

Lokalizacija nakupovalnega vozička v trgovini

Aljaž Trebušak, Peter Krapež

Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška c. 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: at2337@student.uni-lj.si

Localization of a shopping cart in a supermarket

A method of localization of a shopping cart in a supermarket is proposed. Online shops have become very popular nowadays, even grocery shopping. We developed a system that helps workers navigate through the supermarket when gathering groceries for online orders to help speed up the process. The system consists of five Ultra-wideband beacons for rough localization. Four of them are placed in four store corners, and the fifth is mounted on the shopping cart. For precise localization and orientation of the cart, Aruco markers on the store shelves are used. We detect them with a camera that is mounted on a shopping cart. A graphical user interface for a 7-inch touchscreen was also developed. The worker is presented with information about his/her position in a store. The interface also shows the surrounding shelves, which are coloured green when their markers are detected. The entire system can be modified to adapt to a specific store or customer demand.

1 Uvod

Trgovine z mešanim blagom se, zaradi novih tehnologij in s tem tudi drugačnih navad ljudi, srečujejo z novimi oblikami poslovanja. S tem pa tudi z novimi izzivi. Sploh v času korona krize, ko je dostop do trgovin omejen. Ena izmed teh oblik je tudi prodaja preko spletnih trgovin. Kupci torej preko spletne strani trgovca naročijo izdelke na dom. Ideja je sama po sebi precej enostavna, vendar se v ozadju skriva veliko dela in priprav. Da lahko spletno poslovanje sploh funkcionira, mora biti celoten sistem med seboj usklajen in časovno učinkovit.

Eden od delov tega sistema, je tudi nabiranje in priprava izdelkov za pošiljanje na dom. Zaenkrat, prej omenjena naloga poteka podobno kot če bi mi prišli v trgovino, le da to za nas opravi nekdo drug. Zaposleni torej dobi nakupovalni seznam živil, ki smo jih kupili v spletni trgovini. Nato se z nakupovalnim vozičkom poda v trgovino in po trgovini nabira naročene izdelke. Pri planiranju poti, ki jo prehodi se lahko zanaša le na lastne izkušnje o tem, kje se določeni izdelki nahajajo. Takšno delo je zato precej naporno, tako fizično kot psihično.

Pri podjetju SPAR Slovenija, so se zato odločili, da bodo zaposlenim skušali olajšati delo, obenem pa skrajšati dobavne roke pri naročanju iz njihove spletne trgovine.

Podjetje je podalo pobudo za izdelavo sistema, ki ga bomo predstavili v nadaljevanju.

2 Naloga

Naša naloga je bila, da v sodelovanju s podjetjem SPAR Slovenija in Robolabom, razvijemo sistem za lokalizacijo nakupovalnega vozička v trgovini. Takšen sistem bi omogočal določitev pozicije nakupovalnega vozička kjerkoli znotraj trgovine. S tem bi zaposleni, ki izpolnjuje spletne nakupovalne sezname točno vedel kje se nahaja in kje se nahajajo izdelki iz seznama. Sistem bi izračunal tudi optimalno pot po trgovini, kar bi skrajšalo čas za izpolnitev posameznega naročila. Obenem se na vozičku nahajal tudi grafični vmesnik z vsemi potrebnimi informacijami (npr. izpolnjenost nakupovalnega seznama, trenutna pozicija na zemljevidu trgovine, pot, lokacija izdelka). Prilagojen sistem bi lahko uporabljali tudi kupci. V tem primeru bi lahko le spremenili grafični prikazovalnik, da bi prikazoval recimo tudi ceno in popuste, omogočal iskanje izdelkov. Tudi pot po trgovini bi lahko spremenili iz časovno optimalne na poslovno optimalno.

Pri izvedbi naloge smo se odločili za uporabo široko pasovne radijske tehnologije (ang. Ultra-wideband, UWB) za določitev absolutne pozicije v prostoru ter Aruco markerjev za določitev natančne lege v okolici polic.

2.1 UWB tehnologija

UWB je radijska tehnologija za komunikacijo na kratkih razdaljah, podobno kot Bluetooth ali WiFi. Za razliko od njiju, deluje na razmeroma visokih sredinskih frekvencah nad 2,5 GHz in s pasovno širino vsaj 500 MHz oziroma 20 % sredinske frekvence. Zaradi velike pasovne širine je lahko oddan signal v časovnem prostoru zelo kratek, kar omogoča visoko časovno ločljivost. Uporablja se za hitro komunikacijo in lokalizacijo z veliko točnostjo. Razdalje med napravami izračunava algoritem, ki temelji na merjenju časa preleta (angl. Time-of-Flight). Še ena lastnost, ki jo velja poudariti, je zelo majhna poraba energije [1, 2].

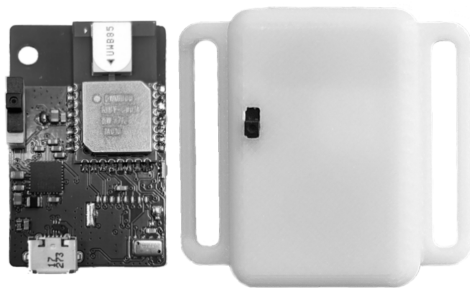
2.2 Aruco markerji

Aruco marker je digitalno ustvarjen kvadrat s črnim robom, njegova notranjost pa je sestavljena iz črno-bele matrike, ki izgleda kot nekakšen vzorec. Črni rob markerja omogoča hitro detekcijo, iz vzorca pa razberemo ID

[3]. Algoritem detekcije markerjev deluje tako, da najprej določi možne kandidate. Nato preveri, če njihova notranjost ustreza binarni kodi Aruco markerjev. Kandidatom, ki ustrezajo tem pogojem priredi ID številke. Nazadnje z znanimi parametri kamere, markerjem določi še njihove koordinatne sisteme.

3 Eksperimentalni sistem

Eksperimentalni sistem sestoji iz petih UWB modulov (Slika 1), mikro računalnika Raspberry Pi 4b, 7 palčnega zaslona na dotik, kamere in Aruco markerjev. Za komunikacijo med komponentami uporabljamo USB vodilo.

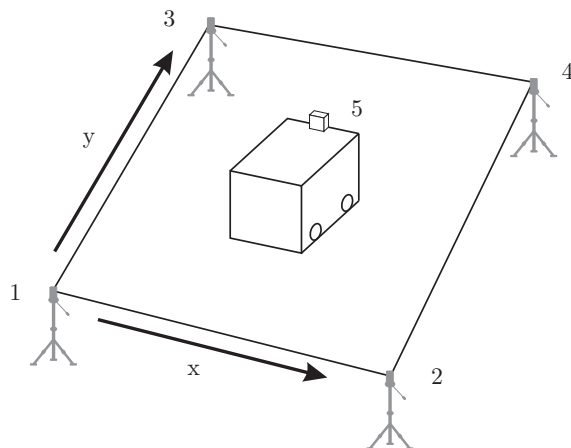


Slika 1: UWB modul s plastičnim ohišjem.

Štirje UWB moduli so uporabljeni kot stacionarni moduli - svetilniki z znano pozicijo. Peti UWB modul je mobilni modul – uporabnik, ki ga lokaliziramo v prostoru (Slika 2). Svetilnike postavimo v štiri vogale prostora (npr. trgovine) znotraj dometa meritve razdalje tako, da so večino časa v vidnem polju mobilnega modula. To najlažje dosežemo tako, da jih namestimo čim višje pod strop. Uporabniški modul je nameščen na nakupovalni voziček in se z njim premika po prostoru. Razdalje med uporabnikom in svetilniki se izračuna z dvosmernim določanjem časa preleta [4] na uporabniški strani. Izmerjene razdalje se preko USB vodila pošilja na računalnik, na katerega je uporabnik priključen. Računalnik na podlagi pridobljenih razdalj sproti izračunava lego vozička, z uporabo trilateracije, obenem pa skrbi za nadzor in nemoten potek komunikacije med oddajniki.

S trilateracijo izračunamo absolutno pozicijo vozička v prostoru s točnostjo do 20 cm. V drugem koraku z uporabo kamere in Aruco markerjev pridobimo informacijo o tem ali se nahajamo pred določeno polico znotraj nekaj cm. Z vozičkom, na katerega je pritrjena kamera, se premikamo po prostoru in zaznamo marker na polici. S tem pridobimo informacije, ki nam omogočajo določitev natančne lege vozička glede na marker. Obenem izvemo tudi pri kateri polici se nahajamo saj ima vsak Aruco marker unikatno identifikacijsko številko (ID). Detekcijo markerjev bomo podrobneje predstavili v poglavju 4.

Pozicijo uporabnika v prostoru in prikazujemo na 7 palčnem zaslonu na dotik. Ta je preko mini HDMI kabla povezan z računalnikom, na katerem se izvaja algoritem za lokalizacijo. Zaslona nam služi kot uporabniški vmesnik. Zaenkrat le prikazuje informacije o poziciji in nima možnosti vnosa. V kolikor bi želeli v prihodnosti dodati



Slika 2: Shema sistema UWB modulov.

recimo iskalnik izdelkov, priključ prodajalca ali kaj podobnega, imamo tudi možnost takšne nadgradnje.

Sprva smo sistem zasilno postavili doma v dnevni sobi. Postavitev ni bila optimalna (majhne razdalje, sistem postavljen na tleh), kar se je odražalo v točnosti meritev. Nato smo sistem postavili še v Laboratoriju za robotiko. Svetilnike smo pritrdili približno 1,8 metra od tal in s pomočjo referenčnega sistema Optotrak ter testnih polic izvedli meritve. Rezultati sledijo v poglavju 5.

4 Metodologija

Celoten algoritem lokalizacije in tudi grafični vmesnik smo sprogramirali v programskem jeziku Python 3 z uporabo podpornih knjižnic Scipy, Numpy, Serial v programskem okolju Visual Studio Code. Poleg tega smo uporabljali tudi program za oddaljeni dostop do Raspberry Pi-ja – Putty ter program za prenos datotek med Raspberry Pi-jem in osebnim računalnikom – FileZilla. Zajem Aruco markerjev smo izvedli z uporabo navadne spletne kamere in openCV knjižnice. Grafični vmesnik smo izdelali z uporabo Python paketa TKinter.

4.1 Trilateracija

Prvi korak pri našem algoritmu, je bila izvedba trilateracije. Trilateracija je postopek določanja neznane pozicije uporabniškega modula u , na podlagi znanih pozicij vsaj treh svetilnikov a_i v 2D prostoru in izmerjenih razdalj d_1 , d_2 in d_3 med svetilniki in uporabnikom (Slika 3). Vsaka od teh razdalj nam pove, koliko stran od njih se mobilni modul nahaja. Torej, ko izmeri razdaljo d_1 , lahko sklepamo, da se nahaja nekje na krožnici s središčem v a_1 in polmerom d_1 . Podobno velja za razdalji d_2 in d_3 . Na podlagi teh treh krožnic uporabnik izračuna njihovo presečišče in s tem določi svojo pozicijo [5]. Relacijo med izmerjenimi razdaljami, znanimi pozicijami svetilnikov a_i in neznano pozicijo uporabnika u zapišemo z:

$$d_i = \|u - a_i\|, \quad (1)$$

za n svetilnikov zapišemo sistem linernih enačb

$$\mathbf{A}\mathbf{u} = \mathbf{b}$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{a}_n - \mathbf{a}_1 \end{pmatrix}, \mathbf{b} = \begin{pmatrix} d_1^2 - d_2^2 - \|\mathbf{a}_1\|^2 + \|\mathbf{a}_2\|^2 \\ \vdots \\ d_1^2 - d_n^2 - \|\mathbf{a}_1\|^2 + \|\mathbf{a}_n\|^2 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

pozicija uporabnika $\mathbf{u}$ se nato izračuna [6]

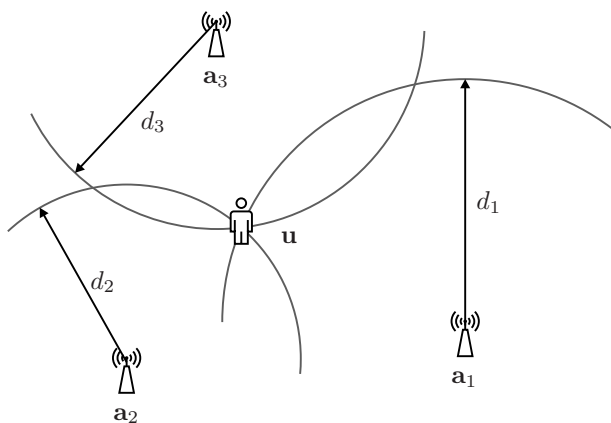
$$\mathbf{u} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}. \quad (3)$$

Enako razmišljanje velja tudi za tri dimenzije, le da imamo v tem primeru namesto krožnic krogle, za enolično določitev pozicije mobilnega modula pa potrebujemo najmanj štiri stacionarne module.

Čeprav smo izvajali izračun le v dveh dimenzijah, smo tudi mi uporabljali štiri svetilnike zaradi večje natančnosti. Uporabnik (na Sliki 2 označen s številko 5) torej ves čas meri razdalje do štirih svetilnikov. V program smo zapisali funkcijo, ki z uporabo trilateracije izračuna pozicijo uporabnika in s tem tudi pozicijo vozička v prostoru.

4.2 Kalmanov filter

Izvedli smo tri verzije lokalizacije s uporabo UWB modulov. Prva verzija uporablja za določitev pozicije uporabnika le izračun trilateracije. Drugi dve poleg trilateracije vsebujeta tudi razširjen Kalmanov filter, kjer nelinearno funkcijo, ki opisuje sistem prehajanja stanj ali proces meritev, aproksimiramo z linearnim modelom [7]. Lokalizacijo s Kalmanovim filtrom smo torej izvedli na dva načina. Obema je skupno to, da se začetna stanja izračunajo preko trilateracije. Enaka sta tudi izračuna predikcije in korekcije. Razlikujeta se v izračunu kovariacijske matrike šuma meritve ($\mathbf{R}$). Namen spreminjanja vrednosti $\mathbf{R}$ je v zmanjševanju vpliva izmerjenih razdalj za katere lahko predpostavimo, da so napačne zaradi ovir med uporabnikom in svetilnikom. V prvem primeru preverjamo inovacijo, če je večja od določene meje, smatramo da ima izmerjena razdalja napako in pomnožimo pripadajoč element v $\mathbf{R}$ z inovacijo in dodatnim faktorjem. V drugem primeru primerjamo standardno deviacijo



Slika 3: Shema lokalizacije s trilateracijo.

inovacije $\hat{\sigma}_k$ v premičnem oknu. Predpostavljamo, da je vrednost $\hat{\sigma}_k$ v primeru ovir med svetilnikom in uporabnikom večja kot pri pogojih brez ovir. Ko je $\hat{\sigma}_k$ večja od izbrane vrednosti, se pripadajoči elementi v $\mathbf{R}$ pomnožijo z vnaprej določenim faktorjem.

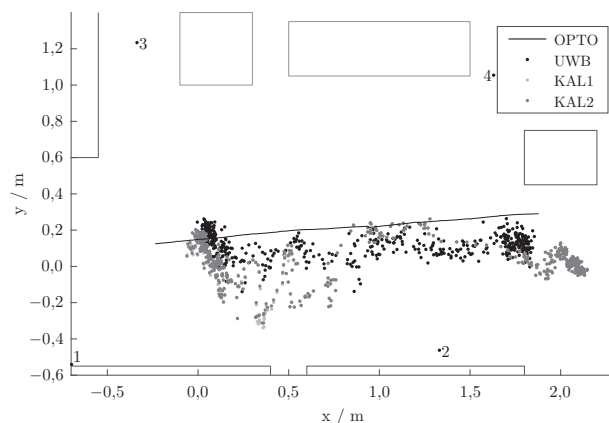
4.3 Detekcija Aruco markerjev

Drugi del algoritma lokalizacije predstavlja detekcija Aruco markerjev. V splošnem se pozicija vozička med gibanjem po trgovini izračunava s trilateracijo. Kadar pridemo mimo police z markerjem, ga s kamero zaznamo ter preberemo njegov ID in podatke o koordinatnem sistemu. Ker poznamo parametre kamere, lahko naredimo preslikavo v koordinatni sistem kamere, nato pa še v koordinatni sistem vozička. Na ta način vozičku določimo natančno lego in orientacijo v prostoru in s tem izboljšamo rezultate trilateracije.

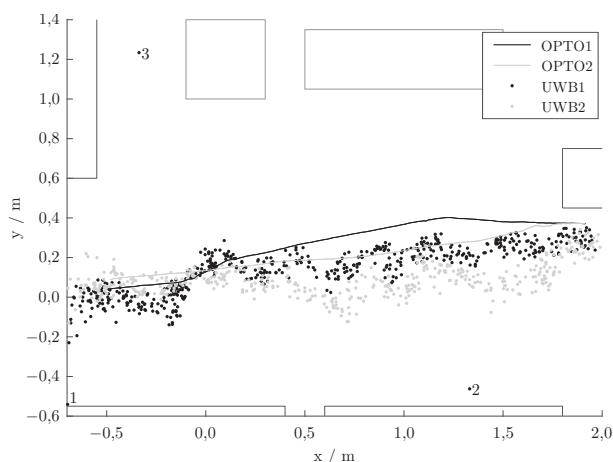
5 Rezultati

V Laboratoriju za robotiko smo postavili celoten eksperimentalni sistem z dvema testnima policama in vozičkom. Na voziček smo pritrdili uporabniški modul in kamero ter na police nalepili markerje. Štiri svetilnike smo pritrdili na stojala in jih razporedili v vogale testnega prostora (slika 4). Pritrjeni so bili na višini približno 1,8 metra, uporabnik pa je bil ves čas v njihovem vidnem polju, z izjemo nekaj trenutkov, ko je operator potiskal voziček in je stal med uporabnikom in posameznim svetilnikom. Referenčno pozicijo vozička smo določili s sistemom Optotrak.

Izvedli smo dvoje meritev. Prvič smo voziček premikali ob policah od začetka polic do konca v eno smer (Slika 4). Premik je prikazan s črno črto na Sliki 4 (referenčna pozicija). Začetek polic se nahaja na levi strani slike, konec pa na desni. Črne pike na sliki predstavljajo izračune pozicije s trilateracijo, brez filtriranja. Koren povprečne kvadratne napake teh meritev znaša 0,193 metra. Temno sive pike predstavljajo izračune pozicije filtrirane s Kalmanovim filtrom. Vidimo, da bolj odstopajo od reference, kar potrdi tudi vrednost korena povprečne kvadratne napake, ki tokrat znaša 0,349 metra.



Slika 4: Premik vozička iz leve proti desni.

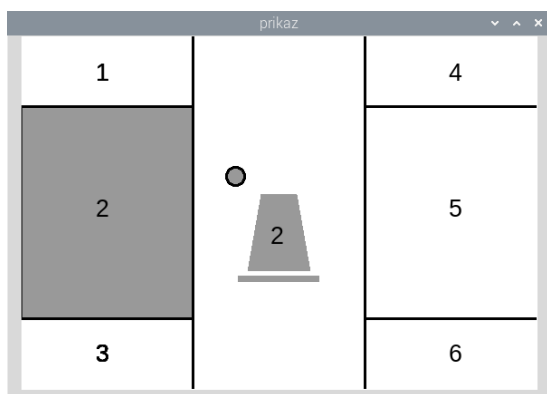


Slika 5: Premik vozička iz leve (črna) proti desni in nazaj (siva).

Drugič smo voziček premikali od začetka polic do konca in nazaj (Slika 5). Tokrat smo prikazovali le izračune pozicije s trilateracijo, brez filtriranja. Črne pike na sliki predstavljajo izračune pozicije pri premiku od začetka polic, do konca. Sive pike predstavljajo izračune pozicije pri premiku nazaj na začetek polic. Črna in siva črta predstavljata referenčne pozicije vozička pri istih premikih. Koren povprečne kvadratne napake združenih meritev znaša 0,206 metra.

Ugotovili smo, da natančnost izračuna pozicije s trilateracijo znaša približno 20 centimetrov. V primeru filtriranja s Kalmanovim filtrom, bi se morala napaka zmanjšati vendar se ta še poveča, na približno 35 centimetrov. Najverjetnejši vzrok je algoritem detekcije napake v izmerjenih razdalji. Predvidevamo, da so bile napake pri meritvah takšne, da ni bilo mogoče nastaviti parametrov filtra tako, da bi uspešno dušil izmerjene razdalje z napako. Pri lokaliziranju vozička z Aruco markerji smo dosegli povprečno napako 3 cm.

Grafični vmesnik je zasnovan tako, da je enostaven za uporabo, prikazuje pa le najpomembnejše informacije. Z njim želimo prikazati pozicijo nakupovalnega vozička glede na njegovo okolico in informacije o tem, kateri izdelki se nahajajo v njegovi bližini. Spodaj je prikazana grafična podoba vmesnika (Slika 6).



Slika 6: Grafični vmesnik.

Na sredini vmesnika se nahaja shema nakupovalnega vozička, okrog nje pa police označene s številkami od 1 do 6. Polici 2 in 5 se nahajata levo in desno od vozička. Z njih lahko vzamemo izdelke, saj sta v našem dosegu. Na vozičku je pritrjena kamera, ki spremlja okolico in išče markerje, narisane na policah. V trenutku, ko kamera zazna marker na polici, se na grafičnem vmesniku s sivo barvo pobarva polica, na kateri je zaznani marker (v našem primeru je to polica številka 2). Na ta način dobimo informacijo o tem, kje se trenutno nahajamo.

Pika prikazuje pozicijo vozička glede na celoten prostor (Slika 6), katerega dimenzije smo linearno preslikali na grafični vmesnik. V danem primeru to pomeni, da se nahajamo približno na sredini trgovine, ob polici številka 2.

6 Zaključek

Predstavili smo rešitev, ki temelji na tehnologiji UWB in detekciji Aruco markerjev. S pomočjo UWB oddajnikov smo določili absolutno pozicijo vozička v prostoru, detekcija markerjev pa služi kot nadgradnja. Z njo natančneje določimo pozicijo, možno pa je tudi orientacijo vozička. Razvili smo tudi grafični vmesnik, ki uporabniku prikazuje informacije o tem, kje v trgovini se nahaja in katere police so v njegovi bližini. Označi tudi polico na kateri se nahaja želeni izdelek.

Obstaja še ogromno možnosti za nadgradnje našega sistema. Trenutno se kamera nahaja na vozičku, markerji pa na policah. Možno bi bilo narediti tudi obratno, tako da bi se kamere nahajale pod stropom in iz ptičje perspektive opazovale nakupovalne vozičke. Markerji bi bili nameščeni na vozičke tako, da bi bili obrnjeni proti stropu. S tem bi se izognili problemu nezaznavanja markerjev zaradi orientacije vozička. Možnosti nadgradenj in personalizacije grafičnega vmesnika pa so tako rekoč neskončne. Sistem bi lahko v veliki meri prilagajali glede na velikost trgovine in potrebe trgovca.

Literatura

- [1] M. Stone, Insights: Phones, Samsung Electronics America, <https://insights.samsung.com/2020/08/21/what-is-ultra-wideband-and-how-does-it-work>
- [2] A. Alarifi, A. Al-Salman, M. Alsaleh, A. Alnafessah, S. Al-Hadhrami, M. Al-Immar in H. Al-Khalifa, "Ultra wide-band indoor positioning technologies: Analysis and recent advances", *Sensors*, vol. 16, št. 5, str 707, 2016.
- [3] OpenCV docs, https://docs.opencv.org/master/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html
- [4] D. Neiryneck, E. Luk in M. McLaughlin, "An alternative double-sided two-way ranging method", 2016 13th Workshop Positioning, Navigation and Communications
- [5] OXTS trilateration, Oxford Technical Solutions Ltd., <https://www.oxts.com/trilateration>
- [6] S. A. Van De Geer, "Least-Squares Estimation", *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability*, Wiley Online Library, vol. 2, 2008
- [7] G. Klančar, *Avtonomni mobilni sistemi*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 2014.