

А.Ю. Бектилеов<sup>1</sup>, Ж.Р. Уалиев<sup>2</sup>, Т. Шуақ<sup>1</sup>, М. Уәлиев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті,  
Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Цифрлық инженерия және технологиялар институты, Алматы, Қазақстан  
(E-mail: shuaqaltayqan@gmail.com)\*

### **Төрт еркіндік дәрежесі бар роботты қолдың қозғалыс траекториясын жоспарлауды кинематикалық талдау**

Бұл мақала MATLAB бағдарламалық қамтамасыз ету ортасында Open MANIPULATOR-X ашық бастапқы роботтық платформасын пайдаланып, төрт еркіндік дәрежесі бар роботты қолдың алға және кері кинематикалық талдауын жүзеге асырды. Мәселені салыстырмалы түрде оңай шешу үшін тікелей және кері кинематикаға арналған алгоритмдер әзірленіп, симуляция жүргізілді. Жүйенің верификациясы және валидациясы жүзеге асырылып, траектория жоспарлау, қателерді талдау және құрылымдық оңтайландыру әдістері қолданылды. Нәтижелер робот қолының траекториясын жоспарлау және робот дизайнын құрылымдық оңтайландыру сияқты болашақ зерттеулер үшін теориялық негіз қалады. MATLAB платформасы арқылы кинематикалық модельдеу, симуляция және алгоритмдерді жазу, тексеру және верификация, траектория жоспарлау, қателерді талдау және құрылымдық оңтайландыру сияқты роботика жұмыстарда қолданылады. Бұл мәселе адамдардың робототехникалық қабілеттерін жақсарту мен инновацияларға жетуіне көмектеседі.

*Кілт сөздер:* роботты қол, қозғалыс траекториясы, кинематика, алгоритм, симуляция.

#### *Кіріспе*

Робототехниканың ілгерілеуі мен роботтарды әртүрлі масштабта қолданудың арқасында соңғы жылдары робототехника саласындағы зерттеулер айтарлықтай дамыды. Роботты қолдар бұл жетістіктердің айқын мысалы болып табылады. Роботты қолдар – адам қолының функцияларын имитациялайтын роботтар. Олар қайталанатын тапсырмаларды адам операторына қарағанда әлдеқайда жоғары жылдамдықпен және дәлдікпен орындай алады. Роботты қолдың қозғалыс траекториясын жоспарлау – оны жобалау мен басқарудағы маңызды қадам болып табылады.



## *Зерттеу әдістері*

Роботты қолға алға және кері кинематикалық талдау жасау барысында келесідей зерттеу әдістері қолданылды: алгоритмді әзірлеу және тексеру; симуляция жасау, траектория жоспарлау; қателерді талдау және түзету; құрылымдық оңтайландыру.

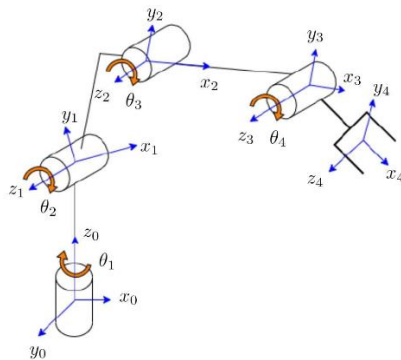
### *Негізгі бөлім*

Төрт еркіндік дәрежесі бар артикуляцияланған роботты қолдың қозғалыс траекториясын жоспарлауды кинематикалық талдау келесідей мәліметтерді қамтиды.

1. *Кинематикалық модельдеу:* Роботты қолдың қозғалысы мен позициясы, бағыты мен үдеуі арасындағы байланыс робот кинематикасында зерттеледі. Кинематиканы талдау – бұл роботты қолдың траекториясын жоспарлауда қолданылатын жалпы кинематика әдісі, оны екі түрге бөлуге болады: алға бағытталған кинематика және кері кинематика. Робототехникада кері кинематика қозғалыс жоспарын роботты қолдың бірлескен жетек траекториясына түрлендіреді. Алға бағытталған кинематика тізбектің конфигурациясын өлшеу үшін түйісу параметрлерін қолданады, ал кері кинематика түйісу параметрлерінің қажетті конфигурациясына жету үшін керісінше есептейді[1].

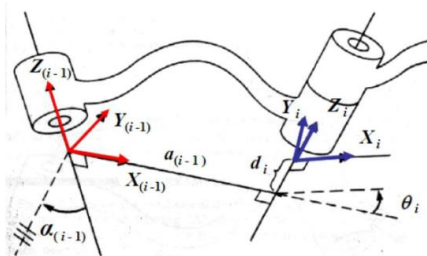
2. *Роботты қол механизмі:* Роботты қолдың бірнеше эксцентрлік арақашықтықтары мен призмалық буындары эксцентрлік қашықтықты құрайды, ал көршілес екі буынның осьтері параллель немесе ортогональды болады. Ортогональды буындар жалпы нормаға қатысты  $90^\circ$  қиылысады, ал ось  $90^\circ$  айналғанда параллель болады[2]. Кейбір роботты қол механизмдеріне ашық, жабық және гибриді ашық және жабық қозғалыс тізбектері жатады. Сонымен қатар, еркіндік дәрежесін кез-келген механизммен немесе машинамен байланысты буынның нақты қозғалысы ретінде анықтауға болады. Буындармен рұқсат етілген еркіндік дәрежесіннің саны және олардың сипаттамалары корпустың немесе буынның конструкциялық шектеулерімен анықталады.

3. *Артикуляцияланған роботты қол:* Артикуляцияланған роботты қол – роботтың айналмалы қолы немесе роботтың антропоморфты қолы деп те аталатын айналмалы буындары бар роботтық қол. Антропоморфты адам қолының дизайнына, оның ішінде иық, шынтақ және білек буындарына ұқсайды[3]. Артикуляцияланған роботты қол қарапайым екі буынды құрылымнан 10 немесе одан да көп өзара әрекеттесетін буындары бар жүйелерге дейін болуы мүмкін[4]. Төрт еркіндік дәрежесі бар артикуляцияланған роботты қолдың конфигурациясы 1-суретте көрсетілген.



Сурет 1. Төрт еркіндік дәрежесі бар артикуляцияланған роботты қолдың конфигурациясы.

4. *Денавит-Хартенберг әдісі*: Денавит-Хартенберг (DH) әдісі – роботтардың кинематикалық тізбектерін бейнелеу үшін робототехникада қолданылатын стандартталған әдіс. Ол роботтың буындары мен буындарына координаталық жақтауларды тағайындаудың жүйелі әдісін қамтамасыз ету арқылы роботтың құрылымы мен қозғалысын математикалық модельдеуді жеңілдетеді. 2-суретте жалғау параметрлері  $\alpha_i$  және  $a_i$ , және буын ығысуы ( $d_i$ ) манипулятор конфигурациясын қамтамасыз ету үшін бекітілген. Бұл конфигурация  $n$  туралы  $\theta_i$  белгілі бір қалыпқа қол жеткізеді[5]. Егер  $\theta_i$  мәні өзгерсе, әр конфигурацияның немесе соңғы эффектордың қалпын өзгертуге болады.



Сурет 2. Роботты қолдың анықтамалық параметрлері.

Қабылданған параметрлер келесідей: 1) буын ығысуы,  $d_i$ ; 2) буын бұрышы,  $\theta_i$ ; 3) жалғау ұзындығы,  $a_i$ ; 4) бұрылу бұрышы,  $\alpha_i$ .

Трансформация матрицасын DH параметрлері негізінде алуға болады, олар  $i$ -кадрдың  $i - 1$  кадрына қатысты түрленуін жоққа шығармайды. Бұл матрицаны  $T_i^{i-1}$  түрінде көрсетуге болады және оны келесідей есептеуге болады,



$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c(\theta_i) & -s(\theta_i)c(\alpha_i) & s(\theta_i)s(\alpha_i) & a_i c(\theta_i) \\ s(\theta_i) & c(\theta_i)c(\alpha_i) & -c(\theta_i)s(\alpha_i) & a_i s(\theta_i) \\ 0 & s(\alpha_i) & c(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(1)

мұндағы  $s$  және  $c$  сәйкесінше  $\sin$  және  $\cos$ -ті білдіреді.  $n+1$  жақтауларынан тұратын  $n$  еркіндік дәрежесі үшін түрлендіру матрицасының сандарының қосындысы  $n$  болады[6]. Біріктірілген матрица  $n$  кадрынан соңғы эффлекторға сәйкес келетін  $0$  кадрға қажетті түрлендіруді қамтамасыз ету:

$$T_n^0 = T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_3^2 \dots T_n^{n-1}$$

(2)

5. *Жабық шешім*: Жабық шешім – бұл мәліметтердің толық көлемін беретін нақты шешімнің көрінісі [7]. Егер теңдеу берілген жалпы жиыннан берілген есепті шешу үшін функциялар мен математикалық амалдарды қолданса, онда ол жабық түрдегі шешім болып саналады.

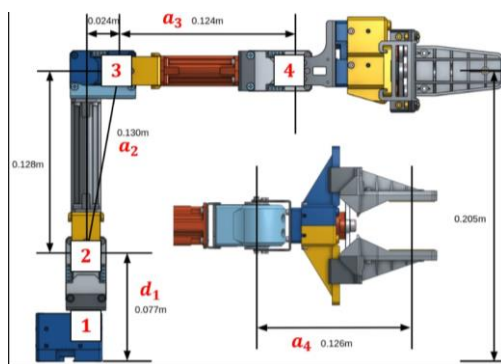
*Алға және кері кинематикалық талдау*



Сурет 3. Кинематикалық модельдеу процесінің блок-схемасы

3-суретте алға және кері кинематикалық талдаудың графикалық схемасы көрсетілген. Алға кинематиканы модельдеу Денавит-Хартенберг (DH) әдісімен жүргізілді. Кері кинематикалық модельдеу үшін мүмкін болатын шешімдердің барлық жиынтығын алу үшін жабық пішінді шешу әдісі қолданылды. Әрі қарай, екі кинематикалық модельдің арасында қандай да бір байланыс бар-жоғын анықтау үшін алға және кері кинематика арасындағы корреляциялық талдау жүргізілді. Соңында, өнімділікті бағалау ubuntu жүйесіндегі matlab және ROS жүйелеріндегі траекторияларды жоспарлау және жол нүктелерін бақылау алгоритмі арқылы жүргізілді.

### Алға Кинематикалық модельдеу



Сурет 4. OpenMANIPULATOR-X платформасында робот қолдың конфигурациясын талдау.

Сурет 4-те OpenMANIPULATOR-X платформасында робот қолдың конфигурациясын талдау көрсетілген, ал 1-кестеде конфигурация талдауы орындалғаннан кейін алынған D-H параметрлері белілген.

Кесте-1. D-H параметрлері

Буын	$\theta_i (^{\circ})$	$\alpha_i (^{\circ})$	$a_i (m)$	$d_i (m)$
1	$\theta_1$	90	0	0.077
2	$\theta_1 - \theta_0$	0	0.130	0
3	$\theta_3 + \theta_0$	0	0.135	0
4	$\theta_4$	0	0.126	0

*Траекторияны жоспарлау және жол нүктелерін қадағалау*



Сурет 5. Траекторияны жоспарлау және жол нүктелерін бақылау үшін модельдеу процедуралары

Траекторияны жоспарлау мен жол нүктелерін бақылауды модельдеу MATLAB бағдарламалық жасақтамасының Robotics System Toolbox, Simulink және Simscape Multibody көмегімен жүзеге асырылады[8]. 5-суретте траекторияны жоспарлау және жол нүктелерін бақылау үшін модельдеу процедурасын көрсетеді.



### Зерттеу нәтижелері

Кесте-2. Алға кинематикалық модельдеу нәтижелері.

Жағдай	Буын бұрыштары(°)				Соңғы эффектордың координатасы		
	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$P_x$	$P_y$	$P_z$
1	103	15	-5	21	-0.1489	0.3508	0.115
2	56	3	-13	79	0.1716	0.2544	0.1531
3	65	68	-23	-20	0.1185	0.2542	0.3347
4	-22	34	-21	53	0.2804	-0.1133	0.2733
5	48	8	-65	32	0.2125	0.236	-0.0963
6	11	70	-8	-67	0.2512	0.0488	0.2966
7	166	42	-35	-40	-0.3407	0.0849	0.0918
8	82	38	-58	36	0.0632	0.3583	0.1246
9	-158	56	-79	14	-0.3158	-0.1276	0.0965
10	-54	75	-37	9	0.1465	-0.2017	0.3691

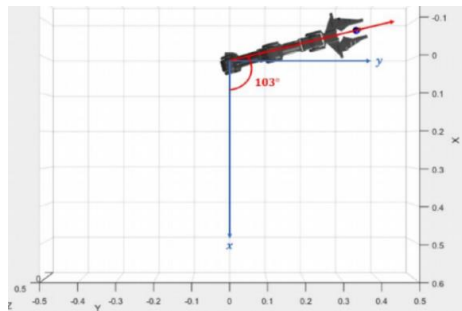
Кесте-3. Бүтін сан түріндегі бірлескен бұрыштарға арналған шешімдер

Шешім	Буын бұрыштары(°)			
	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$
1	103	28	-2	-28
2	103	38	-20	-19
3	103	26	2	-28
4	103	39	-24	-15
5	103	24	5	-28
6	103	40	-27	-13
7	103	23	7	-28
8	103	41	-29	-10
9	103	21	9	-27
10	103	41	-31	-8

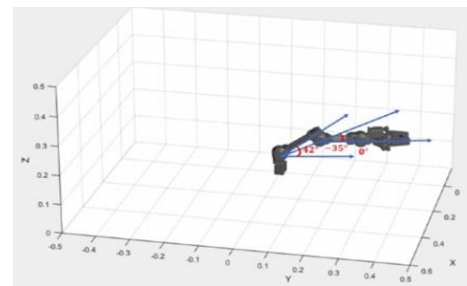
Кесте-4. Кері кинематикалық модельдеу нәтижелері.

Жағдай	Соңғы эффектордың Координатасы			Буын бұрыштары(°)				Шешім саны	
	$P_x$	$P_x$	$P_x$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	0 PD	1 PD
1	-0.0833	0.361	0.1744	103	15	-5	21	66	668
2	0.1716	0.2544	0.1531	56	3	-13	21	179	1769
3	0.1185	0.2542	0.3347	65	68	-23	-20	76	762
4	0.2804	-0.1133	0.2733	-22	34	-21	53	134	1346
5	0.2125	0.236	-0.0963	48	8	-65	32	132	1318
6	0.2512	0.0488	0.2966	11	70	-8	-67	147	1462
7	-0.3407	0.0849	0.0918	166	42	-35	-40	156	1546
8	0.0632	0.3583	0.1246	82	38	-58	36	120	1192
9	-0.3158	-0.1276	0.0965	-158	56	-79	14	176	1752
10	0.1465	-0.2017	0.3691	-54	75	-37	9	64	630

6-суретте (а,б) траекторияны жоспарлаудың модельдеу нәтижелерінің және түйісу бұрыштары үшін шешімдер жиыны көрсетіледі.



а)



б)

Сурет 6- а)Траекторияны жоспарлаудың модельдеу нәтижелері және 1-түйісу бұрышын бақылау; б) Траекторияны жоспарлаудың модельдеу нәтижелері және 2,3 және 4-түйісу бұрышын бақылау.

### Қорытынды

Бұл мақалада төрт еркіндік дәрежесі бар роботты қолдың тікелей және кері кинематикалық модельдері моделденді. Тікелей және кері кинематикалық модельдердің өзара байланысы талданды және кинематикалық модельдердің өнімділігі симуляцияланған роботты қол бағаланды. Әзірленген кинематикалық модельдер болашақ зерттеулер үшін, мысалы, робот қолының траекториясын жоспарлау және робот дизайнын құрылымдық оңтайландыру үшін теориялық негіз болып табылады.



## Пайдаланылған әдебиеттер тізімі:

1. P. Jha. «Inverse kinematic analysis of robot manipulators», India: National Institute of Technology Rourkela, 2015. – 26 p.
2. J. M. McCarthy, and G. S. Soh, «Geometric design of linkages. -New York: Springer, 2010. -52 p.
3. L. Luthsamy, H.F. AL-Qrimli, S.Shazzana Wan Taha, and N.A.Raj, “Design and control of an anthropomorphic robotic arm, «Journal of Industrial Engineering Research» vol. 2, no. 1. 2016. - P. 1–8.
4. I. Al-Naimi, «Introduction to robot manipulators», Robotics and Automation, 2018. - 25 p.
5. P. Corke, «Robotics, vision and control: Fundamental algorithms in MATLAB», 2nd ed. Switzerland: Springer, 2017. -11 p.
6. S. Singh, and E. Singla, «Service arms with unconventional robotic parameters for intricate workstations: Optimal number and dimensional synthesis», Journal of Robotics, 2016. – 47 p.
7. L. Rónai, and T. Szabó, «Kinematical investigation and regulation of a 4DOF model robot», Acta Mechanica Slovaca, vol. 20, no. 3. 2016. – P. 50–56.
8. A. Singh, and A. Singla, “Kinematic Modeling of Robotic Manipulators,” in Proceedings of the 2017 National Academy of Sciences India Section A - Physical Sciences, 2017. – P. 303 - 319.

А.Ю. Бектилезов, Ж.Р. Уалиев, Т. Шуак, М. Уалиев

**Кинематический анализ планирования траектории движения  
роботизированной руки с четырьмя степенями свободы**

В этой статье реализован кинематический анализ вперед и назад роботизированной руки с четырьмя степенями свободы с использованием роботизированной платформы с открытым исходным кодом Open MANIPULATOR-X в среде программного обеспечения MATLAB. Для решения задачи были разработаны алгоритмы для прямой и обратной кинематики, а также проведена симуляция. После этого была выполнена верификация и валидация системы, а также были использованы методы для планирования траектории, анализа ошибок и улучшения конструкции. Полученные результаты служат теоретической основой для будущих исследований, направленных на улучшение траекторного планирования и оптимизации конструкции робота. В работе также подчеркивается важность использования платформы MATLAB для моделирования кинематики, симуляции и разработки алгоритмов, что способствует развитию робототехнических навыков и инноваций.

*Ключевые слова:* роботизированной руки, траектория движения, кинематика, алгоритм, симуляция.



A.Y. Bektilevov, J.R. Ualiev, T. Shuak, M. Ualiyev

### **Kinematics analysis of trajectory planning of four-degree-of-freedom robotic arm**

This article describes the use of the Open MANIPULATOR-X open robotic platform with four degrees of freedom to model the forward and inverse kinematics of the robot arm. Algorithms for forward and inverse kinematics were developed, and simulations were conducted for comparative analysis. System verification and validation were performed, along with trajectory planning, error analysis, and structural optimization methods. The results obtained serve as a theoretical basis for future research into improving trajectory planning and optimizing robot design. The importance of using the MATLAB platform for kinematic modeling, simulation, and algorithm development is emphasized, contributing to the enhancement of robotics skills and innovation.

*Keywords:* robotic manipulation, motion trajectory, kinematics, algorithm, simulation.

#### References:

1. Jha, P. (2015). Inverse «Inverse nematic analysis of robot manipulators». - India: National Institute of Technology Rourkela. – 26 p.
2. McCarthy, J. M. And Soh, G. S (2010). «Geometric design of linkages». - New York: Springer. – 52 p.
3. Luthsamy, L., AL-Qrimli, Shazzana Wan Taha S., and Raj, N.A. (2016). «Design and control of an anthropomorphic robotic arm». - Journal of Industrial Engineering Research, vol. 2. no. 1. - P. 1–8.
4. Al-Naimi, I. ntroduction to robot manipulators (2018).«Roboticsand Automation».- 25p.
5. Corke, P. (2017). «Robotics, vision and control: Fundamental algo-rithms in MATLAB», 2nd ed. – Switzerland: Springer. – 11p.
6. Singh, S. and Singla, E. (2016). «Service arms with unconventional robotic parameters for intricate workstations: Optimal number and dimensional synthesis», Journal of Robotics. – 47 p.
7. Rónai, L. and Szabó, T. (2016). «Kinematical investigation and regulation of a 4DOF model robot», Acta Mechanica Slovaca, vol. 20. no. 3. – P. 50–56
8. Singh, A. and Singla, A. (2017). «Kinematic Modeling of RoboticManipulators» in Proceedings of the 2017 National Academy of Sciences India Section. A - Physical Sciences. – P. 303–319

Бектилеов Алдаберген Юсупович	PhD, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы, Қазақстан
Бектилеов Алдаберген Юсупович	PhD, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан
Bektilevov Aldabergen	PhD, K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan



Уалиев Жомарт Разханович	PhD, Цифрлық инженерия және технологиялар институты, Алматы, Қазақстан
Уалиев Жомарт Разханович	PhD, институт цифровой техники и технологии, Алматы, Казахстан
Ualiyev Zhomart	PhD, Institute of Digital Engineering and Technology, Almaty, Kazakhstan

Шуак Толқын	магистрант, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы, Қазақстан
Шуак Толқын	магистрант, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан
Shuak Tolkun	master's student at K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan

Уәлиев Мерей	магистрант, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы, Қазақстан
Уалиев Мерей	магистрант, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан
Ualiyev Merey	master's student at K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan