**AR-Ge Çalışması Rapor: Ataletsel Ölçü Birim**

**I**nertial**M**easurement**U**nit (**A**taletsel**Ö**lçü**B**irim), hareket halindeki bir cismin üstünde oluşan ivme (birim kütleye düşen kuvvet) ve dönme kuvvetini (dönüş hızı değişimi) 3 eksende ölçen sensörlerin genel ismidir. Bu sensör ayrıca manyetik alan yoğunluğunu da ölçüyor ise **MARG**-Magnetic, Angular Rate and Gravity sensör olarak adlandırılır. Bu verileri kullanarak, cismin konum ve hareketi hakkında bilgi sağlayan elektro-mekanik sistemler ise; **A**çısal **R**eferans **S**istemi (**AHRS** -Attitude and Heading Reference System) olarak bilinir.



BMX055 MARG sensörü kullanarak hazırladığımız OEM ürünümüz, (ayrıca) bluetooth modül ve (flash) bellek birimi de içermektedir.

Çalışmamız şu ana kadar; öncelikle know-how ve tasarım safhalarını geçirmiş olup, bunlara ilave olarak, gömülü kodlama, prototip geliştirme ve ardından kalibrasyonlar, sensör füsyonu ve real time (RT) data testleri ile geliştirme kiti (SDK) çalışmalarını içermiştir.

Bu kapsamdaki alt başlıklar ve bazı bulgular şöyledir:

**Accel/Gyro/Magno Calibrations,**

**Data Fusions: Madgwick-Mahony-Kalman...,**

**Gimbal Lock-compensation,**

**Tilt-compensation,**

**Angular Random Walk-Gyro Drift Elimination,**

**Linear Acceleration Elimination,**

**Fine Tuning…**

**1-Accel/Gyro/Magno Calibrations:** IMU-MARG sensör ölçümlerinin doğruluğu birçok parametreden etkilenmekte olup özellikle magnetometer kalibrasyonu önem arz eder. Magnetometerde sensörü çevreleyen ferromanyetik bileşenlerin oluşturduğu hatalar **H**ard**I**ron/sert-demir ve **S**oft**I**ron/yumuşak-demir olarak adlandırılır ve bu bozulmalardan ilki manyetik alan verisinin orjinden sapmasına neden olurken, diğeri ideal-magno datasının küresel yapısının bozularak elipsoid hale gelmesine neden olur (MagCal-**H**ard**S**oft**I**ron Calibration).

Araştırmamızda, datalar gerçek ortamda RT-online ve Matlab ortamında offline olarak aynı şekilde HSI kompenzasyondan geçirilmiştir. Matlab ortamında magcal built-in fonksiyon dışında, manuel yöntemler (planar/min-max), ST firması tarafından geliştirilen kalibrasyon yöntemi … vb gibi bazı başka yöntemler denenmiştir. Gerçek zamanlı datalara MagCal-HSI uygulandığında genel olarak magnetometer datasının kalibre edildiği görülmüştür. Burada, magnetometre datasında elipsoitten küresele belirli ölçüde dönüş görülmüştür. Ancak, residual error gibi bazı metrikler ile kalibrasyon oranı/başarısı ölçeklendirildiğinde daha iyi kalibrasyon yöntemlerinin bulunabileceği/denenebileceği düşünülmektedir.

Ayrıca Magnetometer bozulması (distortion) ve kalibrasyon metriği/göstergesi için norm değer kullanılabilir. Bozulmamış bir Magno datasında normm değeri uniform olmalıdır. (Sabit ve bire eşit)

normm = sqrt((M\_xx.^2) + (M\_yy.^2) + (M\_zz.^2));

M\_xx = M\_xx./normm ; M\_yy = M\_yy./normm; M\_zz = M\_zz./normm;

Accelerometre ve Gyroscope verilerinin doğruluğu tam yönelim belirlemede kritik olup Gyroscope ile ilgili ayrıca önemli durum zaman içersinde gösterdiği sapmadır **(Angular Random Walk-Gyro Drift).** Bu nedenle kalibrasyonlar dışında ayrıca gyro-drift elimination yapılmalıdır.

(Built-in)  (Manuel)  (ST)

İleride, (hem magno hem de diğerleri -accel/gyro) datalarının kalibrasyonlarının (farklı yöntemler denerek) işlemci yükünü azaltarak yapılması araştırılacaktır. MagCal-HSI, gerçek (Magnetometre) sensör datasında x,y,z bileşenlerini orjine yaklaştırmıştır(-offset).

**2- Data Fusion-Madgwick Filter:**  Madgwick filtresi, Accel/Gyro/Magno datalarını birleştirerek doğru yönelim (euler-orientation) bilgisi sağlayan ve gyroscope datasında zamanla ortaya çıkan sapmayı (drift) elimine ettiği iddiasında olan bir algoritmadır. Burada x-io Technologies tarafından sağlanan filtre kodları incelenmiş ardından toplanan gerçek (RT) datalar bu Madgwick filtresinden geçirilmiştir. (Some both in Matlab/C#..)

Elde ettiğimiz sonuçlar, Madgwick filtresinde Beta parametresinin kritik olduğunu göstermiştir. Gradient-descent algoritmasının benimsendiği Madgwick yaklaşımında, beta 0’a yakın değerler (0.001 optimal değer) aldığında gyro datasının ağırlık kazandığı ve accel-magno datasının etkisinin azaltıldığı görülmüştür. Bu noktada, Madgwick çıkışlı Euler açılarında (ve özellikle daha önceleri sorun olan yaw açısında) pattern olarak gerçek değerlere yakın sonuçlar alınmıştır.

MagCal-HSI kalibre işlemi Madgwick filtresi öncesinda uygulandığında, filtre çıkışında alınan Euler açılarında 1-2 derece kadar iyileştirme görülmüştür.

Bunlar dışında eksen tanımlamaları (conventions), örnekleme frekansı, (MagCal-HSI’da) bias-scale-cross axis alignment faktörleri (manuel hesaplamalar), Madgwick filtre sonuçlarına etkisi bakımından farklı data testleri (matlab dataları, bizim RT datalarımız, internetten diğer datalar) ile incelenmiştir.

+quaternion\_library

**3- Gimbal Lock/ Tilt-compensation:** Yaptığımız gerçek zamanlı testlerimizde (RT imu c# ), pitch +-90 derecelere doğru giderken roll ve özellikle yaw açıları önemli ölçüde sapma yaşamakta/bozulmaktadır Bu durum kısmen Matlab ortamında da görülmekte olup 2 farklı problemi işaret eder. Gimbal lock (kilit), pitch= +-90 derecede bir eksen serbestlik derecesinin/bilgisinin kaybolması nedeniyle yaşanır.

Madgwick yapısında quaternion gösterimi esas alınmasına rağmen eulere geçişten dolayı sorun yaşanmaktadır:

phi = atan2(2.\*(q(:,3).\*q(:,4)+q(:,1).\*q(:,2)),1-2.\*(q(:,1).^2+q(:,2).^2));

theta = asin(2.\*(q(:,1).\*q(:,3)-q(:,2).\*q(:,4)));

psi = atan2(2.\*(q(:,1).\*q(:,4)+q(:,2).\*q(:,3)),1-2.\*(q(:,3).^2+q(:,4).^2));

Madgwick çıkışındaki Quaternion-Euler dönüşümleri yapıldığında pitch= +-90 ‘de psi = atan() tanımsızlığa gitmektedir.

Yapılan diğer çalışmalar gibi bizim RT datalarımız, AHRS yönelim çıktılarının tilt hareketlerinden de etkilendiğini ortaya koymuştur. 0’dan (level) başlayarak +-90 dereceye yakın pitch açıları için roll (phi) ve özellikle yaw (psi) açısı bozulmaktadır.

Tilt ve gimbal lock compensation çözüm önerileri kapsamında toplanan datada, filtre ve kalibre işlemlerinin ardından önce pan/bank hesaplanmış;

Roll = atan2( (ACC(:,2)), sqrt((ACC(:,1).^2) + (ACC(:,3).^2))) ;

Pitch = atan2(-1\*(ACC(:,1)), sqrt((ACC(:,2).^2) + (ACC(:,3).^2))) ;

Ardından compensated yaw şu formüllerle bulunmuştur.

Xh = M\_xx .\* cos(Pitch) + M\_zz .\* sin(Pitch);

Yh = M\_xx .\* sin(Roll) .\* sin(Pitch) + M\_yy .\* cos(Roll) - M\_zz .\* sin(Roll) .\* cos(Pitch);

y2 = atan2(Yh,Xh) \* 180/pi;

Gimbal lock-singularite giderilmesi için ise yaw açısını süreksizliğe götüren pozitif değerlerden 360 derece çıkarılmıştır.

for i=1:7485

if(y2(i)>0)

y2(i)=y2(i)-360;

end

end



Şekilde görüldüğü gibi 90’ar derece roll-pitch-yaw hareketleri (XYZ) verilerek teste sokulan AHRS, genel olarak doğru eksenlerde, doğru sıralamada yönelim açıları sağlamış ancak (özellikle 12-14sn) tilt bozulmasına maruz kalmıştır.

Matlab ortamında da karşılaşılan tilt ve gimbal lock bozulması durumları aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi çözümlenmiş olup ilgili kodlar ise şöyledir:





Diğer/başka öneriler:quaternion gösterimde kalarak euler dönüşümlerini LUT yaklaşımı ile gerçekleştirme, farklı quat2euler formülleri kullanma/geliştirme (roll, yaw açıları dönüşüm formüllerinde atan yerine asin) .. olabilir.

Denenmiş ancak sonuç alınamamış bazı kodlar aşağıdadır.



**(İlgili diğer kodlar, datalar için bkz.** **https://github.com/eroloptoel/IMU\_signal\_operations )**

**Future Works:** Tek eksenli farklı (adet/marka) ataletsel sensörlerin kullanımı denenebilir???

Daha fazla (i.e.8) BT modül içeren uygulamalar, farklı RT trajectories&Datasets … vs

**Road Map:** Reference Sensor, Calibration Setup, Filters:Kalman.., Fine Tuning …etc

**Diğer Bulgular:**

BMX055 çıkışlarının kablolu iletimi gerçekleştirilmiş, önemli bir fark gözlenmemiştir. (Daha detaylı incelemeler yapılabilir.)

BMX055 içinde (gömülü) Accelerometre kalibrasyonu yapılmış, yönelim açılarında (euler) 1-2 derecelik iyileşmeler gözlenmiştir. (Gyro, Magno gömülü kalibrasyonları gibi daha detaylı incelemeler yapılabilir.)