Made available by Hasselt University Library in https://documentserver.uhasselt.be

Fast Incremental Least Square Pose Estimation for Hardware Implementation with Rolling Shutter Camera

Peer-reviewed author version

GUZEL, Aydin; Hisar, Dilara; CLAESEN, Luc & Ugurdag, H. Fatih (2020) Fast Incremental Least Square Pose Estimation for Hardware Implementation with Rolling Shutter Camera. In: 2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), IEEE.

DOI: 10.1109/SIU49456.2020.9302192
Handle: http://hdl.handle.net/1942/34543

Jöle Efekt Kameralı Donanım Gerçekleştirimine Yönelik En Küçük Kareleme Yöntemli Hızlı İnkremental Poz Tahminleme
Fast Incremental Least Square Pose Estimation for Hardware Implementation with Rolling Shutter Camera

Aydın Emre Güzel
Özyeğin Üniversitesi, Hasselt University
İstanbul, Türkiye
aydin.guzel@ozu.edu.tr

Dilara Hisar
Özyeğin Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
dilara.hisar@ozu.edu.tr

Luc Claesen
Hasselt University
Hasselt, Belçika
luc.claesen@uhasselt.be

H. Fatih Uğurdağ
Özyeğin Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
fatih.ugurdag@ozyegin.edu.tr

***Özetçe* —6 serbestlik dereceli pozisyon ve oryantasyon tahminlemesi pek çok gerçek zamanlı uygulama için hayati önem taşımaktadır. Özellikle medikal uygulamalarda gerçek zamanlı dokunumsal geri bildirim hesaplaması için kullanıldığında düşük gecikme, yüksek hassasiyet ve güvenilirlik gereksinimlerinin karşılanması elzemdir. Düşük gecikme ihtiyacı göz önüne alındığında amaca uygun donanım tasarımı yapmak, işlemci üzerinde yazılım koşmaya nispetle ciddi iyileştirmeler vaat etmektedir. Çene cerrahisinde kullanılmak üzere geliştirdiğimiz uygulamamızda, izlenen imleyicili katı objenin pozunu, jöle efektli kameradan akacak anlık ve ham görü hücresi değerleri ile sahada programlanabilir kapı dizinleri (FPGA) üzerinde paralel hesaplama ve boru hatlama konseptlerinden istifade ederek 1 milisaniyenin altında gecikmelerle hassasiyetten ödün vermeden hesaplamayı hedefliyoruz. Bu sebeple pek çok uygulamada yüksek hassasiyetle kullanılan yinelemeli en küçük kareleme yöntemli algoritmaya, anlık veriye göre aynı çerçeve içerisindeki değişikliklere tepki verebilecek şekilde inkremental bir şekil kazandırıldı. Algoritma sentetik olarak üretilen sabit ve jöle efektli görüntülerle yazılım üzerinden farklı parametrelerle test edilerek değerlendirildi.**

Anahtar Kelimeler—inkremental algoritmalar, en küçük karelerle optimizasyon, poz tahminlemesi.

***Abstract*—6 DoF position and orientation estimation is vital for many real-time applications. It is essential to meet low latency, high accuracy and reliability requirements, especially when used for real-time haptic feedback calculation in medical applications. Considering the low latency requirement, designing dedicated hardware promises significant improvements relative to running software on the processor. In our jaw surgery application, we aim to calculate the pose of the rigid object with the tracked marker from the rolling shutter camera by exploiting parallelism and pipe-lining concepts under 1 millisecond latency without sacrificing accuracy on field programmable gate arrays (FPGA) to flow from the camera with rolling shutter effect. Therefore, the iterative least squared algorithm, which is used with high precision in the current applications, has been given an incremental shape to react within the same frame according to the instantaneous data. The algorithm was evaluated by testing with different parameters over the software with synthetically produced fixed and rolling shutter effect images.**

Keywords—incremental algorithms, least squares optimizations, pose estimation.

I. GİRİŞ

Bir objenin bilinen bir koordinat sistemine göre pozisyonunu ve oryantasyonunu bulmak pek çok uygulamanın ihtiyaç duyduğu ve üzerinde çokça çalışılan bir konudur. Katı (eklemleri sabit) objeler söz konusu olduğunda 6 serbesti derecesiyle (Kartezyen koordinatlar ve Euler açıları)bulunması işlemi 6 DoF poz tahminlemesi olarak anılır [1]. Bu önemli bilgisayarlı görü problemini çözmek sanal gerçeklikten robotiğe robotikten biyomedikal uygulamalara birçok alanda hayati önem arz eder [2].

Özellikle medikal uygulamalar söz konusu olduğunda güvenilirlik, hassasiyet ve hızlı tepki vermek büyük önem kazanmaktadır. Üzerinde çalışmakta olduğumuz çene cerrahisi operasyonlarının hazırlık evresinde dokunsal geri dönüş hesaplaması amacıyla kullanılacak uygulamamızda çenenin pozunun 1 milisaniyenin altında tepki süresinde, pozisyonda 50 mikrometre, oryantasyonda 0.05 derece hassasiyette bulunmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Uygulama esnasında ortam geometrisi tamamen bilinmekle beraber, çene üzerine istediğimiz desenleri yerleştirebileceğimiz bir marker yapıştırma imkânımız da bulunmaktadır.

Günümüzde işlemci üzerinde yazılım koşmaya dayalı çözümler çokça çalışılmaktadır [3] [4] [5]. Bizimkisi gibi yüksek hız ve hassasiyet talep eden uygulamalar için bu çözümler yetersiz kalmaktadır. Konuda öncü çalışmalar bile pratikte saniyede 80-120 kare [6] [7] işleyebilmektedirler. Bu soruna çözüm olarak uygulamaya özel donanım tasarımı öneriyoruz. Donanım bizlere kamera verisine anlık doğrudan erişim (hafıza ara yüzlerinde zaman kaybetmeden), ham veri işleyebilme (ışık

sensörlerine düşen veri), FPGA gerçekleştirimiyle işlemleri paralel gerçekleyip, verimli veri boru hatları kurulabilmesi gibi avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca jöle efektli kamera kullanımında taranan renk hücrelerinin zamanlaması farklılık göstermektedir. Kamera tarafından yukarıdan aşağıya satır satır taranan hareketli objelerde daha geç kaydedilen hesaplama noktalarının kullanılması ve eski noktaların hesaplamadan çıkarılması hassaslığı arttıracak bir etmendir.

Donanım tasarımı yaparken ortamın sağladığı avantajların en verimli şekilde kullanılabilmesi için sistemin algoritması ve mimarisinin yeniden formüle edilmesi gerekmektedir. Donanım tasarımının zorluğu düşünüldüğünde, çeşitli algoritmik ve mimarı alternatiflerin yazılım ortamında denenmesi ve doğrulanmasının daha uygun olacağı düşünülmüştür.

Bu bildiri donanım tasarımına yönelik olarak düzenlediğimiz en küçük karelemeli poz tahminlemesi çözüm algoritmasını farklı açılardan değerlendirmektedir. Donanıma yönelik avantajları kullanmaya yönelik olarak tasarlanan bu yaklaşım ihtiyaca göre seçilmek üzere farklı parametreler bulundurmaktadır. Minimum gecikme ve yüksek hassasiyetli hesaplamalar için yeterli sayıda hesaplama noktasının yeterli sayıda yinelenmesiyle tasarım kararları üzerinde hassasiyet ve gecikme bağlamında değiş tokuş problemi oluşturmaktadır. Deneylerimizde farklı algoritma parametreleriyle gözlemlediğimiz hata, işlem yükü, sonuca yaklaşma hızı çıktılarını değerlendirdik. Ayrıca jöle efektli görüntü kareleri üzerinde de çalışarak çalışmamıza farklı bir boyut kazandırdık.

Bildirinin sıradaki bölümünde kamera modeli ve en küçük karelemeler yöntemiyle parametrelerin çözümü aşama aşama anlatılmıştır. Ardından inkremental yaklaşımımız açıklanmaktadır. Son olarak simülasyon yoluyla ürettiğimiz sentetik görüntüler üzerinden farklı tasarım parametreleriyle yaptığımız deneyler yakınsama hızı ve hata miktarı çıktılarıyla değerlendirilecektir.

II. En Küçük Kareleme Yöntemiyle Poz Hesaplama

Mevcut problemimizin çözümü için kullanmakta olduğumuz en küçük kareleme yöntemlerinin yanında farklı uygulamalar mevcuttur. EPnP [8], DSL [9] P3P [10] gibi. Fakat hem tekniğin en iyi uygulamaları olarak hem de yaklaşımımıza uygun olarak Levenberg-Marquardt (LM) ve Gauss-Newton doğrusal olmayan sistemler için optimizasyon metotları öne çıkmaktadır [11] [12] [13]. Biz bu çalışmada LM daha güçlü olmasına rağmen algoritmasının düşük karmaşıklığı sebebiyle Gauss-Newon metodunu kullandık. En küçük kareleme yöntemiyle poz hesaplama adımları alt bölümlerde açıklanacaktır.

A. Hesaplama Noktalarının Tahmini İzdüşümlerinin Bulunması

İlk aşamada mevcut poz tahmini üzerinden takip edilen objenin kontrol noktalarının kamera üzerindeki izdüşümü hesaplanır. Kısaca poz tahminimiz doğru ise 3 boyutlu hesaplama noktaları 2 boyutlu kamera karesinin neresinde gözükecektir sorusunun yanıtı verilir. Bu veri gerçek kamera gözlemindeki hesaplama noktalarıyla beraber minimize edilmek istenen artık fonksiyonunun hesaplanmasında kullanılacaktır.

Üç boyutlu noktanın (X, Y, Z) iki boyutlu kamera karesinin hangi görüntü hücresinin üzerine (x,y) düşeceği hesaplanır. Bu hesaplama aşağıdaki matris operasyonuyla doğrusal olarak hesaplanabilir [14] [15].

(1) Numaralı denklemdeki K kameranın içsel parametrelerini (odak uzaklığı, yamukluk ve görüntünün merkezi) içerir. Uygulamamızda bu bilginin elimizde olduğunu kabul ediyoruz. R ve t matrisleri ise tahmin emekte olduğumuz poz parametrelerini içermektedir. x ve y kamera üzerindeki iki boyutlu noktayı, X, Y ve Z ise bu noktaya eş gelen 3 boyutlu noktanın izlenmekte olan objeye göre koordinatlarını işaret etmektedir.

$$[\ x \quad y \quad 1\ ]^T = K\,[\ \boldsymbol{R} \quad t\ ]\,[\ X \quad Y \quad Z \quad 1\ ]^T \tag{1}$$

B. Kamera Kadrajındaki Görüntüden Hesap Noktalarının Gerçek İzdüşümlerinin Bulunması

Bu aşamada kameradan donanıma akan görüntü verisinden hesaplama noktalarının resim üzerindeki yerleri bulunur ve bir önceki aşamada izdüşümü hesaplanan noktalarla eşleştirilir. Hesaplama noktaları kısmi çerçeve bilgisiyle hızlı ve alt renk hücreleri seviyesinde hassas bir şekilde hesaplanmalıdır. Ciddi problemler içeren bu konuya başka bir yayında ayrıca odaklanılacaktır.

C. Artık Fonksiyonun Hesaplanması

Artık fonksiyon aynı zamanda optimizasyon algoritmamızın maliyet fonksiyonudur. (2) numaralı denklemde belirtildiği gibi izdüşümlenen ve gözlemlenen hesaplama noktalarının konum farklarının karelerinin toplamlarından meydana gelmektedir. Algoritmanın amacı poz değişkenlerini sürekli güncelleyerek bu denklemi minimize etmektir. y gözlenen noktaları, f fonksiyonu izdüşümü sonuçlarını temsil etmektedir.

$$\hat{\beta} = \underset{\beta}{\operatorname{argmin}} S(\beta) \equiv \underset{\beta}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^{m} \left[y_i - f\left(x_i, \beta\right)\right]^2 \tag{2}$$

D. Gauss-Newton Yöntemiyle Kayma Vektörünün Bulunması

Bu aşama algoritmanın kalbi olarak değerlendirilebilir. Diğer doğrusal olmayan en küçük kareleme algoritmalarının aksine kullandığı Jakobian matrisinin ikinci türevine ihtiyaç duymaması gerçekleştirim açısından avantajlı kılmaktadır. Gauss-Newton metodu Taylor Teoremi üzerinden doğrusal kestirim üzerinden kurgulanmıştır [11].

$$J_i = \frac{\partial f\left(x_i, \beta\right)}{\partial \beta} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{\Delta\beta} = \left(\mathbf{J}_{\boldsymbol{f}}^{\top}\mathbf{J}_{\boldsymbol{f}}\right)^{-1}\mathbf{J}_{\boldsymbol{f}}^{\top}[\mathbf{y} - \mathbf{f}(\boldsymbol{\beta})] \tag{4}$$

Artık fonksiyonun numerik yöntemle [16] her parametre için birinci kısmi türevi alınarak Jakobian matrisi hesaplanır (3). Yalancı tersi alınıp artık değerler matrisiyle çarpılmasıyla artık fonksiyonunu minimize edecek kayma vektörü bulunur (4).

E. Poz Parametrelerinin Güncelleştirilmesi

Bir önceki adımda bulunan kayma vektörü mevcut poz parametrelerine eklenerek yineleme tamamlanır. Bulunan poz o anlık nihai sonuç olduğu gibi bir sonraki yinelemenin başlangıç tahmini olarak kullanılır.

$$\beta_j^{k+1} = \beta_j^k + \Delta\beta_j \tag{5}$$

III. İNKREMENTAL YAKLAŞIM

Hesaplama noktalarını incremental olarak kullanmak farklı çalışmalarda kullanılmıştır [17] [18] [19]. Bizim özelimizde, tasarlanmakta olan donanım, jöle efektli kameradan gelecek anlık görüntü bilgilerini tampon belleklerde saklayıp, mevcut kadrajın elimize ulaşan kısmı ile hesaplamaları başlatıp en kısa sürede sonuç verecektir. Ardından yeni gelen hesaplama noktalarını veri boru hattına ekleyip, en eski olanları çıkarmalıdır. Böylece obje aynı kare içerisinde hareketli olsa bile zamanlı hesaplama noktaları hassasiyeti düşürmeyecek, aynı kadraj verisinden mümkün olduğunca fazla sonuç verisi üretilecektir. Bu durum obje hareketine çok hızlı tepki vermeye izin vermektedir.

Bu sistemin sağlıklı çalışabilmesi için inkremental tasarım parametreleri doğru ayarlanmalıdır. Bu parametreler başlıca; boru hattındaki hesaplama noktası sayısı, boru hattındaki hesaplama noktaları için uygulanacak yineleme sayısı ve boru hattındaki hesap noktalarının değişme temposudur. Bu parametreler sonuç hassasiyetini, doğru sonuca yaklaşma hızını, gerekli donanım kaynağı miktarını ve sonuç üretme gecikmesini doğrudan etkileyecektir. FPGA üzerinde gerçekleyeceğimiz donanım tasarımında aktif hesaplama nokta sayısını ve hesap yinelemesini minimumda tutarak poz güncellemesi için gereken işlem miktarını azaltmak istiyoruz. Bu durum gecikmeyi düşüreceği gibi, daha az donanım kaynağı tüketerek yapabileceğimiz paralel işlem miktarını da arttıracaktır. Jöle efektin getirdiği sapma miktarının düşmesi de bir diğer avantajdır. Mamafih, çok düşük hesaplama noktası sayısı da güvenilirliği, yaklaşma hızını ve hassasiyeti olumsuz etkileyecektir. Uygulamaya özel olarak optimum hesaplama noktası ve yineleme sayısı belirlenmelidir.

Bu amaçlarla farklı tasarım parametrelileriyle inkremental çalışabilen Gauss-Newton metoduna dayalı bir poz tahminleme algoritması MATLAB çalışma ortamı üzerinde programlandı. Bu yazılım üzerinden aldığımız sonuçlar donanım tasarımı sürecinde vereceğimiz mimari ve algoritmik kararlarda bizlere ışık tutacaktır.

IV. DENEYLER

Bu aşamada örnek marker deseni olarak dama tahtası kullanıldı. Gelişi güzel poz ayarlamalarıyla simülasyon ortamında oluşturulan resimler MATLAB ortamındaki poz hesaplama yazılımımıza farklı parametreler ile beslenerek sonuçlar üretildi. Sonuçlar artık hatasının yineleme sayısına göre değişimi üzerinden görselleştirildi. Artık hatası poz tahminine göre izdüşümlenen hesaplama noktalarının resim üzerinde gözlemlenenleriyle arasındaki uyumsuzluğun görü hücresi boyutu cinsinden ifade edilmesidir. Artık hatasının yineleme sayısına bağlı değişimiyle işlem yükünün sonuçları iyileştirmedeki verimliliği gözlemlenmek istenmiştir.

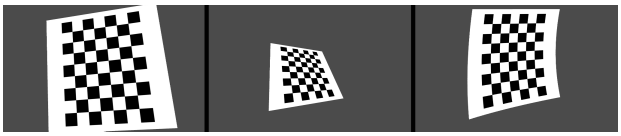
A. Simülasyon

Mevcut algoritmik değişkenlerin sonuçlara etkisini etkili bir şekilde test etmek amacıyla openGL kütüphanesinden yararlanarak JAVA programlama diliyle bir simülasyon yazılımı programladık. Bu yazılım iğne deliği kamera modelinin üzerine tasarlandı. İstenilen desen görüntüsü ayarlanan pozisyon ve oryantasyon bilgisine göre 3 boyutlu ortama yerleştirilir. Ardından koordinat sisteminin merkezinde bulunan kameranın yerleşik değişkenleri programa verilir. Bu bilgiler ışığında kameranın çerçevesinde oluşacak görüntü çıktı olarak kullanıcıya verilir. Jöle efekt kameraları da destekleyen yazılımımız, istenilen yön ve hızda oluşturulabilen hareket vektörünün objeye atanmasıyla jöle efektli resimler de oluşturabilmektedir.

B. Sonuçlar

Hareketsiz ve hareketli (jöle efekti ile) karelerle yaptığımız deneylerden 3 tanesine bu kısımda yer verdik.Şekil 1'de gösterilen İmge 1 ve İmge 2 sabit, İmge 3 hareketli girdi karesidir. Sabit karelerdeki desenin sol üst köşeye göre pozisyon bilgileri (kamera merkezde kabul edilerek) X, Y ve Z koordinatları sırasıyla görüntü hücresi boyutu cinsinden aşağıda sıralanmıştır; İmge 1 için: -215.0 -174.0 -318.0, İmge 2 için: -200.0 -180.0 -500.0, Karelerdeki desenin oryantasyon bilgileri X, Y ve Z eksenleriyle yaptıkları açılar olarak radyan cinsinden sırasıyla aşağıda sıralanmıştır; İmge 1 için: -0.1388889 0.10555556 -0.10555556, İmge 2 için: -0.6632251 -0.4722221 0.049999993, Jöle efektli Şekil 3'deki karenin pozu bir karenin baştan aşağı taranma süresinde aşağıda verilen başlangıç pozundan bitiş pozuna doğrusal hareket yapmıştır. Başlangıç :-0.1126 -0.0995 -0.1441 -202.6091 -128.8405 -481.8817, Bitiş : 0.6602 -0.2738 -0.1260 -162.1023 -59.8573 -724.9764, Tüm deneylerde odak uzaklığı görüntü hücresi boyutu cinsinden 779.42285 olarak kullanılmıştır. Görüntülerin çözünürlüğü 1440 X 900dür.

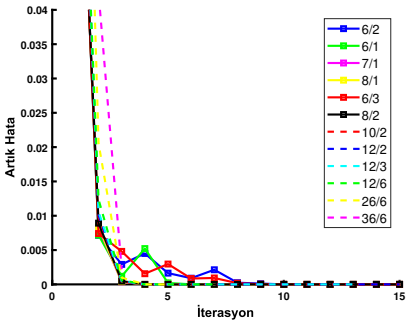
Şekil 2, 3 ve 4'te ise ilgili resimlerin artık hata miktarlarının yineleme sayısınına bağlı değişimleri farklı tasarım parametrelerine göre hesaplanımının sonuçları görselleştirilmiştir. Seklin sağ üst köşesinde x/y olarak verilen değişkenler sırasıyla, o an işlem boru hattı üzerinde olup hesaplamaya katılan nokta sayısı ile her yinelemede hattın içerisine dahil olan yeni hesaplama noktası sayısını söylemektedir.



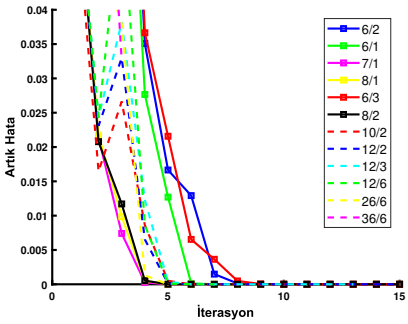
Şekil 1: İmge 1, İmge 2, İmge 3 (Soldan Sağa)

V. BİTİRİŞ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Sonuç olarak inkremental en küçük kareleme yöntemiyle çalışan ve tasarım parametreleri değişebilen bir ortam, yazılım üzerinde gerçeklendi. Üretilen sentetik görüntülerle çalıştırılarak test edildi. Parametre değişikliklerinin etkisi gözlendi. Şu aşamada basit ve gelişi güzel verilerle kullandığımız bu ortamı,



Şekil 2: İmge 1 için sonuçlar



Şekil 3: İmge 2 için sonuçlar

nihai hedefimizin ileriki aşamalarında daha yoğun ve karmaşık desene sahip markerlar ile gerçek ortam verisiyle tekrarlayarak, donanımın mimari ve algoritmik tasarım kararlarını daha bilinçli vermeyi planlıyoruz. Ek olarak sistemimize LM gibi farklı doğrusal olmayan sistem optimizasyonu çözüm algoritmaları ve lens bozunumu gibi modellenebilir hata kaynakları da eklenecek.

KAYNAKLAR

[1] John JC. Introduction to robotics: mechanics and control. Reading: Addison-Wesley. 1989.

[2] Maclaren J, Herbst M, Speck O, Zaitsev M. Prospective motion correction in brain imaging: a review. Magnetic resonance in medicine. 2013 Mar 1;69(3):621-36.

[3] Bouguet JY. Camera calibration toolbox for Matlab (2008). URL http://www. vision. caltech. edu/bouguetj/calib doc. 2008;1080.

[4] Bradski G. OpenCV: Camera calibration and 3d reconstruction. Dr. Dobb's Journal of Software Tools. 2015.

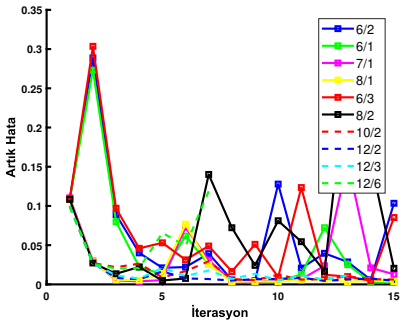
[5] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2000 Nov;22(11):1330-4.

[6] Maclaren J, Armstrong BS, Barrows RT, Danishad KA, Ernst T, Foster CL, Gumus K, Herbst M, Kadashevich IY, Kusik TP, Li Q. Measurement and correction of microscopic head motion during magnetic resonance imaging of the brain. PloS one. 2012;7(11).

[7] Bapat A, Dunn E, Frahm JM. Towards kilo-hertz 6-DoF visual tracking using an egocentric cluster of rolling shutter cameras. IEEE transactions on visualization and computer graphics. 2016 Jul 27;22(11):2358-67.

[8] Lepetit V, Moreno-Noguer F, Fua P. Epnp: An accurate o (n) solution to the pnp problem. International journal of computer vision. 2009 Feb 1;81(2):155.

[9] Hesch JA, Roumeliotis SI. A direct least-squares (DLS) method for PnP. In2011 International Conference on Computer Vision 2011 Nov 6 (pp. 383-390). IEEE.



Şekil 4: İmge 3 için sonuçlar

[10] Gao XS, Hou XR, Tang J, Cheng HF. Complete solution classification for the perspective-three-point problem. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2003 Aug 4;25(8):930-43.

[11] Madsen K, Nielsen HB, Tingleff O. Methods for non-linear least squares problems.

[12] Hartley R, Zisserman A. Appendix 6: Iterative Estimation Methods. Multiple View Geometry in Computer Vision. 2003:597-627.

[13] Mittrapiyanuruk P. A memo on how to use the levenberg-marquardt algorithm for refining camera calibration parameters. 2006.

[14] Bradski G, Kaehler A. Camera models and calibration. Learning OpenCV: Computer Vision with The OpenCV Library. 2008:370-5.

[15] Fusiello A. Elements of geometric computer vision. Available fro m: http://homepages. inf. ed. ac. uk/rbf/CVonline/LOCALCOPIES/FUSIELLO4/tutorial. html. 2006 May 29.

[16] Srivastava RB, Yadav JS. Relative Accuracy of Numerical Quadrature Formulas-Trapezoid Rule, Simpson's 1/3 Rule, Simpson's 3/8 Rule and Boole's Rule. Recent Research in Science and Technology. 2011 Sep 28;3(7).

[17] Zeng XQ, Li GZ. Incremental partial least squares analysis of big streaming data. Pattern recognition. 2014 Nov 1;47(11):3726-35.

[18] Bertsekas DP. Incremental least squares methods and the extended Kalman filter. SIAM Journal on Optimization. 1996 Aug;6(3):807-22.

[19] Cassioli A, Chiavaioli A, Manes C, Sciandrone M. An incremental least squares algorithm for large scale linear classification. European journal of operational research. 2013 Feb 1;224(3):560-5.