ỨNG DỤNG THỦY VĂN BẢO VỆ BẢN QUYỀN ẢNH SỐ

Võ Thành C¹, Võ Phước Hưng², Nguyễn Thái Sơn³

APPLYING WATERMARKING IN DIGITAL IMAGE COPYRIGHT PROTECTION

Vo Thanh C¹, Vo Phuoc Hung², Nguyen Thai Son³

Tóm tắt – Ngày nay, với sự phát triển mạnh mẽ của Internet, sự trao đổi dữ liệu số như hình ảnh, âm thanh, video và văn bản qua môi trường Internet ngày càng dễ dàng hơn. Vì vậy, làm thế nào để bảo vệ sự toàn vẹn và bản quyền của dữ liệu số đã trở thành vấn đề mang tính cấp thiết. Tham luận này trình bày một giải pháp thủy văn số dựa trên biến đổi sóng nhỏ rời rạc (DWT), biến đổi cosin rời rạc (DCT) và phân tích giá trị riêng (SVD) để bảo vệ quyền sở hữu trí tuệ ảnh số. Kết quả thực nghiệm cho thấy chất lượng ảnh sau khi nhúng tốt, độ bền vững cao trước các tấn công và watermark có thể rút trích từ ảnh được nhúng mà không cần ảnh gốc.

Từ khóa: dữ liệu số, bản quyền, watermark, DWT, DCT, SVD.

Abstract – Nowadays, with the rapid development of the Internet, the transmission of digital data such as images, videos and texts through the Internet becomes more convenient. Therefore, how to protect the integrity and copyright of digital data has become an urgent issue. This paper presents a watermarking method that based on Discrete Wavelet Transform (DWT), Discrete Cosine Transform (DCT) and Singular Value Decomposition (SVD) in order to protect copyright of digital images. The experimental results show that the quality of watermarked images are maintained good with high robustness against

various attacks and watermark can be extracted from embedded image without original image.

Keywords: digital data, copyright, watermark, DWT, DCT, SVD.

I. GIỚI THIỆU

Ngày nay, với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ thông tin và truyền thông, việc trao đổi nội dung số dạng text, image, audio và video qua môi trường Internet ngày càng trở nên phổ biến. Bên cạnh những thuận lợi, vẫn còn tồn tại nhiều vấn đề liên quan đến nội dung số khi truyền qua môi trường Internet như làm thế nào để bảo vệ sự toàn vẹn của dữ liệu, bản quyền, quyền sở hữu trí tuệ... [1], [2]. Hiện nay có nhiều giải pháp để bảo vệ nội dung số và có thể chia thành hai loại chính: mật mã (cryptography) và giấu tin (data hiding) [3].

Mật mã: là một kỹ thuật mã hóa dữ liệu thành một dạng mà con người không thể hiểu được trước khi gửi đi. Người nhận phải giải mã thông điệp nhận được bằng khóa do người gửi cung cấp. Như vậy, thông điệp sau khi giải mã đã trở thành bản sao của thông điệp gốc và nó không được bảo vệ nữa. Ngoài ra, mật mã sẽ không che giấu sự giao tiếp, có nghĩa là bên thứ ba có thể thấy được dữ liệu mã hóa khi truyền trên mạng, điều này càng gây ra sự tò mò, nghi ngờ và càng làm cho họ tìm cách giải mã các thông tin bí mật đó.

Giấu tin: là một kỹ thuật giấu thông tin mật vào trong nội dung số sao cho bên thứ ba không phát hiện ra sự thay đổi của nội dung số khi truyền qua Internet. Các thuật toán giấu tin có thể phân thành

^{1,2,3}Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Trà Vinh

Email: vothanhc@tvu.edu.vn

^{1,2,3}School of Engineering and Technology, Tra Vinh University

hai loại: steganography và watermarking. Một thuật toán steganography tốt phải thỏa mãn cả hai tính chất là khả năng nhúng cao và chất lượng của nội dung số sau khi giấu tin phải tốt. Nếu thông tin mật bị tiết lộ thì xem như steganography bị thất bại. Ngược lại, trong watermarking, sự tồn tại của thông tin mật có thể được biết. Mục tiêu của watermarking là làm sao để thông tin mật không bị gỡ bỏ hay thay đổi. Đối với watermarking, chuỗi thông tin mật (còn gọi là watermark) sẽ được nhúng vào trong thông điệp gốc để bảo vệ quyền xác thực và quyền sở hữu trí tuệ. Một thuật toán watermarking tốt phải thỏa mãn hai tính chất: tính không cảm thụ (imperceptibility), tức là khó có thể phát hiện ra watermark được nhúng vào trong thông điệp gốc; tính bền vững (robustness), tức là watermark khó bị thay đổi bởi các tấn công.

Phần còn lại của tham luận được tổ chức như sau: Phần II sẽ giới thiệu tổng quan nghiên cứu; Giải pháp đề xuất sẽ được trình bày chi tiết trong phần III; Phần IV trình bày các kết quả thực nghiệm; và kết luận được trình bày trong phần V.

II. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

Các kỹ thuật watermarking trên ảnh số hiện nay được chia thành hai loại dựa vào miền nhúng watermark là: miền không gian và miền tần số. Các kỹ thuật dựa trên miền không gian sẽ nhúng watermark vào trong ảnh gốc bằng cách thay đổi trực tiếp giá trị các điểm ảnh của ảnh gốc bằng một công thức cụ thể. Một số kỹ thuật watermarking trên miền không gian như dựa trên sự tương quan (Correlation based technique), LSB (Least Significant Bit) [4]. Các kỹ thuật dựa trên miền không gian thường đơn giản, dễ cài đặt. Tuy nhiên, do thay đổi trực tiếp giá trị các điểm ảnh nên chất lượng ảnh sau khi nhúng không cao và watermark không bền vững trước các tấn công.

Các kỹ thuật dựa trên miền tần số sẽ chuyển đổi ảnh từ miền không gian sang miền tần số (hay còn gọi là miền chuyển đổi), việc nhúng watermark sẽ được thực hiện bằng cách thay đổi giá trị của các hệ số trong miền chuyển đổi. Các kỹ thuật dựa trên miền tần số là Discrete Cosine

Transform (DCT) [5], Discrete Wavelet Transform (DWT) [6], Discrete Fourier Transform (DFT), Singular Value Decomposition (SVD) [7], [8], [9]. Các kỹ thuật dựa trên miền chuyển đổi cho chất lượng ảnh sau khi nhúng tốt hơn và watermark bền vững hơn đối với những phép xử lý ảnh và nén, nhưng không mạnh đối với những tấn công dạng cắt (cropping), thay đổi tỉ lệ (scaling), quay (rotation).

Để khắc phục một số hạn chế của các phương pháp nêu trên, việc kết hợp hai hoặc nhiều miền chuyển đổi khi nhúng watermark đã được đề xuất trong những năm gần đây. Một số phương pháp kết hợp thường gặp như DWT-DCT [10], DWT-SVD [11], [12], DCT-DWT-SVD [13], [14], [15], SVD-APBT, DWT-APDCBT-SVD [16]. Các phương pháp kết hợp cho chất lượng ảnh sau khi nhúng tốt. Tuy nhiên, việc rút trích watermark phải dùng ảnh gốc.

Trong tham luận này, chúng tôi đề xuất một phương pháp thủy văn số dựa trên đặc trưng cục bộ bất biến SIFT và DWT, DCT, SVD. Việc kết hợp ba phương pháp biến đổi DWT, DCT và SVD trên đặc trưng SIFT là hướng tiếp cận mới. Kết quả thực nghiệm cho thấy giải pháp đề xuất cho kết quả tốt hơn một số giải pháp trước đây.

A. Giới thiệu về SIFT

SIFT (Scale Invariant Feature Transform) [17] là đặc trưng cục bộ bất biến đối với những phép biến đổi tỉ lệ, tịnh tiến, phép quay, và không đổi một phần đối với những thay đổi về góc nhìn; đồng thời nó cũng rất mạnh với những thay đổi về độ sáng, sự che khuất, nhiễu. Phương pháp trích rút đặc trưng SIFT có thể được tóm tắt như sau:

(1) *Phát hiện các điểm cực trị trong không gian tỉ lệ (Scale-Space extrema detection)* - Sử dụng hàm sai khác Gaussian (Different of Gaussian - DoG) để xác định tất cả các điểm hấp dẫn tiềm năng mà bất biến với tỉ lệ và hướng của ảnh; (2) *Định vị các điểm hấp dẫn (Keypoint localization)* - Ứng với mỗi vị trí tiềm năng, hàm kiểm tra sẽ được đưa ra để quyết định xem các điểm hấp dẫn tiềm năng có được lựa chọn hay không, các điểm hấp dẫn được lựa chọn dựa trên việc đo lường tính ổn định của chúng; (3) *Xác định hướng cho các điểm hấp dẫn (Orientation assignment)*

- Một hoặc nhiều hướng được gán cho mỗi vị trí điểm hấp dẫn dựa trên hướng gradient cục bộ của ảnh; (4) *Mô tả các điểm hấp dẫn (Keypoint descriptor)* - Các gradient ảnh cục bộ được xác định ở tỉ lệ được chọn trong vùng bao quanh mỗi điểm hấp dẫn, và được biểu diễn sang một dạng mà cho phép bất biến với sự thay đổi về hình dạng và điều kiện chiếu sáng.

B. Lí thuyết DWT (Discrete Wavelet Transform)

Trong phép biến đổi DWT, ảnh gốc được phân tích thành các miền tần số LL (low frequency component in horizontal and vertical direction), LH (low frequency component in horizontal direction and high frequency in vertical direction), HL (high frequency component in horizontal direction and low frequency in vertical direction), HH (high frequency component in horizontal direction and high frequency in vertical direction). Các kĩ thuật thủy văn sử dụng phép biến đổi DWT thường nhúng watermark vào một hoặc một số miền tần số với các hệ số tương quan khác nhau. Sau đó, việc xây dựng lại ảnh đã nhúng watermark từ các miền tần số được thực hiện bởi phép biến đổi IDWT.

Hình 1: DWT mức 1

C. Lí thuyết DCT (Discrete Cosine Transform)

DCT là một kĩ thuật chuyển đổi ảnh từ miền không gian sang miền tần số. Trong phép biến đổi DCT, ảnh ban đầu được chia thành các khối có kích thước NxN giống nhau, và phép biến đổi DCT được áp dụng trên các khối. Tùy vào thuật toán mà kích thước của các khối được chọn khác nhau. Thông thường các khối có kích thước 8x8.

Hình 2: Khối ảnh có kích thước 8x8 sau biến đổi DCT

D. Lí thuyết SVD (Singular Value Decomposition)

SVD là một phép biến đổi thường được sử dụng trong xử lý tín hiệu và phân tích thành phần chính. Trong phép biến đổi SVD, một ma trận M được phân tích thành ba ma trận có cùng kích thước với M theo công thức sau:

$$M = USV^T \quad (1)$$

Trong đó:

M: ma trận cấp NxN

U, V: ma trận trực chuẩn cấp NxN

S: ma trận đường chéo không âm cấp NxN

$$S_{N \times N} = \begin{bmatrix} \alpha(1,1) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \alpha(N,N) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Các phần tử trong ma trận S được gọi là các giá trị đơn, thỏa $\alpha(1,1) \geq \alpha(2,2) \geq \dots \geq \alpha(N,N) \geq 0$. Các giá trị đơn này có tính ổn định cao và chứa đựng phần lớn thông tin của ảnh.

III. GIẢI PHÁP ĐỀ XUẤT

Chúng tôi đề xuất một lược đồ thủy văn số dựa trên DWT, DCT, SVD và đặc trưng SIFT. Lược đồ đề xuất gồm hai giai đoạn: giai đoạn nhúng watermark vào ảnh gốc và giai đoạn trích watermark từ ảnh đã nhúng.

A. Thuật toán nhúng Watermark

Trong phần này, chúng tôi sẽ mô tả làm thế nào để nhúng watermark vào trong ảnh gốc. Trước

tiên, thuật toán SIFT sẽ được áp dụng để tính toán các điểm đặc trưng trên ảnh. Vì số lượng điểm đặc trưng SIFT trên ảnh khá lớn nên sẽ chọn ra N điểm đặc trưng có bán kính vùng mô tả lớn hơn hoặc bằng 32 và các vùng mô tả không chồng lấp lên nhau để nhúng watermark. Watermark sẽ được nhúng vào N vùng có kích thước 64x64 với tâm là điểm đặc trưng.

Đầu vào:

I: ảnh gốc

W: watermark

N: số vùng nhúng watermark W

Đầu ra:

I': ảnh sau khi nhúng watermark W

Hình 3: Lược đồ nhúng watermark

Các bước thực hiện:

Lặp $i=1$ đến N . Ứng với mỗi giá trị của i lần lượt thực hiện các bước sau:

Bước 1: Áp dụng DWT lên vùng SIFT có kích thước 64x64 quanh điểm đặc trưng SIFT, ta được HH, HL, LH, LL.

Bước 2: Chia vùng HL, LH thành các khối 4x4, áp dụng DCT lên các khối 4x4

Bước 3: Ứng với mỗi khối DCT, chọn ra tám hệ số để xây dựng ma trận M có kích thước 32x32. Các hệ số được chọn tại các vị trí (2,1), (1,2), (1,3), (2, 2), (3,1), (4,1), (3, 2), (2, 3).

Bước 4: Tính SVD lên ma trận M, W theo công thức sau.

$$SVD(M) = U * S * V^T \quad (3)$$

$$SVD(W) = U_w * S_w * V_w^T \quad (4)$$

Bước 5: Nhúng watermark W theo công thức sau: $S' = S + \alpha * S_w$

$$M' = U * S' * V^T \quad (5)$$

Bước 7: Cập nhật lại hệ số cho các khối DCT từ ma trận M'

Bước 8: Áp dụng DCT ngược để hình thành HL', LH'

Bước 9: Áp dụng DWT ngược lên (HH, HL', LH', LL) để được vùng SIFT' đã nhúng watermark.

Bước 10: Ghép vùng SIFT' vào ảnh I thay cho vùng SIFT trước khi nhúng.

Sau khi kết thúc N lần lặp sẽ được ảnh I' chính là ảnh đã nhúng N watermark.

B. Thuật toán rút trích Watermark

Trong giai đoạn rút trích, thuật toán SIFT cũng được áp dụng để tìm ra N điểm đặc trưng có bán kính vùng mô tả SIFT lớn hơn hoặc bằng 32 mà không chồng lấp lên nhau giống như giai đoạn nhúng. Tiếp theo sẽ áp dụng các bước trong thuật toán để rút trích N watermark đã nhúng. Để nâng cao chất lượng của watermark, chúng tôi đề xuất hàm sửa lỗi dựa trên N watermark đã rút trích để đạt kết quả tốt hơn.

Đầu vào:

I': ảnh đã nhúng watermark W

N: số vùng nhúng watermark W

Đầu ra:

W': watermark rút trích được từ ảnh I'

Các bước thực hiện:

Lặp $i=1$ đến N . Ứng với mỗi giá trị của i lần lượt thực hiện các bước sau:

Bước 1: Áp dụng DWT lên vùng SIFT có kích thước 64x64 quanh điểm đặc trưng SIFT, ta được HH', HL', LH', LL'.

Bước 2: Chia vùng HL', LH' thành các khối 4x4, áp dụng DCT lên các khối 4x4

Bước 3: Ứng với mỗi khối DCT, chọn ra tám hệ số để xây dựng ma trận M' có kích thước 32x32. Các hệ số được chọn tại các vị trí (2,1), (1,2), (1,3), (2, 2), (3,1), (4,1), (3, 2), (2, 3).

Bước 4: Tính SVD lên ma trận M' theo công thức sau.

$$SVD(M') = U' * S' * V'^T \quad (6)$$

Hình 4: Lược đồ rút trích watermark

Bước 5: Trích watermark W_i theo công thức sau:

$$S'_w = (S' - S)/\alpha \quad (7)$$

$$W_i = U_w * S'_w * V_w^T \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} W_{(i,j)} = \frac{(W_{1(i,j)} + W_{2(i,j)} + \dots + W_{N(i,j)})}{N} \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} W_{(i,j)} = \begin{cases} 1 & \text{nếu } W_{(i,j)} \geq 0.5 \\ 0 & \text{nếu ngược lại} \end{cases} \quad (10)$$

IV. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Trong tham luận này, chúng tôi sử dụng các ảnh mức xám “Babara”, “Baboon”, “Blonde”, “Boat”, “Lena”, “Pirate” có kích thước 512x512 làm tập dữ liệu thực nghiệm, watermark là ảnh nhị phân có kích thước 32x32.

Để đánh giá hiệu quả của giải pháp đề xuất, chúng tôi sử dụng PSNR (*peak signal-to-noise ratio*) và NCC (*normalized correlation coefficient*). PSNR được sử dụng để đo lường tính không cảm thụ của ảnh sau khi nhúng watermark, tức chất lượng của ảnh đã nhúng watermark. Giá trị của PSNR cao tức chất lượng ảnh nhúng watermark càng tốt. Thường thì giá trị của PSNR lớn hơn 39dB sẽ chấp nhận được, vì ở giá trị này

Hình 5: Tập các ảnh được dùng trong thực nghiệm

mắt người sẽ không thể phân biệt được sự thay đổi của ảnh nhúng watermark so với ảnh gốc. NCC thường được sử dụng để đánh giá sự giống nhau giữa watermark gốc và watermark sau khi rút trích. NCC cũng được sử dụng để đo lường độ mạnh của thuật toán trước các tấn công.

Công thức tính PSNR:

$$PSNR = 10 \log \left[\frac{512 \times 512}{\sum_{i=1}^{512} \sum_{j=1}^{512} [I(i,j) - I_w(i,j)]^2} \right] \quad (11)$$

Trong đó:

I : là ảnh gốc.

I_w : là ảnh đã nhúng watermark.

(i, j) : vị trí của điểm ảnh.

Công thức tính NCC: $NCC =$ Trong đó:

$$NCC = \frac{\sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} W(i,j) \times W'(i,j)}{\sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} W(i,j) \times W(i,j)} \quad (12)$$

W : watermark gốc.

W' : là watermark rút trích được từ ảnh nhúng watermark.

(i, j) : vị trí của điểm ảnh.

Bảng 1 trình bày kết quả thực nghiệm trên các ảnh. Kết quả cho thấy chất lượng ảnh sau khi nhúng watermark cao (trên 90dB) và giá trị của NCC trên các ảnh Blonde, Lena, Pirate là 1, nghĩa là watermark được rút trích giống như watermark trước khi nhúng.

Bảng 1: Giá trị PSNR và NCC khi chưa tấn công trên ảnh

	Babara	Baboon	Blonde	Boat	Lena	Pirate
PSNR (dB)	90.18	90.66	89.55	90.18	90.34	90.21
NCC	0.9990	0.9893	1.0000	0.9883	1.0000	1.0000

Bảng 2: Giá trị PSNR và NCC khi chưa tấn công trên ảnh Lena

	Liu and Tan [8]	Fazli and Mocini [14]	Xiao Zhou et al. [16]	Wan-Li Lyu et al. [5]	Giải pháp đề xuất
PSNR (dB)	53.83	101.97	101.97	84.67	90.34
NCC	1.0000	0.9603	0.9724	0.9820	1.0000

Bảng 2: so sánh kết quả thực nghiệm với các giải pháp khác trên ảnh Lena. Kết quả cho thấy chất lượng ảnh sau khi nhúng watermark cao (90.34 dB) và giá trị của NCC là 1, nghĩa là watermark được rút trích giống như watermark trước khi nhúng.

(a)

Kết quả trong Bảng 3 cho thấy giải pháp đề xuất mạnh đối với các loại tấn công, đặc biệt là các dạng tấn công làm thay đổi tỉ lệ, phép quay. Còn Bảng 4 cho thấy độ bền vững của watermark trước các tấn công kết hợp. Kết quả thực nghiệm chỉ ra giải pháp đề xuất có độ bền vững cao hơn các giải pháp trước đối với một số loại tấn

(b)

Hình 6: (a và b) Các dạng tấn công và watermark được rút trích sau tấn công

công, một số khác thì thấp hơn một chút. Tuy nhiên, trung bình lại, giá trị NCC của giải pháp đề xuất (0.9947) cao hơn tất cả các giải pháp được so sánh.

Bảng 3: Giá trị NCC của watermark được rút trích dưới những tấn công khác nhau

Attacks	Liu and Tan [8]	Fazli and Moeini [14]	Xiao Zhou et al. [16]	Wan-Li Lyu et al. [5]	Giải pháp đề xuất
salt & peper noise 0.001				0.9803	0.9990
salt & peper noise 0.005	0.9628	0.9993	0.9988	0.9698	0.9990
salt & peper noise 0.02	-	-	-	0.9282	0.9980
JPEG compression (QF=50)	-	-	-	-	0.9971
JPEG compression (QF=100)	-	-	-	0.9818	1.0000
Gaussian filtering 3x3 (0.05)	-	-	-	0.9818	0.9941
Gaussian filtering 3x3 (0.1)	-	-	-	0.9818	0.9932
Gaussian filtering 3x3 (0.2)	-	-	-	0.9818	0.9941
Rotation 2(0)	-	-	-	0.9396	1.0000
Rotation (5°)	0.8223	1	0.9897	0.9308	1.0000
Rotation (10°)	-	-	-	0.8861	0.9990
Cropping (25% from Left Up Corner)	-	-	-	0.9743	0.9980
Center Cropping (50%)	-	-	-	0.9803	1.0000
Center Cropping (75%)	-	-	-	0.9803	0.9980
Median filtering 3x3	0.9321	0.9638	0.9793	0.645	0.9990
Median filtering 5x5	0.8510	0.9621	0.9724	-	0.9971
Average filtering 3x3	0.8987	0.9793	0.9741	-	0.9951
Average filtering 5x5	0.8153	0.9586	0.9690	-	0.9951
Scaling 0.9	-	-	-	0.956	1.0000
Scaling 1.2	-	-	-	0.982	0.9961
Shearing x-0%, y-5%	-	-	-	0.672	0.9883
Brightness +50	-	-	-	-	0.9990
Brightness +100	-	-	-	-	0.9961
Enhance Contrast 1.2	-	-	-	-	0.9941

Bảng 4: Giá trị NCC của watermark được rút trích dưới những tấn công kết hợp

Attacks	Liu and Tan [8]	Fazli and Moeini [14]	Xiao Zhou et al. [16]	Giải pháp đề xuất
Gaussian filtering 3x3 (0.01) + Median filtering 3x3	0.9401	0.9995	0.9971	0.9902
Gaussian filtering 3x3 (0.01) + Average filtering 3x3	0.9716	1.0000	0.9964	0.9951
Salt & peper noise (0.01) + Median filtering 3x3	0.9332	0.9631	0.9793	0.9990
Salt & peper noise (0.01) + Average filtering 3x3	0.9647	0.9993	0.9867	0.9951
Scaling 0.5 + JPEG compression (QF=50)	0.9462	0.9621	0.9707	0.9990
Scaling 2.0 + JPEG compression (QF=50)	0.8942	0.9621	0.9724	0.9902
JPEG compression (QF=50) + Cropping (25%)	0.9485	0.8086	0.8569	0.9922
Median filtering 3x3 + JPEG compression (QF=50)	0.9455	0.9569	0.9707	0.9990
Average filtering 3x3 + JPEG compression (QF=50)	0.8885	0.9707	0.9759	0.9922
Trung bình	0.9369	0.958	0.9673	0.9947

V. KẾT LUẬN

Trong tham luận này, một lược đồ thủy văn số được đề xuất để bảo vệ bản quyền ảnh số. Giải pháp đề xuất cho chất lượng ảnh sau khi nhúng cao và mạnh đối với các tấn công trên ảnh. Trong giải pháp đề xuất, N vùng SIFT không chồng lấp nhau được sử dụng để nhúng watermark. Để tăng độ mạnh cho thuật toán, việc kết hợp DCT, DWT, SVD để nhúng watermark đã được thực hiện. Kết quả thực nghiệm cho thấy giải pháp đề xuất cho chất lượng ảnh tốt hơn và mạnh hơn trước các tấn công khi so sánh với các giải pháp trước đây

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] V. S. Verma and R. K. Jha, "An Overview of Robust Digital Image Watermarking," IETE Technical Review, Jun. 2015.
- [2] I. Cox, M. Miller, J. Bloom, J. Fridrich, and T. Kalker, Digital Watermarking and Steganography. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2007.
- [3] A. Khan, A. Siddiqua, S. Munib, and S. A. Malik, "A recent survey of reversible watermarking techniques," Information Sciences, vol. 279, pp. 251–272, Sep. 2014.
- [4] A. Bamatraf, R. Ibrahim, and M. N. B. M. Salleh, "Digital watermarking algorithm using LSB," in 2010 International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics, 2010, pp. 155–159.
- [5] F. Ernawan and M. N. Kabir, "A Robust Image Watermarking Technique With an Optimal DCT-Psychovisual Threshold," IEEE Access, vol. 6, pp. 20464–20480, 2018.
- [6] W.-L. Lyu, C.-C. Chang, N. T.S, and C.-C. Lin, "Image Watermarking Scheme Based on Scale-Invariant Feature Transform," KSII Transactions on Internet and Information Systems, vol. 8, no. 10, Oct. 2014.
- [7] V. Aslantas, "An optimal robust digital image watermarking based on SVD using differential evolution algorithm," Optics Communications, vol. 282, no. 5, pp. 769–777, Mar. 2009.
- [8] Liu. Ruizhen and Tieniu Tan, "An SVD-based watermarking scheme for protecting rightful ownership," IEEE Transactions on Multimedia, vol. 4, no. 1, pp. 121–128, Mar. 2002.
- [9] Q. Su, Y. Niu, H. Zou, and X. Liu, "A blind dual color images watermarking based on singular value decomposition," Applied Mathematics and Computation, vol. 219, no. 16, pp. 8455–8466, Apr. 2013.
- [10] S. Roy and A. K. Pal, "A robust blind hybrid image watermarking scheme in RDWT-DCT domain using Arnold scrambling," Multimedia Tools and Applications, vol. 76, no. 3, pp. 3577–3616, Feb. 2017.
- [11] A. Mishra, C. Agarwal, A. Sharma, and P. Bedi, "Optimized gray-scale image watermarking using DWT–SVD and Firefly Algorithm," Expert Systems with Applications, vol. 41, no. 17, pp. 7858–7867, Dec. 2014.
- [12] C.-C. Lai and C.-C. Tsai, "Digital Image Watermarking Using Discrete Wavelet Transform and Singular Value Decomposition," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 59, no. 11, pp. 3060–3063, Nov. 2010.
- [13] D. Singh and S. K. Singh, "DWT-SVD and DCT based robust and blind watermarking scheme for copyright protection," Multimed Tools Appl, vol. 76, no. 11, pp. 13001–13024, Jun. 2017.
- [14] S. Fazli and M. Moeini, "A robust image watermarking method based on DWT, DCT, and SVD using a new technique for correction of main geometric attacks," Optik, vol. 127, no. 2, pp. 964–972, Jan. 2016.
- [15] A. K. Singh, M. Dave, and A. Mohan, "Hybrid Technique for Robust and Imperceptible Image Watermarking in DWT–DCT–SVD Domain," National Academy Science Letters, vol. 37, no. 4, pp. 351–358, Aug. 2014.
- [16] X. Zhou, H. Zhang, and C. Wang, "A Robust Image Watermarking Technique Based on DWT, APDCBT, and SVD," Symmetry, vol. 10, no. 3, p. 77, Mar. 2018.
- [17] D. G. Lowe, "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints," International Journal of Computer Vision, vol. 60, no. 2, pp. 91–110, Nov. 2004.