

RAZVOJ SISTEMA ZA LOKALNO DOLOČANJE POLOŽAJA

Dominik Sedonja, Blaž Recek

Mentorja: doc. dr. Darko Hercog, izr. prof. dr. Tone Lerher

Fakulteta za strojništvo, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

dominik.sedonja@gmail.com, blaz.recek@gmail.com

Development of local positioning system

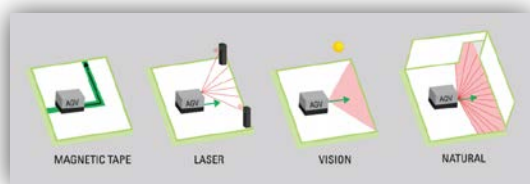
This article presents the development process of a real-time local positioning system and implementation of the first prototype. Developed system is based on the ESP-WROOM-32 microcontroller and the DWM1000 module, while the local position is calculated using trilateration algorithm. The article provides a brief description of software and hardware components and describes the development and testing phases of implemented algorithms using three stationary (*anchor*) and one mobile unit (*tag*). A unified algorithm for the ESP32 microcontroller has been implemented, which can be configured using an Android application so that an individual module can operate as a stationary or mobile unit. The article also contains description of operation of local positioning systems, a description of implemented algorithms, and the test results of the developed system on a 4 x 4 m polygon.

Kratek pregled prispevka

V članku je predstavljen postopek razvoja lokalnega sistema za določanje položaja in izdelava prvega prototipa. Sistem temelji na mikrokontrolerju ESP-WROOM-32 in modulu DWM1000, za določitev položaja pa je uporabljen algoritem trilateracija. V prispevku je opisan tako programski kot tudi strojni del razvitega sistema. Razvoj in testiranje implementiranih algoritmov uporablja tri stacionarne (*anchor*) in eno premično enoto (*tag*). Realiziran je enoten algoritem za mikrokontroler ESP32, ki ga je možno z uporabo Android aplikacije konfigurirati tako, da lahko posamezen modul deluje kot stacionarna ali kot premična enota. Opisano je delovanje lokalnih sistemov za določanje položaja, opis implementiranih algoritmov, stroškovna analiza in rezultati testiranja razvitega sistema na poligonu velikosti 4 x 4 m.

1 Uvod

Določanje položaja v lokalnem okolju je že dlje časa znan postopek, ki se uporablja na različnih področjih. Glede na porast avtomatizacije tovarn in prehoda na t.i. pametne tovarne se v vse večji meri ti sistemi uporabljajo tudi v industrijskih okoljih. Skozi čas so se razvile različne metode pozicioniranja in vodenja premičnih objektov npr. avtomatsko vodenih vozil (Automated Guided Vehicles, AGV) po proizvodnem prostoru. Delitev glede na način pozicioniranja v prostoru je v tem primeru lahko zelo široka, saj obstaja veliko različnih principov določanja položaja, a nekateri uporabljajo isto tehnologijo. V primeru avtomatsko vodenih vozil se najpogosteje uporabljajo sledilni trakovi, sledilna žica in inercialni sistemi (sledenje magnetnim točkam). Naprednejši principi pa so: laserske triangulacije, navigacije s strojnim vidom in naravna navigacija (slika 1).



Slika 1: delitev glede na tip navigacije [6]

Izdelan lokalni sistem za določanje položaja v realnem času (Real-Time Location System, RTLS) temelji na ideji, ki je v osnovi precej podobna laserskemu pozicioniranju v prostoru, a za svoje delovanje ne potrebuje dragih komponent in pri tem vseeno dosega zadovoljivo natančnost določanja položaja. Motivacija oz. namen izvedbe tega projekta je široka možnost uporabe tovrstnih sistemov, ki pa se zaradi relativno visokih investicijskih stroškov ne uporabljajo v tolikšni meri, kot bi si to želeli.

2 Delovanje sistema

Sistem deluje na principu merjenja časa preleta signala med gibajočim objektom do stacionarnih objektov. Gibajočega imenujemo »tag«, statičnega pa »anchor«. Za določitev položaja smo uporabili tri anchorje, ki so bili

fiksno nameščeni v prostoru. Ti so bili nameščeni v obliki pravokotnega trikotnika, saj je tako najlažje v realnem prostoru izvesti koordinatni sistem in posledično najlažje spreminjati razdaljo med *anchorji* za testiranje na večji površini. S to postavitvijo je bila med njimi natančno določena razdalja, ki smo jo uporabili pri izračunu položaja *taga* na podlagi algoritma trilateracije. Trilateracija [1] je metoda določanja položaja objektov, ki temelji na sočasnih meritvah med *tagom* in tremi *anchorji* (v primeru, da je *anchorjev* več se ta algoritem imenuje multilateracija). Trivialno se trilateracija lahko izrazi kot problem iskanja preseka treh sfer (slika 2), ki ga dobimo z rešitvijo sledečega sistema enačb:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = d_1^2 \quad (1)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = d_2^2 \quad (2)$$

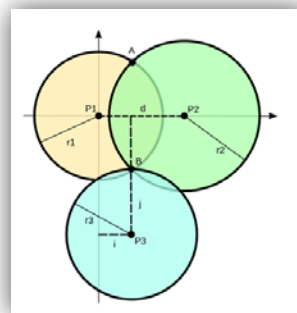
$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = d_3^2 \quad (3)$$

Pri čemer so:

x, y, z [m] – koordinate premikajočega se objekta (*taga*)

$P_i (x_i, y_i, z_i)$ [m] – koordinate bazne postaje i (*anchorja*)

r_i [m] – razdalja med premikajočim se objektom (*tagom*) in bazno postajo (*anchorjem*) i



Slika 2: osnovni princip trilateracije

Tovrstni t.i. absolutni sistemi lokalnega določanja položaja v realnem času uporabljajo tehnologijo ultra širokopasovnega zaznavanja

(Ultra-wideband, UWB). UWB tehnologija omogoča izredno natančno in zanesljivo pozicioniranje. To je zaradi visoke pasovne širine signala (od 3,1 do 10,6 GHz), ki vpliva na kakovost signala, ker se ob višjih frekvencah zmanjša vpliv (ki je še kljub temu močan) učinka več poti (multipath effect). Ta učinek je vir večine pogreškov, ki se pojavijo pri računanju razdalje. Odraža se kot odstopanje od prave vrednosti zaradi odboja signala od različnih ovir namesto, da bi signal opravil pot neposredno med *anchorjem* in *tagom*.

3 Strojna oprema

Strojni del predstavljajo vsa vezja z vsemi pripadajočimi komponentami potrebnimi za stabilno delovanje sistema. Osnovna ideja, ki celotno zadevo naredi kompleksnejšo, je ideja o modularnosti. Na ta način je krmilni modul lahko vedno enak, ne glede na vhodno napajalno napetost in namen uporabe (*anchor/tag*). Strojni del v grobem sestoji iz krmilnega modula, napajalnih modulov in ohišij. Celoten sistem pa je zasnovan po metodi poka-yoke, ki onemogoča napake pri montaži in morebitne nepravilne priključitve napajalnega modula s krmilnim (slika 3).

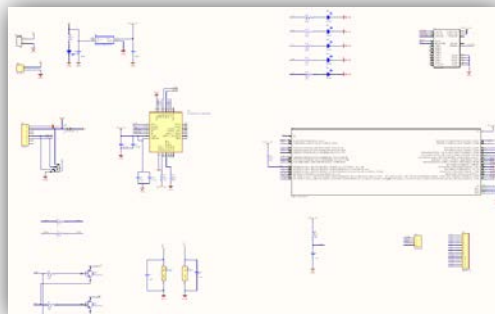


Slika 3: napajalni in krmilni modul v ohišju

3.1 Krmilni modul

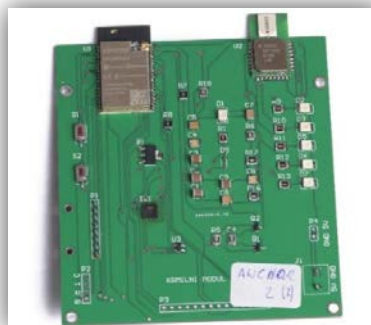
Krmilna enota predstavlja najkompleksnejši in najzahtevnejši del lokalnega sistema za določanje položaja. Zaradi lažje predstave in večje preglednosti je krmilna enota razdeljena na več podsklopov glede na funkcijo, ki jo določen podsklop opravlja (za optimalno delovanje so potrebni praktično vsi sklopi, ki morajo biti povezani v smiselno celoto). Krmilni modul je razdeljen na naslednje podsklope: napajalni del,

USB – programatorski del, stikalni del (stikalna logika), krmilnik s senzorjem, signalni del in ostali GPIO pini (sliki 4 in 5).



Slika 4: električna shema krmilnega modula

Osrednji komponenti, na katerih bazira celoten sistem, sta mikrokrmilnik ESP32-WROVER [2] in senzor DWM1000 [3]. Izbran krmilnik ESP32-WROVER-B poleg klasične antene na PCB-ju omogoča priključitev dodatne IPEX antene, kar je ena večjih prednosti saj mora biti povezava z omrežjem preko Wi-Fi-ja ves čas stabilna, sicer pride do popačenja rezultatov. Ključne lastnosti, zaradi katerih je bil izbran senzorski modul DWM1000 so: visoka natančnost določanja razdalje, velik komunikacijski doseg – do 300 m (potrebni manj senzorskih enot za vzpostavitev delujočega sistema – nižanje stroškov), omogočeno delovanje z velikim številom premikajočih se objektov (*tagov*), nizki stroški (dobro razmerje med ponujenimi lastnostmi in ceno) in dobra imunost na motnje znotraj polja fiksnih objektov (*anchorjev*).



Slika 5: krmilni modul

3.2 Napajalni modul

Napajalni modul (slika 6) skrbi za zagotavljanje električne napetosti 5 V, ki je zahtevana na vhodu krmilnega modula. Napajalni moduli so izdelani v povezavi s krmilnim in sicer tako, da v tlorisu izhodni pini napajalnega modula sovpadajo z vhodnimi napajalnimi pini krmilnega modula. Na ta način je zagotovljena relativno visoka stopnja modularnosti. Vhodna napetost v napajalni modul je odvisna od izbire samega napajalnega modula. Preprosta zasnova omogoča pester nabor vhodnih napetosti. Na ta način lahko obmenjavi napajalnega modula celotno napajalno krmilno enoto uporabljamo kot *anchor* ali *tag*, hkrati pa lahko celoten sklop priključimo na napetosti, ki je v tistem trenutku na določeni lokaciji na voljo (24 V/48 V/230 V).

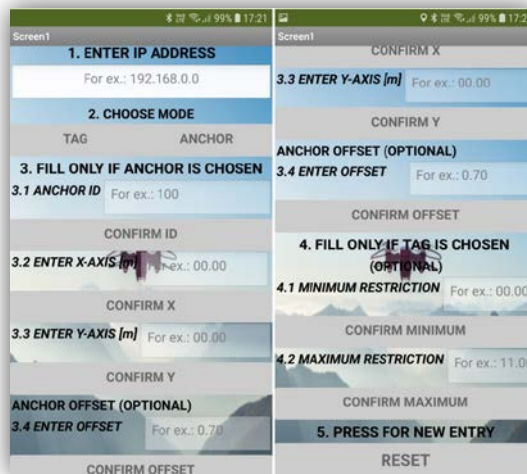


Slika 6: napajalni modul

4 Programska koda

Program za računanje razdalje je bil spisan tako, da je enoten za oba modula. Temelji na izmenjavanju sporočil med moduloma in shranjevanjem časovnih značk prihoda in odhoda sporočil, ki smo jih nato uporabili pri izračunu časa preleta (Time of Flight). Izmenjava sporočil je Double-Sided Two-Way Ranging [4], uporabljen tip algoritma pa je asimetrično računanje. Asimetrično računanje je manj dovzetno na napake napram simetričnemu, vendar je bolj zahtevno za procesor. Ker smo izbrali precej zmogljiv procesor, z računanjem ni bilo težav. Asimetrično računanje dovoljuje, da

so časi med posameznimi sporočili različni. Program se začne izvajati z inicializacijo, nato se vzpostavi povezava z omrežjem Wi-Fi, nakar sledi vejitev programa ali bo modul deloval kot *anchor* ali *tag*. Način delovanja se lahko definira v programski kodi ali pa se konfigurira na daljavo z uporabo izdelane Android aplikacije (slika 7).



Slika 7: Android aplikacija

Po omenjeni konfiguraciji se modul poveže z nasprotnim modulom, torej *anchor* s tagom oz. *tag* z *anchorjem*. Če se *anchor* poveže s tagom, sledi izmenjava sporočil DS-TWR; na podlagi pridobljenih podatkov o času preleta se izračuna razdalja med *anchorjem* in *tagom*. Rezultat razdalje se pošlje na *tag* in cikel se ponovi. V nasprotnem primeru, ko se *tag* poveže z *anchorjem*, pa se izvede izmenjava sporočil DS-TWR, nato *tag* čaka na pridobitev pravilnega rezultata razdalje prvega *anchorja*, nato drugega in še potem tretjega. Ob morebitnem napačnem rezultatu se program ponovno vrne v stanje izmenjave sporočil DS-TWR, da se napaka odpravi. Pri vseh pravilnih rezultatih sledi izračun koordinat *taga* v polju *anchorjev* in izpis rezultata v terminalno okno. Program deluje v neskončni zanki, ki jo lahko prekinemo s pritiskom na tipko RESET in se tako vrnemo v izhodiščni položaj programa.

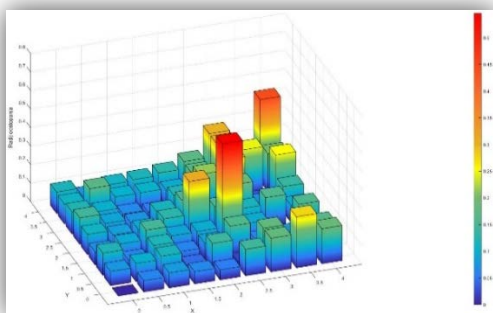
5 Testiranje in rezultati

Testiranje je bilo izvedeno na poligonu velikosti 4x4 m s postavljenimi točkami na vsakih 50 cm po x in y koordinati (slika 8). *Anchorji* so oklepali meje poligona tako, da je bil prvi postavljen v koordinatno izhodišče (0,0) drugi na razdalji 4 m od prvega po x-osi (4,0), tretji pa na razdalji 4 m od prvega po y-osi (0,4).



Slika 8: testni poligon

Tag smo pomikali po zastavljenih točkah in rezultate meritev pošiljali na računalnik v programsko okolje LabVIEW, kjer smo uredili zbrane podatke ter jih uporabili za izris 3D grafa. V grafu je prikazan radij odstopanja glede na referenčne točke meritev.



Slika 9: rezultati testiranja

Iz rezultatov (slika 9) je razvidno, da izmerjeni položaji le redko odstopajo od referenčnih za več kot 10-15 cm. Ti pogreški se predvsem pojavljajo v primerih, ko *tag* prestopi navidezno mejo območja enakostraničnega trikotnika, katerega oglišča predstavljajo *anchorji*. Zanimivost predstavlja pogrešek, ki se je pojavil na sredini poligona, kot posledica dveh možnih razlogov. Prvi je učinek več poti

(multipath effect) [5], drugi pa motnje oz. oslABLJENA jakost Wi-Fi omrežja.

6 Stroškovna analiza

Cena je eden izmed ključnih faktorjev, ki ne dopuščajo hitrejšega razcveta tovrstnih sistemov, saj podjetja vloženi sredstev ne uspejo povrniti v sprejemljivem časovnem obdobju. Prav to je bil eden izmed motivov za izdelavo nizkocenovnega sistema za lokalno določanje položaja. Skupni stroški projekta brez stroškov amortizacije opreme, licenc programske opreme, vloženega časa in porabljene električne energije znašajo 255,40 € (tabela 1). V to ceno so vštete komponente za en komplet sistema za določanje položaja, pri čemer je potrebno omeniti, da je za povečanje natančnosti ali povečevanje merilnega območja potrebno dodati krmilne in napajalne module.

Tabela 1: stroški projekta

#	Komponenta	Cena na kos [€]	Št. kosov	Cena[€]
1	Napajalni modul 24V	13,48	1	13,48
2	Napajalni modul 230V	10,99	3	32,97
3	Krmilni modul	45,79	4	183,16
4	Ohišja in ostali stroški	25,79	1	25,79
SKUPAJ:				255,40€

V primerjavi s sistemi dobavljivimi na trgu je cena relativno ugodna, hkrati pa bi bilo možno z masovno proizvodnjo navedeno ceno izdelave še precej zmanjšati. Zavedati se je sicer potrebno, da bi sistem za uporabo v realnem okolju potreboval še kar nekaj dodelav, testiranj in vloženi sredstev, a vseeno je rezultat v rangu 250€ zelo dober.

7 Sklep

Pregled stanja na trgu je pokazal, da določene rešitve na trgu že obstajajo, a se jih ne uporablja v tolikšni meri, kot bi pričakovali. K temu botrujejo relativno visoki investicijski stroški, ki si jih privoščijo le redka podjetja. To je bil tudi povod za izdelavo lastnega sistema, ki ga je mogoče izdelati in namestiti v objekt z relativno nizkimi stroški pri dovolj dobri kakovosti in zanesljivosti. Pozornost posvečena varnosti uporabnika in samega sistema rezultira v

izdelanih ohišjih. Sistem, glede na to, da je cenovno optimiran, dosega rezultate pozicioniranja znotraj radija 10–15 cm (velikokrat tudi znotraj 5 cm), kar pomeni, da se lahko kosa s komercialno dobavljivimi sistemi. Možnost nadgradnje je lahko pri modulih samih (velikost tiskanega vezja, kakovost in oblika ohišij, ...) in nadgradnje sistema kot celote, v smislu odpravljanja težav z meritvami na mejah (stranicah trikotnika polja), saj so v tem območju rezultati najbolj popačeni, z dodajanjem dodatnih *anchorjev*, da bi lahko tako *tag* izbiral izmed več *anchorji* in ocenil, kateri trije v danem trenutku prispevajo najbolj verodostojne rezultate meritev. S tem bi se izboljšala tudi pokritost prostora in bi zadovoljili tudi najzahtevnejše uporabnike.

8 Literatura

- [1] Wikipedia, „Real-time locating system,“ Februar 2014. [Elektronski]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Real-time_locating_system. [Poskus dostopa 15 Julij 2019].
- [2] Techtonics, „ESP WROOM 32/ ESP32 WiFi-BT-BLE MCU Module,“ Techtonics, [Elektronski]. Available: <https://techtonics.in/product/esp-wroom-32-esp32-wifi-bt-ble-mcu-module/>. [Poskus dostopa 15 Avgust 2019].
- [3] Aliexpress, „DWM1000 DECAWAVE high precision indoor positioning module chip positioning system 10 start,“ [Elektronski]. Available: <https://www.aliexpress.com/item/32843919398.html>. [Poskus dostopa 10 Avgust 2019].
- [4] Sdalu, „Illustration of the Symmetrical Double-Sided Two-Way Ranging process,“ 9 Februar 2018. [Elektronski]. Available: <https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Sds-twr.png>. [Poskus dostopa 13 Oktober 2019].
- [5] ExploreGate, „TDOA Sources of Error - SixtySec,“ 4 Junij 2012. [Elektronski]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=RaVRsIkT5-I>. [Poskus dostopa 4 November 2019].
- [6] A. B. -. S. Technologies, „HOW SENSORS ARE MOVING MATERIALS HANDLING TOWARDS,“ [Elektronski]. Available: https://www.automation.com/pdf_articles/sensata/sensata-material-handling-agv-white-paper_final.pdf. [Poskus dostopa januar 2020].
- [7] G. Ullrich, Automated Guided Vehicle Systems, springer, 2015.