



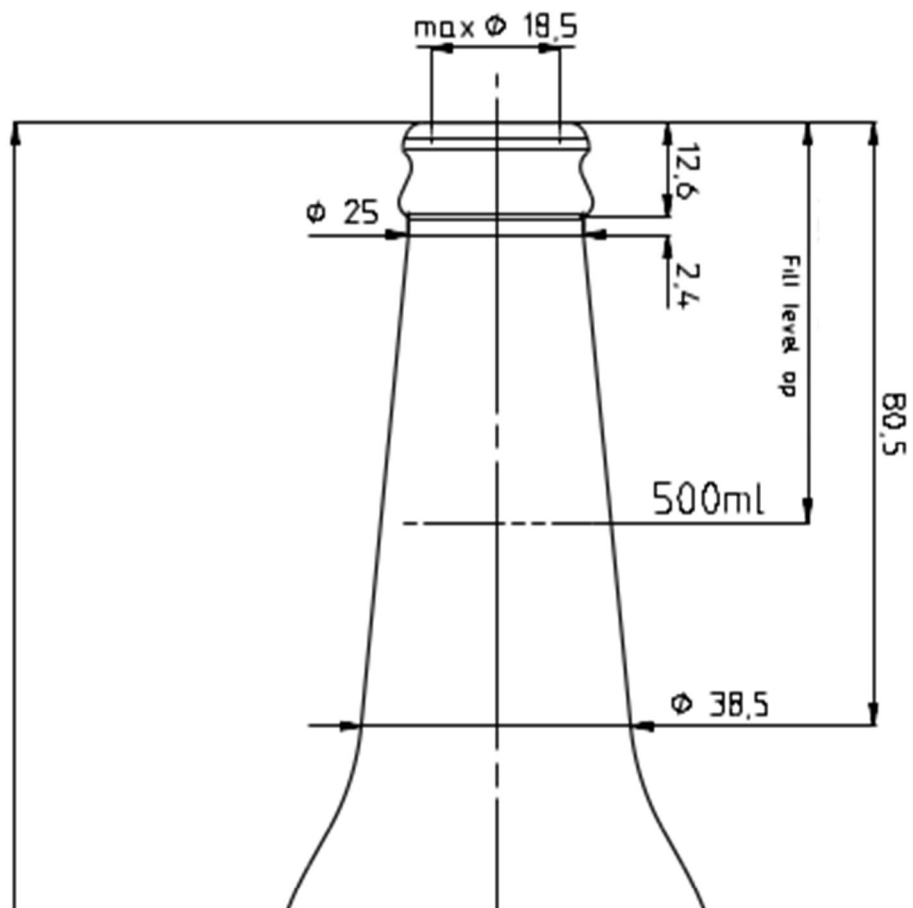
Fakultet elektrotehnike, strojarstva i
brodogradnje Sveučilišta u Splitu

Naručitelj: OPEN BOOK d.o.o.
Put Radoševca 14
21 000 Split

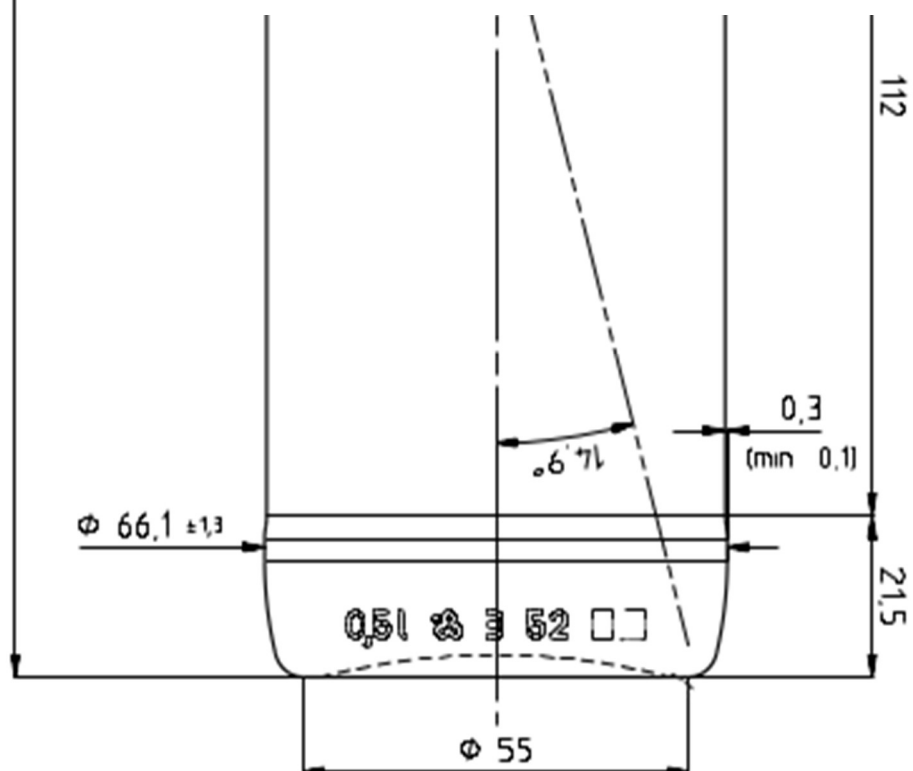
temeljem vaučera izdanog u okviru
Poziva na dostavu projektnih
prijedloga Inovacijski vaučeri za MSP
KK.03.2.2.03 (P21_INO:2018_0235)

Autori:
doc. dr. sc. Ivo Stančić
izv. prof. dr. sc. Josip Musić

Split, studeni, 2021.



Sustav za beskontaktno mjerjenje razine tekućine u bocama prilikom punjenja unutar projekta OPINAU- FILLER-CV

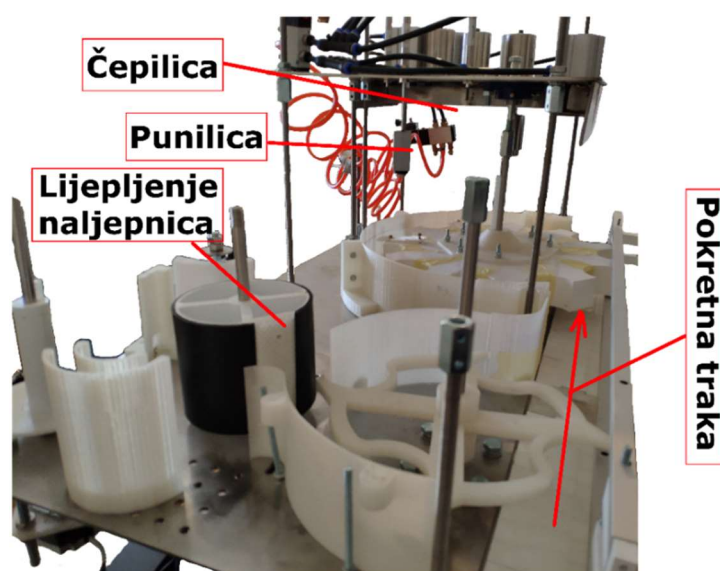


SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	2
1. MOTIVACIJA I CILJ	3
2. MODUL ZA DETEKCIJU RAZINE TEKUĆINE PRILIKOM PUNJENJA – Modul 1	8
3. MODUL ZA KONTROLU RAZINE TEKUĆINE NAKON PUNJENJA – Modul 2	19
4. STRUKTURA POPRATNOG CD-a SA PROGRAMSKIM DATOTEKAMA	24

1. MOTIVACIJA I CILJ

Naručitelj sustava, tvrtka OPEN BOOK d.o.o., je u procesu izrade *open-source* (sklopovski i programski) tipa punionice za male pivovare odnosno tzv. *craft* piva. Glavna odlika takvih pivovara odnosno piva je mala serija proizvodnje odnosno izrada od strane pojedinaca (entuzijasta) i manjih poduzeća. Stoga je jedna od glavnih odlika koje razvijeni sustav treba imati cjenovna pristupačnost kao i jednostavna dostupnost svih komponenti od kojih se sustav sastoji, pri čemu sustav ne mora biti u mogućnosti obraditi veliki broj boca kao velike pivovare. Dodatno, potrebno je da je sustav lako za održavati te zamijeniti neispravne komponente, pa čak i da vlasnik/korisnik može intervenirati u programski kod i/ili dodati dodatno sklopovlje (npr. senzoričku). Tragom navedenoga tvrtka OPEN BOOK je izradila prototip punionice (Slika 1) koja sa sastoji od pokretne trake, dijela za lijepljenje naljepnica na boce, punilice pivom i čepilice, a dijelovi za koje su dostupni kao STL datoteke za 3D printanje, odnosno ključne elektroničke komponente putem platformi za trgovinu kao što su e-Bay odnosno AliExpress.



Slika 1 – Radni prototip OPINAU-FILLER sa naznačenim osnovnim dijelovima (strelica prikazuje smjer kretanja boce) – starija verzija prototipa

Glavni pokretači (Nema 23 bipolarni koračajni motor¹) prototipa punionice su dizajnirani i integrirani u sustav, kao i senzorička za praćenje njihovoga rada i trenutno stanja (položaja) boca unutar sustava. Međutim, dio kojemu nedostaje senzorička a kako bi se mogla zatvoriti povratna upravljačka veza je sama punilica. Naime sustav u trenutnoj konfiguraciji ne posjeduje informaciju o stvarnom stanju razine piva tijekom punjenja, već ventil za punjenje drži otvorenim unaprijed određeno vrijeme. Prilikom punjenja, a kako bi se smanjilo pjenjenje, boca sa pod pritiskom prvo napuni ugljičnim dioksidom (korak pripreme) a zatim kreće samo punjenje pivom. Budući da ugljični dioksid dolazi iz spremnika pod pritiskom, a čiji pritisak

¹ <https://www.omc-stepperonline.com/nema-23-bipolar-1-8deg-1-26nm-178-4oz-in-2-8a-2-5v-57x57x56mm-4-wires.html?search=23hs22-2804s>

opada kako se boca dioksida prazni, to se pritisak u boci piva prilikom punjenja također mijenja. Ovo pak za posljedicu može imati da vrijeme punjenja (u otvorenoj petlji) koje se postavi kada je boca dioksida puna više nije dovoljno dobro kako se boca prazni. Iako su tolerancije prilikom punjenja relativno velike (10% prema zahtjevu naručitelja), poželjno je da punjenje bude što bliže deklariranoj vrijednosti, te da se u slučaju neželjenih efekata (prepunjena boce, preveliko pjenjenje i slično) proces može ili zaustaviti ili obavijestiti operatera o nastaloj grešci.

Prije početka razvoja traženog modula za detekciju razine tekućine u boci prilikom punjenja, napravljen je kratki pregled dostupnih znanstvenih i komercijalnih sustava. Predstavljanje potpunog pregleda izlazi izvan okvira ove studije, ali moguće je konstatirati da se dostupni senzori mogu grubo podijeliti u dvije skupine: kontaktni i beskontaktni. Daljnja podjela je moguća s obzirom na princip rada²: mehanički, magnetski, elektrostatički, ultrazvučni, optički i slično. Moguća je i kombinacija više senzorskih modaliteta u jednu jedinicu kao npr. u komercijalnom sustavu Heuft Prime (<https://heuft.com/en/product/beverage/full-containers/full-container-check-heuft-prime>). Potrebno je također primijetiti da se razina tekućine može mjeriti na dva mjesta: prilikom samog punjenja (što je izazovniji problem zbog prisustva mlaza za punjenje i eventualnih dodatnih dijelova punilice a u svrhu uključenja u regulacijsku petlju – to je problem kojim se bavi ova studija) ili nakon punjenja samo za kontrolu razine (ova studija samo predlaže rješenje za ovaj slučaj ali ga detaljnije ne razmatra i testira)..

Zbog sanitarnih razloga i zahtijeva koje oni nameću poželjno je da senzor za mjerenje razine tekućine u boci prilikom punjenja bude beskontaktni. Stoga su metode strojnog vida prepoznate kao dobri kandidati koji osim što zadovoljavaju zdravstvene kriterije (beskontaktnost) se vrlo dobro uklapaju u paradigmu otvorenog pristupa istaknutu u uvodu (npr. lako ih je mijenjati i nadograditi). Pri tome su postavljeni slijedeći konstrukcijski zahtjevi: 1.) potrebno je koristiti lako dobavljive i cjenovno pristupačne komponente, 2.) sklopovlje mora po svojim dimenzijama mora biti prikladno za integraciju u razvijeni prototip punionice, 3.) sustav treba raditi u realnom vremenu s latencijom ne većom od 200 ms što odgovara brzini ne manjom od 5 sličica u sekundi, 4.) programska podrška treba na svome izlazu davati kontinuiranu vrijednost (trenutno stanje razine) kao i diskretnu vrijednost (da li je dosegnuta željena razina punjenja), 5.) izlaz iz programske podrške treba biti pogodan za kasnije spajanje s ROS-om (eng. *Robotic Operating System*³), 6.) sustav treba biti otporan na promjene osvjetljenja u radnoj okolini, i 7.) sustav treba biti lak za rukovanje (posebno kalibracijska faza – ukoliko je potrebna).

Tijekom ove studije inicijalno je testirano više pristupa upotrebom različitih modaliteta (sklopovlja) mjerenja, ali su naposljetku dva odabrana kao obećavajuća te su stoga detaljnije predstavljena u ovome Izveštaju (primjer jednoga sustava je na Slici 2), i za njih su razvijeni prototipovi modula. Navedeni su osnovni sastavni dijelovi kako bi se mogli jednostavno reproducirati (*open-source* filozofija), kao i cjeloviti kod koji se planira učiniti javno dostupnim

² <http://www.leveldevilsensors.com/main/electronic-sensors-inc-esi-level-devil-american-made-tank-monitors-and-tank-monitoring-systems/tabk-sensor/>

³ <https://www.ros.org/>

(pod odgovarajućim licencama) putem GitHub platforme⁴ (opet, u skladu s *open-source* filozofijom). Potrebno je napomenuti da su svi moduli detaljno testirani u laboratorijskim uvjetima sa ciljanim tipovima boca piva (kojima su i prilagođeni) dok u praktičnoj eksploataciji se mogu javiti neke dodatne neplanirane situacije koje će se trebati naknadno adresirati. Kako bi se minimizirao ovaj efekt jedan od razvijenih prototipova (Modula 1) je u dogovoru s naručiteljem i kratko testiran u relni(ji)m uvjetima prave punionice (ali ne i prilikom stvarnoga punjenja piva). Također, razvoj sustava je prilagođen određenom tipu i udaljenosti pivske boce, ali je kroz (jednostavni) postupak kalibracije (putem ugrađenog mini LCD ekrana) ostavljena mogućnost prilagodbe istih, te posljedične programske prilagodbe odgovarajućih programskih/mjernih parametara. Na taj način je modul postao fleksibilniji i moguće ga je koristiti u više različitih konfiguracija i više različitih namjena. Svi kodovi su pisani u Python programskom jeziku, tako da i korisnici sa manje iskustva mogu po želji prilagođavati funkcionalnost modula.

Naposljetku je potrebno još jednom istaknuti i činjenicu da je tijekom razvoja predloženih sustava testirano više različitih kamera, senzora i mikrokontrolera (u vidu brzine i pouzdanosti rada kao i jednostavnosti upotrebe i nadogradnje), te su predstavljene komponente one koju su naposljetku odabrane a koje ispunjavaju tražene kriterije naručitelja. Za potrebe modula je dizajnirana i izrađena posebna tiskana pločica kao i dizajnirano više mehaničkih dijelova od aluminijskih profila.



Slika 2 – Primjer jednog modula razvijenog prilikom izrade studije

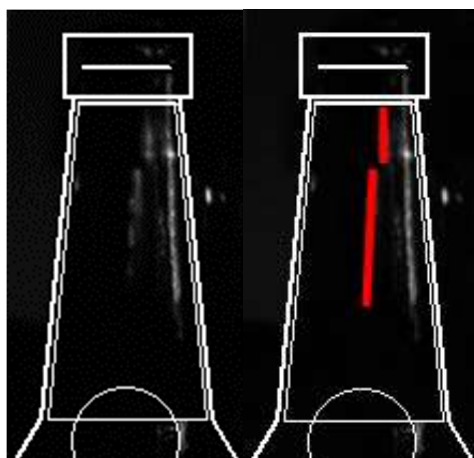
Prilikom razvoja sustava za praćenje je testirano nekoliko kombinacija najpopularnijih kamera i mikro kontrolera koji se koriste u MV-u (*eng. Machine Vision*). Odluka da se u konačnici ne koristi niti jedan specifični mikrokontroler (ugradbeno računalo) već *stand-alone* kamera je bilo motivirano činjenicom da sustav bude prijenosan i da se može jednostavnije integrirati u postojeću upravljačku logiku. Dodatno, ovakva odluka doprinosi jednostavnosti izgradnje i održavanja sustava, Zbog potpunosti razmatra neki od predloženih sustava su testirani i sa Raspberry Pi 4B+ ugradbenim računalom. Jednostavna usporedba nazivnih

⁴ <https://github.com/>

vrijednosti je na strani RPi platforme budući da testovi pokazuju znatnu razliku između OpenMV H7 plus kamere (ARM Cortex-M7) koja radi na taktu 480 MHz i Raspberry Pi 4B (ARM Cortex A72) na taktu 1.5GHz (*Core Mark Performance* 2400 u odnosu na 48,626)⁵ ⁶. Međutim OpenMV H7 plus je dizajniran za primjene strojnog vida, pa kao takav ima neke prednosti kao što su: brza sabirnica (3.84 GB/s), manja potrošnja energije, manje dimenzije i integrirana kamera i mikrokontroler, izravno programiranje i slično. Upravo iz navedenih razloga je isti bio prvi izbor u razvoju predloženog sustava.

Primjer svog testiranog sklopovlje je dan u Tablici 1 kako bi čitatelj dobio bolji osjećaj za performanse drugog sklopovlja, te stoga nisu namijenjeni za direktnu usporedbu s konačnim sustavom. Također, smatramo da bi uključivanje potpunih preliminarnih rezultata u ovu studiju nepotrebno pomaklo fokus sa predloženog sustava i njegovih karakteristika, te stoga oni i nisu uključeni (već samo njihov sažetak kako slijedi).

Inicijalna ideja sustava za detekciju razine tekućine u boci se temeljila na primjeni linijskog lasera i detekcija efekta refrakcije/loma svjetlosti (primjer detekcije na Slici 3). Međutim, testiranja su pokazala da zbog specifičnosti upotrijebljenih boca (nesavršenog oblika) i radnog okruženja željeni efekti nisu dovoljno izraženi i stabilni da bi bili primjenjivi, te se stoga odustalo od navedene ideje. Npr. primijetilo se da jako mali pomaci boce (tek nekoliko mm) mogu rezultirati pomakom zrake, što se može prepoznati kao lažno napunjenost boce.



Slika 3 – Primjer loma laserske linije kod detekcije razine tekućine

Na slične probleme se naišlo kod pokušaja primjene IR senzora udaljenosti: zbog boce i zaštita koje ima nije bilo moguće dobiti smisleno i stabilno rješenje. Stoga se pristupilo pronalaženju alternativnih principa rada, a koji će biti predstavljeni u slijedećem poglavlju.

Dodatna ideja koja se testirala ali koja nije pokazala zadovoljavajuće rezultate (pa se stoga odustalo od njezina daljnjeg razvoja i testiranja) se temeljila na svojstvu apsorpcija svjetlosti boce i tekućine. Kako se radi o jako maloj količine relativno prozirne tekućine, smanjenje intenziteta svjetlosti zbog apsorpcije u tekućini je minimalno i u ovom slučaju nije davalo dovoljno kvalitetne rezultate (primjer na Slici 4). Na slici je prikazan idealan slučaj kada se linija jako dobro može razaznati ali u realnim situacijama zbog male razlike intenziteta

⁵ https://www.eembc.org/viewer/?benchmark_seq=13417

⁶ <https://openmv.io/products/openmv-cam-h7-plus>

„linije“ tekućine i ostatka boce razlika je minimalna i podložna utjecaju smetnji (npr. okolnog osvjetljenja).



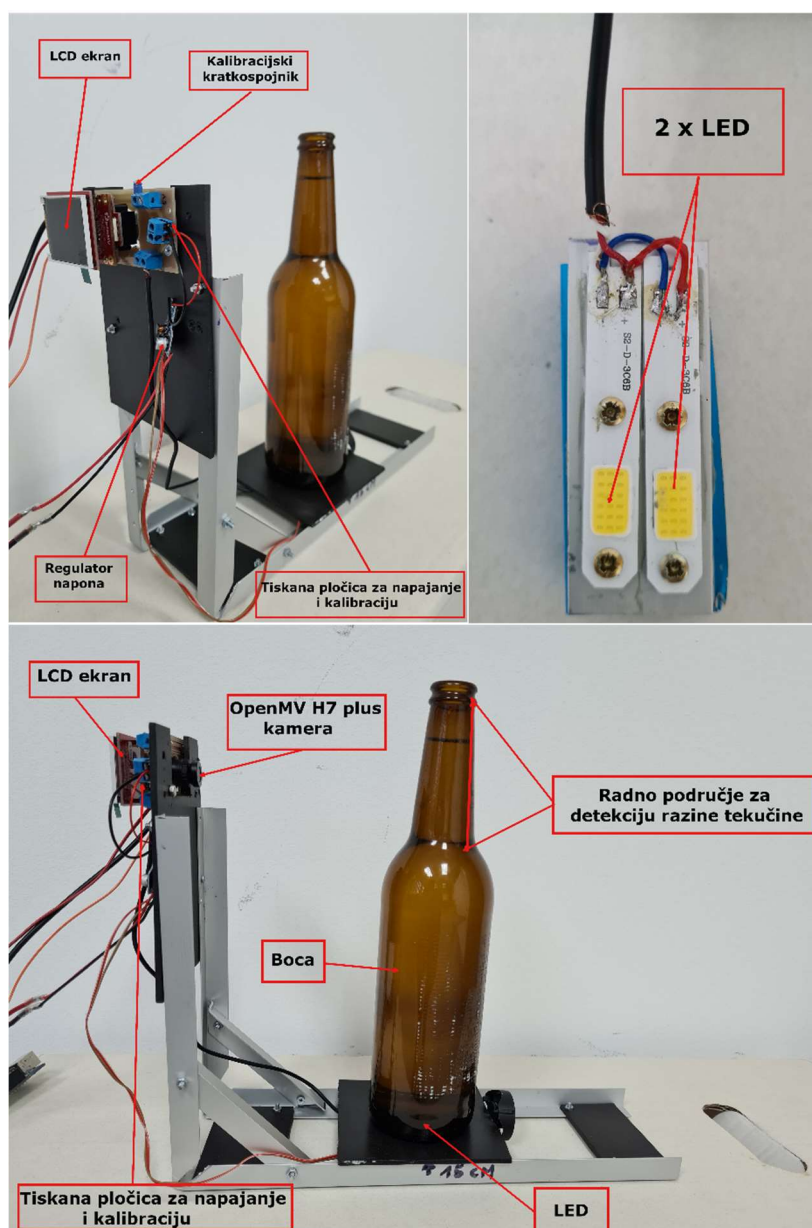
Slika 4 – Primjer detekcije razine tekućine temeljem svojstva

Tablica 1 – Usporedba osnovnih karakteristika testiranog sklopovlja tijekom studije

Sklopovlje	Rezolucija/ udaljenost	Podržane platforme	Ostale (bitne) karakteristike
Arducam OV9281 1MP kamera	1280x800 (1MP)	Raspberry Pi 4, Pi 3/3B+/3A+, CM3/3+, Pi Zero, Arduino	Monokromatski globalni shutter. Senzor ¼ inča. Ugrađen 650nm IR cut-off filter (samo vidljiva svjetlost). Maksimalna brzina 120 fps. Veličina 40x40 mm.
Arducam Stereoscopic Camera kit OV9281	1280x800 (1MP)	Raspberry Pi 3B/3B+/4B and Jetson Nano/NX	Dvije OV9281 1MP kamere sa sinkroniziranim globalnim shutterom. RAW8/RAW10/RAW12 izlazni format. Bez IR filtera (osjetljivo na IR). MIPI serijsko sučelje. Distorzija <1%. FOV 70 stupnjeva (H).
OpenMV H7 plus	592x1944 (5MP)	Neovisno o računalnoj platformi (stand alone ili serijska veza sa drugim uređajem)	STM32H743II ARM Cortex M7 procesor sa 480 MHz i 32MB SDRAM + 1MB RAM + 32 MB vanjskog flasha + 2 MB unutarnjeg flasha. OV5640 optički senzor. Može vrtiti custom algoritme na svome procesoru s brzinama do 50 fps.
Pololu 38kHz IR senzor blizine	60 cm	Analogno sučelje – sve ploče koje imaju pinove koji mogu čitati analogne signale	Baziran na Vishay's TSSP77038 modulacijskim IR prijemnicima. Digitalni senzor sa prilagodljivijom (trimmer) referentnom udaljenošću.
Zeleni laser snage 25 mW	3 m (tipično)	NA	Prilagodljivi fokus. Kut 60 stupnjeva. Akrilni kolimator. Napajanje 12 – 25 VDC. Valna duljina 515-520 nm. Klasa 1/2.

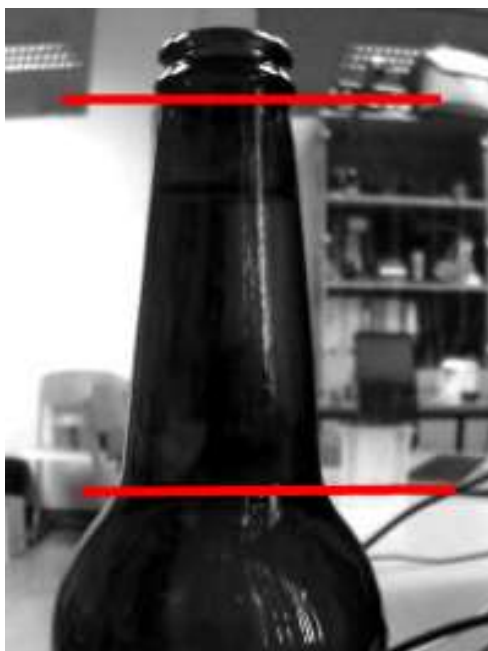
2. MODUL ZA DETEKCIJU RAZINE TEKUĆINE PRILIKOM PUNJENJA – Modul 1

Prototip (laboratorijskog) sustava za detekciju razine tekućine u boci je prikazan na Slici 5 (s označenim glavnim dijelovima), a njegovo planirano mjesto na proizvodnoj liniji (Slika 1) je u punilici. Potrebno je primijetiti da prototip sadrži i neke konstrukcijske i nosive dijelove (alumijski profili) koji neće nužno biti dio prototipa na proizvodnoj liniji budući da će se sustav postavljati na već postojeću konstrukciju na za to prikladan način. Pri tome će osim dodavanja komponenti, zbog prirode razvijenog sustava biti potrebno i prilagoditi postojeće komponente (podloga na kojoj se boca nalazi) a kako bi se mogle ugraditi ključne komponente (LED). Slika 5 sadrži detaljan uvid u sve komponente laboratorijskog sustava.



Slika 5 – Prototip modula za detekciju razine tekućine u boci s označenim osnovnim dijelovima iz nekoliko kuta gledanja

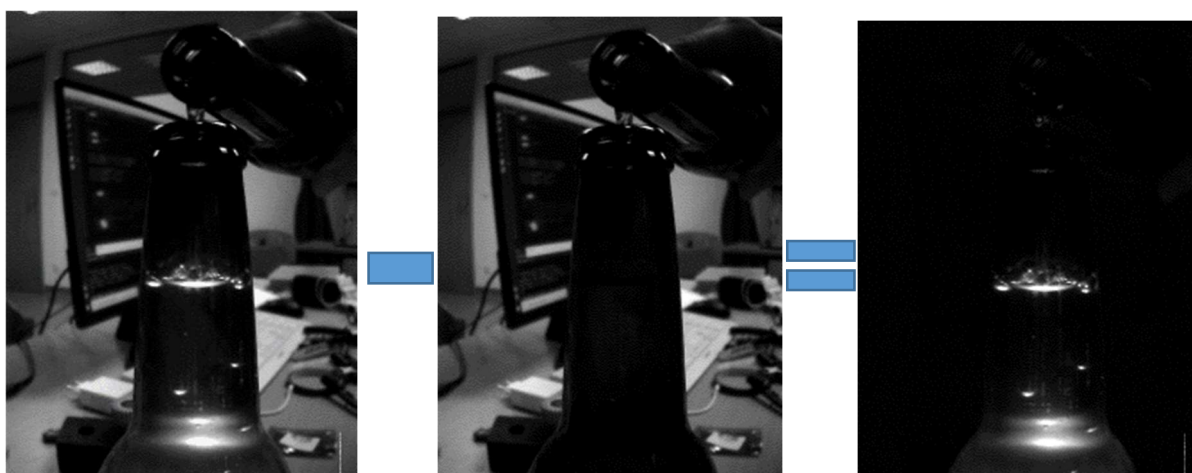
Iz donjeg dijela Slike 5 je vidljivo da da predloženi sustav ne detektira razinu tekućine na cijeloj visini boce, već samo na završnom dijelu (vrhu) gdje je to kod punjenja i najbitnije. Važna pretpostavka je da u trenutku punjenja boca još uvijek nema nikakvu naljepnicu na svome grlu. Naime na ovaj način, fokusiranjem područja, se postigla bolja točnost i pouzdanost mjerenja koja kod širega kuta ne bi bila moguća. Primjer vidnog polja OpenMV H7 plus kamere sa naznačenom minimalnom (donja linija) i maksimalnom (gornja linija) razinom tekućine za mjerenje dan je na Slici 6 (udaljenost kamere od boce je bila približno 16 cm). U konkretnom primjeru za naznačene linije radilo se o napunjenosti boce između 470 i 520 ml (pri čemu su očekivane manje varijacije zbog tolerancija kod proizvodnje boca).



Slika 6 – Boca iz vidnog polja kamere s oznakama minimalne i maksimalne razine tekućine koje može izmjeriti

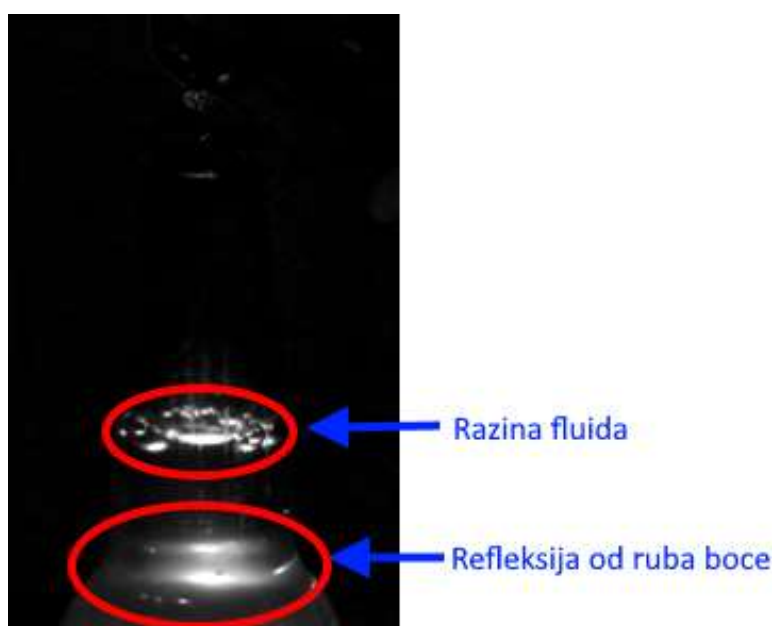
Metode mjerenja razine fluida u transparentnoj ili polu-transparentnoj posudi (boci) u predloženom sustavu se temelje na ključnom svojstvu materijala: reflektivnosti. Pretpostavka je da jaki izvor svjetlosti osvjetljava bocu (od dolje) u jako kratkim vremenskim intervalima (nekoliko ms), i svjetlost se širi od dna boce prema vrhu, pri čemu se rasprostranjuje cijelom bocom (ovo je iznimno važno, ne radi se o usmjerenom svjetlosti već o izvoru svjetlosti sa velikim kutom djelovanja). Svjetlost se reflektira kada prelazi između različitih medija (Snellusov zakon⁷), što uključuje prelazak iz fluida na staklo ali i sa fluida na zrak. Dio svjetlosti koji se reflektira prilikom prelaska iz fluida u zrak upada u leću kamera, i kamera ga vidi kao područje jačeg intenziteta svjetlosti. Kamera snima dvije slike u kratkim vremenskim razmacima, pri čemu je prva slika osvjetljena snažnim LED izvorom, dok je druga slika u normalnim uvjetima (bez dodatnog izvora svjetlosti). Jednostavnom operacijom oduzimanja se mogu izdvojiti razlike među tim slikama. Ovaj efekt i njegovi rezultati su prikazani na Slici 7.

⁷ <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=52225>



Slika 7 – Operacije nad slikama snimljenim u dva uzastopna trenutka (sa i bez LED osvjetljenja)

Osim refleksije od prelaska svjetlosti iz fluida u zrak, na slici 7 (desno) se može detektirati i refleksija koja je posljedica prelaska svjetlosti iz fluid u staklo na samom početku grla (donja oznaka). Navedeno je detaljnije označeno i prikazano na Slici 8.



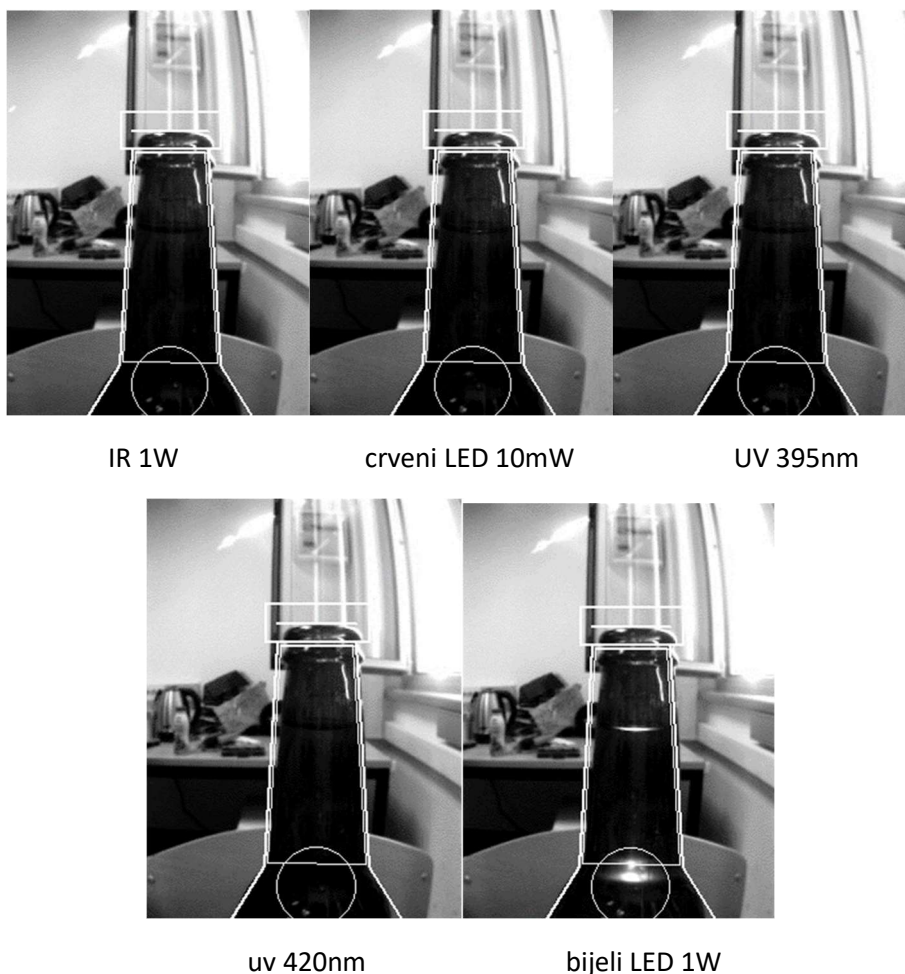
Slika 8 – Refleksije zbog efekata na boci i razine tekućine u boci

Premda je ova refleksija manje-više ujednačenog oblika u istoj boci, zbog različitih oblika boca (velikih tolerancija tokom izrade) mogu se promotriti različiti oblici refleksije. Zbog ovoga je dio početka grla boce jednostavno izbačen iz analize, te se promatraju refleksije samo na ostatku grla boce predefinirane veličine, a što je predstavljeno maskom vidljivom na Slici 9.

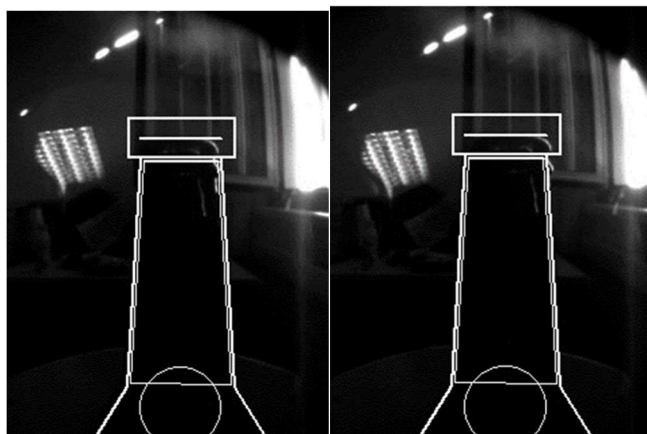


Slika 9 – Maska za definiranje mjernog područja i minimizaciju utjecaja neželjenih artefakata

Ovdje je potrebno istaknuti da se prilikom razvoja sustava testiralo više različitih izvora svjetlosti (primjeri rezultata su prikazani na Slici 10), ali se najboljim izvorom pokazala obična bijela LED snage minimalno 1W (koja se inače koristi za automobilske farove – smatramo da odabir navedene komponente ima značajnu prednost što već sadrži regulator koji se brine za ispravno napajanje naponom i strujom LED-a). Isto tako testirano je i više leća sa filterima: IC cut, IC pass i bez ikakvog IC filtera na leći (Slika 11).



Slika 10 – Primjeri testiranja različitih vrsta izvora svjetlosti ispod pивske boce



IR pass, izgašeno

IR pass, IR 1W

Slika 11 – Primjeri testiranja različitih vrsta filtera

Tijekom testiranja sustava zabilježeno je da oblik refleksije koji kamera može zabilježiti se može svrstati u 3 različite kategorije, kao što je i prikazano na Slici 12, a što se onda može dodatno iskoristiti za klasifikaciju događaja u boci/punilici (pri budućem razvoju).



Tip 1

Tip 2



Tip 3

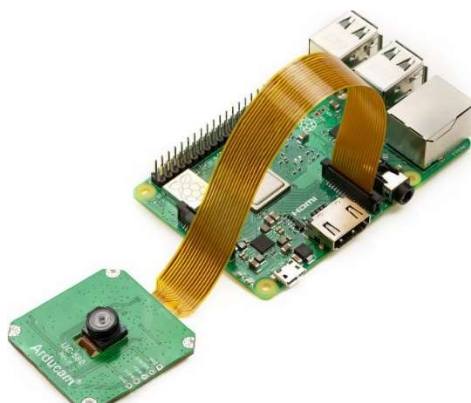
Slika 12 – Primjeri različitih jedinstvenih uzoraka zabilježenih tijekom testiranja sustava

Različiti su oblici primijećeni kada fluid miruje, i kada se boca puni fluidom, pa je i sam algoritam sustava strojnog vida prilagođen da može detektirati bilo koji od potencijalnih oblike. Pa tako Tip 1 na Slici 12 predstavlja mirnu razinu tekućine bez (ili s vrlo malo) pjene, dok Tip 2 predstavlja razinu koja se još nije ustalila budući da ima značajan udio pjene. Tip 3 je karakterističan za sam proces punjenja, kada tekućina koja dolazi iz punilice upada u tekućinu u bocu ispod razine trenutnog punjenja a što je vidljivo kao niz manjih površina ispod najviše detektirane razine (koja predstavlja razinu tekućine).

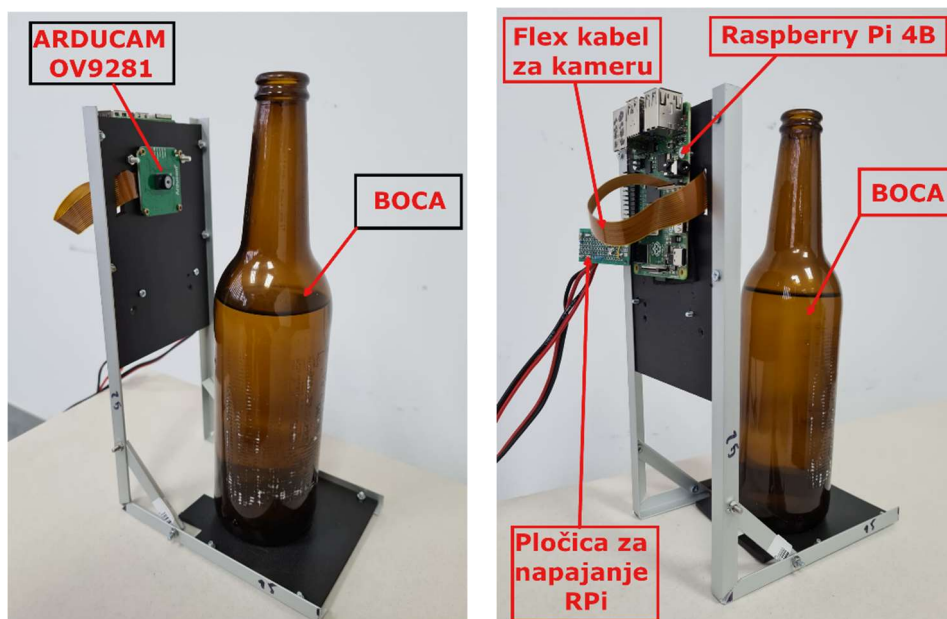
Konačna inačica sustava implementirana unutar mikrokontrolera OpenMV H7 plus kamere doseže brzinu rada od oko 7 parova sličica u sekundi (fps; jedna potpuna obrada traje oko 150 ms), što bi trebalo biti dovoljno za upravljanje punjenja boce koje traje predvidivo 10-30 s. Uzevši u obzir navedeno vrijeme punjenja (30 s), kao i ciljani volumen boce (500 ml) proizlazi prosječna brzina punjenja od oko 16.5 ml/s. Ukoliko se uzme brzina snimanja od 7 fps-a, jednostavnim računom se dobije da je teoretska rezolucija sustava (tj. minimalna razlika promjene volumena između dva snimljena okvira) oko 2.3 ml.

Premda je sustav detekcije razine na kojoj se nalazi „refleksija“ (tj. razina tekućine) iznimno precizan, zbog nemogućnosti točnog razlikovanja radi li se samo o fluidu ili postojanju male količine pjene, ovaj sustav je točan u razini $\sim 2\text{-}5$ ml. Radi usporedbe veličina na slici i u stvarnosti napominjemo da na sredini grla boce razlika od 20 piksela odgovara razlici volumne fluida od oko 5 ml. Pri tome sustav radi na rezoluciji od 320×240 piksela, dok je radno područje sustava (maska sa slike 9) visine oko 150 piksela, i odgovara razini fluida u prosječnoj boci od 470 do 520 ml.

Tijekom razvoja sustava isti princip rada testiran je s drugačijim sklopovljem odnosno sa ArduCam OV9281 1Mpix (NoIR) kamerom u kombinaciji s Raspberry P 4 Model B (Slika 13). Ovakva kombinacija se pokazala sposobnom ostvariti znatno veće brzine rada od 20 fps-a, međutim zbog jednostavnosti samog senzora (sustava) za krajnju realizaciju se predlaže pristup sa OpenMV kamerom (koji ima prednost i da prilikom ponovnog paljenja se znatno brže podiže od RPi računala). Izgled mjernog sustava za ovakve postavke je prikazan na Slici 14.



Slika 13 – Način spajanja Arducam OV9281 1Mpix kamera sa RPi 4B računalom



Slika 14 – Način spajanja Arducam OV9281 1Mpix kamera sa RPi 4B računalom

Pri radu s OpenMV H7 plus kamerom bilo ju je potrebno unutar Python programskog okruženja postaviti na njezinom mikrokontroleru njezine postavke na slijedeći način (a kako bi se ostvarili/reproducirali ovdje prikazani rezultati):

```
sensor.set_pixformat(sensor.GRAYSCALE) # set camera format to grayscale
(color not important in this example)

sensor.set_framesize(sensor.QVGA) # set camera resolution to QVGA 320 x 240

sensor.set_auto_exposure(False, exposure_us=user_exposure_time) # set
exposure time, user changable (user_exposure_time variable)

sensor.set_auto_gain(False, gain_db=22) #set camera gain, keep it as this
value is optimised for given light source and exposure time

sensor.set_brightness(3) #set camera brightness , range -3 to +3

sensor.set_contrast(3) #set camera contrast , range -3 to +3
```

Naravno, parametre je moguće naknadno mijenjati s obzirom na tražena svojstva i svojstva okoline gdje se senzor postavlja. Dodatno ključno svojstvo koje se postavlja je:

```
sensor.set_framebuffers(1)
```

koji omogućava kameri da snima samo jednu sliku u *framebuffer*, tako da kamera mikrokontroleru šalje samo najsvježiju sliku na obradu. Što se tiče samog postupka dobivanja

razlike slika kada je LED upaljen i ugašen (Slika 7), odnosno tzv. *frame differencinga*, on se može jednostavno implementirati putem slijedećih naredbi:

```
pin_LED.value(True) #turn on main LED

time.sleep_ms(5) #sleep for 5ms (allow LED to reach full
brightness)

img = sensor.snapshot() #take first image (led is on)
time.sleep_ms(2)        # wait for a few ms
extra_fb.replace(sensor.snapshot()) #put first image in to
additional frame buffer

pin_LED.value(False)    #turn off main LED
time.sleep_ms(5)

img = sensor.snapshot() #take second image (led is off)
time.sleep_ms(2)        # wait for a few ms
img.difference(extra_fb) #simple frame differencing, first and second image
```

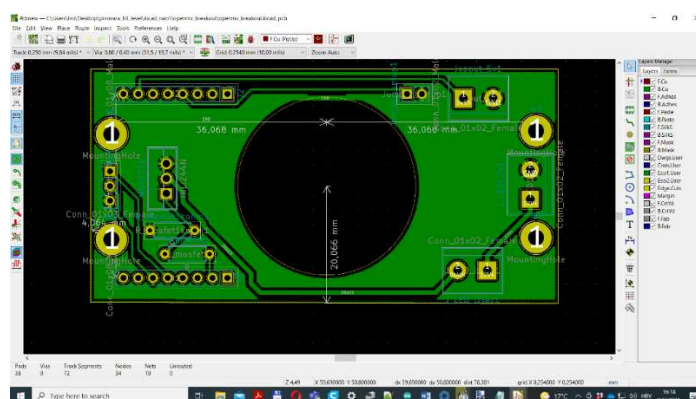
Važan prvi korak pri instaliranju sustava (koji se radi samo jednom i eventualno dodatno ako dođe to pomicanja nosivih komponenti/dijelova) je kalibracija sustava. Zadatak kalibracije je namjestiti kameru i nosivu konstrukciju na način da se boca prilikom punjenja nalazi u dijelu slike u kojem je očekuje (i s kojim radi i za koji ima masku) a kako bi se grlo boce (odnosno gornji dio boce) moglo pouzdano i točno izdvojiti. Kako bi se olakšao ovaj postupak u uvjetima realne primjene, u sustav je ugrađen mali LCD ekran koji se pali uklanjanjem kratkospojnika sa slike 5. U tome trenutku pali se spomenuti LCD ekran te se na njemu prikazuje slika sa OpenMV H7 plus kamere i template boce koji služi za namještanje (vidljiv na Slici 15).



Slika 15 – Način spajanja Arducam OV9281 1Mpix kamera sa RPi 4B računalom

Korisnik zatim treba bilo pomicanjem položaja boce koja se puni (što je teže za očekivati) ili konstrukcije koja nosi kameru, namjestiti bocu da što bolje odgovara templateu (pri čemu je template izrađen za vrstu boce koja se koristi u punionici). Na lijevom dijelu slike 15 se vidi da poklapanje boce i templatea nije idealno (boca je previše desno), dok na desnom dijelu slike poklapanje je idealno. Jednom kada se postigne zadovoljavajuće preklapanje i konstrukcijski dijelovi učvrste u novom položaju, vrati se kratkospojnik koji uzrokuje gašenje ekrana (na njemu je samo logo tvrtke OPEN BOOK d.o.o.). Time je sustav spreman za rad (sa deklariranom točnošću) te LED počinju bljeskat (jednom kada dobiju naredbu za početak sa udaljenog centralnog računala). Ukoliko je potrebno postupak kalibracije je moguće ponoviti skidanjem kratkospojnika.

Paljenje i gašenje LED izvora bijele svjetlosti je ostvareno korištenjem MOSFET-a IRFZ44N. Kako bi se ovaj MOSFET i druge komponente (npr. kratkospojnik) mogli jednostavno integrirati sa OpenMV H7 plus kamerom i njezinom pločicom u programskom okruženju KiCad je izrađena prilagođena tiskana pločica koja je zatim i proizvedena. Izgled pločice unutar KiCad programa je vidljiva na Slici 16.



Slika 16 – Izgled KiCad sučelja sa dizajniranom prilagođenom tiskanom pločicom

U trenutnoj implementaciji razvijeni sustav nije integriran unutra ROS čvora (kao krajnjoj ciljanoj arhitekturi razvijenog sustava), ali je kao generalna priprema (ne samo za ROS već i za druge moguće arhitekture) implementirano izvještavanje o stanju punjenja boce putem standardiziranih poruka i USART komunikacijskog sučelja. U slučaju da se radi o ROS arhitekturi ovakve poruke bi se mogle slati na npr. Arduino Nano mikrokontroler koji bi ih primao i na sebi imao pokrenut ROS čvor koji bi ih zatim objavljivao unutar ROS arhitekture. Slanje preko USART komunikacijskog sučelja na OpenMV H7 plus mikrokontroleru je implementirano sa naredbama (koje se naravno po potrebi mogu mijenjati):

```
uart = UART(4, 9600) #UART pin 4, 9600 baudrate
```

```
uart.write(message+"\n")
```

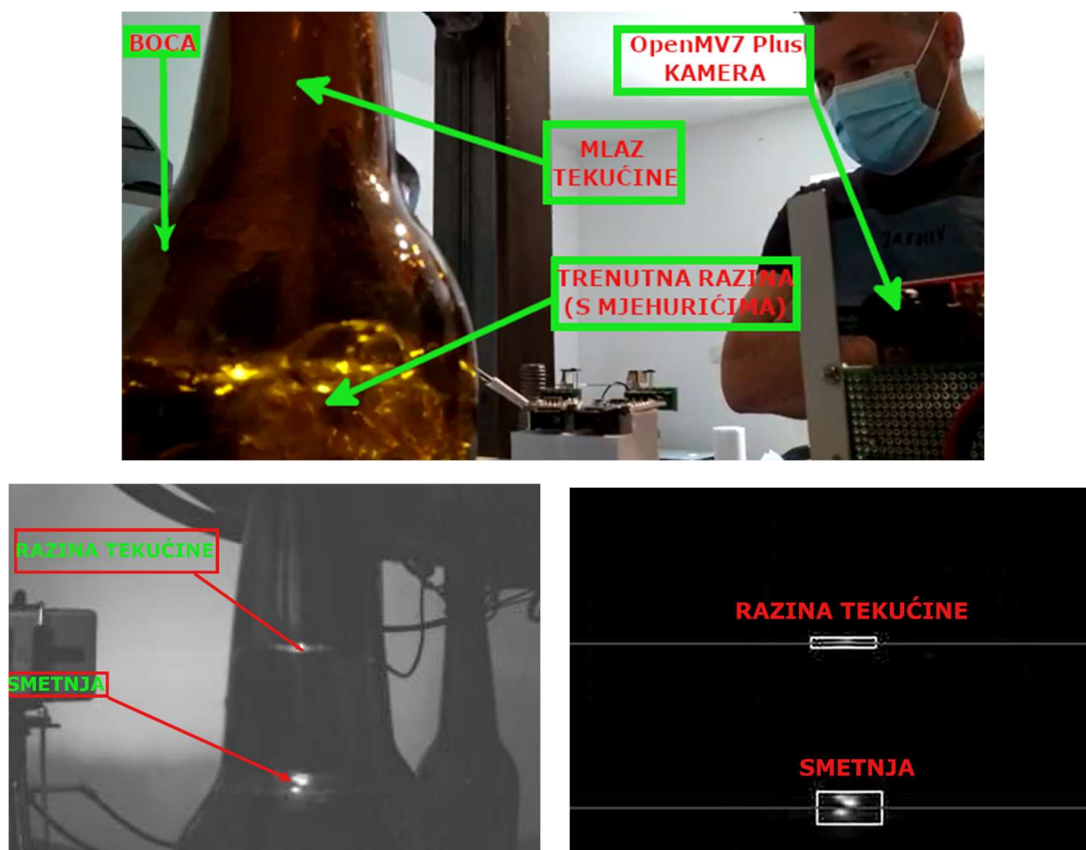
Objekt *message* koji se šalje odnosno koji služi za izvještavanje sadrži slijedeća podatkovna polja: `message = <a,b,c,d,>`

gdje je:

- a- Razlika u pikselima od trenutne linije do predefinirane crte maksimalne razine punjenja boce
- b- Lokacija na slici gdje se trenutno nalazi linija
- c- Visina *bloba* koji je detektiran (povezano s efektima na Slici 11).

Potrebno je istaknuti da je komunikacija preko USART komunikacijskog sučelja u predloženom sustavi zamišljena kao dvosmjerna. Naime, osim prethodno definiranih izvještajnih poruka, mikrokontroler kamere OpenMV H7 plus se konfiguriran i da može primiti dva znaka:

- *T* - završava mjerenje, sustav čeka novu naredbu-
- *S* - starta novo mjerenje, sustav izvještava o stanju.



Slika 17 – Detalji sa testnog mjerenja na samoj punilici (iz perspektive punilice i OpenMV H7 plus kamere)

Njihova zamišljena namjena u sustavu je slijedeća. Budući da se (promatrajući samo jednu bocu) proces punjenja sastoji od dovođenja boce u željeni položaj, pripreme za punjenje tekućinom (punjenje plinom), sami proces punjenja, te pomicanje boce dalje u proces proizvodnje nema potrebe da LED i kamera rade cijelo vrijeme (nego samo u koraku punjenja). Stoga kada je sustav spreman za punjenje mikrokontroleru kamere se šalje znak *S* (iz centralne upravljačke jedinice) za početak mjerenja. Kamera prima taj znak, uključuje LED i počinje slati preko USART-a izvještajne poruke. Kada se dosegne željena razina tekućine u boci, centralni sustav prekida punjenje i šalje znak *T* mikrokontroleru kamere za prekidom mjerenja. Time kamera gasi LED i prestaje slati izvještajne poruke. Detalji cjelokupne programske implementacije su dostupni u (komentiranom) programskom kodu koji se naručitelju isporučuje u elektronskom obliku uz ovo Izvješće.

Prije same isporuke sustava naručitelju izvršeno je testiranje na samoj punilici (ali ne u stvarnim uvjetima punjenja boce piva budući da je punilica bila u ciklusu održavanja). Detalji testiranja su prikazani na Slici 17. Ukupno ponašanje sustave je bilo u skladu s očekivanjima i bez nepredvidljivih događaja. Na Slici 17 je zanimljivo primijetiti i artefakt smetnje koji je posljedica oblika boce i refleksije svjetla na njemu. Ova smetnja je stoga statična te se kao takva (a i uz pomoć templatea sa Slike 9) može jednostavno eliminirati (izvan mjernog područja je) te ne utječe na samu točnost i pouzdanost mjerenja. Dodatno je zanimljivo primijetiti (na donjoj lijevoj slici) da druga boca u kadru kamere nije imala nikakvog utjecaja na mjerenje.

Naposljetku, navodimo tablicu (Tablica 2) materijala korištenih pri izradi laboratorijskog prototipa, pri čemu ne navodimo količinu za konstrukcijske/potporne materijale budući da oni neće biti potrebni (ne barem u tome obliku i obujmu na stvarnoj proizvodnoj liniji).

Tablica 2 – Najvažnije komponente korištene pri izradi Modula 1

Komponenta	Količina (jedinica)
OpenMV Cam H7 plus Image Sensor	1 (kom)
AC 110-240V to DC 12V switching power supply converter SA10-05	1 (kom)
LM2596S DC-DC Constant Current Module Step-down Adjustable CC/CV Power Supply Module (kao opcija – kod rada sa RPi računalom; kamera je u laboratoriju napajana s USB kabelom i računalom)	1 (kom)
IRONWALLS 2 Sets F-S2 Series 9005+9006 LED Headlight Bulbs (10W) ⁸ s regulatorom napona / struje (na 12V)	2 (kom)
IRFZ44N N-kanalni MOSFET	1 (kom)
Prilagođena tiskana pločica	1 (kom)
Potrošni materija (npr. aluminijski profili)	/

⁸ Npr. <https://www.aliexpress.com/item/32909931750.html>

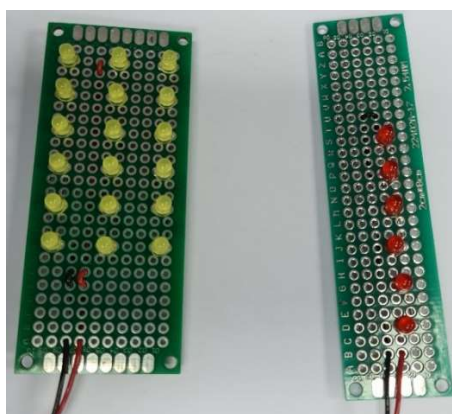
3. MODUL ZA KONTROLU RAZINE TEKUĆINE NAKON PUNJENJA – Modul 2

Drugi princip rada koji je pokazao obećavajući rezultate, ali nešto lošije za sami proces punjenja (prvenstveno zbog mlaza tekućine koji se javlja kroz bocu tijekom samog procesa punjenja – Slika 18) se temeljio na svojstvu transmisivnosti (što uključuje i lom svjetlosti u fluidu) posude (boce) i fluida (tekućine u boci). Međutim ovakav sustav mjerenja je moguće relativno lako primijeniti nakon same punilice, kada boca prolazi pokretnom trakom (Slika 1). Ovaj pristup također polazi od pretpostavke da na boci (još uvijek) nema naljepnica koje bi ometale vidno bolje kamere.

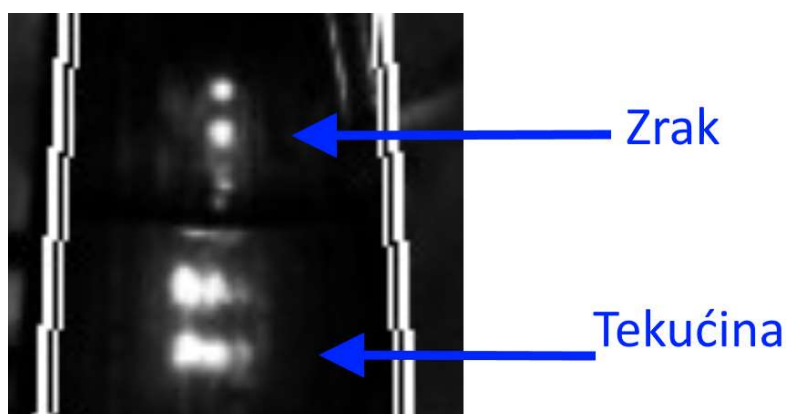


Slika 18 – Primjeri kada svjetlosni uzorak rastera se poklopi s mlazom tekućine koja puni bocu

Kako bi se sustavno testirao ovakav pristup konstruirano je nekoliko LED rastera različitih veličina i sa različitim izvorima svjetlosti. Primjer dva rastera se može vidjeti na Slici 18. Za detaljnija daljnja testiranja je odabran raster veličine 3x6 LED veličine 3 mm (lijevo na Slici 19). Ukoliko se boca nalazi između rasterskog izvora svjetlosti i kamere, svjetlosne zrake prolaze kroz bocu (prazni ili napunjenu fluidom) te dolaze do leće. Kamera drugačije vidi rasterski uzorak kada se u boci nalazi fluid, odnosno kada je boca prazna (Slika 20).

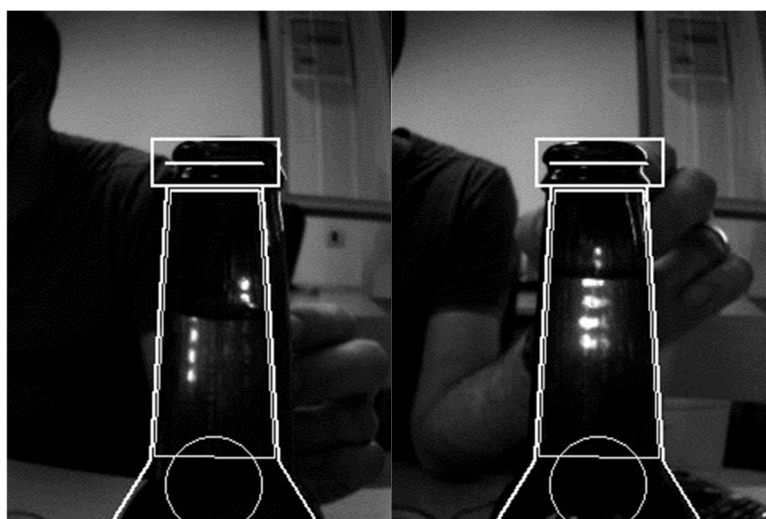


Slika 19 – Primjeri rastera upotrijebljenih prilikom testiranja



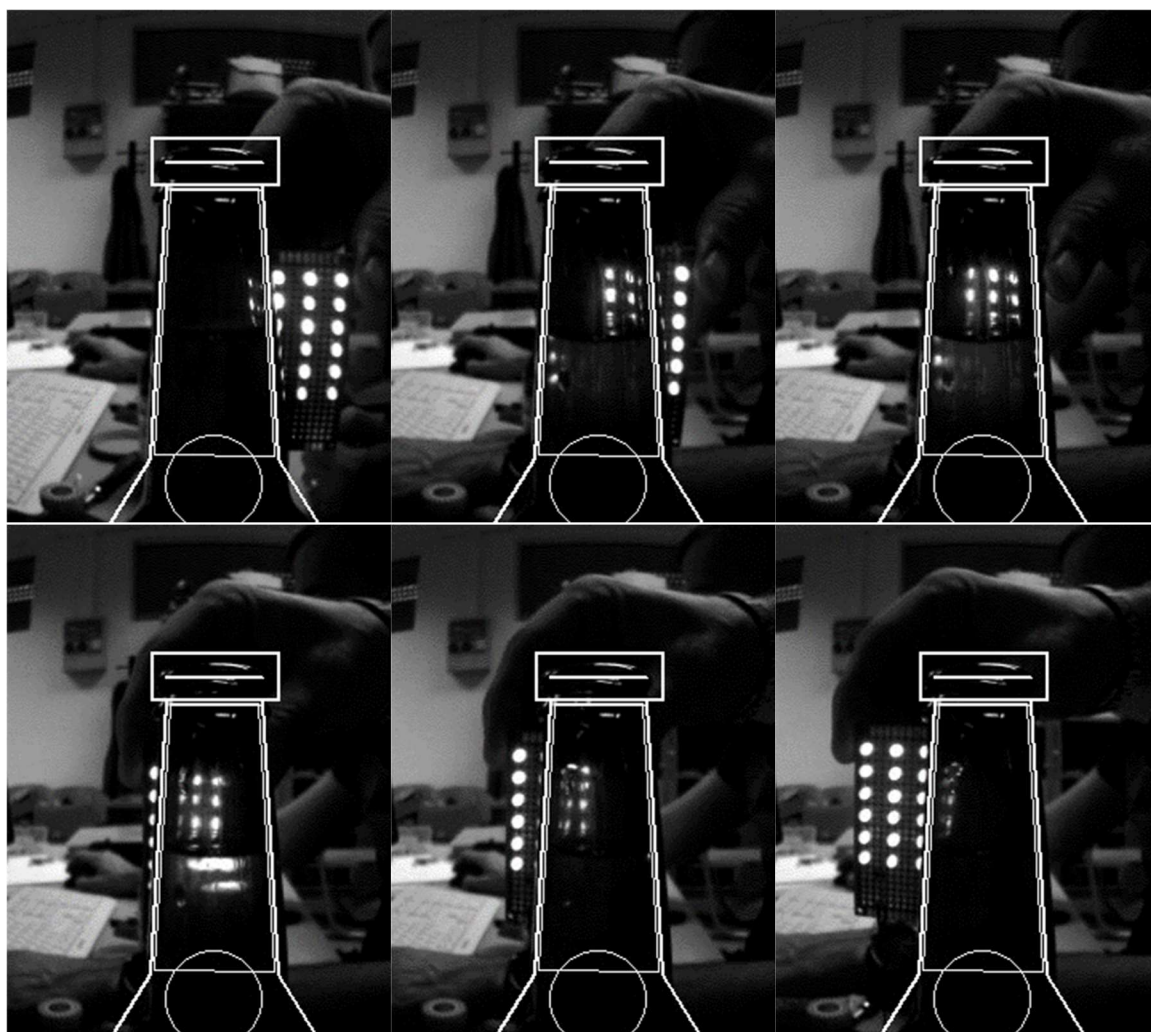
Slika 20 – Razlika uzorka svjetlosti koji prolazi kroz zrak i kroz fluid a kako ga vidi kamera (uvećani detalj)

Gore spomenuto svojstvo se može upotrijebiti kada je grlo boce (ili bilo koji drugi dio boce) napunjeno tekućinom, budući da se ona tada ponaša kao leća, odnosno drugačije lomi zrake upadne svjetlosti od iste boce kada se fluid ne nalazi u grlu. Primjer ispravnog funkcioniranja predložene ideje je vidljiv na Slici 21. Slika također ilustrira da se navedeni efekt može manifestirati na različite načine (pomakom i/ili izobličenjem izvora svjetlosti u slici kamere). Ovo je dodatni nedostatak ovoga pristupa koji uzrokuje potrebu implementacije nešto složenijeg programskog rješenja za klasifikaciju i mjerenje.



Slika 21 – Različite vizualni efekti kao posljedica svojstva transmisivnosti

U slučaju idealnog poravnavanja kamere sa izvorom svjetlosti, nije primjetan lom svjetlosti, ali se može primijetiti drugačiji oblik izvora svjetlosti (3mm crvena LED), zbog efekta leće prilikom prolaska svjetlost kroz tekućinu. Slika 22 ilustrira primjer zamišljene implementacije senzora na proizvodnoj liniji kada boca prolazi između kamere i rasterskog izvora svjetlosti. Iz niza slika je vidljivo da se zbog različitih efekata transmisije koji se javljaju u procesu moguće odrediti liniju do koje je boca puna. Također slika pokazuje da u ovisnosti o trenutnom položaju boce ti efekti mogu biti drugačiji i za istu bocu.



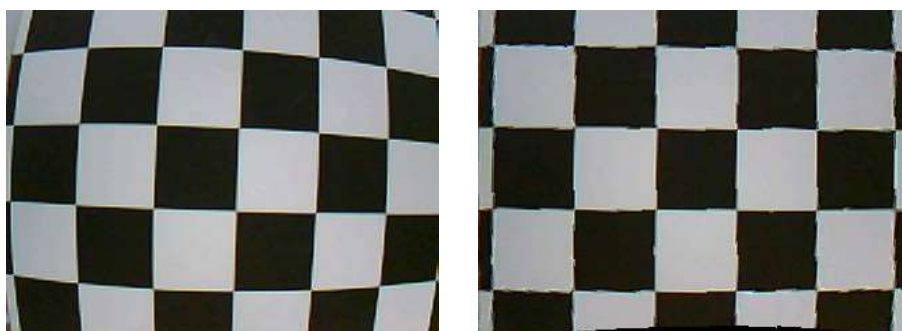
Slika 22 – Primjer mjerenja kada se boca kreće s lijeva na desno na pokretnoj traci

Naposljetku, kao i u prethodnom poglavlju, navodimo tablicu (Tablica 3) materijala korištenih pri izradi laboratorijskog testnog prototipa, pri čemu ne navodimo količinu za konstrukcijske/potporne materijale budući da oni neće biti potrebni (ne barem u tome obliku i obujmu na stvarnoj proizvodnoj liniji).

Tablica 3 – Najvažnije komponente korištene pri izradi modula za kontrolu razine

Komponenta	Količina (jedinica)
Žute LED 3 mm	18 (kom)
DC-DC konverter s izlazom od 12V	1 (kom)
USB kabel za napajanje	1 (kom)
IRFZ44N N-kanalni MOSFET	1 (kom)
Potrošni materija (tiskana pločica, aluminijski profili)	/

Napominjemo da se u razmatranim sustavima nije uklanjala distorzija leće kamere budući da su inicijalni testovi pokazali da to nije bilo potrebno (zbog konfiguracije sustava). Međutim dodatna poboljšanja bi bilo moguće dobiti ukoliko bi se izvršila kalibracija, pa postupak ovdje navodimo za slučaj da naručitelj želi isto implementirati u budućnosti. Kalibracija kamere se vrši kako bi se uklonila radijalna distorzija uzrokovana lećom kamere. Originalna slika sa kamere je prikazana na slici 23 lijevo, dok je ista slika nakon uklonjene distorzije prikazana na istoj slici desno. Zbog jako male fokalne duljine leće (2.8 mm leća sa M12 navojem) radijalna distorzija je u promatranom primjeru znatna (radi ilustracije).

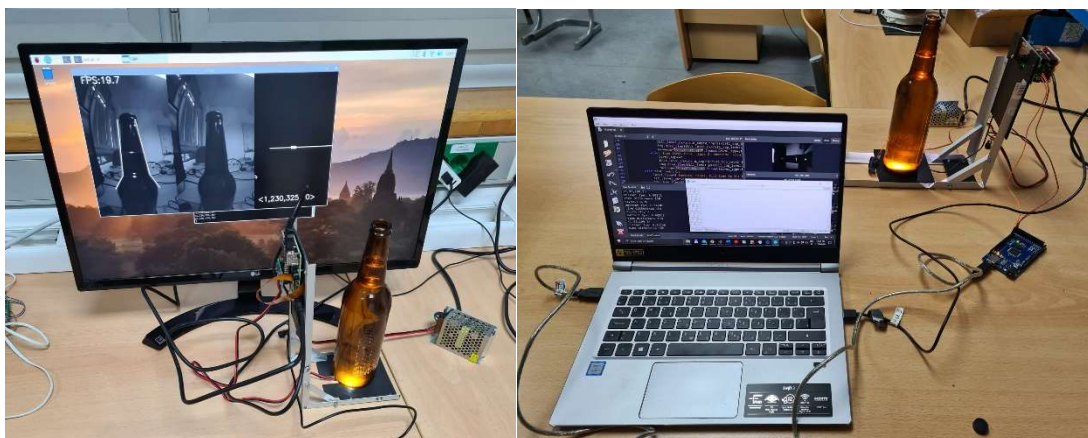


Slika 23 – Distorzirana slika sa kamere (lijevo), te slika nakon uklanjanja distorzije (desno)

U slučaju promjene leće kamere, korisnik se može poslužiti priloženim skriptom `namjestanje_parametra_lece.py` gdje se mogu izračunati parametri nove leće ili kamere. Važno je napomenuti da dvije iste kamere i leće nemaju iste parametre, i svaka promjena komponente sustava zahtjeva ponovno namještanje parametara leće (odnosno intrinzičnu kalibraciju). Računaju se parametri radijalne distorzije: središte distorzije (koje ne mora i niti je u sredini slike) i u konačnici ispravlja se nagib tj. rotacija kamere. Ista skripta se može koristiti i za (ekstrinzičnu) kalibraciju kamere, tj. povezivanje piksela kamere (točke na slici kamere) i kuta od centralne osi kamere, pri čemu se izrađuje novi LUT. Alternativa je korištenje već u Python ugrađene naredbe koja pruža jednostavniji način kalibracije, ali nešto manje točan i sa manjom fleksibilnošću.

Spomenuti LUT-ovi se izrađuju pomoću skripte koja je kompatibilna sa MATLAB-om (ili Octave-om). U skriptama korisnik prati upute i unosi očitane koordinate za nekoliko točaka na temelju čega se interpoliraju vrijednosti za sve moguće vrijednosti na slici, i pripremaju u format zapisa *Python dictionary*-a. Takav kod (tekstualni) se kopira u zaglavlje Python skripte na za to predviđeno mjesto. Ovakav pristup omogućava krajnjem korisniku da po potrebi jednostavno izmjeni postavke rada sustava. Kao i kod primjera sustava za detekciju čepa boce, priloženi Python kod omogućava korisniku da jednostavno utječe na parametre rada sustava, bez potrebe za poznavanjem funkcionalnosti cijelog sustava.

Naposlijetku prikazujemo i dvije slike iz laboratorijskih testiranja sustava sa i bez Raspberry Pi 4B računala (Slika 24).

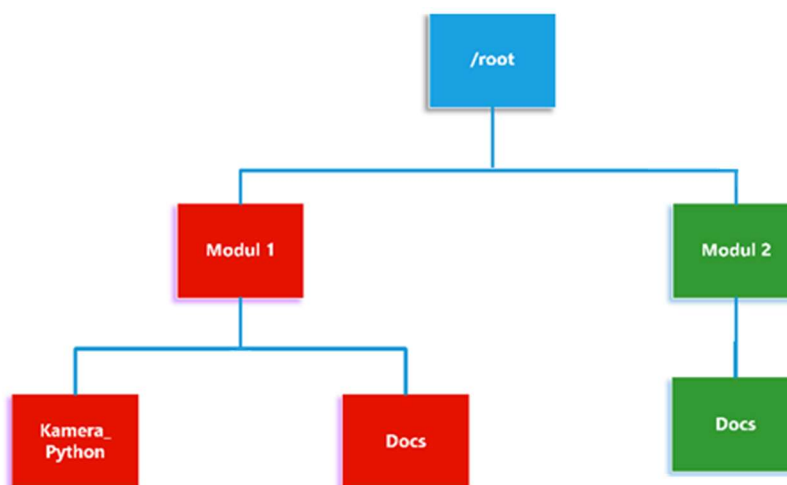


Slika 24 – Primjeri laboratorijskog testiranja dvije inačice sustava: sa RPi računalom (lijevo) i sa OpenMV H7 plus kamere.

4. STRUKTURA POPRATNOG CD-a SA PROGRAMSKIM DATOTEKAMA

Svi kodovi korišteni pri izradi oba modula su priloženi na CD-u koji je sastavni dio ove studije. Komentari koji se nalaze u odgovarajućim kodovima, zajedno s tekstom ove studije bi trebali biti dovoljni da bi svaki krajnji korisnik mogao shvatiti osnove funkcioniranja i karakteristike svakog modula, te promijeniti odgovarajuće parametre sustava u slučaju promjene neke od sklopovskih (ili drugih) komponenti sustava, a kako je to već na nekoliko mjesta istaknuto u studiji.

Radi lakšeg snalaženja na CD-u ovdje navodimo strukturu direktorija i to grafički slikom 25. Iz same strukture i naziva (pod) direktorija bi trebalo biti jasno što on sadrži.



Slika 25 – Struktura direktorija na priloženom CD-u