



UNIVERZITET U SARAJEVU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET
ODSJEK ZA AUTOMATIKU I ELEKTRONIKU

**Prepoznavanje uzoraka na slici
korištenjem metode podudaranja
predložaka**

ZAVRŠNI RAD
- PRVI CIKLUS STUDIJA -

Student:
Mesud Peštek

Mentor:
Doc. dr Emir Sokić, dipl.ing.el.

Sarajevo,
septembar 2018.

Postavka zadatka završnog rada I ciklusa:
Prepoznavanje uzoraka na slici korištenjem metode podudaranja
predložaka

Sažetak:

Prilikom vizuelne inspekcije u industrijskom okruženju, veoma često je potrebno provjeriti da li objekat kojeg analiziramo ima neke proizvodne nedostatke. Takve nedostatke je često teško opisati unaprijed. Ukoliko se inspekcija obavlja automatski i ovaj problem rješava korištenjem računarske vizije, jedan od jednostavnijih pristupa je metoda tzv. podudaranja predložaka (eng. template matching). Ona omogućava definiranje praga korelacije koji služi za identifikaciju objekata koji odstupaju od spomenutog predloška (izdvajanje "škarta"). Zadatak ovog rada je dizajnirati i implementirati sistem računarske vizije koji u realnom vremenu omogućava prepoznavanje objekata koji nemaju odgovarajući stepen podudaranja sa zadanim predloškom.

Koncept i metode rješavanja:

Rad treba da se sastoji iz sljedećih cjelina:

- pregleda literature,
- analize postupaka podudaranja predložaka,
- implementacije odgovarajućih algoritama u C++/OpenCV okruženju,
- integracije sistema u prototip ETFcam v.1.0.
- analize eksperimentalnih rezultata na primjeru detekcije čepova sa oštećenim natpisima.

Polazna literatura:

- [1] Batchelor, Bruce G., and Paul F. Whelan. Intelligent vision systems for industry. Springer Science & Business Media, 2012.
- [2] Torras, Carme, ed. Computer vision: theory and industrial applications. Springer Science & Business Media, 2012.
- [3] Demant, Christian, C. Demant, and Bernd Streicher-Abel. Industrial image processing. Springer-Verlag, 1999.
- [4] Szeliski, Richard. Computer vision: algorithms and applications. Springer Science & Business Media, 2010.
- [5] Sonka, Milan, Vaclav Hlavac, and Roger Boyle. Image processing, analysis, and machine vision. Cengage Learning, 2014.

- [6] Russ, John C. *The image processing handbook*. CRC press, 2016.
- [7] Costa, Luciano da Fontoura Da, and Roberto Marcondes Cesar Jr. *Shape analysis and classification: theory and practice*. CRC Press, Inc., 2000.
- [8] Costa, Corrado, et al. "Shape analysis of agricultural products: a review of recent research advances and potential application to computer vision." *Food and Bioprocess Technology* 4.5 (2011): 673-692.

Doc. dr Emir Sokić, dipl. ing. el.

**Univerzitet u Sarajevu
Elektrotehnički fakultet
Odsjek za automatiku i elektroniku**

Izjava o autentičnosti radova

Završni rad I ciklusa studija

Ime i prezime: Mesud Peštek

Naslov rada: Prepoznavanje uzoraka na slici korištenjem metode podudaranja predložaka

Vrsta rada: Završni rad I ciklusa studija

Broj stranica: 84

Potvrđujem:

- da sam pročitao dokumente koji se odnose na plagijarizam, kako je to definirano Statutom Univerziteta u Sarajevu, Etičkim kodeksom Univerziteta u Sarajevu i pravilima studiranja koja se odnose na I i II ciklus studija, integrirani studijski program I i II ciklusa i III ciklus studija na Univerzitetu u Sarajevu, kao i uputama o plagijarizmu navedenim na web stranici Univerziteta u Sarajevu;
- da sam svjestan univerzitetskih disciplinskih pravila koja se tiču plagijarizma;
- da je rad koji predajem potpuno moj, samostalni rad, osim u dijelovima gdje je to naznaceno;
- da rad nije predat, u cjelini ili djelimično, za stjecanje zvanja na Univerzitetu u Sarajevu ili nekoj drugoj visokoškolskoj ustanovi;
- da sam jasno naznačio prisustvo citiranog ili parafraziranog materijala i da sam se referirao na sve izvore;
- da sam dosljedno naveo korištene i citirane izvore ili bibliografiju po nekom od preporučenih stilova citiranja, sa navođenjem potpune reference koja obuhvata potpuni bibliografski opis korištenog i citiranog izvora;
- da sam odgovarajuće naznačio svaku pomoć koju sam dobio pored pomoći mentora i akademskih tutora/ica.

Sarajevo, 24.09.2018

Potpis:

Mesud Peštek

Sažetak

U industriji se često pojavljuje problem detekcije objekata od interesa, njihove lokalizacije, te određivanja da li zadovoljavaju određene industrijske standarde. U ovom radu se analizira jedna od metoda koje to omogućuju, a to je metoda poređenja predložaka. Cilj rada je odabrati najbolji način primjene metode poređenja predložaka kod problema odvajanja škarta u proizvodnji čepova. Kroz prva tri poglavlja pravi se teorijski uvod u računarsku obradu slike, značajke, te metode poređenja predložaka zasnovane na površini. Zatim testira robusnost metoda poređenja predložaka datih u biblioteci *OpenCV*. Navedene metode su testirane pri uvjetima promjenjivog osvjetljenja, rotacije i skaliranja. Također se testira brzina izvršenja pojedinih metoda pri povećanju rezolucije slike. Cilj je bio odabrati najpogodniju metodu za navedenu primjenu. U analiziranim uvjetima najbolje se pokazuje poređenje predložaka uz primjenu kros-korelacionog kriterija. Konačno se definiše prag kros-korelacije pri kojem se čep proglašava validnim i testira na skupu oštećenih čepova.

Abstract

The detection and localization of an object of interest is a frequent industrial task. Often determining whether the detected object satisfies some predefined production standards is valuable. This work analyzes one of the methods that makes this possible, and that is template matching. The goal is to find the best way to apply this method to the problem of defect cork detection in a cork production facility. A theoretical introduction is made to the field of computer vision, features of images and area based template matching methods. Then, template matching methods implemented in the *OpenCV* library are looked at. They are tested in cases of varying brightness, rotation and scale. In addition, execution time is measured. The goal was to determine which of these methods is the best for the given scenario. Template matching using the cross-correlation criteria gave the best results. Finally, a correlation threshold is to be defined and tested on a set of defect corks.

Sadržaj

Popis slika	ix
Popis tabela	x
Indeks pojmoveva	x
1 Uvod	1
1.1 Računarski prikaz slike	1
1.2 Poređenje predložaka	2
2 Poređenje predložaka zasnovano na značajkama	5
2.1 Ograničavajući okvir	5
2.2 Površina i obim	6
2.3 Faktor oblika	9
2.4 Centar gravitacije	9
2.5 Radijus	10
2.6 Iskrivljenost	10
2.7 Tekstura	11
3 Poređenje predložaka zasnovano na površini	12
3.1 Kros-korelacija	12
3.2 Normalizovana kros-korelacija (NCC)	13
3.3 Metod piramidalne korelacije	14
3.4 Rotirani uzorci	16
3.5 Koeficijent korelacije	16
4 Implementacije u OpenCV	17
4.1 Uvod	17
4.2 Rezultati primjene kriterija najmanje kvadratne greške	21
4.2.1 Rezultati pri promjenjivom osvjetljenju	21
4.2.2 Rezultati pri promjenjivoj rotaciji	22
4.2.3 Rezultati pri promjenjivom skaliranju	24
4.3 Rezultati primjene kriterija normalizovane najmanje kvadratne greške	27
4.3.1 Rezultati pri promjenjivom osvjetljenju	27
4.3.2 Rezultati pri promjenjivoj rotaciji	28
4.3.3 Rezultati pri promjenjivom skaliranju	30
4.4 Rezultati primjene kriterija kros-korelacije	32
4.4.1 Rezultati pri promjenjivom osvjetljenju	32
4.4.2 Rezultati pri promjenjivoj rotaciji	33

4.4.3	Rezultati pri promjenjivom skaliranju	35
4.5	Rezultati primjene kriterija normalizovane kros-korelacije	37
4.5.1	Rezultati pri promjenjivom osvjetljenju	37
4.5.2	Rezultati pri promjenjivoj rotaciji	38
4.5.3	Rezultati pri promjenjivom skaliranju	40
4.6	Rezultati primjene kriterija koeficijenta korelacije	42
4.6.1	Rezultati pri promjenjivom osvjetljenju	42
4.6.2	Rezultati pri promjenjivoj rotaciji	43
4.6.3	Rezultati pri promjenjivom skaliranju	45
4.7	Rezultati primjene kriterija normalizovanog koeficijenta korelacije	47
4.7.1	Rezultati pri promjenjivom osvjetljenju	47
4.7.2	Rezultati pri promjenjivoj rotaciji	48
4.7.3	Rezultati pri promjenjivom skaliranju	50
4.8	Uporedba vremena izvršenja pojedinih kriterija	52
4.9	Uporedba rezultata pojedinih metoda pri promjenjivoj veličini izvorne slike	52
4.10	Uporedba rezultata pojedinih metoda pri promjenjivoj rotaciji izvorne slike	54
4.11	Komentar i zaključak	54
5	Definiranje praga korelacije	55
5.1	Vrijednosti korelacije pri promjenjivom osvjetljenju	55
5.1.1	Vrijednosti korelacije pri promjenjivoj rotaciji	56
5.2	Vrijednosti korelacije pri promjenjivom skaliranju	57
5.3	Zaključak	59
Prilozi		60
A	Primjena praga nad programski proširenim skupom podataka	61
A.1	Rotirani čepovi s oštećenjem	61
A.2	Rotirani čepovi s oštećenjem, osvjetlenost uvećana za 5	65
A.3	Rotirani čepovi s oštećenjem, osvjetlenost umanjena za 10	68
Literatura		72

Popis slika

1.1	Prikaz slike u boji	2
1.2	Prikaz slike u nijansama sive	2
1.3	Matrični prikaz slike	2
1.4	Pravi izgled slike	2
1.5	Izvorna slika	3
1.6	Uzorak	3
1.7	Pozicija uzorka unutar izvorne slike	3
2.1	Ograničavajući okvir	6
2.2	Originalna slika	7
2.3	Slika nakon obavljenе segmentacije	7
2.4	Kodiranje linijskih segmenata (ispunjena površina)	7
2.5	Kodiranje linijskih segmenata (neto površina)	7
2.6	Primjer lančanog koda	8
2.7	Primjer lančanog koda	8
2.8	Kontura kodirana lančanim kodom	9
2.9	Promjena nagiba tangente na konturu	10
2.10	Iskrivljenost konveksne konture	11
2.11	Iskrivljenost konkavne konture	11
2.12	Polirani aluminij, iznos srednjeg gradijenta 15.3	11
2.13	Sirovi aluminij, iznos srednjeg gradijenta 25.1	11
3.1	Uzorak	12
3.2	Izvorna slika	12
3.3	Vrijednost kros-korelacije za različite pozicije uzorka	13
3.4	Prikaz korelacije nijansama sive	14
3.5	Lokacije uzorka u izvornoj slici	14
3.6	Nivo 1	14
3.7	Nivo 2	14
3.8	Nivo 3	14
3.9	Nivo 1	14
3.10	Nivo 2	14
3.11	Nivo 3	14
3.12	Gausova piramida	15
3.13	Uzorak	16
3.14	Izvorna slika	16
3.15	Podudaranja	16
4.1	Izvorna slika	17

4.2	Uzorak	17
4.3	Originalna izvorna slika, najmanja kvadratna greška	21
4.4	Povećano osvjetljenje, najmanja kvadratna greška	21
4.5	Smanjeno osvjetljenje, najmanja kvadratna greška	22
4.6	Promjenjiva rotacija, najmanja kvadratna greška	23
4.7	Greška lokacije u ovisnosti od ugla rotacije	24
4.8	Povećana izvorna slika, najmanja kvadratna greška	24
4.9	Umanjena izvorna slika, najmanja kvadratna greška	25
4.10	Greška pri povećanju izvorne slike	25
4.11	Greška pri smanjenju izvorne slike	25
4.12	Originalna izvorna slika, normalizovana najmanja kvadratna greška	27
4.13	Povećano osvjetljenje, normalizovana najmanja kvadratna greška	27
4.14	Smanjeno osvjetljenje, normalizovana najmanja kvadratna greška	28
4.15	Promjenjiva rotacija, normalizovana najmanja kvadratna greška	29
4.16	Greška lokacije u ovisnosti od ugla rotacije	30
4.17	Povećana izvorna slika, normalizovana najmanja kvadratna greška	30
4.18	Smanjena izvorna slika, normalizovana najmanja kvadratna greška	31
4.19	Greška pri povećanju izvorne slike	31
4.20	Greška pri smanjenju izvorne slike	31
4.21	Originalna izvorna slika, kros-korelacija	32
4.22	Povećano osvjetljenje, kros-korelacija	32
4.23	Smanjeno osvjetljenje, kros-korelacija	33
4.24	Promjenjiva rotacija, kros-korelacija	34
4.25	Greška lokacije u ovisnosti od ugla rotacije	35
4.26	Povećana izvorna slika, kros-korelacija	35
4.27	Smanjena izvorna slika, kros-korelacija	36
4.28	Greška pri povećanju izvorne slike	36
4.29	Greška pri smanjenju izvorne slike	36
4.30	Originalna izvorna slika, normalizovana kros-korelacija	37
4.31	Povećano osvjetljenje, normalizovana kros-korelacija	37
4.32	Smanjeno osvjetljenje, normalizovana kros korelacija	38
4.33	Promjenjiva rotacija, normalizovana kros-korelacija	39
4.34	Greška lokacije u ovisnosti od ugla rotacije	40
4.35	Promjenjiva rotacija, normalizovana kros-korelacija	40
4.36	Promjenjiva rotacija, normalizovana kros-korelacija	41
4.37	Greška pri povećanju izvorne slike	41
4.38	Greška pri smanjenju izvorne slike	41
4.39	Povećano osvjetljenje, koeficijent korelacijske matrice	42
4.40	Povećano osvjetljenje, koeficijent korelacijske matrice	42
4.41	Smanjeno osvjetljenje, koeficijent korelacijske matrice	43
4.42	Promjenjiva rotacija, koeficijent korelacijske matrice	44
4.43	Greška lokacije u ovisnosti od ugla rotacije	45
4.44	Promjenjiva rotacija, koeficijent korelacijske matrice	45
4.45	Promjenjiva rotacija, koeficijent korelacijske matrice	46
4.46	Greška pri povećanju izvorne slike	46
4.47	Greška pri smanjenju izvorne slike	46
4.48	Povećano osvjetljenje, normalizovani koeficijent korelacijske matrice	47
4.49	Povećano osvjetljenje, normalizovani koeficijent korelacijske matrice	47

4.50 Povećano osvjetljenje, normalizovani koeficijent korelacije	48
4.51 Promjenjiva rotacija, normalizovani koeficijent korelacije	49
4.52 Greška lokacije u ovisnosti od ugla rotacije	50
4.53 Promjenjiva rotacija, normalizovani koeficijent korelacije	50
4.54 Promjenjiva rotacija, normalizovani koeficijent korelacije	51
4.55 Greška pri povećanju izvorne slike	51
4.56 Greška pri smanjenju izvorne slike	51
4.57 Promjenjiva rotacija, najmanja kvadratna greška	52
4.58 Uporedba rezultata pri povećanju izvorne slike	53
4.59 Uporedba rezultata pri smanjenju izvorne slike	53
4.60 Uporedba rezultata pri smanjenju izvorne slike	54
 5.1 Izvorna slika	55
5.2 Uzorak	55
5.3 Vrijednosti korelacije u ovisnosti od osvjetljenja	56
5.4 Vrijednosti korelacije u ovisnosti od ugla rotacije	56
5.5 Vrijednosti korelacije u ovisnosti od faktora skaliranja	57
5.6 Polazna izvorna slika	58
5.7 Maksimalno oštećenje čepa	58
5.8 Čepovi sa različitim stepenom oštećenja	59
 A.1 Bez oštećenja oštećenja, rotirani čepovi	61
A.2 Prvi stepen oštećenja, rotirani čepovi	62
A.3 Drugi stepen oštećenja, rotirani čepovi	62
A.4 Treći stepen oštećenja, rotirani čepovi	62
A.5 Četvrти stepen oštećenja, rotirani čepovi	63
A.6 Peti stepen oštećenja, rotirani čepovi	63
A.7 Šesti stepen oštećenja, rotirani čepovi	63
A.8 Sedmi stepen oštećenja, rotirani čepovi	64
A.9 Osmi stepen oštećenja, rotirani čepovi	64
A.10 Bez oštećenja oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenje uvećano za 5	65
A.11 Prvi stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenje uvećano za 5	65
A.12 Drugi stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenje uvećano za 5	66
A.13 Treći stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenje uvećano za 5	66
A.14 Četvrти stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenje uvećano za 5	66
A.15 Peti stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenje uvećano za 5	67
A.16 Šesti stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenje uvećano za 5	67
A.17 Sedmi stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenje uvećano za 5	67
A.18 Osmi stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenje uvećano za 5	68
A.19 Bez oštećenja oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenost umanjena za 10	68
A.20 Prvi stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenost umanjena za 10	69
A.21 Drugi stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenost umanjena za 10	69
A.22 Treći stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenost umanjena za 10	69
A.23 Četvrти stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenost umanjena za 10	70
A.24 Peti stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenost umanjena za 10	70
A.25 Šesti stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenost umanjena za 10	70
A.26 Sedmi stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenost umanjena za 10	71
A.27 Osmi stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenost umanjena za 10	71

Popis tabela

4.1	Specifikacije računara	19
4.2	Promjena kriterija pri promjeni osvjetljenja	22
4.3	Promjena greške pri promjenjivoj rotaciji	23
4.4	Promjena kriterija pri promjeni osvjetljenja	28
4.5	Promjena greške pri promjenjivoj rotaciji	29
4.6	Promjena kriterija pri promjeni osvjetljenja	33
4.7	Promjena greške kriterija pri promjenjivoj rotaciji	34
4.8	Promjena kriterija pri promjeni osvjetljenja	38
4.9	Promjena greške pri promjenjivoj rotaciji	39
4.10	Promjena kriterija pri promjeni osvjetljenja	43
4.11	Promjena greške pri promjenjivoj rotaciji	44
4.12	Promjena kriterija pri promjeni osvjetljenja	48
4.13	Promjena greške pri promjenjivoj rotaciji	49
5.1	Opsezi promjene korelacije	57
5.2	Vrijednosti korelacije za različite stepene oštećenja	59

Poglavlje 1

Uvod

1.1 Računarski prikaz slike

Upotreba kamera kao vida komunikacije raznih računarskih sistema sa vanjskom okolinom je sve češća. Takvi primjeri susreću se u industriji, gdje mnogi proizvodni procesi koriste vizuelnu inspekciju samih proizvoda da bi se utvrdila njihova ispravnost, njihovo prisustvo na određenoj lokaciji ili broj proizvoda unutar nekog pakovanja. Možda najočitiji primjer su mobilni telefoni, čije se kamere najčešće koriste za slikanje, snimanje, a nerijetko se napravljene slike i snimci naknadno obrađuju. Uzimajući to u obzir jasno je da polje računarske vizije dobija na važnosti i da su metode, koje se unutar njega izučavaju, sve više u upotrebi. U ovom radu će se obraditi metoda prepoznavanja uzorka poređenjem predložaka, koja se koristi za pronađak dijelova neke slike koji odgovaraju određenom uzorku.

Prije nego se bilo kakva računarska obrada nad slikom desi, potrebno je predstaviti sliku na način da se ona može pohraniti unutar računara, zatim dalje analizirati i obrađivati. Slika se obično predstavlja konačnim brojem tačaka (piksela), koji imaju određenu boju i zajedno daju aproksimaciju stvarne slike. Što se više piksela ima na raspologanju, to je moguće vjernije predstaviti datu sliku. Da bi se tako predstavljena slika pohranila i dalje obrađivala, pojedini pikseli se kodiraju s jednim ili više brojeva, koji daju informaciju o boji piksela. Ukoliko se svi pikseli predstave kodnim vrijednostima, i te se vrijednosti unesu u matricu, na način da pozicija kodne vrijednosti piksela u matrici odgovara stvarnoj poziciji piksela u slici u odnosu na ostale piksele, dobija se veoma kompaktna matrična reprezentacija slike.

Jedan od jednostavnijih prikaza jeste prikaz slike koristeći nijanse sive boje (eng. *grayscale*). Pojedini piksel se kodira brojnom vrijednošću (obično od 0 do 255) koja nosi informaciju o osvijetljenosti tog piksela. Na osnovu te vrijednosti dodjeljuje mu se određena nijansa sive, na način da broj 0 odgovara potpuno crnoj, a 255 potpuno bijeloj boji. Iako se na ovaj način gube informacije o bojama, još uvijek je u velikoj mjeri moguće raspoznati različite objekte, njihove granice i osvijetljenost, što je za pojedine primjene sasvim dovoljno, a znatno se pojednostavljuje analiza. [13] Na slikama 1.1 i 1.2 dat je primjer prikaza slike u nijansama sive boje.



Slika 1.1: Prikaz slike u boji



Slika 1.2: Prikaz slike u nijansama sive

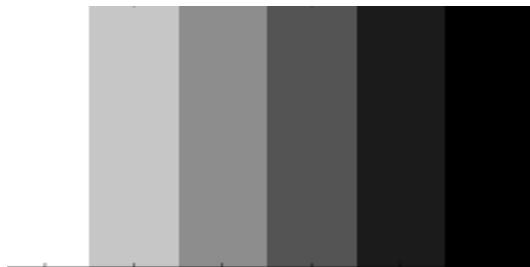
Na slici 1.3 vidi se matrični prikaz slike, a na slici 1.4 vidi se slika koju ona predstavlja. Korisno je uočiti da prva kolona matrice čije su vrijednosti 255 odgovara bijeloj traci unutar slike 4. Kako se vrijednosti matrice smanjuju trake na slici postaju tamnije, dok skroz ne pocrne tamo gdje vrijednosti matrice iznose 0.

Nad ovako predstavljenim slikama se dalje može vršiti računarska obrada i analiza. Kada se zna da je piksel (u prikazanom slučaju) predstavljen brojem između 0 i 255 moguće je provjeravati različite piksele na sličnost, pa samim tim i grupe piksela nakon što se utvrdi određeni kriterij sličnosti. Ako se dvije slike shvate kao grupe piksela koje poredimo na sličnost, moguće je ispitivati postojanje jedne slike (uzorka) unutar druge (izvorne slike). Uzorak može biti neki proizvod na pokretnoj traci čije se prisustvo utvrđuje, oko ljudskog lica koje se prepoznaje, slova uslikanog teksta koja treba pretvoriti u računarski tekstualni zapis, itd. Primjene su mnogobrojne.

Upravo problemom prepoznavanja uzorka se bavi metod poređenja predložaka, koji će u nastavku biti detaljnije obrađen.

$$\begin{bmatrix} 255 & 198 & 141 & 85 & 28 & 0 \\ 255 & 198 & 141 & 85 & 28 & 0 \\ 255 & 198 & 141 & 85 & 28 & 0 \\ 255 & 198 & 141 & 85 & 28 & 0 \\ 255 & 198 & 141 & 85 & 28 & 0 \end{bmatrix}$$

Slika 1.3: Matrični prikaz slike



Slika 1.4: Pravi izgled slike

1.2 Poređenje predložaka

Poređenje predložaka je metoda koja služi da se lociraju dijelovi neke slike, koji su dovoljno slični nekoj drugoj, obično manjoj slici. Slika koja se pretražuje naziva se izvorna, a slika koju potrebno locirati unutar nje uzorak. [8] Osnovni pristup poređenja predložaka sastoji se u tome, da se uzorak pomjera kroz sve pozicije unutar izvirne slike, te se za svaku poziciju računa prethodno odabrani kriterij sličnosti. Nakon toga se pozicija na kojoj je izračunata najveća sličnost uzima kao poziciju uzorka unutar izvirne slike. Na slikama 1.5, 1.6 i 1.7 se može vidjeti primjer upotrebe poređenja predložaka. [1]

**Slika 1.5:** Izvorna slika**Slika 1.6:** Uzorak**Slika 1.7:** Pozicija uzorka unutar izvorne slike

Na slici 1.5 nalazi se izvorna slika unutar koje je potrebno pronaći, ukoliko on postoji, uzorak prikazan na slici 1.6. Uzorak zaista postoji unutar izvorne slike, što se vidi na slici 1.7 i naglašen je tako što je sve osim uzorka prikazano u nijansama sive.

Prethodno pomenuti kriterij sličnosti je ono po čemu se različite implementacije poređenja predložaka razlikuju. On bi trebao da se definiše tako da se dobije što bolja mjera sličnosti između izvorne slike i uzorka, te da algoritam bude što računarski efikasniji.

U implementacijama se često susreću dva kriterija i njihovi normalizovani oblici. Radi se o sljedećim kriterijima [21]:

- **Najmanja kvadratna greška**

Ovaj kriterij dat je formulom:

$$R(x, y) = \sum_{x'y'} (T(x', y') - I(x+x', y+y'))^2, \quad (1.1)$$

pri čemu je

T - uzorak (eng. *template*),

I - izvorna slika.

$T(x, y)$ i $I(x, y)$ predstavljaju realne funkcije dvije realne promjenjive, pri čemu promjenjive x i y određuju poziciju unutar slike, a vrijednost funkcije na toj poziciji nosi informaciju o toj tački slike (pikselu), uglavnom informaciju o boji. Funkcijom $R(x, y)$ data je

mjera sličnosti uzorka i izvorne slike na poziciji određenom sa x i y . Ova formula govori da se za svaku poziciju (x, y) unutar izvorne slike računa kvadratna greška za sve piksele uzorka i odgovarajuće piksele izvorne slike (u tu svrhu su u formulu uvedeni pomoćni x' i y'), te se sve izračunate greške sumiraju. Na taj način se dobija mjera sličnosti za svaku poziciju (x, y) .

- **Normalizovana najmanja kvadratna greška**

Ovaj kriterij predstavlja modifikovani kriterij najmanje kvadratne greške i dat je sa:

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x'y'}(T(x', y') - I(x + x', y + y'))^2}{\sqrt{\sum_{x'y'} T(x', y')^2 \sum_{x'y'} I(x + x', y + y')^2}}. \quad (1.2)$$

U relaciji (2) se vidi da brojnik razlomka odgovara kriteriju (1) normalizovanim članom u nazivniku.

- **Kros-korelacija**

Predstavlja također mjeru sličnosti datu formulom:

$$R(x, y) = \sum_{x'y'}(T(x', y')I(x + x', y + y')). \quad (1.3)$$

- **Normalizovana kros-korelacija**

Normalizovani oblik kros-korelaciije da je sa:

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x'y'}(T(x', y')I(x + x', y + y'))}{\sqrt{\sum_{x'y'} T(x', y')^2 \sum_{x'y'} I(x + x', y + y')^2}}. \quad (1.4)$$

Treba napomenuti da postoje različiti pristupi poređenja predložaka. Tako naprimjer, korelacija se može računati nakon što se na sliku primjeni Fourierova transformacija. Tada će se korelaciona formula (3) u frekventnom domenu svesti na množenje. [8] Ovaj pristup se koristi kada je slika toliko velika, da je efikasnije izvršiti Fourierovu transformaciju pa računati korelaciju nad deskriptorima, nego računati istu za svaku poziciju zasebno. Takav pristup naziva se pristupom zasnovanim na značajkama (eng. *Feature-based*).

Još jedan pristup, koji se koristi da bi se u obzir uzele i potencijalne razlike u orientaciji, te osvjetljenju uzorka i njemu odgovarajućeg dijela izvorne slike, bio bi korištenje većeg broja uzoraka. Prave se kopije uzorka koje su rotirane za različite uglove, a može im se i osvjetljenje mijenjati da bi se i to uzelo u obzir. Sada se radi poređenje za svaki novi uzorak dobijen iz originalnog. Na ovaj način se povećava šansa detekcije uzorka, koji se u određenoj mjeri razlikuje u orientaciji i osvjetljenju od njegovog prikaza unutar izvorne slike, ali se samo računanje produžava svakom dodanom kopijom. [8]

U nastavku će biti detaljnije obrađeni pristupi i pojedine implementacije, uzimajući u obzir njihovu primjenu na problem odvajanja škarta pri proizvodnji čepova. Pojedini pristupi i implementacije će biti "rangirani" u odnosu na to koliko su prikladni za navedenu primjenu.

Poglavlje 2

Poređenje predložaka zasnovano na značajkama

Značajka može biti bilo šta što na neki način opisuje objekat, kao što su njegov oblik, dimenzije i sl. Proces prepoznavanja se može učiniti manje računarski zahtjevnim korištenjem značajki. Umjesto da se pri prepoznavanju poredi svaki piksel uzorka sa pikselom izvorne slike prema osvjetljenju, isti se mogu poreći korištenjem drugih karakteristika kao što su oblik, površina, orijentacija, kontura i sl. Ukoliko se, naprimjer, koristi kontura kao glavna i jedina značajka, te se ona odvoji u fazi preprocesiranja, više se već pomenuti kriteriji ne moraju računati za svaki piksel, nego samo za piksele koji čine konturu objekta, pa se na taj način vrši ušteda potrebnog vremena računanja. Jasno je da od odabira značajki zavisi koliko će se pojednostaviti navedeni proces, te koliko će pouzdan rezultat ovakvo poređenje davati. U nastavku će se navesti neke značajke koje se najčešće pojavljuju.

2.1 Ograničavajući okvir

Svaki objekat na slici se može obuhvatiti pravougaonikom određenih dimenzija. Taj pravougaonik može, ali i ne mora imati strane paralelne osama koordinatnog sistema, koji se koristi za pozicioniranje unutar slike. Obično se ovaj ograničavajući okvir, odnosno pravougaonik koji obuhvata objekat (eng. *enclosing rectangle*) postavlja na način da mu koordinate x , y gornjeg lijevog čoška odgovaraju koordinati x najdalje lijeve tačke objekta, te koordinati y najviše tačke objekta, respektivno. Širina pravougaonika odgovara razlici x koordinata najdalje desne i najdalje lijeve tačke, dok visina odgovara razlici y koordinata najviše i najniže tačke. [8] Primjer značajke prikazan je na slici 2.1.



Slika 2.1: Ograničavajući okvir

Jasno je da ova značajka poprilično loše opisuje objekat, jer mnogi različiti objekti mogu imati iste ograničavajuće okvire. Ovakvo nešto bi možda moglo biti korisno u situacijama kad postoji ograničen broj razdvojenih objekata, različitih veličina, pa bi to bilo dovoljno da se pronađe onaj željeni.

Nešto naprednija verzija ove značajke jeste orijentisani ograničavajući okvir. Kao što se vidi iz naziva, ova značajka pored informacije o veličini, nosi informaciju o orijentaciji objekta. Ovaj okvir se orijentiše uz glavnu osu objekta (eng. *principal axis*). Naime, to je osa za koju je moment inercije objekta najmanji. Ako se objekat zamisliti kao kruti komad kartona, izrezan iz slike, tada se može zamisliti i osa duž koje on kao takav ima najmanji moment inercije. [8]

Ako bi se sada izračunao omjer dužine i širine ograničavajućeg okvira, dobila bi se vrijednost koja ne ovisi o veličini okvira već bi bila ista za okvire svih veličina, istoga oblika. Ovo je jednostavniji primjer značajki koje nose informaciju o obliku objekta. Kasnije bi ovakav vid značajki mogao biti koristan da se prevaziđu problemi skaliranja uzorka, ukoliko oni budu postojali.

Rektangularnost objekta je još jedna takva veličina, koja se u literaturi definiše kao omjer površine objekta i površine najmanjeg ograničavajućeg okvira:

$$R = \frac{A}{A_{ser}}, \quad (2.1)$$

gdje je

A - površina objekta,

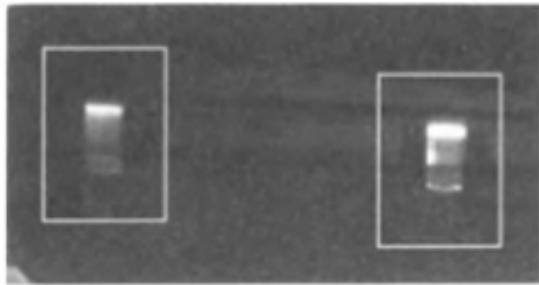
A_{ser} - površina najmanjeg ograničavajućeg okvira (eng. *smallest enclosing rectangle*).

Treba napomenuti da se ove i naredne značajke koje budu pomenute uglavnom odnose na objekte dobijene segmentacijom, procesom pri kojem se određeni objekat na slici izoluje. Sve se ovo odvija u fazi preprocesiranja slike, gdje će se slika i uzorak pripremiti i pojednostaviti, tj. svesti na nivo značajki prije samog poređenja.

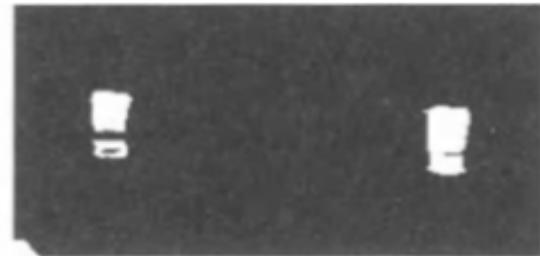
2.2 Površina i obim

Površina objekta se definiše kao broj piksela koji sačinjavaju objekat. Ove vrijednosti se obično računaju za objekte koji predstavljaju zatvorene strukture. Takve objekte kao rezultat daje segmentacija pri kojoj se koristi "prag osvjetljenosti" (eng. *thresholding*). Pri ovoj metodi segmentacije postavlja se određeni prag osvjetljenosti, te se pikseli čija osvjetljenost prelazi definisani

prag boje u jednu boju, a ostali u drugu. Obično su to crna i bijela boja. Ovako segmentirani objekti će predstavljati zatvorene strukture, kojima se može odrediti kontura. Na slikama 2.2 i 2.3 se vidi primjer segmentacije korištenjem praga osvijetljenosti. [8]



Slika 2.2: Originalna slika

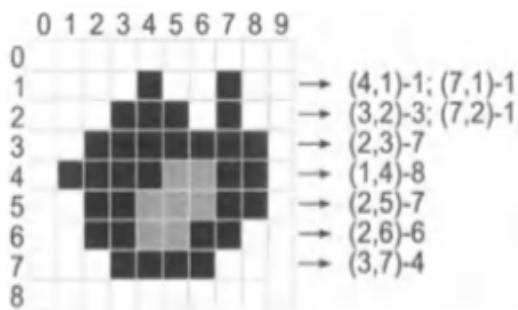


Slika 2.3: Slika nakon obavljene segmentacije

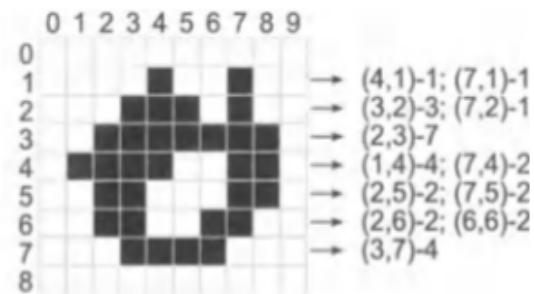
Ukoliko se na drugi način vrši segmentacija, npr. samim poređenjem predložaka, segmentirani objekti neće nužno predstavljati zatvorene strukture, tj. mogu biti sačinjeni od više manjih cjelina.

Kod ovako segmentiranih objekata mogu se razlikovati **ispunjena površina** (eng. *filled area*) i **neto površina** (eng. *net area*). Kod ispunjene površine računaju se svi pikseli unutar konture objekta, pa čak i oni koji ne ulaze u njegov sastav. Kod neto površine računaju se samo pikseli unutar konture koji ujedno ulaze u sastav objekta.

Pri ovim proračunima često se susreće kodiranje objekta po linijskim segmentima (eng. *run*). Objekat se dijeli na linijske segmente koji se kodiraju koordinatama početka segmenta i njegovom dužinom kao što je prikazano na slikama 2.4 i 2.5.



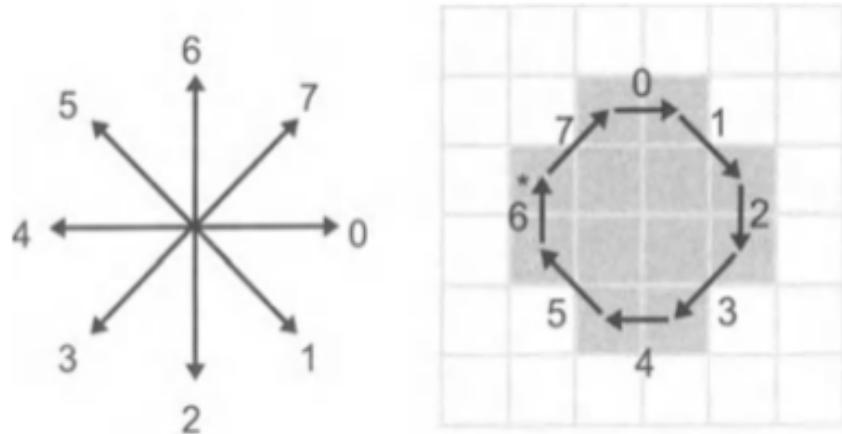
Slika 2.4: Kodiranje linijskih segmenata (ispunjena površina)



Slika 2.5: Kodiranje linijskih segmenata (neto površina)

Na slikama 11 i 12, u zagradama su date koordinate početka linijskog segmenta, te crticom odvojena dužina segmenta. Površina je sada jednostavno zbir dužina svih linijskih segmenata koji čine objekat.

Obim se može jednostavno računati iz tzv. "lančanog koda" (eng. *chain code*). Lančani kod je način reprezentacije konture objekta. Dobija se tako što se kontura objekta prati u smjeru kazaljke na satu, te se svaki piksel kodira brojem koji označava smjer prelaska na njemu susjedni piksel konture. Primjer je prikazan na slici 2.6.



Slika 2.6: Primjer lančanog koda

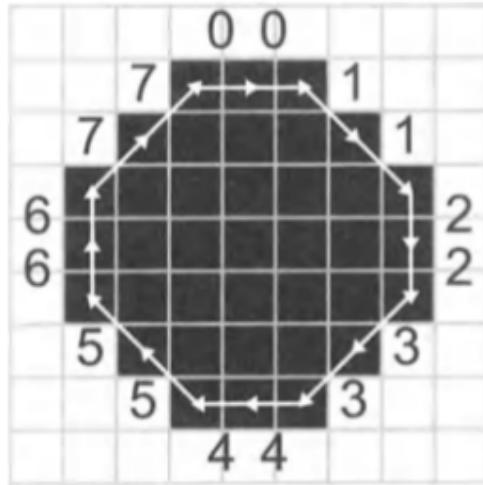
Ako je početni piksel označen zvjezdicom, tada će lančani kod za konturu sa slike 2.6 biti $(7, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6)$ pri čemu svaki broj označava određeni smjer kao što je prikazano. Obično se horizontalni i vertikalni prelasci kodiraju parnim, a dijagonalni neparnim brojevima.

Treba se imati u vidu da stvarna kontura ne prolazi vanjskom, niti unutrašnjom ivicom piksela konture, već negdje između, obzirom da je slika diskretizovana. Prema tome, dva susjedna piksela pozicionirana horizontalno ili vertikalno jedan od drugog ne doprinose jednakob obimu kao dva piksela koji su "susjedni dijagonalno". Udaljenost između centara piksela susjednih horizontalno/vertikalno iznosi 1, dok kod piksela susjednih dijagonalno ta vrijednost je približna $\sqrt{2} = 1.414$ (Slika 2.7). To ujedno predstavlja i njihov doprinos obimu.



Slika 2.7: Primjer lančanog koda

Iz ovako kodirane konture obim se računa jednostavno tako što se svi neparni brojevi pomnože sa $\sqrt{2}$, parni sa 1 (ostaju isti), te sve vrijednosti saberemo. Primjer je konture objekta je dat na slici 2.8.



Slika 2.8: Kontura kodirana lančanim kodom

Lančani kod objekta sa slike 13 je (7, 7, 0, 0, 1, 1, 2, 2, 3, 3, 4, 4, 5, 5, 6, 6), a obim se dobija kao:

$$O = 8 * 1.0 + 8 * 1.414 = 19.312. \quad (2.2)$$

2.3 Faktor oblika

Faktor oblika je zanimljiva značajka, koja se dobija prema formuli:

$$F = \frac{4\pi A}{O^2}, \quad (2.3)$$

gdje su

A - površina objekta,

O - obim objekta.

Faktor oblika je zanimljiva značajka iz razloga što daje istu vrijednost za iste oblike, neovisno o njihovoj orijentaciji i skaliranju. Skaliran je sa 4π da bi krug imao faktor oblika 1, a svi ostali oblici vrijednost manju od 1.

2.4 Centar gravitacije

Centar gravitacije objekta se definiše kao tačka na kojoj bi se objekat mogao balansirati, ukoliko se on zamisli kao kruti komadić slike. Koordinate x , y centra gravitacije računaju se kao sume svih x , odnosno y koordinata podijeljenih sa površinom:

$$x = \frac{\sum_i x_i}{A}, \quad (2.4)$$

$$y = \frac{\sum_i y_i}{A}. \quad (2.5)$$

2.5 Radijus

Radijusom se smatra udaljenost između centra gravitacije objekta i neke tačke na njegovoj konturi. Ako se obilazi cijela kontura, piksel po piksel, moguće je pronaći minimalni i maksimalni radijus objekta, koji nose informaciju o obliku. Ukoliko se pohrane sve vrijednosti radijusa u vektor, to može poslužiti kao još bolji pokazatelj. Na osnovu toga je zatim moguće tražiti srednju vrijednost ili standardnu devijaciju radijusa, itd. Treba voditi računa da se kod objekata kružnog oblika također često može razlikovati minimalni i maksimalni radijus, kao posljedica diskretizacije. U ovakvim slučajevima bolje je ne koristiti radijus kao značajku. [8]

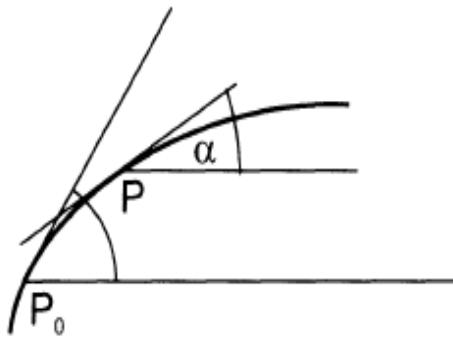
Dosad je uglavnom bila riječ o "dimenzionim" značajkama, osim pojedinih kao što su omjer širine i dužine ograničavajućeg okvira, te faktor oblika, koji se više odnose na oblik objekta nego na njegove dimenzije.

2.6 Iskrivljenost

Iskrivljenost, krivudavost ili krivina (eng. *Curvature*) objekta je primjer značajke koje opisuju isključivo oblik. Informacija o "iskrivljenosti" se može u potpunosti dobiti iz konture objekta. U literaturi se ona definiše kao stopa promjene nagiba tangente pri kretanju po konturi, što nije ništa drugo nego izvod nagiba tangente, uzet po luku konture, što je dato relacijom (2.10).

$$C = \lim_{P_0 \rightarrow P} \frac{\alpha - \alpha_0}{l}, \quad (2.6)$$

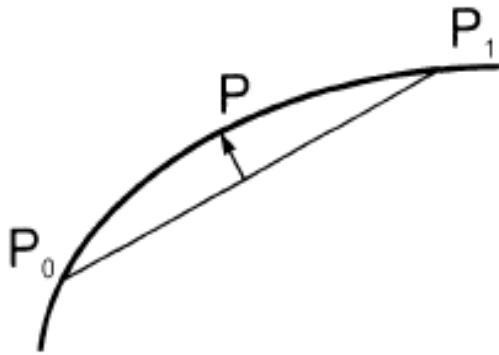
pri čemu je l dužina luka između tačaka P i P_0 (Slika 2.9).



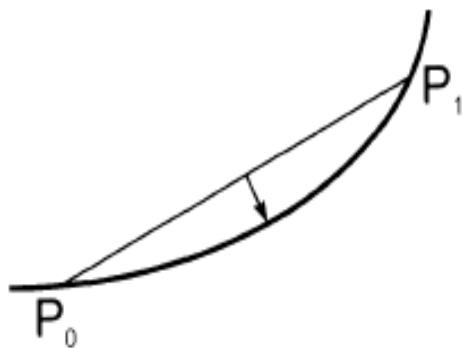
Slika 2.9: Promjena nagiba tangente na konturu

Ako se ova značajka računa na ovaj način, tada je potrebno poznavati funkciju konture, te tražiti izvod te funkcije. Pored toga, slika je diskretizovana, zbog čega nije moguće odrediti pravi nagib tangente, nego samo aproksimaciju istog.

Da bi se olakšalo računanje koristi se sljedeći metod. Uzima se duž unaprijed određene dužine, koja se "pomjera" po konturi. U svakoj poziciji se računa udaljenost od centra duži, do tačke na konturi koja se dobije iz presjeka konture sa normalom duži koja prolazi kroz njen centar (Slike 2.10 i 2.11).



Slika 2.10: Iskrivljenost konveksne konture

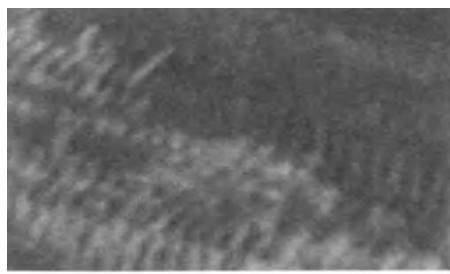


Slika 2.11: Iskrivljenost konkavne konture

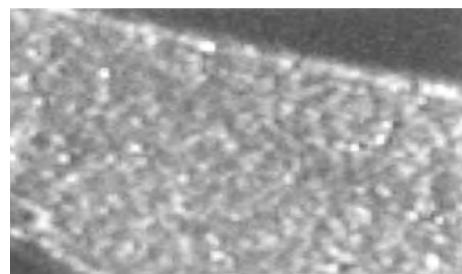
Dobijena vrijednost se uzima kao mjeru zakrivljenosti. Uzimanjem kraće duž dobija se bolja aproksimacija zakrivljenosti u dатој тачки. Међутим, треба имати у виду да прекратка дуž може također unijeti грешке, обзиром на то је слика дискретизована. Ово у примјени обично не представља проблем, јер је ријетко потребно одредити стварну iskrivljenost, већ се она пореди са неком referentnom izračunatom pri истим uvjetima. Moguće je odrediti и то да ли је контура на dijelu na kojem se računa iskrivljenost konveksna ili konkavna. Tu informaciju nosi predznak. [8]

2.7 Tekstura

Tekstura se odnosi на изглед површине objekta. Postoje više метода описивања текстура, заснованих на tzv. statistici другог реда, где се узимају у обзир односи између парова пиксела. Најосновније значајке статистике другог реда су засноване на градијенту. Градијент паја пиксела представља вектор од једног пиксела ка другом, са износом који одговара промјени осветљења међу пикセルима. Узимање средnjeg градијента је довољно да се разликују mnoge površine. [8] На slikama 2.12 и 2.13 се види полирани и сирови алиминиј, uslikani под истим uvjetima, te odgovarajuće vrijednosti srednjeg градијента.



Slika 2.12: Polirani aluminij, iznos srednjeg градијента 15.3



Slika 2.13: Sirovi aluminij, iznos srednjeg градијента 25.1

Poglavlje 3

Poređenje predložaka zasnovano na površini

Često se ove metode nazivaju i metodama poređenja predložaka zasnovanim na uzorcima, korelacionim metodama, itd. Za njihovu primjenu potrebno je imati:

- **Izvornu sliku** - slika koja se testira na postojanje nekog objekta od interesa, odnosno njegove lokacije unutar iste.
- **Uzorak** - slika koja predstavlja objekat od interesa, obično dio izvorene slike.

Ove metode se sastoje u tome da se slika uzorka pomjera kroz sve pozicije unutar izvorene slike i pri tome se za svaku poziciju računa predodređeni kriterij sličnosti. Neki od kriterija su dati u uvodu.

Na slici 3.1 je prikazan priklučak koji predstavlja uzorak. Koristeći kros-korelacioni kriterij sličnosti, potrebno je odrediti sve lokacije priklučka unutar izvorene slike prikazane na slici 3.2.



Slika 3.1: Uzorak



Slika 3.2: Izvorna slika

3.1 Kros-korelacija

Kros-korelacija je jedan od naječešćih metoda računanja sličnosti između dva signala, u ovom slučaju dvije slike. Dobija se tako što se svi pikseli slike uzorka množe sa njima odgovarajućim pikselima izvorene slike, te se međusobno sumiraju, kao što je dato relacijom (3.11).

$$R(x, y) = \sum_{x' y'} (T(x', y') I(x + x', y + y')). \quad (3.1)$$

Vrijednosti kros-korelacijske za određene pozicije uzorka su prikazane na slici 3.3.

Uzorak	Dio izvorne slike	Kros-korelacija
		19404780
		23316890
		24715810

Slika 3.3: Vrijednost kros-korelacijske za različite pozicije uzorka

Vidi se da korelacija stvarno raste, kako se uzorak približava stvarnoj poziciji. Međutim, treba oprezno koristiti ovaj kriterij obzirom da je vrijednost korelacijske vrlo osjetljiva na promjene globalnog osvjetljenja unutar slike. Tačnost ove metode će opadati sa porastom globalnog osvjetljenja. Razlog leži u načinu na koji se dati kriterij računa. [1]

Neka se uzme da vrijednost 0 odgovara crnoj boji, a 255 bijeloj, kada su slike predstavljenje nijansama sive boje. Tada vrijednost korelacijske raste, što su pikseli svjetlijiji. Ukoliko je podloga svjetla i sadržana unutar slike, a koristi se kros-korelacija, vrlo je moguće da će poređenje predložaka u tim uvjetima locirati objekat od interesa negdje u podlozi, zbog visokih vrijednosti korelacijske koje se dobiju.

3.2 Normalizovana kros-korelacija (NCC)

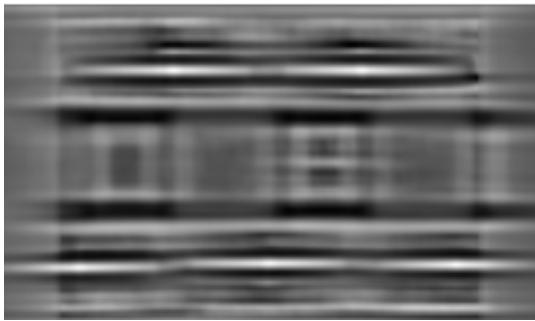
U prethodno opisanim uvjetima je bolje koristiti normalizovanu kros-korelacijsku relaciju (3.12).

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x'y'}(T(x', y')I(x+x', y+y'))}{\sqrt{\sum_{x'y'}T(x', y')^2 \sum_{x'y'}I(x+x', y+y')^2}} \quad (3.2)$$

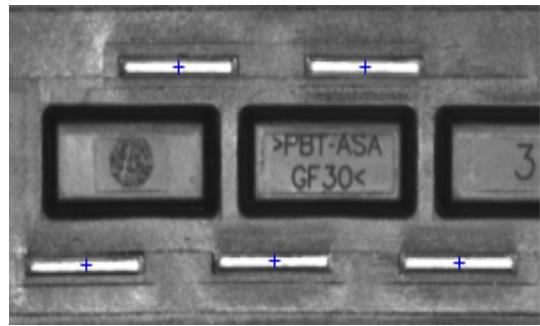
Normalizacijom se postiže invarijantnost vrijednosti kriterija u odnosu na globalno osvjetljenje slike. Član u nazivniku razlomka datog u relaciji (12) će se mijenjati kako se uvjeti osvjetljenja mijenjaju, pa se na taj način kompenzira uticaj tih promjena. Vrijednosti korelacijske su normalizacijom svedene u opseg [0, 1]. [1]

Nakon što je izračunat kriterij za svaku moguću poziciju, rezultate je potrebno predstaviti na neki način. Često se prikazuju u obliku nove slike, veličine izvorne, kojoj su pojedini pikseli osvjetljeni shodno iznosu kriterija u toj lokaciji, kao što je prikazano slikom 3.4.

Zatim je potrebno odrediti neku graničnu vrijednost korelacijske pri kojoj se može reći da se dati objekat nalazi na toj lokaciji. Na taj način se dobijaju sve lokacije objekta, prikazane na slici 3.5.



Slika 3.4: Prikaz korelacije nijansama sive



Slika 3.5: Lokacije uzorka u izvornoj slici

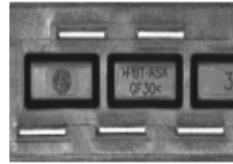
3.3 Metod piramidalne korelaciјe

Obzirom da su korelacione metode računarski veoma zahtjevne, pa zbog toga i spore kada se radi sa slikama većih dimenzija, teži se ubrzavanju ovog procesa. Jedan od načina je korištenje tzv. piramide.

Ideja je da se izvorna slika i uzorak preskaliraju za određeni faktor. Dobijaju se manje slike, dakle manje piksela za proračun, koje su i dalje vjerne reprezentacije početnih. Bitno je primijetiti da je uzorak i dalje prepoznatljiv nakon znatnog umanjivanja slike. [12]



Slika 3.6: Nivo 1



Slika 3.7: Nivo 2



Slika 3.8: Nivo 3



Slika 3.9: Nivo 1



Slika 3.10: Nivo 2



Slika 3.11: Nivo 3

Pristup se sastoji u sljedećem. Krenuvši od vrha piramide (od najmanje slike) prema dnu vrši se poređenje predložaka. Pri svakom novom poređenju uzimaju se obzir samo lokacije koje su na prethodnom nivou imale visok iznos korelaciјe. Na taj način se izbjegava proračun nad velikim brojem piksela. Koliko će se uštediti na vremenu ovisi o samoj implementaciji metode, nivou piramide, itd.

Gausova piramida

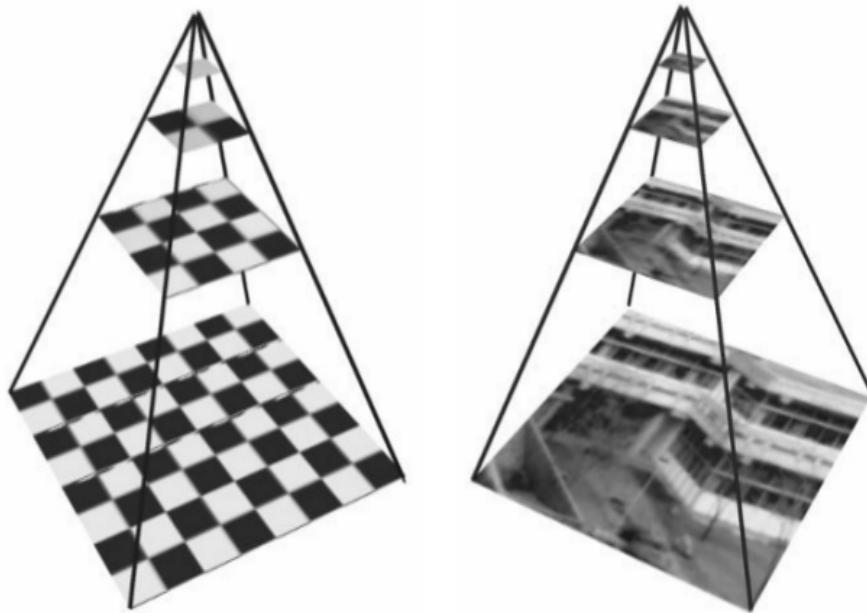
U procesu umanjivanja slike potrebno je paziti da se ispoštuje **teorema o uzorkovanju**. Treba se imati u vidu koliko brzim uzorkovanjem je dobijena slika. Recimo da je slika dobijena uzimanjem 3 uzorka po periodu. Ako se tada slika pokuša umanjiti prostim preskakanjem svakog drugog piksela, teorema o uzorkovanju će biti prekršena. Razlog je što se uzimanjem svakog drugog piskela polovi broj uzoraka, pa će umanjena slika biti uzorkovana 1.5 puta po periodu, a potrebna su minimalno 2. Umanjivanje veličine slike treba biti praćeno adekvatnim filtriranjem. [12]

Operacije smanjivanja i filtriranja mogu biti prikazane kao jedan operator sljedećom notacijom:

$$\mathbf{G}^{(0)} = \mathbf{G}, \mathbf{G}^{(q+1)} = \mathbf{B}_{\downarrow 2} \mathbf{G}^{(q)}, \quad (3.3)$$

pri čemu eksponent od \mathbf{G} označava nivo piramide, a broj u indeksu od \mathbf{B} brzinu uzorkovanja.

Iterativnim smanjivanjem i filtriranjem dobija se niz slika, koji se naziva Gausova piramida, što se vidi na slici 3.12. Svakim nivoom rezolucija se smanjuje 2 puta.



Slika 3.12: Gausova piramida

Ako se uzme slika sa W dimenzija, M piksela u smjeru svake koordinate, te faktor "poduzorkovanja" 2, onda je ukupni broj piksela novodobijene piramide dat sa:

$$M^W \left(1 + \frac{1}{2^W} + \frac{1}{2^{2W}} + \dots\right) < M^W \frac{2^W}{2^W - 1}. \quad (3.4)$$

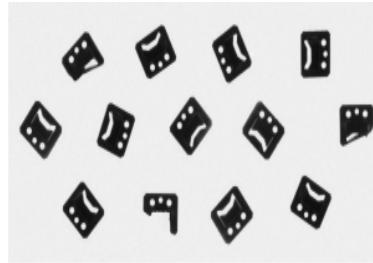
Na vrhu piramide je slika sastavljena od jednog piksela. Iz relacije (14) se vidi da za 2D slike piramide zauzima $\frac{1}{3}$ više prostora u odnosu na originalnu sliku. U tom slučaju je W jednako 2, obzirom da su jedine dimenzije širina i dužina slike.

3.4 Rotirani uzorci

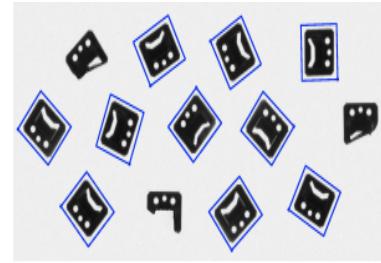
Nekada je potrebno pronaći uzorak unutar slike u kojoj se isti može pojaviti sa drugačijom orijentacijom. Da bi se to uradilo koristi se skup uzoraka ili skup piramida uzoraka, svaki sa drugačijom orijentacijom. Zatim se izvorna slika pretražuje na sve uzorke iz skupa i označavaju lokacije na kojima iznos korelacijske vrijednosti prelazi zadani prag. Na taj način je moguće detektovati orijentirane primjere uzorka, kao što je prikazano na slikama:



Slika 3.13: Uzorak



Slika 3.14: Izvorna slika



Slika 3.15: Podudaranja

3.5 Koeficijent korelacija

Koeficijent korelacija predstavlja mjeru sličnosti dva seta podataka. Tačnije, pokazuje kolika je vjerovatnoća da postoji linearna veza imedju različitih podataka. Prvi formalni koeficijent korelacija jeste Pearson-ov. Računa se kao:

$$r = \frac{\sum_i (x_i - x_m)(y_i - y_m)}{\sqrt{\sum_i (x_i - x_m)^2} \sqrt{\sum_i (y_i - y_m)^2}} \quad (3.5)$$

gdje su x_i i y_i intenziteti i-tog piksela prve i druge slike, a x_m i y_m srednje vrijednost piksela prve i druge slike, respektivno. Korelacija ima vrijednost $r = 1$ ukoliko su slike identične, $r = 0$ ako nisu slične, te $r = -1$ ako su potpuno suprotne. Treba napomenuti da data relacija važi samo za monohromatske slike.

Poglavlje 4

Implementacije u OpenCV

4.1 Uvod

U ovom dijelu testirat će se implementacije metode poređenja predložaka date unutar biblioteke **OpenCV** (Open Source Computer Vision Library). Korištenje biblioteke je besplatno kako u akademske, tako i u komercijalne svrhe. Pisana je za programske jezike C/C++, Phyton i Javu. U ovom radu koristit će se programski jezik **C++**.

U svrhe testiranja koristit će se uzorak i izvorna slika, koji su relativno bliski situaciji u kojoj će se odabrani metod kasnije i koristiti. Radi se o problemu odvajanja škarta u proizvodnji čepova. Škartom se smatraju čepovi koji uslijed nepravilnosti u radu mašina ili nekih drugih nepredvidih situacija, imaju greške unutar slike, natpisa, itd. Uzorak i izvorna slika prikazani su na slikama 4.1 i 4.2.



Slika 4.2: Uzorak

Slika 4.1: Izvorna slika

Poređenje predložaka će biti primjenjivano nad slikama prikazanim u nijansama sive, kako se to i najčešće radi.

Treba napomenuti da nad jednim primjerkom nije moguće dobiti potpunu sliku o prednostima i nedostacima svih metoda. Akcenat se stavlja na pronalaženje što boljeg rješenja za definisani problem. Po potrebi će se uzorak transformisati da se demonstriraju neke prednosti i mane, koje bi u suprotnom bile izostavljene.

Implementacije će se testirati na sljedeće:

- **Tačnost** - odnosi se na mogućnost lociranja uzorka unutar slike. Ispitivat će se pri promjenjivom globalnom osvjetljenju.

- **Robusnost** - podrazumijeva tačnost pri različitim promjenama izvorne slike u odnosu na početnu, iz koje ekstraktovan uzorak.

Ovo se prvenstveno odnosi na ispitivanje robusnosti u odnosu na promjene uslijed:

- **Skaliranja** - slika je veća ili manja od originalne.
- **Rotacije** - slika je za određeni ugao zarotirana u odnosu na originalnu.

Ovim stavkama se nastoji pokriti dio raznih promjena koje mogu nastati u praksi pri ponovnom slikanju. Obzirom da će se čepovi kretati na traci, teško će se dobiti dva puta identična slika.

- **Brzina** - odnosi se na vrijeme potrebno da se pronađe lokacija uzorka.

Unutar OpenCV poređenje predložaka je implementirano u vidu metode sa sljedećim prototipom:

```
void matchTemplate(InputArray image, InputArray templ,  
OutputArray result, int method);
```

Argumenti metode:

- **image** - slika koja se pretražuje (izvorna), dimenzije W x H.
- **templ** - uzorak (eng. *template*), dimenzije w x h.
- **result** - varijabla tipa OutputArray u koju se smješta rezultat u vidu slike dimenzije (W - w + 1) x (H - h + 1), na kojoj su prikazane vrijednosti korelacije u pojedinim lokacijama.
- **method** - enumeracijski tip pomoću kojeg se zadaje kriterij.

Vrijednosti argumenta **method** mogu biti sljedeće:

- **CV_TM_SQDIFF** - najmanja kvadratna greška
- **CV_TM_SQDIFF_NORMED** - normalizovana najmanja kvadratna greška
- **CV_TM_CCORR** - kros-korelacija
- **CV_TM_CCORR_NORMED** - normalizovana kros-korelacija
- **CV_TM_CCOEFF** - koeficijent korelacijske funkcije
- **CV_TM_CCOEFF_NORMED** - normalizovani koeficijent korelacijske funkcije

Nakon što se obavi poređenje predložaka, koristi se funkcija **minMaxLoc()** nad rezultatom poređenja da se dobije lokacija najveće podudarnosti.

Specifikacije računara na kojem su provedena testiranja

Specifikacije računara na kojem su provedena testiranja date su ispod u tabeli 4.1.

Tip računara	Laptop
Model	Acer Aspire 5 A515-51G-54Z3
Šifra	NX.GT1EX.019
Procesor	8x Intel Core i5-8250U CPU @ 1.60GHz
Memorija	8GB DDR4 SDRAM
Disk	SSD 256 GB
Grafička kartica	GeForce® MX150
Operativni sistem	Ubuntu 16.04.5 LTS

Tabela 4.1: Specifikacije računara

Način sprovodenja testiranja

Sve metode će biti testirane na sljedeći način:

- **Osvjetljenje**

Za svaki kriterij prvo će se odrediti rezultati za originalnu izvornu sliku. Zatim će se osvjetljenje povećavati i smanjivati do iznosa 120 i -120, respektivno, sa korakom 10. Osvjetljenje se mijenja na način da se navedeni iznos dodaje na sve piksele, tj. elemente matrice koja predstavlja izvornu sliku. Nakon toga vrijednost kriterija bit će prikazana na slikama, te tabelarno. Vrijednost kriterija u slučaju promjenjivog osvjetljenja predstavlja iznos korelacije na poziciji ograničavajućeg okvira. Kod promjenjivog osvjetljenja odstupanja detekcije su uvijek maksimalna (ukoliko se pojave), tj. uzorak biva detektovan negdje u podlozi uslijed velike korelacije sa podlogom izvorne slike. Iz ovog razloga se ne prikazuje udaljenost centra ograničavajućeg okvira od centra stvarnog čepa, već se rezultat testa tumači kao detektovan, odnosno ne detektovan.

- **Rotacija**

Ispitivanje robusnosti metoda u odnosu na rotaciju izvorne slike vršit će se s prepostavkom da je moguća rotacija u iznosu od -105 do 105 stepeni. Krenuvši od slike zakrenute za -105 stepeni korakom od 15 stepeni će se povećavati zakretanje dok se ne dostigne zakretanje od 105 stepeni. U svakom koraku se računa udaljenost između stvarne lokacije uzorka i one koja je određena korištenom metodom. Treba napomenuti da pozitivan ugao zakretanja podrazumijeva zakretanje u smjeru suprotnom od kazaljke na satu, dok negativan ugao podrazumijeva zakretanje u smjeru kazaljke na satu. Za rotaciju se neće prikazivati vrijednost kriterija (korelacije) nego će se valjanost pronalaska mjeriti greškom, odnosno odstupanjem određene lokacije u odnosu na stvarnu lokaciju uzorka unutar slike. Ovo odstupanje se definiše kao udaljenost između centra ograničavajućeg okvira i centra uzorka na izvornoj slici.

- **Skaliranje**

Ispitivanje robusnosti metode u odnosu na skaliranu izvornu sliku će biti izvršeno na način da će se izvorna slika preskalirati za određeni faktor određeni broj puta, te će se pri tome mjeriti udaljenost između stvarne pozicije uzorka i one određene poređenjem predložaka. Izvorna slika će biti 9 puta uvećana za $\frac{1}{15}$ njene početne veličine, te isti broj

puta umanjena za $\frac{1}{30}$ njene početne veličine. Iznos za koji se slika umanjuje je manji da slika ne bi postala manja od uzorka nakon posljednje iteracije umanjivanja. I u ovom slučaju će valjanost detekcije biti određena na osnovu udaljenosti centra ograničavajućeg okvira od centra uzorka na slici, koja će se u nastavku nazivati greškom.

Napomena: U nastavku će se na mjestima gdje piše “kriterij” podrazumijevati iznos korelacije, a na mjestima gdje piše “greška” podrazumijevat će se udaljenost centra ograničavajućeg okvira od centra stvarne lokacije uzorka.

4.2 Rezultati primjene kriterija najmanje kvadratne greške

Na slici 4.3 je prikazan rezultat poređenja predložaka nad originalnom slikom. Pronađeni uzorak označen je crnim okvirom, a vrijednost kriterija je data u gornjem lijevom uglu. Stvarna vrijednost kriterija se dobije kad se prikazana pomnoži sa 10^9 .



Slika 4.3: Originalna izvorna slika, najmanja kvadratna greška

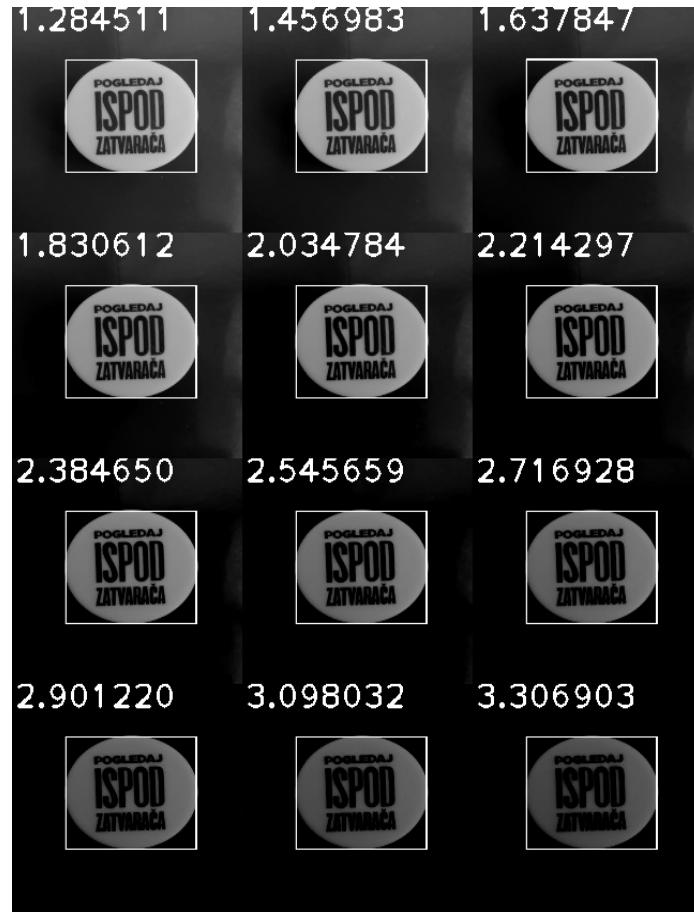
4.2.1 Rezultati pri promjenjivom osvjetljenju

Na slici 4.4 prikazani su rezultati testiranja za slučaj povećanog osvjetljenja i to od iznosa 10 pa do 120, polazeći od slike u gornjem lijevom uglu pa udesno po redovima.



Slika 4.4: Povećano osvjetljenje, najmanja kvadratna greška

Na slici 4.5 prikazani su rezultati testiranja za slučaj smanjenog osvjetljenja i to od iznosa 10 pa do 120, polazeći od slike u gornjem lijevom ugлу pa udesno po redovima



Slika 4.5: Smanjeno osvjetljenje, najmanja kvadratna greška

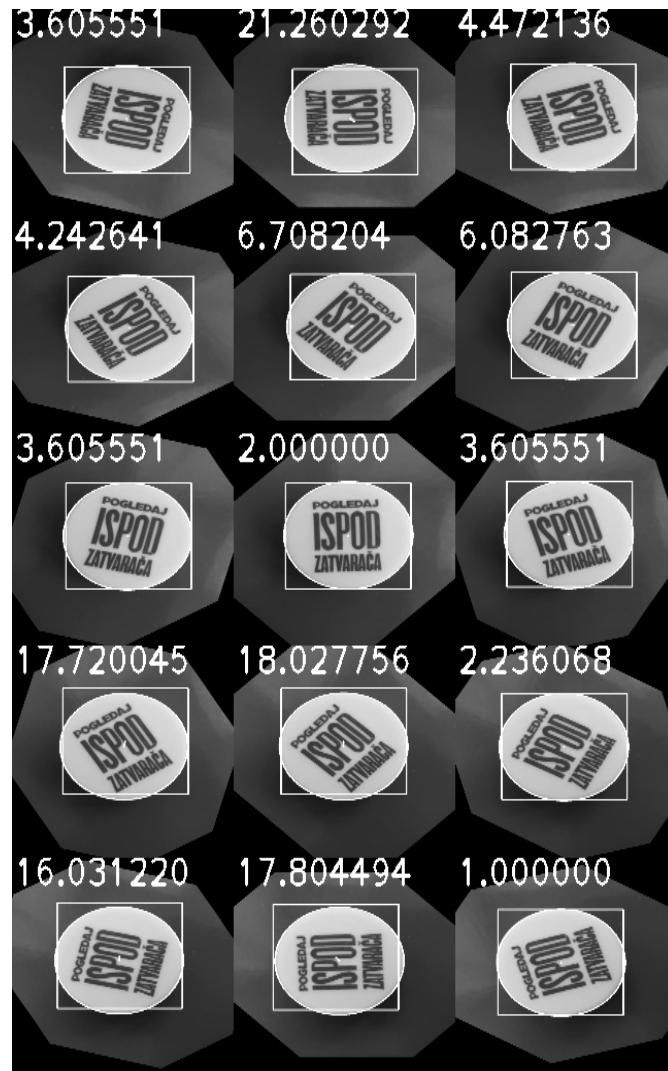
Tabelarni prikaz rezultat dat je sljedećom tabelom:

Promjena osvjetljenja	-120	-110	-100	-90	-80	-70
(Vrijednost kriterija) $\times 10^9$	3.307	3.098	2.901	2.717	2.546	2.385
Promjena osvjetljenja	-60	-50	-40	-30	-20	-10
(Vrijednost kriterija) $\times 10^9$	2.214	2.035	1.831	1.638	1.457	1.285
Promjena osvjetljenja	+10	+20	+30	+40	+50	+60
(Vrijednost kriterija) $\times 10^9$	0.857	0.817	0.801	0.796	0.799	0.798
Promjena osvjetljenja	+70	+80	+90	+100	+110	+120
(Vrijednost kriterija) $\times 10^9$	0.771	0.707	0.665	0.644	0.615	0.598

Tabela 4.2: Promjena kriterija pri promjeni osvjetljenja

4.2.2 Rezultati pri promjenjivoj rotaciji

Rezultati testiranja najmanje kvadratne greške u odnosu na promjenjivu rotaciju dati su na slici 4.6, a tabelarno su prikazani u tabeli 4.3.

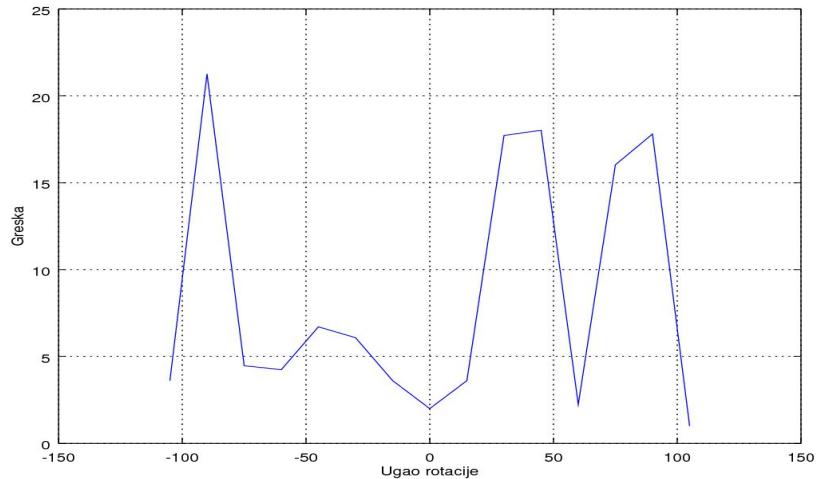


Slika 4.6: Promjenjiva rotacija, najmanja kvadratna greška

Ugao rotacije (stepeni)	-105	-90	-75	-60	-45	-30
Greška	3.61	21.26	4.47	4.24	6.71	6.08
Ugao rotacije (stepeni)	-15	0	15	30	45	60
Greška	3.61	2	3.61	17.72	18.03	2.24
Ugao rotacije (stepeni)	75	90	105			
Greška	16.03	17.80	1			

Tabela 4.3: Promjena greške pri promjenjivoj rotaciji

Na slici 4.7 prikazan je grafik greške u ovisnosti od ugla rotacije.



Slika 4.7: Greška lokacije u ovisnosti od ugla rotacije

4.2.3 Rezultati pri promjenjivom skaliranju

Na slici 4.8 prikazani su rezultati dobijeni uvećavanjem izvorne slike 9 puta za $\frac{1}{15}$ njene početne veličine.



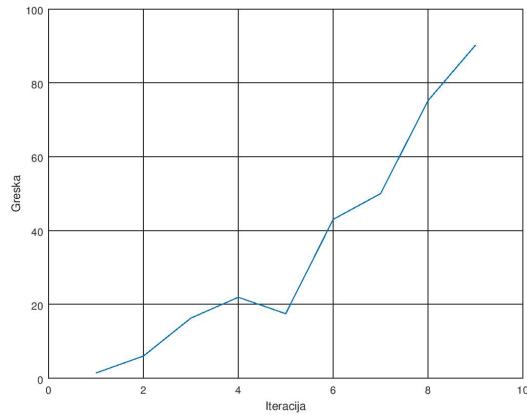
Slika 4.8: Povećana izvorna slika, najmanja kvadratna greška

Na slici 4.9 prikazani su rezultati dobijeni umanjivanjem izvorne slike 9 puta za $\frac{1}{30}$ njene početne veličine.

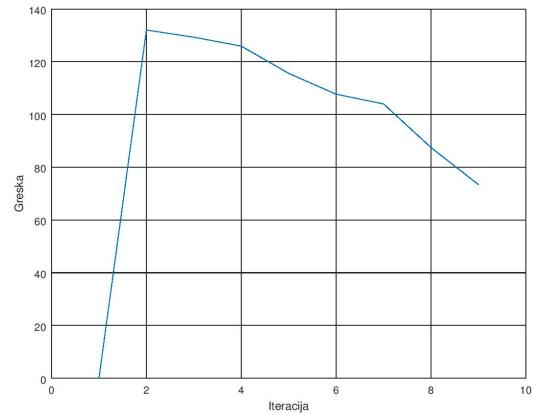


Slika 4.9: Umanjena izvorna slika, najmanja kvadratna greška

Grafički prikaz greške pri skaliranju prikazan je na slikama ispod:



Slika 4.10: Greška pri povećanju izvorne slike



Slika 4.11: Greška pri smanjenju izvorne slike

Komentar

Najmanja kvadratna greška se pokazuje dobrom kod ne toliko ekstremnih promjena globalnog osvjetljenja. Greška nastaje kada se osvjetljenje mnogo poveća. To se i očekuje obzirom da je podloga na kojoj se nalazi uzorak bijela, pa dolazi do velikog podudaranja podloga, što uzrokuje pogrešnu detekciju uzorka.

Pokazuje se relativno robustnom pri zadanim uvjetima u odnosu na rotaciju izvorne slike. Maksimalna greška detekcije iznosi 21.26 piksela i to pri rotaciji izvorne slike za -90 stepeni.

U primjercima gdje je izvorna slika takva, da je instanca uzorka unutar nje manjih dimenzija u odnosu na uzeti, dolazi do pogreške. Nakon što instance uzorka unutar izvorne slike postane već od uzetog, dobijaju se dosta bolji rezultati. Obzirom da će kamera, ukoliko je fiksna, u realnoj situaciji slikati izvornu sliku sa istom ili manjom veličinom instance uzorka (kada čep nije direktno ispod kamere, već nešto pomaknut), potrebno je obratiti pažnju na ovo.

Testiranja pokazuju da je potrebno paziti da uslikana slika ne odudara previše od izvorne što se tiče dimenzija. Treba imati na umu boju podloge uzorka i kako ona može uticati na rezultat uz promjenjeno globalno osvjetljenje.

4.3 Rezultati primjene kriterija normalizovane najmanje kvadratne greške

Na slici 4.12 prikazan je rezultat poređenja predložaka primjenom kriterija normalizovane najmanje kvadratne greške nad originalnom izvornom slikom.



Slika 4.12: Originalna izvorna slika, normalizovana najmanja kvadratna greška

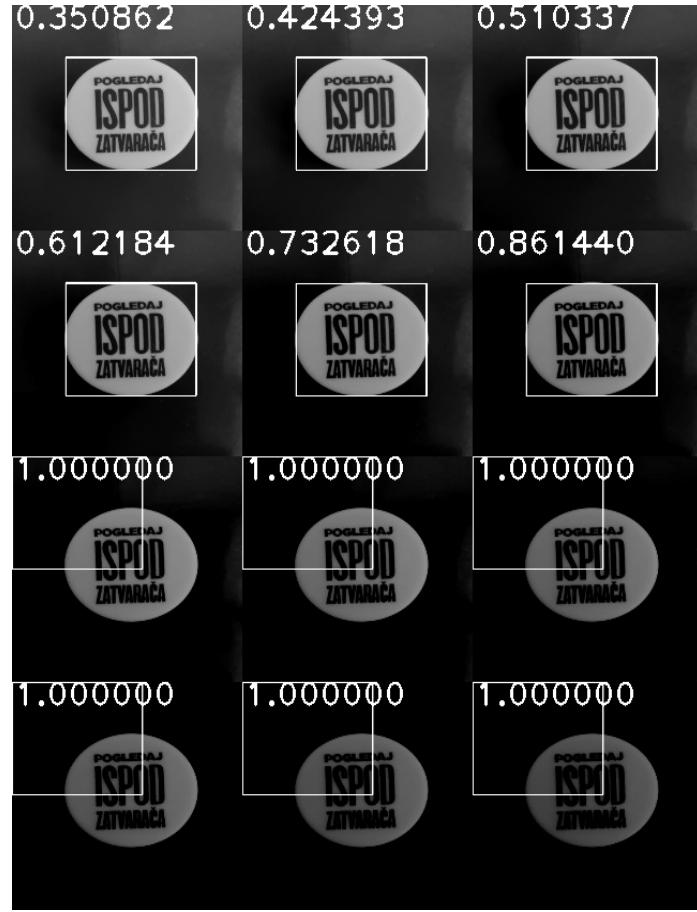
4.3.1 Rezultati pri promjenjivom osvjetljenju

Na slici 4.13 prikazani su rezultati dobijeni pri povećanom osvjetljenju redoslijedom kao i kod prethodne metode.



Slika 4.13: Povećano osvjetljenje, normalizovana najmanja kvadratna greška

Na slici 4.14 prikazani su rezultati pri umanjenom osvjetljenju.



Slika 4.14: Smanjeno osvjetljenje, normalizovana najmanja kvadratna greška

Tabelarni prikaz dobijenih rezultata dat je u tabeli 4.4.

Promjena osvjetljenja	-120	-110	-100	-90	-80	-70
(Vrijednost kriterija)	1	1	1	1	1	1
Promjena osvjetljenja	-60	-50	-40	-30	-20	-10
(Vrijednost kriterija)	0.861	0.732	0.612	0.51	0.424	0.351
Promjena osvjetljenja	+10	+20	+30	+40	+50	+60
(Vrijednost kriterija)	0.186	0.168	0.157	0.151	0.147	0.144
Promjena osvjetljenja	+70	+80	+90	+100	+110	+120
(Vrijednost kriterija)	0.141	0.14	0.136	0.126	0.122	0.119

Tabela 4.4: Promjena kriterija pri promjeni osvjetljenja

4.3.2 Rezultati pri promjenjivoj rotaciji

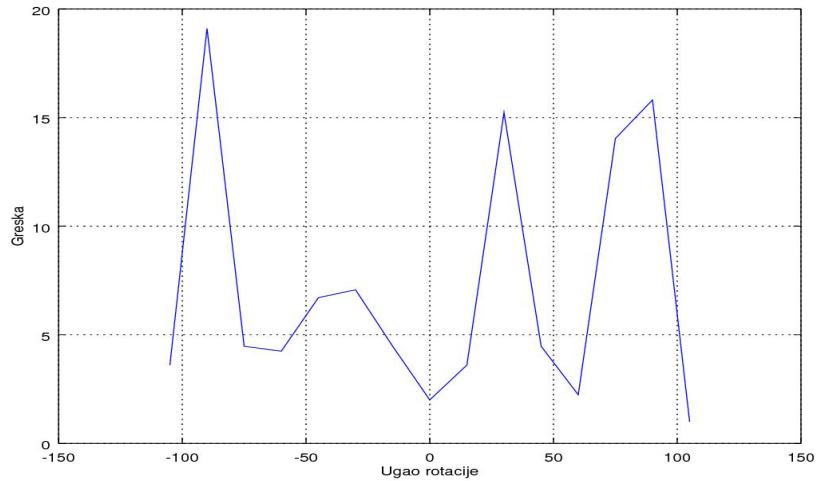
Rezultati kriterija pri promjenjivoj rotaciji prikazani su slikom 4.15.

**Slika 4.15:** Promjenjiva rotacija, normalizovana najmanja kvadratna greška

Ugao rotacije (stepeni)	-105	-90	-75	-60	-45	-30
Greška	3.61	19.10	4.47	4.24	6.71	7.07
Ugao rotacije (stepeni)	-15	0	15	30	45	60
Greška	4.47	2	3.61	15.23	4.47	2.24
Ugao rotacije (stepeni)	75	90	105			
Greška	14.04	15.81	1			

Tabela 4.5: Promjena greške pri promjenjivoj rotaciji

Grafik koji prikazuje ovisnost greške od ugla rotacije izvorne slike prikazan je slikom 4.16.



Slika 4.16: Greška lokacije u ovisnosti od ugla rotacije

4.3.3 Rezultati pri promjenjivom skaliranju

Na slici 4.17 prikazani su rezultati dobijeni uvećavanjem izvorne slike 9 puta za $\frac{1}{15}$ njene početne veličine.



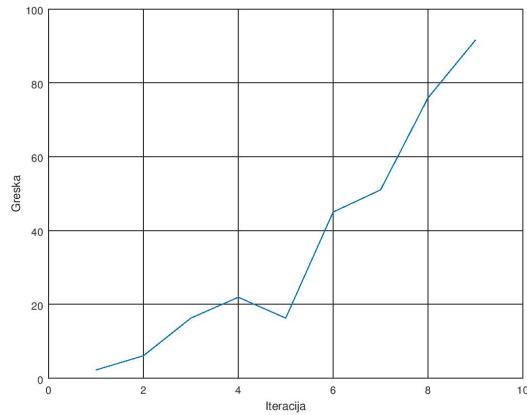
Slika 4.17: Povećana izvorna slika, normalizovana najmanja kvadratna greška

Na slici 4.18 prikazani su rezultati dobijeni umanjivanjem izvorne slike 9 puta za $\frac{1}{30}$ njene početne veličine.

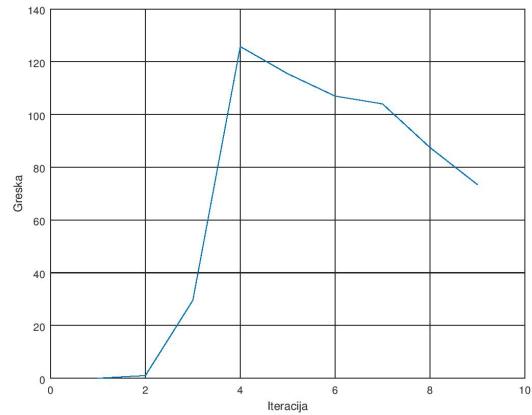


Slika 4.18: Smanjena izvorna slika, normalizovana najmanja kvadratna greška

Grafički prikaz greške pri skaliranju prikazan je na slikama ispod:



Slika 4.19: Greška pri povećanju izvorne slike



Slika 4.20: Greška pri smanjenju izvorne slike

Komentar

Što se tiče promjena globalnog osvjetljenja, kod normalizovane najmanje kvadratne greške dolazi do odstupanja kako pri prevelikom povećanju, tako i pri prevelikom smanjenju globalnog osvjetljenja izvorne slike. Uslijed normalizacije pojavljuje se veliko podudaranje podloga u oba smjera osvjetljivanja, što rezultati i demonstriraju.

Metoda se pokazuje robusnijom od prethodne u odnosu na rotaciju izvorne slike, sa maksimalnom greškom od 19.105 piksela pri rotaciji za -90 stepeni.

Pri skaliranju ima se slična situacija kao kod prethodne metode.

4.4 Rezultati primjene kriterija kros-korelacijske

Rezultat primjene metode kros-korelacijske nad originalnom izvornom slikom prikazan je na slici 4.21. Brojčanu vrijednost prikazanu na slici potrebno je pomnožiti sa 10^9 da se dobije stvarna vrijednost kriterija.



Slika 4.21: Originalna izvorna slika, kros-korelacija

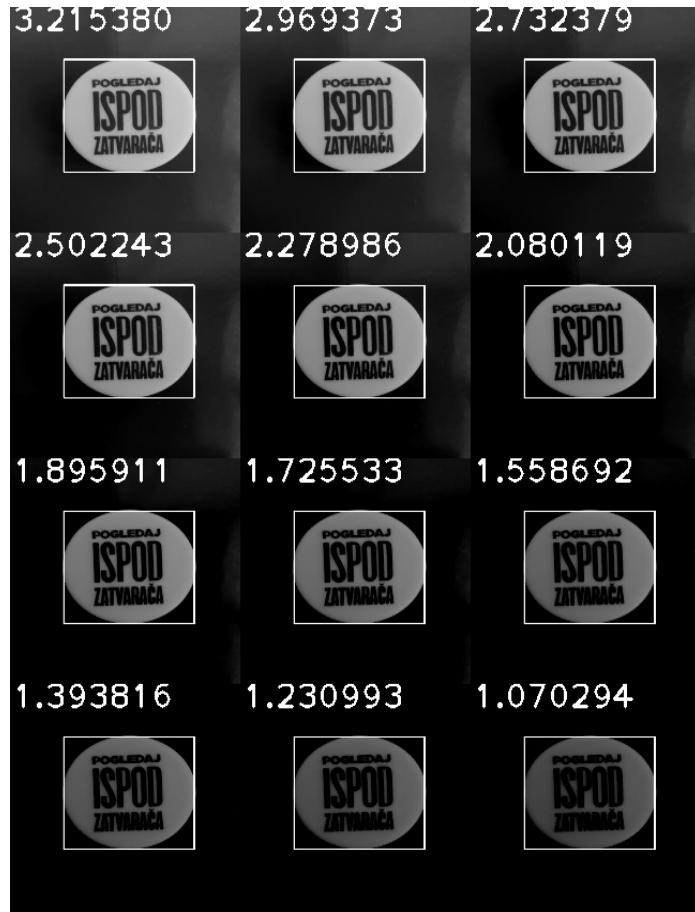
4.4.1 Rezultati pri promjenjivom osvjetljenju

Na slici 4.22 prikazani su rezultati dobijeni pri povećanom osvjetljenju redoslijedom kao i kod prethodne metode.



Slika 4.22: Povećano osvjetljenje, kros-korelacija

Na slici 4.23 prikazani su rezultati pri umanjenom osvjetljenju.



Slika 4.23: Smanjeno osvjetljenje, kros-korelacija

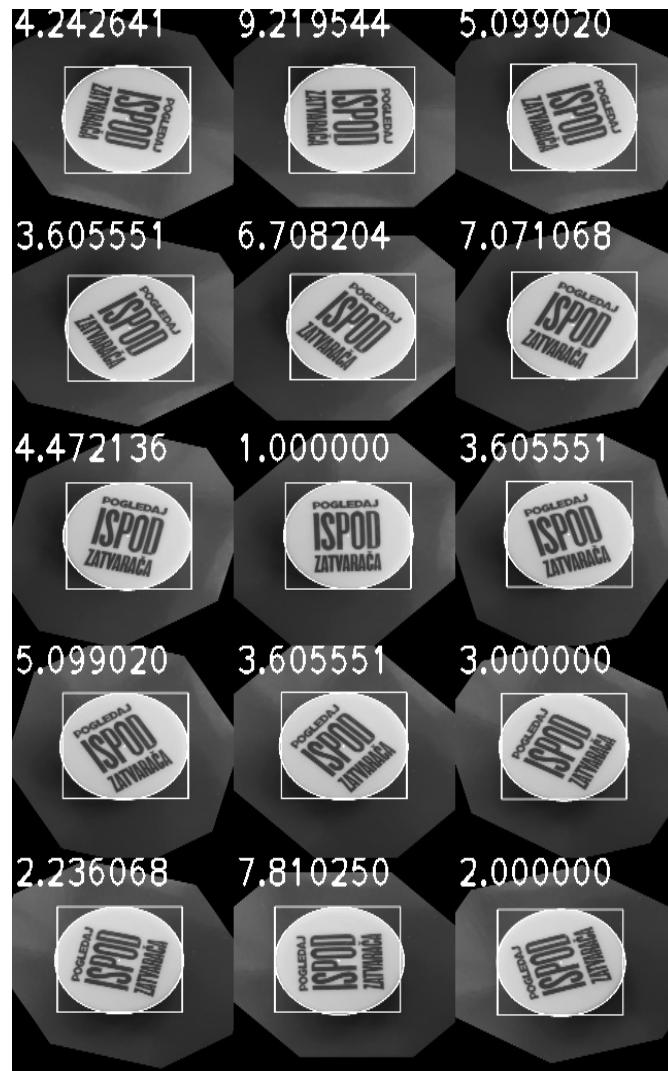
Tabelarni prikaz dobijenih rezultata dat je u tabeli 4.6.

Promjena osvjetljenja	-120	-110	-100	-90	-80	-70
(Vrijednost kriterija) $\times 10^9$	1.0703	1.2309	1.3938	1.5586	1.7255	1.8959
Promjena osvjetljenja	-60	-50	-40	-30	-20	-10
(Vrijednost kriterija) $\times 10^9$	2.0801	2.2789	2.5022	2.7324	2.9694	3.2154
Promjena osvjetljenja	+10	+20	+30	+40	+50	+60
(Vrijednost kriterija) $\times 10^9$	4.2034	4.4492	4.6827	4.8807	5.0502	5.1829
Promjena osvjetljenja	+70	+80	+90	+100	+110	+120
(Vrijednost kriterija) $\times 10^9$	5.2968	5.4013	5.4995	5.593	5.6832	5.7708

Tabela 4.6: Promjena kriterija pri promjeni osvjetljenja

4.4.2 Rezultati pri promjenjivoj rotaciji

Rezultati kriterija pri promjenjivoj rotaciji prikazani su slikom 4.24.

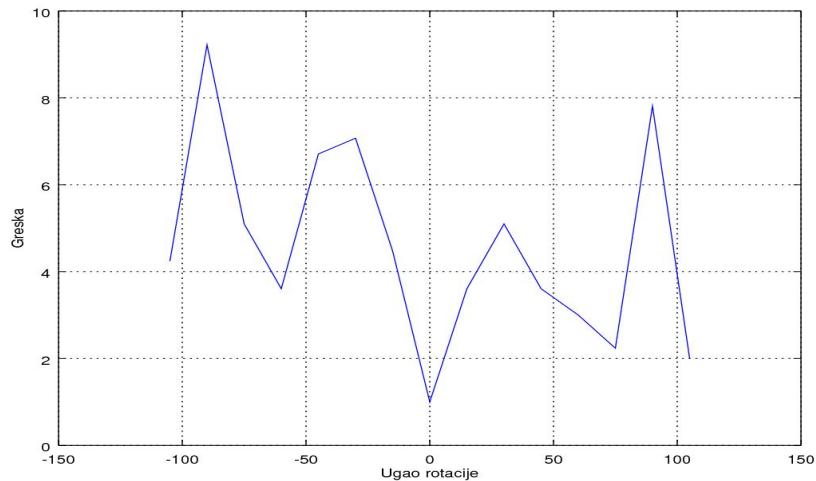


Slika 4.24: Promjenjiva rotacija, kros-korelacija

Ugao rotacije (stepeni)	-105	-90	-75	-60	-45	-30
Greška	4.24	9.22	5.10	3.61	6.71	7.07
Ugao rotacije (stepeni)	-15	0	15	30	45	60
Greška	4.47	1	3.61	5.10	3.61	3
Ugao rotacije (stepeni)	75	90	105			
Greška	2.24	7.81	2			

Tabela 4.7: Promjena greške kriterija pri promjenjivoj rotaciji

Grafik koji prikazuje ovisnost greške od ugla rotacije izvorne slike prikazan je slikom 4.25.



Slika 4.25: Greška lokacije u ovisnosti od ugla rotacije

4.4.3 Rezultati pri promjenjivom skaliranju

Na slici 4.26 prikazani su rezultati dobijeni uvećavanjem izvorne slike 9 puta za $\frac{1}{15}$ njene početne veličine.



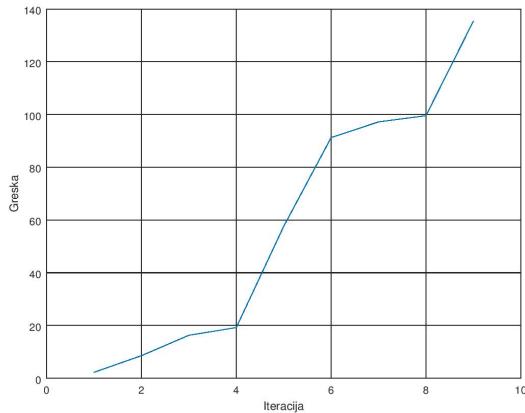
Slika 4.26: Povećana izvorna slika, kros-korelacija

Na slici 4.27 prikazani su rezultati dobijeni umanjivanjem izvorne slike 9 puta za $\frac{1}{30}$ njene početne veličine.

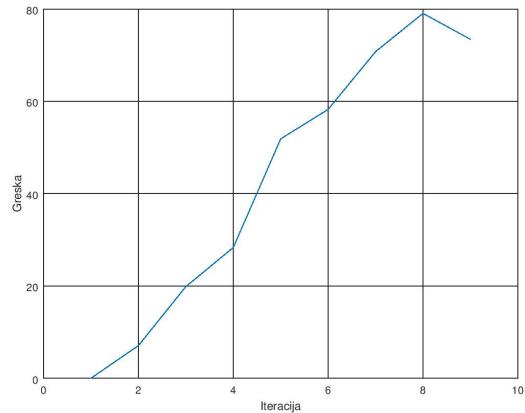


Slika 4.27: Smanjena izvorna slika, kros-korelacija

Grafički prikaz greške pri skaliranju prikazan je na slikama ispod:



Slika 4.28: Greška pri povećanju izvorne slike



Slika 4.29: Greška pri smanjenju izvorne slike

Komentar

Pomoću kros-korelacije lokacije uzorka su tačno određene za sve primjere sa različitim globalnim osvjetljenjem. Dobijeni rezultati donekle zavaravaju. Treba imati u vidu da je sam čep unutar slike uzorka bijele boje (osim natpisa), što dovodi do visokih vrijednosti korelacijske u datim tačkama. U slučaju da je čep bio neke druge boje, a podloga bijele, za očekivati bi bilo da dođe do greške uslijed povećanog osvjetljenja (svijetlijije tačke imaju višu vrijednost).

Kros-korelacija se pokazuje najrobustnijom dosad u odnosu na promjenjivu rotaciju izvorne slike, sa maksimalnog vrijednosti greške od 9.22 piksela pri rotaciji za -90 stepeni.

4.5 Rezultati primjene kriterija normalizovane kros-korelacijske

Rezultat primjene metode normalizovane kros-korelacijske nad originalnom izvornom slikom prikazan je na slici 4.30.



Slika 4.30: Originalna izvorna slika, normalizovana kros-korelacija

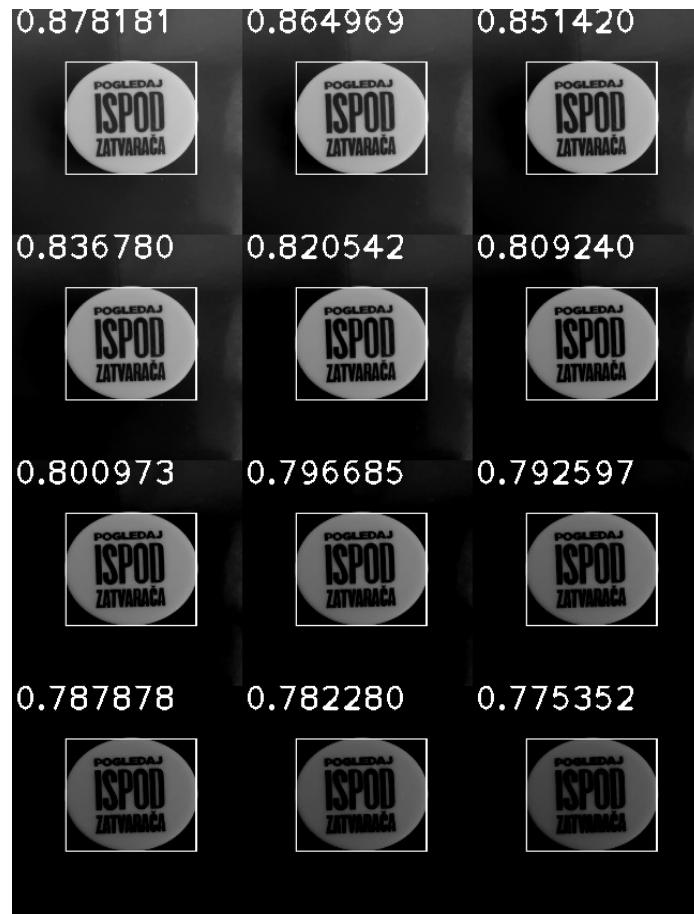
4.5.1 Rezultati pri promjenjivom osvjetljivanju

Na slici 4.31 prikazani su rezultati dobijeni pri povećanom osvjetljivanju redoslijedom kao i kod prethodne metode.



Slika 4.31: Povećano osvjetljivanje, normalizovana kros-korelacija

Na slici 4.32 prikazani su rezultati pri umanjenom osvjetljivanju.

**Slika 4.32:** Smanjeno osvjetljenje, normalizovana kros korelacija

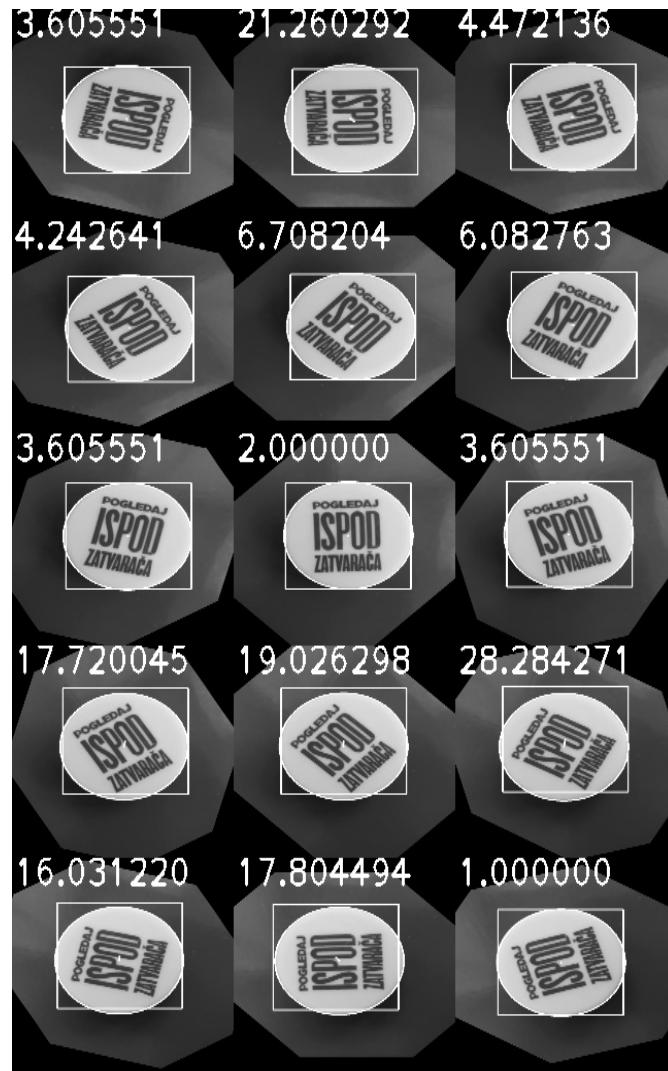
Tabelarni prikaz dobijenih rezultati dat je u tabeli 4.8.

Promjena osvjetljenja	-120	-110	-100	-90	-80	-70
(Vrijednost kriterija)	0.7754	0.7823	0.7879	0.7926	0.7967	0.801
Promjena osvjetljenja	-60	-50	-40	-30	-20	-10
(Vrijednost kriterija)	0.8092	0.8205	0.8368	0.8514	0.8649	0.8782
Promjena osvjetljenja	+10	+20	+30	+40	+50	+60
(Vrijednost kriterija)	0.9117	0.9168	0.9212	0.9253	0.9289	0.9324
Promjena osvjetljenja	+70	+80	+90	+100	+110	+120
(Vrijednost kriterija)	0.9355	0.938	0.94	0.9415	0.9426	0.9432

Tabela 4.8: Promjena kriterija pri promjeni osvjetljenja

4.5.2 Rezultati pri promjenjivoj rotaciji

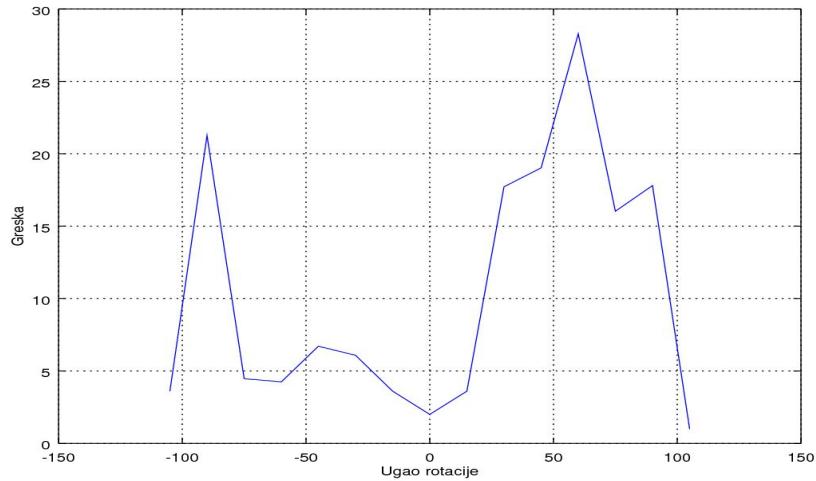
Rezultati kriterija pri promjenjivoj rotaciji prikazani su slikom 4.33.

**Slika 4.33:** Promjenjiva rotacija, normalizovana kros-korelacija

Ugao rotacije (stepeni)	-105	-90	-75	-60	-45	-30
Greška	3.61	21.26	4.47	4.24	6.71	6.08
Ugao rotacije (stepeni)	-15	0	15	30	45	60
Greška	3.61	2	3.61	17.72	19.03	28.28
Ugao rotacije (stepeni)	75	90	105			
Greška	16.03	17.80	1			

Tabela 4.9: Promjena greške pri promjenjivoj rotaciji

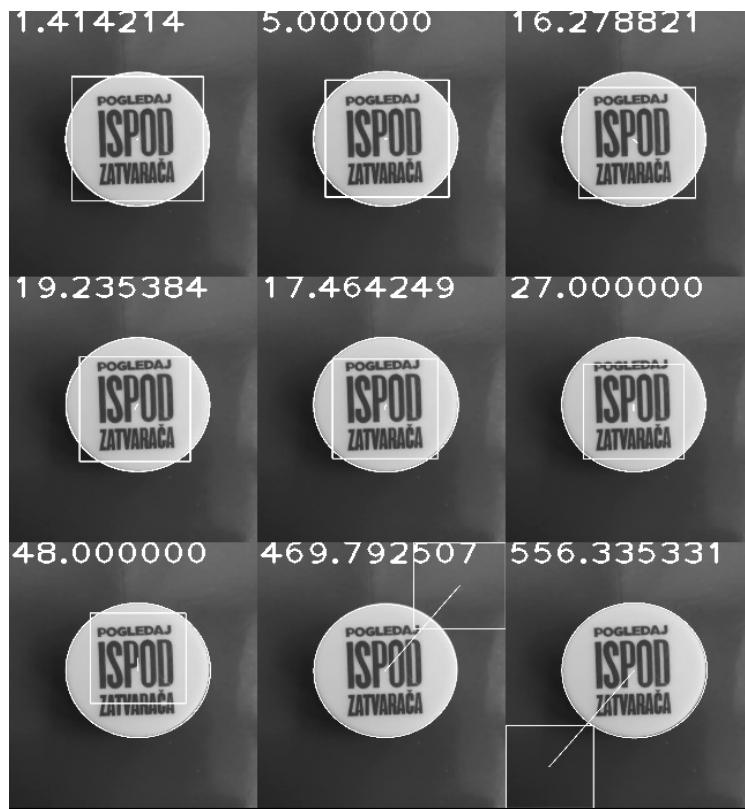
Grafik koji prikazuje ovisnost greške od ugla rotacije izvorne slike prikazan je slikom 4.34.



Slika 4.34: Greška lokacije u ovisnosti od ugla rotacije

4.5.3 Rezultati pri promjenjivom skaliranju

Na slici 4.35 prikazani su rezultati dobijeni uvećavanjem izvorne slike 9 puta za $\frac{1}{15}$ njene početne veličine.



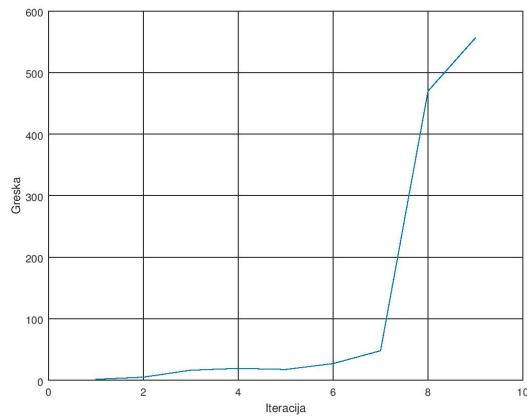
Slika 4.35: Promjenjiva rotacija, normalizovana kros-korelacija

Na slici 4.36 prikazani su rezultati dobijeni umanjivanjem izvorne slike 9 puta za $\frac{1}{30}$ njene početne veličine.

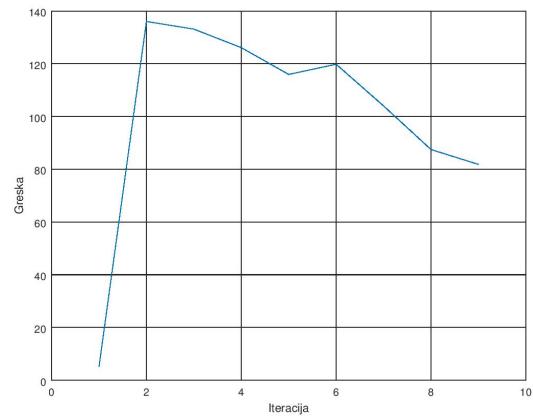


Slika 4.36: Promjenjiva rotacija, normalizovana kros-korelacija

Grafički prikaz greške pri skaliranju prikazan je na slikama ispod:



Slika 4.37: Greška pri povećanju izvorne slike



Slika 4.38: Greška pri smanjenju izvorne slike

Komentar

Normalizovan kros-korelacija se pokazuje robusnom pri promjenjivom osvjetljenju. Uzorak je detektovan za sve slučajeve promjenjivog osvjetljenja.

U slučaju promjenjive rotacije rezultati su lošiji od obične kros-korelacije, sa maksimalnim odstupanjem od 21.26 piksela.

4.6 Rezultati primjene kriterija koeficijenta korelacijske

Rezultat primjene metode koeficijent korelacijske nad originalnom izvornom slikom prikazan je na slici 4.39.



Slika 4.39: Povećano osvjetljenje, koeficijent korelacijske

4.6.1 Rezultati pri promjenjivom osvjetljenju

Na slici 4.40 prikazani su rezultati dobijeni pri povećanom osvjetljenju redoslijedom kao i kod prethodne metode.



Slika 4.40: Povećano osvjetljenje, koeficijent korelacijske

Na slici 4.41 prikazani su rezultati pri umanjenom osvjetljenju.

**Slika 4.41:** Smanjeno osvjetljenje, koeficijent korelacije

Tabelarni prikaz dobijenih rezultata dat je u tabeli 4.10.

Promjena osvjetljenja	-120	-110	-100	-90	-80	-70
(Vrijednost kriterija) $\times 10^8$	1.1486	1.2781	1.4005	1.5140	1.6168	1.7084
Promjena osvjetljenja	-60	-50	-40	-30	-20	-10
(Vrijednost kriterija) $\times 10^8$	1.7974	1.8238	1.7696	1.7209	1.6926	1.6898
Promjena osvjetljenja	+10	+20	+30	+40	+50	+60
(Vrijednost kriterija) $\times 10^8$	1.6896	1.6869	1.6604	1.5792	1.4653	1.3259
Promjena osvjetljenja	+70	+80	+90	+100	+110	+120
(Vrijednost kriterija) $\times 10^8$	1.1799	1.0336	0.8883	0.7461	0.6081	0.4756

Tabela 4.10: Promjena kriterija pri promjeni osvjetljenja

4.6.2 Rezultati pri promjenjivoj rotaciji

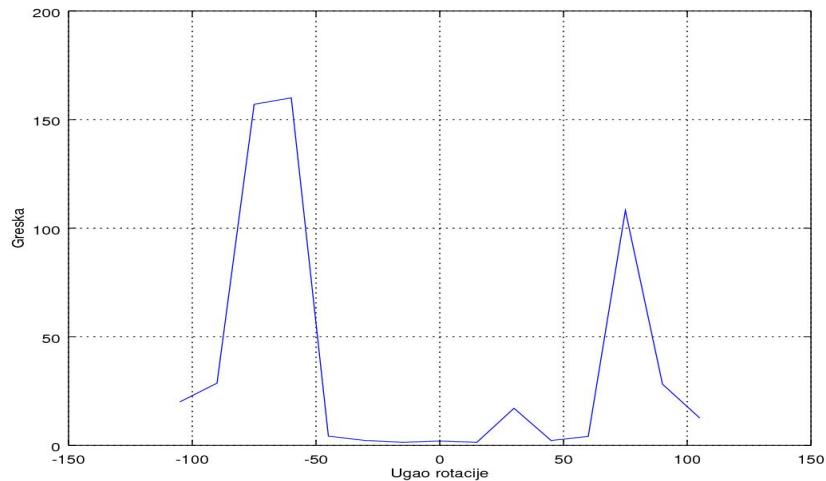
Rezultati kriterija pri promjenjivoj rotaciji prikazani su slikom 4.42.

**Slika 4.42:** Promjenjiva rotacija, koeficijent korelacije

Ugao rotacije (stepeni)	-105	-90	-75	-60	-45	-30
Greška	20.02	28.65	157.03	160.01	4.24	2.24
Ugao rotacije (stepeni)	-15	0	15	30	45	60
Greška	1.41	2	1.41	17.09	2.24	4.12
Ugao rotacije (stepeni)	75	90	105			
Greška	108.17	28.18	12.65			

Tabela 4.11: Promjena greške pri promjenjivoj rotaciji

Grafik koji prikazuje ovisnost greške od ugla rotacije izvorne slike prikazan je slikom 4.43.



Slika 4.43: Greška lokacije u ovisnosti od ugla rotacije

4.6.3 Rezultati pri promjenjivom skaliranju

Na slici 4.44 prikazani su rezultati dobijeni uvećavanjem izvorne slike 9 puta za $\frac{1}{15}$ njene početne veličine.



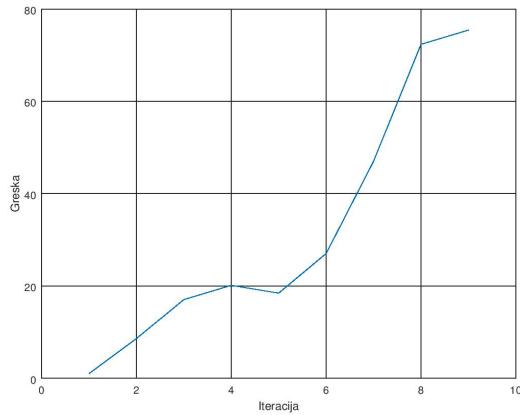
Slika 4.44: Promjenjiva rotacija, koeficijent korelacije

Na slici 4.45 prikazani su rezultati dobijeni umanjivanjem izvorne slike 9 puta za $\frac{1}{30}$ njene početne veličine.

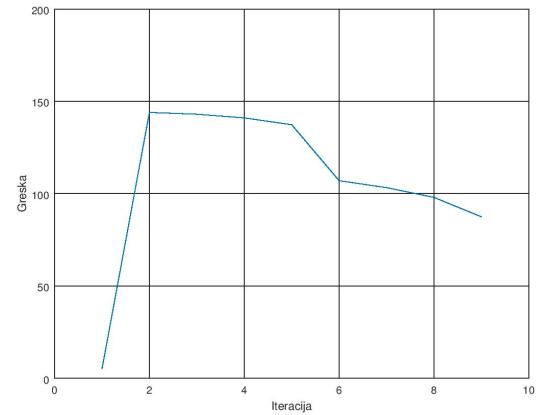


Slika 4.45: Promjenjiva rotacija, koeficijent korelaciјe

Grafički prikaz greške pri skaliranju prikazan je na slikama ispod:



Slika 4.46: Greška pri povećanju izvorne slike



Slika 4.47: Greška pri smanjenju izvorne slike

Komentar

Koeficijent korelaciјe se pokazuje vrlo osjetljiv na rotacije izvorne slike. U ostalim slučajevima daje dobre rezultate.

4.7 Rezultati primjene kriterija normalizovanog koeficijenta korelaciјe

Rezultat primjene metode normalizovanog koeficijenta korelaciјe nad originalnom izvornom slikom prikazan je na slici 4.48.



Slika 4.48: Povećano osvjetljenje, normalizovani koeficijent korelaciјe

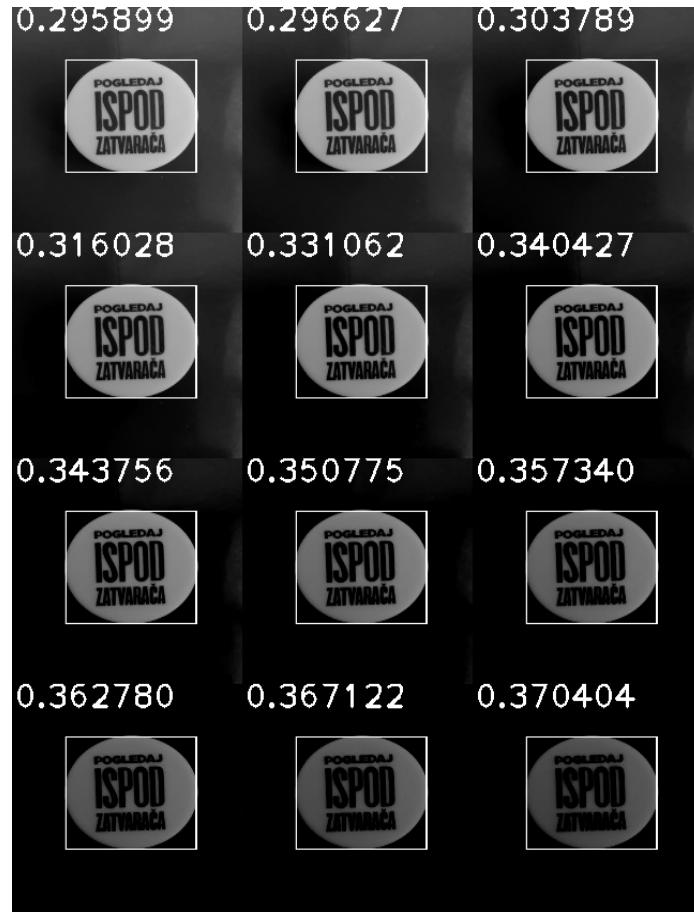
4.7.1 Rezultati pri promjenjivom osvjetljenju

Na slici 4.49 prikazani su rezultati dobijeni pri povećanom osvjetljenju redoslijedom kao i kod prethodne metode.



Slika 4.49: Povećano osvjetljenje, normalizovani koeficijent korelaciјe

Na slici 4.50 prikazani su rezultati pri umanjenom osvjetljenju.



Slika 4.50: Povećano osvjetljenje, normalizovani koeficijent korelacijske matrice

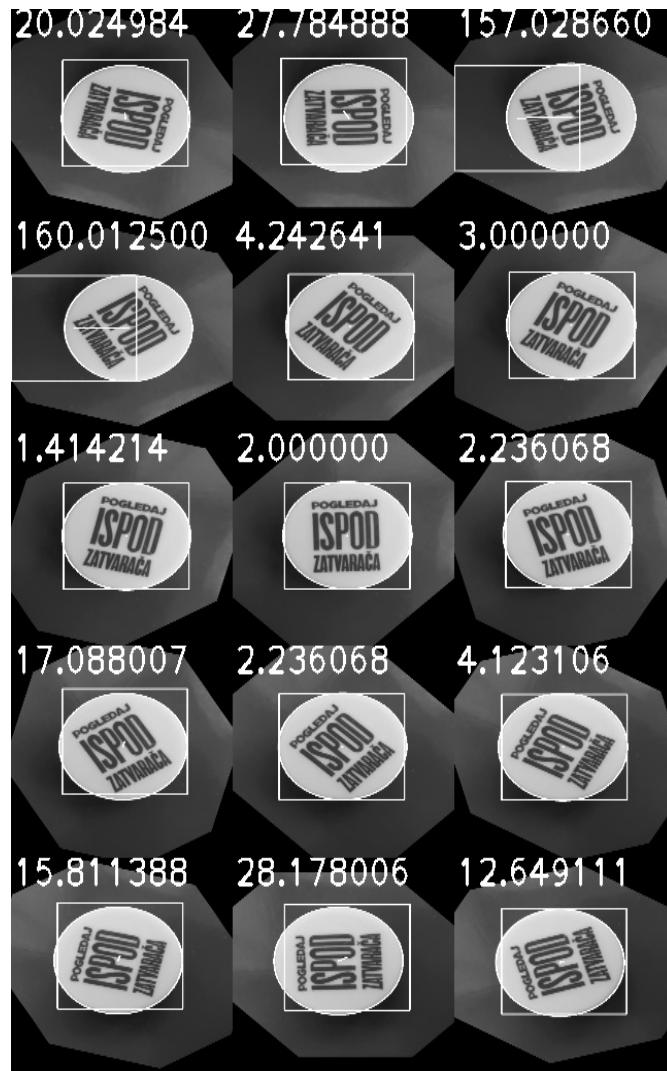
Tabelarni prikaz dobijenih rezultata dat je u tabeli 4.12.

Promjena osvjetljenja	-120	-110	-100	-90	-80	-70
(Vrijednost kriterija)	0.3704	0.3671	0.3628	0.3573	0.3508	0.34376
Promjena osvjetljenja	-60	-50	-40	-30	-20	-10
(Vrijednost kriterija)	0.3404	0.3311	0.316	0.3038	0.2966	0.2959
Promjena osvjetljenja	+10	+20	+30	+40	+50	+60
(Vrijednost kriterija)	0.2959	0.2956	0.2932	0.2864	0.2769	0.2665
Promjena osvjetljenja	+70	+80	+90	+100	+110	+120
(Vrijednost kriterija)	0.2555	0.2437	0.2302	0.2151	0.1976	0.1769

Tabela 4.12: Promjena kriterija pri promjeni osvjetljenja

4.7.2 Rezultati pri promjenjivoj rotaciji

Rezultati kriterija pri promjenjivoj rotaciji prikazani su slikom 4.51.

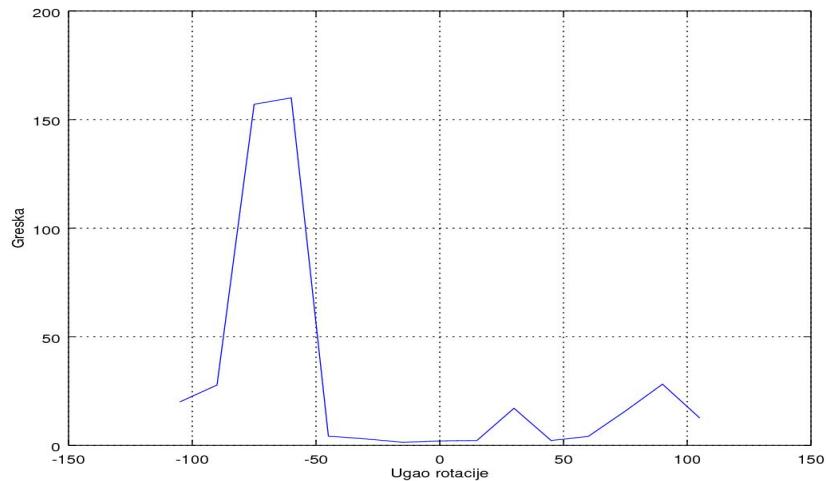


Slika 4.51: Promjenjiva rotacija, normalizovani koeficijent korelacije

Ugao rotacije (stepeni)	-105	-90	-75	-60	-45	-30
Greška	20.02	27.78	157.03	160.01	4.24	3
Ugao rotacije (stepeni)	-15	0	15	30	45	60
Greška	1.41	2	2.24	17.09	2.24	4.12
Ugao rotacije (stepeni)	75	90	105			
Greška	15.81	28.18	12.65			

Tabela 4.13: Promjena greške pri promjenjivoj rotaciji

Grafik koji prikazuje ovisnost greške od ugla rotacije izvorne slike prikazan je slikom 4.52.



Slika 4.52: Greška lokacije u ovisnosti od ugla rotacije

4.7.3 Rezultati pri promjenjivom skaliranju

Na slici 4.53 prikazani su rezultati dobijeni uvećavanjem izvorne slike 9 puta za $\frac{1}{15}$ njene početne veličine.



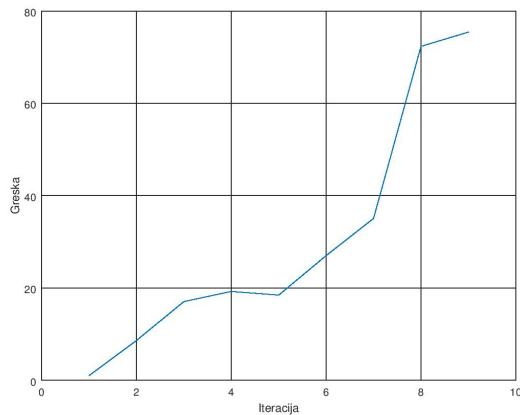
Slika 4.53: Promjenjiva rotacija, normalizovani koeficijent korelacijske funkcije

Na slici 4.54 prikazani su rezultati dobijeni umanjivanjem izvorne slike 9 puta za $\frac{1}{30}$ njene početne veličine.

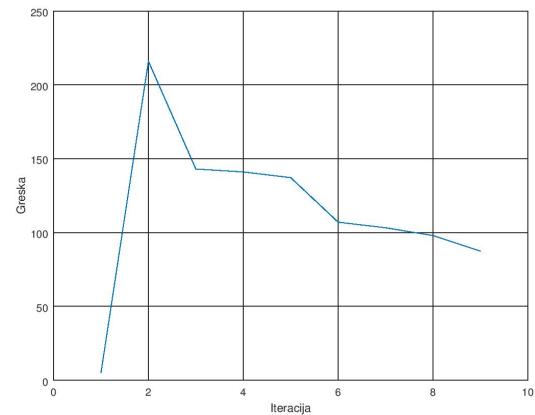


Slika 4.54: Promjenjiva rotacija, normalizovani koeficijent korelaciјe

Grafički prikaz greške pri skaliranju prikazan je na slikama ispod:



Slika 4.55: Greška pri povećanju izvorne slike



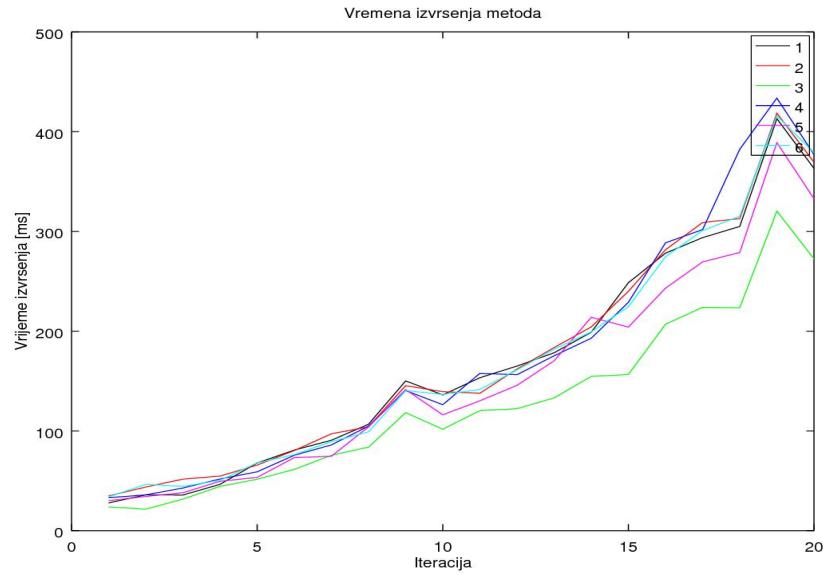
Slika 4.56: Greška pri smanjenju izvorne slike

Komentar

Važi isto kao za prethodni metod.

4.8 Uporedba vremena izvršenja pojedinih kriterija

Vremena izvršenja za pojedine metode mjerena su na način da su se izvorna slika i uzorak povećavali za $\frac{1}{5}$ početne veličine 20 puta i pri svakoj iteraciji se mjerilo vrijeme potrebno da se izvrše funkcije **matchTemplate** i **minMaxLoc**, obzirom da su obje potrebne da se pronađe lokacija uzorka. Rezultati su prikazani grafički na sljedećim slikama, kao vrijeme izvršenja u ovisnosti od iteracije povećavanja. Prva iteracija podrazumijeva povećanje za $\frac{1}{5}$ početne veličine, druga iteracija povećanje za $\frac{2}{5}$ početne veličine, itd.



Slika 4.57: Promjenjiva rotacija, najmanja kvadratna greška

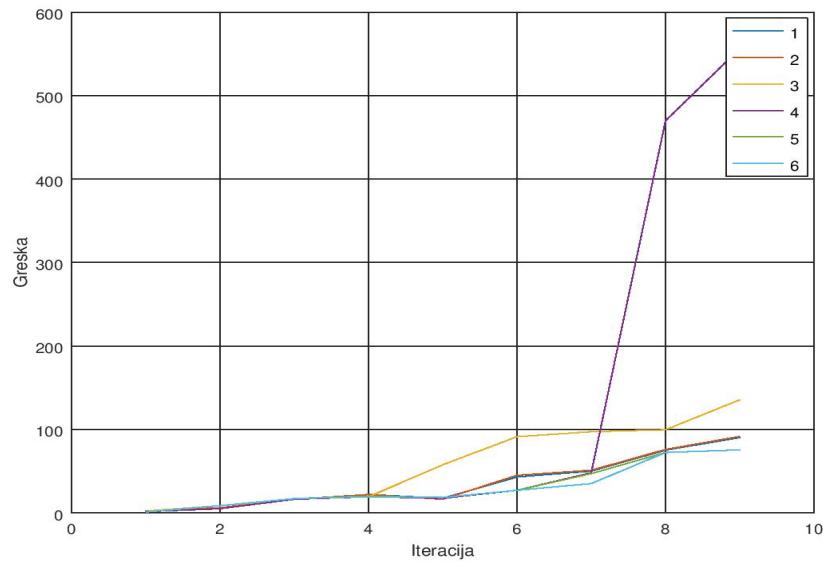
Brojevi u legendi sa slike 4.57 odnose se na rezultate metoda:

- **1** - Najmanja kvadratna greška
- **2** - Normalizovana najmanja kvadratna greška
- **3** - Kros-korelacija
- **4** - Normalizovana kros-korelacija
- **5** - Koeficijent korelacijske
- **6** - Normalizovani koeficijent korelacijske

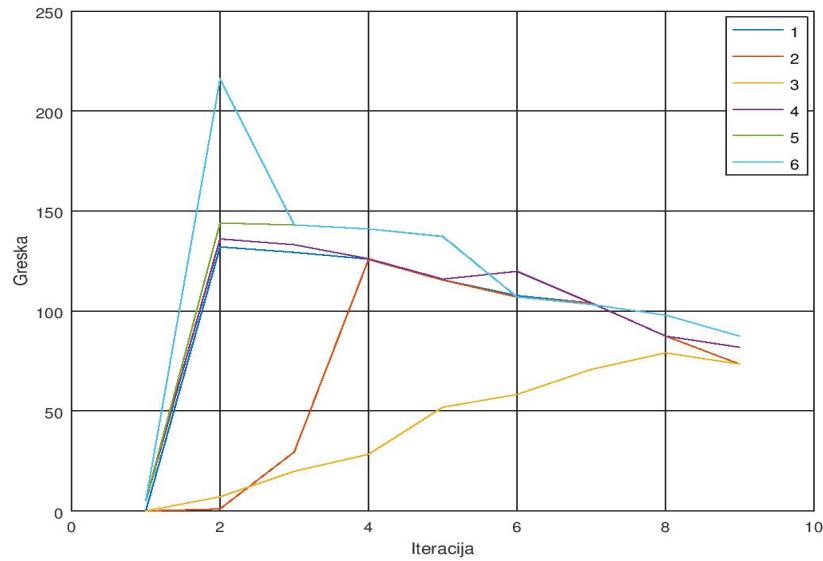
Jasno se vidi da metod **kros-korelacijske** daje ubjedljivo najbolje rezultate kada je u pitanju vrijeme izvršenja.

4.9 Uporedba rezultata pojedinih metoda pri promjenjivoj veličini izvorne slike

Uporedba rezultata metoda koje daju pri promjenjivoj veličini izvorne slike prikazana je na slikama ispod.



Slika 4.58: Uporedba rezultata pri povećanju izvorne slike

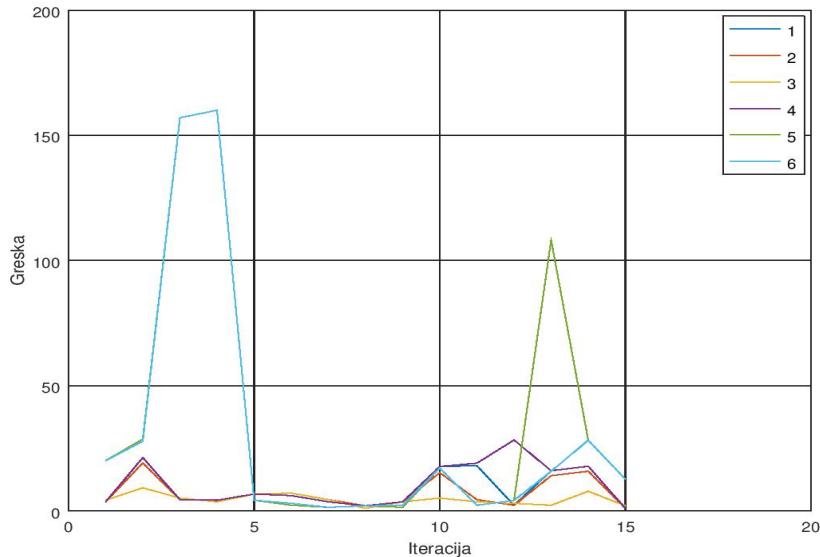


Slika 4.59: Uporedba rezultata pri smanjenju izvorne slike

Pri povećanju izvorne slike najbolje se pokazala metoda sa brojem kojoj iz legende slike 4.58 odgovara broj 6. Riječ je o **normalizovanom koeficijentu korelacije**. Pri smanjenju izvorne slike najbolje rezultate daje metoda **kros-korelacija**. Obzirom da će u ovom slučaju primjene češći biti slučaj da će izvorna slika biti umanjena, nego uvećana, prednost se daje metodu **kros-korelacija**.

4.10 Uporedba rezultata pojedinih metoda pri promjenjivoj rotaciji izvorne slike

Na slici 4.60 je grafički prikazana uporedba metoda pri uvjetima promjenjive rotacije izvorne slike. Redoslijed metoda u legendi slike je isti kao prethodno.



Slika 4.60: Uporedba rezultata pri smanjenju izvorne slike

I u ovom slučaju **kros-korelacija**, obojena narandžastom bojom (broj 3), daje najbolji rezultat.

4.11 Komentar i zaključak

Na osnovu odrađenih testova za praktičnu upotrebu predlaže se korištenje **kros-korelacijske**. Razlog tome je što će u upotrebi podloga biti tamna, te će se uglavnom izbjegći problemi koji dolaze sa svijetlijim podlogama i promjenjivim globalnim osvjetljenjem, barem što se ove metode tiče. Vidjelo se da najmanja kvadratna greška može dovesti do problema i pri tamnijim podlogama. Koeficijent korelacijske se odbacuje zbog velike osjetljivosti na rotaciju slike, obzirom da postoji mogućnost da će čep povremeno biti zarotiran za određeni ugao, pa i to treba uzeti u obzir.

Vrijednost korelacijske pri upotrebi kros-korelacijske nisu ograničene kao kod normalizovane varijante. Prema tome, raspolaze se većim opsegom za određivanje "praga valjanosti" čepova nakon izvršenih testova.

Grafovi izloženi prethodno sve ovo potvrđuju, te **kros-korelacija** zaista u ovom slučaju predstavlja najbolji izbor.

Poglavlje 5

Definiranje praga korelaciјe

Za definiranje praga korelaciјe prvo ће se napraviti pregled vrijednosti korelaciјe pri promjenjivom osvjetljenju, rotaciji i skaliranju. Pri tome ће se pretpostaviti sljedeће:

- Promjene osvjetljenja su u granicama od -30 do 30 u odnosu na originalnu sliku.
- Promjene rotacije su u granicama -30 do 30 stepeni u odnosu na originalnu sliku.
- Promjene skaliranja su u granicama od $\frac{2}{3}$ originalne slike do $\frac{4}{3}$ originalne slike.

Pripremljeni skup oštećenih čepova, koji ће se koristiti za testiranje praga korelaciјe, nije uslikan u istim uvjetima kao oni korišteni pri testiranju metoda. Stoga je uslikana nova izvorna slika i iz nje ekstraktovan uzorak. Nova izvorna slika i uzorak prikazani su na slikama 5.1 i 5.2.



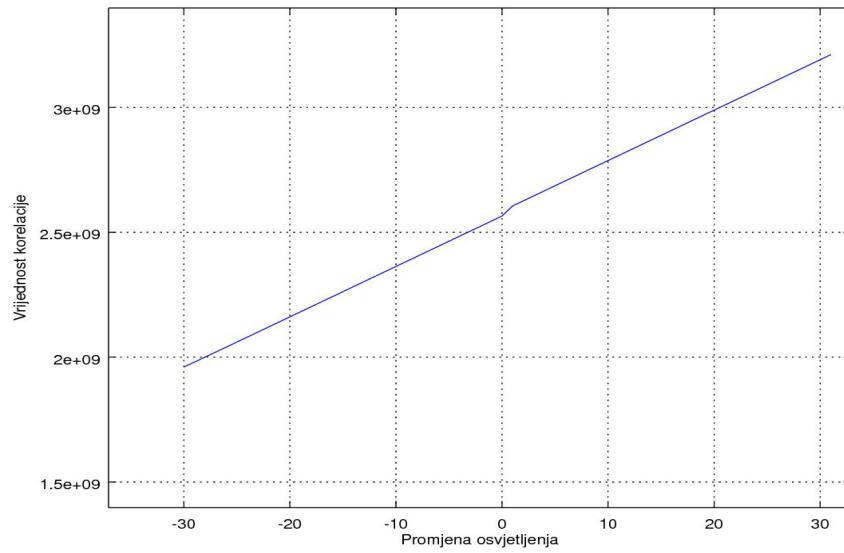
Slika 5.1: Izvorna slika



Slika 5.2: Uzorak

5.1 Vrijednosti korelaciјe pri promjenjivom osvjetljenju

Vrijednosti korelaciјe pri promjenjivom osvjetljenju u granicama od -30 do 30, sa korakom 1, dati su grafikom na slici 5.3.

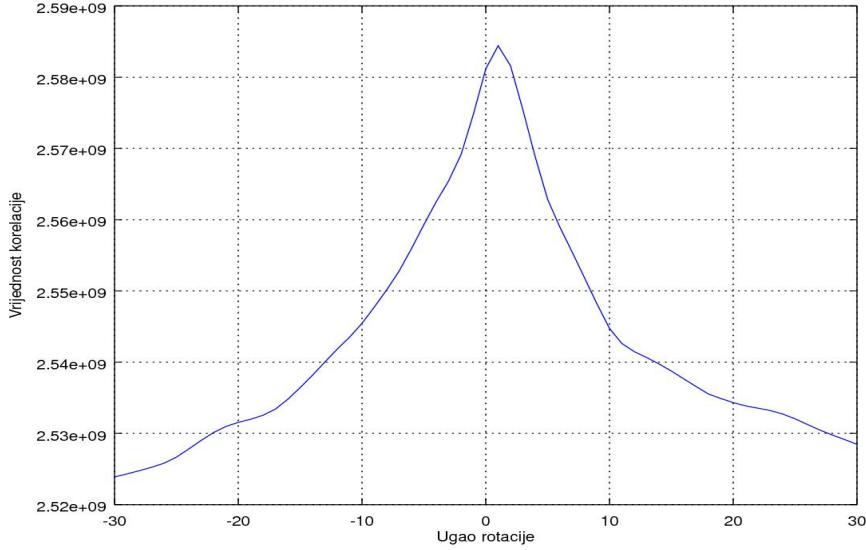


Slika 5.3: Vrijednosti korelaciije u ovisnosti od osvjetljenja

Minimalna vrijednost korelacije je 1.9604×10^9 за промјену освјетљења у износу од -30, а максимална 3.2108×10^9 за промјену освјетљења у износу од 30. Са графиком се види да је веза између корелације и промјене освјетљења пribližno линеарна.

5.1.1 Vrijednosti korelaciije pri promjenjivoj rotaciji

Vrijednosti korelaciје при промјенjivoј ротацији приказане су графиком на слици 5.4. Ротација се мијенја у опсегу од -30 до 30 степени.



Slika 5.4: Vrijednosti korelaciije u ovisnosti od ugla rotacije

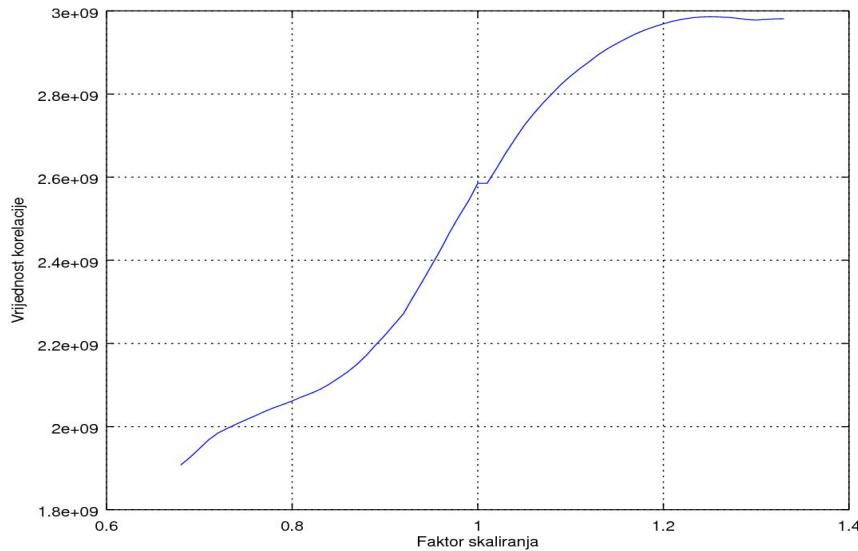
За разлику од промјенjivог освјетљења, промјена ротације узрокује другачије понашање корелације. Функција корелација у односу на промјену ротације чак није ни једнозначна. Занимљиво

je uočiti da sve promjene rotacije uzrokuju manje podudaranje (iznos korelaciije je manji), dok promjena osvjetljenja može uzrokovati veće podudaranje, što je i pokazano.

Minimalna vrijednost korelaciije u ovom slučaju iznosi 2.5239×10^9 za rotaciju od 30 stepeni, dok je maksimalna vrijednost korelaciije 2.5844×10^9 kada nema rotacije slike.

5.2 Vrijednosti korelaciije pri promjenjivom skaliranju

Vrijednosti korelaciije u ovisnosti od faktora skaliranja izvorne slike prikazane su grafikom na slici 5.5.



Slika 5.5: Vrijednosti korelaciije u ovisnosti od faktora skaliranja

Minimalna vrijednost korelaciije iznosi 1.9074×10^9 kada je izvorna slika $\frac{2}{3}$ početne veličine, dok je maksimalna vrijednost korelaciije 2.9862×10^9 kada je izvorna slika $\frac{4}{3}$ početne veličine.

U tabeli 5.1 su prikazani opsezi promjene korelaciije uslijed pomenutih faktora.

	Min. korelacija	Max. korelacija
Korelacija (osvjetljenje) $\times 10^9$	1.9604	3.2108
Korelacija (rotacija) $\times 10^9$	2.5239	2.5844
Korelacija (skaliranje) $\times 10^9$	1.9074	2.9862

Tabela 5.1: Opsezi promjene korelaciije

Najjednostavnije bi bilo reći da je škart svaki čep koji daje vrijednost korelaciije manju od najmanje ili veću od najveće vrijednosti korelaciije date u tabeli 5.1. Međutim, ne znajući kako oštećenje čepova utiče na vrijednosti korelaciije, teško da će se na taj način pogoditi prag korelaciije koji će dati zadovoljavajuće rezultate. Stoga će se ispitati mogući opseg promjene korelaciije, koja nastaje uslijed oštećenja. U datom primjeru pozadina čepa je bijele boje, pa će se na mjestu oštećenja naći upravo ta boja. Stoga će se čitav natpis prefarbiti u boju podloge, da se okvirno dobije neka maksimalna vrijednost korelaciije (u slučaju da je natpis skroz zgreban

sa podloge). Na slici 5.6 prikazana je polazna izvorna slika, a na slici 5.7 izvorna slika na kojoj se nalazi čep sa “maksimalnim” oštećenjem.



Slika 5.6: Polazna izvorna slika



Slika 5.7: Maksimalno oštećenje čepa

Za primjer na slici 5.6 dobija se vrijednost korelacijske u iznosu od $2.56483 * 10^9$, a za primjer na slici 5.7 dobija se korelacija u iznosu od $2.84874 * 10^9$. Dakle, okvirno je dođen opseg u kojem se mogu očekivati promjene uslijed oštećenja na čepu.

Sada je potrebno naći neki kompromis između ovih opsega i onih koji su se dobili pri promjenjivom osvjetljenju, rotaciji i skaliranju, obzirom da i promjena osvjetljenja i skaliranje, u definiranim granicama, prevazilaze opseg promjene korelacijske uslijed oštećenja. Pretpostaviti će se da se uvjeti mogu podesiti tako da korelacija nikad ne prelazi iznos od 2.6 uslijed promjene nekog od gore pomenutih faktora. Neka se kao prag upravo uzme vrijednost korelacijske u iznosu od 2.6, što znači da će svi čepovi koji daju korelacijsku veću od te biti proglašeni škartom. Treba imati na umu da se u ovom slučaju oštećenjima povećava korelacija.

Prag se pokazuje dobrim nad 9 pripremljenih čepova sa oštećenjima i detektuje ih sve kao škart. Čepovi su prikazani na slici 5.8 i poredani su prema stepenu oštećenja. Brojčane vrijednosti prikazane na slikama pomnožene sa 10^9 daju vrijednost korelacijsku za dati slučaj.



Slika 5.8: Čepovi sa različitim stepenom oštećenja

Vrijednosti korelacijske za različite stepene oštećenja su prikazane tabelom 5.2.

Stepen oštećenja	1	2	3	4	5	6	7	8
Korelacija $\times 10^9$	2.72	2.78	2.88	2.82	2.87	2.89	2.93	3.07

Tabela 5.2: Vrijednosti korelacijske za različite stepene oštećenja

5.3 Zaključak

Definirani prag u iznosu od 2.6 se pokazao dobrim nad navedenim skupom testnih primjeraka. Međutim, ukoliko se adekvatni uvjeti postignu vezani uglavnom uz osvjetljenje, nema razloga da detekcija bude neuspješna. U prilogu će, ilustracije radi, biti dodan test nad programski proširenim skupom podataka, tj. rotiranjem i mijenjanjem osvjetljenja kod ovih 9 oštećenih čepova. Primijetit će se da rotacija ne unosi grešku u detekciju, što se moglo zaključiti iz vrlo uskog opsega promjene korelacijske koju uzrokuje. Za razliku od toga, vrlo male promjene osvjetljenja unose greške. Već pri povećanju osvjetljenja za 5 korektni primjeri se proglašavaju škartom, a pri umanjenju od 10 primjeri do drugog stepena oštećenja se ne prepoznaju kao škart.

Prilozi

Prilog A

Primjena praga nad programski proširenim skupom podataka

U nastavku će ilustracije radi biti prikazani rezultati primjene datog praga nad programski proširenim skupom podataka. Skup podataka se proširio rotirajući čepove i promjenom osvjetljenja. Uzorci detektovani kao škart su označeni okvirom.

A.1 Rotirani čepovi s oštećenjem



Slika A.1: Bez oštećenja oštećenja, rotirani čepovi



Slika A.2: Prvi stepen oštećenja, rotirani čepovi



Slika A.3: Drugi stepen oštećenja, rotirani čepovi



Slika A.4: Treći stepen oštećenja, rotirani čepovi



Slika A.5: Četvrti stepen oštećenja, rotirani čepovi



Slika A.6: Peti stepen oštećenja, rotirani čepovi



Slika A.7: Šesti stepen oštećenja, rotirani čepovi



Slika A.8: Sedmi stepen oštećenja, rotirani čepovi



Slika A.9: Osmi stepen oštećenja, rotirani čepovi

A.2 Rotirani čepovi s oštećenjem, osvjetljenost uvećana za 5



Slika A.10: Bez oštećenja oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenje uvećano za 5



Slika A.11: Prvi stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenje uvećano za 5



Slika A.12: Drugi stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenje uvećano za 5



Slika A.13: Treći stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenje uvećano za 5



Slika A.14: Četvrti stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenje uvećano za 5



Slika A.15: Peti stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenje uvećano za 5



Slika A.16: Šesti stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenje uvećano za 5



Slika A.17: Sedmi stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenje uvećano za 5



Slika A.18: Osmi stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenje uvećano za 5

A.3 Rotirani čepovi s oštećenjem, osvjetljenost umanjena za 10



Slika A.19: Bez oštećenja oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenost umanjena za 10



Slika A.20: Prvi stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenost umanjena za 10



Slika A.21: Drugi stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenost umanjena za 10



Slika A.22: Treći stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenost umanjena za 10



Slika A.23: Četvrti stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenost umanjena za 10



Slika A.24: Peti stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenost umanjena za 10



Slika A.25: Šesti stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenost umanjena za 10



Slika A.26: Sedmi stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenost umanjena za 10



Slika A.27: Osmi stepen oštećenja, rotirani čepovi, osvjetljenost umanjena za 10

Literatura

- [1] Paridhi Swaroop, Neelam Sharma: "An Overview of Various Template Matching Methodologies in Image Processing", International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 153 – No 10, November 2016
- [2] Nazil Perveen, Darshan Kumar, Ishan Bhardwaj: "An Overview on Template Matching Methodologies and its Applications", International Journal of Research in Computer and Communication Technology, Vol 2, Issue 10, October- 2013
- [3] Roger M. Dufour, Eric L. Miller, Nikolas P. Galatsanos: "Template Matching Based Object Recognition With Unknown Geometric Parameters", IEEE transactions on Image Processing, Vol. 11, No. 12, December 2002
- [4] R. Brunelli, T. Poggio: "Template Matching: Matched spatial filters and beyond", Pattern Recognition, Vol. 30, No. 5, pp. 751-768, 1997
- [5] Luigi Di Stefano, Stefano Mattoccia, Federico Tombari: "ZNCC-based template matching using bounded partial correlation", Pattern Recognition Letters 26 (2005) 2129–2134
- [6] Chin-Sheng Chen, Jian-Jhe Huang, Chien-Liang Huang: "Template Matching using Statistical Model and Parametric Template for Multi-Template", Journal of Signal and Information Processing, 2013, 4, 52-57
- [7] Carme Torras: "Comptuer Vision: Theory and Industrial Applications", Springer-Verlag
- [8] Christian Demant, Bernd Streicher-Abel, Peter Waszkewitz: "Industrial Image Processing", Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH
- [9] William K. Pratt: "Digital Image Processing", John Wiley & Sons, Inc.
- [10] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods: "Digital Image Processing", Prentice Hal, Upper Saddle River, New Jersey 07458
- [11] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, Steven L. Edding: "Digital Image Processing using MATLAB", Prentice Hal, Upper Saddle River, New Jersey 07458
- [12] Bernd Jahne: "Digital Image Processing", Springer
- [13] E.R. Davies: "Machine Vision, Theory, Algorithm, Practicalities", Elsevier
- [14] Milan Sonka, Vaclav Hlavac, Roger Boyle: "Image Processing, Analysis, and Machine Vision", Thomson

- [15] John C. Russ: "The Image Processing Handbook", Fifth Edition, Taylor & Francis Group
- [16] Luciano da Fontoura Costa, Roberto Marcondes Cesar, Jr.: "Shape Classification and Analysis", CRC Press, Taylor & Francis Group
- [17] Da-Wen Sun: "Computer vision technology in the food and beverage industries", Woodhead Publishing Limited, 2012
- [18] Uwe D. Hanebeck: "Template matching using fast normalized cross correlation", Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, March 2001
- [19] Wiedo Hu, Ahmed Mohamed Gharuib, Alaa El-Din Sayed Hafez: "Template Match Object Detection for Inertial Navigation Systems", Beijing University of Aeronautics & Astronautics; Faculty of Engineering, Alexandria University
- [20] Luke Cole, David Austin, Lance Cole: "Visual Object Recognition using Template Matching", Robotic Systems Lab, RSISE Australian National University, ACT 0200, Australia