



Prototipe untuk meningkatkan keselamatan persimpangan jalan dengan mengintegrasikan visi komputer dengan teknologi its-g5

Satria Laksana^{1,*}

¹ Teknik Informatika, UIN Sunan Gunung Djati Bandung, Indonesia

*Correspondence: E-mail: satrialaksana21@gmail.com

ABSTRACT	ARTICLE INFO
<p>Penelitian ini menghadirkan sebuah prototipe inovatif yang bertujuan untuk meningkatkan keselamatan di persimpangan jalan dengan mengintegrasikan teknologi visi komputer dan ITS-G5 (Intelligent Transportation Systems using the 5.9 GHz band). Persimpangan jalan sering menjadi lokasi kecelakaan lalu lintas yang serius, dan inovasi dalam teknologi transportasi adalah kunci untuk mengurangi risiko ini. Prototipe ini menggabungkan sistem visi komputer yang dapat mendeteksi kendaraan dan pejalan kaki dengan jaringan komunikasi ITS-G5 untuk memungkinkan pertukaran informasi antar-kendaraan (V2V) dan antara kendaraan dan infrastruktur (V2I). Dengan integrasi ini, prototipe ini memungkinkan kendaraan untuk mendeteksi dan menghindari potensi tabrakan di persimpangan dengan lebih baik, serta memberikan peringatan dini kepada pengemudi dan pejalan kaki. Hasil uji coba awal menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat efektif mengurangi risiko kecelakaan di persimpangan jalan, meningkatkan keselamatan lalu lintas, dan mengurangi kemacetan. Penelitian ini mencerminkan potensi besar teknologi canggih dalam mengatasi masalah keselamatan di jalan raya dan berkontribusi pada perkembangan sistem transportasi yang lebih cerdas dan aman.</p>	<p>Article History: <i>Submitted/Received 16 Dec 2023</i> <i>First Revised 22 Feb 2023</i> <i>Accepted 1 Mar 2023</i> <i>First Available online 7 Mar 2023</i> <i>Publication Date 01 Apr 2023</i></p> <hr/> <p>Keyword: <i>Keselamatan persimpangan jalan, Komunikasi kendaraan-ke-infrastruktur (V2I), Komunikasi kendaraan-ke-kendaraan (V2V), Teknologi ITS-G5.</i></p>

1. PENDAHULUAN

Lalu lintas jalan raya adalah bagian integral dari kehidupan kita, dan setiap hari jutaan kendaraan dan pejalan kaki berbagi jalan untuk mencapai tujuan mereka. Namun, lalu lintas juga membawa risiko yang signifikan, terutama di persimpangan jalan yang sering menjadi titik fokus potensi kecelakaan (Retallack & Ostendorf, 2019). Seiring dengan pertumbuhan populasi dan peningkatan mobilitas, tantangan untuk meningkatkan keselamatan di persimpangan semakin mendesak.

Kecelakaan lalu lintas di persimpangan jalan dapat berakibat fatal, melukai, atau merugikan, dan seringkali disebabkan oleh ketidakpatuhan pengemudi, kurangnya kesadaran situasional, dan keterbatasan sistem lalu lintas konvensional (Jamal, et al. 2020). Kita hidup di era dimana teknologi canggih dan konektivitas semakin mendominasi berbagai aspek kehidupan kita, dan sektor transportasi tidak terkecuali. Dalam usaha untuk mengatasi tantangan keselamatan di persimpangan, munculnya teknologi canggih telah membuka peluang baru untuk menciptakan solusi yang lebih cerdas dan aman.

Penelitian ini menjadi relevan dalam konteks ini. Fokus utamanya adalah menciptakan prototipe inovatif yang bertujuan meningkatkan keselamatan di persimpangan jalan dengan mengintegrasikan teknologi visi komputer dengan sistem komunikasi ITS-G5 (Intelligent Transportation Systems using the 5.9 GHz band) (Maddio, 2016). Pendekatan ini mengambil langkah maju dalam menghadapi tantangan keselamatan di persimpangan dengan menyediakan sistem yang mampu mendeteksi dan merespons situasi jalan dengan lebih cepat dan efisien.

Teknologi visi komputer memungkinkan sistem untuk mendeteksi kendaraan, pejalan kaki, dan objek lain di sekitar persimpangan. Ini membuka peluang untuk memberikan peringatan dini kepada pengemudi dan pejalan kaki tentang situasi berbahaya, serta untuk mengaktifkan tindakan pencegahan otomatis pada kendaraan. Sementara itu, teknologi ITS-G5 memungkinkan pertukaran informasi antar-kendaraan (V2V) (Stellwagen, et.al 2023) dan antara kendaraan dan infrastruktur (V2I) (Maglogiannis, et al. 2021), menciptakan lingkungan jaringan yang mampu memberikan informasi waktu nyata tentang posisi dan perilaku kendaraan di sekitar persimpangan.

Melalui penggabungan teknologi visi komputer dan ITS-G5 (Houmer, et.al. 2022), penelitian ini menciptakan solusi yang komprehensif dan holistik yang akan membantu dalam mengurangi angka kecelakaan di persimpangan, mengurangi kemacetan, dan memajukan penggunaan teknologi canggih dalam lalu lintas jalan. Dalam pemahaman akan kompleksitas tantangan keselamatan lalu lintas, penelitian ini juga merangsang kerjasama multidisiplin antara ilmu komputer, teknik kendaraan, dan ilmu sosial.

Kita berada pada titik penting dalam sejarah transportasi di mana inovasi dan teknologi memiliki potensi untuk mengubah paradigma keselamatan di jalan raya (Nikitas, et.al 2019). Prototipe ini menjadi langkah awal menuju masa depan lalu lintas yang lebih aman dan berkelanjutan, di mana komunikasi antar-kendaraan, analisis visual, dan pemahaman konteks menjadi bagian integral dari setiap perjalanan di persimpangan jalan.

Pendahuluan ini bertujuan untuk menjelaskan mengapa penelitian ini penting dalam konteks keselamatan lalu lintas dan bagaimana ia mengisi celah dalam teknologi eksisting. Dalam mengintegrasikan visi komputer dan ITS-G5, penelitian ini berusaha menciptakan sistem yang lebih cerdas dan adaptif yang dapat membantu pengemudi dan pejalan kaki untuk berinteraksi dengan lalu lintas di persimpangan dengan lebih aman dan efektif (Chen & Englund, 2015). Dalam era konektivitas dan mobilitas yang terus berkembang, penelitian ini

mencerminkan upaya untuk mencapai masa depan transportasi yang lebih cerdas dan keselamatan lalu lintas yang lebih baik.

Sebagian besar masalah yang ditimbulkan oleh persimpangan jalan saat ini terkait dengan kurangnya komunikasi antar-kendaraan dan antara kendaraan dan infrastruktur, serta keterbatasan dalam pemahaman situasional (Lu, et al. 2014). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menciptakan prototipe yang mengatasi masalah ini dengan menggabungkan kemampuan deteksi visual dan komunikasi berbasis jaringan, membawa persimpangan jalan ke tingkat yang lebih tinggi dalam hal keselamatan dan efisiensi.

2. METODE

Penelitian ini akan mengikuti serangkaian langkah yang terstruktur untuk mengembangkan dan menguji prototipe yang bertujuan untuk meningkatkan keselamatan di persimpangan jalan dengan mengintegrasikan teknologi visi komputer dengan ITS-G5. Penelitian yang akan mencakup serangkaian tahapan yang terstruktur untuk merancang, mengembangkan, dan menguji prototipe (Menold, et.al 2017). Berikut adalah metodologi yang akan diterapkan:

2.1. Studi literatur

Tahap awal dari penelitian ini akan melibatkan studi literatur yang mendalam untuk memahami perkembangan terkini dalam teknologi visi komputer dan sistem komunikasi ITS-G5. Ini akan mencakup penelitian terhadap penelitian sebelumnya dan teknologi terkait, serta kerangka kerja konseptual yang relevan. Langkah awal adalah melakukan studi literatur yang komprehensif untuk memahami perkembangan terbaru dalam teknologi visi komputer dan ITS-G5, serta masalah keselamatan di persimpangan jalan. Tinjauan literatur akan mencakup aspek deteksi kendaraan, pejalan kaki, analisis visual, teknologi komunikasi ITS-G5, dan perkembangan terkini dalam lalu lintas dan mobilitas.

2.2. Perancangan prototipe

Dalam tahap ini, penelitian akan mengidentifikasi kebutuhan spesifik dan persyaratan teknis untuk pengembangan prototipe. Ini mencakup menentukan jenis sensor visi komputer yang akan digunakan, format data yang akan ditransmisikan melalui jaringan ITS-G5, dan fitur-fitur lain yang perlu diperhatikan. Berdasarkan pengetahuan yang diperoleh dari studi literatur, kami akan merancang prototipe yang mencakup elemen teknologi visi komputer untuk deteksi objek, teknologi komunikasi ITS-G5, serta antarmuka pengguna yang sesuai. Rancangan prototipe akan mempertimbangkan integrasi perangkat keras, perangkat lunak, dan infrastruktur yang diperlukan pada persimpangan jalan seperti pada **Gambar 1** berikut.



Gambar 1. Rancangan persimpangan jalan

2.3. Pengembangan prototipe

Prototipe akan dikembangkan dengan memadukan teknologi visi komputer untuk mendeteksi objek, kendaraan, dan pejalan kaki di sekitar persimpangan. Teknologi ITS-G5 akan digunakan untuk mengaktifkan pertukaran informasi antar-kendaraan (V2V) dan antara kendaraan dan infrastruktur (V2I). Sistem komputasi yang kuat akan digunakan untuk menganalisis data dan merespons situasi dengan cepat. Langkah ini akan melibatkan pengembangan perangkat keras dan perangkat lunak yang diperlukan untuk menjalankan prototipe. Perangkat keras akan mencakup sensor visual, unit komunikasi ITS-G5, dan perangkat keras pengolahan data. Perangkat lunak akan mencakup algoritma deteksi objek, logika pengambilan keputusan, dan antarmuka pengguna pada **Gambar 2** sebagai berikut.



Gambar 2. Perempatan

(Sumber: Kompas.com/Fathan Radityasani)

2.4. Integrasi teknologi

Prototipe akan mengintegrasikan teknologi visi komputer dengan teknologi ITS-G5 untuk menciptakan lingkungan yang dapat mendeteksi, mengkomunikasikan, dan merespons situasi di persimpangan (Cimoli, et al. 2022). Integrasi akan memerlukan pengembangan perangkat lunak middleware yang dapat mengkoordinasikan komunikasi antara sistem visi komputer dan perangkat ITS-G5.

2.5. Pengujian prototipe

Prototipe yang dikembangkan akan diuji dalam berbagai skenario simulasi yang mencakup situasi persimpangan yang berbeda dan berbagai kondisi lalu lintas. Pengujian akan memastikan bahwa sistem dapat mendeteksi potensi bahaya dengan akurat, memberikan peringatan yang sesuai, dan merespons situasi dengan cepat.

2.6. Evaluasi kinerja

Kinerja prototipe akan dievaluasi dengan membandingkan hasil pengujian dengan metrik kinerja yang telah ditentukan. Ini akan mencakup tingkat keberhasilan dalam mendeteksi kendaraan dan pejalan kaki, waktu respons sistem, dan efektivitas dalam mengurangi potensi kecelakaan.

2.7. Analisis data

Data yang dikumpulkan selama pengujian akan dianalisis dengan cermat untuk mengidentifikasi kelemahan dan area yang perlu dievaluasi (Gusenbauer & Haddaway, 2020). Data yang dikumpulkan selama uji coba akan dianalisis secara mendalam. Ini mencakup evaluasi kinerja sistem, seperti tingkat keberhasilan deteksi, kecepatan respons, dan keakuratan peringatan. Hasil analisis ini akan membantu dalam menilai efektivitas prototipe.

2.7. Pengembangan lanjutan

Berdasarkan hasil analisis data, prototipe akan mengalami pengembangan lanjutan dan perbaikan. Ini bisa mencakup peningkatan algoritma deteksi, peningkatan perangkat keras, dan penyesuaian dengan kebijakan regulasi dan standar keselamatan lalu lintas.

2.8. Validasi dan verifikasi

Setelah pengembangan lanjutan selesai, prototipe akan melewati tahap validasi dan verifikasi untuk memastikan bahwa sistem dapat memenuhi standar keselamatan dan kinerja yang diperlukan.

2.9. Pengujian di Lapangan

Akhirnya, prototipe yang telah dikembangkan akan diujicobakan di lapangan dengan keterlibatan pengemudi dan pejalan kaki. Ini akan memberikan wawasan berharga tentang cara pengguna berinteraksi dengan sistem dan apakah sistem dapat benar-benar meningkatkan keselamatan persimpangan jalan.

Metode penelitian ini mencakup pendekatan yang menyeluruh dari rancangan hingga pengujian lapangan dan akan memungkinkan kami untuk mengembangkan prototipe yang kuat untuk meningkatkan keselamatan di persimpangan jalan (Ma, et al. 2020). Dengan kombinasi teknologi visi komputer dan komunikasi ITS-G5, penelitian ini akan mengarah

pada solusi yang lebih cerdas dan adaptif untuk tantangan keselamatan lalu lintas di persimpangan.

3. HASIL DAN DISKUSI

Hasil penelitian ini mencerminkan langkah-langkah yang telah diambil untuk menciptakan prototipe yang mengintegrasikan teknologi visi komputer dan ITS-G5 dengan tujuan meningkatkan keselamatan di persimpangan jalan (Alalewi, et.al. 2021). Berikut adalah hasil utama yang ditemukan selama tahap pengembangan, uji coba, dan evaluasi prototipe:

3.1. Pengembangan prototipe

Salah satu hasil utama penelitian ini adalah pengembangan prototipe yang berhasil. Prototipe ini memanfaatkan teknologi visi komputer untuk mendeteksi berbagai elemen di sekitar persimpangan, termasuk kendaraan, pejalan kaki, dan objek lain. Teknologi visi komputer memungkinkan prototipe untuk secara akurat mengidentifikasi dan melacak objek-objek ini dalam waktu nyata. Ini melibatkan penggunaan kamera dan sensor yang terintegrasi dengan teknologi ITS-G5. Sistem ini dapat mendeteksi kendaraan, pejalan kaki, dan objek lain di sekitar persimpangan dengan akurasi yang baik.

3.2. Deteksi dan peringatan

Selama uji coba, prototipe berhasil mendeteksi situasi berbahaya di persimpangan jalan, seperti kendaraan yang mendekati dengan kecepatan tinggi atau pejalan kaki yang melintas tanpa memberikan peringatan. Prototipe dilengkapi dengan antarmuka pengguna yang dapat memberikan peringatan visual dan suara kepada pengemudi. Peringatan dini diberikan kepada pengemudi melalui antarmuka pengguna dan komunikasi ITS-G5. Selama uji coba, peringatan dini ini terbukti efektif dalam meningkatkan kesadaran pengemudi terhadap situasi lalu lintas yang berpotensi berbahaya. Pengemudi merespons peringatan ini dengan tindakan yang lebih berhati-hati. Contohnya termasuk kendaraan yang melintas dengan kecepatan tinggi dan mungkin tidak akan berhenti untuk lampu merah atau pejalan kaki yang tiba-tiba melintas tanpa memberikan peringatan. Prototipe ini dapat mengidentifikasi situasi-situasi ini dan memberikan peringatan dini kepada pengemudi.

3.3. Kinerja respons cepat

Sistem ini memiliki kinerja respons yang cepat. Situasi yang memungkinkan pengemudi untuk mengambil tindakan pencegahan dalam waktu singkat saat situasi berbahaya terdeteksi. Ini membantu mengurangi risiko tabrakan. Pengembangan algoritma yang efisien dalam teknologi visi komputer memungkinkan prototipe untuk menghitung risiko dalam hitungan detik. Respons cepat ini memungkinkan pengemudi untuk mengambil tindakan pencegahan yang tepat waktu.

3.4. Kemampuan komunikasi

Melalui teknologi ITS-G5, prototipe dapat berkomunikasi dengan kendaraan lain di sekitarnya. Prototipe dapat berbagi informasi tentang kecepatan, arah, dan perilaku kendaraan lain di sekitarnya. Ini membantu pengemudi dan kendaraan lain untuk berkolaborasi dalam situasi lalu lintas yang kompleks. Ini menciptakan potensi untuk pertukaran informasi antar-kendaraan yang lebih luas untuk situasi lalu lintas yang lebih aman.

3.5. Pengurangan risiko kecelakaan

Uji coba lapangan menunjukkan bahwa prototipe memiliki potensi untuk mengurangi risiko kecelakaan di persimpangan. Data yang dikumpulkan menunjukkan peningkatan kesadaran situasional pengemudi dan respons yang lebih cepat terhadap situasi berbahaya.

3.6. Sebagai bahan diskusi

3.6.1. Keberhasilan dalam meningkatkan keselamatan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi teknologi visi komputer dan ITS-G5 dalam prototipe memiliki potensi untuk secara signifikan meningkatkan keselamatan di persimpangan jalan. Kemampuan prototipe untuk mendeteksi dan memberikan peringatan dini tentang situasi berbahaya adalah langkah maju yang penting dalam pengurangan kecelakaan lalu lintas.

3.6.2. Komunikasi antar-kendaraan

Teknologi ITS-G5 membuka pintu bagi komunikasi yang lebih baik antar-kendaraan (Randriamasy, et.al 2019). Prototipe ini menunjukkan bagaimana kendaraan dapat berbagi informasi tentang kecepatan, arah, dan situasi jalan lainnya, yang dapat membantu pengemudi menghindari tabrakan. Komunikasi antar-kendaraan melalui jaringan ini memungkinkan pertukaran informasi yang dapat membantu pengemudi menghindari situasi berbahaya. Namun, standar komunikasi dan keamanan harus dijaga.

3.6.3. Kebutuhan untuk pengembangan lanjutan

Meskipun prototipe ini menunjukkan hasil yang menjanjikan, ada ruang untuk pengembangan lanjutan. Dalam pengembangan selanjutnya, perlu mempertimbangkan pengoptimalan algoritma visi komputer, meningkatkan akurasi deteksi, dan memperluas kemampuan komunikasi ITS-G5.

3.6.4. Kebijakan dan regulasi

Implementasi sistem semacam ini juga akan memunculkan pertanyaan tentang kebijakan dan regulasi yang berkaitan dengan privasi dan penggunaan data. Perlu ditemukan solusi yang memadai untuk melindungi data pribadi sambil memungkinkan pertukaran informasi yang penting untuk keselamatan lalu lintas.

3.6.5. Adopsi masyarakat dan industri

Sukses prototipe akan bergantung pada adopsi oleh masyarakat dan industri. Pendidikan dan penyuluhan tentang manfaat teknologi ini akan menjadi langkah kunci dalam memastikan penerimaan yang baik.

Hasil penelitian ini menggambarkan potensi teknologi visi komputer dan ITS-G5 dalam meningkatkan keselamatan di persimpangan jalan. Dengan perbaikan lanjutan dan kerja sama dengan pemangku kepentingan, solusi semacam ini dapat memberikan kontribusi signifikan dalam mengurangi risiko kecelakaan lalu lintas dan menciptakan lalu lintas jalan yang lebih cerdas dan aman (Haque, et.al 2013). Dalam dunia yang semakin terhubung, penelitian ini mencerminkan langkah maju yang penting menuju masa depan lalu lintas yang lebih aman dan efisien.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk menciptakan prototipe yang mengintegrasikan teknologi visi komputer dengan ITS-G5 untuk meningkatkan keselamatan di persimpangan jalan. Melalui serangkaian uji coba dan evaluasi, berikut adalah kesimpulan utama yang dapat diambil dari penelitian ini:

4.1. Peningkatan keselamatan

Prototipe yang dikembangkan memiliki potensi besar dalam meningkatkan keselamatan lalu lintas di persimpangan jalan. Kemampuannya untuk mendeteksi situasi berbahaya dan memberikan peringatan dini membantu pengemudi dan pejalan kaki menghindari risiko tabrakan.

4.2. Deteksi dan respon cepat

Teknologi visi komputer yang terintegrasi dalam prototipe memiliki kinerja yang baik dalam mendeteksi objek-objek di sekitar persimpangan. Kemampuan prototipe untuk merespons situasi berbahaya dengan cepat memberikan pengemudi lebih banyak waktu untuk mengambil tindakan pencegahan.

4.3. Potensi komunikasi antar-kendaraan

Penggunaan teknologi ITS-G5 membuka potensi komunikasi yang lebih luas antar-kendaraan. Pertukaran informasi tentang kecepatan, arah, dan perilaku kendaraan lain di sekitarnya membantu pengemudi berkolaborasi dalam situasi lalu lintas yang kompleks.

4.4. Perbaikan lanjutan diperlukan

Meskipun hasil penelitian ini menjanjikan, ada ruang untuk pengembangan lanjutan. Peningkatan akurasi deteksi, pengoptimalan algoritma visi komputer, dan perbaikan dalam komunikasi antar-kendaraan perlu menjadi fokus dalam pengembangan berikutnya.

4.5. Pentingnya kebijakan dan regulasi

Implementasi sistem semacam ini memunculkan pertanyaan tentang kebijakan dan regulasi. Perlindungan data pribadi dan keamanan komunikasi harus menjadi fokus dalam mengembangkan kerangka kerja regulasi yang sesuai.

4.6. Keterlibatan pengguna dan industri

Sukses prototipe ini akan bergantung pada keterlibatan aktif pengemudi, pejalan kaki, dan industri kendaraan. Pendidikan dan penyuluhan tentang manfaat teknologi ini menjadi penting untuk memastikan penerimaan yang baik.

Penelitian ini mencerminkan upaya positif dalam menghadapi tantangan keselamatan di persimpangan jalan. Melalui integrasi teknologi visi komputer dan komunikasi antar-kendaraan, penelitian ini berkontribusi pada perkembangan sistem lalu lintas yang lebih cerdas dan aman. Dalam era mobilitas yang terus berkembang, hasil penelitian ini mempromosikan visi masa depan di mana lalu lintas jalan menjadi lebih aman, efisien, dan terhubung.

5. CATATAN PENELITIAN

Penelitian ini didasarkan pada kerja keras, analisis, dan sintesis data serta informasi dari berbagai sumber yang relevan. Kami telah menjunjung tinggi prinsip-prinsip akademik dan etika penelitian dalam seluruh tahapan penelitian ini berkomitmen untuk menjaga keberlanjutan integritas akademik dan mengejar penelitian yang jujur dan original.

6. REFERENSI

- Alalewi, A., Dayoub, I., & Cherkaoui, S. (2021). On 5G-V2X use cases and enabling technologies: A comprehensive survey. *Ieee Access*, *9*, 107710-107737.
- Chen, L., & Englund, C. (2015). Cooperative intersection management: A survey. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, *17*(2), 570-586.
- Cimoli, B., Xing, H., Ho, V., Passchier, I., Kakes, G., Rommel, S., ... & Tafur Monroy, I. (2022). Practical challenges in hybrid communication ecosystems based on its-g5 and lte for cacc and glosa. *Frontiers in Future Transportation*, *3*, 742731.
- Gusenbauer, M., & Haddaway, N. R. (2020). Which academic search systems are suitable for systematic reviews or meta-analyses? Evaluating retrieval qualities of Google Scholar, PubMed, and 26 other resources. *Research synthesis methods*, *11*(2), 181-217.
- Haque, M. M., Chin, H. C., & Debnath, A. K. (2013). Sustainable, safe, smart—three key elements of Singapore’s evolving transport policies. *Transport policy*, *27*, 20-31.
- Jamal, A., Rahman, M. T., Al-Ahmadi, H. M., & Mansoor, U. (2020). The dilemma of road safety in the eastern province of Saudi Arabia: Consequences and prevention strategies. *International journal of environmental research and public health*, *17*(1), 157.
- Lu, N., Cheng, N., Zhang, N., Shen, X., & Mark, J. W. (2014). Connected vehicles: Solutions and challenges. *IEEE internet of things journal*, *1*(4), 289-299.
- Ma, H., Li, S., Zhang, E., Lv, Z., Hu, J., & Wei, X. (2020). Cooperative autonomous driving oriented MEC-aided 5G-V2X: Prototype system design, field tests and AI-based optimization tools. *IEEE Access*, *8*, 54288-54302.
- Maddio, S. (2016). A compact circularly polarized antenna for 5.8-GHz intelligent transportation system. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, *16*, 533-536.
- Maglogiannis, V., Naudts, D., Hadiwardoyo, S., Van Den Akker, D., Marquez-Barja, J., & Moerman, I. (2021). Experimental v2x evaluation for c-v2x and its-g5 technologies in a real-life highway environment. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, *19*(2), 1521-1538.
- Menold, J., Jablokow, K., & Simpson, T. (2017). Prototype for X (PFX): A holistic framework for structuring prototyping methods to support engineering design. *Design Studies*, *50*, 70-112.
- Retallack, A. E., & Ostendorf, B. (2019). Current understanding of the effects of congestion on traffic accidents. *International journal of environmental research and public health*, *16*(18), 3400.

Stellwagen, J., Deegener, M., & Kuhn, M. (2023). Hybrid vehicle-to-x communication network by using its-g5 and lte-v2x. *IEEE Access*, *11*, 30783-30795.