

Deteksi Keretakan Pada Struktur Beton

Muhammad Husain Fadhlullah – 141524017

Abstrak - Banyak sekali hal penting pada infrastruktur sipil terbuat dari struktur beton, informasi yang akurat dengan pemeriksaan yang rutin diperlukan untuk memelihara struktur tersebut. Terkadang pemeriksaan menggunakan cara tradisional biasanya memakan waktu dan berbahaya karena jumlah inspeksi gambar yang banyak dan memerlukan bantuan manusia. Paper ini menjelaskan metode *computer vision* dan pengolahan citra berdasarkan gambar yang diperoleh dari kamera digital untuk dilakukan automatisasi deteksi keretakan pada struktur beton. Hasil eksperimen menunjukkan akurasi rata-rata 84%

Kata kunci - Deteksi keretakan, *computer vision*, pengolahan citra, struktur beton.

I. Pengantar

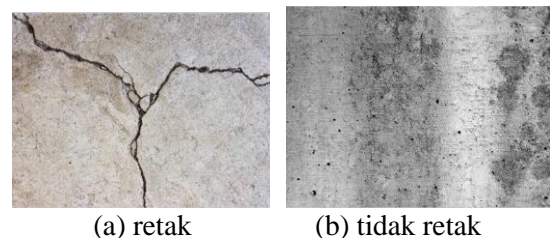
Memperoleh informasi yang akurat untuk kondisi struktur beton dengan pendekatan inspeksi secara tradisional biasanya memakan waktu dan berbahaya karena jumlah inspeksi gambar banyak dan perlu bantuan manusia. Karena perkembangan teknik komputer dan pemrosesan citra, inspeksi otomatis diharapkan dapat membantu menggantikan peran manusia untuk mendeteksi retakan pada struktur beton tersebut. Prinsip berbasis analisis komponen atau Principal Component Analysis (PCA)-based ditambah dengan struktur linier diusulkan untuk mendeteksi celah dengan struktur linier pada deck jembatan beton dengan akurasi terbaik 73% [1].

Algoritma pendeteksi tepi serta metode berbasis transformasi dan statistik diterapkan pada penilaian kerusakan pada struktur beton [2]. Pendekatan analisis tekstur, yang memberikan akurasi keseluruhan 83,3%, ternyata merupakan teknik yang sejauh ini paling efisien untuk mengekstrak keseluruhan informasi dari citranya. Analisis tekstur statistik lainnya juga telah diadopsi untuk mengekstrak fitur tekstur, termasuk mean dan ketidaksamaan

dari matrik koherensi tingkat abu-abu untuk mendeteksi retakan pada beton dengan akurasi keseluruhan antara 68,7 dan 76,5% [3]. Namun, akurasi tersebut tidak memuaskan untuk aplikasi praktik. Oleh karena itu, dalam paper ini, sebuah metode *computer vision* dan *image processing* yang disajikan untuk mendapatkan akurasi berkisar antara 62.5 dan 100%.

II. Material Eksperimen

Deteksi keretakan struktur beton dengan memperoleh gambar menggunakan kamera digital handphone diambil pada waktu siang hari di sekitar kampus Politeknik Negeri Bandung, dengan spesifikasi $7,9 \times 10^6$ (3264×2448) pixel dan focal length 2.96 mm. Untuk mempercepat komputasi dan efektifitas waktu, setiap inspeksi gambar dari 3264×2448 telah dibuat sampel 425×319 atau $1/32$ dari gambar aslinya. Gambar 1. menunjukkan bahwa sampel gambar yang retak dan tidak retak pada tembok beton. Dalam penelitian ini, 32 gambar untuk struktur beton sebagai material eksperimennya. Setengah dari gambar tersebut memiliki pola gambar retak dan setengahnya lagi memiliki pola gambar tidak retak, 16 dari 32 gambar telah dipilih sebagai data latihannya dan sisanya sebagai data pengujiannya. Gambar retak dan tidak retak masing-masing 8 gambar di setiap latihan dan pengujian sampelnya.



(a) retak

(b) tidak retak

Gambar 1. Sampel gambar dari beton yang diinspeksi

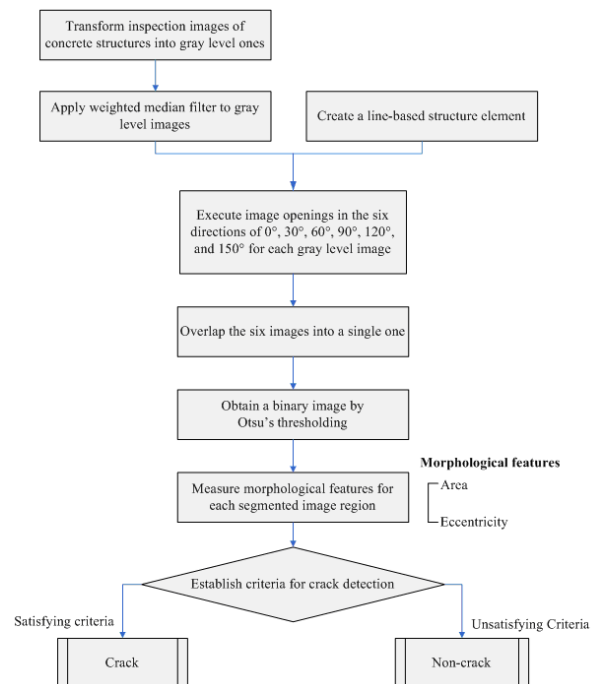
III. Metodologi

Gambar 2. adalah skema yang diusulkan metode *computer vision* dan metode pengolahan citra untuk deteksi keretakan pada struktur beton. Diawali dengan melakukan inspeksi gambar dari struktur beton kemudian ditransformasi ke dalam bentuk derajat keabuan (gray level). Dengan kata lain, informasi warna tidak berpengaruh. Su et al. (2011) menggunakan operasi *opening top-hat* untuk mengidentifikasi representasi morfologi untuk beberapa jenis cacat pada pipa pembuangan [4]. Mereka menemukan bahwa kesulitan dalam segmentasi representasi morfologi dari cacat pipa pembuangan dari inspeksi gambar karena lingkungan yang masih banyak *noise*. Untuk mengurangi interferensi lingkungan yang masih banyak *noise*, penelitian ini menggunakan *weighted median filter* untuk pada berbagai ukuran *mask*-nya untuk menghilangkan lingkungan *noise* pada tekstur beton.

Image Opening telah diterapkan untuk filter gambar untuk meningkatkan kualitas tekstur dari keretakannya. Mengingat karakteristik yang tidak teratur seperti garis-garis retak pada struktur beton, struktur elemen berbentuk garis digunakan untuk *image opening*, yang mana dieksekusi dengan berbagai arah 0° , 30° , 60° , 90° , 120° , dan 150° untuk setiap derajat keabuan. Penggabungan gambar dari operasi *opening* dari setiap arah ke satu gambar kemudian ditransformasi ke dalam bentuk gambar binary dengan *Otsu's thresholding*.

Setelah transformasi binary (atau segmentasi gambar), daerah segmentasi yang besar memiliki peluang yang sangat besar untuk dianggap sebagai retakan dibandingkan dengan daerah segmentasi yang relatif kecil. Di tambahkan dengan nilai *eccentricity* antara 0 dan 1 yang merepresetasikan bentuk lingkaran dan garis. Daerah segmentasi yang memiliki aproksimasi *eccentricity* ke 1 artinya memiliki peluang yang sangat tinggi dianggap retak. Karena itu, 2 fitur morfologi, yaitu daerah atau *area* dan *eccentricity*, untuk mengukur setiap

daerah segmentasinya. Berdasarkan fitur morfologinya, beberapa kriteria telah ditetapkan dan digunakan untuk menentukan pola retak atau tidak retak pada gambar.



Gambar 2. Skema yang diusulkan metode *computer vision* dan metode pengolahan citra untuk struktur beton [5]

A. Weight Median Filter

Median Filter merupakan salah satu filter *smoothing* untuk menghilangkan *noise* pada lingkungannya di suatu gambar. Sayangnya, tekstur dari daerah gambar yang penting akan dihapus bersamaan dengan median filter yang dioperasikan sehingga menyebabkan tekstur buram [6]. Untuk mengatasi masalah di atas maka digunakan *weighted median filter* [7][8]. Prinsip dari *weighted median filter* adalah mirip dengan *median filter* tapi nilai piksel dari posisi central dari *weighted median filter* diduplikasi sebanyak K. Demikian, *weighted median filter* dapat lebih efektif menghilangkan *noise* dan tetap berstruktur setepat mungkin [9]

B. Image Opening

Image opening adalah salah satu operasi morfologi matematika untuk mendeteksi daerah gambar yang penting. Sebelum operasi *image opening* dilakukan. Penentuan tipe bentuk dari *structure element* ditetapkan.

Dengan kata lain, *structure element* digunakan untuk membantu melakukan operasi *image opening* untuk meningkatkan citra daerah yang mirip dengan *structuring element*. Karena karakteristik morfologi yang mirip seperti garis-garis-retak, maka pada penelitian ini digunakan struktur linear dari 15 piksel kepada operasi *image opening* dalam enam arah, yaitu 0°, 30°, 60°, 90°, 120° dan 150°.

C. Otsu's Thresholding

Otsu's Thresholding adalah metode ambang berbasis analisis diskriminan, menentukan threshold yang optimal untuk *image opening* dengan memaksimalkan pengukuran pada kelas yang berbeda [10].

$$D(T) = \frac{P_1(T)P_2(T)[m_1(T) - m_2(T)]^2}{P_1(T)\sigma_1^2(T) + P_2(T)\sigma_2^2(T)} \quad (1)$$

Parameter pada persamaan (1) dijelaskan pada literature Yang dan Su [11]. Dengan memaksimalkan fungsi kriteria pada persamaan (1), daerah gambar dan daerah terang dapat dipisahkan sebaik mungkin dengan variasi dari dua daerah citra dapat diminimalkan. Pada paper ini, Otsu's thresholding diadopsi untuk transformasi *image opening* ke citra *binary*.

D. Pengukuran Terhadap Fitur Morfologi

Pada paper ini, pengukuran morfologi pada daerah segmentasi yaitu area dan *eccentricity*. Jika daerah segmentasi terdiri dari m piksel, mudahnya area tersebut tersimpan sebagai m . *Eccentricity* artinya ratio antara foci/pusat terhadap panjang sumbu major/utama dan di tuliskan sebagai berikut :

$$e = f / L \quad (2)$$

Dimana e adalah *eccentricity*, f dan L merepresentasikan foci dan panjang sumbu major.

E. Menentukan Kriteria dari Deteksi Keretakan

Berdasarkan pengukuran fitur morfologi, beberapa kriteria telah ditetapkan untuk deteksi retak yang mana daerah segmentasi yang

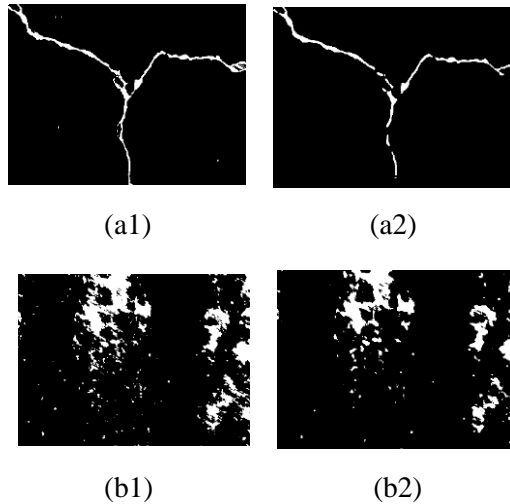
mengandung salah satu kriteria dianggap sebagai bagian yang retak. Sebagai tambahannya, pemberian perbedaan nilai k untuk *weighted median filter* akan memberikan perbedaan hasil segmentasi citranya untuk meningkatkan ketidakpastian penetapan kriteria. Pada paper ini, penetapan kriteria dari deteksi retak juga adalah solusi untuk masalah ketidakpastian dan optimasi.

Sensitivity Analysis telah banyak diterapkan untuk mengetasi ketidakpastian dan masalah optimasi [12][13]. Pada beberapa literature, *sensitivity analysis* juga dipaparkan untuk mempermudah pendeteksi struktur retak. Berdasarkan literature di atas *sensitivity analysis* telah ditunjukkan dapat secara efektif menawarkan parameter optimal untuk masalah keputusan. Ada i kriteria dan j bobot yang harus ditentukan untuk memiliki $i*j$ waktu perhitungan akurasi untuk menyelesaikan masalah tersebut.

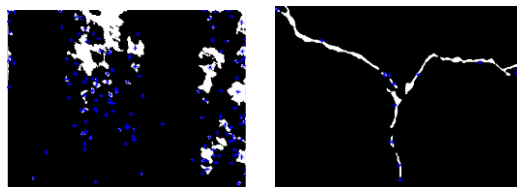
IV. Hasil Eksperimen

Untuk menentukan parameter yang optimal, termasuk menentukan bobot pada *weighted median filter* untuk deteksi keretakan, dibutuhkan. Sangat diperlukan survei untuk mendapatkan bobot yang optimal untuk kasus ini. Mula-mula survei dilakukan dengan memberikan bobot k dengan nilai satu. Kemudian dilakukan kepada kedua gambar pada Gambar 1. Hasil segmentasi dari pada bab 3 dari langkah A sampai C ditunjukan oleh Gambar 3. Dibandingkan dengan dua buah segmentasi, ukuran *mask* dari *weight median filter* sangat berpengaruh terhadap daerah segmentasi untuk mereduksi *noise*-nya. Table I Menunjukkan daftar statistik untuk daerah segmentasi pada Gambar 3. Table I memperlihatkan daerah segmentasi, yang terdiri dari kurang dari 50 piksel atau memiliki *eccentricity* kurang dari 0.8 adalah mayoritas untuk setiap gambar biner. Sayangnya, sebagian wilayah yang tersegmentasi termasuk lingkungan yang ber-*noise*. Dengan kata lain, wilayah yang tersegmentasi memiliki area $\text{threshold} \geq 50$ piksel dan $\text{eccentricity} \geq 0.8$

memiliki kemungkinan yang lebih besar terindikasi retak. Berdasarkan hasil di atas, *sensitivity analysis* dirancang untuk mengetahui kriteria yang tepat untuk mendeteksi retak. Kemudian Gambar 4. Menunjukkan hasil segmentasi region menggunakan Otsu's.



Gambar 3. Hasil segmentasi gambar sampel pada Gambar 1. Menggunakan 3x3 *weight median filter* (Lihat gambar (a1) dan (b1)) dan 5x5 *weight median filter* (Lihat gambar (a2) dan (b2))



Gambar 4. Menunjukkan hasil daerah segmentasi menggunakan Otsu's untuk Gambar 3. (a2) dan (b2)

A. Pelatihan untuk Deteksi Retak

Tabel II menunjukkan sampel *sensitivity analysis* menggunakan *median filter* dengan $k=1$. Menurut setiap kriteria yang tercantum pada masing-masing tabel, ketepatan deteksi retak dan tidak retak diperkirakan.

Pada Tabel II hingga Tabel V, *weighted median filter* dengan perbedaan nilai K, yaitu 1,3,5, dan 7 telah di ujikan. *Sensitivity Analysis* menunjukkan bahwa nilai K untuk *weighted median filter* memiliki sedikit efek pada deteksi

retak berdasarkan perbedaan yang tidak cukup signifikan dengan akurasi total antara 0.625 hingga 0.875. Selain itu keenam kriteria yaitu $(\geq 50, \geq 80)$, $(\geq 50, \geq 85)$, $(\geq 50, \geq 90)$, $(\geq 100, \geq 90)$, $(\geq 150, \geq 90)$ dan $(\geq 200, \geq 90)$ cukup mewakili total akurasi dari kondisi variasi *weight* yang diberikan.

Table I: Nilai Segmentasi Pada Gambar 3.

| Area (Piksel) | ID Gambar | | | |
|----------------------------|-----------|------|------|------|
| | (a1) | (a2) | (b1) | (b2) |
| ≥ 200 | 2 | 4 | 8 | 7 |
| $200 > \sim \geq 150$ | 0 | 0 | 2 | 2 |
| $150 > \sim \geq 100$ | 0 | 1 | 4 | 3 |
| $100 > \sim \geq 50$ | 0 | 2 | 6 | 7 |
| ≤ 50 | 8 | 13 | 275 | 130 |
| Eccentricity | | | | |
| $1.0 \geq \sim \geq 0.95$ | 1 | 8 | 9 | 18 |
| $0.95 \geq \sim \geq 0.90$ | 2 | 3 | 42 | 15 |
| $0.90 \geq \sim \geq 0.85$ | 4 | 2 | 66 | 24 |
| $0.85 \geq \sim \geq 0.80$ | 0 | 0 | 19 | 11 |
| < 0.80 | 3 | 7 | 159 | 78 |

Table II: *Sensitivity Analysis* untuk 16 Sampel Latihan Menggunakan 5x5 *Weighted Median Filter* dengan $k=1$

| Kriteria | | Akurasi deteksi retak | Akurasi deteksi tidak retak | Akurasi Total |
|----------|--------------|-----------------------------|--------------------------------------|------------------|
| Area | Eccentricity | | | |
| ≥50 | ≥0.80 | 1 | 0.75 | 0.875 |
| | ≥0.85 | 1 | 0.75 | 0.875 |
| | ≥0.90 | 1 | 0.75 | 0.875 |
| | ≥0.95 | 0.875 | 0.75 | 0.8125 |
| ≥100 | ≥0.80 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| | ≥0.85 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| | ≥0.90 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| | ≥0.95 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| ≥150 | ≥0.80 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| | ≥0.85 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| | ≥0.90 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| | ≥0.95 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| ≥200 | ≥0.80 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| | ≥0.85 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| | ≥0.90 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| | ≥0.95 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |

Tabel III : *Sensitivity Analysis* untuk 16 Sampel Latihan Menggunakan 5x5 *Weighted Median Filter* dengan K = 3

| Kriteria | Akurasi deteksi retak | Akurasi deteksi tidak retak | Akurasi Total |
|----------|-----------------------|-----------------------------|---------------|
| Area | Eccentricity | | |
| ≥50 | ≥0.80 | 0.375 | 1 0.6875 |
| | ≥0.85 | 0.375 | 1 0.6875 |
| | ≥0.90 | 0.375 | 1 0.6875 |
| | ≥0.95 | 0.375 | 1 0.6875 |
| ≥100 | ≥0.80 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.85 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.90 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.95 | 0.25 | 1 0.625 |
| ≥150 | ≥0.80 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.85 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.90 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.95 | 0.25 | 1 0.625 |
| ≥200 | ≥0.80 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.85 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.90 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.95 | 0.25 | 1 0.625 |

Tabel IV : *Sensitivity Analysis* untuk 16 Sampel Latihan Menggunakan 5x5 *Weighted Median Filter* dengan K = 5

| Kriteria | Akurasi deteksi retak | Akurasi deteksi tidak retak | Akurasi Total |
|----------|-----------------------|-----------------------------|---------------|
| Area | Eccentricity | | |
| ≥50 | ≥0.80 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.85 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.90 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.95 | 0.25 | 1 0.625 |
| ≥100 | ≥0.80 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.85 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.90 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.95 | 0.25 | 1 0.625 |
| ≥150 | ≥0.80 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.85 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.90 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.95 | 0.25 | 1 0.625 |
| ≥200 | ≥0.80 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.85 | 0.25 | 1 0.625 |

| | | | |
|-------|------|---|-------|
| ≥0.90 | 0.25 | 1 | 0.625 |
| ≥0.95 | 0.25 | 1 | 0.625 |

Tabel V : *Sensitivity Analysis* untuk 16 Sampel Latihan menggunakan 5x5 *Weighted Median Filter* Dengan K = 7

| Kriteria | Akurasi deteksi retak | Akurasi deteksi tidak retak | Akurasi Total |
|----------|-----------------------|-----------------------------|---------------|
| Area | Eccentricity | | |
| ≥50 | ≥0.80 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.85 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.90 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.95 | 0.25 | 1 0.625 |
| ≥100 | ≥0.80 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.85 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.90 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.95 | 0.25 | 1 0.625 |
| ≥150 | ≥0.80 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.85 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.90 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.95 | 0.25 | 1 0.625 |
| ≥200 | ≥0.80 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.85 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.90 | 0.25 | 1 0.625 |
| | ≥0.95 | 0.25 | 1 0.625 |

B. Pengujian untuk Deteksi Retak

Berdasarkan 6 kriteria, akurasi deteksi retak dan tidak retak dilakukan untuk 16 sampel gambar. Menurut *weight*, *area* dan *eccentricity* yang optimal ditemukan, hasil dari pengujian deteksi retak dan tidak retak pada Tabel VI menunjukkan bahwa akurasi deteksi retak dan tidak retak pada rentang 0.6875 ke 1. Area Threshold ≥ 50 piksel dibarengi dengan *eccentricity* ≥ 0.80 atau ≥ 0.85 dapat memimpin dengan akurasi di atas 0.8125.

Dibandingkan dengan sampel latihan, perbedaan terbesar akurasi total adalah 31.25% pada saat nilai K = 3 dan area thresholdnya ≥ 50 bersamaan dengan nilai *eccentricity* ≥ 80 , ≥ 85 dan ≥ 90

Tabel VI. Hasil dari Pengujian untuk Deteksi Retak dan Tidak Retak dengan 16 Sampel Pengujian

| k | Kriteria | | Akurasi deteksi retak | Akurasi deteksi tidak retak | Akurasi Total |
|---|------------|--------------|-----------------------|-----------------------------|---------------|
| | Area | Eccentricity | | | |
| 1 | ≥ 50 | ≥ 0.80 | 1 | 0.75 | 0.875 |
| 1 | ≥ 50 | ≥ 0.85 | 1 | 0.75 | 0.875 |
| 1 | ≥ 50 | ≥ 0.90 | 0.875 | 0.75 | 0.8125 |
| 1 | ≥ 100 | ≥ 0.90 | 0.875 | 0.75 | 0.8125 |
| 1 | ≥ 150 | ≥ 0.90 | 0.875 | 0.75 | 0.8125 |
| 1 | ≥ 200 | ≥ 0.90 | 0.875 | 0.75 | 0.8125 |
| 3 | ≥ 50 | ≥ 0.80 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | ≥ 50 | ≥ 0.85 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | ≥ 50 | ≥ 0.90 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | ≥ 100 | ≥ 0.90 | 0.75 | 1 | 0.875 |
| 3 | ≥ 150 | ≥ 0.90 | 0.75 | 1 | 0.875 |
| 3 | ≥ 200 | ≥ 0.90 | 0.75 | 1 | 0.875 |
| 5 | ≥ 50 | ≥ 0.80 | 0.75 | 1 | 0.875 |
| 5 | ≥ 50 | ≥ 0.85 | 0.75 | 1 | 0.875 |
| 5 | ≥ 50 | ≥ 0.90 | 0.75 | 1 | 0.875 |
| 5 | ≥ 100 | ≥ 0.90 | 0.625 | 1 | 0.8125 |
| 5 | ≥ 150 | ≥ 0.90 | 0.625 | 1 | 0.8125 |
| 5 | ≥ 200 | ≥ 0.90 | 0.5 | 1 | 0.75 |
| 7 | ≥ 50 | ≥ 0.80 | 0.625 | 1 | 0.8125 |
| 7 | ≥ 50 | ≥ 0.85 | 0.625 | 1 | 0.8125 |
| 7 | ≥ 50 | ≥ 0.90 | 0.625 | 1 | 0.8125 |
| 7 | ≥ 100 | ≥ 0.90 | 0.625 | 1 | 0.8125 |
| 7 | ≥ 150 | ≥ 0.90 | 0.375 | 1 | 0.6875 |
| 7 | ≥ 200 | ≥ 0.90 | 0.375 | 1 | 0.6875 |

V. Kesimpulan

Paper ini menggunakan metode *computer vision* dan pengolahan citra, dan *weighted median filter*, *image opening*, *Otsu's thresholding*, dan pengukuran fitur morfologi dieksekusi untuk automatisasi deteksi retak pada struktur beton. Ada 16 gambar yang digunakan sebagai data latihan dan 16 gambar sebagai data pengujiannya. Pada paper ini, *mask 5x5 weighted median filter* memiliki *performance* lebih baik dibandingkan dengan *mask 3x3 weighted median filter* untuk deteksi retak.

Fitur morfologi, termasuk *area* dan *Eccentricity*, telah digunakan untuk mengukur

setiap daerah segmentasi gambar. Berdasarkan pengukuran fitur morfologi, *sensitivity analysis* telah digunakan untuk menetapkan kriteria untuk deteksi keretakan. Hasil dari analisis yang telah didemonstrasikan menunjukkan optimal total akurasi 87.5% (menggunakan area ≥ 50 dan *eccentricity* ≥ 80 , ≥ 85 dan ≥ 90) dan 100% (menggunakan area dan *eccentricity* yang sama) dengan rata-rata 84% yang diperoleh masing-masing untuk data latihan dan data pengujian. Dengan demikian, metode *computer vision* dan pengolahan citra yang diusulkan efektif untuk mendeteksi keretakan pada struktur beton.

Sumber

- [1] I. Abdel-Qader, S. Pashaie-Rad, O. Abudayyeh, and S. Yehia, "PCA-Based algorithm for unsupervised bridge crack detection," *Advances in Engineering Software*, vol. 37, no. 12, pp. 771-778, 2006.
- [2] S. Kabir, P. Rivard, D. C. He, and P. Thivierge, "Damage assessment for concrete structure using image processing techniques on acoustic borehole imagery," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 10, pp. 3166-3174, 2009.
- [3] S. Kabir, "Imaging-based detection of AAR induced map-crack damage in concrete structure," *NDT&E International*, vol. 43, no. 6, pp. 461-469, 2010.
- [4] T. C. Su, M. D. Yang, T. C. Wu, and J. Y. Lin, "Morphological segmentation based on edge detection for sewer pipe defects on CCTV images," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 10, pp. 13094-13114, 2011.
- [5] Su. Tung-Ching, *Application of Computer Vision to Crack Detection of Concrete Structure*, 2013.
- [6] F. Y. Shih, *Image Processing and Pattern Recognition*, Wiley, New Jersey, 2010.
- [7] P. D. Wendt, E. J. Coyle, and N. C. Gallagher Jr., "Stack filter," *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process*, vol. 34, no. 4, pp. 898-911, 1986.
- [8] O. Yli-Harja, J. Astola, and Y. Neuvo, "Analysis of the properties of median and weighted median filters using threshold logic and stack filter representation," *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process*, vol. 39, no. 2, pp. 395-410, 1991.
- [9] R. Yang, M. Gabbouj, and Y. Neuvo, "Fast algorithms for analyzing and designing weighted median filters," *Signal Processing*, vol. 41, no. 2, pp. 135-152, 1995.
- [10] H. Yan, "Unified formulation of a class of image thresholding techniques," *Pattern Recognition*, vol. 29, no. 12, pp. 2025-2032, 1996.
- [11] M. D. Yang, and T. C. Su, "Segmenting ideal morphologies of sewer pipe defects on CCTV images for automated diagnosis," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 2, pp. 3562-3573, 2009.
- [12] Cs. Mészáros, and T. Rapcsák, "On sensitivity analysis for a class of decision systems," *Decision Support Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 231-240, 1996.
- [13] J. K. Ravalico, H. R. Maier, and G. C. Dandy, "Sensitivity analysis for decision-making using the MORE method—A Pareto approach," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 94, no. 7, pp. 1229-1237, 2009.