

İvme Sensörü Uygulaması

Tevfik KADIOĞLU¹, Hasan DİNÇER²

¹Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
Kocaeli Üniversitesi
tevfik.kadioglu@gmail.com
²Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
Kocaeli Üniversitesi
hdincer@kou.edu.tr

Özet

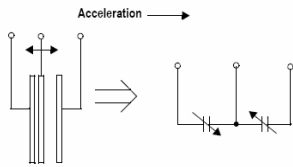
Bu bildiride MEMS yapıdaki kapasitif ivme sensörleri incelenmiş ve bu yapıdaki bir ivme sensörü kullanılarak ivme, hız, alınan toplam yolun ölçümü ve sarsıntı frekansı ölçümü (vibrasyon) uygulamaları hakkında bilgi verilmiştir.

1. Giriş

Günümüzde gelişmekte olan yarıiletken teknolojisi sayesinde MEMS (Micro-ElectroMechanical System) yapılar sayesinde ivme sensörleri devre üzerinde entegre kılıf içerisine girebilmektedir. Bu sayede ivme sensörleri çeşitli uygulama alanları bulabilmektedir. Medikal uygulamalar, güvenlik uygulamaları, MMI (insan makine arayüzleri), robotik uygulamalarına kadar birçok alanda ivme sensörleri kullanılmaktadır.

2. İvme Sensörleri

İvme sensörleri, ivme, titreşim ve mekanik şok değerlerini ölçmede kullanılan elektromekanik elemanlardır. İvme sensörlerinin farklı çalışma yöntemleri vardır. Bazı ivme sensörleri piezoelektrik etkiyi kullanır. İçerdikleri mikroskobik kristal yapılar ivmesel kuvvetle gerilir; bu da voltaj üretilmesini sağlar. Bir başka yol da kapasitedeki değişimi algılamaktır. Birbirine yakın iki mikro yapı arasında kapasitif etki oluşur ve kapasitans değeri açığa çıkar. Kapasitif İvmeölçer; kapasitif iletim prensibi kullanılır. Sismik kütle olarak bir diyafram kullanılır. Bir ivme etkidiği zaman sabit elektrot ile sismik elektrot arasındaki mesafe değişir. Mesafenin değişmesiyle kapasitans değişir ve ivme ile orantılı bir çıkış elde edilir (Şekil 1).

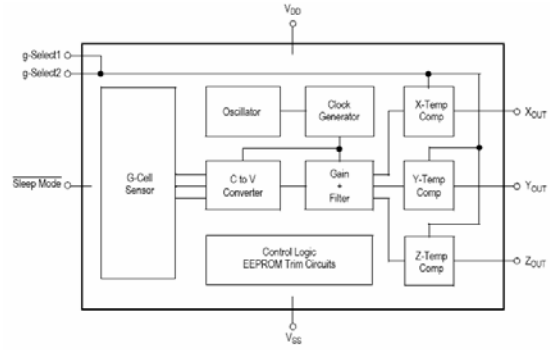


Şekil 2: Basitleştirilmiş Algılayıcı Fiziksel Modeli

2.1. İvme Sensörü İç Yapısı

“G-Cell Sensor”ü olarak adlandırılan blok Şekil 2’de verilen fiziksel modeli içeren 3 adet (x,y,z eksenleri için) birer yarı iletken kapasitif algılayıcıdan oluşmaktadır.

“C to V Converter” olarak adlandırılan blok kapasite ölçümü köprü devresinden oluşmaktadır. Bunu takip eden “Gain+Filter” bloğu integral alıcı ve rms işaretin ortalamasını olarak buna kazanç ekler. İçerisinde bulunan “oscillator” ve “Clock generation” bloğu kapasite ölçümü için gerekli olan osilatör işaretini oluşturur. “X-Temp Comp”, “Y-Temp Comp”, “Z-Temp Comp” blokları sıcaklığa bağlı olarak yarıiletken yapıda meydana gelen değişikliklerden dolayı ölçüm hatalarını gidermek için kompanzasyon devrelerini ve hassasiyeti ayarlamak için gerekli devreleri içerir.



Şekil 2: Kapasitif ivme sensörü

2.2. İvme Sensörü Uygulama Alanları

- İnsan-makine ara yüzleri
- Navigasyon sistemleri
- Çalınmaya karşı korunma sistemleri
- Makine kontrolü
- İnteraktif eğlence
- Remote kontrol

- Spor ve sağlık kontrol sistemleri
- Pusula kompanzasyonu
- Otomotiv de çarpma ve süspansiyon kontrol sistemleri
- GPS uygulamaları
- Düşme algılama
- HDD koruma sistemleri
- Görüntü stabilizasyonu
- Hareket kontrol uygulamaları
- Portatif elektronik ürünler
- Robot uygulamaları
- Sismik görüntüleme sistemleri
- Kargo taşımacılığında paket güvenliği ve takibi
- Araç dinamik kontrol uygulamaları

2.3. İvme Sensörü Seçimi

İvme sensörlerinin analog ve sayısal çıkış veren tipleri bulunmaktadır. Analog çıkışlı ivme sensörleri ivme değerine bağlı olarak sürekli bir gerilim verirler. Sayısal ivme sensörleri çıkış için çeşitli arayüzleri destekleyen (I2C, SPI, UART, vs...) modelleri olduğu gibi modüle edilmiş şekilde çıkış veren (örn PWM) modelleri de mevcuttur.

İvme sensörü seçerken aşağıdaki özellikler göz önünde bulundurulmalıdır.

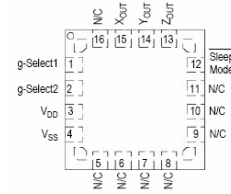
- **Eksen sayısı:** Birçok proje için 2 eksenli ivme sensörü yeterli olmaktadır. Fakat 3 boyutlu pozisyon isteniyorsa 3 eksenli ya da doğru açılarda yerleştirilmiş 2 eksenli ivme sensörleri kullanılabilir.
- **Maximum salınma:** Yerçekimi ivmesini kullanarak yalnızca eğim ölçülmek isteniyorsa $\pm 1,5g$ lik ivme sensörü yeterli olur. Eğer araba, uçak ya da robotun hareketi saptanmak isteniyorsa ± 10 lik bir sensör yeterli olacaktır. Ani başlangıçlar ya da durmaların olduğu projelerde ± 300 ye kadarlık sensörlere ihtiyaç duyulabilir..
- **Hassaslık:** İvmenin hassas ölçümü işaretle daha büyük değişimlerin olmasını sağlar. Daha büyük sinyal değişimleri ölçümü kolaylaştırarak doğru sonuçlar meydana getirir.
- **Bant genişliği:** Yavaş eğimli hareketleri algılama uygulamalarında 50 Hz yeterli olmaktadır. Titreşim ölçümü yapılıyorsa ya da hızlı hareket eden bir makine kontrol ediliyorsa bant genişliğinin yüksek olması gerekir. MEMs yapıdaki ivme sensörleri genelde 100-500Hz band genişliğine sahiptir.
- **Empedans/Bufferlama:** Bir çok ADC'nin düzgün çalışabilmesi için bağlanan elemanın çıkış empedansının 10 k Ω un altında olması gerektiği belirtilmektedir. Bazı üreticilerin analog ivme sensörleri 32 k Ω luk bir çıkış empedansına sahiptir. Bunun çözümü çıkış empedansını

düşürmek için bir 'düşük giriş ofseti bulunan rail to rail op amp' ını buffer olarak kullanmaktır.

Bu uygulamada Freescale MMA7261QT 3-eksenli ivme sensörü kullanılmıştır.

2.3.1. MEMs Yapıdaki MMA7261QT Sensörü Özellikleri

- $\pm 2.5g/3.3g/6.7g/10g$ ayarlanabilir 3 eksenli ivme sensörü
- Düşük güç tüketimi (500uA@3V)
- Uyku modunda 3uA akım tüketimi
- Düşük besleme gerilimi 2.2V-3.6V
- Hızlı açma zamanı
- Tümüleşik tek kutuplu alçak geçiren süzgeç
- XY ekseninde 350Hz, Z 150Hz frekans yanıtı
- 100mHz-1KHz 4.7mV RMS gürültü gerilimi
- Çıkış gerilim aralığı Vss+0.25V ve Vdd-0.25V
- Çalışma aralığı içinde %1 doğrusallıktan sapma
- Çapraz eksen hassasiyeti (Vxy, Vzx, Vyz) %5 (çapraz eksenlerden 90 derece ile uygulanan ivmeyi çıkarma hassasiyeti)
- XY eksenindeki rezonans frekansı 6KHz ve Z eksenindeki rezonans frekansı 3.4KHz



Şekil 3: MMA7261QT Sensörü

3. İvme Sensörü Uygulaması

3.1. Fiziksel Büyüklükleri Ölçme

Uygulama da kullanılan ivme sensörü sayesinde X-Y ve Z eksenlerinde oluşan ivme büyüklükleri ölçülerek matematiksel bağlantılardan yararlanarak yol hız ve ivmeye dair fiziksel büyüklükler ölçülebilir.

İvme hız ilişkisi;

$$V(t) = \int a(t).dt + V_0 \quad (1)$$

Hız yol ilişkisi;

$$x(t) = \int V(t).dt + x_0 \quad (2)$$

İvme hız ve alınan yolun sürekli ifadeler olmasına karşın sensörden alınan veriler ayrıklaştırıldığı için bu işlemleri ayrı olarak gerçekleştirmek gerekmektedir. Bu durumda sayısal integralden kaynaklanan hatalar karşımıza çıkmaktadır. Eğer

ivme sensöründen alınan veriye göre yolu bulmaya çalışıyorsak iki kere integral alacağımız için (1) nolu denklemdeki hata toplanarak (2) nolu denklemde karşımıza çıkmaktadır.

Sayısal integral için (3) nolu denklemdeki gibi trapezoidal sayısal integral yöntemi kullanıldığında;

$$\int_{x_0}^{x_1} f(x)dx \approx \frac{h}{2}(f(x_0) + f(x_1)) \quad (3)$$

Sayısal olarak örnekler uzayında;

$$y[n] = \frac{T_s}{2} \sum_{N} x[n-1] + x[n] \quad (4)$$

$$y[n] = \frac{T_s}{2} \left(\frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \right) \quad (5)$$

T_s örnekleme periyodunu ne kadar azaltabilirsek o kadar iyi integral sonucu elde ederiz. Bu durumda daha fazla hafıza daha hızlı bir ADC daha güçlü bir işlemci ve daha fazla güç tüketimi gereksimi ortaya çıkmaktadır.

İvme bilgisine bağlı olarak hız ve yol fiziksel büyüklüklerini doğru çıkara bilmek için;

- İvme sensöründen alınan verilere göre sistemin kendi kendini kalibre etmesi sağlanmalıdır.
- Alınan veriler sensörün kendi gürültüsünün sisteme olan etkisini azaltmak için sayısal olarak filitreleme yapmak gerekmektedir. Bunun için (6) nolu denklemdeki gibi ortalama alan bir çerçeve filitresi kullanılabilir. Bu filitreleme sonucunda gürültü azaltılmasına rağmen alınan işaretinde tepkiseliliğini çok düşüreceğinden bir gürültü çerçevesi de belirleyerek bu çerçevenin dışında kalan veriler işlenebilir.

$$y[n] = \frac{1}{N} \sum_0^k x[n-k] + y[n-1] \quad (6)$$

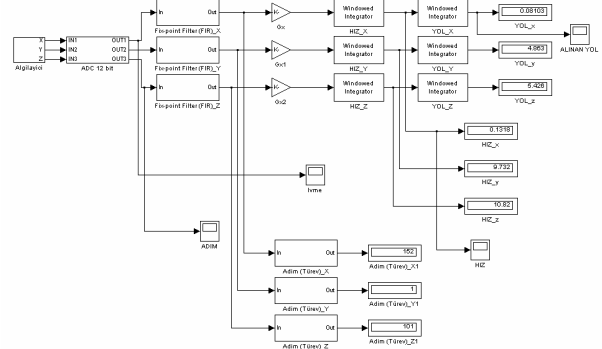
- Hareketin olmadığı durumu kestirmek ve bu duruma göre hız bilgisini sıfırlamak alınan yolu hesaplamak için yapılan integral hatasını azaltmaktadır. Bunun için hareketin olmadığı durumu kestiren bir bloğa ihtiyaç vardır. Kalibrasyon bilgisine göre hareketin olup olmadığını anlaşılabilir.
- Aynı zamanda ara değerlendirme de kullanarak integral hataları bir miktar azaltmak mümkündür.

3.1.1. FFT Kullanarak Sarsıntı Frekansını Belirleme

FFT işlemini gerçekleştirmek için Radix-2 128 Point Cooley-Tukey kütüphanesi kullanılmış ve Q.14 formatında Fixed-Point olarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan sensörün 350Hz frekans tepkisi olduğu düşünüldüğünde yaklaşık 5Hz çözünürlükle hangi frekans da salınımın olduğu gözlenebilir.

3.2. İvme Sensörü Matematiksel Benzetimi

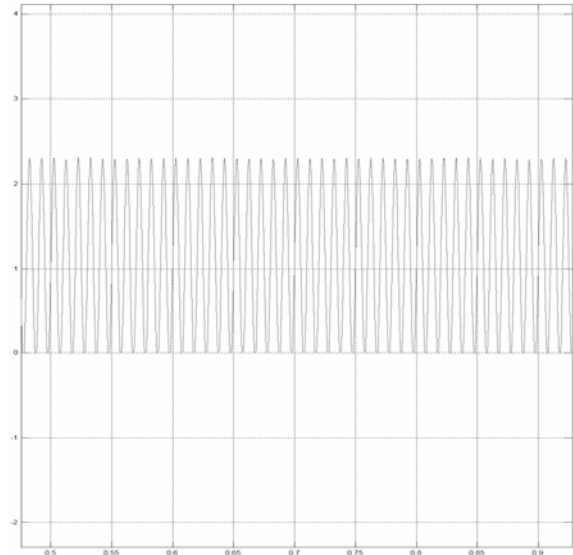
Matlab kullanılarak yapılan benzetim sonucunda yürüyen bir kişinin üstüne yerleştirilen ivme sensörü sayesinde ne kadar yol aldığı ve kaç adım attığını saptamak mümkündür. X eksenini ilerlediği yolu Z yönü yere dik olan eksenini göstermektedir. Bunun için Şekil 4’de verilen blok şema kullanılmış ve sonuçları gözlenmiştir. Yapılan benzetim de Q.14 formatında fix point aritmetik kullanılmıştır.



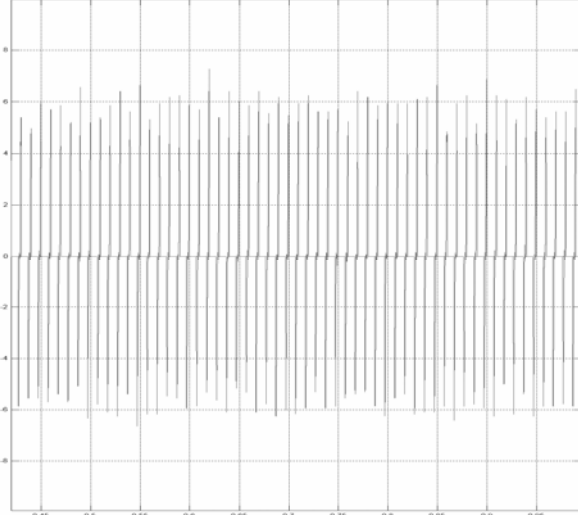
Şekil 4: Matlab kullanılarak yapılan simulasyon blok şeması

Şekil 5’de adım atıldığında ortaya çıkan ivme değişiminden yola çıkarak Şekil 6’da türevi alınmış işaret elde edilir. Bu işarete göre bir eşik belirlenerek belirlenen eşığe göre adım atılıp atılmadığına karar verilir. Şekil 7’de hızın değişimi ve Şekil 8’de X yönünde alınan toplam yolu vermektedir.

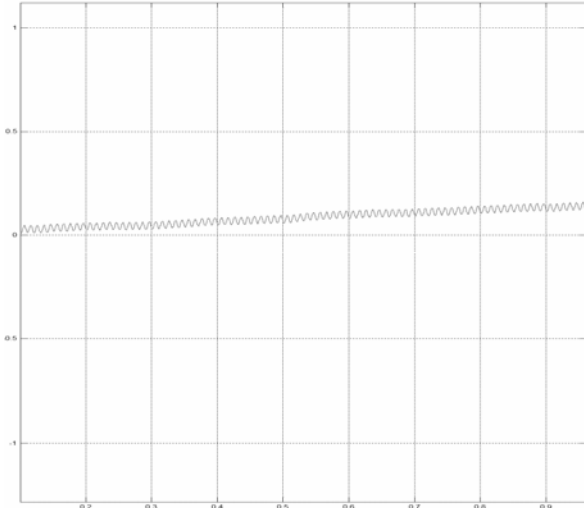
Türev alınarak yapılan adım sayma işleminde adım atma hızı ve ivme işaretinin genliğine göre yanlışlık yapabilmektedir. Bunun üzerine yapılan çalışmalar devam etmektedir. Bunun yerine sarsıntı frekansını algılamak için kullanılan FFT sayesinde adım sayma işlemi yapılmaya çalışılmaktadır.



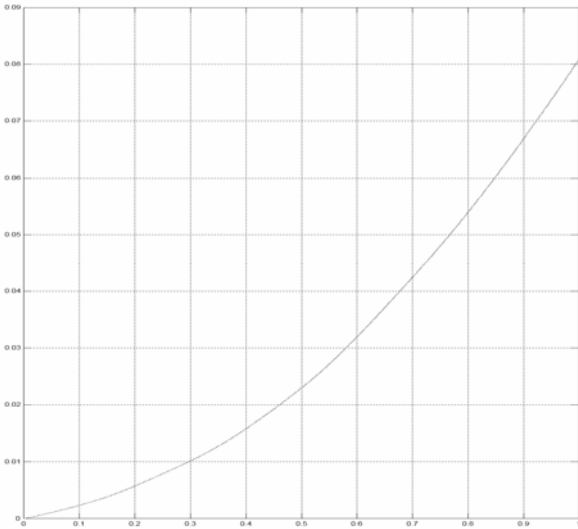
Şekil 5: Adım atıldığında oluşan ivme işareti



Şekil 6: Adım atmaya algılamak için alınan türevin çıktısı



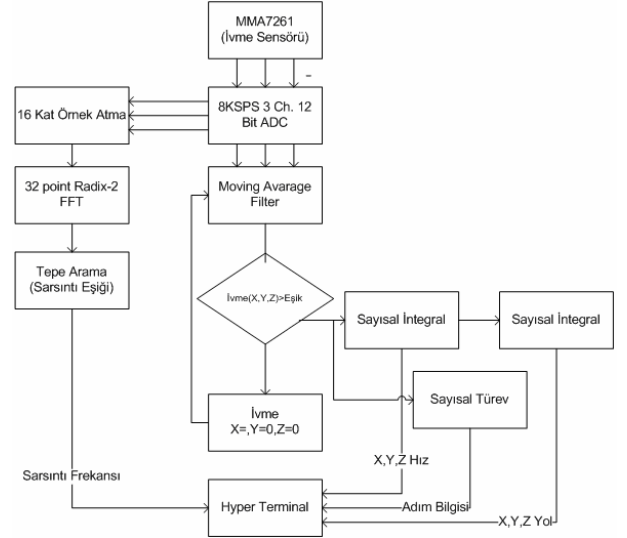
Şekil 7: Yürürken hızın değişimi



Şekil 8: Alınan toplam yol

3.3. DeneY Donanımı

DeneY donanımı olarak; Analog Devices firmasına ait ADuC7020 minikiti kullanılmış ve bunun yanına bir kart olarak ivme sensörü eklenmiştir. Sonuçlar işlemcinin seri portu üzerindeki bilgisayara aktarılmış ve çıktılar gözlenmiştir. FFT alırken gerekli olan hafıza ihtiyacını sağlayabilmek, uygulama iki ayrı alt programa bölünmüş ve deneyler bu şekilde yapılmıştır. MCU üzerinde gerçekleştirilen yazılımda sonuçların güvenilirliğini sağlamak için kayan noktalı aritmetik kullanılmış fakat işlemcinin üzerindeki işlem yükünden dolayı istenilen hızda hesaplamalar gerçekleştirilememiştir. Sabit noktalı aritmetik kullanılarak işlem hızı artırılabilir fakat bunun sonucunda doğan hatalar ve hız ve zamanı bulmak için kullanılan integrallerden kaynaklanan hatalar artarak sistemi kararsız hale getirebilir.



Şekil 8: ADuC7020 mcu'ı üzerinde geliştirilen kodun algoritması

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Analog Devices firmasının ürettiği ADuC7020 ARM7-TDMI mcu ve Freescale'a ait MMA7261 ivme sensörü kullanılarak geliştirilen donanım üzerinde denemeler yapılmıştır ve uygulamayı geliştirmeye yönelik yapılan çalışmalara değinilmiştir. İvme sensörü kullanılarak; hız, yol ve sensörün tepkiselliğine bağlı olarak titreşim ölçme yöntemlerine değinilmiş ve medikal bir uygulama olarak adım sayıcı işleminin nasıl yapılacağına dair bir çalışma örneği verilmiştir.

5. Kaynaklar

- [1] Seifert, K. ve Camacho, O. " Implementing Positioning Algorithms Using Accelerometers", Freescale Application Note AN3397, 2007
- [2] MMA7261QT datasheet
- [3] Tuck, K. "Tilt Sensing Using Linear Accelerometers", Freescale Application Note AN3461, 2007
- [4] ATMEL Application Note:121 "Enchanging ADC Resolution with oversampling", 2005
- [5] Winder, S. "Analog and Digital Filter Design", Newnes, 2002, CH-15