# Rilevamento quantistico dei bordi

Manuel Di Agostino *Università degli studi di Parma*Parma, Italia
manuel.diagostino@studenti.unipr.it
Leonardo Ongari *Università degli studi di Parma*Cremona, Italia
leonardo.ongari@studenti.unipr.it

Sommario—Il rilevamento dei bordi è un processo fondamentale nell'estrazione delle caratteristiche di un'immagine ed è ampiamente utilizzato per analizzare la struttura degli oggetti rappresentati. Tuttavia, con l'aumento della risoluzione delle immagini, i metodi classici affrontano significative sfide computazionali a causa delle operazioni pixel-per-pixel necessarie. Il Quantum Image Processing (QIP), offre il potenziale per accelerazioni esponenziali in determinati scenari, sfruttando algoritmi e rappresentazioni in forma quantistica. Questo articolo esplora l'applicazione dell'algoritmo Quantum Hadamard Edge Detection (QHED), implementato utilizzando la rappresentazione Quantum Probability Image Encoding (QPIE). Utilizzando i principi quantistici e il framework Qiskit, si analizzano i vantaggi e le prospettive di questo nuovo approccio per il rilevamento dei bordi.

Keywords—Rilevamento dei bordi, Quantum computing, Sobel.

# I. INTRODUZIONE

L'identificazione dei bordi è una tecnica fondamentale nell'elaborazione delle immagini, utilizzata per individuare i contorni degli oggetti e le variazioni di intensità in una scena. Questa metodologia rappresenta una componente cruciale in numerosi ambiti, dalla computer vision alla robotica, fino all'analisi medica delle immagini. Nonostante i progressi significativi nell'elaborazione classica delle immagini, l'aumento della risoluzione e della complessità dei dati visivi ha portato a sfide computazionali sempre maggiori, rendendo spesso i metodi tradizionali onerosi in termini di tempo e risorse.

Nei primi anni '60, i filtri di Sobel [1] e Prewitt furono introdotti come i primi metodi strutturati per il rilevamento dei bordi. Entrambi basati su operatori convolutivi, questi algoritmi utilizzano maschere di discrete per approssimare il gradiente di intensità in un'immagine, rilevando così variazioni significative nei livelli di grigio. Sebbene semplici ed efficienti, essi risultano sensibili al rumore e con conseguente difficoltà nel gestire bordi sfumati. Negli anni '80, l'algoritmo di Canny [2] rappresentò una svolta significativa grazie all'introduzione di un approccio più sofisticato al rilevamento dei bordi; ancora oggi, rimane uno tra i metodi più utilizzati. Con l'avanzare della tecnologia e l'aumento della potenza computazionale, il rilevamento dei bordi ha beneficiato dell'utilizzo di tecniche basate sull'intelligenza artificiale, come le *reti neurali convoluzionali* (CNN). Soltanto recentemente l'elaborazione

quantistica delle immagini ha iniziato a emergere come un campo innovativo e promettente, aprendo la strada a potenziali accelerazioni esponenziali.

In questo progetto sarà presentata un'applicazione del *Quantum Hadamard Edge Detection* (QHED) [3]. La Sez. II offre una panoramica sulle attuali tecniche di rappresentazione quantistica delle immagini e una disamina delle tecniche utilizzate nell'esperimento. La Sez. III è invece dedicata all'implementazione della soluzione proposta, utilizzando la libreria Qiskit [4]. In ultimo, sono analizzati i risultati (Sez. IV).

### II. BACKGROUND

### A. Soluzioni classiche

Le tecniche classiche per la rilevazione dei contorni prevedono l'utilizzo di kernel specifici, che permettono di calcolare nuovi valori di intensità per i pixel dell'immagine. Tra i metodi più famosi vi è sicuramente l'operatore di Sobel, che si può descrivere tramite l'applicazione di 2 kernel all'immagine originale:

$$\mathbf{G_x} = \begin{bmatrix} +1 & 0 & -1 \\ +2 & 0 & -2 \\ +1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \ \mathbf{G_y} = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

Un'altra opzione, forse tra le più utilizzate al giorno d'oggi, è l'operatore di Canny. Questo metodo ha un funzionamento del tutto analogo al precedente, ma aggiunge meccanismi per la riduzione del rumore nell'immagine [5]. La complessità di queste tecniche è lineare rispetto al numero di pixel totali dell'immagine, dato che è necessaria una visita completa.

Per un'immagine  $M \times L = N$ , si utilizzano n bit per enumerare i pixel dell'immagine in formato binario, dove  $N = 2^n$ , ottenendo una complessità rispetto ai bit esponenziale  $O\left(2^n\right)$ . In questo progetto verrà mostrato come, dopo una prima fase di preparazione, è possibile risolvere il problema in tempo costante  $O\left(1\right)$ .

## B. Sistemi quantistici

Analogamente a quanto accade nei computer classici, i computer quantistici utilizzano i **quantum bit**, chiamati *qubit*. I qubit rappresentano la più piccola unità di informazione e sono implementati attraverso sistemi quantistici bidimensionali. Le quantità fisiche comunemente usate per questo scopo

1

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Con il termine *maschera* o *kernel* di convoluzione si fa riferimento ad una piccola griglia sovrapposta in maniera iterativa a tutti i pixel dell'immagine, aggiornando i valori in base ai primi vicini.

erve, re entanent includono lo spin di una particella o gli stati eccitati degli atomi.

Assemblando più qubit, è possibile costruire sistemi quantistici la cui dinamica è descritta da spazi vettoriali complessi. Un sistema composto da un singolo qubit è completamente descritto da

$$|\psi\rangle = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \quad \alpha, \beta \in \mathbb{C}$$
 (1)

Mentre un bit classico può assumere soltanto uno tra due possibili valori (generalmente 0 e 1), un bit quantistico è denotato da una combinazione lineare dei suoi stati base, pesata dai coefficienti complessi  $\alpha$  e  $\beta$ . Tali coefficienti sono detti *ampiezze di probabilità* e rispettano la seguente:

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \tag{2}$$

Per descrivere lo stato di un sistema quantistico composto da più qubit, è necessario effettuare un'operazione chiamata *prodotto tensoriale* tra i singoli stati coinvolti. Ad esempio, considerati i vettori di stati

$$|\psi_1\rangle = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, \quad |\psi_2\rangle = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix},$$

il loro prodotto tensore è definito come:

$$|\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ b_2 \\ a_2 & b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1b_1 \\ a_1b_2 \\ a_2b_1 \\ a_2b_2 \end{bmatrix}. \tag{3}$$

Equivalentemente, può essere scritto come  $|\psi_1\rangle|\psi_2\rangle$  o  $|\psi_1\psi_2\rangle$ .

### C. Circuiti quantistici

Analogamente a quanto accade nei circuiti digitali classici, i circuiti quantistici eseguono calcoli manipolando le informazioni immagazzinate nei qubit. Questo viene realizzato attraverso dispositivi chiamati **quantum gate** (porte quantistiche), che sono l'equivalente quantistico delle porte logiche classiche ma operano secondo i principi della meccanica quantistica. L'applicazione di una matrice complessa unitaria ad uno stato quantistico modella matematicamente l'azione di un gate su di esso. Formalmente, data  $U \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{C})$  l'unitaria associata ad una porta logica e dato lo stato  $|\psi\rangle \in \mathbb{C}^n$ , lo stato risultante dall'applicazione è definito come:

$$|\psi'\rangle = U|\psi\rangle \tag{4}$$

# D. Quantum Image Processing

La **Quantum Image Processing** (*processamento quantistico dell'immagine*) si concentra sullo sviluppo di algoritmi in grado di codificare immagini all'interno di circuiti quantistici e di processarle utilizzando operazioni quantistiche. Rappresentazione delle immagini: Tra le varie tecniche proposte negli ultimi anni, la **Quantum Probability Image Encoding (QPIE)** [6] utilizza le ampiezze di probabilità di uno stato quantistico per memorizzare i valori dei pixel di un'immagine classica. Dati n qubit, essa consente di rappresentare un'immagine in toni di grigio di  $2^n$  pixel tramite una superposizione di stati. In generale, il numero di qubit necessari è calcolato tramite:

$$n = \lceil \log_2 N \rceil \tag{5}$$

Come mostrato in Fig. 1, ogni pixel può essere numerato utilizzando stringhe binarie (00,01,10,11); l'intera immagine è quindi rappresentabile come una matrice  $2\times 2$  delle intensità di colore. In questa notazione, il singolo termine  $I_i$  corrisponde all'intensità del pixel in posizione (x,y) (rispetto all'angolo in alto a destra), tale per cui  $i=xy_{10}$ .

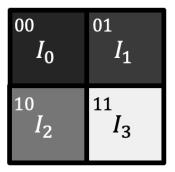


Figura 1. Rappresentazione di un'immagine B&W 4x4 pixel.

Per rappresentare l'immagine come una superposizione di stati base, è necessario che venga rispettata l'Eq. 2; bisogna infatti normalizzare le singole intensità come segue:

$$c_i = \frac{I_i}{\sqrt{\sum_k I_k^2}} \tag{6}$$

In Fig. 2 viene mostrato il risultato della normalizzazione.

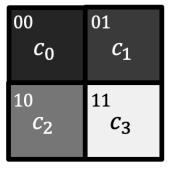


Figura 2. Rappresentazione della Fig. 1 tramite QPIE.

QHED:

# E. Modellazione del rumore

## III. IMPLEMENTAZIONE

### IV. RISULTATI

### V. CONCLUSIONE

# RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] I. Sobel and G. Feldman, "An isotropic 3x3 image gradient operator," 1968, presented at the Stanford Artificial Intelligence Laboratory (SAIL). [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/281104656\_An\_Isotropic\_3x3\_Image\_Gradient\_Operator
- [2] J. Canny, "A computational approach to edge detection," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-8, no. 6, pp. 679–698, 1986.
- [3] X.-W. Yao, H. Wang, Z. Liao, M.-C. Chen, J. Pan, J. Li, K. Zhang, X. Lin, Z. Wang, Z. Luo, W. Zheng, J. Li, M. Zhao, X. Peng, and D. Suter, "Quantum image processing and its application to edge detection: Theory and experiment," *Physical Review X*, vol. 7, no. 3, Sep. 2017. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevX.7.031041
- [4] Qiskit Development Team, "Qiskit: An open-source framework for quantum computing," https://qiskit.org/, 2021, accessed: 2025-01-17. [Online]. Available: https://qiskit.org/
- [5] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital Image Processing (3rd Edition). USA: Prentice-Hall, Inc., 2006.
- [6] X.-W. Yao, H. Wang, Z. Liao, M.-C. Chen, J. Pan, J. Li, K. Zhang, X. Lin, Z. Wang, Z. Luo, W. Zheng, J. Li, M. Zhao, X. Peng, and D. Suter, "Quantum image processing and its application to edge detection: Theory and experiment," *Phys. Rev. X*, vol. 7, p. 031041, Sep 2017. [Online]. Available: https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevX.7.031041