

В.В. Гніліцький, к.т.н., доц.
О.В. Цірук, аспір.
Житомирський державний технологічний університет

ПРИНЦИП ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ПОБУДОВИ ГЕОМЕТРИЧНОГО ПРОФІЛЮ ПОВЕРХНІ

Розглядається питання побудови геометричного профілю та форми поверхонь, виготовлених з різних матеріалів. Для отримання даних про профіль поверхні пропонується використати триангуляційний метод вимірювання відстані до об'єкта (лазерна триангуляція). Для побудови цифрової моделі форми поверхні запропоновано використати триангуляцію Делоне (триангуляція як спосіб представлення форми поверхні).

Постановка проблеми. Проблема побудови геометричного профілю та форми поверхні виникає у зв'язку з необхідністю знати, як змінюється профіль або форма поверхні після механічної обробки з часом, в задачах автоматизованого контролю за якістю зварних швів, для визначення розмірів та (або) положення об'єкта, вимірювання розмірів канавок, вимірювання розмірів зазору між дверима автомобіля, відстані між дверима та кузовом в автомобілебудуванні та інших задачах машино- та приладобудування.

Аналіз досліджень і публікацій. Процес побудови профілю або форми поверхні зводиться до вимірювання висоти певних точок поверхні або відстані від опорної площини до цих точок поверхні. Аналіз доступних джерел з питань методів вимірювання відстані до об'єкта [1–5] показав, що найбільш перспективними є оптичні методи із застосуванням лазера. Оптичні методи вимірювання поєднують в собі відсутність впливу на об'єкт дослідження, високу швидкість та точність. В геоінформатиці, для побудови цифрової моделі форми поверхні, поширеним методом є побудова триангуляцій по заданій множині двовимірних точок [7]. Серед способів побудови триангуляцій слід виділити триангуляцію Делоне, що відрізняється якістю побудови та задовільною трудомісткістю.

Мета дослідження. Метою даної роботи є розробка методів отримання інформації про геометричну форму поверхні та представлення її у вигляді, зручному для подальшої обробки та аналізу.

Основна частина. Суть методу лазерної триангуляції полягає у визначенні відстані за кутом між випроміненням та відбитим від об'єкта лазерними променями. Схема вимірювання представлена на рис. 1. Випромінювач півпровідникового лазера 1 фокусується об'єктивом 2 на об'єкті (поверхні) 6. Дифузно розсіяне на об'єкті випромінювання збирається об'єктивом 3 на ПЗЗ-лінійці 4. Процесор сигналів 5 розраховує відстань до об'єкта за положенням зображення світлової плями на лінійці 4 та інформації про взаємне положення лазерного випромінювача 1 та ПЗЗ-лінійки 4. На рис. 1 L_{min} позначає мінімальну відстань від датчика до об'єкта, S – діапазон вимірювання відстаней.

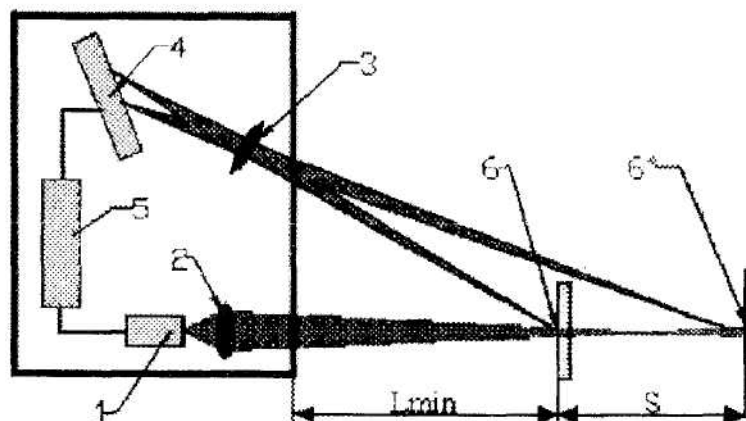


Рис. 1. Схема роботи датчика на основі лазерної триангуляції

Для визначення відстані до об'єкта розглянемо прямокутний трикутник ABC на рис. 2.

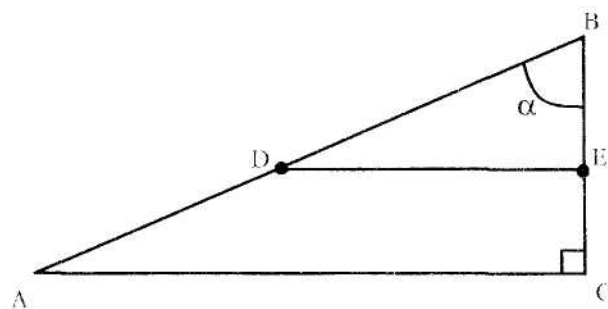


Рис. 2 Визначення відстані до об'єкту

Сторона AB є поверхнею ПЗЗ лінійки, точка D – зображення світлової плями на лінійці, кут α – кут нахилу лінійки до лінії лазерного променя. Оскільки взаємне положення елементів датчика фіксоване, то інформація про положення об'єкта в межах діапазону вимірювання S (див. рис. 1) буде міститись у величині відрізка BE , що утворений кінцем ПЗЗ-лінійки B та точкою E , що є проєкцією точки D на катет BC . Величину відрізка BE знайдемо з виразу (1):

$$BE = DB \cos \alpha \quad (1)$$

Тоді відстань до об'єкта буде визначатись виразом:

$$L = L_1 + BE = L_1 + DB \cos \alpha \quad (2)$$

де L_1 – константа, що визначається конструкцією датчика і включає в себе відстань від B до площини, що проходить через центр об'єктива 2 і перпендикулярної лінії лазерного променя (на рис.1 не позначена), та відстань L_{min} (див. рис. 1).

Однак схема, наведена на рис. 1, має суттєвий недолік. А саме, при умові нерухомості датчика та поверхні в такий спосіб можна виміряти висоту лише однієї точки поверхні. Для сканування профілю вздовж прямої лінії або побудови цифрової моделі форми поверхні необхідно з певним кроком переміщувати датчик або поверхню, що пов'язано з певними технічними труднощами, великим часом вимірювання та додатковими похибками вимірювань. Частково цей недолік можна усунути, розгорнувши лазерний промінь в ліпю (рис. 3). При цьому ПЗЗ-лінійка замінюється на двовимірну ПЗЗ-матрицю. У цьому випадку ПЗЗ-матриця відіграє роль набору ПЗЗ-лінійок. З кожної лінійки отримується інформація про висоту однієї точки з послідовності точок поверхні. Кількість точок вздовж лінії сканування буде визначатись кількістю точок в матриці за шириною сканування, а крок оцифровки форми – будовою датчика і кількістю точок ПЗЗ-матриці за довжиною (тобто кількістю елементів в одній ПЗЗ-лінійці).

В схемі, наведеній на рис. 3, при умові нерухомості датчика та об'єкта з'являється можливість вимірювати не лише висоту певної точки (або відстань до об'єкта), а й отримати профіль поверхні вздовж лінії лазерного променя. Для отримання інформації, необхідної при побудові математичної моделі форми поверхні, необхідно переміщувати датчик або досліджуваний зразок в напрямку, перпендикулярному лінії лазерного променя.

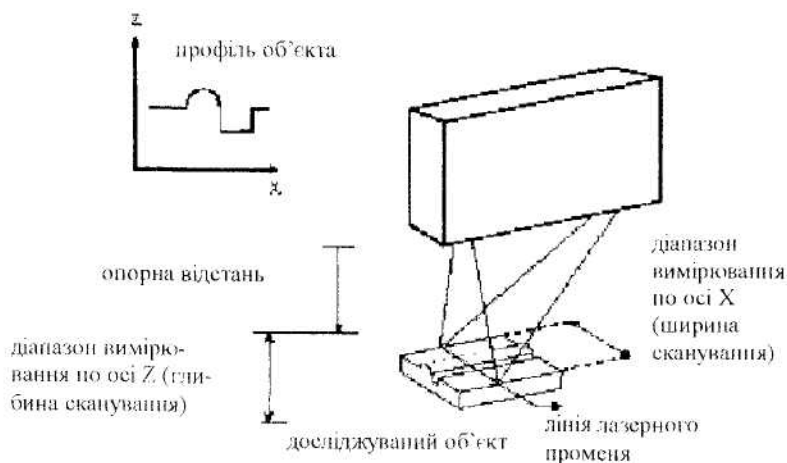


Рис. 3. Схема роботи датчика для сканування профілю

При побудові форми (рельєфу) поверхні дані вимірювань після первинної обробки (фільтрації відосигналу, що надходить з ПЗЗ-матриці) будуть представляти поверхню у вигляді “решітчастої” регулярної сітки. Регулярна сітка – це матриця рівномірно розподілених точок, кожна з яких характеризується своєю висотою. В цій моделі значення висот точок, що знаходяться між вузлами сітки, інтерполюються за значеннями висот в декількох сусідніх точках. Однак, такий спосіб представлення форми поверхні є надлишковим. Форма більшості поверхонь є такою, що містить в собі велику кількість областей, які можна представити у вигляді частини площини з постійним нахилом. Такі області доречно окреслювати простими геометричними фігурами, а точки, що попадають всередину таких областей, відкидати. Таким чином, можна зменшити кількість даних, необхідних для задовільного опису заданої поверхні. Після “відсіювання” зайвих точок початкової регулярної сітки отримуємо представлення поверхні у вигляді нерегулярної сітки.

В геоінформатиці, для представлення форми поверхні за висотними відмітками використовують триангуляцію. Триангуляція – це одна з форм представлення поверхні за нерегулярно заданою системою відліків. Утворена сукупністю точок з x , y , z координатами та набором ребер, що з'єднують ці точки в трикутники, така модель часто використовує меншу кількість точок, ніж інші моделі. Це пояснюється тим, що вихідні точки звичайно вказуються в оптимальних місцях (піках, западинах), що дає можливість “куски” поверхні, що не змінюється, представляти одним-двома трикутниками, а не розбивати її на сукупність однакових малих частин (як у випадку з регулярною сіткою). Приклад триангуляції, що описує ландшафт деякого гірського масиву, представлений на рис. 4. Оскільки задача опису поверхні, що стоїть перед нами, практично не відрізняється від задач геоінформатики, скористаємось набірками в цій області.

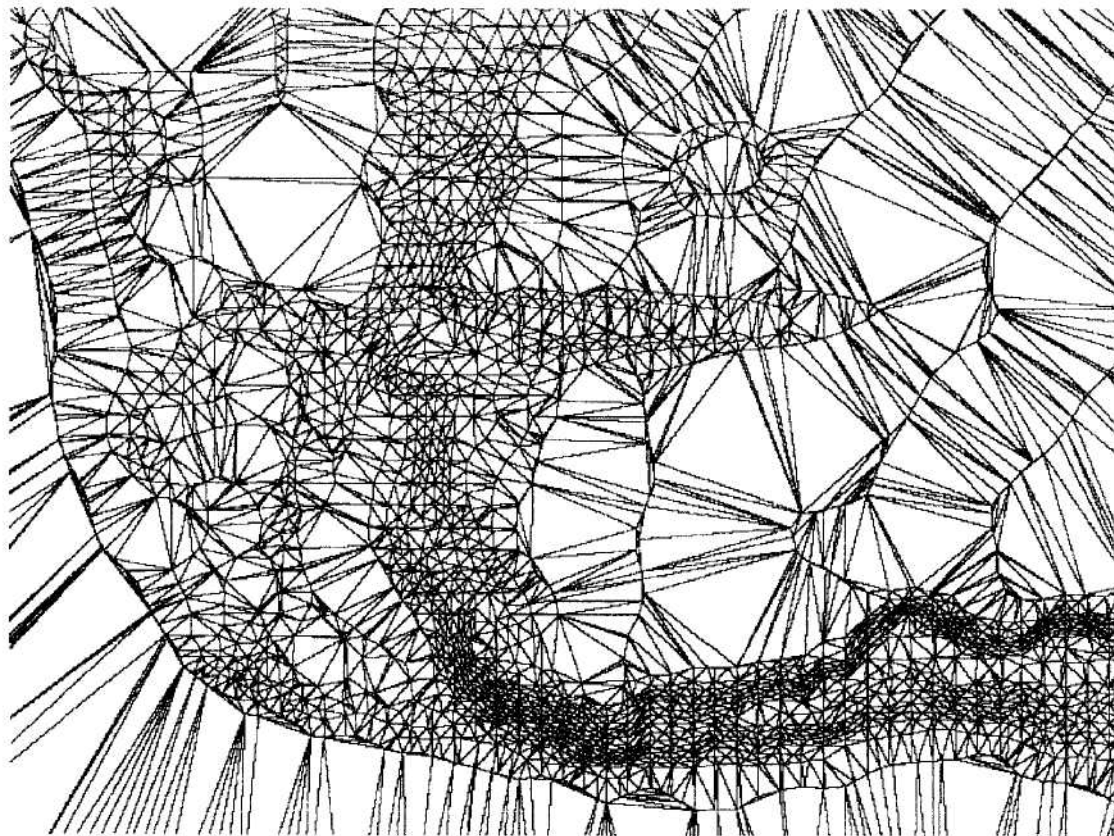


Рис. 4. Приклад триангуляції гірського масиву

Задача побудови триангуляції за початковим набором точок є неоднозначною, тому виникає питання, яка з двох різних триангуляцій краща.

Визначення. Триангуляція називається оптимальною, якщо сума довжин всіх ребер мінімальна серед всіх можливих триангуляцій, побудованих на однакових початкових точках.

Для більшості реальних задач існуючі алгоритми побудови оптимальної триангуляції не можуть бути застосовані через надто велику трудомісткість. При необхідності на практиці використовують наближені алгоритми. Одним з перших було запропоновано наступний алгоритм побудови триангуляції.

Жадібний алгоритм побудови триангуляції.

Крок 1. Генерується список всіх можливих відрізків, що з'єднують пари початкових точок. Список сортується за довжинами відрізків.

Крок 2. Починаючи з найкоротшого, послідовно виконується вставка відрізків в триангуляцію. Якщо відрізок не перетинається з раніше вставленими, то він вставляється, інакше він відкидається.

Кінець алгоритму.

Слід зазначити, що коли всі можливі відрізки мають різну довжину, то результат роботи алгоритму однозначний, інакше він залежить від порядку вставки відрізків однакової довжини.

Жадібний алгоритм на практиці також фактично не використовується через його велику трудомісткість. Крім оптимальної та жадібної триангуляції, також відома триангуляція Делоне. Триангуляція Делоне не є оптимальною в розумінні наведеного вище визначення, але має ряд практично важливих властивостей.

Триангуляція Делоне – це розбиття нерегулярної множини опорних точок на таку сітку трикутників, яка задовольняла б сформульованій ще в 30-ті роки теоремі Делоне про пусту кулю. Стосовно двовимірного простору вона формулюється наступним чином: система взаємозв'язаних трикутників, що не перекриваються, має найменший периметр, якщо жодна з вершин не попадає всередину ні одного з кіл, описаних навкруг утворених трикутників (рис. 5).

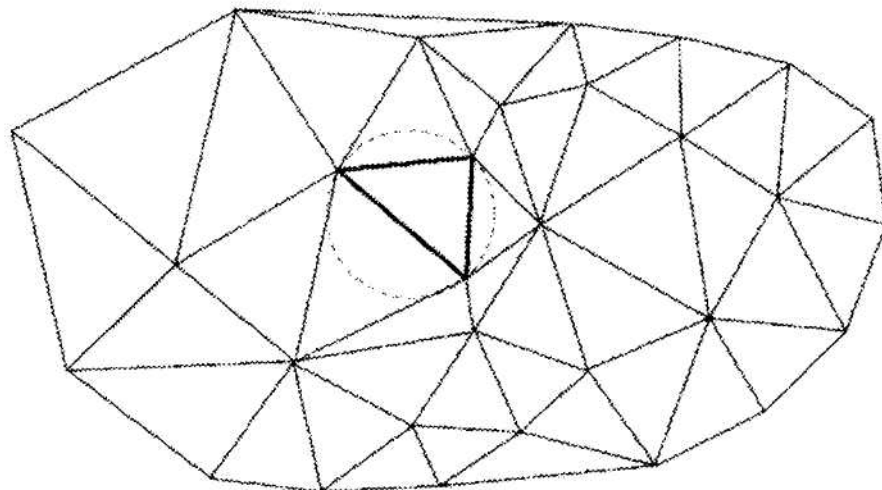


Рис. 5. Триангуляція Делоне

Це означає, що утворені при такій триангуляції трикутники максимально наближаються до рівносторонніх, а кожна зі сторін утворених трикутників видна з протилежної вершини під максимальним кутом з усіх можливих точок відповідної напівплощини. Це саме та триангуляція, по ребрах якої звичайно виконується лінійна інтерполяція для побудови ізоліній.

Таким чином, триангуляція дає можливість задовільного представлення форми поверхні з мінімальною кількістю метрологічної інформації. Що дозволяє прискорити подальшу обробку даних про рельєф з метою отримання його параметрів та іншої інформації в залежності від поставленої задачі.

Розглянемо основні алгоритми побудови триангуляції Делоне [11].

Базовий алгоритм. Цей алгоритм – класичний, часто використовується для побудови триангуляції Делоне (іноді його називають декрементним). Алгоритм містить наступні операції:

- вибір довільної початкової точки;
- пошук другої найближчої точки, відрізок, що з'єднує точки, є початковою базою для подальшої побудови;

- пошук в лівій напівплощині від базового відрізка точки, з якої базовий відрізок видний під максимальним кутом (якщо в лівій напівплощині нема точок, спроба повторюється в правій напівплощині);
- в подальшому за базові відрізки приймаються сторони трикутників, що не мають спряжених трикутників, пошук необхідних вершин завжди ведеться в лівій напівплощині відносно базового відрізка;
- процес продовжується до тих пір, поки вершинами трикутників не будуть закріплені всі точки початкової множини.

Слабкості алгоритму:

- алгоритм постійно використовує обчислення тригонометричних функцій, що різко уповільнює процес побудови;
- при дослідженні взаємовідносин базового відрізка та точок вишикають дуже малі (та зникаючі малі) кути і при використанні тригонометричних функцій постійно виникає небезпека зникання порядку та ділення на 0 у зв'язку з обмеженою точністю представлення даних в комп'ютері, ця ситуація вимагає постійної додаткової обробки.

Інкрементний алгоритм. Вважається значно ефективнішим за попередній. Схема алгоритму така:

- на початку будується довільна триангуляція на заданій множині точок.
- Отримана триангуляція перетворюється в триангуляцію Делоне. Для цього:
- послідовно для кожної точки вибирається гніздо трикутників, що мають цю точку як спільну вершину;
 - для кожного з трикутників гнізда (послідовним обходом навколо центральної вершини, скажімо, за стрілкою годинника) знаходиться спряжений трикутник, розташований навпроти цієї центральної вершини;
 - кожна отримана пара трикутників досліджується на відповідність вимогам теореми Делоне і, якщо відповідності нема, виконується фліп спільної сторони трикутників з отриманням двох нових трикутників замість старих.

Фліпом називається операція перекидки діагоналі опуклого чотирикутника, тобто якщо у чотирикутника $ABDC$ (див. рис.6), розбитого діагоналлю BC на два трикутника, видалити цю діагональ і замінити її на AD , то отримаємо другу триангуляцію чотирикутника.

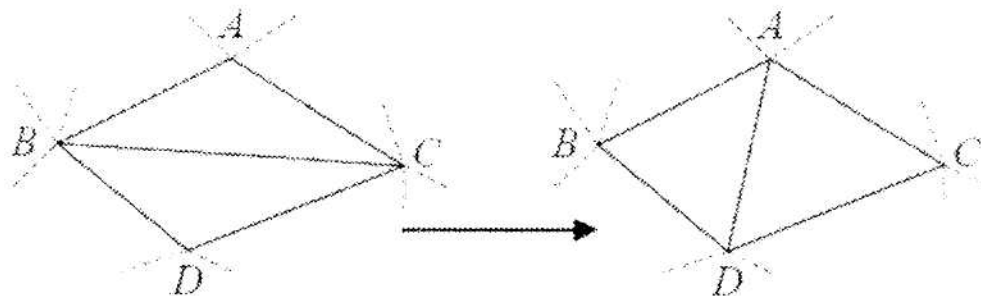


Рис. 6. Приклад виконання фліпу чотирикутника

Обидва наведених алгоритми використовують визначення триангуляції Делоне як вторинну ознаку триангуляції. Можна побудувати триангуляцію Делоне, використовуючи теорему про пуста кулю як основний, первинний принцип побудови трикутників. Алгоритм виглядає так:

- на початку будується довільна триангуляція на заданій множині точок, тобто утворюються комбінації з трьох точок;
- для кожної комбінації знаходиться описане коло і координати його центра;
- якщо всередині кола поточної комбінації не знаходиться жодної точки з тих, що залишились, то ця комбінація є трикутником – частиною триангуляції Делоне.

До переваг цього алгоритму можна віднести:

- відсутність використання тригонометричних функцій;
- безпосередня побудова триангуляції Делоне;
- простота всіх обчислень та перетворень;

Напрямки подальшої роботи.

Базовим напрямком подальшої роботи є розробка алгоритму "відсіювання" зайвих точок регулярної сітки з метою зменшення кількості даних та розробка алгоритмів розпізнавання елементів форми поверхні, представлені у вигляді триангуляції. Розпізнавання елементів форми поверхні дасть можливість спростити аналіз отриманої форми поверхні в наукових дослідженнях та будувати інтелектуальні системи обробки поверхонь з заданою якістю.

ЛІТЕРАТУРА:

1. <http://www.sapr.ru/Temp/1699/index.htm> – ресурс мережі Internet, присвячений питанням розробки та побудови САПР та АСУТП.
2. http://www.ugatu.ac.ru/ugatu.new/npp/nich/optel/pic_rus.html – ресурс мережі Internet, присвячений розробкам систем тривимірного лазерного вимірювання фірми "ОПТЕЛ".
3. <http://www.css-mps.ru/zdm/dm-sty.css> on-line версія журналу "Железные дороги мира"
4. Венедиктов А.З., Демкин В.Н., Доков Д.С. Измерение параметров колесных пар подвижного состава в движении. ЖДМ 2003-09. (Интернет – адреса сайту, з якого було взято статтю: <http://www.css-mps.ru/zdm/dm-sty.css>)
5. http://www.sensorika.com/Sensoika_RUS/prod_mel/m2d_1.htm – ресурс мережі Internet, присвячений датчикам для вимірювання відстаней, датчикам положення та засобам вимірювання профілю фірми MEL.
6. http://algotlist_manual.ru – ресурс мережі Internet, присвячений математичним алгоритмам.
7. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и её применение. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2002. – 128 с.
8. Скворцов А.В. Обзор алгоритмов построения триангуляции Делоне // Геоинформатика: Теория и практика. Выпуск 1. – Томск: Изд-во Томск. ун-та. 1997. – С. 41–64.
9. Скворцов А.В., Костюк Ю.Л. Эффективные алгоритмы построения триангуляции Делоне // Геоинформатика: Теория и практика. Выпуск 2. – Томск: Изд-во Томск. ун-та. 1998. – С. 22–47.
10. Костюк Ю.Л., Фукс А.Л. Предварительная обработка исходных данных для построения цифровой модели рельефа местности // Вестник ТГУ. – 2003. – № 280. – С. 286–289.
11. <http://www.urgea.ru> – сайт Уральської гірничо-геологічної академії.
12. Скворцов А.В. Алгоритмы анализа триангуляционной модели поверхности // Вестник ТГУ. – 2003. – № 280. – С. 289–293.

ГНІЛЦЬКИЙ Віталій Васильович – кандидат технічних наук, доцент, завідує кафедрою автоматизованого управління в технічних системах (АУТС) Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– теорія інформації та методи її обробки.

ЦІРУК Олександр Володимирович – аспірант кафедри АУТС Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– методи отримання та обробки інформації для визначення мікро- та макропараметрів рельєфу поверхні;

– комп'ютерне моделювання.

E-mail: ts_alex@ukr.net

Подано 01.11.2004