

SUSTAVI

časopis za razumijevanje naše okoline / broj 8 / godina 7. / travanj 2022. / ISSN 1864 5080 / besplatni primjerak

**METALNE PJENE
SVOJSTVA, PROIZVODNJA I
PRIMJENA**

**KONSTRUIRANJE 3-BRZINSKOG
PRIJENOSNIKA U GLAVINI
STRAŽNJEG KOTAČA BICIKLA**

**ZMAJ: ISTRAŽIVANJE POMOĆU
VJETRA**

BIOINSPIRIRANI TEHNIČKI SUSTAVI

IMPRESSUM

Izdavač

Hrvatsko interdisciplinarno društvo
Lučića 1, 10 000 Zagreb
e-mail: ured@idd.hr
web: http://idd.hr

Glavni i odgovorni urednik
prof. dr. sc. Josip Stepanić

Urednica broja
dr. sc. Jelena Ćosić Lesičar

Urednički odbor:
prof.dr.sc. Josip Kasać
prof.dr.sc. Biserka Runje
prof.dr.sc. Giuliana Verbanac
mr.sc. Nikica Viličić

Tehnička priprema
Igor Cerin

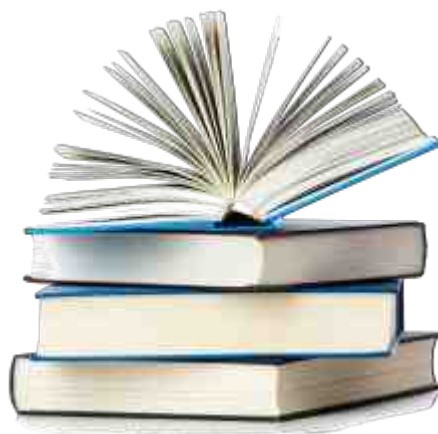
ISSN 1864-5080

Mišljenjima Agencije za odgoj i obrazovanje te Agencije za strukovno obrazovanje, časopis Sustavi se preporuča kao neobvezno, dodatno obrazovno sredstvo

Sadržaj

- 3 RIJEČ UREDNICE
- 4 METALNE PJENE – SVOJSTVA, PROIZVODNJA I PRIMJENA
Tomislav Rodinger, Danko Ćorić
- 11 KONSTRUIRANJE 3-BRZINSKOG PRIJENOSNIKA U GLAVINI STRAŽNJEG KOTAČA BICIKLA
Doris Stavljenić, Josip Hoster, Aleksandar Sušić, Ivica Skozrit
- 23 ZMAJ: ISTRAŽIVANJE POMOĆU VJETRA
Saša Iskrić
- 28 BIOINSPIRIRANI TEHNIČKI SUSTAVI
Petar Ćurković

Riječ urednice!



Drage čitateljice i čitatelji,

pozdravljam Vas kao urednica ovog broja časopisa *Sustavi*. Protekle godine postavile su nam razne izazove što na kreativnom i istraživačkom, što na izdavačkom a posebno osobnom putu. Situacija u kojoj smo se iznenada našli otvorila nam je brojne mogućnosti razvoja i promišljanja kako i na koji način možemo unaprijediti istraživanja. Kako sav naš trud i požrtvovnost približiti čitateljima i u konačnici pobuditi interes za sveobuhvatni razvoj tehnike i tehnologije što ovim brojem časopisa *Sustavi i činimo*.

Ovim brojem časopisa želimo Vam predstaviti i približiti teme iz područja materijala, konstrukcije bicikala te fotografiranja iz zraka pomoću zmajeva. Ujedno Vas uvodimo u područje bioinspiriranih tehničkih sustava.

Članak Metalne pjene – Svojstva, proizvodnja i primjena, autora Rodingera i Čorića, predstavlja karakteristične primjene metalnih pjena koje su zbog svojih specifičnih svojstava i izgleda sve više zastupljene na globalnom tržištu, a sukladno tome broj komercijalnih primjena im svakodnevno raste.

Autori Stavljenić, Hoster, Sušić i Skozrit, u članku Konstruiranje 3-brzinskog prijenosnika u glavini stražnjeg kotača bicikla iznose

detaljan prikaz konstruiranja 3-brzinskog prijenosnika u glavini stražnjeg kotača bicikla uz prikaz različitih rješenja zupčaničkog prijenosnika zatvorenog tipa u glavini.

Članak Zmaj: istraživanje pomoću vjetra nas uvodi u područje fotografiranja iz zraka članova društva KAP Jasa iz Slovenije.

Članak Bioinspirirani tehnički sustavi, autora Čurkovića, predstavlja karakteristične načine primjene generičkih algoritama na gibanje mobilnog robota.

Ako Vas zanimaju ovakve i srodne teme te želite saznati više ili želite svojim radom doprinijeti popularizaciji znanosti kontaktirajte nas pomoću adrese elektroničke pošte ured@idd.hr te pratite naše aktivnosti na mrežnoj stranici našeg izdavača, Hrvatskog interdisciplinarnog društva, <http://idd.hr>.

Srdačan pozdrav i ugodno čitanje!

dr.sc. Jelena Ćosić Lesičar

Metalne pjene

Svojstva, proizvodnja i primjena

Tomislav Rodinger, mag. ing. mech.

prof. dr. sc. Danko Ćorić

Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu

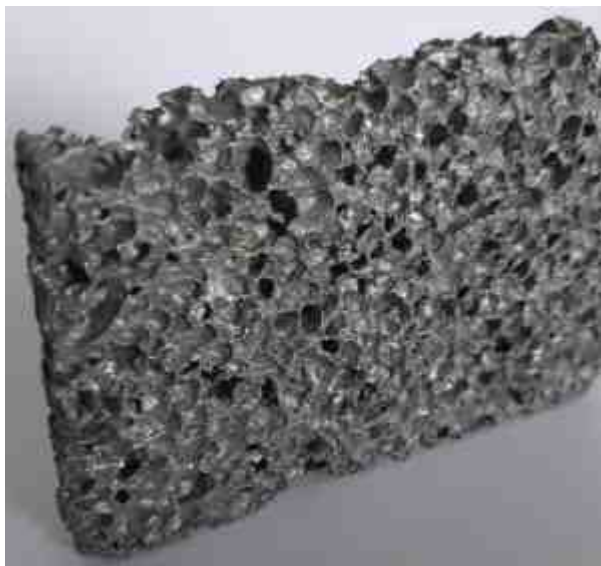
Općenito o metalnim pjenama

Brojni prirodni materijali, poput drva, lista ili kosti imaju poroznu strukturu koja rezultira njihovom manjom masom i svojstvima optimalno prilagođenim određenoj zadaći. Kako bi se ovakva građa preslikala na tehničke materijale poput metala razvijena je posebna skupina materijala pod nazivom metalne pjene (upjenjeni metali). Iako prvi patenti potječu iz 50-ih godina prošlog stoljeća, metalne pjene započinju intenzivni razvoj tek u posljednjih tridesetak godina. Radi se o poroznim metalima koji mogu imati udio šupljina 90 % i više što značajno doprinosi smanjenju mase. Metalne pjene mogu biti napravljene od različitih metala, ali zbog niske temperature tališta, niske gustoće i općenito dobrih svojstava, najčešće se koristi aluminij i njegove legure. Od ostalih metala, prisutne se još bakrene, magnezijeve, niklene ili primjerice čelične pjene. Ukoliko se radi o upjenjenim lakim metalima gustoća takvih pjena može biti manja od gustoće vode. Tako se u slučaju primjene aluminija gustoće 2700 kg/m³ za pjenu poroznosti 65 % postiže gustoća od samo 945 kg/m³, što je manje od gustoće vode (997 kg/m³) pa takva pjena može i plutati. S druge strane, ako se upjenjuju metali veće gustoće, kao npr. čelik (gus-

toća oko 7850 kg/m³), pjena mora sadržati veću poroznost od barem 88 % kako bi plivala na vodi.

Svojstva i primjena

Primjena metalnih pjena može se podijeliti na konstrukcijsku, funkcionalnu i estetsku. Konstrukcijska primjena temelji se na njihovoj maloj masi i specifičnim mehaničkim svojstvima, tako da se najčešće koriste kao jezgre kompozitnih sendvič konstrukcija. Porozna i lagana jezgra osigurava relativno visoku specifičnu krutost i visoku sposobnost apsorpcije energije udara što je presudno u određenim konstrukcijskim primjenama. Funkcionalna primjena zasniva specifičnoj funkcionalnosti ovih materijala, ovisno već o tome sadrži li pjena otvorene ili zatvorene pore odnosno njihove ćelije otvorenih ili zatvorenih stjenki. Tako se na primjer pjene sa zatvorenim ćelijama rabe za toplinske izolatore, a ukoliko se radi o otvorenim ćelijama pjene se koriste kao izmjenjivači topline ili filteri. Ovisno o materijalu iz kojeg su napravljene i morfologiji ćelija metalne pjene mogu imati dobru električnu vodljivost, odličnu sposobnost prigušenja zvuka i vibracija, a mogu biti i vatrootporne. Estetska primjena počiva se na njihovom karakterističnim izgledu, neki dizajneri i umjetnici danas primjenjuju za izradu



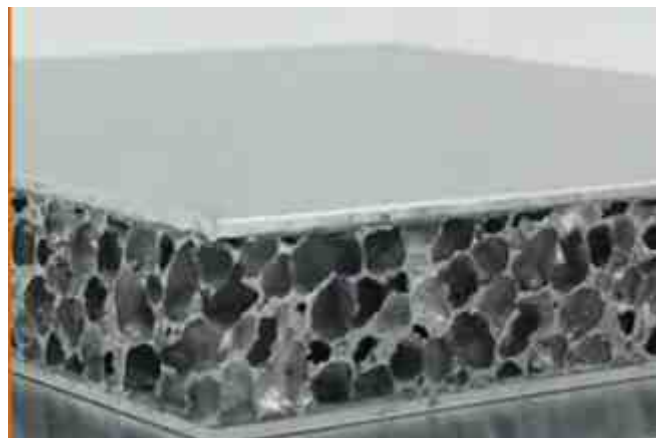
Metalne pjene zatvorenih ćelija



Metalne pjene otvorenih ćelija

skulptura dok ih arhitekti koriste kao obloge za unutrašnju i vanjsku dekoraciju.

U cilju smanjenja potrošnje goriva te posljedično i smanjenja emisija štetnih plinova, automobilska industrija teži primjeni lakih materijala među kojima se metalne pjene nameću kao logičan izbor. Još više to dolazi do izražaja kod električnih vozila, koja zbog težnje za velikim dometom moraju imati velike baterije za pohranu električne energije koje mogu težiti i po 700 kg, pa je lagana konstrukcija od presudne važnosti. Zbog niskog modula elastičnosti i male čvrstoće metalne



Sendvič konstrukcija s jezgrom od metalne pjene

pjene se rijetko koriste zasebno, već se radi o kompozitnim sendvičima čije su vanjske stijenke načinjene od čeličnog ili aluminijevog lima koji preuzima statička i dinamička opterećenja dok porozna jezgra povećava krutost takvog sendviča uz zadržavanje male mase. Budući da imaju vrlo dobru apsorpciju energije udara od ovih pjena se izrađuju dijelovi poput primjerice branika koji povećavaju sigurnost putnika. U vozilima se mogu primjenjivati i za izradu nosača motora kao i dijelova za smanjenje buke, budući da vrlo dobro upijaju vibracije i zvuk.

Osim u cestovnim vozilima, metalne pjene su prisutne u tračničkim vozilima, brodovima i zrakoplovima. Sva ova prometala moraju imati dovoljno čvrstu i krutu konstrukciju uz

što manju masu.

Zbog dobre apsorpcije zvuka ovi se materijali mogu koristiti kao zaštitne barijere koje smanjuju buku uz prometnice te kao sigurnosne barijere uz ceste u slučaju izlijetanja vozila (zaštitne ograde) jer su u mogućnosti velik dio udarne energije pretvoriti u deformaciju i tako zaštititi putnike i smanjiti razmjere oštećenja prilikom sudara. Zbog ovog potonjeg pri-



Dio od Al-pjene za Ferrari 360 i 430 spider



Mali udarno-apsorbirajući element za Audi Q7

mjerene su i za balističku zaštitu vojnih vozila i vozila za prijevoz novca ili zaštitu osoba. Također, u ratom pogođenim područjima mogu se koristiti za zaštitu vojnih objekata od udarnih valova prouzročenih eksplozivnim napravama.



Prototip njemačkog brzog vlaka ICE od zavarenog sendviča s upjenjenom aluminijevom jezgrom



pogled iznutra

Biokompatibilni metali, poput titanija i magnezija, koji se često rabe za izradu implantata imaju krutost veću od ljudske kosti pa ne predstavljaju optimalan izbor koji jamči zadovoljavajuće ponašanje implantata. Međutim, ukoliko se umjesto monolitnog metala primijeni upjenjena verzija biokompatibilnog materijala, može se uspješno prilagoditi krutost (reguliranjem stupnja poroznosti) tako da im-

plantat i kost imaju slična svojstva čime se omogućuje njihova bolja povezanost i sraščivanje.

Od pjena s otvorenim ćelijama proizvode se filtri za odvajanje krutih čestica iz tekućina i plinova ili za uklanjanje onečišćenja iz kapljevina.



Filtri od poroznog metala za funkcionalne primjene

Zbog specifičnog izgleda, metalne pjene su vrlo atraktivne za arhitektonske i dekorativne svrhe. Tako je fasada bioenergane u Virovitici izrađena od panela aluminijske pjene koji su dodatno obojeni u različite nijanse zelene boje kako bi se istaknula proizvodnja energije iz obnovljivih izvora.



Implantat od pjene biokompatibilnog metala

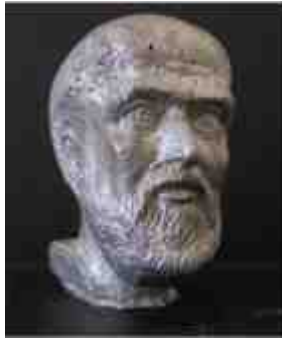


Fasadne obloge bioenergane

Suvremeni umjetnici koriste metalne pjene za izradu umjetničkih dijela, a zbog vizualnog dojma kojeg pružaju paneli s otvorenim ćelijama isti su prikladni za dekorativnu rasvjetu koja stvara ugodnu ambijentalnu atmosferu. Bivši student Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Josip Lukač, fokusirao se na akustična i estetska svojstva aluminijskih pjena pa je



Postolje skulpture načinjeno od Al-pjene



Glava Pitagore izrađena od upjenjenog aluminija



Obloga od metalne pjene za ambijentalnu rasvjetu



Gitara od drveta i aluminijeve pjene, Josip Lukač

u diplomskom radu izradio električnu gitaru koristeći se aluminijevom pjenom. Zahvaljujući tome ova gitara lakša je za više od jednog kilograma (oko 30 % ukupne mase) od identične Fender Telecaster električne gitare s drvenim tijelom. Ispitivanje zvučnih svojstava pokazalo je da njegova gitara nimalo ne zaostaje za drvenom, već dapače ima bogatiji zvuk i dulji ton te jače izražen bas.

Proizvodnja

Za proizvodnju metalnih pjena razvijeno je više postupaka, a svaki od njih bitno utječe na morfologiju ćelija, a time i na primjenu. U nekim tehnološkim postupcima kao polazni materijal koristi se rastaljeni metal, dok se u drugim rabe metalni prahovi u elementarnom stanju ili njihove mješavine. Također, postupci se razlikuju po tome lijeva li se rastaljeni metal u kalup ili na praobljke, ili se za upjenjivanje koristi plin odnosno odgovarajući dodatak za upjenjivanje.

Rastaljeni metal može se lijevati u kalup izrađen od polimerne pjene na koju je nanesen keramički prah. Zagrijavanjem polimerna pjena izgara, a keramički prah očvršne pri čemu se formira negativ oblika pjene. Kalup se zatim puni rastaljenim metalom te nakon ohlađivanja formira se pjena identične strukture polaznoj polimernoj pjenu.

S druge strane metal se može lijevati u praškasti materijal netopljiv u talini, ali topljiv u nekoj drugoj tekućini čime opet nastaju pore. Ovaj se postupak može modificirati na način da se umjesto rastaljenog metala koristi me-

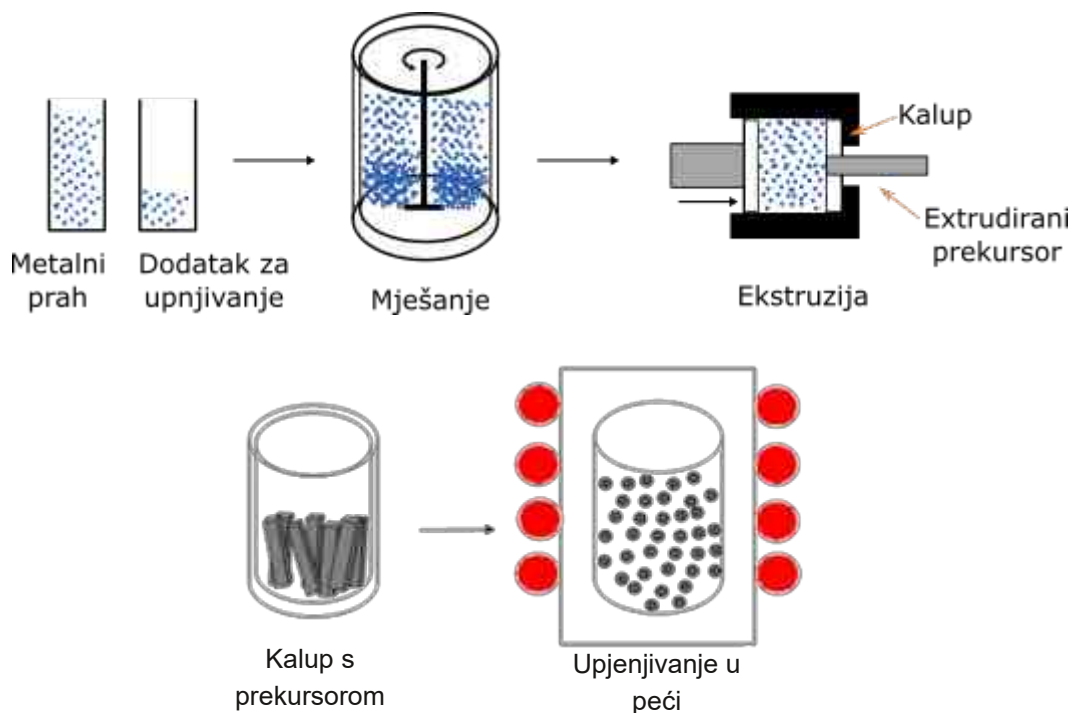
talni prah koji se miješa s određenim topljivim prahom i potom kompaktira nekim od poznatih postupaka, najčešće prešanjem. Kao topljivi prah može se koristiti primjerice sol ili šećer koji se dobro rastvaraju u vodi.

U talinu se vrlo često ubrizgava plin ili se koriste različiti praškasti dodaci za upjenjivanje (najčešće hidridi ili karbonati) koji pri povišenim temperaturama otpuštaju plinoviti sastojak koji u talini stvara mjehuriće.

U postupcima koji polaze od smjese praha metala i aditiva za upjenjivanje, potrebno je mješavinu prahova isprva dobro homogenizirati miješanjem te potom postupkom prešanja ili ekstrudiranja kompaktirati u poluproizvod poznat kao prekursor. Ovakav prekursor stavlja se u kalup željenog oblika i zatim zagrijava u peći čemu dolazi do rastvaranja dodatka za upjenjivanje, a oslobođeni plin stvara pore u polučvrstom stanju.

Zaključno

U tekstu su navedene samo neke karakteristične primjene metalnih pjena koje su zbog svojih specifičnih svojstava i izgleda sve više zastupljene na globalnom tržištu tako da broj



komercijalnih primjena svakodnevno raste. Kao najveći nedostaci trenutno se ističu relativno visoka cijena proizvodnje, pogotovo ako se radi o pjenama izrađenim od skupih materijala visokog tališta te neujednačenost mehaničkih svojstava kao rezultat slučajne raspodjele veličina i oblika ćelija. Ovladavanje postupcima proizvodnje i razumijevanje

utjecaja procesnih parametara na dobivenu strukturu zasigurno će doprinijet daljnjem unaprjeđenju svojstava metalnih pjena te potaknuti i nove mogućnosti primjene.



Tim istraživača na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zavodu za materijale već dugi niz godina aktivno se bavi istraživanjima na području metalnih pjena. Aktivnosti su usmjerene prema što boljem ovladavanju tehnološkim procesima upjenjivanja te mogućnostima ispitivanja svojstva ovih materijala. Dizajniranjem morfologije i razmatranjem utjecaja veličine, oblika i raspodjele ćelija na ponašanje metalnih pjena uz dodatno ojačavanje ćelijaste građe nastoji se unaprijediti njihovu konstrukcijsku i funkcionalnu primjenu. Zahvaljujući suvremenoj opremi, znanju i zalaganju studenata i istraživača te uspješnoj suradnji s međunarodnim institucijama produbljene su spoznaje o ovom novom obliku metalnih materijala karakteristične strukture i svojstava iz čega su proizašli i brojni znanstveni i stručni radovi kao i završni i diplomski radovi studenata preddiplomskog i diplomskog studija strojarstva, smjera Inženjerstvo materijala.

Dodatna literatura

1. T. Filetin, I. Kramer, G. Marić, Metalne pjene: proizvodnja, svojstva i primjena, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2003.
2. I. Bunjan, K. Grilec, D. Ćorić, Investigation and Statistical Evaluation of Reinforced Aluminum Foams, Processes 9 (2021) 2, 1-16
3. M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley, Me-

tal Foams: A Design Guide, Butterworth-Heinemann, Woburn, 2000.

4. J. Banhart, Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams, Progress in Materials Science, 46 (2001), 559 – 632

5. F. Garcia-Moreno, Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production, Metals, 9 (2016) 2

KONSTRUIRANJE 3-BRZINSKOG PRIJENOSNIKA U GLAVINI STRAŽNJEG KOTAČA BICIKLA

**Doris Stavljenić¹, dr.sc. Josip Hoster¹,
prof.dr.sc. Aleksandar Sušić², prof.dr.sc. Ivica Skozrić²**

¹ **Veleučilište u Karlovcu**

² **Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu**



Konstruktivna rješenja

Bicikl kao prijevozno sredstvo daleko nadmašuje odnos prosječne brzine prema utrošenoj energiji za gradsku vožnju. Prosječna brzina gradskog prometovanja automobila u Londonu je oko 19km/h, Berlinu oko 24km/h, Varšavi oko 26km/h. Ako dodamo u razmatranje i odnos prosječne brzine po jedinici mase vozila i vozača bicikl je izvrsno prijevozno sredstvo za „dovoljno“ prihvatljive vremenske uvjete za prijevoz po gradu, na



„Klasični“ lančani: kombinacija naprijed dva lančanika i otraga šest

udaljenosti oko 10 km, uz prijevoz male količine tereta.

Današnji bicikli većinom koriste višestruke lančanike na stražnjoj osovini (kotaču), za postizanje različitih prijenosnih omjera, često u kombinaciji s višestrukim (najčešće tri) lančanicima na vratilu pedala. Stražnji kruto spojeni skup lančanika koji su često nazvani „kranc“, i imaju područje broja zuba 14 do 28. Verzijom koja se često zove „megarange“ s brojem zuba 14 do 34 služi za prošireni raspon prijenosnih omjera i moguće ju je zamijeniti na biciklima s kranc oblikom skupa lančanika. Prednji lančanici imaju na takvim biciklima često 24, 34 i 44 zuba. Takva konstrukcija prijenosnika daje prijenosne omjere od „najsporije“ brzine $34/24=1,42$ do „najbrže“ $14/44=0,318$, što daje raspon od $1,42/0,318=4,46$. Neki bicikli imaju jedan skup lančanika na stražnjem kotaču često s brojem zuba 11 do 42 što daje raspon prijenosnog omjera 3,82. Što je veći broj lančanika na stražnjem kotaču, to je veći kut lanca prema lančanicima kada je lanac u zahvatu s rubnim lančanicima, pa su valjci na lancu u kontaktu nepovoljnije na zubima od paralelnog položaja.



„Klasični“ lančanic: „kazeta“ s 11 lančanika na stražnjem kotaču

Konstrukcija mehanizma za promjenu prijenosnog omjera je kod niže kvalitetnih bicikala, tj. prijenosnika podložna promjeni („preskakanju“) stupnja prijenosa pri udarcu kotača u rubnjak, ili prepreku, jer se javlja značajno vertikalno ubrzanje dijelova mehanizma za promjenu stupnjeva prijenosa, pa su inercijske sile značajno opterećenje za oprugu u mehanizmu te se događa pomak prijenosnog omjera. Pri stajanju takvi mehanizmi ne mogu provesti promjenu stupnja prijenosa, što u slučaju gradske vožnje s puno ciklusa zaustavljanje-pokretanje predstavlja nedostatak, i zahtijeva „uvježbanost“ vozača za promjenu, tj. pripremu na zaustavljanje promjenom u „niži“ stupanja prijenosa radi lakšeg kretanja. Prijenosnici prikazani u članku imaju mogućnost promjene stupnja prijenosa s vrlo malim zakretom ili bez zakreta pedala, slično kao kod prijenosnika u automobilima.

Za proračun prijenosnika bitni čimbenici ili parametri su savladavanje uspona i najveća brzina po horizontalnoj podlozi. Na odabir prijenosnog omjera značajno utječe očekivana sila noge vozača u ustaljenoj vožnji koju može ostvarivati u trajno (većinom u grad-

skoj vožnji oko dvije do tri minute jer je pretpostavka da će u tom vremenu i vrlo malom brzinom svladati uspon duljine oko 200 m), a predstavlja biomehanički značajnu sposobnost čovjeka za dugotrajniji napor. U kontinentalnoj Hrvatskoj su u gradovima (Zagreb) usponi asfaltnih prometnica do 22% (oko 12,4°) (osobno iskustvo autora), što je smjernica za odabir prijenosnog omjera najsporijeg (1.) stupnja prijenosa. Stalna brzina od 25km/h po horizontalnoj podlozi je smjernica za odabir prijenosnog omjera najbržeg (3.) stupnja prijenosa. Prijenosnici smješteni u glavinu stražnjeg kotača komercijalno dostupni su planetarnog tipa, višeredni (više paralelnih „stupnjeva“), koji imaju do 14 stupnjeva prijenosa. Primjer takvog prijenosnika je ovdje izostavljen, dostupan je u proširenoj verziji rada na zahtjev.

Postignuti raspon prijenosnih omjera za planetarni prijenosnik sa slijedeće slike je od 1,458 u 1. stupnju prijenosa do 0,278 u 14. stupnju, tj. raspon omjera od 5,26.

Ovakvi prijenosnici imaju stupanj korisnosti oko 90%. Konstrukcija im je dosta složenija od prijenosnika s više lančanika uz pedale i na stražnjem kotaču. Prednost zatvorenih planetarnih prijenosnika je u sprečavanju ulaska prašine, vode, i ostalih onečišćenja između zupčanika, te moguće postavljanje lanca u ravninu lančanika, što doprinosi trajnosti lanca. Isto tako, postoje izvedbe s ozubljenim remenom (timing belt) umjesto lanca, pa je potreba za podmazivanjem uklonjena u svakodnevnoj upotrebi.

Metodologija traženja (konstruiranja) rješenja

Način stvaranja rješenja prijenosnika počinje od okvirnog određivanja geometrije na temelju funkcijskih zahtjeva. Ovdje je ograničenje na promjer glavine stražnjeg

kotača u kojem je predviđen smještaj prijenosnika oko 150 mm. Na taj promjer dolaze prihvati za žice (žbice, engl. „spokes”), što onda dalje ograničava izbor žica za spajanje s obručem kotača. Simbolično su prihvati žica prikazani na daljnjim slikama na kojima je prikazano rješenje za pojedini oblik prijenosnika. Na ograničenje geometrije dolazi ograničenje u geometriji vratila, načina uključivanja pojedinih pogonskih zupčanika u stupnjevima prijenosa, što daje grube minimalne mjere pogonskih zupčanika i mjesta prijenosa snage (sile) sa spojke na zupčanik.

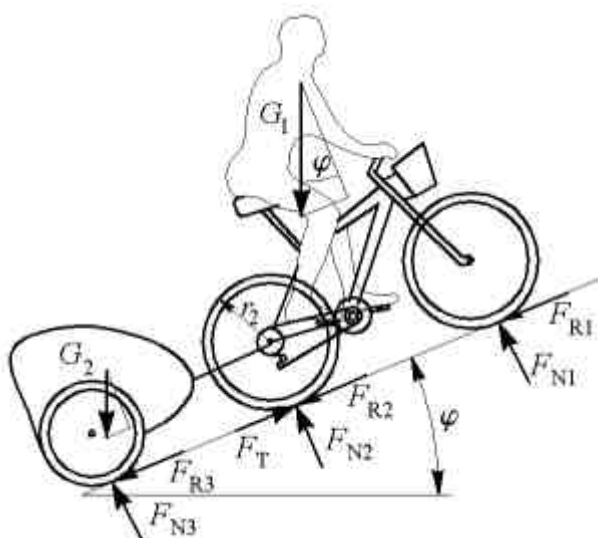
S tim ograničenjima postoji dovoljno parametara za izračun kinematike stupnjeva, te traženje kinematskih promjera zupčanika koji daju željene prijenosne omjere. Opterećenje proizlazi iz najvećeg nagiba koji biciklist treba svladati očekivanom najvećom silom u nozi koju može ostvarivati „trajno”, tj. nekoliko minuta, dovoljno za uspon na očekivane vodoravne ceste (podloge) nakon nagiba u prvenstveno gradskim uvjetima Republike Hrvatske. Nakon toga, na temelju opterećenja u pojedinom stupnju, provodi se proračun nosivosti (čvrstoće) zubi zupčanika prema kriterijima nosivosti (naprezanja) bokova i nosivosti korijena zuba.

OPTEREĆENJE I POGON BICIKLA

Čovjek koji vozi bicikl je sam sebi opterećenje i „izvor” pogonske sile na pedalama, te je stoga osnovni čimbenik u odabiru prijenosnih omjera prijenosnika. Naravno, uz masu (težinu) bicikla i čovjeka, opterećenje mogu biti i prikolica s djecom i stvarima, ili košara za stvari na prednjem dijelu bicikla. U nekim državama EU česti su bicikli s tovarnim prostorom između prednjeg kotača i cijevi upravljača, tzv. Bakfietsen, koji često služi za prijevoz djece. Takvi bicikli imaju redovno mogućnost voziti uz vozača i oko 50kg tereta.

Za konstruiranje prijenosnika prikazanom nadalje, u prvom stupnju prijenosa, namijenjenom savladavanju uspona (usponu od 22%), uzeta je brzina penjanja od $v=4,5\text{km/h}$, pri brzini vrtnje pedala oko $n=1,5\text{s}^{-1}$ (90 min^{-1}). Predviđena masa vozača je 75kg, masa bicikla s dodatnom opremom 25kg, te masa tereta koji prevozi na biciklu ili vuče za biciklom u prikolici je 25kg (osobno iskustvo autora). Prijenosnik je konstruiran za kotače promjera obruča (guma) od 26” do 29”. Te mjere i pretpostavljena kinematika određuju područje „poželjnog” prijenosnog omjera za 1. stupanj prijenosa.

Na donjoj slici G_1 označava težinu čovjeka s biciklom i dodatnom opremom, G_2 težinu prikolice, F_{N1} , F_{N2} i F_{N3} normalne reakcije na podlozi u kontaktu s prednjim, stražnjim i kotačima prikolice, F_{R1} , F_{R2} i F_{R3} tangencijalne sile na kotačima u kontaktu (otpori kotrljanja), r_2 vanjski (kontaktni) radijus gume, F_T silu trenja na pogonskoj gumi i Φ kut nagiba kosine prema horizontali. Tokom vožnje vozač mora savladati otpore uspinjanja, kotrljanja i ako ubrzava, inercijsku silu.



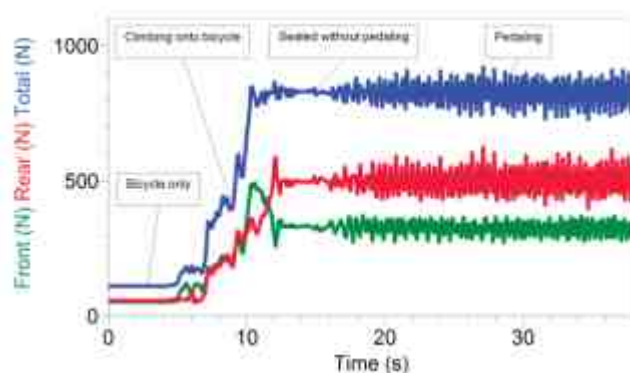
Opterećenja bicikla na uzbrdici

PSlijedeća slika prikazuje normalne komponente reakcije na prednjoj i stražnjoj gumi tijekom okretanja pedala za biciklistu mase 70 kg.

Za ustaljenu vožnju uzbrdo dobivamo prema prethodno opisanim pretpostavljenim podacima otpor vožnje.

$$F_T = (G_1 + G_2) \sin(\varphi) + F_{R1} + F_{R2} + F_{R3} = (m_1 + m_2) g \sin(\varphi) + f_k (m_1 + m_2) g \cos(\varphi) = 125 - 9,81 [\sin(12,4^\circ) + 0,01 \cos(12,4^\circ)] = 275,3 \text{ N}$$

Za grubu kontrolu ostvarivosti tolike sile trenja na pogonskom kotaču (gumi) u



Raspodjela težine na kotače pri opterećenju bicikla

kontaktu s asfaltom koristi raspodjela opterećenja (normalne reakcije podloge) na kotačima za cestovni bicikl. Vozač je položeniji tijelom prema prednjem kotaču, te je minimalna reakcija na stražnjem kotaču oko 53% (~400 N od ukupne težine ~750 N) od ukupne težine. Stoga je opravdano očekivati da je najmanje pola težine vozača normalna reakcija na stražnjem kotaču, što za prethodno navedene parametre proračuna može biti 370N. Uz faktor trenja za suhi asfalt od oko 0,8, očekivana sila trenja je oko 300N. Moment na pogonskom vratilu kotača M_k , ili, kako će kasnije biti vidljivo, dijela prijenosnika sa kojeg se prenosi moment na kotač, iznosi za dva promjera (mjere) kotača 2,25 x 26 (57-559), radijusa r_2 oko 336 mm i 2,25 x 29 (57-635), radijusa oko 375 mm iznosi

$$M_k = F_T r_2 \Rightarrow M_k = 275,3 \cdot \begin{Bmatrix} 0,3365 \\ 0,3745 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 92,64 \\ 103,1 \end{Bmatrix} \text{ Nm.}$$

Ovdje je za dimenzioniranje dijelova bitan najveći očekivani moment, te sila. Ta sila i njen moment ovise o otporima vožnje, okolišnim uvjetima, što se često mijenja. Stoga, najveći moment u jednom okretu, za proračun čvrstoće je to ciklusu naprezanja, se mijenja. Detalji tog proračuna dostupni su u proširenoj verziji rada, na zahtjev.

Uzimajući brzinu vrtnje pedala od $1,5 \text{ s}^{-1}$,

potreban moment na osi stražnjeg kotača, i pretpostavljenog stupnja korisnosti od 90% od pedala do glavine stražnjeg kotača, možemo izračunati potreban prijenosni omjer za 1. stupanj prijenosa i_1 . Ovdje je paralelno (istovremeno) potrebno razmišljati o prijenosnom omjeru za 3. stupanj prijenosa, i_3 , budući da je zajednički dio prijenosa snage i gibanja, lančani (ili remenski) prijenos do pogonskog vratila stražnjeg kotača prvi dio u oblikovanju prijenosnih omjera. Prvi stupanj prijenosa mora biti i dovoljno „usporen“ tj. moment na kotaču toliko povećan da moment za penjanje nije uravnotežen silom na pedali samo u položaju s najvećom tangencijalnom silom, nego u većem području, kako bi vozač uspijevao održavati srednju vrijednost brzine penjanja uz ciklička usporavanja i ubrzavanja. Stupanj između krajnjih je odabran prema geometrijskom nizu, opisano sa $i_2 = i_1 q$; $i_3 = i_2 q \Rightarrow i_3 = i_1 q^2$. $q = \sqrt{i_3 / i_1}$. Cilj je postići konstrukciju koja omogućuje raspon prijenosnog omjera 6, što daje faktor geometrijskog niza $q = \sqrt{i_3 / i_1}$. Tako bi drugi stupanj prijenosa imao prijenosni omjer $i_2 = 2 \cdot 0,408 = 0,816$.

Kao proračunski maksimum čovjek očekivano može ostvariti tangencijalnu silu $F_{\tan, \max}$ iznosa vlastite težine u jednoj nozi što na kraku pedale $r_p = 175$ mm daje najveći moment $M_{T, \max}$ oko osi vratila pedala u iznosu

$$M_{T, \max} = F_{\tan, \max} r_p = 750 \cdot 0,175 = 131,25 \text{ Nm}$$

Ovisno o prijenosnom omjeru u 1. stupnju prijenosa, na pogonskom kotaču će uslijed povećanja momenta uvijanja i gubitaka do kotača biti na raspolaganju najviše moment

$$M_{k, 1} = M_T \eta i_1$$

Ovdje je M_T moment na vratilu pedala, η stupanj korisnosti od pedala do pogonskog kotača i i_1 prijenosni omjer od pedala do kotača u prvom stupnju prijenosa. Očekivani prijenosni omjer od vratila pedala do kotača

u prvom stupnju prijenosa iznosi 2. Najveća ostvariva sila trenja je spomenutih 300 N, pa uvrštavanjem dobivamo moment na osi kotača i pogonskom vratilu kotača

$$M_{k, 1} = F_t r_2 = 300 \cdot 0,375 = 112,5 \text{ Nm}$$

$$M_{T, 1} = M_{k, 1} / \eta i_1 = 112,5 / (0,9 \cdot 2) = 62,5 \text{ Nm}$$

$M_{T, 1}$ je moment na vratilu pedala koji čovjek mora stvoriti za izračunati moment na kotaču u prvom stupnju prijenosa. U drugom stupnju prijenosa na isti način uz očekivanu najveću silu trenja na pogonskom kotaču i prijenosni omjer prema geometrijskom nizu slijedi moment na pogonskom kotaču

$$M_{k, 2} = \min \left\{ \begin{array}{l} F_t r_2 \\ F_{\tan, \max} r_p \eta i_2 \end{array} \right. = \min \left\{ \begin{array}{l} 300 \cdot 0,375 = 112,5 \\ 750 \cdot 0,175 \cdot 0,9 \cdot 0,816 = 96,4 \end{array} \right. = 96,4 \text{ Nm}$$

U trećem stupnju prijenosa moment na vratilu pedala se prenosi remenskim ili lančanim prijenosom uz odabrani prijenosni omjer od pedala do kotača prema dosadašnjim vrijednostima $i_3 / i_1 = 1 / 6$; $i_1 = 2 \Rightarrow i_3 = 0,333$. Uz stupanj korisnosti $\eta = 0,9$ dobivamo moment na pogonskom kotaču

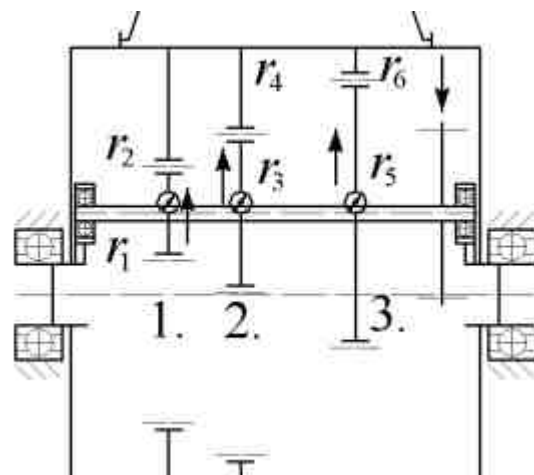
$$M_{k, 3} = F_{\tan, \max} r_p \eta i_3 = 750 \cdot 0,175 \cdot 0,9 \cdot 0,333 = 39,37 \text{ Nm}$$

PRORAČUNSKI MODEL KINEMATIKE – PRIJENOSNOG OMJERA

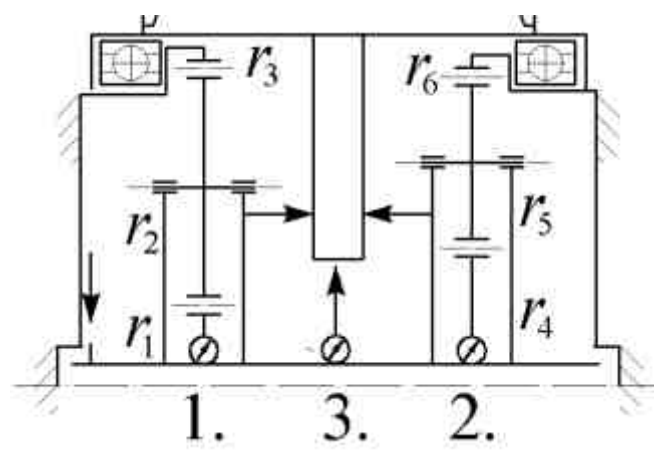
U konstruiranju prijenosnika snage u glavini stražnjeg kotača, prvi kriterij je postići predviđene prijenosne omjere kako je do sad opisano, drugi kriterij postići jednostavni prijenosnik, i treći kriterij postići najmanje mjere prijenosnika koji ima pogonsku čvrstoću za najveći predviđeni moment. Prijenosni omjer se odnosi na brzinu vrtnje od vratila pedala do kotača. Na slijedećim slikama prikazani su shematski prijenosnik s fiksnim osima i planetarni prijenosnik. Na

prvoj slici lančanik na pogonskom vratilu u glavini stražnjeg kotača je spojen s pogonskim vratilom. Cijela glavina je većinom zatvorena „posuda”, s dva otvora predviđena za prolaz lanca ili ozubljenog remena. Strelica koja „dolazi” do vratila predstavlja mjesto lančanika. Lančanik (ili remenica) je smješten na vratilu s tri pogonska zupčanika koji su spojeni s vratilom pomoću radijalnih kandžastih spojki koje omogućuju uključivanje i isključivanje pojedinih „brzina”, tj. stupnjeva prijenosa. Ti su zupčanici čelnici s vanjskim ozubljenjem. Svaki od njih je uparen s čelnicima s unutrašnjim ozubljenjem koji su kruto spojeni s glavinom, na koju su spojene žice te obruč s gumom. Prijenos snage je stoga od pogonskog lančanika (remenice) preko lanca (remena) do zupčanika na pogonskom vratilu do zupčanika spojenog na glavinu i kotač.

Planetarni prijenosnik prikazan na slijedećim slikama građen je od dva planetarna stupnja i jedne spojke za 3. stupanj prijenosa. Strelica koja „dolazi” do vratila predstavlja mjesto lančanika. Lančanik (ili remenica) pokreće pogonsko vratilo s pogonskim sunčanim zupčanicima. Vanjski zupčanik u stupnju mora u ovoj konstrukciji biti fiksiran (nepomičan) prema okviru bicikla. Sunčani zupčanik uzrokuje tangencijalnu silu na vratilima (ležajima) planetarnih zupčanika te stvara moment oko osi kotača. Strelica koja „odlazi” od spojne ploče planetarnih zupčanika (strelice su „vodoravne”) predstavlja tok (mjesto) „odvođenja” momenta prema spojci i glavini sa žicama koje drže obruč s gumom.



Shematski prikaz rješenja prijenosnika u glavini s fiksnim osima vratila



Shematski prikaz rješenja prijenosnika u glavini s pomičnim osima

Detalji proračuna prijenosnika s fiksnim osima dostupan je u proširenoj verziji rada, na zahtjev.

Planetarni prijenosnik

Kinematiku planetarnog prijenosnika prikazanu na prvoj na slijedećoj stranici možemo promatrati kao složeno gibanje planetarnih zupčanika u ravnini. Prijenosno gibanje ostvaruje spojna ploča, koja ima kutnu brzinu ω_s , zasad nepoznatu, a relativno rotacijsko gibanje vrše zupčanici oko osi u ploči, kutnom brzinom ω_2 . Budući

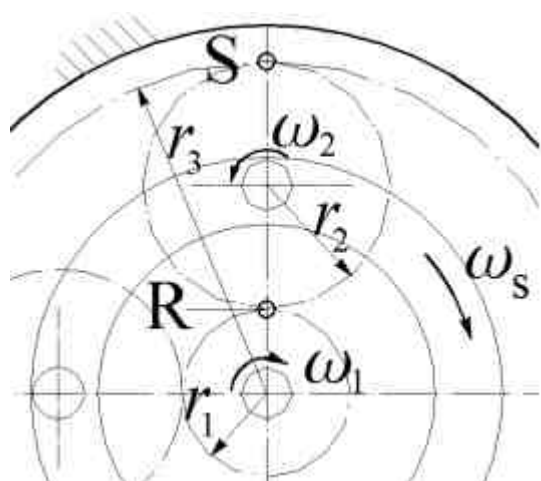
da je pretpostavljena kutna brzina vanjskog zupčanika jednaka nuli, tj. spojen je na konstrukciju bicikla, možemo postaviti dva uvjeta jednakosti brzina točaka R i S na spojevima kinematskih kružnica. Točke R ima brzinu koju određuje gibanje sunčanog zupčanika, koja je povezana s njegovom kutnom brzinom ω_1 . Kao dio planetarnog zupčanika ta brzina je određena kao zbroj prijenosne komponente brzine uslijed gibanja planetarnih zupčanika sa spojnom pločom kao cjelinom, v_R^{pr} prikazano na slici Simbolički proračun kinematike planetarnog prijenosnika tankom crtom, i relativne komponente brzine prikazane na desnom dijelu iste slike, v_R^{rel} . Točka S ima brzinu jednaku nuli (relativno prema okviru bicikla) jer je taj zupčanik fiksiran, kruto spojen s okvirom. Za ove dvije točke jednažbe kinematskih uvjeta su

$$v_R = r_1 \omega_1, v_R^{pr} = r_1 \omega_s, v_R^{rel} = r_2 \omega_2 \Rightarrow r_1 \omega_1 = r_1 \omega_s + r_2 \omega_2.$$

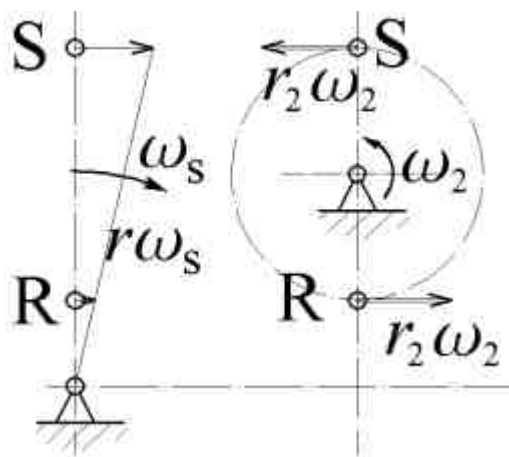
$$v_S = 0, v_S^{pr} = r_3 \omega_s, |r_3 = r_1 + 2r_2|, v_S^{rel} = -r_2 \omega_2 \Rightarrow 0 = r_3 \omega_s - r_2 \omega_2.$$

$$r_3 \omega_s = r_2 \omega_2 \Rightarrow \omega_2 = \omega_s \frac{r_1 + 2r_2}{r_2}.$$

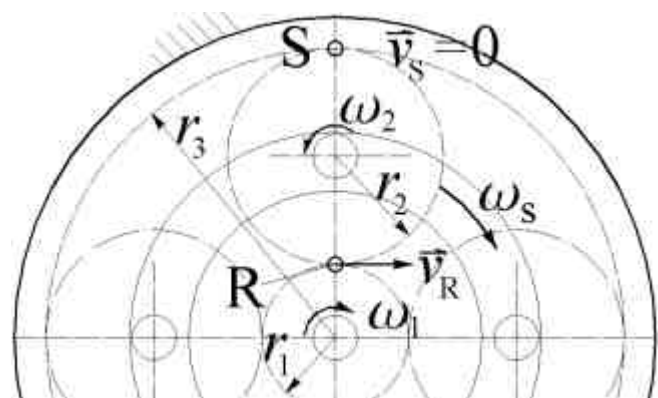
$$r_1 \omega_1 = r_1 \omega_s + r_2 \omega_s \frac{r_1 + 2r_2}{r_2} = \omega_s (2r_1 + 2r_2) \Rightarrow \omega_s = \omega_1 \frac{r_1}{2r_1 + 2r_2}.$$



Proračun kinematike planetarnog prijenosnika prijenosno i relativno gibanje na dijelovima



Simbolički proračun kinematike planetarnog prijenosnika



Proračun kinematike planetarnog prijenosnika apsolutne brzine točaka za analizu

Koristeći prethodnu jednažbu uz odabrani prijenosni omjer v_R^{rel} , što je ostvarivo s brojem zubi lančanika 48 i 16, proizlazi karakteristika prijenosnika

$$i_{AB} = (3,31/1,5) / i_{3p} = 0,3 \Rightarrow i_{3p} = (3,31/1,5) / 0,3 = 0,735.$$

$$i_{1p} / i_{3p} = 0,179 \Rightarrow i_{1p} = 0,179 \cdot i_{3p} = 0,179 \cdot 0,735 = 0,131664.$$

Postizanje prijenosnih omjera 1. i 2. stupnja prijenosa je moguće odabirom broja zuba zupčanika u zahvatu kako slijedi

$$z_1 = 20, z_2 = 40, z_3 = 100 \Rightarrow i_1 = 2,0. z_4 = 50, z_5 = 10, z_6 = 70 \Rightarrow i_2 = 0,8. \text{ izravno} \Rightarrow i_3 = 0,3.$$

KONSTRUKCIJA PRIJENOSNIKA

Planetarni prijenosnici 1. i 2. stupnja imaju različite najveće brojeve planetarnih

zupčanika jer iz jednadžbe (16) planetarni zupčanici 1. stupnja prijenosa su mnogo veći od onih za drugi stupanj. Opterećenje se na sunčanom zupčaniku raspodjeljuje na planetarne zupčanike, ovdje je pretpostavka jednoliko na n zupčanika, pa je u proračunu zupčanog para moguće s dovoljnom točnosti uzeti $1/n$ ukupne obodne sile, tj. momenta uvijanja koji dolazi na ulazno vratilo sunčanog zupčanika. Zupčanici za sve stupnjeve prijenosnika su predviđeni čelnici sa strelastim zubima. Razlog je u većoj nosivosti za isti modul u normalnoj ravnini prema [14], poništavanje uzdužne sile, te ujedno vođenje jednog od uparenih zupčanika aksijalno nepomičnim drugim zupčanikom. Proračun potrebnog modula za principijelno čelnike s kosim zubima proveden je u skladu s dodatnom literaturom.

Izrada čelnika sa strelastim zubima je ovdje predviđena kao „uparivanje” čelnika s kosim zubima sa suprotnim nagibom boka. Za „velike” zupčanike, s brojem zuba iznad 30 je uparivanje, tj. spajanje lako moguće izvesti spajanjem aksijalno postavljenim vijcima, zakovicama ispod korijenskog promjera. No, za najmanje zupčanike, sunčane tj. pogonske u prvom stupnju prijenosa nema radijalno mjesta za vijke ili zakovice. Rješenje je u prijenosu trenjem na konusu. Izrada konusnih površina na malim zupčanicima je izvediva, ne zahtjeva „posebne” postupke obrade, dovoljno je tokarenje. Mogućnosti prijenosa momenta trenja moguće je procijeniti uz pretpostavku jednolikog pritiska prema slici 12. a). Nakon rasterećenja uzdužne sile zaostaje pritisak na dodirnim površinama koji ovisi i o elastičnosti dijelova u kontaktu. Ovdje neće biti detaljnije analize o veličini zaostalog pritiska. Kut nagiba je postavljen tako da u zahvatu zupčanika, opterećenje na zubima uzrokuje pritiskanje dvaju polovica

zupčanika, tj. konusa, tako da postoje mogućnosti za održavanje izračunatog pritiska. Detalji o proračunu trenja na konusu dostupni su u proširenoj verziji rada, na zahtjev.

Kao kontrola mogućnosti rješenja spajanja pogonskog zupčanika konusom, za predviđene promjere konusa $d = 18$ mm, $D = 19,4$ mm, jednadžba (18) daje procjenu momenta za faktor trenja na dodirnim površinama $\mu = 0,05$, silu prešanja $F = 10\,000$ N, u ovisnosti o kutu nagiba boka konusa. Vertikalna crta na $\alpha = 4,5^\circ$ naznačuje kut pri kojem je izračunati moment trenja na konusu jednak najvećim momentu koji očekujemo na pogonskom zupčaniku. Bitno je da jedna polovica zupčanika prenosi pola momenta sa pedala, stoga i konus koji s dijela zupčanika koji moment dobiva od radijalne spojke prenosi do druge polovice zupčanika. Detalji proračuna prijenosnika s fiksnim osima dostupni su u proširenoj verziji rada, na zahtjev.

Rezultati proračuna planetarnog prijenosnika

Planetarni prijenosnik je pretpostavljen kako je prikazano na sljedećoj slici. Lančanik na lijevoj strani unutar kućišta prenosi silu (moment) na vratilo, kruto spojen. Nadalje, vratilo prenosi moment do štapića radijalne kandžaste spojke. Za uključeni prvi ili drugi stupanj štapići prenose moment na pogonski (sunčani) zupčanik. On je uparen s četiri planetarna (proizlazi iz kinematike) zupčanika i vanjskim zupčanikom koji obuhvaća planetarne. Spojna ploča u kojoj su i ležaji koji uležišćuju planetarne zupčanike ima na sebi za prvi i drugi stupanj elastične elemente koji služe za prijenos momenta sa spojne ploče na ozubljeni prsten na ploči koja je kruto spojena na plašt

glavine. Time je omogućeno jednosmjerno djelovanje lanca preko lančanika na kotač, tj. slobodna rotacija kotača kada biciklist ne okreće pedale. Lanac prolazi kroz male kanale u kućištu. Obuhvatni zupčanik u prvom i drugom stupnju spojeni su nepomično na okvir bicikla (stražnju „vilicu“), a na poveznim limovima su uležišteni kuglični ležaji koji omogućuju rotaciju kotača. Za treći stupanj je spojka izravno povezana s glavinom, time i obručem, tj. gumom.

Prema kinematici, odnosno geometriji kinematskih kružnica stupnja, je moguće smjestiti četiri planetarna zupčanika. Uz pretpostavku o jednolikoj raspodjeli opterećenja na svim mjestima zahvata zuba, pogonski zupčanik proračunavamo prema jednoj četvrtini pogonskog momenta. Kombinacija vanjsko – vanjsko ozubljenje na spoju sunčani – planetarni zupčanici je nepovoljnije od kombinacije vanjsko – unutrašnje ozubljenje na spoju planetarni – okvirni zupčanik. Tangencijalne sile su jednake u tim točkama zahvata jer to proizlazi iz uvjeta jednakosti momenta tangencijalnih sila na planetarnom zupčaniku oko osi simetrije tog zupčanika. Najveći pogonski moment za prvi stupanj prijenosa identično kao u proračunu prijenosnika s fiksnim osima iznosi 17 871 Nmm. Proračunski je uzet nadalje 4 468 Nmm. Stoga proračun ozubljenja sunčanog zupčanika prema kriterijima nosivosti boka i korijena počinje analogno prijenosniku s fiksnim osima. Očekivani modul je $m_n = 1,25$ mm slijedi diobeni promjer $d_2 = 25$ mm, pa je obodna sila $F_t = 4468 / 12,5 = 357,5$ N

Specifično opterećenje zuba je $F_t/b = 357,5 / (10 \cdot 1,25) = 286$ N/mm Slijedeći dijagram kao u prvom koraku očitano je $Z_\epsilon = 0,75$. Faktor oblika zuba je prema dijagramu na slici 182.1 u [14] $Z_H = 2,21$. Nadalje je

$K_{H\alpha} = 1 + 2(0,85 - 0,5)(1/0,75^2 - 1) = 1,544$. Ponovni proračun modula prema opteretivosti boka daje normalni modul

$$m_n \geq \sqrt[3]{\frac{6 + 12(0,5 \cdot 4468)\cos^2(30^\circ)}{6 \cdot 20^3 \cdot 10 \cdot 460^2}} \cdot 1,544 \cdot 190^2 \cdot 2,21^2 \cdot 0,75^2 = 0,33 \text{ mm.}$$

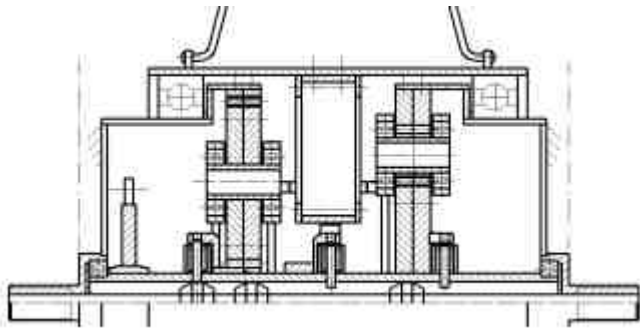
Na temelju rješenja moguće je zaključiti da je modul 1,25 mm dovoljno velik da zadovolji uvjete prijenosa opterećenja opisanog u poglavlju 2. Uvjeti za drugi stupanj su slični. Zbog malog broja zuba planetarnih zupčanika u drugom stupnju moguće ih je postaviti do 10. Na slijedećim slikama prikazano je šest planetarnih zupčanika. Ovdje su planetarni zupčanici u nepovoljnijim uvjetima zbog malog broja zuba, pa će proračun normalnog modula početi od momenta na planetarnim zupčanicima na temelju tangencijalne sile na sunčanom zupčaniku i očekivanom modulu. Očekivani modul je 1,25 mm. Iz geometrije zupčanika dobivamo diobene promjere sunčanog $d_4 = 50 \cdot 1,25 = 62,5$ mm i planetarnih zupčanika $d_5 = 10 \cdot 1,25 = 12,5$ mm. Moment na sunčanom zupčaniku prema i prijenosnom omjeru do sunčanog zupčanika uz očekivani stupanj korisnosti oko 0,9 iznosi $131,25 \cdot 0,333 \cdot 0,9 = 39,37$ Nm. Uz pretpostavku jednolike raspodjele opterećenja na sve planetarne zupčanike, nadalje njih šest, dobivamo moment na svakom planetarnom zupčaniku iznosa $(39,37/6)/5 = 1,312$ Nm. Obodna sila je $F_t = 1312/6,25 = 210$ N. Specifično opterećenje zuba je $F_t/b = 210/(10 \cdot 1,25) = 16,8$ N/mm.

Iz dodatne literature navedene na kraju članka uzet je faktor $q_L = 1,0$.

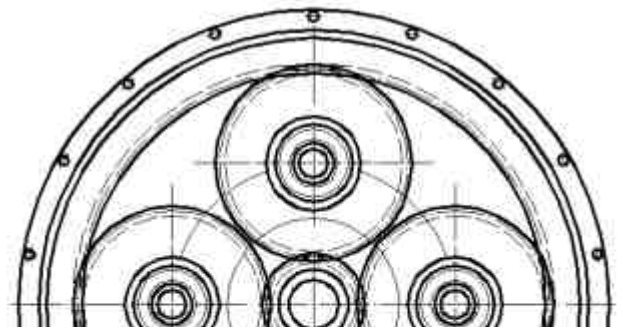
Nadalje je $Z_\epsilon = 0,75$. Nadalje je $K_{H\alpha} = 1 + 2(1 - 0,5)(1/0,75^2 - 1) = 1,778$.

oblika zuba je $Z_H = 2,21$. Proračun modula prema opteretivosti boka daje normalni modul

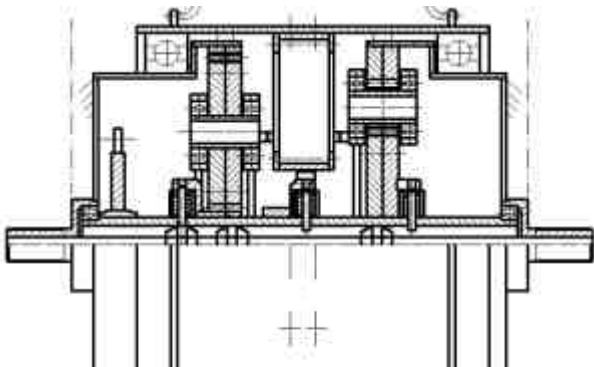
$$m_n \geq \sqrt[3]{\frac{5 + 12(0,5 \cdot 1312)\cos^2(30^\circ)}{5 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 460^2}} \cdot 1,778 \cdot 190^2 \cdot 2,21^2 \cdot 0,75^2 = 0,46 \text{ mm.}$$



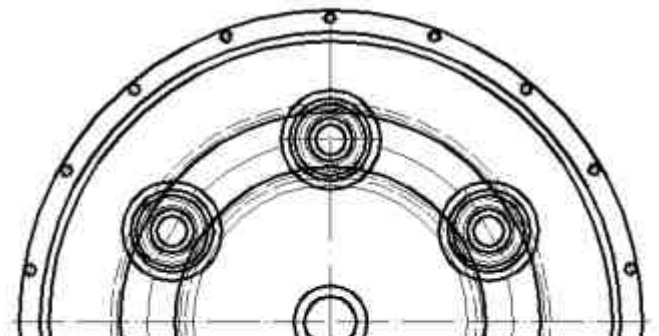
Polovični presjek planetarnog prijenosnika



Bočni pogled stupnjeva prijenosa - prvi



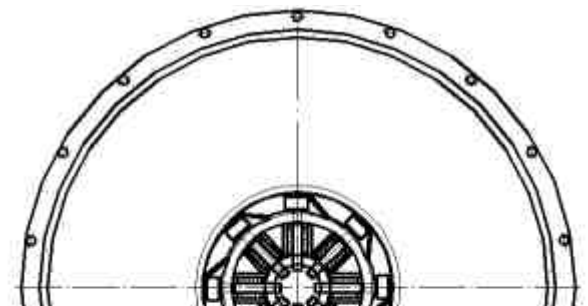
Planetarni prijenosnik - polovični presjek



Bočni pogled stupnjeva prijenosa - drugi



Planetarni prijenosnik - pogled bočno



Bočni pogled stupnjeva prijenosa - treći

Zaključak je da normalni modul iznosa 1,25 mm može koristiti u oba stupnja planetarnog prijenosnika. Bitno je istaknuti da je dosad bilo pretpostavljeno korištenje nultog ozubljenja, koje ima manje karakteristike nosivosti od „v plus” ozubljenja.

ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazano je konstruiranje prijenosnika snage i gibanja u glavini stražnjeg kotača bicikla. Tražena su rješenja različita od postojećih na tržištu, tj. ugrađenih u biciklima, vanjskih skupova lančanika nazvanih „kranc” i „kazeta”, i višestupanjskih planetarnih ugrađenih u glavinu stražnjeg kotača. Cilj je pri tome prikaz (pregled) mogućnosti izvedbe prijenosnika koji imaju nekoliko prednosti u odnosu na prijenosnike s više lančanika uz pedale i na glavini stražnjeg kotača (najčešći) u kojima je lanac otvoren, izložen prašini i vodi, mijenjanje stupnjeva prijenosa je moguće samo pri rotiranju vratila pedala, ovisno o ugrađenim oprugama u mehanizam promjene stupnjeva slobode na stražnjem „skupu” lančanika može promijeniti („preskočiti”) stupanj prijenosa pri udarcu u rubnjak, tj. „značajnom,” vertikalnom ubrzanju stražnjeg kotača. Takvi prijenosnici imaju raspon prijenosnog omjera oko 4,5.

Druga grupa prijenosnika s kojima su prikazana rješenja uspoređena (usporediva) su planetarni prijenosnici u glavini stražnjeg kotača s najviše dostupno 14 stupnjeva prijenosa. Takvi su prijenosnici imaju zatvorene zupčane sklopove, lanac ili ozubljeni remen jesu postavljeni vrlo povoljno jer su samo dva lančanika (remenice) u prijenosu snage i gibanja, ujedno je moguće zaštititi lanac ili remen od utjecaja okoline. Raspon prijenosnog omjera je najveći postignut 5,26, što je povoljno za omogućavanje prosječnom čovjeku u svladavanju velikih nagiba i s dodatnim teretom na biciklu, a i brzu vožnju po vodoravnoj podlozi s relativno malom brzinom vrtnje pedala. Nepovoljna karakteristika tog prijenosnika je kompliciranost planetarnih stupnjeva i njihovo uparivanje (spajanje) što vodi na

veću cijenu od uobičajenih prijenosnika s više lančanika uz pedale i na glavini stražnjeg kotača.

Prikazani prijenosnik s fiksnim osima ima postignut raspona prijenosnog omjera od oko 6. Nepovoljna karakteristika je kompliciran 3. stupanj prijenosa koji ima četiri para zupčanika u zahvatu, kroz koje se prenosi snaga. Prikazana konstrukcija u jednostavnoj izvedbi, kombinaciji zupčanici s vanjskim i unutrašnjim ozubljenjem, što je povoljno za opteretivost s manjim modulom, praktično zatvoreno kućište. Prijenosnik s planetarnim stupnjevima ima raspon prijenosnih omjera od 5,59 što je „konkurentno” tržišno dostupnom prijenosniku, s malom prednosti u jednostavnosti građe, time i robusnosti, ali i manjem broju stupnjeva prijenosa.

Promjena stupnjeva prijenosa za oba prikazana rješenja se vrši vrlo jednostavno pomicanjem „igle” s konusima unutar pogonskog vratila, u stanju mirovanja ili malog zakreta pedala. Zbog primjene strelastih zuba moguće je koristiti ovakav prijenosnik i za tandem bicikle u kojima je očekivano veći moment na pogonskom vratilu u glavini zbog dvaju vozača. Oba prijenosnika koriste radijalnu kandžastu spojku za spajanje pogonskog vratila s pogonskim zupčanicima.

Dodatna literatura

Decker, Karl-Heinz (2006.): Elementi strojeva, drugo popravljeno izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb.

Grupa autora (1996): Inženjerski priručnik IP1, Školska knjiga, ISBN 953-0-31662-3, Zagreb.

<https://www.forbes.com/2008/04/21/>

europe-commute-congestion-forbeslife-cx_po_0421congestion.html?sh=2ede00533c5e, (06.09.2021.)

https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRBQs_-6jwPYALBEGAFDZSqWikbHkYBdvNFZw&usqp=CAU, (12.09.2021.)

<https://www.google.hr/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.youtube.com%2Fwatch%3Fv%3Ds4UpwoDmOb4&psig=AOvVaw3UWw3PD9-YzQqsLm-DOOAt&ust=1631521933602000&source=images&cd=vfe&ved=2ahUKEwjbnNH7gvnyAhWMwQIHHWQ1BXkQjhx6BAGAEAo>, (12.09.2021.)

https://www.google.hr/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.reddit.com%2Fr%2Fbicycling%2Fcomments%2F2k8dfh%2Fcross_section_cutaway_of_a_rohloff_speedhub_50014%2F&psig=AOvVaw0lnwr5BJ5Yzc1zh9bIBBe4&ust=1631522459144000&source=images&cd=vfe&ved=2ahUKEwjX4p32hPnyAhW24rsIHfY6DRkQjhx6BAGAEAo, (12.09.2021.)

<https://www.cyclingabout.com/best-bicycle-gearbox-rohloff-hub-vs-pinion-gearbox/>, (12.09.2021.)

<https://www.rodbikes.com/articles/graphics/rohloff-gear-chart.jpg>, (12.09.2021.)

https://www.vernier.com/vernier-ideas/investigating-weight-distribution-on-a-bicycle/?__cf_chl_captcha_tk__=pmd_nzjAE6Gqc4nruypyaollYNBD6dusxo0zozo01ECBlsc-1632037605-0-gqNtZGzNAvujcnBszQdl, (19.09.2021.)

<https://www.semanticscholar.org/paper/>

Pedal-and-Crank-Kinetics-in-Uphill-Cycling.-Caldwell-Li/02c52dc037e07d44a68b89e21526c6b9ebb3796e, (12.09.2021.)

https://www.researchgate.net/publication/49284193_Optimal_cadence_selection_during_cycling/figures?lo=1, (12.09.2021.)

<https://teamzwatt.com/ftp-study/ftp20-study-basics-from-torque-and-angle-to-peanut-plot/>, (12.09.2021.)

Kraut, Bojan (1987.): Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb.

Oberšmit, Eugen (1993.): Ozubljenja i zupčanici, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.

ZMAJ: ISTRAŽIVANJE POMOĆU VJETRA

Saša Iskrić
Zmajarsko društvo KAP Jasa
Ljubljana, Slovenija



Prije kojih tisuću godina u Kini je izumljena posebna letjelica; zračna platforma koja se tijekom stoljećâ proširila po svijetu. Upotreb-
ljavalo ju se za signalizaciju, za nadzor, pri
opsadama gradova, kao bespilotno oružje,
kasnije za telekomunikaciju i zračno zapreči-
vanje pa i za podizanje ljudi za osmatranje s
većih visina. Naposljetku su do leteće plat-
forme došla djeca i danas je znamo pretežno
kao igračku.

Zmajevi su danas dio zabave. Od malih zma-
jeva za djecu, poput plastičnih leptira i orlo-
va koji često završavaju na drveću, preko
akrobatskih zmajeva s dvije ili četiri špage
koji jure po nebu, do najlonskih čudesnih bi-
ća vilične više desetaka metara koja trepere
na vjetru i oduševljavaju gledatelje na festi-
valima zmajeva po svijetu.

Pritom se gotovo zaboravilo kako je zmaj u
stvarnosti izuzetno uporabljiva leteća platfor-
ma koja može u visine ponijeti mnogo toga.

Malo veći zmaj – a to je recimo zmaj širine
dva metra – pri povoljnom vjetru bez proble-
ma podigne teret mase jednog kilograma. Že-
lite mjeriti zagađenost zraka na različitim
visinama? Želite prikupljati uzorke peludi ili
različitim alergena, ispitivati gibanja zračnih
masa – ili fotografirati iz ptičje perspektive?
Za sve navedeno zmaj je gotovo pa idealan!

Današnje doba je doba dronova. Prirodno je

pitanje pa zašto onda jednostavno za sva na-
vedena mjerenja i fotografiranje ne koristimo
dronove! No, zmaj ima brojne prednosti pred
dronovima, tim letećim, zujavim čudima mo-
derne tehnike. Kao prvo, dovoljno veliki zmaj
lako podiže opremu mase više kilograma.
Dron koji to može i danas je izuzetno rijedak
a iznimno skup. Zmaj može letjeti satima,
sve dok vjetar puše, dok se dronu nakon ne-
koliko desetaka minuta isprazne baterije.
Zmaj leti s vjetrom i sasvim je tih, za razliku
od glasnih dronova koje ljudi zbog buke čes-
to gađaju. Reakcija ljudi na zmajeve u pravi-
lu nosi simpatije. Zmaj je sasvim prirodna,
ekološka i organska zračna znanstvena plat-
forma!

Naše zmajsko društvo KAP Jasa nastalo je
upravo iz želje za fotografiranje iz ptičje pers-
pektive.

Predsjednik našeg društva KAP Jasa, Janez
Vizjak, prije nekoliko je godina na internetu
pronašao nacрте dvometarskog šesterostra-
nog zmaja kojega Japanci nazivaju Rokkaku,
slika 1. Zatim je nabavio ripstop najlon i sa-
šio prvo naše dizalo fotoaparata. Ripstop naj-
lon je materijal od kojega se izrađuju jedra
suvremenih jedrilica.

Zmaj na vjetru vijori. Zato je potrebno riješiti
problem stabilnosti fotoaparata. To se posti-
že posebnom napravom, koja se po svom izu-
mitelju naziva picavet . Picavet je platforma

oblika križa na koju se pričvršćuje fotoaparat. Križ je remenima pričvršćen na konopac kojim je vezan zmaj, slika 2. Težina fotoaparata osigurava da je platforma vodoravna neovisno o njihanju konopca, a fotoaparat usmjeren u istu točku.



Slika 1. Zmaj Rokkaku



Slika 2. Picavet: skica (lijevo) i fotografija tijekom leta (desno)

Za fotografiranje iz zraka pomoću zmaja trebamo još samo dovoljno prostora i dobar vjetar. Zmaja pustimo iz među 30 m i 50 m u visinu, na konopac pričvrstimo picavet s fotoaparatom, fotoaparat usmjerimo u željeni

smjer – i zmaja pustimo koliko već visoko može doći. Pritom treba uzeti u obzir da zmajevi nisu bespilotne letjelice pa se u principu na njih ne odnose pravila koja određuju uporabu dronova. Naravno, ovome treba pristupiti zdravorazumski: zmajevima ne letimo nad cestama i kućama, izbjegavamo dalekovode i visoka drveća, a nikada ne letimo u blizini aerodroma.

U početku našeg fotografiranja pomoću zmajeva prvenstveno smo tražili motive koji su lijepi. Obala mora, stara crkva, meandri rijeke u nizini ... Valja priznati, pogled iz zraka uvijek je fascinant. Fotografije iz visine daju nam jednu novu perspektivu i ujedno nas podsjećaju kako je čovjek biće zemlje a ne neba.



Slika 3. Otok Prvić, kako ga vidi zmaj



Slika 4. Nekadašnji samostan, a danas galerija u Kostanjevici na Krki



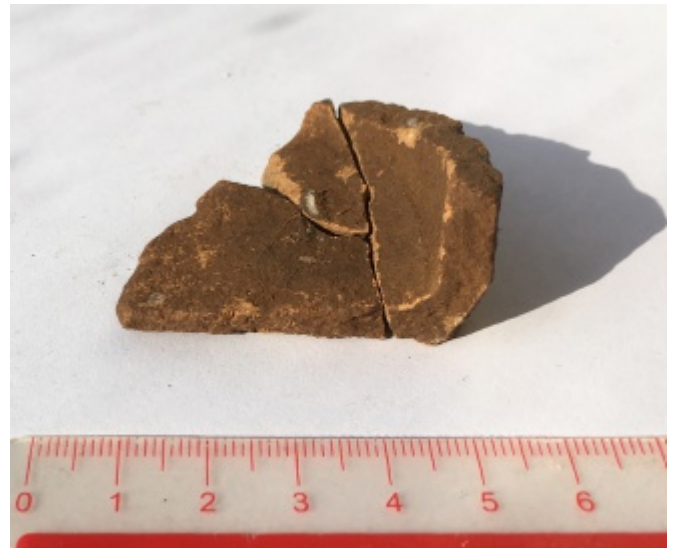
Slika 5. Rijeka Izica na Ljubljanskem polju

Jednom smo na fotografijama dobivenim pomoću zmaja otkrili nešto zanimljivo. Posebnu čar fotografiranju iz zraka daje činjenica da u stvarnosti ne znamo jesmo li slikali ono što smo htjeli, dok se ne spusti zmaja i pogledaju fotografije. Već nam se znalo desiti da prije polijetanja zaboravimo uključiti fotoaparat i to otkrijemo tek kad nakon dva sata fotoaparat opet spustimo! Kao nekad kad smo nosili film na razvijanje i nekoliko dana iščekivali slike. Ukratko, na fotografijama tla u gradu Kalce u Sloveniji opazili smo neobične krugove, slika 6.



Slika 6. Neobičajeni krugovi na travnjaku

Znali smo kako je okolica grada moguće arheološko nalazište iz vremena Rimskog carstva, a možda i iz ranijih vremena. Zato smo pomislili da su ti krugovi ostaci kuća iz željeznog doba. Budući da smo oko krugova našli krhotine keramike razgovarali smo s arheolozima Znanstveno-istraživačkog centra Slovenske akademije znanosti i umjetnosti kao i s drugim stručnjacima. Pokazalo se kako krugovi nisu ostaci prapovijesnih nastambi, nego je rije o zanimljivoj prirodnoj pojavi tzv. vilinskim krugovima koje rade – gljive! No, keramika je zasigurno iz željeznog doba, datirana u rasponu 800-200 g. pr.n.e., čime smo potvrdili postojanje arheološkog nalazišta.



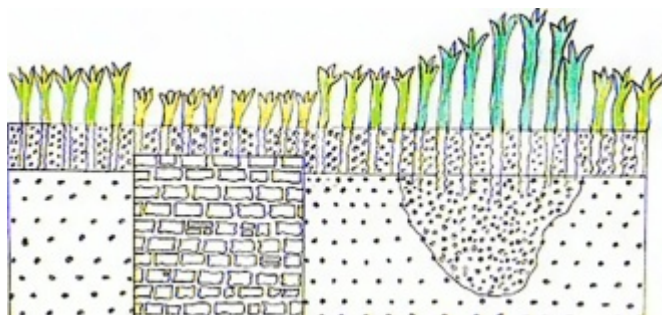
Slika 7. Keramika iz željeznog doba iz nalazišta pokraj grada Kalce

A kad se jednom počneš baviti arheologijom više ne možeš prestati.

Dr. John Wells, pionir zračne arheologije pomoću zmaja, ljubazno nam je ustupio modificiranu kameru koja je osjetljiva na infracrveno zračenje. Snimanje arheoloških ostataka pomoću infracrvenog zračenja jednu fantastičnu karakteristiku: lako pokazuje gdje se u tlu nalaze zidovi i jarci!

Vegetacija koje raste iznad zida u tlu ima na raspolaganju manje resursa i zato slabije raste. Naprotiv, vegetacija koje raste iznad

nekadašnjeg jarka zbog veće dubina tla raste bolje! A bolje izrasla vegetacija bolje reflektira infracrveno zračenje što se takvom kamerom može uočiti, slika 8.



Slika 8. Razlika u rastu koju raspoznaje infracrveni fotoapararat

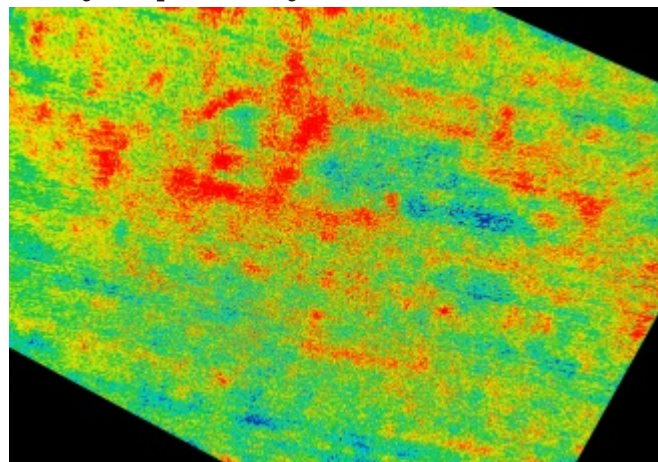
Infracrvenu kameru isprobali smo na travnjaku kraj Ljubljane. Arheolozi su znali da se negdje pod travnjakom nalaze ostaci rimske vile rustike, ali nisu točno znali gdje. Zmaj je ponio fotoapararat te smo snimili cijeli travnjak. Zmajem je upravljao sedamdesetogodišnji Viktor.

Neobrađene infracrvene snimke ne otkrivaju zapravo ništa, slika 9.



Slika 9. Snimka travnjaka dobivena infracrvenim zračenjem valne duljine 720 nm

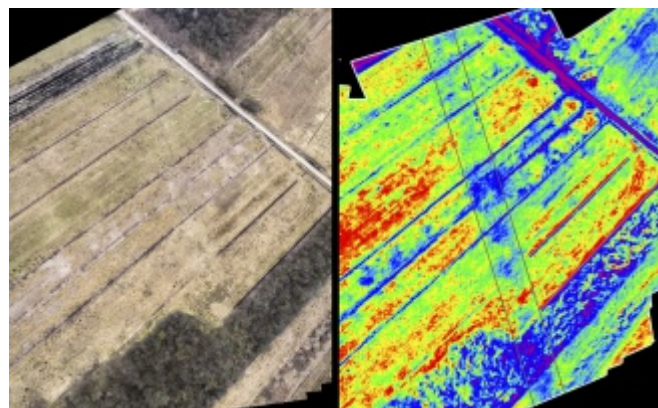
Male razlike u rastu vegetacije dobivaju se tek nakon računanja indeksa normaliziranih razlika u vegetaciji (eng. Normalized Difference Vegetation Index, skraćeno NDVI). Formula za taj indeks je relativno jednostavna te ju je moguće provesti u nekom od dostupnih programa za obradu slika. NDVI navedenog travnjaka prikazan je na slici 10.



Slika 10. NDVI snimka travnjaka. Vide se ukopani zidovi rimske vile rustike

Ukopani zidovi vile rustike, koji su nekad bili sklonište starim Rimljanima, jasno se vide. Arheolozi ne trebaju lopate kako bi otkrili tlocrt te davno srušene građevine.

Taj uspjeh, kojeg su nam potvrdili arheolozi, ohrabrio nas je toliko da smo investirali u kameru za automatski prikaz NDVI, kakvu se upotrebljava u poljoprivredi za nadzor polja, AgroCam Geo NDVI. S tom smo kamerom snimili rimsku cestu, izgrađenu oko 200. g. ne. rimsko cestu, zgrađeno okoli leta 200, tamo gdje je prolazila kroz ljubljansko polje, slika 11.



Slika 11. Fotografija rimske ceste (lijevo) i NDVI-snimka istoga područja (desno)

Arheologija je strast. S ovim smo primjerima nastojali pokazati kako je koristan zmaj ako ga koristimo kao znanstvenu platformu i koliko nam mnogo mogućnosti istraživanja omogućuje. Od jednostavnog prebrojavanja invazivne vegetacije u zaštićenim močvarama, opažanja nastajanja novih meandara pri poplavama, opažanja promjena u ekosustavima, propadanja povijesno značajnih građevina, širenja urbanih područja, praćenja kretanja divljih životinja ... sve do mjerenja onečišćenja zraka, praćenja širenja alergena i dugih zanimljivih znanstvenih područja u kojima je potrebna leteća mjerna oprema.



Slika 12. Praćenje širenja invazivne vrste Velika zlatnica (lat. *Solidago gigantea*) u močvarnom području kraj Grosuplja



Slika 13. Sezonsko nastajanje meandara potoka Stržen na Cerkniškom jezeru

Zmaj je znatno drugačiji od drugih letjelica poput dronova, aviona i helikoptera, prvenstveno zbog manje cijene. Uz malo truda zmaja možete sami napraviti za manje od 100 EUR. Zato je izuzetno prikladan za znanstvenike amatere, za društva, lokalne zajednice i škole. Čak i ako u zrak podignete samo fotoaparatus ili kameru slabijih sposobnosti, slike mogu biti čarobne a video-snimke izuzetne. Pritom, najvažnije je sljedeće: spuštanje zmaja uvijek je izuzetno zabavno!



Slika 14. Stara Ljubljana kako ju vidi zmaj . Ova fotografija izabrana je sliku godine 2020. slovenske Wikipedije

BIOINSPIRIRANI TEHNIČKI SUSTAVI

prof.dr.sc. Petar Ćurković

Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu

Evolucija je proces koji je stvorio rješenja za vrlo teške probleme. Kako se kretati? Kako se prehraniti? kako probaviti hranu, kako pretvoriti hranu u energiju, kako efikasno koristiti energiju? Evolucija je proces optimiranja koji upravlja procesima prirodnih zajednica i usmjerava njihovu prilagodbu kao odgovor na uvjete u kojima žive. Možemo kazati da je evolucija robustan, ali spor proces.

Pitanje koje ovdje želimo postaviti je: može li se evolucijski proces ugraditi u računalno okružje i iskoristiti za evoluciju, razvoj, odnosno možda čak „uzgoj“ rješenja za konkretne, tehničke probleme? Što je potrebno da se to napravi? Ako bismo imali evoluciju u računalu, koliko je vrijeme potrebno za protok jedne generacije? Ako je svijet kojega danas vidimo posljedica 4 milijarde godina evolucije, koliko je 4 milijarde godina procesorskoga vremena i što u tom vremenu računalno može napraviti?

Krenimo redom

Sedamdesetih godina prošlog stoljeća John Holland, predložio je u svome radu *Adaptation in Natural and Artificial Systems* novu teoriju u području biološki inspiriranih algoritama i nazvao ih Genetskim algoritmima. U tom radu potvrđena je osnovna metafora genetskih algoritama, a to je da se korištenjem osnovnih procesa iz biološke evolucije, poput preživljavanja najboljih, križanjem i mutacijom mogu u nadolazećim generacijama očekivati rješenja povećane kvalitete. Ukratko, evolucijski proces unutar računala odvija se na sljedeći način: populacija početnih rješenja

inicijaliziranih najčešće po slučaju natječe se za prelazak u roditeljsku populaciju rješenja. Kvalitetu svakog pojedinog rješenja evaluiramo fitness funkcijom odnosno mjerom kvalitete. Pojedina rješenja imaju veću šansu za prelazak u roditeljsku populaciju ako im je kvaliteta veća. Nakon izbora roditelja, parovi roditelja se križaju tvoreći nova rješenja – potomke. Nakon formiranja populacije potomaka odvija se mutacija. Po dovršetku mutacije, uspoređuje se kvaliteta potomaka s kvalitetom roditelja i zadržavaju se bolja rješenja. Ovo je osnovni koncept izvoženja genetskog algoritma. Potrebno je napomenuti da su svi parametri kod evolucijskog algoritma stohastički, odnosno da u općem slučaju i rješenje najmanje kvalitete ima šansu za prelazak u

roditeljsku populaciju. Križanje i mutacija su također stohastički parametri. Moguće je da se ponekad parovi roditelja direktno kopiraju u populaciju potomaka, isto kao i da se mutacija uopće ne dogodi.

Zbog prirode ovih algoritama koji se temelje na slučajnostima, nazivamo ih stohastičkim algoritmima. Odlika genetskih algoritama je da rade s populacijom rješenja, da ih je moguće paralelizirati i da je moguće istovremeno pretraživati različite dijelove prostora pretrage.

Iz toga proizlazi njihova karakteristika a to je da mogu u relativno kratkom vremenu pronaći vrlo kvalitetna rješenja za teške optimizacijske probleme. Što su teški optimizacijski problemi? To su oni kod kojih imamo suprotstavljene kriterije, ili oni koji imaju jako velik prostor mogućih rješenja.

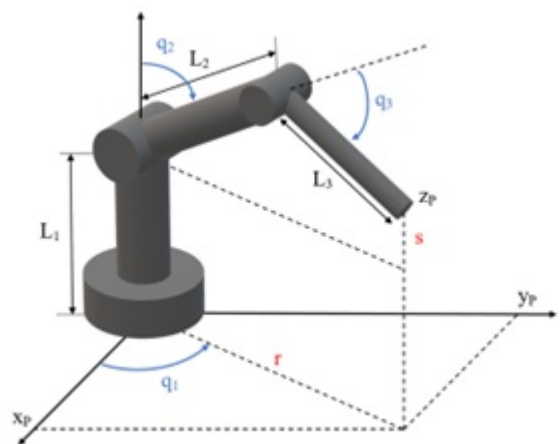
U prvu skupinu problema pripada recimo problem traženja najkraće trajektorije za robota koji se kreće u prostoru ispunjenom preprekama. Kriterij minimizacije prijeđenog puta vodio bi robota ravnom linijom od početne do ciljne točke. Ukoliko bi ta linija prolazila kroz prepreku, tada takva putanja nije prihvatljiva. Znači da imamo dva kriterija koji su međusobno suprotstavljene, a da je optimalno rješenje kompromis između ova dva kriterija. Taj kompromis u općem slučaju nije lako pronaći.

Drugi primjer bi bio problem trgovačkog putnika. Kod ovog problema, trgovački putnik kreće iz polaznog grada i mora samo jednom posjetiti sve gradove koji su mu dodijeljeni prije nego se vrati u početni grad. Ovaj problem spada u skupinu tzv. nepolinomnih problema, odnosno za veći broj gradova broj mogućih kombinacija je toliko velik da egzaktnom pretragom svih kombinacija ne možemo u stvarnom

vremenu pronaći optimalan redoslijed posjećivanja gradova.

Kod oba ova problema genetski algoritmi pokazuju jako dobra svojstva, odnosno vrlo brzo nalaze kvalitetna rješenja.

Kao primjer za snalaženje robota u prostoru, odnosno traženje trajektorije koja se kreće od početne do krajnje točke, promotrimo primjer prikazan slijedećom slikom. Genetski algoritam nagrađuje kraće trajektorije, a kažnjava trajektorije koje rezultiraju sudaranjem sa zidom. Postupak odvijanja algoritma je sljedeći: po slučaju generiramo početnu populaciju trajektorija, veličina populacije je još jedan od parametara evolucijskog algoritma, u ovom primjeru bilo je pedeset pojedinaca u populaciji. Izračunamo duljinu svake trajektorije i prebrojimo broj kolizija sa zidovima.



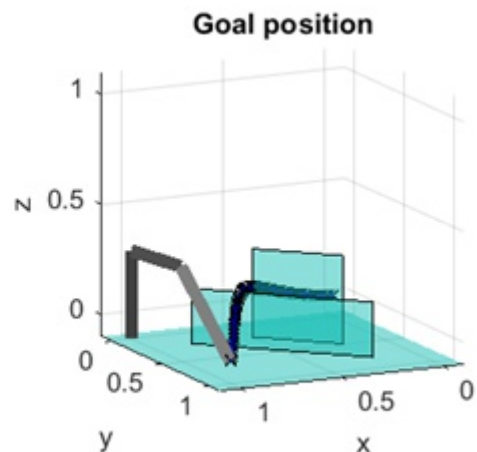
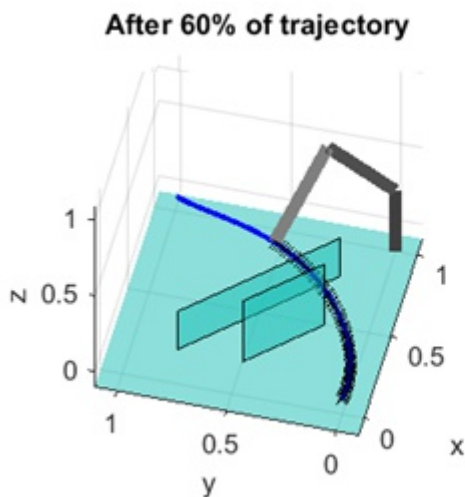
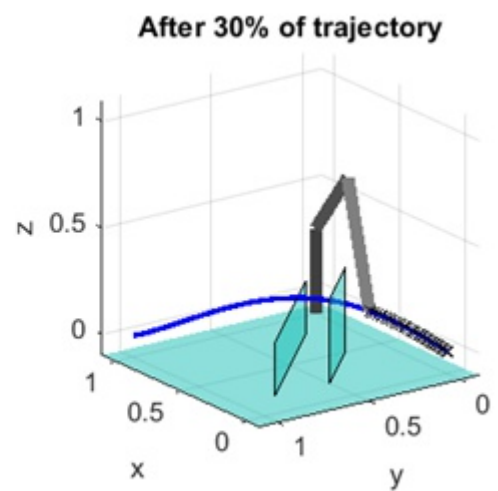
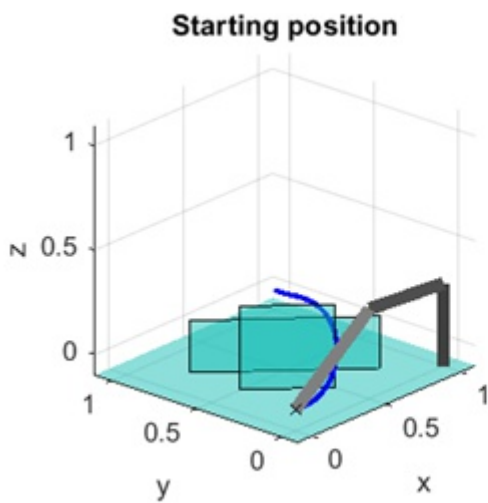
Model robota za kojega ćemo genetskim algoritmom tražiti najbolja rješenja

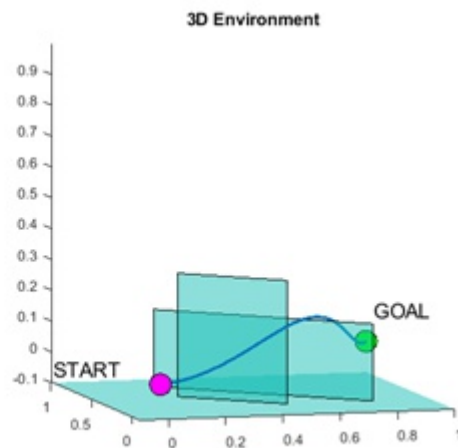
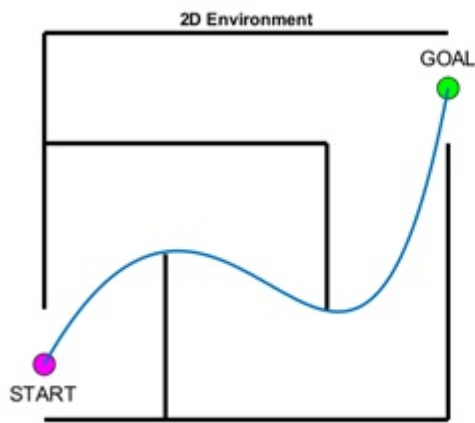
One trajektorije koje su kraće i rezultiraju s manje kolizija bolje su od onih koje su dulje i rezultiraju s više kolizija. Dodijelimo svakoj trajektoriji (svakom pojedincu u populaciji) vjerojatnost prelaska u roditeljsku populaciju proporcionalno njezinoj kvaliteti.

Suma svih vjerojatnosti mora biti jednaka 1.

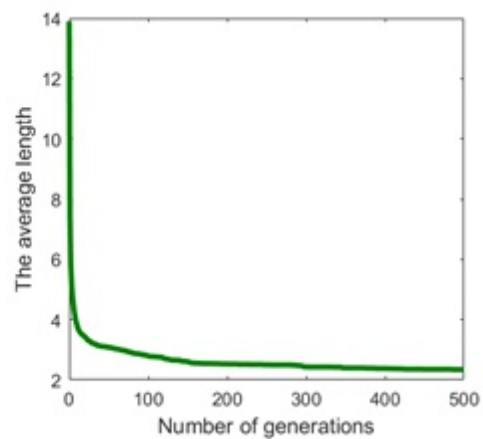
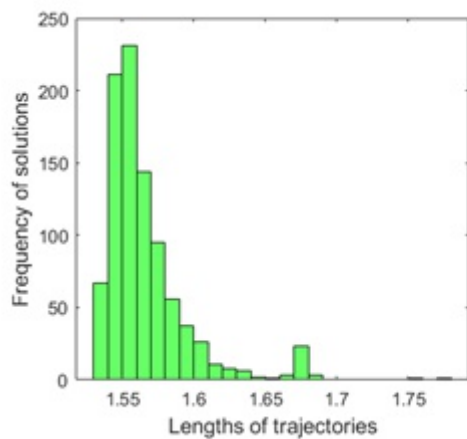
Izaberemo roditeljsku populaciju (pri čemu se neka rješenja mogu kopirati više puta). Križamo parove trajektorija, s idejom da će dvije kvalitetne trajektorije rezultirati kvalitetnim rješenjem – potomkom.

Križanje se izvodi tako da se početni dio jedne trajektorije, a svaka trajektorija opisana je polinomom određenog reda, spoji sa zadnjim dijelom one trajektorije s kojim se križa i tako se tvori novo rješenje. Mutacija se provodi tako da se neki čvor polinoma s malom vjerojatnošću pomakne na neko novo mjesto u prostoru. Potom se ovako dobivena rješenja usporede s roditeljima te se nova generacija tvori tako da se u nju ugrade najkvalitetniji između roditelja i potomaka.





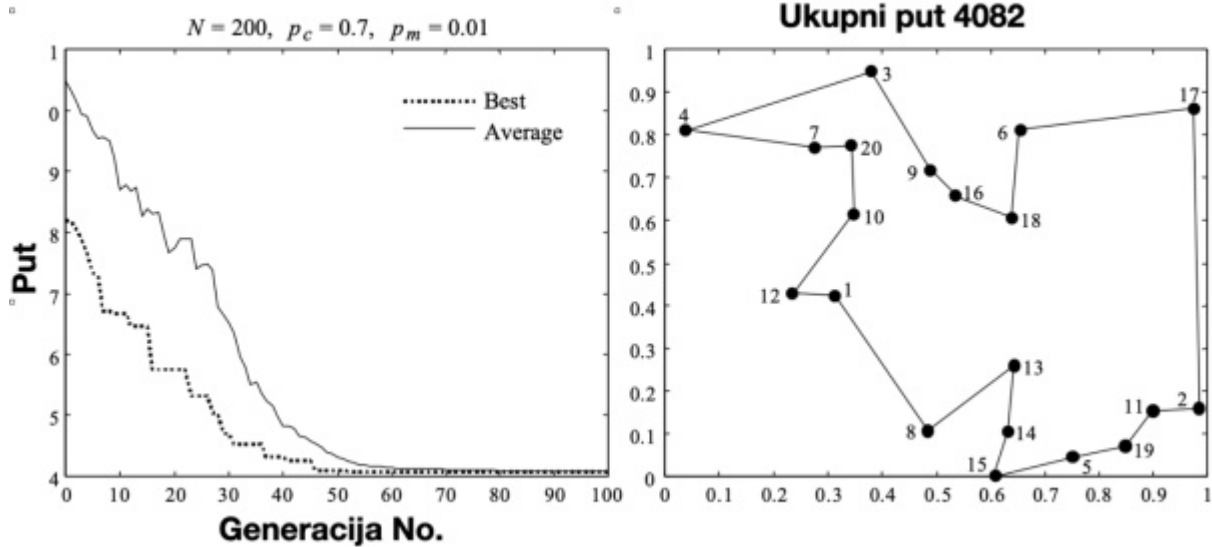
Okruženje testiranja. Lijevo: 2D labirint za mobilnog robota. Desno: 3D okruženje za robotsku ruku. Plava linija – najbolje rješenje koje pronalazi algoritam



Rješenje generičkog algoritma za gibanje mobilnog robota

Na prethodnoj slici možemo vidjeti da je unutar 500 generacija najbolje prosječno rješenje iz populacije palo s 14 jedinica na 2

jedinice što je značajno poboljšanje – naravno promatra se samo ono rješenje koje ne rezultira kolizijom.



Rješenje problema trgovačkog putnika genetskim algoritmom

Primjer traženja rješenja problema trgovačkog putnika genetskim algoritmom za po slučaju inicijaliziranih dvadeset gradova prikazan je gornjom slikom. Parametri koji su korišteni su: Populacija ima dvjesto jedinki ($N=200$), vjerojatnost križanja za svaki par roditelja, $p_c=0.7$, a vjerojatnost mutacije za svakog člana je 0.01. Vidimo da je optimalno rješenje pronađeno već oko pedesete generacije, što je vrlo dobro i vrlo brzo. Kako izgleda pojedinac u ovoj populaciji? Svaki pojedinac unutar populacije kodira redoslijed posjećivanja gradova, dakle jedno potencijalno rješenje bilo bi permutacija brojeva 1 do 20. I tako 200 puta – koliko članova populacije imamo. Vidimo da je genetski algoritam vrlo brzo u stanju pronaći dobra rješenja i kroz križanje njihove značajke proširiti na nadolazeće generacije. Mutacija služi kao fino ugađanje rješenja kojim se omogućuje tvorba novih rješenja koja se teško ili nikako ne mogu postići samo križanjem. napomenimo da kod

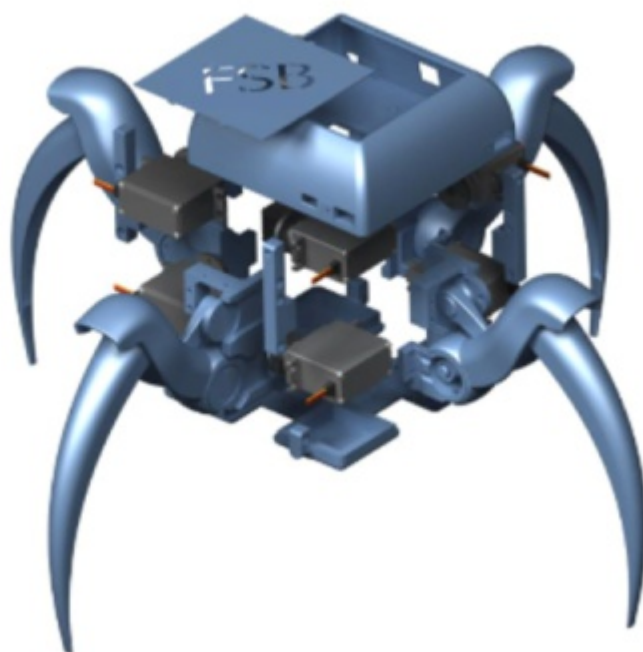
ovakvih problema kod kojih su potencijalna rješenja kodirana permutacijama nije moguće primijeniti jednostavno križanje i mutaciju jer bismo vrlo brzo dobili tzv. nedopustiva rješenja, odnosno ona kod koji neke gradove posjećujemo više puta, dok neke uopće ne posjećujemo. A to je u kontradikciji s definicijom problema koju smo gore iznijeli.

FSB pauk

Na FSB-u u Zagrebu razvijen je robot naziva FSB pauk. To je robot s 4 noge, ali sa osam motora, odnosno osam stupnjeva slobode gibanja. taj robot je namjerno konstruiran tako da je vrlo teško ručno napisati upravljački algoritam, odnosno teško je ručno odabrati ovisnost zakreta svakog od osam motora u vremenu da bi se tom robotu omogućilo kretanje.



Model robota FSB pauk

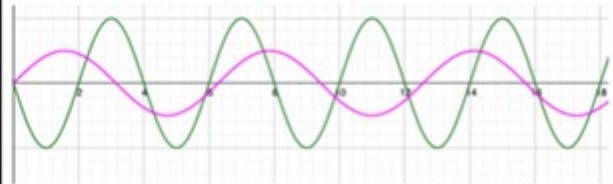


Model robota FSB pauk – eksplodirani pogled

Ovdje je genetski algoritam iskorišten da bi se razvile zakonitosti zakreta svakog od osam motora s ciljem hodanja robota. Problem je zapravo sličan problemu robota koji se treba kretati u radnom prostoru, no ipak nešto složeniji. Ovdje umjesto samo jednog polinoma imamo familiju od osam periodičkih funkcija pri čemu svaka funkcija opisuje zakret motora u vremenu.

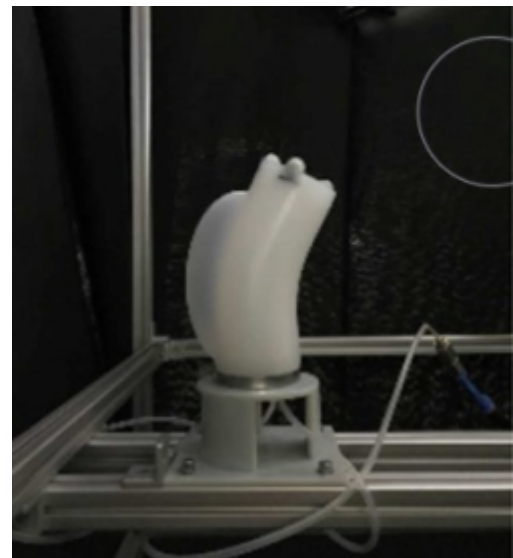
Genetski algoritam svaku od tih osam familija vrijednuje samo po jednom parametru - koliko je put robot prešao s određenom familijom funkcija na svojim motorima. One familije koje rezultiraju većim pomakom robota imaju veću šansu da prijeđu u roditeljsku populaciju i da se križanjem i mutacijom njihova obilježja prenose na nadolazeće generacije i vremenom poboljšavaju. Korak za svih osam motora se određuje kao

$$g(t) = \begin{bmatrix} A \sin(2\pi t/T) M_1 \\ A \sin(2\pi t/T) M_1 M_2 \\ A \sin(2\pi t/T) \\ A \sin(2\pi t/T) M_2 \\ A \sin(2\pi t/T) M_3 \\ A \sin(2\pi t/T) M_2 M_3 \\ A \sin(2\pi t/T) M_1 M_3 \\ A \sin(2\pi t/T) M_1 M_2 M_3 \end{bmatrix}$$



Parametarski zapis svih osam krivulja prikazan je gornjom slikom lijevo, dok je s desne strane prikazana vremenska ovisnost za dva motora. Naravno imamo osam ovakvih vremenskih ovisnosti, no zbog jasnoće prikaza stavljene su dvije. Možemo reći da je ovaj robot pauk uspio naučiti hodati pomoću genetskog algoritma.

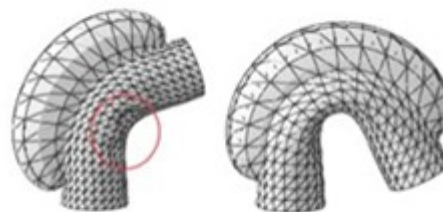
Primjera primjene genetskih algoritama za traženje optimalnih rješenja je jako puno, pokažimo ovdje još primjer mekog robota optimiranog evolucijskim algoritmom.



Pneumatski aktuator mekog robota

Meki roboti su deformabilne strukture izrađene od materijala koji imaju svojstva slična ljudskim tkivima poput mišića i kože. Primjer koji je prikazan gornjom slikom nije jednostavan, a sastoji se u tome da se za određene tlakove meki robot deformira za iznose koji su ovisni o njegovoj geometriji. To su: debljina stijenke, duljina robota, materijal, položaj i oblik zračne komore. Genetskim algoritmom tražila se takva kombinacija navedenih parametara koja će rezultirati maksimalnom deformacijom robota, ali iz ograničenje maksimalnog naprezanja u robotskoj strukturi. Slika dolje desno prikazuje ukupno povećanje deformacije nakon optimiranja genetskim algoritmom temeljem koncepata koje smo izložili već u prethodnim primjerima.

Parameter	Lower bounds in mm	Upper bounds in mm
Inner radius	10	18
Outer radius	20	50
Chamber position	15	40
Chamber thickness	2	8



$$F_i = \frac{a \cdot \frac{R_i}{\sin(b)} + b \cdot \frac{R_i}{\sin(R)}}{\sin(a \cdot \frac{R_i}{\sin(b)} + b \cdot \frac{R_i}{\sin(R)})}$$

Konstruktivska ograničenja mekog robota