

Код МРНТИ 36.23.27

А.С. Әбен¹, Х. Дай², *Ы. Жакыпбек¹, Б.Б. Күмісханова¹
¹Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан),²College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology (Пекин қ., Қытай)

ЭЛЕКТР ЖЕЛІ ТРЕКТЕРІН ҚАЛПЫНА КЕЛТІРУДЕГІ LIDAR ДЕРЕКТЕРІН ГЕОДЕЗИЯЛЫҚ ЕСЕПТЕУ

Аннотация. Электр тарату дәлізінің күрделі рельефі мен кең ауқымына, құрылымына байланысты, соңғы жылдары әуе кемесіндегі LiDAR жүйесі электр желілерін тексеру үшін маңызды құралға айналды. Сондықтан, мақалада электр желі тректерін қалпына келтірудегі LiDAR деректерін геодезиялық есептеу барысы қарастырылған. Сонымен қатар, мақалада кездейсоқ нүктелерді таңдау, қашықтықты бағалау, нүктелердің қатынасы, ең кіші квадраттар әдісін қолдану, итерациялар мен ең жақсы модельді таңдау тәсілдерін ұштастыра отырып есептеу жүргізіледі. Нәтижесінде әртүрлі электр тірек құрылымын қалпына келтіру деректері нігізінде тіректің ұсақ бөлшектерін алудың орташа дәлдігі 98,5%, кері қайтарып алу 96,7% және F1-дің орташа көрсеткіші 97,6%-ды көрсетті. Орташа жұмыс уақыты – 0,9 с тең болды. Ал алгоритмнің орташа мәні мен орташа есептеу уақытын ескеріп, өте жоғары тиімді нәтижені көрсететіндігі дәлелденді.

Түйінді сөздер: геодезия, электр желісі, тіректер, LiDAR, қателіктер, дәлдік.

Geodetic calculation of LiDAR data in the reconstruction of power grid tracks

Abstract. Due to the complex terrain and wide range, structure of the power distribution corridor, in recent years, the LiDAR system on aircraft has become an important tool for checking power lines. Therefore, the article considers the course of analysis of the accuracy of errors in geodetic survey and mathematical processing in the restoration of power grid supports. In addition, the article provides a calculation of random point selection, distance estimation, point ratio, using the least squares method, combining iterations and methods for choosing the best model. As a result, the average accuracy of obtaining small parts of the rack was 98.5%, The recoil was 96.7% and the average F1 was 97.6%. It has been proven that the average operating time is 0.9 s. It has been proven here that the data for restoring various electrical support structures, taking into account the average value of the algorithm and the average calculation time, show a very high effective result.

Key words: Geodesy, electric grid, supports, LiDAR, errors, accuracy.

Геодезическое решение данных LiDAR при реконструкции опор линии электропередач

Аннотация. Из-за сложной местности и широкого диапазона, структуры коридора распределения электроэнергии в последние годы система LiDAR на воздушном судне стала важным инструментом для проверки линий электропередач. Поэтому в статье рассмотрен ход анализа точности ошибок при геодезической съемке и математической обработке при восстановлении опор электросети. Кроме того, в статье проводится расчет в сочетании с выбором случайных точек, оценкой расстояния, соотношением точек, использованием метода наименьших квадратов, итерациями и способами выбора наилучшей модели. В результате средняя точность извлечения мелких деталей стойки составила 98,5%, отзыв – 96,7%, а средний показатель F1 – 97,6%. Доказано, что среднее время работы – 0,9 с. Также было доказано, что данные восстановления различных электрических опорных структур показывают очень высокий эффективный результат с учетом среднего значения алгоритма и среднего времени расчета.

Ключевые слова: геодезия, электросеть, опоры, LiDAR, погрешности, точность.

Кіріспе

Энергия өндіретін және электр энергиясын тасымалдайтын қондырғылар қазіргі өркениеттің жұмыс істеуін қамтамасыз ететін маңызды құрамдастардың бірі болып табылады. Электр энергиясын беру жүйесінің қауіпсіздігі мен тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін электр тарату дәлізін үнемі тексеріп отыру қажет. Электр тіректері көбінесе жоғары вольтты, таулы өңірлерде және негізгі коммуникацияларға жақын орналасады. Сондай-ақ, әуе желілерінің зақымдануы мен үзілген сымдар адам өмірі үшін өте қауіпті, әрі оларды тексеріп бақылауды дәстүрлі әдіспен жүргізу тиімсіз болып саналады. Сондықтан, соңғы жылдары әуе кемесіндегі LiDAR жүйесі арқылы электр желілерін тексерудің маңыздылығы артуда, электр желілерінің аэрофотосуреттерін, сондай-ақ үш өлшемді нүктелер бұлтын жоғары дәлдікпен және тығыздықпен тікелей алуға мүмкіндік береді.

Электр беру желілерін пайдалану және техникалық қызмет көрсету кезінде борттық лидарларды қолдануда негізінен нүктелер бұлтындағы шуды азайтуға, оларды сегментациялауға, жіктеуге және қуат элементтерін үш өлшемді қайта құруға бағытталған [1–5]. Сондықтан электр дәлізіндегі тіректердің автоматты жіктелуі нәтижесінде нүктелер бұлтында қосалқы компоненттер мен қателіктер кездеседі. Олар өсімдіктер, топырақ, оқшаулағыш кабельдер немесе дренаждық желілердің әсерінен туындайды. Бұл қателіктер тіректерді құрылымдық талдау мен олардың қайта құрылу дәлдігіне әсер етеді. Сондықтан тіректердің нүктелер бұлтын дәл анықтау үшін өңдеуде PCA (Principal Component Analysis), аймақтық өсу

мен RANSAC (Random Sample Consensus) алгоритімдік әдістерін біріктіріп, тазарту және құрылымдық нақтылау жұмыстары орындалады. Сондай-ақ, электр тіректерін қайта қалпына келтіруде нақты пішімін қалыптастыруда нүктелер бұлты деректерін сызықтық сәйкестендіру жүргізіледі. Мұнда ең кіші квадраттар (Least Squares Method), негізгі компоненттер (Principal Component Analysis, PCA), Iterative Closest Point (ICP), Procrustes Analysis, RANSAC (Random Sample Consensus) және салмақталған ең кіші квадраттар әдістері (Weighted Least Squares, WLS) жиі қолданылады [6–11].

Сондықтан, мақалада сызықтық сәйкестендірудің әдістерін қолданып, электр желі тіректерін қалпына келтіруде LiDAR деректерінің кездейсоқ нүктелерін таңдау, қашықтықты бағалау, нүктелердің қатынасын анықтау, орташа сәйкестік әдісі қатесін анықтау арқылы ең қолайлы сызықтық теңдеу таңдалынып, PCA алгоритмінде түзу сызықтық бағыты барлық нүктелердің максималды проекциясын алуға, электр тірегінің контур нүктелерін сызықтық сәйкестендіру үшін RANSAC әдістерін қолданып, геодезиялық есептеулер жүргізіледі.

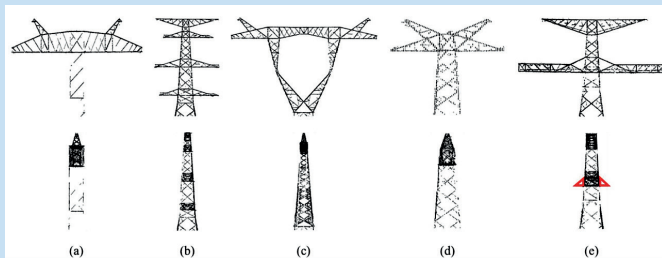
Зерттеу әдістері және материалдары

Электр желі тректерін қалпына келтірудегі LiDAR деректерін геодезиялық есептеуде электр тірегінің жоғарғы жағындағы нүктелер бұлтын алуда ең алдымен контур нүктелері таңдалады, содан кейін сызықтық теңдеуді сәйкестендіру орындалады. Сызықтық сәйкестендіруде ең кіші квадраттар әдісінде барлық нүктелерді есепке алады, оны шуға сезімтал етіп, дәлдігін төмендетеді. Ал PCA

алгоритмінде түзу сызықтың бағыты барлық нүктелердің максималды проекция ұзындығының бағыттық векторына негізделіп, түзу сызықтың келтіру нүктелерінен өтуін қамтамасыз етеді және қалған нүктелерді келтіру нүктесіне дейін есептеуге мүмкіндік береді.

Барлық нүктелерден бастапқы сызықтық тендеуді және басқа нүктелерден түзуге дейінгі қашықтықты анықтау үшін екі нүкте кездейсоқ таңдалып, оларға сәйкес түзу сызық құрылады. Егер түзу сызықтың қателігі берілген шектен аз болса, ол жергілікті шешім ретінде қабылданады. Ал егер қате шектен асып кетсе, онда ең кіші квадраттар әдісі қолданылады. Кездейсоқ таңдауларды бірнеше рет қайталау арқылы ең аз қателікпен сәйкестендірілген сызықтық модель ең қолайлы шешім ретінде таңдалады. Кездейсоқ алгоритмнің сенімділігін арттырып, оның жылдам жинақталуына көмектеседі. Электр тірегінің контур нүктелерінде көмекші компоненттердің болуына байланысты, сызықтық тендеуді сәйкестендіру үшін RANSAC әдісі қолданылады. Бұнда кездейсоқ таңдаулар негізінде түзу сызықты сәйкестендіруге мүмкіндік береді, себебі ол бұрмалаушы компоненттер мен шудың әсерін азайтып, контур нүктелерінің арасына көмекші элементтер кірген жағдайда тиімді жұмыс істейді. Аталмыш әдістердің тиімділігі мен дәлдігін талдау мақсатында мақалада 6 түрлі электр желі тірек деректерінің нүктелер бұлты мәліметтерін өңдеп (1 – сурет), алгоритмдік бағалау және уақыттық талдау жұмыстары жүргізілді.

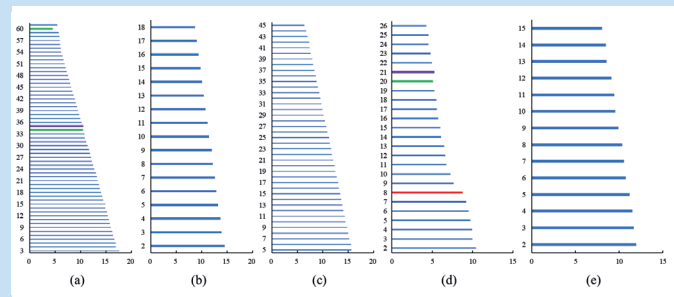
Сондықтан, электр желі тіректерін қалпына келтірудегі LiDAR деректерін геодезиялық есептеуде кездейсоқ түрде барлық нүктелерден екі нүкте таңдалып, бастапқы сызықтық тендеу ретінде $A_0P_x + C_0P_z + D_0 = 0$ көрсетіледі. Бұдан кейін басқа нүктелерден түзу сызыққа дейінгі қашықтық кезекпен бағаланады. Осы қашықтық берілген қатеден аз болса, нүкте жергілікті шешім ретінде қабылданып, нүктелер санының барлық нүктелерге қатынасы есептеледі. Егер бұл қатынас берілген коэффициенттің шекті мәнінен үлкен болса, нүктелер сызықтық сәйкестендіру үшін ең кіші квадраттар әдісін қолдана отырып, орташа сәйкестік қатесін есептеу арқылы нүктеден қолайлы сызыққа дейінгі орташа қашықтықты анықтайды. Ол қателіктерді азайту арқылы ең жақсы шешімді таңдауға мүмкіндік береді.



Сурет 1. Электр беру тіректерінің нүктелер бұлты.
Figure 1. A cloud of transmission line support points.
Рис. 1. Облако точек опор линии электропередачи.

Тіректің сыртындағы қате нүктелерді жоюда және электр тірегі орнын анықтауда, 2-суретте көрсетілгендей, шекті орналасуы қабаттардың ең көп саны бар кластер таңдалып, проекцияның сәйкес иерархиялық ұзынды-

ғына талдау жасалынады. Мұнда қызыл сызыққа сәйкес иерархиялық ұзындық анықталатын шекті орналасу орны болып табылады. Электр тірегінің құрылымдық сипаттамаларына сүйене отырып, 2-суреттегі қабатты нүктелер бұлтының проекциялық ұзындығы жоғарыдан төменге қарай сызықтық өсуге сәйкес келуі керек. Сондай-ақ, алынған тірек нүктелерінің бұлты ішінара жоғалып кетуі мүмкін, нәтижесінде жетіспейтін қабатты проекция ұзындығы оның жоғарғы жағындағы қабатты нүктелер бұлтының проекция ұзындығынан қысқа болады. Осылайша, алынған нүктелер бұлтындағы қателіктерге байланысты нүктелердің аз саны жоғарғы және төменгі көршілес сызықтарында, 2-суретте (a, d) көрсеттегідей, «ойыс» құрылымды күлгін мен жасыл сызықты құрайды.



Сурет 2. Қабатты нүктелер бұлтының проекция ұзындығы.
Figure 2. The length of the layered point cloud projection.
Рис. 2. Длина проекции слоистого облака точек.

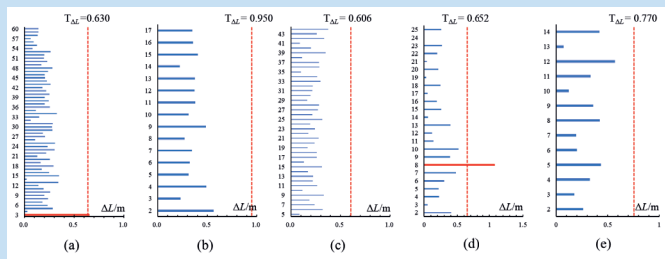
Проекция ұзындығының жоғарыдан төменге қарай біртіндеп ұлғаюын қамтамасыз ету үшін «ойыс» құрылымдары жойылуы қажет. Әр қабаттағы нүктелер бұлтының проекция ұзындығын түзету үшін қабаттарды жоғарыдан төменге қарай 1 – формуламен кезекпен есептеу қажет:

$$(L_{i+1} - L_i)(L_{i-1} - L_i) > 0 \Rightarrow L_i = \frac{L_{i+1} + L_{i-1}}{2}. \quad (1)$$

Түзетілген қабаттың проекция ұзындығына негізделіп отырып, 2 – формула көршілес қабаттар арасындағы проекция ұзындығының ΔL_i айырмашылығын есептеу үшін қолданылады. Көршілес қабаттар арасындағы проекция ұзындығының айырмашылығын қызыл қалың сызық шекті орналасуды, ал қызыл нүктелі сызық $T_{\Delta L}$ бейімделу шегін көрсетеді (3 – сурет). Мұнда $\Delta L_i > T_{\Delta L}$ болса электр бағанының шекті орналасуы ретінде қарастырылады. Егер бірнеше шекті орналасу кездессе (3 a, d – сурет), онда ең үлкен сызықтық ұзындық шекті орналасу орны ретінде қарастырылады. Ал керісінше болса, кластердегі ең қысқа иерархиялық ұзындық (3 b, c, e – сурет) шекті орналасуы ретінде таңдалады.

$$\Delta L_i = L_i - L_{i+1}. \quad (2)$$

Проекция ұзындығы жоғарыдан төменге қарай сызықты түрде өсетіндіктен, ΔL_i теориялық мәні $\Delta h_i/k$ тең, мұндағы k – төртбұрыштың еңісі. Егер көлбеу болса, k_0 төменгі нүктелер бұлтында ең кіші сызықтық сәйкестік қателігі бар позиция ретінде таңдалынып $T_{\Delta L} = 3\Delta h_i / k_0$ формуласымен есептеледі.

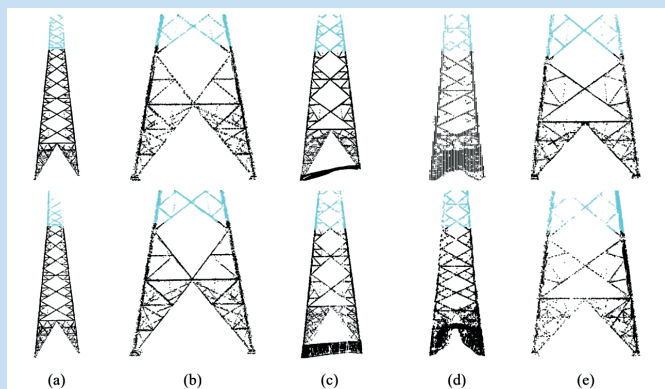


Сурет 3. Көршілес қабатты нүктелер бұлты арасындағы проекция ұзындығының орналасуы.
Figure 3. Location of the projection length between a cloud of adjacent layered red points.

Рис. 3. Расположение длины проекции между облаком соседних точек слоя.

Шекті орналасудың жоғары нүктелер бұлты сәйкесінше $X'Z$ және $Y'Z$ жазықтықтарына проекцияланады. Призмалық сызықтық теңдеуді анықтау үшін нүктелер бұлты контурын алу және сызықтық теңдеуді орнату әдістері қолданылады. 3 – формуламен нүктелер бұлтының орны анықталып, сыртында орналасқан нүктелер жойылып, нақтыланған төменгі нүктелер бұлты ұсынылады (4-сурет).

$$\begin{cases} \frac{-C_L P_Z - D_L}{A_L} - e > P_{x'} \vee \frac{-C_R P_Z - D_R}{A_R} + e < P_{x'} & \Rightarrow \text{нүкте сыртында} \\ \text{басқа} & \Rightarrow \text{нүкте ішінде} \end{cases} \quad (3)$$



Сурет 4. Электр беру тірегі нүктелер бұлтының төменгі бөлігі.

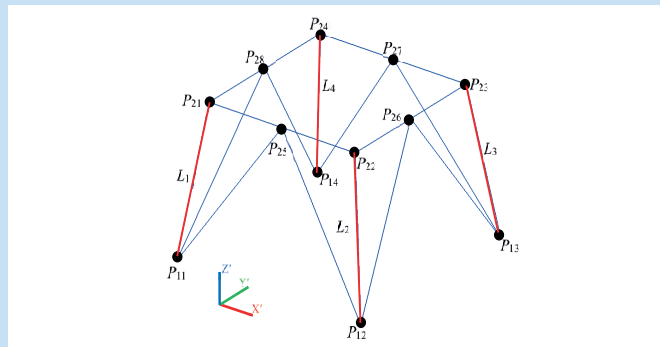
Figure 4. Power transmission support lower part of the cloud of points.

Рис. 4. Нижняя часть облака точек опоры электропередачи.

Электр тірегінің ішкі жағындағы сәйкессіздік нүктелері негізінен тірек аяқтарының ішкі бөлігіне орналасады (5-сурет). Тірек аяқтарының сыртқы контуры төртбұрышты платформа түрінде, ал ішкі жағы төрт төңкерілген үшбұрышты пирамида түрінде сипатталады. P_{25} , P_{26} , P_{27} және P_{28} – жақтардың ортаңғы нүктелері, ал L_i ($i = 1, 2, 3, 4$) төрт жақтың сызықтық теңдеуі. Электр тірегі табанының құрылымын нақтылау үшін P_{ij} ($i = 1, 2, j = 1, 2, 3, 4$) нүктесінің Z координатасын анықтау жеткілікті. Мұнда электр тірегі табанының нақты құрылымы негізінде, егер нүкте төрт төңкерілген үшбұрышты пирамида құрылымының ішінде болса, ол тірек нүктесі ретінде

қарастырылады. Сондай-ақ, тірек нүктесін анықтау екі кезеңнен тұрады:

1. Тірек корпусы мен аяқтарының шекаралық орналасуын, яғни P_{2i} ($i = 1, 2, \dots, 8$) Z координатасын анықтау.
2. P_{li} ($i = 1, 2, 3, 4$) Z координатасын есептеу.



Сурет 5. Тірек аяқтарының құрылымы.
Figure 5. Structure of the support legs.

Рис. 5. Строение опорных ножек.

L_i ($i = 1, 2, 3, 4$) жиегінің сызықтық теңдеуін және P_{ij} ($i = 1, 2, j = 1, 2, 3, 4$) нүктесінің Z координатасын біле отырып, P_{ij} ($i = 1, 2, j = 1, 2, 3, 4$) нүктелерінің X' және Y' координаттарын есептеуге болады. Ал $S_3 - P_{12}P_{26}$ және P_{27} қиылысу нүктелерінің жазықтығы, яғни $A_x P_{x'} + B_y P_{y'} + C_z P_{z'} + D_3 = 0$ теңдеуін қанағаттандыратын жазықтық.

Нүкте мен S_3 жазықтығы арасындағы позициялық байланыс 4 – формуламен анықталады, мұндағы e – қателіктерге төзімділік константасы. Егер нүкте жазықтықтың төменгі жағында болса, ол қажетсіз нүкте ретінде қарастырылады.

$$\begin{cases} \frac{-A_3 P_{x'} + B_3 P_{y'} + D_3}{C_3} - e > P_{z'} & \Rightarrow \text{нүкте жер бетінің астында} \\ \text{басқа} & \Rightarrow \text{нүкте жер бетінің үстінде} \end{cases} \quad (4)$$

Тіректі ажырату дәлдігін сандық түрде бағалау үшін дәлдік коэффициенті P , қалпына келу жылдамдығы R және $F1$ мәні пайдаланылады. Мұндағы дәлдік коэффициенті – нақты тірек нүктелерінің жалпы анықталған нүктелеріне қатынасы, ал қалпына келу жылдамдығы – бастапқы тірек нүктелеріндегі нақты тірек нүктелеріне қатынасы. $F1$ мәні – дәлдік пен қалпына келу жылдамдығының жалпы бағасы.

Дәлдік, қалпына келу жылдамдығы және $F1$ мәні 5 – формуламен анықталады.

$$P = \frac{n}{n+k} * 100\%, R = \frac{n}{n+m} * 100\%, F1 = \frac{2PR}{P+R} * 100\%, \quad (5)$$

Мұндағы:

- n – нақты тірек нүктелерінің саны;
- m – басқа нүктелер ретінде қарастыратын нүктелер саны;
- k – тірек емес нүктелерді қарастыратын нүктелер саны.

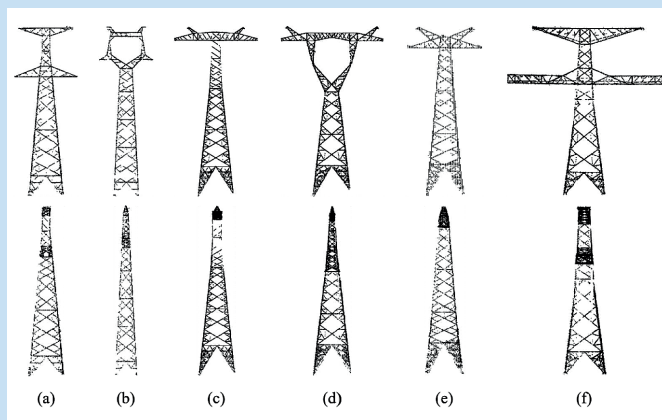
Тірек нүктелерінің бұлттарынан ұсақ ажыратудың дәлдігі мен тиімділігі 1-кестеде көрсетілген, орташа дәлдік көрсеткіші 98,5%, қалпына келудің орташа көрсеткіші 96,7%, $F1$ орташа мәні 97,6%, ал орташа уақыт шығыны 0,9 с. Алынған тірек нүктелерінің бұлты нәтижелері 6-суретте көрсетілген.

Кесте 1
Тіректі ажыратудың дәлдігі мен тиімділігі

Table 1
Precision and efficiency of support extraction

Таблица 1
Точность и эффективность извлечения опоры

Тірек түрлері	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F1</i>	Уақыт <i>s</i>
a	98.9%	96.1%	97.5%	0.8
b	99.1%	98.0%	98.6%	0.8
c	99.9%	99.7%	99.8%	0.9
d	99.6%	99.5%	99.5%	1
e	92.6%	93.4%	93.0%	0.8
f	99.9%	94.2%	96.9%	1.1
Орташа	98.5%	96.7%	97.6%	0.9



Сурет 6. Электр беру тірегінің ажыратылған нүктелері.

Figure 6. Extracted transmission fulcrum points.

Рис. 6. Извлеченные точки опоры электропередачи.

Осылайша, электр желі тіректерінің нақты орнын анықтауда шекті орналасу қабаттары таңдалып, проекцияның иерархиялық ұзындығына сәйкес жоғарыдан төменге қарай талдау жасалынып, сыртында орналасқан нүктелер жойылып және нүктелер бұлтының нақты орны анықталынады.

Зерттеу нәтижелері мен талқылау

Төменгі нүктелер бұлтының ұсақ экстракция ортасы – тіректің шекті орнын анықтау, тірек табаны және корпусының шекаралық орындарын тану алгоритмі. Шекті орнын тану алгоритмінде іргелес қабаттардың проекция ұзындығы айырмашылығының шекті мәні (T_{AL}) негізгі параметр болып табылады. Шекті орын жоғарыдағы төртбұрышты құрылым болғандықтан, іргелес қабаттардың проекция ұзындығының айырмашылығы шамамен тұрақты $\Delta h_1/k_0$ құрайды. Егер көршілес проекция ұзындығының айырмашылығы $3\Delta h_1/k_0$ –ден үлкен болса, онда оның шекті орын болуының үлкен ықтималдығы бар, сондықтан $T_{AL} = 3\Delta h_1/k_0$. Ал тірек табаны мен корпусының шекаралық орналасуын тану алгоритмінің негізгі параметрлері сегмент аралығының екі параметрі ($\Delta h_2, \Delta h_3$) және толтыру жылдамдығының шегі T_f қарастырылады. Мұнда Δh_2 -тік ст-

ратификация интервалының параметрі. Тірек табаны мен корпусының шекаралық позициясындағы нүктелер бұлты биіктігінің максималды айырмашылығы негізінен [0,07, 0,2] арасында бөлінетіндіктен, шекаралық орындағы нүктелер бұлты оның жергілікті максималды тығыздығын көрсету үшін бірдей стратификацияда орналасуы керек. Сондықтан, Δh_2 мәнін 0,2 мәніне орнатады. Демаркациялық позицияны толтыру жылдамдығы жергілікті қабатты нүктелер бұлтының толтыру жылдамдығынан едәуір жоғары болғандықтан, жылдамдығының төмендеуін болдырмау үшін, демаркациялық позицияны толтыру жылдамдығын бөлектеу және басқа жергілікті қабатты толтыру жылдамдығына әсерін азайту үшін үлкен аралық мән орнатады. *У* бағытындағы іргелес нүктелер арасындағы интервал негізінен [0,01, 0,3] арасында бөлінетіндіктен, $\Delta h_2, 0,3$ мәніне орнатылады. T_f толтыру жылдамдығының шегі үшін шекаралық жерде толтыру жылдамдығы T_f -тен жоғары болуы керек, ал маңайдағы орташа толтыру жылдамдығы T_f -тен төмен болуы керек. Көптеген эксперименттерден кейін 60% эмбебаптығы жоғары T_f ретінде таңдалды. Ақаулыққа төзімділік коэффициентінің мәні *e* бұлтының ұсақ экстракциясының жоғарғы нүктесіндегі ақауларға төзімділік коэффициентінің мәнін береді.

Дәлдік коэффициенті анықталған тірек нүктелері нақты үлесін көрсетеді. Анықталған тірек нүктелері басқа нүктелерге сезімтал, бірақ алгоритмнің барлық нақты тірек нүктелерін анықтау қабілетін көрсетпейді. Ал қалпына келу жылдамдығы анықталған нақты тірек нүктелерінің үлесін білдіреді. Бірақ ол анықталған тірек нүктелеріне сезімтал, алгоритмнің тірек нүктелерін басқа нүктелерден ажырату қабілетін көрсетпейді. *F1* мәні – дәлдік пен қалпына келу жылдамдығын жан-жақты бағалайтын көрсеткіш.

Осылайша, 1-кестеден көрініп тұрғандай:

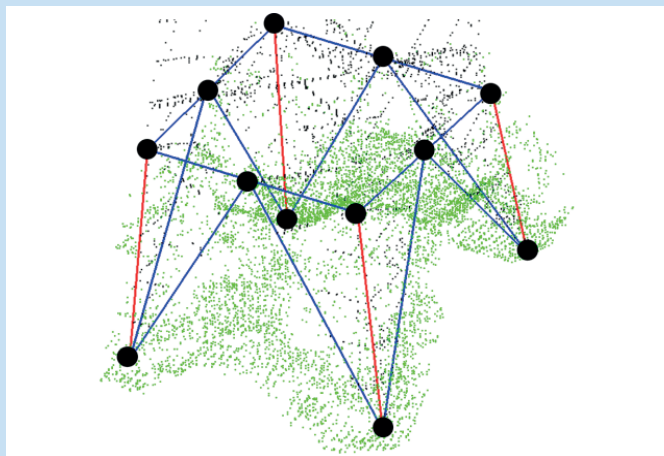
1. *6* түрлі тірек деректері үшін алгоритмнің орташа *F1* мәні 97%-ға дейін жетеді, ең төменгі *F1* мәні 94,2%-ды құрайды;

2. алгоритмнің орташа есептеу уақыты 0,9 секундты құрайды, бұл жоғары тиімділікті көрсетеді;

3. *e* және *f* деректерінің дәлдігі салыстырмалы түрде төмен. *e* деректерінің дәлдігі мен қалпына келу жылдамдығы төмен болса, *F* деректерінің дәлдігі жоғарырақ, бірақ қалпына келу жылдамдығы төмен. *e* және *f* деректерінің дәлдігін жеке талдау төменде жүргізіледі.

e деректерінде тірек табанының ішкі және сыртқы жағында көп жалған нүктелер кездеседі (7-сурет). Тірек табанының сыртындағы нүктелер бұлтын алып тастаған кезде, нүктелер бұлтының сканерлеу қателігі мен құрылымдық орнату қатесіне байланысты, орнатылған төңкерілген үшбұрышты пирамида құрылымының сыртында кейбір тірек нүктелері болуы мүмкін және олар жою үшін дұрыс емес нүкте ретінде қарастырылады. Бұл деректердің дәлдігінің төмендеуіне әкеледі, себебі қате нүктелер мен тірек нүктелерінің араласуы орын алады. Сондай-ақ, құрылымдық шектеулерге байланысты төңкерілген үшбұрышты пирамида құрылымының ішкі жағында да қате нүктелер кездесетіндіктен, құрылымның сыртындағы қате нүктелерді ғана жоя алатын ажырату алгоритмі нәтижесінде қалпына келу жылдамдығы төмендейді.

a, *b* және *d* деректерінде кәте нүктелер аз, сондықтан тірек нүктелер бұлтының деректерін алу дәлдігі жоғары болады, себебі олар кеңістіктік тұрғыдан тірек нүктелерінің бұлтымен аз араласады.

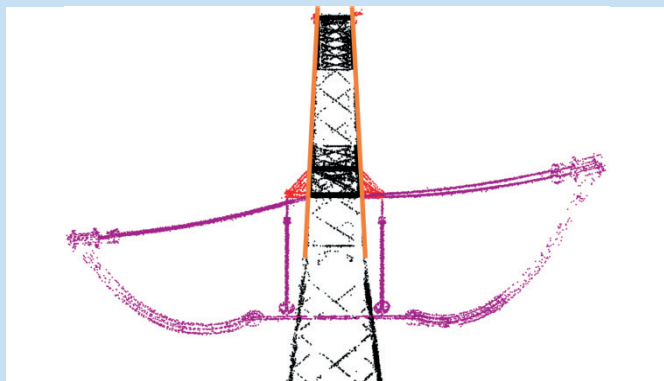


Сурет 7. Тірек негізінің құрылымы және *e* деректер нүктесінің бұлты.

Figure 7. Support base structure and data point *e* cloud.

Рис. 7. Структура опорного основания и облако точек данных *e*.

f деректері үшін $X'Z$ жазықтығындағы бұлтың жоғарғы нүктесінің проекциясы 8-суретте көрсетілген. Мұнда күлгін нүкте – аксессуар нүктесі, қызғылт сары сызық – бекітілген контурдың түзу сызығы, ал қызыл нүкте – тірек нүктесі. Орнатылған контур сызығының сыртында орналасқан қызыл нүктелер жоюға арналған қосалқы нүктелер ретінде қарастырылады, нәтижесінде *f* деректерінің қалпына келу жылдамдығының төмендеуіне әкеледі.



Сурет 8. *f* деректерінің жоғарғы бөлігін $X'Z$ жазықтығына проекциялануы.

Figure 8. Projection of the upper part of the data *f* onto the $X'Z$ plane.

Рис. 8. Проекция верхней части данных *f* на плоскость $X'Z$.

Тірек деректерінің әр түрлі қосалқы құрамдас нүктелері тіректің ажырату дәлдігіне айтарлықтай әсер етпейді. Тіректің ажырату дәлдігіне әсер ететін негізгі факторлар келесідей:

- тірек табанындағы өсімдіктер мен тіректің нүктелер бұлты арасындағы кеңістіктік позициялық байланыс. Егер тіректің табанында төңкерілген үшбұрышты пирамида құрылымының ішінде жалған нүктелер пайда болса, тіректің ұсақ ажырату алгоритмінің дәлдігі төмендейді.

- XZ жазықтығында проекцияланған тіректің жоғарғы нүктелер бұлтының пішін құрылымы. Егер проекцияланған пішін трапеция тәрізді болмаса немесе трапецияның сыртында тіректің кішкене нүктесі болса, алгоритмінің қалпына келу жылдамдығы төмендейді.

Бұл екі фактор тірек нүктелер бұлтының бір бөлігінің жоғалуына әкеліп соқтырса да, жоғалған құрылым тек кішкене құрамдас құрылым немесе шеткі сызықтағы нүктенің бөлігі болғандықтан, тіректің жалпы магистральдық құрылымына айтарлықтай әсер етпейді.

Қорытынды

Қорытындылай келе, тірек нүктелерінің бұлтында орналасқан қосалқы құрамдас, дұрыс емес бөлу және дәл тірек нүктелерінің кеңістіктік құрылымының сипаттамалары мен салыстырмалы позициялық байланыстарын талдай отырып, тірек табанындағы ықтимал «ойықтар» алып тасталады, содан кейін тіректің құрылымдық сипаттамаларын есептеуді жеңілдету үшін PCA алгоритмі негізінде қайта бағытталады. Қайта бағытталған тірек корпусының ұзындығы мен биіктігі арасындағы теріс сызықтық қатынасқа сүйене отырып, тірек корпусының нүктелер бұлтының бір бөлігін алу үшін иерархиялық нүктелер бұлтын кластерлеу жүзеге асырылады. Соңында, тірек корпусының бір бөлігінің төменгі жағындағы нүктелер бұлты үшін призмалық құрылым әдістері және төңкерілген үшбұрышты пирамида құрылымының шектеулері сыртқы және ішкі сәйкессіздік нүктелерін жою үшін қолданылады.

Зерттеу мақаласында әр түрлі тірек және қосалқы компоненттердің қосылу типтері мен жалған нүктелердің таралуы бар түрлі тіректердің нүктелер бұлтары таңдалды. Нәтижесінде тіректің ұсақ бөлшектерін алудың орташа дәлдік көрсеткіші 98,5%, кері қайтарып алудың орташа көрсеткіші 96,7% және *FI* орташа көрсеткіші 97,6% екенін көрсетті. Орташа жұмыс уақыты – 0,9 с тең екендігі дәлелденді. Сондықтан электр желі тіректерін қалпына келтіруде сызықтық сәйкестендірудің әдістері негізінде LiDAR деректерінің кездейсоқ нүктелерін таңдау, қашықтықты бағалау, нүктелердің қатынасы анықтау, орташа сәйкестік әдісі қатесін анықтау арқылы ең қолайлы сызықтық теңдеуді таңдаумен қатар PCA алгоритмін мен RANSAC әдістерін қолдану өте тиімді нәтижені береді.

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Электр желісін бөлектеу үшін электр желісінің дәліз нүктелерінің бұлттарындағы олқылықтарды жою үшін иерархиялық кластерлеу әдісі / *Y. Fan [және т. б.] // Қашықтықтан зондтау. 2021. Т. 13. № 1502. Б. 1–21 (ағылшын тілінде)*

2. Иерархиялық тәсілмен воксельге негізделген қосалқы үлгіні қолдана отырып, лазерлік сканерлеу деректерінен электр желілерін автоматтандырылған және тиімді алу / J. Jung [және т. б.] // ISBN. J. Фотограмметрия. 2020. Т. 163. Б. 343–361 (ағылшын тілінде)
3. Борттық лидар деректерінен электр желілері мен тіректерді алудың GCN негізіндегі әдісі / W. Li [және т. б.] // IEEE-дің жер туралы ғылымдар және қашықтықтан зондтау бойынша еңбектері. 2022. Т. 60. Б. 1–14 (ағылшын тілінде)
4. 3D-дәліздерді тазартуды бақылау үшін ұшқышсыз ұшу аппараттарының суреттерін қолдана отырып, электр желілерін қайта құру / E. Pastucha [және т. б.] // Қашықтықтан зондтау. 2020. Т. 12. № 3698. Б. 1–31 (ағылшын тілінде)
5. Борттық лидар деректерін пайдалана отырып, дерексіз шаблондық конструкциялар негізінде күш тіректерін қайта құру / Chen S. [және т. б.] // Қашықтықтан зондтау. 2019. Т. 11. № 1579. Б. 1–30 (ағылшын тілінде)
6. Kim H.B., Sohn G. Кездейсоқ ормандарды қолдана отырып, электр желісі дәлізінің көрінісін нүктелік жіктеу // Қашықтықтан зондтау. 2013. Т. 79. Б. 821–833 (ағылшын тілінде)
7. JointBoost көмегімен борттық лазерлік сканерлеу деректерінің жіктелуі / Guo B. [және т. б.] // ISPRS J. Фотограмметрия. 2015. Т. 100. Б. 71–83 (ағылшын тілінде)
8. Қалалық жерлерде борттық лидар мәліметтері бойынша электр желілерінің бақыланатын жіктелуі / Y. Wang [және т. б.] // Қашықтықтан зондтау. 2017. Т. 9. № 771. Б. 1–16 (ағылшын тілінде)
9. Mukhopadhyay P., Chaudhuri B.B. Хаф түрлендіруіне шолу // Үлгіні тану. 2015. Т. 48. Б. 993–1010 (ағылшын тілінде)
10. Борттық лидар деректеріне негізделген электр желілерін жылдам алу бойынша зерттеу / Wang P.H. [және т. б.] // Sci. Surv. Mapp. 2017. Т. 42. № 6. Б. 154–158 (ағылшын тілінде)
11. Chum O., Matas J. Оңтайлы рандомизацияланған RANSAC // IEEE үлгілерін талдау және машиналық интеллект бойынша еңбектері. 2008. Т. 30. Б. 1472–1482 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. A Hierarchical Clustering Method to Repair Gaps in Point Clouds of Powerline Corridor for Powerline Extraction / Fan Y. [et al.] // Remote Sensing. 2021. V. 13. No. 1502. 1–21 pp. (in English)
2. Automated and efficient powerline extraction from laser scanning data using a voxel-based subsampling with hierarchical approach / Jung J. [et al.] // ISPRS. J. Photogramm. 2020. V. 163. 343–361 pp. (in English)
3. A GCN-Based Method for Extracting Power Lines and Pylons from Airborne LiDAR Data / Li W. [et al.] // IEEE Trans. Geosci. Remote. 2022. V. 60. 1–14 pp. (in English)
4. 3D Reconstruction of Power Lines Using UAV Images to Monitor Corridor Clearance / Pastucha E. [et al.] // Remote Sens. 2020. V. 12. No. 3698. 1–31 pp. (in English)
5. Power Pylon Reconstruction Based on Abstract Template Structures Using Airborne LiDAR Data / Chen S. [et al.] // Remote Sens. 2019. V. 11. No. 1579. 1–30 pp. (in English)
6. Kim H.B., Sohn G. Point-based classification of power line corridor scene using random forests // Remote Sens. 2013. V. 79. 821–833 pp. (in English)
7. Guo B., Huang X., Zhang F., Sohn G. Classification of airborne laser scanning data using JointBoost // ISPRS J. Photogramm. 2015. V. 100. 71–83 pp. (in English)
8. Supervised Classification of Power Lines from Airborne LiDAR Data in Urban Areas / Wang Y. [et al.] // Remote Sens. 2017. V. 9. No. 771. 1–16 pp. (in English)
9. Mukhopadhyay P., Chaudhuri B.B. A survey of Hough Transform // Pattern Recogn. 2015. V. 48. 993–1010 pp. (in English)
10. Study on power line fast extraction based on airborne LiDAR data / Wang P.H. [et al.] // Sci. Surv. Mapp. 2017. V. 42. No. 6. 154–158 pp. (in English)
11. Chum O., Matas J. Optimal Randomized RANSAC // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2008. V. 30. 1472–1482 pp. (in English)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Метод иерархической кластеризации для устранения разрывов в облаках точек коридора линии электропередач для выделения линии электропередач / Y. Fan [и др.] // Дистанционное зондирование. 2021. Т. 13. № 1502. С. 1–21 (на английском языке)
2. Автоматизированное и эффективное извлечение линий электропередачи из данных лазерного сканирования с использованием подвыборки на основе вокселей с иерархическим подходом / J. Jung [и др.] // ISBN. J. Фотограмметрия. 2020. Т. 163. С. 343–361 (на английском языке)
3. Основанный на GCN метод извлечения линий электропередач и опор из данных бортового лидара. / W. Li [и др.] // Труды IEEE по наукам о земле и дистанционному зондированию. 2022. Т. 60. С. 1–14 (на английском языке)

4. 3D-реконструкция линий электропередач с использованием изображений с беспилотных летательных аппаратов для мониторинга расчистки коридоров / E. Pastucha [и др.] // Дистанционное зондирование. 2020. Т. 12. № 3698. С. 1–31 (на английском языке)
5. Реконструкция силовых опор на основе абстрактных шаблонных конструкций с использованием данных бортового лидара / Chen S. [и др.] // Дистанционное зондирование. 2019. Т. 11. № 1579. С. 1–30 (на английском языке)
6. Kim H.B., Sohn G. Точечная классификация сцены коридора линии электропередачи с использованием случайных лесов // Дистанционное зондирование. 2013. Т. 79. С. 821–833 (на английском языке)
7. Классификация данных бортового лазерного сканирования с использованием JointBoost / B. Guo [и др.] // ISPRS J. Фотограмметрия. 2015. Т. 100. С. 71–83 (на английском языке)
8. Контролируемая классификация линий электропередач по данным бортового лидара в городских районах / Y. Wang [и др.] // Дистанционное зондирование. 2017. Т. 9. № 771. С. 1–16 (на английском языке)
9. Mikhopadhyay P., Chaudhuri B.B. Обзор преобразования Хафа // Распознавание образов. 2015. Т. 48. С. 993–1010 (на английском языке)
10. Исследование по быстрому извлечению линий электропередач на основе данных бортового лидара / P.H. Wang [и др.] // Sci. Surv. Mapp. 2017. Т. 42. № 6. С. 154–158 (на английском языке)
11. Chum O., Matas J. Оптимальный рандомизированный RANSAC // Труды IEEE по анализу паттернов и машинному интеллекту. 2008. Т. 30. С. 1472–1482 (на английском языке)

Авторлар туралы мәліметтер:

Әбен А.С., т.ғ.м., Satbayev University, О.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының оқытушысы (Алматы қ., Қазақстан), a.aben@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-6222-8631>

Дай Хуаян, Геология және геодезиялық инженерия колледжі, Қытай тау-кен және технологиялар Университеті (Пекин қ., Қытай), dhy@cumt.edu.cn; <https://orcid.org/0000-0001-8110-9611>

Жақыпбек Ы., Ph.D, Satbayev University, О.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының профессоры (Алматы қ., Қазақстан), y.zhakypbek@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-2474-9927>

Күмісханова Б.Б., т.ғ.м., Satbayev University, О.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының оқытушысы (Алматы қ., Қазақстан), b.kumiskhanova@satbayev.university; <https://orcid.org/0009-0008-7556-0578>

Information about the authors:

Aben A., Master of Technical Sciences, lecturer at the Department of Mine Surveying and Geodesy of the Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Dai Huayang, College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing, China)

Zhakypbek Y., Ph.D, Professor at the Department of Mine Surveying and Geodesy of the Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Kumiskhanova B., Master of Technical Sciences, lecturer at the Department of Mine Surveying and Geodesy of the Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Сведения об авторах:

Абен А.С., м.т.н., преподаватель кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Горно-металлургический институт им. О.А. Байконурова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Дай Хуаян, Колледж наук о земле и инженерной геодезии, Китайский университет горного дела и технологий (г. Пекин, Китай)

Жақыпбек Ы., Ph.D, профессор кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Горно-металлургический институт им. О.А. Байконурова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Күмісханова Б.Б., м.т.н., преподаватель кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Горно-металлургический институт им. О.А. Байконурова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)