

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKILLI ARAÇLAR KAPSAMINDA İLERİ SÜRÜŞ DESTEK
SİSTEMLERİNDE SENSÖR FÜZYONU**

DOKTORA TEZİ

İlker ALTAY

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Mühendisliği Programı

EYLÜL 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKILLI ARAÇLAR KAPSAMINDA İLERİ SÜRÜŞ DESTEK
SİSTEMLERİNDE SENSÖR FÜZYONU**

DOKTORA TEZİ

**İlker ALTAY
(503072015)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bilin AKSUN GÜVENÇ

EYLÜL 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503072015 numaralı Doktora Öğrencisi **İlker ALTAY**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**AKILLI ARAÇLAR KAPSAMINDA İLERİ SÜRÜŞ DESTEK SİSTEMLERİNDE SENSÖR FÜZYONU**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Bilin AKSUN GÜVENÇ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Erdinç ALTUĞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Elbrus CAFEROV
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Haluk KÜÇÜK
Marmara Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Erkin DİNÇMEN
Işık Üniversitesi

Teslim Tarihi : **12 Ağustos 2014**
Savunma Tarihi : **22 Eylül 2014**

Anne ve babama,

ÖNSÖZ

Otonom araçlar konusu birkaç yıl öncesine kadar otomotiv sektörünün gelmek istediği belki de uç noktalardan birisi gibi gözükdü. Hayali kurulan şey bugün gerçekleşmek üzere görünüyor. 2020’li yıllarda yollarda kendi kendine giden araçların piyasaya sürülmesi hedefleniyor. İleri Sürüş Destek Sistemleri de otonom araçlara giden yolun ön basamağını oluşturuyor. Bu tezin otonom araçlar ve sürüş destek sistemleri konusunda çalışan akademisyen, öğrenci ve otomotiv sektörü çalışanlarına yol göstermesini umuyorum.

Bu tez çalışmasındaki değerli yönlendirmesi için öncelikle danışmanım Prof. Dr. Bilin Aksun Güvenç’e teşekkür ederim. Tez çalışmalarım sırasındaki tavsiyeleri ve katkıları için Prof. Dr. Levent Güvenç’e teşekkür ederim.

Tezimin ilerlemesi aşamasında karşılaştığım zorluklarda desteklerini ve dostluklarını esirgemeyen Mekar takımı üyelerine özellikle İsmail Meriç Can Uygan, Tolga Emirler ve meslektaşım Araş. Gör. Cihat Bora Yiğit’e, arkadaşlarım Mesut Acar, Çağatay Çakır’a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Akademik yaşamım boyunca beni hep desteklemiş olan aileme en içten sevgilerimle..

Eylül 2014

İlker ALTAY
(Makina Yüksek Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
SEMBOL LİSTESİ.....	xxi
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması	1
1.2 Doktora Tezinin Özgünlüğü.....	4
2. SÜRÜCÜLERİN SÜRÜŞ ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ	7
2.1 Amaç	7
2.2 Marjinal Dağılım Analizi	8
2.3 Standart Sapma.....	19
3. LİDAR VERİ ANALİZİ İLE ÖNDEKİ ARACI TAKİP SÜRESİNİN BELİRLENMESİ	23
3.1 Lidar Veri İşleme	23
3.2 CAN Veriyolu-Fren ve Gaz Pedal Basıncı ile Lidar Örnekleme Zamanlarının Eşitlenmesi.....	24
3.3 Sürücü Karakteristiğinin Tespiti	25
3.4 Takip Süresinin Belirlenmesi	28
3.5 GPS Verisini Alma (Belirli Enlem Boylam İçin).....	31
3.5.1 Çevre yolunda THW verisi incelemesi	32
3.5.2 Sıkışık trafikte THW incelemesi	33
3.5.3 Yol sınırlarını belirleme	34
3.6 Segmentasyon Yöntemleri	35
3.6.1 Kafes temelli segmentasyon yöntemi	35
3.6.2 Nokta mesafe temelli segmentasyon yöntemi.....	36
3.7 Kalman Filtresi ile Tespit Edilen Aracın Takibi	37
3.7.1 Araç dinamik durumu	37
3.7.2 Ön tahmin.....	39
3.7.3 Kestirim.....	39
3.7.4 Ölçüm yenileme (güncelleme)	40
3.7.5 Kalman filtresi ile araç takibi sonuçları	40
3.7.6 Seçilen sürücüler için çevreyolu THW incelemesi	43
3.7.7 Farklı grafik denemeleri.....	47
4. ADAPTİF SEYİR KONTROLCÜSÜNÜN İSTANBUL TRAFİĞİNDE TESTİ	49
4.1 Giriş.....	49
4.2 Araç Modellemesi	50

4.3 Motor Ve Güç Aktarma Sistemi Modeli	52
4.4 Fren Sistemi Modeli	52
4.5 ASK Kontrol Algoritması.....	54
4.6 Üst Seviye Kontrolcü Tasarımı	55
4.7 Alt Seviye Kontrolcü Tasarımı.....	58
4.8 ASK Test Sonuçları	58
4.9 Farklı Sürücüler için ASK Test Sonuçları.....	61
4.10 Carsim Test Sonuçları	62
5. ASK/KASK VE YOS SİSTEMLERİNDE KULLANIM İÇİN GPS/INS	
ENTEGRASYONU ÇALIŞMASI.....	65
5.1 Giriş	66
5.2 Ataletsel Ölçüm Sensörü	68
5.2.1 Ataletsel ölçüm Sensörü (IMU)	68
5.2.2 Rotasyon matrisinin matematiksel çıkarımı	70
5.2.3 Rotasyon matrisi (DCM matrisi) türevinin matematiksel çıkarımı.....	72
5.2.4 INS hız denkleminin matematiksel çıkarımı	74
5.2.5 INS mekanizasyon denklemleri	76
5.2.6 Ayrıklaştırılmış INS mekanizasyon denklemleri	78
5.2.6.1 Adım 1	79
5.2.6.2 Adım 2 (opsiyonel).....	81
5.2.6.3 Adım 3	81
5.2.6.4 Adım 4.....	82
5.2.7 Euler denklemleri	83
5.2.8 DCM Phuong denklemleri	83
5.2.9 Quaternion denklemleri.....	85
5.3 GPS Küresel Konumlandırma Sistemi	87
5.4 GPS/INS Entegrasyonu	87
5.4.1 Gevşek bağlı açık ve kapalı döngü entegrasyon	87
5.4.2 Genişletilmiş Kalman filtresi	88
5.4.3 Navigation eksenli hata denklemleri	89
5.4.3.1 Ön tahmin	90
5.4.3.2 Kestirim	91
5.4.3.3 Ölçüm yenileme (düzeltme)	91
5.4.4 INS algoritmasının başlatılması	93
5.4.5 Dışarıdan savrulma açısı beslemesi.....	94
5.4.6 Dış hız beslemesi.....	95
5.4.7 GPS'ten farklı frekansta dış hız beslemesi.....	96
5.4.8 Kaldıraç kolu etkisi	97
5.4.9 GPS ile IMU'nun örnekleme zamanlarının çakışmama durumu	98
5.4.10 Manyetik pusula	99
5.5 Carmaker Simülasyonları	100
5.5.1 GPS/INS kapalı sistem entegrasyona gürültü etkisi.....	102
5.5.2 GPS/INS kapalı entegrasyona farklı örnekleme frekansı ve viraj etkisi .	104
5.5.3 Kovaryans etkisi	107
5.5.4 Tekerlek hızlarından savrulma açısı eldesi	107
5.5.5 Carmaker ile düzlemsel deney sonuçları	108
5.6 Referans Sensör ile Deneysel Sonuçlar	110
5.6.1 Deneysel INS rotasyon testleri	111
5.6.1.1 Savrulma (yaw) açısı testi	112
5.6.1.2 Yuvarlanma (roll) açısı testi	113

5.6.1.3 Yunuslama (pitch) açısı testi.....	114
5.6.2 Deneysel GPS/INS entegrasyon testleri.....	115
5.6.2.1 DCM.....	115
5.6.2.2 DCM Phuong manyetik pusula beslemesi	119
5.6.2.3 DCM Phuong GPS 4 Hz	120
5.6.2.4 DCM Phuong yöntemiyle farklı frekansta savrulma açısı beslemesi....	122
5.6.2.5 DCM yöntemiyle farklı frekansta savrulma açısı beslenmesi.....	123
5.6.2.6 DCM yöntemiyle farklı frekansta araç hızı beslenmesi.....	125
5.6.2.7 GPS kesintisi durumunda GPS/INS entegrasyon sonuçları	126
5.6.2.8 IMU ile odometre sensörlerinin birleştirilmesi	127
DCM.....	127
5.6.2.9 3D – 2D GPS/INS entegrasyon karşılaştırması	129
DCM.....	129
DCM Phuong	130
5.6.3 2D INS DCM entegrasyon denklemleri.....	131
5.6.3.1 2D INS denklemleri 1. Matematiksel çıkarım	131
5.6.3.2 2D INS denklemleri 2. matematiksel çıkarım.....	135
5.6.4 GPS/INS açık-kapalı entegrasyon.....	138
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	139
KAYNAKLAR	141
EKLER.....	145
ÖZGEÇMİŞ.....	151

KISALTMALAR

ABS	: Fren Antipatinaj Sistemi
TCS	: Çekiş Kontrol Sistemi
ESP	: Elektronik Stabilite Sistemi
THW	: Takip Süresi
İSDS	: İleri Sürüş Destek Sistemi
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
GPS	: Küresel Konumlandırma Sistemi
Lidar	: Lazer Ölçüm Sensörü
IMU	: Ataletsel Ölçüm Sensörü
AHRS	: Yönelim Açısı Referans Sistemi
INS	: Ataletsel Navigasyon Sistemi
ECEF	: Dünya Merkezli Dünyaya Sabitlenmiş Eksen
ECI	: Dünya Merkezli Atalet Ekseni
NED	: Kuzey Doğu Aşağı
DCM	: Yönelim Kosinüs Matrisi
KF	: Kalman Filtresi
EKF	: Genişletilmiş Kalman Filtresi
HAD	: Yüksek Otonom Sürüş
V2V	: Araçtan Araca İletişim
V2I	: Araçtan Yapıya İletişim
ASK	: Adaptif Seyir Kontrolü
KASK	: Kooperatif Adaptif Seyir Kontrolü
YOS	: Yüksek Otonom Sürüş

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Farklı sürücüler için standart sapmalar.	20
Çizelge 3.1 : Çevreyolu THW parametresi için sürücü istatistikleri	45
Çizelge 3.2 : Şehiriçi yolda THW parametresi için sürücü istatistikleri	47
Çizelge 4.1 : THW parametresi için sürücü istatistikleri	62
Çizelge 5.1 : Farklı frekanslarda GPS/INS entegrasyonu simülasyon zamanları ..	107
Çizelge 5.2 : DCM, DCM Phuong, Euler ve Quaternion INS karşılaştırması	111
Çizelge 5.3 : DCM ve DCM Phuong GPS/INS karşılaştırması	115

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Uyanık aracı ve araca yerleştirilmiş sensörler.....	7
Şekil 2.2 : Uyanık aracının enlem boylam ekseninde rotası.....	8
Şekil 2.3 : Direksiyon açısı histogramları.	9
Şekil 2.4 : Direksiyon açısı histogramlarına yakından bakış.....	10
Şekil 2.5 : Fren pedalı basıncı histogramları.	11
Şekil 2.6 : Fren pedal basıncı histogramlarına yakından bakış.	12
Şekil 2.7 : Gaz pedal açısı yüzdesi histogramları.	13
Şekil 2.8 : Gaz pedal basıncı histogramları.	14
Şekil 2.9 : Direksiyon açısı frekans spektrumları.	15
Şekil 2.10 : Direksiyon açısı frekans spektrumlarına yakından bakış.	16
Şekil 2.11 : Fren basıncı frekans spektrumları.	17
Şekil 2.12 : Fren basıncı frekans spektrumları.	18
Şekil 2.13 : Gaz pedal açısı yüzdesi frekans spektrumları.	19
Şekil 2.14 : Farklı sürücüler için ilgili standart sapmalar.....	21
Şekil 3.1 : Lidar verisi çizim örnekleri.	23
Şekil 3.2 : Araç hızı, fren basıncı, ön araç mesafe verisi ile araç hızına bağlı ön araç mesafesi grafiği.....	24
Şekil 3.3 : Araç hızına bağlı ön araç mesafesi ile sürücü karakteristiği çıkarımı.....	25
Şekil 3.4 : Ön araç mesafesinin araç hızına bağlı grafiği.	26
Şekil 3.5 : Ön araç mesafesinin araç hızına bağlı verilerinde lokal minimumlar.....	26
Şekil 3.6 : IM1083 kodlu sürücü için yerel minimumlar ile ön araç mesafesi-arac hızı grafiğinin birleştirilmesi.	27
Şekil 3.7 : IM1088 kodlu sürücü için yerel minimumlar ile ön araç mesafesi-arac hızı grafiğinin birleştirilmesi.	27
Şekil 3.8 : İki farklı sürücü için yerel minimum (soldaki şekil) ve yerel minimumun yerel minimumu (sağdaki şekil) grafikleri.	28
Şekil 3.9 : Bağlı mesafe ve araç hızının gösterimi.	28
Şekil 3.10 : THW parametresinin araç hızına bağlı değişimi.	29
Şekil 3.11 : THW parametresinin araç hızına bağlı değişimi.	30
Şekil 3.12 : THW parametresi değişimine yakından bakış.....	30
Şekil 3.13 : THW parametresi değişimine yakından bakış.....	31
Şekil 3.14 : Uyanık aracının E80 çevreyolundaki rotası.	31
Şekil 3.15 : Çevreyolu üzerinde THW parametresinin incelenmesi.....	32
Şekil 3.16 : Çevreyolunda Kalman Filtresi ile THW parametresi incelemesi.....	33
Şekil 3.17 : THW parametresinin sıkışık trafikte incelenmesi.	33
Şekil 3.18 : Uyanık aracı lazer taraması.	34
Şekil 3.19 : Tespit edilen nesnelerin x koordinatının frekansı.	34
Şekil 3.20 : Uyanık aracının ön taramasının kafes temelli gösterimi.	35
Şekil 3.21 : Lazer taraması ve bazı parametrelerin şematik gösterimi [19].	36
Şekil 3.22 : Kalman filtresi algoritması.	39
Şekil 3.23 : Tespit edilen nesnelerin x koordinatının frekansı.	41

Şekil 3.24 : Nesne tespiti ve nesne numarası atanması.....	42
Şekil 3.25 : Tespit edilen nesnelerin 5 sn izlenmesi.	42
Şekil 3.26 : Seçilmiş on altı sürücünün çevreyolu THW histogramı.....	44
Şekil 3.27 : Seçilmiş on altı sürücünün şehiriçi yolda THW histogramı.....	46
Şekil 3.28 : THW, araç hızı ve bağıl mesafe grafiği.....	47
Şekil 3.29 : THW, araç hızı, fren pedal basıncı grafiği.	48
Şekil 3.30 : Araç hızına bağlı fren ve gaz pedal basıncı grafiği.	48
Şekil 4.1 : Normalize motor haritası.	52
Şekil 4.2 : Otonom araç fren sistemi blok diagramı.	53
Şekil 4.3 : Mekar aracının simulink modeli.....	54
Şekil 4.4 : Lider ve takipçi araç.	55
Şekil 4.5 : ASK kontrolcü seviyeleri.	55
Şekil 4.6 : Fren ve gaz değişim durum akış diyagramı.....	58
Şekil 4.7 : Normalize ters motor tablosu.	58
Şekil 4.8 : Lider ve takipçi araç konumları.....	59
Şekil 4.9 : Lider ve takipçi araç hızları.	60
Şekil 4.10 : THW = 1 sn değişim grafiği.	61
Şekil 4.11 : THW = 0.6 sn değişim grafiği.	61
Şekil 4.12 : Carsim’de ASK ile araç takibinden bir görünüm.	63
Şekil 4.13 : ASK Carsim Simulink blok diagramı.....	63
Şekil 4.14 : Carsim’de Mekar Takımı aracının ASK kontrolcüsü.....	64
Şekil 4.15 : Carsim Lider ve Takipçi Araç Hızları.	64
Şekil 5.1 : GCDC yarışmasına katılan Mekar aracı (sol şeritte).....	67
Şekil 5.2 : Okan Üniversitesi Okanom aracı ile otonom patika izleme.	68
Şekil 5.3 : ECI, ECEF, navigasyon ve araç ekseninin gösterimi.....	69
Şekil 5.4 : Navigasyon eksenini ile araç eksenini arası ilişki [43].....	70
Şekil 5.5 : Soldan sağa sırasıyla savrulma, yunuslama ve yuvarlanma açısı rotasyonu [43].....	70
Şekil 5.6 : Referans eksenini [46].	74
Şekil 5.7 : Yerçekimi kuvveti bileşenleri [46].	75
Şekil 5.8 : Gevşek bağlı açık döngü sistem blok diagramı.	88
Şekil 5.9 : Gevşek bağlı kapalı döngü sistem blok diagramı.	88
Şekil 5.10 : Kalman Filtresi algoritması.	89
Şekil 5.11 : GPS ile IMU sensörleri arası konum farkı.	97
Şekil 5.12 : GPS ve IMU örnekleme frekansları.	98
Şekil 5.13 : Manyetik kuzey ile gerçek kuzey.	99
Şekil 5.14 : Google Earth programında Hockenheim rotası.	100
Şekil 5.15 : Hockenheim rotasının enlem ve boylam olarak grafiği.	101
Şekil 5.16 : Carmaker’dan Matlab Aerospace bloksetine gelen veri.	101
Şekil 5.17 : Carmaker’dan gelen GPS verisi.	102
Şekil 5.18 : Tam Hockenheimer rotasında GPS/INS ve GPS karşılaştırması.	102
Şekil 5.19 : GPS/INS entegrasyonu ile GPS rotası boşluklarını doldurma.	103
Şekil 5.20 : Gürültü ve sapma eklenmiş GPS/INS simülasyonu.	103
Şekil 5.21 : Gürültünün GPS/INS entegrasyonuna etkisi.	104
Şekil 5.22 : IMU 100 Hz – GPS 10 Hz frekansta GPS/INS ve GPS karşılaştırması	105
Şekil 5.23 : IMU 10 Hz – GPS 10 Hz frekansta GPS/INS ve GPS karşılaştırması.	105
Şekil 5.24 : IMU 100 Hz – GPS 1 Hz frekansta GPS/INS ve GPS karşılaştırması.	106
Şekil 5.25 : IMU 10 Hz – GPS 1 Hz frekansta GPS/INS ve GPS karşılaştırması..	106
Şekil 5.26 : Savrulma açısı.	108

Şekil 5.27 : Düz yolda 3D ile 2D DCM GPS/INS entegrasyonu karşılaştırması. ...	108
Şekil 5.28 : Virajlı yolda 3D ile 2D DCM GPS/INS entegrasyonu karşılaştırması.	109
Şekil 5.29 : 20° eğimli yolda 3D ile 2D DCM GPS/INS entegrasyonu karşılaştırması.	109
Şekil 5.30 : Referans sensör.	110
Şekil 5.31 : Savrulma açısının zamana bağlı değişimi.	112
Şekil 5.32 : Savrulma açısının referans sensöre göre bağlı hatası.	112
Şekil 5.33 : Yuvarlanma açısının zamana bağlı değişimi.	113
Şekil 5.34 : Yuvarlanma açısının referans sensöre göre bağlı hatası.	113
Şekil 5.35 : Yunuslama açısının zamana bağlı değişimi.	114
Şekil 5.36 : Yunuslama açısının referans sensöre göre bağlı hatası.	114
Şekil 5.37 : Araç rotası.	116
Şekil 5.38 : DCM ve referans GPS/INS entegrasyonu sonuçları karşılaştırması. ...	116
Şekil 5.39 : DCM GPS/INS entegrasyonu ile referans arası bağlı konum hataları.	117
Şekil 5.40 : DCM ve referans rotasyon açıları karşılaştırması.	117
Şekil 5.41 : DCM ve referans rotasyon açıları karşılaştırması.	118
Şekil 5.42 : DCM ve referans sensörünün rotasyon açıları ve dönüşte pusula hatası karşılaştırması.	118
Şekil 5.43 : DCM Phuong GPS/INS yöntemi ve referans sonuçları karşılaştırması.	119
Şekil 5.44 : DCM Phuong GPS/INS yöntemi ile referans arası bağlı konum hataları karşılaştırması.	119
Şekil 5.45 : DCM Phuong ve referans rotasyon açıları karşılaştırması.	120
Şekil 5.46 : DCM Phuong GPS/INS yöntemi ve referans sonuçları karşılaştırması.	121
Şekil 5.47 : DCM Phuong GPS/INS yöntemi ile referans arası bağlı konum hataları karşılaştırması.	121
Şekil 5.48 : DCM Phuong ve referans rotasyon açıları karşılaştırması.	122
Şekil 5.49 : DCM Phuong GPS/INS yöntemi ve referans sonuçları karşılaştırması.	123
Şekil 5.50 : DCM Phuong ve referans rotasyon açıları karşılaştırması.	123
Şekil 5.51 : Manyetik pusuladan 20 Hz savrulma açısı beslenmesi durumunda DCM ve referans sensörü rotasyon açıları karşılaştırması.	124
Şekil 5.52 : Referans sensörü çıkışından 20 Hz savrulma açısı beslenmesi durumunda DCM ve referans rotasyon açıları karşılaştırması.	124
Şekil 5.53 : Manyetik pusuladan 20 Hz savrulma açısı beslenmesi durumunda DCM ve referans rotasyon açıları karşılaştırması.	125
Şekil 5.54 : DCM GPS/INS yöntemi ve referans sonuçları karşılaştırması.	125
Şekil 5.55 : DCM GPS/INS yöntemi ile referans arası bağlı konum hataları.	126
Şekil 5.56 : 7 sn'lik GPS kesintisi.	127
Şekil 5.57 : DCM GPS/INS yöntemi ve referans sonuçları karşılaştırması.	128
Şekil 5.58 : DCM GPS/INS yöntemi ve referans sonuçları karşılaştırması.	128
Şekil 5.59 : DCM GPS/INS yöntemi ve referans sonuçları karşılaştırması.	129
Şekil 5.60 : 2D DCM ve referans rotasyon açıları.	130
Şekil 5.61 : 2D DCM Phuong ve referans rotasyon açıları.	131
Şekil 5.62 : 2D GPS/INS entegrasyon rotası ve konum hataları.	137
Şekil 5.63 : 2D GPS/INS entegrasyonunda DCM ile referans sensör savrulma açısı karşılaştırılması.	137
Şekil 5.64 : Gevşek bağlı açık sistem GPS/INS entegrasyonu.	138
Şekil 5.65 : Gevşek bağlı kapalı sistem GPS/INS entegrasyonu.	138

SEMBOL LİSTESİ

ψ	: Savrulma açısı
θ	: Yunuslama açısı
ϕ	: Yuvarlanma açısı
φ	: Enlem
λ	: Boylam
h	: Yükseklik
f_{ib}^b	: Araç ekseninin atalet eksenine göre özgül kuvvetin araç eksenine izdüşümü
ω_{ib}^b	: Araç ekseninin atalet eksenine göre açısal hız vektörünün araç eksenine izdüşümü
x^i, y^i, z^i	: Dünya merkezli atalet eksenleri
x^e, y^e, z^e	: Dünya merkezli eksenler
x^n, y^n, z^n	: Navigasyon eksenleri
x^b, y^b, z^b	: Araç eksenleri
NED	: Kuzey doğu aşağı eksenleri
R_n^b	: Navigasyon ekseninin araç eksenine göre rotasyon matrisi
R_b^n	: Araç ekseninin navigasyon eksenine göre rotasyon matrisi
Ω	: Skew simetrik açısal hız matrisi
Ω_{nb}^b	: Araç ekseninin navigasyon eksenine göre açısal dönüş hızının araç eksenine izdüşümü matrisi
Ω_{in}^b	: Navigasyon ekseninin atalet eksenine göre açısal dönüş hızının araç eksenine izdüşüm matrisi
Ω_{en}^n	: Navigasyon ekseninin dünya eksenine göre açısal dönüş hızının araç eksenine izdüşüm matrisi
Ω_{ie}^n	: Dünya ekseninin atalet eksenine göre açısal dönüş hızının navigasyon eksenine izdüşüm matrisi
ω_{en}^n	: Navigasyon ekseninin dünya eksenine göre açısal dönüş hızının araç eksenine izdüşüm vektörü
R_N	: Dünya normal yarıçapı
R_M	: Meridyen yarıçapı
e	: Eksen kaçıklığı
a	: Ekvator yarıçapı

ω_{ie}^e	: Dünya ekseninin atalet eksenine göre açısal dönüş hızının dünya eksenine izdüşümü
V^n	: Navigasyon ekseninde hız vektörü
V_n	: Kuzey yönündeki hız değeri
V_e	: Doğu yönündeki hız değeri
V_d	: Düşey yöndeki hız değeri
$\ \cdot \ $	: Norm
f_{ib}^n	: Araç ekseninin atalet eksenine göre özgül kuvvetinin navigasyon eksenine izdüşüm vektörü
g_b^n	: Araç gövdesine etkiyen yerçekimi kuvvetinin navigasyon ekseninde ifadesi
H	: Gözlem matrisi
R	: Ölçüm gürültü kovaryans matrisi
ω_{ie}^e	: Dünyanın kendi ekseninde dönüş hızı
v	: Gürültü
w	: Gürültü
q	: Quaternion vektörü
P	: Kovaryans
Q_k	: Proses gürültü kovaryans matrisi
G	: Giriş matrisi
K	: Kalman kazancı
z	: Ölçüm vektörü
ε	: Rotasyon hata vektörü
σ	: Varyans
ω_{RR}	: Arka sağ tekerlek açısal hızı
ω_{RL}	: Arka sol tekerlek açısal hızı
$l_{\omega R}$	: Dingil mesafesi

AKILLI ARAÇLAR KAPSAMINDA İLERİ SÜRÜŞ DESTEK SİSTEMLERİNDE SENSÖR FÜZYONU

ÖZET

Güvenli Sürüş Projesi kapsamında, 2005 yılında İstanbul içinde şehiriçi ve çevreyolunu kapsayacak şekilde belirlenmiş 25 km'lik bir rotada araç çevresi, yol ve sürücü davranışları hakkında veri toplayan sensörlerle donatılmış Güvenli Sürüş aracının 108 farklı sürücü tarafından kullanılmasıyla toplanan verilerden oluşan bir veri tabanı oluşturulmuştur. Bu tezin ikinci bölümünde bu veritabanından rastgele seçilen sürücülerin verileri kullanılarak sürücünün fren pedal basıncı, gaz pedal ile direksiyon açısı kullanımı gibi sensör verilerinin marjinal dağılım analizi gerçekleştirilmiş, frekans spektrumları incelenmiş ve literatür ile karşılaştırılmıştır. Güvenli Sürüş aracı üzerinde bulunan lidar sensörü, çevre koşulları ile ilgili radar sensörüne göre daha çok bilgi sağlayabildiğinden İleri Sürüş Destek Sistemleri'nin (İSDS) gelecekteki uygulamalarında lidar kullanılması beklenmektedir. Bu sebeple üçüncü bölümde Güvenli Sürüş aracından alınan lidar verisinin detaylı analizi üzerine yoğunlaşmıştır. Fren, gaz pedal basıncı, lidar ile GPS sensörü verilerinin zamanları eşitlenerek farklı sensör verilerinin birlikte incelenmesine temel oluşturulmuştur. İki farklı sürücü için takip mesafesi - araç hızı grafiğinden iki farklı sürüş karakteristiği tespiti yapılmıştır. Önemli bir sürüş parametresi olan takip süresi tanımlanmış ve örnek bir sürücü için sıkışık trafik ve çevreyolunda incelenmiştir. Izgara temelli ve nokta mesafe temelli yöntemler kullanılarak lidar verisinde Güvenli Sürüş aracının önündeki farklı araçlar tespit edilmiştir. Nokta mesafe temelli yöntem seçilip kullanılarak lidarda tespit edilen araçları bir sonraki lidar taramasında tanımak ve izlemek için Kalman filtresi kullanılmıştır. Kalman filtresi ile tespit edilen takip süresinin lidar taramasındaki araca dik doğru boyunca en yakın araç tespit edilerek tespit edilen takip süresine göre üstün yönleri tespit edilmiştir. Şehiriçi ve çevreyolunda Kalman filtresi ile tespit edilen ön araç takip süreleri farklı sürücüler için karşılaştırılmıştır. THW, araç hızı, bağıl mesafe, fren ve gaz basınçları kullanılarak farklı grafik denemeleri sunulmuştur. Bu veriler ışığında %90'ı sürücü hatasından kaynaklanan trafik kazalarını önlemek ve sürücü iş yükünü azaltmak için İleri Sürüş Destek Sistemleri ve otonom araç gerekliliği üzerinde durulmuştur.

Dördüncü bölümde, üçüncü bölümde kazaları önlemek için tavsiye edilen İleri Sürüş Destek Sistemleri'nden araştırma grubumuz MEKAR takımının GCDC 2011 yarışmasında geliştirmiş olduğu Adaptif Seyir Kontrolü (ASK) sistemi Güvenli Sürüş proje veritabanından alınan sürüş verileri kullanılarak test edilmiştir. Güvenli Sürüş projesi verilerinden seçilmiş bir hız profiline sahip araç, kendi ASK kontrolcümüzün denetimindeki sanal araç tarafından takip edilmektedir. Bu test, ASK sisteminin İstanbul trafiğinde test edilmesi anlamına gelir. Güvenli Sürüş projesinden seçilen farklı sürücüler için takip süreleri incelenmiş ve ASK sisteminin gerekliliği vurgulanmıştır. Bir sonraki adım olarak, aynı ASK sistemi Carsim simülasyon ortamında aynı senaryo ile test edilmiştir. ASK sistemini Carsim sanal ortamında test ederken araç dinamiği GCDC'de kullanılan modelden daha kompleks bir model olan

Carsim araç modeli olarak alınmıştır. Bu sanal ortam değişik senaryolarda ve farklı trafik koşullarında ASK sisteminin testine zemin oluşturur.

Karayolu taşıtlarında yüksek otomasyonlu sürüş (YOS) amacıyla, İleri Sürüş Destek Sistemleri'nden biri olan Kooperatif Adaptif Sürüş Kontrol sistemi kullanılarak yapılan kooperatif sürüş ve otonom yörünge takibi için GPS sensör konumunun kullanımı iki güncel araştırma konusudur. Bu iki uygulamada da alınan GPS verisinin yüksek doğrulukta olması ve hızlı örneklenmesi gerekir. Beşinci bölümde tek başına GPS kullanımı ile karşılaştırıldığında daha hızlı örnekleme ve daha doğru konum ve hız verisi sağlayan geçici GPS kesilmelerinde belirli bir süre GPS konum ve araç hız verisini tahmin edebilen bir gevşek bağlı GPS/INS entegrasyonu üzerine çalışılmıştır. Yol testlerine geçmeden önce ön hazırlık olarak Carmaker sanal ortamında INS algoritması ve GPS/INS entegrasyonu denenmiştir. Burada amaç farklı örnekleme frekanslarının, hatalarının ve viraj etkisini incelemek ve GPS/INS entegrasyonunu kullanarak GPS sensöründen daha yüksek örnekleme frekansında araç konum ve hız bilgisini yayınlamaktır. Deney kısmında ilk olarak GPS/INS entegrasyonunu kendi içinde gerçekleştiren hazır bir sensöre sadece rotasyon açıları uygulanarak literatürde yaygın olarak kullanılan çeşitli INS algoritmaları denenmiştir. INS algoritmalarının doğruluğu test edildikten sonra deneysel aracın yol testlerinde belirlenen bir rotada hazır sensör ile kendi programında veri toplanmıştır. Daha sonra toplanan bu veriler Matlab Simulink ortamında genişletilmiş Kalman filtresi kullanılarak geliştirilmiş olan farklı GPS/INS entegrasyonu yöntemlerinde kullanılmıştır. Düzlemsel INS denklemleri çıkarılmış ve düzlemsel GPS/INS entegrasyonu denenmiştir. Açık ve kapalı GPS/INS entegrasyonları karşılaştırılmıştır.

SENSOR FUSION IN ADVANCED DRIVER ASISTANCE SYSTEMS IN THE SCOPE OF INTELLIGENT VEHICLES

SUMMARY

The DriveSafe project was carried out by a consortium of university research centers and automotive OEMs in Turkey to reduce accidents caused by driver behavior in 2005. A huge amount of driving data was collected from 108 drivers who drove the instrumented DriveSafe vehicle named “AWAKE” in the same route of 25 km of urban and highway traffic in İstanbul. DriveSafe vehicle is equipped with many sensors. These sensors are gps, imu, lidar, cameras, microphones, EEG headset, brake pedal and gas pedal pressure sensor. Also vehicle speed and steering wheel angle are acquired from ECU through Canbus.

In the second part, brief introduction to DriveSafe project is given first and the main route is explained. Then, randomly selected drivers from DriveSafe database are investigated by using sensor outputs like steering wheel angle, brake pedal pressure and gas pedal pressure which is called marginal distribution analysis. Steering wheel angle, brake pedal pressure, gas pedal pressure and percent gas pedal usage are shown in histograms. Also standard deviations of them are presented. Fast Fourier Transform is applied to sensor outputs to examine frequency components in these signals. It is found that driver steers and applies pressure to gas and brake pedal under 1 Hz.

Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), Adaptive Cruise Control (ACC), Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC), Collision Warning and Avoidance systems and highly autonomous driving systems needs information about the lead vehicle. Radar is usually used to get this information. In the future implementations of ADAS, lidar is expected to be widely used as it gives more information about the environment. That’s why in the third part of this doctoral thesis concentrated on lidar data analysis from the DriveSafe vehicle. Canbus, gas, brake pedal sensor sampling frequency is reduced to lidar and GPS frequency to evaluate all sensor data together. To get driver characteristics, two driver’s local minimum and local minimum of local minimum of following distances with respect to vehicle speed are compared. A simple algorithm that only looks at the forward direction along a straight line is used first in lidar analysis. Then time headway parameter is detaily explained. Headway times based on this simple approach are presented for an example driver. For that driver THW is calculated for highway traffic and eliminating data for lower speeds allowed to calculate THW at congested traffic. After that the aim was to detect the lidar points belong to same object or not. Grid based and point distance based segmentation methods are investigated. Grid based method is presented first. Grid based method divides lidar area into cell grids and probabilities are appointed to cell grids. Connected components labeling algorithm is used to detect cells are connected or not. Then, point distance based segmentation method is presented. The vehicles are detected by using point distance based method in lidar data. This algorithm is based on comparing the distance between two lidar points with a threshold to decide whether this points belong

to the same object or not. After selecting point distance based method, Kalman filter is used to detect and track vehicles in lidar scanning. Kalman filter approach is superior to the simple approach that mentioned before as it eliminates the lidar maximum target length from the THW calculations when lidar doesn't see any object. The results are demonstrated using experimental data and compared with the test video. The data from the lidar is used here to determine and record the headway time characteristics of different drivers in highway and urban roads. Minimum, maximum, mean and standard deviation of headway times are calculated for selected drivers. Different graphics are plotted using THW, vehicle speed, relative distance, brake and gas pedal pressure. In the lighting of these informations to avoid 90% amount of traffic accidents arising from driver mistakes and to reduce the workload on the driver, the need to ADAS systems like ACC, CACC or autonomous car is demonstrated.

In the fourth part, an existing Adaptive Cruise Controller (ACC) which is an example of ADAS system, based on the previous work of our research group Mekar is tested in a realistic simulation setting using actual driving data taken from the DriveSafe project database. The DriveSafe project database generated actual car is selected as the leading vehicle. This is followed by a virtual vehicle with ACC. The ACC controller and the vehicle model are taken from the actual Team Mekar vehicle that was tested in the Grand Cooperative Driving Challenge 2011 (GCDC 2011) cooperative mobility experiments. This study is used for evaluating our ACC design in a realistic laboratory setting with real world data. The vehicle model is taken as longitudinal vehicle model. Engine and transmission is modelled with the engine maps built from the chasis dynamometer tests. Braking system works with controlling the brake pedal with an electrical motor. It is modelled with system identification to use in offline simulation experiments. ACC's PD type controllers gains are tuned with LQR controller. Stateflow between gas and brake is given. ACC is made up with upper level controller and lower level controller. These controllers are detailly explained. The velocity and displacement of lead and following driver are plotted together when the headway time is set by ACC driver to 1 sec. THW parameter is plotted to show how well Adaptive cruise controller works. Also THW parameter is set to 0.6 sec to show ACC performance at lower headway times. After that the same experiment for different drivers with 1 sec THW is repeated to investigate ACC system statistically. As a further step, the same ACC controller was also implemented and tested in the Carsim environment with the additional benefit of being able to add other cooperating vehicles and traffic conditions. The vehicle mathematical model should be changed to one of complex Carsim car models as it is not possible to use user mathematical model in Carsim.

Use of communicated GPS position and velocity information in adaptive cruise control and cooperative adaptive cruise control with the purpose of cooperative driving and the use of GPS position for automated path following in highly automated driving are two current research applications requiring fast and accurate GPS updates. In the fifth part, based on previous experience, a loosely coupled GPS/INS integration system is presented in this paper to allow faster updates as compared to the use of GPS only and to provide accurate position/velocity information in the presence of temporary losses of GPS fix. An INS algorithm and GPS/INS integration are presented in a realistic simulation setting. The aim is to analyze the effects of different sampling rates of sensors, errors, cornering and to use GPS/INS fusion to broadcast position data at a higher rate than GPS. The DCM method is used to estimate rotations in a inertial measurement unit. As a prerequisite before road testing with our experimental vehicle,

GPS/INS is fused using the extended Kalman filter in a highly realistic simulation setting. In the experimental part, firstly by giving some rotations to Xsens MTI-G in its axis. which is used as an IMU and a reference sensor, INS algorithms named as DCM, Phuong's DCM, Euler, Quaternion are tested. After the INS algorithms are tested, in a decided route GPS and IMU data are collected through reference sensor. After that, the collected data is read in Matlab Simulink environment to run DCM based and Phuong's DCM based GPS/INS fusion methods with using extended Kalman filter. As the road vehicles travel on generally flat roads, by neglecting roll and pitch angles 2D GPS/INS integration is applied and 2D INS equations are derived with two different methods. Moreover, closed loop and open loop GPS/INS integration are compared.

1. GİRİŞ

Günümüz karayolu taşıtlarında gün geçmiyor ki bir yenilik daha piyasaya sürülsün. ABS ile başlayan aktif güvenlik donanımlarına ek olarak TCS, ESP gibi sistemlerin satılan araçlarda standart hale gelmesi planlanıyor. Diğer yandan ise otonom veya yarı-otonom araç çalışmaları hız kesmeden devam ediyor. Gerek aktif güvenlik sistemleri gerek otonom araç çalışmalarında ilerlemenin temel sebeplerinden biri sensör kullanımıdır. Çeşitli sensörlerle donatılmış araçtan bu sensörler vasıtası ile araç veya aracın çevresi ile ilgili bilgiler elde edilir ve bu bilgiler işlenir. Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde çeşitli sensörler ile donatılmış araçtan elde edilen bilgiler işlenerek sürücü ile ilgili bilgiler analiz edilmiş, üçüncü bölümde aracın çevresi ile ilgili lidar aracılığıyla toplanan veriler incelenmiştir. Dördüncü bölümde ise bir ASK sisteminin sanal ve gerçekçi verilerle testi üzerinde çalışılmıştır. Beşinci bölümde ise KASK sistemlerinde ve otonom araçlarda çok kullanılan GPS/INS entegrasyonu gerçekleştirilerek tez sonlandırılmıştır.

1.1 Literatür Araştırması

İkinci bölümle ilgili literatürde Shi doktora tezinde ön veri analizi ve marjinal dağılım incelemesinde direksiyon açısı ile yanal mesafe arasındaki bağı incelemiştir. Kamera ile yoldaki yanal pozisyonu tespit ederek, bunun direksiyon açısı ile ilişkisinden hareketle sürücülerin ARMAX modellerini kullanarak farklı sürücüler için sürücü parametreleri çıkarmış ve farklı sürücüler ayırt etmiştir [1]. Igarashi ve diğerlerinin 1999-2001 yılları arasında 800 sürücü ile Japonya’da gerçekleştirdiği testte pedallara uygulanan basınçları incelemiş ve sürüşün sürücüye has olup olmadığının cevabını aramışlardır [2]. Mijiyama ve diğerleri sürücü davranışına dayanan sürücü modellemesi ve bunun sürücünün tespit edilmesinde kullanılması üzerine bir çalışma yapmıştır. Gaz ve fren pedallarının kullanımı ve araç takip alışkanlıklarının ileri sürüş destek sistemlerinin farklı sürücüler için uyarlanmasına yardımcı olabilir şeklinde tespitleri olmuştur [3]. Lee ve Peng ICCFOT sürüş veritabanını kullanarak ön çarpışma uyarı ve önleme sistemlerini incelemişlerdir [4].

NTHSA (Ulusal Çevreyolu Trafik Güvenlik Kurumu) 2005 yılında Amerika'da 43.000 ölüm ve 2.5 milyon yaralanma ile sonuçlanan altı milyon araç kazası rapor etmiştir [5]. Bu kazaların % 90'lık oranı sürücü hatalarından kaynaklanmıştır [6]. Bu nedenle sürüş dinamiği sürücü kaynaklı kazaları önlemek için incelenmelidir. Sürüş dinamiği araç, yol koşulları ve sürücü arasındaki etkileşimden kaynaklanmaktadır [7]. Bir mikrosimulatörün sürücü davranış temelli teorik modeli kaynak [8]'de verilmiştir, kaynaktaki bilgilere göre sürücü hatası algı, karar verme ve etki kısımlarına ayrılmıştır. [9]'uncu kaynaktaki bilgilere göre aktif ve pasif güvenlik sistemlerinin geliştirilmesi nedeniyle yıllar içinde katedilen mesafelerin artmasına rağmen birim yıl başına düşen araç kazaları ve ölümcül olaylar azalmıştır. Güvenli Sürüş Projesi, OTAM, Sabancı Üniversitesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Ford A.Ş., Renault A.Ş. ve Tofaş A. Ş. 'den oluşan bir konsorsiyum tarafından sürücü davranışlarından kaynaklanan kazaları azaltmak için 2005 yılında başlatılmış ve yüksek miktarda sürüş verisi toplanmıştır [10,11]. 89 erkek ve 19 kadından oluşan 108 sürücü Güvenli Sürüş aracını İstanbul'da 25 km'lik aynı rotada sürmüşlerdir [10], [11]. Bu doktora tezi kapsamında gerçekleştirilen seçilen farklı sürücüler için yapılan FFT testi ve yararlanılan Nyquist teoremi ile ilgili bilgi için [12,13] kaynaklarına bakınız.

Üçüncü bölümle ilgili literatürde takip süresi olan THW parametresi detaylı olarak incelenmiştir. Kaynakların çoğunda, THW verisi araç simülatörleri kullanılarak, yol kameralarından veya araca gömülü sensörler ile alınan ölçümlerle trafikte ve trafik sıkışıklığında incelenmiştir. Takip süresi önemli bir sürüş karakteristiğidir ve yol (şehiriçi, çevreyolu) ve trafik koşulları (sıkışık, açık trafik) aynı tutulduğunda sürücüler arasında dikkate değer farklılık gösterir. Takip süresi (THW), Adaptif Seyir Kontrolü (ASK) ve Kooperatif Adaptif Seyir Kontrolü (KASK) gibi İleri Sürüş Destek Sistemleri'nde (İSDS) kontrol edilen ana değişkendir [14]. ASK ve KASK sistemlerinde, manuel sürüşe göre daha güvenli THW değerleri kullanılır. Bu yüzden ilk olarak manuel sürüşteki THW değerlerinin analizi önemlidir. Bu ASK sisteminin performansının değerlendirilmesi için temel ölçüt olarak kullanılacaktır. Literatürde daha önce yapılan çalışmalarda THW analizi detaylı olarak verilmiştir. Kaynakların çoğunda THW parametresi sanal simülatörler, yola yerleştirilen sensör veya kameralar ile veya araca gömülü sensörle incelenmiş ve trafik sıkışıklığı ile olan korelasyonu tespit edilmiştir [15], [16]. Diğer kaynaklarda THW parametresi ASK ve KASK sistemlerinin bir parçası olarak incelenmiş ve manuel sürüş için THW değerlerine

değnilmemiştir [14,17]. Bu tez çalışmasında lidar verisi analizinde kullanılan Izgara temelli yöntemde lidar taramasındaki alan herbiri 1 metre² olan hücrelere bölünmüş ve bağlı bileşenler algoritması hücrelerin birbirine bağlı olup olmadığını tespit etmek için kullanılarak hücrelerden nesne tespiti yapılmıştır [18]. Daha sonra Nokta mesafe temelli yöntem Izgara temelli yöntemle göre daha az işlem ve işlem zamanı gerektirdiğinden lidar veri işleminde temel yöntem olarak seçilmiş ve araç tespit ve takibinde kullanılmıştır [19]. Kalman filtresi ile araç takibinde sabit hız modeli [20] kaynağındaki modelin basitleştirilerek verildiği [21] kaynağında verilen şekilde alınmıştır. Lidar verisinde tespit edilen nesneyi oluşturan noktalar, araçları temsil ettiğinden bounding box algoritması kullanılarak siyah bir çerçeve ile gösterilmiştir [21,22]. Kalman filtresinde araç takibinde kullanılan artık kovaryans “S” matrisinin kullanımı ile detaylı bilgi [23,24] kaynaklarında bulunabilir. Kalman filtresi ile ilgili detaylı bilgi için [25,26] kaynağına başvurunuz. Yol sınırlarının belirlenmesi yöntemi ise x ekseninde nesne belirleme frekansından tespit edilmiştir [21]. Bu doktora tezi kapsamında lidarda elde edilen bağıl mesafe kullanılarak elde edilen takip süresi parametresi çeşitli sürücüler için şehiriçi ve çevreyolunda incelenmiş ve bu çalışmanın bir kısmı [27] kaynağında yayınlanmıştır. 2 sn kuralı ile ilgili bilgi [28]’den elde edilebilir. Lu ve diğerleri Çin’de takip süresi için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [29].

Tezin dördüncü bölümüyle ilgili olarak Adaptif Sürüş Kontrol sistemleri ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar ile ilgili bilgi verilecektir. Tapani, ASK sistemlerinin araç hızlanma ve yavaşlama oranlarındaki etkilerini çalışmak için trafik simülasyonlarından gelen yörüngeleri kullanmıştır. ASK sistemlerinin güvenlik ve trafiğin çevresel etkisi üzerine pozitif etkileri olabileceği görülmüştür. Bunun yanında ASK donanımsız araçların, ASK donanımlı araçların şehir trafiğinde oranlarının artmasıyla pozitif etkileneceğini tespit etmiştir [30]. Yi ve diğerleri, ASK sistemlerinin diğer bir adı olan akıllı araç seyir kontrol sistemleri için bir gaz kelebeği/ fren kontrolü kuralı önermiştir. Bu kontrolcünün kontrol performansı bilgisayar simülasyonları ve deneyler ile incelenmiştir [31]. Aksun Güvenç ve diğerleri ASK sistemini düşük maliyetli bir donanım içeren sürüş simülatörü ile incelemişlerdir. Simülasyon sonuçları ASK kontrolcüsünün şerit değişiminde ve öne atlayan araç durumlarında tatmin edici sonuçlar vermiştir. Ayrıca ASK kontrolcüsünün sürücü iş yükünü azalttığı da belirtilmiştir [32]. Bu doktora tezi kapsamında kullanılan GCDC 2011 yarışmasında

Mekar takımının kullanmış olduğu araç modeli [33-36] kaynaklarından ve ASK kontrolcü tasarımı için kullanılan kontrolcü tasarımına [36,37] kaynağından bakılabilir.

Tezin beşinci bölümüyle ilgili olarak GPS/INS entegrasyonu ile ilgili yapılan çalışmayla ilgili literatürden bilgi verilecektir. Phuong ve diğerleri Kalman Filtreli DCM yönteminin genişletilmiş Kalman Filtreli Euler ve Quaternion temelli yöntemle göre daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir [38]. Matlab Simulink programında bulunan Aerospace Bloksetini simülasyonlarında kullanmışlardır ve sanal manyetik pusula ile birlikte Ataletsel Ölçüm Sistemi kullanmışlardır [38]. Leung ve diğerleri Kalman Filtresi kullanarak GPS ve INS'yi birleştirmiştir. İki sensörün verileri sanal olarak IPG Carmaker programından 100 Hz'de alınmıştır ve gürültü INS ve GPS ölçümlerine sırasıyla 100 Hz ve 1 Hz'de eklenmiştir [39]. Skog, deneysel çalışmalarında karayolu araç uygulamaları için düşük maliyetli GPS destekli ataletsel navigasyon sistemi üzerinde çalışmıştır [40]. Navigasyon denklemlerini ECEF ekseninde türetmiştir ve GPS/INS entegrasyonun gevşek bağlı şekliyle gerçekleştirmiştir [40]. Schumayer ise Skog'un yaptığı çalışmaların üzerine holonomik olmayan kısıtlar ve GPS anteni ile IMU sensörü arası mesafe düzeltmeleri ile doğrulukta iyileştirmeler yapmıştır [41]. Öztürk ise daha iyi bir performans için sıkı bağlı GPS/INS entegrasyonunu kullanmış ve sonuçlarını yüksek performanslı ataletsel navigasyon sistemi ile karşılaştırmıştır [42]. Bu tezdeki çalışmada ana kaynaklar olarak Phuong, Farrell, Shin ve Godha'nın yayınları kullanılmıştır [38,43,44,45]. Titterton ve Weston'ın yazarı olduğu kitaptan INS hız denkleminin çıkarımında faydalanılmıştır [46]. [38] kaynağında Euler yöntemi ile ilgili detaylı bilgi bulunmaktadır. Saadettin, GPS/INS entegrasyonuna dış hız beslemesi yapılması için Kalman filtresinin nasıl uygulanması gerektiğini anlatmıştır [47]. Düzlemsel GPS/INS entegrasyonunda sayısı azaltılmış ivmeölçer ve jiroskop kullanımı Sun ve diğerleri tarafından gerçekleştirilmiştir [48]. Referans sensör ile ilgili detaylı bilgi [49] kaynağından elde edilebilir. GPS/INS entegrasyonu ile birleştirilen manyetik pusula kullanımı ve ilgili denklemleri ile ilgili detaylı bilgi [50,51] kaynaklarından elde edilebilir. [52] kaynağında açık ve kapalı entegrasyon ile ilgili bilgi verilmiştir.

1.2 Doktora Tezinin Özgünlüğü

Bu doktora tez çalışmasının özgünlüğü aşağıdaki maddelerle özetlenebilir.

Güvenli Sürüş projesi, İstanbul trafiğindeki sürücülerin araç kullanımı hakkında bilgi vermektedir. İstanbul trafiğinde araç kullanım karakteristikleri literatürde incelenmemiştir. Gaz ve fren pedalı ile direksiyon kullanımı detaylı olarak incelenmiş ve frekans spektrumları analiz edilmiştir.

Kaynakların çoğunda, THW verisi araç simülatörleri kullanılarak, yola yerleştirilen sensörler veya kameralarla ve araca gömülü sensörler ile alınan ölçümlerle trafikte ve trafik sıkışıklığında incelenmiştir. Diğer kaynaklarda THW parametresi ASK ve KASK sistemlerinin bir parçası olarak incelenmiş ve manuel sürüş için THW incelemesine değinilmemiştir. Literatürde ASK sistemlerinde genellikle radar sensörü veya kamera kullanılarak ön araçların tespit ve takip edilmesi için kullanımı yaygındır ve gelecekte daha detaylı bilgi sağlayabildiğinden lidar sensörün İleri Sürüş Destek Sistemlerinde yaygınlaşması beklenmektedir. Lidar verisi ise genellikle araç çeşidini ayırt etmek için kullanılmıştır. Burada ise tek katmanlı bir lidar ile İstanbul trafiğindeki araçlar tespit ve takip edilmiş, bununla birlikte araç tespiti için literatürdeki iki farklı algoritma sunulmuştur. Buradan elde edilen araç tespit ve izleme bilgileri ile elde edilen THW parametresi çevreyolu ve şehiriçi trafik için incelenmiş ve farklı sürücüler için THW parametresinin istatistiksel analizi yapılmıştır. Kalman filtresi ile THW parametresini hesaplamanın lidar taramasındaki araca dik doğru boyunca en yakın araç tespit edilerek hesaplamaya göre üstünlüğü gösterilmiştir. Farklı sensörlerin verileri kullanılarak literatürde bulunmayan grafikler elde edilmiştir. İleri Sürüş Destek Sistemlerine olan ihtiyaç vurgulanmıştır.

GCDC yarışmasında kullanılmış ve doğruluğunu kanıtlamış KASK sisteminden türetilen ASK sistemini İstanbul trafiğinde test edebilmek için Güvenli Sürüş projesindeki veri tabanı kullanılmıştır. Güvenli Sürüş aracı lider araç olarak seçilmiş ve ASK sistemine takip ettirilmiştir. Güvenli Sürüş aracını kullanan farklı sürücüler için aynı test tekrarlanmış ve seçilen THW parametresini takip etme performansı incelenmiştir. İleri Sürüş Destek Sistemlerin ve Otonom araçlara olan ihtiyaç güvenli ön araç takibi nedeniyledir. Daha sonra aynı durum Carsim programı ortamına uyarlanmış ve sanal trafik ortamında da ASK sisteminin test edilmesine olanak sağlanmıştır.

Literatürde GPS/INS entegrasyonu üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda genellikle tek bir yöntem, sanal test veya deneysel yöntem üzerine

yoğunlaşmıştır. Bu doktora tezinde ise hem sanal hem deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Sanal ortamda farklı GPS ve IMU sensör frekanslarının, IMU sensör gürültüsünün ve rotadaki virajın GPS/INS entegrasyonuna etkisi incelenmiştir. Deneysel kısımda ise çeşitli INS algoritmaları test edilmiş ve iki farklı GPS/INS entegrasyonu metodu bir referans sensörün sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca literatürde düzlemsel entegrasyon ile ilgili bilgiler kısıtlıdır. Düzlemsel INS denklemleri çıkarımı iki farklı yöntemle verilmiştir ve bu yöntemlerden biri bu doktora tezi kapsamında çıkarılmıştır. Burada Phuong'un DCM yöntemi düzlemsel entegrasyona indirgenerek gösterilmiştir. Açık ve kapalı entegrasyon karşılaştırılmıştır.

2. SÜRÜCÜLERİN SÜRÜŞ ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

2.1 Amaç

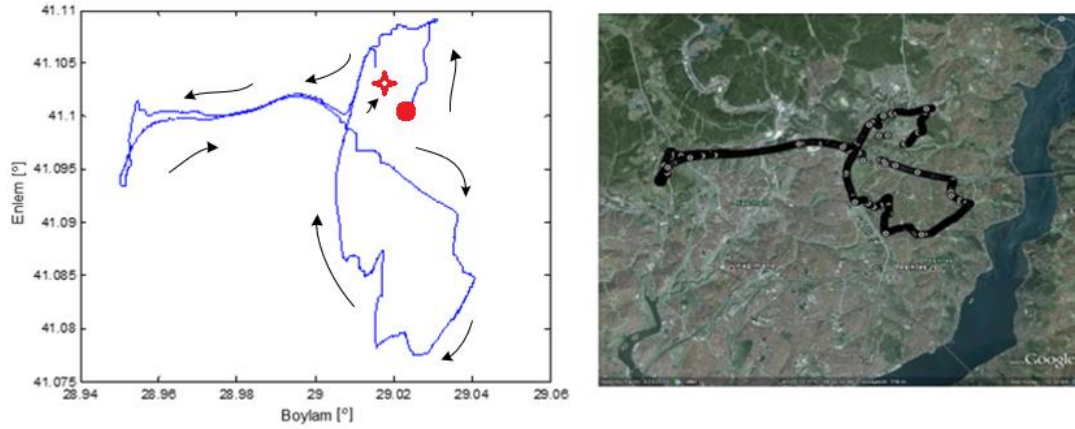
Güvenli Sürüş Projesi, üniversitelerin araştırma merkezleri ve otomotiv üreticisi firmalar tarafından Türkiye’de sürücü davranışlarından kaynaklanan kazaları azaltmak için 2005 yılında başlatılmıştır. Bu amaçla bir çok sensör ve veri toplama sistemiyle donatılmış ve Şekil 2.1’de gösterilen enstrümantasyonlu araç oluşturulmuştur. Güvenli Sürüş aracını İstanbul’da seçilen 25 km şehiriçi ve çevreyolu trafiğini kapsayan aynı rotada 108 sürücü kullanmış ve sürüş verisi toplanmıştır. Bu sürücüler 89 erkek ve 19 kadından oluşmaktadır. Araca “Uyanık” ismi verilmiştir. Güvenli Sürüş aracında Şekil 2.1’de görüldüğü gibi GPS, lidar, IMU, kamera, mikrofon, gaz ve fren basıncı sensörleri ayrıca diğer araştırmalarda kullanılmak üzere sürücü beyin dalgalarını toplamak için EEG kafaseti ve kulaklık ile mikrofon kullanılmıştır [10-11].



Şekil 2.1 : Uyanık aracı ve araca yerleştirilmiş sensörler.

Güvenli Sürüş projesinde hedeflenen sürücü tanıma, trafikte seyir halindeyken normal sürücü davranışının modellenmesi çalışmaları yapılması ve sürücünün yorgunluk ve uykusuzluk belirtileri gösteren davranışlarının simülör ortamında belirlenmesidir. Araçta bulunan sensörlerden GPS sensörü aracın konum ve hız bilgisini vermektedir. GPS sensörü 1 Hz’de örnekleme yapmaktadır ve seri bağlantı ile araçtaki bilgisayara veri kaydedilmektedir. Sick marka lidar sensörü aracın ön tamponuna yerleştirilmiştir ve 1 Hz’de örnekleme yaparak aracın önünü 180° tarayabilmektedir. Tek katmanlı bir

lidardır. Araçta bulunan Crossbow marka IMU sensörü aracın kütle merkezine yakın konum olan vites kutusuna yakın kısma yerleştirilmiştir. IMU sensörü 3 ekseninde açısal hız ve 3 ekseninde özgül kuvvetleri ölçmektedir. Araçta yolu gözleyen bir ve sürücüyü gözleyen iki kamera olmak üzere saniyede 30 resim çekim yapabilen toplam üç kamera bulunmaktadır. Fren ve gaz pedalı üzerine yerleştirilmiş sensör vasıtasıyla sürücünün pedallara uyguladığı fren ve gaz pedal basınçları 32 Hz örnekleme frekansında iki kanallı bir A/D dönüştürücü ile bilgisayara kaydedilmiştir. Araç içi üç adet mikrofon ile sürücü sesi toplanmıştır [10,11].



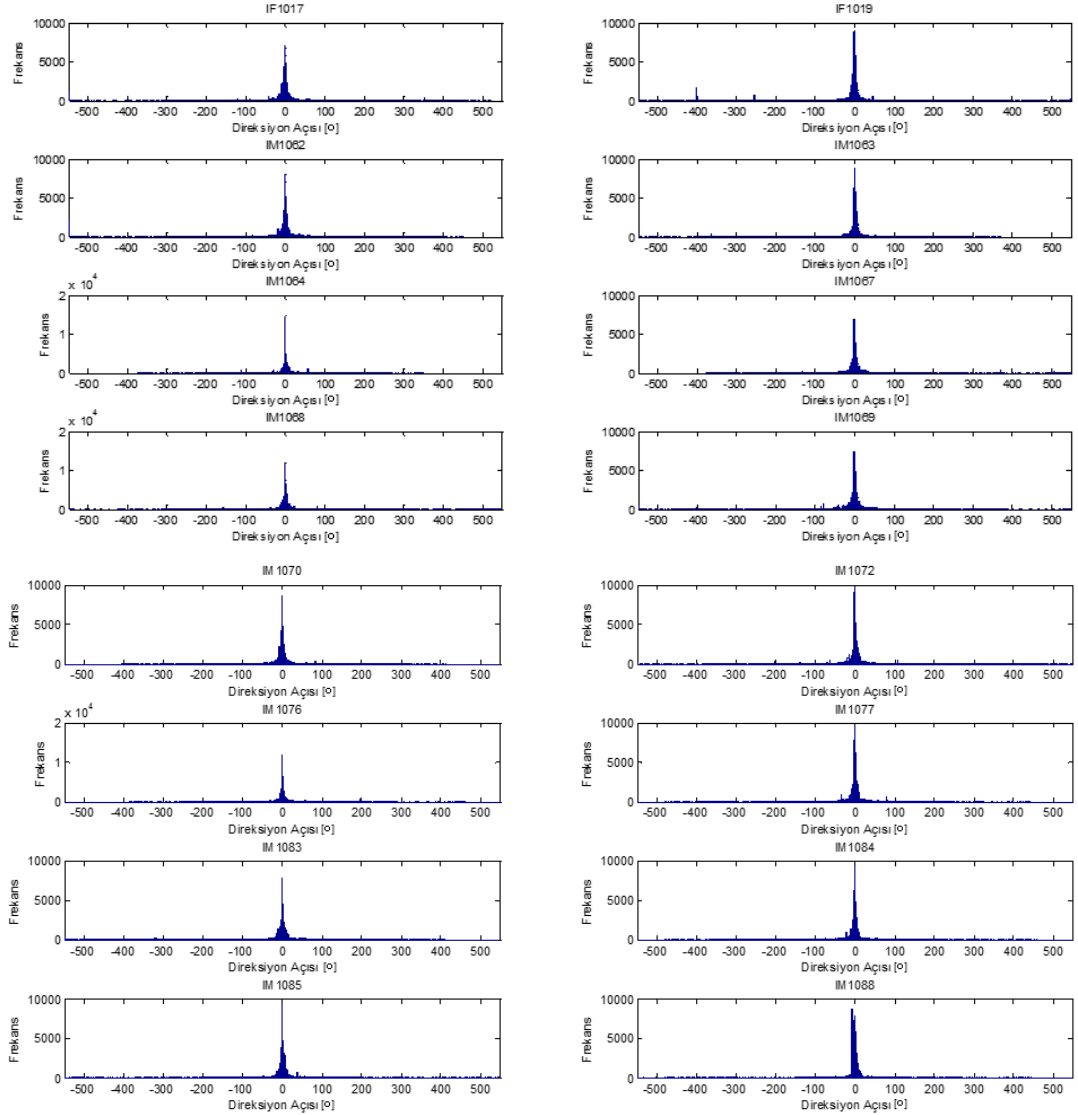
Şekil 2.2 : Uyanık aracının enlem boylam ekseninde rotası.

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi Uyanık aracı sürücülerinin takip ettiği rota 25 km’dir. Şekil 2.2’de görülen yuvarlak başlangıç noktası olan İTÜ Ayazağa kampüsünden yola çıkılarak 1.5 km sıkışık bir trafikte gidilir. Ardından havaalanına doğru TEM yoluna çıkılır. Sonra ilk çıkıştan U dönüşü yapılır ve FSM köprüsüne çıkılır. Etiler çıkışından sapılır. Bu yol üzerinde Etiler, Akatlar, Levent, 4. Levent, Ayazağa istikametleri takip edilerek Şekil 2.2’de yıldız ile gösterilen İTÜ Ayazağa Kampüsü’nde Otam Merkezi önünde rota sonlanır.

2.2 Marjinal Dağılım Analizi

Uyanık araçından elde edilen verileri analiz edebilmek ve çıkarımlar yapabilmek için sinyal işleme yöntemleri ve istatistiksel yöntemler kullanılmalıdır. Doktora tezinin bu bölümünde incelenen veriler aracın CAN veriyolundan ve fren-gaz pedal basınçları iki kanallı bir A/D dönüştürücüden elde edilmiştir. Verilerin analizi için öncelikli olarak histogram eğrileri kullanılmıştır. Histogram analizi, ilgili değişkenin dağılımını diğer bir ifadeyle frekans dağılımı gösterir. Direksiyon açısının histogramları 16 farklı

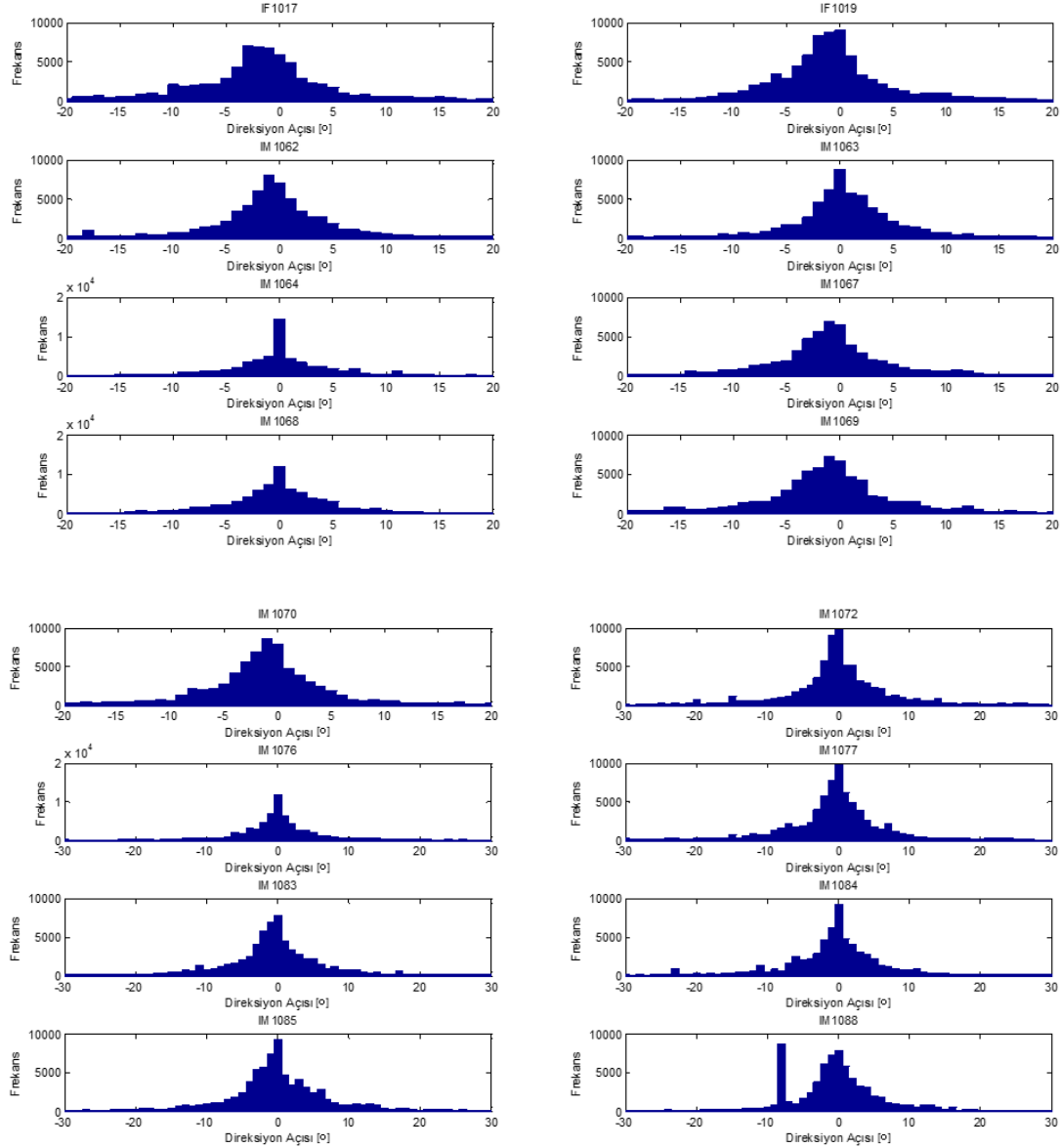
sürücü için Şekil 2.3’de verilmiştir. IF1017 vs. gibi grafiklerin sağ üst köşesinde bulunan ifadeler sürücülerin kodlarıdır. I harfi ölçümün İstanbul’da yapıldığını, bundan sonra gelen F (female) harfi ise bu sürücünün kadın olduğunu veya M (man) harfi gelirse sürücünün erkek olduğunu tanımlar.



Şekil 2.3 : Direksiyon açısı histogramları.

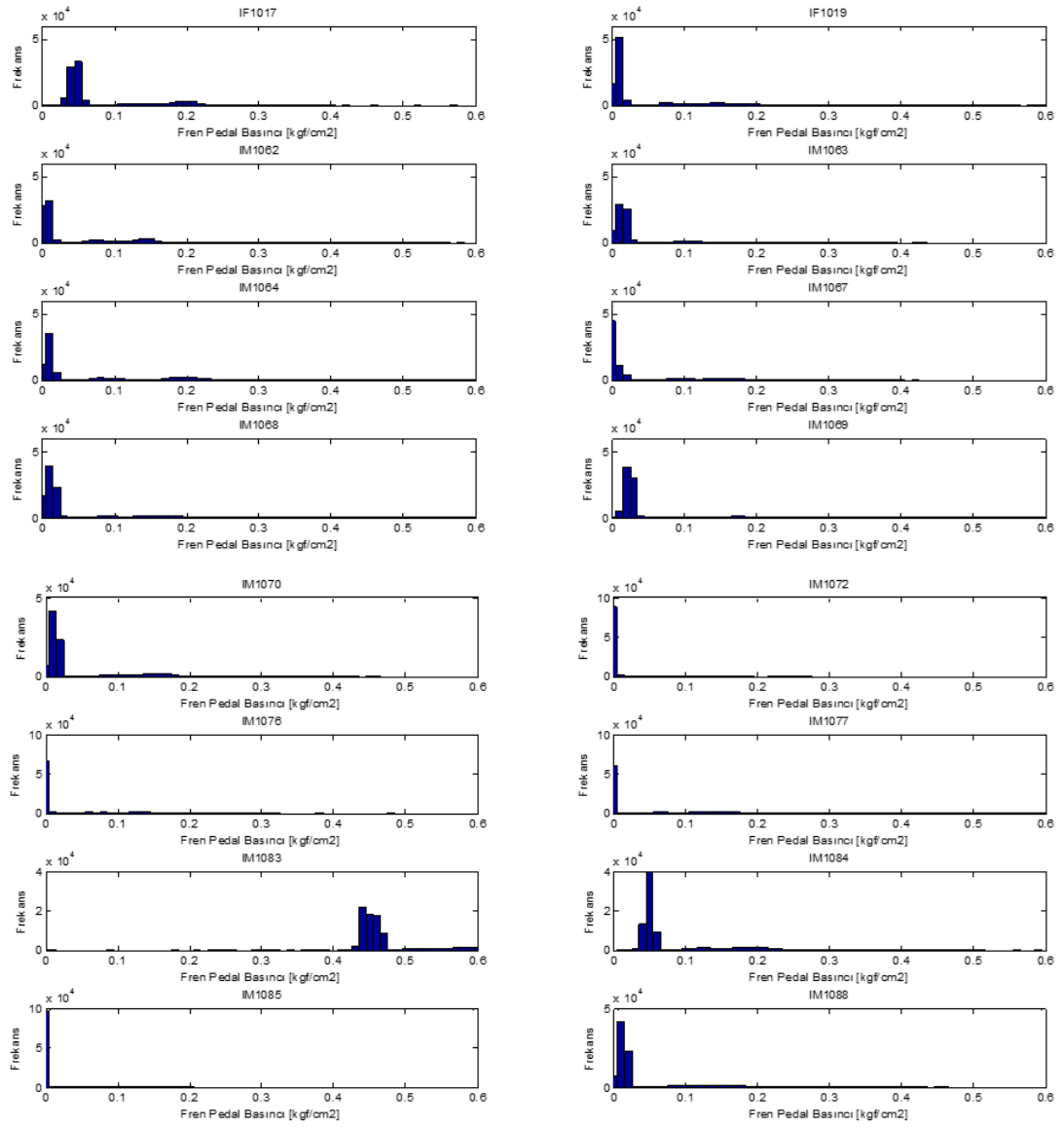
Bu histogram analizleri izlenen bütün rota boyunca yapılabileceği gibi ilgilenilen belirli geçiş noktalarına tekabül eden zamanlar için de yapılabilir. Burada amaç farklı sürücülerin aynı rota boyunca belirli bir karakteristiğini elde edebilmektir. Ayrıca elde edilen veri ile ilgili sensörün çalışıp çalışmadığı, çalışıyorsa doğru ölçüm alınabiliyor alınamadığı gözlemlenebilir. Zaman grafiklerinde görülemeyen, dikkat çekmeyen eksiklik fark edilebilir, gürültü faktöründen etkilenen sensör için filtreleme işleminin uygulanmasına karar verilebilir. Şekil 2.3’de yüksek direksiyon açılarındaki örneklemeler

alınmış olması araç tam dönüş yaparken veya park halinde iken direksiyon çevirmeye karşılık gelmektedir. Direksiyon açılarının histogramları Şekil 2.3'e daha yakından bakılan Şekil 2.4'de daha iyi görülebilir.



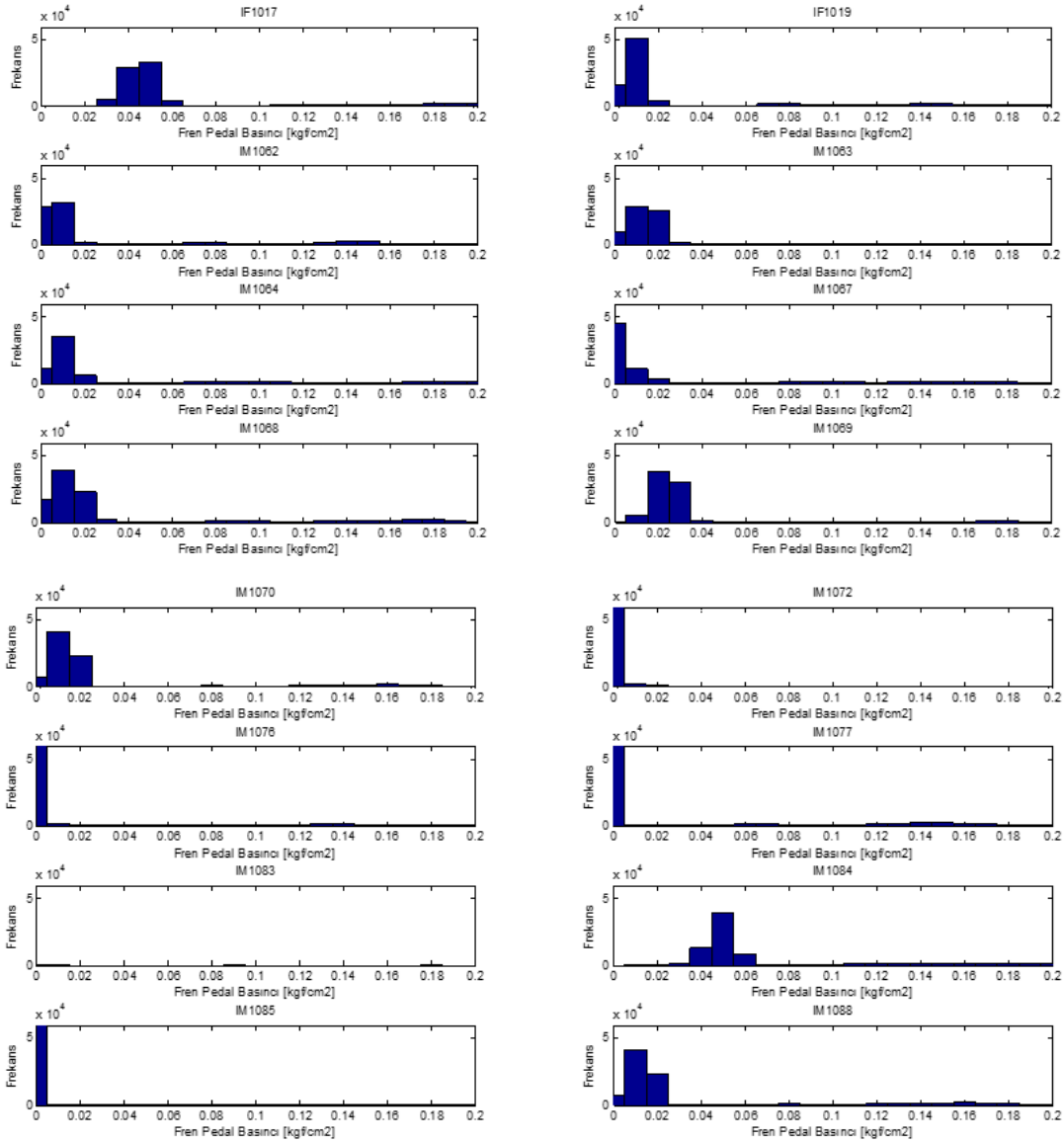
Şekil 2.4 : Direksiyon açısı histogramlarına yakından bakış.

Şekil 2.4'de görüleceği gibi IM1064 kodlu sürücü diğer sürücülere nazaran düreksiyonu daha düz tutmuştur. IM1088 kodlu sürücünün -8° direksiyon açısı civarında diğer sürücülere göre daha fazla yükselme gözlenmektedir. Bu durum sürücünün bu açıda uzun süre direksiyonu sabit tuttuğunu gösterir. CAN veriyolundan elde edilen fren basıncı verisinin histogramları Şekil 2.5'te verilmiştir.



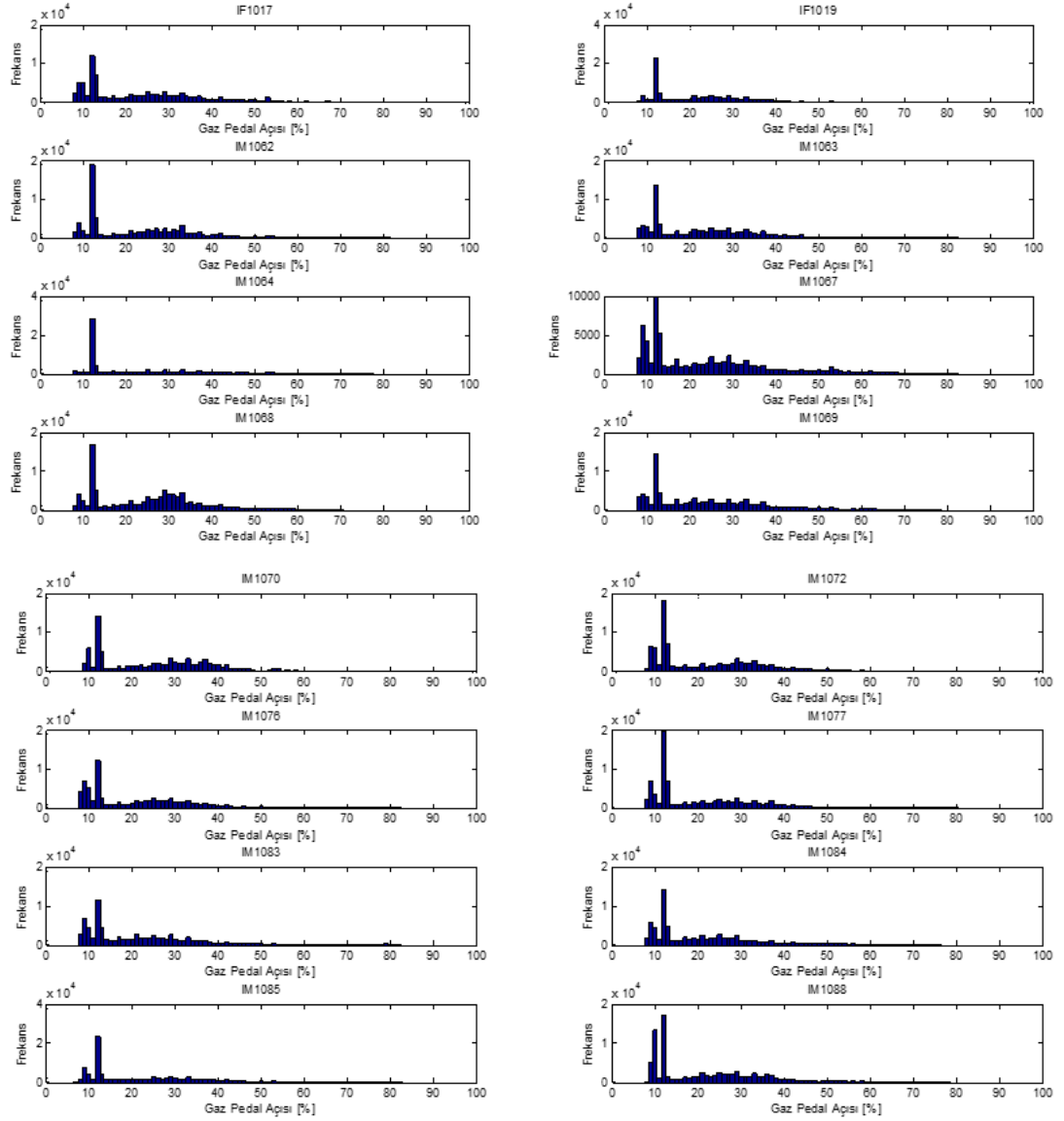
Şekil 2.5 : Fren pedalı basıncı histogramları.

IM1083 kodlu sürücü yüksek basınçlarda fren pedalına basınç uygulamıştır. Buradan çok fren kullandığı sonucu çıkarılabilir. IM1085 kodlu sürücü ise sadece 0.2 kgf/cm^2 basınca kadar fren uygulamıştır, buradan bu sürücünün sakın bir sürüş karakterine sahip olduğu söylenebilir. IM1072 kodlu sürücü de 0.3 kgf/cm^2 fren basıncını geçmemiştir. Bu veriler daha yakından Şekil 2.6’da görülebilir. IM1084 sürücüsünün pedalı 0 ile 0.01 arası değer göstermemiş, bu sürücü en az basınç değerini fren pedalına hiç uygulayamamıştır.



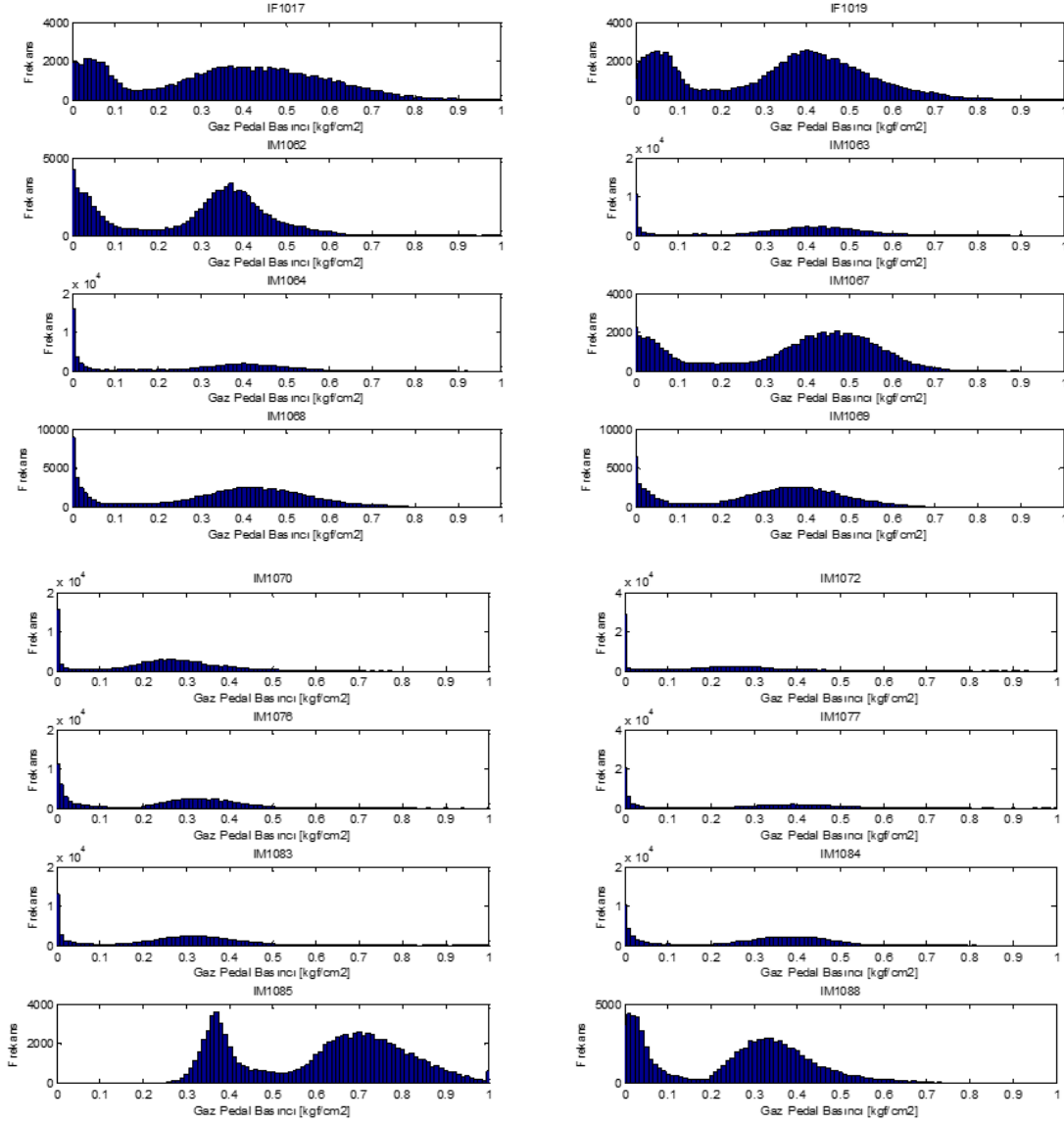
Şekil 2.6 : Fren pedal basıncı histogramlarına yakından bakış.

Şekil 2.7’de sürücülerin gaz pedalı açısına basma yüzdeleri verilmiştir. Bütün bu grafiklerde dikkat çeken nokta gaz pedalında % 8’e kadar bir boşluk olduğudur. IF1019 kodlu bayan sürücü gaz pedal açısında % 52’yi geçmemiş ve diğer sürücülere göre en az uygulayan olmuştur.



Şekil 2.7 : Gaz pedal açısı yüzdesi histogramları.

Gaz pedalı basınç histogramları Şekil 2.8’de gösterilmiştir. IM1085 sürücüsü çok agresif sürücü olabilir, frene de az bastığını gözönüne alırsak trafiğin yoğun olmadığı bir zamanda Uyanık aracını kullanmış olabilir. IM1072 kodlu sürücü de gaz pedal uygulama açısında % 60’ı geçmemiştir fakat gaz pedal basıncı 0.9 kgf/cm^2 ’ye kadar ulaşmıştır, burada ara hızlanmalarda gaz pedalına yüklendiği fakat hız limitlerine dikkat ettiği sonucu çıkarılabilir. Şekil 2.8 ile 2.5 karşılaştırılırsa gaz pedalına uygulanan basınçlar fren pedalına uygulanan basınçlardan fazladır.



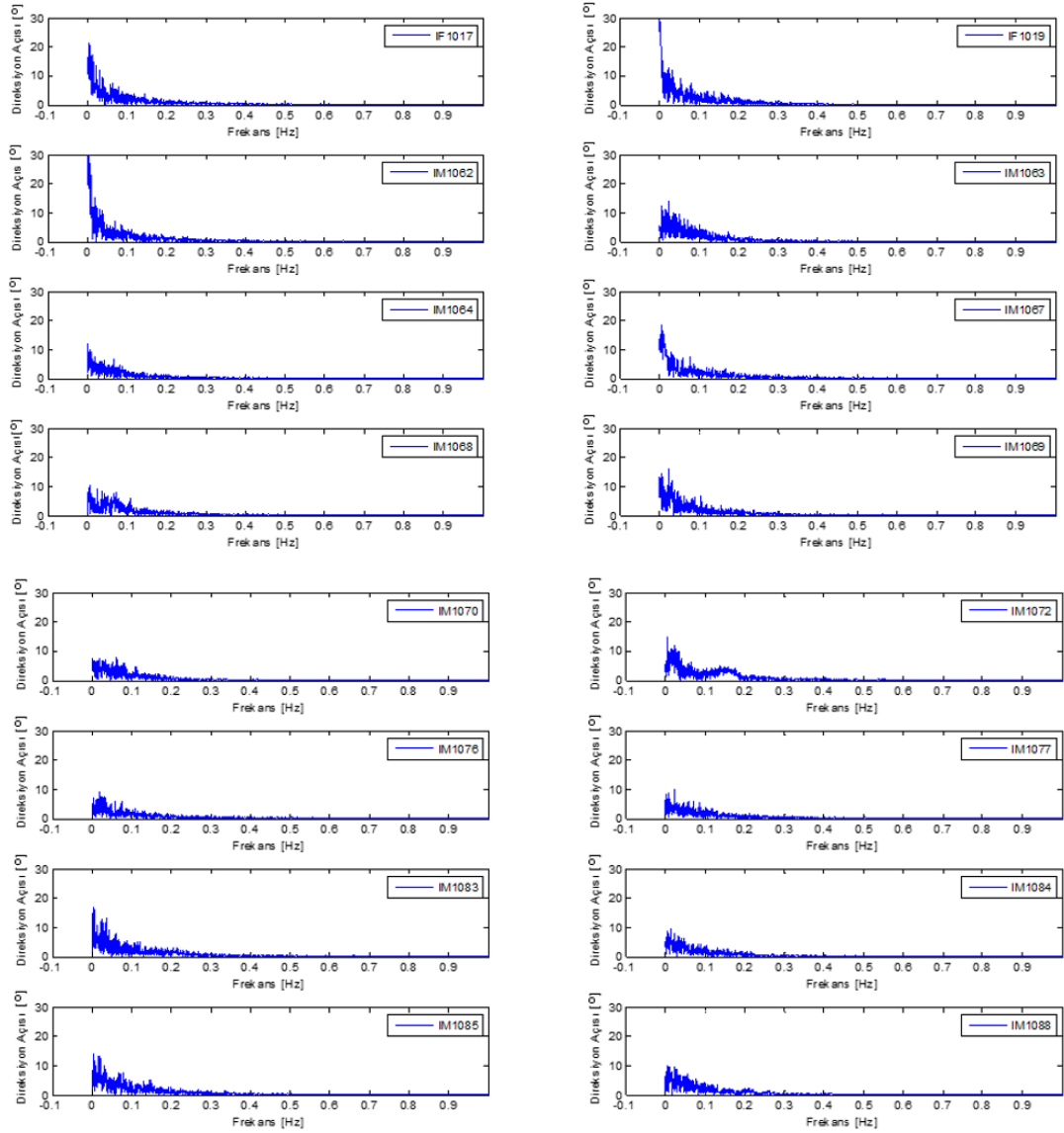
Şekil 2.8 : Gaz pedal basıncı histogramları.

Şekil 2.8’de görüleceği gibi 0.3-0.4 civarında gaz pedal basıncında bir tepe noktası oluşmaktadır. Bu tepe noktası IM1067’de daha 0.5 kgf/cm²’e yakındır ve IM1085 hariç diğer sürücülere göre daha yüksektir.

Bir sinyalin hangi frekanslı sinyalleri içerdiğini öğrenmek istersek zaman eksenini yerine frekans eksenine geçiş yaparız. Bunun için FFT analizi yapılmalıdır. FFT analizi Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform) olarak bilinir.

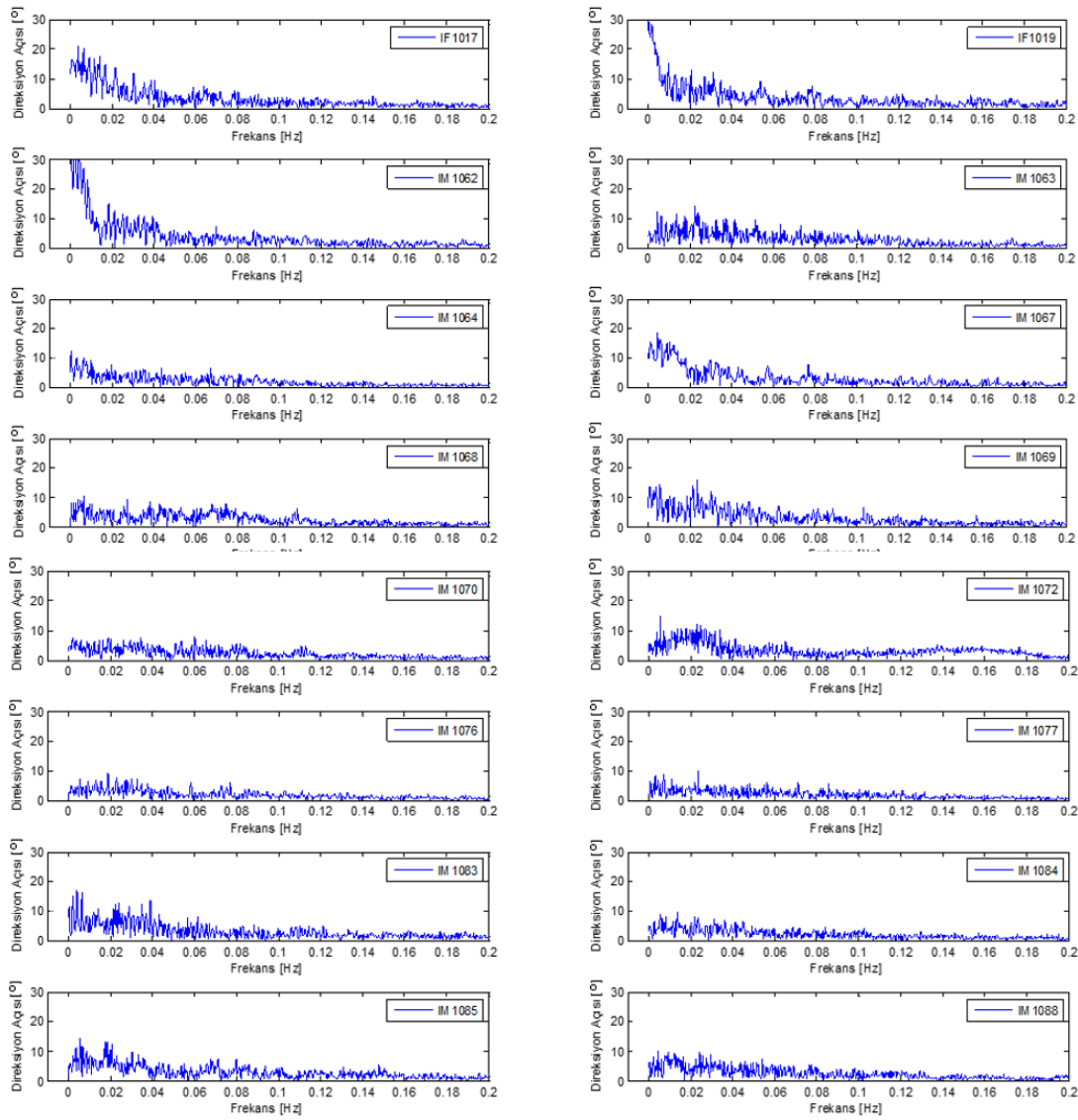
$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi k \frac{n}{N}} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.1)$$

FFT denklemleri [12] kaynağından alınmıştır. Nyquist teoremine göre örnekleme frekansı sinyalin içerisindeki en yüksek frekansın en az iki katı olmalıdır. Aşağıda 32 Hz’de örneklenmiş sinyallerin FFT’si alınırsa sinyal içerisindeki 16 Hz’e kadar olan harmonik bileşenler görülebilir [13].



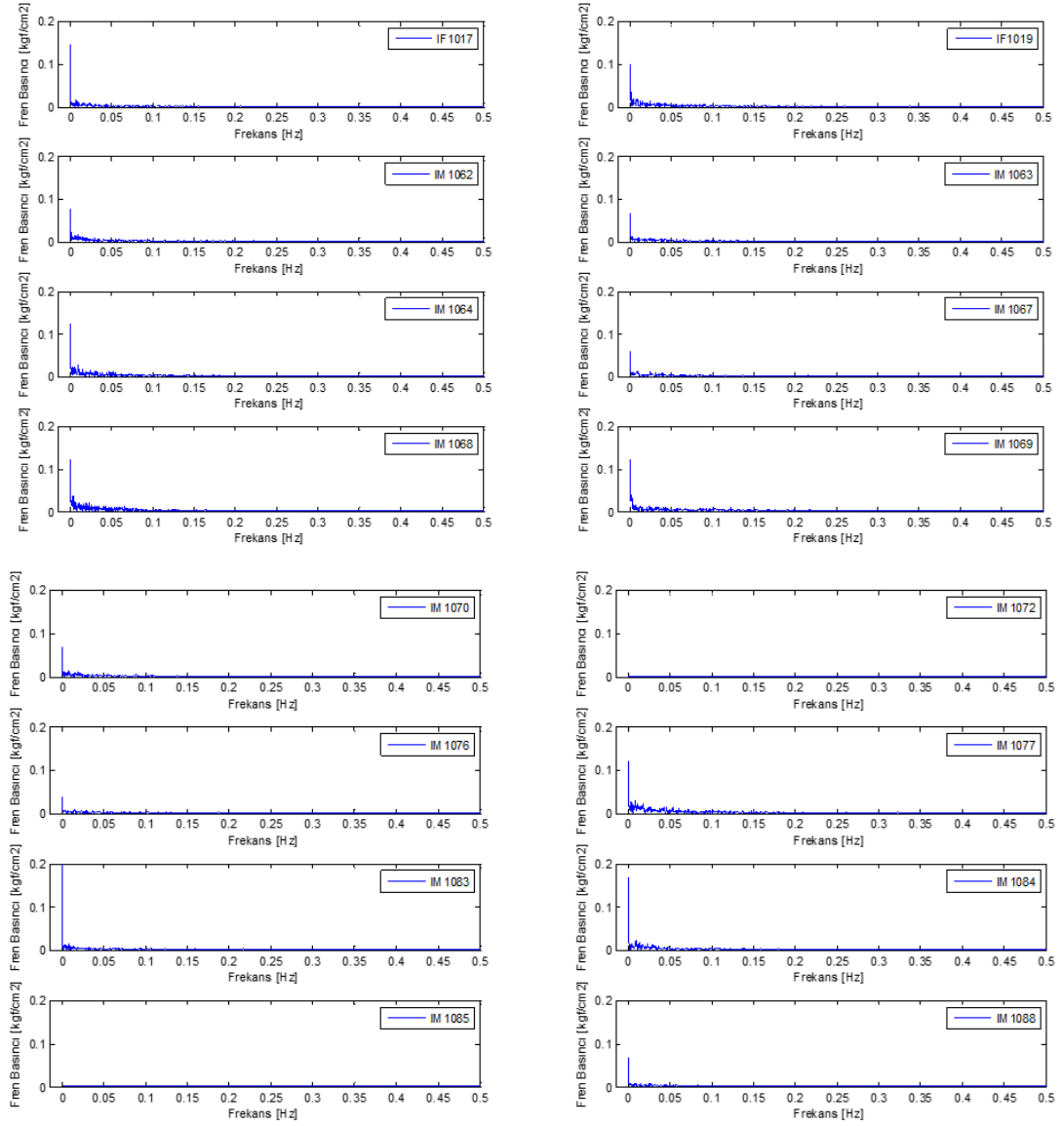
Şekil 2.9 : Direksiyon açısı frekans spektrumları.

Direksiyon açısı frekans spekturumunda 0 Hz’de yükseliş olma sebebi FFT işlemi alırken direksiyon açısı sinyalinde sabit terimlerin de bulunmasıdır.



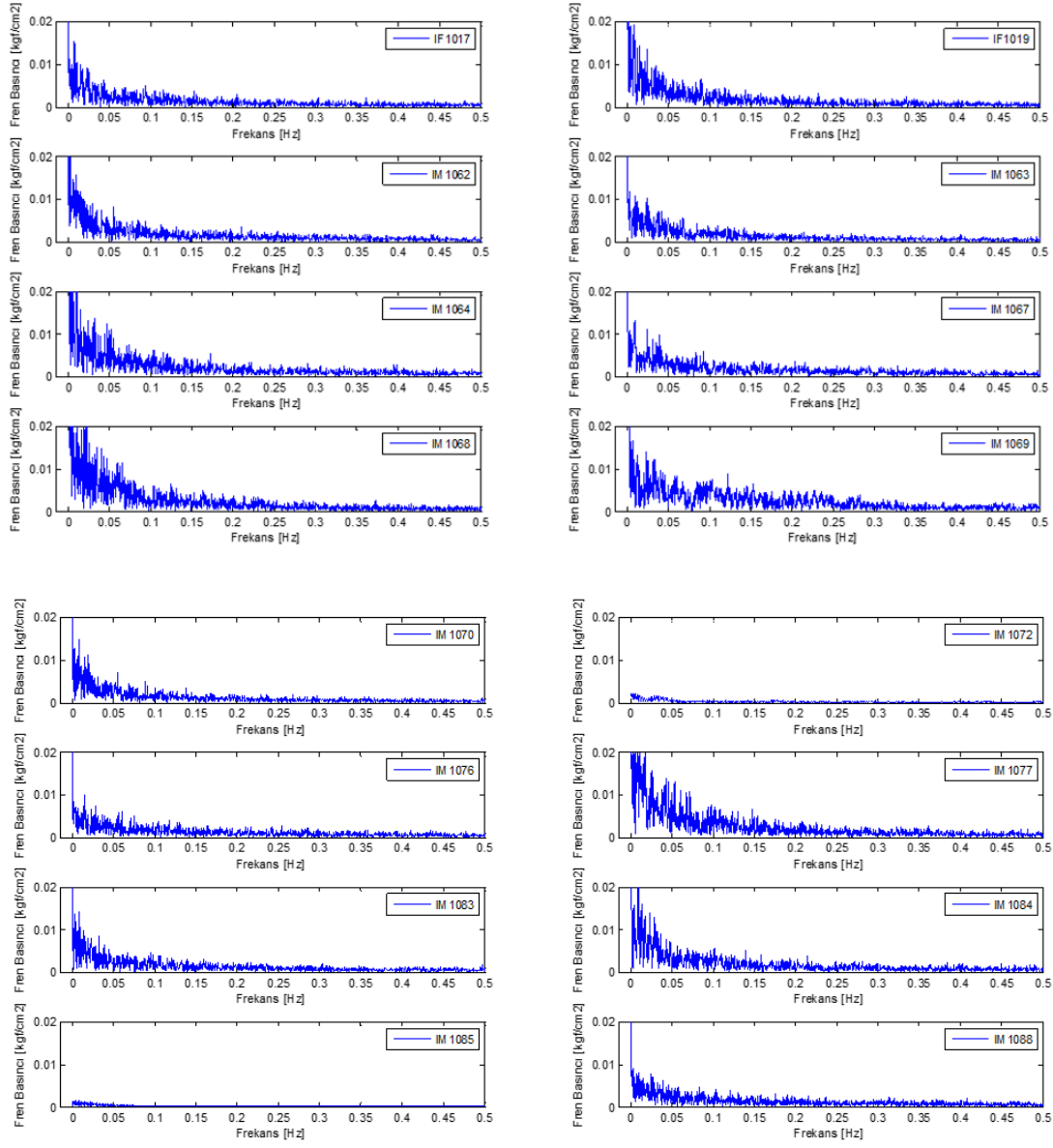
Şekil 2.10 : Direksiyon açısı frekans spektrumlarına yakından bakış.

Frekans spektrumunu gösteren Şekil 2.9, 2.10, 2.11, 2.12 ve 2.13 incelenirse hepsinin ortak özelliğinin 1-2 Hz frekansları üzerinde içerdikleri bileşenlerin düşük genlikte olmasıdır. Bu özellik sürücülerin 1 sn ve üzeri zamanlarda düşük genlikte tepki verebildiğini gösterir. Shi doktora tezinde bir sürücü için direksiyon açısı frekans spektrumunu incelemiş ve direksiyon açısı dönüş frekanslarının genellikle 0.3 Hz'den az olduğunu bulmuştur [1]. Igarashi ve diğerleri 800 sürücü için Japonya'da yapılan 1999-2001 yılları arasındaki testte pedallara uygulanan basıncın frekans spektrumunda düşük frekans bölgesinde genliklerin yüksek olduğunu tespit etmiştir. Bunun da pedal basınçlarının yavaş değişme eğiliminde olduğunu gösterdiğini belirtmiştir [2]. Aynı sonuç buradaki Şekil 2.11, 2.12 ve 2.13'de de gözlenmektedir.

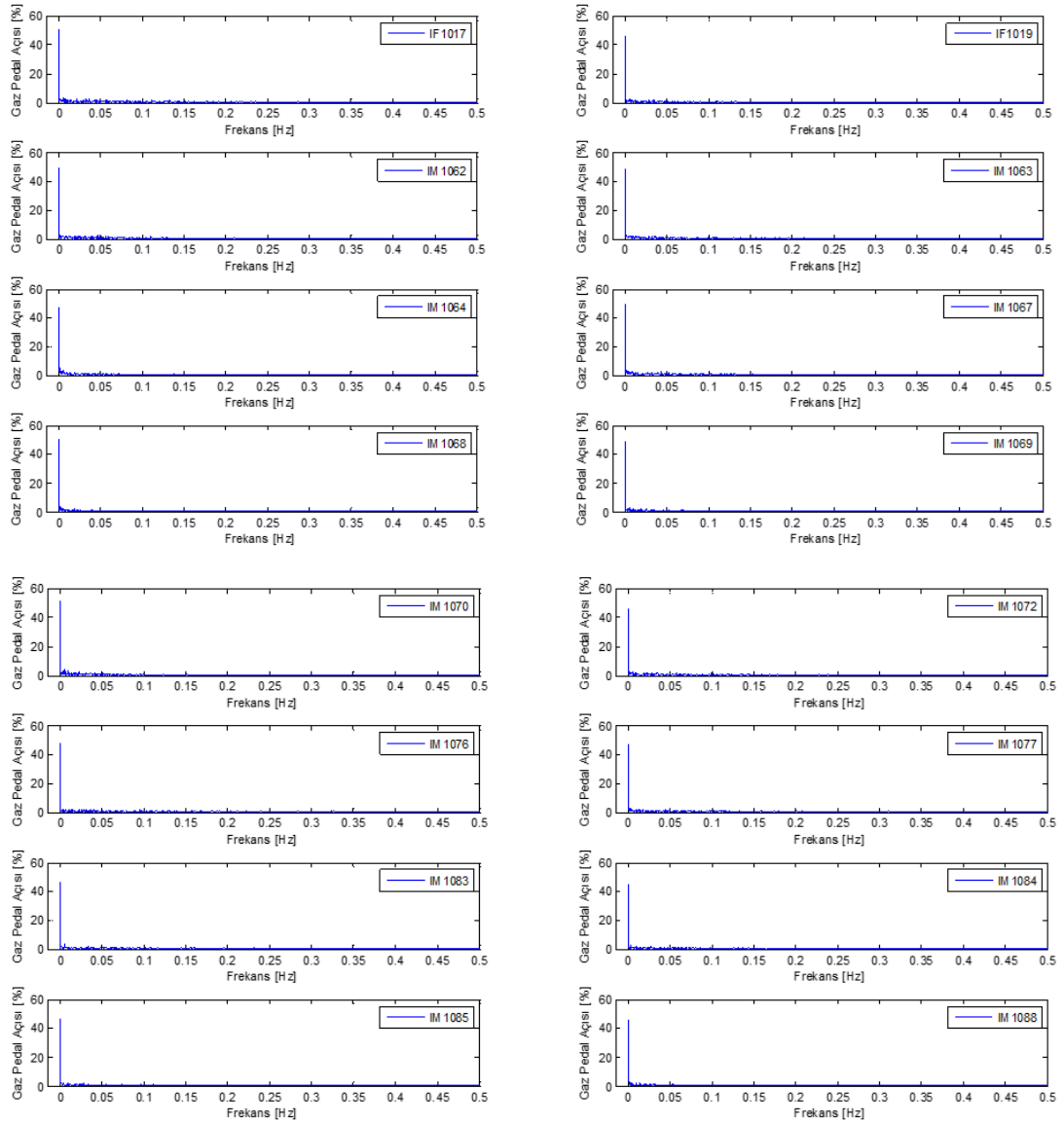


Şekil 2.11 : Fren basıncı frekans spektrumları.

Şekil 2.11 ve 2.12’de fren basıncı frekans spektrumunda 0 Hz’de yükseliş olma sebebi FFT işlemi alırken fren basıncı sinyalinde sabit terimlerinde bulunmasıdır.



Şekil 2.12 : Fren basıncı frekans spektrumları.



Şekil 2.13 : Gaz pedal açısı yüzdesi frekans spektrumları.

Şekil 2.13’de görülen gaz pedal açısı yüzdesinin frekans spekturumunda 0 Hz’de yükseliş olma sebebi FFT işlemi alırken gaz pedalı sinyalinde sabit terimlerinde bulunmasıdır.

2.3 Standart Sapma

Olasılık kuramı ve istatistik bilim dallarında, bir anakütle veya bir örneklem veya bir olasılık dağılımı veya bir rassal değişken için standart sapma, veri değerlerinin yayılımının özetlenmesi için kullanılan bir ölçüdür.

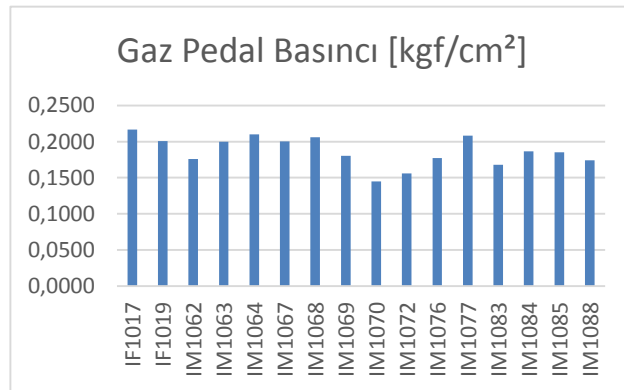
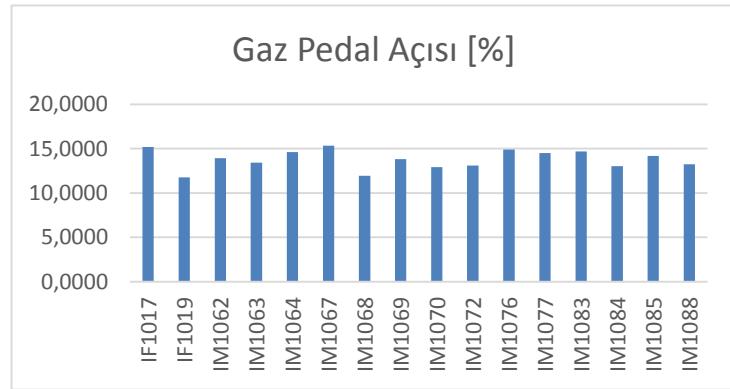
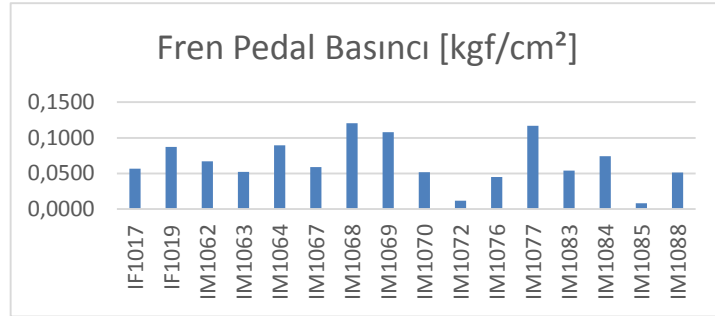
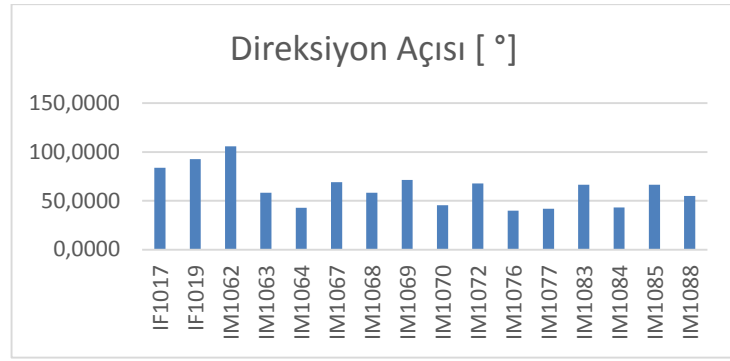
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.2)$$

Daha matematiksel bir ifade ile Denklem 2.2’de verilen standart sapma “ σ ”, 1’den N. veriye kadar olan x_i değerlerinin aritmetik ortalama $\bar{x}$ ’den farklarının karelerinin toplamının veri sayısı “N”e bölümünün kare köküdür, diğer bir ifadeyle verilerin ortalamadan sapmalarının kareleri toplamının ortalamasının karekökü olarak tanımlanır.

Çizelge 2.1 : Farklı sürücüler için standart sapmalar.

Sürücü	Direksiyon Açısı [°]	Fren Pedal Basıncı [kgf/cm ²]	Gaz Pedal Açısı [%]	Gaz Pedal Basıncı [kgf/cm ²]
IF1017	83,8975	0,0564	15,2052	0,2169
IF1019	92,5430	0,0871	11,7831	0,2007
IM1062	105,7866	0,0668	13,9432	0,1758
IM1063	58,2567	0,0522	13,4372	0,1997
IM1064	42,9077	0,0895	14,6299	0,2102
IM1067	68,9222	0,0588	15,3469	0,2003
IM1068	58,3260	0,1207	11,9613	0,2059
IM1069	71,3585	0,1080	13,8131	0,1804
IM1070	45,3631	0,0518	12,9101	0,1448
IM1072	67,8120	0,0117	13,1007	0,1561
IM1076	39,8387	0,0450	14,9090	0,1772
IM1077	41,9922	0,1167	14,5245	0,2083
IM1083	66,4102	0,0540	14,6832	0,1679
IM1084	43,2864	0,0742	13,0195	0,1864
IM1085	66,5868	0,0081	14,1996	0,1852
IM1088	54,8231	0,0512	13,2374	0,1741

Standart sapmanın büyük olması veri noktalarının ortalamadan daha uzağa yayıldıklarını; küçük olması ise ortalama etrafında daha yakında gruplaştıklarını gösterir. Çizelge 2.1’de farklı araç sürücüleri için standart sapmalar verilmiş ve Şekil 2.13’te grafiğe dökülmüştür.



Şekil 2.14 : Farklı sürücüler için ilgili standart sapmalar.

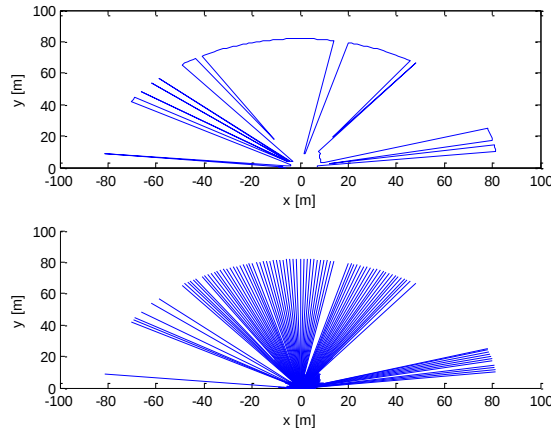
Burada incelenen veriler ışığında sürücülerin sürüş karakteristiklerinin değişkenlik gösterdiği söylenebilir. Otonom araç veya İleri Sürüş Destek Sistemine sahip bir araç kullanıldığında trafikte tehlike yaratabilecek yüksek basınçta frenleme, ani ivmelenmeler söz konusu olmayacaktır ve agresif sürücülerin oluşturduğu tehlikeli

durumlar trafikteki diğ er araçları tehlike atmayacaktır. Otonom araç ve İleri Sürüş Destek Sistemlerine olan ihtiyaç sürücülerin karakteristiğinin değışkenlik göstermesinden kaynaklanmaktadır.

3. LİDAR VERİ ANALİZİ İLE ÖNDEKİ ARACI TAKİP SÜRESİNİN BELİRLENMESİ

3.1 Lidar Veri İşleme

İleri Sürücü Destek Sistemleri (İSDS, İngilizcesi: ADAS), Adaptif Seyir Kontrolü (ASK), Kooperatif Adaptif Seyir Kontrolü (KASK), Çarpışma Uyarı ve Önleyici Sistemler ve yüksek otomasyonlu sürüş için öndeki aracın bağıl konumu ve hızı hakkında bilgiye ihtiyaç vardır. Uygulamada öndeki aracı takip süresi (ingilizcesi: time headway, ingilizce kısaltması: THW) kullanılır. Tezin bu bölümünde Güvenli Sürüş verileri kullanılarak sürücülerin İstanbul'da kullandıkları takip süreleri değerlendirilecektir. Takip süresi değerlerine göre İstanbul'daki araçlarda boyuna yönde otomatik kontrolün önemi vurgulanacaktır. Takip süresini elde etmek için genelde radar kullanılırken, lidar tarama verisi çevre koşulları ile ilgili daha çok bilgi sağlayabildiğinden hem İSDS'nin gelecekteki uygulamalarında hem de takip süresi hesabında lidar kullanılması beklenmektedir.



Şekil 3.1 : Lidar verisi çizim örnekleri.

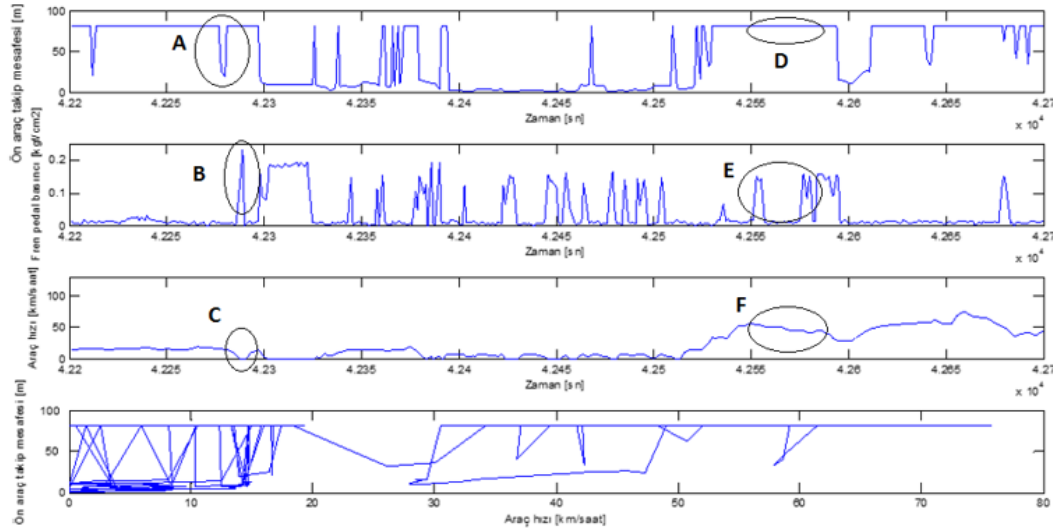
Bu sebeble bu bölüm lidar verisi analizi üzerine yoğunlaşacaktır. Analizlerde Güvenli Sürüş Projesi deneylerinden alınan bir sürücünün verileri kullanılacaktır. İlk olarak bu sürücü için takip zaman karakteristiği incelenecektir. Daha sonra araç tespiti ve tespit edilen aracın takibi için lidar verisi kullanılacaktır. Araç takibi Kalman Filtresi

kullanılarak gerçekleştirilecektir. Şekil 3.1’de lidar verisinin farklı şekillerde çizdirilmesine iki örnek verilmiştir.

3.2 CAN Veriyolu-Fren ve Gaz Pedal Basıncı ile Lidar Örneklemesi

Zamanlarının Eşitlenmesi

Uyanık araçında kullanılan Sick marka lidar 1 Hz frekansında örnekleme yapmakta, iki kanallı bir A/D dönüştürücüden alınan fren basıncı ve CAN veriyolundan alınan araç hızı ise 32 Hz frekansında örneklenmektedir. Bu veriler beraber incelenmek istenirse, aynı zamanlara karşılık gelen veriler incelenmelidir. Bu nedenle lidar, CAN ve A/D dönüştürücü verileri 1 Hz örnekleme frekansına indirgenerek karşılaştırılmalıdır.



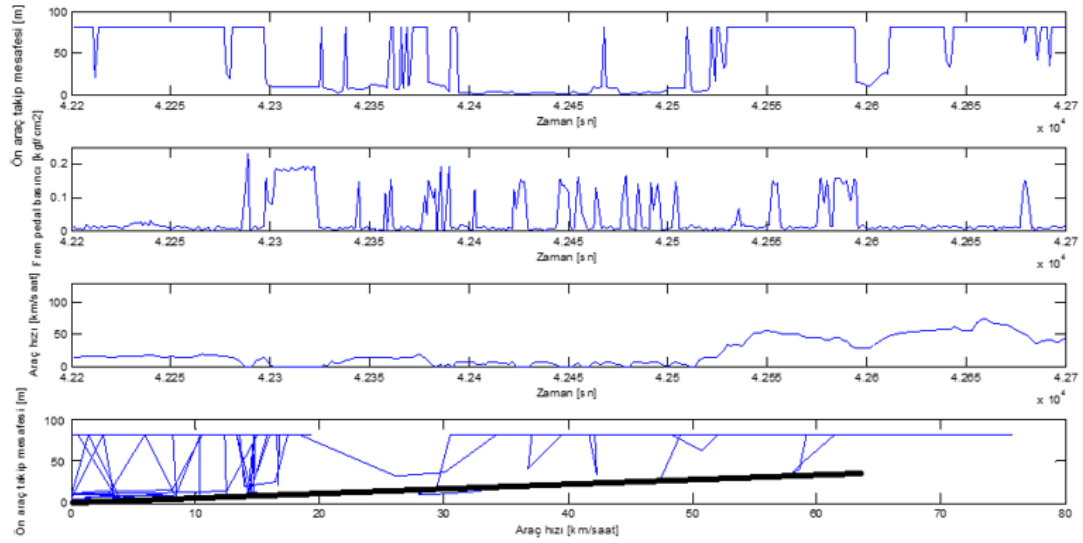
Şekil 3.2 : Araç hızı, fren basıncı, ön araç mesafe verisi ile araç hızına bağlı ön araç mesafesi grafiği.

Şekil 3.2’de IM1088 kodlu sürücüsünün seçili bir zaman aralığında aynı örnekleme frekansında lidar, fren basıncı ve araç hızı verileri gösterilmiştir. Elde edilen ön araç takip mesafesi, lidar taramasının 90°’deki yani araca dik doğru boyunca elde edilen verisi kullanılarak hazırlanmıştır (burada tarama aralığı daha geniş tutulabilir, örneğin 88° ile 92° arası). Ayrıca Şekil 3.2’de olduğu gibi ön araç mesafesi fren basıncı arttıkça zaman azalmıştır, ön araç mesafesi sürücü hakkında ön araçla güvenli bir mesafeyi koruyabilip koruyamadığı ve fren pedalına yüksek kuvvet ile bastıysa fren basıncı yüksek olacağı için tehlikeli frenleme durumları hakkında bilgi verebilmektedir. Şekil 3.2’de ön takip mesafesi maksimum 81 metre değeri olduğunda Güvenli Sürüş aracının

önünde herhangi bir nesne bulunmamaktadır. A ile yuvarlak içine alınan yerde aniden aracın önüne bir nesne çıkmış ardından B kısmında bu nesneyi farkedene sürücü fren pedalına basmış ve C’de hızı azalmıştır. Yine D kısmında Güvenli Sürüş aracının önünde bir nesne olmamasına karşın E’de fren pedalına basmış ve F’de görüleceği üzere hızını azaltmıştır. Bu durum viraja girmiş olma ihtimalini gösterebilir. Ayrıca bu yorumlar farklı sensörlerden gelmiş olan verilerin doğru zamanlamayla birleştirilebildiğini gösterir.

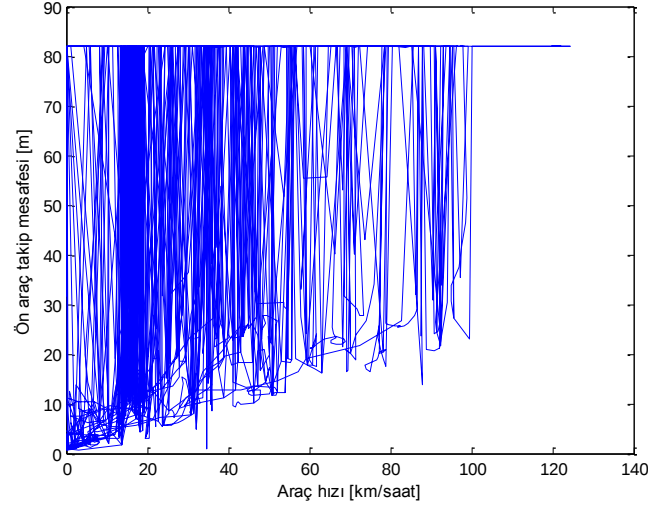
3.3 Sürücü Karakteristiğinin Tespiti

Şekil 3.3’de araç hızına bağlı olarak ön araç mesafesine bakıldığında bu grafikte görülen ve hız arttıkça artan ön araç mesafesi sürüş karakteristiği hakkında bilgi verir. Şekil 3.3’te bu karakteristik, koyu siyah renkle çizilmiştir. Buradaki karakteristiğin farklı sürücüler için değişimini saptamak bu tezin hedeflerinden birisidir.



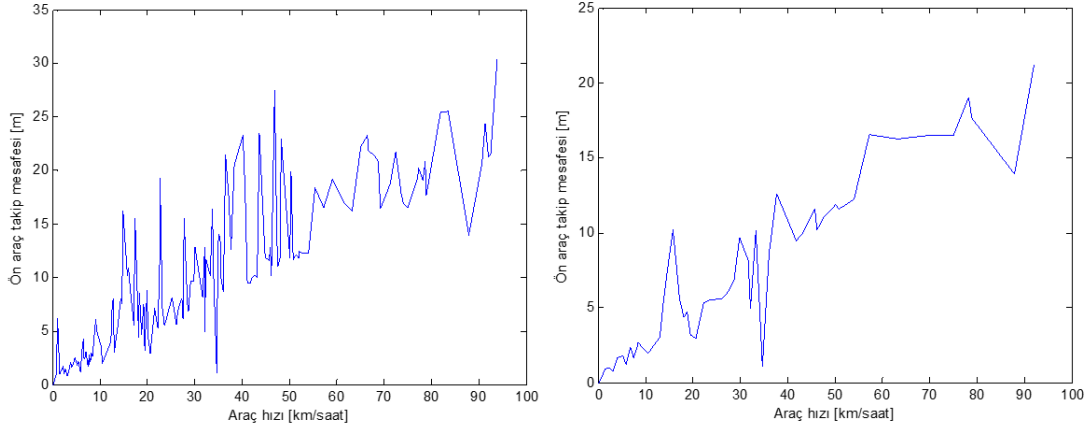
Şekil 3.3 : Araç hızına bağlı ön araç mesafesi ile sürücü karakteristiği çıkarımı.

Görüldüğü üzere bu veriler sürüş esnasındaki belirli zaman aralıkları için olduğu gibi sürüş işleminin tamamı için de incelenebilir. Şekil 3.4, IM1088 kodlu sürücünün tüm izlediği rota boyunca 46:52 dakika süresince ön araç mesafesinin araç hızına bağlı grafiğidir.



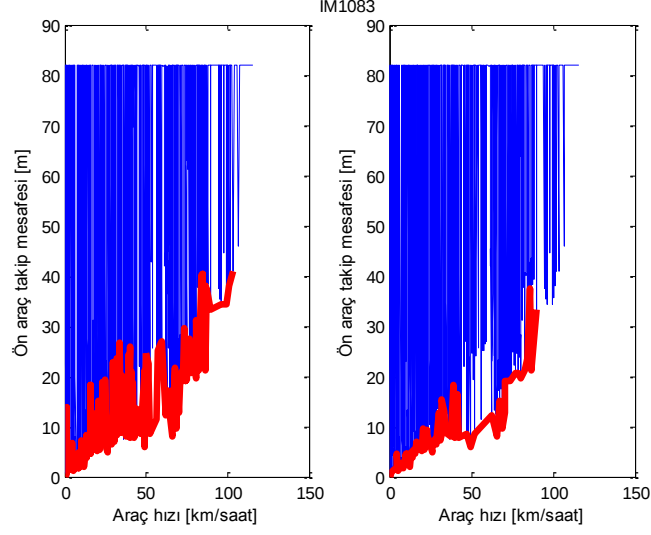
Şekil 3.4 : Ön araç mesafesinin araç hızına bağlı grafiği.

Bu sürücü yaklaşık 36 km/saat hızı ile giderken ön araç mesafesi tehlikeli bir duruma gelmiştir. Sürücü ile ilgili değişen araç hızlarında minimum takip mesafesini bulmak için yerel minimum hesabı ile Şekil 3.5'teki soldaki grafik minimumları sağdaki grafikte ise daha kaba bir grafik elde etmek için yerel minimumların yerel minimumları bulunmuştur.



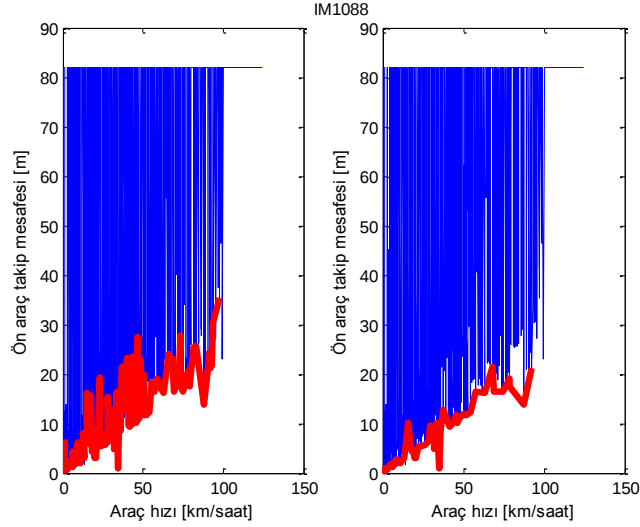
Şekil 3.5 : Ön araç mesafesinin araç hızına bağlı verilerinde lokal minimumlar.

Elde edilmiş yerel minimumlar Şekil 3.6'nın ilk grafiğinde ve yerel minimumların yerel minimumları ikinci grafiğinde ön araç mesafesinin araç hızına bağlı grafiği üzerinde kırmızı çizgi ile gösterilmiştir.



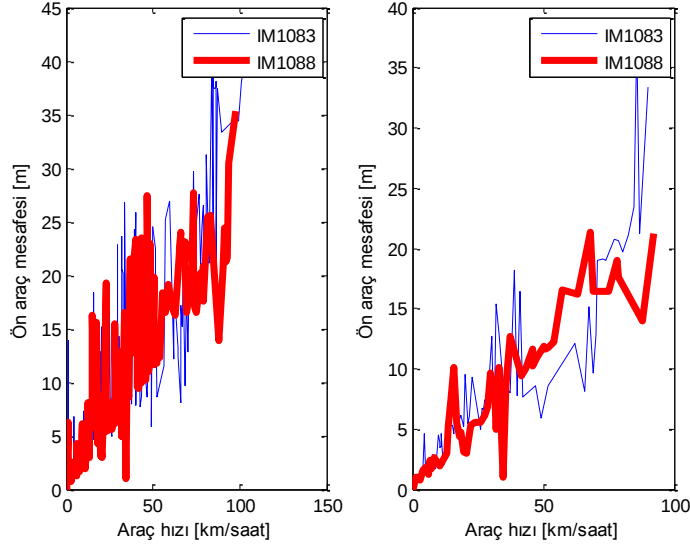
Şekil 3.6 : IM1083 kodlu sürücü için yerel minimumlar ile ön araç mesafesi-araç hızı grafiğinin birleştirilmesi.

Şekil 3.6 ve 3.7’de ön araç mesafesi araç hızına bağlı olarak sıralanarak çizdirilmiştir. Şekil 3.6 ile 3.7 karşılaştırılırsa aynı araç hızlarında takip mesafesinin sürücü karakteristiği ile ilgili ipucu vereceği görülebilir.



Şekil 3.7 : IM1088 kodlu sürücü için yerel minimumlar ile ön araç mesafesi-araç hızı grafiğinin birleştirilmesi.

IM1083 ve IM1088 kodlu farklı iki sürücünün aynı araç hızlarında farklı minimum mesafe değerlerinde ön aracı takip etmeleri bu sürücülerin sürüş karakteristikleri hakkında bilgi vermektedir. Şekil 3.8’de ise iki farklı sürücünün yerel minimum ve yerel minimumun yerel minimumu üst üste çizdirilmiştir ve aradaki sürüş farkı belirgin olarak görülmektedir.



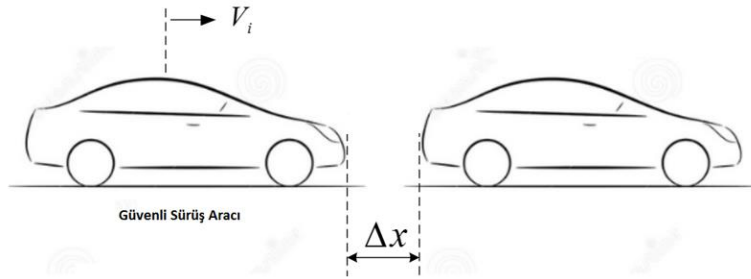
Şekil 3.8 : İki farklı sürücü için yerel minimum (soldaki şekil) ve yerel minimumun yerel minimumu (sağdaki şekil) grafikleri.

3.4 Takip Süresinin Belirlenmesi

Araçlar arası bağıl mesafe Δx 'in takip eden araç hızı v_i 'ye oranı ile ifade edilen takip süresi THW önemli bir sürüş parametresidir. Diğer bir ifade ile takip eden aracın lider aracın şu anki konumuna ulaşması için geçen süredir.

$$THW = \frac{\Delta x}{V_i} \quad (3.1)$$

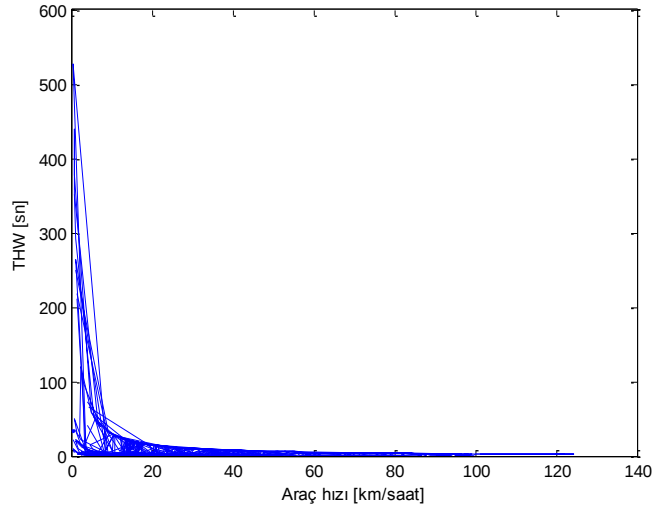
Denklem 3.1'de verilen denklem ile ifade edilir, birimi saniyedir. Δx ve v_i terimleri Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 : Bağıl mesafe ve araç hızının gösterimi.

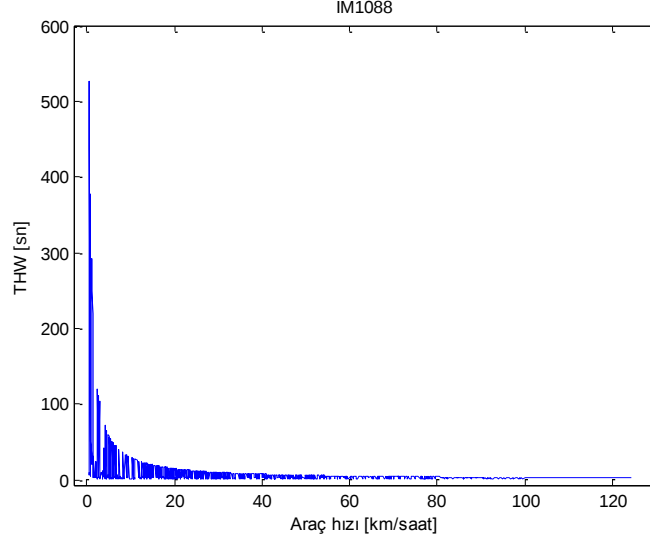
Güvenli Sürüş aracının IM1088 kodlu sürücüsü için hesaplanan THW Şekil 3.10'da görülmektedir. Zaman içerisinde araçlar arası mesafenin ve araç hızının değişmesi ile

THW da değişir. x eksenini araçlar arası mesafe ve y eksenini THW'ı gösteren grafik zamansal artıma göre çizdirilirse kolay okunabilen bir grafik elde edilemez.



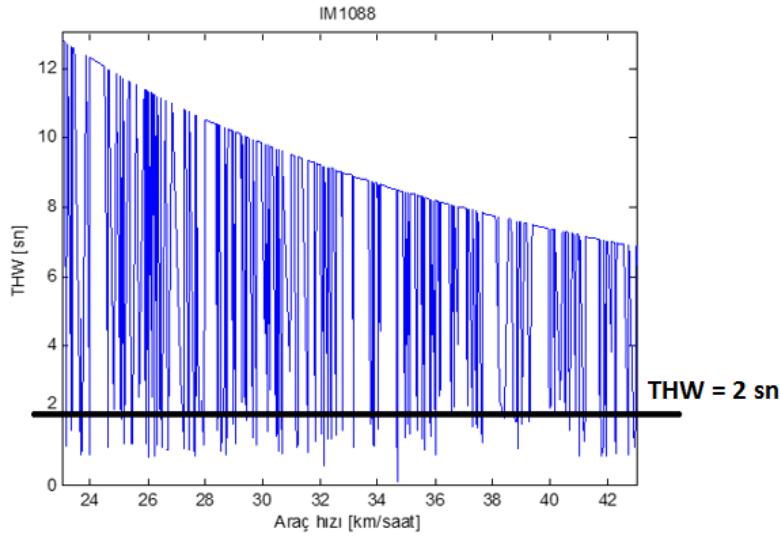
Şekil 3.10 : THW parametresinin araç hızına bağlı değişimi.

Bu sebeple zamanı göze almayarak THW zamanını ve araç hızını, araç hızına göre küçükten büyüğe doğru sıralayarak çizdirildiğinde daha anlamlı olabilecek Şekil 3.11'deki grafiği elde edilmiştir. Bu grafikte araç hızları arttıkça THW süresinin üst sınırının düşeceğini göstermektedir. Bu durumun nedeni de lidar sensörü araç tespit etmediğinde lidarın maksimum ölçebildiği mesafe olan $\Delta x = 81$ metreyi göstermesidir. Bu durum Uyanık aracının öndeki aracın konumuna gelme süresinin araç hızları arttıkça düşeceğini göstermektedir. Güvenli sürüş için literatürde belirtilen THW değeri binek araçlar için 2 sn'dir ve yüksek hızlarda 1.3 sn'ye kadar düşebilir [28]. Bu sürenin altına düşüldüğünde kaza riski yükselmektedir ve güvenli takip mesafesi aşılmış olur.



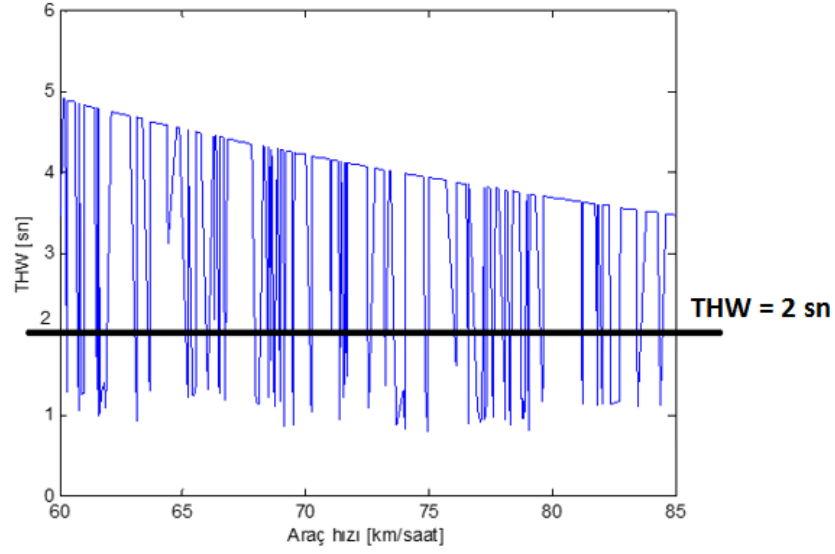
Şekil 3.11 : THW parametresinin araç hızına bağlı değişimi.

THW zamanına daha yakından bakılırsa IM1088 sürücüsünün zaman zaman güvenli takip zamanı olan 2 sn'nin altına düştüğünü görülmüştür. Şekil 3.12, Uyanık aracının hızının 23-43 km/saat aralığında olduğu durumda THW zamanının değişimini göstermektedir. Bu şekilde 2 sn THW sınır değeri düz çizgi ile çizilmiştir.



Şekil 3.12 : THW parametresi değişimine yakından bakış.

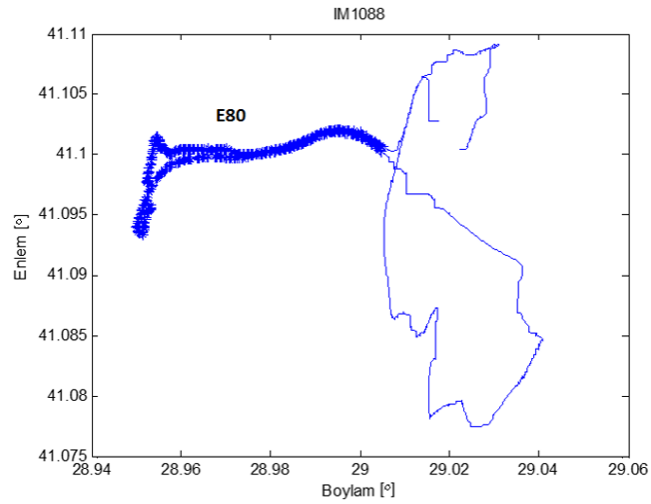
Şekil 3.13'te Uyanık aracının hızının 55-87 km/saat aralığında olduğu durumda THW zamanının değişimini göstermektedir ve 1.3 sn'nin de altına düşülmüştür. Araç hızlarının yükselmesiyle THW zamanında olan sıçrayışların azaldığı sonucu çıkartılabilir.



Şekil 3.13 : THW parametresi değişimine yakından bakış.

3.5 GPS Verisini Alma (Belirli Enlem Boylam İçin)

Uyanık aracının takip ettiği rota içerisinde E80 (TEM) çevre yolu da vardır. Çevre yolunda sürücü şehir içi yollara göre daha yüksek hızlarda yol alabilir. GPS verisi yol güzergahını kısımlara ayırarak incelemeye olanak tanır. Şekil 3.14'te 29.0052° boylamından küçük olan verileri alınmıştır.

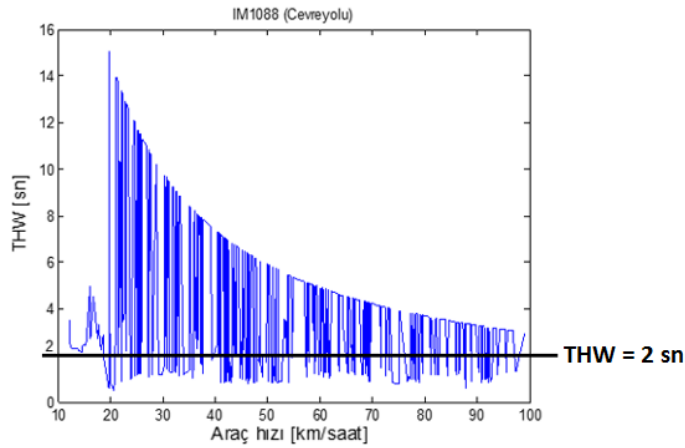


Şekil 3.14 : Uyanık aracının E80 çevreyolundaki rotası.

Şekil 3.14'te koyu renk ile çizilen veriler çevreyolunda yüksek hızlı sürüşe denk gelmektedir.

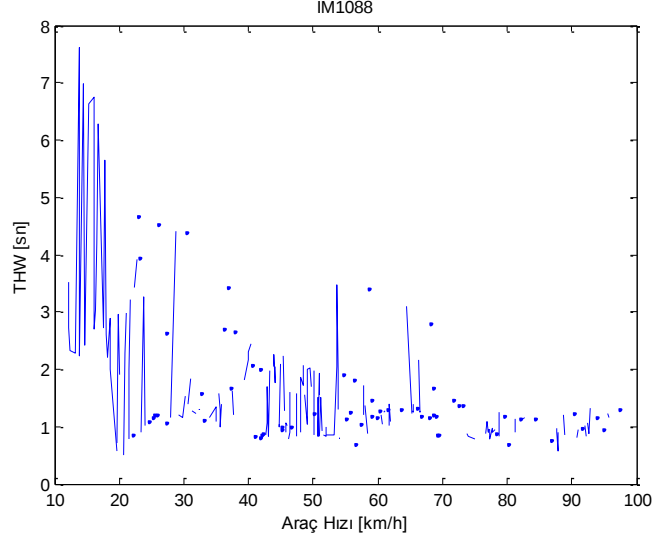
3.5.1 Çevre yolunda THW verisi incelemesi

Çevreyolunda (E80) trafik durumu için Şekil 3.14'teki 29.0052 boylamından küçük olan veriler alınarak analiz edilebilir. Çevreyollarında sürücülerin trafik akışına uymak için araçlarını daha hızlı kullanmaları gerekmektedir. Araçların hızları artarken bağlı mesafe artmaz ise THW da azalır. Bunun anlamı kaza risklerinin artmasıdır. Şekil 3.15'deki verinin minimum THW değeri 0.5143 sn olmuştur ve dikkat edilirse 12 km/saat araç hızından daha düşük hız değeri görülmemektedir. Bunun anlamı çevreyolunda trafik akışı hiç durmamıştır.



Şekil 3.15 : Çevreyolu üzerinde THW parametresinin incelenmesi.

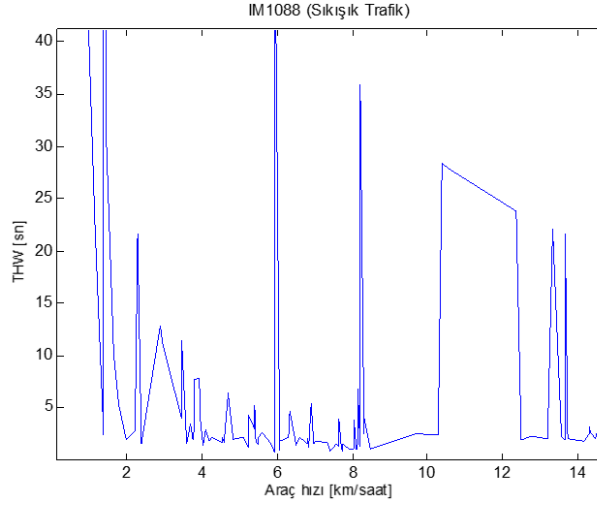
Şekil 3.15'te görülen araç hızı arttıkça eğrisel azalan maksimum THW çizgisine neden olan lidar sensörün önde araç görmediği zaman $\Delta x = 81$ metre ölçüm yapmasıdır. Bu durumdan Bölüm 3.6'da anlatılacağı şekilde ön araçları Kalman filtresi ile tespit ve takip ederek Şekil 3.16'da görüldüğü gibi kurtulunabilir. Böylece THW istatistiksel analizlerinde tespit edilen minimum değer değişmezken ortalama, maksimum ve standart sapma değerleri daha doğru alınmış olur.



Şekil 3.16 : Çevreyolunda Kalman Filtresi ile THW parametresi incelemesi.

3.5.2 Sıkışık trafikte THW incelemesi

Sıkışık trafik durumu için araç hızının minimum olduğu durumlar alınarak analiz yapılabilir. Şekil 3.3’de 440-640 sn’ler arasının min. araç hızlarına tekabül ettiği görülebilir. Sıkışık trafikte hızlar azaldığı için araçlar arası mesafeler daha az olabilir. Şekil 3.17’deki verinin minimum THW değeri 0.7309 sn bulunmuştur.

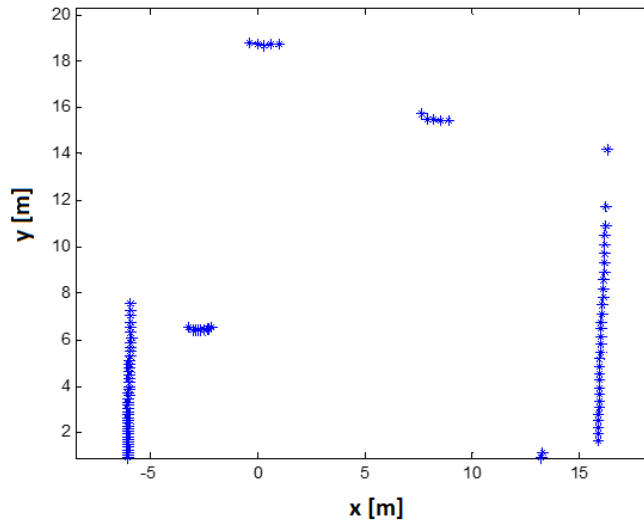


Şekil 3.17 : THW parametresinin sıkışık trafikte incelenmesi.

THW histogramında 1 sn’nin altındaki değerler, bu sürücünün ön araca çok yakın sürme eğilimini göstermektedir.

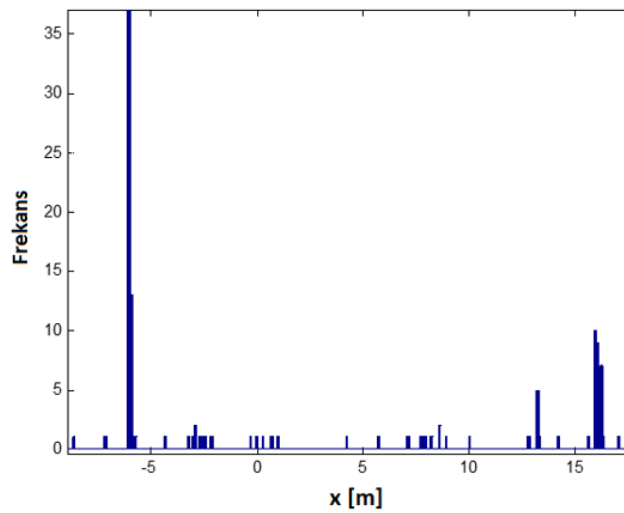
3.5.3 Yol sınırlarını belirleme

Yol sınırı belirleme yol içinde kalmak için önemlidir. Eğer bariyer veya yol sınırı yolda mevcut ise, Şekil 3.18'deki gibi aynı x koordinatı civarında tespit edilmiş tarama sayısında bir artış olur.



Şekil 3.18 : Uyanık aracı lazer taraması.

Uyanık aracının lidarı Şekil 3.18'de $x = 0$, $y = 0$ noktasında bulunmaktadır. Her x ve y ekseninin birimi metredir. x ekseninin -6 ve 16 m noktalarında yol sınırları dik doğru şeklinde görülmektedir.



Şekil 3.19 : Tespit edilen nesnelerin x koordinatının frekansı.

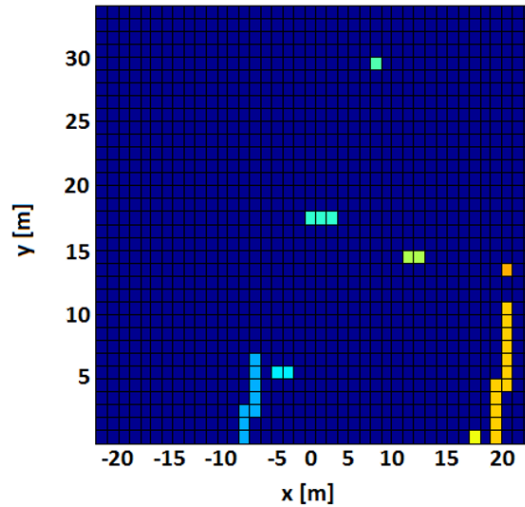
Yol sınırları Şekil 3.19'da görüldüğü gibi histogram grafikleri ile tespit edilebilir. x eksenlerinde yaklaşık olarak -6 ve 16 m'de, lazer tarayıcı ölçümlerinin yansımalarının frekansı artmaktadır. Bu konumlar sol ve sağ yol limitlerine karşılık gelir [21].

3.6 Segmentasyon Yöntemleri

Segmentler düzlem üzerinde birbirine yakın olan mesafe ölçümleri setidir. Segmentasyona ayrıca kümelenme de denir ve iki farklı noktanın aynı nesneyi temsil edip etmediğini gösterir. Bu tezde kafes temelli yöntem ile nokta mesafe temelli yöntem anlatılmış ve araç takip ve izlenmesinde nokta mesafe temelli yöntem seçilmiştir.

3.6.1 Kafes temelli segmentasyon yöntemi

Lazer ile aracımızın ön kısmı taranır. Bu alan kafes (grid) denilen parçalara (hücelere) bölünür. Bu çalışmada, hücre çözünürlüğü 1 m^2 'dir. Küçük nesneleri ayırt edebilmek için bu çözünürlüğün artırılması gerekmektedir. Eğer bir tarama bir hücrenin içine düşerse, bu hücrenin içerisinde bir nesne olma olasılığı %90'dır. Bu değere hücre olasılığı denir. Lazer taramasındaki bir tarama bir hücrenin içine düşmezse hücrenin içerisinde bir nesne olma olasılığı %10'dur. Bilinmeyen duruma sahip hücrelerin içerisinde bir nesne olma olasılığı %50'dir. Kafes temelli yöntem genellikle görüntü işleme ve robotik alanlarında kullanılmaktadır [18].



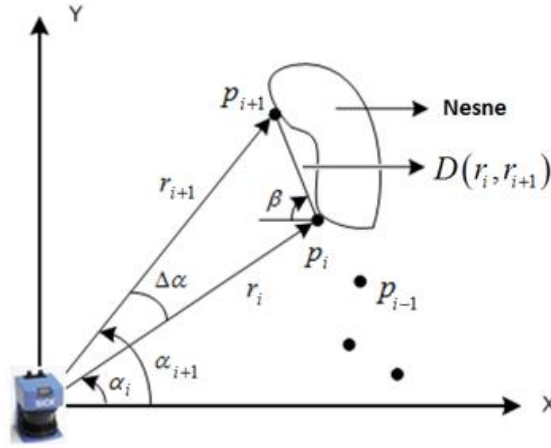
Şekil 3.20 : Uyanık aracının ön taramasının kafes temelli gösterimi.

Şekil 3.20'de lidar taramasının kafes temelli gösterimi görülmektedir. X ekseninin 0 noktası Uyanık aracının lidar sensörünün önünü temsil etmektedir. Şekil 3.20'de x ekseninin -8 m noktasından y eksenine uzanan yol bariyeri veya çevresel sınır, sağ 20 m noktasından y eksenine uzanan ise $x = 0$ noktasından uzak mesafede olduğundan çevresel sınır, -5 m ve y eksenin 5 m noktasında da bir nesne tespit edilmiştir. Hücelere doluluk olasılığı atandıktan sonra, bağlı bileşen algoritması (ingilizcesi:

connected components labeling, ingilizce kısaltması: CCA) uygulanırsa ilgili hücrelerin bağlı olup olmadığı anlaşılır. Bu yöntem nesne boyutlarını verir ve tespit edilen nesnenin araç, kamyon veya yol sınırı olup olmadığını tespiti için sağlar [18].

3.6.2 Nokta mesafe temelli segmentasyon yöntemi

Literatürde segmentasyon metodları, Nokta mesafe temelli yöntemler ve Kalman Filtresi temelli yöntemler olmak üzere iki ana başlık altında toplanmıştır [19]. Burada nokta mesafe temelli segmentasyon yöntemi (ingilizcesi: point distance based segmentation, ingilizce kısaltması: PDBS) seçilerek kullanılmıştır [19]. Bu yöntem ardışık iki tarama noktası arasındaki mesafenin hesaplanmasını temel alır ve bu değeri bir eşik değeri ile karşılaştırır.



Şekil 3.21 : Lazer taraması ve bazı parametrelerin şematik gösterimi [19].

Şekil 3.21'deki Y eksenini aracın ön kısmını göstermektedir. Eğer $D(r_i, r_{i+1}) < D_{thd}$ şartı sağlanırsa, iki farklı lazer tarama noktası aynı nesneyi göstermektedir. Bu durumda kesitler ayrıktır denir. $D(r_i, r_{i+1})$ iki ardışık lazer tarama noktası arasındaki Öklid mesafesidir ve

$$D(r_i, r_{i+1}) = \sqrt{r_i^2 + r_{i+1}^2 - 2r_i r_{i+1} \cos \Delta\alpha} \quad (3.2)$$

formülü ile hesaplanır. $\Delta\alpha$ iki ardışık lazer taraması arasındaki açı değeri, r_i ve r_{i+1} i'inci ile i+1'inci ardışık lazer tarama açısındaki bağıl mesafeyi göstermektedir. D_{thd} eşik değeri ise

$$D_{thd} = C_0 + C_1 \min \{r_i, r_{i+1}\} \quad (3.3)$$

formülü ile hesaplanır. Burada C_0 gürültü azaltımında kullanılan sabit bir parametreyi gösterirken C_1 ise

$$C_1 = \sqrt{2(1 - \cos \Delta \alpha)} \quad (3.4)$$

eşitliği ile ifade edilir. Şekil 3.3'deki açı değeri β tespit edilmiş nesnenin yönelimini gösteren bir parametredir [19].

3.7 Kalman Filtresi ile Tespit Edilen Aracın Takibi

Kalman filtresi dinamik sistemin durumlarını tahmin eden bir algoritmadır. Burada kullanılma nedeni ise hareket halindeki aracın bağlı konum, hız ve belirsizliklerini tahmin etmektir. Bir sonraki lazer taramasında daha az hesaplama yükü ile kestirim yapmak için her bir tespit edilen araç için arama bölgesi vermektedir. Tespit edilmiş aracı çevreleyen bölgeye sınırlayıcı kutu (İngilizcesi: bounding box, oriented box, object box) adı verilir [20,22]. Analizde kontrol noktası olarak, tespit edilmiş aracın lazer tarama noktalarının ortalaması alınmıştır.

3.7.1 Araç dinamik durumu

İki ardışık lazer taramasında tespit edilmiş araçların doğrusal ve düzgün hareket ettikleri varsayılmıştır. Bu nedenle araçların dinamiği Denklem 3.5-3.8'de belirtilen sabit hız modeli ile temsil edilmiştir [21].

$$x_{k+1} = x_k + v_{x,k} T_k \quad (3.5)$$

$$y_{k+1} = y_k + v_{y,k} T_k \quad (3.6)$$

$$v_{x,k+1} = v_{x,k} \quad (3.7)$$

$$v_{y,k+1} = v_{y,k} \quad (3.8)$$

k indisi k'inci andaki lazer tarama numarası, x ve y x-y koordinatları, $v_{x,k}$ ve $v_{y,k}$ x eksenindeki ve y eksenindeki araç hızları ve T örnekleme zamanıdır. k+1 indisi ise k'inci lazer taramasından T zaman sonraki lazer taramasını gösterir.

$$X_{k+1} = A_k X_k \quad (3.9)$$

$$Y_k = H_k X_k \quad (3.10)$$

Denklem 3.9 ve 3.10'da durum uzay modeli verilen sabit hız modelinin içindeki terimler açık olarak Denklem 3.11 ve 3.12'de verilmiştir. A_k durum geçiş modelidir.

$$X_k = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ v_{x,k} \\ v_{y,k} \end{bmatrix} \text{ ve } A_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_k & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T_k \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

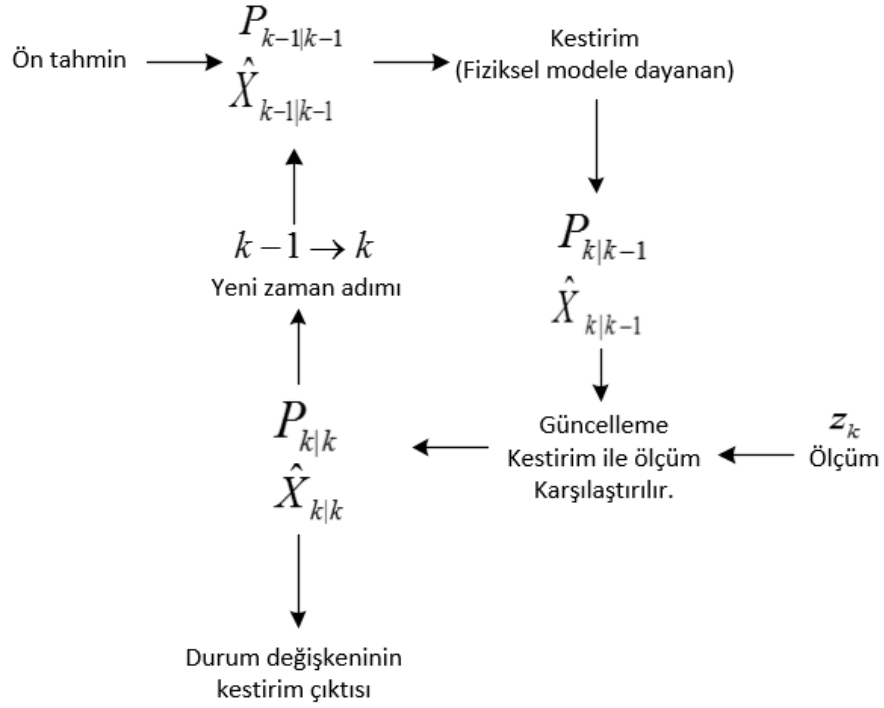
Gözlem matrisi Denklem 3.12'de verilmiştir.

$$H_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Durum uzay formülasyonundaki ilk iki denklem, (3.5) ve (3.6) nolu denklemleri gösterirken, diğer (3.7) ve (3.8) denklemleri sabit hızı göstermektedir [21].

Denklem 3.11-12 kullanılarak Kalman Filtresi ile durum tahmini yapılacaktır. Şekil 3.22'de gösterilen Kalman Filtresi algoritmasının çalışma prensibidir. İlk olarak ön tahmin kısmında olduğu gibi kovaryans matrisi ve durum değişkenleri tahmini yapılır.

Burada $P_{k-1|k-1}$ tahmini kovaryansı ve $\hat{X}_{k-1|k-1}$ tahmini durum değişkenlerini gösterir. k indisi ise zaman adımını temsil etmektedir ve burada k'inci zamana tekabül eden lazer tarama numarasını göstermektedir. Daha sonra durum uzay formülasyonu ile fiziksel modele dayanan kestirim yapılır ve kestirilen durum değişkeni $\hat{X}_{k-1|k-1}$ ile $P_{k-1|k-1}$ kestirilen kovaryanstır. Daha sonra sensörden gelen ölçüm verisi z_k ile kestirim güncellenir. Böylece $\hat{X}_{k|k}$ durum değişkeninin ve $P_{k|k}$ kovaryansın değeri hesaplanmış olur.



Şekil 3.22 : Kalman filtresi algoritması.

Bu değerler bir sonraki durum değişkenin ve kovaryansın bulunmasında ön tahmin olarak kullanılır. Bu döngü yapılan kestirim süresince devam eder [26]. Daha detaylı bilgi Bölüm 3.7.2, 3.7.3 ve 3.7.4’de verilmiştir.

3.7.2 Ön tahmin

Araçlar lidar verisi ile tespit edildikten sonra, geçerli durum vektörü ve kovaryans matrislerine ilk değer atanır. Araç takibi bir sonraki lazer taramasında başlar.

3.7.3 Kestirim

Kestirim işlemi alttaki kestirim denklemlerini her örnekleme lazer taraması için sırasıyla tekrarlayarak başarılır. Denklem 3.9 Kalman filtresinin kestirim kısmında Denklem 3.13 formunda ifade edilir. Q_k proses gürültü kovaryans matrisidir.

$$\hat{X}_{k|k-1} = A_k \hat{X}_{k-1|k-1} \quad (3.13)$$

$$P_{k|k-1} = A_k P_{k-1|k-1} A_k^T + Q_k \quad (3.14)$$

Tespit edilmiş aracın konumunu kestirmek için (3.13) ve (3.14) nolu denklemler kullanılır.

3.7.4 Ölçüm yenileme (güncelleme)

Belirlenmiş arama alanında, ilgili araç dikey ve yatay kenarlar tespit edilerek arama yapılmaktadır. Kestirilmiş araç konumu için araştırma alanı artık kovaryans denilen S_k matrisi yardımıyla hesaplanır [23,24]. İzlenen aracın konumu alınan ölçümlere göre yenilenir. R_k ölçüm gürültü kovaryans matrisidir.

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \quad (3.15)$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (S_k)^{-1} \quad (3.16)$$

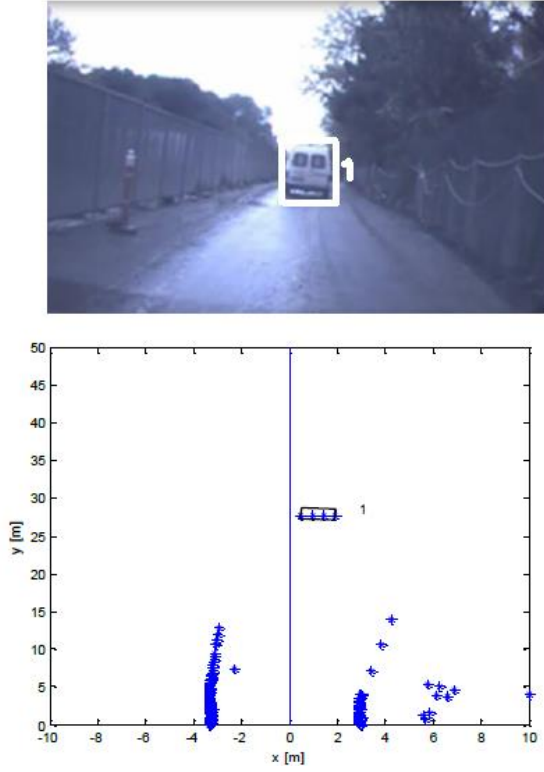
$$\hat{X}_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + K_k (z_k - H_k \hat{X}_{k|k-1}) \quad (3.17)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}^{-1} \quad (3.18)$$

Yukarıdaki denklemlerde, K_k Kalman kazancı, Z_k ölçme vektörü, H_k gözlem matrisi ve I birim matristir.

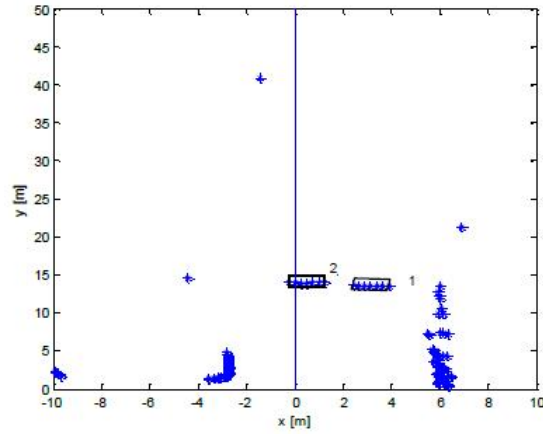
3.7.5 Kalman filtresi ile araç takibi sonuçları

Lidar verilerinden Kalman filtresi ile nesnelerin izlenmesi sonuçları bu bölümde sunulmuştur. İlgili kamera görüntüleri izlenen nesnelerin daha iyi görülebilmesi için sunulmuştur. X ekseninin [-4, +4] metre aralığı ve y ekseninin [0, 50] metre aralığı lazer tarama verisinin incelenmesi için seçilmiştir.



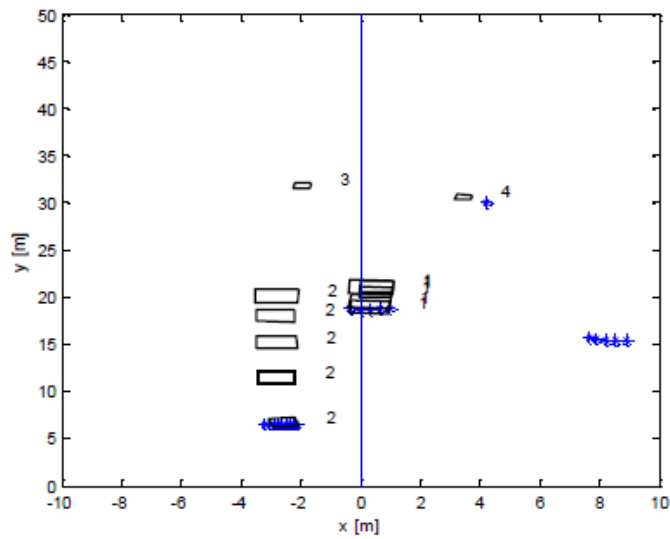
Şekil 3.23 : Tespit edilen nesnelerin x koordinatının frekansı.

Şekil 3.23’de bir araç tespiti görülmektedir. Lidar verisinde Uyanık aracının sol yanında yol üzerindeki güvenlik bariyerleri görülebilmektedir. Trafik uyarı direği x eksenin -2m civarında bir nokta olarak algılanmıştır. İlgili kamera görüntüsü Şekil 3.23’ün üst resminde görülmektedir. Lidar verisindeki 1 sayısı atanmış, dört noktayı çevreleyen siyah çerçeveye minimum alan yönlendirilmiş sınırlayıcı kutu (ingilizcesi: minimum area oriented bounding box) denir, tespit edilen öndeki aracı göstermektedir ve kodu [22] nolu kaynaktan uyarlanmıştır. Bu algoritma [25] kaynağında görüntü işlemede kullanılmıştır ve bu çalışmada ise lidar verisinde tespit edilmiş nesneyi kutu içerisinde göstermek için kullanılmıştır.



Şekil 3.24 : Nesne tespiti ve nesne numarası atanması.

Şekil 3.24’de iki araç tespit edilmiştir. Kalman filtresi ise bir sonraki lazer taramasında aracın büyük olasılıkla olacağı yeri kestirmeye yardımcı olur. Bir arama alanı tespit edilerek bir sonraki lazer taramasında buradaki araçlar tespit edilebilir. Şekil 3.25, araçların 5 saniye için takibini göstermektedir. 1 Hz örnekleme frekansı olan taramada 5 saniyelik veri üst üste çizdirilmiştir.

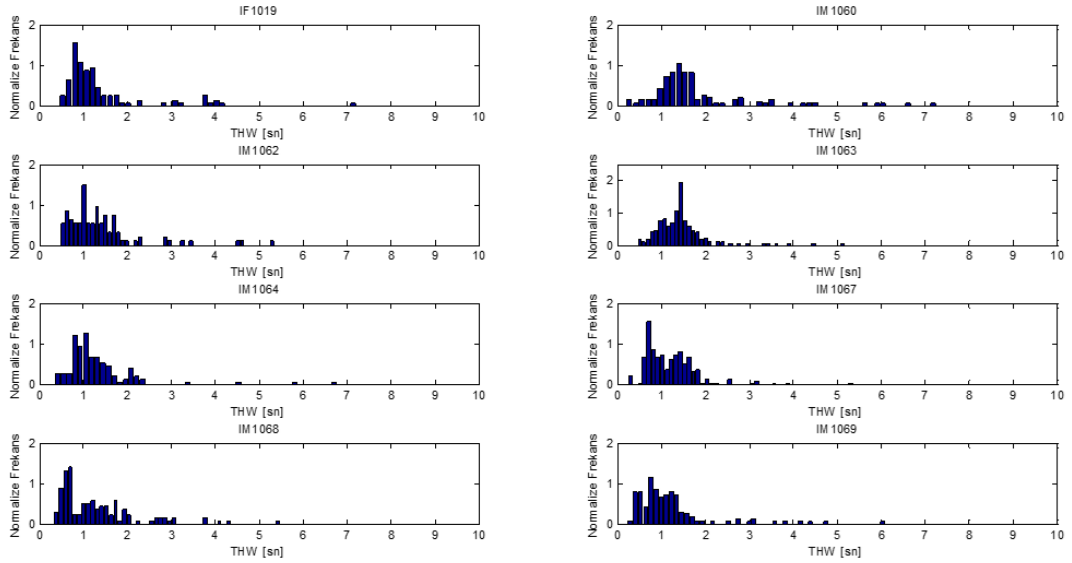


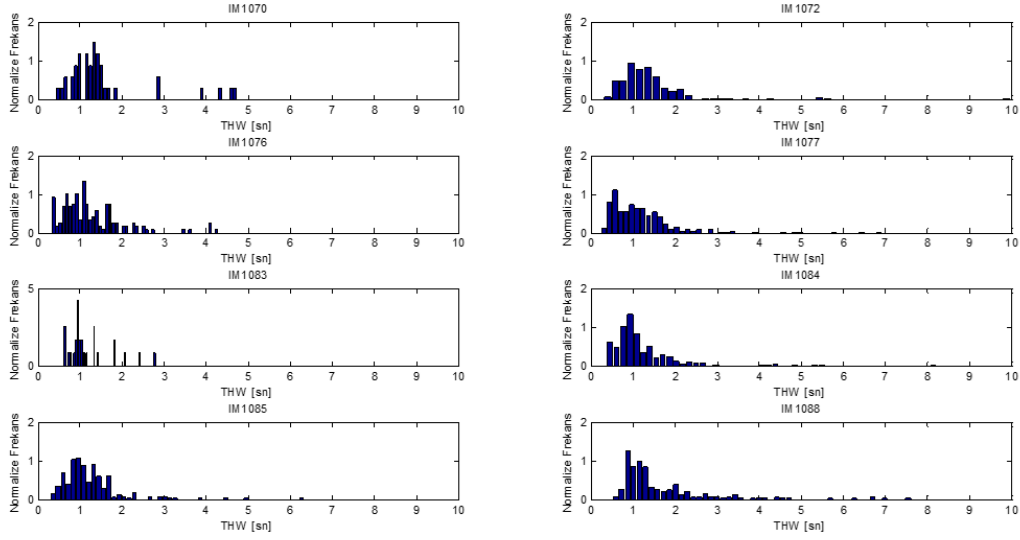
Şekil 3.25 : Tespit edilen nesnelerin 5 sn izlenmesi.

Yıldız şekilli noktalar ilk birinci saniyedeki tespiti göstermektedir. 1 ve 2 nolu araçlar Uyanık aracından daha yüksek hıza sahiptirler. 3 ve 4 nolu araçlar ise 4. saniyede tarama alanına girmişlerdir.

3.7.6 Seçilen sürücüler için çevreyolu THW incelemesi

Çevreyolu tespiti daha önce Şekil 3.14’de gösterilmişti. Aynı işlem seçilen diğer sürücüler için de yapılmıştır ve çevreyolunun dışında kalan rota şehiriçi trafiği olarak kabul edilmiştir. Şekil 3.26’da çevreyolunda Güvenli Sürüş projesi sürücülere arasında seçilmiş 16 sürücüye ait normalize edilmiş THW histogramları verilmiştir. Histogramlar, alan 1 değerine eşit olacak şekilde normalize edildiğinden y eksenini olasılık dağılım fonksiyonu olarak da adlandırılır. Lidar sensöründe araç tespit edilmediği durumda lidar maksimum $\Delta x=81$ metre değeri gösterdiğinden, bu değerlerin THW hesabının maksimum, ortalama ve standart sapma değerlerine olan negatif katkısını ortadan kaldırmak için Kalman filtresi kullanılarak araç takibi yapılmıştır.





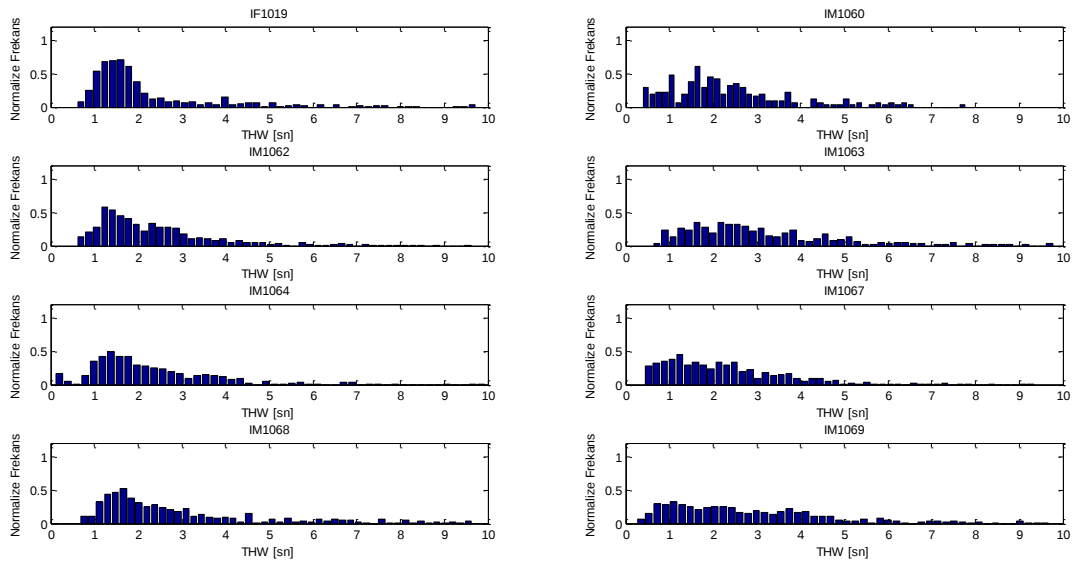
Şekil 3.26 : Seçilmiş on altı sürücünün çevreyolu THW histogramı.

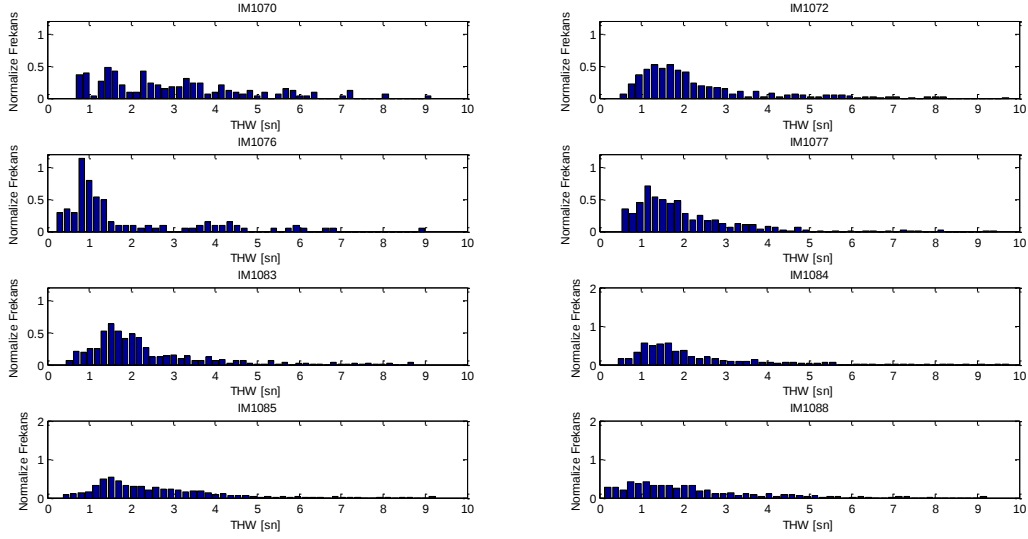
Çizelge 3.1’den görüleceği üzere IM1060 kodlu sürücü diğerlerine nazaran 1,7724 saniye gibi daha yüksek THW ortalama değeriyle daha güvenli bir sürüş gerçekleştirmiştir. IM1069 kodlu sürücü ise 1,1838 saniye THW ortalama değeriyle diğerlerine göre daha tehlikeli veya agresif bir sürüş gerçekleştirmiştir.

Çizelge 3.1 : Çevreyolu THW parametresi için sürücü istatistikleri.

Sürücü	Minimum [sn]	Maksimum [sn]	Ortalama [sn]	Standart Sapma [sn]
IF1019	0,4640	7,1960	1,3671	0,9830
IM1060	0,2002	7,2422	1,7724	1,3836
IM1062	0,4814	4,6590	1,3844	0,7080
IM1063	0,4554	4,4124	1,4525	0,3915
IM1064	0,3540	5,8681	1,3207	0,7598
IM1067	0,2520	3,8535	1,2158	0,3872
IM1068	0,3395	4,3005	1,3013	0,7904
IM1069	0,2277	6,0920	1,1838	0,7862
IM1070	0,4356	4,6158	1,5702	1,0939
IM1072	0,2907	9,9726	1,3715	0,8237
IM1076	0,3343	4,2852	1,2631	0,5706
IM1077	0,2327	6,4221	1,1969	0,7262
IM1083	0,6212	2,7887	1,1940	0,2650
IM1084	0,3757	8,2212	1,2352	0,8026
IM1085	0,2993	4,8949	1,2433	0,4909
IM1088	0,5146	7,6102	1,6446	1,3086

Şekil 3.27’de şehir içi yolda Güvenli Sürüş projesi sürücüleri arasından seçilmiş 16 sürücüye ait normalize edilmiş THW histogramları verilmiştir. Lidar ile çevre taramasında çevreyolunda genellikle diğer araçlara rastlanır fakat tarama şehir içi yollarda yapıldığında lidarın hedefine araç olmayan birçok nesne girebilmektedir ve bu durum ihmal edilmiştir. Dolayısıyla bu durum ve şehir içinde çevreyoluna göre daha yavaş hızlarda seyretme durumu nedenleri ile THW ortalamaları ve standart sapmaları Çizelge 3.2’de görülen değerlere yükselmiştir.





Şekil 3.27 : Seçilmiş on altı sürücünün şehir i yolda THW histogramı.

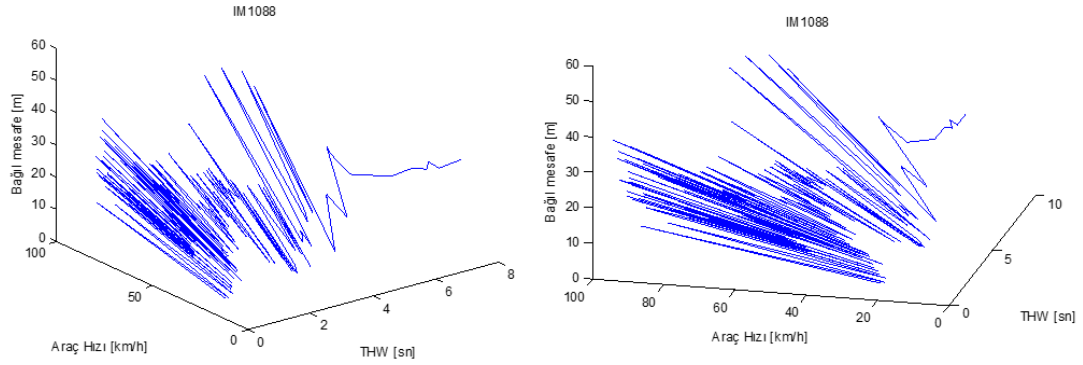
Şehir i yolda  evreyoluna göre THW ortalamaları artmıştır, fakat minimum THW değerleri genellikle artmasına karşın IM1064-76-83-88 nolu dört sürücü için azalmış, IM1064 nolu sürücü ise 0.1051 sn gibi çok tehlikeli bir noktaya gelmiştir. İstanbul şehir i trafiğinde tespit edilen THW ortalama değerlerinin Lu ve diğerlerinin  in’de yapmış olduğu testlerde şehir i yollarda elde edilen değerlerden daha yüksek ve çevreyolunda ise daha düşük değerler bulunmuştur. Buradan hareketle İstanbul  evreyolunda daha tehlikeli sürüş koşulları mevcuttur [29]. Otonom araç veya İSDS sisteminin (boyuna yönde : ASK, KASK) takip sürelerini daha düşük seviyelerde tutarak, çok düşük THW değerlerine izin vermeyerek trafiğin verimini, güvenliğini arttırması ve sürücü işy k n  azaltması nedeniyle otonom, ASK’lı, KASK’lı araçlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Çizelge 3.2 : Şehiriçi yolda THW parametresi için sürücü istatistikleri.

Sürücü	Minimum [sn]	Maksimum [sn]	Ortalama [sn]	Standart Sapma [sn]
IF1019	0,5946	9,7075	2,1636	2,3339
IM1060	0,3880	7,7763	2,3697	2,0237
IM1062	0,6026	8,8567	2,4049	2,1660
IM1063	0,6225	9,7844	3,0411	2,8695
IM1064	0,1051	9,6783	2,3523	2,3585
IM1067	0,4381	9,3454	2,2864	2,1982
IM1068	0,6712	9,6385	2,9078	3,8207
IM1069	0,2505	9,1787	2,8241	3,4298
IM1070	0,6807	9,1534	2,4760	3,0266
IM1072	0,4785	8,1499	2,2962	2,3027
IM1076	0,2028	9,0074	1,8487	2,9242
IM1077	0,5191	9,4773	1,9954	1,7942
IM1083	0,4425	8,6679	2,4041	2,4763
IM1084	0,4215	9,7646	2,2007	2,2475
IM1085	0,3616	9,2590	2,4746	2,1253
IM1088	0,1100	9,2382	2,0939	2,5795

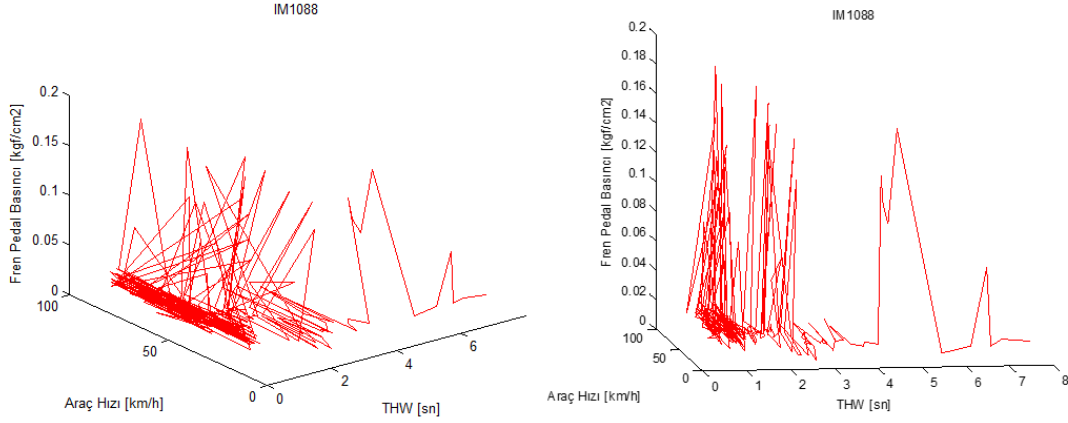
3.7.7 Farklı grafik denemeleri

Örnek bir “IM1088” kodlu sürücü için sensörlerden elde edilen birleştirilmiş verilerle farklı grafik çizim denemeleri yapılmıştır.



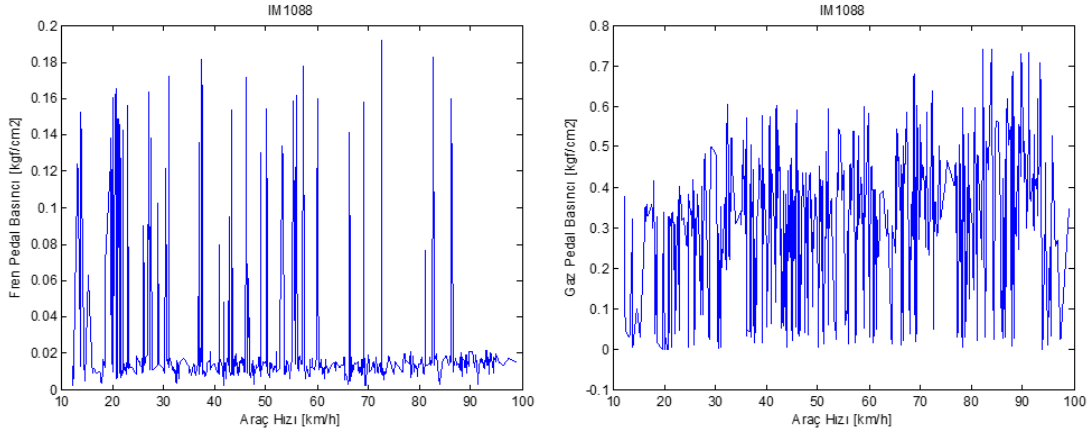
Şekil 3.28 : THW, araç hızı ve bağıl mesafe grafiği.

Şekil 3.28’de örnek IM1088 sürücüsü için THW, araç hızı ve bağıl mesafe grafiği üç boyutta çizilmiştir. Bu grafikte yüksek THW değerleri düşük araç hızlarında elde edilmiştir. 0.6 ile 2 sn THW aralığında araç hızı genellikle yüksek seyretmiştir.



Şekil 3.29 : THW, araç hızı, fren pedal basıncı grafiği.

Şekil 3.29’da THW, araç hızı ve fren pedal basıncı birlikte çizilmiştir. Fren basıncının sık yükselmesi genellikle düşük THW değerlerinde ve nadiren yüksek THW değerlerinde olmuştur. Yüksek THW değerleri düşük THW değerlerine göre daha fazla kullanılmaktadır.



Şekil 3.30 : Araç hızına bağlı fren ve gaz pedal basıncı grafiği.

Şekil 3.30’daki sol grafikte araç hızının daha düşük olduğu 20 km/h civarı daha sık fren pedalına basınç uygulanmıştır. Yüksek hızlarda ise daha düşük sıklıkta fren pedalı kullanılmıştır. Ayrıca gaz pedal basıncının tepe noktalarının Şekil 3.30’daki sağ grafikte araç hızı yükseldikçe genellikle artma eğiliminde olduğunu gösterir.

4. ADAPTİF SEYİR KONTROLCÜSÜNÜN İSTANBUL TRAFİĞİNDE TESTİ

Daha önceki bölümlerde Güvenli Sürüş projesi veri tabanı kullanılarak İstanbul içinde sürücülerin güvenli olmayan ya da çok büyük değişimler gösteren takip süreleri kullandıkları gösterilmişti. Çözüm olarak Adaptif Seyir Kontrolü kullanılması önerilmişti. Bu bölümde, Mekar takımının önceki çalışmalarında geliştirdiği Adaptif Seyir Kontrolü sistemi Güvenli Sürüş proje veritabanından alınan gerçek sürüş verileri kullanılarak gerçekçi bir simülasyon ortamında test edilmiştir. Güvenli Sürüş veritabanı güvenli sürüş çalışmaları için İstanbul trafik koşullarında toplanmıştı. Güvenli Sürüş projesi verileri ile oluşturulan araç simülasyonlarda takip edilen öndeki araç olmuştur. Bu araç kendi ASK kontrolcümüzün denetimindeki sanal araç tarafından takip edilmektedir. ASK sistemi ve araç modeli 2011 Büyük Kooperatif Sürüş Mücadelesi (GCDC 2011) kooperatif sürüş deneylerinde test edilmiş olan Mekar takımı aracından alınmıştır. Bu çalışmada ASK sistemimiz gerçek verilerle, gerçekçi bir laboratuvar ortamında değerlendirilmiştir. Bir sonraki adım olarak, aynı ASK sistemi isteğe bağlı olarak trafik koşullarının da eklenebildiği Carsim simülasyon ortamında da denenmiştir.

4.1 Giriş

Seyir kontrol sistemleri karayolu araçlarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yolcu araçlarında kullanılan bu sistemler artan trafik yoğunluğunda seçilmiş hızda uzun bir süre seyir edebilmeyi nadiren sağlayabilmektedir. Bunun çözümü ön aracın hızına uyum sağlayabilen Adaptif Seyir Kontrolü sisteminin kullanılmasıdır.

ASK sistemlerinin sürüş konforu sağlaması, arkadan çarpmayı önlemesi ve yakıt tüketimini aza indirme beklentisi nedenleriyle yakın bir gelecekte geniş bir kullanım alanı bulması beklenmektedir. Yaptığımız bu çalışmada kullanılan yaklaşım Büyük Kooperatif Sürüş Mücadelesi (GCDC 2011) yarışmasında kullanılan Mekar Takımı aracının ASK kontrolcüsünün performansını incelemektir. Hollanda'da gerçekleşen GCDC 2011 yarışması dört araçlık bitişik kuldardaki iki araç konvoyunda yapılırken,

burada aynı Mekar aracının ASK kontrolcüsünün Güvenli Sürüş projesinden alınan İstanbul trafiği sürüş verileriyle değerlendirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Güvenli Sürüş projesi ile ilgili detaylı bilgi referanslarda verilen Aytekin ve diğerlerinin makalesinde bulunabilir [10]. Güvenli Sürüş projesinin veri tabanından rastgele seçilen bir sürücü için kayıt edilmiş olan araç hızı ve diğer veriler lider araç verisi olarak kullanılmıştır. Ardından bu yaklaşım Mekar Takımının ASK kontrolcüsünün gerçekçi İstanbul şehir trafik koşullarında etkinliğinin testi için kullanılmıştır. Bu yöntem veri tabanındaki diğer sürüş verileri için tekrar edilebilir.

Ayrıca aynı kontrolcüyü ASK tasarımını geliştirmek için Carsim araç dinamiği simülasyon ortamında test etmek mümkündür. Carsim simülasyon ortamında farklı trafik ve yol koşulları uygulanabilir ve ASK kontrolcüsü testi için kullanılabilir. Güvenli Sürüş projesi ve GCDC haberleşen araçlar yarışması hakkında daha fazla bilgi için ilgili kaynaklara başvurunuz [10,11,14,36].

İkinci kısımda araç modellemesi verilmiş, üçüncü kısımda ASK sisteminden bahsedilmiş ve dördüncü kısımda ise Güvenli Sürüş aracını takip eden Mekar aracının ASK test sonuçları verilmiştir. Beşinci kısımda ise Carsim simülasyon ortamında ASK sisteminin uygulanması ve test sonuçlarından bahsedilmiştir. En sonunda ise elde edilen sonuçlar ile ASK çalışması sonlandırılmıştır.

4.2 Araç Modellemesi

GCDC 2011 Mekar Takımı aracının araç parametreleri, modelleri ve kontrolcüleri burada sunulmuştur. Mekar Takımı araç modeli ile ilgili özet bilgi aşağıda verilmektedir. Aracın boyuna hareketi boyunca araca farklı kuvvetler etki etmektedir. Bu kuvvetler boyuna teker kuvvetleri, aerodinamik (rüzgar) direnç, yuvarlanma direnci ve eğim direncinden oluşur. Boyuna dinamik Denklem 4.1 ile temsil edilir.

$$ma_x = \sum F_x = F_{xf} \cos \delta_f - F_{yf} \sin \delta_f + F_{xr} - (F_{aero} + R_{xf} + R_{xr} + mg \sin \theta) \quad (4.1)$$

$\sum F_x$, x yönündeki kuvvetlerin toplamıdır. a_x araç kütle merkezinin x yönündeki ivmelenmesidir. m araç kütlesidir. F_{xf} ve F_{yf} boyuna ve yanal yöndeki ön tekerlek

kuvvetleridir. F_{xr} boyuna yöndeki arka tekerlek kuvvetidir. δ_f ön tekerlek dönüş açısıdır. F_{aero} rüzgar direncidir. R_{xf} ve R_{xr} ön ve arka tekerleklere etkiyen yuvarlanma direnç kuvvetleridir. $mg \sin \theta$, θ eğimine sahip yolda araç ağırlığı dolayısıyla etkiyen eğim direncidir. Araç üzerine etkiyen aerodinamik kuvvetler Denklem 4.2 ile verilmiştir.

$$F_{aero} = 0.5 \rho C_d A_f (V_x + V_{rüzgar})^2 \quad (4.2)$$

ρ havanın yoğunluğunu belirtir. C_d araç aerodinamiği sürüklenme katsayısıdır ve 0.28 ile 0.35 değerleri arası değişir. A_f aracın ön cepheye ait alanını gösterir. $A_f = 1.6 + 0.00056(m - 765)$ eşitliği ile hesaplanır. V_x ve $V_{rüzgar}$ sırasıyla boyuna araç hızı ve rüzgar direnci hızıdır. Aracın boyuna hareketi esnasında, aracın tekerlek lastikleri deformasyona uğramaktadır. Bu deformasyonlar sebebiyle oluşan gerinim enerjisi lastik kuvvetlerinde değişime neden olur ve bu durum yuvarlanma direnci olarak adlandırılır. Toplam yuvarlanma direnci ile toplam normal kuvvet arasındaki ilişki Denklem 4.3'te verilmiştir.

$$R_{xf} + R_{xr} = f (F_{zf} + F_{zr}) \quad (4.3)$$

f yuvarlanma direnç katsayısıdır ve genellikle 0.01 ve 0.04 değerleri arasında değişir. Binek araç için 0.015 değeri alınabilir. F_{zf} ve F_{zr} kuvvetleri sırasıyla ön ve arka lastiklere etkiyen normal kuvvetlerdir. F_{zf} ve F_{zr} kuvvetleri Denklem 4.4 ve 4.5 ile hesaplanabilir.

$$F_{zf} = \frac{-F_{aero} h_{aero} - m a_x h - m g h \sin \theta + m g l_f \cos \theta}{l_f + l_r} \quad (4.4)$$

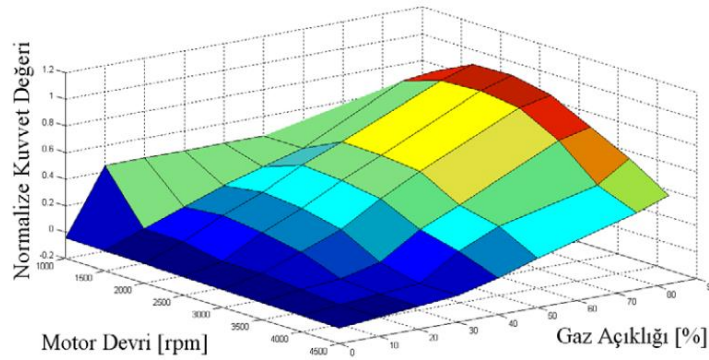
$$F_{zr} = \frac{F_{aero} h_{aero} + m a_x h + m g h \sin \theta + m g l_f \cos \theta}{l_f + l_r} \quad (4.5)$$

h araç kütle merkezinin yerden yüksekliğidir. h_{aero} boyuna yöndeki rüzgarın basınç merkezinin yerden yüksekliğidir. Burada kullanılan lastik modelinden kısa anlatım için bahsedilmemiştir. ASK sisteminin girişi hedeflenen ivmelenmedir. ASK

sisteminin çıkışı da ivmelenme komutu formunda kontrol çabasıdır. Bu ivmelenme komutları ters motor haritasına beslenerek gerekli gaz kelebeği açıklığı elde edilir veya fren sistemi modeline beslenerek gerekli frenleme miktarı belirlenir [33-36].

4.3 Motor Ve Güç Aktarma Sistemi Modeli

İçten yanmalı motorun ürettiği momentin gerçekçi olarak modellenmesi oldukça zordur. Şasi dinamometre testlerinden belirlenmiş statik motor haritası motorun kararlı durum karakteristiğini modellemek için kullanılmıştır. Şekil 4.1’de Mekar Takımı aracının İstanbul Teknik Üniversitesi bünyesindeki OTAM merkezinde yapılan şasi dinamometre testlerinden elde edilmiş normalleştirilmiş motor haritası verilmiştir. Bu harita bilinen gaz kelebeği açıklığı ve motor dönüş hızı için lastiklerdeki normalleştirilmiş kuvveti vermektedir. Gaz keleşek açıklığı CAN veriyolu aracılığı ile kontrol edilmektedir. Motor haritası üçüncü vites için elde edilmiştir.



Şekil 4.1 : Normalize motor haritası.

Mekar Takımı aracı 6 vitesli bir otomatik şanzımana sahiptir. Durum akış diagramı temelli güç aktarma sistemi modeli Mekar Takımı aracının Matlab Simulink modelinde otomatik olarak vites geçisi sağlamak için kullanılmıştır.

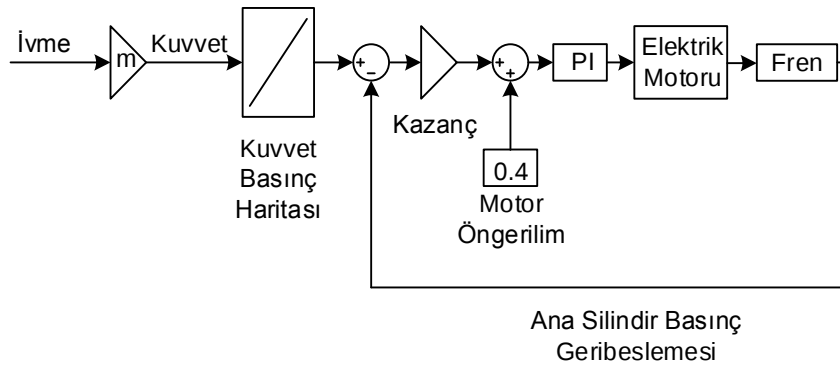
4.4 Fren Sistemi Modeli

ASK sisteminin yavaşlamak için kullandığı frenler için fren sisteminin matematik modeli de gerekmektedir. Fren sistemi sürücünün fren pedalına uyguladığı basıncı vakum arttırıcı kullanarak yükseltmekte ve yükseltilmiş basıncı ana fren silindrine yönlendirmektedir. Silindir, hidrolik basıncı hidrolik fren sistemine iletmektedir. Mekar Takımı aracında bir elektrik motoru fren pedalını otomatik olarak harekete geçirmektedir. Deneysel testler ve sistem tanımlama sonucunda bulunan Denklem

4.6’da verilen model elektrik motoruna beslenen fren sistemi referans voltajı ile normalize ana fren silindir hidrolik basıncı arasındaki modeldir.

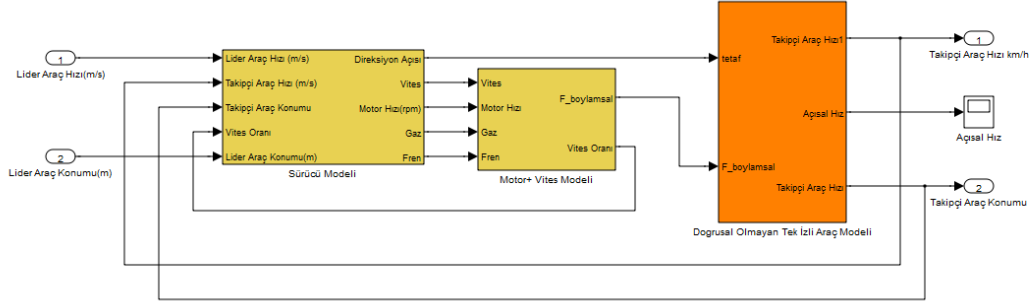
$$G_{fren} = \frac{1}{0.152s + 1} e^{-0.0865s} \quad (4.6)$$

Adaptif seyir kontrolcüsünün frenleme kısmında kullanılan fren sistem modeli Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Şekil 4.2’de gösterilen “Elektrik Motoru” ve “Fren” isimli iki blok Denklem 4.6’daki transfer fonksiyonu kullanılarak modellenmiştir. Şekil 4.2’deki blok diagram ASK’dan gelen yavaşlama komutunu ön beslemeli bloktaki eşdeğer basınca dönüştürmek için kullanılmıştır. PI kontrolcüsü kullanılarak istenen basınç regüle edilmiştir. Bu geribesleme çevrimindeki kullanılan aktivatör fren pedalını harekete geçiren elektrik motorudur. Fren pedalının üzerine yerleştirilmiş bir kuvvet sensörü ile sürücünün frene basınç uygulayıp uygulamadığı tespit edilerek aracın otomatik frenlemeden manuel frenlemeye geçmesini sağlar.



Şekil 4.2 : Otonom araç fren sistemi blok diagramı.

GCDC 2011 yarışmasında kullanılan Mekar Takımı aracının sürücü modeli, motor ve güç aktama sistemi modeli ve doğrusal olmayan tek izli modelinden oluşan Simulink blok diagramı Şekil 4.3’te verilmektedir. Sürücü modeli istenen hız profilini takip edebilmek için simülasyonlarda kullanılan bir kontrolcüdür. Mekar Takımı aracının Simulink modelindeki bütün kontrol fonksiyonları ASK ve Kooperatif Adaptif Sürüş Kontrolü (KASK) sisteminin kontrolcülerinin uygulandığı yer olan dSpace microautobox modülünün elektrik kontrol ünitesine gömülü koda otomatik olarak çevrilerek indirilir. dSpace microautobox hızlı prototipleme işlemcisi gaz kelebeği açıklığını ve fren pedalını tahrik eden elektrik motorunu gerçek zamanlı olarak kontrol eder.



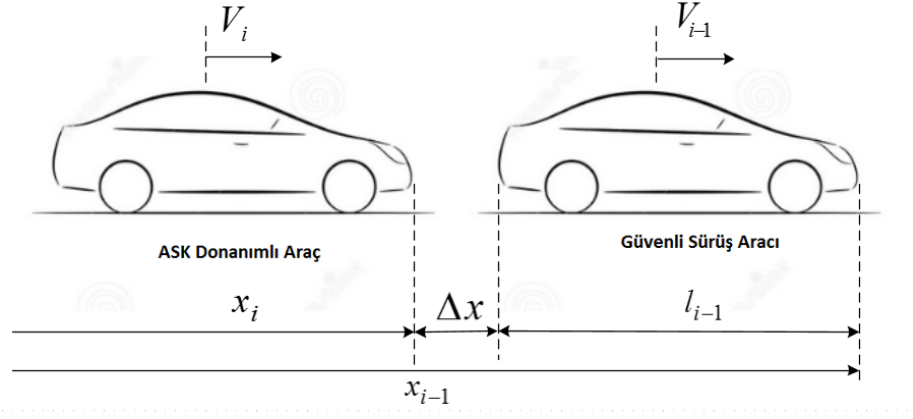
Şekil 4.3 : Mekar aracının simulink modeli.

4.5 ASK Kontrol Algoritması

Adaptif Seyir Kontrolü hız kontrolünün bir üst seviyesidir. ASK sisteminde, takip edilen lider bir araç vardır ve takip eden araç ise hızını lider araca göre ayarlar. Aksi halde ASK donanımlı araç sürücü tarafından ayarlanmış hızda yolculuk eder. Lider aracın hızı radar, lidar veya veri iletişimi (KASK sisteminde GPS konum, hız ve ivmesi) ile elde edilir. Takip eden kendi aracımızın istenen ivmelenmesi PD tipi ASK kontrolcüsünün çıkışıdır ve Denklem 4.7’deki eşitlikle verilir.

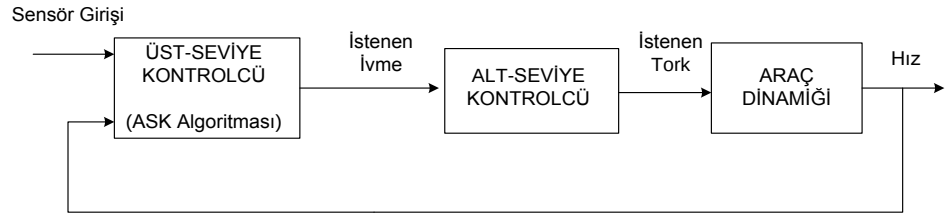
$$a_{\text{takip}} = K_p (\Delta x_{\text{istenen}} - \Delta x) + K_d V_{\text{bağlı}} \quad (4.7)$$

Bu denklemde K_p oransal katsayı, $\Delta x_{\text{istenen}}$ Güvenli Sürüş aracının arka tamponu ile ASK donanımlı aracın ön tamponu arası takip eden sürücü tarafından istenen takip mesafesi ve Δx Güvenli Sürüş aracının arka tamponu ile ASK donanımlı aracın ön tamponu arası hesaplanan bağıl mesafe (lidar veya radar ile hesaplanır fakat burada hız ve zaman çarpımından hesaplanır), K_d hız katsayısı ve $V_{\text{bağlı}} = V_{i-1} - V_i$ Güvenli Sürüş aracının hızı V_{i-1} ile ASK donanımlı aracın hızı V_i arası farktır. Takip süresini sabit tutmak, takip eden araç hızı arttıkça istenen bağıl mesafeyi $\Delta x_{\text{istenen}} = V_i THW$ arttıracaktır. Denklem 4.7, takip eden aracın istenen ivmelenme veya yavaşlamayı elde edebilmesi için kullanılan en basit kontrol algoritmasıdır.



Şekil 4.4 : Lider ve takipçi araç.

ASK sistemini sürücü gaz veya fren pedalına basarak kapatılabilir. Seri üretilen araçlarda, ASK sistemi genellikle araç hızının 40 km/saat'ten daha yüksek olduğu durumlarda devreye girer. Mekar Takımı aracında böyle bir alt limit bulunmamaktadır. ASK sistemi bütün hız aralıklarında çalışmaktadır.



Şekil 4.5 : ASK kontrolcü seviyeleri.

ASK kontrol algoritması Şekil 4.5'te görülebileceği üzere üst seviye kontrolcü ve alt seviye kontrolcü tabakalarından oluşur. Üst seviye kontrolcünde lider aracı istenen mesafe ve hızda (istenen takip süresinde) takip edebilmek için istenen ivmelenme farklı kontrol algoritmaları kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan ivmelenme değeri, alt seviye kontrolcüsüne motor gücü veya fren torku uygulanması için aktarılır.

4.6 Üst Seviye Kontrolcü Tasarımı

Üst seviye kontrolcü lider aracı istenen takip süresinde (THW) takip için istenen ivmelenme/yavaşlama değerini hesaplamaktadır. Bu ivmelenme lider araç konumu ve hızı bilgisi kullanılarak elde edilir. Lider aracı takip etmek için farklı kontrolcü yapıları kullanılabilir. Mekar Takımı aracında ise kontrolcü parametrelerinin kolayca ayarlanabilmesi nedeniyle bir LQR kontrolcü kullanılmıştır.

LQR Kontrolcü Tasarımı

Üst kontrolcü tasarımında kullanılan durum uzay denklemleri Denklem 4.8'den (4.10)'a kadar verilmiştir.

$$\dot{x} = Ax + Bu + \Gamma w \quad (4.8)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} a_{i-1} \quad (4.9)$$

Durum değerleri vektörü x Denklem 4.10'da verilmiştir.

$$x = \begin{bmatrix} \Delta x_{istenen} - \Delta x \\ V_{bağlı} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Bu denklemde bilinmeyenler açılırsa

$$x = \begin{bmatrix} (x_{bağlı} + x_{sabit}) - (x_{i-1} - x_i - l_{i-1}) \\ V_{i-1} - V_i \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

elde edilir. $x_{bağlı} + x_{sabit}$ değerleri lider ile takip eden araçlar arası istenen bağlı mesafe ($x_{bağlı}$) ve lider araç ile takip eden aracın hızları sıfır olsa olması istene ara mesafenin, diğer adıyla güvenlik mesafesinin (x_{sabit}) toplamıdır. $x_{i-1} - x_i - l_{i-1}$ ise iki araç arasındaki gerçek mesafedir. i alt indisi takip eden aracı ve $i-1$ alt indisi lider aracı temsil etmektedir. l_{i-1} lider aracın uzunluğudur. Bu iki değer arasındaki fark konum hatasını vermektedir. $V_{i-1} - V_i$ ise lider araç hızı V_{i-1} ile takip eden araç hızı V_i arasındaki farktır. Durum geribeslemeli kontrolcü tasarımı takip mesafesini ve bağlı hızı minimize etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. u referans ivme girişidir ve $u = -K_{lqr}x$ olarak tanımlanır ve Denklem 4.12'deki maliyet fonksiyonunu minimize edecek şekilde seçilmelidir.

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (4.12)$$

Q durum ceza fonksiyon matrisi ve R control ceza fonksiyonu sırasıyla Denklem 4.13 ve 4.14' de verilmiştir.

$$Q = \begin{bmatrix} \partial_1 & 0 \\ 0 & \partial_2 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$R = r \quad (4.14)$$

Q matrisinin ∂_1 ve ∂_2 girişleri, konum ve hız hatası minimizasyonu arasındaki bağıl farkı temsil eder. R matrisi enerji tüketim seviyesini belirlemek için kullanılmıştır. Bu sebeble, bu matrislerin seçimi takip doğruluğu ile maliyet arası ödünleşim içerir. Denklem 4.12'in çözümünü tanımlayan ilgili Ricatti matris denklemi Denklem 4.15'de verilmiştir.

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (4.15)$$

Pozitif definit Hermitian olan P matrisi Denklem 4.15 çözümü sonucu elde edilir ve Denklem 4.16'te doğrusal kuadratik regülatör probleminin çözümünde kullanılır.

$$K = R^{-1}B^T P = \begin{bmatrix} K_p & K_d \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

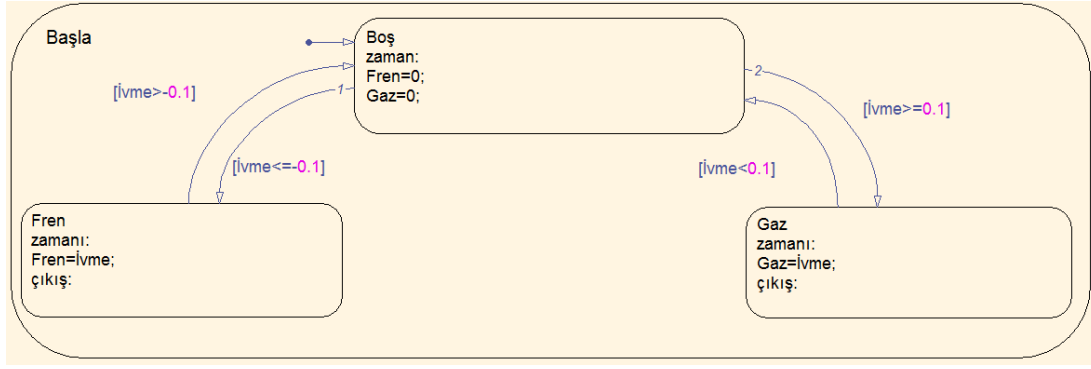
Kontrol sinyali

$$u = a_i = K_p (x_{istenen} - \Delta x) + K_d (V_{i-1} - V_i) \quad (4.17)$$

formuna gelir. u kontrol sinyali açık yazılırsa

$$u = a_i = K_p ((x_{bağıl} + x_{sabit}) - (x_{i-1} - x_i - I_{i-1})) + K_d (V_{i-1} - V_i) \quad (4.18)$$

elde edilir. Lider aracın ivmelenmesi hesaplarda gözönüne alınmaz. LQR yaklaşımı kontrol parametrelerinin kolay ayarlanması için kullanılır [36,37].

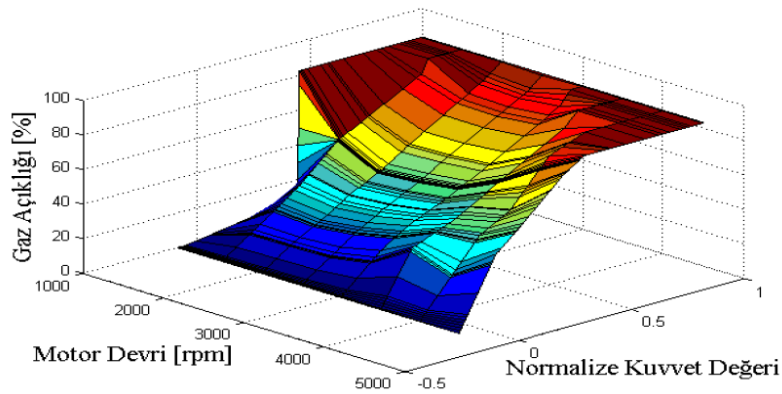


Şekil 4.6 : Fren ve gaz değişim durum akış diyagramı.

Gerekli ivmelenme veya yavaşlama hesaplandığında, Şekil 4.6’da verilen fren ve gaz değişim durum akış diyagramı gaz veya fren sistem komutları arasında geçişi sağlar.

4.7 Alt Seviye Kontrolcü Tasarımı

Alt seviye kontrolcü üst seviye kontrolcünden istenen ivmelenme ve yavaşlama kuvveti olarak iletilen ivmelenme/yavaşlama referanslarına göre fren ve gaz sistemlerini aktive eder. Gaz ve fren için gerekli olan kuvvet değeri aracın kütlesi ve ivmelenmesi çarpılarak Newton’un ikinci hareket yasasına göre hesaplanır. Gaz uygulanması esnasında bu istenen kuvvet değeri ters motor haritası kullanılarak o andaki motor hızında eşdeğer gaz kelebeği açıklığına çevrilir. Ters motor haritası Şekil 4.7’de gösterildiği gibi üç boyutlu statik bir tablo olarak hazırlanır ve ardından dSpace microautobox elektronik kontrol ünitesinde uygulamaya koyulur. Daha iyi bir performans için her bir vites değeri için böyle bir ters motor tablosu kullanılmalıdır.

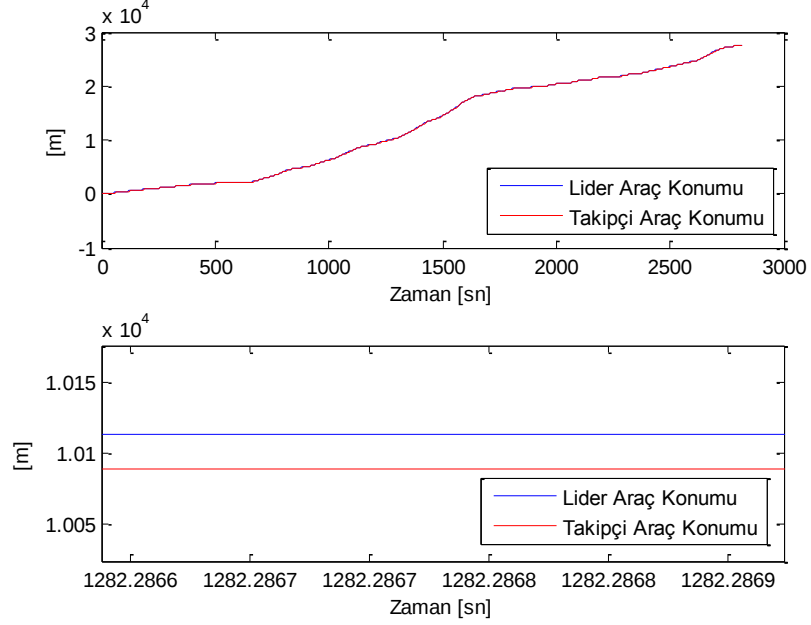


Şekil 4.7 : Normalize ters motor tablosu.

4.8 ASK Test Sonuçları

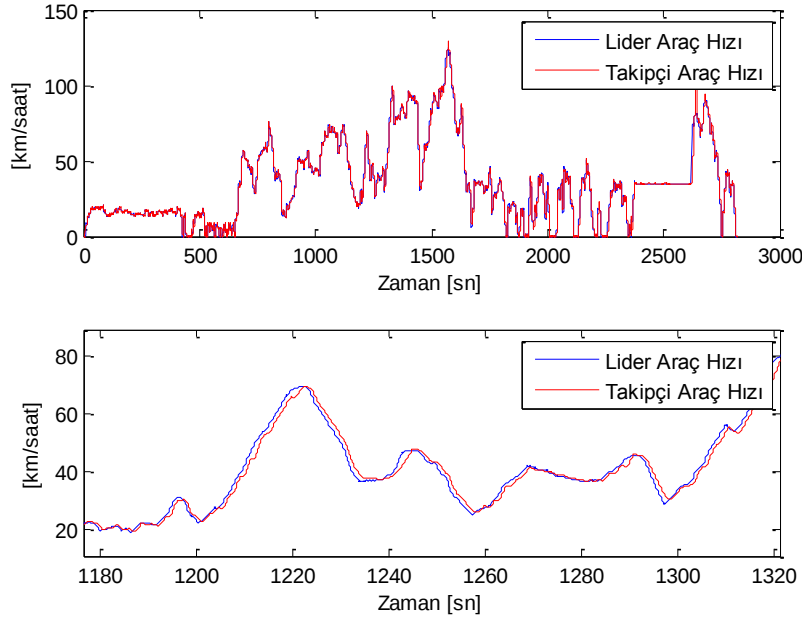
Bu çalışmada, ilk önce ASK donanımlı Mekar Takımı aracının doğrulanmış ve

gerçekçi modelini Simulink ortamında İstanbul trafiğinde test ettik. Lider araç verisi Güvenli Sürüş projesi veritabanından elde edildi. Lider aracın konum ve hızının, takip eden aracın sensörleri aracılığı ile alındığı varsayılarak takip yapıldı. Lider Güvenli Sürüş aracının rotası düz bir yol olarak alındı. Bunun anlamı sanal Güvenli Sürüş aracının her zaman ASK donanımlı Mekar Takımı aracının önünde olması şeklindedir.



Şekil 4.8 : Lider ve takipçi araç konumları.

Şekil 4.8 ve 4.9'daki gerçekçi simülasyon sonuçlarından görülebileceği gibi lider aracın konum ve hızı, takipçi araç tarafından oldukça yakın konum ve hız değerlerinde izlenmiştir. İstenen ve simüle edilen sonuçların eşleşmesi Mekar Takımı aracının ASK kontrolcüsünün memnuniyet verici performansını ispatlamaktadır.

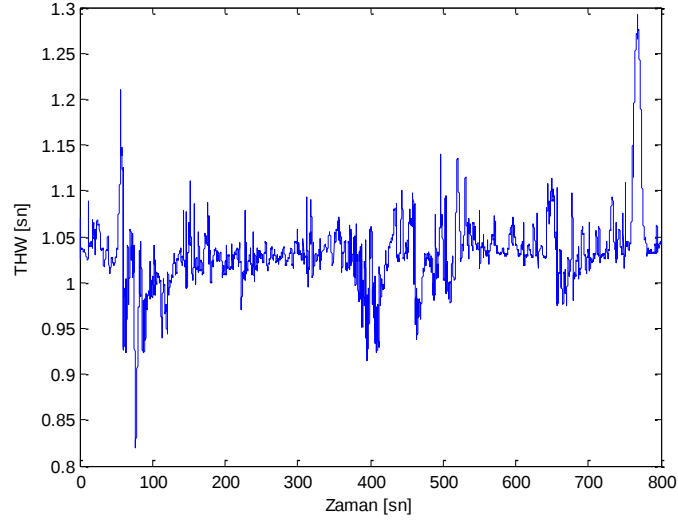


Şekil 4.9 : Lider ve takipçi araç hızları.

Takip süresi (THW) bağıl mesafenin takipçi aracın hızına oranıdır. Literatürde manuel sürüşte güvenli takip mesafesi için 2 saniye kuralı vardır [28]. Bu THW değeri 2 saniye değerine eşit veya bundan büyükse sürüşün güvenli olduğunu gösterir. Bu aralık zamanını yarı otonom sürüşte ASK veya KASK sistemlerini kullanarak 0.6 saniyeye kadar düşürmek mümkündür [14]. THW değerinin hesaplanması Denklem 4.19’da verilmiştir.

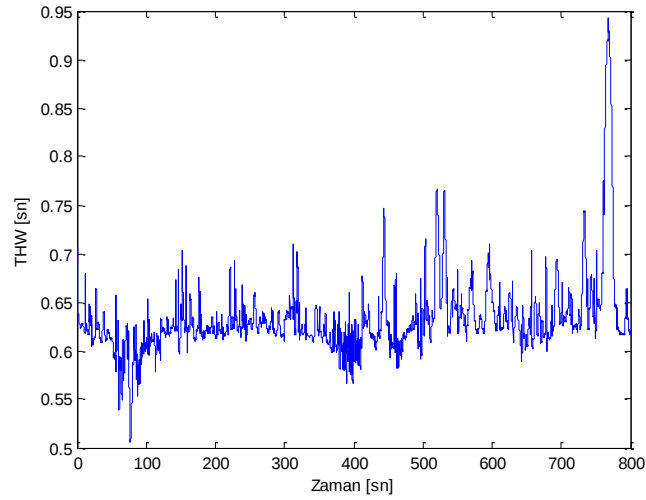
$$THW = \frac{\Delta x}{V_i} \quad (4.19)$$

Denklem 4.19’da takip eden araç sanal araç olduğundan bağıl mesafe $\Delta x = x_{i-1} - x_i - l_{i-1}$ ile hesaplanmıştır. Gerçek deneyde bağıl mesafe Δx radar veya lidar sensöründen elde edilirse bu hesaba gerek kalmaz. Simülasyonlarda istenen THW değeri 1 saniye olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.10’da Mekar Takımı aracı ASK kontrolcüsü istenen THW’ı sağlama performansı gösterilmiştir. Simülasyonunun çoğu kısmında THW değeri $0.8 < THW < 1.3$ aralığında tutulmuştur.



Şekil 4.10 : THW = 1 sn değişim grafiği.

Şekil 4.11’de takip süresi 0.6 sn gibi daha düşük bir değer için denenmiştir. ASK sistemi kontrolcüsü bu değeri de oldukça iyi bir şekilde takip etmiştir.



Şekil 4.11 : THW = 0.6 sn değişim grafiği.

4.9 Farklı Sürücüler için ASK Test Sonuçları

Farklı sürücüler için istenen THW parametresini 1 sn’ye ayarlandığında belirli hız aralık değerleri için THW parametresinin minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : THW parametresi için sürücü istatistikleri.

Sürücü	Minimum[sn]	Maksimum[sn]	Ortalama [sn]	Standart Sapma [sn]	Hız aralığı [km/h]
IF1019	0,8643	1,3033	1,0328	0,0365	95,56-13,38
IM1060	0,9121	1,1438	1,0275	0,0262	111,43-15,75
IM1062	0,7731	1,6553	1,0506	0,0881	128,58-4,66
IM1063	0,9072	1,9444	1,0489	0,1004	106,2-19,51
IM1064	0,7941	1,2619	1,0365	0,0406	124,53-8,66
IM1067	0,851	1,4952	1,0421	0,0597	119,13-15,18
IM1068	0,9231	1,6452	1,0455	0,0741	129,76-16,65
IM1069	0,8397	1,6945	1,0519	0,081	113,23-11,3
IM1070	0,7873	1,2424	1,0261	0,0381	97,76-6,63
IM1072	0,7700	1,5884	1,0430	0,0655	104,11-10,01
IM1076	0,7248	1,7157	1,0751	0,1301	111,93-18,28
IM1077	0,7789	1,7097	1,0453	0,0834	100,68-10,74
IM1083	0,7783	1,7477	1,0566	0,0945	116,15-5,28
IM1084	0,8787	1,3419	1,0415	0,0413	106,98-7,7
IM1085	0,7258	2,0645	1,0457	0,0898	111,82-2,86
IM1088	0,8202	1,2922	1,0317	0,0399	124,48-12,03

ASK sistemi kontrolcüsü ortalamada 1 sn THW değerini yakalamıştır. Standart sapma değerleri ise oldukça düşük değerlerdir ve bu THW değerinin 1 sn değerine çok yakın noktada dağılım gösterdiğini belirtmektedir. Ön araç olan Güvenli Sürüş aracının ani hızlanması, yavaşlaması veya hızının sıfıra yaklaşması nedeniyle THW parametresindeki maksimum ve minimum değerler arasındaki değişimi açıklar. Hız değeri sıfır olduğunda THW değeri sonsuz olacağından bu testler belirli hız aralıkları için gerçekleştirilmiştir.

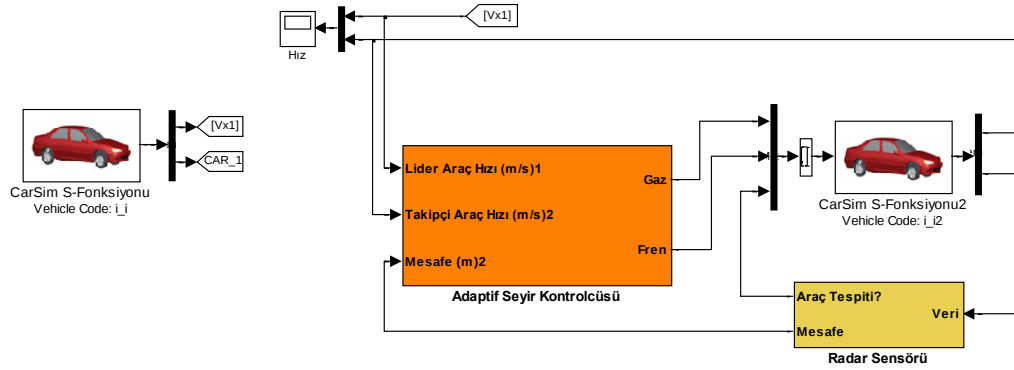
4.10 Carsim Test Sonuçları

Carsim ortamında yapılan simülasyon testleri ASK kontrolcüsünün yüksek gerçeklikli araç modeli ile nasıl çalışacağını görmek için gerçekleştirilmiştir. Carsim programında MATLAB Simulink ortamıyla birlikte çalışan basit örnekler bulunmaktadır. Buradaki amaç Mekar Takımı aracının ASK kontrolcüsünü Carsim programında uygulamaktır. Lider araç için yeniden Güvenli Sürüş projesinin veri tabanı kullanılmıştır. Bu yaklaşım ile ASK kontrolcüsünü farklı yol koşullarında ve trafikte test etmek mümkündür. Carsim, ASK sisteminin testi için virajlarda, ön araç bulunmadığı durumda, vs. seçenekler sunmaktadır.



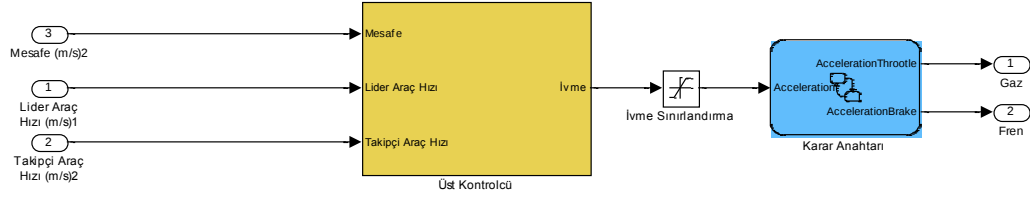
Şekil 4.12 : Carsim’de ASK ile araç takibinden bir görünüm.

Şekil 4.12’de görülen Carsim simülasyonu esnasında çekilen bir enstantanedir. Kırmızı renkli alan (yol üzerinde koyu kısım) Mekar Takımı sanal radarını göstermektedir. Sanal radar, lider araca (beyaz renkli araç) olan bağlı mesafe ve hızı vermektedir. Bu veri de Şekil 4.13’de görüldüğü gibi ASK kontrolcüsüne beslenir. Araç modelleri, Carsim S-fonksiyonları ile temsil edilmektedir.

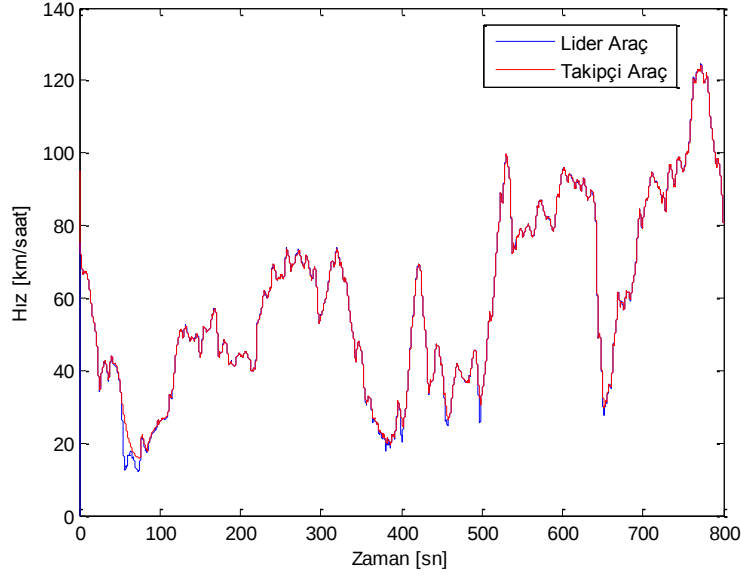


Şekil 4.13 : ASK Carsim Simulink blok diagramı.

Mekar Takımı aracının ASK kontrolcüsünden yalnızca üst kontrolcü ile fren-gaz durum akış diagramı alınarak Carsim’de kullanılmıştır (Şekil 4.14’e bakınız). Çünkü Carsim aracının kendi motor haritaları ve vites modelleri bulunmaktadır. Ayrıca araç modellemesi kısmında daha önce bahsettiğimiz boyuna dinamik eklenmiş doğrusal olmayan tek izli araç modeli yerine Carsim araç modelleri kullanıldığından LQR kontrolcü parametreleri değiştirilmiştir.



Şekil 4.14 : Carsim’de Mekar Takımı aracının ASK kontrolcüsü.



Şekil 4.15 : Carsim Lider ve Takipçi Araç Hızları.

Şekil 4.15’de Carsim sanal ortamının sonuçları gösterilmiştir. Şekil 4.9 ile 4.15’in karşılaştırılması ile takipçi aracın Carsim ortamındaki performansının daha iyi olduğu gözlenmiştir. Carsim sanal aracı gerçek araç modeline göre daha ideal bir sanal model olduğu için bu beklenen bir sonuçtur.

5. ASK/KASK VE YOS SİSTEMLERİNDE KULLANIM İÇİN GPS/INS ENTEGRASYONU ÇALIŞMASI

GPS küresel konumlandırma sistemi olarak adlandırılır ve GPS sensörü bulunan konum bilgisini GPS uyduları ile haberleşerek enlem, boylam ve yükseklik cinsinden vermektedir. Bazı GPS çeşitleri konum değişimlerinden hesapladıkları hız bilgisini de sağlayabilmektedir. Karayolu taşıtlarında yüksek otomasyonlu sürüş (YOS) amacıyla, kooperatif sürüş ve otonom yörünge takibi için GPS sensör konumunun kullanımı iki güncel araştırma konusudur. Bu iki uygulamada da alınan GPS verisinin yüksek doğrulukta olması ve hızlı örnekleme gerekir. Bu çalışmada, tek başına GPS kullanımı ile karşılaştırıldığında daha hızlı örnekleme frekansında konum ve hız verisi sağlayan bir GPS/INS entegrasyonu üzerine çalışılmıştır. Ataletsel ölçüm sistemi (IMU) sensörü içerisinde barındırdığı jiroskoplar ve ivme ölçerler sayesinde dönüş hızı ve öteleme ivmesi ölçebilen MEMS tabanlı bir sensördür. Ataletsel navigasyon sistemi (INS), IMU sensörü çıkışlarından mekanizasyon denklemleri ile konum, hız ve rotasyon açılarını hesaplayan bir sistemdir. INS, IMU sensöründen kaynaklanan gürültü, ofset, sürüklenme ve mekanizasyon denklemlerinde integral alınması nedeniyle oluşan hatalar sonucu doğru sonuçlar veremez. Bu nedenle INS çıkış verileri genişletilmiş Kalman filtresi kullanılarak GPS sensörü ile belirli aralıklarla güncellenmelidir. Bu bölümde deney aracı ile gerçek yol testi yapılmadan önce bir ön çalışma olarak araç dinamiği simülasyon programı Carmaker ile Matlab Simulink ortamı entegrasyonu oluşturularak, bu sanal ortamda gerçekçi simülasyonlar ile INS algoritması ve GPS/INS entegrasyonu gerçekleştirilerek denenmiştir. Burada amaç GPS ve IMU sensörlerinin seçilen farklı örnekleme frekanslarında GPS/INS entegrasyonunu test etmek, bu sensörlerdeki gürültünün GPS/INS entegrasyonuna etkisini incelemek ve yayınlanan GPS konum verisinin örnekleme frekansını GPS/INS füzyonu ile yükseltmektir. Ardından GPS/INS entegrasyonun sahadaki performansını test etmek için Xsens MTI-G sensörü araç üzerine bağlanarak seçilen bir rotada veri toplanmış ve bu veriler Matlab Simulink'te oluşturulmuş olan farklı INS, GPS/INS algoritmaları ve çeşitli algoritma eklentileri ile denenmiştir. Xsens MTI-G sensörü

IMU sensörü olmayıp onun geliştirilmiş versiyonu olan yönelim açısı referans sistemi (AHRS) sensörüdür ve hem IMU sensörü olarak hem de gerçekleştirilen GPS/INS entegrasyonun doğruluğunu karşılaştırmak için referans olarak kullanılacak ve bu sensörden sonraki bölümlerde referans sensör olarak bahsedilecektir. İçerisinde GPS, IMU, manyetik pusula, statik basınç ve sıcaklık sensörü barındırmaktadır. Bu sensörün IMU sensörden farkı IMU sensör çıkışlarına ek olarak rotasyon açılarını yüksek doğrulukta hesaplaması ve içerisindeki EKF algoritması ile yüksek frekansta konum ve hız değerlerini hesaplayabilmesidir.

5.1 Giriş

Aktif güvenlik sistemleri ve İleri Sürüş Destek Sistemleri karayolu araçlarının güvenliğini arttırmak için kullanılırlar. İlk aktif güvenlik sistemi olan ABS fren sisteminin kullanımı uzun bir zamandır zorunludur. ABS/TCS/ESC gibi sistemler 2014 yılı itibariyle yeni araçlarda standart güvenlik paketi olarak sunulmaktadır. Yakın bir zamanda ASK (ACC) sisteminin de standart bir özellik olması beklenmektedir. V2V ve V2I terimleriyle kısaltılmış araçlar arası iletişimin ve araç yol iletişiminin de 2017 yılı itibariyle araçlara yerleştirilmesi için büyük bir çaba mevcuttur. KASK sistemi ASK sisteminin V2V (araçlar arası) iletişim ile ön aracın ivmelenme verisini kullanmasıdır. YOS, yüksek otomasyonlu sürüş sistemleri de çok sayıda araştırmacının ilgisini çekmekte ve bu donanımların 2020 yılından sonra piyasaya sürülmesi beklenmektedir.

ASK, KASK ve YOS, yüksek doğrulukta konum bilgisi gerektiren önemli uygulamalardır. Mekar Takımı, Grand Cooperative Challenge yarışmasına 2011 yılında katılmış ve burada V2V haberleşme gerçekleştirerek GPS verisi ileten ASK ve KASK sistemlerini başarıyla uygulamıştır [14]. Mekar Aracı ve 10 Hz veri güncellemesine sahip RTK GPS sensörü Şekil 5.1’de görülmektedir. RTK GPS gerçek zamanlı kinematik GPS’in kısaltılmasıdır. RTK GPS hata hesaplama algoritması sayesinde konum değerini 1 cm’e yakın doğrulukta sağlayabilen yüksek doğrulukta GPS sensörüdür. YOS da yüksek doğruluklu araç konum bilgisine ihtiyaç duyan diğer bir uygulamadır. Şekil 5.2’de görülen otonom rota izleme yeteneğine sahip Okan Üniversitesi Okanom aracı gelecekte YOS uygulamaları için kullanılacaktır. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de gösterilen her iki deney aracı, araç konum verisini elde etmek için 10 Hz örnekleme frekansına sahip RTK GPS sensörü kullanmaktadır. Deneysel araçlarla

olan önceki deneyimlerimize dayanarak söyleyebiliriz ki geçici GPS sinyal kayıplarında (örneğin köprü altından geçerken) yüksek doğruluklu konum/hız bilgisi ve GPS sensöründen daha hızlı örnekleme gerekmektedir. Bu çalışmada INS ve GPS/INS algoritmaları, referans sensörü ile karşılaştırılarak doğruluğu test edilmiştir. IMU sensör maksimum örnekleme 10 Hz olan GPS sensörüne göre daha yüksek olan 100-10000 Hz arası örnekleme frekansına sahiptir. INS algoritması, IMU verisinden araç konum, hız ve yönelimini hesaplamak için kullanılır. INS algoritması, sadece kısa süreler için doğru konum tahmini yapabilir ve bu sebeble daha düşük örnekleme frekansına sahip GPS verisi ile periyodik olarak güncellenmelidir. Burada GPS/INS füzyonu için genişletilmiş Kalman filtresi kullanılacaktır.



Şekil 5.1 : GCDC yarışmasına katılan Mekar aracı (sol şeritte).

Literatürde GPS/INS entegrasyonu üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda genellikle tek bir yöntem, sanal test veya deneysel yöntem üzerine yoğunlaşmıştır. Bu doktora tezinde ise hem sanal hem deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Sanal ortamda farklı GPS ve IMU sensör frekanslarının, IMU sensör gürültüsünün ve rotadaki virajın GPS/INS entegrasyonuna etkisi incelenmiştir.



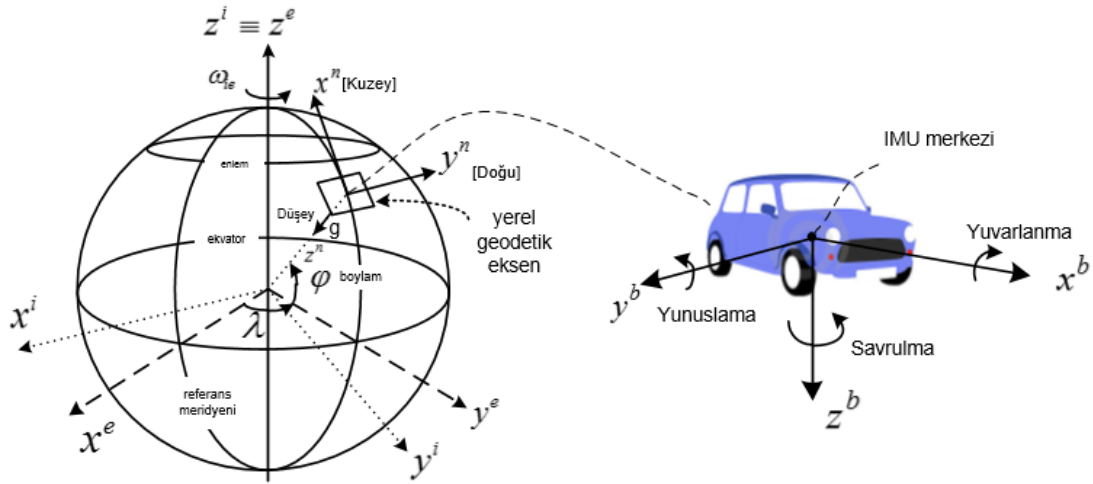
Şekil 5.2 : Okan Üniversitesi Okanom aracı ile otonom patika izleme.

Deneyisel kısımda Şekil 5.2’deki deneysel araç üzerinde referans sensör ile toplanan veriler ile çeşitli INS algoritmaları ve iki farklı GPS/INS entegrasyonu metodu referans sensörün sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca literatürde düzlemsel entegrasyon ile ilgili bilgiler kısıtlıdır. Düzlemsel INS denklemleri çıkarımı iki farklı yöntemle verilmiştir. Burada Phuong’un yöntemi düzlemsel entegrasyona indirgenerek gösterilmiştir.

5.2 Ataletsel Ölçüm Sensörü

5.2.1 Ataletsel ölçüm Sensörü (IMU)

Ataletsel ölçüm sensörü, üç eksenli jiroskop ve üç eksenli ivmeölçer sensörlerinin kombinasyonudur. Düşük maliyetli IMU sensörleri birçok uygulamada kullanılmaktadır. IMU sensörünün çıktısı, üç ana eksenle dönüş hızları ve özgül kuvvetlerdir (specific force). IMU sensörü, dünya merkezli atalet eksenine göre çıkış ürettiği için basit bir integrasyonla dönüş açılarını, öteleme hız ve deplasmanlarını hesaplamak mümkün değildir. Bu sensör ayrıca yerçekimi ve Koriyolis etkileri ile gürültü, oran faktörü, ofset ve sürüklenmeye maruz kalmaktadır. Bir ivmeölçer özgül kuvvet (birim kütle başına uygulanan atalet kuvveti) ölçtüğünden dünya üzerinde herhangi bir yüzeyde statik durumda bırakılırsa, yerçekimine zıt yöndeki tepki ivmesini ölçecektir. Bu bölümün devamında özgül kuvvet terimi yerine ivme terimi kullanılacaktır. IMU sensörlerin 1 kHz’e kadar yüksek örnekleme frekansına sahip olanları vardır fakat ucuz olanları genellikle 100 Hz örnekleme frekansına sahiptir.



Şekil 5.3 : ECI, ECEF, navigasyon ve araç ekseninin gösterimi.

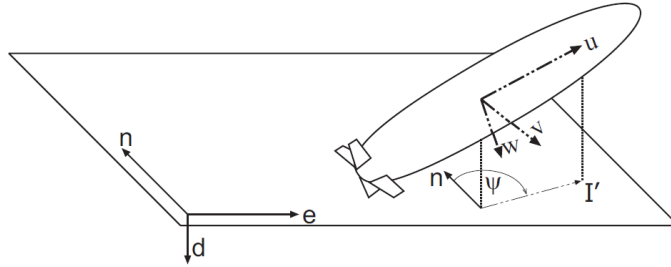
Şekil 5.3'te görülen “i” üst indisli x^i , y^i ve z^i eksenleri dünyanın merkezine sabitlenmiş atalet eksenini (ECI) ve “e” üst indisli x^e , y^e ve z^e eksenleri dünyanın merkezinde dünyaya sabitlenmiş eksenini (ECEF) temsil etmektedir. ECEF eksenini ECI eksenine göre dünyanın kendi eksenine etrafındaki dönüş hızı ile dönmektedir. x^n eksenini elipsoid kuzey (geodetik kuzey), y^n elipsoid doğu (geodetik doğu) ve z^n düşey inen eksen boyunca elipsoid normalidir. “n” üst indisi ile gösterilen eksene, kuzey-doğu-düşey (NED) eksen veya yerel geodetik eksen de denir. Ayrıca teğet eksen veya navigasyon eksen olarak da bilinir ve Şekil 5.3'te görülebilir. Bu navigasyon ekseninin merkezi IMU sensörünün merkezindedir.

Şekil 5.3'te “b” üst indisi ile gösterilen eksen ise araç gövdesinin kütle merkezine sabitlenmiş araç eksenidir veya gövde eksenini olarak da adlandırılabilir. Eğer araç üzerinde kullanılacak IMU, araç ekseninin üzerine takılırsa IMU ile araç eksenini çakışacaktır aksi halde IMU sensörüne yeni bir eksen atanmalıdır ve bu eksene IMU eksenini, enstrüman platform eksenini veya sensör eksenini adları verilebilir. Fakat burada IMU ile araç ekseninin çakıştığı kabulü yapılmıştır. Ataletsel navigasyon sisteminin (INS) algoritması, IMU sensör çıkışının mekanizasyon denklemleri ile düzeltilmesidir. Burada IMU çıkışında herhangi bir kalibrasyona ihtiyaç duyuluyorsa INS algoritmasına geçmeden önce kalibre edilmelidir. INS, IMU'nun etkisi altında kaldığı yerçekimi, Koriolis kuvvetleri gibi etkilerin giderildiği IMU ve Mekanizasyon Denklemleri'nin toplamına denir. Tez çalışmasında INS denklemleri diğer adıyla mekanizasyon denklemleri için navigasyon eksenini referans alınmış ve denklemler

navigasyon eksenine göre çıkarılmıştır. Bu denklemler üç ekseninde konum, hız ve rotasyon denklemlerinden oluşmaktadır.

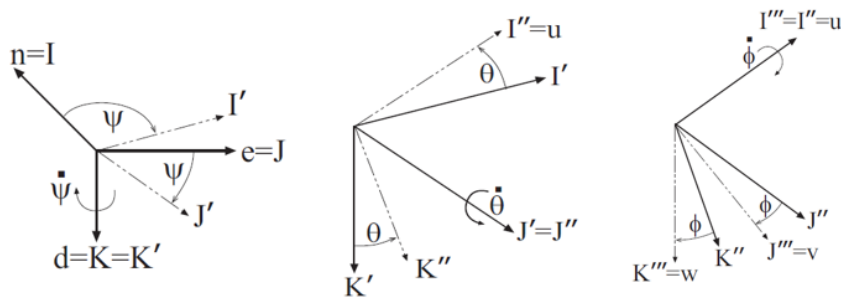
5.2.2 Rotasyon matrisinin matematiksel çıkarımı

Bir eksen takımındaki vektörü diğer bir eksen takımına göre ifade etmek istersek bu vektörü, eksen takımları arasındaki dönüşümü tanımlayan rotasyon matrisi ile çarpmak gerekmektedir. Burada rotasyon matrisi, navigasyon ekseninden araç eksenine dönüşüm için gereklidir. ψ , θ ve ϕ açıları sırasıyla savrulma, yunuslama ve yalpa açıları temsil etmektedir. Savrulma, yunuslama ve yalpa açıları aracın ekseninin navigasyon eksenine göre dönüşünü belirten açılardır.



Şekil 5.4 : Navigasyon eksenini ile araç eksenini arası ilişki [43].

Şekil 5.4'te navigasyon eksenini sırasıyla n-e-d ile araç eksenini u-v-w eksenleri ile gösterilmiştir. Rotasyon matrisi, navigasyon ekseninden araç eksenine dönüşü gösterdiğinden bir koordinat eksenini diğer bir koordinat eksenine çevirmek için sırasıyla eksenler savrulma, yunuslama ve yuvarlanma dönüş açıları kullanılarak döndürülür ve bu çarpımdan rotasyon matrisi elde edilir.



Şekil 5.5 : Soldan sağa sırasıyla savrulma, yunuslama ve yuvarlanma açısı rotasyonu [43].

Şekil 5.5'de görüldüğü gibi navigasyon eksenini ψ savrulma açısı kadar döndürülürse

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n \\ e \\ d \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$x'y'z'$ eksenini elde edilir. $x'y'z'$ eksenini θ yunuslama açısı kadar döndürülürse

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$x''y''z''$ eksenini elde edilir. $x''y''z''$ eksenini ϕ yuvarlanma açısı kadar döndürülürse

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

uvw eksenini elde edilir. Denklem 5.2 ve 5.1 eşitlikleri Denklem 5.3'de yerine yazılırsa

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n \\ e \\ d \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

eşitliği elde edilir. Denklem 5.4'deki matrisler çarpılırsa

$$R_n^b = \begin{bmatrix} c(\psi)c(\theta) & s(\psi)c(\theta) & -s(\theta) \\ -s(\psi)c(\phi) + c(\psi)s(\theta)s(\phi) & c(\psi)c(\phi) + s(\psi)s(\theta)s(\phi) & c(\theta)c(\phi) \\ s(\psi)s(\phi) + c(\psi)s(\theta)c(\phi) & -c(\psi)s(\phi) + s(\psi)s(\theta)c(\phi) & c(\theta)c(\phi) \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

navigasyon ekseninden araç eksenine olan dönüşü temsil eden rotasyon matrisi (DCM matrisi) elde edilir. Rotasyon matrisinin değeri küçük açı değişimleri için bulunmak istenirse Denklem 5.4'te kosinüs 1 değerine sinüs ise radyan cinsinden açı değerine eşit kabul edilir.

$$R_n^b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \delta\phi \\ 0 & -\delta\phi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\delta\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \delta\theta & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \delta\psi & 0 \\ -\delta\psi & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Denklem 5.6'daki matrisler çarpılırsa küçük açı değişimlerini temsil eden Denklem 5.7'deki rotasyon matrisi elde edilir.

$$R_n^b = \begin{bmatrix} 1 & \delta\psi & -\delta\theta \\ -\delta\psi & 1 & \delta\phi \\ \delta\theta & -\delta\phi & 1 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Küçük açı değişimleri, açısal hız ile birim zamanın çarpımı olarak ifade edilirse küçük zaman değişimi şeklinde Denklem 5.8 ile gösterilebilir. Denklem 5.8 sembolik olarak $R_{n(t)}^{n(t+\delta t)}$ terimi ile ifade edilebilir.

$$R_{n(t)}^{n(t+\delta t)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\psi} & \dot{\theta} \\ \dot{\psi} & 0 & -\dot{\phi} \\ -\dot{\theta} & \dot{\phi} & 0 \end{bmatrix} \delta t \quad (5.8)$$

Denklem 5.8’de açısal hızların ters (skew) simetrik matris gösterimi olan Ω_{bn}^n terimi yazılırsa

$$R_{n(t)}^{n(t+\delta t)} = I_{3 \times 3} - \Omega_{bn}^n \delta t \quad (5.9)$$

eşitliği elde edilir. $I_{3 \times 3}$ üç satır ve üç sütunlu birim matristir.

5.2.3 Rotasyon matrisi (DCM matrisi) türevinin matematiksel çıkarımı

Küçük δt zaman sonra, “b” araç eksenin “n” navigasyon eksenine göre rotasyon matrisinin türevi Denklem 5.10 ile elde edilir.

$$\dot{R}_b^n(t) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{R_b^n(t + \delta t) - R_b^n(t)}{\delta t} \quad (5.10)$$

δt zaman sonra oluşan rotasyon matrisi iki çarpana ayrılabilir.

$$R_b^n(t + \delta t) = R_{n(t)}^{n(t+\delta t)} R_b^n(t) \quad (5.11)$$

Küçük δt zaman değişiminde Denklem 5.9’dan alınan rotasyon matris ifadesi Denklem 5.10’da yerine yazılırsa 5.12 eşitliği elde edilir.

$$\dot{R}_b^n(t) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{(I - \Omega_{bn}^n \delta t) R_b^n(t) - R_b^n(t)}{\delta t} = -\Omega_{bn}^n R_b^n(t) \quad (5.12)$$

Denklem 5.12’de $\Omega_{bn}^n = R_b^n \Omega_{bn}^b R_n^b$ ile $-\Omega_{bn}^b = \Omega_{nb}^b$ eşitliğini kullanırsak

$$\dot{R}_b^n = -\Omega_{bn}^n R_b^n = R_b^n \Omega_{nb}^b = R_b^n (\Omega_{ib}^b - \Omega_{in}^b) \quad (5.13)$$

rotasyon matrisinin türev denklemi elde edilir. Aracın atalet eksenine göre olan açısal hızını belirten Ω_{ib}^b matrisinden navigasyon eksenin atalet eksenine göre açısal hızını belirten Ω_{in}^b matrisi çıkarılırsa aracın navigasyon eksenine göre açısal hız matrisi Ω_{nb}^b bulunur ve $\Omega_{nb}^b = \Omega_{ib}^b - \Omega_{in}^b$ eşitliği ile belirtilir. Burada navigasyon eksenin atalet eksenine göre açısal hızını belirten Ω_{in}^b matrisi, dünyanın atalet eksenine göre açısal hızını belirten Ω_{ie}^b matrisi ve navigasyon eksenini dünyanın eksenine göre açısal hızını belirten Ω_{en}^b matrisinin toplamına eşittir ve $\Omega_{in}^b = \Omega_{ie}^b + \Omega_{en}^b$ denklemi ile gösterilir. $\Omega_{nb}^b = \Omega_{ib}^b - \Omega_{in}^b$ ile $\Omega_{in}^b = \Omega_{ie}^b + \Omega_{en}^b$ denklemlerinden Ω_{nb}^b çekilirse $\Omega_{nb}^b = \Omega_{ib}^b - \Omega_{ie}^b - \Omega_{en}^b$ eşitliği çekilir. Bu eşitlik Denklem 5.13’te yerine yazılırsa

$$\dot{R}_b^n = R_b^n (\Omega_{ib}^b - \Omega_{ie}^b - \Omega_{en}^b) \quad (5.14)$$

elde edilir. Rotasyon matris çarpımı dağıtılsa

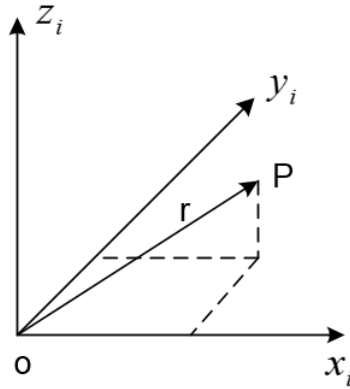
$$\dot{R}_b^n = R_b^n \Omega_{ib}^b - R_b^n \Omega_{ie}^b - R_b^n \Omega_{en}^b \quad (5.15)$$

eşitliği elde edilir. Denklem 5.15’de ters simetrik matris çarpımında $\Omega_{ie}^b = R_n^b \Omega_{ie}^n R_b^n$ ve $\Omega_{en}^b = R_n^b \Omega_{en}^n R_b^n$ kuralları kullanılırsa

$$\dot{R}_b^n = R_b^n \Omega_{ib}^b - (\Omega_{ie}^n + \Omega_{en}^n) R_b^n \quad (5.16)$$

rotasyon matris eşitliği elde edilir. Burada $R_b^n = (R_n^b)^T$ ve $R_n^b = (R_b^n)^T$ eşitliği unutulmamalıdır. Bu çıkarım Farrell kaynağından uyarlanmıştır [43].

5.2.4 INS hız denkleminin matematiksel çıkarımı



Şekil 5.6 : Referans eksen [46].

P noktasının ivmesi uzayda sabit bir i referans eksen takımına göre yazılırsa

$$a_i = \left. \frac{d^2 r}{dt^2} \right|_i \quad (5.17)$$

elde edilir ve bulunan bu ifade r vektörünün zamana göre ikinci dereceden türevi şeklindedir. P noktasına ivmeölçer sensörü yerleştirilse bu sensör hem ağırlık kuvvetini hem de ivmeyi ölçer, ivme eşitliliği bu durumda

$$f = \left. \frac{d^2 r}{dt^2} \right|_i - g \quad (5.18)$$

şeklindedir. Denklem 5.18'i düzenlersek

$$\left. \frac{d^2 r}{dt^2} \right|_i = f + g \quad (5.19)$$

eşitliği elde edilir. Pratikte araç konum ve hızını dönen dünya eksenine göre hesaplamak gerekir. Koriyolis teoreminden

$$V_e = V_i - \omega_{ie} \times r \quad (5.20)$$

Dünya eksen takımına göre yazılan hız atalet eksenine göre yazılıandan $\omega_{ie} \times r$ teriminin çıkarılması ile elde edilir. ω_{ie} dünyanın dönüş hızı vektörüdür ve r P noktasının konumudur. Hız vektörlerini konum vektörü cinsinden yazılırsa ve atalet eksenine göre hızı yalnız bırakılırsa

$$\left. \frac{dr}{dt} \right|_i = \left. \frac{dr}{dt} \right|_e + \omega_{ie} \times r \quad (5.21)$$

eşitliği elde edilir. Denklem 5.21'deki hız denkleminin zamana göre türevi alınırsa

$$\left. \frac{d^2 r}{dt^2} \right|_i = \left. \frac{dV_e}{dt} \right|_i + \frac{d}{dt} [\omega_{ie} \times r] \quad (5.22)$$

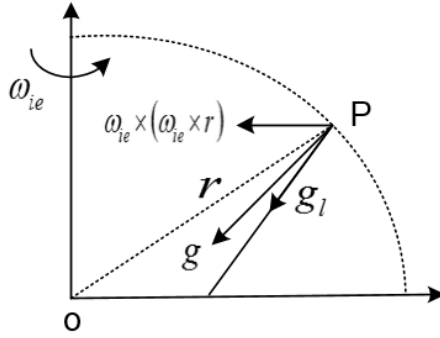
ivme eşitliği elde edilir. Denklem 5.22 eşitliği içindeki türev ifadesi açılırsa

$$\left. \frac{d^2 r}{dt^2} \right|_i = \left. \frac{dV_e}{dt} \right|_i + \omega_{ie} \times V_e + \omega_{ie} \times [\omega_{ie} \times r] \quad (5.23)$$

eşitliği elde edilir. Denklem 5.19 ifadesi Denklem 5.23'te yerine yazılırsa ve düzenlenirse

$$\left. \frac{dV_e}{dt} \right|_i = f - \omega_{ie} \times V_e - \omega_{ie} \times [\omega_{ie} \times r] + g \quad (5.24)$$

eşitliği elde edilir.



Şekil 5.7 : Yerçekimi kuvveti bileşenleri [46].

Yerel ağırlık vektörü ise

$$g_l = g - \omega_{ie} \times [\omega_{ie} \times r] \quad (5.25)$$

şeklinde tanımlanır. Bu eşitlik Denklem 5.24'de yerine yazılırsa

$$\left. \frac{dV_e}{dt} \right|_i = f - \omega_{ie} \times V_e + g_l \quad (5.26)$$

elde edilir. Denklem 5.26 atalet eksenini belirten “i” üst indisi ile ifade edilirse ve özgül kuvvet atalet eksenine R_b^i terimi ile çarpılarak indirgenirse

$$\dot{V}_e^i = R_b^i f^b - \omega_{ie}^i \times V_e^i + g_l^i \quad (5.27)$$

elde edilir. Atalet ekseninde yazılan araç hızı ifadesi navigasyon eksenine

$$\left. \frac{dV_e}{dt} \right|_n = \left. \frac{dV_e}{dt} \right|_i - \omega_{in} \times V_e = \left. \frac{dV_e}{dt} \right|_i - [\omega_{ie} + \omega_{en}] \times V_e \quad (5.28)$$

eşitliği ile dönüştürülür. $\frac{dV_e}{dt}$ terimi Denklem 5.26’dan alınarak Denklem 5.28’de yerine yazılırsa

$$\left. \frac{dV_e}{dt} \right|_n = f - [2\omega_{ie} + \omega_{en}] \times V_e + g_l \quad (5.29)$$

elde edilir. Denklem 5.29’da üst indis n yerine yazılırsa

$$\dot{V}_e^n = R_b^n f^b - [2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n] \times V_e^n + g_l^n \quad (5.30)$$

elde edilir. Denklem 5.30 düzenlenirse

$$\dot{V}_e^n = R_b^n f_{ib}^b - [2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n] \times V_e^n + g_l^n \quad (5.31)$$

ivme eşitliği elde edilir. Burada f_{ib}^b vektörü ivmeölçer sensörün ölçümünden elde edilir. Denklem 5.31’de vektörel çarpım yerine açılmal hızlar ters simetrik formda yazılırsa

$$\dot{V}_e^n = R_b^n f_{ib}^b - (\Omega_{en}^n + 2\Omega_{ie}^n) V_e^n + g_l^n \quad (5.32)$$

navigasyon ekseninde hız diferansiyel denklemi elde edilir [46].

5.2.5 INS mekanizasyon denklemleri

Doğrusal olmayan navigasyon denklemleri üç ana denklemden oluşmaktadır.

$$\dot{r}_{eb}^n = \dot{r}^n = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\lambda} \\ \dot{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_n}{R_M + h} & \frac{v_e}{\cos(\varphi)(R_N + h)} & -v_d \end{bmatrix}^T \quad (5.33)$$

$$\dot{V}_{eb}^n = \dot{V}^n = R_b^n f_{ib}^b - (\Omega_{en}^n + 2\Omega_{ie}^n) V^n + g^n \quad (5.34)$$

$$\dot{R}_b^n = R_b^n \Omega_{ib}^b - (\Omega_{ie}^n + \Omega_{en}^n) R_b^n \quad (5.35)$$

Konum vektörü r^n , hız vektörü V^n 'nin integrasyonu sonrası enlem, boylam ve yükseklik cinsinden yazılması ile elde edilir. Üst indis “n” navigasyon ekseninde hesaplamayı (navigasyon ekseninde ölçme, navigasyon eksenine izdüşüm) temsil etmektedir. Denklem 5.33'teki konumun değişim oranı $\dot{r}^n$, Denklem 5.34'teki V^n hız vektörüne eşit değildir. Burada konum değerleri φ , λ ve h ile belirtilmiştir ve bu terimler sırasıyla enlem, boylam ve yüksekliği temsil etmektedir. Denklem 5.34'teki IMU'dan gelen ivme değerlerini temsil eden f_{ib}^b , araç ekseninde atalet eksenine göre ölçülen ivmelerin araç eksenine izdüşürülmesini gösterirken, g^n IMU'ya etkiyen yerçekimi vektörünün navigasyon eksenindeki değeridir ve IMU konumuna bağlı olarak değişir. v_n , v_e ve v_d sırasıyla karayolu aracının kuzey, doğu ve düşey yöndeki hızlarıdır. $-2\Omega_{ie}^n V^n$ terimi Koriolis ivmesini temsil etmektedir. Araç (gövde) eksenini “b” ile gösterilir ve araç üzerine sabitlenmiş, araçla birlikte dönebilen bir eksenidir. Ω_{en}^n ise ω_{en}^n vektörünün ters simetrik matris şeklinde gösterimidir ve

$$\omega_{en}^n = \begin{bmatrix} \dot{\lambda} \cos \varphi \\ -\dot{\phi} \\ -\dot{\lambda} \sin \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_e}{R_N + h} & \frac{-v_n}{R_M + h} & \frac{-v_e \tan(\varphi)}{R_N + h} \end{bmatrix}^T \quad (5.36)$$

navigasyon ekseninin dünya eksenine göre dönüş hızının navigasyon eksenine izdüşümüdür veya navigasyon ekseninde ölçülmesidir. ω_{en}^n ifadesi basitçe $V^n = \omega_{en}^n \times r$ ifadesiyle bulunabilir ve burada r vektörü dünya ekseninden araç eksenine olan mesafedir. Denklem 5.36'da R_M meridyen yarıçapı, R_N dünyanın normal yarıçapıdır ve Denklem 5.37'de olduğu gibi φ boylamı, Denklem 5.38, 5.39 ve 5.40'da verilen eksen kaçıklığı ve a ekvator yarıçapının fonksiyonu olarak hesaplanır.

$$R_M = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2(\sin \varphi)^2)^{3/2}}, \quad R_N = \frac{a}{(1-e^2(\sin \varphi)^2)^{1/2}} \quad (5.37)$$

$$a = 6378137 \text{ m [ekvator yarıçapı]} \quad (5.38)$$

$$f = 0.00335281 \quad (5.39)$$

$$e = \sqrt{f(2-f)} \quad [\text{eksen kaçıklığı}] \quad (5.40)$$

Denklem 5.34 ve 5.35'teki Ω_{ie}^n dünyanın atalet eksenine göre dönüş hızının navigasyon eksenindeki izdüşümüdür ve $[\omega_{ie} \cos \varphi \quad 0 \quad -\omega_{ie} \sin \varphi]^T$ vektörüne eşit olan $\omega_{ie}^n = R_e^n \omega_{ie}^e$ denklemiyle elde edilir. $\omega_{ie}^e(\omega_{ie})$, $7.292115 \cdot 10^{-5}$ rad/sn değerine eşit olan dünyanın kendi ekseninde dönüş hızıdır. Denklem 5.35'teki Ω_{ib}^b ise araç ekseninin atalet eksenine göre dönüş hızının araç eksenine izdüşümüdür ve IMU'nun çıkışı olan ω_{ib}^b açısal hız vektörünün ters simetrik matris gösterimidir.

5.2.6 Ayırıklaştırılmış INS mekanizasyon denklemleri

(5.33), (5.34) ve (5.35) de bulunan navigasyon denklemleri, nümerik simülasyonlarda kullanılmak üzere Euler integrasyon yöntemi kullanılarak (5.41), (5.42) ve (5.43)'teki denklemlerde olduğu gibi ayırıklaştırılmıştır ve k ile k+1 alt indisi zaman adımını temsil etmektedir.

$$R_{b,k+1}^n = R_{b,k}^n + \left(R_{b,k}^n \Omega_{ib,k}^b - (\Omega_{ie,k}^n + \Omega_{en,k}^n) R_{b,k}^n \right) \Delta t \quad (5.41)$$

$$V_{k+1}^n = V_k^n + \left[R_{b,k}^n f_{ib,k}^b + g_k^n - (\Omega_{en,k}^n + 2\Omega_{ie,k}^n) V_k^n \right] \Delta t \quad (5.42)$$

$$r_{k+1}^n = r_k^n + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{R_M + h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\cos \varphi (R_N + h)} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} (V_k^n + V_{k+1}^n) \Delta t \quad (5.43)$$

Denklem 5.43, Denklem 5.33'ün ayrıklaştırılması ile elde edilmiştir. INS mekanizasyon denklemlerinin bilgisayar ortamında kolayca çözülebilmesi için aşağıda 4 adım oluşturulmuştur ve bu adımlar sırasıyla takip edilerek INS denklemleri çözülebilir.

5.2.6.1 Adım 1

Rotasyon matrisinin bir sonraki adımda (Δt süre sonraki) değerini bulmak gerekmektedir. IMU'dan gelen açısal hız vektörünün ters simetrik matrise çevrilmiş hali Denklem 5.44'de görülmektedir.

$$\Omega_{ib}^b = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (5.44)$$

Dünya eksenin dünyanın merkezinde bulunan atalet eksenine göre açısal hızının dünya eksenine izdüşürülmüş ifadesi Denklem 5.45'de verilmiştir.

$$\omega_{ie}^e = \omega_{ie} = 7.292115 \cdot 10^{-5} \text{ rad / sn} \quad (5.45)$$

Atalet eksenine göre dünyanın dönüş hızının navigasyon eksenine izdüşümü

$$\omega_{ie}^n = R_e^n \omega_{ie}^e = \begin{bmatrix} \omega_{ie} \cos(\varphi) \\ 0 \\ -\omega_{ie} \sin(\varphi) \end{bmatrix} \quad (5.46)$$

şeklindedir. Dünyanın dönüş hızını belirten vektörün navigasyon eksenindeki izdüşümü

$$\Omega_{ie}^n = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{ie} \sin(\varphi) & 0 \\ -\omega_{ie} \sin(\varphi) & 0 & -\omega_{ie} \cos(\varphi) \\ 0 & \omega_{ie} \cos(\varphi) & 0 \end{bmatrix} \quad (5.47)$$

formunda ters simetrik matris olarak da gösterilebilir. Ekvator yarıçapı ve eksen kaçıklığı değerleri sabit değerlerdir. R_M meridyen yarıçapı, R_N dünyanın normal yarıçapıdır ve φ enlemi, e eksantrikliği ve a ekvator yarıçapının fonksiyonu olarak Denklem 5.37-40 eşitlikleri ile hesaplanır. Bu değerler enlem değiştiği zaman

değişirler. Ω_{en}^n matrisi Denklem 5.36'nın ters simetrik gösteriminden elde edilir. Rotasyon matrisi, sayısal türev yöntemlerinden Euler yöntemi kullanılarak ayırıştırılmıştı ve Adım 1 başlığından buraya kadar verilen ifadeler

$$R_{b,k+1}^n = R_{b,k}^n + \left(R_{b,k}^n \Omega_{ib,k}^b - (\Omega_{ie,k}^n + \Omega_{en,k}^n) R_{b,k}^n \right) \Delta t \quad (5.48)$$

denkleminde yerine yerleştirilir. Daha sonra rotasyon matrisinin normu alınarak

$$R_{b,k+1}^n = \|R_{b,k+1}^n\| \quad (5.49)$$

şeklinde normalize edilmelidir. Rotasyon matrisinin güncelleştirilmesi için Farrell'in önerdiği diğer bir yol ise

$$R_{b,k+1}^n = \left(I - \frac{\sin(\|v\|)}{\|v\|} \gamma + \frac{1 - \cos(\|v\|)}{\|v\|^2} \gamma^2 \right) R_{b,k}^n \quad (5.50)$$

formundadır [43]. $v(t_k)$ 'in ters simetrik gösterimi $\gamma = [v(t_k) \times]$ 'dir ve

$v(t_k) = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \omega_{nb}^b(\tau) d\tau = \omega_{nb}^b \Delta t$ eşitliği geçerlidir. $v = [v_1 \ v_2 \ v_3]^T$ vektörünün normu

$\|v\|$ şeklinde gösterilir. ω_{nb}^b araç ekseninin navigasyon eksenine göre dönüş hızının araç

ekseninde izdüşümüdür ve $\omega_{nb}^b = \omega_{ib}^b - \omega_{in}^b$ eşitliği kullanılarak hesaplanır. Bu eşitlikte

$\omega_{in}^b = R_b^n \omega_{in}^n$ 'dir. ω_{in}^n vektörü

$$\omega_{in}^n = [\omega_{ie}^e \cos(\varphi) \ 0 \ -\omega_{ie}^e \sin(\varphi)]^T \quad (5.51)$$

şeklindedir ve navigasyon ekseninin atalet eksenine göre dönüş hızının navigasyon

eksenine izdüşümüdür. Denklem 5.50'deki γ^2 Denklem 5.52 ile hesaplanır.

$$\gamma^2 = \begin{bmatrix} -(v_2^2 + v_3^2) & v_1 v_2 & v_1 v_3 \\ v_1 v_2 & -(v_1^2 + v_3^2) & v_2 v_3 \\ v_1 v_3 & v_2 v_3 & -(v_1^2 + v_2^2) \end{bmatrix} \quad (5.52)$$

5.2.6.2 Adım 2 (opsiyonel)

İkinci adımda, IMU sensöründen gelen 3 eksenle açısal ivme değerleri f_{ib}^b ile rotasyon matrisi çarpılarak navigasyon eksenine izdüşürülür ve örnekleme zamanları arasında f_{ib}^b 'in sabit olduğu kabulü yapılır. Denklem 5.53 GPS/INS entegrasyonunda kullanılacağından INS kısmı için gerekli değildir.

$$f_{ib,k}^n = R_{b,k}^n f_{ib,k}^b \approx \frac{1}{2} (R_{b,k}^n + R_{b,k+1}^n) f_{ib,k}^b \quad (5.53)$$

5.2.6.3 Adım 3

Üçüncü adımda hedeflenen, V_{eb}^n hız ifadesinin bir sonraki adımda değerini bulmaktır.

$$V_{eb}^n = V^n = [v_n \quad v_e \quad v_d]^T \quad (5.54)$$

Araç ekseninin dünya eksenine göre hız vektörü navigasyon eksenine izdüşürülmesi, Denklem 5.54'deki gibi kuzey, doğu ve düşey yönlü hızlardan oluşur. Hız denklemi

$$\dot{V}_{eb}^n = R_b^n f_{ib}^b + g^n - (\Omega_{en}^n + 2\Omega_{ie}^n) V^n \quad (5.55)$$

formunda idi. χ_e değeri 9.7803267715 sabit değeri alınarak

$$\chi = \chi_e \left(\frac{1 + 0.002931851 \sin^2 \varphi}{\sqrt{1 - 0.0066943800 \sin^2 \varphi}} \right) \quad (5.56)$$

$$g^n = [0 \quad 0 \quad \chi]^T \quad (5.57)$$

$$V_{k+1}^n = V_k^n + [R_{b,k}^n f_{ib,k}^b + g_k^n - (\Omega_{en,k}^n + 2\Omega_{ie,k}^n) V_k^n] \Delta t \quad (5.58)$$

g^n yerçekimi vektörü Denklem 5.57'den, $f_{ib,k}^b$ vektörü, $\Omega_{en,k}^n$ ve $2\Omega_{ie,k}^n$ matrisleri Adım 1'den alınarak Denklem 5.58'de yerine yazılarak hız vektörü V_{k+1}^n hesaplanır.

5.2.6.4 Adım 4

Dördüncü adımda hedef konum vektörü ifadesinin bir sonraki adımdaki değerini bulmaktır. φ , λ ve h sırasıyla enlem, boylam ve yüksekliği temsil etmektedir. Burada araç ekseninin dünya eksenine göre konum vektörü enlem, boylam, yükseklik

$$r_{eb}^n = r^n = [\varphi \quad \lambda \quad h]^T \quad (5.59)$$

ile ifade edilir. Konum vektörü de ayrıklaştırılırsa

$$r_{k+1}^n = r_k^n + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{R_M + h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\cos(\varphi)(R_N + h)} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} (V_k^n + V_{k+1}^n) \Delta t \quad (5.60)$$

elde edilir. Konum vektörünün başlangıç değeri GPS'ten ölçülen enlem, boylam ve yükseklik değeri olmalıdır. R_M , R_N , h ve Adım 3'ten gelen hız vektörleri Denklem 5.60'da yerine yazılırsa r_{k+1}^n konum vektörü elde edilir. GPS başlangıç konumu sıfır girilirse, INS o konumdan itibaren olan değişimi gösterir. Hız başlangıç değeri, hesaplar araç durduğu konumdan başlatılıyorsa sıfır vektörü olarak alınır. Burada rotasyon matrisinin de ilk değeri çok önemlidir. Adım 1'deki rotasyon matrisi hesaplamaları yapıldıktan sonra, rotasyon matrisi

$$R_b^n = \begin{bmatrix} c(\psi)c(\theta) & -s(\psi)c(\phi) + c(\psi)s(\theta)c(\phi) & s(\psi)s(\phi) + c(\psi)s(\theta)c(\phi) \\ s(\psi)c(\theta) & c(\psi)c(\phi) + s(\psi)s(\theta)s(\phi) & -c(\psi)s(\phi) + s(\psi)s(\theta)c(\phi) \\ -s(\theta) & c(\theta)s(\phi) & c(\theta)c(\phi) \end{bmatrix} \quad (5.61)$$

ifadesine eşit idi. Denklem 5.61'de bulunan ψ , ϕ ve θ açıları sırasıyla deney aracının araç eksenine göre olan savrulma, yalpalama ve yunuslama açılarını temsil etmektedir.

$$\psi = a \tan 2(R_b^n[2,1], R_b^n[1,1]) \quad (5.62)$$

$$\phi = a \tan 2(R_b^n[3,2], R_b^n[3,3]) \quad (5.63)$$

$$\theta = -a \tan \left(\frac{R_b^n[3,1]}{\sqrt{1 - (R_b^n[3,1])^2}} \right) \quad (5.64)$$

Bu açılar Denklem 5.61'deki rotasyon matrisinden hareketle Denklem 5.62-63-64'teki hesaplamalar yapılarak bulunabilir.

5.2.7 Euler denklemleri

Euler açıları sadece jiroskop ölçümlerinden hareketle Denklem 5.65'in ayrıklaştırılmış formundan elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \phi \sec \theta & \cos \phi \sec \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{ib,x}^b \\ \omega_{ib,y}^b \\ \omega_{ib,z}^b \end{bmatrix} \quad (5.65)$$

Euler yönteminin dezavantajı Denklem 5.65'te $\sec \theta$ terimi θ yunuslama açısı 90° olunca tanımsız olmasıdır. Daha detaylı bilgi için Phuong ve diğerlerinin [38] çalışmasına bakınız.

5.2.8 DCM Phuong denklemleri

Phuong ve diğerlerinin uyguladığı yöntem ise bölüm 5.2.6'da bahsedilen DCM yöntemindeki rotasyon matrisi hesabının iki kaskat yapıda Kalman Filtresi ile birleştirilerek uygulanması esasına dayanır. Sayısal hesap yapıldığından ayrıklaştırılmış Kalman Filtresi kullanılır. Durum uzay denklemi

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + w_k \quad (5.66)$$

şeklindedir. Burada Φ_k ayrıklaştırılmış durum uzay denkleminde F sistem matrisinden hesaplanan matristir. Taylor serisi açılımından, küçük Δt değerleri için

$$\Phi_k = e^{F\Delta t} = I + F\Delta t + \frac{F^2\Delta t^2}{2!} + \dots \cong I + F\Delta t \quad (5.67)$$

elde edilir. Ölçüm vektörü de

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (5.68)$$

şeklindedir. Burada verilen ayrıklaştırılmış Kalman Filtresi aşağıdaki denklemlerde kullanılmalıdır. Phuong'un yönteminde savrulma açısı dış bir kaynaktan beslenmektedir. Burada manyetik pusula dış kaynak olarak kullanılmıştır. Birinci Kalman Filtresi'nde DCM rotasyon matrisinin sadece üçüncü satırı elde edilir. Durum uzay modelinde durum denklemi

$$\dot{R}_b^n(3,:) = -\Omega_{nb}^b R_b^n(3,:) + w_1(t) \quad (5.69)$$

şeklindedir ve Denklem 5.13 eşitliğinden gelmektedir. Burada sadece Denklem 5.13 eşitliğinin üçüncü satırı alınmıştır. $w_1(t)$ ise zamana bağlı olarak değişen sıfır ortalamaya sahip Gauss beyaz gürültüdür. IMU stasyonere halde iken ölçülen ivmeölçer verileri yerçekimi değerini ölçmektedir.

$$\begin{bmatrix} f_{ib,x}^b \\ f_{ib,y}^b \\ f_{ib,z}^b \end{bmatrix} = R_b^n \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} g \quad (5.70)$$

Denklem 5.70'te görülen g yerçekim skaler değerinin önündeki vektör Denklem 5.61'deki rotasyon matrisinin 3. satırıdır. Kalman filtresi çıkışında durum değişkeni olan $R_b^n(3,:)$ rotasyon matrisinin üçüncü sıfır ortalamaya sahip Gauss beyaz gürültüdür.

$$z(t)^T = \begin{bmatrix} f_{ib,x}^b / g & f_{ib,y}^b / g & f_{ib,z}^b / g \end{bmatrix} = I_{3 \times 3} R_b^n(3,:) + v_1(t) \quad (5.71)$$

Kalman filtresi çıkışında durum değişkeni olan $R_b^n(3,:)$ rotasyon matrisinin üçüncü satırı elde edilir. Durum uzay modelinde Denklem 5.71'deki ölçüm modeli, araç ekseninde alınan ivme ölçümlerinden oluşur. Buradaki $v_1(t)$, $R_1(t)$ ölçüm gürültü kovaryans matrisli sıfır ortalamaya sahip Gauss beyaz gürültüdür. Yalpalama ve yunuslama açıları Denklem 5.63 ve 5.64'ten hesaplanarak elde edilir. İkinci Kalman Filtresi kısmında ise manyetik pusuladan hesaplanan savrulma açısı Kalman Filtresi ile yalpalama ve yunuslama açılarına entegre edilir. Ölçüm vektörü

$$z(t) = I_{3 \times 3} R_b^n(2,:) + v_2(t) \quad (5.72)$$

şeklindedir ve Denklem 5.61'deki rotasyon matrisinin ikinci satırı yazılırsa

$$z(t) = \begin{bmatrix} \cos \hat{\theta} \sin \psi \\ \cos \hat{\phi} \cos \psi + \sin \hat{\phi} \sin \hat{\theta} \sin \psi \\ -\sin \hat{\phi} \cos \psi + \cos \hat{\phi} \sin \hat{\theta} \sin \psi \end{bmatrix} \quad (5.73)$$

ölçüm vektörü son formuna ulaşır. Durum uzay modelindeki ölçüm modeli, savrulma, yalpalama ve yunuslama açılarından elde edilir. $\hat{\theta}$ ve $\hat{\phi}$ açıları 1. Kalman Filtresinden tahmin edilen veya kestirilen açılardır. Buradaki $v_2(t)$, $R_2(t)$ ölçüm gürültü kovaryans matrisli sıfır ortalamaya sahip Gauss beyaz gürültüdür. Durum uzay modelinde durum denklemi

$$\dot{R}_b^n(2,:) = -\Omega_{nb}^b R_b^n(2,:) + w_2(t) \quad (5.74)$$

şeklindedir. Durum değişkeni olan rotasyon matrisinin ikinci satırı hesaplanır. Rotasyon matrisinin birinci satırı ise

$$R_b^n(1,:) = R_b^n(2,:) \times R_b^n(3,:) \quad (5.75)$$

ikinci satır ile üçüncü satırın vektörel çarpımıdır. Bu son işlemten sonra ise rotasyon matrisinin normu alınarak normalize edilmelidir. Daha detaylı bilgi için Phuong ve diğerlerinin çalışmasına bakınız [38].

5.2.9 Quaternion denklemleri

Quaternion yöntemi ise genellikle uçak uzay uygulamalarında yapılan GPS/IMU entegrasyonunda kullanılır. Bu yöntemin DCM yönteminden farkı quaternion terimlerinin fiziksel karşılığının olmamasıdır. $\dot{q}$ vektörü

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & \omega_{ib,z}^b & -\omega_{ib,y}^b & \omega_{ib,x}^b \\ -\omega_{ib,z}^b & 0 & \omega_{ib,x}^b & \omega_{ib,y}^b \\ \omega_{ib,y}^b & -\omega_{ib,x}^b & 0 & \omega_{ib,z}^b \\ -\omega_{ib,x}^b & \omega_{ib,y}^b & -\omega_{ib,z}^b & 0 \end{bmatrix} q \quad (5.76)$$

denklemden elde edilir. Quaternionlar cinsinden rotasyon matrisinin elde edilmesi

$$R_b^n = \begin{bmatrix} (q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2) & 2(q_1q_2 - q_3q_4) & 2(q_1q_3 - q_2q_4) \\ 2(q_1q_2 + q_3q_4) & (q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 + q_4^2) & 2(q_2q_3 - q_1q_4) \\ 2(q_1q_3 - q_2q_4) & 2(q_2q_3 + q_1q_4) & (q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_4^2) \end{bmatrix} \quad (5.77)$$

şeklinde dir. Rotasyon matrisinden quaternionlar

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25(R_{b,32}^n - R_{b,23}^n) / (0.5\sqrt{1 + R_{b,11}^n + R_{b,22}^n + R_{b,33}^n}) \\ 0.25(R_{b,13}^n - R_{b,31}^n) / (0.5\sqrt{1 + R_{b,11}^n + R_{b,22}^n + R_{b,33}^n}) \\ 0.25(R_{b,21}^n - R_{b,12}^n) / (0.5\sqrt{1 + R_{b,11}^n + R_{b,22}^n + R_{b,33}^n}) \\ 0.5\sqrt{1 + R_{b,11}^n + R_{b,22}^n + R_{b,33}^n} \end{bmatrix} \quad (5.78)$$

eşitliği ile elde edilir. Denklem 5.76 hız denklemini ayrık denklem haline getirirsek

$$q_{k+1} = q_k + \begin{bmatrix} c(\Delta\theta) & s(\omega_{ib,z}^b dt) & s(-\omega_{ib,y}^b dt) & s(\omega_{ib,x}^b dt) \\ s(-\omega_{ib,z}^b dt) & c(\Delta\theta) & s(\omega_{ib,x}^b dt) & s(\omega_{ib,y}^b dt) \\ s(\omega_{ib,y}^b dt) & s(-\omega_{ib,x}^b dt) & c(\Delta\theta) & s(\omega_{ib,z}^b dt) \\ s(-\omega_{ib,x}^b dt) & s(\omega_{ib,y}^b dt) & s(-\omega_{ib,z}^b dt) & c(\Delta\theta) \end{bmatrix} q_k \quad (5.79)$$

burada

$$\Delta\theta = \sqrt{(\omega_{ib,x}^b dt)^2 + (\omega_{ib,y}^b dt)^2 + (\omega_{ib,z}^b dt)^2} \quad (5.80)$$

$$s = \frac{2}{\Delta\theta} \sin \frac{\Delta\theta}{2} = 1 - \frac{\Delta\theta^2}{24} + \frac{\Delta\theta^4}{1920} + \dots \quad (5.81)$$

$$c = 2 \left(\cos \frac{\Delta\theta}{2} - 1 \right) = -\frac{\Delta\theta^2}{4} + \frac{\Delta\theta^4}{192} + \dots \quad (5.82)$$

eşitlikleri geçerlidir. Daha detaylı bilgi Shin'in çalışmasından elde edilebilir [44].

5.3 GPS Küresel Konumlandırma Sistemi

Küresel konumlandırma sistemi, bu sistem için özel olarak uzaya gönderilmiş uydulardan sinyal alarak bulunulan yerin ECEF eksenine göre konum değerini enlem, boylam ve yükseklik cinsinden veren ve bunun yanında bazı çeşitlerinde navigasyon ekseninde hız bilgisini de kendi içerisindeki bir algoritmayla hesaplayarak veren bir sensördür. GLONASS, GALILEO v.s. gibi farklı bölgelere ait olan çeşitleri de vardır. Temel olarak bir anten ve alıcıya sahip olmalıdır ve konumlandırma için en az dört uyduyu görmesi gerekmektedir. GPS sinyali saat sapması, rastsal gürültü ve iyonosferik gecikme vs. gibi etkilere maruz kalmaktadır. IMU'ya göre daha düşük örnekleme frekansına, fakat daha yüksek doğruluğa sahiptir. GPS sensörü 1 Hz'den 10 Hz'e kadar örnekleme frekansına sahip olabilir. Normalde GPS konum hassaslığı 1-10 metre arası değişir. RTK GPS ise gerçek zamanlı kinematik düzeltmelere sahiptir ve 1 cm'e kadar hassaslığa sahip olabilir fakat yüksek maliyetlidir.

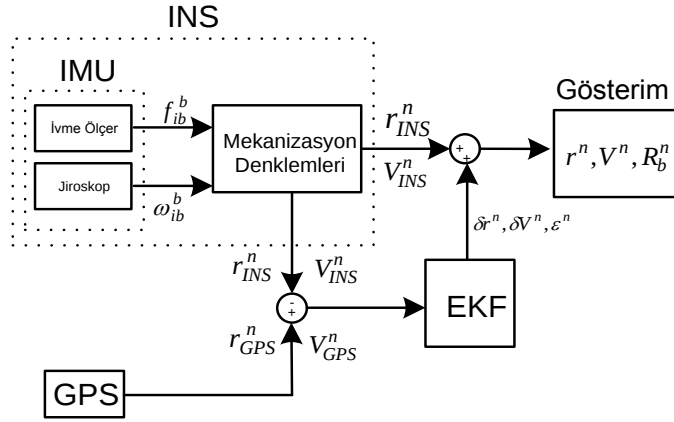
5.4 GPS/INS Entegrasyonu

GPS/INS entegrasyonu için literatürde birçok yöntem bulunmaktadır. Gevşek bağlı ve sıkı bağlı entegrasyon yöntemleri en çok kullanılanlardan ikisidir. Burada gevşek bağlı entegrasyon kullanılmıştır. Bunun nedeni sıkı bağlı entegrasyonda GPS verileri düzeltilir ve bunun için GPS modellemesi gerekmektedir. Bu modelleme için gereken uydu bağıl konumlarını sanal test ve referans sensör verememektedir. GPS hatalarının da kestirilerek GPS sinyalinde düzeltme yapılmasını sağlayan sıkı bağlı entegrasyonda GPS konum, hız bilgileri yanında GPS sinyalinin sağlığı ile ilgili bilgiler de gerekmektedir. INS denklemleri, hız diferansiyel denklemindeki Denklem 5.47'deki Ω_{ie}^n teriminin açılımında bulunan trigonometrik terimler nedeniyle doğrusal olmayan denklemlerdir ve doğrusal olmadığından GPS ile birleştirilirken genişletilmiş Kalman filtresi kullanılır.

5.4.1 Gevşek bağlı açık ve kapalı döngü entegrasyon

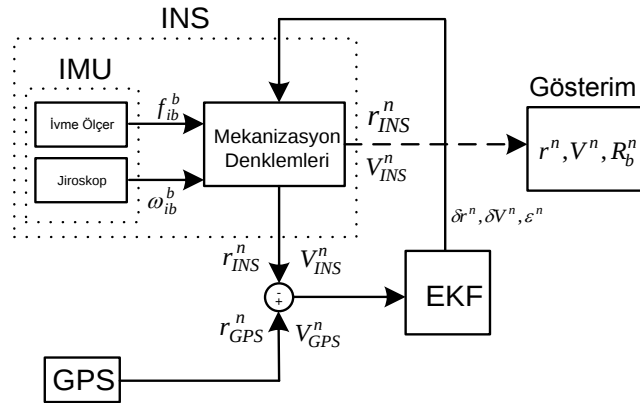
Gevşek bağlı sistemlerde, GPS ve INS'den alınan konum ve hız arasındaki fark Genelleştirilmiş Kalman Filtresi'ne (EKF) beslenir. EKF, durum denklemleri doğrusal olmadığı zaman kullanılan bir filtredir. Burada EKF'nin çıktıları konum ve hızdaki

hata tahmini değerleridir. Şekil 5.8’de görülebileceği gibi gevşek bağlı açık döngü sisteminde, EKF hesaplamaları sonrası bu veri INS çıkış verisine eklenir.



Şekil 5.8 : Gevşek bağlı açık döngü sistem blok diagramı.

Gevşek bağlı kapalı döngüde ise INS’de biriken hatalar mekanizasyon denklemlerine geribesleme yapılarak azaltılır. Literatürde doğrusal olmayan hataların kapalı döngüde daha iyi tolere edildiği belirtilmiştir [52].



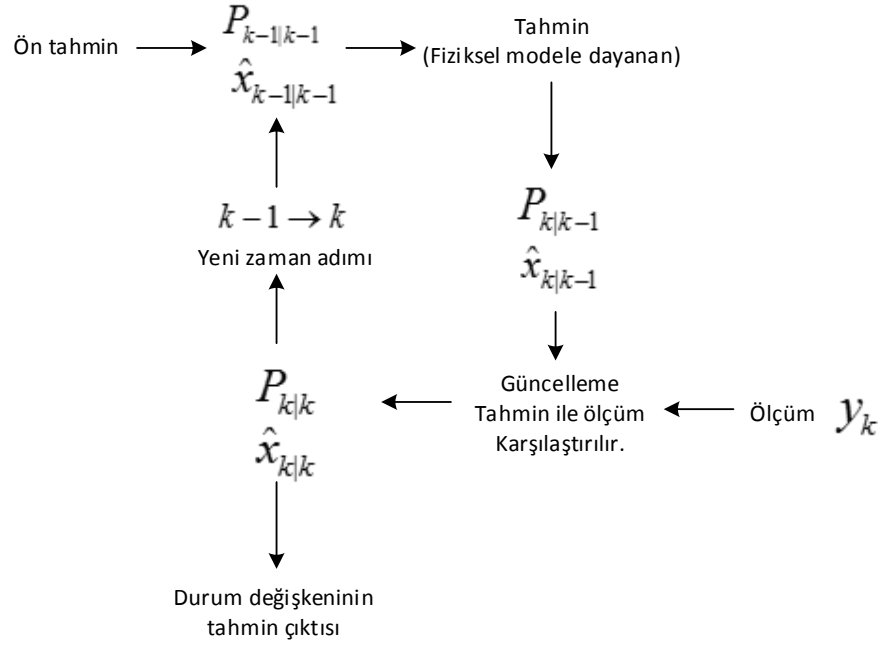
Şekil 5.9 : Gevşek bağlı kapalı döngü sistem blok diagramı.

Kapalı döngüde ise EKF’den mekanizasyon denklemlerine beslenen her hata durumunda EKF durum değişkenlerini sıfırlamak gerekmesidir. Kapalı ile açık döngü ile gerçekleştirilen deneysel çalışma Bölüm 5.6.4’de sunulmuştur.

5.4.2 Genişletilmiş Kalman filtresi

IMU sensörünün verileri zamanla ofset, sürüklenme ve gürültüye maruz kaldığından belirli zaman aralıkları ile düzeltme işlemi GPS verileri ile yapılabilir. Ataletsel Navigasyon Sistemi (INS) ise IMU sensör verilerinin düzeltilerek yüksek doğrulukta

veriler elde edilmiş halidir. INS denklemleri doğrusal olmadığından GPS ile birleştirilirken genişletilmiş Kalman filtresi kullanılır. Genellikle INS'nin frekansı GPS sensörünün frekansından yüksek olduğundan INS iki GPS verisi arasındaki konum, hız ve rotasyon açılarının bulunmasını sağlar. IMU ölçümlerindeki gürültü, ofset, sürüklenme ve mekanizasyon denklemindeki integral vs. sebebiyle INS'de oluşan hatalar zaman içerisinde büyür. Bu sebeble GPS ölçümü INS çıktılarının düzeltilmesi işlevini görür.



Şekil 5.10 : Kalman Filtresi algoritması.

Kalman Filtresi algoritması görülmektedir. EKF algoritmasında hata tahmin edildiğinden Şekil 5.10'da görülen durum değişkeni yerine hata değişkeni yazılır [26].

5.4.3 Navigation eksenli hata denklemleri

EKF'de kullanılacak navigasyon eksenli hata durum hal denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\delta \dot{x}^n = F \delta x^n + G w \quad (5.83)$$

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{r}^n \\ \delta \dot{v}^n \\ \dot{\epsilon}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta r^n \\ \delta v^n \\ \epsilon^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\hat{R}_b^n & 0 \\ 0 & \hat{R}_b^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta f_{ib}^b \\ \delta \omega_{ib}^b \end{bmatrix} \quad (5.84)$$

Denklem 5.83'ün içindeki terimler açık yazılırsa Denklem 5.84'deki durum hal denklemini elde edilir. δr^n , δV^n ve ε^n sırasıyla konum, hız ve rotasyondaki hata durumlarını göstermektedir. $\delta r^n = [\delta\varphi \ \delta\lambda \ \delta h]^T$ konum hata vektörü sırasıyla enlem, boylam yükseklik hatasını ve $\delta V^n = [\delta v_n \ \delta v_e \ \delta v_d]^T$ hız hata vektörü sırasıyla kuzey, doğu ve düşey yöndeki hız hatasını gösterir. $\varepsilon^n = [\varepsilon_n \ \varepsilon_e \ \varepsilon_d]^T$ rotasyon hata vektörü sırasıyla kuzey, doğu ve düşey yönlü rotasyon hataları göstermektedir. Hata durumu değişkenleri vektörleri, durum değişkenlerinin gerçek ile tahmini (kestirilen) değerleri arasındaki fark olarak tanımlanmıştır. $\hat{R}_b^n$ ise INS kısmından gelen ve tahmini rotasyon matrisi değeridir. Denklem 5.33-5.35'deki navigasyon denklemlerinin pertürbasyonu alınarak elde edilen durum geçiş matrisi “F” açık olarak EK A kısmında verilmiştir [43, 44]. IMU sensörün ofsetini tahmin edebilen 15 bilinmeyenli hata denklemleri de EK B kısmında verilmiştir.

5.4.3.1 Ön tahmin

Durum hatası başlangıçta

$$\begin{aligned} t_k &= k = 0 \\ \delta \hat{x}_{0|0} &= 0_{9 \times 1} \\ P_{0|0} &= \text{cov}(\delta \hat{x}_{0|0}) \end{aligned} \quad (5.85)$$

sıfır vektörü ile başlatılır ve kovaryans matrisi “P” nin başlangıçta diagonal elemanları sıfıra yakın değerler seçilir. R ölçüm gürültü kovaryans matrisi GPS konum değerlerinin varyansı $\sigma_{p_{GPS}}^2$ ve hız değerlerinin varyansı $\sigma_{V_{GPS}}^2$ ve Q_w matrisi xyz ekseninde ivmeölçer ve jiroskopların verdiği değerlerin varyansı şeklinde Denklem 5.86 ve 5.87'de gösterilmiştir. Bu değerlere Carmaker simülasyonlarında IMU veya GPS'e eklenen gürültü seviyesi kadar veya gürültü eklenmezse sıfıra yakın değer vermek gerekir.

$$Q_w = \text{diag}(\sigma_{a,x}^2, \sigma_{a,y}^2, \sigma_{a,z}^2, \sigma_{g,x}^2, \sigma_{g,y}^2, \sigma_{g,z}^2) \quad (5.86)$$

$$R = \text{diag}(\sigma_{p_{GPS}}^2, \sigma_{V_{GPS}}^2) = \text{diag}(\sigma_{\varphi}^2, \sigma_{\lambda}^2, \sigma_h^2, \sigma_{v_n}^2, \sigma_{v_e}^2, \sigma_{v_d}^2) \quad (5.87)$$

Gerçek deneyde ise bu değerler araç hareketsiz iken IMU ve GPS sensörlerinden yaklaşık 1 saatte toplanan verilerin varyansı alınarak hesaplanır. Denklem 5.88 ve 5.89’da referans sensör ile yapılan deney sonucu elde edilen değerler verilmiştir.

$$Q_w = \text{diag}(5.8 \times 10^{-5}, 6.4 \times 10^{-5}, 8.6 \times 10^{-5}, 2.7 \times 10^{-5}, 2.7 \times 10^{-5}, 2.7 \times 10^{-5}) \quad (5.88)$$

$$R = \text{diag}(2.1 \times 10^{-19}, 1.2 \times 10^{-18}, 2 \times 10^{-5}, 0.05, 0.05, 0.05) \quad (5.89)$$

Hareketsiz durumda iken IMU sensör ofset, sürüklenme, raslantısal yürüyüş ve rastgele gürültü terimlerini ölçer. Bu işlemin bir IMU için sadece bir kez yapılması yeterlidir.

5.4.3.2 Kestirim

Navigasyon denklemleri daha önce belirtildiği gibi doğrusal olmayan denklemlere sahiptir. Sayısal hesap yapıldığından ayrıklaştırılmış EKF kullanılmalıdır. Durum uzay denklemleri

$$\phi_k = I + F \Delta t \quad (5.90)$$

$$\delta x_{k+1} = \phi_k \delta x_k \quad (5.91)$$

şeklinde. Q_k proses gürültü kovaryans matrisi Denklem 5.92 eşitliği ile hesaplanır.

$$Q_k = \phi_k G_k Q_w G_k^T \phi_k^T \Delta t \quad (5.92)$$

Hata durum değişkenlerinin başlangıç koşulları sıfır seçilir. Fakat kovaryans matrisinin başlangıç koşulu sıfır olamaz. Birim matrisin 0.001 değeri veya daha küçük bir katsayı ile çarpım değeri ile başlatılabilir.

$$P_{k+1|k} = \phi_k P_{k|k} \phi_k^T + Q_k \quad (5.93)$$

5.4.3.3 Ölçüm yenileme (düzeltme)

GPS’ten gelen konum ve hız bilgisinden INS’den gelen değerler çıkartılır. Bu işlem

$$z_k = \begin{bmatrix} r_{GPS}^n - \hat{r}^n \\ V_{GPS}^n - \hat{V}^n \end{bmatrix} \quad (5.94)$$

şeklindedir. Gözlem matrisi

$$H = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (5.95)$$

şeklindedir.

$$\delta y_k = z_k \quad (5.96)$$

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R \quad (5.97)$$

Ölçüm kalanı δy_k terimidir. R, ölçüm gürültü kovaryans matrisidir. Denklem 5.98 ve 5.99'daki K_k kısaltması Kalman kazancını temsil eder.

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1} \quad (5.98)$$

$$\delta \hat{x}_{k|k} = \delta \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - H_k \delta \hat{x}_{k|k-1}) \quad (5.99)$$

Bir sonraki adımda tahmin edilen hata $\delta \hat{x}_{k|k}$ terimi ile ifade edilir. $P_{k|k}$ kovaryansı

$$P_{k|k} = [I - K_k H_k] P_{k|k-1} \quad (5.100)$$

denklemleriyle hesaplanır. Hata durumları Denklem 5.91 gibi öngörölmüş ve Denklem 5.99'daki şekilde düzeltilmiştir. GPS ve IMU sensörleri farklı örnekleme frekanslarına sahip olduklarından, her iki sensörden veri geliyorken kestirim ve düzeltme aynı anda çalıştırılır fakat veri sadece IMU'dan geliyorsa hata durumları sadece kestirim yapılarak hesaplanır. Burada gevşek bağlı kapalı sistem kullanılıyorsa bulunan hataların INS kısmına beslenmesi ve hata durum değişkenlerine sıfır değerinin atanması gerekmektedir. Kapalı döngü GPS/INS entegrasyonunda konum, hız ve rotasyon hatalarının mekanizasyon denklemlerine beslenmesi

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + \delta \hat{x}_{k|k} \quad (5.101)$$

denklemini kullanılarak yapılır. Hata durumuna

$$\delta \hat{x}_{k|k} = 0 \quad (5.102)$$

sıfır değeri atanır. Fakat burada dikkat edilmesi gereken durum değişkenleri güncellenirken rotasyon vektör hataları ε^n ile toplanmadan önce Denklem 5.103'ten E^n matrisi bulunarak Denklem 5.104'deki şekilde rotasyon matrisi güncellenmelidir.

$$E^n = [\varepsilon^n \times], \varepsilon^n = [\varepsilon_n \quad \varepsilon_e \quad \varepsilon_d] \quad (5.103)$$

$$R_b^n = (I + E^n) R_b^n \quad (5.104)$$

5.4.4 INS algoritmasının başlatılması

INS algoritmasının en önemli kısımlarından biri Denklem 5.105-107 ile verilen başlangıç koşullarıdır. Konum r , hız V ve açısal yönelim θ parametrelerini araç durum değişkenlerinden farklı değerlerde almak algoritmanın yakınsamasını geciktirir.

$$r^n(0) = [\varphi(0) \quad \lambda(0) \quad h(0)]^T \quad (5.105)$$

$$V^n(0) = [v_n(0) \quad v_e(0) \quad v_d(0)]^T \quad (5.106)$$

$$\theta(0) = [\phi(0) \quad \theta(0) \quad \psi(0)]^T \quad (5.107)$$

Araç duruyorken GPS ölçümlerinde olan yüksek değişim nedeniyle rotasyon matrisindeki açı değerleri ancak araç 5 m/s'den daha yüksek hıza ulaştığında GPS hızları rotasyon açılarının düzeltilmesi veya doğru değerler ile başlatılması için kullanılabilir.

$$\phi \approx 0 \quad (5.108)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{v_d^{GPS}}{\sqrt{(v_n^{GPS})^2 + (v_e^{GPS})^2}} \right) \quad (5.109)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{v_e^{GPS}}{v_n^{GPS}} \right) \quad (5.110)$$

Bu durumda Denklem 5.108-110 ile yönelim açıları başlatılabilir veya düzeltilebilir.

5.4.5 Dışarıdan savrulma açısı beslemesi

Manyetik pusula gibi bir sensörden sisteme savrulma açısı beslenmek istenirse, önce bu sensörün örnekleme frekansına bakılır. Eğer IMU sensör ile aynı frekansa sahipse savrulma açısı IMU'dan hesaplanan (INS) ile manyetik pusuladan gelen savrulma açısı arasında bir karar güven mekanizması ile veya sadece manyetik pusuladan gelene güvenilerek INS kısmında R_b^n hesaplaması ile sisteme beslenebilir. Fakat eğer savrulma açısı farklı örnekleme frekansı ile sisteme beslenmek istenirse, bu durumda EKF kısmında manyetik pusuladan gelen savrulma açısı sistemin savrulma açısını düzeltmek için sistemin rotasyon matrisindeki hataları düzeltmek için kullanılır. Savrulma açısı.

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{R_b^n(2,1)}{R_b^n(1,1)} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{R_b^n(2,1) + R_b^n(1,1)\varepsilon_D - R_b^n(3,1)\varepsilon_N}{R_b^n(1,1) - R_b^n(2,1)\varepsilon_D + R_b^n(3,1)\varepsilon_E} \right) \quad (5.111)$$

şeklinde tanımlanır. Savrulma açısı hatası ile rotasyon hataları arasındaki bağıntı

$$\delta\psi = \frac{\partial\psi}{\partial\varepsilon_N} \varepsilon_N + \frac{\partial\psi}{\partial\varepsilon_E} \varepsilon_E + \frac{\partial\psi}{\partial\varepsilon_D} \varepsilon_D \quad (5.112)$$

şeklindedir. Savrulma açısının kuzey rotasyon hatası ile değişimi

$$\frac{\partial\psi}{\partial\varepsilon_N} = \frac{-R_b^n(3,1)R_b^n(1,1)}{(R_b^n(1,1))^2 + (R_b^n(2,1))^2} \quad (5.113)$$

şeklindedir. Savrulma açısının doğu rotasyon hatası ile değişimi

$$\frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon_E} = \frac{-R_b^n(3,1) R_b^n(2,1)}{(R_b^n(1,1))^2 + (R_b^n(2,1))^2} \quad (5.114)$$

şeklindedir. Savrulma açısının aşağı rotasyon hatası ile değişimi

$$\frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon_D} = \frac{R_b^n(1,1) R_b^n(1,1) + R_b^n(2,1) R_b^n(2,1)}{(R_b^n(1,1))^2 + (R_b^n(2,1))^2} \approx 1 \quad (5.115)$$

bire yaklaşık olarak eşittir. Bu durumda ölçüm hatası

$$z_k = \delta \psi = \psi^{INS} - \psi^{pusula} \quad (5.116)$$

şeklindedir. Gözlem matrisi

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon_N} & \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon_E} & \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon_D} \end{bmatrix} \quad (5.117)$$

şeklindedir. Ölçüm gürültü kovaryansı

$$R = \sigma_{savrulma_açısı}^2 \quad (5.118)$$

skaler değerine şeklindedir. Bu değer dışarıdan sisteme beslenecek savrulma açısının gürültü kovaryansıdır. Denklem 5.112 ile hesaplanan savrulma açısı hatası EKF'nin düzeltme kısmında IMU'ya eşit veya daha düşük örnekleme frekansında sisteme beslenebilir [44].

5.4.6 Dış hız beslemesi

Eğer GPS/INS entegrasyonuna ekstradan hız (örneğin ön tekerlek hızları kinematik olarak hesaplanmış) beslenmek istenirse bu hızların frekansları EKF doğrulama kısmının frekansına indirgenerek sisteme beslenebilir. Bu durumda ölçüm vektörü

$$z = \begin{bmatrix} z_p^{INS} - z_p^{GPS} \\ z_v^{INS} - z_v^{GPS} \\ z_v^{INS} - z_v^{velocity} \end{bmatrix} \quad (5.119)$$

şeklindedir. Gözlem matrisi ise

$$H = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (5.120)$$

şeklindedir. Denklem 5.99 hatırlanırsa H matrisi durum hata vektörü δx ile çarpılıp z ölçüm vektöründen çıkartılır. H vektörünün en sağ sütunun $0_{3 \times 3}$ matrisi olması δx hata vektörünün 7,8 ve 9.uncu terimleri olan rotasyon hatalarının işleme katılmayacağı anlamına gelir. Ölçüm gürültü kovaryans matrisine dış hız girişi nedeniyle ekleme de yapılır. Denklem 5.87’de $R = \text{diag}(\sigma_{P_{GPS}}^2, \sigma_{V_{GPS}}^2)$ şeklinde tanımlanmıştır. $\sigma_{V_{velocity}}^2$ sisteme dışarıdan beslenen kuzey, doğu ve düşey yönlü hız değerinin gürültü kovaryansıdır ve R matrisi

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{P_{GPS}}^2 & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \sigma_{V_{GPS}}^2 & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & \sigma_{V_{velocity}}^2 \end{bmatrix} \quad (5.121)$$

şeklini alır. Detaylı bilgi için Saadettin referansına bakınız [47].

5.4.7 GPS’ten farklı frekansta dış hız beslemesi

GPS/INS entegrasyonuna dışarıdan beslenecek hız verisi (örneğin araç ön teker hızlarından kinematik olarak hesaplanmış) EKF içerisinde INS hatalarını düzeltmek için kullanılacaksa ve EKF’nin düzeltme frekansından farklı ise

$$z = z_V^{velocity} - z_V^{INS} \quad (5.122)$$

kullanılır. Bu durumda ölçüm vektöründe sadece hız ölçülen sensör ile INS’den gelen hız arası fark kullanılır. Gözlem matrisi ise

$$H = [0_{3 \times 3} \quad I_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3}] \quad (5.123)$$

şeklindedir. Ölçüm gürültü kovaryansı

$$R = \sigma_{V_{velocity}}^2 \quad (5.124)$$

şeklindedir. Shin’den detaylı bilgi elde edilebilir [44].

5.4.8 Kaldıraç kolu etkisi

GPS ile IMU sensörlerinin araca bağlandığı noktalar arasında mesafe farkı varsa bir düzeltmeye ihtiyaç olur.



Şekil 5.11 : GPS ile IMU sensörleri arası konum farkı.

IMU ile GPS arası mesafe vektörü Şekil 5.11'deki gibi Δr^b ise, GPS konum vektörü IMU sensörü konumuna taşınmalıdır. Bunun için gerekli olan denklem

$$r_{IMU}^n = r_{GPS}^n - \begin{bmatrix} \frac{1}{R_M + h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(R_N + h) \cos \varphi} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} R_b^n \Delta r^b \quad (5.125)$$

şeklindedir. $R_b^n \Delta r^b$ ifadesi araç ekseninde ölçülen mesafe Δr^b ile araç ekseninden navigasyon eksenine rotasyon matrisi R_b^n ile çarpılarak navigasyon eksenine dönüşümü ifade eder. Bu ifadenin Denklem 5.125'de olduğu gibi bir matrisle daha çarpılmasının nedeni enlem, boylam ve yükseklik cinsinden değer elde etmek içindir. Aynı şekilde GPS hız vektörü de IMU konumunda ifade edilmelidir.

$$V_{IMU}^n = V_{GPS}^n - R_b^n \Omega_{nb}^b \Delta r^b \quad (5.126)$$

Denklem 5.126 düzenlenirse

$$V_{IMU}^n = V_{GPS}^n - R_b^n (\Omega_{ni}^b + \Omega_{ib}^b) \Delta r^b = V_{GPS}^n + R_b^n \Omega_{in}^b \Delta r^b - R_b^n \Omega_{ib}^b \Delta r^b \quad (5.127)$$

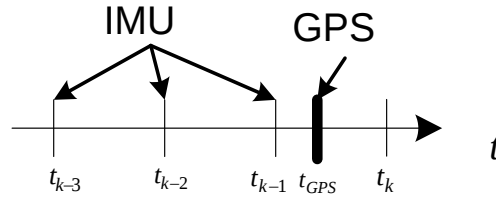
elde edilir. Son durumda hız eşitliği

$$\begin{aligned} V_{IMU}^n &= V_{GPS}^n + R_b^n \Omega_{in}^b R_n^b \Delta r^b - R_b^n \Omega_{ib}^b \Delta r^b \\ V_{IMU}^n &= V_{GPS}^n + (\Omega_{ie}^n + \Omega_{en}^n) R_b^n \Delta r^b - R_b^n \Omega_{ib}^b \Delta r^b \end{aligned} \quad (5.128)$$

halini alır [44].

5.4.9 GPS ile IMU'nun örnekleme zamanlarının çakışmama durumu

GPS ile IMU sensörlerinden gelen veriler farklı zamanlarda olursa diğer bir ifadeyle zamanlamaları çakışmazsa IMU'nun verdiği konum ve hız değerleri interpolasyon yapılarak z vektörü oluşturulur.



Şekil 5.12 : GPS ve IMU örnekleme frekansları.

Şekil 5.12’de görüldüğü gibi IMU ölçümlerinin t_{k-1} ve t_k zamanlarında GPS ölçümlerinin ise t_{GPS} zamanında yapıldığını kabul edelim. Bu durumda GPS ölçüm zamanında IMU sensörünün konum ve hız değerlerini elde etmek için doğrusal interpolasyon denklemlerini uygularsak

$$r^n(t_{GPS}) = r^n(t_{k-1}) + \frac{r^n(t_k) - r^n(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}}(t_{GPS} - t_{k-1}) \quad (5.129)$$

denklemini açarsak

$$r^n(t_{GPS}) = \frac{t_k - t_{GPS}}{t_k - t_{k-1}} r^n(t_{k-1}) + \frac{t_{GPS} - t_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} r^n(t_k) \quad (5.130)$$

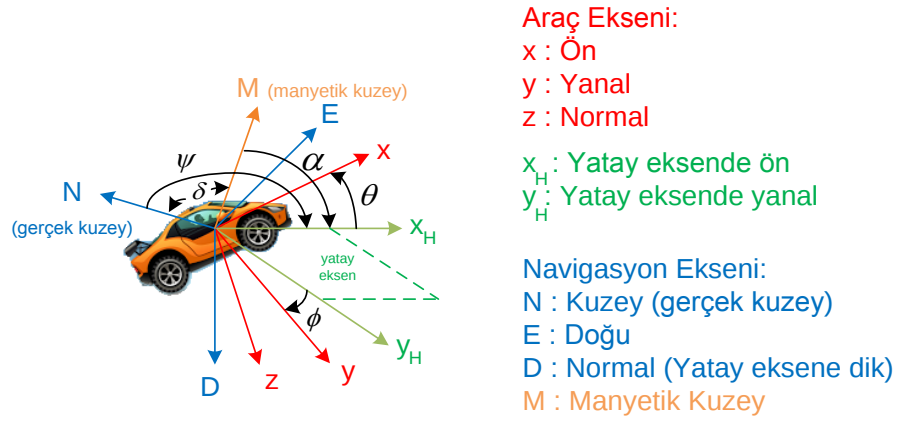
elde edilir. Son olarak hız değeri de benzer şekilde

$$V^n(t_{GPS}) = \frac{t_k - t_{GPS}}{t_k - t_{k-1}} V^n(t_{k-1}) + \frac{t_{GPS} - t_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} V^n(t_k) \quad (5.131)$$

olarak hesaplanabilir. Daha yüksek doğruluk gereken uygulamalarda yüksek dereceli enterpolasyon gerekir. Daha detaylı bilgi [44]’den elde edilebilir.

5.4.10 Manyetik pusula

Deneysel çalışmalarda kullanılan referans sensör manyetik pusula da içermektedir. Fakat manyetik pusula, ortamdaki manyetik alan yayan veya manyetik alanı bozan her cisimden etkilenmektedir.



Şekil 5.13 : Manyetik kuzey ile gerçek kuzey.

Bu yüzden bu sensör yerleştirildiği araç içi veya üzeri gibi metalik ortamlarda da tekrar kalibre edilmelidir. Referans sensörünün arayüzünde manyetik kalibrasyon için manyetik alan haritalanması seçeneği ile kalibrasyon sağlanır. Burada düzlemsel veya üç boyutlu kalibrasyon seçenekleri mevcuttur. Bu kalibrasyonu gerçekleştirebilmek için de sensöre ilgili boyutta rotasyonlar verilmelidir. Sensör araç üzerinde takılı olduğu durumda düzlemsel yapılan birkaç manevra ile bu kalibrasyon elde edilir. Fakat buradaki kalibrasyon da belirli bir hata payına sahiptir. Bu kalibrasyon esnasında elde edilen savrulma açısı başka bir pusula ile de kontrol edilmelidir. Manyetik pusula dünyanın manyetik alanını ölçer ve 3 temel ekseninde Gauss birimi cinsinden sonuç verir. Bu değerler X_m , Y_m ve Z_m ile gösterilir. Bu değerler Şekil 5.13’de görülen yatay eksene iz düşürülürse

$$X_h = X_m \cos \theta + Z_m \sin \theta \quad (5.132)$$

$$Y_h = X_m \sin \varphi \sin \theta + Y_m \cos \varphi - Z_m \sin \varphi \cos \theta \quad (5.133)$$

$$Z_h = X_m \cos \varphi \sin \theta + Y_m \sin \varphi + Z_m \cos \varphi \cos \theta \quad (5.134)$$

X_h ve Y_h Şekil 5.13’de görülmektedir. Burada savrulma açısını bulmak için

$$\psi = a \tan 2(Y_h, X_h) - \delta \quad (5.135)$$

denkleminde yararlanılır Bu denklemde δ manyetik kuzey ile gerçek kuzey arasındaki sapma açısıdır ve Şekil 5.13’de görülebilir. Bulunulan koordinatlara göre değeri değişir [52]. ψ ve δ açıları Şekil 5.13’de gösterilmiştir.

$$\sqrt{X_h^2 + Y_h^2 + Z_h^2} = 1 \quad (5.136)$$

Son olarak yatay eksendeki değerlerin genliği bir değerine eşit olmalıdır. Aksi halde pusula değerleri gürültüye maruz kalıyor veya metal bir nesneden etkileniyor olabilir. Yunuslama ve yalpalama açı değerleri yanlış hesaplanıyor olabilir [51].

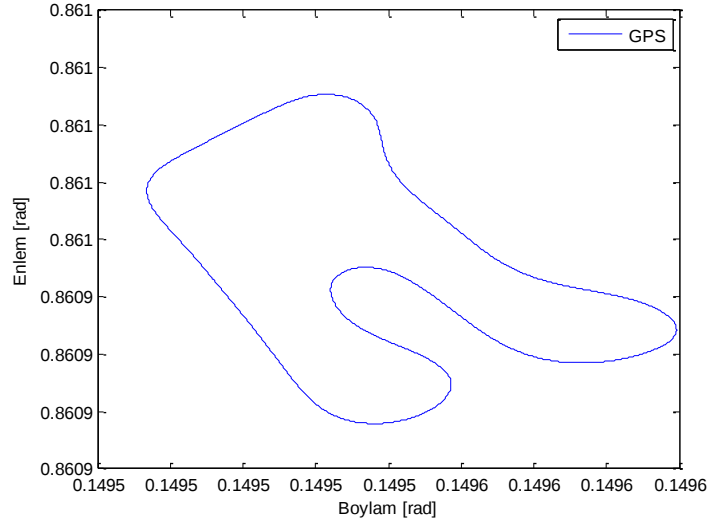
5.5 Carmaker Simülasyonları

Gerçek deneylere geçmeden önce Carmaker ile Matlab Simulink Aerospace bloğunu kullanarak GPS/INS entegrasyon simülasyonu gerçekleştirmek mümkündür ve bu sanal ortam GPS/INS entegrasyonuna eklentiler yaparak geliştirme olanağı da sunar. Dahası GPS kesintisi durumlarında hata artımlarının büyümesi de simüle edilebilir. Simülasyonlarda Carmaker programında bulunan gerçekçi orta sınıf sedan demo araç modeli kullanılmıştır. Carmaker veritabanında bulunan, keskin dönüşleri de olan Hockenheim rotası seçilmiştir. Araç hızı 0 ile 120 km/saat arasında değişmekte ve aracı Carmaker otomatik sürücüsü kullanmaktadır.



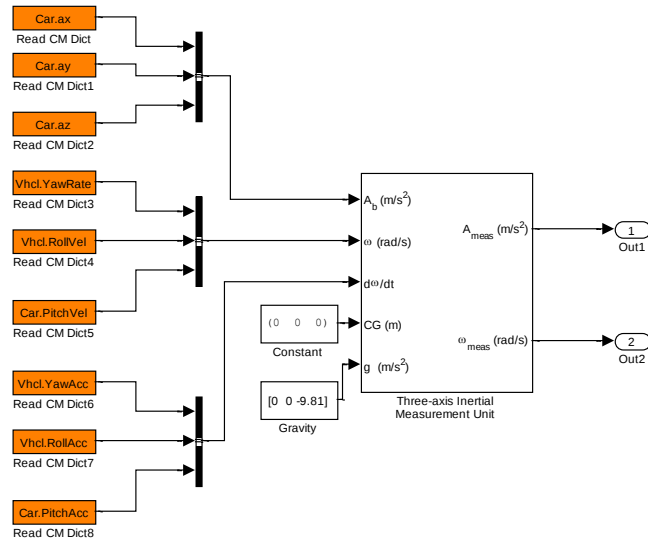
Şekil 5.14 : Google Earth programında Hockenheim rotası.

Simülasyonlarda kullanılan Hockenheim rotasının Google Earth görüntüsü Şekil 5.14’te görülmektedir.



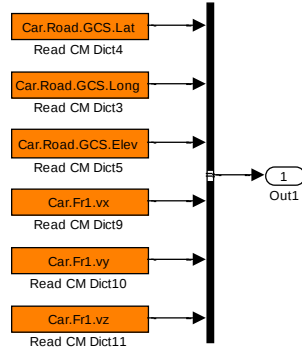
Şekil 5.15 : Hockenheim rotasının enlem ve boylam olarak grafiği.

Hockenheim rotasının radyan cinsinden enlem ve boylam eksenindeki grafiği Şekil 5.15'te görülmektedir.



Şekil 5.16 : Carmaker'dan Matlab Aerospace bloksetine gelen veri.

Şekil 5.16'da görüleceği gibi Carmaker aracının ivmelenmeleri, dönüş hızları, açısal ivmeleri, ağırlık merkezinin konumu ve ağırlık kuvveti Matlab Simulink Aerospace bloksetinin IMU bloğuna giriş olarak beslenmiştir. Bu bloğun çıkışı da 3 eksen ivme ve açısal hızlardır.

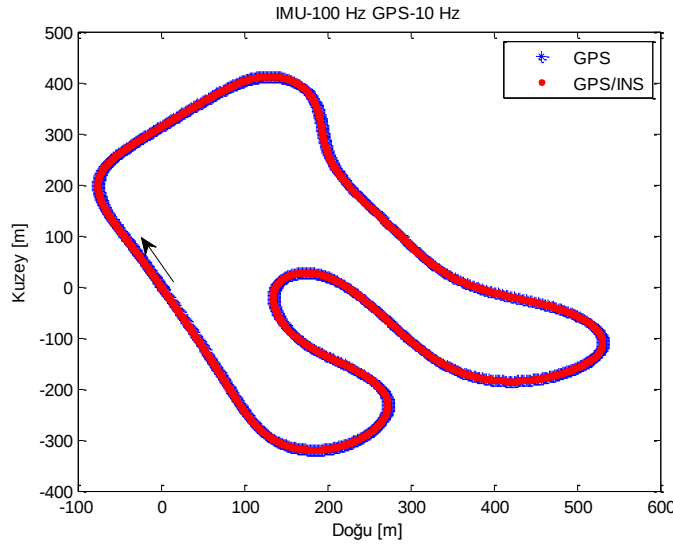


Şekil 5.17 : Carmaker'dan gelen GPS verisi.

Şekil 5.17'de GPS verisi Carmaker simülasyonundan alınmıştır. GPS verisi, ECEF ekseninde üç ana eksenle enlem, boylam, yükseklik ve araç hızlarını içermektedir.

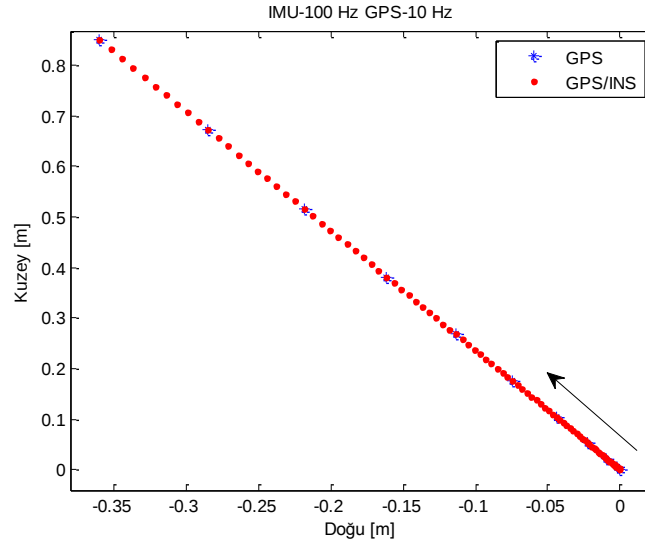
5.5.1 GPS/INS kapalı sistem entegrasyona gürültü etkisi

IMU 10 Hz ve GPS 100 Hz frekansında örneklenmiştir. Şekil 5.18'de ise bütün Hockenheim rotasında yapılan GPS/INS entegrasyonu görülmektedir



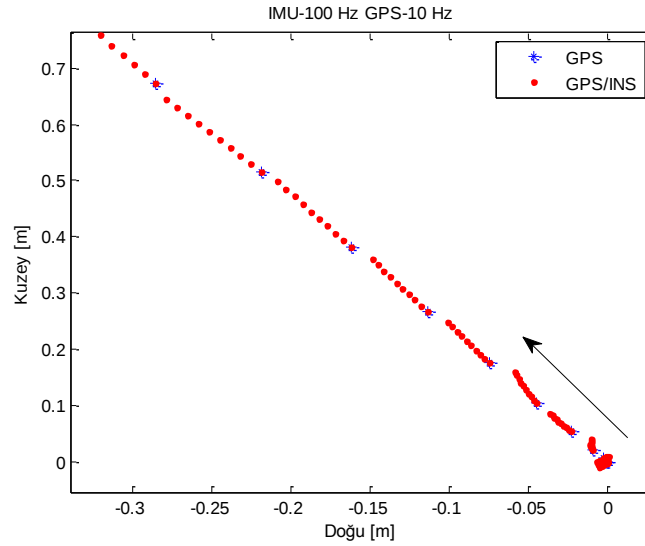
Şekil 5.18 : Tam Hockenheimer rotasında GPS/INS ve GPS karşılaştırması.

Mavi yıldızlar GPS noktalarını, kırmızı noktalar ise her 0.1 sn’de GPS’e göre doğrulanan INS sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 5.19 : GPS/INS entegrasyonu ile GPS rotası boşluklarını doldurma.

Şekil 5.19 ise Şekil 5.18’in daha yakınlaştırılmış halidir. Bu şekilde GPS ölçüm aralıklarının GPS/INS entegrasyonu ile oldukça doğru bir şekilde doldurulması görülmektedir.

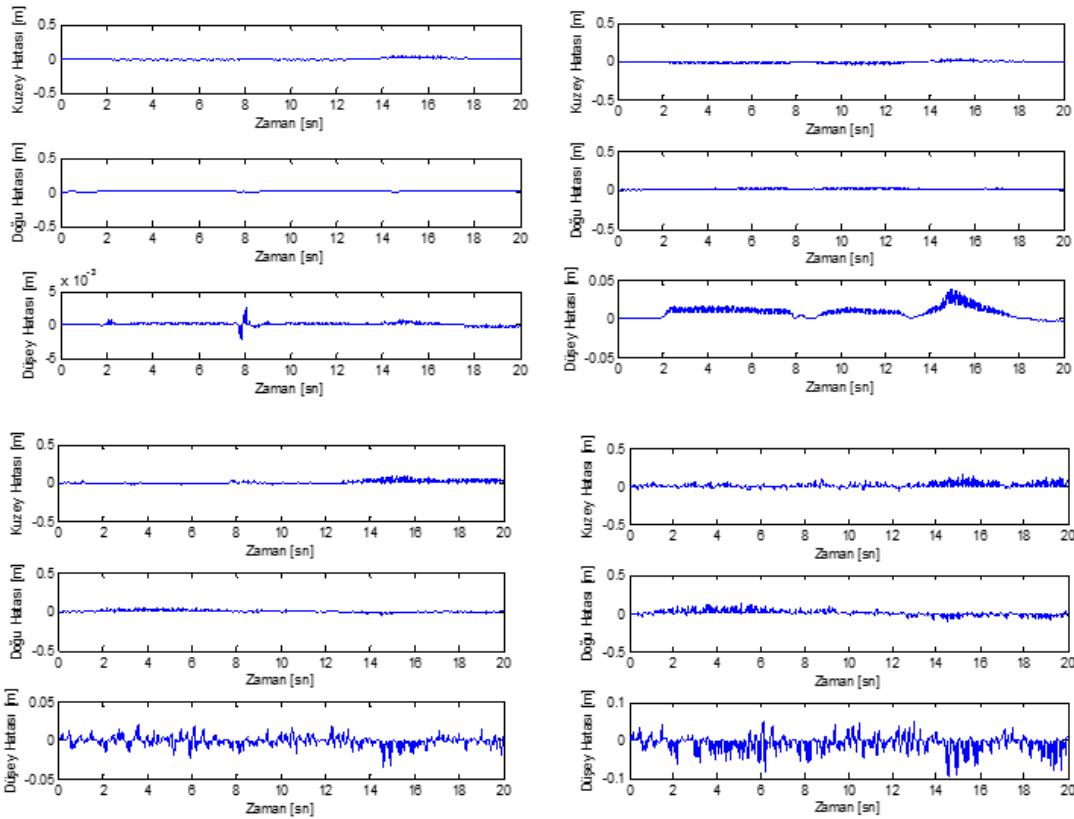


Şekil 5.20 : Gürültü ve sapma eklenmiş GPS/INS simülasyonu.

Daha sonra ölçüm gürültüsü ve sapma simülasyonlara eklenmiş ve Şekil 5.20’de bunun GPS/INS entegrasyonunu nasıl etkilediği gösterilmiştir. Bu şekil ile gürültü ve sapmanın olmadığı Şekil 5.19 karşılaştırılabilir. Şekil 5.20’de görüldüğü gibi GPS/INS algoritmasının dönüş açılarının doğru değerlerine yakınsaması geçici salınımlı bir

geçiş periyodunun ardından olur. Manyetik pusula kullanımı ile başlangıç koşullarının daha iyi tahmin edilmesi sağlanırsa bunun entegrasyon sonuçlarını da geliştirmesi beklenmektedir.

Şekil 5.21’de görülen grafiklerden sol üst gürültüsüz, sağ üst az gürültülü (gürültü gücü : 0.000001), sol alt orta gürültülü (gürültü gücü : 0.01), ve sağ alt da yüksek gürültülü (gürültü gücü : 0.1) IMU sensörün GPS/INS entegrasyonun konumuna etkisi gösterilmiştir ve gürültü gücü arttıkça konum hataları artmaktadır. GPS/INS entegrasyonu konum bilgisini yalnız GPS kullanımından daha yüksek bir frekansı olan IMU sensörün frekansında yayınlanmasına izin verir. GCDC 2011 Haberleşmeli Araç Yarışmaları Helmond’dan Eindhoven’a giden A-270 karayolu üzerinde gerçekleştirilmiştir [14]. A-270 karayolu düz bir yoldur. Bu sebeble CACC uygulamasından beklenen yol test performansı Şekil 5.18’de görülen yolun düz kısımlarındaki GPS/INS performansına benzer olması beklenmektedir.

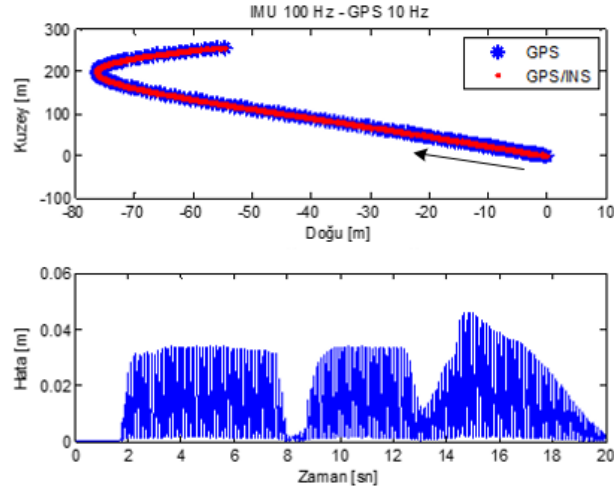


Şekil 5.21 : Gürültünün GPS/INS entegrasyonuna etkisi.

5.5.2 GPS/INS kapalı entegrasyona farklı örnekleme frekansı ve viraj etkisi

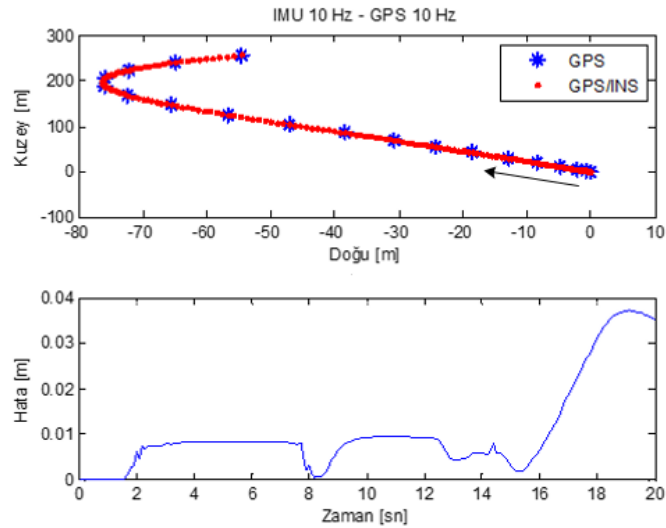
IMU, GPS sensörlerini ve EKF’yi sanal ortamda farklı frekanslarda simüle etmek mümkündür. Bunun gerekçesi farklı örnekleme frekanslarına sahip sensörlerin

seçilmesi, bilgisayarın CPU zamanı veya EKF'nin farklı frekanslarda çalıştırılması gibi istekler olabilir. Örneğin, Öztürk CPU zamanından kazanmak için EKF'yi daha düşük frekanslarda çalıştırmıştır [42].



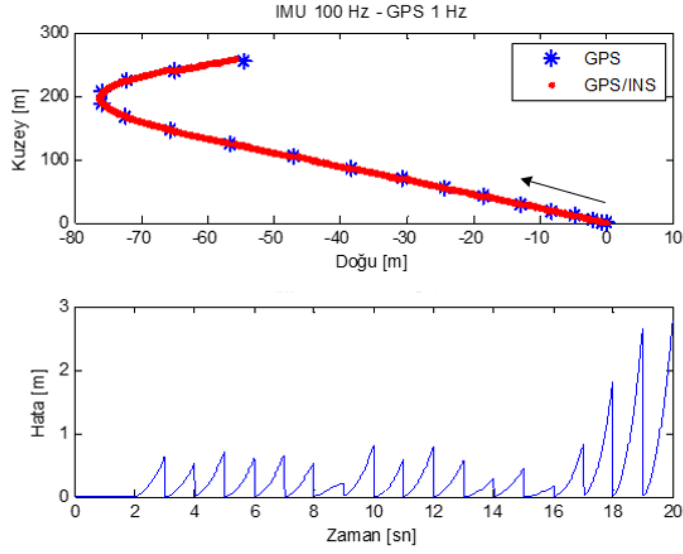
Şekil 5.22 : IMU 100 Hz – GPS 10 Hz frekansta GPS/INS ve GPS karşılaştırması.

Örneğin Şekil 5.22’de IMU 100 Hz, GPS 10 Hz ve EKF 100 Hz’de çalıştırılmıştır. Tanımlanan hata ise rotadan kuzey ve güney yönlerinde olan konum hatasının karelerinin toplamının kareköküdür.



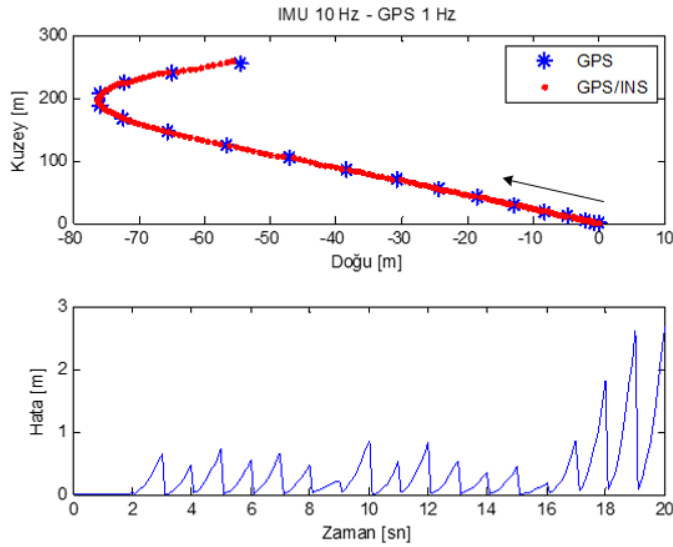
Şekil 5.23 : IMU 10 Hz – GPS 10 Hz frekansta GPS/INS ve GPS karşılaştırması.

Şekil 5.23’de IMU 10 Hz, GPS 10 Hz ve EKF 10 Hz’de çalıştırılmıştır.



Şekil 5.24 : IMU 100 Hz – GPS 1 Hz frekansta GPS/INS ve GPS karşılaştırması.

Şekil 5.24’de IMU 100 Hz, GPS 1 Hz ve EKF 100 Hz’de çalıştırılmıştır. Burada konum hatasının keskin dönüşlerde maksimum olduğu görülebilir.



Şekil 5.25 : IMU 10 Hz – GPS 1 Hz frekansta GPS/INS ve GPS karşılaştırması.

Şekil 5.25’de IMU 10 Hz, GPS 1 Hz ve EKF 10 Hz’de çalıştırılmıştır. Şekil 5.22-25 karşılaştırıldığında GPS frekansının azaltılması konum hatalarında büyümeye neden olmuştur. IMU sensörün 10 Hz ile 100 Hz’de çalıştırılması büyük fark yaratmazken GPS’in 1 Hz’de örneklenmesi konum hatalarını ve özellikle virajdaki hataları oldukça arttırmıştır.

Çizelge 5.1 : Farklı frekanslarda GPS/INS entegrasyonu simülasyon zamanları.

IMU 100 Hz GPS 10 Hz	3,953084 sn
IMU 10 Hz GPS 10 Hz	3,835107 sn
IMU 100 Hz GPS 1 Hz	3,820897 sn
IMU 10 Hz GPS 1 Hz	3,612244 sn

Matlab’de GPS/INS entegrasyonu farklı IMU ve GPS frekanslarında çalıştırılması ile Matlab zamanı ile 20 sn tutulan simülasyonda matematiksel işlem için harcanan süreler Çizelge 5.1’de gösterilmiştir. Buradan görülebileceği üzere sensörlerin örnekleme frekansı azaldıkça matematiksel işlem süresi de azalmıştır.

5.5.3 Kovaryans etkisi

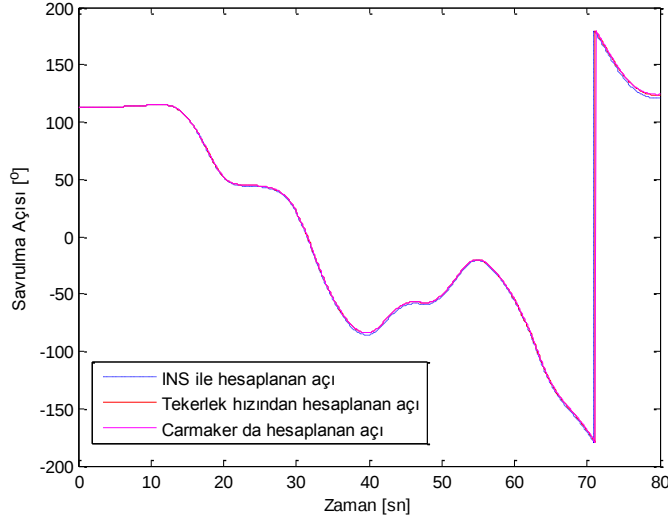
Gerçek deneylerde, EKF’de kullanılan kovaryans matrisleri deney öncesi hesaplanmalıdır. Ölçüm gürültü kovaryans matrisi R ve proses gürültü kovaryans matrisi Q, GPS/INS entegrasyon sonuçlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Dolayısıyla gerçek deney öncesi, IMU ve GPS ölçüm verileri sadece bir kez belirli bir süre toplanmalı ve bu verilerin varyansı ile kovaryanslar hesaplanmalıdır. GPS verisini varyansı ne kadar düşükse GPS/INS entegrasyon sonuçları o derece tatmin edici olacaktır. Bu deneyde yaklaşık 1 saat veri toplandı.

5.5.4 Tekerlek hızlarından savrulma açısı eldesi

Arka teker hızlarını kullanarak savrulma açısı hesaplanabilir. Bulunan açı değeri gyro sensörlerinin yerine kullanılarak GPS/INS entegrasyonuna beslenebilir.

$$\dot{\psi} = \frac{\omega_{RR}R - \omega_{RL}R}{l_{\omega R}} \quad (5.137)$$

Denklem 5.137’de ω_{RR} arka sağ tekerlek açısal hızını, ω_{RL} arka sol tekerlek açısal hızını, $l_{\omega R}$ arka dingil mesafesini, R tekerlek yarıçapını göstermektedir. Burada Carmaker kullanılarak savrulma açısının doğru değer verip vermediği kontrol edilmiştir. Aşağıdaki formülden bulunan savrulma açısının türevinin integrali alınarak savrulma açısı bulunur.

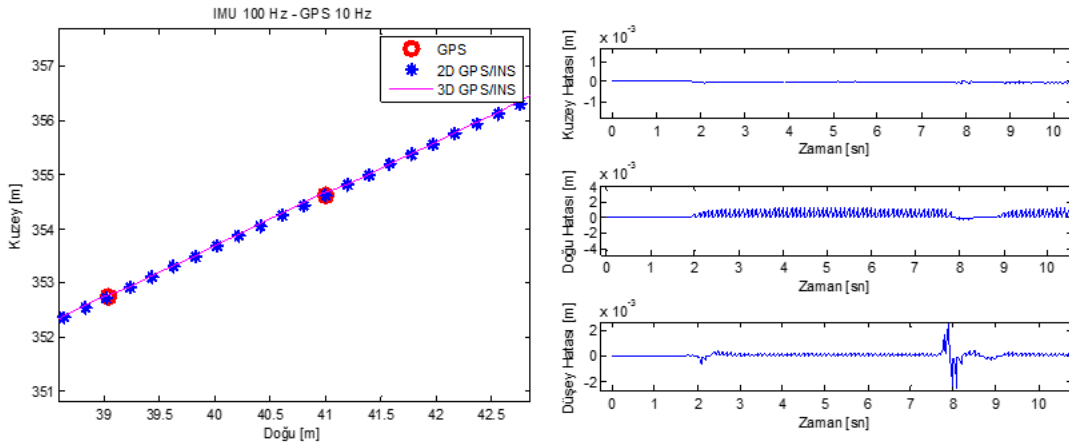


Şekil 5.26 : Savrulma açısı.

Şekil 5.26'dan görüldüğü üzere teker hızından hesaplanan savrulma açısı oldukça başarılıdır ve görülen -180° 'den 180° 'e sıçrayış z ekseninde aynı açı değerine tekabül etmektedir.

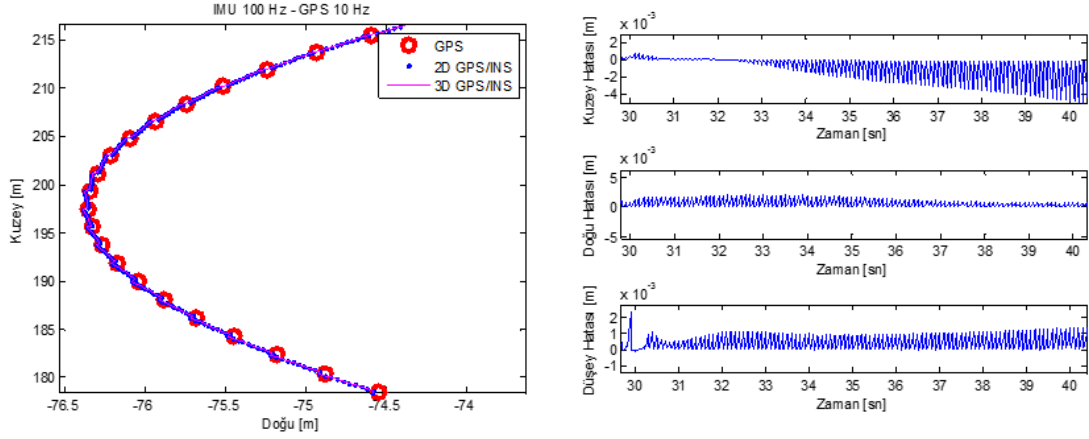
5.5.5 Carmaker ile düzlemsel deney sonuçları

Sanal ortam testlerini her türlü koşul için gerçekleştirme şansı olduğundan farklı yol koşulları, virajlar, dik yokuşlar vs. gibi durumların GPS/INS entegrasyonu üzerine etkisini değerlendirebilmek için oldukça faydalıdır. Sisteme gürültü eklenirse hatalar daha da artmaktadır. Burada simülasyon düz, 69° sağa virajlı ve 20° tümsek eklenen yol üzerinde gerçekleştirilmiştir ve 3D DCM GPS/INS entegrasyonu doğru olarak kabul edilmiştir.



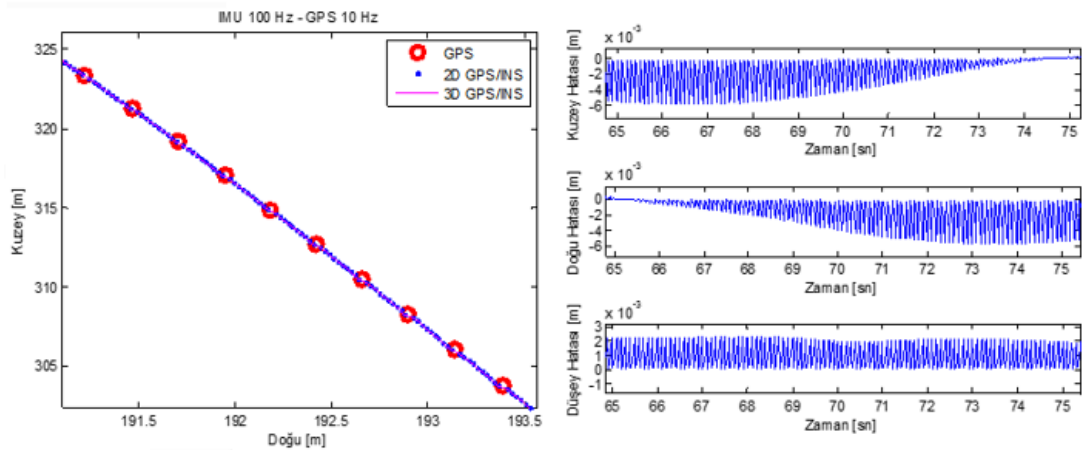
Şekil 5.27 : Düz yolda 3D ile 2D DCM GPS/INS entegrasyonu karşılaştırması.

Burada iki gyronun verdiği x ve y eksenindeki açısal hızlar yerine sıfır ve bir ivmeölçerin verdiği z eksenindeki öteleme ivmesi yerine yerçekimi 9.81 değeri sisteme girilir. Bunları yapmaktaki amaç az sayıda gyro ve ivmeölçer ile de başarılı GPS/INS entegrasyonu yapıp yapılamayacağını test etmektir.



Şekil 5.28 : Virajlı yolda 3D ile 2D DCM GPS/INS entegrasyonu karşılaştırması.

Dolayısıyla $\omega_{ib,x}^b = \omega_{ib,y}^b = 0$ ve $f_{ib,z}^b = 9.81$ eşitlikleri geçerlidir. 3D ile üçboyutlu, 2D ile düzlemsel GPS/INS entegrasyonu kastedilmektedir. Şekil 5.27’de 3D ve 2D GPS/INS entegrasyonu arası oluşan düz yolda bağıl konum hataları görülmektedir. Şekil 5.28’de görülen virajlı yolda ve Şekil 5.29’da görülen yokuşlu yolda bağıl konum hataları artmaktadır. Bu testlerde 3D GPS/INS entegrasyonu doğru kabul edilmiştir.



Şekil 5.29 : 20° eğimli yolda 3D ile 2D DCM GPS/INS entegrasyonu karşılaştırması.

Bunun nedeni 2D entegrasyonda yunuslama ve yalpa açısının ölçülmemesidir.

5.6 Referans Sensör ile Deneysel Sonuçlar

Referans sensörü bir AHRS (yönelim açısı referans sistemi) sensörüdür. 3 eksenli jiroskop, 3 eksenli ivmeölçer, 3 eksenli manyetometre, barometre, termometre ve GPS sensörlerini içermektedir. Arayüzünden seçilebilen farklı senaryolar bulunmaktadır. Bu senaryolar referans sensörün içerisindeki hangi sensörlerin kullanılmak istendiğine göre seçilir. Örneğin havacılık senaryosunda jiroskoplar, ivmeölçerler, barometre ve GPS kullanılır. Bir IMU sensör yerine bu sensörün kullanılma sebebi, gerçekleştirdiğimiz GPS/INS entegrasyon sonuçlarının doğruluğunu bir referans ile karşılaştırma gereksinimidir. Referans sensörü çıktı olarak rotasyon açıları, GPS konumu, GPS/INS entegrasyon sonuçları, INS/Pusula entegrasyonu, GPS/INS/Pusula entegrasyonu, diğer termometre ve barometre ile kalibrasyon gibi sonuçları vermektedir.



Şekil 5.30 : Referans sensör.

Referans sensörü sensörü çıktı olarak ham (raw) veya kalibre edilmiş (calibrated) veri verebilmektedir. Ham veri, 16-bit AD çeviricinin çıkışından gelen veridir. Kalibre edilmiş veriler ise bu ham veriye sadece fiziksel kalibrasyon modelinin uygulanması ile elde edilir. Referans sensörünün içerisinde daha kompleks bir model kullanılmasına karşın, kendi kataloğundan alınan temel bir doğrusal modeli aşağıda verilmiştir. K_T kazanç matrisi, b_T bias vektörü, u ise ham veridir. s ise

$$s = K_T^{-1}(u - b_T) \quad (5.138)$$

kalibrasyon yapılmış sensör çıktısıdır. K_T kazanç matrisi, A eksen kaçıklığı matrisi ve G kazanç matrisinden oluşur. A eksen kaçıklığı matrisi ve G kazanç matrisi

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,x} & a_{1,y} & a_{1,z} \\ a_{2,x} & a_{2,y} & a_{2,z} \\ a_{3,x} & a_{3,y} & a_{3,z} \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} G_1 & 0 & 0 \\ 0 & G_2 & 0 \\ 0 & 0 & G_3 \end{bmatrix} \quad (5.139)$$

şeklindedir. Daha yüksek doğruluk gereken uygulamalarda yüksek dereceden modeller uygulanmalıdır. K_T kazanç matrisi

$$K_T = \begin{bmatrix} G_1 & 0 & 0 \\ 0 & G_2 & 0 \\ 0 & 0 & G_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{1,x} & a_{1,y} & a_{1,z} \\ a_{2,x} & a_{2,y} & a_{2,z} \\ a_{3,x} & a_{3,y} & a_{3,z} \end{bmatrix} + O \quad (5.140)$$

şeklindedir. Denklem 5.140'ta “O” yüksek dereceden modelleri, sıcaklık modellemesini, g yerçekim kuvveti hassaslık düzeltmesini içermektedir, burada bu değerler ihmal edilmiştir [49].

5.6.1 Deneysel INS rotasyon testleri

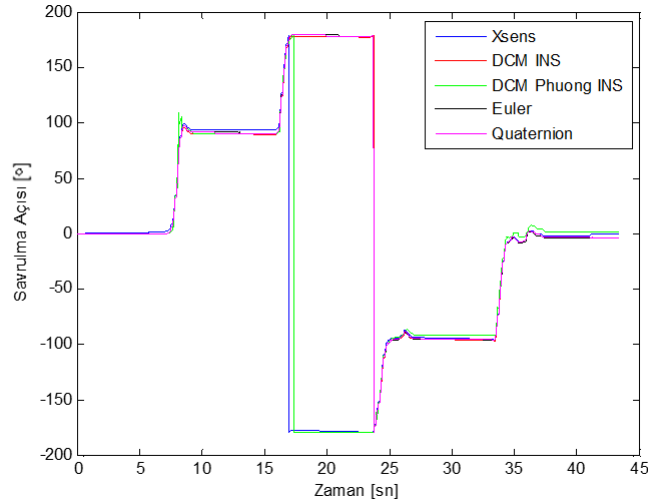
Deneysel INS rotasyon testleri, IMU sensörüne herhangi bir rotasyon açısı verildiğinde INS algoritmasının doğru çalışıp çalışmadığını anlamak açısından oldukça faydalı bir testtir. Bu sebeble sırasıyla IMU sensöre savrulma, yuvarlanma ve yunuslama açıları verilerek INS sonuçları referans sensörün INS algoritması sonuçları ile karşılaştırılarak test edilmiştir. Bu testin gerçekleştirilmesi için önce veriler kendi arayüz programında kayıt edilmiş ve daha sonra bu veriler Matlab Simulink'te okutularak bu tez kapsamında geliştirilmiş INS algoritmaları ile denenmiştir. Burada referans sensörünün INS algoritması savrulma, yuvarlanma ve yunuslama açılarının hesaplanmasında manyetik pusula da kullanılmaktadır. Çizelge 5.2'de uygulanan farklı INS yöntemleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.2 : DCM, DCM Phuong, Euler ve Quaternion INS karşılaştırması.

DCM	DCM Phuong	Euler	Quaternion
3 terim	3 terim	3 terim	4 terim
		±90 savrulma açısında	
		tanımsız olur	

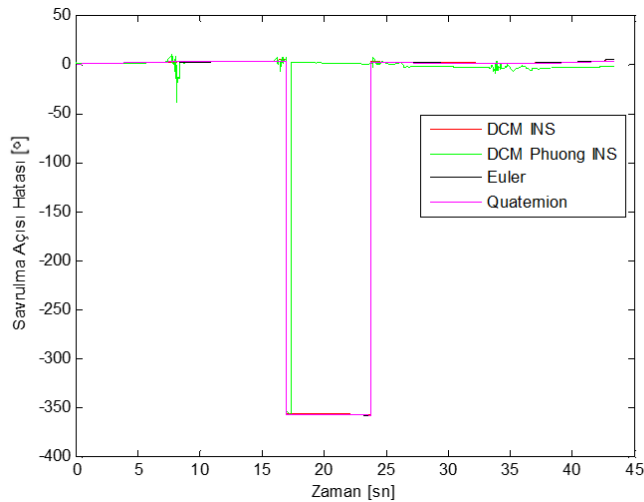
5.6.1.1 Savrulma (yaw) açısı testi

Referans sensörü z eksenini etrafında el ile 360° döndürülmüş ve referans sensörü INS çıkışı ile DCM INS, DCM INS Phuong, Euler ve Quaternion algoritmaları ile bulunan savrulma açısı değişim sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.31 : Savrulma açısının zamana bağlı değişimi.

Şekil 5.31’de savrulma açısının 180° ve -180° arasında salınım yapması normaldir, çünkü her iki açı da aynı değeri ifade eder. Burada DCM Phuong yöntemi manyetik kumpas kullanmaktadır.

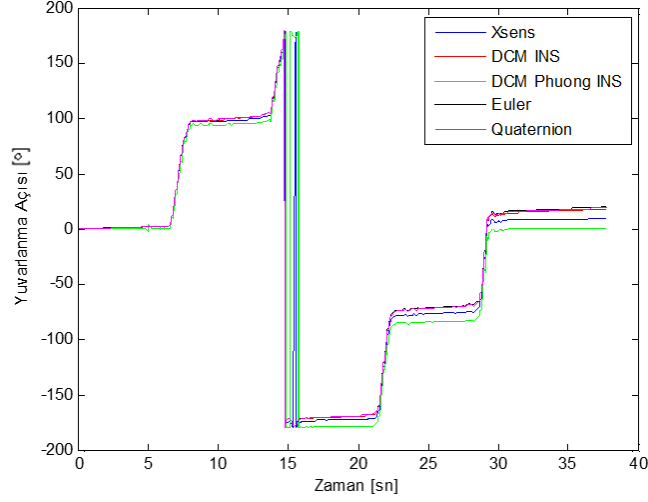


Şekil 5.32 : Savrulma açısının referans sensöre göre bağıl hatası.

Manyetik kumpas manyetik alandan etkilendiğinden referans sensörü araç üzerinde iken kendi programı vasıtasıyla düzlemsel kalibrasyon yapılmış fakat 5-10°'ye kadar doğruluk elde edilmiştir. DCM Phuong'un savrulma açısı hesabındaki diğer yöntemden farkları bu nedenle oluşmaktadır.

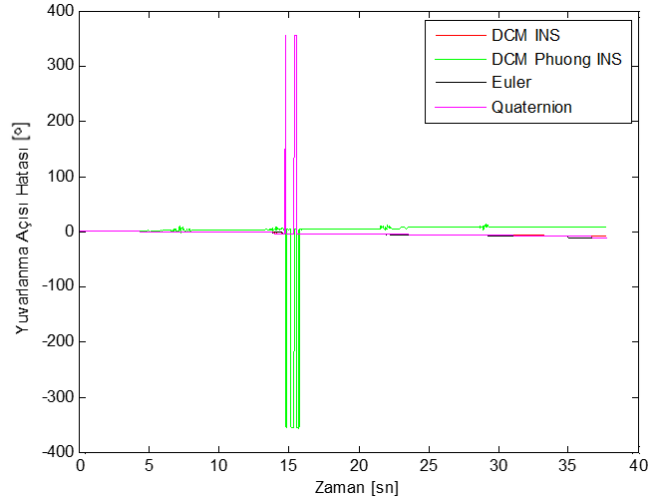
5.6.1.2 Yuvarlanma (roll) açısı testi

Referans sensörü, x ekseninde el ile 360° döndürülmüş ve referans sensörü INS sonuçları ile diğer algoritmaların yuvarlanma açısı değişim sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.33 : Yuvarlanma açısının zamana bağlı değişimi.

Yuvarlanma açısının 180° ve -180° arasında salınım yapması normaldir, çünkü her iki açı da aynı değeri ifade eder. Şekil 5.33’de Euler, DCM INS ve Quaternion yöntemlerinin sonuçları çakışmıştır.

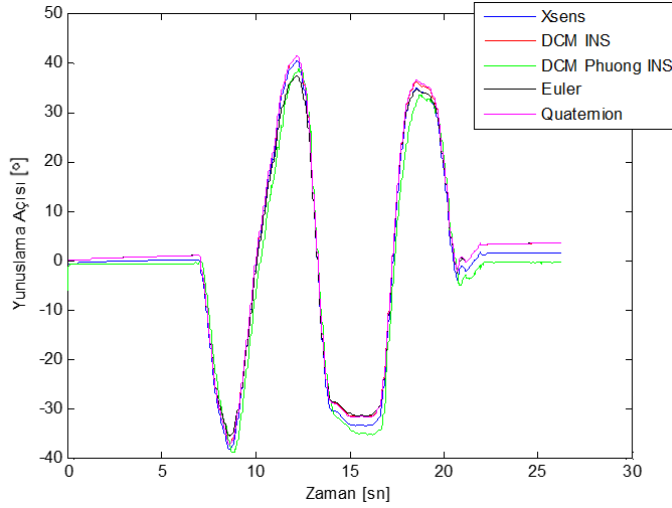


Şekil 5.34 : Yuvarlanma açısının referans sensöre göre bağıl hatası.

Şekil 5.34’den görülebileceği gibi DCM, Euler ve Quaternion’un referans sensöre göre hatası yaklaşık olarak DCM Phuong’un referans sensöre göre hatasına eşittir.

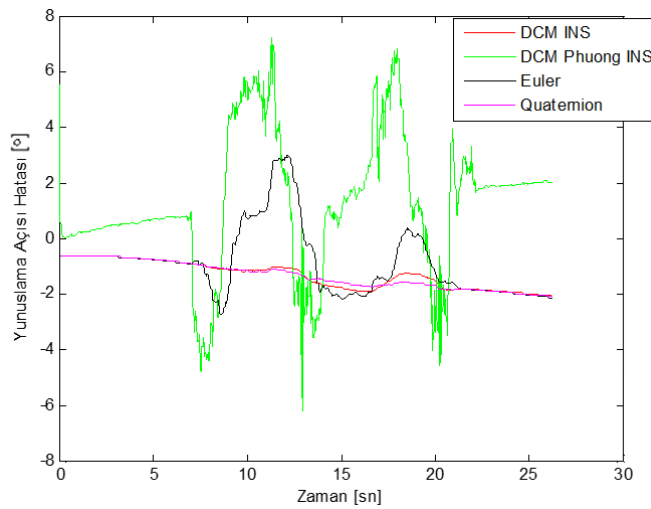
5.6.1.3 Yunuslama (pitch) açısı testi

90° yunuslama açısında Euler yöntemi tanımsız olduğundan referans sensörü y eksenini etrafında el ile önce 40° ve sonra -40°'ye döndürülmüş ve referans sensörün INS sonuçları ile diğer algoritmaların yunuslama açısı değişim sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.35 : Yunuslama açısının zamana bağlı değişimi.

Çeşitli farklı yöntemlerle denenen DCM, DCM Phuong, Euler ve Quaternion yöntemlerinin INS sonuçlarının referans sensörü INS sonuçları ile oldukça yakın değerler verdiği Şekil 5.35'de görülmektedir. Şekil 5.36'da ise Quaternion ile DCM INS'nin hataları ve Euler yöntemi de yaklaşık aynıdır. DCM Phuong hatasında fazla dalgalanma olmasına rağmen diğer yöntemlere eşit zıt yönlü değerde hata elde edilmiştir. Dolayısıyla tez kapsamında oluşturulan farklı INS algoritmalarının başarılı olduğu görülmüş ve GPS/INS entegrasyonu çalışmalarına geçilmiştir.



Şekil 5.36 : Yunuslama açısının referans sensöre göre bağıl hatası.

5.6.2 Deneysel GPS/INS entegrasyon testleri

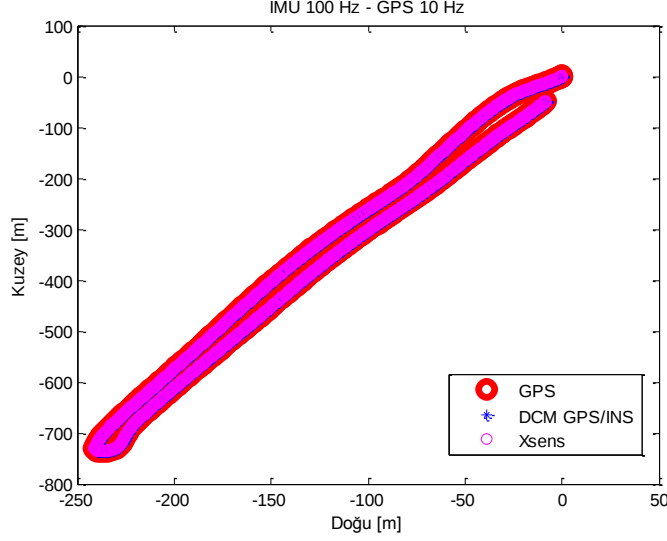
Deneysel INS rotasyon testleri ile INS algoritmalarının doğrulanmasının ardından deneysel GPS/INS entegrasyonu testlerine geçilmiştir. Araç belirli bir rotada sürülmüş ve referans sensörü ile veri toplanmıştır. Bu veriler daha sonra Matlab Simulink'te oluşturduğumuz GPS/INS gevşek bağlı kapalı entegrasyon algoritmasında kullanılmış ve sonuçlar referans sensörünün GPS/INS entegrasyon çıktıları doğru kabul edilerek bu değerlerle karşılaştırılmıştır. Burada farklı yöntemlerle GPS/INS entegrasyonu incelenmiş ve bu entegrasyonu iyileştirmek için çeşitli algoritma denemeleri ve manyetik pusula sensörü gibi ek veri sağlayan sensörler ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.3'te DCM ile DCM Phuong GPS/INS yöntemleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.3 : DCM ve DCM Phuong GPS/INS karşılaştırması.

DCM GPS/INS	DCM Phuong GPS/INS
Savrulma açısı rotasyon matrisinden hesaplanır. Buna ek olarak dışarıdan da beslenebilir.	Savrulma açısı manyetik pusuladan beslenir.
DCM kısmında Kalman filtresi uygulanmaz.	DCM kısmında iki Kalman filtresi uygulanır.
GPS/INS kısmında EKF uygulanır.	GPS/INS kısmında EKF uygulanır.
Rotasyon matrisi bir kerede hesaplanır.	Rotasyon matrisinin ilkin üçüncü sonra ikinci daha sonra da birinci satırı bulunur.

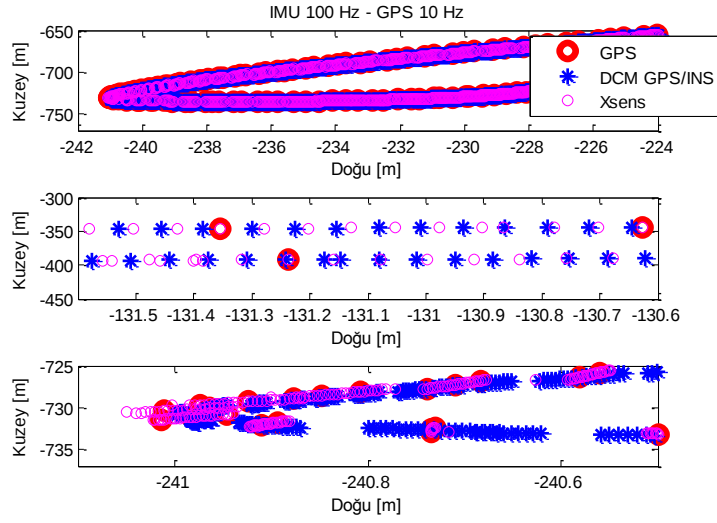
5.6.2.1 DCM

DCM yöntemi kullanılarak GPS/INS entegrasyonu gerçekleştirilmiş ve referans sensörünün sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.37'de görülen bir rota takip edilmiştir, araç boyuna yol alarak yolun sonunda 180° geriye döner.



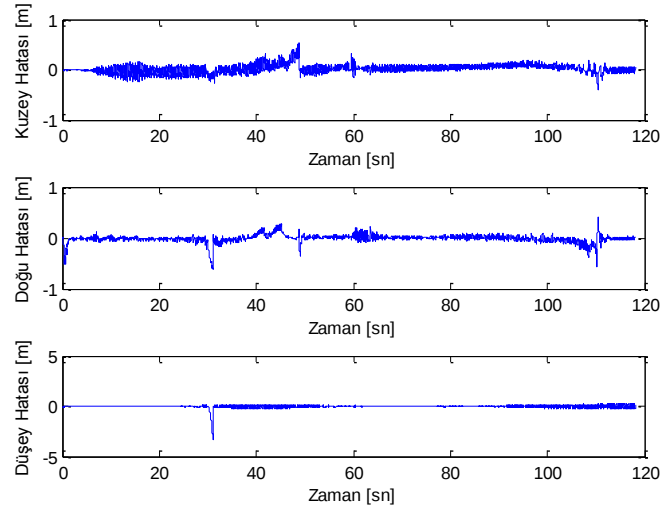
Şekil 5.37 : Araç rotası.

Şekil 5.38’de sonuçların daha iyi görülebilmesi için Şekil 5.37 yakınlaştırılarak sonuçlara bakılmıştır.



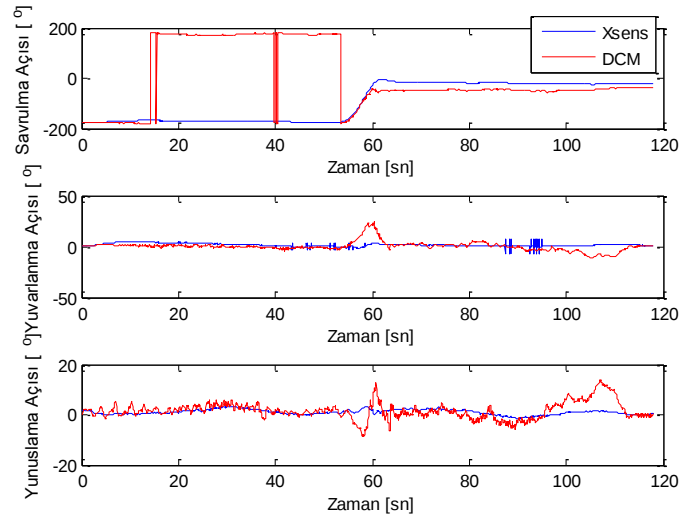
Şekil 5.38 : DCM ve referans GPS/INS entegrasyonu sonuçları karşılaştırması.

Şekil 5.38’de kuzey, doğu ve aşağı yönlerde referans sensörü ile DCM GPS/INS entegrasyonu bağıl hata sonuçları karşılaştırmıştır. Şekil 5.38’in orta şekilinde DCM ile referans sensör yakın sonuçlar vermiştir. Şekil 5.38’in en alt şekilinde viraj kısmının bazı bölümlerinde ise DCM referans sensöre göre daha geniş alanda örnekleme vermiştir.



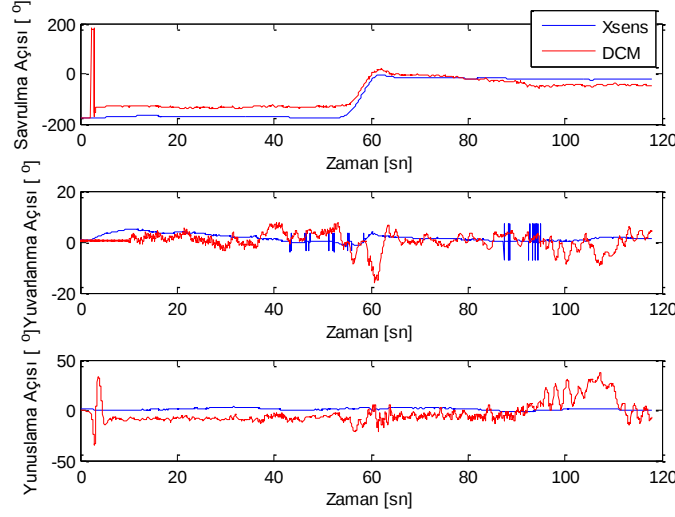
Şekil 5.39 : DCM GPS/INS entegrasyonu ile referans arası bağıl konum hataları.

Şekil 5.39'daki 32. saniyeye tekabül eden hatanın artması viraj noktasına tekabül eder. Referans sensörü ile DCM yönteminden elde edilen savrulma, yuvarlanma ve yunuslama açıları Şekil 5.40'da gösterilmiştir.



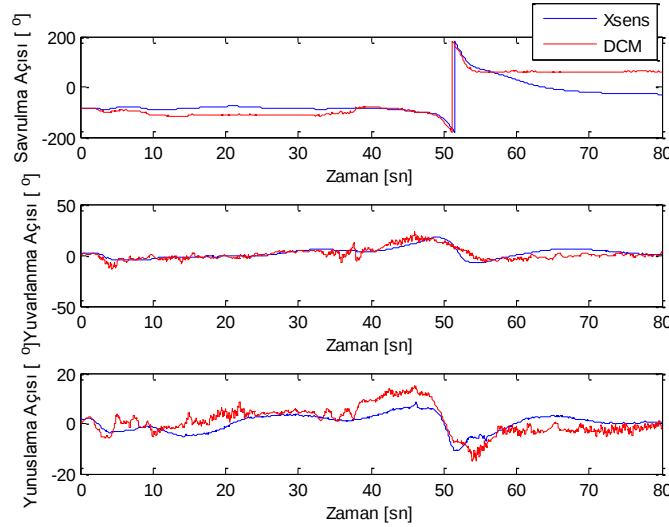
Şekil 5.40 : DCM ve referans rotasyon açıları karşılaştırması.

DCM ile referans sensör sonuçları oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Savrulma açısında aradaki farka referans sensörün manyetik pusula kullanması neden olmuştur. Farrell'in rotasyon matrisi denkleminin ayrıklaştırılmasında daha hassas sonuç vereceği için önerdiği rotasyon matrisi yenilemesi ise Denklem 5.48 yerine 5.50 kullanılarak oluşturulan GPS/INS entegrasyonunu göstermektedir. Bu yöntem kullanıldığında rotasyon açılarında Şekil 5.41'deki sonuçlar elde edilmiştir [43].



Şekil 5.41 : DCM ve referans rotasyon açıları karşılaştırması.

Aynı rotada farklı bir deney yapılmış ve burada referans sensörü ile DCM yöntemlerinden elde edilen savrulma, yuvarlanma ve yunuslama açıları Şekil 5.41’de gösterilmiştir.

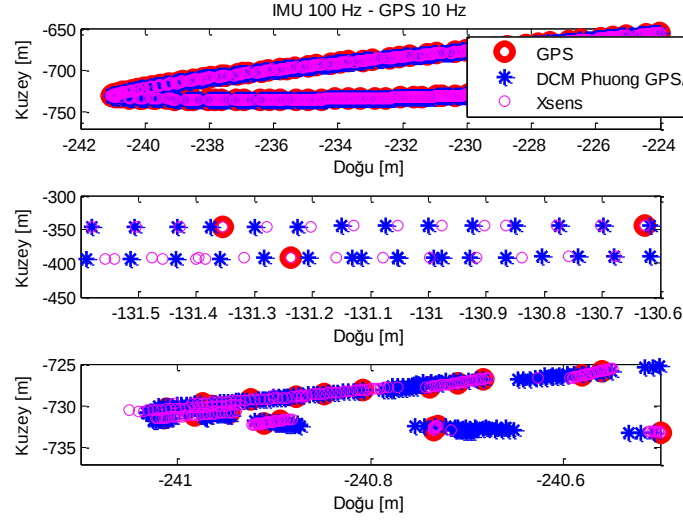


Şekil 5.42 : DCM ve referans sensörünün rotasyon açıları ve dönüşte pusula hatası karşılaştırması.

Burada 50. sn’den sonra rotasyon sebebiyle savrulma açısı 180° değişmelidir fakat referans sensörü manyetik sensör kullandığından sonuçlarda bozulma meydana gelmiştir. Manyetik sensör çok hassas ve çevresel etkilenebilir bir sensördür. Daha önce de belirttiğimiz gibi araç üzerinde yerleştirildikten sonra referans sensörün kendi programındaki manyetik haritalandırma ile kalibrasyonu yapılmıştır.

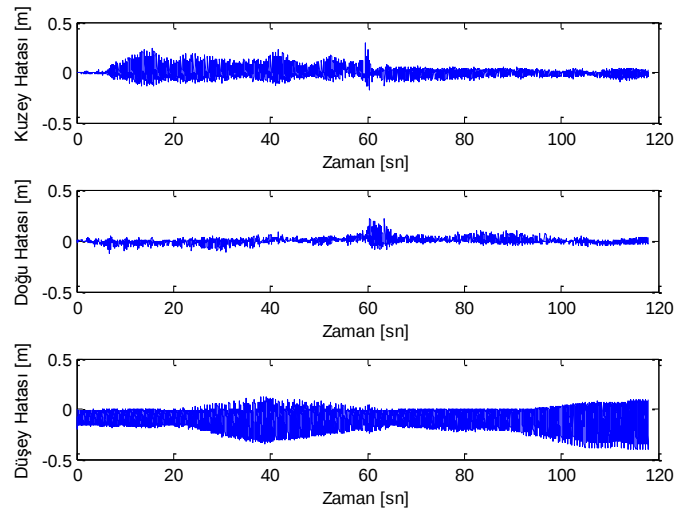
5.6.2.2 DCM Phuong manyetik pusula beslemesi

Phuong'un uyguladığı DCM yöntemi savrulma açısının bir dış kaynaktan denklemlere beslenmesine dayanır. DCM kısmında yapılan deneyin verileri ile tekrarlanmıştır, böylece yöntemleri karşılaştırmak kolaylaşmaktadır. Şekil 5.43'de sonuçların daha iyi görülebilmesi için şekil yakınlaştırılarak sonuçlara bakılmıştır.



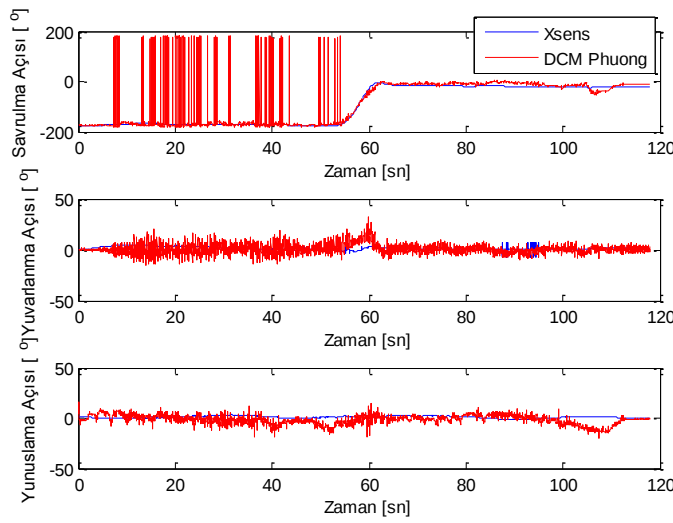
Şekil 5.43 : DCM Phuong GPS/INS yöntemi ve referans sonuçları karşılaştırması.

Şekil 5.43'ün orta şeklinde DCM Phuong ile referans sensör yakın sonuçlar vermiştir. Şekil 5.43'ün en alt şeklinde viraj kısmının bazı bölümlerinde ise DCM Phuong referans sensöre göre daha geniş alanda örnekleme vermiştir.



Şekil 5.44 : DCM Phuong GPS/INS yöntemi ile referans arası bağıl konum hataları karşılaştırması.

Şekil 5.44’de ise kuzey, doğu ve aşağı yönlerde referans sensörü ile DCM Phuong GPS/INS entegrasyonu sonuçları arası bağıl hata verilmektedir. DCM Phuong yöntemi yuvarlanma ve yunuslama açılarını hesaplamak için daha önce Denklem 5.69 ve 5.70’de verilen yerçekimi ivme vektörünü kullanmaktadır. Bu açıların doğru hesaplanabilmesi için araç ya duruyor ya da sabit hızla hareket ediyor olması gerekmektedir. Bu durum araç hareket halinde iken sağlanamadığından gerek konum ve gerek yuvarlanma,yunuslama açılarında hatalar meydana gelmektedir.Referans sensörü ile DCM yöntemlerinden elde edilen savrulma, yuvarlanma ve yunuslama açıları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

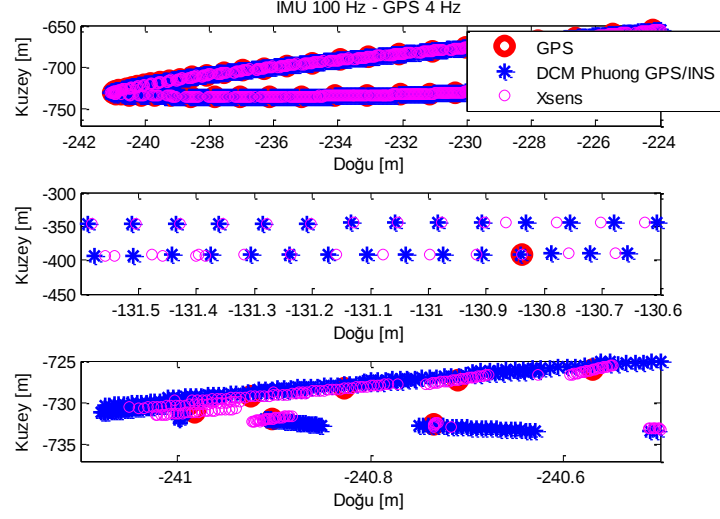


Şekil 5.45 : DCM Phuong ve referans rotasyon açıları karşılaştırması.

Şekil 5.45’de görülebileceği gibi DCM Phuong yönteminde savrulma açısı manyetik pusuladan beslendiğinden referans sensörünün sonuçları ile oldukça yakın değerler vermiştir [38].

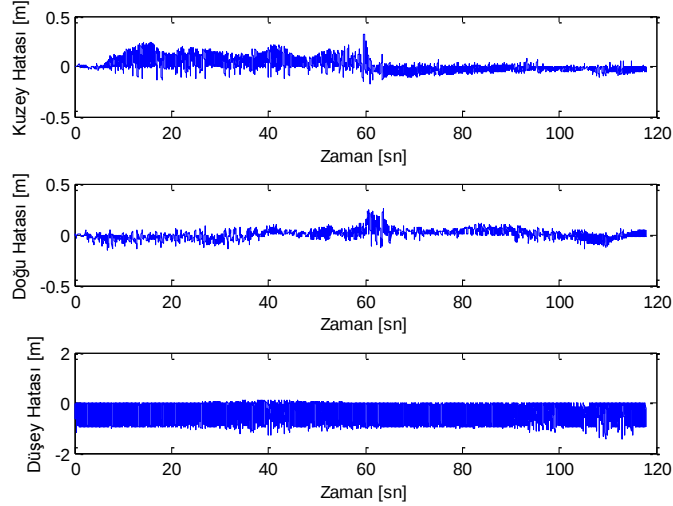
5.6.2.3 DCM Phuong GPS 4 Hz

Referans sensörü 4 Hz’de GPS çıkışı verdiği için algoritma bu frekansta denenmiştir. Şekil 5.46’da sonuçların daha iyi görülebilmesi için şekil yakınlaştırılarak sonuçlara bakılmıştır.



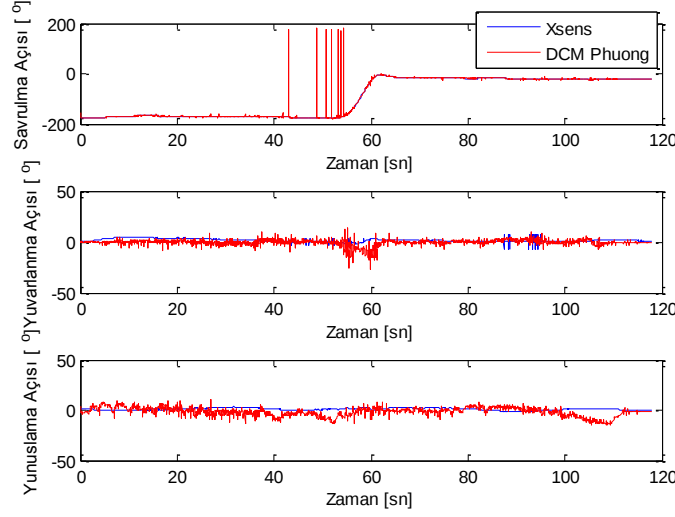
Şekil 5.46 : DCM Phuong GPS/INS yöntemi ve referans sonuçları karşılaştırması.

Şekil 5.46'nın orta şekilinde DCM Phuong ile referans sensör yakın sonuçlar vermiştir. Şekil 5.46'nın en alt şekilinde viraj kısmının bazı bölümlerinde ise DCM Phuong referans sensöre göre daha geniş alanda örnekleme vermiştir. Şekil 5.47'de kuzey, doğu ve düşey yönlerde referans sensörü ile DCM Phuong GPS/INS entegrasyonu sonuçları arası bağıl hata görülmektedir ve 4 Hz'deki düşey hata 10 Hz'den daha fazladır.



Şekil 5.47 : DCM Phuong GPS/INS yöntemi ile referans arası bağıl konum hataları karşılaştırması.

Referans sensörü ile DCM Phuong yöntemlerinden elde edilen savrulma, yuvarlanma ve yunuslama açıları Şekil 5.48'de gösterilmiştir.

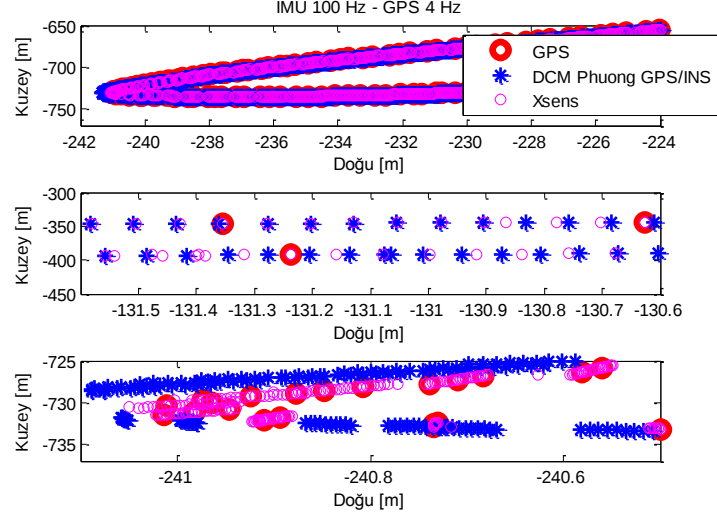


Şekil 5.48 : DCM Phuong ve referans rotasyon açıları karşılaştırması.

DCM Phuong yönteminde savrulma açısı, manyetik pusuladan beslendiğinden 4 Hz GPS örnekleme frekansında da referans sensörü sonuçları ile oldukça yakın değerler elde edilmiştir.

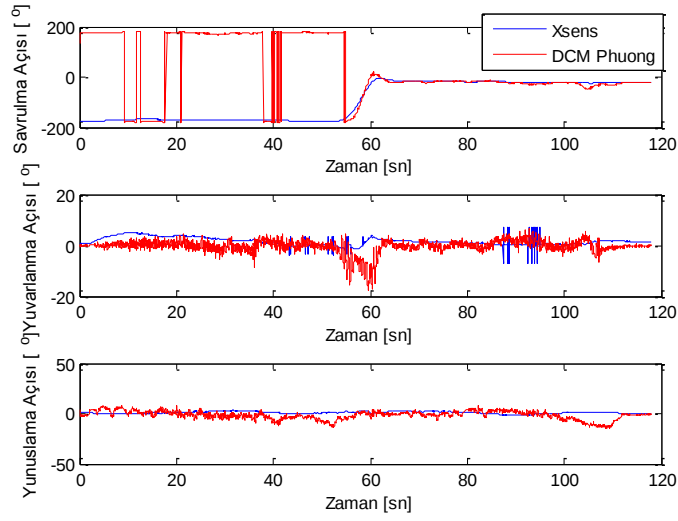
5.6.2.4 DCM Phuong yöntemiyle farklı frekansta savrulma açısı beslemesi

Bu yöntemde savrulma açısı dış bir kaynaktan alınmaktadır. İki kaskat yapıdaki Kalman filtresi rotasyon matrisini bulmak için kullanılır. Savrulma açısı referans ölçüm olarak ikinci Kalman filtresinde kullanıldığından düzeltme işlemi IMU frekansından farklı bir frekansta yapılabilir. Burada düzeltme işlemi 10 Hz’de yapılmıştır. Şekil 5.49’un orta şeklinde DCM Phuong ile referans sensör yakın sonuçlar vermiştir. Şekil 5.49’un en alt şeklinde viraj kısmının bazı bölümlerinde ise DCM Phuong referans sensöre göre daha geniş alanda örnekleme vermiştir fakat 10 Hz beslemesi nedeniyle virajda rotadan sapma meydana gelmiştir.



Şekil 5.49 : DCM Phuong GPS/INS yöntemi ve referans sonuçları karşılaştırması.

Referans sensörü ile DCM yöntemlerinden elde edilen savrulma, yuvarlanma ve yunuslama açıları Şekil 5.50’de gösterilmiştir.



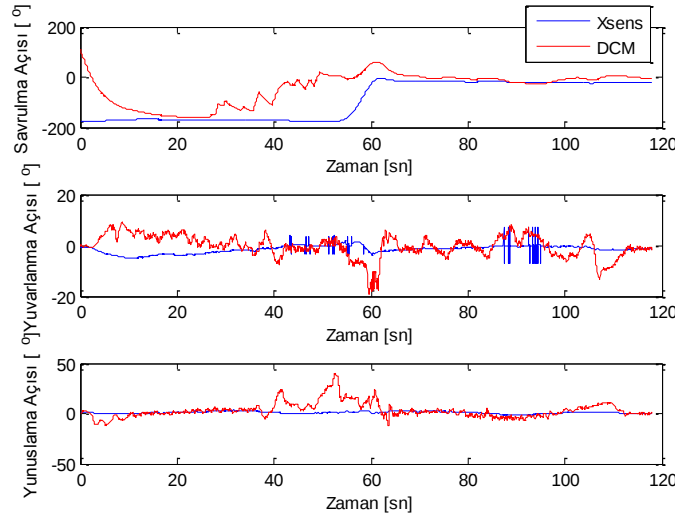
Şekil 5.50 : DCM Phuong ve referans rotasyon açıları karşılaştırması.

DCM Phuong yönteminde Şekil 5.50’de savrulma açısı, manyetik pusuladan 10 Hz’de beslendiğinde de referans sensörü sonuçları ile oldukça yakın değerler vermiştir.

5.6.2.5 DCM yöntemiyle farklı frekansta savrulma açısı beslenmesi

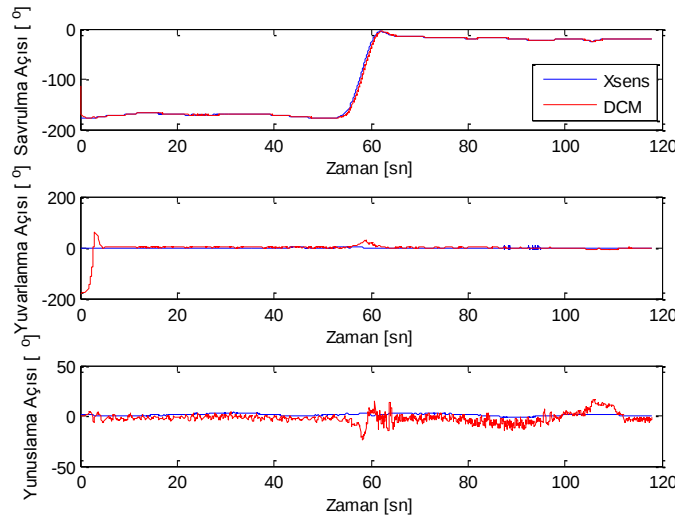
DCM yönteminde dışarıdan IMU sensörün frekansından farklı bir frekansta savrulma açısı beslenmesi genişletilmiş Kalman filtresine ilave olarak ek denklemler gerektirmektedir. Burada rotasyon matrisi hataları, genişletilmiş Kalman filtresine ek olarak eklenen düzeltme kısmıyla başarılabılır. Referans sensörü EKF ile DCM

yöntemlerinden elde edilen savrulma, yuvarlanma ve yunuslama açıları arasındaki fark Şekil 5.51’de gösterilmiştir.



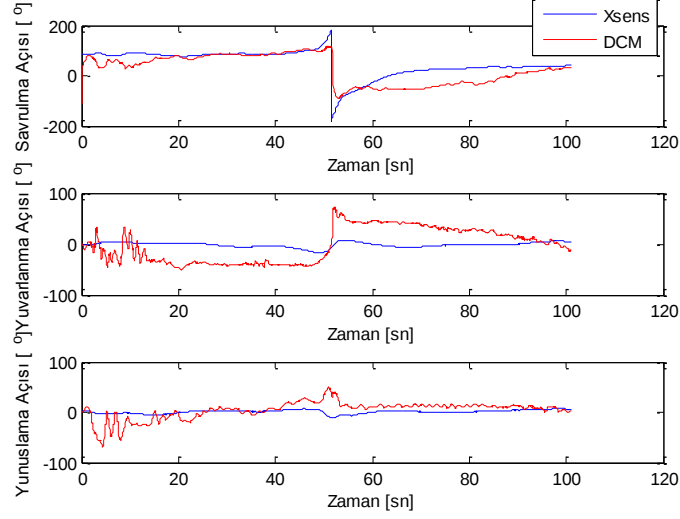
Şekil 5.51 : Manyetik pusuladan 20 Hz savrulma açısı beslenmesi durumunda DCM ve referans sensörü rotasyon açıları karşılaştırması.

Savrulma açısı referans sensörünün çıkışından beslenirse, referans sensörü ile DCM yöntemlerinden elde edilen savrulma, yuvarlanma ve yunuslama açıları Şekil 5.52’de gösterilmiştir.



Şekil 5.52 : Referans sensörü çıkışından 20 Hz savrulma açısı beslenmesi durumunda DCM ve referans rotasyon açıları karşılaştırması.

Referans sensörü ile DCM yöntemlerinden elde edilen savrulma, yuvarlanma ve yunuslama açıları Şekil 5.53’te gösterilmiştir.

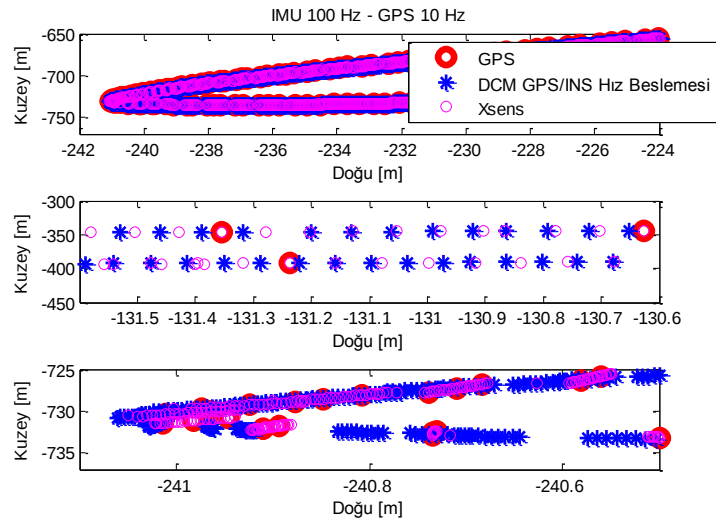


Şekil 5.53 : Manyetik pusuladan 20 Hz savrulma açısı beslenmesi durumunda DCM ve referans rotasyon açıları karşılaştırması.

Sonuç olarak Bölüm 5.4.5’de alınan denklemler [44] kaynağında hatalı türetilmiş olabilir.

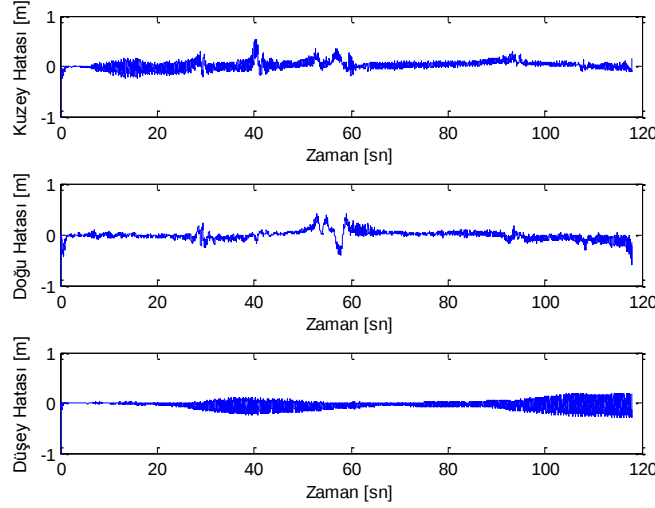
5.6.2.6 DCM yöntemiyle farklı frekansta araç hızı beslenmesi

DCM yöntemine ekleme yapılarak genişletilmiş Kalman filtresi kısmında dışarıdan hız beslemesi yapılabilir. Burada GPS/INS sistemine dışarıdan hız beslemesi yapılmıştır. GPS’ten hız gelmemesi durumunda da dış hız beslemesi bu şekilde yapılabilir. Şekil 5.54’te sonuçların daha iyi görülebilmesi için şekil yakınlaştırılarak sonuçlara bakılmıştır



Şekil 5.54 : DCM GPS/INS yöntemi ve referans sonuçları karşılaştırması.

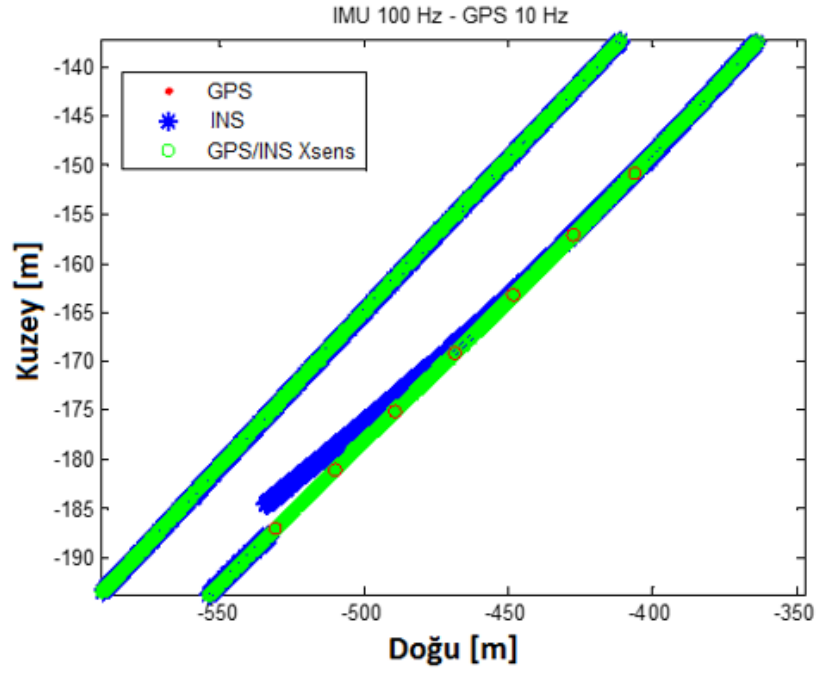
Şekil 5.47’de ise kuzey, doğu ve düşey yönlerde referans sensörü ile DCM GPS/INS entegrasyonu sonuçları karşılaştırmıştır. Referans sensörü ile DCM yöntemleri arasındaki bağıl konum hataları şekilde gösterilmiştir.



Şekil 5.55 : DCM GPS/INS yöntemi ile referans arası bağıl konum hataları.

5.6.2.7 GPS kesintisi durumunda GPS/INS entegrasyon sonuçları

GCDC 2011 Helmond, Hollanda yarışmasında haberleşmeli sürüş deneylerinde takip edilen oldukça düz bir rota idi. Şekil 5.56’da gösterilen bu rotaya benzemektedir. Mekar aracı köprü altından geçerken ortak bir problem olan geçici GPS kesintileridir [14]. GPS kesildiği zaman sadece EKF’nin tahmin kısmı çalışır. Şekil 5.56’da görülen simülasyon sonucunda, bu tekniğin düz yollarda memnun edecek derece iyi çalıştığı görülebilir. Pratikte ise GPS kesilme süresi uzadıkça IMU’daki sapma ve gürültü sebebiyle gerçek rotadan sapılacaktır. GPS sensör bilgisi, köprü altında kesilme, yüksek binaların yanında yansımaya uğrama, çukur yerlerde yeterli uydu görmeme vs. gibi nedenlerle kesintiye uğrayabilir. GPS sinyalinin sağladığı konum ve hız bilgisinin genişletilmiş Kalman filtresiyle ne kadar tatmin edici sonuçlar verdiği geçici kesinti durumlarında GPS/INS entegrasyonunun davranışını incelenerek tespit edilebilir.



Şekil 5.56 : 7 sn'lik GPS kesintisi.

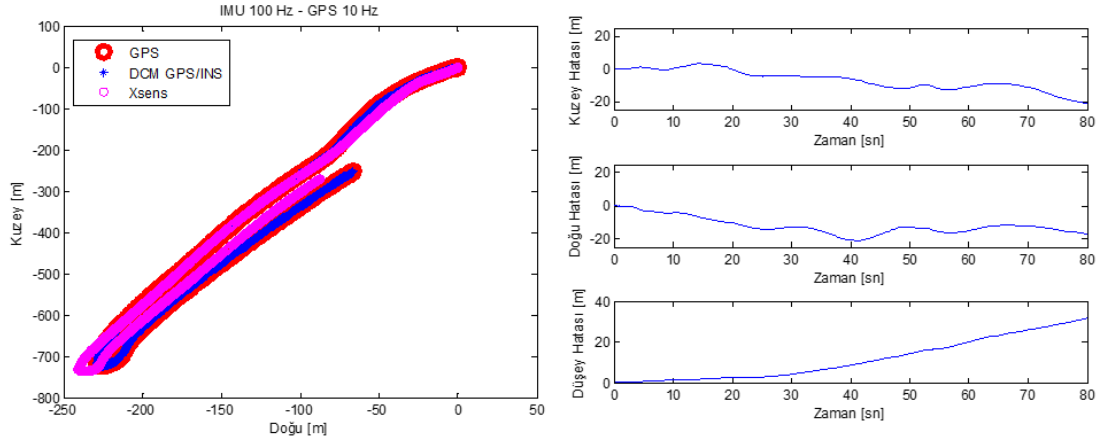
Kesinti yapılan GPS noktaları kırmızı yuvarlak ile gösterilmiştir.

5.6.2.8 IMU ile odometre sensörlerinin birleştirilmesi

GPS verisinin elde edilemediği durumlarda araç ön teker hızlarının kullanılması bir alternatiftir. Fakat burada araç ön teker hızları verisi deneysel olarak henüz toplanmadığından bu durumu simüle etmek için sadece GPS sensöründen gelen hız bilgisi kullanılmıştır. Burada DCM Phuong yöntemi manyetik pusula kullandığı için güzel sonuç vermiştir. DCM yönteminde ise görülmüştür ki manyetik pusula desteği olmadığından başlangıçta savrulma açısında sapma olmuştur. Fakat bu yöntem de yön bilgisi doğru verilirse oldukça iyi sonuç verecektir.

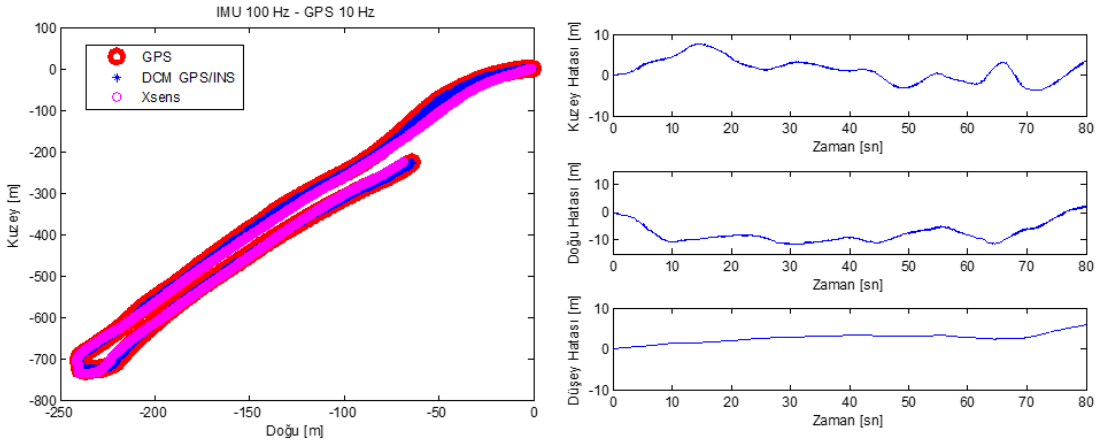
DCM

GPS sensör bilgisi elde edilemediği durumda referans sensöründen alınan ham veri ile yapılmış simülasyon sonuçları Şekil 5.57'de sunulmuştur.



Şekil 5.57 : DCM GPS/INS yöntemi ve referans sonuçları karşılaştırması.

GPS sensör bilgisi elde edilemediği durumda referans sensöründen alınan kalibre edilmiş veri ile yapılmış simülasyon sonuçları sunulmuştur.

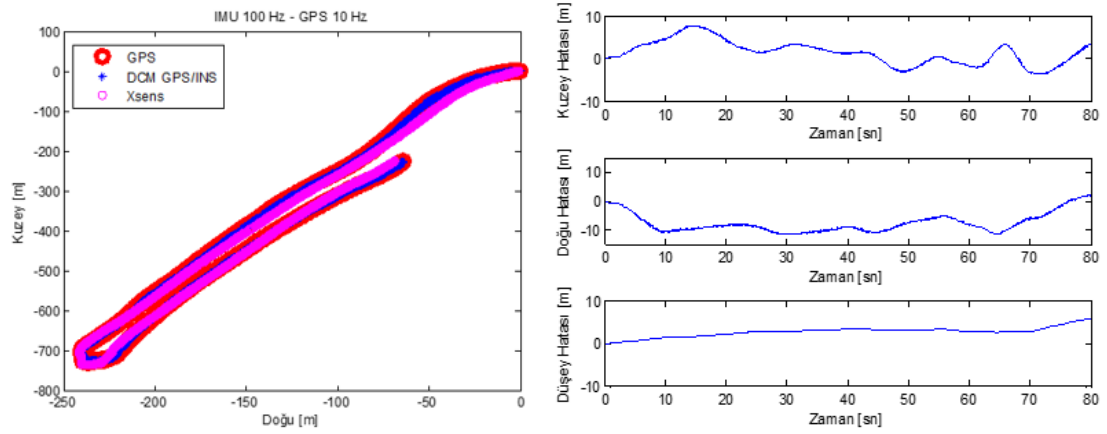


Şekil 5.58 : DCM GPS/INS yöntemi ve referans sonuçları karşılaştırması.

Şekil 5.59’da gözlenen referans sensöründen alınan kalibrasyon yapılmış veri ile yapılan GPS/INS entegrasyonu, ham veri ile olana göre daha düşük bağıl konum sonuç vermiştir.

DCM Phuong

DCM Phuong yöntemiyle de referans sensöründen alınan kalibrasyon yapılmış veri kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.59 : DCM GPS/INS yöntemi ve referans sonuçları karşılaştırması.

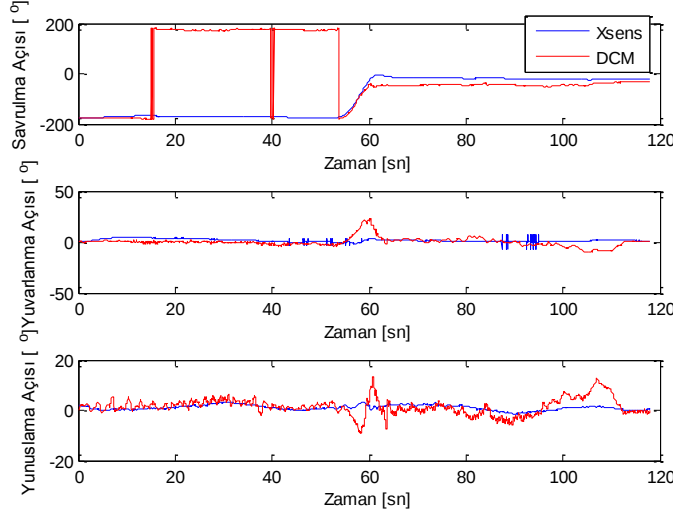
Şekil 5.58 ve 5.59'daki sonuçlara göre DCM ile DCM Phuong yöntemleri ile kalibre edilmiş referans sensörü sonuçları karşılaştırıldığında bu iki yöntemin GPS verisi kullanılmadığı durumlarda oldukça yakın sonuç verdiği gözlenmiştir.

5.6.2.9 3D – 2D GPS/INS entegrasyon karşılaştırması

3 eksenli ivmeölçer ve 3 eksenli jiroskop kullanmak yerine düzlemsel harekette daha az sayıda veya az eksenli ivmeölçer ve jiroskop kullanılabilir. Bu durum için araca herhangi bir IMU sensör bağlamadan ESP sisteminin sensörleri kullanılarak GPS/INS entegrasyonu gerçekleştirilebilir ve maliyetler düşürülebilir.

DCM

Denklemler aynı şekilde uygulanır. Burada iki gyronun verdiği x ve y eksenindeki açısal hızlar yerine sıfır ve bir ivmeölçerin verdiği z eksenindeki öteleme ivmesi yerine yerçekimi 9.81 değeri sisteme girilir. Bunları yapmaktaki amaç az sayıda gyro ve ivmeölçer ile de başarılı GPS/INS entegrasyonu yapıp yapılamayacağını test etmektir. Dolayısıyla $\omega_{ib,x}^b = \omega_{ib,y}^b = 0$ ve $f_{ib,z}^b = -9.81m/sn^2$ eşitlikleri geçerlidir. Şekil 5.60'da düzlemsel DCM ile entegrasyon uygulanmış ve Şekil 5.40'daki 3D entegrasyona benzer sonuç vermiştir.



Şekil 5.60 : 2D DCM ve referans rotasyon açıları.

DCM Phuong

2D entegrasyonda DCM Phuong yöntemindeki yalpalama ve yunuslama açısını tahmin eden Kalman Filtresi uygulanmaz. Dolayısıyla sadece savrulma açısı kullanılarak uygulanan Kalman Filtresi ile rotasyon matrisi tahmin edilir. Ölçüm vektörü denklemi

$$z(t) = I_{3 \times 3} R_b^n(2,:) + v_2(t) \quad (5.141)$$

şeklindedir. Burada Denklem 5.73'deki ölçüm vektörü yalpalama ve yunuslama açıları sıfır alınırsa

$$z(t) = \begin{bmatrix} \sin \psi \\ \cos \psi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.142)$$

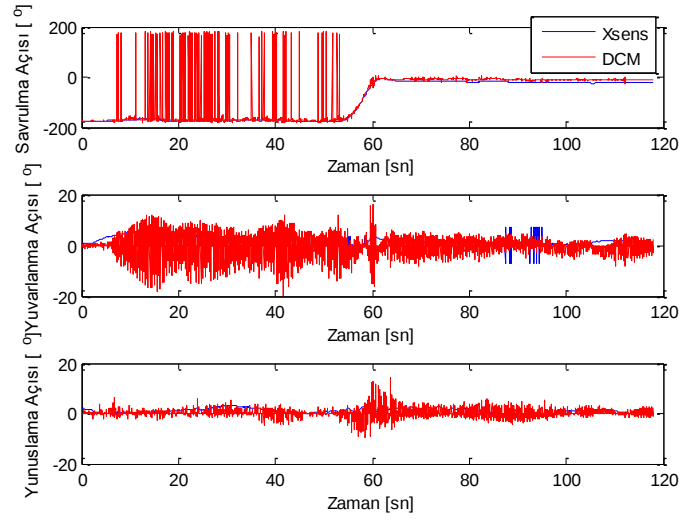
elde edilir. Rotasyon matrisinin ikinci satırı

$$\dot{R}_b^n(2,:) = -[\omega_{nb}^b \times] R_b^n(2,:) + w_2(t) \quad (5.143)$$

şeklindedir. Rotasyon matrisinin birinci satırı

$$R_b^n(1,:) = R_b^n(2,:) \times R_b^n(3,:) \quad (5.144)$$

ikinci satırı ile üçüncü satırının vektörel çarpımından elde edilir. Bu son işlemde sonra ise rotasyon matrisinin normu alınarak normalize edilmelidir.



Şekil 5.61 : 2D DCM Phuong ve referans rotasyon açıları.

Düzlemsel entegrasyonda Şekil 5.61'e benzer sonuç vermiştir. Yuvarlanma açısı hatası biraz artmıştır.

5.6.3 2D INS DCM entegrasyon denklemleri

Araçların karayolunda hareketi genellikle düzlemseldir. Daha az ivmeölçer ve jiroskop kullanılarak GPS/INS entegrasyonu yapmak mümkündür. Burada x ve y ekseninde 2 ivme ölçer (boyuna ve yanal) ve z ekseninde bir jiroskoptan (düşey) gelen veriler kullanılarak 2A1G şeklinde kısaltılan entegrasyon gerçekleştirilmiştir. Bu entegrasyon için INS denklemlerini azaltmak mümkündür. Rotasyon matrisi denklemleri düzlemsel hareket için yazılabilir. Buradaki 1. matematiksel çıkarım, Sun ve diğerlerinin matematiksel çıkarımının bu tezde kullanılan araç eksenlerine göre uyarlanması şeklindedir [48]. 2. çıkarım ise tez kapsamında oluşturulmuştur.

5.6.3.1 2D INS denklemleri 1. Matematiksel çıkarım

Navigasyon eksenin araç eksenine göre rotasyon matrisi

$$R_b^n = A_z(-\psi) A_y(-\theta) A_x(-\phi) = R_{n1}^n R_b^{n1} \quad (5.145)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem 5.145’de rotasyon matrisi savrulma rotasyonu R_{n1}^n ile yunuslama ve yalpa rotasyon matrisi R_b^{n1} şeklinde ikiye ayrılmıştır ve

$$R_{n1}^n = A_z(-\psi), \quad R_b^{n1} = A_y(-\theta)A_x(-\phi) \quad (5.146)$$

eşitlikleri geçerlidir. Denklem 5.145’deki rotasyon matrisinin zamana göre türevi alınır

$$\begin{aligned} \dot{R}_b^n = & \dot{\psi} \dot{A}_z(-\psi) A_y(-\theta) A_x(-\phi) + \dot{\theta} A_z(-\psi) \dot{A}_y(-\theta) A_x(-\phi) \\ & + \dot{\phi} A_z(-\psi) A_y(-\theta) \dot{A}_x(-\phi) \end{aligned} \quad (5.147)$$

eşitliği elde edilir ve burada $\dot{A}_z(-\psi) = dA_z / d\psi$, $\dot{A}_y(-\theta) = dA_y / d\theta$ ve $\dot{A}_x(-\phi) = dA_x / d\phi$ kısmı türevlerini göstermektedir. Denklem 5.147 soldan $A_z(\psi)$ savrulma ile çarpılırsa

$$\begin{aligned} A_z(\psi) \dot{R}_b^n = & \dot{\psi} A_z(\psi) \dot{A}_z(-\psi) A_y(-\theta) A_x(-\phi) + \dot{\theta} \dot{A}_y(-\theta) A_x(-\phi) \\ & + \dot{\phi} A_y(-\theta) \dot{A}_x(-\phi) \end{aligned} \quad (5.148)$$

eşitliği elde edilir. Bir dönüş açısı matrisi tersi (eksilisi) ile çarpılırsa $A_z(\psi)A_z(-\psi) = I$ birim matris elde edilir. Denklem 5.148 sağdan $A_x(\phi)A_y(\theta)$ ifadesi ile çarpılırsa

$$\begin{aligned} A_z(\psi) \dot{R}_b^n A_x(\phi) A_y(\theta) = & \dot{\psi} A_z(\psi) \dot{A}_z(-\psi) + \dot{\theta} \dot{A}_y(-\theta) A_y(\theta) \\ & + \dot{\phi} A_y(-\theta) \dot{A}_x(-\phi) A_x(\phi) A_y(\theta) \end{aligned} \quad (5.149)$$

elde edilir. Rotasyonu ifade eden A_x , A_y ve A_z terimler kısmı türevleri ile çarpılırsa

$$\begin{aligned} \dot{A}_x(-\phi) A_x(\phi) = & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \dot{A}_y(-\theta) A_y(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ A_z(\psi) \dot{A}_z(-\psi) = & \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.150)$$

eşitlikleri elde edilir ve Denklem 5.149'da yerine yazılırsa

$$A_z(\psi) \dot{R}_b^n A_x(\phi) A_y(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\psi} & \dot{\theta} \\ \dot{\psi} & 0 & -\dot{\phi} \\ -\dot{\theta} & \dot{\phi} & 0 \end{bmatrix} = [\Theta \times] \quad (5.151)$$

elde edilir. Denklem 5.151'de

$$\Theta = \begin{bmatrix} -\dot{\phi} \\ -\dot{\theta} \\ -\dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (5.152)$$

eşitliği geçerlidir. Rotasyon matrisinin türevi Denklem 5.13'ten alınarak Denklem 5.151'de yerine yazılırsa

$$A_z(\psi) \dot{R}_b^n A_x(\phi) A_y(\theta) = A_z(\psi) R_b^n (\Omega_{ib}^b - \Omega_{in}^b) A_x(\phi) A_y(\theta) \quad (5.153)$$

eşitliği elde edilir. Rotasyon matrisi ifadesi Denklem 5.145'ten alınıp Denklem 5.153'de yerine yazılırsa

$$A_z(\psi) \dot{R}_b^n A_x(\phi) A_y(\theta) = A_y(-\theta) A_x(-\phi) (\Omega_{ib}^b - \Omega_{in}^b) A_x(\phi) A_y(\theta) \quad (5.154)$$

elde edilir. Denklem 5.154'te $A_y(-\theta) A_x(-\phi)$ yerine R_b^{n1} yazılırsa

$$A_z(\psi) \dot{R}_b^n A_x(\phi) A_y(\theta) = R_b^{n1} (\Omega_{ib}^b - \Omega_{in}^b) A_x(\phi) A_y(\theta) \quad (5.155)$$

elde edilir. Denklem 5.155'te $A_x(\phi) A_y(\theta)$ yerine R_b^{n1} yazılırsa rotasyon matrisi ile çarpımı

$$\begin{aligned} A_z(\psi) \dot{R}_b^n A_x(\phi) A_y(\theta) &= R_b^{n1} (\Omega_{ib}^b - \Omega_{in}^b) R_b^{n1} = \Omega_{ib}^{n1} - \Omega_{in}^{n1} \\ &= \left[(\omega_{ib}^{n1} - \omega_{in}^{n1}) \times \right] \end{aligned} \quad (5.156)$$

şeklinde yazılabilir. Buradan ω_{ib}^{n1} terimi

$$\omega_{ib}^{n1} = R_b^{n1} \omega_{ib}^b = A_y(-\theta) A_x(-\phi) \begin{bmatrix} \omega_{ib,x}^b \\ \omega_{ib,y}^b \\ \omega_{ib,z}^b \end{bmatrix} \quad (5.157)$$

şeklinde yazılabilir. ω_{ib}^{n1} eşitliğindeki ifadeleri açarsak

$$\omega_{ib}^{n1} = \begin{bmatrix} \omega_{ib,x}^b \cos \theta + \omega_{ib,y}^b \sin \theta \sin \phi + \omega_{ib,z}^b \sin \theta \cos \phi \\ \omega_{ib,y}^b \cos \phi - \omega_{ib,z}^b \sin \phi \\ -\omega_{ib,x}^b \sin \theta + \omega_{ib,y}^b \cos \theta \sin \phi + \omega_{ib,z}^b \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (5.158)$$

elde edilir. ω_{in}^{n1} ise Denklem 5.159'daki şekilde yazılabilir.

$$\omega_{in}^{n1} = R_n^{n1} \omega_{in}^n = A_z(\psi) \omega_{in}^n = \begin{bmatrix} \omega_{in,x}^n \cos \psi + \omega_{in,y}^n \sin \psi \\ -\omega_{in,x}^n \sin \psi + \omega_{in,y}^n \cos \psi \\ \omega_{in,z}^n \end{bmatrix} \quad (5.159)$$

Denklem 5.152 ile Denklem 5.156 eşittir. Buradan

$$\Theta = \omega_{ib}^{n1} - \omega_{in}^{n1} \quad (5.160)$$

elde edilir. Denklem 5.160'da bilinmeyenler yerine yazılırsa ve $\theta = 0$ ve $\phi = 0$ kabulü yapılırsa

$$\dot{\psi} = -\omega_{ib,z}^b + \left(\frac{v_e \tan \phi}{R_N + h} + \omega_{ie}^e \sin \phi \right) \quad (5.161)$$

savrulma açısını türevi elde edilir. Düzlemsel mekanizasyon denklemleri en son

$$\begin{aligned}
 \dot{r}^n &= \begin{bmatrix} \frac{v_n}{R_M + h} & \frac{v_e}{\cos(\varphi)(R_N + h)} & -v_d \end{bmatrix}^T \\
 \dot{V}^n &= R_b^n f_{ib}^b - (\Omega_{en}^n + 2\Omega_{ie}^n) V^n + g^n \\
 \dot{\psi} &= -\omega_{ib,z}^b + \left(\frac{v_e \tan \varphi}{R_N + h} + \omega_{ie}^e \sin \varphi \right) \\
 R_b^n &= A_z(-\psi)
 \end{aligned} \tag{5.162}$$

şekline indirgenmiştir. Burada EKF hata denklemleri de aynı şekilde indirgenmesi için Sun ve diğerlerinin çalışmasına başvurunuz [48].

5.6.3.2 2D INS denklemleri 2. matematiksel çıkarım

Düzlemsel INS denklemleri sensör yardımıyla ölçülmeyen ve sıfır kabul edilen yunuslama ve yalpalama açısı ile oluşturulan indirgenmiş rotasyon matrisi Denklem 5.164'in Denklem 5.163'de yerine yazılarak çözüme gidilir. Rotasyon matrisi denklemleri

$$\dot{R}_b^n = R_b^n \Omega_{ib}^b - (\Omega_{ie}^n + \Omega_{en}^n) R_b^n \tag{5.163}$$

şeklinde idi. Denklem 5.162'de sadece savrulma açısından oluşan R_b^n

$$R_b^n = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.164}$$

şeklinde idi. Sadece z ekseninde jiroskoptan elde edilen açısal hız $\omega_{ib,z}^b$ teriminden oluşan Ω_{ib}^b matrisi Denklem 5.44'ten ve Ω_{ie}^n matrisi Denklem 5.47'den ve Ω_{en}^n matrisi Denklem 5.36'nın ters simetrik matris formu olarak alınarak Denklem 5.163'te yerine yazılırsa

$$\dot{R}_b^n = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{ib,z}^b & 0 \\ \omega_{ib,z}^b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & \omega_{ie} \sin \varphi + \frac{V_e \tan \varphi}{R_N + h} & -\frac{V_n}{R_M + h} \\ -\omega_{ie} \sin \varphi + \frac{V_e \tan \varphi}{R_N + h} & 0 & -\frac{V_e}{R_N + h} - \omega_{ie} \cos \varphi \\ \frac{V_n}{R_M + h} & \frac{V_e}{R_N + h} + \omega_{ie} \cos \varphi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.165)$$

eşitliği elde edilir. Kısaltma yapabilmek için

$$\Gamma = \omega_{ie} \sin \varphi + \frac{V_e \tan \varphi}{R_N + h} \quad (5.166)$$

tanımlanırsa ve Denklem 5.165'te matris çarpım işlemleri gerçekleştirilirse

$$\dot{R}_b^n = \begin{bmatrix} \omega_{ib,z}^b \sin \psi & -\omega_{ib,z}^b \cos \psi & 0 \\ \omega_{ib,z}^b \cos \psi & \omega_{ib,z}^b \sin \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\Gamma \sin \psi & \Gamma \cos \psi & -\frac{V_n}{R_M + h} \\ -\Gamma \cos \psi & -\Gamma \sin \psi & -\frac{V_e}{R_N + h} - \omega_{ie} \cos \varphi \\ \cos \psi \frac{V_n}{R_M + h} - \Gamma \sin \psi & \sin \psi \frac{V_n}{R_M + h} + \Gamma \cos \psi & 0 \end{bmatrix} \quad (5.167)$$

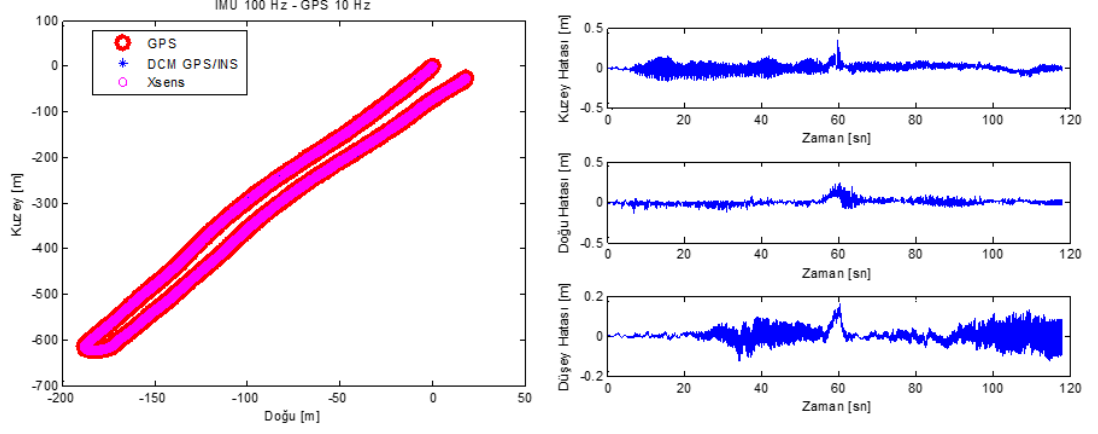
elde edilir. Rotasyon matrisinin türevi $\dot{R}_b^n$ Denklem 5.164 ifadesinin türevi olarak yerine yazılıp matris eşitliğinde 1. satır ve 1. Sütunda bulunan ifade eşitlenirse

$$-\dot{\psi} \sin \psi = \omega_{ib,z}^b \sin \psi - \sin \psi \left(\omega_{ie} \sin \varphi + \frac{V_e \tan \varphi}{R_N + h} \right) \quad (5.168)$$

elde edilir. Savrulma açısının türevi yalnız bırakılırsa

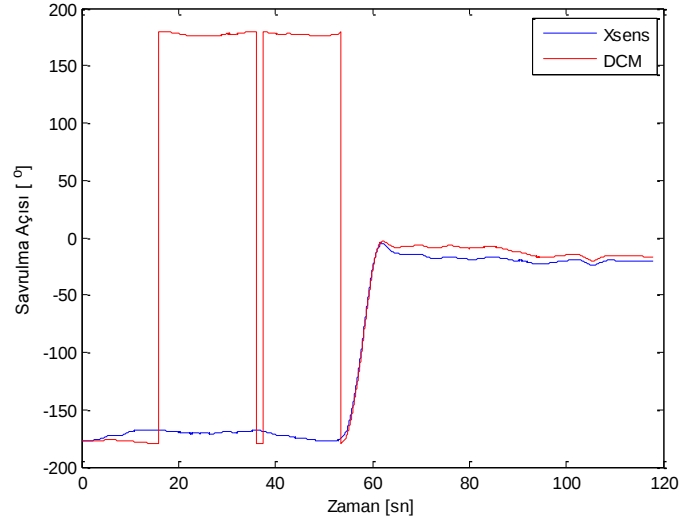
$$\dot{\psi} = -\omega_{ib,z}^b + \left(\frac{v_e \tan \varphi}{R_N + h} + \omega_{ie}^e \sin \varphi \right) \quad (5.169)$$

elde edilir.



Şekil 5.62 : 2D GPS/INS entegrasyon rotası ve konum hataları.

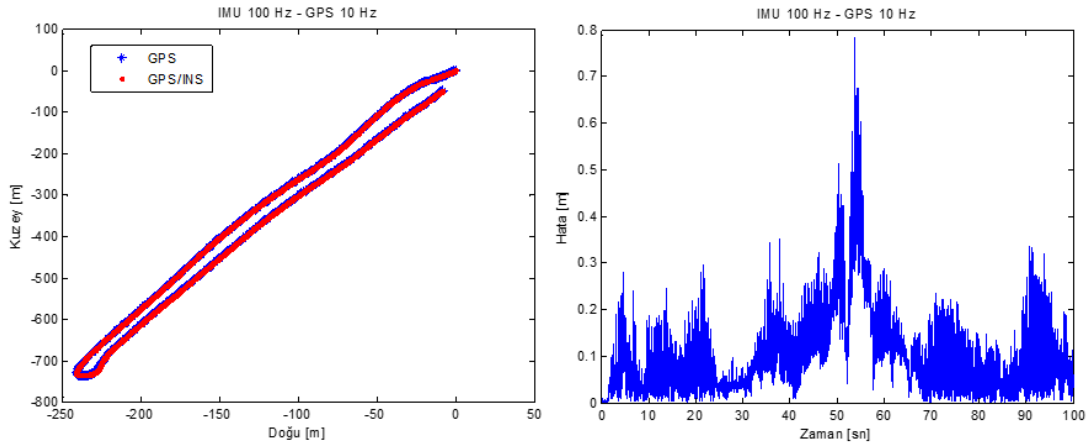
Denklem 5.162'deki denklemler kullanılarak 2D GPS/INS entegrasyonu gerçekleştirilirse Şekil 5.62'de görülen konum hataları elde edilir ve bu durum 3D GPS/INS'ye göre fazla değişiklik göstermemiştir. Şekil 5.63'de görülen savrulma açısı da referans sensörü oldukça iyi bir şekilde takip etmiştir.



Şekil 5.63 : 2D GPS/INS entegrasyonunda DCM ile referans sensör savrulma açısı karşılaştırılması.

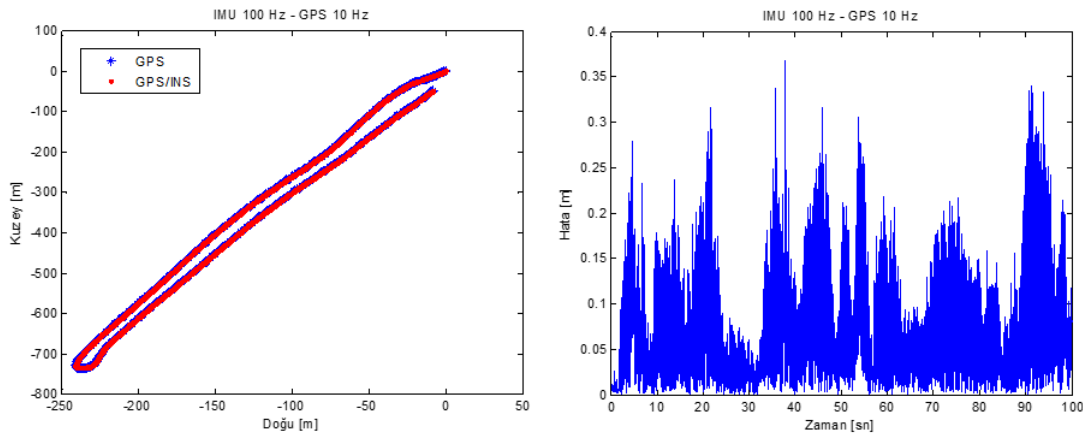
5.6.4 GPS/INS açık-kapalı entegrasyon

Deneyisel testlerde veriler gevşek bağlı açık ve kapalı GPS/INS entegrasyonunun için denenmiştir.



Şekil 5.64 : Gevşek bağlı açık sistem GPS/INS entegrasyonu.

Şekil 5.64 ile 5.65'deki hatalar karşılaştırılırsa gevşek bağlı kapalı sistemin daha iyi sonuç verdiği söylenebilir. Capelle ve diğerleri açık sistemde INS hataları düzeltilmediği için hataların limitsiz artmasına neden olacağını ve bu sebeble kapalı sistem entegrasyonu gerçekleştirmişlerdir [52].



Şekil 5.65 : Gevşek bağlı kapalı sistem GPS/INS entegrasyonu.

Sonuç olarak İleri Sürüş Destek Sistemleri ve otonom araçlarda sıkça kullanılan GPS/INS entegrasyonu ile GPS örnekleme frekansı artırılmıştır. Savrulma açısı referans sensöre yakın tahmin edilmektedir. Referans sensörden hesapla elde edilen yunuslama ve yalpalama açısı karayolunda nispeten az değişim gösterdiğinden nispeten iyi tahmin yapılamamıştır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Güvenli Sürüş projesi kapsamında toplanan gaz, fren pedalı, direksiyon kullanımı ve lidar verisi sürücü davranışı ile aracın çevresi hakkında bilgiyi analiz etmek için kullanılmıştır. Literatürde sürücülerin İstanbul trafiğinde kullanım karakteristikleri incelenmemiştir. Gaz, fren pedal basıncı ve direksiyon açısının farklı sürücüler için kullanım karakteristikleri marjinal dağılım analizi, frekans spektrumları incelenerek ve standart sapmalar hesaplanarak tespit edilmiştir. Kazaların %90'ı sürücü hatasından kaynaklanmaktadır ve bu sebeple İSDS ve otonom araçlar bu kazaların azaltılması için tavsiye edilmiştir. Literatürde takip süresi genellikle radar veya kameralar ile tespit edilmiştir ve bu parametre genellikle ASK/KASK sistemleri ile birlikte değerlendirilmiş ve bu parametreye manuel sürüş için değinilmemiştir. Bu doktora tez çalışmasında ise yakın gelecekte İSDS ve otonom araçlarda lidar sensörü kullanımı yaygınlaşması beklendiği için takip süresi lidar ile tespit edilmiştir. İki farklı sürücünün artan araç hızına bağlı olarak minimum ön araç takip mesafesi ve minimumun minimumu karşılaştırılmış ve belirgin farklar gözlenmiştir. Takip süresi parametresi sürücü hakkında bilgi elde etmek amacıyla çevreyolunda ve şehiriçinde incelenmiştir. Kafes temelli ve nokta mesafe temelli sınıflandırma yöntemleri ile lider araç ve diğer araçlar tespit edilmiştir. Daha sonra nokta mesafe temelli yöntem seçilerek belirlenen araçlar izlenmiştir. Kalman filtresinde sabit hız modeli kullanılarak izlenen araçların bağıl konum ve hızları da yine Kalman filtresi ile tahmin edilmiştir. Bu yöntem Güvenli Sürüş projesindeki seçilmiş 16 sürücünün veri setine uygulanmıştır. Kalman filtresi ile araç takibi gerçekleştirerek takip süresi belirlenmesinin lidarın 90° boyuna dik doğru boyunca tespitine nazaran daha iyi sonuçlar vereceği belirtilmiştir. Literatürde bulunmayan takip süresi, bağıl mesafe, araç hızı, fren pedal basıncı ve gaz pedal basıncı kullanılarak üç eksenli grafikler elde edilmiştir. Sürücülerin sürüş karakteristiklerinin tespiti için gaz, fren pedalı, direksiyon kullanımı ile takip süreleri beraber değerlendirilmelidir. Gelecek çalışmalarda gerçek zamanlı tespit ve takip yöntemi uygulanması, araç modelinde kompleks model kullanımı, daha yüksek tarama frekansı ile yüksek çözünürlüğe sahip

ve üç katmanda tarama yapabilen lidar kullanımı tavsiye edilebilir. Ayrıca lidar ve kamera füzyonu gerçekleştirilebilir. Güvenli Sürüş projesi veritabanının ASK algoritmalarının İstanbul trafik koşullarında test edilmesi açısından oldukça faydalıdır. Mekar Takımı aracı GCDC 2011 yarışması ASK algoritmasının incelenmesinde Güvenli Sürüş projesinden 16 sürücünün veri seti seçilerek değerlendirilmiştir ve farklı istenen takip sürelerinde iyi bir performans gösterdiği görülmüştür. Benzer incelemelerde Carsim programının kullanımı farklı trafik koşullarının uygulanabilmesine olanak tanınması nedeniyle umut vericidir. Farklı sürücü verilerini lider araç olarak kullanmak ve simülasyonları KASK sistemleri için de tekrarlamak gelecek çalışmalar için tavsiye edilebilir.

GPS/INS entegrasyonu simülasyon sonuçlarında görülmüştür ki GPS 10 Hz ve IMU 100 Hz durumunda GPS/INS entegrasyonu daha doğru sonuçlar verir. Bu durum KASK uygulama performansını artırır. EKF hesaplamalarının doğruluğunu sensör kaynaklı hatalar ve aracın dinamik manevrasının keskinliği etkiler. Doğruluğu arttırmak için manyetik pusula bir referans olarak kullanılmıştır. GPS/INS entegrasyonunda hem sanal simülasyonlar hem de deneysel test gerçekleştirilmiştir. Farklı INS yöntemleri deneysel olarak karşılaştırılmış ve daha sonra seçilen iki farklı INS yöntemi GPS/INS entegrasyonunda kullanılmıştır. GPS/INS entegrasyonuna ek sensörler ile savrulma açısı, dış hız bilgisi beslenmiş ayrıca GPS kesilmesi durumu simüle edilmiştir. Literatürden alınan düzlemsel denklemler farklı bir yöntemle daha elde edilmiştir ve Phuong INS denklemleri de düzleme indirgenerek verilmiştir. Gelecekteki çalışmalarda GPS/INS algoritmasının gerçek zamanlı uygulanması hedeflenmektedir. Düzlemsel GPS/INS entegrasyonu başarılıdır ve bu yöntemin ESP sistemlerinin sahip olduğu daha az sayıda ivmeölçer ve jiroskop ile denenmesi amaçlanmaktadır. Bu sayede maliyet azaltılabilir. GPS/INS algoritmasının lidar veya kamera ile füzyon edilmesi gelecek çalışmalar için tavsiye edilebilir. Sıkı bağlı entegrasyon yapılarak GPS'in doğruluğu artırılabilir. IMU sensörü kaynaklı hatalar da EKF'de kestirilerek hata kaynakları minimuma indirilebilir ve yunuslama ile yalpalama açıları daha iyi kestirilebilir, bunun diğer anlamı durum değişkenlerinin sayısının arttırılmasıdır. GPS kesintisi durumlarında RTS (Rauch–Tung–Striebel) algoritması kullanılarak veya INS hatalarını daha iyi kestirmek için daha fazla sayıda durum değişkenlerini tahmin edebilen EKF modelleri kullanılarak GPS/INS entegrasyonunda oluşabilecek ıraksamaların önüne geçilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Shi, M.** (2008). *Real time human driver identification for improved safety* (Doctoral dissertation). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global (UMI No. 3353217)
- [2] **Igarashi K., Takeda, K., Itakura, F. & Abut, H.** (2005). Is our driving behavior unique?. In H. Abut, J. Hansen, K. Takeda (Eds.), *DSP for In-Vehicle and Mobile Systems*, (Chapter 17, pp.257-274). Retrieved from http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F0-387-22979-5_17
- [3] **Miyajima, C., Nishiwaki, Y., Ozawa, K., Wakita, T., Itakura, F.** (2007). Driver modeling based on driving and its evaluation in driver identification. *Proceedings of The IEEE*, 95 (2), 427-437.
- [4] **Lee, K., Peng, H.** (2005). Evaluation of automotive forward collision warning and collision avoidance algorithms, *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 43 (10), 735-751.
- [5] **National Center for Statistics and Analysis.** (2007). *The Nation's Top Strategies to Stop Impaired Driving* (DOT HS 910 712). Retrieved from <http://www.nhtsa.gov/people/injury/alcohol/StrategiesStopID/StrategytoSID.pdf>
- [6] **Olarte, O.** (2011, April). Human error accounts 90% of road accidents. *AlertDriving Magazine*. Retrieved from: <http://www.alertdriving.com/home/fleet-alert-magazine/international/human-error-accounts-90-road-accidents>
- [7] **Wakita, T., Ozawa, K., Miyajima, C., Igarashi, K., Itakura, F.** (2005). Driver identification using driving behavior signals, *Intelligent Transportation Systems. 2005. Proceedings*, (pp. 396-401). September 13-15.
- [8] **Archer, J. & Kosonen, I.** (2000). The Potential of micro-simulation in relation to traffic safety assesment, *ESS Conference Proceedings*, (pp. 427-431). Hamburg.
- [9] **Gietlink, O., Ploeg, J., Shuttes, B. & Verhaegen, M.** (2006). Development of advanced driver assistance systems with vehicle hardware-in-the-loop simulations. *Vehicle System Dynamics : International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 44 (7), 569-590.
- [10] **Aytekin, B., Dinçmen, E., Aksun Güvenç, B., Altuğ, E., Öncü, S.** (2010). Framework for development of driver adaptive warning and assistance systems that will be triggered by a driver inattention monitor, *International Journal of Vehicle Design*, 52 (1-4), 20-37.
- [11] **Abut, H., Erdoğan, H., Erçil, A., Çürüklü, B., Koman, H., Arslan, B.**

(2007). Data collection with uyanik: too much pain; but gains are coming. *Proc. Of the Biennial on DSP for In-Vehicle and Mobile Systems*, Istanbul, June 13–15.

- [12] **Fast Fourier Transform.** (n.d.). *Wikipedia*. Retrieved: April 7, 2014, from http://en.wikipedia.org/wiki/Fast_Fourier_transform
- [13] **Sampling Theorem.** (n.d.). *Wikipedia*. Retrieved: April 7, 2014, from http://en.wikipedia.org/wiki/Sampling_theorem
- [14] **Güvenç, L., Uygan, I. M. C., Kahraman, K., Efendioglu, B.** (2012). Cooperative Adaptive Cruise Control Implementation of Team Mekar at the Grand Cooperative Driving Challenge, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13 (3), 1062-1074.
- [15] **Neubert, L., Santen, L. & Schadschneider, A.** (1999). Single-vehicle data of highway traffic: A statistical analysis, *Physical Review E (Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics)*, 60 (6), 6480-6490.
- [16] **Riccardo, R. & Massimiliano, G.** (2012). An empirical analysis of vehicle time headways on rural two-lane two-way roads, *Proceedings of EWGT2012 - 15th meeting of the EURO Working Group on Transportation*, (pp.865-874). Paris, October 4.
- [17] **Tricot, N. , Rajaonah, B. , Pacaux, M. P. & Popieul, J. C.** (2004). Driver's behaviors and human-machine interactions characterization for the design of an advanced driving assistance system, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, (pp. 3976-3981). Valenciennes, France, October 10-13.
- [18] **Lindner, P. & Wanielik, G.** (2009). 3D LIDAR processing for vehicle safety and environment recognition, *IEEE workshop on Computational Intelligence in Vehicles and Vehicular Systems*, (pp. 66-71). Nashville, TN, March 30.
- [19] **Premebida, C. & Nunes, U.** (2005). Segmentation and geometric extraction from 2D laser range data for mobile robot applications, *5th Nat. Festival of Robotics Scientific Meeting (ROBOTICA05)*, (pp.17-25). Portugal : Coimbra, April 29.
- [20] **Streller, D., Fürstenberg, K. & Dietmayer, K.** (2002). Vehicle and object models for robust tracking in traffic scenes using laser range images, *The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, (pp.118-123). Singapore, September 3-6.
- [21] **Fayad, F. & Cherfaoui, V.** (2007). Tracking objects using a laser scanner in driving situation based on modeling target shape, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, (pp.44-49). Turkey : Istanbul, June 13-15.
- [22] **Lengland, D.** (2011). Feret diameter and oriented box, Retrieved 28 July, 2014. Available from <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30402-feret-diameter-and-oriented-box/content/orientedBox/imOrientedBox.m>
- [23] **Davison, A. J., Reid, I. D., Molton, N. D. & Stasse, O.** (2007). MonoSLAM: real-time camera slam, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and*

Machine Intelligence, 29(6), 1052-1067.

- [24] **Yiğit, C., B.** (2012). *Mikro hava araçlarının bilinmeyen ortamlarda görüntü temelli kontrolü*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [25] **Aytekin, B. & Altuğ, E.** (2010). Increasing driving safety with a multiple vehicle detection and tracking system using ongoing vehicle shadow information, *IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics*, p.3650-3656, Turkey : Istanbul, October 10-13.
- [26] **Kalman Filter.** (n.d.). *Wikipedia*. Retrieved: April 7, 2014, from http://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter
- [27] **Altay, İ., Guvenc, B. A. & Guvenc L.** (2013). Lidar data analysis for time to headway determination in the drivesafe project field tests, *International Journal of Vehicular Technology*, 2013. doi:10.1155/2013/749896.
- [28] **Swov Fact Sheet Headway times and road safety.** (2012). Institute For Road Safety Research, Retrieved from http://www.swov.nl/rapport/Factsheets/UK/FS_Headway.pdf
- [29] **Lu, M., Wang, J., Li, K. & Zhang, L.** (2009). Road category dependence of variations in longitudinal driving behavior, *22nd ICTCT workshop*, England : University of Leeds, October 22-23.
- [30] **Tapani, A.** (2012). Vehicle trajectory impacts of adaptive cruise control, *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, 16(1), 36-44.
- [31] **Yi, K., Cho, Y., Lee, S., Lee, J. & Ryoo, N.** (2000). A throttle/brake control law for vehicle intelligent cruise control, *Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress*, Seoul, Korea : June 12-15.
- [32] **Güvenç, B. A. & Kural, E.** (2006). Adaptive cruise control simulator: a low-cost, multiple-driver-in-the-loop simulator, *IEEE Control Systems Magazine*, 26 (3), 42-55.
- [33] **Rajamani, R.** (2006). *Vehicle Dynamics and Control*, New York, Springer.
- [34] **Gillespie, T., D.** (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Pennsylvania, SAE.
- [35] **Yiğit, T.** (2004). *Araç dinamiği modelleri geliştirilmesi ve savrulma - devrilme engelleyici kontrolde kullanımları* (Yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [36] **Karaahmetoğlu, R.** (2011). *GCDC 2011 Yarı otonom kooperatif adaptif sürüş yarış aracının tasarımı* (Yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [37] **Ogata, K.** (2010). *Modern Control Engineering Fifth Edition*, New Jersey, Pearson.
- [38] **Phuong, N. H. Q., Kang, H. J., Suh, Y. S. & Ro, Y. S.** (2009). A DCM based orientation estimation algorithm with an inertial measurement unit and a magnetic compass, *Journal of Universal Computer Science*, 15 (4), 859-876 .

- [39] **Leung, K. T., Whidborne, J., Purdy, D., Dunoyer, A. & Williams, R.** (2008). A study on the effect of GPS accuracy on a GPS/INS Kalman filter, *UKACC International Conference on Control*, United Kingdom : University of Manchester.
- [40] **Skog, I.** (2005). *A low cost GPS aided inertial navigation system for vehicular applications* (Master's thesis). Retrieved from <http://www.ee.kth.se/>
- [41] **Schumayer, A.** (2006). *Integration of a GPS aided strapdown inertial navigation system* (Master's thesis). Retrieved from <http://www.ee.kth.se/>
- [42] **Öztürk, A.** (2003). Development, implementation and testing of a Tightly Coupled Integrated INS/GPS System (Master's thesis), Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- [43] **Farrell, J. A.** (2008). *Aided navigation GPS with high rate sensors*, McGraw Hill.
- [44] **Shin, E. H.** (2001). *Accuracy improvement of low cost INS/GPS for land applications* (Master's thesis). Retrieved from http://www.ucalgary.ca/engo_webdocs/NES/01.20156.EHShin.pdf
- [45] **Godha, S.** (2006). *Performance evaluation of low-cost MEMS based IMU integrated with GPS for land vehicle navigation application* (Master's thesis). Retrieved from <http://plan.geomatics.ucalgary.ca/papers/06.20239.SGodha.pdf>
- [46] **Titterton, D. H. & Weston, J., L.** (2004). *Strapdown Inertial Navigation Technology 2nd Edition*, Stevenage, The Institution of Electrical Engineers.
- [47] **Saadettin, K. M.** (2013). *Estimating vehicle state by GPS/IMU fusion with vehicle dynamics* (Master's thesis). Retrieved from <https://dspace.aus.edu/xmlui/bitstream/handle/11073/5800/35.232-2013.09%20-%20Kamal%20Saaddin.pdf?sequence=1/>
- [48] **Sun, D., Petovello, M. G. & Cannon, M., E.** (2008). GPS/Reduced IMU with a Local Terrain Predictor in Land Vehicle Navigation, *International Journal of Navigation and Observation*, 2008, doi:10.1155/2008/813821.
- [49] **Xsens**, MTI-G user manuel and technical documentation. Retrived from <http://www.xsens.com>
- [50] **ST Microelectronics**, Using LSM303DLH for a tilt compensated electronic compass (Doc ID: 17353 Rev 1). Retrieved from <http://www.pololu.com/file/0J434/LSM303DLH-compass-app-note.pdf>
- [51] **National Geophysical Data Center**, Magnetic Field Calculators. Retrieved from <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#declination>
- [52] **Cappelle, C., Pomorski, D. & Yang, Y.** (2006). GPS/INS data fusion for land vehicle localization, *IMACS Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications*, (pp.21-27). Beijing, China, October 4-6.

EKLER

EK A : Navigasyon eksenli hata denklemleri

EK B : Navigasyon eksenli hata denklemleri (15 bilinmeyenli)

EK A:

EKF’de kullanılacak Navigasyon eksenli hata denklemleri altta verilmiştir. Bu denklemler Farrell ve Shin kaynaklarından kontrol edilmiştir [43,44]. Daha fazla terimin basitleştirildiği modelleri mevcuttur [43].

$$\delta\dot{x}^n = F\delta x^n + Gw \quad (5.170)$$

$$\begin{bmatrix} \delta\dot{r}^n \\ \delta\dot{V}^n \\ \dot{\varepsilon}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta r^n \\ \delta V^n \\ \varepsilon^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -R_b^n & 0 \\ 0 & R_b^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta f_{ib}^b \\ \delta\omega_{ib}^b \end{bmatrix} \quad (5.171)$$

$$F_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-v_n}{(R_M + h)^2} \\ \frac{v_e \sin \phi}{(R_N + h) \cos^2 \phi} & 0 & \frac{-v_e}{(R_N + h)^2 \cos \phi} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.172)$$

$$F_{12} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_M + h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(R_N + h) \cos \phi} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5.173)$$

$$F_{13} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.174)$$

$$F_{21} = \begin{bmatrix} -2\omega_{ie} \cos \phi v_e - \frac{v_e^2}{(R_N + h) \cos^2 \phi} & 0 & \frac{-v_n v_d}{(R_M + h)^2} + \frac{v_e^2 \tan \phi}{(R_N + h)^2} \\ 2\omega_{ie} \cos \phi v_n - 2\omega_{ie} \sin \phi v_d + \frac{v_e v_n}{(R_N + h) \cos^2 \phi} & 0 & \frac{-v_n v_e \tan \phi - v_d v_e}{(R_N + h)^2} \\ -2v_E \omega_{ie} \sin \phi & 0 & \frac{v_e^2}{(R_N + h)^2} + \frac{v_n^2}{(R_M + h)^2} - \frac{2g}{\sqrt{R_M R_N} + h} \end{bmatrix} \quad (5.175)$$

$$F_{22} = \begin{bmatrix} \frac{v_d}{R_M + h} & -2 \left(\omega_{ie} \sin \phi + \frac{v_e \tan \phi}{R_N + h} \right) & \frac{v_n}{R_M + h} \\ 2\omega_{ie} \sin \phi + \frac{v_e \tan \phi}{R_N + h} & \frac{v_d + v_n \tan \phi}{R_N + h} & 2\omega_{ie} \cos \phi + \frac{v_e}{R_N + h} \\ -2 \frac{v_n}{R_M + h} & -2 \left(\omega_{ie} \cos \phi + \frac{v_e}{R_N + h} \right) & 0 \end{bmatrix} \quad (5.176)$$

$$F_{23} = -[f_{ib}^n \times] = \begin{bmatrix} 0 & f_D & -f_E \\ -f_D & 0 & f_N \\ f_E & -f_N & 0 \end{bmatrix} \quad (5.177)$$

$$F_{31} = \begin{bmatrix} \omega_{ie} \sin \phi & 0 & \frac{v_e}{(R_N + h)^2} \\ 0 & 0 & \frac{-v_n}{(R_M + h)^2} \\ \omega_{ie} \cos \phi + \frac{v_e}{(R_N + h) \cos^2 \phi} & 0 & \frac{-v_e \tan \phi}{(R_N + h)^2} \end{bmatrix} \quad (5.178)$$

$$F_{32} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{R_N + h} & 0 \\ \frac{1}{R_M + h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\tan \phi}{R_N + h} & 0 \end{bmatrix} \quad (5.179)$$

$$F_{33} = -\Omega_{in}^n = \begin{bmatrix} 0 & \omega_D & -\omega_E \\ -\omega_D & 0 & \omega_N \\ \omega_E & -\omega_N & 0 \end{bmatrix} \quad (5.180)$$

EK B:

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{r}^n \\ \delta \dot{V}^n \\ \dot{\varepsilon}^n \\ \dot{b}_a \\ \dot{b}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} & 0_{3 \times 3} & R_b^n \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} & R_b^n & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta r^n \\ \delta V^n \\ \varepsilon^n \\ b_a \\ b_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ -R_b^n & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & R_b^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta f_{ib}^b \\ \delta \omega_{ib}^b \end{bmatrix} \quad (5.181)$$

Denklem 5.181’de b_a kısaltması ivmeölçerlere geribeslenecek ofset (bias) ve b_g jiroskoplara geribeslenecek ofseti temsil etmektedir.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: İlker Altay

Doğum Yeri ve Tarihi: Bandırma 07.08.1981

E-Posta: ilkeraltay1981@gmail.com

Lisans: İTÜ Makina Mühendisliği

Yüksek Lisans: İTÜ Makina Mühendisliği, Makina Din. Titreşim & Akustik

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

İTÜ Makina Fakültesi Araştırma Görevlisi (2006-2014)

Grand Cooperative Driving Challenge (GCDC) haberleşen otonom araçlar yarışmasına Türkiye’den ilk defa katılan Mekar takımı üyesi

Yayın Listesi:

Altay İ. ve Mermertaş V., (2007). Düzlemsel Mekanizmalarda Atalet Kuvvet ve Momentlerinin Dengelenmesi, *UMTS 2007 13. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu*, (s.379-394) Sivas : Cumhuriyet Üniversitesi.

Beykont C., Çakır Ç. ve **Altay İ.**, (2007). Analog Servo Motor Tasarımı, *UMTS 2007 13. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu*, (s.539-550). Sivas : Cumhuriyet Üniversitesi.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

Guvenc, L., Uygan I.M.C., Kahraman K., Karaahmetoglu R., **Altay I.**, ... Efendioglu, B., (2012). Cooperative Adaptive Cruise Control Implementation of Team Mekar at the Grand Cooperative Driving Challenge, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, , 13(3), pg. 1-13, 1062-1074

Altay, I., Guvenc, B. A. & Guvenc, L., (2013). Lidar Data Analysis for Time to Headway Determination in the Drivesafe Project Field Tests, *International Journal of Vehicular Technology*, 2013. doi:10.1155/2013/749896.

Emirler, M. T., Uygan, I. M. C., **Altay, I.**, Acar, O. U., Keleş, T., Guvenc, L., (2013). A Cooperating Autonomous Road Vehicle Platform, *1st IFAC Workshop on Advances in Control and Automation (ACATTA 2013)*, (pp.199-204). İstanbul : İstanbul Technical University.

Altay, İ., Güvenç B. A. & Güvenç L., (2013). A Simulation Study of GPS/INS Integration for Use in ACC/CACC and HAD, 9th *Asian Control Conference (ASCC 2013)*, (pp.1-8). İstanbul, June 23-26.

Altay, İ., Güvenç B. A. ve Güvenç L., (2012). Lidar Data Analysis for Advanced Driver Assistance”, 6. *Otomotiv Teknolojileri Kongresi OTEKON*, Bursa : Uludağ Üniversitesi, 4-5 Haziran.

Altay, İ., Güvenç B. A. ve Güvenç L., (2014). ACC Car Following In City Traffic Conditions, 7. *Otomotiv Teknolojileri Kongresi OTEKON2014*, Bursa, 26-27 Mayıs.