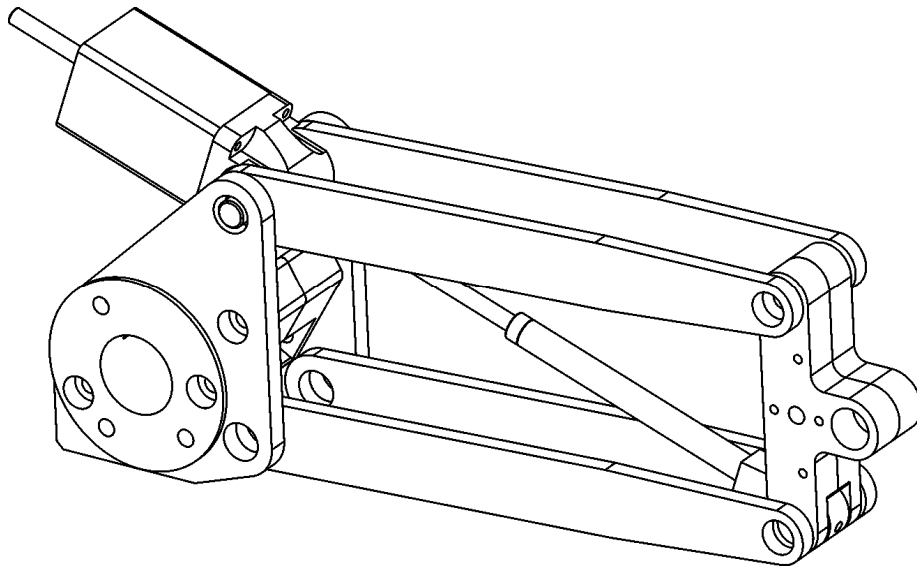


**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
Краљице Марије 16**

Драган Милутиновић
Бранко Кокотовић
Никола Славковић
Саша Живановић

**МЕХАНИЗАМ АКТИВНОГ П-ЗГЛОБА КАО ЕКВИВАЛЕНТА
КОМБИНАЦИЈЕ ОБРТНОГ ЗГЛОБА И
СЕКМЕНТА КОНСТАНТНЕ ДУЖИНЕ**

-Техничко решење-



У Београду, 2014. године

САДРЖАЈ:

1	ОБЛАСТ НА КОЈУ СЕ ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ ОДНОСИ	4
2	ТЕХНИЧКИ ПРОБЛЕМ	4
3	СТАЊЕ ТЕХНИКЕ	4
4	СУШТИНА И ДЕТАЉНИ ОПИС ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА	5
4.1	Моделирање и анализа механизма	9
4.1.1	Инверзна и директна кинематика	10
4.1.2	Односи брзина, Јакобијан матрица и сингуларитети	12
4.1.3	Статичка анализа механизма	14
4.1.4	Анализа убрзања	15
4.2	Развијени прототип П-зглоба са техничким карактеристикама и испитивањем геометрије статичке крутости	16
5	ЗАКЉУЧАК	19
6	ЛИТЕРАТУРА	20
7	ПРИЛОЗИ	21
7.1	Проспект за техничко решење	22
7.2	Документи који су пратили прихватање овог техничког решења	26
	1) Молба Наставно-научном већу за избор рецензената за Техничко решење	
	2) Одлука Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду о именовању рецензената	
	3) Извештај рецензената	
	4) Одлука Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду о прихватању техничког решења	
	5) Мишљење корисника - ЛОЛА института	

Подаци о техничком решењу

Врста техничког решења	Нови производ, М82, механизам активног п-зглоба као еквивалента комбинације обртног зглоба и сегмента константне дужине
Аутори техничког решења	Драган Милутиновић, ред. проф. ¹⁾ Бранко Кокотовић, доцент. ¹⁾ Никола Славковић, дипл. инж. маш. ¹⁾ Саша Живановић, доцент. ¹⁾ ¹⁾ Универзитет у Београду, Машински факултет
Назив техничког решења	МЕХАНИЗАМ АКТИВНОГ П-ЗГЛОБА КАО ЕКВИВАЛЕНТА КОМБИНАЦИЈЕ ОБРТНОГ ЗГЛОБА И СЕГМЕНТА КОНСТАНТНЕ ДУЖИНЕ
За кога је рађено техничко решење	Нови производ, Механизам активног П-зглоба као еквивалента комбинације обртног зглоба и сегмента константне дужине, развијен је на Машинском факултету у Београду, у оквиру пројекта Технолошког развоја ТР035022 "Развој нове генерације домаћих обрадних система".
Ко користи техничко решење	Механизам активног П-зглоба се користи као важна компонента у широј класи машина алатки и робота са паралелном кинематиком. Такође се користи у настави и истраживањима на Машинском факултету Универзитета у Београду.
Година израде техничког решења	2014.
Верификација резултата	Од стране рецензената: 1. проф. др Љубодраг Тановић, Машински факултет Универзитета у Београду и 2. проф. др Милан Зељковић, Факултет техничких наука, Нови Сад
Ко је прихватио техничко решење	Машински факултет Универзитета у Београду
Примена резултата	Лабораторијски производ

1. ОБЛАСТ НА КОЈУ СЕ ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ ОДНОСИ

Техничко решење припада области развоја активних (оснажених) зглобова као кључној компоненти за нове генерације робота и машина алатки са паралелном кинематиком.

2. ТЕХНИЧКИ ПРОБЛЕМ

Појава машина алатки и робота са паралелном кинематиком раних 90-их година прошлог века сматра се за најозбиљнији помак у овој области након појаве нумеричког управљања. Због специфичности паралелних механизма и сложености моделирања, управљања, пројектовања, израде и коришћења машина алатки и робота заснованих на њима, истраживање и развој ових система је базирано на високом нивоу кооперације универзитета, истраживачких института и индустрије [1].

Кинематички ланци (“ноге“) који повезују базу и платформу механизма са паралелном кинематиком (МПК) као и њихови зглобови, нарочито оснажени су од изузетне важности за перформансе машина заснованих на овим механизмима.

Равански зглобни паралелограм, као Ра или П зглоб је од посебне важности код МПК. Са идејом замене комбинације оснаженог обртног зглоба и сегмента константне дужине активним (оснаженим) П-зглобом, развијен је нови механизам са једним степеном слободе на бази зглобног паралелограма. У овом техничком решењу се описује структура механизма, моделирање и анализа, развијени прототип и испитивање активног (оснаженог) П-зглоба.

3. СТАЊЕ ТЕХНИКЕ

У општем случају, механизам са паралелном кинематиком (МПК) се састоји од непокретне основе и покретне платформе које су међусобно повезане кинематичким ланцима, односно зглобовима и сегментима, по одређеном распореду [2]. Зглобови као практична имплементација кинематичких парова се могу генерално класификовати а просте и комбиноване [2-5]. Типични примери простих зглобова који се користе код МПК су обртни (R), трансаторни или призматични (P), цилиндрични (C), завојни (H) и сферни (S). Типични комбиновани зглоб је универзални или карданов зглоб (U) који се састоји од два обртна (R) зглоба чије се осе секу под правим углом. Такође, и сферни зглоб (S) ако је изведен од комбинације три обртна зглоба (R) чије се осе секу постаје комбиновани зглоб [2-5]. Поред ових зглобова Ра или П зглоб као равански паралелограм је од посебног интереса и важности за МПК [2, 6,7,8].

Кинематички ланци (“ноге“) који повезују базу и платформу такође генерално могу бити класификовани на просте [2,4,9] и комплексне [2]. Код већине МПК је уобичајено да су сегменти (чланови) кинематичког ланца (“ноге“) полуге константне дужине. Показало се међутим, да ако кинематички ланац уместо сегмената садржи и једноставне механизме, МПК имају боље кинематичке и динамичке перформансе. Први МПК који је користио овај приступ је био механизам показан у [10]. У циљу побољшања перформанси МПК као и у

остваривању жељеног броја степени слободе неки једноставни механизми поготову зглобни паралелограма, сферни (Ps) [11], равански (Pa) [6] као и њихове комбинације [12] се користе као део сложенијих кинематичких ланаца у многим машинама.

Обртно кретање спојке са константном оријентацијом је суштински разлог примене раванског зглобног паралелограма код МПК. Равански зглобни паралелограм је први пут примењен у области МПК и назван П-зглоб у [6,7]. Овај механизам од тада заокупља пажњу многих истраживача. Примери примене овог механизма су показани у [13-16]. Упркос прихватљивим недостацима везаних за сложену структуру и тачност израде коришћење актиног П-зглоба уместо комбинације активног обртног зглоба и полуге константне дужине има неколико предности као што су: (1) остваривање жељеног броја степени слободе паралелних механизма; (2) значајно већу крутост; (3) веће могућности осега кретања зглобова који се могу поставити на спојку због њене константне оријентације и (4) боље кинематичке и динамичке карактеристике.

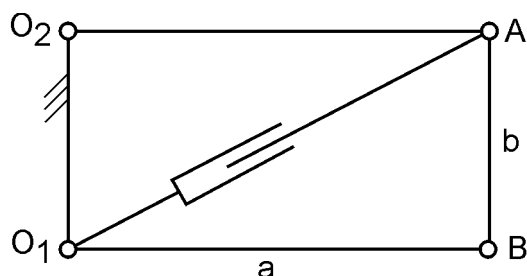
Кључни недостатак коришћења активног П-зглоба уместо комбинације активног обртног зглоба и полуге константне дужине је решење погона П-зглоба. Неколико решења погона П-зглоба, који се такође назива и П-сегмент [17] је разматрано са различитих аспеката у [2, 17-21]. Најдиректнији начин погона је оснаживање једног од два стационарна обртног зглоба сервомотором са различитим преносницима (Harmonic drive, Cyclo, итд.) или без преносника (тзв. Direct Drive мотори). Упркос униформном преносном односу једноставним управљачким алгоритмима динамичке перформансе и моменти савијања погонског сегмента су велики недостатак. Друга решења погона захтевају комплексне механизме на бази зглобног паралелограма [17, 21]. Ова решења, поред тога што су компликована како са становишта израде и моделирања често захтевају и већи простор и појаву савијања полуга.

У циљу решавања проблема погона П-зглоба развијен је нови комплексни механизам са једним степеном слободе на бази паралелограма са дијагоналном телескопском спојком. Поред примене у МПК развијени механизам може бити коришћен и код других типова машина.

4. СУШТИНА И ДЕТАЉАН ОПИС ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Суштину техничког решења чини нови механизам активног П-зглоба са задржаним карактеристикама раванског зглобног паралелограма, али са елиминисаним недостацима постојећих решења везаних за погон.

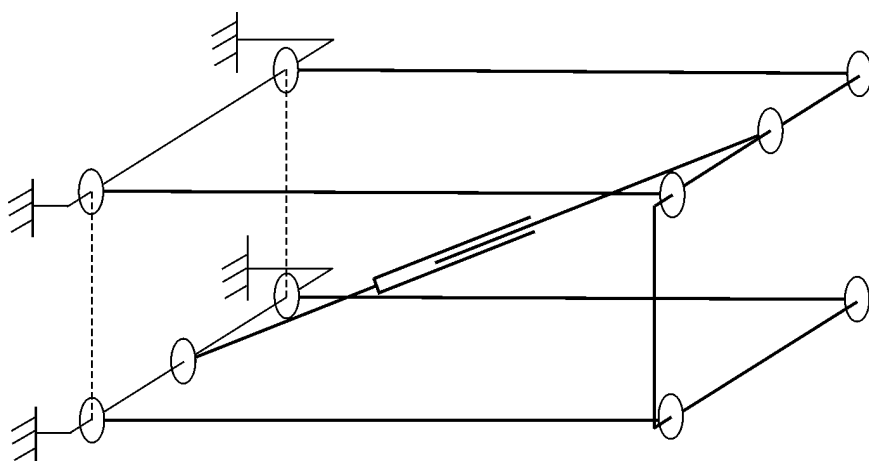
Развијени комплексни механизам са једним степеном слободе на бази раванског зглобног паралелограма и са дијагоналном телескопском спојком, слика 1, је инспирисан решењем датим у нашем патенту [23].



Слика 1. Развијени механизам за активни П-зглоб

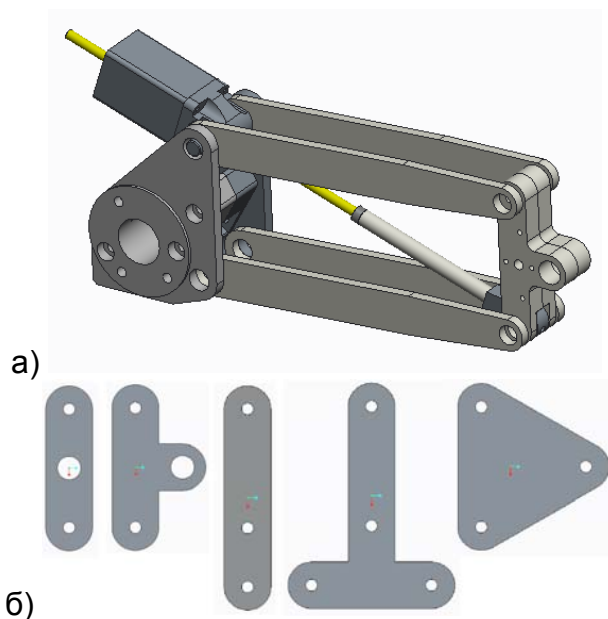
Додавањем дијагоналне телескопске спојке раванском зглобном паралелограму остварују се неколико важних предности као што су:

- велика крутост механизма с обзиром да су формирана два троугла;
- погон и управљање издужењем и скраћењем дијагоналне телескопске спојке могу бити ефикасно решени на неколико начина [24] као што су хидроцилиндар, завојна вретена са рециркулационом навртком, итд.;
- у члановима механизма нема сила и момената савијања;
- габарити раванског зглобног паралелограма нису повећани;
- могућност реализације просторне структуре, слика 2, што повећава крутост механизма у правцу нормалном на раван кретања;
- избором одговарајућих параметара завојног вретена механизам може бити самокочив.



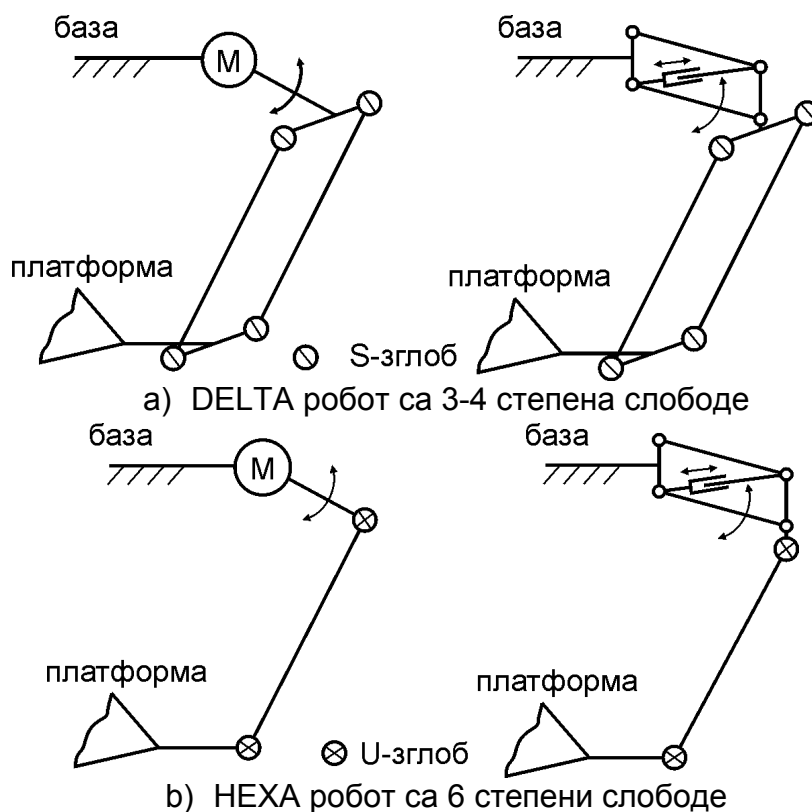
Слика 2. Развијени механизам реализован као просторна структура

CAD модел иницијалне верзије механизма погоњеног минијатурним хибридном корачним мотором је показан на слици 3а. Дијагонална телескопска спојка се састоји од завојног вретена и навртке интегрисане у шупље вратило корачног мотора [24]. Ова иницијална верзија механизма је била основа за развој првог прототипа. Различити облици спојке паралелограма, слика 3б омогућавају везу са различитим сегментима кинематичких ланаца који повезују базу и платформу паралелних механизма. Даље се показују могућности замене комбинације активног обртног зглоба и полуге константне дужине активним П-зглобом на неколико примера просторних и раванских паралелних механизма.



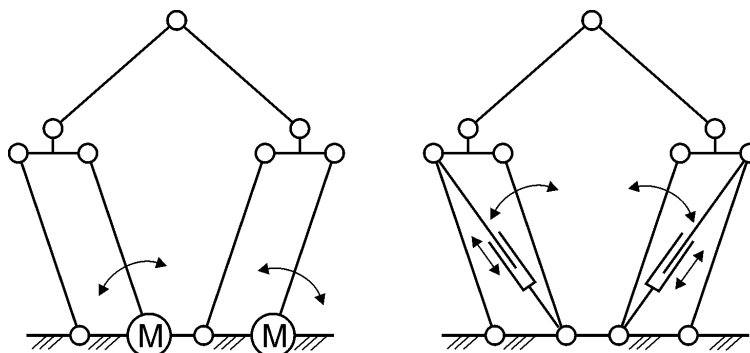
Слика 3. CAD модел иницијалне верзије механизма

На слици 4 су показане концептуалне могућности примене развијеног активног П-зглоба код паралелних робота DELTA и HEXA.

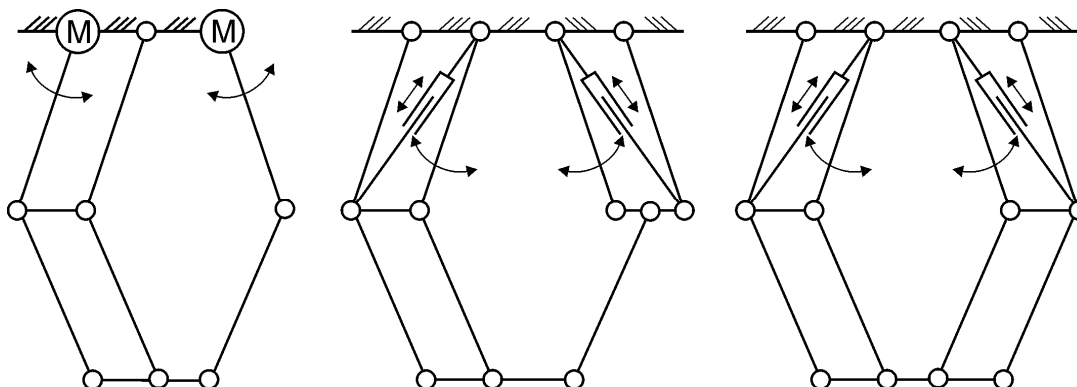


Слика 4. Паралелни роботи DELTA и HEXA са развијеним активним П-зглобом

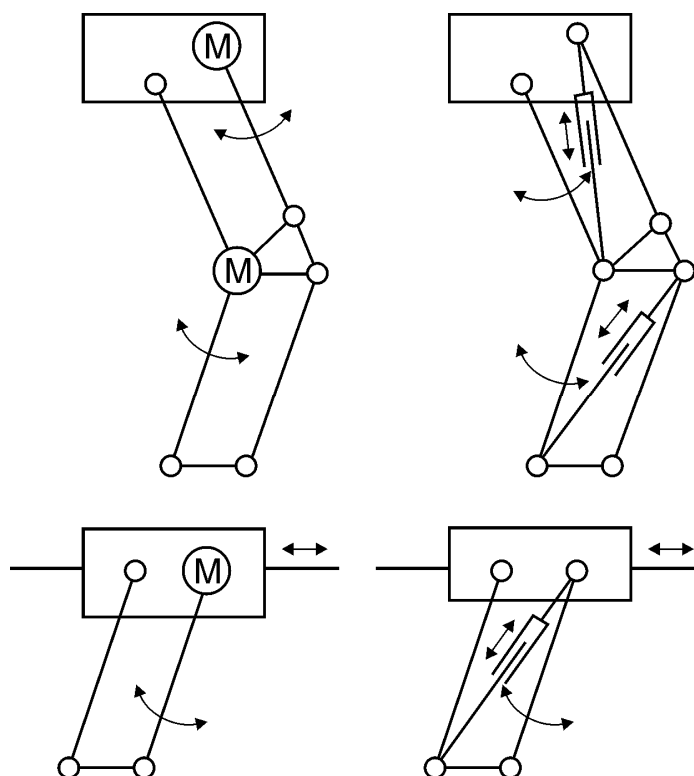
На слици 5 је показано неколико раванских паралелних и серијских механизма описаних у [2,17,18] са постојећим решењима активних П-зглобова и са активним П-зглобом описаним у овом техничком решењу.



Равански 5R механизми са два степена слободe



Равански механизам са два степена слободe и константном оријентацијом платформе



Серијски механизми са два степена слободe

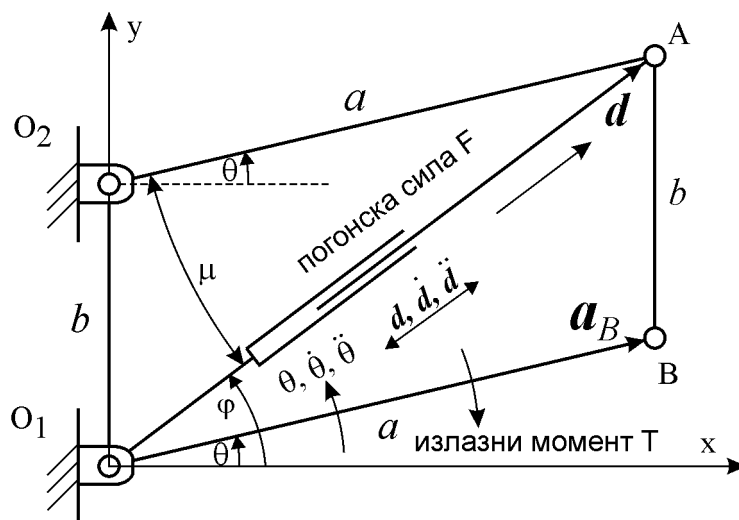
Слика 5. Примери раванских паралелних и серијских механизма са два степена слободe са постојећим решењима активног П-зглоба и активним П-зглобом развијеним у овом техничком решењу

Упркос недостацима који се са неких аспеката могу сматрати значајним, као што су неуниформни преносни однос брзине, кретање самог актуатора телескопске спојке као и проблеми који се могу јавити при производњи, претходно поменуте предности развијеног механизма га чине веома применљивим како код машина са паралелном кинематиком тако и код других типова машина. Неуниформни преносни однос брзине развијеног активног П-зглоба није од значаја за примену код паралелних робота и машина алатки с обзиром да су њихови мотори управљани рачунаром.

4.1 Моделирање и анализа механизма

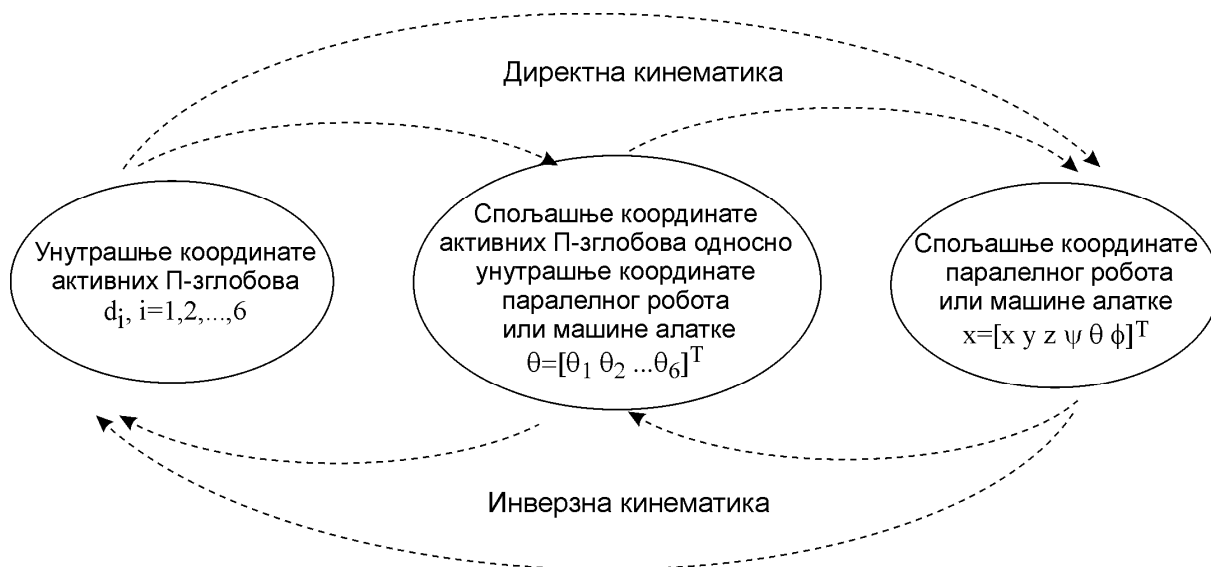
Комплексни кинематички ланци су описани скуповима улаза и излаза који одговарају n -димензионом вектору унутрашњих координата \mathbf{q} и m -димензионом вектору спољашњих координата \mathbf{x} . Ови вектори зависе од природе и намене кинематичког ланца. На пример, код паралелног робота или машине алатке вектор унутрашњих координата \mathbf{q} представља скуп угаоних и/или транслаторних помераја оснажених зглобова док вектор спољашњих координата \mathbf{x} описује позицију и оријентацију платформе у Декартовим координатама. Међутим, у општем случају скуп излаза, односно спољашњих координата, не мора бити изражен Декартовим координатама већ такође може одговарати угаоним и/или транслаторним померајима зглобова [25].

На слици 6 је представљен геометријски модел развијеног механизма активног П-зглоба.



Слика 6. Геометријски модел механизма

С обзиром да се активни П-зглоб са слике 6 посматра као еквивалент комбинацији обртног зглоба и сегмента константне дужине код паралелних робота и машина алатки његова спољашња координата је угао $\theta = \theta(t)$, $(-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2})$, док је његова унутрашња координата дужина $d = d(t)$ дијагоналне телескопске спојке ОА ($d_{min} < d < d_{max}$), слика 7. Опсежи кретања за θ и d зависе од конструкционог решења механизма.



Слика 7. Везе између спољашњих и унутрашњих координата паралелног робота или машине алатке и спољашњих и унутрашњих координата активних П-зглобова

4.1.1 Инверзна и директна кинематика

С обзиром да механизам има само два пара сегмената константних дужина a и b , то је за приступ моделирању који треба да омогући и анализу и оптимизацију механизма уведен бездимензиони параметар $k = b/a$ тако да се добија веза између спољашњих и унутрашњих координата описана једначином

$$F(\theta, d) = a^2(1 + k^2 + 2k \cdot s\theta) - d^2 = 0 \quad (1)$$

где је $s\theta \equiv \sin \theta$. Из ове једначине се добија решење инверзног кинематичког проблема, односно дужина дијагоналне спојке d за задати угао θ као

$$d = a\sqrt{1 + k^2 + 2k \cdot s\theta} \quad (2)$$

Из једначине (1) се такође добија и решење директног кинематичког проблема, односно угао θ за задату дужину дијагоналне спојке d као

$$s\theta = \frac{d^2 - a^2(1 + k^2)}{2a^2k} \quad (3)$$

а затим

$$c\theta = \sqrt{1 - (s\theta)^2} \quad (4)$$

односно

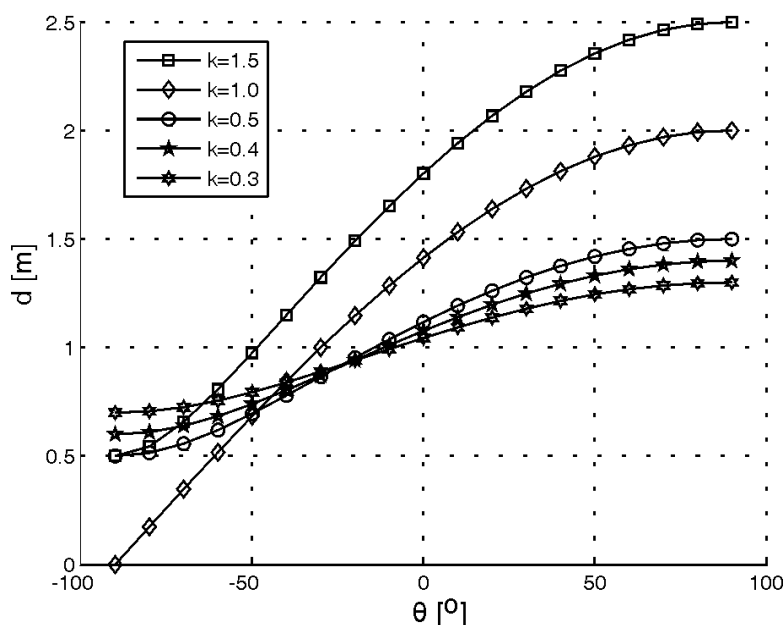
$$\theta = \text{Atan2}(s\theta, c\theta) \quad (5)$$

где је $c\theta \equiv \cos \theta$. С обзиром да се угао θ посматра само у интервалу $(-90^\circ, +90^\circ)$, аргументи у функцији Atan2 обезбеђују једнозначно решење.

Као што је познато, код паралелних механизма па и механизма уопште, поред топологије механизма њихово димензионисање је веома важно због изузетног

утицаја на перформансе механизма. У циљу избора конструктивног решења погона дијагоналне телескопске спојке применом завојног вретена са рециркулационом навртком као и за анализу перформанси механизма прво је анализирана дужина дијагоналне телескопске спојке d , једначина (2), као функција угла θ за различите вредности бездимензионог параметра k .

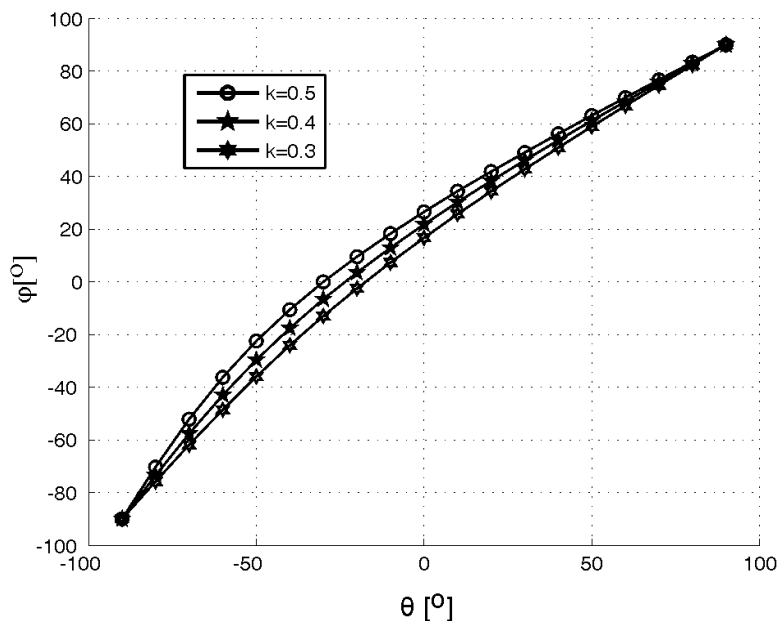
За јединичну дужину полуге $a = 1$ m на слици 8 су приказане дужине дијагоналне телескопске спојке d у функцији угла θ у опсегу $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ и за вредности бездимензионог параметра $k = 0.3, 0.4, 0.5, 1.0$ и 1.5 . Поред вредности за d_{max} и d_{min} на слици 8 је лако уочити да се и њихова разлика смањује са смањењем параметра k . Усвојене вредности бездимензионог параметра $k = 0.3, 0.4$ и 0.5 се показују као најповољније за конструктивна решења П-зглоба који би био применљив за паралелне роботе и машине алатке приказане на сликама 4 и 5. Механизам са димензијама када је $k \geq 1$ нису била од интереса за даљу анализу у овом техничком решењу.



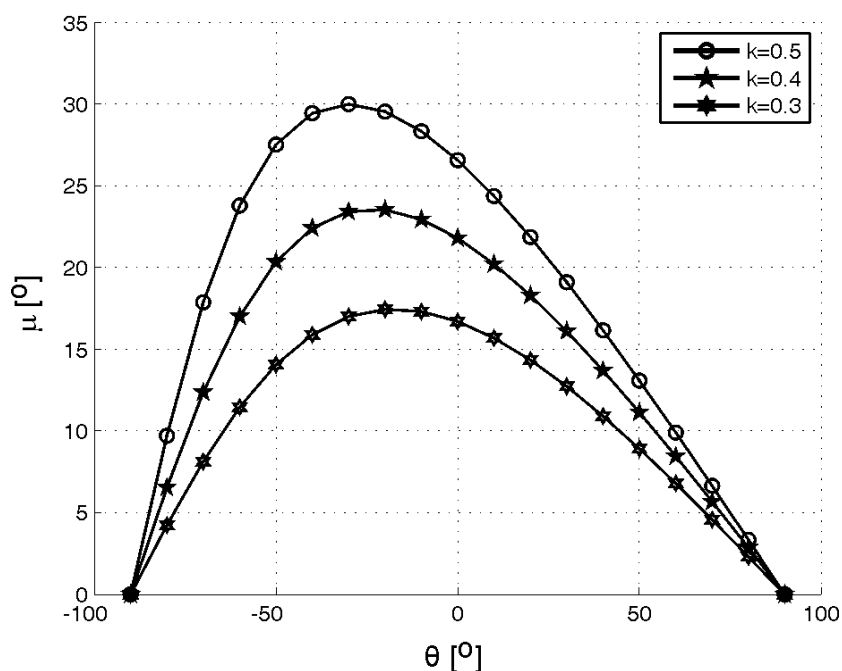
Слика 8. Дужина дијагоналне телескопске спојке d у функцији угла θ за дужину полуге $a = 1$ m

Други важан параметар који мора бити узет у обзир за даљу анализу механизма са усвојеним погоном на бази завојног вретена је пасивни угао φ , слика 6. Његов утицај је важан за одређивање гаоне брзине и убрзања дијагоналне телескопске спојке при динамичкој анализи механизма као и за одређивање угла преноса μ . Промене вредности ових углова за вредности бездимензионог параметра $k = 0.3, 0.4$ и 0.5 и за опсег угла $\theta (-90^\circ, 90^\circ)$ су показане на сликама 9 и 10.

Са слика 9 и 10 је лако уочити да вредности угла преноса μ у интервалу $\theta(-75^\circ, 75^\circ)$ омогућавају на први поглед задовољавајуће једноставну конструкцију механизма. Међутим, много бољи увид у карактеристике механизма и могућа конструктивна решења омогућава анализа Јакобијан матрице.



Слика 9. Промена угла φ у функцији угла θ за усвојене параметре k



Слика 10. Промена угла μ у функцији угла θ за усвојене параметре k

4.1.2 Односи брзина, Јакобијан матрица и сингуларитети

Сингуларитети су један од најзначајнијих и критичних проблема у пројектовању и управљању машинама на бази комплексних кинематичких ланаца. Анализа сингуларитета развијеног механизма у теоријском радном простору ($-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) је спроведена анализом Јакобијан матрица [9, 25]. С обзиром да развијени механизам има један степен слободне то је Јакобијан матрица J , матрица 1×1 , односно скалар и пресликава угаону брзину $\dot{\theta}$ у транслаторну брзину телескопске спојке \dot{d} као

$$\dot{d} = J \cdot \dot{\theta} \quad (6)$$

Јакобијан матрица се може извести диференцирањем једначине (2) као

$$J = \frac{a \cdot k \cdot c \theta}{\sqrt{1 + k^2 + 2k \cdot s \theta}} \quad \vee \quad J = \frac{a^2 \cdot k \cdot c \theta}{d} \quad (7)$$

С обзиром да је Јакобијан матрица 1x1, односно скалар, то су $J^T = J = \det(J)$ и $J^{-1} = 1/J$, тако да се однос пресликавање транслаторне брзине телескопске спојке \dot{d} у угаону брзину $\dot{\theta}$ може изразити као

$$\dot{\theta} = J^{-1} \cdot \dot{d} = \frac{\dot{d}}{J} \quad (8)$$

Међутим, Јакобијан матрица се може изразити и као

$$J = J_d^{-1} \cdot J_\theta \quad (9)$$

где су

$$J_d = -\frac{\partial F(\theta, d)}{\partial d} = 2d \quad \vee \quad J_d = 2a\sqrt{1 + k^2 + 2 \cdot k \cdot s \theta} \quad (10)$$

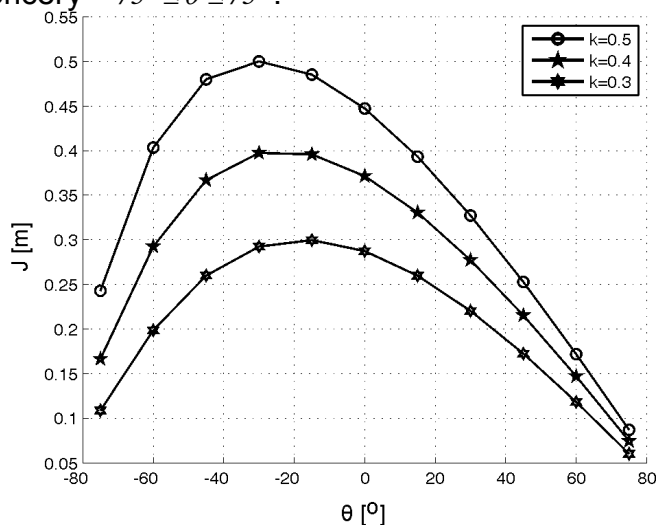
и

$$J_\theta = \frac{\partial F(\theta, d)}{\partial \theta} = 2 \cdot a^2 \cdot k \cdot c \theta \quad (11)$$

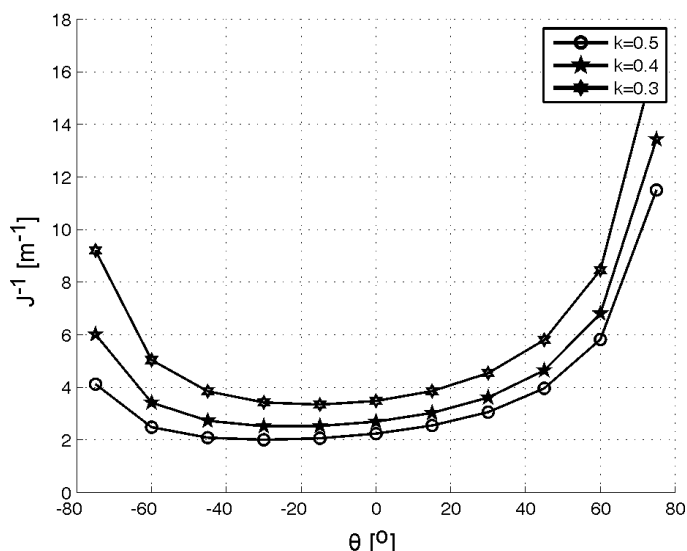
тако да је могуће анализирати сва три типа сингуларитета механизма, односно сингуларитете инверзне кинематике, сингуларитете директне кинематике и комбиноване сингуларитете.

Анализом једначина (9) до (11) је лако уочити да су сви сингуларитети на самим границама радног простора, односно када је $\theta = \pm 90^\circ$.

На сликама 11 и 12 су показане промене вредности Јакобијан матрице J и инверзне Јакобијан матрице J^{-1} , за јединичну вредност дужине полуке $a = 1$ m и вредност угла θ у опсегу $-75^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$.



Слика 11. Вредности Јакобијан матрице као функције угла θ за усвојени опсег $-75^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ и јединичну дужине полуке $a = 1$ m



Слика 12. Вредности инверзне Јакобијан матрице као функције угла θ за усвојени опсег $-75^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ и јединичну дужине полуге $a = 1 \text{ m}$

Посматрајући једначине (6) и (7) слика 11 може бити посматрана и као промена трансляторне брзине телескопске спојке \dot{d} за константну угаону брзину $\dot{\theta} = 1 \text{ s}^{-1}$. Такође и слика 12, према једначини (8) може бити посматрана као промена угаоне брзине $\dot{\theta}$ за константну трансляторну брзину телескопске спојке $\dot{d} = 1 \text{ m/s}$.

4.1.3 Статичка анализа механизма

Уз претпоставку да су трење и гравитационе силе занемариви, однос између излазног статичког момента T и погонске статичке силе F , слика 6, се на основу принципа виртуелног рада [9] може изразити као

$$T = J^T \cdot F \quad (12)$$

Како је Јакобијан матрица 1x1 ова једначина постаје

$$T = J \cdot F \quad (13)$$

на основу које се погонска сила F за задати излазни статички момент T може одредити као

$$F = J^{-1} \cdot T = \frac{T}{J} \quad (14)$$

Посматрајући једначине (13) и (7) слика 11 такође може бити посматрана као промена излазног статичког момента T за константну погонску силу телескопске спојке $F=1 \text{ N}$. Такође, и слика 12 према једначини (14) може бити посматрана и као промена статичке погонске силе телескопске спојке F за константни статички излазни момент $T=1 \text{ Nm}$.

За случај када је погонски мотор директно везан за завојно вретено или навртку корака h , однос између излазног статичког момента T и статичког момента мотора се према једначини (14) може изразити као

$$T_M = \frac{F \cdot h}{2\pi\eta} = \frac{T \cdot h}{2\pi \cdot J \cdot \eta} \quad (15)$$

где је η степен корисности завојног вретена.

4.1.4 Анализа убрзања

Диференцирањем једначине (1) по времену добија се једначина

$$J_\theta \cdot \dot{\theta} = J_d \cdot \dot{d} \quad (16)$$

из које се поновним диференцирањем по времену добија једначина

$$\dot{J}_\theta \dot{\theta} + J_\theta \ddot{\theta} = \dot{J}_d \dot{d} + J_d \ddot{d} \quad (17)$$

Из једначине (17) се транслаторно убрзање телескопске спојке \ddot{d} , слика 6, израчунава као

$$\ddot{d} = J\ddot{\theta} + J_d^{-1}(\dot{J}_\theta - \dot{J}_d \cdot J)\dot{\theta} \quad (18)$$

где члан

$$J\ddot{\theta} = \frac{ak \cdot c\theta}{\sqrt{1+k^2+2k \cdot s\theta}} \quad (19)$$

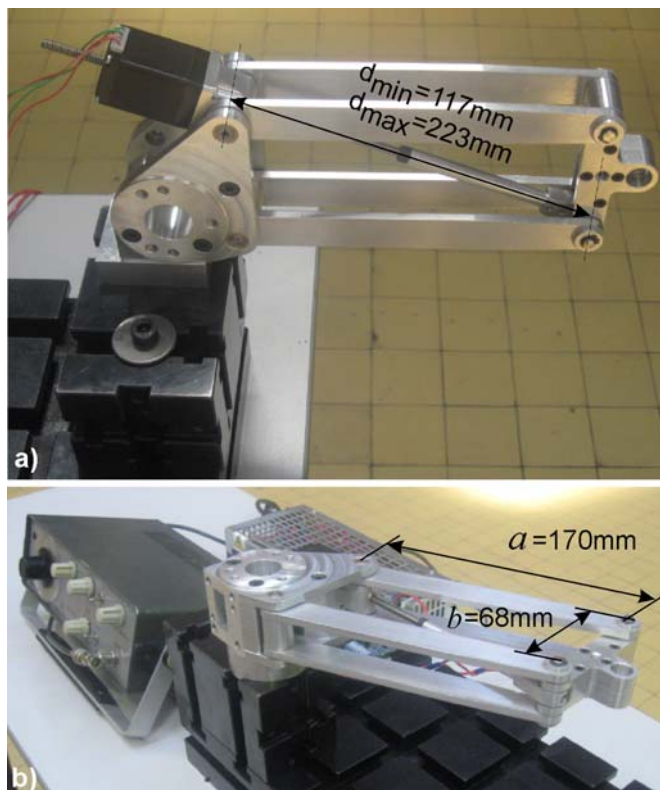
представља убрзање телескопске спојке услед угаоног убрзања $\ddot{\theta}$, док члан

$$J_d^{-1}(\dot{J}_\theta - \dot{J}_d J)\dot{\theta} = -\frac{ak \cdot (k + s\theta)(1 + k \cdot s\theta)}{\sqrt{1+k^2+2k \cdot s\theta} \cdot (1+k^2+2k \cdot s\theta)} \dot{\theta} \quad (20)$$

представља убрзање телескопске спојке услед константне угаоне брзине угаоног убрзања $\dot{\theta}$.

4.2 Развијени прототип П-зглоба са техничким карактеристикама и испитивањем геометрије статичке крутости

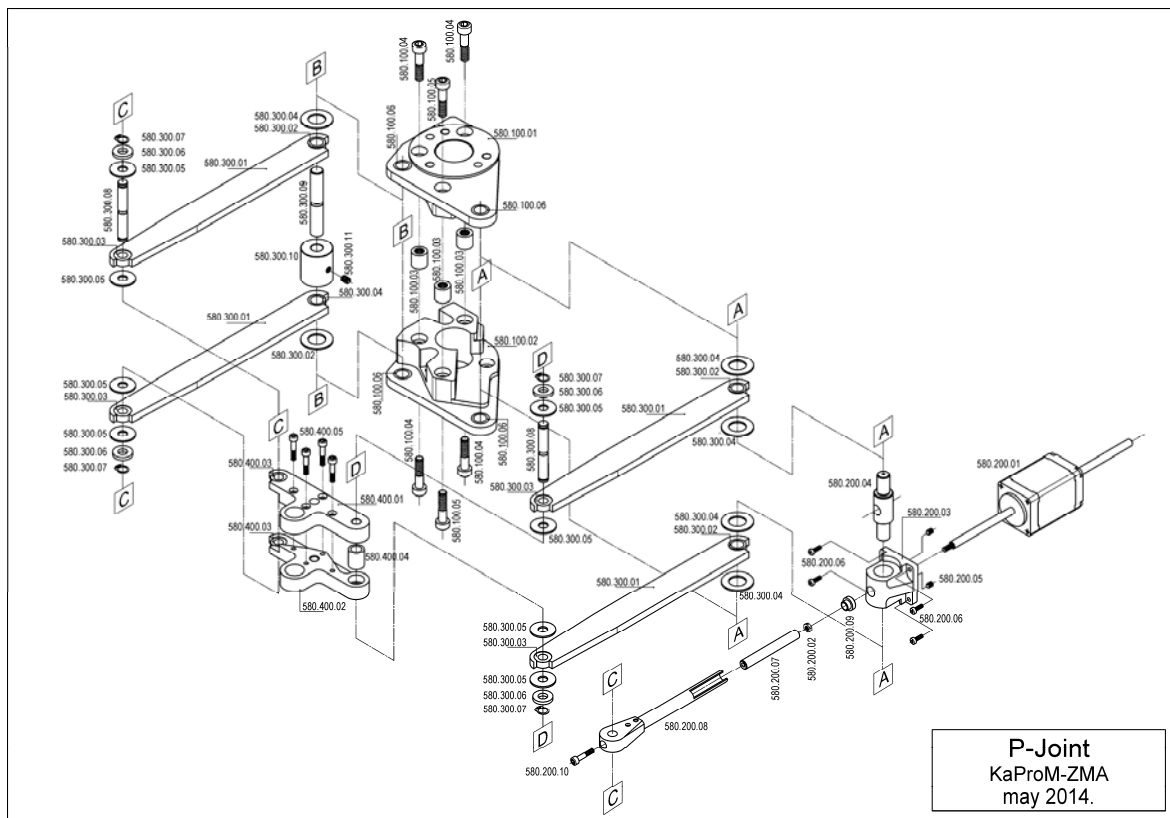
Као што је поменуто развијени механизам омогућава различита конструктивна решења зависно од области примене. Полазећи од идеје да развијени активни П-зглоб, слика 3, буде применљив на неколико примера просторних и раванских паралелних робота, слике 4 и 5, развијен је први прототип, слика 13.



Слика 13. Прототип активног П-зглоба

Прототип је израђен од легуре алуминијума са обликом базног сегмента који омогућава различите начине постављања у вертикалној и хоризонталној равни, слике 13а и 13б. Почетни корак у развоју прототипа је било усвајање дужине полуге a као и опсега угла његове ротације θ . За усвојену дужину полуге $a=170$ mm и угао ротације $\theta=\pm 60^\circ$ дужина спојке b , односно вредност бездимензионог параметра k је анализирана у итеративној процедури. У сваком кораку итерације пажња је била усмерена на потенцијална конструктивна ограничења као што су максимална и минимална дужина дијагоналне телескопске спојке d_{min} и d_{max} , њихове разлике $d_{max} - d_{min}$, могућих инреференци међу сегментима као и вредностима Јакобијан матрица J и њене инверзне матрице J^{-1} .

Бездимензиони параметар $k = 0.4$, односно дужина спојке $b=68$ mm, одређени на овај начин, задовољавају претходно поменуте услове и ограничења поготову када су у питању вредности $d_{max} = 232$ mm, $d_{min} = 117$ mm и $(d_{max} - d_{min}) = 115$ mm. С обзиром да први прототип има за циљ да покаже да је структура развијеног механизма активног П-зглоба ваљано и погодно решење. За његову израду су коришћене комерцијално расположиве компоненте ниже цене, слика 14.



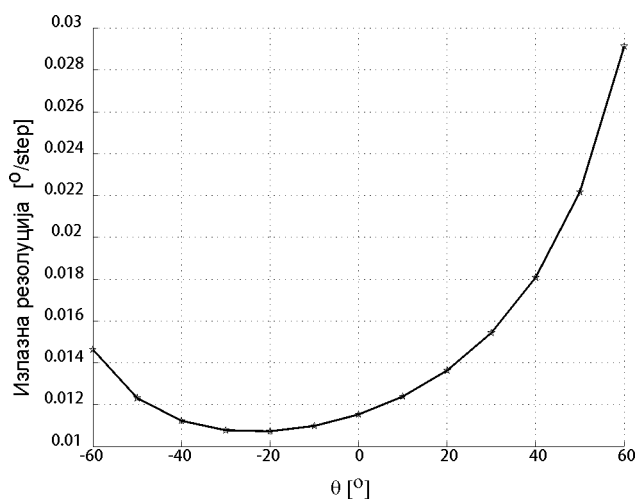
Слика 14. Приказ компоната развијеног прототипа

Минијатурни хибридни корачни мотор са интегрисаним завојним вретеном је коришћен као погон. За овако усвојени погон, дијагонална телескопска спојка је пројектована једноставно и чини је завојно вретено са гоњеном навртком интегрисаном у шупље вратило мотора. Основне карактеристике хибридног корачног мотора са интегрисаним завојним вретеном су показане у Табели 1.

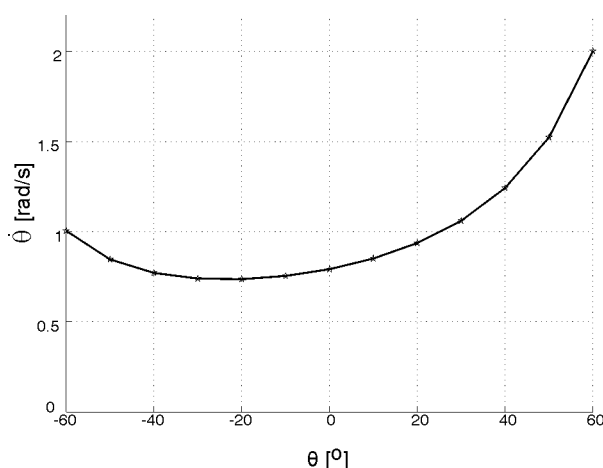
Табела 1 Основне карактеристике хибридног корачног мотора са интегрисаним завојним вретеном

Пречник завојног вретена [mm]		4.7752
Корак [mm]		2.540
Линеарна резолуција [mm/step]		0.01270
Максимална брзина	линеарна [mm/s]	50
	импулса / s	4000
	обртна [min ⁻¹]	1200
Препоручена погонска сила [N]		130
Габарити [mm]		28 x 28 x 45
Маса [g]		180

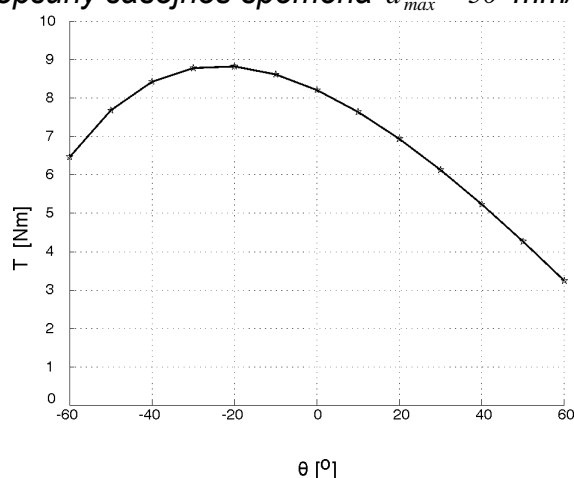
Основне карактеристике активног П-зглоба као што су излазна угаона резолуција, излазна угаона брзина $\dot{\theta}$ и излазни статички момент T су приказани на сликама 15, 16 и 17.



Слика 15. Промена излазне резолуције П-зглоба за константну резолуцију хибридног корачног мотора од 0.0127 mm/step



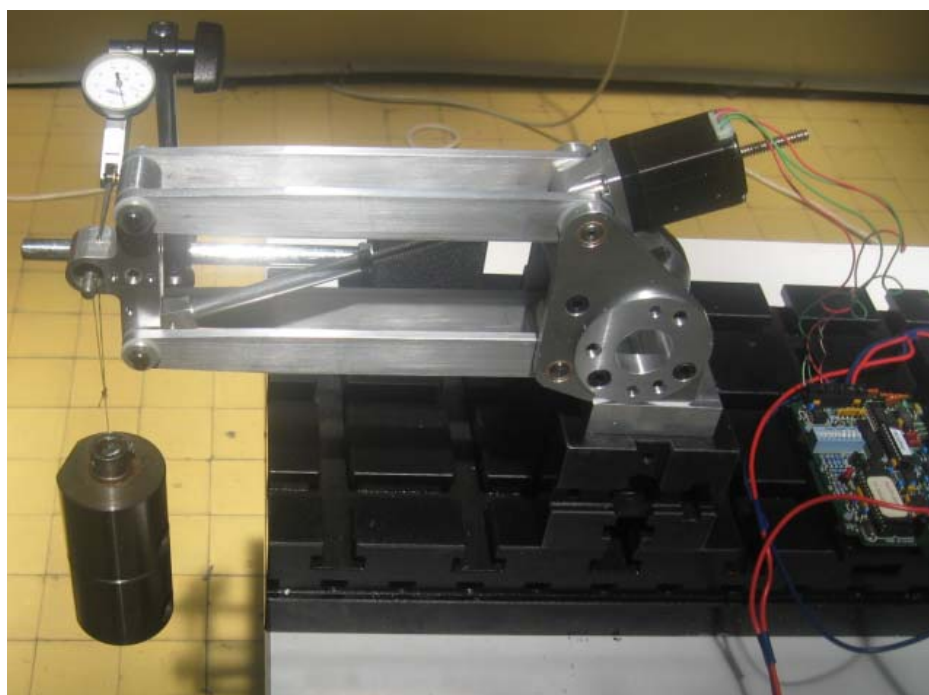
Слика 16. Промена излазне угаоне брзине $\dot{\theta}$ за константну транслаторну брзину завојног вретена $\dot{d}_{max} = 50$ mm/s



Слика 17. Промена излазног статичког момента T за константну погонску силу на завојном вретену $F_{max} = 130$ N

Као што се види на сликама 15 до 17, промене ових основних карактеристика активног П-зглоба, су дате за опсег угла $\theta = \pm 60^\circ$. Са слика 15 до 17 је лако закључити да су нагле промене ових карактеристика у интервалу $\theta = 40^\circ \div 60^\circ$. Зависно од примене најповољнији опсег угла θ би био у интервалу $\theta = [-60^\circ \div 40^\circ]$.

Прелиминарним испитивањима геометрије и статичке крутости активног П-зглоба, слика 18, је идентификована средња статичка крутост у интервалу опсега кретања $\theta = \pm 60^\circ$ од око $3.5 \cdot 10^4 \text{ Nm/rad}$. С обзиром да је реч о првом прототипу који је израђен у лабораторијским условима добијени резултати су изузетно добри у поређењу са статичком крутошћу еквивалента механизма П-зглоба, односно обртног зглоба и сегмента константне дужине.



Слика 18. Испитивање статичке крутости

5. ЗАКЉУЧАК

Развој механизма са једним степеном слободe на бази раванског зглобног паралелограма је имао за циљ решење проблема погона раванског зглобног паралелограма као кинематичког еквивалента обртног зглоба и полуге константне дужине. Активни П-зглоб на бази развијеног механизма поред примене код паралелних робота и машина алатки може бити примењен и на другим типовима машина. У овом техничком решењу је описана структура механизма, приступ моделирања који омогућава анализу и оптимизацију механизма, као и развијени прототип. Развој и прелиминарно тестирање прототипа показује да овакав активни П-зглоб омогућава читав низ предности у поређењу са досадашњим активним П-зглобовима што оправдава даља истраживања и развој у овом правцу.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Merlet J-P (2000) *Parallel Robots*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht ISBN 0-7923-6308-6.
- [2] X.-J. Liu , J. Wang, *Parallel Kinematics Type, Kinematics, and Optimal Design*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2014, doi:10.1007/978-3-642-36929-2.
- [3] IFToMM Terminology, *Mechanism and Machine Theory*, 38(2003) 767–776, doi:10.1016/S0094-114X(03)00015-6.
- [4] L.-W. Tsai, *Mechanism Design Enumeration of Kinematic Structures According to Function*, CRC Press, Boca Raton London New York Washington, D.C., 2001, ISBN 0-8493-0901-8.
- [5] K. J. Waldron, G. L. Kinzel, *Kinematics and Dynamics, and Design of Machinery*, second ed., John Wiley and Sons, New York, 2004, ISBN 10: 0471244171 / ISBN 13: 9780471244172.
- [6] J.M. Hervé, F. Sparacino, *Star, a New Concept in Robotics*, Proceedings of the Third International Workshop on Advances in Robot Kinematics, Ferrara, Italy, Sept. 7–9, 1992, pp. 176–183.
- [7] K. Wohlhart, *Der homogene Paralleltrieb-Mechanismus*, *Mathematica Pannonica*, 2/2(1991) 59–76.
- [8] J. Angeles, *The Qualitative Synthesis of Parallel Manipulators*, *ASME J. Mech. Des.*, 126/4(2004) 617–624, doi:10.1115/1.1667955.
- [9] L.-W. Tsai, *Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1999, ISBN:0-471-32593-7.
- [10] J. Hudgens, D. Tesar, *A fully-parallel six degree-of-freedom micromanipulator: kinematics analysis and dynamic model*, Proceedings of 20th Biennial ASME mechanisms conference, ASME press, Kissimmee, Florida, New York, 1988, pp 29–38.
- [11] R. Clavel, *Delta, a Fast Robot with Parallel Geometry*, Proc.of 18th Int. Symp. on Industrial Robots, Lausanne, 1988, pp. 91–100.
- [12] D. Milutinovic, M. Glavonjic, V. Kvirgic, S. Zivanovic, *A new 3-DOF spatial parallel mechanism for milling machines with long X Travel*, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54/1(2005) 345–348, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60119-X.
- [13] L.W. Tsai, R. Stamper R, *A parallel manipulator with only translational degrees of freedom*, Technical research report, Institute for Systems Research, University of Maryland, 1997.
- [14] M. Sorli, C. Ferraresi, M. Kolarski, et al, *Mechanics of TURIN parallel robot*, *Mech. Mach. Theory*, 32/1(1997) 51–57, doi: 10.1016/0094-114X(96)00023-7.
- [15] M. Ceccarelli, *A new 3 D.O.F. spatial parallel mechanism*, *Mech. Mach. Theory* 32/8(1997) 895–902, doi: 10.1016/S0094-114X(97)00019-0.
- [16] T. Arai, J.M. Herve, T. Tanikawa, *Development of 3 DOF Micro Finger*, Proc. of IROS'96, Osaka, November 5–8, 1996, pp. 981–987.

- [17] O. Company, F. Pierrot, S. Krut, C. Baradat, V. Nabat, Par2: a spatial mechanism for fast planar two-degree-of-freedom pick-and-place applications, *Meccanica*, 46(2011) 239–248, doi: 10.1007/s11012-010-9413-x.
- [18] T. Brogardh, Device for Relative Movement of Two Elements, U.S. Patent No. 6,301,988 B1, 2001.
- [19] A. Morozov, J. Angeles, The mechanical design of a novel Schonflies-motion generator, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 23(2007) 82-93, doi: 10.1016/j.rcim.2005.07.008.
- [20] V. Nabat, Robots parallèles à nacelle articulée, du concept à la solution industrielle pour le pick-and-place, PhD thesis, University Montpellier 2, 2007.
- [21] A. Quaid, Parallelogram based actuating device, Patent application number US 2013/0192396 A1, 2013.
- [22] J. M. McCarthy, G. S. Soh, Geometric Design of Linkages, second ed., Springer, New York Dordrecht Heidelberg London, 2010, doi:10.1007/978-1-4419-7892-9.
- [23] D. Milutinovic, H. Makino, K. Hoshiide, Eiffel-mechanism, patent number JP4485116 (B2), 2010.
- [24] U. Heisel, Precision requirements of hexapod-machines and investigation results, in: C.R. Boer, L. T. Molinari, K.S. Smith (Eds.), *Parallel kinematic machines – theoretical aspects and industrial requirements*, Springer, Berlin, 1999, pp 131–150, doi 10.1007/978-1-4471-0885-6_9.
- [25] C. Gosselin, Kinematic analysis optimization and programming of parallel robotic manipulators, Ph.D. Thesis, McGill University, Montreal, 1988.

7. ПРИЛОЗИ

У наставку су следећа два прилога, који су саставни део овог Елабората и прилог са документима који су пратили ово техничко решење. Ти прилози су следећи:

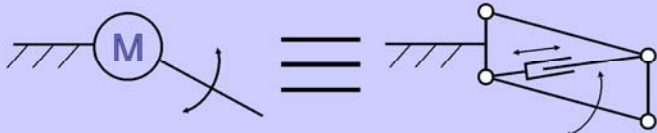
ПРИЛОГ 7.1 Проспект за техничко решење и

ПРИЛОГ 7.2 Документи који су пратили прихватање овог техничког решења

- 1) Молба Наставно-научном већу за избор рецензената за Техничко решење
- 2) Одлука Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду о именовању рецензената
- 3) Извештај рецензената
- 4) Одлука Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду о прихватању техничког решења
- 5) Мишљење корисника - ЛОЛА института

ПРИЛОГ 7.1. Проспект техничког решења

**Mechanism for active P- joint
as an equivalent to the
combination of revolute joint and
proximal fixed-length link**

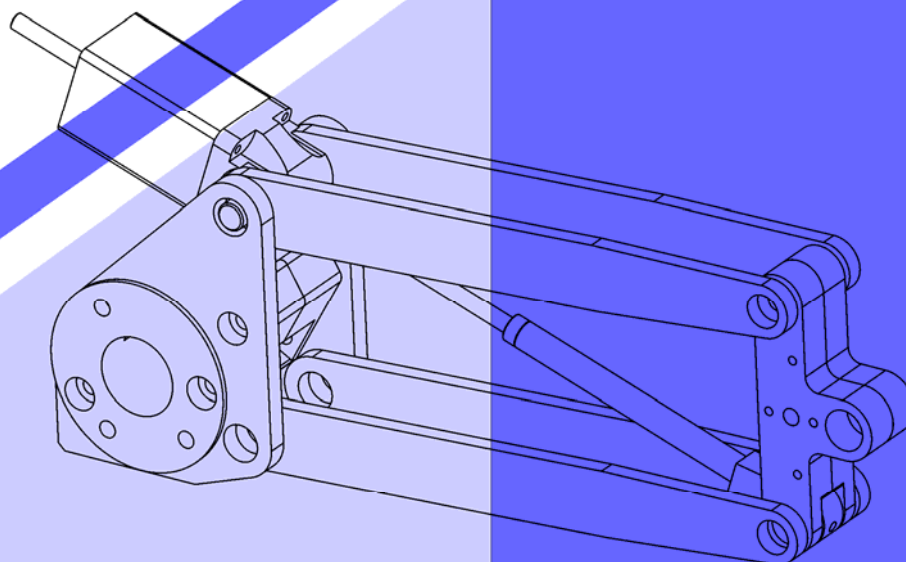


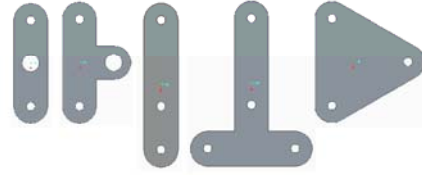
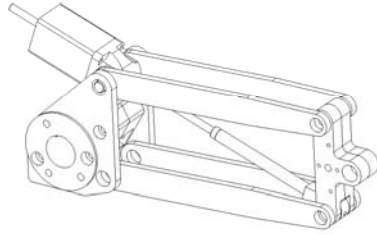
Active П-joint



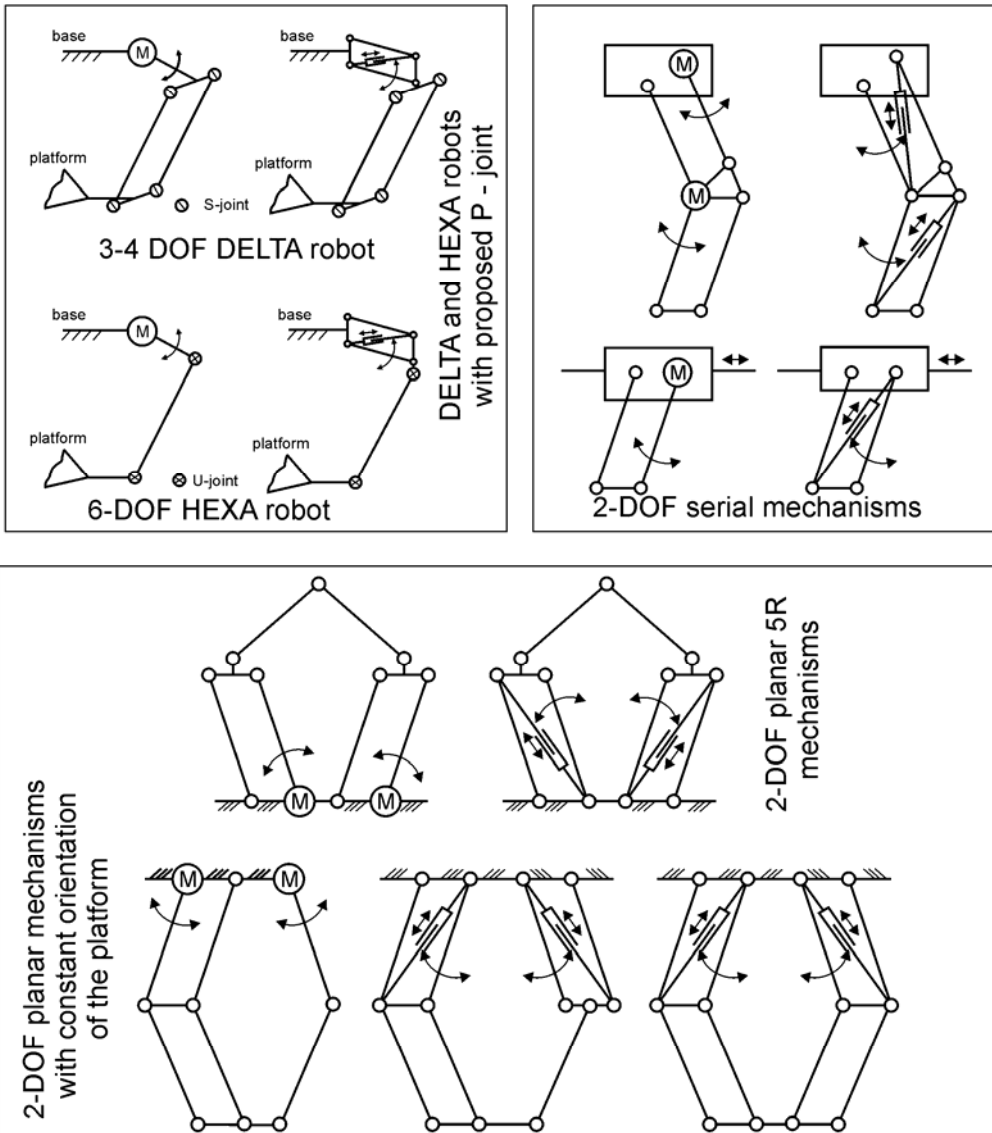
University of Belgrade, Faculty of MECHANICAL ENGINEERING

Production
Engineering Department





Application examples

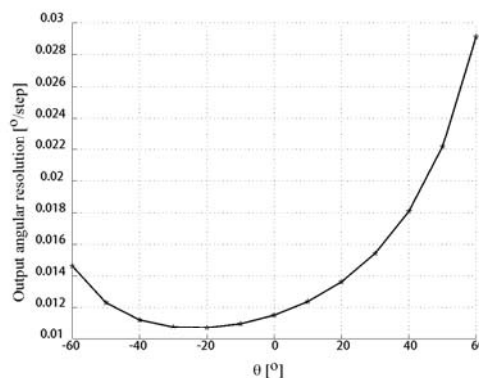


Active П-JOINT

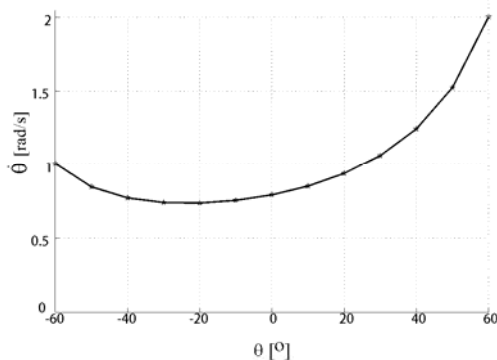
Basic characteristics of the miniature hybrid stepper motor linear actuator

Screw diameter [mm]	4.7752	
Lead [mm]	2.540	
Linear resolution [mm/step]	0.01270	
Maximal Speed	Linear [mm/s]	50
	Pulse [PPS]	4000
	Rotary [min ⁻¹]	1200
Recommended thrust force limit [N]	130	
Dimension [mm]	28 x 28 x 45	
Weight [g]	180	

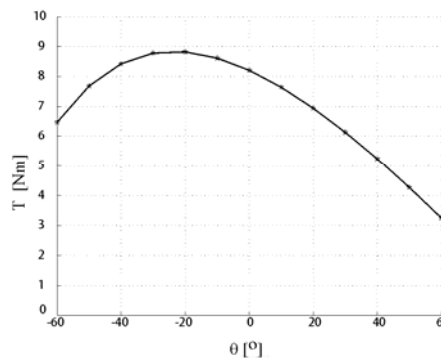
P - joint's output angular resolution for the constant actuator linear resolution of 0.0127 mm/step



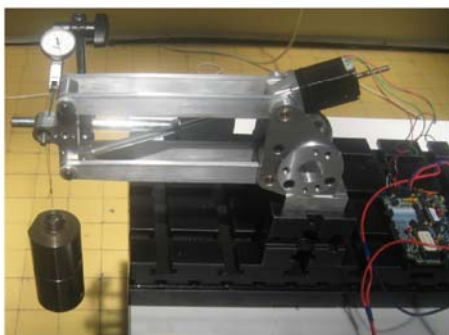
P - joint's output angular velocity $\dot{\theta}$ for the constant actuator maximal input rate $\dot{d}_{max}=50\text{mm/s}$



Change of the P - joint's output static torque T for the constant input actuator maximal static thrust force $F_{max}=130\text{ N}$



Static stiffness test

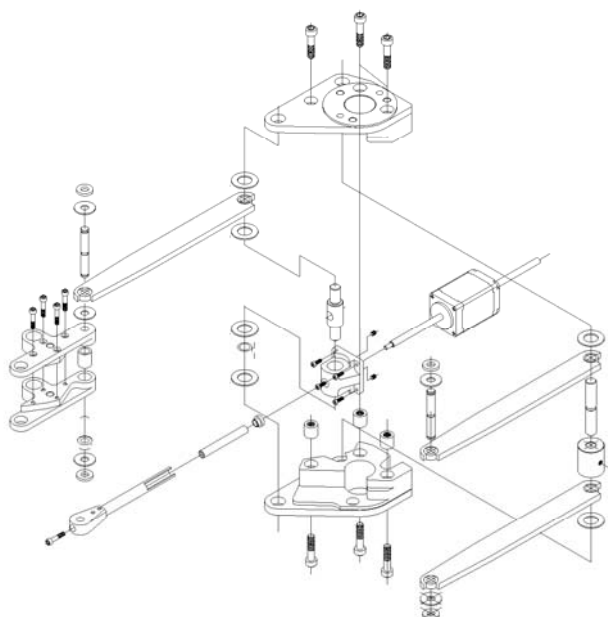
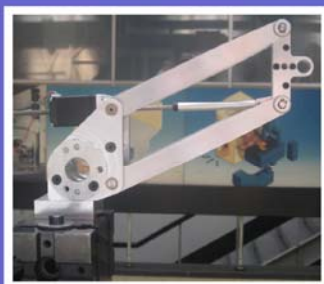


Average overall П - joint stiffness in the range of crank angles $\theta=\pm 60^\circ$:

$$3.5 \times 10^4 \text{ Nm/rad}$$

Mechanism for active P- joint
as an equivalent to the
combination of revolute joint and
proximal fixed-length link

Active П-joint

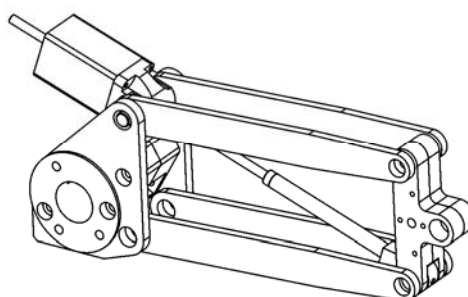


Active П - joint laboratory prototype



Address

University of Belgrade,
Faculty of Mechanical Engineering,
Production Engineering Department,
Kraljice Marije 16,
11120 Belgrade 35, SERBIA
<http://www.mas.bg.ac.rs/>
<http://cent.mas.bg.ac.rs/mpk/index.htm>



ПРИЛОГ 7.2

Документи који су пратили прихватање овог техничког решења

(сваки од ових докумената је на по једној страни,
осим документа број 3, који је на три стране)

- 1) Молба Наставно-научном већу за избор рецензената за Техничко решење
- 2) Одлука Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду о именовању рецензената
- 3) Извештај рецензената.
- 4) Одлука Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду о прихватању техничког решења
- 5) Мишљење корисника - ЛОЛА института

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ



Предмет: Молба за избор рецензената техничког решења

Молимо Наставно-научно веће да за Техничко решење:

**МЕХАНИЗАМ АКТИВНОГ П-ЗГЛОБА КАО ЕКВИВАЛЕНТА КОМБИНАЦИЈЕ
ОБРТНОГ ЗГЛОБА И СЕГМЕНТА КОНСТАНТНЕ ДУЖИНЕ**

аутора:

Драган Милутиновић, ред. проф., Машински факултет Универзитета у Београду,
Бранко Кокотовић, доцент, Машински факултет Универзитета у Београду,
Никола Славковић, дипл. инж. маш., Машински факултет Универзитета у
Београду,
Саша Живановић, доцент, Машински факултет Универзитета у Београду,

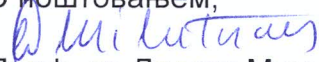
које је реализовано на Машинском факултету Универзитета у Београду, у оквиру пројекта Технолошког развоја TR035022 "Развој нове генерације домаћих обрадних система", који је финансијски подржало Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, именује два рецензента.

Наш предлог је да рецензију овог техничког решења изврше:

Проф. др Љубодраг Тановић, Машински факултет Универзитета у Београду
Проф. др Милан Зељковић, Факултет техничких наука, Нови Сад

У Београду, 25. новембар 2014.

С поштовањем,


Проф. др Драган Милутиновић

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
БРОЈ: 3055/2
ДАТУМ: 28.11.2014.

На основу захтева др Драгана Милутиновића, редовног професора Машинског факултета Универзитета у Београду, бр. 3055/1 од 26.11.2014. године и чл. 63. Статута Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 27.11.2014. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Да се за рецензенте Техничког решења под насловом: „МЕХАНИЗАМ АКТИВНОГ П-ЗГЛОБА КАО ЕКВИВАЛЕНТА КОМБИНАЦИЈЕ ОБРТНОГ ЗГЛОБА И СЕГМЕНТА КОНСТАНТНЕ ДУЖИНЕ“, чији су аутори: проф. др Драган Милутиновић, доц. др Бранко Кокотовић, Никола Славковић, дипл.инж.маш. и доц. др Саша Живановић, именују:

- проф. др Љубодраг Тановић, Универзитет у Београду, Машински факултет
- проф. др Милан Зељковић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Одлуку доставити: Министарству просвете, науке и технолошког развоја РС, рецензентима и архиви Факултета ради евиденције.



2 ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф. др Милорад Милованчевић

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду,
број 3055/2 од 28. 11. 2014. године, именовани смо за рецензенте Техничког
решења под насловом

**" Механизам активног П-зглоба као еквивалента комбинације обртног зглоба и
сегмента константне дужине",**

реализованог у оквиру пројекта ТР-35022, чији су аутори:
проф. др Драган Милутиновић, дипл.маш.инж., доц. др Бранко Кокотовић,
дипл.маш.инж., Никола Славковић, дипл. инж. маш., доц. др Саша Живановић,
дипл.маш.инж.

На основу прегледа Елабората овог техничког решења и увида у публиковане
радове о њему подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

Техничко решење **"Механизам активног П-зглоба као еквивалента
комбинације обртног зглоба и сегмента константне дужине"**, аутора проф. др
Драган Милутиновић, доц. др Бранко Кокотовић, Никола Славковић, дипл. инж. маш.
и доц. др Саша Живановић, приказано је Елаборатом на 26 страница формата А4
писаних фонтом величине 12 pt са нормалним проредом. Елаборат има пет
поглавља, списак коришћене литературе и два прилога. Садржи 18 слика и једну
табелу у основном делу текста, један проспект на 4 стране у Прилогу 7.1 и списак
комплета документације која прати признавање овог техничког решења, Прилог 7.2.
Наслови поглавља су:

1. Област на коју се техничко решење односи
2. Технички проблем
3. Стање технике
4. Суштина и детаљан опис техничког решења
5. Закључак
6. Литература
7. Прилози

Техничко решење припада области развоја активних (оснажених) зглобова као
кључној компоненти за нове генерације робота и машина алатки са паралелном
кинематиком и реализовано је у оквиру пројекта ТР-35022 "Развој нове генерације
домаћих обрадних система", који подржава Министарство просвете, науке и
технолошког развоја Владе Републике Србије.

Механизам активног П-зглоба се користи као еквивалент комбинацији активног
обртног зглоба и сегмента константне дужине у кинематичким ланцима који повезују
базу и покретну платформу код робота и машина алатки са паралелном
кинематиком.

Извештај рецензента.

У поглављима *Област на коју се техничко решење односи* и *Технички проблем* су описани значај и утицаји активних зглобова у кинематичким ланцима који повезују базу и покретну платформу паралелних механизма. Посебно је наглашен значај зглобног паралелограма као еквивалента обртног зглоба и сегмента константне дужине како у погледу перформанси механизма са паралелном кинематиком тако и у погледу остваривања ограничења, односно броја степени слободе механизма са паралелном кинематиком.

У поглављу *Стање технике* поред детаљније анализе простих и комбинованих зглобова и кинематичких ланаца разматран је кључни недостатак односно погон активног П-зглоба који се користи уместо комбинације активног обртног зглоба и полуге константне дужине.

Поглавље *Суштина и детаљан опис техничког решења* поред описа развијеног механизма и датих примера примене обухвата и следеће целине:

4.1 Моделирање и анализа механизма

4.1.1 Инверзна и директна кинематика

4.1.2 Односи брзина, Јакобијан матрица и сингуларитети

4.1.3 Статичка анализа механизма

4.1.4 Анализа убрзања

4.2 Развијени прототип П-зглоба са техничким карактеристикама и испитивањем геометрије и статичке крутости.

На почетку овог поглавља дата је суштина техничког решења, односно развијени комплексни механизам са једним степеном слободе на бази раванског зглобног паралелограма и са дијагоналном телескопском спојком инспирисан решењем датим патенту првог аутора. Затим су дате кључне предности развијеног механизма у погледу: (1) крутости механизма коју обезбеђује сама структура механизма; (2) погона и управљања издужењем и скраћењем дијагоналне телескопске спојке; (3) елиминације сила и момената савијања чланова механизма; (4) задржавања габарита механизма у оквиру габарита раванског зглобног четвороугла; (5) самокочивости, итд.

У оквиру подпоглавља *Моделирање и анализа механизма* је дат приступ моделирања који омогућава анализу и оптимизацију механизма. Поред решавања инверзне и директне кинематике механизма показана је: (1) њихова веза са инверзном и директном кинематиком машина са паралелном кинематиком; (2) анализа параметара и димензионисање механизма; (3) разматрање односа брзина и сингуларитета кроз извођење и анализу Јакобијан матрица; (4) статичка анализа механизма и (5) анализа убрзања као основе за моделирање динамике механизма.

У подпоглављу *Развијени прототип П-зглоба са техничким карактеристикама и испитивањем геометрије статичке крутости* је, на бази развијеног приступа моделирања, у итеративној процедури извршено димензионисање прототипа механизма. Дат је опис развијеног и израђеног прототипа механизма на основу усвојених параметара. Извршена је анализа основних карактеристика механизма (излазна резолуција, излазна угаона брзина и излазни статички момент) за дате карактеристике изабраног хибридног корачног мотора са интегрисаним завојним вретеном као погонског система механизма. Такође, извршено је и прелиминирано испитивање геометрије и статичке крутости развијеног активног П-зглоба.

У оквиру Закључка се наводи да је развој механизма са једним степеном слободе на бази раванског зглобног паралелограма имао за циљ решење проблема погона раванског зглобног паралелограма као кинематичког еквивалента обртног зглоба и полуге константне дужине. Активни П-зглоб на бази развијеног механизма поред примене код паралелних робота и машина алатки може бити примењен и на другим типовима машина. Такође, развој и прелиминарно тестирање прототипа показује да овакав активни П-зглоб омогућава читав низ предности у поређењу са досадашњим активним П-зглобовима што оправдава даља истраживања и развој у овом правцу.

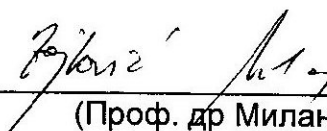
На крају Елабората су прилози. У Прилогу 7.1 је Проспект механизма активног П-зглоба као еквивалента комбинације обртног зглоба и сегмента константне дужине, који је главни део овог техничког решења. У Прилогу 7.2 је списак комплета пратеће документације за признавање овог техничког решења.

МИШЉЕЊЕ

Аутори техничког решења "Механизам активног П-зглоба као еквивалента комбинације обртног зглоба и сегмента константне дужине" јасно су приказали и теоријски обрадили комплетну структуру техничког решења. Приказане могућности механизма активног П-зглоба као еквивалента комбинације обртног зглоба и сегмента константне дужине јасно указују да ово техничко решење представља допринос у развоју активних зглобова као кључној компоненти за нове генерације робота и машина алатки са паралелном кинематиком. Предлажемо Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да се нови производ "Механизам активног П-зглоба као еквивалента комбинације обртног зглоба и сегмента константне дужине" прихвати као ново техничко решење.



(Проф. др Љубодраг Тановић,
Машински факултет,
Београд)



(Проф. др Милан Зељковић,
Факултет техничких наука,
Нови Сад)

У Београду и Новом Саду, децембар 2014. године

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
БРОЈ: 3055/3
ДАТУМ: 26.12.2014.

На основу захтева др Драгана Милутиновића, редовног професора Машинског факултета Универзитета у Београду, бр. 3055/1 од 26.11.2014. године и чл. 63. Статута Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 25.12.2014. године, донело је следећу

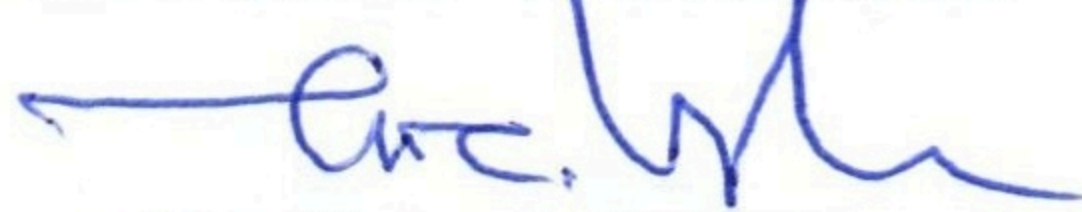
ОДЛУКУ

Прихвата се Техничко решење (М82) под насловом: „**МЕХАНИЗАМ АКТИВНОГ П-ЗГЛОБА КАО ЕКВИВАЛЕНТА КОМБИНАЦИЈЕ ОБРТНОГ ЗГЛОБА И СЕГМЕНТА КОНСТАНТНЕ ДУЖИНЕ**“, чији су аутори: проф. др Драган Милутиновић, доц. др Бранко Кокотовић, Никола Славковић, дипл.инж.маш. и доц. др Саша Живановић.

Одлуку доставити: Министарству просвете, науке и технолошког развоја РС, рецензентима и архиви Факултета ради евиденције.



ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА


Проф.др Милорад Милованчевић

Naš znak: 1283 Datum:
17.12.2014.

Предмет: Механизам активног П-зглоба као еквивалента комбинације обртног зглоба и сегмента константне дужине

Прототип механизма активног П-зглоба као еквивалента комбинације обртног зглоба и сегмента константне дужине је развијен на Машинском факултету Универзитета у Београду.

Овај прототип са техничким решењем су развили аутори: проф. др Драган Милутиновић, дипл.маш.инж., доц. др Бранко Кокотовић, дипл.маш.инж., Никола Славковић, дипл. инж. маш., доц. др Саша Живановић, дипл.маш.инж., сви са Машинског факултета Универзитета у Београду, у оквиру пројекта TR35022 („Развој нове генерације домаћих обрадних система“).

С обзиром да је прототип механизма активног П-зглоба као еквивалента комбинације обртног зглоба и сегмента константне дужине, комплетно завршен, планирамо да га користимо у пројектовању машина за паковање, робота и машина алатки са паралелном кинематиком.

У Београду, 17.12.2014.



В.Д. директора

Владимир Квргић

A handwritten signature in blue ink, appearing to be "V. Kvirgić", written over the stamp and text.