

ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

**ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ
МЕН ТЕХНИКАСЫ**

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ



**НАУКА И ТЕХНИКА
КАЗАХСТАНА**

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 2 (2025)

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ**
выходит 1 раз в квартал

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ KZ51VPY00036165

выдано

Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

Публикация научных исследований по широкому спектру проблем
в области металлургии, машиностроения, транспорта, строительства,
химической и нефтегазовой инженерии, производства продуктов питания

Подписной индекс – 76129

<https://doi.org/10.48081/VJZF6109>

Импакт-фактор РИНЦ – 0,216

Импакт-фактор КазБЦ – 0,406

Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (главный редактор);
Сулейменов Ансаган Дюсембаевич – PhD (ответственный секретарь);
Шокубаева Зауреш Жанатовна – технический редактор.

Члены редакционной коллегии:

Богомолов Алексей Витальевич – к.т.н., ассоц. профессор (Павлодар, Казахстан);
Калиакпаров Алтай Гиндуллинович – д.т.н., профессор (Нур-Султан, Казахстан);
Шеров Карибек Тагаевич – д.т.н., профессор (Караганда, Казахстан);
Кажиева Галия Тулеуевна – к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);
Жунусов Аблай Каиртасович – к.т.н., асс. профессор (доцент) (Павлодар, Казахстан);
Зарубежные члены редакционной коллегии:
Baigang Sun – PhD, профессор (Пекин, Китай);
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);
Magain Lapuerta – д.т.н., профессор (СьюДад Реал, Испания);
Mareks Mezitis – д.т.н., профессор (Рига, Латвия);
Petr Bouchner – PhD, профессор (Прага, Чехия);
Барзов Александр Александрович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Витвицкий Евгений Евгеньевич – д.т.н., профессор (Омск, Россия);
Иванчина Эмилия Дмитриевна – д.т.н., профессор (Томск, Россия);
Лазарев Владислав Евгеньевич – д.т.н., профессор (Челябинск, Россия);
Мягков, Леонид Львович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Янюшкин Александр Сергеевич – д.т.н., профессор (Чебоксары, Россия);
Ребезов Максим Борисович – д.с/х.н., профессор (Москва, Россия).
Чайкин Владимир Андреевич – д.т.н., доцент (Сафоново, Россия);

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на журнал «Наука и техника Казахстана» обязательна

© Торайгыров университет

А. Қ. Мустафа¹, Р. А. Кайыров², *М. Қ. Сағынтай³, Е. З. Нұрман⁴

^{1,2,3,4}Сәтбаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

²Е. А. Бөкетов атындағы Қарағанды университеті, «Қолданбалы механика және робототехника» зертханасы, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;

^{1,3}ЖШС «RnD Center», Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4751-7141>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0899-4981>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7946-1568>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4537-9440>

*e-mail: mustafa_azamat@mail.ru, skmuchagali-2009@mail.ru

АДДИТИВТІ ТЕНОЛОГИЯМЕН 3D БАСПАЛАУ КЕЗІНДЕ ПАЙДА БОЛАТЫН АУЫТҚУЛАРДЫ КОМПЕНСАЦИЯЛАЙТЫН МАНИПУЛЯТОР

Адитивті технологияда пайдаланатын технологияларының сенімділігін арттыру және мүмкіндіктерін кеңейту мақсатында басып шығару жүйесін дәстүрлі технологиялармен интеграциялау қарастырылуда. Алайда, бұл процестегі негізгі мәселелердің бірі – баспа бастиектің дәл позицияланбауы, бұл баспаланатын конструкцияның сапасының төмендеуіне әкелуі мүмкін. Осы мәселені шешу үшін бұл мақалада 3D басып шығару кезінде манипулятор ретінде пайдаланатын дәстүрлі техниканың жебесінің ауытқуын компенсациялайтын, баспа бастиектің дәл орналасуын қамтамасыз ететін манипулятор қолдану ұсынылады. Манипуляторды таңдау кезінде сериялық манипуляторлар және параллельді манипуляторларға анализ жасалып қарастырылды. Манипулятор жұмыс кеңістігіндегі XYZ осьтері бойынша ауытқуларды тиімді түрде компенсациялап, басып шығару дәлдігін және сапасын арттыруға мүмкіндік береді.

Бұл міндетті жүзеге асыру үшін жоғары жылдамдыққа және дәл позициялау мүмкіндігі жоғары, сондай-ақ параллель кинематикасының арқасында жеткілікті қаттылықты қамтамасыз ететін Клавельдің дельта-роботы таңдалды. Зерттеу барысында кинематиканың тура және кері кинематика есептері шығарылып, манипулятордың жұмыс аймағы анықталды және оның қойылған міндетті шешуге жарамдылығы расталды. Алынған нәтижелер 3D басып шығару процесін одан әрі оңтайландыру және оның технологиялық тиімділігін арттыру үшін қолданылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: 3D баспалау, манипулятор, кері кинематика, тура кинематика, Клавель дельта роботы.

Кіріспе

Аддитивті технологияны қолданатын 3D басып шығару – бұл құрылымдарды қабаттап құю арқылы жүзеге асатын заманауи өндірістік процесс [1]. Дәстүрлі құрылыс әдістерімен салыстырғанда бұл тәсілдің бірқатар маңызды артықшылықтары бар. Атап айтқанда, ол шығындарды азайтып, құрылыс қалдықтарын азайтуға және күрделі архитектуралық жобаларды тиімді тұрғызуға мүмкіндік береді [2]. Сонымен қатар, бұл технология өндірістің тұрақтылығымен және үнемділігімен ерекшеленеді, сондықтан ол дамушы елдердегі тұрғын үй тапшылығы мәселесін шешудің тиімді жолы ретінде қарастырылуда [3]. Бұдан бөлек, 3D басып шығару тәсілі күрделі пішіндегі нысандарды жылдам тұрғызуға және шикізат ретінде қайта өңделген материалдарды пайдалануға мүмкіндік береді [4]; [5].

Соған қарамастан, құрылыс конструкцияларын 3D басып шығару әлі де салыстырмалы түрде жаңа технология болып саналады және оның кеңінен қолданылуына бірқатар шектеулер бар. Атап айтқанда, 3D баспалау жабдықтарының жоғары құны, басып шығару көлемінің шектеулілігі және дайын құрылымдардың қауіпсіздігі мен сенімділігін қамтамасыз ету қажеттілігі өзекті мәселелердің қатарына жатады. Баспа бастиекті тасымалдайтын жүйелердің ішінде роботталған қолдар, порталдық принтерлер және кабельдік роботтар секілді түрлі манипуляторлар бар [6]. Алайда олардың басым бөлігі зертханалық жағдайда сыналған және нақты құрылыс алаңдарының күрделі жағдайларына бейімделмеген.

Құрылымдардың сенімділігін арттырудың бір жолы – баспа бастиектің дәл орналасуын қамтамасыз ету үшін дәстүрлі құрылыс машиналарын пайдалану. Осыған орай CONPrint3D монолитті 3D басып шығару тұжырымдамасы ұсынылған [7]; [8]. Бұл тұжырымдама қолданыстағы құрылыс техникасын тиімді пайдалану арқылы технологияны құрылыс стандарттарына бейімдеуді көздейді. Атап айтқанда, басып шығару жүйесі автобетонсорғыға біріктіріледі, ол бұл жағдайда баспа бастиектің орналасуын басқару құралы ретінде қолданылады.

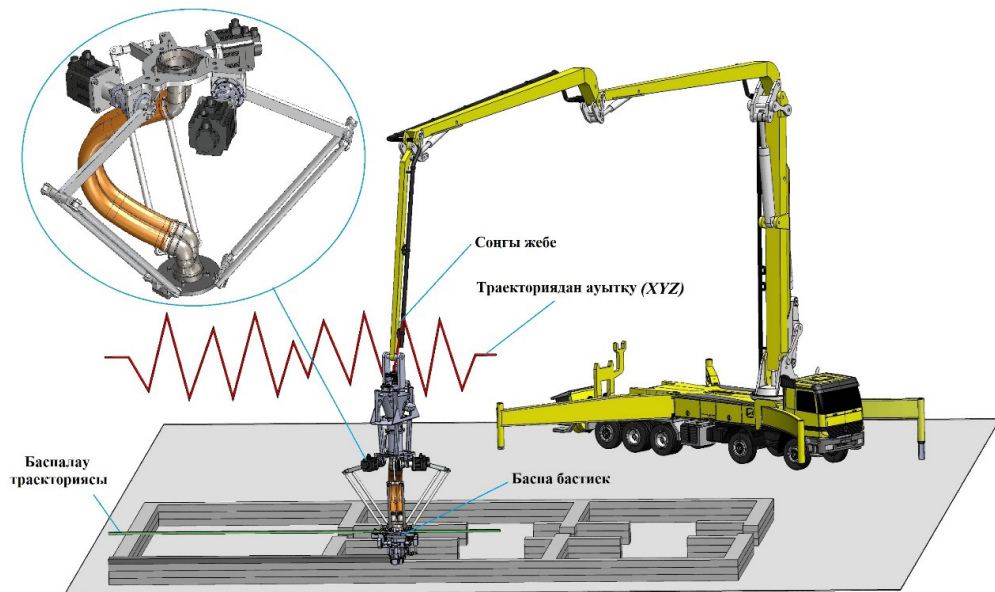
Дегенмен, бетон айдау процесі және қозғалу кезінде автобетонсорғы буындары механикалық деформацияларға және тербелістерге ұшырайды [9], ал буындарында айналмалы қозғалыс жасаған кезінде қосымша вибрациялар пайда болады [10]. Осы тұста Näther, M., Nerella және басқа зерттеушілердің [11] зерттеулері координаталық осьтер бойынша келесі орташа ауытқуларды көрсетті: $X \pm 90$ мм, $Y \pm 51$ мм, $Z \pm 150$ мм. Мұндай дәлсіздік бетонды 3D басып шығару үшін қолайсыз. Ал қабырғаның баспалау дәлдігі DIN 18202 стандартының талаптарына сай болуы тиіс.

Осы мәселені шешу мақсатында бұл мақалада 3D басып шығару процесінде дәстүрлі құрылыс техникасының жебе қозғалысындағы ауытқуларды компенсациялауға арналған, баспа бастиектің дәл орналасуын қамтамасыз ететін манипуляторды қолдану ұсынылады. Бұл бағытта келесі міндеттер шешіледі: манипуляторды таңдау, оның кинематикасының тура және кері есептерін шешу, сондай-ақ жұмыс аймағын анықтау. Жұмыс аймағы $X \pm 300$ мм, $Y \pm 300$ мм,

$Z \pm 300$ мм-ді қамту керек. Сондай ақ манипулятор жоғары жылдамдыққа және жүккөтергіштікке ие болуы керек.

Материалдар мен әдістер

Автобетонсорғы – жаңа дайындалған бетон қоспасын арнайы бетонтасымалдағыш көліктерден қабылдап, оны төсеу орнына дейін көлденең және тік бағытта жеткізуге арналған машина. Бетонды жеткізу төрт секциялы бетон таратқыш жебе арқылы жүзеге асырылады (1 сурет). Баспа бастиек автобетонсорғының соңғы жебесіне орнатылған.



1-сурет – Басып шығару процесінде дәл позициялау үшін қажетті қозғалыстарды анықтау

3D баспалау кезінде баспа бастиекті компенсациялауға арналған манипулятор ықшам және жеңіл болуы тиіс және де жоғары динамикалық сипаттамаларға ие болуы қажет, себебі жылдам компенсациялық қозғалыстарды жүзеге асыру маңызды [12]; [13].

Компенсациялау блогының қажетті еркіндік дәрежелері баспа бастиектің қозғалыс жүйесіне (біздің жағдайда – автобетонсорғы жебесінің қозғалысы) және жоспарланған басып шығару траекториясына байланысты анықталуы керек. 1-суретте автобетонсорғы көмегімен қабырғаны түзу сызық бойымен басып шығару процедурасы көрсетілген.

Автобетонсорғы абсолюттік координаталар жүйесінде орналасқан. Оның жебесі цилиндрлік координаталар жүйесінде қозғалады және 3 еркіндік дәрежесіне ие. 1-суретте қажетті компенсациялық қозғалыстар көрсетілген, олар: $X \pm 300$ мм, $Y \pm 300$ мм, $Z \pm 300$ мм.

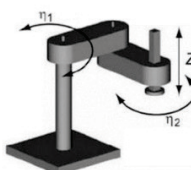
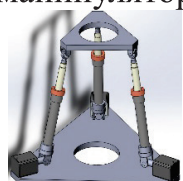
Баспа бастиектің ішіндегі бетонымен бірге 46 кг салмағы бар, бұл компенсациялаушы манипулятордың қатаң конструкцияға ие болуын талап

етеді. Позициялау дәлдігі ± 5 мм құрылыс стандарттарының рұқсат етілген ауытқуларына сәйкес DIN 18202 стандарты бойынша анықталады.

Жоғарыда қойылған талаптарға сәйкес манипулятордың сәйкес кинематикасын таңдағанда, еркіндік дәрежесінен бөлек, динамикалық және құрылымдық аспектілерді де ескеру қажет. Динамикалық мәселелерге әдетте жүк көтергіштік қабілеті, жүйенің конструкциясының қаттылығы және үдеуге қабілеттілігі жатады.

Жоғарыда аталған талаптарға сәйкес келетін манипуляторды таңдау үшін сериялы және параллель құрылымды манипуляторлар қарастырылады (1-кесте).

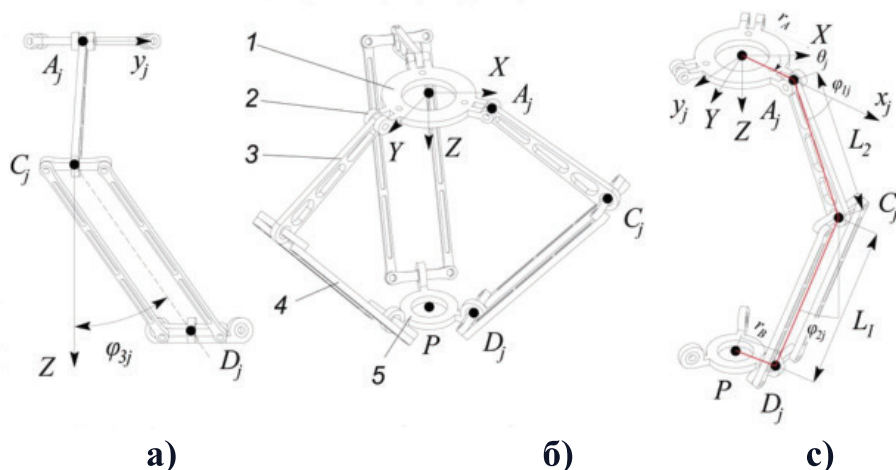
1-кесте – Сериялы және параллельді манипуляторлардың салыстыру кестесі

Сипаттамалары [45]	Сериялы манипулятор 	Параллель манипулятор 
Құрылымдық қаттылық	Төмен	Жоғары
Манипулятордың салмағы	Үлкен	Кіші
Жүк көтергіштігі	Төмен	Жоғары
Инерциялық жүктеме	Жоғары	Төмен
Орналастыру дәлдігі	Төмен	Жоғары
Жұмыс кеңістігі	Үлкен	Кіші
Жұмыс және орнату кеңістігі	Үлкен	Кіші

Манипулятор түрлерінің кейбір қасиеттері 1-кестеде салыстырылған. Сериялық манипуляторлардың артықшылықтары: олардың жұмыс кеңістігі үлкен және шебер маневр жасауға болады. Бірақ консольдық конструкцияға байланысты олардың жүк көтергіштігі төмен [15]. R. Neugebauer-дің [16, 162–190-бб.] еңбегі бойынша сериялық манипуляторлармен салыстырғанда параллель манипуляторлардың төмен қозғалатын массаға және жоғары динамикалық сипаттамаларға ие екені көрсетіледі. Алайда бұл құрылымдардың жұмыс аймағы шектеулі. Соған қарамастан, параллель манипуляторлардың құрылымдық қаттылығына, жүк көтергіштігіне, жылдамдығы және дәл позициялау мүмкіндіктеріне қарап компенсациялаушы жүйе ретінде қарастырған тиімді. Осы себепті сериялық манипуляторлар бұл мақсат үшін қарастырылмайды. Әрі қарай, параллель манипулятор яғни Клавелдің дельта роботы қарастырылады.

Геометрия және қозғалысы.

Баспа бастиекті компенсациялайтын манипулятор (бұдан әрі Клавел дельта роботы) 1-қозғалмайтын платформаны үш бірдей кинематикалық тізбек арқылы 5-қозғалмалы платформамен қосу арқылы алынады.



2-сурет – Клавель дельта-роботының құрылымы: (а) негізгі көрініс, (б) бір аяқтың бөлек қарастырылуы, (с) Клавельдің дельта-роботының параметрлері

Әрбір кинематикалық тізбек белсенді айналмалы кинематикалық жұптардан A_i тұрады, олар 1-қозғалмайтын платформадағы 2-қозғалтқышпен басқарылады. Қозғалыс параллелограммдар арқылы қозғалмалы платформаға беріледі (4-сурет). Мұндай роботтың позициялау дәлдігі шамамен 0,1 мм болады.

Кері кинематика.

Дельта роботтың бір аяғы үшін векторлық контурлардың тұйықталу теңдеулері былайша жазылады

$$\mathbf{r}_{D_i} = \mathbf{r}_{OP} + \mathbf{h}_i, (i = 1, 2, 3). \quad (1)$$

Абсолюттік $O_0X_0Y_0Z_0$ координаттар жүйесі белсенді айналмалы кинематикалық жұптар орналасқан нүктелердің центрінде орналастырылды. Параллель манипулятордың аяқтары арқылы $\mathbf{r}_{D_i}$ векторының компоненттерін анықтау үшін, абсолюттік $O_0X_0Y_0Z_0$ координаттар жүйесінен қозғалмалы платформаның аяқтарға бекітілген универсалды топсалар орналастырылған $D_1X_4Y_4Z_4$ координаттар жүйелерінің арасында Денавит-Хартенбергтің [17] біртекті түрлендіру матрицалары алынды.

1) $O_0X_0Y_0Z_0$ координаттар жүйесінен $D_1X_4Y_4Z_4$ координаттар жүйесіне келесі түрлендіру матрицалары алынды:

$$A_{01,i} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_{01,i} \cdot s\theta_i & s\alpha_{01,i} \cdot s\theta_i & a_{01,i} \cdot c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_{01,i} \cdot c\theta_i & -s\alpha_{01,i} \cdot c\theta_i & a_{01,i} \cdot s\theta_i \\ 0 & s\alpha_{01,i} & c\alpha_{01,i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

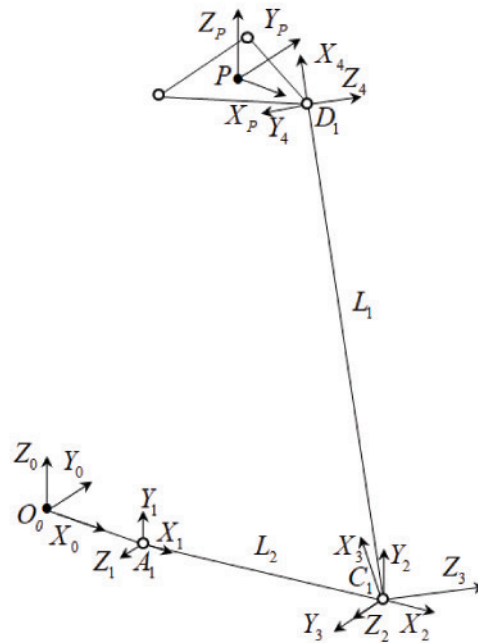
мұнда $\theta_i = 0^0, 120^0, 240^0$, $a_{01,i} = r_a$, $\alpha_{01,i} = 90^0$ ($i = 1, 2, 3$) - тұрақты

$$A_{12,i} = A_{01,i} \cdot \left[\begin{array}{c|c|c|c} c\varphi_{1i} & -s\varphi_{1i} & 0 & L_2 \cdot c\varphi_{1i} \\ \hline s\varphi_{1i} & c\varphi_{1i} & 0 & L_2 \cdot s\varphi_{1i} \\ \hline 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right], \quad i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

$$A_{23,i} = A_{12,i} \cdot \left[\begin{array}{c|c|c|c} c\varphi_{2i} & 0 & s\varphi_{2i} & 0 \\ \hline s\varphi_{2i} & 0 & -c\varphi_{2i} & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right], \quad i = 1, 2, 3, \quad (4)$$

$$A_{34,i} = A_{23,i} \cdot \left[\begin{array}{c|c|c|c} c\varphi_{3i} & -s\varphi_{3i} & 0 & L_1 \cdot c\varphi_{3i} \\ \hline s\varphi_{3i} & c\varphi_{3i} & 0 & L_1 \cdot s\varphi_{3i} \\ \hline 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right], \quad i = 1, 2, 3, \quad (5)$$

(2)-(5) матрицаларға сәйкес абсолюттік және жергілікті координаттар жүйелері 3-суретте көрсетілген.



3-сурет – Абсолюттік және жергілікті координаттар жүйелері

(5)-теңдеудегі $A_{34,i}$ матрицасын $[0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ векторына көбейту арқылы 5-қозғалмалы платформаға бекітілетін D_i универсалды топсалардың координаталары аяқтардың тұрақты және айнымалы параметрлеріне байланысты функциялар ретінде анықталды

$$\begin{aligned}
 X_{D_i} &= r_a \cdot \cos \theta_i + L_2 \cdot \cos \varphi_{1i} \cdot \cos \theta_i + L_1 \cdot \sin \varphi_{3i} \cdot \sin \theta_i + \\
 &+ L_1 \cdot \cos \varphi_{3i} \cdot \cos \theta_i \cdot \cos(\varphi_{1i} + \varphi_{2i}), \\
 Y_{D_i} &= r_a \cdot \sin \theta_i + L_2 \cdot \cos \varphi_{1i} \cdot \sin \theta_i - L_1 \cdot \cos \theta_i \cdot \sin \varphi_{3i} + \\
 &+ L_1 \cdot \cos \varphi_{3i} \cdot \sin \theta_i \cdot \cos(\varphi_{1i} + \varphi_{2i}) \\
 Z_{D_i} &= L_2 \cdot \sin \varphi_{1i} + L_1 \cdot \cos \varphi_{3i} \cdot \sin(\varphi_{1i} + \varphi_{2i}).
 \end{aligned} \tag{6}$$

Кері кинематика есебін шешу кезінде біз қозғалмалы платформаның орнын келесі теңдеулер арқылы береміз

$$\begin{bmatrix} X_{D_i} \\ Y_{D_i} \\ Z_{D_i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_P \\ 0 & 1 & 0 & Y_P \\ 0 & 0 & 1 & Z_P \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_b \cdot \cos \theta_i \\ r_b \cdot \sin \theta_i \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, i = 1, 2, 3, \tag{7}$$

мұндағы $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 2\pi/3$, $\theta_3 = -2\pi/3$.

(7)-теңдіктен мынаны аламыз

$$X_{D_i} = X_P + r_b \cdot \cos \varphi_i, Y_{D_i} = Y_P + r_b \cdot \sin \varphi_i, Z_{D_i} = Z_P, i = 1, 2, 3. \quad (8)$$

(6) және (8) теңдеулерден 5-қозғалмалы платформаның центрінің координаталарын былайша анықтаймыз

$$X_P = r \cdot \cos \theta_1 + L_2 \cdot \cos \varphi_{11} \cdot \cos \theta_1 + L_1 \cdot \sin \varphi_{31} \cdot \sin \theta_1 + L_1 \cdot \cos(\varphi_{11} + \varphi_{21}) \cdot \cos \varphi_{31} \cdot \cos \theta_1, \quad (9)$$

$$Y_P = r \cdot \sin \theta_1 + L_2 \cdot \cos \varphi_{11} \cdot \sin \theta_1 - L_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin \varphi_{31} + L_1 \cdot \cos(\varphi_{11} + \varphi_{21}) \cdot \cos \varphi_{31} \cdot \sin \theta_1, \quad (10)$$

$$Z_P = L_2 \cdot \sin \varphi_{11} + L_1 \cdot \sin(\varphi_{11} + \varphi_{21}) \cdot \cos \varphi_{31}, \quad (11)$$

мұндағы $r = r_a - r_b$.

(9)-(11) теңдеулердің квадраттарының қосындысынан келесі теңдеуді аламыз

$$(X_P - X_i)^2 + (Y_P - Y_i)^2 + (Z_P - Z_i)^2 - L_1^2 = 0, \quad (12)$$

мұндағы

$$X_i = \cos \theta_i \cdot (r + L_2 \cdot \cos \varphi_{1i}), Y_i = \sin \theta_i \cdot (r + L_2 \cdot \cos \varphi_{1i}), Z_i = L_2 \cdot \sin \varphi_{1i}, i = 1, 2, 3.$$

Жақшаларды ашу арқылы (12)-теңдеуді келесі түрге келтіреміз

$$l_1 \cdot \cos \varphi_{1i} + m_1 \cdot \sin \varphi_{1i} - n_1 = 0 \quad (13)$$

мұндағы $l_i = 2 \cdot r \cdot L_2 - 2 \cdot L_2 \cdot X_P \cdot \cos \theta_i - 2 \cdot L_2 \cdot Y_P \cdot \sin \theta_i$,

$$m_i = -2 \cdot L_2 \cdot Z_P,$$

$$n_i = -(r^2 - L_1^2 + X_P^2 + Y_P^2 + Z_P^2 - 2 \cdot X_P \cdot r \cdot \cos \theta_i - 2 \cdot Y_P \cdot r \cdot \sin \theta_i + L_2^2).$$

(13)-теңдеуді шешу арқылы Дельта роботтың әр аяғының екі құрастырылуына сәйкес келесі шешімдерді аламыз

$$\varphi_{1i1} = \arccos(n_1 / k_1) + \alpha_1 \text{ and } \varphi_{1i2} = -\arccos(n_1 / k_1) + \alpha_1, \quad (14)$$

мұндағы $k_1 = \sqrt{l_1^2 + m_1^2}$, $\alpha_1 = \arctan(m_1 / l_1)$.

(9) және (10) теңдеулерді алдын ала сәйкесінше $\cos\theta_j$ және $\sin\theta_j$ ($j = 1, 2, 3$) ға көбейту арқылы келесі теңдікті аламыз

$$L_1 \cdot \cos\varphi_{3i} \cdot \cos\varphi_{12i} = a, \quad (15)$$

мұндағы

$$a = (X_P - (r + L_2 \cdot \cos\varphi_{1i}) \cdot \cos\theta_1) \cdot \cos\theta_1 + (Y_P - (r + L_2 \cdot \cos\varphi_{1i}) \cdot \sin\theta_1) \cdot \sin\theta_1, \\ \varphi_{12i} = \varphi_{1i} + \varphi_{2i}.$$

(11)-теңдеу келесі түрге келтірілді

$$L_1 \cdot \cos\varphi_{3i} \cdot \sin\varphi_{12i} = b, \quad (16)$$

мұндағы $b = Z_P - L_2 \cdot \sin\varphi_{1i}$.

(16)-теңдеудің (15)-теңдеуге қатынасынан келесі шешім алынды

$$\varphi_{2j} = \arctan(b/a) - \varphi_{1j}. \quad (17)$$

(15) және (16) теңдеулерді квадраттап қосу арқылы келесі шешім алынды

$$\varphi_{3j} = \pm \arccos \sqrt{(a_j^2 + b_j^2) / L_1^2}. \quad (18)$$

(14)-теңдеудегі φ_{3j} дің таңбасы X_P және Y_P таңбаларына байланысты өзгеріп отырады.

Тура кинематика.

Клавельдің дельта-роботының тура кинематикасын шешу үшін φ_{1j} белсенді айналмалы кинематикалық жұптарының орналасу бұрыштары беріледі, ал X_P, Y_P, Z_P қозғалмалы платформаның центрінің координаталары анықталады. Сонымен қатар, $\varphi_{2j}, \varphi_{3j}$ пассивті айналмалы кинематикалық жұптарының айналу бұрыштары анықталады.

(12)-теңдеулер келесі түрге келтіріледі

$$\left. \begin{aligned} (X_P - X_1)^2 + (Y_P - Y_1)^2 + (Z_P - Z_1)^2 - L_1^2 &= 0 \\ (X_P - X_2)^2 + (Y_P - Y_2)^2 + (Z_P - Z_2)^2 - L_1^2 &= 0 \\ (X_P - X_3)^2 + (Y_P - Y_3)^2 + (Z_P - Z_3)^2 - L_1^2 &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

(19)-жүйедегі жақшаларды ашып, бірінші теңдеуден екінші теңдеуді және бірінші теңдеуден үшінші теңдеуді шегеріп, келесі екі теңдеуді аламыз

$$\left. \begin{aligned} m_{11} \cdot X_P + m_{12} \cdot Y_P + m_{13} - 2 \cdot Z_P \cdot Z_1 + 2 \cdot Z_P \cdot Z_2 &= b_1 \\ m_{21} \cdot X_P + m_{22} \cdot Y_P + m_{23} - 2 \cdot Z_P \cdot Z_2 + 2 \cdot Z_P \cdot Z_3 &= b_2 \end{aligned} \right\}, \quad (20)$$

мұндағы $m_{11} = -2 \cdot X_1 + 2 \cdot X_2$, $m_{12} = -2 \cdot Y_1 + 2 \cdot Y_2$,

$$m_{13} = X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2 - X_2^2 - Y_2^2 - Z_2^2,$$

$$m_{21} = -2 \cdot X_2 + 2 \cdot X_3, \quad m_{22} = -2 \cdot Y_2 + 2 \cdot Y_3, \quad m_{23} = X_2^2 - X_3^2 + Y_2^2 - Y_3^2 - Z_3^2 + Z_2^2.$$

(20)-жүйе матрицалық түрге келтірілді

$$A \cdot \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \end{bmatrix} = B, \quad (21)$$

$$\text{мұндағы } A = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} -m_{13} + 2 \cdot Z_P \cdot Z_1 - 2 \cdot Z_P \cdot Z_2 \\ -m_{23} + 2 \cdot Z_P \cdot Z_2 - 2 \cdot Z_P \cdot Z_3 \end{pmatrix}.$$

(21)-матрицалық теңдеуден X_P және Y_P былайша анықталды

$$X_P = (k_{11} \cdot Z_P + k_{12}), \quad Y_P = (t_{11} \cdot Z_P + t_{12}), \quad (22)$$

мұнда

$$k_{11} = 2 \cdot (-m_{12} \cdot Z_2 + m_{12} \cdot Z_3 + m_{22} \cdot Z_1 - m_{22} \cdot Z_2) / q, \quad k_{12} = (m_{12} \cdot m_{23} - m_{13} \cdot m_{22}) / q,$$

$$t_{11} = 2 \cdot (m_{11} \cdot Z_2 - m_{11} \cdot Z_3 - m_{21} \cdot Z_1 + m_{21} \cdot Z_2) / q, \quad t_{12} = (m_{13} \cdot m_{21} - m_{11} \cdot m_{23}) / q,$$

$$q = m_{11} \cdot m_{22} - m_{12} \cdot m_{21}.$$

(19)-жүйенің үшінші теңдеуінен (22)-теңдеуді ескере отырып, келесіні аламыз

$$Z_P = \frac{-2 \cdot (k_{11} \cdot k_{12} - k_{11} \cdot x_3 + t_{11} \cdot t_{12} - t_{11} \cdot y_3 - z_3) \pm \sqrt{D}}{2 \cdot (k_{11}^2 + t_{11}^2 + 1)}, \quad (23)$$

$$\text{мұндағы } D = (2 \cdot k_{11} \cdot k_{12} - 2 \cdot k_{11} \cdot X_3 + 2 \cdot t_{11} \cdot t_{12} - 2 \cdot t_{11} \cdot Y_3 - 2 \cdot Z_3)^2 - \\ - 4 \cdot (k_{11}^2 + 1 + t_{11}^2) \cdot (k_{12}^2 - 2 \cdot k_{12} \cdot X_3 + t_{12}^2 - 2 \cdot t_{12} \cdot Y_3 + X_3^2 + Y_3^2 + Z_3^2 - L_1^2).$$

(23)-ші теңдеуден, (22)-теңдеуді ескере отырып, X_P және Y_P мәндерін аламыз. Осылайша, тікелей кинематика есептеуін қолданып, кері кинематика есебін тексереміз.

Қолданылған әдістер

Параллель манипуляторлардың тура есебіне қарағанда, кері есебін шешу оңайырақ болып табылады. Дельта роботтың кері есебі нақты формада шешілді.

Дельта робот кеңістікте X , Y және Z өстері бойынша тек қана ілгерлемелі қозғалыс жасайтындықтан, қозғалмалы платформа үнемі бекітілген негізге параллель орналасады және бағдарын өзгертпейді, сол себепті тура есептің шешімі де оңай анықталды. Параллель манипуляторларға тән тура есепті шешу үшін, полиномдар әдісі немесе итерациялық әдістерді қолдану қажеттілігі туындаған жоқ, себебі үш аяқ үшін кіріс параметрлері φ_{1i} ($i = 1, 2, 3$) берілген жағдайда қозғалмалы платформаның центрінің X_P , Y_P , Z_P координаталарын оңай анықтауға болады, ал қалған пассивті звенолардың бұрылу бұрыштары роботтың геометриясын пайдалана отырып анықталды.

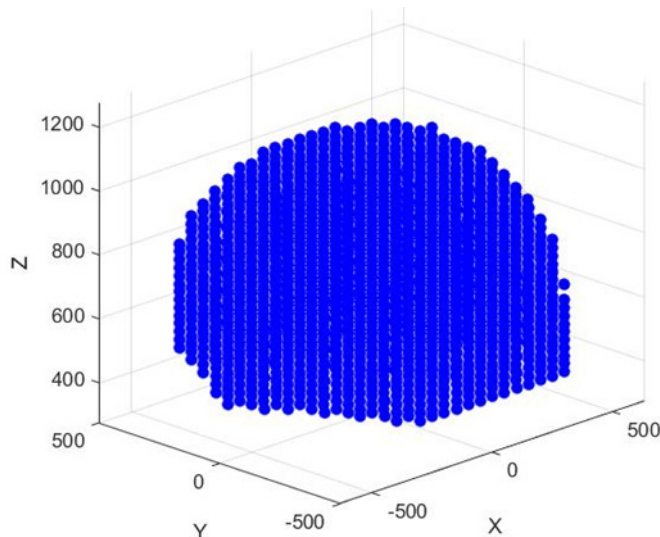
Нәтижелер мен талқылау

Клавельдің дельта-роботы жоғары жылдамдықты және дәл қозғалыстарды орындай алатындықтан ең қолайлы нұсқа ретінде қарастырылды [18]; [19]. Сонымен қатар, манипулятордың параллель құрылымы жабық кинематикаға байланысты жүйенің барлық позицияларында жеткілікті қатаңдыққа қол жеткізуге мүмкіндік береді. Таңдаудың тағы бір себебі – қарапайым дизайн және жеңіл салмақ.

Келесі тұрақты параметрлерді береміз

$$r_a = 182.5, r_b = 105, r = r_a - r_b, L_1 = 740, L_2 = 440, \theta_1 = 0, \theta_1 = 0^0, \\ \theta_2 = 120^0, \theta_3 = 240^0.$$

Кері кинематикалық есептің негізінде Дельта роботының жұмыс аймағы анықталды. Ол үшін қозғалмалы платформаның центрінің координаталары үш цикл бойынша X_P мен Y_P -500-ден +500-ге дейін, 50 қадамымен және Z_P 450-ден 1100-ге дейін, 50 қадамымен өзгертіліп отырған жағдайда кері кинематикалық есептің шешімі бар болған жағдайда кеңістікке нүкте қойып отыратын бағдарлама жасалды. Сәйкес жұмыс аймағы 4-суретте көрсетілген және Дельта робот $Z_P = 300$ ге тең болған жағдайда $X_P = \pm 300$, $Y_P = \pm 300$ аралығында еркін жұмыс жасай алатындығын көре аламыз.



4-сурет – Кері кинематика есебі бойынша жұмыс аймағы

Тура кинематиканың нәтижелері. Белсенді кинематикалық жұптардың айналу бұрыштары кері кинематикалық есеп бойынша $\varphi_{11} = 0.2398$, $\varphi_{12} = 0.5620$, $\varphi_{13} = 1.1922$ шамаларына тең болған жағдайда қозғалмалы платформаның центрінің координаталары $X_P = 298.54$, $Y_P = 298.54$, $Z_P = 749.5$ анықталып, ол мәндер кері кинематика бойынша берілген мәндерге сәйкес келетіндігіне көз жеткізілді.

Зерттеу нәтижелері Клавельдің дельта-роботы бетонды 3D басып шығару кезінде басып шығару басының ауытқуын өтеу үшін оңтайлы шешім екенін растайды, өйткені ол жоғары дәлдікпен, жылдамдықпен және қаттылықпен ерекшеленеді. Кері кинематика есебі негізінде жұмыс аймағын талдау роботтың қажетті қозғалыс диапазонына ие екенін көрсетті, ал тура кинематика есебінің шешімі модельдің дұрыстығын растады. Бұл ұсынылған манипулятордың дәл позициялауды қамтамасыз ете алатынын және ауытқуларды өтеу жүйесіне сәтті интеграцияланатынын дәлелдейді.

Қаржыландыру туралы ақпарат (бар болса)

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (Грант ЖТН АР19679899 – Автобетонсорғы негізіндегі құрылыс 3D принтерінің ауытқуларын компенсациялайтын және баспа бастиекті позициялайтын манипуляторды зерттеп жобалау).

Қорытынды

Зерттеу нәтижесінде бетонды 3D басып шығару технологиясының тиімділігін арттыру үшін автобетонсорғы жебесінің ауытқуын компенсациялайтын манипуляторды қолдану қажеттілігі анықталды. Баспа бастиектің дәл орналасуын қамтамасыз ету құрылыс сапасы мен дәлдігін жақсартудың маңызды факторларының бірі болып табылады. Осы мақсатта Клавельдің дельта-роботы таңдалып, оның тура және кері кинематикасы есептелді, сондай-ақ жұмыс аймағы $XYZ \pm 300$ мм болатындай анықталды. Бұл роботтың жоғары дәлдігі мен жылдамдығы, сондай-ақ жүйенің қажетті қаттылығын қамтамасыз ету қабілеті оны ең тиімді шешімдердің бірі ретінде қарастыруға мүмкіндік берді.

Жүргізілген зерттеулер бетонды 3D басып шығару процесінде дәстүрлі құрылыс техникасын пайдалана отырып, оның мүмкіндіктерін кеңейтуге болатынын көрсетті. Болашақта алынған нәтижелерді нақты құрылыс жағдайларында қолдану және манипуляторды жетілдіру бойынша қосымша зерттеулер жүргізу қажет.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 DIN EN ISO/ASTM 52900. Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie. – Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2018.

2 da Silva, M. D. L. et al. Building a sustainable future: The role of additive manufacturing in civil construction // Case Studies in Construction Materials. – 2024. – Vol. 20. – P. e02976.

3 **de Souza, E. A., Borges, P. H., Stengel, T., Nematollahi, B., & Bos, F. P.** 3D printed sustainable low-cost materials for construction of affordable social housing in Brazil : Potential, challenges, and research needs // Journal of Building Engineering. – 2024. – 108985.

4 **Khajavi, S. H., Tetik, M., Mohite, A., Peltokorpi, A., Weng, M., Li, Y., Holmström, J.** Additive manufacturing in the construction industry : The comparative competitiveness of 3D concrete printing // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. – № 9. – P. 3865. – <https://doi.org/10.3390/app11093865>.

5 **Han, Y., Yang, Z., Ding, T., Xiao, J.** Environmental and economic assessment on 3D printed buildings with recycled concrete // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 278. – P. 123884. – <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123884>.

6 **Puzatova, A. et al.** Large-scale 3D printing for construction application by means of robotic arm and gantry 3D printer : A review // Buildings. – 2022. – Vol. 12. – № 11. – P. 2023.

7 **Krause, M., Otto, J., Bulgakov, A., Sayfeddine, D.** Strategic optimization of 3D concrete printing using the method of CONPrint3D® // ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction. – IAARC Publications, 2018. – Vol. 35. – P. 1–7. – <https://doi.org/10.22260/ISARC2018/0002>.

8 **Badr, A., Fentiman, C., Grantham, M., Mangabhai, R.** Concrete for the Modern Age : Developments in Materials and Processes. – Whittles Publishing, 2017. – P. 74–81. – ISBN 978-184995-372-6.

9 **Liu, R., Gao, Y., Yang, S., Yang, Y.** Vibration Control of the Boom System of Truck-Mounted Concrete Pump Based on Constant-Position Commandless Input Shaping Technique // Shock and Vibration. – 2015. – Vol. 2015. – № 1. – P. 420935. – <https://doi.org/10.1155/2015/420935>.

10 **Yang, W., Zhang, B., Huang, Y., Cai, Q., Zhang, P.** Rotary vibration control simulation and experiment research on the boom of concrete pump truck // 2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). – IEEE, 2017. – P. 988–993. – <https://doi.org/10.1515/9783110267709.259>.

11 **Näther, M., Nerella, V. N., Krause, M., Künze, G., Mechtcherine, V., Schach, R.** Beton-3D-Druck-Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton. Abschlussbericht. – 2017.

12 **Storch, F.** Beton-3D-Druck – Neues Anwendungsfeld für Autobetonpumpen // In: Tagungsband Praxis Transportbeton. – Berlin, 2022. – P. 1–25.

13 **Näther, M., Nerella, V. N., Krause, M., Kunze, G., Mechtcherine, V., Schach, R.** Beton-3D-Druck-Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton. Abschlussbericht. – 2017.

14 **Lynch, K. M., Park, F. C.** Modern robotics. – Cambridge: Cambridge University Press, 2017. – <https://doi.org/10.1017/9781316661239>.

15 **Dasgupta, B., Mruthyunjaya, T. S.** The Stewart platform manipulator: a review [Текст] / B. Dasgupta, T. S. Mruthyunjaya // Mechanism and Machine Theory. – 2000. – № 35(1). – С. 15–40.

16 Neugebauer, R. Parallel kinematische Maschinen : Entwurf, Konstruktion, Anwendung. – Berlin; Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2006. – 259 с.

17 Tsai, L. W. Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators. – New York; Singapore; Toronto: John Wiley & Sons, Inc., 1999. – 499 p.

18 Miller, K. Experimental verification of modeling of DELTA robot dynamics by direct application of Hamilton's principle // Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1995. – № Vol. 1. – P. 532–537.

19 Clavel, R. Delta, a Fast Robot with Parallel Geometry // Springer-Verlag and Heidelberg GmbH and Co., Berlin. – 1988. – № Vol. 26–28. – P. 91–100.

13.03.25 ж. баспаға түсті.

13.03.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.06.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

А. Қ. Мустафа¹, Р. А. Кайыров², *М. Қ. Сағынтай³, Е. З. Нұрман⁴

^{1,2,3,4} Университет Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;

² Карагандинский университет имени академика Е. А. Букетова, НИЛ «Прикладная механика и робототехника», Республика Казахстан, г. Караганда;

^{1,3} ТОО «RnD Center», Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 13.03.25.

Поступило с исправлениями 13.03.25.

Принято в печать 05.06.25.

МАНИПУЛЯТОР ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ОТКЛОНЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ 3D-ПЕЧАТИ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

В целях повышения надежности используемых в аддитивных технологиях методов и расширения их возможностей рассматривается интеграция системы печати с традиционными технологиями. Однако одной из ключевых проблем этого процесса является неточная позиция печатной головки, что может привести к снижению качества изготавливаемой конструкции. Для решения этой проблемы в данной статье предлагается использовать манипулятор, компенсирующий отклонения стрелы традиционной техники, используемой в качестве манипулятора при 3D-печати, обеспечивая тем самым точное расположение печатной головки. При выборе манипулятора был проведен анализ серийных и параллельных манипуляторов. Манипулятор эффективно компенсирует отклонения по осям XYZ в рабочем пространстве, повышая точность и качество печати.

Для выполнения этой задачи был выбран дельта-робот Клавеля, обладающий высокой скоростью и точностью позиционирования, а также обеспечивающий достаточную жесткость благодаря параллельной кинематике. В ходе исследования были решены прямые и обратные задачи кинематики, определена рабочая зона манипулятора и подтверждена его пригодность для решения поставленной задачи. Полученные результаты

могут быть использованы для дальнейшей оптимизации процесса 3D-печати и повышения его технологической эффективности.

Ключевые слова: 3D-печать, манипулятор, обратная кинематика, прямая кинематика, дельта-робот Кладеля.

A. Mustafa¹, R. Kaiyrov², *M. Sagyntay³, Y. Nugman⁴

^{1,2,3,4}Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;

²E. A. Buketov Karaganda State University,
Republic of Kazakhstan, Almaty;

^{1,3}LLP «RnD Center», Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 13.03.25.

Received in revised form 13.03.25.

Accepted for publication 05.06.25.

MANIPULATOR FOR COMPENSATING DEVIATIONS OCCURRING DURING 3D PRINTING WITH ADDITIVE TECHNOLOGY

To enhance the reliability of technologies used in additive manufacturing and expand their capabilities, the integration of the printing system with traditional technologies is being considered. However, one of the main challenges in this process is the inaccurate positioning of the print head, which can lead to a decrease in the quality of the fabricated structure. To address this issue, this paper proposes the use of a manipulator that compensates for deviations of the boom of traditional machinery used as a manipulator during 3D printing, thereby ensuring precise positioning of the print head. In selecting the manipulator, an analysis of serial and parallel manipulators was conducted. The manipulator effectively compensates for deviations along the XYZ axes in the working space, improving printing accuracy and quality.

To accomplish this task, the Clavel delta robot was chosen due to its high speed, precise positioning capabilities, and sufficient rigidity provided by its parallel kinematics. During the study, direct and inverse kinematics problems were solved, the working area of the manipulator was determined, and its suitability for the given task was confirmed. The obtained results can be used to further optimize the 3D printing process and enhance its technological efficiency.
Keywords: concrete 3D printing, manipulator, inverse kinematics, forward kinematics, Clavel's delta robot.

Keywords: 3D printing, manipulator, inverse kinematics, forward kinematics, Clavel delta robot.

Теруге 16.05.25 ж. жіберілді. Басуға 30.06.25 ж. қол қойылды.
Электрондық баспа
257,8121 Mb RAM
Шартты баспа табағы 32,68 Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан
Корректорлар: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4420

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz
<https://nitk.tou.edu.kz>