

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KAMERA KALİBRASYONUNDA YAPAY ZEKA
TEKNİKLERİNİN UYGULANMASI**

**Tezi Hazırlayan
Emre BENDEŞ**

**Tezi Yöneten
Doç.Dr. Coşkun ÖZKAN**

**Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından
FBY-08-357 kodu ile desteklenmiştir.**

**Temmuz 2008
KAYSERİ**

Doç. Dr. Coşkun ÖZKAN danışmanlığında Emre BENDEŞ tarafından hazırlanan “Kamera Kalibrasyonunda Yapay Zeka Tekniklerinin Uygulanması” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

21.07.2008

JÜRİ:

Başkan: Doç. Dr. Erkan BEŞDOK

Üye : Doç. Dr. Coşkun ÖZKAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Alper BAŞTÜRK

[Handwritten signatures of the jury members]

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 29/07/2008 tarih ve 2008/23-18 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

29/07/2008



[Handwritten signature of Prof. Dr. Nusret AYYILDIZ]
Prof. Dr. Nusret AYYILDIZ

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Tezin hazırlanmasındaki bütün aşamalarda bilgi ve tecrübesi ile desteğini hiç esirgemeyentez danışmanı hocamDoç. Dr. Coşkun Özkan’a, hayatım boyunca hep yanımda olmuş, bugünlere gelmemde en büyük emeği bulunan aileme, tez hazırlama aşamasında katkıda bulunan kardeşim Oğuzhan Bendeş’e, doğrudan ya da dolaylı katkıda bulunan herkese teşekkürü bir borç bilirim.

KAMERA KALİBRASYONUNDA YAPAY ZEKA TEKNİKLERİNİN UYGULANMASI

Emre BENDEŞ

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2008
Tez Danışmanı: Doç. Dr. Coşkun ÖZKAN**

ÖZET

Kamera kalibrasyonu özellikle fotogrametri, görüntü işleme ve bilgisayar görme alanlarında kullanılan klasik problemlerden birisidir. Kamera kalibrasyonu ihtiyaç duyulan alanlarda genellikle ön işlem olarak tanımlanır. Yönelim kestirme, görüntü doğrultma kamera kalibrasyonunun kullanıldığı işlemlere örnek olarak verilebilir.

Günümüze kadar birçok kamera kalibrasyon metodu geliştirilmiştir. Geliştirilen her yeni metot ya kendisine temel kabul ettiği metoda yeni bir çözüm stili getirmiş ya da yeni parametreler eklemek suretiyle sistem değiştirilmiştir.

Kamera kalibrasyon metotlarının çözümünde tekniğin türüne uygun olarak değişik algoritmalar kullanılmaktadır. Lineer metotlar için en küçük kareler yöntemi, lineer olmayan daha karmaşık sistemler için ise değişik optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır. Bu algoritmalara bakıldığında zaman en çok türeve dayalı LevenbergMarquardt algoritmasının kullanılmakta olduğu görülebilmektedir.

Bu tez çalışmasında değişik kalibrasyon metotlarında daha önce sık kullanılmayan ya da hiç kullanılmamış farklı sezgisel algoritmalar denenmiş ve sonuçlar gözlenmiştir. Kullanılan optimizasyon algoritmaları içerisinde yeni bir algoritma olan Yapay Arı Algoritması(ABC) ve Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) temel algoritmalar olarak kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler:Kamera Kalibrasyon, Görüntü İşleme, Optimizasyon, Yönelim Kestirme, Projektif Dönüşümler

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES IN CAMERA CALIBRATION

Emre BENDEŞ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, July 2008

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Coşkun ÖZKAN

ABSTRACT

Camera calibration is one of the mostly used classical problem especially in the fields of photogrammetry, image processing and computer vision. Camera calibration is a predetermined task of application fields. Pose estimation, image rectification are the examples of applications using camera calibration.

Many camera calibration methods have been developed so far. A new method can produce a new solution style to based method or can update this method as adding new parameters.

Different types of algorithms are used in camera calibration methods according to type of the techniques. Least square estimation is convenient for linear calibration methods, on the other hand for non-linear calibration methods, different types of optimization algorithms are being used. When the applications considered, it can be noticed that Levenberg-Marquardt algorithm based on derivation is mostly used one.

In this thesis different heuristic optimization algorithms that used rarely or never used before in camera calibration was studied with some calibration methods. The optimization algorithms used in this thesis, Artificial Bee Colony Algorithm and Differential Evolution Algorithm were used mainly

Keywords: Camera Calibration, Image Processing, Optimization, Pose Estimation, Perspective Projections

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	i
TEŞEKKÜR.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
1. BÖLÜM	
GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı.....	3
1.2. Tez Çalışması ve Genel Çerçevesi	3
2. BÖLÜM	
KAMERA KALİBRASYON.....	4
2.1. Kolinearite Eşitliği.....	8
2.2. Radyal Distorsiyon	11
2.1. Tanjant (Teğetsel) Distorsiyon	12
2.2. Kalibrasyon Paleti.....	13
2.3. Horris Corner Köşe Bulma Algoritması	14
2.4. Dlt (Direkt Lineer Transformasyon).....	16
2.4.1. DLT Parametrelerinden Kamera Parametrelerine Dönüş	19
2.5. Luca Lucchese Kalibrasyon Metodu	20
3. BÖLÜM	
OPTİMİZASYON ALGOTRİTMALARI.....	30
3.1. Yapay Arı Koloni Algoritması	30
3.1.1. İşçi Arı.....	32
3.1.2. Gözcü Arı	32
3.1.3. Kaşif Arı.....	32
3.1.4. Algoritmanın Parametreleri ve Adımları	33
3.2. Diferansiyel Gelişim Algoritması.....	35
3.2.1. Parametreler ve Adımları	36
3.3. Genetik Algoritma	39
3.4. Parçacık Sürü Algoritması	41
4. BÖLÜM	

KAMERA KALİBRASYONUNA OPTİMİZASYON ALGORİTMALARININ

UYGULANMASI	44
4.1. Kamera Parametrelerinin Karakteristiği	44
4.2. Kamera Kalibrasyonun Genel Sistemi.....	46
4.3. Değerlendirme Kriteri.....	49
4.4. Optimizasyon Ön İşlemleri.....	49
4.4.1. Klasik Yöntemler İçin Ön Adım	50
4.4.2. Sezgisel Algoritmalar İçin Ön Adım.....	54
4.5. Çok Görüntüyle Kalibrasyon	58
4.5.1. Ön Adım Kullanmadan Sonuçlar	59
4.5.2. Ön Adımda Belirlenen Aralıklar İle Sonuçlar	65
4.6. Kısıtlı Optimizasyon	72
4.7. DLT İçin Sonuçlar	75
5. BÖLÜM	
SONUÇ	78
KAYNAKLAR	80
ÖZGEÇMİŞ	84

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Klasik Yöntemle 25 Görüntü için Bazı Parametrelerin Ön Adım Değerleri.	51
Tablo 4.2. Levenberg Marquardt Algoritması İle Ön Adım Sonuçları.	53
Tablo 4.3. ABC İle Elde Edilen En İyi Parametreler.	54
Tablo 4.4. ABC İle İç Parametre İçin Hesaplanan Aralıklar.	55
Tablo 4.5. DGA ile Ön adımda Hesaplanan İç Parametreler ve Aralıklar.	56
Tablo 4.6. ABC ile Hesaplanan Dış Parametreler ve Luca Lucchese'nin Değerleri.	58
Tablo 4.7. ABC ile Ön Adımsız Hesaplanan İç Parametreler ve Kullanılan Aralıklar.	60
Tablo 4.8. ABC İle Ön Adımsız Hesaplanan Dış Parametreler.	60
Tablo 4.9. DGA ile Ön Adımsız Hesaplanan İç Parametreler ve Kullanılan Aralıklar.	61
Tablo 4.10. DGA İle Ön Adımsız Hesaplanan Dış Parametreler.	62
Tablo 4.11. GA ile Ön Adımsız Hesaplanan İç Parametreler ve Kullanılan Aralıklar.	63
Tablo 4.12. GA İle Ön Adımsız Hesaplanan Dış Parametreler.	63
Tablo 4.13. PSO ile Ön Adımsız Hesaplanan İç Parametreler ve Kullanılan Aralıklar.	64
Tablo 4.14. PSO İle Ön Adımsız Hesaplanan Dış Parametreler.	64
Tablo 4.15. Dış Parametrelerin Eğitim Aralığı.	65
Tablo 4.16. ABC ile 25 görüntüden Elde Edilen İç Parametreler.	66
Tablo 4.17. DGA ile 25 görüntüden Elde Edilen İç Parametreler.	67
Tablo 4.18. GA ile 25 görüntüden Elde Edilen İç Parametreler.	68
Tablo 4.19. PSO ile 25 görüntüden Elde Edilen İç Parametreler.	69
Tablo 4.20. Kullanılan Algoritmaların 3,5, ve 18. Görüntü İçin Hesapladıkları Dış Parametreler.	71
Tablo 4.21 Algoritma Uygunluk Değerlerinin Toplu Gösterimi	71
Tablo 4.22. Kısıtlama Kullanarak ABC İle Hesaplanan İç Parametreler.	73
Tablo 4.23. Kısıtlama Kullanarak ABC İle Hesaplanan 3. 6. ve 24. Görüntüler İçin Dış Parametreler.	74
4.24. Lucchese'nin Sonuçları.	74
Tablo 4.25. Algoritmaların Dlt İçin Sonuçları.	76
Tablo 4.26. DGA İle Kamera Parametreleri Kullanarak DLT'den Elde Edilen Sonuçlar.	76
Tablo 4.27. DGA ile DLT için Üretilen İç Parametreler.	77

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Kamera Kalibrasyonu Genel İşleyişi.	4
Şekil 2.2. Kamera Sistemi.	5
Şekil 2.3. Mercek Yapısı.	6
Şekil 2.4. Kamera Modeli.	7
Şekil 2.5. Perspektif Kamera Modeli [7].	7
Şekil 2.6. Tam Odaklanmış Kusursuz Mercek Sistemine Sahip Kamera [27].	10
Şekil 2.7. Tam Odaklanmamış Görüntü [27].	10
Şekil 2.8. İrisin Mercekten Çok Önde Olması Durumu [27].	10
Şekil 2.9. İrisin Mercekten Çok Geride Olması Durumu [27].	11
Şekil 2.10. Radyal Distorsiyon Çeşitleri.	11
Şekil 2.11. Distorsiyonun Mesafe ile Değişimi [26].	12
Şekil 2.12. Merceklerdeki Kayıklık.	13
Şekil 2.13. Kalibrasyon Paletinin Değişik Açılardan Çekilmiş Görüntüleri.	14
Şekil 2.14. Bölgenin Kenarda Olma Durumu.	15
Şekil 2.15. Kameraların Yerleşimi.	21
Şekil 2.16. İleri Yönde Homografi Adımları.	25
Şekil 3.1. Arıların kovan çevresindeki hareketleri [32].	31
Şekil 3.2. Diferansiyel Gelişim Algoritması Adımları [40].	37
Şekil 3.3. Çaprazlama İşlemi [38].	41
Şekil 4.1. Sistemin Çalışması.	47
Şekil 4.2. Köşe Noktaları Çıkartılmış Görüntüler.	48
Şekil 4.3. Yirmibeş Görüntü İçin ρ Değerleri.	53
Şekil 4.4. İkinci Görüntü İçin ABC Tek Görüntü Sonucu.	55
Şekil 4.5. Beşinci Görüntü İçin ABC Tek Görüntü Sonucu	55
Şekil 4.6. Yirmiüçüncü Görüntü İçin ABC Tek Görüntü Sonucu.	56
Şekil 4.7. İkinci Görüntü için DGA Tek Görüntü Sonucu.	56
Şekil 4.8. Beşinci Görüntü için DGA Tek Görüntü Sonucu.	57
Şekil 4.9. Yirmidördüncü Görüntü için DGA Tek Görüntü Sonucu.	57
Şekil 4.10. Onsekizinci Görüntü İçin ABC Sonucu.	61
Şekil 4.11. Beşinci Görüntü İçin ABC Sonucu.	61
Şekil 4.12. Onaltıncı Görüntü İçin DGA Sonucu.	62
Şekil 4.13. Onaltıncı Görüntü İçin GA Sonucu.	64

Şekil 4.14. Onüçüncü Görüntü İçin PSO Sonucu.	65
Şekil 4.15. Ön Adım Aralıklarıyla ABC'nin 3. Görüntüde Sonuçları.	66
Şekil 4.16. Ön Adım Aralıklarıyla ABC'nin 5. Görüntüde Sonuçları.	67
Şekil 4.17. Ön Adım Aralıklarıyla ABC'nin 18. Görüntüde Sonuçları.	67
Şekil 4.18. Ön Adım Aralıklarıyla DGA'nin 3. Görüntüde Sonuçları.	68
Şekil 4.19. Ön Adım Aralıklarıyla DGA'nin 5. Görüntüde Sonuçları.	68
Şekil 4.20.Ön Adım Aralıklarıyla DGA'nin 18. Görüntüde Sonuçları.	68
Şekil 4.21. Ön Adım Aralıklarıyla GA'nin 3. Görüntüde Sonuçları.	69
Şekil 4.22. Ön Adım Aralıklarıyla GA'nin 5. Görüntüde Sonuçları.	69
Şekil 4.23. Ön Adım Aralıklarıyla GA'nin 18. Görüntüde Sonuçları.	69
Şekil 4.24. Ön Adım Aralıklarıyla PSO'nın 2. Görüntüde Sonuçları.	70
Şekil 4.25. Ön Adım Aralıklarıyla PSO'nın 3. Görüntüde Sonuçları.	70
Şekil 4.26. Ön Adım Aralıklarıyla PSO'nın 5. Görüntüde Sonuçları.	70
Şekil 4.27. Kısıtlama Kullanarak ABC'nin 3. Görüntüde Sonuçları.	73
Şekil 4.28. Kısıtlama Kullanarak ABC'nin 6. Görüntüde Sonuçları.	73
Şekil 4.29. Kısıtlama Kullanarak ABC'nin 24. Görüntüde Sonuçları.	73
Şekil 4.30. Lucchese'nin Parametreleri ile Projeksiyon.	74
Şekil 4.31. ABC ile 3.,5. ve 18. Görüntü için DLT Eğitimi Sonucu.	75
Şekil 4.32. DGA ile 3.,5. ve 18. Görüntü için DLT Eğitimi Sonucu.	75
Şekil 4.33. DGA İle Kamera Parametreleri Kullanarak 20 Görüntüyle DLT'den Elde Edilen Sonuçlar.	77

1. BÖLÜM

GİRİŞ

Kamera kalibrasyonu bilgisayar görme ve görüntü işleme işlemlerinde önemli bir ön adımdır. Altında yatan temel fikir, cismin bilinen 3 boyutlu koordinatları ile görüntüsündeki piksel koordinatları arasında bağıntı kurmaktır. Kamera kalibrasyonunda bu hesaplamalar içerisinde kameranın parametrelerinin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Parametrelerin sayısı modele göre değişiklik göstermekle birlikte iki grupta incelenmekte ve hesaplanmaktadır. Bu gruplar iç ve dış kamera parametreleri olarak isimlendirilir. Bu açıklamalar dahilinde kamera kalibrasyonu, iç ve dış kamera parametrelerinin belirlenmesi ve bu amaçla geliştirilmiş yöntemleri içerir. Dış parametreler kamera konumunu ve yönelim belirlerken, iç parametreler kameranın iç yapısını belirleyerek, kamera merceğine gelen ışık ışınlarının kamera içerisinde nasıl bir yol izleyeceğini izah etmektedir.

Kamera kalibrasyon lineer[1-6] ve lineer olmayan olmak üzere iki kısımda incelenebilir[7]. Lineer teknikler uygulaması kolaydır fakat bir çok lineer kamera kalibrasyon tekniğinde mercekten kaynaklanan distorsiyonlar göz ardı edilmektedir. Böyle bir yöntemde sistem bilinmeyenleri en küçük kareler yöntemi ile kolaylıkla hesaplanabilir. Bu yöntemlerin kolay hesaplanabilir olması avantajıdır. Doğruluk ve kararlılığının eksik olması dezavantajları arasındadır.

Lineer olmayan kamera kalibrasyon tekniklerinde ise mercek kaynaklı radyal ve/veya teğetsel distorsiyonlar sisteme dahil edilmektedir. Sisteme bu tür eklemelerin anlamı yeni kamera parametrelerinin eklenmesidir. Lineer olmayan yöntemlerin çözümü lineer sistemlere göre daha karmaşık ve zordur. Böyle bir sistemin çözümü için iteratif algoritmalar kullanılmaktadır. Bu sistemler elde edilecek sonuç açısından lineer yöntemlere göre daha karardır. Bazı metotlarda iki adımlı çözüm önerilmiştir[8-10]. İlk

aşamada sistemin basitleştirilmiş versiyonunun lineer çözümü gerçekleştirilmektedir. İkinci aşamada ise ilk adımda elde edilen çözümler başlangıç noktası olarak kabul edilip, çözüme devam edilmektedir.

Kamera parametrelerinin hesaplanması için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin bazıları sadece dış parametreleri hesaplarken, bazıları dış parametreler ile birlikte bazı iç parametreleri, bazıları da bütün kamera parametrelerini hesaplamaktadır.

Kolinearite eşitliği kamera kalibrasyonunun en temel eşitliğidir. Üretilen çoğu kalibrasyon metodunun temeli kolinearite eşitliğine dayanmaktadır. Kolinearite eşitliği kamera parametrelerini kullanarak cisim koordinatları ile görüntü koordinatları arasında ki bağıntıyı kurmaktadır. Bu yöntemlerde hesaplama yönü cisim koordinatlarından görüntü koordinatlarına doğrudur. Bunun anlamı 3 boyutlu cismin koordinatlarının, cismin resminde hangi görüntü koordinatlarına denk geldiği araştırılmaktadır. Zaten kamera kalibrasyonunun amacında bu bağıntıyı kurarken kullanılan kamera parametrelerinin hesaplanmasıdır.

Direk Lineer Transformasyon(DLT)Abdel-Aziz tarafından, lineer kalibrasyon metodu olarak 1970'lerin başlarında ortaya atılmıştır[11]. Bu yöntemde 2 boyutlu görüntü düzlemi ile 3 boyutlu cismin koordinatları arasında kamera parametrelerini kullanmadan lineer ilişki kurulmuştur. Bu yöntem ile elde edilecek onbir tane parametreden kamera parametrelerine dönmek mümkündür.Böylelikle DLT yöntemi ile hem iç hem de dış parametreler elde edilebilmektedir. Bu yöneme mercek kaynaklı distorsiyonlarda eklenebilmektedir. Bu çalışmada kullanılacak olan yöntemlerden biriside DLT'ninmercekdistorsiyonlarının sisteme dâhil edilmiş halidir.

Bu çalışmada kullanılan,Luca Lucchese tarafından geliştirilmiş iç ve dış parametrelerin her ikisini de hesaplayan kalibrasyon metodu bir diğer yöntemdir[8]. Bu yöntemin diğer yöntemlerden farkıkalibrasyon paletinin kullanımı vehomografinin(projeksiyon) yönünde bulunmaktadır. Buyöntemde kalibrasyon paletinin 3 boyutlu uzay koordinatları yerinesanal olarak üretilen, kalibrasyon paletinin görüntü koordinatları kullanılmıştır. Diğer bir farklılık ise parametreler hesaplanırken sistem çözümü distorsiyon bulunan çarpıklığa sahip görüntü koordinatlarından, hedef paletin sanal resmine doğrudur.

1.1. Tezin Amacı

Yapılan literatür araştırmasında görülmüştür ki kamera kalibrasyonunda kullanılan algoritmalar genellikle sezgisel olmayan türeve dayalı yaklaşımlardır[7-10, 12-17]. Bununla birlikte bazı çalışmalarda genetik algoritma gibi sezgisel bir yaklaşım da kamera kalibrasyonunda kullanılmıştır[7, 18-21].

Bu çalışmada ise literatürde kullanılan çeşitli kalibrasyon yöntemlerinin bu yöntemlerde daha önce kullanılmamış optimizasyon yöntemleri ile eğitmek, kullanılan yöntemlerin ve algoritmaların başarısı karşılaştırmak amaçlanmıştır.

1.2. Tez Çalışması ve Genel Çerçevesi

Tez çalışmasında kullanılacak olan kamera kalibrasyon yöntemleri Luca Lucchese 'nin kalibrasyon metodu ve DLT metodudur. Kalibrasyon yöntemlerinde kullanılmış olan algoritmalar:

- Yapay Arı Koloni Algoritması (ABC)
- Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA)
- Genetik Algoritma (GA)
- Parçacık Sürü Algoritması (PSO)

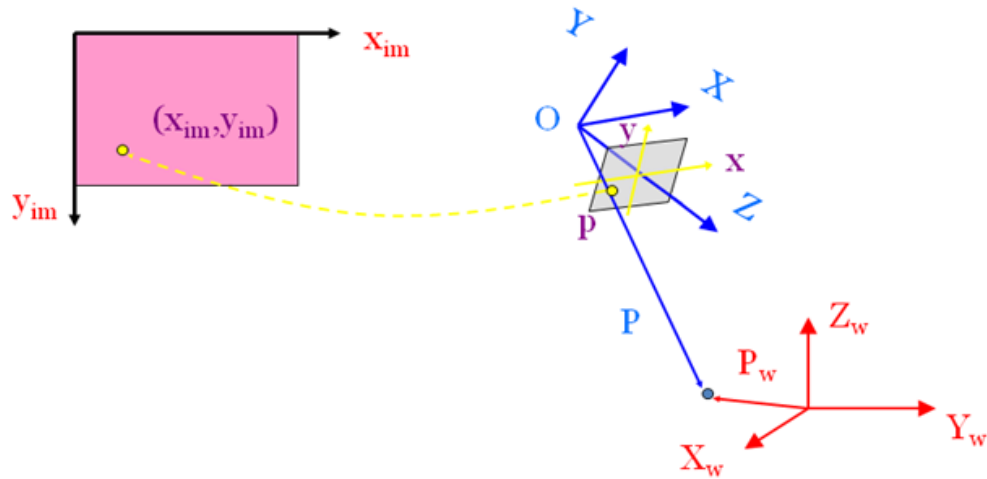
Bu tez çalışmasında simülasyon sonuçları, kamera kalibrasyon yöntemlerinin kodlanması, algoritmaların eğitimi için Matlab 7.0 programı kullanılmıştır. Yazılan Matlab kodları Matlab'in daha eski versiyonlarında hata verebilmektedir.

Test verisi olarak Jean-Yves Bouguet[22] tarafından hazırlanmış yirmibeş tane kalibrasyon paleti görüntüsü kullanılmıştır.

2. BÖLÜM

KAMERA KALİBRASYON

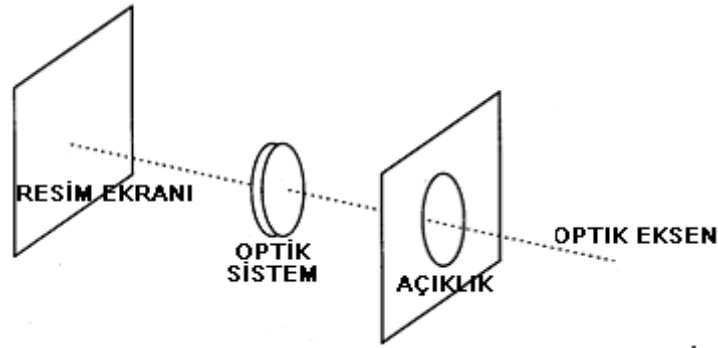
Kamera kalibrasyon bilgisayar görme,fotogrametri alanlarının klasik problemlerinden biridir. Bu alanlarda birçok çalışmada doğru metrik bilginin görüntüden çıkartılması gerekmektedir. Kalibrasyon işlemleri kamera parametreleri ile 3 boyutlu noktaların karşılık geldiği 2 boyutlu noktalar üzerine projeksiyonunu içerir. Bu parametreler ise iç ve dış parametreler olmak üzere iki gruptan oluşmaktadır. Dış parametreler kameranın konumunu ve dönüklüğünü belirlerken iç parametreler kameranın iç geometrisini distorsiyonları belirler[8, 13, 14, 23-25]. Şekil 2.1 'de, dış parametreler ile $X_w Y_w Z_w$ nesne koordinatlarındaki P noktası, XYZ kamera koordinatlarındaki p noktasına ötelenir. İç parametreler ile ise p noktasının piksel koordinatlarındaki (x_{im}, y_{im}) noktası hesaplanır.



Şekil 2.1. Kamera Kalibrasyonu Genel İşleyişi.

Kamera kalibrasyonunun kullanım amaçları, mercek performans değerlendirmesi, mercek kararlılığının ölçülmesi, merceğin optik ve geometrik parametrelerinin hesaplanması, kamera sisteminin distorsiyonlar gibi optik, konumu ve dönüklüğü gibi geometrik parametrelerinin tespit edilmesi olarak özetlenebilir[26].

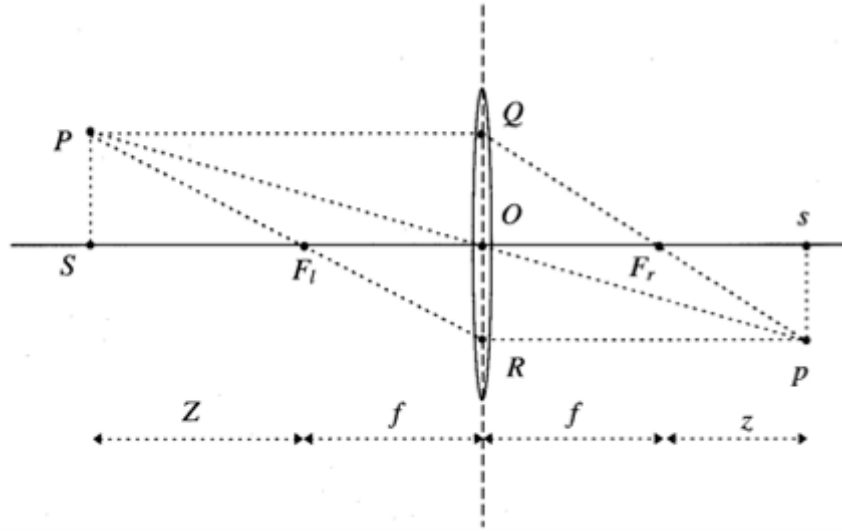
Kamera sisteminde kameranın iç yapısını belirleyen iç parametrelerin etkisini anlamak için kamera yapısı incelenmelidir. Bir mercek sisteminde oluşacak görüntü optik kanunlarına göre belirlenir. Kameraya gelen ışık ışınları Şekil 2.2'deki mercek açıklığından içeri girer. Dolayısıyla kamera bu açıklık oranında çevreden bilgi toplayabilir. Kamera içerisine açıklıktan girebilen her yöndeki ışık ışınları görüntü yüzeyine düşmeden önce kamera mercek sisteminden geçer. Mercekten görüntü düzlemine düşen ışık ışınları buradaki sensörler tarafından algılanır.



Şekil 2.2. Kamera Sistemi.

Mercek olmaması durumunda görüntü düzleminde bir noktaya her yönden ışık ışını gelecektir. Bu durumda o noktada her renk türü barındığı için beyaz anlamsız bilgi oluşur. Mercek sisteminin temel amaçlarından birisi de görüntü düzlemine ışık ışınlarının düzenli bir şekilde düşmesini sağlamaktır. Mercek sisteminde mercek merkezinden dik olarak geçen hat optik eksen olarak isimlendirilir. Optik eksen üzerinde merceğin çapına göre belirlenen mesafe odak uzaklığı olarak isimlendirilir. Odak uzaklığı denklem **Hata! Bilinmeyen anahtar değişkeni.**'e bağlı olarak hesaplanır. Şekil 2.3 'de merceğin önünde ve arkasında odak uzaklığı mesafesinde bulunan noktalar mercek sistemi için önemlidir. Merceğin arka kısmında kalan F_r geri odak noktası merceği geçebilen bütün ışık ışınlarının toplandığı yerdir. Mercek önündeki F_1 ön odak noktasından geçip merceğe gelen ışın ışınları merceği geçip optik eksene paralel olarak görüntü düzlemine düşerler. Aynı noktadan ayrılıp mercek merkezine gelen ışınlar ise hiçbir kırılmaya uğramadan merceği geçerek görüntü

düzlemine düşer. Yine aynı noktadan ayrılıp optik eksene paralel olarak merceğe gelen ışınlar ise F_r geri odak noktasından geçecek şekilde mercekte kırılmaya uğrarlar. Bu şekilde görüntü düzlemindeki bir noktaya kameranın baktığı uzayda odaklanılan mesafedeki alandan sadece bir noktadan bilgi gelmektedir. Bu noktaya doğru yönelmiş diğer ışık ışınları mercek tarafından yansıtılarak görüntü düzlemine düşmesi engellenmiş olur.



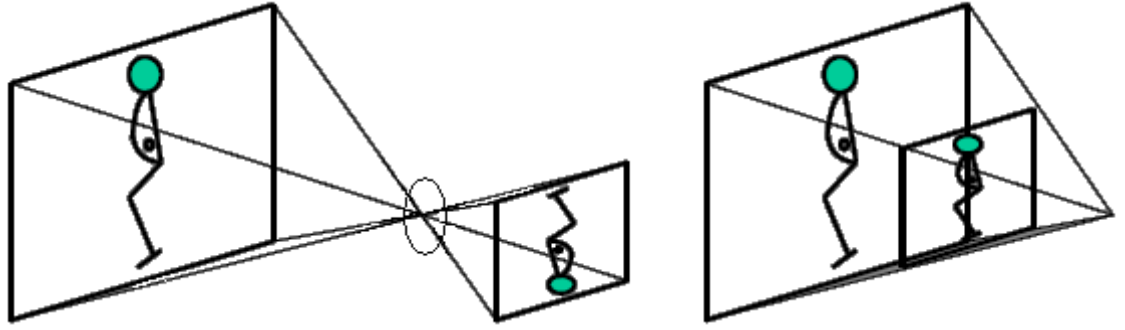
Şekil 2.3. Mercek Yapısı.

Şekil 2.3 verilen mercek yapısındaki mesafeler arasındaki eşitlikler denklemler 2.1 'deki temel mercek eşitliği ile elde edilir.

$$\frac{1}{\hat{Z}} + \frac{1}{\hat{z}} = \frac{1}{f} \quad \text{ve} \quad \hat{Z} = Z + f, \quad \hat{z} = z + f$$

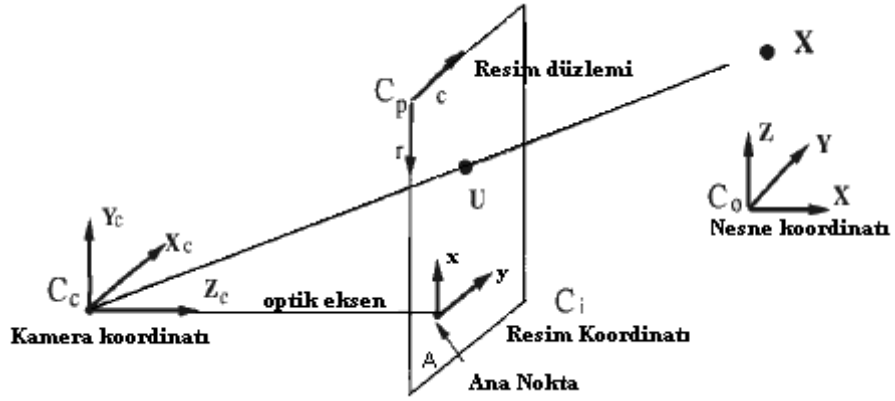
2.1

Şekil 2.3'de görüldüğü gibi görüntü merceğin arkasında ters bir şekilde oluşur. Ancak gösterim ve anlama kolaylığı açısından kaynaklarda genellikle görüntü merceğin önünde oluşmuş gibi ifade edilir[25]. Şekil 2.4'ün sağ ve sol tarafındaki gösterimlerin birbirinden hiçbir farkı bulunmamaktadır.



Şekil 2.4. Kamera Modeli.

Şekil 2.5’ de perspektif kamera sistemi gösterilmiştir. Kameraları ifade etmek için yaygın kullanılan modellerden birisidir. Kamera bir görüntü düzlemi A ve 3 boyutlu C_c noktasından oluşur. C_c noktası projeksiyon merkezidir. A ve C_c arası odak uzaklığıdır. Projeksiyon merkezinde görüntü düzlemi A ’ya çizilen dik çizginin bu düzlemi kestiği yer ana nokta olarak isimlendirilir. Burası görüntü merkezidir. X noktasının resmi X' , C_c görüntü merkezine bağlayan düz çizginin görüntü düzlemini kestiği U noktasında oluşur.



Şekil 2.5. Perspektif Kamera Modeli[7].

X noktasının C_c orijinli 3 boyutlu kamera koordinat sistemine göre koordinatlarına $X=[X_c, Y_c, Z_c]$ ve U noktasının görüntü düzlemindeki koordinatlarına $U=[x, y]$ dersek ikisi arasındaki, kamera kalibrasyonun en temel eşitliklerinden birisi olan eşitlikdenklem 2.2 ile ifade edilir.

$$x = f \frac{X_c}{Z_c} \quad ve \quad y = f \frac{Y_c}{Z_c}$$

2.2

Kamera düzleminde üçüncü eksen her zaman odak uzaklığına eşittir. Bu sebeple görüntü koordinatlarında üçüncü boyut ifade edilmemiştir

2.1. KolineariteEşitliği

$[X_c, Y_c, Z_c]$ kamera koordinat sistemi ve orijini de projeksiyon merkezi C_c dir. Ayrıca bu koordinat sisteminin Z eksenini optik eksendir. Sistemin bu haliyle kameranın uzaydaki konumunu ve dönüklüğünü bilmiyoruz. Bu kameranın dış parametrelerini bilmiyoruz demektir. Kameranın dönüklüğünü 3×3 boyutlu dönüklük matrisi R belirlerken konumunu ise öteleme dizisi T temsil etmektedir. Bu bilgiler ışığında dünya koordinat sistemi ile kamera koordinat sistemleri arasındaki bağıntı denklemin 2.3 ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = R \left(\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} - T \right)$$

2.3

Matris işlemleri yapıldıktan sonra denklem 2.5 elde edilir.

$$\begin{aligned} X_c &= r_{11}(X_w - T_x) + r_{12}(Y_w - T_y) + r_{13}(Z_w - T_z) \\ Y_c &= r_{21}(X_w - T_x) + r_{22}(Y_w - T_y) + r_{23}(Z_w - T_z) \\ Z_c &= r_{31}(X_w - T_x) + r_{32}(Y_w - T_y) + r_{33}(Z_w - T_z) \end{aligned}$$

2.4

Herhangi bir distorsiyonun yokluğunda denklem 2.2'nin yeni parametreler eklenmesi ile birlikte denklem 2.5 ortaya çıkmaktadır.

$$\begin{aligned} x &= -\frac{f}{w} \frac{X_c}{Z_c} + x_p \\ y &= -\frac{f}{h} \frac{Y_c}{Z_c} + y_p \end{aligned}$$

2.5

Yukarıdaki denkleme eklenen (x_p, y_p) resmin ana nokta koordinatlarını temsil etmektedir. Mercek yerleşiminden kaynaklanan bu kayma sebebiyle görüntü düzleminin fiziksel merkezi ana noktayı temsil etmeyebilmektedir. w , h bileşenleri ise

görüntüdüzlemini oluşturan piksellerin sırasıyla en ve boylarını ifade etmektedir. Piksel birimlerinin en ve boy oranlarını ifade eden aspectratio bire çok yakındır. Bu oranın tam bir olmaması sebebiyle x ve y yönlerinde bu yönlerdeki piksel boyutu nispetinde değişik oranlarda projeksiyon gerçekleşmektedir. Bu parametreler kameranın iç parametrelerindendir. X_c , Y_c ve Z_c nindenklem 2.4' de hesaplanan değerini denklem 2.5' de yerini koyduğumuzda genelleştirilmiş kolinearite eşitliğini elde etmiş oluruz. Bu eşitlik denklem 2.6 'daki gibidir.

$$\begin{aligned} x - x_p &= -\frac{f r_{11}(X_w - T_x) + r_{12}(Y_w - T_y) + r_{13}(Z_w - T_z)}{w r_{31}(X_w - T_x) + r_{32}(Y_w - T_y) + r_{33}(Z_w - T_z)} \\ y - y_p &= -\frac{f r_{21}(X_w - T_x) + r_{22}(Y_w - T_y) + r_{23}(Z_w - T_z)}{h r_{31}(X_w - T_x) + r_{32}(Y_w - T_y) + r_{33}(Z_w - T_z)} \end{aligned}$$

2.6

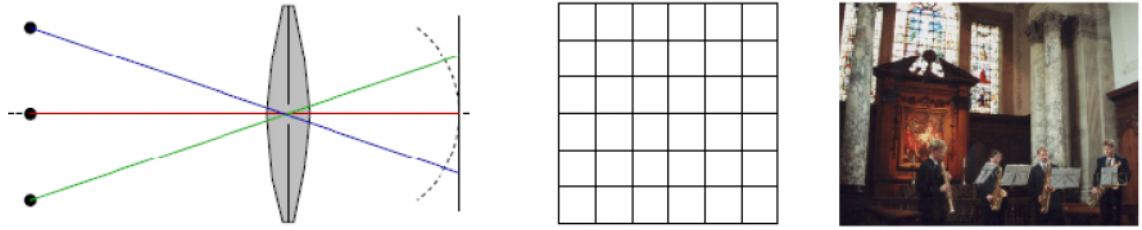
Buradaki eşitlikte koordinatlar önce ötelenmiş daha sonra rotasyona tabi tutulmuş bulunmaktadır. Bu işlem sırası değişebilmektedir. Dolayısıyla çeşitli kaynaklarda farklı türleri kullanılabilmektedir[8, 25]. Ters sıradaki işlemler ile kolinearite eşitliğindenklem 2.7 'deki gibidir.

$$\begin{aligned} x - x_p &= -\frac{f r_{11}X_w + r_{12}Y_w + r_{13}Z_w + T_x}{w r_{31}X_w + r_{32}Y_w + r_{33}Z_w + T_z} \\ y - y_p &= -\frac{f r_{21}X_w + r_{22}Y_w + r_{23}Z_w + T_y}{h r_{31}X_w + r_{32}Y_w + r_{33}Z_w + T_z} \end{aligned}$$

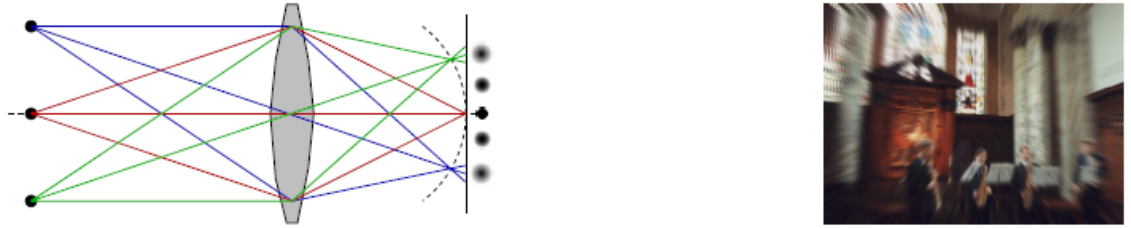
2.7

Bazı durumlarda kamera merceğine gelen ışık ışınının CCD (ChargeCoupled Device) ya da CMOS (Complementary Metal OxideSemiconductor) yüzeyin neresine düşeceğinin bilinmesi gerekmektedir. Işık ışınının nereye düşeceği iç parametreler yardımı ile hesaplanabilir. Mercek sisteminin görüntü netliği için nesneye tam odaklanmış olması gerekmektedir. Aksi takdirde Şekil 2.7'de ki gibi bulanık bir görüntü ortaya çıkacaktır. Genellikle kalibre edilecek kameralar sonsuza odaklanmış olarak düşünülür[8]. Sorunsuz bir mercek sisteminde cisimden gelen ışık ışınlar keskin bir şekilde, optik kurallarına uygun olarak, hiçbir distorsiyona uğramadan görüntü yüzeyine düşerler. Ancak genellikle kamera mercek sistemleri bu şekilde mükemmel üretilmemiştir. Bunun sonucu olarak da görüntü düzlemi üzerinde ışık ışını istenilen yere düşmeye bilir. Uygulamalarda iki tür distorsiyon dikkate alınmıştır. Bunlar radyalve

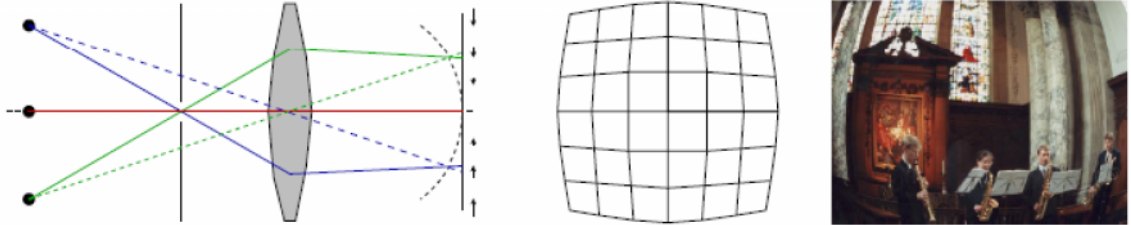
teğetseldistorsiyonlardır. Radyaldistorsiyonmercek yüzeyinin tam oval olmamasından kaynaklanıp, ışık ışınlarımercekten olması gerekenden daha az ya da daha fazla bükülerek görüntü düzlemine düşerler. Bu ise görüntü ana noktasından başlayarak görüntü çevresine doğru artarak ilerleyen eğiklikler şeklinde görüntü üzerinde kendisini gösterir. Görüntü ana noktasında ise distorsiyon bulunmamaktadır. İkinci distorsiyon türü olan teğetseldistorsiyon ise mercek yüzeylerinin ovallik merkezlerinin tam olarak birbirine denk gelememesinden kaynaklanır. Sonuç olarak da görüntü ana noktası ve görüntü düzleminin fiziksel merkezi arasında mesafe oluşmaktadır. Bu distorsiyonlarsebebiyledegörüntü üzerinde düz olması gereken bir nokta aksine eğimli olarak oluşmaktadır. Doğru metrik ölçümler gereken uygulamalarda bu distorsiyonların giderilmesi gerekmektedir.Şekil 2.6, Şekil 2.7, Şekil 2.8 ve Şekil 2.9 ‘da oluşmuş değişik bozulmalar görülmektedir.



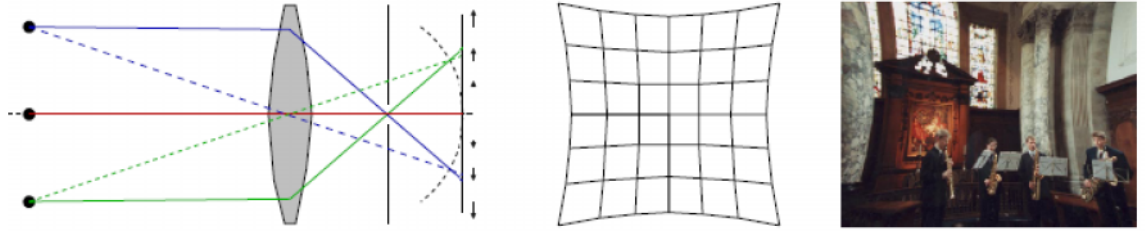
Şekil 2.6.Tam Odaklanmış Kusursuz Mercek Sistemine Sahip Kamera[27].



Şekil 2.7. Tam Odaklanmamış Görüntü[27].



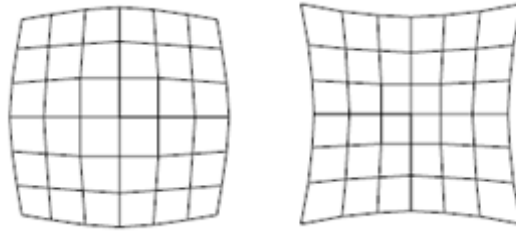
Şekil 2.8. İrisin Mercekten Çok Önde Olması Durumu[27].



Şekil 2.9. İrisin Mercekten Çok Geride Olması Durumu[27].

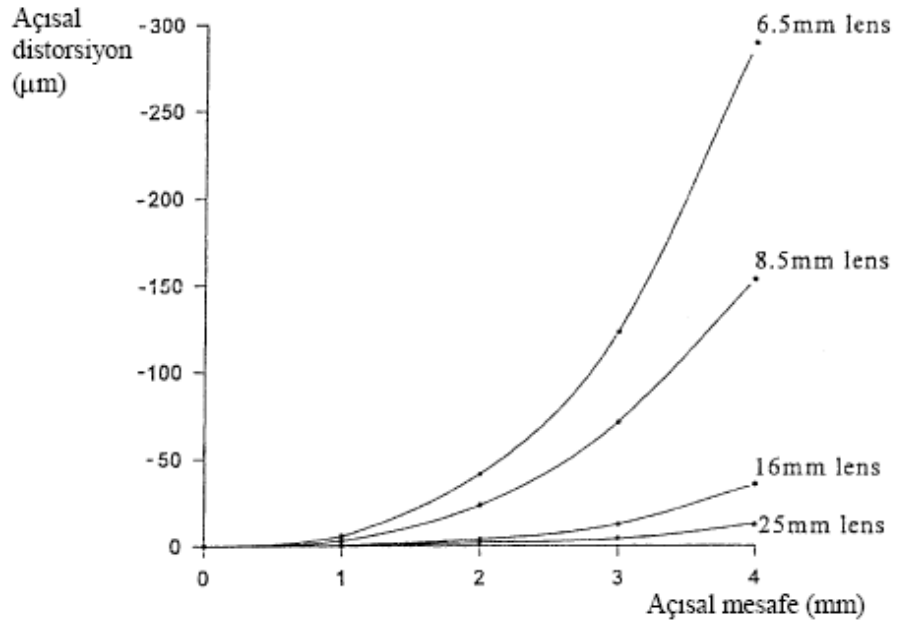
2.2. RadyalDistorsiyon

Bir noktanın, ana noktaya göre olması gereken konumundan daha uzakta (pozitif) ya da daha yakında (negatif) olması şeklinde ortaya çıkar. Şekil 2.10 'nun sağındaki şekilde pozitif, solundaki şekilde ise negatif bozulma görülmektedir.



Şekil 2.10.RadyalDistorsiyon Çeşitleri.

Ana noktada radyal distorsiyon bulunmazken merkezden uzaklaştıkça merceğe de bağlı olarak ana noktaya olan mesafe ile orantılı bir şekilde distorsiyon miktarı artmaktadır. Şekil 2.11 'deki grafikte bozulmanın açısal mesafeye bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Distorsiyonun Mesafe ile Değişimi[26].

Radyalbozunma eşitliği aşağıda gösterildiği gibidir. Bu eşitlikteki $K_1, K_2, K_3, \dots$ katsayıları radyal distorsiyon katsayıları olarak isimlendirilir. Radyal distorsiyon katsayılarının etkileri ana noktaya olan mesafenin kuvvetleri ile orantılıdır (denklem 2.8).

$$\delta_r = K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots$$

2.8

Radyal distorsiyon eşitliğinde ki mesafenin başlangıç noktası ana noktadır. Ana noktadan sıfır distorsiyon ile başlayıp, görüntü çevresine doğru mesafenin ile orantılı olarak distorsiyon etkisi artarak devam edecektir. Denklem 2.8 'daki ana noktaya olan uzaklık denklem 2.9'da verilen eşitlikle hesaplanır.

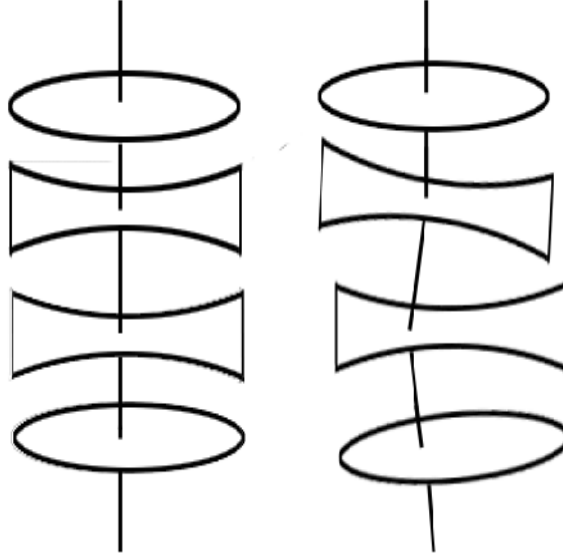
$$r^2 = (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2$$

2.9

2.1. Tanjant(Teğetsel) Distorsiyon

Kamera mercek sistemi çoklu mercek takımından oluşmaktadır. Mercek merkezlerinin ideal bir şekilde hizalanması gerekir. Bununla birlikte kamera üretimi sırasında oluşan hatalardan dolayı bu hizalama ideal şekilde olamayabilir. Şekil 2.12 'de gösterildiği gibi

merceklerdeki yatay mesafe farkı ya da dönüklük ışık ışınlarının görüntü düzleminde düşmesi gereken yerden farklı bir yere düşmesine neden olacaktır.



Şekil 2.12. Merceklerdeki Kayıklık.

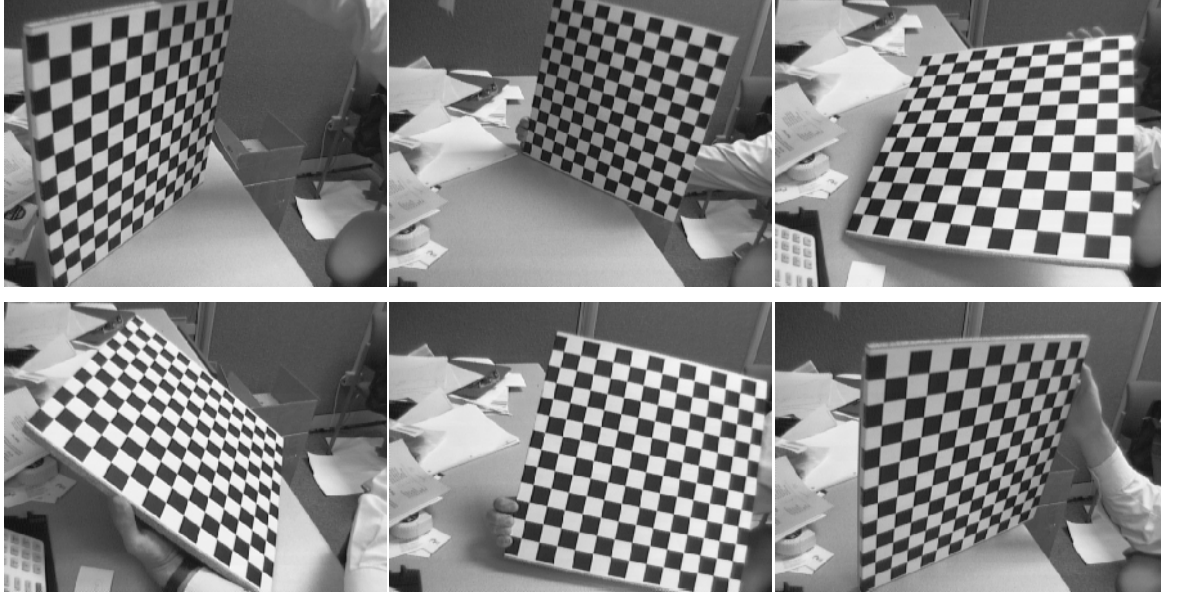
Teğetsel bozulama denklem 2.10 ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}\Delta x_s &= q \left| p_1 \left(r^2 + 2(x_d - x_p)^2 \right) + 2p_2(x_d - x_p)(y_d - y_p) \right| \\ \Delta y_s &= q \left| p_2 \left(r^2 + 2(y_d - y_p)^2 \right) + 2p_1(x_d - x_p)(y_d - y_p) \right| \\ &\quad \text{ve} \\ r &= \left((x_d - x_p)^2 + (y_d - y_p)^2 \right)^{1/2} \text{ ve } q = (1 + p_3 r^2)\end{aligned}$$

2.10

2.2. Kalibrasyon Paleti

Kamera kalibrasyon metotlarında genellikle üzerinde siyah beyaz kareler oluşturma tahtası biçiminde paletler kullanılır. Bu paletlerin özelliği üzerindeki karelerin boyutları bilindiği için uzay koordinatları kolaylıkla belirlenebilir. Ayrıca üzerindeki renklerin büyük kontrastından dolayı görüntüdeki palet köşe noktaları kolaylıkla bulunabilmektedir [15]. Bu sayede kamera kalibrasyon için gerekli olan giriş ve çıkış değerleri elde edilmiş olmaktadır. Doğru hesaplanmış parametreler ile sistem verilen bu koordinatlar arasında en doğru bağıntıyı kuracaktır. Bu tez çalışmasında Bouguet tarafından hazırlanmış görüntü kümesi kullanılmıştır[22]. Lucchese ile aynı veri kümesi kullanarak sistem başarısını karşılaştırmak daha verimli olmuştur.



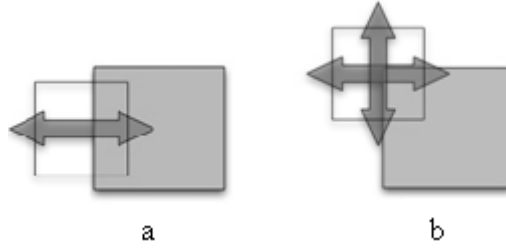
Şekil 2.13. Kalibrasyon Paletinin Değişik Açılardan Çekilmiş Görüntüleri.

2.3. HorrisCorner Köşe Bulma Algoritması

Bu algoritmaya başlamadan önce görüntü üzerinde çalışılacak bölgeyi belirlemek üzere 4 tane nokta alınır. Bu noktalar görüntü üzerinde palet köşelerinde olmalıdır. Algoritma belirlenen bu bölgede çalışacaktır[13].

Görüntü üzerinde küçük bir bölge eğer bir köşe noktası üzerinde ise ve bu bölge herhangi bir yönde kaydırılır ise yüksek yoğunluk(intensity) değişimi meydana gelecektir[28].

Şekil 2.14 ‘deki bölge düz bir alanda ise hareket ettirilmesi durumunda yoğunluk farkı büyük olmayacaktır. Eğer bölge bir kenarda ise sadece bir yöne hareketi ile yoğunluk farkı oluşur. Bölgenin köşede olması durumunda ise her yönde yoğunluk farkı olacaktır. Bu durum o noktanın köşe noktası olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 2.14. Bölgenin Kenarda Olma Durumu.

Haris Corner köşe bulma algoritması dönme, ölçekleme ve aydınlatma şartlarındaki çeşitlilikte bile aynı sonuçları vererek kararlı bir yapı göstermesinden dolayı etkilidir[29]. Haris Corner köşe bulma algoritması temelde bölgesel değişimleri ölçen oto-korelasyon fonksiyonudur.

Verilen $(\Delta x, \Delta y)$ lik kaydırma ve (x, y) noktaları için oto-korelasyon şu şekildedir.

$$c(x, y) = \sum_{\overline{w}} [I(x_i, y_i) - I(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)]^2 \quad 2.11$$

Bu denklemde I görüntü fonksiyonunu ifade etmektedir. (x_i, y_i) W bölgesi içerisindeki (x, y) merkezli noktayı temsil etmektedir.

Kaydırılmış görüntü Taylor serisi açılımının ilk terimleri ile birlikte

$$I(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y) \approx I(x_i, y_i) + [I_x(x_i, y_i)I_y(x_i, y_i)] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad 2.12$$

$I_x(.,.)$ ve $I_y(.,.)$ sırasıyla x ve y ye göre kısmi türevleri temsil eder. Denklem 2.11'de denklem 2.12 yerine konursa

$$c(x, y) = \sum_{\overline{w}} [I(x_i, y_i) - I(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)]^2 \quad 2.13$$

$$= \sum_{\overline{w}} \left| I(x_i, y_i) - I(x_i, y_i) - [I_x(x_i, y_i)I_y(x_i, y_i)] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \right|^2 \quad 2.14$$

$$= \sum_w \left| -[I_x(x_i, y_i)I_y(x_i, y_i)] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \right|^2 \quad 2.15$$

$$= \sum_w \left| [I_x(x_i, y_i)I_y(x_i, y_i)] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \right|^2 \quad 2.16$$

$$= [\Delta x \ \Delta y] \begin{bmatrix} \sum_w (I_x(x_i, y_i))^2 & \sum_w (I_x(x_i, y_i)I_y(x_i, y_i))^2 \\ \sum_w (I_x(x_i, y_i)I_y(x_i, y_i))^2 & \sum_w (I_y(x_i, y_i))^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad 2.17$$

$$= [\Delta x \ \Delta y] C(x, y) \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad 2.18$$

$C(x, y)$ yerel komşuların yoğunluk yapılarını barındırır. $\lambda_1, \lambda_2 C$ matrisinin özdeğerleridir. Özdeğerler dönüklüğe göre değişmemektedir[30]. Özdeğerlere bağlı olarak yukarıda bahsedilen üç durum meydana gelir

1. λ_1, λ_2 nin her ikisi de küçükse alan düzlüktedir
2. eğer bir özdeğer büyük diğeri küçük ise alan bir kenar üzerindedir.
3. Eğer her iki özdeğerde büyük ise alan bir köşe üzerindedir.

2.4. Dlt(Direkt Lineer Transformasyon)

Direkt Lineer Transformasyon(DLT) yöntemi, 1971 yılında Abdel-Aziz ve Karara tarafından ileri sürülmüş olup, görüntü koordinat sistemi ile cisim koordinat sistemi arasındaki dönüşümü lineer bir fonksiyon olarak gerçekleştirir. Metodun temel avantajları, kalibre edilmiş bir kamera istememesi ve parametreler için ilk yaklaşık değerler olmadan da çözümü sağlayabilmesidir. Direkt lineer transformasyon yönteminde on bir tane parametre bulunmaktadır. DLT parametreleri iç ve dış parametrelerin kombinasyonudur. Bu parametrelerden iç ve dış parametreleri elde etmekte mümkündür.

DLT, standart kolinearite eşitliklerinden ya da projektif geometrinin genel teorisinden elde edilebilir. Çözümü lineer olmayan bir probleme dönüştürmesine rağmen, sistematik hata düzeltmeleri de dönüşümün bir parçası olarak ele alınabilir. Üç boyutlu koordinatları bilinen ve düzlemsel olmayan en az altı kontrol noktası, lineer çözüm için gereklidir[11, 31]. Denklem 2.19 'da kolinearite eşitliği verilmiştir.

$$\begin{aligned} x - \delta_x &= x_p - f_x \frac{r_{11}(X - T_x) + r_{12}(Y - T_y) + r_{13}(Z - T_z)}{r_{31}(X - T_x) + r_{32}(Y - T_y) + r_{33}(Z - T_z)} \\ y - \delta_y &= y_p - f_y \frac{r_{21}(X - T_x) + r_{22}(Y - T_y) + r_{23}(Z - T_z)}{r_{31}(X - T_x) + r_{32}(Y - T_y) + r_{33}(Z - T_z)} \end{aligned}$$

2.19

Burada, δ_x ve δ_y görüntü koordinatlarındaki sistematik hataları, f_x ve f_y x ve y doğrultularındaki ana mesafeleri gösterir. Aralarındaki bağıntı denklem 2.20. 'deki gibidir.

$$\begin{aligned} f_x &= \frac{f}{w} \\ f_y &= \frac{f}{h} \end{aligned}$$

2.20.

Kamera koordinat sisteminin orijinine yerleştirilmediği sürece kolinearite eşitlikleri DLT eşitliklerinedenklem 2.21 'den denklem 2.33 'e kadar olan eşitlikler ile dönüştürülür

$$\begin{aligned} x - \delta_x &= \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \\ y - \delta_y &= \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \end{aligned}$$

2.21

$$D = -(T_x r_{31} + T_y r_{32} + T_z r_{33})$$

2.22

$$L_1 = \frac{x_p r_{31} - f_x r_{11}}{D}$$

2.23

$$L_2 = \frac{x_p r_{32} - f_x r_{12}}{D}$$

2.24

$$L_3 = \frac{x_p r_{33} - f_x r_{13}}{D}$$

2.25

$$L_4 = \frac{(f_x r_{11} - x_p r_{31})T_x + (f_x r_{12} - x_p r_{32})T_y + (f_x r_{13} - x_p r_{33})T_z}{D}$$

2.26

$$L_5 = \frac{y_p r_{31} - f_y r_{21}}{D}$$

2.27

$$L_6 = \frac{y_p r_{32} - f_y r_{22}}{D}$$

2.28

$$L_7 = \frac{y_p r_{33} - f_y r_{23}}{D}$$

2.29

$$L_8 = \frac{(f_y r_{21} - y_p r_{31})T_x + (f_y r_{22} - y_p r_{32})T_y + (f_y r_{23} - y_p r_{33})T_z}{D}$$

2.30

$$L_9 = \frac{r_{31}}{D}$$

2.31

$$L_{10} = \frac{r_{32}}{D}$$

2.32

$$L_{11} = \frac{r_{33}}{D}$$

2.33

L1, L2, L3,...L11 katsayıları DLT parametreleri olarak adlandırılır ve cisim uzayreferans düzlemi ile görüntü düzlemi arasındaki ilişkiyi yansıtır.

Elde edilen denklemler direkt metotla ya da iteratif olarak çözülebilir. Görüntü koordinatları için δ_x , δ_y çok küçük olduğunu ve ihmaledebileceğini kabul edilir. Bütün cisim nokta koordinatlarının bilindiği ve hatasız oldukları varsayılırsa, bu metot için optik hataları da göz önünde bulundurursak DLT eşitliği denklem 2.34 ve denklem 2.35 'de verilmiştir.

$$R = L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1$$

2.34

$$\begin{aligned}\frac{1}{R}x &= \frac{1}{R}(L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4 - L_9xX - L_{10}xY - L_{11}xZ) + \delta_x \\ \frac{1}{R}y &= \frac{1}{R}(L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8 - L_9yX - L_{10}yY - L_{11}yZ) + \delta_y\end{aligned}$$

2.35

DLT parametreleri, lineer en küçük kareler yöntemiyle direkt olarak çözülebilir. İteratif çözüm metodu ise standart kolinearite çözümüne benzer.

2.4.1. DLT Parametrelerinden Kamera Parametrelerine Dönüş

DLT parametrelerinden kamera parametrelerine denklem 2.36' den denklem 2.44 'e kadar olan eşitlikler yardımı ile dönmek mümkündür.

$$D = \frac{1}{\sqrt{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}}$$

2.36

$$x_p = (L_1L_9 + L_2L_{10} + L_3L_{11})D^2$$

2.37

$$y_p = (L_5L_9 + L_6L_{10} + L_7L_{11})D^2$$

2.38

$$f_x = \sqrt{[(L_1^2 + L_2^2 + L_3^2)D^2 - x_p^2]}$$

2.39

$$f_y = \sqrt{[(L_5^2 + L_6^2 + L_7^2)D^2 - x_p^2]}$$

2.40

$$\varphi = \sin^{-1}(L_9 D)$$

2.41

$$\omega = \tan^{-1}\left(\frac{-L_{10}}{L_{11}}\right)$$

2.42

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{D(x_p L_9 + L_1)}{f_x \cos \varphi}\right)$$

2.43

$$\begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} L_4 \\ L_8 \\ 1 \end{bmatrix}$$

2.44

2.5. Luca Lucchese Kalibrasyon Metodu

Bu bölümde ilk olarak dijital kamera, $K(P_i)$ nin yapısı anlatılacaktır. P_i kameranın iç parametrelerini ifade etmektedir. Bu parametreler kameranın iç yönelimini, distorsiyonları belirlemektedir. Bu parametreler sayesinde görüntü bozunmalardan arındırılabilir. Böyle bir görüntü, 3B noktaları perspektif projeksiyon ile 2B görüntü noktalarına dönüştüren ideal kamera, k , tarafından elde edilebilir[23, 24].

$R_d^{(k)}$ ($k=1\dots n$) hedef paletin $K(P_i)$ kamerası tarafından değişik açılardan çekilmiş k tane resmini temsil etmektedir. Hedef paleti daha önce bahsedilen iki boyutlu siyah beyaz karelerden oluşan hedef nesnesidir. Palet üzerindeki köşe noktaları kolaylıkla çıkartılabilmektedir. Bunun için sadece iki kısıt bulunmaktadır. Bunlar;

- Palet resme tam sığacak ölçülerde olmalıdır.
- Elde edilecek bütün görüntüler birbirinden farklı açılarda olmalıdır.

Bu yöntemde temel amaç kameranın karakteristiğini belirleyen iç parametreler P_i 'yi, hedef paletin 20 farklı açıdan çekilen görüntülerinden elde edilen köşe noktalarının çarpıklık ve distorsiyonlardan yoksun referans resmin karşılık gelen köşe noktalarına iz düşürerek hesaplamaktır. Bozunma ve çarpıklıktan yoksun olan görüntü, farklı 20 açıdan çekilen kameralar ile aynı odak uzunluğuna sahip, paletle görüntü koordinatının iki

Bu eşitliği açacak olursak x ve y yönündeki odak uzaklıkları $f_x=kf$ ve $f_y=lf$; piksel genişliği ve yüksekliği $w=1/k$ ve $h=1/l$; piksel en boy oranı(aspectratio) $\rho=f_x/f_y=l/k=w/h$ şeklindedir. Burada ki k ve l parametreleri metre başına düşen piksel miktarının ölçüsüdür. Denklem 2.45 homojen koordinatlarda denklem 2.46'de olduğu gibi ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}$$

2.46

Daha öncede belirtildiği gibi k kamerası paletе göre özel bir konuma yerleştirilmiş durumdadır. İki arasındaki mesafe $Z'=L+f$ kadardır. Bu mesafe keyfi olmakla birlikte diğer görüntülerde olduğu gibi paletin tamamını görüntüde barındıracak şekilde seçilmesi gereklidir [16]. Bu haliyle referans görüntü paletin $f_x/(L+f)$ ve $f_y/(L+f)$ kadar ölçeklenmiş halidir.

$R_d^{(k)}$, $K(P_i)$ tarafından R_r resminden farklı bir açıda çekilmiş k. resmi ifade etmekte ve Şekil 2.15'de görülmektedir. OXYZ, sağ el kuralıyla $K(P_i)$ kamerasına yerleştirilmiş kamera koordinat sistemidir. Sistemin orijini O kameranın odak noktasına yerleştirilmiş ve Z ekseninin yönelimi paleti göstermektedir. oxy $K(P_i)$ kamerasının görüntü düzlemine ait koordinatlarını temsil etmektedir. Kamera merceğinin kusurlarından dolayı ana nokta genellikle bu düzlemin orijini ile çakışmaz. Bu yüzden ikinci koordinat sistemi olan $\tilde{o}\tilde{x}\tilde{y}$ sisteme eklenmiştir. $x_p y_p$ kameranın ana nokta koordinatları ise oxy ve $\tilde{o}\tilde{x}\tilde{y}$ arasındaki bağıntı şu şekildedir.

$$\begin{cases} \tilde{x} = x - x_p \\ \tilde{y} = y - y_p \end{cases}$$

2.47

Buradan $K(P_i)$ için perspektif projeksiyon eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$\begin{cases} \tilde{x} = f_x \frac{X'}{Z'} \\ \tilde{y} = f_y \frac{Y'}{Z'} \end{cases}$$

2.48

Denklem 2.47 ve denklem 2.48 birlikte homojen koordinatlardaki ifadesi,

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & x_p & 0 \\ 0 & f_y & y_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix}$$

2.49

şeklindedir. KKS O'X'Y'Z' ve k kamerasının OXYZ aralarında 3B aşağıdaki dönüşüm ile ilişkilidir.

$$X = Rt^{(k)} X' + T^{(k)}$$

2.50

Bu denklemde $X=[XYZ]^T$ seklindeki üç elemanlı kameranın koordinat elemanlarını bulunduran diziyi, $X'=[X'Y'Z']$ seklindeki referans resmi çeken palete tam karşıdan dik bir şekilde bakan kameranın koordinatlarını barındıran üç elemanlı diziyi temsil eder. $T^{(k)}=[T_x^{(k)}T_y^{(k)}T_z^{(k)}]$ ötelemeyi ve $Rt^{(k)}$, 3x3 boyutlu ortagonal dönüklüğü ifade eden matristir. Roll (ω), pitch (φ) ve yaw (θ) açıları kullanılarak bu matris aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} Rt^{(k)} &= Rt(\omega^{(k)})Rt(\varphi^{(k)})Rt(\theta^{(k)}) \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega^{(k)} & \sin\omega^{(k)} \\ 0 & -\sin\omega^{(k)} & \cos\omega^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\varphi^{(k)} & 0 & -\sin\varphi^{(k)} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi^{(k)} & 0 & \cos\varphi^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta^{(k)} & \cos\theta^{(k)} & 0 \\ -\sin\theta^{(k)} & \cos\theta^{(k)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

2.51

Denklem2.51deki matris işlemleri yapılarak $Rt^{(k)}$ matrisi elemanları daha açık bir ifade ile şu şekilde elde edilir.

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{11}^{(k)} = \cos\theta^{(k)}\cos\varphi^{(k)} \\ r_{12}^{(k)} = \sin\theta^{(k)}\cos\varphi^{(k)} \\ r_{13}^{(k)} = -\sin\varphi^{(k)} \\ r_{21}^{(k)} = -\sin\theta^{(k)}\cos\omega^{(k)} + \cos\theta^{(k)}\sin\varphi^{(k)}\sin\omega^{(k)} \\ r_{22}^{(k)} = \cos\theta^{(k)}\cos\omega^{(k)} + \sin\theta^{(k)}\sin\varphi^{(k)}\sin\omega^{(k)} \\ r_{23}^{(k)} = \cos\varphi^{(k)}\sin\omega^{(k)} \\ r_{31}^{(k)} = \sin\theta^{(k)}\sin\omega^{(k)} + \cos\theta^{(k)}\sin\varphi^{(k)}\cos\omega^{(k)} \\ r_{32}^{(k)} = -\cos\theta^{(k)}\sin\omega^{(k)} + \sin\theta^{(k)}\sin\varphi^{(k)}\cos\omega^{(k)} \\ r_{33}^{(k)} = \cos\varphi^{(k)}\cos\omega^{(k)} \end{array} \right.$$

2.52

Denklem 2.52'deki $R_t^{(k)}$ matrisinin elemanları olan $\omega^{(k)}$, $\varphi^{(k)}$, $\theta^{(k)}$ açıları ve $T^{(k)}$ dizisinin üç elemanı k . resmin dış parametreleridir. Bu parametreler OXYZ yi O'X'Y'Z' ile ilişkilendiren dönüşümleri gerçekleştirir[12].

İk kamera sisteminin aksine gerçek kamera K(P_i) mercekdistorsiyonlarından etkilenir. Bu yöntemde radyal ve teğetseldistorsiyonlar mercek kaynaklı distorsiyonları ifade edilmiştir. Radyal distorsiyon mercek eksenindeki noktasal kaynaklardan kaynaklanır. Merceğe gelen ışık ışını olmasa gerekenden fazla ya da daha az yansımaya neden olur. Görüntü merkezinde uzaklaştıkça etkisi artmaktadır. Teğetseldistorsiyon ise mercek merkezlerinin tam denk gelmemesinden kaynaklanır. Bu distorsiyon sebebi ile ana nokta ile kamera görüntü düzleminin fiziksel merkezi çakışmamaktadır. Distorsiyon sebebi ile 3 boyutlu düz çizgiler görüntüde Şekil 2.13'de açıkça görüldüğü gibi eğimli olarak görülmektedir.

K(P_i) tarafından alınmış bir görüntüdeki her iki distorsiyonu da içeren (x_d, y_d) noktalarını bu bozunmalardan arındırarak İk kamerasından alınabilecek formattaki (x_u, y_u) dönüştürmek için denklem 2.53 kullanılır.

$$\begin{cases} x_u = \varepsilon_x(P_i) = x_d + \delta_x(P_i) \\ y_u = \varepsilon_y(P_i) = y_d + \delta_y(P_i) \end{cases}$$

2.53

Yukarıdaki denklemde δ_x ve δ_y gerçek distorsiyonları içeren ifadedir. Açık şekilde aşağıda bildirildiği gibidir.

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_x(P_i) = (x_d - x_p)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ + q [p_1 (r^2 + 2(x_d - x_p)^2) + 2p_2 (x_d - x_p)(y_d - y_p)], \\ \delta_y(P_i) = (y_d - y_p)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ + q [2p_1 (x_d - x_p)(y_d - y_p) + p_2 (r^2 + 2(y_d - y_p)^2)] \end{array} \right.$$

2.54

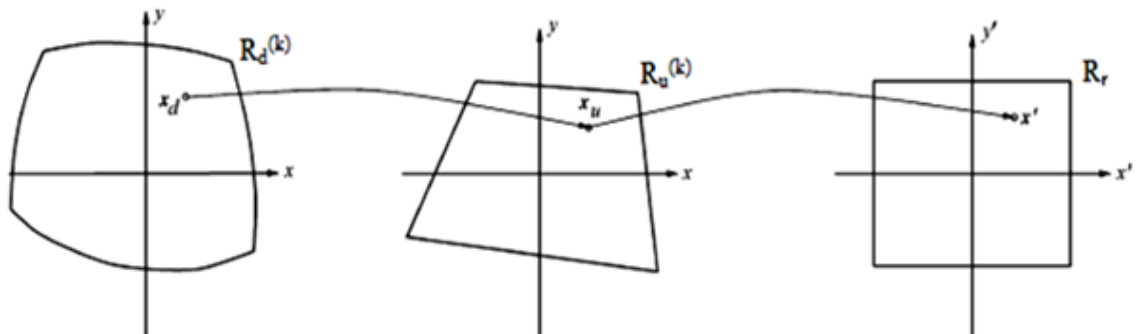
Denklem 2.54'da x_p ve y_p ana nokta koordinatları k_1, k_2, k_3 radyal distorsiyon katsayıları, p_1, p_2, p_3 ise teğetsel distorsiyon katsayılarıdır. r ve q ise aşağıdaki eşitliklere bağlıdır.

$$r = ((x_d - x_p)^2 + (y_d - y_p)^2)^{1/2} \quad \text{ve} \quad q = (1 + p_3 r^2)$$

2.55

Radyal ve teğetsel distorsiyon katsayıları, ana nokta koordinatları ve x ve y yönündeki etkin odak uzaklıkları iç parametreleri oluşturmaktadır. $P_i = [x_p, y_p, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, p_3, f_x, f_y]$ şeklinde dizi formatında gösterilebilir.

Eğer iç parametreler biliniyor ise mercekten kaynaklanan distorsiyonlar düzeltilebilir. Bu sayede de $R_d^{(k)}$ resmi bozunmalardan yoksun çarpıklığa sahip $R_u^{(k)}$ resmine dönüştürülebilir. İkinci adımda ise Şekil 2.16'de de şematik olarak gösterildiği gibi distorsiyonlardan arınmış $R_u^{(k)}$ resmi 2 boyutlu homografi sayesinde distorsiyonsuz ve çarpıklık bulunmayan k kamerası ile elde edilen R_r elde edilir.



Şekil 2.16. İleri Yönde Homografi Adımları.

Aşağıda 2 boyutlu homografi eşitlikleri belirtilmiştir. Bu ayrıca kolinearite,projektif dönüşüm olarak da isimlendirilir.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^{(k)} & a_{12}^{(k)} & b_1^{(k)} \\ a_{21}^{(k)} & a_{22}^{(k)} & b_2^{(k)} \\ c_1^{(k)} & c_2^{(k)} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_p \\ y - y_p \\ 1 \end{bmatrix} = H^{(k)} \begin{bmatrix} x - x_p \\ y - y_p \\ 1 \end{bmatrix}$$

2.56

Açık bir ifade ile

$$\begin{cases} x' = \mathbb{P}_x(x, P_h^k) = \frac{a_{11}^{(k)}(x - x_p) + a_{12}^{(k)}(y - y_p) + b_1^{(k)}}{c_1^{(k)}(x - x_p) + c_2^{(k)}(y - y_p) + 1} \\ y' = \mathbb{P}_y(x, P_h^k) = \frac{a_{21}^{(k)}(x - x_p) + a_{22}^{(k)}(y - y_p) + b_2^{(k)}}{c_1^{(k)}(x - x_p) + c_2^{(k)}(y - y_p) + 1} \end{cases}$$

2.57

şeklindedir. Denklem 2.57’de ki ifade ileri yönlü homografi olarak isimlendirilir. Bu denklemdaki katsayılar $P_h^{(k)} = [a_{11}^{(k)}, a_{12}^{(k)}, b_1^{(k)}, a_{21}^{(k)}, a_{22}^{(k)}, b_2^{(k)}, c_1^{(k)}, c_2^{(k)}]$ ileri yönlü homografi katsayılarıdır.

Eğer denklem 2.53, 2.54 ve 2.57’de birleştirilirse $K(P_i^{(k)})$ kamerası resmi $R_d^{(k)}$ ile $\acute{K}$ kamerası resmi R_r arasındaki bağıntı şu hale dönüşür.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^{(k)} & a_{12}^{(k)} & b_1^{(k)} \\ a_{21}^{(k)} & a_{22}^{(k)} & b_2^{(k)} \\ c_1^{(k)} & c_2^{(k)} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x(P_i) - x_p \\ \varepsilon_y(P_i) - y_p \\ 1 \end{bmatrix}$$

2.58

Denklem 2.58’ de homojen koordinatlardaki denklemin açık ifadesi aşağıdaki şekildedir.

$$\begin{cases} x' = \mathbb{P}_x(x, P_h^k) = \frac{a_{11}^{(k)}(\varepsilon_x(P_i) - x_p) + a_{12}^{(k)}(\varepsilon_y(P_i) - y_p) + b_1^{(k)}}{c_1^{(k)}(\varepsilon_x(P_i) - x_p) + c_2^{(k)}(\varepsilon_y(P_i) - y_p) + 1} \\ y' = \mathbb{P}_y(x, P_h^k) = \frac{a_{21}^{(k)}(\varepsilon_x(P_i) - x_p) + a_{22}^{(k)}(\varepsilon_y(P_i) - y_p) + b_2^{(k)}}{c_1^{(k)}(\varepsilon_x(P_i) - x_p) + c_2^{(k)}(\varepsilon_y(P_i) - y_p) + 1} \end{cases}$$

2.59

P_h ileri yönlü homografikatsayıları dış parametrelerin ve piksel en boy oranına bağlıdır. İleri yönlü homografide $R_d^{(k)}$ üzerinden elde edilmiş köşe noktaları üzerinden, R_r üzerindeki köşe noktalarına projeksiyon yapılır. Geri yönlü homografide ise yön tam tersinedir. Yani $R_d^{(k)}$ den R_r ye doğrudur. Denklem 2.60'daki $P_{\mathcal{H}}^{(k)} = [\alpha_{11}^{(k)}, \alpha_{12}^{(k)}, \beta_1^{(k)}, \alpha_{21}^{(k)}, \alpha_{22}^{(k)}, \beta_2^{(k)}, \gamma_1^{(k)}, \gamma_2^{(k)}]$ geri yönlü homografi katsayılarıdır.

$$\begin{bmatrix} x - x_p \\ y - y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11}^{(k)} & \alpha_{12}^{(k)} & \beta_1^{(k)} \\ \alpha_{21}^{(k)} & \alpha_{22}^{(k)} & \beta_2^{(k)} \\ \gamma_1^{(k)} & \gamma_2^{(k)} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \mathcal{H}^{(k)} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix}$$

2.60

Homojen koordinatlarda denklem 2.61'deki gibi ifade edilir.

$$\begin{cases} (x - x_p) = \epsilon_{x'}(x, P_{\mathcal{H}}^k) = \frac{\alpha_{11}^{(k)} x' + \alpha_{12}^{(k)} y' + \beta_1^{(k)}}{\gamma_1^{(k)} x' + \gamma_2^{(k)} y' + 1} \\ (y - y_p) = \epsilon_{y'}(x, P_{\mathcal{H}}^k) = \frac{\alpha_{21}^{(k)} x' + \alpha_{22}^{(k)} y' + \beta_2^{(k)}}{\gamma_1^{(k)} x' + \gamma_2^{(k)} y' + 1} \end{cases}$$

2.61

Denklem 2.61'de verilen geri yönlü homografi katsayıları denklem 2.62' de ki gibi açık ifadelerle temsil edilebilir.

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{11}^{(k)} = \frac{r_{11}^{(k)}}{D^{(k)}} \\ \alpha_{12}^{(k)} = \frac{f_x}{f_y} \frac{r_{12}^{(k)}}{D^{(k)}} \\ \alpha_{21}^{(k)} = \frac{f_y}{f_x} \frac{r_{21}^{(k)}}{D^{(k)}} \\ \alpha_{22}^{(k)} = \frac{r_{22}^{(k)}}{D^{(k)}} \\ \beta_1^{(k)} = f_x \frac{r_{22}^{(k)} + \tau_x^{(k)}}{D^{(k)}} \\ \beta_2^{(k)} = f_y \frac{r_{23}^{(k)} + \tau_y^{(k)}}{D^{(k)}} \\ \gamma_1^{(k)} = \frac{1}{f_x} \frac{r_{31}^{(k)}}{D^{(k)}} \\ \gamma_2^{(k)} = \frac{1}{f_y} \frac{r_{32}^{(k)}}{D^{(k)}} \end{array} \right.$$

2.62

Denklem 2.62'deki $\tau^{(k)} = [\tau_x^{(k)}, \tau_y^{(k)}, \tau_z^{(k)}]$ ler ölçeklenmiş öteleme elemanlarıdır. $\tau_n^{(k)} = T_n^{(k)} / (L + f)$ eşitliği ile κ kamerası ile palet arasındaki mesafeye bağlı olarak elde edilir ($n=X,Y,Z$). $D^{(k)} = r_{33}^{(k)} + \tau_z^{(k)}$ iken, r ler denklem 2.52'den elde edilir.

İleri ve geri yönlü homografiler birbirinin tam tersi projeksiyonlar yaptığı için katsayıları da birbirinin tersidir[8].

$$P_h^{(k)} = (P_{\mathcal{H}}^{(k)})^{-1}$$

2.63

Bu ifadeden daha açık bir şekilde denklem 2.64, 2.65, 2.66, 2.67 yazılabilir.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{\det \Lambda} \begin{bmatrix} \alpha_{22} - \beta_2 \gamma_2 & -\alpha_{12} + \beta_1 \gamma_2 \\ -\alpha_{21} + \beta_2 \gamma_1 & \alpha_{11} - \beta_1 \gamma_1 \end{bmatrix}$$

2.64

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = -\frac{1}{\det \Lambda} \begin{bmatrix} \alpha_{22} \beta_1 - \beta_2 a_{12} \\ -\alpha_{21} \beta_1 + \beta_2 a_{11} \end{bmatrix}$$

2.65

$$c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = -\frac{1}{\det \Lambda} \begin{bmatrix} \alpha_{22}\gamma_1 - \gamma_2\alpha_{21} \\ -\alpha_{12}\gamma_1 + \gamma_2\alpha_{11} \end{bmatrix}$$

2.66

$$\det \Lambda = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{vmatrix}$$

2.67

Bu metot da işlem sırası olarak ilk önce birbirinden farklı açılarda çekilmiş görüntü setleri $R_d^{(k)}$ 'ların köşe noktalarının elde edilmesi gelmektedir. Bu işlem için HarrisCornerköşe bulma algoritması kullanılmaktadır. Bu işlem sonucunda x ve y noktaları farklı dizilerde sırası ile elde edilir. Daha sonra denklem 2.53 ve 2.54 ile bozunmalardan arınmış notalar olan (x_u, y_u) lare elde edilir. Hedef görüntü R_r ise $\hat{K}$ kamerası tarafından L+f mesafesine bağlı olarak elde edilir. Böylelikle sisteme giriş ve hedef verileri oluşturulmuştur.

Kamera iç ve dış parametreleri ile geri yönlü homografi katsayıları $\mathcal{H}$ denklem 2.62 ile elde edilir. $H=\mathcal{H}^{-1}$ olduğu için ileri yönlü homografi katsayıları da belirlenmiş olur. Artık ana projeksiyon eşitliğimiz olan denklem 2.59'de bütün bilinmeyenler elde edilmiş olur.

3. BÖLÜM

OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI

3.1. Yapay Arı Koloni Algoritması

Yapay Arı Koloni Algoritması, problemin çözümünde sosyal böcek kolonilerinin ya da diğer canlı gruplarının birlikte hareketlerinden esinlenen sürü zekasına dayalı algoritmalarından birisidir [32].

Sürü zekasına dayanan algoritmalarda her parçacık bir çözümü ifade eder ve balık, kuş gibi doğal sürülerin hareketini taklit ederek sürü halinde çözüme ulaşmaya çalışırlar. Sürü içerisinde en iyi pozisyonda bulunan birey, o adımdaki, problemin çözümünü ifade etmektedir. Parçacık sürüleri iteratif olarak bir önceki adımdaki en iyi parçacığın çözümünü ifade eden konumunu da dikkate alarak yeni konumlarını belirlemek yoluyla problem uzayında optimum çözümü bulmaya çalışırlar.

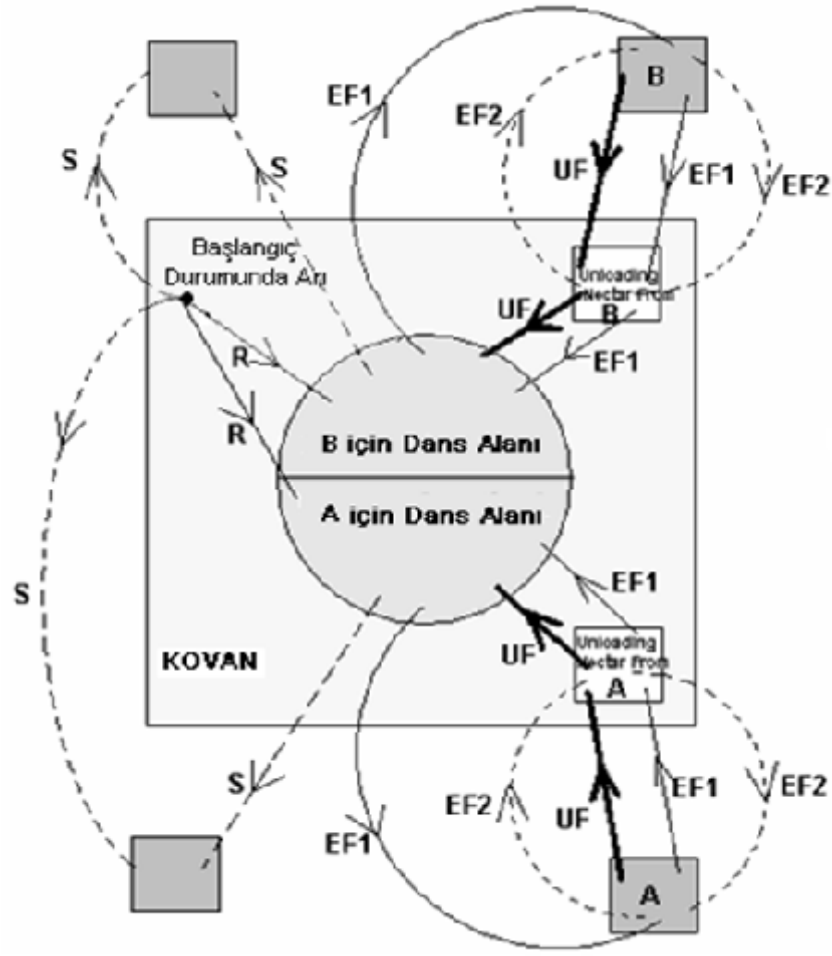
Yapay arı koloni algoritması da (Artificial Bee Colony Algorithm-ABC) doğada arıların yem alanlarını bulmada sergilemiş oldukları davranışları ve yöntemleri taklit eden yeni optimizasyon algoritmalarından biridir. Karınca koloni, partical swarm gibi sürü zekasına dayanan, popülasyon tabanlı, sezgisel algoritmalarından birisidir [32-36]. ABC temel olarak sınırlamasız problemler için geliştirilmekle birlikte sınırlamalı problemlere de uygulandığı çalışmalar yapılmıştır [36].

Gerçek arıların davranışı Şekil 3.1'de görüldüğü gibidir. Şekilde görüldüğü A ve B olmak üzere iki tane yem alanı bulunmaktadır. Bir arının başlangıçta nerede yem olduğu hakkında bilgisi yoktur. Bu tür bir arının iki seçeneği bulunmaktadır.

- Kaşif arı olarak S yolunu izleyerek yem alanı arayabilir.
- Yada dans alanında (R) işçi arıların dansını izleyerek yem aramaya (EF1) başlar.

Bir yem alanı bulan arı bu kaynaktaki nektarı tüketmeye başlar ve yemi kovana taşıyarak işçi arı olur. Yemi kovana getiren arı bu andan sonra şu seçenekleri yapabilir.

- Bulunduğu yem alanını terk edip dans alanına dönebilir. (UF)
- Aynı yem alanına gitmeden önce dans alanına giderek yem alını hakkındaki bilgileri paylaşabilir.(EF1)
- yem alanına dönerek giderek yem taşımaya devam eder.(EF2)



Şekil 3.1. Arıların kovan çevresindeki hareketleri[32].

Algoritma dâhilinde üç çeşit arı bulunmaktadır: İşçi(employed) arılar, gözcü(onlooker) arılar ve kâşif (scout) arılar. Temelde arı popülasyonunu işçi ve gözcü arılar oluşturmaktadır. Toplam arı sayısını yarısı işçi diğer yarısı da gözcü arıdır[33]. Bütün

arı çeşitleri problem uzayında kendi çalışma şekillerinde arama yapmaktadır. Arıların buldukları yem alanları çözümleri temsil etmektedir. Bulundukları konumdaki yem miktarı ise o çözüme ait uygunluk(fitness) değerini ifade etmektedir.

3.1.1. İşçi Arı

Yem alanlarını temsil eden arılardır. Popülasyonda ki çözüm sayısı işçi arı sayısına yani popülasyonun yarısına eşittir. Her bir yem alanında bir işçi arı bulunmaktadır. Bir başka deyişle yem alanı sayısı yani çözüm sayısı işçi arı sayısına eşittir. İşçi arılar başlangıçta rastgele kovan çevresinde uçarak yem alanı aramaktadırlar. Buldukları yem alanlarındaki yem miktarını hesaplayarak bu bilgileri kovandaki dans alanında gözcü arılar ile paylaşmaktadırlar. Bir işçi arı bulunduğu konumdaki yem alanının çevresindeki yem alanlarını her uçuşta kontrol etmekte bu sayede de kovan çevresindeki yem alanlarını taramış olmaktadır[32].

3.1.2. Gözcü Arı

Her yem alanında bir işçi arı bulunmakla birlikte bu yem alanlarında birden fazla gözcü arı bulunabilmektedir. Gözcü arı başlangıçta kovandaki dans alanında işçi arıların dansına göre gideceği yem alanını belirlemek için beklemektedir. Gözcü arıların yem miktarı çok olan yem alanını seçme ihtimalleri daha fazladır. Yem pozisyonunu belirledikten sonra tıpkı işçi arı gibi gittiği yem alanı çevresinde daha iyi pozisyonları tarayarak arama işlemini gerçekleştirmiş olmaktadır[32].

3.1.3. Kaşif Arı

Bulunduğu yem alanındaki yem tükenmiş olan işçi arılar ise kaşif arıya dönüşüp problem uzayında rastgele yem alanı aramaktadır. Bir yem alanı, işçi ve gözcü arılar tarafından tüketilmiş ve çevresinde daha iyi nektar miktarına sahip alan kalmamışsa bu alan terk edilerek gereksiz yere bu bölgede kalınmamalıdır. Bu durumdaki bir işçi arı rastgele olarak kovan çevresinde yeni yem alanı arayarak eski konumunu terk eder. Biyotimizasyon algoritmasında kaşif arıların temel görevi lokal minimumlara takılan sistemi bu durumdan kurtarmaktır.

3.1.4. Algoritmanın Parametreleri ve Adımları

Yapay arı algoritmasının temel üç tane parametresi bulunmaktadır.

Yem alanı: her bir yem alanında sadece bir işçi arı bulunmaktadır. Dolayısıyla bu parametre toplam arı sayısının yarısına eşittir.

Limit: işçi arıların kaşif olması için gereken gelişme olmayan adım sayısı.

Adım sayısı: algoritmanın maksimum kaç adım koşacağını belirler.

Yapay arı koloni algoritmasının temel adımları şu şekildedir.

- Başlangıç parametrelerini belirle
- REPEAT
 - İşçi arıları kaynaklara gönder ve nektar miktarlarını hesapla
 - Gözcü arıları kaynaklara gönder ve nektar miktarlarını hesapla
 - Rasgele yeni kaynaklar bulmaları için kaşif arıları gönder
 - O ana kadarki en iyi kaynağı hafızada tut

UNTIL (durma kriteri sağlanana kadar)

Görüldüğü gibi Yapay arı koloni algoritması üç temel adımdan oluşmaktadır. Algoritma başlamadan önce popülasyon sayısı, limit parametresi, adım sayısı gibi algoritma parametreleri belirlenmelidir. Başlangıç aşamasında arılar rastgele seçtikleri konumlara giderek buradaki nektar miktarını belirlerler. Daha sonra kovana gelerek nektar miktarını dans alanında bekleyen gözcü arılar ile paylaşırlar. İkinci aşamada her işçi arı bir önceki adımdaki kendi yem kaynağına giderek bu kaynağın komşuluğunda yeni yem alanı ararlar. Üçüncü aşamada gözcü arı işçi arılardan topladığı bilgiler ışığında yem alanı seçerek, gittiği yem alanının komşuluğunda yeni yem alanı ararlar. Son olarak limit parametresi süresince yem alanını güncelleyemeyen işçi arı kaşif arı olup rastgele araştırma uzayında bir konum belirler.

Problemimizde hesaplaması gereken verilerin belirli bir düzende sıralanması ile elde edilen dizinin boyutu, arıları arama yapacağı uzayın boyutunu belirlemektedir. Buradaki verilerin her biri problemin parametreleridir. Dolayısıyla ilk aşamadaki arıların rastgele başlangıç konumlarını alması, parametre sayısı kadar boyuta sahip, her bir elemanı o parametrenin sınırlarında rastgele üretilen dizi ile gerçekleşmektedir. Bu konumdaki yem miktarını diğer bir deyişle uygunluk değerini elde etmek için maliyet fonksiyonuna ihtiyaç vardır. Bu fonksiyon parametre olarak arıların konumbilgilerini almakta ve uygunluk değeri üretmektedir. Tabi ki bu işlem her bir arı için tekrarlanacaktır. Bu işlemlerden sonra adım sayısı kadar döngüye girilerek arılar en iyiyi arama işlemine koyulurlar. Arılar ilk adımda rastgele yerleştikleri konumdan başlayarak bir sonraki adım için konumlarının komşuluğuna giderek arama işlemini gerçekleştirir. Komşuluğu seçme işlemi 3.1 denklemindeki gibidir. Buradaki x_{ij} i. arının j. parametresidir. Φ_{ij} $[-1,1]$ aralığında üretilmiş rastgele bir sayıdır. Komşuluğu seçme işleminde parametrelerden birisi değiştirilmektedir. i. arının rastgele seçilen j inci parametresinin gene rastgele seçilen k.arının j. parametresi ile farkı alınır. Bu fark Φ_{ij} sayısı ile çarpılıp şu andaki konuma eklenerek. Bu şekilde v komşuluğu üretilir. Bu konumunda yem miktarını ölçmek için elde edilen yani parametre dizisi maliyet fonksiyonuna gönderilir. Elde edilen yeni konumun yem miktarı eski konumdan daha iyi ise i arısı eski konumu terk ederek yeni konumunu belleğine kaydeder.

$$v_{ij} = x_{ij} + \Phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj})$$

3.1

Gözcü arıların da yaptığı iş temelde işçi arılardan farklı değildir. Ancak işlem olarak temel fark gidecekleri yem alanını seçmelerindedir. Bu arıların konum bilgileri yoktur. Her adımda farklı bir konuma gidebilirler. Buradaki amaç gözcü arıların daha iyi yem alanına gönderme ihtimalini artırarak iyi konumların çevrelerinin daha iyi aranmasını sağlamaktır. Dans alanında gözcü arılar işçi arıları izleyip gidecekleri yem alanını seçerken denklem 3.2yi kullanır. Burada p_i i. işçi arının konumunun seçilme olasılığıdır. Bu değer i. işçi arının uygunluk değerinin toplam uygunluk değerine bölünmesi ile hesaplanır. Burada rulet tekeri seçme işlemi olarak kullanılabilir. Gözcü

arı gideceği konumu seçtikten sonra işçi arı gibi gittiği konumun komşuluğuna denklem 3.1 ile gidip uygunluk değerini hesaplar ve yeni konum daha uygun ise yem alanının pozisyonunu değiştirir.

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{SN} fit_n}$$

3.2

Eğer bir yem alanındaki işçi arının konumu limit parametresi kadar adımda geliştirilememiş ise bu konumunda daha fazla zaman kaybetmeden farklı bir konuma gidilmelidir. Bu durumdaki işçi arı kaşif arıya dönerek arama uzayında rastgele bir konum seçerek eski alanını tamamen terk etmiş olur. Artık arama işlemlerine buradan devam eder. Bu şekilde minimizasyon problemi için yerel minimumlardan kurtulmuş olunur.

3.2. Diferansiyel Gelişim Algoritması

Price ve Storn tarafından 1995 yılında geliştirilmiş, özellikle sürekli verilerin söz konusu olduğu problemlerde etkin sonuçlar verebilen, isleyiş ve operatörleri itibarıyla genetik algoritmaya dayanan popülasyon temelli sezgisel optimizasyon tekniğidir [37, 38].

Temel olarak genetik algoritmaya dayanmaktadır. Popülasyon tabanlıdır. Aynı anda birçok noktada araştırmayı yapmaktadır. Adımlar boyunca, operatörler yardımıyla problemin çözümü için daha iyi sonuçlar araştırılmaktadır. Genetik algoritmadaki çaprazlama, mutasyon ve seçim operatörleri diferansiyel gelişim algoritmasında da kullanılmaktadır. Farklı olarak her bir operatör tüm popülasyona sırayla uygulanmamaktadır. Kromozomlar tek tek ele alınmakta, rastgele seçilen diğer üç kromozomda kullanılarak yeni bir birey elde edilmektedir. Bu işlemler sırasında mutasyon ve çaprazlama operatörleri kullanılmış olmaktadır. Mevcut kromozomla elde edilen yeni kromozomun uygunlukları karşılaştırılarak uygunluğu daha iyi olan, yeni birey olarak bir sonraki popülasyona aktarılmaktadır. Böylelikle seçim operatörü de kullanılmış olmaktadır. Diferansiyel gelişim algoritmasına (DGA) ait işlemler Şekil 3.2’de görülmektedir. Üretilen çözümlerin kalitesi, amaç fonksiyonuna ürettikleri değerle (uygunluk değeri) ölçülmektedir.

3.2.1. Parametreler ve Adımları

Diferansiyel gelişim algoritmasının parametreleri

N:Popülasyonun büyüklüğü

D:Parametre sayısı(gen sayısı)

Cr:Çaprazlama oranı

G:Jenerasyon (adım sayısı)

F:Ölçekleme faktörü

$f(X)$ gibi bir amaç fonksiyonu, problem parametrelerinin uygunluk değerini hesaplar. Amaç fonksiyonu uygunluk fonksiyonu, maliyet fonksiyonu olarak da isimlendirilir. Parametre olarak aldığı parametreler

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$$

şeklinde. X dizisinin her bir elemanı problemin bir parametresini ifade etmektedir ki bu parametreler sırasıyla $x_j^{(l)}$ ve $x_j^{(u)}$ ($j=1\dots n$) arasında değerler alabilmektedir. Yani bu değerler parametrelerin üst ve alt sınırlarını temsil etmektedir.

Amaç, problemin tüm kısıtlarını sağlayan en iyi çözümü araştırmaktır. Diferansiyel gelişim algoritmasında genellikle sürekli değişkenlerle çalışılmakla birlikte, kesikli değişkenler ya da ikisinin birleşimi ile çalışanları da bulunmaktadır[39]. Problemin amaç fonksiyonu her biri bir alternatif çözüm olan kromozomların değerini temsil etmektedir. Problem içerisinde bir kısıt bulunmakta ise bu uygunluk fonksiyonu içerisinde belirtilmelidir[40].

Diferansiyel gelişim algoritması genel adımları şu şekildedir

- Başlangıç popülasyonunun oluşturulması
- Değerlendirme
- Durma kriterleri sağlanıncaya kadar aşağıdaki adımlar tekrarlar

Diferansiyel gelişim algoritmasında bireyler kromozom olarak adlandırılır. Gen sayısı, probleme ait parametre miktarını ile tespit edilir ve her kromozom için aynı sayıdadır. N_p problem çözümünde kullanılacak kromozom sayısıdır. Kromozom sayısı diferansiyel gelişim algoritmasının doğası gereği en az üç tane olmalıdır. Çünkü sonraki bireyler oluşturulurken kendisi dışında iki bireyin bilgisinden yararlanılmaktadır. Başlangıçta N_p adet D boyutlu kromozomdan meydana gelen başlangıç popülasyonu (P_0) aşağıdaki gibi üretilir[38].

$$\forall i \leq N_p \wedge \forall j \leq D: x_{i,j,D=0} = x_j^{(l)} + rand_j[0,1] (x_j^{(h)} - x_j^{(l)})$$

$$i = (1, 2, \dots, N_p), j = (1, 2, \dots, D), G = 0, rand_j[0,1] \in [0,1]$$

3.3

Görüldüğü gibi başlangıç popülasyonu temelde $N, P \times D$ boyutlu bir matristir ve elemanları problem türüne göre ikili tabanda ya da reel sayılardan oluşabilir

Mutasyon, mevcut kromozomun bir kısım genleri üzerinde, rastgele belirlenmiş miktarlarda değişiklikler yapmaktır. Bu değişiklikler sayesinde kromozomun temsil ettiği çözüm noktası, çözüm uzayında hareket etmektedir. Mutasyonun hedefine ulaşabilmesi için, doğru yönde doğru miktarda hareketi sağlayacak değişikliklerin belirlenmesi gerekmektedir.

Diferansiyel gelişim algoritmasında, mutasyon işlemine tabi tutulacak olan kromozom dışında ve birbirlerinden de farklı olan üç kromozom seçilir (r_1, r_2, r_3). Seçilen kromozomlardan ilk ikisinin farkı alınır. Daha sonra bu fark kromozomu F parametresiyle çarpılır. F parametresi genellikle 0-2 arasında değerler almaktadır. Elde edilen ağırlıklandırılmış fark kromozomu seçilen üçüncü kromozomu (r_3) ile toplanır. Böylece mutasyon sonucu çaprazlamada kullanılacak olan kromozom elde edilmiş olur.

$$\forall j \leq D, u_{i,j,G+1} = \begin{cases} x_{j,r_3,G} + F(x_{j,r_1,G} - x_{j,r_2,G}) & \text{eğer } (rand_j[0,1] < CR \vee j = j_{rand}) \\ x_{i,j,G} & \text{Diğer Durumlar} \end{cases}$$

3.4

Farklı olarak geliştirilmiş birçok mutasyon operatörü de bulunmaktadır [41].

Çaprazlama sayesinde diferansiyel gelişim algoritması arama işlemini gerçekleştirmektedir. Aday çözüm üretilirken bir kısım genler ebeveyninden bazı genler ise bir önceki adımda üretilmiş mutasyona uğramış fark kromozomundan elde edilir. Bu aşamada ise hangisinden hangi oranda gen alınacağını belirlemek gerekmektedir. Diferansiyel gelişim algoritmasında bu oranı CR parametresi belirlemektedir. CR parametresi [0,1) aralığında değerler almaktadır. Çaprazlama işlemi yapılırken her bir gen için 0 1 aralığında rastgele bir sayı üretilir. Üretilen sayının Cr parametresinden küçük olanlar bir önceki adımda üretilen fark kromozomundan, büyük olanlar ise ebeveyn kromozomundan genler alınır. Bu şekilde bilgi paylaşımı gerçekleştirilmiş olur.

Seçim operatörü ile mevcut jenerasyon ve üretilen yeni kromozomlar değerlendirilerek yeni jenerasyon oluşturulur. Kromozomların yeni jenerasyonda yer alma olasılıkları uygunluklarına bağlıdır. DGA' da karşılaştırma birebiryapıldığından seçim için karmaşıkprosedürü olan seçim operatörlerine ihtiyaçduyulmamaktadır. Karşılaştırılan kromozomlardan uygunluğu yüksek olan kromozom yeni jenerasyonun bireyi olarak atanmaktadır. Minimizasyon problemi için seçim operatörüne ait işlem denklem 3.5 de görülmektedir.

$$i \leq NP, u_{i,G+1} = \begin{cases} x_{u,G+1} & \text{eğer } f(x_{u,G+1}) \leq f(x_{i,G}) \\ x_{i,G} & \text{Diğer Durumlar} \end{cases}$$

3.5

Yukarıdaki adımlar jenerasyon(G) sayısı kadar tekrarlanarak sonuç bulunmaya çalışılır. Uygunluk fonksiyonunun sonucu optimize edilmeye çalışılmaktadır. Bir minimizasyon işlemi için bu sonucun en küçük olduğu nokta maksimizasyon işlemi için ise en büyük fonksiyon noktası ulaşmaya çalışılan çözüm noktasını temsil eder. Algoritmanın durdurulması kriteri olarak, popülasyondaki en iyi ve en kötü uygunluk değerleri arasındaki farkın çok küçük bir rakama ulaşması olarakda belirlenebilmektedir. Diğer bir yöntemde maliyet fonksiyonunun sonucunun belirlenen bir değerin altına inmesi ya da üstüne çıkması olarak belirlenebilir.

3.3. Genetik Algoritma

Genetik algoritma J. Holland[42], arkadaşları ve öğrencileri tarafından 1975 yılında ortaya atılmış evrimsel temelli bir algoritmadır. Evrimsel algoritmalar tek bireyle

değil, bireylerin popülasyonu ile ilgilenir[38]. Her birey bir çözümü temsil ederken bireylerin uygunlukları bir maliyet fonksiyonu vasıtası ile hesaplanır.

Algoritmanın adımları aşağıdaki sırada gerçekleşir:

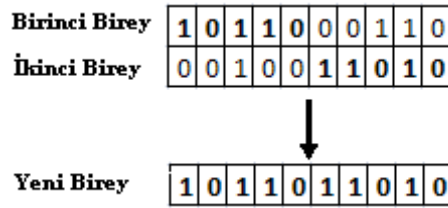
- Çözümlerin başlangıç popülasyonunu oluştur.
- Popülasyonun her bireyinin uygunluk değerlerini hesapla
- Şartlar sağlanana kadar aşağıdaki adımları tekrarla
 - o Tabi seçim işlemini gerçekleştir.
 - o Çaprazlama işlemini gerçekleştir.
 - o Mutasyon işlemini gerçekleştir.

Genetik algoritmada popülasyon bireyleri 0,1 'lerden oluşan ikili kodlamayı kullana bildiği gibi nümerik değerleri de bireyleri kodlamada kullanabilmektedir. İlk adımda sezgisel algoritmaların tamamında olduğu gibi araştırma yüzeyine rastgele popülasyon bireylerini yerleştirilmektedir. Bireylerin koordinatları temsil ettikleri çözümler iken bu koordinatları giriş olarak alıp probleme özgü işlemleri gerçekleştirerek uygunluk değerini hesaplayan fonksiyon maliyet fonksiyonudur. Popülasyon bireyleri ilk adımda rastgele pozisyonların aldıktan sonra bu pozisyonların uygunluk değerinin hesaplanması işlemine sıra geliyor. Bu haliyle popülasyon iterasyonlara başlamaya hazır hale gelir.

Tabi seçme işleminde amaç, kalitesi düşük olan bireylerin popülasyonda sayılarını azaltmak, yüksek kaliteli bireylerin ise varlığını devam ettirilmesi ve sayılarının artırılarak popülasyon gelişiminin sağlanmasıdır. Kaliteli bireylerin özellikleri gelecek nesillere aktarılırken baskın bireylerin özellikleri popülasyonda ağırlığını hissettirir. İterasyonlar boyunca kalitesiz bireylerin yok olması genetik ve evrimsel algoritmanın temel özelliklerinden birisidir. Tabi seçme yöntemi için geliştirilmiş bir çok yöntem bulunmakta. Bunlardan birisi rulet tekeridir. Rulet tekeri, diğer yöntemlerde olduğu gibi iyi bireylerin seçilme olasılığını artırma temeli ile çalışır. İyi bireye açılal olarak daha fazla alan kötü bireye ise daha az açı vermek suretiyle bu sağlanır. daha sonra rulet tekerine atılan topun durduğu birey sıradaki işlemlere tabi tutulma hakkını kazanmış

olur. Bu işlem yeterli miktarda gerçekleştirildikten sonra eşleştirme havuzuna alınmış bireylere diğer genetik operatörler uygulanmaya başlanılır.

Sıradaki işlem olan çaprazlama işleminde eşleştirme havuzundan iki tane rastgele birey seçilerek ikisinde özelliklerinden bazılarını barındıran melez bireyler üretilir. Üretilen yeni bireyler ile eski bireyler popülasyonda tutulabileceği gibi kötü olan birey popülasyondan atılmak suretiyle popülasyon boyutu sabit tutulabilir. Çaprazlama işleminde rastgele seçilen iki bireyden birincisinin rastgele seçilen bir noktadan sonrası atılır. Atılan kısımlar diğer seçilen birey tarafından tamamlanarak en temel anlamda çaprazlama işlemi yapılmış olur.



Şekil 3.3. Çaprazlama İşlemi[38].

Son işlem olarak bireyler mutasyona tabi tutulurlar. Mutasyon işlemini hangi parametrelere uygulanacağını mutasyon oranı belirler. Mutasyon oranı her bir parametrenin mutasyona uğrama ihtimalini belirler. Mutasyona uğrayacağına karar verilmiş parametre yeniden rastgele üretilir. Şayet popülasyon ikilik düzenden oluşuyor ise 1 olan parametre 0, 0 olan parametre ise 1 yapılır. Mutasyon sayesinde bireylerin arama düzleminde daha önce uğranmamış konumlara gitmesi, bu sayede arama işleminin yani yerlere taşınması sağlanmış olur. Diğer bir faydası ise algoritmanın yerel minimumlara takılmasının önüne geçilmiş olunur.

Algoritma adımlar maksimum iterasyon sayısı kadar çalıştıktan ya da istenen ölçütlerde bireyi yakaladıktan sonra durdurulur.

3.4. Parçacık Sürü Algoritması

Parçacık Sürü Algoritması (Particleswarmoptimization - PSO) algoritması Dr. Eberhart ve Dr. Kennedy 'nin 1995'de geliştirdiği, popülasyon tabanlı, sezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır.

Reynolds[43], Heppner ve Grenander[44] kuş sürülerinin simülasyonunu sundular. Kuş sürülerinin koreografilerindeki estetik Reynolds'un ilgisini çekti ve bir zoologist olan Heppner kalabalık kuş sürülerinin senkronize bir şekilde ani yön değiştirmeleri, saçılmaları ve tekrar toplanmalarını mümkün kılan temel kuralları keşfetmeye çalıştı. Her iki bilim adamı da bu yerel davranışın sürülerin sosyal davranışı olduğu görüşünde idiler. Her ikisinin modelide birey mesafelerinin değişimine dayanmaktadır.

Sosyobiyolojist'lere göre sürülerdeki bireyler, sürüdeki diğer bütün bireylerin bilgi birikiminden ve araştırmalarından yararlanabilmektedir. Bu avantaj, yemlerin tahminin güçleştirecek şekilde dağılım gösterdiği şartlarda, yeme ulaşmak için yapılacak yarışın sebep olacağı dezavantaj karşısında daha kesindir. Bu hipotez ParticalSwarm un temelini oluşturmaktadır[45].

PSO kuş sürülerinin davranışlarından esinlenerek geliştirilmiştir. Kuş sürülerinin rastgele dağılmış bir pozisyonda alanda yem aradıklarını düşünelim. Ortamda sadece bir parça yem varsa ve kuşlar yemin yerini bilmiyor ancak her adımda ne kadar uzaklıkta olduğunu biliyor ise, yeme ulaşmanın en iyi yolu yeme en yakın kuşu takip etmektir.

PSO, genetik algoritma gibi evrimsel algoritmalar ile başlangıç popülasyonunun rastgele belirlenmesi, optimum çözümün jenerasyonları güncelleyerek araştırılması gibi benzerlikler taşımaktadır[46]. Bununla birlikte çaprazlama ve mutasyon parametrelerinin olmaması bu algoritmalarla olan farklılıklarına örnektir. PSO genetik algoritmaya nazaran daha az parametre bulundurması ve uygulamasının basit olmasından dolayı daha avantajlıdır.

PSO da parçacık(particle) olarak bilinen terimler kuşları temsil etmekte ve tek bir sonucu göstermektedir. Her bir parçacık uygunluk fonksiyonu denen ve optimize edilmeye çalışılan bir fonksiyon tarafından üretilen bir uygunluk değerine sahiptir. Ayrıca her parçacık hız denilen bir adım büyüklüğüne sahiptir. Parçacıklar o anki optimum parçacığı takip ederek yönünü belirler.

PSO'da parçacıklar başlangıçta rastgele olarak dağıtılarak optimizasyon problemine başlanır. Her bir adımdaki güncelleştirme işleminde parçacıkların konumları şu iki en iyi değere göre değiştirilir. Bunlardan ilki şimdiye kadar gerçekleştirilmiş en iyi çözümdür. Bu değer "pbest" olarak tanımlanır ve bellekte tutulur. Diğer en iyi değer ise

popülasyon içerisinde herhangi bir parçacık tarafından takip edilen global değerdir. Bu değer “gbest” olarak tanımlanır. Bu değer her jenerasyonda değişir. Bir alt popülasyon da bulunan en iyi değer ise “lbest” olarak tanımlanır.

En iyi değerler bulunduktan sonra parçacıkların hız ve sonraki değerleri hesaplanır. Bu hesaplamada denklem 3.6 ve denklem 3.7 kullanılır.

$$v = v + c_1 \text{rand}(pbest - present) + c_2 \text{rand}(gbest - present)$$

3.6

$$present = persent + v$$

3.7

v burada hızı, $present$ o anki parçacık değerini, rand 0-1 aralığında rastgele değer üreten fonksiyonu tanımlar. C_1 ve c_2 öğrenme faktörü olarak adlandırılır ve genelde değerleri 2 dir. Genel PSO algoritmasının adımları aşağıdaki gibidir.

- Parametreleri Belirle
- Başlangıç Popülasyonunu Oluştur
- Amaç Fonksiyonu Değerini hesapla
- Durma Kriteri Sağlanana Kadar Tekrarla
 - o Küresel En İyiyi Bul
 - o Yerel En İyiyi Bul
 - o Hız Vektörünü Güncelleştir
 - o Pozisyon Vektörünü Güncelleştir
 - o Değerlendir

4. BÖLÜM

KAMERA KALİBRASYONUNA OPTİMİZASYON ALGORİTMALARININ UYGULANMASI

Bu bölümde 2. bölüm de ayrıntısı ile anlatılan kalibrasyon metotlarında 3.bölümde anlatılan optimizasyon algoritmalarının hangi çerçevede nasıl uygulandığı anlatılacaktır. Bu amaçla ilk önce sistemin nasıl tasarlandığı, hangi adımlardan geçtiği ve daha sonra sistemin probleme uygulanmasının aktarılması ile birlikte deneysel sonuçlar gösterilecektir.

4.1. Kamera Parametrelerinin Karakteristiği

Bu tez çalışmasında kamera kalibrasyonu için tek görüntülü ve çokgörüntülü denemeler yapılmıştır. Luca Lucchese tarafından ortaya atılan sistemde kullanılan

İç parametreler:

- x_p :ana noktanın x koordinatı
- y_p :ana noktanın y koordinatı
- k_1 :birinci radyaldistorsiyon katsayısı
- k_2 :ikinci radyaldistorsiyon katsayısı
- k_3 :üçüncü radyaldistorsiyon katsayısı
- p_1 :birinci teğetsel(tanjant) distorsiyon katsayısı
- p_2 :ikinci teğetsel(tanjant) distorsiyon katsayısı
- p_3 :üçüncü teğetsel(tanjant) distorsiyon katsayısı

- f_x :x yönündeki etkin odak uzaklığı
- f_y :y yönündeki etkin odak uzaklığı

Dış parametreler:

- t_x :x yönündeki öteleme
- t_y :y yönündeki öteleme
- t_z :z yönündeki öteleme
- ω (roll) : x yönündeki dönüklük
- ϕ (pitch): y yönündeki dönüklük
- θ (yaw) : z yönündeki dönüklük

olmak üzere 10 iç ve 6 tane dış parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerin kameralar açısından karakteristiklerine bakacak olursak, iç parametreler aynı kamera ile çekilmiş bütün görüntüler için aynıdır. Dış parametreler ise her görüntü için farklıdır çünkü bu parametreler kameranın konumunu ve dönüklüğünü belirtmektedir. Bu haliyle çoklu görüntüyle çalışan bir kamera kalibrasyon sisteminde P_s parametre sayısı, N görüntü sayısı, i iç parametrelerin sayısı, d dış parametre sayısı olmak üzere denklem 4.1 ile elde edilir.

$$P_s = i + dN$$

4.1

DLT metodu parametreleri $L_1, L_2, \dots, L_{11}$ olmak üzere onbir tanedir. Bu parametrelerden iç ve dış parametrelere geçiş 2.bölüm de verilmiştir. DLT parametreleri her görüntü için birbirinden farklıdır. Dolayısıyla görüntülerin parametreleri birbirinden bağımsız olarak hesaplanabilmektedir. L_{11} parametresi diğer parametrelerin bir fonksiyonu olarak ifade edile bildiği için optimizasyon algoritmasına ürettirilecek olan parametre sayısı on olarak belirlenmiş olur. L_{11} 'in hesaplanmasında denklem 4.2 kullanılmaktadır.

$$L1 = \frac{-L_2L_6L_9^2 - L_2L_6L_{11}^2 - L_3L_7L_9^2 - L_3L_7L_{10}^2 + L_2L_{10}L_5L_9 + L_2L_{10}L_7L_{11} + L_3L_{11}L_5L_9 + L_3L_{11}L_6L_{10}}{L_5L_{10}^2 + L_5L_{11}^2 - L_9L_6L_{10} - L_9L_7L_{11}} \quad 4.2$$

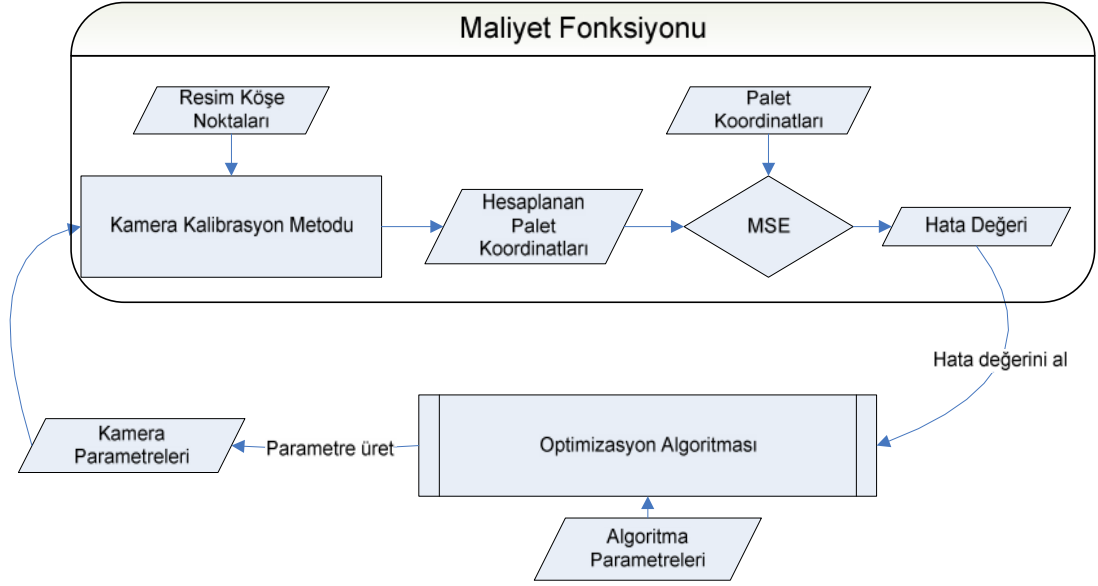
Ayrıca kamera parametreleri ile DLT çözümü de gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon algoritması iç ve dış parametreleri üretip maliyet fonksiyonu içerisinde bu parametrelerden DLT parametrelerine geçerek çözüm üretilmeye çalışılmıştır.

4.2. Kamera Kalibrasyonun Genel Sistemi

Problemin çözümü için geliştirilen sistem genel optimizasyon problemlerinde olduğu gibidir. Optimizasyon algoritması için gerekli olan maliyet fonksiyonu kullanılacak kamerakalibrasyon sistemlerini içermektedir. Bu fonksiyon giriş olarak optimizasyon algoritmasının ürettiği kamera parametrelerini almakta buna karşılık kalibrasyon sistemine kontrol noktalarının projeksiyonunu gerçekleştirmektedir. Çıkış olarak ise projeksiyondan elde edilen noktalarla hesaplanan hata değeri üretilmektedir.

Kamera kalibrasyonunda amaç kamera iç ve dış parametrelerini elde etmek olduğundan sistemin diğer girişlerinin bilinmesi gerekmektedir. Sistem içinde bulunduğu adımda üretilen kamera parametreleri ile sisteme giriş olarak aldığı koordinatlardan yeni koordinatlar üretecektir. Üretilen koordinatların uygun bir nokta olup olmadığını değerlendire bilmek için olması gereken noktalarla karşılaştırması gerekecektir. Dolayısıyla farklı açılardan çekilen görüntülerde kontrol noktalarını temsil eden köşe noktalarının koordinatları ve hedef noktaları temsil eden referans görüntüdeki köşe noktalarının koordinatları daha önce hesaplanmalıdır.

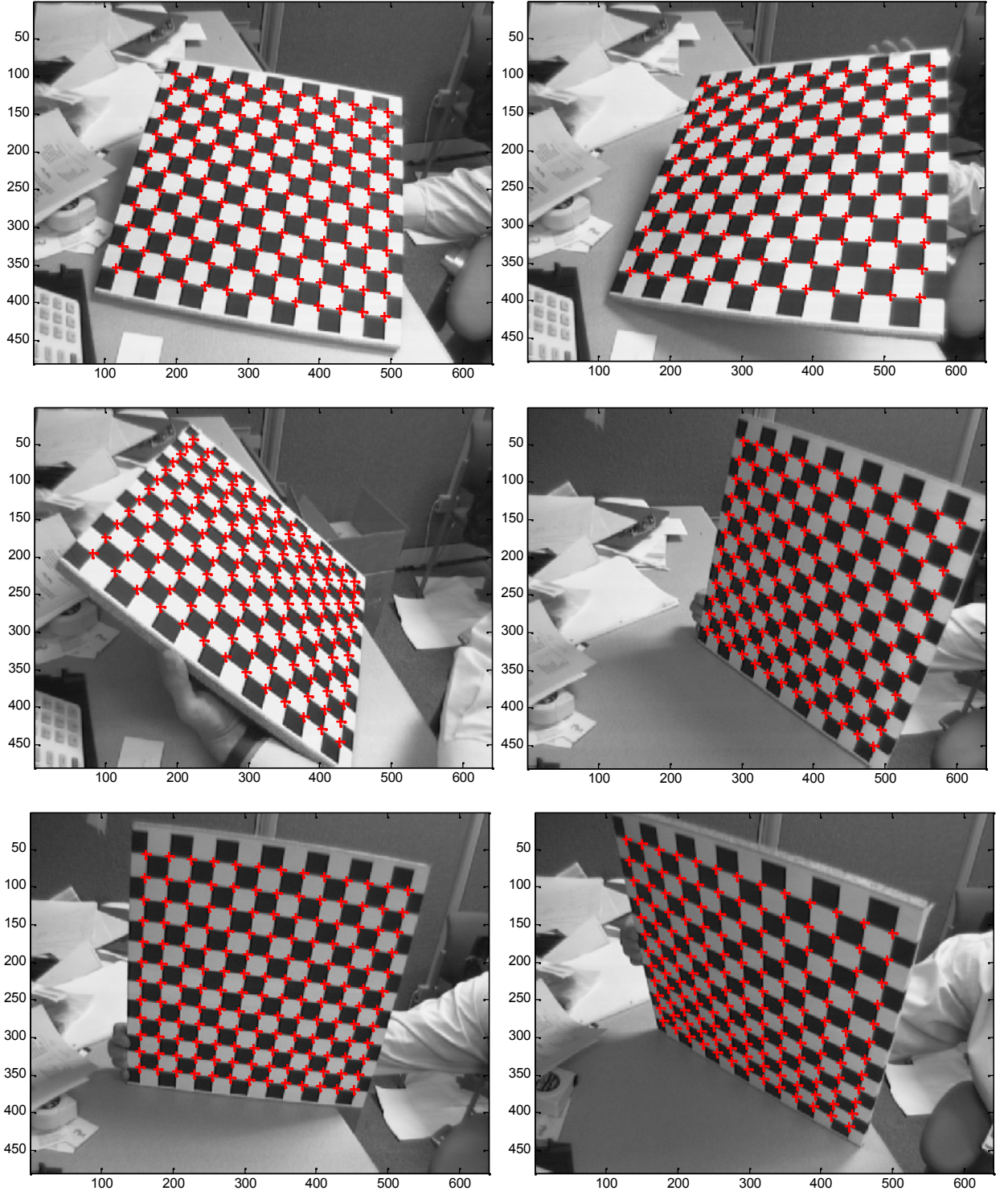
Şekil 4.1 'de bu çalışmada kullanılan sistem gösterilmiştir. Optimizasyon algoritması 3. bölümde bahsedilen algoritmalarından birisidir. Bu algoritmalar sonucuna göre eğitim yapacağı bir maliyet fonksiyonuna ihtiyaç duyar. Şekil 4.1 'de ki maliyet fonksiyonunda kullanılan kamera kalibrasyon metodu 2. bölümde anlatılan metotlardan birisidir.



Şekil 4.1. Sistemin Çalışması.€

Yukarıdaki şekilde gösterilen döngü başlamadan önce bir başlangıç fonksiyonunda resmin köşe noktaları ve palet koordinatları üretilmektedir. Görüntü koordinatları üretmek için HorrisCorner köşe bulma algoritması kullanılmaktadır. Bu algoritmanın ayrıntıları 2. bölüm de anlatılmıştır. Bu algoritma görüntüler üzerinde belirlenen bir bölge üzerinde çalışmaktadır. Bu bölge, görüntü üzerinde bütün paleti içine alacak şekilde, dört tane nokta palet köşelerine konarak belirlenir. Bölge içerisinde elde edilen köşe noktalarının x ve y koordinatları ayrı dizilerde toplanır. Elde edilmiş noktalar Şekil 4.2' de birkaç görüntü üzerinde kırmızı + simgesi ile gösterilmiştir.

Kalibrasyonda kullanılan palette her karenin 30 cm lik en ve boydan oluşmaktadır. Dolayısıyla paletin 3 boyutlu koordinatlarını da kolaylıkla x ve y koordinatları ayrı dizilerde olacak şekilde elde edebiliriz. Elde edilen bu koordinat verileri maliyet fonksiyonunda kullanılmaktadır. Görüntülerin köşe noktaları kalibrasyon metodunun bir girişi iken palet koordinatları ise kalibrasyon metodu çıkışı değerlendirilmekte kullanılır. Şekil 4.2 'de köşe noktaları bulunmuş bazı resimler gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Köşe Noktaları Çıkartılmış Görüntüler.

4.3. Değerlendirme Kriteri

Kamera kalibrasyonunda hesaplanan şey kamera parametreleri vasıtasıyla noktaların koordinatları olduğu için x ve y yönlerinde iki veri grubu bulunmaktadır. Dolayısıyla her yönde ayrı hesaplanan ortalama kareselhata değerlerinin kareleri toplamının karekökü bir görüntü için maliyet fonksiyonunun çıkışı temsil etmektedir. Optimizasyon algoritmaları da bu değeri minimize etmeye çalışmaktadır.

$$MSE_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - x')^2 \quad ve \quad MSE_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - y')^2$$

$$h = \sqrt{MSE_x^2 + MSE_y^2}$$

4.3

Burada n kontrol noktası sayısını ifade etmektedir. Bu çalışmada her görüntü üzerinde 156 tane kontrol noktası kullanılmaktadır. (x,y), referans görüntü üzerindeki kontrol noktalarının koordinatlarını, (x',y') ise sistem tarafında hesaplanan koordinatları temsil etmektedir.

4.4. Optimizasyon Ön İşlemleri

Türeve bağlı algoritmalarda iyi sonuç üretebilmek için iyi bir başlangıç noktasından aramaya başlanmalıdır. Bu tür algoritmalar başlangıç noktasından başlayarak hangi yöne ilerleyeceğini maliyet fonksiyonunun türevine dayanarak karar verirler. Bu amaçla kamera kalibrasyonunda türeve dayalı algoritmalar ile çözüm geliştirileceği zaman ilk adımda, basitleştirilmiş model üzerinden, ikinci aşamada kullanılacak başlangıç noktası üretilir.

Sezgisel algoritmalarda ise türeve dayalı algoritmaların aksine bir başlangıç noktası bulunmamaktadır. Bunun yerine bir çalışma aralığı tanımlanmaktadır. Bunun anlamı ise her parametre için ayrı ya da bütünü için bir tane alt ve üst aralık belirlemek suretiyle algoritma bu aralıkta koşturulur. Bu çalışmada sezgisel algoritmaların başlangıç noktası istememesini bir avantaj olarak kullanıp, aralığı bütün çözümü içinde barındıracak büyüklükte tutarak algoritmanın çalıştırılması denenmiştir. Ancak bu durumda çalışma uzayının özellikle bazı parametreler için oldukça büyük olduğu ve problem çözümüne sezgisel algoritmaların bu haliyle yakınsayamadığı gözlenmiştir. Bu noktada

karşılaşılan en büyük problemlerden birisi sezgisel algoritmanın koşacağı aralığın belirlenmesi olmuştur. Bu amaçla yapılan farklı denemeler ve sonuçları ilerleyen sayfalarda gösterilmektedir.

4.4.1. Klasik Yöntemler İçin Ön Adım

Luca Lucchese'nin metodundaki klasik yöntemde LevenbergMarquart algoritması kullanılmaktadır. Bu algoritma türeve dayalı algoritmalarındandır. Ana çözüme geçmeden önce ön adımda sistemin basitleştirilmiş hali çözülmektedir. Basitleştirilmiş haliyle sistemde tanjant distorsiyon yok gibi düşünülürken, radyal distorsiyonun da sadece ilk parametresi kullanılmaktadır. Bu haliyle distorsiyonlardan arınmış resmi verecek ifade şu şekildedir.

$$\begin{aligned}\delta_y(P_i) &= (y_d - y_p)k_1 r^2 \\ \delta_x(P_i) &= (x_d - x_p)k_1 r^2\end{aligned}$$

4.4

İlk olarak aşağıdaki lineer sistem en küçük kareler yöntemi ile çözülür.

$$\begin{aligned}x' &= \frac{a_{11}^{(k)}x + a_{12}^{(k)}y + d_1^{(k)}}{c_1^{(k)}x + c_2^{(k)}y + 1} \\ y' &= \frac{a_{21}^{(k)}x + a_{22}^{(k)}y + d_2^{(k)}}{c_1^{(k)}x + c_2^{(k)}y + 1}\end{aligned}$$

4.5

Buradan elde edilecek sonuçlar basitleştirilmiş metot için başlangıç değeri olarak kabul edilip çözüm başlatılır.

$$\begin{aligned}d_1^{(k)} &= b_1^{(k)} - (a_{11}^{(k)}x_p + a_{12}^{(k)}y_p) \\ d_2^{(k)} &= b_2^{(k)} - (a_{21}^{(k)}x_p + a_{22}^{(k)}y_p)\end{aligned}$$

4.6

$$\begin{aligned}x' = \Pi_x(x, P_h^k) &= \frac{a_{11}^{(k)}\varepsilon_x(P_i) + a_{12}^{(k)}\varepsilon_y(P_i) + d_1^{(k)}}{c_1^{(k)}(\varepsilon_x(P_i) - x_p) + c_2^{(k)}(\varepsilon_y(P_i) - y_p) + 1} \\ y' = \Pi_y(x, P_h^k) &= \frac{a_{21}^{(k)}\varepsilon_x(P_i) + a_{22}^{(k)}\varepsilon_y(P_i) + d_2^{(k)}}{c_1^{(k)}(\varepsilon_x(P_i) - x_p) + c_2^{(k)}(\varepsilon_y(P_i) - y_p) + 1}\end{aligned}$$

4.7

Denklem 4.7'deki sistem her görüntü için ayrı ayrı çözülür. Bu işlemde gereken parametrelerin başlangıç noktası $[0 \ 0 \ 0 \ H_r]$ dizisidir. H_r denklem 4.5'de elde edilen katsayılarıdır. Sıfırlardan oluşan ilk üç parametre ise sırasıyla ana nokta koordinatlarını ve radyaldistorsiyon katsayısını temsil etmektedir. Denklem 4.7'nin çözümü ile her görüntü için iç parametrelerden ana nokta koordinatlarını ve radyaldistorsiyon katsayısı hesaplanmaktadır. Tablo 4.1'de yirmibeş görüntü için hesaplanmış değerler verilmiştir.

Tablo 4.1. Klasik Yöntemle 25 Görüntü için Bazı Parametrelerin Ön Adım Değerleri.

Görüntü	x_p	y_p	k_1
1	-10,7045	-9,1892	6,0378E-07
2	-12,8800	-8,9142	6,1058E-07
3	-16,5976	-9,0966	6,0635E-07
4	-20,0582	-11,8120	6,0816E-07
5	-18,4212	-16,6719	6,1638E-07
6	0,0000	0,0000	-1,41E-22
7	-18,1031	6,9926	5,9790E-07
8	-10,2494	8,1692	6,0093E-07
9	-12,5796	-9,7274	6,1236E-07
10	-6,4782	-11,0787	5,9652E-07
11	-9,9359	-3,4015	5,9805E-07
12	-9,5605	-1,4492	6,0127E-07
13	-13,9851	2,3246	6,0754E-07
14	-18,1359	0,0896	6,1258E-07
15	-14,2595	-0,4738	6,1387E-07
16	-30,5868	-8,9373	6,2133E-07
17	-15,8271	2,8462	6,1175E-07
18	-50,9110	62,9269	3,6048E-07
19	-4,6916	13,4263	5,8011E-07
20	-15,8538	5,5861	6,0107E-07
21	-18,5620	7,4062	5,9466E-07
22	-19,3941	-5,1844	5,9409E-07
23	-17,0419	7,0796	6,1929E-07
24	-16,8882	1,6084	6,1515E-07
25	-9,5981	-14,7272	6,0621E-07

İç parametrelerin her görüntü için aynı olması gerekliliğinden dolayı elde edilen iç parametre sonuçlarının ortalaması bu parametrelerin ana çözümdeki başlangıç noktasını oluşturur. Elde edilen diğer parametreler ise ileri yönlü homografimatrisini oluşturmak için denklem 4.6 ile birlikte kullanılır. Bu matrisin tersi ile elde edilen geri yönlü homografi matrisi diğer parametrelerin başlangıç değerini bulmada kullanılmaktadır.

$$\mu_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha_{21}}{\rho \alpha_{22}} \right) \text{ ve } \mu_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\rho \gamma_2}{\gamma_1} \right)$$

4.8

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \left(\frac{\rho \alpha_{12}}{\alpha_{11}} \right) \\ \omega &= \pm \tan^{-1} \left(\sqrt{\tan(\mu_1 + \theta) \tan(\theta - \mu_2)} \right) \\ \varphi &= \pm \sin^{-1} \left| \frac{\tan(\mu_1 + \theta)}{\tan(\theta - \mu_2)} \right| \end{aligned}$$

4.9

Denklem 4.9 'da $\pm$ li terimlerin işaretleri için şu şekilde bir yöntem izlenmektedir. İlk olarak denklem 4.5, 4.6, 4.7 ile hesaplanan geri yönlü homografiden, denklem 4.9 da oluşacak sekiz farklı işaret kombinasyonlu açılar ile denklem 2.62 den hesaplanan geri yönlü homografinin farkı alınır. Bu işlemlerde $f_x > 0$ ve $f_y > 0$ kısıtı bulunmaktadır. Sekiz farkın normlarından en küçüğünü veren işaretler denklem 4.9'da kullanılacak olan işaretlerdir.

Geri kalan parametreler ise aşağıdaki eşitlik vasıtasıyla hesaplanır.

$$\begin{cases} f_x = \frac{r_{31}}{\gamma_1(r_{33} + \tau_z)} \\ f_y = \rho f_x \\ \tau_x = \beta_1 \frac{r_{33} + \tau_z}{f_x} - r_{13} \\ \tau_y = \beta_2 \frac{r_{33} + \tau_z}{f_y} - r_{23} \\ \tau_z = \frac{r_{11}}{\alpha_{11}} - r_{33} \end{cases}$$

4.10

f_x ve f_y iç parametre oldukları için bütün görüntülerde hesaplanan değerlerin ortalaması başlangıç değeri olarak alınır. Diğer parametreler ise dış parametrelerdir ve her görüntü için ayrı hesaplanacağından dolayı burada hesaplanan değerlerin her biri başlangıç değeridir.

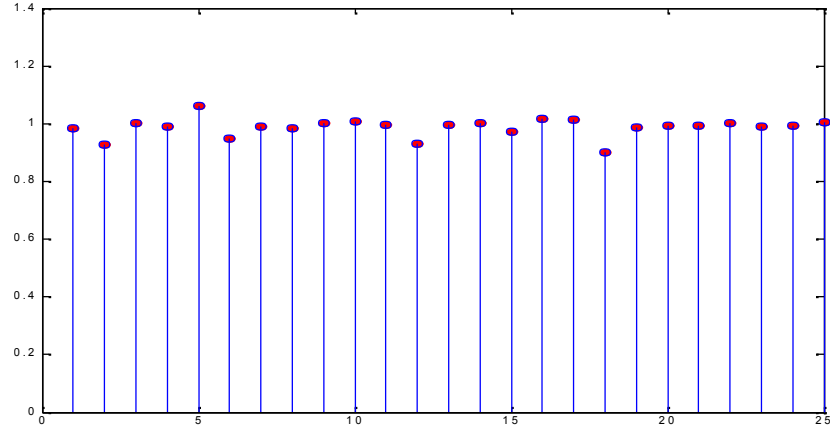
Denklem 4.8'den 4.10'a kadar geçen ρ değeri denklem 4.11'i sıfır yapan değerdir.

$$\det\Delta = \alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha_{12}\alpha_{21}$$

$$f(\rho) = \det\Delta \cos^2 \theta \cos \varphi - \alpha_{11}^2 \cos \omega = 0$$

4.11

Bu fonksiyonla elde edilmiş yirmibeşgörüntü için ρ değerleri Şekil 4.3 'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Yirmibeş Görüntü İçin ρ Değerleri.

Hesaplanan dış parametrelerden bazıları Luca Lucchese 'in makalesinde bulunan sonuçlarla karşılaştırmak için verilmiştir. Lucchese'den alınan sonuçlar ikinci adımın sonuçları yani nihai sonuçlardır.

Tablo 4.2 'de 4, 5, 7, 10, 18 ve 20. görüntüler için üst tarafta hesaplanan, alt tarafta ise küçük punto ile Lucchese'nin sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.2. LevenbergMarquardt Algoritması İle Ön Adım Sonuçları.

Görüntü	τ_x	τ_y	τ_z	ω	φ	θ
4.görüntü	-0,2465 -0,2307	0,6493 0,6445	0,5160 0,5798	-38,5921 -39,4808	-20,6137 -20,4569	15,7974 15,7976
5.görüntü	0,5735 0,6197	0,6299 0,5980	0,6288 0,7983	-40,3249 -43,0698	34,2904 36,9758	17,4050 16,3419
7.görüntü	0,6558 0,6695	-0,5523 -0,5423	0,5160 0,7040	36,8005 37,6955	36,7273 36,7552	10,8564 11,0644
10.görüntü	-0,3555 -0,3245	-0,0012 -0,0164	0,9966 0,9528	13,5716 13,3104	-29,3548 -30,4080	14,7502 14,4798
18.görüntü	-0,5575 -0,5606	-0,7493 -0,7033	0,3210 0,5353	47,7900 50,9554	-33,2180 -30,3129	-3,2637 -1,5450
20.görüntü	0,6780 0,6813	-0,3724 -0,3560	1,0054 0,8494	39,8331 40,4182	53,6431 53,5143	11,1163 11,1280

4.4.2. Sezgisel Algoritmalar İçin Ön Adım

Sezgisel algoritmalar için çalışma aralığı belirleme gerekliliği yüzünden ilk adımda bir başlangıç noktası bulmak yerine çalışma aralığı bulmak gerekmektedir. Yapılan denemelerde sezgisel algoritmalar tek görüntü için iyi sonuç vermiştir. Görüntü sayısı artıkça problem boyutunun artmasının yanında parametre değerleri, özellikle iç parametreler her görüntüde aynı olduğu için, birbirini etkilemektedir. Bu ise problemin zorluğunu artırmaktadır. Tablo 4.3 ‘de sezgisel algoritmalar ABC ve DGA için hesaplanan tek görüntü için sonuçlar gösterilmiştir.

Tablo 4.3. ABC İle Elde Edilen En İyi Parametreler.

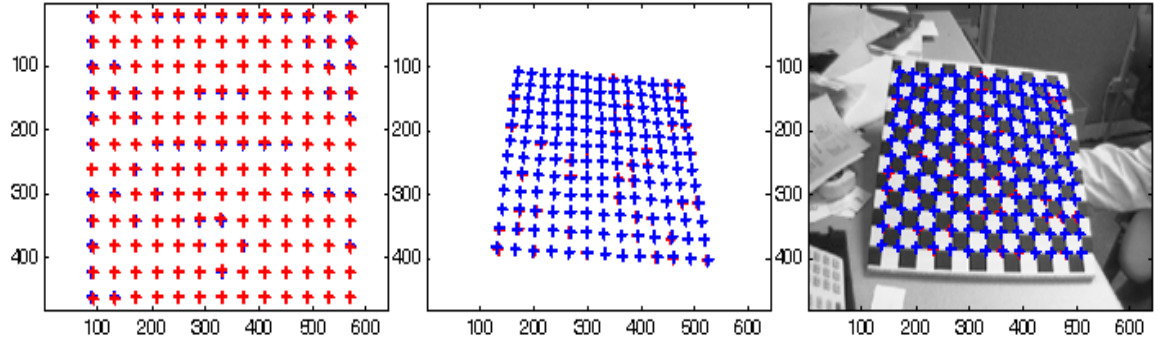
hata=0,1160 , standart hata=306,97		
P_i	Değer	Standart Sapma
x_p	-15,2592	33,2612
y_p	-8,8876	8,0255
k_1	2,2300E-07	7,7667E-07
k_2	1,4200E-11	2,2485E-11
k_3	-1,2200E-16	3,3703E-16
p_1	-1,5000E-06	2,3549E-05
p_2	-1,0000E-09	2,3367E-05
p_3	1,0000E-10	4,0721E-05
f_x	649,9024	36,5199
f_y	650,3254	26,1087

Yukarıdaki tabloda ABC algoritmasında yirmibeşgörüntü içerisinde elde edilen en iyi hataya sahip görüntü için hesaplanan iç parametreleri, diğer görüntüler için elde edilen parametrelerle olan standart sapmasıyla birlikte verilmiştir. Görüntüler bağımsız çalıştığından aynı olması gereken iç parametrenin dağılımını göstermektedir.

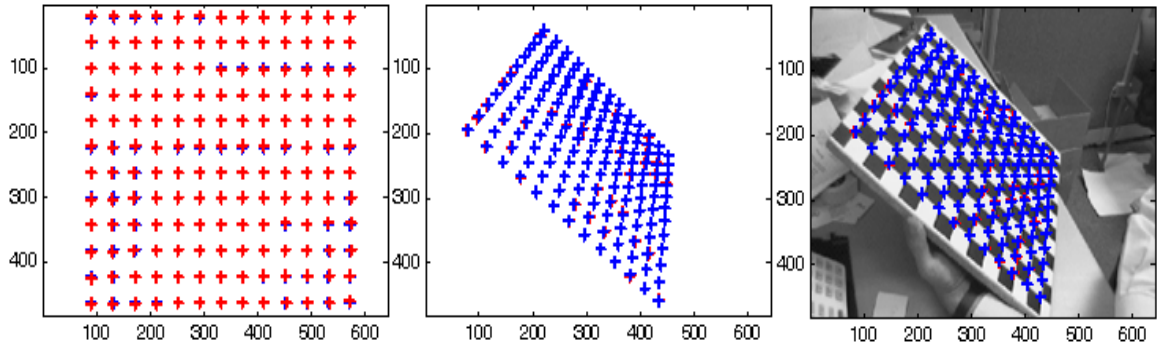
Tablo 4.4 ‘de ise yine ABC algoritması ile birbirinden bağımsız her görüntü için çalıştırılarak elde edilen aralık verilmiştir. Bu hesaplamalar yirmi kere yapılarak paralel koşmalar gerçekleştirilmiştir. Yirmi koşma için belirlenen aralıkların standart sapmaları alt ve üst sınırlar için tabloda verildiği gibidir. Tablonun hemen altında ise farklı açılardan çekilmiş görüntüler için elde edilen parametrelerle noktaların projeksiyonu gösterilmektedir.

Tablo 4.4. ABC İle İç Parametre İçin Hesaplanan Aralıklar.

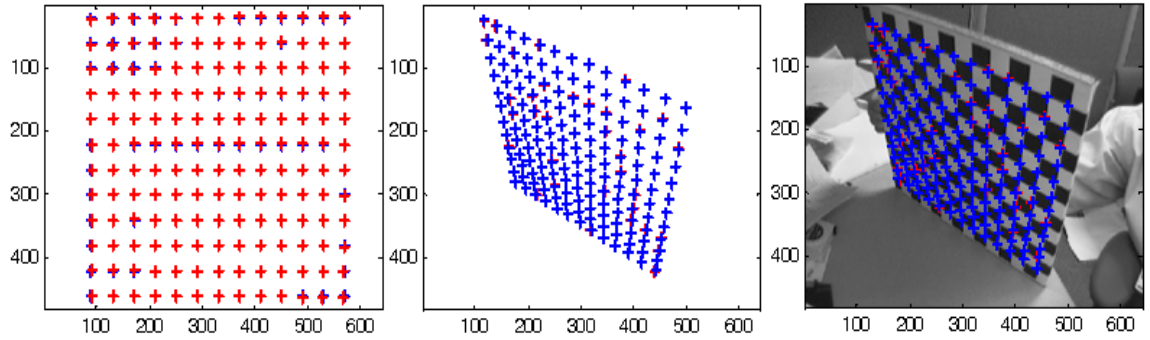
P_i	Aralık		Standart Sapma	
	Alt	Üst	Alt	Üst
x_p	-50,0000	49,9930	0,0302	0,0296
y_p	-10,0000	10,0000	0,0205	0,0212
k_1	1,0000E-09	2,8700E-06	3,0474E-11	2,7467E-06
k_2	4,9500E-15	7,3800E-11	1,3887E-15	9,4147E-12
k_3	-1,0000E-15	-1,0000E-21	6,8491E-20	3,9009E-21
p_1	-1,0000E-04	-1,0000E-09	4,8507E-08	4,4954E-10
p_2	-1,0000E-04	-1,0000E-09	2,0892E-05	3,9356E-10
p_3	1,0000E-10	1,0000E-04	4,1994E-10	1,5745E-07
f_x	600,0001	699,9998	0,0064	0,0026
f_y	600,0140	700,0000	0,0121	0,0007



Şekil 4.4.İkinciGörüntü İçin ABC Tek Görüntü Sonucu.



Şekil 4.5.BeşinciGörüntü İçin ABC Tek Görüntü Sonucu

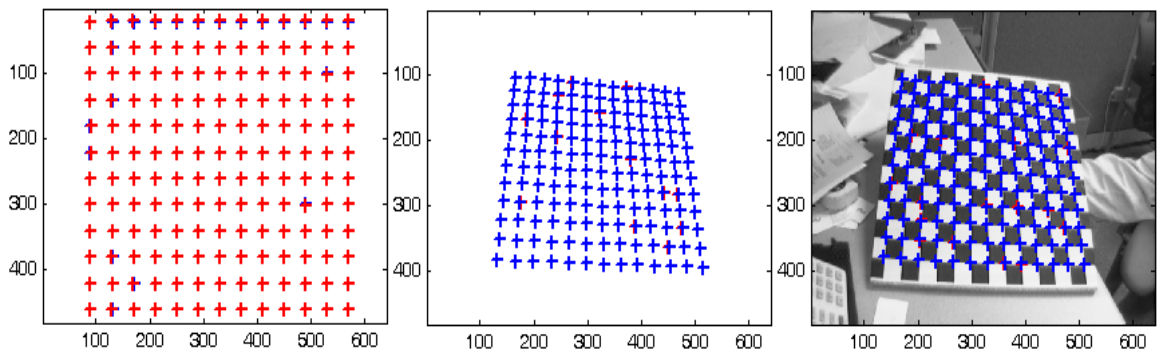


Şekil 4.6.YirmiüçüncüGörüntü İçin ABC Tek Görüntü Sonucu.

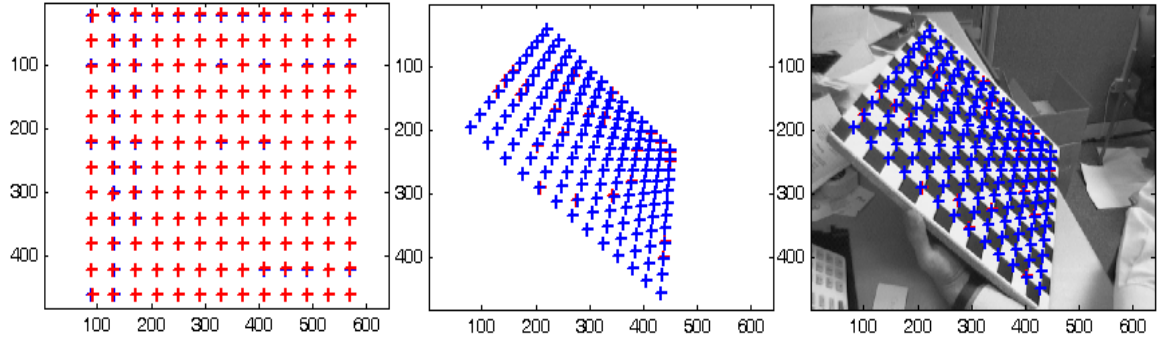
Tablo 4.5’de diferansiyel gelişim algoritması ile elde edilen,yirmi beşgörüntü içerisinde en iyi hatayasahip resmin iç parametreleri ve bütün görüntüler içinelde edilen aralıklar gösterilmiştir. Standart sapma hanesinde ise yirmi beş görüntü için hesaplanan iç parametreler arasındaki standart sapma verilmiştir.

Tablo 4.5. DGA ile Ön adımda Hesaplanan İç Parametreler ve Aralıklar.

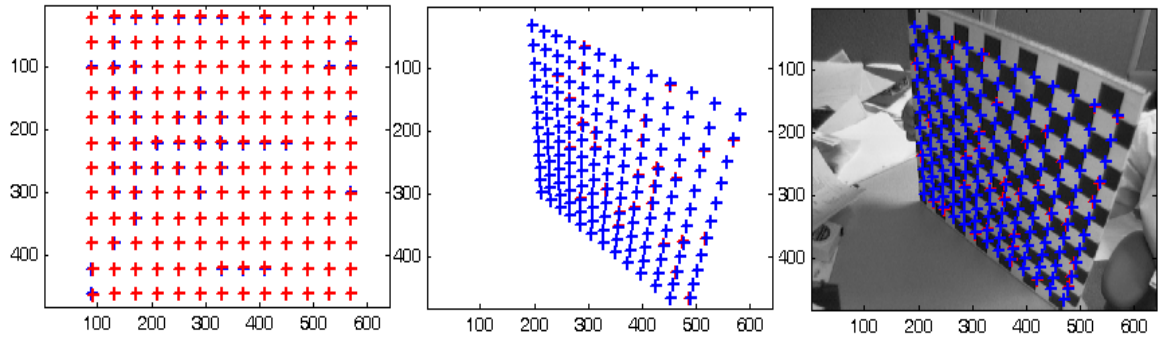
hata=0.0594 , standart hata=13.5686				
P_i	Değer	Standart Sapma	Aralık	
			Alt	Üst
x_p	-12,0227	70,2063	-205,7801	206,7687
y_p	-5,0515	52,9114	-108,7756	182,7534
k_1	6,6383E-07	3,6096E-06	-9,3930E-06	1,3061E-05
k_2	-6,6078E-13	4,9777E-11	-5,4284E-11	2,2450E-10
k_3	1,2382E-18	2,6716E-16	-1,1014E-15	4,1744E-16
p_1	1,5476E-06	8,1356E-05	-1,5567E-04	3,4220E-04
p_2	-6,2935E-06	1,8054E-04	-3,7305E-05	8,9641E-04
p_3	-6,8449E-06	1,4926E-05	-6,4654E-05	1,6726E-05
f_x	674,1071	191,0701	262,2019	1229,8092
f_y	663,5345	115,3135	330,0265	911,7252



Şekil 4.7.İkinciGörüntü için DGA Tek Görüntü Sonucu.



Şekil 4.8.Beşinci Görüntü için DGA Tek Görüntü Sonucu.



Şekil 4.9.YirmidördüncüGörüntü için DGA Tek Görüntü Sonucu.

Yukarıdaki şekillerde soldan sağa doğru sırasıyla, ilk görüntüde kırmızı noktalar referans resmin kontrol noktaları ve mavi olanlar ileri yönlü homografi ile hesaplanan noktalar, ortadaki görüntüde bozunmalardan arınmış noktalar ve sağdaki görüntüde maviler görüntülerin köşe noktaları ve kırmızılar geri yönlü homografi ile hesaplanan noktalardır. Üç görüntüde de maviler farklı açılardan çekilmiş görüntülerin köşe noktaları ve türevleri, kırmızılar ise referans resmin köşe noktaları ve türevleridir.

Tek görüntü için yapılan deney sonuçlarında görüldüğü üzere hata değerleri oldukça iyi değerlere indirilmiştir. Bununla birlikte tek görüntü için yapılan deneylerle bulunan parametreler görüntüden görüntü farklılıklar göstermektedir. Bu yüzden sezgisel algoritmalar ile yapılacak çoklu görüntü deneylerinde, tek görüntü ile elde edilen bu sonuçlardan çıkartılan aralık değerleri kullanılmıştır.

Tablo 4.2 'nin bir benzeri ABC optimizasyon algoritması ile hesaplanmış sonuçlar için Tablo 4.6 'da verilmiştir.

Tablo 4.6. ABC ile Hesaplanan Dış Parametreler ve Luca Lucchese'nin Değerleri.

	Görüntü	τ_x	τ_y	τ_z	ω	φ	θ
1	4.görüntü	-0,2629 <i>-0,2307</i>	0,6633 <i>0,6445</i>	0,4918 <i>0,5798</i>	-39,5949 <i>-39,4808</i>	-18,0223 <i>-20,4569</i>	14,6984 <i>15,7976</i>
2	5.görüntü	0,6229 <i>0,6197</i>	0,6000 <i>0,5980</i>	0,7117 <i>0,7983</i>	-41,6196 <i>-43,0698</i>	33,0948 <i>36,9758</i>	19,4865 <i>16,3419</i>
3	7.görüntü	0,5537 <i>0,6695</i>	-0,5535 <i>-0,5423</i>	0,5599 <i>0,7040</i>	37,7695 <i>37,6955</i>	34,1768 <i>36,7552</i>	5,2256 <i>11,0644</i>
4	10.görüntü	-0,3440 <i>-0,3245</i>	-0,0122 <i>-0,0164</i>	0,8872 <i>0,9528</i>	13,7987 <i>13,3104</i>	-27,8961 <i>-30,4080</i>	14,6884 <i>14,4798</i>
5	18.görüntü	-0,5769 <i>-0,5606</i>	-0,6985 <i>-0,7033</i>	0,5090 <i>0,5353</i>	50,5856 <i>50,9554</i>	-32,0370 <i>-30,3129</i>	-1,4595 <i>-1,5450</i>
6	20.görüntü	0,6572 <i>0,6813</i>	-0,3609 <i>-0,3560</i>	0,7509 <i>0,8494</i>	42,3716 <i>40,4182</i>	54,1154 <i>53,5143</i>	12,6494 <i>11,1280</i>

Tabloda 4, 5, 7, 10, 18 ve 20. görüntüler için üst tarafta hesaplanan alt tarafta ise küçük punto ile Lucchese' nin sonuçları verilmiştir.

Aralık değeri belirlerken kullanılan strateji şu şekildedir. Dış parametreler her görüntüde farklı olacağı için bulunan her değere belirli bir miktar ekleyip çıkartmak suretiyle aralık elde edilir. Dış parametrelerden açı değerleri birim çemberin birinci ve dördüncü bölgelerinde değişmektedir. Öteleme değerleri ise referans kamerası ile kalibrasyon paleti arasındaki mesafe ile ölçeklendiği için -1,1 aralığında değerler almaktadır. İlk adımda elde edilen dış parametre değerleri, olması gereken değerden çok uzak olmadığı görülmüştür. Bu yüzden açı değerlerine 10 öteleme değerlerine 0,1 gibi kendi değişim aralıklarında küçük bir miktar ekleyip çıkartarak aralık elde edilmiştir. İç parametrelerde ise elde edilen parametrelerin en büyükleri üst sınırları en küçükleri ise alt sınırları belirlemektedir.

4.5. Çok Görüntüyle Kalibrasyon

Görüldüğü gibi sezgisel algoritmalarla farklı açılardan çekilmiş görüntüler için ayrı ayrı kamera parametrelerinin tamamı belirli bir doğrulukla hesaplanabilmektedir. Bu noktada akla çoklu görüntüyle hesaplamanın neden yapıldığı gelebilir. Bu tür sistemlerde değişik açılardan çekilmiş görüntülerle çalışmanın amacı elde edilen sonuçların doğruluğunu artırmaktır. Daha öncede bahsedildiği gibi görüntüler değişik açılardan aynı kamera ile çekilmiştir. Dolayısıyla her görüntü için aynı iç parametrenin hesaplanması gerekmektedir. Oysa elde edilen tek görüntülü sonuçlarda görülmüştür ki

her görüntü için farklı iç parametreler elde edilmektedir. Bir diğer problem ise bazı durumlarda aynı görüntü için hata değerinin, özellikle distorsiyon katsayılarında farklı parametre değerleri ile oldukça küçük değere inebilmesidir. Bu ise sistemin kararlı bir sonuç üretmesini engellemektedir.

Bütün görüntüler bir sistemde toplanıp parametreler üretilmeye çalışıldığı zaman görüntüler için farklı dış parametreler üretileceğinden dolayı, sistemi tek görüntüyle çalıştırmakla farklı olamayacak gibi görülebilir. Bununla birlikte her görüntü için ortak iç parametreler üretilecektir. Bu ise bir iç parametredeki değişikliğin bütün görüntüleri etkileyeceği anlamına gelmektedir. Diğer taraftan çok görüntülü sistemde herhangi bir resmi diğerlerinden bağımsız düşündüğümüzde, iç parametreleri kendine özgü, diğerlerinden bağımsız değiştiremediğinden dolayı bu durum o resmin dış parametrelerini de etkileyecektir. Çünkü sistem bütün görüntüler için hata ayrı ayrı hesaplanıp, tüm görüntülerin hataları toplamı sistemin hatasını temsil etmektedir ve bu hata minimize edilmeye çalışılmaktadır. Pek tabidir ki her resmin hatası minimum olduğu zaman sistemin genel hatası da azalacaktır.

$$h_i = \sqrt{\frac{MSE_{x_i}^2 + MSE_{y_i}^2}{n}}$$

$$\Delta h = \sum_{i=1}^n h_i$$

4.12

4.5.1. Ön Adım Kullanmadan Sonuçlar

Ön adımda aralık belirlemeksizin algoritmalar ile yapılan denemelerde hesaplanan hata değerlerinin oldukça büyük olduğu gözlenmiştir. Dış parametrelerde bütün görüntülerdeki dönüklükleri ve ötelemeleri kapsayacak şekilde her görüntü için aynı aralık seçilmiştir. Bu sebeple aralıklar ön adımla hesaplanan aralıklara göre oldukça büyüktür. İç parametreler için ise bazı durumlarda ön adımda daha büyük aralıkların çıktığı gözlenmiştir. Tablo 4.7 'deki sonuçlar yirmi görüntü için hesaplanmıştır. Bu işlemler sırasında kullanılan ABC 'de her adımda bir parametre değiştirilmiştir.

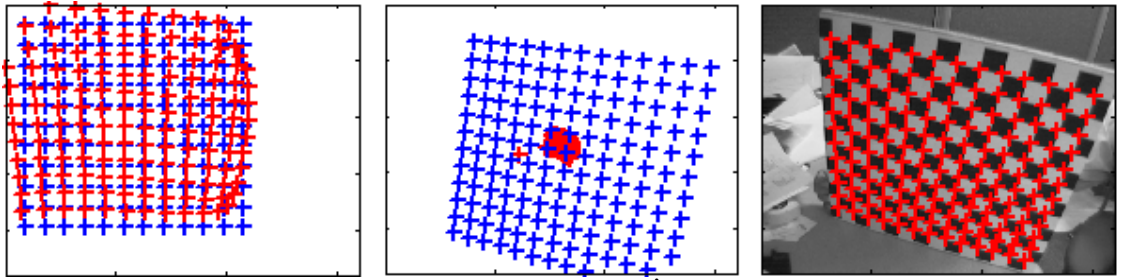
Tablo 4.7.ABC ile Ön Adımsız Hesaplanan İç Parametreler ve Kullanılan Aralıklar.

25 koşmanın en iyisi. Hata değeri: 26469, standart hata: 3244.431				
P_i	Değer	S.Sapma	Alt	Üst
x_p	-25,388	27,6163	-50	50
y_p	-0,81723	6,8493	-10	10
k_1	3,4100E-06	1,0741E-06	1,0000E-09	1,0000E-05
k_2	1,0000E-15	2,1438E-11	1,0000E-15	1,0000E-10
k_3	-5,1200E-16	1,6819E-16	-1,0000E-15	-1,0000E-21
p_1	-2,1700E-05	2,6262E-05	-1,0000E-04	-1,0000E-09
p_2	-8,7800E-05	3,9966E-05	-1,0000E-04	-1,0000E-09
p_3	5,2100E-06	2,5565E-05	1,0000E-10	1,0000E-04
f_x	600,75	12,3831	600	700
f_y	600	0,002	600	700

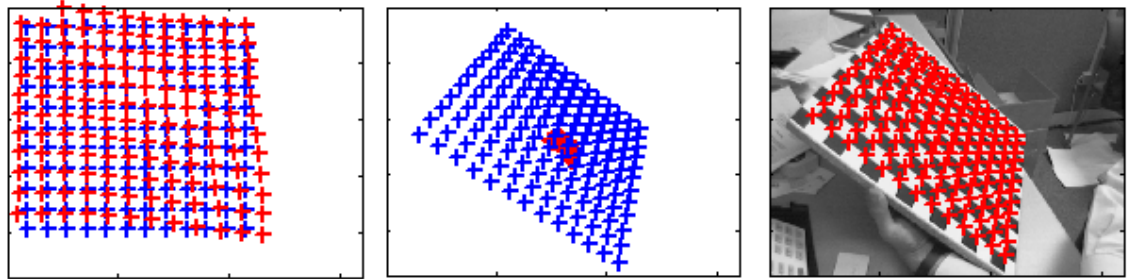
Aynı koşmaya ait ongörüntü için dış parametreler aşağıda verilmiştir. Tablonun uzun olmasından dolayı on görüntü ile yetinildi.

Tablo 4.8. ABC İle Ön Adımsız Hesaplanan Dış Parametreler.

Görüntü	τ_x	τ_y	τ_z	ω	φ	θ
1 Değer	-0,3900	0,0879	0,3425	-15,0510	-32,4780	5,3973
1 S.Sapma	0,4003	0,5108	0,1193	33,8255	23,6383	8,2810
2 Değer	0,2594	-0,0037	0,2420	-4,4523	1,2574	1,3216
2 S.Sapma	0,4142	0,3505	0,1058	22,4608	24,7621	6,1482
3 Değer	-0,1700	0,5812	0,1984	-41,9270	-19,5220	20,0000
3 S.Sapma	0,4475	0,5009	0,0985	32,1221	27,0972	7,1686
4 Değer	0,7788	0,0239	0,2510	-5,5334	26,7210	2,8881
4 S.Sapma	0,4411	0,4067	0,0854	25,7584	24,2749	6,3850
5 Değer	0,6594	0,3990	0,4999	-35,9770	30,7230	20,0000
5 S.Sapma	0,4251	0,4540	0,1170	30,9038	24,7396	0,9906
6 Değer	-0,4438	0,0492	-0,0172	-15,1290	-33,7450	10,5610
6 S.Sapma	0,3885	0,4412	0,1286	28,0333	21,7300	6,8970
7 Değer	-0,2432	0,2147	0,2686	-20,1080	-27,2820	2,3755
7 S.Sapma	0,4251	0,4019	0,1174	25,1866	24,8089	5,1404
8 Değer	-0,0198	0,4052	0,2279	-24,3970	-4,1186	-6,7894
8 S.Sapma	0,4727	0,3429	0,1919	21,9415	29,6298	5,7356
9 Değer	0,4127	-0,5315	0,3053	24,4770	2,9857	20,0000
9 S.Sapma	0,4741	0,3698	0,1063	23,6452	28,5674	3,7604
10 Değer	0,0658	-0,3624	0,5699	24,4200	-14,5500	13,0060
10 S.Sapma	0,3926	0,3569	0,1133	23,2648	25,3074	4,3632



Şekil 4.10. Onsekizinci Görüntü İçin ABC Sonucu.



Şekil 4.11. Beşinci Görüntü İçin ABC Sonucu.

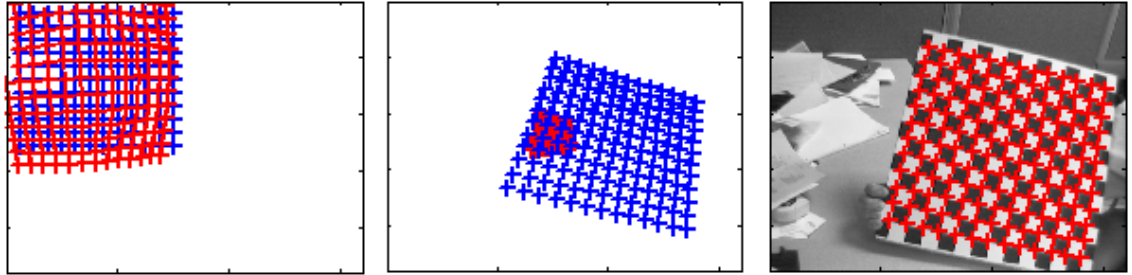
Diferansiyel gelişim algoritması için sonuçlar hesaplanırken adım büyüklüğü 0.6, çaprazlama oranı 0.9 olarak alınmıştır. Sonuçlar aşağıdaki gibidir.

Tablo 4.9. DGA ile Ön Adımsız Hesaplanan İç Parametreler ve Kullanılan Aralıklar.

30 koşmanın en iyisi. Hata değeri: 24744 ,standart hata:10351,447				
P_i	Değer	S.Sapma	Alt	Üst
x_p	63,199	31,506	-50	50
y_p	-21,526	19,283	-10	10
k_1	-6,9900E-06	6,9318E-06	1,00E-09	1,00E-05
k_2	1,0200E-10	9,6628E-11	1,00E-15	1,00E-10
k_3	-5,2600E-16	4,8733E-16	-1,00E-15	-1,00E-21
p_1	-7,3500E-05	9,6066E-05	-1,00E-04	-1,00E-09
p_2	-1,6100E-05	7,9857E-05	-1,00E-04	-1,00E-09
p_3	1,0400E-05	7,8357E-05	1,00E-10	1,00E-04
f_x	420,32	87,897	600	700
f_y	391,83	88,567	600	700

Tablo 4.10. DGA İle Ön Adımsız Hesaplanan Dış Parametreler.

	Görüntü	τ_x	τ_y	τ_z	ω	φ	θ
1	Değer	0,4540	-0,1589	0,0906	-8,4228	14,3640	-1,2044
	S.Sapma	0,4352	0,3959	0,2792	25,1171	24,5782	12,4029
2	Değer	0,2610	-0,4866	0,1997	12,0460	1,3524	1,5264
	S.Sapma	0,3326	0,3860	0,2546	23,2189	19,4889	11,9326
3	Değer	-0,1243	-0,2705	-0,2366	-2,3113	-22,8240	6,9049
	S.Sapma	0,3289	0,4116	0,2938	24,1439	19,2363	12,1688
4	Değer	-0,3525	0,0880	-0,1933	-19,6660	-30,9160	14,5550
	S.Sapma	0,4268	0,3665	0,3271	21,5580	25,4018	9,4801
5	Değer	0,3832	0,3311	-0,0037	-33,4210	13,6050	12,4620
	S.Sapma	0,4126	0,4058	0,2956	25,0008	24,0808	14,8527
6	Değer	0,1354	-0,4899	-0,2119	2,8750	-3,4262	15,7390
	S.Sapma	0,4105	0,3400	0,2814	21,6881	21,3754	10,4751
7	Değer	0,3551	-0,1860	-0,0450	-4,1684	4,1560	-2,0112
	S.Sapma	0,3929	0,3514	0,2916	20,0178	23,9108	8,5078
8	Değer	0,0379	-0,2554	0,1022	1,7753	1,4003	2,3307
	S.Sapma	0,3865	0,3566	0,2422	21,0294	23,2835	8,4499
9	Değer	0,4067	-0,3980	-0,0815	-0,7830	5,5624	21,1910
	S.Sapma	0,3714	0,4061	0,2998	23,6908	20,9579	11,5704
10	Değer	-0,0619	-0,3034	0,1735	11,6000	-20,9130	0,5812
	S.Sapma	0,4167	0,3475	0,2767	21,3263	22,0118	11,3153



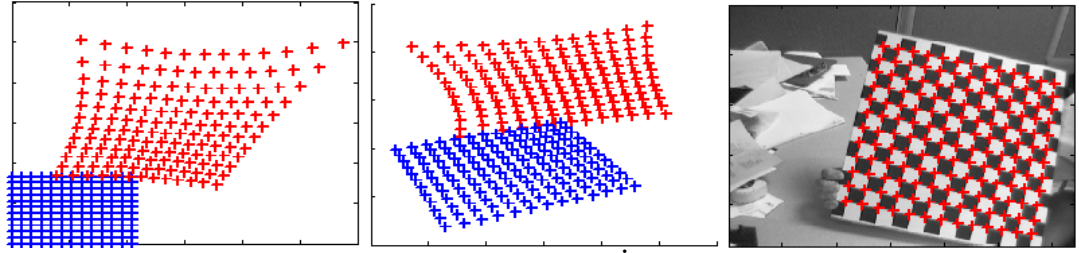
Şekil 4.12. Onaltıncı Görüntü İçin DGA Sonucu.

Tablo 4.11. GA ile Ön Adımsız Hesaplanan İç Parametreler ve Kullanılan Aralıklar.

20 koşmanın en iyisi. Hata değeri:36633 ,standart hata:16984,55				
P_i	Değer	S.Sapma	Alt	Üst
x_p	51,4372	14,9408	-50	50
y_p	-37,7621	16,0664	-10	10
k_1	2,6457E-06	1,6168E-06	1,00E-09	1,00E-05
k_2	3,0151E-11	2,8187E-11	1,00E-15	1,00E-10
k_3	1,8500E-16	2,7695E-16	-1,00E-15	-1,00E-21
p_1	-9,3950E-05	4,5849E-05	-1,00E-04	-1,00E-09
p_2	-1,5701E-05	3,2094E-05	-1,00E-04	-1,00E-09
p_3	5,2180E-05	2,3164E-05	1,00E-10	1,00E-04
f_x	582,0077	17,8224	600	700
f_y	499,5069	30,0636	600	700

Tablo 4.12. GA ile Ön Adımsız Hesaplanan Dış Parametreler.

Görüntü		τ_x	τ_y	τ_z	ω	φ	Θ
1	Değer	0,2333	0,3661	0,5334	30,3729	11,0380	10,9405
	S.Sapma	0,2372	0,2090	0,2817	0,4345	0,6337	1,1582
2	Değer	0,5492	0,3468	0,7219	32,8738	28,9088	12,7728
	S.Sapma	0,2372	0,2090	0,2817	26,0753	38,0242	23,1649
3	Değer	0,6584	0,1434	0,6614	43,3496	36,6039	17,9000
	S.Sapma	0,2628	0,1857	0,1841	9,9538	19,1475	22,4862
4	Değer	0,8664	0,5039	0,6229	22,4833	45,0793	12,3591
	S.Sapma	0,1892	0,3411	0,3128	34,9612	24,8324	33,5277
5	Değer	0,9618	0,2606	0,7260	36,2874	61,3386	18,2996
	S.Sapma	0,2741	0,2143	0,3361	11,0226	55,1982	24,7144
6	Değer	0,5779	0,4883	0,3956	18,3627	35,3242	24,4521
	S.Sapma	0,2670	0,2273	0,1875	14,0825	34,0614	19,0689
7	Değer	0,6939	0,6473	0,5051	16,4771	212,5195	4,9820
	S.Sapma	0,1530	0,2671	0,2751	42,2498	9,6516	24,5822
8	Değer	0,3358	0,1775	0,7682	40,3516	28,3076	22,1439
	S.Sapma	0,2515	0,1791	0,1808	12,6783	58,5351	9,8075
9	Değer	0,8307	0,4824	0,5903	22,7922	40,2091	11,1606
	S.Sapma	0,2320	0,2439	0,1936	49,3380	21,9142	21,4757
10	Değer	0,7451	0,4497	0,6351	28,2056	42,1675	20,6632
	S.Sapma	0,2358	0,1451	0,2137	25,7146	13,5744	9,6773



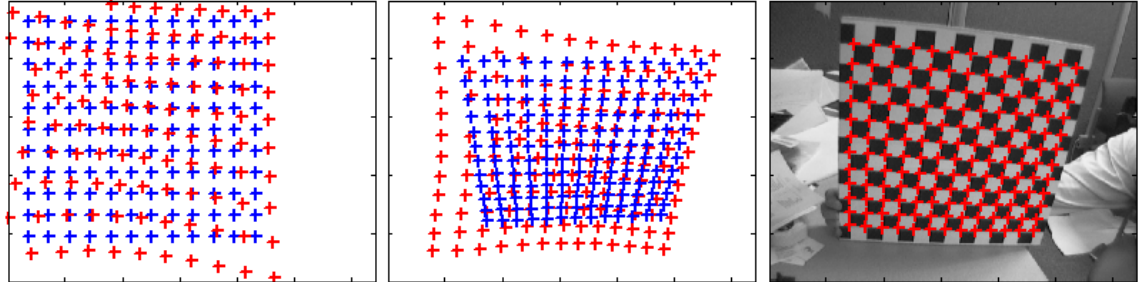
Şekil 4.13. Onaltıncı Görüntü İçin GA Sonucu.

Tablo 4.13. PSO ile Ön Adımsız Hesaplanan İç Parametreler ve Kullanılan Aralıklar.

20 koşmanın en iyisi. Hata değeri: 86654 ,standart hata:55306,06				
P_i	Değer	S. Sapma	Alt	Üst
x_p	12,5630	19,2135	-50	50
y_p	-0,8880	4,4642	-10	10
k_1	6,4100E-06	2,0087E-06	1,00E-09	1,00E-05
k_2	3,5800E-12	1,6605E-11	1,00E-15	1,00E-10
k_3	-7,4100E-16	1,9547E-16	-1,00E-15	-1,00E-21
p_1	-3,4300E-05	1,8996E-05	-1,00E-04	-1,00E-09
p_2	-5,8700E-06	2,0524E-05	-1,00E-04	-1,00E-09
p_3	4,4200E-05	1,6933E-05	1,00E-10	1,00E-04
f_x	600,0000	26,7457	600	700
f_y	611,5800	18,8427	600	700

Tablo 4.14. PSO İle Ön Adımsız Hesaplanan Dış Parametreler.

Görüntü	τ_x	τ_y	τ_z	ω	φ	θ
1 Değer	0,2994	0,3266	0,4963	-28,9920	13,0200	-7,6053
1 S.Sapma	0,3600	0,3251	0,2684	21,2301	21,2314	6,6404
2 Değer	-0,2994	-0,2563	0,1251	5,4172	-23,4500	7,3268
2 S.Sapma	0,2915	0,3347	0,3190	19,2815	18,4830	8,1969
3 Değer	0,2783	0,2410	0,0718	-17,9050	1,3386	3,0700
3 S.Sapma	0,4132	0,2706	0,2062	16,0614	22,7933	7,0873
4 Değer	0,5484	0,5252	-0,2391	-36,7200	22,2690	-16,9120
4 S.Sapma	0,4035	0,3488	0,2448	22,0048	24,3011	7,8712
5 Değer	0,6435	0,1235	-0,0745	-12,7910	30,1650	10,3200
5 S.Sapma	0,3430	0,3497	0,2069	20,5882	19,1450	7,6009
6 Değer	-0,1989	-0,1978	-0,3882	6,3030	-12,6680	-2,9720
6 S.Sapma	0,4121	0,2850	0,2493	17,5007	23,0267	8,7068
7 Değer	0,4922	-0,0790	-0,3655	2,0476	18,7090	-7,3080
7 S.Sapma	0,3548	0,2244	0,3178	12,9625	21,8276	7,0533
8 Değer	-0,0160	-0,5636	0,1860	27,3020	3,4362	7,3484
8 S.Sapma	0,2696	0,3792	0,3187	19,5336	17,2750	7,9961
9 Değer	-0,1634	-0,1400	0,5189	0,6903	-25,1490	16,7410
9 S.Sapma	0,3458	0,2678	0,3217	14,5157	20,2793	10,3863
10 Değer	0,0941	0,3900	0,2169	-17,6460	-9,9752	-6,5562
10 S.Sapma	0,2810	0,2799	0,2990	17,2616	16,1443	8,6238



Şekil 4.14. Onüçüncü Görüntü İçin PSO Sonucu.

Yukarıda sırasıyla ABC, DGA, GA ve PSO için ön adım kullanmaksızın elde edilen sonuçlar verilmiştir. Her optimizasyon algoritması için ayrı ayrı, ilk olarak elde edilen en iyi sonucun iç parametreleri ve paralel koşmalarda elde edilen sonuçlarla olan standart sapması, çalıştırıldığı aralıkla birlikte verilmiştir. İkinci tabloda ise ilk tabloyla aynı koşmada elde edilen ilk on görüntü için dış parametre değerleriyle hemen altında standart sapmaları verilmiştir. Tablonun çok uzun olmaması için her görüntü için elde edilen dış parametreler verilmemiştir. Son olarak ise yirmi görüntü içerisinde en iyi görsel sonuçlara sahip bazı görüntüler için projeksiyon sonuçları gösterilmiştir. Şekillerde sağdan sola doğru ilk görüntü köşe referans görüntü ve homografi ile hesaplanan noktalardır. Hata bu görüntü üzerindeki noktalarla hesaplanmaktadır. Ortadaki görüntübozunmasız dönüklüğe sahip noktaları temsil ederken sağdaki görüntüde belirli açıdan çekilmiş palet resmi ve bu resmin köşe noktaları gösterilmiştir. Bütün algoritmalarda dış parametrelerin hesaplamasında kullanılan aralıklar ise aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4.15. Dış Parametrelerin Eğitim Aralığı.

Aralık	τ_x	τ_y	τ_z	ω	φ	θ
Alt	-1	-1	-1	-60	-60	-20
Üst	1	1	1	60	60	20

4.5.2. Ön Adımda Belirlenen Aralıklar İle Sonuçlar

Yukarıda verilen sonuçlarda da görüldüğü gibi aralıklar bütün görüntülerin parametre değerlerini içerecek büyüklükte seçildiğinde sezgisel algoritmalarla çok verimli

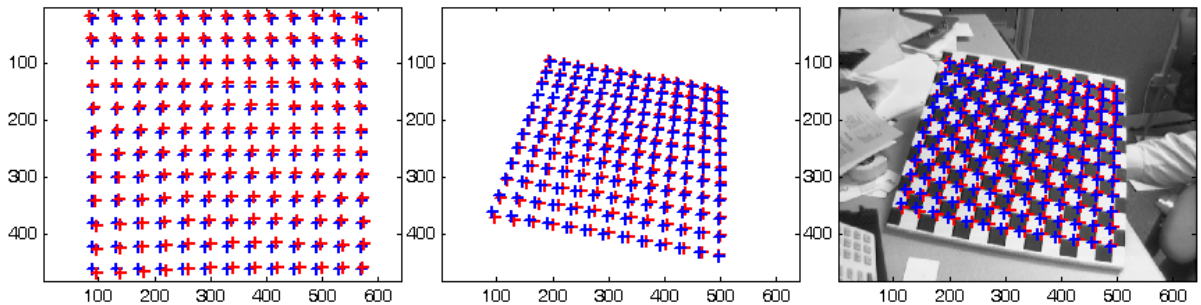
sonuçlar alınmamıştır.Yapılan deneylerde kamera kalibrasyonun da optimizasyon algoritmaları çalışma aralığına oldukça bağımlı olduğu gözlenmiştir. Elde edilen sonuçların geliştirilmesi açısından çalışma aralığının daha iyi belirlenmesi gerekmektedir. Yine tek görüntüyle yapılan testlerde uygun hata değerlerinin elde edilmesi, çoklu görüntüyle çalışmada tek görüntüyle elde edilen sonuçlardan aralık üretme fikrini doğurmuştur.

Aralıkların üretilme mantığı dış parametreler için tek görüntüyle elde edilen sonuca parametrenin hassasiyetine göre küçük bir değer ekleyip çıkartmak(açılar için 10 ötelemeler için 0,1), iç parametreler için ise elde edilen parametrelerin en büyükleri üst sınırları en küçükleri ise alt sınırları belirlemektedir.

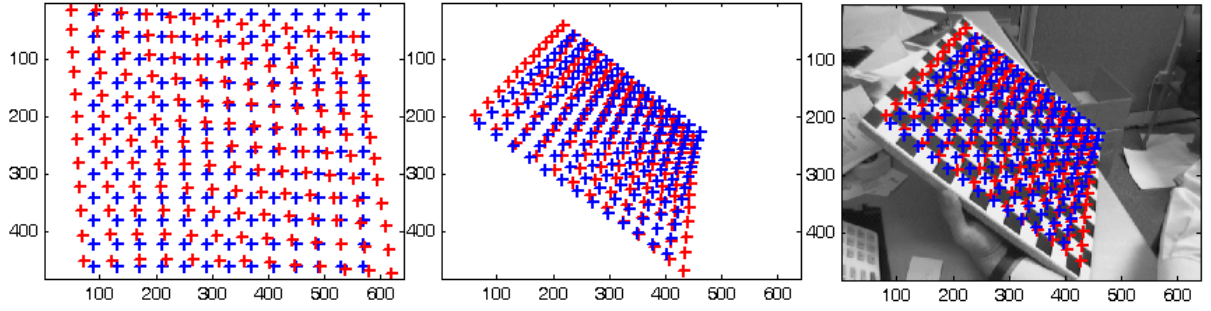
Yapılan deneylerde ön adımla aralık belirleme sistemin performansını artırdığı gözlenmiştir.

Tablo 4.16. ABC ile 25 görüntüden Elde Edilen İç Parametreler.

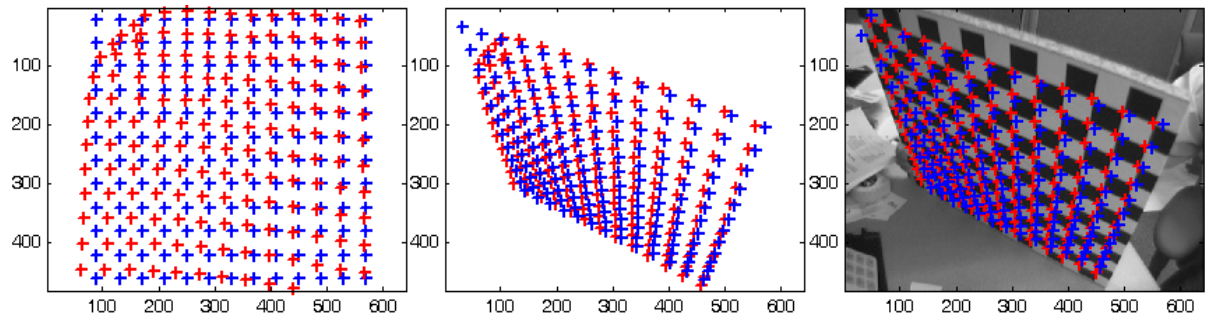
Hata: 15018,9077, Paralel Koşma Sayısı: 10				
P_i	Değer	S. Sapma	Aralık	
			Alt	Üst
x_p	0,1976	3,4074	-50,0000	49,9930
y_p	2,7252	2,0199	-10,0000	10,0000
k_1	9,76E-07	1,25E-06	1,0000E-09	2,8700E-06
k_2	3,45E-11	1,82E-11	4,9500E-15	7,3800E-11
k_3	-5,11E-16	1,74E-16	-1,0000E-15	-1,0000E-21
p_1	-5,14E-06	2,08E-05	-1,0000E-04	-1,0000E-09
p_2	-2,41E-05	2,37E-05	-1,0000E-04	-1,0000E-09
p_3	4,64E-05	2,03E-05	1,0000E-10	1,0000E-04
f_x	633,8860	189,5647	600,0001	699,9998
f_y	654,3528	191,3135	600,0140	700,0000



Şekil 4.15. Ön Adım Aralıklarıyla ABC'nin 3. Görüntüde Sonuçları.



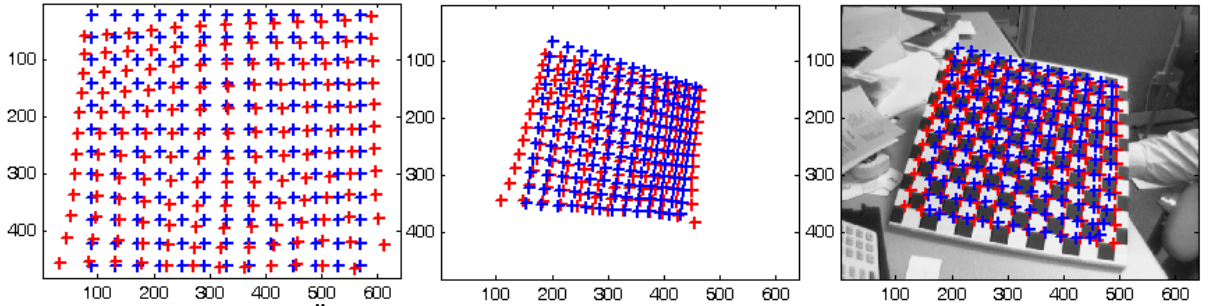
Şekil 4.16.Ön Adım Aralıklarıyla ABC'nin 5. Görüntüde Sonuçları.



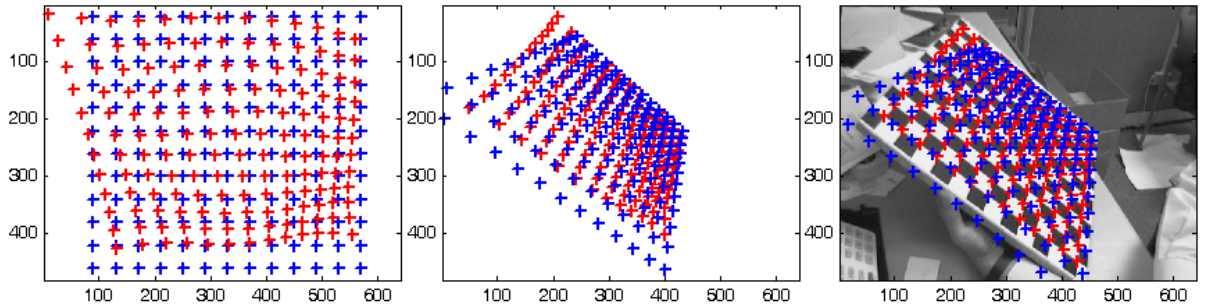
Şekil 4.17.Ön Adım Aralıklarıyla ABC'nin 18. Görüntüde Sonuçları.

Tablo 4.17. DGA ile 25 görüntüden Elde Edilen İç Parametreler.

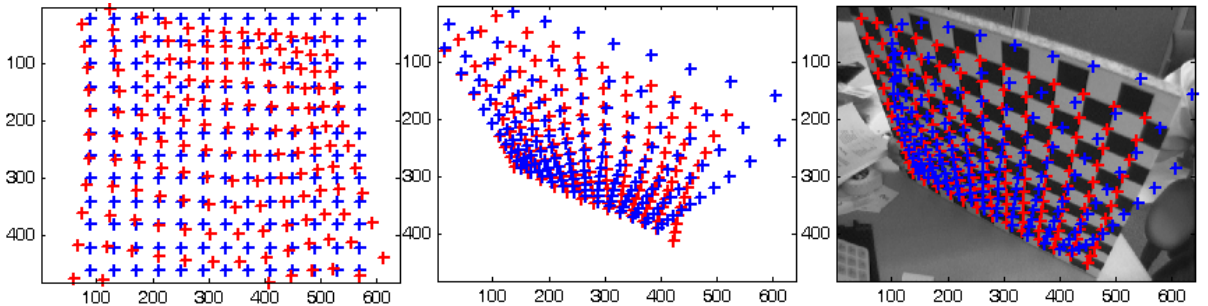
Hata: 17166,8272, Paralel Koşma Sayısı: 10				
P_i	Değer	S.Sapma	Aralık	
			Alt	Üst
x_p	3,4926	0	-205,7801	206,7687
y_p	-5,5450	0	-108,7756	182,7534
k_1	-7,89E-06	0	-9,39E-06	1,31E-05
k_2	1,55E-10	0	-5,43E-11	2,24E-10
k_3	-4,55E-16	0	-1,10E-15	4,17E-16
p_1	-2,77E-04	0	-1,56E-04	3,42E-04
p_2	2,98E-04	0	-3,73E-05	8,96E-04
p_3	-6,69E-06	0	-6,47E-05	1,67E-05
f_x	261,4089	0	262,2019	1229,8092
f_y	278,1926	0	330,0265	911,7252



Şekil 4.18. Ön Adım Aralıklarıyla DGA'nın 3. Görüntüde Sonuçları.



Şekil 4.19. Ön Adım Aralıklarıyla DGA'nın 5. Görüntüde Sonuçları.

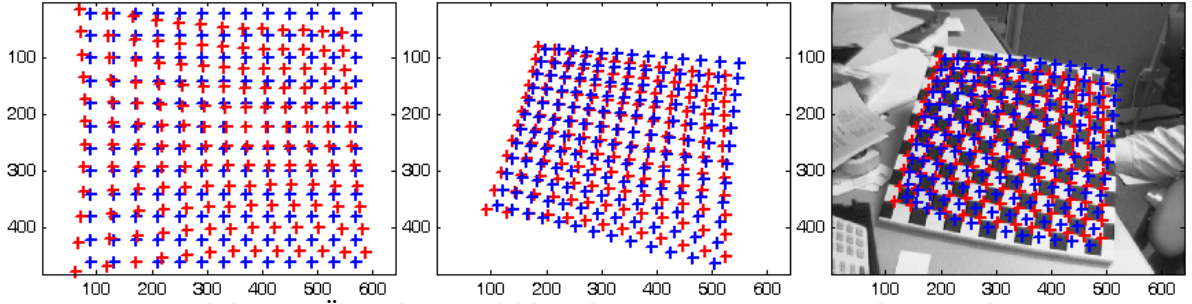


Şekil 4.20.Ön Adım Aralıklarıyla DGA'nın 18. Görüntüde Sonuçları.

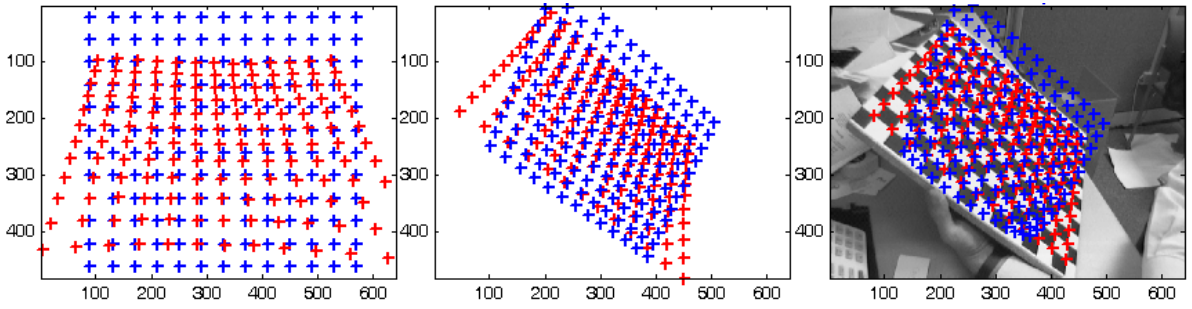
Tablo 4.18. GA ile 25 görüntüden Elde Edilen İç Parametreler.

Hata: 27425.3087, Paralel Koşma Sayısı: 10

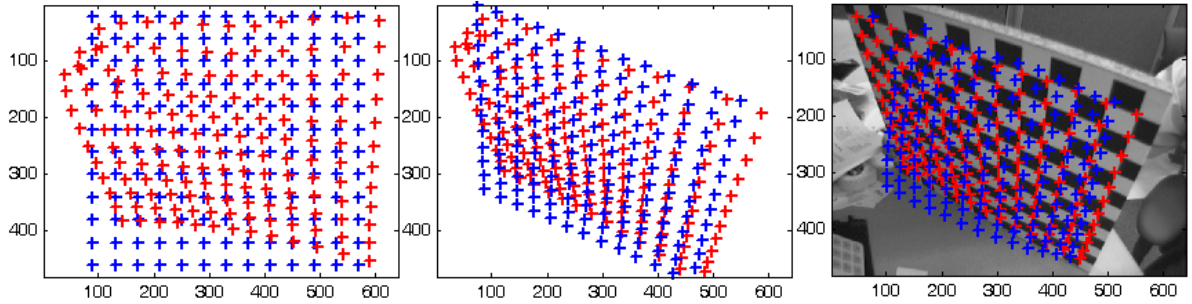
P_i	Değer	Standart Sapma	Aralık	
			Alt	Üst
x_p	0,0283	18,5451	-47,5679	171,7685
y_p	14,7278	25,4152	-128,4685	125,3336
k_1	1,15E-06	4,31E-06	-4,7858E-06	5,0711E-05
k_2	-1,34E-10	1,37E-10	-2,0086E-10	9,9357E-11
k_3	1,31E-15	1,06E-15	-1,7575E-15	3,1907E-15
p_1	1,48E-05	5,96E-05	-2,9603E-04	5,4309E-04
p_2	5,75E-05	2,02E-04	-5,5474E-04	3,9104E-04
p_3	-4,00E-05	3,01E-05	-1,4431E-04	1,3962E-04
f_x	596,5917	146,7433	303,8109	1827,7542
f_y	833,4855	149,0719	285,8401	3715,6202



Şekil 4.21. Ön Adım Aralıklarıyla GA'nin 3. Görüntüde Sonuçları.



Şekil 4.22. Ön Adım Aralıklarıyla GA'nin 5. Görüntüde Sonuçları.

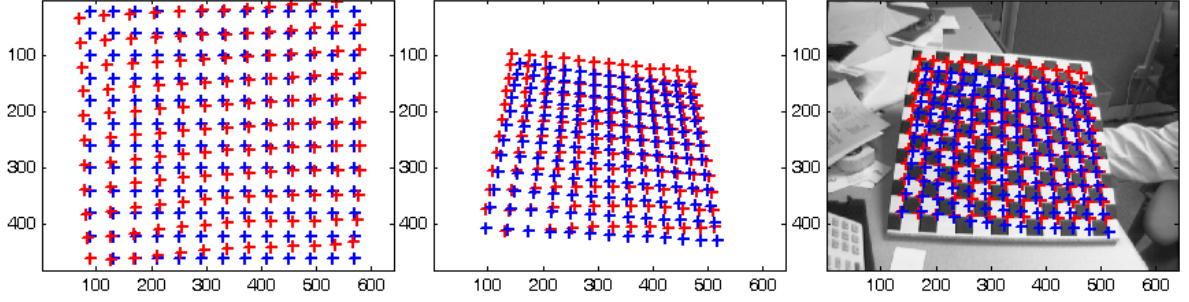


Şekil 4.23. Ön Adım Aralıklarıyla GA'nin 18. Görüntüde Sonuçları.

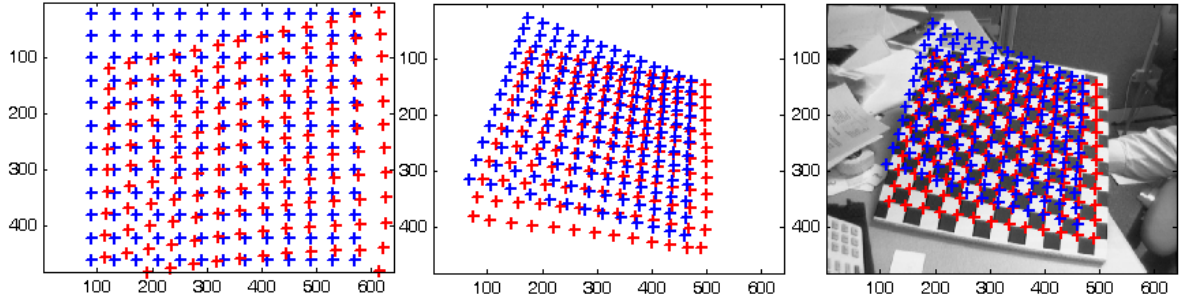
Tablo 4.19. PSO ile 25 görüntüden Elde Edilen İç Parametreler.

Hata: 27425.3087, Paralel Koşma Sayısı: 10

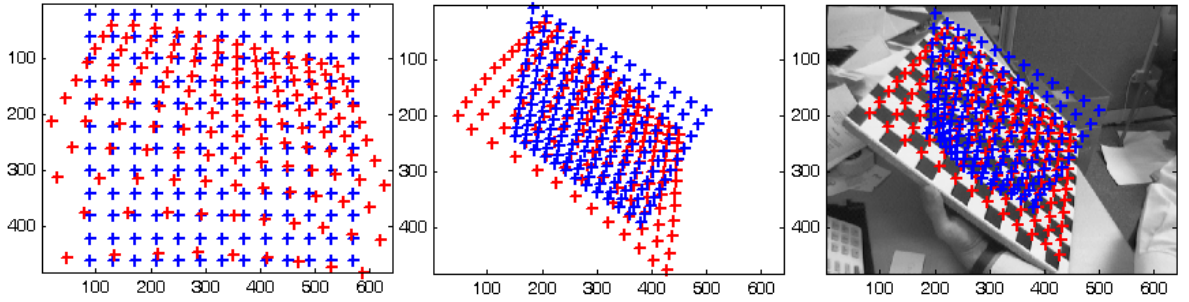
P_i	Değer	Standart Sapma	Aralık	
			Alt	Üst
x_p	1,5300	15,5287	-50,0000	49,9757
y_p	2,7383	4,1444	-10,0000	10,0000
k_1	7,26E-07	1,38E-06	1,0000E-09	7,5810E-06
k_2	5,89E-11	1,68E-11	1,0000E-15	9,9984E-11
k_3	-8,97E-16	1,64E-16	-9,9778E-16	-1,0000E-21
p_1	-2,73E-05	2,34E-05	-1,0000E-04	-1,0000E-09
p_2	-4,46E-05	1,67E-05	-1,0000E-04	-1,0000E-09
p_3	3,40E-05	2,18E-05	1,0000E-10	1,0000E-04
f_x	602,0000	16,1107	600,0000	699,9410
f_y	615,6627	23,0576	600,0000	700,0000



Şekil 4.24. Ön Adım Aralıklarıyla PSO'nun 2. Görüntüde Sonuçları.



Şekil 4.25. Ön Adım Aralıklarıyla PSO'nun 3. Görüntüde Sonuçları.



Şekil 4.26. Ön Adım Aralıklarıyla PSO'nun 5. Görüntüde Sonuçları.

Tablo 4.20. Kullanılan Algoritmaların 3., 5. ve 18. Görüntü İçin Hesapladıkları Dış Parametreler.

Görüntü Sayısı: 25 , Parçacık Sayısı:50, Paralel Koşma Sayısı: 10								
Algoritma		τ_x	τ_y	τ_z	ω	ϕ	θ	Uygunluk
ABC	3.Görüntü	Değer	0,2319	0,5307	0,5380	-32,5191	13,3452	5,4787
		S.Sapma	0,0815	0,0103	0,0271	0,5986	4,7378	4,1475
	5.Görüntü	Değer	0,5394	0,5687	0,7122	-42,0722	34,7706	19,1942
		S.Sapma	0,4608	0,4517	0,0216	33,2916	27,3960	4,0822
	18.Görüntü	Değer	-0,5860	-0,7113	0,4867	50,6518	-28,8643	1,0177
		S.Sapma	0,3104	0,3955	0,0263	27,9140	17,9103	1,8940
DGA	3.Görüntü	Değer	0,2281	0,0916	0,7689	-0,2350	13,8319	9,2097
		S.Sapma	0	0	0	0	0	0
	5.Görüntü	Değer	0,3448	0,6995	0,7375	-32,7347	29,6771	24,2780
		S.Sapma	0	0	0	0	0	0
	18.Görüntü	Değer	-0,6308	-0,7634	0,5649	47,8525	-18,5526	8,9690
		S.Sapma	0	0	0	0	0	0
DE	3.Görüntü	Değer	-0,6062	0,4368	0,5522	-33,5545	-34,9997	24,3040
		S.Sapma	0,4300	0,3074	0,1089	17,0556	23,8229	9,4055
	5.Görüntü	Değer	-0,3649	-0,0091	0,7192	1,6599	-17,1605	26,8795
		S.Sapma	0,3707	0,3867	0,1158	23,4026	19,0514	8,4187
	18.Görüntü	Değer	0,3554	0,3846	0,4486	-28,1542	25,6007	2,7042
		S.Sapma	0,2955	0,4452	0,1240	168,4655	16,9507	8,4956
PSO	3.Görüntü	Değer	0,1154	0,4199	0,4275	-25,5140	6,3941	10,8504
		S.Sapma	0,0595	0,1853	0,0535	10,4921	6,6993	3,4198
	5.Görüntü	Değer	-0,4908	0,1690	-0,9000	-9,9197	-10,0000	14,7504
		S.Sapma	0,6587	0,4725	0,8504	33,4861	28,6028	8,7214
	18.Görüntü	Değer	-0,2276	0,0090	-0,9991	-1,2924	-9,9471	1,0033
		S.Sapma	0,4723	0,5162	0,6753	33,4742	19,6399	9,7660

Tablo 4.21 ‘de kullanılan algoritmaların Luca Lucchese metodunda ürettikleri uygunluk değerleri karşılaştırma amaçlı olarak verilmiştir.

Tablo 4.21 Algoritma Uygunluk Değerlerinin Toplu Gösterimi

	Tek Görüntü	Çok Görüntü	Ön Adımlı
ABC	0,116	26469	15018
DGA	0,0594	24744	17166
GA	42,5	36633	27425
PSO	24,3	86654	141987

4.6. Kısıtlamalı Optimizasyon

Kalibrasyon parametrelerinin bazıları arasında özel ilişkiler tanımlamak mümkündür. Örneğin x ve y yönündeki etkin odak uzaklığı bize, pikselin en ve boy oranı olan aspectratio 'yu verir.İdeal kamerada bu oran birdir ancak gerçek kameralarda genellikle birden farklı, bire çok yakın bir sayıdır.

Deb tarafından yayınlanan kısıtlama yöntemi bu aşamada kullanılmıştır[47]. Kısıtlamalı optimizasyonda,greedyselection denilen, uygunluk değeri daha iyi olan bireyin bir sonraki jenerasyona aktarılması mantığı farklı işlenmektedir. Burada ilk önce çözüm kısıtlar yönünden irdelenir. İki çözümden hangisinin seçileceğine aşağıdaki üç durumla karar verilmektedir.

1. Kısıdı sağlayan birey, kısıdı sağlamayan bireye tercih edilir.
2. Kısıdı sağlayan iki çözüm içerisinde uygunluk değeri iyi olan birey seçilir.
3. Kısıdı sağlamayan iki birey arasında kısıt şartı daha iyi olan birey tercih edilir.

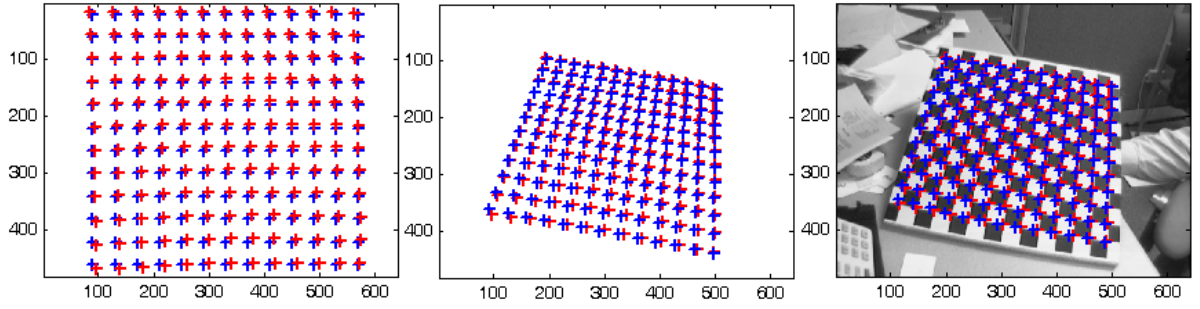
Bu çalışmada uygulanan kısıt ise aspectratio üzerine aşağıdaki eşitlikle oluşturulmuştur.

$$k = 1 - \frac{f_x}{f_y}$$

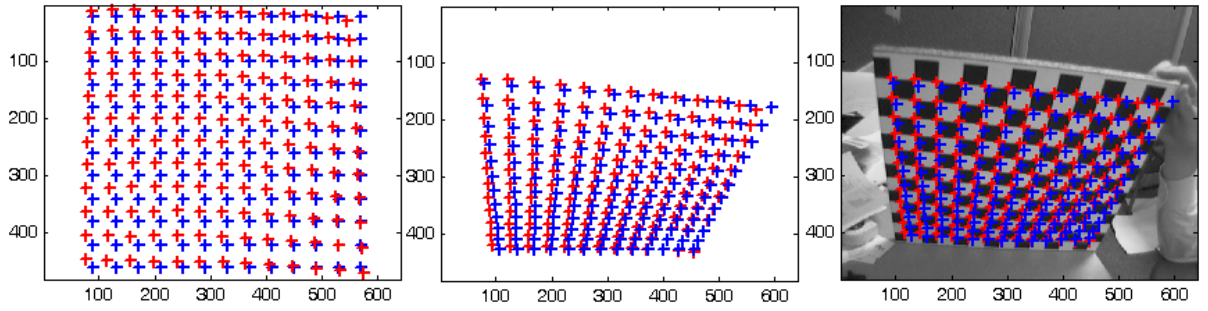
4.13

Üretilen çözümün f_x ve f_y oranının bire olan uzaklığı kısıt derecesini bize vermektedir. Bir bireyin kısıt değeri 0,001 'den büyük ise bu birey kısıdı sağlamayan birey olarak isimlendirilir.

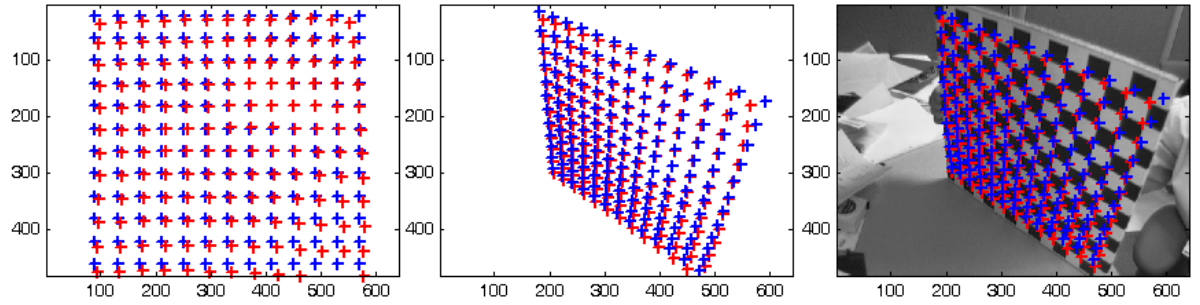
Uygulanan kısıtla birlikte elde edilen deney sonuçlarından da görülebildiği gibi sonuçta iyileşme olmuştur. Bu kısıt ABC algoritması ile birlikte denenmiştir.



Şekil 4.27. Kısıtlama Kullanarak ABC'nin 3. Görüntüde Sonuçları.



Şekil 4.28. Kısıtlama Kullanarak ABC'nin 6. Görüntüde Sonuçları.



Şekil 4.29. Kısıtlama Kullanarak ABC'nin 24. Görüntüde Sonuçları.

Tablo 4.22. Kısıtlama Kullanarak ABC İle Hesaplanan İç Parametreler.

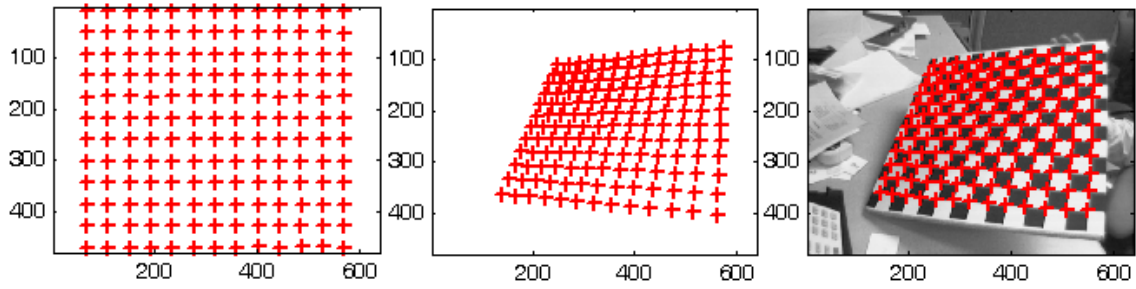
Hata: 12921.297, Paralel Koşma Sayısı: 10				
P_i	Değer	Standart Sapma	Aralık	
			Alt	Üst
x_p	-6,8466	0	-50,0000	49,9930
y_p	1,1187	0	-10,0000	10,0000
k_1	1,04E-06	0	1,0000E-09	2,8683E-06
k_2	2,12E-11	0	4,9450E-15	7,3808E-11
k_3	-3,97E-16	0	-1,0000E-15	-1,0000E-21
p_1	-3,65E-05	0	-9,9977E-05	-1,0000E-09
p_2	-6,22E-05	0	-9,9961E-05	-1,0000E-09
p_3	6,43E-06	0	1,0000E-10	1,0000E-04
f_x	644,8474	0	600,0001	699,9998
f_y	623,1758	0	600,0140	700,0000

Yukarıdaki tabloda kısıtlama kullanılarak elde edilen iç parametreler verilmiştir. Bu işlemlerde de ön adımla belirlenen çalışma aralığı kullanılmıştır. Aşağıdaki tabloda ise yukarıda projeksiyonu resmedilen görüntülerin dış parametreleri verilmiştir.

Tablo 4.23. Kısıtlama Kullanarak ABC İle Hesaplanan 3.6. ve 24. Görüntüler İçin Dış Parametreler.

Görüntü Sayısı: 25 , Parçacık Sayısı:50, Paralel Koşma Sayısı: 10									
Algoritma		τ_x	τ_y	τ_z	ω	ϕ	θ	uygunluk	
ABC	3.Görüntü	Değer	0,0737	0,5277	0,5117	-32,1825	3,8273	9,9434	1292,1297
		S.Sapma	0	0	0	0	0	0	
	5.Görüntü	Değer	0,0876	-0,8060	0,3928	41,6274	5,6779	9,1905	
		S.Sapma	0	0	0	0	0	0	
	18.Görüntü	Değer	-0,6176	-0,4856	0,584584	37,58577	-40,0073	3,426867	
		S.Sapma	0	0	0	0	0	0	

Son olarak Şekil 4.30 ‘deLucchese tarafından dördüncü görüntü için verilen parametreler ve bu parametrelerle yapılan projeksiyon verilmiştir.



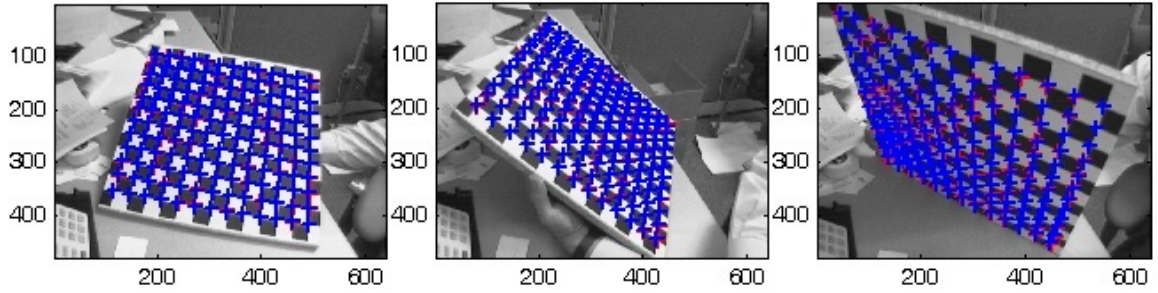
Şekil 4.30.Lucchese 'ninParametreleri ile Projeksiyon.

4.24.Lucchese'nin Sonuçları.

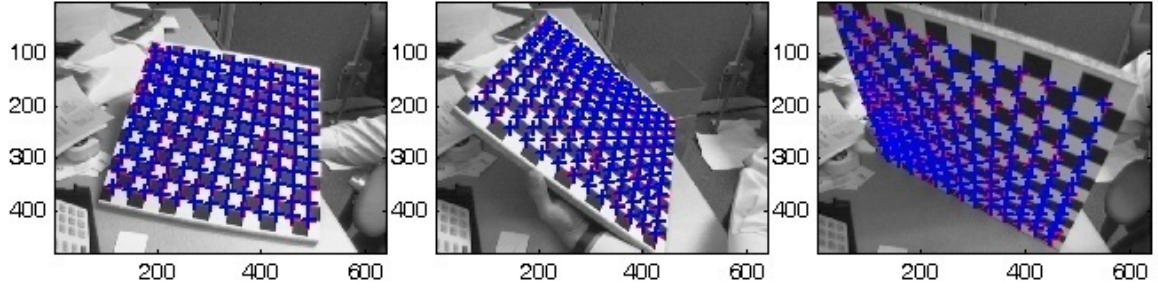
P_i	Değer	Standart Sapma
x_p	-16,4800	0,94
y_p	-2,9000	0,97
k_1	5,71E-07	2,85E-08
k_2	6,05E-13	6,56E-13
k_3	-2,06E-18	4,58E-18
p_1	-6,34E-07	5,23E-07
p_2	-1,06E-06	7,08E-07
p_3	1,37E-06	1,04E-08
f_x	656,6600	0,71
f_y	657,8300	0,57

4.7. DLT İçin Sonuçlar

DLT metodunda yapılan denemeler iki grup halinde incelenebilir. İlk olarak DLT lineer haliyle çözülmüştür. Bu işlemin tek resme uygulanıp üretilen iyi sonuçlardan elde edilecek aralıklarda çok görüntüyle eğitim yapılması ilk grubu oluştururken, ikinci grupta ise kamera parametrelerinden 2.bölüm de verilen eşitlikler yardımıyla DLT metoduna dönülerek çözüm yapılmaya çalışılmıştır.



Şekil 4.31. ABC ile 3.,5. ve 18. Görüntü için DLT Eğitimi Sonucu.



Şekil 4.32. DGA ile 3.,5. ve 18. Görüntü için DLT Eğitimi Sonucu.

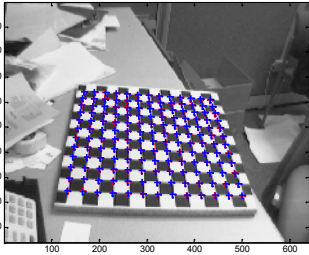
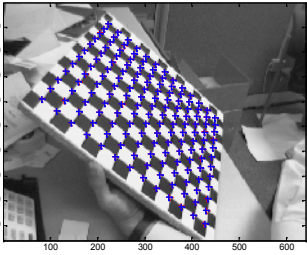
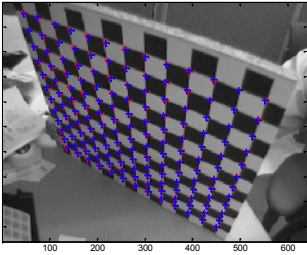
Yukarıda DGA ve ABC algoritmalarının 3, 5 ve 18. görüntüler için elde edilmiş sonuçlar sağdan sola doğru gösterilmiştir. DLT 'de görüntüler için parametreler bağımsız olduğundan ve onbirinci parametre diğer parametreler vasıtasıyla hesaplanabildiğinden 20 görüntü için 200 tane parametre oluşacaktır. Bu parametrelerin tablo gösterimi çok uzun olacağından aşağıdaki tabloda kullanılan algoritmalarla elde edilen hata değerleri ve paralel koşmalar sırasında elde edilen standart hata verilmiştir. Algoritmalar bu haliyle çalışırken kullanacakları aralıkları her görüntü tek başına eğitilerek bulunan değerlerden çıkarılmaktadır. Dolayısıyla 200 farklı aralık kullanılmaktadır.

Tablo 4.25. Algoritmaların Dlt İçin Sonuçları.

20 Görüntü, 20 Paralel Koşma		
	Uygunluk	S.Hata
ABC	25,7630	0,7749
DGA	26,6220	2,6711
GA	45,558	11.746
PSO	30,4190	7,9497

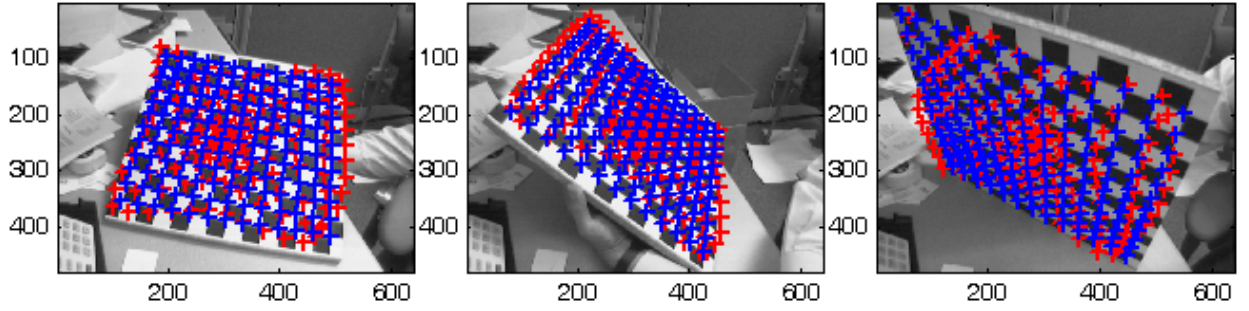
İç ve dış kamera parametreleri ile yapılan deneme sonuçları ise aşağıdaki tablo ve şekiller ile verilmiştir.

Tablo 4.26. DGA İle Kamera Parametreleri Kullanarak DLT'den Elde Edilen Sonuçlar.

1.Görüntü	2.Görüntü	3.Görüntü
		
Hata=0,3013	Hata=0,0164	Hata=1,7972

Yukarıda tablo halinde verilen sonuçlar DGA kullanılarak elde edilmiş ve tek görüntü ile çalıştırılmıştır. Homografigörüntülerinin altında çalışmaya ait uygunluk değeri olan hata verisi gösterilmiştir.

Şekil 4.33 'de verilen sonuçlar çoklu görüntüyle çalışılmış DLT sonuçlarıdır. Burada da yine iç ve dış kamera parametreleri kullanılmıştır.



Şekil 4.33. DGA İle Kamera Parametreleri Kullanarak 20 Görüntüyle DLT'den Elde Edilen Sonuçlar.

Tablo 4.27. DGA ile DLT için Üretilen İç Parametreler.

Hata=13006		
P_i	Değer	Standart Sapma
x_p	-18,4940	0,6306
y_p	-8,5753	0,8651
k_1	7,14E-05	2,57E-07
k_2	-1,40E-09	9,21E-12
k_3	7,97E-15	7,06E-17
p_1	2,70E-06	1,95E-06
p_2	-1,17E-06	1,26E-06
p_3	1,05E-02	0,0095
f_x	0,6914	0,4128
f_y	0,2296	0,3127

5. BÖLÜM

SONUÇ

Bu tez çalışmasında değişik kalibrasyon metotları incelenmiş ve ABC, DGA, GA ve PSO algoritmaları ile çözülmüştür.

ABC, DGA, GA ve PSO algoritmaları sezgisel oldukları için ne tür bir sonuç elde edileceği tahmin edilememektedir. Tek görüntü için elde edilen sonuçlar oldukça iyi olmasına rağmen gerçek problemi temsil eden çok görüntülü çalışmalarda sonuçların aynı kalitede olmadığı gözlenmiştir. Bazı koşullarda iyi sonuç alınabilmesine rağmen kamera kalibrasyonunda kararlı sonuç gözlenmemiştir. Bunun sonucu olarak da klasik algoritma olan LevenbergMarquardt ile elde edilen başarı sezgisel algoritmada elde edilememiştir.

Sezgisel algoritmaların sonuçlarını iç ve dış parametreler olarak farklı incelediğimiz zaman, dış parametrelerin üretilmesinde iç parametrelerin üretilmesine göre daha etkili olduğu söylenilebilir. İç parametrelerden özellikle distorsiyon katsayılarının kestiriminde yanlış sonuçlar alınmaktadır.

Yapılan deneylerden elde edilen gözlemlerde, sezgisel algoritmalar kalibrasyon probleminde çalışma aralığına oldukça bağımlı bir tutum sergilemektedir. Bu nedenle geliştirilen ön işlemler ile sistem başarısı iyileştirilmeye çalışılmıştır. Tek görüntüyle elde edilen tatmin edici sonuçlardan çıkartılan aralıklar çok görüntülü çalışmada kullanılarak deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde sonuçta iyileşme gözlenmekle birlikte klasik algoritmaların sonuçları ile karşılaştırıldığı zaman, verimliliğin istenilen seviyeye ulaşmadığı görülmüştür.

Kamera parametrelerinin birbirine göre olan bazı kısıtları problem çözümünde kullanarak sistem başarısı artırılmaya çalışılmıştır. Elde edilen bazı sonuçlarda

aspectratio oranının 1 den çok uzak olduğu gözlenmiştir. Bu oranı düşürmek için f_x ve f_y arasında kısıt geliştirilmiştir. Sistem bu haliyle çalıştırıldığında daha olumlu sonuçların elde edildiği gözlenmiştir.

Sistem başarısını artırmak için parametreler arasında oluşturulacak farklı kısıtlamalar ile daha iyi sonuçlar elde edilir. Elde edilen sonuçlar, sezgisel algoritmaların kamera kalibrasyonunda türeve dayalı klasik optimizasyon algoritmalarına göre başarısının karşılaştırılması açısından önemlidir.

Kullanılan optimizasyon algoritmalarının kalibrasyon probleminde performansına göre sıraladığımızda DGA ve ABC algoritmaları GA ve PSO 'ya göre daha iyi sonuç alındığı gözlenmiştir. Tek görüntü ile çalışıldığında DGA ile en iyi maliyet değerini üretirken çok görüntülü çalışmalarda en iyi sonucu ABC vermiştir.

KAYNAKLAR

1. Beardley, P., Murray, D., Zisserman, Camera calibration using multiple images. A. Proc. European Conf Computer Vision, 312-320, 1992.
2. Faugeras, Toscani, G. , The calibration problem for stereo. Proc. IEEE Conf: Computer Vision and Pattern Recognition, 15-20, 1986.
3. Gorsky, W., Tamburino, L., A Unified Approach to the Linear Camera Calibration Model. Proc. İnt. Conf. Computer Vision, 511-515, 1987.
4. Gremban, K., Thorpe, C., Kanade,T. , Geometric camera calibration using systems of linear equations. IEEE Conference on Robotics and Automation, 562-567, 1988.
5. Penna, M., Determining camera calibration parameters from the perspective projection of a quadrilateral. Pattern Recognition, 24(6), 1991.
6. Sutherland, I., Three-dimensional data input by tablet. Proceedings of the IEEE, 1974.
7. Zhang, Y., Ji, Q. Camera Calibration With Genetic Algorithms. in International Conference on Robotics & Automation. Seoul, Korea, IEEE, 2001.
8. Lucchese, L., Geometric Calibration of digital cameras through multi-view rectification. Image and Vision Computing, 23,517-539, 2005.
9. Tsai, R.Y., A versatile camera calibration technique for high accuracy 3d machine vision metrology using off the shelf tv cameras and lenses. IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-3(4), 323-344, 1987.
10. Weng J., C., P., Herniou, M., Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. IEEE Transaction of Pattern Analysis and Machine Intelligence, 10(14), 965-980,1992.
11. Abdel-Aziz, Y.I., Karara, M., Direct Linear Transformation From Comparator Coordinates Into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry.

American Society of Photogrammetry Symposium on Close-Range Photogrammetry, 420-475.

12. Lucchese, L., Estimating the Pose and Focal Length of a Camera from the Perspective Projection of a Planar Calibration Plate, in School of Electrical Engineering and Computer Science, Oregon State University: Corvallis.
13. Lucchese, L., Geometric Calibration of Digital Cameras. Part I: Camera Model, Subpixel Feature Extraction and Algorithm Initialization, in School of Electrical Engineering and Computer Science, Oregon State University: Corvallis.
14. Lucchese, L., Geometric Calibration of Digital Cameras. Part II: Internal and External Geometry From Multi-View Alignment, in School of Electrical Engineering and Computer Science, Oregon State University: Corvallis.
15. Lucchese, L., Sanjit K. Mitra, Using Saddle Points For Subpixel Feature Detection In Camera Calibration Target. IEEE, 191-195, 2002.
16. Lucchese, L., Closed-Form Pose Estimation From Metric Rectification Of Coplanar Points. IEEE Proc.-Vis. Image Signal Processing, 153(3), 364-378, 2006.
17. Zhang, Y., A Flexible New Technique for Camera Calibration M. Research, Editor., Microsoft Corporation: Redmond. 1-19, 1998.
18. Abellard, A., Bouchouicha, M., Khelifa, M.B., A Genetic Algorithm Application to Stereo Calibration. Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2005.
19. Bourhooicha, M., Kbelifa, M.B., Puceh, W., A Non-Linear Camera Calibration with Genetic Algoritm. IEEE, 189-192, 2003.
20. Guermeur, P., Louchet, J., An Evolutionary Algorithm for Camera Calibration., laboratoire LEI: Paris, France, 2000.
21. Roberts, M., Naftel, A. J. , A Genetic Algorithm Approach to Camera Calibration in 3D Machine Vision. IEEE, 1211-1215, 1994.

22. Bouguet, J.Y. Camera Calibration Toolbox for Matlab. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html , 2001.
23. Forsyth D. A., P.J., Computer vision—a modern approach. Prentice Hall, 2002.
24. Hartley R. , Z.A., Multiple View Geometry in Computer Vision., UK: Cambridge University Press, 2003.
25. Trucco, E., Verri, A., Introductory Techniques for 3-D Computer Vision. 2000.
26. Atkinson, K.B., Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Departman of Geometric Engineering University College London: Whittles Publishing, 2001.
27. Tordoff, B., Active Control of Zoom for Computer Vision, ed. R.R.G.D.o.E. Science. University of Oxford, 2002.
28. Computer Vision Demonstration Website http://users.ecs.soton.ac.uk/msn/book/new_demo/corners/., 2005
29. Schmid, C., Morn, R. Bauckhage, C., Evaluation of Interest Point Detectors. International Journal of Computer Vision, 37(2), 151-172, 2000.
30. Derpanis, K.G., The Horris Corner Detector. 2004.
31. Yılmaztürk, F., Yapı Elemanlarının Dinamik Testlerine Yer Değiştirmelerin İzlenebilmesi İçin Videogrametrik Bir Sistem Tasarımı, in Fen Bilimleri Enstitüsü., İstanbul Teknik Üniversitesi: İSTANBUL, 2008
32. Karaboga, D., An Idea Based On Honey Bee Swarm For Numerical Optimization, in Engineering Faculty, Computer Engineering Department., Erciyes University, 2005.
33. Karaboga D. , B.A.B., A Powerful And Efficient Algorithm For Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony (Abc) Algorithm. Journal of Global Optimization,. 39(3), 459-171, 2006.

34. Karaboga D. , B.A.B., Artificial Bee Colony Algorithm on Training Artificial Neural Networks. Signal Processing and Communications Applications, SIU 2007(IEEE 15th), 1-4, 2007.
35. Karaboga D., B.A.B., On The Performance Of Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm. Applied Soft Computing, 8(1), 687-697, 2008.
36. Karaboğa D., B.B., Artificial Bee Colony (ABC) Optimization Algorithm for Solving Constrained Optimization Problems. Advances in Soft Computing: Foundations of Fuzzy Logic and Soft Computing, 4529/2007(Springer- Verlag), 789-798, 2007..
37. Storn, R., Price, K., Differential Evolution: A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces, in International Computer Science Institute. Berkeley,1995.
38. Karaboga, D., Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları. Vol. 38. 2004.
39. Y.C Lin , H.K.S., Wang F.S A Mixed-Coding Scheme of Evolutionary Algorithms to Solve Mixed-Integer Nonlinear Programming Problems. Computers and Mathematics with Applications, 47, 1295-1307, 2004..
40. Keskintürk, T., Diferansiyel Gelişim Algoritması. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(5), 85-96, 2006..
41. Storn, R. Differential Evolution <http://www.icsi.berkeley.edu/~storn/code.html>., 2001
42. Holland , J.H., Adaptation in Natural and Artificial System, in University of Michigan Press., MI, 1975.
43. Reynolds, C.W., Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model. Computer Graphics, 21(4), 25-34, 1987..
44. Heppner, F.D., R.W, A Stochastic Nonlinear Model for Coordinated Bird Flocks. The Ubiquity of Chaos., Washington: AAAS Publications, 1990.

45. Kennedy, J., Eberhart, R., Purdue School of Engineering and Technology. Particle Swarm Optimization: Washington, Indianapolis, 1995.
46. Xiaohui, H. Particle Swarm Optimization.
<http://www.swarmintelligence.org/index.php>.
47. Deb, K., Goldberg, D.E, A Comparision of Selection Schemes Used in Genetic Algorithm G.J.E. Rawlins, Editor. 69-93, 1991..

ÖZGEÇMİŞ

Emre Bendeş 1984 yılında Karaman’da doğdu. 2001 yılında Aydınlikevler Lisesi’nden mezun oldu ve aynı yıl Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünü kazandı. 2006 yılında lisans öğrenimini tamamladı ve Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2008 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak atandı ve halen bu görevine devam etmektedir.

Adres:O.Kavuncu M. A.G.Ayhan Bul

Eras Sit. No:60/11

Melikgazi / KAYSERİ

E-posta: ebendes@erciyes.edu.tr