-AT kada se kreće terenom nagiba od 10% i 20 % i nagibom simuliranim s kolicima*

Tablica 5. *Potrošnja energije s obzirom na brzinu kretanja mobilnog robota na putu od 100m*

Tablica 6. *Parametri prometne mreže iz primjera*

Prilozi

Prilog 1: Specifikacija multimetra DT-830B

Funkcije	Mjerni opseg	Detaljnost	Točnost	Obilježje
DCV	200 mV	100 μ V	+ - 0.5% ili + - 2	Max. Izlaz 1000VDC
	2000 mV	1 mV		
	20 V	10 mV	+ - 0.8% ili + - 2	
	200 V	100 mV		
	1000 V	1 V		
ACV	200 V	100 mV	+ - 0.2% ili + - 10	Max. Izlaz 750 V
	750 V	1 V		
DCA	200 μ A	100 nA	+ - 1% ili + - 2	
	2000 μ A	1 μ A	+ - 2 % ili + - 2	
	20 mA	10 μ A	+ - 2 % ili + - 2	
	200 mA	100 μ A		
	10 A	10 mA		
Otpor	200 Ω	100 Ω	+ - 0.8 % ili + - 2	
	2000 Ω	1 Ω		
	20 k Ω	10 Ω	+ - 1 % ili + - 2	
	200 k Ω	100 Ω		
	2000 k Ω	100 Ω		

Prilog 2. *Specifikacije laserskog mjerača udaljenosti Bosch PLR 50 C*

Dioda lasera	635 nm
Klasa lasera	2
Mjerno područje	0,05 – 50,00 m
Točnost mjerenja, tip	± 2,0 mm
Vrijeme mjerenja, tip.	0,5 s
Vrijeme mjerenja, maks.	4 s
Baterija	3 x 1,5-V-LR03 (AAA)
Automatsko isključivanje	5 min
Težina	0,132 kg

Prilog 3: Terenska mjerenja (simulacija nagiba od 0 do 10%)

0%					4%				
Struja:					Struja:				
Br.mjerenja:	Prosjeck struje [A]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija(A):	Br.mjerenja:	Prosjeck struje [A]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija(A):
1	1.19003	0.002027347	0.003901	0.062455885	1	1.996323929	0.004252287	0.003441	0.058656216
2	1.241448621	4.08647E-05			2	2.154973103	0.008730961		
3	1.174408889	0.003678081		Standardna devijacija(mA):	3	2.061211429	1.03726E-07		Standardna devijacija(mA):
4	1.334336774	0.009856658		62.4558854	4	2.033625517	0.000778855		58.65621649
Ukupno:	1.235056071				Ukupno:	2.061533494			
Snaga:					Snaga:				
Br.mjerenja:	Prosjeck snage [W]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija [W]:	Br.mjerenja:	Prosjeck snage [W]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija [W]:
1	15.25093574	0.1284746	0.629069	0.793138883	1	25.63671221	0.590474336	0.562709	0.750139113
2	15.0549695	0.307359116			2	27.64340009	1.533299211		
3	15.15369737	0.207636886		Standardna devijacija [mW]:	3	26.26155424	0.020615576		Standardna devijacija [mW]:
4	16.9778745	1.872806546		793.1388826	4	26.07887543	0.10644563		750.1391125
Ukupno:	15.60936928				Ukupno:	26.40513549			
1%					5%				
Struja:					Struja:				
Br.mjerenja:	Prosjeck struje [A]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija(A):	Br.mjerenja:	Prosjeck struje [A]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija(A):
1	1.540816129	0.000108345	0.00409	0.063949662	1	2.354690769	0.000251334	0.003273	0.057207767
2	1.600847742	0.002462414			2	2.450739677	0.006431299		
3	1.450937826	0.010057521		Standardna devijacija(mA):	3	2.384947742	0.000207459		Standardna devijacija(mA):
4	1.612298387	0.003729956		63.9496618	4	2.291799	0.006200822		57.20776697
Ukupno:	1.551225021				Ukupno:	2.370544297			
Snaga:					Snaga:				
Br.mjerenja:	Prosjeck snage [W]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija [W]:	Br.mjerenja:	Prosjeck snage [W]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija [W]:
1	19.15377925	0.065934821	0.546229	0.739072749	1	29.35124704	0.000462863	0.053517	0.231336629
2	18.85497618	0.001766126			2	29.06973646	0.06759809		
3	17.76635749	1.278355856		Standardna devijacija [mW]:	3	29.69142871	0.130823939		Standardna devijacija [mW]:
4	19.81289303	0.83885731		739.0727491	4	29.20651895	0.015181651		231.3366288
Ukupno:	18.89700149				Ukupno:	29.32973279			
2%					6%				
Struja:					Struja:				
Br.mjerenja:	Prosjeck struje [A]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija(A):	Br.mjerenja:	Prosjeck struje [A]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija(A):
1	1.61428125	0.007436115	0.006683	0.081749251	1	2.40144871	0.006834494	0.012292	0.11087142
2	1.629807333	0.004999456			2	2.552877419	0.004727623		
3	1.747510645	0.002208669		Standardna devijacija(mA):	3	2.628027037	0.020709319		Standardna devijacija(mA):
4	1.810457419	0.01208752		81.74925076	4	2.354125667	0.016898451		110.8714199
Ukupno:	1.700514162				Ukupno:	2.484119708			
Snaga:					Snaga:				
Br.mjerenja:	Prosjeck snage [W]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija [W]:	Br.mjerenja:	Prosjeck snage [W]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija [W]:
1	20.95246545	0.993505332	0.967606	0.983669733	1	30.75796373	0.106889277	1.871805	1.368139316
2	20.9935148	0.91335872			2	30.25602663	0.687036011		
3	22.7558198	0.650614808		Standardna devijacija [mW]:	3	33.39851535	5.352802151		Standardna devijacija [mW]:
4	23.09505126	1.312945712		983.6697326	4	29.92710624	1.340493314		1368.139316
Ukupno:	21.94921282				Ukupno:	31.08490299			
3%					7%				
Struja:					Struja:				
Br.mjerenja:	Prosjeck struje [A]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija(A):	Br.mjerenja:	Prosjeck struje [A]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija(A):
1	1.901196786	0.001553125	0.004267	0.065325221	1	2.678908966	0.02323176	0.01185	0.1088569
2	1.960767	0.000406446			2	2.921028387	0.008046043		
3	1.863846207	0.005892142		Standardna devijacija(mA):	3	2.778561935	0.002784326		Standardna devijacija(mA):
4	2.036616	0.009217824		65.32522106	4	2.946815313	0.013337169		108.8568997
Ukupno:	1.940606498				Ukupno:	2.83132865			
Snaga:					Snaga:				
Br.mjerenja:	Prosjeck snage [W]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija [W]:	Br.mjerenja:	Prosjeck snage [W]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija [W]:
1	24.43961103	0.095475366	0.356813	0.597338622	1	34.18962668	4.841254958	2.778956	1.667020012
2	25.33292118	0.341429002			2	37.14862736	0.575649188		
3	23.92084842	0.685175844		Standardna devijacija [mW]:	3	35.58428638	0.649032434		Standardna devijacija [mW]:
4	25.30102703	0.305173505		597.338622	4	38.63710708	5.049886297		1667.020012
Ukupno:	24.74860191				Ukupno:	36.38991188			

8%				
Struja:				
Br.mjerenja:	Prosjek struje [A]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija(A):
1	3.079104667	0.000144226	0.00311	0.055767868
2	3.006736452	0.007119584		
3	3.12301069	0.001017394		Standardna devijacija(mA):
4	3.155604516	0.004159016		55.76786763
Ukupno:	3.091114081			
Snaga:				
Br.mjerenja:	Prosjek snage [W]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija [W]:
1	39.04476553	0.014653478	0.436015	0.660314629
2	38.18332813	0.965284545		
3	39.43899911	0.074628423		Standardna devijacija [mW]:
4	39.99617555	0.689495191		660.3146291
Ukupno:	39.16581708			
9%				
Struja:				
Br.mjerenja:	Prosjek struje [A]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija(A):
1	3.559105484	0.00545448	0.012639	0.112423823
2	3.604911935	0.014318732		
3	3.310843	0.030418161		Standardna devijacija(mA):
4	3.466143704	0.00036509		112.4238225
Ukupno:	3.485251031			
Snaga:				
Br.mjerenja:	Prosjek snage [W]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija [W]:
1	43.31381164	0.096113518	0.227165	0.476618763
2	42.79366687	0.044151661		
3	42.33601896	0.445917945		Standardna devijacija [mW]:
4	43.57166188	0.322478656		476.6187627
Ukupno:	43.00378984			

10%				
Struja:				
Br.mjerenja:	Prosjek struje [A]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija(A):
1	3.884367742	0.000139978	0.002401	0.048995566
2	3.916626538	0.000417286		
3	3.82478875	0.005099418		Standardna devijacija(mA):
4	3.959012813	0.00394558		48.99556572
Ukupno:	3.896198961			
Snaga:				
Br.mjerenja:	Prosjek snage [W]:	Kvadratno odstupanje:	Varijanca:	Standardna devijacija [W]:
1	49.12858501	1.9611155	0.993461	0.996725245
2	47.025992	0.493077359		
3	48.17780501	0.202156651		Standardna devijacija [mW]:
4	46.58036467	1.317495348		996.7252453
Ukupno:	47.72818667			