

Retinal Vessel Segmentation to Support Foveal Avascular Zone Detection Segmentasi Pembuluh Darah Retina untuk Mendukung Deteksi Foveal Avascular Zone

¹ **Dhimas Arief Dharmawan**

¹ Informatika, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta, Indonesia

^{1*} dhimas.arief@upnyk.ac.id

*: *Penulis korespondensi (corresponding author)*

Informasi Artikel

Received: December 2022

Revised: January 2023

Accepted: January 2023

Published: February 2023

Keywords: retina, blood vessels, length filter

Kata kunci: retina, pembuluh darah, length filter

Abstract

Purpose: This study aims to perform retinal vessel segmentation to support foveal avascular zone detection. Methodology: The proposed approach consists of a multi-stage image processing approach, including preprocessing, image quality enhancement, and segmentation of retinal blood vessel using matched filter and length filter techniques.

Findings: The proposed framework has achieved remarkable results with an average sensitivity, specificity, and accuracy of 77.99%, 86.43%, and 85.24%, respectively. Value: This achievement has the potential to significantly enhance the accuracy and efficiency of detecting and diagnosing medical conditions related to the retina, improving the quality of life for countless individuals.

Abstrak

Tujuan: Penelitian ini bertujuan untuk melakukan segmentasi pembuluh darah retina untuk mendukung deteksi zona avaskular foveal. Metodologi: Pendekatan yang diusulkan terdiri dari pendekatan pemrosesan gambar bertahap, termasuk pra-pemrosesan, peningkatan kualitas gambar, dan segmentasi pembuluh darah retina menggunakan teknik matched filter dan length filter. Temuan: Kerangka kerja yang diusulkan telah mencapai hasil yang luar biasa dengan sensitivitas, spesifisitas, dan akurasi rata-rata masing-masing 77,99%, 86,43%, dan 85,24%.

Nilai: Prestasi ini berpotensi secara signifikan meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam mendeteksi dan mendiagnosis kondisi medis yang terkait dengan retina, meningkatkan kualitas hidup banyak individu.

1. Pendahuluan

Retina merupakan salah satu bagian mata yang penting bagi manusia. Pada manusia, retina berfungsi untuk menerima cahaya terfokus dari lensa, mengubahnya ke dalam bentuk sinyal-sinyal tertentu, dan kemudian mengirim sinyal-sinyal tersebut ke otak melalui jaringan saraf [1]. Di samping fungsi utamanya, dalam dunia medis, retina setelah dicitrakan juga digunakan untuk mendeteksi sejumlah penyakit, seperti diabetic retinopathy, hipertensi, dan glukoma.

Untuk mendeteksi sejumlah penyakit, digunakan citra digital retina yang diambil menggunakan digital fundus camera. Dalam melakukan deteksi pada sejumlah penyakit, khususnya diabetic retinopathy dan hipertensi, dibutuhkan citra digital retina yang tersegmentasi. Dalam beberapa dekade terakhir, segmentasi otomatis terhadap citra digital retina dengan bantuan komputer menjadi hal yang populer. Namun demikian, segmentasi otomatis citra digital retina merupakan sebuah pekerjaan yang kompleks, mengingat adanya artefak maupun derau pada citra digital retina, iluminasi yang merata, intensitas yang gelap, kontras yang rendah, dan panjang pembuluh darah retina yang bervariasi [2][3].

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk melakukan segmentasi pembuluh darah retina. Salah satu di antaranya ialah penelitian yang dilakukan oleh [4] menggunakan matched filter dengan turunan pertama Gaussian sebagai metodenya. Penelitian tersebut berakurasi 93,82%. Penggunaan matched filter untuk segmentasi pembuluh darah retina juga telah dilakukan oleh [5][6][7][8][9][10]. Penelitian serupa juga dilakukan oleh [2] dengan menggunakan multiscale line strength, gabor filter serta fitur morfologis sebagai metodenya, dan memberikan akurasi sebesar 94,76%. Hasil yang lebih baik pada penelitian serupa yakni akurasi sebesar 96,16% didapatkan oleh [11] yang menggunakan gabor filter dan jaringan saraf tiruan sebagai metodenya.

2. Metode

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa citra digital retina yang berjumlah 35 buah. Data tersebut diperoleh dengan mengunduh satu set data citra digital retina dari situs resmi Digital Retinal Images for Vessel Extraction (DRIVE). Citra digital retina yang disediakan memiliki spesifikasi sebagai berikut.

1. Citra digital retina berasal dari empat ratus pasien diabetes berusia 25-90 tahun.
2. Citra digital retina diambil menggunakan kamera Canon CR5 non-mydratic 3CCD dengan sudut pengambilan atau field of view (FOV) sebesar 45o, dan jari-jari setiap FOV sebesar 540 pixel.
3. Tiap citra diambil menggunakan 8 bit per kanal warna, dan masing-masing citra berukuran 768×584 pixel.

Untuk melaksanakan penelitian ini, digunakan alat berupa laptop berspesifikasi Intel Celeron CPU 1007U/RAM 2 GB. Laptop tersebut dilengkapi MATLAB R2013a sebagai aplikasi utama untuk melaksanakan penelitian ini. Adapun langkah-langkah pengolahan citra digital retina yaitu sebagai berikut. Pertama, dilakukan langkah preprocessing yakni pengambilan kanal hijau (green channel) dan cropping pada setiap citra digital retina. Kedua, dilakukan tahapan perbaikan kualitas citra yang terdiri atas multiscale top-hat transformation dan histogram fitting

stretching. Ketiga, dilakukan tahapan segmentasi pembuluh darah retina menggunakan matched filter dan length filter.

2.1. Preprocessing

Tahap preprocessing menjadi awal dari tahapan pengolahan citra digital retina. Pada umumnya, tahap preprocessing merupakan tahapan untuk meyetarakan data sampel masukan apabila data masukan yang diperoleh memiliki ukuran serta tingkat kontras yang berbeda-beda [12]. Berkaitan dengan penelitian ini, preprocessing terdiri atas dua tahapan yakni pengambilan kanal hijau (green channel) pada citra digital retina dan cropping.

Kanal hijau dipilih karena telah terbukti memiliki kualitas terbaik, baik dari sisi kontras maupun iluminasi, sebagaimana yang digunakan pada penelitian-penelitian sebelumnya, dibandingkan dengan kanal lain yakni merah dan biru [13]. Tahap ini dilakukan dengan cara mengambil matriks yang mewakili kanal hijau saja pada setiap citra digital retina.

Tahapan kedua dari tahap preprocessing ialah cropping. Pada tahap cropping, citra digital retina yang berukuran 565×584 pixel dipotong hingga berukuran 200×200 pixel secara otomatis dengan menggunakan software Matlab 2013a.

2.2. Peningkatan Kualitas Citra

1. Tentukan titik pada pixel (x,y) tertentu yang mengindikasikan FAZ secara interaktif.
2. Dari titik tersebut, tentukan titik-titik sudut citra yang dikehendaki, yaitu $(x-200,y-200)$ dan $(x+200,y+200)$.
3. Berdasarkan titik-titik sudut yang terbentuk pada poin 2, lakukan cropping dengan fungsi `imcrop()` yang tersedia pada software Matlab.

Tujuan dilakukannya tahap cropping bukan untuk menyeragamkan ukuran citra, sebagaimana pada umumnya, namun untuk memperkecil daerah kerja. Hal tersebut dilakukan sebab telah diketahui bahwa FAZ pada umumnya terletak di tengah citra [14]. Dengan begitu, proses komputasi dapat berjalan lebih ringan.

Tahap kedua dari tahapan pengolahan citra digital retina ialah perbaikan kualitas citra. Tahap ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas citra digital retina. Perbaikan kualitas citra dilakukan melalui dua langkah, yakni multiscale top-hat transformation dan histogram fitting stretching [15]. Langkah pertama ialah multiscale top-hat transformation. Langkah ini berfungsi untuk meningkatkan kontras dari pembuluh darah yang tipis. Langkah ini terdiri atas dua proses, yakni black top-hat transformation dan white top-hat transformation. Langkah kedua ialah histogram fitting stretching. Langkah ini berfungsi untuk meningkatkan kontras citra digital retina secara menyeluruh. Pada umumnya, histogram citra hasil dari langkah sebelumnya berbentuk gaussian.

2.3. Segmentasi Pembuluh Darah Retina

Tahap ketiga dari tahapan pengolahan citra digital retina ialah segmentasi pembuluh darah retina. Tahapan ini bertujuan untuk memisahkan pembuluh darah retina dengan background. Pada penelitian ini, segmentasi pembuluh darah retina diimplementasikan menggunakan matched filter dan length filter.

Pengoperasian matched filter dilakukan dengan mengkonvolusikan dua belas buah kernel pada citra hasil tahapan sebelumnya. Masing-masing pixel dari citra hasil konvolusi hanya diambil nilai maksimumnya saja. Keluaran dari tahapan ini ialah pembuluh darah tersegmentasi pada citra digital retina, dan akan menjadi masukan pada tahapan selanjutnya yakni segmentasi length

filter. Length filter digunakan untuk meminimalkan derau yang terdapat pada citra hasil matched filter. Length filter bekerja dengan menerapkan nilai threshold tertentu pada citra yang telah dilabeli, dan objek yang jumlah ketetanggaannya kurang dari nilai threshold, akan dihapus.

3. Hasil dan Pembahasan

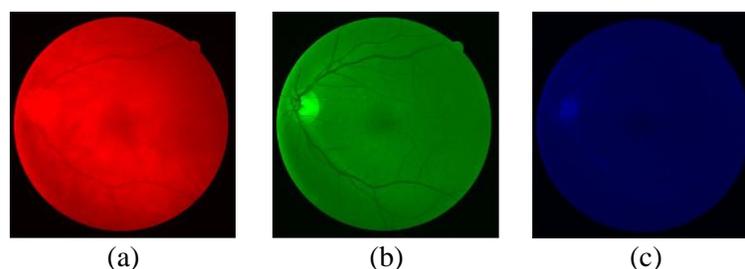
3.1. Preprocessing

Tahap preprocessing didahului dengan pembacaan berkas citra digital retina hasil pengunduhan dari situs resmi DRIVE. Jumlah citra yang tersedia sebanyak empat puluh buah, namun jumlah citra yang digunakan hanya sebanyak 35 buah. Contoh data yang digunakan dan tidak digunakan dapat dilihat pada **Gambar 1**.



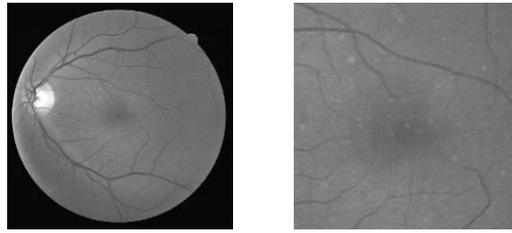
Gambar 1. Citra digital retina yang digunakan (kiri) dan yang tidak digunakan (kanan).

Selanjutnya, dilakukan dua buah operasi, yaitu pengambilan kanal hijau pada citra digital retina dan cropping. Kedua operasi tersebut dilakukan untuk memperoleh bagian citra sesuai kebutuhan penelitian ini. Pengambilan kanal hijau pada citra digital retina bertujuan untuk membuat citra hanya memiliki satu nilai kanal pada setiap pixelnya. Citra digital retina asli memiliki format RGB, di mana masing-masing kanal diwakili oleh matriks tertentu sebagaimana yang telah dijelaskan pada ulasan sebelumnya. Untuk itu, pengambilan kanal hijau cukup dilakukan dengan mengambil matriks yang mewakili kanal hijau saja. Begitupun dalam pengambilan kanal merah dan biru. Perbandingan antara citra kanal merah, hijau, dan biru ditunjukkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Citra kanal (a) merah, (b) hijau, dan (c) biru.

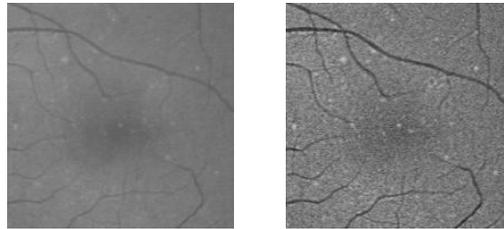
Pada Gambar 2 tampak bahwa citra kanal hijau memiliki kontras dan iluminasi terbaik dibandingkan dengan dua kanal lainnya, sehingga dapat dibedakan antara pembuluh darah dengan background. Dengan begitu, proses segmentasi pembuluh darah pada citra kanal hijau dapat dilakukan secara maksimal. Proses cropping dilakukan secara otomatis dengan menggunakan software Matlab 2013a. Citra awal retina yang berukuran 565x584 pixel dipotong hingga berukuran 200x200 pixel. Contoh hasil proses ini dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Citra digital retina Sebelum (kiri) dan Sesudah (kanan) proses cropping

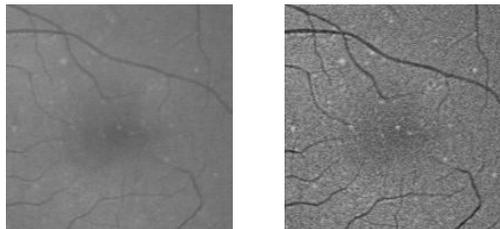
3.2. Peningkatan Kualitas Citra

Tahap peningkatan kualitas citra terbagi menjadi dua, yaitu multiscale top-hat transformation dan histogram fitting stretching. Multiscale Top-Hat Transformation Langkah awal dari operasi ini ialah pemanggilan secara berkelompok citra hasil cropping. Gambar 4 memperlihatkan citra hasil operasi multiscale top-hat transformation.



Gambar 4. Citra sebelum (kiri) dan sesudah (kanan) operasi multiscale top-hat transformation.

Pada **Gambar 4**, tampak bahwa citra hasil operasi multiscale top-hat transformation memiliki kontras yang lebih tinggi daripada citra sebelum operasi multiscale top-hat transformation. Sehingga, perbedaan pembuluh darah dengan background semakin jelas. Citra hasil operasi multiscale top-hat transformation menjadi masukan pada tahap histogram fitting stretching. Langkah ini dilakukan dengan operasi peregangan kontras linear (gray linear stretching), dengan memperhatikan batas atas (I_{max}) dan bawah (I_{min}) operasi tersebut. Nilai keduanya dapat ditentukan melalui pendekatan histogram citra hasil operasi multiscale top-hat transformation. Citra sebelum dan sesudah tahap histogram fitting stretching disajikan pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Citra sebelum (kiri) dan sesudah tahap histogram fitting stretching.

Tampak pada **Gambar 5** bahwa tahap histogram fitting stretching membuat kontras citra meningkat. Hal tersebut terbukti dengan semakin jelasnya perbedaan antara pembuluh darah dan background. Seiring dengan meningkatnya kontras tersebut, proses segmentasi pembuluh darah pada tahap selanjutnya dapat berjalan secara maksimal.

3.3. Segmentasi Pembuluh Darah Retina

Pada penelitian ini, segmentasi pembuluh darah retina diimplementasikan menggunakan *matched filter* dan *length filter*.

3.3.1. Matched Filter

Dalam pengoperasian *matched filter* dibutuhkan sejumlah kernel berukuran 15×16 dengan nilai $\sigma = 2$, $L = 9$, dan $T = 3\sigma$ untuk $\theta = \{0^\circ, 15^\circ, \dots, 165^\circ\}$. Nilai θ pada kernel berkorespondensi pada pembuluh darah dengan orientasi tertentu. Maka, untuk mendapatkan hasil segmentasi pembuluh darah pada seluruh orientasi yang mungkin, hasil segmentasi dengan *matched filter* (R_{max}) dihitung dengan persamaan di bawah ini:

$$R_{max} = \max(R_\theta), \quad (1)$$

di mana R_θ adalah respons *matched filter* pada orientasi θ .

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, terdapat sejumlah parameter *matched filter* selain θ yang harus ditentukan nilainya, yaitu σ , L , dan T . Pada penelitian ini, telah dilakukan pengujian untuk mendapatkan nilai ketiga parameter tersebut yang memberikan respon maksimal pada *matched filter* tersebut. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil segmentasi sebuah citra terhadap *groundtruth*. Pengujian dilakukan pada citra nomor 26 sampai dengan 30, dengan $\sigma = 1$, $L = 6$ sampai dengan 8,5, dan $T = 5$ sampai dengan 6 untuk nilai $\theta = 0^\circ$ sampai dengan 165° . Nilai TPR dan FPR untuk masing-masing kombinasi σ , L , dan T diukur untuk selanjutnya dapat ditentukan nilai *quality factor* (Q_{LT}) melalui persamaan di bawah ini.

$$TPR = FPR \times Q_{LT} \quad (2)$$

$$Q_{LT} = \frac{TPR}{FPR} \quad (3)$$

Merujuk persamaan di atas, maka didapatkan sepasang nilai L dan T terbaik untuk nilai Q_{LT} maksimal yang digunakan pada pengujian seluruh citra seperti pada tabel dibawah ini.

Tabel 1. Parameter L dan T terbaik untuk pengujian seluruh citra.

Nomor Citra	L	T	Q_{LT}
26	8,5	5,1	3,98
27	8,5	5,1	3,81
28	8,5	5,1	4,70
29	8,5	5,1	4,53
30	8,5	5,1	4,15

Tampak bahwa pada lima buah citra yang diujikan memberikan hasil pasangan L dan T yang sama, yaitu sebesar 8,5 dan 5,1 dengan masing-masing Q_{LT} sebesar 3,98, 3,81, 4,70, 4,53, dan 4,15. Berikut contoh citra hasil segmentasi pembuluh darah retina dengan *matched filter* untuk sepasang nilai L dan T di atas.



Gambar 1. Contoh hasil segmentasi pembuluh darah retina dengan *matched filter* untuk $\sigma = 1$, $L = 8,5$, dan $T = 5,1$.

Tahap selanjutnya ialah melakukan segmentasi terhadap seluruh citra, dengan sepasang nilai L dan T pada **Tabel 1**. Tahap ini memberikan hasil seperti pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Hasil segmentasi pembuluh darah retina dengan *matched filter* pada seluruh citra.

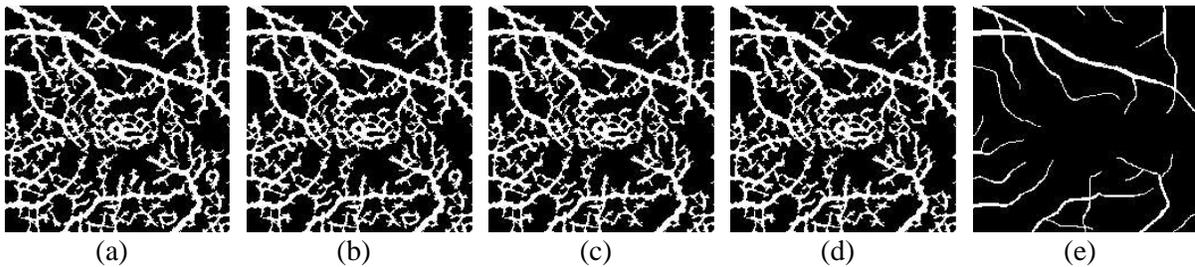
Nomor Citra	L	T	Sensitivitas (%)	Spesifisitas (%)	Akurasi (%)	Q_{LT}
1	8,1	5,1	85,39	82,73	82,98	4,94
2	8,1	5,1	88,22	78,82	79,93	4,17
3	8,1	5,1	75,93	75,75	75,77	3,13
5	8,1	5,1	78,46	80,68	80,43	4,06
6	8,1	5,1	76,75	79,85	79,52	3,81
7	8,1	5,1	67,94	89,75	87,58	6,63
8	8,1	5,1	76,31	80,09	79,81	3,83
9	8,1	5,1	80,67	82,80	82,60	4,69
10	8,1	5,1	79,50	81,21	81,06	4,23
11	8,1	5,1	82,84	80,45	80,70	4,24
12	8,1	5,1	85,58	78,53	79,18	3,99
13	8,1	5,1	79,47	81,46	81,22	4,29
14	8,1	5,1	86,61	74,50	75,38	3,40
16	8,1	5,1	88,29	80,02	81,11	4,42
17	8,1	5,1	80,36	79,54	79,62	3,93
18	8,1	5,1	85,29	80,50	80,95	4,37
19	8,1	5,1	91,47	79,43	80,68	4,45
20	8,1	5,1	90,16	82,49	83,07	5,15
21	8,1	5,1	89,53	76,41	77,28	3,80
22	8,1	5,1	82,47	81,23	81,36	4,39
24	8,1	5,1	81,20	78,53	78,90	3,78
25	8,1	5,1	76,27	80,87	80,42	3,99
26	8,1	5,1	71,21	82,10	81,19	3,98
27	8,1	5,1	80,43	78,87	79,01	3,81
28	8,1	5,1	80,17	82,94	82,70	4,70
29	8,1	5,1	78,18	82,75	82,35	4,53

30	8,1	5,1	79,33	80,87	80,75	4,15
32	8,1	5,1	79,70	79,08	79,13	3,81
33	8,1	5,1	86,92	78,00	78,67	3,95
35	8,1	5,1	81,48	86,83	86,30	6,19
36	8,1	5,1	82,11	82,39	82,36	4,66
37	8,1	5,1	79,90	84,24	83,80	5,07
38	8,1	5,1	85,99	84,01	84,23	5,38
39	8,1	5,1	88,84	81,74	82,42	4,86
40	8,1	5,1	85,42	80,25	80,66	4,33
Rata-rata			81,95	80,85	80,95	4,37

Pada **Tabel 2**, terlihat bahwa hasil segmentasi *matched filter* dengan $L = 8,5$ dan $T = 5,1$ memiliki rata-rata sensitivitas, spesifisitas, dan akurasi sebesar 81,95 %, 80,85 % dan 80,95 %. Sementara rata-rata nilai Q_L yang didapat sebesar 4,37. Dengan kata lain, terlihat bahwa proses segmentasi dengan *matched filter* berjalan dengan baik dengan nilai sensitivitas, spesifisitas, dan akurasi masing-masing berada pada rentang 70 – 90 %.

3.3.2. Length Filter

Merujuk kembali pada **Gambar 1**, terlihat bahwa terdapat non pembuluh darah yang tersegmentasi. Hal tersebut dapat dikategorikan sebagai derau. Untuk mengatasi hal tersebut, maka digunakanlah *length filter*. *Length filter* beroperasi dengan menerapkan nilai *threshold* (N) tertentu, sehingga derau yang jumlah pixelnya kurang dari nilai N tersebut akan dihilangkan. Pada penelitian ini dipilih nilai $N = 50, 100, 150,$ dan 200 . Hasil dari *length filter* dapat dilihat pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Hasil *length filter* dengan $N = 50, 100, 150,$ dan 200 ((a) - (d)) beserta *ground truth* (e).

Sementara itu, nilai sensitivitas, spesifisitas, dan akurasi hasil segmentasi *length filter* dengan $N = 50, 100, 150,$ dan 200 dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Hasil segmentasi menggunakan *Length Filter* dengan $N = 50, 100, 150,$ dan 200 .

N	Sensitivitas (%)	Spesifisitas (%)	Akurasi (%)	Q_N
50	80,36	85,07	84,62	5,56
100	79,23	85,87	85,24	5,82
150	78,57	86,20	85,47	5,92
200	77,99	86,43	85,63	5,99

Dengan membandingkan data pada keempat tabel dan grafik diatas, dapat dikatakan bahwa hasil segmentasi *length filter* dengan $N = 200$ memberikan hasil terbaik, dibandingkan dengan $N =$

50, 100, dan 150, sebab hasil segmentasi *length filter* dengan $N = 200$ memiliki nilai Q_N tertinggi. Selanjutnya, citra hasil segmentasi dengan $N = 200$ dapat digunakan sebagai dasar proses segmentasi *foveal avascular zone* (FAZ).

4. Kesimpulan dan Saran

Telah berhasil dirancang segmentasi pembuluh darah pada citra digital retina. Sistem terdiri dari empat tahapan pengolahan citra, yaitu (i) preprocessing, (ii) peningkatan kualitas citra, (iii) segmentasi pembuluh darah retina. Kerangka kerja yang diusulkan telah mencapai hasil yang luar biasa dengan sensitivitas, spesifisitas, dan akurasi rata-rata masing-masing 77,99%, 86,43%, dan 85,24%. Nilai: Prestasi ini berpotensi secara signifikan meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam mendeteksi dan mendiagnosis kondisi medis yang terkait dengan retina, meningkatkan kualitas hidup banyak individu.

Daftar Pustaka

- [1] W. Joan. Ho, Allen C. Miller, "Retina 2011: The Magical World of Retina," *Subspecialty day AAO 2010*, pp. 150–155, 2011.
- [2] M. M. Fraz, P. Remagnino, A. Hoppe, S. Velastin, B. Uyyanonvara, and S. a. Barman, "A supervised method for retinal blood vessel segmentation using line strength, multiscale Gabor and morphological features," *IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA)*, pp. 410–415, Nov. 2011, doi: 10.1109/ICSIPA.2011.6144129.
- [3] P. Liskowski and K. Krawiec, "Segmenting Retinal Blood Vessels With Deep Neural Networks," *IEEE Trans Med Imaging*, vol. 35, no. 11, pp. 2369–2380, 2016, doi: 10.1109/TMI.2016.2546227.
- [4] B. Zhang, L. Zhang, L. Zhang, and F. Karray, "Retinal vessel extraction by matched filter with first-order derivative of Gaussian," *Comput Biol Med*, vol. 40, no. 4, pp. 438–445, 2010, doi: 10.1016/j.combiomed.2010.02.008.
- [5] S. Chaudhuri, S. Chatterjee, N. Katz, M. Nelson, and M. Goldbaum, "Detection of blood vessels in retinal images using two-dimensional matched filters.," *IEEE Trans Med Imaging*, vol. 8, no. 3, pp. 263–269, 1989, doi: 10.1109/42.34715.
- [6] D. A. Dharmawan and B. P. Ng, "A new two-dimensional matched filter based on the modified Chebyshev type i function for retinal vessels detection," in *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, 2017, pp. 369–372. doi: 10.1109/EMBC.2017.8036839.
- [7] M. Al-Rawi, M. Qutaishat, and M. Arrar, "An improved matched filter for blood vessel detection of digital retinal images.," *Comput Biol Med*, vol. 37, no. 2, pp. 262–267, 2007, doi: 10.1016/j.combiomed.2006.03.003.
- [8] N. P. Singh and R. Srivastava, "Retinal blood vessels segmentation by using Gumbel probability distribution function based matched filter," *Comput Methods Programs Biomed*, vol. 129, pp. 40–50, 2016.

- [9] D. A. Dharmawan, B. P. Ng, and S. Rahardja, “A Modified Dolph-Chebyshev Type II Function Matched Filter for Retinal Vessels Segmentation,” *Symmetry (Basel)*, vol. 10, no. 7, p. 257, 2018.
- [10] H. Zolfagharnasab and A. R. Naghsh-nilchi, “Cauchy Based Matched Filter for Retinal Vessels Detection,” *J Med Signals Sens*, vol. 4, no. 1, pp. 1–9, 2014.
- [11] M. Nandy and M. Banrejee, “Retinal Vessel Segmentation Using Gabor Filter and Artificial Neural Network,” *Third International Conference on Emerging Applications of Information Technology (EAIT)*, no. 4, pp. 157–160, 2012.
- [12] A. F. Frangi, W. J. Niessen, K. L. Vincken, and M. A. Viergever, “Multiscale vessel enhancement filtering,” in *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention --- MICCAI’98*, W. M. Wells, A. Colchester, and S. Delp, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998, pp. 130–137.
- [13] D. A. Dharmawan, B. P. Ng, and N. Borijindargoon, “Design of Optimal Adaptive Filters for Two-Dimensional Filamentary Structures Segmentation,” *IEEE Signal Process Lett*, vol. 26, no. 10, pp. 1511–1515, 2019, doi: 10.1109/LSP.2019.2938631.
- [14] M. H. A. Fadzil, L. I. Izhar, and H. A. Nugroho, “Analysis of Foveal Avascular Zone for grading of Diabetic Retinopathy,” *International Journal of Recent Trends in Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 232–250, 2011, doi: 10.1504/IJBET.2011.041463.
- [15] M. Liao, Y. Q. Zhao, X. H. Wang, and P. S. Dai, “Retinal vessel enhancement based on multi-scale top-hat transformation and histogram fitting stretching,” *Opt Laser Technol*, vol. 58, pp. 56–62, 2014, doi: 10.1016/j.optlastec.2013.10.018.