

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

SEMINAR

**Astronomsko određivanje pozicije računalnim
prepoznavanjem zvijezda**

Vedran Vukotić

Voditelj: Doc. dr. sc. Siniša Šegvić

Zagreb, travanj 2011.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Astronomski koordinatni sustavi	2
2.1. Horizontski koordinatni sustav	2
2.2. Mjesno ekvatorski koordinatni sustav	3
2.3. Nebesko ekvatorski koordinatni sustav	4
2.3. Pretvaranje koordinatnih sustava i određivanje pozicije.....	5
3. Analiza slike zvjezdanog neba	8
3.1. Izdvajanje svijetlih objekata od pozadine	9
3.2. Određivanje koordinata svijetlog nebeskog objekta	10
3.3. Prepoznavanje zvijezda	11
Zaključak	14
Literatura	15
Sažetak	16

1. Uvod

Kroz povijesni razvoj navigacije, svakako je najvažniju ulogu odigrala astronomska navigacija. Ona je prva omogućila čovjeku da se udalji od obale (time i od svih referentnih zemaljskih objekata) a da pritom i dalje može odrediti svoju poziciju na zemaljskoj kugli. Dolaskom elektroničkih navigacijskih metoda, astronomska navigacija je svakako izgubila na važnosti. Prvo razdoblje elektroničke navigacije činili su hiperbolički navigacijski sustavi. Takvi sustavi temeljili su se na razlici udaljenosti od para odašiljača postavljenih na kopnu. Mjerilo se vremensko kašnjenje i razlika u fazi u vremenski i fazno usklađenim signalima obalnih odašiljača, zatim se tvorila hiperbola a presjecištem dvaju ili više hiperbola dobivala se pozicija. U drugom razdoblju elektroničke navigacije referentni objekti su konstelacija umjetnih satelita. Trenutno su aktualni američki *GPS*, ruski *GLONASS* te europski sustav *galileo* koji je još uvijek u razvoju. Takvi se sustavi temelje na mjerenju vremenske razlike signala različitih satelita. Svaki satelit odašilje vrijeme i svoje efemeride na temelju kojih prijemnik računski određuje svoju poziciju. Ono što je zajedničko ovim metodama određivanja pozicije je njihova ovisnost o raspoloživosti ključnih elemenata sustava. Tako neće biti moguće odrediti poziciju *GPS* uređajem u zonama gdje se održavaju vojne vježbe radi ometanja signala za vrijeme trajanja istih te također neće biti moguće oslanjati se na takav sustav u višim orbitama. Svakako važnu ulogu u nezavisnom određivanju pozicije igraju inercijalni navigacijski sustavi. Oni naime, ne ovise o nikakvom vanjskom elementu te mogu samostalno, jako precizno i brzo vraćati podatke o promjeni pozicije. Problem kod njih međutim predstavlja gomilanje greške, zbog čega s vremenom postaju sve manje i manje precizni, osim ako se ne ažurira referenta pozicija nekom drugom metodom. Vidljivo je da kao nezavisna metoda određivanja pozicije i dalje ostaje astronomska navigacija. Ona se u većini slučajeva provodi ljudskim snimanjem azimuta i visine zvijezde te identifikacijom istih. Radi bržih proračuna se u zrakoplovstvu koriste „*sight reduction tables*“ a u pomorstvu „nautičke tablice“. Međutim, zbog potrebe autonomnih letjelica (i pogotovo satelita) takav se postupak danas automatizira. Upravo to je tema kojom se bavi ovaj seminarski rad.

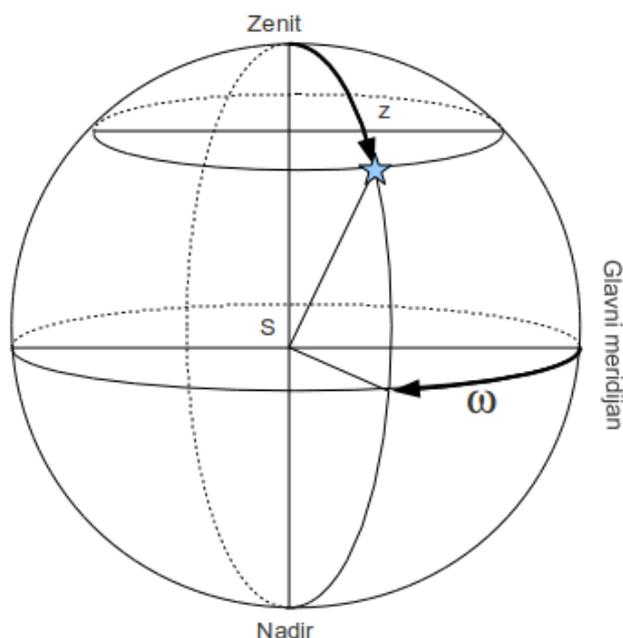
2. Astronomski koordinatni sustavi

Najprije je potrebno definirati koordinatne sustave u kojima se smještaju potrebne veličine te transformacije između istih u cilju određivanja pozicije. Razlikujemo koordinatne sustave koji su relativni položaju promatrača te koordinatne sustave koji su fiksni.

2.1. Horizontski koordinatni sustav

Prvi na redu koordinatni sustav opisuje položaj nebeskog tijela iz perspektive promatrača, odnosno relativno na njegov položaj i orijentaciju. Promatrač se nalazi u ishodištu sfernog koordinatnog sustava. Točka iznad promatrača, odnosno njegova projekcija na nebesku sferu naziva se zenit. Dijametralno suprotna točka se naziva nadir. Zenit je referentna točka odakle se definira prva veličina ovog koordinatnog sustava – zenitna udaljenost. Zenitna udaljenost predstavlja kut u središtu ili lučnu udaljenost na velikoj kružnici od zenita do položaja nebeskog tijela. Komplement zenitne udaljenosti je visina nebeskog tijela, odnosno:

$$z + v = 90^\circ$$

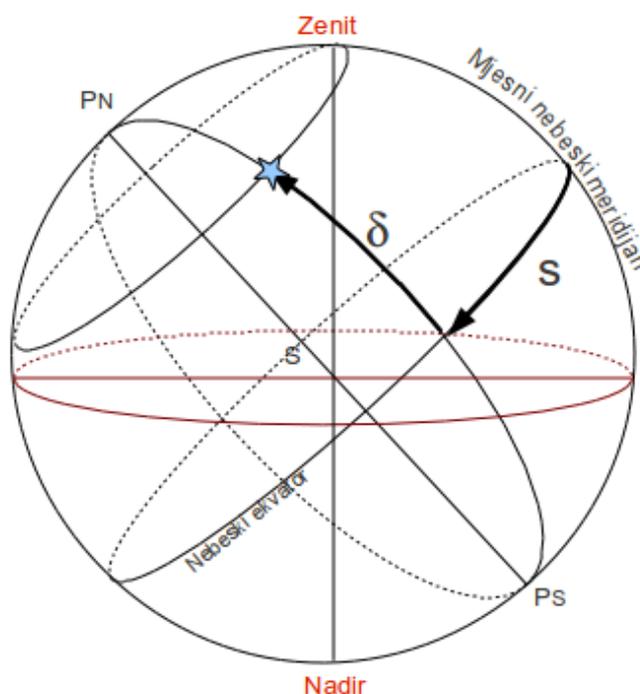


Slika 1. – Horizontski koordinatni sustav

Druga veličina ovog koordinatnog sustava je azimut (označen sa ω). Azimut predstavlja kut ili lučnu udaljenost na ekvatoru od glavnog (Greenwich) meridijana do meridijana koji prolazi nebeskim tijelom. Mjeri se retrogradno a poprima vrijednosti od 0° do 360° .

2.2. Mjesno ekvatorski koordinatni sustav

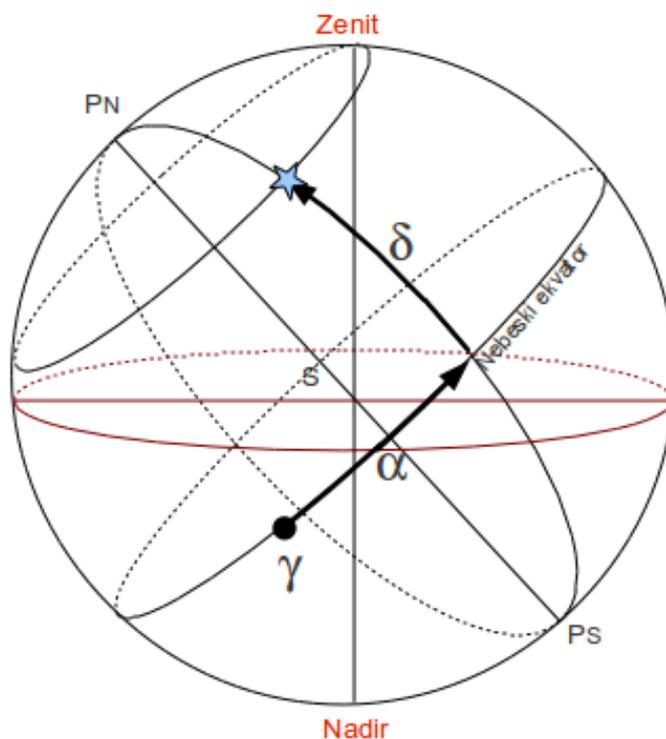
Osnovni dijelovi mjesno ekvatorskog koordinatnog sustava čine nebeski ekvator te na njega okomiti sjeverni (P_N) i južni (P_S) pol. Nebeski ekvator leži u istoj ravnini zemaljskog ekvatora a proteže se do nebeske sfere. Koordinate koje jednoznačno određuju položaj nebeskog tijela u ovom koordinatnom sustavu su deklinacija (δ) i satni kut (s). Deklinacija je kut u središtu od nebeskog ekvatora do nebeskog tijela. Da bi se definirao satni kut potrebno je prvo definirati mjesni nebeski meridijan. On predstavlja meridijan koji prolazi kroz promatrača, odnosno meridijan promatračeve geografske dužine. Satni kut je kut u središtu od mjesnog nebeskog meridijana (meridijana promatrača) do meridijana koji prolazi kroz nebesko tijelo. Vrijedi primijetiti da bi, dakle, satni kut za nebesko tijelo u meridijanu promatrača bilo jednako nuli.



Slika 2. - Mjesno ekvatorski koordinatni sustav

2.3. Nebesko ekvatorski koordinatni sustav

Ovaj koordinatni sustav je kompletno nezavisan o promatraču, te se u njemu zapisuju podatci o položajima pojedinih nebeskih tijela. Deklinacija (δ) je jednako definirana kao i u mjesno ekvatorskom koordinatnom sustavu. Druga veličina koja opisuje položaj nebeskog tijela je rektascenzija (α). Ona je definirana kao kut u središtu, od proljetne točke (γ) do meridijana nebeskog tijela.



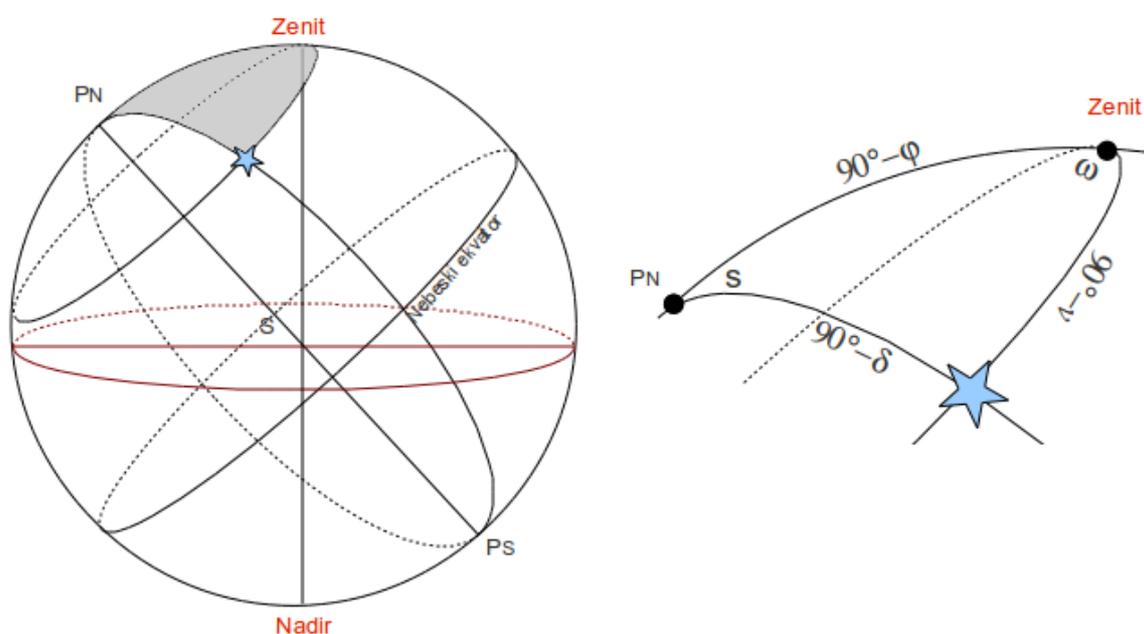
Slika 3. - Nebesko ekvatorski koordinatni sustav

Proljetna točka je pritom fiksna točka definirana kao mjesto gdje na nebeskoj sferi Sunce, gibajući se po ekliptici, prelazi sa južne nebeske hemisfere na sjevernu nebesku hemisferu. Pritom na nebeskoj sjevernoj hemisferi počinje proljeće.

Takav koordinatni sustav definira jednoznačno položaj nebeskog tijela neovisno o promatraču. Tek se konverzijom iz nebesko ekvatorskog koordinatnog sustava u horizontski koordinatni sustav dobiva izgled (lokalne) nebeske sfere za razne moguće položaje promatrača. Vrijedi pritom napomenuti da se često ne zadaje rektascenzija, već njezin komplement surektascenzija (eng. SHA – *Sideral Hour Angle*), koja se od nje razlikuje za 360° .

2.3. Pretvaranje koordinatnih sustava i određivanje pozicije

Promatrač vidi visinu i azimut nebeskog tijela dok je položaj nebeskog tijela u efemeridama¹ dan deklinacijom i surektascenzijom. Da bi vršilo pretvaranje iz jednog para koordinata u drugi par koordinata služimo se tzv. astronomsko – pozicijskim sfernim trokutom. Takav se trokut tvori između nebeskog tijela (\star), sjevernog pola (P_N) i zenita (Z). Kut između zenita i sjevernog pola predstavlja komplement geografske širine ($90^\circ - \varphi$). Naime, ukoliko bi se promatrač nalazio na polu, tada bi se točka zenita (koja se nalazi iznad promatrača) i točka pola poklapale, dok bi se u slučaju da se promatrač nalazio nad zemaljskim ekvatorom one razlikovale za 90° .



Slika 4. - Astronomsko - pozicijski sferni trokut

Kako je deklinacija (δ) definirana kao kut u središtu, od nebeskog ekvatora do nebeskog tijela, a vrijedi da je pol za 90° udaljen od ekvatora, tada je kut između nebeskog tijela i sjevernog pola zapravo komplement deklinacije ($90^\circ - \delta$). Analogno tome kut između zenita i nebeskog tijela predstavlja komplement visine ($90^\circ - \nu$). Jasno je da ukoliko se nebesko tijelo nalazi točno iznad motritelja njegova će visina tada biti jednaka pravom kutu dok, u slučaju da se ono nalazi na horizontu, iznositi će 0° . Također, motritelj ne može vidjeti ispod horizonta pa je $\nu \in [0, 90^\circ]$.

¹ Efemeride – (grč. *Ephemerios* = dnevno) skup vrijednosti koje opisuju položaj nebeskih tijela (obično dane u nautičkim godišnjacima ili kroz programsku podršku).

Za promatrača uvijek postoji tzv. procijenjena pozicija. Ona može biti posljednja poznata pozicija ispravljena (pomaknuta) za očekivano kretanje u danom vremenskom intervalu (zbrojena pozicija, eng. *dead reckoning*) ili pozicija dobivena sustavom koji s vremenom gomilaju grešku, poput inercijskih navigacijskih sustava. Na temelju te pozicije računa se očekivani izgled nebeske sfere. Procijenjeni podatci su dakle geografska širina (φ), satni kut (s) i deklinacija, a traže se horizontske koordinate: azimut (ω) i visina (v) nebeskog tijela. Primjenjujući sferni kosinusov poučak na astronomsko-pozicijski sferni trokut slijedi:

$$\cos(90^\circ - v) = \cos(90^\circ - \varphi) \cos(90^\circ - \delta) + \sin(90^\circ - \varphi) \sin(90^\circ - \delta) \cos s$$

odnosno:

$$v = \sin^{-1}(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos s)$$

Na sličan način se dobiva i azimut nebeskog tijela:

$$\cos(90^\circ - \delta) = \cos(90^\circ - \varphi) \cos(90^\circ - v) + \sin(90^\circ - \varphi) \sin(90^\circ - v) \cos \omega$$

$$\sin \delta = \sin \varphi \sin v + \cos \varphi \cos v \cos \omega$$

$$\omega = \cos^{-1} \frac{\sin \delta - \sin \varphi \sin v}{\cos \varphi \cos v}$$

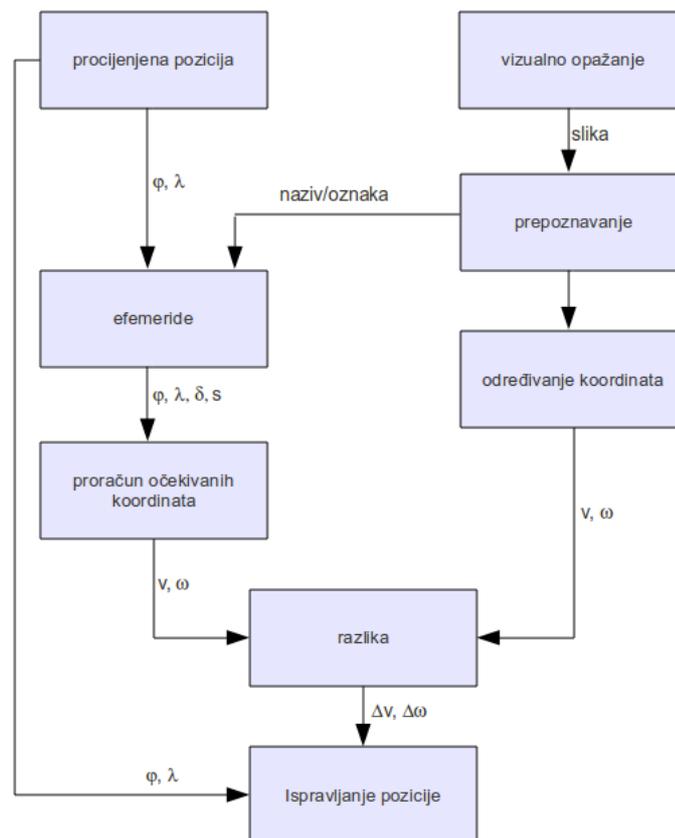
Mjesni (lokalni) satni kut zvijezde (s) *dobiva se zbrajanjem satnog kuta zvijezde (S_\star) i procijenjene geografske širine promatrača.*

$$s = S_\star + \lambda$$

Za razliku od programskih efemerida, tabelarne efemeride često daju satni kut proljetne točke (S_γ) i surektascenziju (SHA) zvijezde. Satni kut zvijezde se tada dobiva zbrajanjem satnog kuta proljetne točke s trenutnim vremenom i surektascenzijom.

$$S_\star = S_\gamma + t_{\text{GMT}} + SHA$$

Kao osnova uzima se procijenjena pozicija. Na temelju nje se na već prikazani način određuju očekivana visina i azimut za prepoznato nebesko tijelo. S druge strane, vizualnim opažanjem se mjere prava visina i azimut prepoznatog nebeskog tijela.

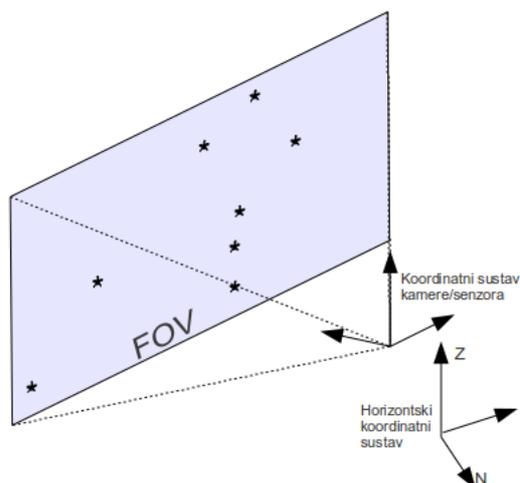


Slika 5. - princip određivanja pozicije

Takav postupak je potrebno ponoviti za više nebeskih tijela (optimalno bi bilo barem tri nebeska tijela koja se ne nalaze međusobno blizu), nakon čega se dobiva razlika očekivane i opažane pozicije nebeskog tijela, na temelju čega se vrši ispravak pozicije, čime se od procijenjene pozicije dobiva prava pozicija. Jasno je da ukoliko bi procijenjena pozicija bila toliko dobra da se neznajčajno razlikuje od prave pozicije, tada bi se očekivana slika neba poklapala sa stvarnom, vizualno osmotrenom slikom neba, te ne bi bilo razlike između očekivanih i osmotrenih visina i azimuta. Do sada je obrađivan način određivanja očekivanih koordinata nebeskih tijela a u nastavku slijedi proces dobivanja stvarnih (opaženih) koordinata promatranih nebeskih tijela.

3. Analiza slike zvjezdanog neba

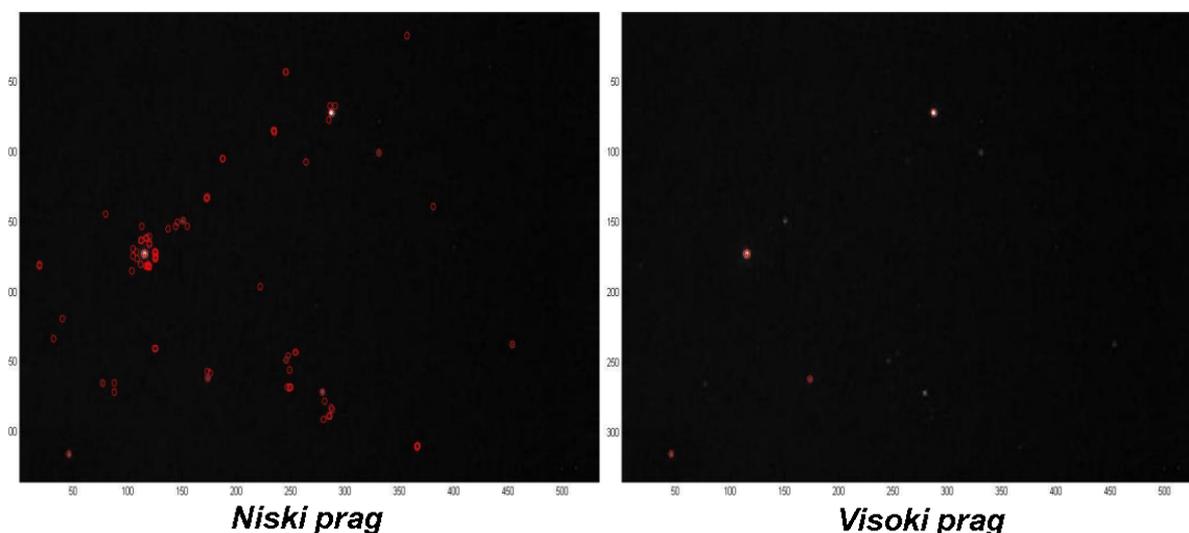
U sklopu analize senzorom dobivene slike zvjezdanog neba potrebno je najprije odvojiti svijetle točke od pozadine koju sačinjava šum. Zatim je potrebno odrediti koordinate rubova slike odnosno vidnog polja kamere (eng. *FOV – Field of View*), uz pretpostavku da slika nema distorzija, jer ukoliko ih ima, potrebno ih je matematički ispraviti. (Takve bi nastale primjerice korištenjem širokokutnih objektivna ili lošijih leća kod koji bi nastala izražena aberacija). Potrebno je dakle u trenutku uzimanja slike zvjezdanog neba poznavati orijentaciju kamere (senzora). To nije problem ukoliko se radi o fiksnom uređaju na zemlji no svakako to predstavlja zaseban problem kod pokretnih objekata. FOV je ovisan o orijentaciji kamere odnosno njezinog koordinatnog sustava, dok su koordinate zvijezda zadane s obzirom na koordinatni sustav promatrača koji je položen horizontalno te orijentiran prema sjeveru. Da bi se pretvaralo iz jednog koordinatnog sustava potrebno je poznavati orijentaciju jednog koordinatnog sustava s obzirom na drugi, a to se najčešće čini kombinacijom žiro-kompasa (ili rjeđe magnetskim kompasom), radi određivanja azimuta u kojem senzor gleda, te inklinometra radi određivanja visine prema kojoj je senzor orijentiran. Drugi mogući način je korištenje akcelerometra kojim se može vraćati podatke o kretanjima senzora u svih 6 stupnjeva slobode. Također, ukoliko je potrebna duža ekspozicija zbog koje se javlja *motion blur* (zamućivanje izazvano pokretom), potrebno je takvu pojavu matematičkom obradom ispraviti što je moguće s podosta dobrim rezultatima.



Slika 6. - Vidno polje kamere i orijentacija istog

3.1. Izdvajanje svijetlih objekata od pozadine

Da bi se uopće moglo pristupiti prepoznavanju zvijezda i određivanju njihovih koordinata potrebno je najprije odvojiti svijetle točke od pozadinskog šuma na slici. Jednostavan način kojim se to može učiniti je postavljanje praga (eng. *threshold*) te prolaženje svake pojedine točke kroz funkciju praga. Funkcija praga je takva da se točka prihvaća ukoliko je njen intenzitet veći od praga, dok se u protivnom odbacuje. Razina praga se određuje empirijski u cilju dobivanja što bolje selekcije a kasnije se proporcionalno mijenja ovisno o dužini ekspozicije. Ovakva operacija je linearne složenosti a pritom donosi dosta dobre rezultate što ju čini pogodnom metodom za slabije procesore, što je čest slučaj kod ugradbenih računala.

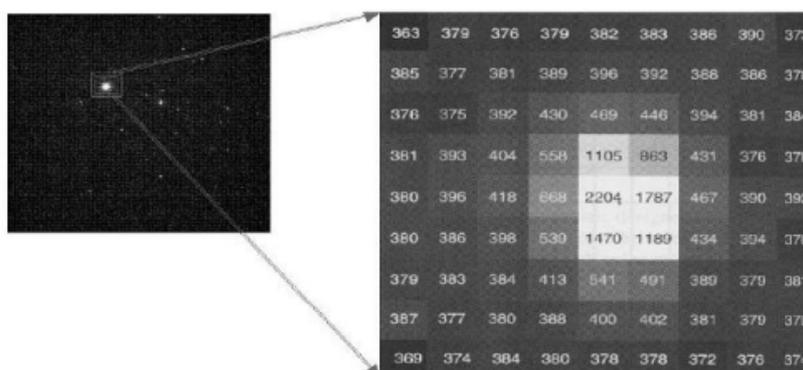


Slika 7. - Utjecaj praga na selekciju svijetlih točaka

O odabiru optimalnog praga će jako ovisiti dobiveni rezultat. Nisko postavljen prag će rezultirati velikim brojem lažnih detekcija (točaka šuma koje su detektirane kao svijetli nebeski objekt), dok će visoko postavljen prag rezultirati pomanjkanjem detekcije nekolicine svijetlih objekata na nebu. Optimalno postavljen prag je takav prag kod kojeg je broj lažnih detekcija i nedetektiranih svijetlih nebeskih objekata sveden na minimum. Također valja primijetiti da će svjetliji objekti uzrokovati da se nekolicina točaka oko njih također detektira zbog raspršenja svjetlosti na leći uređaja. To međutim neće predstavljati problem jer će se nad pozitivno detektiranim svijetlim točkama vršiti računanje njihovog težišta.

3.2. Određivanje koordinata svijetlog nebeskog objekta

Preciznost pozicije veoma ovisi o preciznosti izmjerenih visina i azimuta nebeskih objekata. Iz toga slijedi potreba da se što je moguće preciznije odrede točne koordinate svijetlih objekta na slici noćnog neba. Kako su rezolucije optičkih senzora danas jako velike, svaki svijetli objekt zauzima poveću grupu piksela. Pri tome se intenzitet pojedinih piksela mijenja na način da je u periferiji manji intenzitet a prema središtu veći intenzitet. Cilj je odrediti središte takve svijetle mrlje na nivou jednog piksela ili čak i manje. Jedno od mogućih razmatranja bi bilo odabrati piksel sa najvećim intenzitetom kao središtem, no treba uzeti u obzir da to ne bi davalo željeni rezultat, pogotovo zbog mogućnosti da više piksela ima jednaki maksimalni intenzitet. Ono na što se zapravo svodi određivanje središta svijetle nakupine piksela je određivanje njihovog težišta.



Slika 8. - Određivanje težišta svijetle mrlje

Prije nego li se pristupi računanju težišta potrebno je odvojiti svijetle piksele koji nisu u neposrednom susjedstvu najsvjetlijih piksela jer bi se u protivnom računalo zajedničko težište svih svijetlih objekata, a ne težište pojedinog svijetlog objekta na nebu. Koordinate težišta se dobivaju iz slijedećih izraza:

$$x_t = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I(i, j) \cdot i}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I(i, j)}$$

$$y_t = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I(i, j) \cdot j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I(i, j)}$$

Gdje $I(i, j)$ predstavlja intenzitet piksela na poziciji (i, j) . Ovakva određivanja položaja težišta svijetlih piksela pokazuju preciznost i do $1/10$ piksela², što je svakako veoma zadovoljavajuće s obzirom na ljudsko smjerenje nebeskih objekata

Pretvaranje dobivenih koordinata unutar okvira slike (odnosno vidnog polja kamere) u visinu i azimut se svodi na zbrajanje tih veličina s orijentacijom donjeg lijevog ruba kamere. Naravno uz pretpostavku da je slika uniformna te nema nikakvih distorzija.

$$v = v_{FOV} + b \cdot y$$

$$\omega = \omega_{FOV} + a \cdot x$$

gdje su a i b faktori proporcionalnosti koji ovise o tome koliko piksela zauzima jedna lučna jedinica (što naravno, ovisno o izvedbi senzora, ne mora biti jednako za horizontalni i vertikalni smjer).

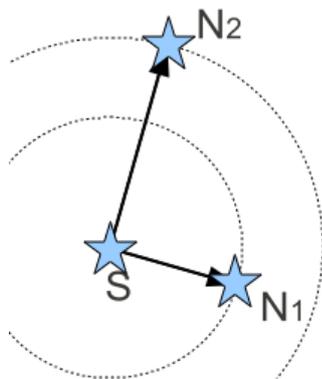
3.3. Prepoznavanje zvijezda

Obzirom da je svako kretanje zvijezda cirkularno te da sazviježđa čuvaju svoj oblik, odnosno sačuvana je jednakost kutova u vremenu unutar oblika koji tvore, najprirodniji način za opisati sazviježđe je upravo kut između pojedinih zvijezda koje tvore sazviježđe. Promatra li se sazviježđe od n zvijezda, ukupno kutova između njih je $\frac{n(n-1)}{2}$. Treba međutim uzeti u obzir da su sazviježđa relativno velika (primjerice sazviježđe Orion) te da veliki dio njih zapravo ne bi ni stao unutar vidnog polja kamere. Osim toga, čak i ako bi čitavo sazviježđe moglo biti obuhvaćeno vidnim poljem kamere, malena je vjerojatnost da se takvo što desi. Najvjerojatniji ishod je slučaj u kojem su jedno ili više sazviježđa djelomično obuhvaćena slikom. Jasno je da je zbog toga bolje katalogizirati manje grupacije zvijezda po nekakvom parametru.

Najčešće korištena metoda se sastoji od promatranja kuta između dvije najbliže zvijezde zvijezdi koja se promatra. Takva se pretraga započinje zvijezdom najveće magnitude (najvećeg intenziteta) u vidnom polju kamere a nastavlja se s drugim zvijezdama manje magnitude dok se ne dobije dovoljan broj podataka.

² Kandiyil, R. *Attitude Determination Software for a Star Sensor*. Magistarski rad. Luleå University of Technology, 2010, str. 27.

Neka je S odabrana zvijezda koja se trenutno pokušava identificirati. Najprije se traži njoj najbliža zvijezda N_1 a potom druga na redu po udaljenosti N_2 . Neka je $\overrightarrow{SN_1}$ vektor iz težišta promatrane zvijezde do težišta zvijezde N_1 te analogno $\overrightarrow{SN_2}$ vektor iz težišta promatrane zvijezde do težišta zvijezde N_2 .



Slika 9. - Metoda susjednih zvijezda

Definira se vektorski produkt tih dvaju vektora (tzv. *k*-vektor)

$$\vec{k} = \overrightarrow{SN_1} \times \overrightarrow{SN_2}$$

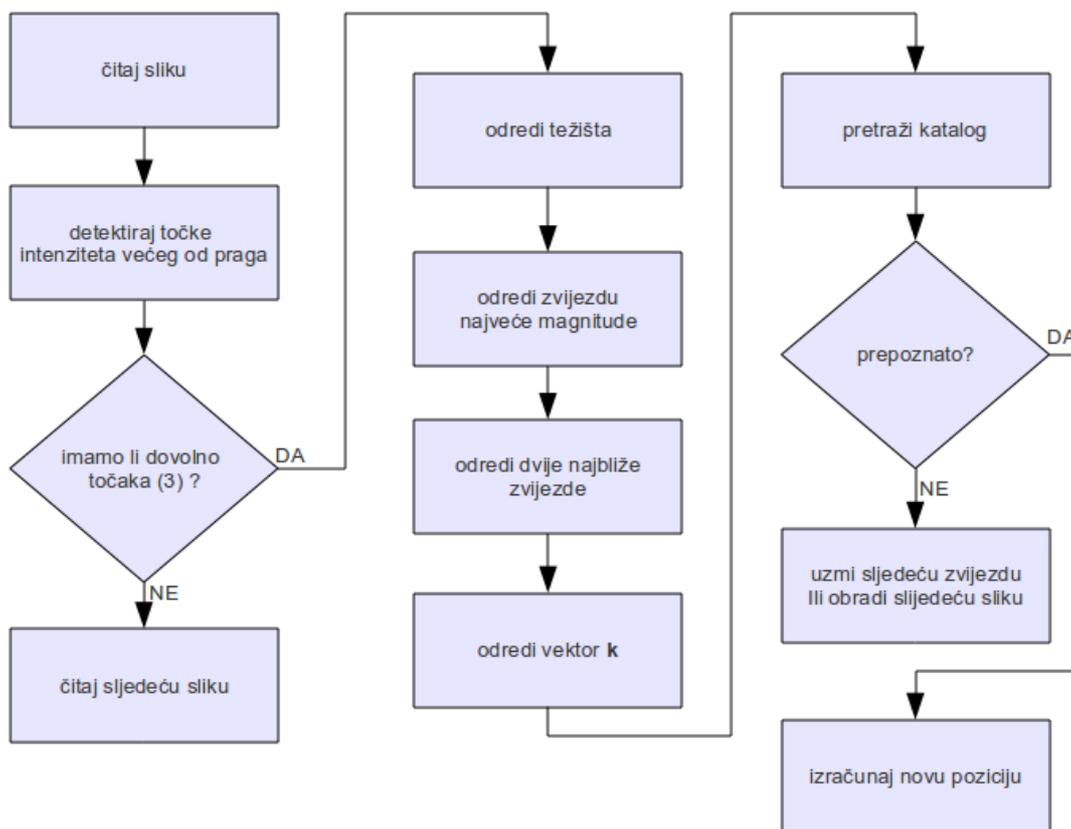
te se na temelju njega gradi pretraživi katalog zvijezda. Ovakvu je metodu predložio Liebe, C.³ po čemu ona i nosi ime.

Ova metoda ima nekoliko loših strana. Prva loša strana je mogućnost da se najbliža zvijezda krivo detektira ukoliko je njoj najbliža zvijezda magnitude taman ispod granice prihvaćanja (eng. *threshold level*). Drugi problem nastaje u slučaju da su dvije zvijezde na veoma sličnim udaljenostima (ali pod različitim kutovima od središnje zvijezde S) zbog čega je moguće da kriva zvijezda bude detektirana kao najbliža što može voditi nemogućnosti prepoznavanja zvijezde ili krivom prepoznavanju zvijezde.

Pozitivne strane ove metode su veličina kataloga koja raste s $O(n)$, gdje je n broj zvijezda u katalogu te pretraživanje kataloga sa $O(f \log_2 b)$, gdje je f broj zvijezda unutar vidnog polja kamere (*FOV*) a b broj zvijezda u uzorku koji se promatra.

³ Liebe, C. C. Pattern recognition of star constellations for spacecraft applications. IEEE Aeronaut. Electron. Syst. Mag. 1992, 10, 2–12.

Kod ovakve metode pogodna svijetla tijela na nebeskoj sferi čine jedino zvijezde iz razloga što one jedine imaju jednoliko kružno gibanje (uzrokovano zemljinom rotacijom) tokom kojeg ne mijenjaju međusobni raspored. Planete te druga tijela koja imaju dovoljnu magnitudu da budu iznad granice prihvaćanja zapravo ne mogu biti prepoznate ovakvom metodom zbog njihovog neravnomjernog kretanja nebeskom sferom. Štoviše, takva nebeska tijela mogu i zasmetati u prepoznavanju zvijezda ukoliko se nađu u vidnom polju kamere na takvoj poziciji da će ih algoritam odabrati bilo kao tijelo najveće magnitude ili kao tijelo najbliže zvijezdi koja se trenutno analizira. Na slici 10. je prikazan dijagram toka rada ovakvog procesa. Radi što sigurnijeg određivanja pozicije se takav postupak ponavlja kontinuirano, a pozicija prihvaća ukoliko se ona dobiva unutar granica grešaka, uz minimalno odstupanje od ostalih pozicija.



Slika 10. - dijagram prepoznavanja zvijezda

Zaključak

Astronomsko određivanje pozicije ne predstavlja veliki problem ljudskom navigatoru, njemu je naime, najveći problem sam proračun pozicije koji je vremenski iscrpan, dok je prepoznavanje zvjezdanog neba gotovo intuitivno. S druge strane, računalu najveći problem predstavlja upravo prepoznavanje zvjezdanog neba te identifikacija pojedinih nebeskih objekata. U ovom radu je prikazana samo jedna takva metoda (*k-vektor*) te je idealizirano nebo u smislu da je ono uvijek savršeno vidljivo. Kod letjelica u višim altitudama neće biti pojave oblaka koji mogu djelomično pokriti dio nebeske sfere te time otežati i onemogućiti prepoznavanje pojedinih objekata na nebu ili dovesti do krivog prepoznavanja. Međutim takva je situacija veoma česta kod prizemnih objekata koji imaju potrebu određivati svoju poziciju na takav način, što predstavlja dodatan problem. Premda je u ovom radu fokus stavljen na zemaljsko određivanje pozicije, ovakve metode se mogu i kod:

- određivanja orijentacije letjelice (kao provjera žiro kompasu)
- navigacije u svemiru
- određivanja visine orbita satelita
- navigacije na Mjesecu ili drugim planetima gdje nisu dostupni elektronički navigacijski sustavi.

Literatura

Kandiyil, R. *Attitude Determination Software for a Star Sensor*. Magistarski rad. Luleå University of Technology, 2010.

Spratling, B., Mortari, D. *A Survey on Star Identification Algorithms*. Algorithms. 2009 (1), 95-104.

Alvelda, P., San Martin, M. *Neural Network Star Pattern Recognition for Spacecraft Attitude Determination and Control*. Advances in Neural Information Processing Systems 1, San Mateo, CA. (1989), 314-322.

Liebe, C. *Pattern Recognition of Star Constellations for Spacecraft Applications*. IEEE Aeronaut. Electron. Syst. Mag. 1992, 10, 2–12.

Špoljarić, D. e-Škola astronomije, *Nebeski koordinatni sustavi*, <http://eskola.zvezdarnica.hr/osnove-astronomije/polozejna-i-efemeridna-astronomija/nebeski-koordinatni-sustavi/> , 10.4.2011.

Sažetak

Cilj ovog rada je prikazati osnovne metode kojima se može autonomno odrediti poziciju astronomskim putem koristeći se računalnim vidom za prepoznavanje i mjerenje koordinata nebeskih tijela. Prikazani su osnovni koordinatni sustavi koji se koriste u astronomskoj navigaciji te način na koji se dolazi do pozicije. Da bi se to omogućilo, pokazane su metode analize slike nebeske sfere te metode određivanja koordinata i prepoznavanja zvijezda.