

УДК 629.733

DOI 10.52167/1609-1817-2024-132-3-382-391

А. Хабай<sup>1</sup>, Қ.Н. Әбдіжәлел<sup>1</sup>, С.Е. Ибекеев<sup>1</sup>, Н.Б. Жұмахан<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Satbayev University, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: a.khabay@satbayev.university

## КҮРДЕЛІ ЖАҒЫДАЙЛАРДАҒЫ ҰШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТТАРЫНЫҢ ТРАЕКТОРИЯСЫ АЛГОРИТІМІН ҚҰРУ

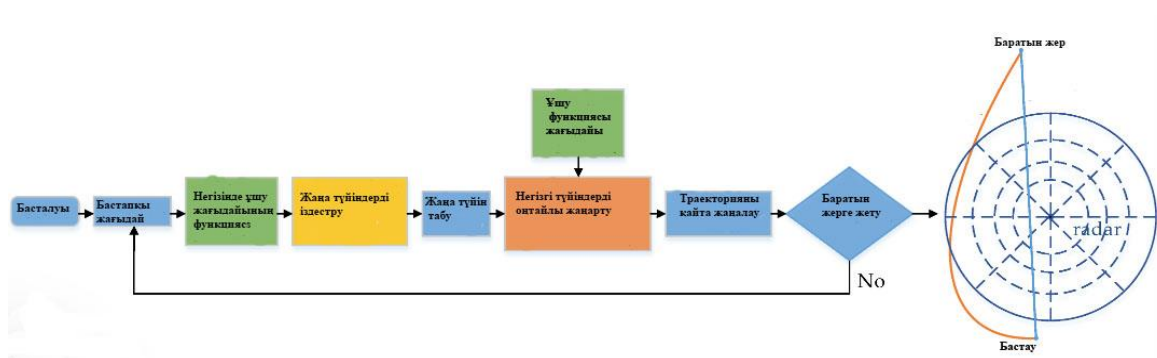
**Аңдатпа.** Күрделі жағыдайларда ұшқышсыз ұшу аппараттарының траектория алгоритмін құру маңызды міндет болып табылады. Бұл мақалада күрделі үш өлшемді ортада ұшқышсыз ұшу аппараттарының қауіпсіздік талаптары мен ұшу шектеулерін қанағаттандыра отырып кеңейтетілген жаңа алгоритм ұсынылады. Біріншіден, траекторияның екі түйіні арасындағы байланысты кеш енді бағалау үшін қауіп төндіретін күштермен мен жолдың ұзындығын қамтитын ұшу функциясы құрылады. Екіншіден, алдыңғы қатардағы ұшқышсыз ұшу траекториясын жоспарлау мәселесін шешу үшін жаңа түйіндердің кеңеюін ынталандыру мақсатында ұшу функциясы мен ұшу шектеулері таңдалады. Үшіншіден, әзірленген функцияларды негізгі түйінді жаңартуға пайдаланылды, осылайша алгоритм құру кезінде қауіп пен жолдың ұзындығы ескерере отырып модельдеу жүргізіледі. Алынған салыстыру нәтижелері бұл алгоритімнің кемшіліктерді тиімді жеңетінін көрсетеді. Бұл жаңартылған алогритім ҰҰА қауіпсіздігін едәуір жақсартып, сондай-ақ күрделі ортада ұшу шектеулерін қанағаттандыратын ең қысқа қашықтықты сақтайтын оңтайлы жолды жоспарлауға қабілетті болады.

**Түйінді сөздер.** ҰҰА траекториясы, динамикалық нысанды бақылау, байланыс сапасы, тұрақты бақылау.

### Кіріспе.

Соңғы онжылдықта ұшқышсыз ұшу аппараттары біртіндеп әртүрлі әскери операцияларда маңызды рөл атқара бастады [1]. Ұшқышсыз ұшу аппараттары қауіпті мақсатты кенеттен қорғану қабілетіне, қауіпті аймақтардан тез кету қабілетіне, сондай ақ, жаудың атысын басу қабілетіне ие көп өлшемді әртараптандырылған қасиетке ие болу талаптары күшейтілді. Траекторияны жоспарлау ұшқышсыз ұшу аппараттарының автономды навигациялық ұшуы кезінде туындауы мүмкін ең маңызды мәселелердің бірі болып табылады [2,3], ол әдетте бастапқы түйіннен соңғы түйінге оңтайлы жолды автономды іздеу ретінде анықталады [4]. Оңтайлы траекторияны таңдау, ұшу-техникалық сипаттамалардың шектеулері, миссияның нақты талаптары және ұшу жағдайларының шектеулері негізінде анықталуы тиіс [5,6]. Ғалымдар ұшқышсыз ұшу аппаратының траекториясын жоспарлау мәселесі бойынша көптеген зерттеулер жүргізді және графикалық оңтайландыру әдістері сияқты бірқатар алгоритмдерді ұсынды, соның ішінде көріну графигі алгоритмі [7] және Вороной диаграммалары [8]; іздеуге негізделген әдістер, соның ішінде Дайкстра алгоритмі [9], A\* алгоритмі [10] алгоритм d\* [11]; PRM алгоритмі [12] және RRT алгоритмі [13-15] сияқты үлгіге негізделген әдістер бар. Жасанды потенциалды өріс алгоритмі [16], бөлшектер тобын оңтайландыру (PSO) [17-21]. Осылайша, күрделі операциялық жағдайларда ұшқышсыз ұшу траекториясын жоспарлау мәселелерін шешу үшін бұл мақалада сирек кездесетін және жақсартылған эволюциялық жаңа алгоритм ұсынамыз. Қашықтық шамасы мен қауіпті жағыдайларды ескеретін ұшу мүмкіндігін әзірлейміз. Тармақталған түйіндерін кеңейту кезінде біз ұшу мүмкіндігі мен ұшу шектеулерінің функциясын жан-жақты қарастырамыз және оларды тармақталған

түйіндерінің кеңеюіне негіз болатын ақпарат ретінде пайдаланамыз. Осыдан кейін негізгі түйіндерді жаңартуда шектеулерді ескере отырып ұшуды басқару функциясының мүмкіндіктерін анықтаймыз. Ұшу функциясы мен ұшуды шектеуді екі рет салыстыра отырып, ұшу қауіпсіздігі талаптарын қанағаттандыратын ең қысқа ұзындығы бар оңтайлы қашықтықты табу алгоритмі құрылады. Траектория әскери операцияларды жоспарлау талаптарын қанағаттандырады, мысалы, бақылау және болжау, жаудың атысын басу мүмкіндігі, қауіпті аймақтан тез кету мүмкіндігі және қауіп пен нысанадан кенеттен қорғану мүмкіндігін пайдаланатын алгоритім құрамыз (1 сурет). Бізде осын негізгі алгоритімдердің элементерін пайдалана отырып сонымен қатар ұшу функциясы, траектория шектеулер әдісін қолдана отырып жаңа алгоритімді құрамыз. Суретте жасыл жақтау 1 негізгі ұшуды, сары жақтау 2 бағытты өзгертіп жаңа басқа түйінге бару, ал қызғылт сары жақтау 3 қауып төнген кезде бағыт өзгерту. Радиолокация басқа қауіпті аймақтар үшін жоғары қауіпсіздік траекториясын бақылауды көрсетеді.



1 сурет - Алгоритмінің блок-схемасы және нәтижелер диаграммасы

### Материалдар мен тәсілдер.

Ұшқышсыз ұшу аппараттары күрделі операцияларды орындайтын нақты ұшу жағдайындағы кедергілер мен қауіптердің көптеген түрлері, соның ішінде жергілікті жердегі қауіптер, радиолокациялық қауіптер, атқыш зеңбірек қауіптері және ұшуға болмайтын аймақ қауіптері жиі кездеседі. Қауіптердің әртүрлі түрлері әртүрлі тәсілдермен өңделеді. Сондықтан, ұшқышсыз ұшу жағдайларын шынымен қалпына келтіру үшін осы мақалада қауіптерді қамтитын күрделі орта модельденеді және осы ортада ұшқышсыз ұшу траекториясы жоспарланады.

Бұл күрделі экологиялық жағдайлар мен ұшқышсыз ұшу аппараттарының сипаттамалары ұшу жолын жоспарлауға көптеген шектеулер қояды. Ұшқышсыз ұшу траекториясын жоспарлау тапсырмаларының шектеулерін мұқият талдау олардың көпшілігі бөлінген маршрут нүктелерін пайдалану үшін геометриялық деңгейде шектелгенін көрсетеді (траекторияны жоспарлау әдетте динамикалық шектеулерді ескермейді). Бұл мақалада ұшудың Жаңа шектеулерін құрудан гөрі ұшқышсыз ұшу траекториясын жоспарлау мәселесіне назар аударылғандықтан, біз ұшқышсыз ұшу траекториясын жоспарлау кезінде өнімділіктің негізгі шектеулері мен күрделі экологиялық талаптарды ескеру үшін [23,24] қолданыстағы өкілдік шектеулерге негізделген осы мақалаға сәйкес келетін ұшу шектеулерінің жиынтығын тікелей таңдаймыз және шығарамыз.

*Жол ұзындығын шектеу:* траектория ұзындығы ұшқышсыз ұшу аппаратының ұшу қашықтығын көрсету үшін қолданылады.  $L_{max}$  ұшқышсыз ұшу аппаратының максималды диапазоны болсын. Содан кейін жол ұзындығының шегі келесідей есептеледі

$$f_L = \sum_{t=0}^N \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \leq L_{max} . \quad (1)$$

Мұнда  $(x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, \dots, N$  3D жоспарлау ортасындағы жолдың  $i$ -ші нүктесінің координатасын, ал  $N$  жол нүктелерінің жалпы санын білдіреді.

*Айналу бұрышын шектеулері:* айналу бұрышын шектеу үшін  $\phi_{max}$  максималды айналу бұрышы енгізілетін траекторияның тегістігін ескере.  $a_i$  векторы  $[(x_i - x_{i-1}, y_i - y_{i-1})]^T$  деп есептейік,  $a_i$  векторының нормасы  $\|a_i\|$ , Ұшқышсыз ұшу аппаратының айналу бұрышының шектелуі

$$\phi_i = \arccos\left(\frac{a_i^T a_{i+1}}{\|a_i\| \|a_{i+1}\|}\right) \leq \phi_{max} . \quad (2)$$

*Көтерілу және түсіу бұрышын шектеу:* Бұрылу бұрышына ұқсас, көтерілу және түсіу бұрышы келесідей есептелуі мүмкін

$$-\gamma_{max} \leq \gamma_i = \arctan\left(\frac{z_i - z_{i-1}}{\|a_i\|}\right) \leq \gamma_{max} , \quad (3)$$

мұндағы  $\gamma_{max}$ -максималды көтеру бұрышы,  $-\gamma_{max}$  бұл ең аз түсіу бұрышы.

*Жол сегментін шектеу:* ұшқышсыз ұшу аппараты ұшу бағытын өзгертпес бұрын немесе бұрылғаннан кейін тікелей қашықтықты сақтауы тиіс. Сонымен қатар, ұшқышсыз ұшу аппараттары навигациялық қателерді азайту үшін жиі бұрылыстар жасамауы керек. Сондықтан  $l_{min}$  жолының ең қысқа бөлігінің ұзындығынан үлкен болу үшін көршілес жол нүктелері арасындағы жол сегменттерін шектеу керек. Жол сегментінің шегі келесідей көрсетілуі мүмкін

$$l_{min} - \|p_{i+1} - p_i\| \leq 0 . \quad (4)$$

Мұндағы  $P_{i+1}$  дегеніміз  $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$  және  $P_i$  дегеніміз  $(x_i, y_i, z_i)$ ,  $P_{i+1}$  мен  $P_i$  бұл жолдың екі іргелес нүктесі.

*Жер бедері шектері:* жер бедері шектері есептеу үшін тек жол нүктелерін пайдалану тиісті жол сегменттерінің жер бедерімен соқтығысуына әкелуі мүмкін нүктелер анықталып, жол сегменттерінің шектеулерін ескеру қажет. сонымен,  $p_{i,j}$  траектория сегментіндегі кез - келген траектория нүктесі болсын  $(p_i, p_{i+1}; h_h)$ ; ұшқышсыз ұшудың минималды қауіпсіз биіктігі, ал  $z_{i,j}^{map} - p_{i,j}$  траекториясының нүктесіндегі жербередр биіктігі. жол нүктесінде

$$g_{i,j} = \begin{cases} 0 & p_{i,j} \geq H_{safe} + z_{i,j}^{map} \\ 1 & \text{басқа жағыдайлар} \end{cases} . \quad (5)$$

Біз әдетте жоспарланған жолдарды бағалау үшін жол ұзындығын шығындар функциясы ретінде қолданамыз. Дегенмен, ұшқышсыз ұшу аппаратының траекториясының қауіпсіздігіне күрделі экологиялық факторлардың әсерін қарастыратын бұл мақалада қауіпке тым жақын траекторияны жоспарлауды болдырмау үшін траектория

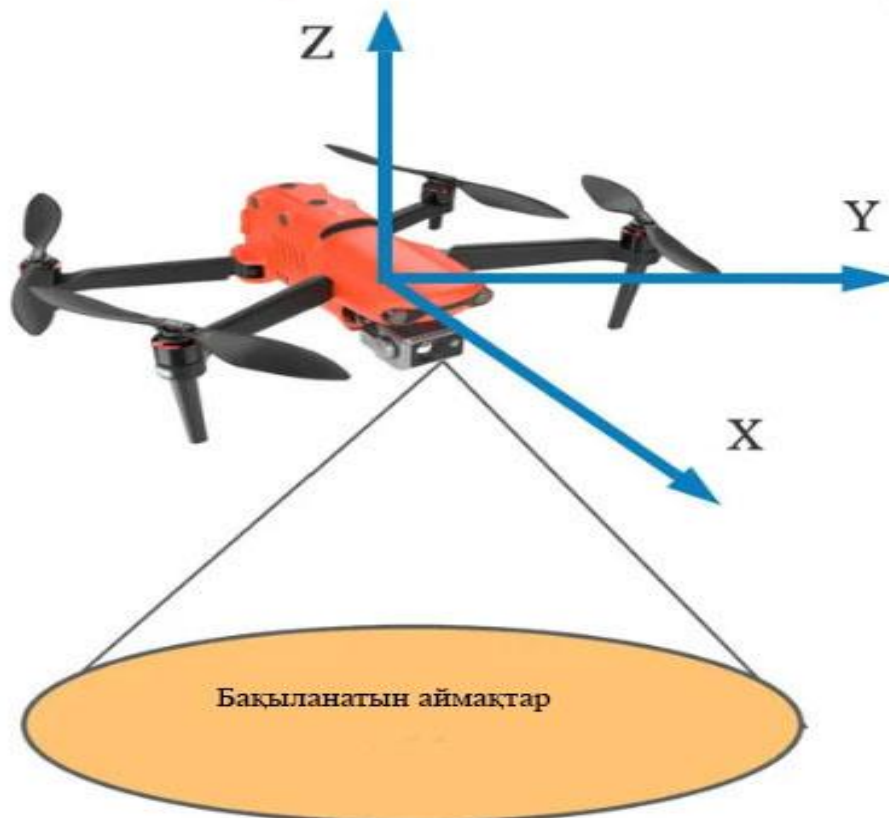
мен қауіп аймағы арасындағы қашықтық қарастырылады, бұл траекторияның қауіп күші құнының функциясы арқылы көрсетіледі.

*Негізгі объектіні іздеу:* суретте көрсетілген ұшқышсыз ұшу аппараты қадағалау шеңберіндегі объектіні іздеу. Байланыс арнасының сапасын бақылай отырып ҰҰА арасындағы қашықтықты сақтай отырып объектке жақындайды алады. Сондықтан үйінді басқару функциясының кіріс деректерінің бірі ретінде орталығы мен объек нүктенің орны арасындағы айырмашылықты есептеу қажет.

$$C_t = \{x_t, y_t, z_t\}, \quad (6)$$

$$x_t = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, y_t = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, z_t = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n}, \quad (7)$$

мұндағы  $n$ -үйір сандары,  $x_i$ - $x$  осі бойынша төмен биіктіктегі  $i$ -ші ұшқышсыз ұшу аппараттарының жағдайы,  $y_i$ - $y$  осі бойынша төмен биіктіктегі  $i$ -ші ұшқышсыз ұшу аппараттарының жағдайы,  $z_i$  бұл  $z$  осіндегі  $i$ -ші төмен биіктіктегі ұшқышсыз ұшу аппаратының орны. Негізгі объектіні келесідей болады.



2 сурет - ҰҰА қадағалау шеңберіндегі объектіні іздеу аймақтары

$T$  уақыт нүктесіндегі үйінді центрі мен іздеу объекті арасындағы қашықтықты келесідей белгілеуге болады:

$$T = \{x_t, y_t, z_t\} \quad T = \|C_t - T\|_2. \quad (8)$$

Іздеу тиімділігін оңтайландыру үшін мақсатты нүкте мен үйір центрі арасындағы қашықтықты бағалау үшін жасанды потенциал функциясы жасалды.

$$\eta(rc_t) = -\delta(rc_t), \forall (i, j) \in n. \quad (9)$$

Мақсатты нүктені іздеу контроллері объектіні іздеу шеңберіндегі аймақтан нақты мақсатты нүктені табуды мақсат етеді.

$$\arg \min x(rc_t) = \{r_{ct} | x(rc_t) = \min(r_{ct}^t)\}. \quad (10)$$

Түйіндерді іздеу кеңістігінің өлшемдерінің ұлғаюынан туындаған есептеу күрделілігінің күрт өсуін болдырмай, іздеу кеңістігін іріктеу арқылы жуықтайды [25] стандартты траекторияны жоспарлау кезінде ұшқышсыз ұшу аппараттарының траекториясының қауіпсіздігіне кепілдік бере алмайтынын дәлелдеді. Сондықтан, күрделі жағдайларда ұшқышсыз ұшу аппараттарының траекториясы мен ұшу шектеулерінің қауіпсіздігін ескере отырып, бұл мақалада ұшқышсыз ұшудың оңтайлы траекториясын табу үшін жаңа алгоритм ұсынылады. Біріншіден, ұшудың функциясы қауімен жол ұзындығын қолдана отырып жасалады; екіншіден, жаңа түйіндердің кеңеюін тікелей басқару үшін ұшуды шектеу функциясы қолданылады.

### Нәтижелер.

Ұшудың негізгі функциясы мен ұшуды шектеу функциясы көршілес аймақтардағы негізгі түйіндерді жаңартуды басқару үшін қолданылады. Бұл алгоритім бір уақытта қауіптің күші мен жолдың ұзындығын ескере отырып оңтайлы траекторияны жоспарлайды. Ол мүмкіндігінше қысқа, сонымен бірге күрделі жағдайларда әскери операцияларға арналған ұшқышсыз ұшу траекториясын жоспарлау талаптарын қанағаттандыру үшін қауіптен тиімді түрде аулақ болады.

Шектеу функциялары негізінде ҰҰА алгоритімін құру

Белгілеу: Тармақ жолдар  $T$ , Қоршаған орта  $\xi$

2:  $T.V \leftarrow \{\text{Бастапқы жағыдай}\}; E \leftarrow \emptyset;$

3: **for**  $i=1$  to  $n$  **do**4:  $T \leftarrow (V, E);$

5: Негізгі түйін  $\leftarrow$  бастапқы түйін( $\xi$ );

6: Жаңа түйін  $\leftarrow$  Жол жағыдайы  $\_cost(T.V, prand)$

7:  $T.V \leftarrow T.V \cup \{\text{жаңа жолдар}\};$

8: Қосымша жолдар  $\leftarrow$   $\text{Near}(pnew, T.V, ri);$

9: **for** жаңа табылған түйінер арасындағы жолдар  $\in$  негізгі түйін **do**

10: қайталау\_алгоритім\*(жаңа түйін);

11: **for all**  $pnear \in Pnear$  **do**

12:  $\text{rewire\_ImpRRT}^*(\text{жаңа түйін});$

13: **return**  $T=(V, E)$

Алгоритмде екі бөлікке ерекшеленеді: жаңа түйіндерді кеңейту және көршілес аймақтардағы негізгі түйіндерді жаңарту. Жаңа түйінді кеңейту үшін алдымен түйін үлгісіне ең жақын тармақ түйінін таңдайды. Содан кейін кеңейту қашықтығына сәйкес тармақ түйінінен үлгі түйініне қарай жаңа түйін таңдалады. Түйінде соқтығысу болмаса, ол жаңа жол ретінде саналады [24]. К Осы стандарт алгоритмі жаңа түйіндердің кеңеюін басқару үшін ұшу шектеулері функциясын қолданамыз. Бұл тәсіл қауіптің күшін, траектория ұзындығын және ұшу шектеулерін бір уақытта ескеретіндіктен, жоспарланған маршрут қауіпсіздік талаптары мен траектория шектеулерін қанағаттандыратын оңтайлы болып табылады.

1-кестеде кейбір негізгі параметрлері келтірілген, мұнда 1-нұсқа, 2-нұсқа және 3-нұсқа сәйкесінше ұшу құнының функциясындағы әртүрлі салмақ мәндерін білдіреді. Сонымен қатар, радар, зениттік зеңбірек және мұнара үшін белгіленген параметрлер көрсетіледі.

1 кесте - Моделедеу параметр мәндері

| Параметр        | Шамасы       |
|-----------------|--------------|
| $L_{th} h$      | 20 m         |
| $\delta$        | 70 m         |
| $N0$            | 15           |
| $\phi_{max}$    | 45°          |
| $\gamma_{max}$  | 30°          |
| $l_{min}$       | 30 m         |
| $I_{тер}$       | 2000         |
|                 |              |
| Басталу нүктесі | (40,40,30)   |
| Тракториячсы    | (350,350,50) |

2 кесте - Радар координаталары

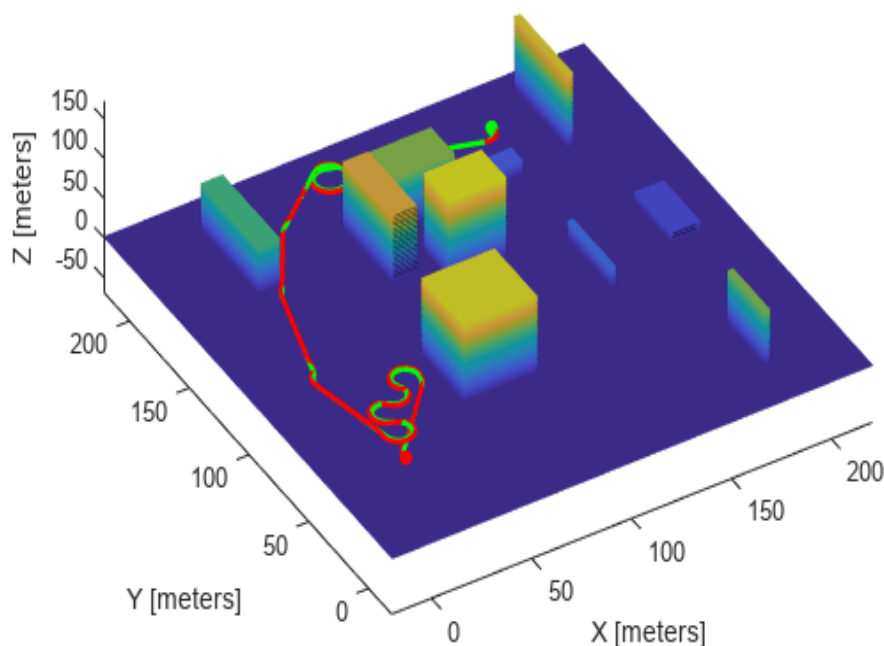
| Радар | Ортасы       | Радиус |
|-------|--------------|--------|
|       | (100,80,0)   | 35     |
|       | (100,350,5)  | 35     |
|       | (170,230,20) | 35     |
|       | (280,200,20) | 35     |

3 кесте - Әуе қорғанысы аймақтары

|                           | Center       | Радиусы | Биіктігі |
|---------------------------|--------------|---------|----------|
| Әуе қорғанысы<br>зеңбірек | (70,170,0)   | 30      | 40       |
|                           | (170,140,0)  | 30      | 40       |
|                           | (300,100,0)  | 30      | 40       |
|                           | (260,180,0)  | 25      | 40       |
| Басқару<br>мұнарасы       | Сентр        | радиусы | Биіктігі |
|                           | (200,290,10) | 15      | 50       |
|                           | (100,275,10) | 20      | 40       |

Бұл бөлімде орталықтандырылған және орталықтандырылмаған басқару схемасын қолдана отырып, MATLAB-та мақсатты нүктені іздеу және жол нүктелерін бақылау алгоритмдеріне негізделген модель модельденеді. Модельдеу нәтижелерін түсіндіру үшін кодтар берілген. Байланыс индикаторының мәні, агенттер арасындағы қашықтық және үйір орталығынан талап етілетін позицияға дейінгі қашықтық сияқты бағалау көрсеткіштері тұрақты анықталады және пайдаланылады. Модельдеу кезінде біз ауа-райы дронды басқару үшін өте қолайлы деп есептейміз, яғни жел ағыны дрон динамикасына әсер етпейді.





3 сурет - Matlab программасы ортасында ҰҰА басқару траекториялары мен қозғалыс параметрлері функциялар негізінде құрылған алгоритім бойынша модель

#### Талқылау.

3-суретте уақыт қадамымен ұшқышсыз ұшу аппараттарының қозғалыс траекториясы көрсетілген. Әр жолы ҰҰА бірегей динамикалық мінез-құлыққа ие және байланыс арнасының тұрақтылығын сақтау үшін қашықтықты сақтай отырып, алға жылжиды. Ұшқышсыз ұшу аппараты платформасы берген түзу сызықты траекторияны тамаша орындай алады. Әрбір жол нүктесі арасындағы өтпелі уақыт жеткілікті болса болды.

Ұсынылған алгоритімнің тиімділігін жан-жақты бағалау үшін біз Имитациялық бағалау мен талдау жүргіземіз. Ұшқышсыз ұшу траекториясын жоспарлау кезінде экологиялық стандарттың жалпы қабылданған моделі жоқ. Үлгіге негізделген траекторияны жоспарлау әдістері үшін біз әдетте кедергілерді немесе қауіптерді көрсету үшін негізгі конфигурацияларды қолданамыз. Демек, бұл мақалада [44] сияқты қауіп моделін құру кезінде ескерту радиолокаторын және оның қауіп-қатер аймағын шамамен сипаттау үшін жарты шар моделі енгізілді, ал модель зениттік зеңбірек ғимаратын және оның шабуыл ауқымын шамамен сипаттау үшін цилиндрлік модельді қолданады. Конус моделі мұнараны шамамен сипаттау үшін пайдаланылды (мұнара анықтау немесе соққы беру қабілетіне ие болмағандықтан, ол ұшуға болмайтын аймақ ретінде қарастырылады). Дегенмен, негізгі конфигурацияны пайдалану рельеф туралы көптеген ақпараттың жоғалуына әкеледі. Сондықтан бұл мақалада жердегі қауіптер туралы ақпаратты шынымен көрсету үшін жер бедерін көрсету үшін нақты биіктік картасы салынды

#### Қорытынды.

Бұл мақалада біз ұшқышсыз ұшу аппараттарының күрделі тапсырмаларды қауіпсіз орындауға қабілетті болуын қамтамасыз ету үшін траектория ұзындығы мен траектория қауіпсіздігін жан-жақты қарастыратын ұшқышсыз ұшу аппараттарына арналған траекторияны жоспарлау алгоритмін құрылды. Біріншіден, біз жолдағы қауіп күшін де, жол ұзындығының да қамтитын ұшу функциясын әзірледік. Содан кейін алдыңғы қатарда жаңа түйіндердің кеңеюіне басшылық ақпарат ретінде ұшуды шектеулер функциясын

қолданатын тәсіл ұсынылады, бұл жаңа түйіндерді ҰҰА қауіпсіздігі жоғары үлгі кеңістігіне дейін кеңейтуге мүмкіндік береді.

Әрине, бұл алгоритм қиын жағдайларда ұшқышсыз ұшу жолын жоспарлаудың жалғыз жолы емес. Генетикалық алгоритм сияқты интеллектуалды Алгоритмдер де бұған қабілетті, бірақ интеллектуалды Алгоритмдер әдетте өте күрделі. Демек, есептеу күрделілігі салыстырмалы түрде төмен алгоритм ретінде осы алгоритмді ұсынуға болады. Сонымен қатар, біз болашақ зерттеулерде осы алгоритмді теориялық жетілдіру және алгоритмнің нақты сынағы бойынша тереңірек зерттеулер жүргіземіз деп үміттенеміз, сондықтан біздің алгоритміміз жоғары қолданбалы мәнге ие болуы мүмкін.

## ӘДЕБИЕТТЕР

- [1] Shirshikova, Z.A. Comparative Analysis of the US-China Artificial Intelligence Architecture and Effects of Autonomous UAVs on the Future of the Battlefield. Master's Thesis, Harvard University, Cambridge, MA, USA, 2022.
- [2] C Y N Norasma, M A Fadzilah, N A Roslin, Z W N Zanariah, Z Tarmidi and F S Candra. Unmanned Aerial Vehicle Applications In Agriculture. OP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019. doi:10.1088/1757-899X/506/1/012063.
- [3] Mohsan, S.A.H.; Khan, M.A.; Noor, F.; Ullah, I.; Alsharif, M.H. Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs): A comprehensive review. *Drones* 2022, 6, 147. [Google Scholar]
- [4] Rojas-Perez, L.O.; Martínez-Carranza, J. On-board processing for autonomous drone racing: An overview. *Integration* 2021, 80, 46–59. [Google Scholar].
- [5] Yun, W.J.; Park, S.; Kim, J.; Shin, M.; Jung, S.; Mohaisen, D.A.; Kim, J.-H. Cooperative multiagent deep reinforcement learning for reliable surveillance via autonomous multi-UAV control. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2022, 18, 7086–7096.
- [6] Shi, Y.; Liu, Y.; Ju, B.; Wang, Z.; Du, X. Multi-UAV cooperative reconnaissance mission planning novel method under multi-radar detection. *Sci. Prog.* 2022, 105, 00368504221103785
- [7] Ahmed, F.; Mohanta, J.; Keshari, A.; Yadav, P.S. Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles: A Review. *Arab. J. Sci. Eng.* 2022, 47, 7963–7984. [Google Scholar].
- [8] Noor, F.; Khan, M.; Al-Zahrani, A.; Ullah, I.; Al-Dhlan, K. A Review on Communications Perspective of Flying Ad-Hoc Networks: Key Enabling Wireless Technologies, Applications, Challenges and Open Research Topics. *Drones* 2020, 4, 65. [Google Scholar] [CrossRef].
- [9] Zhang, H.; Xin, B.; Dou, L.-H.; Chen, J.; Hirota, K. A review of cooperative path planning of an unmanned aerial vehicle group. *Front. Inf. Technol. Electron. Eng.* 2020, 21, 1671–1694.
- [10] Zhao, C.; Liu, Y.; Yu, L.; Li, W. Stochastic Heuristic Algorithms for Multi-UAV Cooperative Path Planning. In Proceedings of the 2021 40th Chinese Control Conference (CCC), Shanghai, China, 26–28 July 2021; pp.
- [11] Sun, W.; Hao, M. A Survey of Cooperative Path Planning for Multiple UAVs. In Proceedings of the International Conference on Autonomous Unmanned Systems, Shanghai, China, 26–28 July 2021; pp.
- [12] Zu, W.; Fan, G.; Gao, Y.; Ma, Y.; Zhang, H.; Zeng, H. Multi-uavs cooperative path planning method based on improved rrt algorithm. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Changchun, China, 5–8 August 2018;



- [13] Karimi, H. The capacitated hub covering location-routing problem for simultaneous pickup and delivery systems. *Comput. Ind. Eng.* 2018, 116, 47–58. [Google Scholar] [CrossRef]
- [14] Khaled Telli, Okba Kraa, Yassine Himeur, Abdelmalik Ouamane, Mohamed Boumehraz, Shadi Atalla, Wathiq Mansoor. A Comprehensive Review of Recent Research Trends on Unmanned Aerial Vehicles, (UAVs) Systems 2023, 11(8), 400; <https://doi.org/10.3390/systems11080400>
- [15] Yang, X.; Bostel, N.; Dejax, P. A MILP model and memetic algorithm for the Hub Location and Routing problem with distinct collection and delivery tours. *Comput. Ind. Eng.* 2019, 135, 105–119. [Google Scholar] [CrossRef]
- [16] Danach, K.; Gelareh, S.; Monemi, R.N. The capacitated single-allocation p-hub location routing problem: A Lagrangian relaxation and a hyper-heuristic approach. *EURO J. Transp. Logist.* 2019, 8, 597–631. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- [17] Wu, Y.; Qureshi, A.G.; Yamada, T. Adaptive large neighborhood decomposition search algorithm for multi-allocation hub location routing problem. *Eur. J. Oper. Res.* 2022, 302, 1113–1127. [Google Scholar] [CrossRef]
- [18] Murray, C.C.; Chu, A.G. The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 2015, 54, 86–109. [Google Scholar] [CrossRef]
- [19] Agatz, N.; Bouman, P.; Schmidt, M. Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone. *Transp. Sci.* 2018, 52, 965–981. [Google Scholar] [CrossRef]
- [20] Ha, Q.M.; Deville, Y.; Pham, Q.D.; Hoàng Hà, M. On the min-cost Traveling Salesman Problem with Drone. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 2018, 86, 597–621. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- [21] Moshref-Javadi, M.; Hemmati, A.; Winkenbach, M. A truck and drones model for last-mile delivery: A mathematical model and heuristic approach. *Appl. Math. Model.* 2020, 80, 290–318. [Google Scholar] [CrossRef]
- [22] Dell'Amico, M.; Montemanni, R.; Novellani, S. Matheuristic algorithms for the parallel drone scheduling traveling salesman problem. *Ann. Oper. Res.* 2020, 289, 211–226. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- [23] Wang, X.; Poikonen, S.; Golden, B. The vehicle routing problem with drones: Several worst-case results. *Optim. Lett.* 2017, 11, 679–697. [Google Scholar] [CrossRef]
- [24] Murray, C.C.; Raj, R. The multiple flying sidekicks traveling salesman problem: Parcel delivery with multiple drones. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 2020, 110, 368–398. [Google Scholar] [CrossRef]
- [25] Luo, Z.; Poon, M.; Zhang, Z.; Liu, Z.; Lim, A. The Multi-visit Traveling Salesman Problem with Multi-Drones. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 2021, 128, 103172. [Google Scholar] [CrossRef]

**Anar Khabay**, PhD, associate professor, Satbayev University, Almaty Kazakhstan, [a.khabay@satbayev.university](mailto:a.khabay@satbayev.university)

**Kuanysh Abdizhalel**, master's student, Satbayev University, Almaty Kazakhstan, [01019500376-m@stud.satbayev.university](mailto:01019500376-m@stud.satbayev.university)

**Serikbek Ibekeev**, senior lecturer, Satbayev University, Almaty Kazakhstan, [s.ibekeev@satbayev.university](mailto:s.ibekeev@satbayev.university)

**Nurzhan Zhumakhan**, senior lecturer, Almaty Technological University, Almaty Kazakhstan, [Nurzhan\\_14\\_95@mail.ru](mailto:Nurzhan_14_95@mail.ru)

## CONSTRUCTION OF UAV TRAJECTORY ALGORITHM IN COMPLEX CONDITIONS

**Abstract.** Creating an algorithm for UAV trajectory in complex environments is an important task. This paper presents a new algorithm that is extended to meet the safety requirements and constraints of UAV flight in complex three-dimensional environments. First, a flight function containing threat forces and path length is constructed to evaluate the relationship between two trajectory nodes. Second, the flight function and flight constraints are selected to induce the expansion of new nodes to solve the UAV flight trajectory planning problem. Third, the developed functions were used to update the main node so that the risk and path length are modeled when creating the algorithm. The obtained comparison results show that this algorithm effectively overcomes the mentioned drawbacks. This updated algorithm will greatly improve the safety of the UAV and can plan an optimal path that preserves the shortest distance and satisfies the constraints of flight in complex environments.

**Keywords.** UAV trajectory, dynamical object tracking, intercommunication quality, persistent surveillance.

**Анар Хабай**, PhD, ассоциированный профессор, Satbayev University, Алматы, Казахстан. a.khabay@satbayev.university

**Куаныш Абдижалел**, магистрант, Satbayev University, Алматы, Казахстан 01019500376-m@stud.satbayev.university,

**Серикбек Ибекеев**, старший преподаватель, Satbayev University, Алматы, Казахстан, s.ibekeyev@satbayev.university

**Нуржан Жумахан**, старший преподаватель, Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан. Nurzhan\_14\_95@mail.ru

## ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМА ТРАЕКТОРИИ БПЛА В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ

**Аннотация.** Создание алгоритма траектории движения БПЛА в сложных условиях является важной задачей. В этой статье представлен новый алгоритм, который расширен для удовлетворения требований безопасности и ограничений полета БПЛА в сложных трехмерных средах. Сначала строится функция полета, содержащая силы угрозы и длину пути, для оценки связи между двумя узлами траектории. Во-вторых, функция полета и ограничения полета выбираются для того, чтобы стимулировать расширение новых узлов для решения проблемы планирования траектории полета БПЛА. В-третьих, разработанные функции использовались для обновления основного узла, чтобы при создании алгоритма моделировались риск и длина пути. Полученные результаты сравнения показывают, что данный алгоритм эффективно преодолевает указанные недостатки. Этот обновленный алгоритм значительно повысит безопасность БПЛА и сможет планировать оптимальный путь, сохраняющий кратчайшее расстояние и удовлетворяющий ограничениям полета в сложных условиях.

**Ключевые слова.** Траектория БПЛА, динамическое слежение за объектом, качество связи, постоянное наблюдение.

\*\*\*\*\*