

VİDEO KAMERA GEOMETRİSİ VE KALİBRASYONU

M.S. Temiz^a, S. Külür^b, S. Doğan^a

^a Ondokuz Mayıs Üniversitesi Müh. Fak. Harita Müh. Böl. (mstemiz, sedatdo)@omu.edu.tr

^b İstanbul Teknik Üniversitesi İnş. Fak. Geomatik Müh. Böl. kulur@itu.edu.tr

Anahtar kelimeler: Video görüntüleri, kamera geometrisi, kalibrasyon, homografi.

ÖZET:

Video görüntülerinin işlenmesi ve gerekli hesaplamaların gerçek zamanlı olarak yapılabilmesi için en önemli kısıtlama zamandır. Kullanılacak yöntemlerin hesap yükü açısından en az olanları tercih edilmelidir. Ancak bu tercih yapılırken de sonuç ürünlerin doğruluğundan ödün verilmemelidir. Metrik olmayan amatör video kameralar kullanıldığında, iç yöneltme elemanları olarak adlandırılan, kameranın odak uzaklığı, asal noktanın koordinatları ve mercek distorsiyonları bilinmemektedir. Görüntüler yardımıyla üç boyutlu model oluşturulması vb. uygulamalar için, kameranın dış yöneltme elemanları olarak bilinen kameranın konumunun da belirlenmesi gerekmektedir. İç ve dış yöneltme elemanları ayrı ayrı belirlenebileceği gibi, aynı zamanda da (örneğin demet dengelemesi) belirlendiği çok sayıda teknik vardır. Bu çalışmada öncelikle video kameraların geometrisine değinilmiş ve video görüntülerinin genel olarak kalibrasyonu için literatürde sıklıkla kullanılmakta olan yöntemler araştırılmış ve bu yöntemlerden çalışmada kullanılan düzlemsel homografi (homography) yöntemi ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Daha sonra video görüntülerinin stereo kalibrasyonu konusu ele alınmıştır. Çalışma içerisinde konuyla ilgili uygulama yapılarak elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

1. GİRİŞ

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

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

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

Heuvel (2003) bir diğer çalışmasında, tek görüntü yerine farklı açılardan çekilmiş beş adet görüntü kullanmıştır. Burada kalibrasyon parametrelerini hesaplamak için görüntülerde çıkarılan doğrulardan yararlanmıştır. Bu çalışmasında gerekli olan, doğruların paralellik ve diklik bilgilerini, görüntülerdeki kaçış noktasını belirleyerek otomatik olarak elde etmiştir. Heuvel çalışmalarında elde ettiği sonuçlarda, çizgisel

fotogrametri olarak da bilinen bu yöntemin mimari alanda başarıyla kullanılabileceğini belirtmiştir. Heuvel (1998) önceki çalışmalarında mimari fotogrametrisinde kaçış noktası belirleme yöntemlerine değinmiş ve birbirine dik üç eksendeki doğruları manuel olarak seçerek kaçış noktalarını dengelemeli olarak bulmuştur. Benzer bir çalışma Ruther (2002) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada da mimaride, binaların modellerinin oluşturulmasında, görüntüde bulunacak üç farklı yöndeki doğrularla kaçış noktalarının belirlenmesi konusu araştırılmıştır. Kaçış noktası geometrisi ve kaçış doğruları, kalibrasyon parametrelerinin hesaplanmasında sık olarak kullanılmaktadır. Beardsley ve Murray (1992) çalışmalarında projektif bir düzlemdeki paralel doğrulardan yararlanarak iç yöneltme elemanlarını belirlemişlerdir. Ancak gözlemlenen düzlem üzerinde işaretlenmiş bilinen dört nokta kullanılmıştır. Wang ve Tsai (1991) kaçış doğruları yardımıyla kamera kalibrasyonunu araştırmışlardır. Düzlemdeki kaçış doğrularını bulabilmek için altıgen bir kalibrasyon hedefi kullanmışlardır. Kaçış doğrularının geometrik projektif ilişkilerinden yararlanarak iç ve dış yöneltmeleri tek görüntüden belirlemişlerdir.

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

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

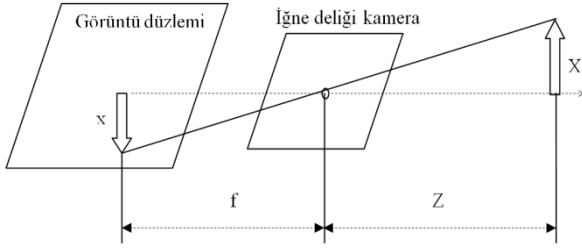
Benzer bir çalışma Grammatikopoulos ve diğ. (2005) tarafından yapılmıştır. Trafik sahnesinin kullanıldığı çalışmada, kameranın sadece yol ekseninde dönüklüğünün olduğu, yol düzleminin tam düz olduğu varsayılmıştır. Ölçek sorununun giderilebilmesi için yol üzerinde, bilinen bir doğrunun ölçüldüğü varsayımları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

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

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

2. KAMERA GEOMETRİSİ

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



Şekil 2.1. İğne deliği kamera modeli.

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

$$x = \frac{f \cdot X}{Z} \quad (2.1)$$

bağıntısı ile tanımlanabilir.

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

$$x = P \cdot X \quad (2.2)$$

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

$$P = M \cdot [R \ t] \quad (2.3)$$

burada **R** 3x3 lük dönüklük matrisi, **t** 3x1 lik öteleme vektörü ve **M**, 3x3 lük kamera matrisidir ve aşağıdaki gibi tanımlanır;

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

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

İğne deliği kamera modeli, gerçek kamera modelinin yaklaşık tanımlamasıdır. Nesne ve görüntü koordinatları arasındaki ilişkinin matematiksel olarak tanımlanmasını kolaylaştırır. Ancak yüksek doğruluğun beklendiği durumlarda kullanılamaz. Bunun için bu model bazı düzeltmeler ve distorsiyon parametrelerinin eklenmesiyle genişletilir (Heikkilä, 1997). Bu distorsiyonların önemli bölümünü lens distorsiyonları oluşturmaktadır. Konuyla ilgili detaylı bilgiye Temiz ve Külür (2008) ve Dörtseel ve diğ. (2003) den ulaşılabilir.

3. KALİBRASYON YÖNTEMLERİ

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

3.1 Direk Lineer Dönüşüm

Majör Direk lineer dönüşüm (Direct Linear Transformation, DLT) ile dönüşüm parametreleri hakkında öncül bilgi (yaklaşık değerler) olmaksızın çözüm yapılabilir ve metrik olmayan kameraların kullanıldığı projeler için çok uygundur. Matematiksel modeli, kolinearite eşitliklerinden elde edilen, görüntü ve nesne koordinatları arasındaki direk lineer ilişkidir. Bu model (3.1)'daki iki kolinearite eşitliklerinden oluşur.

$$\begin{aligned} x - \delta_x &= \frac{(L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4)}{(L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1)} \\ y - \delta_y &= \frac{(L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8)}{(L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1)} \end{aligned} \quad (3.1)$$

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

3.2 Demet Dengelemesi

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

görüntüleme geometrisini tanımlar ve pratikte gerçekleşmesi olanaksızdır. Kolinearite eşitlikleri (3.2)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} x &= x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = \frac{Z_x}{N} \\ y &= y_0 - c \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = \frac{Z_y}{N} \end{aligned} \quad (3.2)$$

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

$$f_x = (x - x_0) = -c \frac{Z_x}{N} + \Delta x \quad f_y = (y - y_0) = -c \frac{Z_y}{N} + \Delta y \quad (3.3)$$

şekindedir. Burada Δx ve Δy ek parametrelerin (lens distorsiyonları) fonksiyonlarıdır. Algılayıcı geometrisinin fiziksel gerçekliğini arttırmak için resim koordinatlarına getirilecek düzeltmeler olarak da düşünülebilir (Beyer, 1991). (3.3) denklemindeki bilinmeyenler en küçük kareler yöntemine göre çözülür. Demet dengelemesi teorik açıdan oldukça duyarlı sonuçlar verebilen, fonksiyonel modelin en iyi geliştirildiği hesaplama tekniğidir. Dengelemenin doğruluğu, kontrol noktalarının doğruluğu, dağılımı ve sayısı ile yakından ilgilidir. Kontrol noktalarının ve resim sayılarının artırılması ile dengelemenin serbestlik derecesi artırılabilir. Buna karşın işlem yükü ve hesaplama zamanı oldukça fazladır.

3.3 Video görüntülerinin kalibrasyonu

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

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

$$Q = [X \ Y \ Z \ 1]^T \quad \text{ve} \quad q = [x \ y \ 1]^T \quad (3.4)$$

Q ve q kullanılarak homografi (H);

$$q = s.H.Q \quad (3.5)$$

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

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

$$W = [R.t] \quad (3.6)$$

Burada R dönüklük matrisi;

$$R = [r_1 \ r_2 \ r_3] \quad (3.7)$$

şekindedir. Kamera matrisi (2.4) yerine yazılırsa;

$$q = s.M.W.Q \quad (3.8)$$

halini alır. Buradan homografi matrisi H ;

$$H = s.M.[r_1 \ r_2 \ t] \quad (3.9)$$

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

$$H = [h_1 \ h_2 \ h_3] = s.M.[r_1 \ r_2 \ t] \quad (3.10)$$

halini alır. Buradan ,

$$\lambda = \frac{1}{s} \text{ (olmak üzere)}$$

$$h_1 = s.M.r_1 \text{ ya da } r_1 = \lambda.M^{-1}.h_1$$

$$h_2 = s.M.r_2 \text{ ya da } r_2 = \lambda.M^{-1}.h_2 \quad (3.11)$$

$$h_3 = s.M.t \text{ ya da } t = \lambda.M^{-1}.h_3$$

elde edilir. Dönüklük vektörleri ortogonal olduğundan,

$$r_1^T.r_2 = 0 \quad (3.12)$$

yazılabilir. r_1 ve r_2 yi yerlerine yazarsak ;

$$h_1^T.M^{-T}.M^{-1}.h_2 = 0 \quad (3.13)$$

elde edilir. Dönüklük vektörlerinin,

$$r_1^T.r_1 = r_2^T.r_2 \quad (3.14)$$

şartında r_1 ve r_2 yi yerlerine yazarsak ;

$$h_1^T.M^{-T}.M^{-1}.h_1 = h_2^T.M^{-T}.M^{-1}.h_2 \quad (3.15)$$

elde edilir.

$$B = M^{-T}.M^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

olarak yazılırsa, B matrisinin kapalı form çözümü;

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{f_x^2} & 0 & \frac{-c_x}{f_x^2} \\ 0 & \frac{1}{f_y^2} & \frac{-c_y}{f_y^2} \\ \frac{-c_x}{f_x^2} & \frac{-c_y}{f_y^2} & \frac{c_x^2}{f_x^2} + \frac{c_y^2}{f_y^2} + 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

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

$$h_i^T B h_j = v_{ij}^T b = \begin{bmatrix} h_{i1}h_{j1} & h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1} & h_{i2}h_{j2} & h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3} & h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3} & h_{i3}h_{j3} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{12} \\ B_{22} \\ B_{13} \\ B_{23} \\ B_{33} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

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

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22})^T \end{bmatrix} b = 0 \quad (3.19)$$

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

$$Vb = 0 \quad (3.20)$$

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

$$\lambda = B_{33} - (B_{13}^2 + c_y (B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})) / B_{11} \quad (3.21)$$

olmak üzere,

$$\begin{aligned} f_x &= \sqrt{\frac{\lambda}{B_{11}}} \\ f_y &= \sqrt{\frac{\lambda B_{11}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}} \\ c_x &= -\frac{B_{13}f_x^2}{\lambda} \\ c_y &= \frac{B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2} \end{aligned} \quad (3.22)$$

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

$$\begin{aligned} r_1 &= \lambda M^{-1} . h_1 \\ r_2 &= \lambda M^{-1} . h_2 \\ r_3 &= r_1 \times r_2 \\ t &= \lambda M^{-1} . h_3 \end{aligned} \quad (3.23)$$

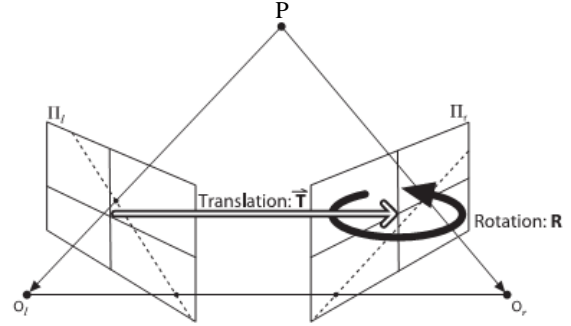
şeklinde bulunur. Burada ölçek parametresi λ , ortonormallik şartından,

$$\lambda = \frac{1}{\|M^{-1}h_{11}\|} \quad (3.24)$$

şeklinde bulunmuştur (Bradsky ve Kaehler, 2008).

4. STEREO KALİBRASYON

Stereo kalibrasyon, üç boyutlu uzayda iki kamera arasındaki geometrik ilişkinin hesaplanması işlemidir. Stereo kalibrasyon şekil 4.1'de gösterilen, iki kamera arasındaki R dönüklük matrisi ve T öteleme vektörünün bulunmasına bağlıdır. Her iki kamera için ayrı ayrı R_l , T_l ve R_r , T_r matris ve vektörlerini hesaplamak mümkündür. İki kamera arasındaki R dönüklük matrisi ve T öteleme vektörünü bulabilmek için şekil 4.1'den yararlanılabilir.



Şekil 4.1. Öteleme ve dönüklükler (Bradsky ve Kaehler, 2008).

P üç boyutlu koordinatları bilinen herhangi bir nokta olmak üzere bu noktanın sağ ve sol resimdeki karşılıkları için;

$$P_l = R_l P + T_l \quad (4.1)$$

$$P_r = R_r P + T_r$$

yazılabilir. Şekil 4.1'den P noktasının iki kameradan görünüşü;

$$P_l = R^T (P_r - T) \quad (4.2)$$

bağıntısıyla ilişkilendirilebilir. (4.1) ve (4.2) denklemleri ile R matrisi ve T vektörü için;

$$\begin{aligned} R &= R_r (R_l)^T \\ T &= T_r - R T_l \end{aligned} \quad (4.3)$$

eşitlikleri elde edilir.

5. UYGULAMA VE SONUÇLAR

Uygulamada, odak uzaklığı 4 mm, çözünürlüğü 640x480 olan ve saniyede 30 resim karesi alabilen stereo amatör dijital video kamera çifti kullanılmıştır. Uygulamanın gerçekleştirilebilmesi için Visual Studio 2010 platformunda C++ programlama dili ile geliştirilen yazılım kullanılmıştır.

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

görüntü çiftinin işleme sokulması gerektiği deneyimlerimizle gözlenmiştir. Bu görüntüler kalibrasyon sırasında kullanılacak ortak noktaları içermektedir. Uygulamada kontrol noktaları bir satraç tahtası biçiminde oluşturulmuş karelerden oluşmakta ve bu karelerin birleşme noktaları (köşe noktaları) kontrol noktaları olarak kullanılmaktadır. Şekil 5.1'de kalibrasyon hedefi ve kullanılan görüntüler gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Kullanılan görüntüler.

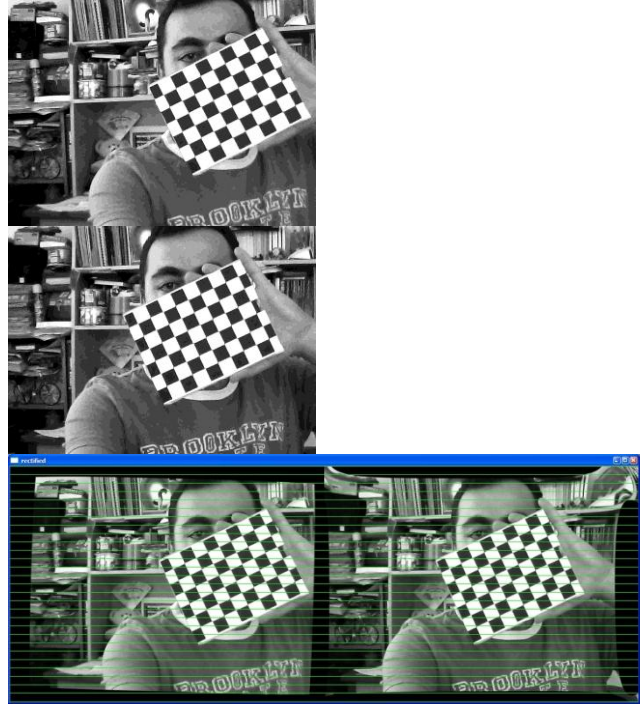
Bu kalibrasyon hedefinde 9x6 köşe noktası olmak üzere 54 adet kontrol noktası bulunmaktadır. Karşılıklı görüntülerden bu noktaların tamamı otomatik olarak belirlenmekte ve görüntü koordinatları piksel altı duyarlıkta elde edilmektedir. Karşılıklı görüntülerden herhangi birinde noktaların tamamı elde edilemezse yani belirlenemezse o görüntü çifti elenmekte ve hesaba katılmamaktadır. Şekil 5.2'de otomatik olarak bulunan kontrol noktaları gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Belirlenen kontrol noktaları.

Stereo görüntü çiftlerindeki karşılıklı kontrol noktalarının görüntü koordinatları bu şekilde elde edildikten sonra bu noktaların nesne koordinatları olarak, birinci köşenin koordinatı (0, 0) olacak şekilde koordinatlandırılmış ve diğer köşe noktalarına koordinat verilmiştir. Herbir kare boyutu 2 cm dir. Görüntü ve nesne koordinatları belirlenip hatalı görüntüler elendikten sonra kalibrasyon işlemine geçilir.

Stereo kalibrasyon sonucu herbir kameranın, kamera matrisleri, distorsiyon parametreleri, dönüklük ve ötelemeleri, esas ve temel matrisleri ile geri projeksiyon matrisleri elde edilmiştir. Stereo kalibrasyon sonucu karesel ortalama hata ± 0.26 cm olarak elde edilmiştir. Şekil 5.3'de orijinal görüntüler ve rektifikasyonu yapılmış görüntüler gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Orijinal ve düzeltilmiş görüntüler.

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

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

KAYNAKLAR

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

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

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

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

- Grammatikopoulos L., Karras G., and Petsa E., 2005. Automatic Estimation of Vehicle Speed From Uncalibrated Video Sequences, Int. Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice In Geodesy and Related Fields, 03-04 November, pp. 332-338, Sofia, Bulgaria.
- Guillou, E., Meneveaux, D., Maisel, E., and Bouatouch, K., 2000. Using Vanishing Points for Camera Calibration and Coarse 3D Reconstruction From a Single Image, The Visual Computer, Vol. 16, pp. 396-410.
- Heikkila, J., 1997. Accurate Camera Calibration and Feature Based 3-D Reconstructruction From Monocular Image Sequences, *PhD Thesis*, Infotech Oulu and Department of Electrical Engineering, University of Oulu, FIN-90570, Oulu, Finland.
- Heuvel, F.A. van den, 1998. Vanishing point detection for architectural photogrammetry. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32 part 5, pp. 652-659.
- Heuvel, F.A. van den, 1999. Estimation of Interior Orientation Parameters From Constraints on Line Measurement in a Single Image, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.32, Part 5W11, pp. 81-88.
- Heuvel, F.A. van den, 2003. Semi-Automatic Camera Calibration and Image Orientation Using the CIPA Reference Data Set, in Proceedings, XIX CIPA Symposium, Antalya, Turkey.
- Khalil, O.A., 2002. Solutions for Exterior Orientation in Photogrammetry: A Review, Photogrammetric Record, 17(100), pp. 615-634.
- Liebowitz, D. and Zisserman, A., 1998. Metric Rectification for Perspective Images of Planes, Proceedings of the IEEE Conference Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 482-488.
- Maduro, C, Batista, K, Peixoto, P. and Batista, J, 2008. Estimation Of Vehicle Velocity And Traffic Intensity Using Rectified Images, 15th IEEE International Conference on , Image Processing, 2008, pp. 777 – 780.
- Masoud, O. and Papanikolopoulos, N.P., 2004. Using Geometric Primitives to Calibrate Traffic Scenes, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Japan.
- Remondino, F., 2006. Image-Based Modelling for Object and Human Reconstruction, *PhD Thesis*, No. 16562, Swiss Federal Institute Of Technology (ETH) – Zurich.
- Ruther, C., 2002. A New Approach for Vanishing Point Detection in Architectural Environments, Journal Image and Vision Computing (IVC; Special Issue on BMVC 2000), Vol. 20, pp. 647-656.
- Temiz, M.S. ve Külür,S., 2008. Rectification of Digital Close Range Images: Sensor Models, Geometric Image Transformations and Resampling, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Spatial Inform. Sci. 37, Part B5. Beijing, (on CD-ROM).
- Wang, L.L. and Tsai, W.H., 1991. Camera Calibration by Vanishing Lines for 3-D Computer Vision, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, No. 4, pp. 370-376.