

Robotski sustavi u recikliranju otpada

Jančevac, Janko

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:920778>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-26**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište
Sjever**

Diplomski rad br. 37/ARZO/2022

Robotski sustavi u recikliranju otpada

Janko Jančevac, 0016091315

Koprivnica, rujan 2022. godine



Sveučilište Sjever

Diplomski sveučilišni studij Ambalaža, recikliranje i zaštita okoliša

Diplomski rad br. 37/ARZO/2022

Robotski sustavi u recikliranju otpada

Student

Janko Jančevac, 0016091315

Mentor

Prof.dr.sc Božo Smoljan

Koprivnica, rujan 2022. godine

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za ambalažu, recikliranje i zaštitu okoliša		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Ambalaža, recikliranje i zaštita okoliša		
PRISTUPNIK	Janko Jančevac	MATIČNI BROJ	0016091315
DATUM	17.05.2022.	KOLEGIJ	Ambalaža i tehnologija pakiranja
NASLOV RADA	Robotski sustavi u recikliranju otpada		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Robotic systems in waste recycling		

MENTOR	dr.sc. Božo Smoljan	ZVANJE	redoviti profesor u tr. zv.
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. Izv. prof. dr. sc. Dean Valdec - predsjednik		
	2. Izv. prof. dr. sc. Krunoslav Hajdek - član		
	3. Prof. dr. sc. Božo Smoljan - mentor		
	4. Izv. prof. dr. sc. Bojan Šarkanj - zamjenski član		
	5.		

Zadatak diplomskog rada

BROJ	37/ARZO/2022
OPIS	

Robotika je sve više prisutna u recikliranju materijala i dobiva sve veći značaj u automatiziranju postupka razvrstavanja otpada. Iako se postupci same proizvodnje reciklata kontinuirano poboljšavaju, razvrstavanje ostaje jedna od slabijih karika u većini procesa recikliranja. Automatizirano razvrstavanje materijala primjenom robota temeljenjem na mehanička i fizikalna svojstva materijala permanentno napreduje. Primjenjuju se fizikalne, mehaničke, optičke i taktilne metod razvrstavanja materijala. Ujedno, koriste se sve suvremeniji softveri u razvrstavanju materijala za recikliranje.

U radu je potrebno proanalizirati mogućnost primjene modernih robotskih tehnologija za prepoznavanje i razvrstavanje iskorištenih materijala, otpada. Potrebno je proanalizirati efikasnost razvrstavanja materijala primjenom robotske tehnologije, koja nerijetko doseže do gotovo stopostotnog učinka. Nadalje potrebno je navesti prednosti primjene robota u odnosu na ljudski rad.

U praktičnom je dijelu, potrebno prikazati povezanost softverskih i strojarско/elektroničkih tehnika u prepoznavanju materijala. Potrebno je prikazati principe komunikacije između softvera i hardvera te razviti posebne dijelove programskog koda za razvrstavanje materijala.

ZADATAK URUČEN	25.5.2022	POTPIS MENTORA	
----------------	-----------	----------------	--

Sažetak

Robotika, sve je prisutnija u području gospodarenja otpadom i sve više dobiva na značaju u automatiziranim postupcima razvrstavanja otpada. Iako se postupci same proizvodnje reciklata kontinuirano poboljšavaju, razvrstavanje ostaje jedna od slabijih karika u većini procesa recikliranja. Razvoj tehnologije i napredak društva negativno utječu na okoliš - resursi se prekomjerno iscrpljuju, a konstantno zagađivanje okoliša ostavlja trajne posljedice na floru i faunu. Svrha automatizacije i robotizacije je olakšati čovjeku život zamjenjujući ljudski rad. Autonomni robotski sustavi bazirani su na umjetnoj inteligenciji. Danas u brojim slučajevima zamjenjuju ljudski rad, kvantitativno obavljaju više rada u manjoj jedinici vremena uz veću preciznost dok je rad čovjeka potreban samo u svrhu nadzora i eventualnog posluživanja robotskih sustava. Cilj ovog rada je prikazati kako i na koji način je moguće uz pomoć suvremenih tehnologija poboljšati kvalitetu ljudskih života uz benefit iskorištavanja važnih sirovina koje možemo izvući iz otpada efikasnim razvrstavanjem. Automatizirano razvrstavanje je proces koji se izvodi upotrebom robotskih sustava temeljenjem mehaničkih i fizikalnih svojstva materijala primjenom fizikalnih, mehaničkih, optičkih i taktilnih metoda prepoznavanja koje se sve više usavršavaju, koriste se sve suvremeniji softveri.

Ključne riječi: robotika, robotski sustavi, recikliranje, razvrstavanje, umjetna inteligencija

Summary

Robotics is increasingly present in the field of waste management and is gaining importance in automated waste sorting procedures. Although the processes of recycling production itself are continuously improving, sorting remains one of the weakest links in most recycling processes. The development of technology and modern society have a negative impact on the environment - resources are excessively depleted, and constant pollution of the environment leaves lasting consequences for flora and fauna. The purpose of automatization and robotization is to make human life easier by replacing manual human work. Autonomous robotic systems are based on artificial intelligence. Today, in many cases, they replace human work, quantitatively perform more tasks in a smaller unit of time with greater precision, while human work is needed only for the purpose of monitoring and possibly maintaining robotic systems. The aim of this study is to show how and in which way it is possible to improve the quality of human life with the help of modern technologies, resulting in the benefit of using important raw materials that can be extracted from waste by efficient sorting. Automated sorting is a process that is carried out using robotic systems based on the mechanical and physical properties of materials, using physical, mechanical, optical and tactile recognition methods that are being improved more and more by implementing new, more precise software.

Keywords: robotics, robotic systems, recycling, sorting, artificial intelligence

Popis korištenih kratica

ML Machine learning (strojno učenje)

AI Artificial intelligence (umjetna inteligencija)

SIFT Scale-Invariant Feature Transform

RPA Robotski procesuirana automatizacija

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Robotika i primjena robotike u razvrstavanju otpada	2
3.	Industrija 4.0 i upravljanje otpadom	3
3.1.	Tehnologija industrije 4.0:	3
3.2.	Industrijski robot	5
3.3.	Podjela robota prema generaciji	6
4.	Princip rada robotskog sustava za recikliranje otpada	7
5.	Tehnologije automatiziranog prepoznavanja materijala	10
5.1.	Računalni vid.....	10
5.1.1.	Algoritam računalnog vida - SIFT.....	11
5.1.2.	Algoritam računalnog vida - Viola-Jones algoritam.....	12
5.2.	Laserska spektroskopija	13
5.3.	Rendgenske zrake - X zrake	13
5.1.	Vrtložne struje	14
6.	Strojno učenje	15
6.1.	Strojno učenje i velike količine podataka.....	17
7.	Upravljanje otpadom i postojeće moderne tehnologije upravljanja.....	18
7.1.	ReWaste4.0 pilot projekt – primjer pametnog upravljanja otpadom	20
7.2.	Predviđanja i rješenja primjenom umjetne inteligencije u prikupljanju elektroničkog otpada na primjeru Republike Indije	23
7.3.	Robotski sustavi za razvrstavanje otpada ZenRobotics	24
7.4.	Princip rada ZenRobotics sustava za razvrstavanje otpada.....	25
7.5.	AMP Robotics Cortex - sustav za razvrstavanje otpada	26
7.6.	TOMRA AUTOSORT – sustav za razvrstavanje otpada.....	27
7.1.	Automatska klasifikacija materijala robotskim opipom.....	29
8.	Efikasnost robotskih u odnosu na standardna postrojenja za recikliranje otpada.....	30
8.1.	Ekonomska analiza vremena povrata investicije ZenRobotics robotskog sustava u odnosu na standardni sustav za recikliranje otpada	31
9.	Praktični dio – prikaz sustava za recikliranje otpada.....	32
9.1.	Primjer autonomnog upravljanja 6 DOF robotske ruke	32
9.2.	Komunikacija između računala i robotske ruke	33
9.3.	Sortiranje bazirano na prepoznavanju boje i oblika	34
9.4.	Primjer uspostavljanja komunikacije između senzora robota i računala baziranog na Arduino tehnologiji	35
9.4.1.	Princip rada Arduino sklopova	35
9.4.2.	Komunikacija između Arduino sklopa i računala Raspberry Pi	37
10.	Primjer računalnog vida detekcijom objekata.....	39
10.1.	Opis procesa detekcije objekata na temelju podudarnosti predložaka	39
10.2.	Koraci u detekciji objekata putem elektroničkog vida upotrebom biblioteke OpenCV	41
10.2.1.	Rezultat detekcije objekta na temelju podudarnosti predložaka	43
11.	Zaključak.....	45

12.	Literatura.....	46
13.	Popis tablica.....	49
14.	Popis slika.....	50

1. Uvod

Cilj ovog rada je prikazati principe pametnog gospodarenja otpadom. Osnovni postupak razvrstavanja otpada nužan je proces koji omogućuje segmentaciju otpada po vrstama kao što su metali, polimeri ili otpad biljnog podrijetla. Učenjem robota da prepozna materijal temeljem mehaničkih i fizikalnih svojstava postizemo veću efikasnost razvrstavanja od onog standardnog u kojem čovjek razvrstava otpad na pokretnoj traci.

U vrijeme kada se koriste pametni telefoni koji imaju mogućnost prepoznavanja lica, otisaka prstiju manje je poznato da se koriste i autonomni robotski sustavi za razvrstavanje otpada koji upotrebljavaju iste principe u prepoznavanju materijala koji je potrebno razvrstati.

Razvojem različitih pametnih sustava, tim istim strojevima možemo ugraditi određenu razinu inteligencije, tako na primjer možemo navesti optičko prepoznavanje znakova u svrhu očitavanja rukopisa (eng. *Optical Character Recognition*) ili sustav koji na temelju opipa može odrediti o kojem se materijalu radi. Na temelju obavljanja repetitivnih zadataka robotski sustav može putem računalnog vida prikupljati podatke i usavršavati svoj rad, a to nazivamo strojnim učenjem. Ponavljajući zadaci za robota ne predstavljaju problem dok čovjeka umaraju. Ujedno robot može raditi neprekidno čime se postiže bolja iskoristivost vremena, a također tu su i ostale prednosti poput obavljanja opasnih i zamornih poslova.

Jedan od glavnih razloga i potreba za razvrstavanjem otpada proizlazi iz činjenice da otpad iz kućanstava dolazi ne razvrstan ili se neodgovorno prikuplja pa se na taj način pomiješa. Važnost preciznog razvrstavanja otpada velika je zato što jedino na taj način otpad možemo oporabiti i pretvoriti ga u sirovinu, ovdje do izražaja dolaze nove tehnologije visoke preciznosti, brzine i gotovo potpune autonomnosti.

2. Robotika i primjena robotike u razvrstavanju otpada

„Robotika je interdisciplinarno znanstveno područje koje se bavi projektiranjem, konstruiranjem, upravljanjem i primjenom robota. Zasniva se na mehatronici te objedinjuje niz znanstvenih područja i disciplina, poput strojarstva, elektrotehnike, elektronike, automatike, računarstva i umjetne inteligencije“ [1].

Robotski sustav bilo koje svrhe možemo opisati na način da je to elektro-mehanički sklop koji automatizirano radi neku radnju ili njime upravlja čovjek. Cilj robotskog sustava je zamijeniti čovjekov rad uz prednosti kao što su: obavljanje opasnih poslova, brzina rada, preciznost, ekonomičnost, efikasnost. Područja primjene robota svestrana su i možemo tvrditi kako se koriste u svim granama našega života poput robota za izvođenje preciznih operativnih zahvata u medicini pa sve do robota za deaktivaciju eksplozivnih naprava.

Kod recikliranja otpada robot može obavljati repetitivne operacije i na taj način otkloniti opasnosti koje prijete zaposlenicima prilikom obavljanja istog procesa. Procesi koji se odvijaju uglavnom su ponavljajući što je i poželjno kod robotske automatizacije istih.



Slika 1. Razvrstavanje otpada [2]

3. Industrija 4.0 i upravljanje otpadom

Industrija 4.0 bazira se na digitalizaciji. Sam naziv industrija 4.0 potječe iz Republike Njemačke, a razlog tome je taj da je njemačka vlada predložila masovnu digitalizaciju svoje industrije. Pojam industrija 4.0 podrazumijeva široko područje koje obuhvaća robotiku, umjetnu inteligenciju, nanotehnologiju, biotehnologiju, 3D ispis, strojno učenje, upravljanje velikim brojem podataka (eng. *Big data*) i mnoge slične pojmove vezane uz digitalizaciju [3].

„Industrija 4.0, promatrana je kao logičan nastavak prethodne tri industrijske revolucije, a odnosi se na brzu digitalnu transformaciju procesa unutar prerađivačko-proizvodnih, ali i ostalih povezanih industrija. Transformacija se temelji na inteligentnom umrežavanju strojeva i drugih uređaja pomoću naprednih informacijsko – komunikacijskih tehnologija s ciljem da se omogući:

- autonomno komuniciranje između uređaja, analiziranje i prikupljanje velike količine podataka,
- autonomno donošenje odluka, praćenje imovine i procesa u stvarnom vremenu,
- stvaranje dodane vrijednosti te vertikalna i horizontalna integracija.

Osnova za postizanje digitalizacije je integracija informacijskih tehnologija s operativnim aktivnostima, što dovodi do jače proizvodne organizacije“ [3].

3.1. Tehnologija industrije 4.0:

1. Internet stvari

Internet stvari možda je i najvažniji element Industrije 4.0. (eng. *Internet of Things*). Karakteriziraju ga povezani uređaji koji komuniciraju međusobno, komunikacija s centralnom bazom odnosno s ljudima putem internetske veze. Na uređaje su obično ugrađeni senzori čiji se zaprimljeni podaci spremaju na udaljene poslužitelje, a se koriste za analize i donošenje odluka u stvarnom vremenu [4].

Komunikacija između uređaja putem senzora i pohranjivanje podataka vrlo je važna za sam proces digitalizacije sustava. Podaci se mogu pohranjivat lokalno ili na udaljene servere (eng. *cloud tehnologija*) te se naknadno iskoristiti prema potrebi.

2. Napredna robotika – autonomni roboti

Roboti postaju sve autonomniji, fleksibilniji i kooperativniji. Već danas mogu preciznije efikasnije i ekonomičnije obavljat rad umjesto ljudi uz dodatak otklanjanja opasnosti koja prijeti ljudima izvršavajući opasne zadatke.

3. Aditivna proizvodnja (3D ispis)

Aditivna proizvodnja je proizvodnja specificiranih dijelova na jednostavniji, često i brži način. Ima široku primjenu, od medicine pa sve do strojarstva što čini ovu tehnologiju ne zamjenjivom u budućnosti.

4. RPA Robotski procesuirana automatizacija

RPA – robotski procesuirana automatizacija predstavlja automatizaciju sustava softverskim robotima koji obavljaju rad poput ispunjavanja obrazaca umjesto ljudi, razvrstavanja i klasifikacije raznih dokumenata.

5. Simulacije

Za ono za što smo nekad koristili makete/modele u smanjenom omjeru, kako bi vidjeli svojstva nekog objekta danas možemo postići uz pomoć 3D modeliranja i simulacija na način da računalo preispituje svojstva određenog objekta ovisno o svojstvima u kojima će se objekt naći.

6. Rad u oblaku

„Očekuje se povećano korištenje softvera smještenih u oblaku vezano uz samu proizvodnju (ne samo generalne procese unutar poduzeća), potaknuto i implementacijom drugih 4.0 tehnologija, što će dovesti do većeg širenja podataka unutar poduzeća i šire“ [4].

7. Kibernetička sigurnost

Digitalizacijom sustava raste i opasnost od raznih kibernetičkih napada različitih namjera od kojih neke mogu biti pogubne, sigurnost je određena različitim normama i procedurama koje je obavezno ispoštovati za stvaranje uvjeta sigurnog poslovanja

8. Veliki podaci i analitika

„Prikupljanje i analiza podataka iz različitih izvora: proizvodne opreme i proizvodnog sustava, cijelog sustava poduzeća, sustava kupaca i dobavljača. Prilika za prepoznavanjem određenih uzoraka ponašanja, što omogućuje optimizaciju kvalitete proizvodnje, uštedu energije i slično“ [4].

9. Horizontalna/vertikalna integracija sustava

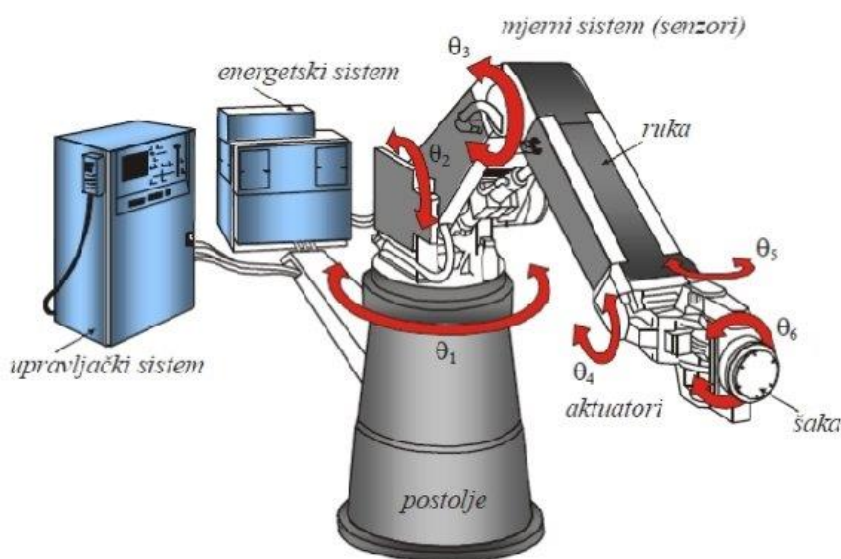
- „Horizontalna integracija sustava: digitalizacija u cjelokupnom lancu vrijednosti kroz razmjenu informacija i povezivanje informacijskih sustava (od kupaca do dobavljača)
- Vertikalna integracija sustava: integracija IT sustava kroz sve razine hijerarhije u poduzeću (proizvodnja, kontrola, operativna razina)“ [5].

3.2. Industrijski robot

„Najčešće se pod pojmom robota podrazumijeva industrijski robot koji se još naziva i robotski manipulator (eng. *robotic manipulator*) ili robotska ruka (eng. *robotic arm*). Postoji mnogo različitih definicija robota, ovisno o mjestu i načinu primjene“ [6].

Glavni dijelovi robotskog sustava:

- Mehanički sustav – niz segmenata povezanih pomoću zglobova koji izvršavaju operacije koje se očekuju od robota
- Energetski sustavi – omogućuju kretanje mehaničkog sustava uz pomoć elektromotora, hidraulike te u određenim slučajevima pneumatike
- Senzori – „oči robota“ detektiraju status robota i okoline
- Upravljački sustav – omogućuje upravljanje i nadzor robota [6].



Slika 2. Osnovni prikaz industrijskog robota [7]

„Robotski manipulator sastoji se tijela, ruke i ručnog zgloba (slika 2.). U proizvodnim procesima najčešće se koriste roboti pričvršćeni na podlogu. Na kraju ruke nalazi se ručni zglob sastavljen od mnogo komponenti koje mu omogućuju orijentaciju u različitim položajima. Relativna kretanja među različitim komponentama tijela, ruke i ručnog zgloba ostvaruju se pomoću niza zglobova.

Kod industrijskih robota koriste se dva osnovna tipa zglobova: rotacijski i translacijski. Rotacijski zglob vrši rotaciju oko osi, a translacijski (linearni) linijsko kretanje po osi. Dva susjedna zglobova spojena su pomoću krutih segmenata. Na ručni zglob pričvršćena je šaka (vrh manipulatora) preciznije alat ili hvataljka koja se ne smatra djelom robota već služi za obavljanje zadataka koji se traže od robota“ [6].

3.3. Podjela robota prema generaciji

Robotski sustavi razvijali s razvojem interdisciplinarnih znanosti čija međusobna suradnja omogućava razvoj robotskih tehnologija na svim poljima industrije i čovjekova života [8].

Robote možemo podijeliti u četiri generacije ovisni o njihovom stupnju razvijenosti:

Prva generacija - Programirani roboti

- Karakterizira ih jednostavno upravljanje.
- To su roboti bez razvijenijih senzora samo sa memorijom programa koji trebaju odraditi.
- Predviđeni su za rješavanje jednostavnih repetitivnih zadataka [9].

Druga generacija – Senzitivni roboti

- Opremljeni su nizom senzora i sustavima za raspoznavanje.
- Preko senzora dobivaju informacije o stanju okoline te se koriste jednostavnom logikom ugrađenom u računalo.
- Konačni cilj je samostalna operacija kao što je pakiranje kutija i paleta [9].

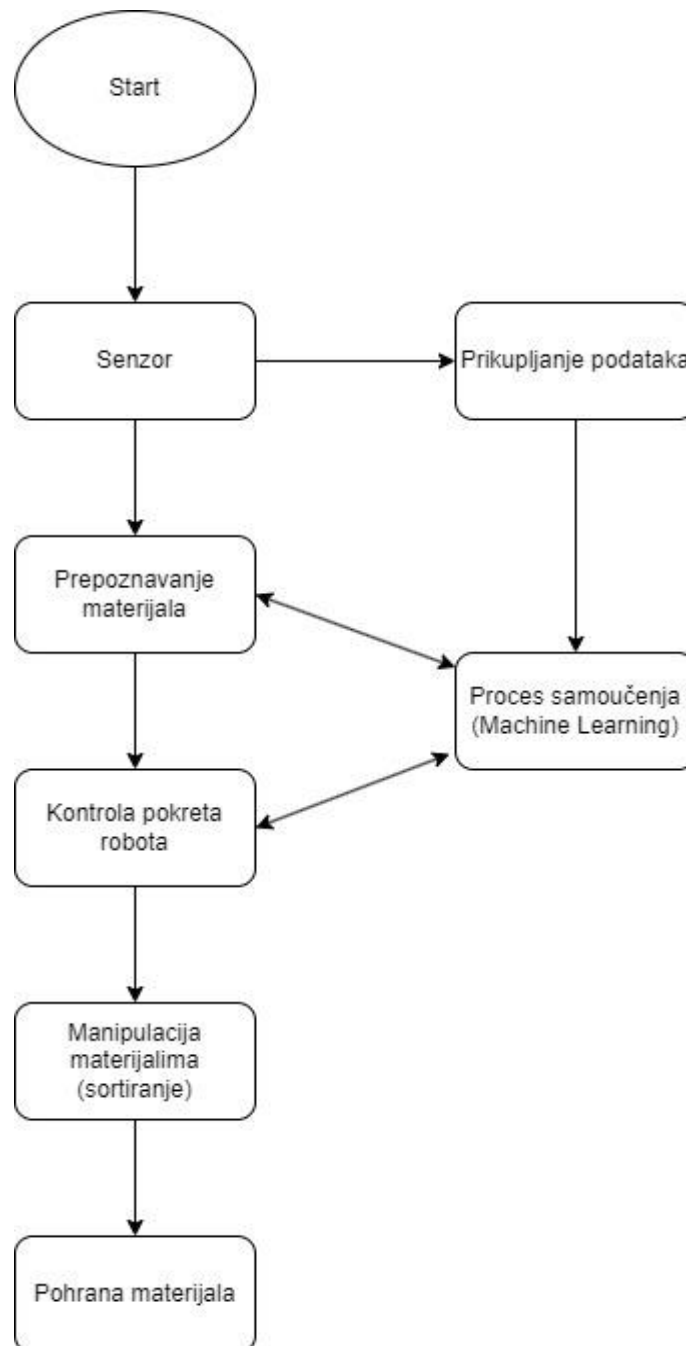
Treća generacija – inteligentni roboti

- Opremljeni računalima nove generacije.
- Mogućnost vođenja procesa s više ulaznih i izlaznih varijabli.
- Inteligentni – mogućnost učenja.
- Uspoređivanje informacija iz vanjskog svijeta - robot samostalno reagira na vanjske promjene [9].

Četvrta generacija - Autonomni roboti

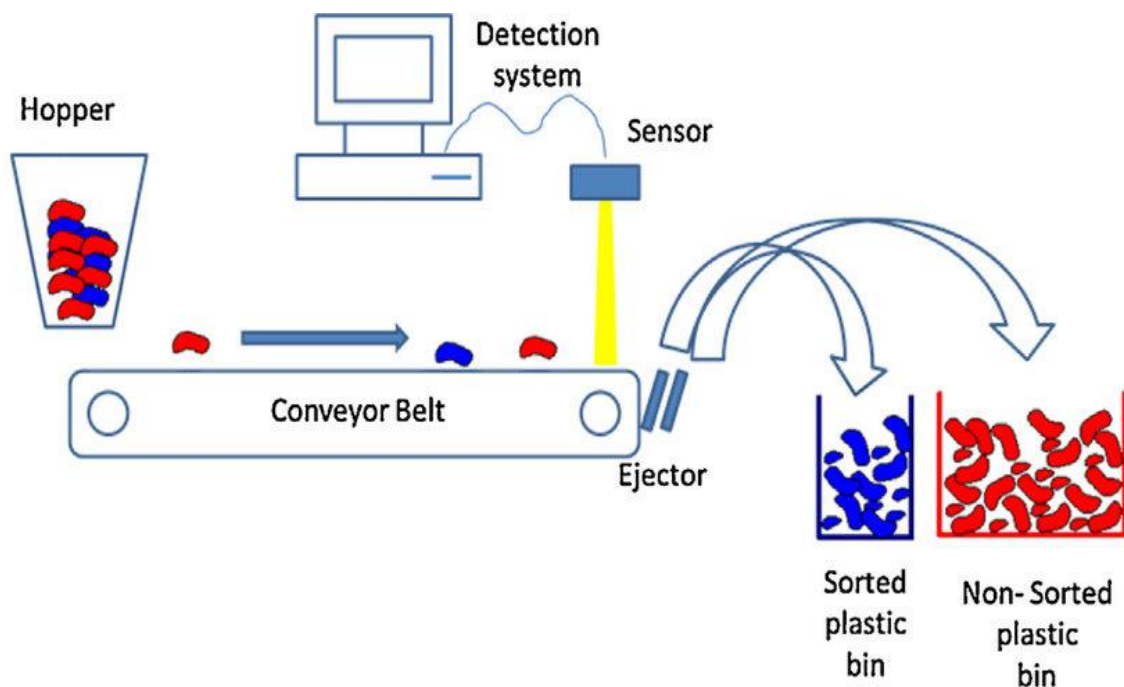
- Potpuno autonomni roboti koji se mogu brinuti sami o sebi, ova generacija je u razvoju i jedan od ciljeva robotike [9].

4. Princip rada robotskog sustava za recikliranje otpada



Slika 3. Blok dijagram – princip rada sustava za recikliranje

Otpad se odlaže na pokretnu traku, obično je potrebna pred obrada otpada kako bih se izbacili preveliki komadi koji ne bi mogli proći kroz sustav za sortiranje. Otpad pokretnom trakom dolazi do senzora koji prikupljaju podatke o položaju i dimenziji istog tog otpada na pokretnoj traci i njegovim fizikalnim i mehaničkim svojstvima (polimer, metal, drvo).



Slika 4. Osnovna struktura sustava za sortiranje [10]

„Oči robota“ su senzori koji rade na različitim principima kao što su 3D za prepoznavanje objekata ili neki drugi optički sustav prepoznavanja poput skeniranja rendgenskim zrakama, pa sve do korištenja opipa u svrhu prepoznavanja materijala.

Prolaskom otpada pokraj senzora prikupljaju se podaci o otpadu na temelju koji robot donosi odluke o daljnjem postupanju, ali i podaci koji služe za proces samoučenja robota ML (eng. *machine learning*). Potrebno je mapirati objekt na pokretnoj traci kako bi robotska ruka na vrijeme od operacijskog sustava dobila informaciju kad i u kojem trenu da dohvati određeni objekt. Ovisno o svojstvima materijala materijal se odlaže u za to predviđeni spremnik.

Robotski sustavi za recikliranje otpada interdisciplinarni su spoj znanosti, predstavljaju spoj strojarstva, elektrotehnike i računarstva.

Dijelove robotskog sustava za recikliranje otpada možemo podijeliti u dva glavna dijela:

1. Elektro/strojarski dio robotskog sustava za recikliranje otpada:

- Elektromehanički dio - dio robota zadužen za direktne manipulacije nad robotskom rukom i operacije nad materijalom koji se razvrstava
- Senzorski dio – senzorski dio još možemo nazvati „očima“ robotskog sustava čiji je zadatak prepoznavanje i klasifikacije materijala

2. Računalni dio robotskog sustava za recikliranje otpada:

- Računalni dio ujedno predstavlja „mozak“ robotskog sustava za recikliranje otpada. Sve informacije koje se prikupe različitim senzorima, u računalnom djelu se procesuiraju uz pomoć softvera koji se stalno nadograđuju s ciljem usavršavanja radnji čiji je cilj autonomnost koja se postiže umrežavanjem senzora i prikupljanjem podataka u svrhu strojnog učenja.
- Softver je programski kod koji predstavlja platformu za upravljanje robotom, a možemo ga podijeliti u dvije skupine :
 - softverski dio za prihvaćanje i čitanje ulaznih parametara prikupljenih uz pomoć senzora
 - softverski dio za izdavanje naredbi za manipulaciju elektro-mehaničkim radnjama robota.
- Umjetna inteligencija je ono što čini razliku i pomak u ovakvim sustavima u odnosu na standardne. Mogućnost prikupljanja i pohranjivanja velikog broja podataka uz njihovu obradu pružaju mogućnost strojnog učenja čime se ostvaruje autonomnost robotskih sustava.

5. Tehnologije automatiziranog prepoznavanja materijala

Neovisno o kakvom robotu govorimo, pod pojmom „upravljanja robotom“ podrazumijevamo kretanje robota željenim smjerom i iznosom. Kako bismo to ostvarili potrebno je poznavati kinematiku kojom se upravlja i način na koji robot prepoznaje objekte. Automatski sustavi za razvrstavanje otpada temelje princip rada prema različitim fizičkim i mehaničkim svojstvima materijala koji je potrebno prepoznati.

Najkorištenije tehnologije automatiziranog prepoznavanja materijala su:

- računalni vid
- laserska spektroskopija
- X zrake
- vrtložne struje.

5.1. Računalni vid

Računalni vid (eng. *computer vision*) je polje umjetne inteligencije (AI) koje omogućava računalima prikupljanje informacija kroz digitalnu sliku, video ili neki drugi digitalni input [11].

Računalni vid znanstvena je i tehnološka disciplina koja se bavi teorijom i izradom samog sustava koji služe dobivanju informacija iz slika, bilo to iz jedne ili više fotografija, video uradaka ili određenih medicinskih uređaja [12].

Da bi računalni vid mogao funkcionirati potrebno je mnogo podataka koje je potrebno konstantno procesuirati više puta, sve dok se ne pronađu ili pronađu razlike na temelju kojih se prepoznaje slika.

Zadaci računalnog vida uključuju metode za stjecanje, obradu, analizu i razumijevanje digitalnih slika i izdvajanje podataka iz stvarnog svijeta kako bi se proizvele brojčane ili simboličke informacije koje računalno može razumjeti [13]. Razumijevanje u ovom kontekstu znači transformaciju vizualnih slika u opise svijeta koji imaju smisla za računalne procese i mogu izazvati odgovarajuće djelovanje. Ovo se razumijevanje slike može se definirati kao razdvajanje simboličkih informacija od slikovnih podataka pomoću modela konstruiranih uz pomoć geometrije, fizike, statistike i teorije učenja. Matematički modeli odnosno algoritmi omogućavaju računalu interpretaciju slike. Algoritmi računalnog vida funkcioniraju na različitim principima,

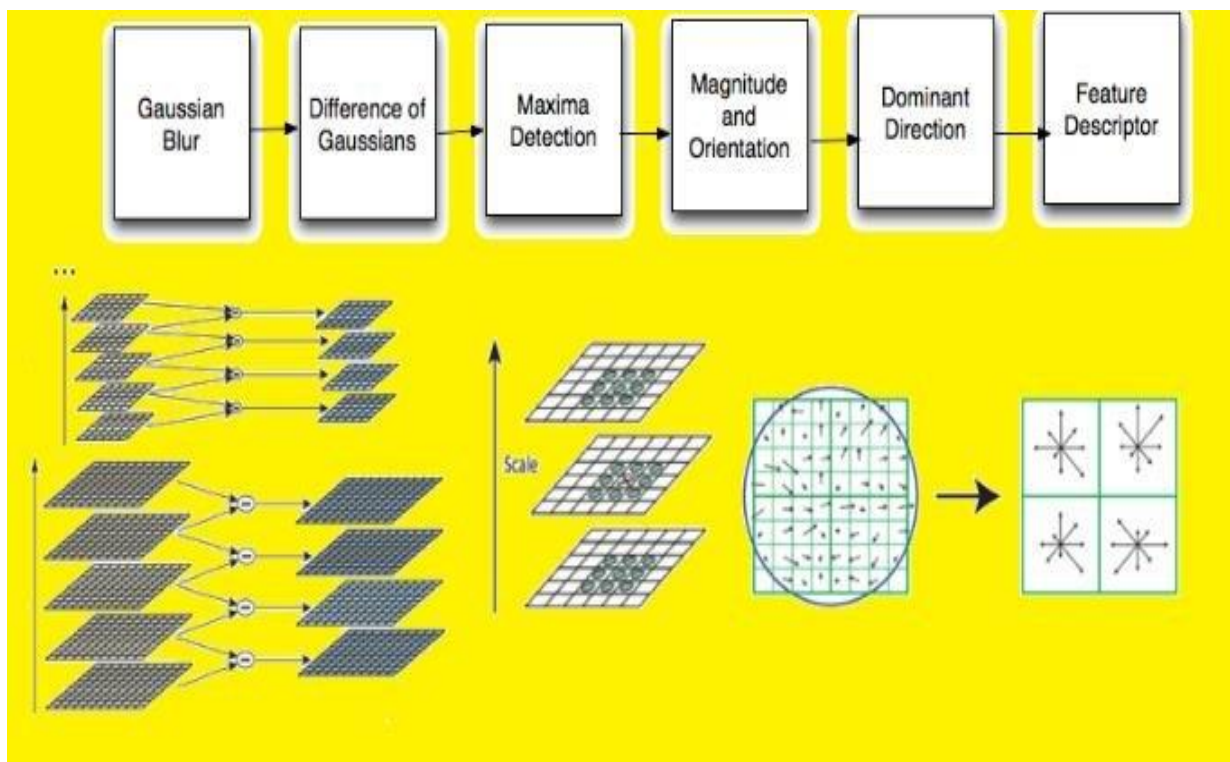
odnosno različite algoritme koristimo za različite svrhe ovisno o zadatku koji se mora izvršiti, a odabiremo ih prema značajkama slike koje nam daju podatak što slika sadržava. Značajke predstavljaju određenu strukturu slike kao što su određene točke, predmeti ili obrub slike [12].

Neki od najpoznatijih algoritama koji bi se ujedno mogu primijeniti u svrhu postizanja računalnog vida robotskih sustava za recikliranje otpada su SIFT i Viola-Jones algoritam.

5.1.1. Algoritam računalnog vida - SIFT

„SIFT (eng. *Scale-Invariant Feature Transform*) služi za pronalazak i opisivanje lokalnih značajki neke slike. Prednost ovog algoritma je invarijantnost s obzirom na rotaciju i uvećanje slike te relativna otpornost na promjene osvjetljenja i zaklonjenosti traženog objekta. SIFT ima velike mogućnosti kod trodimenzionalnog rekonstruiranja scene i uparivanja tj. prepoznavanja“ [14].

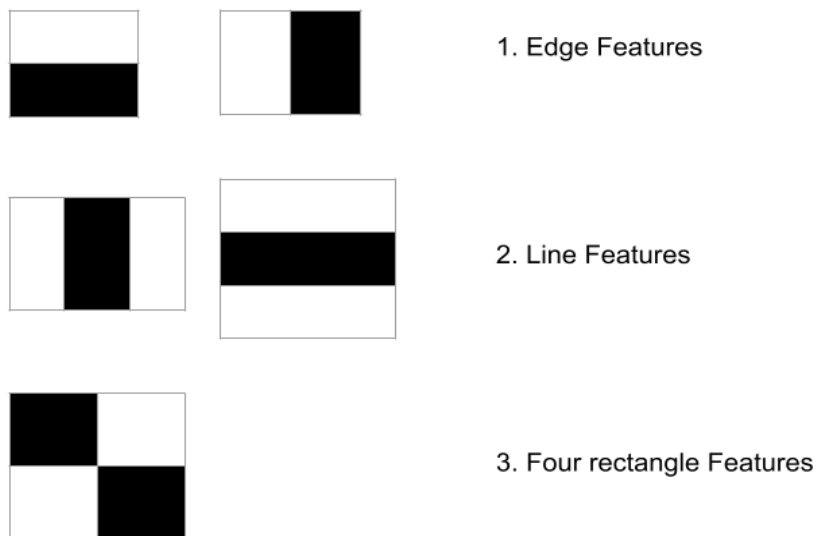
Količina značajki naročito je važna za prepoznavanje objekata. Potrebne su najmanje tri značajke koje se podudaraju za detektiranje manjeg objekta na zatrpanoj podlozi [10].



Slika 5. SIFT Algoritam [15]

5.1.2. Algoritam računalnog vida - Viola-Jones algoritam

„Viola-Jones algoritam prvenstveno je napravljen za prepoznavanje biometrije ljudskih lica, no možemo ga koristiti za prepoznavanje bilo kakvih objekata za čiju svrhu ga se prenamijeni. Ovaj algoritam funkcionira tako da strojnim učenjem aplikaciji dajemo informacije da li svaka slika, od slika iz baze podataka, sadrži ili ne sadrži traženi objekt“ [14].



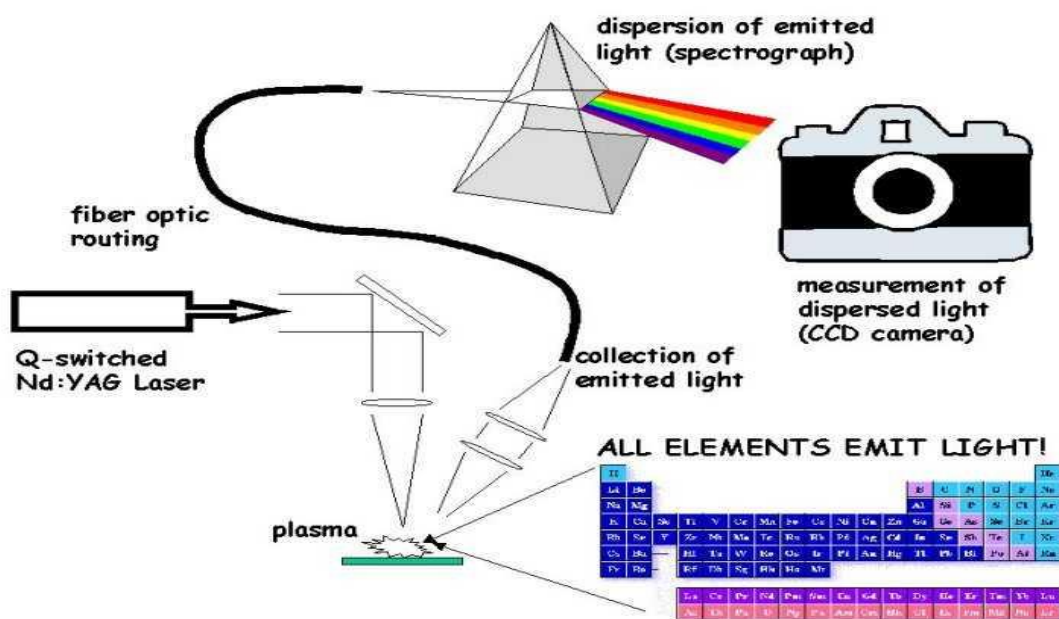
Slika 6. Haarove značajke [16]

Četiri koraka Viola-Jones algoritma:

- Haarove značajke – analiza susjednih pravokutnih područja, provjera vrijednosti intenziteta svakog područja, uočavanje razlika između susjednih područja (slika 6.).
- Integralna slika – pojednostavnjuje se izračun piksela originalne fotografije radi brže detekcije Harrovih značajki.
- Adaboost algoritam – služi za izbor najboljih značajki po principu klasificiranja značajki na pozitivne i negativne.
- Kaskadni klasifikator – fotografija se provjerava kroz kaskade. Ukoliko fotografija zadovolji prolaz kroz sve kaskade dobiva se traženi objekt.

5.2. Laserska spektroskopija

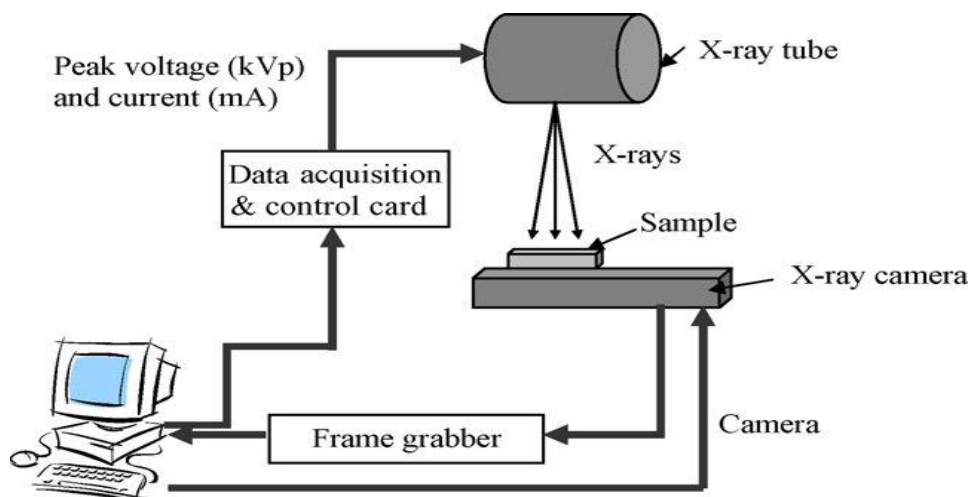
„Laserska spektroskopija temelji se na prepoznavanju strukture, boje i oblika. Koristi se kod automatskih sortirnica za razdvajanje frakcija staklenog krša (odvajanje prema boji stakla, odvajanje nečistoća iz usitnjenog stakla), ali i plastike. To se posebno odnosi na tamnu/crnu plastiku koju uređaji temeljeni na standardni optičkim tehnologijama ne mogu detektirati“ [17].



Slika 7. Princip rada laserske spektroskopije [18]

5.3. Rendgenske zrake - X zrake

Sustav koristi rendgenske zrak za analizu materijala koji se nalazi na pokretnoj traci. Materijal se identificira pomoću X-zraka koje odašilje transmisijski senzor. Zraka potom prolazi kroz predmet, ali dio se i reflektira do senzora koji daje informacije o spektralnoj apsorpciji materijala.

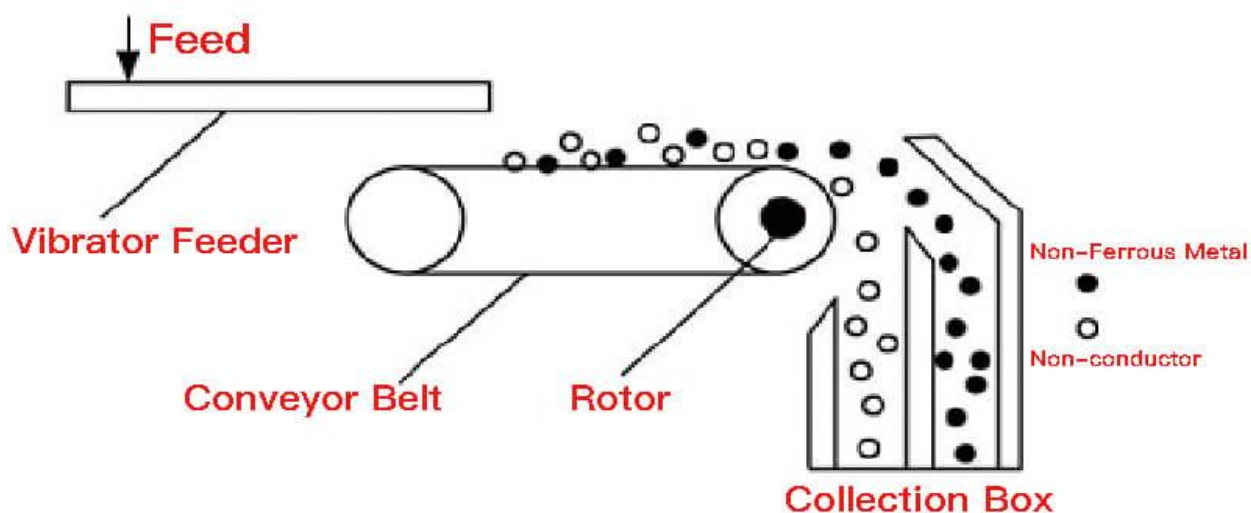


Slika 8. Princip rada X- zrake [19]

5.1. Vrtložne struje

Vrtložne struje služe za separaciju metala koja se provodi po principu vrtložnog sloja. One se induciraju u metalnom vodiču koji se nalazi u magnetskom polju sa promjenjivim magnetskim tokom. Jačina inducirane vrtložne struje ovisi o električnoj vodljivosti i magnetskoj permeabilnosti pojedinog materijala [17].

Ovakve separatore nazivamo još *Eddy current* (slika 9.). Njihov rad zasniva se na Faradejevom zakonu indukcije i Lenzovom pravilu. U rotoru bubnja smješten je elektromagnet koji stvara izmjenična magnetska polja te na taj način separira materijala sa i bez feromagnetskih svojstava [17].



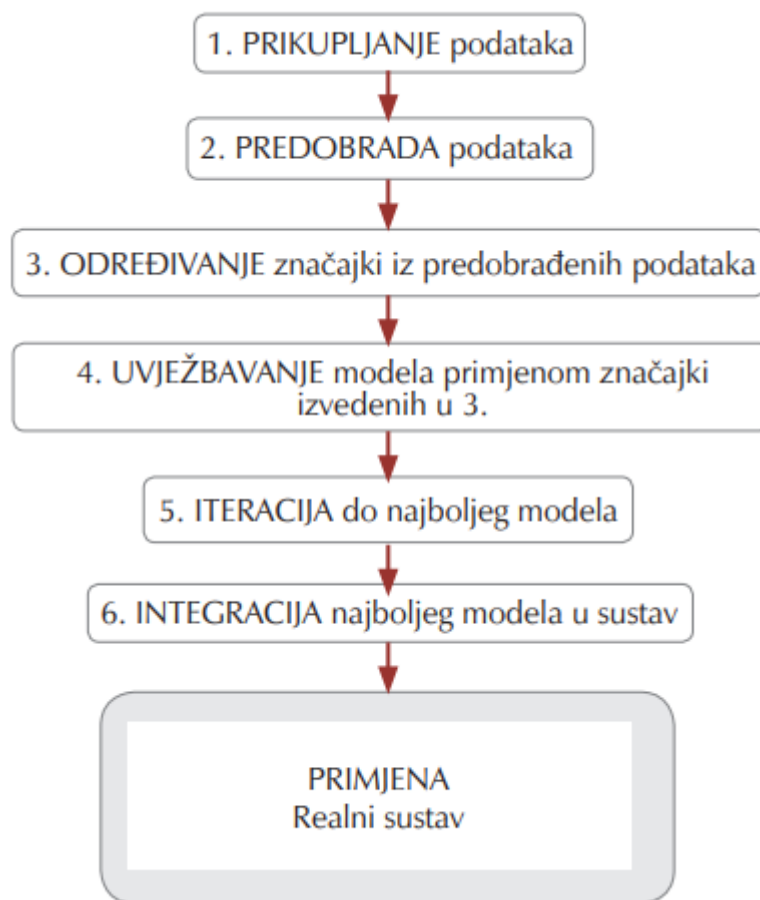
Slika 9. Princip rada Eddy current separatora [20]

6. Strojno učenje

„Zadatak algoritma strojnog učenja (eng. *machine learning*) je pronaći prirodne uzorke i poveznice u podacima te na temelju toga steći uvid i zatim odlučiti i predviđati. Primjenjuju se već svakodnevno za donošenje bitnih odluka u medicinskoj dijagnostici, trgovanju i mešetarenju dionicama, predviđanju potrošnje energije itd. Web-pretraživači mnogih portala oslanjaju se na strojno učenje kako bi nam iz milijuna mogućnosti preporučili ono što nas zanima prema našim preferencijama“ [21].

Algoritmi strojnog učenja dizajnirani su na način da izvide dobiveni zadatak na već pred definiranim primjerima što nazivamo model učenja. Algoritam učenja dizajniran je na način da kreira uzorak za učenje koji se može dinamički proširivati [21].

Za strojno učenje možemo reći da je to grana ili naprednija verzija umjetne inteligencije. Kod sustava za recikliranje prvenstveno se prikupljaju podaci iz slika koje se obrađuju i čiji se rezultati procjenjuju te na temelju njih sustav donosi autonomne odluke od daljnjem postupanju.



Slika 10. Koraci razvoja modela strojnog učenja [21]

Razlikujemo dvije vrste strojnog učenja:

- Nadzirno učenje - modeli se uvježbavaju, odnosno grade primjenom skupa ulaznih i izlaznih podataka prikupljenih eksperimentom ili akvizicijom tako da mogu predviđati buduće izlaze na temelju dostupnih ulaza [21].

U slučaju nadziranog učenja algoritmi rade s već poznatim parametrima i poznatim izlaznim podacima i samim time uvježbavaju sustav za predviđanje. Kod upravljanja otpadom ovakav sustav nadzirnog učenja primjenjuje se kada su poznati ulazni parametri otpada (radi se sličnim ili istim svojstvima materijala).

Kao primjer možemo navesti sustav koji sortira miješani otpad, poznati su nam ulazni parametri (materijali) koju dolaze na pokretnu traku. Cilj sustava je da na temelju ulaznih parametra i onih parametara koje već posjeduje preciznije razvrstava otpad.

- Nenadzirano učenje - zadatak nenadziranog učenja je pronaći skrivene uzorke i inherentne strukture u ulaznim podacima bez poznavanja izlaza. Nenadzirano učenje skuplja podatke u grupe/klastere (eng. *clustering*) te na temelju grupiranja donosi zaključke i predviđanja [21].

Algoritmi strojnog učenja odnedavno pokazuju svoje mogućnosti glede recikliranja otpada. Jedan od razloga zašto su se strojno učenje pa i roboti počeli progresivno primjenjivati u recikliranju otpada je taj da je Kina pokrenula novi program „*Blue sky*“ čije su odredbe da svaki otpad, tj. sirovina koja se uveze u Kinu mora zadovoljavati visoki stupanj čistoće od 0.5%. Također uvoz otpadne plastike smanjio se za 99%, a otpadnog pomiješanog papira za 33% što je imalo velik utjecaj na zemlje koje su redovito svoj otpad odvozile u Kinu [22].

Tako je na primjer u Engleskoj spaljeno pola miliona tona plastike dok je u Australiji nastao veliki problem jer nisu imali kamo sa 1.3 milijuna tona otpada kojeg su prije brodovima odvozili u Kinu. Većina poslova koji se vežu uz recikliranje i dalje se obavljaju ručno uglavnom u ne razvijenim zemljama gdje je određenom broju populacije to jedini izvor prihoda. Također dugoročno cijena troškova zdravstvenog sustava uvelike premašuje prihode od recikliranja. Strojno učenje kao što samo ime govori uči iz primjera zadanih od strane ljudi, a manje od direktnih naredbi. Mogućnost upotrebe strojnog učenja u procesima separacije otpada dugo je bila zanemarevana u industriji recikliranja iako su mogućnosti strojeva i elektroničkog vida daleko brže i efikasnije od ljudskog rada [22].

6.1. Strojno učenje i velike količine podataka

„Velike količine podataka (eng. *Big Data*) obično opisuju služeći se pojmom 3V-a koji se odnosi na volumen (velika količina podataka), varijantnost (raznolikost tipova podataka: tradicionalne baze podataka, fotografije, dokumenti) i brzinu kojom se akumuliraju novi podatci (iz sličnih izvora podataka, iz prethodno arhiviranih podataka, iz podataka koji stalno pridolaze iz različitih izvora (eng. *streamed data*)), ali i brzina kojom se očekuje da pristigli podatci budu dostupni za analizu“ [23].

Upravo je postojanje svih triju vrijednosti ono što razlikuje „*Big data*“ od „*Lot of data*“, ali i ono zbog čega ova vrsta podataka zahtijeva nove metode za oblikovanje, rukovanje i analiziranje [24].

Korištenjem algoritama strojnog učenja za analizu velikih podataka može predstavljati veliko značenje u unapređenju procesa robotske automatizacije sustava za recikliranje. Kombinacijom strojnog učenja i velikih podataka dolazi se preciznih modela strojnog učenja čime se postiže preciznost i efikasnost samog rada sustava.

7. Upravljanje otpadom i postojeće moderne tehnologije upravljanja

Razvrstavanje otpada po vrstama najvažniji je postupak koji prethodi recikliranju i omogućava da se recikliranje izvrši. Kućanstva su najveći proizvođači miješanog otpada, unatoč tome što se podigla svijest građana pa se otpad prikuplja i razdvaja u za to predviđene spremnike i dalje se proizvode velike količine otpada koji bi se mogao iskoristiti kao sirovina u neku drugu svrhu te da time postignemo da put tog otpada ne završi na odlagalištu već da se ponovo upotrijebi.

U Hrvatskoj se reciklira tek 16% kućanskog otpada za razliku od razvijenih europskih zemalja gdje je taj postotak oko 43%. Svaka osoba u prosjeku proizvede čak 400 kilograma otpada godišnje od čega se 80% stvari koje bacimo upotrijebi samo jednom. Cilj ka kojemu se moramo voditi uporaba je otpada bilo to materijalna (recikliranje) ili energetska uporaba (spaljivanje otpada u svrhu dobivanja energije). Sirovine koje koristimo nisu neiscrpne ni jeftine. Kao primjer dobrog postupanja možemo navesti cirkularnu ekonomiju čiji je cilj smanjenje same proizvodnje otpada, recikliranje i iskorištavanje otpada koliko je god to moguće [25].

Što se tiče industrije kada usporedimo digitalizaciju procesa upravljanja otpadom sa digitalizacijom drugih sektora i korištenjem robota u svrhu kružne ekonomije možemo tvrditi kako je proces kružne ekonomije i uporaba robota u svrhu upravljanja otpadom još u začetku. No bez obzira pametno upravljanje otpadom poprima sve veću važnost u poslovanju svakog poduzeća pa se i sve više velikih kompanije trudi predstaviti kao ekološki odgovorne. Digitalizacija upravljanja otpadom biti će sve više zastupljena u kompanijama kao i zeleno poslovanje. Pod zelenim poslovanjem podrazumijeva se slanje elektroničke pošte umjesto papirnate, minimalno korištenje papira u poslovanju, instalacija pametnih robotskih spremnika koji razdvajaju otpad i prate razinu otpada u spremnicima. Razvoj robotskih tehnologija i digitalizacije u procesu upravljanja otpadom i poticanja kružne ekonomije nezaustavljivo raste zbog uvođenja novih zakona i standarada od strane europske unije i raznih drugih institucija koje zahtijevaju sve veću efikasnost u razdvajanju otpada i uporabi istog. Također u današnje vrijeme kada cijena sirovina sve više raste cilj svakog poduzeća je iskoristiti ono što imaju do krajnjih granica kako bi se postigla čim veća ekonomičnost.

Direktive Europske Unije s ciljem pametnog gospodarenja otpadom od 3.svibnja 2018 god:

(36)“Neke su sirovine izrazito važne za gospodarstvo Unije, a njihova je nabava povezana s visokim rizikom. Radi osiguravanja nabave tih sirovina i u skladu s Inicijativom za sirovine koju je Komisija uspostavila svojom Komunikacijom od 4. studenoga 2008. o „Inicijativi za sirovine - ispunjavanje naših ključnih potreba za rastom i radnim mjestima u Europi” te općenitim i konkretnim ciljevima Europskog partnerstva za inovacije u području sirovina, države članice trebale bi poduzeti mjere kojima se promiče ponovna uporaba proizvoda koji predstavljaju glavne izvore ključnih sirovina kako bi se spriječilo da ti materijali postanu otpad. U tom kontekstu, Komisija je utvrdila popis takvih sirovina za Uniju u svojoj Komunikaciji od 13. rujna 2017. o „popisu ključnih sirovina za EU u 2017.”te taj popis podliježe redovitom preispitivanju“ [26].

(37) „Radi daljnje potpore učinkovitoj provedbi Inicijative za sirovine države članice trebale bi također poduzeti mjere za što bolje gospodarenje otpadom koji sadržava značajne količine ključnih sirovina, uzimajući u obzir ekonomsku i tehnološku izvedivost te prednosti za okoliš i zdravlje. One bi u svoje planove gospodarenja otpadom trebale uključiti i mjere za skupljanje, razvrstavanje i uporabu otpada koji sadržava znatne količine tih sirovina koje su primjerene na nacionalnoj razini“ [26].

(56) „Kako bi se izbjegla obrada otpada kojom se resursi zadržavaju na nižim razinama hijerarhije otpada, kako bi se omogućilo visokokvalitetno recikliranje i povećalo korištenje kvalitetnih sekundarnih sirovina, države članice bi trebale osigurati da se biootpad odvojeno skuplja i prolazi postupak recikliranja tako da poslije ispunjava visoku razinu zaštite okoliša i da konačni proizvod ispunjava relevantne standarde visoke kvalitete“ [26].

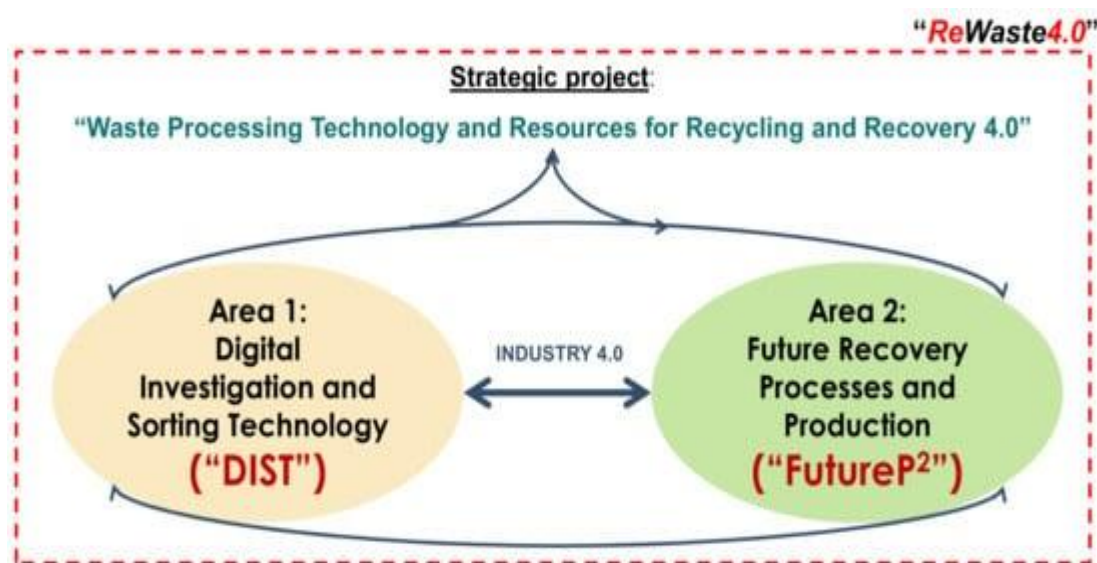
(58) „Pravilno gospodarenje opasnim otpadom i dalje predstavlja problem unutar Unije, a dio podataka o njegovoj obradi nedostaje. Stoga je potrebno poboljšati evidentiranje i mehanizme praćenja uspostavom elektroničkih registara za opasni otpad u državama članicama. Prikupljanje elektroničkih podataka trebalo bi prema potrebi proširiti na ostale vrste otpada kako bi se pojednostavnilo vođenje evidencije za poduzeća i uprave te poboljšao nadzor tokova otpada u Uniji“ [26].

Iz gore navedenih direktiva vidljiva je potreba za implementacijom robotskih sustava u svrhu postizanja zadanih ciljeva. Valja napomenuti kako je robotska tehnologija do najvećeg izražaja dolazi prilikom obrade opasnog otpada gdje se u potpunosti otklanja opasnost koja prijete ljudima. Iz raznih direktiva nastali su projekti koji prikazuju kako poštivati te direktive na brz i efikasan način. Kao primjer navodi se „ReWase4.0 projekt“.

7.1. ReWaste4.0 pilot projekt – primjer pametnog upravljanja otpadom

ReWaste 4.0 pilot projekt je inovativan proces i primjer pametnog upravljanja otpadom financiran i razvijen od strane Austrijskih institucija (eng. *Competence Centers for Excellent Technologies and Austrian Research promotion Agency*).

Ovaj inovativni princip tretiranja pomiješanog otpada omogućava visoki stupanj recikliranja i samim tim oporabu važnih sirovina. Cilj ovog eksperimentalnog pristupa prikupljanje je podataka o postupanju sa otpadom po principu „pametnog upravljanja“ unutar poduzeća.



Slika 11. ReWaste projekt pametnog upravljanja otpadom [27]

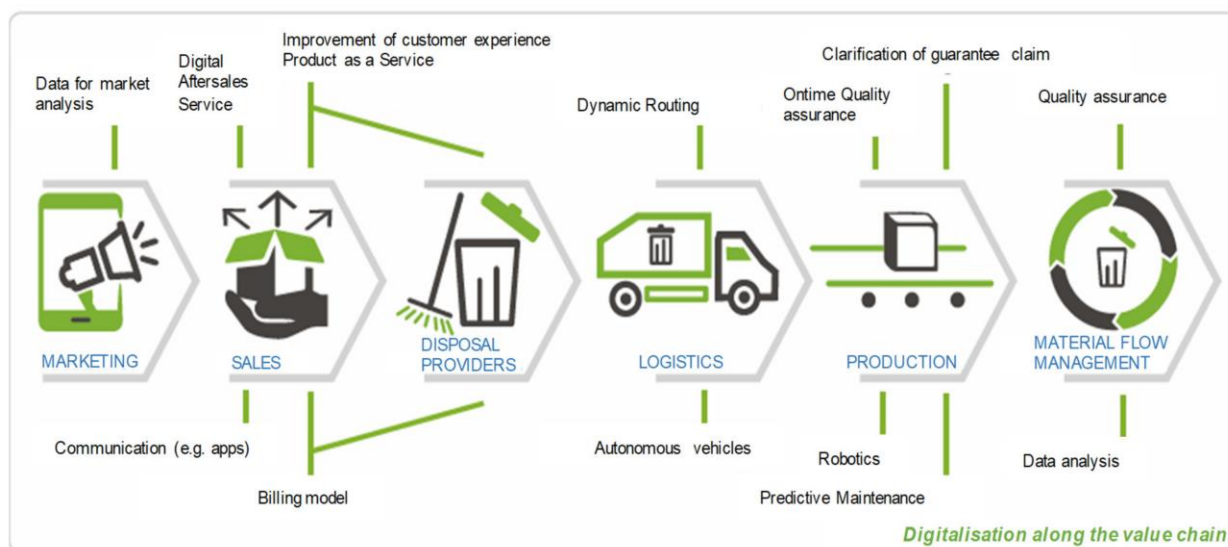
Prilikom inicijalne zamisli vezane za ovaj projekt komisija Europske Unije prezentirala je 2015. godine i predstavila novi podosta zahtjevan paket ciljeva u svrhu postizanja recikliranja komunalnog otpada za čak 65% te ambalažnog otpada za 75% [27].

Ovi ciljevi izglasani su u 2018 godini te je njihov ciljani rok izvršenja:

- Do 2035 – recikliranje 65% miješanog komunalnog otpada
- Do 2030 – recikliranje 75% ambalažnog otpada

Prikupljanje velikih količine dobro strukturiranih podataka igrat će odlučujuću ulogu u digitalizaciji upravljanja otpadom. Spajanjem prikupljenih podataka sa umjetnom inteligencijom

AI (eng. *artificial intelligence*) moguće je strukturirati, proanalizirati i ocijeniti u svrhu strojnog učenja čime bi se npr. mogla postići bolja preciznost prilikom separacije otpada [28].



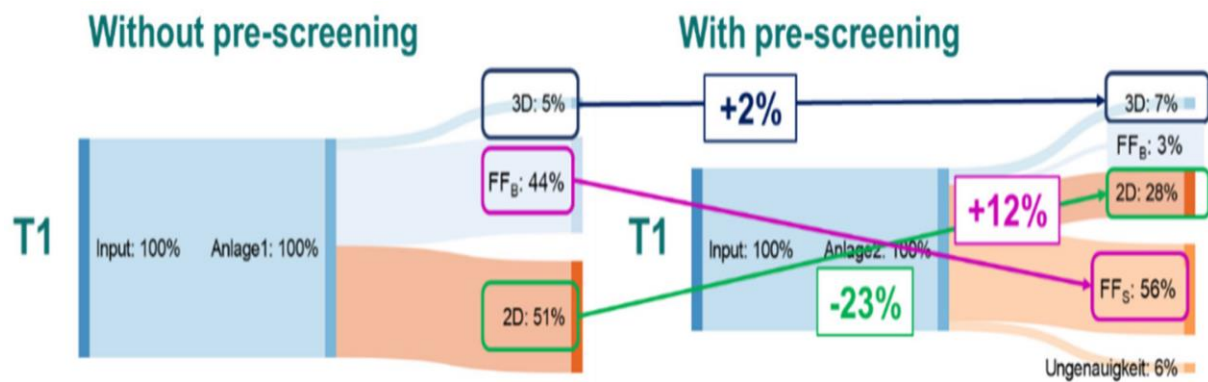
Slika 12. Digitalizacija procesa upravljanja otpadom [27]

Na temeljima pilot projekta ReWaste4.0 i njegovim vrlo dobrim rezultatima nastaje novi projekt ReWaste – F (eng. *Recycling and Recovery of Waste for Future*). ReWaste – F za razliku od svog prethodnika uvodi najmoderniju tehnologiju u vidu novih senzora za kontroliranje čestica koje se ispuštaju u atmosferu prilikom obrade otpada i slično.

Temeljna ideja koja stoji iza ReWaste-F je ta da se omogući komunikacija u stvarnom vremenu između procjene kvalitete otpada i postrojenja koje će ga obraditi. Na ovaj način postiže se dinamička procjena koja omogućuje brzinu recikliranja ovisno o kvaliteti prikupljenog otpada. Postrojenje za obradu otpada bi se samooptimiziralo na temelju prikupljenih podataka putem dinamičke procjene otpada. Ovakva vrsta obrade otpada zahtjeva razvijene baze podataka i općenito digitalizaciju sveukupnog sustava prikupljanja otpada od samog odvoza otpada pa sve do zadnjeg koraka obrade [27].

Prema rezultatima svi oblici plastičnog otpada osim PET-a mogli su se preraditi ili komprimirati [27]. Prilikom testiranja toplinskih svojstava utvrđeno je mala šteta u samom materijalu uz prisustvo određenih organskih nečistoća. Također prilikom testiranja mehaničkih svojstava utvrđena je određena krtoš materijala zbog prisustva organskih nečistoća.

Prilikom samog testiranja izdvajanja i uporabe plastičnog otpada korišteno je više metoda različitih tehnologija, ovdje je navedena: suha mehanička obrada sa prethodnom separacijom i razvrstavanjem uz pomoć senzora [27].



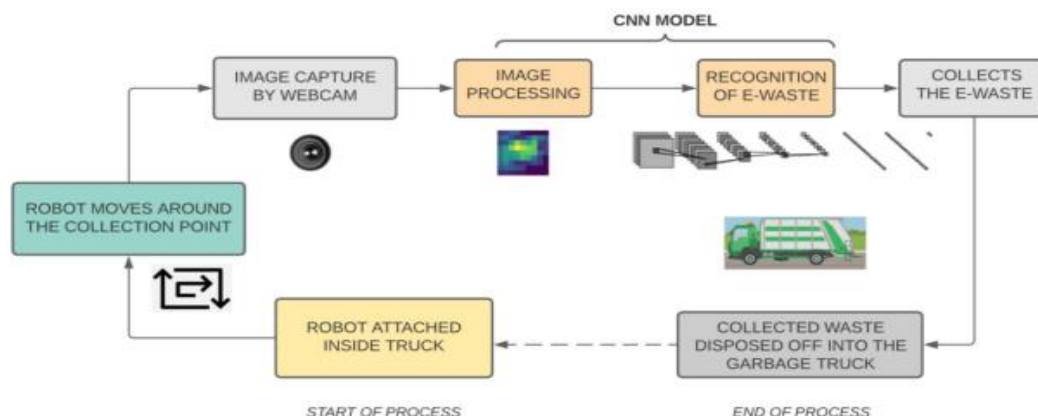
Slika 13. Rezultati obrade plastičnog otpada skeniranjem [27]

Iz slike (slika 13.) vidljivo je povećanje izdvojene 3D plastike za 2% plastike za 12% dok se ukupni ostali otpad smanjio za 23% gdje 3D plastika predstavlja kompozitne materijale i strukture ojačane u više smjerova dok je 2D plastika jeftinija za proizvodnju i sastoji od više slojeva laminata položenih u obliku matrice koja utječe na fizikalna svojstva materija.

7.2. Predviđanja i rješenja primjenom umjetne inteligencije u prikupljanju elektroničkog otpada na primjeru Republike Indije

Razvojem indijskog gospodarstva i velikim tehnološkim napretkom zadnjih desetljeća sve više se pojavljuje problem elektroničkog otpada. Ukupna količina električne i elektroničke opreme povećava se po stopi od 2,6 milijuna godišnje. Globalna je procjena da će se 2030. godine proizvesti 74.8 miliona tona elektroničkog otpada što je vrlo zabrinjavajuća činjenica s obzirom na nisku stopu recikliranja e-otpada od samo 17.4%. Definicija elektroničkog otpada sažima različite oblike elektronike koja može sadržavati teške metale opasne po prirodu, ali i važne resurse koji se mogu ponovo iskoristi [29].

Prednosti ML (eng. *machine learning*) u prepoznavanju objekata pobudio je interes istraživača da tu mogućnost primjene u gospodarenju otpadom. Istraživanjem i korištenjem metoda dubokog učenja za klasifikaciju i analizu otpada postignuto je da se modeliraju podaci koji će se koristiti u razvrstavanju stakla, meta, plastike pa i elektroničkog otpada. Na slici (slika 14.) vidljiv je predloženi E-waste robotski sustav za izdvajanje elektroničkog otpada.



Slika 14. Dijagram toka E-waste robotskog sustav [29]

E-waste sustav (sustav elektroničkog otpada) zasniva se na principu da se sustav pokreće na svakom sabirnom mjestu prilikom prikupljanja otpada kamionom za smeće. Robot koji je instaliran na kamion kreće se i na temelju fotografija koje uzima, procesira i prepoznaje elektronički otpad. Elektronički otpad se robotski izdvaja i pohranjuje unutar prostora predviđenog za takvu vrstu otpada. Programski jezik Python bio bi zadužen za kontrole i učenje ovakvih robota jer je pristupačan i jednostavan za učenje i održavanje, te bi preciznost ovakvih robota iznosila oko 90% [29]. Prednosti ovakvog prikupljanja je zaštita ljudskog zdravlja, jer se prikupljeni elektronički otpad odmah može obrađivati bez da ga netko prethodno izdvaja iz hrpa prikupljenog otpada, kao što je slučaj u Indiji da to najčešće rade ljudi.

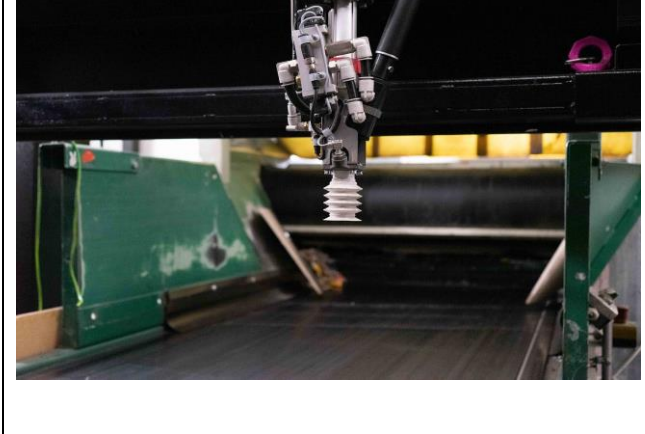
7.3. Robotski sustavi za razvrstavanje otpada ZenRobotics

Pouzeće ZenRobotics osnovano 2007. godine, već je 2009. godine prvo u svijetu razvijalo robote koji posjeduju umjetnu inteligenciju u svrhu sortiranja otpada. Jedna od ključnih inovacija tvrtke ZenRobotics je jedinstven sustav temeljen na strojnom učenju koji radi na principu prikupljanja velike količine podataka iz svog okruženja koji se evaluiraju i procesuiraju te se na temelju toga stvaraju se naredbe koje robot izvršava [30].


Primjeri robotskih sustava poduzeća ZenRobotics [30] prikazani su na slici 15 (a, b, c):

<p>Heavy Picker</p> <ul style="list-style-type: none">• Obraduje do 2300 komada na sat• Maksimalna masa objekata 30kg• Predviđen za sortiranje težeg građevinskog otpada• Efikasnost sortiranja 99%	
---	--

a. Heavy Picker

<p>Fast Picker</p> <ul style="list-style-type: none">• Obraduje do 80 komada otpada u minuti• Maksimalna masa objekata do 1kg• Sortiranje mješovitog otpada• Efikasnost sortiranja 99%	
--	--

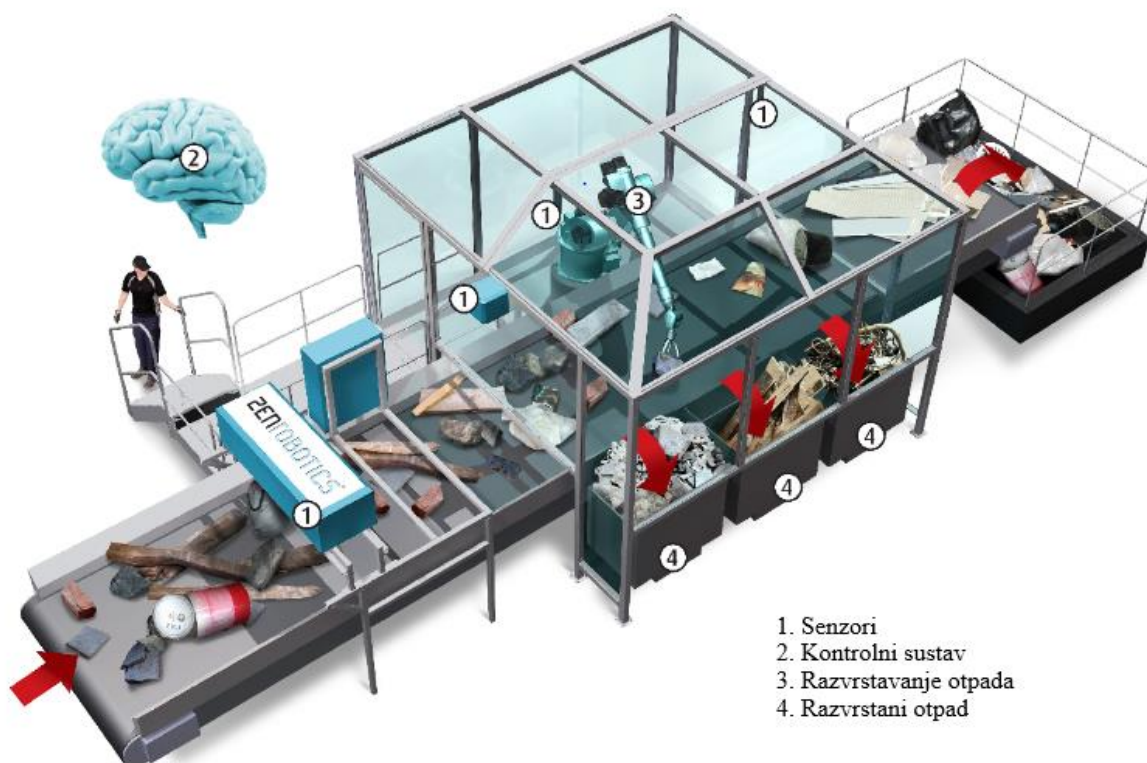
b. Fast Picker

<p>ZenBrain</p> <ul style="list-style-type: none">• Mozak robota – autonomni sustav prepoznavanja i upravljanja• Posjeduje različite senzore za prepoznavanje otpada	
--	--

c. ZenBrain

Slika 15. Primjeri robotskih sustava poduzeća ZenRobotics

7.4. Princip rada ZenRobotics sustava za razvrstavanje otpada



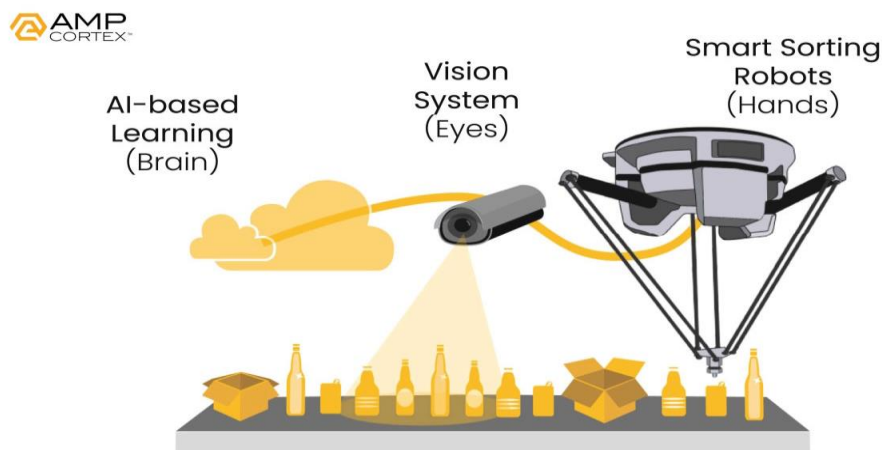
Slika 16. ZenRobotics sortiranje [30]

Faze razvrstavanja otpada:

1. Prethodno obrađen otpad, otpad određenih dimenzija dozira se na pokretnu traku zbog nužnog razmaka između jedinica otpada kako bi skeniranje i razdvajanje bilo čim učinkovitije.
2. Senzor prikuplja podatke o vrsti otpada i položaju otpada na pokretnoj traci uz pomoć 2D i 3D kamera te ostalih elektromagnetskih senzora za detekciju metala. Prikupljeni podaci se obrađuju te se na temelju obrađenih podataka robotskoj ruci zadaju naredbe.
3. Otpad se razvrstava i odlaže velikom brzinom u za to predviđene spremnike [30].

7.5. AMP Robotics Cortex - sustav za razvrstavanje otpada

AMP je jedan od lidera u robotskom recikliranju, njihov sustav također koristi AI (umjetnu inteligenciju) i principe dubokog učenja (eng. *deep learning*) za identifikaciju i razvrstavanje otpada [31].



Slika 17. AMP Cortex [31]

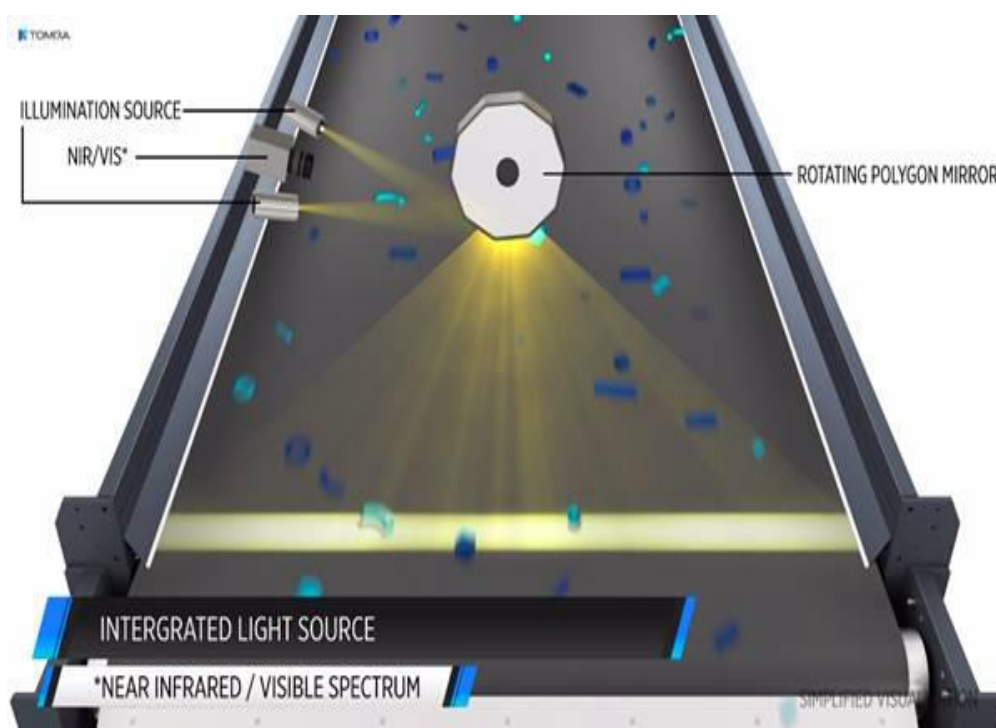
Sustav umjetnog učenja Neuron tvrtke AMP Cortex zasnovan je na algoritmima baziranim po principu rada ljudskog mozga što ovom sustavu omogućuje učenje i konstantno poboljšavanje u prepoznavanju i razvrstavanju materijala. Sustav Neuron procesira slike materijala koji se mogu reciklirati te klasificira podatke dobivene iz slika u stotine kategorija prema svojstvu materijala, boji, obliku te ostalim svojstvima [31].



Slika 18. AMP računalni vid [31]

7.6. TOMRA AUTOSORT – sustav za razvrstavanje otpada

Tvrtka TOMRA nudi niz različitih sustava za razvrstavanje specifičnih vrsta otpada tako da je svaki sustav specijaliziran za jednu vrstu otpada poput polimera metala i slično. Sam stroj koji izvršava razvrstavanje smješten je na kraju pokretne trake gdje uz pomoć senzora (računalnog vida) prepoznaje vrstu otpada koju treba odbaciti. Izdvajanje drugih vrsta otpada u ovom se slučaju izvršava uz pomoć mlazova komprimiranog zraka koji izbacuje otpad izvan trake u za to predviđene spremnike [32].



Slika 19. TOMRA AUTOSORT [32]

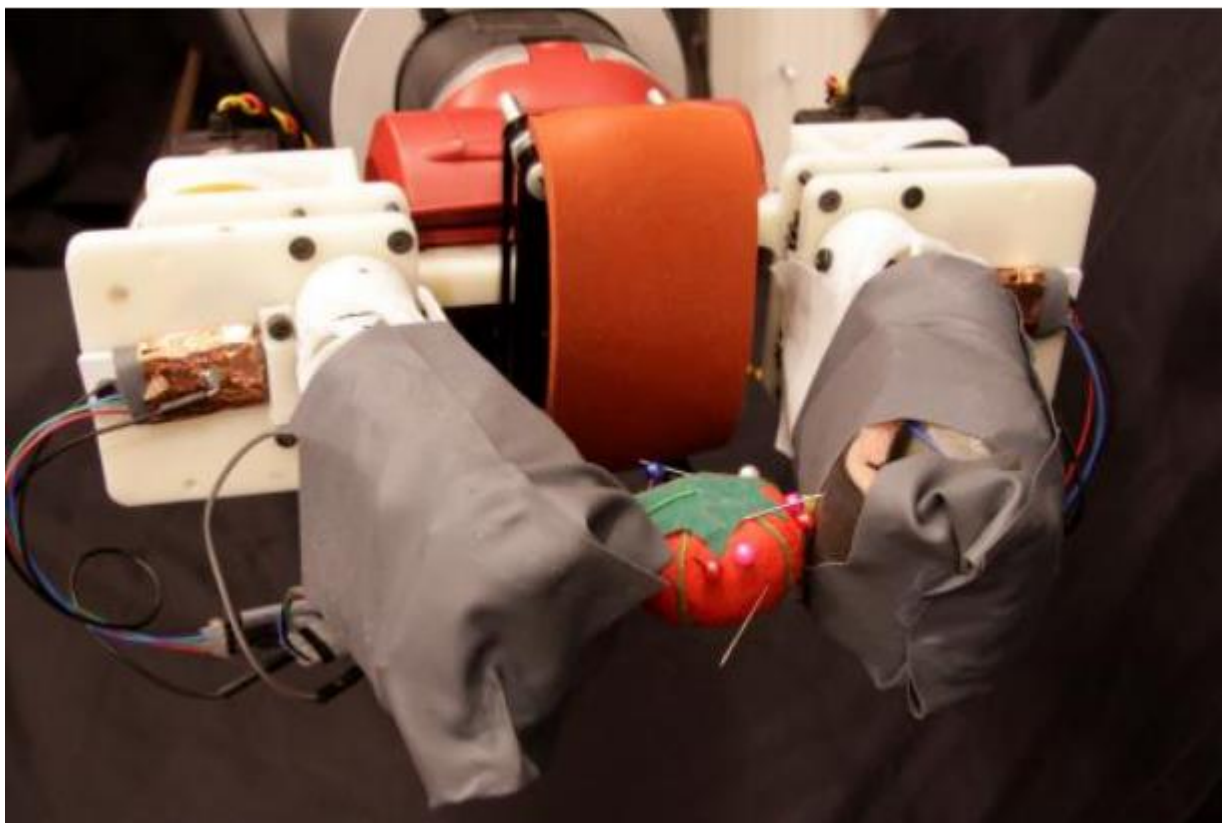
Tvrtka TOMRA ovu tehnologiju naziva „*flying beam*“ (slika 20.) čija je glavna prednost infracrveni senzor za elektronički vid kojem nije potreban vanjski izvor svjetlosti već može raditi i u potpunom mraku. Senzor je sastavljen od poligonalnog rotirajućeg zrcala koje vidi cijelu širinu pojasa. Materijal koji prolazi apsorbira infracrveno svjetlo, ali i reflektira pa tako npr. može odrediti vrstu i boju polimera ili nekog materijala [32].



Slika 20. TOMRA AUTOSORT stvarni izgled [32]

7.1. Automatska klasifikacija materijala robotskim opipom

Klasifikacija materijala robotskim opipom koja se još naziva meka robotika (eng. *soft robotics*), nudi se kao prirodno rješenje za razvrstavanje otpada jer zahtjeva manje računanja za planiranje putanje i hvatanje predmeta u neurednom okruženju. Ova tehnologija još je u razvoju, a glavni izazov je proizvesti dovoljno robusne robote koji bi mogli manipulirati i oštrim predmetima na koje se često nailazi u takvim okruženjima. Unatoč izazovima ova tehnologija ima potencijal unaprijediti automatizirane postupke recikliranja. Iako mnoga reciklaža postrojenja posjeduju automatizirane sustave za razvrstavanje kao što je razvrstavanje pomoću vrtložnih struja ili ono temeljeno na računalnom vidu, potrebno je još mnogo manualnog rada kako bi se sortirali predmeti koji ne prođu kroz automatiziran sustav. Upotrebom robota koji bi mogli putem opipa klasificirati materijal kao što su plastika, staklo, metal postigla bih se veća čistoća recyklata, smanjila bi se opasnost za zaposlenike uz benefit ekonomičnosti [33].



Slika 21. Demonstracija klasifikacije materijala opipom [33]

Iz slike (slika 21.) vidljiva je demonstracija robotske ruke koja drži predmet sa šiljcima. Hvataljke ove robotske ruke izrađene su od posebnih amortizirajućih cilindara koji svojom deformacijom omogućuju da se robotska hvataljka prilagodi uz predmet. Senzori koji se koriste su kapacitivni, senzori tlaka i senzori deformacije [33].

8. Efikasnost robotskih u odnosu na standardna postrojenja za recikliranje otpada

Klasična postrojenja za sortiranje otpada najčešće su velika postrojenja koja zauzimaju mnogo prostora te troše mnogo energije. Za pokretanje takvih postrojenja potreban je pozamašan početni kapital uz visoke operativne troškove i troškove održavanja. Metode razvrstavanja otpada koje se koriste u takvim postrojenjima najčešće su ograničene efikasnosti te mogu izdvojiti samo određene frakcije otpada koji mora biti pred obrađen kako bi razvrstavanje bilo moguće.

Valja napomenuti da je klasičnim postrojenjima ili manjim postrojenjima potreban i ljudski rad što može dovesti do opasnosti po zaposlenike, samim tim takva vrsta manualnog posla odrađenog od strane ljudi spada u opasne poslove i samim tim donosi veće operativne troškove za plaće djelatnika uz veći rizik za njihovo zdravlje.

Glavne prednosti robotskih sustava za recikliranje otpada:

- Mogućnost rada 24/7 što povećava učinkovitost operativnog poslovanja. Robotski sustavi zahtijevaju malo održavanja uz visoke performanse i izdržljivost.
- Otpad kojeg se prije nije isplatilo razvrstavati zbog prevelike kompleksnosti posla robotima ne predstavlja problem
- Uvođenjem dodatnog radnog vremena mogu se sortirati materijali čije sortiranje prije nije bilo ekonomski isplativo zbog utroška energije
- Decentralizacija + jednostavan proces = veća dobit. Robotski sustav može se postaviti u malim postrojenjima čime se smanjuju troškovi transporta otpada u neko drugo veće postrojenje.
- Povećana dobit od recikliranja i reducirani troškovi otpada. Reciklirani materijal visoke čistoće postiže veću cijenu i lakše se plasira na tržište.
- Smanjeni troškovi rada u odnosu na standardna postrojenja, roboti se ne umaraju i rade bez prestanka što štedi puno sati rada i povećava sigurnost djelatnika smanjujući rizik prilikom ručnog razvrstavanja otpada [34].

8.1. Ekonomska analiza vremena povrata investicije ZenRobotics robotskog sustava u odnosu na standardni sustav za recikliranje otpada

Prema podacima iz studije objavljene 2016. godine raspon cijena sustava za recikliranje otpada ZenRobotics kreće se između 600.000 i 800.000 eura. Operativni trošak postrojenja sastoji se od troškova održavanja, troškova električne energije i licenciranja programske podrške. Niska potrošnja energije od 14kW na sat i minimalan trošak održavanja po ruci robota od minimalno 2 eura po satu rezultira niskim troškovima rada. Uz troškove rada dodatan trošak je i licenca programske podrške od 2.350 eura na mjesec [34].

Tablica 1.1 Izračun isplativosti investicije u odnosu na dobit od standardne predade otpada [35].

Kriterij usporedbe	ZenRobotics sustav	Ručni sustav
Prosječna brzina uzimanja predmeta	3000kg/h	800 do 1200 komada
Godišnja količina prerađenog otpada	8900 tona	2310 tona
Prihod = godišnja masa obrađenog otpada pomnožena s procijenjenom cijenom otpada	500.000,00 EUR	115.500,00 EUR
Cijena ZenRobotics sustava	600.000,00 EUR	
Troškovi licence i pogona rada	40.000 EUR	
Vrijeme povrata investicije u odnosu na predviđenu dobit / vrijednost investicije podijeljena s godišnjim prihodom	1,28 godina	

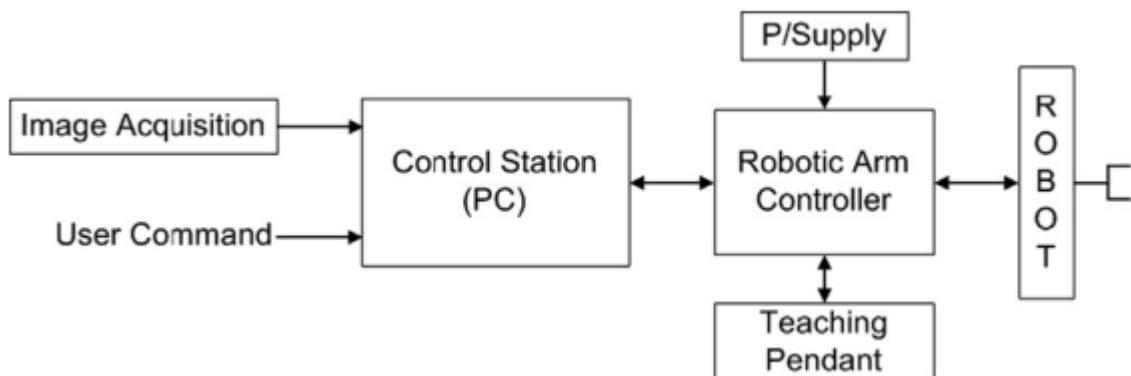
Ručnim sustavom razvrstavanja otpada moguće je ostvariti dobit od 115.500,00 eura, dok se sustav ZenRobotics daje mogućnost ostvarivanja godišnjeg prihoda od 500.000 eura [35].

9. Praktični dio – prikaz sustava za recikliranje otpada

Digitalni sustavi za upravljanje omogućuju jednostavan i brz pristup komunikaciji sa robotom. Jedna od glavnih zadaća robotskog sustava je i prikupljanje informacija koje su neophodne za rad robota. To se postiže senzorima koji su ujedno i osjetila robota te putem kojih robotski sustav prikuplja informacije. Spajanje na robotski sustav može se izvršiti direktno vezom između računala i robotskog kontrolera, putem intranet mreže ili na daljinu. Povezanost je potrebna kako bi se mogao nadzirati rad sustava, ažurirati sustav i mnoge druge operacije koje su potrebne za normalno funkcioniranje.

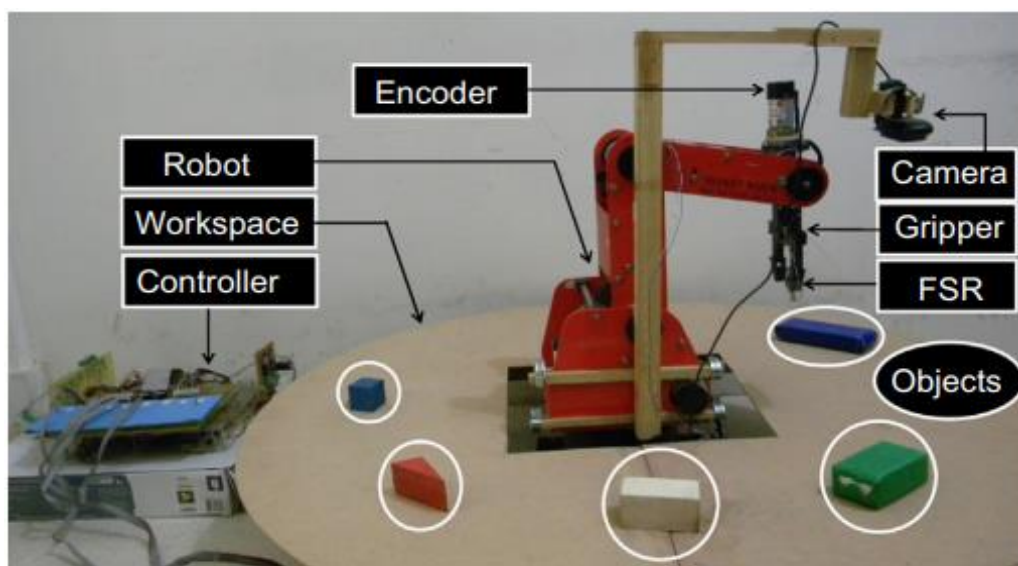
9.1. Primjer autonomnog upravljanja 6 DOF robotske ruke

Na primjeru robotske platforme 6 DOF (eng. *Degrees Of Freedom*) ED korporacije iz Južne Koreje bit će prikazan primjer komunikacije između robotske ruke i računala, točnije principi komunikacije između hardvera i softvera. Ovaj primjer uzet je iz razloga jer su ovakve robotske ruke široko rasprostranjene u svrhu istraživanja i učenja.



Slika 22. Blok dijagram 6 DOF robotske ruke [36]

Robotski manipulator prikazan na slici (slika 22.) može biti kontroliran direktno s glavnog računala ili sa upravljačke konzole. Platforma posjeduje sposobnost računalnog vida u stvarnom vremenu i osjetilo opipa na kraju robotske ruke [36].



Slika 23. Robotski manipulator 6 DOF [36]

9.2. Komunikacija između računala i robotske ruke

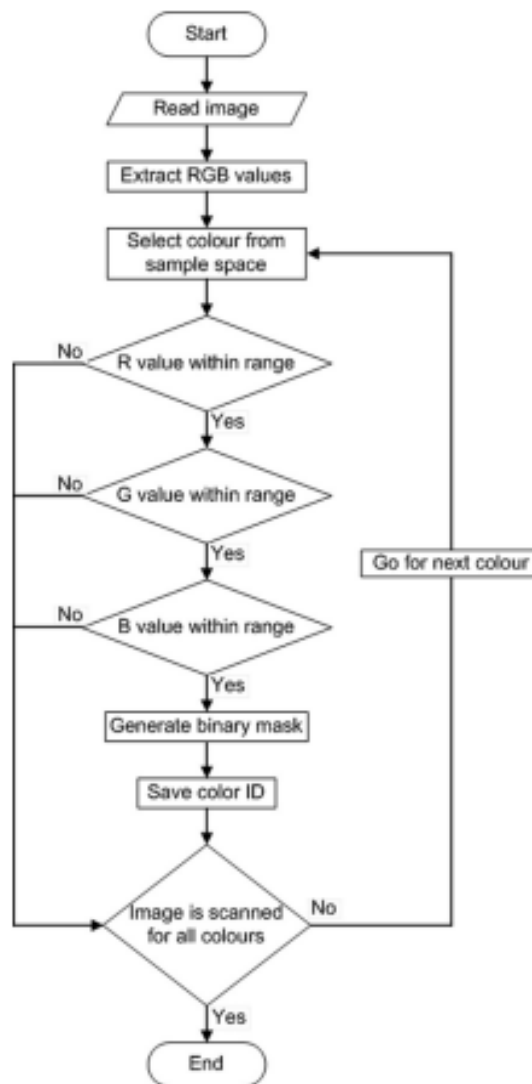
Svaki zglob robotske ruke posjeduje određeni manipulativni prostor. Sam zglob robotske ruke može se okretati i hvatati predmete sa osjetilima pritiska na kraju hvataljka. Svaki zglob je opremljen svojim motorom. Cijeli sustav kontrolira se uz pomoć standardnog računala i upravljačke konzole. Centralno mjesto u sustavu zauzima kontroler (slika 24.) čija je funkcija pružanja ulaznih portova za upravljanje i autonomno odlučivanje pomoću računalnog vida. Kontroler posjeduje mogućnost od stotinjak visoko složenih naredbi što čini ovu platformu svestranom. Kontrolerom se može upravljati u dva moda rada, a to je putem računala ili putem upravljačke konzole. Upravljačkom konzolom možemo naučiti robotsku ruku koordinate na način da je prvi puta manualno odvedemo do zadanih koordinata, a nakon toga putem kontrolera pohranimo zadane koordinate u računalo te ih prema potrebi možemo upotrijebiti i kasnije [37].



Slika 24. 6 DOF kontroler [37]

9.3. Sortiranje bazirano na prepoznavanju boje i oblika

Prepoznavanje boja u ovoj platformi zasniva se na RGB modelu, u kojem se niz crvenih, plavih i zelenih slojeva koristi za identifikaciju objekta skeniranjem slike za svaku definiranu boju. Vrijednosti koje se dobiju skeniranjem označavaju prisustvo ili odsustvo određene boje. Svakoj boji se potom dodjeljuje kod za vođenje evidencije objekata u radnom prostoru. Radi se o skupu binarnih brojeva (binarna maska) koji se generiraju za svaki objekt otkriven senzorom. Ovaj cijeli proces se zasniva na komunikaciji između računala, centralnog kontrolnog sustava i senzora koji prikupljaju informacije [37].



Slika 25. Dijagram toka procesa detekcije boja [37]

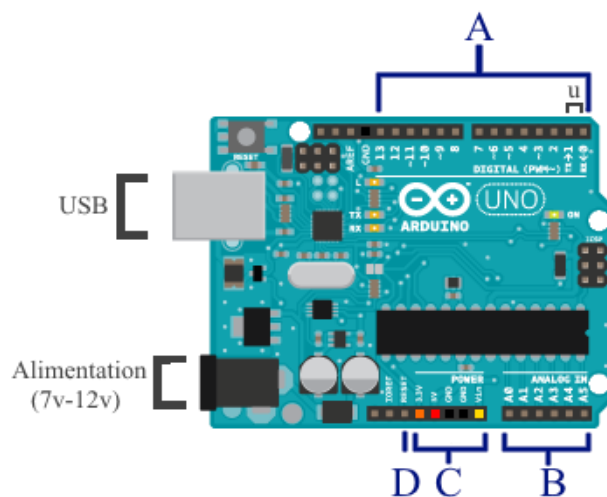
Generirana binarna maska potom se koristi i za određivanje ostalih svojstava predmeta uključujući njegovu veličinu i oblik. Veličina se određuje po principu brojanja piksela u binarnoj maski. Jednom kad se svojstva objekta identificiraju dodjeljuje mu se poseban identifikacijski broj [37].

9.4. Primjer uspostavljanja komunikacije između senzora robota i računala baziranog na Arduino tehnologiji

Arduino je ime za otvorenu softversku i računalnu platformu koja omogućava spajanje računala sa strojevima. Stvaranje interaktivnih okruženja glavni je zadatak Arduino elektroničkih i softverskih komponenti koje se mogu jednostavno povezati. Središnji dio Arduina su mikrokontroleri koji se mogu programirati za određene zadaće. Cilj ove tehnologije je omogućiti jednostavnu izradu prototipova raznih sklopova [38].

9.4.1. Princip rada Arduino sklopova

Arduino pločica bazirana je na AMTEL AVR mikrokontroleru. Mikrokontroleri su ugrađeni integrirani elektronički uređaji koji imaju sposobnost obavljanja određenih operacija kao računala u kontroli nekog specifičnog procesa. Mikrokontroleri su obično predodređeni za specifične operacije, stoga se i na temelju toga programiraju za određeni zadatak kao što je upravljanje nekim sklopom ili prikupljanje podataka sa senzora. Programiranjem mikrokontrolera u njega se pohranjuju instrukcije za obavljanje tih istih zadataka [39].



Slika 26. Sklop Arduino [40]

Pločica Arduino mikrokontrolera posjeduje izlazne i ulazne portove za različite svrhe od programiranja pa do spajanja na neki vanjski sklop ili dodatan mikrokontroler.

„Arduino pločica ostvaruje komunikaciju koristeći protokole za serijsku komunikaciju. Serijska komunikacija je proces slanja dijelova podataka (bajtova) preko jednog kanala, poznatog pod nazivom bus. Podaci se u serijskoj komunikaciji šalju uzastopno jedan za drugim, za razliku od paralelne komunikaciju gdje se više bitova šalju istovremeno preko više kanala. Prednosti serijske komunikacije u odnosu na paralelnu:






- Manji broj žica omogućuje lakšu obradu vremena propagacije.
- S manjim brojem kanala preslušavanje je otežano u odnosu na veći broj kanala.
- Ušteda prostora i novca, zbog manjeg broja žica, što daje mogućnost i povećanja sigurnosti tog kanala“ [39].

„U današnje doba pojas propusnosti serijske komunikacije obuhvaćaju raspon od nekoliko kilobita u sekundi do nekoliko terabita u sekundi. Serijska komunikacija se ostvaruje izmjenom binarnih vrijednosti, te se brzina izražava u baud-ima. Jedan baud označava prijenos jednog simbola po sekundi. Simbol može biti i višebitni“ [39].

□ Arduino senzori

Arduino sklopovi imaju i svojstvo prikupljanja podataka putem senzora. Takvi senzori upotrebljavaju se i za robote u svrhu komunikacije između robota i računala.

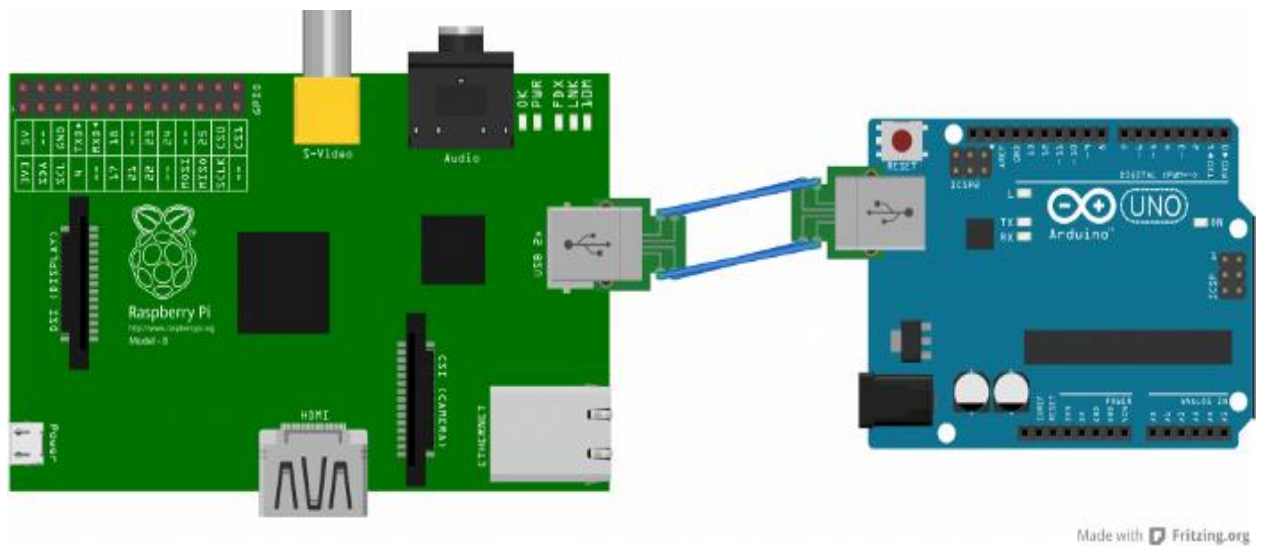
Neke od vrsta senzora su: senzor temperature, akcelerometar, plinski senzor i slično.

 JoyStick XY	 Flame	 RGB LED	 Heartbeat	 Light Cup	 Hall magnetic
 Relay	 Linear Hall	 SMD RGB	 7Color flash	 Tilt switch	 TEMP 18B20
 Big sound	 Touch	 Two-color	 Laser emit	 Ball switch	 Analog temp
 Small sound	 Digital temp	 Two-color	 Button	 photoresistor	 TR emission
 Tracking	 Buzzer	 Reed switch	 Shock	 temp and humidty	 IR receiver
 Avoid	 Passive buzzer	 Mini Reed	 Rotary encoders	 Analog Hall	 Tap module Light blocking

Slika 27. Vrste Arduino senzora [38]

9.4.2. Komunikacija između Arduino sklopa i računala Raspberry Pi

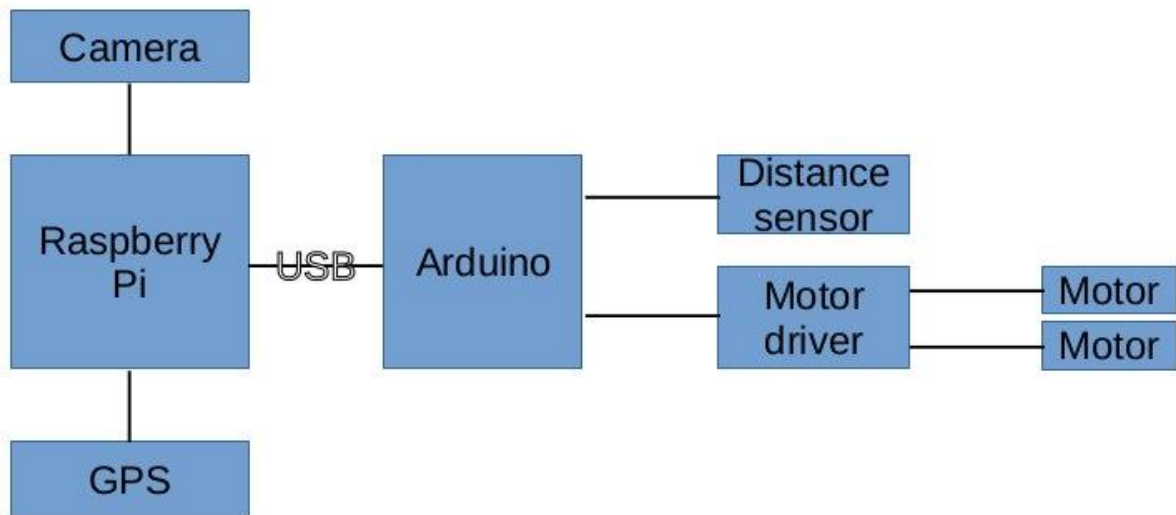
Raspberry Pi je minijaturno računalo koje se koristi za razne projekte pa tako se može spojiti i sa Arduino sklopom. Funkcionalnost takvih računala vrlo je slična normalnim računalima što pruža razne mogućnosti u svrhu automatizacije procesa. Veza između ova dva sklopa može se ostvariti USB konekcijom koja bi služila za prijenos senzorskih podataka sa Arduino sklopa na Raspberry Pi računalo [41].



Slika 28. Komunikacija između Arduino sklopa i Raspberry Pi računala [41]

Upotrebom vanjskog izvora napajanja poput baterije ili akumulatora i napajanja Raspberry Pi računala automatski preko USB porta napajamo i Arduino sklop [41].

Kao takve ih možemo postaviti na robotski sustav i prikupljati podatke putem senzora spojenih na Arduino sklop. Da bi to postigli potrebno je isprogramirati Arduino kako bi mogao očitavati podatke senzora koji mu pristižu i zatim ih proslijediti do računala putem USB konekcije.



Slika 29. Blok dijagram spajanja Raspberry i Arduino sustava [42]

Da bi uspjeli u namjeri autonomnog pokretanja robota komunikacija između Raspberry i Arduino sustava mora biti omogućena za što postoje određeni preduvjeti:

1. Raspberry Pi računalo mora dostaviti komande za pokretanje robota
2. Arduino mora konstantno obavještavati računalo o stanju baterije, vrzini, položaju i slično
3. Arduino mora slati putem senzora i upozoravati računalo na nenadane događaje poput sudara, naglog prekida i svih vanjskih utjecaja detektiranih sensorima [42].

10. Primjer računalnog vida detekcijom objekata

Detekcija objekata na slici ili video snimci ključna je sposobnost svakog sustava za postizanje računalnog vida, detekcija objekata je postupka pronalaženja objekata iz stvarnog svijeta kao što su vozila, građevine, ljudi, životinje [43].

Za izradu praktičnog djela upotrebljavao se programski jezik Python i njegova biblioteka OpenCV (eng. *Open Source Computer Vision Library*) koja je jedna od najčešće korištenih biblioteka u području računalnog vida sa mogućnošću integracije na različite operacijske sustave i uređaje. OpenCV biblioteka otvorenog koda najčešće se koristi u području industrije u raznim proizvodnim procesima, kao primjer možemo navesti detekciju proizvoda na pokretnoj traci koji ne zadovoljavaju standarde proizvodnje ili primjer u medicini kada se uspoređuju mikroskopske i rendgenske slike u svrhu detekcija promjena. Također može se upotrebljavati kao sustav vida za autonomna vozila ili u ovom primjeru kao sustav robotskog vida u svrhu recikliranja otpada [44].

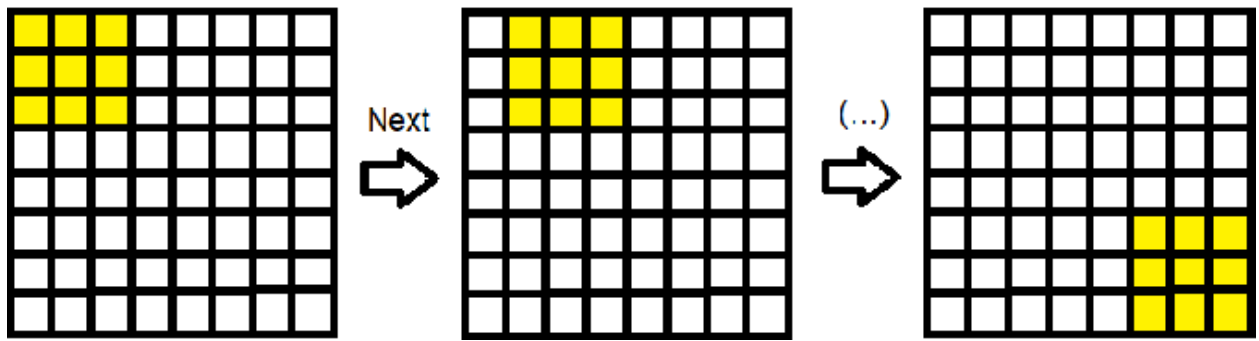
10.1. Opis procesa detekcije objekata na temelju podudarnosti predložaka

Računalni vid u ovom slučaju postiže se detektiranjem slike sa već unaprijed prikupljenim predlošcima. Princip rada ovog algoritma je taj da se prethodno pohranjen predložak uspoređuje sa slikom ili nekim djelom slike uz pomoć metoda koje su ubiti potprogrami specijalizirani za određenu radnju, a u ovom slučaju svrha im je za komparacija predložaka i slike koja se obrađuje. Biblioteka OpenCV posjeduje šest metoda (slika 30.) za uspoređivanje uzoraka.

```
9 methods = [cv2.TM_CCOEFF, cv2.TM_CCOEFF_NORMED, cv2.TM_CCORR,  
10           cv2.TM_CCORR_NORMED, cv2.TM_SQDIFF, cv2.TM_SQDIFF_NORMED]  
11
```

Slika 30. Metode za testiranje računalnog vida temeljenog na prepoznavanju objekata

Svaku sliku možemo promatrati kao dvodimenzionalni niz. Odnosno kao 2d funkciju gdje su x i y planarne koordinate.



Slika 31. Princip spajanja uzoraka [45]

Slika se obrađuje na način da se predložak uspoređuje sa svakim djelom slike kako bih se našli dijelovi koji se podudaraju. Svaki piksel predstavlja dio niza. Kada se poklope najbliže vrijednosti metode programskog koda zadužene za klasifikaciju daju rezultat da je uzorak pronađen.

Metoda uspoređivanja predložaka radi principu pretraživanja i pronalaženja lokacije slike predložka u već spremljenoj slici kao što je prikazano na slici (slika 31.).

Ova biblioteka dolazi sa funkcijom :

```
cv.matchTemplate()
```

pripremljena za tu svrhu lociranja uz pomoć slike predložka. Jednostavno se slika predložka pomiče po ulaznoj slici, te se uspoređuju sličnosti. Kao rezultat dobiva se slika sivih tonova, gdje svaki piksel označava podudarnost sa predložkom [44].

Ako je ulazna slika veličine umnoška širine i visine ($a \times b$), a veličina slike predložka također umnožak širine i visine ($c \times d$). Izlazna slika će imati veličinu $(a-c+1, b-d+1)$ dok nam funkcija:

```
minMax loc()
```

služi za pronalaženje maksimalne/minimalne vrijednosti podudarnosti [44].

Kod metode uspoređivanja predložaka postoje određeni izazovi prilikom detekcije slike :

- skaliranje
- promjena boje
- rotacija
- svjetlost
- modifikacija.

Ako je ulazna slika mijenjana na bilo koji način može doći do poteškoća prilikom obrade.

10.2. Koraci u detekciji objekata putem elektroničkog vida upotrebom biblioteke OpenCV

U sljedećem djelu navedeni su primjeri programskog koda za detekciju objekata unutar slike baziranih na usporedbi predložaka OpenCV biblioteke programskog jezika Python. Za primjer su odabrane slike ambalažne koje obrađene po principu uspoređivanja predložaka [46].

1. Uvoz slike predloška i slika koja će se uspoređivati sa njom pohranjena u varijable (slika 32.)

```
4 img = cv2.imread('assets/otpad.jpg', 0)
5 template = cv2.imread('assets/limenka3.jpg', 0)
6
```

Slika 32. Uvoz slike i predloška

2. Metode kojima se uvezena slika uspoređuje sa predloškom, sve metode međusobno se razlikuju u svojoj matematičkoj podlozi na temelju koje izvršavaju detekciju objekta na slici (Slika 33).

```
methods = [cv2.TM_CCOEFF, cv2.TM_CCOEFF_NORMED, cv2.TM_CCORR,
           cv2.TM_CCORR_NORMED, cv2.TM_SQDIFF, cv2.TM_SQDIFF_NORMED]
```

Slika 33. Metode uspoređivanja

3. Uz pomoć for petlje provjerava se svaka metoda koja se koristi kod detekcije objekata cv.matchTemplate() funkcija koristi se provjeravanje podudarnosti predložaka. minMaxLoc(result) provjerava rezultat i služi nam za pokazivanje minimalne/maksimalne područja podudarnosti (Slika 34.).

```
for method in methods:
    img2 = img.copy()

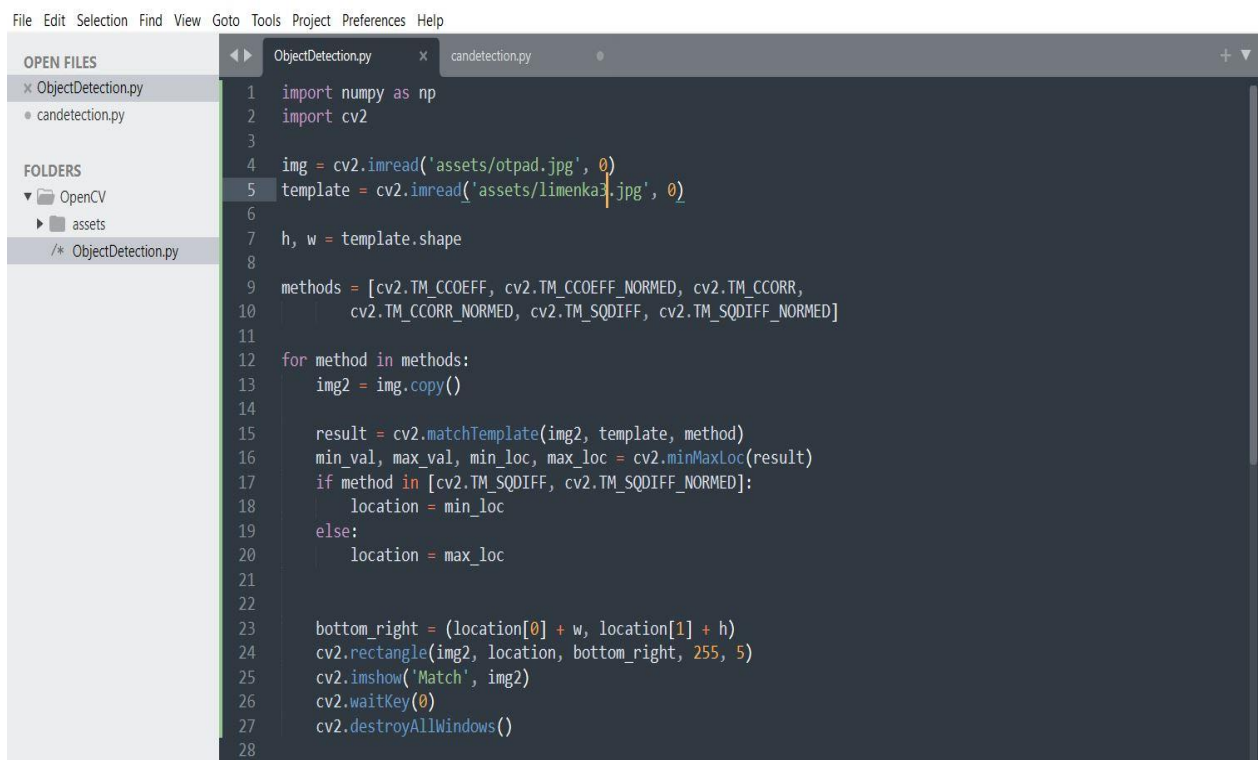
    result = cv2.matchTemplate(img2, template, method)
    min_val, max_val, min_loc, max_loc = cv2.minMaxLoc(result)
    if method in [cv2.TM_SQDIFF, cv2.TM_SQDIFF_NORMED]:
        location = min_loc
    else:
        location = max_loc
```

Slika 34. For petlja i detekcija objekata

4. Ispisuje se i prikazuje rezultat detekcije objekata na slici za svaku pojedinu metodu u zasebnom prozoru (Slika 35).

```
bottom_right = (location[0] + w, location[1] + h)
cv2.rectangle(img2, location, bottom_right, 255, 5)
cv2.imshow('Match', img2)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()
```

Slika 35. Ispis rezultata obrade



```
File Edit Selection Find View Goto Tools Project Preferences Help
ObjectDetection.py candetection.py
OPEN FILES
x ObjectDetection.py
• candetection.py
FOLDERS
v OpenCV
  assets
/* ObjectDetection.py
1 import numpy as np
2 import cv2
3
4 img = cv2.imread('assets/otpad.jpg', 0)
5 template = cv2.imread('assets/limenka3.jpg', 0)
6
7 h, w = template.shape
8
9 methods = [cv2.TM_CCOEFF, cv2.TM_CCOEFF_NORMED, cv2.TM_CCORR,
10           cv2.TM_CCORR_NORMED, cv2.TM_SQDIFF, cv2.TM_SQDIFF_NORMED]
11
12 for method in methods:
13     img2 = img.copy()
14
15     result = cv2.matchTemplate(img2, template, method)
16     min_val, max_val, min_loc, max_loc = cv2.minMaxLoc(result)
17     if method in [cv2.TM_SQDIFF, cv2.TM_SQDIFF_NORMED]:
18         location = min_loc
19     else:
20         location = max_loc
21
22
23     bottom_right = (location[0] + w, location[1] + h)
24     cv2.rectangle(img2, location, bottom_right, 255, 5)
25     cv2.imshow('Match', img2)
26     cv2.waitKey(0)
27     cv2.destroyAllWindows()
28
```

Slika 36. Cjelovit programski kod za detekciju objekata putem biblioteke OpenCV

10.2.1. Rezultat detekcije objekta na temelju podudarnosti predložaka

U ispod prikazanim primjerima prikazane su slike ambalaže i uzorak sa kojim su iste uspoređivane (slika 37. i slika 38.)



Slika 37. Primjer 1. Detekcije objekata

Na primjerima je vidljivo da je računalo uspješno prepoznati o kojem se predmetu na slici radi. Iz toga možemo zaključiti da su ranije spomenute metode za pronalaženje objekata na slici dale su pozitivan rezultat.

Slika koja se obrađuje



Predložak



Rezultat 1.



Rezultat 2.



Slika 38. Primjer 2. Detekcije objekata

Sličan primjer u kojem je računalo na temelju metode uspoređivanja predložaka uspješno prepoznati o kojem predmetu se radi s podjednakim rezultatima kao i na prethodnom primjeru što je vidljivo i na slici (slika 38.).

11. Zaključak

Robotski sustavi globalnom gledano predstavljaju budućnost. Njihova efikasnost i ekonomičnost vidljiva je i u sustavima za recikliranje otpada gdje kvalitetnije i brže obavljaju poslove za razliku od čovjeka uz razne prednosti poput eliminacije zdravstvenog rizika zaposlenika. Ekološka osviještenost i promoviranje benefita automatiziranih sustava ključni su za efikasno recikliranje koje se može obavljati i manualno, ali uz puno veći trošak i manju efikasnost.

Početna investicija u robotske sustave za recikliranje otpada je pozamašna, no ovakvi sustavi brzo vrte ulog u svoj početni kapital i isplaćuju svoje održavanje, a razlog tome je njihovo neograničeno radno vrijeme i veća efikasnost rada. Kvaliteta reciklata u odnosu na onaj koji se proizvede u standardni pogonima ručnim razvrstavanjem neusporedivo je bolja, a samim time postiže se i veća kvaliteta zbog cijene i čistoće izlaznog materijala koji će se oporabiti.

Razvojem umjetne inteligencije koja nezaustavljivo korača prema naprijed i umrežavanjem sa strojevima, kao što je to u ovom slučaju računalni vid koji može prepoznati objekte putem kamere uz puno drugih mogućnosti primjene, ostvaruje se napredak i suradnja na interdisciplinarnom nivou. Spajanjem umjetne inteligencije i robotskih sustava otvaramo mogućnost razvoja svih grana industrije uz uštedu važnih nam resursa kojih je sve manje jer njihovi izvori nisu neiscrpni.

Iz primjera je vidljivo da autonomne robotske sustave ne smijemo gledati kako konkurenciju ljudima, već kao priliku koja može otkloniti opasnost koja prijete ljudima obavljajući repetitivne, zamorne, i ostale vrste zahtjevnih zadataka.

12. Literatura

- [1] "Robotika | Hrvatska tehnička enciklopedija." <https://tehnika.lzmk.hr/robotika/> (accessed Aug. 16, 2022).
- [2] L. Bungler, I. Chan, N. Cotto, M. Sun, B. Calli, and S. J. Wodin-Schwartz, "A Major Qualifying Project," p. 72.
- [3] "Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries," *BCG Global*, Aug. 19, 2020. https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries (accessed Sep. 14, 2022).
- [4] IZ, "Što je Industrija 4.0?," *Happtory*, Mar. 20, 2020. <https://www.happtory.hr/post/industrija-4-0> (accessed Sep. 14, 2022).
- [5] "DI_Industry4.0.pdf." Accessed: Sep. 14, 2022. [Online]. Available: https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/us32959-industry-4-0/DI_Industry4.0.pdf
- [6] "Robotika_uvod.pdf."
- [7] "GEOMETRIJA I KINEMATIKA ROBOTA Osnovni pojmovi Industrijski robot." <https://slidetodoc.com/geometrija-i-kinematika-robota-osnovni-pojmovi-industrijski-robot/> (accessed Sep. 14, 2022).
- [8] "ROBOT GENERATIONS - 21118," *Robotpark ACADEMY*, Mar. 28, 2013. <http://www.robotpark.com/academy/robot-generations-21118/> (accessed Aug. 16, 2022).
- [9] "generacije." <http://web.studenti.math.pmf.unizg.hr/~btrojko/semrac/generacije%20robota.html> (accessed Aug. 16, 2022).
- [10] "news Archives," *Industrial Vision Systems*. <https://www.industrialvision.co.uk/category/news> (accessed Sep. 15, 2022).
- [11] "What is Computer Vision? | IBM." <https://www.ibm.com/topics/computer-vision> (accessed Sep. 12, 2022).
- [12] "Hrga_Zbornik_1-2_2018.pdf."
- [13] Reinhard Klette Enciklopedija site:wikihrrh.top, *Concise Computer Vision Enciklopedija site:wikihrrh.top*. 2014.
- [14] "292457.pdf." Accessed: Aug. 25, 2022. [Online]. Available: <https://hrcak.srce.hr/file/292457>
- [15] "Figure 3. SIFT Algorithm steps," *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/SIFT-Algorithm-steps_fig1_342148975 (accessed Sep. 14, 2022).
- [16] M. Tyagi, "Viola Jones Algorithm and Haar Cascade Classifier," *Medium*, Jul. 16, 2021. <https://towardsdatascience.com/viola-jones-algorithm-and-haar-cascade-classifier-ee3bfb19f7d8> (accessed Sep. 14, 2022).
- [17] Milanović Z and Sinčić D, *Mehanička obrada čvrstog otpada*. Čakovec: Zrinski d.d., 2018.
- [18] "Libs_Laser-induced_breakdown_spectroscopy.jpg (710×553)." https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/32/Libs_Laser-induced_breakdown_spectroscopy.jpg (accessed Sep. 14, 2022).
- [19] "Fig. 1. Schematic of X-ray imaging system." *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-X-ray-imaging-system_fig6_248449554 (accessed Sep. 14, 2022).
- [20] Patrick, "How Does an Eddy Current Separator Work? | GTEK MAGNET," Jun. 02, 2020. <https://gtek-magnet.com/how-does-an-eddy-current-separator-work/> (accessed Sep. 14, 2022).
- [21] "382926.pdf." Accessed: Sep. 12, 2022. [Online]. Available: <https://hrcak.srce.hr/file/382926>

- [22] “China: Plastic imports down 99 percent, paper down a third - Resource Recycling.” <https://resource-recycling.com/recycling/2019/01/29/china-plastic-imports-down-99-percent-paper-down-a-third/> (accessed Sep. 12, 2022).
- [23] Reeve, A., *Managing Data in Motion: Data Integration Best Practice, Techniques and Technologies*. Waltham: Morgan Kaufmann.
- [24] K. Kocijan, “Big Data: kako smo došli do Velikih podataka i kamo nas oni vode,” 2014, pp. 37–62.
- [25] “Što možemo s otpadom,” *Portal Za ljepšu našu*. <https://zaljepsunasu.hr/sto-mozemo-s-otpadom/> (accessed Aug. 17, 2022).
- [26] “Direktiva (EU) 2018/ Europskog parlamenta i Vijeća od 30. svibnja 2018. o izmjeni Direktive 2008/98/EZ o otpadu,” p. 32.
- [27] R. Sarc, “The ‘ReWaste4.0’ Project—A Review,” *Processes*, vol. 9, no. 5, Art. no. 5, May 2021, doi: 10.3390/pr9050764.
- [28] R. Sarc, A. Curtis, L. Kandlbauer, K. Khodier, K. E. Lorber, and R. Pomberger, “Digitalisation and intelligent robotics in value chain of circular economy oriented waste management – A review,” *Waste Management*, vol. 95, pp. 476–492, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.06.035.
- [29] A. Shreyas Madhav, R. Rajaraman, S. Harini, and C. C. Kiliroor, “Application of artificial intelligence to enhance collection of E-waste: A potential solution for household WEEE collection and segregation in India,” *Waste Manag Res*, vol. 40, no. 7, pp. 1047–1053, Jul. 2022, doi: 10.1177/0734242X211052846.
- [30] “Superior waste recycling robots | ZenRobotics.” <https://zenrobotics.com/en/> (accessed Aug. 27, 2022).
- [31] “Artificial intelligence,” *AMP Robotics*. <https://www.amprobotics.com/artificial-intelligence> (accessed Sep. 14, 2022).
- [32] “Transforming how we obtain, use and reuse our planet’s resources - TOMRA.” <http://www.tomra.com/en> (accessed Sep. 04, 2022).
- [33] L. Chin, J. Lipton, M. C. Yuen, R. Kramer-Bottiglio, and D. Rus, “Automated Recycling Separation Enabled by Soft Robotic Material Classification,” in *2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, Seoul, Korea (South), Apr. 2019, pp. 102–107. doi: 10.1109/ROBOSOFT.2019.8722747.
- [34] “CDW_Task 2_Case studies_ZenRobotics.pdf.”
- [35] V. Kaučić, “NOVE METODE U RAZVRSTAVANJU OTPADA,” p. 59.
- [36] S. Manzoor, R. Ul Islam, A. Khalid, A. Samad, and J. Iqbal, “An open-source multi-DOF articulated robotic educational platform for autonomous object manipulation,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 30, no. 3, pp. 351–362, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.rcim.2013.11.003.
- [37] J. Iqbal, M. Ul Islam, and H. Khan, “Modeling and analysis of a 6 DOF robotic arm manipulator,” *Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering*, vol. 3, pp. 300–306, Jan. 2012.
- [38] “Arduino - Home.” <https://www.arduino.cc/> (accessed Sep. 25, 2022).
- [39] “776579.diplomski_Zavrna_verzija_DinoCarFESB.pdf.”
- [40] SadCloud, *Français : schema d’explication d’une carte arduino*. 2014. Accessed: Sep. 15, 2022. [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schema_arduino.png
- [41] J. Ceroni, “Setting Up a Real-Time Communication Network Between Robot/IoT Sensor Data and a Computer Interface,” *Medium*, Apr. 07, 2019. <https://medium.com/@jackceroni/setting-up-a-real-time-communication-network-between-robot-iot-sensor-data-and-a-computer-interface-311a3744a8ab> (accessed Sep. 15, 2022).
- [42] “Controlling a robot with Raspberry Pi and Arduino - Blog - Raspberry Pi - element14 Community.” <https://community.element14.com/products/raspberry-pi/b/blog/posts/controlling-a-robot-with-raspberry-pi-and-arduino> (accessed Sep. 15, 2022).

- [43] “What Is Object Detection?” <https://nl.mathworks.com/discovery/object-detection.html> (accessed Sep. 21, 2022).
- [44] “Home,” *OpenCV*. <https://opencv.org/> (accessed Sep. 14, 2022).
- [45] A. A. Süzen, B. Duman, and B. Şen, “Benchmark Analysis of Jetson TX2, Jetson Nano and Raspberry PI using Deep-CNN,” *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, 2020, doi: 10.1109/HORA49412.2020.9152915.
- [46] “techwithtim - Overview,” *GitHub*. <https://github.com/techwithtim> (accessed Sep. 25, 2022).

13. Popis tablica

Tablica 1.1 Izračun isplativosti investicije u odnosu na dobit od standardne predade otpada [35].....	31
---	----

14. Popis slika

Slika 1. Razvrstavanje otpada [2]	2
Slika 2. Osnovni prikaz industrijskog robota [7].....	5
Slika 3. Blok dijagram – princip rada sustava za recikliranje	7
Slika 4. Osnovna struktura sustava za sortiranje [10].....	8
Slika 5. SIFT Algoritam [15].....	11
Slika 6. Haarove značajke [16].....	12
Slika 7. Princip rada laserske spektroskopije [18].....	13
Slika 8. Princip rada X- zrake [19]	14
Slika 9. Princip rada Eddy current separatora [20].....	14
Slika 10. Koraci razvoja modela strojnog učenja [21]	15
Slika 11. ReWaste projekt pametnog upravljanja otpadom [27].....	20
Slika 12. Digitalizacija procesa upravljanja otpadom [27].....	21
Slika 13. Rezultati obrade plastičnog otpada skeniranjem [27]	22
Slika 14. Dijagram toka E-waste robotskog sustav [29].....	23
Slika 15. Primjeri robotskih sustava poduzeća ZenRobotics	24
Slika 16. ZenRobotics sortiranje [30].....	25
Slika 17. AMP Cortex [31].....	26
Slika 18. AMP računalni vid [31].....	26
Slika 19. TOMRA AUTOSORT [32].....	27
Slika 20. TOMRA AUTOSORT stvarni izgled [32].....	28
Slika 21. Demonstracija klasifikacije materijala opipom [33]	29
Slika 22. Blok dijagram 6 DOF robotske ruke [36]	32
Slika 23. Robotski manipulator 6 DOF [36].....	33
Slika 24. 6 DOF kontroler [37].....	33
Slika 25. Dijagram toka procesa detekcije boja [37]	34
Slika 26. Sklop Arduino [40].....	35
Slika 27. Vrste Arduino senzora [38]	36
Slika 28. Komunikacija između Arduino sklopa i Raspberry Pi računala [41].....	37
Slika 29. Blok dijagram spajanja Raspberry i Arduino sustava [42].....	38
Slika 30. Metode za testiranje računalnog vida temeljenog na prepoznavanju objekata	39
Slika 31. Princip spajanja uzoraka [45]	40
Slika 32. Uvoz slike i predložka	41
Slika 33. Metode uspoređivanja	41

Slika 34. For petlja i detekcija objekata.....	41
Slika 35. Ispis rezultata obrade	42
Slika 36. Cjelovit programski kod za detekciju objekata putem biblioteke OpenCV	42
Slika 37. Primjer 1. Detekcije objekata	43
Slika 38. Primjer 2. Detekcije objekata	44



**IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU**

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, JANKO JAVČEVEC (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom ROBOTSKI SUSTAVI U RECIKLIRANJU OTPADA (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

J. Javčevc
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, JANKO JAVČEVEC (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom ROBOTSKI SUSTAVI U RECIKLIRANJU OTPADA (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

J. Javčevc
(vlastoručni potpis)

4.8%

Date: 2022-09-25 09:12 UTC

* All sources 54 | Internet sources 47 | Organization archive 4 | Plagiarism Prevention Pool 3

<input checked="" type="checkbox"/>	[0]	eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/?uri=CELEX:32018L0851	0.6%	16 matches
<input checked="" type="checkbox"/>	[1]	eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018L0851&from=EN	0.6%	16 matches
<input checked="" type="checkbox"/>	[2]	www.happtory.hr/post/industrija-4-0	0.5%	17 matches
<input checked="" type="checkbox"/>	[3]	zir.nsk.hr/islandora/object/etfos:1772/preview	1.7%	18 matches 2 documents with identical matches
<input checked="" type="checkbox"/>	[6]	bib.irb.hr/datoteka/776579.diplomski_Zavrna_verzija_DinoCarFESB.pdf	0.0%	11 matches
<input checked="" type="checkbox"/>	[7]	core.ac.uk/download/198059684.pdf	0.0%	11 matches 1 documents with identical matches
<input checked="" type="checkbox"/>	[9]	qdoc.tips/roboti-za-opsluzivanje-masina-pdf-free.html	0.0%	11 matches
<input checked="" type="checkbox"/>	[10]	idoc.pub/documents/robotika-skripta-jlk9ekvmv045	0.0%	10 matches
<input checked="" type="checkbox"/>	[11]	darhiv.ffzg.unizg.hr/5064/1/KocijanK_BigData.pdf	0.4%	9 matches
<input checked="" type="checkbox"/>	[12]	docplayer.net/52863786-Diplomski-rad-sveucilisnog-diplomskog-studija.html	0.2%	11 matches
<input checked="" type="checkbox"/>	[13]	hrcak.srce.hr/file/382926	0.4%	7 matches
<input checked="" type="checkbox"/>	[14]	pdfslide.tips/documents/big-data-kako-smo-doli-do-velikih-pitanju-fizika-biologija-ili-sociologija.html	0.2%	6 matches
<input checked="" type="checkbox"/>	[15]	pdfcoffee.com/download/robotika-4-pdf-free.html	0.0%	9 matches
<input checked="" type="checkbox"/>	[16]	tr-ex.me/translation/croatian-english/sadrzava-znatne	0.2%	5 matches
<input checked="" type="checkbox"/>	[17]	zir.nsk.hr/islandora/object/hrstud:1978/datastream/PDF/view	0.1%	6 matches
<input checked="" type="checkbox"/>	[18]	hr.glosbe.com/sl/hr/pobuda-za-rast-v-Evropi	0.4%	3 matches

- ✓ [19] pdfslide.tips/documents/roboti-za-opsluzivanje-masina.html
0.0% 7 matches

- ✓ [20] glosbe.com/ga/hr/Gaibhniú
0.0% 1 matches

- ✓ [21] ["primjer zavrsnog 2.pdf" dated 2022-08-21](#)
0.3% 4 matches

- ✓ [22] hr.glosbe.com/de/hr/verwertete
0.0% 1 matches
1 documents with identical matches

- ✓ [24] repositorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb:6308/datastream/PDF/download
0.0% 4 matches

- ✓ [25] www.fkit.unizg.hr/_download/object/fsb:6308/datastream/PDF/download
0.2% 6 matches

- ✓ [26] ["Hatlek Kristina - DIPLOMSKI RAD.odt" dated 2020-12-14](#)
0.1% 3 matches

- ✓ [27] dokumen.tips/documents/fazi-kontrola-robotskog-manipulatora.html
0.0% 4 matches

- ✓ [28] konferencija-plin.unisb.hr/wp-content/uploads/zbornici/PLIN2019-Zbornik-radova-V1.pdf
0.3% 6 matches

- ✓ [29] de.lizarder.com/deutsche-kroatisch/Übersetzung/wesentliche produktgruppen
0.1% 3 matches

- ✓ [30] www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2018-0262_HR.html
0.0% 3 matches
1 documents with identical matches

- ✓ [32] de.lizarder.com/deutsche-kroatisch/Übersetzung/Datenerfassung
0.0% 1 matches

- ✓ [33] www.techdico.com/translation/english-croatian/recovery_of_waste.html
0.0% 1 matches

- ✓ [34] link.springer.com/article/10.1007/s11740-022-01110-5
0.2% 2 matches

- ✓ [35] zir.nsk.hr/islandora/object/etfos:1235/preview
0.0% 3 matches

- ✓ [36] www.scribd.com/document/388512789/Seminarski-rad-TSII-Suad-doc
0.0% 3 matches

- ✓ [37] casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-74-2022-2-5A-ZAKLJUCCI.pdf
0.0% 1 matches

- ✓ [38] www.semanticscholar.org/paper/Automated-Recycling-Separation-Enabled-by-Soft-Chin-Lipton/a9db4b328031c926f2a89717efce987cb076ae
0.1% 2 matches

-
- ✓ [39] www.scribd.com/document/393819016/Arduino
0.0% 2 matches

 - ✓ [40] dokumeny.site/document/amu-solarna-iradijacija-arduino.html
0.0% 1 matches

 - ✓ [41] docplayer.net/228671534-Effect-of-human-involvement-on-work-performance-and-fluency-in-human-robot-collaboration-for-recycling.html
0.1% 2 matches

 - ✓ [42] dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3468784.3471273
0.0% 1 matches

 - ✓ [43] from a PlagScan document dated 2020-09-28 10:02
0.0% 1 matches

 - ✓ [44] www.scribd.com/doc/300535447/Amu-Solarna-Iradijacija-Arduino
0.0% 1 matches

 - ✓ [45] from a PlagScan document dated 2017-04-05 09:08
0.0% 2 matches

 - ✓ [46] ms-my.facebook.com/INEA-CR-111213110781868/videos/industrija-40-promatrana-kao-logican-nastavak-prethodne-tri-industrijske-revoluc/
0.0% 1 matches

 - ✓ [47] "Benček_Tena - Viola Jones algoritam za prepoznavanje lica.docx" dated 2022-02-10
0.0% 2 matches

 - ✓ [48] www.bug.hr/transport/autonomna-cestovna-vozila-robote-vozi-polako-20775
0.1% 1 matches

 - ✓ [49] dl.acm.org/doi/abs/10.1109/IROS45743.2020.9341165
0.1% 1 matches

 - ✓ [50] ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8722747
0.0% 1 matches

 - ✓ [51] www.researchgate.net/publication/339696704_Automated_Recycling_Separation_Enabled_by_Soft_Robotic_Material_Classification
0.0% 1 matches


 - ✓ [52] www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323904452000118#!
0.1% 1 matches


 - ✓ [53] jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=201902257452922273
0.0% 1 matches


 - ✓ [54] "1_22.12.2021_NOVO_ZADNJA VERZIJA_Znanstveno- istraživačka strategija 2021._2027_. _glavna - lektorirano - konačno (00.docx" dated
0.1% 1 matches

 - ✓ [55] www.unin.hr/preddipomski-sveucilisni-studij-zastita-okolisa-recikliranje-i-ambalaza/


 - ✓ [56] 0.1% 1 matches

[56]  ec.europa.eu/info/sites/default/files/nrp_2022_croatia_en_0.pdf
0.0% 1 matches

[57]  from a PlagScan document dated 2020-09-13 10:30
0.0% 1 matches

[58]  link.springer.com/article/10.1007/s00506-021-00814-9
0.1% 1 matches

70 pages, 9812 words

 A very light text-color was detected that might conceal letters used to merge words.

PlagLevel: 4.8% selected / 14.4% overall

108 matches from 59 sources, of which 52 are online sources.

Settings

Data policy: *Compare with web sources, Check against organization repository, Check against the Plagiarism Prevention Pool*

Sensitivity: *Medium*

Bibliography: *Consider text*

Citation detection: *Reduce PlagLevel*

Whitelist: --