İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

VİDEO GÖRÜNTÜLERİNDEN HAREKETLİ NESNELERİN ÇIKARILMASI VE HAREKET YÖRÜNGELERİNİN BELİRLENMESİ

DOKTORA TEZİ

Mahir Serhan TEMİZ

Anabilim Dalı : Jeodezi ve Fotogrametri

Programı : Geomatik Mühendisliği

ARALIK 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

VİDEO GÖRÜNTÜLERİNDEN HAREKETLİ NESNELERİN ÇIKARILMASI VE HAREKET YÖRÜNGELERİNİN BELİRLENMESİ

DOKTORA TEZİ

Mahir Serhan TEMİZ
(501052601)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16 Eylül 2011
Tezin Savunulduğu Tarih : 23 Aralık 2011

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sıtkı KÜLÜR (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Orhan ALTAN (İTÜ)
Prof. Dr. Gönül TOZ (İTÜ)
Doç. Dr. Bülent BAYRAM (YTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Sedat DOĞAN (OMÜ)

ARALIK 2011

Eşime, oğluma ve aileme,

ÖNSÖZ

"Video Görüntülerinden Hareketli Nesnelerin Çıkarılması ve Hareket Yörüngelerinin Belirlenmesi" başlıklı bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak hazırlanmış, BİDEB 2211 Yurt İçi Doktora Burs Programıyla TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

Tez danışmanlığımı üstlenerek, tez çalışması süresince değerli görüş ve önerileri ile yol gösteren, bana destek olan, ilgi ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Sıtkı KÜLÜR'e teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez izleme komitesinde görev alarak çalışmalarım sırasında bilimsel desteklerini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren değerli hocalarım Prof. Dr. Orhan ALTAN ve Yrd. Doç. Dr. Sedat DOĞAN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında, video görüntülerinin çekilmesinde yardımda bulunan, Arş. Gör. Nükhet GÜNBEYAZ'a ve Arş. Gör. Bilge KEÇECİ'ye teşekkür ederim. Görüntülerin çekilmesinde bulunduğu yardımlarının yanı sıra deneyimleriyle de beni aydınlatan ve yol gösteren Yrd. Doç. Dr. Halil AKINCI'ya teşekkür ederim. Ayrıca doktora eğitimim süresince her türlü yardımıma koşan Arş. Gör. Serdar BİLGİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, beni bugünlere getiren canım anne ve babama, her zaman manevi olarak destek olan ve sürekli beni çalışmaya teşvik eden sevgili eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eylül 2011

Mahir Serhan TEMİZ

Harita Yüksek Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 2
1.2 Literatür Özeti 4
1.3 Kullanılan Yöntemler 13
2. VİDEO KAMERA GEOMETRİSİ VE KALİBRASYON **15**
2.1 Kamera Geometrisi 15
2.1.1 Lens Distorsiyonları 16
2.2 Kalibrasyon Yöntemleri 18
2.2.1 Direk Lineer Dönüşüm 18
2.2.2 Demet dengelemesi 19
2.2.3 Video görüntülerinin kalibrasyonu 20
3. GÖRÜNTÜLERDEKİ DEĞİŞİMLERİN BELİRLENMESİ **25**
3.1 Değişim Belirlemenin Tanımı 26
3.2 Görüntülerden Nesnelerdeki Değişimin Belirlenmesi 28
3.2.1 Statik görüntülerden nesnelerdeki değişimlerin belirlenmesi 29
3.2.1.1 Basit fark alma yöntemi 29
3.2.1.2 Anlamlılık ve hipotez testleri 31
3.2.2 Dinamik görüntülerden nesnelerdeki değişimlerin belirlenmesi 31
3.2.2.1 Arka fonun çıkarılması 33
3.2.2.2 Sahne modelleme 34
4. HAREKET VEKTÖRLERİNİN ÇIKARILMASI **35**
4.1 Problemin Tanımı 35
4.2 İzlenecek Noktaların Otomatik Olarak Seçilmesi 37
4.3 Seçilen Noktaların İzlenmesi ve Hızın Belirlenmesi 40
4.3.1 Optik Akış 41
4.3.2 Lucas – Kanade (LK) optik akış yöntemi 42
5. REKTİFİKASYON **47**
5.1 Polinomal Rektifikasyon 47
5.1.1 İki boyutlu benzerlik dönüşümü 48
5.1.2 Afin dönüşümü 48
5.1.3 Bi-lineer dönüşüm 48
5.2 Projektif Rektifikasyon 50
5.3 Kaçış Noktası Geometrisi 50

5.3.1 Görüntüdeki doğruların belirlenmesi 52
5.3.2 Görüntünün rektifikasyonu 54
6. GÖRÜNTÜLERDEN ÜÇ BOYUTLU MODEL OLUŞTURMA 57
6.1 Epipolar Geometri 60
6.1.1 Temel matris 61
6.1.2 Esas matris 62
6.2 Stereo Kalibrasyon 63
6.3 Görüntü Çiftlerinin Rektifikasyonu 64
6.4 Stereo Karşılıkların Bulunması 65
6.4.1 Blok eşleştirme algoritması 65
6.4.2 Graph cut algoritması 67
6.5 Üç Boyutlu Model Koordinatlarının Elde Edilmesi 68
7. UYGULAMALAR 73
7.1 Araç Hızlarının Belirlenmesi 73
7.2 Nesnelerin Üç Boyutlu Modellerinin Oluşturulması 88
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 99
KAYNAKLAR 107
EKLER 115
ÖZGEÇMİŞ 121

KISALTMALAR

API	**:** Application Programming Interface
CODEC	**:** Compression/Decompression Module
DLT	**:** Direct Linear Transformation
EDS	**:** Elektronik Denetleme Sistemi
LK	**:** Lucas – Kanade
MOBESE	**:** Mobil Elektronik Sistem Entegrasyonu
ROI	**:** Region of Interest
GPS	**:** Gloabal Positioning System
OPENCV	**:** Open Computer Vision Library
SAD	**:** Sum of Absolute Difference
SSD	**:** Sum of Squared Difference

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 7.1 : Bulunan vektörler ve büyüklükleri. 82
Çizelge 7.2 : Bulunan vektörlerin grafiksel gösterimi (Doğan ve diğ. 2010). 83
Çizelge 7.3 : Hız – Resim karesi çizelgesi. 84
Çizelge 7.4 : Doğruluk test ölçümleri (Doğan ve diğ., 2010). 86
Çizelge 7.5 : Gerçek zamanlı hız belirleme algoritması. 87
Çizelge 7.6 : Üç boyutlu model oluşturma algoritması 89
Çizelge 7.7 : Derinlik çözünürlüğü. 97
Çizelge 7.8 : 6 ve 15 cm baz uzunluklarında derinlik çözünürlükleri. 97
Çizelge 7.9 : f= 8 mm ve f=12 mm olan kameralar için derinlik çözünürlükleri. 98
Çizelge A.1 : Hız vektörleri ve hızlar 116
Çizelge B.1 : Sol resim görüntü koordinatları 117
Çizelge B.2 : Sağ resim görüntü koordinatları 118

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : İğne deliği kamera modeli. 15
Şekil 2.2 : Işınsal distorsiyon. 17
Şekil 3.1 : İlk görüntü(solda), ikinci görüntü(ortada) ve fark görüntüsü (sağda). 30
Şekil 3.2 : Değişim belirleme: Orjial görüntü (üstte) ve fark görüntüsü (altta). 33
Şekil 4.1 : Otomatik olarak seçilen noktalar. 40
Şekil 4.2 : Optik akış (Doğan ve diğ., 2010). 41
Şekil 5.1 : Orijinal görüntü (üstte), bi-lineer dönüşüm sonucu (altta). 49
Şekil 5.2 : Kaçış noktaları. 51
Şekil 5.3 : Orijinal ve düzeltilmiş doğrular. 55
Şekil 6.1 : 3 Boyutlu model elde etme işlem akış şeması (Pollefeys, ve diğ., 2002b). 59
Şekil 6.2 : Epipolar geometri. 61
Şekil 6.3 : Öteleme ve dönüklükler (Bradsky ve Kaehler, 2008). 62
Şekil 6.4 : Hizalanmış kameralar. 63
Şekil 6.5 : Stereo rektifikasyonu yapılmış görüntüler (Bradsky ve Kaehler, 2008). . 64
Şekil 6.6 : Karşılıklı satırları hizalanmış görüntüler. 66
Şekil 6.7 : SAD ile eşleştirme işlemi (Hamzah ve diğ., 2010). 67
Şekil 6.8 : Normalize edilmiş stereo kameralar (Bradsky ve Kaehler, 2008). 68
Şekil 6.9 : Farklılık ve derinlik ilişkisi (Bradsky ve Kaehler, 2008). 69
Şekil 6.10 : Oluşan düzlemler. 70
Şekil 6.11 : Derinlik çözünürlüğü (Kytö ve diğ., 2011). 70
Şekil 7.1 : Orijinal görüntü. 73
Şekil 7.2 : Canny operatörü ile bulunan kenarlar. 74
Şekil 7.3 : Hough dönüşümü ile bulunan kenarlar. 75
Şekil 7.4 : Azaltılmış doğrular. 76
Şekil 7.5 : Rektifikasyonu yapılmış görüntü. 77
Şekil 7.6: Orijinal ve kesilmiş görüntü. 77
Şekil 7.7 : Orijinal(üstte) ve düzeltilmiş (altta) görüntüler. 78
Şekil 7.8 : Elle sayısallaştırılan doğrular. 79
Şekil 7.9 : Geometrik dönüşümü yapılmış görüntü. 80
Şekil 7.10 : Hatalı bulunan doğru. 81
Şekil 7.11 : Otomatik olarak seçilen noktalar. 81
Şekil 7.12 : Hatalar giderilmeden önceki hız vektörleri ve anlık hız. 82
Şekil 7.13 : Hatasız vektörler ve aracın anlık hızı. 84
Şekil 7.14 : Yandan görüntü elde etme planı (Doğan ve diğ., 2010). 85
Şekil 7.15 : Programın genel ekran görüntüsü. 88
Şekil 7.16 : Kullanılan kalibrasyon hedefi. 90
Şekil 7.17 : Kullanılan görüntüler. 90
Şekil 7.18 : Belirlenen kontrol noktaları. 91
Şekil 7.19 : Hatalı kontrol noktaları. 92
Şekil 7.20 : Orijinal ve düzeltilmiş görüntüler. 92
Şekil 7.21 : Elenen görüntü çifti. 93

Şekil 7.22 : Video sıkıştırma formatları.....94
Şekil 7.23 : Stereo görüntüler ve derinlik görüntüsü. 95
Şekil 7.24 : Farklı boyutlarda pencerelerle elde edilen sonuçlar. 96
Şekil 8.1 : Kavşaklardaki kamera sistemi. 102
Şekil 8.2 : Elektronik denetleme sistemi. 103
Şekil 8.3 : Hız koridoru uygulaması (Url-6). 104
Şekil 8.4 : Uyarı levhaları. 105

VİDEO GÖRÜNTÜLERİNDEN HAREKETLİ NESNELERİN ÇIKARILMASI VE HAREKET YÖRÜNGELERİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Video görüntülerinin kullanımı otomasyonu sağlamak için her geçen gün artmaktadır, örneğin hareketli nesnelerin izlenmesi, hareket yörüngelerinin çıkarılması, trafik yoğunluğunun bulunması ve araç hızlarının tespit edilmesi gibi. Bu çalışmada, video kameralar yardımıyla trafik akışının izlenmesi, araç hızlarının belirlenmesi ve olası kaza durumlarında kaza anının üç boyutlu modelinin oluşturulması konuları araştırılmıştır. Tez kapsamında metrik olmayan amatör CCD video kameralar kullanılmıştır. Bu kameralar yardımıyla elde edilecek video görüntülerindeki hareketli nesnelerin üç boyutlu modelleri oluşturulmuş, hareket yörüngeleri ve hızları belirlenmiştir. Video görüntülerinin işlenmesi ve gerekli hesaplamaların gerçek zamanlı olarak yapılabilmesi için en önemli kısıtlama zamandır. Kullanılacak yöntemlerin hesap yükü açısından en az olanları tercih edilmelidir. Ancak bu tercih yapılırken de sonuç ürünlerin doğruluğundan ödün verilmemelidir. Bu tez çalışması kapsamında da bu iki uç koşul en dengeli bir şekilde sağlanmaya çalışılmıştır. Bunun için mevcut yöntemler araştırılmış ve içlerinden en uygun olanları seçilmiştir. Bu yöntemler kullanılacak yöntemler kısmında verilmiş ve sonraki bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır. Nesne hızlarının ve hareket yönlerinin belirlenmesi gerçek zamanlı olarak yapılmıştır. Belirlenen nesnelerin üç boyutlu modelleri oluşturulmuş ve sonuçlar irdelenmiştir.

Video kameralar tarafından kaydedilen trafik akışında meydana gelen kazaların üç boyutlu model koordinatlarının hesaplanması ve araç hızlarının tespiti için, tez yazarı tarafından C++ programlama dili kullanılarak geliştirilen yazılım sistemi kullanılmıştır.

EXTRACTION OF MOVING OBJECTS FROM VIDEO SEQUENCES AND DETERMINATION OF THE OBJECT TRAJECTORIES

SUMMARY

The use of video images is rapidly growing from day to day to provide automation on traffic management applications such as tracking of moving objects, and extraction of their motion orbits, finding the density of the traffic flow at the desired locations, estimation of vehicle speeds etc. In this Ph. D. thesis, detailed studies have been performed for developing a real time system to be used for surveillance of the traffic flow by using video cameras to find speeds of the vehicles for secure travelling, and if occurs, metric 3D reconstruction of any traffic accident event which may be used both for automatic emergency systems and for forensic and juridical purposes as well as directing the traffic flow to optional roads automatically during accidents. For the traffic surveillance and 3D reconstruction tasks, the developed system uses amateur digital CCD video cameras. The moving objects seen by the video cameras are reconstructed in metric 3D models and also their speeds and 3D motion orbits are computed. The most important factor for real time video image processing and 3D reconstruction computations is the time factor. In a very short time period between video frames, huge amount of computations should be performed. For this purpose, the methods that will be used for real time computations must be as simple as possible and must provide sufficient accuracy and precision. In order to provide optimum solutions by the means of fast computing and accuracy requirements, the most appropriate methods have been selected. These methods have been explained in the thesis in details. Real time speed estimation and 3D metric reconstruction methods used in the thesis have been tested precisely to find the statistical confidence criterions. In order to solve the speed estimation and 3D reconstruction problems, the author of the thesis has written a software system in C++ programming language. This software system has been used for all of the computations and test applications.

1. GİRİŞ

Dijital fotogrametri, günümüzde sadece yüksek doğruluklu haritaların ya da üç boyutlu arazi modellerinin oluşturulmasında değil, tıp alanından (Doğan ve Altan, 2003) endüstriye (Fang ve diğ. 2003) ve mimariye (Ruther, 2002) kadar birçok farklı disiplinlerde başarıyla uygulanmaktadır. Teknolojideki gelişmelere paralel olarak fotogerçekçi (photorealistic) üç boyutlu ürünlere olan eğilim artmış durumdadır. Görüntüler yardımıyla nesnelerin üç boyutlu modelleri yüksek doğrulukta elde edilebilmekte ve hemen hemen her alanda kullanılmaktadır. Günümüzde artık üçüncü boyutun ötesinde, zaman parametresi de hesaba katılarak, dördüncü boyuttan bahsedilmekte ve eş zamanlı üç boyutlu model elde etme yöntemleri araştırılmaktadır. Bu konuda çok çeşitli alanlarda yapılmış başarılı çalışmalar vardır. Bu uygulamaların birçoğunda metrik olmayan kameralar kullanılmıştır. Uygulamadan uygulamaya değişmekle birlikte, kamera parametreleri biliniyor ya da bilinmiyor olabileceği gibi, kalibrasyonun yapılıp yapılmayacağı da yine uygulamaya ve uygulamadan beklenen duyarlığa göre değişmektedir. Zaman parametresinin de eklenmesiyle, kullanılacak görüntülerin elde ediliş zamanına göre statik ve ya dinamik görüntülerden söz edilebilir. Statik görüntü iki görüntünün elde edilmesi arasında zaman farkının fazla olduğu yani birkaç saniyeden birkaç yıla hatta daha fazla süreye denk gelen görüntülerdir. Görüntülerin elde edilmesi arasındaki sürenin saniyeden küçük olması (1:10 sn ya da daha küçük) durumunda dinamik görüntülerden söz edilebilir ki bu da video görüntülerine karşılık gelmektedir (Doğan ve Temiz, 2008). Video görüntülerinin kullanımı her geçen gün artmaktadır ve hayatımızdaki yeri genişlemektedir. Hemen her alışveriş merkezinde, resmi binalarda, büyük şehirlerde kavşaklarda, otobanlarda vs. güvelik kameraları ve MOBESE (Mobil Elektronik Sistem Entegrasyonu) kameraları olarak bilinen video kameralar yerleştirilmiş durumdadır.

MOBESE, Türkiye'de ilk olarak İstanbul Emniyet Müdürlüğü bünyesinde faaliyete geçirilen "Kent Bilgi ve Güvenlik Sistemi"dir (Url–1). Daha sonra hemen hemen tüm büyük şehirlerde de benzer uygulamalar faaliyete geçirilmiştir.

Bu kameralardan, güvenlikten, trafik yoğunluna, hatta çalıntı ya da suça karışmış araçların tespit edilmesine kadar birçok alanda faydalanılmakta ve dünya çapında da bu konuda birçok çeşitli daldan bilimsel araştırmalar devam etmektedir. Ortalama trafik akış hızının ve yoğunluğunun belirlenmesi (Dailey ve diğ. 2000), trafikteki araçların türlerine göre sınıflandırılması (Shin ve diğ. 2006), seyir halindeki araçların hızlarının belirlenmesi (Maduro ve diğ. 2008), (Doğan ve diğ. 2010a), çalışılmış ve çalışılmakta olan konulardan bazılarıdır.

Bu tez çalışmasında da, kazaya karışan araçların kaza öncesi hızlarının belirlenmesi, kurallara uymayan araçların tespit edilmesi, kaza olması halinde, kaza sahnesinin üç boyutlu model koordinatlarının elde edilmesi konuları araştırılmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Çalışmanın amacı, dijital kameralarla elde edilen video görüntülerinden hareketli nesnelerin çıkarılması, hareket yörüngelerinin ve hızlarının belirlenmesidir. Bunun için metrik olmayan amatör CCD video kameralar kullanılmıştır. Bu kameralar yardımıyla elde edilen video görüntülerindeki hareketli nesnelerin hareket yörüngeleri ve hızları belirlenmiştir. Resimler yardımıyla üç boyutlu modellerin oluşturulması bilinen bir konudur. Ancak mevcut yaklaşımlarda bu problemlerin çözümü için öncül bilgilere gerek duyulmaktadır. Bu tez kapsamında geliştirilen sistemde ise, kullanılacak olan video görüntülerin kendilerinden başka öncül bilgiye gerek duyulmadan nesnelerin üç boyutlu model koordinatları elde edilmektedir.

Uygulama için, tez yazarı tarafından C++ programlama dili kullanılarak geliştirilen yazılım sistemi kullanılmıştır. Burada, kazaya karışan araçların kaza öncesi hızlarının belirlenmesi, kurallara uymayan araçların tespit edilmesi, kaza olması halinde, kaza sahnesinin üç boyutlu model koordinatlarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca geliştirilen sistemin farklı uygulamalarda da; örneğin sigortacılık sektörü için araçlarda meydana gelen hasarın belirlenmesi ve ekspertiz raporlarının nesnel bir şekilde hazırlanması gibi farklı ve geniş birçok alanda kullanılması da mümkündür. Bunun yanı sıra olağan trafik akışında hız sınırına uymayan araçların tespit edilmesi de geliştirilen sistemle mümkündür.

Mevcut trafik uygulamalarında, trafiğin yoğun olduğu bölgelerde kameraların yanı sıra kameralarla birlikte radar cihazları da kullanılmakta ve hız sınırını aşan araçlar radar ile belirlenip görüntüleri kayıt edilmektedir. Yani kameralar mevcut sistemlerde, sadece görüntü kaydı için kullanılmaktadır.

Tez kapsamında geliştirilen sistemde ise radar cihazlarına gerek olmadan, araçların hızları sadece kameralarla belirlenmekte, bu sayede kameraların sadece görüntü kayıt cihazı olarak kullanılması yerine bunların radar işlevini yerine getirecek niteliklere sahip olması sağlanmış ve radar cihazlarına gereksinimi ortadan kaldırarak bu tür sistemlerin maliyetlerinin düşürülmesi için önemli katkılar ortaya koymaktadır. Bu nedenle, tez kapsamında geliştirilen sistemin gerçek hayatta kullanılması için gerekli olan desteğin sağlanması konusunda çalışmalarımız devam etmektedir.

Tez çalışmasında geliştirilen sistemle gerçekleştirilen ve tezin uygulama bölümünde gerçekleştirilen örnek uygulamalarda, çözünürlüğü 640x480 piksel, odak uzaklığı 4 mm olan düşük fiyatlı amatör dijital kameralar kullanılmıştır. Görüleceği gibi, amatör kameraların kullanılması durumunda bile, geliştirilen sistemle yüksek doğruluk ve duyarlıkta işlemler gerçekleştirilebilmektedir. Gerçek uygulamalarda, istenirse pek tabii ki daha gelişmiş kameraları da geliştirilen sistemle birlikte kullanmak mümkündür. Ancak bu çalışmada, olabildiğince düşük özellikli ve fiyatı son derece düşük olan kameralar tercih edilerek, bu basit donanımlarla bile mümkün olduğunca yüksek doğruluk elde edilmeye çalışılmış ve ümit edilen bu doğruluk düzeyleri elde edilmiştir. Bu sayede, geliştirilen sistemin gerçek hayatta uygulanması için gereken yatırım maliyetleri, olabilecek en düşük düzeye getirilmiştir. Sistemin geliştirilmesi için tez çalışması kapsamında izlenen yöntemler, geliştirilen yaklaşımlar, bunların analizleri ve örnek uygulamaları sistemin yeteneklerini de ele alacak şekilde tezin ilerleyen bölümlerinde detaylıca anlatılmıştır.

Sonraki bölümde, konuyla ilgili bu zamana kadar yapılan çalışmalar, bu çalışmalarda kullanılan modeller ve yaklaşımlar, bu yaklaşımların sorunları ve iyi yönleri detaylıca incelenmiş ve bu tez çalışmasında, incelenen mevcut literatürdeki sorunlar da göz önünde bulundurularak çözümler üretilmiştir.

1.2 Literatür Özeti

Video görüntüleri söz konusu olduğundan görüntü kareleri arasında zaman farkı nedeni ile olası değişimlerin beklenmesi kaçınılmazdır. Bunun için öncelikle değişim belirleme yöntemleri araştırılmıştır. Aynı bölgenin farklı zamanlarda elde edilmiş görüntülerindeki değişimin belirlenmesi işi, video görüntülerinden (Collins ve diğ. 2000) uzaktan algılamaya (Zhong ve diğ. 2006) tıp alanından (Bosc ve diğ. 2003) endüstriyel uygulamalara (Fang ve diğ. 2003) birçok alanda kullanılmaktadır. Bir uzay bölgesindeki değişimlerin belirlenmesi için, bölgenin en az t1 ve t2 gibi iki farklı zamanda çekilmiş görüntüleri olmalıdır. Burada t1 ve t2 zamanları arasında geçen Δt süresinin uzunluğuna bağlı olarak, görüntüler statik ve dinamik görüntüler olarak gruplandırılabilir. Buna göre Δt süresi bir saniyeden daha kısa ise, dinamik görüntülerden söz edilebilir ki bu video görüntülerine karşılık gelmektedir. Diğer taraftan Δt aralığının daha büyük olduğu durumlarda, örneğin günlerle veya daha uzun sürelerle ifade edilmesi durumunda, görüntülere statik görüntüler adı verilebilir. Farklı zamanlarda çekilen uydu veya hava görüntüleri bu anlamda statik görüntülerdir. Bu yaklaşıma göre, statik ve dinamik görüntülerden değişimlerin belirlenmesi için kullanılacak teknikler, bu görüntülerin geometrik ve fiziksel doğalarına göre değişiklik gösterecektir. Her ne kadar uygulama alanlarına göre farklılık gösterse de, değişim belirlemede birçok ortak işlem adımı ve çekirdek algoritmalar vardır.

Değişim belirlemede sıklıkla kullanılan yöntemlerden bir tanesi, basit fark alma yöntemidir. Bu yöntem uygulanması basit ve işlem yükü en az olan değişim belirleme yöntemidir. Yöntem temel olarak iki görüntüdeki karşılıklı piksellerin parlaklık değerlerinin farkının alınması işlemidir. Burada değişimi tanımlayan karar sınırı yani eşik değeridir. Eşik değer uygulamadan uygulamaya farklılık gösterir ve genellikle deneysel olarak seçilir (Doğan ve Temiz, 2008).

Rosin (1998), değişim belirlemede eşik değerin belirlenmesi için yaptığı çalışmada, ya gürültü ya da sinyali modellemekte ve buna bağlı olarak model ya konumsal ya da yoğunluk dağılımı karakteristiklerinden oluşmaktadır.

Buna göre dört yöntem araştırmışlardır. Bu yöntemler; 1) gürültü yoğunluk dağılımlarının kullanıldığı normal model, 2) sinyal yoğunluklarının iki görüntüdeki lokal yoğunluk dağılımlarının karşılaştırılması yaklaşımıyla test edilmesi, 3) gürültünün konumsal özelliklerinin Poisson dağılımıyla modellenmesi yaklaşımı, 4) sinyalin konumsal özelliklerinin sabit Euler sayılarıyla ifade edilmesi yaklaşımı. Rosin, çalışmasında bu yöntemlerden son ikisinin diğerlerine göre daha iyi sonuç verdiğini belirtmiştir.

Bir diğer değişim belirleme yöntemi de anlamlılık ve hipotez testlerinin kullanıldığı yöntemdir. Değişim belirleme algoritmaları çoğunlukla, karar kuralı bir istatistiksel hipotez testine dayanır. Bir x pikselinde değişim olup olmadığına karar vermek için iki hipotez ileri sürülür: H_0 sıfır hipotezi ve H_1 seçenek hipotezi. H_0, değişim olmadığı varsayımını, H_1 ise değişim olduğu varsayımını ifade eder (Doğan ve Temiz, 2008). Hipotezleri oluştururken, görüntülerdeki piksel değerlerini etkileyen aydınlatma, gölgelendirme ve başka nedenlerle oluşan gürültülerin modellenmesi, değişim belirleme işinin doğruluğunu artırır. Bu fiziksel olguların etkisi de düşünülerek önerilmiş hipotez belirleme teknikleri vardır. Örneğin, benzerlik oranları testi, olasılıklı karışık modeller, en küçük tanım uzunluğu vb. yaklaşımlar verilebilir, (Radke ve diğ., 2005).

Aach ve Kaup (1995), yaptıkları çalışmada, geleneksel birçok değişim belirleme algoritmasında, eşik değerin lokal olarak bir görüntüde belirlendiğini ve bunu global olarak tüm görüntülere uygulamanın hatalı sonuçlar vereceğini ileri sürmüşlerdir. Bu problemin üstesinden gelebilmek için değişim maskesindeki olası değişikliklerin öncül olarak belirlenmesi gerektiğini söylemişler ve bunun içinde Bayesian algoritmaları kullanmışlardır. Bu teknikte eşik değeri, görüntü içeriğine göre değişmektedir ve değişim belirleme performansı artmaktadır. Ancak özellikle video görüntüleri düşünüldüğünde, her resmin yeniden taranması ve eşik değerin belirlenmesi gerektiğinden işlem yükünü arttırmaktadır.

Zhonq ve Wang (2006), farklı zamanlı uydu görüntülerindeki değişimin belirlenmesi için ana bileşenler analizi yöntemi yerine bağımsız bileşenler analizi yöntemini kullanmışlardır. Bu yaklaşımda görüntülerde değişen ve değişmeyen bölgelerin birbirinden bağımsız olması gerektiği düşünülmüştür.

Buna göre farklı zamanlarda elde edilen görüntülerde değişmeyen bölgelerin korelasyonu yüksek, değişen bölgelerin ise düşük olur. Farklı zamanlı görüntülerin her biri, değişen ve değişmeyen fiziksel sinyal kaynaklarının bir karışımı olarak düşünülebilir. Bu durumda bağımsız bileşenler analizi ile görüntüler arasındaki değişimin belirlenmesi mümkündür. Sentetik ve gerçek verilerle yapılan uygulamalarda, farklı zamanlarda elde edilen uzaktan algılama görüntülerinde bağımsız bileşen analizinin etkili sonuçlar verdiği görülmektedir (Zhonq ve Wang, 2006).

Dinamik görüntülerde, izleyici sistemin ve izlenen nesnenin gerçek zamanlı değişimleri belirlenmelidir. Değişim için mutlaka bir hareketin var olması gerektiği düşünülürse, bu hareketler (ve neden oldukları değişimler) optik akış, deforme olan modeller ve çok ölçekli modeller yaklaşımlarıyla daha etkin bir şekilde belirlenebilir.

Bu yöntemlerden yaygın olan bir tanesi arka fonun modellenmesidir. Arka fon çıkarıldıktan sonra geriye sadece ön fondaki nesneler kaldığından, bu teknikle analitik görüntü çıkarma yaklaşımı birlikte kullanılarak, izlenen sahnedeki değişimler etkin bir şekilde belirlenebilmektedir. Arka fon çıkarma teknikleri, iteratif ve iteratif olmayan teknikler olmak üzere ikiye ayrılabilir. İteratif olmayan tekniklerden en yaygın olanları, görüntü karelerinin farklarının alınması, medyan filtreler, lineer kestirim filtreleri, iteratif teknikler ise, yaklaşık medyan filtreler, Kalman filtreleri ve Mixture of Gaussians sayılabilir (Hu ve diğ. 2008a). Fon çıkarma teknikleri için Toyama ve diğ. (1999) incelenebilir. Arka fonun çıkarılması için önce arka fonun hangi nesnelerden oluştuğunun öğrenilmesi gerekir. Bir kez arka fon öğrenilince, diğer video çerçevelerinden gerçek zamanlı olarak bu arka fon çıkarılır. Çıkarma işleminden sonra geriye sadece ön fondaki nesneler kalır (Doğan ve Temiz, 2008).

Gerçek zamanlı video ve görüntü işleme uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir diğer teknik de kenar belirleme algoritmalarıdır. Kenar belirlemenin genel olarak amacı, bir görüntüdeki verilerin önemli oranda azaltılarak ilgilenilen nesne ya da nesnelere ait olma olasılıkları yüksek olanlarının kalmasını sağlamaktır.

Birçok kenar belirleme algoritması vardır; Roberts, Prewitt ve Sobel kenar bulma operatörleri gibi. Ancak bu tip gradyen hesabı gerektiren algoritmalar görüntüdeki gürültülere karşı çok duyarlıdır. Bu yüzden görüntüdeki olası gürültülerin etkisini en aza indirecek bir algoritmaya ihtiyaç vardır (Neon ve Hazanchuk, 2005). 1986 yılında John Canny tarafından bulunan Canny algoritması bu problemi büyük oranda çözmektedir. Çok eski bir yöntem olmasına rağmen halen kullanılmaktadır ve neredeyse standart kenar bulma algoritması haline gelmiştir (Url–2). Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında işlem yükünün fazla olmasına rağmen, birçok farklı uygulamada diğer metotlara göre daha iyi sonuçlar vermektedir (Rangarajan, 2010).

Metrik olmayan amatör kameralar kullanıldığında, iç yöneltme elemanları olarak adlandırılan, kameranın odak uzaklığı, asal noktanın koordinatları ve mercek distorsiyonları bilinmemektedir. Görüntüler yardımıyla üç boyutlu model oluşturabilmek için kameranın dış yöneltme elemanları olarak bilinen kameranın konumunun da belirlenmesi gerekmektedir. İç ve dış yöneltme elemanları ayrı ayrı belirlenebileceği gibi, aynı zamanda da (örneğin demet dengelemesi) belirlendiği çok sayıda teknik vardır (Khalil, 2002). En etkin yöntemlerden biri olan demet dengelemesi 1950'li yıllarda geliştirilmiş ve 1970'li yıllarda self-kalibrasyon olarak genişletilmiştir (Beyer, 1991). Geometrik kamera kalibrasyonun amacı, kameranın iç yöneltme elemanlarını belirlemek ve perspektif geometriden, sistematik sapmaları modellemektir (Dörtsel ve diğ. 2003).

Khalil (2002) çalışmasında yöneltme elemanlarının belirlenmesi için mevcut yöntemleri araştırmış ve üç grup altında toplamıştır. Birinci grup yöntemler özellikle fazla hassasiyetin beklenmediği, direkt lineer dönüşüm gibi yaklaşık tekniklerdir. İkinci grupta ise kontrol noktalarının kullanıldığı, aynı doğru üzerinde bulunma (collinearity), aynı düzlem üzerinde bulunma (coplanarity) kısıtlamalarını kullanan yöntemler ve üçüncü grup olarak da görüntüdeki geometrik kısıtlamalardan yararlanılan yöntemler olarak sıralanmıştır.

İç yöneltme elemanları görüntü çiftlerinden belirlenebileceği gibi, tek bir görüntüden de belirlenebilir. Heuvel (1999) çalışmasında tek bir görüntüden iç yöneltme elemanlarının belirlenmesi konusunda araştırma yapmıştır. Bunun için görüntüdeki doğruların paralellik ve diklik şartlarından yararlanmıştır.

Heuvel (2003) bir diğer çalışmasında, tek görüntü yerine farklı açılardan çekilmiş beş adet görüntü kullanmıştır. Burada kalibrasyon parametrelerini hesaplamak için görüntülerde çıkarılan doğrulardan yararlanmıştır. Bu çalışmasında gerekli olan, doğruların paralellik ve diklik bilgilerini, görüntülerdeki kaçış noktasını belirleyerek otomatik olarak elde etmiştir. Heuvel çalışmalarında elde ettiği sonuçlarda, çizgisel fotogrametri olarak da bilinen bu yöntemin mimari alanda başarıyla kullanılabileceğini belirtmiştir. Heuvel (1998) önceki çalışmalarında mimari fotogrametrisinde kaçış noktası belirleme yöntemlerine değinmiş ve birbirine dik üç eksendeki doğruları manüel olarak seçerek kaçış noktalarını dengelemeli olarak bulmuştur. Benzer bir çalışma Rother (2000) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada da mimaride, binaların modellerinin oluşturulmasında, görüntüde bulunacak üç farklı yöndeki doğrularla kaçış noktalarının belirlenmesi konusu araştırılmıştır.

Kaçış noktası geometrisi ve kaçış doğruları, kalibrasyon parametrelerinin hesaplanmasında sık olarak kullanılmaktadır. Beardsley ve Murray (1992) çalışmalarında projektif bir düzlemdeki paralel doğrulardan yaralanarak iç yöneltme elemanlarını belirlemişlerdir. Ancak gözlemlenen düzlem üzerinde işaretlenmiş bilinen dört nokta kullanılmıştır. Wang ve Tsai (1991) kaçış doğruları yardımıyla kamera kalibrasyonunu araştırmışlardır. Düzlemdeki kaçış doğrularını bulabilmek için altıgen bir kalibrasyon hedefi kullanmışlardır. Kaçış doğrularının geometrik projektif ilişkilerinden yararlanarak iç ve dış yöneltmeleri tek görüntüden belirlemişlerdir.

Guillou ve diğ. (2000) tek görüntüden üç boyutlu model elde edebilmek için yaptıkları çalışmada, kalibrasyon adımı için kalibrasyon hedefi ya da noktalar kullanmamışlardır. Ancak onlar da dört varsayımda bulunmuşlardır: Kullanılacak tek görüntü en az iki kaçış noktası içermeli, kullanılacak doğrunun gerçek uzunluğu bilinmelidir. Asal noktanın, görüntünün merkezinde olduğu ve piksel boyutunun kullanıcı tarafından sabit olarak kabul edildiği varsayımları yapılmıştır. Kullandıkları yöntemde öncelikle odak uzaklığı belirlenmekte, sonra dönüklük matrisi ve ötelemeler hesaplanmaktadır.

Masoud ve Papanikolopoulos (2004) benzer bir yöntemi trafik görüntülerinde kullanmışlardır. Onlar da trafik sahnesinde doğal olarak bulunan paralel çizgileri, yol genişliklerini ve çizgi uzunluklarını öncül bilgi olarak kullanmışlar ve yöneltme elemanlarını kaçış noktaları yardımıyla hesaplamışlardır.

Benzer bir çalışma Grammatikopoulos ve diğ. (2005) tarafından yapılmıştır. Trafik sahnesinin kullanıldığı çalışmada, kameranın sadece yol ekseninde dönüklüğünün olduğu, yol düzleminin tam düz olduğu varsayılmıştır. Ölçek sorununun giderilebilmesi için yol üzerinde, bilinen bir doğrunun ölçüldüğü varsayımları yapılmıştır.

Kaçış noktası geometrisi, görüntüdeki perspektif etkilerin giderilmesi için de sık olarak kullanılmaktadır. Özellikle yol, bina gibi insan yapımı düzlemsel nesnelerin görüntülerinin geometrik olarak düzeltilmesinde kaçış noktaları otomatik olarak belirlenebilir ve metrik rektifikasyonu yapılır (Liebowitz ve Zisserman, 1998).

Maduro ve diğ. (2008), araç hızlarının bulunması için yaptıkları çalışmada, görüntülerin rektifikasyonunu, yol düzlemindeki paralel doğrular yardımıyla elde ettikleri kaçış noktasından yararlanarak, projektif dönüşümle yapmışlardır.

Görüntülerin rektifikasyonu ve görüntü çiftlerinin normal konuma getirilmesi için kullanılan bir diğer yöntem de epipolar geometridir. Epipolar geometri, her bir resmin nesne uzayı ile ilişkisini ifade ettiği gibi, resimlerin birbiriyle bağıl ilişkilerini de aynı anda ifade eder. Epipolar geometri ile ilgili kapsamlı bir çalışma Zhang (1998) tarafından yapılmıştır. Pollefeys ve diğ. (1999a) görüntünün rektifikasyonu için yaptıkları çalışmada, epipolar geometriden yararlanmışlardır. Kullandıkları algoritma olası her türlü kamera geometrisinde çalışabilmektedir. Görüntünün rektifikasyonu için tek ihtiyaç temel matrisin bulunmasıdır. Temel matris bir görüntüdeki nokta ve epipolar doğru ile diğer görüntüdeki karşılıkları arasındaki dönüşümü tanımlar.

Papadimitriou ve Dennis (1996), yapay ve gerçek görüntüler üzerinde epipolar geometri kullanarak yaptıkları rektifikasyonda başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Morgan ve diğ. (2004) epipolar geometrinin temel amacının normalize edilmiş görüntüler elde etmek olduğunu ve düzeltilmiş görüntüde y paralaksı bulunmadığını belirtmişlerdir. Epipolar geometriyi uydu görüntülerinin rektifikasyonunda kullanmışlardır. Chen ve diğ. (2001) benzer bir çalışmada, görüntüler üzerinde epipolar kısıtlamalar yardımıyla temel matrisi bulup, görüntülerin rektifikasyonunu yapmışlardır.

Kaçış noktalarının resim düzlemindeki konumlarının belirlenmesi için öncelikle doğruların otomatik olarak çıkarılması gerekir. Bunun için bu çalışmada Hough dönüşümü kullanılmıştır.

Hough dönüşümü, sayısal görüntülerdeki doğruların ve diğer şekillerin tespiti işlemi için sıkça kullanılan bir görüntü analiz algoritmasıdır (Safran ve Öktem, 2007).

Grammatikopoulos ve diğ. (2005), yaptıkları çalışmada doğruları belirlemek için Canny algoritmasını kullanmakla yetinmişlerdir. Onoguchi (2009) trafikte araçların belirlenmesi için yaptığı çalışmada yatay ve düşey doğruları bulmak için bir diğer kenar bulma operatörü olan Sobel operatörünü kullanmıştır. Cathey ve Dailey (2005) ise görüntüye öncelikle Sobel operatörü uygulayarak kenarları belirlemiş ve daha sonra bu görüntü üzerinde Hough dönüşümü uygulayarak doğruları bulma yoluna gitmişlerdir. Shin ve diğ. (2006) çalışmalarında benzer şekilde görüntüye önce sobel operatörü uygulamışlar daha sonra ikili (binary) görüntü üzerinde Hough dönüşümü uygulayarak görüntüdeki doğruları belirlemişlerdir. Uygulamalarında gereğinden fazla sayıda doğru buldukları için bu doğruları azaltmak amacıyla kullanılabilecek yöntemler önermişlerdir.

Video görüntülerinde hareketli nesnelerin, örneğin trafikteki araçların, izlenmesi için farklı yöntemler vardır. Beymer ve diğ. (1997) bu yöntemleri dört başlık altında toplamışlardır. Birincisi üç boyutlu model tabanlı izlemedir. Bu yöntemde nesnelerin ve yörüngelerinin yüksek doğrulukta belirlenebildiğini, ancak geometrik nesne modelinin detaylı olarak belirlenemeyeceğini bildirmişlerdir. Ayrıca işlem yükü yüksek bir yöntemdir. Bir diğer yöntem olan bölge tabanlı izlemede, araçların her biri için su damlası (blob) denilen bölgeler tanımlanmaktadır. İşlemin uygulanması için arka plan çıkarma teknikleri kullanılabilir. Bu teknik özellikle trafiğin yoğun olmadığı durumlarda iyi çalışmaktadır. Kalabalık trafiğin olduğu ve araçların birbirinin önünü kapattığı durumlarda kullanılamamaktadır. Başka bir yöntem aktif kontur tabanlı izleme yöntemidir. Bu yöntemde de nesneler aktif kontur modelleriyle (snake'lerle) izlenmektedir. Koller ve diğ. (1994) de bu yöntemi kullanmıştır. Ancak uygulaması zor bir yöntemdir. Son teknik ise özellik tabanlı izlemedir. Nesnelerin tamamı yerine nesne üzerinde belirlenen nokta ya da çizgilerin izlenmesini esas alır. Yöntemin en büyük avantajı nesnelerin tamamı yerine kısmi parçalarının görünmesi durumunda da izlemeye olanak vermesidir. Nokta ve çizgilerin izlenmesi için Kalman filtreleme teknikleri kullanılmaktadır.

Onoguchi (2009) çalışmasında, üst üste gelen araçların belirlenmesi için araçlar üzerinde belirlediği yatay çizgileri izlemiştir. Bunun dışındaki uygulamaların birçoğunda bölge tabanlı izleme yöntemleri kullanılmıştır.

Melo ve diğ. (2004), Yoneyama ve diğ. (2005) yaptıkları çalışmada bu yöntemi uygulamışlardır. Jung ve Ho (1999) çalışmalarında benzer bir şekilde bölge tabanlı izleme yöntemini kullanmışlar, ancak faklı olarak, belirledikleri bölgenin orta noktasını izlemek için kullanmışlardır. Kanhere ve diğ. (2005), Sand ve Teller (2004), Doğan ve diğ. (2010a-b) özellik tabanlı izleme yöntemini kullanmışlardır. Görüntüdeki hareketli nesneler üzerinde seçilen noktalarla nesneleri izlemişlerdir.

Video görüntülerinde, hareket eden nesnelerin izlenmesi için, nesne üzerinde ardışık video çerçevelerinde izlenmesi gereken noktalar otomatik olarak seçilmelidir. İzlenecek nesneler üzerinde noktaların seçilmesi için bir yöntem nesne üzerindeki köşe noktaların seçilmesidir (Doğan ve diğ. 2010a). Köşe tanımı için en sık kullanılan tanım, (Harris ve Stephens, 1988)'de verilmiştir. Shi ve Tomasi (1994), köşelerin daha iyi tanımlanması için, iki özdeğerin küçük olanının, önceden tanımlanan minimum bir eşik değerle karşılaştırılmasının ve bu eşikten büyük olması durumunda köşenin var olduğuna karar vermenin, diğerine göre daha etkin bir yöntem olduğunu göstermiştir. Bu yöntem gerçekten de, Harris'in yöntemine göre daha etkin sonuçlar vermektedir. Köşeleri bulmak için faklı yöntemler de kullanılabilir. Örneğin Förstner operatörü, Moravec operatörü vs. bu amaçla kullanılabilir (Doğan ve diğ. 2010a). Pollefeys (1999b–2004), Sand ve Teller (2004) çalışmalarında noktaların otomatik olarak seçilmesinde Shi ve Tomasi'nin yöntemini kullanmışlardır.

Video görüntülerinde seçilen noktaların izlenmesi içinde literatürde genel olarak iki yöntem kullanılmaktadır. Maduro ve diğ. (2008) araç hızlarının belirlenmesi için yaptıkları çalışmada, Kalman filtresi ile izleme yöntemini kullanmışlardır. Kalman ile bir sonraki resim karesindeki yerini yaklaşık olarak belirleyip, görüntüden çıkardıkları bloklarla modeli düzeltmişlerdir. Bu yöntemle araç hızını %2 doğrulukla belirlediklerini bildirmişlerdir. Li-Qun ve diğ. (1992), Jung ve Ho (1999), Melo ve diğ. (2004) ve Hu ve diğ. (2008b) çalışmalarında, nesneleri izlemek için Kalman filtreleme tekniğini kullanmışlardır.

Video görüntülerinde seçilen noktaların izlenmesi için kullanılan bir diğer yöntem de optik akış yöntemidir. Bu konuda ilk çalışmalardan biri Horn ve Schunk (1981) tarafından yapılmıştır. Lucas ve Kanade (1981) tarafından yöntem geliştirilmiştir.

Optik akış basit olarak piksel parlaklık değerlerinin korunduğunu varsayar. Diğer optik akış yöntemleri problemi ek şartlar getirerek çözmeye çalışır. Bu konudaki en popüler yöntemlerden bir tanesi Lucas-Kanade optik akış yöntemidir (Radgui ve diğ. 2008). Sand ve Teller (2004), Sinha ve diğ. (2009), Doğan ve diğ. (2010a–2010b) ve Santoro ve diğ. (2010) çalışmalarında, nesneleri izlemek için bu yöntemi kullanmışlardır. Lucas-Kanade optik akış yönteminde, optik akış yöntemine ek olarak, iki çerçeve görüntüsü arasında, noktanın konumunun çok az (birkaç piksel) değişeceği ve noktanın, komşu pikselleriyle birlikte davrandığı varsayımları yapılmıştır.

Üç boyutlu model oluşturma teknikleri son birkaç yılda büyük gelişmeler göstermiştir ve bu konudaki çalışmalar, tek nesneler ya da özel uygulama alanları (örneğin mimari gibi) üzerine yoğunlaşmıştır (Remondino, 2006). Üç boyutlu model oluşturmak için farklı yaklaşımlar vardır. Bulardan en iyi bilinenlerinden bir tanesi lazer tarayıcılarla nesnenin üzerine projekte edilen ışının yansımalarının gözlenmesiyle üç boyutlu modellerin elde edilmesidir. Bir diğer yaklaşım da, bu işlem için görüntülerden yararlanmaktır (Pollefeys ve Van Gool, 2002a). Günümüzde resimlerden veya video görüntülerinden doğru ve tam otomatik olarak üç boyutlu model oluşturma halen uğraşılan bir problemdir. Geliştirilen mevcut üç boyutlu model oluşturma tekniklerinin birçoğu, yarı otomatik yöntemlere dayanmaktadır ve güvenilir tam otomatik yöntemlerin geliştirilmesi işi fotogrametri ve bilgisayarla görme alanlarının temel araştırma konularından birisi olmuştur (Remondino, 2006).

Üç boyutlu model oluşturabilmek için görüntülerin kullanıldığında üç durumdan söz edilebilir. Birincisi, tek bir kamera ile farklı konumlardan elde edilen görüntüler kullanarak, ikincisi stereo kameralar yardımıyla elde edilen görüntüler kullanılarak ve son olarak tek bir görüntü kullanarak üç boyutlu model elde etmektir.

1.3 Kullanılan Yöntemler

Önceki bölümde, daha önce yapılan çalışmalara ve kullandıkları yöntemlere yer verilmiştir. Bu yöntemler sonraki bölümlerde daha geniş kapsamlı olarak ele alınacaktır. Bu bölümde tez çalışması kapsamında kullanılan yöntemlere yer verilmiştir.

Video görüntülerinin işlenmesi ve gerekli hesaplamaların gerçek zamanlı olarak yapılabilmesi için en önemli kısıtlama zamandır. Kullanılacak yöntemlerin hesap yükü açısından en az olanları tercih edilmelidir. Ancak bu tercih yapılırken de sonuç ürünlerin doğruluğundan ödün verilmemelidir. Bu tez çalışması kapsamında da bu iki uç koşul en dengeli bir şekilde sağlanmaya çalışılmıştır. Örneğin kenarların belirlenmesi için kullanılan yöntemlerden birisi olan Sobel operatörü, Canny algoritmasına göre daha hızlı çalışmaktadır. Ancak, bir görüntüde daha iyi sonuçlar veren Sobel operatörü, bir başka görüntüde gürültüler nedeniyle hatalı sonuçlar verebilmektedir. Bu tür bir hatanın önüne geçebilmek için, işlem yükü fazla olmasına rağmen, Canny algoritması tercih edilmiştir. Tersi bir durum olarak, sonraki bölümlerde ele alınacak değişim belirleme yöntemlerinden, diğer yöntemler daha iyi sonuçlar vermesine rağmen, tez kapsamında ve uygulamalarda elde edilen deneyimler sonucunda, basit fark alma yönteminin yeterli olduğu görülmüş ve bu yöntem tercih edilmiştir.

Nesnelerin hızlarını belirlerken, görüntüdeki perspektif etkilerin giderilmesi ve görüntülerin düzeltilmesi için görüntülerdeki geometrik şartlardan yararlanılmıştır. Rektifikasyon işlemi, görüntülerin tamamı yerine, sadece ilgili nesneler üzerinde seçilen noktalara uygulanmış ve işlem zamanı büyük oranda düşürülmüştür. Benzer şekilde, görüntüler üzerinde yapılacak işlemler görüntünün tamamı yerine seçilen ilgi alanı (ROI-Region of Interest) üzerinde yapılmıştır. Uygulamadan uygulamaya değişmekle beraber, ilgi alanı belirlenirken, kameranın çekim açısına göre, ya yol düzlemi ilgi alanı olarak belirlenmiş, ya da kaçış noktasından yararlanılarak görüntüdeki perspektif etki nedeniyle uygulama açısından anlamsız hale gelen bölgeler kesilmiştir.

Hareketli nesnelerin izlenmesi için en sık kullanılan yöntemlerden biri olan özellik tabanlı izleme yöntemi tercih edilmiştir. Nesne üzerindeki özellikli noktaların seçilmesi için Shi ve Tomasi (1994) tarafından bulunan yöntem kullanılmıştır. Seçilen noktaların sonraki görüntü karesinde izlenmesi ve hareket vektörlerinin belirlenmesi için Lucas-Kanade optik akış yöntemi kullanılmıştır.

Kameraların kalibrasyonu için kullanılmakta olan yöntemler araştırılmış ve tez kapsamında kullanılan yöntem geniş bir şekilde anlatılmıştır.

Stereo kameraların kalibrasyonu sonrasında epipolar geometri yardımıyla temel matris hesaplanmış ve stereo görüntü çiftlerinin rektifikasyonu yapılmıştır. Stereo rektifkasyonu yapılıp görüntü satırları aynı hizaya getirilen görüntüler, görüntü eşleştirme tekniği yardımıyla eşleştirilmiş ve farklılık haritaları oluşturulmuştur.

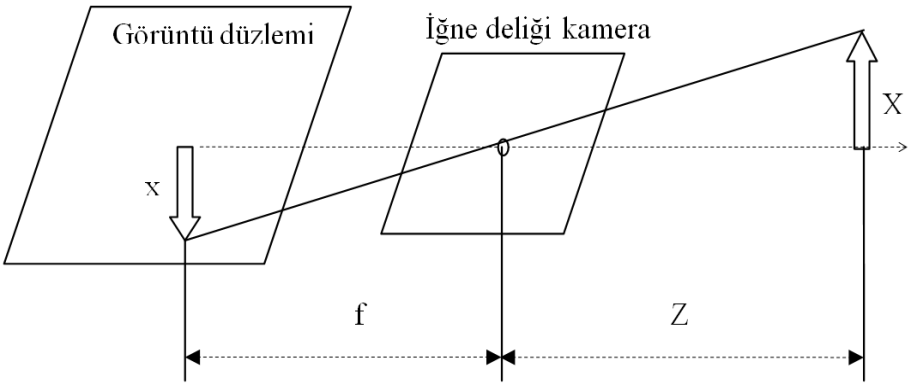
Görüntülerin eşleştirilmesi için farklı yöntemler vardır. Temel olarak özellik tabanlı ve alan tabanlı olmak üzere iki grup yöntemden söz edilebilir. Çalışmada alan tabanlı yöntemlerden mutlak farkların toplamı yöntemi, karelerinin farkları toplamı (Sum of Squared Difference, SSD) yöntemine göre daha hızlı çalıştığı için tercih edilmiştir. Graph Cut algoritması blok eşleştirme algoritmalarına göre çok daha iyi sonuçlar vermesine rağmen işlem yükü fazla olduğu için tercih edilmemiştir.

Son olarak, elde edilen farklılık haritalarından da derinlik haritaları ve üç boyutlu model koordinatları (point clouds) elde edilmiştir.

2. VİDEO KAMERA GEOMETRİSİ VE KALİBRASYON

2.1 Kamera Geometrisi

En basit kamera modeli iğne deliği (pinhole) kamera modelidir. Bu basit modelde nesneden gelen tek bir ışık ışını, tek bir noktadan geçerek görüntü düzlemine izdüşer. Şekil 2.1'de böyle bir model gösterilmektedir.



Şekil 2.1 : İğne deliği kamera modeli.

İğne deliği kamera modeli üç boyutlu nesnenin görüntü üzerinde iki boyutlu olarak haritalanmasını tanımlar. Projeksiyon merkezinin görüntü düzleminden f kadar uzakta olduğu düşünülürse, nesnenin gerçek boyu ile görüntü düzlemi üzerindeki boyu;

$$x = \frac{f.X}{Z} \qquad \textbf{(2.1)}$$

bağıntısı ile tanımlanabilir.

Tüm projektif görüntüleme işlemi ve iğne deliği kamera modeli, homojen koordinatlar kullanılarak lineer olarak şu şekilde gösterilebilir;

$$x = \mathbf{P}.X \qquad \textbf{(2.2)}$$

Burada **P**, projektif kamera matrisidir ve şu şekilde tanımlanır;

$$\mathbf{P} = \mathbf{M}.[\mathbf{R}.\mathbf{t}] \qquad \textbf{(2.3)}$$

burada **R** 3x3 lük dönüklük matrisi, **t** 3x1'lik öteleme vektörü ve **M**, 3x3 lük kamera matrisidir ve aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} f_x & s & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \textbf{(2.4)}$$

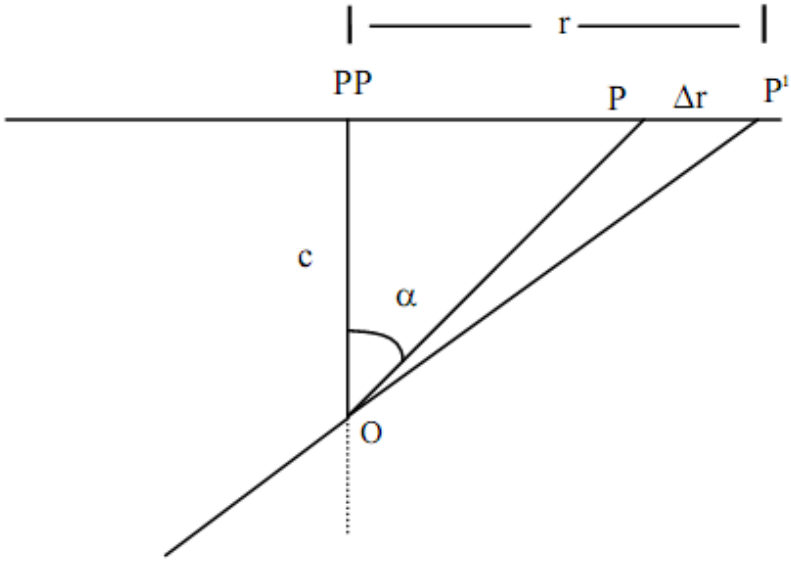
burada, f_x, f_y kameranın x ve y yönlerindeki ayrı ayrı odak uzaklığı, s eğrilik parametresi, x_0 ve y_0 ise ana noktanın piksel cinsinden koordinatlarıdır (Remondino, 2006). Çalışmada matris ve vektörler koyu harflerle temsil edilmiştir.

İğne deliği kamera modeli, gerçek kamera modelinin yaklaşık tanımlamasıdır. Nesne ve görüntü koordinatları arasındaki ilişkinin matematiksel olarak tanımlanmasını kolaylaştırır. Ancak yüksek doğruluğun beklendiği durumlarda kullanılamaz. Bunun için bu model bazı düzeltmeler ve distorsiyon parametrelerinin eklenmesiyle genişletilir (Heikkila, 1997). Bu distorsiyonların önemli bölümünü lens distorsiyonları oluşturmaktadır.

2.1.1 Lens Distorsiyonları

Teorik olarak lenslerin distorsiyonsuz oldukları varsayılabilir. Ancak gerçekte hiçbir lens kusursuz değildir. Temel olarak iki önemli lens distorsiyonu vardır. Işınsal (radial) ve teğetsel (tangential) lens distorsiyonları.

Işınsal distorsiyon her mercek sisteminde mutlaka bulunur ve görüntü noktalarının ideal konumlarından, ışınsal olarak yer değiştirmesine neden olur. Havadan gelen ışın cam ortama girer ve tekrar havaya çıkar. Bu sırada ışın yolunda kırılmalar meydana gelir. Mercek sisteminde kullanılan cam maddenin kusursuz bir şekilde homojen olarak dağıtılamayacağı gerçeği düşünülürse, ışınsal distorsiyonun her mercek sisteminde mutlaka var olacağı anlaşılmış olur. Işın yolundaki yer değiştirme, ana noktadan itibaren doğru bir hat üzerinde simetrik olduğu varsayılabilir (Temiz ve Doğan, 2005).



Şekil 2.2 : Işınsal distorsiyon.

Şekil 2.2'de Δr ışınsal distorsiyon olup P ideal konumu ile P' gerçek konum arasındaki ışınsal uzaklıktır. Bunun matematiksel ifadesi ;

$$\Delta r = r - c.\tan\alpha \qquad \textbf{(2.5)}$$

olarak yazılabilir. Burada r görüntü noktasının ana noktadan uzaklığını, α açısı ise alan açısını ifade etmektedir. Işınsal mercek distorsiyonu,

$$r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2 \qquad \textbf{(2.6)}$$

olmak üzere,

$$\Delta x_r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 \qquad \Delta y_r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 \qquad \textbf{(2.7)}$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada K_i katsayıları ışınsal distorsiyon katsayılarıdır.

Sensör sistemlerinde genellikle bir mercek yerine birden çok mercek kullanılır ve bu merceklerin her birinin odak noktalarının aynı doğru üzerinde olması gerekir. Ancak bunları kusursuz bir şekilde yerleştirmek mümkün değildir. Bunun sonucunda da teğetsel distorsiyon oluşur. Bir başka nedeni de lenslerin görüntü düzlemine tam olarak paralel olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu distorsiyon ;

$$\Delta x_d = (r^2 + 2\bar{x}^2)P_1 + 2\bar{x}\bar{y}P_2 \qquad \Delta y_d = 2\bar{x}\bar{y}P_1 + (r^2 + 2\bar{y}^2)P_2 \qquad \textbf{(2.8)}$$

şeklinde ifade edilir. Burada teğetsel distorsiyon katsayıları Pi ile gösterilmiştir. (Dörtsel ve diğ., 2003).

Görüntüleme sistemlerinde bunlardan başka daha birçok distorsiyon bulunmaktadır, ancak hiçbirinin etkisi ışınsal ve teğetsel distorsiyon kadar önemli olmadığından bunlar göz ardı edilmiştir.

2.2 Kalibrasyon Yöntemleri

Metrik olmayan amatör kameralar kullanıldığında, iç yöneltme elemanları olarak adlandırılan, kameranın odak uzaklığı, asal noktanın koordinatları ve önceki bölümde anlatılan mercek (lens) distorsiyonları bilinmemektedir. Görüntüler yardımıyla üç boyutlu model oluşturabilmek için, ek olarak kameranın dış yöneltme elemanları olarak bilinen kameranın konumunu belirleyen parametrelerin de belirlenmesi gerekmektedir.

Kalibrasyon yöntemleri üç grup altında toplanabilir: Birinci grup yöntemler özellikle fazla hassasiyetin beklenmediği, direkt lineer dönüşüm gibi yaklaşık tekniklerdir. Bu yöntemler özellikle iteratif işlemler için gerekli değerlerin hesaplanmasında da kullanılır. İkinci grupta aynı doğru üzerinde bulunma (collinearity - kolinearite), aynı düzlem üzerinde bulunmayı (coplanarity) kullanan nokta tabanlı yöntemler ve üçüncü grup olarak da fotogrametricilerin ilgilerinin giderek arttığı, görüntüdeki kısıtlamalardan ve projektif geometrinin ilkelerinden yararlanılan yöntemlerdir (Khalil, 2002). Bu yöntemlere kısaca değinilecek ve tez çalışması kapsamında kullanılan yöntem açıklanacaktır.

2.2.1 Direk Lineer Dönüşüm

Direk lineer dönüşüm (Direct Linear Transformation, DLT) ile dönüşüm parametreleri hakkında öncül bilgi (yaklaşık değerler) olmaksızın çözüm yapılabilir ve metrik olmayan kameraların kullanıldığı projeler için çok uygundur. Matematiksel modeli, kolinearite eşitliklerinden elde edilen, görüntü ve nesne koordinatları arasındaki direk lineer ilişkidir. Bu model **(2.9)**'daki iki kolinearite eşitliklerinden oluşur.

$$x - \delta x = \frac{(L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4)}{(L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1)}$$
$$y - \delta y = \frac{(L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8)}{(L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1)} \qquad \textbf{(2.9)}$$

Burada x ve y görüntü koordinatları, X, Y, Z nesne koordinatları δ_x ve δ_y sistematik hatalardır (lens distorsiyonları). Bilinmeyen 11 parametre (L_i), en az 6 kontrol noktasıyla iteratif olarak çözülebilir (Khalil, 2002.) δ_x ve δ_y parametrelerinin de hesaplanması durumunda ek 5 parametre (lens distorsiyonları) daha eklenecek bilinmeyen sayısı 16 ya yükselecektir. Bu durumda da çözüm için aynı düzlem üzerinde olmayan en az 8 kontrol noktası gerekmektedir.

2.2.2 Demet dengelemesi

Demet dengelemesi çok yönlü, esnek ve yüksek doğruluklu bir çözüm tekniğidir. Işın demetlerinin ortak noktalarda kesiştirilmesi esasına dayanır. Bu dengelemenin en büyük özelliği, matematik modelin genişletilebilir olmasıdır. Bu olanak sayesinde, dengeleme modeli içine bazı ek parametreler ve yardımcı ölçüler katılabilir. Matematiksel modeli kolinearite (doğrusallık) şartına dayanır. Kolinearite, bir resim noktasının, perspektif merkezinin ve resim noktasının nesne uzayındaki karşılığının aynı ışın demeti üzerinde olması gerektiğinin matematiksel ifadesinden ibarettir. Kolinearite şartı ideal görüntüleme geometrisini tanımlar ve pratikte gerçekleşmesi olanaksızdır. Kolinearite eşitlikleri **(2.10)**'da verilmiştir.

$$x = x_0 - c\frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = \frac{Z_x}{N}$$
$$y = y_0 - c\frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + d_{33}(Z - Z_0)} = \frac{Z_y}{N} \qquad \textbf{(2.10)}$$

İdeal görüntüleme geometrisinden fiziksel sapmalar, kolinearite eşitliklerinde sistematik hatalara neden olurlar. Bunlar (lens distorsiyonları) kolinearite eşitliklerine eklenerek hesaplanabilirler. Genişletilmiş kolinearite eşitlikleri;

$$f_x = (x - x_0) = -c\frac{Zx}{N} + \Delta x \qquad f_y = (y - y_0) = -c\frac{Zy}{N} + \Delta y \qquad \textbf{(2.11)}$$

şeklindedir. Burada Δx ve Δy ek parametrelerin (lens distrorsiyonları) fonksiyonlarıdır. Algılayıcı geometrisinin fiziksel gerçekliğini arttırmak için resim koordinatlarına getirilecek düzeltmeler olarak da düşünülebilir (Beyer, 1991).

(2.11) denklemindeki bilinmeyenler en küçük kareler yöntemine göre çözülür. Demet dengelemesi teorik açıdan oldukça duyarlı sonuçlar verebilen, fonksiyonel modelin en iyi geliştirildiği hesaplama tekniğidir. Dengelemenin doğruluğu, kontrol noktalarının doğruluğu, dağılımı ve sayısı ile yakından ilgilidir. Kontrol noktalarının ve resim sayılarının arttırılması ile dengelemenin serbestlik derecesi arttırılabilir. Buna karşın işlem yükü ve hesaplama zamanı oldukça fazladır.

2.2.3 Video görüntülerinin kalibrasyonu

Video görüntülerinin kalibrasyonu için işlem yükü nispeten az yöntemler kullanmak gerekmektedir. Bu bölümde, kullanılan yöntem ve matematik modeli geniş bir şekilde anlatılacaktır.

Düzlemsel homografi (homography), bir düzlemden diğer düzleme projektif dönüşümü tanımlar. Bu dönüşümü matris çarpımlarıyla açıklamak mümkündür. Homojen koordinatlar kullanarak, nesne noktası Q ve görüntüdeki karşılığı q şu şekilde yazılabilir;

$$\mathbf{Q} = [X \quad Y \quad Z \quad 1]^T \text{ ve } \mathbf{q} = [x \quad y \quad 1]^T \qquad \textbf{(2.12)}$$

Q ve **q** kullanılarak homografi (**H**);

$$\mathbf{q} = s.\mathbf{H}.\mathbf{Q} \qquad \textbf{(2.13)}$$

şeklinde yazılabilir. Burada s keyfi bir ölçek faktörüdür. **H** fiziksel dönüşümü ve kamera (iç yöneltme) matrisini içermektedir.

Fiziksel dönüşüm matrisi **R** dönüklük matrisi ve t öteleme vektöründen oluşmaktadır. Bunlar homojen koordinatlarla tek bir matrisle aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\mathbf{W} = [\mathbf{R}.\mathbf{t}] \qquad \textbf{(2.14)}$$

Burada **R** dönüklük matrisi;

$$\mathbf{R} = [\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{r}_3] \tag{2.15}$$

şeklindedir. Kamera matrisi **(2.4)** yerine yazılırsa;

$$\mathbf{q} = \mathbf{s}.\mathbf{M}.\mathbf{WQ} \tag{2.16}$$

halini alır. Buradan homografi matrisi **H**;

$$\mathbf{H} = \mathrm{s}.\mathbf{M}[\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{t}] \tag{2.17}$$

olarak yazılabilir. **H** 3x3 lük matristir. Bu matris 3x1 lik vektörlerle gösterilirse;

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \quad \mathbf{h}_2 \quad \mathbf{h}_3] = \mathrm{s}.\mathbf{M}[\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{t}] \tag{2.18}$$

halini alır. Buradan ,

$$\mathbf{h}_1 = \mathrm{s}.\mathbf{M}.\mathbf{r}_1 \text{ ya da } \mathbf{r}_1 = \lambda.\mathbf{M}^{-1}.\mathbf{h}_1$$

$$\mathbf{h}_2 = \mathrm{s}.\mathbf{M}.\mathbf{r}_2 \text{ ya da } \mathbf{r}_2 = \lambda.\mathbf{M}^{-1}.\mathbf{h}_2 \qquad (\lambda = \frac{1}{s} \text{ olmak üzere }) \tag{2.19}$$

$$\mathbf{h}_3 = \mathrm{s}.\mathbf{M}.\mathbf{t} \text{ ya da } \mathbf{t} = \lambda.\mathbf{M}^{-1}.\mathbf{h}_3$$

elde edilir. Dönüklük vektörleri ortogonal olduğundan,

$$\mathbf{r}_1^{\mathrm{T}}.\mathbf{r}_2 = 0 \tag{2.20}$$

yazılabilir. $\mathbf{r}_1$ ve $\mathbf{r}_2$ yi yerlerine yazarsak ;

$$\mathbf{h}_1^{\mathrm{T}}.\mathbf{M}^{-\mathrm{T}}.\mathbf{M}^{-1}.\mathbf{h}_2 = 0 \tag{2.21}$$

elde edilir. Dönüklük vektörlerinin,

$$\mathbf{r}_1^{\mathrm{T}}.\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_2^{\mathrm{T}}.\mathbf{r}_2 \tag{2.22}$$

şartında $\mathbf{r}_1$ ve $\mathbf{r}_2$ yi yerlerine yazarsak ;

$$\mathbf{h}_1^{\mathrm{T}}.\mathbf{M}^{-\mathrm{T}}.\mathbf{M}^{-1}.\mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2^{\mathrm{T}}.\mathbf{M}^{-\mathrm{T}}.\mathbf{M}^{-1}.\mathbf{h}_2 \tag{2.23}$$

elde edilir.

$$\mathbf{B} = \mathbf{M}^{-\mathbf{T}}.\mathbf{M}^{-\mathbf{1}} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.24)}$$

olarak yazılırsa, **B** matrisinin kapalı form çözümü;

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{f_x^2} & 0 & \frac{-c_x}{f_x^2} \\ 0 & \frac{1}{f_y^2} & \frac{-c_y}{f_y^2} \\ \frac{-c_x}{f_x^2} & \frac{-c_y}{f_y^2} & \frac{c_x^2}{f_x^2} + \frac{c_y^2}{f_y^2} + 1 \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.25)}$$

olur**. B** matrisi simetrik olduğu için 1x6 boyutunda vektör olarak yazılabilir.

$$\mathbf{h}_i^{\mathbf{T}}\mathbf{B}\mathbf{h}_j = \mathbf{v}_{ij}^{\mathbf{T}}\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{h_{i1}h_{j1}} \\ \mathbf{h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1}} \\ \mathbf{h_{i2}h_{j2}} \\ \mathbf{h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3}} \\ \mathbf{h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3}} \\ \mathbf{h_{i3}h_{j3}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{12} \\ B_{22} \\ B_{13} \\ B_{23} \\ B_{33} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \quad \textbf{(2.26)}$$

Buradaki v_{ij}^T tanımlamasını kullanarak, iki kısıtlamamız,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{12}^{\mathbf{T}} \\ (\mathbf{v_{11}} - \mathbf{v_{22}})^{\mathbf{T}} \end{bmatrix} \mathbf{b} = 0 \quad \textbf{(2.27)}$$

şeklinde yazılabilir. Uygulama içerisinde n tane resim çekildiyse her biri için,

$$\mathbf{V}\mathbf{b} = 0 \quad \textbf{(2.28)}$$

yazılır. Burada **V** matrisi, 2.n x 6'lık matris ve **b** vektörü, $\mathbf{b} = [B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33}]^T$ şeklindedir. **B** matrisi için kapalı form çözüm yapılırsa iç yöneltmeler;

$$\lambda = B_{33} - (B_{13}^2 + c_Y(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}))/B_{11} \quad \textbf{(2.29)}$$

olmak üzere,

$$f_x = \sqrt{\frac{\lambda}{B_{11}}}$$

$$f_y = \sqrt{\frac{\lambda B_{11}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}}$$

$$c_x = -\frac{B_{13} f_x^2}{\lambda} \qquad \textbf{(2.30)}$$

$$c_y = \frac{B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}$$

şeklinde hesaplanabilir. Öteleme ve dönüklükler daha önce bahsedilen homografi şartından,

$$\mathbf{r_1} = \lambda.\mathbf{M^{-1}}.\mathbf{h_1}$$

$$\mathbf{r_2} = \lambda.\mathbf{M^{-1}}.\mathbf{h_2} \qquad \textbf{(2.31)}$$

$$\mathbf{r_2} = \mathbf{r_1} \times \mathbf{r_2}$$

$$\mathbf{t} = \lambda.\mathbf{M^{-1}}.\mathbf{h_3}$$

şeklinde bulunur. Burada ölçek parametresi λ, ortonormallik şartından,

$$\lambda = \frac{1}{\left\|\mathbf{M^{-1}h_{11}}\right\|} \qquad \textbf{(2.32)}$$

şeklinde bulunmuştur (Bradsky ve Kaehler, 2008).

3. GÖRÜNTÜLERDEKİ DEĞİŞİMLERİN BELİRLENMESİ

Aynı bölgenin farklı zamanlarda elde edilmiş görüntülerindeki değişimin belirlenmesi işi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Video görüntülerinden (Collins ve diğ. 2000; Wren ve diğ. 1997) uzaktan algılamaya (Huertas ve Nevatia, 2000; Zhong ve Wang, 2006) tıp alanından (Bosc ve diğ. 2003; Doğan ve Altan, 2003) endüstriyel uygulamalara (Fang ve diğ. 2003) birçok alanda kullanılmaktadır. Bir uzay bölgesindeki değişimlerin belirlenmesi için, bölgenin en az t_1 ve t_2 gibi iki farklı zamanda çekilmiş görüntüleri olmalıdır. Burada t_1 ve t_2 zamanları arasında geçen Δt süresinin uzunluğuna bağlı olarak, görüntüler statik ve dinamik görüntüler olarak gruplandırılabilir. Buna göre Δt süresi bir saniyeden daha kısa ise, dinamik görüntülerden söz edilebilir ki bu video görüntülerine karşılık gelmektedir. Diğer taraftan Δt aralığının daha büyük olduğu durumlarda, örneğin günlerle ya da daha uzun sürelerle ifade edilmesi durumunda, görüntülere statik görüntüler adı verilebilir. Farklı zamanlarda çekilen uydu veya hava görüntüleri bu anlamda statik görüntülerdir. Bu yaklaşıma göre, statik ve dinamik görüntülerden değişimlerin belirlenmesi için kullanılacak teknikler, bu görüntülerin geometrik ve fiziksel doğalarına göre değişiklik gösterecektir. Her ne kadar uygulama alanlarına göre farklılık gösterse de, değişim belirlemede birçok ortak işlem adımı ve çekirdek algoritmalar vardır. Bu bölümde bu bakış açısıyla, değişim belirleme teknikleri incelenmiştir. Konuyla ilgili detaylı bir inceleme (Radke ve diğ. 2005) tarafından yapılmıştır. Çalışmadaki esas problem farklı zamanlarda görüntüleri elde edilmiş bir bölgedeki değişimlerin bu görüntülerle belirlenmesi işidir.

Aranılan değişim, ilk görüntüde bulunmayan bir nesnenin ikinci görüntüde bulunması, var olan bir nesnenin yok olması ya da hareket etmesi, arka fondan ayrılması veya nesnede oluşan şekil değişiklikleri olabileceği gibi nesnelerin renklerinde meydana gelen değişimler de olabilir. Bunun yanı sıra görüntülenen bölgenin aydınlatma şartlarında oluşan farklılıklar ve izleme sisteminin kendisinde oluşan farklılıklar da bir değişim nedeni olabilir (klasik uygulamalarda bu son iki değişim türü, istenilmeyen veya aranılmayan değişimlerdir). Uygulamalarda,

yukarıda özetlenen değişimlerden hangisi veya hangilerinin belirleneceği konusu değişiklik gösterebilir. Bu nedenle, değişim belirleme işinde ilk yapılması gereken şey hangi değişim veya değişim türlerinin belirleneceğine karar vermektir. Daha sonra, eğer istenmiyorsa, aydınlatmadan kaynaklanan değişimler ve gürültülerden kaynaklanan farklılıklar giderilmelidir. Bunun için radyometrik düzeltme ve görüntü filtreleme teknikleri kullanılır (Temiz ve diğ., 2005). Bu adımlardan sonra görüntülerin algılayıcı sistemden, atmosferik şartlardan vb. nedenlerden oluşan geometrik hataları giderilerek görüntüler çakıştırılır. Görüntü çakıştırma problemi değişim belirlemede en önemli işlem adımlarından birisidir. Değişim belirlemenin doğruluğu doğrudan çakıştırma işleminin doğruluğuna bağlıdır (Radke ve diğ., 2005). Son adım olarak da geometrik ve radyometrik hatalardan arındırılan ve çakıştırılan görüntülerdeki değişimlerin belirlenmesi işlemine geçilir.

3.1 Değişim Belirlemenin Tanımı

Değişimlerin görüntülerden belirlenmesi işi, zamana bağlı değişimleri incelenecek olan nesne veya uzay bölgesinin görüntüleri ile gerçekleştirilir. Problemin çözümü için, sadece nesnenin farklı zamanlarda elde edilmiş görüntüleri vardır. Bazı durumlarda, nesneyi gözlemleyen sistemlerin özellikleri ile ilgili başka bilgiler de var olabilir. Kavramsal olarak görüntü, bir fiziksel sürecin sonucunda, nesnenin görünümünü oluşturan bilgilerin belli bir düzende dizilişinden oluşmuş görüntü verilerinin kümesi olarak düşünülebilir. Sonuç görüntü verileri, görüntüleme veya izleme sürecindeki bütün etkilerin son halini içermektedir. Bu fiziksel süreçte ortaya çıkan her türlü değişiklik, sonuç görüntü verilerinde büyük veya küçük miktarlarda mutlaka bir değişime yol açar.

Geleneksel değişim belirleme uygulamalarında asıl amaç, bu değişimlerden sadece nesneye ait olanlarını bulmaktır. Örneğin izleme sürecinde, nesneyi aydınlatan ışık kaynaklarındaki değişim, atmosferik şartlarda oluşan değişimler, izleme sisteminin fiziksel durumu vs. gibi nedenlerle oluşan değişimler nesneye ait olmadıkları için nesne değişimi olarak yorumlanmamalıdır. Ancak ne var ki, nesne dışındaki fiziksel süreçle ilgili bu değişimler de, sonuç görüntü verilerinde piksel değerlerinin değişmesine neden olmaktadır. Başka bir ifadeyle, t_i anında elde edilen bir nesne görüntüsü, $t_{i+\Delta t}$ anında elde edilen aynı nesnenin görüntüsü ile hiçbir zaman bire-bir eşit olamaz.

Bu durumda, bu farkı ortaya çıkaran durumun gerçekten nesnenin kendisinde oluşan değişimden mi yoksa sadece izleme sürecinin fiziksel parametrelerinde ortaya çıkan değişimlerden mi kaynaklandığının bulunması gerekir. Değişim olgusunu tanımlayan bağımsız parametrelerin doğrusal olmayan doğası nedeniyle, değişim belirleme problemi eksik yapılıdır. Diğer taraftan, görüntü veya görüntüleme olgularının doğasının da eksik yapılı olması, problemin çözümünün hiç de kolay olmadığını göstermektedir.

Değişim belirleme probleminde, temel yaklaşım şöyledir: İşlenecek görüntü dizisi, değişim belirleme fonksiyonuna giriş görüntüsü olarak sunulur. Sonuçta değişim alanlarını gösteren ikili görüntü elde edilir. Bu ikili görüntü, $B : R^l \rightarrow [0,1]$ şeklinde ifade edilir ve bu görüntüye değişim maskesi (change mask) adı verilir. Bu ifadede, gri düzey görüntüler için l=1, renkli RGB görüntüler için l=3 olur. Değişim maskesi, son görüntüdeki değişen bölgeleri tanımlayan bir ikili görüntüdür. Değişim maskesi, $\{I_1, \ldots I_m\}$ farklı zamanlarda elde edilen görüntü dizisi olmak üzere matematiksel olarak şöyle ifade edilebilir:

$$B(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & \text{eger } I_m \text{ görüntüsünün } \mathbf{x} \text{ pikselinde önemli degisim varsa,} \\ 0, & \text{aksi halde.} \end{cases} \qquad \textbf{(3.1)}$$

Bu yaklaşıma göre, artık değişim belirleme problemi, değişim maskesinin bulunması problemine dönüşmektedir. Bu maske, matematiksel olarak I_m görüntülerinin piksellerinin parlaklık ve renk değerlerine bağlı olarak belirlendiği için, gerek nesnedeki değişimlerin gerekse izleme sürecinin fiziksel doğasındaki değişimlerin piksel değerlerine etkisinin ortaya konması gerekir. Kameranın hareketi, yani kamera konumunun değişmesi, nesnenin görünümünün değişmesine neden olur. Bu değişim, nesnenin doğasında bir değişimin oluştuğu anlamına gelmez. Benzer şekilde, ortamın ışık koşullarında oluşan bir değişim yine, nesnenin görünümünde bir değişime yol açar. Bu değişim de nesnenin doğasında bir değişimin oluştuğu anlamına gelmez. Bu ve buna benzer değişimlerde, B(**x**) maskesi değişmemelidir. B(**x**) değişim maskesi, sadece gerçekten de nesnenin doğasında bir değişim varsa değişmelidir.

Değişim belirleme probleminde, değişim maskesini belirlemek için maskenin kullanılacağı uygulamada aranılan değişimin niteliği önemlidir.

Eğer amaç, izleme sürecinde değişen ışık ve aydınlatma koşullarında oluşan değişimlerin belirlenmesi problemini çözmek ise, bu durumda nesne ve gözlemci konumundaki değişimlerin hesaba katılmaması gerekir. Benzer şekilde, amaç sadece gözlemcinin değişimlerini belirlemek ise, o zaman da aydınlatma koşulları ve nesnelerde oluşan değişimlerin ihmal edilmesi gerekir. Amaç sadece, nesnelerde oluşan değişimleri belirlemek ise, bu durumda da aydınlatma koşulları ve gözlemcide oluşan değişimlerin hesaba katılmaması gerekir.

Görüntülerden aydınlatma ve ışık farklılıklarının giderilmiş olduğu ideal bir durum düşünülürse, her iki görüntüdeki netlik, bulanıklık, gölge etkileri vs. aynı olmalıdır. Bu tespite göre, eğer bu etkiler bir şekilde ortadan kaldırılsaydı, değişim maskesinde bu kaynakların etkileri bulunmazdı. Öyleyse, karşılaştırılacak görüntü çiftlerinde bütün piksellerin parlaklık değerleri analiz edilerek ya sırf istatistiksel yaklaşımlarla ya da mümkünse fiziksel sürecin matematik modeliyle her iki görüntünün radyometrik değerleri eşdeğer sayılabilecek bir duruma getirilirse, bu etkiler ortadan kaldırılmış sayılabilir. Bunun için gölge modelleri, histogram dönüşüm teknikleri, spektral bileşen analizleri vb. yöntemler kullanılabilir.

Alışılagelmiş uygulamaların çoğunda (hemen hepsinde), sadece nesnelerde oluşan değişimlerin belirlenmesi esastır. Örneğin uzaktan algılamada, yeryüzünde oluşan zamana bağlı değişimlerin belirlenmesi istenir. Bu durumda yeryüzü nesnedir. Burada sadece nesnelerdeki değişimlerin belirlenmesi problemi ele alınmıştır.

3.2 Görüntülerden Nesnelerdeki Değişimin Belirlenmesi

Görüntülerden sadece nesnelerin doğasındaki değişimlerin belirlenmesi istendiğinde; ideal durumda değişim maskesi sadece nesne değişimlerini içermelidir. Başka bir ifadeyle, gerek ışık ve aydınlatma şartlarında oluşan değişimler, gerekse gözlemcinin konumundaki değişimler değişim maskesinde yer almamalıdır. Değişim maskesinin elde edilebilmesi için t_i ve $t_{i+\Delta t}$ zamanlarında elde edilmiş olan görüntülerin birbiriyle karşılaştırılması gerekir. İki görüntüyü karşılaştırmak demek, karşılıklı piksellerin parlaklık değerlerini karşılaştırmak demektir. Örneğin ideal durumda, farklı iki görüntüye ait olan iki pikselin parlaklık değeri birbirine eşitse, bu iki pikselin temsil ettiği uzay noktasının zamanla değişmediği sonucu çıkarılabilir.

Bu karşılaştırma için örneğin basit fark alarak değişim belirleme tekniği kullanılabilir. Ancak burada bu fark alma işlemini gerçekleştirebilmek için, fark alınacak piksellerin uzayda aynı geometrik noktaya karşılık gelmesi şarttır ve piksel değerlerinin de farklı olmaması gerekir. Piksel değerlerinin farklı olmaması demek, farklı iki zamanda görüntüler elde edilirken, ışık, aydınlatma, nesne yüzeyinden ışınlarının yansıma enerjileri vs. gibi niteliklerin farklı olmaması demektir. Pratikte bu mümkün olmaz. Öyleyse, değişim maskesi elde edilmeden önce, karşılaştırılacak görüntülerin yukarıda bahsedilen geometrik ve radyometrik farklılıklarının giderilmesi gerekir. Görüntülerden geometrik farklılıkların giderilmesi sayesinde, her iki görüntünün piksellerinin, uzayda aynı noktalara karşılık gelmesi sağlanmış olur. Bunun için birçok farklı teknik kullanılabilir. Bu geometrik işlemler, görüntü çakıştırma, görüntü eşleştirme ve veri kaynaştırma alanlarının konusudur. Görüntülerin radyometrik farklılıklarının giderilmesi işlemi ile farklı zamanlarda elde edilen görüntülerin aydınlatma, yansıtma ve diğer bozucu sinyallerin etkileri ortadan kaldırılır veya en aza indirilir. Radyometrik düzeltme yaparken, nesneleri oluşturan sınırların ve kenarların anlamlı düzeyde bozulmaması gerekir.

3.2.1 Statik görüntülerden nesnelerdeki değişimlerin belirlenmesi

Statik görüntülerden değişimlerin belirlenmesi için, farklı zamanlarda elde edilen görüntüler karşılaştırılır. Görüntülerin karşılaştırılması için ya görüntülerin karşılıklı piksel parlaklık değerleri birbirinden çıkarılır ya da birbirine bölünür. Daha sonra tespit edilen farklılıkların gerçekten nesnelerde oluşan değişimden mi yoksa artık hatalardan mı kaynaklandığına karar vermek için istatistiksel karar verme yöntemleri kullanılır. Bu bölümde, statik görüntülerde değişim belirleme için kullanılan temel yöntemler kısaca anlatılmıştır.

3.2.1.1 Basit fark alma yöntemi

Bu yöntem uygulanması basit ve işlem yükü en az olan değişim belirleme yöntemidir, halen birçok uygulamada sıkça kullanılmaktadır. Yöntem temel olarak iki görüntüdeki karşılıklı piksellerin parlaklık değerlerinin farkının alınması işlemidir. Bu işlem;

$$F(x) = I_1(x) - I_2(x) \qquad \textbf{(3.2)}$$

şeklinde yapılır. Burada $I_1(x)$ ve $I_2(x)$ farkı alınacak görüntüler, $F(x)$ de fark görüntüsüdür. Fark alınırken sonuç piksel değerinin negatif çıkma olasılığı vardır. Bu durumda iki seçenek mevcuttur. Negatif çıkan fark değeri ya sıfıra eşitlenir ya da mutlak değeri alınır. Bu iki tercih, uygulamalarda farklı sonuçlar elde etme olanağı sağlamaktadır. Fark alma yönteminde değişim maskesi, fark değerlerinin bir eşik değerle karşılaştırılması ile de tanımlanabilir. Bu durumda maske;

$$G(x) = \begin{cases} F(x) \geq \tau, & 1 \\ F(x) < \tau, & 0 \end{cases} \qquad \textbf{(3.3)}$$

şeklinde ifade edilir. Şekil 3.1'de basit fark alma yöntemine bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : İlk görüntü(solda), ikinci görüntü(ortada) ve fark görüntüsü (sağda).

Sonuçta elde edilen G(x) maskesi, aranan B(x) maskesine eşittir ve bu maske ikili görüntüdür. Burada τ değişimi tanımlayan karar sınırı yani eşik değeridir. Eşik değer uygulamadan uygulamaya farklılık gösterir ve genellikle deneysel olarak seçilir. Eşik değerin seçimi de önemlidir, çünkü seçilecek değer bazı nesnelerin ya da nesne özelliklerinin kaybolmasına neden olabilir. Rosin (1998), değişim belirlemede eşik değerin belirlenmesi için yaptığı çalışmada, hem gürültü hem de sinyallerin modellendiği ve hem konumsal hem de parlaklık dağılım özelliklerinin modellendiği dört yöntem araştırmıştır. Bu yöntemler, gürültü parlaklık dağılımlarının kullanıldığı normal model, sinyal şiddetlerinin iki görüntüdeki lokal parlaklık dağılımlarıyla test edildiği model, Poisson dağılımıyla gürültünün konumsal özelliklerinin modellenmesi ve sinyalin konumsal özelliklerinin sabit sayıda bölge olarak modellendiği yöntemlerdir.

Rosin, çalışmasında bu yöntemlerden son ikisinin diğerlerine göre daha iyi sonuç verdiği belirtmiştir.

Aach ve Kaup (1995), yaptıkları çalışmada, geleneksel birçok değişim belirleme algoritmasında, eşik değerin lokal olarak bir görüntüde belirlendiğini ve bunun global olarak tüm görüntülere uygulamanın hatalı sonuçlar vereceğini ileri sürmüşlerdir. Bu problemin üstesinden gelebilmek için değişim maskesindeki olası değişikliklerin öncül olarak belirlenmesi gerektiğini söylemişler ve bunun içinde Bayesian algoritmaları kullanmışlardır. Bu teknikte eşik değeri, görüntü içeriğine göre değişmektedir ve değişim belirleme performansı artmaktadır. Ancak özelikle video görüntüleri düşünüldüğünde, her resmin yeniden taranması ve eşik değerin belirlenmesi gerektiğinden işlem yükünü arttırmaktadır.

3.2.1.2 Anlamlılık ve hipotez testleri

Birçok değişim belirleme algoritmasında karar kuralı bir istatistiksel hipotez testine dayanır. Bir x pikselinde değişim olup olmadığına karar vermek için iki hipotez ileri sürülür: H_0 sıfır hipotezi ve H_1 seçenek hipotezi. H_0, değişim olmadığı varsayımını, H_1 ise değişim olduğu varsayımını ifade eder. ($I_1(x)$, $I_2(x)$) görüntü çifti, bir rastgele vektör olarak düşünülür. $P(I_1(x), I_2(x) \mid H_0)$ ve $P(I_1(x), I_2(x) \mid H_1)$ koşullu olasılık yoğunluk fonksiyonlarıyla, x pikselindeki değişimi en iyi tanımlayan hipotezler seçilir. Olası değişimler genelde lokal bir bölgedeki piksel gruplarında ortaya çıktığından, değişim kararları x'in piksel komşuluklarındaki küçük piksel grupları ile verilir.

Hipotezleri oluştururken, görüntülerdeki piksel değerlerini etkileyen aydınlatma, gölgelendirme ve başka nedenlerle oluşan gürültülerin modellenmesi, değişim belirleme işinin doğruluğunu artırır. Bu fiziksel olguların etkisi de düşünülerek önerilmiş hipotez belirleme teknikleri vardır. Örneğin, benzerlik oranları testi, olasılıklı karışık modeller, en küçük tanım uzunluğu vb. yaklaşımlar verilebilir, (Radke ve diğ., 2005).

3.2.2 Dinamik görüntülerden nesnelerdeki değişimlerin belirlenmesi

Dinamik görüntülere örnek olarak video görüntüleri veya gerçek zamanlı izleme yapan görme sistemleriyle elde edilen görüntüler verilebilir. Video görüntüleri, bir bölgenin (veya sahnenin) bir saniyede 30-40 kez resminin çekilmesiyle elde edilmiş ardışık resim dizileri şeklinde düşünülebilir. Gerçek zamanlı izleme sistemleri de benzer şekilde düşünülebilir. Eğer izleme sistemi, gözlemini yaparken elde ettiği görüntüleri kaydediyorsa, kaydedilen görüntüler video görüntü dizisi oluşturur. Yani

kaydedilen dizi, tam olarak video görüntüsüdür. Eğer sistem kayıt yapmadan işlem yapıyorsa; televizyon, otomatik navigasyon sistemleri vs. gibi, bu durumda da yine saniyede 30-40 resim çerçevesi dijital olarak elde diliyor ancak kaydedilmiyor demektir. Bu şekilde elde edilen dinamik görüntülerden değişim belirleme işi, özellikle gerçek zamanlı izleme sistemlerinde, izleme işlemi devam ederken gerçekleştirilmelidir. Yani bir taraftan dijital görüntü verileri toplanırken, diğer taraftan toplanan veriler eş zamanlı olarak işlenip değişimler belirlenmelidir. Video görüntüsü şeklinde kaydedilmiş görüntülerde ise, veriler kayıtlı olduğu için iki seçenek vardır. Ya her bir çerçeve çifti statik görüntü olarak düşünülüp işlenir ya da dinamik olarak video oynatılırken işlenir. İlk seçenek, söz konusu olan video görüntüleri olduğu için anlamsız bir yaklaşım olacaktır. Çünkü dinamik olarak elde edilmiş görüntüler, bu görüntülerin dinamik doğası ile ilgili bilgilerin çıkarılması için dinamik olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla, dinamik görüntülerden nesne değişimlerinin belirlenmesi işi, izleme süreci ile eş zamanlı olarak gerçekleştirilmesi gereken bir iştir. Bu durumda, gerçek zamanlı olarak belirlenen değişimler, gerçek zamanda icra edilecek bir başka iş için kullanılacaktır.

Dinamik görüntülerden nesne değişimlerinin gerçek zamanlı olarak belirlenebilmesi için, işlemlerin çok hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekir. Bunun için en iyi yol, değişim belirleme işini gerçekleştirecek matematiksel modellerin çiplere yazılmasıdır. Bunun için gömülü sistemler ve mikroişlemcilerle ilgili konular bilinmelidir. Ayrıca, problemin çözümü için en etkin ve en hızlı algoritmalar geliştirilmelidir. Paralel işlemciler veya paralel işleme teknikleri de gerçek zamanlı işler için kullanılabilir.

Dinamik görüntülerle değişim belirleme problemi, uzaktan algılama gibi statik görüntülerin kullanıldığı uygulamalardan daha farklı uygulamalarda kullanılabilir. Dinamik görüntülerde, işlemlerin gerçek zamanlı yapılmasını sağlayacak teknik yöntemlerden başka, kullanılacak yaklaşım tarzları ve modeller de farklıdır.

Eğer izleyici kameranın konumu sabitse, bu durumda klasik fark alma yöntemi ve diğer statik yöntemler etkin bir şekilde kullanılabilir. Ancak, kamera sisteminin sabit olduğu güvenlik kamerası sistemlerinde, ek yöntemlere de gerek duyulur. Örneğin, belli zaman aralıklarında, değişim belirleme sistemine gelen görüntülerde, bir anda başka bir kameranın görüntüsü gösterilmeye başlanır. Bu tarz görüntü sahnesinde oluşan değişimler, nesne değişimi olarak yorumlanmamalıdır. Şekil 2.2'de bir video

görüntüsünde değişim belirleme işlemi sonucu elde edilen fark görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Değişim belirleme: Orjial görüntü (üstte) ve fark görüntüsü (altta).

Dinamik görüntülerde, izleyici sistemin ve izlenen nesnenin gerçek zamanlı değişimleri belirlenmelidir. Değişim için mutlaka bir hareketin var olması gerektiği düşünülürse, bu hareketler (ve neden oldukları değişimler) optik akış, deforme olan modeller ve çok ölçekli modeller yaklaşımlarıyla da daha etkin bir şekilde belirlenebilir. Sonraki bölümlerde, dinamik görüntülerde değişim belirleme için kullanılan en temel yaklaşımlar kısaca anlatılmıştır.

3.2.2.1 Arka fonun çıkarılması

Basit olması ve kamera konumlarının da sabit olması nedeniyle birçok video güvenlik uygulamasında en temel olarak kullanılan bir görüntü işleme tekniğidir. Arka fon çıkarıldıktan sonra geriye sadece ön fondaki nesneler kaldığından, bu teknikle görüntü çıkarma tekniği bir arada kullanılarak, izlenen sahnedeki değişimler etkin bir şekilde belirlenebilmektedir. En popüler arka fon çıkarma teknikleri olarak, tekrarlamasız tekniklerden, görüntü karelerinin farklarının alınması, medyan filtreler, lineer kestirim filtreleri, iteratif tekniklerden yaklaşık medyan filtreler, Kalman filtreleri ve Mixture of Gaussians sayılabilir (Hu ve diğ. 2008a). Fon çıkarma teknikleri için (Toyama ve diğ. 1999) incelenebilir. Arka fonun çıkarılması için önce arka fonu nelerin oluşturduğunun öğrenilmesi gerekir. Bir kez arka fon öğrenilince, diğer video çerçevelerinden gerçek zamanlı olarak bu arka fon çıkarılır. Çıkarma işleminden sonra geriye sadece ön fondaki nesneler kalır.

Burada yine, arka fonun bulunması işi de eksik yapılı bir problemdir. Bu yüzden, arka fonun tanımı uygulamadan uygulamaya değişir. Normal olarak arka fon, izlenen bir sahnede statik olarak kalan veya periyodik olarak hareket eden sahne

elemanlarının kümesi olarak tanımlanabilir. Örneğin, rüzgarda salınan bir ağaç ve ağaç yaprakları, bir parkı izleyen gözlemci için arka fon olarak tanımlanabilir. Böyle bir arka fonun tanımında, zamanla değişen parametreler kullanılmalıdır. Rüzgarın bir süre sonra kesildiği düşünülürse, arka fon tanımı dinamik parametrelerle yapılmalıdır.

Basit uygulamalarda arka fon çıkarma teknikleri etkindir ama dikkat edilirse, fonu oluşturan nesnelerin belirlenmesi işinde bütün piksellerin birbirinden bağımsız değişkenler olduğu varsayılmaktadır. Bu varsayım çoğu durumda geçerli olmaz. Çünkü en azından, aydınlatma sürecinin fiziksel doğası nedeniyle bir piksel, kendi komşusu olan piksellerle ilişkili olarak düşünülmelidir. Bunun için arka fon ve ön fonu birlikte modelleyen daha başka teknikler kullanılmalıdır.

3.2.2.2 Sahne modelleme

Video görüntüsünün yorumlanması sırasında, bir yol üzerinde hareket halinde olan araç ön fondur. Ancak araç durup park ettiği zaman bir süre sonra arka fon olarak yorumlanması gerekir. Ancak bu nesneler tekrar harekete geçerse ve sahneyi terk ederse o zaman bu hareket sürecinde, bu nesnelerin tekrar ön fon olmaları gerekir. Bu tarz sorunlara çözüm elde edebilmek için, sahneyi tanımlayan daha yüksek düzeyli bir modele gereksinim vardır. Bu sahne modeli, arka fondan ön fona doğru birden çok düzey veya katman tanımı içermelidir. Bu düzey geçişleri de zamana bağlı olarak değişen yumuşak geçişler şeklinde olmalıdır. Bu durumda, bir piksel bir katmandan diğerine geçtiğinde, açık/kapalı şeklinde tanımlanan bir durum değişimi gerçekleştirmelidir. Bu duruma göre de katmanlar güncelleştirilmelidir.

Yukarıda anlatılan yöntemlere ek olarak; çerçeve çıkarma, ortalama arka fon tanımlama yöntemi ve daha farklı yöntemler kullanılabilir.

4. HAREKET VEKTÖRLERİNİN ÇIKARILMASI

Video görüntüleriyle nesnelerin hareket vektörlerinin ve hızlarının belirlenmesi problemini çözmek için, video görüntülerinde görüntüsü izlenen nesneler üzerinde çok sayıda noktanın otomatik olarak belirlenmesi ve bu noktaların zaman ilerledikçe ne kadar yer değiştirdiklerinin bulunması gerekir. Daha sonra, geçen sürede her bir noktanın yer değiştirme miktarlarının geçen süreyi ölçen birim zamandaki değişim oranlarının yani hızlarının bulunması gerekir. Burada kısaca özetlenen işlemlerin otomatik olarak gerçekleştirilmesi, üstelik bütün bu işlemlerin bir saniyeden daha kısa bir süre içerisinde tamamlanması gerekmektedir. Problemin doğasının eksik yapılı olması nedeniyle ortaya çıkabilecek birçok sorunun teknik olarak çözülmesi gerekmektedir. Daha en başta, problemin fiziksel doğasının bir kenara bırakıldığı düşünülse bile, bir taşıtta izlenecek noktaların nasıl belirleneceği; bunların, izleyen video çerçeve görüntülerinde nasıl takip edileceği soruları (örneğin, hareket eden aracın konumundaki değişiklikler nedeniyle, bir önceki çerçevede yer alan bir nokta bir sonraki çerçevede görülememesi veya görüş alanının dışına çıkması durumu gibi) bile çözümü güç sorunlar içermektedir. Ayrıca, görüntü koordinat sisteminde yer değiştirme vektörleri belirlenirse, bu değişim miktarı nesne uzayında ne kadarlık bir değişime karşılık geldiği bilinmelidir. Bu sorunlara, çok farklı yaklaşımlarla cevap aramak mümkündür. Bu bölümde, bütün bu sorunlar sırayla ele alınacaktır. Bu bağlamda sırasıyla, video görüntüleriyle hareket vektörlerinin ve hızın belirlenmesi için kullanılacak yaklaşım ve görüntülerin işlenmesi süreci anlatılacaktır.

4.1 Problemin Tanımı

Bu bölümde, bir tek kamera ile nesnelerin hareket yörüngelerinin ve hızlarının belirlenmesi problemi anlatılmıştır. Problemin çözümünü olanaklı hale getirmek için bazı geometrik sınır şartlarının konması ve bu şartları sağlayacak şekilde görüntülerin elde edilmesi veya işlenmesi gerekir. Örneğin izlenen sahnenin düz olduğunu varsayan düz yeryüzü modeli (flat earth model) gibi yaklaşımların kullanılması gerekir. Görüntülerdeki perspektif bozulmalar olabildiğince az olmalı

veya bu bozulmalar kolayca düzeltilebilecek düzeyde olmalıdır. Ayrıca görüntülerin hız vektörleri yönündeki ölçeği, güvenilir şekilde belirlenebilmelidir. Bunun için nesne uzayında, görüş alanı içerisinde yer alan ve hız vektörleri yönünde olan en az bir tane uzunluğun mutlak değeri bilinmelidir. Bunun için nesne uzayında örneğin yol üzerinde görüş alanına giren iki nokta arasındaki uzaklık klasik yöntemlerle ölçülmelidir. Ölçek faktörünü, nesneleri sınıflandırılıp nesneler üzerinde standart boyutları olduğu bilinen, mesela araç plakası, taşıtın boyu vs. gibi öncül bilgilerin çıkarılması ile belirlemek de mümkündür. Hesap yükü çok fazla olduğu için bu son bahsedilen şekilde ölçek belirleme işinin gerçek zamanlı olarak yapılması güçtür. Bu nedenle bu çalışmada, ölçeğin belirlenmesi için iki nokta arasındaki uzaklık yersel yöntemlerle ölçülmüştür.

Kamera ile bir nesnenin hızının belirlenmesi için, nesne üzerindeki noktaların, zaman geçerken ne kadar yer değiştirdiklerini bulmak gerekmektedir. Noktalar nesne üzerinde sabit durduklarından, nesne kameraya göre (yani gözlemciye göre) hangi hızda ve hangi yöne hareket ediyorsa, üzerindeki noktalar da aynı hızda aynı yöne hareket ediyor olmalıdır. Hızı bulmak için video kamerasının ardışık çerçeve görüntüleri kullanıldığından, iki çerçeve görüntüsü arasında geçen süreyi kullanarak, ardışık iki çerçeve aralığında nesne hızının anlık değerini bulmak gerekir. Buna göre anlık hız;

$$\mathbf{v} = \frac{\Delta p}{\Delta t} \qquad \textbf{(4.1)}$$

olur. Burada **v** anlık hız vektörü, Δp iki çerçeve görüntüsü arasında geçen sürede bir noktanın yer değiştirme vektörü ve Δt ise video kamerasının bir tam çerçevelik video görüntüsünü örneklemesi için geçen süredir.

Hız, nesne üzerinde seçilen noktalarla belirleneceği için, önce her bir noktanın ayrı ayrı yer değiştirme vektörlerinin ve anlık hızlarının bulunması gerekir. Noktalar seçilirken, sonraki bölümde anlatıldığı üzere, lokal ölçütler ve yaklaşımlar kullanıldığından, sadece bir tane noktanın hız vektörüyle nesne hızının belirlenmesi güvenilir olmaz. Bu noktanın seçiminde veya izlenmesinde oluşacak bir hata, hızın yanlış bulunmasına neden olur. Bu nedenle, nesne üzerindeki çok sayıda noktanın her birinin hız vektörü bulunup, bunların ortalaması alınarak anlık ortalama hız vektörü bulunmalıdır. Örneğin nesne üzerinde n tane nokta seçilmişse, bunların her

birisinin ardışık iki çerçeveden elde edilen anlık hızları $\boldsymbol{V_i}$ *(i = 1,…,n)* ile gösterilirse, anlık hız vektörü bu noktalarla;

$$\boldsymbol{\nu_a} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\nu_i \qquad \textbf{(4.2)}$$

şeklinde bulunur. Burada, hatalı olarak bulunan $\mathbf{v_i}$ hızları varsa, bunların ortalama anlık hız hesaplamadan önce ayıklanması gerekir. Bunun için $\mathbf{v_i}$ anlık hızlarının standart sapmaları hızlı değerlendirme yapmak için kullanılabilir. Hız, nesne ilk kez kameranın görüş alanına girdiği andan itibaren, görüş alanından çıkana kadar, ardışık her çerçevede anlık olarak **(4.2)** eşitliği ile bulunmalıdır. Bu anlık hızlar kullanılarak, ilk çerçeve ile son çerçeve arasında geçen zaman içerisinde, nesnenin ortalama hızı bulunabilir. Nesnenin, kameranın görüş alanı içerisinde bulunan çerçeve görüntüleri $I_1,\ldots, I_m$ ile gösterilirse (burada m, görüş alanı içerisindeki toplam çerçeve sayısıdır), I_j ve I_{j-1} (j=1,.., m) ardışık çerçeve aralığındaki **(4.3)** eşitliği ile hesaplanan $\mathbf{v}_{a,j}$ anlık hızlarının ortalaması ile ortalama nesne hızı;

$$\nu_{ort} = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\boldsymbol{\nu}_{aj} \qquad \textbf{(4.3)}$$

bağıntısı ile bulunur.

Video görüntüleriyle nesnelerin hızlarının bulunması için anlatılan bu fiziksel yaklaşımların uygulanabilmesi için, iki büyük sorunun çözülmesi gerekir. Bunlar; (1) Nesne üzerinde, izlenecek noktaların seçilmesi, (2) Seçilen noktaların izlenmesi ve hız vektörlerinin hesaplanması problemidir. Sonraki bölümlerde bu sorunlar sırasıyla ele alınacaktır.

4.2 İzlenecek Noktaların Otomatik Olarak Seçilmesi

Video görüntülerinde, hareket eden nesnelerin izlenmesi için, nesne üzerinde ardışık video çerçevelerinde izlenmesi gereken noktalar otomatik olarak seçilmelidir. Teorik olarak, bir nesne üzerinde sonsuz sayıda nokta seçilebilir. Ancak pratikte, seçilecek olan noktalar düşünsel (teorik olarak boyutsuz) noktalar değil, sonlu bir uzay alanını kapsayan, dolayısıyla en az iki boyutlu bir yüzey alanıdır. Buna göre, bir noktanın seçilmiş olması durumu düşünüldüğünde, seçilen noktanın gerçekten seçilmiş yani, diğer seçilmeyen noktalardan ayırt edilmiş olması gerekir. Eğer böyle bir ayrımın

varlığı söz konusu olmazsa, "seçim" kavramından bahsetmek de mümkün olmaz. Örneğin yüzey rengi aynı olan bir arabada nokta nasıl seçilir? Böyle bir nokta rastgele seçilirse, videoda bir sonraki çerçeve görüntüsünde bu noktayı bulmaya çalışmak olanaksız bir çabadır. Öyleyse, nokta seçimi yapılırken zorunlu olarak, bazı ayırt edici nitelikleri olan noktalar bulmak gerekir. Bu ayırt edici niteliklerin de tek anlamlı olmalarını beklemek doğal olanıdır. Buna göre pratikte, izleme için seçilecek noktaların tek anlamlı olması veya olabildiğince tek anlamlı denebilecek niteliklere sahip olması ve bu niteliklerin de matematiksel olarak diğer noktalardan ayırt edilecek şekilde bir parametrik ifadeyle gösterimi mümkün olmalıdır. Bir görüntüde bir noktayı nokta yapan şey, bulunduğu konumda sahip olduğu lokal niteliklerinin diğerlerinin lokal niteliklerinden farklı olması durumudur. Öyleyse, görüntüdeki nesneye ait her bir pikselin lokal değişimleri etrafındaki diğer piksellerle karşılaştırılarak bulunabilir. Bunun için türev kullanılır. Bir görüntü, $I=I(x, y)$ şeklinde ayrık bir fonksiyon olarak düşünülürse, (x, y) noktasındaki fonksiyonun değişim oranı, 2-boyutlu uzayda, o noktadaki kısmi türevin değerine eşit olur. Buna "gradyen" adı verilir. Eğer bir noktada gradyen vektörü ne kadar büyükse, orada o kadar fazla lokal değişim vardır demektir. Bir nokta seçmek için tek başına gradyen vektörünün şiddeti yeterli bir ölçüt değildir. Çünkü görüntülerde, bir kenar üzerinde de gradyen vektörü büyüktür. Ancak 1-boyutlu bir kenar üzerinde de bir tane nokta seçmek mümkün değildir (ilk ve son noktalar hariç).

Kenar üzerindeki veya aynı doğru üzerindeki noktaların da birbirinden farkı yoktur. Bu durum "aperture problemi" olarak bilinen soruna da neden olur. Eğer kenar hareket yönünde ise, kenar üzerindeki bir noktada, eğer varsa hareket yönüne dik yöndeki hareketleri algılamak mümkün olmaz. Nokta seçimi için bir pikselde, birbirine dik (ortogonal) iki yöndeki türev değişimlerine bakmak gerekir. Eğer bu iki ortogonal yöndeki gradyen vektörünün şiddeti büyükse, burada tek anlamlı bir noktanın var olduğunu söylemek daha büyük olasılıkla geçerli olacaktır. Bu şekilde, ortogonal iki yöndeki türevleri büyük olan noktalar "köşe" noktalarıdır. Köşe noktaları bir kenarın üzerinde olamayacağı için aperture problemi oluşmaz. Dolayısıyla, izlenecek noktaların köşe noktaları olması gerekir.

Köşe tanımı için en sık kullanılan tanım, (Harris and Stephens, 1988)'de verilmiştir. Bu tanımda bir köşe, ikinci mertebeden türevlerle ifade edilen bir matrisle tanımlanır. Bu türevler, görüntüdeki piksellerin parlaklık değerlerinin $\partial^2 x$, $\partial^2 y$ ve $\partial x \partial y$ kısmi

türevleridir. Bir çerçeve görüntüsündeki piksellerin ikinci mertebeden türevleri hesaplanarak yeni bir görüntü oluşturulabilir. Bu yeni görüntüye "Hessian görüntüsü" adı verilir. Bu Hessian kavramı, bir nokta etrafındaki Hessian matrisi kavramından ortaya çıkmaktadır, (Bradski ve Kaehle, 2008). 2-boyutlu uzayda Hessian matrisi:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \end{bmatrix} \quad \textbf{(4.4)}$$

şeklinde tanımlanır. Harris köşesinin bulunması için, görüntüde her bir pikselin etrafında tanımlanan küçük bir pencere (maske) üzerinde ikinci türev görüntüsünün otokorelasyon matrisleri hesaplanır.

Harris'in yaklaşımına göre köşeler, ikinci türevlerin otokorelasyon matrislerinin en büyük özdeğere sahip olduğu yerlere yerleştirilir. Bunun anlamı, köşelerin bir kenar veya belirgin bir doku (texture) olan yerde en az iki ayrı kenarın birleştiği bağlantı noktası üzerinde olması durumudur. Gerçekten de köşeler, en az iki kenarın birleştiği bağlantı noktalarıdır. Burada birinci türevler (gradyenler) yerine, ikinci türevlerin kullanılmasının nedeni, ikinci türevlerin homojen (sabit) gradyene sahip bölgelerde sıfır olması özelliğinden yararlanmaktadır. Gradyen vektörlerinin bileşenleri birinci türevlerle elde edilir. Eğer birinci türevler sabitse, ikinci türevler sıfır olur. Bu durum görüntüdeki homojen alanlarda yani aynı renk ve dokuya sahip görüntü bölgelerinde ortaya çıkar. Böyle bölgelerde köşe var olamayacağı için, bu bölgeleri elemenin etkin bir yolu ikinci türevlere bakmaktır. Ayrıca bu tanımın başka bir yararlı tarafı da vardır. Otokorelasyon matrisinin özdeğerleri ele alındığında, bu özdeğerlerin dönüklüklerin var olması durumunda bile değişmez olması nedeniyle, herhangi bir yöne doğru değişen piksel değerlerinde de köşeleri bulabilmektedir. Bu özelliğin ne kadar önemli olduğu, izlenen nesnenin hareket halindeyken yönünün değişebileceği gerçeğinin göz önüne alınması durumunda daha da çarpıcı şekilde ortaya çıkacaktır.

Harris'in orijinal tanımında, H matrisinin determinantından matrisin izi çıkarılmakta ve bulunan farklar önceden tanımlanan bir eşik değeriyle karşılaştırılmaktadır. Daha sonraları (Shi and Tomasi, 1994), köşelerin daha iyi tanımlanması için, iki özdeğerin küçük olanının, önceden tanımlanan minimum bir eşik değerle karşılaştırılmasının ve

bu eşikten büyük olması durumunda köşenin var olduğuna karar vermenin, diğerine göre daha etkin bir yöntem olduğunu göstermiştir. Bu yöntem gerçekten de, Harris'in yöntemine göre daha etkin sonuçlar vermektedir. Köşeleri bulmak için faklı yöntemler de kullanılabilir. Örneğin Förstner operatörü, Moravec operatörü vs. bu amaçla kullanılabilir. Görüntülerden duyarlı geometrik bilgilerin çıkarılması istendiğinde, köşe noktalarının piksel altı duyarlıkta bulunması gerekir. Bunun için köşe noktası civarında, köşe olmaya aday diğer noktalar kullanılarak bir parabol uydurulup, parabolün maksimum noktasının koordinatları bulunabilir. Bu yöntemler için (Lucchese and Mitra, 2002; Chen and Zhang, 2005) incelenebilir.

Şekil 4.1'de, taşıt üzerinde otomatik olarak seçilen noktalar görülmektedir. Burada noktalar, Shi ve Tomasi'nin yaklaşımına göre seçilmiştir.



Şekil 4.1 : Otomatik olarak seçilen noktalar.

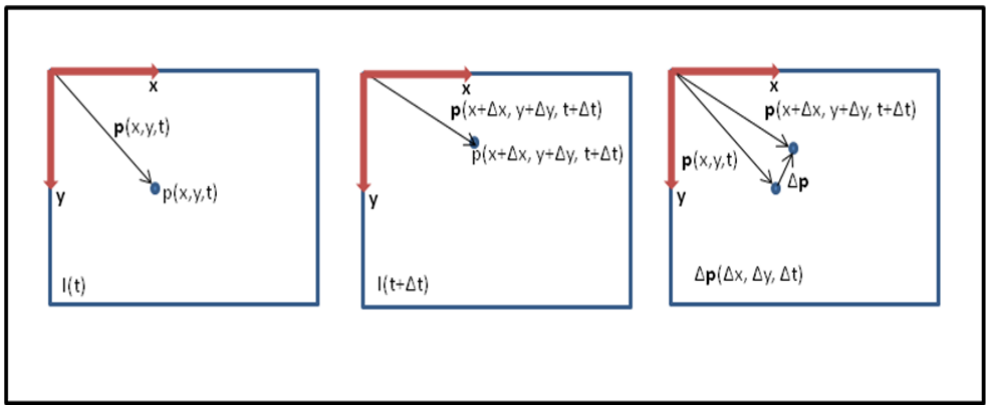
4.3 Seçilen Noktaların İzlenmesi ve Hızın Belirlenmesi

Hızın belirlenmesi için bir çerçevede seçilen noktaların her birisinin, sonraki çerçevede karşılığının bulunması gerekir. Bir noktanın bir sonraki çerçevede karşılığının bulunması demek, aslında ideal anlamda aynı noktanın bulunması veya takip edilmesi demektir. Bu iş için ilk çerçevedeki noktaların kendisinden başka öncül bilgi yoktur. Bir noktanın bir sonraki çerçevede nerede bulunacağını kestirmek de mümkün değildir. Bir tek kamera olduğu için, ikinci çerçevede noktaların aranacağı arama bölgesini sınırlandıracak epipolar geometri gibi bir sınır şartı tanımlamak da mümkün değildir. Öyleyse burada, noktanın karşılığını bulmak için stereo görüntü eşleştirme yaklaşımları kullanılamaz. Bunun yerine, her bir çerçevedeki görüntülerin bir öncekine göre, kısa bir zaman aralığında akarak yer değiştirdiği ve bu yer değişimi nedeniyle ikinci çerçevede farklı bir konumda göründüğü varsayılırsa, bu akış problemini modelleyen bir yaklaşım kullanılabilir. Bu tarz yaklaşım modellerine "optik akış" (optical flow) adı verilmektedir. Sonraki

bölümlerde, öncelikle optik akış konusuna değinilmiş ve daha sonra çalışmada kullanılan yöntemler anlatılmıştır.

4.3.1 Optik Akış

2-boyutlu görüntü uzayında bir köşe noktası, p(x, y) koordinatları ile gösterilebilir. Bu (x, y) koordinatları, piksel koordinat sisteminde tanımlanabilir. Bir t anında elde edilen bir video çerçeve görüntüsü I(t) ile gösterilirse, bu çerçevede yer alan bir P noktası p(x, y, t) ile gösterilebilir. Burada p(x, y, t) Є I(t)'dir. Bu gösterime göre, $p_i(x_i, y_i, t)$ noktaları, ait oldukları I(t) çerçeve görüntülerinde, başlangıcı piksel koordinat sisteminin orijininde, ucu p_i noktasında bulunan $p_i(x_i, y_i, t)$ yer vektörleri ile ifade edilebilir, (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 : Optik akış (Doğan ve diğ., 2010).

Şekil 4.2'den kolayca anlaşıldığı üzere, noktaların anlık hız vektörleri, yer değiştirme vektörlerinin geçen *Δt* süresiyle ölçeklendirilmesiyle elde edilen vektörlerdir. Δp yer değiştirme vektörleri 2-boyutlu olduğundan, **v** hız vektörleri de 2-boyutludur. Yani **v** hız vektörlerinin $\mathbf{v}(v_x, v_y)$ şeklinde iki bileşeni vardır. Öyleyse, izlemek için belirlenen her bir noktaya, ardışık iki çerçevenin işlenmesinden sonra bir hız vektörü veya eşdeğer olarak bir yer değiştirme vektörü karşılık gelir. Eğer bu işlem sadece seçilen noktalara değil de bütün piksellere uygulanırsa, buna "yoğun optik akış" (dense optical flow) adı verilir. Bu durumda, bütün görüntünün hız vektör alanı elde edilebilir. Horn-Schunk yöntemi, (Horn and Schunk, 1981) bu şekilde yoğun hız vektör alanını bulmaya çalışan ilk örneklerden birisidir. Ancak, bu kadar çok sayıda nokta için hız vektörlerinin bulunması işi oldukça fazla hesap yükü gerektirmektedir. Bu nedenle yoğun optik akış, gerçek zamanlı uygulamalar için uygun değildir. Bunun yerine, sadece seçilen noktalardaki dağınık hız vektörlerini bulma yaklaşımı,

gerçek zamanlı uygulamalar için hesap yönünden daha etkin bir yaklaşımdır. Bu şekilde daha az sayıda ve yoğun olmayan, yani seyrek ve dağınık noktalarla belirlenen optik akışa ise "seyrek optik akış" (sparse optical flow) adı verilir. Bu çalışmada, önceden seçilen köşe noktaları izlenerek hız belirlendiğinden, seyrek optik akış yöntemi kullanılmıştır.

4.3.2 Lucas – Kanade (LK) optik akış yöntemi

Bir tek video kamera kullanıldığında, bir önceki çerçeve görüntüsünde seçilen noktaların bir sonraki çerçeve görüntüsünde karşılıklarının bulunması için noktaların kendisinden başka bilgi bulunmamaktadır. Bu nedenle, önceki çerçevede bulunan bir noktanın, bir sonraki çerçevede nerede olduğunu bilmek mümkün değildir. Ancak, problemin doğası incelenerek, noktanın nerede olabileceği konusunda varsayımlar yapılabilir. Bu varsayımların gerçeğe yakın doğrulukta olması için, varsayımların dayandığı teorik bir dayanağın olması ve bu dayanağın da belirli sınır şartları altında kabul edilebilir olması gerekir.

Bu bağlamda ilk önce, noktanın karşılığının belirlenmesinde kullanılabilecek bilgilerin neler olduğunu belirlemek gerekir. Buna göre ilk akla gelen şey, ilk çerçeve görüntüsünde noktanın dokusu, rengi (veya parlaklık değeri) nasılsa, ikincisinde de buna eşit veya yakın bir parlaklık değeri ve dokuya sahip olmasını beklemek gerekir. Eğer gerçekten bu beklenti gerçekleşirse, o zaman doku ve parlaklık bilgileri, noktanın karşılığının belirlenmesi için kullanılabilir. Tek başına bu bilgi, elbette ki noktanın tek anlamlı olarak bulunması için yetmez. Çünkü aynı dokuya ve parlaklık değerine sahip başka noktalar da var olabilir. Öyleyse, bir şekilde noktanın geometrik yerinin tahmin edilmesini sağlayan bir başka varsayımın da olması gerekir. Lucas-Kanade yöntemi (Lucas and Kanade, 1981; Bradski ve Kaehle, 2008), problemin çözümü için noktanın parlaklık değeri, dokusu (komşu piksellerle ilişkisi) ve geometrik konumu ile ilgili üç temel varsayımın üzerine kurulmuştur. Bu varsayımlar aşağıda açıklanmıştır.

- Parlaklık değerinin sabit olduğu varsayımı: Bir I(t) çerçeve görüntüsündeki p(t) noktasının parlaklık değerinin, bir sonraki I(t+Δt) {Δt<<1 saniye} çerçeve görüntüsünde değişmeden aynı kalması gerektiğini öne süren bir varsayımdır. Ardışık iki çerçeve görüntüsü arasında geçen sürenin çok kısa olması durumunda, bu varsayımın gerçekten de doğru olma olasılığının çok

yüksek olduğu görülebilir. Çünkü iki çerçeve görüntüsü arasında geçen ve milisaniyelerle ölçülen sürede, noktanın parlaklık değerlerinin değişmesine neden olabilecek; ortamın ışık şartları, hareket eden nesnenin konumundaki değişimler vs. gibi etkilerin sonucu, bu kadar kısa sürede büyük değişikliklere yol açmıyor olmalıdır. Bu varsayımın %100 doğru olması mümkün değildir. Bunun için nesnenin duruyor olması ve kameranın örnekleme oranının (çerçeve oranının) sonsuz küçük olması gerekir. Ancak, 30 milisaniye gibi kısa bir sürede, izlenen araç 250 km/h hızla hareket etse bile, varsayımın gerçeğe yakın olma olasılığı çok yüksektir. Ancak, I(t) görüntüsü ile I(t+2Δt) çerçeve görüntüsü için artık bu varsayımın gerçekleşme olanağı yok denecek kadar azdır.

- İki çerçeve görüntüsü arasında, noktanın konumunun çok az (birkaç piksel) değişeceği varsayımı: Varsayımın dayandığı gerekçe, ilk varsayımın dayandığı gerekçeye benzemektedir. I(t) ve I(t+ Δt) { Δt<<1 saniye} çerçeve görüntülerinde, çerçeve örnekleme aralığı ne kadar kısa ise, kısa sürede nesnenin katedeceği yol da o kadar kısa olur. Buna göre, I(t) çerçeve görüntüsündeki (x, y) piksel koordinatlarında bulunan bir p(t) noktasının bir sonraki ardışık I(t+Δt) çerçeve görüntüsündeki piksel koordinatları (x+Δx, y+Δy) olacak ve bu yeni koordinatlar da (x, y) koordinatlarına çok yakın bir konumda bulunacaktır. Öyleyse, ilk çerçeve görüntüsünden seçilen bir noktanın ikinci çerçevedeki karşılığını, (x, y) koordinatlarının çok yakınlarında aramak mantıklı bir yaklaşım olmaktadır. Pek tabii ki bu şartın da %100 gerçekleşmesi beklenemez.
- Noktanın, komşu pikselleriyle birlikte davrandığı varsayımı: Nokta için geçerli olduğu varsayılan yukarıdaki iki varsayımın, noktanın hemen etrafındaki komşuları için de geçerli olması gerektiğini kabul eden yeni bir varsayımdır. Ek olarak, eğer nokta v hızıyla hareket ediyorsa, komşu pikselleri de (noktaları da) v hızıyla hareket ediyor olmalıdır.

Bu üç varsayım, etkin bir hedef izleme algoritmasının geliştirilmesini sağlar. Bu varsayımlarla hem noktaları izlemek hem de noktaların hızlarını bulabilmek için, bunların matematiksel olarak ifade edilmesi ve bu ifadelerle hız bağıntısının çıkarılması gerekir. Bunun için şekil 4.2'de verilen sembolik gösterimler kullanılırsa, ilk varsayım;

$$\mathrm{l}(\mathbf{p}(\mathrm{x},\mathrm{y},\mathrm{t}),\mathrm{t}) = \mathrm{l}(\mathbf{p}(\mathrm{x},\mathrm{y},\mathrm{t}),\mathrm{t}+\Delta\mathrm{t}) \qquad \textbf{(4.5)}$$

Şeklinde ifade edilebilir. Burada, I(**p**,t), t anında I(t) görüntüsündeki **p** noktasının (**p** noktasının konumu, 2-boyutlu **p** konum vektörü ile ifade edilmektedir) parlaklık değerini ifade etmektedir. Eşitliğin sağ tarafı da benzer şekilde, t+Δt anında I(t+Δt) görüntüsünde, yer değiştiren **p** noktasındaki parlaklık değerini ifade etmektedir. Buna göre **(4.5)** eşitliği, iki çerçeve görüntüsü arasında geçen Δt süresince, **p**'deki parlaklığın yani, I(**p**,t)'nin değişmediğini ifade etmektedir. Başka bir ifadeyle, I(**p**,t)'nin zamanla değişimi sıfırdır. Bu son tahlil matematiksel olarak;

$$\frac{\partial \mathrm{I}(\mathbf{p}(\mathrm{x},\mathrm{y},\mathrm{t}),\mathrm{t})}{\partial \mathrm{t}} = 0 \qquad \textbf{(4.6)}$$

demektir. Türevde zincir kuralını uygulayarak **(4.6)**eşitliğindeki türev alınırsa;

$$\frac{\partial \mathrm{I}(\mathbf{p}(\mathrm{x},\mathrm{y},\mathrm{t}),\mathrm{t})}{\partial \mathrm{t}} = \frac{\partial \mathrm{I}(\mathbf{p},\mathrm{t})}{\partial \mathbf{p}} \frac{\partial \mathbf{p}(\mathrm{t})}{\partial \mathrm{t}} + \frac{\partial \mathrm{I}}{\partial \mathrm{t}} = 0 \qquad \textbf{(4.7)}$$

elde edilir. Burada, $\partial I / \partial p$ türevi, I(t) görüntüsündeki **p** noktasındaki konumsal türevi ifade etmektedir. Bu yüzden, $\partial I / \partial p = \nabla I$ olur. Açık olarak yazılırsa;

$$\nabla \mathrm{I} = \frac{\partial \mathrm{l}}{\partial \mathrm{x}} \mathrm{i} + \frac{\partial \mathrm{l}}{\partial \mathrm{y}} \mathrm{j} = \mathrm{I}_{\mathrm{x}} \mathrm{i} + \mathrm{I}_{\mathrm{y}} \mathrm{j} \qquad \textbf{(4.8)}$$

olur. $\partial \mathbf{p}(t) / \partial t$ türevi ise;

$$\frac{\partial \mathbf{p}(\mathrm{t})}{\partial \mathrm{t}} = \frac{\partial}{\partial \mathrm{t}} (\mathrm{xi} + \mathrm{yj}) = \frac{\partial \mathrm{x}}{\partial \mathrm{t}} \mathrm{i} + \frac{\partial \mathrm{y}}{\partial \mathrm{t}} \mathrm{j} \qquad \textbf{(4.9)}$$

olur. **(4.9)** eşitliğine dikkat edilirse, $(\partial x / \partial t) i$ vektörü, **p** noktasının x-ekseni yönündeki hızına eşittir. Yani, **p** hız vektörünün v_x bileşenidir. Benzer şekilde, $(\partial y / \partial t) j$ vektörü de, **v** hız vektörünün v_y bileşenidir. Yani;

$$\frac{\partial \mathbf{p}(\mathrm{t})}{\partial \mathrm{t}} = \mathrm{v} = \mathrm{v}_{\mathrm{x}} \mathrm{i} + \mathrm{v}_{\mathrm{y}} \mathrm{j} \qquad \textbf{(4.10)}$$

olur. **(4.7)** eşitliğindeki $\partial I / \partial t = I_t$ türevi ise, **p** noktasında, I(t) görüntüsünün parlaklık değeri ile I(t+Δt) görüntüsünün parlaklık değişimlerinin oranlarının değerini ifade eder. Buna göre sonuç olarak **(4.7)** eşitliği;

$$\nabla \mathrm{I}.\mathrm{V} + \mathrm{I}_t = 0 \qquad \textbf{(4.11)}$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada da;

$$\nabla \mathrm{I} = \begin{bmatrix} \mathrm{I}_x \\ \mathrm{I}_y \end{bmatrix} \text{ ve } \mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathrm{V}_x \\ \mathrm{V}_y \end{bmatrix} \qquad \textbf{(4.12)}$$

yazılırsa, **(4.11)** eşitliği;

$$\begin{bmatrix} \mathrm{I}_x & \mathrm{I}_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{V}_x \\ \mathrm{V}_y \end{bmatrix} = -\mathrm{I}_t \qquad \textbf{(4.13)}$$

olur. Bu son eşitlikte I_x, I_y ve I_t çerçeve görüntülerinden kolayca bulunabilir. v_x, v_y ise, problemde bulunması istenilen nokta hızının x ve y yönlerindeki bilinmeyen bileşenleridir. İki bilinmeyene karşılık yalnızca bir denklem olduğu için bu haliyle iki bilinmeyenin bulunması mümkün değildir. Bunun için, LK algoritmasının üçüncü varsayımı kullanılır. Yani, p noktasının komşusu olan noktaların da P ile aynı şekilde **(4.13)** bağıntısını sağlamak zorunda olduğu ve p ile aynı hıza (v_x, v_y) sahip olması gerektiği varsayımı yapılarak, aynı denklemler, örneğin 3x3 veya 5x5 piksel komşuluğundaki diğer noktalar için de yazılıp, sırasıyla 9 veya 25 denklem yazılarak iki tane bilinmeyen hız bileşeni, en küçük kareler yöntemi ile hesaplanır.

5. REKTİFİKASYON

Dijital bir görüntü, temel olarak radyometrik özelliklerin ve konumsal bilgilerin her ikisine birden sahip olan, iki boyutlu piksel dizilerinden oluşur (Fogel, 1997). Dijital görüntülerin rektifikasyonu için üç ana yöntem kullanılır; polinomal rektifikasyon, projektif rektifikasyon ve diferansiyel rektifikasyon. Bu tekniklerden ilk iki tanesi, sensör geometrisini ve yöneltmesini dikkate almadan görüntü ve orto-foto arasında tanımlanan analitik dönüşümlerle gerçekleştirilir. Bunlar daha çok yaklaşık çözümlerdir. Fakat son teknik, görüntüleme sisteminin fiziksel gerçekliğini kolinearite eşitlikleriyle modeller ve yükseklik farklarından kaynaklanan bozulmaları da (relief displacement) düzeltir (Novak, 1992).

Sayısal yükseklik modeli tabanlı, dijital diferansiyel rektifikasyon en yaygın sayısal orto-foto üretim yöntemidir. (Xuan and Lin, 2002).

Dijital görüntülerin dönüşümü için direkt ve dolaylı olmak üzere iki yaklaşım vardır. Dolaylı yöntemde her pikselin sonuç görüntüdeki yeri, seçilecek bir dönüşüm fonksiyonu ile belirlenir ve bu noktadaki parlaklık değeri orijinal görüntüdeki komşu piksellerden enterpole edilerek belirlenir. Direkt yöntemde ise dönüşümden sonra piksel en yakın pikselin parlaklık değerini alır. Bu yöntemde sadece orijinal görüntüdeki parlaklık değerleri kullanıldığı için kontrast ve yoğunluğun değişmemesine rağmen görüntüdeki bazı pikseller hiçbir renk değerine sahip olmayabilir. Bu durumda sonuç görüntüye uygulanacak ikinci bir işlemle bu pikseller doldurulur (Novak, 1992).

5.1 Polinomal Rektifikasyon

Dönüşüm görüntüler üzerinde yapıldığından, iki boyutlu bir dönüşüm fonksiyonu yeterlidir. Bu genellikle iki değişkenli polinomal bir eşitliktir;

$$\begin{aligned} x' &= a_{00} + a_{01}y + a_{10}x + a_{11}xy + a_{02}y^2 + a_{20}x^2 + a_{12}xy^2 + a_{21}x^2y + \cdots + a_{rk}x^r y^k \\ y' &= b_{00} + b_{01}y + b_{10}x + b_{11}xy + b_{02}y^2 + b_{20}x^2 + b_{12}xy^2 + b_{21}x^2y + \cdots + b_{rk}x^r y^k \end{aligned} \quad \textbf{(5.1)}$$

Dönüşümü gerçekleştirebilmek için, her iki sistemdeki ortak noktalar yardımıyla a ve b katsayıları hesaplanır ve dönüşüm yapılır (Monti ve diğ., 1999)

Eğer geometrik dönüşüm, görüntüdeki konuma bağlı olarak süratle değişmiyorsa, düşük seviyeli polinomal yaklaşımlar iyi sonuçlar verebilir. Eğer dönüşüm konuma duyarlıysa yani, değişimler konuma göre büyük değişimler gösteriyorsa, düşük düzeyli polinomlar başarısız olacaktır. Bu durumda yaklaşım yüksek düzeyli bir polinom olmalıdır (Url-3).

5.1.1 İki boyutlu benzerlik dönüşümü

İki boyutlu benzerlik dönüşümü, 2 öteleme, 1 ölçek ve 1 dönüklük parametresi ile tanımlanır. **(5.1)** eşitliklerindeki ilk üç terim, $a_{01}=b_{10}$ ve $a_{10}=-b_{01}$ kısıtlamaları ile yazılırsa benzerlik dönüşümü;

$$x' = a_{00} + a_{01}y + a_{10}x$$
$$y' = b_{00} - a_{10}y + a_{01}x \qquad \textbf{(5.2)}$$

şeklinde elde edilir.

5.1.2 Afin dönüşümü

(5.1) eşitliklerinin ilk üç terimin alınmasıyla afin (affine) dönüşümü belirlenir.

$$x' = a_{00} + a_{01}y + a_{10}x$$
$$y' = b_{00} + b_{01}y + b_{10}x \qquad \textbf{(5.3)}$$

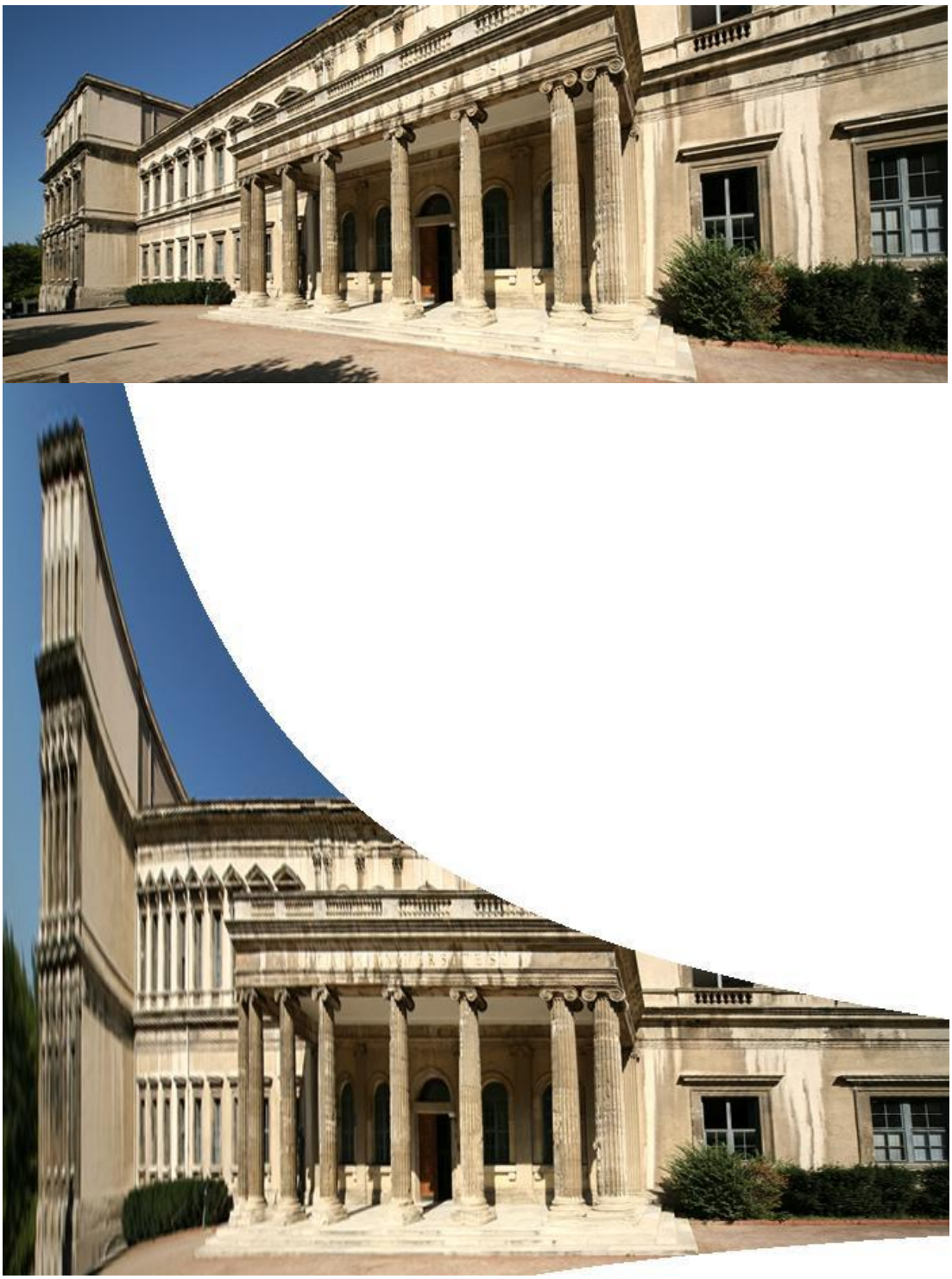
Dönüşümün gerçekleştirilebilmesi için iki görüntü arasında en az 3 ortak noktanın bilinmesi gerekir.

5.1.3 Bi-lineer dönüşüm

Görüntü dönüşümlerinde sıklıkla kullanılan yöntemlerden biridir. Dönüşümün gerçekleştirilebilmesi için karşılıklı en az 4 noktanın bilinmesi gerekir.

$$x' = a_{00} + a_{01}y + a_{10}x + a_{11}xy$$
$$y' = b_{00} + b_{01}y + b_{10}x + b_{11}xy \qquad \textbf{(5.4)}$$

Şekil 5.1’de Taşkışla kampüsünün orijinal ve bi-lineer dönüşüm ile düzeltilmiş görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.1 : Orijinal görüntü (üstte), bi-lineer dönüşüm sonucu (altta).

5.2 Projektif Rektifikasyon

Projektif dönüşüm, iki düzlem arasındaki ilişkiyi tanımlar. İki görüntüdeki karşılıklı dört nesne noktasından elde edilen, sekiz parametreyle tanımlanır. (Novak, 1992). Dönüşüm fonksiyonları;

$$x = \frac{a_1 x' + a_2 y' + a_3}{c_1 x' + c_2 y' + 1} = f_x(x', y') \qquad y = \frac{b_1 x' + b_2 y' + b_3}{c_1 x' + c_2 y' + 1} = f_y(x', y') \qquad \textbf{(5.5)}$$

şeklindedir.

Projektif dönüşüm genellikle, perspektif görüntülerdeki projektif distorsiyonların etkilerinin giderilmesi için kullanılmaktadır (Remondino, 2006).

5.3 Kaçış Noktası Geometrisi

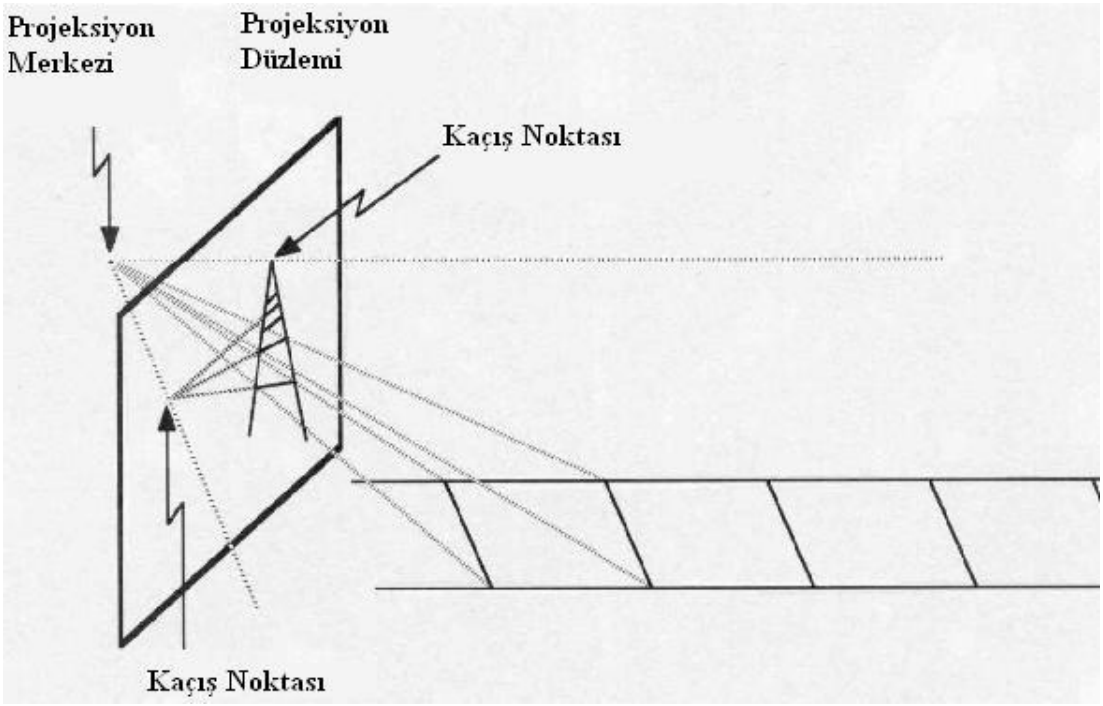
Görüntülerin rektifikasyonu için kullanılan bir diğer yöntem de görüntüdeki geometrik şartlardan ve kısıtlamalardan yararlanan yöntemlerdir. Bunlardan bir tanesi kaçış noktası ve kaçış noktası geometrisini kullanan yöntemdir. Epipolar geometriyi kullanan teknik, bölüm 6.1'de ele alınacaktır.

Kaçış noktası geometrisi ve kaçış doğruları, kalibrasyon parametrelerinin hesaplanmasında sık olarak kullanılmaktadır. Beardsley ve Murray (1992) çalışmalarında projektif bir düzlemdeki paralel doğrulardan yaralanarak iç yöneltme elemanlarını belirlemişlerdir. Ancak gözlemlenen düzlem üzerinde işaretlenmiş bilinen dört nokta kullanılmıştır. Wang ve Tsai (1991) kaçış doğruları yardımıyla kamera kalibrasyonunu araştırmışlardır. Düzlemdeki kaçış doğrularını bulabilmek için altıgen bir kalibrasyon hedefi kullanmışlardır. Kaçış doğrularının geometrik projektif ilişkilerinden yararlanarak iç ve dış yöneltmeleri tek görüntüden belirlemişlerdir.

Kaçış noktası geometrisi, görüntü rektifikasyonu ve görüntüdeki perspektif etkinin giderilmesi içinde sık olarak kullanılmaktadır. Özellikle yol, bina gibi insan yapımı düzlemsel nesnelerin görüntülerinin rektifikasyonunda kaçış noktaları otomatik olarak belirlenebilir ve metrik rektifikasyonu yapılır (Liebowitz ve Zisserman, 1998).

Uzaydaki bir d doğrusuna karşılık resim düzleminde d' doğrusu karşılık gelir. İki doğrunun kesim noktaları uzayda ve izdüşümünde birbirine karşılıktır. Ancak uzaydaki paralel doğrular, eğer projeksiyon düzlemine paralel değilseler, bu paralel doğruların izdüşümleri V gibi bir noktada kesişirler. Bu noktaya kaçış noktası (Vanishing Points) adı verilir.

Kaçış noktası izdüşüm merkezinden nesne uzayındaki söz konusu paralel doğrulara çizilen paralelin projeksiyon düzlemini deldiği noktadır. Birbirine paralel bütün doğruların kaçış noktası aynı noktadır. Bir izdüşümde birden fazla kaçış noktası olabilir. Bir düzlem içinde bulunan tüm kaçış noktalarının geometrik yerine kaçış doğrusu denir. Şekil 5.2'de kaçış noktası geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 5.2 : Kaçış noktaları.

Kaçış noktalarının resim düzlemindeki konumlarının belirlenmesi için öncelikle doğruların otomatik olarak çıkarılması gerekir. Bir sonraki bölümde bu konuya yer verilecektir. Doğrular belirlendikten sonra paralel doğruların denklemleri en küçük kareler yöntemiyle çözülerek kaçış noktaları belirlenir.

Doğru denklemleri;

$$
\begin{aligned}
y &= a_1.x + b \\
y &= a_2.x + b \\
&\dots \\
&\dots \\
y &= a_n.x + b
\end{aligned}
\tag{5.6}
$$

şeklinde yazıldıktan sonra, kaçış noktasının yeri;

$$\bar{\boldsymbol{x}} = (\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{A})^{-1}.\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{b} \tag{5.7}$$

şeklinde hesaplanır. Burada $\bar{\boldsymbol{x}} = |x_v, y_v|^T$ kaçış noktasının koordinatlarıdır.

5.3.1 Görüntüdeki doğruların belirlenmesi

Kaçış noktalarının belirlenmesi için yukarıda da değinildiği gibi resimdeki doğruların otomatik olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için çeşitli teknikler bulunmaktadır. Radon dönüşümü, Hough dönüşümü gibi teknikler resimdeki doğruların bulunmasında kullanılır. Radon dönüşümü iki boyutlu uzayda düz çizgilere uygulanan integral dönüşümüdür. Ters radon dönüşümü ile görüntülerin tekrar oluşturulması sağlanabilir (Ar, 2009). Radon dönüşümünün genelleştirilmiş hali Trace dönüşümüdür. Genellikle, yüz tanıma, plaka tanıma vb. amaçlarla kullanılır. Burada Hough dönüşümü anlatılacaktır.

Hough dönüşümü, sayısal görüntülerdeki doğruların ve diğer şekillerin (genellikle dairesel) tespiti işlemi için sıkça kullanılan bir görüntü analiz algoritmasıdır. Temel olarak siyah-beyaz görüntülerdeki düzgün doğruları tespit etmek için geliştirilmiştir. Bunun yanı sıra, doğrusal olmayan düzensiz eğrilerin tespitinde de kullanılmaktadır.

Görüntüden yakalanabilecek olan şekiller arasında, düzgün doğrular, eğriler, çemberler ve elipslere ek olarak doğrusal olmayan keyfi dağılımlı düzensiz şekiller de yer almaktadır. Elbette bunların hepsi için ayrı parametreler ve denklemler geliştirilmiştir. Hough dönüşümü yöntemiyle bir sayısal görüntüden doğruları yakalamak istediğinizde, görüntünün içindeki doğrusal olmayan daire ve eğri gibi şekiller, dönüşüm sonucu oluşacak olan yeni görüntüde yer almayacaklardır. Çıktı görüntüsünde sadece düzgün doğrulara yer verilecektir.

Hough dönüşümü resim üzerinde sıfırdan farklı değerler alan her bir (x, y) koordinat çifti için;

$$y_i = a.x_i + b \quad \textbf{(5.8)}$$

doğru denklemi ile ifade edilen eğim (a) ve doğrunun y eksenini kestiği noktanın (b), hesaplanmasını sağlar. Hough dönüşümü ile önerilen bu yöntemde bu işlem, **(5.8)** denkleminin;

$$b = -a.x_i + y_i \quad \textbf{(5.9)}$$

şeklinde yeniden yapılandırılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Öncelikle (a, b) katsayılarının en küçük ve en büyük değerleri belirlenir, belirlenen aralıktaki her bir olası (a, b) noktası için bir toplama kümesi oluşturulur. bmin'den bmax'a kadar her olası b değerine karşılık gelen a değerleri **(5.9)** denklemi kullanılarak hesaplanır, her bir hesap için ilgili toplama hücresinin değeri bir arttırılır. Bu işlem bittiğinde toplama hücrelerinden yüksek değerli olanlar incelenir, bunlardan aralarındaki boşlukların yüksek olduğu (a, b) noktaları atıldıktan sonra geriye kalanlar resimde yer alan doğruların ifadesi olarak seçilir (Safran ve Öktem, 2007).

Dik doğrularda a ve b 'nin sonsuza gidebileceği göz önüne alınarak kartezyen koordinatlar yerine kutupsal koordinatlar (ρ, θ) kullanılır. Bu haliyle doğru denklemi;

$$\rho = x.\cos(\theta) + y.\sin(\theta) \quad \textbf{(5.10)}$$

şeklini alır. Burada θ orijinden geçen doğrunun x düzlemiyle yaptığı açı, ρ ise doğrunun orijinden olan uzaklığıdır. İki sistem arasında dönüşüm kolaylıkla yapılabilir (Temiz ve Külür, 2011).

Dairesel çizgiler için Hough dönüşümü biraz daha karmaşıktır; resim üzerindeki (x, y) düzleminden farklı r değerleri için (x_0, y_0, r) uzayına dönüşüm yapılarak dairesel nesnelerin bulunması yoluna gidilir. Tez kapsamı dışında kaldığı için bu detaya girilmeyecektir.

Hough dönüşümü siyah-beyaz (ikili) görüntüler üzerinde çalıştığından, renkli veya gri düzey görüntülerin ikili görüntüye çevrilmesi gerekmektedir. Görüntü seçilen bir eşik değer ile basitçe eşiklenerek ikili görüntü elde edilebilir. Hough dönüşü sonucu yüksek doğruluk elde edebilmek için görüntü üzerindeki kenarların ön bir filtreleme işlemi ile yaklaşık olarak belirlenmesi gerekmektedir.

Kenar belirlemenin genel olarak amacı, bir görüntüdeki verilerin önemli oranda azaltılarak ilgilenilen nesne ya da nesnelere ait olma olasılıkları yüksek olanlarının kalmasını sağlamaktır.

Birçok kenar belirleme algoritması vardır; Roberts, Prewitt ve Sobel kenar bulma operatörleri gibi. Ancak bu tip gradyen hesabı gerektiren algoritmalar görüntüdeki gürültülere karşı çok duyarlıdır. Bu yüzden görüntüdeki olası gürültülerin etkisini en aza indirecek bir algoritmaya ihtiyaç vardır (Neon ve Hazanchuk, 2005).

1986 yılında John Canny tarafından bulunan Canny algoritması bu problemi büyük oranda çözmektedir. Çok eski bir yöntem olmasına rağmen halen kullanılmaktadır ve neredeyse standart kenar bulma algoritması haline gelmiştir (Url–2). Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında işlem yükünün fazla olmasına rağmen, birçok farklı uygulamada diğer metotlara göre daha iyi sonuçlar vermektedir (Rangarajan, 2010).

Canny kenar arama algoritmasında öncelikle görüntüdeki olası gürültüleri gidermek için bir filtre ile yumuşatılır. Gradyenler hesaplanır ve yerel maksimumlar belirlenir. Görüntü eşiklenerek potansiyel kenarlar belirlenir. Kenar olduğu kesin olan kenarlara bağlı olmayan diğer kenarlar baskılanarak sonuç kenarlar belirlenir (Url–2).

Canny kenar arama algoritmasından sonra, Hough dönüşümü uygulanarak görüntüdeki doğrular belirlenir.

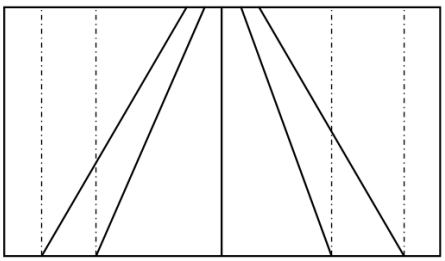
5.3.2 Görüntünün rektifikasyonu

Kaçış noktasının yeri dönüşüm öncesinde resim üzerindeki ilgi alanının (ROI) belirlenmesi işleminde de kullanılacaktır. Kaçış noktasının görüntü dışında kaldığı durumlarda görüntünün kesilmesine gerek yoktur. Kaçış noktasının görüntü içerisinde olması durumunda, kaçış noktasının yukarısındaki bölge uygulama açısından anlamsız olacaktır. Görüntünün bu kısmında nesneleri ayırt edebilmek dahi mümkün değilken hızlarının bulunması imkansızdır. Bu yüzden kaçış noktası yardımıyla görüntü kesilerek sadece anlamlı kısmın kalması sağlanır.

Kaçış noktasının yeri belirlenip, gerekmesi halinde, görüntü kesildikten sonra rektifikasyon işlemine geçilebilir. Dönüşümün yapılabilmesi için **(5.5)** denklemlerindeki a, b ve c katsayılarının hesaplanması gerekmektedir.

Katsayıları hesaplayabilmek için orijinal görüntüdeki paralel doğrular üzerinde seçilecek olan noktalardan yararlanılır. Seçilen noktaların ikinci sistemdeki

(düzeltilmiş görüntüdeki) karşılıkları olarak da şekil 5.3'de kesik çizgilerle gösterilen doğrulardan yararlanılır.



Şekil 5.3 : Orijinal ve düzeltilmiş doğrular.

Şekil 5.3'de koyu kenarlar mevcut görüntüdeki doğrular, kesik çizgilerde bu doğruların gerçekte olması gereken (nesne uzayındaki) halleridir. Bu örnekte, ilk görüntüde seçilen noktanın ikinci sistemdeki karşılığı olarak y koordinatı aynı kalırken, x koordinatı olarak kesikli çizgiyle ifade edilen doğrunun x koordinatı alınır ve böylelikle iki sistem arasındaki ortak noktalar ve kenarlar belirlenir.

Ortak noktalar belirlenip katsayılar hesaplandıktan sonra projektif dönüşüm yardımıyla görüntü rektifikasyonu yapılır.

6. GÖRÜNTÜLERDEN ÜÇ BOYUTLU MODEL OLUŞTURMA

Üç boyutlu model oluşturma işlemi, görüntülerin elde edilmesinden başlayıp, bilgisayarda üç boyutlu görsel modelin oluşturulmasına kadar olan işlemlerin tamamını kapsar. Üç boyutlu model oluşturma teknikleri son birkaç yılda büyük gelişmeler göstermiştir ve bu konudaki çalışmalar, tek nesneler ya da özel uygulama alanları (örneğin mimari gibi) üzerine yoğunlaşmıştır (Remondino, 2006). Üç boyutlu model oluşturmak için farklı yaklaşımlar vardır. Bulardan en iyi bilinenlerinden bir tanesi lazer tarayıcılarla nesnenin üzerine projekte edilen ışının yansımalarının gözlenmesiyle üç boyutlu modellerin elde edilmesidir. Bir diğer yaklaşımda, bu işlem için görüntülerden yararlanmaktır (Pollefeys ve Van Gool, 2002a). Günümüzde resimlerden veya video görüntülerinden doğru ve tam otomatik olarak üç boyutlu model oluşturma halen uğraşılan bir problemdir. Geliştirilen mevcut üç boyutlu model oluşturma tekniklerinin birçoğu, yarı otomatik yöntemlere dayanmaktadır ve güvenilir tam otomatik yöntemlerin geliştirilmesi işi fotogrametri ve bilgisayar alanlarının temel araştırma konularından birisi olmuştur (Remondino, 2006).

Üç boyutlu modelin oluşturulması işlemi, verilerin elde ediliş yöntemlerine ve kullanılacak tekniklere göre farklılıklar oluşturmaktadır. Video kameralar kullanılarak üç boyutlu model oluşturabilmek için genel olarak üç durum vardır: Birincisi, tek bir video kamera ile farklı konumlardan elde edilen görüntüler kullanarak, ikincisi stereo kameralar yardımıyla elde edilen görüntüler kullanılarak ve son olarak tek bir görüntü kullanarak üç boyutlu model elde etme yöntemlerinden söz edilebilir.

Nesne veya sahnenin üç boyutlu modellenmesi için 4 alternatif yöntemden bahsedilebilir:

1. Görüntü tabanlı sahneleme-yorumlama (Image Based Rendering): Tam olarak geometrik üç boyutlu modelin oluşturulmasını kapsamaz fakat belirli nesnelerin, özellikli kamera hareketleri ve sahne koşullarının görsel modellerinin oluşturulması için etkin bir tekniktir.

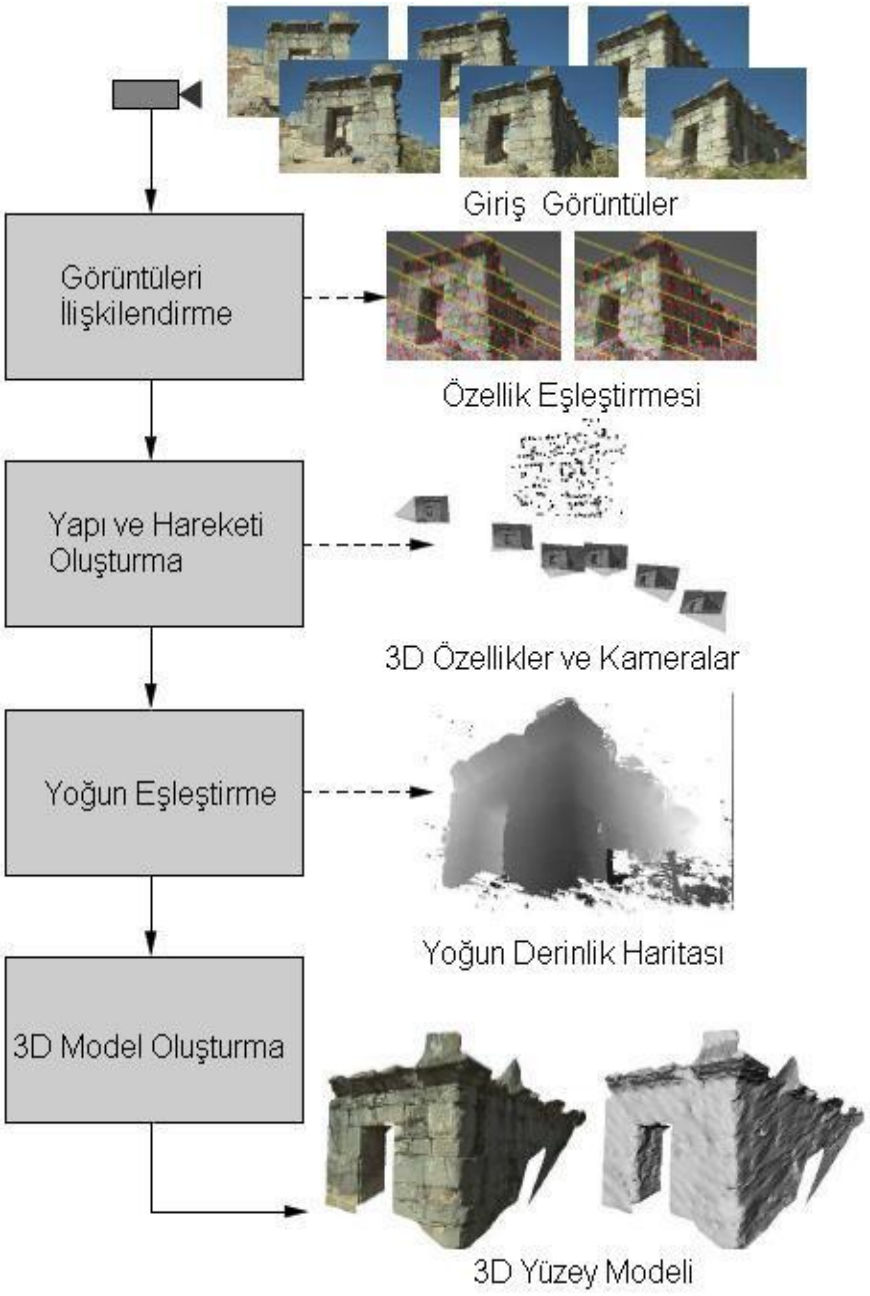
2. Görüntü tabanlı modelleme (Image Based Modeling): Mimari nesnelerin geometrik yüzeylerinin oluşturulmasında, duyarlı arazi ve şehir modellemesinde geniş bir kullanım alanı vardır. Görüntü tabanlı modelleme, iki boyutlu görüntü noktalarını (ve karşılıklarını) kullanarak üç boyutlu nesne bilgilerinin bulunması (örneğin fotogrametri) ya da yüzey normallerini üç boyutlu veri yerine, gölgelemeden şekil belirleme, dokudan şekil belirleme işlemlerini kapsar.
3. Mesafe tabanlı modelleme (Range Based Modeling): Bu yöntemde üç boyutlu geometrik bilgi doğrudan nesne üzerinden elde edilir. Bunun için pahalı aktif algılayıcılar (lazer taratıcılar gibi) kullanılır. Herhangi bir nesnenin yüksek detaylı ve doğruluklu görünümü elde edilir.
4. Görüntü ve mesafe tabanlı modelleme: Fotogrametri ve lazer tarayıcıların birleştirilmesi tekniğidir. Burada genellikle basit şekiller (düzlemsel nesneler) görüntü tabanlı olarak, detaylı şekiller (örneğin rölyefler, kabartmalar) mesafe tabanlı olarak modellenir (Remondino, 2006).

Bu çalışmada stereo kameralar kullanılarak, görüntü tabanlı üç boyutlu model oluşturma teknikleri araştırılmıştır.

Görüntülerden, tam, detaylı, yüksek doğruluklu ve güvenilebilir üç boyutlu model oluşturma işi halen zor bir problemdir. Genellikle kalibrasyonu yapılmamış kameralar ve ayrık görüntüler kullanılmaktadır. İlk olarak kamera parametrelerinin yanlış ya da eksik elde edilmesi, sonuçta hatalı ve bozuk model oluşmasına neden olacaktır. İkinci olarak da görüntüler arasında geniş baz mesafeleri bulunması, nokta ölçümleri sırasında kullanıcı müdahalesi gerektirmektedir. Görüntü tabanlı modelleme, tanım olarak görüntülerden güvenilir üç boyutlu bilgilerin elde edilmesidir. Özellikle fotogrametri, görüntüler yardımıyla nesnelerin üç boyutlu modellerinin oluşturulması işi ile senelerdir uğraşmaktadır. Bunu için güvenilir kalibrasyon ve yöneltme işlemlerinin yapılması gerekmektedir (Remondino, 2006).

Üç boyutlu model oluşturabilmek için ilk adım karşılıklı görüntü karelerinin ilişkilendirilmesidir. Bunun için epipolar geometriden yararlanılacaktır. Görüntülerin rektifikasyonu ve geri çatılması işlemi için temel matrislerden (fundamental matrix) yararlanılacaktır.

Karşılıklı stereo görüntülerdeki aynı özellik noktaları bulunacaktır, bu adımın sonucunda farklılık haritası (disparity map, y paralaksı giderilmiş normal konumdaki x paralaksları) elde edilecektir. Buradan bulunan tüm noktaların kameraya olan uzaklıkları triangulasyon yardımıyla bulunacak ve derinlik haritası (depth map) elde edilecek ve son olarak nokta bulutları yani üç boyutlu model koordinatları elde edilecektir. İşlem akış şeması şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1 : 3 Boyutlu model elde etme işlem akış şeması (Pollefeys, ve diğ., 2002b).

6.1 Epipolar Geometri

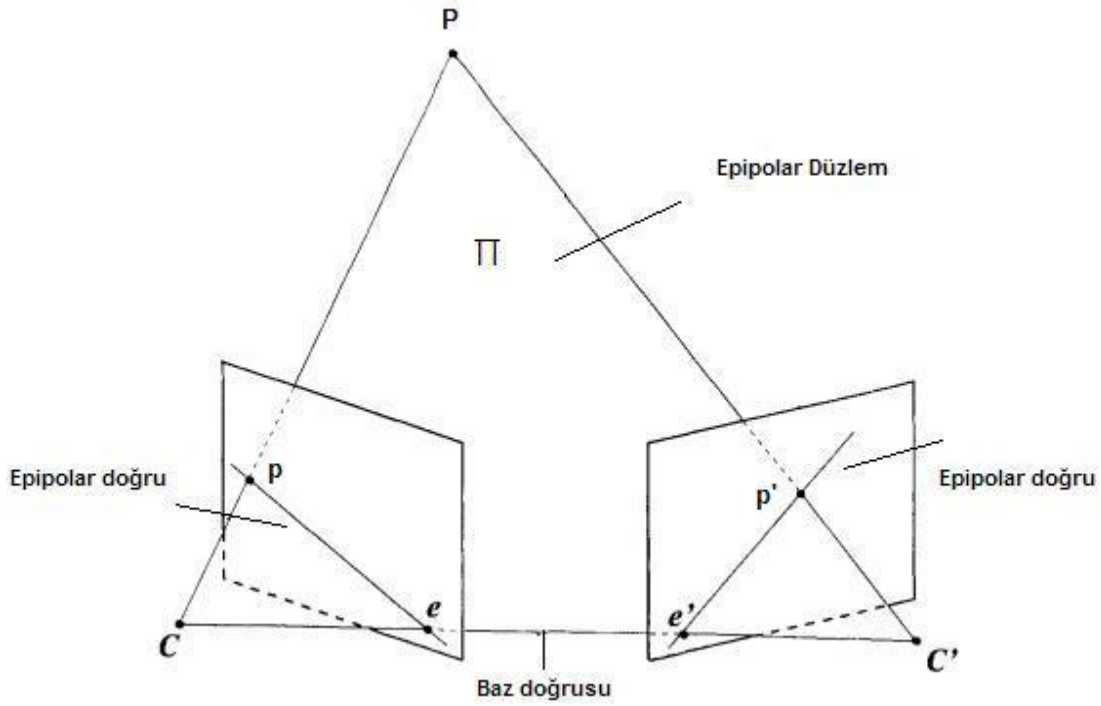
Aynı nesne bölgesine ait farklı konumlardan çekilmiş resim çiftlerinde, resimler ve nesne uzayı arasındaki geometrik ilişkiler, en genel olarak epipolar geometri ile ifade edilirler. Epipolar geometri, her bir resmin nesne uzayı ile ilişkisini ifade ettiği gibi, resimlerin birbiriyle bağıl ilişkilerini de aynı anda ifade eder. Bu nedenle, resimlerin birbiriyle bağıl ilişkileri ele alınacak, bu ilişkilerin temel ve esas matrislerle yorumlanması ve bu yaklaşımla görüntülerin normalleştirilmesi işlemi yapılacaktır.

Elde edilecek normal görüntüler otomatik görüntü eşleştirme ve üç boyutlu nesne modellerinin geri çatılması (3D reconstruction) işlem adımlarında büyük kolaylık sağlayacaktır. Normalleştirilmiş yani, normal resim çekim konumuna getirilmiş görüntülerden, otomatik olarak görüntü eşleştirme yoluyla resim koordinatlarının ölçülmesi daha kolay ve hızlı olmaktadır. Görüntü eşleştirme probleminin otomatik olarak gerçekleştirilmesi sayesinde, üç boyutlu nesne modellerinin elde edilmesi sağlanacaktır. Bu uygulamaların gerçekleştirilmesi için kullanılabilecek yaklaşımlar da, epipolar geometri yöntemi kullanılarak sağlanacaktır.

Stereo görüntülemenin temelini epipolar geometri oluşturur. Epipolar geometri iki iğne deliği kamera modelini ve epipol (epipole) noktalarını içerir. İki kameranın izdüşüm noktaları (C, C'), cisim noktası (P) ve cisim noktasının iki görüntüdeki karşılıkları (p, p') aynı düzlem üzerindedir. Bu düzleme epipolar düzlem ($\prod$) denir. Şekil 6.2'de epipolar geometri gösterilmiştir.

İki izdüşüm merkezi arasındaki doğruya baz doğrusu denir. Bu doğrun görüntüleri kestiği varsayılan noktalara da epipol (e, e') denir. Bir başka ifadeyle, bir kamera merkezinin (izdüşüm merkezinin) diğer görüntüdeki izdüşümüne epipol denir. Epipol noktalarıyla resim noktalarını birleştiren doğruya da epipolar doğru denir.

Kameranın görüş alanındaki her üç boyutlu nokta, görüntüleri epipolar doğrularla kesen epipolar düzlem üzerinde yer alır. Bir görüntüdeki noktanın diğer görüntüdeki karşılığı, diğer resimdeki karşılık gelen epipolar doğru üzerindedir. Bu epipolar kısıtlama olarak bilinir. Epipolar kısıtlama, iki görüntüdeki karşılıklı noktaların bulunmasında, bir noktanın karşılığını diğer görüntüde iki boyutlu bir pencerede aramak yerine tek boyuta düşürür. Bu sayede hesaplama yükünün büyük oranda azalmasının yanı sıra yanlış eşleştirmelerinde büyük oranda önüne geçilmesini sağlar (Bradsky ve Kaehler, 2008).



Şekil 6.2 : Epipolar geometri.

6.1.1 Temel matris

Kısaca tanımlamak gerekirse, temel matris (Fundamental Matrix) epipolar geometrinin cebirsel gösterimidir. Temel matris bir görüntüdeki nokta ve epipolar doğru ile diğer görüntüdeki karşılıkları arasındaki dönüşümü tanımlar. Temel matris farklı iki konumdan çekilmiş görüntüler arasındaki öteleme, dönüklük bilgilerinin yanı sıra kameraların iç yöneltmelerini de içerir. Epipolar kısıtlama matematiksel olarak formüle edilirse;

$$\boldsymbol{x'^{T}Fx} = 0 \qquad \textbf{(6.1)}$$

şeklinde yazılabilir. Burada **F** , temel matris olmak üzere temel matrisin bazı özeliklerini şu şekilde sıralanabilir:

- Eğer **F**, iki kamera arasındaki (C, C') temel matrisse, $\mathbf{F}^{T}$ de (C', C) için temel matristir.
- Birinci görüntüdeki x noktası için epipolar doğru,

$$\boldsymbol{l' = Fx} \qquad \textbf{(6.2)}$$

şeklinde tanımlanır. Benzer şekilde ikinci görüntüdeki x' noktası içinde;

$$l = \boldsymbol{F}^T \boldsymbol{x}' \quad \textbf{(6.3)}$$

şeklinde epipolar doğru tanımlanır.

- Epipolar doğru $l' = \boldsymbol{F}\boldsymbol{x}$ epipol e^{l} yü içerir (Lu, 2005).

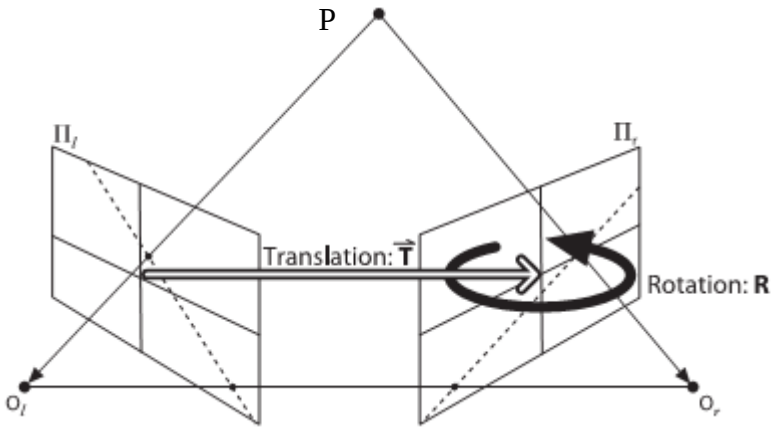
6.1.2 Esas matris

Esas matris (Essential matrix) hemen hemen temel matrisle aynıdır. Esas matris kameraların iç yöneltmelerini içermez. Temel matris ile arasındaki fark, temel matris kameraların kalibrasyonunun yapılmadığını varsayarken, esas matris kalibrasyonun yapıldığını varsayar. Temel matris gibi esas matrisi tanımlayan eşitlikte;

$$\boldsymbol{x}'^{T} \boldsymbol{E}\boldsymbol{x} = 0 \quad \textbf{(6.3)}$$

şeklindedir. Yukarıda temel matris için sayılan özellikler esas matris içinde aynen geçerlidir (Lu, 2005).

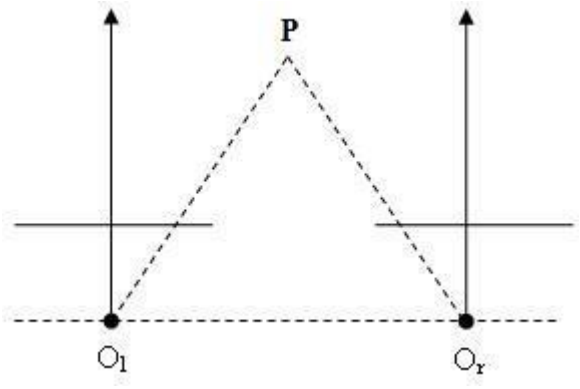
Epipolar geometri kurulup, temel matris bulunduktan sonra, epipolar doğrular hesaplanır ve projektif dönüşüm yapılır. Görüntülerin birbirilerine göre hizalanması sağlanır. Ancak görüntülerden global ölçeği belirlemeye imkan yoktur. Oluşturulan model keyfi ölçektedir ve metrik düzeye yükseltmek gerekmektedir. Bunun içinde stereo kalibrasyon yapmak gerekir. Stereo kalibrasyon işlemi, iki izdüşüm noktasının uzaydaki geometrik ilişkisinin belirlenmesidir. Bunun için şekil 6.3'de gösterilen öteleme (**T**) ve dönüklüklerin (**R**) belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 6.3 : Öteleme ve dönüklükler (Bradsky ve Kaehler, 2008).

6.2 Stereo Kalibrasyon

Stereo kalibrasyon, üç boyutlu uzayda iki kamera arasındaki geometrik ilişkinin hesaplanması işlemidir. Sonraki bölümde ele alınacak olan stereo rektifikasyon işlemi, iki stereo görüntünün, aynı doğru üzerinde bulunan (birbirime göre dönüklükleri olmayan) kameralardan çekilmiş gibi düzeltilmesidir. Böyle bir rektifikasyonla, iki kameranın optik eksenleri birbirine paralel, dolayısıyla kesişimleri de sonsuzda olacaktır (şekil 6.4).



Şekil 6.4 : Hizalanmış kameralar.

Stereo kalibrasyon şekil 6.3'de gösterilen, iki kamera arasındaki **R** dönüklük matrisi ve **T** öteleme vektörünün bulunmasına bağlıdır. Her iki kamera için ayrı ayrı $\mathbf{R_l}$, $\mathbf{T_l}$ ve $\mathbf{R_r}$, $\mathbf{T_r}$ matris ve vektörlerini hesaplamak mümkündür. Bu önceki bölümlerde ele alınmıştır. İki kamera arasındaki **R** dönüklük matrisi ve **T** öteleme vektörünü bulabilmek için şekil 6.3'den yararlanılabilir. **P** üç boyutlu koordinatları bilinen herhangi bir nokta olmak üzere bu noktanın sağ ve sol resimdeki karşılıkları için;

$$\mathbf{P_l} = \mathbf{R_l}\mathbf{P} + \mathbf{T_l}$$
$$\mathbf{P_r} = \mathbf{R_r}\mathbf{P} + \mathbf{T_r} \qquad \textbf{(6.5)}$$

yazılabilir. Şekil 6.3'den **P** noktasının iki kameradan görünüşü;

$$\mathbf{P_l} = \mathbf{R}^{\mathbf{T}}(\mathbf{P_r} - \mathbf{T}) \qquad \textbf{(6.6)}$$

bağıntısıyla ilişkilendirilebilir. **(6.5)** ve **(6.6)** denklemleri ile **R** matrisi ve **T** vektörü için;

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_r (\mathbf{R}_l)^T$$
$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_r - \mathbf{R}\mathbf{T}_l \quad \textbf{(6.7)}$$

eşitlikleri elde edilir.

6.3 Görüntü Çiftlerinin Rektifikasyonu

Buraya kadar görüntü çiftleri arasında kalibrasyonu yapılıp **R** dönüklük matrisi, **T** öteleme vektörü ve **F** temel matrisi de elde edilmiştir. Sonraki işlem adımlarında epipolar kısıtlama ile otomatik görüntü eşleştirmenin tek boyuta indirilebilmesi için görüntü çiftlerinin projektif rektifikasyonu yapılır. Burada rektifikasyondan kasıt, yapılacak projektif bir dönüşümle stereo görüntü çiftinin epipolar doğrularının kolineer ve genellikle yatay eksenle paralel olmasını sağlamaktır. Bu rektifikasyonu yapılmış görüntü çifti, normalize stereo görüntü çifti olarak da adlandırılır. Rektifikasyonu yapılmış görüntü çiftlerini kullanmanın en büyük avantajı, karşılıklı noktaları iki görüntüde de aynı doğru üzerinde olmasıdır (Schmidt ve diğ., 2002). Rektifikasyon sonucunda iki görüntü aynı düzlemde ve tam olarak tüm satırları hizalanmış konuma gelir (normal konum). Şekil 6.5'de bu durum gösterilmiştir.



Şekil 6.5 : Stereo rektifikasyonu yapılmış görüntüler (Bradsky ve Kaehler, 2008).

6.4 Stereo Karşılıkların Bulunması

Stereo karşılıkların bulunması işlemi, bir görüntüdeki bir pikselin ya da nesnenin diğer görüntüdeki karşılığının bulunmasıdır. Stereo karşılıkların bulunması yani, iki farklı kamera görüntülerinin karşılıklı olarak eşleştirilmesi, sadece iki kameranın ortak olarak gördüğü bölgede yapılabilir. Stereo görüntülerin eşleştirilmesi için genel olarak temel iki algoritma vardır; özellik tabanlı (feature based) ve alan tabanlı (area-region based) algoritmalar.

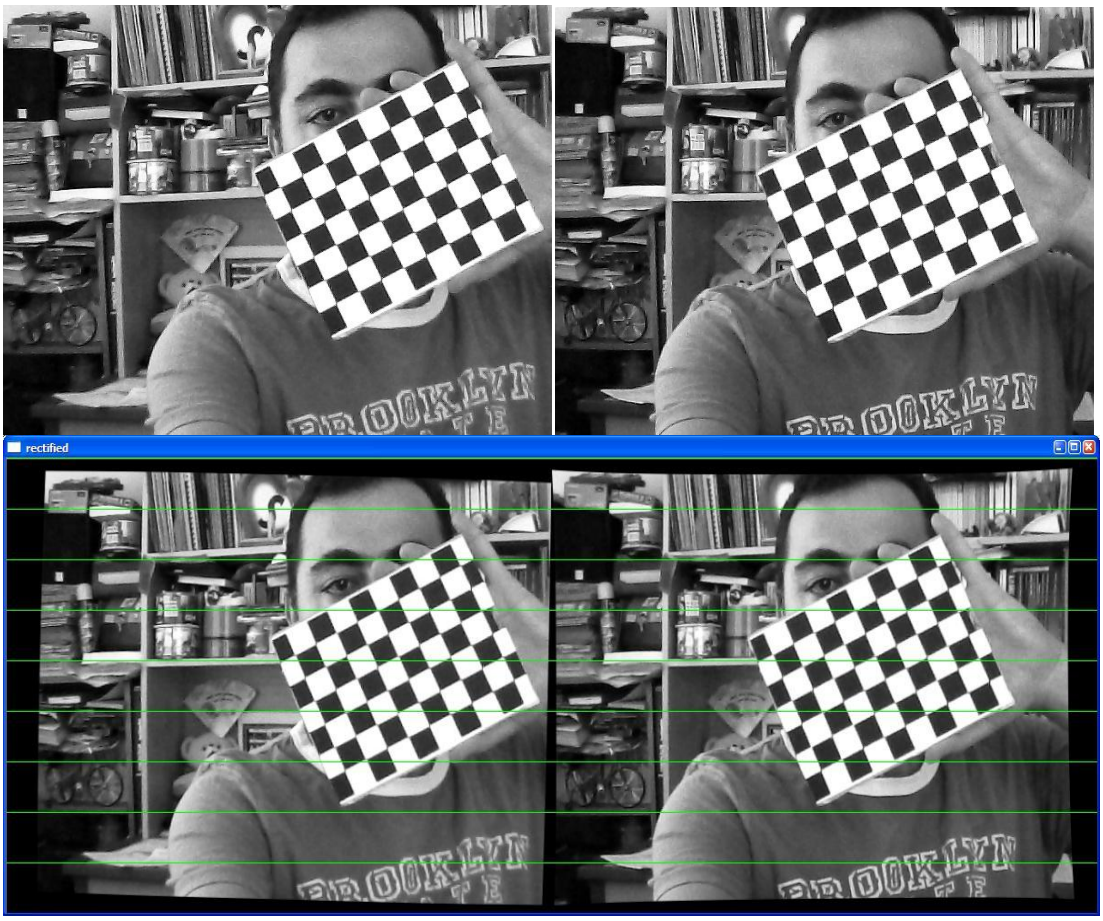
Özellik tabanlı eşleştirme algoritmalarında öncelikle özellikler çıkarılır ve diğer görüntüdeki karşılığı aranır. Bu özellikler iki görüntüde de tekil olmalıdır, köşe noktaları, kenarlar gibi. Sonuç haritalar az detaylı olur ve görüntüdeki her piksel için derinlik haritaları belirlenemez. Bu tarz bir yaklaşım olan optik akış yöntemi bölüm 4.3'de anlatılmıştır.

Bir diğer eşleştirme algoritması da, alan tabanlı eşleştirme algoritmalarıdır. Bu yöntemde görüntüdeki her pikselin, diğer görüntüdeki karşılığı aranır. Bunun için piksellerin parlaklık değerlerinden yararlanılır. Sağ görüntüdeki piksel, sol görüntüde seçilen blok (komşuluk) içerisinde, komşu piksellerle karşılaştırma yapılarak bulunur. Bu algoritmanın sonunda görüntüdeki tüm pikseller için farklılık (disparity) haritaları bulunur. Sonucun doğruluğu seçilecek blok boyutuna bağlıdır. Boyutun büyütülmesi olası hatalı eşleştirmeleri azaltırken işlem yükü de hızla artar.

6.4.1 Blok eşleştirme algoritması

Bu çalışmada da alan tabanlı eşleştirme algoritmalarından biri olan, stereo blok eşleştirme algoritması araştırılmıştır. Yöntem sağ ve sol görüntüdeki noktaların eşlerini bulmak için mutlak farkların toplamı (sum of absolute differnce-SAD) yöntemini kullanır (Bradsky ve Kaehler, 2008).

SAD yöntemi, v_x x v_y boyutundaki pencere içerisinde tüm merkez pikseller için parlaklık değerlerinin farklarını hesaplar. Görüntülerin distorsiyonları giderilip karşılıklı rektifikasyonları yapıldığı için yani, görüntülerin satırları tam olarak aynı hizaya getirildiği için, sol görüntüdeki bir nokta sağ görüntüde aynı doğru üzerinde olacaktır (Şekil 6.6).



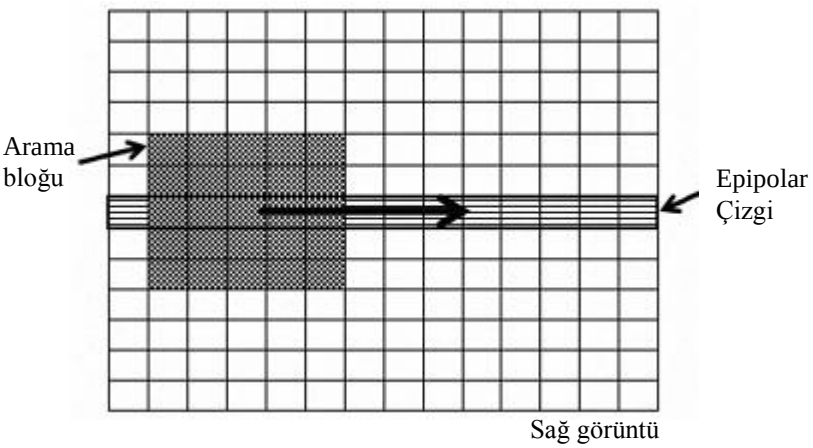
Şekil 6.6 : Karşılıklı satırları hizalanmış görüntüler.

Dolayısıyla bir görüntüdeki noktanın diğer görüntüde aranması tek boyuta indirgenmiştir. SAD algoritması **(6.8)**'de verilmiştir.

$$SAD_{v}(x,y) = \sum_{i=-w/2}^{w/2} \sum_{j=-w/2}^{w/2} \left\| g_{t}(x+i, y+j) - g_{t-1}(x+v_{x}+i, y+v_{y}+j) \right\| \qquad \textbf{(6.8)}$$

Burada g_t ve g_{t-1} karşılıklı görüntüler, v_x ve v_y aramanın yapıldığı pencere boyutları, w x w ise görüntüdeki (x, y) konumundaki blok boyutudur (Nitsuma ve Maruyama, 2005).

Sol görüntüdeki seçili komşuluk içerisindeki tüm piksellerin parlaklık değerleri toplanır. Sağ görüntüdeki piksellerin toplamından farklarının mutlak değeri alınır. Elde edilen en küçük değer en iyi eşleştirmedir. Şekil 6.7'de SAD blok eşleştirme algoritmasının genel işleyişi gösterilmiştir.



Şekil 6.7 : SAD ile eşleştirme işlemi (Hamzah ve diğ., 2010).

Yöntemde sadece güçlü eşleştirmelerin olduğu noktalar bulunur, yani dokunun yüksek olduğu (high-texture) sahnelerde piksellerin tamamının derinlikleri belirlenebilir. İşlem adımları kısaca şöyledir;

1. Görüntü parlaklıklarındaki farklılıkların giderilmesi ve görüntü dokusunun iyileştirilmesi için ön filtreleme yapılır.
2. SAD penceresi kullanılarak epipolar doğru üzerinde karşılıklar aranır. Doku yeterliyse eşleştirme bulunur.
3. Hatalı eşleştirmeler elenir.

İşlem sonucunda, görüntüdeki tüm piksellerin karşılıkları, dolayısıyla farklılık haritaları elde edilmiş olacaktır (Hamzah ve diğ., 2010).

6.4.2 Graph cut algoritması

Farklılık haritalarının belirlenmesinde sıklıkla kullanılan bir diğer yöntemde Graph Cut algoritmasıdır. Normal görüntü eşleştirme algoritmaları, sağ ve sol görüntüdeki pikselleri eşleştirmek için genellikle bir takım özelliklerden (piksel parlaklığı gibi) yararlanmaktadır. Graph Cut algoritması ise enerjinin minimasyonu algoritmasına dayanmaktadır (Dainese ve diğ., 2005). Enerji minimasyonu algoritması, en iyi farklılık haritası **f**'nin, yumuşaklık (smoothness) ve veri (data) terimlerini içeren enerjiyi minimize etmesi olarak tanımlanır (Kim ve diğ., 2003).

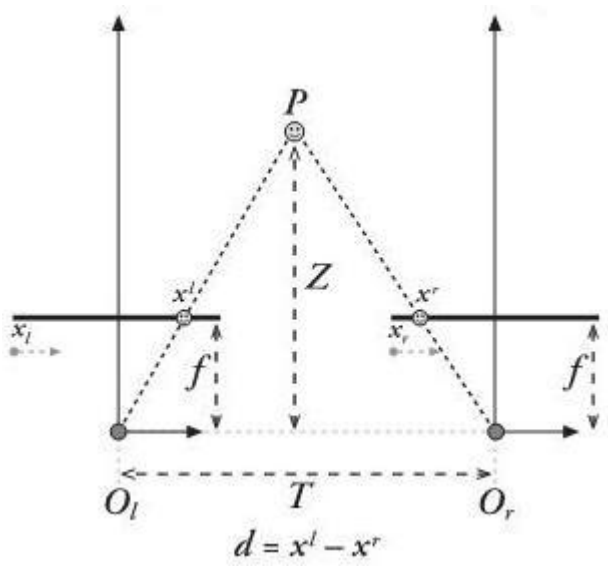
$$E(f) = E_{smooth}(f) + E_{data}(f) \qquad \textbf{(6.9)}$$

Graph cut algoritması, blok eşleştirme algoritmalarına göre daha kaliteli sonuçlar vermesine rağmen, blok eşleştirme algoritmaları çok daha hızlıdır.

6.5 Üç Boyutlu Model Koordinatlarının Elde Edilmesi

Buraya kadar olan bölümlerde distorsiyonların giderilmesi, görüntülerin tam olarak hizalanması ve yöneltme elemanlarının belirlenmesi anlatılmıştır. İki farklı konumdaki kameranın görüntüleri aynı düzleme getirilip, optik eksenleri paralel hale getirilmiştir. Ayrıca iki görüntünün satırları tam olarak aynı hizaya getirilmiştir.

Kalibrasyondan işlemi sonucu elde edilen kamera parametreleri ve stereo karşılıkların bulunması sonucu elde edilen farklılık haritalarıyla derinlik haritaları dolayısıyla üç boyutlu model koordinatları belirlenebilir.



Şekil 6.8 : Normalize edilmiş stereo kameralar (Bradsky ve Kaehler, 2008).

Önceki bölümde sağ ve sol görüntüdeki piksellerin eşleştirilmesi anlatılmıştır. Görüntülerin satırları tam olarak aynı hizaya getirildiği için sol görüntüdeki bir nokta sağ görüntüde aynı doğru üzerinde olacaktır. Nesne uzayındaki bir P noktasının resimdeki karşılıkları, x^l ve x^r olsun. Şekil 6.8'den de görülebileceği gibi farklılık basit olarak;

$$d = x^l - x^r \qquad \textbf{(6.10)}$$

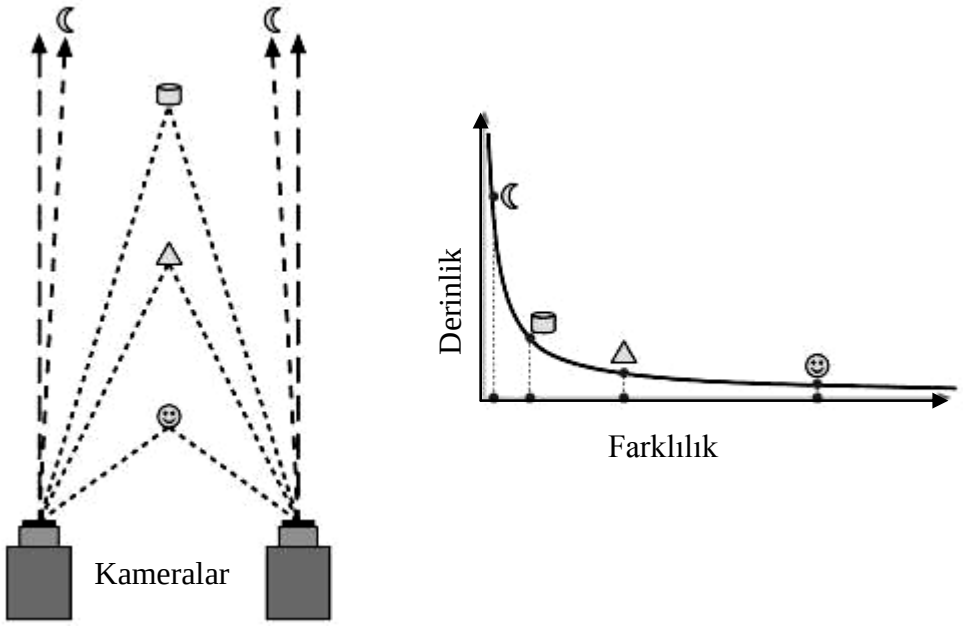
şeklinde bulunabilir. Bu işlemi tüm detay noktaları için tekrarlanırsa farklılık haritası elde edilir.

Derinlik (Z) ise şekil 6.8'deki benzer üçgenlerden,

$$\frac{T-(x^{l}-x')}{Z-f}=\frac{T}{Z}\Rightarrow Z=\frac{fT}{x^{l}-x'} \qquad \textbf{(6.11)}$$

şeklinde bulunur.

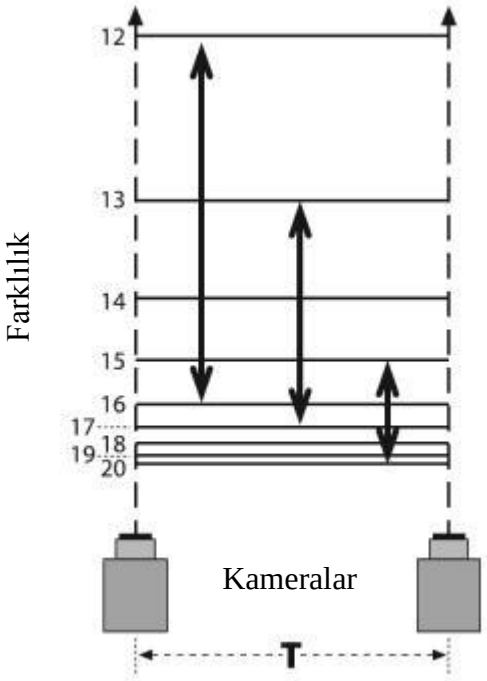
Derinlik farklılıkla ters orantılı olduğundan, bu iki terim arasında lineer olmayan bir ilişki vardır. Farklılık 0'a yakın olduğunda, küçük farklılık farkları (disparity differences) büyük derinlik farklarını oluşturacaktır. Farklılık büyük olduğunda ise, küçük farklılık farkları derinliği fazla değiştirmeyecektir. Sonuç olarak bu tür bir stereo görüş sisteminde sadece kameraya yakın nesnelerde derinlik çözünürlüğü yüksek olacaktır. Şekil 6.9'da bu durum gösterilmiştir.



Şekil 6.9 : Farklılık ve derinlik ilişkisi (Bradsky ve Kaehler, 2008).

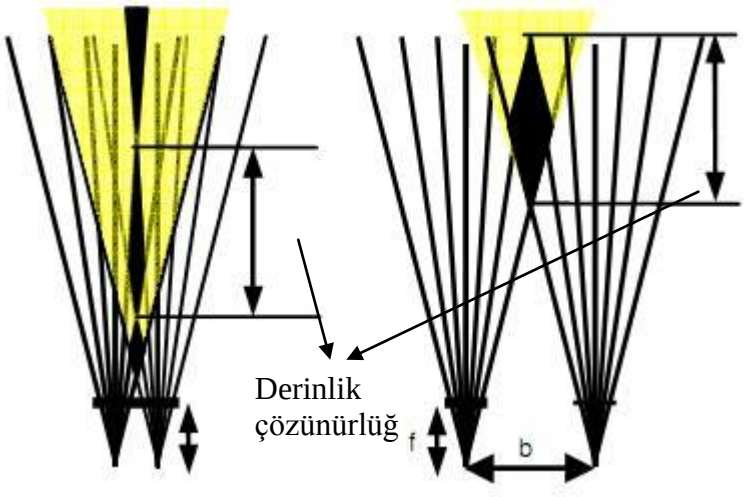
Elde edilecek derinlik seçilecek farklılık büyüklüğüne de bağlıdır. Eşleştirme işleminde arama, verilecek en küçük farklılık değerinden (genellikle 0 piksel) başlayıp en büyük farklılık değerleri arasında arama yapılacaktır. Farklılık büyüklüğü azaltmak, epipolar doğru üzerinde yapılacak hesaplama zamanını düşürmektir. Büyük farklılık değerleri yakın mesafeleri temsil edecektir. Aralık içerisindeki her farklılık değeri kameralardan sabit uzaklıktaki düzlemlere karşılık

gelmektedir. Bu durum şekil 6.10'da gösterilmiştir. Bu aralık dışında kalan pikseller delik (hole) olarak adlandırılmakta ve bu bölgelerde derinlik bilgisi elde edilememektedir. Bu delikler görüntüde siyah ile temsil edilir. Bunun dışında, kameraların orak görüş alanına bağlı olarak, sol görüntüde olup sağ görüntüde olmayan özellikler içinde derinlik bilgisi elde edilemeyeceğinden siyah ile temsil edilirler.



Şekil 6.10 : Oluşan düzlemler.

Stereo görüş sisteminde elde edilebilecek derinlik çözünürlüğü kameralar arasındaki baz uzunluğuna doğrudan bağlıdır.



Şekil 6.11 : Derinlik çözünürlüğü (Kytö ve diğ., 2011).

Çözünürlüğünün şematik gösterimi şekil 6.11'de verilmiştir. Şekilde farklı baz uzunluklarında elde edilecek derinlik çözünürlükleri gösterilmiştir. Baz uzunluğunun artırılması, derilik çözünürlüğünü de artırmaktadır (Kytö ve diğ., 2011).

Derinlik çözünürlüğünü Δd verilen en küçük farklılık artırımı olmak üzere;

$$\Delta Z = \frac{Z^2}{f.T}\Delta d \qquad \textbf{(6.12)}$$

eşitliğinden hesaplanabilir (Bradsky ve Kaehler, 2008).

Üç boyutlu koordinatların hesaplanabilmesi için farklılık haritasından ve stereo rektifikasyon adımında elde edilen geriye projeksiyon (reprojection) matrisinden yararlanılır. $\mathbf{Q_{rep}}$ 4x4'lük geriye projeksiyon matrisi olmak üzere;

$$\begin{aligned} X &= x * \mathbf{Q_{rep}}(0,0) + \mathbf{Q_{rep}}(0,3) \\ Y &= y * \mathbf{Q_{rep}}(1,1) + \mathbf{Q_{rep}}(1,3) \\ Z &= \mathbf{Q_{rep}}(2,3) \end{aligned} \qquad \textbf{(6.13)}$$

yazılabilir.

$$W = d * \mathbf{Q_{rep}}(0,3) + \mathbf{Q_{rep}}(3,3) \qquad \textbf{(6.14)}$$

olmak üzere, üç boyutlu koordinatlar;

$$\begin{aligned} X &= X/W \\ Y &= Y/W \\ Z &= Z/W \end{aligned} \qquad \textbf{(6.15)}$$

şeklinde elde edilir (Bradsky ve Kaehler, 2008).

7. UYGULAMALAR

Çalışma kapsamında 3 farklı uygulama yapılmıştır. Araç hızlarını belirlemek için tek kamera kullanılarak yandan ve üstten yapılan çekimler kullanılmıştır. Yapılan üçüncü uygulamada hareketli nesnenin üç boyutlu modellenmesi amaçlanmıştır.

Kullanılan teknikler farklı olduğu için, uygulamalar araç hızlarının belirlenmesi ve üç boyutlu modellerin oluşturulması olarak iki ayrı başlık altında verilecektir.

7.1 Araç Hızlarının Belirlenmesi

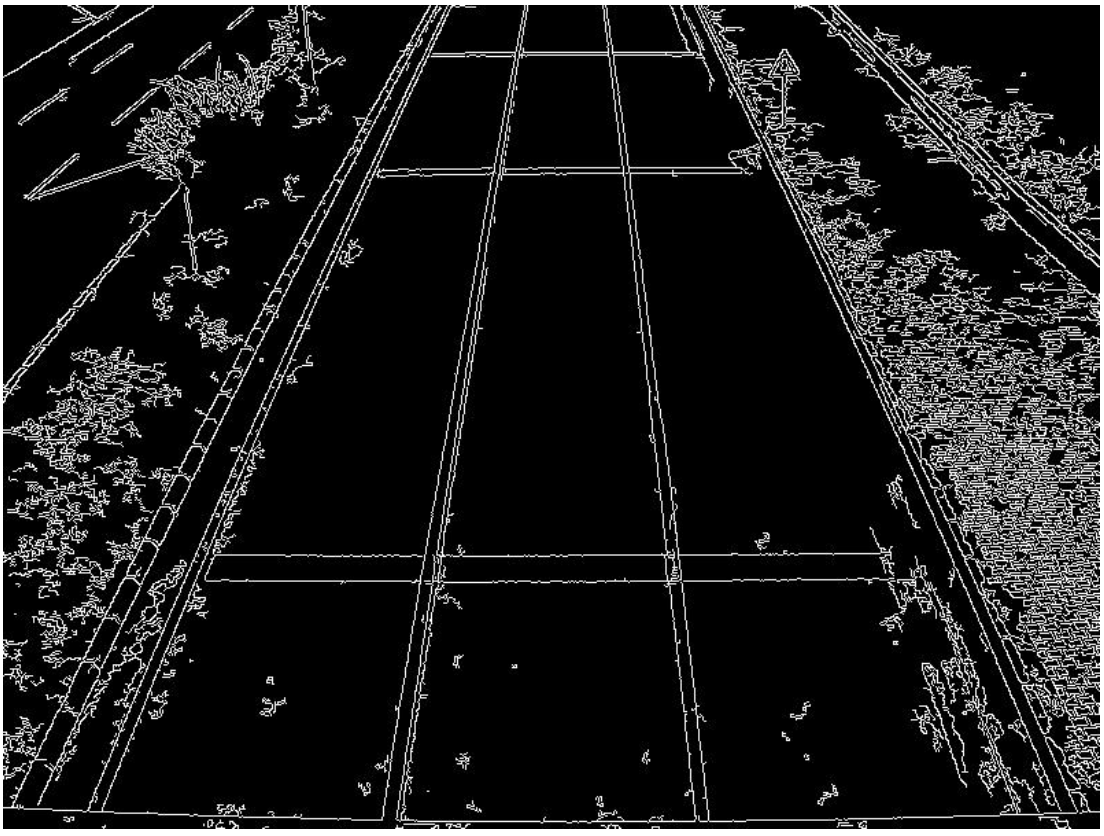
Uygulamada, çözünürlüğü 640x480 olan ve saniyede 30 resim karesi alabilen amatör dijital video kamera kullanılmıştır. Araç hızlarının belirlenebilmesi için görüntünün rektifikasyonun yapılması gerekmektedir. Bunun için bölüm 5.3 de anlatılan yöntemden yararlanılmıştır. Şekil 7.1 de üstten yapılan çekimin orijinal görüntüsü verilmiştir.



Şekil 7.1 : Orijinal görüntü.

Uygulama için hazırlanan yazılımda doğruların belirlenmesi için iki seçenek sunulmuştur. Birincisi görüntüdeki doğruların Hough dönüşümü ile otomatik olarak bulunması, ikinci olarak da doğruların kullanıcı tarafından görüntü üzerinden sayısallaştırılarak belirlenmesi. İlk olarak doğruların otomatik çıkarıldığı Hough dönüşümüne ait örnekler verilmiştir.

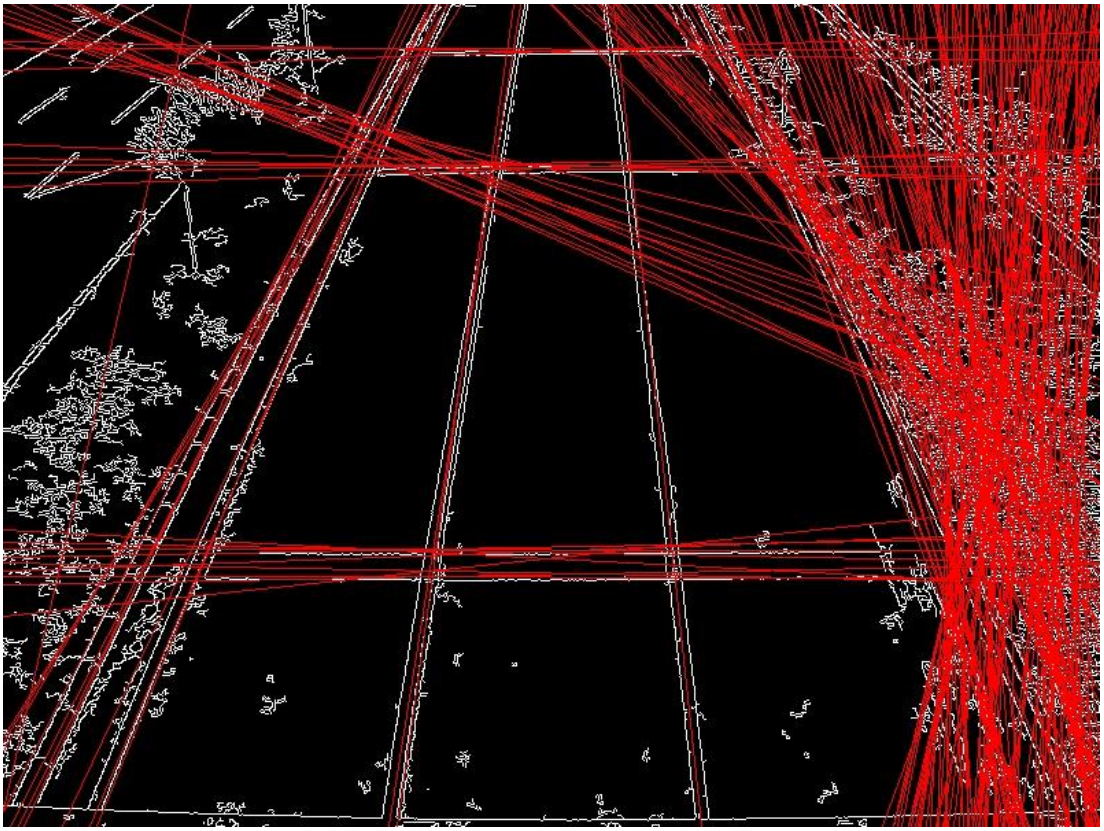
Daha önce değinildiği gibi Hough dönüşümü siyah-beyaz görüntüler üzerinde çalıştığından ve temel olarak amaç doğruları bulmak olduğundan, giriş görüntüsü üzerinde öncelikle Canny kenar arama operatörü uygulanarak olası kenarlar yaklaşık olarak bulunur. Canny algoritmasının görüntüye uygulanmasından sonra sonuç olarak siyah-beyaz bir görüntü elde edilir. Bulunan olası kenarlar, beyaz renkle gösterilir. Şekil 7.2 Canny kenar arama operatörü yardımıyla bulunan olası kenarlar gösterilmiştir.



Şekil 7.2 : Canny operatörü ile bulunan kenarlar.

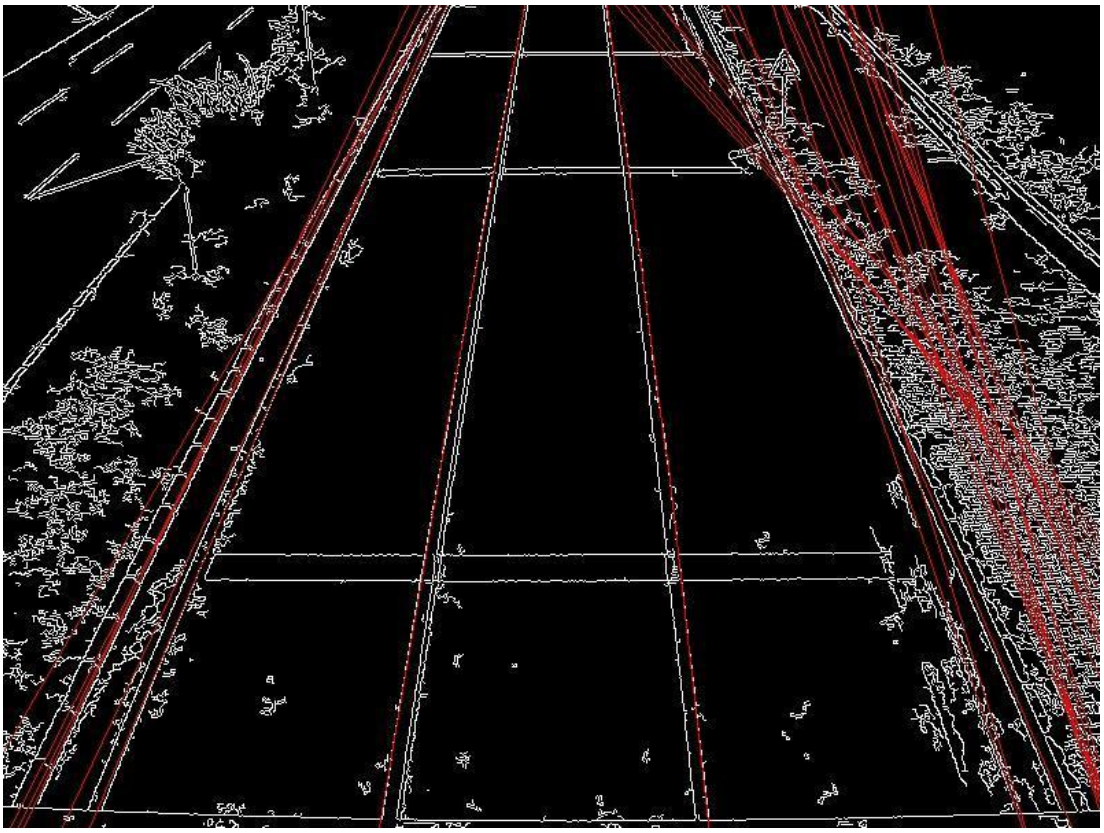
Kenarlar yaklaşık olarak bulunduktan sonra Hough dönüşümüyle görüntü üzerindeki doğrular bulunur. Bunun için görüntüye Canny algoritmasından sonra Hough algoritması uygulanır. Sonuç olarak görüntüdeki doğruların belirlenmesi amaçlanmaktadır. Ancak Hough dönüşümü görüntü üzerindeki her yöndeki ve çeşitli

uzunluktaki bütün doğruları bulacaktır. Şekil 7.3 de görüldüğü gibi işlem sonucunda 200'ün üzerinde ve farklı yönlerdeki doğrular bulunmuştur. Bulunan bu doğruların birçoğu hatalı ve gereksizdir. Elde edilen görüntüde kullanılacak doğruların seçilmesi neredeyse imkansızdır. Bu gereksiz doğrulardan kurtulmak için algoritmaya açı ve uzunluk şartı getirilmiş ve bulunan mevcut doğru sayısı azaltılmıştır.



Şekil 7.3 : Hough dönüşümü ile bulunan kenarlar.

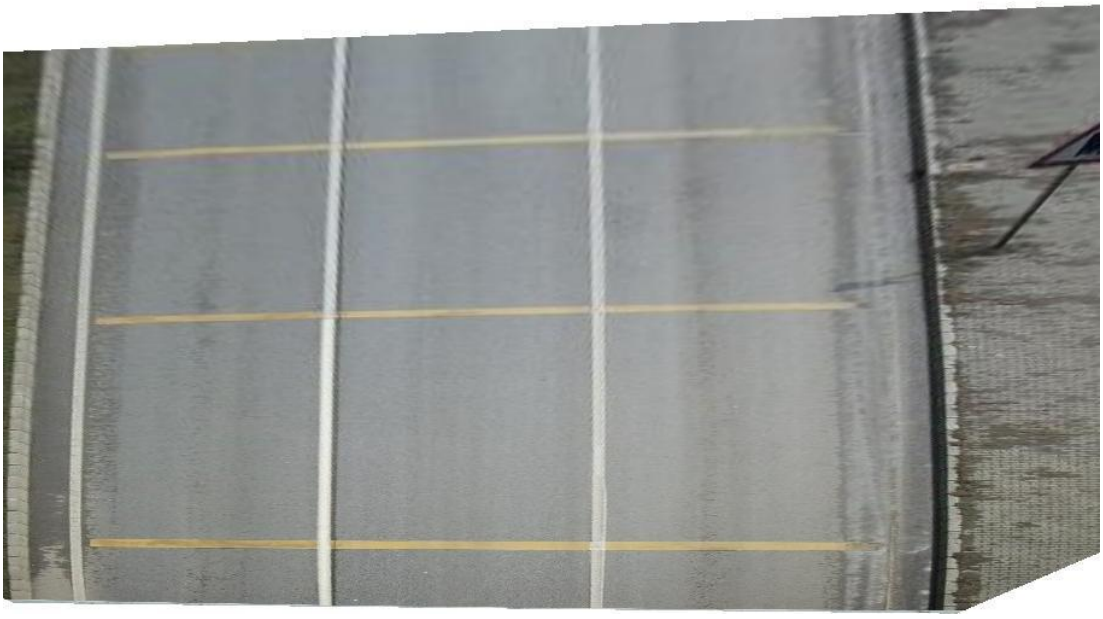
Şekil 7.4'de kalan doğrular gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi bu yeni görüntüden, kullanılacak doğruların seçilmesi olanaklı hale gelmiştir. Görüntüde halen gereksiz doğrular bulunmaktadır. Bunun nedeni, kaldırım dokusunun ve görüntüdeki mevcut gölgelerin Canny algoritması tarafından kenar olarak yorumlanmasından kaynaklanmaktadır. Ancak şekil 7.4'den de görüldüğü gibi bulunan bu hatalı doğrular, kullanılacak doğruların seçilmesinde engel teşkil etmemektedir.



Şekil 7.4 : Azaltılmış doğrular.

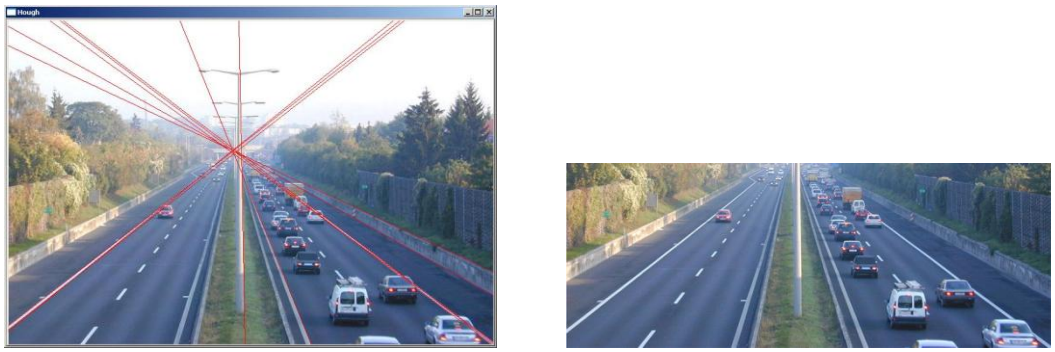
Şekil 7.4'de doğrular bulunduktan sonra, burada kaçış noktasının belirlenmesi için kullanılacak paralel doğrular seçilir. Doğruların kesim noktaları tek bir nokta olması gerekirken birden, farklı noktada da kesişebilmektedirler. Bunun nedeni ise bulunan doğruların gerçekte tamamen paralel olmayabilecekleri gibi, Hough dönüşümü ile doğruların bulunması için gerekli hesaplamalarda oluşan hatalardır. Bu nedenle kaçış noktasının yeri seçilen doğrular kullanılarak en küçük kareler yöntemiyle dengelemeli olarak bulunur (Temiz ve Külür, 2011). Kaçış noktasının yeri dengelemeli olarak bulunabileceği gibi, basit olarak bulunan farklı kesim noktalarının ortalamasının alındığı uygulamalar da vardır.

Paralel doğrular ve kaçış noktası bulunduktan sonra projektif dönüşüm katsayıları hesaplanır ve görüntünün rektifikasyonu yapılır. Şekil 7.5'de hough dönüşümüyle bulunan doğrular yardımıyla rektifikasyonu yapılmış görüntü gösterilmektedir.



Şekil 7.5 : Rektifikasyonu yapılmış görüntü.

Bu örnekte olduğu gibi kaçış noktası her zaman görüntü dışında olmayabilir. Kaçış noktasının görüntü içerisinde olması durumunda, kaçış noktasının üzerindeki kısım uygulama açısından anlamsız olacaktır. Bu durumda kaçış nokrasının üstündeki kısım kesilir. Şekil 7.6 da böyle bir durum ve kesilmiş görüntü verilmiştir.



Şekil 7.6: Orijinal ve kesilmiş görüntü.

Görüntünün yandan çekilmesinde de benzer şekilde doğrular bulunup görüntü rektifikasyonu yapılır. Şekil 7.7 orijinal ve düzeltilmiş görüntü verilmiştir.



Şekil 7.7 : Orijinal(üstte) ve düzeltilmiş (altta) görüntüler.

Bu rektifikasyon işlemi, burada sadece görsel olarak sonuçları gösterebilmek amacıyla görüntü üzerinde uygulanmıştır. Uygulamada rektifikasyon işlemi sadece

izlenecek noktalar üzerinde yapılmıştır. Bu sayede işlem zamanı büyük ölçüde azaltılmıştır.

Programın ikinci seçeneğinde doğrular kullanıcı tarafından, görüntü üzerinden sayısallaştırılmakta ve rektifikasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. İlgi alanı (ROI-Region Of Interest) da bu işlem sonucunda otomatik olarak belirlenmiş olmaktadır. Şekil 7.8'de orijinal görüntü üzerinden sayısallaştırılan doğrular gösterilmiştir.



Şekil 7.8 : Elle sayısallaştırılan doğrular.

Orijinal görüntü üzerinde, başlangıç ve bitiş noktaları gösterilen doğrular için, birinci yöntemdekine benzer şekilde, bölüm 5.3.2'de anlatıldığı gibi rektifikasyon için gerekli parametreler hesaplanmakta ve görüntü rektifikasyonu yapılmaktadır. Şekil 7.9'da rektifikasyonu yapılmış ve ilgi alanı belirlenmiş görüntü gösterilmiştir.

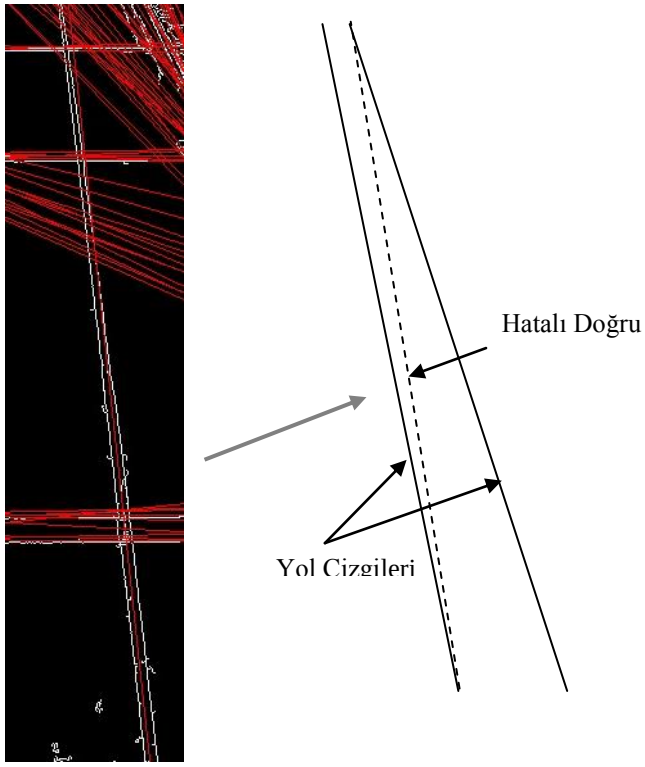
Hızların gerçek zamanlı olarak hesaplanmasında, görüntünün perspektif etkinin giderilmesi için kullanılan, doğruların otomatik ve kullanıcı tarafından belirlendiği iki durum önerilmiştir. Burada uygulamada verilen sonuçlardan görüldüğü gibi, şekil 7.5 ve şekil 7.9 incelenirse, kullanıcı tarafından doğruların elle belirlendiği yöntemde görüntüdeki perspektif etkinin daha iyi giderildiği görülmüştür.



Şekil 7.9 : Geometrik dönüşümü yapılmış görüntü.

Bunun temel nedeni ise, kullanıcının olası hatalı noktaları ya da doğruları fark edip eleyebilmesidir. Doğruların otomatik olarak belirlenmesinde kullanılan yöntem her ne kadar yüksek doğruluklu bir teknik olsa da hatalı sonuçlar içerebilmektedir. Böyle bir durum şekil 7.10'da verilmiştir.

Şekilden de görülebileceği gibi, yol çizgisi boyunca gerçekte birbirine paralel olan iki tane doğru elde edilmesi gerekirken, kesikli çizgilerle gösterildiği gibi, bir çizginin başından başlayıp diğer çizginin sonunda birleşerek hatalı doğruyu oluşturmuştur. Görüntüde hatasız olarak belirlenen diğer paralel doğrulara paralel olmamasına rağmen, paralelmiş gibi işleme girmiş ve kesim noktalarının bir yerine birden fazla noktada bulunmasına ve görüntünün tam olarak düzeltilmemesine yol açmıştır.



Şekil 7.10 : Hatalı bulunan doğru.

Bundan sonraki işlem adımı video görüntüsünde izlenecek nesne üzerindeki noktaların otomatik olarak seçilmesi işlemidir. Bunun için bölüm 4.2 de anlatılan yöntemle noktalar otomatik olarak seçilmiştir.



Şekil 7.11 : Otomatik olarak seçilen noktalar.

Sistemimizde, kamera çalışmaya başladığı anda, gerçek zamanlı olarak sürekli ve otomatik şekilde fark görüntüsü üzerinden noktalar seçilmektedir. Bulunan hız vektörleri irdelenerek hatalı olanlar elenmekte, geriye kalanlarla aracın anlık hızı hesaplanmaktadır. Sistemimizde en çok 500 tane nokta en az 20 tane nokta seçilmektedir. Şekil 7.11'de, aracın üzerinde seçilen ve hatasız olarak değerlendirilen noktalar görülmektedir. İlk çerçevede noktalar seçilmekte, bir sonraki çerçevede bu

noktalar izlenerek hız vektörleri bulunmaktadır. Şekil 7.12'de, sistemimizin aracın anlık hız vektörleri ile anlık hızını gösteren bir ekran görüntüsü verilmiştir.



Şekil 7.12 : Hatalar giderilmeden önceki hız vektörleri ve anlık hız.

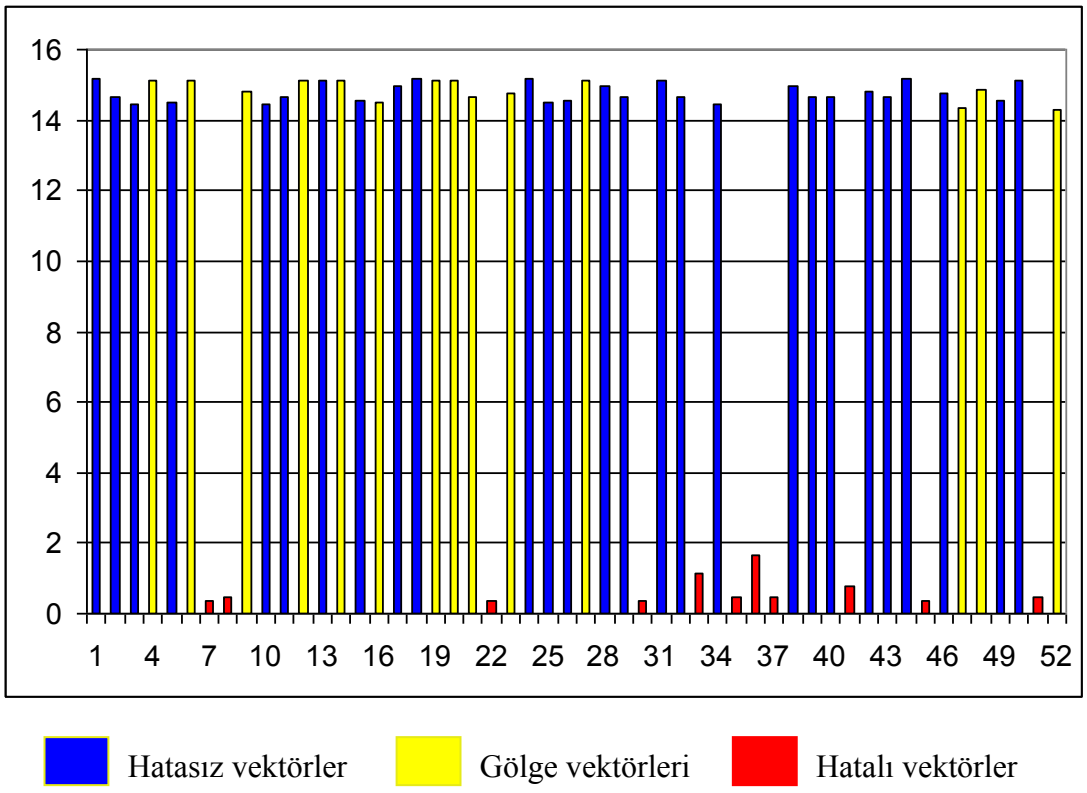
Şekil 7.12'de noktaların hız vektörleri ve yönleri 3 farklı renkte gösterilmektedir. Kırmızı renkteki vektörler hatalı bulunan eşleşmeler sonucu oluşan vektörler, sarı renktekiler ise aracın gölgesi üzerinde bulunan vektörlerdir. Çizelge 7.1'de bu vektörler ve piksel cinsinden büyüklükleri gösterilmiştir.

Çizelge 7.1 : Bulunan vektörler ve büyüklükleri.

Vektör	Büyüklük	Vektör	Büyüklük	Vektör	Büyüklük	Vektör	Büyüklük
1	15,17244	14	15,09534	27	15,10201	40	14,67062
2	14,67051	15	14,53567	28	14,97215	41	0,755547
3	14,44615	16	14,48191	29	14,67011	42	14,79012
4	15,09515	17	14,97209	30	0,376249	43	14,67086
5	14,48138	18	15,17195	31	15,12538	44	15,17658
6	15,10202	19	15,09523	32	14,63253	45	0,366519
7	0,367685	20	15,09504	33	1,141713	46	14,73801
8	0,478954	21	14,64967	34	14,44434	47	14,343
9	14,81166	22	0,37704	35	0,478588	48	14,84108
10	14,42731	23	14,73827	36	1,631859	49	14,52454
11	14,63479	24	15,17197	37	0,479087	50	15,11971
12	15,09527	25	14,52401	38	14,97558	51	0,473406
13	15,11739	26	14,52534	39	14,67038	52	14,29117

Çizelge 7.1'de görüldüğü gibi bulunan vektörlerin bazılarının büyüklükleri oldukça küçüktür. Bu vektörler muhtemel olarak hatalı bulunan vektörlerdir. Çizelge 7.2'de daha iyi anlaşılabilmesi için bulunan vektörler grafiksel olarak gösterilmiştir.

Çizelge 7.2 : Bulunan vektörlerin grafiksel gösterimi (Doğan ve diğ. 2010).



Bu hatalı vektörlerin ayıklanabilmesi için, Her resim karesinde (frame) bulunan vektörlerin ortalama ve standart sapmaları hesaplanmış**, (7.1)** eşitliğinde verilen varsayımdan yararlanılmıştır.

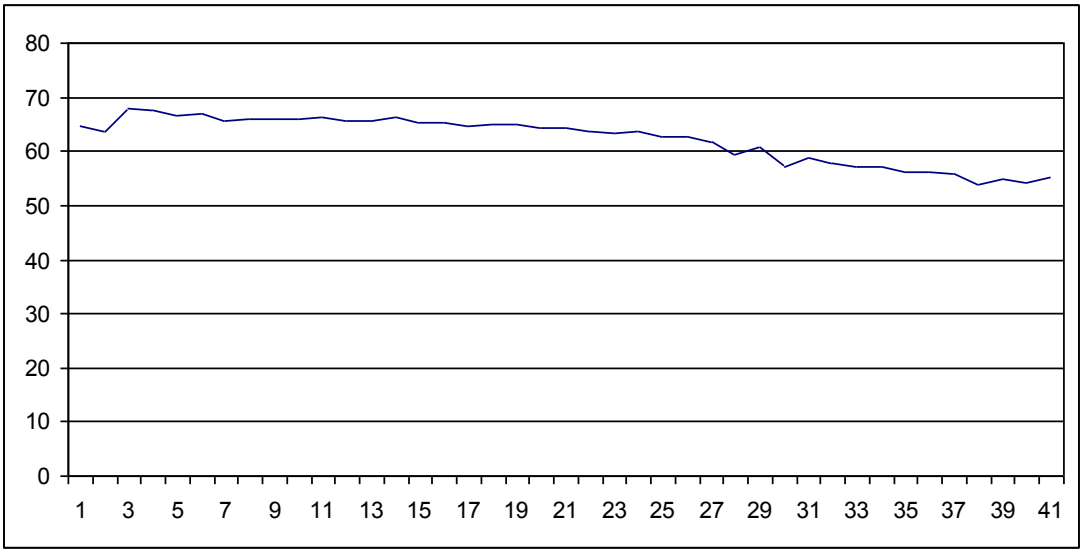
$$\|\mathbf{V}\| \leq \left\|\overline{V} - \delta_V\right\| \qquad \textbf{(7.1)}$$

Burada ***V***, vektör büyüklüğü $\overline{V}$, ortalama, δ_V ise standart sapmadır. Buradaki ilişki gereği, şartı sağlamayan vektörler atılarak, araçların gerçek hızları bulunmuştur.

Hız vektörlerinin bu hatalı haliyle ortalaması, 11.80 piksel, standart sapması, 5.85 piksel ve bulunan araç hızı şekil 7.12'de görüldüğü gibi 46.26 km/h'dir. Hatalı vektörler ayıklandıktan sonra ortalama, 14.78 piksel, standart sapması 0.27 piksel ve düzeltilmiş hız, 57.92 km/h olarak bulunmuştur. Burada örnek olarak verilen değerler, Ek A1'de verilen hız değerlerinden sadece bir resim karesi için hesaplanan

değerlerdir. Çizelge 7.3'de hatalı vektörler atıldıktan sonra hız/resim karesi çizelgesi verilmiştir.

Çizelge 7.3 : Hız – Resim karesi çizelgesi.



Şekil 7.13'de hatalı vektörler atıldıktan sonraki hatasız vektörler ve hesaplanan araç hızı gösterilmiştir.

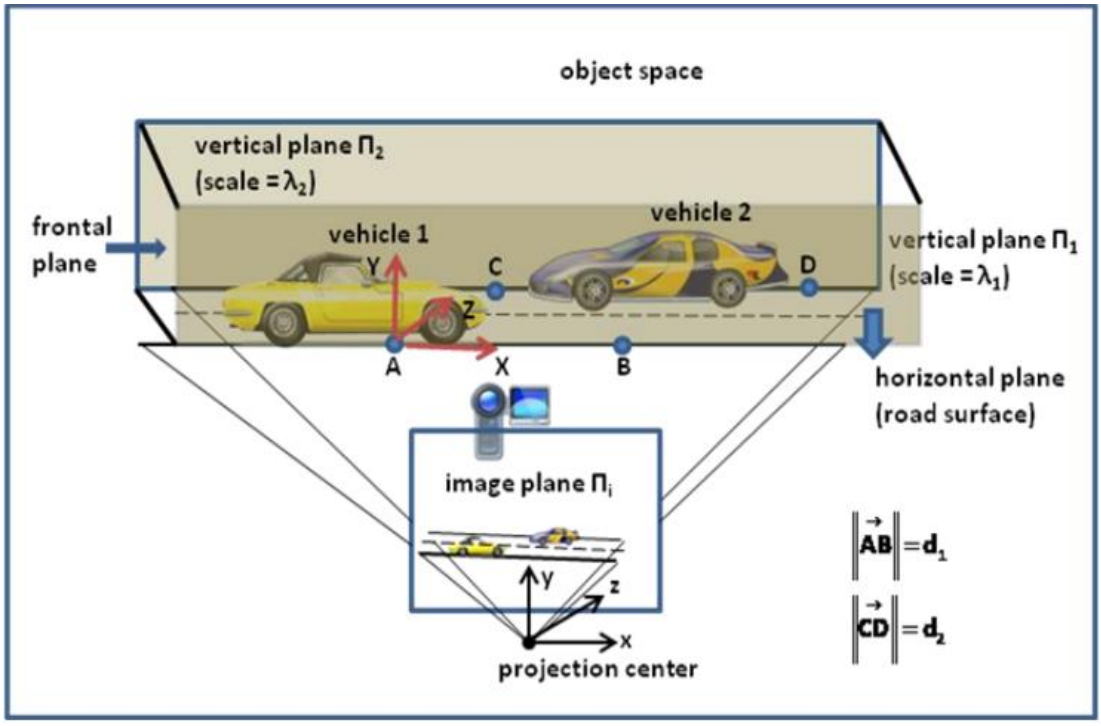


Şekil 7.13 : Hatasız vektörler ve aracın anlık hızı.

Bulunan hız vektörleri yardımıyla araçların nesne uzayındaki gerçek hızlarını belirleyebilmek için resim düzleminden nesne düzlemine dönüşümlerinin yapılması buradaki anlamıyla ölçeğin belirlenmesi gerekmektedir. Ölçek faktörünü, nesneleri sınıflandırıp nesneler üzerinde standart boyutları olduğu bilinen, mesela araç plakası, taşıtın boyu vs. gibi öncül bilgilerin çıkarılması ile belirlemek de mümkündür. Hesap yükü çok fazla olduğu için bu şekilde ölçek belirleme işinin gerçek zamanlı olarak yapılması güçtür. Bu nedenle bu çalışmada, ölçeğin belirlenmesi için iki nokta arasındaki uzaklık yersel yöntemlerle ölçülmüştür. Şekil 7.13'deki gibi bir görüntü elde etme planından yararlanılmıştır.

Şekil 7.14'de görüldüğü gibi nesnelerin kameraya olan uzaklıkları farklıdır, dolayısıyla d_1 ve d_2 doğruları farklı derinliklerden dolayı birbirine eşit olmayacaktır. Diğer taraftan tek bir kamera ile derinliklerin belirlenmesi ve buna bağlı olarak

ölçeklerinin hesaplanması olanaksızdır. Bu nedenle şekildeki gibi görüntü üzerindeki geliş ve gidiş yönündeki her iki düzlemde de (araçların geçiş yaptıkları) arazi üzerinde |AB| ve |CD| uzunlukları ayrı ayrı ölçülmüş ve her iki düzlem için ölçekler hesaplanmıştır.



Şekil 7.14 : Yandan görüntü elde etme planı (Doğan ve diğ., 2010).

Sistemin doğruluğunun test edilmesi için, anlık hız belirleme doğruluğu çok yüksek olan GPS alıcısı kullanılmıştır. Farklı hızlarla seyreden aracın içinde, bir dizüstü bilgisayara bağlı olan GPS alıcısı ölçtüğü hızları bilgisayara kaydetmiştir. GPS alıcısı bir operatör tarafından, araç kameranın görüş açısına girdiği anda kayda başlatılmış ve araç görüş açısından çıktığı anda da kayıt işlemine son verilmiştir. Bu sırada, sistemimiz de kamera ile ölçtüğü hızları kaydetmiştir. Kameranın görüş alanının başladığı ve bittiği noktalara, yol üzerinde işaretler konmuştur. Bu işaretler sayesinde, operatör görüş alanına girildiğini veya görüş alanından çıkıldığını anlayabilmektedir. Bu yaklaşımla farklı hızlarda ve farklı gidiş yönlerinde hız ölçüm deneyi yapılmış ve deneyler sonucunda, GPS ölçüleriyle sistemimizin ölçüleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 7.4'de yapılan deneyler, bulunan hızlar ve GPS alıcısının ölçtüğü hızlar verilmiştir. GPS alıcısının ölçtüğü hızın doğruluğu çok yüksek olduğundan (0.018 km/h), GPS ölçüleri doğru kabul edilmiştir (Al-Gaadi, 2005),

(Keskin ve Say, 2006). Yapılan GPS ölçümlere göre sistemimizin ortalama bağıl hatası çizelge 7.4'deki farklardan ± 1.12 km/h olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.4 : Doğruluk test ölçümleri (Doğan ve diğ., 2010).

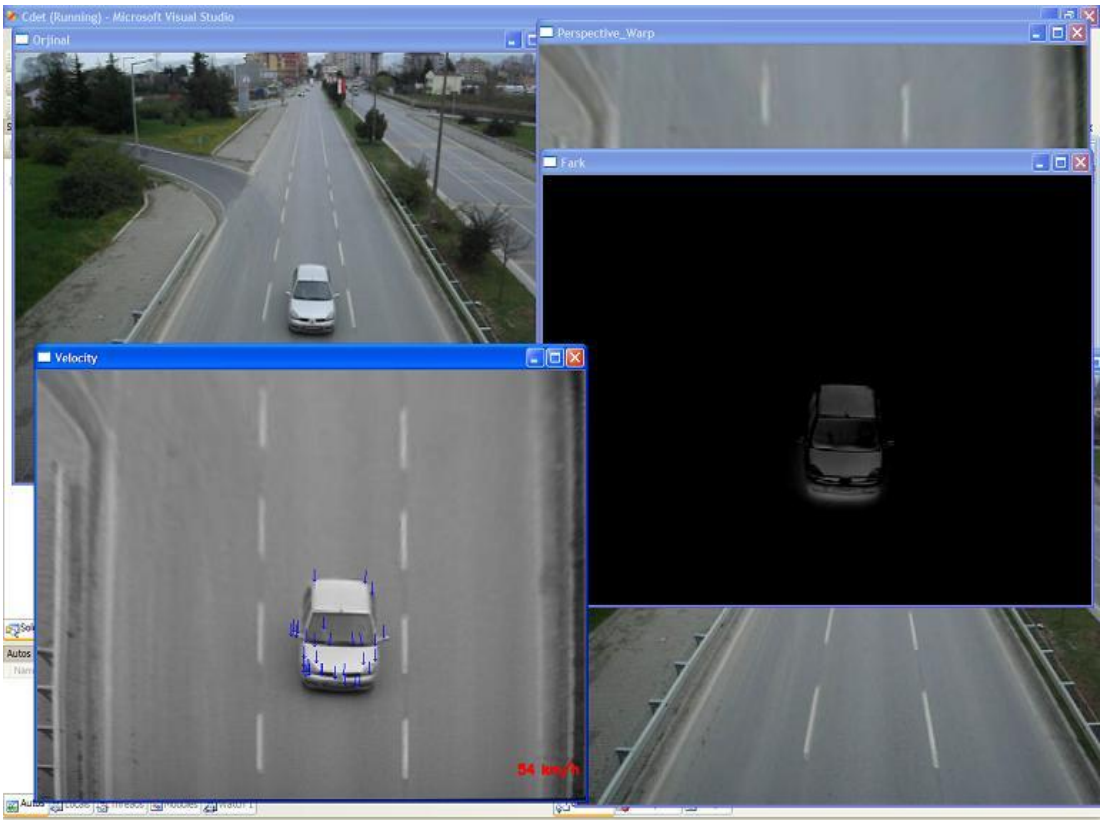
Deney No:	Araç Yönü: LR : Soldan Sağa RL : Sağdan Sola	Hesaplanan Hız (km/h)	GPS Hızı (km/h)	Fark (GPS ölçümlerine göre hesaplanan hatalar)
1	LR	38.26	38.6	0.34
2	RL	36.73	38.5	1.77
3	LR	37.41	38.5	1.09
4	LR	47.61	48.3	0.69
5	RL	57.92	57.7	–0.22
6	LR	57.50	57.0	–0.50
7	RL	64.25	63.2	–1.05
8	LR	68.92	67.3	–1.62
9	RL	75.35	76.9	1.55

Araç hızlarının gerçek zamanlı olarak hesaplanabilmesi için hazırlanılan yazılım temel olarak iki bölümden oluşmaktadır. Birinci kısım çevrim dışı (offline) olarak yapılan işlemlerden oluşmaktadır. Burada öncelikle paralel doğrular otomatik ya da manüel olarak belirlenmekte ve hesaplanılan parametrelerle görüntünün rektifikasyonu yapılmaktadır. İkinci kısım ise gerçek zamanlı olarak araç hızının hesaplanması için gerekli işlemler gerçekleştirilmektedir. Burada hareketli nesneler belirlenmekte, belirlenen nesneler üzerinde noktalar otomatik olarak seçilmekte, hareket vektörleri ve hızları hesaplanmaktadır. Çizelge 7.5'de gerçek zamanlı olarak hızların belirlenmesi için hazırlanan programın genel algoritması verilmiştir. Birinci adımdaki işlemler tamamlandıktan sonra ikinci adımdaki işlemlere geçilir. İkinci adımda video görüntüsü kaydedildiği sürece işlemler tekrarlanır.

Çizelge 7.5 : Gerçek zamanlı hız belirleme algoritması.

Çevrim Dışı Yapılan İşlemler :	Gerçek Zamanlı Yapılan İşlemler
1.1 İlk görüntü karesi alınır. 1.2 Görüntüdeki doğrular belirlenir. 1.3 Rektifikasyon parametreleri hesaplanır ve kaydedilir. 1.4 Ölçek belirlemek için ölçülen mesafeler girilir. 1.5 İlgi alanı belirlenir. 1.6 İkinci görüntü karesi alınıp arka plan belirlenir.	2.1 İlgi alanı boyutlarında i. görüntü karesi alınır. 2.2 İlgi alanı boyutlarında i+1. görüntü karesi alınır. 2.3 İki görüntü karesi içinde fark görüntüleri bulunur. 2.4 Fark görüntülerindeki istenmeyen değişimler histogram eşikleme teknikleri ile silinir. 2.5 İzlenecek nesne üzerindeki noktalar i. görüntü karesi üzerinde otomatik olarak belirlenir. 2.6 Bir önceki adımdaki noktaların karşılıkları i+1 görüntüsü üzerinde bulunur. 2.7 Bulunan noktaların dönüşümleri 1.3 adımında hesaplanan parametrelerle yapılır. 2.8 Hız vektörleri hesaplanır. 2.9 Vektörlerin ortalama ve standart sapmaları hesaplanır. 2.10 Hatalı vektörler elenir. 2.11 Nesnenin anlık ortalama hızı belirlenir. 2.12 Adım 2.2. ye dönülür.

Şekil 7.15'de gerçek zamanlı hız belirlemek amacıyla hazırlanan programın genel ekran görüntüsü verilmiştir.



Şekil 7.15 : Programın genel ekran görüntüsü.

7.2 Nesnelerin Üç Boyutlu Modellerinin Oluşturulması

Nesnelerin üç boyutlu modellerinin oluşturulması için yapılan uygulamada, çözünürlüğü 640x480 olan ve saniyede 30 resim karesi alabilen stereo amatör dijital video kamera çifti kullanılmıştır.

Uygulamanın gerçekleştirilebilmesi için Visual Studio 2010 platformunda C++ programlama dili ile geliştirilen yazılım kullanılmıştır. Program çevrimdışı ve gerçek zamanlı yapılan işlemler olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Program çalıştırıldıktan sonra kullanıcı tarafından, gerekmesi halinde, öncelikle kalibrasyon işlemleri çevrimdışı olarak yapılmaktadır. Kalibrasyonda işlemi tamamlanıp gerekli parametreler elde edildikten sonra görüntülerin eşleştirilmesi ve üç boyutlu model koordinatlarının oluşturulması için gerekli işlem adımları gerçek zamanlı olarak yapılmaktadır.

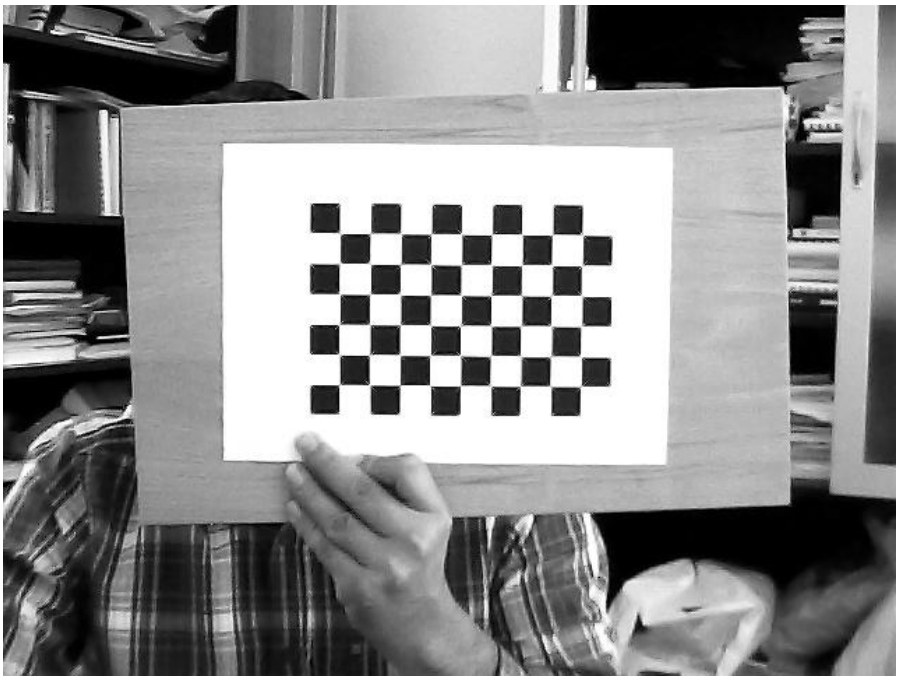
Çizelge 7.6'da programın genel işleyiş algoritması verilmiştir.

Çizelge 7.6 : Üç boyutlu model oluşturma algoritması

Çevrim Dışı Yapılan İşlemler :	Gerçek Zamanlı Yapılan İşlemler
1.1 Kameraları yükle, aç. 1.2 Kameralardan eşzamanlı stereo görüntü yakala. 1.3 Kalibrasyon için yeteri sayıda görüntü kaydet. 1.4 Stereo görüntülerdeki kontrol noktalarını otomatik olarak oku. 1.5 Hatalı görüntü çiftlerini ele. 1.6 Stereo kalibrasyonu yap. 1.7 Karşılıklı epipolar doğruları hesapla. 1.8 Stereo rektifikasyonu yap. 1.9 Karesel ortalama hatası yüksek görüntü çiftleri varsa ele, 1.6 adımına dön. 1.10 Yöneltme elemanlarını ve kamera matrislerini dosyaya kaydet. 1.11 Rektifikasyonu yapılıp satırları hizalanmış görüntüleri göster. 1.12 Stereo eşleştirme adımına geç.	2.1 Kameralardan eşzamanlı stereo görüntü yakala. 2.2 Görüntülerin rektifikasyonunu yap. 2.3 Stereo eşleştirmeyi yap. 2.4 Farklılık haritasını oluştur. 2.5 Üç boyutlu nokta bulutunu hesapla ve dosyaya kaydet. 2.6 Adım 2.1 e geri dön.

Programda öncelikle kameralar çalıştırılmış ve stereo görüntüler eş zamanlı olarak aynı anda iki kameradan alınmıştır. Bu işlemin eş zamanlı gerçekleştirilebilmesi için açık, kaynak kodlu OPENCV kütüphanesinin API'lerinden (Application Programming Interface - Uygulama Programlama Arayüzü) yararlanılmıştır. Stereo kalibrasyonu yapabilmek için gerekli, yeterli sayıda görüntü kaydedilmiştir. Program kapsamında, kalibrasyonun yapılabilmesi için 1 çift stereo görüntü yeterli olsa da, gerekli duyarlığın sağlanabilmesi için en az 10 stereo görüntü çiftinin işleme

sokulması gerektiği deneyimlerimizde gözlenmiştir. Bu görüntüler kalibrasyon sırasında kullanılacak ortak noktaları içermektedir. Uygulamada kontrol noktaları bir satranç tahtası biçiminde oluşturulmuş karelerden oluşmakta ve bu karelerin birleşme noktaları (köşe noktaları) kontrol noktaları olarak kullanılmaktadır. Şekil 7.16'da kullanılan kalibrasyon hedefi, 7.17'de kullanılan görüntüler gösterilmiştir.



Şekil 7.16 : Kullanılan kalibrasyon hedefi.



Şekil 7.17 : Kullanılan görüntüler.

Bu kalibrasyon hedefinde 9x6 köşe noktası olmak üzere 54 adet kontrol noktası bulunmaktadır. Karşılıklı görüntülerden bu noktaların tamamı otomatik olarak belirlenmekte ve görüntü koordinatları piksel altı duyarlıkta elde edilmektedir. Karşılıklı görüntülerden herhangi birinde noktaların tamamı elde edilemezse yani belirlenemezse o görüntü çifti elenmekte ve hesaba katılmamaktadır. Şekil 7.18'de otomatik olarak bulunan kontrol noktaları gösterilmiştir.



Şekil 7.18 : Belirlenen kontrol noktaları.

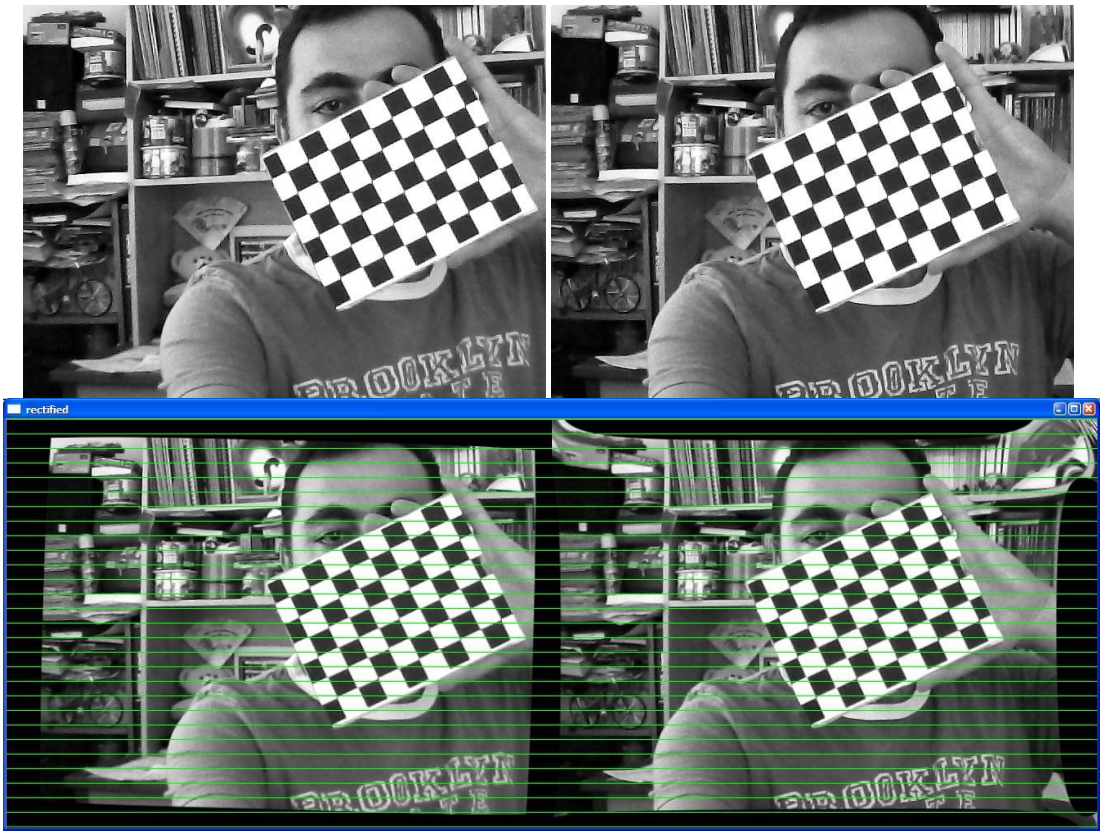
Stereo görüntü çiftlerindeki karşılıklı kontrol noktalarının görüntü koordinatları bu şekilde elde edildikten sonra bu noktaların nesne koordinatları olarak, birinci köşenin koordinatı (0, 0) olacak şekilde koordinatlandırılmış ve diğer köşe noktalarına koordinat verilmiştir. Her bir kare boyutu 2 cm dir. Görüntü ve nesne koordinatları belirlenip hatalı görüntüler elendikten sonra kalibrasyon işlemine geçilir. Şekil 7.19'da kontrol noktaları hatalı olarak bulunduğu için elenen görüntü verilmiştir. Ek A2'de bir görüntü çifti için otomatik olarak bulunan görüntü koordinatları verilmiştir.

Stereo kalibrasyon sonucu her bir kameranın, kamera matrisleri, distorsiyon parametreleri, dönüklük ve ötelemeleri, esas ve temel matrisleri ile geri projeksiyon matrisleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Ek A3'de verilmiştir.



Şekil 7.19 : Hatalı kontrol noktaları.

Stereo kalibrasyon sonucu karesel ortalama hata ± 0.26 cm olarak elde edilmiştir. Stereo kalibrasyondan elde edilen temel matrisler yardımıyla karşılıklı görüntü çiftlerindeki epipolar doğrular bulunmuştur.Sonraki adım görüntü çiftlerinin stereo rektifikasyonun yapılmasıdır. Stereo rektifikasyon yapılacak ve karşılıklı görüntü satırlarının kolineer olması sağlanacaktır. Şekil 7.20'de orijinal ve rektifikasyonu yapılmış görüntüler gösterilmiştir.



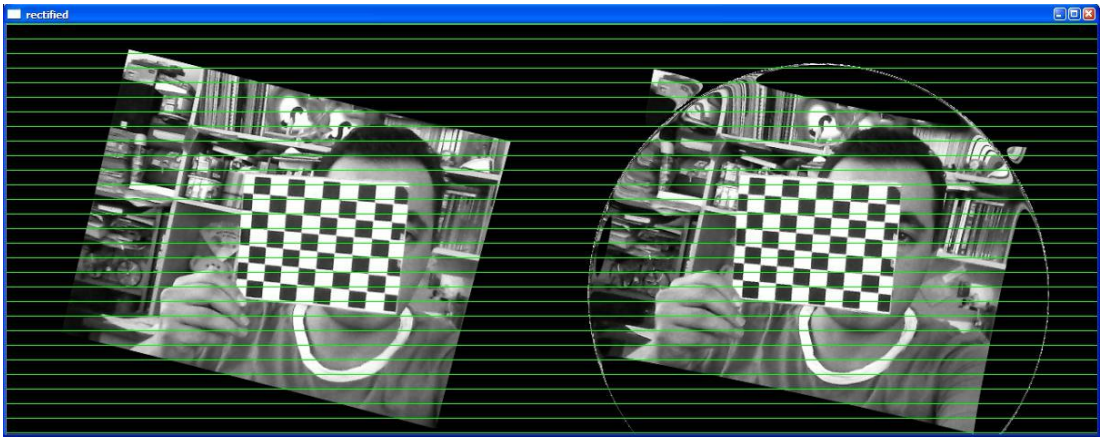
Şekil 7.20 : Orijinal ve düzeltilmiş görüntüler.

Rektifikasyon işlemi sonucunda, kameralar aynı hizada (koplanar ve yatay olarak hizalı), birbirinden baz uzaklığı kadar uzaklıkta ve aynı odak uzaklığına sahip olacaktır. Gerçekte kameraları, şekil 6.8'de gösterildiği gibi yerleştirebilmek mümkün değildir. Bunun yerine matematiksel olarak projeksiyonlar ve distorsiyonlar hesaplanarak sağ ve sol görüntüler bu konuma getirilir. Uygulamada stereo görüntüler çekilirken kameralar mümkün olduğu kadar aynı hizada ve birbirine yakın yerleştirilmiştir. Bu sayede matematiksel dönüşümler daha işlenebilir kılınacaktır. Eğer kameralar yaklaşık olarak bu şekilde yerleştirilmezse, matematiksel hizalama sonucunda yüksek distorsiyonlar oluşabilir ve stereo bindirme alanlarının azalmasına neden olabilir.

Uygulamada görüntülerin tam olarak aynı hizadan elde edildiği konuma kolayca getirilebilmesi için, kameralar yaklaşık olarak aynı hizada, mümkün olduğunca az dönüklük olacak şekilde ve birbirine 2-3 cm baz uzunluğunda yerleştirilmiş ve görüntüler bu şekilde elde edilmiştir.

Rektifikasyon işlemi sonrasında her görüntü çiftinin ortalama hatasına bakılmıştır. Ortalama hatası yüksek görüntü çiftleri olması durumunda bu görüntüler elenerek stereo kalibrasyon adımından işlemler tekrarlanmıştır. Şekil 7.21'de elenen görüntü çiftlerinden bir tanesi gösterilmiştir. Stereo rektifikasyon sonucu elde edilen karesel ortalama hata ± 0.39 piksel olarak hesaplanmıştır.

Yapılan uygulamalarda kalibrasyon sonucu elde edilen karesel ortalama hata ±0.62 cm'den, ortalama hataları yüksek görüntülerin elenmesiyle ±0.26 cm'ye, ortalama projeksiyon hatası ise ±0.71 pikselden ±0.39 piksele kadar düşürülmüştür.



Şekil 7.21 : Elenen görüntü çifti.

Gerekmesi halinde hatalı görüntüler elenip işlemler tekrarlandıktan sonra, yeterli duyarlığa ulaşıldığında elde edilen tüm yöneltme elemanları, kamera matrisleri, projeksiyon matrisleri dosyaya kaydedilerek işlemlerin gerçek zamanlı olarak yapıldığı adıma geçilmektedir. Buraya kadar olan işlemler sadece bir defaya mahsus yapılmakta olup, kamera konularında bir değişiklik olmadığı takdirde farklı uygulamalarda tekrarlanmasına gerek yoktur ve program içerisinde kullanıcıya bu adımı atlama seçeneği sunulmuştur. Ancak kamera konumlarında meydana gelebilecek en ufak değişiklikte kalibrasyon işleminin tekrarlanması gerekmektedir.

İşlemlerin gerçek zamanlı yapıldığı ikinci adımda öncelikle kamera parametreleri ve dönüklükler dosyadan okunur. Daha sonra stereo kameralardan aynı anda görüntüler yakalanır. Program kapsamında, yakalanan görüntüler bir video dosyasına her iki kamera içinde ayrı ayrı kaydedilebilir. Video kaydedilirken, video görüntülerinin oluşturulması için gerekli video sıkıştırma tekniklerinden, kullanılan bilgisayarda mevcut yüklü tüm CODEC'lerden (compression/decompression module) kullanıcı tarafından (şekil 7.22) istenilen bir tanesi seçilebilir (DivX, MPEG4 formatı gibi). Ayrıca görüntü boyutları, saniyede gösterilecek kare sayısı gibi video özellikleri kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir.



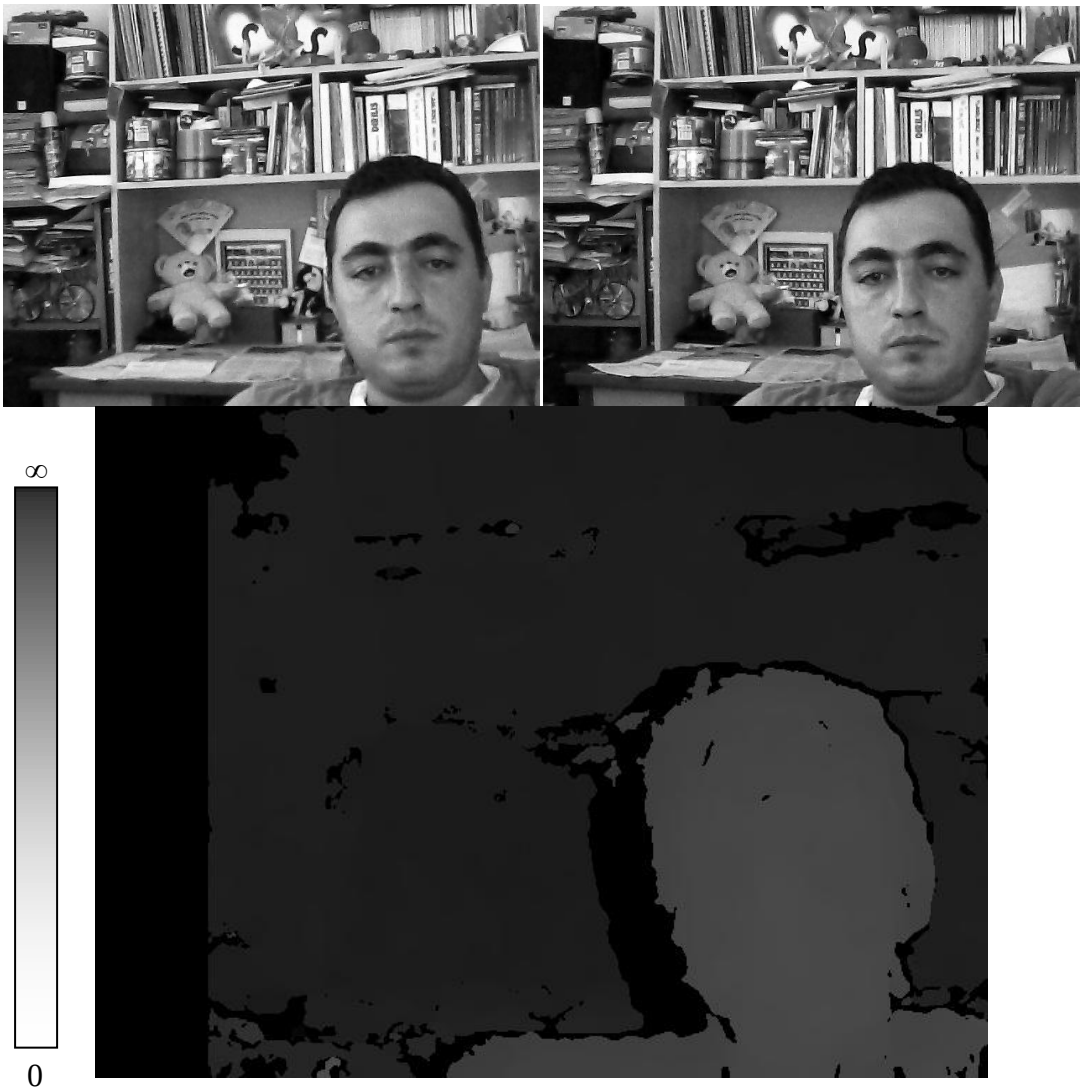
Şekil 7.22 : Video sıkıştırma formatları.

Her iki kameradan görüntüler yakalandıktan sonra, rektifikasyonları yapılarak eşleştirme işlemine geçilir. Karşılıklı görüntülerin eşleştirilmesinde, alan tabanlı eşleştirme yöntemi olan SAD algoritması diğer yöntemlere göre daha iyi sonuç verdiği ve işlem yükü nispeten daha az olduğu için tercih edilmiştir.

Karşılıklı görüntülerdeki aynı özellik noktaları bulunmuş, bu adımın sonucunda farklılık haritası (disparity map, y paralaksı giderilmiş normal konumdaki x paralaksları) elde edilmiştir. Buradan bulunan tüm noktaların kameraya olan uzaklıkları triangulasyon yardımıyla hesaplanarak ve derinlik haritası (depth map)

elde edilmiştir. Elde edilen üç boyutlu nokta bulutu dosyaya kaydedilmektedir. Şekil 7.23'de stereo görüntü ve elde edilen derinlik görüntüsü gösterilmiştir.

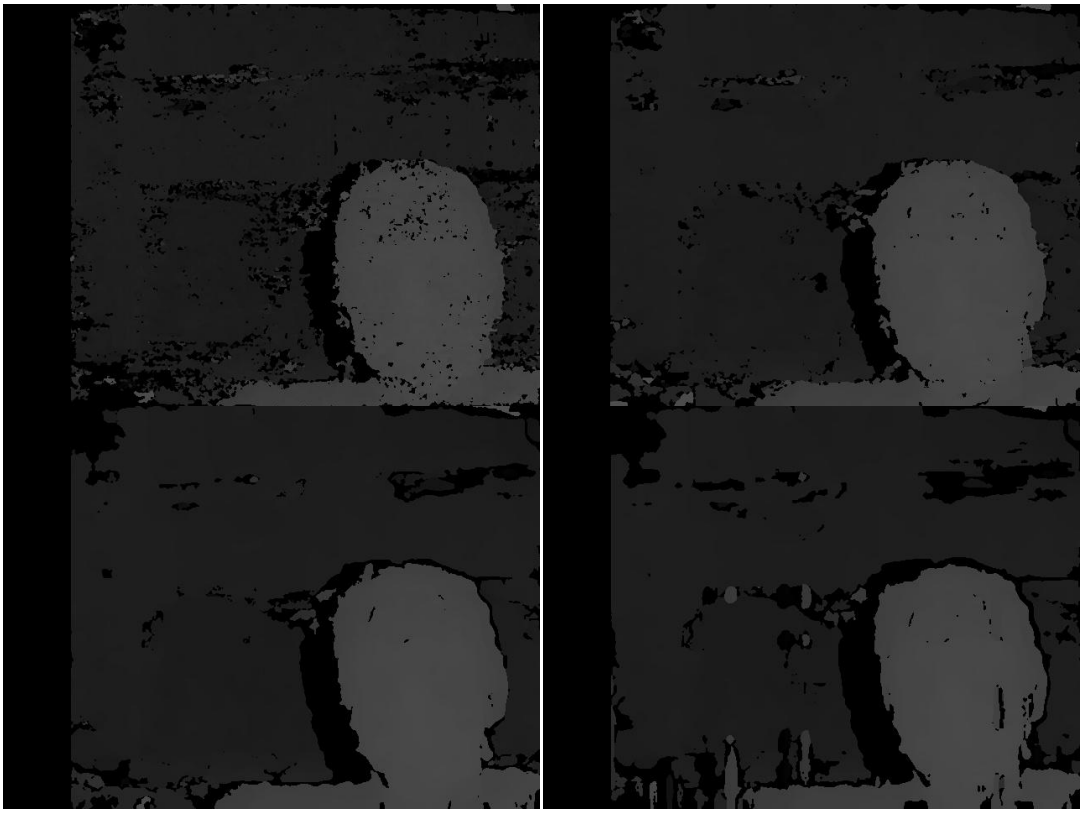
Elde edilen derinlik görüntülerinde yükseklik bilgisi gri düzey değerleriyle ilişkilendirilmiştir. Bir başka ifadeyle görüntü üzerindeki (x, y) koordinatındaki bir nokta için X ve Y koordinatlarına ilaveten gri düzey değeri de Z koordinatına karşılık gelmektedir. Nesne kameradan uzaklaştıkça beyazdan siyaha doğru gri düzey değerleri değişmektedir.



Şekil 7.23 : Stereo görüntüler ve derinlik görüntüsü.

Stereo eşleştirmeden elde edilecek sonuçlar SAD penceresinin boyutuyla ve görüntünün dokusuyla direk ilgilidir. SAD algoritmasında kullanılacak arama penceresi boyutu küçüldükçe daha ayrıntılı derinlik haritaları oluşturulabilirken hatalı eşleştirmeler sonucu görüntüdeki gürültüler artmaktadır. Pencere boyutu büyütüldükçe sonuç görüntüdeki gürültüler azalırken detay kaybı oluşabilmektedir.

Şekil 7.24'de farklı arama pencereleri ile elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Şekil 7.24'de sol üstte 3x3'lük arama penceresinin, sonra sırasıyla 9x9, 15x15 ve 21x21 boyutlarında arama pencerelerinin sonuçları gösterilmiştir. Sonuçlardan görülebildiği gibi bu görüntüde en ideal sonuçlar 9x9 ve 15x15 boyutlarında elde edilmiştir.



Şekil 7.24 : Farklı boyutlarda pencerelerle elde edilen sonuçlar.

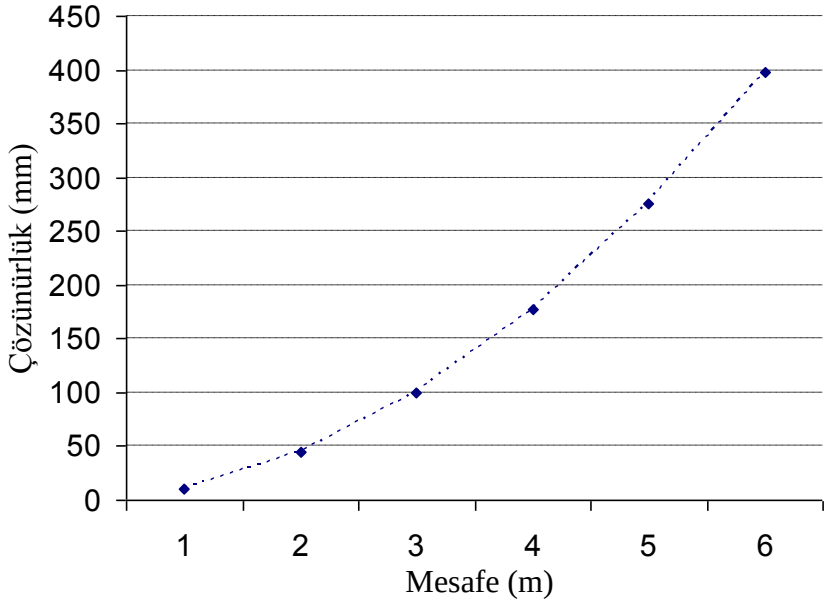
Elde edilecek sonuç model koordinatlarının doğruluğunun,

- Baz – derinlik oranının artırılmasıyla,
- Görüntülerin, optik eksenlerin birbirine paralel olduğu durum yerine konvergent olarak elde edilmesiyle,
- İki yerine daha fazla sayıda görüntü kullanarak,
- Her görüntüde, ölçülen nokta sayılarının (noktaların görüntüde iyi dağılmış olması gerekmektedir) artırılmasıyla,
- Görüntü çözünürlüğünün artırılmasıyla,

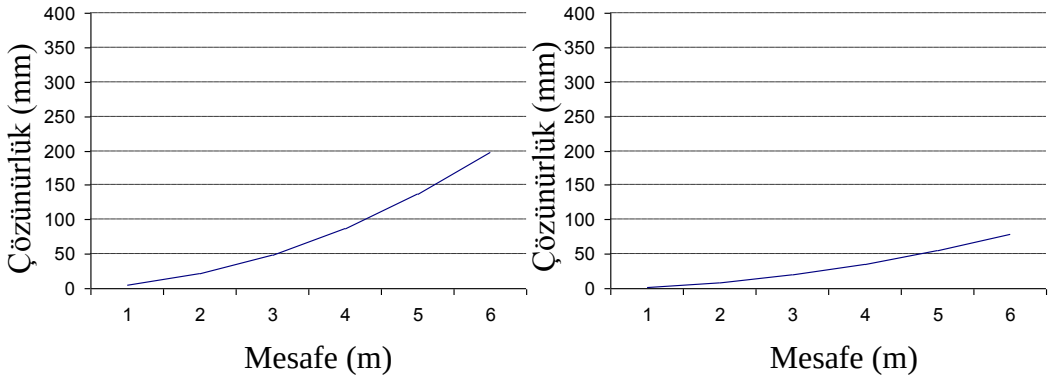
arttığı görülmüştür (Remondino, 2006). Ancak uygulamanın doğası gereği, birbirine paralel ve baz uzaklığı 3-4 cm olan, iki ayrı kameradan elde edilen ve çözünürlüğü 640x480 piksel olan görüntüler kullanılmıştır.

Uygulama sonucu farklı mesafelerde elde edilen derinlik çözünürlükleri çizelge 7.7'de verilmiştir. Hesaplamalarda baz uzunluğu olarak uygulamada kullanılan 3 cm alınmıştır. Baz uzunluğunun artırılması ile elde edilebilecek derinlik çözünürlük değerleri çizelge 7.8'de verilmiştir. Birincisinde baz uzunluğu 6 cm, ikincisinde 15 cm olarak alınmıştır.

Çizelge 7.7 : Derinlik çözünürlüğü.

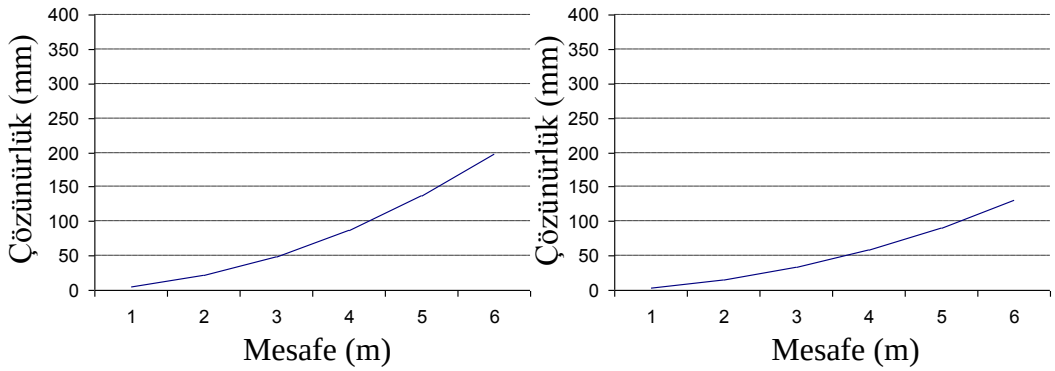


Çizelge 7.8 : 6 ve 15 cm baz uzunluklarında derinlik çözünürlükleri.



Çizelge 7.7 ve 7.8'deki sonuçlar incelenirse baz uzunluğunun artırılması ile elde edilecek derinlik çözünürlükleri artmaktadır. Ancak baz uzunluğu artırıldığında görüntülerin bindirmesi, yani ortak alanları azalmaktadır. Çalışmada odak uzaklığı 4 mm olan kamera kullanılmıştır. Odak uzaklığının artması ile de derinlik çözünürlüğünde artış mümkün olmaktadır. Çizelge 7.9'da baz uzunluğu 3 cm olmak üzere odak uzaklığı 8 mm ve 12 mm olan kameralar için hesaplanmış derinlik çözünürlükleri verilmiştir. Öncekilerde olduğu gibi yatay eksen kameradan olan uzaklığı, düşey eksen ise o uzaklıktaki derinlik çözünürlüğünü göstermektedir. Odak uzaklığı yükseldikçe de görüş açıları düşeceği için, burada da ortak alanın azalması söz konusu olacaktır.

Çizelge 7.9 : f= 8 mm ve f=12 mm olan kameralar için derinlik çözünürlükleri.



8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında dijital kameralarla elde edilen video görüntülerinden hareketli nesnelerin çıkarılması, hareket yörüngelerinin ve hızlarının belirlenmesini sağlayacak bir sistem geliştirilmiştir. Bunun için önce bilinen yöntemler araştırılmış, ve en etkin oları seçilerek, gerekli yeni iyileştirmeler de eklenip sistem oluşturulmuştur.

Video görüntülerinin, gerçek zamanlı olarak işlenebilmesi ve gerekli hesaplamaların yapılabilmesi için, işlemlerin çok hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekir. Bunun için en iyi yol, istenilen işi gerçekleştirecek matematiksel modellerin çiplere yazılmasıdır. Bunun için gömülü sistemler ve mikroişlemcilerle ilgili konular bilinmelidir. Ayrıca, problemin çözümü için en etkin ve en hızlı algoritmalar geliştirilmelidir. Paralel işlemciler ve paralel programlama teknikleri de gerçek zamanlı işler için kullanılabilir. Bu çalışmada anlatılan tekniklerin uygulanabilmesi amacıyla C++ programla diliyle ve OPENCV kütüphanesinden yararlanılarak tez yazarı tarafından geliştirilen yazılım sistemi kullanılmıştır.

Video görüntülerinin işlenmesi ve bu görüntüler yardımıyla gerekli hesaplamaların gerçek zamanlı olarak yapılabilmesi için en önemli kısıtlama zamandır. Bu nedenle, kullanılacak yöntemlerin hesap yükü olabildiğince az ama buna rağmen beklenen duyarlıkları sağlayacak yöntemler olması gerekir. Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen sistem, bu gereksinimleri karşılayan etkin bir sistemdir.

Yaptığımız uygulamalarda hareketli nesnelerin izlenmesi ve araç hızlarının belirlenebilmesi için en sık kullanılan yöntemlerden biri olan özellik tabanlı izleme yöntemi tercih edilmiştir. Nesne üzerindeki özellikli noktaların seçilmesi için Shi ve Tomasi (1994) tarafından önerilen nokta seçme yöntemi kullanılmıştır. Seçilen noktaların sonraki görüntü karesinde izlenmesi ve hareket vektörlerinin belirlenmesi için LK optik akış yöntemi kullanılmıştır. Yapılan uygulamalar sonucunda araç hızları ± 1 ile ± 2 km/h arası doğruluklarda elde edilmiştir.

Grammatikopoulos ve diğ. (2005) yaptıkları çalışmada araç hızlarını ±3 km/h doğrulukla elde etmişlerdir. Benzer şekilde Maduro ve diğ. (2008) çalışmalarında, tez kapsamında kullanılan LK optik akış yöntemi yerine Kalman filtreleme yöntemini kullanmışlar ve sonuç olarak araç hızlarını %2 hatayla elde etmişlerdir. Hu ve diğ. (2008) ise çalışmalarında tek kamera yerine birden fazla kamera kullanmışlar ve araç hızlarını %88 ile %97.7 arası doğruluklarla elde etmişlerdir. Bu bağlamda, tez çalışması kapsamında geliştirilen sistemin hız belirleme doğruluğu, diğer yaklaşımlardan daha yüksektir.

Video kameralar ile gerçekleştirilen hız belirleme probleminden başka, geliştirilen sistemin, olası bir kaza halinde, kaza sahnesindeki araçların üç boyutlu model koordinatların duyarlı bir şekilde hesaplaması da sağlanmıştır. Bunun için stereo kamera sistemi kullanılmıştır. Şekil 8.1 ve 8.2'de Türkiye genelinde kullanılmakta olan kamera sistemleri ile ilgili örnekler gösterilmiştir. Mevcut MOBESE sistemlerinde, kameralar aynı sahneyi görecek şekilde (ortak alanları olacak şekilde) yerleştirilmediğinden, gerçek kazaların stereo görüntüleri bu MOBESE sistemlerinden elde edilememiştir. Bunun yerine tez çalışmasında gerçekleştirilen uygulama kapsamında çekilen stereo video görüntüleri kullanılmış ve gerekli olan üç boyutlu model koordinatları hesaplanmıştır. Başka bir ifadeyle, tez kapsamında geliştirilen sistem, MOBESE kameralarının stereo modeller oluşturacak şekilde yerleştirilmeleri durumunda, izlenen sahnenin üç boyutlu model koordinatlarını da otomatik olarak hesaplayabilmektedir. Sistemin bu yeteneğini göstermek için, tez kapsamında yapılan uygulamada, kaza görüntüsü içermeyen stereo video görüntü çiftleri kullanılmıştır.

Çalışmada geliştirilen sistemle, mümkün olduğunca az sayıda öncül bilgi kullanarak hatta sadece mevcut video görüntülerini kullanılarak izlenen sahnenin üç boyutlu model bilgilerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Gereken öncül bilgilerin otomatik olarak görüntü verilerinden çıkarılması sağlanmış ve sistemin amaçları gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen sistemle elde edilen koordinat bilgilerinin duyarlıklarının, trafik izleme ve güvenlik gibi konular için yeterli olduğu gözlenmiştir.

Geliştirilen sistemle, hem sonuç model duyarlılığının hem de kalibrasyon sonuçlarının daha da duyarlı bir şekilde belirlenmesi elbette mümkündür. Bunun için önceden yapılacak arazi ölçümleri ile hassas bir şekilde koordinatlandırılmış tam bir kalibrasyon hedefi yardımıyla kalibrasyonun yapılması kalibrasyon duyarlığını artıracaktır. Ancak bu tarz bir yaklaşım, daha çok son işleme (post processing) uygulamalar için daha uygundur. Çünkü, gerçek zamanlı işlemler için en duyarlı yöntemlerin kullanılması sistemin hızlı çalışmasını engelleyecektir. Ancak buna rağmen, geliştirilen sistem, seçimlik olarak gerçek zamanlı hesapların yanı sıra, son işleme uygulamalarının da gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Bu anlamda, çok etkin ve esnek bir sistemdir.

Benzer şekilde nesneye ait üç boyutlu nokta bulutunun elde edilmesi için ışınların kesiştirilmesi yoluyla demet dengelemesinin yapılması gerekmektedir. Ancak daha önce vurgulandığı gibi bu tez çalışması kapsamında esas amaç, mümkün olduğunca az veri kullanmak ve uygulamaların gerçek zamanlı yapılabilmesi için kullanılacak algoritmaların işlem yükü bakımından en az olanlarını seçmektir.

Elde edilecek sonuç model koordinatlarının doğruluğunu artırmak için, son bölümde de değinildiği gibi, baz mesafesi dışında, iki tane yerine daha çok sayıda noktadan elde edilen görüntülerin kullanılması, benzer şekilde paralel konum yerine konvergent olarak elde edilmiş görüntülerin kullanılması gerekmektedir.

Ancak uygulamanın doğası gereği, birbirine paralel konumdaki iki kameradan elde edilen görüntüler kullanılmıştır. İki yerine üç ya da daha fazla kamera kullanmak, sistemin kuruluş maliyetini artırmanın yanı sıra işlem yükünü de bir hayli artıracaktır ve burada yapılan işlemlerin gerçek zamanlı olarak uygulanmasını olanaksız hale getirecektir. Uygulamada çözünürlüğü 640x480 piksel olan kameralar kullanılmıştır. Pek tabi daha yüksek çözünürlüklü kameralar kullanılarak sonuç doğrulukları artırmak mümkündür. Ancak görüntünün piksel sayısının artması, özellikle yoğun eşleştirme işlemi sırasında hesap yükünü oldukça artırmaktadır.

Görsel üç boyutlu modelin gerçek zamanlı olarak oluşturulabilmesi ise şu aşamada mümkün değildir. Nokta bulutlarının oluşturulması, nokta bulutlarından hatalı noktaların ayıklanması, doku haritalarının oluşturulması, yüzey modelinin oluşturulması ve render işlemlerinin her biri yüksek işlem zamanı gerektirmektedir.

Özellikle render işlemi bilgisayarın işlemcisine çok fazla yük bindirdiğinden dakikalarca sürebilmektedir. Kullanılan işlemci hızı ve sayısı render süresini etkilemektedir. Bunun için yüksek performanslı bilgisayarlara, paralel programlama tekniklerine gerek duyulmaktadır. Buna rağmen tüm işlemlerin 30-40 milisaniye gibi kısa sürelerde tamamlanması olanaklı görülmemektedir. Ancak böyle bir görsel üç boyutlu modelin elde edilmesi uygulaması, sonradan büro çalışmasıyla (post-process) yapılarak gerçekleştirilebilmekte ve bu sayede kaza anı simülasyonlarının oluşturulması da mümkün olmaktadır.

Çalışma kapsamında, Samsun Emniyet Müdürlüğü'nde kurulmuş olan Kent Güvenlik Yönetim Sistemi incelenmiştir. Samsun ili içerisinde 3 farklı tip kamera ve uygulama bulunmaktadır. Bunlardan birincisi 360^{o} hareket edebilen ve güvenlik için kullanılan kameralar, ikicisi kavşaklarda sabit olarak yerleştirilmiş, her 4 yönü görüntüleyen kameralar, ve son olarak EDS (Elektronik Denetleme Sistemi) olarak bilinen ve otomatik hız tespitinde kullanılan sabit olarak yerleştirilmiş kamera sistemleridir. Şekil 8.1'de kavşaklarda kullanılan kamera sistemi gösterilmiştir..



Şekil 8.1 : Kavşaklardaki kamera sistemi.

Hız tespitinde kullanılan sistem iki bileşenden oluşmaktadır: Her şerit için ayrı ayrı olmak üzere bir kamera ve hız tespiti için bir radar cihazı bulunmaktadır. Şekil 8.2'de EDS sistemi gösterilmiştir.

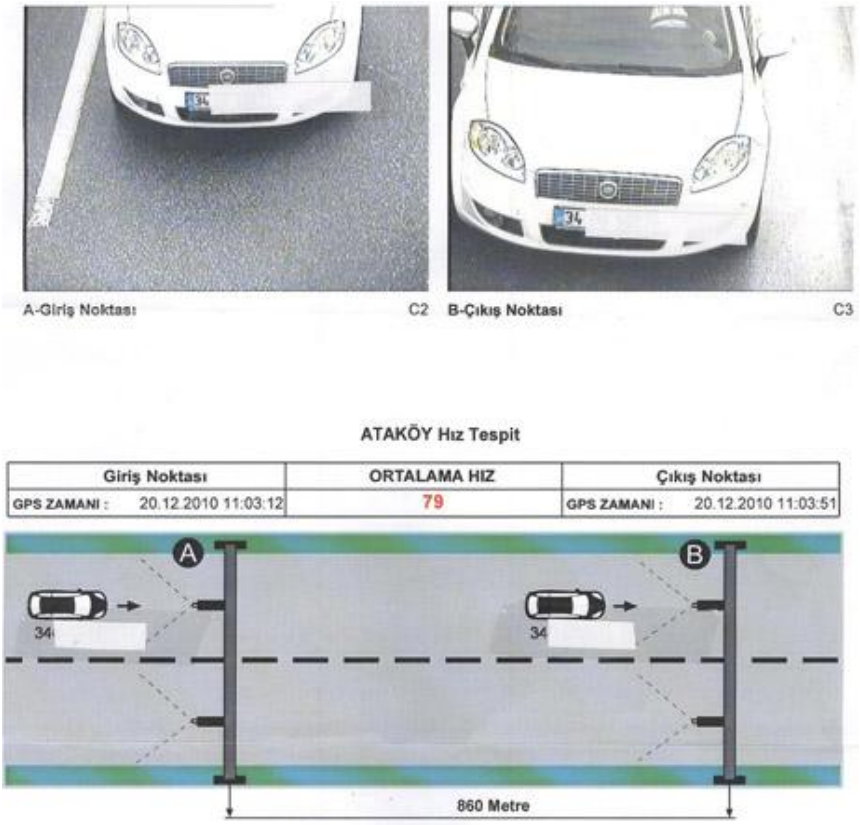


Şekil 8.2 : Elektronik denetleme sistemi.

Sistemin yazılımında da kullanıcı ekranında, aracın plaka kısmını gösteren görüntüsü, aracın hangi şeritten geçtiği (sağ, sol, orta vb) ve araç hızı görülebilmektedir. Sistemin kurulu olduğu yerden bir aracın geçmekte olduğu bir algılayıcı tarafından belirlenmekte, kamera ile görüntüsü çekilmekte ve radar ile hızı ölçülmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen sistem, sadece kameraları kullanmakta ve diğer bileşenlere gerek duymamaktadır. Bu sayede, sistemin maliyeti önemli ölçüde azaltılmaktadır. İzlenen sahneden herhangi bir aracın geçip geçmediğini anlamak için, bir algılayıcı kullanmak yerine, geliştirilen sistem görüntü bilgilerindeki değişimleri hesaplayarak karar vermektedir. Yine sahneden geçen aracın hızını belirlemek için aynı görüntüler kullanılmakta, herhangi bir hız ölçer radar sistemine gerek duyulmamaktadır. Geliştirilen sistem aynı zamanda sahneden geçen aracın görüntüsü de kaydedilmektedir. Tez çalışması kapsamında geliştirilen bu sistem sayesinde, şu anda mevcut, sabit olarak yerleştirilmiş tüm kameralar hız tespiti için kullanılabilecektir. Örneğin şekil 8.2'de gösterilen sabit kameralar yardımıyla hız belirlenebilecektir. Benzer şekilde hız belirlemek amacıyla yeni kurulacak sistemlerde de maliyetin büyük oranda düşürülmesi sağlanacaktır.

EDS; trafik akışı kontrolünün sağlanması ve şehir yaşantısının kurallara uygun, medeni bir yapıya kavuşturulması amacı ile kent trafiğinde kural ihlali yapan araçların tespiti için faaliyete geçirilen bir uygulamadır (Url-5). İstanbul ilinde uzun zamandır kullanılmaktadır. Ancak deneyimlere göre, sürücülerin EDS kameralarının bulunduğu güzergaha geldiklerinde hızlarını düşürdükleri ve kameraları geçince yeniden hızlandıkları tespit edilmiştir. Bu sorunu çözmek için, hız koridoru adı verilen yeni bir pilot uygulama hayata geçirilmiştir. Bu hız koridoru yaklaşımı ile çalışan sistemde, EDS noktasına gelen sürücülerin hızlarını düşürmeleri yeterli olmamaktadır. Çünkü, kameradan geçtiği konumdan (A noktası) belli bir uzaklıktaki konuma (B noktasına) yerleştirilmiş diğer EDS`lerle, A ve B arasındaki aracın ortalama hızı bulmaktadır. (Url-6). Şekil 8.3'de sistemin işleyişi gösterilmiştir. Buna rağmen, bu yaklaşımında kısa sürede etkisiz kalacağı öngörülmektedir.



Şekil 8.3 : Hız koridoru uygulaması (Url-6).

Çünkü hız koridoru yöntemi, her ne kadar daha iyi bir uygulama gibi gözükse de, ilgili yasa gereği bu tür radarlarla hız ölçümünün yapıldığı yerlere, şekil 8.4'deki gibi uyarı levhaları konulması gerekmekte ve sürücülere bu alanda hız kontrolü yapıldığı hususu bildirilmek zorundadır. Bu durumda, sürücüler bu alanlara geldiklerinde yavaşlayacaklar ve bu alanlar dışında hızlarını yine artıracaklardır.



Şekil 8.4 : Uyarı levhaları.

Sürücülerin trafik kurallarına ve hız sınırlarına sürekli olarak uymalarını sağlamanın en etkin yollarından biri ise bahsedilen hız koridorlarının sayılarını mümkün olduğunca artırmaktır. Böyle bir sistemi, şehrin bütününe yaymak ise oldukça maliyetli olacaktır. Halbuki tez çalışması kapsamında geliştirilen sistem, bu sorunu etkin bir şekilde çözmektedir. Çünkü sistem, halen kullanılmakta olan mevcut bütün kameraların hız tespiti yapabilmesini sağlamaktadır. Bu sayede, tüm sabit kameralar hız belirleme amacıyla kullanabileceğinden, kentin hemen her bölgesi hız koridoru kapsamı içerisinde olacaktır. Bunun için de herhangi bir donanım maliyeti gerekmeyecektir. Samsun ili düşünüldüğünde, her 2-3 kavşaktan birinde sadece izleme amacıyla yerleştirilmiş ancak hız belirleyemeyen bu kameralardan bulunmaktadır. Geliştirilen sistem sayesinde bütün bu kameraların hız tespiti için kullanılması mümkün olacaktır. Dolayısıyla kentin önemli bir kısmında bu tarz hız kontrolünün yapılması sağlanacaktır.

Tez çalışması sonrasında, sistemin gerçek uygulamalarda uzun süreli test edilmesi sağlanacak, ve bu testlerden sonra gerekmesi halinde iyileştirmeler yapılacaktır. Bu kısa dönemli gelecek çalışmalar tamamlandıktan sonra da, kazaların yoğun olarak yaşandığı bölgelere stereo kameraların yerleştirilmesi konusu, bir proje önerisi ile konuyla ilgili yetkili birimlere sunulacaktır. Böylelikle geliştirilen sistem, kazaya karışan araçların kaza öncesi hızlarının belirlenmesi, kurallara uymayan araçların tespit edilmesi, kaza halinde kaza sahnesinin üç boyutlu modellenmesi gibi yetenekleri ile adli olayların çözümlenmesine büyük katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Aach, T. and Kaup, A., 1995. Bayesian Algorithms for Adaptive Change Detection in Image Sequences using Markov Random Fields, *Signal Processing, Image Communication* No:**7**, pp. 147–160.

Al-Gaadi, K.A., 2005. Testing the accuracy of autonomous GPS in ground speed measurement. *J. Appl. Sci.,* Vol. **5**, pp. 1518-1522.

Ar, İ., 2009. Videolarda İnsan Eylemlerinin Tanınması, Seminer raporu, Gebze Y.T.E., İzmit.

Beardsley, P. and Murray, D., 1992. Camera calibration using vanishing points, in Proceedings of the *British Machine Vision Conference.*

Beyer, H., 1991. An Introduction to Photogrammetric Camera Calibration, *Seminaire Orasis*, St. Malo, pp. 37-42.

Beymer, D., McLauchlan, P., Coifman, B. and Malik, J., 1997. A Real Time Computer Vision System for Measuring Traffic Parameters, in Proceedings of the *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 495-501.

Bosc, M., Heitz, F., Armspach, J.P., Namer, I., Gounot, D. and Rumbach, L., 2003. Automatic Change Detection in Multimodel Sreial MRI: Application to Multiple Sclerosis Lesion Evolution, *Neuroimage,* **20**, pp. 643-656.

Bradsky G., and Kaehler A., 2008. *Learning OpenCV Computer Vision with the OpenCV Library*, O'Reilly Media, Inc, 555 p.

Canny, J., 1986. A computational approach to edge detection. Pattern Analysis and Machine Intelligence, *IEEE Transactions on, PAMI*-**8**(6), pp. 679–698.

Cathey F.W. and Dailey D.J., 2005. A Novel Technique to Dynamically Measure Vehicle Speed using Uncalibrated Roadway Cameras, IEEE Proceedings of *Intelligent Vehicles Symposium*, 6-8 June, pp. 777-782.

Chen D., and Zhang G., 2005. A New Sub-Pixel Detector for x-corners in Camera Calibration Targets, *WSCG Short Papaers Proceedings*, 31 Jan- 4 Feb, pp. 97-100, Czech Republic.

Chen, Z., Wu, C. and Tang, L., 2001. Image Rectification Based on Minimal Epipolar Distortion, in Proceedings of *SPIE, Vision Geometry X*, Vol. **4476**, pp. 186-193.

Collins, R., Lipton, A. and Kanade, T., 2000. Introduction to the Special Section on Video Surveillance, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* **22**(8), pp. 745-746.

Coppin, P. and Bauer, M., 1996. Digital Change Detection in Forest Ecosystems With remote Sensing Imagery, *Remote Sensing Rev*., Vol. **13**, pp. 207-234.

Dailey, D.J., Cathey, F.W. and Pumrin, S., 2000. An Algorithm to Estimate Mean Traffic Speed Using Uncalibrated Cameras, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol: **1**, No: 2, pp. 98-107.

Dainese, G., Marcon, M., Sarti, A. and Tubaro, S., 2005. Accurate Depth-Map Estimation for 3D Face Modelling, Proc. *13th European Signal Processing Conference*, Antalya, 4-5 September, pp. 1883-1886.

Dogan, S. and Altan, M.O., 2003. 3D Modeling of Human Face and Brain by Using CT, MR and Digital Images for Finding Abnormalities. In: Grün A, Kahmen H editors. *Optical 3D Measurement techniques VI Conference*, Zurich, Vol. **1**, pp. 148-155.

Doğan, S. ve Temiz, M.S., 2008. Statik Ve Dinamik Görüntülerden Zamana Bağlı Değişimlerin Belirlenmesi Üzerine Bir İnceleme, *Bakanlıklararası Harita İşlerini Koordinasyon ve Planlama Kurulu (BHİKPK) I. Sempozyumu*, Ankara.

Doğan, S., Temiz, M.S. ve Külür, S., 2010a. Hareket Halindeki Taşıtların Hızlarının Kamera Görüntüleri ile Gerçek Zamanlı Belirlenmesi, *İleri Teknolojiler Çalıştayı*, 30 Nisan 2010, Kocaeli.

Doğan, S., Temiz, M.S. and Külür, S., 2010b. Real Time Speed Estimation Of Moving Vehicles From Side View Images From An Uncalibrated Video Camera. *Sensors.* **10**(5), pp. 4805-4824.

Dörtsel, C., Jacobsen, K. and Stallmann, D., 2003. DMC -Photogrammetric Accuracy- Calibration Aspects And Generation Of Synthetic DMC Images, *Optical 3D Measurement Techniques VI*, Vol. **1**, pp 74-82, Zurich, Switzerland

Fang, C.Y., Chen, S.W. and Fuh, S., 2003. Automatic Change Detection of Driving Environments in a Vision Based Driver Assistance System, *IEEE Trans. Neural Networks*, **14**(3), pp. 646-657.

Grammatikopoulos L., Karras G., and Petsa E., 2005. Automatic Estimation of Vehicle Speed From Uncalibrated Video Sequences, *Int. Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice In Geodesy and Related Fields*, 03-04 November, pp. 332-338, Sofia, Bulgaria.

Guillou, E., Meneveaux, D., Maisel, E., and Bouatouch, K., 2000. Using Vanishing Points for Camera Calibration and Coarse 3D Reconstruction From a Single Image, *The Visual Computer*, Vol. **16**, pp. 396-410.

Hamzah, R.A., Rahim, R.A. and Noh, Z.M., 2010. Sum of Absolute Differences Algorithm in Stereo Correspondence Problem for Stereo Matching in Computer Vision Application, *Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010 3rd IEEE International Conference*, pp. 652-657

Harris C. and Stephens M., 1988. A Combined Corner and Edge Detector, Proceedings of the *4th Alvey Vision Conference*, pp.147-151.

Heikkila, J., 1997. Accurate Camera Calibration and Feature Based 3-D Reconstrtuction From Monocular Image Sequences, *PhD Thesis*, Infotech Oulu and Department of Electrical Engineering, University of Oulu, FIN-90570, Oulu, Finland.

Heuvel, F.A. van den, 1998. Vanishing point detection for architectural photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. **32** part 5, pp. 652-659.

Heuvel, F.A. van den, 1999. Estimation of Interior Orientation Parameters From Constraints on Line Measurement in a Single Image, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.**32**, Part 5W11, pp. 81-88.

Heuvel, F.A. van den, 2003. Semi-Automatic Camera Calibration and Image Orientation Using the CIPA Reference Data Set, in Proceedings, *XIX CIPA Symposium*, Antalya, Turkey.

Horn B.K.P. and Schunck B.G., 1981. Determining Optical Flow, *Artificial Intelligence*, Vol.**17**, pp. 185-203.

Hu, Z., Wang, C. and Uchimura, K., 2008a. 3D Vehicle Extraction and Tracking from Multiple Viewpoints for Traffic Monitoring by using Probability Fusion Map, *Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis*, Vol.**7**, No.2, pp. 110-119.

Hu, N., Aghajan, H., Gao, T., Camhi, J., Lee, C.H. and Rosario, D., 2008b. Smart Node: Intelligent Traffic Interpretation, *World Congress on Intelligent Transport Systems*.

Huertas, A. and Nevatia, R., 2000. Detecting Changes in Aerial Views of Manmade Structures, *Image Vision Computation*, **18**(8), pp. 583-596.

Jung, Y.K. and Ho, Y.S., 1999. Traffic Parameter Extraction Using Video-based Vehicle Tracking, Proc. *IEEE Intelligent Transportation System Conf.'99*, Vol.**1**, pp. 746-769.

Khalil, O.A., 2002. Solutions for Exterior Orientation in Photogrammetry: A Review, *Photogrametric Record*, **17**(100), pp. 615-634.

Keskin, M., Say, S.M., 2006. Feasibility of low cost GPS receivers for ground speed measurement. *Comput. Electron. Agric*., Vol: **54**, pp. 36-43.

Kim, J., Kolmogorov, V. and Zabih, R., 2003. Visual Correspondence Using Energy Minimization and Mutual Information, Proc. of *Ninth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV 2003)*, Nice, France.

Koller, D., Weber J. and Malik, J., 1994. Robust Multiple Car Tracking with Occlusion Reasoning, *in EECV*, Stockholm, pp. 189-196.

Kytö, M., Nuutinen, M. and Oittinen, P., 2011. Method for measuring stereo camera depth accuracy based on stereoscopic vision, Three-Dimensional Imaging, Interaction and Measurement, Proc. *SPIE* Vol. **7864**, pp. 786401-786410.

Liebowitz, D. and Zisserman, A., 1998. Metric Rectification for Perspective Images of Planes, Proceedings of the *IEEE Conference Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 482-488.

Li-Qun, X., Young, D. and Hogg, D.C., 1992. Building a model of a road junction using moving vehicles in: Hogg, D & Boyle, R.D. (editors) *British Machine Vision Conference*, pp. 443-452. Springer.

Lu, Y., 2005. Automatic Object Extraction and Reconstruction in Active Video, *PhD Thesis*, Computing Science, Simon Fraser University, Canada.

Lucas B.D., and Kanade T., 1981. An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision, Proceedings of the *1981 DARPA Imaging Understanding Workshop*, pp. 121-130, Washington, USA.

Lucchese L., and Mitra K.S., 2002. Using Saddle Points for subpixel feature detection in camera calibration targets, Proceedings of the *2002 Asia Pacific Conference on Circuits and Systems*, 16-18 December, pp. 191-195, Singapore.

Maduro, C, Batista, K, Peixoto, P. and Batista, J, 2008. Estimation Of Vehicle Velocity And Traffic Intensity Using Rectified Images, *15th IEEE International Conference on , Image Processing*, pp. 777 – 780.

Masoud, O. and Papanikolopoulos, N.P., 2004. Using Geometric Primitives to Calibrate Traffic Scenes, Proceedings of the *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Japan.

Melo J., Naftel A., Bernardino A., and Victor J.S., 2004. Viewpoint Independent Detection of Vehicle Trajectories and Lane Geometry from Uncalibrated Traffic Surveillance Cameras, *Int. Conf. On Image Analysis and Recognition*, 29 Sept.- 1 Oct., Porto, Portugal.

Monti, C., Guerra, F., Balletti, C. and Miniutti, D., 1999. Geometric Operations in Digital Images, *CIPA International Symposium*, Recife/Olinda, Brazil.

Morgan, M., Kim, K., Jeong, S. and Habib, A., 2004. Indirect Epipolar Resampling of Scenes Using Parallel Projection Modeling of Linear Array Scanners, *XXth Congress of ISPRS*.

Morris B., and Trivedi M., 2006. Improved Vehicle Classification in Long Traffic Video by Cooperating Tracker and Classifier Modules, *IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, 22-24 November, Sydney, Australia.

Neoh, H.S. and Hazanchuk, A., 2005. Adaptive Edge Detection for Real-Time Video Processing using FPGAs, from http://*www.altera.com/literature/cp/gspx/edge-detection.pdf*, alındığı tarih 08.12.2010.

Novak, K., 1992. Rectification of Digital Imagery, Review Article, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **58**(3): 339-344.

Nitsuma, H. and Maruyama, T., 2005. High Speed Computation of the Optical Flow, *ICAP, 13th International Conference*, Cagliary, Italy.

Onoguchi, K., 2009. Overlap Vehicle Detection by Tracking Horiontal Lines, MVA2009 IAPR, *Conference on Machine Vision Applications*, Yokohama, JAPAN.

Papadimitriou, D.V. and Dennis, T.J., 1996. Epipolar Line Estimation and Rectification for Stereo Image Pairs, *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. **5**, No. 4, pp. 672-676.

Pollefeys, M., Koch, R. and Van Gool, L., 1999a. A simple and efficient rectification method for general motion, Proceedings of *International Conference on Computer Vision*, pp. 496-501, Corfu (Greece).

Pollefeys, M., Koch, R., Vergauwen, M. and Van Gool, L., 1999b. Hand-held acquisition of 3D models with a video camera, in Proceedings *3DIM'99 (Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling), IEEE Computer Society Press*, pp. 14-23.

Pollefeys, M. and Van Gool, L., 2002a. From Images to 3D Models, *Communications of the ACM*, July 2002, Vol. **45**, No. 7, pp. 50-55.

Pollefeys, M., Van Gool, L., Vergauwen, M., Cornelis, K., Verbiest, F. and Tops, J., 2002b. Video-to-3D, Proc. *Photogrammetric Computer Vision 2002 (ISPRS Commission III Symposium), International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing.*

Pollefeys, M., Van Gool, L., Vergauwen, M., Cornelis, K., Verbiest, F., Tops, J. and Koch R., 2004. Visual modeling with a hand-held camera, *International Journal of Computer Vision,* **59**(3), pp. 207-232.

Radgui, A., Demonceaux, C., Mouaddib, E., Aboutajdine, D. and Rziza, M., 2008. An Adapted Lucas-Kanade's Method for Optical Flow Estimation in Catadioptric Images, *The 8th Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-classical Cameras, OMNIVIS*, Marseille, France.

Radke, R.J., Andra, S., Al-Kofahi, O. and Roysam, B., 2005. Image Change Detection Algorithms: A Systematic Survey, *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. **14**, No. 3, pp. 294-307.

Rangarajan, S., 2010. Algorithms for Edge Detection, from *http://www.uweb.ucsb.edu/~shahnam/AfED.doc*, alındığı tarih 08.12.2010.

Remondino, F., 2006. Image-Based Modelling for Object and Human Reconstruction, *PhD Thesis*, No. 16562, Swıss Federal Instıtute Of Technology (ETH) – Zurich.

Rosin, P.L., 1998. Thresholding for Change Detection, *VIth International Conference on Computer Vision (ICCV'98)*, pp. 274-279.

Ruther, C., 2002. A New Approach for Vanishing Point Detection in Architectural Environments, *Journal Image and Vision Computing (IVC; Special Issue on BMVC 2000)*, Vol. **20**, pp. 647-656.

Safran, M.İ. ve Öktem, R., 2007. Hızlı Hough Dönüşümü Yaklaşıklığı ve Çubuk Kod Tespitine Uygulanması, *SIU 2007*, Eskişehir.

Sand, P. and Teller, S., 2004. Video Matching, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. **22**, No. 3, pp. 592-599.

Santoro, F., Pedro, S., Tan, Z.H. and Moeslund, T.B., 2010. Crowd Analysis by using Optical Flow and Density Based Clustering, *18th European Signal Processing Conference, Aalborg*, Denmark, August 23-27.

Schmidt, J., Niemann, H., and Vogt, S., 2002. Dense Disparity Maps in Real-Time with an Application to Augmented Reality, Proceedings *Sixth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV 2002)*, pp. 225–230, Orlando, FL. USA.

Shi J., and Tomasi C., 1994. Good Features To Track, *9th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 593-600, Seattle, USA.

Shin, W.S., Song, D.H. and Lee, C.H., 2006. Vehicle Classification by Road Lane detection and Model Fitting Using a Survillance Camera, *International Journal of Information Processing Systems*, Vol.**2**, No.1, pp. 52-57.

Sinha, S., Frahm, J.M., Pollefeys, M. and Genc, Y., 2009. Feature Tracking and Matching in Video Using Programmable Graphics Hardware, *Machine Vision and Application*, Nov. 2009.

Singh, A., 1989. Digital Change Detection Techniques Using Remotely Sensed Data, *International Journey of Remote Sensing*, Vol.**10**, No. 6, pp. 989-1003.

Temiz M.S. ve Doğan S., 2005, Dijital Görüntülerin Rektifikasyonu. Sensör Modelleri, Geometrik Görüntü Dönüşümleri ve Yeniden Örnekleme, *HKMO 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara.

Temiz, M.S. ve Külür,S., 2008. Rectification of Digital Close Range Images: Sensor Models, Geometric Image Transformations and Resampling, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Spatial Inform. Sci. 37*, Part B5. Beijing, (on CD-ROM).

Temiz, M.S. ve Külür, S., 2011. Video Görüntülerinin Kaçış Noktaları Yardımıyla Rektifikasyonu, *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, 18 Nisan - 22 Nisan, Ankara.

Toyama, K., Krumm, J., Brumitt B. and Meyers, B., 1999 . Wallflower: Principles and Practice of Background Maintenance, in Proceedings *ICCV*, pp. 255-261.

Wang, L.L. and Tsai, W.H., 1991. Camera Calibration by Vanishing Lines for 3-D Computer Vision, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. **13**, No. 4, pp. 370-376.

Wren, C.R., Azarbayejani, A., Darrel, T. and Pentland, A., 1997. Pfinder: Real-Time Tracking of the Human Body, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **19**(7), pp. 780-785.

Xuan, W. and Lin, Z., 2002. Various Methods For Producing Orthophoto Out of Central Perspective Imagery, *IAPRS*, Vol. **34**, Part. 2, Commission II.

Zhang, Z., 1998. Determining the Epipolar Geometry and its Uncertainty: A Review, *International Journal of Computer Vision*, Vol. **27**, No. 2, pp. 161-195.

Zhong, J. and Wang, R., 2006. Multi-temporal Remote Sensing Change Detection Based on Independent Component Analysis, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. **27**, No. 10, pp. 2055-2061.

Url-1 <*http://mobese.iem.gov.tr/*>, alındığı tarih 18.06.2011.

Url-2 <*http://www.cvmt.dk/education/teaching/f09/VGIS8/AIP/canny_09gr820.pdf*>, alındığı tarih 08.08.2011.

Url-3 <http://www.coursehero.com/file/4525887/geometric-transxiangwei/>, alındığı tarih 12.08.2011.

Url-4 <http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/fogel_david/santafe.html> alındığı tarih 12.08.2011.

Url-5 <http://trfdenetleme.iem.gov.tr/eds-nedir.aspx> , alındığı tarih 30.08.2011.

Url-6 < http://www.tumgazeteler.com/?a=6554820>, alındığı tarih 31.08.2011.

EKLER

EK A : Hız vektörleri ve hızlar.
EK B : Görüntü koordinatları.
EK C : Elde edilen sonuçlar.

EK A : Hız vektörleri ve hızlar

Çizelge A.1: Hız vektörleri ve hızlar.

Frame No	Vekt. Boyu	Stnd Sapma	Hız	Vekt. Sayısı
1	16,58056	0,379448	64,69763	12
2	16,377091	0,501746	63,66024	12
3	17,343416	0,432514	67,97944	20
4	16,269908	4,636752	67,46309	24
5	17,187862	1,702402	66,62018	35
6	17,306982	0,535551	67,04557	30
7	15,8986	3,7224	65,65021	18
8	16,175403	3,000815	66,10311	17
9	16,738424	1,387892	65,85723	22
10	16,710791	1,756932	66,12124	27
11	16,804604	0,754354	66,1802	27
12	16,068845	3,078146	65,71929	28
13	16,112564	3,064978	65,5592	23
14	16,059258	3,742561	66,34809	36
15	16,519438	0,998035	65,45037	35
16	16,343062	1,011188	65,19728	42
17	16,295763	0,708622	64,50943	55
18	16,579572	0,30077	64,95984	46
19	16,866502	1,346131	64,82323	65
20	16,282014	1,002394	64,34706	64
21	16,361482	0,522699	64,4185	63
22	16,303372	0,326305	63,82455	43
23	16,109648	0,379468	63,46647	56
24	16,151546	0,375932	63,54827	40
25	15,402804	2,11976	62,67304	39
26	15,794087	3,62735	62,71751	38
27	13,588709	5,387344	61,81033	38
28	14,367363	3,421939	59,32589	31
29	15,323972	0,501098	60,58979	16
30	13,445342	3,489016	57,29808	16
31	11,717851	5,806446	58,62259	18
32	11,803757	5,852248	57,9227	27
33	14,068209	2,551506	57,07758	43
34	13,854424	1,492483	57,07589	31
35	14,440105	0,993871	56,07216	32
36	14,190036	1,003806	56,12228	39
37	13,981383	1,734592	55,88538	43
38	13,494474	0,535561	53,89195	17
39	14,132095	0,670669	55,00927	20
40	12,854027	2,388924	54,09028	25
41	13,328378	1,881963	55,08462	26

EK B : Görüntü koordinatları

Çizelge B.1: Sol resim görüntü koordinatları.

NN	x	y	NN	x	y
1	322,873	202,705	28	361,953	280,423
2	348,689	189,686	29	387,942	266,649
3	374,390	176,515	30	414,111	253,624
4	399,831	163,386	31	439,916	240,362
5	425,654	150,464	32	466,025	227,143
6	451,145	137,257	33	491,754	213,675
7	476,574	123,995	34	517,424	200,441
8	501,749	110,844	35	542,902	186,670
9	526,960	97,559	36	569,100	173,623
10	335,773	228,480	37	374,940	306,225
11	361,683	215,064	38	400,943	292,810
12	387,569	202,072	39	427,220	279,400
13	413,387	188,973	40	453,326	266,328
14	439,149	175,772	41	479,343	252,898
15	464,713	162,566	42	505,397	239,502
16	490,218	149,158	43	531,263	226,046
17	515,512	136,085	44	557,102	212,645
18	540,758	123,177	45	582,540	199,146
19	348,851	254,255	46	388,334	332,252
20	374,830	241,084	47	414,498	318,674
21	400,968	227,699	48	440,797	305,583
22	426,678	214,654	49	466,992	292,284
23	452,530	201,397	50	493,074	278,874
24	478,317	188,119	51	519,011	265,347
25	503,752	174,785	52	545,090	251,978
26	529,209	161,387	53	570,891	238,438
27	554,641	147,934	54	596,845	224,872

Çizelge B.2: Sağ resim görüntü koordinatları.

NN	x	y	NN	x	y
1	270,133	204,469	28	305,677	283,085
2	295,821	192,201	29	332,280	270,471
3	322,281	179,791	30	358,429	258,182
4	348,323	167,414	31	384,807	245,811
5	374,210	155,178	32	411,112	233,424
6	400,335	142,806	33	437,462	221,136
7	426,286	130,336	34	463,677	208,414
8	452,164	118,037	35	489,875	195,794
9	478,271	105,562	36	516,588	183,634
10	281,798	230,408	37	317,613	309,372
11	308,054	218,228	38	343,784	297,000
12	334,160	205,867	39	370,546	284,648
13	360,366	193,325	40	396,873	272,190
14	386,582	181,167	41	423,608	259,781
15	412,587	168,675	42	449,898	247,378
16	438,703	156,301	43	476,337	234,858
17	464,741	143,613	44	502,773	222,354
18	490,868	131,413	45	529,447	209,925
19	293,787	256,739	46	329,630	335,811
20	319,991	244,281	47	356,122	323,358
21	346,174	231,996	48	382,822	311,169
22	372,518	219,489	49	409,391	298,866
23	398,852	207,210	50	435,849	286,331
24	424,908	195,034	51	462,446	273,714
25	451,242	182,364	52	489,109	261,347
26	477,343	169,829	53	515,626	248,805
27	503,712	157,331	54	542,097	235,925

EK C : Elde edilen sonuçlar

- İç yöneltmeler : M_i kamera matrisleri, D_i distorsiyon parametreleri:

M1: 3x3

data: [1.0442153807164568e+003, 0., 3.1548423316038742e+002,
0., 1.0442153807164568e+003, 2.5875379617768556e+002, 0., 0., 1.]

D1: 8x1

data: [-4.2430521296740090e-002, -1.3427232292107349e+000,
-9.3139124265056875e-004, -1.2294363816595145e-002,
1.4792435110258850e+002, 0., 0., 1.3144003407472744e+002]

M2: 3x3

data: [1.0442153807164568e+003, 0., 3.1588110992545847e+002, 0.,
1.0442153807164568e+003, 2.7262625697972589e+002, 0., 0., 1.]

D2: 8x1

data: [-1.7173056256438801e-001, 3.3482291717307082e+000,
-6.5390637966044798e-003, -1.4936428385409923e-002,
-1.0301852514508508e+002, 0., 0., -7.6327386811033833e+001]

- Dış yöneltmeler : R dönüklük matrisleri, T ötelemeler:

R: 3x3

data: [9.9912466756082752e-001, -3.0285126454683096e-002,
2.8856711300659598e-002, 3.0628972869462732e-002,
9.9946409990580654e-001, -1.1548983524001329e-002,
-2.8491484559908024e-002, 1.2422725751613141e-002,
9.9951683887389942e-001]

T: 3x1

```
data: [ -5.9663049843682687e+000, -2.5781416421909207e-002,
       2.4979496421730363e-001 ]
```

R1: 3x3

```
data: [ 9.9956488341056426e-001, -2.6462952249988805e-002,
       -1.3029044885937801e-002, 2.6388182604633346e-002,
       9.9963449217793843e-001, -5.8775732219825015e-003,
       1.3179820607637151e-002, 5.5312029767539518e-003,
       9.9989784384324998e-001 ]
```

R2: 3x3

```
   data: [ 9.9911539031151575e-001, 4.3173471685822966e-003,
       -4.1830579198633644e-002, -4.0785802652950698e-003,
       9.9997491088479462e-001, 5.7916132438483973e-003,
       4.1854534111452894e-002, -5.6158805518554764e-003,
       9.9910793203734527e-001 ]
```

- Projeksiyon matrisleri: P_i projeksiyon matrisleri, Q_{rep} geri projeksiyon matrisi:

P1: 3x4

```
data: [ 9.3799144242010698e+002, 0., 3.3599347305297852e+002, 0.,
0.,       9.3799144242010698e+002, 2.6408391189575195e+002, 0., 0.,
0., 1.,       0. ]
```

P2: 3x4

```
data: [ 9.3799144242010698e+002, 0., 3.3599347305297852e+002,
       -5.6012979806676503e+003, 0., 9.3799144242010698e+002,
       2.6408391189575195e+002, 0., 0., 0., 1., 0. ]
```

Qrep: 4x4

```
data:  [  1.,  0.,  0.,  -3.3599347305297852e+002,  0.,  1.,  0.,
           2.6408391189575195e+002,        0.,        0.,        0.,
           9.3799144242010698e+002,   0.,0.,   -1.6745965768246854e-
           001, 0. ]
```

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Mahir Serhan TEMİZ

Doğum Yeri ve Tarihi: Ankara - 26/11/1979

Adres: Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği Bölümü 55139 Kurupelit/SAMSUN

Lisans Üniversite: Ondokuz Mayıs Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Müh. 2001

Y. Lisans Üniversite: Ondokuz Mayıs Üniversitesi F.B.E. Jeodezi ve Fotogrametri Müh. A.B.D. 2005

Yayın Listesi:

- **Temiz, M.S.,** Doğan, S., 2005. Dijital Görüntülerin Rektifikasyonu: Sensör Modelleri, Geometrik Görüntü Dönüşümleri ve Yeniden Örnekleme. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, 28 Mart - 1 Nisan, Ankara.

- **Temiz, M.S.,** Külür,S., 2008. Rectification of Digital Close Range Images: Sensor Models, Geometric Image Transformations and Resampling. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Spatial Inform. Sci. 37*, Part B5. Beijing, (on CD-ROM).

- Doğan, S., **Temiz, M.S.,** 2008. Statik Ve Dinamik Görüntülerden Zamana Bağlı Değişimlerin Belirlenmesi Üzerine Bir İnceleme. *Bakanlıklararası Harita İşlerini Koordinasyon ve Planlama Kurulu (BHİKPK) I. Sempozyumu*, Ankara.

- Doğan, S., **Temiz, M.S.,** Külür, S., 2010. Hareket Halindeki Taşıtların Hızlarının Kamera Görüntüleri ile Gerçek Zamanlı Belirlenmesi. *İleri Teknolojiler Çalıştayı*, 30 Nisan 2010, Kocaeli.

- Doğan, S., **Temiz, M.S.,** Külür, S., 2010. Real Time Speed Estimation Of Moving Vehicles From Side View Images From An Uncalibrated Video Camera. *Sensors. 2010,* **10**(5), pp. 4805-4824. doi:10.3390/s100504805

- **Temiz, M.S.,** Külür, S., 2011. Video Görüntülerinin Kaçış Noktaları Yardımıyla Rektifikasyonu. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, 18 Nisan - 22 Nisan, Ankara.

- Akıncı, H., Doğan, S., Kılıçoğlu, C., **Temiz, M.S.**, 2011. Production of Landslide Susceptibility Map of Samsun (Turkey) City Center by Using Frequency Ratio Method. *International Journal of the Physical Sciences*, Vol. **6**(5), pp. 1015-1025, 4 March, 2011, ISSN 1992 – 1950.