



TESIS - EE185401

**TRAJECTORY TRACKING PADA MOBIL
AUTONOMOUS MENGGUNAKAN *PREDICTION*
KONTROL DENGAN REFERENSI WAKTU**

RENARDI ADRYANTORO PRIAMBUDI
6022211030

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. Ari Santoso, DEA.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM PENGATURAN
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2023



TESIS - EE185401

**TRAJECTORY TRACKING PADA MOBIL
AUTONOMOUS MENGGUNAKAN *PREDICTION*
KONTROL DENGAN REFERENSI WAKTU**

RENARDI ADRYANTORO PRIAMBUDI
6022211030

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. Ari Santoso, DEA.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM PENGATURAN
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2023

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

RENARDI ADRYANTORO PRIAMBUDI

NRP: 6022211030

Tanggal Ujian: 12 Juli 2023

Periode Wisuda: September 2023

Disetujui oleh:

Pembimbing:

1. Dr. Ir. Ari Santoso, DEA
NIP: 196602181991021001



Penguji:

1. Prof. Ir. Abdullah Alkaff, M.Sc, Ph.D
NIP: 195501231980031002



2. Prof. Dr. Ir. Achmad Jazidie, M.Eng
NIP: 195902191986101001



3. Dr. Trihastuti Agustinah, ST., MT
NIP: 196898121994032001



4. Yurid Eka Nugraha, ST., M.Eng, Ph.D
NPP: 2023199511059



Kepala Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas

Dedet Candra Riawan, ST, M.Eng., Ph.D.
NIP: 197311192000031001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul “**TRAJECTORY TRACKING PADA MOBIL AUTONOMOUS MENGGUNAKAN PREDICTION CONTROL DENGAN REFERENSI WAKTU**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 12 Juli 2023



Renardi Adryantoro Priambudi

Halaman ini sengaja dikosongkan

TRAJECTORY TRACKING PADA MOBIL *AUTONOMOUS* MENGUNAKAN *PREDICTION CONTROL* DENGAN REFERENSI WAKTU

Nama mahasiswa : Renardi Adryantoro Priambudi
NRP : 6022211030
Pembimbing : Dr. Ir. Ari Santoso, DEA.

ABSTRAK

Pengaturan pada kendaraan *self-driving* khusus nya pada topic *trajectory tracking* sangat banyak dikembangkan oleh civitas akademisi. Pada kasus ini penulis coba menyelesaikan permasalahan *trajectory tracking* menggunakan pendekatan non-linear yang memiliki batasan waktu tempuh. Pada penelitian ini akan dibentuk *time mission control* diaman didalamnya terdapat kontrol lateral dan kontrol longitudinal. Kontrol longitudinal dibentuk menggunakan *Bezier curve* yang akan membentuk *local path* baru pada saat ingin mendahului mobil lain. Kontrol lateral dibentuk dari gabungan *velocity profile* dan *adaptive cruise control* yang akan mengatur kecepatan mobil. Mobil *autonomous* juga harus memenuhi *time mission*, dimana mobil akan bergerak dengan kecepatan dinamis dengan menyesuaikan waktu yang telah ditentukan serta kondisi lalu lintas yang ada. Kontrol trejektori menggunakan PID, Mobil akan diamati hanya terhadap jalan yang dilaluinya. Hasil yang diamati adalah visual *path* yang dibentuk dari mobil *autonomous* pada saat bergerak dengan referensi *global path* dan error waktu tempuhnya.

Kata kunci: *Autonomous, PID, Nonlinear, path planning, Trajectory tracking, Velocity Profile*

Halaman ini sengaja dikosongkan

TRAJECTORY TRACKING ON AUTONOMOUS VEHICLES USING PREDICTION CONTROL WITH TIME REFERENCE

By : Renardi Adryantoro Priambudi
Student Identity Number : 6022211030
Supervisor : Dr. Ir. Ari Santoso, DEA.

ABSTRAK

The development of self-driving vehicles, particularly in the field of trajectory tracking, has been extensively explored by academia. In this case, the author attempts to address the trajectory tracking issue using a nonlinear approach with a time constraint. This research focuses on implementing a time mission control system that incorporates both lateral and longitudinal control. The longitudinal control is established using a Bezier curve, which creates a new local path when overtaking other vehicles. The lateral control is a combination of a velocity profile and adaptive cruise control, which regulates the vehicle's speed. The autonomous vehicle must also adhere to the time mission, meaning it moves at a dynamic speed, adjusting to the predetermined time and traffic conditions. Trajectory control is achieved using a PID controller, with the vehicle's observations limited to the road it is traveling on. The observed results include the visual path formed by the autonomous vehicle in relation to the global path reference and the corresponding travel time error.

Key words: *Autonomous, PID, Nonlinear, path planning, Trajectory tracking, Velocity Profile*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Dengan sukacita, saya mempersembahkan tesis berjudul "**Trajectory Tracking pada Mobil Autonomous Menggunakan Prediction Control dengan Referensi Waktu.**" Karya ini merupakan hasil dari perjalanan riset dan pendidikan saya di Teknik Sistem Pengaturan.

Tesis ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan S2 Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. atas selesainya penyusunan tesis ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya
2. Keluarga Penulis terutama bapak Sulistyono Iswanto, ibu Indah Ariyati, Adek Fernandi Dwi A, dan Adek Aira Trivianda N yang selalu memberikan dukungan secara materil maupun non-materil.
3. Bapak Dr. Ir. Ari Santoso, DEA selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dan petunjuk dalam menyelesaikan laporan tesis.
4. Teman-teman LAB AJ104 yang saling berjuang dan memberi semangat satu sama lain dalam pengerjaan tesis.
5. Seluruh teman-teman saya yang berasal dari berbagai golongan yang telah memberikan banyak pengalaman selama mengenyam bangku perkuliahan ini.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tesis ini, namun besar harapan penulis akan saran dari pembaca agar nantinya laporan tesis ini dapat menjadi referensi yang berguna bagi penelitian selanjutnya

Surabaya, 12 Juli 2023

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS	v
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRAK	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Kontribusi	3
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	5
2.1 Kajian Penelitian Terkait	5
2.1.1 <i>Bezier Curved-based Trajectory Planning for Autonomous Vehicles with Collision Avoidance</i>	5
2.1.2 <i>Model Predictive Control for Autonomous Vehicle with Speed Profile Shaping</i>	11
2.1.3 <i>Real-Time Trajectory and Velocity Planning for Autonomous Vehicles</i>	19
2.2 Teori Dasar	24
2.2.1 Model Kendaraan Roda 4	24
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Rancangan Diagram Blok Sistem	25
3.2 Pemodelan Kinematika Mobil	26
3.3 Pemodelan Dinamika Mobil	27
3.4 Diagram Blok <i>Time Mission Control</i>	29
3.5 Pemodelan <i>Travel Distance Calculation</i>	29
3.6 Pemodelan <i>Longitudinal Kontrol</i> menggunakan <i>Velocity Profile</i>	30
3.7 Pemodelan Adaptive Cruise Control	32
3.8 Pemodelan Lateral Kontrol	33
3.9 Pemodelan Jarak Aman Adaptive	35
3.10 Pemodelan hubungan curvature dengan kecepatan	36
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Perangkat dan Lingkungan Uji Coba	37
4.2 Pengujian Velocity Profile	37
4.3 Pengujian pembentukan global path	40
4.4 Pengujian pembentukan Curvature	41

4.5 Pengujian hubungan curvature dengan kecepatan	42
4.6 Pengujian kecepatan kontrol PID kecepatan.....	43
4.7 Pengujian <i>Time mission control</i> dengan tanpa gangguan	45
4.8 Pengujian <i>Time mission control</i> dengan gangguan.....	49
BAB 5 KESIMPULAN	53
DAFTAR PUSTAKA.....	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Model kinematika mobil	5
Gambar 2.2 Mobil berjalan pada dua jalur lurus searah	6
Gambar 2.3 Gaya <i>repulsive</i> dari jalan berbentuk tiga dimensi	7
Gambar 2.4 Hubungan antara koordinat kartesian dan frenet koordinat	8
Gambar 2.5 Representasi tiga dimensi dari jalan memiliki dua jalur	8
Gambar 2.6 Representasi tiga dimensi dari jalan memiliki dua jalur dengan <i>obstacle</i>	9
Gambar 2.7 Simulasi <i>path following</i> bentuk “S”	10
Gambar 2.8(a) Simulasi <i>path following</i> dengan dua obstacle static, (b) Respon kecepatan, (c) Respon akselerasi.....	10
Gambar 2.9 (a) Simulasi <i>path following</i> dengan <i>moving obstacle</i> , (b) Respon kecepatan, (c) Respon akselerasi.....	11
Gambar 2.10 Ilustrasi mobil yang memiliki kontrol <i>longitudinal</i>	12
Gambar 2.11 (a) akselerasi mobil akibat perubahan v terhadap Δt_d (b) deselerasi mobil pada rentang t_s hingga t_e	13
Gambar 2.12 Ilustrasi saat mobil melakukan deselerasi	13
Gambar 2.13 (a) <i>target velocity</i> (b) <i>upper limit of distance</i>	14
Gambar 2.14 Perubahan akselerasi	16
Gambar 2.15 Kondisi mobil kontrol saat terdapat mobil lain yang memotong jalur.	17
Gambar 2.16 (a) running distance d (b) acceleration a (c) jerk u	18
Gambar 2.17 Pembagian segmen pada path	19
Gambar 2.18 Grafik v/t	20
Gambar 2.19 Grafik hubungan v/s	20
Gambar 2.20 Profil kecepatan trapezoid dengan pembatasan kecepatan	21
Gambar 2.21 Grafik kecepatan mobil setelah diperhalus	22
Gambar 2.22 Grafik hubungan jarak dengan kecepatan	22
Gambar 2.23 Profil kecepatan trapezoidal yang telah dihaluskan dengan cubic spline.	23
Gambar 2.24 Struktur sistem dinamik mobil	24
Gambar 3.1 Rancangan diagram blok sistem.....	25
Gambar 3.2 Model dinamika mobil	27
Gambar 3.3 Diagram blok <i>time mission control</i>	29
Gambar 3.4 Ilustrasi kontrol poin <i>Bezier Curve</i>	33
Gambar 3.5 Tangen Cubic Bezier Curve	34
Gambar 4.1 Profil kecepatan dengan waktu 100 detik dan jarak 1 km.....	38
Gambar 4.2 Profil kecepatan dengan waktu tempuh 500 detik dengan jarak 1 Km	39
Gambar 4.3 Profil kecepatan dengan waktu tempuh 100 detik dengan jarak 5 Km	39
Gambar 4.4 Global path dengan jarak 1 Km.....	40

Gambar 4.5 Global path dengan jarak 5 Km	40
Gambar 4.6 Representasi Curvature	41
Gambar 4.7 Hubungan curvature dengan kecepatan	42
Gambar 4.8 Percobaan kecepatan dengan menggunakan $k_p = 100$, $k_d = 80$, $k_i = 0.1$	43
Gambar 4.9 Percobaan kecepatan dengan menggunakan $k_p = 20$, $k_i = 20$	43
Gambar 4.10 Percobaan kecepatan dengan menggunakan $k_p = 20$, $k_i = 10$	44
Gambar 4.11 Percobaan kecepatan dengan menggunakan $k_p = 1000$, $k_i = 0$	44
Gambar 4.12 Percobaan pada performa mobil mengikuti trajectory pada saat menggunakan $T_r = 100$ detik.	45
Gambar 4.13 Kecepatan mobil dengan pada saat menggunakan $T_r = 100$ detik..	45
Gambar 4.14 Percobaan pada performa mobil mengikuti trajectory pada saat menggunakan $T_r = 60$ detik	46
Gambar 4.15 Kecepatan mobil dengan menggunakan $T_r = 60$ detik	46
Gambar 4.16 Kecepatan kompensasi dan akibat dari curvature.....	47
Gambar 4.17 Percobaan pada performa mobil mengikuti trajectory pada saat menggunakan referensi waktu $T_r = 55$ detik	48
Gambar 4.18 Kecepatan mobil dengan menggunakan $T_r = 55$ detik	48
Gambar 4.19 Kecepatan kompensasi dan akibat dari curvature.....	49
Gambar 4.20 Performa mobil dengan menggunakan dengan gangguan $T_r = 80$ detik	49
Gambar 4.21 Kecepatan mobil pada saat diberi gangguan dengan $T_r = 80$ detik	50
Gambar 4.22 Kecepatan mobil pada saat diberi gangguan dengan $T_r = 60$ detik	50
Gambar 4.23 Kecepatan mobil pada saat diberi gangguan dengan $T_r = 60$ detik	51
Gambar 4.24 Kecepatan kompensasi dan akibat dari curvature.....	51

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Spesifikasi perangkat pengujian.....	37
---	----

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada saat ini, Mobil dengan sistem navigasi otomatis atau biasa disebut mobil *autonomous* saat ini banyak menarik perhatian civitas akademisi sampai profesional. Tujuan utama mobil *autonomous* adalah dapat melakukan perjalanan dari satu tujuan ke tujuan yang lain tanpa adanya intervensi manusia/pengemudi. Kualitas dari mobil *autonomous* didefinisikan ketika mobil tersebut dapat bergerak dengan halus tanpa menabrak objek lain yang berada pada lingkungan tersebut. Algoritma yang digunakan untuk memenuhi ekspektasi tersebut adalah *path planning* oleh karena itu algoritma ini adalah *core* dari sebuah mobil listrik. *Path planning* sendiri tidak hanya digunakan untuk menemukan jalur yang bebas dari tabrakan tapi juga harus memenuhi batas-batas lingkungan dan dinamika dari mobil tersebut.

Optimal Path planning adalah salah satu dari banyak pendekatan untuk diimplementasikan pada mobil *autonomous*. *Optimal path planning* pada dasarnya berusaha untuk meminimalkan *cost function* dengan tidak menghilangkan batas-batasan yang sudah diketahui sebelumnya, *Cost function* akan bergantung pada tantangan yang dihadapi atau mungkin waktu tempuh atau simpangan dari *reference path* atau dari variabel dinamik yang lain. Beberapa metode optimisasi dari masalah *path planning* sudah diaplikasikan (Yahja et al, 2000) dan beberapa juga sudah diimplementasikan pada mobil *autonomous* (Purwin et al 2006).

Penelitian yang lain tentang *global planning* yang dapat menghasilkan *continuous curvature* menggunakan metode *straight segments*, $CC_{in}-C-CC_{out}$, dan *elementary path* untuk mengenerate solusi yang mudah dan dekat dengan intuisi manusia meskipun pada situasi yang kurang baik. (Domokos kiss).

Permasalahan optimal ini juga berhubungan dengan variabel waktu t . Dimana dalam permasalahan mencari tempat parkir dengan waktu singkat, maka tempat parkir tersebut dapat dimodelkan dengan menggunakan *time varying graph* lalu digunakan metode *shortest path*. Algoritma telah disimulasikan menghasilkan pengurangan rata-rata 40% untuk setiap case terbaik. (Guangqun wang dan Tsuneo)

Sebagian besar masalah sistem navigasi mobil *autonomous* ada pada *Local path* karena lalu lintas dinamis dan kecepatan tinggi yang membuat para peneliti masih terus mencari solusi terbaik. Beberapa peneliti menggunakan metode *Model Predictive Control* (MPC) (Yoon et al 2006). Metode tersebut langsung menggunakan data dari sensor lalu digunakanlah untuk mengubah derajat putar/belok dari mobil *autonomous* tersebut, pendekatan tersebut dinilai efisien.

Pada thesis kali akan membahas tentang pengintegrasian *global path* dan *local path* dengan melihat batasan waktu tempuh, dinamika mobil, dan kondisi dinamis pada lingkungan, jarak tempuh, serta kecepatan. Lalu akan didapat trajectory yang aman serta waktu tempuh yang sesuai.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasar latar belakang yang telah ditulis sebelumnya, perumusan masalah pada thesis ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana menggunakan *prediction control* pada mobil *autonomous*.
2. Bagaimana respon kecepatan dan error waktu tempuh
3. Bagaimana respon mobil pada saat diberikan variasi situasi lalu lintas.

1.3 Tujuan

Pada perumusan thesis terdapat tujuan yang ingin dicapai yaitu:

1. Meminimalkan perbedaan waktu tempuh pada sistem dengan waktu tempuh yang diinginkan.
2. Memilih jalur teraman pada saat mendahului mobil lain.

1.4 Batasan Masalah

Pada usulan thesis ini terdapat beberapa batasan antara lain:

1. Energi listrik yang tersimpan pada battery selalu dianggap mampu memenuhi kebutuhan energi mobil sampai ke tujuan.
2. Uji coba pada lingkungan lalu lintas perkotaan
3. Penelitian dilakukan menggunakan simulasi
4. Batasan sudut steering adalah 30 derajat

1.5 Kontribusi

Kontribusi yang diharapkan dari hasil penelitian ini adalah dengan menyelesaikan sistem *prediction control*. Kontribusi pertama, diharapkan mobil *autonomous* dapat berjalan sampai tujuan dengan aman dengan mengikuti *path* yang telah ditentukan. Kontribusi kedua, menjamin *trajectory* yang telah dibentuk aman dengan kecepatan yang sesuai dengan kondisi lalu lintas. Kontribusi ketiga, diterapkannya *time mission* yang diharapkan dapat membuat mobil dapat sampai ketujuan tepat waktu.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

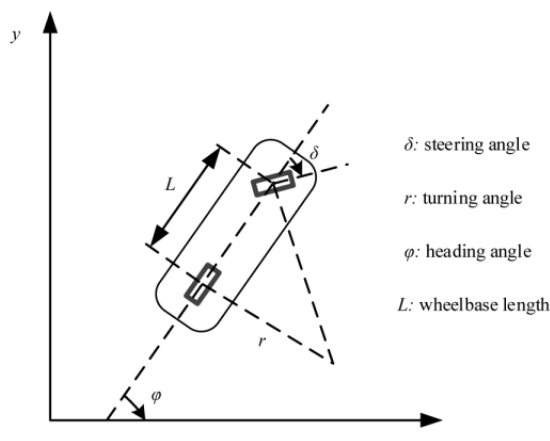
2.1 Kajian Penelitian Terkait

Pada sub-sub ini menjelaskan penelitian yang telah dilakukan beberapa peneliti lain mengenai algoritma *path planning* untuk mobil *autonomous* dengan berbagai macam metode yang berbeda. Selanjutnya akan dijelaskan beberapa penelitian dan dasar teori yang menjadi landasan pengambilan tema thesis pada subab berikut:

2.1.1 *Bezier Curved-based Trajectory Planning for Autonomous Vehicles with Collision Avoidance*

Penulis : Ling Zheng, Pengyun Zeng, Wei Yang, Yinong Li, Zhenfei Zhan
Publikasi : Intelligent Transport Systems Journal
Tahun : 2020

Penelitian ini bertujuan untuk membuat *trajectory planning* yang efektif menggunakan quartic Bezier Curve dan *potential field* untuk mobil *autonomous*. Pada penelitian ini juga menerapkan metode koordinat *frenet* untuk mengatasi limitasi scenario mengemudi yang kompleks seperti bentuk jalan. Selain itu kelebihan dari penelitian ini dapat membuat path yang di generate oleh *potential field* menjadi *continuous* meskipun pada sambungan lintasan dengan menggunakan Bezier curve. Selanjutnya, *Velocity generation* juga diajukan Ketika batasan dinamika mobil diperhitungkan.



Gambar 2.1 Model kinematika mobil

Permodelan hubungan antara sudut steering, turning radius, curvature dan *wheelbase* dapat dideskripsikan sebagai berikut

$$k = \frac{1}{r} = \frac{\tan(\delta)}{L} \quad (2.1)$$

Dimana:

- k = Curvature
- r = Sudut belok
- δ = Sudut *Steering*
- L = Panjang *Wheelbase*

Pemodelan kinematika mobil dapat dideskripsikan seperti berikut:

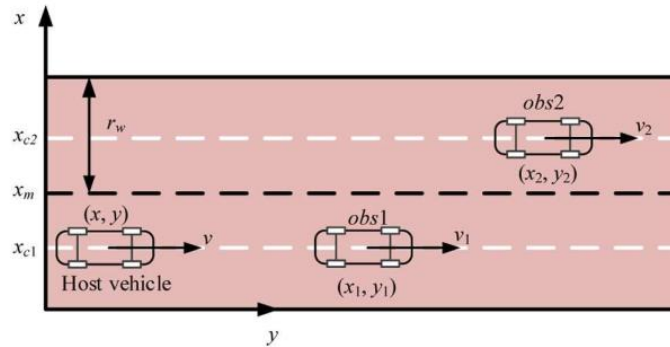
$$\dot{\varphi}(t) = v(t)k(t) \quad (2.2)$$

$$\dot{x}(t) = v(t)\cos(\varphi(t)) \quad (2.3)$$

$$\dot{y}(t) = v(t)\sin(\varphi(t)) \quad (2.4)$$

Kecepatan dan akselerasi untuk mengeksekusi *path planning* seharusnya juga dilimitasi. Selanjutnya, ini juga menjamin bahwa tidak ada *slip* pada saat mobil menghindari kendaraan lain.

Pemodelan *artificial potential field* pada umumnya menggunakan koordinat kartesius. Pada ilustrasi ini mobil berjalan pada dua jalur searah.



Gambar 2.2 Mobil berjalan pada dua jalur lurus searah

Pemodelan dari total gaya *potential* yang mempertimbangkan tepi jalan, *obstacle static* 1, dan *moving obstacle* 2 seperti berikut

$$U_{total} = U_{road} + U_{obs1} + U_{obs2} \quad (2.5)$$

Untuk mendefinisikan U_{road} menggunakan pemodelan trigonometry seperti berikut:

$$U_{road} = 0.5 * A(x) \left(\cos \left(\frac{2\pi x}{r_w} + 1 \right) \right) \quad (2.6)$$

Dimana:

r_w = lebar jalan

$A(x)$ = Amplitudo dari potential field untuk *road*

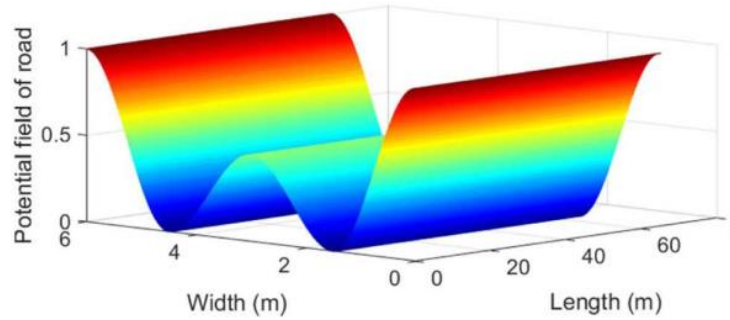
Pemodelan amplitude dituliskan seperti berikut:

$$A(x) = \frac{|sgn(x-x_{c1})+sgn(x-x_{c2})|(1-p_m)+2p_m}{2} \quad (2.7)$$

Dimana:

x_{c1}, x_{c2} = koordinat lateral dari dua garis tengah.

p_m = nilai potential field digaris tengah dari dua lajur tersebut



Gambar 2.3 Gaya *repulsive* dari jalan berbentuk tiga dimensi

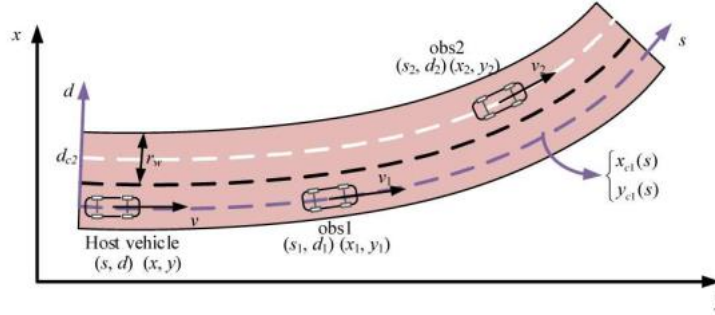
Gaya *repulsive* yang ditimbulkan ketika mobil peneliti mendekati mobil *obstacle* untuk menjaga jarak aman serta mobil didorong untuk pindah lajur dimodelkan seperti berikut

$$U_{obs(i)} = \begin{cases} e^{\left[\frac{1}{(|v_e - v_i| + \varepsilon)} \right] \left[\frac{(x-x_i)^2}{\delta_x^2} - \frac{(y-y_i)^2}{\delta_y^2} \right]}, & (2.8) \\ 0, & \text{if } [v_e \geq v_i \ \& \ x \leq x_i] \text{ atau } [v_e < v_i \ \& \ x > x_i] \text{ lainnya} \end{cases}$$

jika $[v_e \geq v_i \ \& \ x \leq x_i]$ atau $[v_e < v_i \ \& \ x > x_i]$ lainnya

Dimana n merepresntasikan jumlah obstacle. ε diberikan nilai sangat kecil untuk menghindari error. δ_x dan δ_y adalah standart deviasi

Pemodelan *artificial potential field* yang telah dimodifikasi menggunakan koordinat Frenet. Perbedaan nya adalah sistem pengkuruan koordinatnya. Pada koordnat kartesian posisi mobil didefinisikan menjadi (x,y) sedangkan pada koordiinat frenet didefinisikan menjadi (s,d) dimana s adalah jarak tempuh, d adalah simpangan dari garis tengah jalan.



Gambar 2.4 Hubungan antara koordinat kartesian dan frenet koordinat

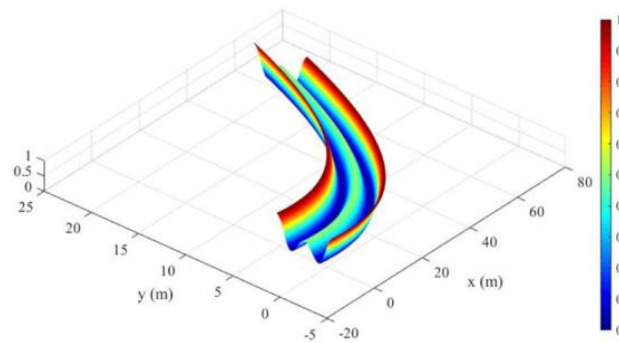
Pemodelan fungsi *potential* dari jalan dapat dimodifikasi menjadi seperti berikut

$$U_{road} = 0.5 * A(d) \left(\cos \left(\frac{2\pi(d+r_w/2)}{r_w} + 1 \right) \right) \quad (2.9)$$

Dimana $A(d)$ dapat ditulis seperti berikut

$$A(d) = \frac{|sgn(d - d_{c1}) + sgn(d - d_{c2})|(1 - p_m) + 2p_m}{2} \quad (2.10)$$

Koordinat frenet yang diaplikasikan pada jalan dapat ditampilkan menjadi bentuk tiga dimensi seperti berikut



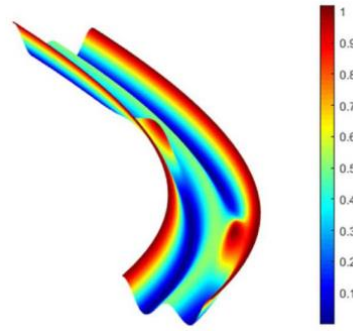
Gambar 2.5 Representasi tiga dimensi dari jalan memiliki dua jalur

Gaya repulsive pada koordinat frenet dapat modelkan seperti berikut:

$$U_{obs(i)} = \begin{cases} e^{\left[\frac{1}{(|v_e - v_i| + \varepsilon)}\right] \left[\frac{(s - s_i)^2}{\delta_s^2} - \frac{(d - d_i)^2}{\delta_d^2}\right]}, \\ 0, \end{cases} \quad (2.11)$$

jika $[v_e \geq v_i \ \& \ d \leq d_i]$ atau $[v_e < v_i \ \& \ d > d_i]$ lainnya

U_{obs} pada kurvatur tiga dimensi akan terlihat akan berbentuk ellipse yang mengikuti bentuk jalan tidak seperti traditional potential field yang berbentuk bulat tidak mengikuti bentuk jalan.



Gambar 2.6 Representasi tiga dimensi dari jalan memiliki dua jalur dengan *obstacle*.

Setelah mengetahui resultan gaya gaya potential yang dihasilkan dari *potential field* maka peneliti mengetahui bahwa *way point* dari potential field tidak begitu halus dan terdapat *uncertainty* oleh karena itu penullis menggunakan Bezier Curved sebagai *local path* nya.

Pemodelan *Bezier curve* dengan derajat n ditulis seperti berikut

$$P(\tau) = \sum_{i=0}^n B_i^n(\tau) P_i, \tau \in [0,1] \quad (2.12)$$

Dimana:

P_i = Posisi dari *control point*

$B_i^n(\tau)$ = Bernstein polynomial

Bernstein polynomial dapat dimodelkan seperti berikut:

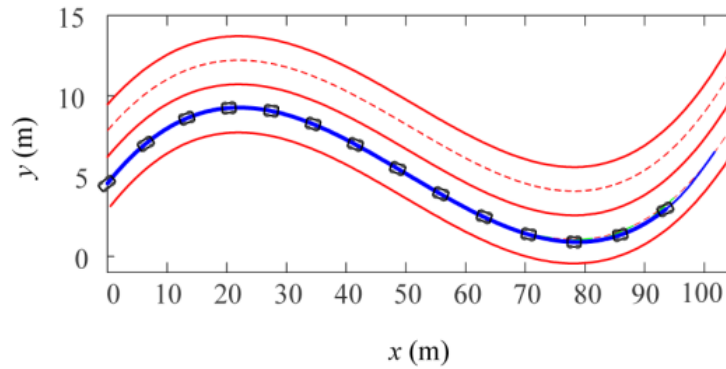
$$B_i^n(\tau) = C_n^i (1 - \tau)^{n-i} \tau^i \quad (2.13)$$

Ketika n di set menjadi 4 maka formulasi Bezier menjadi seperti berikut

$$P(\tau) = P_0(1 - \tau)^4 + 4P_1(1 - \tau)^3\tau + 6P_2(1 - \tau)^2\tau^2 + 4P_3(1 - \tau)\tau^3 + P_4\tau^4, \tau \in [0,1] \quad (2.14)$$

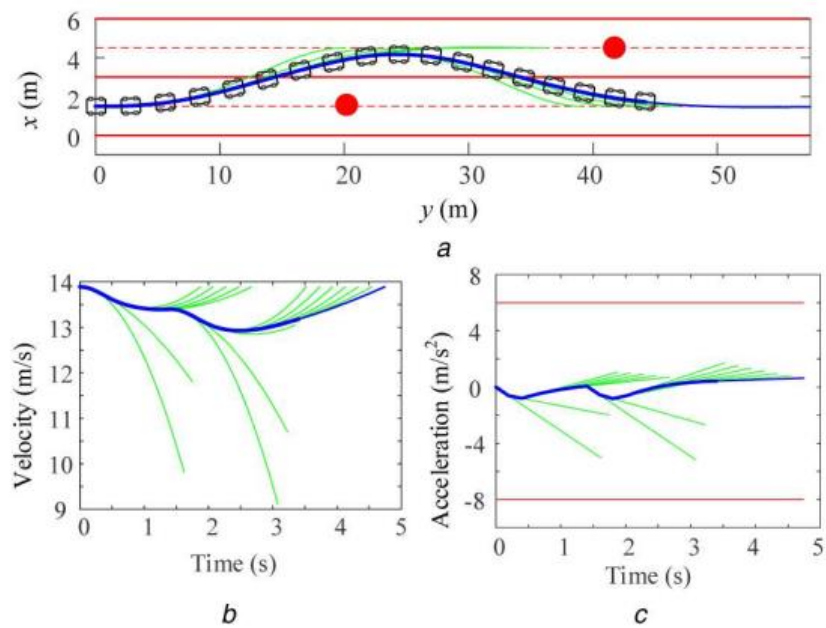
Hasil simulasi

Percobaan 1, Mengikuti jalan tanpa adanya *obstacle*

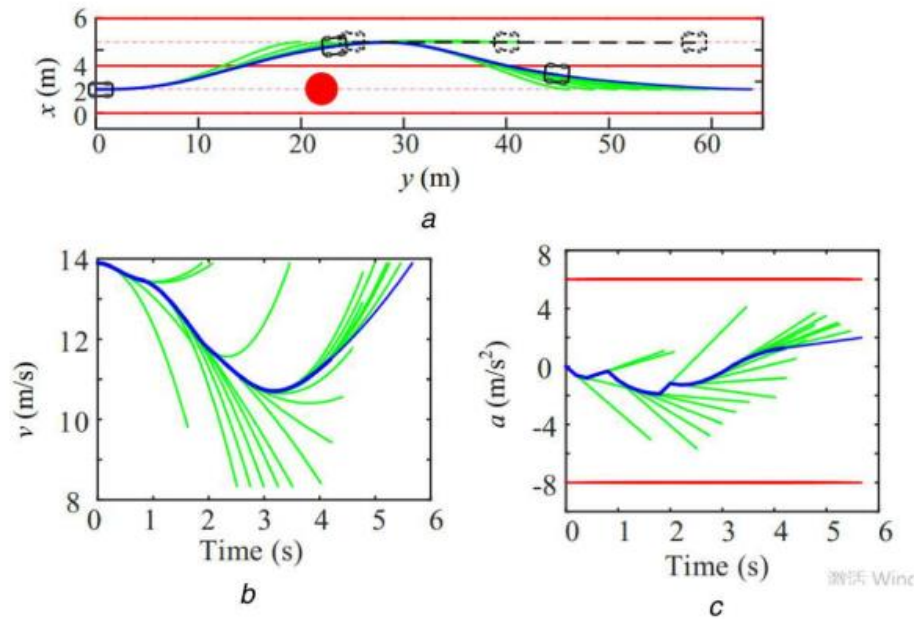


Gambar 2.7 Simulasi *path following* bentuk “S”

Percobaan 2, Mengikuti jalan dengan dua obstacle static



Gambar 2.8(a) Simulasi *path following* dengan dua obstacle static, (b) Respon kecepatan, (c) Respon akselerasi



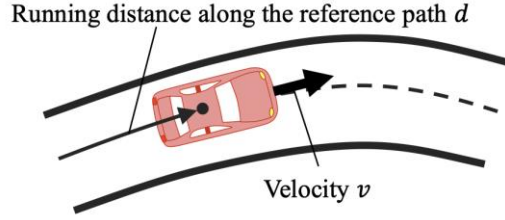
Gambar 2.9 (a) Simulasi *path following* dengan *moving obstacle*, (b) Respon kecepatan, (c) Respon akselerasi

2.1.2 Model Predictive Control for Autonomous Vehicle with Speed Profile Shaping

Penulis : Y.Mizhushima, I.Okawa, K.Nonaka.
 Publikasi : 10Th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicle IAV
 Tahun : 2019

Pada penelitian ini berfokus pada control kecepatan. Pada umumnya *mobil autonomous* memerlukan deselerasi secara cepat untuk menghindari tabrakan dengan mobil lain. Akselerasi dan deselerasi diperhatikan pada penelitian ini karena berhubungan dengan kenyamanan berkendara. Penelitian ini juga memperkenalkan *Hard constraint* dan *soft constrain*, akselerasi yang berlebihan dan tiba tiba akan ditekan ketika terdapat resiko terhadap mobil lain. Kelebihan dari metode yang diajukan akan diverifikasi melalui simulasi numeric seandainya ada kendaraan yang yang memotong didepan mobil.

Model mobil pada penelitian berfokus pada *longitudinal vehicle motion* digambarkan seperti gambar 2.10



Gambar 2.10 Ilustrasi mobil yang memiliki kontrol *longitudinal*

Dimana d adalah *running distance* diatas path dan v adalah kecepatan, a adalah akselerasi. State vector $x := [d, v, a]^T$ serta input u adalah jerk. Setiap state memiliki hubungan sebagai $\dot{d} = v, \dot{v} = a, \dot{a} = u$. Persamaan state dengan bentuk system continuous dideskripsikan seperti berikut:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (2.15)$$

Menggunakan zero-order hold, Persamaan state dapat direpresentasikan sebagai discrete-time system seperti berikut:

$$x[k+1] = \begin{bmatrix} 1 & \Delta_t & \frac{\Delta_t^2}{2} \\ 0 & 1 & \Delta_t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x[k] + \begin{bmatrix} \frac{\Delta_t^3}{6} \\ \frac{\Delta_t^2}{2} \\ \Delta_t \end{bmatrix} u[k] \quad (2.16)$$

Dimana Δ_t adalah sampling time.

Cruise control (CC) menghasilkan target kecepatan. Ketika mobil berkendara secara constant biasanya target kecepatan akan sama dengan kecepatan maximum. Model untuk menentukan waktu berapa lama melakukan akselerasi/deselerasi adalah seperti berikut:

$$\Delta t_d = \frac{v_e - v_s}{a_r} \quad (2.17)$$

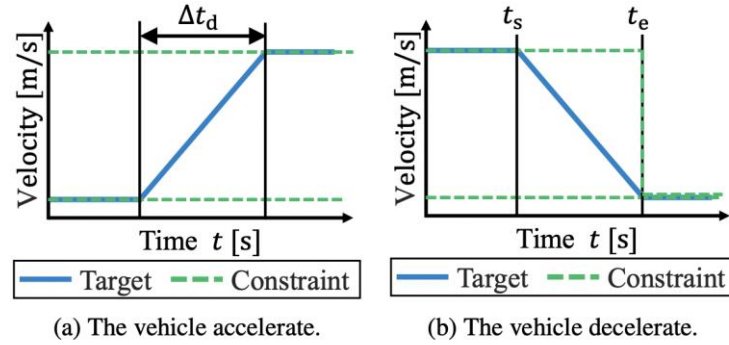
Dimana:

v_s = Kecepatan awal
 v_e = Kecepatan target
 a_r = Akselerasi target

Khusus untuk deceleration, terdapat waktu awal deselerasi model seperti berikut

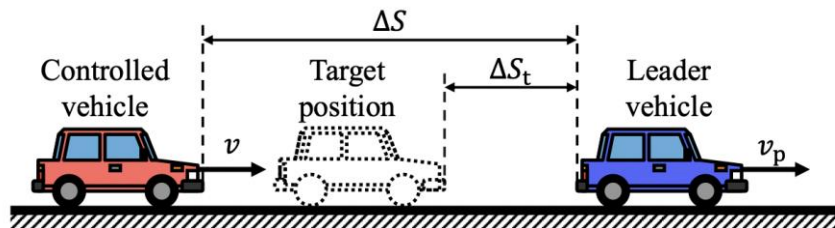
$$\Delta t_s = \frac{d_r + \frac{1}{2} a_r \Delta t_d^2}{v_s} \quad (2.18)$$

Dimana d_r adalah jarak menuju tempat berhenti. Waktu akhir deselerasi t_e dihitung menggunakan $t_e = t_s + \Delta t_d^2$. Sebagai penambahan, Kecepatan maximal $\bar{v}_{cc}[k]$ dihasilkan untuk didalam batas kecepatan.



Gambar 2.11 (a) akselerasi mobil akibat perubahan v terhadap Δt_d (b) deselerasi mobil pada rentang t_s hingga t_e

Pada gambar 2.11 menunjukkan target kecepatan dan batas kecepatan pada saat mobil bergerak.



Gambar 2.12 Ilustrasi saat mobil melakukan deselerasi

Pada gambar 2.12, menggambarkan ketika mobil melakukan deselerasi saat *leader vehicle* mengurangi kecepatan.

Adaptive cruise control (ACC), Kontrol pada metode ini menjamin bahwa mobil dapat mengikuti *leader vehicle* dengan tetap menjaga jarak aman. Pada gambar 2.12 juga menunjukkan relasi antara *controlled vehicle* dan *leader vehicle*. Dimana v adalah kecepatan dari *controlled vehicle*, v_p adalah kecepatan dari *leader vehicle*. ΔS adalah jarak kedua *vehicle*. Model target jarak target antar *vehicle* dapat dekspresikan sebagai berikut:

$$\Delta S_t[k] = v[k]t_{THW} - (v_p[k] - v_k[k])t_{TTC} + \overline{\Delta S} \quad (2.19)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} t_{THW} &= \text{Constant time - head away} \\ t_{TTC} &= \text{Constant time - collision} \\ \overline{\Delta S} &= \text{Target jarak dengan vehicle} \end{aligned}$$

Pada paper ini juga dijelaskan bagaimana membuat target akselerasi $a_{t,acc}[k]$ diexspresikan seperti berikut:

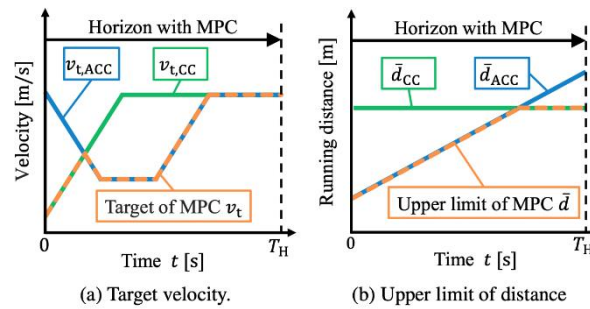
$$a_{t,acc}[k] = K_s(\Delta S[k] - \Delta S_t[k]) - K_v(v[k] - v_p[k]) \quad (2.20)$$

Dimana K_d dan K_v adalah gain constant. Model $v_{t,acc}$ dapat digambarkan seperti berikut:

$$v_{t,acc}[k+1] = v_{t,acc}[k] + a_{t,acc}[k]\Delta h \quad (2.21)$$

Dimana Δh adalah *time horizon* MPC.

Penggabungan *Cruise control* dengan *Adaptive Cruise Control*. Kedua metode tersebut dapat digabungkan dengan cara mengambil nilai terkecil pada setiap waktunya.



Gambar 2.13 (a) *target velocity* (b) *upper limit of distance*

Pada penelitian ini menggunakan batasan batasan untuk menjamin keselamatan berkendara. Pembatasan pada state \mathbf{x} dan input u . Seperti pembatasan pada jarak dimana dimulainya deselerasi sampai sesuai dengan jarak yang telah ditentukan terhadap *leader vehicle*.

$$d[k] \leq \bar{d}[k] \quad (2.22)$$

Dimana \bar{d} adalah batas atas jarak.

Limitasi kecepatan dapat mengikuti persamaan berikut

$$\underline{v}[k] \leq v[k] \leq \bar{v}[k] \quad (2.23)$$

Limitasi percepatan dapat mengikuti persamaan berikut

$$\underline{a}[k] \leq a[k] \leq \bar{a}[k] \quad (2.24)$$

Untuk mengamankan mesin dan gearbox dari perubahan akselerasi tiba tiba maka pembatasan pada perubahan percepatan atau jerk diperlukan

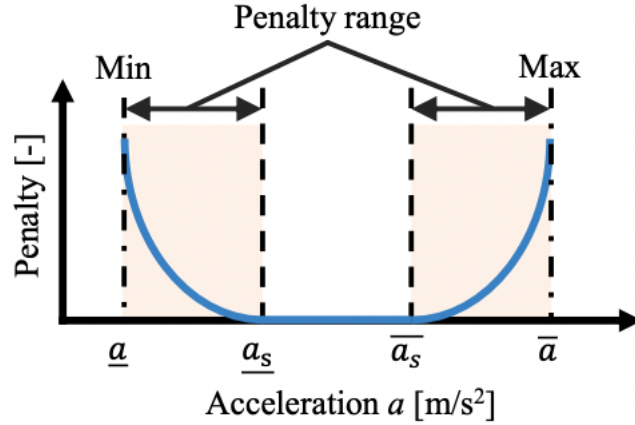
$$\underline{u}[k] \leq u[k] \leq \bar{u}[k] \quad (2.25)$$

Pada penelitian juga diberikan pembatasan perubahan percepatan menggunakan variable yang disebut slack

$$\underline{a}_s - \sigma_a[k] \leq a[k] \leq \bar{a}_s + \sigma_a[k] \quad (2.26)$$

$$\underline{u}_s - \sigma_u[k] \leq u[k] \leq \bar{u}_s + \sigma_u[k] \quad (2.27)$$

Pada penggunaan variable slack akan mempengaruhi lebar bagian berwarna kuning. Sedangkan bagian putih adalah batas akselerasi yang masih dikategorikan nyaman.



Gambar 2.14 Perubahan akselerasi

Formulasi MPC untuk trayektori tracking dengan tetap mempertimbangkan kenyamanan diformulasikan seperti berikut

Deviasi dari target $e[k]$ direpresentasikan sebagai berikut

$$e[k] = x[k] - x_t[k] \quad (2.28)$$

Dimana $x_t[k] := [d_t[k] \quad v_t[k] \quad a_t[k]]$

Cost function j dituliskan seperti berikut

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \left(e[k]^T Q e[k] + R u[k]^2 + \frac{1}{2} e[N]^T Q e[N] + \frac{1}{2} Q_a \sum_{k=1}^N \sigma_a[k]^2 + \frac{1}{2} Q_u \sum_{k=1}^N \sigma_u[k]^2 \right) \quad (2.29)$$

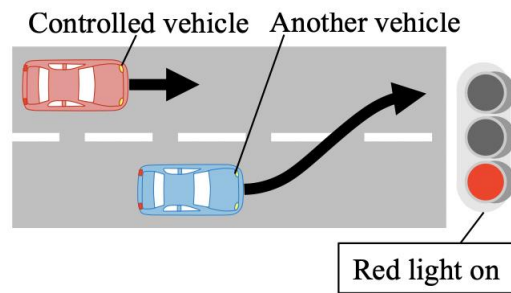
Meminimalkan J

Terhadap $u[k], \sigma_u[k]$ untuk $(k = 0, 1, \dots, N - 1)$

$\sigma_a[k]$ untuk $(k = 1, 2, \dots, N)$

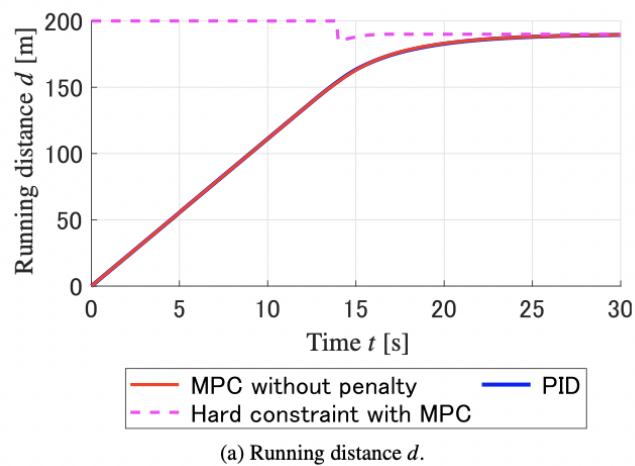
Pada Persamaan (2), (8) ~ (13)

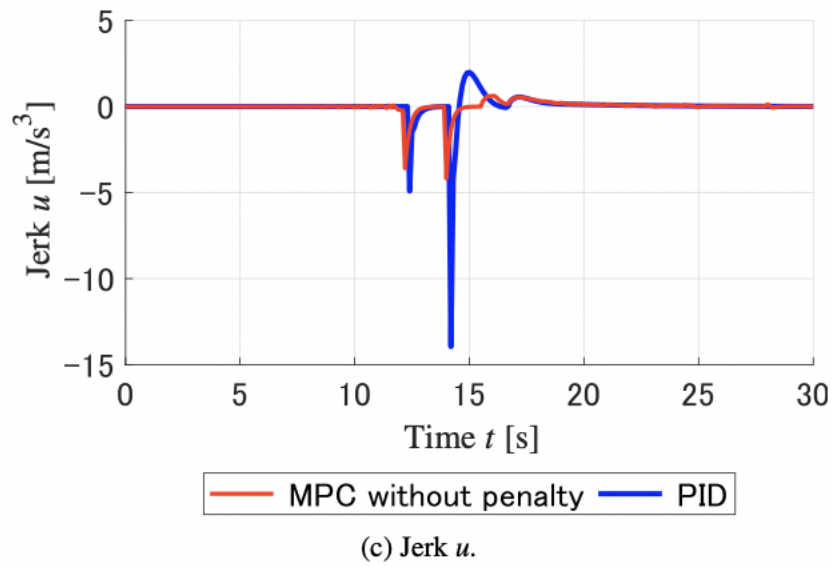
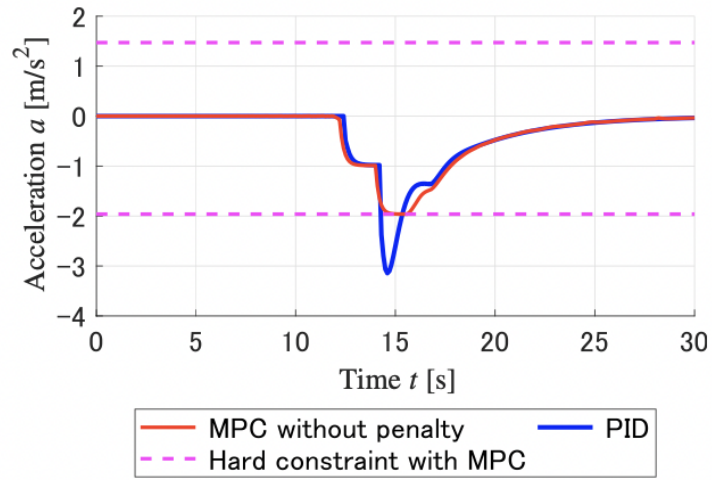
Percobaan dilakukan dengan menggunakan satu skenario.



Gambar 2.15 Kondisi mobil kontrol saat terdapat mobil lain yang memotong jalur.

Skenario ditunjukkan pada gambar diatas dimana mobil lain akan memotong jalur didepan mobil yang kita control lalu mobil lain tersebut berhenti karena terdapat lampu merah





Gambar 2.16 (a) running distance d (b) acceleration a (c) jerk u

2.1.3 Real-Time Trajectory and Velocity Planning for Autonomous Vehicles

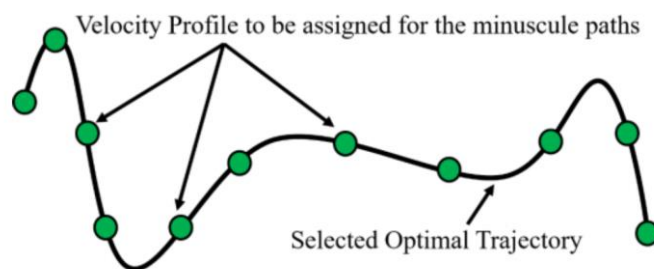
Penulis : Hrishikesh Dey, Rithika Ranadive, Abhishek Chaudari
Publikasi : International Journal of Engineering and Advance Technology (IJEAT)
Tahun : 202

Pada penelitian ini menyajikan bagaimana menjalankan mobil *autonomous* pada simulasi tanpa melebihi limitasi kecepatan, akelerasi, jerk, serta tidak keluar jalur. Pada penelitian ini juga disebutkan bahwa akelerasi tidak boleh melebihi $10 \frac{m}{s^2}$ dan jerk tidak boleh melebihi $10 \frac{m}{s^3}$.

Desain velocity profile menggunakan pendekatan bentuk trapezoidal yang telah dimodifikasi. Pada penentuan velocity profile ini dibutuhkan variable pendukung seperti kecepatan awal v_o , kecepatan maximal v_m dan kecepatan akhir v_e . Pada penelitian ini dibagi menjadi dua fase algoritma.

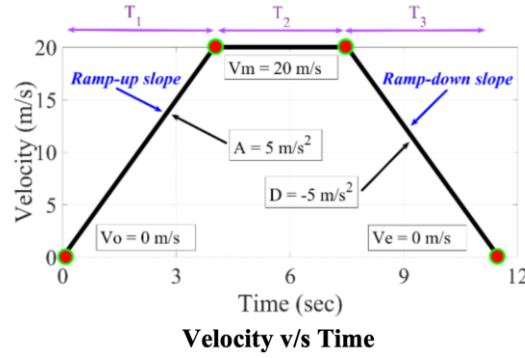
Algoritma fase 1, Prosedur pertama yaitu membuat profil kecepatan dengan menggunakan trapezoidal. Pemberian kecepatan akan diberikan pada path yang telah dibagi menjadi beberapa bagian path s (minuscule) untuk mendapatkan perhitungan jarak yang akurat.

Algoritma fase 2, Kecepatan maximum v_m dijaga tetap constant untuk setiap segment path. Pada fase ini peneliti melakukan pembatasan waktu T_s dimana variable tersebut menunjukkan waktu minimal untuk mobil dapat bergerak pada kecepatan maximal untuk menghindari halangan serta menjamin stabilitas. Kecepatan akhir v_e akan bergantung pada kecepatan *leader vehicle*. Kecepatan akhir v_e pada segment path sebelumnya akan menjadi kecepatan awal pada segment selanjutnya.



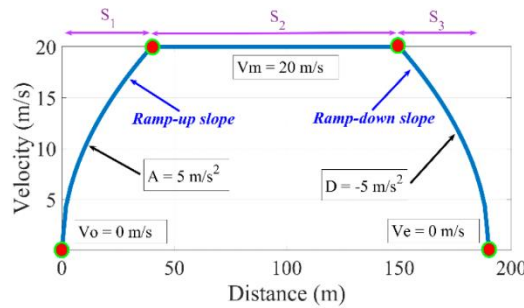
Gambar 2.17 Pembagian segmen pada path

Pemodelan profil kecepatan menggunakan bentuk trapezoidal. Profil kecepatan akan dihitung pada masing masing *segment path*. Dimana setiap segment akan dibagi kembali menjadi tiga bagian kecepatan yaitu *rampup*, *Constant transversal* dan *Ramp-down*.



Gambar 2.18 Grafik v/t

Gambar 2.18 adalah hubungan antara kecepatan dan waktu pada profil kecepatan trapezoidal. Untuk hubungan antara kecepatan dan jarak pada satu segment adalah



Gambar 2.19 Grafik hubungan v/s

Menurut gambar diatas profil kecepatan terdiri dari tiga bagian:

1. *Ramp-up slope* $\frac{T_1}{S_1}$ dari kecepatan v_o sampai ke kecepatan maximum v_m
2. *Constant traversal segment* $\frac{T_2}{S_2}$ pada kecepatan maximum v_m
3. *Ramp-down slope* $\frac{T_3}{S_3}$ dari kecepatan v_m sampai kecepatan akhir v_e

Pemodelan matematika dari profil kecepatan disajikan seperti berikut

$$S_1 = \frac{v_m^2 - v_o^2}{2a} \quad (2.30)$$

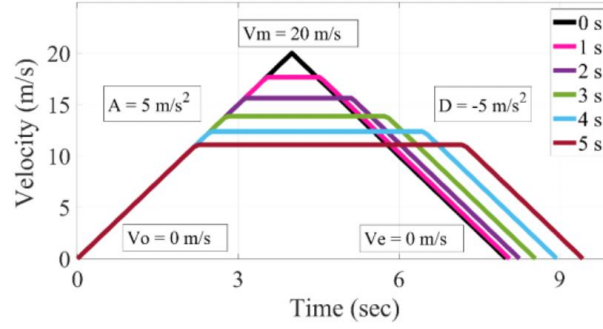
$$S_2 = v_m t_{S_2} \quad (2.31)$$

$$S_3 = \frac{v_e^2 - v_m^2}{2dec} \quad (2.32)$$

$$s = S_1 + S_2 + S_3 \quad (2.33)$$

$$t_{S_2} = \frac{s - (S_1 + S_3)}{v_m} \quad (2.34)$$

Pada penelitian juga diperkenalkan cara bagaimana mengatur kecepatan v_m melalui waktu T_k . Dimana T_k berguna untuk menunjukkan berapa lama mobil bergerak pada kecepatan constant tanpa akselerasi.



Gambar 2.20 Profil kecepatan trapezoid dengan pembatasan kecepatan

Pemodelan matematika dari trapezoidal dengan T_k disajikan seperti berikut

$$v_m = \frac{-T_k + \sqrt{T_k^2 - 4\left(\frac{1}{2a_{acc}} - \frac{1}{2a_{dec}}\right)\left(\left(\frac{v_e^2}{2a_{acc}} - \frac{v_o^2}{2a_{dec}}\right) - s\right)}}{2\left(\frac{1}{2a_{acc}} - \frac{1}{2a_{dec}}\right)} \quad (2.35)$$

Selanjutnya profil kecepatan dapat dihaluskan kembali menggunakan *cubic polynomial*

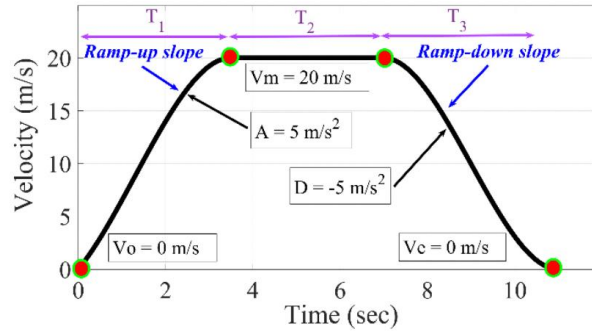
$$v(t) = v_0 + at + bt^2 + ct^3 \quad (2.36)$$

$$acc(0) = a = a_1 \quad (2.37)$$

$$v(t_f) = v_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 = v_f \quad (2.38)$$

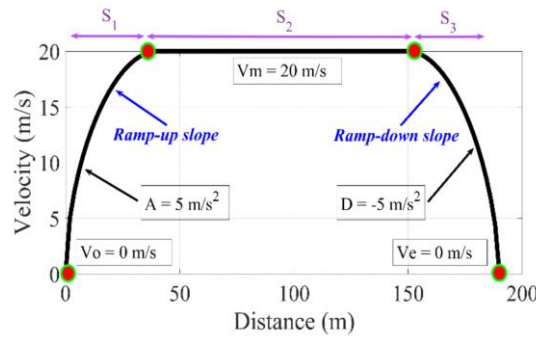
$$acc(t_f) = a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 = af \quad (2.39)$$

Hasil dari penghalusan profil kecepatan pada model trapezoidal menjadi seperti berikut



Gambar 2.21 Grafik kecepatan mobil setelah diperhalus

Hubungan grafik kecepatan dengan jarak seperti berikut



Gambar 2.22 Grafik hubungan jarak dengan kecepatan

Pemodelan matematika dari profil kecepatan yang telah dihaluskan seperti berikut

$$s(t_f) = v_0 t_f + \frac{a_1 t_f^2}{2} + \frac{a_2 t_f^3}{3} + \frac{a_3 t_f^4}{4} = s_f \quad (2.40)$$

$$0 = \left(\frac{a_0 - a_f}{12} \right) t_f^2 + \left(\frac{v_f - v_0}{2} \right) t_f \quad (2.41)$$

$$a_2 = 3 \left(\frac{v_f - v_0}{t_f^2} \right) - \left(\frac{2a_0 - a_f}{t_f} \right) \quad (2.42)$$

$$a_3 = \left(\frac{a_f - a_0}{3t_f^2} \right) - \left(\frac{2a_2}{3t_f} \right) \quad (2.43)$$

Persamaan cubic untuk $v(t)$ pada saat t . Total waktu t_f membutuhkan setiap segment S_1 dan S_3 telah dikalkulasi. Persamaan panjang path pada t_f sebagai contoh $s(t_f)$ dijabarkan seperti persamaan 11, dengan mengintegrasikan kecepatan pada persamaan 9. Diberikan kecepatan awal v_0 , akselerasi awal a_0 , kecepatan terminal v_f , akselerasi akhir a_f . Metode newton Raphson digunakan untuk

menghitung nilai t_f . Nilai t_f akan dievaluasi setiap point pada trajectory dan pada segments, S_1 dan S_3 dihaluskan secara terpisah untuk semua nilai t dari $0 - t_f$.

Kecepatan untuk setiap titik pada t , bergantung pada total waktu yang ditempuh pada per segment path T . Jarak, waktu, kecepatan dan akselerasi didapatkan dari hukum gerak newton.

$$T_1 = \left(\frac{v_m - v_o}{A} \right) \quad (2.44)$$

$$T_2 = t_{S_2} \quad (2.45)$$

$$T_3 = \left(\frac{v_e - v_m}{D} \right) \quad (2.46)$$

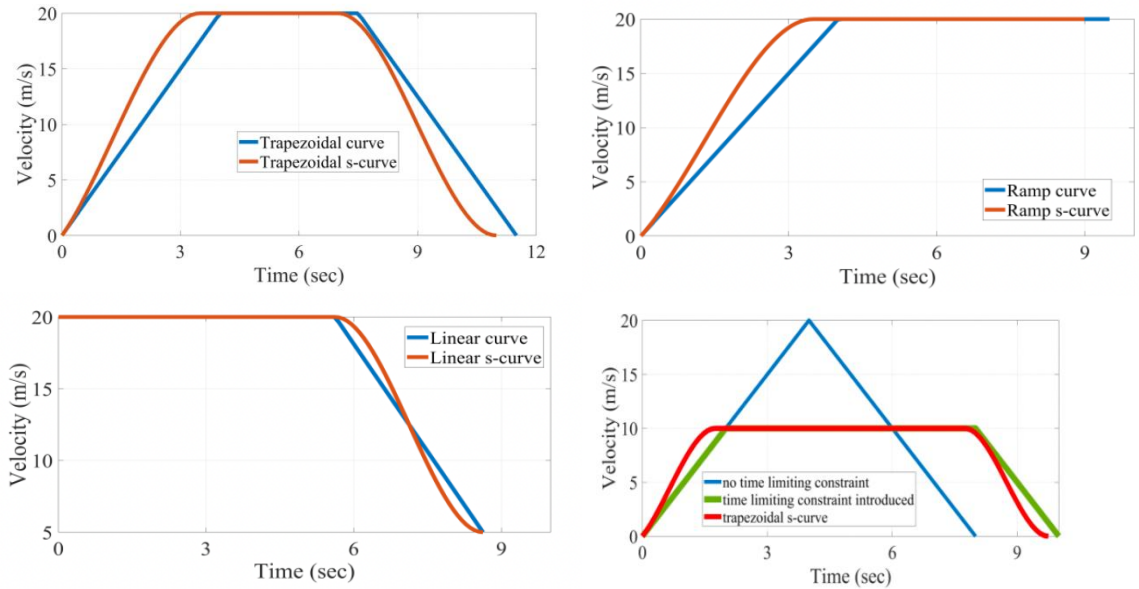
$$V_1 = V_0 + (A t) \quad (2.47)$$

$$V_2 = V_m \quad (2.48)$$

$$V_3 = V_m + (D(t - (T_1 + T_2))) \quad (2.49)$$

Kecepatan pada setiap waktu t memiliki rentang dari 0 sampai T_1 , T_1 sampai T_2 , dan T_2 sampai T_3 pada kecepatan kurva dapat dikalkulasi menggunakan persamaan 2.47, 2.48, dan 2.49.

Hasil dari penelitian ini adalah pembuatan profil kecepatan trapezoidal yang telah dihaluskan dengan cubic spline.



Gambar 2.23 Profil kecepatan trapezoidal yang telah dihaluskan dengan cubic spline.

2.2 Teori Dasar

Pada bab ini akan dijelaskan beberapa landasan teori yang digunakan untuk mendukung perumusan dan penyelesaian masalah yang akan digunakan dalam penulisan tesis ini.

2.2.1 Model Kendaraan Roda 4

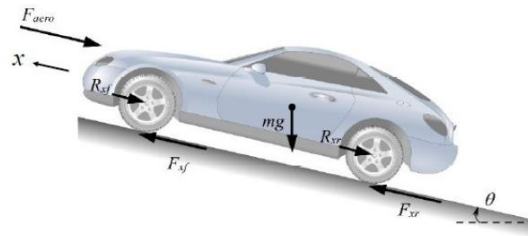
Model kinematic dari mobil adalah representasi dari persamaan matematika yang mewakili gerakan mobil tanpa memperhitungkan gaya dan momen yang mempengaruhi gerakan seperti kondisi sebenarnya. Model kinematik adalah gerakan mobil terhadap titik tetap pada sumbu kartesian. Untuk menyederhanakan maka digunakan model *bicycle*.

$$\dot{x}_r = v_r \cos(\theta_r) \quad (2.50)$$

$$\dot{y}_r = v_r \sin(\theta_r) \quad (2.51)$$

$$\dot{\theta}_r = \frac{v_r}{l} \tan(\delta_r) \quad (2.52)$$

Dimana V adalah kecepatan linear, δ adalah sudut *steering*, l adalah jarak dari COG dari roda depan. Lebih lanjut kita dapat mendefinisikan model dinamik dari mobil dimana kinematic digabungkan dengan gaya gaya yang mempengaruhinya



Gambar 2.24 Struktur sistem dinamik mobil

$$\dot{x}_r = v_r \cos(\theta_r + \alpha_d) \quad (2.53)$$

$$\dot{y}_r = v_r \sin(\theta_r + \alpha_d) \quad (2.54)$$

$$\dot{\theta}_r = \omega_d \quad (2.55)$$

Dimana α adalah sudut slip.

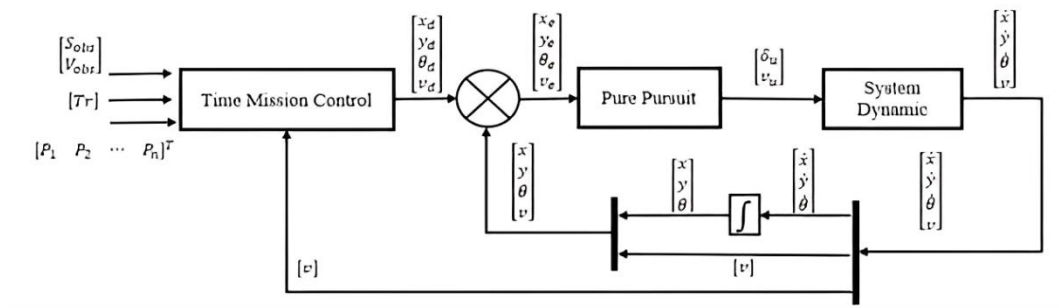
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan diuraikan hal-hal yang dilakukan pada penelitian ini dalam pembentukan *time mission control*. Dimulai dari rancangan blok diagram system, dilanjutkan dengan penjelasan dinamika mobil yang digunakan, pembahasan kontrol lateral dan kontrol longitudinal, kemudian membahas lingkungan pengujian serta batas batas dari sistem secara keseluruhan dalam penelitian yang akan dilakukan.

3.1 Rancangan Diagram Blok Sistem

Diagram blok akan menunjukkan garis besar sistem serta parameter masukan dan keluaran setiap sistem blok yang akan digunakan untuk mengontrol mobil. Blok sistem kontrol ditunjukkan pada gambar 3.1



Gambar 3.1 Rancangan diagram blok sistem

Blok sistem terdiri dari 3 bagian utama yaitu *Time Mission Control*, Pure Pursuit kontrol, dan model dinamika mobil. Semua blok tersebut akan dijalankan secara bersama sama sesuai dengan *time horizon* dari control purepursuit. Pada penilitan ini akan berfokus pada pembentukan *time mission control* yang akan mengatur kecepatan v dan sudut yaw mobil θ . Input yang dibutuhkan *Time mission control* terdiri dari kumpulan waypoint $[P_1 \ P_2 \ \dots \ P_n]^T$, referensi waktu, jarak dan kecepatan mobil lain yang berpotensi mengganggu pada trayektori mobil peneliti, selanjutnya juga akan diberikan input *feedback* dari keluaran dinamika mobil seperti kecepatan mobil, jarak tempuh, dan sudut yaw mobil pada saat t .

Nilai keluaran dari *time mission control* akan digunakan oleh Pure Pursuit kontrol untuk menjaga agar mobil tetap berada pada pathnya serta menjaga kecepatan pada setiap waktu t sesuai dengan referensi yang diberikan. Keluaran Pure pursuit kontrol adalah nilai kecepatan mobil v dan sudut steering δ .

3.2 Pemodelan Kinematika Mobil

Kinematika model pada penelitian ini akan mengacu pada koordinat kartesius (x , y , θ)

$$\dot{x}_r = v_r \cos(\theta_r) \quad (3.1)$$

$$\dot{y}_r = v_r \sin(\theta_r) \quad (3.2)$$

$$\dot{\theta}_r = \frac{v_r}{l_f} \tan(\delta_r) \quad (3.3)$$

Dimana:

v = Kecepatan Linear

δ = Sudut Steering

l_f = Jarak dari titik tengah ke titik CoG mobil ke sumbu roda depan.

Error model dapat didefinisikan sebagai perbedaan antara parameter terukur dengan parameter yang kita inginkan, lalu akan didapatkan vector error seperti berikut

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_d) & \sin(\theta_d) & 0 \\ -\sin(\theta_d) & \cos(\theta_d) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_d \\ y_r - y_d \\ \theta_r - \theta_d \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Untuk digunakan pada kontrol maka persamaan diatas diturunkan

$$\dot{x}_r = v_r \cos(\theta_r) \quad (3.5)$$

$$\dot{y}_r = v_r \sin(\theta_r) \quad (3.6)$$

$$\dot{\theta}_r = \frac{v_r}{l_f} \tan(\delta_r) \quad (3.7)$$

$$\dot{x}_e = -v_d + v_r \cos(\theta_e) + y_e \omega_d \quad (3.8)$$

$$\dot{y}_e = v_r \sin(\theta_e) + x_e \omega_d \quad (3.9)$$

$$\dot{\theta}_e = \frac{v_r}{l_f} \tan(\delta_r) - \frac{v_d}{l_f} \tan(\delta_d) \quad (3.10)$$

3.3 Pemodelan Dinamika Mobil

Pada bagian ini pemodelan dinamika sangat penting karena akan menjelaskan bagaimana mobil dapat bergerak dengan mempertimbangkan gaya luar yang mempengaruhi mobil.

Bentuk model matematika dari dinamika mobil yang mendeskripsikan gerakan pada sumbu kartesian.

$$\dot{x}_r = v_r \cos(\theta_r + \alpha_r) \quad (3.11)$$

$$\dot{y}_r = v_r \sin(\theta_r + \alpha_r) \quad (3.12)$$

$$\dot{\theta}_r = w_r \quad (3.13)$$

Jika dinamika mobil direpresentasikan sebagai *error vector* maka akan menjadi seperti berikut,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_d + \alpha_d) & \sin(\theta_d + \alpha_d) & 0 \\ -\sin(\theta_d + \alpha_d) & \cos(\theta_d + \alpha_d) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_d \\ y_r - y_d \\ \theta_r - \theta_d \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Turunan dari *error vector* akan menjadi seperti berikut

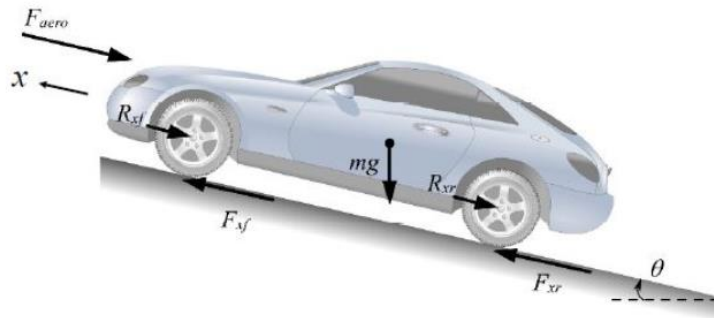
$$\dot{x}_e = -v_d + v_r \cos(\theta_e + \alpha_e) + y_e(\dot{\theta}_d + \dot{\alpha}_d) \quad (3.15)$$

$$\dot{y}_e = v_r \sin(\theta_e + \alpha_e) + x_e(\dot{\theta}_d + \dot{\alpha}_d) \quad (3.16)$$

$$\dot{\theta}_e = (w_r - \dot{\alpha}_r) - (w_d - \dot{\alpha}_d) \quad (3.17)$$

Dimana

α = sudut slip



Gambar 3.2 Model dinamika mobil

Persamaan penurunan akselerasi dari sudut slip dan akselerasi putar didefinisikan sebagai berikut:

$$\dot{v}_d = \frac{F_{xRd} \cos(\alpha_d) + F_{yFd} \sin(\alpha_d - \delta_d) + F_{yRd} \sin(\alpha_d) + F_{drag} - F_{fric}}{m} \quad (3.18)$$

$$\dot{\alpha}_d = \frac{-F_{xRd} \sin(\alpha_d) + F_{yFd} \cos(\alpha_d - \delta_d) + F_{yRd} \cos(\alpha_d)}{mv} \quad (3.19)$$

$$\dot{\omega}_d = \frac{F_{yRd} \cos(\delta) + F_{yRd} \cdot b}{I} \quad (3.20)$$

Untuk model dari gaya longitudinal dan Lateral yang diterima oleh roda belakang dan roda depan seperti berikut:

$$F_{yFd} = C_x \cos\left(\delta_d - \alpha_d - \alpha \frac{\omega_d}{v_d}\right) \quad (3.21)$$

$$F_{yRd} = C_x \cos\left(-\alpha_d + b \frac{\omega_d}{v_d}\right) \quad (3.22)$$

Model aerodynamic dari mobil adalah sebagai berikut:

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \rho * C_d * v^2 * A \quad (3.23)$$

Pemodelan Gaya gesek didefinisikan sebagai

$$F_{fric} = \mu F g \quad (3.24)$$

Dimana:

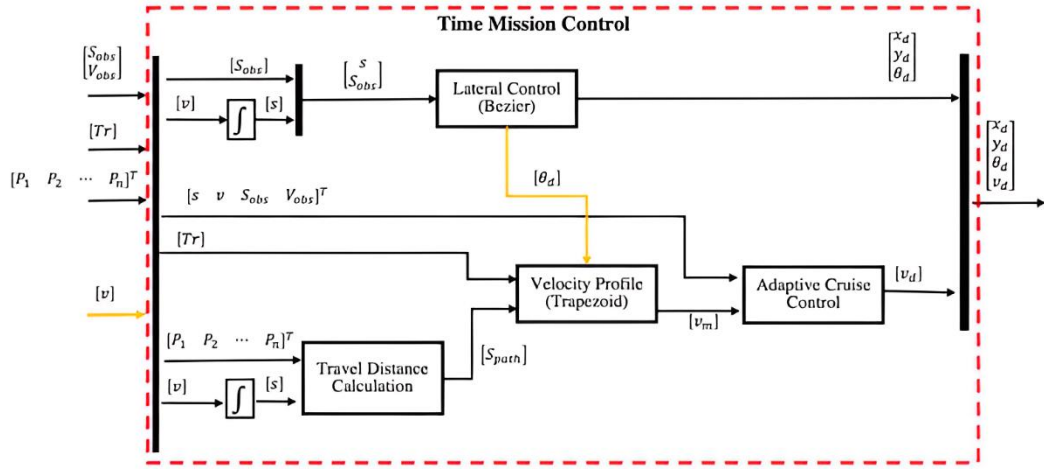
F_{xR}	=	Gaya longitudinal pada roda belakang
F_{yF}	=	Gaya Lateral pada roda depan
F_{yR}	=	Gaya Lateral pada roda belakang
F_{drag}	=	Gaya hambat aerodynamic
F_{fric}	=	Gaya gesek F
g	=	Konstanta gravitasi
μ	=	Koefisien gesek
ρ	=	Kepadatan udara
v	=	Kecepatan mobil
δ	=	Sudut Steering
α	=	Sudut slip

Pada percobaan ini menggunakan parameter kendaraan seperti berikut

Lebar	=	1.78 meter
Sumbu	=	2.843 meter
Roda		
l_r	=	1.105 meter
l_f	=	1.738 meter

Dimana l_f dan l_r adalah jarak sumbu roda belakang dan depan ke tengah mobil

3.4 Diagram Blok *Time Mission Control*



Gambar 3.3 Diagram blok *time mission control*

Pada gambar 3.3 adalah komponen yang ada didalam blok *time mission control*. Terdapat 4 bagian utama yang berperan sebagai kontrol. Kontrol logitudinal terdiri dari tiga blok *Travel Distance Calculation*, *Velocity Profile Trapezoid*, *Adaptive cruise control*. Kontrol lateral hanya terdapat satu blok yaitu dengan menggunakan Bezier curve.

3.5 Pemodelan *Travel Distance Calculation*

Pada penentuan kecepatan mobil dengan referensi waktu tertentu maka diperlukan penghitungan jarak yang telah ditempuh oleh mobil dibandingkan dengan total jarak yang harus ditempuh, Nilai masukan modul ini adalah kumpulan waypoint $[P_1 \ P_2 \ \dots \ P_n]^T$ dan kecepatan yang telah diintegrasikan menjadi jarak yang telah ditempuh oleh mobil.

Jarak total yang dibentuk oleh waypoint ini akan dihitung menggunakan penambahan dari jarak setiap point sekarang dengan point sebelumnya. Point ini terdiri dari vector x dengan vector y maka jarak antar point akan dihitung menggunakan euclidean distance

$$D_n = \sqrt{((x_n - x_{n-1}) + (y_n - y_{n-1}))} \quad (3.25)$$

Maka jarak pada waypoint dapat dihitung menggunakan penambahan dari nilai D_n

$$S_g = \sum_{n=1}^m D_n \quad (3.26)$$

Dimana:

S_g = Jarak total dari global path

Nilai global path akan dihitung dengan jarak yang telah ditempuh oleh mobil maka akan didapat jarak yang tersisa dari path tersebut. Pemodelan matematika untuk menghitung jarak dapat dilihat dari persamaan berikut

$$S_{path} = S_g - s \quad (3.27)$$

Dimana:

S_{path} = jarak yang tersisa

s = Jarak yang telah ditempuh oleh mobil

3.6 Pemodelan Longitudinal Kontrol menggunakan Velocity Profile

Lateral kontrol pada penelitian ini bertujuan untuk mengatur kecepatan, dan akselerasi. Pengaturan kecepatan dan akselerasi menggunakan model Trapezoid. Pemilihan bentuk trapezoid pada penelitian karena bentuk tersebut teradapt bagian akselerasi pada titik awal dan deselerasi pada titik akhir. Kondisi tersebut dapat membantu mobil untuk mencapai target dengan kecepatan yang cenderung halus. Lalu bentuk trapezoid dipilih karena terdapat area dengan kecepatan konstan yang berarti tidak ada akselerasi, dimana dengan berkurangnya porsi akselerasi maka akan meningkatkan kenyamanan pada pengemudi.

Untuk membuat profil kecepatan trapezoid maka sisa jarak yang harus ditempuh harus dibagi menjadi 3 bagian. Bagian pertama mewakili *rampup*, bagian kedua *flat* kecepatan konstan, dan bagian tiga yaitu *rampdown*. Model untuk model posisi dari bentuk trapezoid dapat ditulis seperti berikut:

$$q(t) = \begin{cases} q_0 + \frac{V}{2t_b}t^2 & 0 \leq t \leq t_b \\ \frac{q_f + q_0 - Vt_f}{2} + Vt & t_b \leq t \leq t_f - t_b \\ q_f - \frac{V}{2t_b}t_f^2 + \frac{Vt_f}{2}t - \frac{V}{2t_b}t^2 & t_f - t_b \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (3.28)$$

Dimana:

t_b : Durasi Waktu Kecepatan Kontant

q : Posisi

q_0 : Posisi Awal

q_f : Posisi Akhir

t_f : Waktu Akhir

Hasil nilai dari q adalah representasi jarak yang telah ditempuh dari kendaraan pada path yang telah didefinisikan sebelumnya terhadap waktu. Dimana diharapkan akan berbentuk slop yang nilai maksimalnya adalah total dari jarak tempuh.

Pada penelitian ini kontrol yang digunakan adalah pure pursuit dimana masukan dari system ini adalah kecepatan. Kecepatan mobil akan diatur oleh velocity kontrol. Velocity kontrol akan didapat dari penurunan nilai q terhadap waktu. Persamaan akan menjadi seperti berikut:

$$\dot{q}(t) = \begin{cases} \left(q_0 + \frac{V}{2 t_b} t^2 \right) \frac{dx}{dt} & 0 \leq t \leq t_b \\ \left(\frac{q_f + q_0 - V t_f}{2} + V t \right) \frac{dx}{dt} & t_b \leq t \leq t_f - t_b \\ \left(q_f - \frac{V}{2 t_b} t_f^2 + \frac{V t_f}{2 t_b} t - \frac{V}{2 t_b} t^2 \right) \frac{dx}{dt} & t_f - t_b \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (3.29)$$

Penurunan nilai q akan membentuk \dot{q} . Kecepatan yang didapat akan berbentuk trapezoid yang memiliki kecepatan maksimal akan menyesuaikan dengan panjang lintasan serta waktu yang telah kita tentukan.

3.7 Pemodelan Adaptive Cruise Control

Pada penelitian ini menggunakan kontrol yang dapat menjaga jarak antara mobil *leader* dengan mobil peneliti. Kontrol ini diperlukan karena mobil diharapkan dapat mengurangi kecepatan pada saat tidak memungkinkan untuk mendahului mobil *leader* karena beberapa faktor seperti diberikannya batasan putaran *steering* sebesar 15 derajat. Pembatasan ini menyebabkan mobil tidak dapat mendahului jika jaraknya terlalu dekat karena akan memiliki membutuhkan sudut *steering* yang lebih dari batas tersebut.

Berikut model adaptive cruise kontrol, pada penelitian ini menggunakan jarak aman antara mobil dengan mobil *leader* sebagai berikut:

$$\Delta S_t[k] = v[k]t_{THW} - (v_p[k] - v_k[k])t_{TTC} + \overline{\Delta S} \quad (3.30)$$

$$a_{t,acc}[k] = K_s(\Delta S[k] - \Delta S_t[k]) - K_v(v[k] - v_p[k]) \quad (3.31)$$

$$v_{t,acc}[k+1] = v_{t,acc}[k] + a_{t,acc}[k]\Delta h \quad (3.32)$$

Dimana:

$$t_{THW} = \text{time headway}$$

$$t_{TTC} = \text{time to collision}$$

$$\overline{\Delta S} = \text{Jarak mobil dengan mobil } leader \text{ yang kita inginkan}$$

Nilai $v_{t,acc}$ pada persamaan 3.39 adalah kecepatan disaat mobil bertemu dengan halangan didepannya dimana kecepatan itu akan menyesuaikan jarak antara mobil dengan mobil didepannya. Kecepatan ini tidak dapat digunakan karena tidak ada input waktu yang ditentukan sebelumnya pada subab 3.6. Oleh sebab itu maka kecepatan tanpa obstacle pada subab 3.6 akan digabungkan dengan subab 3.7 dengan diambil nilai yang lebih kecil dari perbandingan dua kecepatan tersebut pada waktu t . Ilustrasi model ini ditunjukkan pada gambar 2.13.

$$v_d = \begin{cases} v_m, & v_m < v_{t,acc} \\ v_{t,acc}, & v_{t,acc} \leq v_h \end{cases} \quad (3.33)$$

$$v_d = \begin{cases} v_m, & v_m < v_{t,acc} \\ v_{t,acc}, & v_{t,acc} \leq v_h \end{cases} \quad (3.34)$$

3.8 Pemodelan Lateral Kontrol

Pemodelan lateral ini akan bertanggung jawab pada keluaran sudut mobil yang dibentuk pada saat ingin mendahului. Lateral kontrol ini membentuk *local path* pada saat jarak mobil telah masuk jarak toleransi aman S_{safe} .

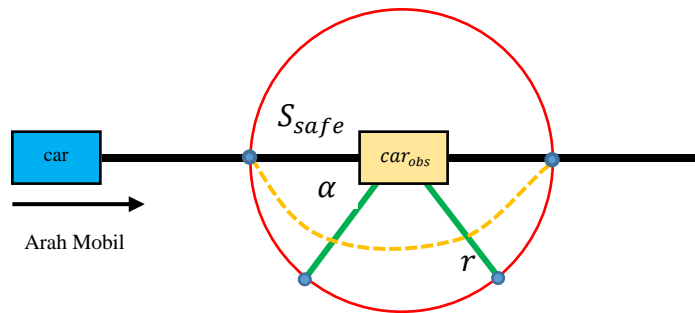
Pemodelan Bezier curve dengan 4 titik / cubic Bezier. Penggunaan Bezier jenis ini karena lebih flexible pada pembuatan path jika dibandingkan dengan Bezier yang memiliki kontrol point yang lebih sedikit. Model matematika dari cubic Bezier disajikan seperti berikut:

$$B(t) = P_0(1-t)^3 + 3P_1(1-t)^2t + 3P_2(1-t)t^2 + P_3t^3, t \in [0,1] \quad (3.35)$$

Dimana:

P_n = Kontrol poin

Kontrol point Bezier curve akan ditempatkan pada jarak toleransi yang bersinggungan dengan lingkaran.



Gambar 3.4 Ilustrasi kontrol poin *Bezier Curve*

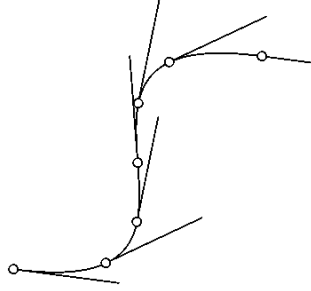
Dimana α adalah sudut antara path dengan jari jari lingkaran atau garis r . Nilai α adalah constant. Setiap garis r akan terbentuk 4 titik berwarna biru (*control point bezier*) tersebut akan menciptakan *local path* (garis putus putus berwarna orange). Pada penelitian ini menggunakan nilai $\alpha = 60^\circ$

Nilai r akan sama dengan nilai S_{safe} dimana jarak tersebut diasumsikan adalah jarak teraman bagi mobil peneliti, pada saat ingin tetap mengikuti atau ingin mendahului mobil didepannya.

$$r = S_{safe} \quad (3.36)$$

Nilai S_{safe} juga mempertimbangkan nilai maksimal *steering* sebesar maksimal 30 derajat jika mobil ingin berpindah jalur serta tanpa menabrak mobil didepannya.

Setelah path terbentuk menggunakan persamaan 3.19 maka peneliti mendapatkan kumpulan koordinat $\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix}$. Hasil ini hanya merepresentasikan posisi pada *path* sedangkan pada mobil autonomous diperlukan variable oriantasi θ_d . Nilai θ_d akan didapat dari perhitungan *tangen* pada Bezier curve.



Gambar 3.5 Tangen Cubic Bezier Curve

Untuk mencari tangen maka persamaan Bezier harus diturunkan satu kali

$$B'(t) = 3(1-t)^2(P_1 - P_0) + 6(1-t)t(P_2 - P_1) + 3t^2(P_3 - P_2), t \in [0,1] \quad (3.37)$$

Persamaan ini dapat di representasikan menggunakan x dan y

$$\frac{dx}{dt} = 3(1-t)^2(x_1 - x_0) + 6(1-t)t(x_2 - x_1) + 3t^2(x_3 - x_2), t \in [0,1] \quad (3.38)$$

$$\frac{dy}{dt} = 3(1-t)^2(y_1 - y_0) + 6(1-t)t(y_2 - y_1) + 3t^2(y_3 - y_2), t \in [0,1] \quad (3.39)$$

Maka persamaan dapat ditulis menjadi seperti berikut untuk mencari gradient dari slope yang dibentuk oleh Bezier

$$\frac{dy}{dx} = \frac{3(1-t)^2(y_1 - y_0) + 6(1-t)t(y_2 - y_1) + 3t^2(y_3 - y_2)}{3(1-t)^2(x_1 - x_0) + 6(1-t)t(x_2 - x_1) + 3t^2(x_3 - x_2)} \quad (3.40)$$

Karena gradient adalah tangen dari slope maka θ_d dapat dicari menggunakan arc

tangen. Setelah didapatkan θ_d maka output dari modul ini adalah $\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ \theta_d \end{bmatrix}$

3.9 Pemodelan Jarak Aman Adaptive

Bezier dapat dikontrol dengan mengubah posisi atau menambah jumlah control point. Pada bagian ini akan dijelaskan bagaimana mempengaruhi titik control point terhadap kecepatan kendaraan. Percobaan sebelumnya, Parameter jarak aman yang digunakan adalah 10 meter

Model matematika yang digunakan adalah linear interpolations

Model Linear Interpolations:

$$p(x) = y_0 + (v - v_0) \frac{y_1 - y_0}{v_1 - v_0} \quad (3.41)$$

Dimana:

v = Input kecepatan

v_0 = batas kecepatan minimal

v_1 = batas kecepatan maximal

y_0 = batas jarak aman minimal

y_1 = batas jarak aman maximal

Membatasi nilai keluaran $p(x)$,

Lalu melakukan limitasi

$$r = safe_{distance} = \begin{cases} x_0 & p(x) < x_0 \\ p(x) & \\ x_1 & p(x) > x_1 \end{cases}$$

3.10 Pemodelan hubungan curvature dengan kecepatan

Pendekatan linear terbalik adalah salah satu pendekatan yang umum digunakan dalam masalah kendali gerak, termasuk kendali kendaraan seperti mobil. Dalam konteks ini, hubungan antara curvature (κ) dan kecepatan kendaraan (V) dapat diaproksimasi dengan menggunakan pendekatan linear terbalik.

Dalam pendekatan linear terbalik, asumsi dasar yang digunakan adalah bahwa kurvatur (κ) dan kecepatan kendaraan (V) memiliki hubungan linier terbalik. Artinya, semakin besar nilai κ , semakin kecil nilai V yang diperlukan untuk menjaga stabilitas kendaraan di sekitar tikungan, dan sebaliknya, semakin kecil nilai κ , semakin besar nilai V yang diperlukan untuk mencapai kecepatan tertentu.

Namun, perlu dicatat bahwa pendekatan ini adalah sebuah model sederhana dan tidak mempertimbangkan semua faktor kompleks yang terlibat dalam kendali dinamis kendaraan. Pendekatan ini mungkin cocok untuk kasus di mana hanya ingin memahami bagaimana kendaraan bergerak menuju tujuan dengan tetap mempertimbangkan faktor dinamis secara sederhana.

Model matematika pendekatan linear terbalik seperti berikut:

$$p(x) = v_0 + (\kappa - \kappa_0) \frac{v_1 - v_0}{\kappa_1 - \kappa_0} \quad (3.42)$$

Dimana:

κ = Input curvature

κ_0 = batas curvature minimal

κ_1 = batas curvature maximal

v_0 = batas kecepatan maximal

v_1 = batas kecepatan minimal

Pada thesis ini mobil bergerak pada sumbu koordinat kartesius, Curvature adalah kelengkungan dari lintasan dimana curvature akan bernilai positive jika lintasan melengkung menuju ke negative. Sedangkan akan bernilai negative jika melengkung nilai sumbu kartesian positive.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini, akan dijelaskan bagaimana percobaan pada tesis ini berdasar hasil yang telah didapat selama proses pengerjaan. Sehingga Dengan adanya proses ini dapat diketahui sampai mana tingkat keberhasilan system yang telah dibuat

4.1 Perangkat dan Lingkungan Uji Coba

Pengujian dilakukan dengan menggunakan simulasi yang menyerupai lingkungan sebenarnya dengan menyesuaikan dengan topik tesis ini. Spesifikasi Komputer, system operasi, dan perangkat pemrograman untuk proses pengujian pada proyek akhir ini ditunjukkan pada Tabel 4.1

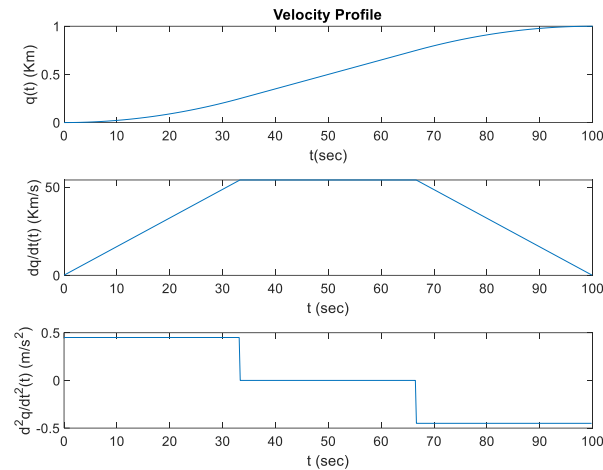
Tabel 4. 1 Spesifikasi perangkat pengujian

No	Deskripsi	Spesifikasi
1	Laptop	Lenovo 3i
2	Kartu Grafis	NVIDIA RTX
3	Sistem Operasi	Windows 11
4	Program	MATLAB 2022

4.2 Pengujian Velocity Profile

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana bentuk dari trapezoid yang diberikan jarak dan waktu tempuh yang berbeda beda. Pada penelitian juga berharap bahwa dapat mengetahui respon dari velocity profile. Velocity profile ini digunakan sebagai referensi mobil pada saat bergerak pada global path. Pada pengujian kali ini penulis akan menggunakan menguji beberapa parameter yang pada velocity profile ini.

Pengujian dengan menggunakan parameter waktu 100 detik dengan jarak 1 Km. Pada pengujian ini akan menghasilkan tiga keluaran yaitu posisi, kecepatan dan percepatan.



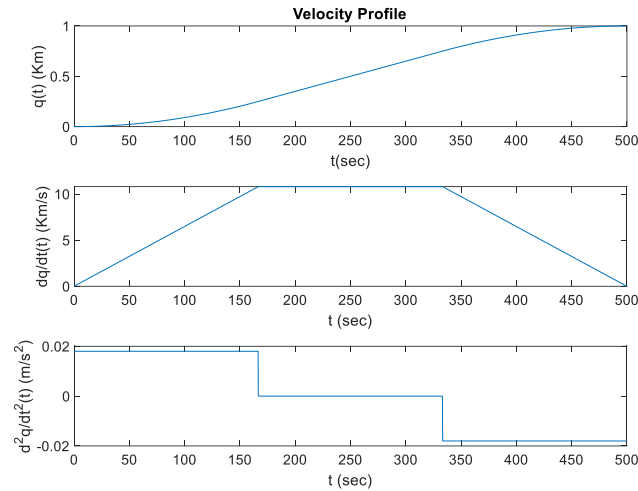
Gambar 4.1 Profil kecepatan dengan waktu 100 detik dan jarak 1 km

Pada gambar 4.1 terlihat bahwa pada grafik paling atas memperlihatkan bahwa posisi berubah dari 0 Km menjadi 100 Km. Pada saat $t=0$ maka posisi juga menunjukkan 0 Km, Lalu berlanjut pada saat $t=50$ jarak menunjukkan 0.5 Km. Pada saat detik ke 100 posisi menunjukkan tepat 1 Km.

Pada grafik tengah terdapat kecepatan. Kecepatan ini akan digunakan untuk simulasi selanjutnya. Dapat dilihat pada gambar 4.1, Gambar tersebut menunjukkan pada saat $t=0$ kecepatan menunjukkan 0 Km/jam lalu berlanjut pada $t=35$ kecepatan terlihat konstan. Kecepatan ini bertujuan untuk menjaga keamanan dan kenyamanan penumpang. Pada saat $t=65$ kecepatan akan menurun sampai pada detik ke 100.

Selanjutnya pada grafik paling bawah, dapat kita lihat bahwa terdapat percepatan yang memiliki rentang 0.5 m/s^2 sampai -0.5 m/s^2 . Percepatan ini akan berubah seiring dengan waktu dimana terdapat percepatan $a=0$ ketika detik ke 35 dan ke 65. Lalu dilanjutkan dengan percepatan bernilai negative pada detik ke 65 sampai detik ke 100.

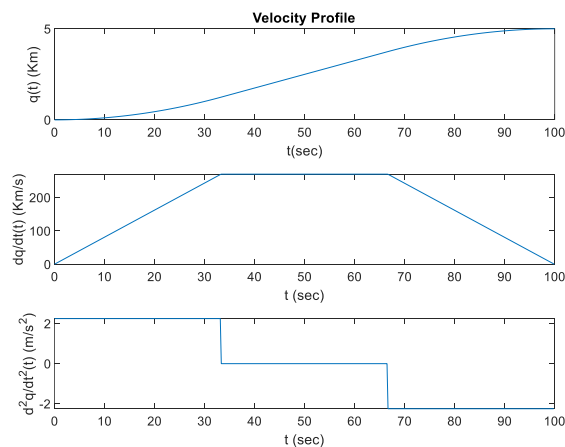
Pengujian dengan parameter waktu 500 detik dengan jarak 1 Km. Percobaan ini akan memiliki figur kecepatan yang berbeda jika dibandingkan dengan sebelumnya



Gambar 4.2 Profil kecepatan dengan waktu tempuh 500 detik dengan jarak 1 Km

Pada pengujian ini memiliki karakteristik yang sama seperti percobaan sebelumnya. Percobaan ini menunjukkan pada grafik paling atas bahwa posisi mengalami perubahan dimana sebelumnya berada tepat 1 Km pada saat $t=100$ namun sekarang berpindah menjadi $t=500$. Begitupun dengan kecepatan, Kecepatan konstan maximal pada bernilai 10 km/jam dimana lebih rendah daripada sebelumnya. Begitu pun juga percepatan dimana percepatan jika dibandingkan dengan gambar 4.1 terdapat pengurangan menjadi 0.02.

Pengujian dengan menggunakan parameter waktu 100 detik dengan jarak 5 Km. Pada pengujian ini akan menghasilkan tiga keluaran yaitu posisi, kecepatan dan percepatan.

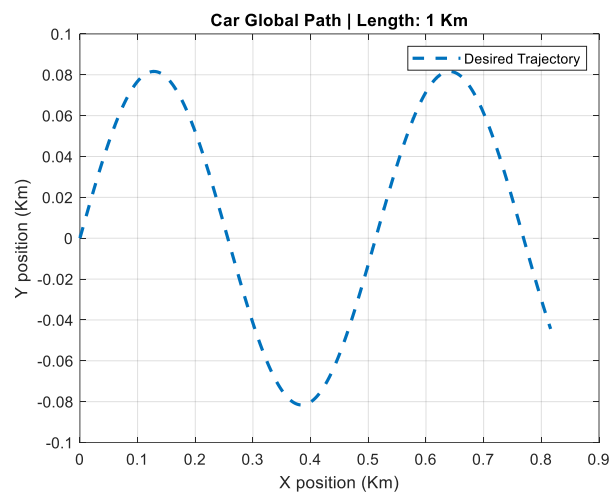


Gambar 4.3 Profil kecepatan dengan waktu tempuh 100 detik dengan jarak 5 Km

Pada percobaan ini menunjukkan pada saat mengubah jarak maka grafik juga akan terpengaruh dimana dengan jarak 5 Km dengan waktu 100 detik, kecepatan mobil akan sangat tinggi yaitu lebih dari 200 Km/jam. Percepatan juga mengalami perubahan dimana menunjukkan nilai 2 m/s^2 . Pada percobaan kali menunjukkan bagaimana jarak dan waktu dapat mempengaruhi kecepatan dengan tetap menjaga bentuk velocity profile.

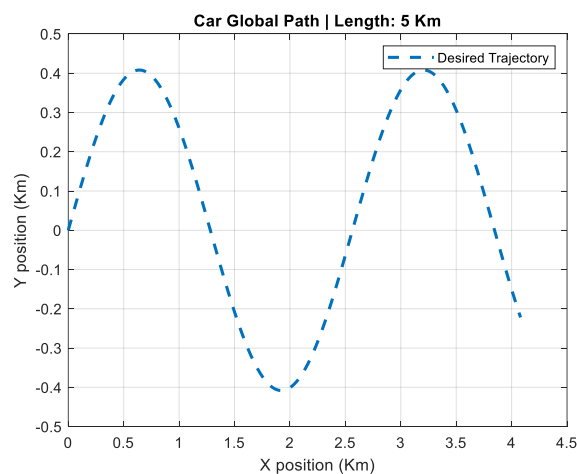
4.3 Pengujian pembentukan global path

Pada global-path dibentuk dengan menggunakan sinus model dengan jarak yang ditentukan.



Gambar 4.4 Global path dengan jarak 1 Km

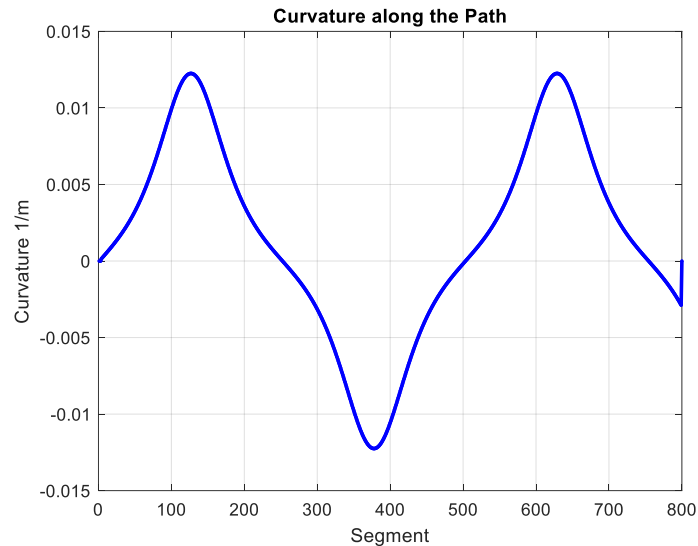
Percobaan iki untuk membuat global path menggunakan model sinus. Panjang sinus ini adalah 1 Km. Penggunaan sinus ini bertujuan melihar dinamika mobil pada saat melewati linstasan yang memiliki tikungan.



Gambar 4.5 Global path dengan jarak 5 Km

Perbedaan gambar 4.5 dengan 4.4 hanya pada panjangnya saja sedangkan bagian lembah dan bukit nya tetap sama. Hal tersebut dapat terjadi karena pemodelan hanya menggunakan scaling untuk memperpanjang lintasan.

4.4 Pengujian pembentukan Curvature



Gambar 4.6 Representasi Curvature

Pada percobaan yang sedang dilakukan, selain menguji kelengkungan dari path yang terbentuk pada subbab 4.3, juga dilakukan pengukuran terhadap curvature. Curvature ini mengacu pada sejauh mana path tersebut melengkung, dan nilainya dapat berkisar antara 0.01225 hingga -0.01225. Penting untuk dicatat bahwa tanda negatif pada curvature menunjukkan bagaimana kelengkungan path terjadi.

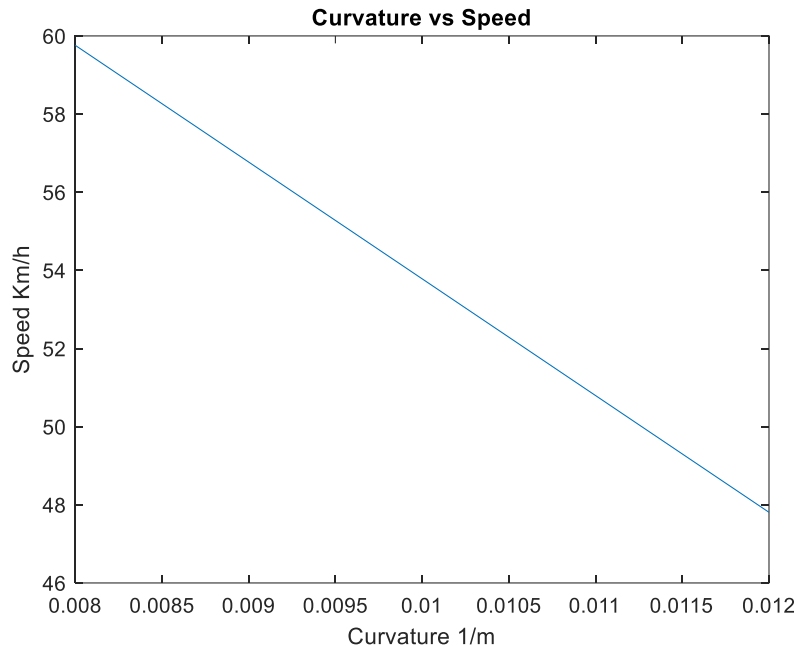
Dalam percobaan ini, jika path melengkung ke arah nilai negatif, maka curvature akan memiliki nilai positif. Sebaliknya, jika path melengkung ke arah nilai positif, maka curvature akan memiliki nilai negatif. Hal ini berkaitan dengan arah dan orientasi path relatif terhadap sumbu koordinat.

Dalam penghitungan curvature pada percobaan ini, path dibagi menjadi 800 segmen. Jumlah segmen ini dapat disesuaikan sesuai dengan kebutuhan eksperimen atau konfigurasi yang digunakan dalam program MATLAB.

Data curvature yang diperoleh nantinya akan digunakan untuk menentukan kecepatan saat melewati tikungan. Dengan memahami kelengkungan path, dapat diambil keputusan mengenai kecepatan yang aman dan sesuai dengan karakteristik tikungan tersebut. Informasi ini sangat berguna dalam mengoptimalkan kecepatan kendaraan dan menjaga kestabilan serta keselamatan dalam menghadapi tikungan.

4.5 Pengujian hubungan curvature dengan kecepatan

Pengujian linearisasi dari hubungan curvature dengan kecepatan.



Gambar 4.7 Hubungan curvature dengan kecepatan

Pada Gambar 4.7, terdapat hubungan yang menunjukkan pola linear terbalik antara kecepatan dan curvature. Pola ini menggambarkan bahwa terjadi penurunan kecepatan saat kendaraan menghadapi tikungan dengan nilai curvature yang besar.

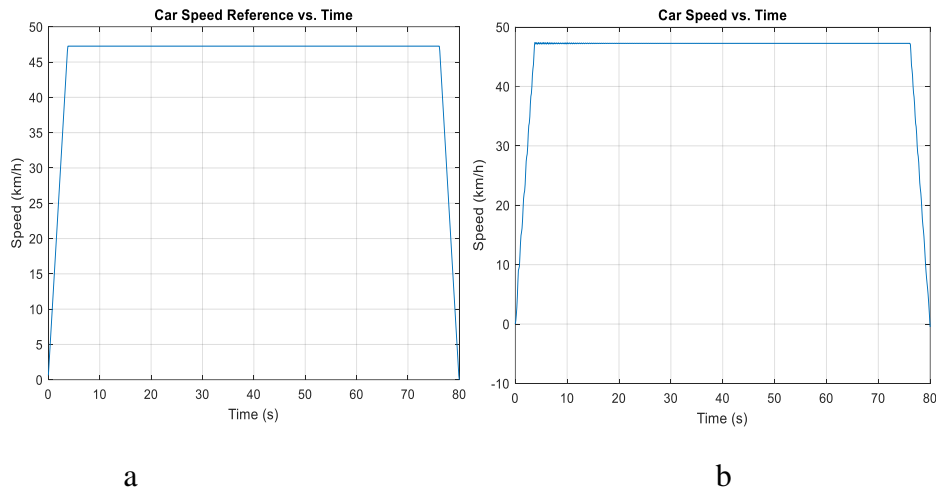
Dalam konteks ini, kecepatan yang diuji adalah sebesar 60 km/jam, yang diasumsikan sebagai batas maksimal kestabilan kendaraan saat berbelok dengan curvature tertentu. Dalam kondisi tersebut, jika kendaraan menghadapi tikungan dengan nilai curvature yang tinggi, kecepatannya akan turun sebesar 20% dari kecepatan awalnya di puncak kelengkungan path.

Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan kendaraan harus disesuaikan secara proporsional dengan nilai curvature tikungan yang dihadapi. Semakin tinggi nilai curvature, semakin besar penurunan kecepatan yang harus dilakukan untuk menjaga kestabilan kendaraan.

4.6 Pengujian kecepatan kontrol PID kecepatan

Pada pengujian bertujuan untuk melihat performa kontrol kendaraan. Aspek keberhasilan dari percobaan ini adalah dimana kecepatan mobil harus dapat mengikuti reference / velocity profile.

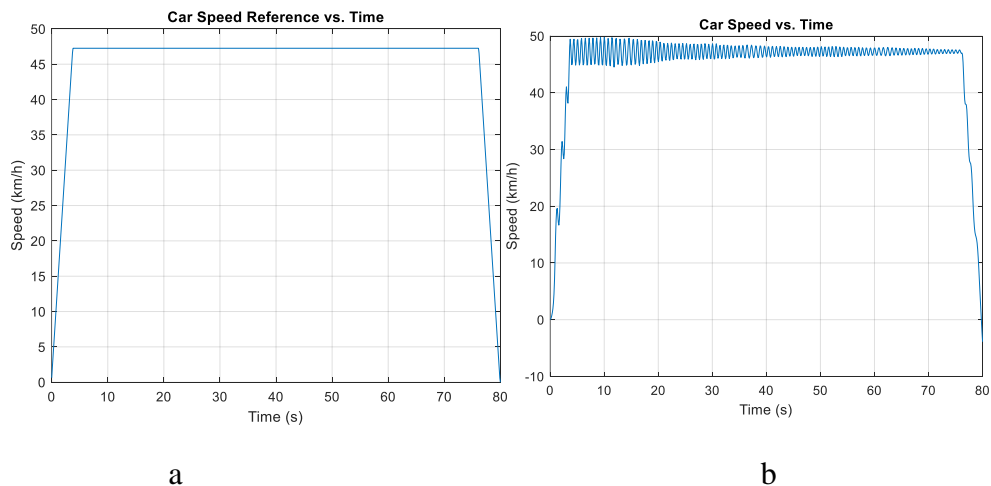
A. Percobaan selanjutnya menggunakan nilai K_p 100, K_i 80



Gambar 4.8 Percobaan kecepatan dengan menggunakan $k_p = 100$, $k_d = 0.1$, $k_i = 80$

Pada gambar 4.8 terlihat bahwa kecepatan dapat mengikuti kecepatan reference dimana ini adalah yang diharapkan. Bagian ini sangatlah penting karena jika tidak dapat mengikuti maka waktu tidak dapat tercapai.

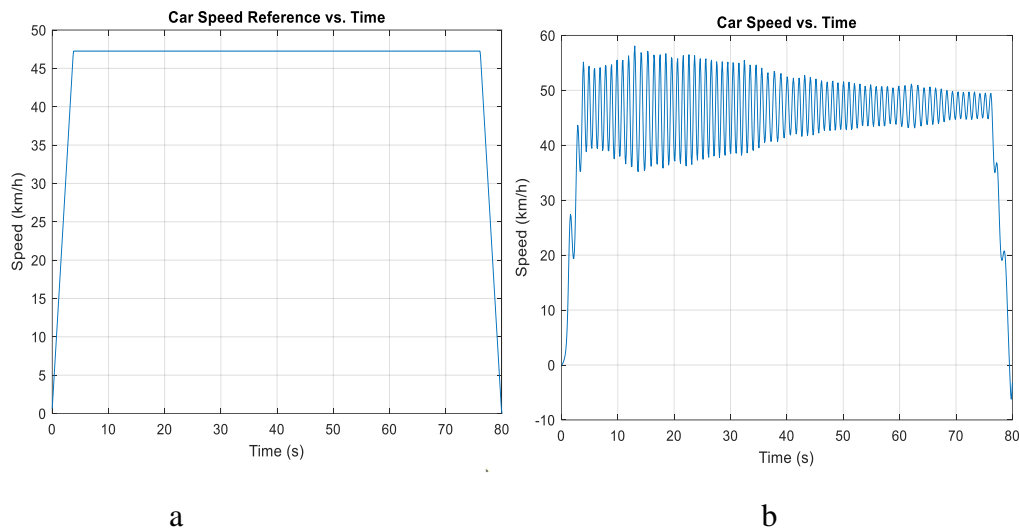
B. Percobaan selanjutnya menggunakan nilai K_p 20, K_i 20



Gambar 4.9 Percobaan kecepatan dengan menggunakan $k_p = 20$, $k_i = 20$.

Pada gambar 4.9 menunjukkan terdapat riak riak atau ketidak rataan pada grafik kecepatan yang dimiliki oleh mobil tersebut. Pada bagian ini seharusnya dapat dihindari dengan menkonfigurasi ulang nilai nilai konstanta PID nya.

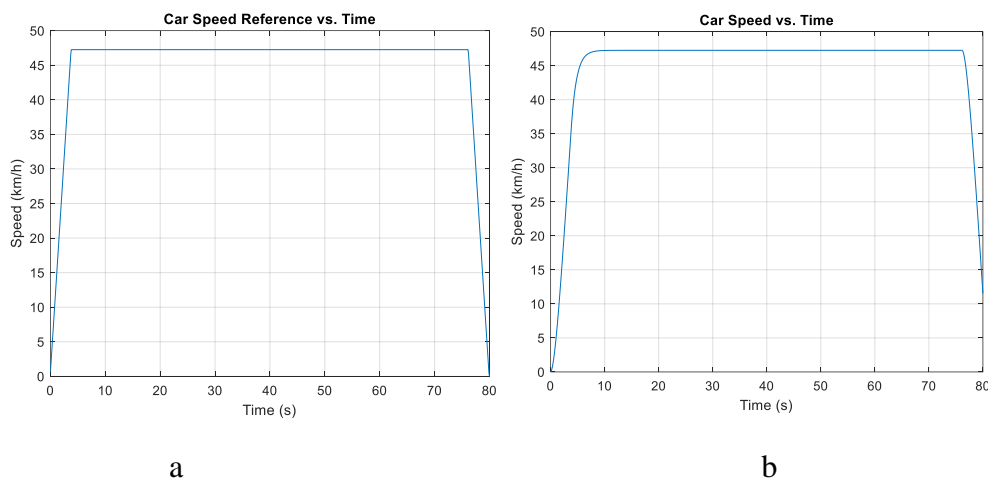
C. Percobaan selanjutnya menggunakan nilai K_p 20, K_i 10



Gambar 4.10 Percobaan kecepatan dengan menggunakan $k_p = 20$, $k_i = 10$.

Pada percobaan ini terlihat bahwa riak akan semakin besar jika nilai konstanta pid semakin kecil.

D. Percobaan selanjutnya menggunakan nilai K_p 1000, K_i 0



Gambar 4.11 Percobaan kecepatan dengan menggunakan $k_p = 1000$, $k_i = 0$.

Percobaan terus dinaikkan sampai menuju ke $K_p = 1000$. Pada percobaan ini dapat diamati bahwa osilasi pada percobaan ini lebih minimal daripada gambar 4.10. Oleh

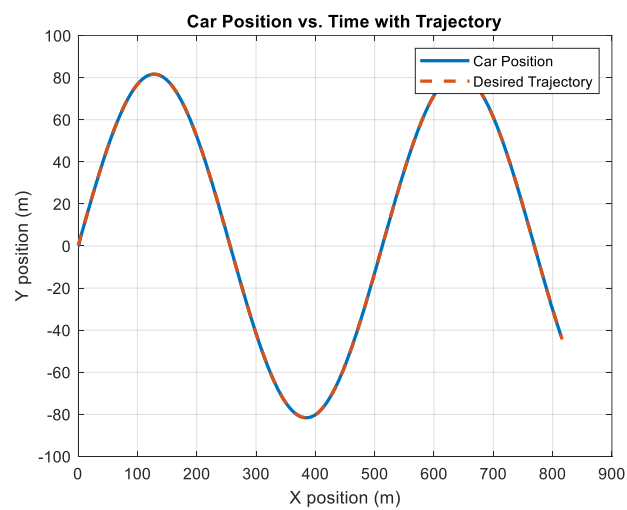
sebab itu dapat disimpulkan bahwa nilai konstanta yang baik pada percobaan kali ini pada gambar 4.11 yang menggunakan $k_p = 1000$, $k_d = 0$, $k_i = 0$.

4.7 Pengujian *Time mission control* dengan tanpa gangguan

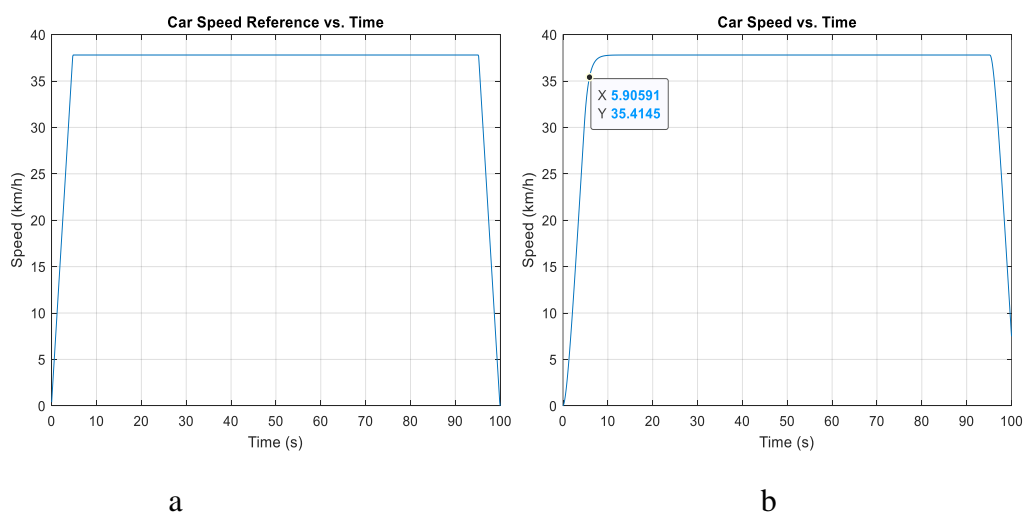
Pada pengujian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana respon mobil pada saat seluruh system telah dirangaki. Dimana pada pengujian ini menggunakan input adalah waktu. Lalu akan diamati kecepatan yang terbentuk pada mobil serta waktu tempuhnya.

Percobaan 1:

Menggunakan waktu sebesar 100 detik dengan jarak 1 km



Gambar 4.12 Percobaan pada performa mobil mengikuti trajectory pada saat menggunakan $T_r = 100$ detik.

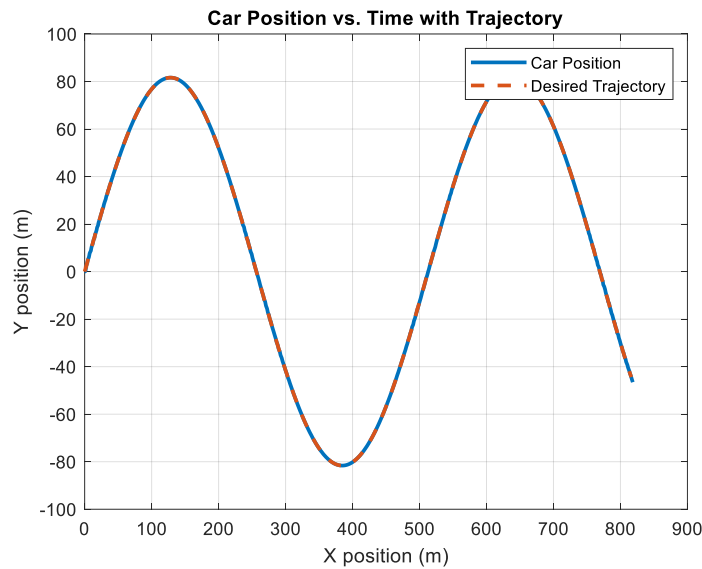


Gambar 4.13 Kecepatan mobil dengan pada saat menggunakan $T_r = 100$ detik

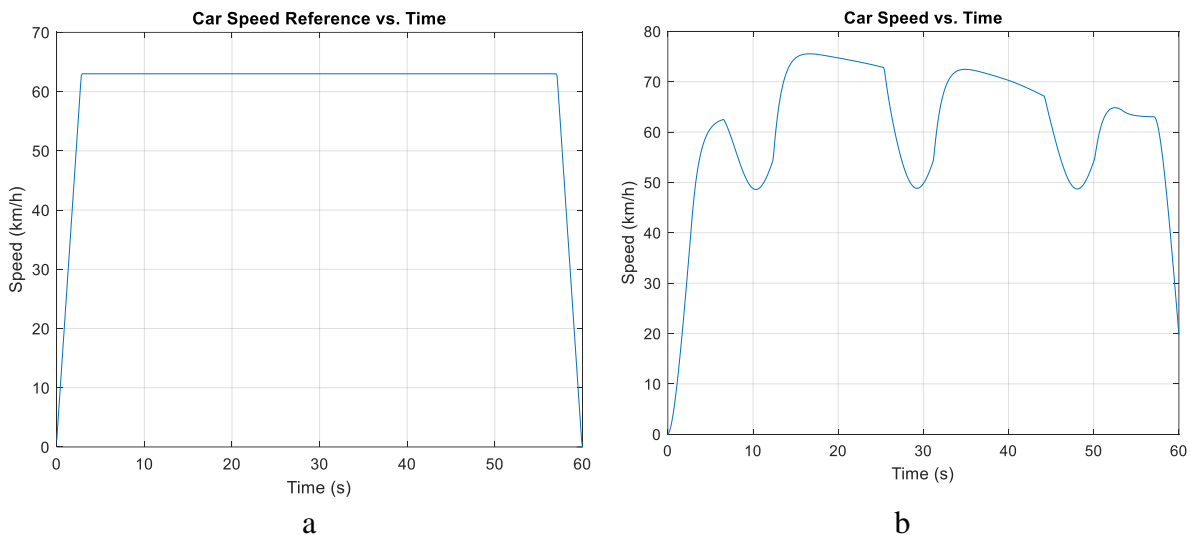
Pada gambar 4.12 dan 4.13 menunjukkan bahwa penggunaan waktu $Tr=100$ performa mobil autonomous telah dapat memenuhi ekspektasi. Rise time pada percobaan ini sebesar 5.9 detik untuk menuju kecepatna 40 km/jam. Kecepatan akan bernilai 0 pada saat $t = 100$. Lalu kita juga dapat mengamati pada gambar 4.12 bahwa posisi mobil akan berakhir pada saat di akhir dari global path.

Percobaan 2:

Menggunakan waktu sebesar 60 detik dengan jarak 1 km



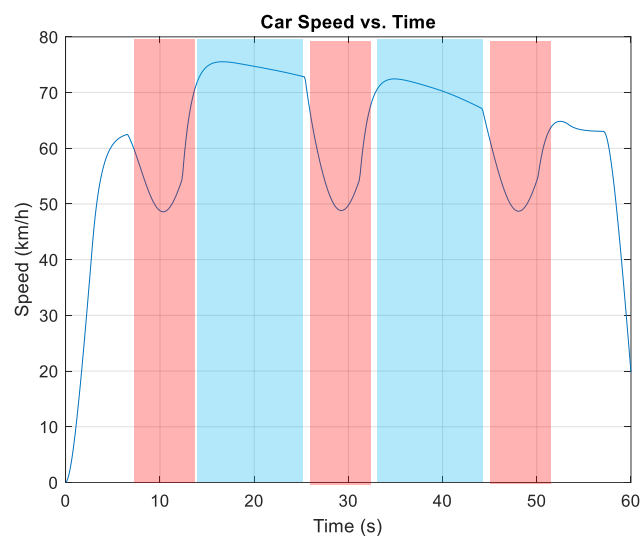
Gambar 4.14 Percobaan pada performa mobil mengikuti trajectory pada saat menggunakan $Tr = 60$ detik



Gambar 4.15 Kecepatan mobil dengan menggunakan $Tr = 60$ detik

Pada percobaan ini menunjukkan bahwa kecepatan referensi gambar 4.15a berbentuk trapezium dimulai adalah 0 sampai waktu akhir adalah 60 detik. Kecepatan maximal adalah 62 km/jam.

Pada gambar 4.15 b, terlihat bahwa detik ke 0 sampai detik ke 7 mengalami akselerasi untuk mencapai kecepatan maximal sesuai dengan kecepatan referensi. Pada detik ke 7 sampai detik ke 18 kecepatan mengalami penurunan akibat dari tikungan tajam dimana nilai curvature tinggi. Pada detik ke 18 sampai detik ke 25 adalah waktu untuk kompensasi waktu dimana kecepatan akan meningkat melebihi dari kecepatan referensi untuk mengejar ketertinggalan waktu akibat dari tikungan tajam.

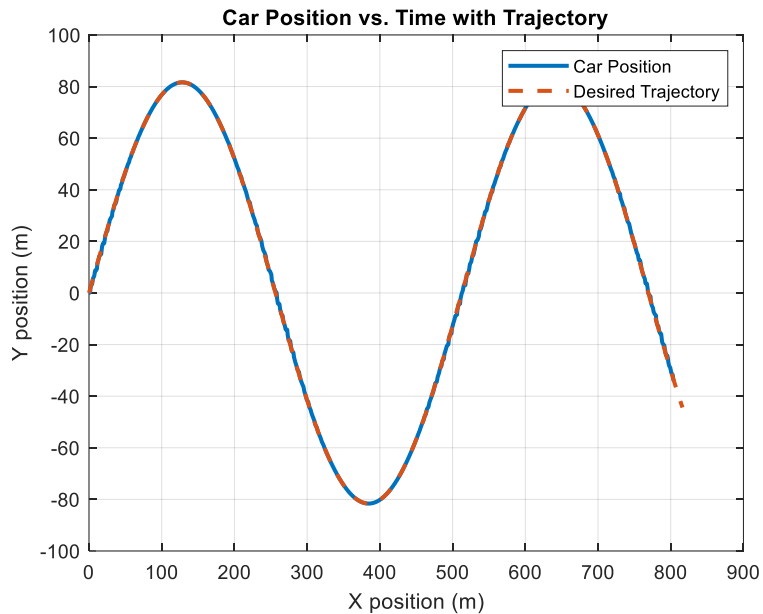


Gambar 4.16 Kecepatan kompensasi dan akibat dari curvature

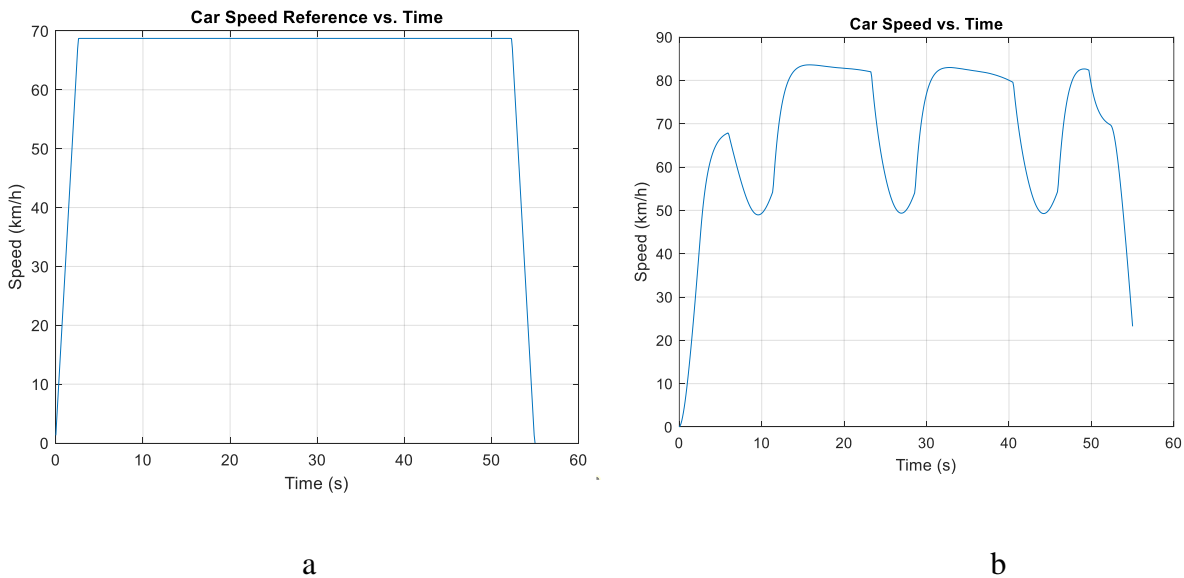
Pada gambar 4.16 terdapat beberapa bagian dimana pada saat kompensasi dengan pada saat menghadapi tikungan. Terdapat block warna merah yang menunjukkan bahwa telah terjadi deserasi akibat dari melewati tikungan. Lalu terdapat block berwarna biru dimana kompensasi kecepatan yang nilainya lebih tinggi dari kecepatan reference karena untuk memenuhi waktu yang telah ditentukan.

Percobaan 3:

Menggunakan waktu sebesar 55 detik dengan jarak 1 km



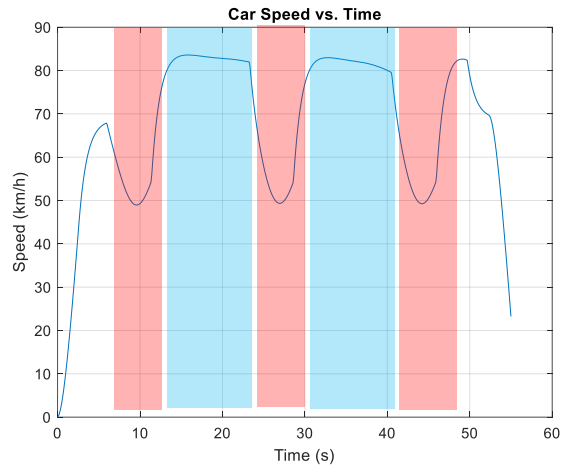
Gambar 4.17 Percobaan pada performa mobil mengikuti trajectory pada saat menggunakan referensi waktu $Tr = 55$ detik



Gambar 4.18 Kecepatan mobil dengan menggunakan $Tr = 55$ detik

Pada percobaan ini menggunakan waktu referensi sebesar 55 detik. Kecepatan maksimal pada gambar 4.18a adalah 68 km/jam. Pada gambar 4.18 adalah representasi kecepatan yang diamati dari pergerakan mobil. Pada detik ke 0 sampai dengan 5 terjadi akselerasi sampai memenuhi kecepatan referensi. Pada detik ke 6

sampai ke 15 terjadi perlambatan karena menghadapi tikungan tajam sedangkan pada detik ke 15 sampai detik ke 25 terjadi kompensasi kecepatan.

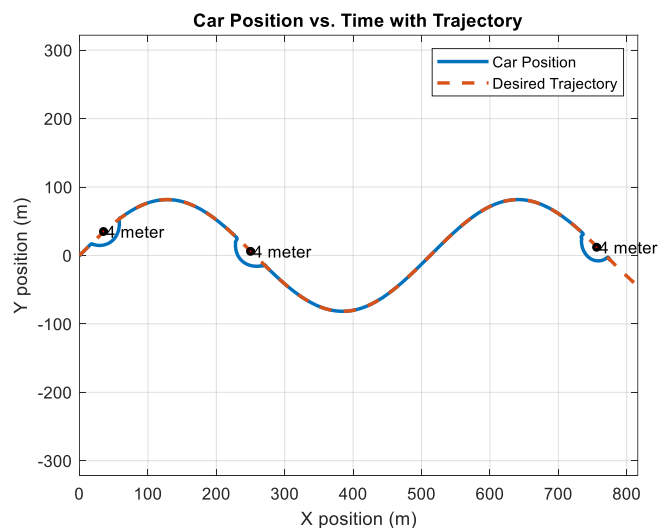


Gambar 4.19 Kecepatan kompensasi dan akibat dari curvature

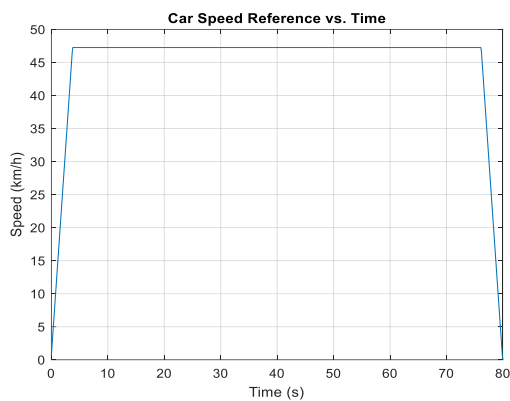
Pada gambar 4.19 terjadi dijelaskan dimana letak percepatan akibat kompensasi dan perlambatan akibat dari mobil melewati tikungan. Pada gambar blok berwarna biru adalah posisi dimana mobil idealnya akan memiliki kecepatan diatas referensi untuk mengkompensasi dari perlambatan yang dilakukan pada blok warna merah.

4.8 Pengujian *Time mission control* dengan gangguan

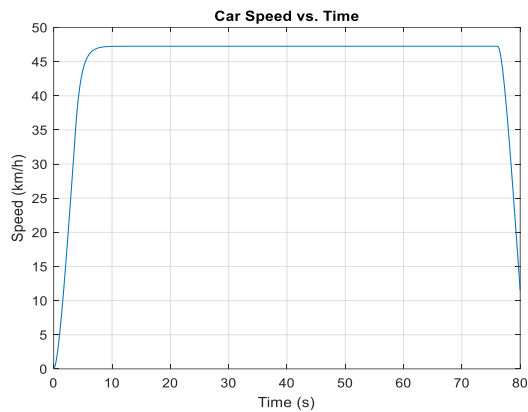
Pada percobaan ini menggunakan teori yang sama seperti sebelumnya dimana menggunakan model global path yang sama namun sekarang pada beberapa titik ditambahkan obstacle yang akan membuat mobil akan mengikuti local path yang terbentuk.



Gambar 4.20 Performa mobil dengan menggunakan dengan gangguan $Tr = 80$ detik



a

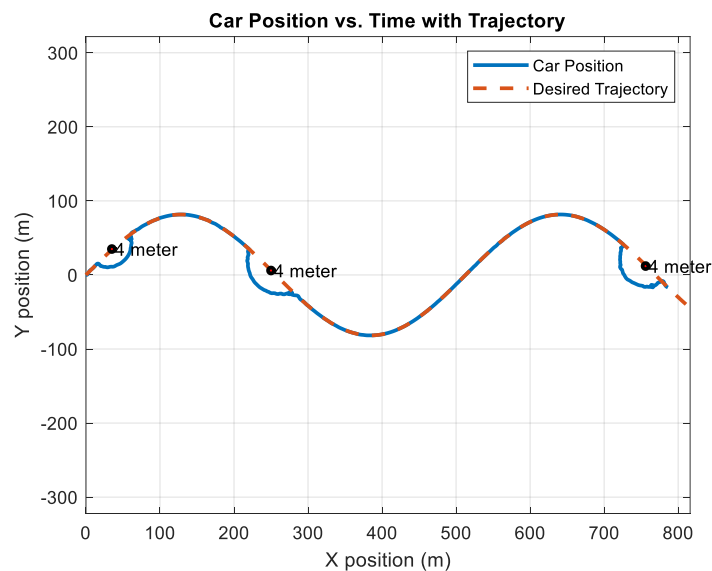


b

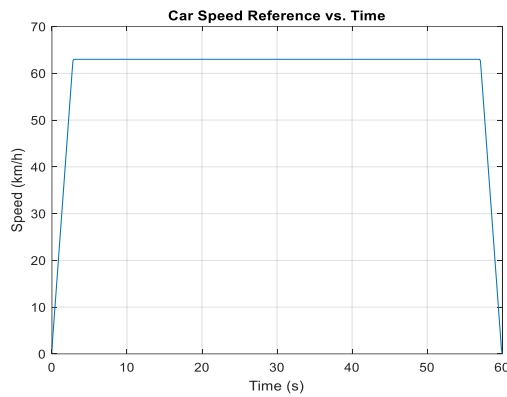
Gambar 4.21 Kecepatan mobil pada saat diberi gangguan dengan $T_r = 80$ detik

Pada gambar 4.21 terlihat bahwa kendaraan dapat menghindari object yang mengganggu. Pada percobaan tersebut terdapat 3 objek yang peneliti tempatkan tepat diatas path. Terlihat bahwa kendaraan tersebut menyimpang dari global path untuk menghindari tabrakan. Kecepatan pada gambar 4.21b tetap menunjukkan bahwa dapat mengikuti reference point yang telah ditentukan dimana kecepatan akan bernilai 0 ketika $t=80$ sesuai dengan referensi.

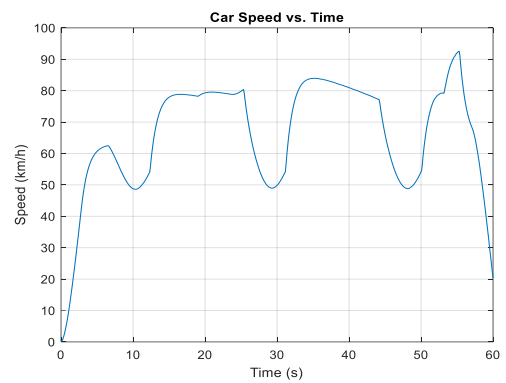
Pada percobaan selanjutnya waktu dipercepat agar mencapai kecepatan yang tinggi agar memenuhi keadaan dynamic. Percobaan dilakukan dengan referensi waktu sebesar 60 detik



Gambar 4.22 Kecepatan mobil pada saat diberi gangguan dengan $T_r = 60$ detik



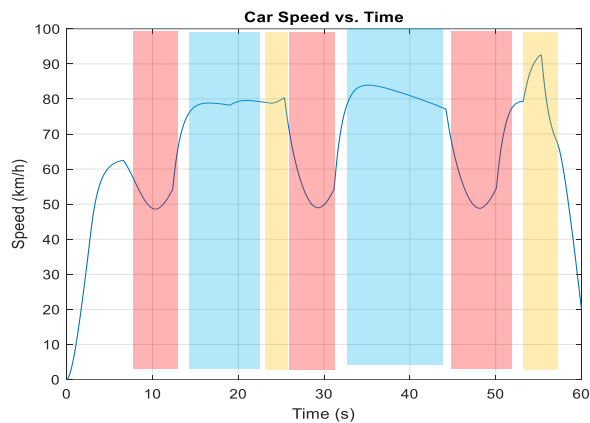
a



b

Gambar 4.23 Kecepatan mobil pada saat diberi gangguan dengan $T_r = 60$ detik

Pada percobaan ini terlihat kecepatan maximal pada gambar 4.23a adalah 65 km/jam dengan rise time 4 detik. Pada gambar 4.23b dapat diamati bahwa kecepatan pada detik ke 0 sampai dengan detik ke 5 mengalami akselerasi sampai mendekati kecepatan referensi. Pada detik ke 5 sampai 18 terjadi perlambatan akibat dari tikungan. Begitu pun seterusnya.



Gambar 4.24 Kecepatan kompensasi dan akibat dari curvature

Pada gambar ini dapat dibandingkan dengan gambar 4.24 dimana diuji dengan parameter sama yaitu menggunakan $T_r = 60$ dengan jarak 1 km. Perbedaannya adalah dimana pada gambar 4.24 terdapat obstacle dimana system harus mengkompensasi lebih banyak. Dapat terlihat pada blok berwarna kuning adalah tempat dimana kompensasi kecepatan terhadap obstacle. Untuk mendahului maka terjadi peningkatan kecepatan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN

Hasil eksperimen ini mengungkapkan bahwa kendaraan menunjukkan performa yang mengesankan dengan mencapai tujuan yang ditentukan dalam batasan waktu tertentu. Untuk memenuhi batasan waktu yang ketat ini, kendaraan secara dinamis menyesuaikan kecepatannya sepanjang trajektori. Kontrol kecepatan yang dinamis ini memungkinkan kendaraan mengoptimalkan gerakannya dan menjaga kecepatan yang sesuai dengan batasan waktu yang telah ditentukan. Meskipun secara umum kendaraan berhasil mencapai tujuan dalam jangka waktu yang ditentukan, masih ada ruang untuk perbaikan. Aspek penting yang perlu diperhatikan adalah mengurangi kesalahan profil kecepatan antara trajektori referensi dan kinerja nyata kendaraan selama pengujian. Kesalahan profil kecepatan mengindikasikan perbedaan antara profil kecepatan ideal yang ditetapkan oleh trajektori referensi dan kecepatan sebenarnya kendaraan saat melintasi trajektori.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ling Zheng, Pengyun Zeng, Wei Yang, Yinong Li, Zhenfei Zhan ,“Bezier Curved-Based trajectory planning for autonomous vehicle with Collision Avoidance”, Intelligent Transport Systems Journal, 2020.
- [2] Y. Mizhusima, I.Okawa dan K.Nokana , “Model Predictive Control for Autonomous Vehicle with speed Profile Shaping”. International Federation of Automatic Control (IFAC), 2019
- [3] Mohan Reddy Rajanna , “Real-Time Trajectory and Velocity Planning for Autonomous Vehicles”, International Journal of Engineering and Advance Technology, 2021
- [4] Hu Hongyou, Zhang Chi, Sheng Yuhuan, Zhou Bin, Gao Fei,“An Improved Artificial Potential Field Model Considering Vehicle Velocity for Autonomous Driving”, International Federation of Automatic Control, 2018
- [5] B. Mashadi dan M. Majidi , “Global optimal path planning of an autonomous vehicle for overtaking a moving obstacle” Latin America Journal of Solids and Structure, 2014
- [6] Jin-Kai Yin, dan Wei ping. , “A Safety Navigation Method Integrating Global Path Planning and Local Obstacle Avoidance for Self-Driving Cars in dynamic Environment ” Scientia Iranica International Journal Science dan Teknologi, 2020
- [7] Miranda Elias dan Dorio Cerezo. , “Modelling and Simulation of Autonomous Vehicle in A Multi-Lane and Heterogeneous Traffic” Universitat Politecnica de Catalunya, 2019
- [8] Ahmed El Mahdawy dan EL Mougy. , “Path Planning for Autonomous Vehicle with Dynamic Lane Mapping and Obstacle Avoidance” International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART), 2021
- [9] Trieu Minh Vu, Reza Moezzi, Jindrich Cyrus, dan Jaroslav Hlava , “Model Predictive Control Autonomous Driving Vehicle”, MDPI, 2021

- [10] Seiung-Hi Lee dan Chung Choo Chung , “Predictive Control with Sliding mode for Autonomous Driving Vehicle Lateral Maneuvering”, American Control Conference, 2017
- [11] Randerson Arujo de lamos, Olmer garcia, Janito Vaquerio Fereira, “Local and Global Path Generation for autonomous Vehicle Using Splines”, Workshop on Engineering Applications-International Congress on Engineering (WEA), 2015