

PİKSEL-ALTI DOĞRULUKLU DİJİTAL GÖRÜNTÜ EŞLEŞTİRME TEKNİKLERİ VE FOTOGRAMETİK APLİKASYONLARI

Gürcan Büyüksalih¹

ÖZET :

Yıllarca, görüntü eşleştirme teknikleri stereo-korelasyon ve uzaktan algılanmış görüntülerin sınıflandırılmasında kullanılmıştır. 1980'li yıllarda görüntüler üzerindeki hedeflerin yüksek doğrulukla koordinatlarının ölçümü için bazı araştırmalar yapılmıştır. Fakat, son yıllarda, dijital fotogrametrimin gelişmesiyle dijital formdaki görüntüler üzerinde çerçeve işaretleri, yer kontrol noktaları ve kalibrasyon levhası işaretleri gibi hedeflerin otomatik görüntü eşleştirme teknikleriyle ölçümü iyi bilinen ve çok kullanılan bir proses halini almaya başlamıştır. Bunda başlıca sebep, sağladıkları yüksek hız ve doğruluğun yanısıra gerektirdikleri minimum operatör emeğidir. Eşleştirme metodları sayesinde, bütün işlemlerin programlar altında gizlendiği dijital fotogrametri aplikasyonlarında ana ve en zor aşama olan ortak alanların belirlenip stereomodelin yaratılması adımı operatörün görsel aktivitelerine dayanan manüel proses otomatik hale getirilmektedir.

1. GİRİŞ

Fotogrametrik stereodeğerlendirme aletinde operatörün yerine getirdiği ana işlevlerden birisi stereoskopik görüş olayıdır. Bu işlemde, operatör konum ve yükseklik ölçümlerini yapabilmek için bindirmeli fotoğraflar üzerinde karşılıklı görüntüleri eşleştirir. Fotogrametri dünyası tarafından çok iyi bilinen bu manüel metoda alternatif yöntem, ya analog (aletsel) ya da analitik (çözümsel) yaklaşımlar kullanılarak aynı objenin çok sayıda görüntüsünden ortak görüntü niteliklerini tanıyan teknik olan otomatik görüntü eşleştirmedir. Bu teknik, bindirmeli iki görüntünün ortak alanlarını eşleştirmek için kullanılabilceği gibi, kalıp (template) hedef ve tek bir görüntü kullanılarak nokta, çizgi veya işaretli hedefleri bulan ve konumlarını ölçen yöntemleri kapsayacak şekilde genişletilebilir. Görüntü eşleştirme tekniğinden bilgisayar vizyon, mikrodalga radar ve iletişim, bilgisayar destekli tasarım, bilgisayar destekli üretim, kalite kontrol, robot yönlendirme gibi çok değişik alanlarda yoğun şekilde yararlanılmaktadır. Fotogrametride ise özellikle dijital arazi modeli oluşturma amacıyla fotoğraflanmış objelerden (esasen yerin yüzeyi) üç boyutlu bilgi (x-paralaksları) veya ortofoto üretme gibi ana amaçları gerçekleştirmede kullanılmaktadır. Bütün bunlara ek olarak, nokta hedeflerin, çerçeve işaretlerinin, yer kontrol noktalarının

¹ Yard.Doç.Dr (ZKÜ)

ve diğer çeşit görüntü niteliklerinin otomatik ölçümü işlemleri de görüntü eşleştirme teknikleriyle gerçekleştirilmektedir.

1980'li yıllardan beri çok değişik görüntü eşleştirme teknikleri geliştirilmiştir. Bunlar değişik disiplinler içinde geliştirildiklerinden onların metod ve teorilerinden etkilenmişlerdir ve bu nedenle spesifik olarak üzerinde birleşilmiş teorik altyapı mevcut değildir. Girdi verilerinde, deneysel konfigürasyonda, işleme tekniklerinde, teoride ve çözüm bulunacak problemlerdeki farklılıklar, birbirinden tamamıyla veya kısmen farklı çok sayıda görüntü eşleştirme tekniğinin geliştirilmesine katkıda bulunmuştur. Bu durum eşleştirmenin karmaşık ve zor bir proses olması ve bunun sonucu üniversal algoritmanın geliştirilememesi gerçeklerinde kısmen sonucu olmuştur. Bu yazıda, ilk önce fotogrametride kullanılan eşleştirme tekniklerinin sınıflandırması ve ana adımları üzerinde durulmuştur. Daha sonra eşleştirme operasyonu ile ilgili problemler açıklanmıştır. Konuyu sınırlandırmak için, eski analog (optik ve elektronik) teknikler dışarıda bırakılmış ve ayrıca aktif algılayıcılarla (laser, radar ve vb.) kullanılan teknikler belirtilmemiştir. Çalışma, yazar tarafından geliştirilen görüntü eşleştirme tekniğinin ayrıntılı tanıtımı ve bunun test sonuçlarının verilmesiyle tamamlanmıştır.

2. Görüntü Korrelasyonu Sınıflandırması

Görüntü eşleştirme tekniklerini sınıflamaya çalışmak başlıbaşına zor bir olaydır. Makaroviç (1980) aşağıda verilenlerin temel içeriklerine göre korrelasyon tekniklerini sınıflandırmıştır. Bunlar:

- ◆ girdi görüntü verisi (analog, dijital, melez),
- ◆ değerlendirme araçları (elektronik ve optik eşleştirici, dijital bilgisayarlar, vb.), ve
- ◆ yürütülen operasyonun türü (çevrim-içi, çevrim-dışı)

dür. Fakat genelde, görüntü eşleştirme en uygun şekilde analog ve dijital korrelasyon teknikleri diye iki geniş yaklaşıma ayrılabilir. Bu çalışmada, günümüzde geline aşama nedeniyle sadece dijital görüntü eşleştirme teknikleri incelenecektir.

3. Görüntü Eşleştirme Esasları

Genel anlamda, dijital görüntü korrelasyonu için gerçekleştirilen prosedür aşağıdaki şekilde açıklanabilir: Stereo-çiftin sol fotoğrafı üzerinde belirli satır ve sütun sayısında iki boyutlu matris (pencere matrisi) seçilir. Bu matrisin karşılığı olan görüntüyü kuşatan daha geniş matris (arama matrisi) sağ fotoğraf üzerinde seçilir. Daha sonra, pencere matrisi, arama matrisinin içinde sistematik olarak ötelenir ve herbir konumda arama matrisi içindeki eşit boyutlu alt-arama alanları ile karşılaştırılır. En iyi benzerliğe sahip alt-arama matrisi, pencere matrisine karşı gelen bölgedir. Sol görüntü üzerindeki daha sonraki pencere matrisi için karşılık gelen arama matrisi, daha önce eşleşmiş noktanın konumundan yararlanılarak bulunur. Bu işlem istenilen alan kaplanıncaya kadar tekrarlanır.

Yukarıda belirtilenlere dayanılarak, görüntü korrelasyonunun iki farklı operasyonu gerektirdiği görülür. Bunlar:

- ❖ iki fonksiyon arasında en iyi benzerliği bulan algoritma ve
- ❖ eşleşmiş bir noktadan diğerine geçişi sağlayan strateji veya metottur.

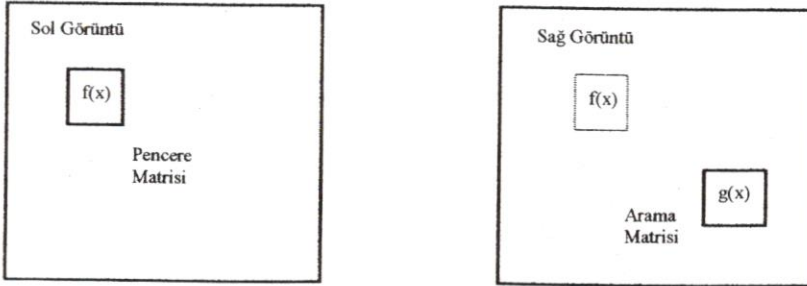
4. Görüntü Eşleştirme Problemleri

Görüntü eşleştirme operasyonu boyunca hemen her zaman mevcut olan problemler vardır. Bunlar aşağıda verilmiştir.

- ✓ **Piksel-altı ölçüm:** Herbir piksel sonlu büyüklüğe sahip olduğundan piksel-altı doğruluk çoğu durumlarda gereklidir.
- ✓ **Geometrik karışıklık:** Bunlar yeryüzünde mevcut eğimler ve kırıkların sonucu oluşur ve görüntü üzerindeki uçurumlar, kırık hatlar, ağaçlar ve binalar tarafından üretilir. Bunun yanında kamera ekseninin düşeyden sapması ve değişik görüntü distorsiyonlarından dolayı sol ve sağ görüntüler üzerinde geometrik yerdeğiştirmeler ve uyuşmazlıklar meydana gelmektedir.
- ✓ **Radyometrik değişiklikler:** Bunlar, görüntüleyicinin bakış açısına göre yansımının değişmesi, atmosferik refraksiyon, görüntünün değişik kısımlarında radyometrik farklılıklar, detektör sistemi ve analog-dijital dönüştürücülerce yaratılan gürültü gibi etmenler sayesinde oluşur ve görüntü üzerinde yanındaki piksellerin gri düzeyleri ile karşılaştırıldığında oldukça farklı değere sahip olan izole edilmiş pikseller topluluğu şeklinde görülürler.

5. En Küçük Kareler Eşleştirme Metodu

En küçük kareler yaklaşımına dayanan görüntü eşleştirme, en küçük kareler dengelemesini kullanarak eşleştirme pencereleri arasındaki gri değerleri farklılıklarını minimize eden bir yöntemdir. Bu prosedür, herbir piksel konumunda eşleşme düzeyini hesaplamak ve böylece en iyi değeri bulma yerine şahane uyumu veren konumu tek bir eşitlik seti ile çözen bir yaklaşımdır. En küçük kareler eşleştirme tekniği Stuttgart Üniversitesi Fotogrametri Enstitüsü tarafından geliştirilmiş ve kullanılmıştır (Förstner, 1982; Ackermann, 1984; Pertl, 1985). Bu metodun arkasındaki temel fikir, şu şekilde gibi açıklanabilir: Bindirmeli fotoğraf çiftinin iki benzer görüntü penceresi $f(x)$ ve $g(x)$ 'in (bak. Şekil 1) aynı objeyi tasvir ettiği düşünölsün. Bu durumda iki pencere arasında şu eşitlik mevcuttur:

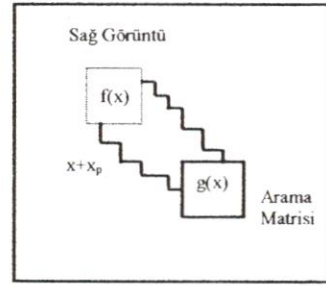
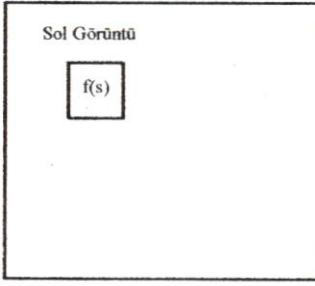


Şekil 1. Pencere ve arama matrisleri

$$g(x) = f(x + x_p) + n(x)$$

(1)

Burada; x_p bilinmeyen öteleme miktarını ve $n(x)$ gürültü faktörünü göstermektedir. (1) eşitliği bilinmeyen öteleme x_p 'ye göre doğrusal değildir (bak. Şekil 2). Bu durumda (1) eşitliğinin birinci dereceden seriye açılımı



Şekil 2. Pencere matrisinin sağ görüntü üzerinde eşleşmek amacıyla hareket ettirilmesi

$$g(x) + v(x) = f(x) + f'(x)dx_p \quad (2)$$

eşitliğini verir. Burada, $f'(x) = df(x) / dx$ eğim oranısı fonksiyonu ve $v(x) = -n(x)$ dir. (2) eşitliği düzenlenirse,

$$\Delta g(x) + v(x) = f'(x)dx_p \quad (3)$$

olur. Burada $\Delta g(x) = g(x) - f(x)$ dir. (3) eşitliği pencere matrisindeki bütün pikseller için yazılabilir. Pencere matrisinde N tane pikselin olduğu farzedilirse, normal denklemler

$$Bdx_p = C \quad (4)$$

şeklinde olacaktır. Burada

$$B = \sum_{i=1}^N f^2(x_i) \text{ ve } C = \sum_{i=1}^N f(x_i)\Delta g(x_i)$$

biçimindedir. (4) eşitliğindeki dx_p bilinmeyen normal denklemlerin çözümü ile bulunabilir.

(3) eşitliği iki görüntü arasındaki geometrik ve radyometrik farklılıkları modellemek için genişletilebilir. Bu durumda son formülasyon aşağıdaki ek parametreleri kapsayacaktır. Böylece,

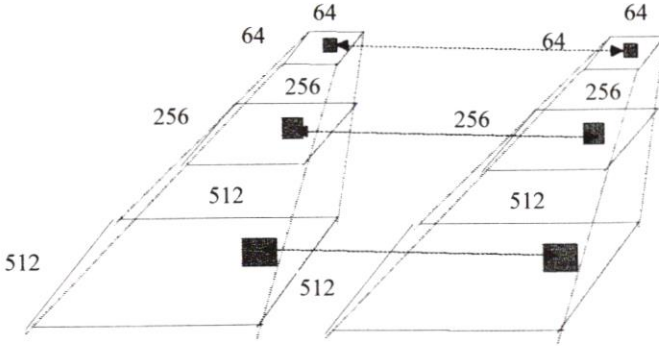
$$\Delta g(x_i) + v(x_i) = f'(x_i)dx_p + x_i f'(x_i)dh_0 + dh_1 + f(x_i)dh_1 \quad (5)$$

eşitliği elde edilir. Burada dx_p ve dh_0 geometrik öteleme ve ölçek faktörünü tanımlarken dh_1 parametreleri radyometrik öteleme ve ölçek faktörünü belirtmektedir.

(5) eşitliği bilinmeyen parametrelere göre doğrusal olmadığından doğrusallaştırılması gerekir ve bu durum iteratif bir çözümü gerektirecektir. Doğrusallaştırma aşamasında iki ana problem mevcuttur. Bunlar, bilinmeyenler için yaklaşık değerler ve hesaplamada gereken iterasyon sayısıdır. Yaklaşık (ilk) değer problemi bütün en küçük kareler tabanlı tekniklerin maruz kaldığı bir problemidir (Bak. Thurgood and Mikhail, 1982; Ackermann, 1984; Gruen and Baltsavias, 1986; Day and Muller, 1988). Ackermann (1984)'de belirtildiği üzere, en küçük kareler eşleştirmesi metodlarının yakınsama çapı oldukça küçüktür. Bu nedenle, çok yakın yaklaşık değer yakınsama için gereklidir. İkinci problem ilki ile doğrudan bağlantılı olan iterasyon sayısıdır. Bu problemler için üç tane çözüm çeşidi önerilebilir. İlki görüntünün ön-işlenmesidir. Bu işlem görüntüyü iyiye transforme etmek için pikseller üzerinde yapılır. Böylece kolay işleme ve yakınsamayı hızlandırmak için bazı nitelikler zenginleştirilirken diğerlerini bastırılır ve bu şekilde az gürültü ve distorsiyona sahip görüntü elde edilir. İkinci çözüm, bilinmeyen parametreler için yaklaşık değer hesabında nitelik-tabanlı metodlar kullanmaktır. Üçüncüsü ise görüntü piramitlerinden yararlanmaktır.

5.1. Görüntü Piramitleri

Bu metod hesaplama işlemini hızlandıracak küçük-boyutlu görüntülerle çalışma imkanı sağlar. Örnek olarak, 512x512 (262144) piksel görüntüyü işlemde kullanma yerine, ilk durumda eşleştirme prosedürü için sol ve sağ görüntülerin 64x64 (4096) pikseli küçük-boyutlu versiyonları daha bir kolaylıkla kullanılabilir (bak. Şekil 3). Bu iki görüntüde benzer ilgi niteliğinin eşleştirilmesi sonucu, onun kaba konumu belirlenmiş olur. Buradan, boyut 256x256 piksele genişletilir. Bu durumda, ilgi niteliğinin kaba konumu önceden bilindiğinden prosedür, oldukça kolay şekilde fazla arama ve iterasyona gerek duymadan gerekli eşleştirmeyi yapar. Daha sonra, karşılıklı görüntülerin boyutu gerçek boyut olan 512x512 piksele arttırılır. Önceki adımlarda kullanılan prosedürün aynısı tekrar uygulanır ve sonunda ilgi niteliğinin kesin konumu piksel-altı düzeyinde belirlenmiş olur.



Şekil 3. Görüntü piramitleri

6. X-Şekilli (Çarpı) İşaretlerin Fotograf Koordinatlarının Görüntü Eşleştirme Teknikleri Kullanılarak Ölçümü

X-şekilli işaretler, fotogrametrik uygulamalar için oldukça önemlidir. Bilindiği üzere, gerek tek gerekse de çift resim değerlendirmesinde matematiksel hesaplamalarda çerçeve işaretleri kullanılmaktadır. Ayrıca bu işaretler, fotogrametrik değerlendirme sürecinde iç yöneltme elemanlarının belirlenmesinde de önemli rol oynamaktadır. Bütün bunlara ek olarak çerçeve işaretlerinin koordinatlarından resim distorsiyonlarının tesbitinde yararlanılmaktadır. Bu işaretler genellikle X biçimli olduklarından bu çalışmada sadece onların görüntü eşleştirme teknikleri ile otomatik olarak ölçümü üzerinde durulmuştur.

X-şekilli işaretlerin merkezinin konumunu piksel-altı düzeyinde belirlemek iki farklı adımı gerektirir. Bunlar:

- hedefin yaklaşık yerinin nitelik-çıkarma (feature extraction) teknikleri kullanılarak belirlenmesi ve
- hedefin kesin konumunun görüntü koordinat sisteminde en küçük kareler eşleştirme tekniği kullanılarak ölçülmesidir.

6.1. X-Şekilli Hedeflerin Görüntü Üzerinde Belirlenmesi

X-şekilli hedeflerin konumlarını doğru olarak belirlemede kullanılan metodlar iki ayrı kısımda incelenebilir.

a) Eşleştirme Metodları

Günümüzde X-şekilli işaretlerin belirlenmesinde kullanılan en yaygın metodlar; kalıp eşleştirme ve görüntü modelleme yaklaşımlarıdır. Kalıp eşleştirme de ya verilen modelle görüntü parçası ya da iki görüntü parçası eşleştirilir. Çok sayıda pikseli içeren kalıp $f(x)$, görüntüde $g(x,y)$ ile ifade edilsin. Kalıbın merkezi herbir görüntü pikseli üzerine yerleştirilir ve eşleşme derecesi (6) eşitliğinde verilen normalleştirilmiş çapraz-korrelasyon fonksiyonu ρ_{fg} ile hesaplanır. Bu görüntü üzerinde mümkün olan bütün konumlarda (verilen tolerans içerisinde) en iyi eşleşme bulununcaya kadar tekrarlanır.

$$\rho_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(i,j) g(i+t, j+h)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(i,j)^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g(i+t, j+h)^2}} \quad (6)$$

Bu metod kullanıldığında doğacak zorluk, her farklı hedef şekli için ayrı bir kalıp kullanma ihtiyacıdır. Ayrıca işaretler aynı şekilli olsalar bile kalıba göre farklı büyüklük ve açısal parametrelere sahip olacaklarından herbirini eşleştirmek için farklı kalıp kombinasyonlarından yararlanmak gerekecektir.

Diğer metod, en küçük kareler yöntemini uygulamak suretiyle ideal hedefle görüntü üzerindeki karşılığı arasındaki farklılıkları en küçük yapan görüntü modelleme yaklaşımıdır. Bu çözümde, dijital görüntü üzerindeki hedefin gri değerleri nokta yayılım fonksiyonunun belirli bir türü ile modellenen ideal hedef üzerindeki gri değerlerin fonksiyonu olarak tanımlanır ve bunun sonucu oluşan gözlem denklemleri serisi en küçük kareler yöntemi ile çözülür. Bu yaklaşımda, en küçük kareler çözümü hedefi tanımlayan bilinmeyen parametreler için değerler üretir. Bu metod Thurgood and Mikhail (1982)'de X-şekilli hedeflerin dijital görüntü koordinatlarının otomatik ölçümü için uygulanmıştır. Fakat fonksiyonel modelde mevcut yüksek dereceli doğrusal olmama nedeniyle yakınsama bütün durumlarda oluşmamıştır. Bu problemi ortadan kaldırmak için, en küçük kareler yöntemi iyi bir yaklaşık değer üreten ön bir eşleştirme tekniği ile birleştirilmelidir. Bunun için, günümüzde kenar bulma yöntemleri kullanılmaktadır.

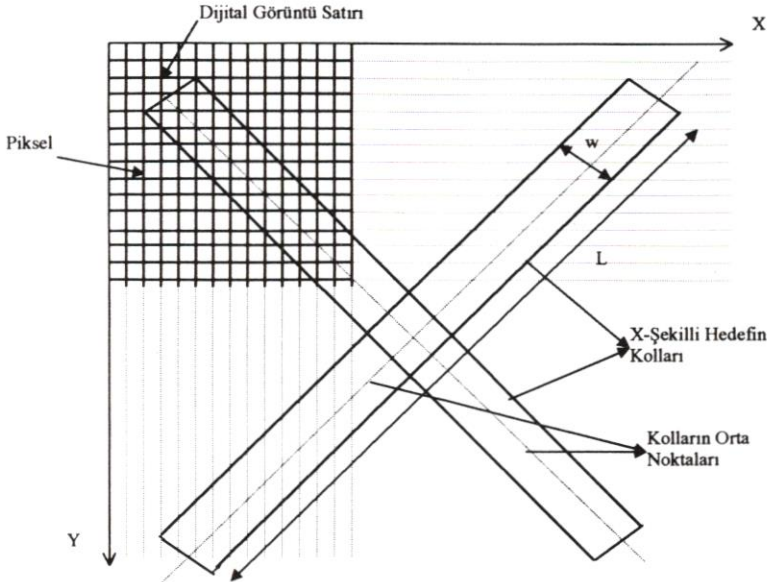
b) Kenar Bulma Yöntemleri

En küçük kareler yaklaşımının yakınsama problemini ortadan kaldıran bu yöntemlerde hedefin konumunu belirlemede farklı türdeki dijital konum operatörlerinden yararlanılmaktadır. Zhou (1986)'da dijital görüntüde iki köşegenel çizginin kesişmesinden oluşan X-şekilli hedefin merkezi "sınır izleme kenar bulma metodu" ile belirlenmiştir. Burada hedefin merkezi aynı doğrultu üzerinde olan noktaların oluşturduğu köşegenel çizgilerin kesiştirilmesi sonucu bulunur. Diğer bir çalışma olan Azizi (1990)'da, sayısallaştırılmış hava fotoğrafı üzerindeki X-şekilli çerçeve işaretlerinin otomatik ölçümü "eğim metodu" kullanılarak yapılmıştır. Aynı yöntemden Büyüksalih (1997)'de kamera ve tarayıcıların geometrik kalibrasyonunda kullanılan hedef levhası üzerindeki X-şekilli işaretlerin otomatik ölçümünde yararlanılmıştır.

6.2. X-Şekilli Hedeflerin Ölçümü İçin Geliştirilmiş Yöntem

Azizi (1990) ve Büyüksalih (1997)'de belirtildiği üzere, en küçük kareler tekniğinin yakınsama problemi eğim metodu ortadan kaldırılmıştır. Büyüksalih (1997)'de her iki metod bir tek bilgisayar programında birleştirilip X-şekilli hedeflerin otomatik ölçümünde kullanılmıştır. Programın ana adımları şu şekilde açıklanabilir:

1. İlk işlem olarak eğim operatörü-tabanlı kenar bulma metodu kullanılarak X-şekilli hedefin koordinatları ölçülür. Bunlara ek olarak, program Şekil 4'de gösterilen hedef parametrelerini de hesaplamaktadır. Bunlar:
 - X-şekilli hedefin ortalama gri değeri (onu oluşturan piksellerin ortalama gri değerleri)
 - X-şekilli hedefin arka-plan ortalama gri değeri (onu çevreleyen piksellerin ortalama gri değeri) ve
 - X-şekilli hedefin dijital görüntü satırı ile yaptığı açıdır.
2. İkinci adım, görüntü modelleme ve en küçük kareler eşleştirme tekniğini gerçekleştirir. Bu işlemde, ilk adım tarafından sağlanan hedefin konumunun yaklaşık değerleri ile yukarıda verilen diğer parametreler hakkında bilgiye ihtiyaç duyulur. Bu aşama sonucunda, X-şekilli hedefin görüntü koordinatlarının kesin değeri piksel-altı düzeyinde belirlenmiş olur.



Şekil 4. X-şekilli hedefin parametreleri

6.2.1. X-Şekilli Hedefin Konumunun Eğim Metodu İle Ölçülmesi

Yukarıda belirtilen hedef parametrelerini bulabilmek için, aşağıdaki adımlar yerine getirilmelidir:

(i) hedef ve onun arka-planının ortalama gri değerinin hesabı
X-şekilli hedefin ortalama gri değeri (MGL) ile onun arka-planının ortalama gri değerini (MBGL) hesaplamak için, hedef kabaca arka-planından ayrıştırılmalıdır. Herbir X-şekilli hedef arka-planları karşılaştırıldığında gri değerlerinde ani bir değişim ortaya koyarlar. Bu nedenle, hedefi ayrıştırmak için, yaklaşık bir T eşik değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$T = (MXL - MNL) / 2 \quad (7)$$

Burada MXL ve MNL hedefi kapsayan görüntü parçasının maksimum ve minimum gri değerlerini göstermektedir. Daha sonra, alan fonksiyonu (AF) ve bütünleştirilmiş optik yoğunluk (IOD) değerleri hesaplanır. Bir görüntünün alan fonksiyonu, spesifik bir gri değerden büyük ve ona eşit olan gri değerlere sahip piksellerin sayısıdır. O halde,

$$AF = \int_T^{\max} H(p) dp \quad (8)$$

şeklinde bulunur. Burada H(p) görüntü histogramını tanımlarken T yukarıdaki adımda hesaplanan yaklaşık eşik değerini, dp T'ye eşit veya ondan büyük gri değere sahip piksellerin toplam sayısını ve max'da görüntü de mevcut gri düzeylerinin maksimum değerini ifade etmektedir.

Bütünleştirilmiş optik yoğunluk (IOD), spesifik görüntü objesini (örneğin X-şekilli hedef) oluşturan piksellerin gri değerlerinin toplamı olarak tanımlanır. Görüntü g(x,y) için IOD,

$$IOD = \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^a g(i,j) \quad (9)$$

şeklinde hesaplanır. Burada g(i,j), i.satır, j.sütündeki pikselin gri değeridir. a ve b ise görüntü içinde ilgi objesinin yer aldığı alanın sınır değerleridir. X-şekilli hedef için, a ve b ile sınırlı alanın (8) eşitliğinden hesaplanan AF'ye eşit olduğu gözönüne alınır ve buradan hareketle,

$$MGL = IOD_c / AF_c \quad (10)$$

$$MBGL = IOD_b / AF_b$$

olarak bulunur. Burada c indisi hedefi b ise arka-planı ifade etmektedir.

(ii) Kesin eşik değeri hesabı

Kesin eşik değeri MGL ve MBGL kullanılarak

$$THR = (MGL^2 + MBGL^2)^{1/2} \quad (11)$$

bağıntısıyla bulunur.

(iii) X-şekilli hedefin kollarının sağ ve sol kenarlarının eğim operatörü ile belirlenmesi

Eğim operatörü dijital görüntü üzerinde hedeflerin gri değerlerini arka-plandan ayırmada böylece görüntü üzerinde süreksizliği tesbit etmede kullanılır. Eğim operatörü,

$$\text{eğim}(i,j) = \{ [g(i+1,j) - g(i,j)]^2 + [g(i,j+1) - g(i,j)]^2 \}^{1/2}$$

şeklinde ifade edilir. Burada eğim(i,j) operatör çıktısı, g(i,j) dijital görüntünün gri değerlerini ifade etmektedir. Herhangi bir görüntü satırında eğim(i,j) kesin eşik değeri THR'dan büyükse bu durum orada hedefin kenarının varlığının ispatı olacaktır.

(iv) Bulunan kenarları kullanarak herbir görüntü satırında X-şekilli hedef kollarının orta noktalarının konumlarının hesabı

Herbir dijital görüntü satırında verilen hedef kolu için hesaplanan eğim(i,j) ya pozitif ya da negatif işarete sahip olacaktır (+eğim(i,j) ve -eğim(i,j)). Bu eğim değerleri hedefin kollarının başlangıç ve bitiş

konumlarını göstermektedir. Bu değerlerden, herbir görüntü satırı için hedef kollarının orta noktaları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned} W &= j_{+eğim} - j'_{-eğim} \\ x_{orta} &= j_{+eğim} + W / 2 \\ y_{orta} &= n \end{aligned} \quad (12)$$

dır. Burada W, hedef kolunun genişliği; x_{orta} ve y_{orta} , kol orta noktalarının x ve y koordinatları; $j_{+eğim}$ ve $j'_{-eğim}$, eğim (i,j)'nin pozitif ve negatif işaretlere sahip olduğu sütün yönündeki piksel numaraları; n ise üzerinde çalışılan görüntü satırının numarasıdır.

- (v) Aynı doğrultudaki hedef kollarının orta noktalarına doğru uydurma ve oluşan doğruların keşişiminden X-şekilli hedefin koordinatları ve eğiminin bulunması

Aynı doğrultudaki hedef kollarının orta noktaları,

$$işaret(x_{orta(n)}) = x_{orta(n)} - x_{orta(n-1)} \quad (11.24)$$

şeklinde belirlenir. Burada $x_{orta(n)}$ ve $x_{orta(n-1)}$ sağ ve sol hedef kollarının bulunan ardışık iki orta noktası, $işaret(x_{orta(n)})$ ise pozitif ve negatif olabilen ve $x_{orta(n)}$ orta noktasına karşılık gelen değerdir. Pozitif ve negatif işarete sahip kol orta noktaları, aynı işaretli orta noktalar aynı matris içinde olacak şekilde düzenlenirler.

6.2.2. X-Şekilli Hedefin Koordinatlarının Pixel-Altı Düzeyde Ölçümü İçin Görüntü Modelleme ve En Küçük Kareler Eşleştirmesi Metodu (IMLS)

Metrik uygulamalar için geliştirilmiş bu metod, özellikle iç yöneltme sırasında çerçeve işaretlerinin konumlarının yüksek doğrulukla ölçümünde kullanılmıştır. Bu yöntemle alınan sonuçlar hiçbir kenar bulma tekniği kullanılarak elde edilemezler (Day and Muller, 1988). Burada ilgilenilen parametreler, dijital resim üzerindeki satır ve sütun konumları ile bağlantılı görüntü koordinatlarıdır. Fakat, metod bunun yanında radyometrik ve geometrik parametreleri kapsayan problemleri çözmeye potansiyeline de sahiptir. Zaten gerçekte de verilen görüntü hedefi için herbir pikselin ölçülen optik yoğunluk (gri) değeri, bu iki tip parametre cinsinden yazılan fonksiyonel modelle bağlantılıdır. Ancak bu yöntem, görüntüleme sisteminin nokta-yayılım fonksiyonu hakkında ön bilgi gerektirmektedir. Bütün bilinmeyen parametrelerin eğim metodu ile bulunmuş yaklaşık değerleri kullanılarak iteratif hesaplamalar sonucu görüntü niteliğinin ideal modeline en iyi uyum sağlayan değerler seti elde edilir.

6.2.2.1. Genel Dengeleme Modeli

Bu yöntem için esas dengeleme modeli Thurgood and Mikhail (1982) tarafından kurulmuştur. Buna göre, $f(s,t)$ 'nin ideal resim fonksiyonunu yani mükemmel görüntüleme sistemi çıktısı olduğu farzedilsin. Görüntü çekiminde kullanılan sistemin nokta yayılım fonksiyonu $p(s,t)$ 'ninde bilindiği kabul edilsin. Ayrıca $l(s,t)$, örnekleme konumu (s,t) 'deki ölçümü belirten rasgele değişken olsun. Böylece ölçülen miktar, $f(s,t)$ ve $p(s,t)$ 'nin birleştirilme operasyonu kullanılarak modellenirse aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$l(s,t) = f(s,t) * p(s,t) \quad (14)$$

olur. Burada * birleştirilme operasyonunu ifade eder. Eğer x parametreler setinin, ilgilenilen görüntü alanı üzerinde $f(s,t)$ 'yi tamamiyle karakterize ettiği düşünülürse (14) eşitliği,

$$l(s,t) - f(s,t;x) * p(s,t) = 0 \quad (15)$$

halini alır. Kolaylık için s,t atılırsa, bu eşitlik

$$1 + F(\underline{x}) = 0 \quad (16)$$

olacaktır. Burada $F(\underline{x}) = -f(s,t;\underline{x}) * p(s,t)$ dir.

ij. görüntü elemanı için (16) eşitliğinin doğrusallaştırılmış şekli,

$$l_{ij}^o + v_{ij} + B_{ij} \underline{\Delta} = -F_{ij}(\underline{x}^o) \quad (17)$$

dır. Burada,

l_{ij}^o	gözlemler için yaklaşık değerler,
v_{ij}	düzeltilmeler,
B_{ij}	$F_{ij}(\underline{x})$ 'in bilinmeyenlere göre kısmi türevleri,
$\underline{x}^o$	bilinmeyenlerin yaklaşık değerler seti,
$\underline{\Delta}$	bilinmeyenlerin yaklaşık değerlerine gelecek düzeltmeler seti, ve
u	bilinmeyen sayısıdır.

(17) eşitliği model için tek bir şart denklemini belirtir ve dolaylı ölçüler dengelemesi olarak bilinir. Eğer ilgilenilen alan n tane pikseli içeriyorsa, şart denklemlerinin toplam seti matris biçiminde,

$$l^o + v + B \underline{\Delta} = -F(\underline{x}^o) \quad (18)$$

yazılır. Ölçülerle ilgili stokastik bilgi kovaryans matris Σ ile karakterize edilir. Kofaktör matris Σ^{-1} genelde Σ yerine kullanılır ve kovaryans matris'in ölçeklendirilmesi yoluyla elde edilir, yani

$$Q = (1/\sigma_o^2) \Sigma$$

dır. Burada σ_o^2 referans varyans olarak bilinir. Bundan başka, ağırlık matrisi W ise Q^{-1} 'e eşittir. Burada bilinmeyenlerin yaklaşık değerlerine getirilecek düzeltmeler $\underline{\Delta}$ normal denklemlerin çözümü ile

$$B^T W B \underline{\Delta} = B^T W f^o \quad (19)$$

olarak hesaplanır. Burada $f^o = -[l^o + F(\underline{x}^o)]$ dır.

(19) eşitliği aynı zamanda

$$N \underline{\Delta} = t \quad (20)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $N = B^T W B$ ve $\underline{\Delta} = N^{-1} t$ dir.

Bu eşitliklerde geçen B matrisi $F(\underline{x})$ 'in bilinmeyenlere göre kısmi türevleri alınmak suretiyle oluşturulmuştur. (15) eşitliğinden tek bir şart denklemi gözönüne alınırsa, k. parametre için kısmi türev:

$$\partial F_{ij} / \partial x_k = -(\partial f_{ij} / \partial x_k) * p_{ij}$$

şeklinde dir. $\partial F_{ij} / \partial x = B_{ij}$ için notasyon,

$$[-(\partial f_{ij} / \partial x_1) * p_{ij} - (\partial f_{ij} / \partial x_2) * p_{ij} \dots \dots \dots - (\partial f_{ij} / \partial x_k) * p_{ij}] \quad (21)$$

olacaktır.

6.2.2.2 Nokta Yayılım Fonksiyonu

Görüntüleme işleminde fiziksel sistemin etkisi, örneğin örnekleme noktasından optik sapma, kama merceklerinin aberasyonu ve odaklanmalarında meydana gelen eksiklikler hepsi birlikte nokta yayılım fonksiyonunu (point spread function-psf) oluşturur. Başka bir deyişle, psf mükemmel nokta veya nokta kaynağının görüntüsüdür. Eğer resim $f(x,y)$ nokta kaynaklarının toplamı olarak düşünülürse, burada nokta kaynağı çıktısı hakkındaki bilgi, $f(x,y)$ fonksiyonunun çıktısını belirlemede kullanılabilir. Örneğin eğer Gaus örnekleme noktalı görüntüleme sistemi kullanılırsa, nokta kaynağının görüntüsü optik yoğunlu

bakımından Gaus normal dağılım eğrisi şeklinde değişim veren sonlu boyutta daire olacaktır. Bu sonlu daire, örnekleme noktası ile aynı boyutta ve gri değerine sahip olacaktır. Bu nedenle psf bunun yanında impulse response olarak da adlandırılır. Örnekleme noktasının karakterlerini tanımlayan matematiksel fonksiyon hakkındaki bilgi görüntüleme sisteminin psf'i olarak kullanılabilir. Alternatif olarak, görüntüleme sisteminin girdi ve çıktısı hakkındaki bilgi psf'i belirlemede kullanılabilir. Bu nedenle, psf matematiksel anlamda görüntüleme sisteminin davranışını ortaya koyar. İki çeşit psf mevcuttur:

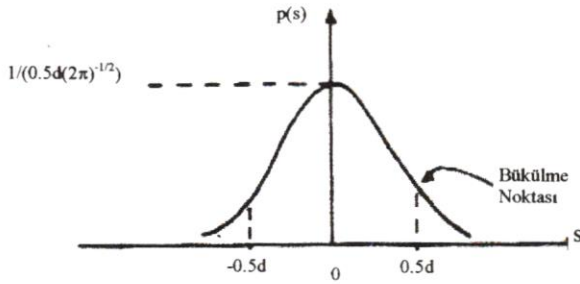
- Dikdörtgen biçimli psf ve
- Göbek biçimli (Gaus) psf.

Göbek biçimli psf'in yaygın olarak kullanılan fotografik malzemelerde impulse response'u en yakın modellediği bulunmuştur (Thurgood and Mikhail, 1982). Ayrıca, Mikhail ve diğerleri (1984)'de en küçük kareler çözümünde Gaus psf'in daha iyi çalıştığı görülmüştür.

Gaus yayılım fonksiyonu,

$$p(s) = (1/(0.5d(2\pi)^{-1/2}))\exp(-s^2/(0.5d^2)) \quad (22)$$

şeklinde ifade edilir. Burada d fonksiyonun genişliğidir ki bu değer p(s)'yi tanımlayan iki bükülme noktası arasındaki uzaklıktır.



Şekil 5. Gaus yayılım fonksiyonu (Thurgood and Mikhail, 1982)

2.2.2.3 X-Şekilli Hedefler

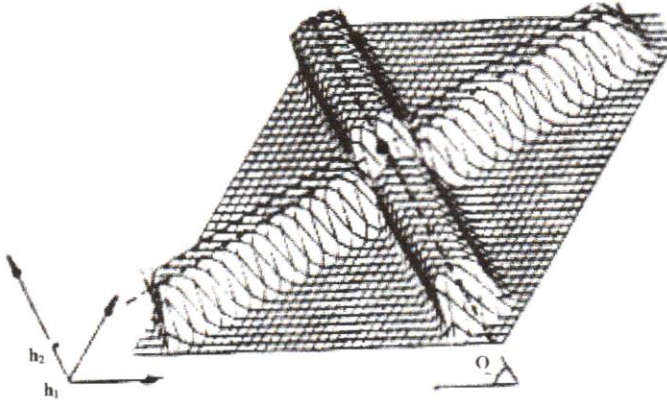
Şekil 6 gözönüne alındığında, X-şekilli hedefi tanımlamak için şu parametrelerin bilinmesi gerekir:

- hedefin ve arka-planının gri değerleri (h_2, h_1);
- hedef kollarının genişliği ve uzunluğu (W, l);
- hedefin görüntü satırı ile yaptığı açı (Q); ve
- hedefin merkezinin koordinatları (x, y).

14) eşitliğinden yararlanılarak ve hedefi oluşturan 4 kolun herbiri ayrı düşünülürse

$$l(s,t) = h_1 + (h_2 - h_1) \sum_{i=1}^4 P_n P_{si} \quad (23)$$

buradan da,



Şekil 6. X-şekilli hedef (Azizi, 1990).

$$F(\underline{x}) = -h_1 - (h_2 - h_1) \sum_{i=1}^4 P_{ti} P_{si} \quad (24)$$

elde edilir.

Böylece X-şekilli hedefin bilinmeyen parametreleri için kısmi türevler

$$\partial F / \partial h_1 = -1 + \sum_{i=1}^4 P_{ti} P_{si}$$

$$\partial F / \partial h_2 = - \sum_{i=1}^4 P_{ti} P_{si}$$

ve

$$\partial F / \partial x_k = -(h_2 - h_1) \sum_{i=1}^4 \partial / \partial x_k (P_{ti} P_{si}).$$

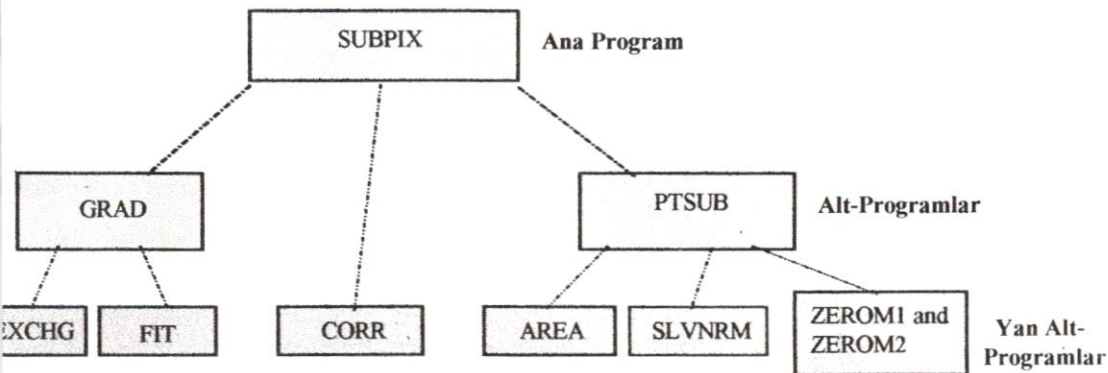
olarak elde edilir. Burada x_k ifadesi x , y ve Q parametreleri için kullanılmıştır.

Daha sonra bilinmeyen parametreler için kısmi türevler (19) eşitliğinde verilen normal denklemlere sokulur. Bu denklemlerin çözülmesiyle bilinmeyenler için düzeltmeler hesaplanmış olur. Fakat, daha önce de belirtildiği gibi, bu denklemlerin doğrusal olmayışı iteratif çözümü gerektirmektedir.

7. Görüntü Eşleştirme Metodunun Bilgisayar Programlaması

Detaylı açıklaması verilen görüntü eşleştirme tekniğinin SUBPIX adı altında Fortran 77 programlama dili kullanılarak bilgisayar programlaması yapılmış ve bu programın genel yapısı Şekil 7'de verilmiştir. Bu

program iki alt-program ve bunlara bağı 7 yan-alt programı içermektedir. Yan alt-programlardan biri CORR ana program SUBPIX'e doğrudan bağıdır. Bunun yanında, EXCHG ve FIT yan-alt programları GRAD alt-programı tarafından kullanılırken AREA, SLVNRM, ZEROM1 ve ZEROM2 yan-alt programları sadece PTSUB alt-programınca çağırılabilir.



Şekil 7. SUBPIX programının genel yapısı

7.1. GRAD ve PTSUB Alt-Programları

GRAD alt-programı, X-şekilli hedefin aşağıda belirtilen parametreleri için dengelemeye girecek yaklaşık değerleri hesaplamaktadır. Bunlar sırasıyla; hedefin ve arka-planının ortalama gri değerleri, hedefin merkez koordinatları ve görüntü satırı ile yaptığı açıdır.

PTSUB alt-programı ise SUBPIX ana programının ikinci aşamasını oluşturmaktadır ve görüntü modelleme ve en küçük kareler yaklaşımını kullanarak GRAD alt-programı ile ölçülen hedef parametreleri için dengelenmiş değerleri hesaplamaktadır.

7.2. Yan Alt-Programlar

Yukarıda belirtildiği gibi, GRAD ve PTSUB alt-programları kendilerine bağı birçok yan alt-program kullanırlar. Bunlar:

CORR: İlk ve son X-şekilli hedef arasındaki korelasyonu kontrol eder.

EXCHG: Hedefin kollarının aynı doğrultudaki orta noktalarını tek bir matris içinde olacak şekilde düzenler.

FIT: Hedef kollarının aynı doğrultudaki orta noktalarına bir doğru uydurur.

ZEROM1 ve *ZEROM2*: Sırasıyla bir ve iki boyutlu matrisleri oluşturmada kullanılır.

AREA: Gaus psf eğrisi altında kalan alanı hesaplar.

SLVNRM: Hedefin bilinmeyen parametrelerini bulmak için normal denklemleri çözer.

7.2. SUBPIX Görüntü Eşleştirme Programının Testi

Bu amaç için Britanyanın Glasgow Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri bölümünce tasarlanmış ve yaptırılmış kalibrasyon levhası kullanılmıştır. Bu levha X-biçimli 150 tane hedefi kapsamaktadır. Bu hedefler sistematik ve eşit aralıklı olarak (30mm) 10 sıra ve 15 sütun şeklinde düzenlenmişlerdir. Herbir hedefin kol uzunluğu 14mm, genişliği 2mm dir ve referans koordinatları Ferranti Monokomparatörü kullanılarak ölçülmüştür.

Bu hedef levhasının Barr & Stroud IR-18 termal video çerçeve tarayıcısı ve CCD kamera ile çekilmiş dijital görüntüleri SUBPIX programı ile ölçülmüş ve elde edilen görüntü koordinatları ile bilinen referans koordinatları arasında afin transformasyonu uygulanmıştır. Bunun sonucunda bulunan x ve y yönündeki rms değerleri herbir görüntü için Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. SUBPIX programı ile elde edilen sonuçlar

Termal görüntü		CCD görüntüsü	
m_x	m_y	m_x	m_y
± 0.71	± 0.61	± 0.29	± 0.26

7.3. Alternatif Metodla Test

Karşılaştırma için, MSDPW (MOMS SPOT Digital Photogrammetric Workstation) programı (Zoej, 1997) X-şekilli işaretlerin görüntü koordinatlarının ölçümünde kullanılmıştır. C++ programlama dilinde yazılmış bu program MOMS ve SPOT uydu görüntüleri üzerinde mevcut olan yer kontrol noktalarının ölçümünü manüel olarak yapılmasını sağlamaktadır. Bu programda yürütülen yaklaşım, görüntü zumlendiğinde hedefin alanı ekranda büyürken kursör boyutu aynı kalmaktadır. Böylece, hedefin merkezi yüksek doğrulukla piksel-altı düzeyinde ölçülebilmektedir. SUBPIX programının testinde kullanılan görüntüler MSDPW programında farklı zum değerlerinde ölçülmüştür. Daha sonra hedeflerin ölçülen görüntü koordinatları ile referans koordinatları arasında yapılan afin dönüşüm sonucu elde edilen doğruluk değerleri Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. MSDPW programı ile elde edilen sonuçlar

Zum değeri	Termal görüntü		CCD görüntüsü	
	m_x	m_y	m_x	m_y
1/7	± 0.69	± 0.62	± 0.29	± 0.28
1/10	± 0.70	± 0.62	± 0.30	± 0.26

8. Sonuçlar

Kullanılan otomatik görüntü eşleştirme prosedürü, manüel metodlara göre birçok avantaj sağlamıştır. Bunlar:

- ✓ Emek gerektirmemekte ve minimum zaman harcaması gerçekleştirilebilmektedir. Hedeflerin koordinatları SUBPIX programı ile 1-2 dakika içerisinde ölçülürken, MSDPW ile manüel olarak en az 30 dakika gibi bir zamanda ölçülebilmektedir.
- ✓ Operatör tarafından manüel olarak yapılan ölçümlerin taşıdığı hataları bertaraf etme avantajına sahiptir.
- ✓ X-şekilli hedef koordinatları bilgisayar çıktısı şeklinde alındığından bütün diğer programlar tarafından kullanılması için yeniden yazımına veya formatlanmasına gerek yoktur. Bu da operatörün işini oldukça kolaylaştırır. Şöyleki koordinatların yeniden yazımı ve bunda yapılacak hatalardan kaçınılmış olunur.
- ✓ Daha öncede belirtildiği gibi, en küçük kareler görüntü eşleştirme metodunun matematik modelinin yüksek dereceli doğrusal olmayışı nedeniyle, bu teknik oldukça düşük yakınsama çapına sahiptir. Eğer, bilinmeyen hedef parametreleri için yaklaşık değerler mevcut değilse, program doğru değerlere ulaşamamaktadır. Bu problem, etkin şekilde hedef parametreleri için oldukça doğru yaklaşık değerler üreten nitelik-tabanlı eşleştirme yöntemi olan eğim metodu ile aşılmıştır. O nedenle en küçük kareler dengelemesine giren değerler, gerçek değerlere çok yakın olduğundan SUBPIX programı ile en fazla iki iterasyonda sonuç değerlerine yakınsamaktadır.
- ✓ Görüntü modelleme ve en küçük kareler eşleştirme yöntemi ile hedeflerin merkezlerinin koordinatları ± 0.1 piksel altındaki doğruluk derecesiyle belirlenebilmektedir.

9. Kaynaklar

1. Ackermann, F., 1984. Digital Image Correlation Performance and Potential Application in Photogrammetry. Photogrammetric Record, 11 (64): 429-439.
2. Azizi, A., 1990. The Design and Implementation of A Purely Digital Stereo-Photogrammetric System on the IBM 3090 Multi-User Mainframe Computer, Ph.D Thesis, University of Glasgow, 235 pp.
3. Büyüksalih, G., 1997. Geometric and Radiometric Calibration of Video Infrared Imagers for Photogrammetric Applications, Ph.D Thesis, University of Glasgow, 497 pp.
4. Day, T. and Muller, J.P., 1988. Quality Assesment of Digital Elevation Models Produced by Automatic Stereomatchers from SPOT Image Pairs. Photogrammetric Record, 12 (72): 797-808.
5. Forstner, W., 1982. On the Geometric Precision of Digital Correlation. International Archives of Photogrammetry, 24 (3): 176-189.
6. Gruen, A.W. and Baltsavias, E.P., 1986. High Precision Image Matching for Digital Terrain Model Generation. International Archives of Photogrammetry, 26(3/1): 284-296.
7. Makarovic, B., 1980. Image Correlation Algorithms. International Archives of Photogrammetry, 23 (B2): 167-175.
8. Mikhail, E.M., Akey, M.L. and Mitchell, O.R., 1984. Detection and Sub-Pixel Location of Photogrammetric Targets in Digital Images. Photogrammetria, 39 (1): 63-83.

9. Pertl, A., 1985. Digital Image Correlation With Analytical Plotter Planicomp C100. Photogrammetria, 40 (1): 9-19.
10. Thurgood, J.D. and Mikhail, E.M., 1982. Subpixel Mensuration of Photogrammetric Targets in Digital Images. Technical Report, School of Civil Engineering, Purdue University, CE-PH-82-2: 252 pp.
11. Zoj, M.J.V., 1997. Photogrammetric Evaluation of Space Linear Array Imagery for Medium Scale Topographic Mapping, Ph.D Thesis, University of Glasgow, 303 pp.
12. Zhou, G., 1986. Accurate Determination of Ellipse Centers in Digital Imagery. Technical Papers, ACSM-ASPRS Annual Convention, 4: 256-264.