

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

1. Uvod	1
2. Analiza postojećih izvora informacija za penjače	3
2.1. Tradicionalni tiskani penjački vodiči	3
2.2. Digitalne platforme	5
2.2.1. 8a.nu	5
2.2.2. 27crags	7
2.2.3. Ostale značajne digitalne platforme	7
2.3. Problem identifikacije penjačkog smjera: praktični izazovi	8
3. Računalni vid u prepoznavanju penjačkog smjera	10
3.0.1. Detekcija i opis značajki (engl. feature detection and description)	11
3.0.2. Uparivanje značajki (engl. feature matching)	13
3.0.3. Homografija i transformacija perspektive	14
4. Arhitektura i dizajn sustava "Alpinity"	16
4.1. Arhitektura sustava	16
4.2. Dizajn baze podataka	16
4.3. Dizajn pozadinskog sustava	16
4.4. Dizajn procesa prepoznavanja smjera	16
5. Implementacija rješenja	17
5.1. Implementacija pozadinskog sustava	17
5.2. Implementacija iOS aplikacije	17
5.2.1. Korisničko sučelje u SwiftUI	17
5.2.2. Integracija s bibliotekom OpenCV	17
5.3. Implementacija web aplikacije	17

6. Testiranje i vrednovanje rješenja	18
6.1. Funkcionalno testiranje	18
6.2. Vrednovanje performansi prepoznavanja	18
6.3. Analiza ograničenja	18
7. Zaključak	19
7.1. Sažetak ostvarenih rezultata	19
7.2. Smjernice za budući razvoj	19
Literatura	20

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.

Sportsko penjanje i sroдна disciplina *bouldering* posljednjih su desetljeća doživjeli eksponencijalni rast u popularnosti, privlačeći sve veći broj zainteresiranih ljudi kako u specijalizirane penjačke dvorane, tako i na stijene u prirodi. 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.

Tradicionalno, glavni izvor informacija za penjače koji žele penjati na stijenama u prirodi su tiskani penjački vodiči. Ovi vodiči sadrže detaljne opise penjališta, karte pristupa, kao i skicirane prikaze stijene ili često nazivane *topo* s ocrtanim linijama penjačkih smjerova, njihovim nazivima i težinama. Iako su desetljećima bili nezamjenjiv alat, tiskani vodiči imaju ograničenja. Neki od ključnih nedostataka su statičnost i zastarijevanje podatka, nepraktičnost nošenja, nekonzistentnost između različitih izdanja te, najvažnije, poteškoće u interpretaciji dvodimenzionalnih skica na stvarnoj, trodimenzionalnoj stijeni zbog liminitiranog broja slika koji se mogu staviti u vodič.

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. Una-

toč tim prednostima, digitalna rješenja nisu bez nedostataka. Unatoč tim prednostima, i digitalna rješenja imaju svoja ograničenja. Ključni nedostaci uključuju oslananje na statične, dvodimenzionalne prikaze koji ne rješavaju problem interpretacije na terenu, kao i praktične izazove poput ovisnosti o trajanju baterije i dostupnosti internetskog signala na udaljenim lokacijama.

Navedeni nedostaci postojećih alata stvaraju potrebu za rješenjem koje pokriva njihove nedostatke. Cilj je iskoristiti mobilnu tehnologiju kako bi se stvorilo rješenje koje bi minimiziralo navedene nedostatke. Ideja je omogućiti penjačima da jednostavnim usmjeravanjem kamere mobilnog uređaja prema stijeni dobije vizualnu informaciju o položaju i nazivima smjerova izravno u stvarnom okruženju korištenjem tehnologije proširene stvarnosti. Takav pristup ne samo da štedi vrijeme i smanjuje frustracije, već i omogućuje sigurnije iskustvo penjanja.

2. Analiza postojećih izvora informacija za penjače

Nakon postavljanja motivacije te definiranja problema identifikacije penjačkog smjera slijedi analiza postojećih izvora informacija 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.

Za razmijevanje potreba penjača potrebno je analizirati alate koje penjači koriste. Ta rješenja mogu se podijeliti u dvije glavne kategorije: tradicionalne tiskane vodiče i moderne digitalne platforme koje su odgovorile na neka od ograničenja tiskanih vodiča.

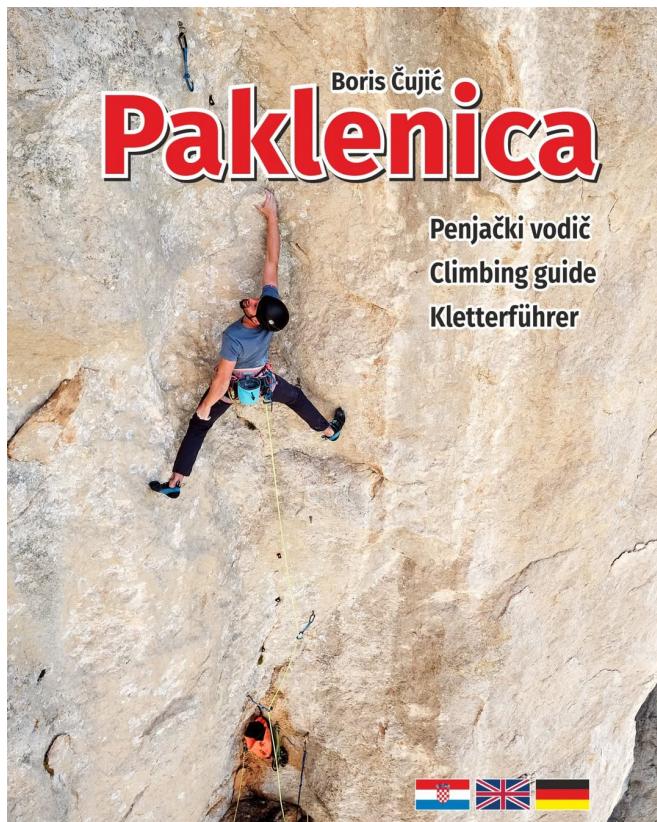
2.1. Tradicionalni tiskani penjački vodiči

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 osunčanost 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 sklono 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

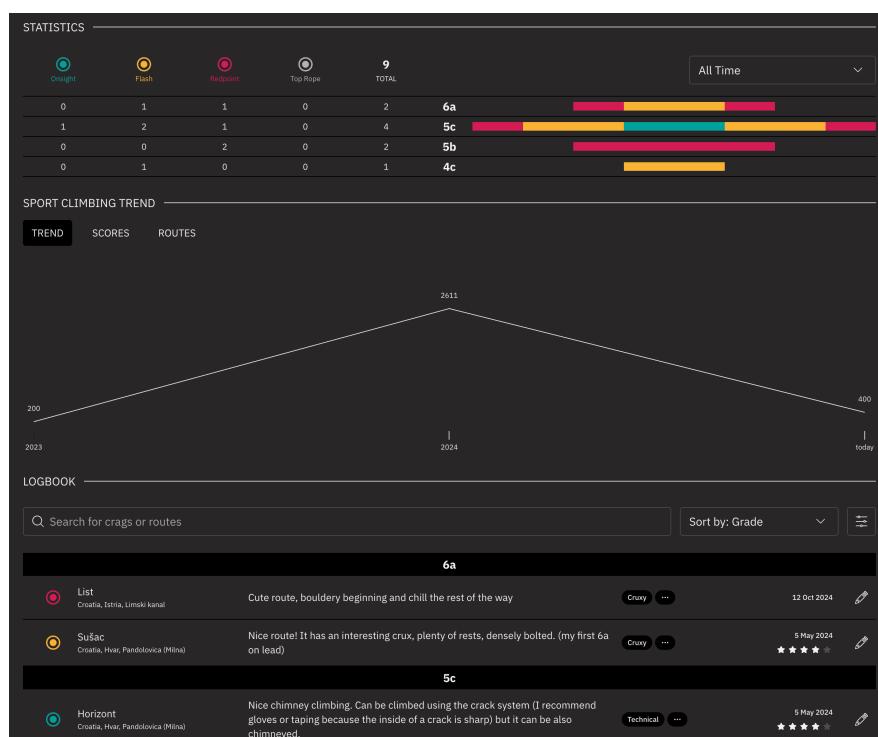
Dodatnu složenost unoše i izdanja stranih izdavača poput "Istra" autora Jurija Ravnika. Ova raznolikost izdavača dovodi do nedostatka konzistentnosti. Različiti vodiči koriste različite simbole, stilove i metodologije izrade *topo* skica. Neki se oslanjaju na ručno crtane skice, a neki na fotografije. 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.

2.2. 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.

2.2.1. 8a.nu

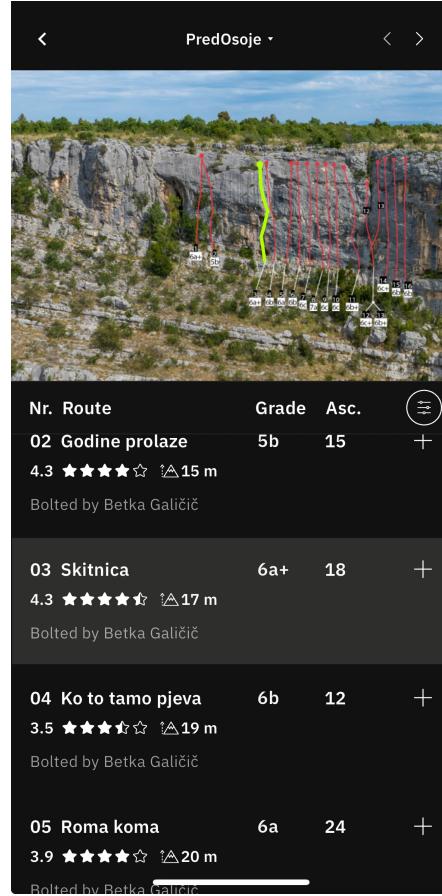
Platforma 8a.nu pokrenuta je 2000. godine i predstavlja jednu od najstarijih digitalnih platformi za penjanje. Njena glavna svrha nije funkcija terenskog vodiča, već uloga globalnog dnevnika uspona i sustava za rangiranje. Korisnici koriste platformu kako bi bilježili svoje ispenjane smjerove, navodeći 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.



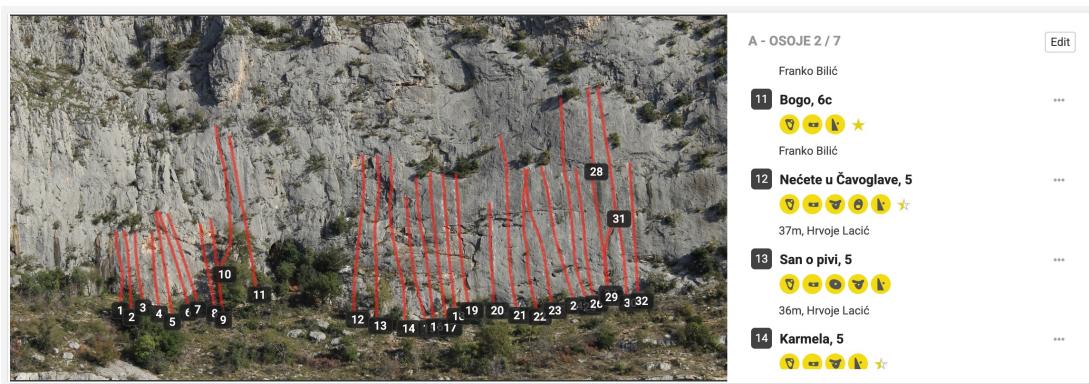
Slika 2.3: Prikaz topo skice na mobilnoj aplikaciji 8a.nu

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.

2.2.2. 27crags

27crags predstavlja digitalnu platformu za penjače koje je izrađeno primarno s ciljem pružanja informacija o penjačkim lokacijama i smjerovima. Ideja platforme 27crags 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 ograničenja po pitanju dvodimenzionalnog *topo* prikaza čime se ne rješava problem identifikacije penjačkih smjerova.



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

2.2.3. Ostale značajne digitalne platforme

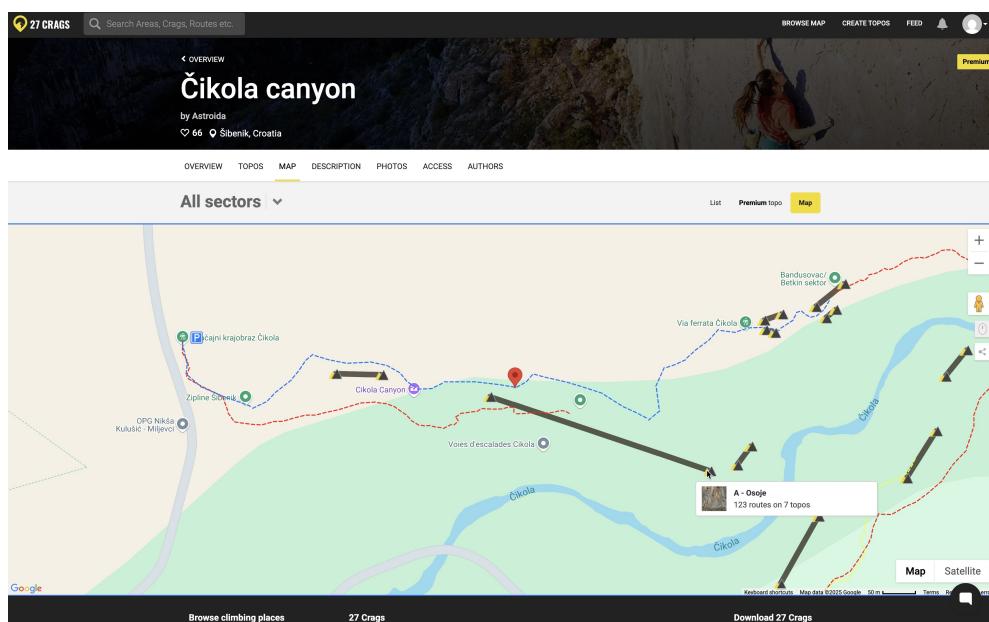
Uz navedene platforme, postoje i druge značajne digitalne platforme poput Mountain Project i KAYA. Mountain Project funkcioniра као sveobuhvatna, korisnički generirana baza podataka koja pokriva penjanje, planiniranje i druge aktivnosti u prirodi. Razlika između Mountain Project i drugih aplikacija je što je izraziti fokus na rad bez internetske veze. Aplikacija zahtjeva od korisnika da unaprijed preuzme podatke za cijelu regiju kako bi mogao pristupiti sadržaju. Unatoč što to osigurava rad na lokacijama bez signala, platforma se i dalje oslanja na statične fotografije i korisničke opise.

KAYA je primjer novije platforme koja je popularna u svijetu *bouldering* penjanja. Osim standardnih funkcionalnosti dnevnika uspona, KAYA omogućuje korisnicima objavu video sadržaja gdje pokazuju kako se penju određeni smjerovi, poznato pod nazivom *beta* video. Platforma je primarno usmjerena na američko tržište i dvoransko penjanje, zbog čega je njena pokrivenost manja od ostalih platformi, specifično za pe-

njališta u Hrvatskoj. Unatoč inovativnom pristupu dijeljenja video sadržaja, KAYA ne nudi rješenje za identifikaciju penjačkog smjera na stjeni.

2.3. Problem identifikacije penjačkog smjera: praktični izazovi

Teorijska analiza nedostataka postojećih digitalnih aplikacija dobiva dodatno značenje kada se promotri stvarni proces identifikacije penjačkog smjera na terenu. Proces odabira penjačkog smjera može se podijeliti u dvije faze. Prva faza je identifikacija sektora u kojem se korisnik nalazi. Ova faza se generalno odvija prije nego što penjač dolazi ispred stijene. Penjač odabire sektor na temelju penjačkih smjerova koji se nalaze u sektoru, primjerice gleda težine smjerova, traži dulje penjačke smjerove ili traži sektor sa mnogo penjačkih smjerova.



Slika 2.5: Prikaz geografske karte penjačke lokacije Čikola na 27crags

Problem odabira i pronalaženja sektora fizički i digitalni vodići uspješno rješavaju. Svaka penjačka lokacija sadrži geografsku kartu sa prikazom lokacija sektora. Slika 2.5 prikazuje kako taj problem riješava 27crags. Na karti su označeni sektori te prelaskom miša preko ikone pojavljuje se ime tog sektora. Fizički vodići također sadrže kartu, no nije interaktivna kao što je na 27crags. Svaki sektor sadrži listu penjačkih smjerova kojom penjač može odlučiti koji sektor želi posjetiti.

Dolaskom ispred stijene sektora kreće druga faza odabira penjačkog smjera i pojavljuje se problem identifikacije penjačkog smjera. Slika 2.4 predstavlja *topo* sliku kojom se penjač koristi kako bi identificirao penjački smjer na stijeni.



Slika 2.6: Stvarna stijena na penjačkoj lokaciji Čikola sektora Osoje

Gledajući sliku 2.6 teško je rasaznati gdje se penjač nalazi u odnosu na topo sliku i time je teško odrediti u koji penjački smjer penjač gleda. Često se traže distinktni elementi na stijeni poput velike rupe, nagle promjene u boji ili vegetacije, no ako je slika slikana iz velike udaljenost, to nije uvijek moguće. Cjelokupni proces je zahtjevan i podložan pogreškama te oduzima vrijeme koje bi se moglo iskoristiti za penjanje. Čak i uz pomoć fizičkih i digitalnih vodiča problem ostaje neriješen. Ta neefikasnost i nedostatak informacija predstavlja ključnu motivaciju za izradu sustava koji automatizira proces i pruža korisniku nedvosmislenu informaciju.

3. 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 zahtijeva 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.

3.0.1. 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 različitih udaljenosti. 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 zamućenih 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 16×16 piksela te se rotira u skladu s dominantnom orijentacijom čime se postiže nezavisnost rotacije. Rotirana okolina se zatim dijeli na 4×4 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

referentnu sliku penjačkog smjera te slike dobivene sa kamere mobilnog uređaja.

3.0.2. 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

$$d(d_1, d_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^{128} (d_1[i] - d_2[i])^2} \quad (3.1)$$

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

$$\frac{d(d_1, d_2)}{d(d_1, d_3)} < t \quad (3.2)$$

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 visokodimenzionalnih 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 odabrati 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.

3.0.3. 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 dvostrislenosti 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 3×3 matričnom jednadžbom

$$s * \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

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 četri para točaka, a iz procesa uparivanja dobije se znatno više parova, potrebno je odabratи 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 četri 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 ukloputi 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.

4. Arhitektura i dizajn sustava "Alpinity"

- 4.1. Arhitektura sustava**
- 4.2. Dizajn baze podataka**
- 4.3. Dizajn pozadinskog sustava**
- 4.4. Dizajn procesa prepoznavanja smjera**

5. Implementacija rješenja

5.1. Implementacija pozadinskog sustava

5.2. Implementacija iOS aplikacije

5.2.1. Korisničko sučelje u SwiftUI

5.2.2. Integracija s bibliotekom OpenCV

5.3. Implementacija web aplikacije

6. Testiranje i vrednovanje rješenja

6.1. Funkcionalno testiranje

6.2. Vrednovanje performansi prepoznavanja

6.3. Analiza ograničenja

7. Zaključak

7.1. Sažetak ostvarenih rezultata

7.2. 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.