

DİJİTAL GÖRÜNTÜLERİN REKTİFİKASYONU: SENSÖR MODELLERİ, GEOMETRİK GÖRÜNTÜ DÖNÜŞÜMLERİ VE YENİDEN ÖRNEKLEME

M. S. Temiz¹, S. Doğan¹

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, 55 139 Kurupelit, Samsun, mstemiz@omu.edu.tr, sedatdo@omu.edu.tr.

ÖZET

Rektifikasyon, görüntülerin sayısal yöntemlerle geometrik olarak distorsiyonsuz görüntüye dönüştürülmesi işi olarak da ele alınabilir. Geometrik dönüşüm sonucunda, yeni görüntüdeki piksellerin parlaklık değerlerini elde edebilmek için piksel değerlerinin (gri düzey, parlaklık, radyometrik veya renk değerleri) yeniden örneklenmesi gerekir. Bunun için enterpolasyon yöntemleri kullanılır. Bu çalışmada, rektifikasyon işlemini gerçekleştirmek için kullanılan geometrik görüntü dönüşümleri ve radyometrik değerlerin yeniden örneklenmesi konuları da örneklerle anlatılmıştır. Bu çalışmada kullanılan örnek görüntüler, sayısal görüntülerin rektifikasyonu için gerekli olan bütün işlemleri gerçekleştiren ve makalenin yazarları tarafından Borland C++ Builder platformunda geliştirilen Restore 1.0 isimli yazılım kullanılarak işlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Görüntü Rektifikasyonu, Polinomal, Projektif, Diferansiyel, Orto Rektifikasyon.

ABSTRACT

RECTIFICATION OF DIGITAL IMAGES: SENSOR MODELS, GEOMETRIC IMAGE TRANSFORMATIONS AND RESAMPLING

Rectification may be considered as the transformation process of digital images carried out to obtain distortion free versions of the images. At the end of the geometric transformation, to obtain the pixel values of the new image a radiometric resampling is required. For this purpose, interpolation techniques are used. In this paper, in order to perform rectification issues, we used Restore 1.0 software which we developed for rectification of digital images, in Borland C++ Builder platform..

Keywords: Resampling, Rectification, Image Restoration, Digital Ortho-Rectification.

1. GİRİŞ

Sensör dizileriyle elde edilen dijital görüntüler, sensörlerin kapasitesi, atmosferik şartlar ve izdüşüm geometrisinden kaynaklanan hatalarla yüküldürler. Bu hatalar, sensörlerin ölçtüğü elektromanyetik dalgaların enerjilerinin değerlerini ve ayrıca sensörlerin karşılık geldiği nesne detaylarının uzaydaki geometrik dizilişini etkilerler. Buna göre, iki ana grup altında ele alınabilecek bu etkiler sırasıyla; radyometrik ve geometrik hatalar olarak adlandırılır. Dijital görüntülerden geometrik ve semantik bilgilerin çıkarılmasından önce, uygulamalardan beklenen sonuç ürünler ve sonuç duyarlıklara göre görüntülerin bu hatalardan arındırılması gerekir. Geometrik hataların giderilmesi için yapılan bu işlemlere genel olarak görüntü rektifikasyonu adı verilir. Görüntü rektifikasyonu işleminde, hatalarla yüklü orijinal görüntünün, geometrik hataları düzelten bir sisteme (matematiksel işlem süreci) girildiği düşünülürse, sistemden hataları ayıklanmış yeni bir görüntünün çıktığı olarak verileceği varsayılabilir. Bu durumda, giriş ve çıkış görüntüleri geometrik olarak birbirinin aynısı olmayacak, dolayısıyla da piksel sayıları birbirinden farklı olacaktır. Bu durumda, çıkış görüntüsünün elde edilebilmesi için orijinal giriş görüntüsü esas alınarak çıkış görüntüsünün piksel değerleri yeniden örnekleme ile elde edilecektir. Piksel değerleri radyometrik değer olduğundan bu yeniden örnekleme işi radyometrik değerleri iyileştirmek için yapılan filtreleme ve görüntü iyileştirme işleriyle karıştırılmamalıdır. Bu son bahsedilen işlemler, ham görüntülerde oluşan radyometrik hataların düzeltilmesi için, orijinal görüntünün geometrisini bozmadan yapılan iyileştirme işlemleridir.

Görüntülerin geometrisi en başta, bu görüntüleri elde eden sensörlerin fiziksel tasarımına bağlı olarak kendi içlerindeki geometrik dizilişlerine ve daha sonra da kullandıkları izdüşüm yönteminin geometrisine bağlıdır. Bu nedenle, görüntülerin geometrik hatalarının düzeltilmesi için kullanılacak olan matematiksel modelin, ilgili görüntüyü elde eden sensör sisteminin fiziksel ve geometrik özelliklerine bağlı olarak tanımlanması gerekir. Geometrik distorsiyonların en duyarlı şekilde giderildiği teknikler, sensörlerin kalibrasyonu için modellenen ek parametreleri kullanan tekniklerdir, (Fraser, 1997). Fotogrametride ölçülerin çoğu görüntüler üzerinde yapılır ve bu ölçülerin duyarlılığı olabildiğince yüksek olmalıdır. Üzerinde ölçülerin yapılacağı görüntüler geometrik ve radyometrik hatalarla yüklü olduğundan fotogrametrinin temel işlerinden birisi de bu hataların giderilmesi işi olmuştur, (Gruen and Beyers, 2001). Bu hataların duyarlı bir şekilde giderilebilmesi için algılayıcı sistemlerin (örneğin kamera sisteminin) iç geometrisinin yani, kalibrasyon parametrelerinin bilinmesi gerekir. Kalibrasyonda, kamera sisteminin performansını en iyi tanımlayan parametreler belirlenir, (Remondino, 2000). Bu parametreler,

sensörlerin özelliklerine göre değişkenlik gösterirler. Bu çalışmada, matris dizisi şeklinde sıralanmış sensör sistemleri için modellenmiş ek parametreler anlatılmıştır. Satır dizisi şeklinde sıralanmış ve nesnelerin görüntülerini nesnelere satır satır tarayarak elde eden sensör sistemlerinde ise bazı ek parametreler farklılık göstermektedir. Ancak, sensör sistemi her nasıl olursa olsun, sensörlere gelen elektromanyetik ışınları toplayan mercekle sistemleri aynıdır. Dolayısıyla merceklerden kaynaklanan geometrik distorsiyonu tanımlayan ek parametreler, satır ve matris sensör dizilerinde aynıdır, (Poli,). Ek parametreler algılayıcı geometrisinin fiziksel gerçekliğini arttırmak için resim koordinatlarına getirilecek düzeltmeleri belirleyen parametreler olarak da düşünülebilir (Beyer, 1991).

Bu çalışmada, görüntüyü geometrik ve radyometrik olarak etkileyen hataların giderilmesi, yani görüntü rektifikasyonu ele alınacaktır. Literatürde çeşitli rektifikasyon yöntemleri mevcuttur. Bunlardan polinomal rektifikasyon, projektif rektifikasyon ve diferansiyel rektifikasyon yöntemleri sıklıkla kullanılan üç genel yöntemdir (Novak, 1992). Bu tekniklerden ilk iki tanesi, algılayıcı sistemlerin sensör dizilerinin dizilişlerini, izdüşüm geometrisini ve dış yöneltmesini hesaba katmadan, görüntü ve orto-foto arasında var olduğu düşünülen analitik dönüşümlerle gerçekleştirilir. Bunlar sorunun yaklaşık çözümleri olarak kabul edilirler. Buna rağmen bu yaklaşık çözümler, düşük geometrik duyarlılığı uydur görüntülerinin işlenmesinde yeterlidir. Sonuncu yani üçüncü teknik ise, görüntüleme sisteminin fiziksel gerçekliğini izdüşüm geometrisinin matematiksel bağıntılarıyla birlikte yorumlayan ve yükseklik farklarından kaynaklanan geometrik bozulmaları da modelleyip düzeltme yaklaşımından oluşur.

Rektifikasyon, görüntülerin sayısal yöntemlerle geometrik olarak distorsiyonsuz görüntüye dönüştürülmesi işi olarak da ele alınabilir. Geometrik dönüşüm sonucunda, yeni görüntüdeki piksellerin parlaklık değerlerini elde edebilmek için piksel değerlerinin (gri düzey, parlaklık, radyometrik veya renk değerleri) yeniden örnekleme gerekir (Zhang, 2001). Bunun için entropolasyon yöntemleri kullanılır. Bu çalışmada, rektifikasyon işlemini gerçekleştirmek için kullanılan geometrik görüntü dönüşümleri ve radyometrik değerlerin yeniden örnekleme konuları da örneklerle anlatılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan örnek görüntüler, sayısal görüntülerin rektifikasyonu için gerekli olan bütün işlemleri gerçekleştiren ve makalenin yazarları tarafından Borland C++ Builder platformunda geliştirilen Restore 1.0 isimli yazılım kullanılarak işlenmiştir.

2. SENSÖRLER ve EK PARAMETRELER

Görüntüler, nesnelere yansıyan elektromanyetik dalgaların enerjilerinin sensörler ile ölçülmesi ve ölçülen enerji değerlerinin görüntülenmesi yoluyla elde edilirler. Eğer ölçülen enerjiler, elektromanyetik spektrumun görünen dalga boylarından elde edilmişse, bu değerler gerçek renk değerlerini verecek şekilde bilgisayarlarda görüntülenebilirler. Görünmeyen dalga boylarında elde edilen enerji değerleri ise, görünen dalga boylarında yer alan enerji aralıklarına izdüşürülerek görüntülenebilirler. Bu durumda, nesnelere gerçek renklerinde değil sahte renklerle görüntülenmiş olurlar. Yanyana dizilmiş sensörlerin ölçtüğü enerji değerlerinin her birisi bilgisayar ekranında bir piksel karşılık gelecek şekilde yanyana dizilerek görüntülendiğinde, anlamlı ve gerçeğe yakın bir şekilde nesnelere geometrilerini ve renklerini temsil etmelidirler. Bunu sağlamak için, her bir komşu sensörün, nesne uzayında aynı nesnenin komşu iki alanından geldiği düşünülen dalgaların enerjilerini ölçmüş olması gereklidir. Nesne yüzeylerine, sonsuz sayıda ışık ışınları ya da elektromanyetik dalgalar ulaşır ve nesne yüzeyinden geriye yine sonsuz sayıda ışık ışınları yansır. Tabii ki gelen ışınların nesne yüzeyindeki yüzey normalleriyle yaptığı geliş açıları yansırken de aynı açı değerindedirler. Tersine yine, bir sensörün yüzey alanı sınırlı bir alan olduğundan pekala bu sınırlı alana da sonsuz tane ışık ışını geliyor olmalıdır. Ancak, sensörlerin boyutu olabildiğince küçültülürse ve seçilen çok kısa anlık bir birim zamanda gelen foton sayısı ölçülürse, buradan enerji değeri fiziksel hesaplarla elde edilebilir. Birim zamanda bir sensörün ölçtüğü enerji değerlerinin ortalaması, nesneden bu sensöre yansıtılarak ulaşan bir tek ışının enerji değeriymiş gibi düşünülebilir. Bu düşünce, sensörlerin boyutları ne kadar küçülürse o kadar fiziksel gerçekliğe yakınsayacaktır. Şimdi bu noktada, cevaplanması gereken şu soru akla gelmelidir. *“Bir tek sensöre geldiği düşünülen bir tek ışık ışını hangi nesneden ve nesnenin neresinden gelmektedir?”*. Bu soruya yanıt verebilmek için sensörden geriye doğru ışık ışını izlemek ve ışın yolu boyunca nesne uzayına doğru ilerlemek gibi bir yol düşünülebilir. Işın yolunu izlerken, ışının kestiği ilk nesne hangisi ise, bu ışının o nesneden ve ışın ile nesnenin kesiştiği noktadan geldiği sonucuna varılır. Ancak, ışın yolunu doğru bir şekilde izleyebilmek için, ışının uzaydaki konumunu bilmek gerekir. Bunun için ışının üzerinden geçtiğinden emin olunulan en az iki tane noktanın mutlaka var olması gerekir. Bu noktalardan birisi sensörün kendisi yani sensörün orta noktasıdır. Bu zaten bilinmektedir. Peki diğer nokta neresidir? Pekala ikinci nokta uzayda herhangi bir keyfi nokta olabilir. Bu keyfiyeti ortadan kaldırmak gerekir. Bunun için yapılması gereken en akıllıca şey, bütün sensörlere gelen ışık ışınlarının hepsinin daha sensörlere ulaşmadan önce bir tek ortak noktadan geçmelerini sağlayacak bir yöntem bulmaktır. Bunun için, sensör sistemine gelen ışınları sensörlere ulaşmadan hemen önce bir tek noktadan geçirecek şekilde, başka bir ifadeyle bu ışınları bir tek noktaya odaklayacak şekilde bir fiziksel sistemin kullanılmalıdır. Bu sistem, sensörlerde kullanılan optik sistemlerdir. Şimdi artık optik sistemin odak noktasının konumu bilinirse, ve ayrıca bütün sensörlerin de aynı referansa göre konumları tanımlanır, artık her bir ışının izleyeceği yol elde edilmiş olur. Bu ışınların nesne uzayında olması gereken uzaysal konumu da tanımlanır, artık hangi ışının hangi nesneden ve bu nesnenin neresinden geldiğini bulmak mümkün olur. Burada anlatılan süreç, aslında geometrik olarak da perspektif izdüşüm işlemine karşılık gelmektedir. Sensörlerin optik sistemini ve sensörlerin iç konumlarını tanımlayan parametrelere “iç

yöneltme elemanları” adının verildiği bilinmektedir. Benzer şekilde, sensör sisteminin nesne uzayına göre konumunu belirleyen parametrelere de “dış yöneltme elemanları” adı verilmektedir.

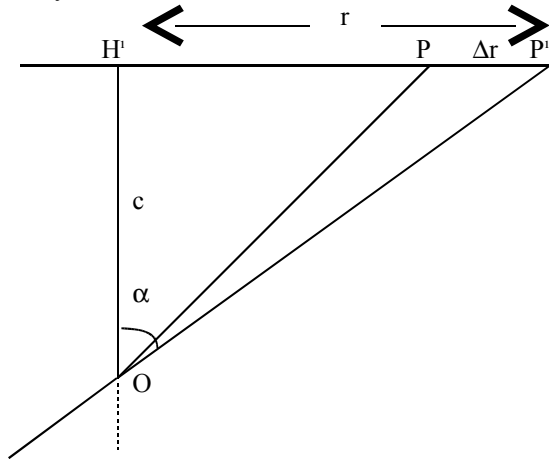
Buraya kadar anlatılanlarla, bir görüntünün geometrisinin doğrudan sensörlerin optik sistemine ve sensörlerin geometrik ve fiziksel özelliklerine bağlı olduğu kolayca anlaşılmalıdır. Dijital görüntüler, sensör sisteminin yetersizliği, örneklemede oluşan hatalar ve atmosferik etkenlerden dolayı geometrik distorsiyona uğrarlar. Bu hatalar sensör sistemini ve optik sistemi tanımlayan parametrelerle matematiksel olarak modellenip giderilmelidir. Bu bölümde, matris dizisi şeklinde sıralanmış CCD sensörleriyle elde edilen sayısal görüntülerde meydana gelen hatalar ve bu hataların modellenmesi ele alınmıştır. Satır dizisi şeklindeki sensör sistemlerinin optik sistemleri de aşağıdaki bölümde anlatılan parametrelerle modellenirler. Ancak, sensörlerin dizilişleri ve boyutlarındaki olası farklılıkların modellenmesi için kullanılan son iki parametre farklı tanımlanır. Satır dizisi CCD sensörlerin iç yöneltme bilinmeyenlerinin modellenmesi konusunda (Poli, 2003)’de yeterli bilgiler bulunmaktadır.

2.1. Radyal (Işımsal) Mercek Distorsiyonu

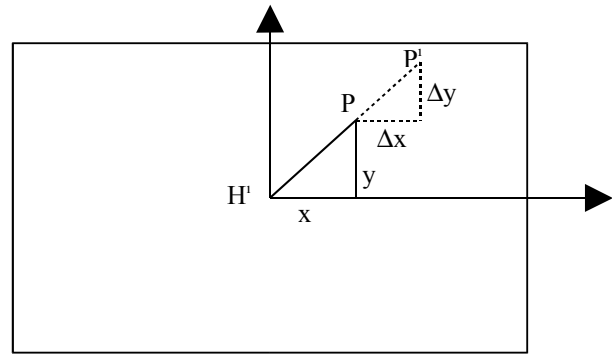
Işımsal distorsiyon her mercek sisteminde mutlaka bulunur ve görüntü noktalarının ideal konumlarından, ışımsal olarak yer değiştirmesine neden olur. Havadan gelen ışın cam ortama girer ve tekrar havaya çıkar. Bu sırada ışın ylında kırılmalar meydana gelir. Mercek sisteminde kullanılan cam maddenin kusursuz bir şekilde homojen olarak dağıtılamayacağı gerçeği kavranırsa, ışımsal distorsiyonun her mercek sisteminde mutlaka var olacağı anlaşılmış olur. Işın yolundaki yer değiştirme, ana noktadan itibaren doğru bir hat üzerinde simetrik olduğu varsayılabilir. Şekil 1 de Δr ışımsal distorsiyon olup P ideal konumu ile P' gerçek konum arasındaki ışımsal uzaklıktır. Bunun matematiksel ifadesi ;

$$\Delta r = r \cdot c \cdot \tan \alpha \quad (1)$$

olarak yazılabilir.



Şekil 1: Işımsal distorsiyon.



Şekil 2 : Işımsal distorsiyonun resim düzleminde gösterimi

Burada r görüntü noktasının ana noktadan uzaklığıdır. α açısı ise alan açısını ifade etmektedir. Işımsal distorsiyon resim düzleminde şekil 2 deki gibi gösterilebilir. Işımsal mercek distorsiyonu,

$$r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2 \quad (2)$$

olmak üzere

$$\Delta x_r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 \quad \Delta y_r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 \quad (3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada “r” ışımsal uzaklık, k_i ler ışımsal distorsiyon katsayılarıdır

2.2. Teğetsel Mercek Distorsiyonu

Sensör sistemlerinde genellikle bir mercek yerine birden çok mercek kullanılır ve bu merceklerin her birinin odak noktalarının aynı doğru üzerinde olması gerekir. Ancak bunları kusursuz bir şekilde yerleştirmek mümkün değildir. Bunun sonucunda da teğetsel (dışmerkezlik) distorsiyon oluşur. Bu distorsiyon (2) kısaltmaları ve,

$$\bar{x} = (x - x_0) \quad \bar{y} = (y - y_0) \quad \bar{z} = -c \quad (4)$$

olmak üzere,

$$\Delta x_d = (r^2 + 2\bar{x}^2)P_1 + 2\bar{x}\bar{y}P_2 \quad \Delta y_d = 2\bar{x}\bar{y}P_1 + (r^2 + 2\bar{y}^2)P_2 \quad (5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada teğetsel distorsiyon katsayıları P_1 ile gösterilmiştir. (Dörtzel vd., 2003).

2.3. Sensör Düzlemindeki Distorsiyon

Sensör düzlemindeki distorsiyon parametreleri de ampirik doğadadır ve polinomal olarak modellenirler. Bu parametreler “ b_1 ”ölçek, “ b_2 ” büzülmedir.

$$\Delta x = b_1 \bar{x} + b_2 \bar{y} \quad \Delta y_f = 0 \quad (6)$$

Ölçek parametresi b_1 kare olmayan piksel boyutunu modellerken, b_2 büzülme parametresi düzlem olmayan piksel dizisine karşılık gelir (Dörtzel vd., 2003).

Bunlardan başka düzlem dışı düzlemsizlik ve atmosferik etkenler nedeniyle oluşan hatalar da vardır. Atmosferik etkenlerden meydana gelen hataların 1 km’lik uzaklıkta 2 cm kadar olduğu belirtilmektedir. Fraser (1997)’ in bildirdiğine göre düzlemden sapma Kodak KAF-1600 1K x 1K CCD de yaklaşık 0.3µm civarındadır. Düzlem dışı düzlemsizliği fotogrametrik tekniklerle belirlemek mümkün değildir. Sadece CCD yüzeyi doğrudan ölçülerek bu hatanın etkileri kontrol altına alınabilir (Dörtzel vd., 2003). Bu nedenle bu hatalar bu çalışmada göz ardı edilmiştir.

3. REKTİFİKASYON (GEOMETRİK GÖRÜNTÜ DÖNÜŞÜMLERİ)

Dijital bir görüntü, temel olarak radyometrik özelliklerin ve konumsal bilgilerin her ikisine birden sahip olan, iki boyutlu piksel dizilerinden oluşur (Fogel, 1997). Rektifikasyon, görüntülerin doğal olarak sahip oldukları distorsiyonlarının giderilmesiyle, hatasız (en az hatalı) hallerinin elde edilmesi işlemidir.

Dijital görüntülerin rektifikasyonu için üç ana yöntem kullanılır; polinomal rektifikasyon, projektif rektifikasyon ve diferansiyel rektifikasyon. Bu tekniklerden ilk iki tanesi, sensör geometrisini ve yönettmesini dikkate almadan görüntü ve orto-foto arasında tanımlanan analitik dönüşümlerle gerçekleştirilir. Bunlar daha çok yaklaşık çözümlerdir. Fakat son teknik, görüntüleme sisteminin fiziksel gerçekliğini kolinearite eşitlikleriyle modeller ve yükseklik farklarından kaynaklanan bozulmaları da (relief displacement) düzeltir (Novak, 1992).

Sayısal yükseklik modeli tabanlı, dijital diferansiyel rektifikasyon en yaygın sayısal orto-foto üretim yöntemidir. Sayısal arazi modeli gerektirmeyen ve çift resim kullanılan yöntemler olsa da bu çalışmada en yaygın olarak kullanılan ve en doğru sonuçlar veren dijital rektifikasyon yöntemi araştırılmıştır (Xuan and Lin, 2002).

Rektifikasyon işleminde yapılan iş aslında, hatalı görüntüye geometrik dönüşüm uygulayarak hataları gidermektir. Bu durumda problem, geometrik hataları düzeltmek için kullanılacak hata düzeltme fonksiyonunu (dönüşüm fonksiyonunu ve parametrelerini) belirleme ve hesaplama problemi olarak ele alınmalıdır.

Geometrik görüntü dönüşümünün ilk adımı piksel koordinat dönüşümüdür. Piksel koordinat dönüşümünde amaç, giriş görüntüsündeki piksellerin, sonuç görüntüsündeki koordinatlarını hesaplamaktır. İkincisi ise sonuç görüntüdeki piksellerin parlaklığını hesaplamakta kullanılan gri düzey enterpolasyonu yani yeniden örneklemedir.

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

Piksellerin, geometrik dönüşümle hesaplanan yeni koordinat değerleri tamsayı değerler olmayacaktır. Tamsayı grid değerlerindeki parlaklık değerlerini elde edebilmek için gri düzey enterpolasyonunun yapılması gerekir (Zhang, 2001). Yeniden örnekleme zorunlu olması ile ilgili literatürde en sık karşılaşılan açıklama budur. Ancak bunun başka önemli nedenleri daha vardır. Dönüşümden sonra, giriş ve sonuç görüntüdeki piksel sayıları eşit olmayabilir. Örneğin, görüntüler arasında ölçek farkı varsa, iki görüntü boyutu aynı olmayacak dolayısıyla piksel sayıları farklı olacaktır. Yeni piksel değerlerinin ne olacağı, ancak gri düzey enterpolasyonu yapılarak elde edilebilir.

Gri düzey enterpolasyonu, hesaplanan yeni piksel noktasının parlaklık değerinin etrafındaki komşu pikseller kullanılarak hesaplanmasını sağlayan tekniklerin genel adıdır. Pikselin parlaklık değerinin yeniden bulunması işlemini içerdiği için genel olarak, yeniden örnekleme (resampling) ya da gri düzey yeniden örnekleme (gray-level resampling) olarak da kullanılır.

Gri düzey enterpolasyonu önemlidir, çünkü sonuç görüntünün görüntü kalitesini etkiler (Sonka vd., 1993). Seçilecek yöntem görüntü kalitesini sonuçta, doğruluğu etkileyecektir. Seçilecek yöntem, mümkün olduğunca az işlem yükü getirirken, görüntü kalitesinde kayba neden olmamalıdır. Literatürde sıklıkla kullanılan üç yöntem; en yakın komşuluk, bi-lineer enterpolasyon ve bi-küçük enterpolasyondur.

En yakın komşulukta dönüşüm sonrası en yakın komşu pikselin parlaklık değeri alınır. Çok hızlı bir yöntem olmasına karşın bir çok durumda sonuç görüntüde basamaklı bir görünüm oluşturmaktadır Bi-lineer enterpolasyon, gri düzey değeri bulunacak pikselin dördü komşuluğunu araştırır ve bu komşulukta, parlaklık fonksiyonunun bi-lineer olduğunu kabul eder. Sonuç görüntüde basamaklanma etkisi azalırken bulanıklaşma görülmektedir. Bi-küçük enterpolasyon yöntemi, parlaklık fonksiyonu olarak bi-küçük polinomal yüzey fonksiyonu kullanılır. Enterpolasyon için 16 komşu pikselden yararlanılır. Bi-küçük enterpolasyonda, en yakın komşuluk enterpolasyonundaki gibi blok etkisi sorunu yoktur, bi-lineer enterpolasyonundaki bulanıklaşma sorununun da üstesinden gelir.

3.1. Polinomal Rektifikasyon

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

$$x' = \sum_{r=0}^m \sum_{k=0}^{m-r} a_{rk} x^r y^k \quad y' = \sum_{r=0}^m \sum_{k=0}^{m-r} b_{rk} x^r y^k \quad (7)$$

Yukarıdaki (37) eşitliği açık yazılırsa,

$$\begin{aligned} x' &= a_{00} + a_{01}y + a_{10}x + a_{11}xy + a_{02}y^2 + a_{20}x^2 + a_{12}xy^2 + a_{21}x^2y + \dots + a_{rk}x^r y^k \\ y' &= b_{00} + b_{01}y + b_{10}x + b_{11}xy + b_{02}y^2 + b_{20}x^2 + b_{12}xy^2 + b_{21}x^2y + \dots + b_{rk}x^r y^k \end{aligned} \quad (8)$$

şeklinde elde edilir (Monti vd., 1999).

Dönüşümü gerçekleştirebilmek için, dönüşüm parametreleri a_{rk} ve b_{rk} lar bilinmelidir. Eğer dönüşüm parametreleri bilinmiyorsa, her iki görüntüdeki ortak noktalar yardımıyla hesaplanır ve dönüşüm yapılabilir. Burada iki görüntüden kastedilen, hatalı ve hatasız görüntüdür. Hatasız görüntü henüz oluşturulmamıştır. Ancak, geometrik düzeltmeden sonra orijinal hatalı görüntüdeki bazı noktaların hatasız koordinatlarının da bilinmesi gerekir. Örneğin bir uydu görüntüsünün, görüntü bölgesinin bir çizgisel haritası üzerine çakıştırılması istenirse, bu durumda hem haritada hem de resimde ortak noktaların seçilmesi gerekir. Bundan sonra yeterli ortak nokta ile dönüşüm parametreleri hesaplanır ve görüntü haritayla çakışacak şekilde görüntüye geometrik dönüşüm uygulanır.

Eğer geometrik dönüşüm, görüntüdeki konuma bağlı olarak süratle değişmiyorsa, düşük seviyeli polinomal yaklaşımlar iyi sonuçlar verebilir. Eğer dönüşüm konuma duyarlıysa yani, değişimler konuma göre büyük değişimler gösteriyorsa, düşük düzeyli polinomlar başarısız olacaktır. Bu durumda yaklaşım yüksek düzeyli bir polinom olmalıdır (Zhang, 2001).

Dönüşümü yapabilmek için çeşitli teknikler mevcuttur. Bi-lineer dönüşüm, literatürde sıklıkla kullanılan dönüşüm türlerinden biridir. Bunun yanı sıra; benzerlik dönüşümü veya afin dönüşümü de, dönüşüm fonksiyonu olarak kullanılabilir.

3.1.1. İki Boyutlu Benzerlik Dönüşümü

İki boyutlu benzerlik dönüşümü; iki öteleme, bir ölçek ve bir dönüklük ile tanımlanır. x , y distorsiyonlu giriş görüntüsündeki piksel koordinatları ve x' , y' sonuç görüntüdeki koordinatlar olmak üzere eşitlikler;

$$x' = a_0 + a_1x + a_2y \quad y' = b_0 + b_1x + b_2y \quad (9)$$

şeklinde. Burada $a_2 = b_1$ ve $a_1 = -b_2$ yazılırsa benzerlik dönüşümü elde edilir.

Dönüşümü gerçekleştirebilmek için, her iki görüntüdeki iki ortak nokta yeterlidir. Bu iki ortak nokta yardımıyla, bilinmeyen dönüşüm parametreleri hesaplanıp dönüşüm gerçekleştirilebilir.

Hesaplama açısından basit bir yöntemdir, bilinmeyen dönüşüm parametrelerini hesaplayabilmek için iki nokta çifti yeterlidir. Ancak görüntüdeki distorsiyonu tam olarak modellemek, özel durumlar hariç, imkansızdır.

3.1.2. Afin Dönüşümü

Afin dönüşümü, dönüklük, öteleme, ölçek ve eğrilik gibi tipik geometrik dönüşüm elemanlarını içeren 6 parametrelilik bir dönüşümdür. Dönüşüm eşitlikleri (8) polinomunun ilk üç parametresinin alınmasıyla;

$$x' = a_0 + a_1x + a_2y \quad y' = b_0 + b_1x + b_2y \quad (10)$$

şeklinde elde edilir. Dönüşümün gerçekleştirilebilmesi için, 6 adet a_i , b_i parametresinin bilinmesi veya her iki görüntüdeki 3 ortak nokta çiftinden hesaplanması gerekir.

3.1.3. Bi-Linear Dönüşüm

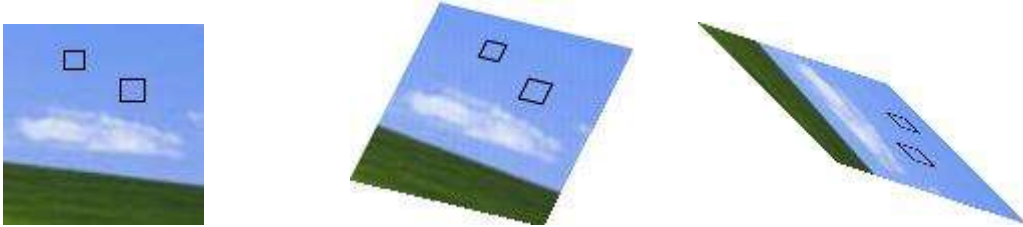
Pratikte, dönüşüm fonksiyonu olarak en sık kullanılan dönüşüm yöntemidir. Her iki görüntüdeki dört çift ortak nokta, dönüşümü belirlemek için yeterlidir. (Zhang, 2001).

Yukarıdaki (8) eşitliklerinin ilk dört terimini alırsak bi-linear dönüşüm eşitlikleri için;

$$x' = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy \quad y' = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy \quad (11)$$

denklemleri yazılabilir. Bilinmeyen a_i , b_i parametreleri bulunarak dönüşüm yapılır.

Polinomlar, rektifikasyon için büyük kolaylık sağlamasına rağmen, dönüştürülmüş görüntüde bazı hatalar hala giremezler. Çünkü, yükseklikten dolayı meydana gelen hataları tam olarak düzeltemezler ve görüntüleme sisteminin geometrisini içermezler. Yüksek dereceli polinomların görüntülerdeki bozulmayı daha iyi giderdiği görülmüştür (Novak, 1992). Ancak bu da yeni görüntünün fiziksel gerçeklikten daha da uzaklaşmasına neden olabilir. Şekil 3'de, görüntü dönüşümüne örnek verilmiştir.



Şekil 3: (a) Orijinal görüntü, (b) Bozulmuş görüntü, (c) Çok bozulmuş görüntü

Şekil 3 deki orijinal görüntü yapay olarak distorsiyona uğratılmış ve sırasıyla (b) ve (c) deki 1. ve 2. bozulmuş görüntü elde edilmiştir. Restore 1.0 yazılımında görüntülerdeki ortak köşe noktaları yardımıyla bilinmeyen dönüşüm parametreleri hesaplanmış ve afin dönüşümü yapılarak Şekil 4 deki düzeltilmiş görüntüler elde edilmiştir.



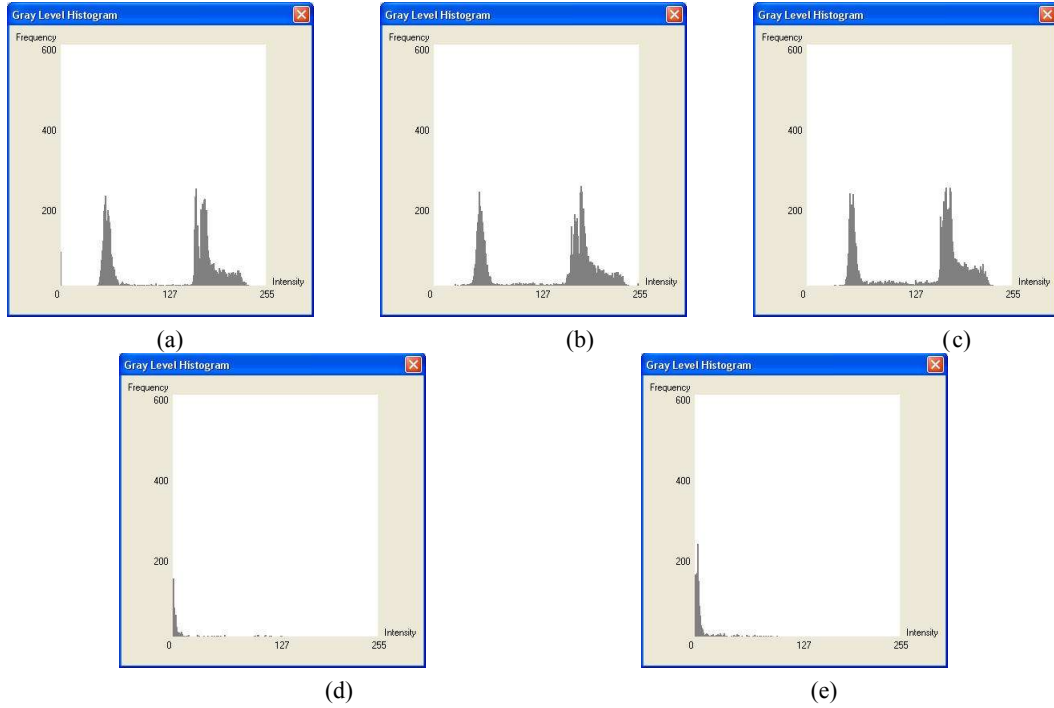
Şekil 4: Rektefe edilmiş görüntüler.

Rektifikasyon işlemi sırasında piksel değerlerinin yeniden örnekleme için bi-küçük enterpolasyon yöntemi kullanılmıştır. Şekil 4 de görüldüğü gibi görüntüler büyük oranda düzeltilmiştir. Ancak şekil 3 (c) deki görüntünün aşırı distorsiyonlu olması nedeniyle yeniden örnekleme sonrasında bulanık bir görüntü elde edilmiştir. Düzeltilmiş görüntülerin orijinal görüntüden farkları Restore 1.0 yazılımında hesaplanarak şekil 5 de verilmiştir.



Şekil 5: Düzeltmiş görüntülerin orijinal görüntüden farkları.

Hesaplanan bu fark görüntülerin piksellerinin tamamının beklenen değeri sıfır, yani siyah bir görüntüdür. Ancak örneklemeden ve hesaplamalardaki yuvarlatmalardan kaynaklanan hatalar nedeniyle beklenen görüntü elde edilemez. Görüntülerin histogramları incelenirse bu fark daha net olarak anlaşılacaktır.



Şekil 6: (a) Orijinal görüntünün, (b) 1. düzeltilmiş görüntünün, (c) 2. düzeltilmiş görüntünün (d) 1. fark görüntüsünün, (e) 2. fark görüntüsünün histogramı

Şekil 6 (a) da orijinal görüntünün ve (b) ve (c) de düzeltilmiş görüntünün histogramları verilmiştir. Buradan görülebileceği gibi bu üç histogram birbirinden farklıdır. Bu farkın nedeni yukarıda da belirtildiği gibi örneklemedeki ve hesaplamalardaki yuvarlatmalardan kaynaklanan hatalardır. Şekil 6 (d) ve (e) de verilen görüntüler incelenirse bu fark daha rahat anlaşılabilir. Buradaki histogramlardaki frekans değerlerinin tamamı 0 parlaklık değeri üzerinde olması beklenmektedir. Ancak görüldüğü gibi, 1. düzeltilmiş görüntüde biraz sapmalar varken 2. düzeltilmiş görüntüde bu sapmalar daha fazladır.

3.2. Projektif Dönüşüm ile Rektifikasyon

Projektif dönüşüm, görüntülerdeki merkezi izdüşümden kaynaklanan perspektif etkinin giderilmesi amacıyla kullanılır. Görüntülerdeki perspektif etki giderilerek ortogonal bir görüntü elde edilir. Yani görüntü paralel izdüşümle elde edilmiş gibi nesne düzlemine paralel bir hale getirilir.

Projektif dönüşüm, iki düzlem arasındaki ilişkiyi tanımlar. İki görüntüdeki karşılıklı dört nesne noktasından elde edilen sekiz parametreyle tanımlanır. İç ve dış yöneltme elemanlarına gerek yoktur. Çünkü, bu parametreler yöneltme elemanlarını içerir (Novak, 1992). Dönüşüm fonksiyonları;

$$x = \frac{a_1x' + a_2y' + a_3}{c_1x' + c_2y' + 1} = f_x(x', y') \quad y = \frac{b_1x' + b_2y' + b_3}{c_1x' + c_2y' + 1} = f_y(x', y') \quad (12)$$

şeklinde. Fonksiyon dikkatlice incelenirse, kolinearite eşitliklerine benzemektedir. Buradaki a_i , b_i ve c_i parametreleri kolinearite denklemleri yardımıyla hesaplanır. Kolinearite denklemlerinde “Z=0” alınıp, $(-r_{33}.c)$ ile

bölünürse, kolinearite eşitlikleri (12) deki şeklini alır. Burada r_{33} , dönüklük matrisinin elemanı ve c kameranın asal uzaklığıdır.

Bu yöntem genellikle düz alanların hava fotoğraflarında ve bina yüzeylerinin görüntülerinde bulunan hataları gidermekte kullanılır.

Şekil 7 de bir test alanının görüntüsü görülmektedir. Test alanı üzerinde işaretli 140 adet kontrol noktası bulunmaktadır. Bu işaretli noktaların 68 tanesinin üç boyutlu koordinatları teodolit yardımıyla ölçülmüştür (Beyer, 1992). (Bu görüntüler ve noktaların ölçülen nesne koordinat değerleri Zurih-ETH Fotogrametri Enstitüsünden elde edilmiştir.)

Görüntünün rektifikasyonu için öncelikle bilinmeyen parametrelerin hesaplanması gerekmektedir. Bunun için Restore 1.0 yazılımı yardımıyla, ilk olarak self-kalibrasyon ile demet dengelemesi yapılmıştır. İşlem sonucunda bilinmeyen iç ve dış yöneltme elemanları ile ek parametrelerin dengeli değerleri elde edilmiştir. Perspektif dönüşüm parametreleri yukarıda anlatıldığı gibi, Restore 1.0 yazılımı tarafından iç ve dış yöneltme elemanları kullanılarak hesaplanmıştır. Daha sonra hesaplanan bu parametrelerle projektif rektifikasyon işlemi uygulanmış ve şekil 8 deki rektefe edilmiş görüntü elde edilmiştir.



Şekil 7: Test görüntüsü.



Şekil 8: Rektefe edilmiş görüntü.

Şekil 8 e bakılırsa, test görüntüsünün büyük oranda düzeltilmiş olmasına rağmen, hala hatalı olduğu görülür. Ayrıca perspektif etki tam olarak giderilememiştir. Bunun nedeni yükseklikten kaynaklanan distorsiyonların giderilememiş olmasıdır. Görüntünün bu hatalardan arındırılabilmesi için diferansiyel rektifikasyon yöntemi kullanılmalıdır.

3.3. Dijital Diferansiyel Rektifikasyon

Diferansiyel rektifikasyon terimi, fotoğrafın küçük parçalarının ayrı ayrı aynı anda rektefe edilmesidir. Geleneksel analog ve analitik orto-projektörler bunu optik görüntü transferi ile yaparlar. Dijital rektifikasyonda her piksel ayrı ayrı orijinal görüntüden sonuç görüntüye döndürülür (Novak, 1992). Diferansiyel rektifikasyon, literatürde sıklıkla orto-rektifikasyon olarak da adlandırılmaktadır.

Yükseklik düzeltmelerinin yapılabilmesi için sayısal yükseklik modeline gerek vardır.

$$x = x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = f_x(x', y')$$
$$y = y_0 - c \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = f_y(x', y')$$
(13)

Burada x' , y' ler harita koordinatları X, Y lere eşittir. dönüşümü yapabilmek için iç ve dış yöneltme elemanları ve sayısal yükseklik modeli bilinmelidir. Dönüşümün doğruluğunu arttırmak için algılayıcının hatalarının modellendiği ve önceki bölümlerde anlatılan ek parametreler de modele dahil edilebilir.

Rektifikasyon için, sayısal yükseklik modelinin grid boyutuna göre, görüntüde küçük (diferansiyel) alanlar seçilir. Bu alanlar modeldeki gridlere karşı gelen alanlardır. Bu alanlardaki köşe noktalarının resim koordinatları, grid köşe noktalarının koordinatlarından en küçük yükseklik baz alınarak, dengelenmiş iç ve dış yöneltme elemanlarıyla yeni resim koordinatları hesaplanır. Rektifikasyon sonrası oluşan yeni piksellerin parlaklık değerleri ve grid içerisindeki diğer noktalar herhangi bir enterpolasyon yöntemi kullanılarak belirlenir ve görüntü yeniden örneklenir. Kullanılacak

enterpolasyon yönteminde bilinmeyen katsayılar, orijinal ve düzeltilmiş resim koordinatları yardımıyla hesaplanabilir. Bu işlem görüntünün tamamı üzerinde tek tek uygulanır ve sonuç görüntüde diferansiyel parçalar birleştirilir. Böylelikle sonuç görüntü (düzeltilmiş görüntü) elde edilmiş olur.

Polinomlar yükseklik hatalarını düzeltemezler, çünkü kullanılan yer kontrol noktalarının yükseklikleri hakkında bilgi yoktur. (Rocchini, 2004). Dijital diferansiyel rektifikasyon, görüntülerdeki hataları gideren en iyi rektifikasyon yöntemidir. Görüntüde yükseklik farklarından dolayı meydana gelecek olan hataları da düzeltir. Hem algılayıcının geometrisini hem sayısal arazi modelinden yükseklik bilgisini kullanır ve görüntüde oluşabilecek her türlü hatayı giderir. Bu yöntemin en büyük dezavantajı başlangıçta çok veri gerektiriyor olmasıdır ki çoğu durumda sayısal yükseklik modeli mevcut olmayabilir.

4. SONUÇ

Görüntülerdeki geometrik hataların giderilmesi için fazla duyarlılık gerektirmeyen polinomal geometrik dönüşümler kullanılabilir. Özellikle düşük geometrik duyarlılığa sahip uydu görüntülerinin rektifikasyonunda, ya da görüntülerin elde edildiği sensörler hakkında bilgi bulunmadığı durumlarda tercih edilebilirler. Hava fotogrametrisinde yaklaşık olarak düz kabul edilebilecek alanların hava fotoğraflarından küçük ölçekli orto-fotoların üretilmesi için projektif rektifikasyon tercih edilebilir. Benzer şekilde, bina yüzeylerinin ya da düzlem olarak kabul edilebilecek nesne yüzeylerinin yakın fotogrametri ile değerlendirilmesinde ve foto-realistik texture haritalama için kullanılacak görüntülerin orto-rektifikasyonunda da projektif dönüşüm kullanılabilir. Daha duyarlı ortofotoların üretilmesi için yükseklik farklarından dolayı oluşan hataların da geometrik olarak düzeltilmesi gerekir. Bu amaçla da perspektif izdüşüm geometrisi, sensör parametreleriyle birlikte kullanılarak dijital rektifikasyon yapılmalıdır. Bütün geometrik dönüşümlerden sonra yapılması gereken yeniden örnekleme için, bu çalışmada kullanılan enterpolasyon yöntemlerinden en iyi sonuç veren yöntemin bi-kübik enterpolasyon yöntemi olduğu görülmüştür. Ancak, yeniden örnekleme için kullanılmak üzere herhangi bir enterpolasyon yöntemini seçmek için kullanılacak teorik bir ölçüt yoktur. Bu nedenle, rektifikasyon için geliştirilecek yazılımların bütün enterpolasyon tekniklerini yapacak kapasitede olması gerekir. Rektefe edilen görüntülerin, radyometrik değerler kullanılarak sınıflandırma amacıyla kullanılması düşünülürse, bu durumda yeniden örnekleme için en yakın komşu enterpolasyonu tercih edilmelidir. Çünkü diğer yöntemler orijinal radyometrik değerleri bozarlarlar.

KAYNAKLAR

Beyer, H., 1991. An Introduction to Photogrammetric Camera Calibration, Invited Paper, Seminaire Orasis, St. Malo, September 24-27, pp. 37-42.

Beyer, H., 1992. Accurate Calibration of CCD Cameras. Proceeding of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Patern Recognition , Champaign, Illinois, pp.96-101.

Beyer, H., 1992. Geometric and Radiometric Analysis of a CCD Camera Based Photogrammetric Close-Range System. Dissertation, No.9701, ETH, Zurich.

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

Fogel, D. N., 1997. Image Rectification with Radial Basis Functions : Application to RS/GIS Data Integration. Available on site http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/fogel_david/santafe.html

Fraser, C. S., 1997. Digital Camera Self-Calibration. JPRS, April, 52(4): 149-159.

Gruen, A. and Beyer, H., 2001. Springer Series in Information Sciences. Vol. 34 Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

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

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

Poli, D., 2003. Sensor Model for Airborne CCD Linear Scanners. www.photogrammetry.ethz.ch/general/persons/daniela_pub/PS_12.pdf

Remondino, F., 2000. Praktikum in Photogrammetry, Investigation and Calibration of Sony DSC-F505 Cybershot, Institute of Geodesy and Photogrammetry ETH-Hönggerberg, Zurich, Switzerland.

Rocchini, D., 2004. Misleading Information From Direct Interpretation of Geometrically Incorrect Aerial Photographs. *The Photogrammetric Record*, 19(106):138-148.

Sonka, M., Hlavak, V. and Boyle, R., 1993. *Image Processing Analysis and Machine Vision*. Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London, UK.

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

Zhang, X., 2001. Image Correction Using Geometric Transformation. Iowa State University. [http://www.eng.iastate.edu/ee528/Projects/Project1-s2001/results/geometric %20 transxiangwei.doc](http://www.eng.iastate.edu/ee528/Projects/Project1-s2001/results/geometric%20transxiangwei.doc)