

УДК 528.4

ВИЗНАЧЕННЯ КРЕНІВ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД МЕТОДОМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ

С. Войтенко, Р. Шульц

Київський національний університет будівництва і архітектури

М. Білоус

“Укргеодезмарк”

Постановка проблеми в загальному вигляді

Загальновідомо, що головна причина крену споруди – це нерівномірне осідання фундаменту споруди. Геометрична сутність визначення крену полягає у визначенні координат двох таких точок споруди, які за технічними умовами повинні перебувати на одній висковій лінії. Різні способи визначення кренів споруд поділяють на дві групи: геометричні способи і фізичні способи. До теперішнього часу, крени споруд визначають залежно від технічних вимог та умов спостережень за допомогою: дротяних висків, зворотних висків, приладів вертикального проектування, клінометрів та датчиків нахилу, геодезичних методів (спосіб координат, спосіб вертикального проектування, спосіб горизонтальних та вертикальних кутів тощо), фотограмметричних та стереофотограмметричних методів [1]. Є спроби застосувати для визначення кренів супутникові радіонавігаційні приймачі (ГЛОНАСС, GPS).

Граничні похибки вимірювання кренів залежно від висоти H споруди, не повинні перевищувати згідно з ГОСТ 24846-81 [2] таких величин в мм, для:

- цивільних будівель та споруд – 0,0001 H ;
- промислових будівель та споруд, димових труб, башт та ін. – 0,0005 H ;
- фундаментів під машини та агрегати – 0,00001 H .

Різноманітність методів визначення кренів свідчить про відсутність єдиного підходу до вирішення цієї проблеми. Очевидно, що вихід мабуть потрібно шукати в поєднанні різних приладів та методів визначення. Покажемо, що використовуючи метод наземного лазерного сканування, можна отримати практично будь-яку інформацію про положення споруди та її зміщення в часі.

Огляд попередніх публікацій

Запропонована в цій роботі тема не досить широко описана у закордонних публікаціях. Використання лазерного сканування для розв'язання інженерних задач є одним з напрямків дистанційного зондування та інженерної геодезії, що найбільш бурхливо розвивається останнім часом. Кількість публікацій, що присвячені розв'язанню задач інженерної геодезії щороку збільшується, такими типовими роботами є наприклад [3–6]. У цих роботах, до речі, викладені головні сучасні досягнення в обробці матеріалів наземного лазерного сканування.

Постановка завдання

Метою роботи є дослідження можливостей методу наземного лазерного сканування під час визначення кренів інженерних споруд.

Основний зміст роботи

З технологічного погляду, процес лазерного сканування є простішим порівняно з традиційними геодезичними роботами. Основна частина робіт, отже, переноситься в камеральні умови. Головне завдання, що постає перед інженером, – це виділення безпосередньо споруди з сканерної хмари. Після побудови 3D моделі споруди практично не являє складності визначити крени, та будь-які інші види деформацій. Практично одразу створити тривимірну модель споруди дуже складно і цей процес супроводжується значною кількістю помилок. Тому будь-який об'єкт намагаються розчленити на геометричні примітиви та прості поверхні і шляхом їх комбінації відтворити тривимірну модель

споруди. Процес виділення на сканерній хмарі геометричних об'єктів має назву сегментації. Достатньо повно розглянуті алгоритми сегментації в роботі [4]. У нашому випадку під сегментацією розуміють процес поділу точок на різні множини, що відносяться до різних геометричних об'єктів (прямі, площини, поверхні, ребра та ін.). Різні способи сегментації відрізняються між собою критерієм подібності, який дає змогу віднести точки до різних груп. Виділяють три головні способи сегментації: сегментація за границями; сегментація за поверхнями і сегментація за лініями сканування.

Перший алгоритм має два етапи: виділення границі, що розділяє різні області і присвоєння точок відповідним областям. Оскільки виділення границі ґрунтується на миттєвій зміні властивостей (напрямок нормалі до локальної ділянки поверхні, градієнт, головна кривина, похідні вищого порядку), то такий метод дуже чутливий до місцевих нерівностей об'єкта та випадкових похибок вимірювань.

Сегментація за поверхнями використовує як критерій подібності властивості локальної ділянки поверхні і поступово приєднує до поверхні сусідні точки, які мають подібні властивості. Цей метод є менш чутливим до випадкових похибок вимірювань. Для визначення характеристик локальної ділянки поверхні (напрямок нормалі до локальної ділянки поверхні, градієнт, головна кривина, похідні вищого порядку) використовують робастні методи оцінювання.

В основу третього алгоритму покладено принцип, що лінія сканування на поверхні утворює просторову лінію. Рухаючись поступово вздовж цієї лінії, можна класифікувати точки, що відносяться до різних поверхонь.

Існують також гібридні алгоритми, що об'єднують перераховані вище методи.

Звичайно, потрібно пам'ятати, що до початку сегментації виконано попередню обробку всіх лазерних сканів і видалено шуми.

Сутність запропонованого алгоритму сегментації полягає ось у чому. На першому етапі виконують сегментацію за лініями сканування для визначення точок, що належать одній поверхні. На другому етапі виконують повторну сегментацію за поверхнею, причому вид поверхні задається в інтерактивному режимі.

Для прикладу візьмемо найпростішу форму споруди у вигляді паралелепіпеда з елементами, що відступають від його поверхні рис. 1.

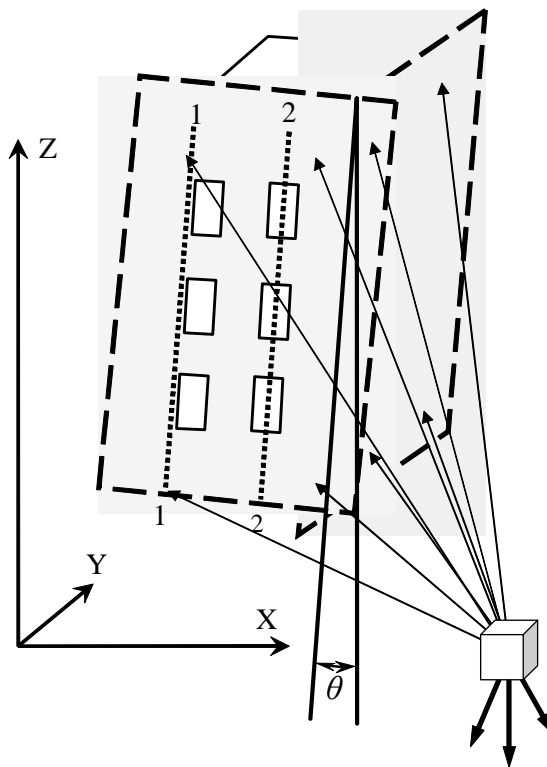


Рис. 1. Принципова схема визначення крену методом наземного лазерного сканування

Якщо розглянути рис. 1, очевидно, що профіль лінії сканування 1-1 буде відрізнятися від профілю лінії 2-2. Графічно цю різницю зображено на рис. 2. Незалежним параметром обрано висоту точки Z , а залежною змінною є проекція відстані R на площину сканування – R_{Γ} . Для реалізації першого етапу сегментації використовуємо алгоритм звичайної крокової регресії. Рівняння запишемо в такому вигляді:

$$R_{\Gamma_i} = a + bZ_i. \quad (1)$$

Алгоритм сегментації послідовно виконує операції:

- Оцінка параметрів регресії в певному околі;
- Приєднання наступної точки до прямої;
- Оцінка параметрів регресії з приєднаною точкою;
- Перевірка відповідності приєднаної точки визначеним параметрам регресії;
- Приєднання наступної точки до прямої.

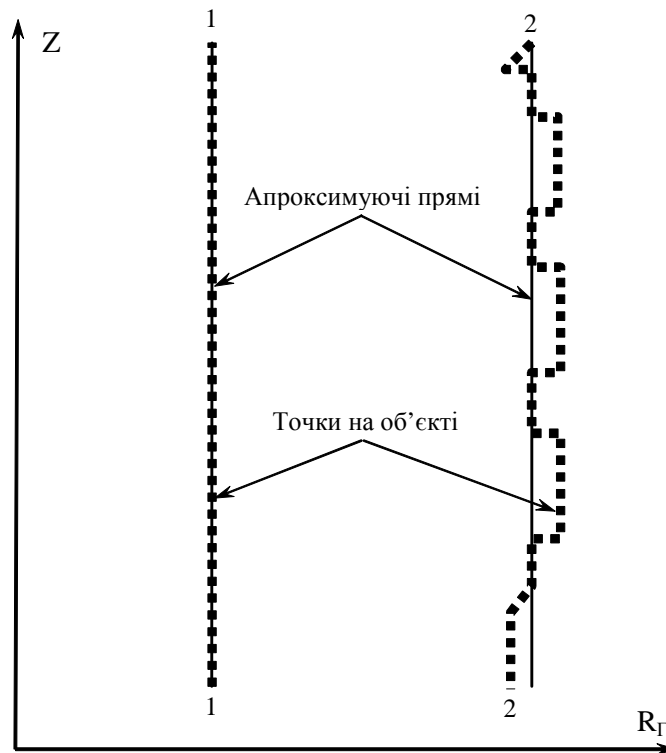


Рис. 2. Виділення площини будівлі з хмари точок шляхом сегментації за лініями сканування

Визначення параметрів рівняння регресії виконують за традиційною схемою МНК. $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{I} = \mathbf{v}$ – модель спостережень.

Коефіцієнти рівняння регресії \mathbf{x} знаходять як:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{I}. \quad (2)$$

Варто пам'ятати, що точність визначення координат точок змінюватиметься залежно від відстані, тому вагові коефіцієнти у ваговій матриці \mathbf{P} для різних точок будуть різними. Ваги точок обчислюють через СКП спостережень. Матриця СКП вимірювання відстаней та кутів \mathbf{M}_S без врахування кореляційних зв'язків має вигляд

$$\mathbf{M}_S = \begin{pmatrix} m_{\alpha}^2 & 0 & 0 \\ 0 & m_{\beta}^2 & 0 \\ 0 & 0 & m_R^2 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Оскільки безпосередньо спостережуваними величинами є горизонтальні та вертикальні кути і відстані, для отримання СКП координат точок, матрицю M_S перетворюють відповідно до правила перетворення коваріацій:

$$M_C = A \cdot M_S \cdot A^T \quad (4)$$

де M_C – матриця СКП координат точки; A – матриця частинних похідних.

Критерієм відповідності оберемо максимальне відхилення точки від прямої після апроксимації v_{\max}^{\min} . Довірчий інтервал для перевірки відповідності приєднаної точки також змінюється залежно від відстані і кутів нахилу і розраховується за апріорними значеннями похибок, за допомогою коваріаційної матриці M_C .

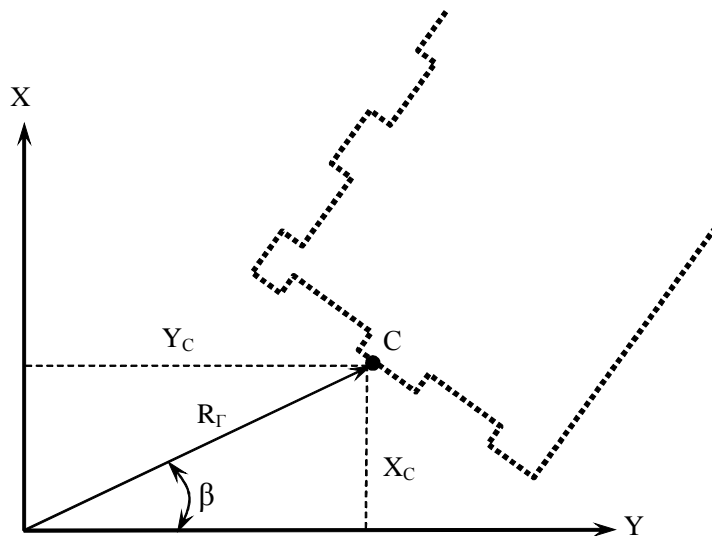


Рис. 3. Горизонтальна проекція відстані R_G

Якщо прийняти СКП визначення положення точки в горизонтальній площині $m_{R_{\max}^{\min}} = \sqrt{m_X^2 + m_Y^2}$, то умова для визначення довірчого інтервалу матиме вигляд

$$v_{\max}^{\min} \geq z_q m_{R_{\max}^{\min}} \quad (5)$$

де z_q – коефіцієнт, що залежить від прийнятого рівня довірчої ймовірності p . Значення СКП m_X, m_Y отримують з виразу (4).

Після сегментації за лініями сканування, за точками, що залишились після сегментації переходимо до другого етапу. На другому етапі виконуємо сегментацію за поверхнею. В якості найпростішої поверхні в нашому випадку обираємо площину. Порядок побудови апроксимуючої площини аналогічний до побудови апроксимуючої прямої. Відмінність полягає, по-перше у критерії відповідності приєднаної точки до площини і по-друге у способі приєднання нових точок до площини. В якості критерію відповідності оберемо відхилення нормалі у приєднаній точці від нормалі у раніше апроксимованій площині.

Алгоритм сегментації послідовно виконує операції:

- Апроксимація площини в певному околі точок;
- Приєднання наступної області до площини;
- Оцінка нормалі в приєднаних точках;

- Перевірка відповідності нормалі приєднаної точки та нормалі визначеної раніше площини;
- Приєднання наступної області точок до площини.

З метою визначення рівняння апроксимуючої площини в нормальній формі, використаємо алгоритм, запропонований в [7]. Рівняння площини в нормальній формі має вигляд

$$AX + BY + CZ + D = 0. \quad (6)$$

Відповідно до [7] сформуємо матрицю \mathbf{P} координат точок локальної ділянки площини та матрицю \mathbf{C} , що містить середні значення координат:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n \end{pmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} \frac{\sum X_n}{n} & \frac{\sum Y_n}{n} & \frac{\sum Z_n}{n} \end{pmatrix}.$$

Обчислимо матрицю \mathbf{M}

$$\mathbf{M} = n\mathbf{C}^T\mathbf{C} - \mathbf{P}^T\mathbf{P}.$$

Для матриці \mathbf{M} обчислюємо \mathbf{E} – вектор, елементами якого є власні значення матриці \mathbf{M} та \mathbf{V} – матриця, що містить нормовані власні вектори, що відповідають власним значенням матриці \mathbf{M} . Для максимального власного значення з \mathbf{E} отримуємо власний вектор \mathbf{N} . Коефіцієнти рівняння площини дорівнюють

$$-\mathbf{N} = (A \ B \ C)^T \quad D = \mathbf{N}\mathbf{C}^T. \quad (7)$$

Процедура розрахунку власних значень матриць та нормованих власних значень векторів, що їм відповідають, досить добре розроблена і є практично у всіх математичних програмних засобах.

Після знаходження за допомогою сегментації всіх площин, які утворюють споруду, визначасмо лінії перетину між площинами. Знайдемо рівняння прямої, як результат перетину двох площин.

У векторній формі рівняння просторової прямої має вигляд $\mathbf{P}(t) = \mathbf{P}_0 + \mathbf{V}t$. У координатній формі рівняння записують як:

$$X(t) = X_0 + lt, \quad Y(t) = Y_0 + mt, \quad Z(t) = Z_0 + nt.$$

Якщо пряма визначається як результат перетину двох площин, які задані $F_1 = [N_1 \ D_1]$ та $F_2 = [N_2 \ D_2]$ то пряма, по якій вони перетинаються, має невідомі вектори \mathbf{P}_0 , \mathbf{V} .

Скористаємось алгоритмом, який розповсюджений в обчислювальній геометрії. Запишемо систему рівнянь двох площин:

$$[p \ 1] \begin{bmatrix} N_1^T & N_2^T \\ D_1 & D_2 \end{bmatrix} = [0 \ 0] \Rightarrow p \begin{bmatrix} N_1^T & N_2^T \end{bmatrix} = [-D_1 \ -D_2].$$

Отримане векторне рівняння є еквівалентним невизначеній системі двох рівнянь з трьома невідомими. Розв'язок системи знаходять, використовуючи множники Лагранжа. Функція Лагранжа має вигляд

$$L(p, \lambda) = \frac{1}{2}(p \cdot p^T) + \lambda \cdot \varphi(p)^T,$$

де λ – вектор множників Лагранжа; $\varphi(p) = p \begin{bmatrix} N_1^T & N_2^T \end{bmatrix} + [D_1 \ D_2]$ – векторна функція зв'язку координат точки p .

Вектор множників Лагранжа отримують як

$$\lambda = [D_1 \quad D_2] \left(\begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1^T & N_2^T \end{bmatrix} \right)^{-1}.$$

Координати точки p знаходять

$$p = -[D_1 \quad D_2] \begin{bmatrix} N_1 \cdot N_1^T & N_1 \cdot N_2^T \\ N_1 \cdot N_2^T & N_2 \cdot N_2^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \end{bmatrix}.$$

Визначимо очікувану точність визначення крену. Якщо рівняння двох площин задані у вигляді

$$\begin{aligned} A_1 X + B_1 Y + C_1 Z + D_1 &= 0 \\ A_2 X + B_2 Y + C_2 Z + D_2 &= 0 \end{aligned}$$

то напрямні косинуси прямої, по якій перетинаються площини визначають за виразами (8).

$$l_1 = B_1 C_2 - B_2 C_1, \quad m_1 = C_1 A_2 - C_2 A_1, \quad n_1 = A_1 B_2 - A_2 B_1. \quad (8)$$

Точність визначення напрямних косинусів прямої можна отримати звичайним переходом до середніх квадратичних похибок.

$$\left. \begin{aligned} m_{l_1}^2 &= C_2^2 m_{B_1}^2 + B_1^2 m_{C_2}^2 + C_1^2 m_{B_2}^2 + B_2^2 m_{C_1}^2, \\ m_{m_1}^2 &= C_2^2 m_{A_1}^2 + A_1^2 m_{C_2}^2 + C_1^2 m_{A_2}^2 + A_2^2 m_{C_1}^2, \\ m_{n_1}^2 &= B_2^2 m_{A_1}^2 + A_1^2 m_{B_2}^2 + B_1^2 m_{A_2}^2 + A_2^2 m_{B_1}^2. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Напрямні косинуси нормалі в точці визначення крену мають значення $l_2 = m_2 = 0, n_2 = 1$, у такому разі кут крену визначають за формулою (10).

$$\text{Cos} \theta = \frac{n_1}{\sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2}}. \quad (10)$$

Значення середньої квадратичної похибки обчислюють за формулою

$$\begin{aligned} m_{\theta}^2 &= \frac{n_1^2 l_1^2}{(l_1^2 + m_1^2 + n_1^2)^3} m_{l_1}^2 + \frac{m_1^2 l_1^2}{(l_1^2 + m_1^2 + n_1^2)^3} m_{m_1}^2 + \\ &+ \left(\frac{1}{\sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2}} + \frac{n_1^4}{(l_1^2 + m_1^2 + n_1^2)^3} \right) m_{n_1}^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Використовуючи вирази (9) і (11), можна обчислити очікувану СКП визначення крену. Приймавши розповсюджений в геодезії принцип рівного впливу, можна виконати обернений розрахунок. Відштовхнувшись від граничної помилки визначення крену, величину якої наведено в постановці проблеми, перейти до СКП визначення крену m_{θ} , від неї перейти до СКП визначення коефіцієнтів прямої $m_{l_1}, m_{m_1}, m_{n_1}$, а від них до СКП визначення коефіцієнтів площин $m_{A_1}^2, m_{A_2}^2, m_{B_1}^2, m_{B_2}^2, m_{C_1}^2, m_{C_2}^2$, за якими визначають лінію напрямку крену.

Висновки та рекомендації

Запропонований в роботі алгоритм дозволяє розв'язати задачу визначення кренів інженерних споруд методом наземного лазерного сканування. Подальші дослідження необхідно виконати для об'єктів, що мають не лише прямокутну, а і складнішу форму.

Література

1. Левчук Г.П., Новак В.Е., Лебедев Н.Н. Прикладная геодезия. Геодезические работы при изысканиях и строительстве инженерных сооружений / Под. ред. Г.П. Левчука. – М.: Недра, 1983. – 400 с.
2. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений ГОСТ 24846-81. – М.: Госстройиздат, 1982.
3. Ismail Abd El hamid M. Towards an automatic registration for terrestrial laser scanner data. Dissertation. Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig 2007. – 128 p.
4. T. Rabbani Shah. Automatic Reconstruction of Industrial Installations Using Point Clouds and Images. Dissertation. Netherlands Geodetic Commission. Delft, May 2006. – 175 p.
5. Rinske van Gosliga, R. Lindenbergh, N. Pfeifer Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXV. – 6 p.
6. R. Lindenbergh, N. Pfeifer, T. Rabbani. Accuracy analysis of the leica HDS3000 and feasibility of tunnel deformation monitoring. ISPRS WG III/3 Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, the Netherlands, September 12–14, 2005. – 6 p.
7. Никулин Е.А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 560 с.

Визначення кренів інженерних споруд методом наземного лазерного сканування

С. Войтенко, Р. Шульц, М. Білоус

Запропоновано методику визначення крену інженерної споруди методом наземного лазерного сканування. Наведено вирази, за якими можна виконати оцінку точності визначення крену за запропонованою методикою.

Определение кренов инженерных сооружений методом наземного лазерного сканирования

С. Войтенко, Р. Шульц, Н. Белоус

В работе предложена методика определения крена инженерного сооружения методом наземного лазерного сканирования. Приведены выражения, с помощью которых можно выполнить оценку точности определения крена по предложенной методике.

Determination of engineering structures rolls by terrestrial laser scanning

S. Voytenko, R.Schultz, N. Bilous

The method of roll determination of engineering building by terrestrial laser scanning is offered in work. Expressions by which it is possible to execute the accuracy estimation of roll determination on the offered method are resulted.