



Biyomekanik Verilerin Filtrelenmesi İçin Kesim Frekansı Belirleme Yöntemleri

Cut-off Frequency Estimation Methods for Biomechanical Data Filtering

Serkan ÇİZMECİOĞULLARI¹, Şenay MİHÇİN²,
Aydm ANAN²

Biyomedikal Mühendisliği Bölümü

¹İstanbul Üniv., İstanbul, ²İzmir Katip Çelebi Üniv. İzmir,
serkancizmecioğullari@gmail.com
senay.mihcin@ikc.edu.tr, aydin.akan@ikc.edu.tr

Yaşar KESKİN³, Berna ÜRKMEZ³, Teoman AYDIN³
Fiziksel Tıp ve Rehabilitasyon Bölümü

³Bezmialem Vakıf Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
ykeskin42@hotmail.com, drbernaurkmez@gmail.com
drteomanaydin@gmail.com

Özetçe— Biyomekanik Mühendisliği'nde insan vücudunun 3 boyutlu kinematik verisinin elde edilebilmesi için hareket yakalama sistemlerinin kullanılması yaygın bir yöntemdir. Bu sistemlerle alınan verilerde karşılaşılan temel problemlerden birisi alınan veri içerisinde harekete ait olmayan yüksek frekanslı gürültü sinyalinin de bulunmasıdır. Gürültülü sinyalinin ortadan kaldırılması için filtreleme tekniği kullanılır. Filtreleme işlemi için alçak-geçiren (low-pass) dijital filtreler kullanılmaktadır. Bu filtrelerin tasarımında önemli olan nokta ise filtre kesim frekansının belirlenmesidir. Bu çalışmanın amacı optimum filtre kesim frekansının tahmini için kullanılan iki ayrı yöntem arasındaki olası ilişkinin varlığını ve hangi yöntemin daha kullanışlı olabileceğini araştırmaktır. Bu çalışmada hareket engeli bulunmayan 21 (8 erkek, 13 kadın) sağlıklı bireyden derinlik kamerasıyla toplanılan “Omuz Abdüksiyonu” üç boyutlu konum verileri kullanılmıştır. Bu veriler bilgisayar ortamına aktarılarak konum verisinden omuz hareket açısı hesaplanmıştır. Omuz eklem açısının zamana bağlı değişimini gösteren sinyal üzerinde Kümülatif Güç Spektral Yoğunluk (KGSY) ve Rezidü yöntemleriyle hangi sinyalin daha iyi bir kesim frekans tahmini sağlayabileceği analiz edildi. Rezidü Analizi Yöntemi ve KGSY Yöntemi ile edilen kesim frekansları değerinin ortalaması sırasıyla 3.121 ± 0.6 Hz ve 0.469 ± 0.1 Hz olarak bulundu. İki yöntem arasındaki Pearson korelasyon katsayısı analizinde $r = 0.501$ bulundu. Analiz sonuçları göre filtreleme işleminde kesim frekansının hesaplanmasında Rezidü Yöntemi'nin KGSY Yöntemi'ne göre optimum sonuçlar ürettiğini ortaya çıkardı.

Anahtar Kelimeler — hareket yakalama; kesim frekansı ;KGSY ; Rezidü .

Abstract— Motion capture systems are widely used in biomechanical engineering to obtain 3D kinematic data of the human body. However, during post processing, one of the main problems in the extracted data is the presence of high frequency noise signal. To eliminate the noise in the signal filtering methodology is applied. In order to eliminate the noise in the signal low-pass digital filters are commonly used. Here we focus on design of the filters in order to find the optimum method in determination cutoff frequency of the filter. Fourier Frequency Transformation and Residue methods are the two methods that have been investigated in this study. For this purpose, “Shoulder Abduction” motion data from 21 (8 male, 13 female) healthy

people were collected with a depth camera to obtain 3D position signal. The collected position data were transferred to the computer for post processing. Using the position data, shoulder movement angles were calculated. The shoulder angle signal with respect to time was analyzed using Cumulative Power Spectral Density (CPSD) and Residue Analysis techniques to estimate better cutoff frequency. The mean values of cutoff frequencies obtained with Residue Analysis and CPSD were 3.121 ± 0.6 Hz and 0.469 ± 0.1 respectively. The Pearson correlation coefficient between the two methods was $r = 0.501$. As a result, the Residue Analysis method proved to produce optimal results in estimation of cut-off frequency.

Keywords — motion capture ;cut-off frequency; CPSD; Residue

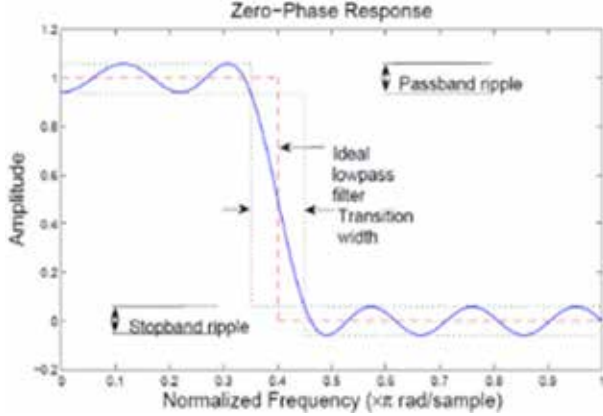
I. GİRİŞ

Biyomekanik canlı sistemlerin yapısal ve fonksiyonel özelliklerini statik ve dinamik mekanik prensipleriyle inceleyen bilim dalıdır. İnsan vücudunun biyomekanik özellikleri de yoğun bir araştırma alanıdır [1]. Son yıllarda üst ve alt ekstremitelerin hareketlerinin incelenmesiyle sağlıklı ve hasta bireylerde fonksiyonel iyilik durumları analiz edilmeye çalışılmaktadır. Ekstremiteler hareketlerinin araştırılmasında hareket takip sistemleri önemli bir rol oynamaktadır [2]. Hareket takip sistemlerinin temel elemanları ise harekete duyarlı sensörlerdir. Bu sensörlerle hareket verisi elde edilirken karşılaşılan yaygın bir problem ise sensörlerden ve ölçümün tabiatından dolayı ölçülmek istenen işarete harici gürültü işaretlerinin de karışmasıdır. Alınan verinin işlenmeden önce gürültü işaretlerinin ortadan kaldırılması hesaplanan parametrelerinin doğruluğu açısından son derece önemlidir.

İnsan hareketine ait işaretler alçak frekanslı bileşenlerden oluşmaktadır [3]. Dolayısıyla sensörlerden alınan işaretlerde alçak frekanslı bileşenlerinin korunup yüksek frekanslı bileşenlerinin filtrelenmesi lazım. Bu amaçla tasarlanacak bir dijital filtrede doğru kesim frekansının belirlenmesi en önemli tasarım parametresidir.

İdeal bir alçak-geçiren filtrenin geçirme bandında (passband) minimum işaret bozulması, geçiş (transition) bandının mümkün

olduğunca keskin bir cevap, durdurma bandında (stopband) maksimum zayıflama ve sıfır-faz gecikme (zero-phase delay) özelliklerine sahip olması gerekir. Filtrenin geçiş bandının keskin olma derecesini (roll-of rate) ise filtrenin mertebesi (order) belirler (Şekil 1).



Şekil 1. Alçak-geçiren filtreye ait frekans cevabı

Alçak-geçiren filtreler pek çok uygulama alanında alınan verilerin filtrelenmesinde kullanılır. Bu çalışmadaki amaç insan vücudunda omuz eklemine hareket çeşitlerinden olan “Omuz Abdüksiyonu” hareketi sırasında alınan verilerin filtrelenmesinde kullanılacak alçak-geçiren bir filtre için optimal kesim frekansını belirleyebilecek uygun bir yöntem önermektir. Bu çalışmada CPSD ve Rezidü yöntemleri karşılaştırılacak ve kesim frekansının belirlenmesi için hangi yöntemin uygun olduğu belirlenecektir.

II. MATERYAL VE METOTLAR

A. Materyaller

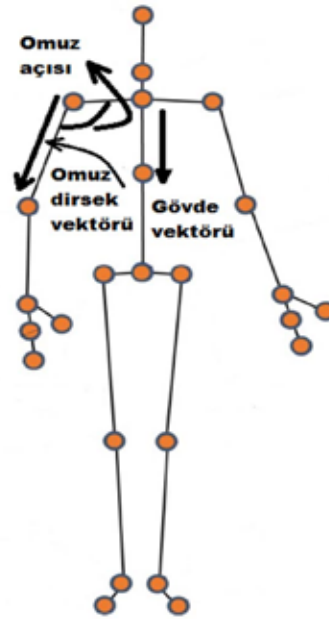
Bu çalışmada kişilerin hareketlerinin kaydedilmesi için Microsoft (Redmond, USA) firmasının oyun konsolları için üretmiş olduğu Kinect Xbox One V2 kamerası kullanıldı. Kinect kamera iki tip görüntü alabilmektedir. Bunlardan ilki renkli kameradır. Bu kamera sayesinde gözlenen ortamın renkli görüntüsü kaydedilebilmektedir. Diğer kamera ise Kızılötesi (Infrared) kameradır. Kızılötesi kamera bir infrared yayıcı (emitter) ve alıcı (receiver) modülden oluşmaktadır. Kızılötesi kamera sayesinde insan vücudunda bulunan 25 eklem 3-boyutlu konum bilgisi kartezyen koordinatlarda elde edilebilmektedir [4,5,7].

Çalışmaya toplam 21 (8 erkek, 13 kadın) sağlıklı birey katıldı. Bireylerin yaş ortalaması 30 ± 3.1 dur. Katılımcıların seçilmesinde abdüksiyon hareketini yapmalarını engelleyecek herhangi bir fiziksel engelleri bulunmamasıdır. Bireylerin hareketleri öncelikle kamera ile kaydedilmiş sonrasında USB bağlantı ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Hareketler kamera yerden 0.75 m yüksekliğe konumlandırılmış ve bireyler kameradan 1.80 m uzaklıkta ve oturur pozisyonda iken kaydedilmiştir. Kameranın XY düzlemi hareketleri kaydedilen bireylerin koronal düzlemine paralel olacak biçimde yerleştirilmiştir. Kameradan alınan veriler işlenmek üzere MATLAB 2017b (MathWorks® Inc., Massachusetts, USA) programına transfer edildi. Bu amaçla MATLAB ortamında bir kullanıcı ara yüz programı yazıldı.

Omuz abdüksiyonu hareketi yaptırılırken izlenen protokol ise şöyledir: Bireye harekete başlaması için bilgisayar tarafından sesli bir komut verilmesiyle birey sağ Omuz Abdüksiyonu hareketini 10 saniye içerisinde ardı ardına an az üç kez gerçekleştirir. Harekete ait kaydın başarılı bir şekilde tamamlandığını belirten sesli mesajdan sonra kayıt sonlandırılır.

B. Metotlar

Kinect kamera harekete dair üç boyutlu konum bilgisi vermekte fakat eklemlerin hareket açılarına dair bir bilgi vermemektedir. Konum bilgisi ölçülen bir parametreye iken, açı bilgisi hesaplanan bir parametredir. Omuz Abdüksiyon hareketi temel olarak koronal düzlemde gerçekleşen bir harekettir. Bu harekette sağlıklı bir bireyin abdüksiyon açısı aralığının 0 dan 180° ye kadar olması beklenir. Kinect kamerasının görüntüyü örnekleme frekansı 30 Hz olması dolayısıyla toplamda 300 görüntü çerçevesi kaydedilmiştir. Eklemlere ait 3D koordinatlardan faydalanılarak MATLAB ortamında iki vektör arasındaki açıyı tanımlayan formülle omuz abdüksiyon açısı hesaplandı. Buradaki iki vektörden ilki omuzdan dirseğe diğeri ise omuz seviyesinden aşağıya doğru gövde vektörü olarak tanımlandı (Şekil 2).



Şekil 2. Omuz Abdüksiyon açısı

Koordinat verisinden Abdüksiyon açısı hesaplanmadan önce bu veri alçak - geçiren bir filtreden geçirilir ve sonrasında açı değeri hesaplanır. Bu aşamada tasarlanan filtrenin mertebesi genellikle 4 veya 6 Hz olarak alınmaktadır. Kesim frekansının belirlenmesi için bahsedilen yöntemlerden ilki Kümülatif Spektral Güç Yoğunluğu yöntemidir. Öncelikle bu yöntemle açı-zaman sinyali incelenmiştir. Bu yöntemde ilk olarak işaretin Spektral Güç Yoğunluğu (SGY) elde edildi (Denklem 1). SGY'den Kümülatif Spektral Güç Yoğunluğu'na (KGSY) kavramına geçiş mümkündür. PSD ile CPSD arasında Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (OYF, İngilizce: Probability Density Function) ile Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (KDF, İngilizce: Cumulative Distribution Function) arasındaki gibi bir ilişki mevcuttur. Dolayısıyla SGY' nin Matlab ortamında sayısal

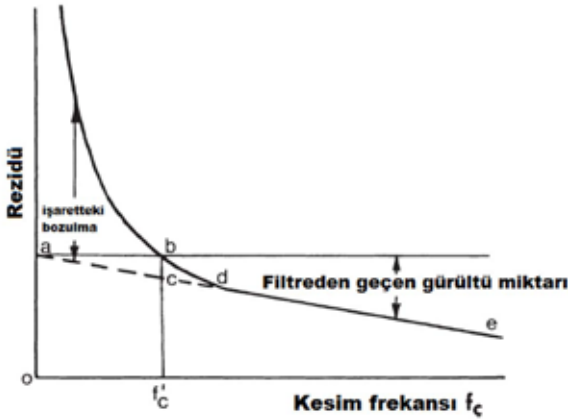
integralinin alınmasıyla KGSY elde edilmiştir. Genel olarak KGSY eğrisinde % 95 (diğer bir deyişle 0.95) güç değerine karşılık gelen frekans değeri filtrenin optimal kesim frekansı olarak kabul edilir.

$$P_{xx}(f) = 1/(N * F_s) * \left| \sum_{k=0}^{N-1} x[k] * e^{-j2*\pi*f*k/F_s} \right|^2 \quad (1)$$

burada F_s işaretin örnekleme frekansını temsil eder.

İkinci bir analiz yöntemi olan Rezidü Analizi'nde ise sensörden elde edilen ham işaret ile filtrelenmiş işaret arasındaki farkın değişimi kesim frekansına bağlı olarak analiz edilir (Şekil 3). Rezidü terimi ham işaretten filtrelenmiş işaretin çıkarılmasıyla elde edilen kalan kısmı temsil eder [6,8,9]. Frekansın rezidü değerine bağlı analitik ifadesi aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

$$R(f_c) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_i - x'_{i,f_c})^2}{N}} \quad (2)$$



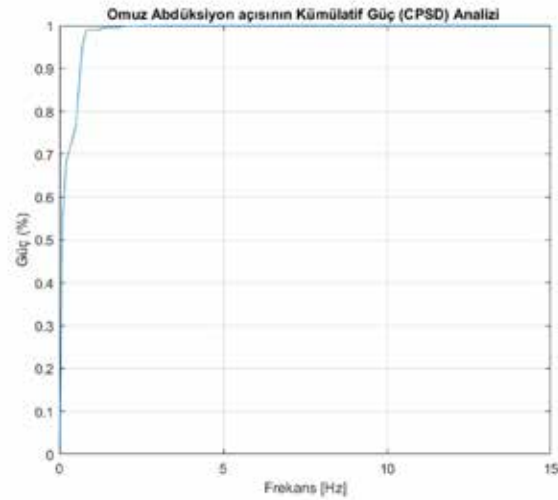
Şekil 3. Rezidü değerinin kesim frekansına bağlı değişim grafiği

Eğer işaret sadece gürültü işaretinden ibaret olsaydı rezidü eğrisi 0 Hz değerinde "Y" eksenini "a" noktasında, "X" eksenini de Nyquist frekansında kesen bir doğru halini alırdı. Şekil 3'te "de" doğrusu gürültüye ait rezidü değerinin en iyi kestirimini temsil eder. Şekil 3 ham işaretin alçak geçiren bir filtreden geçirilmesiyle elde edilmiş bir rezidü değerinin frekansa bağlı değişimini göstermektedir. Ordinat eksenindeki "a" noktası gürültü işaretinin Kareler Ortalamasının Kareköküdür (RMS: Root Mean Square). İşaret hem gerçek işareti hem de gürültü işaretini beraberinde bulundurduğu durumda kesim frekansının değeri düştükçe rezidü değeri kesikli çizginin üzerinde bir değere yükselir. Kesim frekansı azaldıkça kesikli çizginin üzerindeki artış işaretteki bozulmayı gösterir. Kesim frekansı f_c nin nihai değeri işaretteki bozulma ve filtreden geçen gürültü işaretinin miktarı arasında bir denge olacak biçimde seçilir. Her ikisinin de eşit olması durumunda "a" noktasından X eksenine paralel olacak biçimde bir doğru çizilir ve bu doğrunun rezidü eğrisini kestiği noktanın absis değeri kesim frekansı f'_c olarak alınır. Bu frekans değerinde işaretteki bozulma "bc" doğru parçası ile ifade edilir.

III. SONUÇLAR

Bu çalışmanın ilk aşamasında bireylerin omuz hareketlerinden kaydedilen verilerle abduksiyon açısının zamanla değişim

işaretleri hesaplandı. Sonraki aşamada her bir işaretin Kümülatif Güç Spektral Yoğunluğu eğrisi oluşturuldu. İşaretin güç spektral yoğunluğu Matlab ortamında Welch tahmin yöntemiyle elde edildi ve 'csum' komutuyla integrali alınarak KGSY bulundu. Şekil 4'te bu eğriye bir örnek gösterilmiştir. Eğri üzerinde toplam gücün % 95 lik kısmına karşılık gelen frekans değeri alçak -geçiren filtrenin kesim frekansı olarak alınmıştır. Tüm bireylerin hesaplanan değerlerinden elde kesim frekansının istatistiksel ortalaması (\pm standart sapma) 0.469 ± 0.1 Hz olarak elde edilmiştir.



Şekil 4. Örnek Kümülatif Güç Spektral Yoğunluğu (KGSY) eğrisi

Rezidü Analiz yönteminde ise ham işaret ile filtrelenmiş işaretin farkının denklem 2'deki gibi hesaplanan değeri frekans ekseninde birer birimlik adımlara karşılık gelecek biçimde hesaplandı. Bu hesaplamada veri sıfır-faz gecikmeli 4. mertebeden Alçak - Geçiren Butterworth filtre ile filtrelendi. Butterworth filtre Matlab ortamında 'filtfilt' komutu kullanılarak sıfır-faz gecikmeli olarak elde edildi. 'filtfilt' komutu filtrenin mertebesini ikiye katladığı için 4. mertebe filtre elde etmek için filtrelemede mertebe 2 olarak alındı. Tüm bireylerin hesaplanan değerlerinden elde kesim frekansının istatistiksel ortalaması (\pm standart sapma) 3.121 ± 0.6 Hz olarak elde edilmiştir.

İki yöntem arasındaki ilişkinin incelemesinde korelasyon katsayısı hesabı yaygın olarak kullanılmaktadır. Korelasyon katsayısı r [-1,1] aralığında değerler alabilmekte olup katsayının mutlak değerinin 1 değerine olan yakınlığı büyüklüğünü, işareti ise yönünü ifade eder. Bu iki yöntem arasındaki ilişkinin yönü ve büyüklüğü açısından veriler incelendiğinde Pearson korelasyon katsayısı $r = 0.501$ bulunmuştur. Her iki yöntemle elde edilen kesim frekanslarından hangisinin optimal olduğunu belirlemek için abduksiyon açısının zamanla değişim işaretinde ardışık 3 hareketin yapılması için geçen süreler üzerinden bir frekans hesabı yapılmıştır. Diğer bir deyişle her katılımcının abduksiyon hareketinin sayısı (sabit olarak 3 kez) bu hareketi yapma süresine bölünerek frekans değerleri elde edilmiştir. Bu analizin sonucuna göre elde edilen ortalama değer



0.461 ± 0.09 Hz minimum ve maksimum değerler ise 0.243 ve 0.619 Hz olarak bulunmuştur.

IV. TARTIŞMA

Sonuçlar incelendiğinde $r = 0.501$ olan korelasyon katsayısı bu iki yöntem arasında pozitif yönde ve orta düzeyde bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan bu iki yöntemden hangisinin daha iyi bir kesim frekansı tahmini sağladığını belirlemek için elde edilen KGSY ve Rezidü yöntemlerinin sonuçları zaman işareti üzerinden hesaplanan minimum ve maksimum değerlerle karşılaştırılmıştır. Buna göre seçilecek yöntemde kesim frekansı değeri maksimum değer olan 0.619 un üzerinde bir değer olmalıdır. KGSY ve Rezidü yöntemiyle elde edilen değerlerden sadece Rezidü yönteminin (3.121 ± 0.6) bu şartı sağladığı görülmektedir. Dolayısıyla Rezidü yönteminin abduksiyon açısının filtrelenmesinde daha optimal bir sonuç sağladığı ifade edilebilir. Gelecek çalışmalarda Rezidü yönteminin üst ve alt ekstremitenin diğer hareketlerine ait açılarının zamana bağlı analizinde de benzer sonuçlar sağlayıp sağlamayacağını test edilmesiyle bu yöntemin genel bir yöntem olarak kullanılabilirliği tespit edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Hamill J.,Knutzen K. M, Derrick T.R, "Biomechanical basis of human movement" Fourth Ed.,(2015), China, Wolters Kluwer
- [2] Webster D., Celik O., (2014), Experimental Evaluation of Microsoft Kinect's Accuracy and Capture Rate, IEEE Haptics Symposium
- [3] Angeloni C., Riley P.O.,Krebs D., (1994),Frequency Content of Whole Body Gait Kinematic Data, IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering,Vol 2,No 1
- [4] Pagliari D., Pinto L.,2015,Calibration of Kinect for Xbox One and Comparison between the Two Generations of Microsoft Sensors,Sensors,15,27569-27589
- [5] Szykman A.G.,Gois J. P.,2014, Evaluating the Feasibility of Low Cost Motion Capture Systems,SBC - Proceedings of the SBGames
- [6] Winter, D. A., Ed. ,(2005), Biomechanics and Motor Control of Human Movement. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons,
- [7] Zerpa C.,Lees C.,Patel P.,Pryzsucha E.,2015,The Use of Microsoft Kinect for Human Movement Analysis, International Journal of Sports,5(4):120-127
- [8] Sinclair J.,Taylor P.J,Hobbs S J.,2013,Digital Filtering of Three-Dimensional Lower Extremity Kinematics: an Assessment, Journal of Human Kinetics volume 39/2013, 25-36
- [9] Angeloni C.,Riley P.O.,Krebs D.E.,Frequency Content of Whole Body Gait Kinematic Data,IEEE Transactions On Rehabilitation Engineering, Vol. 2, No. 1, March 1994