

Konstrukcija dvonožnog hodajućeg robota pokretanog umjetnim pneumatskim mišićima

Fanjek, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:261410>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-14**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Fanjek

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Šitum, dipl. ing.

Student:

Ivan Fanjek

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Željku Šitumu na prilici, stručnoj pomoći, vremenu i strpljenju prilikom izrade ovog rada.

Ivan Fanjek



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **IVAN FANJEK**

Mat. br.: 0035191813

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**KONSTRUKCIJA DVONOŽNOG HODAJUĆEG ROBOTA
POKRETANOG UMJETNIM PNEUMATSKIM MIŠIĆIMA**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**DESIGN OF A TWO-LEGGED WALKING ROBOT DRIVEN BY
PNEUMATIC ARTIFICIAL MUSCLES**

Opis zadatka:

Iako je suvremeni tehnološki razvoj podario veličanstvene pronalaskе, javnost je posebno fascinirana bioničkim sustavima poput humanoidnih robota, koji na neki način imitiraju svoga tvorca. Brojne tvrtke i istraživačke grupe na sveučilištima širom svijeta razvijaju humanoidne robote s različitim ciljevima i motivima istraživanja. Gibanje strojeva koji se za svoje pokretanje služe nogama, kao što je to slučaj kod dvonožnih hodajućih mehanizama, predstavljaju jedan od najzahtjevnijih zadataka suvremene mobilne robotike. Autonomni humanoidni roboti predstavljaju spoj mehaničkog, elektroničkog i programerskog inženjerstva i jedno su od najkompleksnijih i najzanimljivijih inženjerskih područja. Člankovita struktura udova pokretanih mišićima kod živih organizama predstavlja veliki izazov biološki inspiriranim izvedbama tehničkih sustava sa stanovišta konstrukcije, upravljanja gibanjem te postizanja stabilnosti prilikom gibanja humanoidnih robota.

U radu je potrebno:

- konstruirati i izraditi dvonožni hodajući mehanizam koji koristi pneumatske mišiće kao aktuatore za ostvarenje gibanja,
- dati tehnički opis komponenti korištenih za izradu dvonožnog hodajućeg robota,
- simulirati gibanje hodajućeg robota po ravnoj podlozi,
- dati prijedloge za izvedbu upravljačkog sustava hodajućeg robota kao autonomnog sustava.

Zadatak zadan:

29. studenog 2018.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Željko Šitum

Rok predaje rada:

1. rok: 22. veljače 2019.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.

3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.

2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.

3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. OSNOVNE ZNAČAJKE MOBILNIH ROBOTA	2
2.1. Podjela mobilnih robota na okolinu i načinu postizanja gibanja	3
2.2. Upravljanje robota.....	6
2.3. Senzorika.....	7
3. HUMANOIDNI ROBOTI.....	9
4. KONSTRUKCIJA I IZRADA DVONOŽNOG ROBOTA.....	11
4.1. Konstrukcija trupa.....	11
4.2. Konstrukcija nogu	13
4.3. Konstrukcija stopala.....	17
5. KOMPONENTE POGONSKOG I UPRAVLJAČKOG SUSTAVA	18
5.1. Komponente pogonskog sustava.....	18
5.2. Komponente upravljačkog sustava	24
6. SIMULACIJA HODA ROBOTA PO RAVNOJ PODLOZI.....	29
7. PRIJEDLOG UPRAVLJAČKOG SUSTAVA.....	31
8. ZAKLJUČAK.....	33
LITERATURA.....	34
PRILOZI.....	35

POPIS SLIKA

Slika 1.	Različite vrste aktuatora	3
Slika 2.	Mobilni roboti s kotačima	4
Slika 3.	Mobilni roboti s gusjenicama	4
Slika 4.	Mobilni roboti s nogama	5
Slika 5.	Leteći robot.....	5
Slika 6.	Podvodni mobilni roboti.....	5
Slika 7.	Puzajući roboti.....	6
Slika 8.	Model upravljanja robotom	7
Slika 9.	Tipovi senzora u mobilnim robotima	8
Slika 10.	Humanoidni robot.....	9
Slika 11.	Pneumatski humanoidni robot Denise sveučilišta TUDelft	10
Slika 12.	Konstrukcija trupa	12
Slika 13.	Izrađen trup robota	13
Slika 14.	Spreg pneumatskih mišića	14
Slika 15.	Geometrija nogu	15
Slika 16.	Izrada nogu	16
Slika 17.	Izvedba gornjeg članka noge (lijevo) i izvedba kućišta ležaja (desno).....	16
Slika 18.	Konačna verzija stopala.....	17
Slika 19.	Izrađeno stopala.....	17
Slika 20.	Viair 400C kompresor	19
Slika 21.	Shema spoja kompresora	19
Slika 22.	Spremnik zraka Festo CRVZS-2	21
Slika 23.	Pripremna grupa Festo LFRS-1/8-D-7-MINI-A	21
Slika 24.	Ventilski blok Festo.....	22
Slika 25.	Prigušno-nepovratni ventil Festo GR-QS-6	23
Slika 26.	Prikaz rada pneumatskog mišića	24
Slika 27.	Umjetni pneumatski mišići Festo DMSP	24
Slika 28.	Mikrokontroler Arduino Mega 2560	25
Slika 29.	Akcelerometar/žiroskop MPU 6050.....	26
Slika 30.	Baterija s brzim pražnjenjem.....	27
Slika 31.	Relejni blok Songle SRD-05VDC-SL-C.....	27
Slika 32.	Linearni graničnici za koljena	28
Slika 33.	Položaj robota u nultom stanju	29
Slika 34.	Prikaz hoda robota.....	30
Slika 35.	Shema pogonskog i upravljačkog sustava.....	31

POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristike kompresora	20
Tablica 2. Brzine punjenja spremnika	20
Tablica 3. Adrese DB9 priključka	22
Tablica 4. Specifikacije mikrokontrolera Arduino Mega 2560	25

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

1. Robot
2. Postolje
3. Postolje poveznica
4. Osovina noga postolje
5. Držać Ležaja
6. Fiksator
7. Noga gornji članak
8. Poveznica noga
9. Noga donji članak
10. Noga I profil
11. Osovina noga
12. Osovina postolje
13. Osovina mišić
14. Postolje ploča
15. Trup I profil
16. Trup L profil
17. Trup L profil 2
18. Trup ploča
19. Trup I profil 2
20. Trup L profil 3
21. Filtar I profil
22. Ruka I profil
23. Stopalo

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$M_{\text{skraćeno}}$	m	Duljina pneumatskog mišića u skraćenom stanju
$M_{\text{nominalno}}$	m	Nominalna duljina pneumatskog mišića
L_1	m	Visina postolja
L_2	m	Duljina između osi rotacije i profila za pričvršćenje mišića
L_3	m	Duljina između srednjeg i lijevog provrta I profila gornjeg članka noge
L_4	m	Duljina između srednjeg i desnog provrta I profila gornjeg članka noge
L_5	m	Duljina između srednjeg i lijevog provrta postolja
L_6	m	Duljina između srednjeg i desnog provrta postolja
X_1	m	Projekcija duljine L_2 na x os
X_2	m	Projekcija duljine L_3 na x os
X_3	m	Zbroj duljina X_1 i X_2
X_4	m	Projekcija duljine L_4 na x os
Y_1	m	Projekcija duljine L_2 na y os
Y_2	m	Projekcija duljine L_3 na y os
Y_3	m	Zbroj duljina L_1 i Y_1 od koje je oduzeta duljina Y_2
Y_4	m	Projekcija duljine L_4 na y os
α	°	Kut noge

SAŽETAK

Tema rada je izrada autonomnog dvonožnog humanoidnog mobilnog robota pokretanog umjetnim pneumatskim mišićima. Dvonožni hod je jedan od težih dinamičkih problema u robotici. Postizanje stabilnosti takvih sustava zahtijeva dobro osmišljenu konstrukciju i adekvatan upravljački algoritam. Autonomnost pneumatskog sustava zahtijeva kompresor i spremnik stlačenog zraka kako bi se mogao sam napajati zrakom.

Rad se ponajprije bavi izradom konstrukcije hodajućeg dvonožnog robota. Na konstrukciju su montirani svi dijelovi potrebni za hod humanoidnog robota. Predložena je nadogradnja sustava s ciljem postizanja autonomnog hoda.

Opisani su stupnjevi slobode gibanja robota zajedno s njihovim ograničenjima. Također je objašnjen rad energetskog i upravljačkog sustava. Humanoidni robot konstruiran je u CAD alatu i prikazana je željena simulacija hoda.

Ključne riječi: autonomni, humanoidni robot, konstrukcija, umjetni pneumatski mišić, pneumatika

SUMMARY

This work deals with manufacturing of autonomous bipedal humanoid mobile robot actuated by artificial pneumatic muscles. Bipedal walk is one of the most complex dynamic processes in robotics. Achieving stability of such systems requires a well designed mechanical structure and adequate control algorithm. Autonomy of pneumatic system requires a compressor and a tank for compressed air so that it could be supplied with compressed air.

This work primarily focuses on the construction of mechanical structure of bipedal walking robot. All parts needed for the bipedal walk of the humanoid robot are mounted on the mechanical structure. Upgrades to the system are suggested with the goal of achieving bipedal autonomous walk.

Degrees of freedom and their limitations are described. The operating mode of power and control systems are also explained. The humanoid robot is constructed in CAD program and the simulation of the bipedal walk is shown.

Keywords: autonomous, humanoid robot, construction, artificial pneumatic muscle, pneumatics

1. UVOD

Robotika je multidisciplinarno područje koje objedinjuje znanja iz strojarstva, elektrotehnike, računarstva, automatike i drugih tehničkih disciplina. Ona se bavi konstrukcijom, primjenom, funkcionalnošću robota, te regulacijskog procesa računalnim sustavima korištenjem senzora i procesiranjem informacija[1].

Roboti se primjenjuju u područjima opasnima ili nečistim za ljude, te oponašaju ljudske pokrete. Veliku primjenu imaju u industriji i uvjetima gdje ljudi ne mogu preživjeti. Koriste se s ciljem obavljanja poslova na jeftiniji, bolji, točniji i pouzdaniji način od ljudi. Koriste se u vojnoj industriji, proizvodnji, montaži, pakiranju, transportu, medicini, agrikulturi, istraživanju i mnogim drugim područjima [1].

Roboti mogu predstavljati i veliku opasnost. Zbog nesavršenosti algoritama upravljanja robot se može početi ponašati nepredvidljivo. U tu svrhu definirani su Osnovni zakoni robotike poznatiji kao Asimovi zakoni [2]:

- Robot ne smije nauditi ljudskom biću ili svojim postupcima dopustiti da čovjek bude povrijeđen.
- Robot mora izvršavati ljudske naredbe osim ako to nije u skladu s prvim zakonom.
- Robot mora štiti svoje postojanje osim ako to nije u skladu prvim i drugim zakonom.

U ovom radu je izrađen humanoidni autonomni robot koji je pokretan s četiri umjetna pneumatska mišića. Dvonožni hod predstavlja zahtjevniji dinamički model robotike. Mehanička konstrukcija uvelike utječe na stabilnost robota, te će se na kraju rada dati prijedlog nadogradnje upravljačkog sustava robota. Hodajući roboti imaju mogućnost kretanja po neravnim podlogama i rukovanja alatima namijenjenim za rad čovjeka. Osim za industrijske i istraživačke namjene humanoidni roboti su zanimljivi zbog imitacije ljudskog kretanja što ih čini pogodnim i za komercijalne svrhe. U prilogu se nalazi simulacija robota načinjena u CAD alatu, a prikazuje očekivani način hoda. Robot u ovom radu izrađen je s pneumatskim energetske sustavom za razliku od uobičajenih izvedbi s električnim pogonom, uz iznimku električne baterije. Velika prednost sustava je i autonomnost robota što znači da nije potreban vanjski izvor napajanja. Kako su za aktuator odabrani pneumatski mišići otklanjaju se smetnje vibracija i udara koje nastaju prilikom dvonožnog hoda.

2. OSNOVNE ZNAČAJKE MOBILNIH ROBOTA

Postoji mnogo vrsta robota s različitim izvedbama i funkcijama. Iako je velika raznolikost primjene i oblika robota svi imaju tri bazne osnovne konstrukcijske sličnosti [1]:

- moraju imati neku vrstu mehaničke konstrukcije koja je oblikovana kako bi mogli obavljati njihove zadatke.
- posjeduje električne komponente koje napajaju i upravljaju robotom. Određena količina električne energije je potrebna za napajanje komponenata robota koje služe za pokretanje, senzoriku i naredbe.
- posjeduju programski kod koji diktira postupke i operacije koje robot obavlja.

Trenutačno kao izvor energije roboti tipično koriste električne baterije kao izvor napajanja s time da su bolje one vrste baterija koje su lakše kao što su srebro-kadmij baterije. Kao izvor napajanja još se mogu koristiti i motori s unutarnjim izgaranjem, pneumatika (stlačeni zrak), solarna energija, hidraulika (stlačeni fluid) i nuklearni izvori napajanja. Neki od parametara izvora napajanja su sigurnost, vijek trajanja i težina.

Kako bi se konstrukcija robota mogla pomicati potrebni su aktuatori koji pretvaraju pohranjenu energiju u gibanje. Najpopularniji su električni motori i linearni aktuatori koji pokreću industrijske robote. Aktuatori za pogon robota se mogu podijeliti u sljedeće vrste [1]:

- električni motori najčešće se koriste za pogon robata. Istosmjerni motori se uobičajeno koriste kod mobilnih robota, a kod industrijskih robota i CNC strojeva većinom se koriste izmjenični motori. Koriste se često u sustavima s lakšim teretom i gdje je dominantno rotacijsko gibanje.
- linearni aktuatori uobičajeno su napajani zrakom ili fluidom. Koriste se pri brzim izmjenama smjera i velikim silama, te se zbog toga koriste u industrijskim robotima.
- Umjetni pneumatski mišići ili zračni mišići su vrsta aktuatora kod kojih se stlačeni zrak dovodi u mišić, te se on skuplja, a promjer mu se povećava.
- Elektro-aktivni polimeri su aktuatori načinjeni od plastike koji se skupljaju pod djelovanjem struje, te se koriste kod mišića lica i ruku kod humanoidnih robota.

- piezoelektrični motori rade na principu vibriranja piezoelektričnog elementa nekoliko tisuća puta po sekundi, te uzrokuju linearno ili rotacijsko gibanje. Prednosti motora su visoka rezolucija, brzina i moguća sila s obzirom na njihovu veličinu.

Senzori omogućuju robotu da prima određena mjerenja iz okoline ili unutarnjih komponenti kako bi sustav mogao ispravno izvršavati svoj zadatak ako dođe do bilo kakvih promjena u okolini. Mogu upozoriti robota na bilo kakvu sigurnosnu mjeru ili kvar, te pružaju podatke u stvarnom vremenu (real-time) o zadatku koji se izvršava.



Slika 1. Različite vrste aktuatora

2.1. Podjela mobilnih robota prema okolini i načinu postizanja gibanja

Mobilni roboti imaju mogućnost da se gibaju u svom okruženju, te nisu fiksirani na jednoj točnoj poziciji. Autonomni mobilni roboti mogu se sami navoditi kroz nekontrolirano okruženje, bez fizičkih ili elektro-mehaničkih sustava za navođenje. Mogu se također oslanjati na sustave za navođenje, te se gibati kroz predviđene putanje. Komponente mobilnih robota su kontroler, koji može biti mikroprocesor ili PLC, upravljački algoritam, potrebni senzori i aktuatori [3]. U nastavku će se pokazati mobilni roboti koji se gibaju u zraku, vodi i po zemlji, koji se gibaju pomoću kotača, gusjenica i nogu, te posebne izvedbe mobilnih robota.

Mobilni roboti s kotačima su najčešća izvedba sustava za gibanje robota. Kotači mogu biti bilo kojih veličina, a roboti mogu imati različit broj kotača. Najčešće su izvedeni s tri ili četiri kotača, dok izvedba s dva kotača zahtjeva žiroskop kako bi se mogla dobiti informacija o posrtanju robota, te na temelju te informacije i dinamičkog modela robota postiže se stabilizacija. Izvedbe s četiri i šest kotača imaju prednost kod korištenja više aktuatora za pogonjenje kako bi se smanjio utjecaj klizanja. [4].



Slika 2. Mobilni roboti s kotačima

Mobilni roboti s gusjenicama su najbolja izvedba za robote koji se gibaju po mekoj podlozi i vanjskom okruženju. Korištenjem gusjenica smanjuje se klizanje i raspodjela mase je jednolikija u odnosu na robote s kotačima. Gusjenice ih čine učinkovitima kod korištenja za pjeskovite podloge, šljunčane podloge i podloge s rastresitim materijalima. Jedan od većih nedostataka im je kada se robot zakreće dolazi do sile okomite na bočne stranice gusjenica koje uzrokuju njihovo trošenje i moguće oštećenje donje podloge robota [4].



Slika 3. Mobilni roboti s gusjenicama

Hodajući mobilni roboti su mobilni roboti koji koriste jednu ili više nogu. Najlakša izvedba je sa šest nogu, jer omogućuje robotu statičko stabiliziranje tako da je u bilo kojem trenutku robot stabiliziran preko tri stajajuće noge. Smanjivanjem broja nogu se otežava problem stabilizacije robota, što čini hod jednim od težih dinamičkih problema. Humanoidni roboti koriste dvije noge za gibanje, te je cilj tih izvedbi približiti se što više organskim i prirodnim gibanjima čovjeka. Hodajući roboti imaju potencijalnu prednost prelaska preko većih zapreka i gibanja preko neravne površine [4].



Slika 4. Mobilni roboti s nogama

Roboti koji se kreću zrakom su leteći roboti, te u njih spadaju dronovi i bespilotne letjelice. Prednost je da imaju mogućnost daljinskog upravljanja, te se često koriste u vojnim operacijama kao nadzorne jedinice. Nedostatak tih robota je da prilikom pada, cijela letjelica je uništena [4].



Slika 5. Leteći robot

Podvodni mobilni roboti koji se gibaju u vodi su bespilotna podvodna vozila i plivajući roboti. Bespilotna podvodna vozila veličinom variraju od ljudske veličine pa do desetak metara, gdje veće izvedbe imaju prednost u smislu veće izdržljivosti i veće sensorike. Najčešće se za postizanje gibanja koriste propeleri i potisnici. Plivajući roboti pokušavaju oponašati gibanja bioloških sustava iz prirode, a to su najčešće ribe. Iako su još u eksperimentalnom stadiju cilj im je postići veće stupnjeve učinkovitosti u pogonu i pokretljivosti robota [4].



Slika 6. Podvodni mobilni roboti

Posebne izvedbe mobilnih robota su eksperimentalne izvedbe koje uzimaju inspiraciju iz prirode kao što su puzajući roboti koji gibanje ostvaruju pomoću tijela. Konstrukcija im se sastoji od više članaka koji se mogu relativno gibati u odnosu na druge članke [4].



Slika 7. Puzajući roboti

2.2. Upravljanje robota

Mehanička struktura robota mora biti kontrolirana preko njezinih stupnjeva slobode gibanja kako bi se mogao ispuniti traženi zadatak. Kontrola robota uključuje tri koraka: prikupljanje informacija, obrada prikupljenih informacija i djelovanje. Informacije se prikupljaju preko senzora, koji mogu prikupljati informacije o okolišu ili samom robotu. Prikupljene informacije se zatim obrađuju, te se šalju aktuatorima kako bi se postiglo željeno gibanje [2]. Upravljački sustavi mogu imati jedan od tri stupnja autonomnosti:

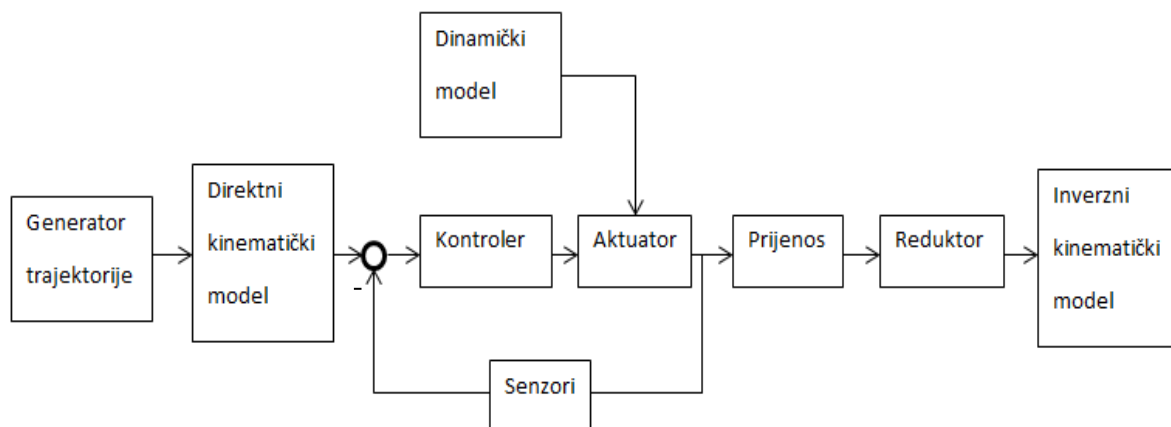
- Direktno upravljanje gdje čovjek ima skoro potpunu kontrolu nad robotskim gibanjem,
- Posredno upravljanje gdje čovjek zadaje zadatak koji robot treba obaviti, a sami robot autonomno proračunava na koji način će izvršiti zadatak,
- Autonomni robot obavlja zadatak bez interakcije s čovjekom preko dužeg vremenskog tijeka.

Druga podjela robota se uzima između načina komunikacije robota i čovjeka [1]:

- Daljinsko upravljanje, gdje čovjek upravlja svakim pomakom to jest svaka promjena aktuatora je određena sa strane operatera.
- Nadzorno upravljanje, gdje čovjek određuje općenite pomake ili promjene u poziciji, a robot odlučuje kakve će specifične pokrete obaviti preko aktuatora kako bi napravio zadani generalni pomak.

- Autonomija na razini zadatka, gdje čovjek određuje samo koji zadatak će robot obavljati, a sami robot upravlja svojim aktuatorima kako bi izvršio taj zadatak.
- Potpuna autonomija, gdje će robot osmisлити i izvršiti sve svoje zadatke bez ikakve ljudske interakcije.

Kako bi uopće mogli upravljati robotom potrebna su nam znanja iz dinamike i kinematike. Direktni kinematički model koristi se za izračun krajnjih pozicija, orijentacija, brzine i ubrzanja preko poznatih odgovarajućih vrijednosti aktuatora. Kod inverznog kinematičkog problema poznata je željena krajnja pozicija, orijentacija, brzina i ubrzanje, te preko njih se računaju vrijednosti u aktuatorima za željeno gibanje. Nakon izračuna pozicije, orijentacije brzine i ubrzanja konstrukcije primjenom kinematike određuju se utjecaji sila na gibanje robota putem dinamičke analize. Direktni dinamički problem se bavi izračunom ubrzanja pokretnih dijelova konstrukcije robota kada su poznate sile koje djeluju na njih. Direktni kinematički problem se koristi pri računalnim simulacijama gibanja robota. Inverzni dinamički problem se koristi za izračunavanje sila u aktuatorima potrebnim za postizanje određenih vrijednosti ubrzanja u člancima konstrukcije. Inverzni dinamički problem služi za poboljšanje upravljačkih algoritama robota [5].

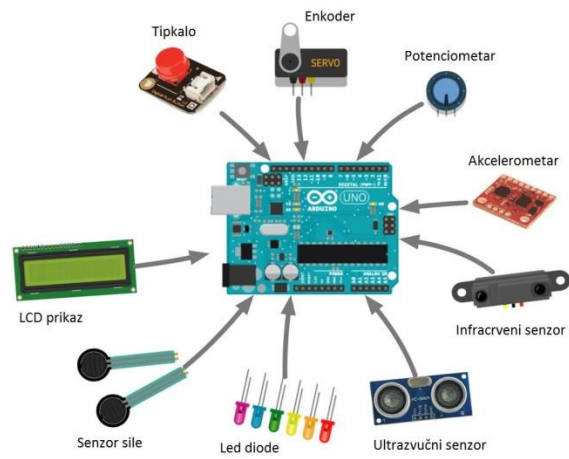


Slika 8. Model upravljanja robotom

2.3. Senzorika

Senzori omogućuju prikupljanje informacija o određenim mjerama iz okoline ili unutarnjih komponenata robota. Prema tome se mogu podijeliti na senzore unutarnjih stanja koji kod robota mjere poziciju, orijentaciju, brzinu i ubrzanje, te na senzore vanjskog stanja koji su osjet dodira, kamere i zvučni senzori. Tipovi senzora unutarnjeg stanja su

akcelerometar, žiroskop i senzori sila. Prikupljena mjerenja su potrebna kako bi robot mogao obavljati zadatke i proračunati reakciju na promjene u svojoj okolini. Koriste se za različita mjerenja.



Slika 9. Tipovi senzora u mobilnim robotima

3. HUMANOIDNI ROBOTI

Humanoidni robot je robot čija konstrukcija ima oblik koji nalikuje ljudskome tijelu. Općenito se konstrukcija sastoji od dvije noge, dvije ruke, trupa i glave. Rađeni su za rukovanje alatima namijenjenim za ljude, proučavanje dvonožnog hoda i druge svrhe. Prvobitni cilj istraživanja humanoidnih robota je bio poboljšanje ortoza i proteza. Trenutačno se razvijaju kako bi mogli izvoditi ljudske poslove koji su prljavi i opasni za zdravlje čovjeka, te kao privatni pomoćnici starijima i nemoćnima. Kako su napravljeni s mogućnošću korištenja alata mogu se primijeniti i u industriji kod pokretnih traka. Mogućnosti robota su vrlo velike, jedini problem su skupa izvedba, te potreba za algoritmima za obavljanje bilo kakvog zadatka [6].



Slika 10. Humanoidni robot

Humanoidni roboti su konstruirani tako da oponašaju ljudsko tijelo, stoga se koriste aktuatori čiji rad može oponašati mišiće i zglobove. Ponajviše se koriste rotacijski aktuatori, koji mogu biti: električni, pneumatski, hidraulički, piezoelektrični i ultrazvučni. Hidraulički i električni aktuatori imaju kruto djelovanje, te zbog toga je potrebna relativno komplicirana povratna kontrolna petlja kako bi se dobilo njihovo željeno djelovanje. Hidraulički aktuatori se koriste pri malim brzinama i visokim iznosima tereta, dok električni aktuatori pri visokim brzinama i malim iznosima tereta. Piezoelektrični aktuatori se koriste kod preciznog pozicioniranja. Ultrazvučni aktuatori proizvode gibanja do reda mikrometra pri ultrazvučnim

frekvencijama. Korisni su za kontrolu vibracija, sustave pozicioniranja i kao brze sklopke. Pneumatski aktuatori koriste komprimirani zrak, koji kad se upuhuje aktuator se proširuje, a kada se ispuhuje aktuator se skrati. Obično su linearni, te se koriste pri malim brzinama i niskim do srednjim opterećenjima. Pneumatski aktuatori se mogu naći u izvedbama: cilindra, zračnog mijeha, pneumatskog koračnog motora i umjetnih pneumatskih mišića.

Humanoidni roboti moraju oponašati ljudski hod, što im je glavna razlika u odnosu na druge robote. Normalan hod robota treba biti izveden uz potrošnju minimalne potrebne energije, stoga su provedena mnoga istraživanja vezana za dinamiku i regulacijsku strukturu humanoidnih robota. Glavni cilj je regulacija stabilnosti hoda, tako da se centar mase zadržava u potrebnoj poziciji. Kako bi se zadržala dinamička stabilnost prilikom hoda robotu su potrebne informacije o dodirnim silama, te o trenutnom i željenom gibanju. Druge karakteristike humanoidnih robota su da se gibaju, skupljaju informacije iz okoline pomoću senzora, te utječu na okolinu. Kako bi se mogli gibati u kompliciranim okruženjima planiranje i regulacija robota se bazira na detekciji sudara, planiranja putanje gibanja, te izbjegavanje prepreka [6].



Slika 11. Pneumatski humanoidni robot Denise sveučilišta TUDelft

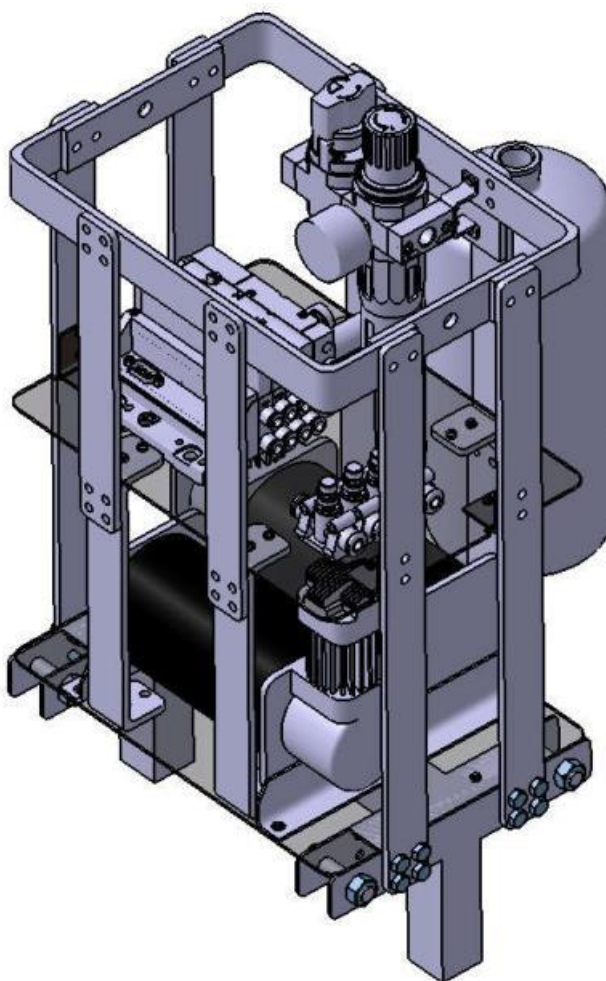
4. KONSTRUKCIJA I IZRADA DVONOŽNOG ROBOTA

U ovom radu je izrađena konstrukcija dvonožnog hodajućeg robota. Konstrukcija se može podijeliti na tri dijela: trup, noge i stopala. Trup se sastoji od tri platforme koje su međusobno povezane aluminijskim profilima, a izrađene su od akrilnog stakla. Na njima se nalaze upravljačke i pogonske komponente. Kako trup sadrži većinu mase cjelokupne konstrukcije, predstavlja opasnost od bočnog prevrtanja robota. Noge povezuju trup sa stopalima, te prenose silu aktuatora na podlogu, zbog toga imaju ključnu ulogu u stabilizaciji i putanji robota. Izrađene su iz kvadratnih aluminijskih profila međusobno povezanih ležajevima. Noge imaju četiri stupnja slobode, svaka noga po dva stupnja slobode. Po svakoj nozi jedan stupanj slobode je upravljan dok drugi ovisi o brzini gornjeg članka, te masi i inerciji donjeg članka. Stopala se promatraju zasebno zbog utjecaja na dinamičku stabilnost preko dodirne površine stopala i podloge. Izrađena su pomoću tehnologije 3D printanja.

Pri izradi robota napravljene su promjene u ovisnosti na prvobitnu konstrukciju. Dva paralelno spojena kompresora zamijenjena su sa jednim kompresorom, zbog mogućnosti dobavne snage kompresora. Na temelju te promjene spremnik zraka je smješten na prvu platformu trupa umjesto na leđima robota. Ta promjena uvelike poboljšava stabilnost robota u stanju mirovanja i hodanja, zbog toga što je smanjena sama težina trupa robota.

4.1. Konstrukcija trupa

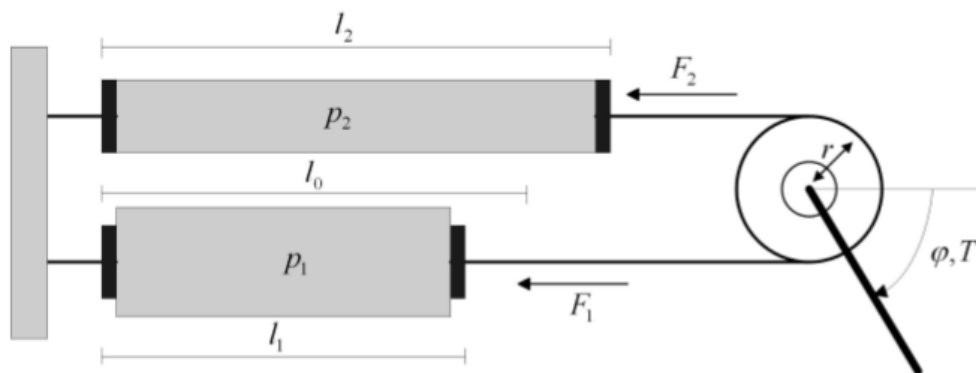
Trup se sastoji od tri platforme izrađene od akrilnog stakla, povezane aluminijskim profilima, te osigurane od relativnog međusobnog gibanja i razdvajanja vijčanim spojevima. Na platformama se nalaze elementi upravljačkog i pogonskog sustava. Pogonski sustav se sastoji od: kompresora, spremnika stlačenog zraka, filtera zraka, regulatora tlaka, ventilskog bloka, prigušno-nepovratnih ventila i umjetnih pneumatskih mišića. Većina pogonskog sustava se sastoji od pneumatskih elementa, dok se kompresor, ventilski blok i dijelovi upravljačkog sustava napajaju električnom baterijom. Glavna komponenta upravljačkog sustava je mikrokontroler Arduino Mega2560, a najvažniji senzor je žiroskop. Mikrokontroler na temelju informacija koje dobiva iz senzora o vanjskim i unutarnjim stanjima, te implementiranom algoritmu poduzima akcije koje će održati dvonožni robot stabilnim.



Slika 12. Konstrukcija trupa

U nultom položaju robota platforme su paralelne s podlogom. Na prvoj platformi, koja se nalazi najbliže podlozi i koja je direktno spojena s nogama, nalazi se kompresor i spremnik stlačenog zraka, zbog njihove veličine i mase kako bi se centar mase sklopa približio što više podlozi. Druga platforma sadrži pneumatske elemente: pripremna grupa, ventilski blok i četiri prigušno-nepovratna ventila, a treća platforma sadrži mikrokontroler, relejni blok, žiroskop i testnu pločicu. Zbog veličina komponenti prva platforma zauzima polovicu volumena trupa, dok druga i treća platforma zajedno zauzimaju preostalu polovicu.

upravljan s dva umjetna pneumatska mišića postavljena u antagonistički par, dok drugi stupanj slobode gibanja ovisi o momentu prvog članka i inercije drugog članka. Postavljanjem mišića u antagonistički par omogućuje se da vlačna sila mišića može iskoristiti za rotaciju oko željene osi, gdje je jedan mišić zadužen za pozitivnu rotaciju, a drugi za negativnu.



Slika 14. Spreg pneumatskih mišića

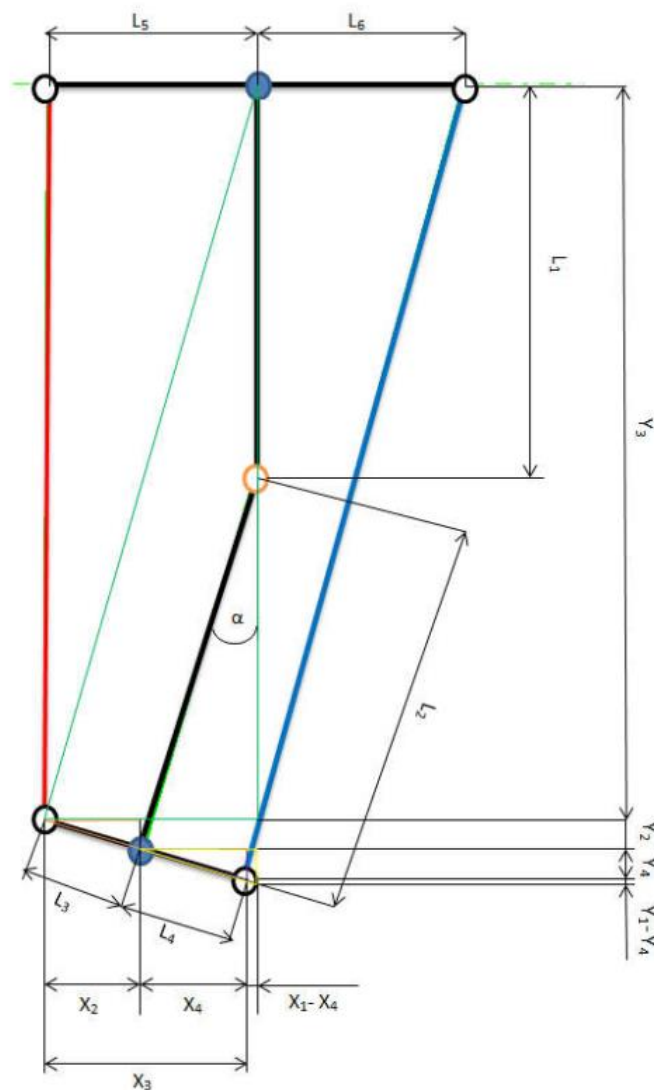
Iz slike 15, koja prikazuje spoj nogu i postolja trupa, se izračunavaju potrebne duljine umjetnih pneumatskih mišića u nominalnom i skraćenom stanju. Na slici, pneumatski mišići su označeni crvenom i plavom bojom, konstantna geometrija crnim linijama, stupanj slobode gibanja koji je upravljan narančastim krugom, osi rotacije aktuatora crnim krugovima. Širina robota određena je kompresorom i spremnikom zraka, te iznosi L_5+L_6 . Iz slike se određuje duljina mišića u skraćenom stanju, prema izrazu:

$$M_{skraćeno} = \sqrt{(L_5 - X_3)^2 + Y_3^2}, \quad (1)$$

te u nominalnom stanju, prema izrazu:

$$M_{nominalno} = \sqrt{(L_6 - X_4 + X_1)^2 + (Y_2 + Y_3 + Y_4)^2}. \quad (2)$$

Izrazi (1) i (2) imaju uračunatu duljinu popratnih elemenata, a to je zglobna glava, koja povezuje pneumatske mišiće s konstrukcijom. Nominalna duljina mišića se odnosi samo na duljinu rastezljivog materijala, gdje je izabrana nominalna duljina od 180 mm. Ostvarivi kut α pri tlaku od 5 bar iznosi 15° . Kada je pozicija nogu u drugom krajnjem položaju $-\alpha$ vrijednosti u izrazima (1) i (2) se zamjenjuju zbog simetričnosti.

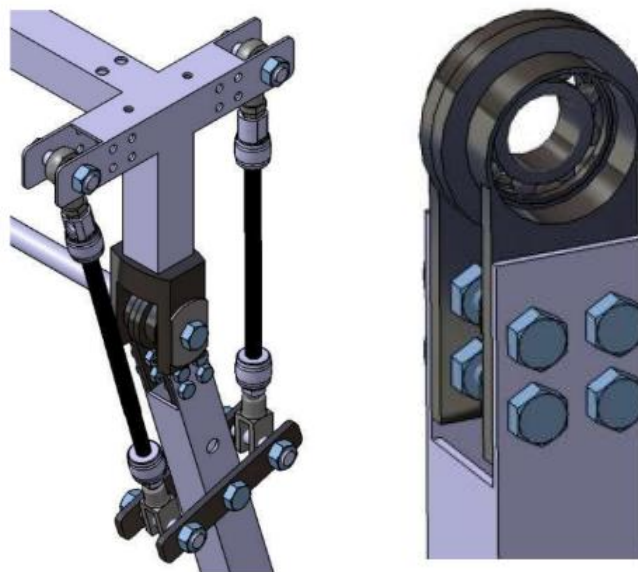


Slika 15. Geometrija nogu

Rotacijske stupnjeve slobode gibanja nogu potrebno je osigurati ležajevima. Izabran je ležaj SKF 6002 zbog male dimenzije. Ležaj se nalazi u dvodijelnom aluminijskom kućištu, te je montiran na mirujuću osovinu odgovarajućim dosjedom. Aksijalni pomak vanjskog prstena ležaja onemogućen je kućištem. Stupanj slobode gibanja između dva članka izrađen je tako da se u ispruženom stanju noge rotacija u jednom smjeru onemogućava. Rotacija je onemogućena mehaničkim graničnikom.



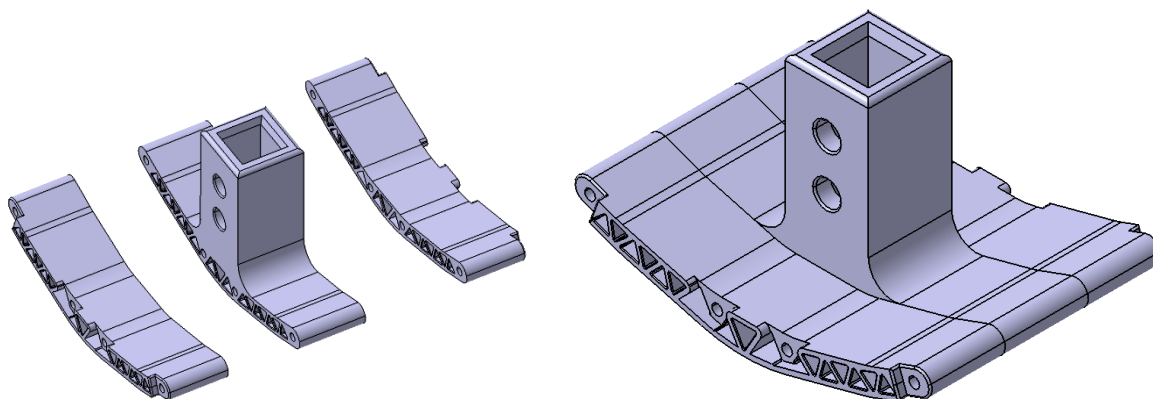
Slika 16. Izrada nogu



Slika 17. Izvedba gornjeg članka noge (lijevo) i izvedba kućišta ležaja (desno)

4.3. Konstrukcija stopala

Kako bi se što više onemogućilo bočno prevrtanje robota i postigla stabilnost robota u nultom položaju izrađena su velika stopala. Kut između okomice na podlogu i ispružene noge je glavni parametar oblika stopala i označava se sa α . Kako su krajnji kutevi nogu simetrični, onda su simetrični i kutevi nalijevanja na stopalu. Stopala imaju dva kuta nalijevanja od 15° i 20° , koji se postižu pneumatskim mišićima pri tlaku od 5 bar i 8 bar. Kako je stopalo izrađeno primjenom tehnologije 3D printanja veličina stopala ograničena je veličinom 3D printera. Pri procesu izrade stopala korišten je materijal ABS plastika. Stopalo se sastoji od tri dijela, koji su međusobno povezani navojnom šipkom. Gustoća dijelova je mala kako bi se uštedjelo na materijalu, ali je krutost zadovoljena korištenjem trokutne poprečne strukture.



Slika 18. Konačna verzija stopala



Slika 19. Izrađeno stopala

5. KOMPONENTE POGONSKOG I UPRAVLJAČKOG SUSTAVA

Dvonožni hodajući robot izrađen je s umjetnim pneumatskim mišićima, te za njihov rad potrebna je odgovarajuća pneumatska oprema. Kako bi se mogla održati stabilnost robota potrebna je regulacija sustava. Regulacija se vrši na temelju podataka iz senzora stanja koje mikrokontroler obrađuje preko implementiranog algoritma. Mikrokontroler šalje signale u relejni blok gdje se usmjerava struja za okidanje elektromagneta u elektromagnetskom upravljanoj ventilskoj blok. Tada se propušta protok zraka u određene mišiće i ostvaruje gibanje. Komponente potrebne za rad sustava se mogu podijeliti u komponente pogonskog sustava i komponente upravljačkog sustava.

5.1. Komponente pogonskog sustava

Pogonski sustav je zadužen za ostvarenje momenta potrebnog za gibanje robota. Za aktuatore se koriste četiri umjetna pneumatska mišića, gdje se po jednoj nozi nalaze dva mišića spojena u antagonistički par. Stoga, u sustavu od četiri stupnja slobode gibanja samo su dva stupnja slobode gibanja upravljana. Kako pneumatski mišići rade pomoću stlačenog zraka potrebno je taj stlačeni zrak dovesti unutar mišića. Također, za autonomnost robota potreban je i izvor stlačenog zraka na samom robotu. Komponente pogonskog sustava, izuzevši bateriju, su: kompresor, spremnik stlačenog zraka, priprema grupa, elektromagnetski upravljani ventilski blok, prigušno-nepovratni ventili i umjetni pneumatski mišići.

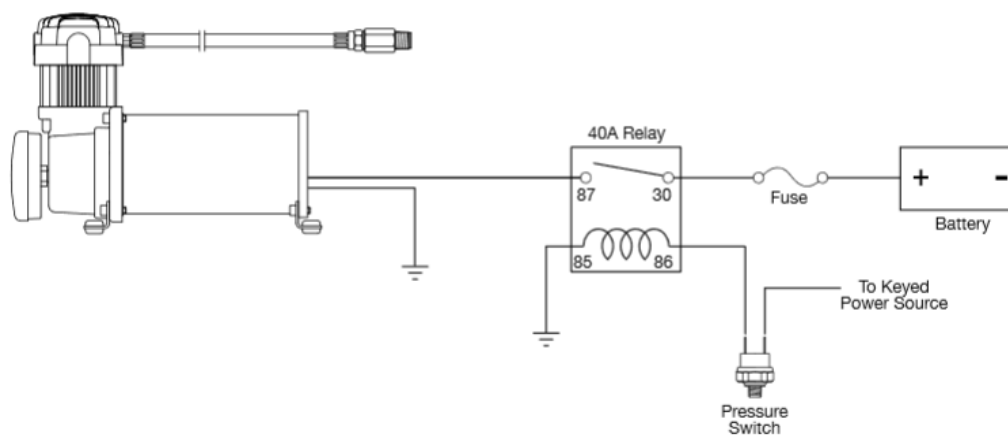
Kompresor uzima zrak iz okoline dvonožnog hodajućeg robota i stlačuje ga, te se stlačeni zrak pohranjuje u spremnik stlačenog zraka. Kada mikrokontroler pošalje signal na relejnu sklopku, struja iz baterije proteče do ventilskog bloka te se okida elektromagnet jednog od četiri elektro-magnetski aktivirana 3/2 ventila unutar njega. Tada stlačeni zrak iz spremnika proteče kroz pripremu grupu, ventilski blok, prigušno-nepovratne ventile i dolazi unutar pneumatskog mišića. U sustavu je ventilski blok zadužen za smjer protoka zraka kroz sustav, a priprema grupa za filtraciju nečistoća i ograničenje tlaka.

Kompresor

Kompresor se koristi kako bi sustav mogao biti autonoman, a uloga mu je da opskrbljuje robota sa stlačenim zrakom koji je potreban za umjetne pneumatske mišiće. Za ovaj sustav predviđena su bila dva kompresora, ali zbog snage nabavljenog kompresora sustav je izveden samo s jednim. Kompresor ima veliki utjecaj na stabilnost sustava zbog svoje težine i veličine, stoga je izvedba s jednim kompresorom pogodnija za stabilnost sustava.



Slika 20. Viair 400C kompresor



Slika 21. Shema spoja kompresora

Dimenzije kompresora su 228.6 mm×101.6 mm×171.45 mm, a masa iznosi 3.92 kg. Struja pokretanja kompresora je 28 A, te ima snagu od 186.425 W. Maksimalni tlak koji može ostvariti iznosi 10.34 bar. Sadrži elektromotor s permanentnim magnetima koji ima 33% duty cycle. U slučaju pregrijavanja kompresor se automatski gasi, te mu je potrebno hlađenje od trideset minuta na atmosferskom zraku.

Tablica 1. Karakteristike kompresora

Tlak [bar]	Protok [l/min]	Struja [A]
0	74	16
1	65	20
2	60	23
3	56	25
4	53	27
5	49	28
6	46	28
7	42	28
8	38	28
9	35	27
10	31	27

Tablica 2. Brzine punjenja spremnika

Spremnik volumena 9.46 l	Vrijeme [s]
0 bar do 7.24 bar	87
5.86 bar do 7.24 bar	21
0 bar do 10 bar	140
7.58 bar do 10 bar	48

Spremnik zraka

Spremnik zraka na robotu je oznake CRVZS-2 proizvođača Festo. Radni tlak mu je između -0.95 bar i 16 bar relativnog tlaka, te volumen spremnika iznosi 2 l. U njega se pohranjuje stlačeni zrak iz kompresora, te je najveća komponenta sustava. Spremnik je potreban kako bi robot mogao biti autonoman, te kompenzira fluktuacije tlaka koje dolaze iz kompresora. Ima veliki utjecaj na stabilnost robota zbog svoje veličine i težine.



Slika 22. Spremnik zraka Festo CRVZS-2

Pripremna grupa

Ugrađena je pripremna grupa oznake LFRS-1/8-D-7-MINI-A proizvođača Festo, koja se sastoji od filtra zraka i regulatora tlaka. Filter zraka uklanja nečistoće iz zraka kako one ne bi oštetile pneumatske komponente. Stupanj filtracije filtera je $40\ \mu\text{m}$, te ima automatski ispušćivač kondenzata. Regulator tlaka služi za ograničavanje tlaka na određenu vrijednost između 0.5 bar do 7 bar pri protoku zraka od 110 l/min do 11000 l/min s maksimalnom histerezom tlaka od 0.2 bar.



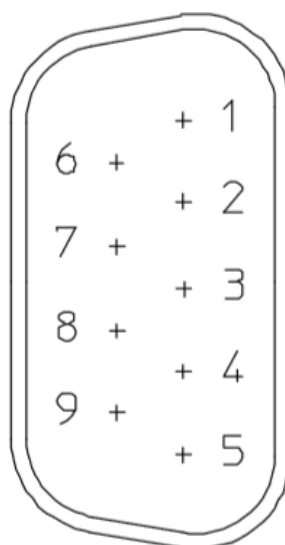
Slika 23. Pripremna grupa Festo LFRS-1/8-D-7-MINI-A

Ventilski blok

Ugrađen je ventilski blok oznake 34P-MS2-UAA-KK proizvođača Festo. Blok se sastoji od četiri elektromagnetskih 3/2 on/off ventila s radnim tlakom od 3 bar do 10 bar. Njime se određuje smjer protoka zraka kroz sustav. Zrak se do ventilskog bloka dovodi jednim vodom, a unutar njegovog kućišta se vrši odzračivanje. Upravljan je mikrokontrolerom preko DB9 8-pinskim konektorom. Ventili se okidaju s 24 V signalom jačine 50 mA, te je maksimalna brzina okidanja 20 ms.

Tablica 3. Adrese DB9 priključka

Pin	Adresa
1	0
2	1
3	2
4	3
5	4
6	5
7	6
8	7
9	0 V



Slika 24. Ventilski blok Festo

Prigušno-nepovratni ventili

Prigušno-nepovratni ventil sastoji se od prigušnog ventila i nepovratnog ventila u paralelnom vodu. Na taj način prigušenje se obavlja samo u jednom smjeru gibanja fluida, dok u suprotnom smjeru fluid se giba neprigušeno, zbog toga što mu nepovratni ventil predstavlja mali otpor strujanju [7]. Sustav ima četiri prigušno-nepovratna ventila, za svaki mišić po jedan ventil. Ugrađeni su ventili GR-QS-6 od proizvođača Festo, te im je nazivni protok 85 l/min do 265 l/min, a prigušuju tlakove od 0.2 bar do 10 bar.

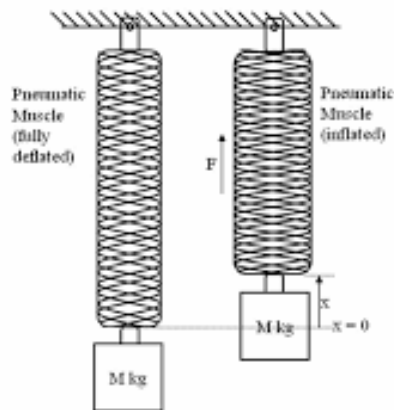


Slika 25. Prigušno-nepovratni ventil Festo GR-QS-6

Određuju protok zraka na ulazu/izlazu svakog pneumatskog mišića, te su mehanički i nije ih moguće upravljati ni primati informacije o protoku zraka u digitalnom obliku. Dva prigušno-nepovratna ventila koji su odgovorni za zamah noge slobodno propuštaju zrak u pneumatske mišiće, dok prigušuju protok zraka koji izlazi iz mišića. Druga dva koja su odgovorna za prebacivanje težišta konstrukcije prigušuju protok prema pneumatskim mišićima, a dozvoljavaju nesmetan protok zraka koji izlazi iz mišića.

Umjetni pneumatski mišići:

Umjetni pneumatski mišići izrađeni su od cijevi koja se može skupljati i potrebnih priključaka za dovod i odvod stlačenog zraka. Cijev pneumatskog mišića je napravljena od gumene membrane koja je omeđena nesavitljivim vlaknima aramidne pređe. Kada se u cijev pneumatskog mišića dovodi stlačen zrak njegov nazivni promjer će se povećati, a nominalna duljina mišića se smanjuje. Ta karakteristika rada umjetnih pneumatskih mišića oponaša rad stvarnih bioloških mišića [8]. Smanjenjem nominalne duljine uzrokuje se vlačna sila, koja se u ovom radu iskorištava za postizanje momenta za pokretanje robota.



Slika 26. Prikaz rada pneumatskog mišića

Ugrađena su četiri mišića oznake DMSP-10-180N-RM-CM proizvođača Festo. Nominalna duljina pneumatskog mišića iznosi 180 mm, nazivni promjer im je 10 mm. Moguća je najveća kontrakcija nominalne duljine mišića od 25% pri maksimalnom tlaku od 8 bar, te je maksimalna vlačna sila 630 N. Svaka noga ima dva mišića koja su spojena u antagonistički par.



Slika 27. Umjetni pneumatski mišići Festo DMSP

5.2. Komponente upravljačkog sustava

Glavna komponenta upravljačkog sustava je mikrokontroler. U njemu se nalazi program za upravljanje cijelog sustava. Mikrokontroler na temelju podataka iz senzora šalje signale ventilskom bloku koji propušta zrak prema pneumatskim mišićima s ciljem stabilizacije hoda robota. Mikrokontroler je napajan električnom baterijom, te se orijentacija trupa mjeri akcelerometrom/žiroskopom. Elementi upravljačkog sustava uz bateriju su: mikrokontroler, akcelerometar/žiroskop, baterija, relejni blok, graničnici za koljeno.

Mikrokontroler

Na robot je postavljen mikrokontroler Arduino Mega 2560 koji ima 54 digitalnih ulaza/izlaza, 16 analognih ulaza, 4 UART-a i 16 MHz kristalni oscilator. Može se napajati USB priključkom ili preko vanjskoga izvora napajanja, koji mogu biti istosmjerno-izmjenični adapteri ili baterije od 6 V do 20 V. Za pravilan rad mikrokontrolera potrebno mu je napajanje između 7 V do 12 V.

Tablica 4. Specifikacije mikrokontrolera Arduino Mega 2560

Radni napon	5 V	SRAM	8 KB
Ulazni napon	7-12 V	EEPROM	4 KB
Digitalni I/O pinovi	54(15 PWM)	Brzina procesora	16 MHz
Analogni ulazni pinovi	16	LED_BUILTIN	13
DC struja po I/O pinu	20 mA	Dužina	101.52 mm
DC struja za 3.3V pinove	50 mA	Širina	53.5 mm
Flash memorija	256 KB	Težina	37 g

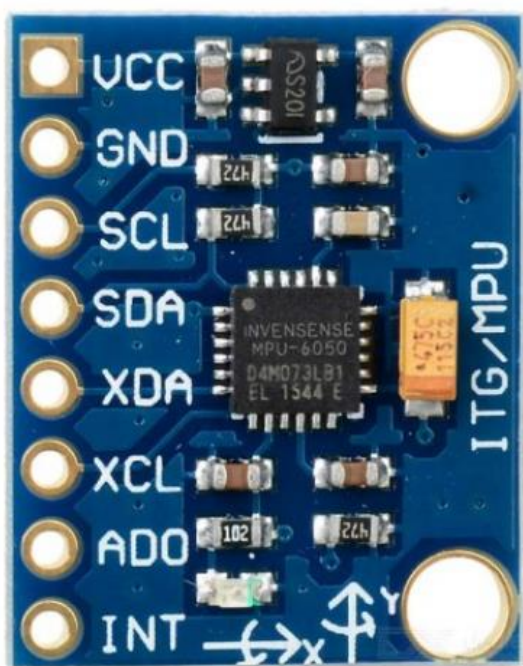
Digitalni pinovi rade pri naponu od 5 V, te mogu pružiti ili primiti struju jačine 20 mA. Također dodatno su određeni pinovi za PWM izlaze, serijsku komunikaciju i interrupt. Rezolucija analognih ulaza je 10 bita, što omogućuje 1024 mogućih iteracija.



Slika 28. Mikrokontroler Arduino Mega 2560

Akcelerometar/Žiroskop

Ugrađen je senzor MPU 6050 koji sadrži tro-osni žiroskop, tro-osni akcelerometar i Digital Motion Processor (DMP). Senzor ima tri analogna izlaza za akcelerometre, te tri 16-bitna analogno digitalna pretvornika za diskretizaciju izlaza iz žiroskopa. Osjetljivost žiroskopa se može podesiti na ± 250 °/sec, ± 500 °/sec, ± 1000 °/sec i ± 2000 °/sec, a osjetljivost akcelerometra na $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ i $\pm 16g$. I2C veza se koristi za komunikaciju sa svim registrima. Uređaj je napajan s naponom od 2.375 V do 3.46 V.



Slika 29. Akcelerometar/žiroskop MPU 6050

Baterija

Električna baterija pruža napajanje kompresoru, ventilskom bloku, mikrokontroleru, graničniku za koljena i mjernim uređajima. Baterija je odabrana prema snazi kompresora, koji zahtjeva 12 V napajanje i vršnu struju od 28 A, i ventilskog bloka, koji zahtjeva za okidanje elektromagneta napon od 24 V. Postavljena je baterija s brzim pražnjenjem kapaciteta 16800 mAh. Sadrži USB utor preko kojeg se napaja mikrokontroler, 19 V izlaz za napajanje ventilskog bloka i 12 V izlaz vršne struje od 600 A za napajanje kompresora.



Slika 30. Baterija s brzim pražnjenjem

Relejni blok

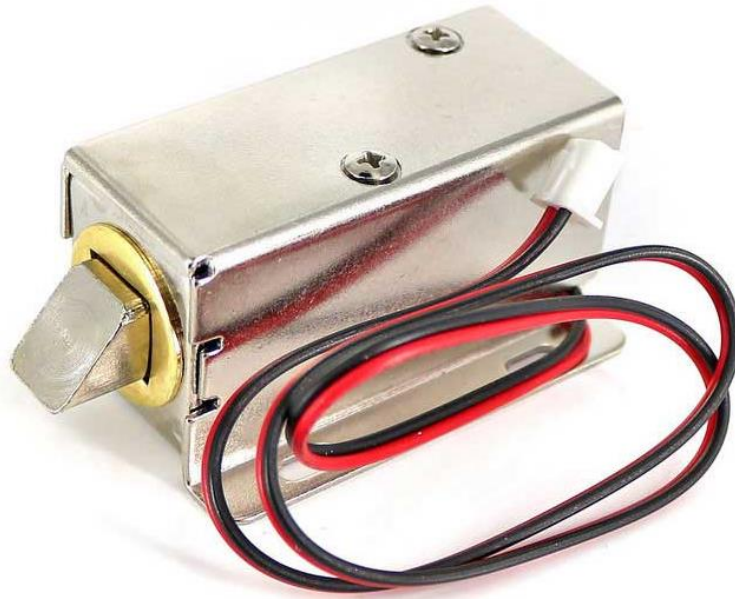
Kako bi ventilski blok dobio napon od 24 V za okidanje elektromagneta elektromagnetskih on/off 3/2 ventila koristi se baterija. Baterija napaja ventilski blok preko releja, koji su upravljani mikrokontrolerom. Relejni blok se sastoji od četiri releja Songle SRD-05VDC-SL-C, gdje je potreban jedan relej po pneumatskom mišiću. Releji mogu prekapčati do 250 V, a maksimalna struja prekapčanja iznosi 15 A, te je maksimalna snaga 3.75 kW. Brzina okidanja releja je manja od 10 ms, te je potreban napon od 5 V za okidanje, koji dolazi iz mikrokontrolera.



Slika 31. Relejni blok Songle SRD-05VDC-SL-C

Graničnici za koljeno

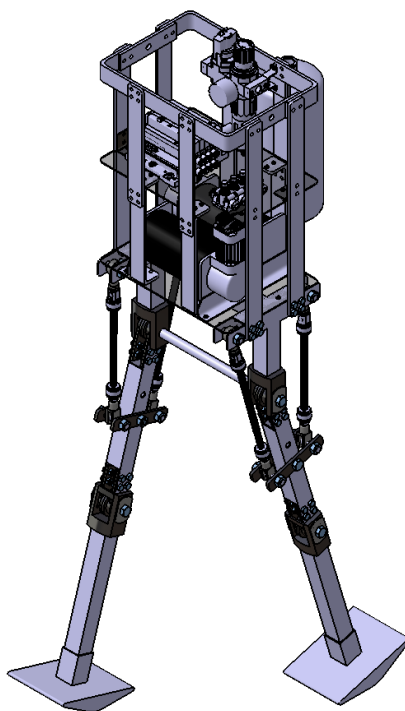
Na robotu su postavljeni linearni graničnici kod koljena robota u izvedbi elektromagnetske okidne brave, kako bi se omogućila kolinearnost članaka nogu prilikom hoda robota. Pod naponom od 12 V graničnici se uvlače i zadržavaju stanje sve dok su pod naponom.



Slika 32. Linearni graničnici za koljena

6. SIMULACIJA HODA ROBOTA PO RAVNOJ PODLOZI

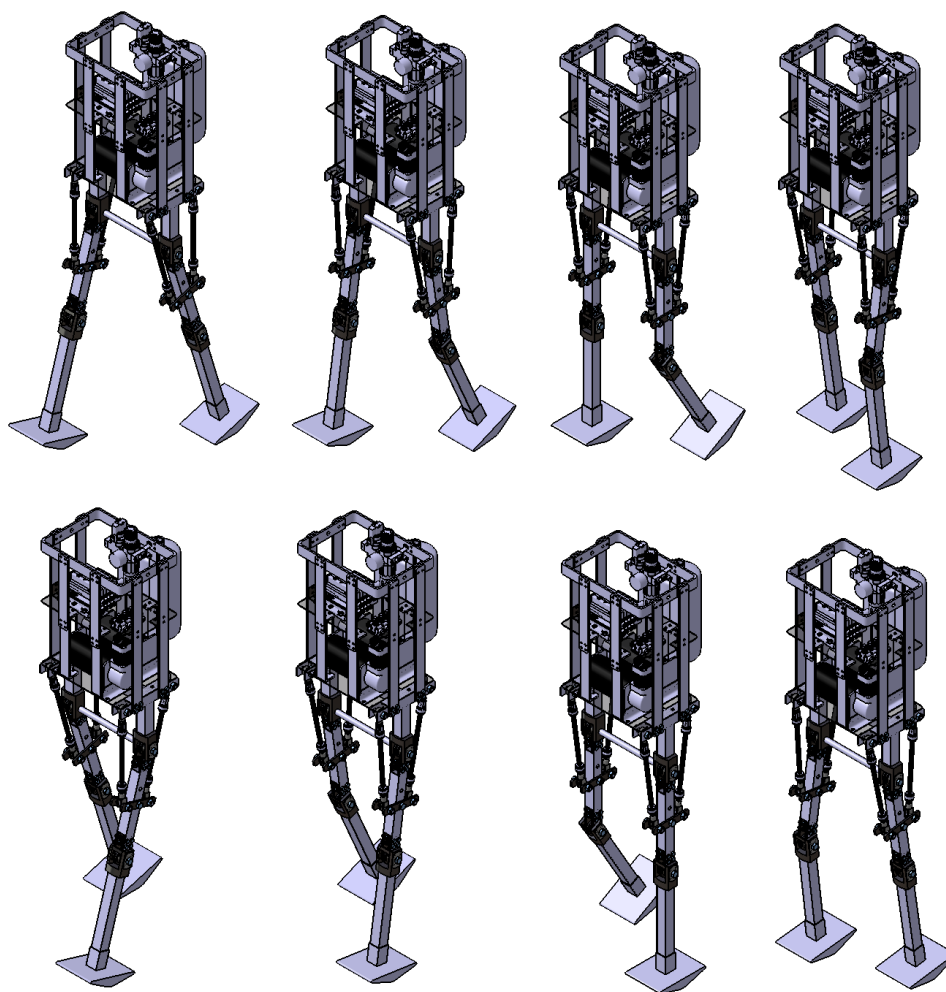
Nulto stanje robota je u poziciji kad su noge u krajnjim položajima. Članci nogu su kolinearni, te prednji pneumatski mišić prednje noge i stražnji pneumatski mišić stražnje noge su skupljeni pri tlaku od 5 bar. Kolinearnost članaka osigurana je linearnim graničnicima i konstrukcijom zgloba koljena, a preostala dva pneumatska mišića su u nominalnom stanju. Konstrukcija je izvedena tako da se u nultom položaju postiže stabilnost. Tlakom od 5 bar u pneumatskim mišićima postiže se raskorak od 355 mm pri kutu između nogu od 30 °. Stabilnost u smjeru dviju osi i stabilnost bočnog prevrtanja se djelomično osigurava velikim stopalima, ali je ujedno potrebna i nadogradnja sustava s upravljanim momentom oko osi normale na podlogu.



Slika 33. Položaj robota u nultom stanju

Slika 33 prikazuje tijek hoda. Početni položaj je u nultom stanju, što znači da će dva pneumatska mišića biti pod tlaku od 5 bar, a druga dva u nominalnom stanju. Dvonožni hodajući robot započinje gibanje kada stražnja noga kreće unatrag, te gubi kontakt s podlogom, tako što joj se stražnji pneumatski mišić opušta, a prednji pneumatski mišić

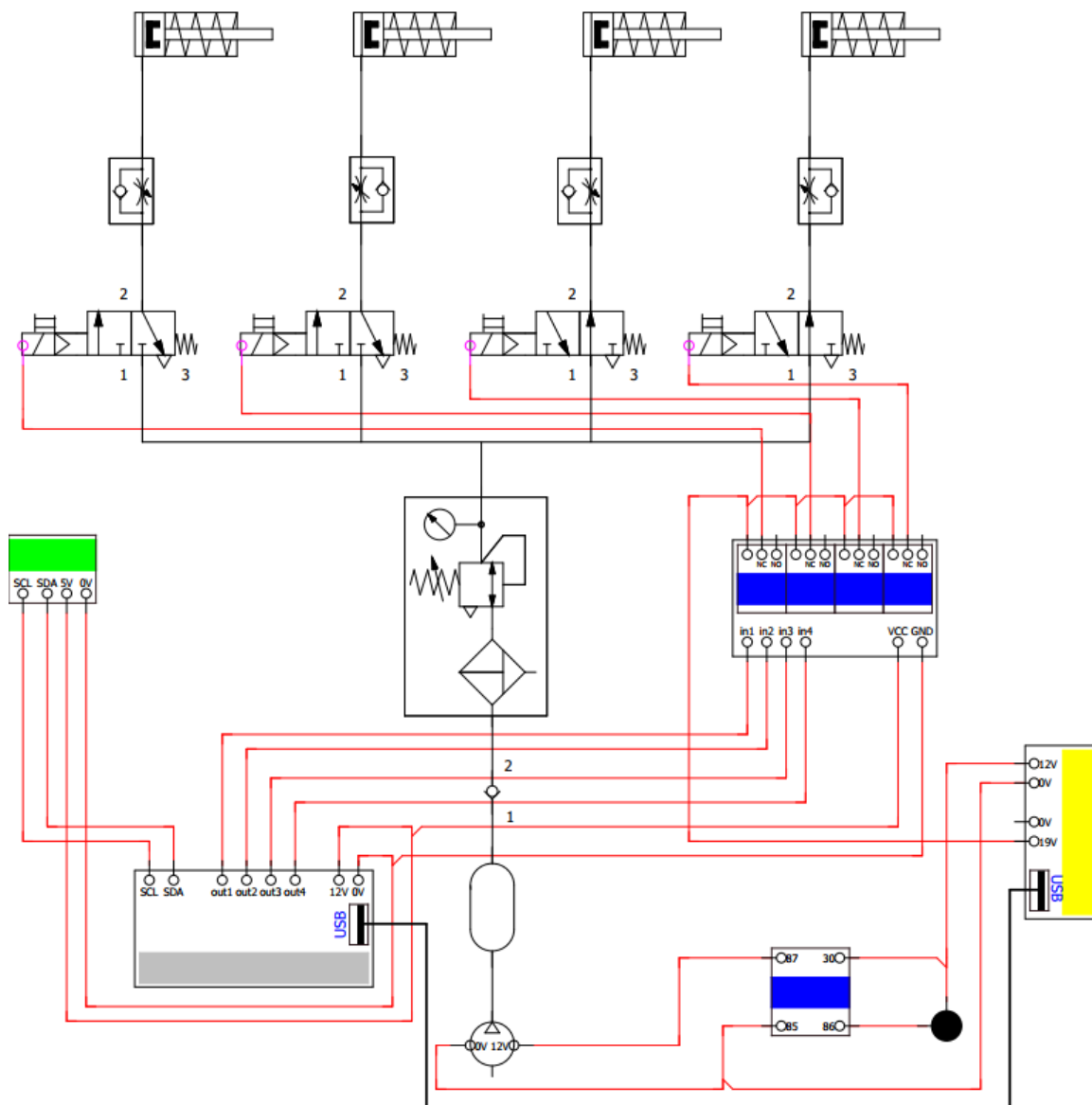
skuplja pri tlaku od 5 bar. Za to vrijeme prednja noga zadržava dodir s podlogom, ali se giba unatrag. Prednja noga ostvaruje gibanje opuštanjem prednjeg pneumatskog mišića, te skupljanjem stražnjeg pneumatskog mišića pri tlaku od 5 bar. Kako bi se prebacilo težište konstrukcije prednja noga mora zadržati kolinearnost članaka, sve dok stražnja noga ne dođe u kontakt s podlogom. U trenutku kada su obje noge opet u dodiru s podlogom dolazi do udarnog opterećenja, koji je djelomično kompenziran zbog elastičnog svojstva pneumatskih mišića. Ujedno se za to vrijeme treba regulirati nagib trupa, pomoću podataka iz akcelerometra/žiroskopa i vlačnim silama pneumatskih mišića, za koje su potrebni dodatni senzori. Tada je napravljen jedan korak, te zbog simetričnosti sustava ponavljaju se gibanja, gdje se uloge nogu zamjenjuju, a svi parametri su jednaki samo suprotnih vrijednosti. Nakon što sustav napravi još jedan korak, uloga nogu se ponovno zamjenjuje, sustav se smatra da je u početnom položaju, te se ciklus hoda ponavlja.



Slika 34. Prikaz hoda robota

7. PRIJEDLOG UPRAVLJAČKOG SUSTAVA

Autonomni dvonožni hodajući robot je sastavljen s upravljačkim i pogonskim komponentama montiranim na njemu, gdje slika 34 prikazuje njihov spoj.



Slika 35. Shema pogonskog i upravljačkog sustava

Upravljački sustav upravlja s protokom zraka kroz sustav do umjetnih pneumatskih mišića, što uzrokuje vlačnu silu. Tlak u pneumatskim mišićima određuje vlačnu silu, te se

ograničuje na 5 bar preko regulatora tlaka u pripreмноj grupi prije ulaza u ventilski blok. Kako je regulator tlaka mehanički nije moguće mijenjati vrijednost tlaka prilikom rada. U sustavu, baterija napaja pet uređaja: kompresor, mikrokontroler, ventilski blok i dva linearna graničnika. Kompresor se napaja s 12 V napona i vršne struje od 30 A. Povezan je na bateriju relejom, te je dodatno osiguran tlačnom sklopkom. Ako se tlak u spremniku stlačenog zraka spusti ispod 7.584 bar ponovno će se pokrenuti sve dok se ne dostigne vrijednost tlaka u spremniku od 10 bar. Dva linearna graničnika se napajaju s 12 V, te su pod naponom u uvučenom stanju. Mikrokontroler se napaja s naponom od 5 V, a za okidanje ventila ventilskog bloka primjenjuje se napon od 19 V, što je unutar potrebnog radnog napona uređaja od $24V \pm 25\%$. Ventili u ventilskom bloku propuštaju protok zraka sve dok su pod naponom.

Nagib konstrukcije trupa se mjeri pomoću inercijske mjerne jedinice MPU6050, te se stanja nagiba u x i y smjeru šalju na mikrokontroler. Mikrokontroler na temelju tih podataka šalje signal od 5 V preko digitalnog PWM izlaza na relejni blok, koji propušta protok struje na ventilski blok. Tada se okida određeni elektromagnetski on/off ventil u ventilskom bloku, te zrak struji prema određenom pneumatskom mišiću, koji se skuplja i stvara vlačnu silu.

Predlaže se nadogradnja sustava upravljanja s odgovarajućim sensorima kako bi se mogla postići regulacija vlačne sile uzrokovane skupljanjem pneumatskih mišića. Moguća izvedba je zamjenom elektromagnetskih on/off ventila s proporcionalnim ventilima. Proporcionalni ventili imaju karakteristiku rada da se protok zraka mijenja linearno s linearnom promjenom napona. Iako se s proporcionalnim ventilima može precizno regulirati vlačna sila njihova je cijena visoka. Drugo rješenje je ugradnja osam senzora i to četiri senzora tlaka za mjerenje tlaka unutar mišića i četiri senzora duljine kako bi se mogla mjeriti duljina pneumatskih mišića. S povratnom vezom iz tih osam senzora moguće je regulirati vlačnu silu pneumatskih mišića. Ujedno predlaže se nadogradnja konstrukcije dvonožnog hodajućeg robota s rukama. Konstrukcija ruku bi bila povezana na gornji dio trupa robota, te bi bile simetrične. Obje ruke bi bile pogonjene s istim elektromotorom. S tom izvedbom bila bi omogućena regulacija momenta u smjeru normale na postolje trupa, što bi omogućilo jedan dodatan upravljivi stupanj slobode gibanja. S dodatnim upravljivim stupnjem slobode gibanja lakše se može postići stabilnost hoda robota i smanjuje se opasnost od bočnog prevrtanja.

8. ZAKLJUČAK

U ovom radu je izrađena konstrukcija autonomnog dvonožnog hodajućeg robota, te su montirane pneumatske i upravljačke komponente. Cjelokupni robot je izrađen s ciljem da cijena komponenata i izrada konstrukcije bude što niža. Većina konstrukcije je jednostavna i može se vrlo jednostavno proizvesti. Pogonski sustav se sastoji od komponenata iz tvrtke Festo izuzevši kompresor s čime se postiže kompatibilnost između komponenti.

Hod autonomnog dvonožnog hodajućeg robota je jedan od težih dinamičkih problema, a zahtjev autonomnosti dodatno ga otežava. Zbog autonomnosti potreban je kompresor i spremnik stlačenog zraka, koji zbog svoje veličine i težine otežavaju stabilnost sustava. Potrebno je napomenuti da se s četiri stupnja slobode gibanja, od kojih su dva upravljana, povećava složenost izrade upravljačkog algoritma.

Smatram da je moguće postići krajnji cilj hoda ovog sustava uz nabavu dodatnih senzora za tlak i duljinu kojima bi se regulirala vlačna sila uzrokovana pneumatskim mišićima. Predlažem nadogradnju konstrukcije robota s rukama pogonjenim s jednim elektromotorom, kako bi se dobio dodatni upravljani stupanj slobode gibanja. Dodatan stupanj slobode gibanja olakšao bi stabilizaciju sustava, te smanjio opasnost od bočnog prevrtanja.

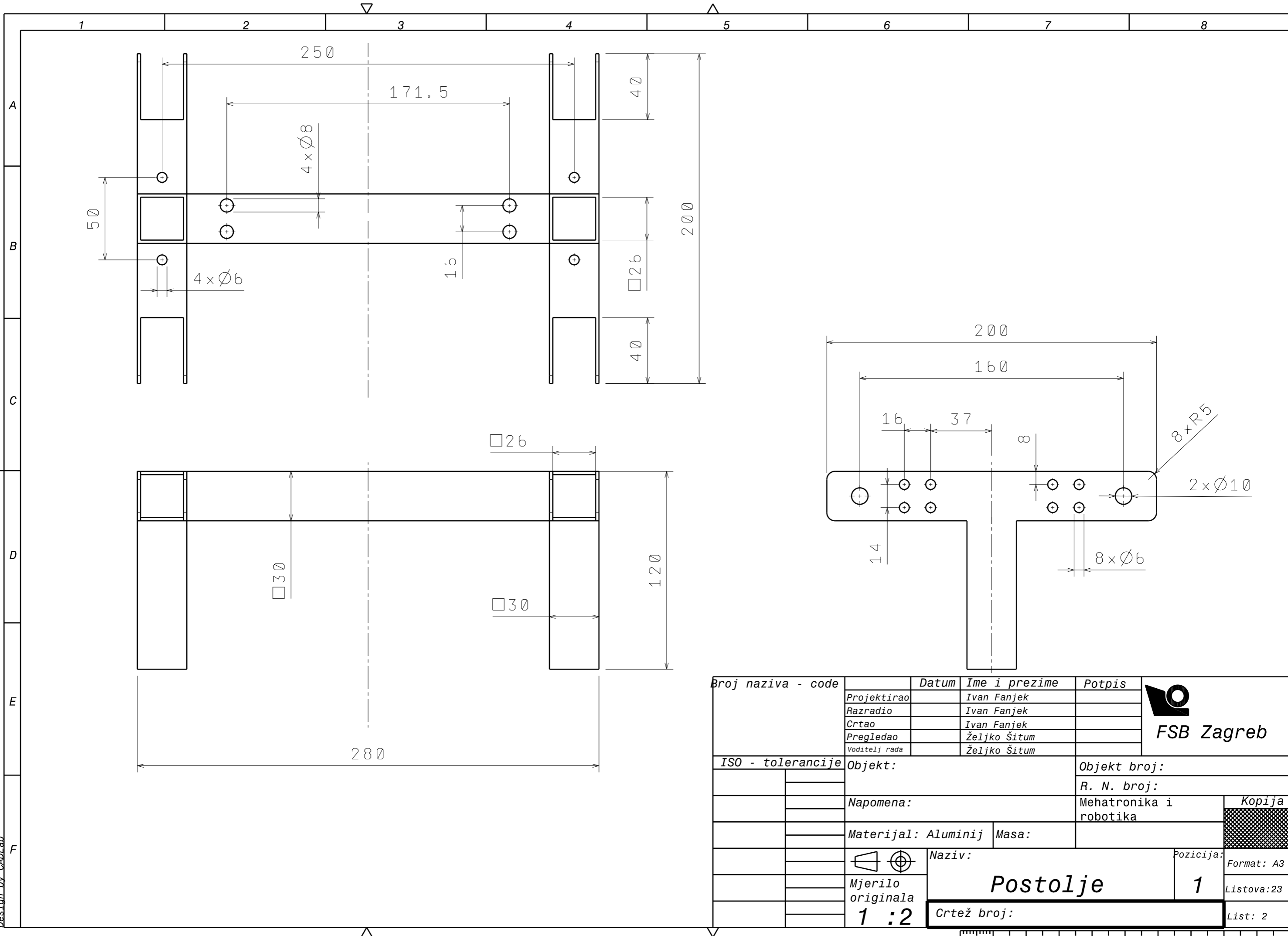
LITERATURA


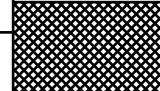
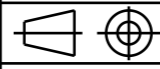
- [1] Wikipedia, Robotics, <https://en.wikipedia.org/wiki/Robotics>, (07.01.2019.)
- [2] Crenković, M.: Industrijski i mobilni roboti, predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [3] Wikipedia, Mobile robot, https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_robot, (08.01.2019.)
- [4] Robotshop, Basics: what types of mobile robots are there, <https://www.robotshop.com/community/tutorials/show/basics-what-types-of-mobile-robots-are-there>, (07.01.2019.)
- [5] Wikipedia, Robot kinematics, https://en.wikipedia.org/wiki/Robot_kinematics, (08.01.2019.)
- [6] Wikipedia, Humanoid robot, https://en.wikipedia.org/wiki/Humanoid_robot, (08.01.2019.)
- [7] Petrić, J.: Hidraulika i pneumatika, 1. dio: Hidraulika, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2012.
- [8] Wikipedia, Pneumatic artificial muscles, https://en.wikipedia.org/wiki/Pneumatic_artificial_muscles, (09.01.2019.)

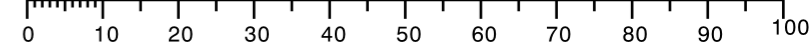
PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija
- III. Specifikacije ležaja
- IV. Specifikacije kompresora
- V. Specifikacije spremnika
- VI. Specifikacije pneumatskog mišića

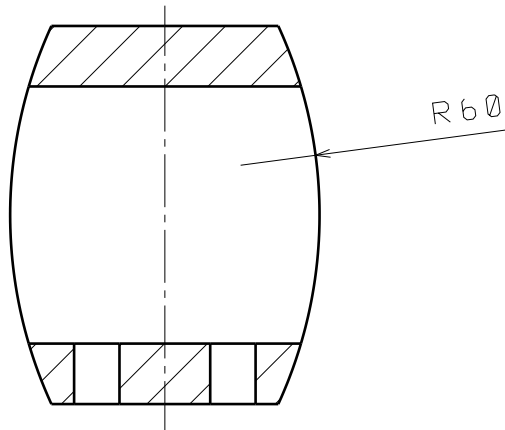
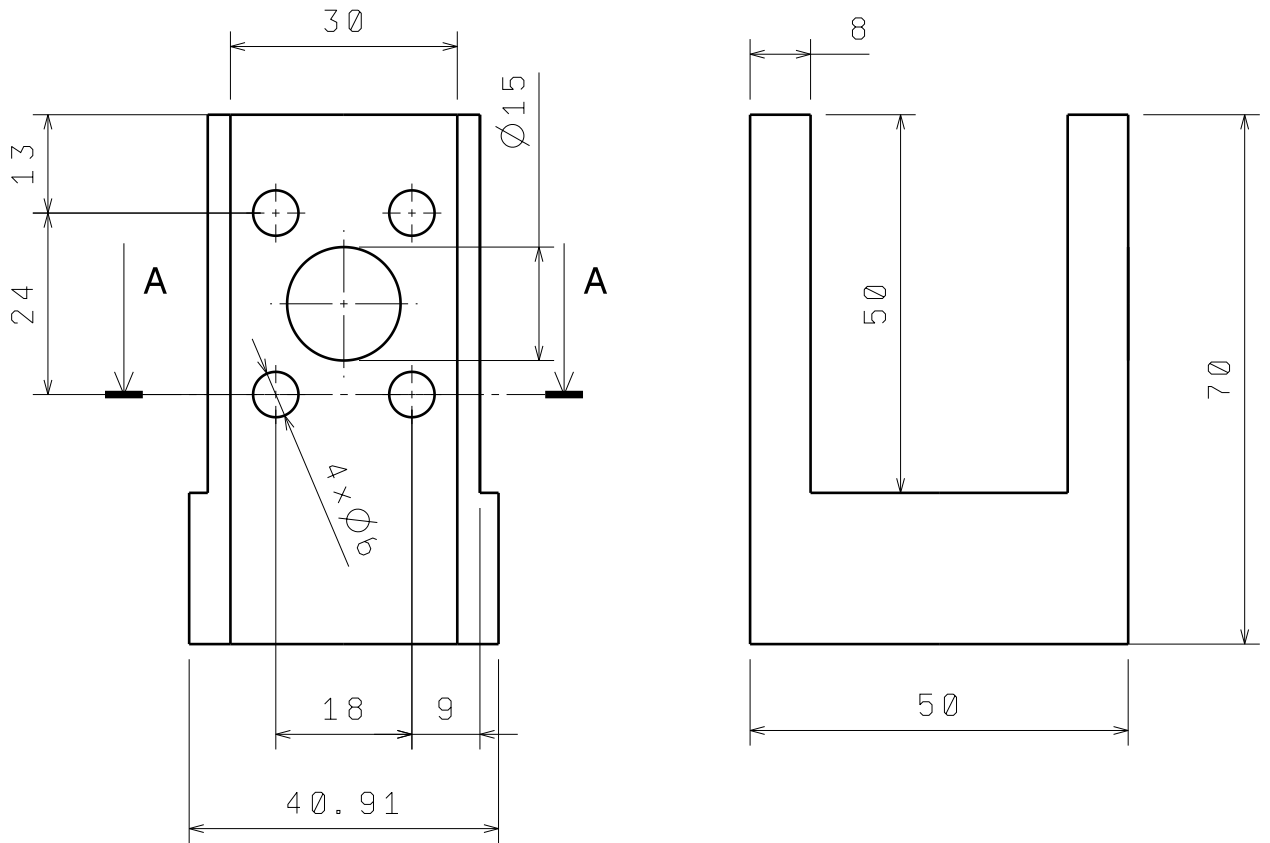
PRILOG II: TEHNIČKA DOKUMENTACIJA




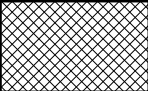

Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Projektirao	Ivan Fanjek		
	Razradio	Ivan Fanjek		
	Crtao	Ivan Fanjek		
	Pregledao	Željko Šitum		
	Voditelj rada	Željko Šitum		
ISO - tolerancije	Objekt:		Objekt broj:	
			R. N. broj:	
	Napomena:		Mehatronika i robotika	
	Materijal: Aluminij		Masa:	 Kopija
	Naziv:		Pozicija:	
			Postolja	
	Mjerilo originala		1	
	1 : 2		Crtež broj:	
			List: 2	

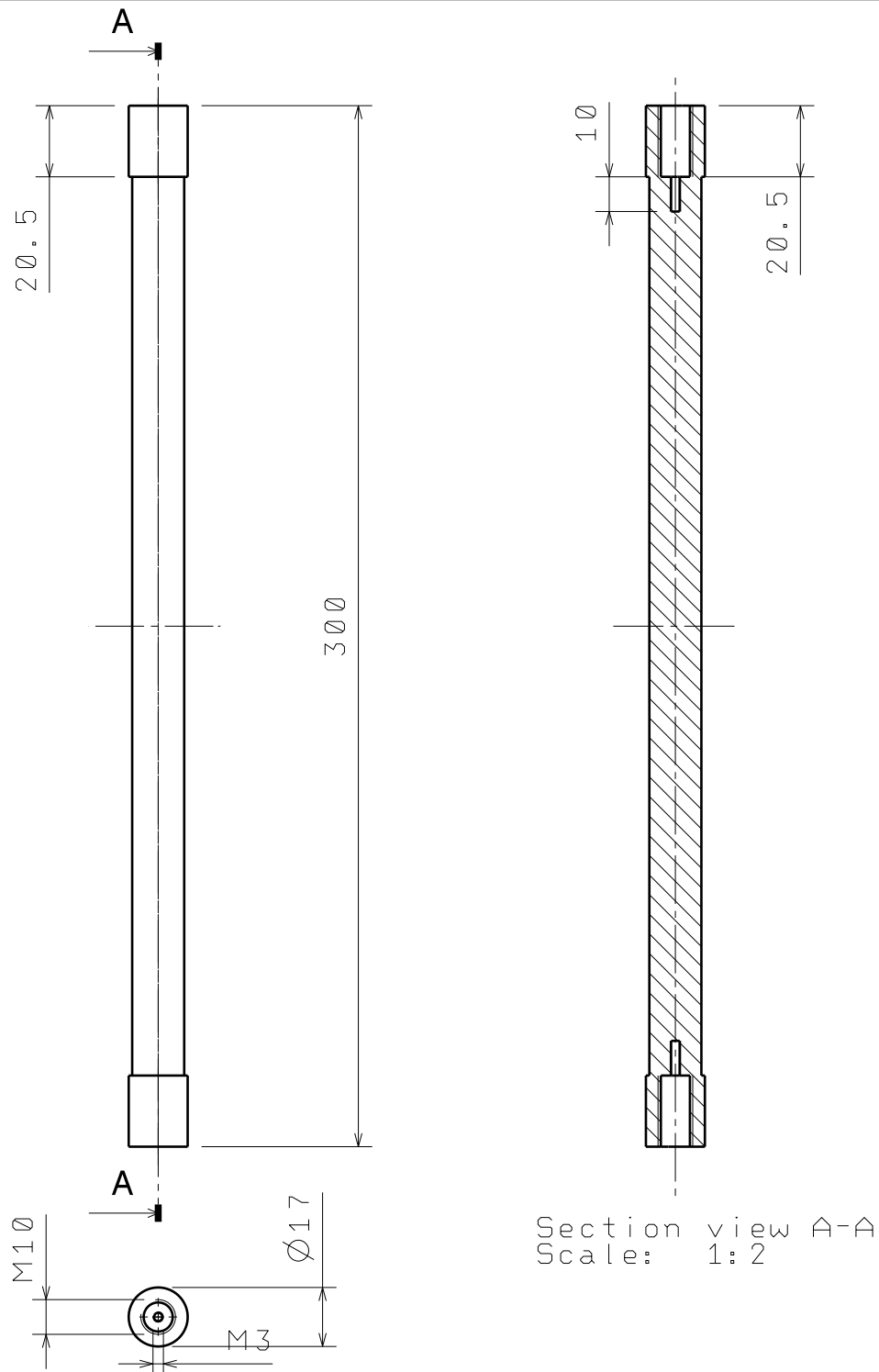




Design by CADLab



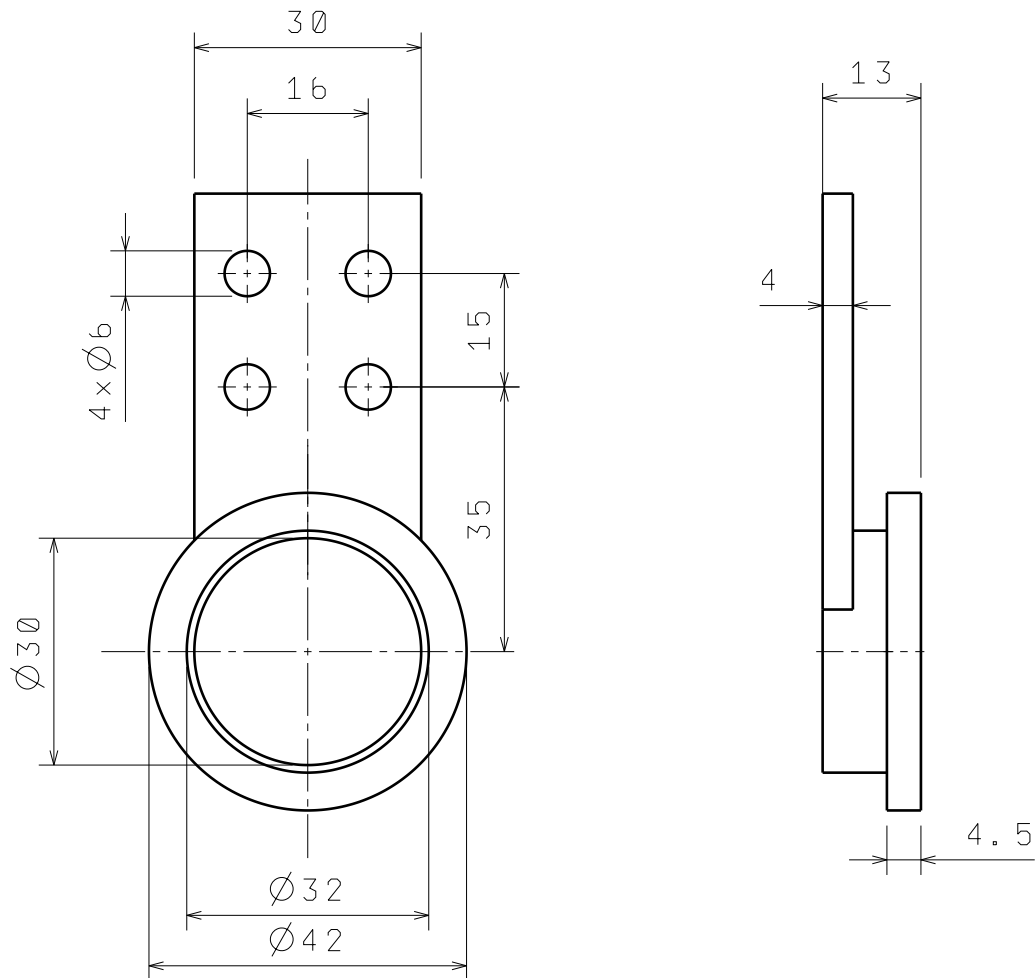
Section view A-A
Scale: 1:1

Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Projektirao	Ivan Fanjek		
	Razradio	Ivan Fanjek		
	Crtao	Ivan Fanjek		
	Pregledao	Željko Šitum		
ISO - tolerancije	Voditelj rada	Željko Šitum		
	Objekt:	Objekt broj:		
		R. N. broj:		
	Napomena:	Mehatronika i robotika		Kopija
	Materijal: čelik	Masa:	ZAVRŠNI RAD	
		Naziv:	Pozicija	Format:
	Mjerilo originala 1:1	Postolje poveznica	2	A4
		Crtež broj:		Listova: 23
				List: 3



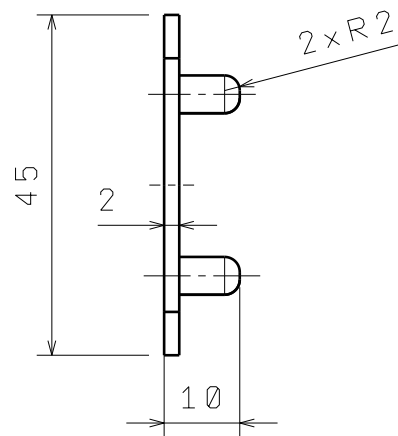
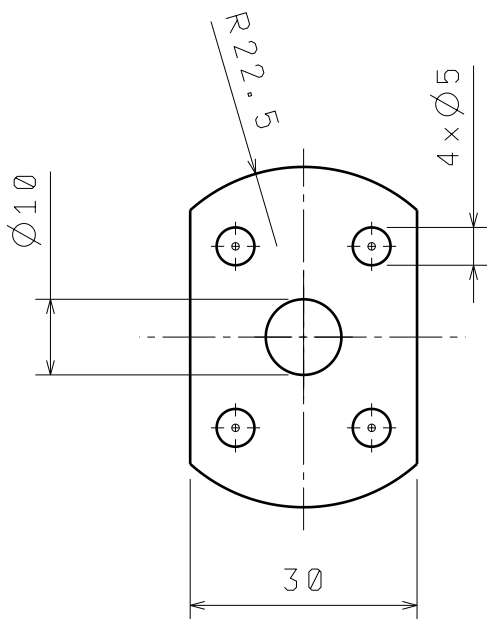
Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Projektirao	Ivan Fanjek		
	Razradio	Ivan Fanjek		
	Crtao	Ivan Fanjek		
	Pregledao	Željko Šitum		
ISO - tolerancije	Voditelj rada	Željko Šitum		
	Objekt:	Objekt broj:		
		R. N. broj:		
	Napomena:	Mehatronika i robotika		Kopija
	Materijal: Aluminij	Masa:	ZAVRŠNI RAD	
		Naziv:		Pozicija
	Mjerilo originala 1:2	Osovina noga postolja		3
		Crtež broj:		Format: A4
				Listova: 23
				List: 4


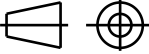
Design by CADLab

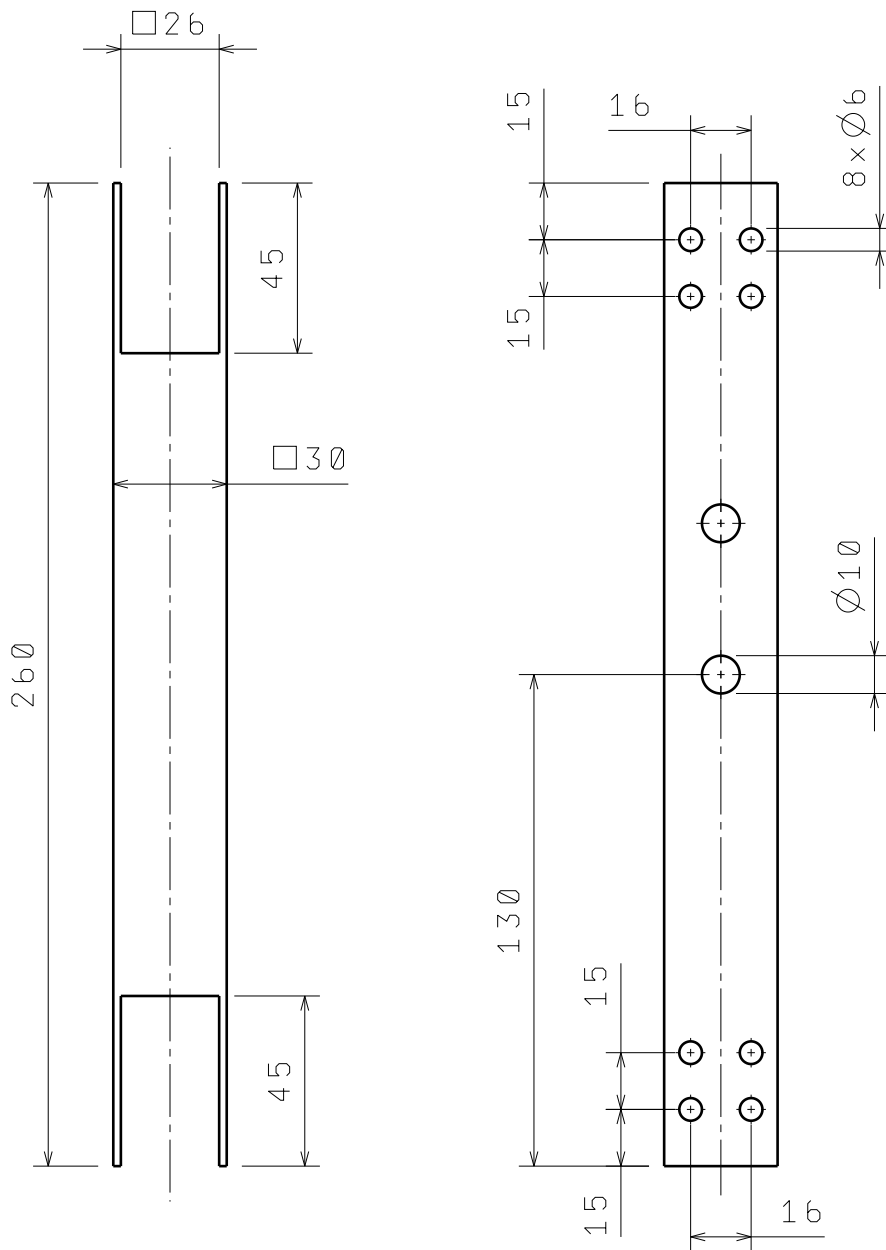




Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Projektirao	Ivan Fanjek		
	Razradio	Ivan Fanjek		
	Crtao	Ivan Fanjek		
	Pregledao	Željko Šitum		
Voditelj rada	Željko Šitum			
ISO - tolerancije	Objekt:		Objekt broj:	
			R. N. broj:	
	Napomena:		Mehatronika i robotika	Kopija
	Materijal: Aluminij	Masa:	ZAVRŠNI RAD	
		Naziv: Držač ležaja		Pozicija
	Mjerilo originala 1:1			4
		Crtež broj:		Format: A4
				Listova: 23
				List: 5

Design by CADLab

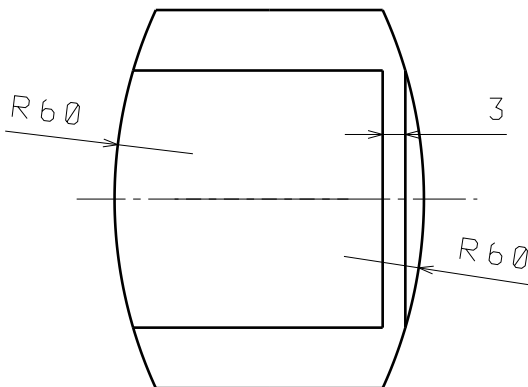
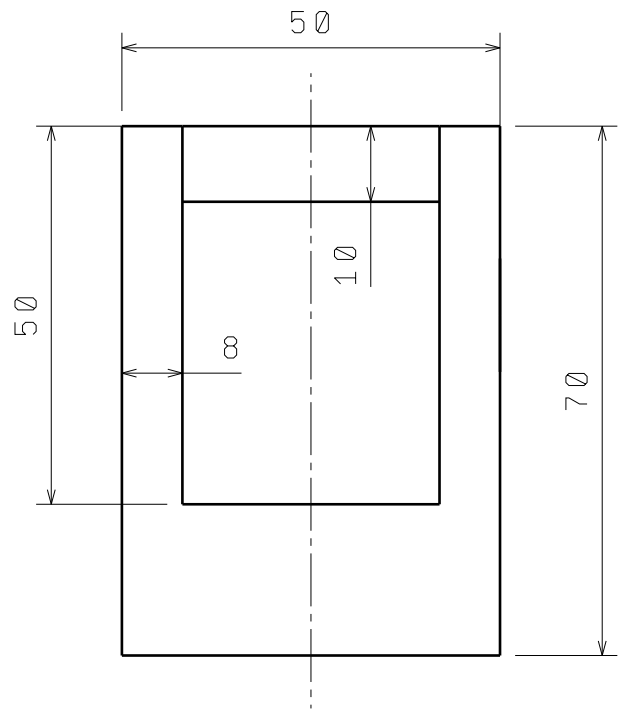
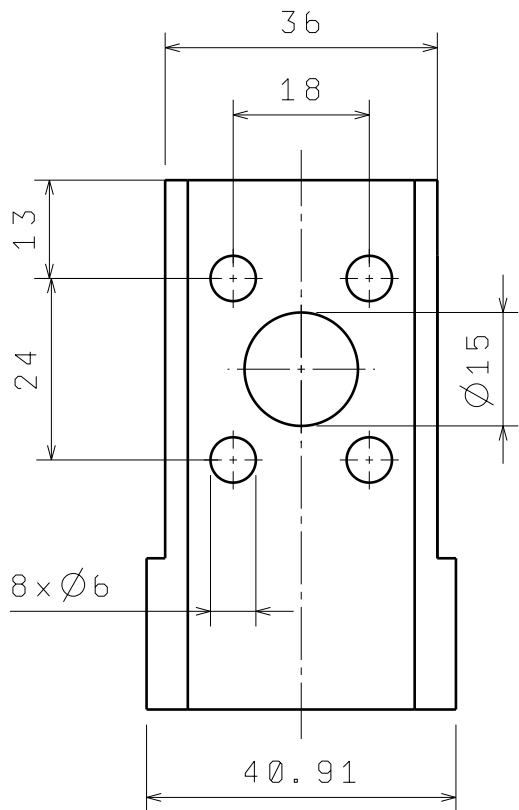




Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Projektirao	Ivan Fanjek		
	Razradio	Ivan Fanjek		
	Crtao	Ivan Fanjek		
	Pregledao	Željko Šitum		
Voditelj rada	Željko Šitum			
ISO - tolerancije	Objekt:		Objekt broj:	
			R. N. broj:	
	Napomena:		Mehatronika i robotika	Kopija
	Materijal: Aluminij	Masa:	ZAVRŠNI RAD	
		Naziv:		Pozicija
	Mjerilo originala 1:1	Fiksator		5
		Crtež broj:		Format: A4
				Listova: 23
				List: 6



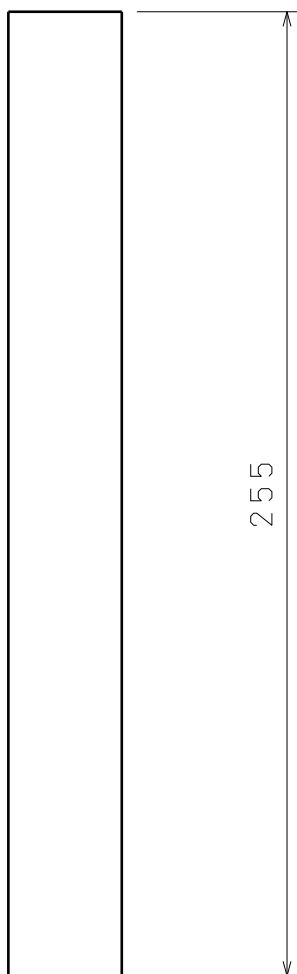
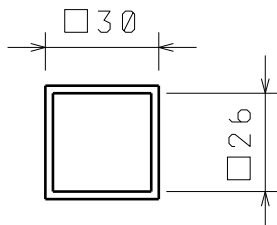
Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Projektirao	Ivan Fanjek		
	Razradio	Ivan Fanjek		
	Crtao	Ivan Fanjek		
	Pregledao	Željko Šitum		
Voditelj rada	Željko Šitum			
ISO - tolerancije	Objekt:		Objekt broj:	
			R. N. broj:	
	Napomena:		Mehatronika i robotika	Kopija
	Materijal: Aluminij	Masa:	ZAVRŠNI RAD	
		Naziv:		Pozicija
	Mjerilo originala 1:2	Noga gornji članak		6
		Crtež broj:		Format: A4
				Listova: 23
				List: 7


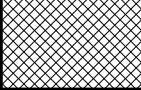


Design by CADLab



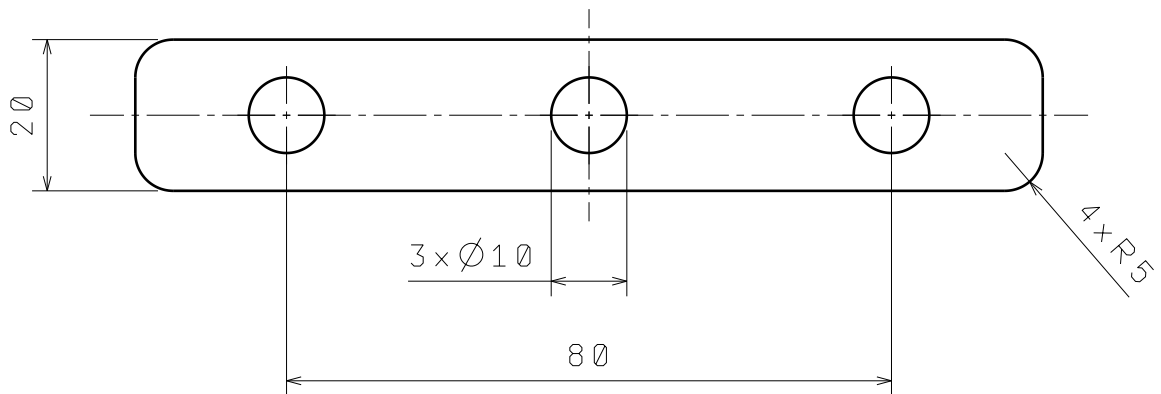
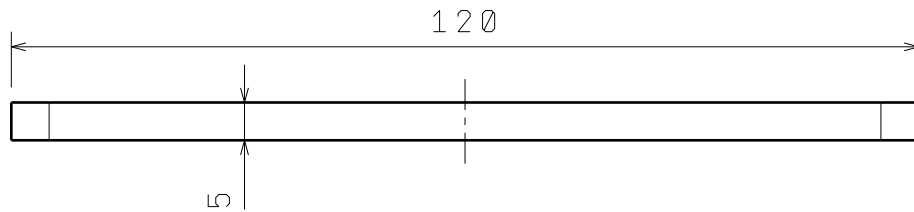
Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
	Projektirao	Ivan Fanjek			
	Razradio	Ivan Fanjek			
	Crtao	Ivan Fanjek			
	Pregledao	Željko Šitum			
ISO - tolerancije	Voditelj rada	Željko Šitum			
	Objekt:	Objekt broj:			
		R. N. broj:			
	Napomena:	Meatronika i robotika		Kopija	
	Materijal: Čelik	Masa:	ZAVRŠNI RAD		
		Naziv:		Pozicija	
	Mjerilo originala 1:1	Poveznica noga		7	
		Crtež broj:			Format: A4
					Listova: 23
					List: 8


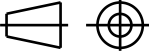
Design by CADLab

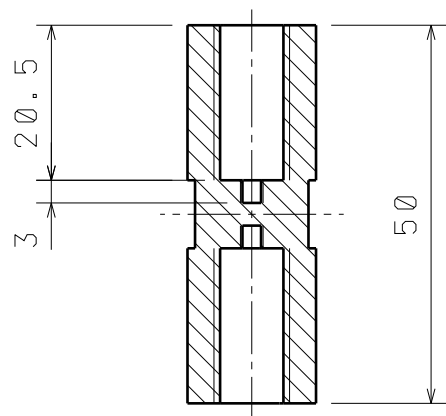
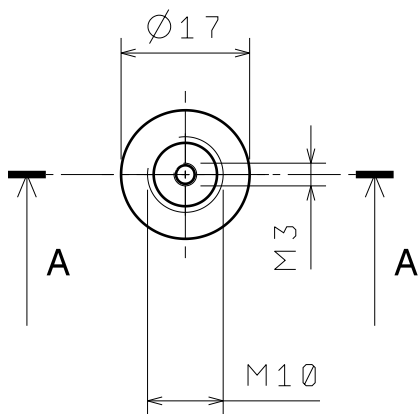


Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
	Projektirao	Ivan Fanjek			
	Razradio	Ivan Fanjek			
	Crtao	Ivan Fanjek			
	Pregledao	Željko Šitum			
Voditelj rada	Željko Šitum				
ISO - tolerancije	Objekt:		Objekt broj:		
			R. N. broj:		
	Napomena:		Mehatronika i robotika	Kopija	
	Materijal: Aluminij	Masa:	ZAVRŠNI RAD		
	  Naziv:		Pozicija		Format: A4
	Mjerilo originala 1:2	Noga donji članak		8	Listova: 23
	Crtež broj:			List: 9	




Design by CADLab

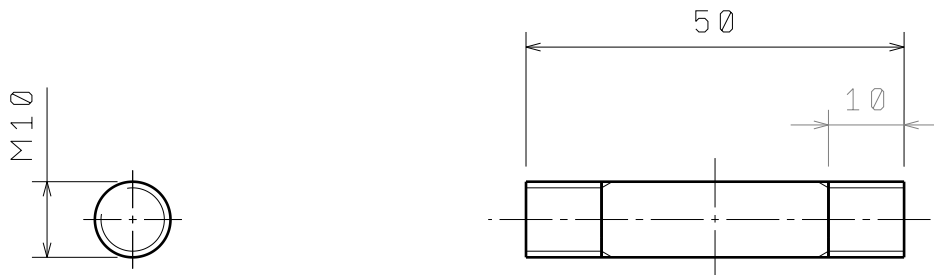



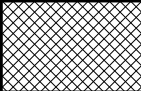


Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Projektirao	Ivan Fanjek		
	Razradio	Ivan Fanjek		
	Crtao	Ivan Fanjek		
	Pregledao	Željko Šitum		
	Voditelj rada	Željko Šitum		
ISO - tolerancije	Objekt:		Objekt broj:	
			R. N. broj:	
	Napomena:		Mehatronika i robotika	Kopija
	Materijal: Čelik	Masa:	ZAVRŠNI RAD	
		Naziv:		Pozicija
	Mjerilo originala 1:1	Noga I profil		9
		Crtež broj:		Format: A4
				Listova: 23
				List: 10



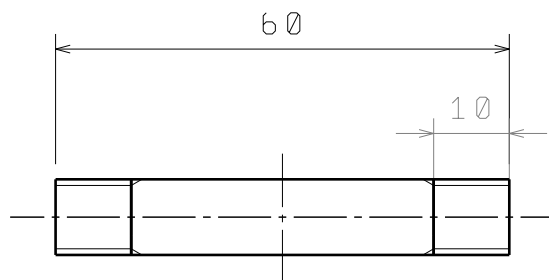
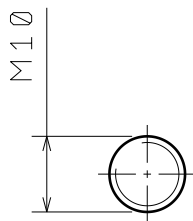
Section view A-A
Scale: 1:1


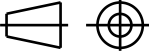
Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Projektirao	Ivan Fanjek		
	Razradio	Ivan Fanjek		
	Crtao	Ivan Fanjek		
	Pregledao	Željko Šitum		
	Voditelj rada	Željko Šitum		
ISO - tolerancije	Objekt:		Objekt broj:	
			R. N. broj:	
	Napomena:		Mehatronika i robotika	Kopija
	Materijal: Aluminij	Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	 	Naziv:		Pozicija
	Mjerilo originala 1:1	Osovina noga		10
		Crtež broj:		Format: A4
				Listova: 23
				List: 11

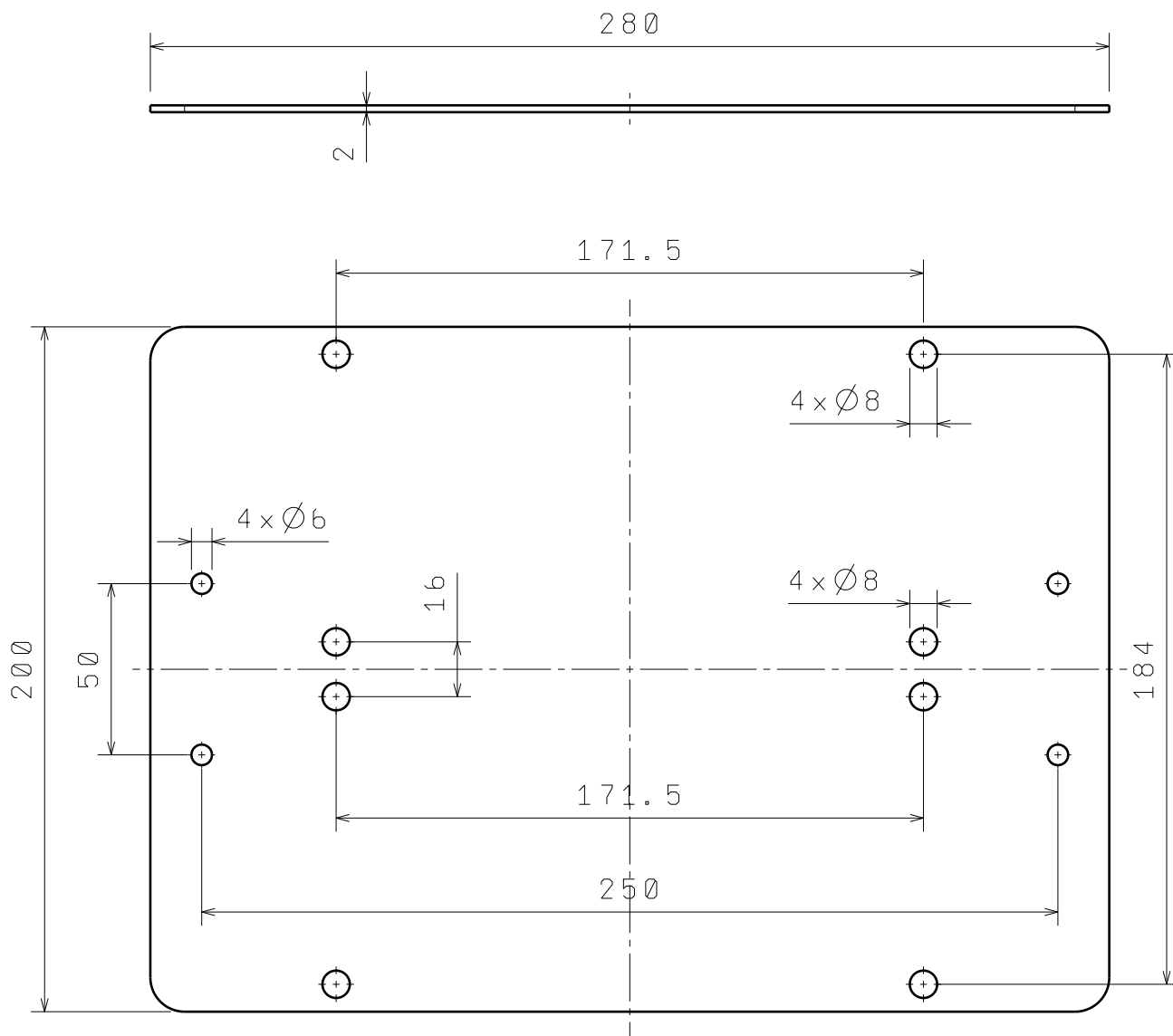



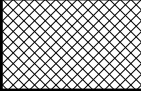


Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
	Projektirao		Ivan Fanjek			
	Razradio		Ivan Fanjek			
	Crtao		Ivan Fanjek			
	Pregledao		Željko Šitum			
Voditelj rada		Željko Šitum				
ISO - tolerancije	Objekt:			Objekt broj:		
				R. N. broj:		
	Napomena:			Mehatronika i robotika	Kopija	
	Materijal: Aluminij		Masa:	ZAVRŠNI RAD		
	  Naziv:			Pozicija		Format: A4
	Mjerilo originala 1:1			Osovina postolja	11	Listova: 23
	Crtež broj:				List: 12	

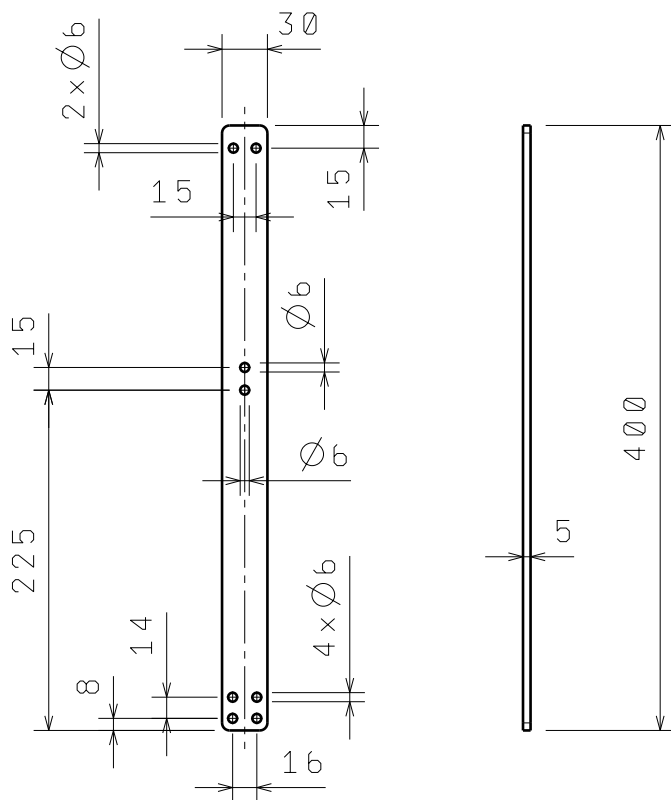
Design by CADLab






Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Projektirao	Ivan Fanjek		
	Razradio	Ivan Fanjek		
	Crtao	Ivan Fanjek		
	Pregledao	Željko Šitum		
Voditelj rada	Željko Šitum			
ISO - tolerancije	Objekt:		Objekt broj:	
			R. N. broj:	
	Napomena:		Mehatronika i robotika	Kopija
	Materijal: Aluminij	Masa:	ZAVRŠNI RAD	
		Naziv:		Pozicija
	Mjerilo originala	Osovina mišić		12
	1:1	Crtež broj:		Format: A4
				Listova: 23
				List: 13

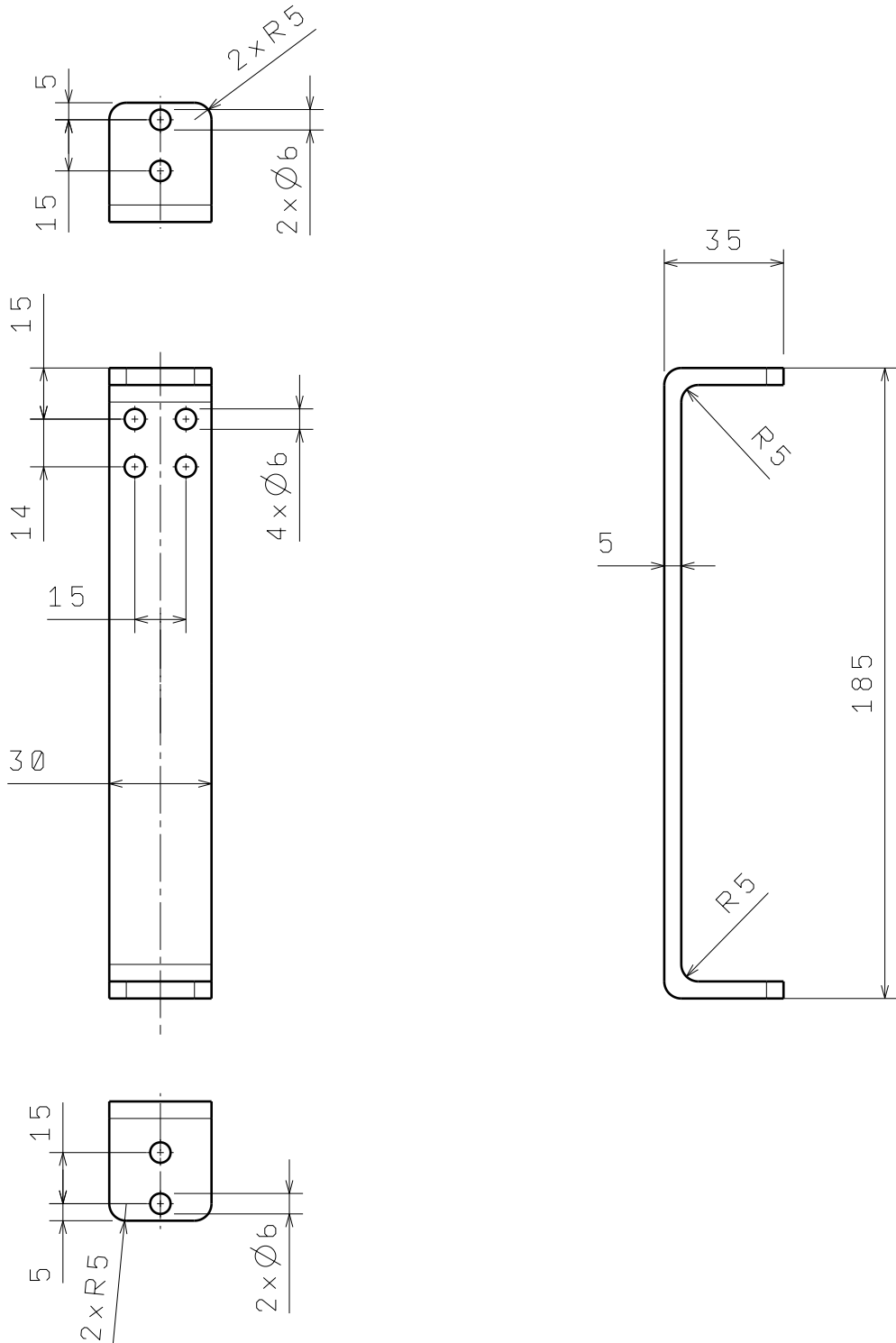





Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Projektirao	Ivan Fanjek		
	Razradio	Ivan Fanjek		
	Crtao	Ivan Fanjek		
	Pregledao	Željko Šitum		
Voditelj rada	Željko Šitum			
ISO - tolerancije	Objekt:		Objekt broj:	
			R. N. broj:	
	Napomena:		Mehatronika i robotika	Kopija
	Materijal: Plexiglass	Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	 	Naziv:		Pozicija
	Mjerilo originala 1:2	Postolja ploča		13
		Crtež broj:		Format: A4
				Listova: 23
				List: 14



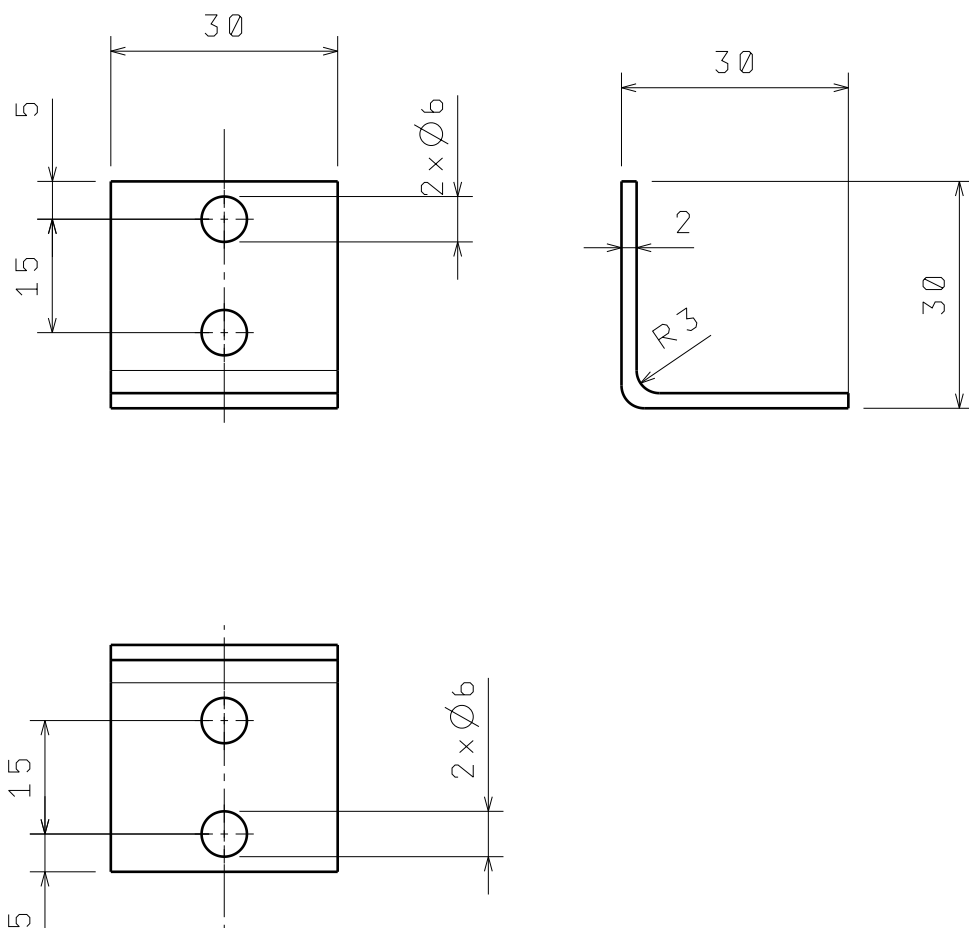
Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Projektirao	Ivan Fanjek		
	Razradio	Ivan Fanjek		
	Crtao	Ivan Fanjek		
	Pregledao	Željko Šitum		
ISO - tolerancije	Voditelj rada	Željko Šitum		
	Objekt:	Objekt broj:		
		R. N. broj:		
	Napomena:	Mehatronika i robotika	Kopija	
	Materijal: Aluminij	Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	 	Naziv:	Pozicija	Format:
	Mjerilo originala 1:5	Trup I profil	14	A4
		Crtež broj:		Listova: 23
				List: 15




Design by CADLab

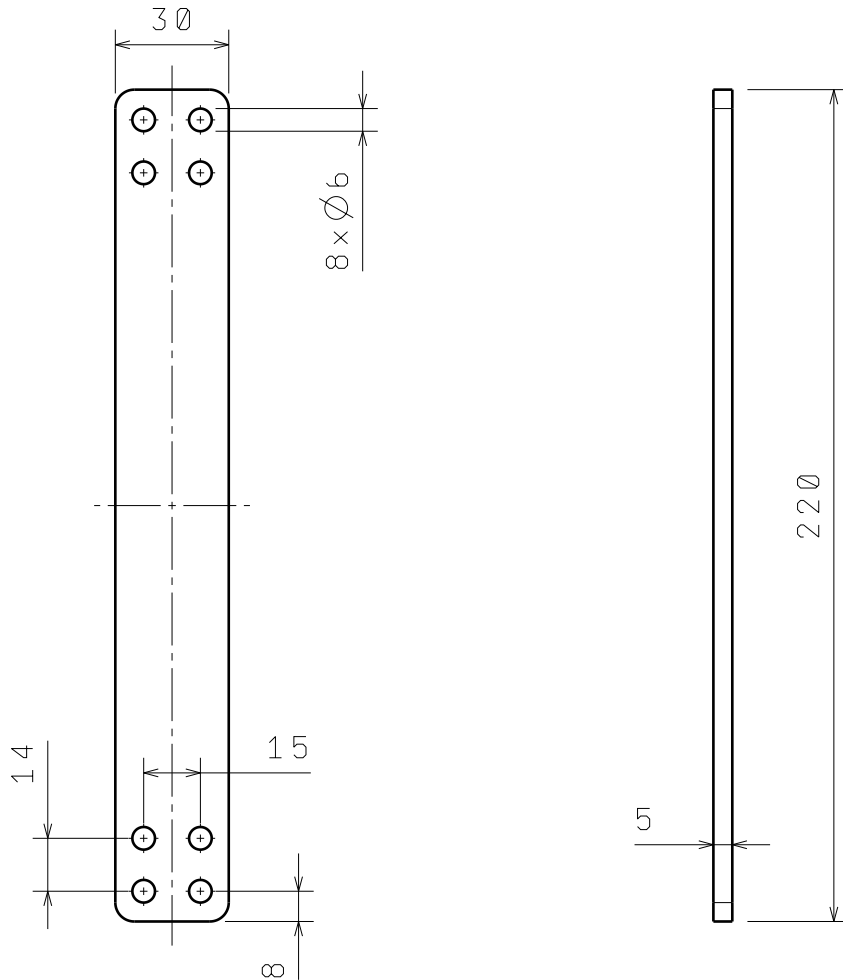



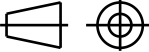
Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Projektirao	Ivan Fanjek		
	Razradio	Ivan Fanjek		
	Crtao	Ivan Fanjek		
	Pregledao	Željko Šitum		
ISO - tolerancije	Voditelj rada	Željko Šitum		
	Objekt:	Objekt broj:		
		R. N. broj:		
	Napomena:	Mehatronika i robotika	Kopija	
	Materijal: Aluminij	Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	 	Naziv:		Pozicija
	Mjerilo originala 1:2	Trup L profil		15
		Crtež broj:		Format: A4
				Listova: 23
				List: 16

Design by CADLab

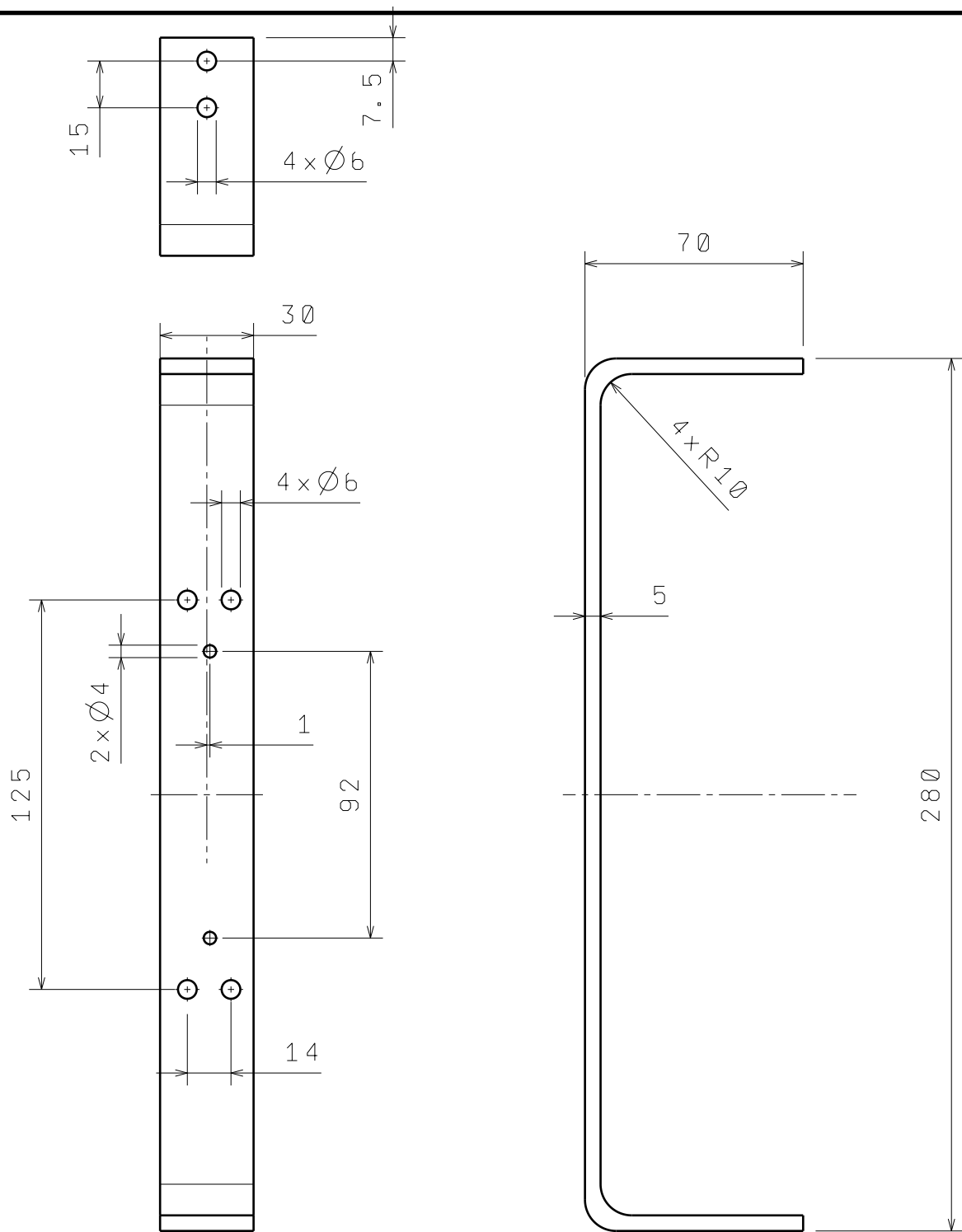




Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Projektirao	Ivan Fanjek		
	Razradio	Ivan Fanjek		
	Crtao	Ivan Fanjek		
	Pregledao	Željko Šitum		
ISO - tolerancije		Objekt:	Objekt broj:	
			R. N. broj:	
		Napomena:	Mehatronika i robotika	Kopija
		Materijal: Čelik	Masa:	ZAVRŠNI RAD
		 	Naziv:	Pozicija
		Mjerilo originala	Trup L profil 2	16
		1:1	Crtež broj:	Format: A4
				Listova: 23
				List: 17

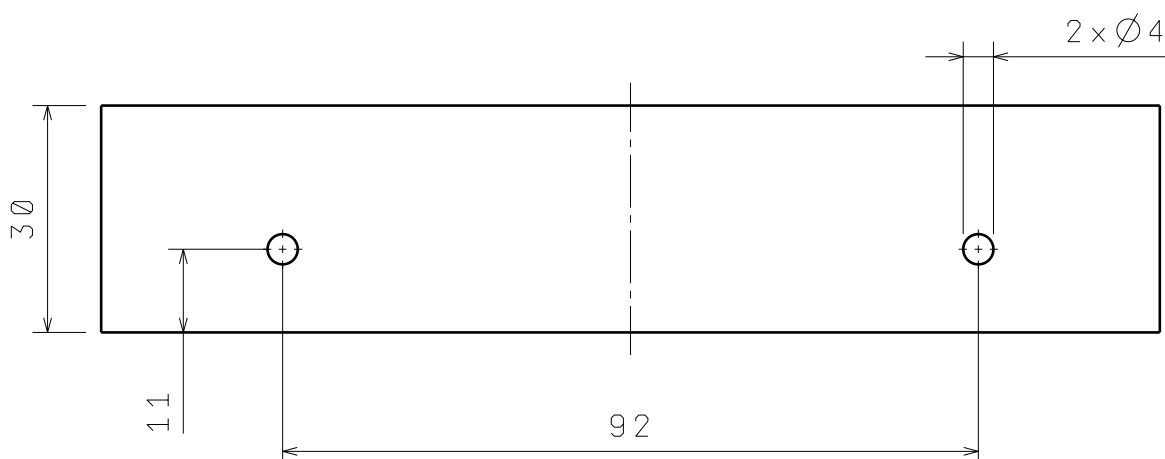
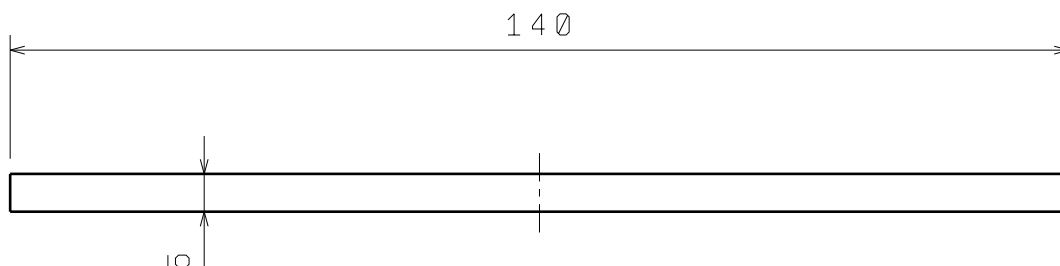



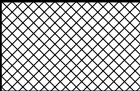


Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Projektirao	Ivan Fanjek		
	Razradio	Ivan Fanjek		
	Crtao	Ivan Fanjek		
	Pregledao	Željko Šitum		
	Voditelj rada	Željko Šitum		
ISO - tolerancije	Objekt:		Objekt broj:	
			R. N. broj:	
	Napomena:		Mehatronika i robotika	Kopija
	Materijal: Aluminij	Masa:	ZAVRŠNI RAD	
		Naziv:		Pozicija
	Mjerilo originala 1:2	Trup I profil 2		18
		Crtež broj:		Format: A4
				Listova: 23
				List: 19

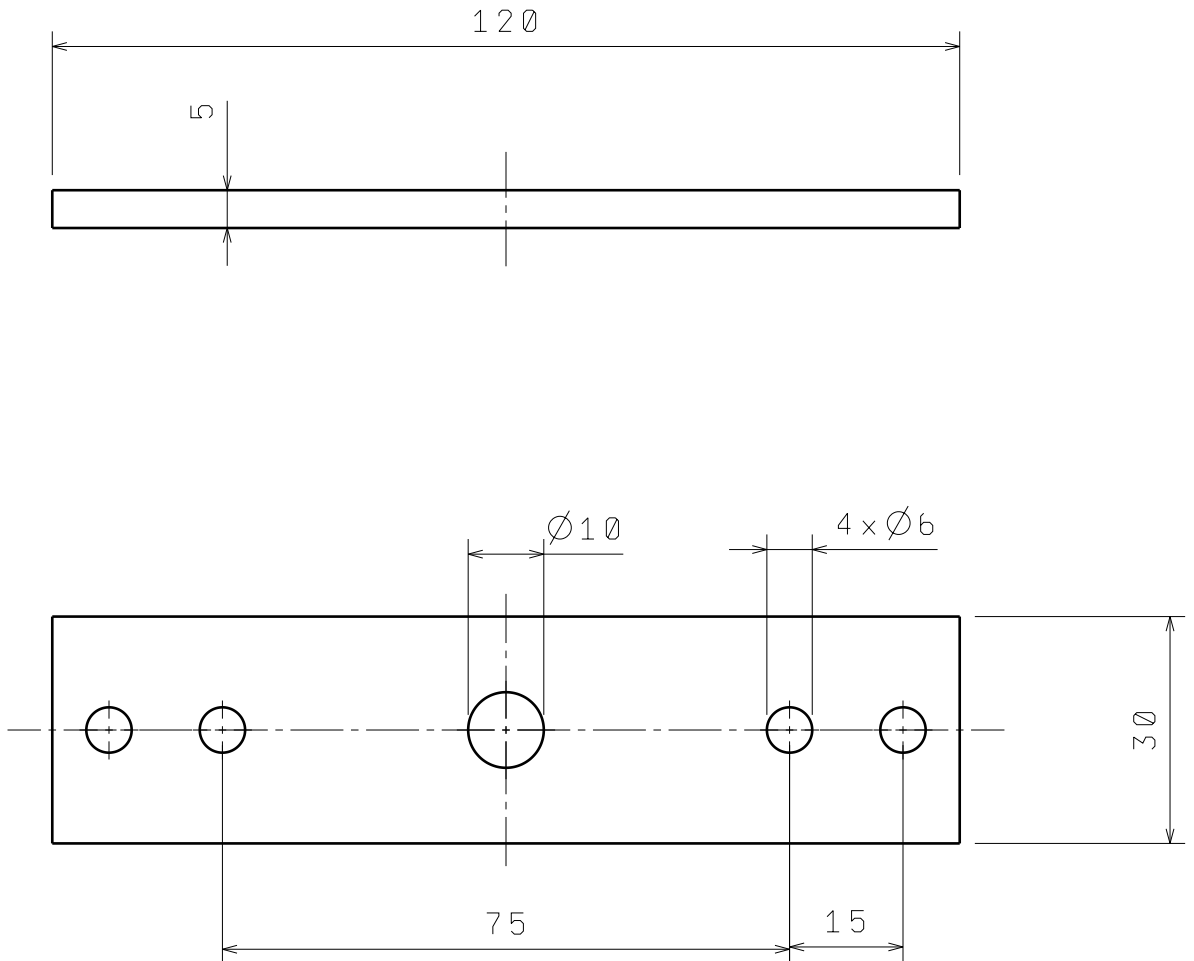
Design by CADLab






Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Projektirao	Ivan Fanjek		
	Razradio	Ivan Fanjek		
	Crtao	Ivan Fanjek		
	Pregledao	Željko Šitum		
Voditelj rada	Željko Šitum			
ISO - tolerancije	Objekt:		Objekt broj:	
			R. N. broj:	
	Napomena:		Mehatronika i robotika	Kopija
	Materijal: Aluminij	Masa:	ZAVRŠNI RAD	
		Naziv:		Pozicija
	Mjerilo originala 1:2	Trup L profil 3		19
		Crtež broj:		Format: A4
				Listova: 23
				List: 20

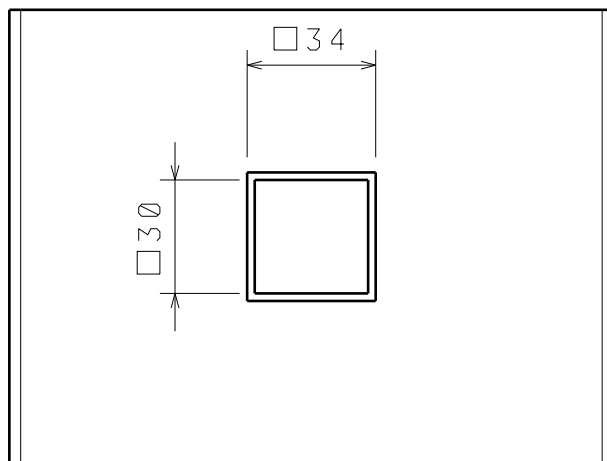
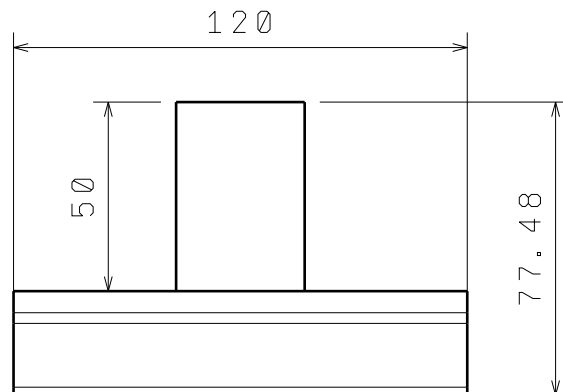
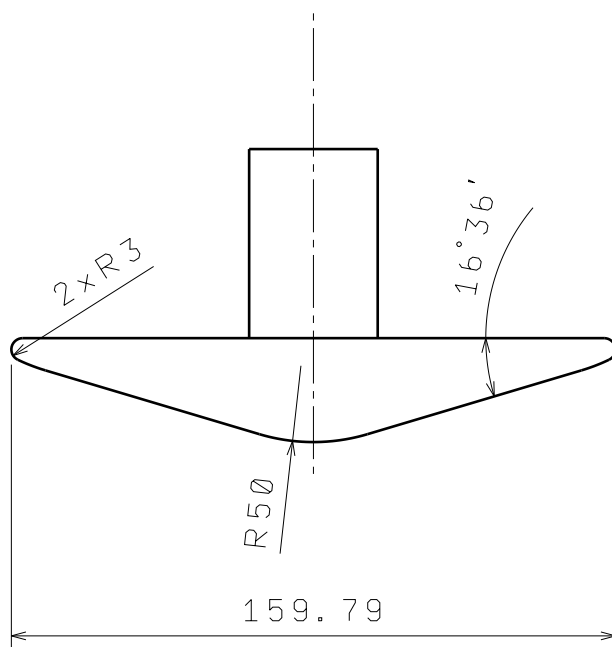




Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Projektirao	Ivan Fanjek		
	Razradio	Ivan Fanjek		
	Crtao	Ivan Fanjek		
	Pregledao	Željko Šitum		
	Voditelj rada	Željko Šitum		
ISO - tolerancije	Objekt:		Objekt broj:	
			R. N. broj:	
	Napomena:		Mehatronika i robotika	Kopija
	Materijal: Aluminij	Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	 	Naziv:		Pozicija
	Mjerilo originala 1:1	Filtar I profil		20
		Crtež broj:		Format: A4
				Listova: 23
				List: 21



Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Projektirao	Ivan Fanjek		
	Razradio	Ivan Fanjek		
	Crtao	Ivan Fanjek		
	Pregledao	Željko Šitum		
Voditelj rada	Željko Šitum			
ISO - tolerancije	Objekt:		Objekt broj:	
			R. N. broj:	
	Napomena:		Mehatronika i robotika	Kopija
	Materijal: Aluminij	Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	 	Naziv:		Pozicija
	Mjerilo originala	Ruka I profil		21
	1:1	Crtež broj:		Format: A4
				Listova: 23
				List: 22

Design by CADLab



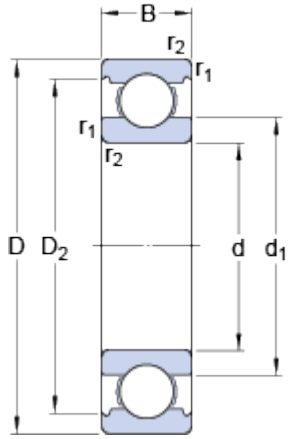
Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Projektirao	Ivan Fanjek		
	Razradio	Ivan Fanjek		
	Crtao	Ivan Fanjek		
	Pregledao	Željko Šitum		
ISO - tolerancije	Voditelj rada	Željko Šitum		
	Objekt:	Objekt broj:		
		R. N. broj:		
	Napomena:	Mehatronika i robotika	Kopija	
	Materijal: ABS plastika	Masa:	ZAVRŠNI RAD	
		Naziv:	Pozicija	Format:
	Mjerilo originala	Stopalo	22	A4
	1:2	Crtež broj:		Listova:
				23
				List:
				23

PRILOG III: SPECIFIKACIJE LEŽAJA

6002

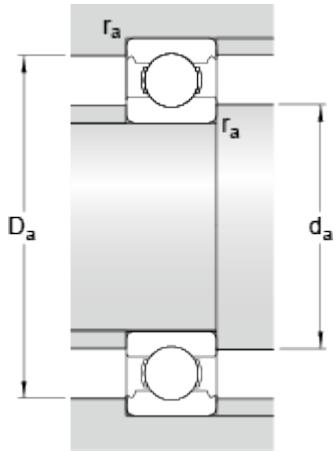
SKF Explorer

Dimensions



d	15	mm
D	32	mm
B	9	mm
d ₁	≈ 20.5	mm
D ₂	≈ 28.2	mm

Abutment dimensions



d _a	min.	17	mm
D _a	max.	30	mm
r _a	max.	0.3	mm

Calculation data

Basic dynamic load rating	C	5.8	kN
Basic static load rating	C ₀	2.8	kN
Fatigue load limit	P _u	0.12	kN
Reference speed		50000	r/min
Limiting speed		32000	r/min
Calculation factor	k _r	0.025	
Calculation factor	f ₀	14	

Mass

Mass bearing	0.0296	kg
--------------	--------	----

PRILOG IV: SPECIFIKACIJE KOMPRESORA

VIAIR®

Your Vital Air Source

400C & 450C DUAL PERFORMANCE VALUE PACKS



(Chrome)
PART NO. 40013



(Silver)
PART NO. 45012



(Chrome)
PART NO. 45013

IMPORTANT:

It is essential that you and any other operator of this product read and understand the contents of this manual before installing and using this product.

SAVE THIS MANUAL FOR FUTURE REFERENCE

USER MANUAL



400C & 450C DUAL PERFORMANCE VALUE PACKS

COMPRESSOR APPLICATION GUIDE

To ensure that you get the highest level of satisfaction from your compressor's performance, refer to information below:

VIAIR COMPRESSOR REFERENCE CHART

COMPRESSOR SERIES	DUTY CYCLE (100 PSI @ 72°F)	MAX. WORKING PRESSURE
090 SERIES	9%	120 PSI
092 SERIES	9%	120 PSI
095 SERIES	9%	120 PSI
097 SERIES	10%	130 PSI
098 SERIES	10%	130 PSI
100 SERIES	15%	130 PSI
250 IG SERIES	100%	150 PSI
275 SERIES	25%	150 PSI
280 SERIES	30%	150 PSI
325 SERIES	33%	150 PSI
330 IG SERIES	100%	150 PSI
350 SERIES	100%	150 PSI
380 SERIES	100%	200 PSI
	*55%	
400 SERIES	33%	150 PSI
420 SERIES	33%	150 PSI
444 SERIES	100%	200 PSI
	*50%	
450 SERIES	100%	150 PSI
450 IG SERIES	100%	150 PSI
460 SERIES	100%	150 PSI
480 SERIES	100%	200 PSI
	*50%	

*Duty Cycle at 200 PSI and 72°F.

ABOUT COMPRESSOR DUTY CYCLE:

Duty cycle refers to the amount of time a compressor can be operated in a given time period at 100 PSI, and a standard ambient temperature of 72° F. It is commonly expressed in percentage format: $\text{Compressor on time} \div (\text{on time} + \text{off time}) = \text{Duty Cycle \%}$.

ONE-HOUR DUTY CYCLE

(100 PSI @ 72°F)

	MINUTES ON / MINUTES OFF
9%	5 Min. On / 55 Min. Off
10%	6 Min. On / 54 Min. Off
15%	9 Min. On / 51 Min. Off
20%	12 Min. On / 48 Min. Off
25%	15 Min. On / 45 Min. Off
30%	18 Min. On / 42 Min. Off
33%	20 Min. On / 40 Min. Off
50%	30 Min. On / 30 Min. Off
100%	1 Hour Run Time

NOTE: All compressors, regardless of rated duty cycle, require sufficient rest time in between cycles to allow for partial or complete heat dissipation. Heat dissipation rates may vary depending on ambient temperatures and operating conditions.

ABOUT RATED WORKING PRESSURE:

To ensure trouble free service life of your compressor, always operate compressor within rated working pressure of the compressor. Never use a pressure switch with a higher cut-off pressure than compressor's rated working pressure.

400C & 450C DUAL PERFORMANCE VALUE PACKS

TROUBLESHOOTING GUIDE:

PROBLEM:	POSSIBLE CAUSE(S)	CORRECTIVE ACTION
Tank pressure drops when compressor(s) shut off	<ol style="list-style-type: none"> 1. Loose drain cock 2. Check valve leaking 3. Loose connections 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tighten drain cock 2. Replace check valve or compressor(s) 3. Check all connections with soap and water solution and tighten
Compressor runs continuously and air flow lower than normal	<ol style="list-style-type: none"> 1. Excessive air usage 2. Loose connections 3. Worn piston ring or inlet valve. 4. Clogged air filter element 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Decrease air usage 2. Check all connections with soap and water solution and tighten. 3. Repair or replace compressor 4. Replace air filter element
Compressor runs continuously causing safety valve (if equipped) to open	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bad pressure switch 2. Defective safety valve 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Replace pressure switch 2. Replace safety valve
Excessive moisture in discharge	<ol style="list-style-type: none"> 1. Excessive water in air tank 2. High humidity 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Drain tank, tilt tank to drain. Drain tank more frequently 2. Move compressor to area with less humidity, or use air line filter.
Compressor will not run	<ol style="list-style-type: none"> 1. No power, or power switch in OFF position 2. Blown fuse 3. Motor overheats 4. Faulty pressure switch. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Make sure compressor switch is ON 2. Disconnect compressors from power source, replace fuse. (Refer to Specifications section for correct fuse amperage.) 3. Let compressors cool off for about 30 Minutes to allow thermal overload switch reset. 4. Replace pressure switch
Thermal overload protector cuts out repeatedly	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lack of proper ventilation or ambient temperature too high 2. Compressor valves failed 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Move compressor to well ventilated area, or area with lower ambient temperature 2. Repair or replace compressor
Excessive knocking or rattling	<ol style="list-style-type: none"> 1. Loose mounting bolts 2. Worn bearing on eccentric or motor shaft 3. Cylinder or piston ring is worn 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tighten mounting bolts 2. Repair or replace compressor 3. Repair or replace compressor

CAUTION: NEVER DISASSEMBLE COMPRESSOR WHILE COMPRESSOR IS PRESSURIZED.

400C & 450C DUAL PERFORMANCE VALUE PACKS

SPECIFICATIONS

- Part No. 40013 / Dual 400C Value Pack / Chrome

Motor Voltage:	12 Volts
Combined Max. Current Consumption:	60 Amps
Motor Type:	Permanent Magnetic
Horsepower:	1/4
Max. Working Pressure:	150 PSI
Max. Duty Cycle (@ 72°F & 100 PSI):	33%
Minutes On/Off (@ 72°F & 100 PSI):	20 min. / 40 min.
Max. Restart Pressure:	150 PSI
Max. Ambient Temperature:	158°F
Min. Ambient Temperature:	-40°F
Auto. Reset Thermal Protection:	Yes

- Part No. 45012 / Dual 450C Value Pack / Silver
- Part No. 45013 / Dual 450C Value Pack / Chrome

Motor Voltage:	12 Volts
Combined Max. Current Consumption:	44 Amps
Motor Type:	Permanent Magnetic
Horsepower:	1/4
Max. Working Pressure:	150 PSI
Max. Duty Cycle (@ 72°F & 100 PSI):	100%
Minutes On/Off (@ 72°F & 100 PSI):	Continuous
Max. Restart Pressure:	150 PSI
Max. Ambient Temperature:	158°F
Min. Ambient Temperature:	-40°F
Auto. Reset Thermal Protection:	Yes

LIMITED WARRANTY:

VIAIR Corporation warrants this product, when properly installed and under normal conditions of use, to be free from defects in workmanship and materials for a period of one year from its original date of purchase. To receive warranty service or repair, please contact VIAIR Corporation.

Returns should be made within one year of the date of purchase, after a Return Goods Authorization (RGA) number has been assigned by VIAIR Corporation. To obtain RGA, fax a copy of your receipt to (949) 585-0188. For complete warranty details, please visit: www.viaircorp.com/warranty

PLEASE NOTE:

THIS WARRANTY COVERS PRODUCT DEFECTS ONLY; IT DOES NOT COVER INCIDENTAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES AS RESULT OF MISUSE OR ABUSE.



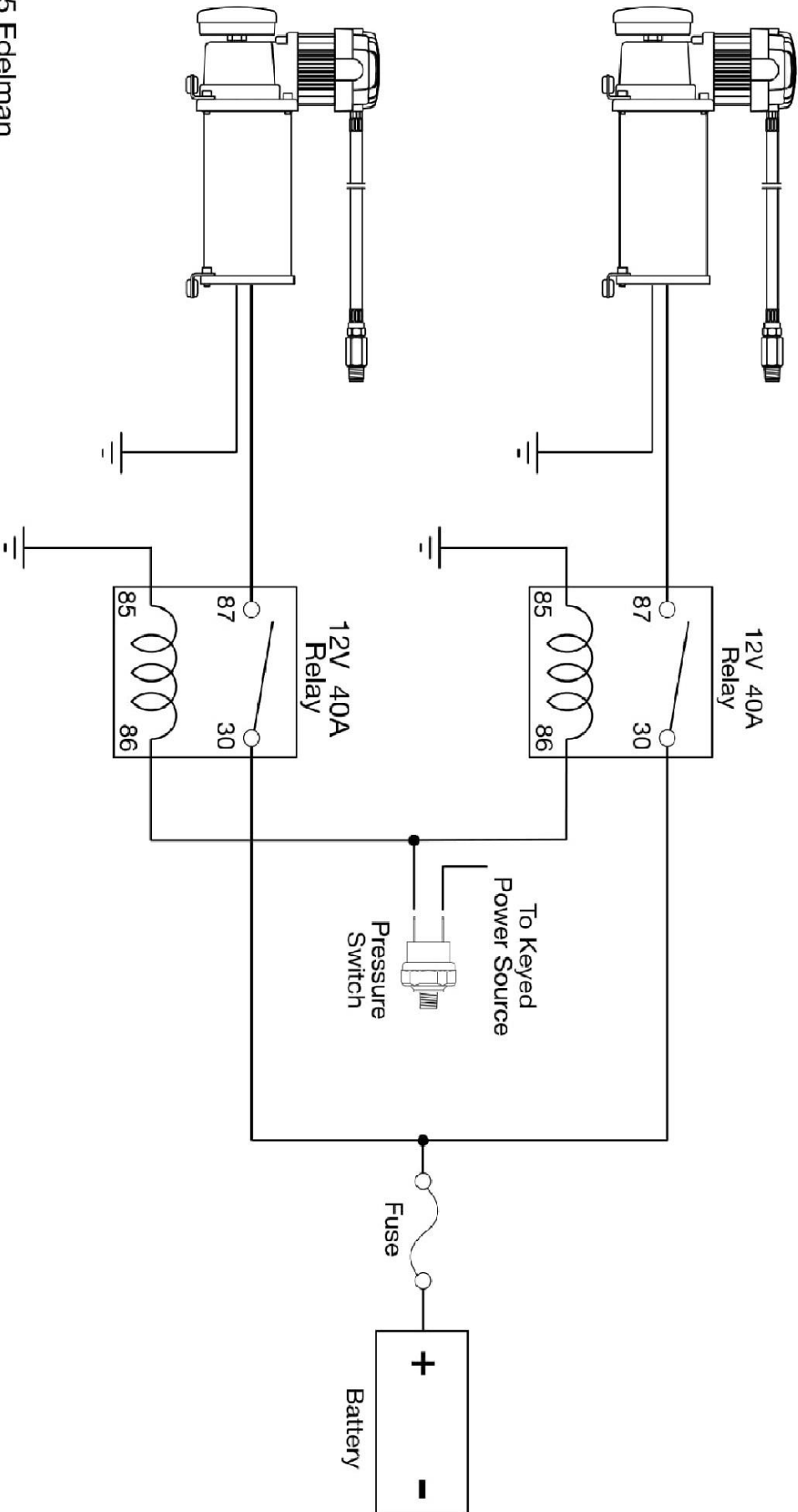
15 EDELMAN • IRVINE, CA 92618
TEL: (949) 585-0011 • FAX: (949) 585-0188
www.viaircorp.com

USER MANUAL

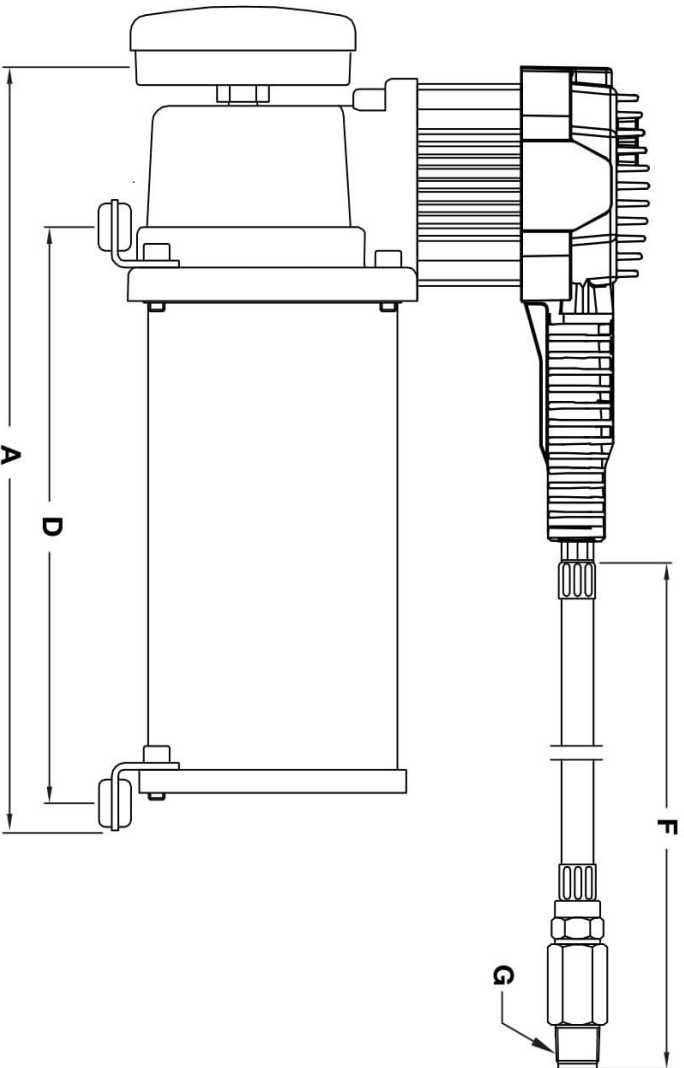


Your Vital Air Source

DUAL "C" MODEL COMPRESSOR WIRING DIAGRAM



15 Edelman
Irvine, CA 92618
949-585-0011
www.viaircorp.com



DIMENSIONS - MM

Part Number	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
40040	228.6	100.0	171.5	171.5	84.0	470.0	1/4" (M)	630.0	7.0	8.40

* All measurements in millimeters, unless otherwise noted.

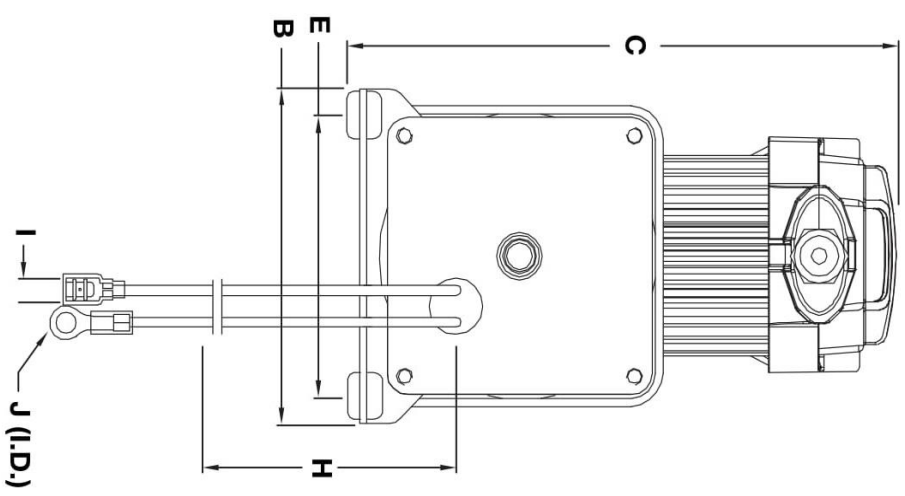
** All fittings are NPT, unless otherwise noted.

DIMENSIONS - IN

Part Number	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
40040	9.0	3.94	6.75	6.75	3.31	18.50	1/4" (M)	24.80	0.28	0.33

* All measurements in inches, unless otherwise noted.

** All fittings are NPT, unless otherwise noted.



PRILOG V: SPECIFIKACIJE SPREMNIKA

Air reservoirs

FESTO



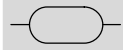
Air reservoirs CRVZS

FESTO

Technical data

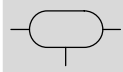
Function


CRVZS-0.1/0.4/0.75/2




CRVZS-5/10/20

with condensate drain




•  Temperature range
-10 ... +100 °C

•  Operating pressure
-0.95 ... 16 bar



- The reservoirs can be used to compensate pressure fluctuations, and act as accumulators in the event of sudden air consumption
- They can also be used to provide large quantities of compressed air for supplying fast pulsing drives
- Time delays for pressure build-up can be achieved in combination with flow control valves

Technical data							
Type	CRVZS-0.1	CRVZS-0.4	CRVZS-0.75	CRVZS-2	CRVZS-5	CRVZS-10	CRVZS-20
Pneumatic connection	G $\frac{1}{8}$	G $\frac{1}{4}$		G $\frac{1}{2}$	G1		
Condensate drain connection	-				G $\frac{3}{8}$		
Type of mounting	Retaining clips			Via through-holes			
Installation position	Any				Condensate drain downwards		
Volume [l]	0.1 ±20%	0.4 ±20%	0.75 ±20%	2 ±10%	5 ±10%	10 ±10%	20 ±10%
Weight [g]	226	543	736	1,681	3,581	6,459	10,208

•  Note: This product conforms to ISO 1179-1 and to ISO 228-1

Operating and environmental conditions							
Type	CRVZS-0.1	CRVZS-0.4	CRVZS-0.75	CRVZS-2	CRVZS-5	CRVZS-10	CRVZS-20
Operating pressure [bar]	-0.95 ... +16						
Operating medium	Compressed air in accordance with ISO 8573-1:2010 [-:-:-]						
	Nitrogen						
Ambient temperature [°C]	-10 ... +100 (observe operating range of tubing and pipe)						
Temperature of medium [°C]	-10 ... +100 (observe operating range of tubing and pipe)						
Corrosion resistance class CRC ¹⁾	3						
Conforms to standard	AD 2000						
CE symbol (see declaration of conformity ²⁾)	-				In accordance with EU Pressure Equipment Directive		
Food-safe ²⁾	See supplementary material information						
Approval ²⁾	German Technical Control Board (TÜV)						
	-				CRN		
RISK criterion	-				Pressure equipment CRN		
Certificate issuing department	-				CRN0H15669.5C	TSSA0H15669.5	CRN0H15669.5C

1) Corrosion resistance class CRC 3 to Festo standard FN 940070
High corrosion stress. Outdoor exposure under moderate corrosive conditions. External visible parts with primarily functional requirements for the surface and which are in direct contact with a normal industrial environment.

2) Additional information www.festo.com/sp → Certificates.

Air reservoirs CRVZS

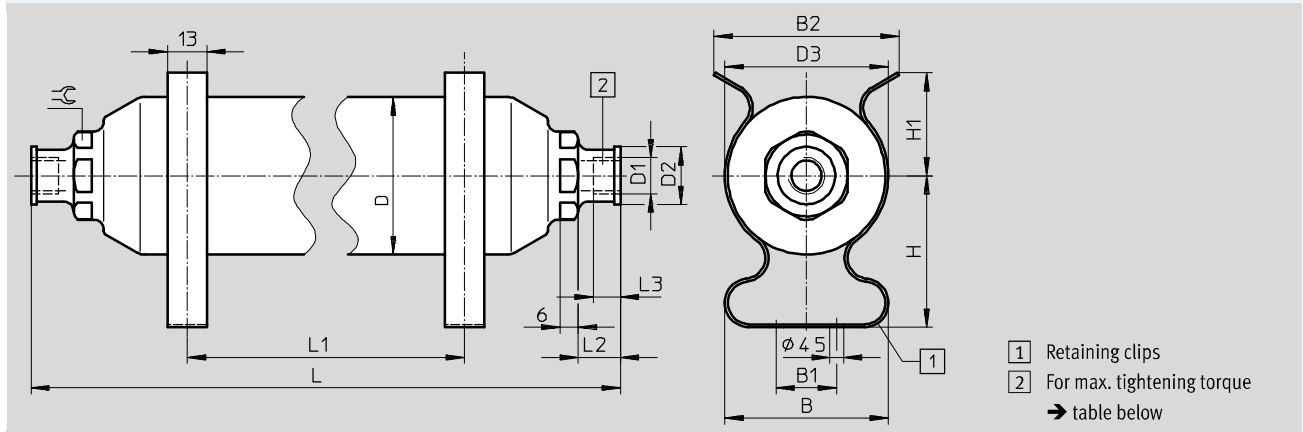
Technical data



Materials							
Type	CRVZS-0.1	CRVZS-0.4	CRVZS-0.75	CRVZS-2	CRVZS-5	CRVZS-10	CRVZS-20
Air reservoir	High-alloy stainless steel						
Retaining clips	High-alloy stainless steel			-			
Note on materials	Free of copper and PTFE						
	Conforms to RoHS						

Dimensions Download CAD data → www.festo.com

CRVZS-0.1/CRVZS-0.4/CRVZS-0.75



- 1 Retaining clips
- 2 For max. tightening torque
→ table below

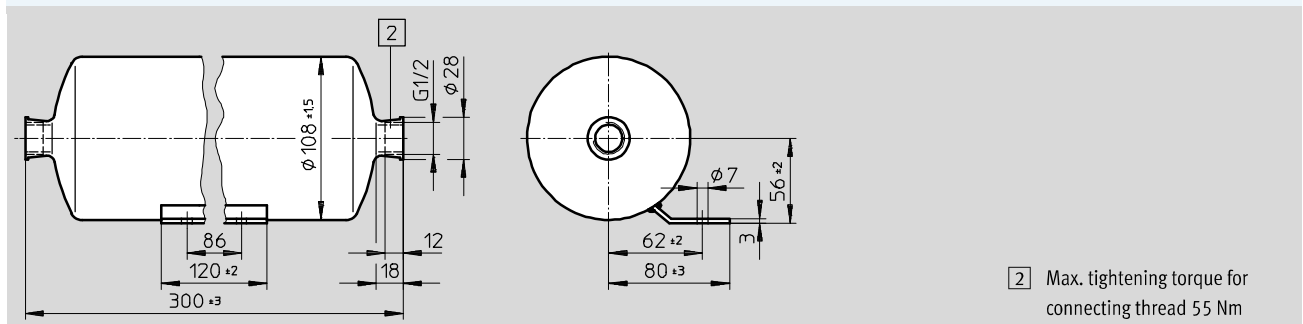
Type	B	B1	B2	D	D1	D2	D3	H	H1
	±2		±2	∅		∅	∅	±1	±1
CRVZS-0.1	51	14	-	40	G1/8	15	42	43	28
CRVZS-0.4	54	14	-	52	G1/4	19	54	50	34
CRVZS-0.75	60	20	79	70	G3/4	19	72	61	34

Type	L	L1		L2	L3	≡	Max. tightening torque for connecting thread [Nm]
		min.	max.				
CRVZS-0.1	±1	13	50	10	6	19	15
CRVZS-0.4	±1	13	150	14	9	27	23
CRVZS-0.75	±1	13	140	14	9	27	23

Note: This product conforms to ISO 1179-1 and to ISO 228-1

Dimensions Download CAD data → www.festo.com

CRVZS-2



- 2 Max. tightening torque for connecting thread 55 Nm

Note: This product conforms to ISO 1179-1 and to ISO 228-1

PRILOG VI: SPECIFIKACIJE PNEUMASKOG MIŠIĆA

Fluidic Muscle DMSP/MAS

FESTO



Fluidic Muscle DMSP/MAS

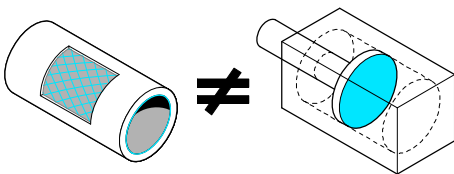
Key features

Mode of operation

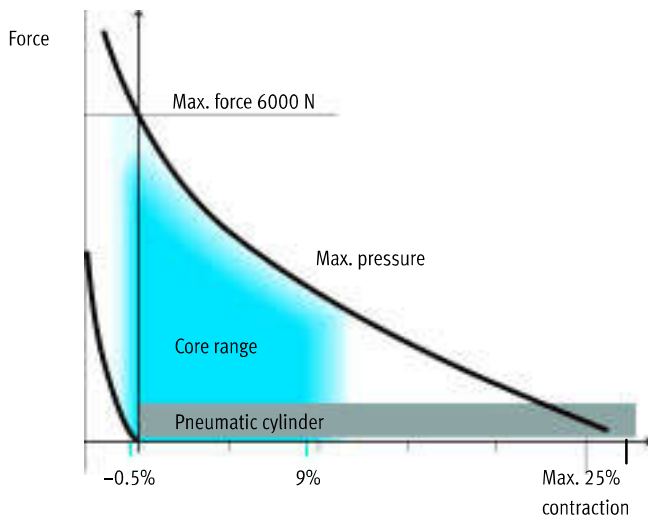


Fluidic Muscle is a tensile actuator which mimics the natural movement of a muscle. It consists of contractible tubing and appropriate connectors. The contractible tubing is made up of a rubber diaphragm with a non-crimped fibre made of aramid yarns on the inside. The diaphragm provides a hermetic seal enclosing the operating medium. The yarns serve as a reinforcement and trans-

mit power. When internal pressure is applied, diaphragm extends in the circumferential direction. This creates a tensile force and a contraction motion in the longitudinal direction. The usable tensile force is at its maximum at the start of the contraction and then decreases with the stroke.



Force profile and operating range



The muscle expands lengthways when it is pretensioned by an external force. When pressurised, on the other hand, the muscle contracts, i.e. its length decreases.

Areas of application

Clamping

- High force combined with a small diameter
- Insensitive to dirt
- Frictionless movement
- Hermetically sealed

Vibrating and shaking

- Frequency up to 150 Hz
- Amplitude/frequency can be adjusted independently of each other
- Insensitive to dirt

Pneumatic spring

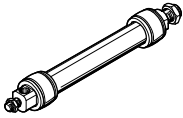
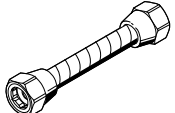
- Adjustable spring force
- Frictionless movement
- Hermetically sealed
- Easy to handle

Other

- Positioning using pressure
- High acceleration of a load

Fluidic Muscle DMSP/MAS

Product range overview

Function	Version	Type	I.D. [mm]	Nominal length [mm]	Lifting force [N]
Single-acting, pulling	Fluidic Muscle with press-fitted connection				
		DMSP	5	30 ... 1000	0 ... 140
			10	40 ... 9000	0 ... 630
			20	60 ... 9000	0 ... 1500
			40	120 ... 9000	0 ... 6000
	Fluidic Muscle with screwed connection				
		MAS	10	40 ... 9000	0 ... 630
			20	60 ... 9000	0 ... 1500
40			120 ... 9000	0 ... 6000	

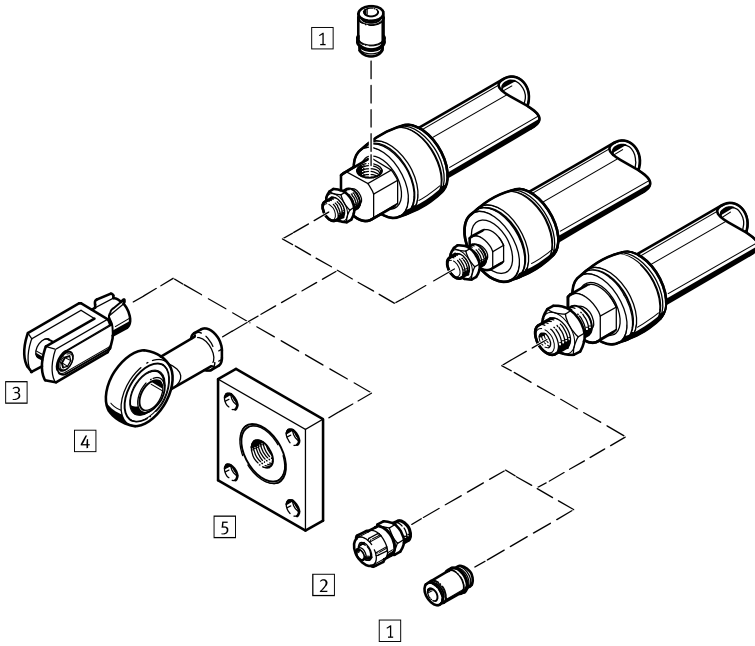
Type	I.D. [mm]	Max. permissible pretensioning	Max. permissible contraction	Operating pressure [bar]	→ Page/Internet
Fluidic Muscle with press-fitted connections					
DMSP	5	1% of nominal length	20% of nominal length	0 ... 6	11
	10	3% of nominal length	25% of nominal length	0 ... 8	
	20	4% of nominal length	25% of nominal length	0 ... 6	
	40	5% of nominal length	25% of nominal length	0 ... 6	
Fluidic Muscle with screwed connection					
MAS	10	3% of nominal length	25% of nominal length	0 ... 8	20
	20	4% of nominal length	25% of nominal length	0 ... 6	
	40	5% of nominal length	25% of nominal length	0 ... 6	

New
DMSP-5

Fluidic Muscle DMSP with press-fitted connection

Peripherals overview

FESTO



Accessories		Description	Size				→ Page/Internet
			5	10	20	40	
1	Push-in fittings QSM/QS	For connecting compressed air tubing with standard outside diameters	■	■	■	■	qs
2	Quick connectors CK	For connecting compressed air tubing with standard internal diameters	-	■	■	■	ck
3	Rod clevis SG	Permits swivel motion of the Fluidic Muscle in one plane	■	■	■	■	19
4	Rod eye SGS	With spherical bearing	■	■	■	■	19
5	Coupling pieces KSZ	To compensate for radial deviations	■	■	■	■	19
	Coupling pieces KSG	To compensate for radial deviations	-	■	■	■	19

New
DMSP-5

FESTO

Fluidic Muscle DMSP with press-fitted connection

Technical data



Size
5 ... 40

Nominal length
30 ... 9000 mm

Lifting force
0 ... 6000 N



General technical data				
Size	5	10	20	40
Pneumatic connection	M3	G1/8	G1/4	G3/8
Design	Contracting diaphragm			
Mode of operation	Single-acting, pulling			
I.D. [mm]	5	10	20	40
Nominal length [mm]	30 ... 1000	40 ... 9000	60 ... 9000	120 ... 9000
Stroke [mm]	0 ... 200	0 ... 2250	0 ... 2250	0 ... 2250
Max. additional load, freely suspended [kg]	5	30	80	250
Max. permissible pretensioning ¹⁾	1% of nominal length	3% of nominal length	4% of nominal length	5% of nominal length
Max. permissible contraction	20% of nominal length	25% of nominal length		
Max. perm. offset of connections	Angle tolerance: ≤ 1.0°			
	Parallelism tolerance: ± 0.5 % (up to 400 mm nominal length), ≤ 2 mm (from 400 mm nominal length)			
Type of mounting	Via accessories			
Mounting position	Any (an external guide is required if lateral forces occur)			

1) The max. pretensioning is achieved when the max. permissible freely suspended payload is attached.

Operating and environmental conditions				
Size	5	10	20	40
Operating pressure [bar]	0 ... 6	0 ... 8	0 ... 6	0 ... 6
Operating medium	Compressed air according to ISO 8573-1:2010 [7:-:-]			
Note on operating/pilot medium	Lubricated operation possible (in which case lubricated operation will always be required)			
Ambient temperature [°C]	-5 ... +60			
Corrosion resistance class CRC ¹⁾	2			
Certification	TÜV			

1) Corrosion resistance class CRC 2 to Festo standard FN 940070
Moderate corrosion stress. Indoor applications in which condensation may occur. External visible parts with primarily decorative requirements for the surface and which are in direct contact with the ambient atmosphere typical for industrial applications.

Forces [N] at max. permissible operating pressure				
Size	5	10	20	40
Theoretical force ¹⁾	140	630	1500	6000

1) For minimum nominal length, the force is reduced by approx. 10%.

Fluidic Muscle DMSP with press-fitted connection

Technical data

Permissible force F [N] as a function of the contraction h [%] of the nominal length

Force/displacement diagrams and sizing ranges

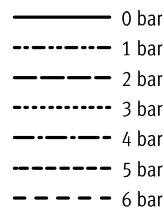
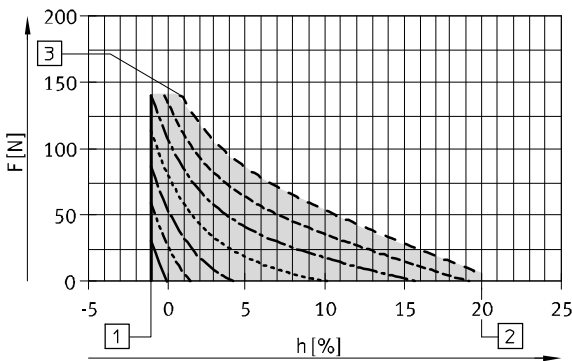
The limits specified in the technical data must be complied with when using the Fluidic Muscle. The graphs below illustrate the operating range of the Fluidic Muscle as a function of the diameter, within the limits shown below.

Using the graphs

1. The upper limit of the grey area indicates the maximum permissible force.
2. The right limiting curve of the grey area indicates the maximum permissible operating pressure.
3. The right vertical limit of the grey area indicates the maximum permissible contraction.
4. The left limit of the grey area indicates the load limit of the muscle in terms of the maximum permissible pretensioning.

Operating range DMSP-5-100N-...

Sizing examples → 33

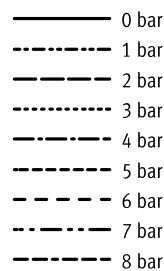
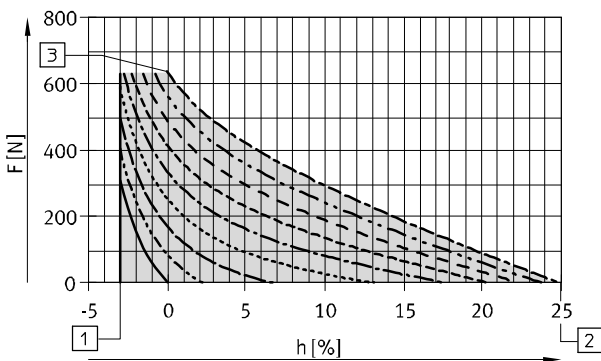


- 1 Max. permissible pretensioning
- 2 Max. permissible contraction
- 3 Theoretical force (140 N) at max. operating pressure

■ Permissible operating range

Operating range DMSP-10-100N-...

Sizing examples → 33



- 1 Max. permissible pretensioning
- 2 Max. permissible contraction
- 3 Theoretical force (630 N) at max. operating pressure

■ Permissible operating range

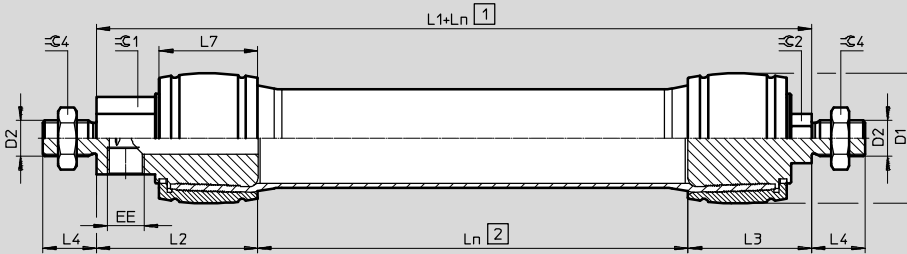
Fluidic Muscle DMSP with press-fitted connection

Technical data

Dimensions

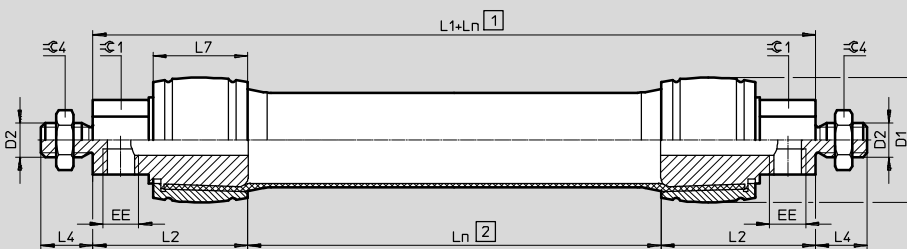
Download CAD data → www.festo.com

DMSP...-RM-CM – pneumatic connection, radial – no connection, with male thread



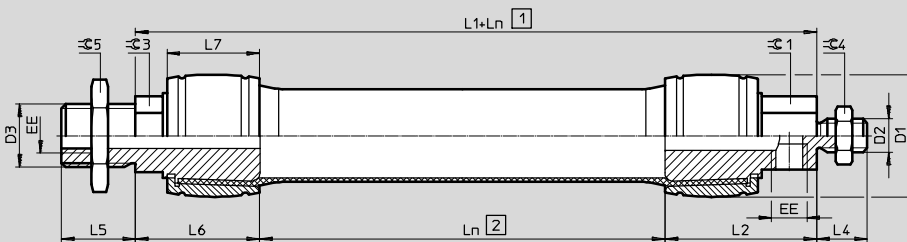
- 1 Installed length
- 2 Nominal length

DMSP...-RM-RM – pneumatic connection, radial – pneumatic connection, radial



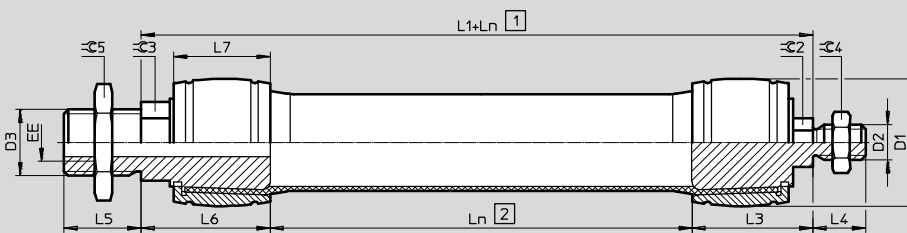
- 1 Installed length
- 2 Nominal length

DMSP...-AM-RM – pneumatic connection, axial – pneumatic connection, radial



- 1 Installed length
- 2 Nominal length

DMSP...-AM-CM – pneumatic connection, axial – no connection, with male thread



- 1 Installed length
- 2 Nominal length

Size	D1 max.	D2	D3	EE ²⁾	Ln ¹⁾		L1				L2
					min.	max.	RM-CM	RM-RM	AM-RM	AM-CM	
5	11	M6	M8	M3	30	1000	33	37	33	29	18.5
10	22	M8	M16x1.5	G $\frac{1}{8}$	40	9000	62	72	63	53	36
20	35	M10x1.25	M20x1.5	G $\frac{1}{4}$	60		95	113	97	79	56.5
40	57	M16x1.5	M30x1.5	G $\frac{3}{8}$	120		127	144	131	114	72





Size	L3	L4	L5	L6	L7	\varnothing C1 ²⁾	\varnothing C2 ²⁾	\varnothing C3 ²⁾	\varnothing C4	\varnothing C5
5	14.5	10	10	14.5	10	8	8	10	13	13
10	26	15	16	27	19	17	10	17	13	24
20	38.5	20	18	40.5	30	19	12	20	17	30
40	55	24	35	59	44	30	19	30	24	46

1) Tolerance < 100 mm ±1 mm, 100 ... 400 mm ±1%, > 400 mm ±4 mm.

2) Parallel orientation of the spanner flats on the left and right connection side can lead to deviations (for production reasons).

Fluidic Muscle DMSP with press-fitted connection

Accessories

Ordering data				Technical data → Internet: piston-rod attachment			
Description	For size	Part No.	Type	Description	For size	Part No.	Type
Rod eye SGS				Coupling piece KSG			
	5	9254	SGS-M6		5	–	
	10	9255	SGS-M8		10	–	
	20	9261	SGS-M10x1,25		20	32963	KSG-M10x1,25
	40	9263	SGS-M16x1,5¹⁾		40	32965	KSG-M16x1,5
Rod clevis SG				Coupling piece KSZ			
	5	3110	SG-M6		5	36123	KSZ-M6
	10	3111	SG-M8		10	36124	KSZ-M8
	20	6144	SG-M10x1,25		20	36125	KSZ-M10x1,25
	40	6146	SG-M16x1,5¹⁾		40	36127	KSZ-M16x1,5

 - Note

- 1) If there is a dynamic load on the DMSP40, the technical data will be subject to restrictions because of the accessories.
- Fundamentals: rated load, friction torque where $\mu = 0.2$:
- Endurance limit at 6000 N: 1 million load cycles (higher values on request)
 - Endurance limit at 4000 N: 10 million load cycles