

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 035504 (640-649)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 035504 (640-649)

DOI: 10.35414/akufemubid.851780

Araştırma Makalesi / Research Article

Fotogrametrik Cerrahi Navigasyon Uygulamalarında Kamera ve Sistem Kalibrasyonunun Ölçüm Doğruluklarına Etkisi

Temel DURGUT^{1*}, Erdem Emin MARAŞ²¹ Harita Genel Müdürlüğü, Fotogrametri Dairesi, Ankara.² Samsun Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Samsun.

Sorumlu yazar e-posta: tdurgut@gmail.com.

e-posta: erdem.maras@samsun.edu.tr.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9881-339X>ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5205-1622>

Geliş Tarihi: 01.01.2021

Kabul Tarihi: 07.06.2021

Öz

Klasik cerrahi yöntemlerin taşıdığı riskleri ve cerrahi müdahale sürelerini en aza indirmek için günümüz teknolojik gelişmelerine paralel olarak fotogrametrik cerrahi uygulamalar gün geçtikçe daha da önem kazanmaktadır. Cerrahi müdahalenin yapılacağı bölgenin tamamen açılmasına ihtiyaç duyulmayan durumlarda belirlenen uygun bir noktadan giriş yapmak suretiyle kısa sürede ve daha güvenli cerrahi işlemler yapılabilmektedir. Cerrahi navigasyonda; standart bir ölçü biriminde tanımlı bir altlık üzerinde (MR, Tomografi, vb.), belirli periyotlarla takip edilen, 3 Boyutlu (3B) konumları belirlenen ve ulaşılmak istenen bir konuma yönlendirilen hareketli sondalar kullanılmaktadır. Söz konusu sondaların 3B hareketlerinin yüksek doğruluklarla ve gerçek zamanlı olarak konumlandırılabilmesi için kullanılan stereo kameraların fotogrametrik olarak kalibrasyona tabi tutulması büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında söz konusu kalibrasyonların sistemin konumlandırılabilirliğine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, kameralara ait iç yönelme parametreleri ve sabit olan stereo kamera bazı ileri dengeleme teknikleri kullanılarak yeniden hesaplanmıştır. Çalışmada, sorumlu yazar tarafından 2014 yılından bu yana geliştirilmekte olan "Stereo Fotogrametrik Cerrahi Navigasyon Yazılımı" ve "Fotogrametrik Kamera Kalibrasyon Yazılımı" kullanılmıştır. Çalışma neticesinde; kalibrasyonu yapılmış sistem bileşenlerinin, gerçek zamanlı 3B konum doğruluğunu 2-3 mm seviyelerinden 0,2 mm seviyelerine çektiği görülmüş ve ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Anahtar kelimeler

Cerrahi navigasyon;
Yersel fotogrametri;
Kamera kalibrasyonu;
EKK dengeleme;
Konum doğruluğu

Camera and System Calibration Effects on Measurement Accuracies in Photogrammetric Surgical Navigation Applications

Abstract

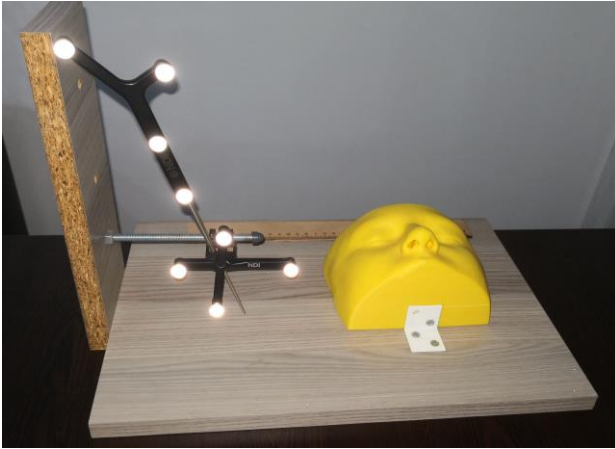
Photogrammetric Surgical Navigation Systems are getting more importance day by day to minimize the surgical operation times and the risk of classical methods with respect to the technological developments. More reliable surgical operations are now possible in shorter times without opening the whole related location of the body if it is not necessary. In surgical navigation; moving surgical probes which are periodically tracked and navigated to a desired location on a layer that is defined in a standart measuring unit are used. It is of vital importance to calibrate the cameras photogrammetrically for real-time 3D movements of the probes to be located highly accurate. In this study; the effect of respective calibrations for measuring accuracy of the system is investigated. For this purpose; camera interior orientation parameters and stereo camera baseline length are re-calculated with the advanced adjustment techniques. In this study; "Stereo Photogrammetric Surgical Navigation Software" and "Photogrammetric Camera Calibration Software" which have been developed since 2014 by responsible author are used. As a result of study; it is observed and presented in detail that the calibrated system components have brought the real-time location measurement accuracy from 2-3 mm level to 0,2 mm level.

Keywords

Surgical navigation;
Close-range
photogrammetry;
Camera calibration;
Least-squares
adjustment;
Geolocation accuracy

1. Giriş

Teknolojik yeniliklere paralel olarak; fotogrametrik yöntemlerle 3 Boyutlu (3B) olarak gerçekleştirilen cerrahi uygulamalar son yıllarda giderek daha da öne çıkan bir alan haline gelmektedir. Cerrahi navigasyon sistemleri sayesinde geleneksel yöntemlerin ihtiva ettiği riskler ve cerrahi işlem süreleri en aza indirilmektedir. Özellikle cerrahi operasyonun yapılacağı alanın bütünüyle açılmasına gerek duyulmayan işlemlerde hasta üzerinde belirlenen en uygun bölgede sadece sondanın gönderileceği kadar yeterli bir dokunun açılması suretiyle daha kısa sürede ve daha güvenli cerrahi müdahaleler yapılabilmektedir. Bu çalışmada ele alınan optik esaslara dayalı fotogrametrik cerrahi navigasyonda; standart 3B altlık uzaylar üzerinde (MR, Tomografi, vb.) fotogrametrik teknikler ve ileri dengeleme yöntemleri yardımıyla, gerçek zamanlı ve anlık olarak takip edilen (3B konumları belirlenen) ve cerrahi müdahalenin yapılacağı ilgili bölgeye yönlendirilen hareketli sondalar kullanılmaktadır.



Şekil 1. Referans yüzey, hareketli sonda ve sabitlenen kafa modeli.

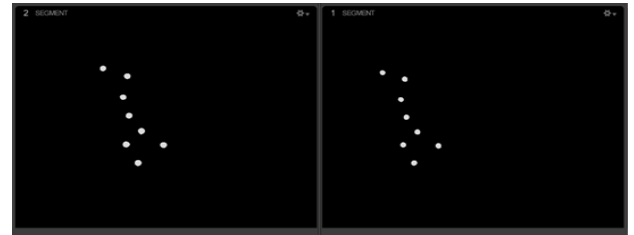
Bu çalışmada; bilimsel teknik olarak 3B stereo görüş, stereo fotogrametri ve En Küçük Kareler (EKK) dengelemesi, konumlandırılan ve takip edilen hareketli objeler olarak ise cerrahın kullandığı hareketli sondalar esas alınmıştır. 3B Konumlamanın yapılabilmesi için sondalar üzerinde uygun geometrik dağılıma sahip gümüş toplar bulunmaktadır ve bu gümüş topların anlık ve otomatik tespitinin daha kolay yapılabilmesi için 800 nm yakın kızılötesi (Near InfraRed-NIR) bantta görüntü alımı yapan kameralar kullanılmıştır.

Bu kameralar ameliyat ortamını belirli bir baz aralığında eş zamanlı ve stereo olarak görüntülemektedir. Kullanılan aletler Şekil 1'de, görüntüleme örneği ise Şekil 2'de sunulmuştur.

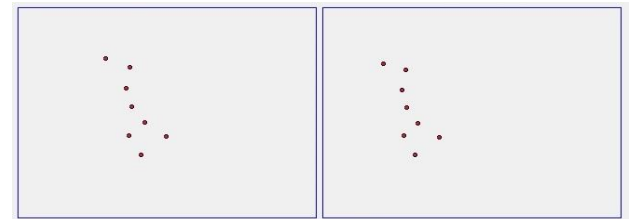
Stereo görüntüleme prensibine dayalı olarak; her iki kamera görüntüsü içerisine giren hareketli sonda üzerindeki gümüş topların anlık görüntü koordinatları kullanılarak bu topların ameliyat ortamında tanımlanan bir obje uzay koordinat sistemindeki anlık 3B koordinatlarının hesaplanması için uzayın merkezi izdüşümü esaslarına dayalı uzayda 3B benzerlik dönüşümü yapılmaktadır. Söz konusu benzerlik dönüşümünün yapılabilmesi için öncelikle her iki kameranın obje uzay koordinat sistemindeki öteleme ve dönüklük parametrelerinin (dış yöneltme parametrelerinin) gerçek zamanlı ve anlık olarak hesaplanması gerekmektedir. Bu dengelemenin yapılabilmesi için obje uzay koordinat sistemindeki 3B koordinatları (X, Y, Z) yüksek doğruluklarla bilinen en az dört adet sabit referans noktasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak için ise üzerinde yeterli sayıda gümüş top bulunan referans yüzeyler kullanılmaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2. Gri tonlamalı normal görüntüler (a), Filtrelenmiş NIR görüntüler (b) ve otomatik olarak tespit edilmiş vektör görüntü koordinatları (c).

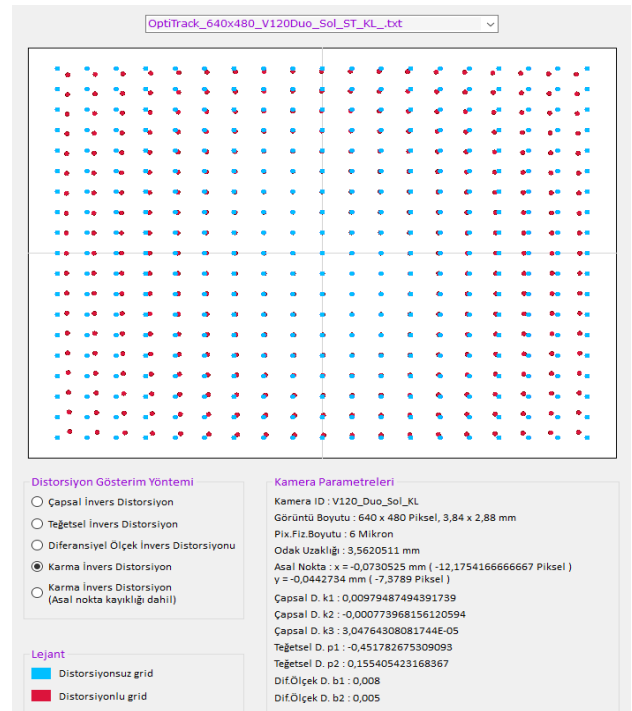
Objeye uzay koordinat sistemi bu referans düzlem üzerinde tanımlanmaktadır ve operasyona başlamadan önce hasta ile birlikte birbirlerine sabitlenmektedir. Hasta ile referans yüzey birlikte sabitlendiği için cerrahi müdahale boyunca hasta, tanımlanan objeye uzay koordinat sistemi içerisinde hep aynı konumda bulunmaktadır. Burada önemli olan nokta; dış yöneltme parametreleri sürekli ve gerçek zamanlı olarak çözüldüğünden, ihtiyaç halinde kamera platformu stereo görüşün uygun olacağı farklı bir konuma çekilebilmektedir. Referans yüzey ile hastanın konumu birbirlerine göre sabit olduğundan bu durum hastanın objeye uzay koordinat sistemindeki konumunu değiştirmemektedir. Yukarıda da belirtildiği üzere söz konusu dış yöneltme parametrelerinin EKK dengelemesi ile hesaplanması görüntüleme frekansına bağlı olarak saniyede çekilen her eş zamanlı (senkronize) stereo görüntü çifti için yapılmaktadır.

Cerrahın elindeki hareketli sondanın 3B konumunu anlık takip edebilmek için ise; sonda üzerinde bulunan en az dört adet gümüş topa ait görüntü koordinatları anlık görüntü işleme yardımıyla tespit edilmekte ve bilinen dış yöneltme parametreleri ile eş-doğrusallık (kolinearite) bağıntıları birlikte kullanılarak anlık 3B objeye uzay koordinatları hesaplanmaktadır. Hareketli sonda üzerindeki gümüş toplar ile sonda ucuna ait sonda lokal koordinatları ve birbirleri arasındaki çapraz mesafelerin yüksek doğrulukla bilinmesinden yola çıkarak yine EKK dolaylı model dengelemesi ile 3B benzerlik dönüşümü yapılarak sonda uç noktasının gerçek zamanlı objeye uzay koordinatları hesaplanmaktadır. Bu dengeleme esansında sonda üzerindeki gümüş topların aynı düzlemde olması ve çapraz mesafeleri kısıt olarak kullanılmakta ve konum doğruluğu iyileştirilmektedir.

Yukarıda anlatılan bütün işlem ve hesaplamaların yapıldığı Cerrahi Navigasyon Sistemi ve Kamera Kalibrasyon Sistemi yazılımları sorumlu yazar tarafından C# dilinde geliştirilmiştir. Söz konusu yazılımlar kullanılarak ameliyat veya operasyon uzayında kullanılan sondaların 3B konumlarının gerçek zamanlı tespiti $\pm 0,2$ mm doğrulukla elde edilebilmektedir.

2. Materyal ve Metot

Yukarıda anlatılan işlem adımlarının ve sonuç koordinatlarının istenilen yüksek doğrulukta elde edilebilmesi için fotogrametrik kamera kalibrasyonu ve stereo kamera baz kalibrasyonunun yapılması şarttır. Kullanılan kameraların kalibrasyonu sonucunda optimize edilen parametrelerine göre distorsiyon ve kamera detay gösterimi için yazılıma eklenen kamera detay görüntüleme modülüne ait arayüz Şekil 3'de gösterilmektedir.



Şekil 3. Kalibrasyon sonuçlarına göre kamera detay ve distorsiyon gösterimi

2.1 Kamera (Sensör) kalibrasyonu

Kamera kalibrasyonu; her iki kameraya ait Çizelge 1'de verilen iç yöneltme parametrelerinin yüksek doğrulukla hesaplanmasını esas almaktadır.

Çizelge 1. İç yöneltme parametreleri listesi.

Sembol	Açıklama
c	Odak uzaklığı
x_0, y_0	Asal noktanın ve aynı zamanda distorsiyon merkezinin konumu
k_1, k_2, k_3	Çapsal distorsiyon katsayıları
p_1, p_2	Teğetsel distorsiyon katsayıları
b_1, b_2	Sayısal kamera diferansiyel ölçek distorsiyonu katsayıları

Söz konusu kamera kalibrasyonu EKK dengelemesi yöntemiyle yapılmaktadır. Bu dengeleme için önceden hassas olarak tasarlanmış bir kalibrasyon levhası üzerindeki kesişim noktaları Yer Kontrol Noktası (YKN) mantığıyla kullanılmaktadır. Koordinatları bilinen bu kesişim noktalarına ait elde edilen görüntü koordinatları (x, y) EKK dengelemesine ölçümler olarak, Çizelge 1’de verilen iç yöneltme parametreleri ise bilinmeyen olarak sokulmaktadır.

Çizelge 2. EKK dengeleme karakteristiği.

Sembol	Açıklama
n	Kesişim noktalarına ait her görüntüde 2 adet olmak üzere x ve y görüntü koordinatları ve ilave olarak levha konumları arası ofset mesafesinden oluşan gözlem (ölçüm) sayısı
u	Çizelge 1’de verilen 10 adet bilinmeyen iç yöneltme parametresi ve her görüntü için 6 adet dış yöneltme parametresi
s	Dengelemenin serbestlik derecesi ($n - u$)

$n > u$ olmak şartıyla Çizelge 2’de karakteristiği verilen EKK dengelemesi ile u adet bilinmeyen, n adet ölçüm ile s serbestlik derecesinde çözülmektedir. Eş-doğrusallık (kolinearite) denklemlerinin görüntü koordinatları cinsinden yazılan (4) ve (5) numaralı eşitlikleri matematiksel modelimizin esasını teşkil etmektedir. Bu durumda;

$$Z_x = r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0) \quad (1)$$

$$Z_y = r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0) \quad (2)$$

$$N = r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0) \quad (3)$$

Olmak üzere, distorsiyonsuz ve asal nokta kayıklığı giderilmiş görüntü koordinatlarını ifade eden \tilde{x} ve \tilde{y} eşitliklerimiz aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\tilde{x} = -c \frac{Z_x}{N} \quad (4)$$

$$\tilde{y} = -c \frac{Z_y}{N} \quad (5)$$

Ölçülen ham görüntü koordinatları x ve y , asal noktanın görüntü koordinat sistemindeki konumu x_0 ve y_0 ve yalnızca asal nokta kayıklığı ötelenmiş görüntü koordinatları \tilde{x} ve \tilde{y} olmak üzere distorsiyon eşitliklerimizi yazacak olursak;

- (6) ve (7) numaralı eşitlikler çapsal distorsiyon,
- (8) ve (9) numaralı eşitlikler teğetsel distorsiyon,
- (10) numaralı eşitlik ise sayısal kamera diferansiyel ölçek distorsiyon etkisini ifade etmektedir.

$\tilde{x} = x - x_0$, $\tilde{y} = y - y_0$ ve $r = \sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2}$ olmak üzere;

$$\delta x_1 = \tilde{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (6)$$

$$\delta y_1 = \tilde{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (7)$$

$$\delta x_2 = p_1(r^2 + 2\tilde{x}^2) + 2p_2\tilde{x}\tilde{y} \quad (8)$$

$$\delta y_2 = p_2(r^2 + 2\tilde{y}^2) + 2p_1\tilde{x}\tilde{y} \quad (9)$$

$$\delta x_3 = b_1\tilde{x} + b_2\tilde{y} \quad (10)$$

Bu durumda distorsiyon etkisi ve asal nokta kayıklığı giderilmiş görüntü koordinatlarını (11) ve (12) numaralı eşitliklerdeki gibi distorsiyon ve asal nokta kayıklığı düzeltmelerini içerecek şekilde açabiliriz.

$$\tilde{x} = \tilde{x} + \delta x_1 + \delta x_2 + \delta x_3 \quad (11)$$

$$\tilde{y} = \tilde{y} + \delta y_1 + \delta y_2 \quad (12)$$

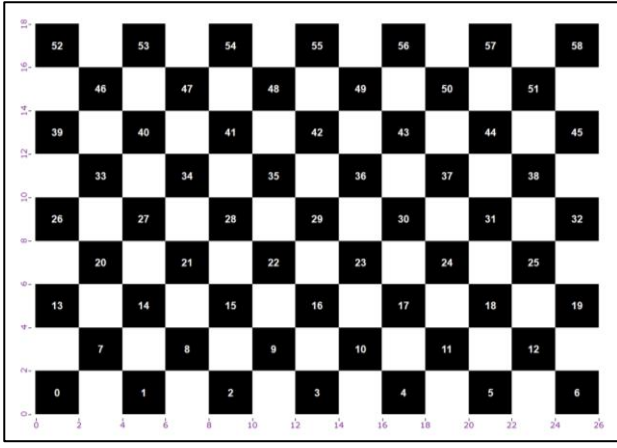
Son olarak; bütün parametreleri ve bilinmeyenleri içerecek şekilde eş-doğrusallık denklemlerimizi ölçülen (ham) görüntü koordinatları cinsinden (13) ve (14) numaralı eşitliklerdeki gibi yeniden yazabiliriz.

$$x = x_0 - c \frac{Z_x}{N} - \delta x_1 - \delta x_2 - \delta x_3 \quad (13)$$

$$y = y_0 - c \frac{Z_y}{N} - \delta y_1 - \delta y_2 \quad (14)$$

Yukarıda detaylı olarak anlatılan matematiksel model kullanılarak Şekil 4’de gösterilen kalibrasyon levhasının farklı mesafelerden çekilen görüntülerinden okunan ve (13) ile (14) numaralı eşitliklerle ifade edilen ham görüntü koordinat ölçümlerine (gözlemlerine) ilave olarak (15) numaralı eşitlikle verilen levha konumları arası ofset mesafesinden oluşan şart (koşul) gözlemi EKK yöntemiyle iteratif dolaylı model dengelemesine sokularak kamera iç yöneltme parametreleri hesaplanmaktadır.

$$Ofs = \sqrt{(X_{01} - X_{02})^2 + (Y_{01} - Y_{02})^2 + (Z_{01} - Z_{02})^2} \quad (15)$$



Şekil 4. Kalibrasyon levhası.

Kamera kalibrasyonunda her bir kamera ayrı olarak değerlendirilmekte ve dolayısıyla mono görüntüler kullanılmaktadır. Gözlem (ölçüm) denklemlerinin bilinmeyenlere göre türevleri alınarak Taylor serilerine açılmak suretiyle katsayılar (dizayn) matrisi her iterasyon için dinamik olarak oluşturulmakta ve dengeleme için belirlenen yakınsama ve doğruluk kriterleri sağlanana kadar iteratif olarak çözülmektedir. Farklı parametrelerin ölçüm doğruluğuna olan etkisini ayrı ayrı incelemek maksadıyla iç yöneltme parametrelerinin kısmi veya tamamının dengelemeleri yapılabilecek şekilde yazılımda ilave kodlama yapılmıştır.

2.2. Stereo kamera baz kalibrasyonu

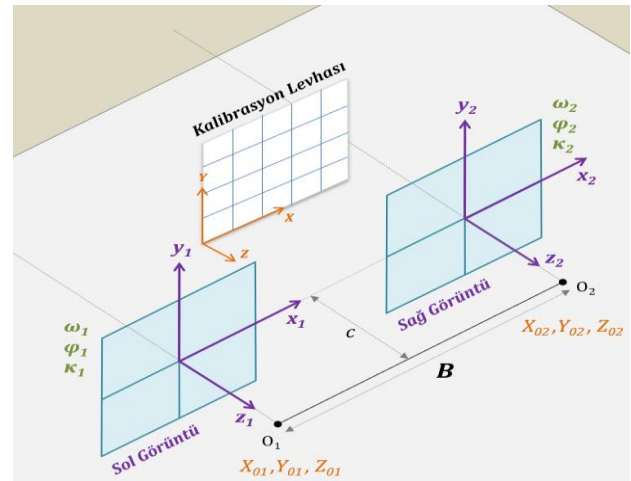
Her ne kadar anlık olarak hesaplanan sağ ve sol kamera dış yöneltme parametrelerinden stereo kamera bazı hesaplanabilse de referans yüzeyin her iki görüntü düzlemi üzerinde küçük bir bölgeye izdüşümünden kaynaklı konumlama (referanslama) hatasını minimize etmek maksadıyla stereo kamera bazının kalibrasyon dengelemesi ile önceden belirlenerek anlık ölçümlere şart gözlemi olarak dâhil edilmesi konumlama hassasiyetine olumlu yönde katkı sağlamaktadır.

Bu dengeleme; kalibrasyon levhasının her iki kamera görüntüsü üzerine maksimum yayılacak şekilde stereo görüntüleri alındıktan sonra levha üzerinde bulunan kesişim noktalarına ait x ve y görüntü koordinatları ve bu kesişim noktalarının bilinen obje uzay koordinatları yardımıyla, her görüntü için 6 adet olmak üzere, stereo çift için toplam 12 adet dış yöneltme parametresinin EKK dengelemesi yardımıyla iteratif olarak optimize edilmesi esasına

dayanmaktadır. Dengeleme öncesinde her iki kameranın da fotogrametrik kalibrasyonlarının yapılarak iç yöneltme parametrelerinin yüksek doğruluklarla belirlenmesi gerekmektedir. Böylelikle; dengelemeye sokulan her bir x ve y gözlemi (görüntü koordinatı) için gerekli distorsiyon ve asal nokta kayıklığı düzeltmeleri (11) ve (12) numaralı eşitliklerdeki gibi en baştan uygulanmakta ve kalibre edilmiş odak uzaklığı da dikkate alındığında uzayın merkezi izdüşümü olması gerekene en yakın haliyle ifade edilerek işlemlere başlanmaktadır. Dengelemeye sokulan her bir x ve y gözlemi için (4) ve (5) numaralı eş-doğrusallık (kolinearite) eşitlikleri matematiksel model olarak alınmıştır.

Baz kalibrasyonunda önemli olan nokta; ilave olarak belirlenmek istenen stereo kamera bazının aslında bir bilinmeyen değil bilinmeyenler yardımıyla optimize edilen ilave bir değer olmasıdır. Sonuç olarak; Şekil 5'de görüldüğü üzere sol kameraya ait (X_{01}, Y_{01}, Z_{01}) ve sağ kameraya ait (X_{02}, Y_{02}, Z_{02}) olmak üzere, dengeleme neticesinde elde edilen her iki kameraya ait dış yöneltme parametreleri kullanılarak (16) numaralı eşitlik yardımıyla sabit olan stereo kamera bazı (B) kolaylıkla hesaplanabilmektedir.

$$B = \sqrt{(X_{01} - X_{02})^2 + (Y_{01} - Y_{02})^2 + (Z_{01} - Z_{02})^2} \quad (16)$$



Şekil 5. Stereo kamera bazının kalibrasyonu.

Kalibre edilen söz konusu stereo kamera bazı, ilgili stereo kamera tanıtım dosyasında gereken yere yazılarak gerçek zamanlı ölçümler esnasında iyileştirme gözlemi olarak döngüye dâhil edilmektedir.

2.3. Cerrahi navigasyon ve kamera kalibrasyon yazılımları

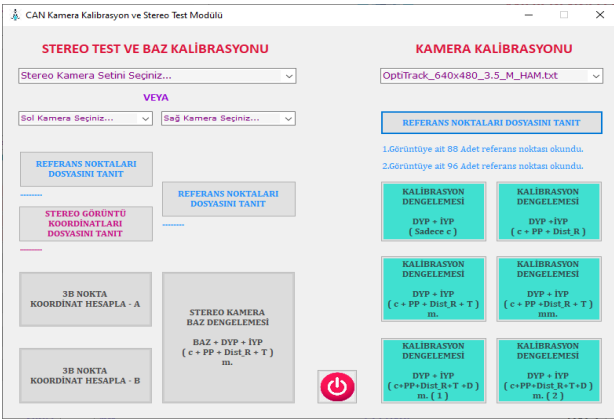
CAN Stereo Fotogrametik Cerrahin Navigasyon yazılımı sorumlu yazar tarafından 2014-2021 yılları arasında doktora çalışması kapsamında geliştirilmiştir. Temel olarak; Hareketli obje tespit ve ölçüm, Navigasyon, Kalibrasyon ve Kamera detay görüntüleme modüllerini içermektedir. Modüllere ait kullanıcı arayüzleri Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9’da sunulmuştur.



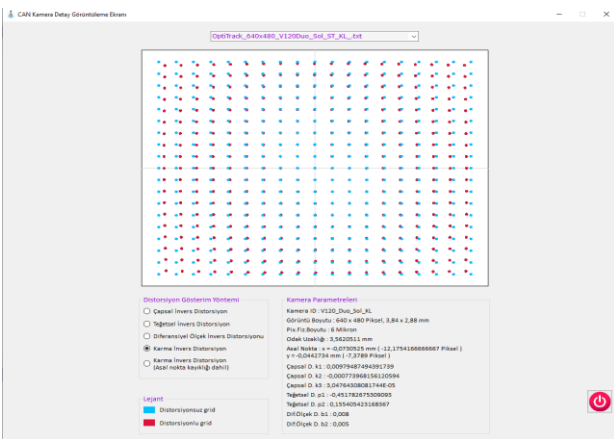
Şekil 9. Navigasyon modülü.



Şekil 6. Hareketli obje tespit ve ölçüm modülü.



Şekil 7. Kamera kalibrasyon ve stereo test modülü.



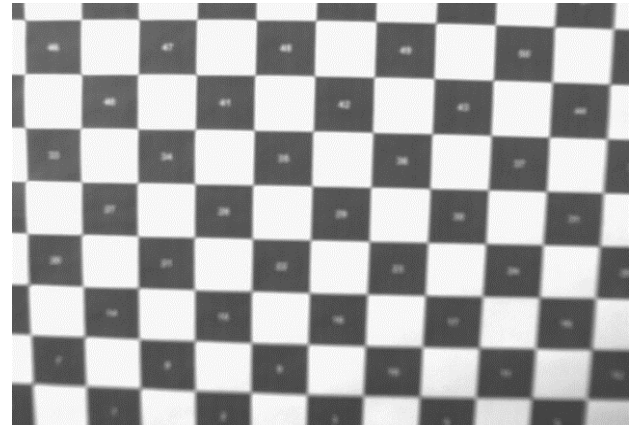
Şekil 8. Kalibrasyon görüntüleme modülü.

3. Uygulama ve Bulgular

Bölümde 2’de ayrıntılı olarak değinilen bilgiler ışığında sağ ve sol olmak üzere her iki kamera ile kalibrasyon levhasının görüntüleri çekilerek kamera kalibrasyonu ve stereo kamera baz kalibrasyonu dengelemeleri yapılmış ve elde edilen yeni iç yöneltme parametreler kullanılarak hareketli sonda üzerinde gerçek zamanlı stereo ölçüm testleri icra edilmiştir. Söz konusu testler, kalibrasyon modülü içerisindeki stereo test özelliği kullanılarak yapılmaktadır. Testlerde kullanılan stereo kamera ve kalibrasyon levhasının dengeleme için çekilen gri tonlamalı örnek bir görüntüsü Şekil 10’da sunulmuştur.



(a)



(b)

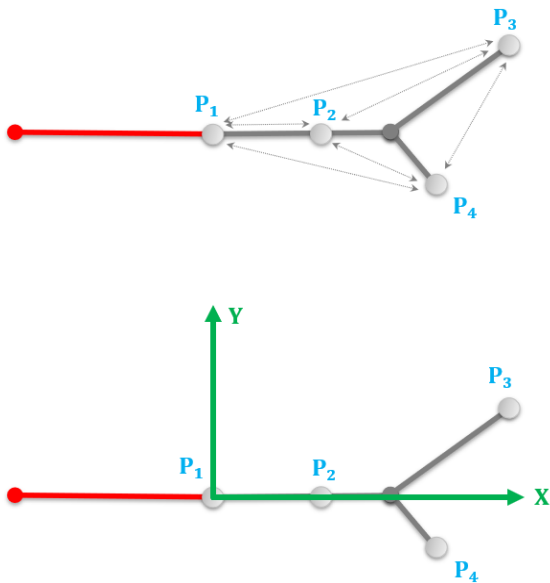
Şekil 10. Kullanılan Optitrack v120 Duo stereo kamera (a) ve örnek bir görüntüsü (b).

Söz konusu testler, hareketli sonda üzerinde bulunan gümüş toplar arasında yüksek doğruluklarla önceden bilinen çapraz mesafeler üzerinden yapılmıştır. Sondanın ölçümler esnasında obje uzayında her zaman hareketli ve dolayısıyla da keyfi bir konumda bulunması sebebiyle testlerde çapraz mesafeler kullanılmıştır. Kalibrasyonlar neticesinde yapılan stereo ölçüm testleri sonucunda hesaplanan mesafeler önceden bilinenler ile karşılaştırılarak Bölüm 3.1 ve 3.2’ de sunulmuştur.

Testlerde kullanılan hareketli sonda üzerinde bulunan gümüş topların önceden $\pm 0,05$ mm hassasiyetle bilinen yüksek doğruluklu lokal (üretim) koordinatları Çizelge 3’de, bu lokal koordinatlardan hesaplanan ve yapılan kontrollere esas teşkil eden çapraz mesafelere ait grafik gösterim ise Şekil 11’de sunulmuştur.

Çizelge 3. Sonda lokal (üretim) koordinatları.

NO	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
P1	0,00	0,00	0,00
P2	50,00	0,00	0,00
P3	135,00	25,00	0,00
P4	100,00	-25,00	0,00



Şekil 11. Sonda üzerinde kontrol edilen çapraz mesafeler ve lokal koordinat eksenleri.

3.1. Kamera kalibrasyonunun ölçüm doğruluğuna etkisi

Kalibrasyon levhasının 2 farklı mesafeden çekilen mono görüntüleri kullanılarak her kamera için ayrı olarak yapılan dengeleme sonucunda her iki kamera için hesaplanan yeni iç yöneltme parametreleri Çizelge 4’de verilmiştir. Söz konusu parametrelerin dengeleme sonucunda hesaplanan hata miktarları Çizelge 4’de yuvarlandıkları anlamlılık düzeylerinin çok altındadır ve tablonun sadeliği açısından verilmemiştir. Elde edilen bu yeni parametreler kullanılarak Şekil 11’de görülen sonda üzerindeki gümüş topların gerçek zamanlı obje uzay koordinatları (X, Y, Z) ve birbirleri arasındaki çapraz mesafeleri fotogrametrik olarak hesaplanmış ve önceden bilinen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4. Kamera kalibrasyon sonuçları (640x480 piksel çözünürlük ve 6x6 μ m fiziksel piksel boyutu ile)

Parametre	Simge	Sol Kamera	Sağ Kamera
Odak uzaklığı (mm)	c	3,562	3,571
Asal noktanın konumu (mm)	x_0	-0,0621	0,0001
	y_0	-0,0438	-0,0825
Çapsal distorsiyon katsayıları	k_1	9,701 E-03	7,815 E-03
	k_2	-7,341 E-04	-5,439 E-05
	k_3	2,544 E-05	-5,002 E-05
Teğetsel distorsiyon katsayıları	p_1	-5,109 E-04	-1,290 E-04
	p_2	1,618 E-04	-7,585 E-06
Diferansiyel Ölçek dist. katsayıları	b_1	1,183 E-05	1,408 E-05
	b_2	1,027 E-06	9,421 E-06

Elde edilen sonuçlar ışığında; yalnızca odak uzaklığının kalibre edilmesinin anlamlı sonuçlar vermediği, asal noktanın konumu, çapsal ve diferansiyel ölçek distorsiyon katsayılarının kalibre edilmesinin sistemin ölçüm doğruluğuna önemli oranda katkı sağladığı, teğetsel distorsiyon etkisinin ise ihmal edilebilir seviyede olduğu Çizelge 5’de sunulan karşılaştırma tablosunda görülmektedir.

Çizelge 5. Kamera kalibrasyonunun anlık ölçüm doğruluklarına etkisi.

MESAFE NO	A (mm.)	B (mm.)					FARKLAR (mm.)				
		B1	B2	B3	B4	B5	A – B1	A – B2	A – B3	A – B4	A – B5
P1 - P2	50,00	49,04	49,35	49,94	49,94	49,96	0,96	0,65	0,06	0,06	0,04
P1 - P3	137,30	134,14	135,03	136,76	136,74	137,09	3,16	2,27	0,54	0,56	0,21
P1 - P4	103,08	101,61	102,17	102,60	102,50	102,93	1,47	0,91	0,48	0,58	0,15
P2 - P3	88,60	86,28	86,87	88,17	88,14	88,43	2,32	1,73	0,43	0,46	0,17
P2 - P4	55,90	55,34	55,61	55,46	55,36	55,68	0,56	0,29	0,44	0,54	0,22
P3 - P4	61,03	58,33	58,86	60,94	60,93	60,91	2,70	2,17	0,09	0,10	0,12

A - Fiziksel olarak yüksek doğrulukla önceden ölçülen mesafeler

B - Akıcı stereo görüntülerden gerçek zamanlı (anlık) ve fotogrametrik olarak hesaplanan mesafeler

B1 - Kalibrasyonsuz kamera parametreleri kullanılarak

B2 - Sadece odak uzaklığı kalibre edilerek

B3 - Odak uzaklığı, asal noktanın konumu ve çapsal distorsiyon katsayıları kalibre edilerek

B4 - Odak uzaklığı, asal noktanın konumu, çapsal ve teğetsel distorsiyon katsayıları kalibre edilerek

B5 - Odak uzaklığı asal noktanın konumu, çapsal, teğetsel ve diferansiyel ölçek distorsiyon katsayıları kalibre edilerek.

3.2. Stereo kamera baz kalibrasyonunun ölçüm doğruluğuna etkisi

Bölüm 2.2’de teorik olarak anlatıldığı üzere; kalibrasyon levhasının her iki kamera görüntüsü üzerine maksimum yayılacak şekilde çekilen stereo görüntüleri kullanılarak yapılan dengeleme sonucunda yüksek doğrulukla elde edilen sabit stereo kamera bazı Çizelge 6’da sunulmuştur.

Çizelge 6. Stereo kamera baz kalibrasyonu sonucu.

Parametre	Değer (mm)
Baz aralığı	200,72 ± 0,02

Yapılan araştırmalar ve matematiksel hesaplamalar ışığında; kameraların birbirlerine göre rölatif olarak sabit dönüklükte (içe dönük) ve sabit baz aralıklı olarak stereo kamera seti şeklinde kullanılmasının sistemin ölçüm doğruluğuna ve tutarlılığına olumlu yönde katkı sağladığı görülmüştür.

Bu teknik; önceden kalibre edilen (hassas olarak hesaplanan) stereo kamera bazının ilave şart gözlemi olarak sürekli ölçüm döngüsüne (dengelemelerine) dâhil edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu sayede; referans yüzeyin görüntülerde küçük bir alana izdüşümü sebebiyle oluşabilecek referanslama ve ölçek hatası minimize

edilmekte, dolayısıyla gerçek zamanlı olarak elde edilen dış yöneltme parametreleri çok daha yüksek doğrulukla elde edilmekte ve buna bağlı olarak da nihai konumlama ve ölçüm doğruluğu bu oranda artmaktadır. Kalibre edilen stereo kamera bazının anlık ölçüm dengelemelerine ilave şart gözlemi olarak dâhil edilmesinin ölçüm doğruluklarına etkisi Çizelge 7’de sunulmuştur.

Çizelge 7. Stereo kamera bazının sabit şart gözlemi olarak dengelemeye dâhil edilmesinin anlık ölçüm doğruluklarına etkisi.

MESAFE NO	A (mm.)	B (mm.)		FARKLAR (mm.)	
		B1	B2	A – B1	A – B2
P1 - P2	50,00	50,95	49,96	0,95	0,04
P1 - P3	137,30	139,58	137,09	2,28	0,21
P1 - P4	103,08	104,55	102,93	1,47	0,15
P2 - P3	88,60	90,01	88,43	1,41	0,17
P2 - P4	55,90	56,36	55,68	0,46	0,22
P3 - P4	61,03	61,91	60,91	0,88	0,12

A - Fiziksel olarak yüksek doğrulukla hassas olarak ölçülen mesafe

B - Akıcı stereo görüntülerden gerçek zamanlı (anlık) olarak hesaplanan mesafe

B1 - Stereo kamera bazı şart gözlemi olarak alınmadan

B2 - Kalibre edilmiş stereo kamera bazı ilave şart gözlemi olarak alınarak.

4. Sonuç ve Öneriler

Stereo fotogrametri temel olarak uzayın merkezi izdüşümü ve uzayda 3B benzerlik dönüşümünü esas almaktadır. Bu sebeple, söz konusu geometri ne kadar sağlıklı oluşturulursa o oranda doğru ve güvenilir konum doğruluğu elde edilmektedir. Bu geometriyi sağlıklı olarak ortaya koymanın yolu ise kamera iç yönelme bilinmeyenlerinin yüksek doğruluklarla belirlenmesinden geçmektedir.

Bu çalışmada; ölçüm doğruluklarının hayati öneme sahip olduğu cerrahi navigasyon uygulamalarında kullanılan sistem ve kameraların ileri dengeleme teknikleriyle fotogrametrik kalibrasyonları yapılarak elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Fotogrametrik kamera kalibrasyonu ile uzayın merkezi izdüşüm geometrisi sağlıklı olarak ortaya kalsa da anlık ölçüm doğruluklarını etkileyen diğer bir faktör ise kameraların gerçek zamanlı referanslama işlemidir. Bu işlem YKN kullanımına benzer şekilde dizayn edilen referans yüzey ile yapılmaktadır fakat, referans yüzeyin her iki görüntüde de mecburen ufak bir alana izdüşümü sebebiyle anlık görüntülerin öteleme ve dönüklükleri olumsuz yönde etkilenmekte, bu olumsuz etki ise nihai ölçüm doğruluklarına yansımaktadır. Milimetre altında ölçüm doğruluğu gerektiren bu sistemlerde söz konusu olumsuz etkiyi minimize etmek için elde olan bütün ilave koşulların anlık çözümlere ve dengelemelere dâhil edilmesi gerekmektedir.

Hava fotogrametrisinden farklı olarak, anlık hareket tespiti ve anlık konum ölçümlerinin yapıldığı bu tarz sistemlerde iki kamera aynı anda senkronize bir şekilde, operasyon ortamını sağlıklı bir şekilde görüntülemek üzere sabit bir baz aralığında stereo kamera seti olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada ayrıca; kamera iç yönelme parametrelerine ilave olarak, sabit olan stereo kamera bazı da ileri dengeleme teknikleriyle kalibre edilmiş ve gerçek zamanlı konum ölçümlerine ilave koşul (şart) olarak dâhil edilmiştir. Söz konusu ilave koşulun ölçüm sağlığında önemli derecede artış sağladığı ve $\pm 0,2$ mm duyarlılıkta mutlak konum doğruluğu elde edildiği belirlenmiştir.

Yapılan stereo fotogrametrik ölçümlerin doğruluk ve duyarlılığı için; kamera odak uzaklığı, kamera görüş açısı, görüntü çözünürlüğü, stereo baz mesafesi, görüntüleme mesafesi, referans yüzey ve sondaların boyut ve geometrileri gibi bileşenlerin sistem tasarımı esnasında en baştan sağlıklı bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Teşekkür

Bu makalenin yazarları; 7 yıllık doktora ve yazılım çalışmaları süresince değerli katkılarından dolayı Doç.Dr. H. Hakan MARAŞ, Dr.Müh. Coşkun DEMİR ve Prof.Dr. Bahadır AKTUĞ'a teşekkür ederler.

5. Kaynaklar

- Alturki, A.S., 2017. Principal point determination for camera calibration, PhD Thesis, University of Dayton, Dayton (USA), 104.
- Brown, D.C., 1966. Decentering distortion of lenses. *Photogrammetric Engineering*, **32**(3), 444-462.
- Brown, D.C., 1971. Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, **37**(8), 855-866.
- Bukhari, F., Dailey, M.N., 2013. Automatic radial distortion estimation from a single image, *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, **45**(1), 31-45.
- Clarke, T.A. & Fryer, J.F. 1998. The development of camera calibration methods and models. *Photogrammetric Record*, **16**(91), 51-66.
- Cronk, S., Fraser, C.S. and Hanley, H.B., 2006. Automatic Calibration of Colour Digital Cameras. *Photogrammetric Record*, **21**(116), 355-372.
- Fraser, C.S., 1997. Digital camera self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, **52**, 149-159.
- Fraser, C.S. and Al-Ajlouni, S., 2006. Zoom-dependent camera calibration in close-range photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **72**(9), 1017-1026.
- Fraser, C.S., 2013. Automatic camera calibration in close range photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **79**(4), 381-388. Doi:0099-1112/13/7904-381.

- Fryer, J.G. and Brown, D.C., 1986. Lens distortion in close range photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **52**(2), 51-58.
- Fryer, J.G and Fraser, C.S., 1986. On the calibration of underwater cameras. *Photogrammetric Record*. **12**(67), 73-85.
- Fryer, J.G., 1989. Camera calibration in non-topographic photogrammetry. *ASPRS*, 59-69.
- Fryer, J.G. and Goodin, D.J., 1989. In-flight aerial camera calibration from photography of linear features. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **55**(12), 1751-1754.
- Fryer, J.G., 1992. Recent developments in camera calibration for close-range applications. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, **29**(5), 594-599.
- Fryer, J.G., 1996. Camera calibration. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, Whittles Publishing, Scotland, 156-179.
- Hallert, B., 1963. The method of least squares applied to multicollimator camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, **29**(5), 836-840.
- Hothmer, J., 1958. Possibilities and limitations for elimination of distortion in aerial photographs. *Photogrammetric Record*, **2**(12), 426-445.
- Kraus, K., 2008. Fotogrametri. Cilt-1. O.Altan, S.Külür, G.Toz, H.Demirel, Z.Duran, M.Çelikoyan (çeviri editorleri), Nobel Yayınları, 3-462.
- Linder, W., 2009. Digital Photogrammetry - A Practical Course. Springer-Verlag, Heidelberg, 1-179.
- Luhmann, T., Hastedt, H. and Tecklenburg, W., 2006. Modelling of chromatic aberration for high precision photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **36**(5), 173-178.
- Nakiboğlu, M., Demir, C., 2006. Dengeleme Hesabı (Dengeleme-1). Harita Genel Komutanlığı, 1-62.
- Nakiboğlu, M., Demir, C., 2006. Dengelemede İleri Uygulamalar (Dengeleme-2). Harita Genel Komutanlığı, 1-64.
- Sampath, A., Moe, D. and Christopherson, J., 2012. Two methods for self-calibration of digital camera. *International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **39**(B1), 261-266
- Stamatopoulos, C., 2011. Orientation and calibration of long focal length cameras in digital close-range photogrammetry. PhD Thesis, Dept. of Infrastructure Engineering, University of Melbourne, Melbourne, 170.
- Wang, S., Tseng, Y.H., 2000. Automatic self-calibration of digital cameras for close-range photogrammetry. *IAPRS*, **33**, 7.

İnternet kaynakları

- 1- <https://www.isprs.org/>
- 2- <https://www.asprs.org/>
- 3- <https://www.researchgate.net/>
- 4- <https://social.msdn.microsoft.com/>
- 5- <https://www.c-sharpcorner.com/>
- 6- <https://stackoverflow.com/>