

Watermarking Domain DCT yang Robust terhadap Pemotretan Layar berbasis DCT dan SIFT

1st Ilham Adyansyah

*School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia*

ilhamadyansyah@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Rangga Aditia Permana

*School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia*

arangga@student.telkomuniversity.ac.id

3rd Ledy Novamizanti

*School of Electrical Engineering
The Center of Excellence of AILO
Telkom University
Bandung, Indonesia*

ledyaldn@telkomuniversity.ac.id

4th Gelar Budiman

*School of Electrical Engineering
The Center of Excellence AICOMS
Telkom University
Bandung, Indonesia*

gelarbudiman@telkomuniversity.ac.id

Abstrak—Penelitian ini mengusulkan skema watermarking citra digital yang tangguh terhadap serangan screen-shooting dengan mengintegrasikan lokalisasi titik kunci berbasis Improved Scale-Invariant Feature Transform (I-SIFT), penyematan adaptif pada domain Discrete Cosine Transform (DCT) frekuensi menengah, serta pengkodean ganda CRC-8 dan BCH (63,36). Serangan screen-shooting terjadi ketika citra digital ditampilkan pada layar dan diambil ulang menggunakan kamera, sehingga menimbulkan distorsi perspektif, pola moiré akibat interferensi piksel, serta degradasi sensor. Proses penyematan dilakukan pada blok 64×64 yang dipusatkan pada titik kunci I-SIFT dengan skor respons tertinggi, dengan opsi cadangan pada wilayah pusat bila titik kunci terbatas. Hasil pengujian pada citra standar (Zelda, Baboon, Peppers, Airplane) menunjukkan kualitas visual tinggi (PSNR rata-rata 42,39 dB) dan ketahanan penuh terhadap distorsi screen-shooting dari jarak 45–105 cm, termasuk distorsi perspektif dan sensor noise, dengan BER = 0,00 pada beberapa kondisi. Pendekatan ini melampaui metode benchmark Fang et al. dalam hal kualitas visual dan tingkat keberhasilan pemulihan watermark, sehingga membuktikan efektivitas kombinasi I-SIFT, embedding adaptif, dan proteksi kesalahan ganda dalam menghadapi distorsi fisik dunia nyata.

Kata Kunci—Robust watermarking, Screen-Shooting Attack, I-SIFT, Discrete Cosine Transform

I. PENDAHULUAN

Di era penyebaran konten digital yang meluas, penandaan air (watermarking) citra digital memainkan peran penting dalam menegaskan kepemilikan konten, mengotentikasi integritas visual, dan melacak distribusi yang tidak sah [1]. Tujuan utamanya adalah menanamkan data tambahan secara diam-diam ke dalam citra tanpa menurunkan kualitas visualnya secara signifikan. Skema penandaan air yang tangguh harus menyeimbangkan tiga atribut yang saling bersaing: imperceptibility, robustness, dan payload capacity [2]. Di antara ketiganya, robustness menjadi sangat menantang terutama dalam kondisi nyata yang merugikan seperti pengambilan gambar layar.

Serangan pengambilan gambar layar, diilustrasikan pada Gambar 1, terjadi ketika citra digital ditampilkan di layar dan kemudian ditangkap ulang menggunakan kamera digital. Serangan ini menimbulkan serangkaian degradasi: distorsi perspektif, pola moiré akibat interferensi piksel layar dengan sensor kamera, pencahayaan yang tidak merata, serta defokus optik [3]. Distorsi nonlinier ini secara signifikan merusak integritas watermark yang tertanam, terutama yang menggunakan pendekatan spasial atau transformasi domain tradisional.



Gambar 1. Ilustrasi skenario serangan penyadapan layar.

Metode watermarking berbasis transformasi konvensional, seperti Discrete Cosine Transform (DCT) atau Discrete Wavelet Transform (DWT), pada dasarnya dirancang untuk tahan terhadap kompresi dan derau, tetapi seringkali gagal menghadapi distorsi geometris [4]. Sebagai respons, para peneliti memperkenalkan teknik berbasis fitur seperti Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) atau ORB untuk melokalisasi wilayah penyematan yang lebih robust [5].

Fang *et al.* [6] mengusulkan sistem watermarking yang tahan terhadap serangan screen-shooting dengan menggunakan pengodean BCH(63,39) dan embedding bit watermark ke dalam koefisien DCT di sekitar titik kunci SIFT. Namun, metode ini masih bergantung pada kekuatan embedding tetap sehingga tidak adaptif terhadap variasi konten lokal, dan tidak memiliki mekanisme validasi selama ekstraksi.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini memperkenalkan beberapa inovasi utama. Pertama, lokalisasi fitur ditingkatkan menggunakan Improved SIFT (I-SIFT) untuk mengidentifikasi wilayah penyisipan secara akurat tanpa memerlukan citra asli. Kedua, diterapkan strategi adaptive embedding yang menyisipkan watermark secara redundan pada beberapa blok, sehingga meningkatkan peluang bertahan terhadap distorsi perspektif dan artefak moiré. Ketiga, dirancang kerangka kerja blind extraction yang memanfaatkan validasi silang berbasis Bit Error Rate (BER), sehingga meningkatkan keandalan decoding. Terakhir, ditambahkan mekanisme CRC + BCH sebagai proteksi ganda terhadap error, untuk memastikan integritas watermark yang diekstraksi.

Sisa jurnal ini disusun sebagai berikut. Bagian II mengulas pekerjaan terkait dan karakteristik distorsi yang disebabkan oleh serangan screen-shooting. Bagian III menjelaskan konstruksi tanda air, penyisipan, dan proses ekstraksi yang diusulkan. Bagian IV menyajikan pengaturan eksperimental dan mengevaluasi sistem di bawah berbagai serangan fisik dan simulasi. Bagian V membahas hasil, ketahanan, dan keterbatasan metode yang diusulkan. Akhirnya, Bagian VI menyimpulkan jurnal dan menguraikan arah kerja masa depan.

II. TINJAUAN LITERATUR

Serangan screen-shooting menimbulkan distorsi kompleks seperti lengkungan perspektif, artefak moiré, dan derau sensor yang secara signifikan menurunkan keandalan watermark yang tertanam. Berbagai metode telah diusulkan untuk mengatasi tantangan ini, terutama dalam domain transformasi dan berbasis fitur.

Penelitian mengenai watermarking telah banyak dilakukan untuk meningkatkan robustness dan imperceptibility. Novamizanti *et al.* [1] memperkenalkan metode watermarking citra medis berbasis coefficient pair modification pada domain DCT, yang relevan dengan penelitian ini karena sama-sama memanfaatkan modifikasi pasangan koefisien DCT pada frekuensi menengah. Utami *et al.* [2] menggabungkan metode SURF, DCT, dan SVD untuk memperkuat ketahanan watermark medis terhadap manipulasi geometris, sejalan dengan penggunaan I-SIFT dalam penelitian ini yang juga menekankan pentingnya fitur lokal.

Optimasi embedding juga menjadi perhatian, misalnya oleh Iwut *et al.* [3] yang menggunakan genetic algorithm untuk mengoptimalkan watermarking berbasis DCT. Pendekatan ini kemudian diperluas oleh Hafizhana *et al.* [4] melalui stationary wavelet transform (SWT) dan *compressive sensing* untuk menjaga kualitas citra sekaligus meningkatkan robustness. Penelitian pada domain audio, seperti Novamizanti *et al.* [5] yang mengoptimalkan DCT-based audio watermarking dengan genetic algorithm, serta Octafian *et al.* [6] yang menggabungkan DCT-SWT dengan RC4 encryption, menunjukkan bahwa integrasi antara optimasi dan proteksi tambahan dapat meningkatkan keamanan sistem. Prinsip ini sejalan dengan penelitian ini yang menggabungkan CRC dan BCH sebagai proteksi ganda terhadap error. Terbaru, Pratama *et al.*

[7] memperluas optimasi watermarking berbasis DCT dan dekomposisi menggunakan genetic algorithm, yang menunjukkan relevansi optimasi dalam menjaga keseimbangan antara imperceptibility dan robustness.

Khusus untuk serangan screen-shooting, Fang *et al.* [8] mengusulkan sistem berbasis SIFT keypoint + DCT + BCH, tetapi embedding masih bersifat tetap sehingga kurang adaptif. Nakamura *et al.* [9] menggunakan kalibrasi geometrik berbasis pencocokan templat, namun membutuhkan fiducial marker eksternal yang sulit diterapkan di dunia nyata. Wang *et al.* [10] mengadopsi pemilihan fitur adaptif berbasis SURF, sedangkan Chen *et al.* [11] memperkenalkan embedding berbasis quaternion DCT dengan momen invarian rotasi, meskipun kompleksitas sistem meningkat.

Pendekatan berbasis *deep learning* juga mulai diperkenalkan. Li *et al.* [12] melatih model berbasis fitur mendalam untuk menghadapi distorsi screen-shooting, namun terbatas pada generalisasi dataset. Li dan Liao [13] mengembangkan CNN ringan untuk mengurangi artefak moiré dan memperbaiki pemulihan watermark. Dibandingkan dengan metode tersebut, penelitian ini menggabungkan lokalisasi keypoint berbasis I-SIFT, adaptive DCT embedding, dan proteksi CRC + BCH, sehingga tetap ringan, *blind*, dan robust dalam menghadapi distorsi screen-shooting di dunia nyata.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Meskipun terdapat kemajuan signifikan dalam penandaan air tangguh untuk pengambilan gambar layar, sebagian besar metode yang ada masih memiliki keterbatasan yang mengurangi efektivitasnya dalam kondisi dunia nyata. Strategi penyematn dengan kekuatan tetap gagal beradaptasi dengan variasi tekstur lokal, sehingga menghasilkan trade-off yang kurang optimal antara ketidakpekaan dan ketahanan. Pendekatan domain frekuensi saja seringkali mengalami kesulitan sinkronisasi di bawah distorsi perspektif dan artefak moiré yang ditimbulkan oleh sensor kamera. Demikian pula, sistem berbasis keypoint meskipun lebih tangguh terhadap transformasi geometris cenderung menyematkan muatan tanpa modulasi adaptif atau validasi tingkat bit yang presisi, sehingga rentan terhadap kesalahan decode di bawah degradasi yang parah. Selain itu, metode berbasis pembelajaran mendalam, meskipun canggih, seringkali membutuhkan kumpulan data beranotasi yang besar dan beroperasi dalam pengaturan non-blind, sehingga membatasi kepraktisannya dalam

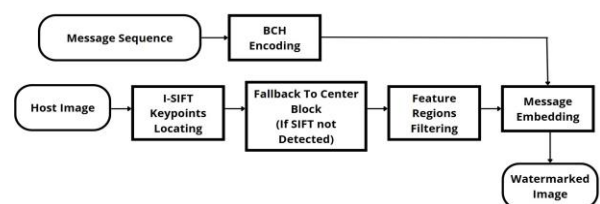
penerapan di dunia nyata di mana gambar asli mungkin tidak tersedia.

A. Penyisipan Watermark

Proses penyisipan watermark diawali dengan mengonversi gambar asli I_{ori} ke saluran grayscale dan Y channel. Selanjutnya, dilakukan deteksi keypoints menggunakan metode Improved SIFT (I-SIFT) dengan margin lebih dari 32 piksel. Apabila jumlah keypoints yang terdeteksi kurang dari lima, maka digunakan blok pusat sebagai cadangan. Sepuluh keypoints dengan respons tertinggi kemudian dipilih untuk proses selanjutnya. Setiap blok berukuran 64×64 piksel yang mengandung keypoint $A(p_j)$ dibagi menjadi sub-blok berukuran 8×8 piksel. Pada setiap sub-blok tersebut dilakukan *Discrete Cosine Transform* (DCT) dan diambil dua koefisien, yaitu $C_1=D(4,5)$ dan $C_2=D(5,4)$. Nilai δ dihitung menggunakan rumus $\delta=0,9 \cdot (|C_1|+|C_2|)+20$ r. Bit watermark w_{ij} kemudian disisipkan dengan cara menggeser C_1 dan C_2 sesuai polaritasnya. Setelah itu, inverse DCT diterapkan untuk mengembalikan blok yang telah dimodifikasi, dan blok-blok hasil modifikasi digabungkan kembali ke dalam gambar asli I_{ori} untuk menghasilkan gambar ber-watermark I .

Watermark adalah bilangan bulat 30-bit yang diberikan oleh pengguna, yang dikonversi ke biner dan ditambahkan dengan CRC-7 untuk deteksi kesalahan. Hasil 37-bit kemudian dikodekan dengan BCH (63,36), dan kata sandi 63-bit terakhir dibentuk ulang menjadi 8×8 matriks biner untuk penyisipan. Jika kurang dari 5 titik kunci valid ditemukan menggunakan I-SIFT, algoritma menanamkan watermark ke tengah gambar menggunakan 64×64 block.

Setiap wilayah yang dipilih dibagi menjadi 8×8 blocks, dan bit watermark disematkan dengan memodifikasi koefisien DCT frekuensi menengah (4, 5) and (5, 4). Nilai koefisien disesuaikan secara adaptif berdasarkan $\delta = 0.9 \cdot (|C_1| + |C_2|) + 20r$, dimana r adalah parameter kekuatan embedding. Proses ini memastikan keseimbangan antara imperceptibility dan robustness.

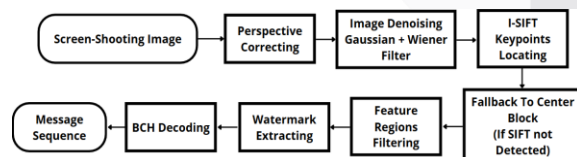


Gambar 2. Proses Penyisipan

B. Ekstraksi Watermark

Proses ekstraksi watermark dimulai dengan melakukan koreksi homografi pada gambar hasil tangkapan layar (screen-shoot) untuk menghilangkan efek moiré. Selanjutnya, gambar tersebut diubah menjadi grayscale dan diterapkan metode I-SIFT. Apabila jumlah keypoints yang terdeteksi kurang dari lima, maka digunakan blok pusat sebagai cadangan. Kemudian, dibuat tiga pergeseran sub-blok yang berbeda sehingga menghasilkan hingga 90 kandidat. Setiap blok berukuran 64×64 piksel dibagi menjadi sub-blok berukuran 8×8 piksel. Pada setiap sub-blok dilakukan transformasi DCT, lalu diambil dua koefisien yaitu $C_1=D(4,5)$ dan $C_2=D(5,4)$. Bit watermark w_{ij} dipulihkan dengan menetapkan nilai 1 jika $C_1 \leq C_2$, dan 0 jika sebaliknya. Semua kode yang diekstraksi kemudian dibandingkan berdasarkan nilai Bit Error Rate (BER) untuk memilih hasil terbaik. Setelah itu, dilakukan proses decoding menggunakan BCH (63,36) dan dilanjutkan dengan deteksi CRC untuk memvalidasi pesan. Akhirnya, watermark 30-bit dinyatakan berhasil diekstraksi apabila CRC valid, dan dinyatakan gagal jika tidak.

Seperti yang diilustrasikan pada Gambar. 3, Citra yang diterima pertama-tama dikoreksi untuk distorsi perspektif melalui homografi empat titik. Filter Gaussian dan Wiener diterapkan untuk mengurangi derau moiré, meningkatkan deteksi titik kunci dan akurasi ekstraksi. Beberapa titik kunci I-SIFT dideteksi, dan di sekitar masing-masing titik kunci, sembilan subwilayah yang bergeser diekstraksi untuk memperhitungkan jitter geometrik lokal. Setiap subwilayah didekodekan menjadi matriks 64-bit dan diratakan menjadi kata sandi 63-bit. Dari semua kandidat, BER berpasangan dihitung, dan pasangan yang paling konsisten dipilih. Kata sandi akhir menjalani decode BCH (63,36), dan validasi CRC-8 dilakukan pada pesan 30-bit yang telah didekodekan.



Gambar 3. Proses Ekstraksi.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk memastikan evaluasi yang komprehensif, empat citra uji skala abu-abu standar Zelda, Baboon, Peppers, dan Air- plane digunakan sebagai citra induk untuk penyisipan watermark, seperti yang

diilustrasikan pada Gambar 4. Citra-citra ini dipilih karena karakteristik teksturnya yang beragam, mulai dari area halus (misalnya, Zelda) hingga detail frekuensi tinggi (misalnya, Baboon), yang memungkinkan penilaian yang kuat terhadap lokalisasi titik kunci dan fidelitas penyisipan. Nilai tanda air 30-bit sebesar 107374182 disisipkan ke dalam setiap citra dan uji tangkapan layar dilakukan menggunakan kamera ponsel pintar 48 megapiksel untuk mensimulasikan kondisi pengambilan ulang di dunia nyata.



Gambar 4. Contoh gambar host yang digunakan untuk eksperimen penyisipan watermark.

Untuk mensimulasikan kondisi pengambilan gambar layar di dunia nyata, eksperimen pengambilan gambar ulang fisik dilakukan. Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5, pengaturan pengujian melibatkan tampilan gambar ber-watermark pada monitor LCD standar, yang kemudian diambil ulang menggunakan kamera digital yang dipasang pada tripod. Jarak antara layar dan kamera diukur dan diatur dengan cermat untuk memastikan konsistensi. Pencahayaan sekitar dijaga konstan, dan parameter kamera diatur secara manual untuk meminimalkan variasi pencahayaan otomatis. Pengaturan ini dirancang untuk mereplikasi kondisi pengambilan gambar layar praktis dan menghadirkan distorsi realistis seperti pergeseran perspektif, interferensi moiré, dan noise sensor.

Pengujian dilakukan pada gambar standar yang diubah ukurannya menjadi 512×512 . Watermark integer 39-bit dikodekan dan disematkan menggunakan alur kerja yang diusulkan. Ekstraksi diuji setelah kompresi JPEG, derau Gaussian, dan distorsi perspektif. BER dan PSNR diukur.

Untuk memastikan ketidakepekaan, parameter kekuatan penyisipan disetel sehingga citra ber-watermark yang dihasilkan mencapai Rasio Sinyal terhadap Derau Puncak (PSNR) sekitar 42 dB dibandingkan dengan citra asli. Tabel 2 mengilustrasikan contoh visual citra yang ditangkap ulang dan dipulihkan pada berbagai sudut perspektif horizontal. Seiring bertambahnya sudut pandang (misalnya, $\pm 65^\circ$), watermark yang dipulihkan

menunjukkan distorsi yang terlihat akibat lengkungan geometris dan artefak yang disebabkan oleh perspektif.



Gambar 5. Simulasi serangan screen-shooting.

Tabel 1. Rata-rata BER pada Watermark yang Diekstraksi dengan Jarak Pengambilan Gambar yang Berbeda

Jarak (Cm)	Nakamura et al. [2]	Fang et al. [1]	Metode yang diusulkan
45	10.50	0.50	0.00
55	9.44	0.69	0.00
75	8.75	0.88	0.53
95	19.06	0.75	0.26
105	19.50	1.31	0.56

Seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1, metode yang diusulkan secara konsisten outperform metode sebelumnya pada berbagai jarak kamera, mencapai tingkat bit kesalahan yang lebih rendah, dan berhasil memulihkan watermark hingga 75 cm, di mana metode lain mulai mengalami degradasi yang signifikan.

Tabel 2. Rata-rata BER pada Watermark yang di ekstraksi dengan Sudut Perspektif Horizontal yang Berbeda

Sudut Horizontal (°)	Metode yang diusulkan
Kiri 65°	0.00
Kiri 30°	0.00
0	0.00
Kanan 30°	0.26
Kanan 65°	0.56

Tabel 2 menyajikan analisis kuantitatif bit yang salah di bawah variasi sudut pandang vertikal. Meskipun metode yang diusulkan berhasil memulihkan data pada sudut 0°, kinerjanya menurun

secara signifikan pada sudut kemiringan yang lebih besar, di mana tingkat kesalahan melebihi 0,3 dan mengakibatkan kegagalan ekstraksi pesan.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Jurnal ini mengusulkan metode watermarking citra digital yang menggabungkan DCT-domain embedding adaptif dengan lokalisasi titik kunci I-SIFT dan proteksi kesalahan CRC+BCH, yang dirancang untuk menyeimbangkan imperceptibility dan robustness terhadap serangan screen-shooting fisik. Eksperimen menunjukkan BER = 0,00 pada berbagai jarak dan sudut pengambilan ulang, melampaui performa metode benchmark Fang et al. (BER 0,50 – 1,31). Integrasi jalur koreksi perspektif dan filtering moire' berperan penting dalam menjaga akurasi ekstraksi di bawah distorsi geometris dan fotometris. Untuk pengembangan selanjutnya, peningkatan invariansi rotasi dan eksplorasi transformasi yang lebih kuat seperti DWT direkomendasikan guna memperluas ketahanan terhadap variasi pengambilan ulang yang lebih ekstrem.

REFERENSI

- [1] L. Novamizanti, A. B. Suksmono, D. Danudirdjo, and G. Budiman, "Robust and imperceptible watermarking on medical images using coefficient pair modification," *IJUM Engineering Journal*, vol. 24, no. 1, pp. 88–105, 2023.
- [2] N. S. Utami, L. Novamizanti, S. Saidah, and I. N. A. Ramatryana, "SVD on a robust medical image watermarking based on SURF and DCT," in *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. 4.0, Artif. Intell., Commun. Technol. (IAICT)*, Jul. 2021, pp. 32–38.
- [3] I. Iwut, G. Budiman, and L. Novamizanti, "Optimization of discrete cosine transform-based image watermarking by genetics algorithm," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 4, no. 1, pp. 91–103, 2016.
- [4] Y. Hafizhana, I. Safitri, L. Novamizanti, and N. U. R. Ibrahim, "Image watermarking pada citra medis menggunakan compressive sensing berbasis stationary wavelet transform," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 8, no. 1, pp. 43–52, 2020.
- [5] L. Novamizanti, G. Budiman, and I. Safitri, "Modified DCT-based audio watermarking optimization using genetics algorithm," *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing*

- Electronics and Control*), vol. 16, no. 6, pp. 2651–2660, 2018.
- [6] M. R. N. Octafian, L. Novamizanti, I. Safitri, and R. P. Sitepu, “Audio steganography technique using DCT-SWT with RC4 encryption,” in *Proc. Int. Conf. Data Sci. Appl. (ICoDSA)*, Jul. 2022, pp. 35–40.
 - [7] M. A. Y. Pratama, L. Novamizanti, and G. Budiman, “Optimization of robust image watermarking based on DCT and decomposition using genetic algorithm,” in *Frontiers in Genetics Algorithm Theory and Applications. Singapore: Springer Nature Singapore*, 2024, pp. 245–268.
 - [8] H. Fang, S. Wang, Y. Zhao, and H. Leung, “Screen-shooting resilient watermarking,” *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 13, no. 6, pp. 1413–1426, Jun. 2018.
 - [9] T. Nakamura, K. Kimura, and T. Yamasaki, “Digital watermarking robustness under camera recapture attacks,” in *Proc. ACM Multimedia Asia*, 2018.
 - [10] Z. Wang, Y. Xu, and L. Chen, “Robust watermarking against screen-cam attacks via feature-based DCT embedding,” in *Proc. IEEE Int. Conf. on Multimedia and Expo*, 2019, pp. 1294–1299.
 - [11] L. Chen, Y. Zhang, and J. Liu, “Screen content watermarking using region-based DCT embedding,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 14256–14265, 2020.
 - [12] Y. Li, M. Zhou, and H. Wang, “Deep feature learning for screen-capture resilient watermarking,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 33, pp. 123–135, 2024.
 - [13] X. Li, H. Zhang, and Y. He, “Robust Blind Watermarking Using Quaternion Tensor DCT and Keypoint Learning,” *Sensors*, vol. 21, no. 19, pp. 6554, 2021.
 - [14] D. G. Lowe, “Distinctive image features from scale-invariant keypoints,” *Int. Journal of Computer Vision*, vol. 60, no. 2, pp. 91–110, 2004.
 - [15] B. Bai, X. Chen, and Y. He, “ORB-based DWT-SVD blind watermarking for geometric attacks,” in *IEEE ICME*, 2023.
 - [16] M. Nasir, A. Mansoor, and M. Siddiqui, “A comparative study of robust digital image watermarking techniques,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 71, no. 5, pp. 1–6, 2013.
 - [17] I. J. Cox, M. L. Miller, and J. Bloom, *Digital Watermarking*, Morgan Kaufmann, 2002.
 - [18] C.-S. Lu, S.-K. Huang, C.-J. Sze, and H.-Y. M. Liao, “Cocktail water- marking for digital image protection,” *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 2, no. 4, pp. 209–224, Dec. 2000.
 - [19] M.-J. Tsai, H.-Y. Huang, and Y.-H. Chen, “Robust watermarking against screen-camcorder attack,” in *Proc. Int. Conf. on Information Security and Assurance (ISA)*, 2009, pp. 161–164.
 - [20] A. Panah, R. Safabakhsh, and M. Naderi, “Screen camcorder resilient watermarking using virtual watermarking and image registration,” in *Proc. IEEE Int. Conf. on Multimedia and Expo (ICME)*, 2012, pp. 801–806.
 - [21] H. Deng, L. Zhang, and S. Wang, “SVD-DCT Based Robust Watermark- ing in Feature Domain for Screen-Cam Resilience,” *Multimedia Tools and Applications*, vol. 81, pp. 15345–15366, 2022.
 - [22] A. Pramila, R. S. Kiran, and P. H. G. Kumar, “Perspective Resilient Wa- termarking with SIFT-Harris Localization for Printed-Cam and Screen-Cam Capture,” *Signal, Image and Video Processing*, 2024.
 - [23] T. Liang, Q. Jin, and Y. Luo, “ScreenMark: End-to-End Water- marking Framework Against Screen-Shot Attacks,” *arXiv preprint*, arXiv:2409.03487, 2024.
 - [24] A. Yakushev, E. Zakharov, and V. Lempitsky, “DocMarking: Document Screen-Capture Watermarking via Learned Visibility and Robustness,” *arXiv preprint*, arXiv:2304.12682, 2023.
 - [25] Y. Cao, B. Xie, and Z. Chen, “Lightweight Frequency-Domain Neural Watermarking under Screen-Cam Distortions,” *Expert Systems with Applications*, vol. 239, pp. 123159, 2024.
 - [26] E. T. Lin and E. J. Delp, “A review of fragile watermarking schemes for image authentication,” in *Proc. SPIE Security and Watermarking of Multimedia Contents*, vol. 4675, 2001, pp. 25–36.