

YERÜSTÜ KOMPLEKSLƏR, UÇAN APARATLAR VƏ ONLARIN SİSTEMLƏRİNİN İSTİSMARI

UOT: 629.7.054

DOI: 10.34826/NAA.2022.24.3.002

MİKROELEKTROMEXANİKİ İNERSİAL ÖLÇÜ MODULLARININ TƏDQIQI

Nəbiyev R.N., Məmmədov A.Z., Əliyev O.O.

Milli Aviasiya Akademiyası

Məqalədə MPU-9250 və MPU-6050 mikroelektromexaniki inersial ölçü modulları tədqiq edilmişdir. İnersial ölçü modullarının mikrokontrollerə qoşulmasının funksional və prinsipial elektrik sxemləri işlənmişdir. Yaradılmış stend qurğusu vasitəsilə modulların kalibr-lənmə edilmədən və kalibr-lənmə edildikdən sonrakı praktiki ölçmələrin nəticələri əldə edilmişdir. Əldə edilmiş nəticələrə əsasən sensorların kalibr-lənməsinin zəruriliyi aşkar edilmiş və yazılmış Kalman süzgəç algoritmi ilə kalibr-ləmə aparılaraq dəqiqlik yüksəldilmişdir.

Açar sözlər: inersial ölçü modulu, giroskop, akselerometr, mikroelektromexaniki sistem, kren, tanqaj, vurnuxma, təcil.

Uçuş aparatlarının (UA) fəzada əsas oxları istiqamətində təcilin və bucaq sürətinin qiymətləndirilməsi və həmçinin uçuş istiqamətinin təyini uçuş rejimini səciyyələndirən çox mühüm parametrlərdən biridir. Məlum olduğu kimi [1], uçuş parametrlərinin hesablanması üçün inersial naviqasiya sistemindən (İNS) istifadə edilir. İNS-in əsas funksiyası UA-nın fəza koordinat sistemində təcilin və bucaq sürətlərinin ölçülməsi və integrallanması əsasında onun koordinat-larının, sürətinin və eləcə də kren, tanqaj və vurnuxma bucaqları haqqında informasiyanı hesablayıb lazımi sistemlərə ötürməkdir. Belə məlumatlar son illərdə avtonom nəqliyyat idarəetmə sistem-lərində işlənərək tətbiq olunduqda uğurlu nəticələr əldə etməyə imkan verir. Buna misal olaraq, limanlarda yük daşıyan avtonom nəqliyyat vasitələrinin istiqamətinin müəyyən edilməsi, müxtəlif məqsədlər üçün sualtı qayıqları tədqiq etmək qabiliyyətinə malik pilotsuz nəqliyyat vasitələrinin uğurla istifadə edilməsi, şəhər və şəhərlərarası nəqliyyatda pilotsuz hərəkət edə bilən avtonom nəq-liyyat vasitələrinin yaradılması və ya bomba məhv edən robotların hazırlanması göstərilə bilər [2].

Son illərdə sürətli inkişaf edən mikroelektromexaniki sistemlər (MEMS) - sensorlu inersial ölçü modulları (İÖM) vasitəsilə hazırlanmış İNS artıq quru və hava nəqliyyatı vasitələrinin, raketlərin naviqasiya və idarəetmə sistemlərində geniş istifadə olunur [3]. Xüsusilə, MEMS əsaslı İÖM qabaqcıl MEMS istehsal texnologiyasının təklif etdiyi aşağı qiymətə, az enerji sərfinə və kiçik ölçülərinə görə pilotsuz uçuş aparatlarında (PUA) və robototexnikada tətbiqi mühüm əhəmiyyət kəsb edir. MEMS əsaslı İÖM ənənəvi optik lifli və ya lazer giroskopu əsaslı İÖM ilə müqayisədə həcm və qiymətində azalma əldə etsə də, daha çox qeyri-xətti və ya təsadüfi xətlərlə üzləşir ki, bu da MEMS İNS-də naviqasiya həllərinin zamanla kəskin şəkildə fərqlənməsinə səbəb olur [4].

Hal-hazırda yüngül və ifratyüngül pilotsuz uçuş aparatlarının (PUA) kütləvi istehsalı və tətbiqi inersial naviqasiya sistemlərinə qoyulan kütlə-qabarit tələblərini sərtləşdirir ki, bu da ənənəvi İNS-lərin tətbiqini mümkünsüz edir. Son dövrlərdə dronlara olan tələbatın kəskin artması bu istiqamətdə tədqiqatların genişlənməsinə və dərinləşməsinə səbəb olmuşdur. Bu növ aparatlar üçün mümkün qədər yüngül, kiçik həcmli və dəqiq idarəetməni təmin edən peyk-inersial naviqasiya sistemlərinin işlənməsi və tətbiqi xüsusilə əhəmiyyətlidir. Beləliklə, apardığımız tədqiqat işləri yüngül və ifratyüngül uçuş aparatları üçün yeni nəsil naviqasiya sistemlərinin texniki para-metrlərinin müəyyənəşdirilməsi və işlənməsi baxımından olduqca aktualdır.

Tədqiqatın məqsədi kiçikölçülü uçuş aparatlarının fəzada səmtlənməsinə təyin edən MEMS əsaslı İÖM-lərin Arduino platformasında quraşdırılması və onun tətbiqi ilə praktiki ölçmələr zamanı alınmış nəticələrin təhlilindən və qiymətləndirilməsindən ibarətdir.

Tərkibində giroskop, akselerometr və maqnitometr olan MEMS əsaslı İÖM-lar tədricən artan dəqiqliyi, kiçik ölçüsü və aşağı qiymətinə görə mövqe və naviqasiya parametrlərinin ölçülməsində geniş şəkildə istifadə edilməkdədir. Bununla belə, MEMS əsaslı İÖM-lərdə müxtəlif qeyri-xətti xətlər olduğundan MEMS əsaslı avtonom İNS-in xətləri zamanla əhəmiyyətli dərəcədə artır. Buna görə də, MEMS İNS vasitəsilə etibarlı naviqasiya həllərini təmin etmək üçün İÖM kalibrlənərək Qlobal Peyk Naviqasiya Sistemi (GPS) ilə inteqrasiya olunur.

İÖM komponentlərindəki (giroskoplar və akselerometrlər) xətlərdən dolayı mövqeyi tam mükəmməl göstərə bilmir. Həmin xətlər müəyyən edilən mövqedəki xətlərin vaxt keçdikcə daha da artmasına səbəb olur. Qısamüddətli uçuşlar edən nəqliyyat vasitələrində isə bu xətlər qəbul edilə bilər. Daha uzunmüddətli tapşırıqları yerinə yetirmək üçün, əsasən İNS-in səbəb olduğu xətlərin mümkün olduqca sıfıra yaxın olaraq, azaldılması üçün naviqasiya sisteminə korreksiyaedici dövrü tədbirlər görülməsi lazımdır. Bu səbəbdən, naviqasiya sistemlərində məlumatların emalı üçün xətlərin azaldılması üçün süzgəclənməsinin mürəkkəb alqoritmləri, eləcə də, sensorların kalibrlənməsi üçün alqoritmlər tətbiq edilir [5].

Bu gün müxtəlif qiymətlər üzrə, müxtəlif xüsusiyyətli inersial sensorların və modulların çoxsaylı seçimi vardır. Hazırda bir çox firmalar [6-9] giroskopları, akselerometrləri, hətta maqnitometrləri, temperatur sensorlarını və barometrləri özündə birləşdirən inersial ölçü modulları istehsal edirlər. İÖM-ları istehsal edən STMicroelectronics, InvenSense, Analog Devices, Honeywell, XSens, Teknol və s. kimi lider şirkətlərdir. Bu növ sensorların və onların əsasında olan İÖM-lərin dəqiqliyini artırmaq üçün uyğun kalibrlənmə proseduru etmək lazım gəlir.

Daha əvvəl apardığımız tədqiqatlara əsasən [3] PUA-larda tətbiq edilə bilən kifayət qədər dəqiqlikli inersial ölçü sisteminin yaradılması üçün münasib parametrlərə malik InvenSense firmasının istehsal etdiyi 3x3x1 mm qabarit ölçülü üçoxlu giroskop, akselerometr və maqnitometrə malik MPU-9255 və 4x4x0.9 mm qabarit ölçülü üçoxlu giroskop və akselerometrə malik olan MPU-6050 MEMS sensorlarının istifadəsinin daha məqsəduyğunluğunu müəyyənləşdirmişdik. Hal-hazırda MEMS inersial sensorların yaradılması ilə lider kompaniya olan InvenSense şirkəti [9] özündə maqnit kompası yerləşdirməklə (MPU-91xx və MPU-92xx) 9 oxa qədər MPU-ları (Motion Processing Units) istehsal edir.

Tədqiqatda InvenSense firmasının istehsal etdiyi üçoxlu giroskop və üçoxlu akselerometrə malik MPU-6050 və üçoxlu giroskop, üçoxlu akselerometr və üçoxlu maqnitometrə malik MPU-9250 inersial ölçü modullarından istifadə olunmuşdur. Bu modulların ən başlıca üstünlüyü onun aşağı dəyərdə nisbətən yüksək xarakteristikaları təmin etməsidir.

Üçoxlu giroskop, üçoxlu akselerometr və temperatur sensoruna malik MPU-6050 tipli modul X, Y və Z oxları istiqamətində meyl bucaqlarını aşkar etmək üçün nəzərdə tutulmuşdur. Modulun qida gərginliyi 3.3-5V, akselerometrin ölçmə diapazonu $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ və $\pm 16g$, giroskopun ölçü diapazonu isə ± 250 , ± 500 , ± 1000 və ± 2000 $^{\circ}/\text{san}$ -dir. Modulu düz səth üzərinə qoyduqda X və Y oxunda $0g$, Z oxunda isə $+1g$ ölçəcəkdir.

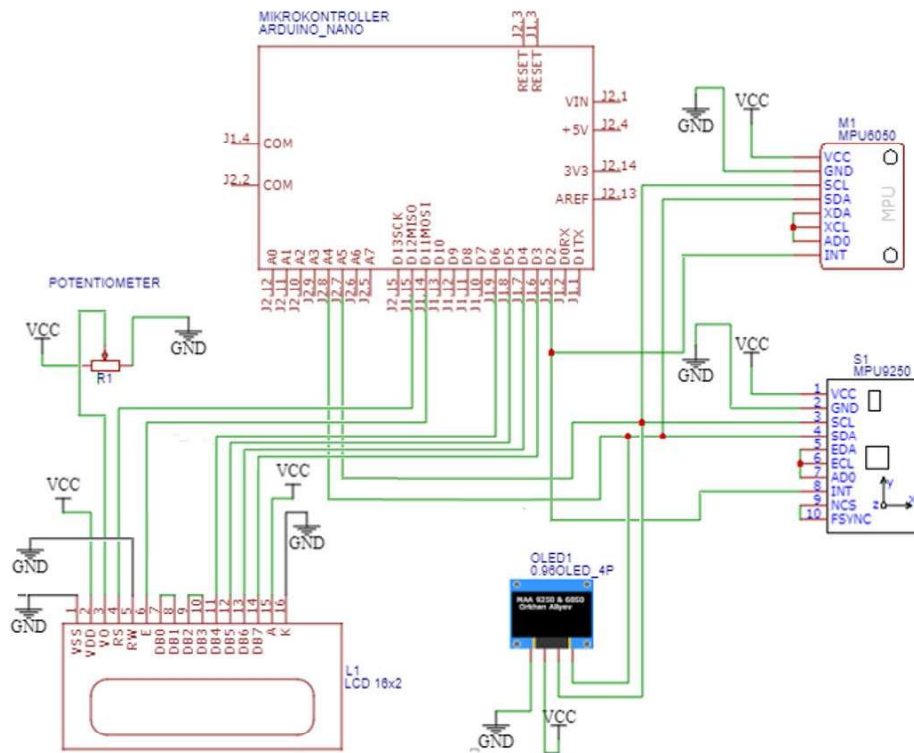
Tədqiqatda istifadə edilən digər bir modul isə InvenSense kompaniyasının ikinci nəslinin ən miniatur doqquz parametmə malik MPU – 9250-dir. Mikrosxemin gövdəsində iki kristal birləşmişdir. Bir kristalda üçoxlu giroskop, üçoxlu akselerometr və ikinci kristalda isə üçoxlu maqnitometr yerləşdirilmişdir. Buna əsasən MPU-9250 doqquz parametmə malik izləyici (Motion Tracking) modulunu özündə təcəssüm etdirir.

MPU-9250 modulun qida gərginliyi 3-5V, interfeysi I²C (400kHz)/SPI (1 MHz), akselerometrin ölçü diapazonları $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ və $\pm 16g$, giroskopun ölçü diapazonları ± 250 , ± 500 , ± 1000 və ± 2000 $^{\circ}/\text{san}$, maqnitometrin tam miqyaslı diapazonu ± 4800 μT , ölçüsü 15x25mm-dir. Bundan başqa, MPU-9250 modulunun I²C köməkçi portu təzyiq sensorları kimi bir neçə qeyri-inersial rəqəmsal sensorların qoşulması üçün nəzərdə tutulmuşdur. MPU-9250 modulunda giroskopun, akselerometrin və maqnitometrin çıxış məlumatlarının rəqəmlə göstərilməsi ümumilikdə doqquz 16 bitli analoq-rəqəm çeviricisi (ARÇ) istifadə edilmişdir. Sensorlardan alınan məlumatlar 16 bitlik ARÇ-də rəqəmsallaşdırılır, DMP (Digital Motion Processor) signal prosessoru vasitəsilə hərəkətlərin birləşdirilməsi (Motion Fusion) alqoritmləri istifadə edilərək işlənir və I²C/SPI şin

interfeysi vasitəsilə xarici mikrokontrollerə ötürülür. Motion Fusion alqoritmləri bütün daxili sensorlarla işləyir və tam məlumat toplayır [10]. Bundan başqa, modulda əlavə olaraq proqramlaşdırılan rəqəmsal süzgəc və temperatur sensoru da yerləşdirilmişdir. Qurğunun bütün registrləri ilə əlaqə ya 400kHs-li I²C-dən, ya da 1MHs-li SPI-dən istifadə etməklə yerinə yetirilir.

Tədqiqatın aparılması üçün İÖM-ların mikrokontrollerə və displayə qoşulmasının montaj sxemi işlənmişdir. Verilmiş sxemdə maket lövhəsi üzərində ilkin qoşulma strukturuna uyğun olaraq, “beyin” funksiyasını yerinə yetirən mikrokontroller və digər intellektual sensorların hər biri ilk maket lövhəsi üzərinə əlavə olunaraq, şinlər vasitəsi ilə rəqəmsal pinlərə uyğun protokollar üzrə qoşulmuşdur. İlk təcrübə sxem kimi nəzərə alınan maket lövhəsi üzərində dəşikli sütun və sətirlərə müvafiq strukturda pinlər təyin edilmişdir.

Bundan əlavə, EasyEda online proqramından istifadə edilərək inersial ölçü modullarının mikrokontrollerə qoşulmasının prinsipal elektrik sxemi qurulmuşdur (şəkil 1).

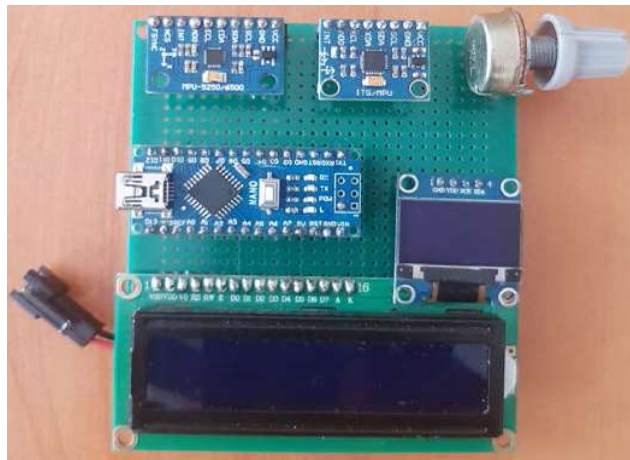


Şəkil 1. İÖM-ların mikrokontrollerə və displayə qoşulmasının prinsipal elektrik sxemi

Verilmiş sxemdə MPU-6050 və MPU-9250 modullarından gələn məlumatları emal etmək üçün mikrokontroller kimi Arduino Nano platformasından, emal olunmuş qiymətləri göstərmək üçün isə LCD və Oled displayləri istifadə olunmuşdur. Funksional sxemdə Atmel firmasının Atmega328 markalı mikrokontrollerli Arduino Nano lövhəsindən istifadə edilmişdir. O, 14 rəqəmsal giriş/çıxış pininə (6 pin PWM çıxışı kimi istifadə edilə bilər), 8 analoq girişə, 16MHs kristala, USB yuvasına, ICSP konnektoruna və sıfırlama düyməsinə malikdir. O, adapter və ya batareya ilə təchiz edilmiş USB kabel vasitəsilə kompüterə qoşula bilər. Proqramları yükləmək və kompüterlə əlaqə qurmaq üçün FTDI FT232 USB-serial çeviricisi də əlavə edilmişdir.

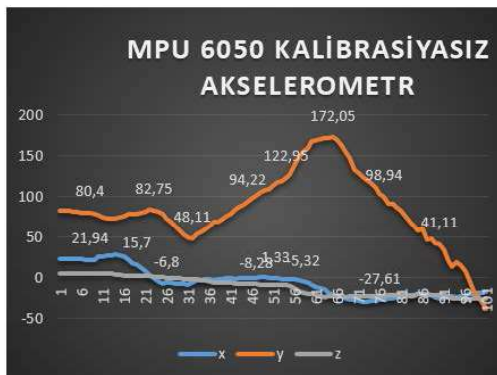
Sxemdə istifadə olunan Oled ekran, MPU-9250 və MPU-6050 modulları I²C protokolundan istifadə etdiyi üçün, hər biri mikrokontrollerin A4 və A5 analoq girişlərinə qoşulmuşdur. LCD 16x2 yəni, 16 sətir 2 sütun məlumat əks etdirə bilən ekran 6 digital d7, d6, d5, d4, e, rs çıxış ilə müvafiq olaraq kontrollerin d2, d3, d4, d5, d11, d12 girişlərinə daxil edilmişdir.

Şəkil 2-də inersial ölçü modullarının tədqiqi üçün şəkil 1-də verilmiş sxem əsasında yığılmış stend qurğunun xarici görünüşü göstərilmişdir. Tədqiqat aparılmasında ilk öncə MPU-6050 modulu qoşulduqdan sonra kalibrasiyasız və kalibrasiyalı ölçmələrin nəticələri əldə edilmişdir.

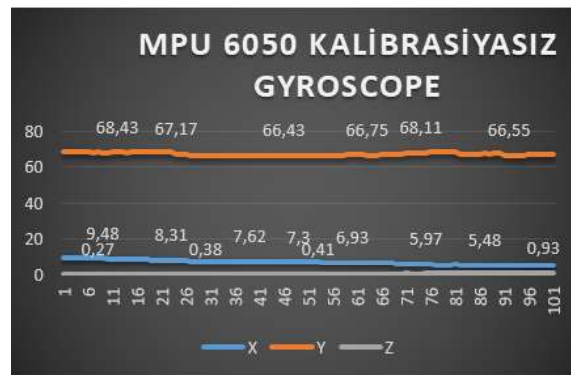


Şəkil 2. Stend qurğu

Yazılmış kodu mikrokontrollərə yüklədikdən sonra MPU-6050 modulunda kalibrlənmə edilmədən akselerometr və giroskopun çıxış qiymətlərinin zaman diaqramları şəkil 3 və şəkil 4-də göstərildiyi kimi alınmışdır.



Şəkil 3. MPU-6050 modulunda akselerometrin X,Y, Z oxları üzrə kalibrlənməmiş xarakteristikası

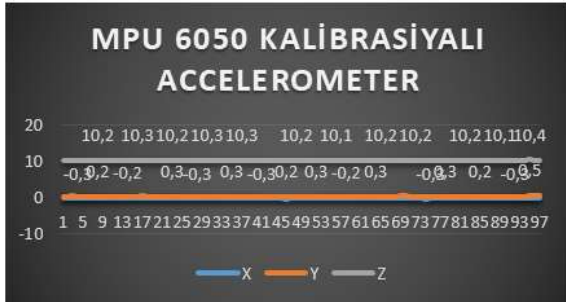


Şəkil 4. MPU-6050 modulunda giroskopun X,Y, Z oxları üzrə kalibrlənməmiş xarakteristikası

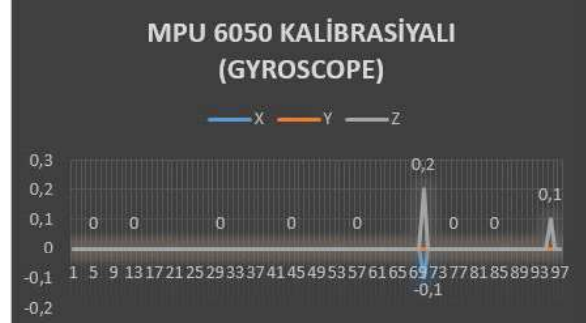
Xarakteristikalardan göründüyü kimi giroskopun və akselerometrin çıxış qiymətləri zaman oxu X və Z oxları üzrə getdikcə azalır, Y oxu üzrə isə çıxış signalının qiymətinin əvvəlcə zəif azalması, sonra yüksək templo artması və axırda yenidən eyni templo azalması müşahidə olunur. Daha stabil və dəqiq çıxış siqnallarının əldə edilməsi üçün modulun kalibrlənməsi tələb olunur. Bunun üçün modulda BasicAHRS [11] kalibrasiya kodundan istifadə edilmişdir. Şəkil 5-də və şəkil 6-da MPU-6050 modulunda giroskopun və akselerometrin X,Y və Z oxları üzrə kalibrlənmiş xarakteristikası verilmişdir.

Aparılmış praktiki ölçmə nəticələrinə əsasən modulun kalibrlənmə edilmədən akselerometrin qiymətlərinin X oxu üzrə orta sürüşməsi 0.0872 m/san^2 , Y oxu üzrə 0.06 m/san^2 , Z oxu üzrə 0.277 m/san^2 , kalibrasiya edildikdən sonra X oxu üzrə orta sürüşmə qiyməti 0.04 m/san^2 (4.7 mg), Y oxu üzrə 0.026 m/san^2 (2.65 mg), Z oxu üzrə 0.038 m/san^2 (3.87 mg) olması müəyyən edilmişdir ki, bu da kalibrlənmə nəticəsində 46% yaxşılaşma deməkdir. Giroskopun çıxış siqnallarında isə kalibrlənmə edilmədən giroskopun X oxu üzrə orta sürüşməsi 0.66 dər/dəq , Y oxu üzrə 1.88 dər/dəq , Z oxu üzrə 4 dər/dəq , kalibrlənmə edildikdən sonra X oxu üzrə orta sürüşmə

qiyməti 0.0040 dər/dəq, Y oxu üzrə 0.0038 dər/dəq, Z oxu üzrə 0.0065 dər/dəq olması müəyyənləşdirilmişdir, hansı ki, MPU-6050 modulun texniki xarakteristikasında [9] giroskopun sıfırının sürüşməsi ± 20 dər/san (± 1200 dər/dəq), akselerometrin sürüşməsinin isə X və Y oxları üzrə ± 50 mg, Z oxu üzrə ± 80 mg olması göstərilmişdir.

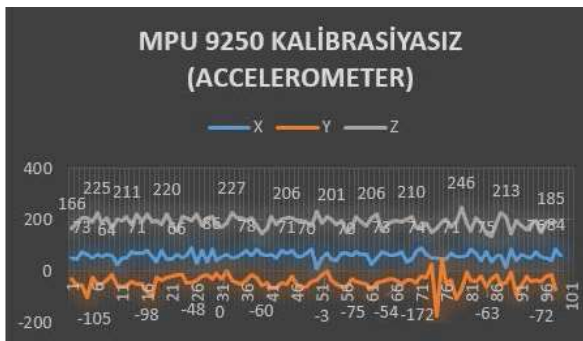


Şəkil 5. MPU-6050 modulunda akselerometrin X, Y, Z oxları üzrə kalibrlənmiş xarakteristikası

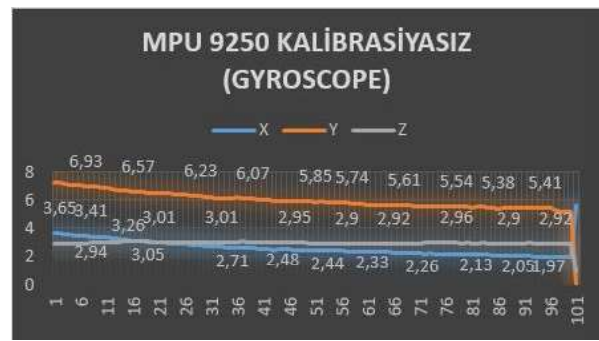


Şəkil 6. MPU-6050 modulunda giroskopun X, Y, Z oxları üzrə kalibrlənmiş xarakteristikası

Daha sonra, stendə MPU-9250 modulu qoşularaq kalibrlənmə olmadan ölçmə nəticələri əldə edilmişdir (şəkil 7 və şəkil 8).

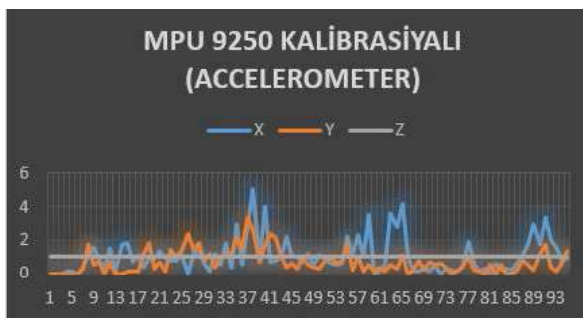


Şəkil 7. MPU-9250 modulunda akselerometrin X, Y, Z oxları üzrə kalibrlənməmiş xarakteristikası

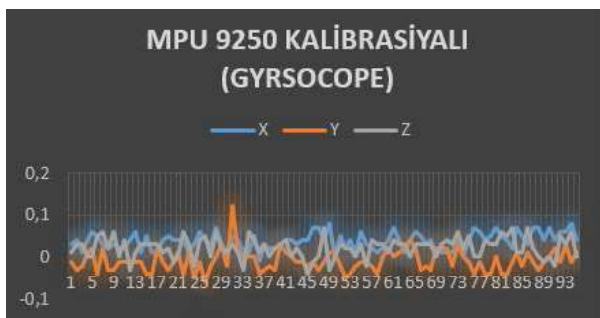


Şəkil 8. MPU-9250 modulunda giroskopun X, Y, Z oxları üzrə kalibrlənməmiş xarakteristikası

MPU-9250 modulundan alınan nəticələrə əsasən çıxış siqnallarının qeyri-stabil və qeyri-dəqiq olması aşkarlanmışdır. Bu səbəbdən modulu heç bir kalibrlənmə etmədən istifadəsi onun PUA-da tətbiqini əlverişsiz edəcəkdir. Modulu heç bir kalibrlənmə etmədən işlətsək və çıxış qiymətlərini oxumaq istəsək alacağımız nəticənin dəqiqliyi və stabilliyi də aşağı olacaqdır. Daha stabil və dəqiq çıxış siqnallarının əldə edilməsi üçün modulun kalibrlənməsi tələb olunur. Kalibrasiya kodundan istifadə edildikdən sonra modulun üç ox üzrə çıxış xarakteristikaları əldə edilmişdir (şəkil 9 və şəkil 10).

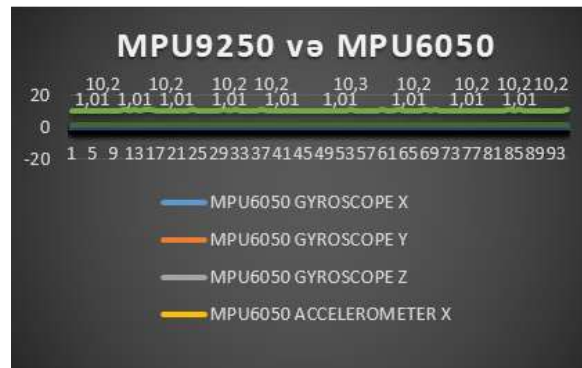


Şəkil 9. MPU-9250 modulunda akselerometr X, Y, Z oxları üzrə kalibrlənmiş xarakteristikası

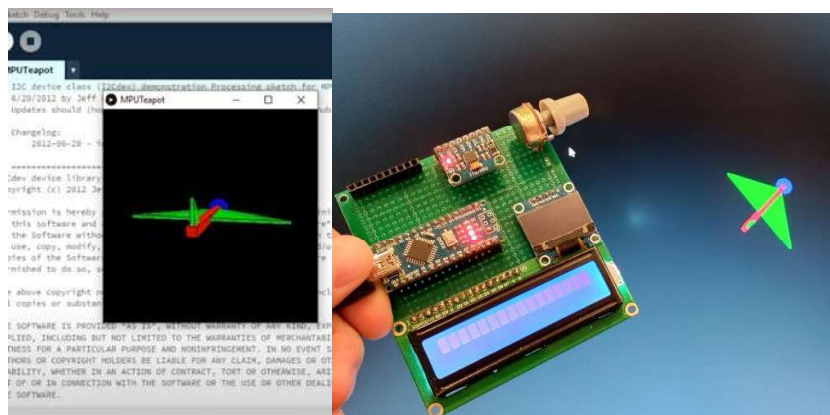


Şəkil 10. MPU-9250 modulunda giroskopun X, Y, Z oxları üzrə kalibrlənmiş xarakteristikası

MPU-6050 və MPU-9250 modullarının stend üzərində 1 saat müddətində aparılmış tədqiqat ölçmələri zamanı müqayisəli analiz nəticəsində alınmış xarakteristikadan aydın şəkildə göründüyü kimi hər iki inersial modulun kalibrlənmədən sonrakı çıxış qiymətlərinin zaman oxu üzərində bütün qiymətlərinin Accx, Accy, Accz, GyX, GyY, GyZ göstərilmiş hədlər daxilində sabit qəbul edilə bilər (şəkil 11).



Apardığımız tədqiqat zamanı modulların kalibrlənməsindən sonra alınmış nəticələrin simulyasiyası üçün Processing proqramından [12] istifadə etməklə 3D formatında qrafiki nəticələr əldə edilmişdir. Bu proqram vizual formatda kodlaşdırılmış qiymətləri göstərmək üçündür. Arduinoda yazdığımız (MPU-6050 və MPU-9250 aid) kodları Processing proqramına daxil edərək 3D formatında vizual ölçmə nəticələri əldə edilmişdir (şəkil 12).



12

Simulyasiyadan aydın olduğu kimi, kalibrlənmə edildikdən sonra hər üç ox üzrə bucaq vəziyyətlərinin dəyişməsinin daha stabil və hamar olması bizə bu modulların kiçikölçülü PUA-larda tətbiqinin mümkünlüyünü göstərir.

Nəticə. Yüngül və ifratyüngül uçuş aparatları üçün MEMS əsaslı İÖM-larının parametrləri müəyyənləşdirilmiş və inersial naviqasiya sisteminin idarə edilməsinin alqoritmi və proqram təminatı yaradılmışdır. Arduino platformasından istifadə edilərək modulun kalibrlənmə edilmədən və kalibrlənmə edildikdən sonrakı praktiki ölçmə nəticələri alınmışdır. Əldə edilmiş nəticələrə əsasən sensorların kalibrlənməsinin zəruriliyi aşkar edilmiş və yazılmış Kalman süzgəç alqoritmi ilə kalibrləmə aparılaraq dəqiqlik 46% və 26%-ə qədər yaxşılaşdırılmışdır. Aparılmış tədqiqat işlərinə əsasən kalibrlənmədən alınan nəticələr nəzərdən keçirilmiş modulun yüngül və ifrat yüngül uçuş aparatlarının integrasiya olunmuş naviqasiya sistemində istifadə edilməsini məqsədəuyğun hesab etmək olar.

ƏDƏBİYYAT

1. Bədəlov A.Z., Nəbiyev R.N., Məmmədov A.Z. Aviasiya cihazları və informasiya-ölçmə sistemləri. Dərslik, Bakı-2017, 382 səh.
2. Набиев Р.Н., Маммадов А.З. Модели построения инерциальной навигационной системы для беспилотных летательных аппаратов. Авиакосмическое приборостроение, Москва-2021, №1, стр.11.
3. Nəbiyev R.N., Məmmədov A.Z. Mikroelektromexaniki akselerometr və giroskopların parametrlərinin müqayisəli təhlili. Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri, Bakı-2018, №3, 14 səh.
4. Nəbiyev R.N., Məmmədov A.Z. Aerokosmik sahədə tətbiq edilən dairəvi lazer və optik-lifli giroskopların analizi. Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri, Bakı-2019, №3, 16 səh.
5. Aggarwal, P.; Syed, Z.; Niu, X.; El-Sheimy, N. A standard testing and calibration procedure for low cost MEMS inertial sensors and units. J. Navig. 2008, 61, 323–336.
6. <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lsm9ds1.html>
7. Motion Sensors | Bosch Sensortec (bosch-sensortec.com)
8. Sensors and MEMS | Analog Devices
9. <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking>
10. <http://www.innovationsinsightmag.com/articles/mems-datchiki-inercii-datchiki-dvizheniya-invinsense-2014-goda-giroskopiy-kombi-datchiki>
11. <https://codebender.cc/sketch:626593#MPU-9250%20Basic%20AHRS.ino>
12. <https://processing.org/>

REFERENCES

1. Badalov A.Z., Nabiyev R.N., Mammadov A.Z. Aviasiya cihazları ve informasiya-olchme sistemleri. Derslik, Bakı-2017, 382 seh.
2. Nabiev R.N., Mammadov A.Z. Modeli postroeniya inercialnoy navigacionnoy sistemi dilya bespilotnix letatelnix apparatov. Aviakosmiceskoe priborostroenie. Moskva 2021, №1, p.11.
3. Nabiyev R.N., Mammadov A.Z. Mikroelektromexaniki akselerometr ve giroskopların parametrlərinin muqayiseli tehlili. Azerbaycan Muhendislik Akademiyasinin Xeberlari, Baki-2018, №3, 14 seh.
4. Nabiyev R.N., Mammadov A.Z. Aerokosmik sahede tetbiq edilen dairevi lazer ve optik-lifli giroskopların analizi. Azerbaycan Muhendislik Akademiyasinin Xeberlari, Bakı-2019, №3, 16 seh.
5. Aggarwal, P.; Syed, Z.; Niu, X.; El-Sheimy, N. A standard testing and calibration procedure for low cost MEMS inertial sensors and units. J. Navig. 2008, 61, 323–336.
6. <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lsm9ds1.html>
7. Motion Sensors | Bosch Sensortec (bosch-sensortec.com)
8. Sensors and MEMS | Analog Devices
9. <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking>

10. <http://www.innovationsinsightmag.com/articles/mems-datchiki-inercii-datchiki-dvizheniya-invensense-2014-goda-giroskopiy-kombi-datchiki>
11. <https://codebender.cc/sketch:626593#MPU-9250%20Basic%20AHRS.ino>
12. <https://processing.org/>

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ

Набиев Р.Н., Мамедов А.З., Алиев О.О.

Национальная Академия Aviации

В статье исследованы микроэлектромеханические инерциальные измерительные модули MPU-9250 и MPU-6050. Разработаны функциональная и принципиальная электрические схемы подключения модулей инерциальных измерений к микроконтроллеру. Результаты практических измерений модулей без калибровки и после калибровки были получены с помощью созданного стендового устройства. На основании полученных результатов, выявлена необходимость калибровки датчика, а точность повышена за счет проведения калибровки с написанным алгоритмом фильтра Калмана.

Ключевые слова: инерциальный измерительный модуль, гироскоп, акселерометр, микроэлектромеханическая система, крен, тангаж, рыскание, ускорение.

RESEARCH OF MICROELECTROMECHANICAL INERTIAL MEASUREMENT MODULES

Nabiyev R.N., Mammadov A.Z., Aliyev O.O.

National Aviation Academy

The authors have investigated the microelectromechanical inertial measuring modules MPU-9250 and MPU-6050. Functional and principal electrical circuits for connecting modules of inertial measurements to the microcontroller were also developed. The results of practical measurements of modules without calibration and after calibration were obtained by using the created bench device. Based on the results obtained, the need for sensor calibration was identified, and the accuracy was improved by calibrating with the written Kalman filter algorithm.

Key words: inertial measurement module, gyroscope, accelerometer, microelectro-mechanical system, roll, pitch, yaw, acceleration.

Rəyçi: t.f.d., dos. T.İ. Kərimli

Müəlliflər haqqında məlumat

Soyadı, adı, atasının adı	İş yeri	Vəzifəsi, elmi dərəcəsi, elmi adı	Əlaqə
Nəbiyev Rasim Nəsim oğlu	Milli Aviasiya Akademiyası	Aviasiya elektronikaşı şöbəsinin rəisi, t.e.d., prof.	nabiyevrasim@gmail.com mob: (+994)55 754 76 46
Məmmədov Aftandil Zəkali oğlu	Milli Aviasiya Akademiyası	Aerokosmik cihazlar kafedrasının dosenti, t.f.d., dosent	aftandil855@mail.ru mob: (+994)70 686 08 18
Əliyev Orxan Oqtay oğlu	Milli Aviasiya Akademiyası	Magistr	orxan-aliyev99@mail.ru mob: (+994)50 724 66 81