

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 959

**Aplikacija za interaktivnu pomoć  
penjačima po stijenama uporabom  
proširene stvarnosti**

Adrian Cvijanović

Zagreb, lipanj 2025.



# SADRŽAJ

<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>
1.1. Kontekst i rast popularnosti sportskog penjanja . . . . .	1
1.2. Problem identifikacije penjačkih smjerova i ograničenja tradicionalnih alata . . . . .	2
1.3. Ograničenja postojećih digitalnih alata . . . . .	3
1.4. Cilj i doprinos rada . . . . .	3
<b>2. Analiza postojećih rješenja, tehnologija i tehnika</b>	<b>5</b>
2.1. Postojeće aplikacije za penjače . . . . .	5
2.1.1. Tradicionalni tiskani penjački vodiči . . . . .	6
2.1.2. Digitalne platforme . . . . .	7
2.2. Računalni vid u prepoznavanju penjačkog smjera . . . . .	10
2.2.1. Detekcija i opis značajki (engl. feature detection and description)	11
2.2.2. Uparivanje značajki (engl. feature matching) . . . . .	13
2.2.3. Homografija i transformacija perspektive . . . . .	15
2.3. Tehnologije za razvoj sustava . . . . .	16
2.3.1. Razvoj za iOS platformu . . . . .	16
2.3.2. Tehnologije pozadinskog sustava . . . . .	16
2.3.3. Tehnologije web aplikacije . . . . .	16
<b>3. Arhitektura i dizajn sustava "Alpinity"</b>	<b>17</b>
3.1. Arhitektura sustava . . . . .	17
3.2. Dizajn baze podataka . . . . .	17
3.3. Dizajn pozadinskog sustava . . . . .	17
3.4. Dizajn procesa prepoznavanja smjera . . . . .	17
<b>4. Implementacija rješenja</b>	<b>18</b>
4.1. Implementacija pozadinskog sustava . . . . .	18

4.2. Implementacija iOS aplikacije . . . . .	18
4.2.1. Korisničko sučelje u SwiftUI . . . . .	18
4.2.2. Integracija s bibliotekom OpenCV . . . . .	18
4.3. Implementacija web aplikacije . . . . .	18
<b>5. Testiranje i vrednovanje rješenja</b>	<b>19</b>
5.1. Funkcionalno testiranje . . . . .	19
5.2. Vrednovanje performansi prepoznavanja . . . . .	19
5.3. Analiza ograničenja . . . . .	19
<b>6. Zaključak</b>	<b>20</b>
6.1. Sažetak ostvarenih rezultata . . . . .	20
6.2. Smjernice za budući razvoj . . . . .	20
<b>Literatura</b>	<b>21</b>

# 1. Uvod

Digitalna tehnologija obuhvaća gotovo sve aspekte ljudskog života, od komunikacije, poslovanja do zabave i znanja. Rekreativne aktivnosti i sportovi koji su se oslanjali na fizičku opremu i materijale sve više usvajaju digitalne alate koji proširuju mogućnosti i količinu informacija koje korisnici mogu dobiti. Sportsko penjanje, kao aktivnost koja spaja fizičku spremnost i boravak u prirodi, predstavlja primjer aktivnosti koja se može proširiti digitalnim alatima.

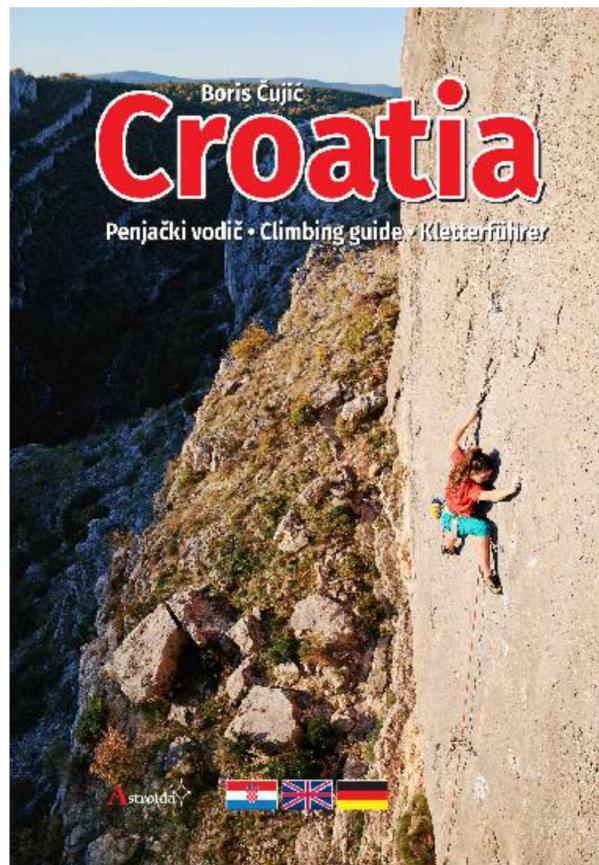
Dok su postojeće digitalne platforme omogućile lak pristup informacijama penjačkih lokacija, ključni izazov ostaje upotreba tih informacija u stvarnom okruženju - isprijeđ same stijene. Taj ključni izazov otvara prostor za inovacije, posebice u domeni mobilnih tehnologija, računalnog vida i proširene stvarnosti.

## 1.1. Kontekst i rast popularnosti sportskog penjanja

Sportsko penjanje i srodnna disciplina *bouldering* posljednjih su desetljeća doživjeli eksponencijalni rast u popularnosti, Privlačeći sve veći broj zainteresiranih ljudi kako u specijalizirane penjačke dvorane, tako i na prirodne stijene. Na Olimpijskim igrama 2020. godine u Tokiju sportsko penjanje je po prvi put uvršten u program čime je sport dobio globalnu pozornost i dodatno potaknuo interes javnosti. Olimpijskim igrama 2024. godine u Parizu popularnost sporta je još više porasla. Prema članku iz *The Oxford Blue*, dok se vrijednost globalnog tržišta penjačkih dvorana procjenjuje na 117.61 milijardi dolara do 2031. godine [1]. S rastom zajednice, raste i potreba za kvalitetnim, dostupnim i preciznim informacijama o penjalištima i smjerovima.

## 1.2. Problem identifikacije penjačkih smjerova i ograničenja tradictionalnih alata

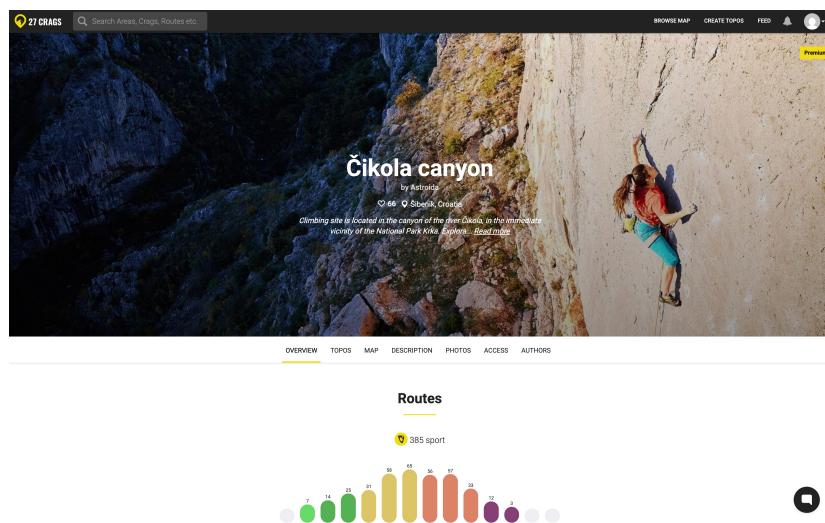
Tradicionalno, glavni izvor informacija za penjače su tiskani penjački vodiči. Ovi vodiči sadrže detaljne opise penjališta, karte pristupa, kao i skicirane prikaze stijene ili često nazivane *topo* s ocrtnim linijama penjačkih smjerova, njihovim nazivima i težinama. Iako su desetljećima bili nezamjenjiv alat, tiskani vodiči imaju ograničenja. Podložni su zastarijevanju jer ne mogu pratiti dinamiku promjena na penjalištima poput dodavanja novih smjerova, promjena težina ili upozorenja o opasnostima na pojedinim smjerovima. Bilo kakve promjene zahtjevaju novo tiskanje i kupovanje novog izdanja. Tiskani vodiči su nepraktični za nošenje, a najveći izazov predstavlja interpretacija dvodimenzionalnih skica, koje su često slikane iz daljine, na trodimenzionalnu strukturu stijene. Proces lociranja točnog početka smjera na temelju crteža često je subjektivan, dugotrajan i može dovesti do frustracija ili pokušaj penjanja smjera koji je težinski izvan dohvata za penjača.



Slika 1.1: Prikaz tiskanog penjačkog vodiča

## 1.3. Ograničenja postojećih digitalnih alata

S pojavom interneta i pametnih telefona, razvile su se digitalne platforme i mobilne aplikacije koje su djelomično riješile problem dostupnosti i ažurnosti podataka. One omogućuju centralizirano prikupljanje informacija, korisničke komentare i lakšu pretragu. Osim toga, nude i napredne funkcionalnosti poput vođenja osobnog dnevnika uspona, analize statistike, praćenja napretka i povezivanja s drugim penjačima. Unatoč tim prednostima, digitalna rješenja nisu bez nedostataka. Većina postojećih aplikacija i dalje se oslanja na prikazivanje statičnih, dvodimenzionalnih *topo* skica, čime se ne rješava temeljni problem identifikacije smjera u stvarnom okruženju. Nadalje, oslanjanje na elektronički uređaj u često udaljenim prirodnim okruženjima uvodi i praktične izazove. Ograničeno trajanje baterije i čest nedostatak mobilnog signala ili internetske veze mogu učiniti digitalne alate nedostupnima u trenutku kada su potrebni. Korisnik se tako suočava s dva ključna problema: interpretacija 2D prikaza i ovisnost o bateriji i signalu.



proširene stvarnosti. Takav pristup ne samo da štedi vrijeme i smanjuje frustracije, već i omogućuje sigurnije iskustvo penjanja.

## **2. Analiza postojećih rješenja, tehnologija i tehnika**

Nakon postavljanja motivacije te definiranja problema identifikacije penjačkog smjera slijedi analiza postojećih rješenja te definiranje tehnologija i tehnika za razvoj novih funkcionalnosti.

Prvi dio poglavlja bavi se detaljnim pregledom postojećih rješenja namijenjenih penjačima. Cilj je identificirati njihove temeljne funkcionalnosti te analizirati njihove prednosti i nedostatke. Poseban naglasak stavljen je na način na koji ti alati rješavaju, ili ne uspijevaju rješiti, razne probleme navedene u prethodnom poglavlju. Ova komparativna analiza omogućuje bolje razumijevanje problema čime se stvara osnova za razvoj novog rješenja.

Drugi dio poglavlja posvećen je tehnološkoj podlozi koja omogućuje implementaciju funkcionalnosti prepoznavanja penjačkih smjerova. Budući da se rješenje temelji na primjerni računalnog vida, ovaj dio obrađuje osnove relevantnih algoritama i metoda. Objasnjavaju se koncepti poput detekcije i opisa značajki (eng. *feature detection and description*), s posebnim fokusom na algoritam SIFT (eng. *Scale-Invariant Feature Transform*) te metoda za transformaciju perspektive temeljenih na homografiji. Razumijevanje ovih koncepta omogućuje bolje razumijevanje kako precrtati liniju penjačkog smjera na sliku stvarne stijene dobivene kamerom mobilnog uređaja.

Treći i završni dio poglavlja analizira i obrazlaže odabir specifičnih tehnoloških okvira i platformi korištenih za razvoj sustava. Detljano se opisuju odabrane tehnologije za iOS aplikaciju, pozadiniski (eng. *backend*) sustav te web aplikaciju čime se postavlja tehnički temelj sustava.

### **2.1. Postojeće aplikacije za penjače**

Za razmijevanje potreba penjača potrebno je analizirati alate koje penjači koriste. Ta rješenja mogu se podijeliti u dvije glavne kategorije: tradicionalne tiskane vodiče i mo-

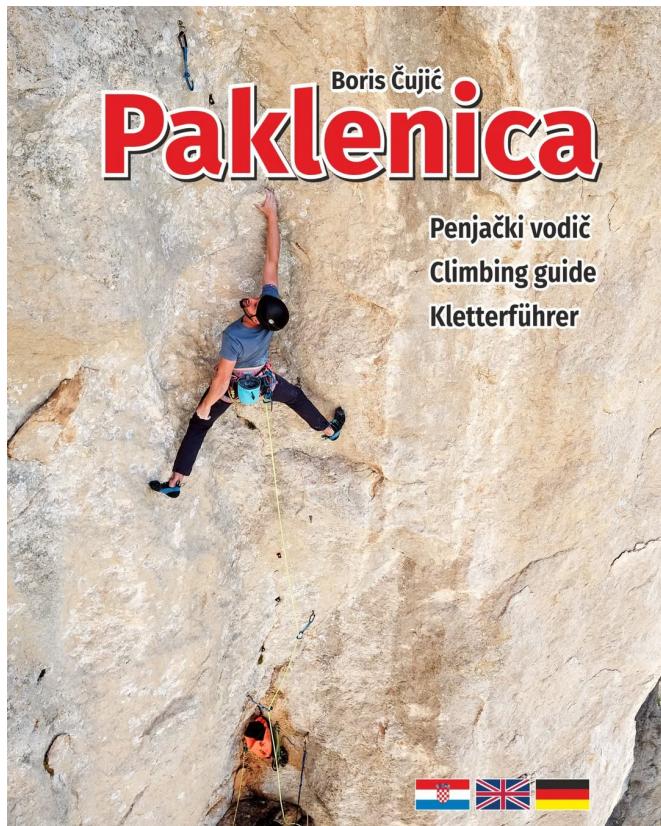
derne digitalne platforme koje su odgovorile na neka od ograničenja tiskanih vodiča.

### **2.1.1. Tradicionalni tiskani penjački vodiči**

Desetljećima su tiskani vodiči bili jedini dostupni izvor informacija za snalaženje na stijenama. Njihova temeljna vrijednost leži u detaljnem i strukturiranom prikazu informacija koje kreiraju iskusni penjači.

Vodiči su gotovo uvijek organizirani hijerarhijski kako bi korisniku olakšali navigaciju. Na najvišoj razini, vodič je podijeljen na šira penjačka područja, primjerice Kalnik, Kanjon Čikola, Golubinjak. Ta penjačka područja su često označena na velikoj karti koja se nalazi na početku vodiča. Unutar svakog područja sadržaj se dalje raščlanjuje na pojedinačne sektore, odnosno manje odvojene dijelove stijene. Za svaki sektor pružaju se ključne logističke informacije poput detaljni opis prilaza, informacije o parkiranju, vrijeme potrebno za pristup, GPS koordinate te opće napomene poput osuščanost ili preporučeno doba godine za posjet. Središnji element svakog vodiča je vizualni prikaz smjerova, odnosno *topo*, koji može biti u formi detaljnog crteža ili fotografije preko koje su ucrtane linije smjerova. Uz svaki smjer navode se podaci o smjeru poput naziv, težina, dužina smjera te eventualno napomene poput upozorenje na nestabilno kamenje skljono kidanju. Osim informativnih *topo* prikaza, vodiči su često obogaćeni fotografijama penjača te pejzažnim fotografijama.

U pravilu svaki vodič pokriva specifično geografsko područje, od pojedinačnog velikog penjališta do cijele regije. U Hrvatskoj, najpoznatiji primjer vodiča za veću regiju je vodič "Croatia" autora Borisa Čujića. Uz njega postoje i specijalizirani vodiči za pojedina područja poput Nacionalnog parka Paklenica ili za regiju Istre.



**Slika 2.1:** Prikaz tiskanog penjačkog vodiča "Paklenica" autora Borisa Čujića

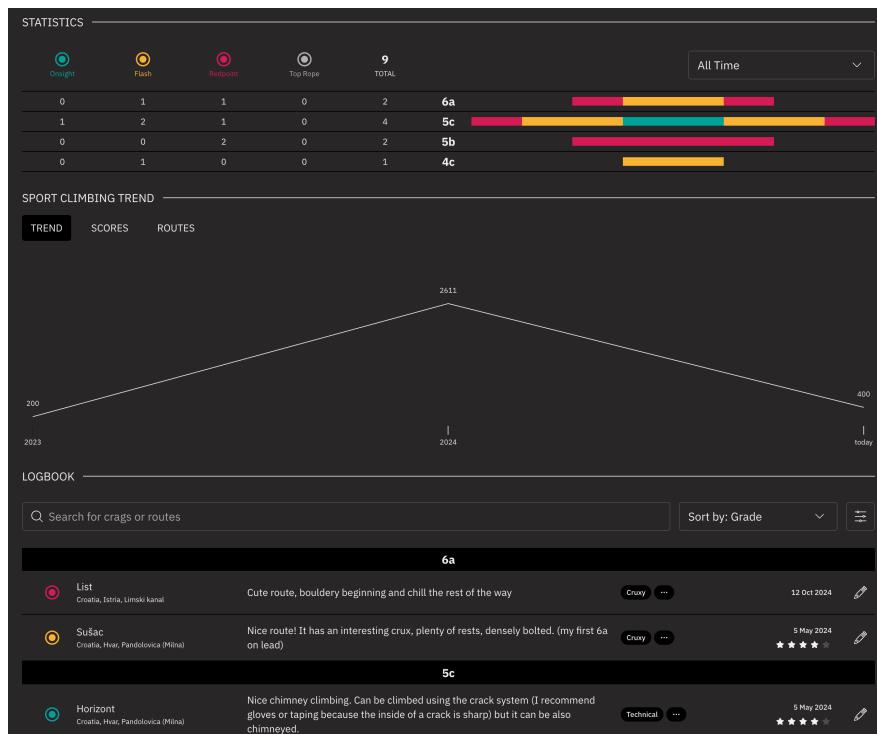
Dodatnu složenost unoše i izdanja stranih izdavača poput "Istra" autora Jurija Ravnikarja. Ova raznolikost izdavača dovodi do nedostatka konzistentnosti. Različiti vodiči koriste različite simbole, stilove i metodologije izrade *topo* skica. Neki se oslanjaju na ručno crtane skice, a neki na fotografije. Bitno je spomenuti da se neujednačenost vidi i u težinama smjerova. Nije rijetko da isti smjer ima različite težine u različitim vodičima, što nije nužno posljedica promjene na stijeni ili novije izdanje, već subjektivna procjena autora. Ponekad se dogode i veće pogreške pri određivanju težine smjera što može dovesti do zabune. Sveukupno te nekonzistentnosti otežavaju snalaženje penjačima koji posjećuju različita područja i koriste vodiče različitih autora.

### 2.1.2. Digitalne platforme

Ograničenja u tiskanim vodičima dovela su do pojave digitalnih platformi koje su omogućile veću dostupnost i ažurnost podataka. Dvije platforme, 8a.nu i 27crags, ističu se kao primjer rezličitih pristupa unutar digitalnog penjačkog svijeta.

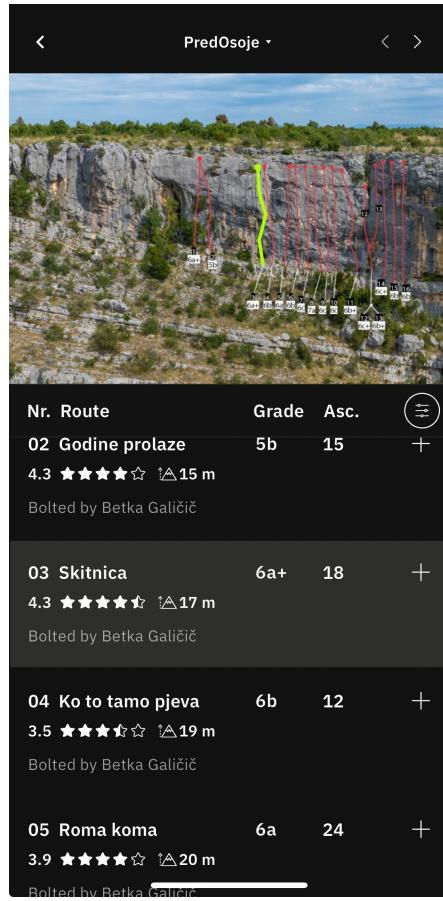
## 8a.nu

Platforma 8a.nu pokrenuta je 2000. godine i predstavlja jednu od najstarijih digitalnih platformi za penjanje. Njena glavna svrha nije funkcija terenskog vodiča, već uloga globalnog dnevnika uspona i sustava za rangiranje. Korisnici koriste platformu kako bi bilježili svoje ispenjane smjerove, navodeći stil uspona, predlagajući težine i komentare za smjerove. Time se stvara velika, iako često nestrukturirana, baza podataka koja služi kao arhiv i statički resurs.



Slika 2.2: Prikaz dnevnika uspona na platformi 8a.nu

Ta društvena i natjecateljska komponenta je razlog njene dugovječnosti jer motivira penjače svih razina da upisuju svoje uspone. Platforma također nudi vjesti o značajnim usponima i forum za raspravu između penjača. Unatoč što aplikacija nudi *topo* slike i hijerarhijski organizirane penjačke lokacije, njena primarna uloga je i dalje orijentirana prema društvenom aspektu. S nedavnim razvojem mobilne aplikacije, platforma je modernizirala korisničko sučelje i poboljšala dostupnost podataka na terenu nudeći opciju preuzimanja podataka na lokalni uređaj. Time je sustav upotrijebiv i u uvjetima bez signala.



**Slika 2.3:** Prikaz *topo* skice na mobilnoj aplikaciji 8a.nu

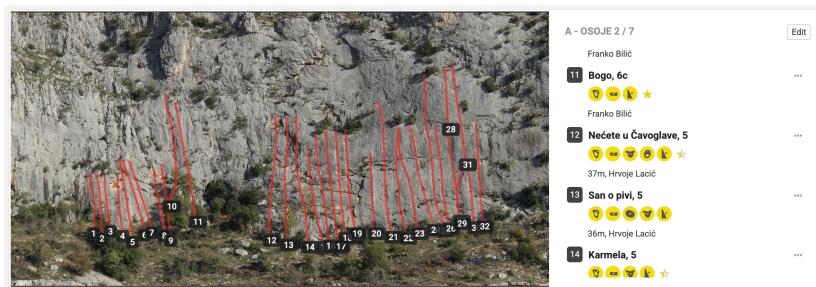
Analizirajući 8a.nu kao alata za snalaženje na stijeni, njeni nedostaci u kontekstu vizalne navigacije su i dalje prisutni. Temeljni problem leži u samoj prirodi vizalnih prikaza. *Topo* fotografije su često snimljene s velike udaljenosti kako bi obuhvatile cijeli sektor, zbog čega su ucrtane linije smjerova malene i nejasne. Ovaj problem postaje posebno izražen na sektorima s velikom gustoćom smjerova, kao što je prikazano na primjeru sektora PredOsoje, gdje je teško precizno raspoznati pojedinačne linije i njihove početke. Dodatni problem predstavlja i neujednačena pokrivenost. Dok su međunarodno popularna penjališta dobro dokumentirana, manje ili lokalne penjačke lokacije, poput Kalnika u Hrvatskoj, nemaju dostupne *topo* prikaze. Unatoč svojoj važnosti kao arhiva, 8a.nu nije pouzdano rješenje za problem identifikacije smjerova na stijeni.

## 27crams

27crams predstavlja digitalnu platformu za penjače koje je izrađeno primarno s ciljem pružanja informacija o penjačkim lokacijama i smjerovima. Ideja platforme 27crams je

popisati što više penjačkih lokacija i smjerova, a manji fokus je stavljen na društveni aspekt. *Topo* skice su napravljene na sličan način kao i kod 8a.nu, no društveni aspekt po pitanju uspona drugih penjača nije toliko u fokusu kao kod 8a.nu. Aplikacija nudi više informacija o penjačkoj lokaciji, poput parking lokacije sa detaljnim kartografskim prikazom.

Unatoč boljoj pokrivenosti penjačkih lokacija, 27crags također ima limitacije po pitanju dvodimenzionalnog *topo* prikaza čime se ne riješava problem identifikacije penjačkih smjerova.



**Slika 2.4:** Prikaz dvodimenzionalne *topo* skice sa 27Crags za penjalište Čikola sektora Osoje



**Slika 2.5:** Stvarna stijena na penjalištu Čikola sektora Osoje

## 2.2. Računalni vid u prepoznavanju penjačkog smjera

Prepoznavanje specifičnih objekata sa slike, u ovom slučaju prepoznavanje penjačkih smjerova na slici stijene, zahtijeva primjenu metoda koje su otporne na promjene u osvjetljenju, udaljenosti i kutu gledanja. Pristupi koji se temelje na uspoređivanju

piksela slike su neefikasni i nepouzdani jer su osjetljivi na spomenute varijacije. Zbog toga se koriste robusnije metode temeljene na detekciji i opisu lokalnih značajki (eng. *feature-based methods*). Temeljna ideja je pronaći jedinstvene, stabilne i ponovljive točke na slici, značajke, te ih iskoristiti za usporedbu i prepoznavanje.

Cjelokupni proces prepoznavanja penjačkog smjera pomoću detekcije značajki zahhtjeva tri komponente, referentnu sliku penjačkog smjera, referentnu sliku linije penjačkog smjera te sliku stijene dobivene sa kamere mobilnog uređaja. Referentna slika penjačkog smjera te referentna slika linije penjačkog smjera moraju biti iste dimenzije. Proces se može se raščlaniti na sljedeće korake. Prvi korak je detekcija i opis značajki, gdje se na referentnoj slici, unaprijed pripremljenoj slici stijene, i slici dobivenoj s kamere pronalaze ključne točke te se za svaku ključnu točku generira jedinstveni numerički opis, odnosno deskriptor. Potom se uparuju značajke između slika uspoređujući deskriptore, tipično koristeći algoritam poput *FLANN Matcher*. Te uparene značajke koriste se u trećem koraku, gdje se računa procjena geometrijske transformacije. Računa se matematički model - homografija, koja opisuje kako je slika stijene dobivene sa kamera rotirana, skalirana i perspektivno izobličena u odnosu na referentnu sliku. Konačno provodi se primjena transformacije, gdje se izračunati model koristi kako bi se referentna slika linije penjačkog smjera preslikala na sliku dobivenu sa kamere. Time se postiže željeni efekt vizualizacije penjačkog smjera u stvarnom vremenu.

U ovom poglavlju detaljno se obrađuju svi koraci procesa prepoznavanja penjačkog smjera, od detekcije značajki, preko uparivanja značajki do transformacije perspektive, koristeći prave slike penjačkog smjera i OpenCV biblioteku.

### **2.2.1. Detekcija i opis značajki (engl. feature detection and description)**

#### **Odabir algoritma detekcije značajki**

Za uspješno prepoznavanje objekta potrebno je odabrati algoritam koji može detektirati značajke koje su invarijantne na promjene u okolini. U domeni detekcije značajki postoji nekoliko algoritama, koji se razlikuju po brzini i preciznosti detekcija. Primjerice SURF (eng. *Speeded Up Robust Features*) dizajniran je kao brža aproksimacija SIFT-a, koristeći integralne slike s ubrzanje izračuna. ORB (eng. *Oriented FAST and Rotated BRIEF*), koji kombinira brži detektor kutova FAST s binarnim deskriptorima BRIEF, što ga čini iznimno popularnim za uvjete mobilnih uređaja s ograničenim resursima. Unatoč manjoj brzini, u ovom radu se proučava i koristi SIFT, koji je razvio

David Lowe. Odluka se temelji na njegovoj preciznosti i robusnosti u odnosu na ostale algoritme, unatoč što zahtijeva više resursa. SIFT generira visokodimenzionalne deskriptore koji omogućuju pouzdanije prepoznavanje kompleksnih površina poput prirodne stijene.

Iako su u modernom računalnom vidu pristupi temeljeni na dubokom učenju (eng. *deep learning*) postali dominantniji, njihova primjena u ovom problemu nije praktična radi količine potrebnih podataka za treniranje. U kontekstu ovog rada, to bi značilo da za svaki penjački smjer trebalo bi biti mnogo slika iz različitih kutova, udaljenosti i uvjeta osvjetljenja, te ih ručno kategorizirati. S obzirom da je sustav dinamičan i korisnici su oni koji dodaju penjačke smjerove, za svaki novi unos podatak potrebno bi bilo ponovno trenirati model. Takav proces prikupljanja podataka i treniranja modela je iznimno zahtjevan i nepraktičan. SIFT i drugi algoritmi detekcije značajki funkcioniрају na principu učenja iz jednog primjera, tj. potrebna je samo jedna referentna slika za kasnije prepoznavanje.

## SIFT algoritam

Rad SIFT algoritma može se podijeliti u četri faze. U prvoj fazi se detektiraju ekstremi u prostoru skale. Kako bi se postigla invarijantnost u skali, algoritam ne pretražuje značajke samo na originalnoj slici, već u trodimenzionalnom prostoru skale koji se generira postupnim zamalućivanjem i skaliranjem originalne slike primjenom Gaussovih filtera s rastućom standardnom devijacijom. Cijeli proces se često provodi u oktavama, gdje se nakon određenog broja zamalućenja slika smanjuje na pola veličine i proces se ponavlja. Time se dobivaju različite verzije slike, od oštре do zamalućene, simulirajući pogled na objekt s različitim udaljenostima. Za efikasnu detekciju stabilnih točaka koje su neovisne o skali, SIFT koristi aproksimaciju Laplaceove-Gaussove funkcije zvanu razlika Gaussovih funkcija (eng. *Difference of Gaussians, DoG*). DoG slike dobivaju se oduzimanjem dviju susjednih, različito zamalućenih slika unutar iste oktave. Potencijalne ključne točke lociraju se kao lokalni minimum ili maksimum u DoG prostoru. Točka se smatra lokalnim ekstremom ako je njena vrijednost veća ili manja od svih osam susjednih piksela na istoj DoG slici, te svih 9 susjednih piksela na DoG slici iznad ili ispod nje - ukupno 26 susjeda.

Kandidati dobiveni u prethodnoj fazi trebaju se dalje filtrirati kako bi se odbacile nestabilne točke. Prvo se interpolira vrijednosti sub-piksela gdje se nalazi lokacija ekstrema. Ideja iza interpolacije je da se želi povećati preciznost i stabilnost ključnih točaka. Preciznije točke omogućuju bolje uparivanje te bolje naknadno korištenje

značajnih točka, poput izračuna homografije. Nakon interpolacije primjenjuje se eliminacija točaka koje leže na rubovima. Rubovi su detektirani kao ekstremi, no točke na samom rubu su nepouzdane za precizno uparivanje jer je njihova lokacija duž samog ruba slabo definirana.

Kako bi se postigla invarijantnost na rotaciji, svakoj preostaloj ključnoj točki dodjeljuje se jedna ili više orijentacija. Orijentacija se izračunava na temelju lokalnog gradijenta slike u okolini ključne točke koristeći magnitudu i smjer gradijenta svakog piksela. Za svaku ključnu točku kreira se histogram orijentacija gradijenta s 36 spremnika koji svaki pokriva kut od 10 stupnjeva. Svaki unos u histogram uključuje u račun magnitudu gradijenta te udaljenost od centra ključne točke. Ako je piksel na oštroj kontrasnoj liniji magnituda gradijenta biti će veća, također ako je piksel na rubu okoline, magnituda će biti manja i time utjecaj te orijentacije manji. Vrh tog histograma definira dominantnu orijentaciju ključne točke. Ako postoji više od jedne orijentacije, tj. ako postoji orijentacija koja je veća od 80% od dominantne orijentacije, tada se kreira nova ključna točka sa istim položajem i skalom, ali s drugom orijentacijom. Time se povećava stabilnost uparivanja na mjestima s kompleksnim gradijentom.

Poslijednji korak je stvaranje jedinstvenog numeričkog deskriptora za svaku ključnu točku. Oko ključne točke uzima se 16x16 piksela te se rotira u skladu s dominantnom orijentacijom čime se postiže nezavisnost rotacije. Rotirana okolina se zatim dijeli na 4x4 podregije. U svakoj podregiji računa se histogram orijentacija gradijenta s 8 spremnika i vrijednosti iz svih 16 histograma spaja se u jedan 128-dimenzionalni vektor te se vektor normalizira kako bi se smanjila ovisnost o osvjetljenju.

Izlaz iz SIFT algoritma je skup detektiranih značajki, tj. njen položaj, skala, orijentacija i 128-dimenzionalni deskriptor. Cijeli proces SIFT algoritma provodi se za refrentnu sliku penjačkog smjera te slike dobivene sa kamere mobilnog uređaja.

### 2.2.2. Uparivanje značajki (engl. feature matching)

Nakon što se odrede SIFT značajke na obije slike, potrebno je pronaći podudaranja među njima. Proces se svodi na pronalaženje parova deskriptora koji su međusobno najsličniji u visokodimenzionalnom prostoru. Postoji nekoliko metoda za mjerjenje sličnosti deskriptora.

Prva metoda je korištenje *brute force* algoritma. Sličnost između dva 128-dimenzionalna SIFT deskriptora mjeri se koristeći Euklidsku udaljenost formulom

$$d(d_1, d_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^{128} (d_1[i] - d_2[i])^2} \quad (2.1)$$

gdje su  $d_1$  i  $d_2$  dva 128-dimenzionalna SIFT deskriptora. Manja Euklidska udaljenost predstavlja veću sličnost između deskriptora, odnosno između lokalnih struktura slike koje oni predstavljaju. Kada bi se uparivanje izvodilo jednostavnim pronalaskom para sa minimalnom udaljenosti došlo bi do velikog broja pogrešnih podudaranja. Zbog toga se koristi algoritam zvan Loweov test omjera. Umjesto da se traži samo jedan, za svaki deskriptor s referentne slike pronalaze se dva najbliža susjeda na slici s kamere. Ako je omjer udaljenosti između najbližeg i drugog najbližeg susjeda manji od koeficijenta  $t$ , deskriptor se smatra valjanim podudaranjem. Ovo se može opisati formulom

$$\frac{d(d_1, d_2)}{d(d_1, d_3)} < t \quad (2.2)$$

gdje su  $d_1$ ,  $d_2$  i  $d_3$  tri 128-dimenzionalna SIFT deskriptora,  $d$  je Euklidska udaljenost, a  $t$  je koeficijent koji se koristi za filtriranje pogrešnih podudaranja. Uobičajena vrijednost za prag  $t$  je između 0.7 i 0.8. Ovaj test provjerava je li podudaranost nedvosmislena, odnosno ako je najbliži susjed znatno bliži od drugog oonda je značajka jedinstvena i podudarnost je vjerojatno ispravna. Ako to nije istina onda to ukazuje na dvosmislenost i takva podudaranost se odbacuje kao nepouzdana.

Unatoč što ovaj algoritam daje dobre rezultate, njegova vremenska kompleksnost ga čini nepraktičnim za rad u stvarnom vremenu. Kako bi se ubrzao proces, često se koriste algoritmi za aproksimativnu pretragu najbližih susjeda koji se oslanjaju na efikasne strukture podataka za organizaciju visokodimezionalnih vektora. Jedna od takvih struktura je *k-d stablo*. K-d stablo je prostorna podatkovna struktura koja rekurzivno dijeli prostor u polovične podprostore čime postiže brzu eliminaciju velikih dijelova prostora pretrage. Unatoč njenoj efikasnosti u prostorima niske dimenzionalnosti, njena primjena u visokodimenzionalnim prostorima nije učinkovita, što je problematično za 128-dimenzionalne SIFT deskriptore. Zato je za SIFT deskriptore bolja tehnika LSH (eng. *Locality-Sensitive Hashing*) koja se oslanja na hash funkcije za brzo pronalaženje sličnih vektora u visokodimenzionalnom prostoru. U praksi se takvi algoritmi ne implementiraju ručno već se koriste gotove biblioteke koje nude bolja rješenja. Jedna od takvih biblioteka je *FLANN* (eng. *Fast Library for Approximate Nearest Neighbors*) koja implementira više različitih algoritama, uključujući i k-d stablo i LSH. Prednost FLANN-a je u tome što može automatski odabratи najprikladniju strukturu podataka i parametre pretrage na temelju podataka i odabranih kompromisa brzine ili preciznosti. Tim algoritmima i bibliotekama se postižu veće brzine uz minimalne gubitke u preciznosti naspram *brute force* algoritma.

### 2.2.3. Homografija i transformacija perspektive

Rezultat procesa uparivanja značajki je skup parova odgovarajućih točaka između referentne slike i slike dobivene sa kamere, no taj skup gotovo uvijek sadrži i određeni broj pogrešnih podudaranja. Te pogreške nastanu zbog dvostruko pogreške ili nesavršenosti SIFT deskriptora. Kako bi se uspostavila pouzdana geometrijska veza između dviju slika potrebno je pronaći matematički model koji opisuje transformaciju tih slika, ali na način koji je robustan na prisutnost tih pogrešnih parova. Takav model je homografija.

Homografija je projektivna transformacija u 2D prostoru koja preslikava točke iz jedne ravnine u drugu. U ovom slučaju te ravnine su referentna slika i slika dobivena sa kamere. Homografija se može opisati  $3 \times 3$  matričnom jednadžbom

$$s * \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

gdje su  $x$  i  $y$  koordinate točke na referentnoj slici, a  $x'$  i  $y'$  koordinate točke na slici dobivenoj sa kamere.  $s$  predstavlja faktor skale tj.  $s$  je posljedica korištenja homogenih koordinata i predstavlja treću komponentu rezultirajućeg vektora prije normalizacije. Faktor  $s$  osigurava da jednadžba vrijedi u projektivnom prostoru. Matrica  $H$  je homografska matrica koja se sastoji od 9 koeficijenata, no  $h_9$  je tipično postavljen na 1 što znači da matrica ima 8 stupnjeva slobode. Za njen izračun potrebno je poznavati barem 4 odgovarajuće točke na referentnoj i slici dobivenoj sa kamere, pod uvjetom da su točke nekolinearne. Budući da za izračun homografije potrebno je samo četiri para točaka, a iz procesa uparivanja dobije se znatno više parova, potrebno je odabrati najbolje parove na način da se također eliminira utjecaj pogrešnih podudaranosti. Za rješavanje ovog problema koristi se RANSAC (eng. *Random Sample Consensus*) algoritam. RANSAC je iterativni algoritam koji se sastoji od sljedećih koraka. Prvo se nasumično odabire minimalni podskup podataka potreban za izračun homografije, odnosno četiri para uparenih točaka. Na temelju tih nasumičnih točaka izračunava se preliminarna homografija  $H$ . Potom se ta preliminarna homografija testira na način da se ta matrica primjenjuje na sve ostale točke iz početnog seta podataka i određuje se udaljenost između izračunate točke i prave točke iz seta. Ako je ta udaljenost manja od predefiniranog praga onda se taj par smatra podudaranim s modelom. Cijeli ovaj postupak se ponavlja veliki broj puta. Na kraju se odabire matrica  $H$  koja je u jednoj od iteracija dobila najveći broj podudaranja s modelom. Korištenjem ovog algoritma osigurava se da pogrešne podudaranosti budu efikasno ignorirane jer se neće uklopliti

u jedan konzistentan geometrijski model.

Kada je pronađena matrica  $H$  s njom se može postići transformacija perspektive između dviju slika. Korištenjem homografije moguće je preslikati referentnu sliku linije penjačkog smjera na sliku dobivenu sa kamere koristeći OpenCV biblioteku te algoritam *warpPerspective*. Kao izlaz, generira se nova slika na kojoj je sadržaj perspektivno izobličen u skladu s matricom  $H$ . Rezultirajuća slika transformirane linije penjačkog smjera tada se može iscrtati preko slike dobivene sa kamere. Budući da je homografija izračunata na temelju značajki sa stijene, transformirana linija će se precizno poklapati s geometrijom stijene u trenutnom pogledu kamere čime se postiže efekt proširene stvarnosti.

## **2.3. Tehnologije za razvoj sustava**

### **2.3.1. Razvoj za iOS platformu**

### **2.3.2. Tehnologije pozadinskog sustava**

### **2.3.3. Tehnologije web aplikacije**

## **3. Arhitektura i dizajn sustava "Alpinity"**

- 3.1. Arhitektura sustava**
- 3.2. Dizajn baze podataka**
- 3.3. Dizajn pozadinskog sustava**
- 3.4. Dizajn procesa prepoznavanja smjera**

## **4. Implementacija rješenja**

**4.1. Implementacija pozadinskog sustava**

**4.2. Implementacija iOS aplikacije**

**4.2.1. Korisničko sučelje u SwiftUI**

**4.2.2. Integracija s bibliotekom OpenCV**

**4.3. Implementacija web aplikacije**

## **5. Testiranje i vrednovanje rješenja**

**5.1. Funkcionalno testiranje**

**5.2. Vrednovanje performansi prepoznavanja**

**5.3. Analiza ograničenja**

## **6. Zaključak**

**6.1. Sažetak ostvarenih rezultata**

**6.2. Smjernice za budući razvoj**

# LITERATURA

- [1] The Oxford Blue. Why does everyone suddenly want to rock climb? <https://theoxfordblue.co.uk/why-does-everyone-suddenly-want-to-rock-climb/>, siječanj 2025. Pristupljeno 7. lipnja 2025.