|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  **ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У НОВОМ САДУ** |  |

Андреј Личанин

**Примена клик механизма у лету код отротропних микролетелица**

МАСТЕР РАД

Нови Сад, 2021

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Редни број, **РБР**: | |  | |
| Идентификациони број, **ИБР**: | |  | |
| Тип документације, **ТД**: | | Монографска документација | |
| Тип записа, **ТЗ**: | | Текстуални штампани материјал | |
| Врста рада, **ВР**: | | Дипломски – мастер рад | |
| Аутор, **АУ**: | | **Андреј Личанин** | |
| Ментор, **МН**: | | **професор доктор Звонко Ракарић** | |
| Наслов рада, **НР**: | | **Клик механизам диптара** | |
| Језик публикације, **ЈП**: | | Српски / латиница | |
| Језик извода, **ЈИ**: | | Српски | |
| Земља публиковања, **ЗП**: | | Република Србија | |
| Уже географско подручје, **УГП**: | | Војводина | |
| Година, **ГО**: | | **2021** | |
| Издавач, **ИЗ**: | | Ауторски репринт | |
| Место и адреса, **МА**: | | Нови Сад; трг Доситеја Обрадовића 6 | |
| Физички опис рада, **ФО**: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога) | | **<уписати статистику>** | |
| Научна област, **НО**: | | Електротехника и рачунарство | |
| Научна дисциплина, **НД**: | | Рачунарска техника | |
| Предметна одредница/Кqучне речи, **ПО**: | | **<кључне речи>** | |
| **УДК** | |  | |
| Чува се, **ЧУ**: | | У библиотеци Факултета техничких наука, Нови Сад | |
| Важна напомена, **ВН**: | |  | |
| Извод, **ИЗ**: | | **<кратак садржај рада>** | |
| Датум прихватања теме, **ДП**: | |  | |
| Датум одбране, **ДО**: | |  | |
| Чланови комисије, **КО**: | Председник: | **<име председника комисије>** |
|  | Члан: | **<име члана комисије>** | Потпис ментора |
|  | Члан, ментор: | **<име ментора>** |  |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Accession number, **ANO**: | |  | |
| Identification number, **INO**: | |  | |
| Document type, **DT**: | | Monographic publication | |
| Type of record, **TR**: | | Textual printed material | |
| Contents code, **CC**: | | Master Thesis | |
| Author, **AU**: | | **<ime autora>** | |
| Mentor, **MN**: | | **<ime mentora, sa oznakom titule PhD>** | |
| Title, **TI**: | | **<naslov rada, na engleskom jeziku>** | |
| Language of text, **LT**: | | Serbian | |
| Language of abstract, **LA**: | | Serbian | |
| Country of publication, **CP**: | | Republic of Serbia | |
| Locality of publication, **LP**: | | Vojvodina | |
| Publication year, **PY**: | | **<godina odbrane>** | |
| Publisher, **PB**: | | Author’s reprint | |
| Publication place, **PP**: | | Novi Sad, Dositeja Obradovica sq. 6 | |
| Physical description, **PD**: (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes) | | **<upisati statistiku>** | |
| Scientific field, **SF**: | | Electrical Engineering | |
| Scientific discipline, **SD**: | | Computer Engineering, Engineering of Computer Based Systems | |
| Subject/Key words, **S**/**KW**: | | **<ključne reči, na engleskom jeziku>** | |
| **UC** | |  | |
| Holding data, **HD**: | | The Library of Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia | |
| Note, **N**: | |  | |
| Abstract, **AB**: | | **<kratak sadržaj rada, na engleskom jeziku>** | |
| Accepted by the Scientific Board on, **ASB**: | |  | |
| Defended on, **DE**: | |  | |
| Defended Board, **DB**: | President: | **<ime predsednika komisije>** |
|  | Member: | **<ime člana komisije>** | Menthor's sign |
|  | Member, Mentor: | **<ime mentora>** |  |

**Zahvalnost**

< Na ovo mesto treba ubaciti zahvalnicu, ukoliko postoji >

**Sadržaj**

[1. Klik mehanizmi 1](#_Toc78654915)

[2. Bio mimikrija 2](#_Toc78654916)

[3. Mikro letelice 3](#_Toc78654917)

[4. Analiza letenja 4](#_Toc78654918)

[4.1 Anatomija diptera (kućna muva) 5](#_Toc78654919)

[4.2 Mehanizam leta 6](#_Toc78654920)

[4.2.1 Rana ispitivanja 6](#_Toc78654921)

[4.2.2 Areodinamičko skaliranje i realni rezultati 10](#_Toc78654922)

[4.3 Mehanizam pokretanja letećih mišića 16](#_Toc78654923)

[4.4 Kontrola leta 22](#_Toc78654924)

[5. Model klik mehanizma 26](#_Toc78654925)

[6. Rešavanje modela 27](#_Toc78654926)

[7. Analiza 28](#_Toc78654927)

[8. Zaključak 29](#_Toc78654928)

[9. Literatura 30](#_Toc78654929)

**Spisak slika**

[Slika 4.1 Vrste koje su evoluirale letenje 4](#_Toc78654989)

[Slika 4.2 Anatomija muve (CeCe i obična kućna) 5](#_Toc78654990)

[Slika 4.3 Prikaz krila muve i sila koje deluju na nju 6](#_Toc78654991)

[Slika 4.4 Ispitivanje u vadušnom tunelu 7](#_Toc78654992)

[Slika 4.5 Grafički prikazi koeficjenata 8](#_Toc78654993)

[Slika 4.6 Cirkulacija vazduha oko krila 8](#_Toc78654994)

[Slika 4.7 Kvazistatička analiza muve brzom kamerom 9](#_Toc78654995)

[Slika 4.8 Aerodinamičke polare rezultata kvazistatičke analize 10](#_Toc78654996)

[Slika 4.9 Ispitivanja aerodinamičkim skaliranjem 11](#_Toc78654997)

[Slika 4.10 Šema eksperimenta i snimak 12](#_Toc78654998)

[Slika 4.11 Uticaj ugla napda na silu uzgona 12](#_Toc78654999)

[Slika 4.12 Noviji eksperimenti. 13](#_Toc78655000)

[Slika 4.13 Kompijuterska vizuelizacija leta pčele (Kristina Poelma i Sean Humbert) 13](#_Toc78655001)

[Slika 4.14 Translacija i rotacija krila i uticaj na vrtloge 14](#_Toc78655002)

[Slika 4.15 Dodatni efekti letenja 15](#_Toc78655003)

[Slika 4.16 Mehanizam aktivacije normalnih mišića 16](#_Toc78655004)

[Slika 4.17 Frekvencija krila malih i velikih insekata 17](#_Toc78655005)

[Slika 4.18 Vreme aktivacije i isključenja mišića kod skakavac I komaraca 18](#_Toc78655006)

[Slika 4.19 Pogled na različite vrste mišića kod insekata pod mikroskopom 19](#_Toc78655007)

[Slika 4.20 Mišići koji služe za upravljanje 20](#_Toc78655008)

[Slika 4.21 Tonični i fazni mišići koji su odogovrni za brze promene trajektorije 20](#_Toc78655009)

[Slika 4.22 Organi za opažanje okoline kod muve 22](#_Toc78655010)

[Slika 4.23 Nebo kako ga muva vidi 23](#_Toc78655011)

[Slika 4.24 Orijentisanje muve u odnosu na sunce 24](#_Toc78655012)

[Slika 4.25 Optički tog muve tokom translacije i rotacije 24](#_Toc78655013)

**Spisak tabela**

**No table of figures entries found.**

**Skraćenice**

**FPGA** - *Field Programming Gate Array*, Programabilne sekvencijalne mreže

**CPU** - *Central Processor Unit*, Centralni procesoor

**GND** - Oznaka za signal na nultom potencijalu

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.1) |

# Klik mehanizmi

|  |
| --- |
| Slika . Dijagram figure letnog motora i fizičkog modela |

Mehanizam sa slike 1.1 prikazuje tri pozicije tokom kretanja krila tokom jednog zamaha. Leva kolona prkazuje uproštenu šemu kostiju a desna model mehanizma na osnovu tih kostiju. U ovom mehanizmu je masa u pozicij C je ekvivaletna masa celog mehanizma sa slika a-c.BE i DF su laki štapovi koji prestavljalju kost pa (pleural apophysis) i n (notum). BAC i CD su laki štapovi koji predstavljaju pomoćne kosti ax2 (axilarz sclerite) i p (parascutum). WA predstavlja krilo. Pobudna sila je pretpostavljena kao  gde je F amplituda a  ugaona frekvencija. Ona deluje na tačku C i služi kao ulaz za model, kost sl (scutellar lever).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.1) |

Pomeranje mase iz položaja u kom je BCD horizontalan je označen sa *y* , dok je lateralno pomeranje poluga BE i DF označeno sa x. Pretpostavlja se da je mehanizam simetričan tj BC=CD=*l* i distanca između nedeformisanih nosača je *b*. Jednačina kretanja ovog modela je:

U ovoj jednačini k je savojna krutost lakih štapova BE i DF,  je sila prigušivanja indukovana aerodinamičkim i mehaničkim efektima.

# Bio mimikrija

|  |
| --- |
| Sta je bio mimkrija  kratka istorija  trenutno stanje  izazovi |

Ili Biomimetika je emulacija pridonih sistema ili elemanat u svruh rešavanje problema koji se pojavljuju u ljudskoj praksi. Razni organizmi su evoluirali veoma dobro prilagođenje sisteme i materijale tokom vremena preko prirodne selekcije. Moglo bi se reći da su današnji organizmi rezultat miliona godine iteracije i adaptacije organizama. Posmatrajući prirodu došlo se do mnogo rešenja na makro i mikro novima. U ovom radu je fokus na biomimikriji sitnih letećih organizama.

Rani pokušaji rekreiranja leta ptica, bez razumevanja principa pod kojima onih funkcionišu su uglavnom bili neuspešni. Sistematskim posmatranjem i eskperimentisanjem se na kraju došlo do dizajna klizećih letelica koji su ostvarili dugotrajan let. Moderne letelice imaju malo zajedničkog sa modelima ptica iz kojeg su nastali, osim generalnog oblika krila i osnovnih aredinamičkih principa pod kojima rade. One su mnogo prevazišle svoje „rođake“ po veličini, brzini, nosivosti, potrošnji griva, pokretljivosti. Ali u nedavnim vremenima pojavila se potreba za samnjenjem veličine letelica u red veličine par desetina grama i raspona krila u centimetrima.

Centralna informaciona agencija u Americi je još sedamdesetih godina dvadesetog veka pokušavala da konstruiše minijaturne letelice u obliku vilikonjica koje će nositi mikrofone za prisluškivanje.1990 – ih su u Los Anđelosu pokušali da naprave mikro letelice u vojnoj službi koja će skupljati infomracije iz određenog pordučja i vršiti ometanje neprijateljskih signala. Tokom ovog pokušaja konstruisana je letelica koja koristi rotacioni pogon sa malim motorom (1,5g), koja je nosila malu kamericu, senzore i komunikacone čipove. Imala je u totalu 4g i mogla je da skreće brzinom od 900 cm/s. Nedavno je DARPA objavila specifikacije za projekat nano letelica, koje bi trebalo da budu još manje od mikro letelica.

Američka laboratorija za letenje je prikazala plan u kome opisiju jata robotskih ptica do 2015 godine i punopravne robotske insekte do 2030. godine.

Ove agencije se interesuju za mirko letelice putem biomimikrije zbog 2 bitna razloga. Prvi je da posmatranje koje vrši letelica koja liči na pticu ili insekta može mnogo duže da ostane neprimećenja od strane druge partije, čak i da se nadgleda velike količine ljudi neprimetno. Drug je da pošto mikroletelice spadaju u red veličine ptica i velikih insekata, mogu se kopirati neki apsekti ili sistemi i time poboljšati njihove performanse.

# Mikro letelice

# Analiza letenja

Dipteri su česta vrsta u svim većini zemaljskih biosfera i do sada je otkriveno oko više od 150 000 vrsta. Smatra se da su pored pčela najbitniji insketi koji pomažu razmonžavanje biljaka oprašivanjem. Pripadaju supergrupi Endopterigota, tj insekata koje u svom životnom ciklusu imaju radikalne morfološke promene, što se može primetiti kada se porede larve i odrasle jedinke. Interesantna razlika kod diptara u odnosu da druge leteće vrste je to da su za let razvile specifične dodatke , umesto da krila budu nakačena na već postojeće ruke kao kod ostalih

Let je evoluirao tačno četri puta u nama vidljivoj istoriji.života.Kod pterosaura, ptica, letećih miševa i insekata. Svaki put kada je evoluirao proizveo je veliki spektar raznih vrsta. Let je jako koristan i jeftin vid kretanja koji omogućava vrstama koje ga imaju da razvijaju jedinstvene niše u načinu nalaženja hrane, migracije i pronalaženja partenra za reprodukciju. U ovom radu se fokusiramo na insekte iz roda Diptera ( dvokrilci, muve ).

|  |
| --- |
| Slika 4.1 Vrste koje su evoluirale letenje (google.com//images ) |

## Anatomija diptera (kućna muva)

Telo diptere se deli na glavu, toraks i abdomen. Na glavi se nalaze oči, antena i usta za hranjenje.Na toraksu su krila, halteri i noge. Abdomen nosi organe za varenje i reprodukciju.

Diptare imaju specijalizovane organe zvane halteri ili balanseri, koji služe kao ugrađeni giroskopi kojima one mere svoju poziciju i orijentaciju u prostoru. One osciluju velikom frekvencijom zajedno sa krilima, skupljaju informacije i šalju direktno mišićima koji kontrolišu krila. Jedinke kojima je ovaj organ odstranjen ne mogu da lete. Ovaj sistem im je omogućio da budu jedni on najboljiš letača u životninjskom carstvu.

|  |
| --- |
| Slika . Anatomija muve (CeCe i obična kućna)  Glava muve je opremljena sa dva velika kompozitna oka, koje imaju različite podele na ćelije oka zavino od vrste do vrste. Poseduju još dva očna organa na vrhu glave ali dosada nije ustanovljeno za šta se koriste. Pored očiju na glavi se nalazi i par antena kojima muva detektuje miris i ukus. Usta su specijalizovana za penetraciju i sisanje  Diptare poseduju jedan par krila i jedan par haltera sa obe strane toraksa, koje imaju specijalizovane mišiće i nervni sistem što im omogućuje da budu veoma okretni tokom leta.  Za kretanje po krutim površinama muve koriste tri para segmetnisanih nogu. Abdomen je segmentisan različito zavisno od vrste. Uglavnom je podeljen na 8-10 segmenata, gde zadnja dva služe za reprodukciju, a ostatak je sistem za varenje. |

## Mehanizam leta

### Rana ispitivanja

Da bi bilo koji objekat mogao da leti potrebne su da se reše tri ključne stvari. Način na koji će proizvesti dovoljnu podizajnu silu, sistem koji će ga održati u vazduhu i mehanizam kojim će kontrolisati kretanje dok leti. Prvo će se posmatrati kako se generišu sile koje muvama omogućuju let. Ako se posmatra poprečni presek krila **S** može se uočiti da krilo napada vazduh (fluid) pod nekim uglom . Ako se krilo kreće nekom brzinom **U,** može se zapaziti da krilo generiše silu koja je upravna na površinu krila. Ta sila se dalje može razložiti na dve sile, Uzgon koji je normalan na vektor brzine krila i paralelnu silu koja predstavlja otpor sredine kretanju.

|  |
| --- |
| Slika . Prikaz krila muve i sila koje deluju na nju  Drugi Njutnov zakon kaze da je promena u količini kretanja jednaka sili koja deluje na to telo. Ako posmatramo gornji sistem sa strane fluida mogu se izvesti jednačine za silu. |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.2.1) |

Gde je  - Gustina fluida. Ova jednačina se drugačije može napisati kao:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.2.2) |

Gde je CF  - Koeficjent sile.

Ovaj koeficjent govori koliko je bilo koje krilo dobro u smislu stvaranja Uzgona, tj. koliko dobro smiče vazduh ka dole. Dalje se ova formula može raložiti na svoje komponente koje odgovaraju sili uzgona (eng. *lift*) i sili otpora (eng. *drag*)

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.2.3) |

Koeficjent uzgona i otpora se ispituje u vazdušnom tunelu tako što se krilo izloži kontrolisanom toku vazduha (kome se nekada dodaju boje radi vizualizacije), pa se onda varira ugao napada I preko senzora se meri sila uzgona I otpora.

|  |
| --- |
| Slika 4.4 Ispitivanje u vadušnom tunelu |

Ova merenja se mogu predstaviti grafički i bolje sagledati kako se krilo ponaša. Praksa je da se vrednosti koefcijenata predstavi jedan u odnosu na drugi za raličite vrednosti napada. Ovako se dobija nova kriva koja se zove Aerodinamička polara. Ova kriva je veoma korisna u analizi letelica.

|  |
| --- |
| Slika . Grafički prikazi koeficjenata |

Da bi se razmula mehanika letenja kod muva neophodno je uvesti jos jedan koncept. Ako ubacimo ravno krilo u fluid koji teče, i nagnemo ga malo, čestice koje se kreću na gornjem delu krila će se kretati brže nego čestice koje su ispod krila. Ovo stvara razliku pritiska i silu potiska nagore. Ovo se drugačije može zamisliti kao cirkulacija fluida oko krila.

|  |
| --- |
| Slika . Cirkulacija vazduha oko krila |

Kutta-Jukovski Teorema. Jedna od najbitnih u aerodinamici.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.2.4) |

Gde je:

*  gustina fluida
* brzina toka
*  Cirkulacija
*  potisak po razmaku krila

Bilo koja sila potiska bilo kog poprečnog dela krila je proporcijalna cirkulaciji brzini i gustini fluida.

U 1960 I 1970 godinama, naučnici su imali prvi put pristupak kamerama koje mogu da snimaju velikom brzinom (veliki broj slika u sekundi). Neki naučnici su dobili ideju da snimaju let muve ne bi li odgonetnuli tajnu njenog leta.

Torkel Weis-Fogh (1922-1975) je radio ovakvu vrstu merenja ne bi li došao do odgovora. On je uradio sledeću vežbu.

|  |
| --- |
| Slika 4.7 Kvazistatička analiza muve brzom kamerom |

Ako se krilo snimi u određenom položaju ( ponoću brze kamere), mogue će izvući sve podatke preko kojih se računa potisna sila 4.2.3.1. Ovo je moguće uraditi u mnogo položaja duž krila i rezultat se sumira. Suma ovih sila bi trebala da bude veća ili jednaka težini tela muve.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.2.5) |

|  |
| --- |
| Slika . Aerodinamičke polare rezultata kvazistatičke analize |

Kada je ova vežba sprovedena na mnogo više insekata, učenik Torkela, Čarli Elington (1952-2019.) je obradio podatke za vise insekata I grafički predstavio sve areodinamičke polare insekata I došao do zaključka da insekti ne bi mogli da polete, jer njihova krila ne generišu dovoljno veliku silu uzgona.

### Areodinamičko skaliranje i realni rezultati

Bilo koji objekat u fluidu uvek trpi dve sile, Inerciju I viskozne sile. Inercija se može objasniti kao čisto mehaničko dejstvo izmedju molekula fluida cvrstog tela, njihovi sudari i razmene enrgije. Ove sile su posledica cinjenice da fluid ima nekakvu gustinu.

Viskozne sile su posledice interakcije molekula fluida sa drugim molekulima fluida. Ovo se može videti kao osbonia lepljivosti fluida. Med mnogo sporije teče od vode. Odnos ovih sila je veoma bitan bezdimenzioni broj koji se naziva Rejnoldsov broj i označava sa Re.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.2.6) |

Gde je  viskoznost.

Ukazalo se tokom raznih eksperimenata da ako je Rejnoldsov broj isti onda je ponašanje sila za bilo koji problem sa tim brojem isti. Ovo je bitno zasto sto nam pokazuje kako da obavimo eksperimente na umanjenim modelima fizičkih objekata a da dobijemo iste rezultate kao da radimo ispitivanje nad objekitma koje imaju prave dimenzije.

Primer za ovo bi bio, da se može napraviti maketa aviona koja je 100 puta manji i ispitivati kako se fluid ponaša recimo u vazdušnom tunelu. Jedina bitna stavka je da se podesi viskoznost ili gustina vazduha tako da je Rejnoldsov broj isti kao i kod velike letelice. Ovaj princip se naziva dinamičko skaliranje i naučnici širom sveta ga koriste u raznim ispitivanjima, od zgrada, mašina pa do živih organizama.

|  |
| --- |
| Slika . Ispitivanja aerodinamičkim skaliranjem |

Pošto su insekti veoma mali, lakše je napraviti veći model njihovih krila i vršiti ispitivanje na tim modelima. Primer jednog takvog eksperimenta je jednostavan komadić materijala koji brzo osciluje iz jednog položaja u drugi, potopljen u ulje da bi se dobio dobar Rejnoldsvo broj. Eksperimen su izvršili Dickenson I Götz. 1993.

|  |
| --- |
| Slika . Šema eksperimenta i snimak |

Na snimku se jasno vidi da krilce formira vrtloge kako se kreće kroz fluid. Ovaj eksperiment je doveo do zaključka da sila uzgona ima veliku zavisnost od ugla napda krila i formiranje vrtloga. Posto se vrtlog formira na glavnoj ivice krila, tako je i nazvan, **vrlog vodeće ivice**.

|  |
| --- |
| Slika 4.11 Uticaj ugla napda na silu uzgona |

Na graficima se vide vremena, rano i kasno, koje ukazuju na uticaj vrtloga na potisnu silu samog krila. Aerodinamička polara ranog vrtloga jasno stavlja krilo u zonu u kojoj može da generiše dovoljno veliku silu da podigne insekta u vazduh.

|  |
| --- |
| Slika . Noviji eksperimenti. |

Od tog eksperimenta, napravljeni su mnogo veći i tačniji modeli krila i fluida, što je omogućilo bolje vizualizacije fluida i krila.

|  |
| --- |
| Slika . Kompijuterska vizuelizacija leta pčele (Kristina Poelma i Sean Humbert) |

Ovi eksperimenti su pokazali da insekti generišu ove vrtloge tako što zamahnu u jednom pravcu, rotiraju krilo I onda zamahnu u drugom pravcu. Od tada do danas ova vrsta generisanja pogona je pronađena i u drugim vrstama životinja kao što su laste, slepi miševi, neke vrste riba, pa čak i kod nekih biljaka. Izgleda da je ovo čest mehanizm koji evolucija koristi da bi organizmi leteli.

Razjašnjeno je i zašto je ovo bilo tako teško otkriti. Krilo insekata se ne kreće kao krilo aviona. Ono vrši rotaciju kroz vazduh a ne transalciju, što ima veliki uticaj na formiranje i trajanje vrtloga.

|  |
| --- |
| Slika 4.14 Translacija i rotacija krila i uticaj na vrtloge |

Kada se vrtlog formira pri translaciji, on se mnogo brže odlepi od krila nego kada se krilo kreće rotacijom kao kod helikoptera. U tom slučaku vrtlog mongo duže ostane prilepljen uz krilo. Insekti oponašaju tu rotaciju, samo nisu u stanju da je urade u kompletu oko centralne telesne ose. Oni zamahnu krilom u jednu stranu, rotiraju I zamahnu na drugu stranu. Ovo se može videti na slici 4.13.

Ovaj mehanizam kretanja dovodi do još nekoliko efekata koji pomažu letu.

Generisanje vrtloga je najizraženije sredini zamaha krila sa jedne strane na drugu, ne nalazi se samo na gornjoj ivici nego i na donjoj.

|  |
| --- |
| Slika 4.15 Dodatni efekti letenja |

Još jedan intersantan aerodinamički fenomej ne rotacioni uzgon. Pošto krilo mora da se rotira da be krenulo da se kreće nazad, ono menja ugao napada u smer vrtloga i pojačava njegovo dejstvo.

Kada promeni rotaciju skroz, cirkulacija gornjeg vrtloga gura vazduh na donji deo krila u suprotnom smeru, pomžući formiranje vrtloga na donjoj ivici krila time pojačavajući uzdiznu silu. Ovo funkcioniše kao mehanizam zarbljavanje dela energije iz jednog zamaha i iskorišćavanje u drugom.

Ovi dodatni efekti su jako izraženi kod insekata koji imaju kratak zamah krila i veliki ugao napada, kao kod medonosne pčele.

Sada kad je razjasnjen mehanizam krila muve i uticaj vazduha na njega, može se pristupiti unutrašnjoj analizi generisanja pokretačih sila, kao i način na koji se taj mehanizam kontroliše.

## Mehanizam pokretanja letećih mišića

Mišići insekta moraju da rade drugačije od ostalih životnja zbog njihove male veličine.

Posmatrajmo kako funkcioniše normalan mišić. On se aktivira kada primi signal od motor neurona koji se zove akcioni potencija. On propagira od neurona ka mišiću preko aksona, gde signal kroz sinapse izaziva hemijsku reakciju koja pokreće mišiće. Glavna uloga ovog akcionog potencijala je da poplavi mišić kalcijumom (Ca), koji aktivira aparat mišića da se skuplja i rasteže. U mišićima se nalazi organ koji se zove sarkoplazmicni retikulum koji vrši ulogu skladištenja kalcijuma.

|  |
| --- |
| Slika 4.16 Mehanizam aktivacije normalnih mišića |

Kada se kalcijum oslobodi, on brzo propagira kroz mišić i aktivira ga, što dozvoljava mišiću da brzo proizvede silu. Da bi se mišić „isključio“ sav taj kalcijum mora da se ispumpa iz mišića , i ovo oduzima i energiju i vreme. Kada se snimi odziv mišića može se videti da vreme aktivacije veoma brzo a deaktivacija je spora.

|  |
| --- |
| 6  Slika 4.17 Frekvencija krila malih i velikih insekata |

Posmatrajmo frekvenciju krila insekata. Uvidja se da veliki insekti imaju mnogo manju frekvenicju od sitnih insekata. Razlog povećanja frekvencije je viskoznost vazduha. Za stinijeg insekta vazduh je viskozniji i teže mu je da razije vrtloge koji su mu potrebni za let. Kada ga generiše on je manji i generiše manje uzgona. Rešenje koji mali insekat ima je da udara krilima jako brzo da bi postigao što veću brzinu. Ovo takođe znači da mišići moraju da rade mnogo brže.

Za velikog ineskta kao što je skakavac, frekvencija mišića lagano postiše potrebnu frekvenciju aktivacije za let. Mišići u gornjem zamahu se dobro sinhronizuju sa mišićima u donjem zamahu..

Ako bi se isti mišić od skakavca pojavio u telu komarca, problem bi bio da se on ne može aktivirati dovoljno brzo da proizvede potrebnu frekvenciju krila. Njima je očigledno potrebna drugačija struktura mišića.

|  |
| --- |
| Slika . Vreme aktivacije i isključenja mišića kod skakavac I komaraca |

Brzina kojom mićić može da se deaktivira je povezana sa količinom sarkoplazmičnog retikuluma. Jedno od rešenja je da se poveća količina retikuluma da se poveća brzina ispumpavanja, no ovo dovodi do probelma prevelikog povećanja mase. Tj dobija se jako slab mišić. Ovo je generalni problem u evoluciji vrsta. Jako je teško imati brz i jak mišić.

Insekti su evoluirali specijalni mičić koji se zove „asinhroni“ koji skoro nema retikuluma. Sva zapremina je ispunjena delovima koji su odgovorni za generisanje velike sile.

Način na koji ovaj mišić radi je da se deaktivacija ne aktivira električnim impulsom, nego drugim elastičnim mišićem čija je cela svrha da bude kontra električno aktiviranom mišiću.

Kod muva su elekrični mišići oni koji guraju krilo na dole, mišići donjeg zamaha, dok su elastični mišići gornjeg zamaha. Kad god se jedan aktivira, drugi je elastično napregnut i na kraju pokreta će se aktivirati u drugom smeru, nezavisno od električnog impulsa aktivacije. Zato je dobio ime asihroni mišić. Ovaj sistem radi na velikim frekvencijam bez ikakvog retikuluma.

|  |
| --- |
| Slika . Pogled na različite vrste mišića kod insekata pod mikroskopom |

Iako mišić ima automatsku aktivaciju, nervni sistem muve i dalje koristi kalcijum da diktira frekvenciju lupanja krila. Nešto kao gas na automobilima. Interesanta stvar oko ovih mišića je to da oni nisu direktno povezani sa krilima, i njima se ne može direktno upravljati. Pored njih postoji još jedna grupa mišića koji služe samo za upravljanje krilima, i oni mogu da malo pomere krilo u svakom ciklusu.

|  |
| --- |
| Slika . Mišići koji služe za upravljanje |

Eksperimentisanjem se došlo do zaključka da se ovaj mišić ponaša kao opruga, kojo se može menjati krutost električnim signalima neurona. Menjajući krutost ove opruge menja se trajektorija krila u svakom ciklusu malo po malo.

Takođe se uvidelo da ostali mišići za kontrolu tokom leta se mogu podeliti u dve grupe, Tonične i Fazne mišiće. Tonični su aktivni uvek tokom leta, a Fazni se pale samo kada insekt oće da menja trajektorjiu leta.

|  |
| --- |
| Slika . Tonični i fazni mišići koji su odogovrni za brze promene trajektorije |

Na dijagramu se vidi da postoje četri kosti, koji svaki na svoj način menja kretanje krila. Na svaki je nakačen Tonični mičić koji je uvek aktivan i radi prepravke i Fazni koji može da se aktivira ako muvi treba da brzo menja trajektorjiu.

Veruje se da ovi mišići glavni za generisanje i kontrolu kretanja muve dok leti. Snimcima velike brzine se videlo da muva nema nagle pokrete krila dok menja trajektorija, nego na svakom zamahu ima jako malu devijaciju kretanja krila.

Kada su muvi otklonili polovinu jednog krila, videli su muva i dalje može dosta dobro da leti, ali Fazični mišići imaju mnogo veću aktivaciju tokom leta. Ovo je verovatno evoluiralo da dozvoli muvi da preživi sa oštećenim krilima, pošto krila ne rastu ponovo, te koje ima od rođena moraju da joj traju celi životni vek.

## Kontrola leta

Važan faktor kod kontrole leta je opažanje okoline i brza obrada podataka. Muve imaju veoma napredne sisteme za ovu funkciju. Oči muve se smatraju za najbrže na planeti iako nemaju veliku rezoluciju. To su dva velika oka koja su očevidna na prvi pogled. Pored toga ima još dva mala oka koja koriste za detekciju horizonta. Na krilima imaju dlačice kojima detektuju strujanje vazduha, mirise i temperaturu. Takođe imaju i dve antene koje takođe detekuje kretanje vazduha i jako dobro osećaju mirise. Pored ovih imaju i haltere. Ovaj organ se smatra da je deevolucija zadnjeg krila koji imaju ostali insekti, u specijalan senzorni organ koji služi kao žiroskop i tajmer. On je odgovoran za fantastičnu manevarsku spobnost muva.

|  |
| --- |
| Slika 4.22 Organi za opažanje okoline kod muve |

Konačni element za kontrolu leta muva je mozak koji obrađuje sve te informacije i formuliše odgovorajaući odgovor.

Da bi se analizirala kontrola leta mora se posmatrati ceo organizam muve kao sistem , a ne delovi pojedinačno. Ovo je dosta zahtevno i obuhvata više discipline nauke, neurolog za nervni sistem, neko za neuro muskularni sistem jer su mišići jako bitni, mehaničar za fiziku leta i ponašanje krila ... Muvu možemo posmatrati kao složeni sistem automatskog upravljanja koji priva veliki broj informacija i sredine i ima veoma komplikovane povratne petlje.

U tom duhu možemo posmatrati muvu kao sistem koji treba da obavi sledeće:

* Poleti
* Održava se u vazuduh
* Kreće se u određenom pravcu
* Izbegava prepreke
* Izbegava predatore
* Pronalazi mirise hrane i članove suprotnog pola

Eksperminetalnim putem se otkrilo da muve kada navigiraju kroz prostor, ono što muva uglavnom gleda je nebo. Muva, kao i još mnogo insekata, može da zapazi orijentaciju polarizacije svetla o atmosferu, tako da njima nebo izleda kao površina bureta u kome se nalaze, sa linijama ispresecanim upravno na pravac vektor položaja u odnosu na sunce. Ovo im služi kao uvek pristuan kompas, i nije zavisno od toga da li vide sunce. Kada je sunce vidljivo , pored ovog mehanizma mogu da koriste i samo sunce za orijentaciju.

|  |
| --- |
| Slika . Nebo kako ga muva vidi |

Neke grupe insekata lete ka suncu kada se orijentišu, ovo se zove fototaksa, dok muve mogu da lete u arbirtrarnom uglu u odnosu na sunce, ovo se naziva menotaksa.

|  |
| --- |
| Slika . Orijentisanje muve u odnosu na sunce |

Pored ovoga, za navigaciju kroz prostor blizu zemlje muve koriste sistem pod nazivom Optički tog. Dok ona leti kroz let, muva detektuje šablon promene fokusa u donosu na brzinu promene polažaja predmeta u vidokrugu. Prostorečeno , ako se translira u prostoru zapazice da bliži objekti brže menjaju fokus neko dalji, i to koristi da ocenivanje dubine.

Kada se rotira , muva će zapaziti da se svi objekti kreću istom brzinom u smeru suprotnom od rotacije. Slični sistemi se koriste u pokušajima kreiranja automatko-upravljajućih automobila preko kompijuterskog vida.

|  |
| --- |
| Slika . Optički tog muve tokom translacije i rotacije |

Eksperimentisanjem je ustanovljeno da muva jako dobro detektuje vertikalne ivice, i ka njima naviguje.

Takođe je primećeno da muve imaju automatski odgovor na nagle promene u vidnom polju,i to vazdušni manevar u kome u isto vreme kreće da lete unazad i rotira ka suprotnom pravcu. Smatra se da je ova adaptacija odgovorna za izbegavanje grabljivica.

Kada muva detekuje miris hrane, onda leti unapred u cik-cak maniru i pokušava da ustanovi iz kog pravca dolazi miris. Ovo ponavlja neprestano dok ne dodjđe do izvora mirisa. Interesatno je da kada detekuje miris, neurološki sistem promeni automatsku detekciju objekata koje dolazi od velikih očiju, maltene u sprotnom pravcu, tako da je muva sada privučena ka objektu koji postaje sve veći i veći.

# Model klik mehanizma

Matematički model se izvodi iz strukture kostiju.

|  |
| --- |
| Slika 5.1 Koštana struktura diptera (slika iz ref 3\*) |

Na osnovu ove strukture konstruisan je sledeći model. Ulaz u ovaj model je harmonična sila koja se primenjuje na kost sl (scutellar lever) a izlaz modela je na komponenti rv (radial vein) koja je direktno povezana sa krilom insekta.

|  |
| --- |
| Slika 5.2 Uprošćen mehanizam koštane strukture (slika iz ref 3\*) |

Dve grede (1) i (2) na slici 5.2 odogovaraju kostima n (*notum*) i pa (*Pleural* *apophysis*). Pretpostavlja se da imaju istu krutost k. Ovo je uprošćavanje pošto mišić koji je povezan na tu kost doprinosi krutosti. Krilo se modeluje kao kruta laka poluga ABC. CD je takođe kruta poluga i odgovara kosti p (*parascutum*). Veza u tački B odgovora kosti pw (*wing process*). Zglob u tački ce odgovoara kosti ax1 (*axillary sclerite*). Sila se primenjuje na tačku c , f(t). Zbog jednostavnosti se pretpostavlja da je BC=CD=l i masa je koncentrisana u tački C. Pomeranje y je izdizanje mase C, a x je pomeranje nosećih štapova.

Odon između kretanja i ugaonog pomeranja je dat sa jednačinama:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.1) |

mogu se kombinovati :

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.1) |

kao i :

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.1) |

Ako važi , onda je 

Dijagram oslobeđnih veza je dat na slici 5.2 c.) Sistemu su dodate sile prigušenja da bi se uračunali efekti trenja vazduha kao i unutrašnja trenja samog mehanizma. Ako se one zanemare na trenutak i posmatra ravnoteža momenata dobija se:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.1) |

Zbog Hukovog zakona. dobij se kombinoavnjem jednačina XX i ZZ

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.1) |

Pošto je  zagrada u sredini se može razviti u binomni red i dobija se:

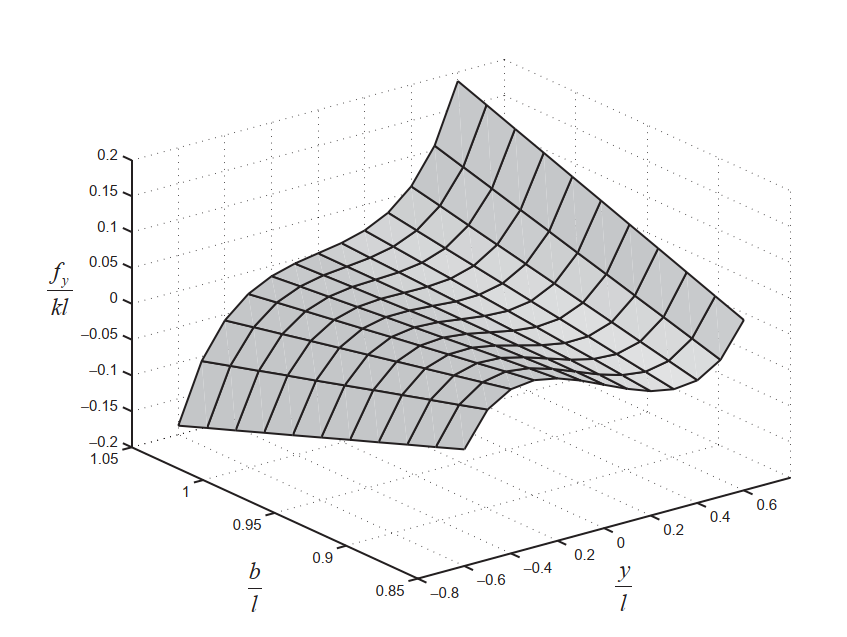
|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.1) |

gde je a stavljeno zbog aproksimacije. Ako se jednačine XX i YY podeli sa kx, dobije se bezdimenzijski izrazi:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.99) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.98) |

Na grafičkom prikazu jednačine 1.99 može se videti zavisnost bezdimenzijske krutosti. Kada je  manje od jedan onda mehanizam može da ima i pozitivne i negativne vredonsti u zavisnosti od vrednosti , a kada je više od jedinice onda može da bude samo pozitivna i u tom regionu ne može da postoji klik mehanizam, jer u tom slučaju krutost uvek raste. Stoga se može videti da klik mehanizam ima „on/off“ sposobnost podešavanjem vrednosti , i za analizu je najinteresantniji za vrednosti manje od 1.



Da bi se ispitao uticaj krutosti prikazaće se dvodimenzioni grafik za vrednosti .



Na ovim graficima se mogu videti pozicije kada mehanizam ima negativnu krutost.Na levom grafiku je iscrtana potencijalna energija klik mehanizma koja se dobija integracijom izraza 1.98.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.98) |

Sa desnog grafika se vidi da imaju tri stabilne pozicije, **A**, **B**, **C** . Pozicije **A** i **C**  su potencijalne jame u kojim je stabilna ravnoteža dok za y=0 , pozicija **B.**  Bilo kakva pertubacija mehanizma dovodi do „pada“ u pozicije **A** i **C.**

**Dinamička analiz**

Da bi se uradila dinamička analiza mehanizma neophodno je uračunati masu i prigušenje Sistema. Ako se primeni drugi Njutnov zakon na dijagram slobodnih tela na slici XX.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.2) |

U ovoj jednačini C je pretpostavljen koefcijent viskoznog prigušenja. Ako se iskoristi približni izraz za  umesto I pretpostavi sinusoidna pobuda tipa dobija se:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.2) |

Ovo je opšti oblik Dafingove jednačine sa pobudnom kružnom frekvencijmo . Može se normalizovati deljenjem sa m .

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.2) |

U svrhu bezdimenzionianja uvode se nove promenljive

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.2) |

Prirodna frekvencija za male oscilacije je data izrazom:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.2) |

A faktor prigušenja se definiše kao:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.2) |

gde je  faktor viskoznog prigušenja jenak  gde  odnos viskoznog prigušenja (ako ova veličina bude jednaka jedan, dolazi do kritičnog priguđenja sistema i on ne može više da vrši slobodne oscilacije.

Jednačina XX sada postaje:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.2) |

Definiše se bezdimenzijsko vreme :

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.2) |

Jednačina YY u standardnoj formi.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.2) |

Gde je , je bezdimenziona amplitude a  je bezdimenzijska frekvencija. Ovo je normirana Dufingova jednačina. Od interesa je analiza ove jednačine pod harmonijskim pobudnim silama i zbog toga je podobno koristiit harmonisko slaganje za rešavanje ove jendačine.

Bezdimenziono pomeranje se sastoji od određenog broja harmonika S sa frekvencijom jednakom pobudnoj.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.2) |

Iz ovoga se mogu izvesti bezdimenziona brzina i ubzanje.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

Maksimalna kinetička energija (bezdimenziona) je :

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

Bezdimenzijski rad ostavren preko n ciklusa je:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

Gde je  bezdimenzijski period ciklusa. Ako se uvrste jednačine 2 i 3 u jednačinu 4 i potom se formira njihov odnos dobija se

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

Nelniarni sistem se može porediti sa Dafingovim iz jednačine XX ako se ona linearizuje oko stabilnog ekvilibijuma. Ovo se radi tako što se u zameni sa I zamenare elementi sa malim doprinosima. Dobija se jednačina:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

Koristi se kompleksna eksponencijalna funkcija da bi se bolje opisala harmonica pobuda. Ako se pretpostavi harmoničko rešenje  dobija se:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

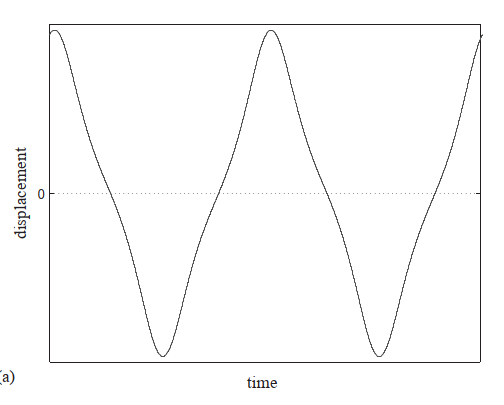
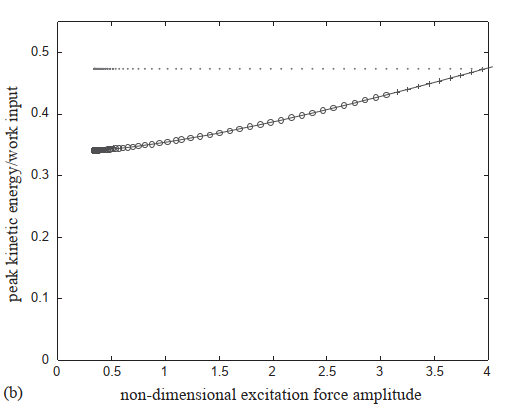
Jednačina 5 sada postaje:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

**Simulacije i analiza**

Koristeći model gde je  podešen na 0.9 urađen je određen broj simulacija. Pobudna sila i prigušenje su varirana na frekvenciji od  do 0.1 . Četri različite simulacije su izvršene sa sledećim podešavanjima:

*  u rezonanci,  sa malim prigušenjem
*  u rezonanci,  sa velikim prigušenjem
*  deseti deo rezonatne frekvencije ,  sa malim prigušenjem
*  deseti deo rezonatne frekvencije ,  sa velikim prigušenjem

**** 

Odziv pomeranja sistema sa konfiguracijom 1 pokazuje da klik mehanizam nema strme promene , tj nema veliku brzinu. Na drugom grafiku se vidi se sistem kontroliše samo sa modifikovanjem prigušenja u sistemu. Na njemu imaju dve linije koje predstavljaju pošto harmonična metoda ponekad nalazi nestabilna rešanja (krstići) dok krugovi označavaju realnu situaciju. Sa ovih grafika se vidi da rezonantan sistem ima prednost u odnosu na sistem koji radi na frekvencijama približnim prirodnoj frekvenciji.

Konfiguracija 2 je prikazana na sledećim graficima.

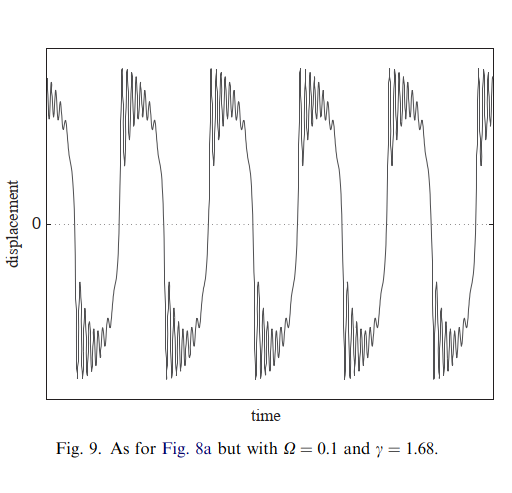
|  |
| --- |
|  |

Visoko prigušen sistem koji je pobuđen na prirdnoj frekvenciji. Veliki nivo prigušenja se dešava tokom leta kada krila trpe velike sile trenja od strane vazduha, a ne od internog mehanizma insekta.

U konfiguracijama 3 i 4 sistem je pobuđen na 1/10 prirodne frekvencije, što bi zahtevalo da leteći motor radi na veoma visokim frekvencijama.

|  |
| --- |
|  |

Na ovim graficima se može videti efektat klik mehanizma. Kada su izvršene simulacije koefcijent prigušenja je povećan sa 0.168 na 168 smanjenjem mase, dok je omega0 ostala ista. Oblik talasa pokazuje da su se postigle velike brzine. Ovaj efekat je prikazan na sledećem grafiku.



Iako sistem (linarizovan) može da bude pobunjen na rezonatnoj frekvenciji, postojaće maksimum koji krilo može da dostigne zbog geometrije sistema. Tako ograničen sistem može da poveća svoju brzinu jedino ako poveća frekvenciju. Opseg ovih frekvencija je od 6-480 Hz. Iz simulacija se jasno vidi da klik mehanizam može da poveća maksimalne brzine bez povećanja frekvencije.

Trenutna je pretpostavka da je prirodna frekvencija motora ista kao frekvencija krila.



# Rešavanje modela



# Analiza

# Zaključak

and are given by 

,

which can be combined to give 

Also from Eq. (1a) and (1b) . Noting that  results in





Therefore



and because of Hooke's law

.

Combining Eqs. (2)-(5) gives 

Since , Eq. (6) can be rewritten using the binomial expansion theorem, and ignoring higher order terms to give ,

where the subscrint  denotes that it is anproximate

non-dimensional displacement  :



and



# Literatura

1. Vladimir Kovačević: *Logičko projektovanje računarskih sistema I –projektovanje digitalnih sistema*, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih Nauka, 2001
2. Michael Dickinson (CalTech): video prezentacija link: [*https://www.youtube.com/watch?v=lv5vDW59hbY&ab\_channel=iBiology*](https://www.youtube.com/watch?v=lv5vDW59hbY&ab_channel=iBiology)
3. *The ‘‘click’’ mechanism in dipteran ﬂight:if it exists, then what effect does it have?* M.J. Brennana,\*, S.J. Elliotta, P. Bonelloa, J.F.V. Vincentb , Journal of Theoretical Biology 224 (2003), 205-213