



LAPORAN PENELITIAN OPSI

**TEREKA: Teknologi Rekonstruksi Kecelakaan Lalu Lintas dengan
Extended Kalman Filter dan Rekacitra Tiga Dimensi**

SAGACIOUS A

Fisika Terapan dan Rekayasa

**SMA Negeri 1 Kayuagung
Ogan Komering Ilir, Sumatera Selatan
Tahun 2024**

PERNYATAAN PENELITI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dhali Rozan Fadhaillah

Tempat/Tanggal Lahir : Palembang, 27 Oktober 2007

NIS : 0076409761

Asal Sekolah : SMAN 1 Kayuagung

Dengan ini menyatakan sejujurnya bahwa proposal penelitian saya dengan judul *TEREKA: Teknologi Rekonstruksi Kecelakaan Lalu Lintas dengan Extended Kalman Filter dan Rekacitra Tiga Dimensi* bersifat **orisinal/bukan hasil tindak plagiarisme/belum pernah dikompetisikan dan/atau tidak sedang diikuti pada lomba penelitian sejenis/belum pernah mendapatkan penghargaan di tingkat Nasional//Internasional**.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, saya bersedia menerima konsekuensi sesuai aturan OPSI.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sesungguhnya dan dengan sebenar-benarnya.

Dibuat di Kayuagung
Pada tanggal 8 September 2024

Mengetahui,
Guru Pembimbing



Akhmad Dafril, M.Pd
NIP. 196504161990011001

Yang membuat pernyataan,



Dhali' Rozan Fadhaillah
NIS. 0076409761

ABSTRAK

Angka kecelakaan lalu lintas terus meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah kendaraan di jalan raya. Meskipun berbagai upaya telah dilakukan oleh pihak berwenang untuk mencegah kecelakaan, cakupan sistem pemantauan lalu lintas masih terbatas, terutama di luar wilayah perkotaan. Dalam pengembangan sistem manajemen lalu lintas yang lebih efektif, data yang akurat dan komprehensif sangat diperlukan untuk proses observasi dan identifikasi kecelakaan. Namun, seringkali kecelakaan lalu lintas tidak terpantau secara optimal karena berbagai keterbatasan teknis dan geografis. Informasi dari saksi mata serta data terkait kecelakaan sangat penting, baik untuk proses penegakan hukum maupun sebagai dasar pengambilan kebijakan preventif untuk mengurangi angka kecelakaan. Maka dari itu, TEREKA hadir sebagai solusi untuk mengatasi masalah ini. Sistem TEREKA dirancang untuk merekam data inersial dan posisi kendaraan, kemudian menggunakannya untuk merekonstruksi kejadian kecelakaan lalu lintas secara detail dan akurat melalui rekacitra tiga dimensi.

TEREKA menggunakan informasi GPS dan IMU *9-axis* untuk menghasilkan rekacitra tiga dimensi yang menyajikan informasi visual dan temporal terkait kecelakaan lalu lintas. Teknologi ini didukung oleh model rekonstruksi kecelakaan Steffan serta penggunaan Extended Kalman Filter (EKF) untuk meningkatkan akurasi hasil rekonstruksi. Selain itu, perangkat keras TEREKA dirancang dengan bentuk yang minimalis agar mudah dipasang pada kendaraan tanpa mengganggu fungsionalitasnya.

Melalui pengujian dengan Python, aplikasi Webots, dan aplikasi CARLA, TEREKA terbukti berhasil memberikan rekacitra yang sangat serupa dengan kejadian riilnya. Hal tersebut dibuktikan dengan komparasi antara rekaman video kecelakaan dan luaran rekacitra yang didapat. Dengan demikian, TEREKA mampu menjadi pelengkap dalam penyempurnaan sistem lalu lintas di Indonesia yang hingga saat ini belum tercakup secara merata.

Kata kunci: rekonstruksi kecelakaan, GPS, IMU, EKF.

DAFTAR ISI

PERNYATAAN PENELITI	i
ABSTRAK	ii
DAFTAR ISI	iii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 RUMUSAN MASALAH	2
1.3 TUJUAN PENELITIAN	2
1.4 MANFAAT PENELITIAN	2
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 REKONSTRUKSI KECELAKAAN LALU LINTAS MELALUI REKACITRA	3
2.2 PENGOLAHAN INFORMASI TEMPORAL-SPASIAL MELALUI INERTIAL MEASUREMENT UNIT (IMU) DAN GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS) ..	3
2.4 MODEL REKONSTRUKSI KECELAKAAN	4
2.5 KONSEP DAN DESAIN PERANGKAT KERAS	5
BAB 3. METODE PENELITIAN	7
3.1 WAKTU DAN TEMPAT PENELITIAN	7
3.2 ALAT DAN BAHAN	7
3.3 RANCANGAN DAN PROSEDUR PENELITIAN	7
3.3.1 Pembuatan Perangkat	8
3.3.2 Pengambilan Data Sampel Sensor	9
3.3.3 Pengambilan Data Sampel Uji Rekonstruksi Kecelakaan	10
3.3.4 Evaluasi dan Koreksi Model	10
3.4 PENGOLAHAN DAN ANALISIS DATA	11
3.4.1 Pengolahan dan Karakterisasi Statistik Data Sensor GPS	11
3.4.2 Pengolahan dan Karakterisasi Statistik Data Sensor IMU	12
3.4.3 Analisis dan Autokorelasi Hasil Rekacitra	12
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	13
4.1 PENGUJIAN GPS	13
4.2 PENGUJIAN IMU	13
4.2.1 Uji Spesifikasi	13
4.2.2 Uji Identifikasi Tabrakan	14
4.3 PENGUJIAN REKONSTRUKSI KECELAKAAN	15
4.3.1 Uji Orientasi	15
4.3.2 Uji Tabrakan Sederhana	15

4.3.3 Uji Jatuh Jurang	16
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	18
5.1 Kesimpulan	18
5.2 Saran.....	18
UCAPAN TERIMA KASIH	19
DAFTAR PUSTAKA	20
LAMPIRAN	21
Lampiran 1: Biodata Ketua.....	21
Lampiran 2: Biodata Pembimbing.....	22
Lampiran 3: Madgwick Filter dan <i>Complementary Filter</i>	23
Lampiran 4: Lanjutan EKF untuk Alat Transportasi Darat	24
Lampiran 5: Desain Logo Alat.....	25
Lampiran 6: Desain Skematik Elektronik Alat	26
Lampiran 7: Desain <i>Printed Circuit Board</i>	27

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Angka terjadinya kecelakaan lalu lintas kian meningkat seiring pertambahan jumlah kendaraan bermotor di jalanan. Menurut catatan Korlantas Polri, jumlah kendaraan bermotor di Indonesia mencapai 153 juta unit, mengalami peningkatan satu persen dibandingkan tahun sebelumnya (BPS, 2024; Kurniawan dan Kurniawan, 2023). Peningkatan satu persen ini berdampak pada kenaikan kasus kecelakaan sebesar 6,8 persen di seluruh wilayah Indonesia, tepatnya pada angka 116 ribu kasus di tahun 2023 (Waluyo dkk., 2024). Fakta tersebut menegaskan perlunya suatu adaptasi dan perubahan pada teknologi transportasi darat, menimbang upaya pencegahan kecelakaan lalu lintas akan semakin sulit untuk diterapkan secara efektif apabila jumlah kendaraan bermotor terus meningkat.

Seperti yang diketahui, beberapa ruas jalan kini telah dipasang kamera pemantau berupa Closed-Circuit Television (CCTV) yang mendukung pelaksanaan Electronic Traffic Law Enforcement (ETLE) di Indonesia. Meskipun demikian, pada kenyataannya, masih terdapat sejumlah pelanggaran dan kecelakaan lalu lintas yang tidak terekam akibat jumlah CCTV yang terbatas dan minimnya cakupan area yang dipantau (Dahlan dkk., 2023; Saputra, 2022). Apabila tidak terdapat saksi mata, proses administrasi pascakecelakaan, baik untuk keperluan hukum, catatan kepolisian, maupun klaim asuransi, dapat menjadi terkendala. Hingga saat ini, kecelakaan yang tidak terekam dan tidak disaksikan hanya dapat dinilai secara subjektif oleh tim kepolisian dan korban yang selamat (Nugroho dkk., 2016). Oleh karena itu, diperlukan teknologi yang mampu memantau kendaraan secara kontinu, tanpa terbatas oleh lokasi kendaraan, mudah untuk diaplikasikan di semua kendaraan, dan dapat mendukung proses penyelidikan dan pendataan kecelakaan lalu lintas oleh pihak terkait.

Masalah tersebut mendasari ide dari penelitian ini, yaitu pengembangan teknologi rekonstruksi kecelakaan lalu lintas dengan menggunakan rekacitra tiga dimensi (3D). Pendekatan ini dipilih karena rekacitra 3D mampu memberikan gambaran yang akurat dan komprehensif tentang proses terjadinya sebuah kecelakaan lalu lintas. Selanjutnya, informasi rekacitra tersebut dapat digunakan untuk memfasilitasi seluruh proses pascakecelakaan. Maka dari itu, tantangan terbesar dalam penelitian ini adalah memastikan kehandalan dan pengaplikasian produk agar keabsahan informasi kecelakaan yang direkonstruksi dapat dipertanggungjawabkan; diikuti oleh tantangan lain, seperti efektivitas, efisiensi, dan kompatibilitas pemakaian produk bagi berbagai macam kendaraan.

Sebagai landasan utama dalam penelitian ini, Steffan (2009) telah menawarkan model matematis yang dapat merekonstruksi sebuah kecelakaan lalu lintas didasari data deret waktu inersial kendaraan. Namun, model tersebut belum mengikutsertakan faktor *noise* dan *error* yang berasal dari sensor sehingga diperlukan *filtering* yang mengeliminasi faktor tersebut. Barbosa dkk. (2016) dan Erfianti dkk. (2023), secara terpisah, mengusulkan metode *filtering* serupa untuk transportasi darat dengan menggunakan Extended Kalman Filter (EKF) dari gabungan sensor Inertial Measurement Unit (IMU) dan Global Positioning System (GPS). Berlanjut ke rekacitra dari kecelakaan, Struble (2020) menyampaikan berbagai metode komputasi rekacitra 3D dari kecelakaan lalu lintas melalui beragam bahasa pemrograman. Dalam penelitian ini, persamaan, metode, dan algoritma yang telah dikemukakan oleh penelitian sebelumnya akan dikembangkan menjadi sebuah model rekonstruksi yang aplikatif. Terlepas dari sisi perangkat lunak, aspek desain dari perangkat keras juga menjadi perhatian dalam penelitian untuk memastikan alat berdimensi kompak dan dapat diterapkan ke berbagai jenis kendaraan.

Teknologi rekonstruksi kecelakaan yang menjadi luaran pada penelitian ini kami sebut dengan TEREKA. Harapannya, TEREKA dapat menjadi solusi yang efektif terhadap tantangan pemantauan lalu lintas, terutama dalam kasus kecelakaan. Melalui pemanfaatan berbagai metode rekonstruksi kecelakaan lalu lintas dan desain yang kompatibel, TEREKA diharapkan mampu berkontribusi dalam peningkatan kemampuan sistem pemantauan lalu lintas di masa depan.

1.2 RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakangnya, poin-poin rumusan masalah yang akan ditelaah pada penelitian ini dapat dituliskan sebagai berikut.

1. Bagaimana proses perancangan model rekonstruksi kecelakaan lalu lintas melalui informasi sensor IMU dan GPS berdasarkan model Steffan?
2. Bagaimana perangkat keras dan teknologi rekonstruksi kecelakaan TEREKA bekerja?
3. Bagaimana EKF dapat meningkatkan akurasi dan validitas rekonstruksi kecelakaan?
4. Seberapa baik hasil rekonstruksi kecelakaan oleh teknologi TEREKA?

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Berikut adalah penjabaran dari tujuan penelitian ini.

1. Mengembangkan model rekonstruksi kecelakaan yang lebih realistis dengan melibatkan sensor IMU dan GPS.
2. Membuat sebuah sistem utuh yang terdiri dari perangkat keras dan perangkat lunak yang mampu merekonstruksi kecelakaan menjadi sebuah rekacitra tiga dimensi.
3. Mengintegrasikan EKF untuk meningkatkan kualitas hasil rekonstruksi kecelakaan.
4. Mendemonstrasikan rekonstruksi kecelakaan dengan luaran rekacitra sebaik mungkin.

1.4 MANFAAT PENELITIAN

Hasil dari penelitian ini akan berkontribusi besar dalam upaya penegakan hukum lalu lintas di Indonesia. TEREKA, sebaga produk dari penelitian, dapat meningkatkan akurasi dan validitas investigasi kecelakaan lalu lintas sehingga pihak berwenang mendapatkan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai faktor-faktor penyebab kecelakaan. Peneliti percaya bahwa pengembangan teknologi rekonstruksi kecelakaan, TEREKA, akan memulai pengembangan besar lainnya bagi sistem lalu lintas dan teknologi transportasi darat di Indonesia.

Selain itu, penelitian ini juga memberikan hasil eksperimen dan produk luaran dari penyempurnaan metode rekonstruksi kecelakaan dengan berbagai teknik pengolahan isyarat, yang akhirnya menghasilkan produk yang dapat diimplementasikan dalam situasi riil. Hasil yang dipaparkan dalam penelitian ini dapat menjadi rujukan bagi peneliti di masa mendatang dalam pengembangan ilmu dan teknologi yang relevan.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 REKONSTRUKSI KECELAKAAN LALU LINTAS MELALUI REKACITRA

Rekonstruksi kecelakaan lalu lintas merujuk pada proses penggambaran ulang kejadian kecelakaan lalu lintas yang telah terjadi dengan berbagai media, seperti narasi, gambar, atau video animasi (Struble dan Struble, 2020). Sedangkan, istilah ‘rekacitra’ adalah padanan Bahasa Indonesia untuk kata ‘*rendering*’ yang mengacu pada proses penciptaan gambar atau citra dalam dua atau tiga dimensi melalui perangkat lunak komputer (Kajiya, 1986). Secara definisi, rekacitra merupakan salah satu bentuk perwujudan dari rekonstruksi kecelakaan.

Penelitian ini akan menggunakan dua perangkat lunak sebagai media bantu rekacitra, yaitu Webots dan CARLA. Webots adalah sebuah program simulasi sistem mekanik dengan *physics engine* yang realistis (Cyberbotics, 2023). Umumnya, Webots digunakan untuk mensimulasikan berbagai sistem mekanik, seperti robot, *drone*, dan mobil, sehingga tidak terbatas pada alat transportasi darat. Sementara itu, CARLA adalah *open-source driving simulator* yang didedikasikan untuk pengembangan mobil kendali otonom (Dosovitskiy et al., 2017). Jadi, secara fungsional, keduanya sangat berbeda.

Peneliti memutuskan untuk memilih Webots sebagai alat bantu praproses (*preprocessing tools*) yang akan menerjemahkan isyarat sensor dari perangkat keras TEREKA menjadi visualisasi citra sederhana. Pemilihan ini disebabkan oleh rendahnya beban komputasi yang digunakan Webots jika dibandingkan dengan CARLA. Webots cenderung menitikberatkan beban komputasinya pada model fisika, bukan pada kualitas hasil rekacitra. Di sisi lain, CARLA dipilih sebagai *front-end* dari TEREKA berkat realisme lalu lintas yang ditawarkan dan visualisasi yang memanjakan. Gambar 2.1 menunjukkan perbandingan rekacitra yang dihasilkan oleh kedua program komputer.



Gambar 2.1: Perangkat lunak: Webots (kiri), CARLA (kanan).

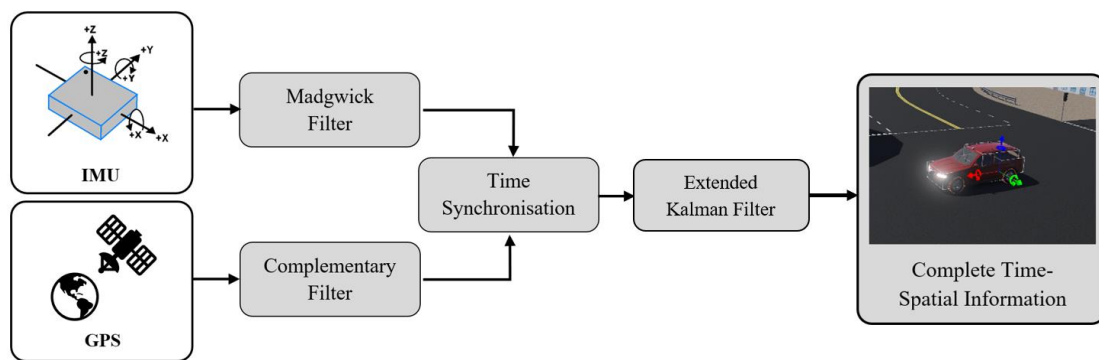
2.2 PENGOLAHAN INFORMASI TEMPORAL-SPASIAL MELALUI INERTIAL MEASUREMENT UNIT (IMU) DAN GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS)

Untuk memperoleh informasi lengkap mengenai keadaan spasial tiga dimensi suatu kendaraan, terdapat dua informasi yang perlu diketahui dari tubuh kendaraan tersebut, yaitu posisi dan orientasi (Steffan, 2009; Struble dan Struble, 2020). Posisi dan orientasi didefinisikan sebagai ‘letak relatif’ dan ‘arah hadap relatif’ secara berturut-turut terhadap suatu sistem koordinat. Dalam penelitian ini, posisi dan orientasi tersebut diukur relatif terhadap permukaan bumi (geografis). Salah satu metode untuk menyerap kedua nilai tersebut dari kendaraan adalah dengan menggabungkan dua buah sensor yang kerap digunakan, yaitu Inertial Measurement Unit (IMU) dan Global Positioning System (GPS) (Barbosa et al., 2016; Erfianti et al., 2023).

Informasi posisi dapat diakuisisi secara langsung dengan GPS melalui pertukaran informasi antara perangkat dan satelit. Informasi yang diperoleh dari GPS berupa besaran sudut bujur dan lintang relatif terhadap permukaan bumi. Akan tetapi, nilai posisi GPS tidak begitu presisi sehingga perlu dikenai proses *filtering* terlebih dahulu untuk menyempurnakan posisi mobil pada luaran rekacitra. *Filter* yang digunakan adalah *complementary filter*, seperti yang didemonstrasikan oleh Erfianti et al.

Untuk orientasi, terdapat sensor IMU yang berperan sebagai perekam sembilan buah nilai: tiga sumbu percepatan linier, tiga sumbu kecepatan angular, dan tiga sumbu kuat medan magnet bumi. Masing-masing dari tiga nilai tersebut ditangkap oleh sensor *accelerometer*, *gyroscope*, dan *magnetometer* yang tergabung ke dalam sebuah sensor IMU. Sembilan nilai tersebut akan diproses menjadi nilai orientasi, yang dalam penelitian ini akan direpresentasikan dalam unit quaternion melalui Transformasi Madgwick atau juga dikenal sebagai Madgwick Filter (Bonev, 2023; Madgwick, 2010).

Setelah sekumpulan informasi posisi dan orientasi disimpan, data waktu dari proses penangkapan informasi sensor juga turut direkam untuk menyatukan informasi posisi dan orientasi secara temporal (Steffan, 2009; Struble & Struble, 2020). Perlu diketahui bahwa waktu cuplik antara IMU dan GPS jauh berbeda—IMU memiliki waktu cuplik rata-rata 10 milisekon per sampel, sementara GPS memiliki waktu cuplik rata-rata 1 milisekon per sampel—sehingga diperlukan proses sinkronisasi waktu di antara keduanya melalui interpolasi pada data GPS. Gambar 2.2 menampilkan diagram blok dari proses pengolahan informasi temporal-spasial melalui sensor IMU dan GPS.



Gambar 2.2: Diagram blok pengolahan data temporal-spasial melalui sensor IMU dan GPS.

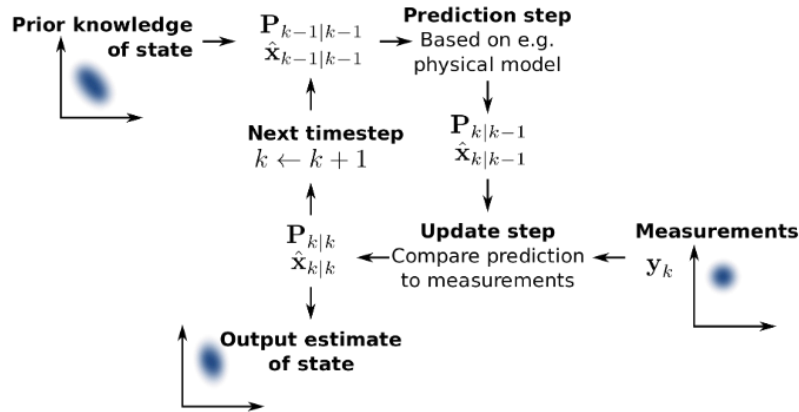
2.3 EXTENDED KALMAN FILTER (EKF) UNTUK SENSOR IMU DAN GPS

Untuk meningkatkan akurasi, informasi orientasi dari IMU dan geoposisi dari GPS memerlukan proses *filtering*, menimbang galat yang terus-menerus dihasilkan kedua sensor tersebut selama beroperasi. Maka dari itu, model Extended Kalman Filter (EKF) ikut berperan dalam penyelesaian masalah rekonstruksi ini. Alasan pemilihan EKF adalah kinematika alat transportasi darat, serta nilai sensor IMU dan GPS sangat didukung oleh model EKF (Barbosa et al., 2016; Erfianti et al., 2023). Apabila ditinjau dari Gambar 2.2, EKF adalah tahap terakhir dari pengolahan data kedua sensor sebelum akhirnya menjadi data yang siap dimasukkan ke model.

EKF adalah pengembangan lebih lanjut dari Kalman Filter (KF) yang merupakan suatu metode untuk meningkatkan akurasi pengukuran berdasarkan model referensi, informasi mengenai *noise*, dan karakteristik lain dari variabel yang ingin diukur, sebut variabel tersebut sebagai \mathbf{x} , dengan mengestimasi *joint probability distribution* (\mathbf{P}) dan nilai yang diukur ($\hat{\mathbf{x}}$) di sepanjang waktu observasi (Welch dan Bishop, 1995). Perbedaan mendasar antara EKF dan KF adalah linieritas model referensi dari variabel yang diukur; KF digunakan untuk model yang linier, sedangkan EKF digunakan untuk model yang nonlinier. Kesimpulannya, untuk membuat sebuah EKF, peneliti perlu untuk memahami karakteristik statistis dari IMU dan GPS yang digunakan melalui serangkaian percobaan. Gambar 2.3 menunjukkan bagaimana EKF bekerja.

2.4 MODEL REKONSTRUKSI KECELAKAAN

Merujuk pada Steffan (2009), model rekonstruksi kecelakaan dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu *pre-collision* (sebelum tabrakan) dan *post-collision* (setelah tabrakan). Pembagian ini diperlukan karena model dinamika *pre-collision* dan *post-collision* dinilai memiliki karakteristik yang sangat berbeda sehingga penyempurnaan model dapat dilakukan dengan mudah jika keduanya dipisahkan.

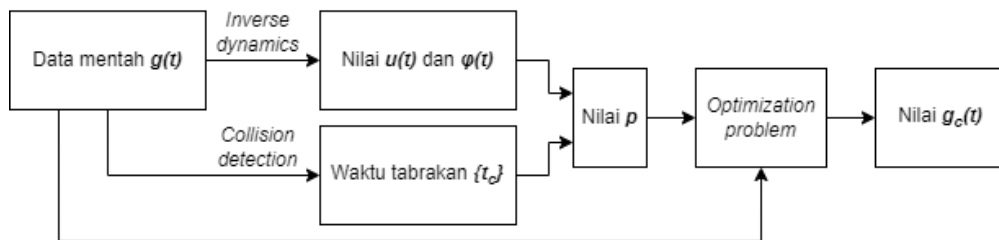


Gambar 2.3: Proses estimasi dan koreksi pada EKF (Aimonen, 2016).

Ide utama dari model *pre-collision* adalah penentuan nilai masukan *throttle* kendaraan $u(t)$ dan sudut kemudi $\phi(t)$ melalui sekumpulan data deret waktu posisi dan orientasi sebelum kendaraan mengalami kecelakaan. Informasi deret waktu posisi dan orientasi selanjutnya disebut sebagai $g(t) \in \mathbf{SE}(3)$ — $\mathbf{SE}(3)$ adalah grup *special euclidean* yang memuat posisi dan orientasi secara sekaligus.

Selanjutnya, model *post-collision* adalah penentuan nilai momentum p tepat sebelum kendaraan mengalami tabrakan melalui nilai $u(t)$ dan $\phi(t)$ dari model *pre-collision*. Nilai momentum p , bersama dengan $g(t_c)$ — t_c menotasikan waktu tabrakan—akan ditransformasi menjadi nilai $g_c(t) \in \mathbf{SE}(3)$, yaitu posisi dan orientasi selama pascatabrakan hingga waktu terminasi (waktu kendaraan berhenti). Perlu menjadi catatan bahwa tabrakan mungkin saja terjadi secara berulang sehingga pendeteksian waktu tabrakan $t_c^{(1)}, t_c^{(2)}, \dots, t_c^{(n)}$ adalah masalah tersendiri dalam penelitian ini. Gambar 2.4 menunjukkan bagaimana diagram blok dari model rekonstruksi kecelakaan.

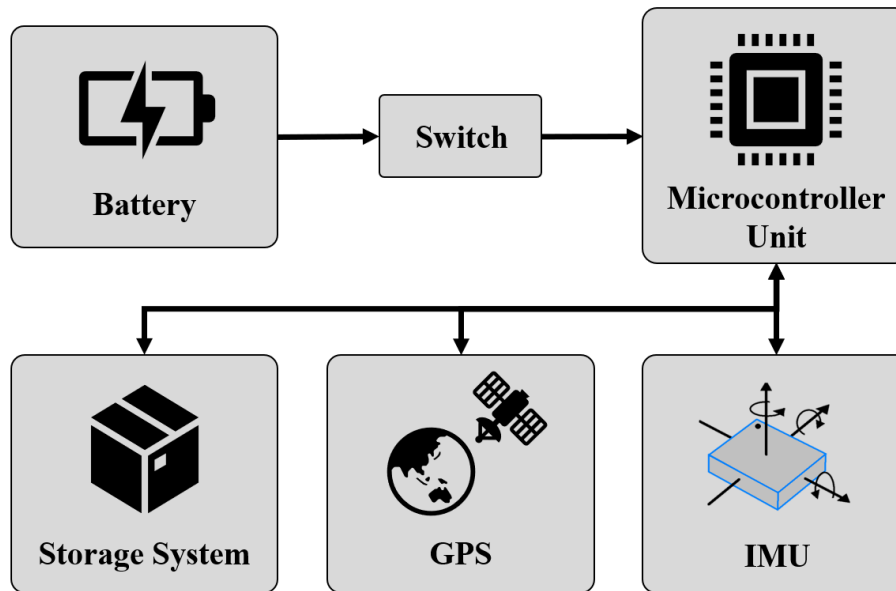
Terdapat dua artikel lain yang turut menjadi rujukan dalam penelitian ini (Brach et al., 2022; Liu et al., 2019). Liu et al. menawarkan penyempurnaan model yang telah digagas Steffan dengan memasukkan *uncertainty* (ketidakpastian) dan korelasi untuk tabrakan antarkendaraan. Di sisi lain, Brach et al. menawarkan analisis mendalam mengenai penyempurnaan model untuk menangani berbagai kasus rekonstruksi kecelakaan. Metode dan hasil dari kedua artikel tersebut akan digunakan sebagai penyempurnaan model Steffan dalam penelitian ini.



Gambar 2.4: Diagram blok model rekonstruksi kecelakaan Steffan.

2.5 KONSEP DAN DESAIN PERANGKAT KERAS

Menyimpulkan uraian sebelumnya, perangkat TEREKA memerlukan beberapa komponen penting: IMU, GPS, mikrokontroler, media penyimpanan, dan catu daya. Kelima komponen ini disatukan menjadi sebuah perangkat yang siap dipasang ke sebuah kendaraan. TEREKA bekerja secara otomatis ketika kendaraan dinyalakan hingga kendaraan dimatikan. Ketika rekonstruksi kecelakaan diperlukan, perangkat diambil dari kendaraan dan media penyimpanan yang terdapat di dalam perangkat TEREKA dimasukkan ke komputer untuk diolah menjadi rekacitra. Gambar 2.5 menunjukkan skema desain TEREKA berdasarkan komponen utamanya.



Gambar 2.5: Skema desain TEREKA berdasarkan komponen pembangunnya.

Aspek utama dalam mendesain perangkat keras agar dapat dicatu daya oleh kendaraan adalah level tegangan input dan daya yang diperlukan perangkat agar dapat menyala. Dari sisi daya, sistem mikroprosesor beserta dengan sensor-sensornya tidak akan memakan lebih dari 1 W sehingga dapat dengan mudah dicatu oleh sumber daya aki apapun. Apabila dipandang dari level tegangan, aki kendaraan saat ini memiliki dua macam level tegangan, yaitu 12 V untuk motor dan sebagian tipe mobil serta 24 V untuk kendaraan berukuran besar. Level tegangan ini perlu diturunkan menjadi 3,3 V agar dapat mencatu mikroprosesor yang digunakan, yaitu ESP32, dengan menggunakan sebuah regulator yang sekaligus merangkap fungsi sebagai *buck converter*, seperti IC LM2596 yang tersedia di pasaran (Texas Instruments, 2023).

Komponen berikutnya adalah sensor IMU. Modul IMU *9-axis* yang digunakan harus memberikan ketelitian data dan akurasi yang tinggi sehingga modul BNO055 dari Bosch dipilih (Bosch, 2021). BNO055 menawarkan fitur yang beragam dan akurasi yang sangat tinggi, yaitu 14 bit *accelerometer* dengan rentang nilai $\pm 2g$ hingga $\pm 16g$ *adjustable*, 16 bit *gyroscope* dengan rentang nilai $125^\circ/s$ hingga $2.000^\circ/s$ *adjustable*, dan 16 bit *magnetometer* dengan rentang nilai $\pm 1.200\mu T$. Tidak hanya itu, di dalam BNO055 telah tersedia *filter* yang dapat diatur *bandwidth*-nya sehingga derau yang tidak diinginkan pada lebar pita tertentu dapat ditapis secara langsung. BNO055 dilengkapi mikrokontroler 32 bit Cortex M0+ sebagai antarmuka ke mikroprosesor utama menggunakan protokol Inter-Integrated Circuit (I2C).

Lebih lanjut, modul GPS yang dipilih dalam penelitian ini adalah u-Blox Neo 6MV2 karena ketersediaannya yang beredar di pasaran (U-Blox, 2011). Radius *error* titik lokasi yang terbaca oleh modul ini mencapai radius 2,5m hingga 8m. Kecepatan pencuplikan data lokasi yang ditawarkan oleh modul ini mencapai 5Hz atau 5 data per detik. Spesifikasi ini dinilai cukup oleh peneliti karena informasi titik geoposisi selanjutnya akan disempurnakan melalui EKF.

Terakhir, media penyimpanan yang digunakan adalah microSD karena kecepatan penulisan dan pembacaan data yang dinilai cukup cepat bagi peneliti untuk diterapkan pada TEREKA (lebih dari 12,5 MB/s) (Kingston, 2020). Spesifikasi sensor selanjutnya akan kembali diujikan melalui serangkaian percobaan untuk mendapatkan karakteristik statistis dari sensor yang digunakan. Hal ini bertujuan untuk menyempurnakan model sensor berdasarkan kondisi nyata ketika diimplementasikan secara langsung bersamaan dengan sistem yang dibangun.

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 WAKTU DAN TEMPAT PENELITIAN

Penelitian berlangsung di setiap akhir pekan di sepanjang periode pelaksanaan penelitian, yang dimulai di bulan April dan berakhir di awal bulan September. Tabel 3.1 merincikan waktu, agenda, dan tempat selama penelitian berlangsung.

Tabel 3.1: Waktu (dalam bulan), agenda, dan tempat selama penelitian

No	Agenda	Bulan (Minggu ke-1, 2, 3, 4)																							
		April				Mei				Juni				Juli				Agustus				September			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Pembuatan prototipe alat																								
2	Pengembangan perangkat lunak																								
3	Pengujian pertama																								
4	Evaluasi dan koreksi prototipe dan perangkat lunak																								
5	Pengujian kedua dan finalisasi																								
6	Pembuatan laporan																								

3.2 ALAT DAN BAHAN

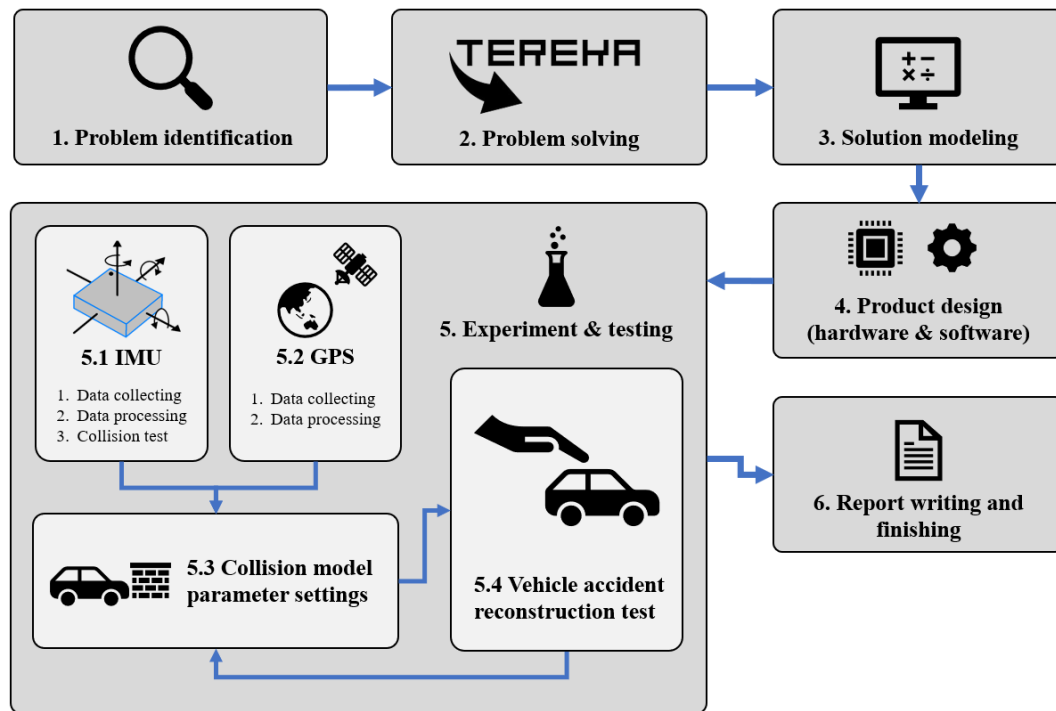
Tabel 3.2 menunjukkan alat dan bahan yang digunakan selama penelitian.

Tabel 3.2: Daftar Alat dan Bahan

Alat	
1 Komputer dengan OS Linux (Ubuntu)	7 Software Autodesk Fusion
2 Soldering station	8 Software Webots
3 3D printer	9 Software CARLA
4 Micro SD card reader	10 Python interpreter
5 FTDI USB-TTL programmer	11 ROS2 environment
6 Smartphone berbasis Android	12 PlatformIO
Bahan	
1 ESP32 WROOM 32D IC	7 Micro SD reader module
2 AMS1117 3.3v regulator SMD	8 Double-layered PCB
3 LM2596 5V regulator SMD	9 Button SMD 6mm
3 Kapasitor dan resistor SMD	10 Active buzzer 5V
4 BNO055 9-axis IMU	11 3D print PLA filament
5 GPS u-Blox 6MV2	12 Sekrup dan mur
6 KF103 terminal block	13 Pinhead male dan female

3.3 RANCANGAN DAN PROSEDUR PENELITIAN

Penelitian terdiri dari empat tahapan utama: pembuatan perangkat, pengambilan data sampel sensor, pengambilan data sampel uji rekonstruksi kecelakaan, serta evaluasi dan koreksi model. Namun, secara lebih menyeluruh, penelitian ini juga terdiri dari identifikasi masalah dan penyelesaiannya. Roadmap keseluruhan penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1. Pada bagian ini, akan dibahas empat tahapan utama yang telah disebutkan.



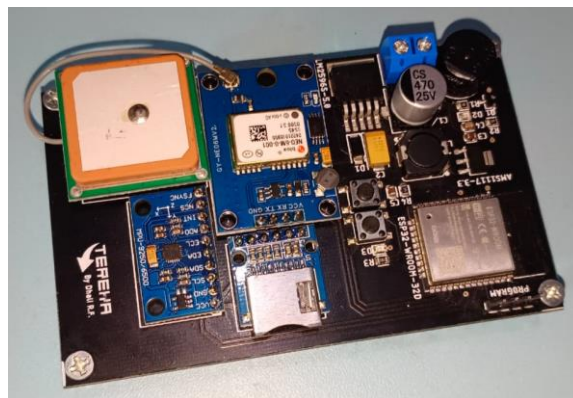
Gambar 3.1: Roadmap penelitian dan pengembangan TEREKA

3.3.1 Pembuatan Perangkat

Alat TEREKA dirancang menggunakan aplikasi Autodesk Fusion, di mana aplikasi ini memiliki fitur desain *printed circuit board* (PCB), desain skematik elektronik alat, dan desain tiga dimensi. Ketiga fitur tersebut digunakan dalam proses desain TEREKA sehingga sebelum proses pencetakan, alat memiliki prototipe dalam tiga dimensi. Setelah didapatkan desain papan PCB yang terbaik, desain dikirimkan ke pencetak PCB untuk direalisasikan ke dalam bentuk fisik.

Setelah pencetakan, proses selanjutnya adalah melakukan pemasangan komponen-komponen di papan PCB menggunakan solder. TEREKA menggunakan komponen-komponen SMD, yang berukuran sangat kompak dan tidak menembus PCB. Hal tersebut memungkinkan TEREKA untuk didesain seminimalis mungkin sehingga memudahkan pemasangan pada kendaraan. Gambar 3.2 menunjukkan perangkat TEREKA yang telah selesai dibuat.

Program atau *firmware* TEREKA di-install menggunakan *USB transistor to transistor logic* (TTL) ke IC ESP32 yang terdapat pada perangkat TEREKA. Program dikembangkan pada PlatformIO, yaitu sebuah *platform* pengembangan *firmware open-source* serbaguna yang mudah digunakan. Untuk mempercepat pengembangan, peneliti menggunakan *library* yang disediakan oleh pamanufaktur.



Gambar 3.2: Perangkat TEREKA untuk dipasangkan ke kendaraan,

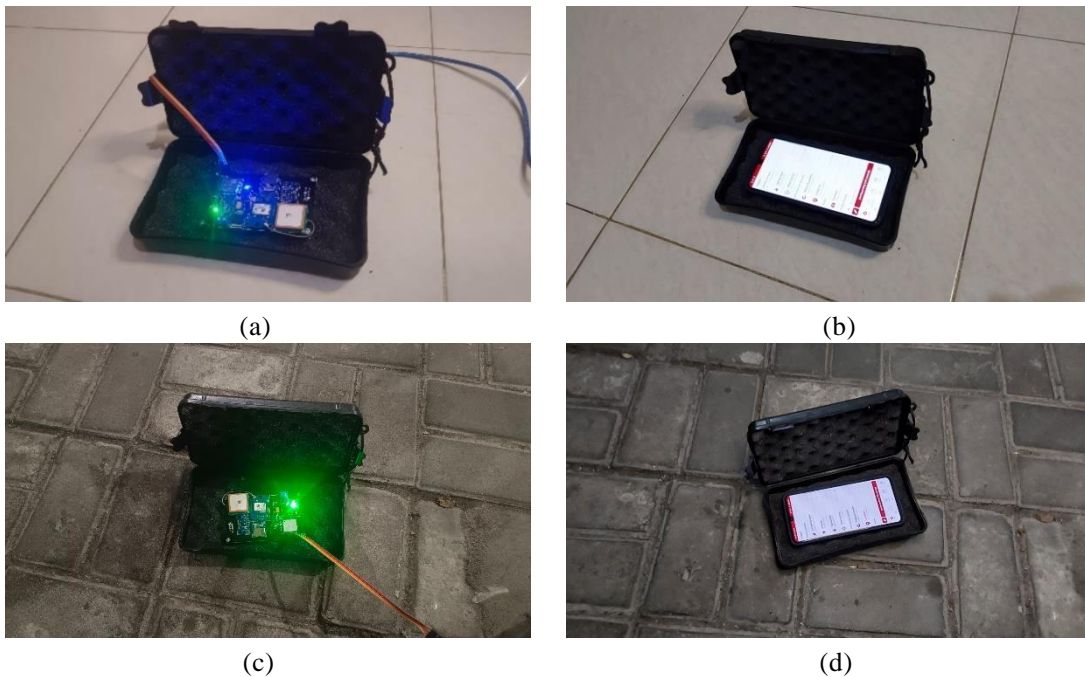
3.3.2 Pengambilan Data Sampel Sensor

a) Sensor GPS

Sebagai *baseline* atau *ground truth*, data GPS referensi diambil dari *smartphone* untuk dibandingkan dengan data yang diperoleh dari GPS u-Blox 6MV2. Percobaan dilakukan secara *line of sight* (LOS) dan *non-line of sight* (NLOS). Pengambilan sampel dijalankan selama 2 menit per percobaan dengan tujuan setidaknya 60 sampel posisi dapat diambil, mengingat identifikasi kenormalan distribusi sensor membutuhkan setidaknya 30 sampel berdasarkan teorema limit pusat (Islam, 2018). Data disimpan dalam bentuk .csv pada microSD untuk kemudian diolah. Gambar 3.3 menampilkan set pengambilan sampel.

b) Sensor IMU

Dengan cara yang serupa dengan GPS, *ground truth* data IMU diambil dari *smartphone* untuk dibandingkan dengan data yang diperoleh dari BNO055. Perangkat TEREKA dan *smartphone* ditempelkan agar informasi inersial yang diperoleh keduanya sama. Pengambilan sampel dilakukan berdasarkan beberapa variasi gerakan untuk dihitung distribusi eror kumulatif antara sensor IMU *smartphone* dan BNO055. Data disimpan dalam bentuk .csv pada microSD. Gambar 3.4 menampilkan set pengambilan sampel.



Gambar 3.3: Set pengambilan data sampel GPS; (a) NLOS (dalam ruangan) menggunakan TEREKA, (b) NLOS (dalam ruangan) menggunakan *smartphone*, (c) LOS (luar ruangan) menggunakan TEREKA, (d) LOS (luar ruangan) menggunakan *smartphone*.



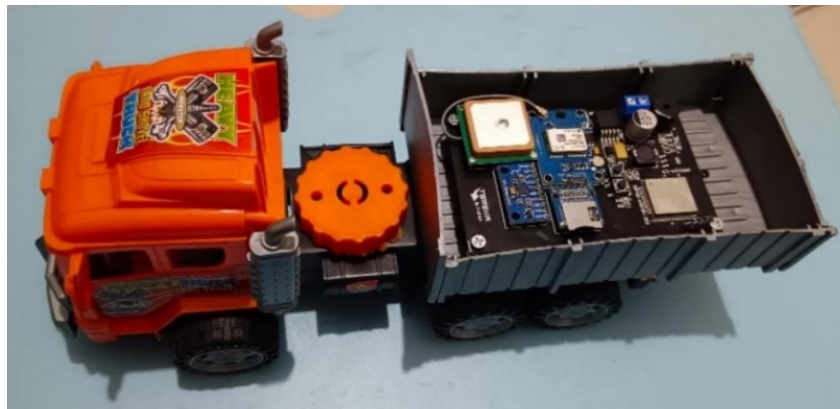
Gambar 3.4: Set pengambilan data sampel IMU; *smartphone* dan TEREKA direkatkan.

3.3.3 Pengambilan Data Sampel Uji Rekonstruksi Kecelakaan

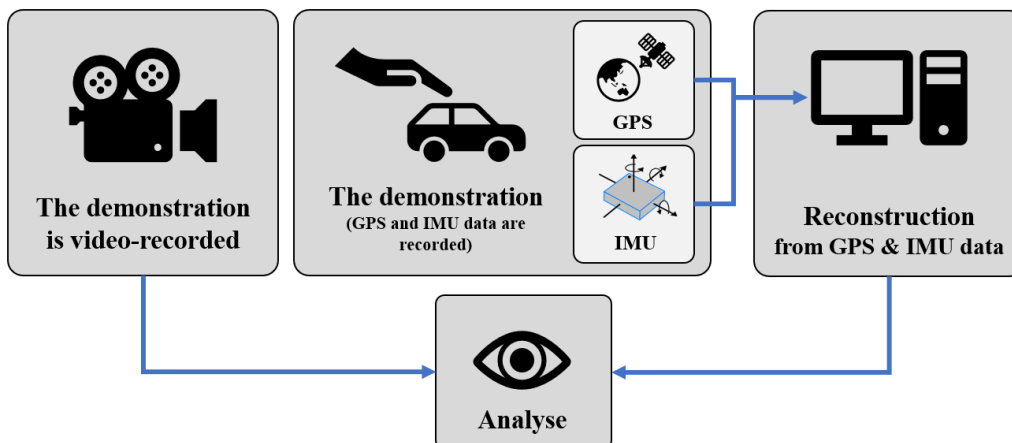
Sampel uji rekonstruksi kecelakaan dilakukan dengan pemasangan perangkat TEREKA pada replika kendaraan, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5. Pengambilan data dieksekusi dengan mendemonstrasikan kecelakaan melalui kendaraan replika secara manual. Demonstrasi direkam dengan menggunakan *smartphone*, bersamaan dengan data IMU dan GPS yang juga direkam ke perangkat TEREKA. Selanjutnya, data IMU dan GPS direkonstruksi untuk mendapatkan hasil rekacitra pada aplikasi Webots. Perhatikan Gambar 3.6 untuk melihat skema pengambilan data pada tahap ini.

Terdapat tiga buah skema yang diujikan:

- Uji Orientasi:** Uji ini bertujuan untuk melihat performa sistem dalam menentukan arah hadap kendaraan.
- Uji Tabrakan Sederhana:** Uji ini bertujuan untuk melihat bagaimana tanggapan sistem dalam mengidentifikasi tabrakan dan merekacitra kejadian yang terjadi.
- Uji Jatuh Jurang:** Uji ini bertujuan untuk melihat bagaimana sistem merekacitra ketika kendaraan terjatuh ke jurang.



Gambar 3.5: Perangkat TEREKA pada kendaraan replika.



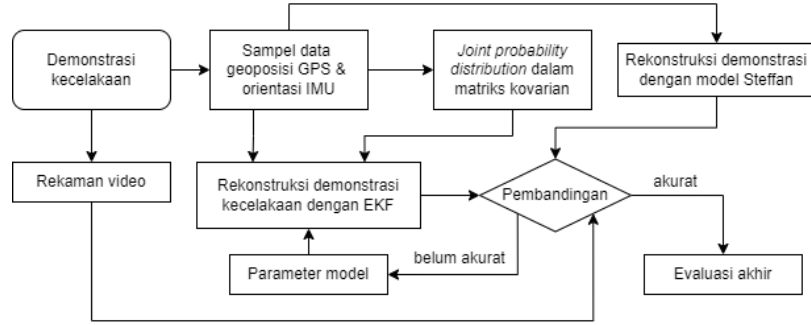
Gambar 3.6: Skema pengambilan data sampel uji rekonstruksi kecelakaan.

3.3.4 Evaluasi dan Koreksi Model

Setelah pengujian dilakukan, yaitu pengambilan data sampel sensor dan sampel uji rekonstruksi kecelakaan, parameter model disesuaikan untuk menghasilkan luaran rekacitra yang lebih akurat. Tahap ini terbagi menjadi dua bagian, secara visual dapat ditinjau dari Gambar 3.7:

- Berdasarkan uji sensor:** matriks kovarian yang menggambarkan *joint probability distribution* antara sebaran statistik IMU dan GPS disesuaikan menggunakan *maximum likelihood estimation* (MLE). Matriks tersebut digunakan sebagai parameter EKF.

- b) **Berdasarkan uji rekonstruksi kecelakaan:** Parameter diatur secara manual oleh peneliti berdasarkan analisis rekaman video dan hasil rekacitra. Parameter model rekonstruksi yang dimaksud: μ (konstanta gesek roda dan permukaan), α (konstanta aerodinamis kendaraan), \mathbf{I} (matriks nilai inersial kendaraan), \mathbf{L} (matriks Kalman gain dari EKF), dan \mathbf{K}_1 serta \mathbf{K}_2 (matriks *gain* dari dinamika kontroler *pre-collision*).



Gambar 3.7: Alur evaluasi dan koreksi model TEREKA

3.4 PENGOLAHAN DAN ANALISIS DATA

3.4.1 Pengolahan dan Karakterisasi Statistik Data Sensor GPS

Data mentah GPS berbentuk runtun nilai *latitude* (lintang), notasikan sebagai ϕ , dan nilai *longitude* (bujur), notasikan sebagai θ . Asumsikan sistem koordinat GPS sebagai $\Psi = (\phi, \theta) \in \mathbb{R}^2$. Akan dibandingkan nilai GPS referensi dari *smartphone*, yaitu Ψ_r dan n -buah nilai sampel GPS dari perangkat TEREKA: $\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_n$. Berdasarkan nilai-nilai tersebut, peneliti akan menghitung dua buah parameter statistik, yaitu nilai rerata aritmetik $\bar{\Psi}$ deviasi standar σ_{Ψ} menggunakan:

$$\bar{\Psi} = \frac{1}{n} \sum_{1 \leq i \leq n} \Psi_i \quad (1)$$

$$\sigma_{\Psi} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{1 \leq i \leq n} (\Psi_i - \bar{\Psi})^2} \quad (2)$$

Nilai rerata aritmetik $\bar{\Psi}$ merepresentasikan rerata sebaran dari luaran GPS u-Blox 6MV2, atau setara dengan akurasi apabila dibandingkan terhadap referensi Ψ_r . Dengan kata lain, magnitudo pergeseran akurasi $\bar{\Psi}$ terhadap Ψ_r adalah

$$\Delta\Psi = \|\Psi_r - \bar{\Psi}\| \quad (3)$$

Lebih lanjut, deviasi σ_{Ψ} menunjukkan distribusi lokal dari GPS u-Blox 6MV2, atau ekuivalen dengan kepresisian terhadap nilai tengah $\bar{\Psi}$. Dengan demikian, karakterisasi statistik dari data sensor GPS pada perangkat TEREKA didefinisikan oleh parameter akurasi $\Delta\Psi$ dan presisi σ_{Ψ} .

Agar lebih intuitif, besaran sudut $\Delta\Psi$ dan σ_{Ψ} dapat dikonversi menjadi satuan jarak (dalam meter) dengan menggunakan rumus Haversine (Van Brummelen, 2012):

$$d = (12,842 \times 10^3) \sin^{-1} \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \sin^2 \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2} \right)} \right) \quad (4)$$

di mana (ϕ_i, θ_i) adalah *latitude* dan *longitude* dari koordinat GPS secara berturut-turut dan d adalah jarak antarkoordinat dalam meter.

3.4.2 Pengolahan dan Karakterisasi Statistik Data Sensor IMU

Data sensor IMU antara *smartphone* dan BNO055 dibandingkan melalui distribusi eror kumulatif dengan IMU *smartphone* sebagai nilai referensi. Sebagaimana telah dijabarkan sebelumnya, IMU terdiri dari *accelerometer* sebagai $\mathbf{a}(t) \in \mathbb{R}^3$, *gyroscope* sebagai $\mathbf{g}(t) \in \mathbb{R}^3$, dan *magnetometer* sebagai $\mathbf{m}(t) \in \mathbb{R}^3$ yang berubah terhadap waktu t . Notasikan nilai IMU referensi sebagai $\mathbf{a}_r(t)$, $\mathbf{g}_r(t)$, dan $\mathbf{m}_r(t)$. Berdasarkan nilai-nilai tersebut, dikonstruksi distribusi eror kumulatif (atau dikenal sebagai *cummulative distribution function*, disingkat CDF) dengan eror:

$$\begin{aligned} e_a(t) &= \|\mathbf{a}_r(t) - \mathbf{a}(t)\| \\ e_g(t) &= \|\mathbf{g}_r(t) - \mathbf{g}(t)\| \\ e_m(t) &= \|\mathbf{m}_r(t) - \mathbf{m}(t)\| \end{aligned} \quad (5)$$

sehingga CDF-nya adalah:

$$f_{cdf}(e) = P(e_{a,g,m} \leq e) \quad (6)$$

Dengan kata lain, untuk suatu nilai eror e , nilai distribusi eror kumulatif f_{cdf} menggambarkan peluang nilai eror e atau lebih kecil sama dengan e dapat terjadi, berdasarkan sebaran eror yang didapat melalui percobaan.

3.4.3 Analisis dan Autokorelasi Hasil Rekacitra

Analisis dan autokorelasi berdasarkan hasil rekacitra terdiri dari dua tahapan: menghitung *joint probability distribution* \mathbf{P} dan menentukan parameter model $(\mu, \alpha, \mathbf{I}, \mathbf{L}, \mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2)$. Kedua tahapan ini digunakan untuk mendapatkan parameter terbaik selama proses rekonstruksi sehingga luaran rekacitra yang didapat mampu merepresentasikan kejadian kecelakaan sebaik mungkin.

Melalui hasil pengukuran sensor (IMU atau GPS) sebanyak n kali $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, didapatkan parameter $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$ dari *maximum likelihood estimation* (MLE) melalui penyelesaian persamaan:

$$f(\mathbf{x} | \boldsymbol{\theta}) \cong \mathcal{L}(\boldsymbol{\theta} | \mathbf{x}) : \frac{\partial \log \mathcal{L}(\boldsymbol{\theta} | \mathbf{x})}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \mathbf{0} \quad (7)$$

dengan f adalah *probability density function* dan \mathcal{L} adalah *likelihood function* atau model distribusi dari variabel \mathbf{x} dan parameter $\boldsymbol{\theta}$. Banyaknya parameter $\boldsymbol{\theta}$ atau m akan dicari selama penelitian berlangsung. Nilai \mathbf{P} dapat ditentukan melalui konstruksi f relatif terhadap dinamika sistem yang nilainya berubah setiap waktu.

Di sisi lain, nilai-nilai parameter model akan diset secara manual oleh peneliti melalui analisis aspek-aspek subjektif dari perbandingan hasil rekonstruksi dengan video hasil rekaman demonstrasi kecelakaan. Aspek-aspek ini dapat dilihat dari kelelahan kendaraan, kecepatan kendaraan, efek *oversteer* dan *understeer* dari kendaraan, serta tingkat kelentingan kendaraan ketika tabrakan.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 PENGUJIAN GPS

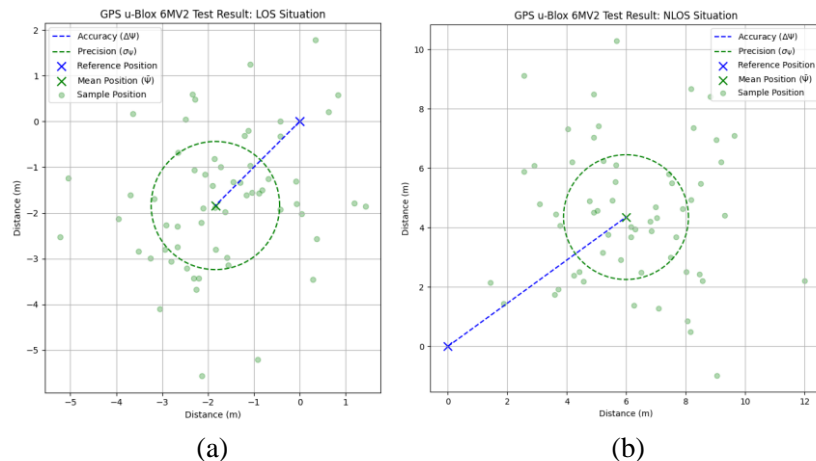
Pengujian GPS dilaksanakan di dua tempat:

- secara LOS di Lapangan Ucara SMA Negeri 1 Kayuagung dengan koordinat $3,381166^\circ$ lintang selatan dan $104,827610^\circ$ bujur timur;
- secara NLOS di Laboratorium Fisika SMA Negeri 1 Kayuagung dengan koordinat $3,380829^\circ$ lintang selatan dan $104,827698^\circ$ bujur timur.

Percobaan di kedua tempat menghasilkan parameter yang ditunjukkan oleh Tabel 4.1. Secara visual, data titik lokasi hasil pengujian dapat ditinjau pada Gambar 4.1. Perlu kembali diingat bahwa konversi besaran sudut menjadi jarak dilakukan dengan rumus Haversine (Van Brummelen, 2012).

Tabel 4.1: Tingkat akurasi dan presisi GPS u-Blox 6MV2.

Situasi	Akurasi ($\Delta\psi$) (dalam meter)	Presisi (σ_ψ) (dalam meter)
LOS (<i>line of sight</i>)	2,6	1,4
NLOS (<i>non-line of sight</i>)	7,4	2,1



Gambar 4.1: Data hasil pengujian GPS u-Blox 6MV2; (a) situasi LOS, (b) situasi NLOS.

4.2 PENGUJIAN IMU

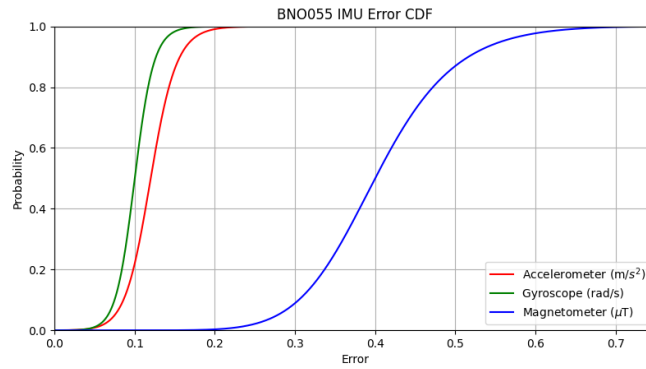
Pengujian IMU dibagi menjadi dua, yaitu uji spesifikasi dan uji identifikasi tabrakan. Masing-masing hasil pengujian dipaparkan sebagai berikut.

4.2.1 Uji Spesifikasi

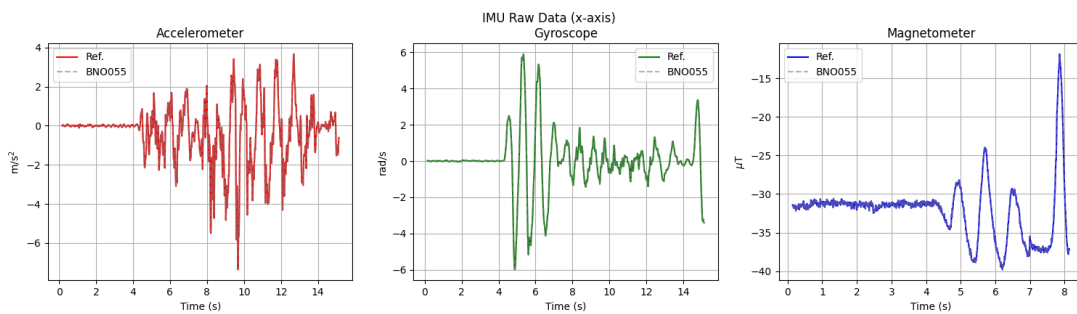
Modul 9-axis IMU BNO055 memiliki akurasi yang sangat tinggi. Hal tersebut dapat ditinjau dari CDF yang diperoleh ketika dibandingkan dengan IMU dari *smartphone*, pada Gambar 4.2. Berdasarkan hasil tersebut, diperoleh informasi error maksimum dari setiap sensor yang ditampilkan pada Tabel 4.2. Besaran error tersebut pada praktiknya dapat diabaikan sehingga sensor dapat langsung digunakan tanpa penapisan derau lebih lanjut. Gambar 4.3 menunjukkan cuplikan data pengujian.

Tabel 4.2: Error maksimum sensor IMU BNO055

No	Sensor IMU BNO055	Error Maksimum
1	<i>Accelerometer</i>	$0,20 \text{ m/s}^2$
2	<i>Gyroscope</i>	$0,18 \text{ rad/s}$
3	<i>Magnetometer</i>	$0.69 \mu\text{T}$



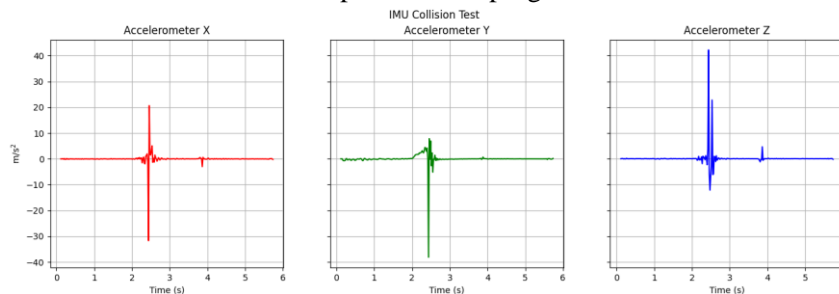
Gambar 4.2: Distribusi error kumulatif (CDF) data BNO055 berbanding IMU pada *smartphone*; *accelerometer* (merah), *gyroscope* (hijau), *magnetometer* (biru).



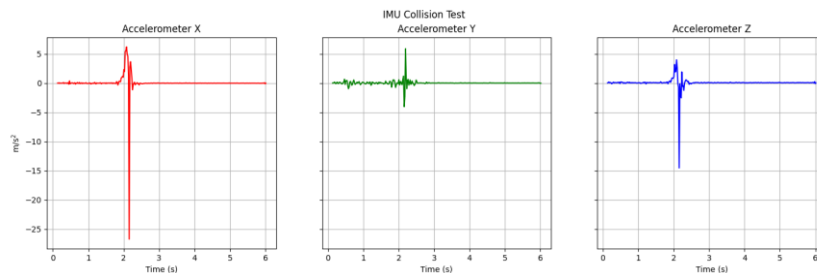
Gambar 4.3: Cuplikan data hasil pengujian IMU BNO055 berbanding *smartphone* pada sumbu-x; *accelerometer* (merah), *gyroscope* (hijau), *magnetometer* (biru).

4.2.2 Uji Identifikasi Tabrakan

Tabrakan menimbulkan lonjakan atau impuls pada ranah akselerasi (Brach et al., 2022; Erfianti et al., 2023; Liu et al., 2019; Steffan, 2009; Struble & Struble, 2020). Melalui deteksi impuls pada *accelerometer*, sistem dapat mengetahui kapan kendaraan mengalami tabrakan sekaligus menentukan arah datang tabrakan. Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 menunjukkan impuls yang terjadi pada *accelerometer* ketika ada tabrakan di sisi depan dan samping kendaraan secara berturut-turut.



Gambar 4.4: Impuls pada *accelerometer* ketika terjadi tabrakan di sisi depan kendaraan.



Gambar 4.5: Impuls pada *accelerometer* ketika terjadi tabrakan di sisi samping kendaraan.

















4.3 PENGUJIAN REKONSTRUKSI KECELAKAAN

Hasil pengujian rekonstruksi kecelakaan yang tertampil adalah hasil iterasi paling sempurna dari pengaturan parameter model, sebagaimana dijelaskan pada Bagian 3.4.3. Proses tersebut telah melalui 18 iterasi hingga diperoleh hasil terbaik.

4.3.1 Uji Orientasi

Pengujian ini adalah tahap awal dan paling utama dalam melakukan rekonstruksi. Hal tersebut disebabkan orientasi merupakan faktor penentu pertama dalam keberhasilan proses rekonstruksi. Ketika terjadi ketidakselarasan antara masukan dan luaran rekacitra, proses dinamis rekonstruksi akan mengarah ke posisi dan orientasi yang berbeda dari yang diharapkan. Apabila orientasi pada masukan dan luaran rekacitra telah serupa, pengujian lain dapat dilanjutkan. Tabel 4.3 menunjukkan hasil uji orientasi yang selaras antara masukan dan luaran rekacitra.




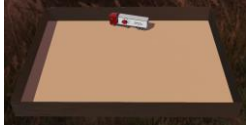




Tabel 4.3: Masukan dan luaran rekacitra uji orientasi, tanda panah menjadi patokan.

No	Masukan	Luaran Rekacitra	No	Masukan	Luaran Rekacitra
1			5		
2			6		
3			7		
4			8		











4.3.2 Uji Tabrakan Sederhana

Uji tabrakan sederhana membatasi skenario rekonstruksi kecelakaan menjadi satu tabrakan sederhana antara kendaraan dan objek mulus tak bergerak (dalam kasus ini adalah dinding). Skenario pengujian dibagi menjadi dua: kecepatan rendah dan tinggi, dengan tujuan membedakan tanggapan *post-collision*. Pada skenario kecepatan rendah, kendaraan diberi gaya masukan sedemikian sehingga momentum tabrakan tidak mengangkat kendaraan, mengakibatkan kendaraan hanya berganti arah. Sedangkan pada skenario kecepatan tinggi, momentum kendaraan cukup untuk mengangkat kendaraan dan mengakibatkan kendaraan terbalik pasca tabrakan. Pengujian dengan skenario kecepatan rendah ditunjukkan oleh Tabel 4.4, sementara pengujian skenario kecepatan tinggi ditunjukkan oleh Tabel 4.5.

Tabel 4.4: Klip rekaman dan luaran rekacitra uji tabrakan kecepatan rendah.

No	Klip Rekaman	Luaran Rekacitra	No	Klip Rekaman	Luaran Rekacitra
1			3		
2			4		





Tabel 4.5: Klip rekaman dan luaran rekacitra uji tabrakan kecepatan tinggi.




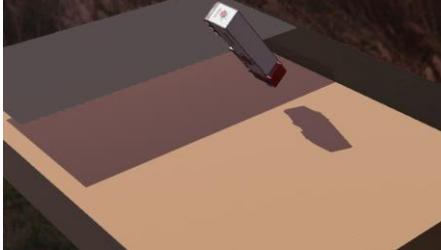



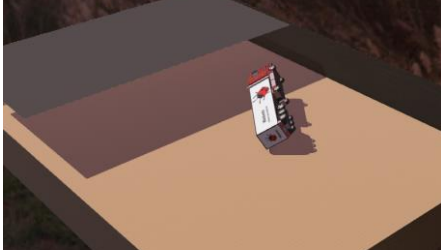


No	Klip Rekaman	Luaran Rekacitra	No	Klip Rekaman	Luaran Rekacitra
1			4		
2			5		
3					

4.3.3 Uji Jatuh Jurang

Uji jatuh jurang adalah pengujian lanjutan dengan skenario yang lebih kompleks, di mana rekonstruksi perlu menggambarkan proses jatuhnya kendaraan dari ketinggian hingga mendarat di daratan bawahnya. Tabel 4.6 menunjukkan hasil rekonstruksi uji jatuh jurang.

Tabel 4.6: Klip rekaman dan luaran rekacitra uji jatuh jurang.

No	Klip Rekaman	Luaran Rekacitra
1		
2		

3		
4		
5		
6		
7		

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Menarik kembali masalah utama penelitian ini, teknologi TEREKA terbukti mampu untuk menyelesaikan permasalahan mengenai pemantauan kecelakaan di luar teknologi ETLE yang cakupan pantauannya masih sangat terbatas. Terlepas dari kamera pemantau di jalan raya, TEREKA menggunakan informasi inersial dari kendaraan untuk disimpan dan direkonstruksi menjadi rekacitra tiga dimensi ketika diperlukan. Teknologi ini sangat berguna sebagai alat penegak hukum ketika terjadi kecelakaan dan pelanggaran lalu lintas, di mana tidak terdapat bukti atau saksi di sekitar.

Menindaklanjuti rumusan masalah:

1. Pengujian IMU dan GPS menghasilkan parameter statistik yang dapat digunakan ke dalam parameter model, seperti tingkat akurasi dan tingkat presisi. Namun, sebelum dimasukkan ke model, parameter tersebut perlu melewati proses optimasi, hingga akhirnya menghasilkan sekumpulan nilai yang lebih relevan terhadap model. Akhirnya, melalui sensor IMU dan GPS, informasi mengenai model dinamis menjadi lebih lengkap dan proses rekonstruksi dapat berjalan baik.
2. Perangkat keras TEREKA bekerja dengan menyimpan data IMU dan GPS ke media penyimpanan microSD. Ketika rekonstruksi kecelakaan diperlukan, microSD tersebut dapat diambil dan data yang terkandung di dalamnya dapat diolah untuk menjadi rekacitra tiga dimensi.
3. Setelah 18 iterasi penyempurnaan parameter model, EKF terbukti mampu meningkatkan kualitas rekonstruksi kecelakaan. Hasil pengujian membuktikan bahwa luaran rekacitra yang didapat dari model Steffan dan EKF berhasil memproduksi rekacitra yang serupa dengan kejadian kecelakaan aslinya, melalui komparasi dengan rekaman video.
4. Hasil rekonstruksi kecelakaan dari teknologi TEREKA dinilai sangat baik oleh peneliti, setidaknya dalam batasan yang digunakan dalam penelitian ini.

5.2 Saran

Berikut adalah beberapa saran yang mampu peneliti berikan untuk pengembangan TEREKA atau penelitian terkait selanjutnya.

1. **Peningkatan kualitas sensor**, saat ini sensor yang digunakan belum memenuhi standar industrial yang baik sehingga perlu adanya peningkatan kualitas sensor ke depannya.
2. **Pengembangan aplikasi rekonstruksi citra yang komersial**, aplikasi yang digunakan, Webots dan CARLA, merupakan aplikasi *open-source* yang dapat diakses siapa saja. Maka dari itu, pengembangan aplikasi baru dengan tujuan yang spesifik, yaitu rekonstruksi kecelakaan menggunakan rekacitra tiga dimensi akan sangat mendukung dalam pengembangan TEREKA ke depannya.
3. **Pengujian TEREKA ke kendaraan sesungguhnya**, seperti yang telah dibahas sebelumnya, pengujian TEREKA masih terbatas pada kendaraan replika. Maka dari itu, pengujian ke kendaraan sesungguhnya akan meningkatkan informasi mengenai TEREKA

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah. Swt karena atas karunia-Nya saya dapat mengerjakan penelitian ini dengan lancar dan sesuai dengan harapan. Ucapan terima kasih pertama dan yang terspesial saya berikan kepada kedua orang tua saya, Bapak Akhmad Kartono, S.Pi, M.Si dan Ibu Catur Retno Widiastuti, S.E., yang telah memberikan dukungan sepenuhnya bagi saya, baik secara materi maupun non materi. Ucapan terima kasih berikutnya saya berikan kepada kedua kakanda, dr. Salwa Darin Luqyana dan Dhonan Nabil Hibatullah yang ikut memberikan dukungan dan ilmunya selama saya melakukan penelitian dan membuat laporan ini. Tidak lupa dukungan yang berharga dari pihak-pihak yang telah memberikan kontribusi penting dalam pelaksanaannya. Saya ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus kepada para guru yang telah membimbing kami selama proses penelitian ini, yakni:

1. Akhmad Dafril, M.Pd
2. Eva Susanti, S.Pd
3. Sanen Sukardi S.Pd

Saya juga ingin mengucapkan terima kasih kepada seluruh teman-teman yang ada di dalam organisasi SAGACIOUS yang telah dengan sukarela memberikan bantuan berupa dukungan motivasi serta ide-ide yang sangat membantu proses berlangsungnya penelitian ini. Kontribusi mereka sangat berharga dalam meningkatkan kualitas dan kegunaan alat yang kami kembangkan.

Serta tidak lupa staf tata usaha SMA Negeri 1 Kayuagung yang telah memberi bantuan dalam proses mengurus administrasi sehingga saya dapat mengikuti lomba OPSI dengan lancar tanpa adanya kendala administrasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Aimonen, P. (2016, July 7). *Basic Concept of Kalman Filtering*. The Department of Computer Science of University of North Carolina .
- Barbosa, D., Lopes, A., & Araújo, R. E. (2016). Sensor fusion algorithm based on Extended Kalman Filter for estimation of ground vehicle dynamics. *IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 1049–1054.
- Bonev, I. (2023). *How to Use Quaternions in Industrial Robotics*. Mecademic Industrial Robotics. https://www.mecademic.com/academic_articles/quaternions-in-industrial-robotics/
- Bosch. (2021). BNO055 Datasheets. In *Bosch Sensortec*. Bosch Sensortec.
- Brach, M., Mason, J., & Brach, R. M. (2022). *Vehicle accident analysis and reconstruction methods*. Sae international.
- Cyberbotics. (2023, June 23). *Webots Open Source Simulator*. Cyberbotics. <https://cyberbotics.com>
- Dosovitskiy, A., Ros, G., Codevilla, F., Lopez, A., & Koltun, V. (2017). CARLA: An Open Urban Driving Simulator. *Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning*, 1–16.
- Erfianti, R., Asfihani, T., & Suhandri, H. F. (2023). GNSS/IMU Sensor Fusion Performance Comparison of a Car Localization in Urban Environment Using Extended Kalman Filter. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1127(1), 012006.
- Islam, M. R. (2018). Sample size and its role in Central Limit Theorem (CLT). *Computational and Applied Mathematics Journal*, 4(1), 1–7.
- Kajiya, J. T. (1986). The rendering equation. *Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 143–150. <https://doi.org/10.1145/15922.15902>
- Kingston. (2020, December). *A Guide to Speed Classes for SD and microSD Cards*. Kingston Technology. <https://www.kingston.com/en/blog/personal-storage/memory-card-speed-classes>
- Liu, Q., Liu, J., Wu, X., Han, X., Cao, L., & Guan, F. (2019). An inverse reconstruction approach considering uncertainty and correlation for vehicle-vehicle collision accidents. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 60, 681–698.
- Madgwick, S. (2010). An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. *Report X-10 and University of Bristol (UK)*, 25, 113–118.
- Steffan, H. (2009). Accident reconstruction methods. *Vehicle System Dynamics*, 47(8), 1049–1073.
- Struble, D. E., & Struble, J. D. (2020). *Automotive accident reconstruction: practices and principles*. CRC Press.
- Texas Instruments. (2023). LM2596 Step-Down Voltage Regulator. In *Texas Instruments*.
- U-Blox. (2011). *u-Blox Neo-6 Datasheet*. u-Blox.
- Van Brummelen, G. (2012). *Heavenly mathematics: The forgotten art of spherical trigonometry*. Princeton University Press.
- Welch, G., & Bishop, G. (1995). *An introduction to the Kalman filter*.

LAMPIRAN

Lampiran 1: Biodata Ketua

Kode Registrasi <i>Project</i>	: OPSISMA24-295051079
Nama Lengkap (sesuai KTP/Kartu Pelajar)	: Dhali Rozan Fadhaillah
NISN	: 0076409761
Posisi dalam Penelitian	: Ketua
Jenis Kelamin	: Laki-laki/ Perempuan
Tempat Lahir	: Palembang
Tanggal Lahir	: 27 Oktober 2007
Nomor Induk Siswa	: -
Kelas	: 11/F
Peminatan/Jurusan	: IPA
Alamat Rumah	: Jalan: Beringin 3
	Kelurahan/Desa: Sukadana
	Kecamatan: Kayuagung
	Kabupaten/Kota: Ogan Komering Ilir
	Provinsi: Sumatera Selatan
Nomor Telepon Rumah	: -
Nomor Ponsel	: 081274147682
E-mail Siswa	: dhali701@sma.belajar.id
Nama Ibu Kandung	: Catur Retno Widiastuti
Ukuran Kaos/ <i>T-Shirt</i>	: , XXL
Kompetisi Penelitian yang Pernah Diikuti 2 Tahun Terakhir.	1. Judul : National Young Inventors Award 2022 Tempat : Cibinong, Bogor, Jawa Barat Waktu : 27 Oktober – 30 Oktober 2022 Penyelenggara : Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Prestasi : Special Award
Nama Sekolah	: Nama Sekolah: SMA Negeri 1 Kayuagung
Status Sekolah	: Negeri Swasta
Alamat Sekolah	: Jalan: Jl. letnan mukhtar saleh no.7
	Kelurahan/Desa: Paku
	Kecamatan: Kayuagung
	Kabupaten/Kota: Ogan Komering Ilir
	Provinsi: Sumatera Selatan
Nomor Telepon Sekolah	: 0712321147
Email Sekolah	: smansakayuagung@yahoo.co.id

Lampiran 2: Biodata Pembimbing

Nama Lengkap dan Gelar Guru Pembimbing	:	Akhmad Dafril, MPd
Jenis Kelamin	:	Laki-laki/ Perempuan
Mata Pelajaran	:	Matematika
NIP/Nomor Register Guru	:	196504161990011001
Nomor Ponsel Guru Pembimbing	:	08127165261
E-mail Guru	:	akhmaddafril64@guru.sma.belajar.id

Lampiran 3: Madgwick Filter dan *Complementary Filter*

Madgwick Filter digunakan untuk mencari orientasi dari sebuah objek melalui informasi yang diberikan oleh sensor IMU. Representasi nilai dari Tapis Madgwick menggunakan *quaternion*, $\mathbf{q} \in \mathbb{H}$:

$$\begin{aligned}\mathbf{q} &= q_\omega + \mathbf{i}q_x + \mathbf{j}q_y + \mathbf{k}q_z \\ \mathbf{ij} &= -\mathbf{ji} = \mathbf{k}, \quad \mathbf{jk} = -\mathbf{kj} = \mathbf{i}, \quad \mathbf{ki} = -\mathbf{ik} = \mathbf{j} \\ \mathbf{i}^2 &= \mathbf{j}^2 = \mathbf{k}^2 = \mathbf{ijk} = -\mathbf{1}\end{aligned}\quad (L.1)$$

Representasi ini acapkali digunakan dalam transformasi geometri di \mathbb{R}^3 .

Selanjutnya, nilai \mathbf{q} bisa didapatkan dari menggabungkan ketiga data IMU, yaitu *accelerometer* \mathbf{a} , *gyroscope* \mathbf{g} , dan *magnetometer* \mathbf{m} , melalui sebuah *objective function* yang didefinisikan oleh:

$$\begin{aligned}\mathbf{f}(\mathbf{q}, \mathbf{d}_s, \mathbf{s}_b) &= \mathbf{q}^* \mathbf{d}_s \mathbf{q} - \mathbf{s}_b \\ \Rightarrow \mathbf{f}(\mathbf{q}, \mathbf{d}_s, \mathbf{s}_b) &= \begin{bmatrix} 2d_x \left(\frac{1}{2} - q_y^2 q_z^2 \right) + 2d_y (q_\omega q_z + q_x q_y) + 2d_z (q_x q_z - q_\omega q_y) - s_x \\ 2d_x (q_x q_y - q_\omega q_z) + 2d_y \left(\frac{1}{2} - q_x^2 q_z^2 \right) + 2d_z (q_\omega q_x - q_y q_z) - s_y \\ 2d_x (q_\omega q_y + q_x q_z) + 2d_y (q_y q_z - q_\omega q_x) + 2d_z \left(\frac{1}{2} - q_x^2 q_y^2 \right) - s_z \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (L.2)$$

$$\nabla \mathbf{f}(\mathbf{q}, \mathbf{d}_s, \mathbf{s}_b) = \mathbf{J}^T(\mathbf{q}, \mathbf{d}_s) \mathbf{f}(\mathbf{q}, \mathbf{d}_s, \mathbf{s}_b) \quad (L.3)$$

$$\mathbf{q}[n+1] = \mathbf{q}[n] + \left(\dot{\mathbf{q}}[n] - \beta \frac{\nabla \mathbf{f}}{\|\nabla \mathbf{f}\|} \right) T_s \quad (L.4)$$

$$\mathbf{q}[n] = \gamma \mathbf{q}_v + (1 - \gamma) \mathbf{q}_\omega, \quad \gamma \approx \frac{\beta T_s}{\mu_t} \quad (L.5)$$

di mana $\mathbf{q}[n]$ adalah estimasi orientasi ke- n , \mathbf{d}_s adalah referensi inisial dalam *quaternion* di *spatial frame* (perhatikan kembali $\{s\}$ pada Bagian 2.1.1), \mathbf{q}^* adalah konjugat *quaternion* dari \mathbf{q} , \mathbf{s}_b adalah hasil fusi sensor dalam *quaternion*, \mathbf{J} adalah operator Jacobian, γ adalah konstanta kepercayaan *complementary*, T_s adalah waktu cuplik, μ_t adalah konstanta *convergence rate*, dan β adalah konstanta pengali untuk γ . Fungsi \mathbf{f} kemudian didefinisikan menjadi dua, yaitu \mathbf{f}_{ag} dan \mathbf{f}_m , di mana \mathbf{f}_{ag} adalah fungsi konstrain orientasi atas *accelerometer* dan *gyroscope* dan \mathbf{f}_m adalah fungsi konstrain orientasi atas *magnetometer* dan GPS. Kedua fungsi tersebut dijadikan dalam satu pemetaan $\mathbf{f}_{agm}: \mathbb{R}^{12} \rightarrow \mathbb{R}^6$,

$$\begin{aligned}\mathbf{f}_{agm}(\mathbf{q}, \mathbf{a}_b, \mathbf{b}_s, \mathbf{m}_b) &= \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{ag}(\mathbf{q}, \mathbf{a}_b, \mathbf{0}) \\ \mathbf{f}_m(\mathbf{q}, \mathbf{b}_s, \mathbf{m}_b) \end{bmatrix} \\ \mathbf{J}_{agm}(\mathbf{q}, \mathbf{b}_s) &= \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{ag}^T(\mathbf{q}) \\ \mathbf{J}_m(\mathbf{q}, \mathbf{b}_s) \end{bmatrix} \\ \mathbf{q}[n+1] &= \mathbf{q}[n] + \left(\dot{\mathbf{q}}[n] - \beta \frac{\mathbf{J}_{agm}^T[n] \mathbf{f}_{agm}[n]}{\|\mathbf{J}_{agm}^T[n] \mathbf{f}_{agm}[n]\|} \right) T_s\end{aligned}\quad (L.6)$$

Di sisi lain, *complementary filter* adalah teknik *filter* sederhana dengan mendefinisikan sebuah konstanta $\alpha \in [0,1] \subset \mathbb{R}$ sehingga posisi \mathbf{p} selanjutnya adalah:

$$\mathbf{p}[n+1] = \alpha \mathbf{p}[n] + (1 - \alpha) \mathbf{p}[n-1] \quad (L.7)$$

Complementary filter ini digunakan untuk mem-*filter* posisi mentah yang dihasilkan oleh GPS.

Lampiran 4: Lanjutan EKF untuk Alat Transportasi Darat

Seperti yang telah dipaparkan sebelumnya, EKF adalah teknik penapisan yang didasarkan pada model referensi dan karakteristik sensor yang digunakan. Dinotasikan $\mathbf{g} \in \mathbf{SE}(3)$ sebagai posisi dan orientasi asli dari kendaraan secara berturut-turut. Maka, model dinamis EKF dapat dinotasikan sebagai:

$$\dot{\mathbf{g}} = \mathbf{f}(\mathbf{g}, \mathbf{u}) + \mathbf{w} \quad (L.8)$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{g}) + \mathbf{v} \quad (L.9)$$

dengan $\dot{\mathbf{g}}$ adalah perubahan \mathbf{g} terhadap waktu, \mathbf{u} adalah masukan (gas, rem, dan sudut kemudi), \mathbf{w} adalah model gangguan sistem, dan \mathbf{v} adalah model derau sensor.

Target dari EKF adalah untuk merancang suatu estimasi terbaik dari \mathbf{g} atau dinotasikan $\hat{\mathbf{g}}$ dengan mendesain dinamika $\hat{\mathbf{g}}$:

$$\dot{\hat{\mathbf{g}}} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{g}}, \mathbf{u}) + \xi(\mathbf{P}, \mathbf{L}, \hat{\mathbf{g}}, \mathbf{z}) \quad (L.10)$$

melibatkan *joint probability distribution* \mathbf{P} , kalman gain \mathbf{L} , estimasi $\hat{\mathbf{g}}$, dan hasil bacaan sensor \mathbf{z} . Nilai \mathbf{P} dan \mathbf{L} dapat berubah setiap waktu mengikuti:

$$\mathbf{L}_{k+1} = \mathbf{f}^T \mathbf{P}_k (\mathbf{f}_k \mathbf{P}_k \mathbf{f}_k^T + \mathbf{E}(\mathbf{v} | \mathbf{w}))^{-1} \quad (L.11)$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = (\mathbf{I} - \mathbf{L}_{k+1} \mathbf{f}_k) \mathbf{P}_k \quad (L.12)$$

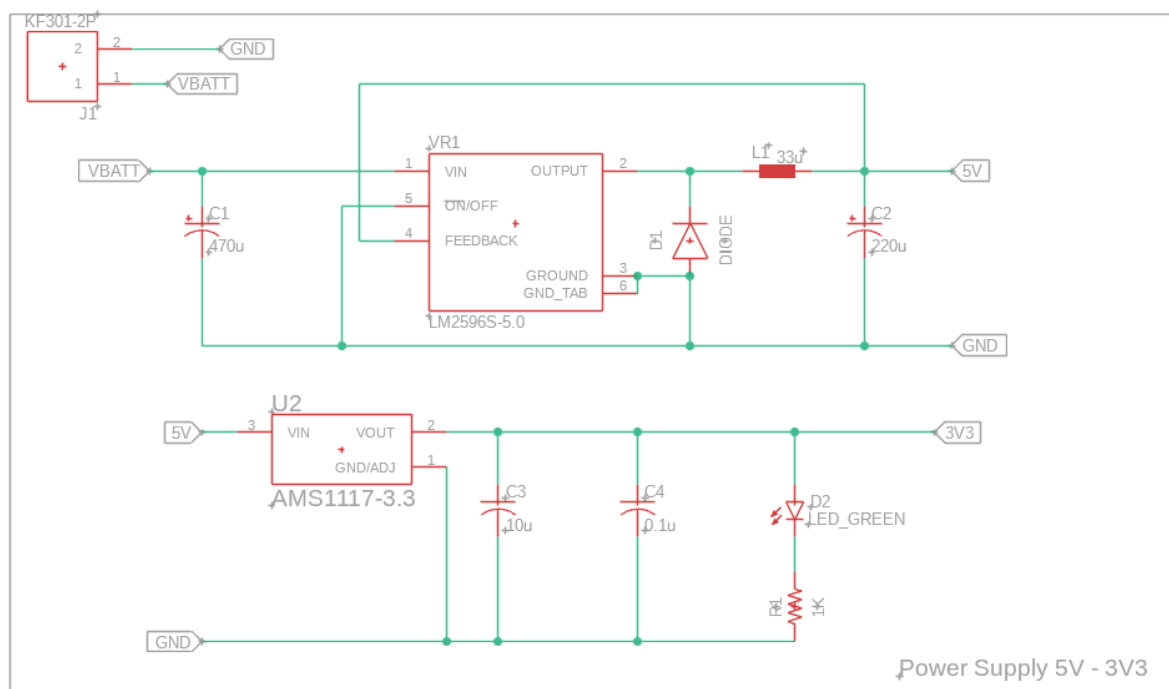
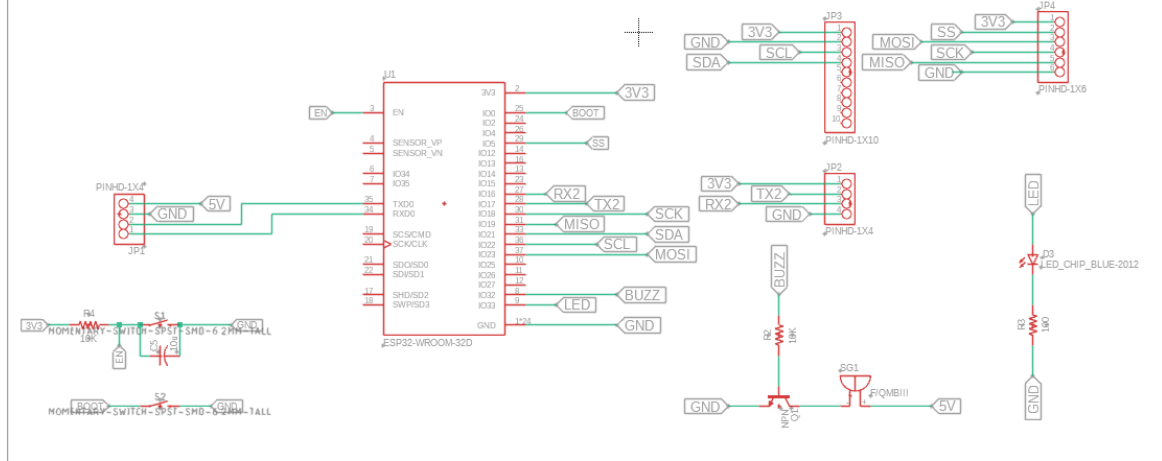
dengan \mathbf{E} adalah nilai ekspektasi dari derau \mathbf{v} dan \mathbf{w} .

Lampiran 5: Desain Logo Alat



Lampiran 6: Desain Skematik Elektronik Alat

ESP32 and Peripherals



Lampiran 7: Desain *Printed Circuit Board*

