



Optimalisasi Jaringan Lalu Lintas Kota Menggunakan Algoritma Genetika Dan Fuzzy Logic

Ratniasih¹,

¹Institut Teknologi dan Bisnis STIKOM Bali, Indonesia

Article Information

Article history:

Received 2026-11-01
Approved 2026-11-01
Accepted 2026-11-01

Keywords:

*Algoritma genetika,
Fuzzy logic,
Smart city*

ABSTRAK

Kemacetan lalu lintas di kawasan perkotaan menjadi tantangan serius dalam pembangunan kota cerdas (smart city). Permasalahan ini diperburuk oleh sistem pengaturan lalu lintas yang tidak adaptif terhadap dinamika arus kendaraan. Penelitian ini mengusulkan integrasi Algoritma Genetika (Genetic Algorithm/GA) dan Fuzzy Logic sebagai solusi cerdas dalam mengoptimalkan pengaturan sinyal lampu lalu lintas pada persimpangan jalan. Algoritma Genetika digunakan untuk menentukan konfigurasi waktu optimal lampu lalu lintas berdasarkan data historis, sedangkan Fuzzy Logic berfungsi sebagai pengendali adaptif berbasis kondisi real-time. Simulasi dilakukan menggunakan dataset volume kendaraan dari tiga titik simpang di kota metropolitan. Hasil menunjukkan peningkatan efisiensi lalu lintas dengan penurunan rata-rata waktu tunggu kendaraan sebesar 35,4% dan peningkatan throughput kendaraan sebesar 28,7%. Temuan ini mengindikasikan bahwa pendekatan hybrid GA-Fuzzy dapat menjadi alternatif strategis dalam pengembangan sistem transportasi cerdas berbasis kecerdasan buatan.

ABSTRACT

Traffic congestion in urban areas is a serious challenge in the development of smart cities. This problem is exacerbated by traffic management systems that are not adaptive to the dynamics of vehicle flow. This study proposes the integration of Genetic Algorithm (GA) and Fuzzy Logic as an intelligent solution to optimize traffic light signal settings at intersections. Genetic Algorithm is used to determine the optimal timing configuration of traffic lights based on historical data, while Fuzzy Logic functions as an adaptive controller based on real-time conditions. Simulations were conducted using vehicle volume datasets from three intersections in a metropolitan city. The results show an increase in traffic efficiency with a 35.4% decrease in average vehicle waiting time and a 28.7% increase in

vehicle throughput. These findings indicate that a hybrid GA-Fuzzy approach can be a strategic alternative in the development of intelligent transportation systems based on artificial intelligence.

Copyright © 2024, The Author(s)
This is an open-access article under the CC-BY-SA license



*Corresponding author email: ratniasih@stikom-bali.ac.id

PENDAHULUAN

Pada era digital yang terus berkembang, konsep smart city telah menjadi arah pembangunan kota-kota besar di seluruh dunia. Smart city tidak hanya merujuk pada penggunaan teknologi informasi dan komunikasi, tetapi juga menekankan integrasi sistem-sistem cerdas untuk meningkatkan kualitas hidup masyarakat secara menyeluruh (Nam & Pardo, 2011). Salah satu aspek krusial dalam implementasi smart city adalah pengelolaan sistem transportasi yang efisien, adaptif, dan berbasis data. Di Indonesia, kemacetan lalu lintas telah menjadi persoalan menahun yang tidak hanya menyebabkan pemborosan waktu dan energi, tetapi juga berdampak negatif terhadap lingkungan dan produktivitas ekonomi nasional (Setiawan et al., 2021). Ketidakefisienan sistem pengaturan lalu lintas menjadi salah satu penyebab utama dari ketimpangan arus kendaraan, terutama pada persimpangan jalan yang padat.

Teknologi Artificial Intelligence (AI) saat ini telah diadopsi secara luas dalam berbagai aspek kehidupan, termasuk dalam pengembangan sistem transportasi cerdas. AI memberikan peluang untuk menciptakan sistem yang mampu belajar dari data, beradaptasi terhadap kondisi yang berubah, serta mengambil keputusan yang optimal dalam waktu nyata (Russell & Norvig, 2020). Dalam konteks lalu lintas perkotaan, AI dapat diterapkan untuk mengendalikan sistem sinyal lalu lintas, memprediksi kepadatan kendaraan, dan mengatur alur pergerakan secara efisien. Salah satu pendekatan AI yang banyak digunakan adalah algoritma optimasi seperti Algoritma Genetika (Genetic Algorithm/GA) dan sistem berbasis logika fuzzy (Fuzzy Logic) yang mampu menangani ketidakpastian dan variabilitas input dalam pengambilan keputusan.

Namun demikian, penerapan satu metode tunggal dalam menangani kompleksitas lalu lintas seringkali menghadapi keterbatasan. Pendekatan klasik seperti pengaturan lampu lalu lintas berbasis waktu tetap (fixed-time control) tidak mampu merespons perubahan volume kendaraan yang bersifat dinamis, terutama pada jam-jam sibuk atau ketika terjadi kejadian luar biasa seperti kecelakaan atau gangguan cuaca (Zhang et al., 2020). Di sisi lain, metode AI tunggal seperti Fuzzy Logic, meskipun adaptif, membutuhkan desain aturan yang sangat kompleks jika ingin menangani variasi kondisi lalu lintas yang sangat besar. Oleh karena itu, kombinasi beberapa pendekatan AI menjadi pilihan strategis dalam membangun sistem pengaturan lalu lintas yang lebih efisien dan cerdas.

Penelitian ini mengusulkan integrasi Algoritma Genetika dan Fuzzy Logic sebagai pendekatan hybrid untuk optimalisasi pengendalian lalu lintas di simpang jalan perkotaan. Algoritma Genetika dipilih karena kemampuannya dalam mengeksplorasi ruang solusi secara global dan menemukan konfigurasi waktu lampu lalu lintas yang optimal melalui mekanisme seleksi, crossover, dan mutasi (Goldberg, 1989). Dalam sistem ini, setiap solusi direpresentasikan sebagai kromosom yang

mengandung informasi durasi setiap fase lampu (merah, kuning, hijau). Kualitas solusi (fitness) diukur berdasarkan parameter seperti waktu tunggu rata-rata kendaraan, panjang antrean, dan throughput. Setelah parameter dasar ini dihasilkan oleh GA, sistem Fuzzy Logic digunakan untuk melakukan penyesuaian mikro berdasarkan kondisi real-time seperti kepadatan lalu lintas, panjang antrean kendaraan, dan kecepatan rata-rata. Sistem fuzzy mengandalkan aturan linguistik yang fleksibel dan mampu menangani data numerik maupun simbolik secara simultan (Zadeh, 1973).

Integrasi antara GA dan Fuzzy Logic memberikan beberapa keuntungan strategis. Pertama, sistem menjadi adaptif terhadap perubahan kondisi lalu lintas karena Fuzzy Logic mampu merespons input real-time secara cepat. Kedua, penggunaan GA memungkinkan sistem untuk memperbarui konfigurasi waktu secara berkala guna menyesuaikan dengan pola lalu lintas yang berubah dari waktu ke waktu (misalnya hari kerja vs akhir pekan, pagi vs malam). Ketiga, kombinasi ini memungkinkan pengurangan beban pemrograman manual dalam merancang aturan fuzzy karena GA dapat menghasilkan konfigurasi awal yang optimal sehingga hanya dibutuhkan penyesuaian mikro oleh sistem fuzzy. Pendekatan hybrid seperti ini telah terbukti meningkatkan efisiensi lalu lintas di berbagai penelitian sebelumnya (Sharma et al., 2019; Liu et al., 2020).

Dalam implementasinya, sistem GA-Fuzzy ini memerlukan data lalu lintas historis maupun real-time yang dapat diperoleh dari sensor kendaraan, kamera CCTV, atau sistem GPS. Proses optimasi dilakukan secara iteratif dalam simulasi komputer, dengan hasil akhir berupa parameter waktu sinyal yang optimal pada setiap persimpangan. Sistem kemudian diuji menggunakan platform simulasi lalu lintas seperti SUMO (Simulation of Urban Mobility) untuk memvalidasi kinerjanya sebelum diterapkan secara nyata (Krajzewicz et al., 2012). Melalui simulasi ini, peneliti dapat mengevaluasi berbagai skenario lalu lintas seperti kepadatan tinggi, arus tidak seimbang, dan lonjakan mendadak, serta membandingkan performa sistem GA-Fuzzy dengan pendekatan konvensional.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk merancang dan mengevaluasi sistem pengendalian lalu lintas berbasis AI yang adaptif dan efisien melalui pendekatan hybrid Algoritma Genetika dan Fuzzy Logic. Sistem ini diharapkan mampu mengurangi waktu tunggu kendaraan, meminimalkan antrean, dan meningkatkan kelancaran arus lalu lintas di kota-kota besar yang menghadapi tekanan mobilitas tinggi. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi transportasi cerdas di Indonesia yang selaras dengan visi smart city nasional. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat dijadikan acuan bagi pemerintah daerah maupun pengembang sistem lalu lintas dalam mengadopsi teknologi AI untuk meningkatkan pelayanan transportasi publik dan mobilitas masyarakat secara umum.

Lebih jauh lagi, pengembangan sistem seperti ini akan memperkuat sinergi antara bidang teknik transportasi, teknologi informasi, dan ilmu komputer dalam menciptakan solusi multidisipliner yang inovatif dan aplikatif. Keterlibatan pemangku kepentingan seperti Dinas Perhubungan, pengembang perangkat lunak, dan komunitas akademik juga menjadi kunci sukses dalam implementasi sistem ini secara berkelanjutan. Dengan fondasi teoritis yang kuat dan pendekatan teknologi yang adaptif, sistem pengendalian lalu lintas berbasis GA dan Fuzzy Logic ini berpotensi menjadi bagian integral dari ekosistem smart city yang ramah lingkungan, efisien, dan berbasis data.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental berbasis simulasi untuk menguji efektivitas sistem pengendalian lalu lintas hybrid yang menggabungkan Algoritma Genetika (GA) dan Fuzzy Logic. Sistem dirancang untuk mengoptimalkan durasi lampu lalu lintas pada simpang empat jalan perkotaan. Tahapan utama dalam metodologi ini meliputi: pengumpulan data lalu lintas, perancangan algoritma GA, pengembangan sistem fuzzy, integrasi kedua metode dalam satu kerangka kerja, serta validasi melalui simulasi menggunakan perangkat lunak SUMO (Simulation of Urban Mobility).

Data lalu lintas dikumpulkan dari rekaman CCTV dan sensor kendaraan pada tiga titik persimpangan padat di Kota Surabaya. Parameter utama yang diambil meliputi volume kendaraan per arah, kecepatan rata-rata, panjang antrean, dan waktu tunggu. Data ini digunakan sebagai dasar dalam membentuk populasi awal untuk GA dan sebagai input variabel linguistik dalam sistem fuzzy. Algoritma Genetika digunakan untuk mencari konfigurasi optimal dari durasi lampu hijau, kuning, dan merah dengan representasi kromosom berdimensi tiga. Proses seleksi dilakukan berdasarkan nilai fitness yang dihitung dari total waktu tunggu dan throughput kendaraan.

Sementara itu, sistem Fuzzy Logic dirancang menggunakan metode inferensi Mamdani dengan tiga input utama: panjang antrean, kecepatan kendaraan, dan kepadatan lalu lintas. Output dari sistem fuzzy adalah penyesuaian durasi lampu secara dinamis. Seluruh simulasi dilakukan selama 60 menit waktu puncak (07.00–08.00 dan 16.00–17.00) untuk mengevaluasi performa sistem pada dua skenario lalu lintas yang berbeda. Hasil dari sistem GA-Fuzzy dibandingkan dengan sistem fixed-time control untuk mengukur peningkatan efisiensi lalu lintas.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem pengendalian lalu lintas berbasis hybrid Algoritma Genetika (GA) dan Fuzzy Logic memberikan peningkatan performa yang signifikan dibandingkan dengan sistem pengaturan waktu tetap (fixed-time control). Simulasi dilakukan pada tiga titik persimpangan padat di Kota Surabaya, yaitu Simpang A (Jalan Darmo–Diponegoro), Simpang B (Jalan Mayjend Sungkono–HR Muhammad), dan Simpang C (Jalan Ahmad Yani–Margorejo). Masing-masing titik memiliki karakteristik arus lalu lintas yang berbeda, yang memungkinkan evaluasi sistem dalam berbagai kondisi volume kendaraan.

Parameter yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem meliputi waktu tunggu rata-rata kendaraan, panjang antrean, dan throughput atau jumlah kendaraan yang berhasil melewati simpang per satuan waktu. Pada skenario pagi hari (07.00–08.00), rata-rata waktu tunggu kendaraan pada sistem fixed-time mencapai 128 detik per kendaraan. Setelah diterapkan sistem GA-Fuzzy, waktu tunggu turun drastis menjadi 83 detik atau mengalami penurunan sebesar 35,1%. Penurunan ini menunjukkan bahwa sistem hybrid mampu merespons lonjakan volume kendaraan yang umumnya terjadi pada jam sibuk.

Peningkatan juga terlihat pada parameter throughput. Pada Simpang A, sistem konvensional mencatat throughput sebesar 510 kendaraan/jam, sedangkan dengan sistem GA-Fuzzy meningkat menjadi 656 kendaraan/jam. Hal yang sama terjadi pada Simpang B dan C dengan peningkatan masing-masing 27,3% dan 31,6%. Hasil ini memperkuat temuan bahwa penggunaan algoritma evolusioner seperti GA dalam menentukan konfigurasi optimal waktu sinyal lalu lintas dapat secara efektif meningkatkan kapasitas jalan dan mengurangi kemacetan.

Sistem fuzzy yang diterapkan dalam penelitian ini menggunakan tiga input: panjang antrian, kecepatan kendaraan, dan kepadatan arus. Dengan 27 aturan fuzzy berbasis logika linguistik, sistem berhasil melakukan penyesuaian waktu lampu secara real-time berdasarkan kondisi aktual. Misalnya, ketika panjang antrian di salah satu jalur meningkat secara signifikan, sistem fuzzy akan memperpanjang durasi lampu hijau pada jalur tersebut dalam batas toleransi tertentu. Respons adaptif ini menjadikan sistem lebih fleksibel dibandingkan pendekatan konvensional yang bersifat statis dan tidak mempertimbangkan fluktuasi lalu lintas harian.

Keunggulan sistem GA-Fuzzy juga terlihat pada kemampuan menangani variasi kondisi. Pada skenario lalu lintas tidak seimbang (misalnya volume kendaraan dari arah timur lebih tinggi dibanding arah barat), sistem GA-Fuzzy mampu mengalokasikan waktu lampu hijau yang lebih proporsional sehingga tidak terjadi penumpukan kendaraan yang ekstrem di satu arah. Hal ini menunjukkan bahwa sistem memiliki respons spasial yang adaptif, sebuah keunggulan penting dalam pengelolaan simpang perkotaan yang padat.

Selain efisiensi teknis, aspek stabilitas sistem juga dievaluasi. Sistem diuji pada skenario puncak sore (16.00–17.00) di mana variasi volume kendaraan sangat tinggi dan sering terjadi lonjakan tiba-tiba. Pada simulasi ini, waktu tunggu rata-rata tetap berada di bawah 90 detik, bahkan dalam kondisi beban lalu lintas maksimum. Ini mengindikasikan bahwa sistem GA-Fuzzy mampu mempertahankan performa optimalnya pada kondisi ekstrem. Stabilitas sistem dalam jangka pendek ini merupakan prasyarat penting untuk pengembangan sistem jangka panjang berbasis pembelajaran berkelanjutan.

Dari sisi teknis, integrasi GA dan Fuzzy Logic memberikan pembagian fungsi yang efisien: GA bekerja pada aspek global untuk menemukan solusi optimal dari waktu siklus lampu lalu lintas, sedangkan Fuzzy Logic menangani pengambilan keputusan berbasis data real-time secara mikro. Pendekatan ini terbukti lebih unggul daripada sistem fuzzy murni yang memerlukan desain aturan kompleks untuk semua kondisi lalu lintas yang mungkin. Dengan pendekatan hybrid, jumlah aturan fuzzy dapat diminimalkan tanpa kehilangan akurasi pengambilan keputusan karena GA telah menyederhanakan ruang solusi dari awal.

Dalam literatur sebelumnya, beberapa pendekatan serupa telah diusulkan, seperti penggunaan sistem berbasis Reinforcement Learning (RL) atau Deep Q-Networks (DQN) untuk mengendalikan lampu lalu lintas (Zhang et al., 2020). Namun, metode tersebut sering membutuhkan data pelatihan dalam jumlah besar dan waktu pelatihan yang lama, serta tidak selalu stabil pada kondisi lingkungan nyata yang penuh noise. Dalam konteks ini, sistem GA-Fuzzy lebih mudah diimplementasikan karena tidak memerlukan data pelatihan historis dalam jumlah besar, tetapi cukup dengan data lalu lintas harian yang umum dimiliki oleh dinas perhubungan.

Hasil penelitian ini juga sejalan dengan studi Krajzewicz et al. (2012) yang menunjukkan bahwa simulasi dengan SUMO dapat merepresentasikan perilaku lalu lintas secara akurat dan fleksibel. Dalam simulasi yang dilakukan, model kendaraan dibuat dengan distribusi kecepatan normal antara 20–40 km/jam dan kepadatan kendaraan berdasarkan rata-rata 3000 kendaraan per jam. Penggunaan SUMO memungkinkan pengujian sistem dalam berbagai skenario tanpa harus mengganggu lalu lintas nyata. Validasi hasil dilakukan dengan membandingkan performa sistem terhadap parameter standar dalam perencanaan transportasi.

Dari sisi implementasi, sistem ini memiliki potensi besar untuk diterapkan secara nyata di kota-kota besar di Indonesia, terutama pada simpang-simpang utama yang mengalami beban lalu lintas

tinggi. Namun, penerapan di lapangan membutuhkan integrasi dengan sensor real-time seperti kamera CCTV, sensor magnetik, atau teknologi Internet of Things (IoT). Dengan data yang diperoleh secara real-time, sistem fuzzy dapat bekerja lebih optimal dalam menyesuaikan waktu sinyal berdasarkan kondisi lalu lintas aktual.

Meskipun hasil simulasi menunjukkan keberhasilan, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, simulasi dilakukan dalam kondisi lingkungan virtual yang tidak sepenuhnya mencerminkan kompleksitas lalu lintas nyata, seperti perilaku pengemudi, kondisi jalan rusak, atau cuaca ekstrem. Kedua, sistem belum diuji dalam konfigurasi multi-junction secara penuh. Artinya, setiap simpang masih dioptimalkan secara individual, belum dalam bentuk jaringan simpang yang saling bergantung. Ke depan, penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan mengadopsi metode multi-agent system atau pendekatan terdistribusi untuk mengoptimalkan jaringan lalu lintas secara keseluruhan.

Selain itu, pendekatan GA-Fuzzy juga dapat dikembangkan dengan memanfaatkan sistem adaptasi berbasis Reinforcement Learning untuk menyempurnakan pemilihan aturan fuzzy secara otomatis. Kombinasi triple hybrid (GA-Fuzzy-RL) mungkin menjadi arah penelitian masa depan yang menjanjikan. Tak hanya itu, evaluasi dampak lingkungan seperti pengurangan emisi CO₂ akibat efisiensi lalu lintas juga dapat dimasukkan sebagai parameter evaluasi tambahan untuk mendukung agenda kota hijau (green city).

Secara umum, hasil penelitian ini memberikan kontribusi nyata terhadap pengembangan sistem transportasi cerdas yang adaptif, hemat energi, dan ramah lingkungan. Pendekatan hybrid GA-Fuzzy mampu menjawab tantangan pengelolaan lalu lintas yang kompleks di kota-kota besar, sekaligus menjadi alternatif solusi berbasis teknologi yang dapat mendukung implementasi smart city di Indonesia. Dengan dukungan kebijakan dan infrastruktur yang tepat, sistem ini dapat diadopsi oleh pemerintah kota sebagai bagian dari sistem pengendalian lalu lintas modern yang responsif, terintegrasi, dan berbasis data.

SIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa integrasi Algoritma Genetika (Genetic Algorithm) dan Fuzzy Logic mampu meningkatkan efisiensi pengaturan lalu lintas di kawasan perkotaan secara signifikan. Sistem pengendali lampu lalu lintas yang dikembangkan melalui pendekatan hybrid ini menunjukkan kemampuan adaptif dalam merespons perubahan kondisi lalu lintas secara real-time. Hasil simulasi pada tiga titik simpang padat di Kota Surabaya menunjukkan penurunan rata-rata waktu tunggu kendaraan hingga 35% dan peningkatan throughput kendaraan sebesar lebih dari 28%. Hal ini membuktikan bahwa kombinasi GA sebagai alat optimasi global dan Fuzzy Logic sebagai sistem pengambil keputusan lokal dapat bekerja secara sinergis dalam meningkatkan kelancaran arus lalu lintas. Pendekatan ini tidak hanya efektif dari segi teknis, tetapi juga sejalan dengan visi pengembangan smart city yang membutuhkan sistem transportasi cerdas, adaptif, dan berbasis data. Oleh karena itu, sistem GA-Fuzzy ini sangat layak untuk diterapkan secara lebih luas dalam jaringan transportasi perkotaan di Indonesia.

Ke depan, pengembangan sistem dapat diarahkan pada integrasi dengan teknologi Internet of Things (IoT) untuk mendapatkan input data secara langsung dari sensor jalan, kamera, atau perangkat kendaraan. Selain itu, eksplorasi metode hybrid lanjutan seperti penggabungan dengan Reinforcement Learning juga direkomendasikan guna memperkuat kemampuan adaptasi jangka

panjang terhadap pola lalu lintas yang terus berubah. Uji implementasi lapangan juga menjadi langkah penting untuk memvalidasi efektivitas sistem dalam kondisi nyata dan mendukung transformasi digital sektor transportasi secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley.
- Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M., & Bieker, L. (2012). Recent development and applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 5(3–4), 128–138.
- Liu, H., Ma, Y., Wang, Y., & Xu, L. (2020). Adaptive traffic signal control using a fuzzy logic and genetic algorithm. *Journal of Advanced Transportation*, 2020, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2020/1847367>
- Nam, T., & Pardo, T. A. (2011). Conceptualizing smart city with dimensions of technology, people, and institutions. *Proceedings of the 12th Annual International Digital Government Research Conference*, 282–291. <https://doi.org/10.1145/2037556.2037602>
- Putra, A., Santosa, B., & Gunawan, D. (2022). Smart Traffic System di Indonesia: Peluang dan Tantangan. *Jurnal Teknologi dan Inovasi*, 11(1), 33–41. <https://doi.org/10.22219/jti.v11i1.1188>
- Russell, S., & Norvig, P. (2020). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (4th ed.). Pearson.
- Setiawan, I., Nugroho, Y., & Prabowo, M. A. (2021). Evaluasi Dampak Kemacetan Lalu Lintas terhadap Produktivitas Kota Metropolitan. *Jurnal Transportasi dan Sistem Jalan Raya*, 9(2), 112–121. <https://doi.org/10.14710/jtsjr.9.2.112-121>
- Sharma, S., Aggarwal, D., & Bhatia, R. (2019). Intelligent traffic light control: A hybrid fuzzy-genetic approach. *International Journal of Computer Applications*, 182(33), 17–22. <https://doi.org/10.5120/ijca2019918510>
- Zadeh, L. A. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3(1), 28–44. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.5408575>
- Zhang, Y., Liu, C., & Yu, H. (2020). Analysis of Traffic Signal Timing and Optimization under Urban Congestion. *IEEE Access*, 8, 89932–89942. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993497>