

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 3807

Modeliranje gibanja pčele u simulatoru biohibridnih sustava

Una Pale

Zagreb, srpanj 2014.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD MODULA**

Zagreb, 14. ožujka 2014.

ZAVRŠNI ZADATAK br. 3807

Pristupnik: **Una Pale (0036467680)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Modul: Elektroničko i računalno inženjerstvo

Zadatak: **Modeliranje gibanja pčele u simulatoru biohibridnih sustava**

Opis zadatka:

U okviru EU FP7 projekta ASSISIbf razvija se pojednostavljeni simulator biohibridnih sustava, temeljen na Enki simulatoru otvorenog koda. Simulator treba omogućiti kvalitativno modeliranje gibanja pčela u polju senzorsko-aktuatorских uređaja (CASU). Uređaji mogu generirati temperaturne, vibracijske i svjetlosne podražaje koji imaju utjecaja na pčele. Pojednostavljeni model pčele temeljen je na modelu vozila s diferencijalnim pogonom i opremljen je odgovarajućim senzorima. U okviru ovog rada, potrebno je implementirati odgovarajući upravljački sustav, koji će osigurati da gibanje simulirane pčele bude kvalitativno slično gibanju pravih pčela. Podatke o gibanju pčela potrebno je prikupiti iz video materijala snimljenih na eksperimentalnom postavu.

Zadatak uručen pristupniku: 14. ožujka 2014.

Rok za predaju rada: 13. lipnja 2014.

Mentor:

Prof.dr.sc. Stjepan Bogdan

Predsjednik odbora za
završni rad modula:

Vučić Mladen

Prof.dr.sc. Mladen Vučić

Djelovođa:

Izv.prof.dr.sc. Dražen Jurišić

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Postojeći modeli gibanja pčela	4
2.1. Inteligencija decentraliziranih skupina	4
2.2. Pčele i toplina	6
3. Modeli pčele	8
3.1. Model pčele s memorijom	8
3.2. Model pčele s osjetom gradijenta temperature	9
3.3. Model arene s izvorom topline	10
4. Metode za usporedbu gibanja pčela	12
4.1. Prostorna metoda	12
4.2. Vremenska metoda	14
5. Analiza modela	16
5.1. Ovisnost o duljini simulacije	16
5.2. Rasipanje karakteristike	19
5.3. Ovisnost o udjelu temperaturnog kuta	21
5.4. Usporedba dva osnovna modela	22
5.5. Ovisnost o dozvoljenim kutevima zakreta	23
5.5.1. Maksimalni kut zakreta pčele	23
5.5.2. Razdioba kuteva	25
5.6. Ovisnost o izvoru topline	27
5.6.1. Osnovni model	27
5.6.2. Cjeloviti model	28
5.7. Ovisnost o duljini memorije pčele	31
5.8. Usporedba dva cjelovita modela	31

6. Analiza stvarnih gibanja pčele	33
6.1. Analiza videa prostornom metodom	34
6.2. Analiza videa vremenskom metodom	34
7. Usporedba modela sa stvarnim gibanjima pčele	38
8. Implementacija u simulatoru biohibridnih sustava	40
9. Zaključak	42
10. Reference	44
11. Dodatci	47
11.1. Generiranje gibanja pčele sa osjetom gradijenta temperature	47
11.2. Generiranje gibanja pčele sa osjetom memorijom	50
11.3. Pomoćne funkcije za računanje gibanja	53
11.3.1. Izračun temperature	53
11.3.2. Ubacivanje u memoriju	53
11.3.3. Pronalazak najveće temperature u memoriji	54
11.4. Vremenska i prostorna metoda analize	54

1. Uvod

Kroz povijest je čovjek često bio inspiriran prirodom u mnogim područjima: u umjetnosti, u gradnji, u znanosti, u inženjerstvu. Danas je priroda kao inspiracija prisutna u gotovo svim segmentima života. Iako je robotika područje koje se bavi nečim što nije priroda stvorila i ona nalazi inspiraciju prirodnim mehanizmima i zakonima. Mnoge grane robotike sve više se posvećuju prirodi i životinjskim zajednicama s ciljem shvaćanja, oponašanja i integriranja u takve zajednice.

Projekt ASSISIbf (Animal and robot Societies Self-organise and Integrate by Social Interaction - bees and fish) je projekt čiji je cilj stvoriti robote koji će moći utjecati na kolektivno ponašanje riba i pčela. Roboti bi trebali biti sposobni samostalno "učiti" o socijalnom ponašanju i "jeziku" životinja, kako bi se mogla uspostaviti funkcionalna i samoorganizirajuća zajednica životinja i robota. Takve zajednice trebale bi moći zajednički ostvarivati neki cilj, koji može biti prirodan zadatak te zajednice životinja, ali i upravljan čovjekom. Takve zajednice omogućile bi čovjeku razumjevanje inteligencije i ponašanja decentraliziranih životinjskih sustava. Komunikacija između čovjeka i životnijskih zajednica ponudila bi jedan novi način upravljanja procesima u prirodi. Očekuje se da bi ovakav način interakcije između čovjeka i životinja imao mnoge koristi u agrikulturi, uzgoju životinja, zaštiti životinjskih vrsta, okoliša itd.

Jedinice koje bi svojim ponašanjem nalikovale pčelama te istovremeno mogle uspostaviti "komunikaciju" s njima i međusobno nužan su dio ovog projekta. Robotske jedinice nazvane Casu (Combined actuator sensor units) sadržavat će na sebi aktuatore kojima će proizvoditi signale i uvjete na koje pčele reagiraju, poput topline i vibracija. Osim aktuatora cilj je da Casu na sebi imaju i senzore kojima bi omogućile mjerjenje i praćenje reakcija pčela, bez da na njih utječu. Na taj način čovjek bi dobio jednu novu perspektivu iz koje može promatrati životinsku zajednicu, kako bi pokušao shvatiti i opisati ponašanje pčela. Želja je da taj proces praćenja, učenja i zaključivanja bude što više automatiziran i samostalan pomoću Casu jedinica.

U početnim stadijima razvoja projekta Casu jedinice su nepokretne, ali imaju aktuatore i senzore. Da bi se Casu jedinicama implementiralo gibanje potrebno je anal-



Slika 1.1: Životinje koje su predmet ASSISI projekta

izirati i opisati gibanje pojedine pčele. Gibanje pčele mora biti definirano i za razne podražaje na koje pčela reagira poput: topline, vibracije, susreta s drugom pčelom itd. U ovom radu pokušat će se razviti matematički model gibanja pčele u okolini izvora topline, te ga kasnije implementirati u Enki simulatoru biohibridnih sustava. Kao izvor ideja i kasnije kao potvrda o podudaranju modela sa stvarnim gibanjem pčela koristit će se podaci s video materijala snimanih na pčelama starim 1 dan. Pčele moraju biti dovoljno mlade da još ne mogu letjeti nego samo hodati. Na taj način moguće je pratiti 2D koordinate pčele u prostoru. Podatci o (x,y) poziciji pčele u prostoru kasnije će se analizom uspoređivati s modelom.

Struktura rada je sljedeća. U drugom poglavlju prikazani su postojeći modeli gibanja pčela. Svi modeli su modeli za gibanje pčele u društvu drugih pčela, odnosno karakteristično gibanje pčele posljedice su reakcija kada se dvije ili više pčela susretnu. U tim modelima gibanje pčele kao jedinke bez interakcije s drugim pčelama najčešće ne bi dovelo do karakterističnog ponašanja npr. pronašlaska izvora topline, najbolje lokacije za novu košnicu itd. S obzirom da Casu jedinice trebaju uvijek imati definirano gibanje, u ovom radu predložiti će se model u kojem je jedna pčela sposobna pronaći izvor topline, i to na način sličan gibanju prave pčele. Predložena su dva modela: model u kojem pčela ima memoriju, te model u kojem pčela može osjetiti gradijent temperature npr. pomicanjem ticala. Modeli su detaljno opisani u trećem poglavlju.

Kako bi se modeli mogli osim kvalitativno i kvantitativno usporediti s gibanjima prave pčele, osmišljene su dvije metode analiziranja i kvantiziranja gibanja. Prostorna i vremenska metoda za usporedbu su opisane u četvrtom poglavlju. U modelima postoji mnogo slobodnih parametara, pa je bilo potrebno ispitati ponašanje modela u ovisnosti o tim parametrima. Također putem tih parametara su modeli međusobno uspoređeni. Cjelovita analiza modela opisana je u petom poglavlju.

Na jednak način kako su modeli analizirani vremenskom i prostornom metodom analizirani su i video zapisi kretanja pčele. Rezultati obrade kretanja uz objašnjenja prikazani su u šestom poglavlju. Nakon toga u sednom poglavlju nalazi se usporedba

modela sa stvarnim gibanjem pčela sa videa. Konačni odabrani modeli implementirani su u Enki simulatoru biohibridnih sustava. Upoznavanje sa simulatorom te implementiranim modelima čine osmo poglavlje. Na kraju sve je sumirano u devetom poglavlju te su predloženi daljnji koraci za rad.

2. Postojeći modeli gibanja pčela

2.1. Inteligencija decentraliziranih skupina

Organizacija, donošenje odluka i uzorci gibanja bioloških sustava s puno članova tema su istraživanja već desetljećima. Načini i pravilnosti gibanja pojedinaca i cijele skupine još uvijek nisu potpuno razjašnjeni. Mnogo je modela predlagano, od koji su se neki bili robustniji, neki osjetljiviji na parametre, neki su primjenjeni samo na jednu vrstu životinja, neki se mogu primjeniti na više različitih vrsta.

U početcima se mislilo da životinje izvode svojevrsno Brownovo gibanje u potrazi za hranom, ali kasnije je predložen Levyev let [6] za opis leta albatrosa. Levyeve gibanje pridjeljivano je gibanju bubamara i jelena, no naknadno se uspostavilo da metode usporedba nisu bile dovoljno precizne, a i primjećeno je da neke životinje kombiniraju više vrsta gibanja ovisno o vrsti zadatka koji obavljaju, uvjetima u okolišu, raspodjeli meta (ciljeva), a najviše o tome je li cilj potrebno više puta posjetiti ili samo jednom. U tom slučaju složeno Brownovo gibanje (composite Brownian motion - CBM) [2] puno bolje opisuje gibanja nego prethodni modeli. CBM se sastoji od dva slučajna gibanja sa različitim funkcijama razdiobe. Primjer takvog gibanja je gibanje mrava u potrazi za mravinjakom. U početku mrav pretražuje s mnogo okretanja i gotovo potpuno slučajnim zakretanjima. Kasnije u drugoj fazi s giba sa mnogo manje zakretanja i gotovo pravocrtnim gibanjem. U početku se gibanje promatralo kroz niz točaka u vremenu koje su se promatrалe kao nezavisni i odvojeni zakreti gibanja. Danas se smatra da su mnogo izgledniji modeli s koreliranim slučajnim gibanjem u kontinuiranom vremenu (continuous time correlated random walk - CTCRW) [2] u kojem trenutni zakret određuju i prethodna gibanja.

Prema [2] kad pčele traže novo mjesto za košnicu, samo dio pčela izlazi van u nepoznato i pretražuje prostor. Te pčele nazvane su izviđači. Nakon što se vrate u košnicu one izvode "waggle dance". Waggle dance je način na koji izviđači poručuju koliko je pronađeno mjesto kvalitetno. Što dulje izvode ples to je mjesto kvalitetnije. Na kraju se u košnici kvorumom odlučuje o sljedećoj lokaciji košnice. Radilice čekaju

signal, pa nakon što je odlučeno cijela košnica se seli.

Ove činjenice bile su inspiracija za [2] u kojem je ovaj princip traženja nove lokacije i odlučivanja implementiran za pronalaženje najštetnije mete među zadanim metama. U areni nalazi se jednoliko raspoređenih M meta, te N pčela od kojih je N_i izviđača i N_r radilica. Zadatak izviđača je da pronađu mete te izvijeste ostale pčele o štetnosti i lokaciji mete. Oni mogu odašiljati i primati poruke od ostalih izviđača. Radilice s druge strane čekaju u košnici i mogu samo primati informacije. Pčele mogu biti priklonjene nekoj meti, ili neprikloljene ukoliko još nisu pronašle metu ili nisu dobile informaciju od druge pčele. Gibanje izviđača sastoji se od pretraživanja prostora dok ne pronađe metu. Kad pronađe metu on odlazi do košnice, te kad se odluka donese vodi ostale pčele do odabrane lokacije. Čim postane priklonjen nekoj meti izviđač odašilje tu informaciju u definiranom radiusu oko sebe. Ukoliko se radilica nađe u tom radiusu, ona postaje priklonjena toj meti. Ukoliko se nađe drugi izviđač u tom radiusu, oba izviđača dalje prenose poruku koja sadrži infomaciju o štetnijoj meti. S obzirom na realnu prirodu problema, vrijeme odlučivanja mora biti konačno. U modelu se definiralo vrijeme unutar kojeg se odluka mora donjeti. Ukoliko su po isteku tog vremena sve pčele priklonjene istoj meti, cijeli roj će se preseliti na istu lokaciju. Ukoliko postoji nekoliko meta kojima su pčele priklonjene, roj će se razdvojiti. Cilj je bio modelirati gibanje izviđača tako da pretraženo područje bude što veće i sa što manjom energetskom potrošnjom. Upotrebljen je jedan oblik prije spomenutog CTCRW gibanja. Vektor brzine u svakom trenutku određen je stohastičkim i heurističkim vektorom brzine. Ukupni iznos brzine uvijek je jednak maksimalnom iznosu brzine pčele, jer će se na taj način pretražiti najveći dio prostora. Heuristički kut i iznos brzine su definirani pomoću prethodnih pozicija i brzina koje su spremljene u kratkoročnoj memoriji. Utjecaj pojedinih prethodnih pozicija je ponderiran, a u ovisnosti o faktoru ponderiranja mjenjala se veličina pretraženog područja. Stohastički kut je definiran uniformnom raspodjelom od $\left[\frac{-\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$. Sličan model biti će korišten i u ovom radu.

Inteligencija grupe je pojam koji se pripisuje svojstvima jata i rojeva, a manifestira se time da su zajedno sposobni riješiti probleme i obaviti zadatke koje svaki pojedinac sam ne može. Ta pojava je zanimljiva jer pojedine jedinke nisu složene, često nemaju mnogo senzora, niti sposobnosti komunikacije, ali cijela skupina se uspije samoorganizirati i samoupravljati. Primjer proučavan u [1] je reagiranje pčela na toplinske podražaje odnosno

pronalaženje toplijih područja. U zamračenoj areni je postavljena IR izvor topline te je proučavano gibanje pojedine pčele kao i cijele skupine. Pčele su bile stare jedan dan tako da mogu hodati, ali ne i letjeti. Zamjećeno je da se nakon nekog vremena

počnu formirati skupine pčela blizu izvora topline. Na kraju obično ostane jedna velika skupina u optimalnom području od približno 36° C. Zamjećeno je da skupljanje ovisi o temperaturnom gradijentu. Pčele na ticalima imaju senzore topline, ali ukoliko je gradijent mali one ne uspjevaju odrediti smjer pozitivnog gradijenta i zapravo se gibaju slučajno. Ukoliko u areni postoji više pčela one će bez obzira na iznos gradijenta nakon nekog vremena ipak pronaći izvor topline. Također je primjećeno da pčela razlikuje susret sa zidom arene i drugom pčelom. Većinu slučajeva kad se susrela sa drugom pčelom pčela je stala, dok kod susreta sa zidom nije gotovo nikada stala. Objašnjenje ove pojave je da kad dođe do susreta dvije pčele one ostanu stajati na tom mjestu vremenski proporcionalno dugo s temperaturom na tom mjestu (a ne gradijentom). Analiza gibanja pčela je to i pokazala; u toplijim područjima prosječno vrijeme zadržavanja pčele bilo je dulje. Ukoliko se stvori nakupina pčela na pojedinom području, ukoliko je tu toplije, prilikom međusobnih sudara unutar skupine pčele će dulje vremena stajati te će prosječno vrijeme trajanja nakupine biti veće. Time što je trajanje nakupine veće, veća je i vjerojatnost da nova pčela dođe do te nakupine i tamo se zadrži. Na taj način u toplijim područjima stvaraju se veće nakupine pčela koje dulje traju. Protokom vremena će se manje nakupine raspasti i polako će se jedna po jedna pčela pridruživati najvećoj nakupini dok na kraju jedino ona ne ostanе. Na taj način pčela optimira dvije stvari koje "voli": društvo i toplinu.

Implementacija ovog algoritma na robote ne zahtjeva neprestano očitavanje senzora, komplikirane algoritme odlučivanja o smjeru kretanja, niti memoriju poput većine ostalih modela. Senzor očitava vrijednosti jedino pri sudaru. Na taj način što je više jedinki u skupini, kvaliteta i brzina pronalaženja izvora topline se povećava. To je iz tog razloga što ukoliko je veći broj jedinki, veći je broj sudara u vremenu, pa je i veća frekvencija "skeniranja" prostora. Eksperimenti sa skupinama robota su pokazali da povećanjem broja jedinki povećanje mogućnosti skupine nije linearno, te da pri nekom broju jedinki dolazi do zastoja zbog problema s komunikacijom, koordinacijom itd. Iz toga razloga u ovom radu pokušane su odrediti mogućnosti jedne pčele u pronalaženju izvora topline.

2.2. Pčele i toplina

Temperatura je jedan od najutjecajnijih faktora okoliša za kukce. Iako mnogi kukci mogu preživjeti samo u uskom rasponu temperature, te svoju tjelesnu temperaturu mogu regulirati samo u skladu s okolnom temperaturom, postoje i kukci koji sami endotermno proizvode toplinu. Jedne od njih su i neke vrste pčela npr. zapadna pčela

(*Apis mellifera*) [3], što im omogućava preživljavanje zimi, kontroliranje temperature košnice, razvoj ličinki i mlađih pčela unutar košnice itd. Unutar košnice temperatura se kreće od 32° C do 36° C. Odrasle pčele pomažu pri održavanju temperature jer mlađe pčele nisu još sposobne proizvoditi toplinu. Mlađe pčele potpuno razviju sposobnost proizvođenja topline tek oko petog dana starosti. Dok ne postanu sposobne same proizvoditi toplinu one se skupljaju na toplijim mjestima unutar košnice.

Promatrani su algoritmi ponašanja mlađih pčela u simuliranim košnicama, odnosno u arenama s izvorima topline. Zapaženo je da se pčele skupljaju na području od 36° C, s obzirom da je to temperatura koja prevladava u košnici. Također se pokazalo da grupe pčela uspjevaju pronaći mjesto optimalne temperature, ali većina pčela samostalno to ne uspjeva.

3. Modeli pčele

Cilj ovoga rada je osmisliti model pčele koji će modelirati gibanje pčele u prostoru s gradijentom topline. Pčela se giba pod utjecajem temperaturnog gradijenta, ali i pod utjecajem slučajnosti. Iako se prethodnim eksperimentima utvrdilo da jedna pojedina pčela nije uvijek uspješna u pronalaženju izvora topline, ovdje će se krenuti s pretpostavkom da pčele i kao pojedinke mogu pronaći izvor topline. Gibanja proizašla modeliranjem usporediti će se s podacima snimljenim na pčelama u areni sa gradijentom temperature te će se na taj način pokušati potvrditi ispravnost modela.

3.1. Model pčele s memorijom

Prepostavljen je da pčela ima memoriju kojom pamti prethodne pozicije te pripadne temperature. Na temelju njih u svakom koraku pri odabiru smjera zakretanja prolazi kroz memoriju i odabire prethodnu poziciju na kojoj je bila najviša temperatura. Iz trenutne pozicije i orijentacije te odabrane pozicije s najvećom temperaturom odabire se kut zakretanja. Ukupni kut zakretanja je zbroj kuta određenog na temelju memorije te slučajnog kuta. Slučajni kut odabire se iz normalne ili uniformne razdiobe. Faktor α određuje koliki je utjecaj memorije, a koliki slučajnog kuta prema 3.1.

$$\phi_{uk} = \alpha * \phi_{temp} + (1 - \alpha) * \phi_{rand} \quad (3.1)$$

U modelu se pčela može kretati samo određenom nominalnom brzinom ili stajati. Kreće li se ili stoji određuje se slučajno uniformnom ili normalnom razdiobom. Pčela se može okrenuti neovisno o tome da li se kreće ili stoji. Na taj način, iako je pretpostavljen da se pčela u jednom koraku ne može okrenuti za kut veći od maksimalnog, na xy prikazu putanje kutevi zakretanja mogu biti veći od maksimalnog u slučajevima kad je pčela neko vrijeme stajala i zakretala se oko svoje osi.

Parametri kojima se može mjenjati ponašanje u ovom modelu su: *duljina memorije* kao broj prethodnih pozicija koje pčela pamti, α kojim se mjenja udio temperaturnog

kuta u ukupnom kutu zakreta pčele, $max\alpha$ kojim se određuje maksimalni kut pri jednom zakretu te σ kojim se mjenja raspon 68% vjerojatnosti kuteva.

Nakon što je ovaj model bio ispitana za sve parametre (u Analiza modela - 5. poglavlje) model je dorađen na način da α više nije slobodan parametar nego se mjenja pri svakoj točci izračuna okretanja pčele. Naime, u trenutnom modelu nigdje nije uzet u obzir iznos maksimalne temperature izvora odnosno maksimalne temperature pronadene u memoriji. Promatrajući gibanja pčele u stvarnosti vidljivo je da i temperatura izvora ima utjecaj na kretanje. Iz tog razloga, utjecaj temperature izvora uključen je pri izračunu α . Formula za izračun α uključuje najveću temperaturu to tog trenutka detektiranu u prostoru. Pretpostavljeno je da izvor topline neće nikada biti topliji za više od $14^\circ C$ u odnosu na okolinu. Za okolinu je pak pretpostavljeno da se nalazi na $26^\circ C$. Na ovaj način postignuto je da su za veće temperature izvora svi α veći.

$$\alpha = \beta * \sqrt{\frac{T_{max} - 26}{40 - 26}} \quad (3.2)$$

Programski kod opisanog modela nalazi se u Dodatku.

3.2. Model pčele s osjetom gradijenta temperature

Inspiracija za ovaj model potječe iz činjenice da pčela ima ticala kojima može istraživati prostor oko sebe. Pretpostavljeno je da na njima ima i osjet za temperaturu. Na taj način, pomicanjem ticala, pčela može odrediti smjer maksimalnog gradijenta topline. Na temelju trenutne orijentacije i detektiranog smjera najvećeg gradijenta topline izračuna se potrebni kut zakreta. I u ovom slučaju na kut zakreta određen temperaturnim gradijentom dodaje se slučajan kut određen normalnom ili uniformnom razdiobom. Udio kuta definiranog gradijentom kao i u prethodnom modelu određuje se parametrom α , po formuli 3.1.

Parametri ovog modela isti su kao i parametri modela s memorijom samo bez parametra duljina memorije.

Ovaj model pokazao se jako sličan modelu sa memorijom (u Analiza modela - 5. poglavlje) zbog činjenice da je jedina razlika u načinu računanja temperaturnog kuta. Ipak, i ovaj model je dorađen na način da α više nije slobodan parametar nego se mjenja pri svakoj točki izračuna okretanja pčele. Naime, u trenutnom modelu nigdje nije uzet u obzir iznos maksimalne temperature izvora. Iz tog razloga formula za izračun α te argumentacija su jednake kao i za model pčele s memorijom.

3.3. Model arene s izvorom topline

Arena je okrugla površina radiusa 30 cm. Središte koordinatnog sustava nalazi se u središtu arene.

U oba modela postoje dva parametra koji određuju uvjete okoline u kojima se pčela kreće; temperatura izvora topline te pozicija izvora topline. Temperatura izvora može se postaviti u rasponu od 26 do 40° C, jer su to rasponi temperatura na kojima pčele obično bivaju. Prilikom izračuna temperature i gradijenta na pojedinim pozicijama u prostoru korišten je model raspodjele temperature u prostoru definiran formulom 3.3.

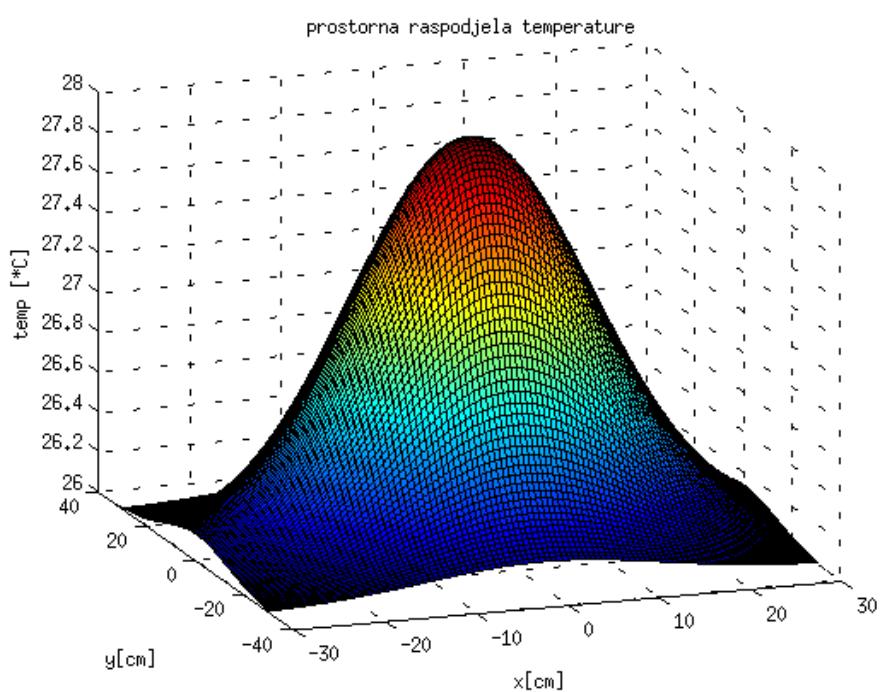
$$z = \frac{T_{max}(e^{-\gamma((x-t_{xc})^2 + (y-t_{yc})^2)} - e^{-\gamma*60^2}) + 26(1 - e^{-\gamma((x-t_{xc})^2 + (y-t_{yc})^2)})}{1 - e^{-\gamma*60^2}} \quad (3.3)$$

Ovaj model odabran je iz razloga što je gradijent temperature u prostoru najstrmiji na malim udaljenostima od izvora te zatim dosta naglo postaje jako blag. Modificiranim eksponentijalnom funkcijom postiglo se da (t_{xc}, t_{yc}) definira koordinatu izvora topline, a T_{max} temperaturu izvora u toj točci. Kako bi se omogućilo mjenjanje gradijenta mjenjanjem $tempmax$ postavljeno je da se na udaljenosti od 60 cm od izvora temperatura održava na 26° C. Parametar γ određen je eksperimentalno tako da prostorna raspodjela temperature ne bude prestrma, odnosno da na svim područjima unutar arene postoji gradijent koji će pčela moći registrirati. Vrijednost γ je 0.003. Taj parametar se može prilagoditi ukoliko se dobiju stvarni podaci o temperaturama na pojedinim mjestima u areni.

Izvor topline u stvarnosti se može postaviti bilo gdje unutar arene, no u simulaciji mu se može mijenjati samo x koordinata dok y koordinata mora biti 0. To je iz razloga pojednostavljivanja računa u prostornoj metodi analize gibanja pčele i računanja površina. Iznakao nije bitno da izvor može biti bilo gdje nego da možemo mijenjati početnu udaljenost pčele i izvora, a za to postoji dovoljno parametara i bez potrebe za mjenjanjem t_{yc} (npr. pomicanjem početne pozicije pčele).

Prikaz prostorne raspodjele temperature prikazan je na slici 3.1.

Programski kod opisanog modela nalazi se u Dodatku.



Slika 3.1: Prostorna raspodjela temperature

4. Metode za usporedbu gibanja pčela

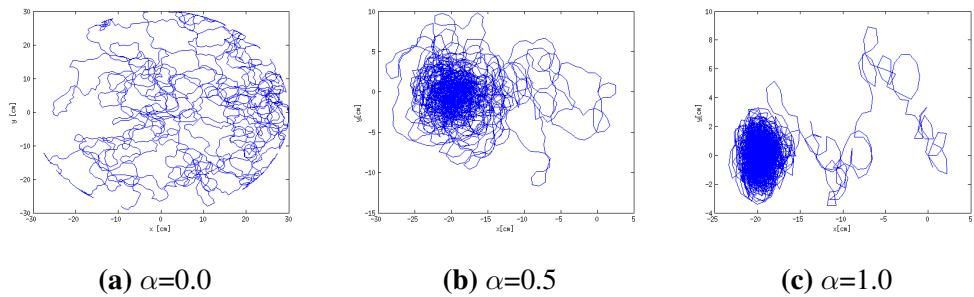
Kako bi se omogućila usporedba stvarnog gibanja pčele i gibanja pčele u modelu te kasnije odabir optimalnog modela, bilo je potrebno osmisliti kako ocjeniti i kvantificirati gibanje pčele u određenim uvjetima u areni ili uz određene parametre u modelu.

4.1. Prostorna metoda

Odabrana je metoda učestalosti boravka pčele unutar prostora polumjera r oko izvora topline. Naime, ukoliko nema izvora topline pčela će jednako vjerojatno biti bilo gdje u prostoru. Ako se pretpostavi da je izvor u koordinatama $(0,0)$ te računamo koliko posto vremena je pčela unutar radiusa 5 cm, 10 cm, 15 cm itd. to vrijeme trebalo bi biti proporcionalno površini prostora unutar radiusa r . S druge strane, ako postoji izvor topline, pčela će zbog svoje tendencije prema toplini težiti da bude blizu izvora topline. Tada ovisnost vremena provedenog unutar nekog područja radiusa r nije više samo funkcija te površine nego i temperature tog područja. U tom slučaju će pčela više vremena provoditi na manjem radiusu od izvora.

Ova dva slučaja prikazana su na slikama 4.1. Slike su dobivene iz modela gibanja pčele uz postavljanje parametara tako da se na slici (a) pčela giba slučajno jer nema izvora topline, na slici (b) se pčela giba uz utjecaj topline, ali još uvijek je njen gibanje utjecano slučajnim faktorom, te na slici (c) gdje se pčela giba potpuno pod utjecajem topline. Faktor α je faktor korišten u modelu da bi se definiralo kolikim postotkom gradijent utječe na gibanje pčele.

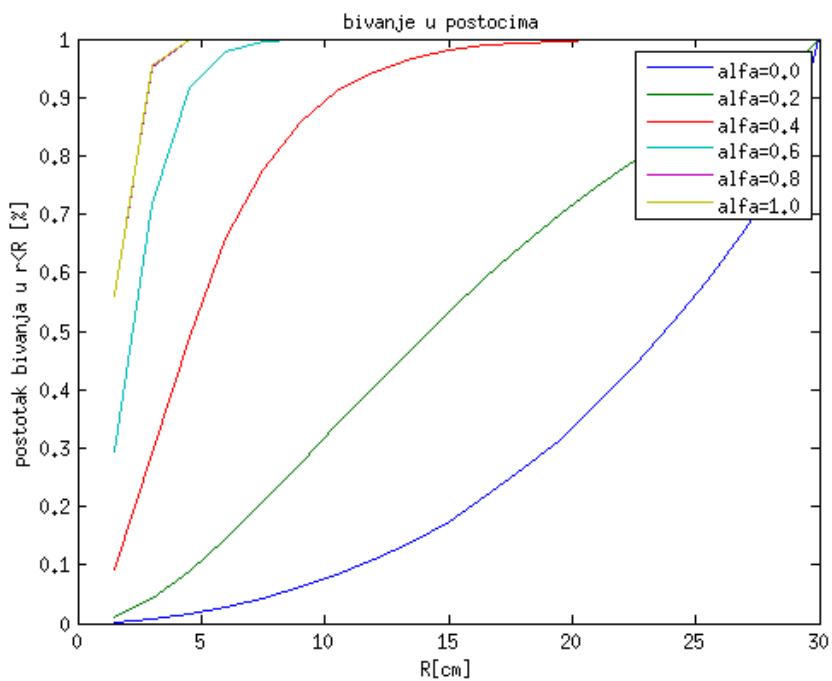
Na slikama 4.2 i 4.3 je prikazan rezultat navedene metode ocjene gibanja pčele. Prostor arene podjeljen je na nekoliko kružnica oko izvora topline. Za svaku od tih kružnica računato je koliko puta je pčela bila unutar tog radiusa. Kasnije je izračunato koliki je to postotak ukupnog vremena gibanja pčele. Na taj način, za najveći radius postotak je uvijek 1. Taj postotak ovisi o parametru α koji govori kolikim udjelom na gibanje pčele utječe temperatura, a koliko je njen gibanje slučajno. Na slici 4.2 je prikazana ta ovisnost uz variranje parametra α . Taj prikaz je napravljen je za



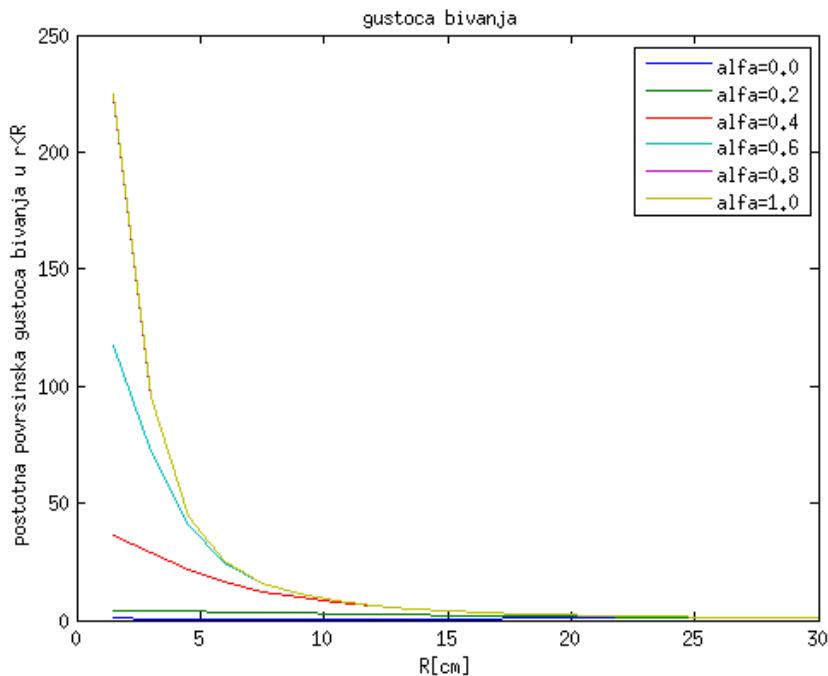
Slika 4.1: Putanja pčele u prostoru za različite tendencije prema toplini

model gibanja pčele s memorijom, no ovdje je bitan samo približni oblik krivulje da se primjeti tendencija i način na koji ova metoda ocjenjivanja gibanja radi.

S obzirom da na postotak boravka unutar određenog radiusa utječe i površina tog prostora, izračunata je ta površina (integriranjem u ovisnosti o položaju izvora topline, jer to nisu uvijek kružnice) te je podjeljen s ukupnom površinom arene kako bi se dobio koji je to postotak površine. Djeljenjem postotka vremena i postotka površine dobiven je prikaz na kojem se jasno vidi tendencija pčele o njenom položaju. To je prikazano na slici 4.3. Za $\alpha=0.0$ kad je gibanje pčele slučajno rezultat je ravni pravac jer je jednaka gustoća boravka za svaki radius. Kako se α povećava, odnosno utjecaj temperature na gibanje, gustoća boravka unutar manjih radiusa oko izvora topline postaje sve veća.



Slika 4.2: Boravak unutar radiusa r u postotnom vremenu

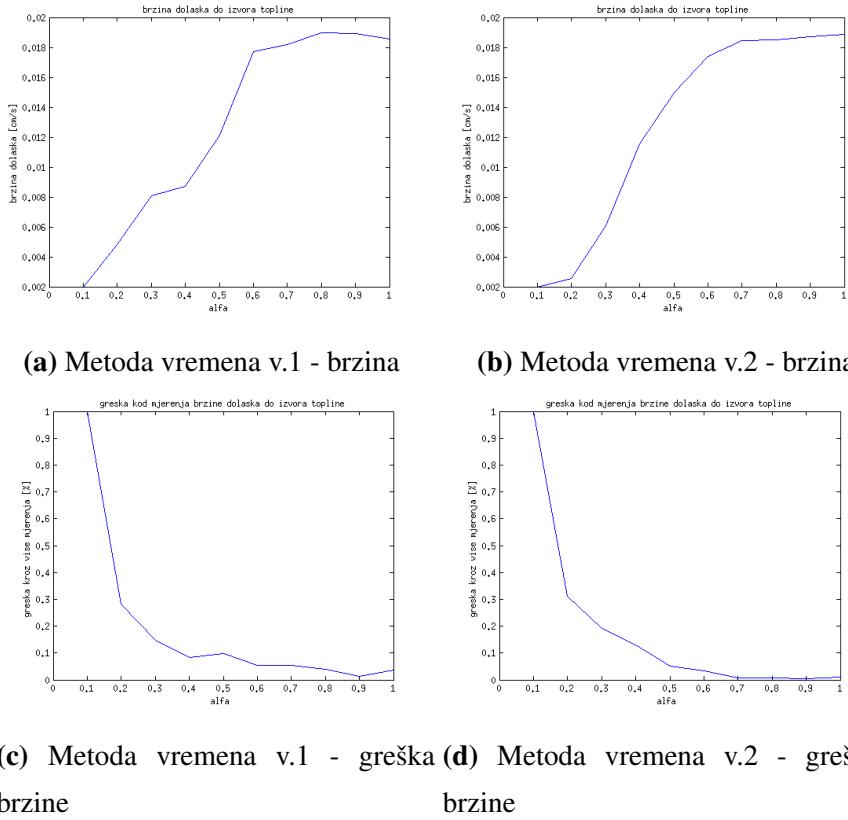


Slika 4.3: Omjer postotka vremena boravka unutar radiusa r i postotka povrsine

4.2. Vremenska metoda

Ukoliko je gradijent temperature veći, pčela će brže doći do izvora topline. No to prostorna metoda ne može detektirati. Iz tog razloga, odlučeno je da se u analizu gibanja uključi još jedna metoda: metoda vremena. Cilj te metode je promatrati vrijeme potrebno da pčela dođe do izvora topline, odnosno do nekog područja oko izvora topline. Za to područje odlučeno je da bude područje unutar prva dva radiusa odnosno unutar 10% maksimalne udaljenosti od izvora do ruba arene (jer je u simulaciji prostor podjeljen na 20 sfernih kružnica oko izvora). Prilikom stvaranja metode bile su dvije ideje kako definirati trenutak koji dobro opisuje brzinu dolaska, neovisno o slučajnostima. Prva ideja je bila uzeti trenutak kad je pčela već n-ti put unutar područja, te eksperimentalno odrediti najbolji n kao postotak duljine simulacije. Druga ideja bila je zabilježiti trenutak kad gustoća boravka unutar prva dva radiusa postane veća od svih ostalih. Iako se očekivalo da će druga metoda biti robusnija na slučajnosti ispalio je da razlika nije toliko velika; greške u izračunu brzine za obje metode su bile podjednake (oko 10%). Računanje za drugu metodu trajalo je puno dulje, pa je odabrana prva metoda kao metoda koja će se koristiti u daljnjoj analizi.

Na slici 4.4 su prikazane dvije ideje za izvedbu metode vremena. Prikazana je brzina u ovisnosti o α parametru odnosno udjelu temperaturnog kuta u ukupnom kutu



Slika 4.4: Usporedba dvije metode vremena

zakreta. Ukoliko je temperaturni kut više zastupljen, pčela se giba usmjerenije, a manje slučajno, te brže dolazi do izvora topline. To vidimo na grafovima. Također što je α veći, a pčela usmjerena, greška pri izračunu brzine pada. Za verziju 1 metode vremena, mjenjan je broj n koliko puta mora pčela biti unutar područja oko izvora topline kad proglašimo to kao sigurno vrijeme dolaska. Zaključeno je da je optimalan n 5-10% od broja točaka (duljine) simulacije.

Programski kod obje metode nalazi se u Dodatku.

5. Analiza modela

Kako bi se upoznalo ponašanje modela u ovisnosti o raznim parametrima, analizirana su dva predložena modela. Cilj je odabratи najpovoljnije parametre za ispitivanje modela, a i kako bi se kasnije prilagodili parametri i model stvarnom gibanju pčela. Također, cilj analize bio je i međusobno usporediti dva predložena modela.

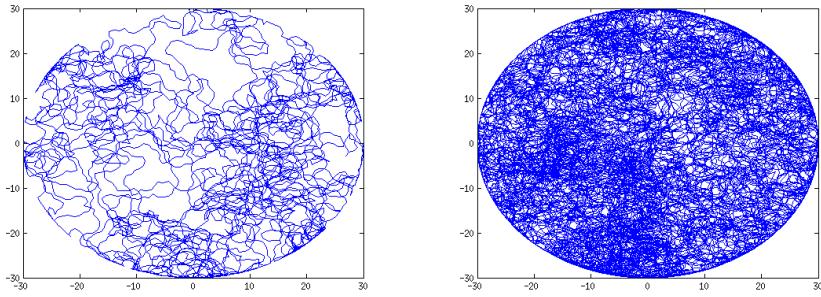
Pri svim analizama, za svaku liniju na grafu, mjerena su provedena u prosjeku 10 puta te su rezultati uprosjećeni. Čak i u slučajevima kad je na grafu pokazano više krivulja za iste parametre svaka od tih krivulja dobivena je prosjekom 10 krivulja u čiji račun nisu uzete u obzir najveća i najmanja vrijednost.

5.1. Ovisnost o duljini simulacije

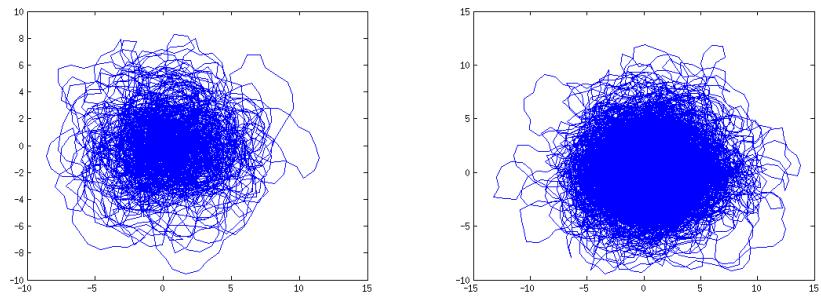
Prvi parametar pri pokretanju simulacije je određivanje broja koraka simulacije. Trajanje simulacije nije bitan parametar modela, ali duljina simulacije može utjecati na rezultate koje izvlačimo iz simulacije. Ukoliko je simulacija prekratka, može se dogoditi da ne zamjetimo karakteristično gibanje pčele za pojedine parametre. S druge strane, dugačka simulacija također smanjuje izražajnost utjecaja pojedinih parametara, a i usporava cijeli proces analiziranja. Iz toga razloga bilo je potrebno analizirati te naći optimum trajanja (broja koraka) simulacije.

Na slikama 5.1 prikazani su grafički prikazi gibanja pčele, za dvije duljine simulacije i dva karakteristična gibanja pčele; slučajno gibanje bez prisustva gradijenta topline na slikama (a) i (b) te gibanje pčele: pod utjecajem izvora topline na slikama (c) i (d). Ovdje su uzete duljine od 10.000 i 50.000 koraka. Za kraće duljine simulacije ponekad ne bi došlo do karakterističnog gibanja pčele, te su uzete veće duljine za ovu analizu.

Na grafovima na slikama 5.2 prikazan je rezultat analize gibanja preko prostorne metode, odnosno gustoće boravka u pojedinim radiusima oko izvora topline. Oni nam pokazuju koliko analiza gibanja ovisi o duljini simulacije. Sa slika (a) i (b) prikazana su dva karakteristična ponašanja kao ovisnost postotka vremena koje je pčela provela



(a) broj točaka simulacije=10000, (b) broj točaka simulacije=50000,
 $\alpha=0.0$ $\alpha=0.0$



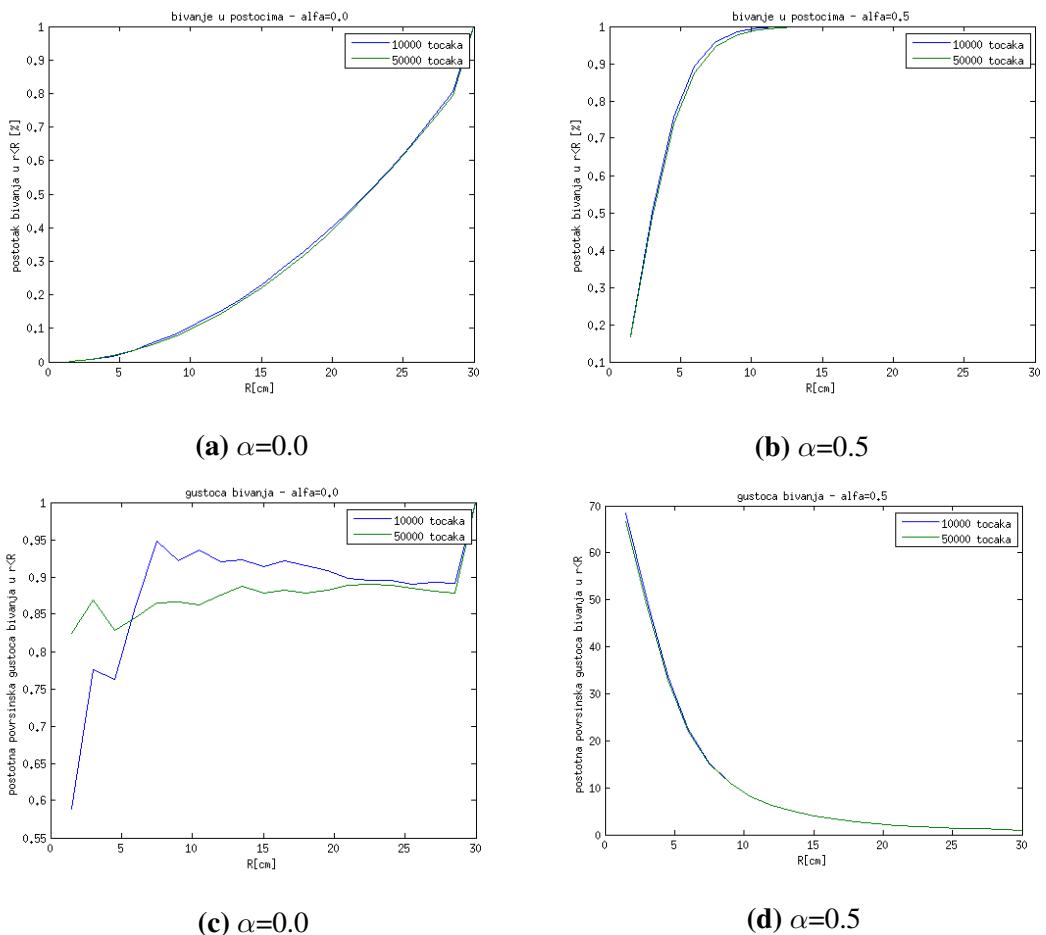
(c) broj točaka simulacije=10000, (d) broj točaka simulacije=50000,
 $\alpha=0.5$ $\alpha=0.5$

Slika 5.1: Putanja pčele u prostoru za različite duljine simulacije i različite α

u području unutar kružnice zadanoj radijusu u ovisnosti o iznosu zadanoj radijusa. Na slikama (c) i (d) prikazane su gustoće boravka, odnosno postotak vremena prikazan na (a) i (b) podjeljen je iznosom postotka površine kruga tog zadanoj radijusa sa ukupnom površinom arene. Za slučajno gibanje pčele s $\alpha=0$, postotak vremena se povećava kako se i radius povećava. Odnosno gustoća boravka (postotak vremena podjeljen sa pripadnim postotkom površine arene) trebao bi biti konstantan. To je prikazano na slici (c).

Vidimo da graf nije idealan kao i to da se mijenja u ovisnosti o duljini simulacije. Uzrok tome je što je to slučajna raspodjela te bi odstupanja postojala i za više puta ponovljenu simulaciju s istom duljinom simulacije. Postotna ovisnost na slici (a) puno je jednoličnija za obje duljine simulacije. Za gibanje pčele pod utjecajem izvora topline (tada α faktor nije 0.0 nego veći) primjećuje se da postotak boravka u područjima blizu izvora raste. Iz tog se razloga gustoća boravka u većim radiusima smanjuje. To se jasno primjećuje na slici (d).

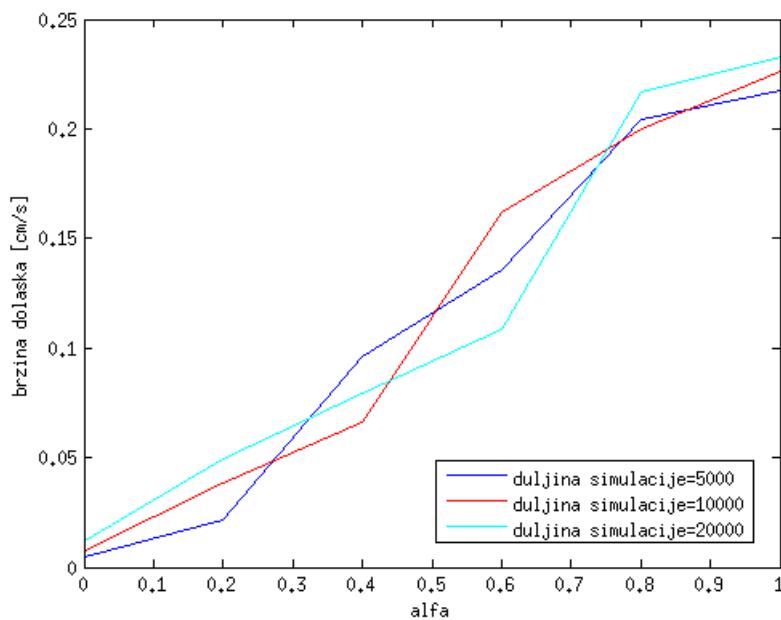
Na slici 5.3 prikazana je analiza vremenskom metodom u slučaju nekoliko duljina simulacija. Za svako gibanje mjenjan je α , te je izračunata brzina dolaska do izvora.



Slika 5.2: Analiza boravka metodom učestalosti boravka unutra prostora polumjera r za različitu duljinu simulacije

Kako α raste, udio temperaturnog kuta je rasao, pa je time i usmjerenost pčele prema izvoru bila veća. Iz tog razloga rasla je i brzina. Ponovljena je analiza za gibanja koja su trajala 5.000, 10.000 i 20.000 točaka simulacije.

Odstupanja za obje metode analize su jako mala. Iz tog razloga zaključeno je da duljina može biti proizvoljno dugačka, ali minimalno toliko da se primjeti karakteristično gibanje, npr. dolazak do izvora topline. U dalnjim mjerjenjima korištena je duljina simulacije od 5000 točaka.

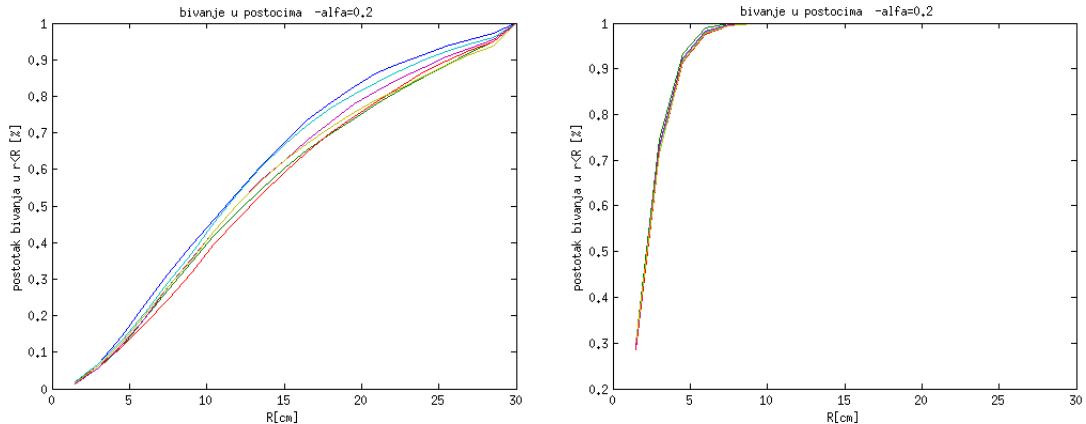


Slika 5.3: Brzina pronalaska izvora topline u ovisnosti o alfi za različite duljine simulacije

5.2. Rasipanje karakteristike

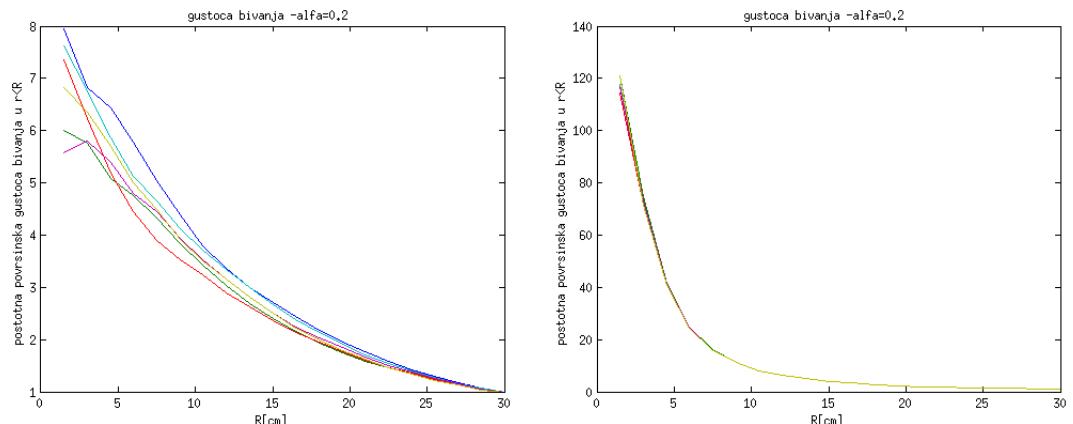
Unutar istih parametara dobivaju se različita gibanja pčele, a time i različiti rezultati analize. Kako bi kasnije prilikom analize mogli znati koliko odstupanje je bitno, a koliko je zanemarivo, provedena je analiza koliko se za iste parametre karakteristične ovisnosti mijenjaju. S obzirom da je faktor udjela toplinskog kuta u odnosu na slučajni kut (α) faktor koji najviše utječe na karakteristiku analize, odlučeno je ispitati rasipanje te karakteristike i to za dve vrijednosti α : 0.2 i 0.6.

Na slici 5.4 (a) i (b) prikazano je rasipanje postotnog vremena za dvije α , a na slikama (c) i (d) rasipanje gustoće boravka. Što je α manji, odnosno što je veći slučajni kut, rasipanje je veće. Odnosno, ukoliko je gibanje određeno modelom tj. toplinom, rasipanje je manje.



(a) Postotak boravka u postocima za $\alpha=0.2$

(b) Postotak boravka u postocima za $\alpha=0.6$

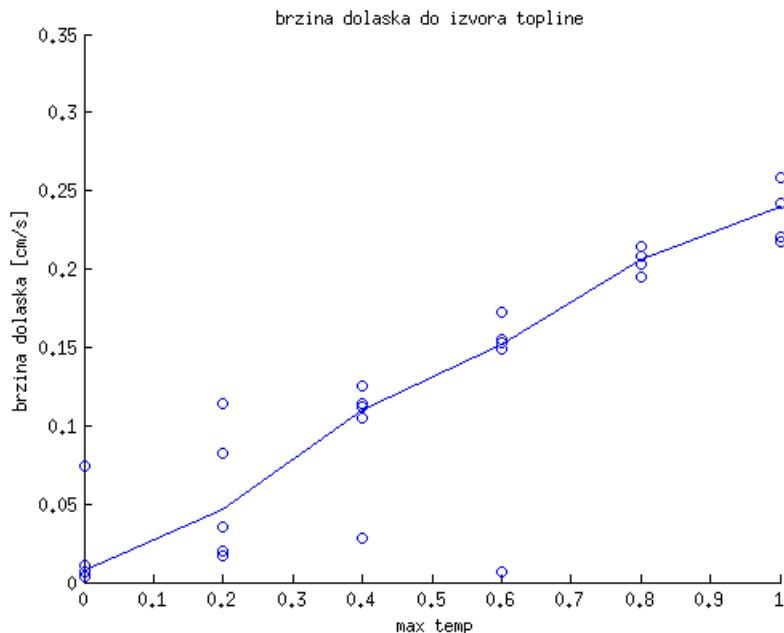


(c) Gustoća boravka za $\alpha=0.2$

(d) Gustoća boravka za $\alpha=0.6$

Slika 5.4: Analiza boravka metodom učestalosti boravka unutar prostora polumjera r - usporedba karakteristike kroz više ponovljenih mjerena

Na slici 5.5 prikazano je rasipanje odnosno variranje izlaznih vrijednosti za iste parametre simulacije prilikom analize vremenskom metodom. Prikazano je mjenjanje brzine u ovisnosti o alfi. Za svaki α mjerjenje je ponovljeno 5 puta te je nacrtano. Linijom su pospojene srednje vrijednosti. Primjećuje se da odstupanja mogu postojati, i to dosta velika, posebno za male α . To je iz razloga što je svako gibanje generirano koristeći slučajnu raspodjelu kuteva.



Slika 5.5: Rasipanje karakteristike nakon obrade vremenskom metodom

5.3. Ovisnost o udjelu temperaturnog kuta

S obzirom da je kut ono što najviše određuje gibanje pčele (jer je brzina ili 0 ili nominalna), a kut je određen iz dva kuta: slučajnog kuta koji je određen iz normalne ili uniformne razdiobe kuteva, te temperaturnog kuta koji je određen iz prostorne raspodjele temperature ili gradijenta (ovisno o kojem modelu se radi), bilo je potrebno analizirati gibanje pčele s obzirom na udio pojedinog kuta. Parametar α je upravo broj koji izražava udio temperaturnog kuta u ukupnom kutu. Ovisnost gustoće boravka i pos-totnog vremena provedenog unutar područja radiusa r oko izvora topline u ovisnosti o α prikazano je na slikama 4.1.

Za $\alpha=1.0$, pčela se giba uz kuteve potpuno određene samo temperaturnim kutom i iz toga razloga dolazi do izvora topline i nakon toga ostaje u tom području. To je

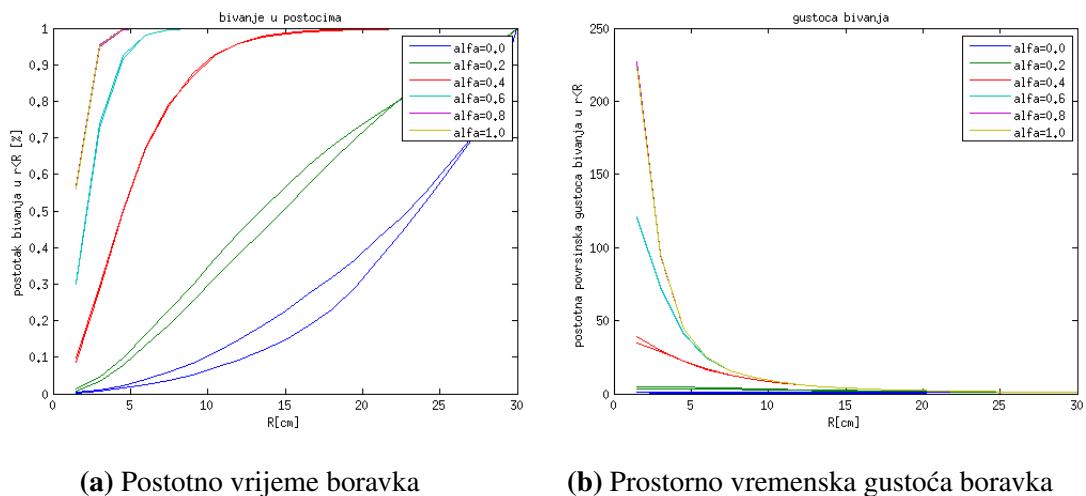
vidljivo na prikazu postotnog vremena gdje vidimo da je 100% provedenog vremena već u malom radiusu. Također gustoća boravka je u malim radiusima oko izvora puno veća od one za veće radiuse. S druge strane kako se α smanjuje tako radius pri kojem je 100% postotnog vremena se povećava i istovremeno pada gustoća u manjim radiusima i izjednačava se s gustoćom u područjima ostalih radiusa.

Rezultat analize vremenskom metodom za različite udjele temperaturnog kuta α prikazan je na ranijoj slici 5.5. Kako raste α prema 1.0, tako i brzina dolaska raste. To je smisleno, jer što je veći udio točnog kuta kuda pčela treba ići da bi došla do izvora to će i prije doći do izvora.

5.4. Usporedba dva osnovna modela

Dva modela vrlo su slična što se tiče raspodjele slučajnih kuteva i načina utjecaja kuta zbog izvora topline, a jedina razlika je u načinu odabira kuta zbog topline. S obzirom na to, odlučeno je usporediti modele.

Na slikama 5.6 prikazana je usporedba osnovnog modela prostornom metodom. Mjenjan je udio temperaturnog kuta α , te je promatrani postotak i prostorna gustoća boravka unutar pojedinih radiusa oko izvora. Odstupanja su jako mala, posebno za veće α (pri kojima je značajan temperaturni kut). Za manje α odstupanja su veća, ali na temelju analize rasipanja karakteristike pri kojoj je bilo zaključeno da su rasipanja također veća za manje α , razlika između modela je unutar tog rasipanja. Iz tog razloga zaključeno je da su oba modela dovoljno slična, te će se sva daljnja analiza osnovnih modela raditi samo na jednom modelu (modelu s memorijom).

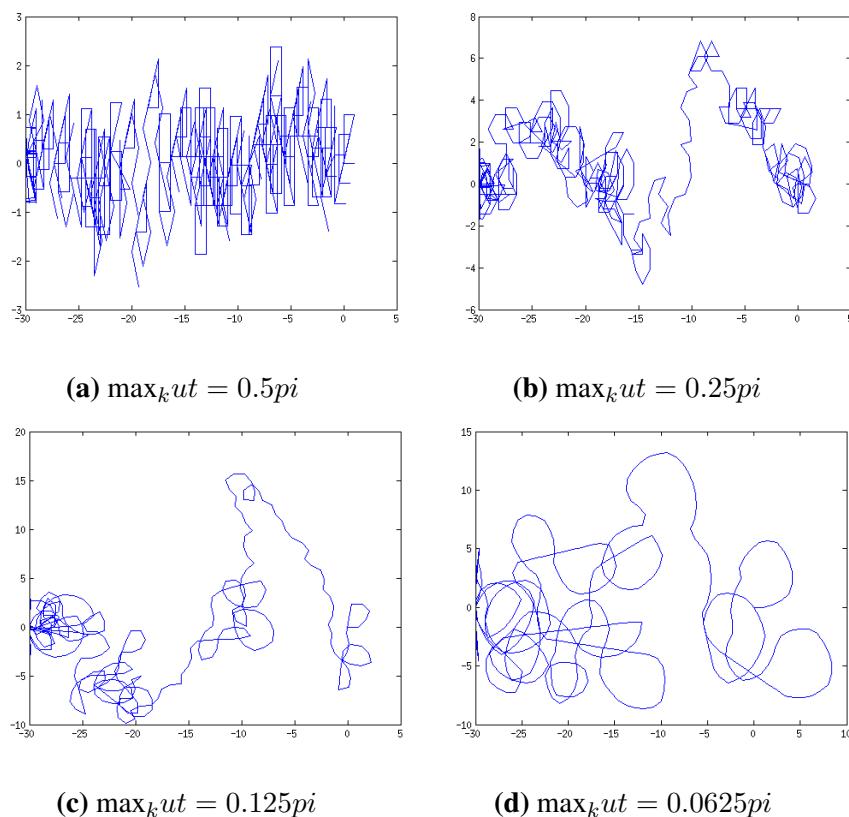


Slika 5.6: Usporedba dva modela za različite udjele temperaturnog kuta

5.5. Ovisnost o dozvoljenim kutevima zakreta

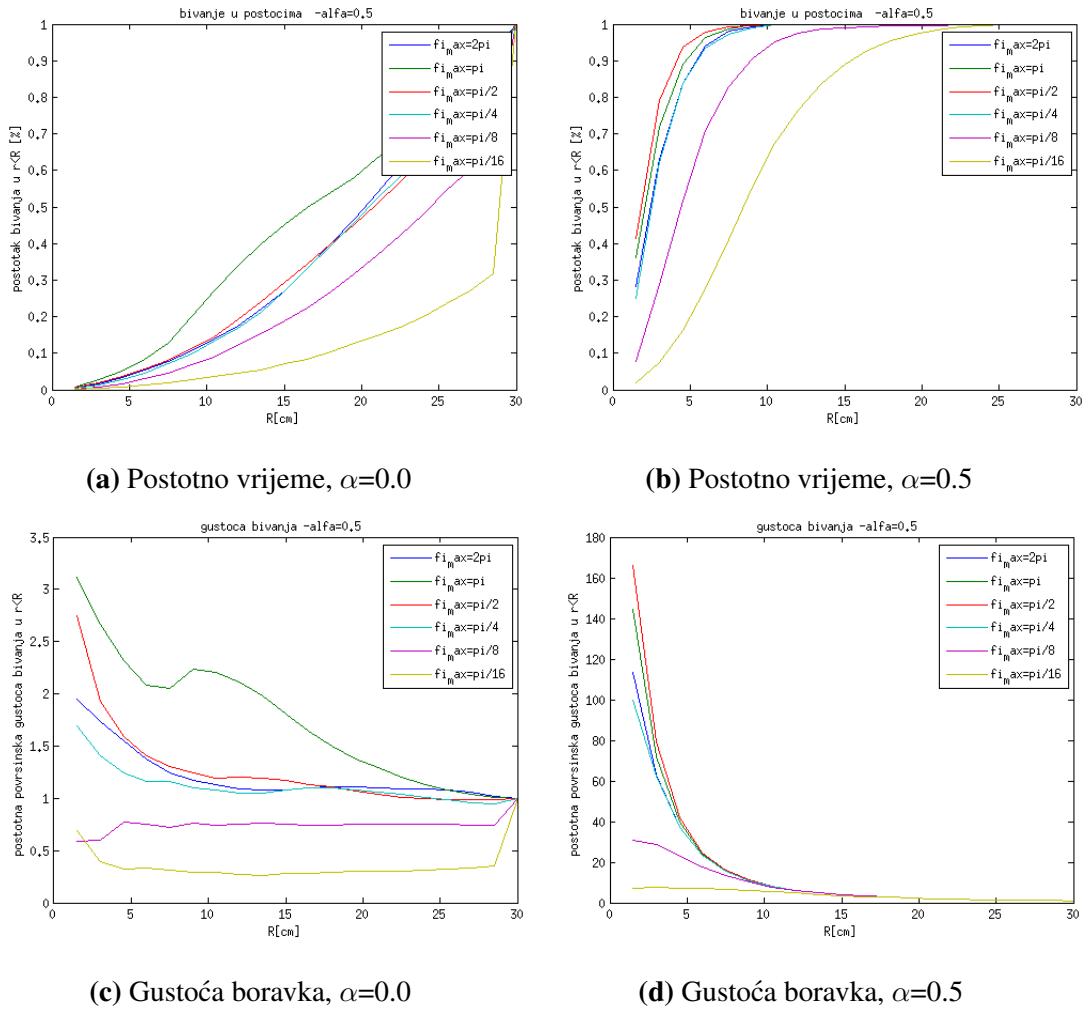
5.5.1. Maksimalni kut zakreta pčele

Uočeno je da se pčela u jednom trenutku ne može zakrenuti za bilo koji kut već da postoji neki najveći kut. Stoga se i u modelu vodilo računa o tome. Odnosno, nakon izračuna slučajnog i temperaturnog kuta te njihovog ponderiranog zbrajanja, kut koji je izračunat ne smije biti veći od najvećeg mogućeg kuta zakreta pčele. Taj kut variran je te su prikazani rezultati na 5.7. Na slikama se na pojedinim mjestima može vidjeti da je kut zakreta veći od najvećeg mogućeg, no razlog tomu je što je u tim trenutcima pčela stajala neko vrijeme te se nekoliko puta okrenula oko svoje osi, pa se ukupni kut mogao povećati na iznos veći od najvećeg dopuštenog. Prema podacima biologa, najveći kut za koji se pčela može zakrenuti je u prosjeku oko 35° .

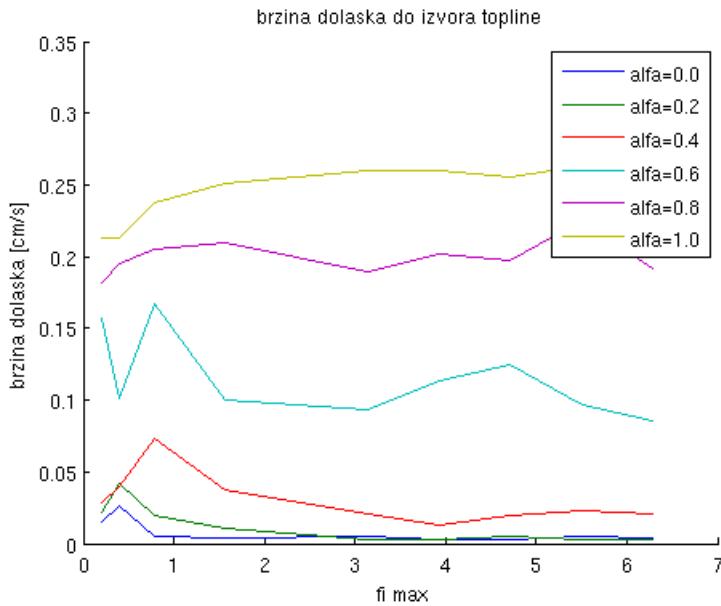


Slika 5.7: Prikaz gibanja u ovisnosti o najvećem dopuštenom kutu zakreta

Sa slika 5.8 primjetan je dosta veliki utjecaj maksimalnog kuta. Analiza je napravljena za dva slučaja α ; 0.0 i 0.5. Kod 0.0 (a) i (c) odstupanja su malo veća, no i kod 0.5 (b) i (d) ona nisu zanemariva. Ukoliko se najveći dopušteni kut smanjuje, karakteristika se po svom obliku i položaju na obje vrste grafova (i za postotno vrijeme i



Slika 5.8: Analiza prostornom metodom za različite maksimalne dopuštene kuteve zakreta



Slika 5.9: Ovisnost o najvećem dozvoljenom kutu zakreta pčele za različite α

gustoću boravka) približava karakteristici za manji α . To je iz razloga što ukoliko su dopušteni samo jako mali kutevi zakreta, pčela neće moći ići u smjeru najvećeg gradijenta ili najveće temperature jer će se moći svaki put samo za malo zakrenuti. Na taj način ona, da bi došla u neku željenu poziciju, mora napraviti puno dulji okolni put. Jednako tako, iako je $\alpha=0.5$ te bi pčela trebala doći blizu izvora topline i tamo provesti većinu vremena pčela će dosta vremena provesti na puno većim radiusima, prvo dok dođe do izvora, a nakon toga zato što prođe pored njega treba napraviti veliki krug da se ponovno vrati. Ako su dopušteni veći kutevi zakreta, pčela može brže doći (kraćim putem) do izvora i brže će se vratiti kad prođe pored njega.

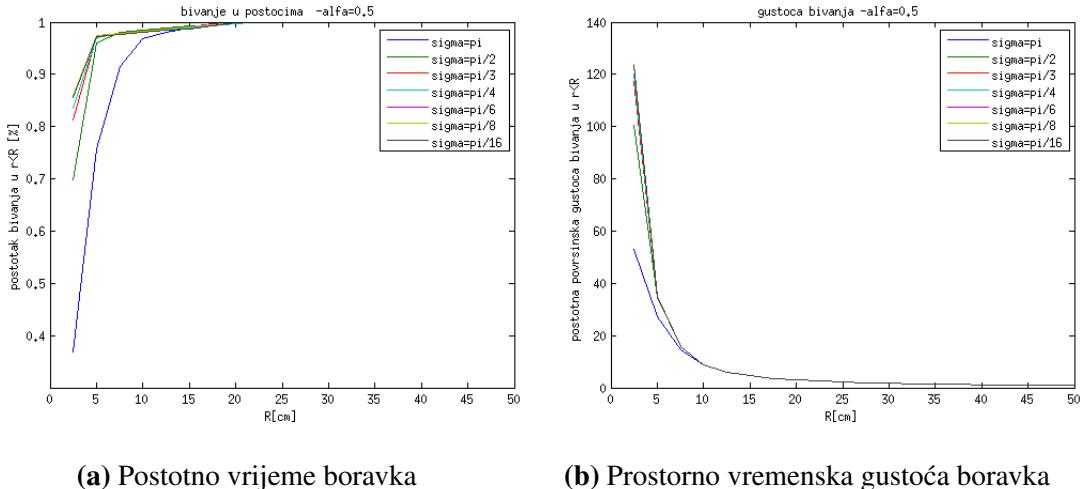
Na slici 5.9 prikazan je utjecaj najvećeg mogućeg kuta zakreta pčele na brzinu pronalaženja izvora topline. Brzina blago pada iz razloga što ukoliko je dopušten veći kut zakreta indirektno je dopušten i veći slučajni kut zakreta, te time pčela može više skretati sa usmjerenog gibanja. Za veće α brzine su ponovno veće.

5.5.2. Razdioba kuteva

Na kut zakreta utječu slučajni kut i temperturni kut. Pretpostavljen je da je razdioba slučajnog kuta normalna, pa je parametar kojim možemo utjecati na slučajni kut varijanca σ odnosno vrijednost kuta unutar kojeg će se nalaziti 68.27% vrijednosti kuteva.

Na slikama 5.10 je prikazana ovisnost analize prostornom metodom za različite vrijednosti σ . Utjecaj je gotovo zanemariv, osim za jako velike σ (npr. pi). Utjecaj je

sličan kao i utjecaj najvećeg dopuštenog kuta zakretanja, samo u puno manjoj mjeri. S obzirom da postoji parametar najvećeg kuta okreta pčele, a koji u stvarnosti iznosi oko 35° . Tako veliki kutevi uglavnom neće doći do izražaja. Stoga je zaključeno da parametar σ ne igra veliku ulogu u ponašanju pčele i može se ostaviti postavljen na neku srednju vrijednost (npr. $\pi/4$).



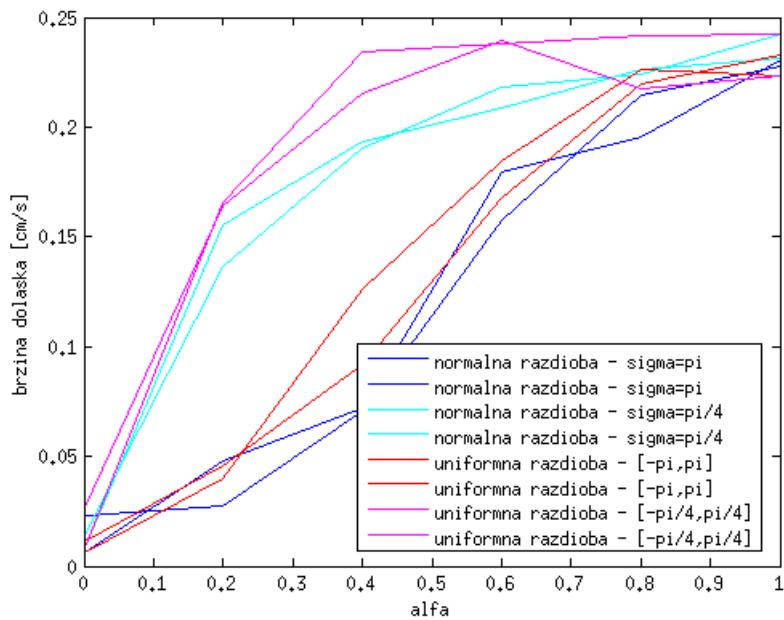
Slika 5.10: Analiza utjecaja faktora σ u normalnoj razdiobi slučajnog kuta zakreta

Ukoliko se pretpostavi da je razdioba kuteva uniformna u rasponu od $[-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}]$, izgled karakteristike se ponovno neće mnogo promjeniti jer veću ulogu igra maksimalni kut zakreta nego razdioba kuteva. No radi usporedbe normalne i uniformne provedena su mjerjenja te je rezultat prikazan na slici 5.11. Prikazana je ovisnost brzine za sve α uz biranje slučajnog kuta pomoću normalne i pomoću uniforme razdiobe. Može se primjetiti da razlika nije jako velika, ali da se između $\sigma = \pi/4$ i $\sigma = \pi$ za normalnu razdiobu, odnosno između dva intervala iz kojih se odabire uniformni kut mjerena mnogo više razlikuju. Za veće raspone kuteve brzina je manja. To se slaže s prije navedenim objašnjenjem da ukoliko je slučajni kut veći, skretanje od pravog smjera gdje se nalazi izvor (smjera temperturnog kuta) će biti veći, te će pčela puno više vrludati nego se usmjereni kretati.

5.6. Ovisnost o izvoru topline

5.6.1. Osnovni model

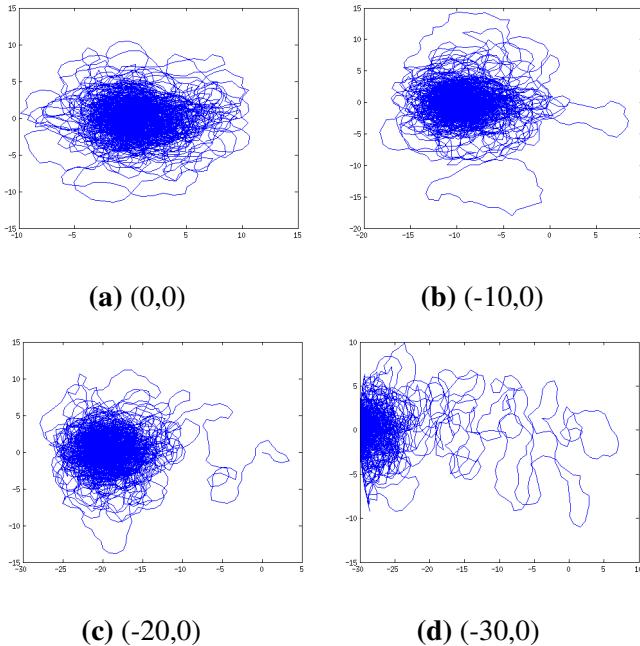
Na slikama 5.12 je prikazano gibanje pčele i pronalaženje izvora topline za različite položaje izvora topline. U sva četiri slučaja, početna pozicija pčele je bila u središtu



Slika 5.11: Analiza vremenskom metodom za uniformnu i normalnu razdiobu kuteva

arene (0,0). Analiza prostornom metodom daje bliske rezultate bez obzira na poziciju izvora.

Na slikama 5.13 mjenjan je iznos temperature izvora topline, no primjećuje se da razlike nema. Prostorni (x,y) prikazi gibanja su također bili gotovo jednaki. To je iz razloga što se u osnovnom modelu (koji se koristio za analizi svih parametara) nigdje ne gleda iznos gradijenta ili iznos najveće temperature u memoriji, nego samo smjer u kojem je. Iz tog razloga, bez obzira kolike su stvarne temperature i koliki je gradijent, ponašanje ostaje isto. Zato je napravljen cjeloviti model, na temelju svih dosadašnjih analiza.



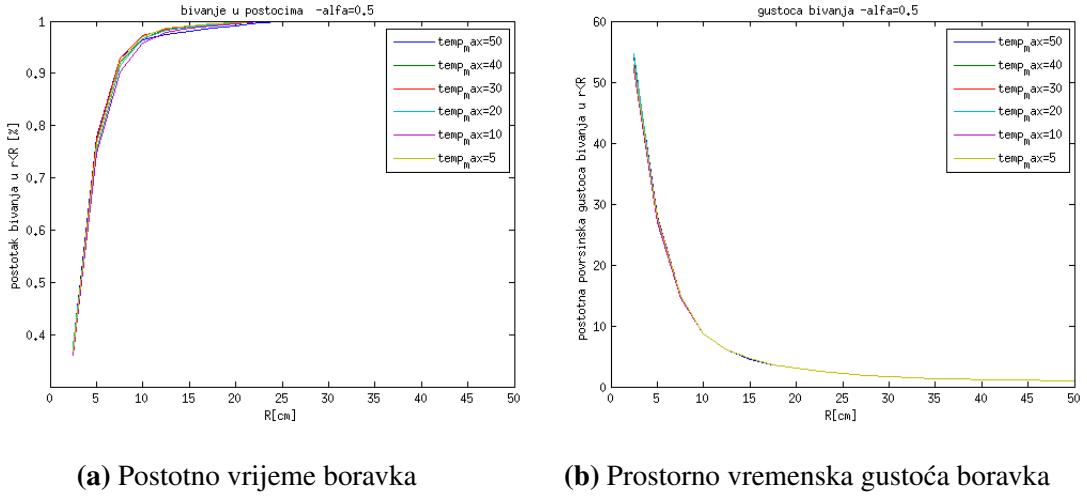
Slika 5.12: Gibanje pčele uz mjenjanje pozicije izvora topline

5.6.2. Cjeloviti model

Do sada u osnovnim modelima udio temperaturnog kuta, α , mogao se slobodno mijenjati te je tokom izvođenja jedne simulacije bio konstantan. U cjelovitom modelu α se mjenja pri svakoj točki izračuna. On se računa prema (3.2) iz razlike najveće temperature koja je do tog trenutka detektirana negdje u prostoru i temperature okoline od 26° C. Kako bi α bio faktor u rasponu $[0,1]$ on je podjeljen sa najvećim mogućim rasponom temperatura u kojima pčela može boraviti. Faktor beta je kasnije služio kao slobodan parametar kojim se model uskladio sa mjeranjima sa videa. Ovaj način računanja α implementiran je u oba modela; sa memorijom i sa računanjem gradijenta. α se dalje jednako koristi za izračun ukupnog kuta iz temperaturnog i slučajnog kuta kao i prije. Na ovaj način model nema fiksni α , niti je to više slobodan parametar.

Analiza za osnovni model nije se mnogo razlikovala među modelima, te je su prikazani samo rezultati sa modelom s memorijom. To je vjerojatno iz razloga što se α zadaje ručno, a on najviše određuje samo gibanje. U cjelovitim modelima α nije zadan ručno nego se određuje iz prethodnog gibanja pčele, te je na taj način zatvoren krug. Gibanje određuje α , i alfa određuje gibanje. Kod cjelovitih modela pokazalo se modeli više nisu toliko slični. Razlika će biti kasnije pokazana.

Ukoliko je iznos temperature izvora veći α će biti veći, a gibanje više usmjerenog nego slučajno. Posljedica je da će pčela prije doći do izvora topline. Da bi se to moglo

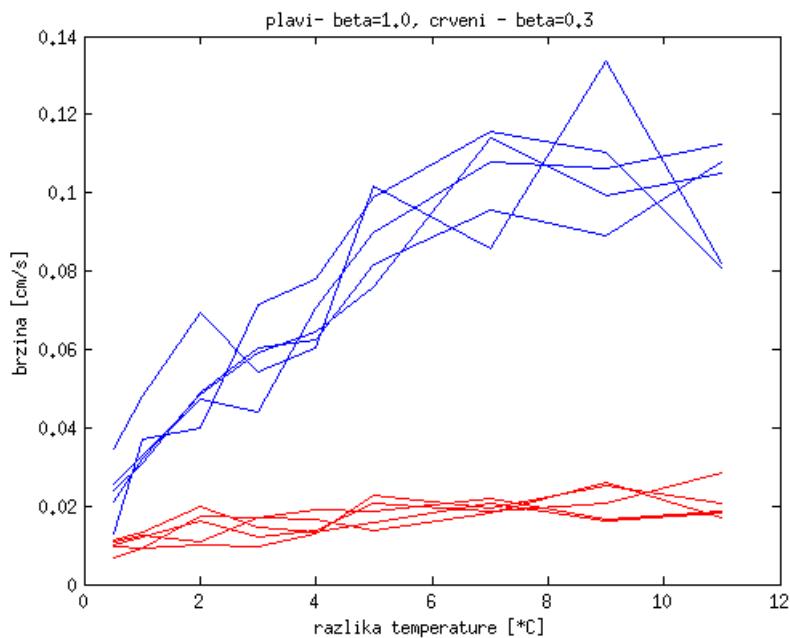


Slika 5.13: Analiza utjecaja temperature izvora topline prostornom metodom na osnovne modelle (prikazano za model s memorijom)

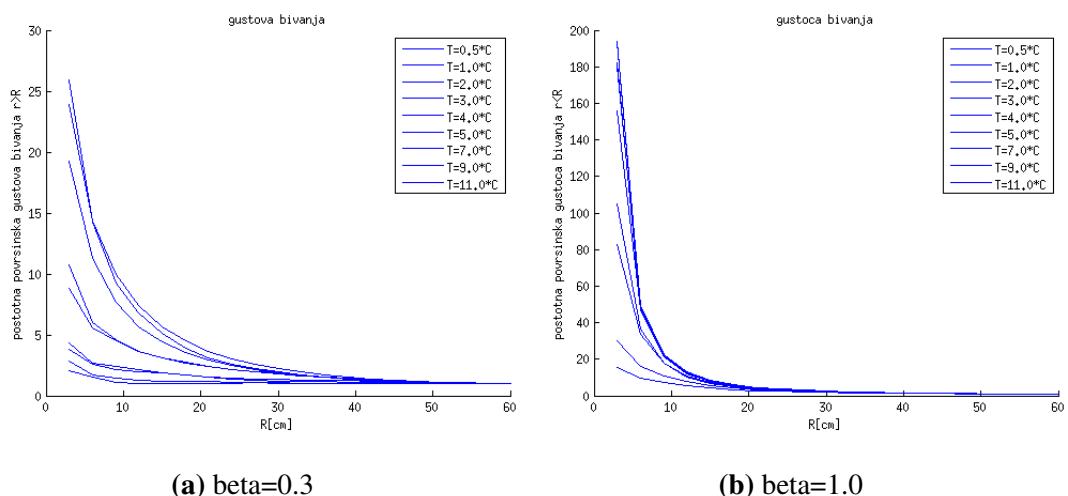
analizirati, osmišljena je vremenska metoda.

Na slici 5.14 je prikazana analiza cijelovitog modela vremenskom metodom. Za dva različita faktora beta prikazane su ovisnosti brzine dolaska do izvora o razlici temperature izvora i okoline. Što je veća temperaturna razlika to je veća toplina. Faktor beta skalira faktor α 3.2, pa što je beta manji i α je manji, pa je usmjerenost pčele prema izvoru manja, čime je i brzina za manji beta manja.

Na slikama 5.15 prikazana je analiza cijelovitog modela prostornom metodom. Za različite temperaturne razlike prikazane su postotne površinske gustoće boravka na pojedinim radiusima oko izvora. Što je veća temperaturna razlika, veća je gustoća boravka na manjim radiusima. Ovdje su prikazana dva grafa: za $\beta=0.3$ i $\beta=1.0$. Za veći beta postotna gustoća boravka je mnogo veća nego za manji radius. Ona nam direktno govori koliko je pčela otišla do izvora topline i ostatak vremena provela tamo, a koliko je zapravo vremena provele tražeći okolo izvora. Za manji beta, manji je i α , pa pčela puno više skreće zbog slučajnog kuta i time je manje usmjerena prema izvoru.



Slika 5.14: Analiza vremenskom metodom za cjeloviti model



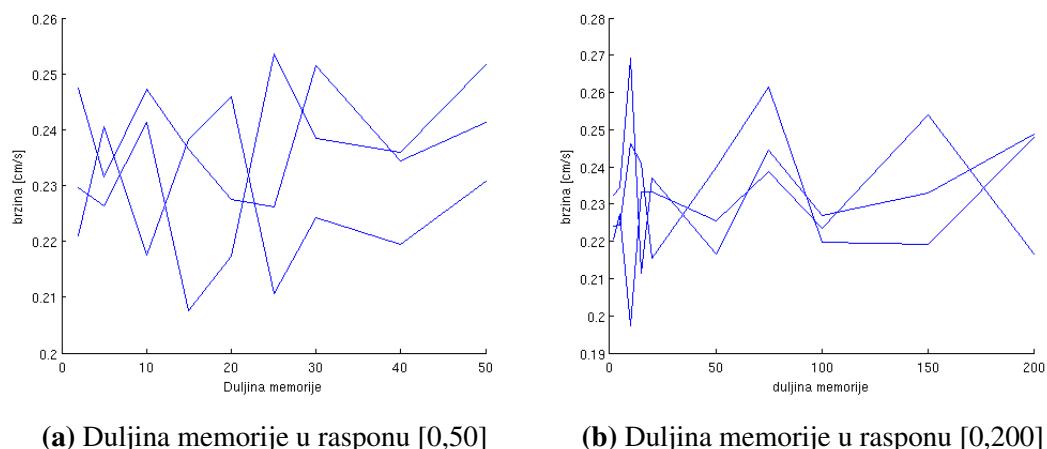
(a) $\beta=0.3$

(b) $\beta=1.0$

Slika 5.15: Analiza prostornom metodom za cjeloviti model

5.7. Ovisnost o duljini memorije pčele

Na slici 5.16 prikazana je ovisnost brzine dolaska o duljini memorije kod modela pčele sa memorijom. Svaka linija dobivena je prosjekom 10 mjerena, gdje su izbačene najmanja i najveća vrijednost. Sve linije su također dobivene koristeći iste parametre. Prikazane su po tri linije na svakom grafu kako bi se pokazalo odstupanje i kvaliteta ponovljivosti mjerjenja. Promatrano je na dva raspona duljine memorije: od 0 do 50 i od 0 do 200. Primjećeno je da je za oba raspona brzina dosta nestabilna, ali gledajući globalno ne mjenja se zamjetno. To je vjerojatno iz tog razloga što iako se u memoriji pohrane više temperature i njihove pozicije, to uglavnom nisu stvarno najviše temperature u prostoru, nego najviše temperature blizu trenutne pozicije. U svakom slučaju utjecaj slučajnog kuta je toliki da je zaključak da duljina memorije nije ograničavajući faktor: može biti i manja, a da prosječna brzina ostane otprilike jednaka.



Slika 5.16: Ovisnost o duljini memorije

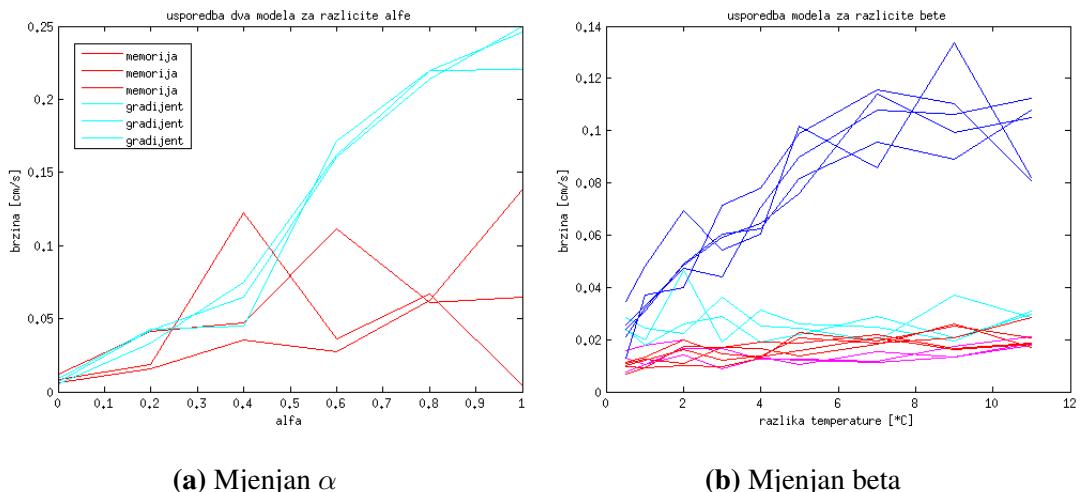
5.8. Usporedba dva cjelovita modela

S obzirom da u osnovne modele nije bio uključen iznos najveće temperature već samo smjer najveće temperature ili gradijenta, rezultati usporedbe vremenskom metodom prilikom mijenjanja parametra α bili su jednakci. U cjelovitim modelima utjecaj najveće temperature implementiran je tako što on određuje iznos α . Na taj način ukoliko je veća temperaturna razlika između izvora i okoline, α će biti veći, a time će i brzina biti veća. Izračun α prikazan je formulom (3.2).

Dva modela analizirani su za dvije različite α , te dvije različite β . To je prikazano na slikama 5.17. Na (a) slici prikazana su po tri mjerena uz iste parametre za oba

modela. Primjećuje se da su odstupanja za model s memorijom dosta veća od modela s gradijentom. Također bitno je primjetiti da za veće α brzina kod modela s gradijentom je mnogo veća nego kod modela s memorijom. To je stoga što su u memoriji zapisane samo lokacije na kojima smo već bili, i te temperature ne moraju biti globalno najveće temperature. Da bi pčela vodeći se po tom modelu stvarno našla izvor topline ona mora zbog slučanog kuta ili nemogućnosti okretanja za bilo koji kut doći na mjesto na kojem nije bila kako bi izmjerila temperaturu tamo. Da je gibanje bez slučajnog kuta, i sa mogućim svim kutevima zakreta, pčela bi vjerojatno ostala kružiti oko neke točke gdje misli da je najveća temperatura, iako to zapravo nije. Kod modela sa gradijentom, pčela može odrediti smjer gdje se stvarno nalazi najveća temperatura, i iz tog razloga pčela stvarno ide prema izvoru topline.

Ispitan je utjecaj i faktora β (b). Kad je β mali (crvene i roze linije), i α su male, pa su razlike između modela jako male. Za veće β (tamno i svjetlo plave linije) primjećuje se da je model s gradijentom (crvene i plave linije) mnogo brži od modela sa memorijom (svjetlo plave i roza linije), uz objašnjnje kao što ranije navedeno.



(a) Mjenjan α

(b) Mjenjan beta

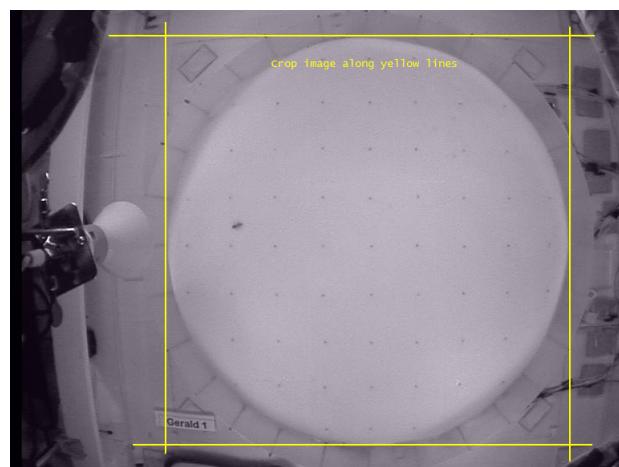
Slika 5.17: Usporedba dva modela vremenskom metodom

6. Analiza stvarnih gibanja pčele

Podaci o stvarnom gibanju pčela dobiveni su snimanjem pčela u okrugloj areni radiusa 30 cm. U arenu je stavljena jedna pčela te je snimano njeno gibanje. S videa su dobivene (x,y) koordinate pčele u vremenu. Na temelju tih koordinata radila se obrada. S obzirom da su pčele postavljene u arenu u kojoj postoji izvor topline, odnosno gradijent topline, a pčele vole toplinu, one su više vremena provele blizu izvora topline. Iz toga razloga korištena je prostorna metoda za procjenu pčeline tendencije boravka blizu izvora topline.

Također, u različitim videima početna pozicija pčele se mijenjala, a time i udaljenost pčele od izvora topline. Pčele su ovisno o početnoj udaljenosti i temperaturi izvora za različito mnogo vremena došle do područja oko izvora. Kako bi se utvrdila ovisnost brzine dolaska do izvora u ovisnosti o gradijentu temperature, korištena je vremenska metoda analize gibanja pčele.

Na videima je izvor topline postavljen na koordinate (-30,0), ako je centar (0,0) u središtu arene, što se može primjetiti na slikama 6.3. Primjer slike sa videa, te kako ju je bilo potrebno izrezati kako bi se dobile prave koordinate pčele prikazan je na slici 6.1.



Slika 6.1: Prikaz okvira videa spremnog za izrezivanje i obradu

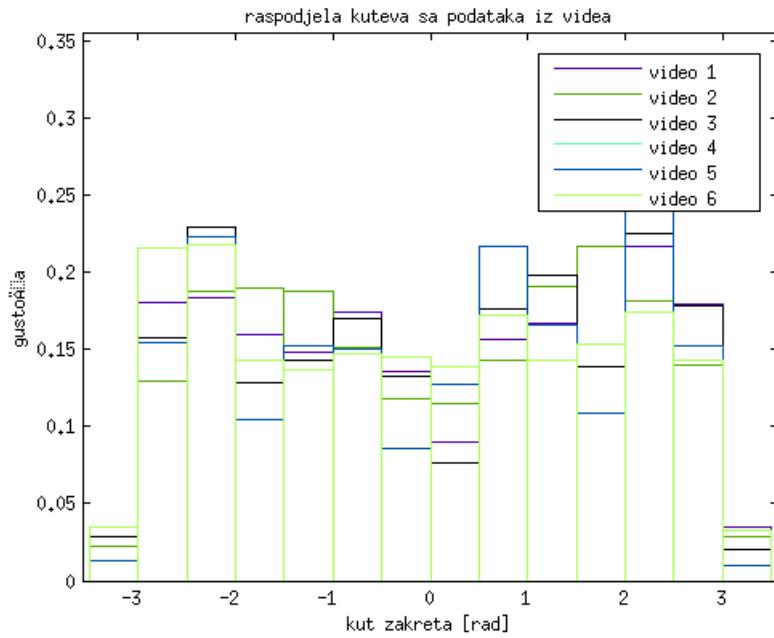
Na slici 6.2 prikazana je razdioba kuta okretanja pčele za više videa, kako bi se s većom sigurnošću potvrdila tendencija. Primjećuje se da postoji rasipanje, te da ne liči na normalnu razdiobu. Iz tog razloga prepostavljena je uniformna razdioba kuta.

6.1. Analiza videa prostornom metodom

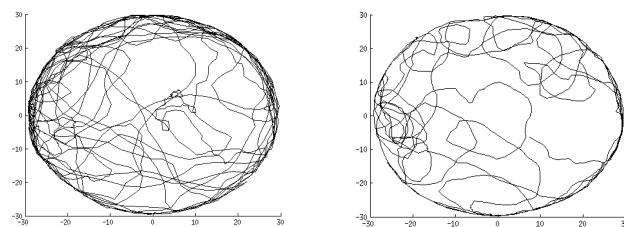
Na slikama 6.3 prikazano je gibanje pčele u prostoru. Prikazana su četri videa sa različitim temperaturama. Ispod slika napisani su iznosi najmanje i najveće temperature u areni. Na (a) i (b) slici razlika temperature je jednaka, ali izgledom gibanja ne izgledaju kao da su bilo u istim uvjetima. Kasnije će se na analiziranim podacima također pokazati da postoje odstupanja. Razlozi odstupanja mogu biti mnogi; možda je bitan iznos niže i više temperature, a ne samo razlika, možda se i svaka pčela razlikuje, možda je pčela bila starija u jednom od videa, a možda se samo desila greška u mjerenu temperature. Nakon obrade učestalost boravka pčele unutra pojedinih radiusa dana je na slikama 6.4. Detaljnim promatranjem temperatura na legendi i krivulja, može se zamjetiti da neke krivulje odstupaju od onog što bi se činilo smisleno. Da bi se takva odstupanja maknula bilo bi potrebno imati više videa sa istim temperaturama te napraviti prosjek. Na slici 6.5 izdvojeni su bolji videi, kako bi se jasnije primjetio trend gustoće boravka za različite temperaturne razlike.

6.2. Analiza videa vremenskom metodom

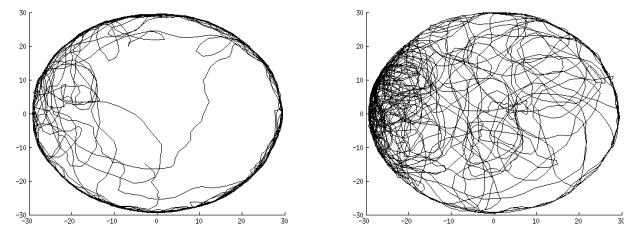
Videi su analizirani i vremenskom metodom kako bi se istražila brzina kojom pčela dođe do izvora topline. Iznosi su prikazani na slici 6.6. Na slici su prikazana dva načina određivanja; samo na temelju prve koordinate i brzine određene pomoću nje, prosjek brzina za prvih 10 početnih koordinata. Prosjeci imaju malo manja odstupanja i jasniju tendenciju, no u oba slučaja se čini kao da su pogreške i odstupanja pojedinih mjerjenja relativno velika. Usprkos odstupanjima vidljivo je da je prosječna brzina za veći gradijent veća od brzine za manji gradijent.



Slika 6.2: Razdioba kuta zakreta pčele

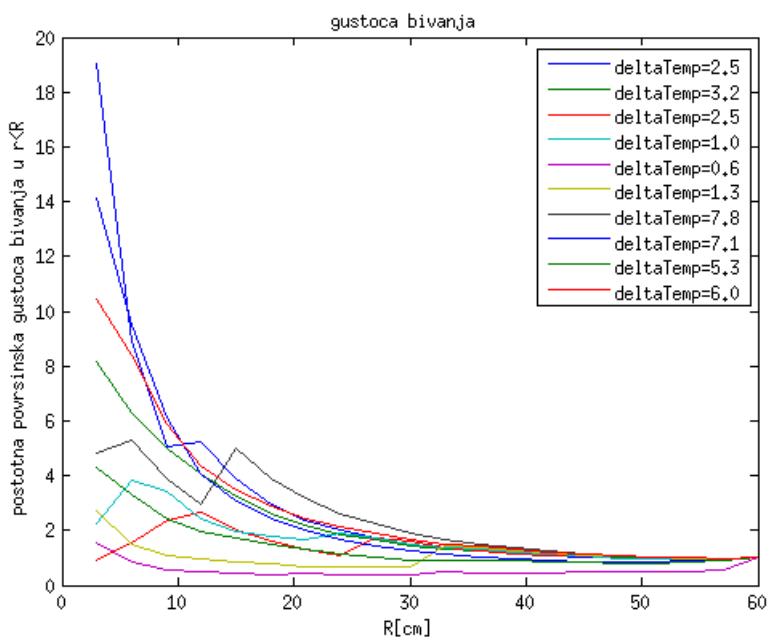


(a) Raspon temp: 35.3-38.5 **(b)** Raspon temp: 34.6-37.1

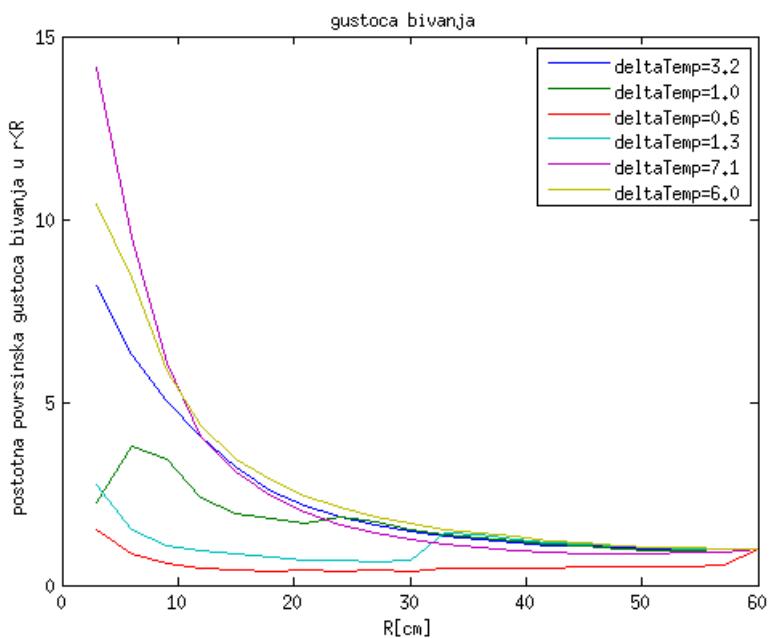


(c) Raspon temp: 30.7-36.0 **(d)** Raspon temp: 30.3-36.3

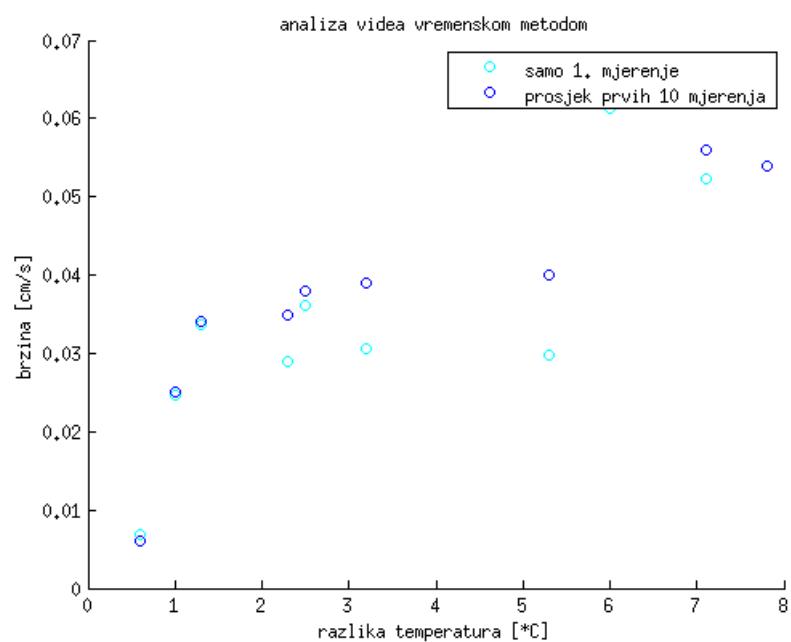
Slika 6.3: Gibanje pčele u prostoru dobiveno sa videa



Slika 6.4: Analiza podataka sa videa prostornom metodom - svi videi



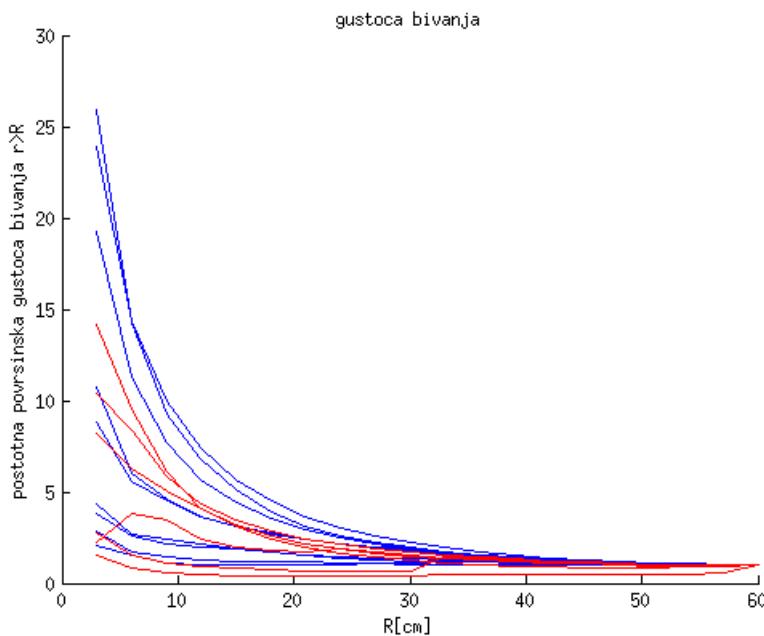
Slika 6.5: Analiza podataka sa videa prostornom metodom - bolji videi



Slika 6.6: Brzina pronašlaska izvora topline o gradijentu temperature

7. Usporedba modela sa stvarnim gibanjima pčele

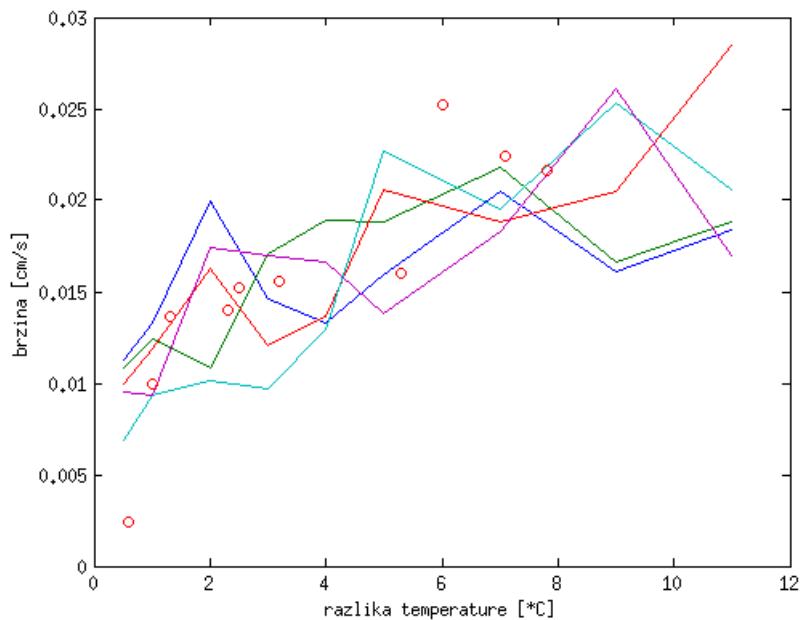
Konačni cilj bio je usporediti podatke sa modela sa podacima sa videa. Metoda usporedbe također se temeljila na prostornoj i vremenskoj metodi. Na slici 7.1 prikazana je usporedba prostornom metodom. Slobodan parametar beta iz (5.1) mijenjan je dok vrijednosti postotnog boravka nisu poprimile vrijednosti kao i na analizi videa. Parametar beta za to je bio 0.3. Crvenom bojom prikazana su podaci sa videa, na kojim se promjena temperatura kretala od najviše 7.8, preko 7.1, 6.0, 5.3, 3.2, 2.5, 1.3, 1.0 do 0.6° C. Za najveću temperaturu gustoća je najveća. Plavom bojom prikazani su podaci iz modela gdje su se rasponi temperatura kretali od 11.0, preko 9.0, 7.0, 5.0, 4.0, 3.0, 2.0, 1.0 do 0.5.



Slika 7.1: Usporedba modela i mjerjenja sa videa prostornom metodom

Na slici 7.2 prikazana je analiza vremenkom metodom. Slobodan parametar beta

sad je ostao na 0.3 postavljen, kako bi bio u skladu sa prostornom metodom. Na isti graf stavljene su nekoliko istih ovisnosti brzine o rasponu temperatura za iste parametre modela kako bi se primjetila odstupanja unutar samog modela. Na taj graf postavljeni su i podaci sa videa. Podaci su se morali podjeliti sa 2.5 kako bi se dobile otprilike jednake vrijednosti. Ovo množenje može biti zbog mnogih preračunavanja unutar modela, ali i zbog frekvencije računanja koraka u modelu. Poklapanje nije savršeno, ali niti unutar modela poklapanje za iste parametre nije potpuno, a ni mjerena nisu potpuno bez odstupanja što se moglo zaključiti iz ranijih grafova. Da bi se dobilo poklapanje sa većom sigurnošću potrebno je imati više mjerena za jednake raspone temperature, iz njih izračunati prosjek, te ponovno pronaći najbolje slobodne parametre beta i faktor s kojim je potrebno pomnožiti brzine sa videa da bi se dobilo najbolje poklapanje.



Slika 7.2: Usporedba modela i mjerena sa videa vremenskom metodom

8. Implementacija u simulatoru biohibridnih sustava

U okviru ASSISIbf projekta razvija se pojednostavljeni simulator biohibridnih sustava temeljen na Enki simulatoru otvorenog koda. Cilj simulatora je omogućiti kvalitativno modeliranje pčela u polju senzorsko-aktuatorskih uređaja (Casu).

U simulatoru su implementirani moduli pčele, Casu jedinice i fizičkog objekta. Pčela je modelirana kao vozilo s diferencijalnim pogonom na dva kotača. Zadavanjem brzina pojedinog kotača može se postići rotacija i translacija. Veza translacijske brzine v i kutne brzine w sa brzinama pojedinih kotača su 8.1 i 8.2.

$$v = \frac{v_d + v_l}{2} \quad (8.1)$$

$$w = \frac{v_d - v_l}{2} \quad (8.2)$$

Pčela je objekt koji ima svoje ime preko kojeg mu se pristupa. Trenutno ima mogućnosti: vraćanja trenutne koordinate na kojoj se nalazi u formatu (x,y,fi), gdje je fi orijentacija, čitanja intenziteta svjetla u (r,g,b) formatu, čitanje temperature sa senzora, određivanje amplitude i frekvencije vibracija te pokretanje zadavanjem brzina lijevom i desnom kotaču.

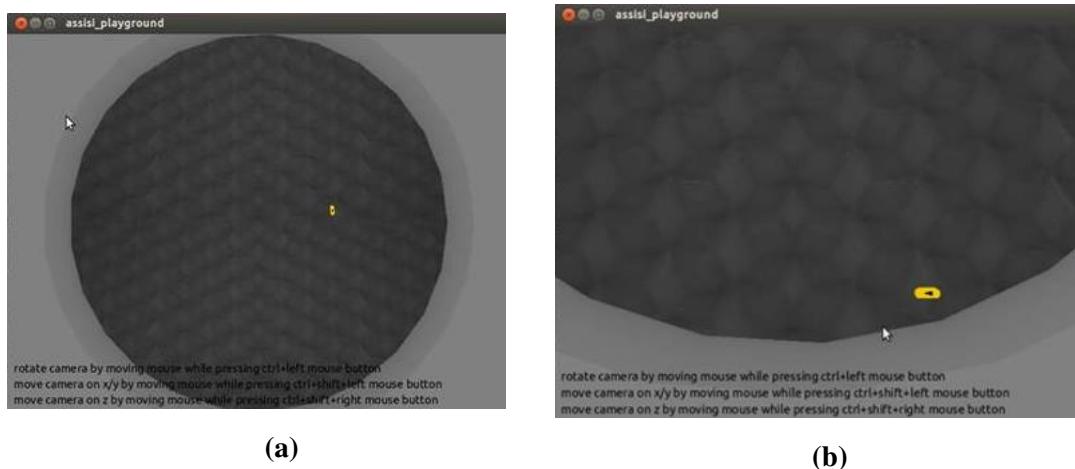
Casu jedinica je objekt koji ima ime, te log tj. ime '.csv' datoteke u koju će bilježiti sve podatke koje pročita ili pošalje. On može slati dijagnostičko svjetlo, odrediti udaljenost pomoću IR senzora udaljenosti, odrediti temperaturu, te amplitudu i frekvenciju vibracija. Osim što ima navedene senzore, može stvoriti električno ili magnetsko polje određene frekvencije, može služiti kao izvor topline, svjetlosti i vibracija. Također omogućeno je da dve Casu jedinice komuniciraju šaljući i čitajući jednostavne poruke.

Zbog svih ovih mogućnosti simulator će služiti za ispitivanja i testiranje cijelog sustava pčela i robota (Casu jedinica) prije nego se implementiraju na pravim Casu jedinicama i pčelama.

Trenutno se za simulaciju modela sa memorijom i modela sa gradijentom koriste samo moduli pčele sa mogućnostima čitanja trenutne pozicije.

Fizički objekt može služiti kao prepreka ili kao labirint za pčele.

Na slici 8.1 prikazan je izgled arene te pčele u simulatoru.



(a)

(b)

Slika 8.1: Prikaz arene unutar simulatora

Unutar simulatora implementirana su oba navedena modela: sa memorijom i sa detektiranjem gradijenta, te se gibanje pčele može pratiti unutar arene simulatora. Moguće je istovremeno crtati na grafu gibanje pčele, te spremati koordinate kroz vrijeđe u '.csv' file pa se kasnije ta kretanja mogu nacrtati ili analizirati. Svi parametri simulacije podešavaju se u konfiguracijskoj datoteci 'parametri.txt'.

9. Zaključak

Kroz ovaj rad osmišljena su dva modela koja opisuju gibanje pčela u polju temperaturnog gradijenta. Jedan od modela temeljio se na pretpostavci da pčela ima cikličku memoriju u kojoj pamti prethodne (x,y) pozicije i pripadnu temperaturu. Pri svakom koraku pretražujući memoriju pronalazi poziciju u kojoj je bila najveća temperatura te se želi usmjeriti u tom smjeru. Drugi model je bio napravljen s pretpostavkom da pčela može osjetiti gradijent temperature te odrediti njegov smjer, npr. pomicanjem ticala na kojima ima senzore za toplinu. U oba modela implementirano je pčelino gibanje koje je određeno kutem koji je posljedica temperaturnog polja ("temperaturni kut") i "slučajnim kutem". "slučajni kut postreban je kako bi definirao gibanja pčele kad ne postoji temperaturni gradijent.

Osmisljene su dvije metode za analizu dobivenih gibanja pčele; prostorna i vremenska metoda. Metode su bile potrebne kako bi se proučio utjecaj pojedinih parametara na pojedine modele, te kako bi se kasnije modeli mogli usporediti i uskladiti sa podacima prikupljenim sa videa.

Oba modela analizirana su krenuvši od pojednostavljenih modela. Analizirani su krenuvši od utjecaja duljine simulacije, preko rasipanja karakteristike za iste parametre simulacije, ovisnosti o udjelu temperaturnog kuta, dozvoljenim kutevima zakreta, temperaturi izvora topline, te duljini memorije za model s memorijom. Ustanovljeno je da su osnovni modeli veoma slični analizirajući ih prostornom metodom, te su stoga većina mjerena napravljena samo za metodu pčele s memorijom. Od svih parametara najviše utječe udio temperaturnog kuta α , te maksimalni dopušteni zakret pčele. Parametar α je kasnije unutar cjelovitog modela prestao biti slobodan parametar te je definiran iz najveće pronađene temperature u areni te sobodnog parametra β . Za maksimalni dopušteni kut zakreta pčele uzet je kut od 35° prema podacima biologa o stvarnom zakretu pčela.

Temperatura izvora nije utjecala na osnovne modele, jer se u njima uzimao u obzir samo smjer najvećeg gradijenta i najveće temperature pronađene u memoriji, ali ne i iznos. Kako bi se i to uzelo u obzir s obzirom da se sa videa primjećivalo da brzina

dolaska do izvora ovisi o temperaturi izvora topline odnosno o razlici temperatura u areni, u cjelovitom modelu, parametar α se određivao u svakom koraku pomoću najveće do tada pronađene temperature u prostoru. Na taj način ta veće tempetarure α je bio veći, a time je i usmjerenošć pčele bila veća. Posljedica toga bila je da je i brzina pčele veća za veće razlike temperature u areni, što se poklapalo s mjerjenjima. Izraza za račun α sadrži slobodan parametar β kako bi se brzina pronalaženja izvora topline u ovisnosti o temperaturi u modelima iznosila uskladila s brzinama zabilježenim na videima.

Usporedbom cjelovitih modela za pčelu s memorijom i pčelu s osjetom gradijenta ustanovljeno je da brzina pčele s gradijentom veća, odnosno da pčela s gradijentom može brže pronaći izvor topline. To je objasnjivo time što smjer najvećeg gradijenta uvijek pokazuje u smjeru izvora topline, dok najveća temperatura u memoriji neće uvijek usmjeriti pčelu prema izvoru topline nego prema mjestu gdje je već bila koje je bilo najtoplijie. Iz toga razloga metoda gradijent je i preciznija i brža.

Konačni cjeloviti modeli uspoređeni su s podacima s videa. Kako bi se iznosi za vremensku i prostornu metodu videa i modela poklapali za slobodan parametar β je odabrana vrijednost 0.3, a brzine s videa se moraju podjeliti sa 2.5 kako bi odgovarale brzinama sa modela. Množenje ili djeljenje svih iznosa brzine je iz razloga što brzina izračunata iz modela ovisi o unaprijed postavljenim parametrima $V_{nominal}$ i dt koji služe za definiranje maksimalne brzine pčele, te vremena između dvije točke simulacije. Podešavanjem tih parametara mogli bi se dobiti iznosi brzina koje nebi trebalo množiti sa nikakvim faktorom.

Na kraju su modeli implementirani u Enki simulatoru biohibridnih sustava kako bi se moglo u realnom vremenu pratiti gibanje pčele. Naravno ti modeli u simulatoru moraju još biti dorađeni, kako dodavanjem senzora tako i boljim i bržim algoritmom. Ipak, dva dovoljno jednostavna modela su osmišljena te pokazuju relativno dobro poklapanje s podacima sa videa. Također, pokazano je kako se ovi modeli mogu implementirati na pčelama u simulatoru.

U dalnjem radu, trebali bi se na podacima s više videa potvrditi ovi modeli. Trebalo bi za jednake razlike temperature u areni imate više videa, te napraviti prosjek, kako ne bi bilo točaka koje jako odskaču. Također trebalo bi izmjeriti temperature na raznim udaljenostima od izvora te odrediti faktor γ tako da model temperature u prostoru najviše odgovara izmjerjenima. Može se i promjeniti model temperature u prostoru, ako je potrebno. Nakon toga treba se odrediti faktor β kojim će se ovisnost brzine pronalaženja izvora o temperaturi uskladiti na modelima i videima.

10. Reference

- [1] O.Kornienko, R.Thenius, S.Kernbach, T.Schmickl: Re-Embodiment of Honeybee Aggregation Behavior in an Artificial Micro-Robotic System
- [2] M.Varga, S.Bogdan, M.Dragojević, D.Miklić: Collective search and decision-making for target localization
- [3] M.Szopek, T.Schmickl, R.Thenius, G.Radspieler, K.Crailsheim: Dynamics of Collective Decision Making of Honeybees in Complex Temperature Fields
- [4] T.Kimura, M.Ohashi, K.Crailsheim, T.Schmickl, R.Okada, G.Radspieler, H.Ikeno: Development of a New Method to Track Multiple Honey Bees with Complex Behaviors on a Flat Laboratory Arena
- [5] S.Kernbach, D.Habe, O.Kernbach, R.Thenius, G.Radspieler, T.Kimura, T.Schmickl: Adaptive collective decision-making in limited robot swarms without communication
- [6] A.Edwards, R. Phillips, N. Watkins, M Freeman, E. Murphy, V. Afanasyev, S. Buldyrev, M. G. E. da Luz, E. Raposo, H.Stanley, G. Viswanathan: Revisiting Lévy flight search patterns of wandering albatrosses, bumblebees and deer

Modeliranje gibanja pčele u simulatoru biohibridnih sustava

Sažetak

Cilj rada je osmišljavanje i analiza modela gibanja pčele u polju senzorsko-aktuatorskih uređaja (CASU) kako bi se on kasnije iskoristio u sklopu EU projekta ASSISIbf („Animal and robot Societies Self-organize and Integrate by Social Interaction (bees and fish)“). ASSISIbf je projekt čiji je cilj stvoriti robote koji su sposobni uklopiti se u životinjske zajednice (riba i pčela) te međusobnom interakcijom omogućiti utjecaj čovjeka na njih. Pčela voli toplinu, svjetlost i vibracije. U radu je analizirano gibanje pčele u polju gdje postoji gradijent temperature. Osmišljena su i analizirana dva modela: model u kojem je pčela sposobna osjetiti gradijent temperature (npr. pomicanjem ticala) i model u kojem pčela raspoznaje temperaturu te ima memoriju kojom pamti temperature pripadajuće prethodnim pozicijama. Podaci o stvarnom gibanju pčela prikupljeni su iz video materijala snimljenih na eksperimentalnom postavu. Gibanje pčele statistički je obrađeno te uspoređeno s navedenim modelima. U Enki simulatoru implementiran je upravljački proces za navedene modele kako bi se vizualno predstavilo gibanje pčele, te kasnije simulirao cijeli sustav pčela i CASU jedinica.

Ključne riječi: model gibanja pčela, ASSISIbf, biohibridni sustavi, Enki simulator, CASU jedinice, utjecaj temperature, prirodnom inspirirani

Model of bees motion implemented in the simulator of biohybrid systems

Abstract

The goal of the project is to develop and analyze the model of bee movement in a field of CASUs (Combined actuator sensor units), which would be later used as a part of EU project ASSISIbf („Animal and robot Societies Self-organize and Integrate by Social Interaction (bees and fish)”). ASSISIbf is project whose goal is to create robots that are able to develop communication channels to animal societies (bees and fish) on its own, which would later be used to lay new foundations on the way how humans can interfere with animal societies in order to manage the environment. Bees like heat, light and vibrations. In this project bee's reaction and movement in a field with a temperature gradient was researched. Two models were proposed: one in which is assumed that the bee can feel and detect temperature gradient (possibly with tentacles) and another one in which is assumed that bee can detect temperature and also has a memory to log position and belonging temperature. Data about bee's real movement were acquired from video materials made on experimental setup. Moves were analyzed and compared with proposed models. In Enki simulator a control system for bees was implemented to visualize movement but also to enable future simulation of the whole system of bees and CASU units.

Keywords: model of bee movement, ASSISIbf, biohybrid systems, Enki simulator, CASU units, temperature influence, nature inspired

11. Dodatci

11.1. Generiranje gibanja pčele sa osjetom gradijenta temperature

```
global temp_x_centar temp_y_centar alfa dt
global duljina_simulacije temp_max R

% Parametri
beta=1.0;
%[model]
rucno=1;
dt=2;
%[bee]
x0=20;
y0=0;
fi_max= pi/5.14;
sigma=pi;
alfa=0.0;      %0=random %1=temperaturno
v_nominal= 0.5;
d=0.4;
v_turn= 0.3;
%len_podataka= 100;
%[space]
R=30;
temp_x_centar=-20;
temp_y_centar=0;
temp_max=36;
%[casu]
```

```

casu_x=5;
casu_y=0;
duljina_simulacije=5000;

x=[];y=[];uk_dfi=[];mi=[];vi=[];fi=[];kutxy=[];rand_kut=[];

% Pocetne vrijednosti
mi(1)=0;
x(1)=x0;y(1)=y0;
fi(1)=0;
brojac=1;
fi_temp(1)=0;6
uk_dfi(1)=0;
suma_kut=0;
naj_temp=0;
h=0.1e-4;
max_grad=0;

while(brojac<duljina_simulacije)
    % Racunanje najvece pronadene temperature u areni
    temp_tu=temp(x(brojac),y(brojac));
    if temp_tu>naj_temp
        naj_temp=temp_tu;
    end

    % Racunanje gradijenta
    dx=(temp(x(brojac)+h/2,y(brojac))-
        temp(x(brojac)-h/2,y(brojac)))/h;
    dy=(temp(x(brojac),y(brojac)+h/2)-
        temp(x(brojac),y(brojac)-h/2))/h;
    brojac=brojac+1;
    grad(brojac)=sqrt(dx^2+dy^2);

    % Odredivanje temperaturnog kuta
    fi_temp(brojac)=atan2(dy,dx);

```

```

% Racunanje alfa
if rucno~=1
    alfa=beta*sqrt((naj_temp -26)/(40 -26));
end

% Odredivanje da li se bolje okrenuti u desno ili u lijevo
suma_kut=suma_kut+uk_dfi(brojac -1);
pom_kut=fi_temp(brojac)-suma_kut;
if pom_kut>pi
    pom_kut=pom_kut-2*pi ;
else if pom_kut<-pi
    pom_kut=pom_kut+2*pi ;
end
end
fi_temp(brojac)=pom_kut;

% Odredivanje slucajnog kuta zakreta
rand_kut(brojac)=random('Normal',0,sigma);
%rand_kut(brojac)=random('Uniform',-pi,pi);

% Odredivanje ukupnog kuta zakreta
uk_dfi(brojac)= alfa*fi_temp(brojac)+(1-alfa)*(rand_kut(brojac));

if abs(fi_max)<abs(uk_dfi(brojac))
    if uk_dfi(brojac)>0
        uk_dfi(brojac)=+fi_max ;
    else
        uk_dfi(brojac)=-fi_max ;
    end
end

% Da li se kreće ili stoji
mi(brojac)=random('Uniform',0,1.0);
if mi(brojac)>0.5
    mi(brojac)=1;
else

```

```

        mi( brojac )=0;
    end
    vi( brojac )=v_nominal*mi( brojac );

% Racunanje koordinata
if brojac>1
    fi( brojac )=fi( brojac -1)+uk_dfi( brojac );
    x( brojac )=x( brojac -1)+cos( fi( brojac ))* vi( brojac )* dt ;
    y( brojac )=y( brojac -1)+sin( fi( brojac ))* vi( brojac )* dt ;
else
    x( 1)=0;y( 1)=0; fi( 1)=0;
end

% Ukoliko je dosao do ruba arene
kutxy( brojac )=atan2( y( brojac ),x( brojac ));
if (x( brojac )^2+y( brojac )^2)>R^2
    x( brojac )=R*cos( kutxy( brojac ));
    y( brojac )=R*sin( kutxy( brojac ));
end

end

```

11.2. Generiranje gibanja pčele sa osjetom memorijom

```

global len_podataka podaci temp_x_centar temp_y_centar
global alfa dt duljina_simulacije temp_max R

```

```

% Parametri
beta=0.3;
%[model]
rucno=1;
dt=2;
%[bee]
x0=10;
y0=0;
fi_max= pi/5.14;

```

```

sigma=pi/1;
alfa=0.0;      %0=random %1=temperaturno
v_nominal= 0.5;
d=0.4;
v_turn= 0.3;
%len_podataka= 100;
%[space]
R=30;
temp_x_centar=-20;
temp_y_centar=0;
temp_max=30;
%[casu]
casu_x=5;
casu_y=0;
duljina_simulacije=5000;

x=[];y=[];uk_dfi=[];mi=[];vi=[];fi=[];
kutxy=[];rand_kut=[];podaci=[];

% Pocetne vrijednosti
mi(1)=0;
x(1)=x0;y(1)=y0;
fi(1)=0;
brojac=1;
fi_temp(1)=0;
uk_dfi(1)=0;
suma_kut=0;
naj_temp=0;
podaci=zeros(len_podataka ,4);

while(brojac<duljina_simulacije)
    % Racunanje najvece pronadene temperature u arenii
    svjetlo=temp(x(brojac), y(brojac));
    if svjetlo>naj_temp
        naj_temp=svjetlo ;
    end

```

```

% Ubacivanje u memoriju
ubaci_u_memoriju(x(brojac),y(brojac),fi(brojac), svjetlo);

% Racunanje temperaturno i slu ajnog kuta
fi_temp(brojac+1)=kut_max_temp(x(brojac),
y(brojac), fi(brojac), svjetlo);
brojac=brojac+1;
rand_kut(brojac)=random( 'Normal' ,0 ,sigma );
%rand_kut(brojac)=random( 'Uniform' ,-pi ,pi );

% Racunanje alfa
if rucno~=1
    alfa=beta*sqrt(( naj_temp -26)/(40 -26));
end

% Ukupni kut zakreta
uk_dfi(brojac)= alfa*fi_temp(brojac)+(1-alfa)*(rand_kut(brojac));

if abs(fi_max)<abs(uk_dfi(brojac))
    if uk_dfi(brojac)>0
        uk_dfi(brojac)=+fi_max ;
    else
        uk_dfi(brojac)=-fi_max ;
    end
end

% Stoji ili se kreće
mi(brojac)=random( 'Uniform' ,0 ,1.0);
if mi(brojac)>0.5
    mi(brojac)=1;
else
    mi(brojac)=0;
end
vi(brojac)=v_nominal*mi(brojac);

```

```

% Racunanje koordinata
if brojac>1
    fi(brojac)=fi(brojac-1)+uk_dfi(brojac);
    x(brojac)=x(brojac-1)+cos(fi(brojac))*vi(brojac)*dt;
    y(brojac)=y(brojac-1)+sin(fi(brojac))*vi(brojac)*dt;
else
    x(1)=0; y(1)=0; fi(1)=0;
end

% Ukoliko je dosao do ruba arene
kutxy(brojac)=atan2(y(brojac),x(brojac));
if (x(brojac)^2+y(brojac)^2)>R^2
    x(brojac)=R*cos(kutxy(brojac));
    y(brojac)=R*sin(kutxy(brojac));
end

end

```

11.3. Pomoćne funkcije za računanje gibanja

11.3.1. Izračun temperature

```

function [z]=temp(x,y)
global temp_x_center temp_y_center temp_max

z=(temp_max*(exp(-0.003*abs((x-temp_x_center)^2+(y-temp_y_center)^2)
-exp(-0.003*60^2))+26*(1-exp(-0.003*abs((x-temp_x_center)^2+
(y-temp_y_center)^2))))/(1-exp(-0.003*60^2));
end

```

11.3.2. Ubacivanje u memoriju

```

function []=ubaci_u_memoriju(x,y,fi,temp)
global podaci len_podataka
for i=1:len_podataka-1
    podaci(i,1)=podaci(i+1,1);
    podaci(i,2)=podaci(i+1,2);

```

```

        podaci(i,3)=podaci(i+1,3);
        podaci(i,4)=podaci(i+1,4);
    end
    podaci(len_podataka,1)=x;
    podaci(len_podataka,2)=y;
    podaci(len_podataka,3)=fi ;
    podaci(len_podataka,4)=temp ;
end

```

11.3.3. Pronalazak najveće temperature u memoriji

```

function [ fi_temp_okreta ]=kut_max_temp(x,y,fi,temp)
global podaci len_podataka tmax
tmax=temp; xmax=x; ymax=y; fimax=fi ;
for i=1:len_podataka
    if podaci(i,4)>tmax
        tmax=podaci(i,4);
        xmax=podaci(i,1);
        ymax=podaci(i,2);
        fimax=podaci(i,3);
    end
end
fi_temp=atan2(ymax-y, xmax-x);
fi_temp_okreta=fi_temp-fi ;
if fi_temp_okreta>pi
    fi_temp_okreta=fi_temp_okreta-2*pi ;
else if fi_temp_okreta<-pi
    fi_temp_okreta=fi_temp_okreta+2*pi ;
end
end
end

```

11.4. Vremenska i prostorna metoda analize

```

global temp_x_centar temp_y_centar
global dt duljina_simulacije
global brzinaV

```

```

syms dx r

% Paramteri koji se mogu menjati
br_kruznica=20;
faktor_dolaska=10;

% Ostali parametri
T=duljina_simulacije; %ako ne dode do izvora da v bude max
xc=temp_x_centar;
yc=temp_y_centar;
Rarene=30; % kod analize videa i matlabom generiranih
kretanja =30,a kod analize iz assisi simulatora=40

% Racunanje polumjera kruznica
Rk=linspace((Rarene-xc)/br_kruznica,(Rarene-xc),br_kruznica);

% Postavljanje brojaca za sve polumjere na 0
for i=1:br_kruznica
    num_R(i)=0;
end

% Proracun povrsina područja unutar radiusa Rk
for i=1:br_kruznica
    if xc>0
        xc=-xc;
    end
    % Ako je povrsina kruznica
    if xc-(-Rarene)<Rk(i)
        xg=(Rarene^2-Rk(i)^2+xc^2)/(2*xc);
        p=2*int(sqrt(Rarene^2-dx^2),-Rarene,xg)+
            2*int(sqrt(Rk(i)^2-(dx-xc)^2),xg,xc+Rk(i));
        % Ako povrsina nije kruznica nego je malo odrezzana
        else if xc-(-Rarene)>=Rk(i)
            p=Rk(i)^2*pi;
        end
    end
end

```

```

end
R_povr(i)=vpa(p);

end

[mx,nx]=size(x);
for i = 2:nx
    r=sqrt((x(i)-xc)^2+(y(i)-yc)^2);

    % Zbrajanje koliko puta je unutar kojeg radiusa Rk bila
    for j=1:br_kruznica
        if r<=Rk(j)
            num_R(j)=num_R(j)+1;
        end
    end
    % Ako je unutar prva dva radiusa ve
    % zadan broj puta zabiljezi to vrijeme
    if num_R(2)==faktor_dolaska
        T=i;
    end
end

% Ispis i izracun trenutka T i brzineV
T
brzinaV=abs(x(1)-xc)/(T*dt)

% Racunanje postotnog vremena bivanja unutar
% pojedinih kruznica radiusa Rk te gustoce bivanja
for i=1:br_kruznica
    posto_R(i)=num_R(i)/num_R(br_kruznica);
    rel_num_R(i)=posto_R(i)/(R_povr(i)/R_povr(br_kruznica));
end

```