

## **Mengekspos Pemalsuan Digital dengan Mendeteksi Daerah Gambar yang Digandakan**

Alin C Popescu dan Hany Faridkan  
Departemen Ilmu Komputer

Perguruan Tinggi Dartmouth  
Hanover NH 03755

### **Abstrak**

Kami menjelaskan teknik efisien yang secara otomatis mendeteksi daerah duplikat dalam gambar digital. Teknik ini bekerja dengan terlebih dahulu menerapkan analisis komponen utama ke blok gambar berukuran tetap kecil untuk menghasilkan representasi dimensi yang dikurangi. Representasi ini kuat untuk variasi kecil pada gambar karena noise tambahan atau kompresi lossy. Daerah duplikat kemudian dideteksi dengan menyortir semua blok gambar secara leksikografis. Kami menunjukkan kemanjuran teknik ini pada pemalsuan yang kredibel, dan mengukur ketahanan dan kepekaannya terhadap noise tambahan dan kompresi JPEG lossy.

---

kan Penulis koresponden: H. Farid, 6211 Sudikoff Lab, Departemen Ilmu Komputer, Dartmouth College, Hanover, NH 03755 USA (email: farid@cs.dartmouth.edu ; tel/fax: 603.646.2761/603.646.1672). Pekerjaan ini didukung oleh Alfred P. Sloan Fellowship, National Science Foundation CAREER Award (IIS-99-83806), Hibah Infrastruktur National Science Foundation departemen (EIA-98-02068), dan di bawah Award No. 2000-DT- CS-K001 dari Kantor Kesiapsiagaan Domestik, Departemen Keamanan Dalam Negeri AS (sudut pandang dalam dokumen ini adalah milik penulis dan tidak selalu mewakili posisi resmi Departemen Keamanan Dalam Negeri AS).

## 1. Perkenalan

Kamera digital canggih dan paket perangkat lunak pengedit foto menjadi ada di mana-mana. Akibatnya, menjadi relatif mudah untuk memanipulasi gambar digital dan membuat pemalsuan yang sulit dibedakan dari foto asli. Manipulasi umum dalam merusak gambar adalah menyalin dan menempelkan bagian gambar untuk menyembunyikan seseorang atau objek di tempat kejadian. Jika penyambungan tidak terlihat, sedikit perhatian biasanya diberikan pada fakta bahwa daerah yang identik (atau hampir identik) ada dalam gambar.

Dalam makalah ini, kami menyajikan teknik yang dapat secara efisien mendeteksi dan melokalisasi daerah yang diduplikasi dalam sebuah gambar. Teknik ini bekerja dengan terlebih dahulu menerapkan analisis komponen utama (PCA) pada blok gambar berukuran tetap kecil untuk menghasilkan representasi dimensi yang dikurangi. Representasi ini kuat untuk variasi kecil pada gambar karena noise tambahan atau kompresi lossy. Daerah duplikat kemudian dideteksi dengan menyortir semua blok gambar secara leksikografis. Metode serupa untuk mendeteksi daerah duplikat berdasarkan penyortiran leksikografik dari koefisien blok DCT diusulkan pada [3]. Sementara kedua metode menggunakan pendekatan yang sama, basis PCA berbasis data dapat menangkap fitur pembeda dengan lebih baik. Kami menunjukkan kemanjuran teknik ini pada pemalsuan yang kredibel, dan mengukur ketahanan dan kepekaannya terhadap noise tambahan dan kompresi JPEG lossy.

## 2 Mendeteksi Daerah yang Digandakan

Diberikan gambar dengan  $n$  piksel tugas kita adalah menentukan apakah itu berisi daerah duplikat dari lokasi dan bentuk yang tidak diketahui. Pendekatan lengkap yang akan memeriksa setiap kemungkinan pasangan wilayah akan memiliki kompleksitas eksponensial dalam jumlah piksel gambar. Pendekatan seperti itu jelas-jelas menghambat komputasi.

Algoritma yang lebih efisien mungkin mencari duplikasi blok berukuran kecil yang tetap 1. Dengan merangkai setiap blok tersebut menjadi vektor dan secara leksikografis menyortir semua blok gambar, blok identik sesuai dengan pasangan yang berdekatan dalam daftar yang diurutkan. Biaya utama dari algoritma ini adalah penyortiran leksikografis, yang menghasilkan kompleksitas PADA catatan  $N$ , karena jumlah blok gambar sebanding dengan jumlah piksel gambar,  $N$ . Perhatikan bahwa ini adalah peningkatan yang signifikan atas algoritme eksponensial brute-force. Kelemahan dari pendekatan ini, bagaimanapun, adalah sensitif terhadap variasi kecil antara daerah yang diduplikasi karena, misalnya, kebisingan tambahan atau kompresi lossy. Kami selanjutnya menjelaskan algoritma yang mengatasi batasan ini sambil mempertahankan efisiensinya.

Pertimbangkan gambar skala abu-abu dengan  $n$  piksel (kita bahas bel/ aduhv/dengan algoritme ini meluas ke im-usia). Sebuah gambar diberi ubin dengan blok yang tumpang tindih dari  $B$  piksel ( $B \times B$  piksel dalam dimensi), yang masing-masing diasumsikan jauh lebih kecil daripada ukuran duplikat/ ted regu yang akan dideteksi. Biarkan  $\sim x_{\text{saya}} = 1, \dots, n_B$  menyatakan blok-blok ini dalam bentuk vektor, di mana  $n_B = (N - b + 1)^2$ . Kami sekarang mempertimbangkan representasi alternatif dari blok gambar ini berdasarkan analisis komponen utama (PCA) [1]. Asumsikan bahwa balok  $\sim x_{\text{saya}}$  adalah nol-mean 2, dan hitung matriks kovarians sebagai:

$$C = \sum_{\text{saya}=1}^{\sim n_B} \sim x_{\text{saya}} \sim x_{\text{saya}}^T. \quad (1)$$

Vektor eigen,  $\sim e_j$ , dari matriks  $C$ , dengan nilai eigen yang sesuai,  $\lambda_j$ , memuaskan:

$$C \sim e_j = \lambda_j \sim e_j, \quad (2)$$

<sup>1</sup>Kami berasumsi bahwa ukuran blok jauh lebih kecil daripada wilayah duplikat yang akan dideteksi.

<sup>2</sup>Jika balok,  $\sim x_{\text{saya}}$ , bukan mean nol, maka mean,  $\mu = 1/n_B \sum_{\text{saya}=1}^{n_B} \sim x_{\text{saya}}$ , harus dikurangi dari setiap blok,  $x \sim x_{\text{saya}} - \mu$ .

tentukan komponen utama, di mana  $j = 1, \dots, B$  dan  $1 \geq \lambda_2 \dots \lambda_B$ . Vektor eigen,  $\sim e_j$ , membentuk basis linier baru untuk setiap blok gambar,  $\sim X_{Saya}$ :

$$\tilde{X}_{Saya} = \sum_{j=1}^B \text{sebuah } \sim e_j, \quad (3)$$

di mana  $\text{sebuah}_j = X_{Saya} \sim e_j$ , dan  $\sim \text{sebuah}_Saya = (\text{sebuah}_1 \dots \text{sebuah}_B)$  adalah representasi baru untuk setiap blok gambar.

Dimensi representasi ini dapat dikurangi dengan hanya memotong jumlah dalam Persamaan (3) ke yang pertama  $n$  ketentuan. Perhatikan bahwa proyeksi ke yang pertama vektor eigen dari basis PCA memberikan yang terbaik n pendekatan -dimensi dalam arti kuadrat terkecil (jika distribusi  $\sim X_{Saya}$  adalah Gaussian multidimensi [1]). Representasi dimensi yang direduksi ini, oleh karena itu, menyediakan ruang yang nyaman untuk mengidentifikasi blok serupa di hadapan noise yang merusak, karena pemotongan basis akan menghilangkan variasi intensitas kecil.

Algoritma deteksi hasil sebagai berikut. Pertama, untuk lebih mengurangi variasi kecil karena noise yang merusak, representasi dimensi yang dikurangi dari setiap blok gambar,  $\sim Saya$ , adalah komponen-bijaksana terkuantisasi,  $b \sim Saya/QC$ , dimana bilangan bulat positif  $Q$  menunjukkan jumlah bin kuantisasi 3. SEBUAH  $n \times B$  matriks dibangun yang barisnya mengandung koefisien terkuantisasi ini. Biarkan matriks  $S$  menjadi hasil dari pengurutan leksikografis baris-baris matriks ini dalam urutan kolom. Biarkan  $\sim Saya$  menunjukkan  $Saya$  baris matriks yang diurutkan ini, dan biarkan tupel  $(x_{Saya}, kamusaya)$  menunjukkan koordinat gambar blok (sudut kiri atas) yang sesuai dengan  $\sim Saya$ . Pertimbangkan selanjutnya semua pasangan baris  $\sim Saya$  dan  $\sim S_j$ , yang jarak barisnya,  $|Saya - S_j|$ , dalam matriks yang diurutkan  $S$  kurang dari ambang batas yang ditentukan. Offset, pada gambar, dari semua pasangan tersebut diberikan oleh:

$$\begin{aligned} (x_{Saya} - x_j, kamusaya - kamuj) & \quad \text{jika } x_{Saya} - x_j > 0 \\ - x_{Saya}, kamusaya - kamuj) & \quad \text{jika } x_{Saya} - x_j < 0 \\ (0, |kamusaya - kamuj|) & \quad \text{jika } x_{Saya} = x_j \end{aligned}$$

Dari daftar semua offset tersebut, daerah duplikat pada gambar dideteksi dengan mencatat offset dengan kemunculan tinggi. Misalnya wilayah duplikat besar akan terdiri dari banyak blok yang lebih kecil, masing-masing blok ini akan muncul berdekatan satu sama lain dalam matriks yang diurutkan secara leksikografis, dan akan memiliki offset yang sama. Untuk menghindari pukulan palsu karena area intensitas seragam, besaran offset di bawah ambang batas yang ditentukan diabaikan. Lihat Lampiran A untuk algoritma langkah-demi-langkah rinci.

Hasil deteksi ini dapat divisualisasikan dengan membuat peta duplikasi — gambar nol dengan ukuran yang sama dengan aslinya dibuat, dan semua piksel di wilayah yang diyakini diduplikasi diberi nilai skala abu-abu yang unik. Kompleksitas algoritma ini, didominasi oleh pengurutan leksikografis, adalah  $PADATn$  (catatan N), di mana  $n$  adalah dimensi representasi tereduksi PCA dan  $n$  adalah jumlah total piksel gambar.

Setidaknya ada dua cara di mana algoritma ini dapat diperluas ke gambar berwarna. Pendekatan paling sederhana adalah memproses secara independen setiap saluran warna (misalnya, RGB) untuk menghasilkan tiga peta duplikasi. Pendekatan kedua adalah menerapkan PCA ke blok warna dengan ukuran  $3B$ , dan lanjutkan dengan cara yang sama seperti yang dijelaskan di atas.

---

<sup>3</sup>Untuk kesederhanaan, kami menggunakan jumlah bin kuantisasi yang konstan, meskipun mungkin lebih tepat menggunakan lebih banyak bin untuk koordinat dengan varians yang lebih tinggi, dan lebih sedikit bin untuk koordinat varians yang lebih rendah.

### **3. Hasil**

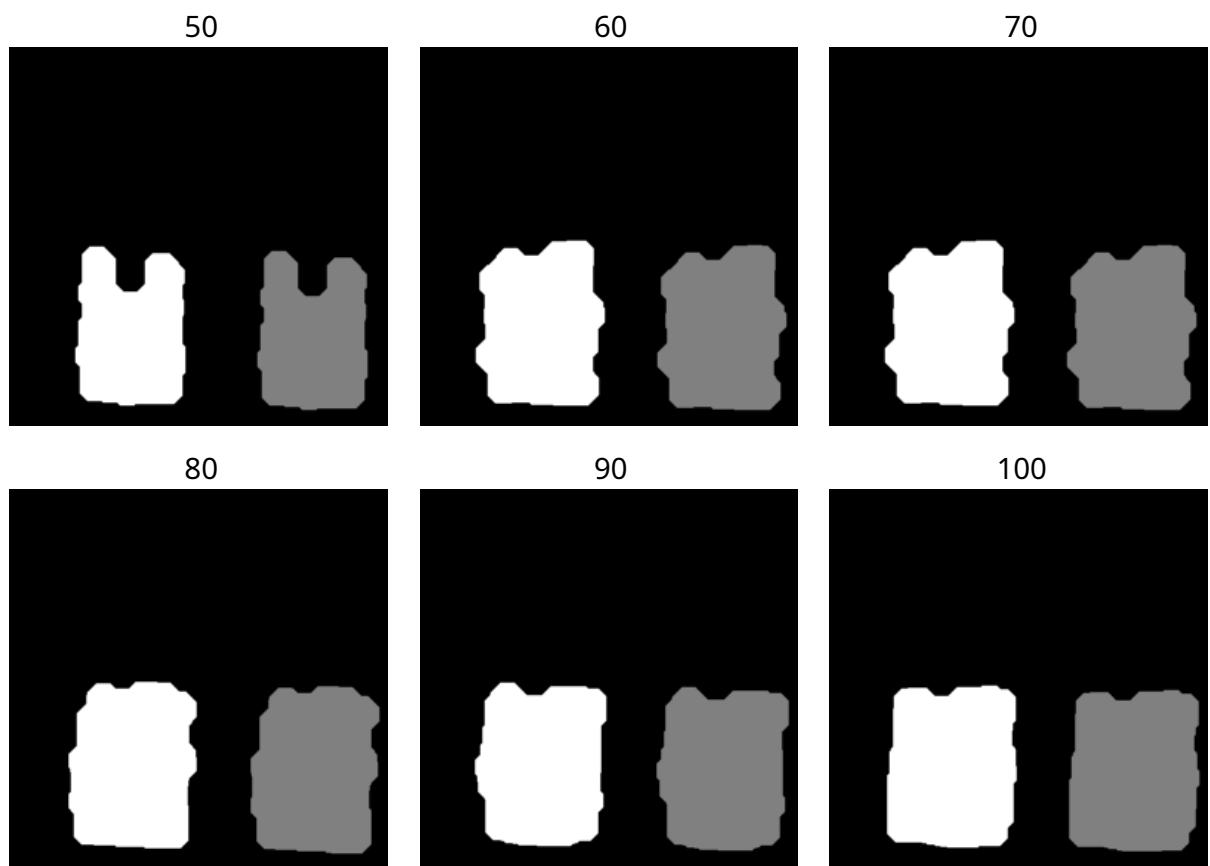
Ditunjukkan pada Gambar 1-3 adalah gambar asli dan rusak. Tampering terdiri dari menyalin dan menempelkan suatu wilayah pada gambar untuk menyembunyikan seseorang atau objek. Ditampilkan di bagian bawah angka-angka ini adalah output dari algoritma deteksi kami seperti yang diterapkan pada gambar rusak yang disimpan dengan faktor kualitas JPEG antara 50 dan 100. Di setiap peta, dua wilayah yang digandakan ditampilkan dengan nilai skala abu-abu yang berbeda. Dalam semua contoh ini, semua parameter disetel ke:  $b = 64$ ,  $\sigma = 0,01$ ,  $Q = 256$ ,  $n_n = 100$ ,  $n_f = 128$ ,  $n_d = 16$  (lihat Lampiran A untuk rinciannya). Pemotongan basis PCA biasanya mengurangi dimensi dari 64 ke 32. Rata-rata runtime untuk satu saluran warna a  $512 \times 512$  gambar berjalan pada prosesor 3 GHz, kira-kira 10 detik. Untuk tujuan visualisasi, peta duplikasi itu (1) dilebarkan kemudian dikikis untuk menghilangkan lubang di daerah yang diduplikasi, dan (2) terkikis kemudian dilebarkan untuk menghilangkan pasangan palsu dari blok duplikat. Elemen penataan berbentuk cakram dengan jari-jari 20 piksel digunakan untuk operasi morfologi ini [4].

Untuk mengukur ketahanan dan sensitivitas algoritma kami, kami membangun database 100 gambar berwarna dengan ukuran  $512 \times 512$  piksel. Gambar-gambar ini dipotong dari yang lebih besar  $2000 \times 3008$  gambar yang diambil dengan kamera digital Nikon D100. Di setiap gambar, wilayah persegi acak disalin dan ditempelkan ke posisi acak yang tidak tumpang tindih dalam gambar. Setiap gambar kemudian dikompresi JPEG dengan berbagai faktor kualitas, atau rusak dengan noise tambahan dengan rasio sinyal terhadap noise (SNR) yang bervariasi. Ditampilkan di baris atas Gambar 4, misalnya, empat gambar dengan wilayah ukuran yang digandakan  $32 \times 32$ ,  $64 \times 64$ ,  $96 \times 96$ , dan  $128 \times 128$  — dua gambar pertama dikompres dengan kualitas JPEG 85 dan 65, dan dua gambar lainnya rusak dengan noise tambahan dengan SNR 36db dan 29db. Ditampilkan di baris bawah Gambar 4 adalah peta duplikasi yang dikembalikan saat menjalankan algoritme kami pada saluran hijau setiap gambar. Dalam contoh ini, dan yang dijelaskan di bawah, semua parameter disetel ke:  $b = 64$ ,  $\sigma = 0,01$ ,  $Q = 256$ ,  $n_n = 100$ ,  $n_f = 128$ ,  $n_d = 16$ . Ditunjukkan pada Gambar 5 adalah akurasi deteksi dan tingkat positif palsu sebagai fungsi dari kualitas kompresi JPEG. Perhatikan bahwa akurasinya, secara umum, sangat baik, kecuali untuk ukuran blok kecil dan kualitas JPEG yang rendah. Perhatikan juga bahwa jumlah rata-rata positif palsu (wilayah yang salah diberi label sebagai duplikat) relatif rendah. Ditunjukkan pada Gambar 6 adalah akurasi deteksi dan tingkat positif palsu sebagai fungsi rasio sinyal terhadap noise (SNR) dari noise Gaussian putih aditif. Seperti pada contoh sebelumnya, tingkat deteksi hampir sempurna, kecuali untuk ukuran blok kecil dan SNR rendah.

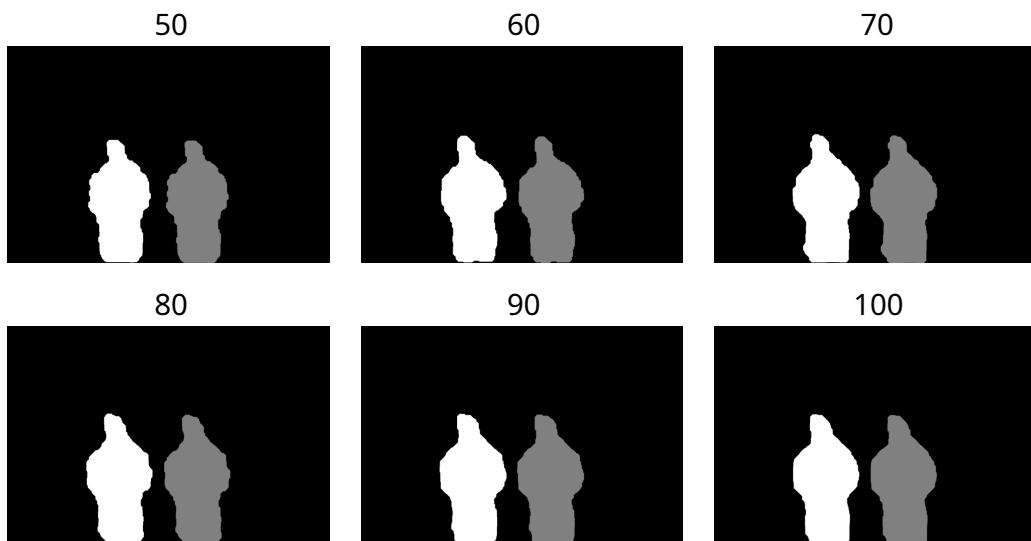
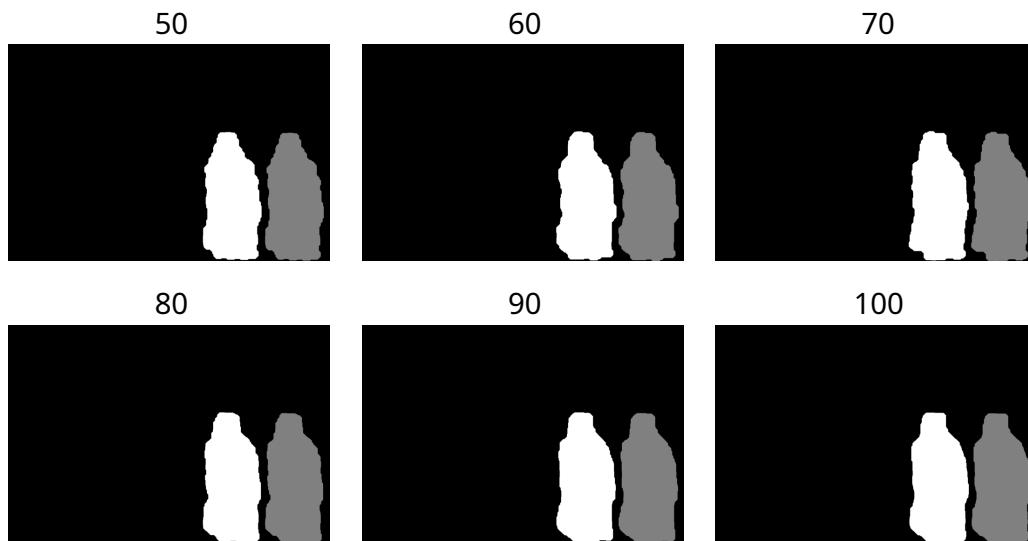
### **4. Diskusi**

Kami telah menyajikan teknik yang efisien dan kuat yang secara otomatis mendeteksi daerah yang diduplikasi dalam sebuah gambar. Teknik ini bekerja dengan terlebih dahulu menerapkan analisis komponen utama (PCA) pada blok gambar berukuran tetap kecil untuk menghasilkan representasi dimensi yang dikurangi yang kuat untuk variasi kecil pada gambar karena noise tambahan atau kompresi lossy. Daerah duplikat kemudian dideteksi dengan menyortir semua blok gambar secara leksikografis. Kami telah menunjukkan keefektifan teknik ini pada pemalsuan yang masuk akal, dan telah mengukur sensitivitasnya terhadap kompresi lossy JPEG dan noise aditif — kami menemukan bahwa deteksi dimungkinkan bahkan dengan adanya sejumlah besar noise yang merusak.

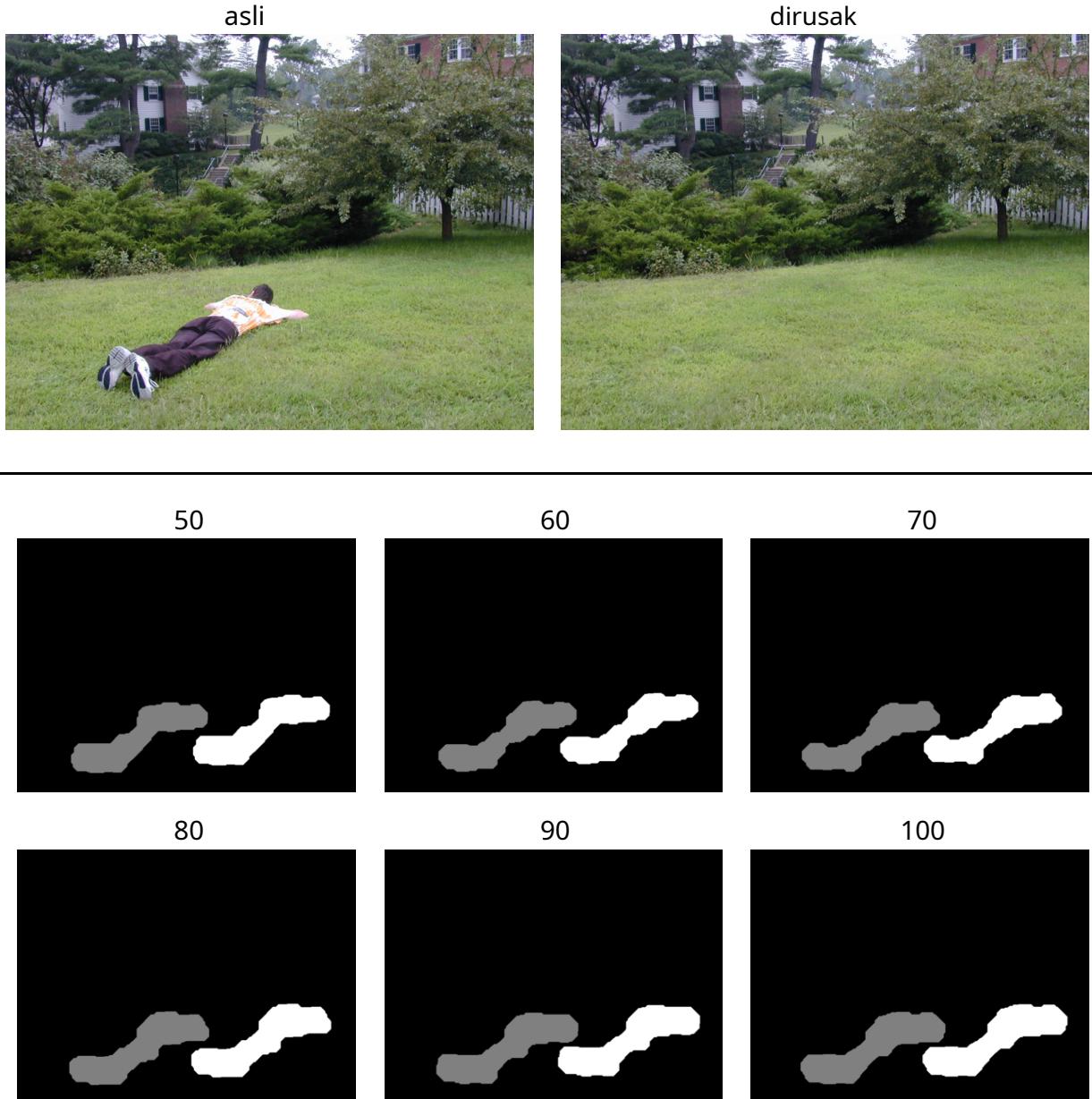
Kami juga telah mengembangkan teknik lain untuk mendeteksi jejak gangguan digital pada gambar [2, 6, 7, 8]. Setiap teknik dalam rangkaian ini berfungsi tanpa adanya tanda air atau tanda tangan digital yang menawarkan pendekatan pelengkap untuk otentifikasi gambar. Ada sedikit keraguan bahwa tindakan balasan akan dibuat untuk menggagalkan masing-masing teknik ini. Harapan kami, bagaimanapun, adalah bahwa alat kami, serta yang lain [3, 5], akan membuat semakin sulit untuk membuat pemalsuan digital yang kredibel yang secara bersamaan akan menggagalkan setiap skema deteksi.



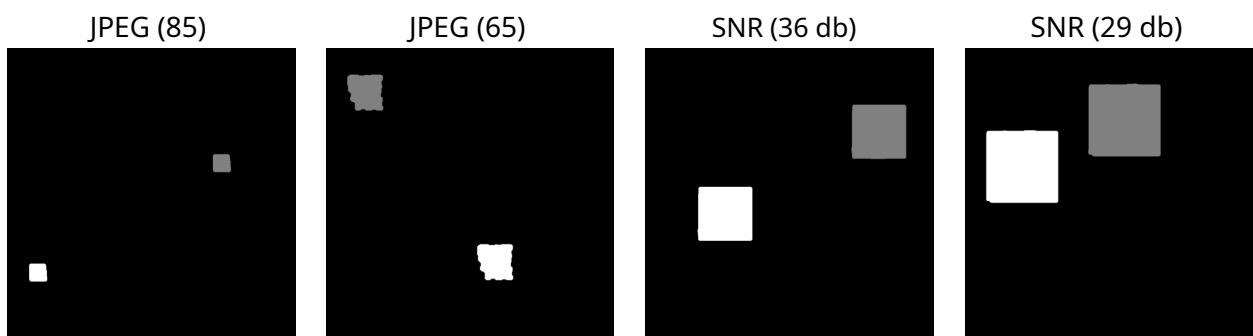
**Gambar 1:** Yang ditampilkan adalah gambar asli dan rusak. Ditampilkan di bawah ini adalah peta duplikasi keluaran dari saluran hijau dari gambar rusak yang disimpan dengan kualitas JPEG berkisar antara 50 dan 100.



**Gambar 2:** Yang ditampilkan adalah gambar asli dan rusak. Ditampilkan di bawah ini adalah peta duplikasi keluaran (sesuai dengan wilayah berbeda yang digunakan untuk menyembunyikan setiap orang) dari saluran hijau gambar rusak yang disimpan dengan kualitas JPEG berkisar antara 50 dan 100.



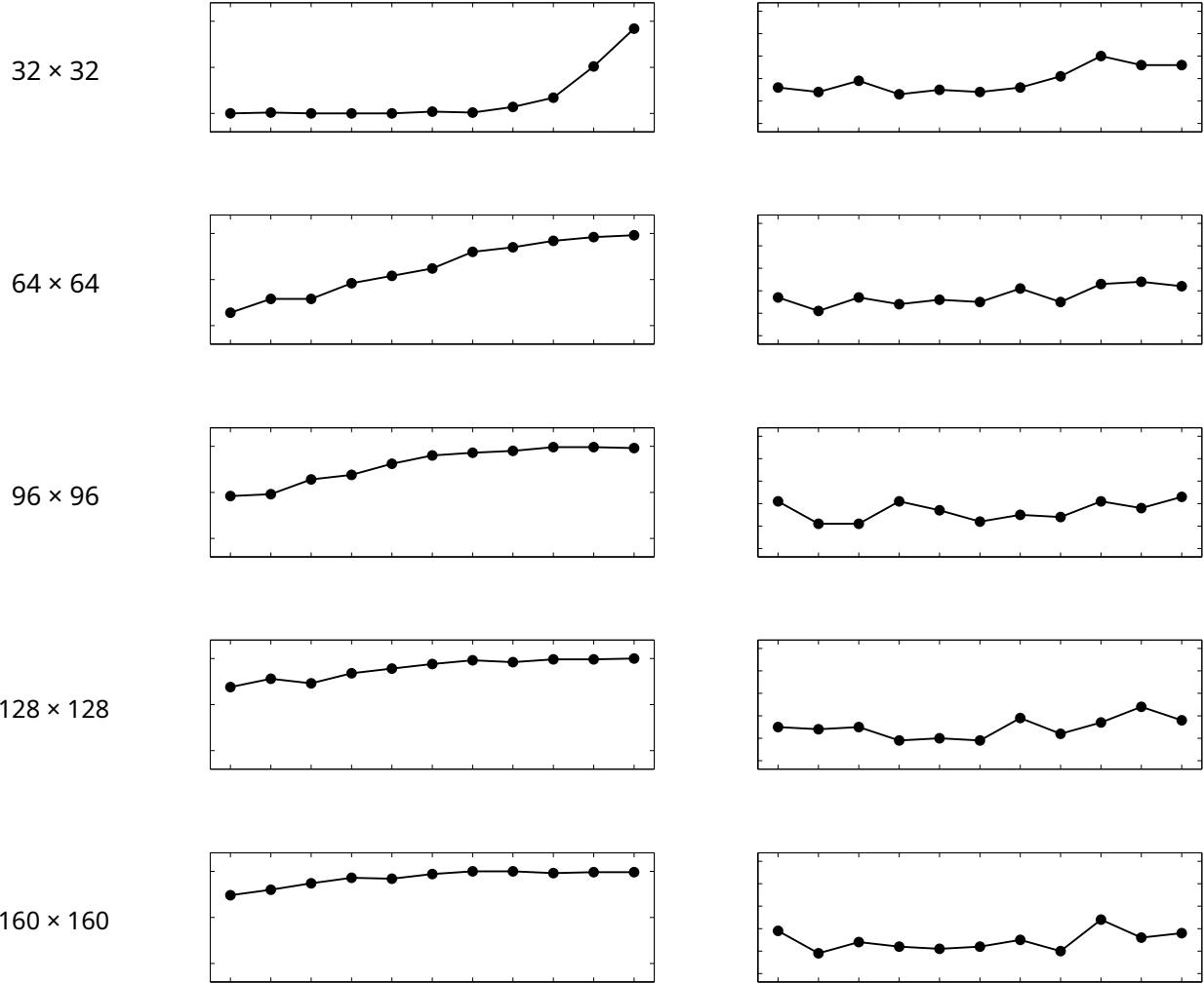
**Gambar 3:** Yang ditampilkan adalah gambar asli dan rusak. Ditampilkan di bawah ini adalah peta duplikasi keluaran dari saluran hijau dari gambar rusak yang disimpan dengan kualitas JPEG berkisar antara 50 dan 100.



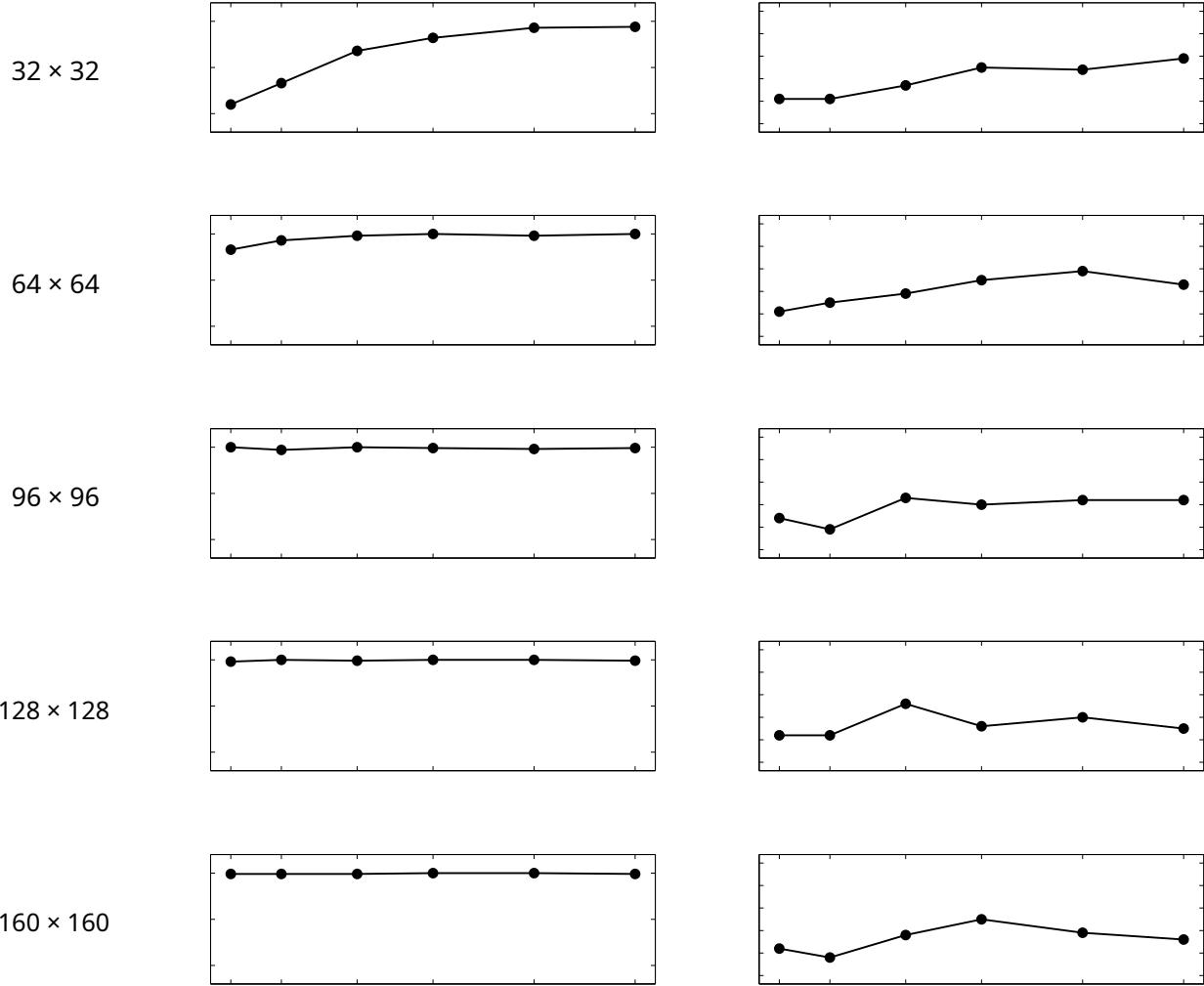
**Gambar 4:** Ditampilkan di baris atas adalah empat gambar dengan area ukuran yang digandakan  $32 \times 32$ ,  $64 \times 64$ ,  $96 \times 96$ , dan  $128 \times 128$ , setelah dikompresi (gambar pertama dan kedua) atau rusak dengan noise tambahan (gambar ketiga dan keempat). Di bawah ini adalah peta duplikasi yang dikembalikan saat menjalankan algoritme kami pada saluran hijau setiap gambar.

## Referensi

- [1] R. Duda dan P. Hart. *Klasifikasi Pola dan Analisis Pemandangan*. John Wiley and Sons, 1973.
- [2] H. Farid dan S. Lyu. Statistik wavelet tingkat tinggi dan penerapannya pada forensik digital. Di *Workshop IEEE tentang Analisis Statistik dalam Computer Vision*, Madison, Wisconsin, 2003.
- [3] J. Fridrich, D. Soukal, dan J. Lukás. Deteksi pemalsuan copy-move dalam gambar digital. Di *Prosiding Workshop Penelitian Forensik Digital*, Agustus 2003.
- [4] RC Gonzalez dan RE Kayu. *Pemrosesan Gambar Digital*. Perusahaan Penerbitan Addison Wesley, 1992.
- [5] J. Lukas dan J. Fridrich. Estimasi matriks kuantisasi primer dalam gambar JPEG terkompresi ganda. Di *Lokakarya Penelitian Forensik Digital*, Cleveland, Ohio, Agustus 2003.
- [6] AC Popescu dan H. Farid. Mengungkap pemalsuan digital dengan mendekripsi jejak pengambilan sampel ulang. *Transaksi IEEE pada Pemrosesan Sinyal*, 2004. (muncul).
- [7] AC Popescu dan H. Farid. Alat statistik untuk forensik digital. Di *Prosiding 6th Lokakarya Penyembunyian Informasi*, Mei 2004.
- [8] AC Popescu dan H. Farid. Mengekspos pemalsuan digital dalam gambar interpolasi array filter warna. *Transaksi IEEE pada Pemrosesan Sinyal*, 2005. (dalam tinjauan).



**Gambar 5:** Ditampilkan di kolom kiri adalah akurasi deteksi rata-rata sebagai fungsi dari kualitas kompresi JPEG. Ditampilkan di kolom kanan adalah jumlah rata-rata positif palsu sebagai fungsi dari kualitas kompresi JPEG. Setiap baris sesuai dengan blok yang digandakan dengan ukuran mulai dari  $32 \times 32$  ke  $160 \times 160$  piksel. Setiap titik data sesuai dengan rata-rata lebih dari 100 gambar-gambar.



**Gambar 6:** Ditampilkan di kolom kiri adalah akurasi deteksi rata-rata sebagai fungsi SNR dari derau Gaussian putih yang ditambahkan. Ditampilkan di kolom kanan adalah jumlah rata-rata positif palsu sebagai fungsi dari SNR. Setiap baris sesuai dengan blok ukuran yang digandakan mulai dari  $32 \times 32$  ke  $160 \times 160$  piksel. Setiap titik data sesuai dengan rata-rata lebih dari 100 gambar-gambar.

# Algoritma Deteksi Duplikasi

---

1. Mari  $n$  menjadi jumlah total piksel dalam skala abu-abu atau gambar berwarna
  2. Inisialisasi parameter:
    - $B$ : jumlah piksel per blok (blok  $\sqrt{B} \times \sqrt{B}$  piksel dalam dimensi) – ada  $n_B = (\frac{\sqrt{n}}{\text{tidak}} \times \sqrt{b+1})^2$  seperti itu
    - $\tau$ : fraksi dari varians yang diabaikan sepanjang sumbu utama
    - $Q$ : jumlah bin kuantisasi
    - $n_n$ : jumlah baris tetangga untuk dicari dalam matriks yang diurutkan secara leksikografis
    - $n_F$ : ambang frekuensi minimum
    - $n_D$ : ambang batas offset minimum
  3. Menggunakan PCA, hitung yang baru  $n_T$ -representasi dimensi,  $\sim S_{\text{saya}}$ ,  $\text{saya} = 1, \dots, n_B$ , setiap  $B$  blok gambar piksel (untuk gambar berwarna: (1) menganalisis setiap saluran warna secara terpisah; atau (2) membangun satu blok warna ukuran  $3B$  piksel). Nilai  $\lambda$  dipilih untuk memenuhi:  $1 = \text{nilai } \frac{\text{tidak}}{\text{sayat} = 1 \lambda \text{saya}}, \text{ dimana } \text{saya} \text{ adalah eigen seperti yang dihitung oleh PCA.}$
  4. Membangun  $n_B \times B$  matriks yang barisnya diberikan oleh koordinat terkuantisasi komponen-bijaksana:  $b \sim \text{sebuah } \text{saya}/QC$ .
  5. Urutkan baris-baris matriks di atas secara leksikografis untuk menghasilkan matriks  $S$ . Biarkan  $\sim S_{\text{saya}}$  menunjukkan baris dari  $S$ , dan biarkan  $(x_{\text{saya}}, \text{kamusaya})$  menunjukkan posisi koordinat gambar blok (sudut kiri atas) yang sesuai dengan  $\sim S_{\text{saya}}$ .
  6. Untuk setiap pasangan baris  $\sim S_{\text{saya}}$  dan  $\sim S_j$  dari  $S$  sedemikian rupa sehingga  $|saya_j| < T_n$ , tempatkan pasangan koordinat  $(x_{\text{saya}}, \text{kamusaya})$  dan  $(x_j, \text{kamu}_j)$  ke dalam daftar.
  7. Untuk semua elemen dalam daftar ini, hitung offsetnya, yang didefinisikan sebagai:
$$\begin{aligned} (x_{\text{saya}} - x_j, \text{kamusaya} - \text{kamu}_j) (x_j - x_{\text{saya}}, \text{kamusaya} - \text{kamu}_j) &\quad \text{jika } x_{\text{saya}} - x_j > 0 \\ - (x_{\text{saya}}, \text{kamusaya} - \text{kamu}_j) &\quad \text{jika } x_{\text{saya}} - x_j < 0 \\ (0, |\text{kamusaya} - \text{kamu}_j|) &\quad \text{jika } x_{\text{saya}} = x_j \end{aligned}$$
  8. Buang semua pasangan koordinat dengan frekuensi offset kurang dari  $n_F$ .
  9. Buang semua pasangan yang besarnya offset,  $(x_{\text{saya}} - x_j)^2 + (kamusaya - \text{kamu}_j)^2$ , kurang dari  $n_D$ .
  10. Dari pasangan blok yang tersisa buat peta duplikasi dengan membuat gambar nol dengan ukuran yang sama dengan aslinya, dan mewarnai semua piksel di wilayah duplikat dengan nilai intensitas skala abu-abu yang unik.
-