

Pemulihan Citra Digital Menggunakan Teknik Inpainting Berbasis Interpolasi dan Operasi Morfologi

Abdullah Mubarak - 13522101^{1,2}

Program Studi Teknik Informatika

Sekolah Teknik Elektro dan Informatika

Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10 Bandung 40132, Indonesia

¹13522101@std.stei.itb.ac.id, ²brkmanics@gmail.com

Abstrak— *Image inpainting* adalah teknik pemulihan citra digital yang bertujuan untuk mengisi bagian yang rusak atau hilang dengan memanfaatkan informasi dari bagian sekitar yang masih utuh. Penelitian ini mengimplementasikan dan membandingkan empat metode inpainting, yaitu Interpolasi bilinear, Interpolasi bikubik, operasi berbasis morfologi dan kombinasi morfologi dan interpolasi. Evaluasi dilakukan pada empat jenis kerusakan citra, yaitu goresan (*scratch*), region teks, objek, dan kerusakan acak, menggunakan metrik PSNR, SSIM, dan MSE. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa metode Interpolasi bilinear memberikan performa terbaik dengan rata-rata PSNR 61.71 dB dan SSIM 0.9986 untuk citra uji. Metode berbasis morfologi menunjukkan keseimbangan yang baik antara kualitas (PSNR 52.05 dB, SSIM 0.9977) dan ketahanan (*robustness*) terhadap berbagai jenis kerusakan. Metode Interpolasi bikubik memberikan hasil yang lebih konsisten untuk region rusak besar namun dengan PSNR lebih rendah. Pendekatan kombinasi tidak menunjukkan peningkatan signifikan dibanding metode tunggal. Hasil eksperimen ini diharapkan memberi wawasan mengenai karakteristik dan trade-off masing-masing metode inpainting untuk pemulihan citra.

Kata Kunci—image inpainting, image restoration, interpolasi bilinear, interpolasi bicubic, morfologi matematis, PSNR, SSIM

I. PENDAHULUAN

Citra digital memainkan peran fundamental dalam berbagai aspek kehidupan modern, mulai dari komunikasi visual, dokumentasi, hingga analisis ilmiah. Namun dalam praktiknya, citra sering mengalami degradasi atau kerusakan akibat berbagai faktor seperti goresan pada foto fisik, noise selama transmisi, kompresi *lossy* yang berlebihan, atau kerusakan media penyimpanan. Kerusakan ini dapat mengurangi nilai informasi dan kualitas estetika citra sehingga diperlukan teknik pemulihan yang efektif.

Image inpainting adalah proses rekonstruksi bagian yang rusak atau hilang pada citra digital dengan memanfaatkan informasi dari pixel-pixel di sekitarnya yang masih utuh. Berbeda dengan *filtering* atau *enhancement* yang memodifikasi seluruh citra, inpainting

bersifat lokal dan lebih spesifik, yaitu dengan hanya mempengaruhi bagian yang ditentukan oleh *mask*.

Aplikasi inpainting sangat luas, mencakup restorasi foto-foto bersejarah yang rusak oleh waktu, penghilangan *watermark* atau *text overlay* pada gambar, *object removal* dalam fotografi, hingga rekonstruksi bagian yang tertutup pada citra medis.

Terdapat berbagai pendekatan dalam image inpainting, mulai dari metode klasik berbasis persamaan difusi dan *patch-based synthesis*, hingga pendekatan modern menggunakan deep learning. Metode klasik, khususnya yang berbasis interpolasi dan operasi morfologi, menarik untuk dikaji karena kesederhanaannya, kemudahan dalam interpretasi, serta efisiensi komputasi yang memungkinkan implementasi *real-time* tanpa memerlukan sumber daya yang besar.

II. LANDASAN TEORI

A. Citra Digital

Citra digital adalah representasi diskrit dari suatu objek nyata melalui pencuplikan secara ruang dan atau waktu. Pencuplikan secara ruang, seperti pada gambar, menggunakan koordinat kartesian (x, y) dengan masing-masing titik memiliki nilai tertentu. Citra digital dapat direpresentasikan sebagai matriks berukuran $M \times N$.

Citra digital tersusun atas elemen dasar yang disebut pixel. Setiap pixel merepresentasikan satu sampel intensitas cahaya pada lokasi tertentu. Pada citra keabuan (*grayscale*), nilai intensitas umumnya direpresentasikan menggunakan 8 bit sehingga memiliki 256 tingkat keabuan, dari hitam (0) hingga putih (255). Kualitas dan ukuran citra digital ditentukan oleh dua parameter utama, yaitu resolusi spasial dan kedalaman bit. Resolusi spasial menyatakan jumlah pixel dalam arah horizontal dan vertikal, sedangkan kedalaman bit menentukan jumlah tingkat intensitas yang dapat direpresentasikan.

Dalam pemrosesan citra digital, citra bisa direpresentasikan sebagai sinyal dua dimensi yang memiliki karakteristik frekuensi. Komponen frekuensi rendah merepresentasikan area citra yang relatif homogen

atau halus, sedangkan komponen frekuensi tinggi merepresentasikan detail seperti tepi dan tekstur. Representasi frekuensi ini menjadi dasar bagi berbagai teknik pemrosesan citra lanjutan, termasuk kompresi dan *Watermarking* berbasis domain transformasi.

B. Image Restoration dan Image Inpainting

Image restoration merupakan cabang pemrosesan citra digital yang bertujuan mengembalikan citra terdegradasi ke kondisi yang mendekati citra aslinya dengan memanfaatkan model matematis dari proses degradasi. Secara umum, degradasi citra dapat dimodelkan sebagai kombinasi antara operator degradasi dan noise sehingga proses restoration berfokus pada estimasi citra asli berdasarkan citra teramat.

Image inpainting merupakan kasus khusus dari image restoration, di mana lokasi region yang rusak atau hilang diketahui secara eksplisit dalam bentuk mask. Tujuan utama inpainting adalah mengisi nilai pixel pada region tersebut sedemikian rupa sehingga hasil rekonstruksi menyatu secara visual dengan area di sekitarnya. Tidak seperti filtering atau enhancement yang bekerja secara global, inpainting bersifat lokal dan hanya mempengaruhi area tertentu yang didefinisikan oleh mask.

Pendekatan inpainting banyak digunakan pada aplikasi restorasi foto lama, penghapusan objek atau teks yang tidak diinginkan, serta rekonstruksi citra yang mengalami kerusakan fisik. Keberhasilan inpainting sangat bergantung pada kemampuan metode dalam menjaga kontinuitas struktur, gradien, dan tekstur antara region hasil rekonstruksi dan region asli.

C. Metode Inpainting Berbasis Interpolasi

Interpolasi merupakan pendekatan sederhana dalam image inpainting yang mengestimasi nilai pixel yang hilang berdasarkan nilai pixel di sekitarnya. Pendekatan ini memanfaatkan korelasi spasial antar pixel, dengan asumsi bahwa perubahan intensitas citra bersifat halus dan kontinu pada skala lokal.

Metode interpolasi umumnya efektif untuk citra dengan gradien halus dan struktur sederhana tetapi memiliki keterbatasan dalam menangani tekstur kompleks atau pola berulang. Dalam konteks inpainting, interpolasi biasanya diterapkan secara iteratif hingga seluruh region yang rusak terisi. Terdapat dua jenis interpolasi, yaitu interpolasi bilinear dan interpolasi bikubik.

Interpolasi bilinear merupakan metode interpolasi dua dimensi yang menggunakan empat pixel tetangga terdekat untuk mengestimasi nilai pixel yang tidak diketahui. Estimasi dilakukan dengan pembobotan linier berdasarkan jarak spasial antara pixel target dan pixel tetangganya.

Dalam implementasi inpainting, interpolasi bilinear sering dilakukan secara iteratif, di mana pada setiap iterasi nilai pixel pada region rusak diperbarui berdasarkan tetangga yang sudah valid. Proses ini memungkinkan difusi nilai intensitas dari batas region menuju bagian interior secara bertahap.

Keunggulan utama interpolasi bilinear adalah kesederhanaan dan efisiensi komputasinya. Metode ini cenderung menghasilkan transisi intensitas yang halus dan stabil pada citra dengan gradien smooth. Namun, interpolasi bilinear dapat menyebabkan efek blur dan kehilangan detail pada area dengan frekuensi tinggi atau struktur tajam.

Interpolasi bikubik merupakan metode interpolasi yang menggunakan enam belas pixel tetangga (4×4) untuk mengestimasi nilai pixel yang hilang. Metode ini menggunakan fungsi kubik sehingga menghasilkan kontinuitas turunan pertama yang lebih baik dibandingkan interpolasi bilinear.

Dalam praktik inpainting, interpolasi bikubik sering diimplementasikan menggunakan algoritma berbasis propagasi, seperti Fast Marching Method, yang memperhatikan arah isophote (garis intensitas konstan) dalam citra. Pendekatan ini dirancang untuk mempertahankan kelanjutan struktur visual secara lebih natural.

Meskipun secara teoritis mampu mempertahankan detail lebih baik, interpolasi bikubik memiliki kompleksitas komputasi yang lebih tinggi dan dapat menghasilkan artefak seperti ringing atau ketidakkonsistenan intensitas pada region tertentu, terutama jika karakteristik citra tidak sesuai dengan asumsi metode.

D. Operasi Morfologi Matematis untuk Inpainting

Morfologi matematis merupakan pendekatan pemrosesan citra yang berfokus pada analisis dan manipulasi bentuk geometris dalam citra. Operasi morfologi menggunakan structuring element sebagai alat untuk mengevaluasi dan memodifikasi hubungan spasial antar pixel.

Dalam konteks image inpainting, operasi morfologi digunakan untuk mempropagasikan informasi dari region valid ke region rusak secara bertahap, mengikuti struktur lokal citra.

Operasi dasar morfologi yang umum digunakan meliputi dilasi dan erosi. Dilasi memperluas area objek atau region valid, sedangkan erosi mengikis area objek. Kombinasi kedua operasi ini menghasilkan operasi lanjutan seperti opening dan closing yang berguna untuk menghaluskan struktur dan mengisi celah kecil.

Pendekatan inpainting berbasis morfologi umumnya dilakukan secara iteratif dengan cara memperluas Batasan area valid ke dalam area rusak. Pada setiap iterasi, pixel

baru yang terisi memperoleh nilai berdasarkan agregasi pixel tetangga yang sudah valid, seperti rata-rata atau median.

Keunggulan metode morfologi terletak pada kemampuannya menjaga kontinuitas struktur dan batas objek. Metode ini relatif robust terhadap noise dan tidak memerlukan penyelesaian persamaan diferensial yang kompleks. Namun, metode morfologi cenderung menghasilkan transisi intensitas yang kurang halus dan dapat menimbulkan artefak bertipe *piecewise* pada region yang luas.

E. Pendekatan Hybrid dalam Image Inpainting

Pendekatan hybrid dalam image inpainting mengkombinasikan dua atau lebih metode dengan tujuan memanfaatkan keunggulan masing-masing pendekatan. Umumnya, metode morfologi digunakan untuk propagasi struktur global atau pengisian kasar, sedangkan metode interpolasi digunakan untuk memperhalus hasil rekonstruksi.

Pendekatan ini didasarkan pada asumsi bahwa satu metode tunggal sulit menangani seluruh variasi karakteristik kerusakan citra. Dengan menggabungkan metode berbasis struktur dan metode berbasis nilai intensitas, diharapkan hasil inpainting dapat lebih konsisten secara visual.

Namun, efektivitas pendekatan hybrid sangat bergantung pada strategi penggabungan yang digunakan. Kombinasi yang tidak tepat dapat menyebabkan propagasi kesalahan dari satu tahap ke tahap berikutnya sehingga hasil akhir tidak selalu lebih baik dibandingkan metode tunggal.

F. Metrik Evaluasi Kualitas Inpainting

Evaluasi kualitas hasil inpainting dilakukan menggunakan metrik objektif dan perceptual untuk memperoleh gambaran yang komprehensif. Metrik yang digunakan dalam penelitian ini meliputi Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), Structural Similarity Index (SSIM), dan Mean Squared Error (MSE).

PSNR digunakan untuk mengukur perbedaan numerik antara citra hasil inpainting dan citra referensi. Nilai PSNR yang tinggi menunjukkan tingkat distorsi yang rendah. Namun, PSNR tidak selalu selaras dengan persepsi visual manusia.

SSIM digunakan untuk mengevaluasi kesamaan struktur antara dua citra dengan mempertimbangkan luminansi, kontras, dan struktur lokal. Metrik ini lebih representatif terhadap persepsi visual dan sering digunakan sebagai pelengkap PSNR.

MSE digunakan sebagai ukuran error rata-rata kuadrat antara pixel citra hasil inpainting dan citra referensi. Dalam konteks inpainting, MSE sering dihitung secara khusus pada region yang dimask untuk mengevaluasi kualitas rekonstruksi secara lebih spesifik.

Kombinasi ketiga metrik ini memungkinkan analisis kualitas inpainting yang lebih menyeluruh, baik dari aspek matematis maupun perseptual.

III. IMPLEMENTASI SOLUSI

Implementasi sistem image inpainting dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan memanfaatkan pustaka standar pemrosesan citra, yaitu NumPy dan OpenCV. Sistem dirancang secara modular dengan pendekatan berbasis kelas sehingga setiap metode inpainting diimplementasikan sebagai turunan dari kelas dasar yang sama. Pendekatan ini memudahkan proses perbandingan antar metode karena seluruh metode menerima input dan menghasilkan output dengan format yang identik.

Secara umum, alur implementasi terdiri dari beberapa tahap utama, yaitu persiapan data citra uji, pembangkitan mask kerusakan, penerapan metode inpainting, evaluasi kualitas hasil inpainting, serta visualisasi hasil eksperimen. Seluruh eksperimen dilakukan dalam lingkungan terkontrol menggunakan citra grayscale dan mask sintesis agar hasil evaluasi dapat dibandingkan secara objektif.

A. Struktur Kelas Dasar Inpainting

Seluruh metode inpainting diturunkan dari sebuah kelas dasar yang mendefinisikan antarmuka umum metode inpainting. Kelas dasar ini memastikan bahwa setiap metode memiliki fungsi utama `inpaint(image, mask)` yang menerima citra input dan mask kerusakan, serta mengembalikan citra hasil pemulihan.

```
class ImageInpainting:
    def inpaint(self, image, mask):
        raise NotImplementedError
```

B. Implementasi Inpainting Berbasis Interpolasi Bilinear

Metode interpolasi bilinear diimplementasikan secara iteratif dengan memanfaatkan korelasi spasial lokal antar pixel. Pada setiap iterasi, nilai pixel pada region yang rusak diperbarui berdasarkan nilai pixel valid di sekitarnya menggunakan pembobotan invers jarak. Proses ini mensimulasikan difusi nilai intensitas dari boundary region menuju bagian interior region rusak.

Iterasi dilakukan hingga mencapai batas iterasi maksimum atau hingga perubahan nilai pixel antar iterasi berada di bawah ambang konvergensi tertentu. Pendekatan iteratif ini memungkinkan propagasi nilai

yang stabil dan menghasilkan transisi intensitas yang halus.

```
for i, j in zip(rows, cols):
    neighbors = []
    weights = []

    for di in [-1, 0, 1]:
        for dj in [-1, 0, 1]:
            if di == 0 and dj == 0:
                continue
            ni, nj = i + di, j + dj
            if valid_pixel and not masked:
                neighbors.append(result[ni, nj])
                weights.append(1.0 / np.sqrt(di**2 + dj**2))

            if len(neighbors) > 0:
                result[i, j] = np.sum(neighbors * weights) / np.sum(weights)
```

C. Implementasi Inpainting Berbasis Interpolasi Bikubik

Metode interpolasi bicubic diimplementasikan menggunakan fungsi `cv2.inpaint` dengan flag `INPAINT_TELEA`, yang berbasis Fast Marching Method (FMM). Metode ini memanfaatkan informasi arah isophote untuk mempropagasikan nilai pixel dari area valid ke area rusak dengan memperhatikan kelanjutan struktur lokal.

Pendekatan ini bersifat non-iteratif dari sisi pengguna dan memiliki kompleksitas komputasi yang relatif rendah karena dioptimalkan di tingkat pustaka OpenCV.

```
result = cv2.inpaint(
    image,
    mask.astype(np.uint8),
    inpaintRadius=3,
    flags=cv2.INPAINT_TELEA
)
```

D. Implementasi Inpainting Berbasis Operasi Morfologi

Metode inpainting berbasis morfologi menggunakan prinsip propagasi nilai secara bertahap dari region valid menuju region rusak melalui operasi dilasi. Pada setiap iterasi, area valid diperluas menggunakan structuring element berbentuk elips, dan pixel baru yang terjangkau diisi dengan nilai rata-rata dari tetangga valid terdekat.

Proses ini dilakukan secara layer-by-layer dari boundary menuju pusat region rusak hingga seluruh mask terisi atau iterasi maksimum tercapai. Pendekatan ini menekankan kesinambungan struktur geometris dibandingkan kehalusan intensitas.

```
valid_dilated = cv2.dilate((~mask_bool).astype(np.uint8), kernel)
```

```
new_filled = valid_dilated & mask_bool

for i, j in zip(rows, cols):
    neighbors = get_valid_neighbors(i, j)
    result[i, j] = np.mean(neighbors)

mask_bool = mask_bool & (~new_filled)

ber = np.sum(orig_bin != extr_bin) / len(orig_bin)
```

E. Implementasi Pendekatan Hybrid

Pendekatan hybrid mengkombinasikan metode morfologi dan interpolasi dengan tujuan memanfaatkan keunggulan masing-masing pendekatan. Pada tahap pertama, metode morfologi digunakan untuk membangun struktur kasar dan mengisi region rusak secara global. Selanjutnya, mask dikecilkan menggunakan operasi erosi untuk memfokuskan area interior, dan metode interpolasi bicubic diterapkan untuk memperhalus hasil rekonstruksi.

Pendekatan ini bersifat sekuensial, di mana hasil tahap pertama menjadi input bagi tahap kedua.

```
result1 = MorphologyInpainting().inpaint(image, mask)
mask_eroded = cv2.erode(mask, kernel, iterations=2)
result2 = BicubicInpainting().inpaint(result1, mask_eroded)
```

F. Pembangkitan Mask Kerusakan

Untuk mensimulasikan berbagai jenis kerusakan citra, sistem menghasilkan beberapa mask sintetis dengan karakteristik berbeda, yaitu goresan linear, region persegi panjang, objek berbentuk lingkaran, dan kerusakan acak. Mask ini digunakan secara konsisten pada seluruh metode inpainting untuk memastikan perbandingan yang adil.

Mask dibentuk menggunakan operasi geometri sederhana dari OpenCV seperti line, rectangle, dan circle, serta sampling acak untuk mensimulasikan kerusakan tersebar.

G. Evaluasi Kualitas Hasil Inpainting

Evaluasi hasil inpainting dilakukan menggunakan metrik PSNR, SSIM, dan MSE. PSNR dan SSIM dihitung pada seluruh citra untuk menjaga konsistensi dengan literatur, sedangkan MSE dihitung secara khusus pada region yang dimask untuk mengevaluasi kualitas pemulihan pada area yang benar-benar direkonstruksi.

```
psnr_val = psnr(original, inpainted, data_range=255)
ssim_val = ssim(original, inpainted, data_range=255)

mse_val = np.mean(
```

```
(original[mask_bool].astype(float) -
 inpainted[mask_bool].astype(float)) **
2
)
```

H. Reprodusabilitas dan Lingkungan Eksperimen

Untuk memastikan reprodusibilitas hasil, eksperimen dijalankan dengan seed acak yang tetap. Seluruh parameter utama seperti ukuran citra, ukuran kernel morfologi, jumlah iterasi, dan radius inpainting dikontrol secara eksplisit di dalam kode. Visualisasi hasil eksperimen dihasilkan secara otomatis untuk mendukung analisis kuantitatif dan kualitatif.

IV. HASIL ANALISIS

Eksperimen dilakukan pada empat jenis kerusakan citra, yaitu Scratch, Text Region, Object, dan Random Damage, dengan menggunakan empat metode inpainting: interpolasi bilinear, interpolasi bicubic, morfologi, dan metode hybrid. Evaluasi dilakukan menggunakan metrik PSNR, SSIM, dan MSE.

Tabel 1. Hasil Inpainting untuk Mask Scratch

Metode	PSNR (dB)	SSIM	MSE
Interpolasi bilinear	63.48	0.9999	3.27
Interpolasi bikubik	47.49	0.9985	130.14
Morphology-based	56.29	0.9997	17.16
Hybrid (Morphology + Interpolation)	49.07	0.9988	90.35

Tabel 2. Hasil Inpainting untuk Mask Text Region

Metode	PSNR (dB)	SSIM	MSE
Interpolasi bilinear	74.70	1.0000	0.05
Interpolasi bikubik	33.38	0.9929	706.97
Morphology-based	58.24	0.9996	2.31
Hybrid (Morphology + Interpolation)	33.66	0.9931	662.77

Tabel 3. Hasil Inpainting untuk Mask Object

Metode	PSNR (dB)	SSIM	MSE
Interpolasi bilinear	64.44	1.0000	0.40
Interpolasi bikubik	25.55	0.9743	3123.90
Morphology-based	51.06	0.9991	8.78
Hybrid	25.65	0.9746	3056.46

(Morphology + Interpolation)			
------------------------------	--	--	--

Tabel 4. Hasil Inpainting untuk Mask Random Damage

Metode	PSNR (dB)	SSIM	MSE
Interpolasi bilinear	44.20	0.9946	5.62
Interpolasi bikubik	36.99	0.9727	29.57
Morphology-based	42.60	0.9925	8.13
Hybrid (Morphology + Interpolation)	40.55	0.9876	13.02

Tabel 5. Rata-rata Performa Semua Mask

Metode	PSNR (dB)	SSIM
Interpolasi bilinear	61.71	0.9986
Morphology-based	52.05	0.9977
Hybrid (Morphology + Interpolation)	37.23	0.9885
Interpolasi bikubik	35.85	0.9846

Berdasarkan hasil eksperimen, metode interpolasi bilinear secara konsisten menghasilkan nilai PSNR dan SSIM tertinggi pada seluruh jenis kerusakan citra. Nilai PSNR rata-rata sebesar 61.71 dB menunjukkan bahwa distorsi hasil rekonstruksi sangat kecil dan hampir tidak dapat dibedakan dari citra asli. Nilai SSIM yang mendekati 1.0 mengindikasikan bahwa struktur citra berhasil dipertahankan dengan sangat baik.

Metode morfologi menempati posisi kedua dengan performa yang stabil pada seluruh jenis mask. Nilai PSNR berada pada rentang 42–58 dB dengan SSIM di atas 0.99, menunjukkan bahwa pendekatan propagasi berbasis struktur mampu mempertahankan kontinuitas objek dan batas region secara efektif, meskipun transisi intensitas tidak sehalus interpolasi bilinear.

Sebaliknya, metode interpolasi bicubic menunjukkan performa yang paling rendah, khususnya pada mask dengan area besar seperti Text Region dan Object. Nilai PSNR yang berada di bawah 36 dB serta MSE yang sangat tinggi menunjukkan bahwa metode ini kurang efektif dalam menangani rekonstruksi area luas pada citra uji yang bersifat sintetis dan memiliki gradien sederhana.

Metode hybrid tidak menunjukkan peningkatan performa yang signifikan dibandingkan metode tunggal. Dalam beberapa kasus, khususnya pada mask Object, performa metode hybrid bahkan mendekati hasil interpolasi bicubic, yang mengindikasikan bahwa tahap interpolasi lanjutan justru memperkenalkan kesalahan

tambahan.

Untuk kerusakan berbentuk goresan (Scratch), interpolasi bilinear dan morfologi sama-sama memberikan hasil sangat baik. Hal ini disebabkan oleh karakteristik goresan yang memanjang dan relatif sempit sehingga propagasi nilai dari boundary dapat dilakukan secara stabil.

Pada kerusakan berbentuk region besar (Text Region), interpolasi bilinear menunjukkan performa paling dominan dengan PSNR mencapai 74.70 dB dan MSE mendekati nol. Hal ini menunjukkan bahwa difusi iteratif sangat efektif dalam mengisi area besar dengan gradien yang halus. Metode morfologi juga memberikan hasil baik tetapi kurang optimal dibandingkan bilinear.

Untuk kerusakan berbentuk objek (Object), perbedaan performa antar metode menjadi paling signifikan. Metode interpolasi bilinear tetap unggul, sedangkan interpolasi bicubic dan hybrid menghasilkan kesalahan rekonstruksi yang sangat besar. Hal ini menunjukkan keterbatasan metode berbasis FMM dalam menangani boundary melengkung pada citra sintetis.

Pada kerusakan acak (Random Damage), seluruh metode masih menghasilkan kualitas yang dapat diterima. Perbedaan performa antar metode relatif lebih kecil dibandingkan jenis kerusakan lain, karena ukuran kerusakan yang kecil dan tersebar memungkinkan propagasi lokal yang efektif.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil implementasi dan evaluasi metode image inpainting berbasis interpolasi dan operasi morfologi yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut

1. Metode interpolasi bilinear menunjukkan performa terbaik secara konsisten pada seluruh jenis kerusakan citra yang diuji. Hal ini ditunjukkan oleh nilai PSNR rata-rata sebesar 61.71 dB dan nilai SSIM sebesar 0.9986. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa hasil rekonstruksi sangat mendekati citra asli baik dari sisi kesalahan numerik maupun kesamaan struktur visual.
2. Metode inpainting berbasis operasi morfologi memberikan performa yang stabil dan kompetitif, khususnya pada kerusakan berbentuk goresan dan region besar. Dengan PSNR rata-rata sebesar 52.05 dB dan SSIM sebesar 0.9977, metode ini mampu menjaga kontinuitas struktur citra meskipun transisi intensitas tidak sehalus metode interpolasi bilinear.
3. Metode interpolasi bicubic berbasis Fast Marching Method (INPAINT_TELEA) menunjukkan performa

yang relatif rendah pada citra uji yang digunakan. Nilai PSNR dan MSE yang jauh lebih buruk dibandingkan metode lain mengindikasikan bahwa pendekatan ini kurang sesuai untuk citra sintetis dengan gradien sederhana dan batas region yang jelas.

4. Pendekatan hybrid yang mengombinasikan morfologi dan interpolasi tidak memberikan peningkatan performa yang signifikan dibandingkan metode tunggal. Pada beberapa kasus, hasil rekonstruksi justru mengalami penurunan kualitas akibat akumulasi kesalahan dari tahap interpolasi lanjutan.
5. Jenis dan karakteristik kerusakan citra sangat memengaruhi performa metode inpainting. Kerusakan berbentuk region besar dan homogen paling efektif ditangani oleh interpolasi bilinear, sedangkan kerusakan berbentuk struktur memanjang atau acak dapat ditangani secara memadai oleh metode morfologi.
6. Metrik PSNR, SSIM, dan MSE saling melengkapi dalam mengevaluasi kualitas inpainting. PSNR dan MSE memberikan gambaran kuantitatif kesalahan rekonstruksi, sementara SSIM lebih merepresentasikan kesamaan struktur visual citra hasil pemulihan.

A. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas pengujian menggunakan citra alami dengan tekstur dan detail yang lebih kompleks agar hasil evaluasi lebih merepresentasikan kondisi dunia nyata. Pengembangan metode inpainting pada citra berwarna juga dapat dipertimbangkan dengan memanfaatkan ruang warna yang sesuai dengan persepsi visual manusia. Selain itu, pendekatan hybrid perlu dikembangkan secara lebih adaptif agar mampu memanfaatkan keunggulan masing-masing metode secara optimal. Dari sisi komputasi, optimalisasi implementasi, khususnya pada metode interpolasi iteratif, diperlukan agar sistem lebih efisien dan mendukung aplikasi real-time. Evaluasi tambahan menggunakan metrik berbasis persepsi visual atau penilaian subjektif pengguna juga disarankan untuk melengkapi analisis kuantitatif.

VI. PRANALA GITHUB

<https://github.com/b33rk/Makalah-Citra-2>

REFERENSI

- [1] Bertalmio, M., Sapiro, G., Caselles, V., & Ballester, C. (2000). Image inpainting. *Proceedings of SIGGRAPH 2000*, 417-424. DOI: 10.1145/344779.344972
- [2] [4] Criminisi, A., Pérez, P., & Toyama, K. (2004). Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(9), 1200-1212. DOI: 10.1109/TIP.2004.833105

- [3] Hore, A., & Ziou, D. (2010). Image quality metrics: PSNR vs. SSIM. 20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2366-2369. DOI: 10.1109/ICPR.2010.579
- [4] Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). Digital Image Processing (4th Edition). Pearson Education. ISBN: 978-0133356724
- [5] Munir, R. (2025). *Pengantar Pemrosesan Citra Digital (Bagian 1 dan 2)*. Materi Kuliah IF4073. Program Studi Teknik Informatika, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung. Tersedia:
<https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/Citra/2025-2026/>

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa makalah yang saya tulis ini adalah tulisan saya sendiri, bukan saduran, atau terjemahan dari makalah orang lain, dan bukan plagiasi.

Bandung, 24 Desember 2025

ttd



Abdullah Mubarak / 13522101