

# Використання перетворень Хафа для визначення геометричних параметрів профілю різьби

Роман Воробель, Наталія Опыр, Олена Берегуляк

Відділ обчислювальних методів і систем перетворення інформації  
Фізико-механічного інституту НАН України, м. Львів  
vorobel@ah.ipm.lviv.ua, опыр@ipm.lviv.ua

## Abstract

**Roman Vorobel, Natalia Opyr, Olena Berehulyak. Application of the Hough transform for determination of the thread geometric parameters.** The use of Hough transform for determination of the thread geometric parameters is considered. The survey of methods for parameters determination of exterior thread of oil and gas assortment pipes on the base of grayscale image gained by shadow method was held. Approaches to the thread angel, step and tooth height definition on each turn of thread are described. Methods of precision increasing of thread parameters determination are examined.

## 1. Вступ

Задача контролю зношення різьб труб нафтового сортаменту є актуальною, оскільки приблизно 50% аварій відбувається внаслідок виходу з ладу різьбових з'єднань. Контроль експлуатаційних характеристик різьбового з'єднання є одним зі способів запобігання аваріям і своєчасного виявлення дефектності. Діапазон методів перевірки різьб дуже широкий – від лазерних до різного роду механічних вимірювальних приладів [1-4]. Найбільш поширені оптико-електронні методи, що використовують зображення профілю різьби, отриманого тінювим методом. За допомогою оптикоелектронної системи інформація про об'єкт формується у вигляді зображення, яке представлено в пам'яті комп'ютера масивом рівнів сірого його елементів. Реальна оптична система створює зображення предмету зі спотвореннями. Використовуючи відповідне програмне забезпечення, яке враховує спосіб отримання інформації, вдається компенсувати спотворення, відкалібрувати систему, автоматизувати процес вимірювання. При цьому важливо, щоб спотворення зображення були мінімальні, бо вимірювання геометричних параметрів проводиться за бінаризованим зображенням. Тому далі розглянемо основні підходи до визначення параметрів зовнішньої різьби труб за її

тінювим зображенням.

## 2. Визначення геометричних параметрів профілю різьби

Використовуючи тінювий метод профіль різьби представляється у вигляді багатоградаційного зображення (рис. 1).

Згідно зі стандартами [5] регламентуються такі параметри профілю трубної різьби: крок різьби, конусність, висота гострокутного профілю, висота профілю різьби, робоча висота профілю, висота зрізу вершини, радіус заокруглення, кут нахилу. Оцінку цих параметрів будемо проводити на основі контуру профілю різьби. Проблеми точності визначення контура в даній роботі не розглядаються. Тому припускаємо, що контур отримано без спотворень і він представлений однозв'язною лінією на бінарному зображенні. Сторони зубців на контурі можемо розглядати як куски прямих ліній. Координати вершин профілю різьби на зображенні дають можливість визначити деякі геометричні параметри ("теоретичний" кут різьби, крок, висоту зубця і інші на кожному витку). Для виявлення сторін зубців (їх прямолінійних ділянок) використано перетворення Хафа. Суть методу полягає у знаходженні параметрів прямих, які утворюють кут [6]. В цілому перетворення Хафа дозволяє розпізнавати геометричні предикати об'єктів різної форми. Взявши його за основу розглянемо далі виділення ліній, як базових елементів предикатів об'єктів. Розв'язавши задачу виділення граней профілю різьби (відрізків ліній) для кожного її витка перейдемо до визначення кутів та обчислення параметрів різьби.

### 2.1. Виділення ліній – сторін кутів

Концепція перетворення Хафа полягає у визначенні матриці відповідності між просторами зображення і параметрів [7]. Стандартне перетворення Хафа застосовують до бінарних зображень і безпосередньо реалізують його шляхом знаходження прямих, які

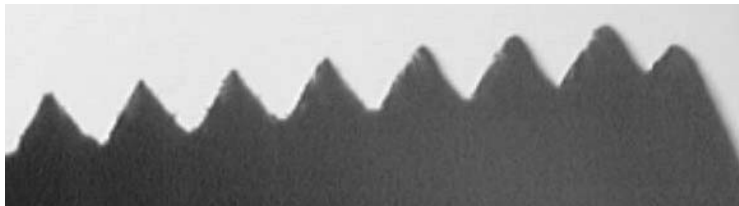


Рис.1. Вхідне зображення профілю різьби.

проходять через велику кількість точок інтересу. Нехай сімейство прямих на площині задане параметричним рівнянням

$$h(\rho, \theta, x, y) = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta - \rho \quad (1)$$

де  $h$  – деяка функція;  $(x, y)$  – множина параметрів простору;  $(\rho, \theta)$  – множина параметрів сімейства прямих ( $\rho$  – довжина перпендикуляра, опущеного на пряму з початку координат;  $\theta$  – кут між перпендикуляром до прямої та віссю  $X$ ).

У перетворенні Хафа обчислюється матриця акумуляторів  $S$  у просторі параметрів  $(\rho, \theta)$ . Введемо спосіб обчислення проходження прямої через комірку  $S(\rho, \theta)$  як

$$r(x, y_i, \rho, \theta) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } S(\rho, \theta) \cap \{A : h(X_i, A) = 0\} \text{ не порожнє,} \\ 0 & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (2)$$

В цілому перетворення Хафа можна записати так

$$H(S(\rho, \theta)) = \sum r(x, y, \rho, \theta). \quad (3)$$

Кожній комірці фазового простору відповідає акумулятор з певною кількістю точок інтересу на зображенні. Кількісний аналіз акумуляторів дозволяє знайти на зображенні прямі, на яких знаходиться найбільше точок інтересу. Значення параметрів

$(\rho_i, \theta_i)$ , в яких функція  $H(S(\rho, \theta))$  досягає локальних максимумів, є параметрами шуканих прямих ( $i = 1, n$ , де  $n$  – кількість прямих).

## 2.2. Визначення величини кута

Знаючи деяку апріорну оцінку щодо можливого розташування прямих на зображенні, вибирають необхідні пари параметрів двох прямих  $(\rho_1, \theta_1)$  і  $(\rho_2, \theta_2)$  та визначають точку їх перетину – координати вершини кута  $(x_0, y_0)$  і кут між ними –  $\varphi$  (рис.2) за виразами

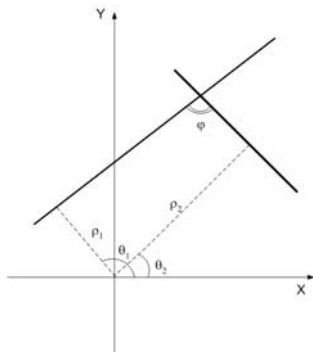


Рис.2. Визначення кута через параметричне представлення прямих.

$$x_0 = \frac{(\rho_1 \times \sin(\theta_2) - \rho_2 \times \sin(\theta_1))}{\cos \theta_1 \times \sin \theta_2 - \cos \theta_2 \times \sin \theta_1}, \quad (4)$$

$$y_0 = \frac{\rho_1 \times \cos(\theta_2) - \rho_2 \times \cos(\theta_1)}{\cos(\theta_2) \times \sin(\theta_1) - \cos(\theta_1) \times \sin(\theta_2)}, \quad (5)$$

$$\varphi = 180^\circ - |\theta_2 - \theta_1|. \quad (6)$$

## 2.3. Обчислення параметрів різьби

Використаємо вище наведений апарат для знаходження геометричних параметрів профілю різьби. Оскільки запропонований математичний апарат застосовується до бінарних зображень, то вхідні багатоградаційні зображення необхідно попередньо обробити, а саме, виділити краї одним з відомих градієнтних операторів та біналізувати його. Як приклад застосуємо до зображення, що на рис.1, оператор виділення країв Канні [8] з середньоквадратичним відхиленням  $\sigma = 3$  та порогоми бінаризації  $R_1 = 0,01 \times I_{\max}$ ,  $R_2 = 0,06 \times I_{\max}$ , де  $I_{\max}$  – максимальне значення рівня сірого на зображенні. Результат дії цього оператора представляється бінарним зображенням країв, які відображають контур профілю різьби. На рис.4 ці краї виділені чорним кольором і нанесені поверх сірого зображення профілю різьби.

Застосовуючи перетворення Хафа до бінарного зображення контура виділених країв отримемо розподіл величин акумуляторів, обчислених за виразами (2)-(3) (рис.3). Кількісно значення перетворення Хафа  $H(S(\rho, \theta))$  відображено відповідним рівнем сірого елементів зображення. Чим більше значення  $H$ , тим яскравішою є відповідна точка на зображенні. На рис. 3 виділяються яскравіші точки, що відповідають значенням параметрів  $\rho_i$  і  $\theta_i$ , в яких функція  $H(S(\rho, \theta))$  досягає локальних максимумів. Визначаючи координати локальних максимумів знаходимо параметри прямих, рівняння яких описують сторони кутів профілю різьби стосовно параметрів, то їх визначають відносно центра зображення профілю різьби. Для кожного зубця обчислюємо його геометричні параметри.

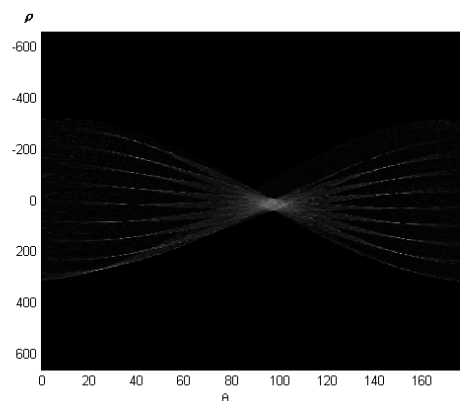


Рис.3. Вигляд функції  $H(S(\rho, \theta))$  для профілю різьби.

Застосовуючи градієнтні оператори до багатоградаційного зображення в околі вершин кутів на бісектрисах кутів визначаємо координати вершин

$(Y_{\max}^k, X_{\max}^k)$  і впадин  $(Y_{\min}^k, X_{\min}^k)$  для  $k$ -го зубця, радіуси їх заокруглення, крок різби та висоту профілю на кожному витку. Висоту профілю на  $k$ -му витку визначаємо за виразом  $h_k = Y_{\max}^k - Y_{\min}^k$ , а крок різби як  $P_k = X_{\min}^k - X_{\max}^k$ .

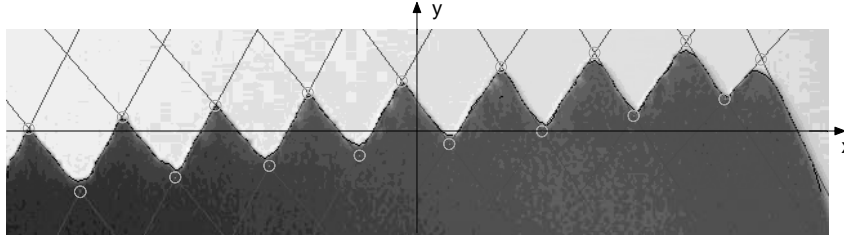


Рис.4 Профіль різби з нанесеними прямими, параметри яких обчислені за запропонованою методикою.

### 3. Підвищення точності визначення параметрів різби

Перетворення Хафа дозволяє розпізнати геометричні предикати об'єктів, однак має ряд недоліків, через що не завжди вдається застосовувати його в практиці. По-перше, важко підібрати оптимальне розбиття простору параметрів – воно залежить від наповненості об'єктами, масштабу і рівня шуму вхідного зображення. Розмір комірки фазового простору необхідно визначити емпірично, що неприйнятне для автоматизованих систем. Крім цього, алгоритм Хафа чутливий до деяких видів шумів.

Добрий результат можна отримати при використанні апроксимації точок у певних областях, які попередньо визначені за допомогою перетворень Хафа. Параметри шуканих прямих "трубо" визначаються, використовуючи перетворення Хафа з відповідною сіткою простору параметрів, а потім уточнюються, з врахуванням точок, що оточують цю пряму. Для уточнення (підгонки) прямих, що відповідають сторонам кута різби та оцінки параметрів найкраще підігнаної лінії  $\theta^*$  та  $\rho^*$ , використовуємо метод найменшого середньоквадратичного відхилення. Величина відхилення вимірювалась за перпендикуляром до прямої, оскільки при такому представленні не втрачається точність при збільшенні кута нахилу прямої до осі X. Підгонка ліній полягає у знаходженні параметрів прямої, яка найкращим чином наближає відповідний набір точок. Обмежимося точками  $(x_n^*, y_n^*)$  ( $n = 1, \dots, N$  – кількість точок, які лежать в сегменті  $S$ ), які є результатом неточного представлення ідеальних точок  $(x_n, y_n)$  що належать прямій  $x_n \cos \theta + y_n \sin \theta - \rho = 0$ . Мінімізуючи суму середньоквадратичної радіальної похибки

$$e^2 = \sum (x_n^* \cos \theta^* + y_n^* \sin \theta^* - \rho^*)^2 \quad (7)$$

знаходимо параметри підігнаної прямої.

Однак, метод найменших квадратів має недолік – велику залежність від початкових даних, і як наслідок, нестійкість до існування помилкових точок. Так, наприклад, якщо серед вхідних даних координати однієї точки мають сильне відхилення від решти, то результат наближення може бути неточним. Вихід з цієї проблеми

– виключити помилкові точки або зменшити їх вплив. Тому виключимо з поля зору наперед відомі хибні точки, які не належать відповідним прямим. На бінарному зображенні обмежимося набором точок що відображають сторони кутів у прямокутнику на відстані  $d$  над прямою і під прямою (рис. 5), а також вилучимо точки біля вершин кутів, координати яких знаходимо з виразів (4) і (5).

Інший підхід для підгонки ліній при наявності вхідних точок з сильним відхиленням полягає у тому, що вводиться спеціальна функція, яка модифікує розрахунок суми квадратів відстаней від точок до прямих таким чином, що вплив кожної окремої точки зменшується в міру її віддаленості від прямої. Позначають цю функцію як  $\rho(r, \sigma)$ , де  $r$  – відстань від точки до прямої в будь-якій метриці,  $\sigma$  – параметр, який визначає швидкість зменшення впливу точок. Часто функція  $\rho$  має вигляд

$$\rho(r, \sigma) = \frac{r^2}{\sigma^2 + r^2}.$$

Враховуючи, що відстань від точки до прямої – це

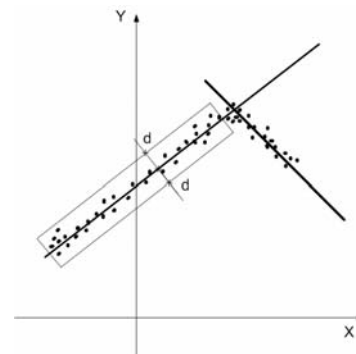


Рис.5. Вибір точок для підгонки прямої – сторони кута.

функція  $r = r(x, \theta)$ , задача апроксимації зводиться до

задачі мінімізації суми [9]  $\sum_i \rho(r_i(x_i, \theta); \sigma)$ .

Застосування такої модифікації значно зменшує вплив помилкових точок на результат апроксимації.

Для точнішого визначення параметрів прямих використовуються також модифікації перетворень Хафа, які враховують розмитість ліній. У випадку зашумлених зображень, піки для знаходження прямих є часто розмиті. Тому в цьому випадку задача апроксимації деякої множини точок прямою зводиться до розв'язку задачі:

$$h_0 = \arg \max_{h \in H} S(T_0, T(h)), \quad (8)$$

де  $h$  - параметри, які визначають положення і орієнтацію апроксимованої лінії;  $H$  - область допустимих значень параметрів  $h$ ;  $T(h)$  - підмножина точок зображення, що належать окремому апроксимуючому відрізку, (смужка точок що оточують осеву лінію);  $T_0$  - множина контурних точок на зображенні;  $S$  - деяка функція, що визначає міру подібності між  $T_0$  і  $T(h)$ . В даному випадку міра подібності визначається як

$$S(T_0, T(h)) = \sum_{t \in T_0} E(t, T(h)),$$

де  $E(t, T(h))$  - функція, що вказує на ступінь належності окремій точці зображення  $t$  підмножині  $T(h)$ .

Для розв'язку задачі (8) використовуються дзвоноподібні функції належності [10, 11]

$$E(t, h) = \frac{D^2}{D^2 + d^2},$$

де  $d$  - величина відхилення від осевої апроксимуючої лінії;  $D$  - визначає відхилення, при якому значення функції належності зменшується в два рази. Для пошуку параметрично заданої прямої задача (1) зводиться до знаходження відповідних параметрів  $\rho$  і  $\theta$ . В роботі [10] функції міри подібності називають неперервними ядрами перетворення Хафа і визначають як

$$S(T_0, T(h)) = H(\rho, \theta) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f(x_m, y_m) \frac{D^2}{D^2 + (x_m \cos \theta + y_m \sin \theta - \rho)^2}, \quad (9)$$

де  $f(x_m, y_m)$  - бінарне цифрове зображення розміром  $M \times N$  елементів.

Обчислення значення простору акумуляторів  $H(\rho, \theta)$  і знаходження локальних максимумів потребує значних обчислювальних затрат. Порівняно зі звичайним перетворенням Хафа і підгонкою ліній згідно виразів (7) обчислювальні затрати зростають в сотні разів, а точність знаходження параметрів визначається дискретністю сітки параметрів  $\rho$  і  $\theta$ .

Використання методів підгонки ліній, які є сторонами кутів при вершині зубців різби, підвищує точність обчислення цих кутів і координат вершин, що робить точнішим визначення параметрів різби.

## 4. Висновки

Запропонований спосіб визначення геометричних параметрів різби використовує зображення її профілю. Для обчислення величини кута при вершині зубця застосовано апарат перетворень Хафа. Досліджено способи підвищення точності визначення параметрів алгоритмічними засобами, вказано їх переваги і недоліки. Показано, що метод ефективний для автоматизованих систем неруйнівного контролю параметрів різби, оскільки на основі отриманих параметрів профілю для кожного зубця, використовуючи існуючі методики [10] і державні стандарти [4], можна автоматизувати процес перевірки різб як при їх виготовленні, так і при поточному контролі різб труб, які вже були в експлуатації.

## 5. Література

- [1] Adams L. Follow the Thread, *QUALITY*, June 2002 ([www.qualitymag.com](http://www.qualitymag.com)).
- [2] Иванов А.А., Миронченко В.И., Мишуров Р.Т., Родин В.М., Шишов В.Н. Автомат безконтактного контроля наружных резьб, *Измерительная техника*, №9, 1991, с.31-32.
- [3] Воробьев В.А., Магдеев В.Ш. Измерение параметров наружной цилиндрической резьбы в цеховых условиях, *Измерительная техника*, №5, 1990, с.21-23.
- [4] Калинин О.Б. Автоматизированные лазерно-оптоэлектронные системы для измерения параметров резьбы насосно-компрессорных труб и муфт к ним, *НИСОНГ* №1, 2002, с. 41-43.
- [5] ГОСТ 6211-81. Резьба трубная коническая, М.: Изд.-во Стандартов, 1981.
- [6] Опири Н. В. Вимірювання кутів на зображенні з використанням перетворень Хафа, *Матеріали міжнародної конференції з управління "Автоматика 2004"*, с. 34.
- [7] Duda R.O., Hart P.E. Use of the Hough transform to detect lines and curves in pictures, *Comm.AC*, 197, Vol. 15, №11, p. 11-15.
- [8] Canny J. A computation approach to edge detection, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, Vol.8, №6, p. 679-698.
- [9] Stewart C.V. Robust Parameter Estimation in Computer Vision, *SIAM REVIEW*, Vol.41, №3, p.513-537, 1999.
- [10] Turan J., Farkash P., Line fitting using Hough-like Procedure, *Radioengineering*, Vol.10, № 1, p.25-30, 2001
- [11] Шульга В.И. Комплекс помехоустойчивых процедур аппроксимации контурных границ и распознавания объектов на контурных изображениях (исследовательская разработка), Институт кибернетики имени В.М. Глушкова АН Украины, Киев, 1992, 75 стр. /Депонировано во Всесоюзном институте научной и технической информации (ВИНИТИ), Москва, 04.01.92, №12-B92.