

Videogrametrik bir sistem tasarımı

Ferruh YILMAZTÜRK*, Sıtkı KÜLÜR

İTÜ İnşaat Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bu çalışmada, yapı elemanlarının dinamik yük deneylerinde yer değiştirmelerin izlenmesinde kullanılmak üzere videogrametrik bir sistem tasarımı yapılmıştır. Sistem, yazılım ve donanım olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Borland C++ builder programlama dili kullanılarak geliştirilen yazılımda, video kameralardan görüntü alma, hedef görüntülerin resim koordinatlarını piksel altı doğrulukta ölçme, görüntü eşleme ve ek parametrelerle demet dengelemesi gibi birçok fonksiyon sunulmuştur. Sistemin donanım bileşeni ise, üç adet Basler A302fc video kamera, PCI IEEE 1394 arabirim kartı, bağlantı kabloları ve kalibrasyon cismini içermektedir. Sistemin ölçme prensibi kısaca, kamera parametre ve konum bilgilerinin belirlendiği sistem kalibrasyonu ve sonra tanımlanan zaman aralıklarında ya da yükleme sonrası, sabit kamera konumlarından yapı elemanı üzerindeki ilgili noktaların üç boyutlu koordinatlarının uzaysal ileriden kestirme dengelemesiyle hesaplanması ilkesine dayanır. Görüntülerin elde edilmesinden yapı elemanı üzerindeki işaretli noktaların 3 boyutlu koordinatlarının hesaplanmasına kadar bütün işlem adımları gerçek zamana yakın biçimde sistem içerisinde çözülebilmektedir. Test edilmesi amacıyla sistem, zemin numunelerinin serbest basınç deneylerinde kullanılmış ve ölçme sonuçları, deney aletinden okunan ölçme değerleriyle karşılaştırılmıştır. Geliştirilen sistemle gerçekleştirilen fotogrametrik değerlendirmelerde, her bir deney için resim koordinat düzeltmelerinin karesel ortalama hata değerleri, 0.02 pikselle 0.05 piksel aralığında elde edilmiştir. Cisim koordinatlarının ortalama prezisyonu ise X ve Z doğrultularında 16 µm, Y doğrultusunda, 62 µm olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Videogrametrik sistem, yer değiştirme ölçmeleri, görüntü eşleme, kalibrasyon.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Ferruh YILMAZTÜRK. yilmazturk@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 65 53.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Yapı elemanlarının dinamik testlerinde yer değiştirmelerin izlenebilmesi için videogrametrik bir sistem tasarımı " adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 21.03.2008 tarihinde dergiye ulaşmış, 03.04.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.09.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

A videogrammetric system design

Extended abstract

The testing and monitoring of structures and structural components under different loading conditions are a standard engineering application. Geometrical measurements are performed for the examination of the behavior of test objects and for the verification of theories or mechanical models. This is often realized by static, quasi-static, or dynamic short and long time load experiments on test objects. In these tests, it is demanded to determine parameters and effects such as the changes in shape, load and strain which are commonly measured by LVDTs, extensometers and strain gauges. These devices provide on-line results with a high geometric precision and reliability. A general disadvantage of these techniques, however, is their point wise and only one-dimensional measurement capability. The techniques are generally not suited for tasks requiring a large number of measurement points distributed over an object surface or for complete surface measurements. In these cases, techniques of digital photogrammetry depict a valuable option for the design of powerful and flexible measurement tools. However, while the measurement of the absolute coordinates and the movement of signalized targets on an object can be solved by commercial software packages, non standard monitoring tasks or applications with real time or near real time requirements will often necessitate the development of customized software tools. In this study, a videogrammetric system is developed to measure the coordinates of signalized targets on structural components during both dynamic and static load tests. After the system calibration, the entire process from acquisition multi image sets to computation of 3D object coordinates are solved by the system at almost real time. The system consists of two basic components: hardware and software. The software which was developed by using Borland C++ builder programming language presents many functions such as acquiring images, locating targets and calculating their centroids, converting target centroids to spatial coordinate in object space, and computing displacement. The hardware component of the system comprises of 3 Basler A302fc video cameras, PCI IEEE-1394 interface card, connecting cables and calibration object. The entire measurement process is realized as a two-stage process which are a preliminary offline phase and online photogrammetric triangulation process. Offline photogrammetric processing stage

includes system calibration which is defined as the calibration and orientation parameters of all the components involved in the acquisition system and a zero measurement. Camera calibration refers to the determination of the parameters describing the internal geometry of the individual imaging devices and other parameters modeling the systematic errors caused by the optical system and other sources. Camera orientation includes the determination of the parameters of exterior orientation to define the camera station and camera axis in the 3D space. After orientation procedure, it is required that the cameras ought to stable during the entire measurement process. For zero measurement, images of the test object on which the signalized targets are placed are acquired firstly. Then, the image coordinates of all targets are measured with sub-pixel accuracy automatically via intensity weighted centroiding. Afterward, matching process is implemented to establishment of correspondences in the multi-images. Finally the 3D coordinates of the matched points are computed by forward ray intersection using the results of the calibration process.

The main aim of on-line data processing was the determination of the displacement values at each measurement epoch associated with the current loading. Online photogrammetric processing stage is composed of three steps as follows: the simultaneously acquisition of multi-image sets of the structural element at defined time intervals or after load applications; the measurement of the image coordinates of targets which are labeled in the zero measurement and computation of the 3D coordinates of the points whose image coordinates are measured. The system was used for unconfined compression tests in order to demonstrate the functionality of it and measurement results obtained from two different systems obtained were compared.

This study has been shown that the developed system was successfully employed to determine the displacement measurements in structural components during loading tests. The achieved average theoretical precision is about 16 microns in the X and Z directions and about 62 microns in the Y direction. The RMS value of image co-ordinate residuals which are important quality indicators was determined between 0.02 and 0.05 pixel.

Keywords: Videogrammetric systems, displacement measurements, image matching, calibration.

Giriş

İnşaat mühendisliği malzeme testi uygulamalarında, değişen koşullar altında test cisminin geometrik şeklinin izlenmesi istenir. Geometrik ölçmeler, teorilerin ya da mekanik modellerin doğrulanması için veya test cisminin davranışının belirlenmesi için uygulanır. Bu genellikle statik, yarı statik ya da dinamik kısa ve uzun süreli yük deneyleri ile laboratuvar koşullarında gerçekleştirilir. Yük testleri boyunca, deformasyon, gerilme ve yer değiştirme gibi etki ve parametrelerin belirlenmesi amaçlanır.

Malzeme testi uygulamalarında, yer değiştirme ölçmeleri genel olarak gerilimölçerler (*strain gauges*) ya da doğrusal değişimli fark transformatörleri (LVDT- *Lineer Variable Differential Transducer*) gibi klasik ölçme araçları ile yapılır. Klasik ölçme sistemleri yüksek geometrik doğruluk ve güvenilirlikle on-line sonuçlar verirler. En önemli dezavantajları ise noktasal ve tek boyutlu ölçme yeteneklerinin olmasıdır. Söz konusu teknikler, cisim yüzeyi üzerindeki çok sayıda ölçme noktasının gerekli olduğu ya da komple yüzey ölçmeleri için uygun değildir.

Bu durumlarda, dijital fotogrametrik teknikler, güçlü ve esnek bir ölçme sisteminin tasarımı için uygun bir seçenek olarak karşımıza çıkar. Kameranın görüş alanı içerisindeki çok sayıda noktanın deformasyon ya da yer değiştirmeleri, eş zamanlı olarak belirlenebilir. Veri işleme, bir video çevirimi oranında gerçek zamanlı izlemeye izin verecek şekilde otomatik ve hızlı olabilir. Fotogrametrik tekniklerin doğruluk potansiyeli ise genellikle obje boyutuna lineer bir bağımlılık gösterir ve uygun koşullar altında cisim boyutunun 1:100000 oranında bir koordinat standart sapması elde edilebilir. Tekrarlı ölçmelerin yapılabildiği sistem konfigürasyonlarının kullanıldığı deformasyon analizlerinde bu değer 1:250000 olarak elde edilmiştir (Maas ve Niederöst, 1997).

Videogrametri ise son yirmi yıldır kullanılan bir terimdir ve video kameralar kullanılarak görüntülerin eş zamanlı olarak kayıt edilmesi ve fotogrametrik sistem ve algoritmalarla kayıt edilen görüntü verisinin işlenmesi olarak tanımla-

nır. Gerçek zamanlı fotogrametri ya da on-line sistemlerle gerçek zamanlı videogrametri terimleri eş anlamlı olarak kullanılır. Bu teknikler, dijital görüntünün elde edilmesine bağlıdır ve dijital görüntülerin doğası nedeniyle veri işlemenin otomasyonu bahsedilen yöntemlerde temel bir sistem özelliği olmuştur.

Fotogrametrik ya da videogrametrik olarak isimlendirilen bir sistemin,

- Üç boyutlu yeniden oluşturma fonksiyonları ile ilgili olarak esneklik,
- Yüksek doğruluk ve güvenilirlik,
- Ölçme ve sonuçları üzerinde kalite kontrolü şartlarını sağlaması istenir (Gruen, 1997).

Bir bilgisayara bağlı tek bir kameradan oluşan sistem hızlı sonuçlar verebilir ancak gerçek zamanlı değildir. Online sistemler gerçek zamanlı ya da gerçek zamana yakın üç boyutlu cisim nokta konumu verebilen ileri bilgisayar teknolojileri ile birleştirilmiş çoklu video kameralardan oluşur. Farklı zamanlarda ya da farklı yükleme koşulları altında, yapı üzerinde istenen noktaların 3 boyutlu koordinatları fotogrametrik teknikler kullanılarak hesaplanır ve noktaların hareketinin büyüklüğünü ve yönünü veren yer değiştirmeler, koordinat değişimlerinden belirlenebilir.

Zaman, maliyet ve diğer deneysel sınırlamalar nedeniyle bütün bir yapı yerine genellikle yapı bileşenlerinin testleri yapılır. Literatürde, kolon, kiriş gibi yapı elemanlarının test edilmesi ve izlenmesini amaçlayan fotogrametrik tekniklerin kullanıldığı birçok uygulama vardır.

Bir test cismi üzerindeki işaretlenmiş noktaların hareketi ve mutlak koordinatlarının ölçmesi ticari fotogrametrik yazılımlar tarafından çözümlenirken, standart olmayan izleme uygulamaları ya da gerçek zamanlı veya gerçek zamana yakın sonuçlar isteyen uygulamalar için bu amaca yönelik özel yazılım araçlarının geliştirilmesi gerekir (Maas ve Hampel, 2006). Yapılan çalışmada, yapı elemanlarının dinamik yük testlerinde yer değiştirmelerin izlenmesinde kullanılmak üzere videogrametrik bir sistem geliştirilmesi ve görüntülerin elde edilmesinden 3 boyutlu koordinatların hesaplanmasına kadar bütün işlemele-

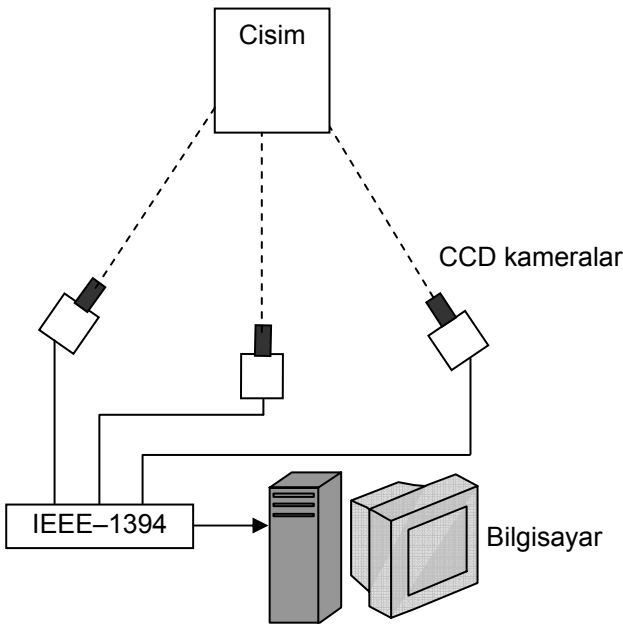
rin bu sistem içerisinde ve gerçek zamana yakın çözülmesi amaçlanmıştır. Sistem test amacıyla serbest basınç deneyinde kullanılmış ve SBD aletinden okunan ölçme değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Sistem tasarımı

Geliştirilen sistem yazılım ve donanım olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Donanım bileşeni kısaca görüntü elde etme sistemini, yazılım bileşeni de elde edilen görüntü verisinin fotogrametrik olarak değerlendirilmesini içerir.

Görüntülerin elde edilmesi

Kalite ve performans açısından, çok görüntülü video dizilerinin elde edilmesi için en iyi görüntü elde etme aracı, alan taramalı (area scan) CCD kameralardır. Alan taramalı kameralar, tam bir görüntü karesini hareket eden cisimlerle bile algılayıcı tam çözünürlüğünde elde edebilmektedir. Geliştirilen sistemde de bu tür kameralar kullanılmıştır. Kamera-bilgisayar bağlantısını sağlayan IEEE-1394 ara yüzü, bazı kamera parametrelerinin yazılımla kontrolü kadar görüntülerin dijital iletimine de izin verir. Alan taramalı CCD kameralar kullanılarak oluşturulan görüntü elde etme sistemi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Görüntü elde etme sistemi

Yazılımda, CCD kameralara bağlanmak ve görüntü verisini elde etmek içinse DirectShow filtreleri kullanılmıştır. DirectShow'un temel ilkesi olan filtreler aslında birer yazılım bileşenidir. DirectShow multimedya verinin işlenmesini farklı adımlara böler ve her filtre bir işlem adımını gösterir. BCAM DirectShow Video kaynak filtresi bir WDM (Windows Driver Model) sürücüsü olarak kullanılabilir ve video akışı ve editleme yazılımı, görüntü işleme yazılımı, video yakalama araçları gibi DirectX / DirectShow uyumlu bir uygulamaya Basler 1394 kameraların bağlanmasını sağlamaktadır. BCAM DirectShow video kaynak filtresi, kullanılan kameralara ait Basler 1394 sürücü yazılımının bir parçasıdır ve kameralara ait WEB sitesinden ücretsiz olarak indirilebilen BCAM 1394 sürücü yazılım paketi içinde bulunmaktadır (Pesce, 2003).

Sistem kalibrasyonu

Çoklu kamera sistemi özellikleri, uygun kamera kalibrasyon yönteminin seçimi için temel bir öneme sahiptir. Bu özellikler; rölatif konumları değişmeksizin çoklu kamera sisteminin birlikte hareket etmesi ve kameraların çok sık kalibre edilmesi gerekliliğidir. Dolayısıyla çoklu kameraların eş zamanlı kalibrasyonu daha uygun bir yöntem olarak kabul edilmiştir. Sistemin tümü bir ölçme aracı olarak düşünüldüğünde, bütün kameralara ait kalibrasyon ve yöneltme bilinmeyenlerinin belirlenmesi sistem kalibrasyonu olarak tanımlanır (D'Apuzzo, 2003).

Kalibrasyon ve yöneltme amacıyla üç boyutlu koordinatları önceden hassas olarak belirlenmiş, siyah arka plan üzerinde beyaz dairesel hedeflerden oluşan bir test alanı kullanılmıştır. Yazılım bu tür hedeflerin resim koordinat ölçmelerini otomatik yapmaktadır. Yazılımda, test alanına ait 6 noktanın resim koordinat ölçülerini gerektiren dış yöneltme parametrelerinin ilk yaklaşık değerleri hesabından sonra, diğer hedef noktaları geriye hesap yöntemiyle otomatik olarak ölçülebilir. Yazılımın kalibrasyon modülü, demet dengelemeli kalibrasyon yöntemine dayalıdır. Kalibrasyon işleminin sonucunda, ana mesafe ve ana nokta koordinatlarından oluşan kamera iç yöneltme parametreleri ile kolinarite modelden

olan farklı sapmaları karşılayan resim koordinat düzeltmeleri belirlenir. Bütün bu parametrelerin hesaplanması, yüksek doğruluklu ölçü sonuçları elde etmek için gereklidir.

Görüntüleri tarama

Hedef görüntülerinin piksel altı doğrulukta konumlarının hesaplanması, hedef tanıma ve konum belirleme olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilir. Hedef görüntülerinin tanınması, resim üzerinde hassas bir şekilde konumunun belirlenebilmesi için gereklidir. Hedef konumunun belirlenmesi genellikle ikinci bir aşamadır. Görüntüde hedeflerin otomatik tanınması ve ölçümü için birçok yöntem önerilmiştir. Bu tekniklerin çoğu, kodlanmış özel hedefler ve görüntünün filtrelenmesi kombinasyonunu kullanarak, karışık bir arka plandan hedef görüntülerin hassas bir şekilde çıkarılmasını amaçlar (Shortis vd., 1994). Bir diğer yöntem ise, görüntüdeki cisimleri daha karanlık ya da daha parlak yaparak hedef görüntülerin kolaylıkla belirlenmesini sağlamaktır. Endüstriyel fotogrametride sıkça kullanılan bu yöntemde, kontrollü aydınlatma şartları ve geri-yansıtımlı hedefler kullanılır.

Geliştirilen yazılımda hedef tanıma kriteri olarak çapraz korelasyonla görüntü eşleştirme yöntemi kullanılmıştır. Bu tip eşleştirmede temel düşünce, aynı olayı tanımlayan iki görüntü penceresindeki gri düzey değerleri arasında hesaplanan korelasyon katsayılarının en büyüğü ile benzerliği bulmaktır. Bu pencerelerden ilki şablon pencere diye adlandırılan referans görüntü, diğeri ise bu şablon pencerenin çakıştırılacağı arama penceresidir (Kraus, 1997). Korelasyon katsayısı her iki görüntüdeki gri düzey değerler arasındaki kovaryanstan ve görüntülerin gri değerlerinin standart sapmalarından hesaplanır.

Yazılımın hedef belirleme algoritması aşağıdaki gibi çalışır. Görüntülerden direkt olarak elde edilen şablon pencere, geçerli görüntü üzerinde piksel piksel kaydırılır ve her konumdaki korelasyon katsayısı hesaplanır. Şekil 2, geliştirilen yazılımda hedef görüntü ve hedef parametreleri girişini göstermektedir. Hesaplanan değer hedef parametrelerinde tanımlanan minimum korelasyon katsayısından büyükse söz konusu konumda hedef görüntüsü olduğu düşünülür.

Şekil 2. Yazılımda şablon görüntüyü de içeren hedef görüntü parametreleri

Hedef görüntü tanındıktan sonraki aşama, hedef görüntü konumunun en yüksek korelasyon katsayısıyla belirlenmesi ve hedef görüntünün etiketlenmesi aşamasıdır. Bu amaçla yazılım parametrelerinden girilen arama penceresi boyutlarında ve hesaplanan ilk yaklaşık piksel koordinatları ortalamayan bir arama penceresi görüntüsü geçerli görüntüden ikinci kez korelasyon katsayısı hesabı yapılır. Her konum için hesaplanan korelasyon katsayılarından en büyük olanı, hedef görüntünün aranan piksel konumunu gösterir. Geçerli görüntü üzerindeki tanımlı hedef görüntüyü arama işleminde, aynı hedef görüntüsü için minimum korelasyon katsayısından büyük birden çok değer hesaplanabilir. Bu durumda, hedef görüntüsünün minimum korelasyon katsayısından büyük her değeri için, ikinci korelasyon hesabıyla elde edilen hedef görüntü merkezinin yaklaşık piksel koordinatları aynı olacaktır. Dolayısıyla geçerli görüntü üzerindeki her hedef görüntüsü merkezi için yalnız bir piksel koordinat çifti elde edilerek hedef görüntüler etiketlenmiş olur. Yazılımda bu amaçla önce bir piksel koordinat dosyası oluşturulur. Geçerli hedef görüntünün minimum korelasyon katsayısından büyük her değeri için ikinci korelasyon hesabıyla belirlenen yaklaşık piksel koordinatları, piksel koordinat dosyasında sorgulanır. Kayıt yoksa hedef görüntünün yeni hedef olduğu dü-

şünülür ve etiketi yani nokta numarası ile yaklaşık piksel koordinatları dosyaya kayıt edilerek piksel altı konum belirleme işlemine geçilir. Koordinatlarının daha önceden kaydı varsa söz konusu hedef görüntü geçilerek geçerli görüntü üzerinde tanımlı hedef görüntüyü arama işlemine devam edilir.

Hedef nokta görüntülerinin resim koordinatlarının hesaplanması

Yazılımda hedef görüntü merkezinin yaklaşık piksel koordinatları belirlenir belirlenmez geçerli görüntü üzerinde hedef görüntünün piksel altı doğrulukta konumunun belirlenmesi için ikinci bir hesap işlemi uygulanır. Bu hesaplama, ön işlem aşaması ve gerçek merkez hesabı olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilir.

Ön İşleme, pikselleri hedef bilgisi ya da artalan görüntüsü olarak sınıflandıran bir eşikleme işlemidir. Eşikleme işleminde hedefin yoğunluk görüntüsünden belirli bir artalan yoğunluğu çıkarılır. Hedef görüntünün geçerli görüntü üzerindeki konumunu piksel altı doğrulukta belirleyebilmek içinse farklı yöntemler kullanılabilir. Fakat yoğunluk ağırlıklı merkez belirleme metodu basit, hızlı ve doğru bir hesap yöntemi olması nedeniyle endüstriyel fotogrametri uygulamalarında en çok kullanılan yaklaşım olmuştur. Geliştirilen yazılımda da kullanılan bu yöntemde x_0 , y_0 piksel altı ağırlık merkezi koordinatları;

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_{ij} \begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \end{bmatrix}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_{ij}} \quad (1)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada, x_{ij} ve y_{ij} hedef şeklin içerisindeki piksellerin satır ve sütun koordinatlarını, g_{ij} 'de karşılık gelen gri değeri gösterir. Yüksek kontrastlı görüntülerde bu teknik kullanılarak, piksel boyutunun %2'sine varan bir ölçü doğruluğuna ulaşılabilmektedir (Shortis vd., 1994; Otepka vd., 2002).

Görüntü eşleme – karşılıklı görüntü noktalarını belirleme

Geliştirilen yazılımda homolog noktaların yerini belirlemek için kabul edilen teknik Sabel tarafından önerilen epipolar plan açılı yöntemidir. Bu yöntem hızlıdır ve dijital kameralar kullanıldığı zaman homolog noktaların belirlenmesinde oldukça etkili olan lens distorsiyonlarını da hesaba katar (Sabel, 1999; Otepka, 2001).

Epipolar plan açılı yönteminin esası, Şekil 3'te gösterildiği gibi homolog görüntü noktaları ışınlarının herhangi bir epipolar düzlemle aynı açılı oluşturması ilkesine dayanır. Her iki resmin resim noktaları için gerekli açılı hesaplamada, ilk olarak keyfi bir epipolar düzlem tanımlanır. Tanımlanan düzlem, iki izdüşüm merkezi ve üçüncü bir noktayı içermelidir. Genellikle üçüncü nokta olarak ilk görüntünün ana noktası alınır.

n_1 ve n_2 vektörleri ve baz çizgisi birbirlerine dik ve tanımlanan epipolar düzlemin n_1 vektörünü de içermesi koşulu ile,

$$\bar{a}_1 = R_1 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

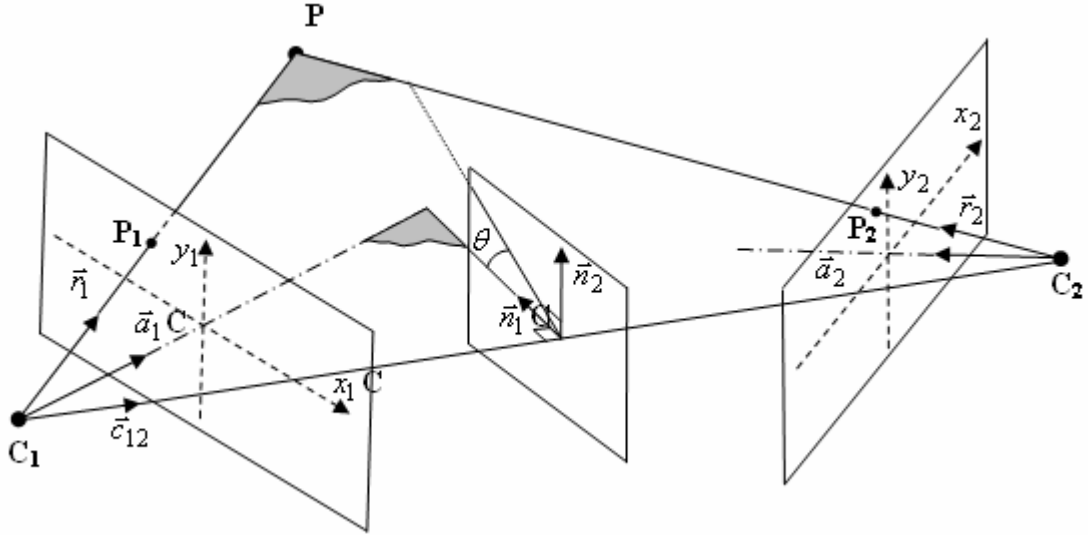
$$\bar{n}_2 = \bar{c}_{12} \times \bar{a}_1 \quad (3)$$

$$\bar{c}_{12} = \frac{C_2 - C_1}{|C_2 - C_1|} \quad (4)$$

$$\bar{n}_1 = \bar{n}_2 \times \bar{c}_{12} \quad (5)$$

normalize vektörler n_1 ve n_2 hesaplanır. Burada, R_1 , birinci resmin dönüklük matrisini gösterir. Bu vektörler şimdi her iki görüntüdeki her görüntü noktası için epipolar plan açılarını hesaplamak için kullanılabilir. Aşağıdaki eşitlik her iki görüntü için de aynıdır.

$$\bar{v}_i = R \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ -c \end{bmatrix} \quad (6)$$



Şekil 3. Epipolar plan açı geometrisi

Burada, R , geçerli görüntü için dönüklük matrisini, x_i ve y_i , görüntü noktasının düzeltilmiş resim koordinatlarını, c 'de kullanılan kameranın odak uzaklığını gösterir. Her iki görüntüdeki her bir görüntü noktası için epipolar düzlem açıları ise aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$\theta = \arctan(\bar{n}_2 \cdot \bar{v}_i, \bar{n}_1 \cdot \bar{v}_i) \quad (7)$$

Epipolar düzlem açıları belirlendikten sonra, eşleme parametrelerinde tanımlanan bir tolerans içinde aynı θ açısına sahip olacaklarından homolog görüntü noktaları kolayca belirlenebilir. Bir görüntü noktası, ikinci görüntüde aynı epipolar plan açısına sahip sonsuz sayıda homolog noktasına sahip olabilir. Dolayısıyla homolog nokta belirlemedeki belirsizliklerin çözümü ya da büyük ölçüde düşürülmesi için üçüncü bir resmin kullanılması gerekebilir.

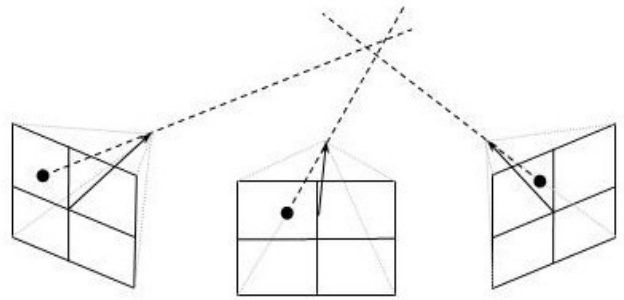
Uzaysal ileriden kestirme

Şekil 4, yakın resim fotogrametrisinde, klasik üç görüntü durumunu göstermektedir. İç ve dış yöneltme elemanları bilinen görüntülerin her birinde, aynı cisim noktasının görüntü noktaları bulunmaktadır.

Kameraların kusursuz kalibrasyonu durumunda bu üç ışın ortak bir noktada yani cisim nokta-

sında kesişecektir. Ancak bu genellikle mümkün olmaz ve üç ışın tam olarak bir noktada kesişmez. Dolayısıyla bütün ışınlara olan mesafeyi minimize edecek hayali bir kesişme noktası hesaplanır. Bu işlem uzaysal ileriden kestirme olarak isimlendirilir. Cisim uzayının görüntü düzlemine projeksiyonunu tanımlayan matematik model burada da kullanılmıştır. Standart kolinearite eşitliklerine distorsiyon etkilerinin de eklenmesiyle genişletilmiş model elde edilir (D'Apuzzo, 2003).

Uzaysal ileriden kestirme problemi en küçük kareler kestirimi ile çözülür. Bu durumda, ölçüler, farklı görüntülerdeki karşılıklı noktaların resim koordinatları, bilinmeyenlerde ölçülen noktaların cisim uzay koordinatları olur. Dengelemede dış yöneltme elemanları ve kamera parametreleri sabit değerler olarak alınmıştır.

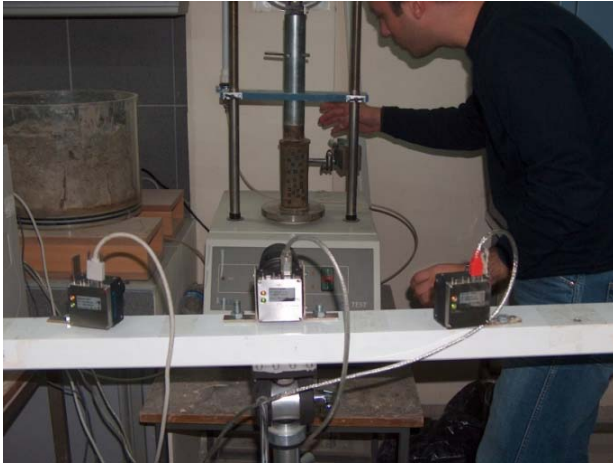


Şekil 4. Uzaysal ileriden kestirme geometrisi

Örnek uygulama

Geliştirilen sistemin test edilmesi amacıyla Y.T.Ü. Geoteknik Anabilim Dalı laboratuvarında, 6 farklı zemin numunesinin yük altındaki davranışını inceleyen serbest basınç deneyleri yapılmıştır (Şekil 5). Serbest basınç deneyi (SBD), yanal bir gerilme uygulanmadan sadece eksenel yükleme altında zemin numunesine ait gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin belirlendiği deney olarak bilinir. Bu deneylerde, zemin numunesi, SBD aletinin biri sabit, diğeri düşey yönde hareket edebilen iki yuvarlak plakası arasına yerleştirilmekte ve düşey yükle zemin numunesinin düşey eksenel boy kısılması, deney aleti üzerindeki deformasyon saatlerinden manuel olarak ölçülmektedir.

Bu deneylerin ilk üçünde 5 diğer deneylerde ise 15 saniye aralıklarla üç farklı video kameradan görüntüler alınarak numune üzerindeki hedef noktalara ait üç boyutlu koordinat değerleri otomatik olarak geliştirilen sistemle hesaplatılmıştır. Kameraların zemin numunesine olan mesafesi yaklaşık 80 cm'dir. Her biri 5 dakika ile 37 dakikalık bir zaman aralığında gerçekleştirilen deneylere ait özet bilgi Tablo 1' de verilmiştir.



Şekil 5. Serbest basınç deneyi

Sistemin bütün ölçme işlemi, başlangıç offline aşaması ve online fotogrametrik triyagülasyon işlemi olmak üzere iki işlem adımından oluşur. Offline fotogrametrik işlem aşaması, kalibrasyon parametreleriyle yöneltme bilinmeyenlerinin belirlendiği sistem kalibrasyonu ve bir başlangıç sıfır okumasını içermektedir. Sıfır oku-

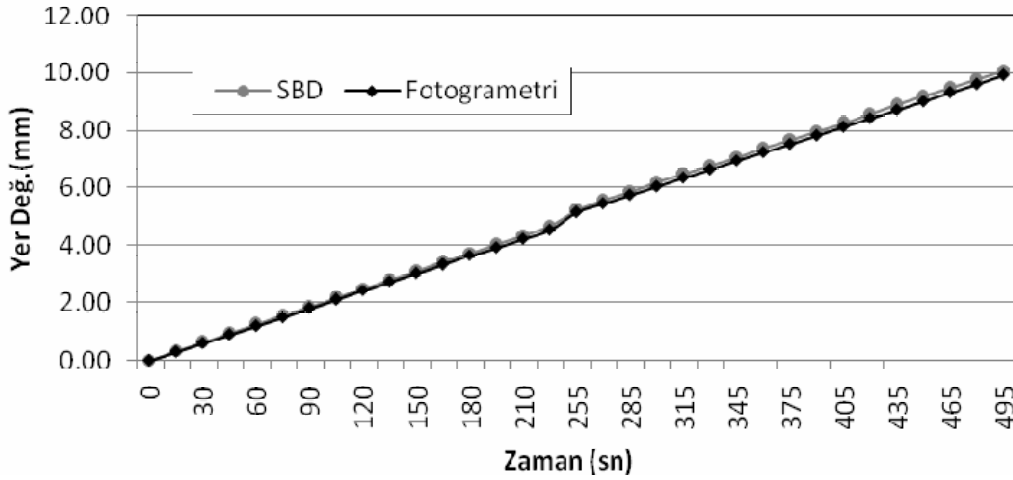
masında, ilk olarak sabit konumdaki zemin numunesinin görüntüleri elde edilir ve bu görüntüler tanımlı hedef görüntü için taranarak bütün hedef görüntülerinin resim koordinatları piksel altı doğrulukta ölçülür. Daha sonra, karşılıklı hedef görüntü noktalarının belirlenmesi için görüntü eşleme işlemi yapılır ve son işlem aşaması olarak eşlenmiş noktaların üç boyutlu cisim koordinatları, uzaysal ileriden kestirme dengelemeyle kalibrasyon sonuçları kullanılarak hesaplanır.

Tablo 1. Geliştirilen sisteme ait serbest basınç deneyi özet bilgisi

Deney Grubu	Top. Süre [sn]	Deney sayısı	Koordinat düzeltmeleri K.O.H. [μ m]	Ortalama nokta konum hatası [mm]
Num.1	2230	448	0.35	0.099
Num.2	270	55	0.37	0.086
Num.3	500	101	0.27	0.062
Num.4	870	59	0.20	0.047
Num.5	420	29	0.18	0.039
Num.6	465	32	0.23	0.057

Online fotogrametrik işlem aşaması ise kısaca aşağıdaki üç işlem adımından oluşur; (1) Yük testi boyunca istenen zaman aralıklarında test malzemesinin görüntülerinin eşzamanlı olarak alınması; (2) Sıfır ölçmesinde etiketlenen hedeflerin resim koordinatlarının piksel altı doğrulukta otomatik olarak ölçülmesi; (3) Bu noktaların üç boyutlu cisim koordinatlarının uzaysal ileriden kestirme dengelemeyle belirlenmesi. Yazılım tarafından geçerli ölçme oturumuna ait hedef görüntülerin piksel altı konumlarının belirlenmesinde bir önceki ölçme oturumuna ait aynı hedef noktaların piksel koordinatlarını merkez alan arama penceresi kullanılmıştır.

Geliştirilen sistemle gerçekleştirilen fotogrametrik değerlendirmelerde, bütün deneyler için resim koordinat düzeltmelerinin karesel ortalama hata değerleri, 0.02 pikselle 0.05 piksel aralığında elde edilmiştir. Her bir deney için hesaplanan cisim nokta koordinatlarının ortalama prezisyon değerleri ise X ve Y doğrultularında 10-24 mikron ve Z doğrultusunda da 36-98 mikron aralığında hesaplanmıştır. Düşey eksen yönündeki en büyük boy kısılması, yaklaşık 141 mm



Şekil 6. Zemin numunesi 3'e ait SBD aleti ve fotogrametrik sistemle elde edilen ölçme değerlerinin karşılaştırması

uzunluğundaki 4 numaralı zemin numunesinin serbest basınç deneyinde, toplam 174 kpa yük altında 16.50 mm, en küçük boy kısalması ise yine yaklaşık aynı boylardaki 2 numaralı zemin numunesinin serbest basınç deneyinde, toplam 100 kpa yük altında 4.50 mm olarak ölçülmüştür.

Numunenin düşey eksenel boy kısalması 3 deneyde belirli zaman aralıklarıyla serbest basınç deney aletinden de okunmuş ve numunenin en ucuna yapıştırılan hedef noktalara ait fotogrametrik sistemle elde edilen ölçme değerleriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 6, 3 numaralı zemin numunesinin SBD aleti ve fotogrametrik sistemle elde edilen ölçme değerlerinin karşılaştırmasını göstermektedir.

Sonuçlar

Çalışmada, yük testleri süresince konumsal yer değiştirmeye konu olan hedef noktaların fotogrametrik teknikler yardımıyla otomatik olarak ölçülmesi ve izlenmesi için geliştirilen sistem ve kullanılan yöntemler sunulmuştur. Sistem kalibrasyonundan sonra, görüntülerin elde edilmesinden 3 boyutlu koordinatların hesaplanmasına kadar bütün işlem aşamaları geliştirilen sistem içerisinde ve gerçek zamana yakın çözümlenebilmektedir. Örneğin, üç kameralı sistemimizde, sistem kalibrasyonundan sonra görüntülerin elde edilmesini de içeren 20 hedef noktasına ait üç boyutlu koordinatların hesabı işlemi 0.5 saniyede gerçekleştirilebilmektedir.

Sistem, hem dinamik hem de statik yükleme deneylerinde kullanılabilecek şekilde tasarlanmıştır.

Görüntüler eşzamanlı alınmasına rağmen kameralar elektronik olarak senkronize edilemediği için elde edilen görüntüler arasında bir zaman gecikmesi (maksimum 46 ms) oluşmaktadır. Dolayısıyla sistemin kullanılacağı dinamik uygulamalarda bu fark göz önüne alınmalı ya da kameraların elektronik olarak senkronizasyonu (donanımsal olarak) sağlanmalıdır.

Daha gelişmiş kamera ve bilgisayarların kullanılmasıyla insan hareketlerinin modellenmesinden çok hızlı hareket eden yapı bileşenlerinin yük altındaki davranışlarının belirlenmesine kadar birçok bilgisayarlı görüş uygulamasında geliştirilen sistemin kullanılabileceği düşünülmektedir.

Kaynaklar

- D'Apuzzo, N., (2003). Surface measurement and tracking of human body parts from multi station video sequences, *Ph.D. Thesis*, Institute of Geodesy and photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland.
- Gruen, A., (1997). Fundamentals of videogrammetry—a review, *Human Movement Science*, **16**, 155–187.
- Kraus, K., (1997). *Photogrammetry*, vols 1, Bonn: Dümmler, ISBN 3-427-78686-6, 78653-6.
- Maas, H.-G. ve Niederöst, M., (1997). The accuracy potential of large format still video cameras,

- Videometrics V*, SPIE Proceedings Series, Volume 3174.
- Maas, H.G. ve Hampel, U., (2006). Photogrammetric techniques in civil engineering material testing and structure monitoring, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **72**, 1, 39-45.
- Otepka, J., (2001). Algorithms and their implementation in an automated close-range photogrammetric system, *Diploma thesis*, Vienna University of Technology.
- Otepka, J.O., Hanley, H.B. ve Fraser, C.S., (2002). Algorithm developments for automated off-line vision metrology, *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium*, ISPRS, Corfu, Greece, September 1-2, 60-67.
- Pesce, M., (2003). *Programming Microsoft DirectShow for digital video and television*, Microsoft Press.
- Sabel, J.C., (1999). Calibration and 3D reconstruction for multi camera marker based motion measurement, *PhD thesis*, Faculty of Applied Physics, Technical University of Delft, Netherlands.
- Shortis, M.R., Clarke, T.A. ve Short, T., (1994). Comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images, *SPIE Proceedings*, **2350**, P. 25.