Upotreba animacija u poučavanju kinematike

Petek, Maja

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:616049

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

University North Digital Repository

Sveučilište Sjever

Odjel za strojarstvo

Proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 323/PS/2020

Upotreba animacija u poučavanju kinematike

Maja Petek, 1532/336

Varaždin, rujan 2020. godine

Sveučilište Sjever

Odjel za strojarstvo

Proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 323/PS/2020

Upotreba animacija u poučavanju kinematike

Student

Maja Petek, 1532/336

Mentor

Katarina Pisačić, dipl. ing.

Varaždin, rujan 2020. godine

Sveučilište Sjever
Sveučilišni centar Varaždin
104. brigade 3, HR–42000 Varaždin

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL: Odjel za strojarstvo

STUDIJ: preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo

PRISTUPNIK: Maja Petek | MATIČNI BROJ: 1532/336

DATUM: 10.9.2020. | KOLEGIJ: Mehanika II

NASLOV RADA: Upotreba animacija u poučavanju kinematike

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU: The use of animation in teaching kinematics

MENTOR: Katarina Pisačić, dipl. ing., viši predavač | ZVANJE: viši predavač

ČLANOVI POVJERENSTVA:

1. Marko Horvat, dipl.ing., predavač
2. Katarina Pisačić, dipl.ing., viši predavač
3. dr. sc. Zlatko Botak, viši predavač
4. Damir Mađerić, dipl. ing., viši predavač
5.

Zadatak završnog rada

BROJ: 323/PS/2020

OPIS:

Prilikom poučavanja gradiva kinematike moguće je koristiti fizičke modele kako bi se zornije objasnilo gibanje elemenata mehanizma. Zbog poteškoća u pripremi takve nastave radije se koriste animacije i virtualni modeli. U ovom radu je potrebno:

- opisati povijesni razvoj mehanizama
- na primjerima objasniti grafoanalitičku metodu za rješavanje mehanizama
- prikazati kako je moguće rješavati mehanizme koristeći digitalne alate
- objasniti prednosti korištenja animacija i virtualnih modela u poučavanju

ZADATAK URUČEN: 11.09.2020. | POTPIS MENTORA: Katarina Pisačić

REPUBLIKA HRVATSKA
SVEUČILIŠTE SJEVER

Sažetak

Kinematika. Riječ koja dolazi od grčke riječi „kinesis“ što u prijevodu znači kretanje. Međutim, ona je puno više od same riječi. Ona proučava gibanje tijela i stanje tijela pod djelovanjem sile. Sustav međusobno povezanih tijela koji služi za ostvarivanje zadanog gibanja i prenošenja sila se naziva mehanizam. Današnji svijet je nezamisliv bez mehanizama. Slobodno možemo reći da oni pokreću svijet. Da bi se oni mogli dalje razvijati, jednu od važnijih uloga ima kinematička analiza.

Cilj ovog rada je napraviti animacije mehanizama i prikazati koliko one pomažu u predočavanju rada istih. Osim animacija, napravljena je kinematička analiza mehanizma, najprije grafičko-analitičkom metodom, a zatim uz pomoć digitalnog alata SAM – The Ultimate Mechanism Designer i uspoređeni su rezultati.

Ključne riječi: kinematika, mehanizam, kinematička analiza, animacija

Abstract

Kinematics. The word that comes from the Greek word "kinesis" which means motion. However, kinematics is much more than just a word. It studies the motion of the body and the condition of the body under the action of force. System of connected bodies that serves to achieve a given motion and transmission of forces is called a mechanism. Today’s world is unimaginable without mechanisms. They run the world. Kinematic analysis has an important role in the further development of mechanisms.

The aim of this paper is to create animation mechanisms and show how much one helps in presenting their work. In addition to animations, a kinematic analysis of the mechanism was made, first by the graphical-analytical method, and then with help of the digital tool SAM - The Ultimate Mechanism Designer. After analysis, results were compared.

Key words: kinematics, mechanism, kinematic analysis, animation

Popis oznaka

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
$\vec{v}$	m/s	vektor brzine
$\overrightarrow{v_{A/B}}$	m/s	vektor brzine točke A u odnosu na točku B
ω	rad/s	kutna brzina
$\vec{a}$	m/s^2	vektor ubrzanja
$\overrightarrow{a^n}$	m/s^2	vektor normalnog ubrzanja
$\overrightarrow{a^t}$	m/s^2	vektor tangencijalnog ubrzanja
α	rad/s^2	kutno ubrzanje
$\overrightarrow{r_{A/B}}$	m	udaljenost između točaka A i B
m	kg	masa tijela
φ	deg	kut

Sadržaj

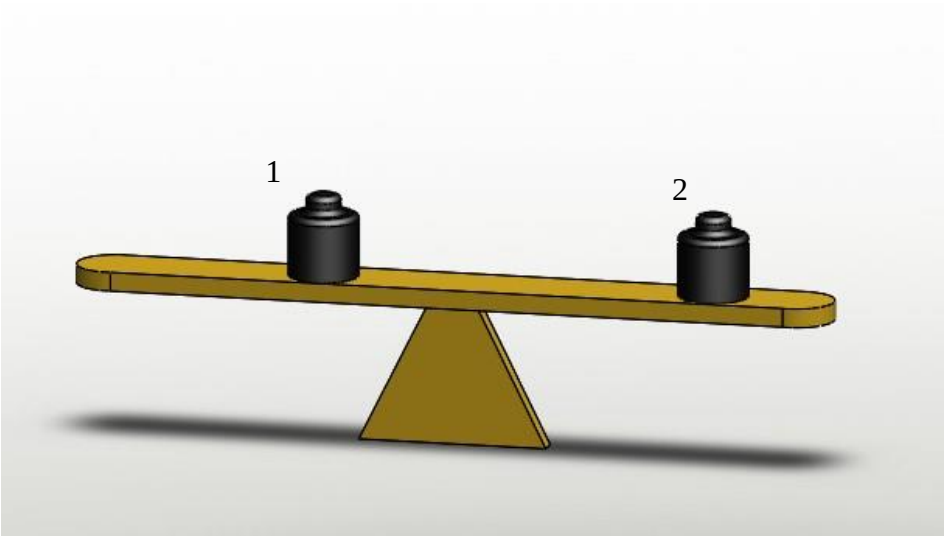
1. Uvod 1
2. Teorija mehanizama 2
2.1. Kurt Hain – „Važni glumac Drugog Zlatnog doba IFToMM-a“ 6
2.1.1. Životni radovi Haina 7
3. Kinematska analiza raninskog mehanizma 14
3.1. Grafičko – analitičko rješenje mehanizma 14
3.1.1. Plan položaja 15
3.1.2. Plan brzina 16
3.1.3. Plan ubrzanja 17
4. Digitalni alati u kinematskoj analizi 20
4.1. Sam - the ultimate mechanism designer 20
4.2. Crtanje mehanizma 20
4.3. Kinematička analiza mehanizma u SAM-u 25
5. Složeno gibanje 28
5.1. Kruta tijela nasuprot čestica 29
5.2. Planarno gibanje 29
5.3. Primjer složenog gibanja 31
5.4. Relativno gibanje 32
5.5. Coriolisovo ubrzanje 33
5.6. Kinematska analiza složenog mehanizma 35
5.6.1. Plan položaja 35
5.6.2. Plan brzina 36
5.6.3. Plan ubrzanja 37
6. Animacije mehanizama 40
6.1. Animacija mehanizma bez motora 41
6.2. Animacija mehanizma s motorom 44
6.3. Upotreba animacija i virtualnih modela u nastavi 46
6.3.1. Upotreba animacija i virtualnih modela u poučavanju strojarstva 46

6.3.2. Primjeri animacija 47
6.3.3. Prednosti animacija 48
7. Zaključak 50
Popis slika 52
Popis tablica 54
Literatura 55

1. UVOD

Strojarstvo je u osnovi višedisciplinska djelatnost. Za razliku od, primjerice, matematike, fizike ili kemije, strojarstvo se prvenstveno bavi elementima koje stvara čovjek. Strojevi funkcioniraju u stvarnom svijetu, pa su važne sve njihove karakteristike. Novi izumi i nove tehnologije mogu dovesti do promjena kod postojećih strojeva ili do uvođenja novih. To vodi do situacija u kojima se inženjeri strojarstva moraju prilagoditi novim okolnostima, a to nerijetko uključuje i učenje drugih disciplina. Pojam „najbolji mogući stroj“ u načelu ne ovisi samo o novim dostignućima u znanosti, već uključuje, primjerice, i uvođenje novih zakona ili ekonomski razvoj. Pa tako sve dok ne postoje zakoni o okolišu, dizajner motora može zanemariti plinove koje motor ispušta u prirodu. Stupanjem novog zakona na snagu, to se može drastično promijeniti. Zakoni prirode ne ovise o ljudskim institucijama, pa bi tako najbolji mogući stroj „preko noći“ mogao izgubiti titulu najboljeg. Taj višedisciplinski karakter znanosti strojarstva ogleda se u povijesti.

Razvoj znanosti strojarstva započinje statikom. Djelovanje osnovnih strojeva poput poluge, remenica, klina i vijka objašnjeno je postojanjem ravnoteže: ako su mase utega obrnuto proporcionalne udaljenosti od središta, kao što je prikazano na slici 1.1., ravnoteža postoji. Masa utega 1 je veća od mase utega 2.

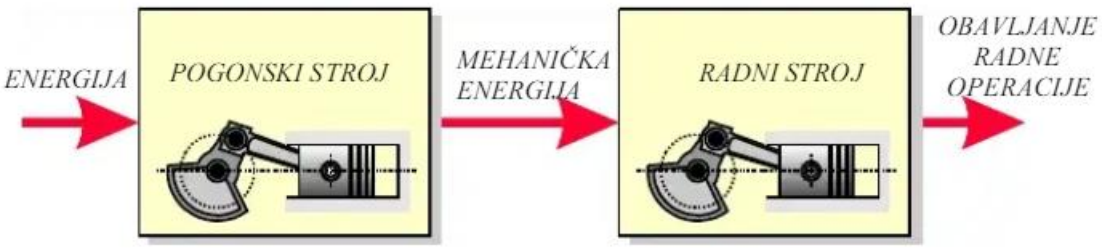


Slika 1.1.: Ravnoteža

Tijekom industrijske revolucije razvili su se novi strojevi koji su bili puno složeniji. Velika raznolikost u geometriji strojeva zahtijevala je posebna istraživanja. Na strojeve se gledalo kao na složene mehanizme koji bi mogli biti klasificirani prema načinu na koji pretvaraju gibanje. To je dovelo do Mongeove klasifikacije mehanizama. Oko 1830. prvi put se pojavljuje riječ kinematika kao nova pod-znanost mehanike koja se bavi kretanjem bez uzimanja u obzir sila i masa. [1]

2. TEORIJA MEHANIZAMA

Teorija mehanizama i strojeva je primjenjena znanost koja se bavi geometrijom gibanja dijelova strojeva i mehanizama (kinematika) i silama koje ostvaruju to gibanje (dinamika). Pod pojmom mehanizam podrazumijevamo sustav međusobno povezanih tijela koji služi za ostvarivanje zadanog gibanja i prenošenja sila. Pojam stroja usko je vezan s namjenom. Stroj je takva tehnička naprava koja sliži za mehanizaciju bilo kakvog procesa, pa tako u zavisnosti od vrste procesa razlikujemo energetske, tehnološke, transportne i regulacione strojeve. Strojeve možemo podijeliti na pogonske i radne. Kod pogonskog stroja se energija (mehanička, toplinska, kemijska) pretvara u mehaničku energiju. Kod radnih strojeva se mehanička energija koristi za obavljanje neke radne operacije. Sastavni dijelovi svih tih strojeva su mehanizmi koji omogućavaju pretvorbe energije.[2]



Slika 2.1.: Pretvorbe energije [2]

Mehanika je znanost koja proučava kretanje tijela pod djelovanjem sila. Prije svega proučava kretanje sile kojom tijela djeluju jedno na drugo. To dovodi do istraživanja tema kao što su gravitacija, magnetizam, električna energija i slično. Poznavajući sile, traži se način na koji se tijela kreću pod utjecajem istih.

Povijesno gledajući, mehanika je bila jedna od prvih znanosti koja se razvila. Njezina unutarnja ljepota kao matematička disciplina i njezin nevjerojatni rani uspjeh u detaljnom

proračunu kretanja Mjeseca, Zemlje i drugih planetarnih tijela imali su ogroman utjecaj na filozofsko mišljenje i dali poticaj sustavnom razvoju znanosti u 20. stoljeću. [4]

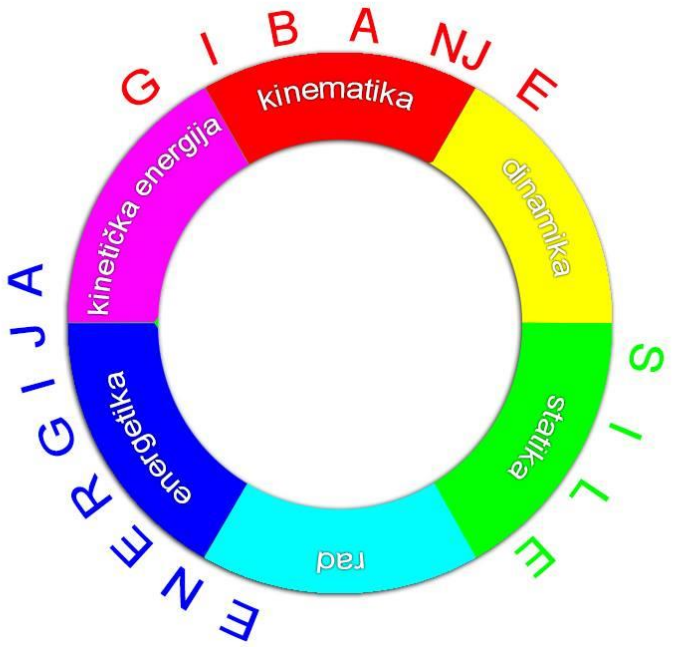
Mehanika se može podijeliti na:

Kinematika – proučava gibanje tijela i stanje tijela pod djelovanjem sile

Dinamika – proučava djelovanje sila i momenata na tijela

Statika – dio dinamike koji koji proučava djelovanje sila na tijelo prilikom mirovanja

Kinetika – dio dinamike koji analizira gibanja krutih tijela pod djelovanjem sila i momenata



Slika 2.2.: Spektar mehanike [26]

Kinematika je grana mehanike koja opisuje gibanje točaka, objekata i sustava skupina objekata, bez navođenja uzroka gibanja (tj. sila). Proučavanje kinematike često se naziva i "geometrijom pokreta". Predmeti su u pokretu svuda oko nas. Sve, od teniske utakmice do leta svemirske sonde planeta Neptuna, uključuje kretanje. Kad mi odmaramo, naše srce pomiče krv kroz vene. Neprekidno kretanje postoji čak i u neživim objektima u obliku vibracija atoma i molekula. Mogu se postaviti različita zanimljiva pitanja o kretanju, npr.: Koliko će trebati vremena svemirskoj sondu za putovanje na Mars? Gdje će nogometna lopta sletjeti ako se baci pod određenim kutom? Razumijevanje pokreta je ključno za razumijevanje drugih koncepata u fizici. Primjerice, razumijevanje ubrzanja presudno je za proučavanje sile. Da bi opisala gibanje, kinematika proučava putanje točaka, linija i drugih geometrijskih objekata, kao i

njihova različita svojstva (poput brzine i ubrzanja). Kinematika se koristi u astrofizici za opisivanje kretanja nebeskih tijela i sustava te u strojarstvu, robotiziranju i biomehanici za opisivanje sustava koji se sastoje od spojenih dijelova (poput motora, robotske ruke ili kostura ljudskog tijela). Riječ "kinematika" dolazi od grčke riječi "kinesis" što znači kretanje, a povezana je s drugim engleskim riječima poput "kino" i "kineziologija" (proučavanje ljudskog pokreta). Kinematska analiza je postupak mjerenja kinematskih količina koje se koriste za opisivanje kretanja. [5]

Statika je grana mehanike koja se bavi silama koje djeluju na tijela u mirovanju u ravnotežnim uvjetima. Njezine su temelje postavili stari grčki matematičar Archimedes i drugi prije više od 2200 godina, proučavajući svojstva jednostavnih strojeva kao što su poluga i osovina. Metode i rezultati statike pokazali su se posebno korisnim za projektiranje zgrada, mostova i brana, kao i dizalica i drugih sličnih mehaničkih uređaja. Da bi mogli izračunati dimenzije takvih konstrukcija i strojeva, arhitekti i inženjeri prvo moraju odrediti sile koje djeluju na njihove međusobno povezane dijelove. Statika pruža analitičke i grafičke postupke potrebne za prepoznavanje i opisivanje tih nepoznatih sila. Statika pretpostavlja da su tijela, koja ona proučava, savršeno kruta. Također smatra da je zbroj svih sila koje djeluju na tijelu u mirovanju nula te da nema tendencije da se sile okreću oko bilo koje osi. Ta su tri uvjeta neovisna jedna o drugom, a oni se prikazuju u obliku jednadžba ravnoteže. Postoje tri jednadžbe ravnoteže kojima se mogu izračunati samo tri nepoznate sile. Ako ih postoji više, znači da ima više komponenti nego što je potrebno za podnošenje opterećenja ili da je potrebno više zadržavanja kako se tijelo ne bi kretalo Takav sustav se naziva statički neodređenim. [6]

Kinetika je grana mehanike koja proučava gibanje krutih tijela pod djelovanjem sila i momenata. Njena načela polaze iz Newtonovih zakona ih kojih su izvedeni opći zakoni kinetike kao što su zakon kinetičke energije, zakon količine gibanja, zakon kinetičkog momenta i dr. [7]

Najjednostavniji mehanički sustav je čestica koja je definirana kao tijelo toliko malo da njegov oblik i unutarnja struktura ne predstavljaju posljedicu u danom problemu. Kompliciranije je gibanje sustava od dvije ili više čestica koje djeluju jedne na drugu i eventualno podliježu silama koje djeluju tijela izvan sustava.

Klasična mehanika bavi se gibanjem tijela pod utjecajem sila ili s ravnotežom tijela kada su sve snage uravnotežene. To se može smatrati razradom i primjenom osnovnih postulata koje je prvi izgovorio Isaac Newton u svojoj Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (1687.), obično poznatoj kao Principia. Ti postulati su nazvani Newtonovim zakonima. Središnji pojmovi klasične mehanike su sila, masa i gibanje. Newton nije ni silu ni masu jasno definirao i oba pojma su bila predmet filozofskih nagađanja. I masa i gibanje su najpoznatiji po svojim

učincima. Masa je mjera sklonosti tijela da se odupire promjenama stanja gibanja. Sila, s druge strane, ubrzava tijelo, što znači da mijenja gibanje tijela na koje se primjenjuje. [4]

Newtonov prvi zakon govori da će svaki objekt ostati u mirovanju ili u jednoličnom kretanju po ravnoj crti osim ako je primoran promijeniti svoje stanje zbog djelovanja vanjske sile. To se uzima kao definicija inercije. Znači, ako na objekt ne djeluje sila, on će zadržati konstantnu brzinu. Ako je ta brzina jednaka nuli, objekt miruje. Ako se primijeni vanjska sila, brzina se mijenja.

Drugi zakon govori da se brzina objekta mijenja kada je on podvrgnut vanjskoj sili. Zakon definira silu koja je jednaka promjeni momenta (masa pomnožena s brzinom) po promjeni u vremenu. Newton je razvio i matematički izračun, a promijene izražene u drugom zakonu najpreciznije se definiraju u diferencijalnim oblicima. Za objekt s konstantnom masom m, drugi zakon govori da je sila F produkt mase objekta i njegovog ubrzanja a:

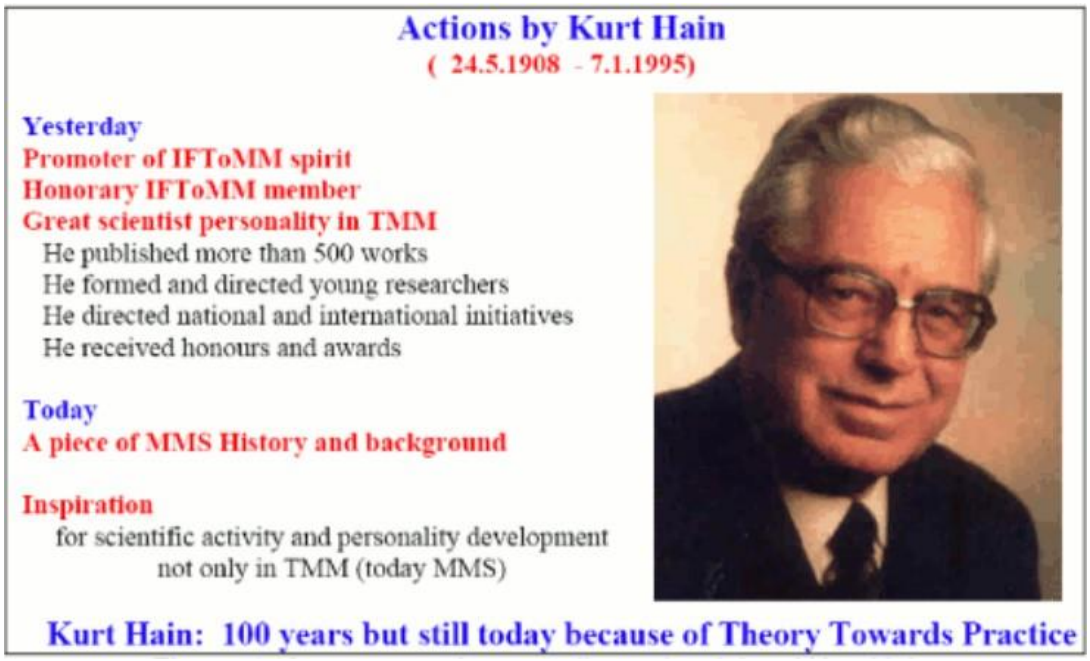
$$F = m \cdot a$$

Treći zakon govori da za svaku akciju u prirodi postoji reakcija. Drugim riječima, ako objekt A djeluje na objekt B nekom silom, onda objekt B djeluje istom silom na objekt A. [8]

Slika 2.3.: Isaac Newton

2.1. KURT HAIN – „VAŽNI GLUMAC DRUGOG ZLATNOG DOBA IFTOMM-A“

IFToMM (International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science) Međunarodna federacija za promociju mehanizma i strojnih znanosti je organizacija koja podržava međunarodnu razmjenu istraživača i inženjera iz širokog raspona disciplina vezanih za strojarstvo.[3]



Slika 2.4.: Kurt Hain [3]

Kurt Hain rođen je 24. svibnja 1908. u Leipzigu. Nakon što je završio pripravnički staž kao mehaničar i tokar, studirao je strojarsko inženjerstvo na Hohere Maschinenbauschule u svom rodnom gradu. Visoko cijenjeni prof. Paul Knechtel ga je podučavao i u njemu izazvao zanimanje za kinematiku kao osnovno znanje za razdoblje mehanizacije u razvoju. Nakon studija radio je nekoliko godina u različitim tvrtkama u Leipzigu, Dessauu i Dresdenu dok se nije preselio s obitelji 1939. u Braunschweig, gdje je radio kao istraživač u Nacionalnoj instituciji za istraživanje zrakoplovstva. Ova se institucija promijenila neposredno nakon rata u Poljoprivrednu istraživačku Instituciju. Kurt Hain je postao voditelj Odjela za kinematiku u Institutu za agrotehnička temeljna istraživanja i tamo napravio, na primjer, velika poboljšanja u dizajnu traktorskih viljuškara. U mirovinu je otišao 1973. godine.

Kurt Hain je dobro poznati u IFToMM zajednici zbog njegove osobnosti i aktivnosti. Njegovi radovi su danas važna pozadina, pa čak i izvori inspiracije za nova istraživanja. Objavio

je opsežni znanstveni rad koji sadrži 13 knjiga i više od 500 radova iz gotovo svih polja kinematike.

Danas je Kurt Hain dio IFToMM povijesti. Njegovo remek djelo "Angewandte Getrierechre" ubrzo je prevedeno na engleski jezik u "Primijenjenu kinematiku" od strane nekolicine njegovih američkih prijatelja-kolega. Knjiga rezimira većinu njegovoga rada na polju kinematike, utemeljen na prenošenju teorije u praksu. Istraživačka aktivnost Kurta Haina bila je usmjerena na praktične primjene i podučavanje rješenja. Tako je nastavio njemačku tradiciju korištenja modela mehanizama za objašnjenje aspekata dizajna i operativnih značajki, čak i kad se računalna tehnika pojavila kao moćno sredstvo i za podučavanje i za dizajn.

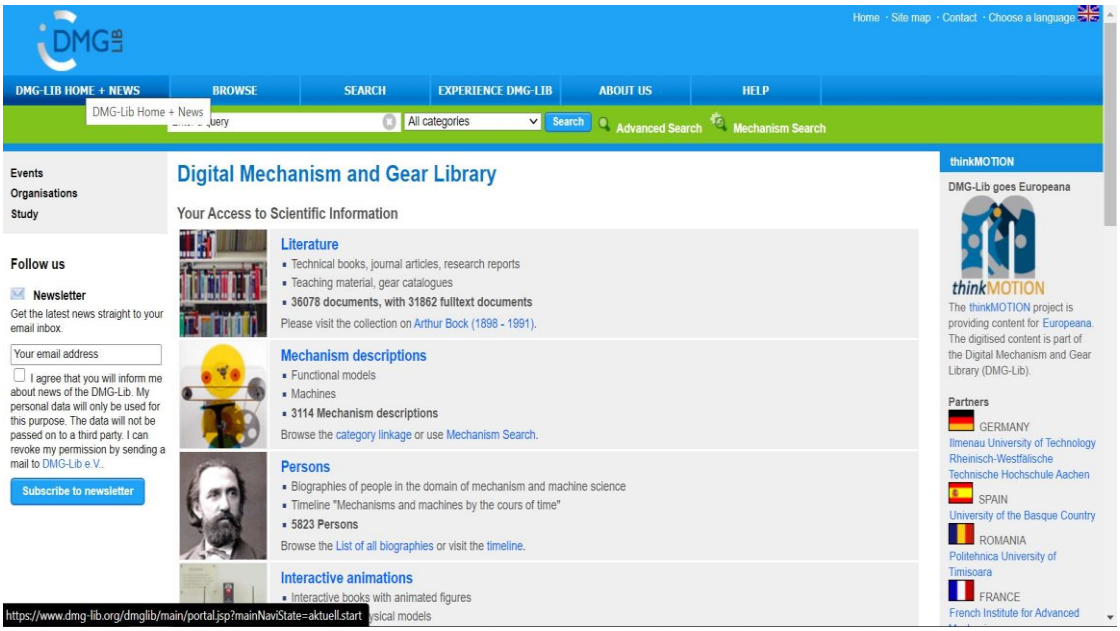
Kurt Hain nije bio izravno uključen u osnivanje IFToMM-a. Međutim, njegova aktivnost je bila usmjerena na suradnju i širenje inženjerstva u korist društva i zbog toga je poznat kao jedan od utemeljitelja IFToMM-a.[3]

2.1.1. Životni radovi Haina

„Digitale Mechamismen- und Getreibe-bibliothek“ (DMG-Lib) je projekt koji je 2005. započelo *Deutsche Forschungsgeimenschaft* (DFG). Projekt se fokusira na:

- Razvoj i realizaciju moćne infrastrukture, uključujući potrebne alate za digitalizaciju, pripremu, akumulaciju i prikladnu prezentaciju informacija
- Izbor i kolekcija znanja iz područja strojarstva
- Dizajn višejezične digitalne knjižnice za mehanizme i teoriju zupčanika koji su središnja informacijska memorija u tehnologiji gibanja

Kao pionir Primjenjene kinematike, Kurt Hain nesumnjivo pripada najznačajnijim njemačkim istraživačima u području tehnologije gibanja. Iza sebe je ostavio značajan životni rad koji je pohranio u 13 knjiga, otprilike 380 akademskih zapisa, 160 modela zupčanika i nekoliko drugih zapisa i nacrta koji su gotovo u cijelosti javno dostupni u digitalnom obliku putem projekta DMG-Lib.



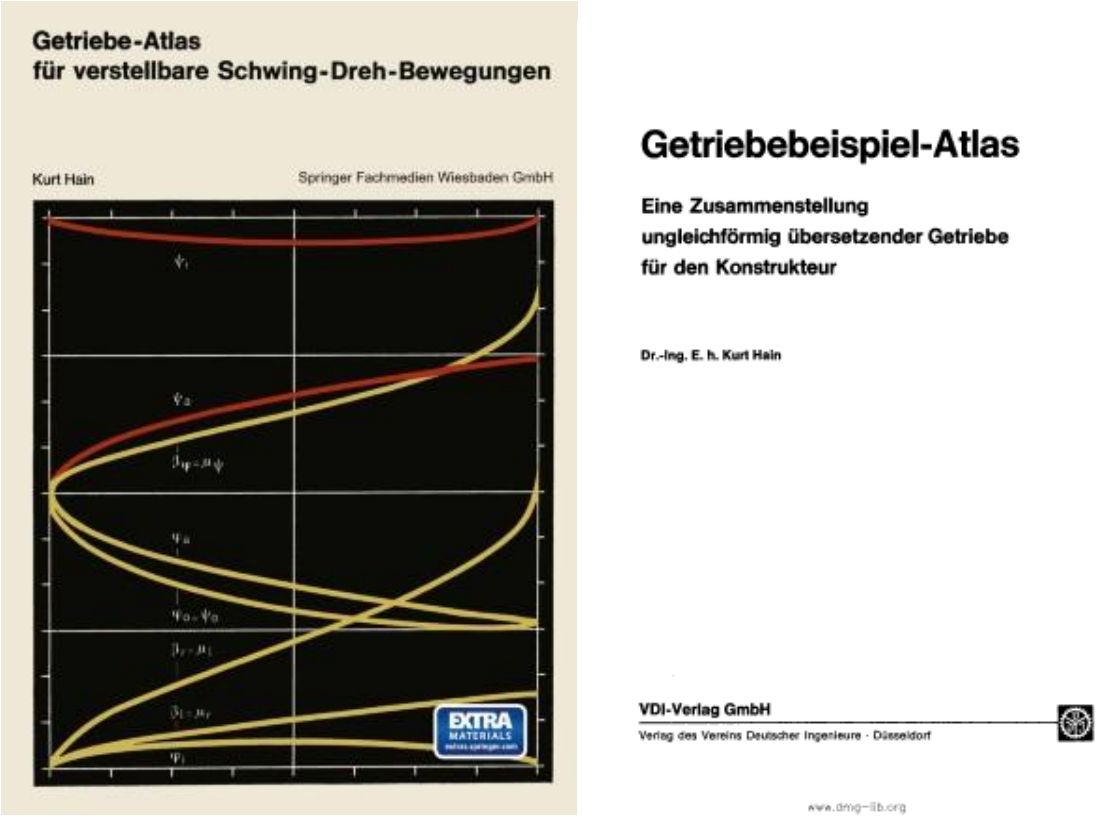
Slika 2.5.: DMG-Lib [3]

Kurt Hain je sa svojim životnim djelom trenutno najzastupljeniji autor na DMG-Lib-u. Njegovih 508 vidljivih djela ogovaraju polovici svih djela. Hain je imao posebno kreativno razdoblje početkom 40.-ih. Samo je 1944. napisao više od 40 članaka. Nakon Drugog svjetskog rata, pa sve do svoje smrti 1995. godine kontinuirano je obrađivao veliku količinu publikacija. Tijekom tih 50 godina njegovog znanstvenog rada, svake je godine objavio oko 10 radova. Veliki dio njegovih publikacija čine znanstveni radovi. Više od 5000 stranica Hainovog životnog djela se reflektira u njegovoj želji za skupljanjem stručnosti u području tehnologije kretanja kao i susjednim istraživačkim područjima i želji da to prenese svome čitateljstvu. [9]

Kombinacija dizajniranih grafikona, kataloga i primjera naziva se *Getriebeatlas*. To je njegova najviša razina kompaktnog i sažetog znanja o mehanizmu ili posebnoj grupi mehanizama, što je korak prije izgradnje modela mehanizma. Hain je objavio tri atlasa. Prvi i drugi proučavaju četverozglobne veze i njihove kombinacije. Posljednji atlas je najbolji s obzirom na raznolikost, vrste i broj primjera primjene. Hain je taj atlas završio neposredno prije mirovine. Posljednji atlas je pregled gotovo svih modela mehanizama koje je Hain dizajnirao od 1959. godine. Prema naslovima deset poglavlja, sadržaj *Getreibebeispiel-Atlas*-a je sljedeći:

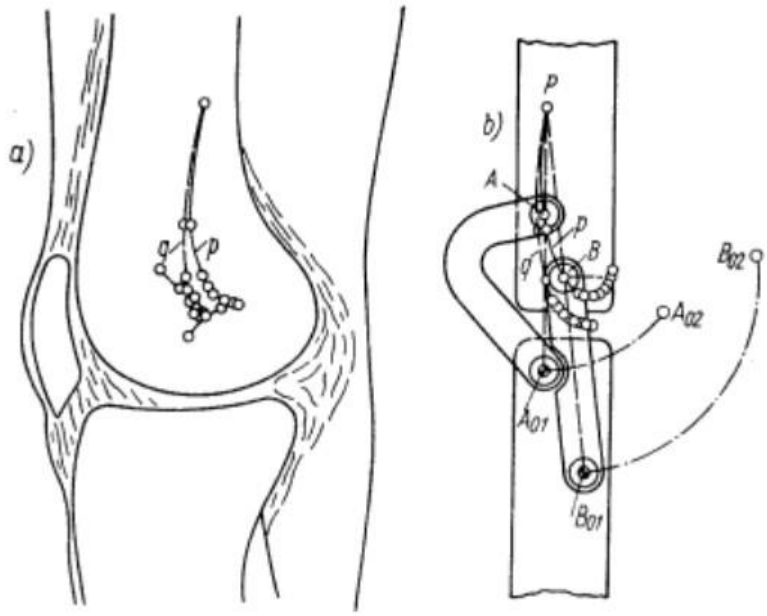
1. Mehanizmi za oscilacijsko-rotacijska i oscilacijsko-linearna gibanja
2. Mehanizmi s okretnom izlaznom vezom

3. Mehanizmi koji predstavljaju krivulje spajanja ili cikloidne putanje
4. Mehanizmi navođenja
5. Oscilirajući mehanizmi
6. Mehanizmi indeksiranja
7. Prostorni mehanizmi
8. Podesivi mehanizmi
9. Mehanizmi s oprugom
10. Primjeri primjene



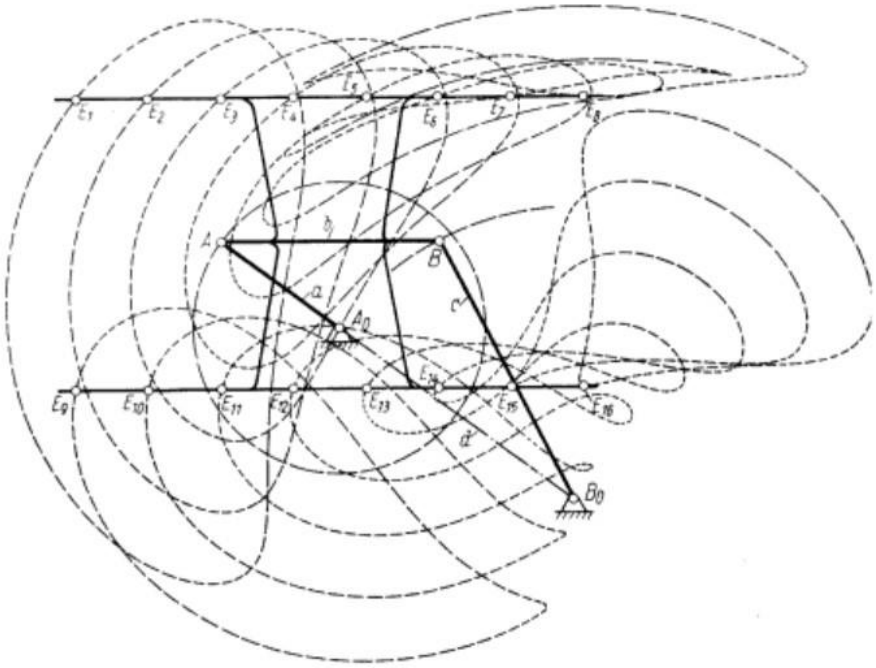
Slika 2.6.: Hainovi Atlasi

Na slici 2.7. prikazani primjer iz Atlasa na ljudskome koljenu. Izmjereno je relativno kretanje između ljudskih udova i određene su staze pola *p* i *g*. Staza pola *p* pripada gornjem, a *q* donjem pomičnom djelu.[10]



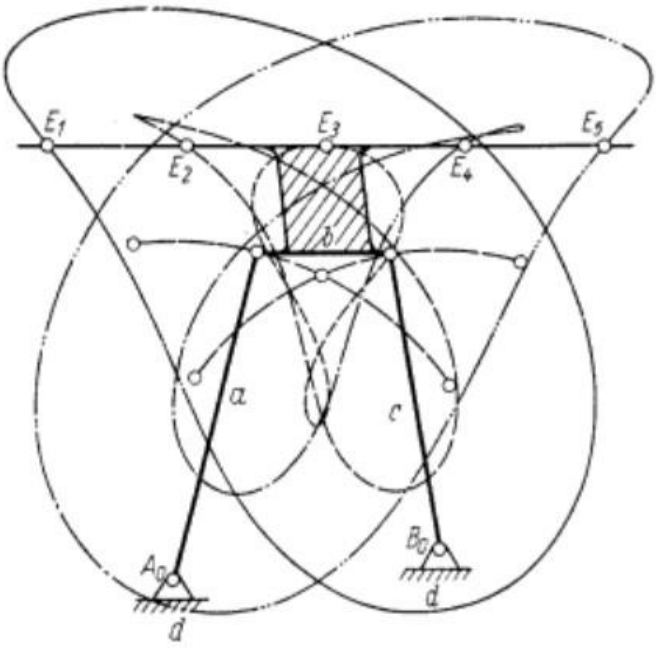
Slika 2.7.: Primjer iz Atlasa - koljeno[10]

Na slici 2.8. prikazane su krivulje okretnog momenta mehanizma koji se ponaša kao okretna osovina. [10]



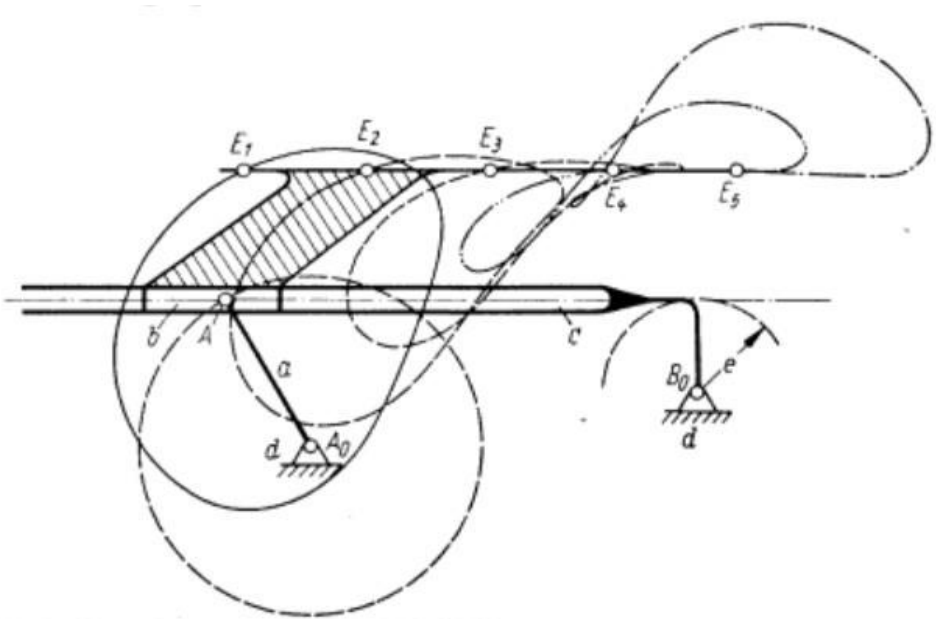
Slika 2.8.: Primjer iz Atlasa – krivulje okretnog momenta[10]

Na slici 2.9. su prikazane krivulje okretnog momenta četverozglobnog mehanizma. [10]



Slika 2.9.: Primjer iz Atlasa – krivulje okretnog momenta [10]

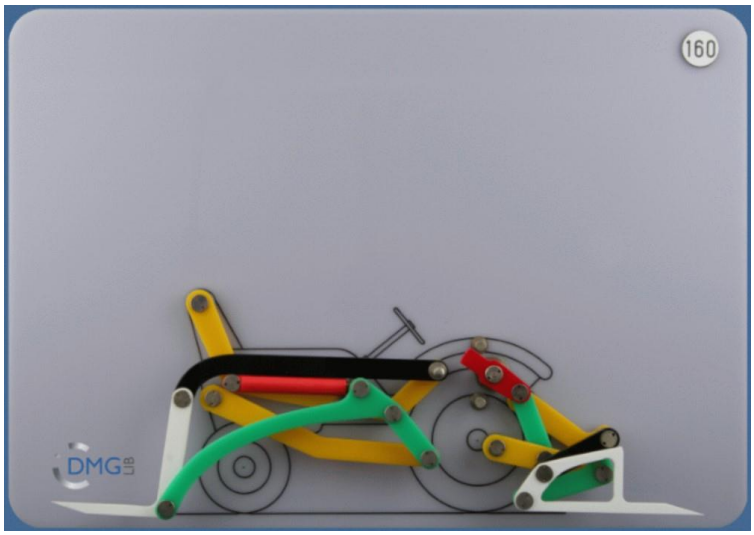
Na slici 2.10. prikazane su krivulje okretnog momenta osovinske petlje. [10]



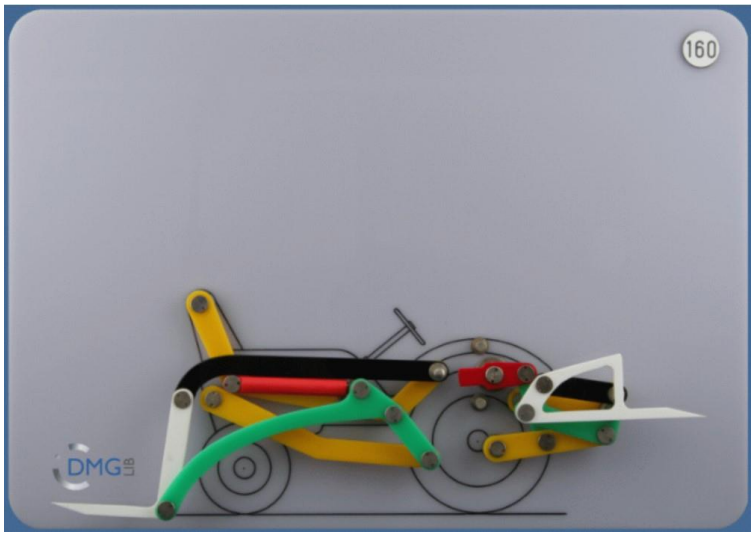
Slika 2.10.: Primjer iz Atlasa – krivulje okretnog momenta [10]

Slike 2.11. – 2.13. prikazuju Hainov priključak za poljoprivredni traktor: [11]

- Demonstracijski model s neovisno upravljanim prednjim i stražnjim utovarivačima
- Prednji i zadnji utovarivači na poljoprivrednim traktorima u režimu viljuškara
- Vodeći zupčanik za generiranje ravninskih paralelnih navođenja ravnina spojnica
- Stražnji dodatak: ravna osovina zupčana osovina (stražnji utovarivač)
- Prednji dodatak: ravan osmerostruki zupčanik



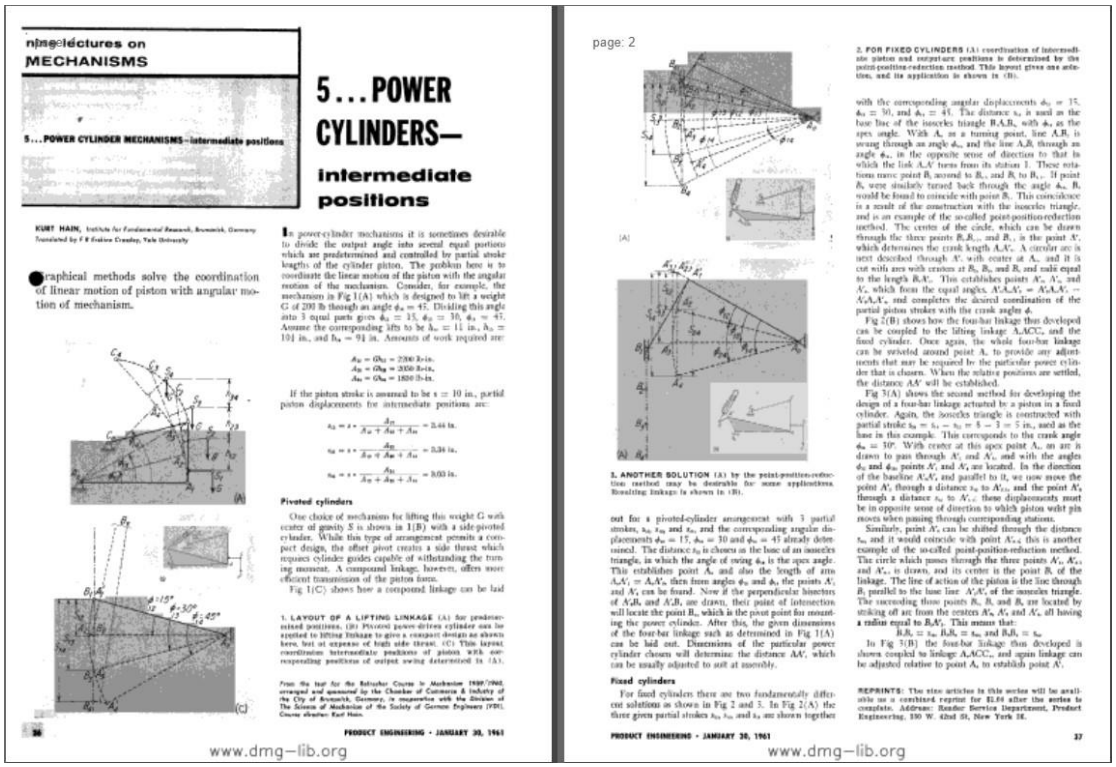
Slika 2.11.: Priključak za poljoprivredni traktor (1) [11]



Slika 2.12.: Priključak za poljoprivredni traktor (2) [11]

Slika 2.13.: Priključak za poljoprivredni traktor (3) [11]

Slika 2.14. prikazuje jednu od mnogobrojnih Hainovih publikacija.



mechanisms lectures on MECHANISMS

5 . . . POWER CYLINDER MECHANISMS—intermediate positions

5 . . . POWER CYLINDERS— intermediate positions

KURT HAIN, Institute for Fundamental Research, Brunswick, Germany
Translated by F. R. Erskine Crumley, Yale University

Graphical methods solve the coordination of linear motion of piston with angular motion of mechanism.

In power-cylinder mechanisms it is sometimes desirable to divide the output angle into several equal portions which are predetermined and controlled by partial stroke lengths of the cylinder piston. The problem here is to coordinate the linear motion of the piston with the angular motion of the mechanism. Consider, for example, the mechanism in Fig 1(A) which is designed to lift a weight G of 200 lb through an angle $\phi_o = 45$. Dividing this angle into 3 equal parts gives $\phi_1 = 15$, $\phi_2 = 30$, $\phi_3 = 45$. Assume the corresponding lifts to be $h_1 = 11$ in., $h_2 = 10\frac{1}{4}$ in., and $h_3 = 9\frac{1}{4}$ in. Amounts of work required are:

$$A_{01} = Gh_1 = 2200 \text{ lb-in.}$$
$$A_{02} = Gh_2 = 2050 \text{ lb-in.}$$
$$A_{03} = Gh_3 = 1850 \text{ lb-in.}$$

If the piston stroke is assumed to be $s = 10$ in., partial piston displacements for intermediate positions are:

$$s_1 = s \cdot \frac{A_{01}}{A_{01} + A_{02} + A_{03}} = 3.44 \text{ in.}$$
$$s_2 = s \cdot \frac{A_{02}}{A_{01} + A_{02} + A_{03}} = 3.34 \text{ in.}$$
$$s_3 = s \cdot \frac{A_{03}}{A_{01} + A_{02} + A_{03}} = 3.03 \text{ in.}$$

Pivoted cylinders

One choice of mechanism for lifting this weight G with center of gravity S is shown in 1(B) with a side-pivoted cylinder. While this type of arrangement permits a compact design, the offset pivot creates a side thrust which requires cylinder guides capable of withstanding the turning moment. A compound linkage, however, offers more efficient transmission of the piston force.

Fig 1(C) shows how a compound linkage can be laid out for a pivoted-cylinder arrangement with 3 partial strokes, s_1, s_2 and s_3, and the corresponding angular displacements $\phi_1 = 15$, $\phi_2 = 30$ and $\phi_3 = 45$ already determined. The distance s_0 is chosen as the base of an isosceles triangle, in which the angle of swing ϕ_o is the apex angle. This establishes point A_o and also the length of arm $A_oA'_1 = A_oA'_3$, then from angles ϕ_1 and ϕ_3 the points A'_1 and A'_3 can be found. Now if the perpendicular bisectors of A'_1B_o and A'_3B_o are drawn, their point of intersection will locate the point B_o, which is the pivot point for mounting the power cylinder. After this, the given dimensions of the four-bar linkage such as determined in Fig 1(A) can be laid out. Dimensions of the particular power cylinder chosen will determine the distance AA', which can be usually adjusted to suit at assembly.

1. LAYOUT OF A LIFTING LINKAGE (A) for predetermined positions. (B) Pivoted power-driven cylinder can be applied to lifting linkage to give a compact design as shown here, but at expense of high side thrust. (C) This layout coordinates intermediate positions of piston with corresponding positions of output swing determined in (A).

From the text for the Refresher Course in Mechanism 1959/1960, arranged and sponsored by the Chamber of Commerce & Industry of the City of Brunswick, Germany, in cooperation with the Division of The Science of Mechanism of the Society of German Engineers (VDI). Course director: Kurt Hain.

PRODUCT ENGINEERING · JANUARY 30, 1961

www.dmg-lib.org

page: 2

2. FOR FIXED CYLINDERS (A) coordination of intermediate piston and output-arc positions is determined by the point-position-reduction method. This layout gives one solution, and its application is shown in (B).

with the corresponding angular displacements $\phi_1 = 15$, $\phi_2 = 30$, and $\phi_3 = 45$. The distance s_0 is used as the base line of the isosceles triangle $B_oA_oB_o$, with ϕ_o as the apex angle. With A_o as a turning point, line A_oB_o is swung through an angle ϕ_o, and the line A_oB_o through an angle ϕ_o, in the opposite sense of direction to that in which the link A_oA' turns from its station 1. These rotations move point B_o second to B_{o1}, and B_o to B_{o3}. If point B_o were similarly turned back through the angle ϕ_o, B_o would be found to coincide with point B_o. This coincidence is a result of the construction with the isosceles triangle, and is an example of the so-called point-position-reduction method. The center of the circle, which can be drawn through the three points B_oB_{o1}, and B_{o3}, is the point A', which determines the crank length A_oA'. A circular arc is next described through A' with center at A_o, and it is cut with arcs with centers at B_o, B_{o1} and B_o and made equal to the length B_oA'. This establishes points A'_1, A'_2, and A'_3, which form the equal angles, $A'_1A_oA'_2 = A'_2A_oA'_3 = A'_3A_oA'_4$, and completes the desired coordination of the partial piston strokes with the crank angles ϕ.

Fig 2(B) shows how the four-bar linkage thus developed can be coupled to the lifting linkage A_oACC_o and the fixed cylinder. Once again, the whole four-bar linkage can be swiveled around point A_o to provide any adjustments that may be required by the particular power cylinder that is chosen. When the relative positions are settled, the distance AA' will be established.

Fig 3(A) shows the second method for developing the design of a four-bar linkage actuated by a piston in a fixed cylinder. Again, the isosceles triangle is constructed with partial stroke $s_0 = s_1 - s_2 = 5 - 3 = 5$ in., used as the base in this example. This corresponds to the crank angle $\phi_o = 10°$. With center at this apex point A_o, an arc is drawn to pass through A'_1 and A'_2, and with the angles ϕ_2 and ϕ_{3o}, points A'_2 and A'_3 are located. In the direction of the baseline $A'_1A'_2$ and parallel to it, we now move the point A'_1 through a distance s_0 to A'_{11}, and the point A'_2 through a distance s_0 to A'_{12}; these displacements must be in opposite sense of direction to which piston orbit pin moves when passing through corresponding stations.

Similarly, point A'_3 can be shifted through the distance s_0, and it would coincide with point A'_{13}; this is another example of the so-called point-position-reduction method. The circle which passes through the three points A'_{11}, A'_{12}, and A'_{13}, is drawn, and its center is the point B_o of the linkage. The line of action of the piston is the line through B_o parallel to the base line $A'_1A'_2$ of the isosceles triangle. The succeeding three points B_1, B_2 and B_3 are located by striking off arc from the centers A'_1, A'_2 and A'_3, all having a radius equal to $B_oA'_1$. This means that:

$$B_oB_1 = s_0,\ B_oB_2 = s_0,\ \text{and } B_oB_3 = s_0.$$

In Fig 3(B) the four-bar linkage then developed is shown coupled to linkage A_oACC_o, and again linkage can be adjusted relative to point A_o to establish point A'.

3. ANOTHER SOLUTION (A) by the point-position-reduction method may be desirable for some applications. Resulting linkage is shown in (B).

REPRINTS: The nine articles in this series will be available as a combined reprint for $1.50 after the series is complete. Address: Reader Service Department, Product Engineering, 330 W. 42nd St, New York 36.

PRODUCT ENGINEERING · JANUARY 30, 1961

www.dmg-lib.org

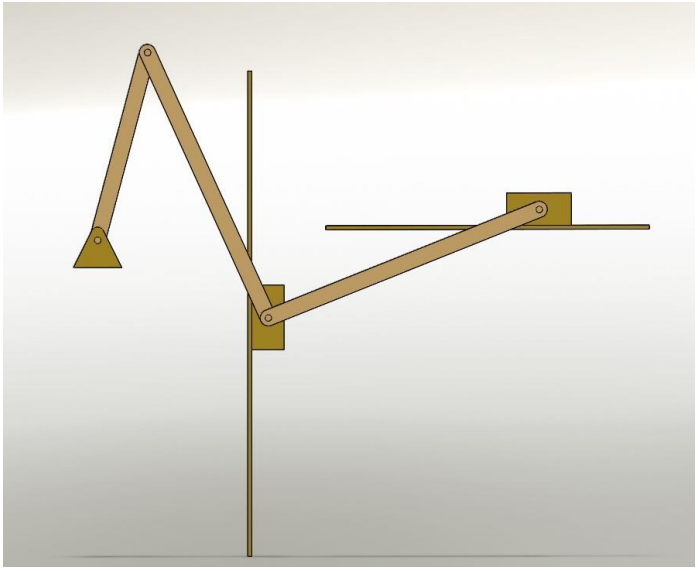
Slika 2.14.: Hainov rad [12]

Ovo su samo neki Hainovi primjeri. Navedeni primjeri ne mogu ni približno prikazati njegovu genijalnost. Da bi se to stvarno prikazalo, ovaj rad bi imao previše stranica.

3. KINEMATSKA ANALIZA RANINSKOG MEHANIZMA

Kinematska analiza se sastoji od izračuna položaja, brzine i ubrzanja bilo koje točke mehanizma. Grafičko - analitičkom metodom plana brzina i ubrzanja u SolidWoks-u je izrađeno rješenje za mehanizam na slici 3.1.

SolidWorks je CAD (computer-aided design) i CAE (computer-aided engineering) program koji se, između ostaloga, najčešće koristi za projektiranje i izgradnju mehaničkih, električnih i softverskih elemenata.



Slika 3.1.: Mehanizam

3.1. GRAFIČKO – ANALITIČKO RJEŠENJE MEHANIZMA

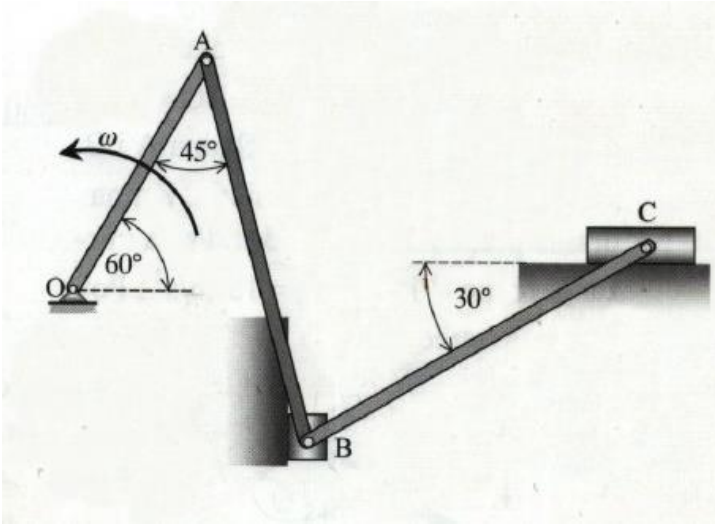
Za mehanizam na slici 3.2 ćemo odrediti brzine i ubrzanja za svaki štap.

kutna brzina ručice $\overline{OA}$ je konstantna i iznosi 10 rad/s

$\overline{OA} = \overline{EF} = 0{,}4$ m

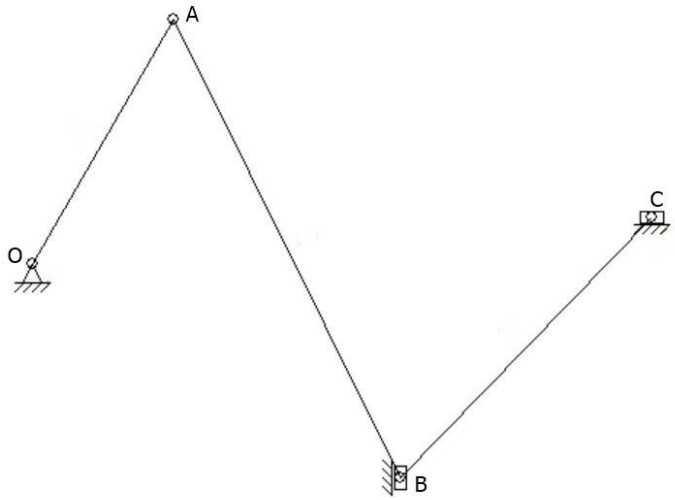
$\overline{BC} = 0{,}6$ m

$\overline{AE} = \overline{EB} = 0{,}3$ m



Slika 3.2.: Zadani mehanizam

3.1.1. Plan položaja



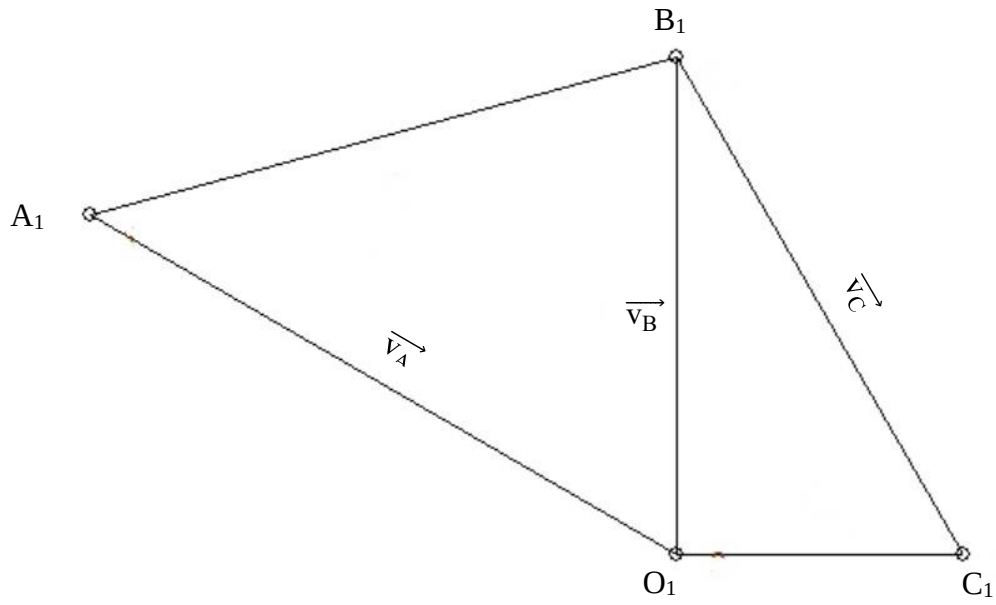
Slika 3.3.: Plan položaja

Najprije je potrebno nacrtati plan položaja prema kojemu se kasnije lakše crtaju planovi brzina i ubrzanja. Plan položaja na slici 3.3. je konstruirani u programu SAM u kojem će se kasnije također napraviti kinematička analiza ovog mehanizma.

3.1.2. Plan brzina

Prije crtanja plana brzina odabire se adekvatno mjerilo u kojem će se isti crtati. Za ovaj primjer je odabrano mjerilo 1 m/s = 100 mm jer je plan brzina konstruirani u SolidWorks-u.

Napomena: Slika 3.4. nije u mjerilu.



Slika 3.4.: Plan brzina

$$\overrightarrow{v_A} = \cancel{\overrightarrow{v_O}} + \overrightarrow{v_{A/0}}$$

$$\overrightarrow{v_A} = \overrightarrow{v_{A/O}} = \omega \cdot \overline{AO} = 10 \cdot 0{,}4$$

$$\overrightarrow{v_A} = 4\ \mathrm{m/s}$$

- $\overrightarrow{v_O}$ iznosi 0 jer u točki O zbog uklještenja nema brzine
- izračunata brzina $\overrightarrow{v_A}$ se crta okomito na štap OA iz plana položaja
- brzina $\overrightarrow{v_A}$ se crta kao dužina $\overline{O_1\,A_1}$ duljine 400 mm

$$\overrightarrow{v_B} = \overrightarrow{v_A} + \overrightarrow{v_{B/A}}$$

- u točki B se nalazi klizač koji se kreće vertikalno, što znači da će se brzina $\overrightarrow{v_B}$ crtati vertikalno iz točke O_1
- $\overrightarrow{v_{B/A}}$ je okomita na štap AB

- ne znamo točnu duljinu ni jedne od ovih brzina, ali znamo njihove smjerove, pa nacrtamo polupravce (jedan vertikalan iz točke O_1, a drugi iz točke A_1 okomit na štap AB)
- na sjecištu tih polupravaca se nalazi točka B_1
- mjerenjem dužine $\overline{O_1\,B_1}$ dobijemo iznos brzine $\overrightarrow{v_B}$
- mjerenjem dužine $\overline{A_1\,B_1}$ dobijemo iznos brzine $\overrightarrow{v_{B/A}}$

$\overrightarrow{v_B} = 292{,}82\ \mathrm{mm} = 2{,}928\ \mathrm{m/s}$

$\overrightarrow{v_{B/A}} = 358{,}63\ \mathrm{mm} = 3{,}586\ \mathrm{m/s}$

$\overrightarrow{v_C} = \overrightarrow{v_B} + \overrightarrow{v_{C/B}}$

- u točki C se nalazi klizač koji se kreće horizontalno, što znači da će se brzina $\overrightarrow{v_C}$ crtati horizontalno iz točke O_1
- $\overrightarrow{v_{C/B}}$ je okomita na štap BC
- ne znamo točnu duljinu ni jedne od ovih brzina, ali znamo njihove smjerove, pa nacrtamo polupravce (jedan horizontalan iz točke O_1, a drugi iz točke B_1 okomit na štap BC)
- na sjecištu tih polupravaca se nalazi točka C_1
- mjerenjem duljine dužine $\overline{O_1\,C_1}$ dobijemo iznos brzine $\overrightarrow{v_C}$
- mjerenjem duljine dužine $\overline{B_1\,C_1}$ dobijemo iznos brzine $\overrightarrow{v_{C/B}}$

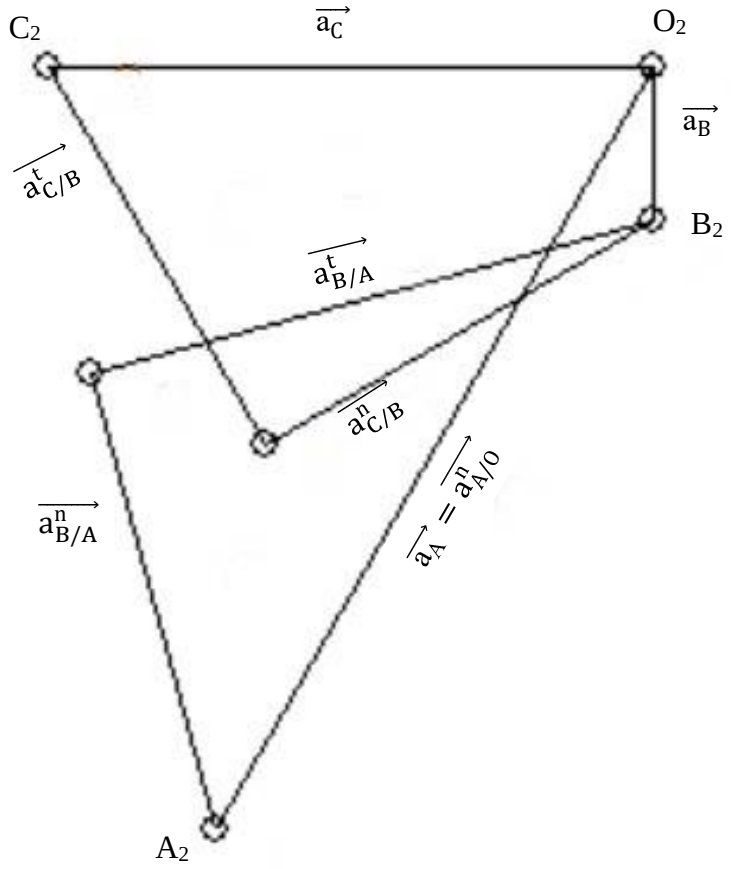
$\overrightarrow{v_C} = 169{,}06\ \mathrm{mm} = 1{,}69\ \mathrm{m/s}$

$\overrightarrow{v_{C/B}} = 338{,}12\ \mathrm{mm} = 3{,}381\ \mathrm{m/s}$

3.1.3. Plan ubrzanja

Prije crtanja plana ubrzanja odabire se adekvatno mjerilo u kojem će se isti crtati. Za ovaj primjer je odabrano mjerilo 10 m/s^2 = 100 mm jer je plan brzina konstruirani u SolidWorks-u.

Napomena: Slika 3.5. nije u mjerilu.



Slika 3.5.: Plan ubrzanja

$$\overrightarrow{a_A} = \cancel{\overrightarrow{a_O}} + \overrightarrow{a^n_{A/O}} + \cancel{\overrightarrow{a^t_{A/O}}}$$

$$\overrightarrow{a_A} = \overrightarrow{a^n_{A/O}} = \frac{\overrightarrow{v_{A/O}}^2}{\overline{AO}} = \frac{4^2}{0{,}4} = 40\ \mathrm{m/s^2}$$

- točka O je uklještena, pa su iznosi $\overrightarrow{a_O}$ i $\overrightarrow{a^t_{A/O}}$ jednaki nuli
- normalna komponenta ubrzanja se crta paralelno sa štapom, što znači da se ubrzanje $\overrightarrow{a_A}$ crta iz točke O_2 paralelno štapu OA jer je jednako normalnoj komponenti $\overrightarrow{a^n_{A/O}}$ kao dužina O_2A_2 duljine 400 mm

$$\overrightarrow{a_B} = \overrightarrow{a_A} + \overrightarrow{a^n_{B/A}} + \overrightarrow{a^t_{B/A}}$$

$$\overrightarrow{a^n_{B/A}} = \frac{\overrightarrow{v_{B/A}}^2}{\overline{AB}} = \frac{3{,}586^2}{0{,}6} = 21{,}432\ \mathrm{m/s^2}$$

- normalna komponenta ubrzanja $\overrightarrow{a^n_{B/A}}$ se crta paralelno sa štapom AB iz točke A_2 duljine 214,32 mm
- u točki B se nalazi klizač koji se kreće vertikalno, što znači da će se ubrzanje $\overrightarrow{a_B}$, isto kao i brzina, crtati vertikalno iz točke O_2
- tangencijalna komponenta ubrzanja $\overrightarrow{a^t_{B/A}}$ je okomita na štap AB i na normalnu komponentu $\overrightarrow{a^n_{B/A}}$
- ne znamo točnu duljinu ubrzanja $\overrightarrow{a_B}$, ni tangencijalne komponente $\overrightarrow{a^t_{B/A}}$, ali znamo njihove smjerove, pa nacrtamo polupravce (jedan vertikalan iz točke O_2, a drugi iz točke završetka normalne komponente ubrzanja $\overrightarrow{a^n_{B/A}}$, okomit na istu)
- na sjecištu tih polupravaca se nalazi točka B_2
- mjerenjem duljine dužine $\overline{O_2\,B_2}$ dobijemo iznos ubrzanja $\overrightarrow{a_B}$
- mjerenjem duljine dužine od kraja normalne komponente ubrzanja $\overrightarrow{a^n_{B/A}}$ do točke B_2 dobijemo iznos brzine $\overrightarrow{a^t_{B/A}}$

$\overrightarrow{a_B} = 69{,}2\ \text{mm} = 6{,}92\ \text{m/s}^2$

$\overrightarrow{a^t_{B/A}} = 264{,}93\ \text{mm} = 26{,}493\ \text{m/s}^2$

$\overrightarrow{a_C} = \overrightarrow{a_B} + \overrightarrow{a^n_{C/B}} + \overrightarrow{a^t_{C/B}}$

$\overrightarrow{a^n_{C/B}} = \dfrac{\overrightarrow{v_{C/B}}^2}{\overline{BC}} = \dfrac{3{,}381^2}{0{,}6} = 19{,}052\ \text{m/s}^2$

- normalna komponenta ubrzanja $\overrightarrow{a^n_{C/B}}$ se crta paralelno sa štapom BC iz točke B_2 duljine 190,52 mm
- u točki C se nalazi klizač koji se kreće horizontalno, što znači da će se ubrzanje $\overrightarrow{a_C}$, isko kao i brzina, crtati horizontalno iz točke O_2
- tangencijalna komponenta ubrzanja $\overrightarrow{a^t_{C/B}}$ je okomita na štap BC i na normalnu komponentu $\overrightarrow{a^n_{C/B}}$
- ne znamo točnu duljinu ni ubrzanja $\overrightarrow{a_C}$, ni tangencijalne komponente $\overrightarrow{a^t_{C/B}}$, ali znamo njihove smjerove, pa nacrtamo polupravce (jedan horizontalan iz točke O_2, a drugi iz točke završetka normalne komponente ubrzanja $\overrightarrow{a^n_{C/B}}$, okomit na istu)
- na sjecištu tih polupravaca se nalazi točka C_2

- mjerenjem duljine dužine $\overline{O_2\,C_2}$ dobijemo iznos ubrzanja $\overrightarrow{a_C}$
- mjerenjem duljine dužine od kraja normalne komponente ubrzanja $\overrightarrow{a^n_{C/B}}$ do točke C_2 dobijemo iznos brzine $\overrightarrow{a^t_{C/B}}$

$\overrightarrow{a_C} = 275{,}63\ \mathrm{mm} = 27{,}563\ \mathrm{m/s^2}$

$\overrightarrow{a^t_{C/B}} = 197{,}74\ \mathrm{mm} = 19{,}774\ \mathrm{m/s^2}$

4. DIGITALNI ALATI U KINEMATSKOJ ANALIZI

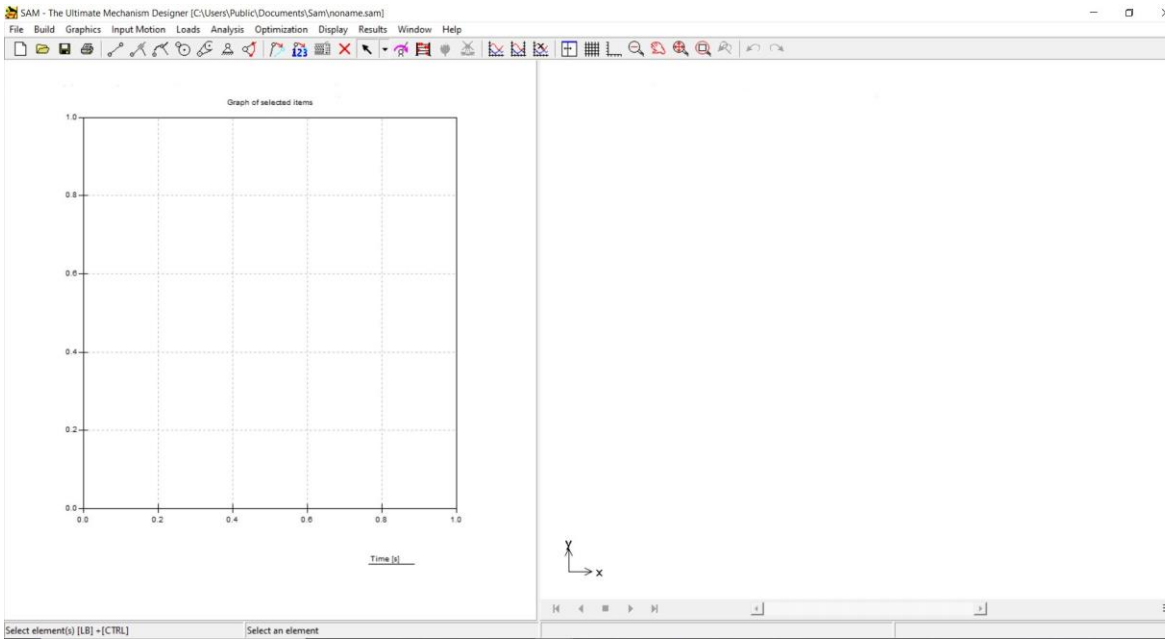
Postoje razni softverski programi koji omogućuju stvaranje i analizu mehanizama, kao i vrlo detaljnu analizu kretanja svih članova u karakterističnim točkama, pojedinačnim položajima članova mehanizma ili za ukupne cikluse kretanja. Neki od njih su: SolidWorks, MechDesigner, SAM - the ultimate mechanism designer, Linkage, Pro / Engineer i drugi. U ovom radu koristit će se samo SAM – the ultimate mechanism designer.

4.1. SAM - THE ULTIMATE MECHANISM DESIGNER

SAM (Sinteza i analiza mehanizama) interaktivni je računalni softverski paket za dizajn, analizu (kretanje i sila) i optimizaciju proizvoljnih planarnih mehanizama. Mehanizmi se mogu stvoriti pomoću čarobnjaka za projektiranje ili se mogu sastaviti iz osnovnih komponenti uključujući grede, klizače, zupčanike, pojaseve, opruge, prigušivače i elemente trenja. SAM integrira predobradu, numeričku analizu i naknadnu obradu, poput animacije i xy-plotova, u okruženju koje se jednostavno koristi nudeći padajuće izbornike, podršku miša i pomoć. [27]

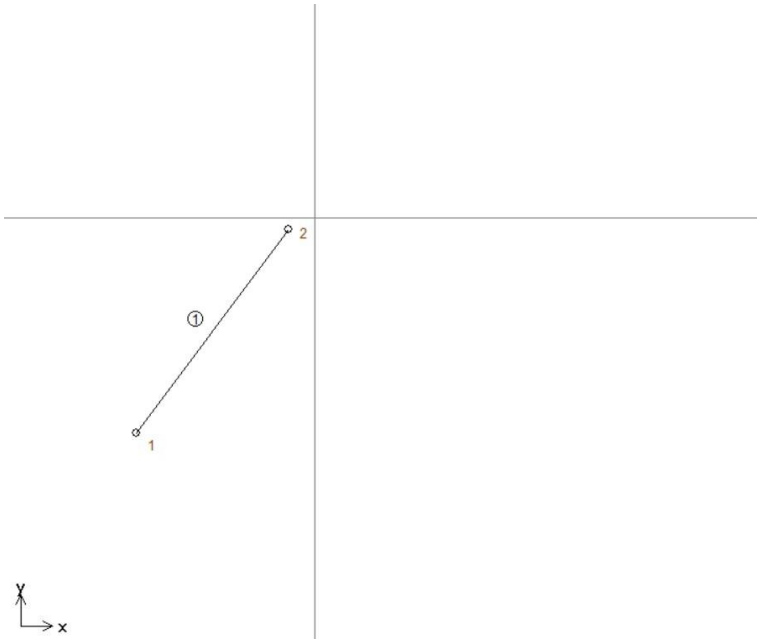
4.2. CRTANJE MEHANIZMA

Otvaranjem programa otvara se platforma za rad prikazana na slici 4.1. S desne strane se crta mehanizam, a na lijevoj strani je područje gdje se prikazuje kinematski dijagram za odabrani/e element/e.



Slika 4.1.: Sučelje

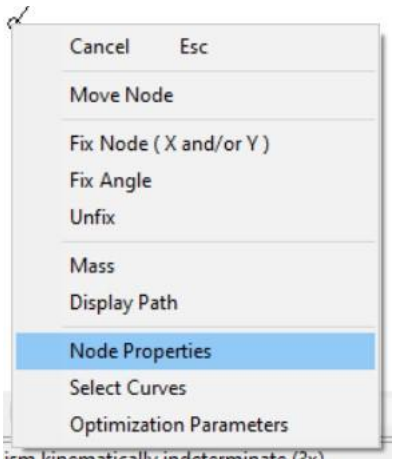
Na traci s ikonama odaberemo naredbu *Create beam element* kojom ćemo krenuti s crtanjem mehanizma. Na desnoj strani sučelja povučemo dužinu koja će predstavljati štap OA.



Slika 4.2.: Crtanje mehanizma u SAM-u – 1. korak

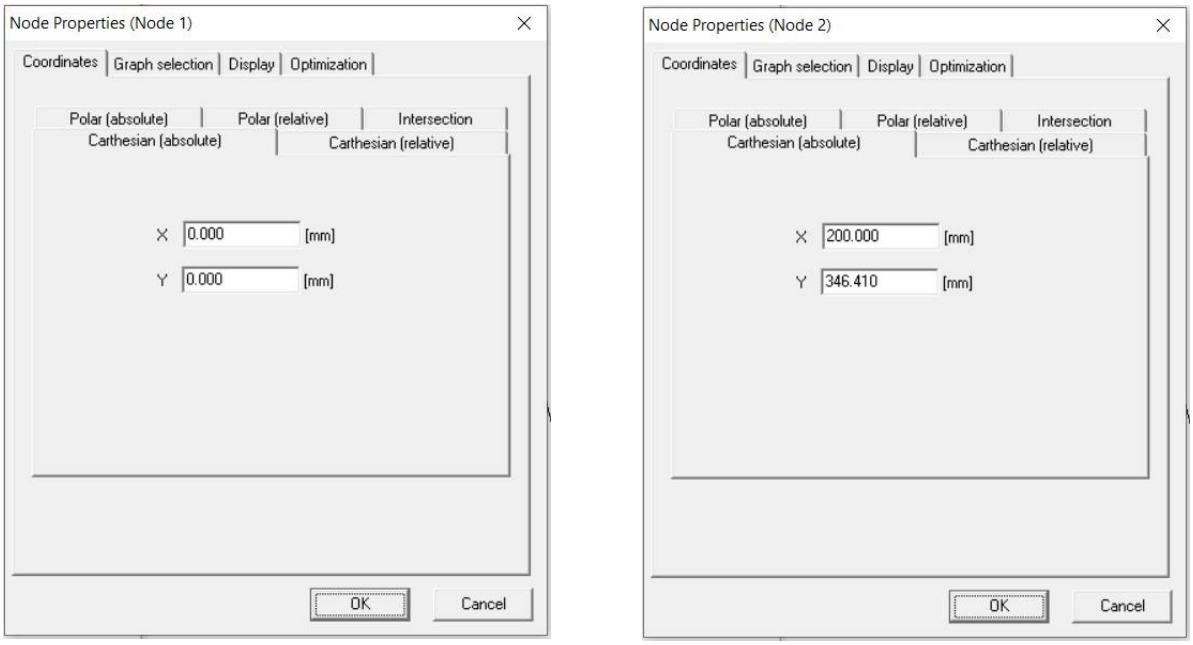
Odmah nakon toga možemo postaviti koordinate točaka koje smo očitali s mehanizma u SolidWorksu. Koordinate se mogu i računski odrediti, ali samo očitavanje u SolidWorksu je

puno brže i jednostavnije. Točne koordinate se mogu postaviti i nakon crtanja skice. Odaberemo točku za koju želimo postaviti koordinatu, desnim klikom kliknemo na nju i odaberemo *Node Properties*.



Slika 4.3.: Padajući izbornik – Node Properties

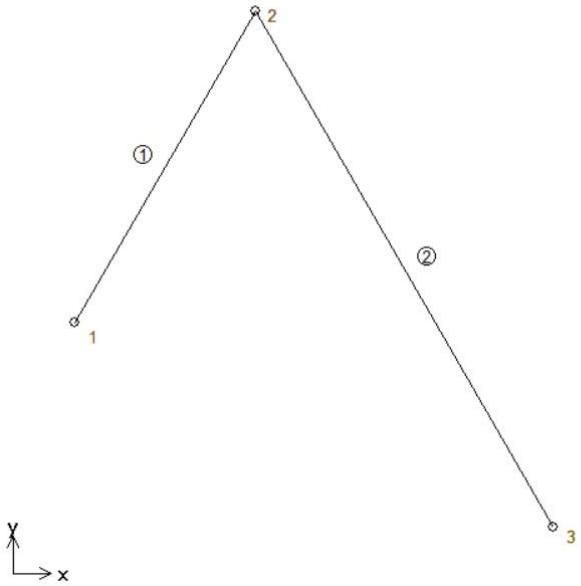
Koordinate prve točke, gdje ćemo kasnije dodati uklještenje su 0, 0, pa u prozor koji se otvori upišemo da je x = 0 i y = 0. Koordinate druge točke su 200, 346.41. Koristimo Katezijev koordinatni sustav.



a) b)

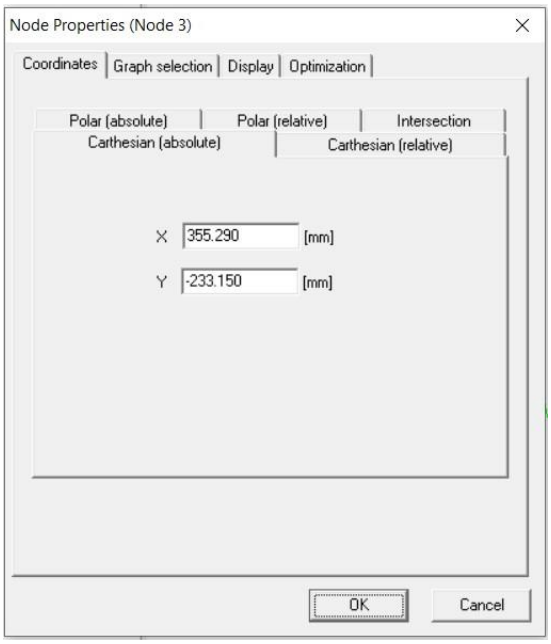
Slika 4.4.: Node Properties – a) točka 1, b) točka 2

Nakon što smo definirali prvu i drugu točku, ponovno odaberemo *Create beam element* i povučemo drugu dužinu koja će predstavljati štap AB.



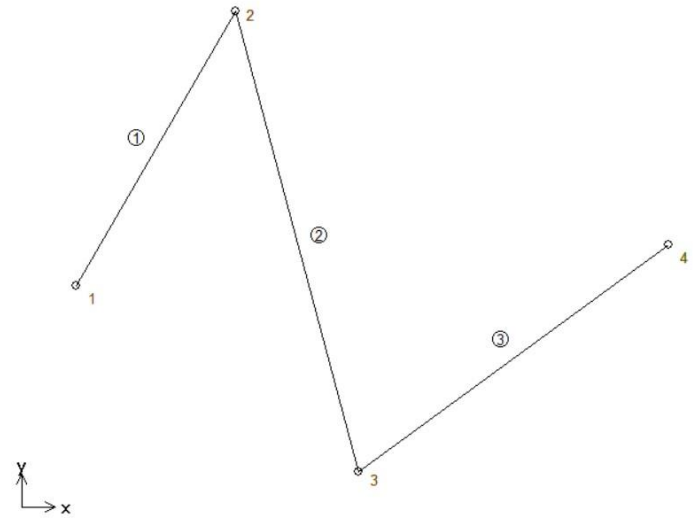
Slika 4.5.: Crtanje mehanizma u SAM-u – 2. korak

Postavimo koordinate točke 3 koje iznose 355.29, - 233.15. Y koordinata je negativna jer se točka 3 nalazi ispod točke 1.

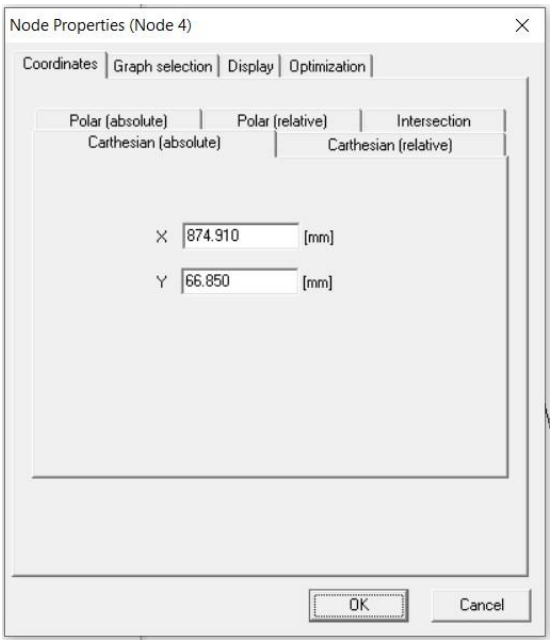


Slika 4.6.: Node Properties – točka 3

Isto napravimo i za dužinu koja će predstavljati štap BC. Koordinate točke 4 su 874.91, 66.85.



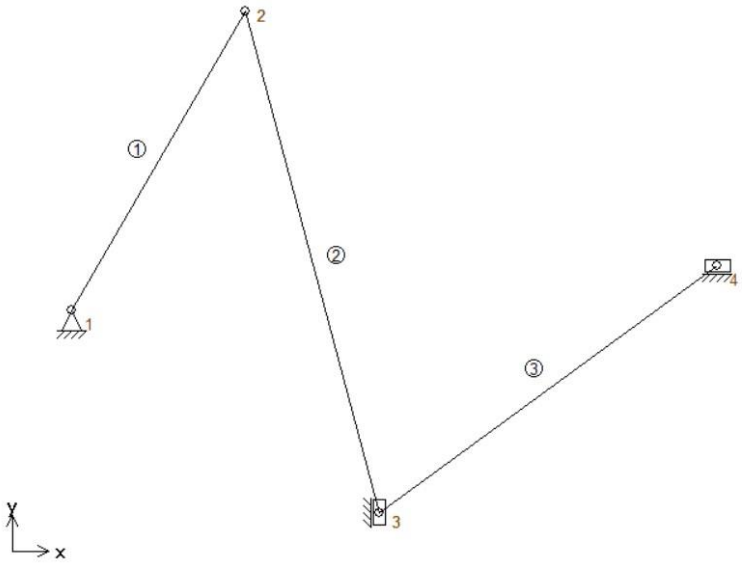
a)



b)

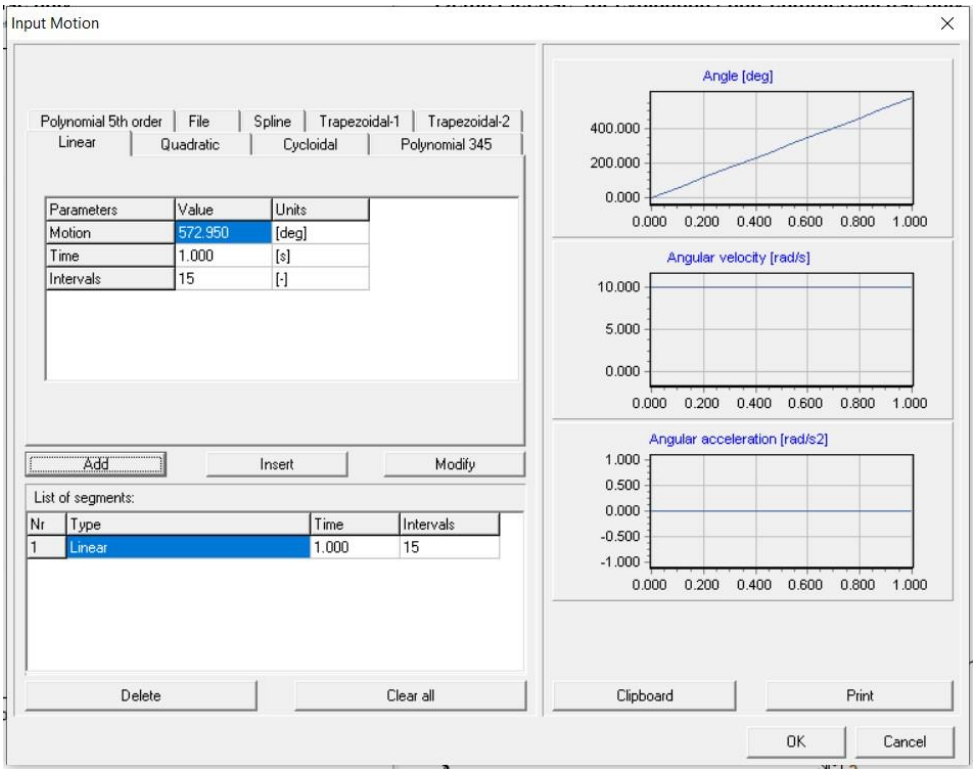
Slika 4.7.: a) Crtanje u SAM-u korak 3, b) Node Properties točka 3

Nakon što smo to nacrtali dodati ćemo učvršćenje i klizače pritiskom na ikonu *Fix node in X- and/or Y-direction* . Postavimo učvršćenje na točku 1, okomiti klizač na točku 3 i horizontalni klizač na točku 4.



Slika 4.8.: Crtanje mehanizma u SAM-u – učvršćenja i klizači

Da bi se analiza mogla napraviti, treba zadati pokret. U ovom mehanizmu dodati ćemo pokret na učvršćenje kod točke 1. Odaberemo naredbu *Angle Input Motion* na traci s ikonama i kliknemo na točku 1. Otvara se novi prozor koji je prikazani na slici 4.9.

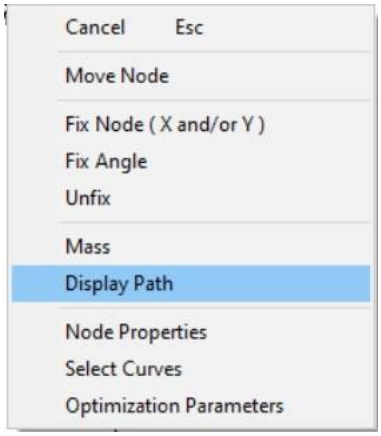


Slika 4.9.: Angle Input Motion

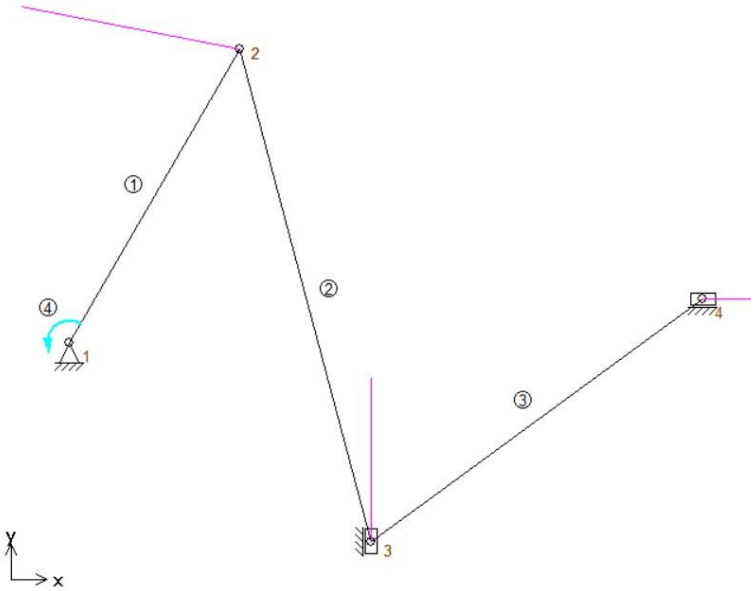
Kad se prozor otvori pod poljem *Motion* je 360 deg, ali kod ovog mehanizma želimo kutnu brzinu koja iznosi 10 rad/s. Kad to pretvorimo u deg/s dobivamo 572,950 deg/s i taj iznos upisujemo umjesto 360. Pod *Intervals* je broj 15 što znači da će se izvršiti 15 mjerenja. Klikom na *Add* dodajemo to gibanje i s *Ok* zatvaramo prozor. Sada možemo pokrenuti mehanizam klikom na *Start/Stop Animation* .

4.3. KINEMATIČKA ANALIZA MEHANIZMA U SAM-u

Kad je animacija nacrtana i pokrenuta, možemo prikazati putanju svake točke i to na način da na padajućem izborniku, nakon desnog klika na točku, odaberemo *Display Path*.

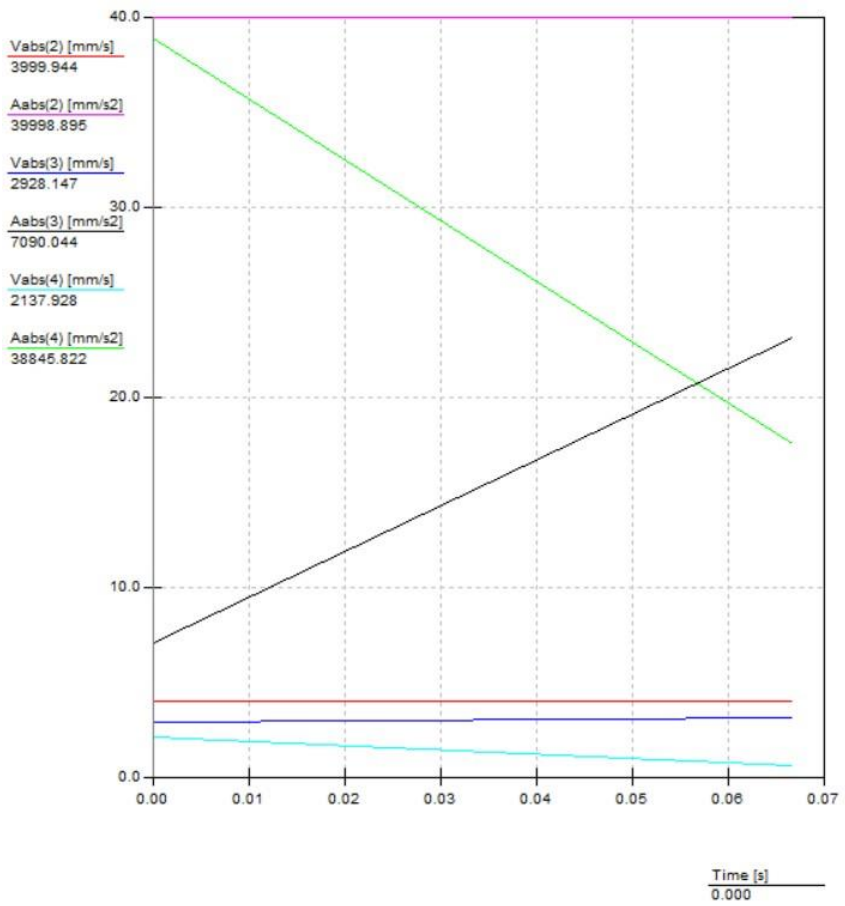


Slika 4.10.: Padajući izbornik – Display Path



Slika 4.11.: Mehanizam s putanjama točaka

Da bi provjerili brzine i ubrzanja točaka odabiremo *Start Analysis* nakon čega se otvara prozor gdje odabiremo što želimo analizirati – točku ili element. Mi želimo analizirati točke pa odabiremo *Node Data*. Nakon toga odaberemo točku za koju želimo analizu. Moguće je odabrati i više točaka. Na kraju se odaberu željene veličine. U našem slučaju to su apsolutna brzina i ubrzanje. Ako je sve ispravno napravljeno s lijeve strane se prikazuje dijagram s brzinama i ubrzanjima pojedenih točaka.



Slika 4.12.: Dijagram

Sve te vrijednosti moguće je izvesti u .pdf datoteku klikom na *Results* > *Export*. Izvezeni podatci su izraženi u mm/s ili mm/s^2, pa ih treba pomnožiti s 1000 da bi mjerne jedinice bile jednake kao i one u kojima su ranije u radu izražene izračunate vrijednosti.

Tablica 1. Izračunate vrijednosti brzine i ubrzanja

$\overrightarrow{v_a}$	$\overrightarrow{a_a}$	$\overrightarrow{v_b}$	$\overrightarrow{a_b}$	$\overrightarrow{v_C}$	$\overrightarrow{a_C}$
[m/s]	[m/s^2]	[m/s]	[m/s^2]	[m/s]	[m/s^2]
4	40	2,928	6,92	1,69	27,563

Tablica 2. Vrijednosti brzina i ubrzanja - SAM

Nr	Time	Vabs(2)	Aabs(2)	Vabs(3)	Aabs(3)	Vabs(4)	Aabs(4)
[-]	[s]	[mm/s]	[mm/s2]	[mm/s]	[mm/s2]	[mm/s]	[mm/s2]
0	0.000	3999.944	39998.895	2928.147	7090.044	1690.551	26094.110
1	0.067	3999.944	39998.895	3174.729	23150.798	574.403	13440.947
2	0.067	3999.944	39998.895	3174.729	23150.798	574.403	13440.947
3	0.067	3999.944	39998.895	3174.729	23150.798	574.403	13440.947
4	0.067	3999.944	39998.895	3174.729	23150.798	574.403	13440.947
5	0.067	3999.944	39998.895	3174.729	23150.798	574.403	13440.947
6	0.067	3999.944	39998.895	3174.729	23150.798	574.403	13440.947
7	0.067	3999.944	39998.895	3174.729	23150.798	574.403	13440.947
8	0.067	3999.944	39998.895	3174.729	23150.798	574.403	13440.947
9	0.067	3999.944	39998.895	3174.729	23150.798	574.403	13440.947
10	0.067	3999.944	39998.895	3174.729	23150.798	574.403	13440.947
11	0.067	3999.944	39998.895	3174.729	23150.798	574.403	13440.947
12	0.067	3999.944	39998.895	3174.729	23150.798	574.403	13440.947
13	0.067	3999.944	39998.895	3174.729	23150.798	574.403	13440.947
14	0.067	3999.944	39998.895	3174.729	23150.798	574.403	13440.947
15	0.067	3999.944	39998.895	3174.729	23150.798	574.403	13440.947

Nakon uspoređivanja rezultata vidimo da vrijednosti zanemarivo odstupaju, a razlog tome je što SAM izbacuje više decimala.

5. SLOŽENO GIBANJE

Za razliku od ravninskog gibanja, gdje se čestica ili tijelo giba u odnosu na jedan referentni sustav, u mehanici je neophodno da se proučava i gibanje čestice ili tijela u odnosu na dva sustava istodobno: jedan pomični, a drugi nepomični. U stvarnome životu postoji mnoštvo takvih primjera: pokretni dijelovi strojeva na brodu, čestica vode na lopatici turbine, putnik koji hoda u vlaku itd. Takvo gibanje krutog tijela ili čestice s obzirom na neko drugo referentno tijelo koje se giba s obzirom na nepomični sustav, se naziva složeno gibanje. [13]

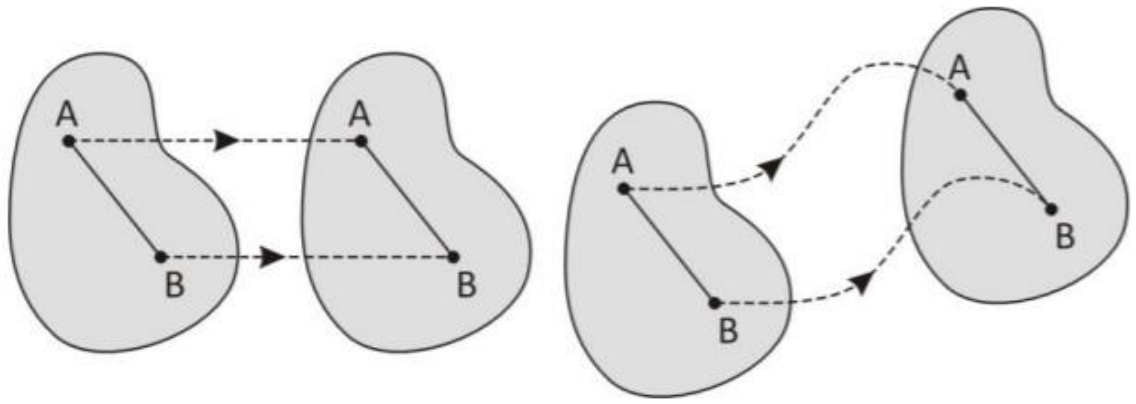
5.1. KRUTA TIJELA NASUPROT ČESTICA

Kruta tijela su idealizirana tijela kojima su volumen i oblik nepromjenjivi. Pod utjecajem vanjskih sila moguća je jedino promjena gibanja, a razmak između čestica ostaje isti. U stvarnosti ne postoje kruta tijela, ali stvarna tijela često imaju dovoljno male promjene oblika da se one mogu zanemariti, pa se takva tijela proučavaju kao kruta. [15]

Kruta tijela su fizički predmeti koji su raširenu u prostoru. Čestice su točke masa. Odnosno, čestice su objekti čije fizičko širenje u prostoru nije bitno u analizi. Veličina objekta također često nije bitna. Na primjer, mehanika planeta Sunčevog sustava koji se okreću oko Sunca može se pojednostaviti tako da se za analizu pretpostavi da su mase svih planeta, kao i Sunca, koncentrirane u jednoj točki, iako su i planeti i Sunce prilično velika tijela. [14]

5.2. PLANARNO GIBANJE

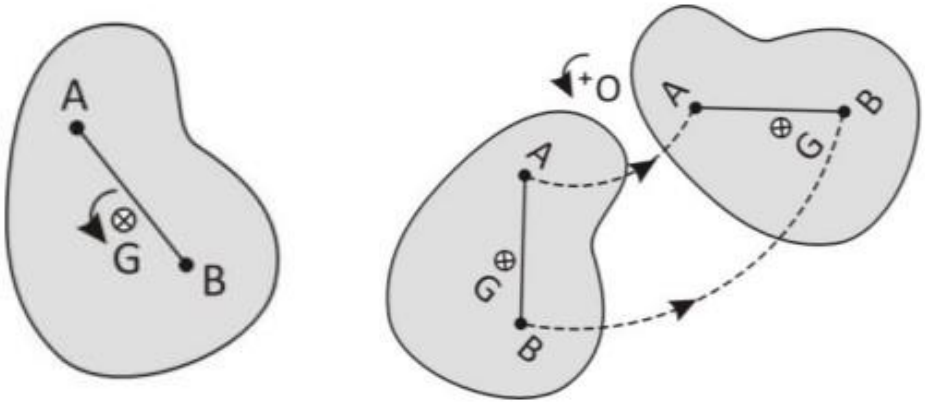
Kruto tijelo se može kretati u dvije osnovne vrste gibanja – translatorno (gibanje bez rotacije) i rotaciono. Translacija se može odvijati po pravcu ili po zakrivljenoj putanji. Translaciju karakterizira to što putanja po kojoj se tijelo kreće ne mijenja svoju orijentaciju prilikom izvođenja gibanja. Na slici 5.1. prikazana su dva slučaja translacije – pravocrtno (po pravcu) i krivocrtno. U oba slučaja linija između točaka A i B ostaje usmjerena u smjeru u kojem se tijelo kreće. [14]



b) Pravocrtna translacija *a) Krivocrtna translacija*

Slika 5.1.: Translacija [14]

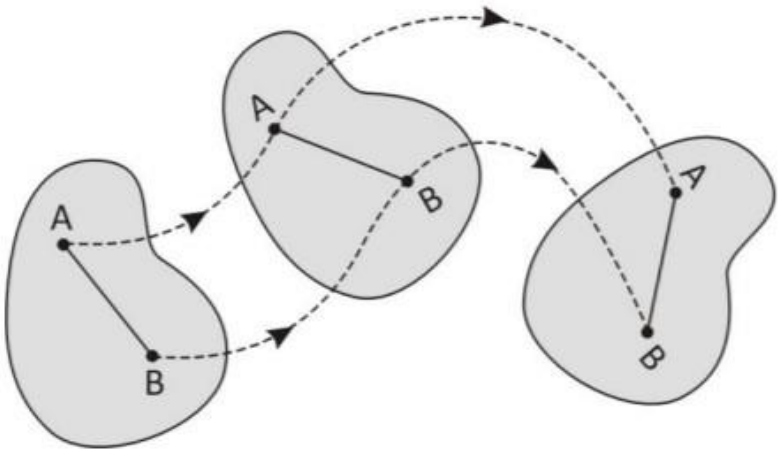
Druga vrsta gibanja je rotacija. Čista rotacija je rotacija oko centra mase tijela. Centar mase je nepomičan, pa se ni tijelo ne pomiče. Rotacija se također može odvijati oko fiksne točke koja nije središte mase tijela. [14]



a) *Čista rotacija* b) *Rotacija oko fiksne točke*

Slika 5.2.: Rotacija [14]

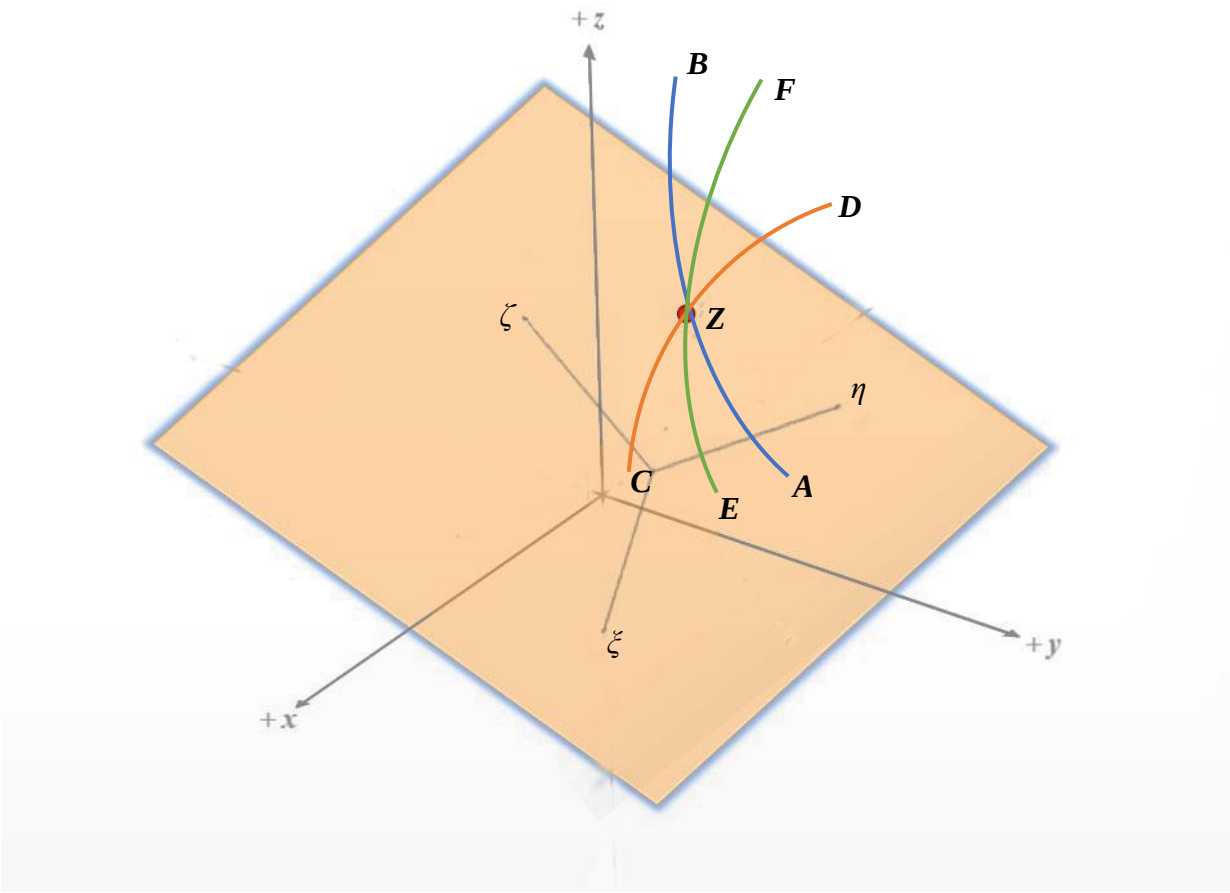
Tijelo također može biti podvrgnuto kombinaciji translacije i rotacije. Gibanja se događaju istovremeno i bez fiksne osi rotacije. To se naziva složenim gibanjem. [14]



Slika 5.3.: Složeno gibanje [14]

5.3. PRIMJER SLOŽENOG GIBANJA

Kao najjednostavniji primjer složenoga gibanja razmotrit ćemo gibanje čovjeka u vlaku. U ovom slučaju, čovjek predstavlja česticu *Z* koja se giba po vlaku, u ovom slučaju po pomičnom koordinatnom sustavu ξ, η, ζ, a čovjek se s vlakom giba po tračnicama, po nepomičnom koordinatnom sustavu *x*, *y*, *z*.



Slika 5.4.: Složeno gibanje

Složeno gibanje čestice *Z* ili točke tijela *Z* nastaje kada se točka giba s obzirom na neki pomični (relativni) koordinatni sustav ξ, η, ζ koji se s obzirom na nepomični (apsolutni) *x*, *y*, *z* također giba.

Relativno gibanje točke *Z* u odnosu na ξ, η, ζ (gibanje čovjeka u odnosu na vlak) određeno je promjenom koordinata položaja točke *Z* u tom sustavu. Putanja *AB* koju točka *Z* prilikom relativnog gibanja opisuje naziva se putanja relativnog gibanja. Brzina čestice u odnosu na

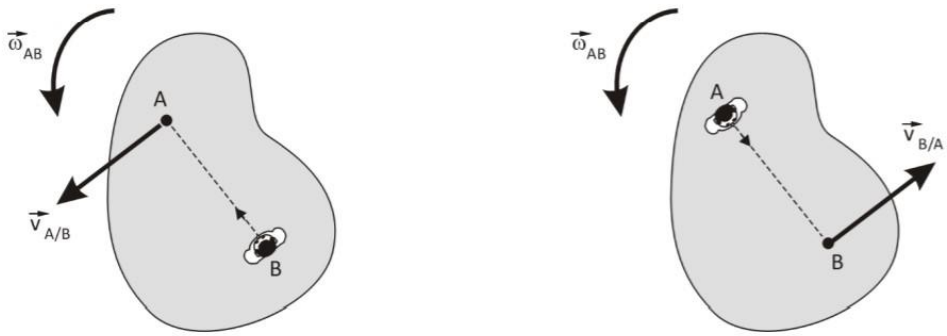
pokretni koordinatni sustav se naziva relativna brzina $\overrightarrow{v_r}$, a promjernu relativne brzine karakterizira realtivno ubrzanje $\overrightarrow{a_r}$.

Prijenosno gibanje je gibanje pokretnog koordinatnog sustava zajedno sa svim točkama tijela za koje je vezan, a krivulja *CD* predstavlja putanju prijenosnog gibanja. Kad bi čestica *Z* u promatranom trenutku bila čvrsto vezana za tijelo koje izvodi prijenosno gibanje, ta čestica bi imala prijenosnu brzinu $\overrightarrow{v_p}$ koju bi karakterizirano prijenosno ubrzanje $\overrightarrow{a_p}$. Dakle, kretanje vlaka u odnosu na Zemlju predstavlja prijenosno gibanje.

Apsolutno gibanje je gibanje koje u odnosu na nepomični sustav vrši čestica *Z*, a krivulja EF je putanja apsolutnog gibanja. Brzina pri tom gibanju se naziva apsolutna brzina $\overrightarrow{v_a}$ koju karakterizira apsolutno ubrzanje $\overrightarrow{a_a}$. Apsolutno gibanje je gibanje čovjeka u odnosu na Zemlju. [13]

5.4. RELATIVNO GIBANJE

Gibanje krutog tijela se proučava s gledišta promatrača koji iz točke na tijelu promatra gibanje druge točke na istom tijelu. Ako na slici 5.5. zamislimo promatrača na točki B kako promatra točku A, ona se ne približava točki B, a niti se udaljava od točke B jer je tijelo kruto. Promatrač nije svjestan vlastitog pokreta, tj. sve točke na tijelu imaju jednako kretanje. Dakle ni promatrač na točki B promatrajući točku A nije svjestan pokreta što znači da je relativno gibanje između točke A i točke B jednako nuli.



Slika 5.5.: Relativno gibanje [14]

Jedino gibanje točke A koje promatrač s točke B vidi je rotacija. Kako promatrač nije svjestan vlastitoga gibanja, čini mu se da se tijelo okreće oko njegove promatračke točke. Svaka točka na tijelu mu izgleda kao da se okreće oko točke B, dok se promatraču na točki A čini da se svaka točka na tijelu okreće oko točke A. Nijedna točka na krutom tijelu se ne može pomaknuti, ni doći do promatrača, pa promatrač vidi bočno kretanje, ulijevo ili udesno. To je rezultat rotacije tijela. Okretanje u smjeru suprotnom od kazaljke na satu izgleda kao gibanje ulijevo, a u smjeru kazaljke na satu kao gibanje udesno. [14]

$$\overrightarrow{v_{A/B}} = \overrightarrow{\omega} \cdot \overrightarrow{r_{A/B}}$$

Gdje je:

- $\overrightarrow{v_{A/B}}$ - vektor brzine točke A u odnosu na točku B
- $\overrightarrow{\omega}$ - kutna brzina tijela
- $\overrightarrow{r_{A/B}}$ - udaljenost između točaka A i B

Relativno gibanje u stvarnom životu bi mogli opisati na primjeru frizbija. Kad frizbi dodamo drugoj osobi on vrši složeno gibanje jer se giba po nekoj putanji, a u isto vrijeme se rotira. Zamislimo li da se nalazimo na sredini tog frizbija u gibanju činilo bi nam se da se on ne giba nego da svijet rotira oko nas.

5.5. CORIOLISOVO UBRZANJE

Brzina točke koja se giba po putanji je njezina vektorska veličina koja ima vrijednost i smjer. Vektor brzine se s vremenom može mijenjati zbog ubrzanja koje može biti tangencijalno, radijalno ili Coriolisovo. Coriolisovo ubrzanje proizvod je linearnih i rotacijskih brzina. Obično se u obzir uzima vrijednost Coriolisovog ubrzanja u stanju kada se objekt kreće i rotira promjenjivom brzinom. Veličine ubrzanja variraju ovisno o uvjetima kretanja objekta. [17]

Coriolisovo ubrzanje nastaje kao rezultat djelovanja Coriolisove sile. Ono se pojavljuje kod tijela koje se giba u ne-inercijalnom rotirajućem sustavu. Ne-inercijalni sustavi se pomiču s ubrzanjem ili rotiraju u prostoru, pa bi razmatrajući ovu temu našu planetu Zemlju mogli uvrstiti u ne-inercijalni sustav, iako se u većini fizičkih problema ona svrstava pod inercijalni referentni sustav zbog vrlo niske kutne brzine. [18]

Zemlja se okreće oko svoje osi od zapada prema istoku konstantnom brzinom. Zbog svojega oblika, očito je da se njen širi dio oko Ekvatora rotira brže nego područje oko polova. Dakle, brzina rotiranja u Brazilu je puno veća od brzine na Sjevernom polu. Zamislimo da stojimo na Ekvatoru, a točno ravno od nas se nalazi prijatelj u Hrvatskoj kojemu želimo baciti loptu. Bacimo li loptu ravno po liniji, ona neće sletjeti točno ravno do prijatelja, nego desno od njega jer on rotira sporije od nas. Čeka li nas ipak prijatelj s druge strane Ekvatora, recimo u Angoli, lopta također neće stići do njega po ravnoj crti nego lijevo od njega. To je rezultat Coriolisove sile. Coriolisova sila na Ekvatoru je jednaka nuli. [19]

Coriolisova sila definira se sljedećim izrazom:

$$F = 2 \cdot m \cdot (\omega \cdot v)$$

gdje je:

- m – masa tijela
- ω – kutna brzina sustava
- v – linearna brzina.

Coriolisovo ubrzanje definira se sljedećim izrazom:

$$a = 2 \cdot (\omega \cdot v)$$

gdje je:

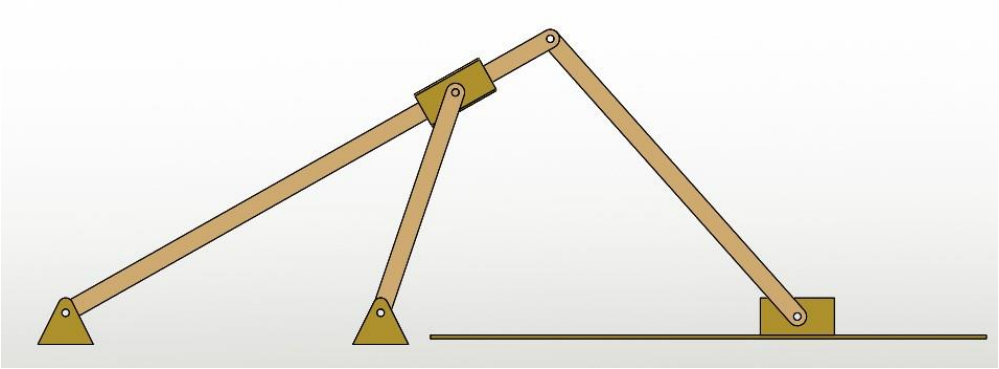
- ω – kutna brzina sustava
- v – linearna brzina. [18]

Coriolisovo ubrzanje će iščeznuti:

- kada nema rotacije pomičnog koordinatnog sustava, tj. postoji samo translacija u odnosu na nepomični koordinatni sustav.
- kada nema relativnog gibanja pomičnog koordinatnog sustava u odnosu na nepomični koordinatni sustav. To onda nije ni složeno gibanje.
- kada su pravci vektora kutne brzine prijenosnog gibanja i relativne brzine međusobno paralelni. [20]

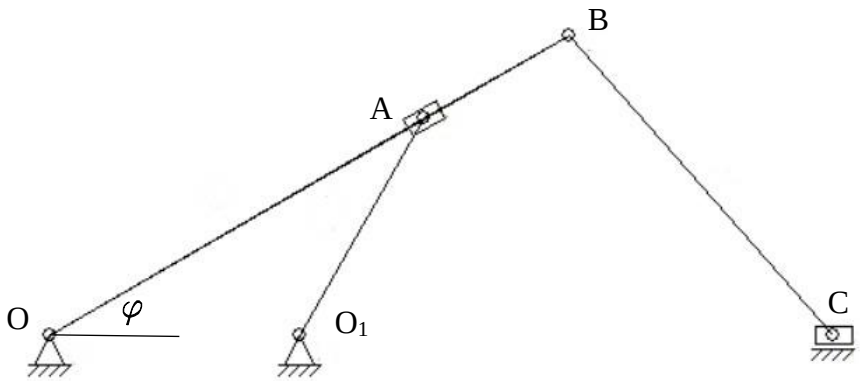
5.6. KINEMATSKA ANALIZA SLOŽENOG MEHANIZMA

Kinematska analiza složenog mehanizma sa slike 5.6. izrađena je grafičko-analitičkom metodom u SolidWorks-u.



Slika 5.6.: Složeni mehanizam

5.6.1. Plan položaja



Slika 5.7.: Složeni mehanizam – plan položaja

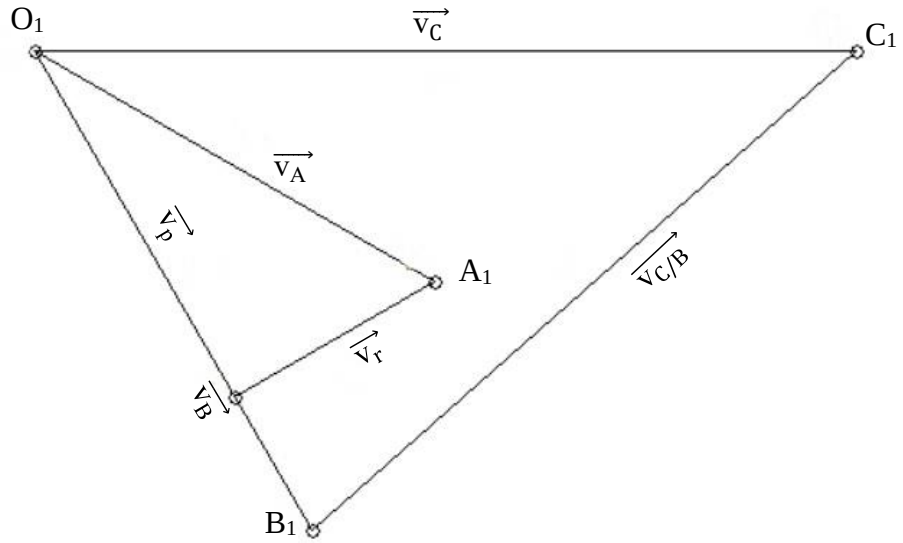
Za ovaj mehanizam zadane veličine su:

- $\overrightarrow{v_C}$ = 2 m/s = const.
- $\overline{O_1 A} = \overline{O_1 O}$ = 25 cm
- $\overline{OB}$ = 60 cm
- $\overline{BC}$ = 40 cm
- φ = 30°

5.6.2. Plan brzina

Mjerilo u kojem je nacrtani ovaj plan brzina je 1 m/s = 100 mm.

Napomena: Slika 5.8. nije u mjerilu.



Slika 5.8.: Složeni mehanizam – plan brzina

$\overrightarrow{v_C} = 2\ \mathrm{m/s}$

- iz točke O_1 povučemo dužinu duljine 200 mm
- kraj te dužine predstavlja točku C_1
- dužina $\overline{O_1\ C_1}$ je horizontalna jer se klizač u točki C kreće samo horizontalno
- iz točke C_1 povučemo polupravac koji je okomit na štap BC
- iz početne točke O_1 povučemo polupravac koji je okomit na štap OB
- na sjecištu tih polupravaca se nalazi točka B_1
- mjerenjem duljine dužine $\overline{O_1\ B_1}$ dobijemo iznos brzine $\overrightarrow{v_B}$
- mjerenjem duljine dužine $\overline{B_1\ C_1}$ dobijemo iznos brzine $\overrightarrow{v_{C/B}}$

$\overrightarrow{v_B} = 1{,}35\ \mathrm{m/s}$

$\overrightarrow{v_{C/B}} = 1{,}76\ \mathrm{m/s}$

$$\omega_{BO} = \frac{\overrightarrow{v_B}}{\overline{OB}} = \frac{1{,}35}{0{,}6} = 2{,}25\ \mathrm{rad/s}$$

$$\omega_{BC} = \frac{\overrightarrow{v_{C/B}}}{\overline{BC}} = \frac{1{,}76}{0{,}4} = 4{,}4\ \mathrm{rad/s}$$

- na planu položaja izmjerimo udaljenost od točke A do točke B,

$\overline{AB}$ = 167 mm = 0,167 m

$\overrightarrow{v_p} = \omega_{BO} \cdot \overline{OA} = 2{,}25 \cdot 0{,}44 = 0{,}99\ \mathrm{m/s}$

- koristimo kutnu brzinu ω_{BO} jer se klizač A nalazi na štapu OB
- iz točke O_1 povučemo polupravac okomit na štap O_1A
- i točke B povučemo dužinu prema točki O_1, okomit na štap OB, duljine 99 mm jer on predstavlja brzinu $\overrightarrow{v_p}$
- na kraju te dužine povučemo polupravac koji je paralelan na dužinu OB, prema polupravcu koji smo povukli iz točke O_1
- na sjecištu tih polupravaca se nalazi točka A_1
- mjerenjem duljine dužine $\overline{O_1\ A_1}$ dobijemo iznos brzine $\overrightarrow{v_A}$

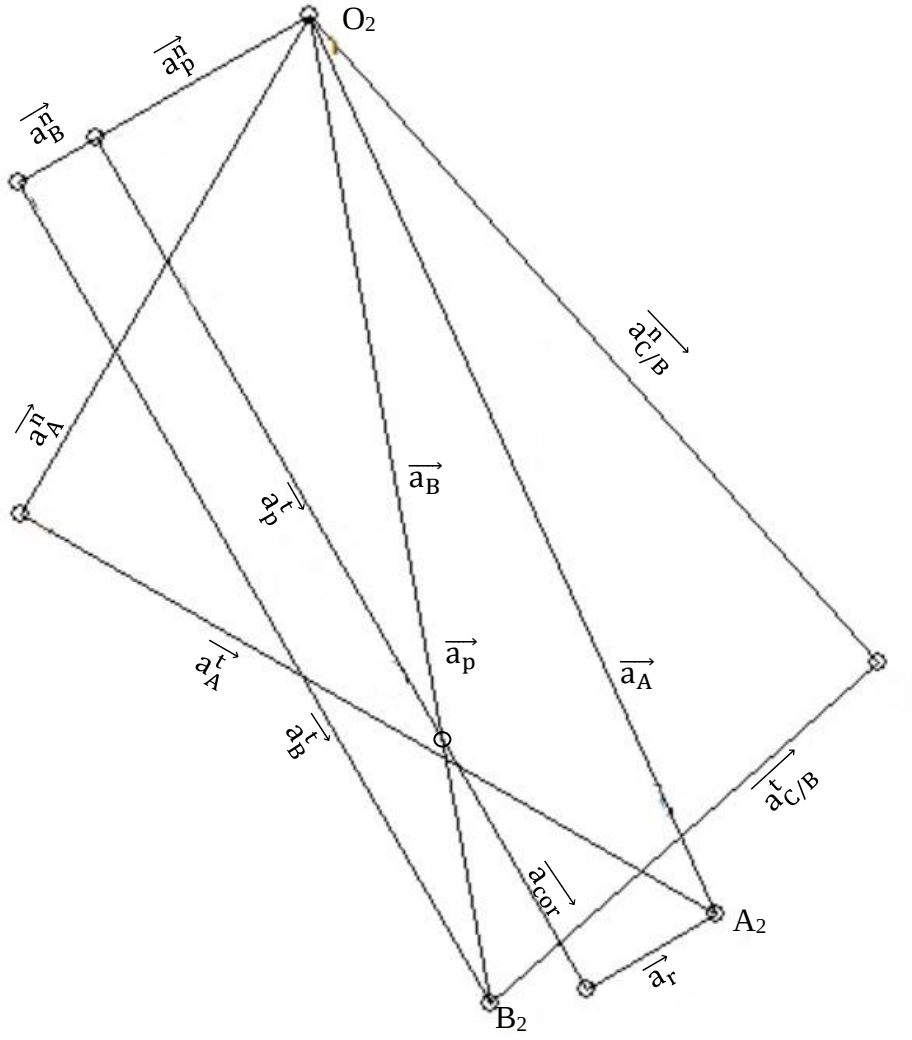
$\overrightarrow{v_A} = 1{,}14\ \mathrm{m/s}$

$$\omega_{AO_1} = \frac{\overrightarrow{v_A}}{\overline{O_1A}} = \frac{1{,}14}{0{,}25} = 4{,}56\ \mathrm{rad/s}$$

5.6.3. Plan ubrzanja

Mjerilo u kojem je nacrtani ovaj plan ubrzanja je 1 m/s^2 = 100 mm.

Napomena: Slika 5.9. nije u mjerilu.



Slika 5.9.: Složeni mehanizam – plan ubrzanja

$$\overrightarrow{a_B} = \cancel{\overrightarrow{a_O}} + \overrightarrow{a^n_{B/O}} + \overrightarrow{a^t_{B/O}}$$

$$\overrightarrow{a^n_B} = \overrightarrow{a^n_{B/O}} = \frac{\overrightarrow{v_B}^2}{\overline{OB}} = \frac{1{,}35^2}{0{,}6} = 3{,}04\ \mathrm{m/s^2}$$

- točka O je uklještena, pa je iznos $\overrightarrow{a_O}$ jednak nuli
- normalna komponenta ubrzanja se crta paralelno sa štapom, što znači da se ubrzanje $\overrightarrow{a_B}$ crta iz točke O_2 paralelno štapu OB jer je jednako normalnoj komponenti, kao dužina $\overline{O_2\,B_2}$ duljine 304 mm
- iz krajnje točke normalne komponente povuče se okomica koja predstavlja tangencijalnu komponentu

$$\overrightarrow{a_B} = \cancel{\overrightarrow{a_C}} + \overrightarrow{a^n_{C/B}} + \overrightarrow{a^t_{C/B}}$$

$$\overrightarrow{a^n_{C/B}} = \frac{\overrightarrow{v_{C/B}}^2}{\overline{CB}} = \frac{1{,}76^2}{0{,}4} = 7{,}8\ \mathrm{m/s^2}$$

- točka C ima konstantnu brzinu, pa zbog toga nema ubrzanje
- normalna komponenta ubrzanja se crta paralelno sa štapom BC kao dužina duljine 780 mm
- na kraju te dužina povučemo okomiti polupravac koji predstavlja tangencijalnu komponentu $\overrightarrow{a^t_{C/B}}$
- na sjecištu tangencijalnih komponenata $\overrightarrow{a^t_{C/B}}$ i $\overrightarrow{a^t_{B/O}}$ se nalazi točka B_2
- mjerenjem duljine dužine $\overline{O_2\,B_2}$ dobijemo iznos ubrzanja $\overrightarrow{a_B}$

$\overrightarrow{a^t_{C/B}}$ = 4,68 m/s^2

$\overrightarrow{a^t_{B/O}}$ = 8,57 m/s^2

$\overrightarrow{a_B}$ = 9,09 m/s^2

$$\overrightarrow{a_A} = \cancel{\overrightarrow{a_{O_1}}} + \overrightarrow{a^n_{A/O_1}} + \overrightarrow{a^t_{A/O_1}}$$

$$\overrightarrow{a^n_A} = \overrightarrow{a^n_{A/O_1}} = \frac{\overrightarrow{v_A}^2}{\overline{O_1A}} = \frac{1{,}14^2}{0{,}25} = 5{,}2\ \mathrm{m/s^2}$$

$$\overrightarrow{a_{cor}} = 2 \cdot \omega \cdot v_r = 2 \cdot 2{,}25 \cdot 0{,}57 = 2{,}6\ \mathrm{m/s^2}$$

$$\overrightarrow{a^n_p} = \frac{\overrightarrow{v_p}^2}{\overline{OA}} = \frac{0{,}99^2}{0{,}44} = 2{,}23\ \mathrm{m/s^2}$$

- normalno ubrzanje $\overrightarrow{a^n_A}$ se crta paralelno sa štapom O_1A iz točke O_2 duljine 520 mm
- tangencijalno ubrzanje $\overrightarrow{a^t_A}$ se crta okomito na štap O_1A iz krajnje točke normalnog ubrzanja $\overrightarrow{a^n_A}$
- normalno prijenosno ubrzanje se crta paralelno sa štapom O_1A iz točke O_2 duljine 223 mm
- tangencijalno prijenosno ubrzanje se crta okomito na štap O_1A iz krajnje točke dužine normalnog prijenosnog ubrzanja do vektora ubrzanja $\overrightarrow{a_B}$
- od točke O_2 do sjecišta $\overrightarrow{a^t_p}$ i $\overrightarrow{a_B}$ se nalazi vektor prijenosnog ubrzanja

- Coriolisovo ubrzanje se crta iz krajnje točke prijenosnog ubrzanja (sjecišta $\overrightarrow{a_p^t}$ i $\overrightarrow{a_B}$), okomito na štap OB, duljine 260 mm
- relativno ubrzanje se crta paralelno sa štapom OB iz krajnje točke Coriolisovog ubrzanja do tangencijalnog ubrzanja $\overrightarrow{a_A^t}$
- na sjecištu tih vektora se nalazi točka A_2
- između točaka O_2 i A_2 je brzina $\overrightarrow{a_A}$

$\overrightarrow{a_A^t} = 7{,}28\ m/s^2$

$\overrightarrow{a_p^t} = 6{,}29\ m/s^2$

$\overrightarrow{a_p} = 6{,}67\ m/s^2$

$\overrightarrow{a_r} = 1{,}36\ m/s^2$

$\overrightarrow{a_A} = 8{,}93\ m/s^2$

$\overrightarrow{a_A^t} = 7{,}28\ m/s$

$$\overrightarrow{a_A^t} = \alpha \cdot \overline{O_1 A}$$

$$\alpha = \frac{\overrightarrow{a_A^t}}{\overline{O_1 A}} = \frac{7{,}28}{0{,}25} = 29{,}12\ rad/s^2$$

6. ANIMACIJE MEHANIZAMA

Za izradu animacija mehanizama korišten je program SolidWorks.

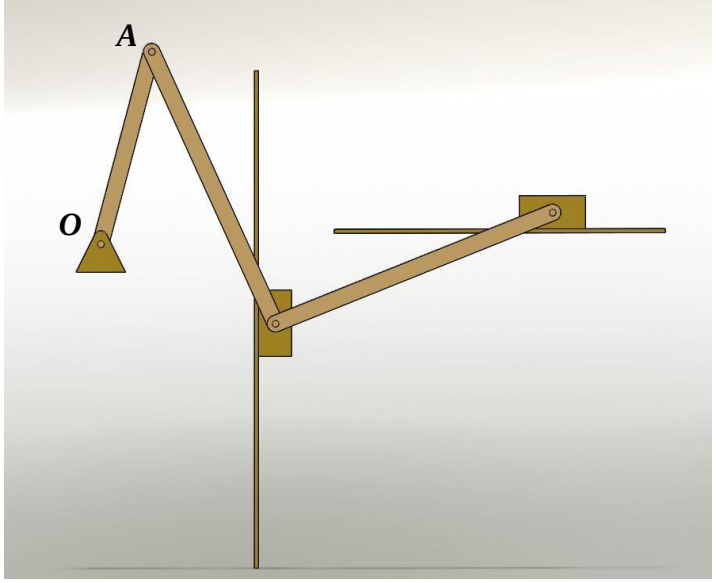
Od najranijih dana CAD-a, inženjeri su mogli koristiti SolidWorks za pretvaranje svojih ideja iz skica i proračuna na papiru u virtualne modele. Osim svih tih mogućnosti, SolidWorks omogućuje i izradu animacija modela. Taj značajka se naziva *Motion Study*. S njom se mogu napraviti pokreti koje možemo podijeliti u tri kategorije:

- Animacija: za jednostavne vizualne prikaze za prezentaciju ili marketing bez obzira na masu i gravitacija
- Osnovni pokret: za složenije prikaze kod kojih se uzimaju u obzir utjecaju mase, opruga, gravitacije i detekcije fizičkih sudara
- Analiza pokreta: najviša razina značajke *Motion Study* koja uzima u obzir širi spektar fizičkih interakcija kao što su udar, prigušivanje, sila, zamah… [16]

Postupak izrade animacije mehanizma bez motora je objašnjeni na primjeru na kojem je u 3. poglavlju ovog rada napravljena kinematička analiza.

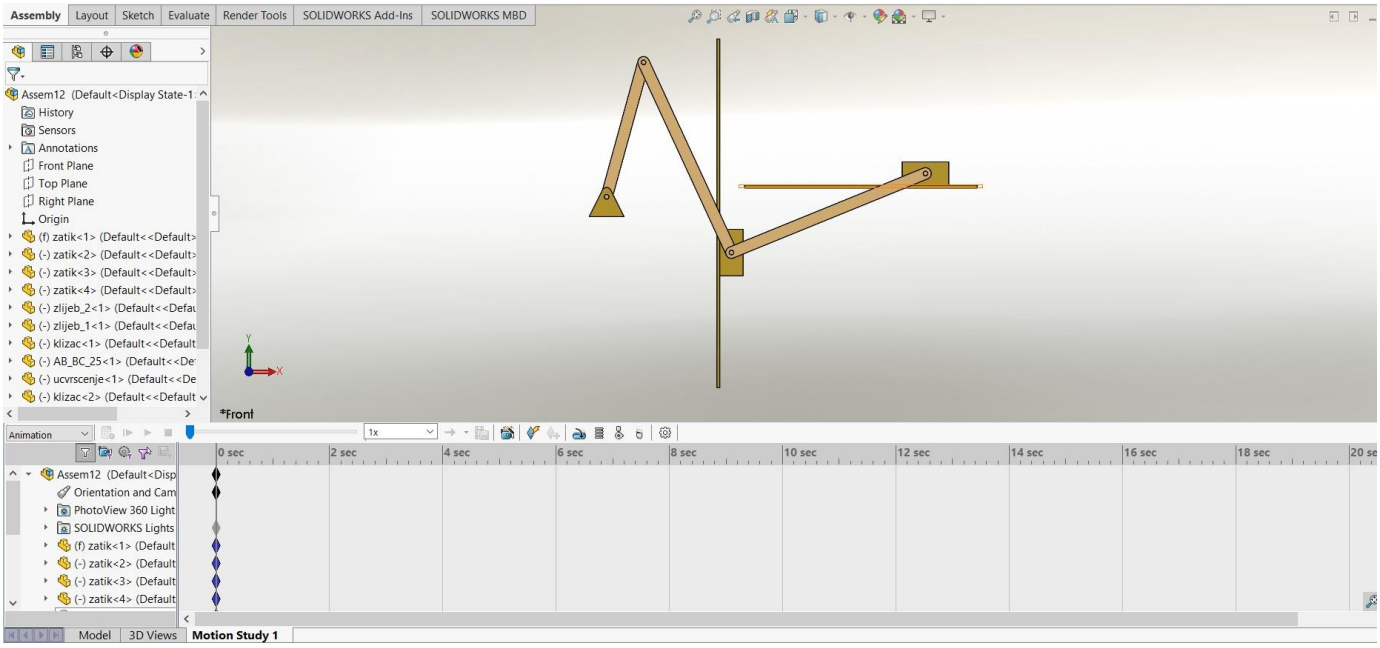
6.1. ANIMACIJA MEHANIZMA BEZ MOTORA

Kao prvi i osnovni korak možemo navesti crtanje mehanizma. Nakon što je on nacrtani prelazimo na izradu animacije.



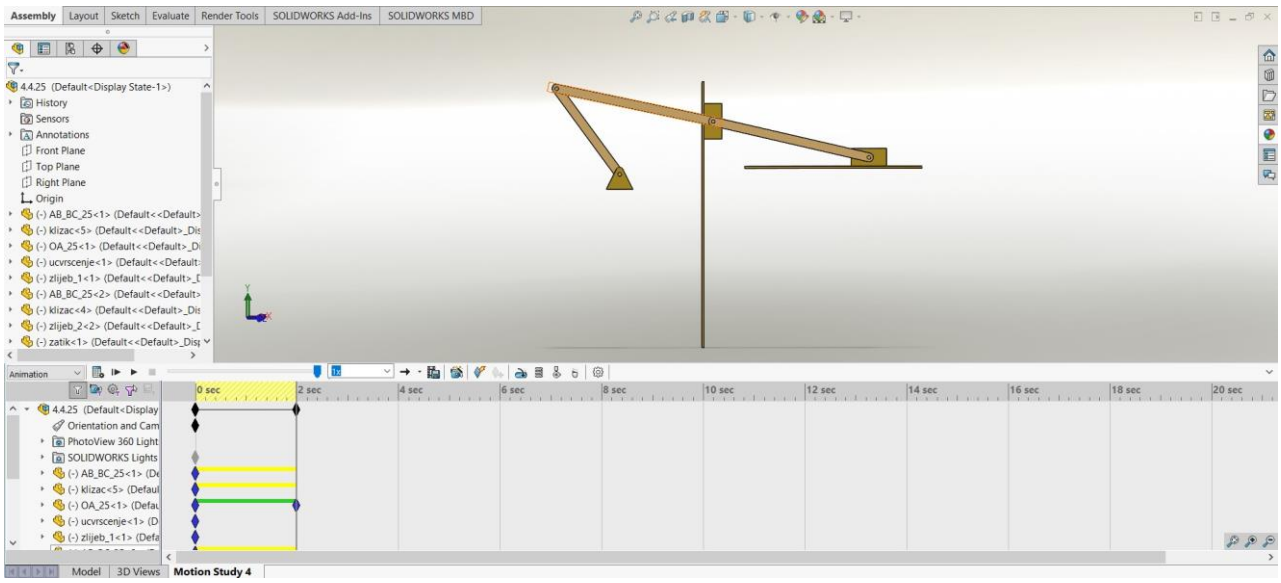
Slika 6.1.: Mehanizam bez motora

U ovom mehanizmu želimo da štap OA rotira oko učvršćenja. Animacijom će se prikazati ta rotacija štapa, ako se on uopće i rotira u potpunosti.



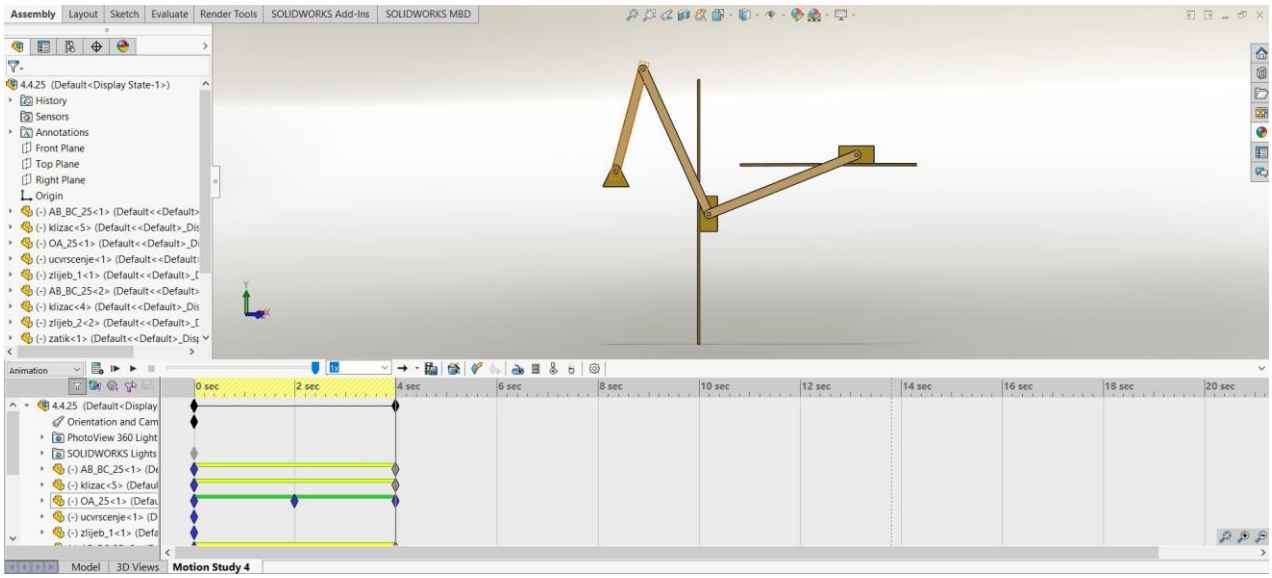
Slika 6.2.: Animacija 1 – prvi korak

Nakon što smo nacrtali mehanizam, u donjem lijevom kutu odaberemo *Motion Study*. Na donjoj polovici ekrana se otvara prozor s vremenskom crtom.



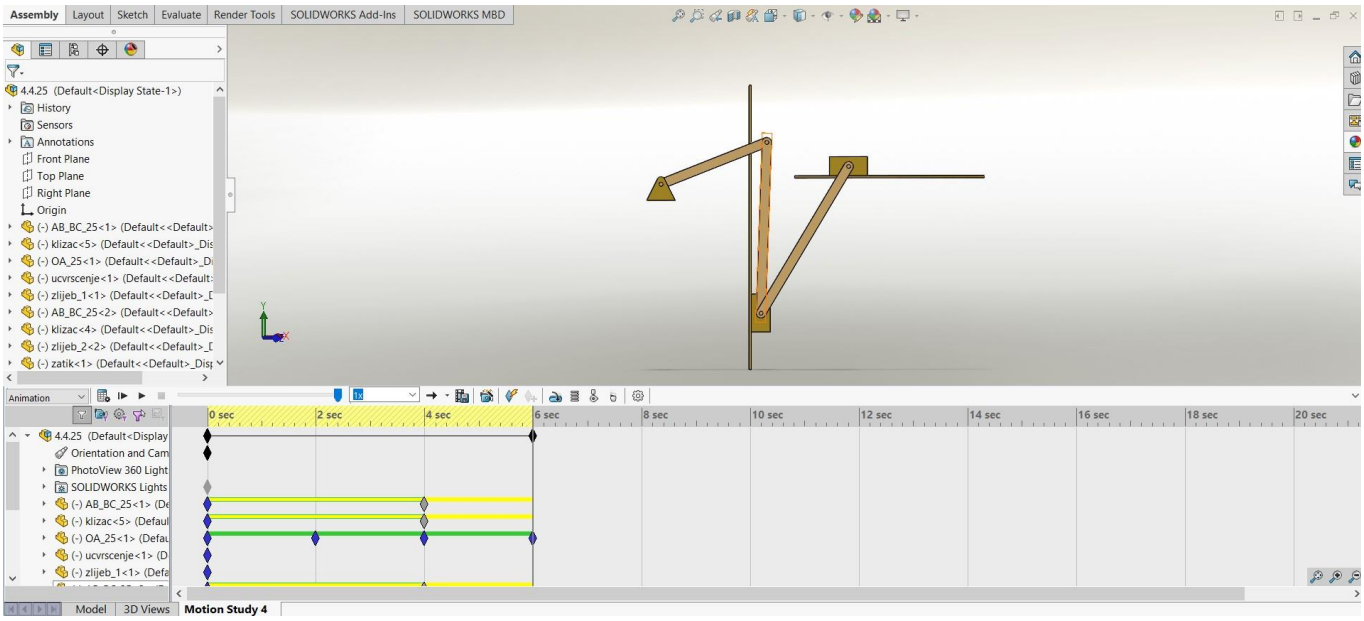
Slika 6.3.: Animacija 1 – drugi korak

Zadano je da se štap OA okreće i samo on definira kretanje, pa na popisu dolje s lijeve strane pronađemo taj štap i povučemo 'dijamant' na vremenskoj traci do sekunde po izboru. U ovom je primjeru povučen do druge sekunde. Nakon što smo definirali vrijeme na vremenskoj traci, kliknemo na štap na modelu i držeći lijevi klik povučemo isti do krajnje pozicije u lijevu stranu. Važno je napomenuti da odmah na početku treba uključiti 'dijamant s munjom' koji se nalazi iznad vremenske crte. Nakon toga potrebno je pritisnuti ikonu *Calculate* iznad popisa na lijevoj strani da bi se kretanje učitalo.



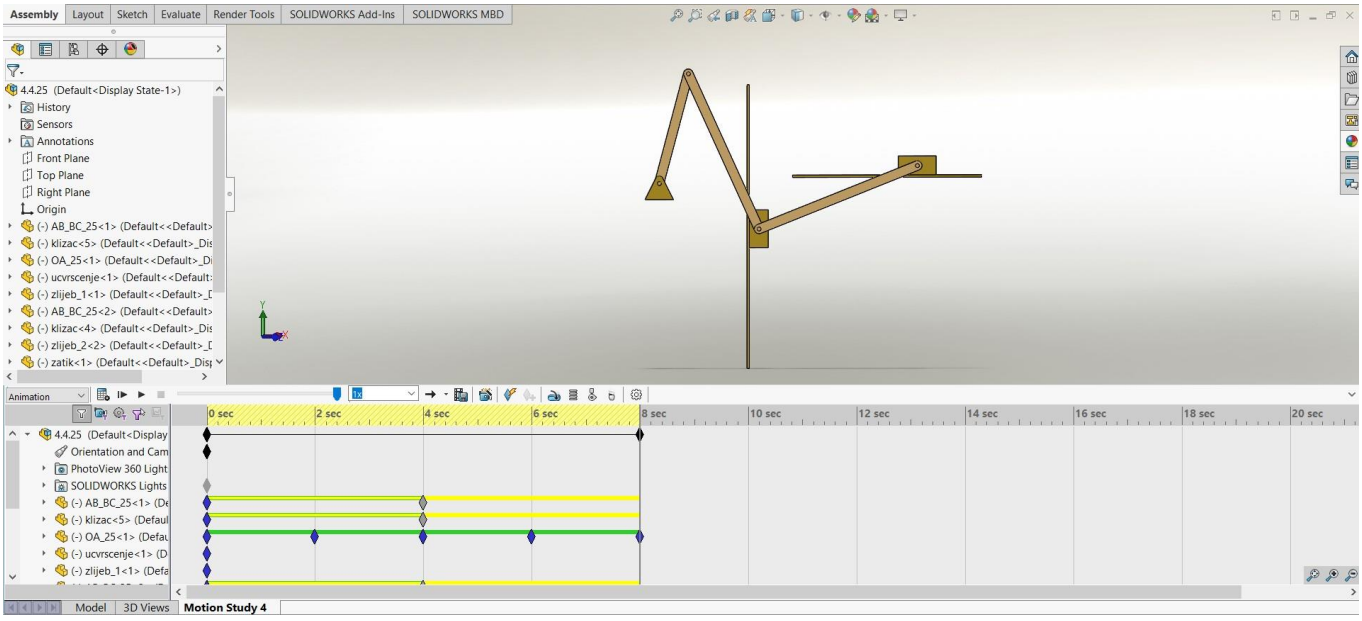
Slika 6.4.: Animacija 1 – treći korak

Nakon toga odaberemo sljedeću sekundu i sljedeći pokret. U četvrtoj sekundi želimo da se mehanizam iz prethodnog položaja vrati natrag u početni. To možemo napraviti isto kao i u prethodnom koraku povlačenjem 'dijamanta', ali postoji i jednostavnije rješenje. Na prvom 'dijamantu', na nultoj sekundi, pritisnemo desni klik i *Copy*, kliknemo desnim klikom na četvrtu sekundu i zatim *Paste*.



Slika 6.5.: Animacija 1 – četvrti korak

Povučemo 'dijamant' do šeste sekunde i štap OA najdalje u desnu stranu izbjegavajući kontakt s klizačem.

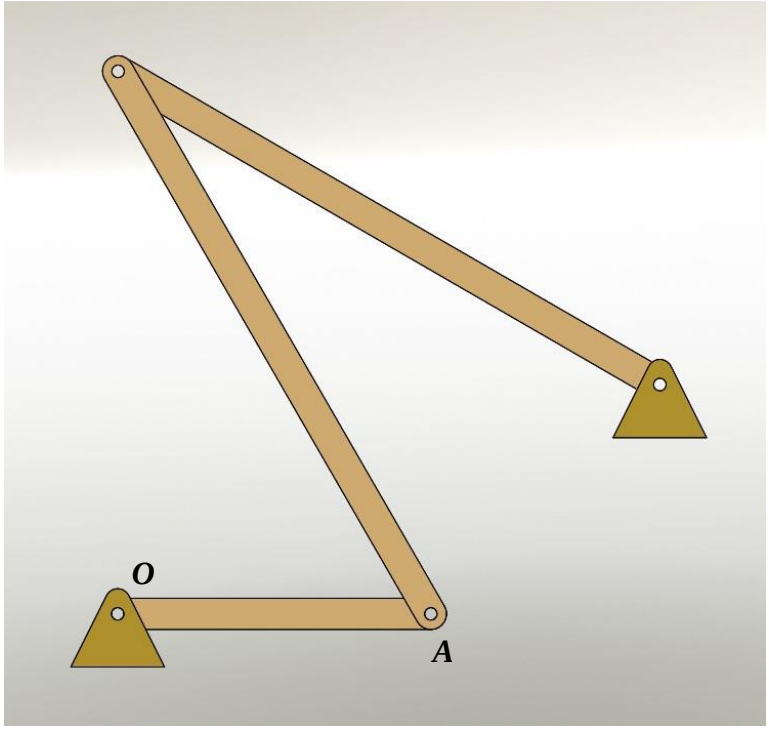


Slika 6.6.: Animacija 1 – peti korak

Na kraju ponovno kopiramo 'dijamant' na nultoj sekundi i zalijepimo ga na osmu. Poželjno je nakon svakoga koraka pritisnuti *Calculate* ikonu , ali ukoliko se to ne radi, onda se na kraju kalkulira. Time je animacija gotova i pritiskom na *Play* se ista može pokrenuti. Želimo li spremiti animaciju u .avi formatu, pritisnemo ikonu *Save animation* .

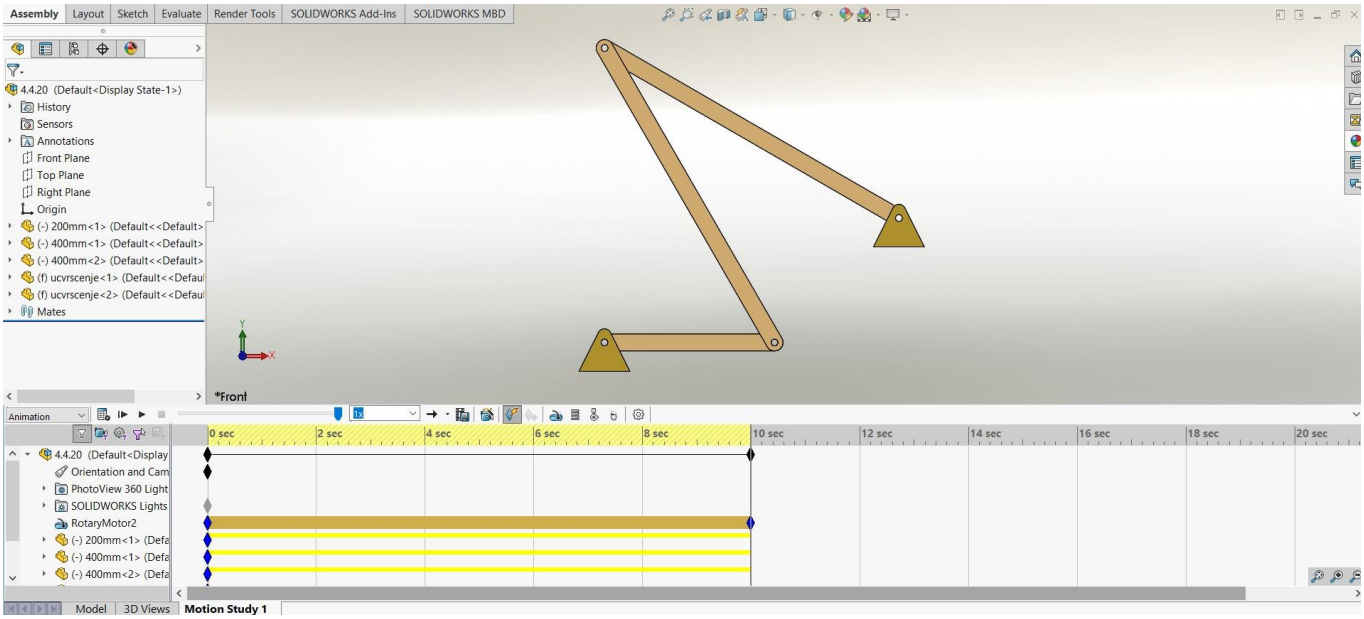
6.2. ANIMACIJA MEHANIZMA S MOTOROM

U ovom primjeru je prikazano kako napraviti animaciju mehanizma kod kojeg štap u potpunosti rotira oko učvršćenja.



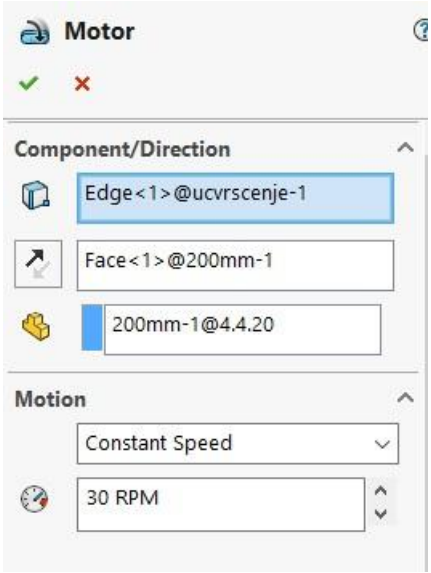
Slika 6.7.: Mehanizam s motorom

U ovom primjeru, kao i u prethodnom, štap OA rotira oko učvršćenja. Razlika između prethodnog i ovog primjera je da ovdje štap napravi puni krug oko učvršćenja. Ovdje se animacija može napraviti u samo jednom koraku. Treba napomenuti da je ovo najjednostavniji primjer i ako je u mehanizmu potpuna rotacija, ne znači nužno da će izrada animacije uvijek biti u jednom koraku.



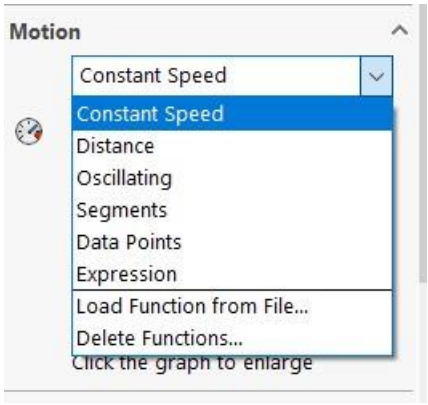
Slika 6.8.: Animacija 2

Otvorimo *Motion Study* i kliknemo na ikonu *Motor* . S lijeve strane se otvori prozor u kojem se ispunjavaju polja vezana za motor koji ubacujemo (slika 6.9.).



Slika 6.9.: Značajke motora

U prvo polje se automatski upisuje položaj motora kad isti označimo na mehanizmu. Drugo polje označava smjer vrtnje motora, a treće koja komponenta će se okretati. U drugom dijelu odabiremo koju vrstu kretanja želimo. U ovom primjeru je odabrana konstantna brzina, pa se nakon toga bira brzina.



Slika 6.10.: Vrste kretanja

Na slici 6.10. su prikazana sva ostala kretanja koja se mogu odabrati i svako od njih imaju različita polja koja se nakon odabira ispunjavaju.

Pritiskom na zelenu kvačicu ✔ prozor se zatvara, a vremenska crta se automatski ispunjava kao što je prikazano na slici 6.8.

6.3. UPOTREBA ANIMACIJA I VIRTUALNIH MODELA U NASTAVI

Proces podučavanja i učenja je važan element koji osigurava da studenti mogu slijediti sadržaj teme. Odgovarajuće korištenje nastavnih sredstava u procesu podučavanja čine studente usredotočene na predavanje i lakše pohranjuju novo znanje. U tome uvelike mogu pomoći animacije. [21]

Animacija oživljava stvari, posebno u složenim temama koje zahtijevaju strojeve koji su ili nedostupni ili ih je teško zamisliti opisivanjem isključivo govorom i tekstom. Animacija također pruža jasno i točno objašnjenje subjekta. [22]

6.3.1. Upotreba animacija i virtualnih modela u poučavanju strojarstva

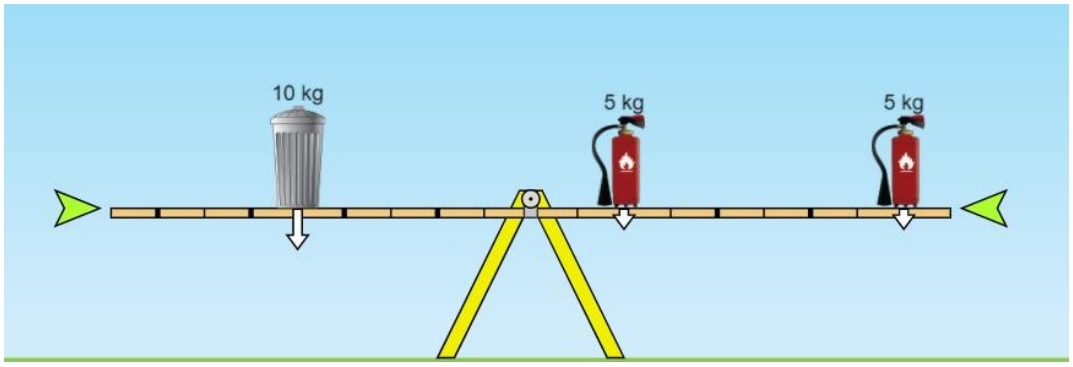
Strojarstvo je važno područje inženjerskog obrazovanja. Studenti strojarstva izvode eksperimente na složenim strojevima i alatima. Određeni mehanički strojevi poput automobila, klima uređaja, svemirskih letjelica i svih vrsta motora su skupi i rijetko dostupni studentima u svrhu učenja. Osim toga, teške i detaljne teme zahtijevaju detaljna objašnjenja i pravilno

pripremljeni uvod kako bi studentima bilo lakše razumjeti temu. Zato su za takva područja potrebne tehnologija i multimedija.

Multimedijska tehnologija se uglavnom fokusira na interaktivne računalne funkcije koje korisnicima pružaju mogućnost razmjene ideja i znanja kroz digitalne i tiskane komponente. Multimedijski elementi su animacije, grafika, audio, video i tekst. Animacije postaju sve popularnije sredstvo u poučavanju strojarstva zbog svoje jedinstvene značajke koja korisniku omogućuje stvarni doživljaj animiranog elementa. Animacije također čine učenje poučnije i zanimljivije. [22]

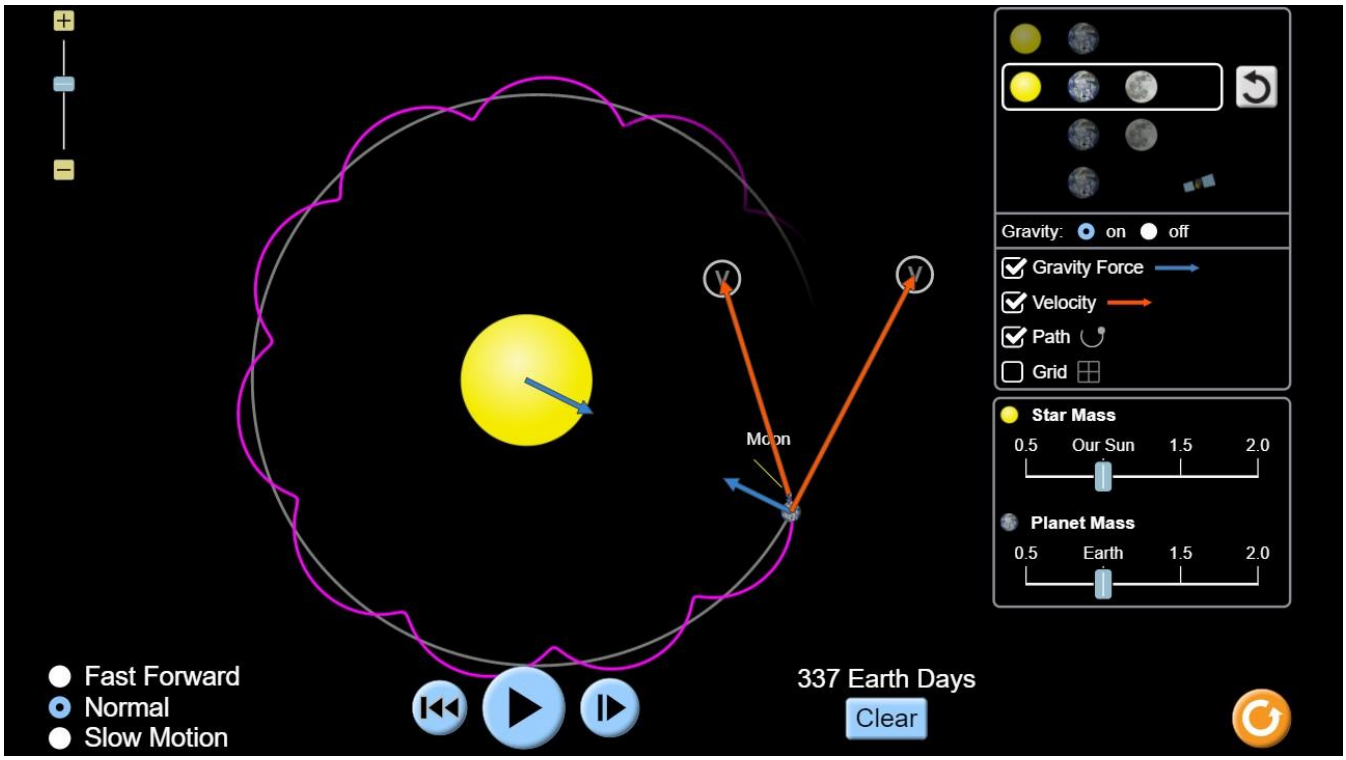
Mehanička 3D animacija se najjednostavnije može definirati kao postupak stvaranja fotorealistične 3D animacije koja vizualno prikazuje konfiguraciju proizvoda, njegov sklop i rad u obliku animiranog videozapisa. Animacija je napredovala u posljednjih nekoliko godina i sada se smatra bržim i pristupačnijim načinom za prikazivanje mehanizma. Kao rezultat, ova je tehnika danas široko prihvaćena u usporedbi s arhaičnim metodama poput gradnje maketa kojima treba vremena, skuplje su i zahtijevaju više sirovina. Danas mnoge industrije poput mehaničke, zrakoplovne, automobilske, zdravstvene, pa čak i prehrambene, 3D dizajn i animaciju proizvoda smatraju načinom bržeg prototipiranja, bržeg izlaska na tržište i u određenim slučajevima promoviranja svojega brenda. [23]

6.3.2. Primjeri animacija



Slika 6.11.: Animacije – ravnoteža [24]

Na slici 6.11. je prikazana slika simulacije koja omogućuje testiranje ravnoteže pomicanjem objekata po klackalici. Ispod svakog objekta su prikazani i vektori sile.



Slika 6.12.: Animacije – gravitacija i orbite [25]

Na slici 6.12. prikazana je slika animacije kruženja Zemlje oko Sunca, a ujedno i kruženja Mjeseca oko Zemlje. Prikazane su putanje Zemlje (siva) i Mjeseca (ljubičasta) i njihovi smjerovi brzina kao i smjer gravitacijske sile.

6.3.3. Prednosti animacija

Odlično za prototipiranje

- Kad želimo predstaviti tržištu novi proizvod, veći dio troškova odlazi na kreiranje odgovarajućeg prototipa. Korištenjem 3D modeliranja, izrada prototipa može se izvršiti u virtualnom okruženju provjeravajući ima li točne kinematike, geometrije i ispunjava li proizvod tražene specifikacije.

Lako otkrivanje problema

- Još jedna prednost 3D animacije je mogućnost kreatorima i gledateljima da identificiraju i otklone tehničke propuste, greške u crtanju i inženjeringu i nedostatke u dizajnu. Pogled od 360° omogućuje lakše proučavanje mehanizama i cjelokupnog djelovanja proizvoda.

Sjajan marketinški medij

- Ljepota 3D animacije leži u činjenici da svaki uobičajeni proizvod može biti prikazani na uzbudljiv i intezivan način.

Privlači pažnju investitora

- Teško objašnjive koncepte uvijek je najlakše objasniti vizualno jer ne postoji jači medij koji bi prikazao proizvod i njegove unutarnje mehanizme, a pritom animaciju održao edukativnom i zanimljivom.

Štedi novac

- Jedna od najjačih prednosti 3D animacije je isplativost. Ne samo da pomaže u simulaciji dizajna i koncepta proizvoda u virtualnom svijetu, već i pomaže u minimaliziranju troškova uklanjanjem zahtjeva za preradom jer se sve promjene unose u samoj animaciji. [23]

7. ZAKLJUČAK

U radu su predstavljeni i kinematički analizirani ravninski i složeni mehanizmi iz knjige „Kinematika sa zbirkom zadataka“ autora Franje Matejičeka. Kinematičke analize su najprije napravljene grafičko-analitičkom metodom, a zatim uz pomoć digitalnog alata SAM – The Ultimate Mechanism Designer. Nakon usporedbe dobivenih rezultata, vidljivo je da su vrlo mala odstupanja između dobivenih vrijednosti. Na temelju toga možemo pretpostaviti da će se grafičko-analitička metoda u potpunosti prestati koristiti jer je digitalna metoda dovoljno pouzdana, jednostavna i definitivno puno brža od grafičko-analitičke.

Svaki mehanizam koji je zadani u ranije spomenutoj knjizi je skiciran i kotiran sa svim mjerama. Da bi si lakše predočili na koji način radi koji mehanizam, isti možemo vrlo jednostavno animirati uz pomoć SolidWorks-a. Nije bitno je li on jednostavan ili složeni, ima li 2 štapa ili 10 štapova, izradom animacije se točno vidi na koji način se koji štap giba.

Na kraju ovoga rada možemo zaključiti da digitalni alati kao i animacije uvelike pomažu u kinematičkoj analizi memhanizama kao i u poučavanju i učenju. Ne samo da su rezultati precizniji, nego i štede vrijeme, a i lakše se predočava način rada pojedinog mehanizma.

U Varaždinu, 21. rujna 2020.

Sveučilište
Sjever

IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, MAJA PETEK (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom UPOTREBA ANIMACIJA U POUČAVANJU KINEMATIKE (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Maja Petek
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnost i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, MAJA PETEK (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom UPOTREBA ANIMACIJA U POUČAVANJU KINEMATIKE (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Maja Petek
(vlastoručni potpis)

Popis slika

Slika 1.1.: Ravnoteža 1
Slika 2.1.: Pretvorbe energije [2] 2
Slika 2.2.: Spektar mehanike [26] 3
Slika 2.3.: Isaac Newton 5
Slika 2.4.: Kurt Hain [3] 6
Slika 2.5.: DMG-Lib [3] 8
Slika 2.6.: Hainovi Atlasi 9
Slika 2.7.: Primjer iz Atlasa - koljeno[10] 10
Slika 2.8.: Primjer iz Atlasa – krivulje okretnog momenta[10] 10
Slika 2.9.: Primjer iz Atlasa – krivulje okretnog momenta [10] 11
Slika 2.10.: Primjer iz Atlasa – krivulje okretnog momenta [10] 11
Slika 2.11.: Priključak za poljoprivredni traktor (1) [11] 12
Slika 2.12.: Priključak za poljoprivredni traktor (2) [11] 12
Slika 2.13.: Priključak za poljoprivredni traktor (3) [11] 13
Slika 2.14.: Hainov rad [12] 13
Slika 3.1.: Mehanizam 14
Slika 3.2.: Zadani mehanizam 15
Slika 3.3.: Plan položaja 15
Slika 3.4.: Plan brzina 16
Slika 3.5.: Plan ubrzanja 18
Slika 4.1.: Sučelje programa 21
Slika 4.2.: Crtanje mehanizma u SAM-u – 1. korak 21
Slika 4.3.: Padajući izbornik – Node Properties 22
Slika 4.4.: Node Properties – a) točka 1, b) točka 2 22
Slika 4.5.: Crtanje mehanizma u SAM-u – 2. korak 23
Slika 4.6.: Node Properties – točka 3 23
Slika 4.7.: a) Crtanje u SAM-u korak 3, b) Node Properties točka 3 24
Slika 4.8.: Crtanje mehanizma u SAM-u – učvršćenja i klizači 24
Slika 4.9.: Angle Input Motion 25
Slika 4.10.: Padajući izbornik – Display Path 26
Slika 4.11.: Mehanizam s putanjama točaka 26

Slika 4.12.: Dijagram 27
Slika 5.1.: Translacija [14] 29
Slika 5.2.: Rotacija [14] 30
Slika 5.3.: Složeno gibanje [14] 30
Slika 5.4.: Složeno gibanje 31
Slika 5.5.: Relativno gibanje [14] 32
Slika 5.6.: Složeni mehanizam 35
Slika 5.7.: Složeni mehanizam – plan položaja 35
Slika 5.8.: Složeni mehanizam – plan brzina 36
Slika 5.9.: Složeni mehanizam – plan ubrzanja 38
Slika 6.1.: Mehanizam bez motora 41
Slika 6.2.: Animacija 1 – prvi korak 41
Slika 6.3.: Animacija 1 – drugi korak 42
Slika 6.4.: Animacija 1 – treći korak 42
Slika 6.5.: Animacija 1 – četvrti korak 43
Slika 6.6.: Animacija 1 – peti korak 43
Slika 6.7.: Mehanizam s motorom 44
Slika 6.8.: Animacija 2 45
Slika 6.9.: Značajke motora 45
Slika 6.10.: Vrste kretanja 46
Slika 6.11.: Animacije – ravnoteža [24] 47
Slika 6.12.: Animacije – gravitacija i orbite [25] 48

Popis tablica

Tablica 1. Izračunate vrijednosti brzine i ubrzanja..... 27
Tablica 2. Vrijednosti brzina i ubrzanja - SAM 28

Literatura

[1] https://www.dmg-lib.org/dmglib/main/portal.jsp?mainNaviState=browsen.docum.viewer&phyPageNo=1&id=29390009

[2] Husjak, M., *Teorija mehanizama*. 2003.

[3] https://www.dmg-lib.org/dmglib/main/portal.jsp?mainNaviState=browsen.docum.viewer&phyPageNo=1&id=23723009

[4] https://www.britannica.com/science/mechanics

[5] https://courses.lumenlearning.com/boundless-physics/chapter/basics-of-kinematics/

[6] https://www.britannica.com/science/statics

[7] https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=31497

[8] https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/newton.html

[9]https://books.google.hr/books?id=Dkq6_mdW43IC&pg=PA47&lpg=PA47&dq=iftomm+kurt+hain+life+work&source=bl&ots=-kyhVXU50h&sig=ACfU3U0xJ30ZAgJ6ih5B-anU_FxvgsHxxQ&hl=hr&sa=X&ved=2ahUKEwiv8L7gjOTqAhVEi8MKHYpKDbcQ6AEwBHoECAoQAQ#v=onepage&q&f=false

[10] https://www.dmg-lib.org/dmglib/main/portal.jsp?mainNaviState=browsen.docum.viewer&phyPageNo=2&id=86009

[11] https://www.dmg-lib.org/dmglib/main/portal.jsp?mainNaviState=browsen.mecdesc.viewer&id=1467025

[12] https://www.dmg-lib.org/dmglib/main/portal.jsp?mainNaviState=browsen.docum.viewer&phyPageNo=1&id=868009

[13]https://www.oss.unist.hr/sites/default/files/file_attach/Tehni%C4%8Dka%20mehanika%20II%20-%20Bo%C5%BEe%20Plazibat%2C%20Ado%20Matokovi%C4%87.pdf

[14]https://web.calpoly.edu/~fowen/DAUST-KinDynMach/9RigidBodyKinematicsVelocity.pdf?fbclid=IwAR3RYjqgJbps50_jc4wY8RjPlyIys8QxRFD_5_w443OHorIaOnVeXA9-pOw

[15] https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=70273

[16] https://www.engineersrule.com/motion-studies-and-how-to-do-them/

[17]https://www.researchgate.net/publication/261637430_Analysis_of_a_Coriolis_Acceleration_Journal_of_Advanced_Science_and_Engineering_Research_Vol_4_No_1_March_2014_1-8

[18]https://hr.sodiummedia.com/4327384-coriolis-acceleration-definition-cause-formula-effect-on-terrestrial-processes

[19] https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/coriolis-effect/

[20] Matejiček F., *Kinematika sa zbirkom zadataka*. Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod 2011.

[21] https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/203/1/012023/pdf

[22] http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.415.8255&rep=rep1&type=pdf

[23]https://www.flatworldsolutions.com/engineering/articles/mechanical-3d-product-animation-benefits.php

[24] https://phet.colorado.edu/en/simulation/balancing-act

[25] https://phet.colorado.edu/en/simulation/gravity-and-orbits

[26]https://physics.info/motion/?fbclid=IwAR2CJ9bPCuAo_hKRZjg9qJhmB73xKb9TA33WveYs9MxXZS2QIxPloqQ8BcE

[27] SAM 8.0 The ultimate mechanism designer