

ULTRAZVUČNA LOKALIZACIJA PREDMETA U RADNOM PROSTORU MOBILNOG ROBOTA

Milan Rašić, Aleksandar Dejanović i Goran S. Đorđević, *Elektronski fakultet u Nišu*

Sadržaj – *Ultrazvučni sonari su gotovo nezamenljivi senzori u mobilnoj robotici, kako zbog svoje cene, tako i zbog jednostavnosti obrade signala. U ovom radu opisan je algoritam za detekciju i lokalizaciju objekata u radnom prostoru mobilnog robota primenom ultrazvučnog sonara Polaroid 6500 sa pratećom mernom instrumentacijom. Rezultati primene algoritma eksperimentalno su provereni.*

1. UVOD

Snalaženje u prostoru jedan je od navažnijih zadataka koji savremeni mobilni roboti treba autonomno da reše. Da bi se ostvarilo autonomno ponašanje mobilnog robota i omogućilo donošenje pravilnih odluka, neophodan je senzorski sistem koji će dati informacije o neposrednoj okolini u kojoj se mobilni robot kreće. Obrada ovih informacija treba da omogućiti kako lokalizaciju samog robota, odnosno određivanje njegovog apsolutnog ili relativnog položaja u odnosu na okolinu, tako i lokalizaciju objekata i prepreka u radnom prostoru.

Ultrazvučni sonari – daljinari, pripadaju klasi senzora koja se vrlo često koristi za ovu namenu. Nekoliko povoljnih karakteristika, a pre svih relativno niska cena i jednostavnost obrade informacija, kvalifikuju sonare za primenu kako kod eksperimentalnih robota i studentskih projekata, tako i kod komercijalno dostupnih mobilnih platformi.

U ovom radu opisana je primena ultrazvučnog sonara Polaroid 6500 za lokalizaciju predmeta u radnom prostoru mobilnog robota. Sam sonar, sa pratećom elektronikom i algoritimima za kalibraciju predstavljen je u našem prethodnom radu [1], kao i u [2]. Rad je organizovan na sledeći način. U odeljku 2 predstavljen je pretpostavljeni način funkcionisanja mobilnog robota i njegov radni prostor. U odeljku 3 opisan je algoritam za obradu rezultata merenja i njegova implementacija. U odeljku 4 prikazani su i eksperimentalno verifikovani rezultati primene algoritma.

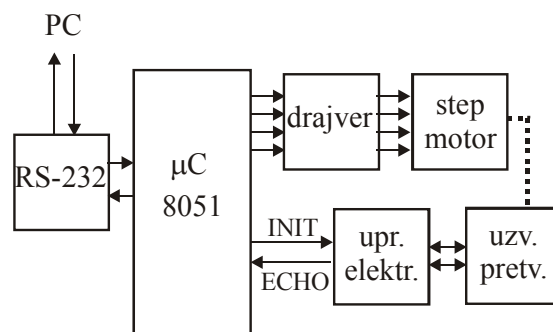
2. POSTAVKA PROBLEMA

Razvoj algoritma za lokalizaciju predmeta u radnoj okolini mobilnog robota podstaknut je višegodišnjim učešćem studenata Elektronskog fakulteta na nacionalnom i internacionalnom takmičenju iz mobilne robotike EUROBOT [5]. Svake godine, organizacioni komitet postavlja novi zadatak koji učesnici treba da reše. Nakon nacionalnih kvalifikacija, po tri najbolje ekipe iz svake zemlje učestvuju na evropskom prvenstvu. Iako je zadatak svake godine različit, mogu se prepoznati zajednički elementi koji se ponavljaju. To su pre svega, zahtevana autonomnost robota, po pitanju izvora energije, sensorike i upravljanja. Dalje, dve ekipe se međusobno takmiče u meču, čiji će robot bolje ostvariti postavljeni zadatak. U tom cilju, zadatak obično ima dve komponente: jedna je obavljanje operacije koja donosi poene ekipi, a druga je obavljanje operacija koje oduzimaju poene suparničkoj ekipi. Na taj način moguća je velika kombinacija strategija i taktika ekipa, a mečevi dobijaju na dinamičnosti i neizvesnosti. Konačno, zadatak je obično definisan tako da se na terenu, koji predstavlja radni prostor robota, nalaze proizvoljno raspoređeni objekti, koje robot

treba da pronađe i sa njima učini nešto. Iako je manipulacija nad objektima različita iz godine u godinu, da bi se ona obavila, potrebno je pre toga prepoznati i odrediti položaj objekata u radnom prostoru robota, da bi se zatim napravio plan kretanja, i konačno obavila manipulacija nad predmetima.

Mobilni robot se, po pravilima takmičenja, kreće po pravougaonom stolu tačno specificiranih dimenzija. Sa svih strana sto je ograđen, tako da nije moguće da robot napusti radni prostor. Predmeti koje mobilni robot treba da pronađe a kasnije i da manipuliše njima nalaze se u radnom prostoru, na lokacijama koje nisu unapred poznate. Zadatak ovog algoritma pretrage je da na osnovu polukružnog skeniranja detektuje, identifikuje i locira predmete u radnom prostoru robota. Lociranje predmeta se svodi na određivanje kordinata položaja datog predmeta u kordinatnom sistemu stola.

Sonar i prateća elektronika za podršku detaljno su opisani u [1],[2]. Blok šema aparature sonara data je na Slici 1. Ultrazvučni pretvarač montiran je na osovinu step motora, i nalazi se na prednjem kraju robota. Step motor omogućava da se orijentacija pretvarača menja, i tako dobije polukružna slika prostora ispred robota. Pretvarač je povezan sa upravljačkom elektronikom sonara. Kontrolu rada upravljačke elektronike i step motora vrši mikrokontroler, koji takođe obrađuje rezultate merenja. Mikrokontroler se preko RS-232 porta može povezati na PC u toku razvoja algoritma, odnosno na upravljački sistem mobilnog robota u toku eksploatacije algoritma.



Slika 1. Blok šema aparature ultrazvučnog sonara

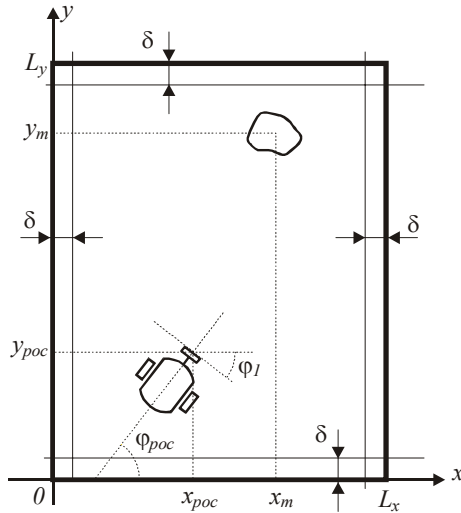
3. OPIS ALGORITMA ZA ODREĐIVANJE POLOŽAJA METE U RADNOM PROSTORU

Pre opisa algoritma, potrebno je istaći nekoliko faktora koji mogu uticati na tačnost dobijenih rezultata. Pre svega, u tehničkoj dokumentaciji sonara [3], a što je takođe i eksperimentalnim putem provereno [1], data je ugaona karakteristika sonara kao složena višedelna funkcija, pri čemu je širina glavnog lista oko 15°. Uprkos tome, za potrebe konstrukcije algoritma za pretragu, smatraćemo da se zračenje sonara može aproksimirati pravolinijskim zrakom. Drugi faktor, koji treba imati na umu, jeste da se vrši niz uzastopnih merenja za redom. To znači da je moguće da neki ultrazvučni talas, koji

potiče od ranijeg merenja, bude odbijen od udaljene prepreke i detektovan pri kasnijem merenju, kao da potiče od bliskog objekta. Konačno, sonar ima domet koji je veći od dimenzija radnog prostora, što znači da može da detektuje predmete koji se nalazi i van njega. Zbog svega navedenog, bilo bi poželjno da algoritam za lokalizaciju predmeta u radnom prostoru poseduje sledeće osobine:

- ne reaguje na predmete koji se nalaze van radnog prostora kao ni na ivice stola
- vrši selekciju objekata prema njihovoj procenjenoj veličini i odbacuje šumove u merenjima.

Da bi smo u potpunosti definisali položaj predmeta u radnom prostoru, usvojimo koordinatni sistem kao na Slici 2. Koordinatne ose poklapaju se sa ivicama stola, pri čemu se kraća ivica poklapa sa pravcem x ose a duža sa pravcem y ose. Svaka tačka od interesa na stolu može se jednoznačno predstaviti preko koordinata $[x, y]^T$. Dalje ćemo pretpostaviti da je poznata pozicija i orijentacija mobilnog robota, zadata preko vektora $[x_{poc}, y_{poc}, \varphi_{poc}]^T$. Ne umanjujući opštost izlaganja, pretpostavimo da koordinate x_{poc} i y_{poc} definišu položaj osovine rotora step motora na kojem je montirana ultrazvučna sonda, a ugao φ_{poc} definiše orijentaciju između normale na reflektujuću površinu sonde i pozitivnog smera x -ose, kada se aksijalne ose sonde i robota poklapaju, kao na Slici 2.



Slika 2. Opis koordinatnog sistema i radnog prostora

Prilikom određivanja položaja mete, step motor rotira ultrazvučnu sondu za neki ugao, i vrši merenje rastojanja do prve prepreke. Zadatak algoritma za lokalizaciju predmeta u radnom prostoru robota je da na osnovu podataka o rastojanju, ugla merenja i početne pozicije robota, prepozna mete odnosno tražene predmete i odredi njihovu poziciju u koordinatnom sistemu stola, odnosno radnog prostora.

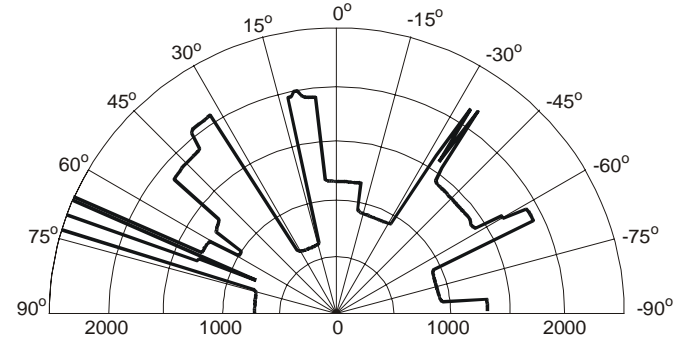
Zbog načina definisanja položaja robota, i potrebe da se merenje obavi u polukrugu ispred robota, odnosno u opsegu od 180° , prvi ugao u kome se vrši merenje je φ_1 i određen je izrazom:

$$\varphi_1 = \varphi_{poc} - \pi/2 \quad (1)$$

Svaki sledeći ugao merenja razlikuje se od prethodnog za $\Delta\varphi = 0,9$ stepeni, koliko iznosi rezolucija step-motora koji nosi sonar. Pri k -tom merenju, ugao merenja φ_k se izračunava na osnovu pozicije osovine rotora step motora kao

$$\varphi_k = \varphi_1 + k \cdot \Delta\varphi \quad (2)$$

Kada se obave merenja za sve vrednosti indeksa k , odnosno na celom polukrugu, rezultati merenja, a to su rastojanja d_k , smeštaju se u niz. Tipičan izgled rezultata polukružnog skeniranja prikazani su u polarnom dijagramu na Slici 3.



Slika 3. Tipičan polarni dijagram rezultata merenja

Na osnovu poznate pozicije i orijentacije robota, i rezultata merenja, moguće je izvršiti transformaciju merenih vrednosti tako da se dobiju koordinate tačaka refleksije izražene u referentnom koordinatnom sistemu:

$$x_k = x_{poc} + d_k \cdot \cos(\varphi_k) \quad (3)$$

$$y_k = y_{poc} + d_k \cdot \sin(\varphi_k) \quad (4)$$

Tačka refleksije je zapravo pretpostavljeno izvorište reflektovanog ultrazvučnog talasa.

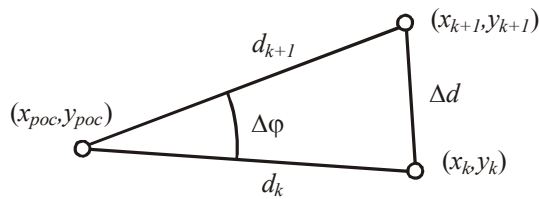
Iz dobijenog skupa tačaka refleksije, potrebno je eliminisati tačke za koje je jasno da potiču od objekata van radnog prostora, kao i one tačke koje potiču od ivica stola. Klasifikaciju tačaka koje se nalaze u radnom prostoru možemo izvršiti testiranjem pripadnosti intervalu:

$$\begin{aligned} x_k &\in [\delta, L_x - \delta], \\ y_k &\in [\delta, L_y - \delta], \end{aligned} \quad (5)$$

gde su L_x i L_y dimenzije stola, a δ je tolerancija. Uvođenje tolerancije potrebno je zbog širokog lista zračenja ultrazvučne sonde, koji čini da se pravolinijske ivice stola detektuju kao polukružni objekti konstantnog radijusa [4]. Faktor korekcije zapravo definiše širinu zone oko ivice stola koja se izbacuje iz razmatranja, pa u njoj nije moguće detektovati objekte, kao na Slici 2. Ovaj faktor korekcije potrebno je eksperimentalno podestiti tako da zona oko ivice bude što manja a da pri tome ivice stola budu pravilno detektovane.

Sledeći korak algoritma predstavlja grupisanje tačaka refleksije koje potiču od istog objekta. Intuitivno je jasno da tačke refleksije koje potiču od istog objekta u radnom prostoru, moraju biti grupisane relativno blizu jedna drugoj, a relativno daleko od tačaka refleksije koje potiču od drugih predmeta. Da bi smo preciznije utvrdili kriterijum bliskosti

tačkaka, razmotrimo rezultate dva uzastopna merenja, k -tog i $(k+1)$ -vog, kao što je to prikazano na Slici 4.



Slika 4. Rastojanje između dve bliske tačke

Ugao pod kojim se nalaze bliske tačke refleksije jednak je rezoluciji step motora $\Delta\varphi$. Ako tačke refleksije zaista potiču od jednog objekta, onda su rastojanja d_{k+1} i d_k približno jednaka, a rastojanje između dve tačke refleksije dato je sa

$$\Delta d_k \approx d_k \cdot \Delta\varphi. \quad (6)$$

Ukoliko tačke refleksije ne potiču od istog objekta, onda su rastojanja d_{k+1} i d_k u znatnoj meri različita, i prethodna relacija ne važi. Prema tome, kriterijum bliskosti može se aproksimativno izraziti u obliku

$$\begin{aligned} |x_{k+1} - x_k| &\leq d_k \cdot \Delta\varphi + \varepsilon, \\ |y_{k+1} - y_k| &\leq d_k \cdot \Delta\varphi + \varepsilon, \end{aligned} \quad (7)$$

pri čemu zahtevamo da obe nejednakosti budu istovremeno zadovoljene. Konstanta ε koja se javlja u (7) predstavlja faktor korekcije koji zavisi od oblika i karakteristika objekata koji se detektuju, pa se određuje eksperimentalno.

Primenom ovakvog kriterijuma moguće je izvršiti grupisanje tačkaka refleksije u podnizove koji predstavljaju pojedinačne objekte. Za svaki od podnizova mogu se odrediti koordinate prve i poslednje tačke, kao i dužina podniza. odnosno, broj tačkaka refleksije koje predstavljaju objekat. Označimo veličine j -tog podniza indeksom j . Pozicija detektovanog objekta može se izračunati kao srednja vrednost koordinata prve i poslednje tačke podniza

$$[x, y]^T = \left[\frac{x_{li} + x_{lf}}{2}, \frac{y_{li} + y_{lf}}{2} \right]^T, \quad (8)$$

gde se indeks i odnosi na prvu, a indeks f na poslednju tačku podniza. Dužina podniza je zapravo razlika između indeksa prve i poslednje tačke podniza

$$l = f - i \quad (9)$$

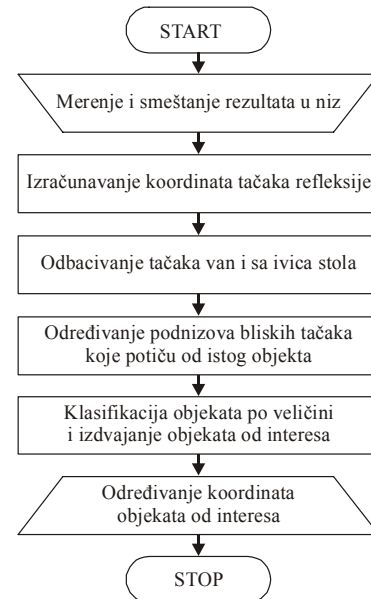
i predstavlja veličinu objekta.

Na osnovu procenjene veličine objekata može se izvršiti njihova klasifikacija. Pri tome objekte čija je veličina manja od nekog praga proglašavamo šumom, a za objekte od interesa proglašavamo sve one čija se veličina nalazi u intervalu

$$l \in [l_{\min}, l_{\max}]. \quad (10)$$

Kao i ranije, granice intervala l_{\min} i l_{\max} zavise od karakteristika objekata koji se nalaze u radnom prostoru, kao i od širine snopa zračenja sonde.

Konačno, opisani algoritam za lokalizaciju predmeta u radnom prostoru robota može se predstaviti kao na Slici 5. Algoritam je najpre razvijen u MATLAB okruženju, da bi nakon verifikacije konceptata bio implementiran u mikrokontroleru koji vrši upravljanje ultrazvučnim senzorom.



Slika 5. Algoritam za lokalizaciju predmeta u radnom prostoru mobilnog robota

4. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA ALGORITMA

Za proveru algoritma za lokalizaciju predmeta načinjen je sledeći eksperiment. Pet predmeta cilindričnog oblika visine 10 cm i prečnika 6 cm, raspoređeno je po stolu i utvrđene su tačne vrednosti koordinata njihovih centara. Izvršena su tri seta merenja čiji su rezultati usrednjeni, a zatim je nad njima izvršena obrada opisanim algoritmom. Parametri potrebni za rad algoritma prikazani su u Tabeli 1.

Tabela 1. Vrednosti parametara u eksperimentu

Rb	Parametar	Vrednost	Rb	Parametar	Vrednost
1.	x_{poc}	750 mm	5.	ε	10 mm
2.	y_{poc}	750 mm	6.	l_{\min}	5
3.	φ_{poc}	$\pi/2$	7.	l_{\max}	30
4.	δ	100 mm			

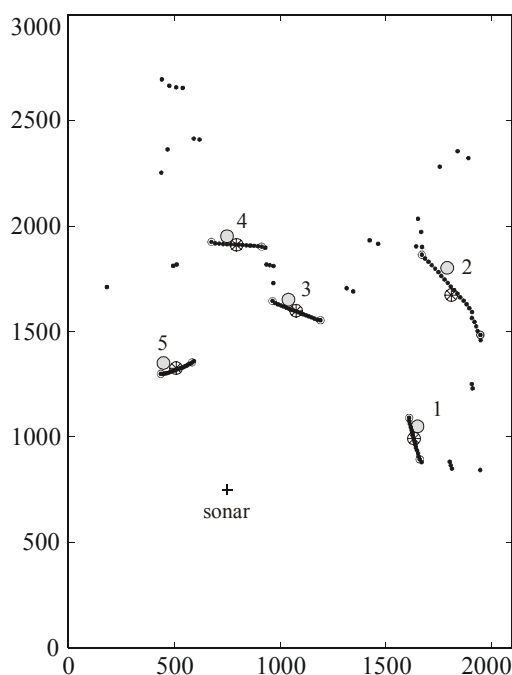
Vrednosti tačnih koordinata, kao i vrednosti koordinata dobijenih primenom algoritma, i greške merenja date su u Tabeli 2, dok su rezultati izvršavanja algoritma prikazani na Slici 6.

Ukupna relativna greške određivanja položaja objekta, poslednja kolona Tabele 2, iznosi oko 6% u proseku. Najveća relativna greška dobijena je za objekat broj 5 sa Slike 6, i iznosi 13,65%. Treba primetiti da je ovaj objekat

najbliži sonaru, na rastojanju koje je približno jednako minimalnom rastojanju koje sonar može da detektuje, pa je to uticalo na veličinu greške merenja.

Tabela 2. Rezultati i greške merenja

R. b.	tačna vrednost (mm)		merena vrednost (mm)		relativna greška (%)		ukupna rel. greška (%)
	X	Y	X _m	Y _m	X _e	Y _e	
1	1650	1050	1635,8	992,52	0,86	5,47	5,54
2	1790	1800	1809,1	1673,5	1,06	7,02	7,10
3	1040	1650	1078	1598,6	3,65	3,11	4,80
4	750	1950	795	1912,4	6,00	1,91	6,30
5	450	1350	510,93	1326,1	13,54	1,7	13,65



Slika 6. Lokalizacija predmeta u radnom prostoru

Položaj sonara u radnom prostoru predstavljen je znakom plus na Slici 6, dok su tačkicama označene tačke refleksije koje pripadaju objektima u radnom prostoru. Početne i krajnje tačke podnizova tačaka refleksije koje predstavljaju objekat označene su malim belim kružićem. Tačan položaj objekata prikazan je sivim kružićima, a detektovani položaj označen je kružićem sa zvezdicom. Primetimo da su kružići koji predstavljaju objekat nacrtani u razmeri, tako da njihova veličina odgovara veličini objekata u radnom prostoru.

Na slici se može uočiti nekoliko interesantnih pojava. Pre svega, pored nizova tačaka koji predstavljaju refleksije od objekata, pojavlju se i tačke refleksije koje ne potiču od realnih objekata. Ovo je naročito izraženo u oblasti između dva objekta, kada dolazi do neke vrste interferencije ultrazvučnih talasa, odnosno u pravcima kada je sonda usmerena ka ćošku stola, kada dolazi do višestruke refleksije ultrazvučnog talasa. Algoritam je sa uspehom odbacio ove smetnje. Dalje možemo uočiti sa je ultrazvučni odraz objekta znatno veći od samog objekta, što je posledica zanemarene širine

lista zračenja sonde. Najveći odraz ima objekat pod rednim brojem dva, Slika 6, koji se nalazi vrlo blizu desne ivice stola, odnosno margine δ , jednačina (5). Šta više, u odrazu možemo primetiti prelom na dve grupe tačaka, pri čemu je verovatno da manja grupa (dole desno), potiče zapravo od ivice stola a ne od objekta, ali je algoritam nije odbacio. Takođe možemo primetiti da su detektovani objekti uvek ispred stvarnih, što je posledica načina detekcije. Naime, tačan položaj objekta definisan je položajem njegovog centra, dok ultrazvučni sonar detektuje ivicu objekta, pa zbog konačnih dimenzija objekta postoji razlika. Takođe se može uočiti da su detektovani objekti pomereni u desno u odnosu na tačne položaje, što ukazuje na grešku u određivanju početnog položaja robota, a naročito njegove orijentacije.

Na osnovu interpretacije rezultata možemo zaključiti da su dobijeni rezultati više nego zadovoljavajuće, te da se opisani algoritam sa uspehom može primeniti za ultrazvučnu lokalizaciju objekata u radnom prostoru mobilnog robota.

3. ZAKLJUČAK

U radu je opisan algoritam za lokalizaciju predmeta u radnom prostoru mobilnog robota primenom ultrazvučnog sonara Polaroid 6500 sa pratećom mernom instrumentacijom na bazi mikontrolera. Predstavljene su matematičke osnove i izložena je konstrukcija algoritma. Algoritam je implementiran najpre u Matlab-u a kasnije i na upravljačkom mikontroleru. Željene osobine algoritma, kao što su odbacivanje predmeta van i sa ivica radnog prostora, neosetljivost na smetnje i šumove, i klasifikacija objekata prema veličini su u znatnoj meri ostvarene. Izvršena je eksperimentalna provera algoritma određivanjem pozicija pet objekata u radnom prostoru. Algoritam je uspešno detektovao svih pet objekata, a detektovane koordinate su zadovoljavajuće tačnosti.

LITERATURA

- [1] M. Rašić, A. Dejanović i G. Đorđević: "Kalibracija ultrazvučnog sonara za primene u mobilnoj robotici", Zbornik radova XLVIII Etran, Čačak, 2004. str. 273-276
- [2] A. Dejanović: *Primena ultrazvučnog sonara za lokalizaciju predmeta u radnom prostoru robota*, diplomski rad, Elektronski fakultet u Nišu, 2004.
- [3] *Technical Specification for 6500 Series Sonar Ranging Module*, Polaroid Corporation
- [4] G. Dudek, and M. Jenkin: *Computational Principles of Mobile Robotics*, Cambridge University Press, 2000.
- [5] On-line: <http://www.eurobot.org>

Abstract – Ultrasound sonars are almost indispensable in mobile robot applications, for both low price and simple signal processing. This paper presents algorithm for detection and localisation of objects in a mobile robot workspace. Algorithm is based on Polaroid 6500 ultrasound sonar along with custom measurement equipment. Results are verified experimentally.

ULTRASOUND OBJECT LOCALISATION IN MOBILE ROBOT WORKSPACE

M. Rašić, A. Dejanović and G. S. Đorđević