

Integracija globinske kamere za povečanje varnosti avtonomnega vozila

Lenart Lavrih¹, dr. Aleš Bizjak², prof. dr. Marko Munih¹,

¹ Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška c. 25, 1000 Ljubljana

² I. H. S. d.o.o., Cesta 4. julija 84 D, 8270 Krško

E-pošta: ll1542@student.uni-lj.si

Integration of a depth camera to increase the safety of the autonomous vehicle.

The objective of the seminar was to enhance the safety of the logistic AMRs that transport food pallets between automated lines. The current AMR already complies with the standard [1], which guarantees the safety of AMRs in the presence of a person. To further improve the security, we installed stereo cameras, also known as depth sensors, on the north and south sides of the AMR (Figure 1). Main focus was on obstacles that are lower than 15 cm, such as those detected by safety laser beams and overhead obstacles. When the AMR is loaded, we must also monitor the height of its surroundings to prevent damage to the load.

The entire AMR architecture is built on the ROS framework. We used the Intel Realsense D435f depth camera, which already has ROS libraries available. We employed the RANSAC method to separate the objects that could potentially obstruct the planned path of the AMR from the flat surfaces. Based on the location and distance of the obstacles from the AMR, we adjust the driving speed accordingly. Our tests validated the effectiveness and functionality of the added security camera.

Kratek pregled prispevka

Cilj seminarja je povečanje varnosti logističnega AMR-ja. Ta skrbi za prevoz palet z živili med avtomatiziranimi linijami. Obstoječ AMR je sicer že zadostoval standardu [1], ki se nanaša na varnost AMR-jev ob prisotnosti osebe. Za dodatno zagotavljanje varnosti sta na severno in južno stran AMR-ja (slika 1) nameščeni stereo kameri, ki sta senzorja globine. Osredotočili smo se predvsem na ovire, ki so nižje od 15 cm, oziroma so pod varnostnim laserskim žarkom, in viseče ovire. Ko je AMR naložen, moramo namreč spremljati višino okolice, saj ne želimo poškodovati tovora na njem.

Celotna arhitektura AMR-ja sloni na odprtokodni arhitekturi ROS. Uporabili smo globinsko kamero Intel Realsense D435f, za katero že obstajajo knjižnice za uporabo le te v okolju ROS. Razpoznavanje objektov, ki bi potencialno ovirale načrtovano pot AMR-ja, poteka z metodo RANSAC. Glede na postavitev in oddaljenost ovir od AMR-ja reguliramo hitrost vožnje. Testi so potrdili koncept in delovanje dodatne varnostne kamere.

1 Uvod

Standard [1] določa minimalne varnostne pogoje, da AMR lahko deluje v okolju, kjer se gibljejo tudi ljudje. Minimalnemu standardu zadošča horizontalen laserski žarek, ki zaobjame celotno konturo robota na višini 15 cm. AMR podjetja I.H.S. tem standardom zadošča, odločili pa smo se za nadgradnjo s kamero. Večina AMR –jev na trgu se zadovolji z vodoravnimi žarki in dodatnim navpičnim (senzorska fuzija)[2], ki preverja višino okolja. Ko je AMR polno naložen, je lahko njegova višina vključno s paletjo približno 2,5 m.

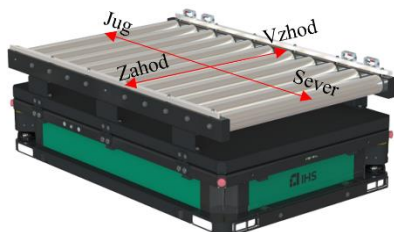
Cilj tega seminarja je bila integracija kamere, ki pokrije širše območje in z oblakom točk ponuja dodatno informacijo o lokaciji objektov in glede na bližino objektov vpliva na hitrost.

2 Metode

Glavna razloga za vpeljavo kamer v AMR je zaznavanje objektov pod horizontalnim žarkom na višini 15 cm, in bi lahko ovirali pot. Drugi razlog je preverjanje, če je višina okolja za AMR sploh primerna. Problem se pojavi pri prehodu skozi vrata, če ta niso dovolj dvignjena.

2.1 AMR

Dimezije AMR-ja so 1700 mm × 1130 mm × 400 mm. Ima diferencialni pogon z dodatnimi štirimi pomožnimi kolesi, ki služijo stabilizaciji. Voziček se lahko obrača na mestu, zaradi omenjene kinematike pa nima vodilne smeri.



Slika 1: AMR z označenimi smermi vožnje.

2.2 Kriteriji za izbor kamere

Kot glavne parametre za izbor kamere smo si izbrali: tehnika s katero kamera zaznava globino, stanje integracije z ROS-om, cena, vidno polje, dobavni rok, velikost.

2.2.1 Intel Realsense D435f

Cena kamere je bila 399 €, rok dobave pa 10 dni. Za kamero so že spisane ROS knjižnice, dimenzije pa ustrezajo vgradnji v okvir AMR-ja. Zorni kot kamere je omejen z vertikalnim kotom 58 ° in horizontalnim 87 °. Kamera pošilja podatke s frekvenco 30 Hz.

Od osnovnega modela D435 se razlikuje le po dodatnem IR filtru. Ta izboljša kakovost globine v prizorih s ponavljajočimi se navpičnimi vzorci, kot so drogovi, navpične žaluzije, cevi v stropu itd. Filter je nameščen pred leči obeh kamer.

2.2.2 SICK Visionary – S

Cena te kamere je trikratnik Intelove, kar je očitno tudi na podatkih, ki jih dobimo iz kamere. Ti so manj pošumljeni, kar je ugodno za nadaljnjo obdelavo podatkov. Kamera je dimenzijsko večja od Intelove. Ta model nima podpore za ROS, kar bi podaljšalo čas razvoja.



Slika 2: Primerjava velikosti kamer, na levi D435f (90 mm × 25.8 mm × 25 mm) in na desni Visionary – S (162 mm × 93 mm × 78 mm).

Po testiranju obeh kamer smo se odločili za D435f, ki je od Visionay – S po vseh naših kriterijih bolj primerna.

2.3 Stereo vid

S stereo kamero na podlagi dveh slik določimo globino. Osnovni koncept je triangulacija. Točka na sceni in točki, ki predstavljata središči kamer tvorijo trikotnik. S poznavanjem razdalje med kamerama in nastalima kotoma lahko izračunamo razdaljo predmeta od kamere [3]. Kamera zajame slike

in v postopku procesiranja išče korespondenčne pare točk. Objekti bližje kameri imajo na epipolarni premici večji relativni premik (dispariteta) v horizontalni smeri [4]. S triangulacijo na podlagi disparitete izračunamo globino in sestavimo oblak točk, ki ga uporabljamo za nadaljnjo obdelavo.

Intel realsense za višjo kvaliteto končne slike uporablja še IR projektor. Ta projicira 100000 pik na psevdo naključnih področjih iz katerih kasneje sestavi pare korespondenčnih točk in s triangulacijo izračuna globino posameznega para. To je dodaten korak s katerimi izboljšamo dispariteto slike.

2.3.1 Integracija kamere na AMR

Kamera je pritrjena na okvir AMR-ja s kovinskim nosilcem, kot je vidno na spodnji sliki, na sredini sprednjega dela AMR-ja.



Slika 3: Montaža kamere na zunanjo stran AMR-ja.

Da zajame čim večje področje je nagnjena za 7° nazaj. Pomembno nam je bila zgornja meja vidnega polja, saj je v primeru ko je voziček naložen visok kar 2.5 m. To višino lahko zaznamo šele pri razdalji 3 m od AMR-ja.

2.4 Arhitektura sistema

AMR sestavlja več modulov, ki delujejo paralelno in komunicirajo preko ROS-a. Najbolj pomembni moduli so navigacija, lokalizacija, upravljanje flote, planiranje poti. Tak modul je tudi detekcija objektov. Podatek bi se moral upoštevati v planiranju poti, trenutno stanje pa je tako, da modul le dodatno zagotavlja varnost. Glede na detektiranje objektov se odzovemo z akcijami, ki zmanjšajo hitrost oziroma ustavijo AMR. Za obdelavo podatkov in akcije skrbi program, ki je spisan v programskem jeziku python.

Vhodni podatki v program so: oblak točk s kamere, hitrost AMR-ja, smer vožnje (drive mode) in višina tovora. Izhodni podatke je semafor, ki prilagaja hitrost.

Tabela 1: Semafor hitrosti

| | | |
|-----------------------|-------------------------------|------------------|
| Zelena luč: | Rumena luč: | Rumena luč: |
| Objekt ne ovira poti | Približevanje objektu | Objekt ovira pot |
| Hitrost je konstantna | Hitrost se zmanjša na 0,3 m/s | Ustavitev |

Iz oblaka točk pridobivamo objekte v okolici, iz hitrosti in smeri določamo postavitev varnostnih con.

Zahteva za izvajanje programa je 10 Hz.

2.4.1 Oblak točk

V oblaku točk je vsaka podatkovna točka predstavljena s koordinatami x, y in z ter dodatnimi informacijami kot so barva, intenzivnost in obseg.

Oblak točk je glavni podatek, glede na katerega lahko določimo položaj okolice glede na AMR. Iz oblaka zaznavamo ravnine in objekte v okolici, ki bi nam lahko prišle na pot.

Pomemben korak pri obdelovanju oblaka točk je podvzorčenje. S tem zmanjšamo velikost oblaka točk in olajšamo obdelave in pohitrimo RANSAC algoritem [5]. Poleg tega še odstranimo šum in druge nepomembne podatke.

2.4.2 Zaznavanje objektov in ravnin

Zaznavanje ravnin poteka z algoritmom RANSAC. Deluje tako, da vzame naključno podmnožico danih podatkov in iz nje ustvari model ravnine. Nato preverimo, kako dobro se celoten nabor podatkov ujema z modelom. Te korake ponavljamo, dokler ne najdemo modela ravnine, ki dobro ustreza našim podatkom. V našem primeru smo izvedli dvesto iteracij.

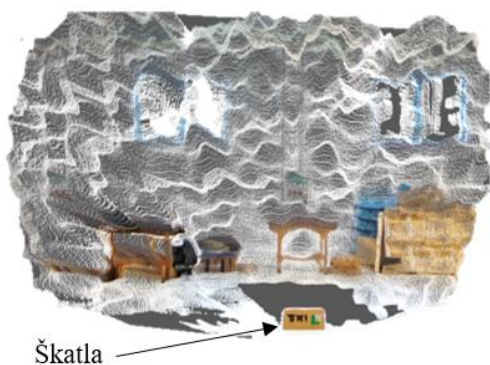
Pomembno je, da predmetov na sliki ne zaznamo kot ravnino. To smo rešili tako, da mora ravnina zavzemati vsaj 60% celotne slike.

To v grobem drži, dokler objekt ni čisto pred kamero.

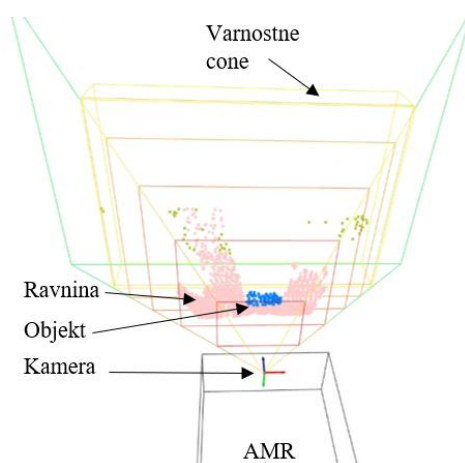
Za nadaljnjo uporabo originalen oblak točk obrežemo tako, da izločimo vse točke, ki so sestavljajo ravnino. Točke, ki ostanejo, so objekti pomembni za nas.

Glede na to v kateri coni se nahajajo, AMR – ju sporočimo, kako naj prilagodi hitrost. Z modro je na sliki 5 označen najbližji predmet (na sliki 4, da je to kartonasta škatla), z roza barvo pa ravnina. V ozadju lahko vidimo še zelene pike. To naj bi bili objekti, ki se nahajajo daleč stran, a so v resnici le šum, ki odstopa od ravnin.

Na sliki 4 je za lažjo predstavo scena, ki jo dobimo direktno iz slike kamere.



Slika 4: Realna slika s kamere.



Slika 5: Zaznavanje objektov na podlagi oblaka točk.

2.4.3 Varnostne cone

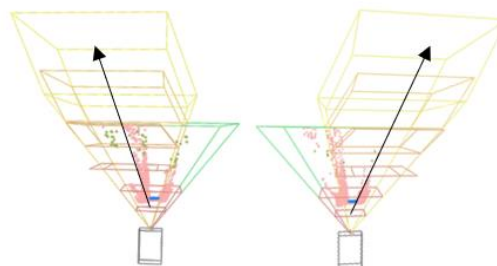
Varnostne cone za kolaboracijo s človekom so za AMR-je definirane v standardu EN ISO 3691-4-2020. Definirane so tako, da je mogoče robota varno in kontrolirano upočasniti ali po potrebi ustaviti, da ne pride do kontakta s stoječim ali ležečim človekom pri uporabi ESPE (Electro-sensitive protective equipment) [1].

Ker smo se seminarja lotili raziskovalno, naše cone niso usklajene s standardom.

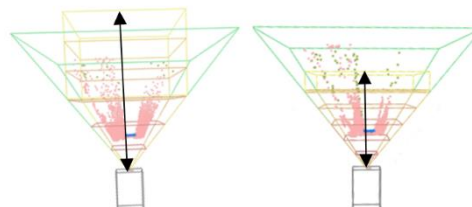
Odločili smo se za dinamične varnostne cone, ki se spreminjajo s hitrostjo AMR-ja (večja hitrost, večje cone). Še dodaten parameter je smer vožnje. AMR ima 16 načinov vožnje. Zaradi omenjenega zornega kota kamere se nismo lotili pokriti obračanja na mestu in ostrega zavijanja.

Upoštevali smo smeri vožnje: sever – naravnost, sever – rahlo levo, sever – levo, sever – rahlo desno, sever – desno.

Na slikah 6 in 7 je z zeleno označen vidni kot kamere, piramide, ki pa si sledijo od rumene do rdeče barve, pa so varnostne cone.



Slika 6: Vpliv smeri (označena s puščico) vožnje na spremembo varnostne cone. Levo je smer sever – levo, na desni sever – desno.



Slika 7: Vpliv hitrosti vožnje na spremembo varnostne cone. Na levi je hitrost višja kot na desni.

Cone niso fiksne, ampak se glede na vhodne parametre dinamično spreminjajo.

2.4.4 Zaznavanje višine okolice

Oblak točk moramo zaradi nagnjenosti kamere zarotirati za 7° po y osi. V primeru, da se objekt nahaja nad y osjo, preverjamo, ali ta višina ustreza trenutni skupni višini AMR-ja in tovora. V kolikor je okolica prenizka, da bi se varno zapeljali skozenj, se AMR ustavi.

3 Rezultati

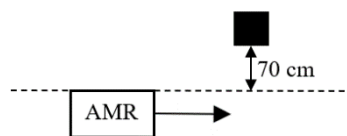
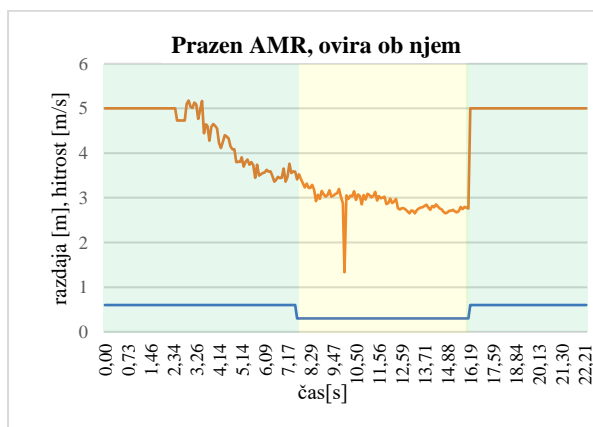
3.1 Test: vožnja naravnost

AMR se je vozil naravnost 10 m, na sredini poti pa ga je čakala ovira. S prikazom hitrosti in barve semaforja v odvisnosti od časa, smo potrdili pričakovana obnašanja. Na grafih je z rdečo označena razdalja objekta od AMR-ja, z modro pa regulirana hitrost, ki se spreminja glede na semafor. Barve semaforja so označene na grafih.

3.1.1 Zaznavanje objekta, ki ne ovira poti

Objekt se je nahajal 70 cm stran od bližnjega roba AMR-ja. Tako smo zagotovili, da laserski senzorji še niso vplivali na regulacijo hitrosti. Ti imajo najbolj oddaljeno cono postavljeno 50 cm od AMR-ja.

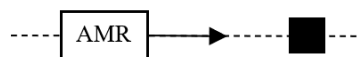
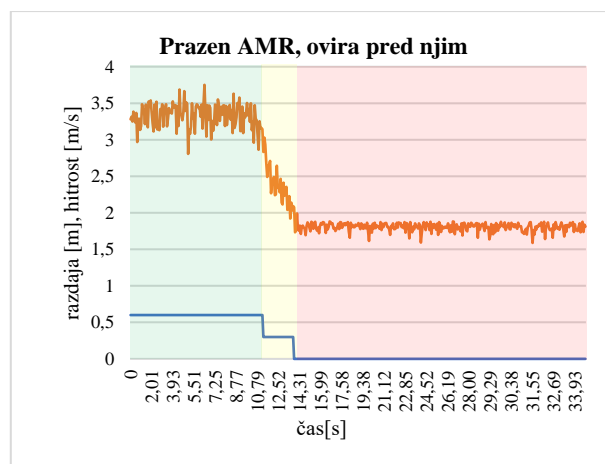
Na sliki 8 je vidno, da se hitrost v prisotnosti objekta zmanjša. Ko ni več v vidnem polju, se hitrost sprosti nazaj na prvotno.



Slika 8: Zmanjševanje hitrosti, ko je objekt blizu, a ne ovira poti. Spodnja slika je tloris eksperimenta.

3.1.2 Zaznavanje objekta nižjega od 15 cm, ki ovira pot

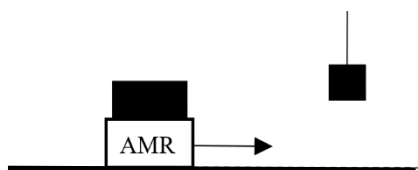
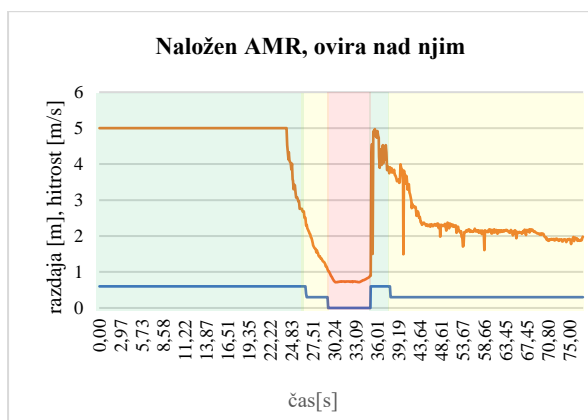
Objekt, ki je nižji od 15 cm, laserji ne zaznajo. Na regulacijo hitrosti tu vpliva le semafor s kamere. Ko je objekt v rdeči coni, se AMR ustavi.



Slika 9: Zmanjševanje hitrosti in ustavitvev, ko objekt ovira poti. Spodnja slika je tloris eksperimenta.

3.1.3 Zaznavanje višine okolice (naložen AMR)

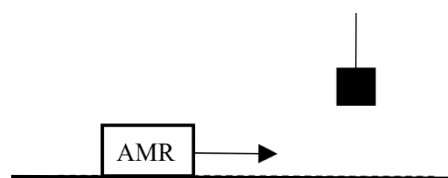
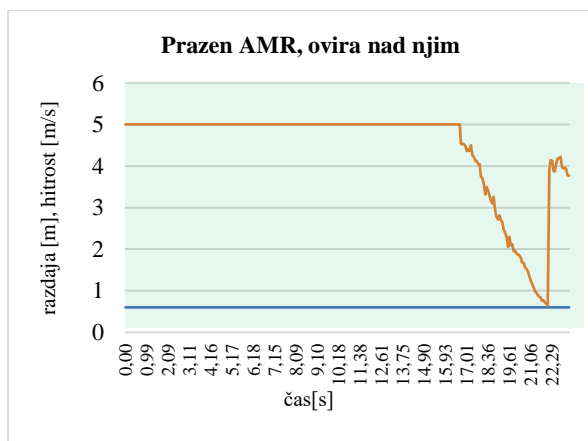
Naložen AMR se ustavi, ko je dovolj blizu oviri. Visečo oviro smo v času 36 s dvignili in AMR je nadaljeval s potjo.



Slika 10: Zmanjševanje hitrosti in ustavitv, ko viseč objekt ovira poti. Ko odmaknemo objekt, AMR nadaljuje pot. Spodnja slika je stranski ris naloženega AMR – ja in pred njim viseče ovire.

3.1.4 Zaznavanje višine okolice (prazen AMR)

Ko AMR ni naložen, lahko kljub viseči oviri nadaljuje pot z nezmanjšano hitrostjo.



Slika 11: Konstantna hitrost, ko je viseč objekt na poti, a ne ovira praznega AMR-ja. Spodnja slika je stranski ris praznega AMR – ja in pred njim viseče ovire.

Povprečna frekvenca zaznavanja za vse štiri teste je bila 13 Hz, najmanjša pa 5 Hz.

4 Diskusija

Trenutno je na AMR-ju le ena kamera, ki zaznava objekte in višino oklice in glede na videno glavno kontrolno enoto opozarja s semaforjem.

Ko se AMR vozi v eno smer deluje le kamera sever, kamera jug pa se vključi, ko AMR obrne smer gibanja. Vidni kot kamere je omejen, kar bi nadgradili s premikanjem kamere, dodatnimi kamerami ali menjavo kamere. Problem je torej mrtvi kot, saj ima AMR tudi opcijo obrata na mestu.

Kot je že na začetku omenjeno, bi bilo smiselno podatke o objektih vključiti v proces planiranja poti, s čimer bi se aktivno ogibali oviram.

5 Zaključek

Integracij kamere je poceni način za zagotavljanje dodatne varnosti AMR – jem. Največja pomanjkljivost kamere je njen vidni kot, pomanjkljivost algoritmov pa je ločevanje majhnih predmetov od tal.

Literatura

- [1] EN ISO 3691-4-2020- Industrial trucks - Safety requirements and verification - Part 4 Driverless industrial trucks and their systems
- [2] Y. Wunderle and E. Lyczkowski, "Sensor fusion for functional safety of autonomous mobile robots in urban and industrial environments," 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ETFA52439.2022.9921688. [dec. 2022]
- [3] Siciliano B Khatib O. Springer Handbook of Robotics. Berlin: Springer; 2008. doi:10.1007/978-3-540-30301-5 [jan. 2023]
- [4] http://vision.stanford.edu/teaching/cs131_fall1415/lectures/lecture9_10_stereo_cs131.pdf [dec. 2022]
- [5] Urbančič, Tilen & Fras, Mojca & Stopar, Bojan & Božo, Koler. (2014). The Influence of the Input Parameters Selection on the RANSAC Results. International)3.258. [dec. 2022]