

# Про один підхід до обчислення проєктивної довжини горизонтальних печер як задачі цифрової обробки зображень

Андрій Верченко, Микита Козлов

Кафедра моделювання складних систем  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
[An.Verchenko@gmail.com](mailto:An.Verchenko@gmail.com), [Nikita.Kozlov@gmail.com](mailto:Nikita.Kozlov@gmail.com)

## Анотація

Розглянуто проблему лінеаризації та обчислення ряду морфологічних характеристик растрових зображень печер як задачі цифрової обробки. При цьому проводяться попередня фільтрація растру, бінаризація, виділення скелетної лінії, постобробка скелету та подальша його векторизація. На основі отриманого результату обчислюється така важлива характеристика, як сумарна проєктивна довжина печери. Алгоритм реалізовано у вигляді програмного комплексу.

## 1. Вступ

В Україні знаходяться цілий ряд лабіринтових гіпсових печер-гігантів. Найдовша з них – Оптимістична є третьою в світі по довжині (понад 230 км) і першою серед гіпсових печер [1]. Окрім Оптимістичної, ще дев'ять печер в Україні мають довжину понад 10 км [2]. Таким чином, актуальним є питання розробки методики обчислення загальної довжини всіх ходів як для печер України, так і в цілому для інших печер-гігантів. Враховуючи, що переважна більшість печер-лабіринтів є горизонтальними, в якості «паспорта» печери розглядається лише її план (проекція всіх ходів на горизонтальну площину). В такому випадку сумарну довжину можна обчислити як суму довжини ходів на плані. Таку характеристику називають проєктивною довжиною [3] і в більшості випадків саме цю величину ототожнюють з сумарною довжиною для горизонтальних печер. Якщо ж печера має суттєві вертикальні ділянки, при підрахунку сумарної довжини їх необхідно враховувати додатково.

Щоб порахувати величину проєктивної довжини, ходи печери апроксимуються полілініями (як правило, це деяка середня лінія, рівновіддалена від стінок печери). Часто спелеологи намагаються інтуїтивно провести таку лінію безпосередньо при створенні карти печери. Тоді проєктивна довжина дорівнюватиме сумі довжин всіх замірів у печері. Проте, часто процес топозйомки ускладнений рядом факторів (складні природні умови, наявність колон та розгалужень, велика кількість тупикових ходів). Ці фактори також впливають і без того суб'єктивний процес побудови лінії, рівновіддаленої від стінок печери.

Отже, до вирішення даної проблеми потрібно підходити як до задачі цифрової обробки зображень, беручи за основу вже побудований план печери з нанесеними на нього абрисами стінок печери. Такий підхід звільняє спелеологів від необхідності руху по «уявній» середній лінії, а процес підрахунку проєктивної довжини повністю відділяється

від обробки нитки ходу. На таку методику підрахунку вказується, наприклад, в [4].

## 2. Опис алгоритму

Пропонується наступний алгоритм побудови лінеаризованого представлення ходів печери та обчислення проєктивної довжини.

На вхід алгоритму подається растрове зображення плану печери (Рис.1).

### Алгоритм.

*Початок.* На вхід алгоритму подається растрове зображення плану печери та масштабний коефіцієнт.

#### *I. Етап попередньої обробки*

Попередня фільтрація шумів.  
Бінаризація.

#### *II. Скелетизація*

Побудова растрової скелетної лінії.  
Векторизація скелету.  
Постобробка скелету.

#### *III. Обчислення морфологічних характеристик печери*

Обчислення проєктивної довжини.  
Побудова гістограмних діаграм направленості ходів.

*IV. Експорт отриманих результатів*  
*Кінець.*

Розглянемо детально етапи запропонованого алгоритму. Для фільтрації окремих пікселів на етапі попередньої обробки застосовується ряд фільтрів, реалізованих у вигляді клітинних автоматів [5]. Далі проводиться адаптивна бінаризація растрового зображення, реалізована на основі модифікації алгоритму Савуоли [6]. На етапі скелетизації реалізовано модифікацію алгоритма Робертса [7], який також можна представити як двовимірний клітинний автомат [5].

Растрову скелетну лінію (див. Рис.2) необхідно додатково обробити, продовживши кінцеві точки скелету назовні. Це пов'язано зі специфікою реалізації метода скелетизації як одного із різновидностей методу спалювання границі [7]. При цьому кінцева точка не доходить до краю об'єкта на довжину радіуса кола, що дотикається до границі зображення і має центр в цій кінцевій точці (див. Рис.2).

Далі растрове представлення скелету перетворюється у векторне, що складається з набору з'єднаних між собою відрізків. При цьому використовується правило, щоб всі внутрішні точки скелету не відхилялися від даного відрізка на задану порогову величину.

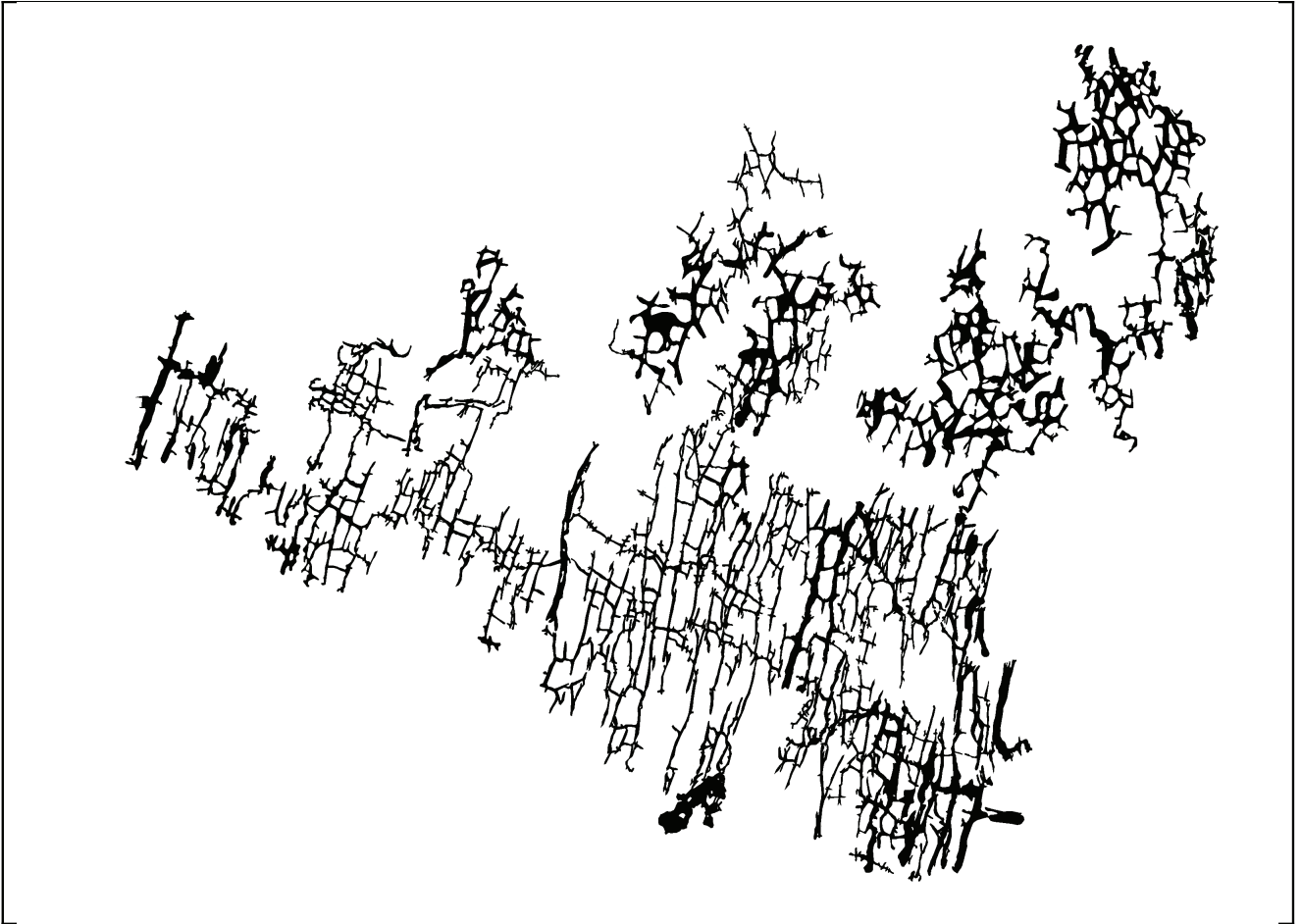


Рисунок 1: Растровий план складної лабіринтової печери (печера Млинки, Зах.Україна).

Далі відрізки, що містять кінцеві точки скелету, продовжуються назовні до перетину з контуром об'єкту. При реалізації цього етапу використовувалась модифікація алгоритму Брезенхейма [8] для побудови множини растрових точок, що належать даному відрізку. Остаточна векторизація набору отриманих пікселів [9] призводить до побудови лінеаризованого представлення ходів печери. На основі даного представлення обчислюється проективна довжина як сума довжин всіх сегментів представлення з врахуванням масштабного коефіцієнта (кількість метрів у одному пікселі растра). Отриманий на виході алгоритму набір послідовно зв'язаних між собою відрізків можна використовувати також для побудови діаграми направленості, коли для кожного азимуту сумується довжина ходів, направлених у даному напрямку [3, 4].

### 3. Обчислювальний експеримент

Запропонований алгоритм було реалізовано у вигляді програмного комплексу, що включає методи роботи з растровими зображеннями, діалоги введення масштабного коефіцієнта та експорт результату у форматі *pdf*.

При розробці використано мову програмування C++ та мультиплатформенну бібліотеку Qt.

Планується розповсюдження розробленого програмного продукту в мережі Інтернет для вільного використання та розвитку всіма зацікавленими особами.

Було проведено тестування програмного комплексу на ряді реальних прикладів. На Рис.2 приведено план вапнякової печери Карані (Крим, плато Карабі); на Рис.1, 3– гіпсова печера Млинки (Чортківський район Тернопільської області).

Заявлена сумарна довжина по приведеній частині Млинків складає 27632.3 м, отримана програмно – 27046.4 м. Тобто ми отримали нев'язку між даними величинами в 2.1% (причому в сторону зменшення сумарної довжини).

Адекватність запропонованої методології обговорювалася з співробітниками Українського інституту спелеології та карстології (УІСК), Крим, м. Сімферополь.

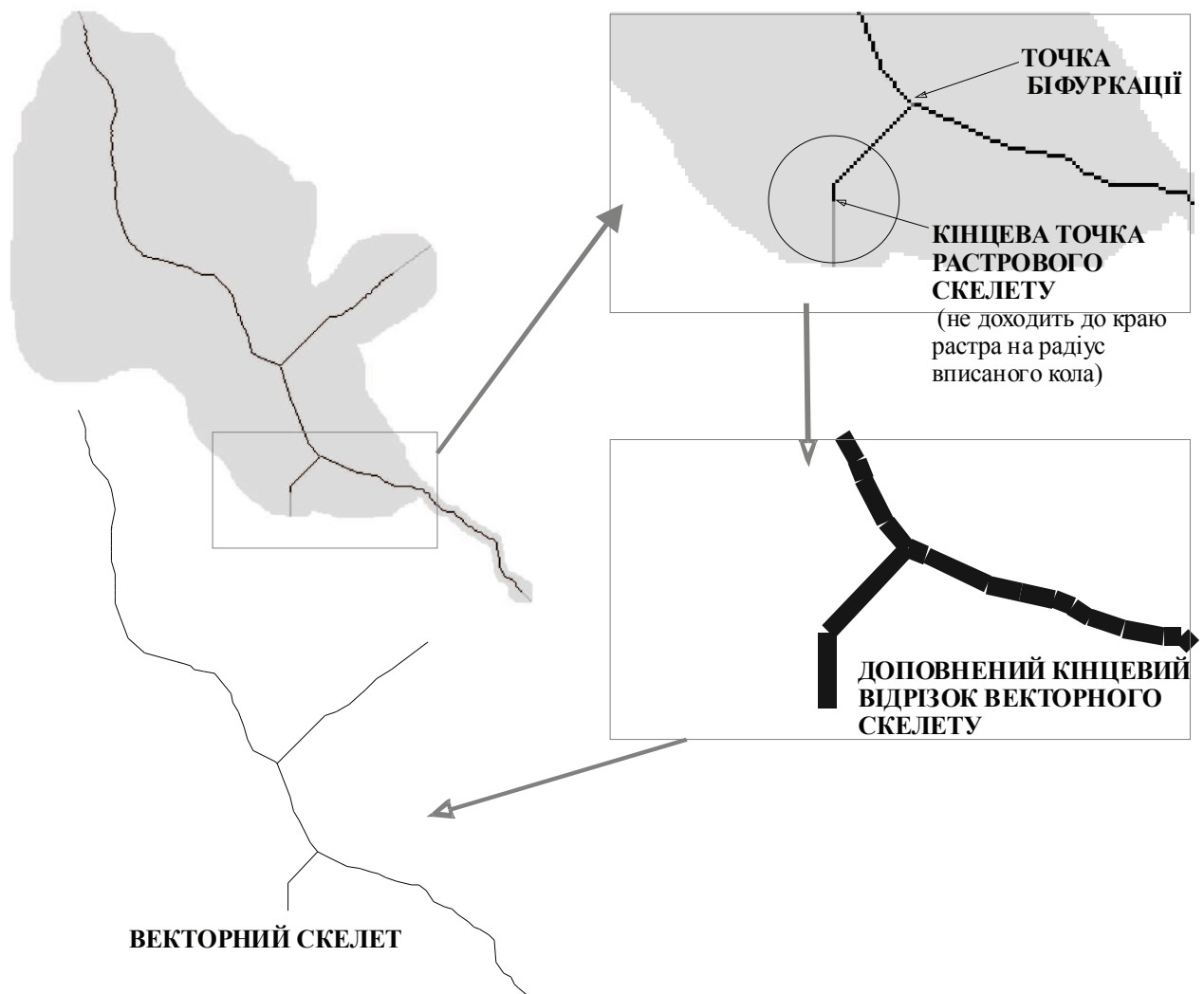


Рисунок 2: Основні етапи цифрової обробки растрового плану.

#### 4. Висновки

Представлено методику для підрахунку сумарної проективної довжини на основі лінеаризації ходів печери. При цьому використовується комбінація алгоритмів цифрової обробки растрового зображення плану печери. Розроблена програма буде корисна для спелеоколективів, що систематично досліджують великі спелеологічні об'єкти як на території України, так і за її межами.

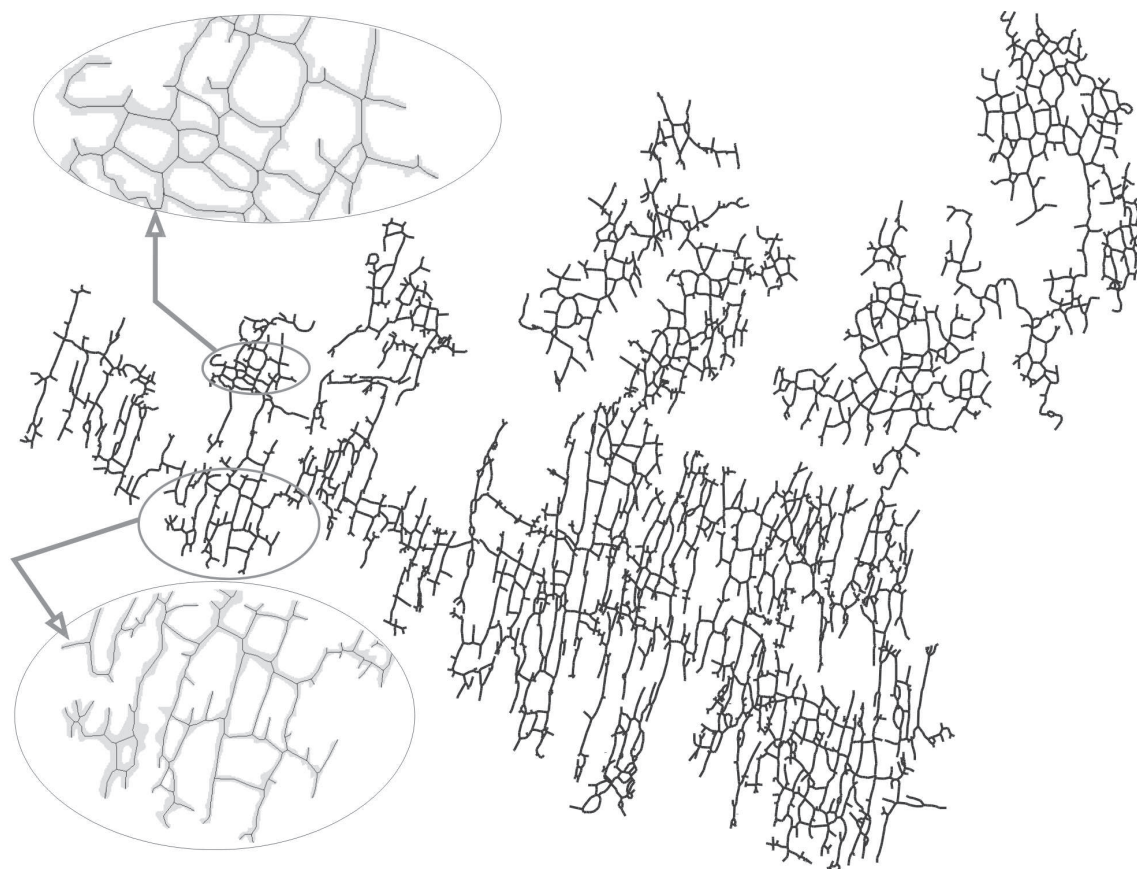


Рисунок 3: Результат роботи алгоритму у випадку складної лабіринтової печери (печера Млинки, Тернопільська обл.).

## 5. Література

- [1] WORLDS LONGEST CAVES.–  
<http://www.caverbob.com/wlong.htm>
- [2] Кадастр печер України.–  
<http://www.institute.speleoukraine.net>
- [3] Дублянський, В.Н., и Илюхин, В.В., *Путешествия под землей*, ФиС, Москва, 1982.
- [4] Зимельс, Ю.Л., *Пещера Озерная. Серия "Кадастр пещер Тернопольщины"*, Астон, Тернополь, 2009.
- [5] Козлов, М.В., "Алгоритми та структури даних для ефективної морфологічної обробки зображень", *УкрОбраз'2008*, –С. 177-180.
- [6] Sauvola, J., and Pietikainen, M., "Adaptive document image binarization", *Pattern Recognition*, 33(2), 2000, pp.225-236.
- [7] Lam, L., Lee, S.-W., and Suen, C.Y., "Thinning methodologies: a comprehensive survey", *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell*, PAMI(14), No.9, 1992, pp.869-885.
- [8] Bresenham, J.E., "Algorithm for computer control of a digital plotter", *IBM Systems Journal*, 4(1), 1965, pp.25-30.
- [9] Верченко, А.П., та Попов, В.В., "Про один ефективний алгоритм векторизації растрового бінарного зображення", *Вісник КУ. Серія фіз.-мат. науки*, №4, 2005, С.215–219.