

GÖKTÜRK-2 GÖRÜNTÜLERİNDEN ÜÇBOYUTLU GERİÇATIM

A. Ö. Kozal^{a,b}, U. M. Leloğlu^b

^a TÜBİTAK UZAY, Ankara, Türkiye – omer.kozal@tubitak.gov.tr

^b ODTÜ, Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri, Ankara, Türkiye - leloglu@metu.edu.tr

ANAHTAR KELİMELER: Taramalı Algılayıcı, Epipolar Geometri, Stereoskopik Görüntüleme, 3-B Geriçatım

ÖZET:

Göktürk-2 uydusu, sahip olduğu 2,5 m yer örnekleme mesafeli yüksek çözünürlüklü algılayıcı ve çevik yönelim kontrol sistemi ile yüksek çözünürlüklü stereoskopik görüntüleme yapabilmektedir. Bu çalışmada, Göktürk-2 uydusu ile alınan stereoskopik görüntülerden yeryüzünün üç-boyutlu yapısının geriçatılması konusu çalışılmıştır. Çerçeve tipi (frame) görüntüleyiciler ile stereoskopi çok çalışılmış bir konu olup geometrisi görece kolaydır. Ancak Göktürk-2 gibi taramalı (pushbroom) görüntüleyicilerde geometri karmaşıktır. Belli varsayımlar altında epipolar çizgilerin doğrusal değil eğri olarak oluştuğu gösterilmiştir [Kim 2000, Lee et al. 2002]. Ancak, uydunun yönelim kontrol sisteminin özelliklerine bağlı olarak doğrusal epipolar çizgilerden sapma farklı karakterde olabilir. Çalışmamızda, öncelikle Göktürk-2 uydusunun kamerası modellenerek kalibre edilmiştir. Ardından, taramalı algılayıcının karmaşık epipolar geometrisini kestirerek epipolar düzeltme yapmak yerine, nesne uzayında çözüm yapılarak hesaplanan yerel olarak doğrusal epipolar geometri ile görüntüler eşlenerek sayısal yükseklik haritası çıkartılmıştır.

KEY WORDS: Pushbroom Sensors, Epipolar Lines, Stereoscopic Images

ABSTRACT:

Göktürk-2 satellite can capture high resolution stereoscopic images with the 2.5 m GSD high resolution sensor and an agile attitude control system. In this work, reconstructing 3D structure of the earth is studied from the stereoscopic images that Göktürk-2 offers. Stereoscopia is a well-studied subject for frame type sensors, but for the pushbroom sensors like Göktürk-2 has, the geometry is quite complicated. It is proven that with certain assumptions the epipolar lines are not linear but curves [Kim 2000, Lee et al. 2002]. Depending on the properties of the attitude control system, deviation from the linear epipolar lines can be different. In our study, first the sensor of the Göktürk-2 satellite is modelled and calibrated. Then instead of predicting the complicated epipolar geometry of the pushbroom imager and correcting epipolarity, the stereo pairs are match to construct the digital elevation model with the local linear epipolar geometry that solved in the object space.

1. GİRİŞ

Göktürk-2 (2,5 m Çözünürlüklü Görüntüleme Amaçlı Bilimsel Araştırma ve Teknoloji Geliştirme) Uydusu, TÜBİTAK UZAY ve TUSAŞ ortaklığı tarafından Türkiye’de geliştirilmiş ve üretilmiş, 2,5 m çözünürlükte pankromatik ve 5 m çözünürlükte multispektral görüntüleyiciye sahip bir yer gözlem uydusudur. 18 Aralık 2012 tarihinde uzaya fırlatılmış olan uydusu, çevik yönelim yeteneği sayesinde stereoskopik çekim yapabilmektedir.

Stereoskopik görüntüleme, bir bölgenin birden fazla bakış açısı ile görüntülenmesidir. Bu görüntüler farklı zamanlarda alınabileceği gibi çevik yönelim kontrol sistemine sahip uydularda aynı geçişte ileriye doğru ve geriye doğru bakılarak da alınabilmektedir. Böylelikle görüntüler arasındaki zamansal fark en aza indirilmektedir. Stereo geometri ile alınmış görüntülerden söz konusu bölgenin üç-boyutlu (3B) şeklini oluşturmak mümkündür.

Çerçeve tipi (frame, iki-boyutlu) görüntüleyicilerden elde edilen görüntülerin stereo geometrisi fotogrametrinin çok olgunlaşmış bir konusudur. Ancak uydularda sıklıkla kullanılan taramalı (pushbroom, tek-boyutlu) algılayıcıların geometrisi karmaşıktır. Hem kamera modeli çok daha karmaşıktır, hem de görüntü eşleme aşamasını kolaylaştıran epipolar düzeltme çok daha zordur. Bu nedenle Göktürk-2 gibi uyduların stereo görüntü işleme işlemleri daha karmaşıktır.

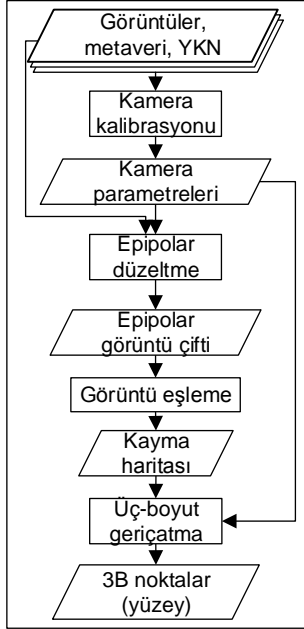
Bu çalışmada; taramalı algılayıcıların görüntü düzleminde oluşan karmaşık epipolar yapısı, geometrinin nesne uzayına taşınması ile çözümlenmeye çalışılmıştır. Görüntü verisi olarak Göktürk-2 tarafından alınmış stereo çift görüntüler kullanılmıştır. Epipolar geometrinin nesne uzayına taşınması için, görüntü başlangıç ve bitiş zamanındaki uydunun yönelimi ve pozisyon ve hız bilgilerinden de faydalanılarak bir kamera modeli oluşturulmuş, model yer kontrol noktaları kullanılarak kalibre edilmiş ve temel bir eşleme algoritması ile üç-boyutlu yapı oluşturulmuştur. Sonuçlar ASTER yükseklik modeli ile karşılaştırılmıştır. ASTER yükseklik modeli, METI ve NASA tarafından üretilmiştir (Tachikawa vd., 2011).

2. TARAMALI ALGILAYICILAR İLE STERESKOPI

Çerçeve tipi görüntüleyiciler ile stereo 3B geriçatım işlemi başta haritacılık olmak üzere çeşitli alanlarda rutin olarak kullanılmaktadır. Çeşitli şekillerde gerçekleştirilmesi mümkünse de tipik bir akış diyagramı Şekil 1’de gösterildiği gibidir.

Epipolar geometri, bir bölgenin stereoskopik görüntülenmesi ile oluşan 3B noktaların iki boyuta dönüşümü ile oluşan noktaların geometrik ilişkisini görüntüleyicilerin merkezi ile açıklar. Buna göre, çerçeve tipi bir görüntüleyici için, görüntü düzleminde aynı pikselde görüntülenmiş ve kameraya farklı uzaklıktaki

noktaların diğer stereo eş kamerada görüntülediği piksellerin görüntü düzlemindeki geometrik yeri epipolar çizgileri oluşturmaktadır. Şekil 1'deki iş akışında bulunan epipolar düzeltme aşaması sayesinde bir görüntüdeki herhangi bir noktanın diğer görüntüdeki karşılığının aynı numaralı satırda olması garantilenmekte, bu da eşleme aşamasını çok kolaylaştırmaktadır.



Şekil 1. Tipik stereo görüntü işleme akışı.

Taramalı algılayıcılar görüntülerin, çizgi halinde bir algılayıcı üzerine düşürülerek oluşturulduğu, hareketli bir platform üzerinde yerleştirilerek doğrusal algılayıcı ile tüm alanın tarandığı bir görüntüleyici türüdür. Taramalı algılayıcılarda görüntünün her satırı farklı zamanlarda alındığı için hareketli platformun ve dolayısı ile algılayıcının yeri her çizgi için değişmektedir. Bunun yanında platformun yönelimde oluşabilecek hareketler sebebiyle görüntüdeki satırlar farklı yönelimler ile alınabilmektedir. Bu sebeple görüntüler işlenirken her satır ayrı bir görüntüymüş gibi ele alınmalıdır. Bu nedenle taramalı kamerada stereo geometrisi çerçeve tipi görüntüleyicilerden farklı ve daha karmaşıktır. Görüntüleyici merkezinin her satır için değişiyor olması ve ayrıca yönelimde oluşabilecek farklılıklar, taramalı algılayıcının epipolar geometrisini çok karmaşık hale getirmektedir. Yönelim sabit kabul edildiğinde bile, oluşan epipolar geometri hiperboller ile ifade edilebilmektedir [Gupta ve Hartley1997]. Wang vd., 2011, çalışmasında, epipolar geometri nesne uzayına taşınmış, kamera için rasyonel fonksiyon modeli kullanılmıştır. Bunun için nesne uzayından H yüksekliğinde bir düzlem tanımlanmış, epipolar çizgiler bu düzlem üzerine projekte edilmiştir. Geometri problemindeki bilinmeyen sayısını azaltmak adına çalışmalar yapılmış, aynı yörüngede iz boyu (along track) stereo görüntüleme uydunun kepler yörüngesi iki parametre ile ifade edilmiş ve görüntüleme boyunca yöneliminin değişmediğini kabul edilerek bilinmeyen sayısını azaltılmış ve kesin (rigorous) kamera modeli oluşturulmuştur [Dowman ve Michalis 2003]. Poli vd., 2004 çalışmasında uydunun yörünge ve yönelim bilgileri 2.dereceden denklemler ile modellenmiş, algılayıcının iç modeli, öz kalibrasyon parametreleri ile çözülerek keskin algılayıcı modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model farklı algılayıcılarda uygulanmıştır.

3. UYGULANAN YÖNTEM

3.1 Veriler

TÜBİTAK UZAY projeleri olan BiLSAT ve RASAT uydularında kazanılan tecrübe ile geliştirilen ve Türkiye'nin RASAT'tan sonra ikinci milli olarak üretilmiş yer gözlem uydusu olan Göktürk-2, birçok farklı amaç için dünyanın her bölgesinden herhangi bir kısıt olmadan görüntü alabilmektedir [Atak 2015]. Mekânsal çözünürlüğü siyah-beyaz bantta 2,5 m ve R,G,B,NIR bantlarda 5 m, radyometrik örnekleme çözünürlüğü de 11 bit olan Göktürk-2 uydusunun; görüntü genişliği 20 km'dir [Çınar 2014].

Çalışmada kullanılan görüntü 2014 yılı Ocak ayında Diyarbakır bölgesinden alınmış olup 40 km x 20 km'lik bir alanı kapsamaktadır (Şekil 2). Stereo çift görüntünün alınması sırasında, ilk görüntü güneyden +30° bir yunus açısı ile alınmış; uydu, görüntü merkezinin üzerinden geçtikten sonra -30°'lik bir yunus açısı verilerek ikinci görüntü elde edilmiştir. L1 aşamasına kadar işlenmiş görüntüler kullanılmıştır. Kullanılan veriler siyah-beyaz bant ile alınmış, 2,5 m çözünürlüğündedir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan görüntü çiftinden güneyden çekilen (Kontrastı artırılmıştır).

Stereo çift görüntülerle birlikte; uydunun, görüntülemelerin başlangıç noktasındaki yönelimi ve başlangıç ve bitiş noktalarındaki pozisyon ve hız bilgileri de kullanılmıştır.

Yer kontrol noktaları (YKN) Google Earth programından toplanmıştır ve doğruluk oranı tam bilinmemektedir. Sayısal yükseklik verisi, görüntünün 5 km x 5 km'lik bir alanından üretildiği için bu bölgede daha fazla YKN kullanılmıştır. İlgili YKN'ler genel olarak keskin köşeler olan, binaların uç noktalarından toplandığı için bina yükseklikleri de elde edilen yükseklik verisine hata olarak girdi yapmaktadır.

3.2 Kamera Kalibrasyonu

Görüntüleme geometrisini oluşturmak için MATLAB programlama dili ile bir kamera modeli oluşturulmuştur. Modelde, her görüntü satırı için ayrı bir perspektif izdüşüm yapılmıştır. Kamera koordinatları, z-ekseni optik eksen doğrultusunda ve bakış yönünde, x-ekseni algılayıcı doğrultusunda ve sağa doğru ve y-ekseni de diğer eksenlere dik olacak şekilde sağ-elli bir Kartezyen sistem olarak oluşturulmuştur. Kamera koordinat sisteminde 3B bir nokta olan $(x_o, y_o, z_o)^T$ 'nin izdüşümü

$$\begin{bmatrix} x'_o \\ y'_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f x_o / z_o \\ f y_o / z_o \end{bmatrix} \quad (1)$$

formülü ile verilmektedir. Burada f kameranın odak uzaklığıdır. Buradan, piksel büyüklüğü kullanılarak görüntü koordinatlarına ulaşılmaktadır. Diğer taraftan, tüm noktalar Yer Merkezli Yere Sabit (YMYS) bir koordinat sisteminde ifade edilmiştir. İhtiyaç oldukça, coğrafi koordinatlardan veya UTM projeksiyonundan her iki yönde dönüştürülmüştür. Tüm işlemlerde WGS84 datumu kullanılmıştır. Ayrıca, ilk verilen yönelme bilgilerini dönüştürebilmek için bir yerel yörünge koordinat sistemi de geçici olarak kullanılmıştır.

Kamera modelinde, kamera merkezi her satır için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bunun için başlangıç ve bitiş noktaları arasında doğrusal aradeğerleme yapılmıştır. YMYS'den kamera sistemine yönelme matrisi de her satır için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bunun için başlangıç noktası Euler açıları görüntüleme boyunca ikinci derece bir polinoma göre değiştiği varsayılmıştır. Dolayısı ile kamera kalibrasyonu dokuz adet yönelme ile ilgili parametrenin kestirimi için yapılmıştır.

Kalibrasyon için YKN'lerin kameraya izdüşümü yapılarak bilinen görüntü koordinatları ile olan hatalar en küçük kareler anlamında minimize edilmiştir. Çerçeve kameradan farklı olarak, nokta izdüşümlerini yapmak çok kolay değildir. Çünkü noktanın, aslında satır sayısı kadar olan kameralardan hangisine izdüşümünün yapılacağı belli değildir. Bu nedenle, doğru satırı bulan yinelemeli bir algoritma geliştirilmiştir ve birkaç izdüşüm işlemi sonucunda doğru satır bulunmaktadır. 11 YKN ile yapılan kalibrasyon sonucunda hata 4-6 piksel aralığına kadar indirilmiştir. Yükseklik hesaplanan bölgede ise çok daha küçüktür.

3.3 Görüntü Eşleme

Çalışmamızın en özgün yönünü görüntü eşleme için kullandığımız geometrik yöntem oluşturmaktadır. Yukarıda açıklandığı gibi bu tür algılayıcılarla epipolar düzeltme mümkün olmamaktadır. MATLAB rutinleri ile yapılan epipolar düzeltme de, beklendiği gibi, yeterli performansı vermemiştir. Yönelmenin ikinci derece polinomlarla modellendiği sistemimizde bu işlem pratikliğini tamamen kaybetmektedir. Bu nedenle, nesne uzayında eşleme yapılmıştır. Söz konusu algoritma şu şekilde özetlenebilir:

1. YMYS sisteminde, çalışma bölgesinin en yüksek ve en alçak noktalarından geçen ve yere paralel iki düzlemin denklemleri bulunur.
2. İlk görüntüdeki her nokta için:
 - a. Noktanın uzaya geridüşümü yapılarak üzerinde yer aldığı doğrunun denklemi bulunur.
 - b. Doğrunun alt ve üst düzlemleri kestiği 3B noktalar bulunur.

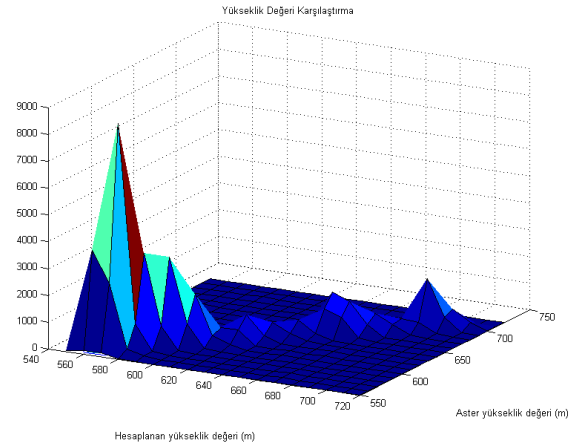
- c. Her iki noktanın ikinci görüntüye izdüşümü yapılır.
- d. Bu iki nokta arasında doğrusal olarak eşleme aranır. Bu kısa mesafede epipolar doğrudan bahsedilebilir.
- e. Bulunan noktaya karşılık gelen yükseklik doğrusal olarak hesaplanır.

Böylece ilk görüntüdeki (eşlenebilen) tüm noktalar için 3B noktalar YMYS'de hesaplanmış olur. Bu noktaların daha sonra WGS84 elipsoidine izdüşümü yapılır.

Bu çalışmanın amacı 2B görüntü eşlemek için bir yöntem geliştirmek olmayıp, doğru stereo geometrisini oluşturmak olduğu için çok temel bir eşleme algoritması kullanılmıştır. İlk görüntüden alınan bir nokta ve çevresindeki küçük bir alan stereo çift olan ikinci görüntüde bir pencere aralığında iki boyutlu çapraz korelasyon ile aranmıştır. 7x7'lik pencerelerde belirli bir eşik değerini (0,9) geçen değerler doğru eşleme olarak kabul edilmiştir.

3.4 Sonuçların Doğruluğu

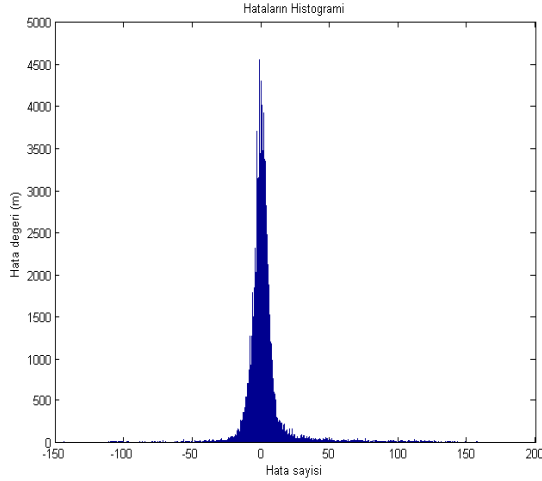
Algoritmanın doğası sonucu nokta koordinatları YMYS koordinat sisteminde elde edilip WGS84 elipsoidine izdüşümü bulunmaktadır. Korelasyon eşik değeri belli bir seviyenin üzerindeki noktalar için, aynı konumdaki ASTER yükseklik modeli yüksekliği ile olan farkların saçılım grafiği Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. Yükseklik hatalarının saçılım grafiği.

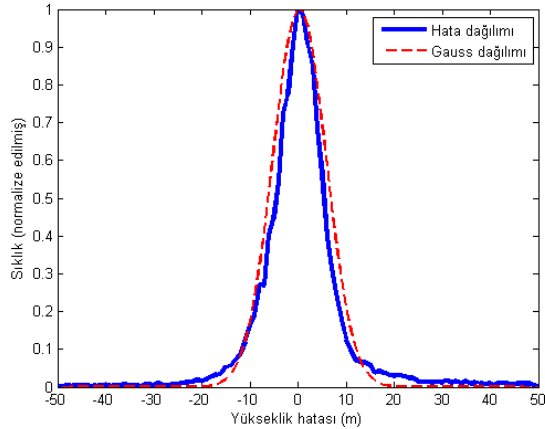
Grafikten görüldüğü gibi çoğu nokta için hata küçük bir bant içerisinde kalmaktadır. Bu bant dışında kalan hatalar eşleme algoritmasının yanlış eşlemeleri sonucu olduğu için geometrik hata hakkında bilgi vermemektedir. Bu nedenle hata hesabına bu aykırı değerler katılmamalıdır. Şekil 4'te hataların histogramı görülmektedir.

Bu hatalara uyan Gauss dağılımının parametreleri bulunmuş (Şekil 5) ve 3-σ dışında kalan aykırı değerler listeden çıkarılmıştır. Sonuçta yükseklik hatası 5,5 m (1- σ) olarak bulunmuştur. Bu hatanın içerisinde, YKN hataları, ASTER verisinden kaynaklanan hatalar, eşlemedeki küçük hatalar ve stereo geometrisi kaynaklı hatalar bulunmaktadır.



Şekil 4. Hataların histogramı.

Bu aşamada sadece, ister efemeristen, ister kamera kalibrasyonundan kaynaklınsın, stereo geometrisi hatasının bu değerin altında olduğu sonucuna ulaşmak mümkündür.



Şekil 5. Hataların Gauss dağılımına oturtulması.

Göktürk-2 Uydu Görüntü Testleri ile yapılan benzer bir çalışmada, ticari yazılım kullanılmış, Google Earth'ten toplanan YKN ile 90 metre çözünürlüklü bir Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) oluşturulmuştur ve sonucunda 10,51 m hata ve 56,44 m'lik standart sapma elde edilmiştir. Ardından daha yüksek hassasiyetli YKN'ler ile çalışılmış ve hatalar 5 m'ye kadar indirilmiştir. Ayrıca tarla gibi tekdüze bölgelerdeki eşleşme hatalarından kaçınmak için daha hassas hatların bulunduğu bir alan HGK arşivlerindeki SYM ile karşılaştırılmıştır [Atak 2015]. Söz konusu çalışmanın sonuçları ile bu çalışmanın sonuçları birbiri ile uyumludur.

Bu çalışmada özgün bir yazılım paketi geliştirilmiş, benzer şekilde YKN'ler Google Earth ile toplanmış, alan olarak 2 km x 2 km'lik kırsal bir alan seçilmiştir. Yükseklik, her bir piksel için ayrı hesaplanmıştır. Sonuç olarak radyometrik kalibrasyonu yapılmış L1 görüntülerinden eşleşme hatalarının eşik bir değer ile süzülmesi 5,5 metre hatalı sayısal yükseklik haritası elde edilmiştir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, geliştirilen bir yazılım paketi ile Göktürk-2 stereoskopik görüntülerinden yükseklik haritası elde edilmiştir. Kamera kalibrasyonu efemeris ve YKN kullanılarak bir taramalı kamera modeli temelinde gerçekleştirilmiştir. Epipolar düzeltmedeki güçlüklerden kaçınmak amacıyla tüm aşamalar nesne uzayında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar çok başarılıdır. Ancak, hataların daha da küçültülmesi için kameranın daha iyi kalibrasyonu (ışınsal bozulmanın düzeltilmesi, uydu konumunun daha fazla nokta ile temsili), dönme parametrelerinin değişiminin daha iyi modellenmesi, ikiden fazla görüntü kullanılması, doğruluğu bilinen yüksek doğruluklu YKN'ler kullanılması, farklı görüntü çiftleri ile denemeler yapılması, eşleme algoritmasının geliştirilmesi ve eşlemede multispektral bantların da kullanılması gibi çalışmalar yapılacaktır.

TEŞEKKÜR

Çalışmamız için görüntüleri sağlayan Hava Kuvvetleri'ne, uydu yörünge sistemleri ile ilgili yardımı için Dr. Egemen İmre'ye ve görüntülerin hazırlanmasında yardım eden Mustafa Teke'ye teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

Atak V.O, Erdoğan M., Yılmaz A. Göktürk-2 Uydu Görüntü Testleri. *Harita Dergisi* Ocak 2015 Sayı 153

Çınar, E., GÖKTÜRK-2 Uydu Sisteminin Operasyonel Kabiliyetleri (Sözlü Sunum), *Yer Gözlem Uydu Teknolojileri ve Veri Kıymetlendirme Çalıştayı*, 19-20 Mart 2014, Ankara.

Dowman, I. J., & Michalis, P. (2003, October). Generic rigorous model for along track stereo satellite sensors. In *ISPRS Workshop on High Resolution Mapping from Space 2003*, Hannover (pp. 4-6).

Hartley, R. I., Gupta, R., (1997). Linear pushbroom cameras. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, IEEE Transactions on, 19(9), 963-975.

Poli, D., Zhang, L., & Gruen, A. (2004). Orientation of satellite and airborne imagery from multi-line pushbroom sensors with a rigorous sensor model. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 35(B1), 130-135.

Tachikawa, T. ; Hato, M. ; Kaku, M. ; Iwasaki, A. (2001). Characteristics of ASTER GDEM version 2, 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Vancouver, BC, USA, 3657 – 3660.

Wang, M., Hu, F., & Li, J. (2011). Epipolar resampling of linear pushbroom satellite imagery by a new epipolarity model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(3), 347-355.