ADVANCED TECHNOLOGIES IN AUTOMATED PRODUCTION

Automated synthesis of optimal robotic trajectories in mechanical-assembling FMC of engineering and instrument making

Eng. Sc. D. Valerii KYRYLOVYCH

Professor of the Department of Robotics, Electroeneogetics and Automation named after prof. B.B. Samotokin Zhytomyr Politechnic State University, Ukraine

THE STRUCTURE AND CONTENT OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION



2

CURRENT STATE OF WORLD ROBOTICS PRODUTION (IFR)





ESSENCE OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION (OM)



THE IMPACT FACTORS ON GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION



 \sum_{5}

THE STATEMENT OF THE PROBLEM TASKS



THE SADT-DIAGRAM OF THE RESEARCHING



THE SADT-DIAGRAM OF THE A1 BLOCK (see slide 7)



8

THE SADT-DIAGRAM OF THE A2 BLOCK (see slide 7)



5 9

SADT – DIAGRAM OF CALCULATION AND CHOICE OF OPTIMAL TRAJECTORIES VALUES







COMPARISON OF THE EXISTING SOFTWARES FOR RESOLVING TASKS RELATED TO GRIPPERS' INTERACTION WITH THE OBJECTS OF

MANIPULATION

The analyzed Softs The analyzed characteristics	RobotWorks	V-Rep	RobotMaster	RobotExpert	Dyn-Soft robSim	RoboAnalyzer	ROS	RoboDK	MBS	Robix
Можливість створення 3D-моделі ПР та інших	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
структурних складових І ВК										
Побудова 3D сцени I ВК на основі готових моделей ПР, ОМ, ТО	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Формування траєкторій переміщення ЗППР за опорними точками	+	+	+	+	_	-	+	+	+	+
Offline корегування колізійних траєкторій	_	+	+	+	_	_	+	_	_	+
Можливість перевірки на колізію між елементами ГВК	+	+	+	+	+	_	+	_	_	+
Підготовка інформації для управляючих програм ПР	+	+	+	+	+	_	+	+	+	+
Розробка управляючих програм ПР	+	+	+	+	_	_	+	+	+	_
Програмування ПР	_	+	+	+	-	_	+	+	-	-
Можливість розрахунку часу циклу (швидкодія) траєкторій	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Вирішення прямої задачі кінематики (ПЗК)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Вирішення зворотної задачі кінематики (ЗЗК)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Вирішення прямої задачі динаміки (ПЗД)	_	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Вирішення зворотної задачі динаміки (ЗЗД)	_	+	+	+	+	+	+	+	+	—
Визначення координат точки затиску ОМ в ЗППР (ЛПС)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
Визначення орієнтації ЗППР при затиску ОМ в ЗППР (КПС)	_	_	_	_	_	_	_	-	_	+
Визначення енергоємності траєкторій	_	_	_	_	_	_	_	_	_	+
Апроксимація траєкторій кінцевою множиною сплайнів	_	_	-	-	_	-		_	_	+
Вибір оптимальної траєкторії	_	_								+
Підтримувані операційні системи	Windows	Linux, Mac OS, Windows	Windows	Windows	Windows	Windows	Linux	Linux, Mac OS, Windows	Linux, Mac OS, Windows	Windows
Додаткове програмне забезпечення	Solid Works	_	_	_	3DStudio MAX	_	-	_	MatLab	_
Вартісна складова	300\$ / 1 pc	Free educational license	н/д	н/д	~70\$	_	-	_	н/д	-

 ≥ 12

THE PROPOSED STRUCTURE OF DSS FOR AUTOMATED CONTROL OF GRIPPERS' INTERACTION WITH THE OBJECTS OF MANIPULATION



13

Приклад ПР:		внн	Оцінка ФМ		
Кінематична структура	Опис	Коментарі	Форма пода	Переваги	Недоліки
	Π⊥Π∥Ρ⊥Π	Рухи ланок: – П – прямолінійні; – Р – обертальні. Розташування ланок: – – паралельне; – ⊥ – перпендикулярне	літерно-символьна	 Визначає вид руху та взаєморозташування ланок у ФШП 	 Не надає повної інформації про функціональні можливості ПР; не відображає однозначно розташуваня ланок МС ПР відносно обраної системи координат; не визначає величини переміщень ланок в СК ПР; не визначає геометричні параметри ланок МС ПР
	$\Pi_{\mathbf{y}} \perp \Pi_{\mathbf{x}} \parallel \mathbf{P}_{\mathbf{x}} \perp \Pi_{\mathbf{y}}$	Рухи ланок: – П – прямолінійні; – Р – обертальні. Розташування ланок: – – паралельне; – ⊥ – перпендикулярне; – Х, Ү, Z – вісі прийнятої системи координат, відносно яких відбувається лінійне переміщення/обертання ланок при ФПП	літерно-символьна	 Визначає вид руху та взаєморозташування ланок у ФПП та відносно обраної системи координат 	 Не надає повної інформації про функціональні можливості ПР; не визначає величини переміщень ланок в СК ПР; не визначає геометричні параметри ланок МС ПР; інформаційна збитковість, що визначається наявністю символів паралельного та перпендикулярного взаєморозташування ланок та осей, відносно яких вони розташовані; неможливість використання при аналізі кутових переміщень, відмінних від 90°



$ \begin{array}{c} \gamma \\ & \Pi_{\chi} \\ & & \Pi_{\chi} \\ & & \Pi_{Y} \\ & & & \Pi_{Y} \\ & & & \Pi_{Y} \\ & & & & \Pi_{Y} \\ & & & & & \Pi_{Y} \\ & & & & & & \Pi_{Y} \\ & & & & & & & \Pi_{Y} \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & $	Π _γ Π _χ Ρ _χ Π _γ	Рухи ланок: – П – прямолінійні; – Р – обертальні. Розташування ланок: – X, Y, Z – вісі прийнятої системи координат, відносно яких відбувається лінійне переміщення/обертання ланок при ФПП	літерно-символьна	 Визначає вид руху та взаєморозташування ланок у ФПП та відносно обраної системи координат 	 Не надає повної інформації про функціональні можливості ПР; не визначає величини переміщень ланок в СК ПР; не визначає геометричні параметри ланок МС ПР; не визначає однозначно розташування ланок МС ПР відносно прийнятої СК
	$Y \to X \to a \to Y$	Переміщення ланок відносно осей прийнятої СК Х ^{ПР} , У ^{ПР} , Z ^{ПР} при ФПП: Х, Ү, Z – лінійні вздовж одноіменних осей; $\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}$ – обертові навколо осей Х ^{ПР} У ^{ПР} Z ^{ПР} відповідно	літерно-символьна	 Визначає вид та напрям руху та взаєморозташування ланок у ФПП та відносно обраної СК ПР 	 Не надає повної інформації про функціональні можливості ПР; не визначає величини переміщень ланок в СК ПР; не визначає геометричні параметри ланок МС ПР; не визначає однозначно розташування ланок МС ПР відносно прийнятої СК



y	$\left< \mathbf{l}_{\mathbf{i}_{1}\mathbf{c}}\mathbf{O}_{\mathbf{i}_{1}} \ \mathbf{\tau}_{\mathbf{i}_{1}} \left(\mathbf{l}_{\mathbf{i}_{1}\mathbf{v}} ight) \right>$	Складові ФО: – $\mathbf{l}_{i_{1}e}$ – постійний розмір i_{Γ} ої ланки; – $\mathbf{O}_{i_{1}}$ – вісь прийнятої СК, вздовж якої розташовується i_{Γ} та ланка; – $\boldsymbol{\tau}_{i_{1}}$ – оператор, що визначає напрямок та тип руху наступної ланки відносно попередньої $\boldsymbol{\tau}_{i_{1}} \in \{\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, \mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}\};$ – $\mathbf{l}_{i_{1}v}$ – визначає максимальну величину переміщення для i_{1} -ої ланки	символьна літерно-числова	 Визначає вид руху ланок у ФПП відносно осей прийнятої правої СК, величини переміщень ланок та розрізняє їх; чітко задає розташування ланок у ФПП 	 Не надає повної інформації про функціональні можливості ПР; не визначає геометричні параметри ланок МС ПР; проблеми, що зумовлені використанням кутів Ейлера при відображенні переміщень
y by by by by be be be be be be be be be be be be be	$ \left< \begin{matrix} \mathbf{l}_{i_{1}c} \mathbf{O}_{i_{1}} \text{ type } [\mathbf{p}_{1}, \mathbf{p}_{2}] \\ \mathbf{\tau}_{i_{1}} (\mathbf{l}_{i_{1}v}) \mathbf{S}_{i_{1}} \end{matrix} \right>$	Складові ФО: – $\mathbf{l}_{i_{i_{l}e}}$ – постійний розмір і _г -ої ланки; – \mathbf{O}_{i_1} – вісь прийнятої СК, вздовж якої розташовується і _г -та ланка; – τ_{i_1} – оператор, що визначає напрямок та тип руху наступної ланки відносно попередньої $\tau_{i_1} \in \{\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, \mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}\};$ – type – тип геометричного примітиву, що описує і _г -ту ланку; [$\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$] – параметри, що описують розмір геометричного примітиву; – \mathbf{l}_{i_1v} – визначає максимальну величину переміщення для i_1 -ої ланки	символьна літерно-числова	 Визначає вид руху ланок у ФПП відносно осей прийнятої правої СК, величини переміщень ланок та розрізняє їх; чітко задає розташування ланок у ФПП; задає типи геометричних примітивів i₁-ої ланки та їх розміри 	 Проблеми, що зумовлені використанням кутів Ейлера при відображенні переміщень



		Складові ФО:		– Визначає вид руху данок	– Чітко визначене ФПП
		$-\theta$ – узагальнена коорлината:		v ФПП вілносно осей	(розташування ланок МС ПР у
		o ysurusiniena koopginiara,		прийнятої правої СК:	виглялі прямої лінії) не лає змогу
70		– 1 – довжина ланки;		– величини кутових	описувати більшість моделей ПР;
Y		– ^т – операція транспонування;		переміщень ланок ;	– не визначає геометричні
	$\Omega = \left\{ \begin{array}{c} D, d; D_k(\theta), d_k(l, \theta), \\ - \end{array} \right\}$	 – Ω – базис ПР; 		 – чітко задає розташування ланок у ФПП; 	параметри ланок МС ПР; – проблеми, що зумовлені
	[k=1,4]	 – D – матриця задання положення; 		 вирішує пряму та зворотню 	використанням матриць із
		– d – матриця переходу до		кінематики;	– неможливість опису MC ПР із
3 62	$\mathbf{D}_{1}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \end{bmatrix},$	узагальнених координат;	oBa	– визначає орієнтацію та пілхіл Сх ПР	лінійними переміщеннями; – не вілображає можливість
- 6	$\left(0 \sin \theta \cos \theta\right)$	 – k – кількість осей прийнятої СК; 	числ		одночасного переміщення ланок
щ С ₁	$\left(\cos \theta \ 0 \ \sin \theta \right)$	$- \qquad D_1(\theta), D_2(\theta), D_3(\theta) \qquad -$	1-0Hd		мс пр; – не вказує на рухомість та
Log X'''	$\mathbf{D}_2(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$	матриці положення відносно	nirel		нерухомість ланок
Z	$(-\sin\theta \ 0 \ \cos\theta)$	відповідних осей СК;	юна		
	$\left(\cos \theta \sin \theta \ 0 \right)$	$- \mathbf{D}_{4}(\mathbf{ heta}) -$ одинична матриця	MBOJ		
	$\mathbf{D}_{3}(\boldsymbol{\theta}) = -\sin\boldsymbol{\theta}\cos\boldsymbol{\theta}0,$		СИІ		
	$D_4(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$				
	$\mathbf{d}_{\mathbf{k}}(\mathbf{l},\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{l}\mathbf{e}_{1}, \ \mathbf{k} = \overline{1,3},$				
	$e_1 = (1, 0, 0)^T$,				
	$\mathbf{d}_4(\mathbf{l}, \mathbf{\theta}) = (\mathbf{l} - \mathbf{\theta})\mathbf{e}_1$				











DESCRIPTION OF BOUNDARY LINKS MOVEMENTS

Тип переміщень	Приклади ступенів рухомості МС ПР у ФПП	Представлення традиційним математичним апаратом	Представлення математичним апаратом теорії кватерніонів	Тип переміщень	Приклади ступенів рухомості МС ПР у ФПП	Представлення традиційним математичним апаратом	Представлення математичним апаратом теорії кватерніонів
ртовий А		$\mathbf{I}_{\mathbf{i}_{i}-(\mathbf{i}_{i}-1)} =$	$Q_{i_i-(i_i-1)} =$	лінійний Х		$\mathbf{l}_{i,v} = \mathbf{X}$	$Q_{i_1-(i_1-1)} =$ = L($\sqrt{X^2}$; X; 0; 0)
ogel	1-1 1 -20*	= A = +A + -A 50 = +20° + -30°	= + R(0,9848;0,1736;0;0) - R(0,9659;-0,2588;0;0)	іійний Ү		$\mathbf{l}_{i,v} = \mathbf{Y}$	$Q_{i_{i_{i_{i_{i_{i_{i_{i_{i_{i_{i_{i_{i_$
вий		$\mathbf{l}_{\mathbf{i}_{i}-(\mathbf{i}_{i}-1)} =$	$Q_{i_i - (i_i - 1)} =$	ци	i-1		
оберто В	-20° -30°	$= \mathbf{b} = +\mathbf{b} + -\mathbf{b} $ 50 = +20° + -30°	= + R(0,9848;0;0,1730;0) - R(0,9659;0; - 0,2588;0)	лінійний Z	1.1 N.1	$\mathbf{l}_{i,v} = \mathbf{Z}$	$Q_{i_{i}-(i_{i}-1)} =$ = L($\sqrt{Z^{2}};0;0;Z$)
обертовий С	1-1 i ₁ -45° C	$l_{i_1-(i_1-1)} =$ = C = +C + -C 80 = +45° + -35°	$Q_{i,-(i,-1)} =$ = +R(0,9238;0;0;0,3826) - R(0,9537;0;0;-0,3007)				M
							20

THE FETURES OF INFORMATION MODELS OF FLEXIBLE MANUFACTURING CELL COMPONENTS

1. DESCRIPTION AND USING OF THE GEOMETRICAL PRIMITIVES

Послідовність: аналіз конструкції складової – складання її так званої схеми заміщення (СЗ, тобто складання ниткової моделі складової) – заміна рухомих та / або нерухомих елементів СЗ складової її ЗD-еквівалентами з використанням геометричних примітивів (ГП) – складання IM складової як такої з урахуванням її можливої рухомості або нерухомості.

Базові розташування ГП в СК елемента (Е) ГВК



Se:
$$X_{Se}$$
, Y_{Se} , Z_{Se} , R_{Se}

Se – ідентифікатор примітиву Se (sphere) – "сфера"; X_{Se} – розташування сфери вздовж осі X в СК елемента E, мм; Y_{Se} – розташування сфери вздовж осі Y в СК елемента E, мм; Z_{Se} – розташування сфери вздовж осі Z в СК елемента E, мм; R_{Se} – радіус сфери, мм.



<u>1. DESCRIPTION AND USING OF THE GEOMETRICAL PRIMITIVES</u></u>



Onuc ГП muny "циліндр": **Cr**: X_{Cr}, Y_{Cr}, Z_{Cr}, R_{Cr}, L_{Cr}

 X_E $X_Cr - iдентифікатор примітиву$ **Cr**(**cylinder**) – "циліндр"; $<math>X_{Cr} - pозташування циліндра вздовж осі X в СК елемента E, мм;$ $<math>Y_{Cr} - pозташування циліндра вздовж осі Y в СК елемента E, мм;$ $<math>Z_{Cr} - pозташування циліндра вздовж осі Z в СК елемента E, мм;$ $<math>R_{Cr} - pадіус циліндра, мм;$

L_{Cr} – довжина циліндра, мм.

 Y_E R_{Ce} Ce T_{Ce} X_E Z_E X_{Ce}, Y_{Ce}, Z_{Ce} *Опис ГП типу "конус":* **Се**: Х_{Се}, Ү_{Се}, Z_{Ce}, R_{Ce}, r_{Ce}, L_{Ce}

Тут: Ce – ідентифікатор примітиву Ce (cone) – "конус"; X_{Ce} – розташування конуса вздовж осі X в CK елемента E, мм; Y_{Ce} – розташування конуса вздовж осі Y в CK елемента E, мм; Z_{Ce} – розташування конуса вздовж осі Z в CK елемента E, мм; R_{Ce} – лівий радіус конуса, мм; r_{Ce} – правий радіус конуса, мм; L_{Ce} – довжина конуса, мм.



1. DESCRIPTION AND USING OF THE GEOMETRICAL PRIMITIVES



Onuc ГП muny "napaлeлenined": **Pd**: X_{Pd}, Y_{Pd}, Z_{Pd}, W_{Pd}, H_{Pd}, D_{Pd}

Рd – ідентифікатор примітиву Рd (parallelepiped) – "паралелепіпед"; X_{Pd} – розташування паралелепіпеда вздовж осі X в СК елемента E, мм; X_E Y_{Pd} – розташування паралелепіпеда вздовж осі Y в СК елемента E, мм; Z_{Pd} – розташування паралелепіпеда вздовж осі Z в СК елемента E, мм; W_{Pd} – ширина паралелепіпеда, мм;

H_{Pd} – висота паралелепіпеда, мм;

D_{Pd} – глибина паралелепіпеда, мм.

 $Y_{E} \qquad W_{Tz} \qquad X$ $D_{Tz} \qquad H2_{Tz} \qquad Y$ $H1_{Tz} \qquad B \qquad H$ $Z_{E} \qquad X_{Tz}, Y_{Tz}, Z_{Tz} \qquad H$

Опис ГП типу "трапеція": Тут: **TZ**: X_{Tz} , Y_{Tz} , Z_{Tz} , D_{Tz} , W_{Tz} , $H1_{Tz}$, $H2_{Tz}$, a_{Tz} , b_{Tz} Tz – ідентифікатор примітиву **Tz** (**Trapeze**) – "трапеція"; X_{Tz} – розташування трапеції вздовж осі X в СК елемента E, мм; Y_{Tz} – розташування трапеції вздовж осі Y в СК елемента E, мм; Z_{Tz} – розташування трапеції вздовж осі Z в СК елемента E, мм; D_{Tz} – глибина трапеції, мм; W_{Tz} – ширина трапеції, мм; $H1_{Tz}$ – ліва висота трапеції, мм; $H2_{Tz}$ – права висота трапеції, мм; a_{Tz} – відстань між базовою віссю B та центром грані із висотою H1, мм: b_{Tz} – відстань між базовою віссю B та центром грані із висотою H2, мм.

THE FETURES OF INFORMATION MODELS OF FLEXIBLE MANUFACTURING CELL COMPONENTS

2. DESCRIPTION AND USING OF ORIENTATION QUATERNIONS

При потребі змінити орієнтацію ГП вказується кватерніон його орієнтації, що описується за рахунок 4-ох додаткових параметрів:





THE FETURES OF INFORMATION MODELS

OF FLEXIBLE MANUFACTURING CELL (FMC) COMPONENTS

– a single mathematical apparatus in case of IM creation is the theory of quaternions. The description of all components as single semantic units – quaternions – owing to these providing a scalar and vector component, allows describing both the motionless structural components, and mobile ones displaying linear and rotary movements. It is especially important for the description of relative movements of mobile links of the handling system, gripper elements, mobile elements of each working post device;

- utilization in the quaternion description of components of geometric primitives allows the **recreation of 3D-models as separate parts of each component** and their arrangement in sequence. It is important in the case of the solution of a number of tasks of technological content, for example, for the determination of the trajectory parameters of the gripper movements in case of technological operations of unloading and loading of each working post;

- including into the information model of the CFR of parameters used for "connecting" separate cells determined by features of the described component for the display of their ordered sequence; for example, in the case of the description of the ordered sequence of links of the handling system, gripper, and devices is universal;

- other parameters (weight and speed of the relative movement of links) brought into the IM allow the further **solving of direct and inverse problems of kinematics and dynamics necessary for determining the temporary and dynamic parameters of synthesizable gripper trajectories**, and also the determination of the link control laws for the automatic implementation of the synthesized optimum trajectory of gripper movements.



THE EXISTING GRIPPERS' INFORMATION MODELS

Графічне представлення	Позначення / математичні	Переваги	Недоліки
	вирази 1 – фланець; 2 – двигун; 3– передача; 4– захватний пристрій	 відображає розташування ЗППР в маніпуляцій ній системі промислового робота 	 ≻ не надає повної інформації про функціональні можливості ЗППР; ≻ відсутність математичних виразів
$B\Pi \perp \Pi \underbrace{\begin{pmatrix} \perp \dagger \mid 3_{1} \\ \perp \dagger \mid 3_{2} \end{pmatrix}}_{\substack{\perp \dagger \mid 3_{2} \end{pmatrix}} B\Pi \perp \Pi_{1} \underbrace{\begin{pmatrix} \perp \dagger \mid \Pi_{2} \\ \perp \dagger \mid \Pi_{3} \end{pmatrix}}_{\substack{\perp \Pi_{1} \end{pmatrix}} B\Pi \underbrace{\begin{pmatrix} \perp \Pi_{1} \\ \perp \Pi_{2} \end{pmatrix}}_{\substack{\perp \Pi_{2} \end{pmatrix}} B\Pi \underbrace{\begin{pmatrix} \perp \Pi_{1} \\ \perp \Pi_{2} \end{pmatrix}}_{\substack{\perp \Pi_{2} \end{pmatrix}} B\Pi \underbrace{\begin{pmatrix} \perp \Pi_{2} \\ \perp \Pi_{2} \end{pmatrix}}_{\substack{\perp \Pi_{2} \end{pmatrix}} B\Pi \underbrace{\begin{pmatrix} \perp \Pi_{2} \\ \perp \Pi_{2} \end{pmatrix}}_{\substack{\perp \Pi_{2} \end{pmatrix}} B\Pi \underbrace{\begin{pmatrix} \perp \Pi_{2} \\ \perp \Pi_{2} \end{pmatrix}}_{\substack{\perp \Pi_{2} \end{pmatrix}} B\Pi \underbrace{\begin{pmatrix} \perp \Pi_{2} \\ \perp \Pi_{2} \end{pmatrix}}_{\substack{\perp \Pi_{2} \end{pmatrix}} B\Pi \underbrace{\begin{pmatrix} \perp \Pi_{2} \\ \perp \Pi_{2} \end{pmatrix}}_{\substack{\perp \Pi_{2} \end{pmatrix}} B\Pi \underbrace{\begin{pmatrix} \perp \Pi_{2} \\ \perp \Pi_{2} \end{pmatrix}}_{\substack{\perp \Pi_{2} \end{pmatrix}} B\Pi \underbrace{\begin{pmatrix} \perp \Pi_{2} \\ \perp \Pi_{2} \end{pmatrix}}_{\substack{\perp \Pi_{2} \end{pmatrix}} B\Pi \underbrace{\begin{pmatrix} \perp \Pi_{2} \\ \perp \Pi_{2} \end{pmatrix}}_{\substack{\perp \Pi_{2} \end{pmatrix}} B\Pi \underbrace{\begin{pmatrix} \perp \Pi_{2} \\ \perp \Pi_{2} \end{pmatrix}}_{\substack{\perp \Pi_{2} \end{pmatrix}} B\Pi \underbrace{\begin{pmatrix} \perp \Pi_{2} \\ \perp \Pi_{2} \end{pmatrix}}_{\substack{\perp \Pi_{2} \end{pmatrix}} B\Pi \underbrace{\begin{pmatrix} \perp \Pi_{2} \\ \perp \Pi_{2} \end{pmatrix}}_{\substack{\perp \Pi_{2} \end{pmatrix}} B\Pi \underbrace{\begin{pmatrix} \perp \Pi_{2} \\ \perp \Pi_{2} \end{pmatrix}}_{\substack{\perp \Pi_{2} \end{pmatrix}}_{\substack{\perp \Pi_{2} \end{pmatrix}} B\Pi \underbrace{\begin{pmatrix} \perp \Pi_{2} \\ \perp \Pi_{2} \end{pmatrix}}_{\substack{\perp \Pi_{2} \coprod}_{\substack{\perp \Pi_{2} \end{pmatrix}}_{\substack{\perp \Pi_{2} \coprod}_{\substack{\perp \Pi_{2}$	ВЛ – вихідна ланка робота; 3 – захват; О – рух кінематичної пари відносно власної вісі; П _{ло} – поступальне локально- операційне переміщення; /, ⊥, // – з'єднання ланок ↓, Ҳ, 눼 – напрямок осей ланок;	 компактне представлення; можливість опису різних механічних конструкцій ЗППР 	 ≻ не надає повної інформації про функціональні можливості ЗППР; ≻ відсутність математичних виразів



THE PROPOSED GRIPPERS' INFORMATION MODELS

		-	J1111
$ \frac{\mathbf{V}_{i}}{\mathbf{I}_{i}} = \frac$	 містить інформацію про обмеження та величини переміщень рухомих елементів захватного пристрою; надає відомості про геометричні розміри захватного пристрою та їх взаємне положення; придатний для опису багатьох існуючих конструкцій захватних пристроїв 	обмеженість набору геометричних примітивів, якими описуються елементи захватного пристрою	 відображення геометричних розмірів елементів ланок маніпуляційних систем та схватів промислових роботів; наявність інформації про обмеження та величини переміщень рухомих елементів робота; використання єдиного математичного апарату представлення обертальних та лінійних рухів; універсальність для більшості існуючих конструкцій маніпуляційних системи та захватних пристроїв промислових роботів; простота програмної реалізації для вирішення різноманітних технологічних задач АС

27

EXAMPLES OF THE GRIPPERS' INFORMATION MODELS

Приклад 1. ФО вакуумного ЗППР моделі "VGS^{тм}3010 BF80P" виробника фірми Piab (Швеція)



```
 \begin{array}{l} \Phi O \ 3\Pi\Pi P \ (VGS^{TM} 3010 \ BF80P) = \{ \\ CFP[(20, 30, 0)(0, 0, 0, 1)] \\ M(0.3) \\ C\{ \\ & GP:[ \\ & PD: 5, 0, 0, 40, 20, 20; \\ & CR: -5, 0, 0, 7, 80; \\ & CR: 25, 15, 0, 10, 20, 0.71, 0, 0, 0.71; \\ & CR: 25, -45, 0, 13, 60, 0.71, 0, 0, 0.71; \\ & CR: 25, -48, 0, 35, 10, 0.71, 0, 0, 0.71; \\ & \\ & \\ & \\ \end{array} \right. \\ \left. \right\} \\ \left. \right\} \\ \end{array}
```

Приклад 2. ФМ кутового пневматичного ЗППР моделі "LGR 32" з 2-ма ЗЕ фірми Schunk (Німеччина)





Конструкція ЗППР

3D-еквівалент ЗППР

28

ΦΟ 3ΠΠΡ (LGR 32) = { CFP[(0, 0, 0)(0.707,0,0,0.707)] M(2) C{ GP:[PD:0, 0, 0, 130.5, 60, 37;] } V{ LIM[(0, 119, 24, 0)(0, 119, 24, 0)(1, 0, 0, 0)(0.707, 0, 0, 0.707)] GP:[PD:-15, 0, 0, 30, 12.5, 16; PD:15, 0, 0, 30, 12.5, 16; PD:20, 12.5, 0, 58, 14, 16; PD:42.5, 0, 0, 40, 12.5, 16, 0.985,0,0,0.174; PD:76, 13.2, 0, 40, 12.5, 16, 0.985,0,0,-0.174; PD:110, -0.5, 0, 6, 11.5, 16;] } V{

LIM[(0, 119, -24, 0)(0, 119, -24, 0)(1, 0, 0, 0)(0.707, 0, 0, -0.707)] GP:[PD:-15, 0, 0, 30, 12.5, 16; PD:15, 0, 0, 30, 12.5, 16; PD:20, -12.5, 0, 58, 14, 16; PD:42.5, 0, 0, 40, 12.5, 16, 0.985,0,0,-0.174; PD:76, -13.2, 0, 40, 12.5, 16, 0.985,0,0,0.174; PD:110, 0.5, 0, 6, 15, 16;]

THE SCHEME OF FORMING GENERAL INFORMATION MODEL OF INDUSTRIAL ROBOTS



 $\begin{aligned} \mathbf{IR'sIM} & \langle \mathbf{MS's IM} \rangle \langle \mathbf{Gr's IM} \rangle = \\ &= \langle \pm \mathbf{Oi}_{1} \ \mathbf{t}_{i_{1}}[\mathbf{H}_{i_{1}}] \mathbf{Q}_{i_{1} \cdot (i_{1} \cdot 1)} \ \mathbf{C}_{i_{1} \cdot (i_{1} + 1)} \Big| \mathbf{i}_{1} = \overline{\mathbf{1, n_{1}}} \rangle \langle \mathbf{P}_{\mathbf{IR'sIM}}, \mathbf{CFP}, (\mathbf{C}) \lor \left(\mathbf{V}_{i_{v}} | i_{v} = \overline{\mathbf{1, I_{v}}}\right) \rangle \end{aligned}$

29

THE VECTOR-PROJECTION (V-P) COMPONENT OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION



ПрРП_t — пристосування t-ої робочої позиції;

РП_t — t-та робоча позиція;

OM_t^dg — d-ий об'єкт маніпулювання g-ої групи;

ЗППР — захватний пристрій промислового робота;

 G_t — центр мас $OM_t^{d_{2}};$ $P_{3\Pi}$ — полюс 3 $\Pi;$

ЛПЗ/Р_t — лінійні параметри затеску/розтиску;

TBB_t — технологічний вектор відходу;

ТВП_t — технологічний вектор підходу;

ТКП_t — технологічний кут підходу;

ТКВ_t — технологічний кут відходу;

ТКПр_t — технологічний кут пристосування t-ої робочої позиції;





THE SIMPLIFIED SCHEME OF CALCULATION SEQUENCE OF ANGULAR SERVICE PARAMETERS (ASP) AND LINEAR SERVICE PARAMETERS (LSP)



THE MAIN CONTENT OF THE CRYSTALIZATION OF ALTERNATIVES FIELD METHOD

Сутність методу кристалізації, в тому числі кристалізації розсипу альтернатив, полягає у вивченні і використанні метаевристик, закладених в природних механізмах прийняття рішень. У роботі поряд з метаевристиками, на яких побудовані ройові алгоритми, використовується метаевристика, яка враховує тенденцію до використання альтернатив (варіантів компонентів) з найкращих знайдених рішень. В процесі еволюціної колективної адаптації методами дискримінантного аналізу формуються оцінки пристосованості альтернатив. Пристосованість альтернатив розглядається як ймовірність її використання в формованому рішенні. Сукупність даних про альтернативи та їх оцінок складає розсип альтернатив. Дискримінантний аналіз альтернатив в процесі еволюційної колективної адаптації названий за аналогією з процесами виокремлення об'єктів (формування кристалів) кристалізацією. Іншими словами, в процесі еволюційної колективної адаптації проводиться вичленення з множини варіантів найбільш пристосованих альтернатив. Звідси назва методу оптимізації - метод кристалізації розсипів альтернатив (КРА) (англ. Crystallization of Alternatives Field (CAF)).

THE GRAPHIC INTERPRETATION OF THE CAF METHOD IN COMPLEX OF THE CONTENT OF THE SOLUTED TASKS





THE ASP and LSP (the examples for cylindric object with parameters OM $\emptyset = 52_{MM}, L = 400_{MM}$)



The Angle Service Parameters ASP_{t-1} , ASP_t

The Linear Service Parameters LSP_{t-1}, LSP_t



THE GEOMETRICALY-FORCE (G-F) COMPONENT OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION



- $$\begin{split} P_{3\Pi\Pi P} &- G_{OM_t}, J_{3\Pi\Pi P} \\ & \Pi\Pi C_{P_{3\Pi\Pi P} G_{OM_t}}, K\Pi C_{P_{3\Pi\Pi P} G_{OM_t}} \\ & \Pi\Pi C_{J_{3\Pi\Pi P}}, K\Pi C_{J_{3\Pi\Pi P}} \end{split}$$
- Р полюс захватного пристрою;
- F_G сила затиску затискного елемента ЗППР;
- F_K тиск (контактна сила) на ОМ;
- F_R сила тертя; G сила тяжіння;



THE TRAJECTORY-DYNAMIC (T-D) COMPONENT OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION



 $\begin{array}{l} {\bf Tr}_t - {\rm траєкторія \ переміщення \ 3}\Pi\Pi P \ {\rm до/від \ OM}_t; \\ {\bf Tr} {\bf Sp}_t - {\rm траєкторний \ простір \ переміщення \ 3}\Pi\Pi P \ {\rm 3/бе3 \ OM}_t; \\ {\bf \omega}, {\bf \epsilon} - {\rm кутові \ швидкість \ та \ прискорення \ ланок \ MC\Pi P; \\ {\bf G}_{{\rm OM}_t}^{-} {\rm сила \ тяжіння, \ що \ діє \ на \ OM}_t; \\ {\bf F}_G - {\rm сила \ затиску \ OM}_t \ {\rm B \ 3}\Pi\Pi P \ ; \\ {\bf F}_{R\,\omega} - {\rm осьова \ силa \ тертя; \ F}_{\omega} - {\rm відцентровa \ силa; \ F}_{t\,\omega} - {\rm силa \ ihepцii} \end{array}$


THE PROPOSED METHOD OF INVERSE KINEMATICS TASKS RESOLVING



THE EXAMPLE OF THE GENERATED TRAJECTORY REALIZATION BY DEVELOPED "ROBIX" SOFTWARE





THE EXAMPLE OF GENERATED TRAJECTORY REALIZATION BY DEVELOPED "ROBIX" SOFTWARE



THE PROPOSED METHOD OF COLLISIONAL TRAJECTORIES CORRECTION



ALGORITHM OF AUTOMATED GENERATION OF NON-COLLISIONAL TRAJECTORIES





INFORMATION MODEL OF MANIPULATION SYSTEM

IR's MS mod. KUKA KR-30-3 (Germany):

KUKA KR-30-3 = $\{$

P:0,0,0;

O:1,0,0,0;

L1:(D:0,1,0;S:350;m:250; GP:[cr: 0, 0, 0, 300, 350;]);

L2:(D:0,1,0;S:150;m:137;v:140; Qmin: -0.044,0,-0.999,0;

Qmax:-0.044,0,0.999,0; GP:[cr: 0, 0, 0, 300, 150;]);

L3:(D:1,1,0;S:450;m:92; GP:[tz: 220, 220, -100, 200, 400, 600, 500, 300, 0, 0.924,0,0,0.383;]);

L4:(D:-1,1,0;S:850;m:60;v:126; Qmin: 0.462,0,0,-0.887; Qmax: 0.924,0,0,0.383; GP:[cr:0,0,0,150,300, 0.707,0.707,0,0; pd:0,0,200,850,250,200;]);

L5:(D:0,1,0;S:145;m:40;v:140; Qmin: 0.829,0,0,-0.559; Qmax: - 0.259,0,0,0.966;GP:[cr:0,0,0,150,300, 0.707,0.707,0,0;pd:-50,-150,0,400,500,200;]);

L6:(D:1,0,0;S:350;m:20; GP:[cr:0,0,0,100,350;]);

L7:(D:0,1,0;S:465;m:10;v:260; Qmin: -0.996,0,-0.087,0; Qmax:-0.996,0,0.087,0;GP:[cr:0,0,0,100,150;pd:0, 150, 0, 200, 100,

100;pd:0, 310, -60, 200, 100, 30;pd:0, 310, 60, 200, 100, 30;]); L8:(D:0,1,0;S:170;m:5;v:245; Qmin: 0.508,0,0,-0.862; Qmax:

0.508,0,0,0.862; GP:[cr:0, 0, 0, 50, 170;]);

L9:(D:0,1,0;S:10;m:1;v:322; Qmin: -0.996,0,-0.087,0; Qmax:-0.996,0,0.087,0; GP:[cr:0, 0, 0, 40, 10;]);







INFORMATION MODEL OF THE GRIPPER

Gr mod. LGR 32 (Schunk, Germany):

```
Gripper(LGR 32) = {
CFP[(0, 0, 0)(0.707, 0, 0, 0.707)]
M(2)
C{
GP:[PD:0, 0, 0, 130.5, 60, 37;]
}
V{
LIM[(0, 119, 24, 0)(0, 119, 24, 0)(1, 0, 0, 0)(0.707, 0, 0, 0.707)]
GP:
PD:-15, 0, 0, 30, 12.5, 16;
PD:15, 0, 0, 30, 12.5, 16;
PD:20, 12.5, 0, 58, 14, 16;
PD:42.5, 0, 0, 40, 12.5, 16, 0.985, 0, 0, 0.174;
PD:76, 13.2, 0, 40, 12.5, 16, 0.985, 0, 0, -0.174;
PD:110, -0.5, 0, 6, 11.5, 16;
]}
V{
LIM[(0, 119, -24, 0)(0, 119, -24, 0)(1, 0, 0, 0)(0.707, 0, 0, -0.707)]
GP:[
PD:-15, 0, 0, 30, 12.5, 16;
PD:15, 0, 0, 30, 12.5, 16;
PD:20, -12.5, 0, 58, 14, 16;
PD:42.5, 0, 0, 40, 12.5, 16, 0.985, 0, 0, -0.174;
PD:76, -13.2, 0, 40, 12.5, 16, 0.985,0,0,0.174;
PD:110, 0.5, 0, 6, 11.5, 16;]}
```



Конструкція ЗППР



3D-еквівалент ЗППР



(reducing the duration of GC's working from the first link (rack) of IR's MS to Gr)



P1: X = 2234,8; Y = 1012,9; Z = 0; **P2**: X = 996,1; Y = 1327,8; Z = 1110,1.

(reducing the duration of GC's working from Gr to the first link of IR's MS)



P1: X = 2234,8; Y = 1012,9; Z = 0; **P2**: X = 996,1; Y = 1327,8; Z = 1110,1.

(duration of activated GC's working for 1 second from Gr to the first link of IR's MS)



(duration of activated GC's working for 1 second from the first link of IR's MS to Gr)



(increasing the duration of GC's working from Gr to the first link of IR's MS)



(GC's working from the first link of IR's MS to Gr with the highest allowable speed)



50

P1: X = 2234,8; Y = 1012,9; Z = 0; **P2**: X = 996,1; Y = 1327,8; Z = 1110,1.

(simultaneous start and completion at the same time of GS's working)



P1: X = 2234,8; Y = 1012,9; Z = 0; **P2**: X = 996,1; Y = 1327,8; Z = 1110,1.



(GC's working from Gr to the first link of IR's MS with the highest allowable speed)



P1: X = 2234,8; Y = 1012,9; Z = 0;

P2: X = 996,1; Y = 1327,8; Z = 1110,1.

(GC's working with the highest allowable speed for MS with positional control system)



53

P1: X = 2234,8; Y = 1012,9; Z = 0; **P2**: X = 996,1; Y = 1327,8; Z = 1110,1.

(simultaneous completion of GC's working with the largest allowable speed)



P1: X = 2234,8; Y = 1012,9; Z = 0; **P2**: X = 996,1; Y = 1327,8; Z = 1110,1.

(simultaneous start of GC's working with the largest allowable speed)



№ option	N, mWatt	ΔN, %	τ_{P1-P2} , seconds	Δτ _{P1-P2} , %
1 (slide 40)	748,90	6.54	2,0	100
2 (slide 41)	702,95	0	1,9	90
3 (slide 42)	878,95	25.04	1,5	50
4 (slide 43)	821,80	16.91	1,9	90
5 (slide 44)	756,10	7.56	2,0	100
6 (slide 45)	741,26	5.45	2,0	100
7 (slide 46)	1004,52	42.9	1,9	90
8 (slide 47)	729,38	3.76	2,0	100
9 (slide 48)	1043,38	48.43	1,5	50
10 (slide 49)	1098,14	56.22	3,9	290
11 (slide 50)	1256,53	78.75	1,0	0
12 (slide 51)	1512,80	115.21	1,0	0

Comparison table of the received results

$$\Delta N = \frac{N_i - N_{\min}}{N_{\min}} \cdot 100\% \qquad \qquad \Delta \tau = \frac{\tau_i - \tau_{\min}}{\tau_{\min}} \cdot 100\% \qquad \qquad i = \overline{1,12}$$



EXAMPLE OF THE NONCOLLISIONAL TRAJECTORY FINDING



Позначен	Координати опорних точок			Напрям вектора Gr			Напрям осі $O_{t-1}^{d_g}$		
ня	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm
C _{t-1}	1276,46	1649,52	701,21	-0,76	0,49	-0,41	-0,48	0,00	0,87
Ct	1422,82	1636,13	-271,24	-0,83	0,52	0,15	0,18	0,00	0,98

 $\tau = [0,24, 0,36], \tau_{colmax} = 0,30$

Розрахований час відпрацювання траєкторії: $\tau = 0,45 c$ Розраховане значення енергоємності траєкторії ПР між тт. C_{t-1} та C_t : $E = 0,000038 \ \kappa B \tau$ -год



EXAMPLE OF NONCOLLISIONAL TRAJECTORY FINDING



Позначен	Координати опорних точок			Напрям вектора Gr			Напрям осі $O_{t-1}^{d_g}$		
ня	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm
C _{t-1}	1276,46	1649,52	701,21	-0,76	0,49	-0,41	-0,48	0,00	0,87
B ₁	876,47	1639,73	-5,75	—	—	—	—	—	—
Ct	1422,82	1636,13	-271,24	-0,83	0,52	0,15	0,18	0,00	0,98



 $\tau = [0,27, 0,39], \tau_{colmax} = 0,31$

EXAMPLE OF THE NONCOLLISIONAL TRAJECTORY FINDING



Позначен	Координати опорних точок			Напрям вектора Gr			Напрям осі $O_{t-1}^{d_g}$		
НЯ	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm
C _{t-1}	1276,46	1649,52	701,21	-0,76	0,49	-0,41	-0,48	0,00	0,87
B ₂	891,92	1642,85	217,51	—	—	—	_	—	—
B ₁	876,47	1639,73	-5,75	—	—	—	_	—	—
Ct	1422,82	1636,13	-271,24	-0,83	0,52	0,15	0,18	0,00	0,98

Z 59

 $\tau = [0,27, 0,39], \tau_{colmax} = 0,31$

EXAMPLE OF THE NONCOLISION TRAJECTORY FINDING



Позначен ня	Координати опорних точок			Напр	оям вектор	oa Gr	Напрям осі $O_{t-1}^{d_g}$		
	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm
C _{t-1}	1276,46	1649,52	701,21	-0,76	0,49	-0,41	-0,48	0,00	0,87
B ₂	891,92	1642,85	217,51	_	_	_	—		
B ₁	876,47	1639,73	-5,75	—	—	_	—	_	_
B ₃	1024,99	1637,46	-285,72	—	—	_	—	_	_
Ct	1422,82	1636,13	-271,24	-0,83	0,52	0,15	0,18	0,00	0,98



 $\tau = [0,28, 0,30], \tau_{colmax} = 0,29$

EXAMPLE OF THE NONCOLLISIONAL TRAJECTORY FINDING



Позначен	Координати опорних точок			Напр	оям вектор	oa Gr	Напрям осі $O_{t-1}^{d_g}$		
НЯ	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm
C _{t-1}	1276,46	1649,52	701,21	-0,76	0,49	-0,41	-0,48	0,00	0,87
B ₂	891,92	1642,85	217,51	-	-	-	-	-	-
B ₁	876,47	1639,73	-5,75	-	-	-	-	-	-
B_4	974,94	1637,75	-265,41	-	-	-	-	-	-
B ₃	1024,99	1637,46	-285,72	-	—	—	—	-	-
Ct	1422,82	1636,13	-271,24	-0,83	0,52	0,15	0,18	0,00	0,98



COMPARISON OF THE TRAJECTORIES BASED ON GENERATED EXTRA POINTS





COMPARISON OF THE TRAJECTORIES BASED ON THE GENERATED EXTRA POINTS





THE MAIN ALGORITHM OF DSS FOR CALCULATION PARAMETRIES OF THE GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION



THE STRUCTURE SCHEME OF THE PROPOSED DSS SOFTWARE (a part of "Robix" software, developed in Delphi)



THE CONDITIONS OF THE RESEARCHING PARAMETRIES OF GRIPPERS' **INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION**



перпендикулярно-

горизонтальне

паралельно-горизонтальне



– апроксимація траєкторій за сплайнами: Cubic, Akima, Linear

- МСПР мод.: KUKA KR-30

11

перпендикулярно-

вертикальне

 $\left(X_{OM_{t-i}};Y_{OM_{t-i}};Z_{OM_{t-i}}\right)_{Var}\rightarrow\left(X_{OM_{t}};Y_{OM_{t}};Z_{OM_{t}}\right)_{Var}$



THE RESEARCHING PARAMETRIES OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION FOR CORRECTED NONCOLLISION TRAJECTORIES





THE RESEARCHING OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION FOR CORRECTED NONCOLLISIONAL TRAJECTORIES (for analyzed example on slide 63)

Досліджуваний параметр: швидкодія відпрацювання траєкторії (т, с)

Сплайн згладжування траєкторії полюса ЗППР: Cubic

Розташування СК ОМ: $\leftarrow OM_{t-1}$ $\leftarrow OM_t$



RESEARCHING OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION FOR CORRECTED NONCOLLISIONAL TRAJECTORIES (for analyzed example on slide 63) Досліджуваний параметр: швидкодія відпрацювання траєкторії (т, с)

Сплайн згладжування траєкторії полюса ЗППР: Акіта

OM_{t-1} OM_t Розташування СК ОМ: 🤶



RESEARCHING OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION FOR CORRECTED NONCOLLISIONAL TRAJECTORIES (for analyzed example on slide 63)

Досліджуваний параметр: швидкодія відпрацювання траєкторії (т, с)

Сплайн згладжування траєкторії полюса ЗППР: Linear

Розташування СК ОМ: $\leftarrow OM_{t-1}$ $\leftarrow OM_t$



RESEARCHING OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION FOR CORRECTED NONCOLLISIONAL TRAJECTORIES (for analyzed example on slide 63)

Досліджуваний параметр: енергоемність (Е, Вт ·год)

Сплайн згладжування траєкторії полюса ЗППР: Cubic

Розташування СК ОМ: $\leftarrow OM_{t-1}$ $\leftarrow OM_{t}$



RESEARCHING OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION FOR CORRECTED NONCOLLISIONAL TRAJECTORIES (for analyzed example on slide 63)

Досліджуваний параметр: енергоемність (Е, Вт ·год)

Сплайн згладжування траєкторії полюса ЗППР: Акіта

Розташування СК ОМ: $\leftarrow OM_{t-1}$ $\leftarrow OM_{t}$


RESEARCHING OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION FOR CORRECTED NONCOLLISIONAL TRAJECTORIES (for analyzed example on slide 63)

Досліджуваний параметр: енергоемність (Е, Вт ·год)

Сплайн згладжування траєкторії полюса ЗППР: Linear

Розташування СК ОМ: $\leftarrow OM_{t-1}$ $\leftarrow OM_t$



GENERALIZED RESULTS OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION FOR CORRECTED NONCOLLISIONAL TRAJECTORIES

(for analyzed example on slide 63, stage E1)

	Досліджуваний параметр		Умови за слайдами 62,63 (<i>i</i> = 1,12; spl=(C,A,L))							
Сплайн			$OM_{t-1}/OM_t: \mathcal{V} \longrightarrow (N_27)$				$OM_{t-1}/OM_t: \checkmark / \longleftarrow (N_2 8)$			
			$F^*_{OPT} = \tau_{MIN7}$				$F^*_{OPT} = E_{MINs}$			
			τ, c	Е, мВт·год	КПС, •	ЛПС, мм	τ, c	Е, мВт·год	КПС, •	ЛПС, мм
Cubic	$ au_{min}$		1,7796	0,9118	318	290	1,7459	0,8579	320	236,85
		$ au_{max}$	1,9934	0,9051	2	197,52	2,1776	0,9939	5	76,22
	E_{min}		1,8563	0,8644	333	307,48	1,7564	0,8569	322	236,85
		E_{max}	1,7927	0,9612	320	236,85	2,0012	1,0262	330	89,33
Akima	$ au_{min}$		1,5678	0,8089	327	329,33	1,5638	0,8191	320	236,85
		$ au_{max}$	1,7337	0,839	2	197,52	2,0753	0,8805	5	76,22
	E_{min}		1,6186	0,7902	339	329,33	1,5737	0,8097	327	236,85
		E_{max}	1,6099	0,9075	339	201,89	1,9185	0,9334	343	80,59
Linear	$ au_{min}$		1,3024	0,6694	323	316,22	1,4174	0,7383	326	76,22
		$ au_{max}$	1,9972	0,7135	0	329,33	2,1515	0,7826	5	76,22
	E_{min}		1,5129	0,6534	316	329,33	1,4895	0,6488	333	236,85
		E_{max}	1,9972	0,7135	0	329,33	2,1515	0,7826	5	76,22

$$F_{opt}^{*} = \left({}^{L}\tau_{\min_{7}}\right) \in \left({}^{Spl}\tau_{\min_{i}} \middle| i = \overline{1,12}; spl = (C, A, L)\right)$$
$$F_{opt}^{*} = \left({}^{L}E_{\min_{8}}\right) \in \left({}^{Spl}E_{\min_{i}} \middle| i = \overline{1,12}; spl = (C, A, L)\right)$$

CALCULATIONS OF TRAJECTORIES IN DEVELOPED ''Robix" SOFTWARE



CALCULATIONS OF TRAJECTORIES IN DEVELOPED ''Robix'' SOFTWARE



CALCULATIONS OF TRAJECTORIES IN DEVELOPED ''Robix'' SOFTWARE



CALCULATIONS OF TRAJECTORIES IN DEVELOPED ''Robix'' SOFTWARE



CALCULATION RESULTS

№ з/п	Час т , с	Потужність, P , mW	Енергоємність, E , mW*h
1	0,7972	1419,7	0,5729
2	1,8938	1635,21	0,8602
3	2,0634	1635,21	0,9372
4	6.0341	1392,27	2,3336
5	3,5754	1829,6	1,8171
6	3,3418	1993,03	1,8501
7	2,8973	1663,74	1,3306
8	3,0886	2339,08	2,0088
	$\xi_{\tau} = \frac{0.7972}{6.0341} * 100 = 761\%$	$\xi_P = \frac{2339.08}{1392.27} * 100 = 168\%$	$\xi_P = \frac{2.3336}{0.5729} * 100 = 407\%$



GRAPHIC ILLUSTRATION OF OPTIMAL MUTUAL LOCALIZATION OF WORK POSITION AND INDUSTRIAL ROBOT IN TIME AND ENERGY





GRAPHIC ILLUSTRATION OF NON OPTIMAL MUTUAL LOCALIZATION OF WORK POSITION AND INDUSTRIAL ROBOT IN TIME AND ENERGY





THE ILLUSTRATION OF PROPOSED 3-STAGED METHOD FOR NONCOLLISIONAL TRAJECTORY GENERATION

The calculated values of F^*_{opt} by stages E1, E2, E3, block A3 (slide 10)



TRAJECTORY SMOOTHING SCHEME (STAGE 2)





GENERALIZED RESULTS OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION FOR CORRECTED NONCOLLISIONAL TRAJECTORIES

Comparison table of received results of linear-spline based trajectory (slides 71, 72)

Етапи	Досліджуваний параметр при N _{Tr} = 100								
		F [*] _{OP1}	$\tau = \tau_{MIN}$		$\mathbf{F}_{\mathbf{OPT}}^* = \mathbf{E}_{\mathbf{MIN}}$				
	τ, c	ζτ, %	Е, мВт·год	ζ _E , %	τ, c	ζτ, %	Е, мВт·год	ζ _E , %	
E1	1,302	_	0,669	_	1,489	_	0,649	_	
E2	1,159	12,338	0,660	1,364	1,100	35,363	0,615	5,528	
E3	1,066	22,138	0,604	10,761	1,070	35,701	0,572	13,462	

 $\Delta_{\tau} = \tau_{\max} - \tau_{\min} \qquad \Delta_{E} = E_{\max} - E_{\min} \qquad \xi_{E} = \frac{\Delta_{E}}{E_{\min}} \cdot 100\% \qquad \xi_{\tau} = \frac{\Delta_{\tau}}{\tau_{\min}} \cdot 100\%$

× 85