



ХҒТАР 55.03.14

Шолу мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-151-2-181-194>

Сериялық, параллель және гибриді манипуляторларға шолу: функционалдық мүмкіндіктері мен шектеулері

А.Қ. Мустафа*^{1,2} , Е.З. Нұғман¹ , Н.С. Камзанов¹ , Ж.С. Тургунов^{1,2} 

¹Сәтбаев университеті, Алматы қаласы, Қазақстан

²ТОО «RnD Center», Республика Казахстан, г. Алматы

E mail: mustafa_azamat@mail.ru

Аңдатпа. Бұл мақалада манипуляторлардың конструктивтік ерекшеліктерін, еркіндік дәрежелерін және кинематикалық сипаттамаларын зерттеу қарастырылады. Манипуляторлар өндіріс, медицина, машина жасау және робототехника салаларында кеңінен қолданылатын маңызды құрылғылар болып табылады. Қазіргі өндірістік процестерде автоматтандыру тиімділікті арттырудың, адам еңбегін жеңілдетудің және шығындарды азайтудың басты факторы болып табылады. Алайда, технологиялардың қарқынды дамуына қарамастан, қолайлы манипуляторды таңдау күрделі міндет болып табылады. Манипуляторды таңдау көптеген факторларға, соның ішінде конструкцияның қаттылығына, еркіндік дәрежелерінің санына, жүк көтергіштігіне және жұмыс аймағына тәуелді. Зерттеудің негізгі мақсаты – сериялық, параллель және гибриді манипуляторлардың құрылымдық айырмашылықтарын салыстыру, олардың функционалдық мүмкіндіктері мен шектеулерін талдау, сондай-ақ таңдау критерийлерін жүйелеу. Жұмыс барысында жүйелі шолу әдісі қолданылып, ғылыми әдебиеттер, рецензияланған мақалалар және өндірушілердің техникалық құжаттары негізінде деректер жинақталады. Грюблер формуласы арқылы манипуляторлардың еркіндік дәрежелері есептеліп, олардың қозғалыс мүмкіндіктері мен кинематикалық параметрлері бағаланды. Бұл зерттеу манипуляторлардың кинематикалық сипаттамаларын жетілдіруге, олардың нақты өндірістік жағдайларға бейімделуін жақсартуға және таңдау әдістерін жүйелеуге үлес қосады. Жұмыстың практикалық маңызы – өндірісте, медицинада және робототехникада

Түйін сөздер: манипулятор, сериялық манипулятор, параллель манипулятор, гибриді манипулятор, жұмыс аймағы, кинематикалық схема.

Түсті 13.03.2025. Жөнделді 18.03.2025. Мақұлданды 14.05.2025. Онлайн қолжетімді 30.06.2025

* автор по корреспонденции

Кіріспе

Манипулятор — бұл объектілерді жылжыту, ұстау және басқару үшін арналған механикалық құрылғы. Олар өнеркәсіпте, машина жасауда, медицинада, робототехникада және басқа да салаларда кеңінен қолданылады, олар жоғары дәлдік пен өнімділікті қажет ететін тапсырмаларды орындайды [1,2]. Қазіргі өндірістік процестер жағдайында автоматтандыру тиімділікті арттыруға, адам факторының әсерін азайтуға және шығындарды оңтайландыруға мүмкіндік беретін негізгі рөл атқарады [2,3].

Алайда, технологиялардың қарқынды дамуына қарамастан, қолайлы манипуляторды таңдау күрделі міндет болып қала береді. Бұл әрқайсысының өзіндік ерекшеліктері мен шектеулері бар әртүрлі конструкциялардың кең ауқымымен байланысты. Манипуляторды таңдау көптеген факторларға, соның ішінде конструкцияның қаттылығына, еркіндік дәрежелерінің санына, жүк көтергіштігіне және жұмыс аймағына тәуелді. Бүгінгі таңда манипуляторлардың негізгі түрлері сериялық, параллель және гибриді болып табылады [4,5]. Сериялық манипуляторлар: бұл манипуляторлардың ең көп таралған түрі. Бұл манипуляторлар жоғары маневрлік және икемділікке ие, оларды көбінесе жинау, дәнекерлеу, бояу және басқа өндірістік жұмыстар үшін пайдаланады. Параллель манипуляторлар: бұл құрылымда бірнеше буындар бір-біріне параллель жалғанған, жабық кинематикалық тізбекті құрады, олар жоғары дәлдік және қаттылықты қамтамасыз етеді [6]. Олар көбінесе жоғары дәлдікті қажет ететін тапсырмалар үшін қолданылады, мысалы материалдарды өңдеу, 3D басып шығару және медицина. Гибриді манипуляторлар: манипуляторлар сериялық және параллель манипуляторлардың сипаттамаларын біріктіреді. Олар икемділік пен дәлдік арасындағы балансын ұсынады, бұл оларды әртүрлі қолдану үшін әмбебап етеді. Жоғарыда айтылған факторлар керекті манипуляторды таңдауды қиындатады. Осыған байланысты манипуляторларды таңдаудағы жүйелік тәсіл мәселесі өзекті инженерлік және ғылыми міндет болып қала береді.

Көптеген манипуляторларға арналған зерттеулерде олардың конструктивтік ерекшеліктері, еркіндік дәрежелерінің саны және жұмыс аймақтары қарастырылады. Мысалы, Ahmed A. [7] мақаласында параллель роботтарға жан-жақты шолу жасалып, олардың артықшылықтары, түрлері қарастырылған. Antonov A. мақаласында гибриді (параллель-сериялы) манипуляторлардың қолдану салалары, жобалау және талдау әдістерін қарастырған [8]. Бұл зерттеулер сериялық, параллель және гибриді манипуляторлар бойынша әдеби шолулардың жүргізілгенін көрсетеді, алайда олардың таңдауын жүйелендірілген әдістер арқылы жасау мәселесі әлі де жеткілікті деңгейде зерттелмеген.

Бұл әдеби шолу негізінде қолданыста бар және зерттеу мақалаларындағы манипуляторларды таңдаудың оңтайлы әдістерін ұсыну арқылы осы олқылықтың орнын толтыруға бағытталған. Осылайша, мақалада манипуляторларды таңдаудағы негізгі қиындықтар қарастырылып, олардың конструктивтік ерекшеліктерін салыстырмалы талдау негізінде оңтайлы шешімдер ұсынылады.

Әдіснама

Осы мақалада сериялық, параллель және гибриді манипуляторлардың конструктивтік ерекшеліктерін, еркіндік дәрежелерін және қаттылығын зерттеу үшін

жүйелі шолу әдістемесі қолданылады. Жүйелі шолу – бұл манипуляторлардың функционалдығына әсер ететін негізгі факторларды анықтауға мүмкіндік беретін мәліметтерді жинаудың және талдаудың құрылымдық тәсілі.

Манипуляторлар кинематикалық құрылымы, еркіндік дәрежелері, жұмыс аймағы және қаттылығы бойынша талданды. Бұл үшін кітаптар, рецензияланған ғылыми мақалалар, ғылыми журналдар, конференция материалдары және жетекші манипулятор өндірушілерінің құжаттары пайдаланылды.

Манипулятордың әртүрлі бағыттардағы қозғалыс сипаттамаларын анықтау үшін еркіндік дәрежесі есептелді, бұл үшін Грюблер формуласы қолданылды.

$$F = 6(l - n - 1) + \sum_{(i=1)}^n f_i$$

мұндағы l - буындар саны, n – қозғалмалы буындар саны, f_i – i -ші буынның еркіндік дәрежесі.

Қолайлы кинематикалық схеманы таңдау барысында еркіндік дәрежесі (DOF) санынан бөлек, динамикалық және конструктивтік аспектілерді ескеру қажет. Негізгі динамикалық параметрлерге жүк көтергіштік қабілеті, жүйенің белгілі бір позициядағы қаттылығы және үдеу қабілеті жатады.

Манипуляторлардың кейбір түрлерінің сипаттамалары 1-кестеде көрсетілген. Сериялық манипуляторлар кең жұмыс аймағына ие және жоғары маневрлік қабілетімен ерекшеленеді. Алайда, олардың консольдік құрылымына байланысты жүк көтергіштік мүмкіндігі шектеулі [9].

1-кесте. Сериялық және параллель манипуляторлардың салыстырмалы сипаттамалары

Сипаттамалар	Сериялық манипулятор	Параллель манипулятор
Қолданылатын тізбек түрі	Ашық кинематикалық тізбек	Жабық кинематикалық тізбек
Тікелей кинематика	Оңай	Күрделі
Кері кинематика	Бірнеше шешім бар	Жай және екі бағытты шешім
Орналасу дәлдігі	Төмен	Орташа
Жүк көтергіштік қабілеті	Төмен	Жоғары
Жұмыс аймағы	Үлкен	Шағын
Инерциялық жүктеме	Жоғары	Төмен

Зерттеулер көрсеткендей, Reimund Neugebauer [10], Uchiyama M. D [11], сондай-ақ Hesse Stefan мен Malisa Viktorio [12] еңбектерінде параллель роботтардың сериялық манипуляторларға қарағанда қозғалмалы массасы аз және динамикалық сипаттамалары

жақсы екені атап өтілген. Дегенмен, олардың негізгі кемшіліктерінің бірі — шектеулі жұмыс аймағы.

Гибридті манипуляторлар жабық және ашық кинематикалық тізбектердің немесе сериялық-параллельдік механизмдердің үйлесімі болып табылады. Мұндай манипуляторлар параллель құрылымдардың шектеулі жұмыс аймағын кеңейтуге және сериялық пен параллель манипуляторлардың артықшылықтарын біріктіруге бағытталған [13-15].

Манипуляторлардың буындарының байланыстары да манипулятордың жұмыс істеуіне, жұмыс аймағының көлеміне, оның жұмыс істеуінің ұзақтығына және өзіндік құнына әсер етеді. Манипулятордың буындарының қосылу түрлерін таңдағанда практикалық маңыздылығы ескеріледі. Сол үшін байланыс түрлері қарастырылды.

Көптеген роботтардағы буындар айналмалы немесе сызықтық қозғалысқа мүмкіндік береді, олар сәйкесінше айналмалы (R - revolute) және қозғалмалы (P - prismatic) буындар деп аталады. Басқа қолжетімді буындарға сферикалық (S), сырғымалы (P), бұрандалы (H), цилиндрлік (C) және универсалды (U) жатады (1-сурет).



1-сурет. Кинематикалық буындардың қосылыстары

Айналмалы (R) буындар таза айналу қозғалысына қамтамасыз етіп, басқа қозғалыстарды азайтады. Бұл буын қосылған денелер арасында тек айналу қозғалысына мүмкіндік береді. Оның бір еркіндік дәрежесі бар.

Призматикалық (P) немесе сырғымалы буындар бекітілген бағыт бойымен сызықтық қозғалысқа мүмкіндік береді. Олар ішкі және сыртқы цилиндрлік беттерден тұрады. Бұл буындар екі түрге бөлінеді: бір сатылы және телескопиялық. Бір сатылы буындар бекітілген бет бойымен сызықты сырғиды, қарапайымдылығы мен қаттылығы жоғары. Телескопиялық буындар ықшамдылығымен және үлкен созылу коэффициентімен ерекшеленеді, сондай-ақ кейбір қозғалыстарда инерцияны азайтады. Призматикалық буындардың бір еркіндік дәрежесі (DOF) бар.

Бұрандалы буындар (Н) – бұрандалы буындар айналу мен сызықтық орын ауыстыруды біріктіріп, бұрандалы жол бойымен қозғалысқа мүмкіндік береді.

Цилиндрлік буындар (С) – екі дөңгелек цилиндрден тұрады, цилиндр осі бойымен айналуға және сырғуға мүмкіндік береді. Функционалды түрде оны айналмалы және призматикалық буындардың тізбегімен алмастыруға болады.

Сферикалық буындар (S) – екі сфералық беттердің түйісуі арқылы түзіледі, үш бағытта айналуға мүмкіндік беріп, үш еркіндік дәрежесіне ие. Оны осьтері қиылысатын үш айналмалы буынмен алмастыруға болады, бірақ кейбір жағдайларда сингулярлыққа әкелуі мүмкін.

Универсалды буындар (U) – кардан немесе гук буыны деп те аталады. Ол екі айырдың арасындағы аяқастәрізді элементтен тұрады және біліктер арасында бұрыштық қозғалысқа мүмкіндік береді. Тиімді жұмыс істеуі үшін жұмыс бұрышы әдетте 25°-тан аспауы керек, ал механикалық шектеулерге байланысты ең үлкен бұрышы шамамен 37,5° болады [17].

Нәтижелер және талқылау

Әдеби шолу барысында сериялық, параллель және гибриді манипуляторлардың негізгі конструктивтік ерекшеліктері, еркіндік дәрежелері және аяқтарының құрылымы талданды. Зерттеу аясында сериялық манипуляторлардың 4 түрі [18-21], параллель манипуляторлардың 11 [22-32] түрі және гибриді манипуляторлардың 3 түрі [33-35] қарастырылды (2-кесте).

Манипуляторлардың қозғалыс мүмкіндіктерін анықтау үшін Грюблер формуласы қолданылды. Бұл әдіс әр манипулятордың буындар саны мен олардың қосылу түрлеріне байланысты еркіндік дәрежесін есептеуге мүмкіндік берді. Талдау нәтижелері көрсеткендей, сериялық манипуляторлар, әдетте, 6 еркіндік дәрежесіне ие болып, күрделі кеңістіктік қозғалыстарды орындай алады. Ал параллель манипуляторлардың еркіндік дәрежесі конструкциясына байланысты өзгеріп, 3-тен 6-ға дейінгі мәнге ие болды. Жабық кинематикалық құрылымының әсерінен кейбір параллель манипуляторларда қозғалыс шектеулері байқалды.

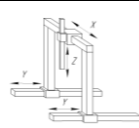
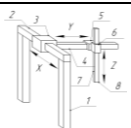
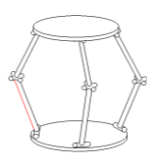
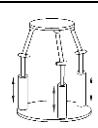
Манипуляторларда қолданылатын кинематикалық буындардың түрлері олардың функционалдығына айтарлықтай әсер етеді. Айналмалы (R) буындар жоғары маневрлік пен ықшамдылықты қамтамасыз етеді. Осындай буындардан жасалған манипуляторлар сызықтық қозғалыс жасайтын манипуляторларға қарағанда ықшам құрылымға ие, кедергілерді тиімді айналып өте алады және кең қолдану аясымен ерекшеленеді.

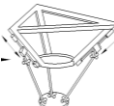
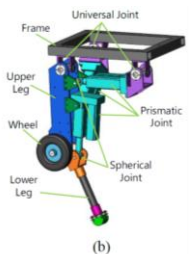
Призматикалық (P) буындар сызықтық қозғалыстар үшін тиімді. Бұрандалы (H) және цилиндрлік (C) буындар бір мезгілде айналу және сызықтық қозғалысты үйлестіре алады, бұл кейбір өндірістік процестерде үлкен артықшылық береді. Сферикалық (S) және универсалды (U) буындар кең қозғалыс мүмкіндіктерін ұсынғанымен, олардың өндірістік күрделілігі мен тозуға бейімділігі олардың қолданылуын шектейді.

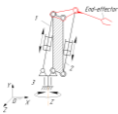
Жүргізілген талдаулар нәтижесінде манипуляторлардың әрбір түріне тән артықшылықтар мен шектеулер анықталды. Сериялық манипуляторлар кең қозғалыс диапазонын ұсынса да, олардың қаттылығы төмен. Параллель манипуляторлар жоғары дәлдік пен қаттылыққа ие, бірақ қозғалыс еркіндігі шектеулі. Гибриді манипуляторлар

осы екі түрдің артықшылықтарын біріктіре отырып, көпсалалы өндірістер үшін оңтайлы шешім болуы мүмкін.

2-кесте. Сериалы, параллель және гибриді манипуляторларды салыстыру кестесі

	Манипулятордың немесе механизмнің атауы	Манипулятор суреті	Еркіндік дәрежесі (DOF)			Жетектердің саны		Аяқ құрылымы
			Барлығы DOF	Айналу	Қозғалмалы	Сызықтық	Айналмалы	
1	2	3	4	5		6	7	8
Сериялық манипуляторларлар								
1	IRB 4600-45/2.05 [18]		6	-			4	Барлығы R
2	Flyer-M20iB-35S [19]		6	-			4	Барлығы R
3	Three axis gantry robot (XYZ) type 1 [20]		3DOF	-	3	4	-	Барлығы P
4	Three axis gantry robot (XYZ) type 2 [21]		3DOF	-	3	3	-	Барлығы P
Параллель манипуляторлар								
5	3SPU parallel manipulator [22]		6	3	3	3	3	SPU
6	3RUU (WUT MR2120) - parallel manipulator [23]		3	-	3	-	3	RUU
7	3PRS parallel manipulator [24]		3	1	2	3	-	PRS

8	3PUU parallel kinematic machine [25]		3	-	3	-		PUU
9	4URS parallel manipulators [26]		6	3	3	3		URS
10	4UPU parallel manipulator [27]		4	1	4	2		UPU
11	Stewart-Gough Platform (SPS) [28]		6	3	3	3		SPS
12	Stewart-Gough Platform (UPS) [29]		6	3	3	3		UPS
13	RUS type PM [30]		6	3	3	3		RUS
14	2 legs Delta parallel robot [31]		2	-	2	-		RRR
15	Clavel's 3-DOF Delta parallel robot [32]		3	-	3	-		RRП(R)R
Гибриді манипулятор								
16	Serial-Parallel Hybrid Mechanism [33]		3					2-UPS+U, R+RPS

17	Hydraulic Manipulator [34]		6	4	2	3		$R(\underline{RPR})+R(\underline{RPR})+R+\underline{R}+\underline{R}$
18	Electrical arm [35]		3	1	2	2		$R(\underline{RPR})+R(\underline{RPR})$

Осылайша, манипуляторды таңдау кезінде оның құрылымдық ерекшеліктерін, жұмыс аймағын, қаттылығын және еркіндік дәрежесін кешенді түрде қарастыру қажет. Алдағы зерттеулерде нақты өндірістік жағдайларға бейімделген манипуляторларды оңтайландыру әдістерін әзірлеу маңызды болып табылады.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу нәтижелері 4 сериялық, 11 параллель және 3 гибридті манипуляторлардың конструктивтік ерекшеліктерін, еркіндік дәрежелерін және қозғалыс мүмкіндіктерін салыстыруға мүмкіндік берді. Грюблер формуласы арқылы әртүрлі манипуляторлардың еркіндік дәрежелері есептеліп, олардың кинематикалық шектеулері мен артықшылықтары нақтыланды.

Зерттеу нәтижесінде сериялық манипуляторлардың 6 еркіндік дәрежесіне ие болып, кеңістіктік қозғалыстарды тиімді орындайтыны анықталды. Олардың құрылымдық икемділігі жоғары болғанымен, қаттылығы төмен және инерция жүктемесі үлкен. Параллель манипуляторлар жабық кинематикалық құрылымы арқасында жоғары қаттылық пен жүк көтергіштікке ие, бірақ қозғалыс еркіндігі шектеулі және күрделі басқаруды қажет етеді. Гибридті манипуляторлар сериялық және параллель құрылымдардың артықшылықтарын біріктіріп, жоғары маневрлік пен жүк көтергіштікті қамтамасыз етеді, бұл оларды өндірістік қолданбалар үшін тиімді шешім етеді.

Кинематикалық буындардың түрлері манипуляторлардың функционалдығына әсер етеді. Айналмалы (R) буындар маневрлік қабілетті арттырса, призматикалық (P) буындар сызықтық қозғалыстар үшін тиімді. Сферикалық (S) және универсалды (U) буындар кең қозғалыс мүмкіндіктерін ұсынғанымен, өндірістік күрделілігі мен тез тозуы белгілі бір шектеулер тудырады.

Осылайша, манипуляторды таңдау кезінде оның құрылымдық ерекшеліктерін, жұмыс аймағын, қаттылығын және еркіндік дәрежесін кешенді түрде қарастыру қажет. Алдағы зерттеулерде ауыр өндірістік жағдайда жұмыс істейтін манипуляторларға шолу маңызды.

Алғыс айту, мүдделер қақтығысы

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (Грант № AP19679253 – Көпфункционалды мобильді металл 3д принтерді зерттеу және жобалау).

Авторлардың қосқан үлесі.

Мустафа А.Қ. – мәтінді түсіну, талдау, өңдеу, бекіту.

Нұғман Е.З. – мәліметтерді жинау, визуализация, жобалау.

Камзанов Н.С. және Тургунов Ж.С. - мәліметтерді жинау, талдау, жазу.

Әдебиеттер тізімі

1. Юревич Е. И. Основы робототехники, 4 изд. – БХВ-Петербург, 2018.
2. FU KS G. R. C., LEE C. S. G. Robotics: control, sensing, vision and intelligence. – 1987.
3. Ceccarelli M. Fundamentals of mechanics of robotic manipulation. – Cham, Switzerland : Springer, 2022. – Т. 112. – С. 1-381.
4. Олешук В. Автоматизация производственных процессов в машиностроении. – Litres, 2023.
5. Chrysosolouris G., Alexopoulos K., Arkouli Z. Artificial intelligence in manufacturing equipment, automation, and robots //A Perspective on Artificial Intelligence in Manufacturing. – Cham : Springer International Publishing, 2023. – С. 41-78.
6. L.W. Tsai, Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators. New York John Wiley & Sons, 1999.
7. Deabs A., Gomaa F. R., Khader K. Parallel Robot //Journal of Engineering Science & Technology Review. – 2021. – Т. 14. – №. 6.
8. Antonov A. Parallel–serial robotic manipulators: a review of architectures, applications, and methods of design and analysis //Machines. – 2024. – Т. 12. – №. 11. – С. 811.
9. Dasgupta B., Mruthyunjaya T. S. The Stewart platform manipulator: a review //Mechanism and machine theory. – 2000. – Т. 35. – №. 1. – С. 15-40.
10. Neugebauer R. (ed.). Parallelkinematische Maschinen: Entwurf, Konstruktion, Anwendung. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2006.
11. Uchiyama M. Structures and characteristics of parallel manipulators //Advanced robotics. – 1993. – Т. 8. – №. 6. – С. 545-557., doi: 10.1163/156855394x00248.
12. S. Hesse, V. Malisa, A. Almansa, R. Ambrosch, B. Graf, C. Hieger, M. Trenker, W. Kubinger, Taschenbuch Robotik-Montage-Handhabung, Aufl. München: Carl Hanser, 2010.
13. Shaik A. A., Tlale N. S., Bright G. A new hybrid machine design for a 6 DOF industrial robot arm //International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications. – 2012. – Т. 11. – №. 1-2. – С. 63-80, doi: 10.1504/ijista.2012.046544.
14. Sun L., Fang L. An approximation method for stiffness calculation of robotic arms with hybrid open-and closed-loop kinematic chains //Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – Т. 10. – №. 2. – С, doi: 10.1177/1687814018761297.
15. Kumar S. et al. A survey on modularity and distributivity in series-parallel hybrid robots //Mechatronics. – 2020. – Т. 68. – С. 102367., doi: 10.1016/j.mechatronics.2020.102367.
16. Siciliano B., Khatib O., Kröger T. (ed.). Springer handbook of robotics. – Berlin : springer, 2008. – Т. 200. – С. 1.
17. https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROB0109EN_G&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch

18. <https://www.fanuc.eu/pl/en/robots/robot-filter-page/m-20-series/m-20ib-35s?returnurl=https%3A%2F%2Fwww.fanuc.eu%2Fpl%2Fen%2Frobots%2Frobot-filter-page%23%3Ft%3Dc1494f783e1f441a8472ab688bf9ca08%2C1fc42cb423f2445bb0da1ea4a885389a%257C0bd0fb61ad95421abdd51eda626103cc%20>
19. Černohorský J., Lindr D. Laboratory gantry robot design and control //Proceedings of the 13th International Carpathian Control Conference (ICCC). – IEEE, 2012. – C. 86-90.
20. Lörinc, M. THREE AXIS LINEAR PORTAL MANIPULATOR. Acta Mechatronica - International Scientific Journal about Mechatronics. Volume: 1 2016 Issue: 2 Pages: 27-30 ISSN 2453-7306.
21. Zohoor H., Vakil M., Pendar H. On the Kinematic Analysis of a Spatial Six-Degree-of-Freedom Parallel Manipulator //Scientia Iranica. – 2009. – T. 16. – №. 1.
22. Bałchanowski J. Positioning accuracy analysis of the parallel mechanism near singular positions. – 2015.
23. Dr. C. Dhandapani 1 Head, Dept of Mechanical Engg, Rajagopal Polytechnic College, Gudiyattam– 632 602, Tamil nadu, India. Triglidle Parallel Manipulator for Orientation and Positioning of Models for Wind Tunnel Testing. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181 Published by, www.ijert.org NCFTEET - 2020 Conference Proceedings.
24. Li Y., Xu Q. Stiffness analysis for a 3-PUU parallel kinematic machine //Mechanism and machine theory. – 2008. – T. 43. – №. 2. – C. 186-200.
25. Yi B. J., Cox D., Tesar D. Analysis and design criteria for a redundantly actuated 4-legged six Degree-of-Freedom parallel manipulator //Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164). – IEEE, 2001. – T. 4. – C. 3286-3293.
26. Solazzi M. et al. Kinematics analysis and singularity loci of a 4-UPU parallel manipulator //Advances in Robot Kinematics. – 2014. – C. 467-474.
27. Ay S., Vatandas O. E., Hacıoglu A. Determination of the reachable workspace of 6-3 Stewart platform mechanism //engineering, 2012. Proceedings. World Congress on. – 2012. – T. 3.
28. Dasgupta B., Mruthyunjaya T. S. The Stewart platform manipulator: a review //Mechanism and machine theory. – 2000. – T. 35. – №. 1. – C. 15-40.
29. Mirshekari E., Ghanbarzadeh A., Shirazia K. H. Structure comparison and optimal design of 6-RUS parallel manipulator based on kinematic and dynamic performances //Latin American Journal of Solids and Structures. – 2016. – T. 13. – №. 13. – C. 2414-2438.
30. Huang T. et al. Optimal design of a 2-DOF pick-and-place parallel robot using dynamic performance indices and angular constraints //Mechanism and machine theory. – 2013. – T. 70. – C. 246-253.
31. Maya M. et al. Workspace and payload-capacity of a new reconfigurable delta parallel robot //International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2013. – T. 10. – №. 1. – C. 56.
32. Niu J. et al. Kinematic analysis of a serial-parallel hybrid mechanism and its application to a wheel-legged robot //IEEE Access. – 2020. – T. 8. – C. 111931-111944.
33. Monk S. D. et al. Implementation and evaluation of a semi-autonomous hydraulic dual manipulator for cutting pipework in radiologically active environments //Robotics. – 2021. – T. 10. – №. 2. – C. 62.
34. <https://www.ecagroup.com/en/solutions/arm-5e>.

А.Қ. Мустафа^{1,2}, Е.З. Нұғман¹, Ж. С. Тургунов^{1,2}, Н.С.Камзанов¹

¹Университет Сампаева, г. Алматы, Казахстан

²ТОО «RnD Center», г. Алматы, Казахстан

Обзор серийных, параллельных и гибридных манипуляторов: функциональные возможности и ограничения

Аннотация. В данной статье рассматриваются конструктивные особенности манипуляторов, их степени свободы и кинематические характеристики. Манипуляторы являются важными устройствами, широко используемыми в промышленности, медицине, машиностроении и робототехнике. В современных производственных процессах автоматизация является ключевым фактором повышения эффективности, облегчения труда человека и снижения затрат. Однако, несмотря на стремительное развитие технологий, выбор подходящего манипулятора остается сложной задачей. Выбор манипулятора зависит от множества факторов, включая жесткость конструкции, количество степеней свободы, грузоподъемность и рабочую зону. Основная цель исследования – сравнение конструктивных различий серийных, параллельных и гибридных манипуляторов, анализ их функциональных возможностей и ограничений, а также систематизация критериев выбора. В ходе работы использован метод систематического обзора, данные собираются на основе научной литературы, рецензируемых статей и технической документации производителей. С помощью формулы Грюблера рассчитаны степени свободы манипуляторов, проведена оценка их движений и кинематических параметров. Данное исследование вносит вклад в совершенствование кинематических характеристик манипуляторов, улучшение их адаптации к реальным производственным условиям и систематизацию методов выбора. Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций, направленных на оптимизацию и выбор эффективных манипуляторов для применения в промышленности, медицине и робототехнике.

Ключевые слова: манипулятор, серийный манипулятор, параллельный манипулятор, гибридный манипулятор, рабочая зона, кинематическая схема.

A. Mustafa^{1,2}, Y. Nugman¹, Zh. Turgunov^{1,2}, N. Kamzanov¹

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²LLP "RnD Center," Almaty, Kazakhstan

Review of Serial, Parallel, and Hybrid Manipulators: Functional Capabilities and Limitations

Abstract. Manipulators are essential devices widely used in industry, medicine, mechanical engineering, and robotics. In modern production processes, automation is a key factor in increasing efficiency, reducing human labor, and minimizing costs. However, despite the rapid advancement of technology, selecting a suitable manipulator remains a complex task. The choice of a manipulator depends on various factors, including structural rigidity, the number of degrees

of freedom, load capacity, and working area. The main objective of this study is to compare the structural differences between serial, parallel, and hybrid manipulators, analyze their functional capabilities and limitations, and systematize the selection criteria. A systematic review method was applied, and data were collected from scientific literature, peer-reviewed articles, and manufacturers' technical documentation. Using Grübler's formula, the degrees of freedom of the manipulators were calculated, and their motion capabilities and kinematic parameters were evaluated. This research contributes to improving the kinematic characteristics of manipulators, enhancing their adaptability to real production conditions, and systematizing selection methods. The practical significance of the study lies in developing recommendations aimed at optimizing and selecting efficient manipulators for applications in industry, medicine, and robotics.

Keywords: manipulator, serial manipulator, parallel manipulator, hybrid manipulator, workspace, kinematic scheme.

References

1. Yurevich E. I. Osnovy robototekhniki, 4 izd. – BHV-Peterburg, 2018.
2. FU KS G. R. C., LEE C. S. G. Robotics: control, sensing, vision and intelligence. – 1987.
3. Ceccarelli M. Fundamentals of mechanics of robotic manipulation. – Cham, Switzerland : Springer, 2022. – T. 112. – C. 1-381.
4. Oleshchuk V. Avtomatizaciya proizvodstvennyh processov v mashinostroenii. – Litres, 2023.
5. Chryssolouris G., Alexopoulos K., Arkouli Z. Artificial intelligence in manufacturing equipment, automation, and robots //A Perspective on Artificial Intelligence in Manufacturing. – Cham : Springer International Publishing, 2023. – C. 41-78.
6. L.W. Tsai, Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators. New York John Wiley & Sons, 1999.
7. Deabs A., Gomaa F. R., Khader K. Parallel Robot //Journal of Engineering Science & Technology Review. – 2021. – T. 14. – №. 6.
8. Antonov A. Parallel-serial robotic manipulators: a review of architectures, applications, and methods of design and analysis //Machines. – 2024. – T. 12. – №. 11. – C. 811.
9. Dasgupta B., Mruthyunjaya T. S. The Stewart platform manipulator: a review //Mechanism and machine theory. – 2000. – T. 35. – №. 1. – C. 15-40.
10. Neugebauer R. (ed.). Parallelkinematische Maschinen: Entwurf, Konstruktion, Anwendung. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2006.
11. Uchiyama M. Structures and characteristics of parallel manipulators //Advanced robotics. – 1993. – T. 8. – №. 6. – C. 545-557., doi: 10.1163/156855394x00248.
12. S. Hesse, V. Malisa, A. Almansa, R. Ambrosch, B. Graf, C. Hieger, M. Trenker, W. Kubinger, Taschenbuch Robotik-Montage-Handhabung, Aufl. München: Carl Hanser, 2010.
13. Shaik A. A., Tlale N. S., Bright G. A new hybrid machine design for a 6 DOF industrial robot arm //International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications. – 2012. – T. 11. – №. 1-2. – C. 63-80, doi: 10.1504/ijista.2012.046544.
14. Sun L., Fang L. An approximation method for stiffness calculation of robotic arms with hybrid open-and closed-loop kinematic chains //Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – T. 10. – №. 2. – C, doi: 10.1177/1687814018761297.
15. Kumar S. et al. A survey on modularity and distributivity in series-parallel hybrid robots //Mechatronics. – 2020. – T. 68. – C. 102367., doi: 10.1016/j.mechatronics.2020.102367.

16. Siciliano B., Khatib O., Kröger T. (ed.). Springer handbook of robotics. – Berlin : springer, 2008. – T. 200. – C. 1.
17. https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROB0109EN_G&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch
18. <https://www.fanuc.eu/pl/en/robots/robot-filter-page/m-20-series/m-20ib-35s?returnurl=https%3A%2F%2Fwww.fanuc.eu%2Fpl%2Fen%2Frobots%2Frobot-filter-page%23%3Ft%3Dc1494f783e1f441a8472ab688bf9ca08%2C1fc42cb423f2445bb0da1ea4a885389a%257C0bd0fb61ad95421abdd51eda626103cc%2C8eae3d9d089e416b91dce58863eb7730%257C395757318f7048bab50ba46484da18dd%2C8eae3d9d089e416b91dce58863eb7730>.
19. Černohorský J., Lindr D. Laboratory gantry robot design and control //Proceedings of the 13th International Carpathian Control Conference (ICCC). – IEEE, 2012. – C. 86-90.
20. Lörinc, M. THREE AXIS LINEAR PORTAL MANIPULATOR. Acta Mechatronica - International Scientific Journal about Mechatronics. Volume: 1 2016 Issue: 2 Pages: 27-30 ISSN 2453-7306.
21. Zohoor H., Vakil M., Pendar H. On the Kinematic Analysis of a Spatial Six-Degree-of-Freedom Parallel Manipulator //Scientia Iranica. – 2009. – T. 16. – №. 1.
22. Bałchanowski J. Positioning accuracy analysis of the parallel mechanism near singular positions. – 2015.
23. Dr. C. Dhandapani 1 Head, Dept of Mechanical Engg, Rajagopal Polytechnic College, Gudiyattam– 632 602, Tamil nadu, India. Triglide Parallel Manipulator for Orientation and Positioning of Models for Wind Tunnel Testing. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181 Published by, www.ijert.org NCFET - 2020 Conference Proceedings.
24. Li Y., Xu Q. Stiffness analysis for a 3-PUU parallel kinematic machine //Mechanism and machine theory. – 2008. – T. 43. – №. 2. – C. 186-200.
25. Yi B. J., Cox D., Tesar D. Analysis and design criteria for a redundantly actuated 4-legged six Degree-of-Freedom parallel manipulator //Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164). – IEEE, 2001. – T. 4. – C. 3286-3293.
26. Solazzi M. et al. Kinematics analysis and singularity loci of a 4-UPU parallel manipulator //Advances in Robot Kinematics. – 2014. – C. 467-474.
27. Ay S., Vatandas O. E., Hacıoglu A. Determination of the reachable workspace of 6-3 Stewart platform mechanism //engineering, 2012. Proceedings. World Congress on. – 2012. – T. 3.
28. Dasgupta B., Mruthyunjaya T. S. The Stewart platform manipulator: a review //Mechanism and machine theory. – 2000. – T. 35. – №. 1. – C. 15-40.
29. Mirshekari E., Ghanbarzadeh A., Shirazia K. H. Structure comparison and optimal design of 6-RUS parallel manipulator based on kinematic and dynamic performances //Latin American Journal of Solids and Structures. – 2016. – T. 13. – №. 13. – C. 2414-2438.
30. Huang T. et al. Optimal design of a 2-DOF pick-and-place parallel robot using dynamic performance indices and angular constraints //Mechanism and machine theory. – 2013. – T. 70. – C. 246-253.

31. Maya M. et al. Workspace and payload-capacity of a new reconfigurable delta parallel robot //International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2013. – Т. 10. – №. 1. – С. 56.
32. Niu J. et al. Kinematic analysis of a serial-parallel hybrid mechanism and its application to a wheel-legged robot //IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – С. 111931-111944.
33. Monk S. D. et al. Implementation and evaluation of a semi-autonomous hydraulic dual manipulator for cutting pipework in radiologically active environments //Robotics. – 2021. – Т. 10. – №. 2. – С. 62.
34. <https://www.ecagroup.com/en/solutions/arm-5e>.

Авторлар туралы мәлімет:

А.Қ. Мустафа – доктор PhD, қауымдасқан профессор, Сәтбаев университеті, Сәтбаев көш. 22, Алматы қ., 050013, аға ғылыми қызметкер, ЖШС «RnD Center», Алматы қ., 050067, Қазақстан, тел: +77075233344, E-mail: mustafa_azamat@mail.ru.

Е.З. Нұғман – доктор PhD, кафедра меңгерушісі, Сәтбаев университеті, Сәтбаев көш. 22, Алматы қ., 050013, Қазақстан, тел: +77075233344, E-mail: e.nugman@satbayev.university.

Тургунов Ж.С. - ғылыми қызметкер, Сәтбаев университеті, Алматы қ., 050013, ғылыми қызметкер, ЖШС «RnD Center», Алматы қ., 050067, Қазақстан, e-mail: jarqyn.kz@gmail.com.

Камзанов Н.С. - доктор PhD, қауымдасқан профессор, Сәтбаев университеті, Сәтбаев көш. 22, Алматы қ., 050013, Қазақстан, тел: +7 702 110 0005.

А.Қ. Мустафа – доктор PhD, ассоциированный профессор, Сатбаев университет, ул. Сатбаев 22, г. Алматы, старший научный сотрудник, ТОО «RnD Center», Алматы, 050067, Казахстан, тел: +77075233344, E-mail: mustafa_azamat@mail.ru.

Е.З. Нұғман – доктор PhD, заведующий кафедры, Сатбаев университет, ул. Сатбаев 22, г. Алматы, Казахстан, тел: +77075233344, E-mail: e.nugman@satbayev.university.

Тургунов Ж.С. - научный сотрудник, Сатбаев Университет, г. Алматы, 050013, научный сотрудник, ТОО «RnD Center», г. Алматы, 050067, Республика Казахстан, e-mail: jarqyn.kz@gmail.com.

Камзанов Н.С. – доктор PhD, ассоциированный профессор, Университет Сатбаева, ул. Сатбаева 22, г. Алматы, 050013, Казахстан, тел: +7 702 110 0005.

A. Mustafa – PhD, Associate Professor, Satbayev University, 22 Satbaev st., Almaty, Senior Researcher, LLP "RnD Center", Almaty, 050067, Kazakhstan, phone: +77075233344, E-mail: mustafa_azamat@mail.ru.

E. Nugman – PhD, head of department, Satbayev University, 22 Satbaev st., Almaty, Kazakhstan, tel: +77075233344, E-mail: e.nugman@satbayev.university.

Zh. Turgunov - researcher, Satbayev University, Almaty, 050013, researcher, «RnD Center» LLP, Almaty, 050067, Republic of Kazakhstan, e-mail: jarqyn.kz@gmail.com.

N. Kamzanov– PhD, Associate Professor, Satbayev University, 22 Satbayev St., Almaty, 050013, Kazakhstan, Tel: +7 702 110 0005.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).