

Dokunsal Uygulamalarda Düşük Çözünürlüklü Döner Enkoderin Jiroskopa Entegrasyonu

Seyit Yiğit Sızlayan

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ODTÜ
Ankara, Türkiye
e187686@metu.edu.tr

Mustafa Mert Ankaralı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ODTÜ
Ankara, Türkiye
mertan@metu.edu.tr

Öz — Bu çalışmada doğrudan tahrikli dokunsal uygulamalar için düşük çözünürlüklü enkoder ile jiroskopun Kalman-Bucy filtresiyle entegrasyonu anlatılmaktadır. Bu çalışma, gerçek zamanlı çalışması, motorun doğrudan bağlı olması ve ölçümlerdeki hataların az olması sebebiyle yüksek performans; dokunsal uygulamalardaki yüksek çözünürlüklü enkoder ihtiyacını ortadan kaldırarak da düşük maliyet sağlamaktadır. Çalışmada kullanılan metotla üretilmiş olan cihazlar, doğrudan tahrik özelliğiyle kasnak veya dişli eşleniklerine göre kalibrasyon ihtiyaçlarını azaltmakta; yalnızca enkoder verisiyle pozisyon-hız kestirimi yapan eşleniklerine göre ise pozisyon-hız kestirimini daha başarılı yapmaktadır. Kalibrasyon süresinin ve maliyetin azalmasının uygulamalara katkıları açıkken; daha başarılı pozisyon-hız kestirimi, dokunsal cihazların kullanıldığı bilimsel çalışmalarda analiz hatalarını azaltmaya da yardımcı olmaktadır.

Anahtar Kelimeler— Dokunsal cihazlar, enkoder, jiroskop, Kalman filtresi, algılayıcı entegrasyonu

I. GİRİŞ

A. Motivasyon

Dokunsal geri bildirim akademik alandan gerçek yaşam uygulamalarına, işitsel ve görsel geri bildirim olgunlaşmaya başlaması sebebiyle, geliştirilmesi hedeflenen yeni alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle sanal ve artırılmış gerçeklik cihazlarının – uygulamalarının sayısının arttığı şu dönemde, insanlar dokunsal geri bildirim daha çok ihtiyaç duymaya başladılar. Bu geri bildirim ultrasonikten titreşime kadar pek çok yolla sağlanabilse de motorlu dokunsal cihazlar (kinestetik cihazlar) yaratılan etkinin daha gerçekçi olması sebebiyle tercih unsuru olmakta ve bu tip cihazlar insanların hareket analizinin yapıldığı bilimsel çalışmalarda daha çok tercih edilmektedir. Piyasada bulunan pek çok dokunsal cihaz şu günlerde akademik çevrelere hitap etse de demin de bahsetmiş olduğumuz sebeplerden ötürü, yakın gelecekte genel kullanıma da hitap edecektir. Bu yaygınlaşma sadece sanal-artırılmış gerçeklik uygulamalarında da değil; bilgisayar-insan etkileşimi, nöral protezler ve gelişmiş robotik uygulamalarında da kendine yer bulacaktır.

Bu noktada ritmik insan davranışlarında dokunsal geri bildirim etkisini incelemek için geliştirilmeye başlanmış olduğumuz 1 serbestlik dereceli kinestetik cihazın maliyetlerini düşük tutmayı da gaye edindik. Çalışmayı yürütürken, daha önce benzer araştırmalar yapan ekiplerin kullandıklarından daha iyi performansları daha uygun maliyetle elde edebildiğimiz bir kinestetik cihaz hazırlamayı hedefledik.

B. Önceki çalışmalar

[1], [2] ve [3]'te verilen çalışmalarda bizim hedeflediğimiz gibi 1 serbestlik dereceli kinestetik bir cihaz kullanılmıştır. Bu cihazlar direk olarak bilgisayar üzerinden veri toplanıp, analizi yapıp, kullanıcıyla iletişime geçecek şekilde tasarlanmıştır. Uygulamalar genel amaçlı bir işletim sistemi üzerinde çalıştığından, gerçek zamanlılığı yaklaştırmak için hızlı donanımlar tercih edilmiş, pozisyon ve hız bilgisi ise motorun üzerine takılmış olan enkoder üzerinden kestirilmiştir. [4]'te ise geliştirilmiş olan kinestetik pedalın, eğitim amaçlı geliştirildiğinden neredeyse tüm parçaları 3-boyutlu yazıcıdan çıkarılabilecek şekilde tasarlanmış ve kontrolü 8-bit'lik bir mikro kontrolcü üzerinden yapılmıştır. Bu sistemde maliyetleri düşürmek amacıyla performans kaybını göze alarak magneto-resistive bir pozisyon kestirim entegresi kullanılmış. Çok düşük maliyeti hedefleyen ve iyi düzeyde pozisyon-hız bilgisi gerektiren bilimsel araştırmalar için elverişsiz olabilecek bu sistemi karşılaştırmamız sonucunda almayı uygun görmedik.

Biz de kendi cihazımızı geliştirmeye başlarken, bahsettiğimiz cihazlarda problematik olarak ilk gözümüze çarpan, önceki çalışmalarda kullanılan 1 serbestlik dereceli kinestetik cihazların tutacaklarının kasnak veya tahrikli makara ile döndürülüyor oluşuydu. Bununla 2 sebebi vardı: ilki motordan gelen torku yükseltmek, ikincisiyse motora bağlı olan enkoder çözünürlüğünü arttırmaktı. Bu artırma kavramını ileriki bölümlerde açıklayacağız. İlki içinse genellikle kasnak/makara sistemlerinin arttırdığı eylemsizlik momenti dokunsal geri bildirim etkilemesi; sistemin geriye sürülebilirliğini ve verimi azaltması sebebiyle çok bir fayda sağlamadığı görüşü hâkim. Pozisyon ve hız ölçümü gerektiren cihazlardaysa bu tarz tahrik sistemleri kalibrasyon ihtiyacını da beraberinde getirmekte.

İkinci husus, bu sistemlerde motorun shaft pozisyonundan tutacağı pozisyonu, kasnakta kayma olmaması durumunda, az bir niceleme gürültüsüyle tespit edilebilse de sistemde geriye dönük fark alma metoduyla bulunan hız, bu niceleme gürültüsünden oldukça yüksek etkilenebilir. Tutacağın hızının yüksek olduğu durumlarda bu etki azalsa da yine de tam olarak üstesinden gelinememesi sebebiyle bu hız ölçümüne bir de filtre uygulanması gerekiyor. Uygulanan filtrenin mertebesine göreyse kestirilen hız ve gerçek hız arasında bir faz farkı oluşuyor ve bu gerçek zamanlılığa zarar veren bir unsur olarak göze çarpıyor. Bu sistemler için kullanılan diğer bir metot, enkoderin iki yarığı arasında geçen zamanı bularak hız ölçümü

yapmaktır. Fakat o da düşük hızlarda ölçüm gelmemesi sebebiyle sıfır hız değerini ölçememekte. Ayrıca enkoderin üretimi esnasında ortaya çıkan ve niceleme gürültüsünden daha yüksek bir varyansa sahip olabilen üretim hataları bu tarz bir ölçümü riskli bir hale de getirmekte.

C. Çözümlerimiz

I.B'de bahsettiğimiz hususlar için bizim kullandığımız çözümler şunlar oldu:

1. Geri sürülebilirlik ve eylemsizlik momenti yükünün azalması için doğrudan bağlı tahrik mekanizması tercih ettik. Bu da dokunma hissiyatına da katkı sağladı.
2. Doğrudan tahrikin getirdiği düşük çözünürlük probleminin üstesinden gelmek için jiroskop kullandık. Bu yöntem, tutacak pozisyonunun geriye dönük farkını alma ya da yarı zamanını ölçme gibi hız kestirme metotları yerine direk olarak açısal hızı ölçmesi sebebiyle de hata miktarı çok daha düşük bir hız bilgisi sağlamakta.
Elde edilen hız bilgisini ardışık iki enkoder ölçümü arasındaki pozisyon bilgisini elde etmek amacıyla kullandık ki bu da niceleme gürültüsünü büyük miktarda azalttı.

II. DOĞRUDAN/DOLAYLI TAHRİK KARŞILAŞTIRMASI

Doğrudan tahrik isminden de anlaşılacağı gibi motorun yükün uygulanacağı kola, arada bir aktarma mekanizması olmadan bağlandığı durumdur. Kasnak veya tahrik makarası ile tahrik ise torkun olduğu motor şaftı ile yükün bağlandığı kolun arasına, uygulanan torku yükseltmek ya da motor şaftına yüklenen yükü azaltmak amacıyla bağlandığı durumdur. Kinestetik cihazlarda dişlili tahrik sistemlerinin uygulaması, dişler arasındaki geçiş rahatlıkla hissedilebildiği için oldukça azdır. Yine de dişlili kasnak sistemleri uygulama kolaylığı açısından tercih edilebilmektedir.

Kinestetik cihaz uygulamalarında bu iki tahrik mekanizmasını, beş başlıkta karşılaştırabiliriz:

A. Montaj:

Kasnaklı bir sistemde kasnağın gerginliği kuvvet aktarımının sağlığını oldukça etkileyen bir unsurdur. Belirli aralıklarla bu gerginliğin kontrol edilmesi gerekir. Doğrusal tahrikli bir sistemde buna ihtiyaç olmayacaktır.

B. Kalibrasyon ihtiyacı:

Eğer her ölçümde aynı noktada aynı değer elde edilmesini istiyorsak, kasnaklı sistemlerdeki kayma vb. durumlara karşı ölçümlerden önce kalibrasyon yapılması ihtiyacı doğar. Doğrudan tahrikli bir sistemdeyse başlangıç noktasında pozisyonun sıfırlanması yeterli olacaktır.

C. Tork:

Dokusal geri bildirim uygulanabilmesi için motorun ürettiği torkun ele aktarımı tahrik yapısıyla doğrudan ilintilidir. Doğrudan tahrikli sistemlerde, uygulanan tork bir kol vasıtasıyla direk olarak ele aktarılırken kasnak/tahrik makaralı kinestetik cihazlarda tahrikin uygulandığı kasnak ile yük kolunun bağlı olduğu kasnakların yarıçapları oranında tork yükseltilmektedir. Bu, kasnak/tahrik makaralı sistemlerde daha

küçük motorlar ve düşük akımlarla ele uygulanan geri bildirim kuvvetinin daha yüksek olmasını sağlamaktadır.

D. Tork çözünürlüğü ve kesinliği:

II.C kapsamında kasnak/tahrik makaralı sistemler avantajlı gözükse de kasnak/tahrik makaralı sistemlerin tork açısından dezavantajı tork çözünürlüğünü ve kesinliğini azaltmalarındır.

Fırçalı bir DC motor tarafından üretilen tork değeri, motordan geçen akım değeriyle doğru orantılıdır. Bu sebeple, Akım yükseltici devrelerle kontrol edilen bir motor için, şaft çıkışı tork kontrolünü elektriksel olarak yapmak zor değildir.

Kinestetik cihazlar için tutacağa uygulanan kuvvetin rahatlıkla kontrol edilebilmesinde ve gözlemlenebilmesinde önemli bir artı olan bu unsur, motor şaftıyla tutacak arasına bir aktarım mekanizması bulunduğu doğrusallığı kaybetmeye başlamaktadır. Özellikle kasnaklı sistemlerde havanın sıcaklığıyla bile değişebilen kayış gerginliği bu konudaki en bariz örnektir. Ayrıca belirli aralığın altındaki ya da üstündeki tork değerlerini iletememeleri, düşük değerler için ölü bant ve yüksek değerler için doyunluk karakteristiği halinde sirayet edebilmektedir ve bu durum motordan elde edilebilecek tork çözünürlüğünün düşmesi demektir.

Motordan tutacağa aktarılan kuvvetin doğrulsallığı ile de daha kesin tork değerlerini elde etmek mümkün olacağından, doğrudan tahrik kinestetik bir cihaz için daha uygundur denebilir.

E. Eylemsizlik Momenti:

Dokusal bir uygulamada tutacağı oynatan insan, tutacağı hareket ettirmek için ne kadar az kuvvet uygulamak zorunda kalırsa uygulanan bildirim etkileri o kadar daha rahat gözlenebilir. Mekanizmada yer alan sürtünme, eylemsizlik momenti ve ağırlık sabit bir kuvvet teşkil ettiklerinden bu kuvvetlerin azalması, yalnızca üretilen dokusal kuvvetin tutacakta gözlenebilirliğini arttıracaktır.

Bu durum göz önüne alındığında, doğrudan tahrikli bir sistemde tutacağın ağırlığı ve motorun kendi eylemsizlik momenti bu kuvveti oluşturan tek unsurdur. Kasnak ve tahrik makaralı sistemlerde ise motorun eylemsizlik momenti kasnakların yarıçapları oranının karesiyle çarpılarak tutacakta hissedilecektir. Ayrıca sistemdeki eleman sayısının artmasıyla beraber de sürtünme kuvveti artacaktır. Eğer sistemde dişli kasnak kullanılmışsa da geçen her bir diş, dokusal olarak hissedilecektir. Bütün bunları göz önünde bulundurarak doğrudan tahrik sisteminin, kinestetik bir cihaz için daha uygulanabilir olduğuna kanaat getirdik.

Bu noktada bilimsel çalışmalarda kullanılan birçok kinestetik cihazdan ayrılıyor. Yukarıda belirtmiş olduğum sebepler, doğrudan tahrikin avantajını gösterse de çalışmalarda tercih edilmemesinin en büyük sebebi pozisyon ölçümünde kullanılan sistemlerin yetersizliğinde ileri geliyor.

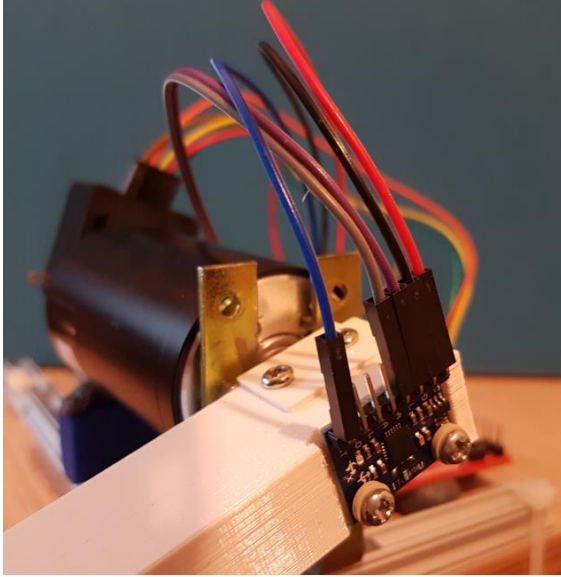
Bu konuyu şöyle açıklayabiliriz: Uygulamaları gereğince, 1 serbestlik dereceli kinestetik cihazlar genellikle belirli bir merkez çizgi etrafında yaklaşık ± 30 derecelik bir dilimi tararlar. Bu da sistemde kullanılan pozisyon ölçüm sensör bilgisinin tam ölçeğinin 1/6'lık bir bölümünün kullanılabilirdiği anlamına gelmektedir. Tur başına 600 atım verebilen bir enkoder için sistemden yalnızca 100 atımlık pozisyon bilgisi ile

sınırlanacağına anlamına geliyor bu. Dört evreli bir enkoder bile olsa, bu pozisyon bilgisi uçtan uca taranan açının insandan insana değişken olabilmesi sebebiyle yetersiz gelmekte ve yüksek niceleme gürültüsüne sahip bir pozisyon ölçümü elde edilmektedir. Bu pozisyon bilgisinden geriye dönük fark olarak elde edilen hız bilgisiyse çok daha fazla gürültüye sahiptir. Literatürdeki uygulamalarda bu durumun önüne geçmek ve enkoderden elde edilmiş ölçümün hassasiyetinin artırmak için ya daha yüksek çözünürlüklü (2000CPR ve üzeri, dört evreli) enkoderler kullanılmış ya da kasnaklı/tahrik makaralı sistemler tercih edilmiştir. Yüksek çözünürlüklü enkoder fiyat dezavantajını, diğer uygulama ise yukarıda bahsetmiş olduğumuz diğer dezavantajları beraberinde getirmektedir.

III. DÜŞÜK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ ENKODER BİLGİSİNİN JİROSKOP YARDIMIYLA DÜZELTİLMESİ

A. Kullanılan Elemanlar ve Üretim

Çalışmamızın önceden yapılmış pek çok araştırmadan ayrılan avantajlarından biri doğrusal tahrikin getirdiği ölçüm araçları yetersizliklerinin, şaft ile aynı hizaya monte edilmiş olan jiroskop ile kompanse edilmesidir. Bahsedilen sistemin resmini Şekil 1'de vermişizdir.



Şekil 1: Jiroskop montelenmiş kinestetik cihaz

Kasnaklı sistemlerin aksine, bu sistemde motor şaftına rahatlıkla jiroskop monte edilebilir çünkü insan elinin hareket hızı kullanılmış olduğumuz ataletsel ölçü birimi (AÖB) olan MPU6050'nin jiroskopunun en yüksek tam ölçek değeri olan 2000 dps (derece/saniye) değerinin altında kalıyor. AÖB'nin 3 eksen jiroskopunun yalnızca z eksenini kullanıyoruz.

Pedalda kullandığımız tutacağı, 3B yazıcı ile AÖB'nin entegre devresi tam olarak şaftla eş merkezli olarak şekilde ürettik. Tutacağı iki parça halinde üretilip şaftı bu iki parçanın

arasında kalacak şekilde vidaladık. Bu sayede, motorun arka tarafında, enkoder; motorun ön tarafında tutacağın üstünde jiroskop olacak şekilde pedala monte ettik.

Uygulamada kullandığımız motor, Maxon'un 148877 parça numaralı RE40-150W modelinin 48V'luk modelidir. Uygun fiyat hedefleyen bir uygulama için pahalı bir alternatif olarak gözükebilir. Fakat laboratuvarımızda fazlaca bulunması ve üzerinde ortalama çözünürlükte (500CPR, dört evreli) Avago HEDS-5540 modelli enkoder olması sebebiyle bu motoru tercih ettik.

Buraya kadarki tüm elemanları daha sonrasında geniş yüzeyli tahta bir zemine alüminyum profiller kullanarak sabitledik.

Çalışmada gerçek zamanlılığı sağlamak, enkoder ve jiroskop ile arayüzlemeyi de kolaylaştırmak amacıyla Texas Instrument'ın Tiva-C Launchpad ismindeki 13\$'lık mikro kontrolcü kartını kullanıyoruz. Bu kartı tercih etmemizin sebebi üzerinde bulunan Tiva-TM4C123GH6PM işlemcisinin dahili dört evreli enkoder arayüzü ve I2C haberleşme modülü bulundurmasıydı. Dahili dört evreli enkoder arayüzü, işlemcinin gelen her bir atım için kesmeye girmeden pozisyon bilgisini tutabilmesini sağlayan bir durum makinesidir. Bu arayüzün varlığı gerçek zamanlılığın sağlanmasında oldukça faydalıdır çünkü kesmeye girilmediğinden pozisyon bilgisinin güncellenmesi için işlemci tarafından zaman harcanmamakta ve pozisyon bilgisine erişme zamanı, yalnızca bir hafıza elemanına erişim süresi kadardır. I2C modülü ise jiroskopa haberleşme amacıyla kullanılmaktadır.

B. Gömülü yazılım

Bu yazı dahilinde gömülü yazılımdan yalnızca zamanlama ve Kalman-Bucy filtresinin uygulaması ölçüğünde bahsedeceğiz.

Çalışmada kullandığımız AÖB olan MPU6050 programlanabilir bir entegredir. Bu entegreyi bizim uygulamamız için, tam ölçek değeri 1000dps, bant genişliği jiroskop için 256Hz olacak şekilde programladık. Bu şekilde jiroskop 8Khz'lik bir raporlama frekansına sahip oluyordu. İnsan motor sisteminin döngü hızı yaklaşık 1Khz olduğundan, raporlama hızını 8'e bölürerek 1Khz'e düşürdük. Ayrıca zamanın doğruluğundan emin olmak için de ölçüm hazır olduğunda kesme pinini düşük voltaja çekmesini sağladık. Bu işlemimiz tarafından da kesme olarak algılanıp, kesme altprogramına girildiğinde Kalman-Bucy filtresini uygulamasını ve bilgisayarla haberleşmesini sağladık. Çalışmamız esnasında AÖB, 1Khz için programlanmış olsa da genellikle 1.3Khz gibi bir frekansta çıktı üretti. Farklı entegrelerde farklı sonuçlar verse de işlemimiz altından kalkabildiğinden, bu hızı düşürme ihtiyacı duymadık.

Burada küçük bir not olarak, kesme altprogramlarında haberleşme gibi girdi/çıkış işlemleri yapılması önerilirse de işlemcinin donanımsal çıktı tamponundan faydalanarak, kartın tüm bu işlemleri 1Khz'in üzerinde bir hızda periyodik olarak yapmasını sağlayabildiğimiz için burada kullanmak herhangi bir çakılmayla sonuçlanmadı. Aksine, haberleşme rutinini buradan ayırdığımızda, aralarda periyodikliğin bozulduğunu, bazı ölçümlerin bilgisayara gönderilemediğini, bu sebeple de

çevrimdışı yapılan analizlerde hataların oluştuğunu gözlemledik.

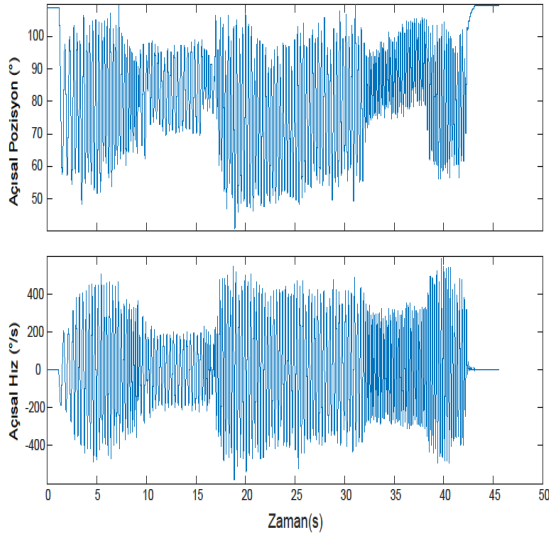
Ölçüm zamanlarını tutmak için mikro-saniye sayan bir zamanlayıcı hazırladık.

AÖB özelinde, elektriksel her jiroskopta lehimleme vb. hatalarla oluşan sıfır hareket değerini tespit için program başlangıcından itibaren 1 milyon adet ölçüm alıp bunların ortalamasını alarak sinyaldeki DC değeri bulduk. Sonrasında gelen her bir ölçümden bu DC değeri çıkararak ölçümleri sıfır etrafına çektik.

Çevrimdışı analiz amacıyla geliştirdiğimiz bu gömülü yazılım, bilgisayara sırasıyla çalışmasının başından beri geçen zamanı, enkoderden okuduğu açısal pozisyon değerini ve jiroskoptan okuduğu açısal hız değerini gelen her yeni jiroskop ölçümü ile raporluyor.

C. Çevrimdışı analiz

Jiroskop ve enkoder değerini Kalman-Bucy filtresiyle birleştirebilmek için öncelikle pedalı zeminle 110 derece yapacak şekilde başlatıp, sonrasında rastgele oynayarak ölçümler topladık. Şekil 2’de bir ölçüm örneğini görebilirsiniz.



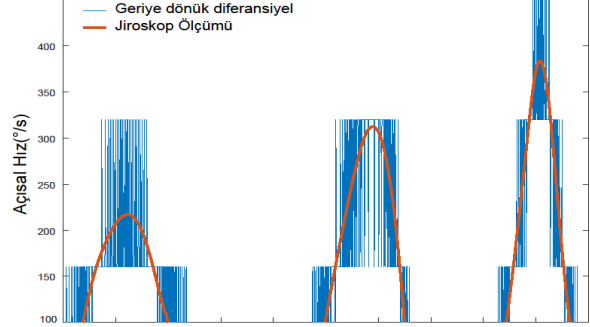
Şekil 2: Açısal pozisyon ve açısal hız ölçüm örneği

Analiz sonucunda elde edeceğimiz değerlerin teyidi için birkaç farklı ölçümü de yine bu metotla elde ettik.

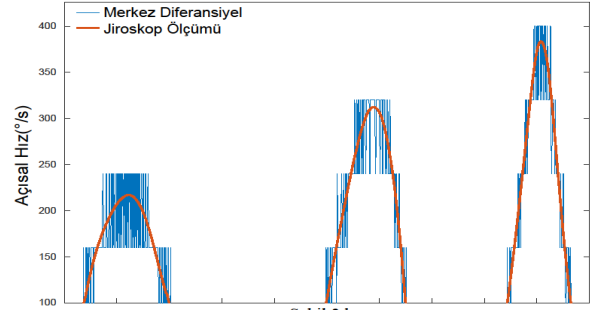
Her bir ölçüm arasında geçen zamanı, elde ettiğimiz ölçüm zamanlarının farkını alarak bulduk. Aradaki ± 3 mikro-saniyelik farklılıklar 1Khz’lik bir sistem için göz ardı edilebileceğinden, bu zaman farklarının ortalamasını ölçüm periyodu olarak aldık.

İlk yaptığımız analiz açısal hızın, açısal pozisyonun geriye dönük farkının ölçüm periyoduna bölümüyle kestirimi oldu. Sonuçlar beklediğimiz gibi jiroskop lehine olduğundan, bir de nedensel-olmayan merkez diferansiyel metodu ile denedik. Bu durumda kestirim jiroskop sonuçlarına biraz daha yaklaşırsa da 4-10 mertebeli bir filtre uygulamadan kullanılması mümkün değildi. Böyle bir filtrenin uygulanması da 2-5 örneklilik bir

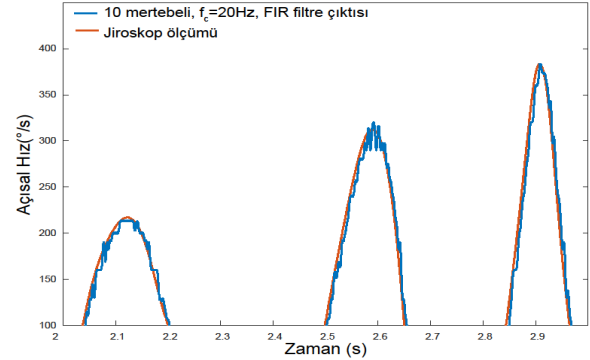
gecikmeye sebep olacağından gerçek zamanlılığı fazlasıyla bozuyordu. Şekil 3’teki grafikte, Şekil 2’de verilmiş olan ölçümden elde edilmiş diferansiyel hızı (geriye dönük ve merkez), geriye dönük diferansiyelle bulunan hızın 10 mertebeli sonlu yanıtı süzgeçten geçirilmiş halini ve jiroskop ölçümünün değerlerini görebilirsiniz.



Şekil 3.a



Şekil 3.b



Şekil 3.c

Şekil 3: Geriye dönük diferansiyel (3.a), merkez diferansiyel 1 (3.b) ve 20Hz sınır frekanslı FIR filtre ile filtrelenmiş merkez diferansiyel (3.c) hız kestirimleri ile jiroskop ölçümünün karşılaştırılması

Şekil 3’ten de rahatlıkla görülebileceği gibi, 5 örneklilik (5ms) gecikmeye sebep olan 10 mertebeli filtre dahi jiroskop kadar pürüzsüz sonuç veremedi. Bu pürüzsüzlük [5]’te de bahsedilen gibi uygulamalarda, sanal görüntü almadaki çarpışma hesaplarının doğruluğunu arttırmakta faydalı olacaktır.

Buradan yola çıkarak jiroskop kullanımının, enkoderden hız kestirimi yapmaya göre daha uygulanabilir olduğunu göstermiş olduk.

D. Kalman-Bucy Filtresi ve Varyansların Çevrimdışı Ölçümlerden Belirlenmesi

1) Kalman Filtresi Modeli

Hız kestirimi için jiroskop kullanımının daha iyi sonuç verebildiğini gösterdikten sonraki adımımız, enkoder ve jiroskop ölçümlerini birleştirmektir. Literatür aramalarında bunun için sabit hız, sabit ivme gibi birçok model yer aldığını gördük fakat bu modellerin deneysel olarak ölçülme süreleri fazla olan birçok parametre ihtiyacı vardı. Ayrıca her insanın tutacağı uyguladığı kuvvet birbirinden oldukça farklı olacağından, sabit hız ya da sabit ivme modelleri de tamamıyla doğru sonuçlara sahip olmayacaktı.

Geliştirme süresinde farklı mertebelerden farklı parametreler ve modellerle birçok farklı filtreyi test ettik. Ayrıca bu süreçte bu filtrenin 1ms periyot ile 80Mhz'lik bir mikro-kontrolcü üzerinde çalışacağını düşünerek, filtrede gerekli olacak aritmetik işlem sayısını az tutmaya çalıştık. Elde ettiğimiz en iyi model, insan elinin uyguladığı kuvveti sıfır ortalamalı bir Gauss gürültüsü olarak kabul ettiğimiz; jiroskop ölçümünü, jiroskop gürültü varyansının model ve enkoder gürültü varyansından 1000'ler mertebesinde küçük olmasından ötürü ihmal ettiğimiz ve yalnızca pozisyon kestirimi yaptığımız model oldu.

Kalman filtresi her yeni gelen jiroskop ölçümüyle birlikte çağırılrsa da modelde güncelleme denklemleri yalnızca enkoderden okunan pozisyon bilgisi değiştiğinde çalıştırıldı, böylece mikro-işlemciye binecek yük miktarı da azalmış oldu. Modelin matematiksel gösterimi şu şekildedir:

$$\begin{aligned}\theta_{k|k-1} &= \theta_{k-1|k-1} + \Delta t \dot{\theta}_k + \omega_k \\ P_{k|k-1} &= P_{k-1|k-1} + Q_{model}\end{aligned}$$

→ Enkoder önceki değerle aynıysa:

$$\begin{aligned}\theta_{k|k} &= \theta_{k|k-1} \\ P_{k|k} &= P_{k|k-1}\end{aligned}$$

→ Enkoder değeri değişmişse:

$$\begin{aligned}e &= \theta_{enkoder} - \theta_{k|k-1} \\ K &= \frac{P_{k|k-1}}{P_{k|k-1} + R_{enkoder}} \\ \theta_{k|k} &= \theta_{k|k-1} + K e \\ P_{k|k} &= (1 - K) P_{k|k-1}\end{aligned}$$

Denklem 1: Kalman-Bucy Filtresi

Bu filtrede:

- θ Kestirilen pozisyonu,
- $\dot{\theta}_k$ Jiroskop ölçümünü,
- $\theta_{enkoder}$ Enkoderden ölçülen açısız pozisyon değerini,
- Q_{model} Model varyansını,
- $R_{enkoder}$ Sensör gürültü varyansını

Göstermektedir. Sistem tek durumlu olduğundan, Kalman-Bucy filtresindeki kovaryans matrisleri skalere dönüşmüş ve varyans olarak kullanılmaktadır.

İnsan elinin uyguladığı kuvvetler sisteme ivme girdisi olarak etki edip, sıfır ortalamalı Gauss dağılımı olarak modellendiğinden, model varyansının bir parçası haline gelmiştir.

Bu denklemde bilinmeyen iki değer model gürültü varyansı ve enkoderin sensör gürültüsüdür.

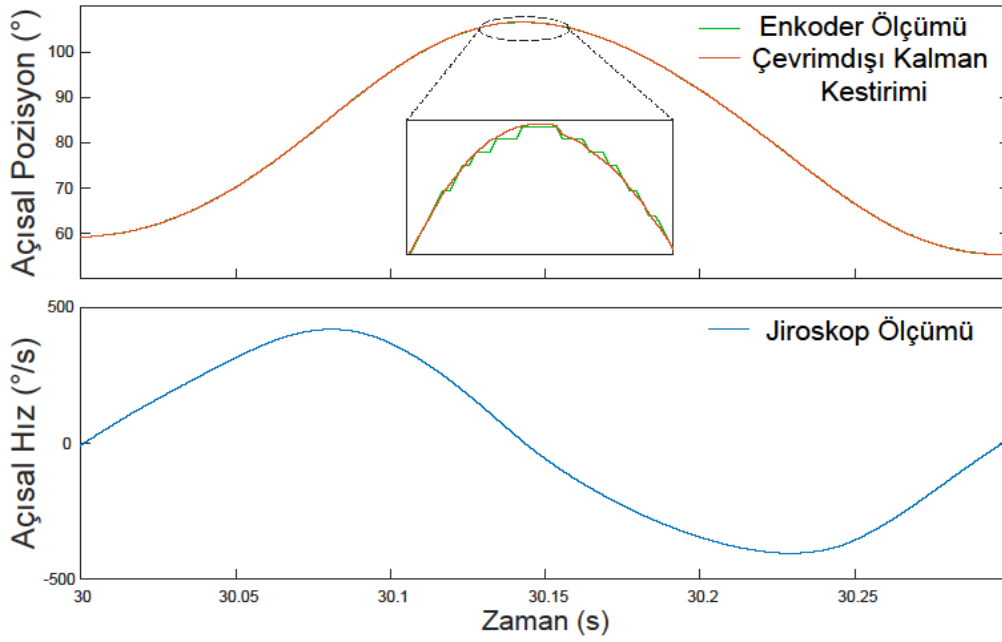
2) Gürültü Varyanslarının Belirlenmesi

Enkoderin sensör gürültüsü niceleme gürültüsü içerdiğinden, temelde tekbiçimli dağılım şeklinde modellenir. Bunun haricinde Gauss dağılımı şeklinde modellenen üretim hataları da enkoderde mevcut olduğundan bu iki hatanın toplamı Gauss dağılımına yakınlaştığını varsayıyoruz. Bu sebeple, enkoder ölçüm gürültüsü varyansını, tekbiçimli dağılımın varyansına yakın olduğunu düşünerek değerini 0.0027 olarak belirledik.

Model gürültüsünün varyansı içinse, 0.0001 gibi küçük değerlerden başlayarak 10'ar katlık aralıklar belirleyip; sonrasında bu aralıkları ikiye bölerek aramalar yapıp, en düzgün görünümlü ölçümü elde etmeye çalıştık. Ölçümlerin bozulduğu güzergahta değil, diğer doğrultuda ilerleyerek en uyguna yakın bir çözüm bulmaya çalıştık. Burada Q_{model} değerini 0.00056 bulduk. Bu değerden büyük ya da küçük değerlerde çıktının bozulmaya başladığını gördüğümüz için aramamızı bu değerde sonlandırdık.

Belirlemiş olduğumuz bu iki değer için III.D.1)'de belirtmiş olduğum modeli çalıştırarak aldığımız sonuçları Şekil 4'te görebilirsiniz. Hızın düştüğü bölgelerde niceleme hatalarının miktarı arttığı için, bu bölgelerde Kalman filtresinin pürüzsüzleştirici etkisi daha iyi gözlemlenebilmektedir. Ayrıca sinüzoidal bir hareket için hız ve pozisyon arasındaki türev ilişkisi de figürden açıkça görülebilmekte.

Kullanmış olduğumuz değerler ile uygulamış olduğumuz Kalman filtresinin niceleme gürültüsünü azalttığı ve hız konusunda jiroskop ölçümünün, kestirimden uygulanabilir olduğu Şekil 4'ten rahatlıkla anlaşılabilir.



Şekil 4: Kaydedilmiş veri üzerinde çevrimdışı Kalman-Bucy filtresi çalıştırılarak elde edilmiş pozisyon kestirimi

IV. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, yakın gelecekte kullanımları artacak olan dokunsal uygulamalarda kullanılmak üzere, yüksek çözünürlüklü enkodere ihtiyaç duymayan ve doğrudan tahrikli 1 serbestlik dereceli kinestetik bir cihazın mekanik ve yazılımsal yönlerini ele alarak geliştirilme aşamalarından bahsettik. Öncelikle farklı tahrik mekanizmalarını beş ayrı yönden ele alarak karşılaştırdık. Sonrasında vardığımız sonuçlarla yola çıkarak ürettiğimiz 1 serbestlik dereceli kinestetik cihaz üzerinde jiroskop ve enkoder entegrasyonunu Kalman-Bucy filtresi kullanarak yaptık. Çalışma sonucunda doğrudan tahrikli bir kinestetik cihazın, üzerindeki enkoder düşük çözünürlükte olsa dâhi; mekanik avantajıyla üzerine jiroskop takılabilmesi sayesinde, Kalman filtresi uygulanarak hız ve pozisyon bilgisinin kestiriminde literatürdeki eşleniklerinden daha iyi performanslar elde edebildiğini de göstermiş olduk. Ayrıca, bu yöntem kullanılarak üretim maliyetlerinin de hayli düştüğü dikkat çeken diğer bir nokta oldu.

Bu çalışmanın diğer bir potansiyel avantajı, [5]'te de belirtilmiş olan, gerçek ve sanal arasındaki ayrıklık ve devamlılığın hesaplanan kuvvetlerdeki etkisini azaltmasıdır. Pozisyon kestirimi niceleme gürültüsü bakımından hayli az olduğundan sanal duvar uygulamalarındaki az miktardaki oynamaları dahi tespit etmekte başarılı olacaktır. Ayrıca yine [5]'te belirtilmiş olan çarpışma tespiti esnasında harcanan işlemci zamanı, görselleştirmeye hız parametresinin daha iyi aktarılması sebebiyle azalacaktır.

Bu çalışmanın devamında öncelikle kullanmış olduğumuz model varyans bulma metodunu daha analitik ya da deneysel bir zemine oturtmak için yöntemler arayacağız. Sonrasında elde

edilen yeni değerlerle Kalman-Bucy filtresini mikro işlemci üzerinde çalıştıracamız. Devamında, bir yandan bilgisayar arayüzlemesiyle uğraşırken, diğer yandan, 1 serbestlik dereceli cihaz için başarılı sonuçlar elde etmemiz durumunda, kinestetik cihazı 2 serbestlik derecesi için yeniden düzenleyeceğiz.

V. TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma esnasında motivasyonumuzun yüksek olması konusunda bizleri sürekli teşvik eden Gülçin Ece Şaşmaz'a; mekanik tasarımı, üretim ve montajda bizden yardımlarını esirgemeyen Denge Uzel ve Osman Karagöz'e teşekkürü bir borç bilirim.

VI. KAYNAKÇA

- [1] M. M. Ankarali, H. Tutkun Sen, A. De, A. M. Okamura, and N. J. Cowan, "Haptic feedback enhances rhythmic motor control by reducing variability, not improving convergence rate," *J. Neurophysiol.*, vol. 111, no. 6, pp. 1286–1299, 2014.
- [2] R. Gassert *et al.*, "Physical student-robot interaction with the ETHZ haptic paddle," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 56, no. 1, pp. 9–17, 2013.
- [3] A. De, "Neuromechanical control of paddle juggling," pp. 1–64, 2010.
- [4] M. O. Martinez *et al.*, "3-D printed haptic devices for educational applications," *IEEE Haptics Symp. HAPTICS*, vol. 2016–April, no. Figure 1, pp. 126–133, 2016.
- [5] C. Basdogan and M. a Srinivasan, "Haptic rendering in virtual environments," *Handb. Virtual Environ. Des. Implementation, Appl.*, vol. 1996, no. 1, pp. 117–134, 2002.