

# OBRAZLOŽENJE PRIJEDLOGA TEME DOKTORSKE DISERTACIJE

*Kandidat:*

Dinko Osmanković, MoE, dipl.el.ing.

*Radni naslov teme doktorske disertacije:*

## Generiranje trodimenzionalnih termalnih modela unutarnjih prostora zasnovano na fuziji laserskih i termovizijskih podataka

### Sadržaj

1. Obrazloženje teme doktorske disertacije	1
2. Pregled stanja u oblasti istraživanja	2
2.1. Tehnologija i algoritmi za 3D mapiranje	2
2.1.1. Objedinjavanje (fuzija) mjerenja 3D lasera i termalne kamere	3
2.1.2. Registracija mjerenja 3D lasera i termalne kamere	4
2.2. Algoritmi za rekonstrukciju 3D modela iz neorganiziranog skupa tačaka	4
2.2.1. Delaunay 3D triangulacija	4
2.2.2. Rekonstrukcija na bazi kotrljajuće kugle	6
2.2.3. 3D rekonstrukcija na bazi estimacije tangetne površine	6
2.2.4. 3D rekonstrukcija na bazi rješavanja Poissonove jednačine	7
2.2.5. Marching Cubes Algorithm	7
2.3. Problem preslikavanja vrijednosti skalarnog i/ili vektorskog polja na 3D model	9
2.4. Ograničenja u vezi sa zadacima u oblasti robotike	9
3. Zadaci i ciljevi istraživanja	10
4. Metodologija istraživanja	11
5. Izvorni znanstveni doprinosi	11

### 1. Obrazloženje teme doktorske disertacije

Gubici prilikom održavanja temperature u stambenim objektima i tvornicama dovode do velikih gubitaka u energiji. Akcijski plan za energetske efikasnost koji je donijela Evropska komisija procjenjuje da ogroman potencijal za uštedu energije leži u rezidencijalnim ( $\approx 27\%$ ) i komercijalnim zgradama ( $\approx 30\%$ ).

U vezi s navedenim nastoje se razviti tehnologije i postupci koji će omogućiti automatizirano generiranje preciznih 3D termalnih modela unutarnjih prostora, koji omogućuju korisniku detekciju mjesta na kojima se javljaju gubici energije s ciljem modificiranja prostorija i postizanja ušteda u energiji.

Automatizacija ovakvog procesa neminovno nameće korištenje mobilnih robota pri izvršavanju ovakvih zadataka. Ovi roboti trebaju biti opremljeni preciznim 3D laserskim skenerom i termalnom kamerom, gdje bi se na temelju fuzije njihovih mjerenih podataka omogućilo dobivanje 3D skupa tačaka sa pridruženim vrijednostima temperatura. Nažalost, prikazivanje takvih, sirovih podataka nije optimalno, zamara oči, otežava detekciju značajki i u konačnici ne bi dalo željene rezultate u smislu uštede energije.

Disertacija ima za cilj da kroz teorijsko i praktično istraživanje predstavi nove koncepte u izgradnji 3D modela sa naglaskom na 3D modele u kojima su sadržane informacije o temperaturi. Pored teorijskog pregleda i analize trenutno dostupnih tehnika za izgradnju 3D modela iz neorganiziranog skupa tačaka, zajedno sa kritičkim osvrtom na postojeće metode, njihove prednosti i nedostatke, disertacija ima za cilj da ponudi rješenje problema dodavanja dodatnih informacija o temperaturi 3D modelima unutarnjih prostorija koji su dobiveni mjerenjima termalne kamere.

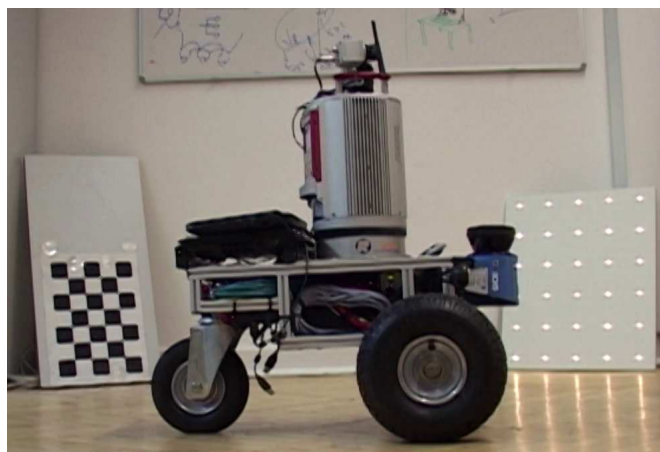
## 2. Pregled stanja u oblasti istraživanja

Gubici topline u stambenim objektima i tvornicama predstavljaju značajne iznose korisne energije. Da bi se smanjili ovi gubici energije zahtijeva se precizan digitalni model distribucije topline i njenog protoka. U vezi s tim neophodno je kreirati trodimenzionalne prikaze okoline korištenjem distribucije toplotne energije, što predstavlja novinu u području istraživanja uštede energije u stambenim objektima. Trenutne tehnologije omogućuju dobivanje prikaza zidova prostorije na temelju kojih se može dobiti precizna informacija o temperaturi, ali se ne mogu dobiti informacije o dimenzijama topline ili gubitka zraka. Obično su slike projicirane u 2D prostore i iz sekvence takvih prikaza je moguće rekonstruirati 3D prikaze. Ovi pristupi omogućuju gradnju struktura iz kretanja (SFM – structure from motion), pri čemu se ovaj problem najčešće rješava istovremenom lokalizacijom i mapiranjem (SLAM – simultaneous localization and mapping) koja se zasniva na rekonstrukciji 3D strukture okoline i pozicija i orijentacija senzora. Budući da prihvatljiva rješenja zahtijevaju pristupe 3D rekonstrukcije, a oni trenutno još nisu razvijeni, u disertaciji će se razmatrati korištenje tehnike 3D laserskog skeniranja prostora. Metode laserskog skeniranja su dobro poznate i široko primijenjene u robotici. 3D laserski sistem za skeniranje daje precizne informacije o tačkama u trodimenzionalnom koordinatnom sistemu (3D point clouds). Skeniranje iz različitih poza omogućuje dobivanje digitaliziranog unutarnjeg prikaza kompletne okoline i rješavanja problema zadržavanja topline u njoj. Algoritmi registracije iz geodezije i robotike za automatsko poravnanje skeniranih prikaza iz različitih poza se uveliko koriste za ove svrhe [1]. Planiranje postavljanja senzora je neophodno za ciljno usmjerenu akviziciju 3D podataka. Relativno mali broj radova u ovoj oblasti planiranja lokacija senzora zasniva se korištenju dodatnih modaliteta, kao što su geometrija površina i temperatura [2]. Vizualizacija i simulacija termalnih 3D modela trenutno nisu dostupni. Slični radovi su aktualni u inspekcijskoj robotici koji uključuju ljudsku detekciju sa termalnim kamerama korištenjem termalnih potpisa [3]. Međutim, trenutno su u fokusu vanjske okoline i slikovno zasnovane (image – based) tehnike, kao što je SFM. U [4] je predstavljen sistem stereovizije korištenjem termalnih kamera, ali je primijenjen na aplikacije u malim skaliranim sredinama. Metode gradnje 3D mapa okoline korištenjem 3D skenera su predmet istraživanja u [4, 5]. Međutim, na temelju dostupnih informacija, još nitko nije kombinirao 3D lasersko skeniranje i slike dobivene termalnom kamerom za 3D prikaz okoline u standardnim formatima virtuelnog modeliranja.

U nastavku se predstavljaju najvažniji dijelovi sistema za automatizirano generiranje 3D termalnih modela unutarnjih prostorija.

### 2.1. Tehnologija i algoritmi za 3D mapiranje

Za izradu doktorske disertacije planirano je korištenje podataka dobiveni mjerenjem 3D lasera i termalne kamere montiranih na mobilnu robotsku platformu IRMA3D (Slika 2.1).



Slika 2.1: IRMA3D mobilna robotska platforma



Slika 2.2: Senzorski sistem sa 3D laserom, termalnom i RGB kamerom

### 2.1.1. Objedinjavanje (fuzija) mjerenja 3D lasera i termalne kamere

Objedinjavanje, odnosno fuzija mjerenja 3D lasera i termalne kamere se vrši ko–kalibracijom ta dva senzora (Slika 2.2). Kalibracija pojedinačnih senzora, 3D lasera, termalnih i RGB kamere, je dobro istraženo područje. Međutim, ko–kalibracija senzorskih sistema sa više ovakvih senzora je problem koji još uvijek nije u potpunosti riješen. Jedno od ponuđenih rješenja [6, 7] kombinira tehnike pojedinačne kalibracije 3D lasera i termalne kamere. U tu svrhu koristi se predložak sa simetričnim krugovima koji su zbog termalne kamere zamjenjeni sijalicama (Slika 2.3).

Postupak ko–kalibracije je sljedeći. Laserskim 3D skenerom se snimi 3D skup tačaka te se izdvađa ravan na kojoj se nalaze sijalice. Zatim se vrši uklapanje sa izmjerenim pozicijama sijalica na slici snimljenoj termalnom kamerom [8, 9]. Pseudokod ove procedure je dat u algoritmu 1.

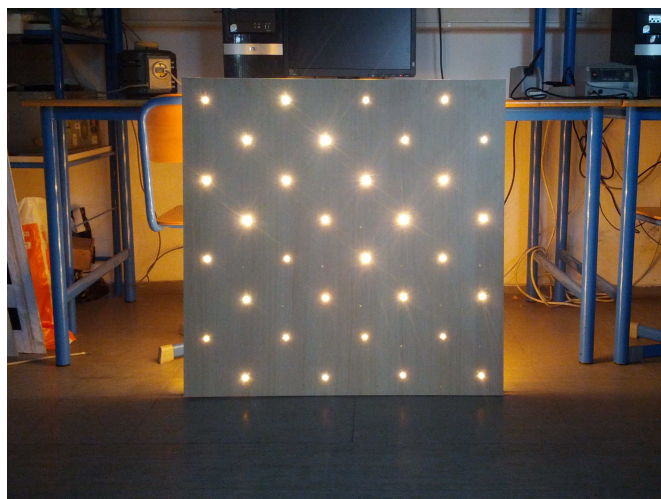
---

**Algoritam 1** Detekcija predložka za kalibraciju u snimci 3D lasera.

---

**Require:** skup 3D tačaka, specifikacija predložka za kalibraciju

- 1: odbacivanje skupa tačaka izvan očekivane ravni predložka
  - 2: RANSAC algoritmom pronaći najveću ravan
  - 3: izvršiti projekciju generiranog modela ravni na centar RANSAC–om pronađene ravni
  - 4: ICP (en. *Iterative Closest Point*) algoritmom uklopiti pozicije sijalica (određene mjerenjem termalne kamere) na model ravni
  - 5: **return** pozicije sijalica kao rezultat ICP algoritma
-



Slika 2.3: Predložka za ko–kalibraciju 3D lasera i termalne kamere; Ova predložka se može koristiti i za ko–kalibraciju Kinect senzora i termalne kamere

Također, problemi okluzije uzrokovani različitim uglovima gledanja lasera i kamere su riješeni klasterizacijom, tj. pretpostavlja se da se ako tačka pripada nekom objektu na snimci 3D lasera onda postoji još tačaka koje pripadaju istom.

### 2.1.2. Registracija mjerenja 3D lasera i termalne kamere

Snimici ko–kalibriranog sistema 3D lasera i termalne kamere se registriraju u zajednički koordinatni sistem korištenjem SLAM6D metode [5, 10, 11, 12]. Algoritam je prikazan dijagramom toka na slici 2.4. Pored SLAM6D algoritma i njegovih varijanti [13], postoje još nekoliko SLAM algoritama. Njihova uporedba u smislu performansi je prezentirana u [14].

## 2.2. Algoritmi za rekonstrukciju 3D modela iz neorganiziranog skupa tačaka

Dobiveni podaci nisu pogodni za prezentaciju s ciljem inspekcije modela. Naime, prethodno opisani algoritmi za akviziciju i registraciju kao izlaz daju skup 3D tačaka sa pridodanim informacijama o temperaturi (termalna kamera) ili boji (RGB kamera). Osobe koje vrše inspekciju modela s ciljem pronalaženja značajki, izvora toplote i gubitaka, koriste veoma velike količine podataka, te je potrebno predstaviti te podatke na najbolji mogući način. Osim toga, inspekcija 3D modela predstavljenog skupom tačkama zamara oči što može dovesti do grešaka prilikom same inspekcije. Stoga se pristupa rekonstrukciji potpunog 3D modela sa površinama čime bi se snimljena okolina realistično predstavila.

U nastavku se opisuju neki od algoritama za rekonstrukciju 3D modela iz neorganiziranog skupa tačaka.

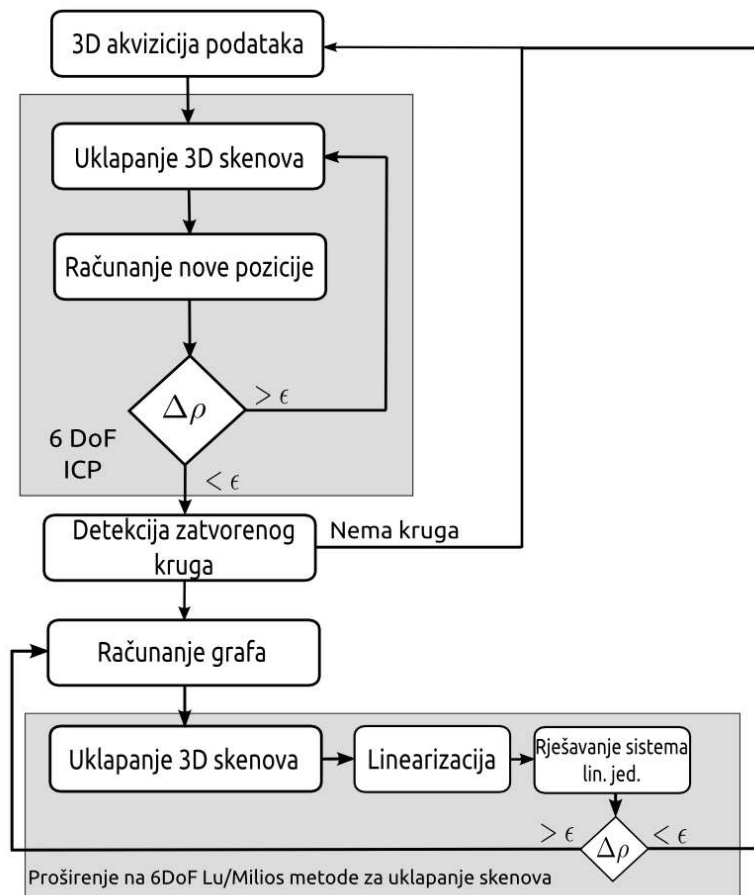
### 2.2.1. Delaunay 3D triangulacija

Jedan od najstarijih algoritama za rekonstrukciju 3D modela iz skupa tačaka je Delaunay triangulacija [15].

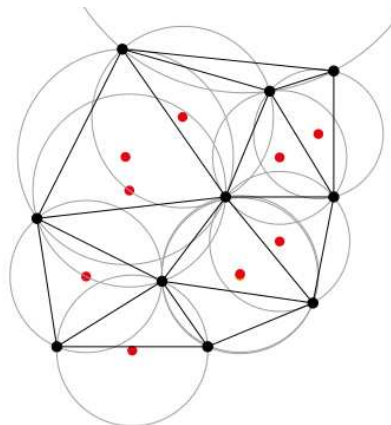
Originalna, dvodimenzionalna, verzija ovog algoritma može se iskazati sljedećom definicijom:

**Definicija 2.1.** *Delaunay triangulacija skupa tačaka  $\mathbf{P}$  je triangulacija  $DT(\mathbf{P})$  takva da se ni jedna tačka iz  $\mathbf{P}$  ne nalazi unutar bilo kruga opisanog oko bilo kog trokuta u  $DT(\mathbf{P})$ .*

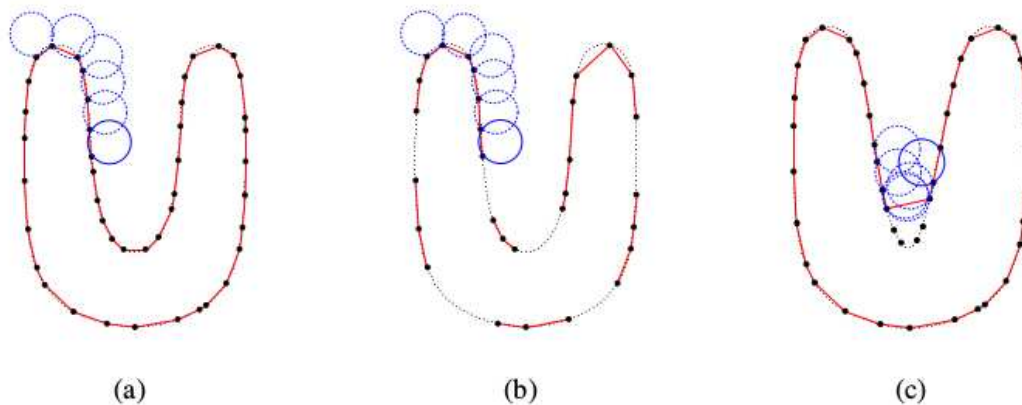
Primjer 2D Delaunay triangulacije je prikazan na slici 2.5.



Slika 2.4: Dijagram toka SLAM6D algoritma



Slika 2.5: Primjer 2D Delaunay triangulacije



Slika 2.6: Primjer 2D varijante Ball pivotting algoritma; (a) Krug radijusa  $\rho$  se kotrlja od tačke do tačke povezujući ih ivicama (b) Kada je gustoća uzorkovanja mala, neke ivice neće biti formirane što formira rupe u modelu (c) Kada je zakrivljenost mnogostrukosti  $M$  veća od  $\rho/2$  neke od tačaka su nedostiže kotrljajućoj kugli i značajke neće biti uzete u obzir prilikom rekonstrukcije.

Generalizacija ovog algoritma za višedimenzionalni skup tačaka je predstavljena u [16], međutim nije dokazano postojanje niti jedinstvenost rješenja. Osim toga, algoritam ima jako veliku kompleksnost [17], a kada su kompleksni objekti u pitanju često ne postoji rješenje. Treba napomenuti da postoji i varijanta triangulacije bazirana na Voronoijevim dijagramima [18, 19], ali ona zbog sličnih problema kao sa Delaunay triangulacijom nije od interesa za istraživanje.

### 2.2.2. Rekonstrukcija na bazi *kotrljajuće* kugle

Rekonstrukcija na bazi *kotrljajuće* kugle (en. *Ball pivotting*) je jedna od prvih metoda koja je nastojala riješiti problem kompleksnosti Delaunay triangulacije [20].

Osnovni koncept ove metode je veoma jednostavan. Neka je  $M$  mnogostrukost (en. *manifold*) koja predstavlja površinu nekog trodimenzionalnog objekta, a  $S$  skup tačaka koji predstavlja njegovu diskretizaciju. Pretpostavimo da je  $S$  dovoljno gusta tako da kugla radijusa  $\rho$  ne može proći kroz površinu  $M$  bez dodirivanja tačaka iz  $S$ . Kugla se postavlja da dodiruje dvije tačke iz  $S$ , a zatim se kugla zakotrlja dok ne dodirne sljedeću tačku. Algoritam se izvršava dok sve tačke iz  $S$  ne budu *dodirnite* ili se ne može *dodirnuti* ni jedna nova tačka iz  $S$ .

Konačno, skup trokutova se formira dok se lopta *kotrlja* po površini 3D modela što predstavlja neki vid interpolacije. Dvodimenzionalna varijanta izvršavanja ovog algoritma je prikazana na slici 2.6. U [21] je predstavljena ograničena varijanta BPA, koja pojednostavljuje dijelove modela koji sadrže ravne dijelove. Sličan metod na bazi  $\alpha$ -oblika je prezentiran u [22].

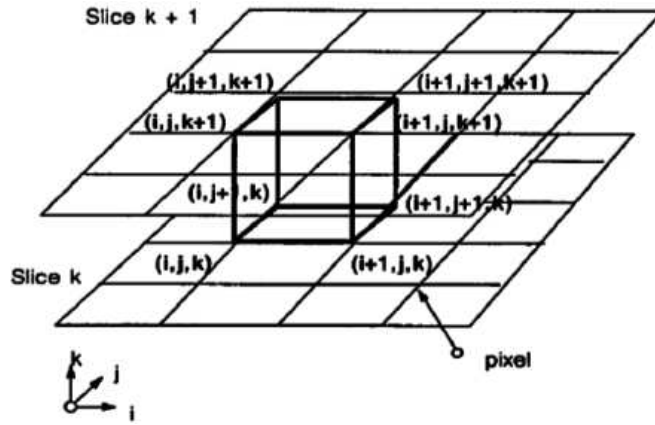
### 2.2.3. 3D rekonstrukcija na bazi estimacije tangetne površine

Najprecizniji od algoritama za rekonstrukciju 3D modela iz neorganiziranog skupa tačaka je algoritam koji koristi estimaciju tangentne površine u svakoj tački [23].

Ovaj algoritam se izvršava u dvije faze. U prvoj fazi se definira funkcija  $f : D \rightarrow \mathcal{R}$ , gdje  $D \subset \mathcal{R}^3$  predstavlja okolinu oko ulaznih podataka, takva da  $f$  estimira označenu geometrijsku distancu do nepoznate površine  $M$ . Skup nula  $Z(f)$  funkcije  $f$  predstavlja estimaciju  $M$ . U drugoj se fazi algoritam konturiranja koristi za aproksimaciju  $Z(f)$  nekom površinom.

Zbog jednostavnosti se funkcija  $f$  uzima kao ravan, što znači da algoritam rekonstrukciju vrši lokalno tako da zamjenjuje tačke sa ravni, uzimajući u obzir označenu udaljenost, odnosno orijentaciju te ravni. Ovo je važno zbog kasnijeg procesa konturiranja koji izbacuje suvišne dijelove lokalno estimiranih ravni.

Pored osnovne, postoji još i varijanta sa lokalnim izgladivanjem [24].



Slika 2.7: Kocka unutar koje se određuje lokacije površine na osnovu iso vrijednosti

#### 2.2.4. 3D rekonstrukcija na bazi rješavanja Poissonove jednačine

Računanje implicitne funkcije koja u potpunosti opisuje površinu modela je računarski vrlo kompleksno. Stoga se problem pokušava pojednostaviti na način da se implicitna funkcija za opis modela konstruira tako da se skup parova  $(p_i, \mathbf{n}_i)$ , gdje je  $p_i$  tačka u  $\mathcal{R}^3$  i  $\mathbf{n}_i$  lokalno estimirana normala na površinu u tački  $p_i$ , smatra diskretizacijom vektorskog polja  $\mathbf{V}$ . Konačno, integriranjem ovako estimiranog vektorskog polja se dobiva implicitna funkcija, odnosno 3D model [25, 26].

Velika prednost ove metode je globalna konzistentnost i robusnost. Dok estimacija implicitne funkcije površine lokalno aproksimira skup tačaka, Poissonovska rekonstrukcija koristi koncept indikatorske funkcije koja govori da li se tačka nalazi u unutrašnjosti modela ili van.

U [27] je predstavljena paralelizacija ovog algoritma, dok se u [28] susreće varijanta sa dodatnim ograničenjima koja poboljšavaju preciznost izgrađenog modela.

#### 2.2.5. Marching Cubes Algorithm

Ovaj algoritam je razvijen za potrebe vizualizacije podataka u medicini dobivenih CT, MR i SPECT uređajima [29, 30, 31, 32]. Obzirom na način rada ovih uređaja, podaci koji se dobivaju su predstavljeni kao skup odrezaka (en. *slice*), te se definira pojam iso-vrijednosti koja je jednaka za sve tačke jednog odreska. Ova vrijednost se uzima konstantnom u osnovnoj verziji algoritma.

Iso vrijednosti formiraju skalarno polje čijim integriranjem se dobiva iso površina koja predstavlja rekonstruirani 3D model iz ulaznog skupa tačaka. Površinski integral skalarnog polja iso vrijednosti se ne računa zbog računarske kompleksnosti, nego se pristupa određenom aproksimativnom rezonovanju.

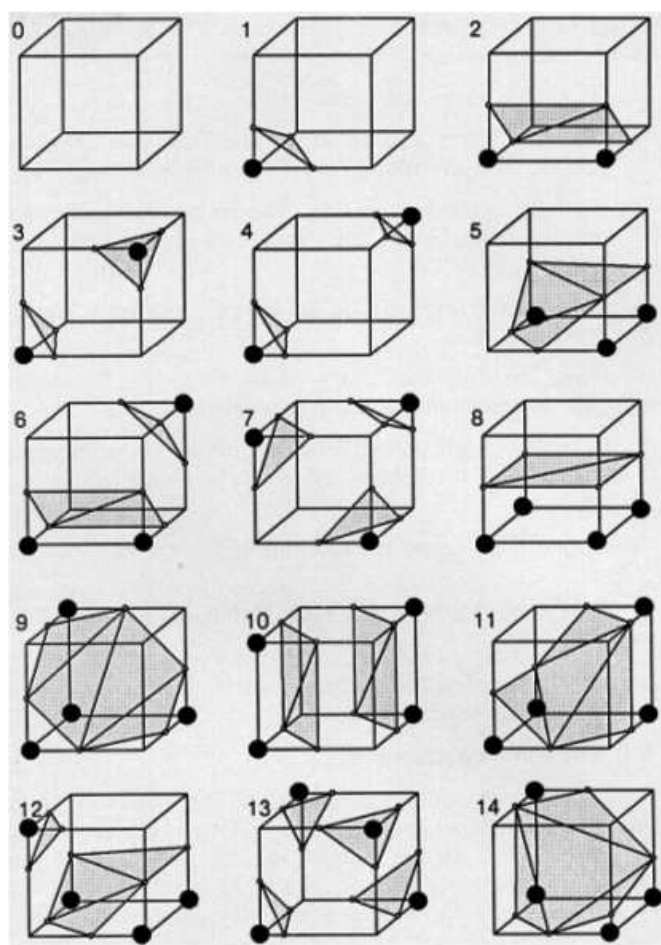
Algoritam se bazira na *podijeli pa vladaj* taktici da se locira površina unutar kocke sastavljene od 8 tačaka iz 2 susjedna odreska (Slika 2.7).

Algoritam određuje na koji način porvš prolazi kroz kocku i nakon toga prelazi na sljedeću kocku. Da bi se odredio način na koji površ prolazi kroz kocku, dodjeljuje se iso vrijednost 1 onom vrhu kocke u slučaju da je iso vrijednost u tom vrhu veća ili jednaka od iso vrijednosti površine (koja se, kao što je navedeno, uzima konstantnom). Na taj način se označavaju tačke koje su unutar, a koje su van površine: vrijednost 1 dobivaju one koje su unutar ili na površini, u protivnome 0. Konačno, zaključuje se da površina prolazi kroz one ivice kocke kod kojih je jedan vrh ispod, a drugi iznad površine [29].

Kako kocka ima 8 vrhova i dva moguća slučaja za svaki (unutar ili van), postoji tačno  $2^8 = 256$  načina na koji površina može proći kroz kocku. Na osnovu ovoga se formira tabela slučajeva u zavisnosti od označenih vrijednosti vrhova kocke.

Zbog postojanja simetrije, ovaj broj slučajeva se može reducirati na 14 zbog simetričnosti kocke [29]. Tih 14 slučajevi su prikazani na slici 2.8.





Slika 2.8: Triangularizirani slučajevi prolaska površine kroz kocku



Ono što je nedostatak originalnog MCA jest pojava *rupa* u modelu uzrokovane odabirom slučajeva kao što su 3 i 6 na slici 2.8. Taj problem je riješen proširivanjem ovakih slučajeva sa linearno interpoliranim varijantama, čime je tabela slučajeva proširena na 33 slučaja [33].

Postoje i drugi načini tretiranja problematičnih slučajeva originalnog MCA. U [34] skup tačaka je predstavljen kao Bayesov sistem, te se na osnovu uvjerenja pokušavaju triangularizirati određeni dijelovi rekonstruiranog modela s ciljem eliminacija rupa u modelu. Sa druge strane, u [35] rekonstruirani model dodatno izgladuje i popunjavaju se rupe u modelu na bazi funkcija udaljenosti. Također, postoje i razne varijante algoritma u smislu korištenja strukture podataka za opis modela koje pokušavaju da smanje vrijeme izvršavanja i zauzeće memorije tokom izvršavanja [36].

Zbog svoje jednostavnosti i male kompleksnosti, MCA je *de facto* standard u rekonstrukciji 3D modela na osnovu tačaka dobiveni iz odrezaka. Koristi se u različitim poljima istraživanja u medicini, astrofizici, računarskim naukama, meteorologiji, geologiji [31, 32, 37, 38, 39, 40, 41].

### 2.3. Problem preslikavanja vrijednosti skalarnog i/ili vektorskog polja na 3D model

Naredni problem koji se susreće u zadatku generiranja 3D termalnih modela jeste na koji način. Jedan od pristupa je pristup mapiranja tekstura gdje se skalarno polje sa informacijama o temperaturi objekta predstavljaju kao tekstura u nekom od standardnih formata (PNG ili DXTC).

Mapiranje tekstura se često susreće u literaturi vezanoj za mapiranje skalarnih i/ili vektorskih polja bilo da je u pitanju informacija o boji, temperaturi, pritisku, nadmorskoj visini i sl. [42, 43, 44, 45, 46].

Međutim, uvjeti zadatka generiranja 3D termalnih mapa unutarnjih prostorija ne daju mogućnost korištenja nekog od algoritama mapiranja tekstura. Naime, zbog zahtjeva za mogućnošću inspekcije modela, informacija dobivena iz senzorskog sistema mora ostati nepromijenjena i ona ne daje mogućnost bilo kakvog dobivanja texture. Teksturu je moguće rekonstruirati u 2D prostoru, ali njeno ponovno mapiranje dovodi ponovno do problema okluzije koji je svakako već riješen prilikom ko-kalibracije senzorskog sistema.

Treba napomenuti da ovaj problem nije rješavan u dostupnoj literaturi uz uslove koji se susreću u postavci zadatka generiranja 3D termalnih mapa.

### 2.4. Ograničenja u vezi sa zadacima u oblasti robotike

Svi pobrojani algoritmi rekonstrukcije 3D modela su namijenjeni *offline* izvršavanju i nisu predviđeni za primjenu u robotici. Treba napomenuti da se u dostupnoj literaturi mogu naći i modifikacije ovih algoritama koji pokušavaju da donekle riješe problem preciznosti i/ili problem kompleksnosti.

Sa druge strane, ono što se može pronaći u dostupnoj literaturi ne govori o rekonstrukciji modela unutarnjih prostorija. Od svih algoritama, MCA se pokazao kao dovoljno brz da se uklapi u zahtjeve koji se susreću u robotici, prije svega vremenska kompleksnost, te donekle memorijski zahtjevi. Problem MCA je način predstavljanja skupa tačaka u formi skupa odrezaka. Zbog toga se bez modificiranja MCA ne može riješiti problem rekonstrukcije 3D modela iz neorganiziranog skupa tačaka dobivenog na opisani način.

U zadnjih nekoliko godina je problem rekonstrukcije 3D modela okoline sa fokusom na primjenu autonomnih robotskih sistema za automatiziranu akviziciju i rekonstrukciju 3D modela veoma aktuelan i izazovan za istraživanje. Dodatni zamah je postignut pojavom jeftine opreme za akviziciju 3D skupa tačaka kao što je Microsoft Kinect ili Asus Xtion. Tako je u [47] predstavljen algoritam za volumetrijsku rekonstrukciju 3D modela (sa dodatnim Ray-casting algoritmom za poboljšanu vizualizaciju). U [48] je prezentirana i dinamička varijanta Kinectfusion algoritma koja rješava probleme brzog pomjeranja i tresanje senzora prilikom akvizicije. Ovaj algoritam, nažalost, ima velike probleme sa preciznošću prilikom rekonstrukcije objekata velikih dimenzija. Dobar kvalitet 3D modela se dobiva za modele koji imaju zapreminu do nekoliko  $m^3$ , dok se u

zadatku generiranja 3D termalnih mapa unutarnjih prostorija očekuju modeli čija zapremina se kreće do nekoliko stotina  $m^3$ .

Kada je u pitanju korištenje 3D lasera industrijske kvalitete kao što je Riegl VZ-400, u dostupnoj literaturi nije moguće pronaći primjenu ovakvog sistema, niti rješenja prethodno navedenih problema.

### 3. Zadaci i ciljevi istraživanja

Osnovni cilj disertacije je konstruiranje preciznih termalnih 3D modela unutarnjih prostora, na temelju kojih se mogu identificirati gubici topline u zgradama i tvornicama i na taj način ponudila odgovarajuća rješenja koja omogućuju uštedu u potrošnji energije između 27–30%. Istraživanje se temelji na kreiranju 3D modela okoline koji sadrže dodatne informacije o temperaturama njihovih tačaka. Zadatak modeliranja je složen i uključuje brojne fundamentalne naučne pristupe.

Prvi zadatak, odnosno pristup, je gradnja mape okoline. Ručni proces konstrukcije mape je težak i tendiciozan posao. Otprilike je potrebno sedam dana za kreiranje 2D prikaza muzeja u Bonnu [49]. Općenito, mobilni robotski sistemi sa 3D laserskim skenerima, koji automatski obavljaju višestruke korake kao što su: skeniranje, mjerenje i automatska registracija, imaju potencijalno velike mogućnosti poboljšanja procesa gradnje mape prostora. Ovakvi sistemi automatskog mapiranja predmet su istraživanja u robotici posljednjih nekoliko godina. Korespondentni problem se naziva SLAM, odnosno metod istovremene lokalizacije i mapiranja. Ako su položaji senzora dobro poznati, tada se lokalni podaci, kao što su lokalne mape, mogu registrirati u zajedničkom koordinatnom sistemu kako bi se kreirala mapa. Registracija opisuje proces postavljanja lokalnih podataka u referentni koordinatni sistem. Budući da su položaji senzora nepoznati tada se mjerni senzorski podaci koriste za kreiranje precizne globalne mape. Sistemi sa 2D mapiranjem, u ovom slučaju sistemi mapiranja zidova, su veoma razumljivi i dobro razvijeni u robotici. Inicijalni 3D sistemi mapiranja su razvijeni i ova tehnologija se tek uspostavlja. Budući da se mapa prostora gradi na temelju mjerenja termalne kamere i lasera, prvi cilj disertacije je transfer algoritama iz robotike u ove senzore i primjena tih algoritama. U ovoj disertaciji se za potrebe rješavanja ovog problema koriste Riegl VZ-400 laserski skener i Optris PI 160 kamera. Također, razmatrati će se i korištenje jeftinije opreme, npr. Microsoft Kinect za izradu 3D termalnih mapa okoline.

Drugi pristup, odnosno zadatak, je rješavanje problema ponovne kalibracije 3D skenera i slika sa termalne kamere. Budući da je ponovna kalibracija skenera sa normalnom kamerom u boji poznata, u disertaciji će se razviti proširenje ovih metoda na termalne kamere. Kalibracija standardnih kamera se obavlja analizom slike koja sadrži uzorke kojima se identificiraju i koreliraju jednoznačna svojstva, na primjer korneri u uzorku sa tačnošću izraženom u dijelovima piksela [50]. Važno je napomenuti da termalna kamera ne prepoznaje printane uzorke, pa je njihov pronalazak izazov u području termalnih kamera. Treći zadatak je generiranje modela okoline zasnovan na podacima dobivenim procesom mapiranja. Mapiranje daje 3D prikaze skupine tačaka, prikupljene 3D laserskim skenerom, i toplotne slike, dobivene toplotnom kamerom. Na temelju ovih podataka se računa 3D model, odnosno model površine. Ovom modelu se pridružuju informacije o temperaturi. Istraživački izazovi proizlaze iz nekonzistentnosti ili kontradiktornih podataka. Budući da su mjerenja zahvaćena šumom i postoje netačnosti u njihovom mjerenju, neophodno je razviti algoritam za gradnju ispravnog 3D termalnog modela.

Vizualizacija i simulacija također nameću istraživačke izazove u polju računarske grafike i diskretnih simulacija [51]. Cilj je razviti standardno sučelje za potencijalnog korisnika korištenjem predloženih tehnologija i metodologija. U vezi s tim je potrebno razviti softver koji će ostvariti navedeni cilj. Softver će omogućiti kolekciju podataka i računanje 3D termalnog modela okoline na temelju simulacije distribucije, odnosno prostiranja topline.

## 4. Metodologija istraživanja

Za gradnju 3D modela predlaže se pristup koji kombinira EKF (Extended Kalman Filter), SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) i MCA (Marching Cubes) algoritme. EKF algoritam se koristi za rukovanje neizvjesnostima u prikazu okoline i nelinearnostima izraženim u sceni tokom kretanja [52]. Posebna pažnja se posvećuje detektiranju različitih značajki objekata i ekstrakciju rubova i kornera prostorijske površine. Ovo omogućuje efektivan i robusan alat za reduciranje neizvjesnosti pozicije značajki i prikaza velikih prostora. Transformiranje tačaka slike u prikaze površina može se efikasno obaviti pomoću metoda mrežastih prikaza, u koje spada i MCA [29]. Pomoću ove metode je moguće detektirati veće ravnine u unutarnjim prostorima.

## 5. Izvorni znanstveni doprinosi

Očekivani, izvorni znanstveni doprinosi doktorske disertacije su:

- EKF-SLAM-MCA ili 6D-SLAM-MCA metod generiranja 3D modela okoline iz 2D prikaza i 3D podataka prikupljenih sa termalne kamere i laserskog skenera. Ovaj metod omogućuje da se interesantne tačke 2D segmenata ekstrahiraju iz slika, dok se 3D planarne strukture segmentiraju iz podataka područja (laserski skener). Fuzija različitih vrsta značajki čine izgrađenu 3D mapu prostora mnogo stabilnijom u različitim okolinama.
- MCA bazirana metoda za brzu izgradnju 3D modela zadovoljavajuće preciznosti. Kako je MCA veoma brza metoda za rekonstrukciju 3D modela, planirano je razviti i implementirati varijantu koja koristi promjenjive iso-vrijednosti što bi rekonstruiralo dovoljno precizan model unutarnjih prostorijske površine u zadovoljavajućem vremenu (vrijeme potrebno robotu da završi skeniranje sa trenutne pozicije i pređe u narednu poziciju za skeniranje). Također, analizom 3D skupova tačaka, nastojati će se povećati gustoća skupa što će poboljšati preciznost rekonstruiranog 3D modela.
- Metoda preslikavanja skalarnog polja, u ovom slučaju temperaturnog, na rekonstruirani 3D model. Poopćenje metode i za vektorska polja (RGB). Ova metoda će biti bazirana na pretraživanju metodom najbližih susjeda. Obzirom da postoje više takvih pristupa, analizom performansi će biti određen najbolji. Također, metoda će biti ocjenjena kvalitativnom analizom računanjem greški prilikom preslikavanja, kao i ekspertskom ocjenom 3D termalnog modela.
- Softver za rekonstrukciju površina sa njihovim eksportiranjem u vanjske ili integrirane 3D preglednike (viewere) koji omogućuje pronalaženje defekata i razlika u površinama, kao što su: detekcija gubitaka topline u zidovima prostorijske površine stambenih objekata, inspekcija pukotina na cijevima, lociranje i praćenje prekida u energetskim kablovima i podzemnim plinskim instalacijama, generiranje 3D modela prostora, ispitivanje lemnih spojeva, detekcija curenja uslijed adhezije, itd.

## Literatura

- [1] D. O'Donohue, S. Mills, S. Kingham, P. Bartie, and D. Park, "Combined thermal-lidar imagery for urban mapping," in *Image and Vision Computing New Zealand, 2008. IVCNZ 2008. 23rd International Conference*, pp. 1–6, Nov 2008.
- [2] K. Arunachalam, P. F. Maccarini, and P. R. Stauffer, "A thermal monitoring sheet with low influence from adjacent waterbolus for tissue surface thermometry during clinical hyperthermia," *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 55, no. 10, pp. 2397–2406, 2008.

- [3] S. Markov and A. Birk, “Autonomous victim detection in rescue operations by modelbased reproduction of 3d scenes from 2d thermal images,” in *KI 2007: Advances in Artificial Intelligence* (J. Hertzberg, M. Beetz, and R. Englert, eds.), vol. 4667 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI)*, Springer, Springer, 2007.
- [4] S. Prakash, P. Y. Lee, and T. Caelli, “3d mapping of surface temperature using thermal stereo,” in *Control, Automation, Robotics and Vision, 2006. ICARCV '06. 9th International Conference on*, pp. 1–4, Dec 2006.
- [5] A. Nüchter, *3D Robotic Mapping - The Simultaneous Localization and Mapping Problem with Six Degrees of Freedom*, vol. 52 of *Springer Tracts in Advanced Robotics*. Springer, 2009.
- [6] D. Borrmann, A. Nüchter, M. Dakulovic, I. Maurovic, I. Petrovic, D. Osmankovic, and J. Velagic, “The project thermalmapper—thermal 3d mapping of indoor environments for saving energy,” in *Proceedings of the 10th International IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO)*, vol. 10, p. 1, 2012.
- [7] D. Borrmann, H. Afzal, J. Elseberg, and A. Nüchter, “Mutual calibration for 3d thermal mapping,” in *Proc., 10th Int. IFAC Symp. on Robot Control (SYROCO'12), IFAC, Laxenburg, Austria*, 2012.
- [8] D. Borrmann, J. Elseberg, K. Lingemann, and A. Nüchter, “The 3d hough transform for plane detection in point clouds: A review and a new accumulator design,” *3D Research*, vol. 2, no. 2, pp. 1–13, 2011.
- [9] D. Borrmann, J. Elseberg, K. Lingemann, and A. Nüchter, “A data structure for the 3d hough transform for plane detection,” in *Proceedings of the 7th IFAC symposium on intelligent autonomous vehicles (IAV'10), Lecce, Italy*, 2010.
- [10] D. Borrmann, J. Elseberg, K. Lingemann, A. Nüchter, and J. Hertzberg, “Globally consistent 3d mapping with scan matching,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 56, no. 2, pp. 130–142, 2008.
- [11] J. Elseberg, D. Borrmann, and A. Nuchter, “Efficient processing of large 3d point clouds,” in *Information, Communication and Automation Technologies (ICAT), 2011 XXIII International Symposium on*, pp. 1–7, IEEE, 2011.
- [12] J. Elseberg, D. Borrmann, and A. Nüchter, “One billion points in the cloud—an octree for efficient processing of 3d laser scans,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 76, pp. 76–88, 2013.
- [13] A. Nüchter, S. Gutev, D. Borrmann, and J. Elseberg, “Skyline-based registration of 3d laser scans,” *Geo-spatial Information Science*, vol. 14, no. 2, pp. 85–90, 2011.
- [14] M. Guirguis, *Robot search and rescue: a comparison of 3D mapping techniques*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [15] B. N. Delaunay, “Sur la sphère vide,” *Bulletin of Academy of Sciences of the USSR*, no. 6, pp. 793–800, 1934.
- [16] M. d. Berg, O. Cheong, M. v. Kreveld, and M. Overmars, *Computational Geometry: Algorithms and Applications*. Santa Clara, CA, USA: Springer-Verlag TELOS, 3rd ed. ed., 2008.
- [17] Y. Xue, M. Sun, and A. Ma, “On the reconstruction of three-dimensional complex geological objects using delaunay triangulation,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 20, no. 7, pp. 1227–1234, 2004.

- [18] G. Böhm, P. Galuppo, and A. Vesnaver, “3d adaptive tomography using delaunay triangles and voronoi polygons,” *Geophysical Prospecting*, vol. 48, no. 4, pp. 723–744, 2000.
- [19] M. J. Golin and H.-S. Na, “On the average complexity of 3d-voronoi diagrams of random points on convex polytopes,” *Computational Geometry*, vol. 25, no. 3, pp. 197–231, 2003.
- [20] F. Bernardini, J. Mittleman, H. Rushmeier, C. Silva, and G. Taubin, “The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction,” *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 4, pp. 349–359, 1999.
- [21] E. Medeiros, L. Velho, and H. Lopes, “Restricted bpa: Applying ball-pivoting on the plane,” in *Computer Graphics and Image Processing, 2004. Proceedings. 17th Brazilian Symposium on*, pp. 372–379, IEEE, 2004.
- [22] P. Stelldinger, “Topologically correct surface reconstruction using alpha shapes and relations to ball-pivoting,” in *Pattern Recognition, 2008. ICPR 2008. 19th International Conference on*, pp. 1–4, IEEE, 2008.
- [23] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald, and W. Stuetzle, *Surface reconstruction from unorganized points*, vol. 26. ACM, 1992.
- [24] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, M. Halstead, H. Jin, J. McDonald, J. Schweitzer, and W. Stuetzle, “Piecewise smooth surface reconstruction,” in *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 295–302, ACM, 1994.
- [25] M. Kazhdan, M. Bolitho, and H. Hoppe, “Poisson surface reconstruction,” in *Proceedings of the Fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing*, SGP ’06, (Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland), pp. 61–70, Eurographics Association, 2006.
- [26] M. Kazhdan, “Reconstruction of solid models from oriented point sets,” in *Proceedings of the third Eurographics symposium on Geometry processing*, p. 73, Eurographics Association, 2005.
- [27] M. Bolitho, M. Kazhdan, R. Burns, and H. Hoppe, “Parallel poisson surface reconstruction,” in *Advances in Visual Computing*, pp. 678–689, Springer, 2009.
- [28] M. Kazhdan and H. Hoppe, “Screened poisson surface reconstruction,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 32, no. 3, p. 29, 2013.
- [29] W. E. Lorensen and H. E. Cline, “Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm,” *SIGGRAPH Comput. Graph.*, vol. 21, pp. 163–169, Aug. 1987.
- [30] H. Wang, “Three-dimensional medical ct image reconstruction,” in *Proceedings of the 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation - Volume 01*, ICMTMA ’09, (Washington, DC, USA), pp. 548–551, IEEE Computer Society, 2009.
- [31] H. E. Cline, W. E. Lorensen, S. P. Souza, F. A. Jolesz, R. Kikinis, G. Gerig, and T. E. Kennedy, “3d surface rendered mr images of the brain and its vasculature,” *Journal Of Computer Assisted Tomography*, vol. 15, no. 2, pp. 344–351, 1991.
- [32] R. Motiur, U. Shorif, and H. Mosaddik, “3d segmentation and visualization of left coronary arteries of heart using ct images,” *International Journal of Computer Applications*, no. 2, pp. 88–92, 2010.
- [33] E. V. Chernyaev, “Marching cubes 33: Construction of topologically correct isosurfaces,” tech. rep., 1995.

- [34] P. Jenke, M. Bokeloh, A. Schilling, W. Straßer, and M. Wand, “Bayesian point cloud reconstruction,” in *EUROGRAPHICS 2006*, 2006.
- [35] J. C. Carr, R. K. Beatson, J. B. Cherrie, T. J. Mitchell, W. R. Fright, B. C. McCallum, and T. R. Evans, “Reconstruction and representation of 3d objects with radial basis functions,” in *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH ’01, (New York, NY, USA), pp. 67–76, ACM, 2001.
- [36] T. S. Newman and H. Yi, “A survey of the marching cubes algorithm,” *Computers and Graphics*, vol. 30, no. 5, pp. 854 – 879, 2006.
- [37] P. Navratil, J. Johnson, and V. Bromm, “Visualization of cosmological particle-based datasets,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 13, pp. 1712–1718, November 2007.
- [38] C. So, G. Baciú, and H. Sun, “Reconstruction of 3d virtual buildings from 2d architectural floor plans,” in *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, VRST ’98, (New York, NY, USA), pp. 17–23, ACM, 1998.
- [39] A. J. F. Kok and R. van Liere, “A multimodal virtual reality interface for 3d interaction with vtk,” *Knowl. Inf. Syst.*, vol. 13, pp. 197–219, October 2007.
- [40] A. Trembilski, “Two methods for cloud visualisation from weather simulation data,” *The Visual Computer*, vol. 17, no. 3, pp. 179–184, 2001.
- [41] T. Wright, M. Burton, D. Pyle, and T. Caltabiano, “Visualising volcanic gas plumes with virtual globes,” *Computers & Geosciences*, vol. 35, no. 9, pp. 1837–1842, 2009.
- [42] G. Zigelman, R. Kimmel, and N. Kiryati, “Texture mapping using surface flattening via multidimensional scaling,” *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 2, pp. 198–207, 2002.
- [43] T. Matsuyama, X. Wu, T. Takai, and T. Wada, “Real-time dynamic 3-d object shape reconstruction and high-fidelity texture mapping for 3-d video,” *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 3, pp. 357–369, 2004.
- [44] J. Maillot, H. Yahia, and A. Verroust, “Interactive texture mapping,” in *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 27–34, ACM, 1993.
- [45] C. Bennis, J.-M. Vézien, and G. Iglésias, “Piecewise surface flattening for non-distorted texture mapping,” in *ACM SIGGRAPH computer graphics*, vol. 25, pp. 237–246, ACM, 1991.
- [46] M. M. Oliveira, G. Bishop, and D. McAllister, “Relief texture mapping,” in *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 359–368, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000.
- [47] S. Izadi, D. Kim, O. Hilliges, D. Molyneaux, R. Newcombe, P. Kohli, J. Shotton, S. Hodges, D. Freeman, A. Davison, *et al.*, “Kinectfusion: real-time 3d reconstruction and interaction using a moving depth camera,” in *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 559–568, ACM, 2011.
- [48] S. Izadi, R. A. Newcombe, D. Kim, O. Hilliges, D. Molyneaux, S. Hodges, P. Kohli, J. Shotton, A. J. Davison, and A. Fitzgibbon, “Kinectfusion: real-time dynamic 3d surface reconstruction and interaction,” in *ACM SIGGRAPH 2011 Talks*, p. 23, ACM, 2011.

- [49] H. Surmann, A. Nüchter, and J. Hertzberg, “An autonomous mobile robot with a 3d laser range finder for 3d exploration and digitalization of indoor environments,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 45, no. 3, pp. 181–198, 2003.
- [50] S. Thrun, M. Bennewitz, W. Burgard, A. B. Cremers, F. Dellaert, D. Fox, D. Hahnel, C. Rosenberg, N. Roy, J. Schulte, *et al.*, “Minerva: A second-generation museum tour-guide robot,” in *Robotics and automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE international conference on*, vol. 3, IEEE, 1999.
- [51] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration,” *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 11, pp. 1330–1334, 2000.
- [52] J. Weingarten and R. Siegwart, “EKF-based 3d slam for structured environment reconstruction,” in *Intelligent Robots and Systems, 2005.(IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 3834–3839, IEEE, 2005.
- [53] L. Hoegner and U. Stilla, “Texture extraction for building models from ir sequences of urban areas,” in *Urban Remote Sensing Joint Event, 2007*, pp. 1–6, April 2007.
- [54] G. M. Nielson and B. Hamann, “The asymptotic decider: Resolving the ambiguity in marching cubes,” in *Proceedings of the 2Nd Conference on Visualization '91, VIS '91*, (Los Alamitos, CA, USA), pp. 83–91, IEEE Computer Society Press, 1991.