



پایان نامه مقطع کارشناسی مهندسی برق - کنترل

## طراحی و پیاده سازی سرعت سنج پدال دوچرخه ثابت مبتنی بر

### داده های شتاب

ریحانه هادی پور ملاسرائی

استاد راهنما:

دکتر حمیدرضا تقی راد

استاد مشاور:

دکتر محمد مطهری فر

تابستان ۱۴۰۱

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

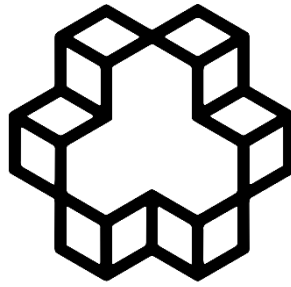
## تأییدیه هیئت داوران

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه/رساله خانم / آقای: ریحانه هادی پور ملاسرائی

را با عنوان: طراحی و پیاده سازی سرعت سنج پدال دوچرخه ثابت مبتنی بر داده های شتاب

از نظر شکل و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی تأیید می کنند.

امضا	رتبه علمی	نام و نام خانوادگی	اعضای هیئت داوران
	استاد	دکتر حمیدرضا تقی راد	۱- استاد راهنما
	استادیار	دکتر امیرحسین نیکوفرد	۲- استاد داور



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

## اظهارنامه دانشجو

اینجانب ریحانه هادی پور ملاسرائی دانشجوی مقطع کارشناسی رشته مهندسی برق گواهی می‌نمایم که مطالب ارائه شده در این پایان‌نامه با عنوان:

### طراحی و پیاده‌سازی سرعت‌سنج پدال دوچرخه ثابت مبتنی بر داده‌های شتاب

با راهنمایی استاد محترم دکتر حمیدرضا تقی راد توسط شخص اینجانب انجام شده است. صحت و اصالت مطالب نوشته شده در این پایان‌نامه تأیید می‌شود و در تدوین متن پروژه قالب مصوب دانشگاه را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ: شهریور ۱۴۰۱

## حق طبع، نشر و مالکیت نتایج

- ۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده و استاد راهنمای آن است. هرگونه تصویربرداری از کل یا بخشی از پروژه تنها با موافقت نویسنده یا استاد راهنما یا کتابخانه دانشکده‌های مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز است.
- ۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی است و بدون اجازه کتبی دانشگاه قابل واگذاری به شخص ثالث نیست.
- ۳- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود پروژه بدون ذکر مرجع مجاز نیست.

### **تقدیم به:**

تمام آن‌هایی که می‌خواستند بمانند و وطن را از نو بسازند، اما نشد.

## تشکر و قدردانی

همانا تنها لایق سپاس بی‌پایان خالق زیبایی‌هاست که در هر قدم از زندگانی همراه من بوده است و با قراردادن مسیرهای منتهی به یادگیری روزافزون بر سر راه من، مرا در مسیر تعالی شخصی و علمی همواره راهنما بوده است.

در اینجا لازم است از استاد گرامی جناب آقای دکتر حمیدرضا تقی راد و دکتر محمد مطهری فر که با صبر و بردباری بسیار مرا در انجام این پروژه با سعه‌صدر راهنمایی و ارشاد نموده‌اند تشکر و قدردانی نمایم و نهایت سپاسگزاری را از ایشان به عمل آورم.

از پدر و مادرم که در تمام سال‌های زندگانی برای هموار کردن مسیر تحصیلی اینجانب تلاش کردند سپاسگزارم.

همچنین از دوستانم در گروه رباتیک ارس، آقای مهندس خرم بخت، مهندس دین‌دارلو، مهندس حیدری، آقای ساکی و آقای پازانی که با راهنمایی‌ها و به اشتراک گذاشتن اطلاعات مفیدشان موجب پیشرفت این‌جانب شدند و علاقه‌مندی من به یادگیری را روزافزون می‌کردند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

## چکیده

این پروژه در راستای هدف استفاده از دوچرخه ثابت به منظور فعالیت‌های توان‌بخشی بیماران انجام شده است. ابتدا، سخت‌افزار مناسب مبتنی بر شتاب‌سنج‌های موجود در بازار طراحی و پیاده‌سازی شد. این سخت‌افزار شامل شتاب‌سنج وژیروسکوپ سه محوره و یک پردازنده دارای وای‌فای و بلوتوث داخلی است. پس از طراحی و ساخت برد با پیش‌پردازش داده‌های دریافتی شتاب وژیروسکوپ، داده‌های خام به داده‌های قابل استفاده در فیلتر کالمن و فیلتر مکمل تبدیل شدند. زاویه دورانی از دو طریق داده‌ی شتاب‌سنج و داده‌ی ژيروسکوپ قابل محاسبه است. داده‌ی شتاب‌سنج، شتاب خطی در سه جهت دستگاه دکارتی است و داده‌های ژيروسکوپ سرعت چرخش حول سه محور اصلی را به ما می‌دهد. برای افزایش دقت در این پروژه از داده هر دو سنسور استفاده شده است. در مرحله فیلتر کردن، با توجه به نویز موجود در داده‌های شتاب‌سنج و سه‌بعدی بودن آن در ابتدا مدل مناسبی برای استفاده در فیلتر کالمن به دست آورده شد. در نهایت، سرعت دورانی پدال دوچرخه ثابت پس از فیلتر کردن مقادیر به صورت همزمان محاسبه و به پردازنده واقعیت مجازی ارسال شد. همچنین در فاز بعدی با استفاده از دو دکمه که روی دسته دوچرخه قرار می‌گیرد، جهت حرکت دلخواه فرد به سیستم نرم‌افزاری اطلاع داده می‌شود تا در ادامه این پروژه در گروه ارس با شبیه‌سازی مسیر مطلوب حرکت دوچرخه‌سوار محیط شبیه‌ساز مناسبی را با استفاده از فیلم‌های دوچرخه‌سواری موجود به صورت هم‌زمان به شخص منتقل شود.

**کلیدواژه:** دوچرخه ثابت، شتاب‌سنج، واقعیت مجازی، فیلتر کالمن، ژيروسکوپ.



## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست جدول‌ها.....	ل
<b>فصل ۱- مقدمه.....</b>	<b>۱</b>
۱-۱- پیشگفتار.....	۱
۲-۱- طرح مسئله.....	۲
لزوم وجود راه‌حل‌های نوین برای زندگی بهتر.....	۲
۳-۱- استفاده از دوچرخه ثابت به‌منظور توان‌بخشی.....	۳
۴-۱- اهداف پروژه.....	۵
۵-۱- دستاوردهای پروژه.....	۶
۶-۱- ساختار پایان‌نامه.....	۶
<b>فصل ۲- طراحی و ساخت سخت‌افزار موردنیاز.....</b>	<b>۷</b>
۱-۲- نگاه کلی به سخت‌افزار موردنیاز.....	۷
۲-۲- قطعات مورد استفاده.....	۸
۱-۲-۲- پردازش اطلاعات.....	۸
۲-۲-۲- دریافت اطلاعات از محیط.....	۱۰
۳-۲-۲- ارتباط CAN.....	۱۳
۳-۲- طراحی شماتیک.....	۱۴
۱-۳-۲- مدار تغذیه.....	۱۴
۲-۳-۲- مدار شارژ باتری.....	۱۴
۳-۳-۲- ارتباط برد با کامپیوتر.....	۱۴
۴-۳-۲- آی‌سی ESP32.....	۱۷
۵-۳-۲- شتاب‌سنج MPU6050.....	۱۷
۶-۳-۲- شتاب‌سنج BMI088.....	۱۷
۷-۳-۲- قطب‌نمای Hmc5883l.....	۱۷
۸-۳-۲- فشارسنج bmp180.....	۱۸
۴-۲- طراحی PCB.....	۱۹
۵-۲- جای‌گذاری قطعات.....	۲۱

۲۲.....	۶-۲ طراحی جعبه .....
۲۳.....	۷-۲ چاپ جعبه .....
۲۴.....	۸-۲ تعیین جهت حرکت .....
۲۵.....	<b>فصل ۳- پردازش داده‌های دریافتی.....</b>
۲۵.....	۱-۳ دریافت و پیش‌پردازش داده‌های سنسور .....
۲۵.....	۱-۱-۳ داده‌های خام.....
۲۷.....	۲-۱-۳ کالیبراسیون.....
۲۷.....	۳-۱-۳ تبدیل واحد.....
۳۰.....	۴-۱-۳ محاسبه زوایا با استفاده از داده‌های سنسور شتاب‌سنج.....
۳۲.....	۵-۱-۳ محاسبه زوایا با استفاده از داده‌های سنسور ژيروسکوپ.....
۳۴.....	۶-۱-۳ لزوم استفاده از فیلتر کالمن.....
۳۵.....	<b>فصل ۴- نحوه فیلتر اطلاعات.....</b>
۳۵.....	۱-۴ فیلتر کالمن .....
۳۶.....	۱-۱-۴ مدل‌سازی و معادلات.....
۳۹.....	۲-۱-۴ نحوه عملکرد.....
۴۰.....	۳-۱-۴ پیاده‌سازی.....
۴۶.....	۲-۴ فیلتر مکمل .....
۴۶.....	۱-۲-۴ ترکیب حسگرها.....
۴۷.....	۲-۲-۴ ترکیب اطلاعات شتاب‌سنج و ژيروسکوپ.....
۴۹.....	۳-۲-۴ نتایج.....
۵۰.....	۴-۲-۴ انجام آزمون عملکردی.....
۵۲.....	<b>فصل ۵- نتایج و پیشنهادات.....</b>
۵۲.....	۱-۵ نتایج.....
۵۳.....	۲-۵ پیشنهادات.....
۵۴.....	۳-۵ چالش‌ها.....
۵۵.....	<b>پیوست ا- محاسبات پیاده‌سازی فیلتر کالمن.....</b>
۵۷.....	<b>فهرست مرجع‌ها.....</b>
۵۸.....	<b>پیوست ب- واژه‌نامه فارسی - انگلیسی.....</b>

## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: الف: (سمت راست) اولین دوچرخه ثابت، ۱۷۹۶ میلادی. ب: (سمت چپ) ساختار داخلی اولین دوچرخه ثابت [۲].. ۳	۳
شکل ۱-۲: یک نمونه دوچرخه توان‌بخشی [۴]..... ۴	۴
شکل ۱-۳: دوچرخه‌سواری داخل منزل، با ویژگی واقعیت مجازی [۵]..... ۵	۵
شکل ۲-۱: پردازنده استفاده شده در این پروژه، ESP32..... ۹	۹
شکل ۲-۲: (سمت راست): شتاب‌سنج وژیروسکوپ MPU6050 و (سمت چپ) شتاب‌سنج وژیروسکوپ BMI088..... ۱۲	۱۲
شکل ۲-۳: آی‌سی برقراری ارتباط CAN (SN65HVD230D)..... ۱۳	۱۳
شکل ۲-۴: نحوه اتصالات اجزای برد (بخش پاور)..... ۱۶	۱۶
شکل ۲-۵: شماتیک نحوه اتصال اجزای برد..... ۱۸	۱۸
شکل ۲-۶: نمای جلویی PCB..... ۲۰	۲۰
شکل ۲-۷: نمای پشتی PCB..... ۲۰	۲۰
شکل ۲-۸: برد نهایی (جلو)..... ۲۱	۲۱
شکل ۲-۹: برد نهایی (پشت)..... ۲۱	۲۱
شکل ۲-۱۰: جعبه طراحی شده..... ۲۲	۲۲
شکل ۲-۱۱: سخت‌افزار نهایی (نمای بالایی)..... ۲۳	۲۳
شکل ۲-۱۲: سخت‌افزار نهایی (نمای کناری)..... ۲۳	۲۳
شکل ۲-۱۳: سخت‌افزار تعیین جهت حرکت..... ۲۴	۲۴
شکل ۳-۱: داده‌های خام شتاب، نمودار قرمز مربوط به محور X، نارنجی Y و طوسی Z..... ۲۶	۲۶
شکل ۳-۲: داده‌های خام ژيروسکوپ..... ۲۶	۲۶
شکل ۳-۳: داده‌های شتاب بر حسب متر بر مجذور ثانیه..... ۲۸	۲۸
شکل ۳-۴: داده‌های ژيروسکوپ بر حسب درجه بر ثانیه..... ۲۹	۲۹
شکل ۳-۵: نحوه قرارگیری محورها در شتاب‌سنج..... ۳۰	۳۰
شکل ۳-۶: زوایای رول و پیچ محاسبه شده از داده‌های شتاب‌سنج بر حسب درجه..... ۳۱	۳۱
شکل ۳-۷: زوایای رول و پیچ و یاو محاسبه شده از داده‌های ژيروسکوپ بر حسب درجه..... ۳۳	۳۳
شکل ۴-۱: الگوریتم فیلتر کالمن..... ۳۸	۳۸
شکل ۴-۲: بلوک دیاگرام سیستم فیلتر کالمن برای ژيروسکوپ و شتاب‌سنج..... ۳۹	۳۹
شکل ۴-۳: جزئیات بلوک دیاگرام سیستم فیلتر کالمن برای ژيروسکوپ و شتاب‌سنج..... ۳۹	۳۹
شکل ۴-۴: بلوک دیاگرام سیستم فیلتر مکمل برای ژيروسکوپ و شتاب‌سنج..... ۴۸	۴۸
شکل ۴-۵: نتایج نهایی فیلتر کردن داده‌ها..... ۴۹	۴۹
شکل ۴-۶: منوی انتخاب کشور..... ۵۰	۵۰
شکل ۴-۷: انجام آزمون عملکردی پروژه..... ۵۱	۵۱

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۲۷	جدول ۳-۱: جدول حساسیت شتاب‌سنج
۲۹	جدول ۳-۲: جدول حساسیت ژيروسکوپ

## فهرست علامتها و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
زاویه رول	$\phi$
زاویه پیچ	$\theta$
زاویه یاو	$\psi$
سرعت زاویه‌ای	$\omega$



# فصل ۱ - مقدمه

## ۱-۱- پیشگفتار

در سال‌های گذشته، خصوصاً در روزهایی که جهان با ویروس کرونا درگیر شده است، توجه خاصی به اهمیت و ضرورت ورزش هوازی و تفریحات ورزشی در گروه بیماران و سالمندان و حتی افراد عادی شده است؛ حال آن‌که بسیاری از بیماران و ناتوانان جسمی و حرکتی و یا حتی سالمندان، به دلیل نقصی که در سیستم حرکتی خود دارند، نمی‌توانند از لذت دوچرخه‌سواری در محیط بهره‌مند شوند، و از طرفی توان‌بخشی با استفاده از دوچرخه‌های ثابت پس از مدتی برای آنان خسته‌کننده می‌شود و ایشان علاقه خود را برای ادامه تمرین توان‌بخشی از دست می‌دهند.

همچنین در سال ۲۰۲۲، به علت همه‌گیری ویروس کرونا و لزوم رعایت پروتکل‌های بهداشتی، مسابقات سه‌گانه داخل سالن آلمان، با استفاده از دوچرخه‌هایی که دارای قابلیت واقعیت مجازی بودند برگزار شد. در این مسابقات، دوچرخه‌سواران، سوار بر دوچرخه‌های ثابت بودند، اما به کمک عینک‌های واقعیت مجازی، می‌توانستند سرعت حرکت خود را متوجه شوند و همچنین دیگر شرکت‌کنندگان را نیز ببینند. [۱]

## ۱-۲- طرح مسئله

### لزوم وجود راه‌حل‌های نوین برای زندگی بهتر

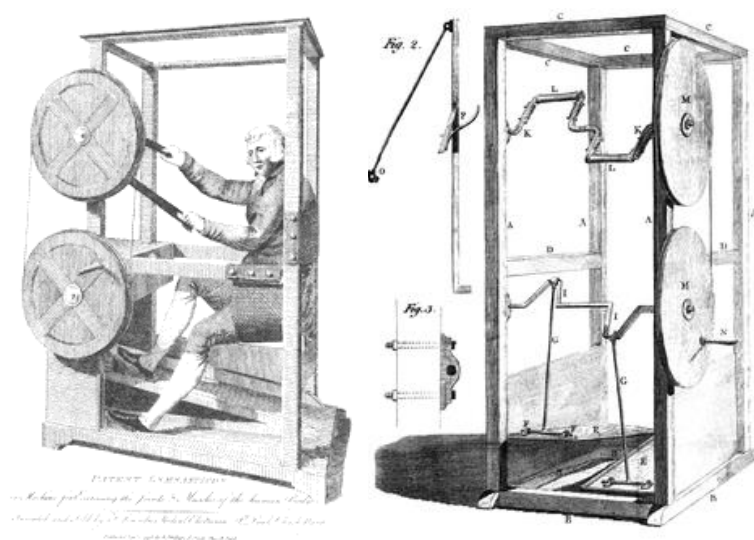
با نگاهی به مسائلی که پیش‌تر عنوان شد، می‌توان متوجه شد دنیای امروز برای رفع مشکلات خود، نیاز به استفاده از فناوری به‌روز و ایده‌های نو و خلاقانه دارد. تمام مسائلی که روزمره با آن‌ها در ارتباط هستیم، از ساده‌ترین مسائل مانند حمل‌ونقل، تا سفارش‌های اینترنتی که در زمانه کنونی همه با آن آشنا هستند، در روزگاران گذشته به نحو دیگری انجام می‌شدند.

استفاده از فیزیوتراپی نیز برای افراد کم‌توان، پیشینه طول و درازی دارد. با گذشت زمان، این روش درمان و توان‌بخشی نیز اشکال تازه‌ای به خود گرفته و با فناوری روز همراه شده است. از سالیان دور که پزشکان با دست خود عضلات بیماران را حرکت می‌دادند، تا امروز که به کمک وسایل کمکی به توان‌بخشی بیماران کمک می‌کنند. در این میان، احساسی که فرد کم‌توان حین درمان دارد، از اهمیت بالایی برخوردار است. چرا که بسیاری از این بیماران، پس از مدتی، دیگر اشتیاقی برای پیگیری روند درمانی خویش ندارند. با پیشرفت روزافزون علم، برای این موضوع نیز راه‌حل‌هایی اندیشیده شده است.



### ۱-۳- استفاده از دوچرخه ثابت به منظور توان بخشی

اولین “دوچرخه ثابت” در سال ۱۷۹۶ میلادی توسط فرانسیس لوندز<sup>۱</sup> اختراع شد [۲] و GYMNASTICON نام داشت. این دوچرخه از چوب به همراه قطعات فلزی ساخته شده بود، دوچرخه به صورت عمودی قرار داشت و دارای یک صندلی بود تا افراد هنگام ورزش راحت باشند. از این دوچرخه ها برای اهداف پزشکی مانند درمان ناتوانی، روماتیسم، فلجی و غیره استفاده می شد.



شکل ۱-۱: الف: (سمت راست) اولین دوچرخه ثابت، ۱۷۹۶ میلادی. ب: (سمت چپ) ساختار داخلی اولین دوچرخه ثابت [۲]  
مدل های مختلفی از دوچرخه ثابت در طول سال ها معرفی شدند. در دهه ۱۹۶۰ میلادی، استفاده از دوچرخه ثابت در ایالت متحده آمریکا رواج پیدا کرد و در دهه ۱۹۸۰، دوچرخه ثابت تقریباً در همه جا یافت می شد.

امروزه دوچرخه های ثابت نه تنها به منظور استفاده برای تناسب اندام، بلکه به عنوان وسیله توان بخشی برای تقویت عضلاتی که دچار تنبلی شده اند، به کار می روند و پدال زدن های مکرر سبب تنظیم گردش خون در

<sup>1</sup> Francis Lowndes

بدن می‌شود<sup>۱</sup>؛ بنابراین به طور مثال برای افرادی که دچار بیماری ام‌اس شده‌اند، کاربرد دارد. این دستگاه همچنین برای بیمارانی که دچار ضایعه نخاعی هستند و کسانی که می‌خواهند عضلات خود را تقویت کنند، مناسب است. ورزش با دوچرخه ثابت به افراد مبتلا به پوکی‌استخوان نیز توصیه می‌شود به این علت که احتمال بروز شکستگی حین دویدن یا راه رفتن در این افراد بالاست و استفاده از دوچرخه ثابت این خطر را کاهش می‌دهد. افراد دیابتی که دچار زخم پا شده‌اند و نمی‌توانند به مدت طولانی راه بروند و از پاهای خود استفاده کنند نیز می‌توانند از مزایای دوچرخه ثابت بهره ببرند. در سال ۲۰۱۰ در یک کارآزمایی برای اثبات کارایی دوچرخه‌سواری به‌عنوان شکلی از تمرینات عملکردی تکراری ضروری برای افراد در روزهای اولیه پس از سکته مغزی پیشنهاد شده است [۳]. دوچرخه توان‌بخشی فیزیوتراپی برای استفاده در منزل یا مطب پزشک مناسب است. این دوچرخه‌ها برای بیماران سالمندی که توانایی طی مسافت‌های طولانی برای رفتن به مراکز توان‌بخشی فیزیوتراپی را ندارند، بسیار می‌تواند مفید واقع شود و جایگزین مناسبی برای تمرینات فیزیوتراپی است. بیمار روی صندلی در جایگاه مخصوص قرار می‌گیرد و با فشردن دکمه شروع به کار می‌کند. این دوچرخه‌ها دارای یک نمایشگر هستند که میزان کالری سوخته شده، مسافت طی شده و سرعت را برای شما مشخص می‌کند [۴].



شکل ۲-۱: یک نمونه دوچرخه توان‌بخشی [۴]

<sup>1</sup> Rehabilitation Bike

## ۴-۱- اهداف پروژه

در ادامه این پروژه، یک برد با هدف دریافت شتاب پدال زدن کاربر روی دوچرخه ثابت و ارسال دیتای سرعت با استفاده از بلوتوث طراحی خواهد شد. در ادامه داده‌ی ارسال شده توسط این برد، با استفاده از فیلترهای مناسب پردازش خواهد شد. همچنین در مرحله بعد برای تشخیص جهت حرکت دلخواه کاربر، دو دکمه روی دسته‌های دوچرخه قرار خواهد گرفت تا با فشردن آن‌ها کاربر بتواند جهت حرکت دلخواه خود را به چپ یا راست انتخاب کند.

این برد در پروژه طراحی واقعیت مجازی برای یک دوچرخه ثابت استفاده خواهد شد به این صورت که هنگامی که کاربر پدال می‌زند تصویری از محیط اطراف برای وی نشان داده خواهد شد که متناسب با سرعت پدال زدن کاربر حرکت می‌کند. این‌گونه کاربر هنگام استفاده از دوچرخه ثابت تا حدودی احساس واقعی دوچرخه‌سواری را تجربه خواهد کرد.



شکل ۳-۱: دوچرخه‌سواری داخل منزل، با ویژگی واقعیت مجازی [۵]

## ۱-۵- دستاوردهای پروژه

دست‌آورد این پروژه، یک سیستم مکاترونیکی فشرده برای اندازه‌گیری داده‌های سرعت در حین ورزش دوچرخه‌سواری درحالی‌که از آن‌ها در یک شبیه‌سازی واقعیت مجازی استفاده می‌شود، است. مجموعه این سیستم‌ها بازخورد دیداری و شنیداری مشابه حضور در مسیرهای دوچرخه‌سواری را به فرد ارائه می‌دهد.

## ۶-۱- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه شامل ۵ فصل و ۲ پیوست است. در فصل ۲ به نحوه طراحی و ساخت سخت‌افزار موردنیاز پرداخته شده است. فصل ۳ شامل نحوه و روند پیش‌پردازش اطلاعات است. در فصل ۴، توضیحات نحوه کارکرد فیلترها، پیاده‌سازی فیلترها و نتایج استفاده از آن‌ها آمده است. در نهایت، در فصل ۵ به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات پرداخته شده است.

## فصل ۲- طراحی و ساخت سخت‌افزار موردنیاز

### ۲-۱- نگاه کلی به سخت‌افزار موردنیاز

در یک ساختار معمولی دوچرخه، بدنه پدال با شفت پدال به بازوی میل‌لنگ بسته می‌شود. مجموعه‌ای از بلبرینگ‌ها بین بدنه پدال و شفت پدال قرار دارند. در نتیجه شفت پدال نسبت به بازوی میل‌لنگ ثابت است. پدال نسبت به میل پدال و بازوی میل‌لنگ آزادانه می‌چرخد. دوچرخه‌سواری همان‌طور که با چرخاندن بازوی میل‌لنگ، نسبت به مرجع خارجی تعریف می‌شود، با چرخش پدال نسبت به میل‌لنگ همراه است. با توجه به این پیچیدگی ذاتی در ساختار انتقال نیروی پدال - دوچرخه، اندازه‌گیری زاویه پدال با توجه به مرجع خارجی کار ساده‌ای نیست. این موضوع در مشکل طراحی ما بیشتر تأکید شد، به‌طوری‌که باید یک ماژول مستقل از دوچرخه ثابت طراحی می‌شد. براین‌اساس از ترکیب سنسور <sup>1</sup>IMU با فیلتر کالمن پس از پردازش اولیه برای این پروژه استفاده شد. به‌علاوه انتقال اطلاعات باید به‌صورت بی‌سیم صورت می‌گرفت که برای این مورد انتقال اطلاعات با بلوتوث پیشنهاد شد. همچنین به علت کوچک بودن فضایی که سخت‌افزار ما روی آن نصب می‌شود، نیاز بود تمامی قطعات لازم روی بردی کوچک جای گیرد.

---

<sup>1</sup> Inertial Measurement Unit

## ۲-۲- قطعات مورد استفاده

### ۲-۲-۱- پردازش اطلاعات

برای بخش پردازش، از ESP32 استفاده خواهیم کرد. ماژول ESP32 از سری بردهای الکترونیکی ارزان و کم‌مصرف است که از یک میکروکنترلر مرکزی به همراه بلوتوث ۲ حالت و شبکه Wi-Fi تشکیل شده است. این برد جانشین برد ESP8266 محسوب می‌شود. مورد دیگری که باید در مورد ESP32 به آن اشاره شود این است که این میکروکنترلر با فناوری TSMC 40 نانومتر ساخته شده و از نظر مصرف انرژی بسیار بهینه است و برای پروژه‌های پرتابل مثل ساعت‌های هوشمند، گجت‌های پوشیدنی و ... گزینه فوق‌العاده‌ای به شمار می‌آید. ویژگی‌های این پردازنده به تفصیل به صورت زیر است:

- پردازنده ۲ هسته‌ای (به استثنا مدل ESP32-S0WD که پردازنده تک‌هسته‌ای دارد)
- فرکانس پردازش تا ۲۴۰ مگاهرتز
- ۴۴۸ کیلوبایت حافظه ROM
- ۵۲۰ کیلوبایت حافظه SRAM
- ۱۶ کیلوبایت حافظه SRAM برای واحد RTC (دو قسمت ۸ کیلوبایتی)
- پشتیبانی از اتصال وای‌فای ۸۰۲.۱۱ b/g/n با سرعت بیشینه ۱۵۰ Mbps
- پشتیبانی از بلوتوث نسخه ۲
- پشتیبانی از بلوتوث کم‌انرژی BLE
- ۳۴ پایه قابل برنامه‌ریزی GPIO
- تا ۱۸ کانال ADC ۱۲ بیتی
- تا ۲ کانال DAC ۸ بیتی
- تا ۴ واحد SPI، ۲ واحد I2C، ۲ واحد I2S و ۳ واحد UART
- پشتیبانی از اترنت برای اتصال LAN
- پشتیبانی از SDIO
- ۱ کانال اختصاصی PWM برای موتور و تا ۱۶ کانال PWM دیگر

با توجه به ویژگی‌های ذکر شده از این پردازنده، مشاهده می‌شود که این قطعه دارای بلوتوث داخلی است، در نتیجه دیگر نیازی به قطعه جدیدی برای ارسال داده از طریق بلوتوث نیست و ESP32 هر دو کار پردازش و ارسال دیتا را انجام می‌دهد.



شکل ۱-۲: پردازنده استفاده شده در این پروژه، ESP32

## ۲-۲-۲- دریافت اطلاعات از محیط

با توجه به توضیحاتی که پیش‌تر ارائه شد برای بخش دریافت شتاب از محیط از دو قطعه استفاده خواهد شد. (یکی از قطعات در این پروژه روی برد لحیم خواهد شد و تنها محل نصب دیگر قطعه روی برد قرار خواهد گرفت تا در پروژه‌های آتی مورد استفاده قرار گیرد.)

برای انتخاب سنسور، باید به مواردی مانند هزینه، اندازه، دقت و نوع سنسور توجه می‌شد؛ پس از بررسی‌های انجام شده، یک شتاب‌سنج و یکژیروسکوپ مورد استفاده قرار گرفت.

۱. سنسورژیروسکوپ<sup>۱</sup> و شتاب‌سنج<sup>۲</sup> MPU6050 یکی از معروف‌ترین سنسورها برای اندازه‌گیری شتاب خطی و سرعت زاویه‌ای است که به دلیل قیمت کم، مصرف پائین انرژی و عملکرد بسیار خوبی که دارد در بسیاری از پروژه‌ها و دستگاه‌هایی مانند تلفن‌های هوشمند، تبلت‌ها و نظایر آن استفاده می‌شود. این سنسور در واقع یک شتاب‌سنج خطی سه محوره و یکژیروسکوپ سه محوره است و به همین دلیل به‌عنوان یک سنسور ۶ محوره تلقی می‌شود. البته MPU6050 دارای یک سنسور دماسنج نیز هست که بازه اندازه‌گیری این سنسور از ۴۰- تا ۸۵+ درجه سانتیگراد است.

روش برقراری ارتباط این ماژول با آردوینو<sup>۳</sup> یا دیگر میکروکنترلرها، پروتکل I2C یا همان TWI است. برای دستیابی به دقت بالای اندازه‌گیری در حرکات‌های کند و حرکات‌های سریع در سنسور MPU6050 امکانی فراهم شده تا کاربر بتواند بازه اندازه‌گیری را متناسب با شتاب یا سرعت زاویه‌ای تغییر دهد و به ترتیب برای شتاب‌سنج بازه‌های  $\pm 2g$ ،  $\pm 4g$ ،  $\pm 8g$ ،  $\pm 16g$ ، و برایژیروسکوپ بازه‌های  $\pm 250$ ،  $\pm 500$ ،  $\pm 1000$ ،  $\pm 2000$  درجه بر ثانیه قابل انتخاب هستند. قابل ذکر است که  $g$  یک واحد اندازه‌گیری شتاب و هر  $g$  برابر شتاب جاذبه زمین است و درجه بر ثانیه (dps) واحد اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای است.

<sup>1</sup> Gyroscope

<sup>2</sup> Accelerometer

<sup>3</sup> Arduino



از کاربردهای این سنسور می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- رباتیک و ربات‌های پرنده
  - دستگاه‌های جهت‌یاب
  - ریموت کنترل‌های سه‌بعدی
  - کنسول‌های بازی
- برخی دیگر از ویژگی‌های این سنسور:
- خروجی دیجیتال داده Motion Fusion در ۶ یا ۹ محور با فرمت داده به‌صورت ماتریس چرخش<sup>۱</sup>، کوآترنیون<sup>۲</sup>، زاویه اویلر<sup>۳</sup> و یا فرمت داده خام<sup>۴</sup>
  - موتور پردازش دیجیتال حرکت (DMP) با توانایی اجرای الگوریتم‌های پیچیده Motion Fusion، سنکرون‌سازی زمانی سنسور و تشخیص نوع حرکات
  - دارای الگوریتم‌های داخلی موردنیاز برای بایاس در زمان run-time و نیز قابلیت کالیبراسیون قطب‌نما، بدون نیاز به دخالت کاربر
  - دارای وقفه‌های<sup>۵</sup> قابل برنامه‌ریزی با قابلیت پشتیبانی از تشخیص حرکات مانند ضربه، حرکات ناگهانی، بالا و پایین رفتن، سقوط آزاد، حرکت با شتاب‌های بالا، بدون حرکت.
  - وقفه مجزا برای تشخیص ضربات و تشخیص لرزش
  - دارای مدار Timing داخلی با تغییرات فرکانسی به میزان ۱ درصد در تغییراتی به میزان کل بازه دمای کاری
  - ولتاژ منبع تغذیه: ۳ تا ۵ ولت
  - اندازه: دو سایز ۲۰ میلی‌متری و ۱۵ میلی‌متری

---

<sup>1</sup> Rotation matrix

<sup>2</sup> Quaternion

<sup>3</sup> Euler angles

<sup>4</sup> raw

<sup>5</sup> Interrupt

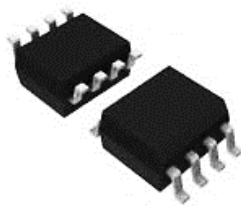
۲. BMI088 یک سنسور ۶ محوره با کارایی بالا است که امکان اندازه‌گیری دقیق جهت و تشخیص حرکت در سه محور متعامد را فراهم می‌کند. BMI088 متشکل از شتاب‌سنج دیجیتالی ۱۶ بیتی، سه محوری وژیروسکوپ دیجیتالی سه محوره، در رده IMUهای با کارایی بالا که در محیط‌های سخت مانند پهپادها و برنامه‌های رباتیک استفاده می‌شود، منحصر به فرد است. علاوه بر استحکام ارتعاش بالا، پایداری دمای عالی BMI088 به کاهش تلاش‌ها و هزینه‌های طراحی در سطح سیستم کمک می‌کند.



شکل ۲-۲: (سمت راست): شتاب‌سنج وژیروسکوپ MPU6050 و (سمت چپ) شتاب‌سنج وژیروسکوپ BMI088

## ۲-۲-۳-ارتباط CAN

جهت برقراری ارتباط پروتکل‌های زیادی که برخی از آن‌ها برای ارتباطات نزدیک و برخی برای راه دور طراحی شده‌اند وجود دارد؛ در این بین، اطمینان از صحت داده‌های دریافتی از مهم‌ترین نیازهای هر ارتباط است. از آنجایی که در بیشتر پروتکل‌های ارتباطی سیستم خطایابی به صورت نرم‌افزاری می‌باشد، سرعت رابط‌های مستقیم با فرکانس پردازنده خواهد داشت. اما در پروتکل‌های ارتباطی نظیر شبکه و CAN (شبکه محلی کنترلر) خطایابی به صورت سخت‌افزاری می‌باشد و نیازی به درگیر کردن پردازنده با این موضوع نیست، به سرعت بالاتری می‌توان دست پیدا کرد. در پروتکل ارتباطی CAN، پنج مکانیزم برای شناسایی خطا به کار می‌رود که سه‌تای آن در سطح فریم و دوتای آن در سطح بیت می‌باشد؛ بنابراین در این پروتکل قابلیت اطمینان بالا است. برای پیاده‌سازی ارتباط CAN\_BUS در ابتدا نیاز به واسطه‌هایی می‌باشد که بین میکروکنترلر و خطوط باس ایجاد ارتباط کند. آی‌سی هشت پایه SN65HVD230D، واسطه سخت‌افزاری CAN استفاده شده در برد طراحی شده است. مطابق شکل پایه‌های ۱ و ۴ باید با پروتکل ارتباطی CAN به میکروکنترلر متصل شوند، همچنین ولتاژ تغذیه این آی‌سی ۳.۳ ولت می‌باشد. پایه‌های ۶ و ۷ همان باس ارتباطی هستند.



شکل ۳-۲: آی‌سی برقراری ارتباط CAN (SN65HVD230D)

## ۲-۳- طراحی شماتیک<sup>۱</sup>

اکنون که با آی‌سی‌های اصلی مورد استفاده در بردهای این پروژه آشنا شدیم، وقت آن رسیده است که به مراحل طراحی برد بپردازیم. در این پروژه از نرم‌افزار آلتیوم دیزاینر<sup>۲</sup> برای طراحی استفاده کرده‌ایم. شماتیک طراحی شده و نحوه اتصال اجزای برد در شکل ۲-۴: نحوه اتصالات اجزای برد (بخش پاور) و شکل ۲-۵: شماتیک نحوه اتصال اجزای برد آورده شده است.

### ۲-۳-۱- مدار تغذیه

تمامی آی‌سی‌هایی که پیش‌تر نام برده شدند، با ولتاژ ۳.۳ ولت کارایی بهینه را از خود نشان می‌دهند. مدار تغذیه‌ی استفاده شده در طراحی برد، ولتاژ لازم را به آی‌سی‌ها می‌رساند.

### ۲-۳-۲- مدار شارژ باتری

با توجه به اینکه برد این پروژه از باتری تغذیه می‌کند، بهتر است یک مدار شارژ نیز برای این باتری قرار داده شود تا بدون نیاز به مدار اضافه و جانبی‌ای بتوانیم در مواقع نیاز باتری را شارژ کنیم. برای طراحی مدار شارژ باتری از آی‌سی ETA9742 استفاده کرده‌ایم. آی‌سی ETA9742 یک آی‌سی شارژ ۳ آمپر و دارای ۳ نمایشگر LED برای مقدار باتری و وضعیت شارژ/دشارژ باتری و از نوع smd است.

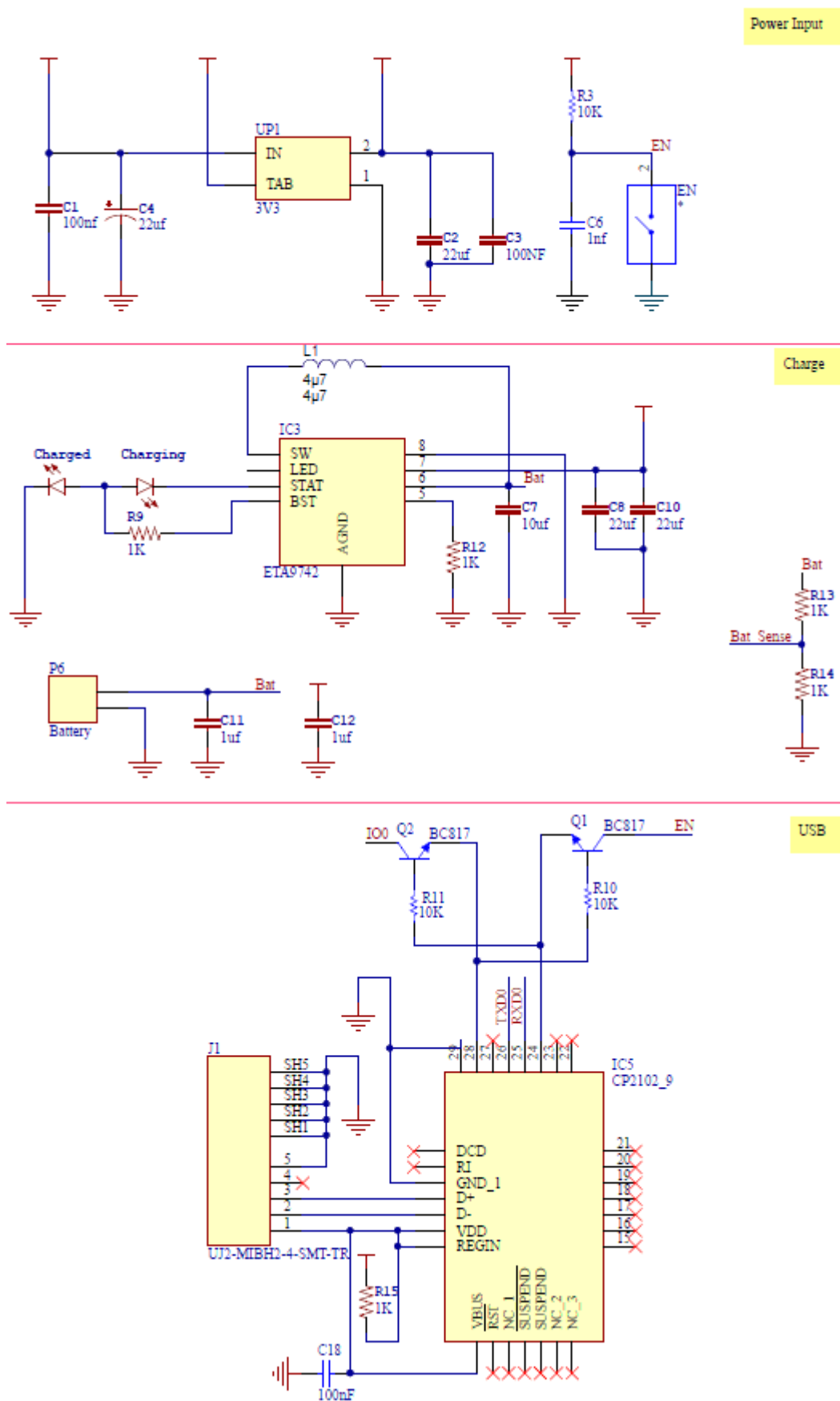
### ۲-۳-۳- ارتباط برد با کامپیوتر

برای این بخش از رابط MiniUSB استفاده می‌کنیم. همچنین برای تبدیل USB به UART از یک آی‌سی استفاده خواهیم کرد. آی‌سی CP2102 یک مبدل USB به UART می‌باشد. برای این که برد ما بتواند از طریق USB نیز هنگام اتصال به کامپیوتر تغذیه لازم را به برد برساند، یک سر ورودی ۵ ولت USB را به

<sup>1</sup> Schematic

<sup>2</sup> Altium Designer

آی‌سی شارژ می‌رسانیم تا جهت رعایت مسائل ایمنی و بهینه‌سازی هنگامی که ارتباط برد با کامپیوتر برقرار است باتری از مدار خارج شود.



شکل ۴-۲: نحوه اتصالات اجزای برد (بخش پاور)

#### ۴-۳-۲-آی‌سی ESP32

این آی‌سی هسته اصلی برد را تشکیل می‌دهد. در شکل ۵-۲: شماتیک نحوه اتصال اجزای برد که در انتهای این بخش آمده، نحوه ارتباط این قطعه با دیگر قطعات برد نشان داده شده است. در اتصالات ورودی/خروجی این برد، LED تعبیه شده است تا هنگامی که سامانه روشن و آماده‌باش است روشن شود. همچنین پایه‌هایی از آی‌سی ESP32 که در این پروژه مورد استفاده قرار نگرفته‌اند با قراردادن کانکتورهای DIP شرایطی آماده شده است که در آینده در صورت نیاز از این پایه‌ها نیز استفاده شود.

#### ۵-۳-۲-شتاب‌سنج MPU6050

این آی‌سی با پروتکل I<sup>2</sup>C با ESP32 ارتباط برقرار می‌کند. دو پایه برقرارکننده این ارتباط پایه‌های ۲۳ و ۲۴ MPU6050 خواهند بود.

#### ۶-۳-۲-شتاب‌سنج BMI088

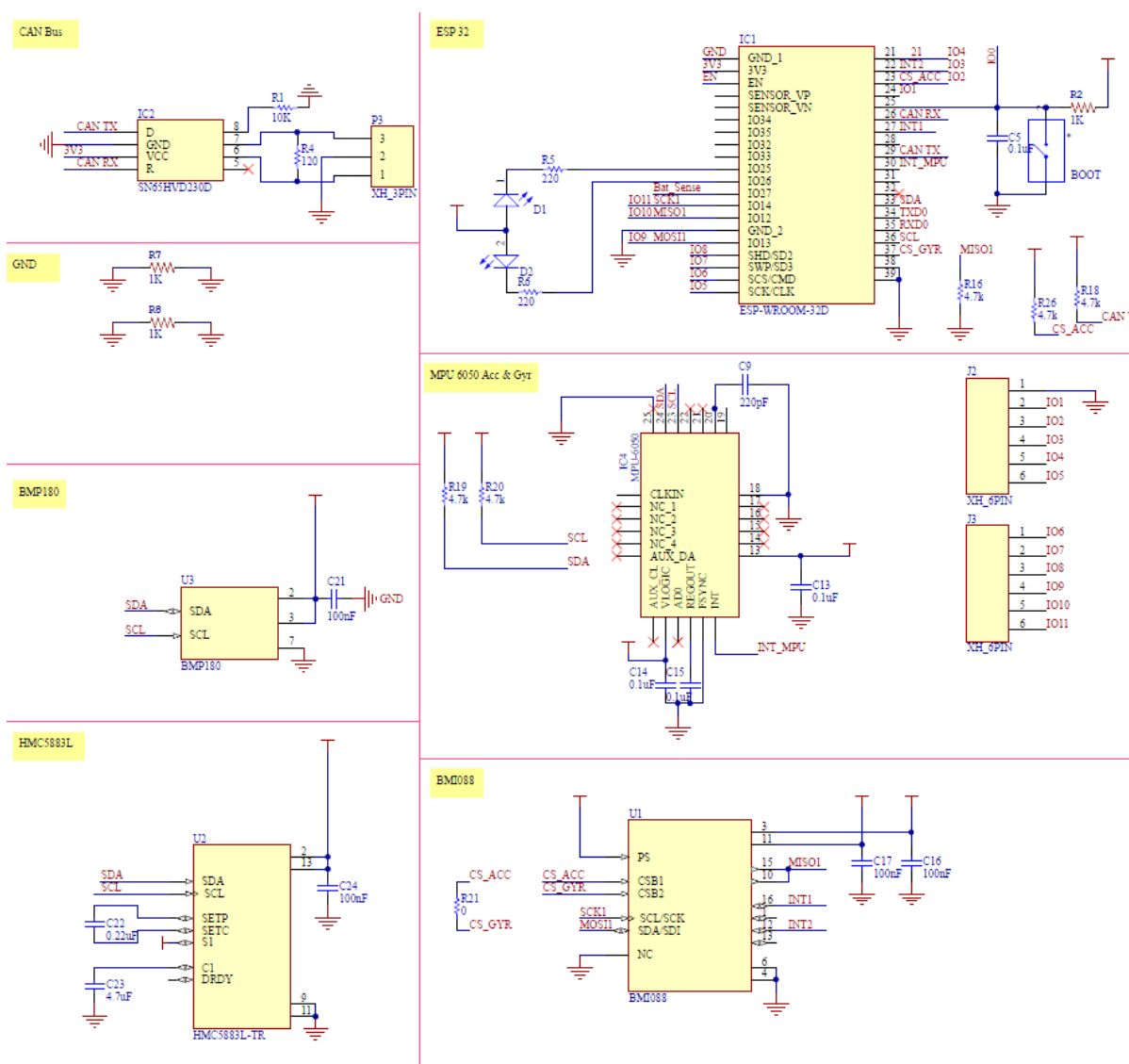
این IMU با پروتکل SPI با ESP32 ارتباط برقرار می‌کند. در این پروژه از شتاب‌سنج MPU6050 استفاده شده است که نسبت به BMI088 قیمت کمتری دارد. قرار دادن این قطعه بر روی برد به این منظور بوده است که در آینده در صورت نیاز به‌دقت بالاتر از این قطعه استفاده شود.

#### ۲-۳-۷-قطب‌نمای Hmc5883l

قطب‌نمای الکترونیکی ۳ محوره محصول Honeywell یک قطب‌نمای ۳ محوره دیجیتال است که می‌تواند شدت میدان مغناطیسی تا  $\pm 8$  گاوس را با دقت ۵ میلی‌گاوس اندازه‌گیری نماید. توسط این ماژول می‌توان به‌دقت ۱ تا ۲ درجه در جهت‌یابی و ناوبری رسید. هدف از قرار دادن این قطعه روی برد، گسترده‌تر کردن حیطه کاربردهای این برد برای پروژه‌های آتی است.

## ۲-۳-۸- فشارسنج bmp180

این فشارسنج قابلیت سنجش فشار بارومتریک بادقت بالا با جریان مصرفی پایین در بازه ۳۰۰ تا ۱۱۰۰ هکتوپاسکال دارد. این سنسور بر اساس فناوری مقاومت پیزوالکتریک<sup>۱</sup> طراحی و تولید شده است. استفاده از این فناوری دقت بالا، خطی بودن و پایداری طولانی مدت را برای این سنسور فراهم نموده است. هدف از قرار دادن این قطعه نیز روی برد پروژه، گسترده‌تر کردن حیطه کاربردهای این برد برای پروژه‌های آتی است.



شکل ۵-۲: شماتیک نحوه اتصال اجزای برد

<sup>1</sup> Piezoelectric

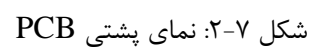
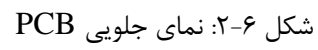


## ۲-۴- طراحی PCB<sup>۱</sup>

با ساخت یک فایل PCB در نرم‌افزار آلتیوم دیزاینر، به رسم محل نصب صحیح و جای‌گذاری بهینه قطعات پرداخته شد. این مرحله، مهم‌ترین و حساس‌ترین مرحله طراحی یک برد است، چرا که یک خطا در طراحی موجب می‌شود تا برد به درستی کار نکند و یا حتی به قطعات آسیب جدی وارد شود. در این مرحله قواعد زیادی وجود دارد که با رعایت آن‌ها می‌توان بر دی بهینه با کوچکترین اندازه طراحی کرد. در این مرحله آن چیزی که از اهمیت بیشتری برخوردار است این است که قطعات طوری کنار یکدیگر قرار بگیرند که در مراحل بعدی و روتینگ بهینه‌ترین حالت را داشته باشد. همچنین یکی از قواعد طراحی این است که مدار تغذیه و مدارات جانبی آن پشت برد قرار بگیرند تا از اثر نویز روی دیگر قطعات مدار جلوگیری شود.

LEDهای برد روی لبه‌های برد قرار گرفته‌اند تا هنگام استفاده از برد و روشن شدن چراغ‌ها بتوان نور آن‌ها را از بیرون جعبه‌ای که برد درون آن قرار می‌گیرد مشاهده کرد. روی لبه‌های برد کانکتورهای اضافه‌ای قرار داده شده است تا در آینده در صورت نیاز، بتوان از پایه‌های استفاده نشده پردازنده توسط این کانکتورها بدون اضافه کردن سیم یا قطعه جدید به راحتی استفاده کرد. نکته دیگری که اهمیت بسیاری دارد این است که خازن‌های نویزگیر باید نزدیک‌ترین مکان به قطعه موردنظر قرار بگیرند تا نویز را در آخرین مرحله بی‌اثر کنند. در شکل ۲-۶: نمای جلویی PCB و شکل ۲-۷: نمای پشتی PCB تصاویر برد نهایی طراحی شده آورده شده است.

<sup>۱</sup> Printed Circuit Board

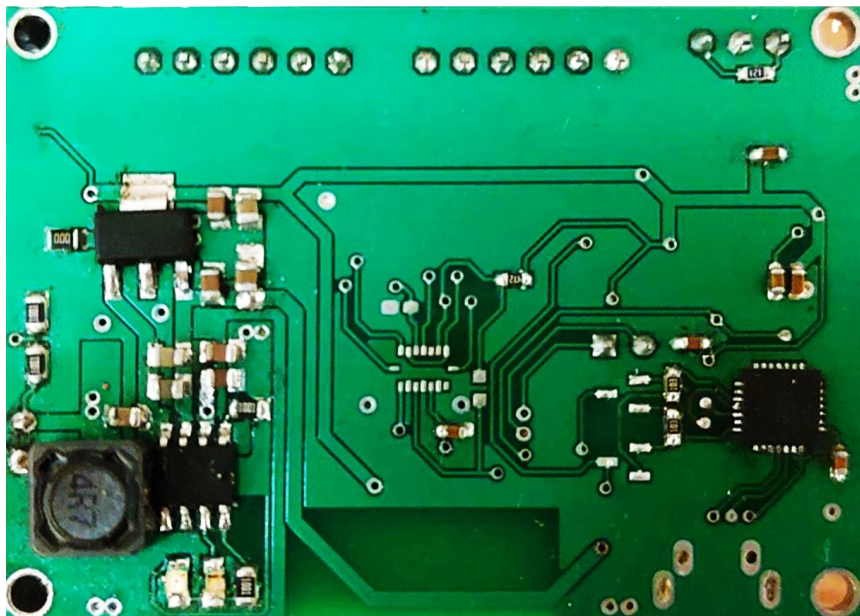


## ۲-۵- جای گذاری قطعات

پس از مرحله چاپ برد، قطعات روی آن جای گذاری و لحیم شدند.



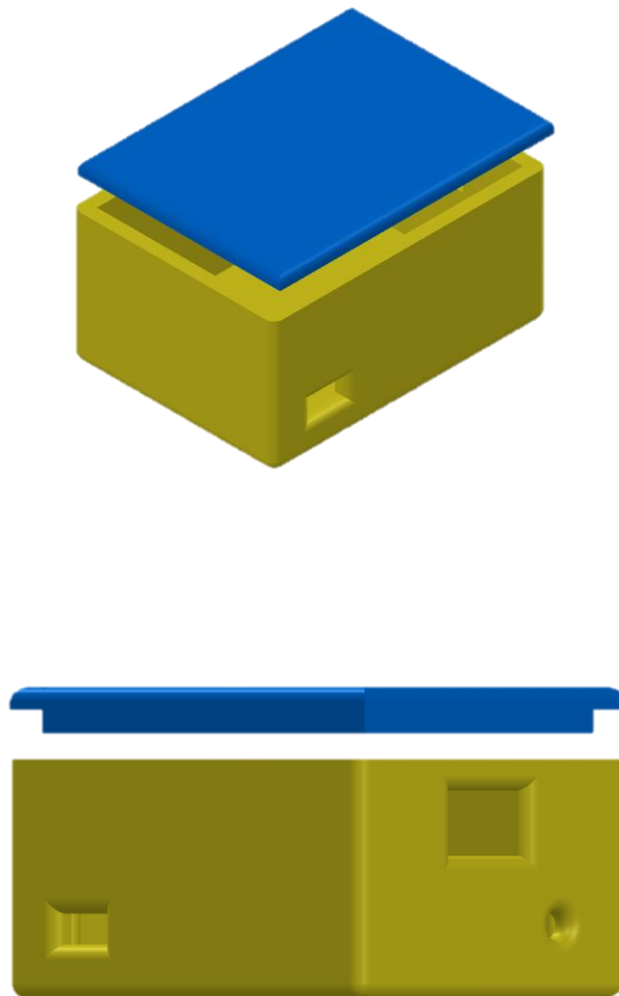
شکل ۲-۸: برد نهایی (جلو)



شکل ۲-۹: برد نهایی (پشت)

## ۲-۶- طراحی جعبه

در این مرحله، با استفاده از نرم‌افزار سالی‌دورکس<sup>۱</sup>، جعبه کوچکی طراحی کردیم تا برد اصلی پروژه را درون آن قرار دهیم. در شکل ۲-۱۰: جعبه طراحی شده، یک راه دسترسی برای پورت mini USB، جایگاه قرار گیری کلید روشن خاموش و جایگاه در نظر گرفته شده برای LED وضعیت دستگاه قابل مشاهده است.



شکل ۲-۱۰: جعبه طراحی شده.

<sup>۱</sup> Solidworks



## ۲-۷- چاپ جعبه

پس از چاپ جعبه طراحی شده، برد را درون آن قرار می‌دهیم. بخش سخت‌افزار پروژه به اتمام رسیده است و پس از این وارد بخش نرم‌افزاری پروژه خواهیم شد.



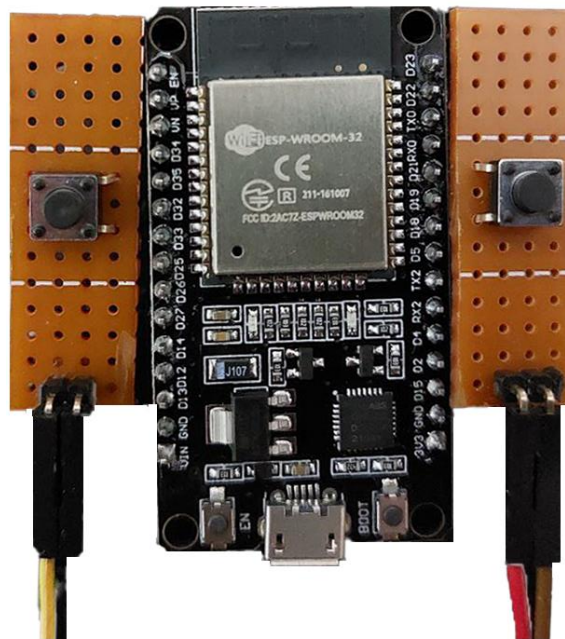
شکل ۲-۱۱: سخت‌افزار نهایی (نمای بالایی)



شکل ۲-۱۲: سخت‌افزار نهایی (نمای کناری)

## ۸-۲- تعیین جهت حرکت

برای آن که کاربر بتواند در محیط سه‌بعدی حرکت کند، لازم است جهت حرکت دلخواه کاربر به نحوی به سامانه اطلاع داده شود. این بخش، شامل یک برد ESP32 DevKit برای ارسال داده‌ها و دو دکمه است که بر روی دسته دوچرخه قرار خواهند گرفت. ارتباط این دو دکمه با برد با سیم خواهد بود و سپس برای انتقال داده، مانند گذشته از بلوتوث استفاده خواهیم کرد. در صورتی که کاربر هرکدام از دکمه‌ها را بفشارد، داده دیجیتال ورودی به پایه‌های ESP، از صفر به یک تبدیل می‌شود و با ارسال این مقدار به برد رزبری پای که پردازنده اصلی بخش واقعیت مجازی ما است، جهت چرخش دلخواه کاربر مشخص می‌شود. در شکل ۱۳-۲: سخت‌افزار تعیین جهت حرکت سخت‌افزار این بخش پروژه آورده شده است.



شکل ۱۳-۲: سخت‌افزار تعیین جهت حرکت

## فصل ۳ - پردازش داده‌های دریافتی

### ۳-۱- دریافت و پیش‌پردازش داده‌های سنسور

#### ۳-۱-۱- داده‌های خام

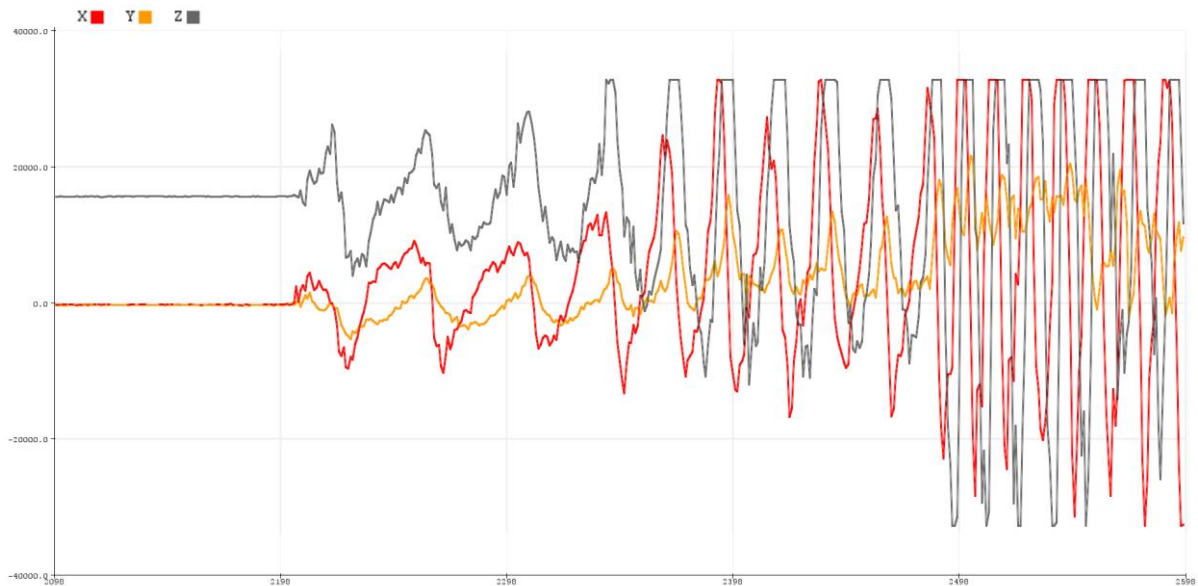
داده‌ی اولیه‌ای که از شتاب‌سنج دریافت می‌شود، اصطلاحاً داده‌ی خام<sup>۱</sup> نام دارد. داده‌های خام داده‌هایی هستند که هنوز پردازش و پاک‌سازی نشده‌اند و داده‌های پرت از آن‌ها جدا نشده‌است و یا تحلیل‌ای بر روی آن‌ها صورت نگرفته‌است. می‌توان گفت داده‌های خام بخشی از اطلاعاتی است که هنوز از سوی برنامه نرم‌افزاری یا تحلیلگر انسانی دستکاری نشده‌است. در اینجا منظور از داده خام، اعدادی است که از طریق شتاب‌سنج و ژيروسکوپ مستقیماً خوانده می‌شود.

داده‌هایی که ژيروسکوپ حاصل می‌کند با چرخاندن سنسور در راستای محورها، بسته به سرعت چرخش تغییر می‌کند (هر چه سرعت چرخش بیشتر باشد عدد خروجی بزرگ‌تر است). حال پس از چرخش در صورتی که سنسور در موقعیت بدون حرکت نگه داشته شود مقادیر خروجی مشابه حالتی خواهند بود که سنسور به‌صورت افقی و ساکن است که این انتظار هم می‌رود، زیرا ژيروسکوپ تغییرات سرعت را می‌سنجد و وقتی سنسور ساکن باشد (فرقی نمی‌کند در چه موقعیتی باشد) خروجی آن تغییر نمی‌کند. یعنی اگر سنسور را در حالتی که در یک زاویه‌ی مشخص قرار گرفته روشن شود، خروجی‌های سنسور با حالتی که

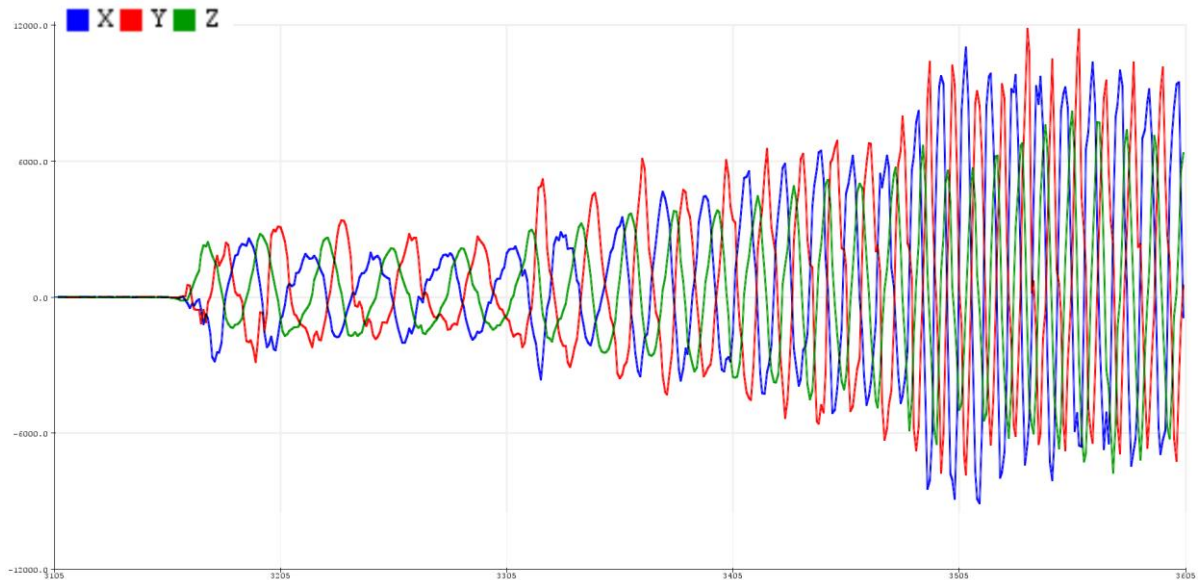
---

<sup>۱</sup> raw

سنسور به صورت افقی قرار دارد فرقی ندارد. در شکل ۳-۱: داده‌های خام شتاب، نمودار قرمز مربوط به محور  $x$ ، نارنجی  $y$  و طوسی  $z$ . شکل ۳-۲: داده‌های خام ژيروسکوپ، نمودار آبی مربوط به محور  $x$ ، قرمز  $y$  و سبز  $z$ .



شکل ۳-۱: داده‌های خام شتاب، نمودار قرمز مربوط به محور  $x$ ، نارنجی  $y$  و طوسی  $z$ .<sup>۱</sup>



شکل ۳-۲: داده‌های خام ژيروسکوپ، نمودار آبی مربوط به محور  $x$ ، قرمز  $y$  و سبز  $z$ .

<sup>۱</sup> محور افقی در تمامی نمودارها نشان‌دهنده زمان است.



۲-۱-۳- کالیبراسیون<sup>۱</sup>

در مرحله بعدی برای شروع پردازش داده‌های خام، اصطلاحاً به کالیبره کردن سنسور پرداخته می‌شود. برای این کار، اساس کار بدین صورت است که حدود ۲۰۰۰ مرتبه داده‌های سنسور ژيروسکوپ را که به صورت کاملاً افقی و ساکن قرار گرفته است خوانده شده و همه‌ی داده‌ها باهم جمع می‌شوند. پس از آن که اندازه‌گیری‌ها تمام شد مقادیر حاصله در راستای ۳ محور بر عدد ۲۰۰۰ (تعداد اندازه‌گیری‌ها) تقسیم می‌شود تا مقدار آفست<sup>۲</sup> به دست آید.

## ۳-۱-۳- تبدیل واحد

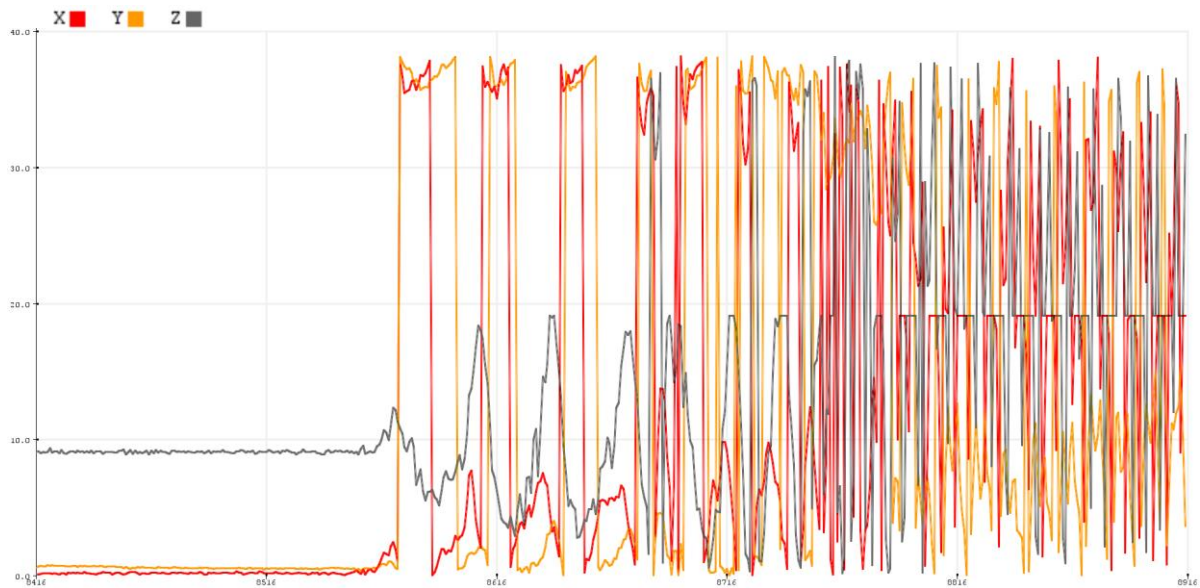
در مرحله بعدی، لازم است تبدیل واحدهای لازم انجام شود. طبق اطلاعات برگه مشخصات فنی، وقتی بازه اندازه‌گیری شتاب‌سنج 2g است، مقدار حساسیت سنسور برابر 16834 LSB/g است که همان شتاب گرانش زمین است. در نتیجه برای تبدیل واحد اعداد سنسور، باید مقادیر در g ضرب و سپس بر ۱۶۸۳۸۴ تقسیم شوند. در جدول ۳-۱: جدول حساسیت شتاب‌سنج بر حسب بازه اندازه‌گیری آورده شده‌است. در شکل ۳-۲: داده‌های خام ژيروسکوپ، نمودار آبی مربوط به محور x، قرمز y و سبز z همان‌طور که انتظار می‌رفت، شتاب در راستای محور z، حدوداً برابر ۱۰ یا همان شتاب گرانش زمین است.

جدول ۳-۱: جدول حساسیت شتاب‌سنج

AFS_SEL	Full Scale Range	LSB Sensitivity
0	±2g	16384 LSB/g
1	±4g	8192 LSB/g
2	±8g	4096 LSB/g
3	±16g	2048 LSB/g

<sup>۱</sup> Calibration

<sup>۲</sup> Offset

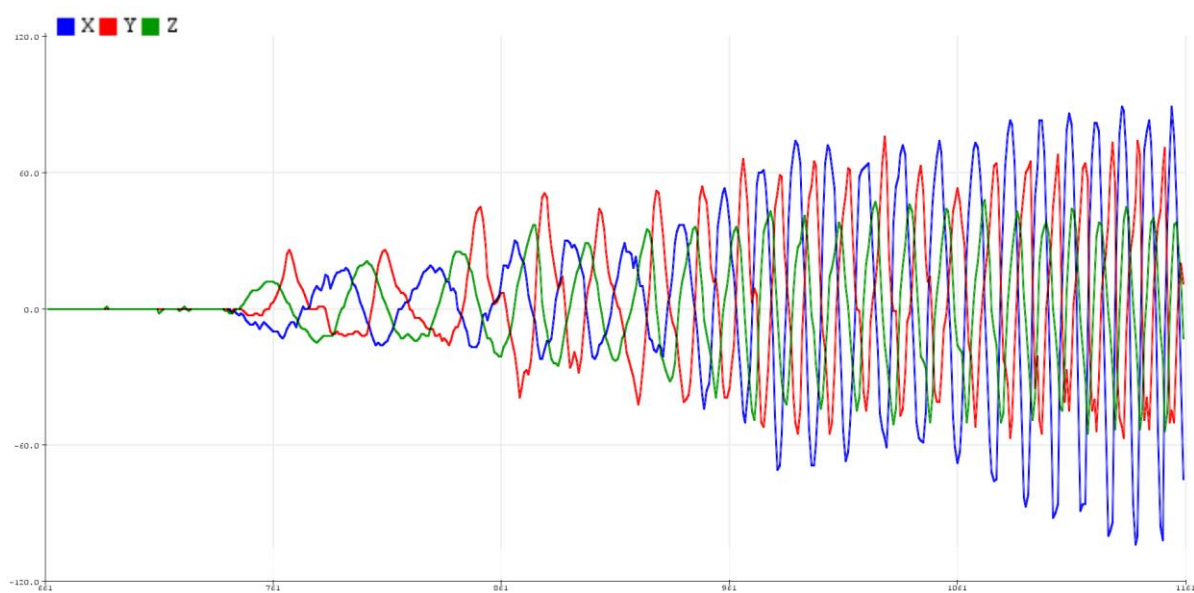


شکل ۳-۳: داده‌های شتاب بر حسب متر بر مجذور ثانیه، در ابتدا سنسور ثابت بوده و به تدریج سرعت چرخش پدال بیشتر شده است. همان‌طور که دیده می‌شود پیش از شروع حرکت، شتاب در دو راستای X و Y، حدوداً برابر ۰ و در راستای Z حدوداً برابر شتاب جاذبه زمین ( $g=9.8$ ) است. نمودار قرمز مربوط به محور X، نارنجی Y و طوسی Z.

برای ژيروسکوپ نیز، طبق برگه مشخصات فنی، وقتی بازه اندازه‌گیری ۲۵۰ باشد، مقدار حساسیت برابر  $131\text{LSB/dps}$  است، یعنی در حالتی که خروجی ژيروسکوپ برابر ۱۳۱ باشد، به این معناست که ژيروسکوپ با سرعت زاویه‌ای ۱ درجه بر ثانیه در حال چرخش است. پس برای تبدیل واحد اگر مقادیر اعداد به دست آمده از سنسور بر ۱۳۱ تقسیم شوند، سرعت زاویه‌ای به دست خواهد آمد. در جدول ۲-۳: جدول حساسیت ژيروسکوپ میزان حساسیت بر حسب بازه اندازه‌گیری آورده شده است. در شکل ۳-۴: داده‌های ژيروسکوپ بر حسب درجه بر ثانیه، در ابتدا سنسور ثابت بوده و به تدریج سرعت چرخش پدال بیشتر شده است. نمودار آبی مربوط به محور X، قرمز Y و سبز Z، داده‌های ژيروسکوپ پس از تبدیل واحد بر حسب درجه بر ثانیه رسم و نشان داده شده‌اند.

جدول ۲-۳: جدول حساسیت ژيروسکوپ

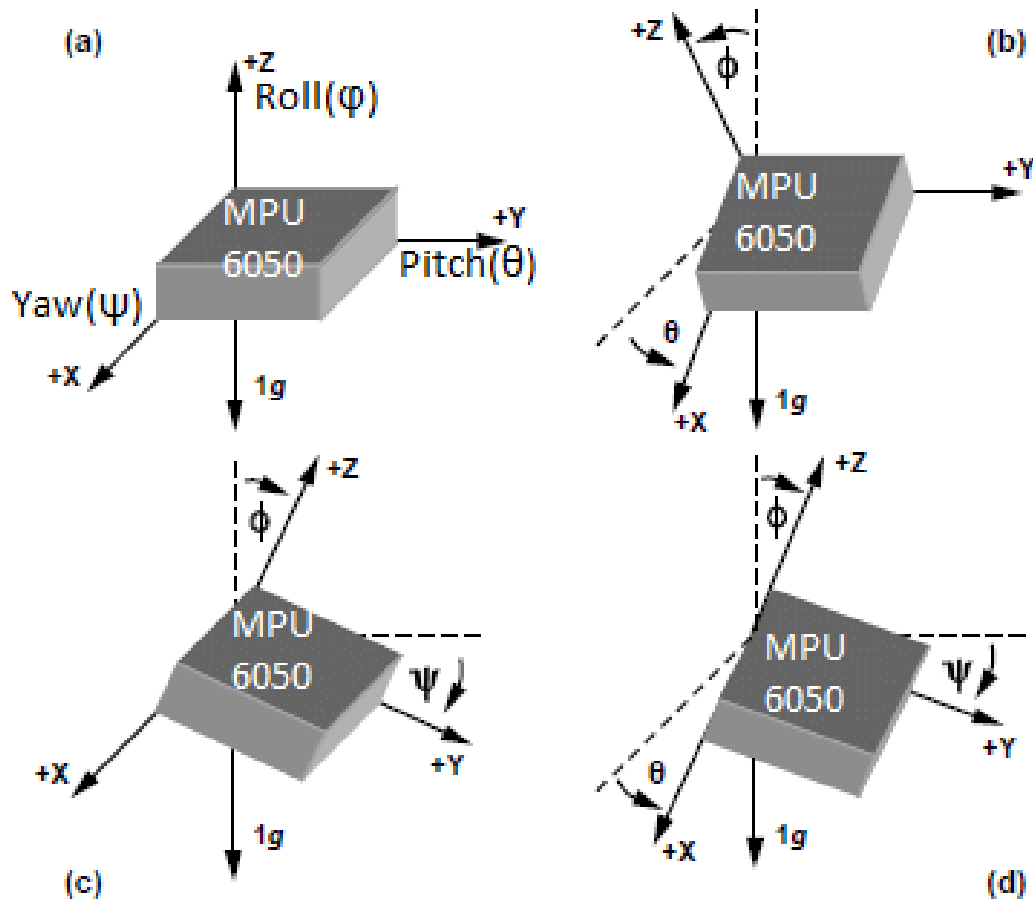
FS_SEL	Full Scale Range	LSB Sensitivity
0	$\pm 250 \text{ }^\circ/\text{s}$	131 LSB/ $^\circ/\text{s}$
1	$\pm 500 \text{ }^\circ/\text{s}$	65.5 LSB/ $^\circ/\text{s}$
2	$\pm 1000 \text{ }^\circ/\text{s}$	32.8 LSB/ $^\circ/\text{s}$
3	$\pm 2000 \text{ }^\circ/\text{s}$	16.4 LSB/ $^\circ/\text{s}$



شکل ۳-۴: داده‌های ژيروسکوپ بر حسب درجه بر ثانیه، در ابتدا سنسور ثابت بوده و به تدریج سرعت چرخش پدال بیشتر شده است. نمودار آبی مربوط به محور X، قرمز Y و سبز Z.

## ۳-۱-۴- محاسبه زوایا با استفاده از داده‌های سنسور شتاب‌سنج

IMUها زاویه را به طور مستقیم در اختیار ما قرار نمی‌دهند و استخراج زاویه از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط سنسورهای IMU به کمی محاسبات و ریاضیات نیاز دارد. زاویه پدال را می‌توان از روی ژيروسکوپ با گرفتن انتگرال جزء roll ( $\omega$ ) و همچنین زاویه بین اجزای Y و Z شتاب‌سنج محاسبه کرد. در شکل زیر زوایایی که سنسور چرخانده شده با محورهای X، Y و Z تشکیل داده نشان داده شده است.



شکل ۳-۵: نحوه قرارگیری محورها در شتاب‌سنج [۶]

توسط یک شتاب‌سنج فقط می‌توان زوایای roll و pitch را توسط فرمول‌های زیر محاسبه کرد.

$$\theta_{pitch} = \arctan \left( \frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \right) \quad (3-1)$$

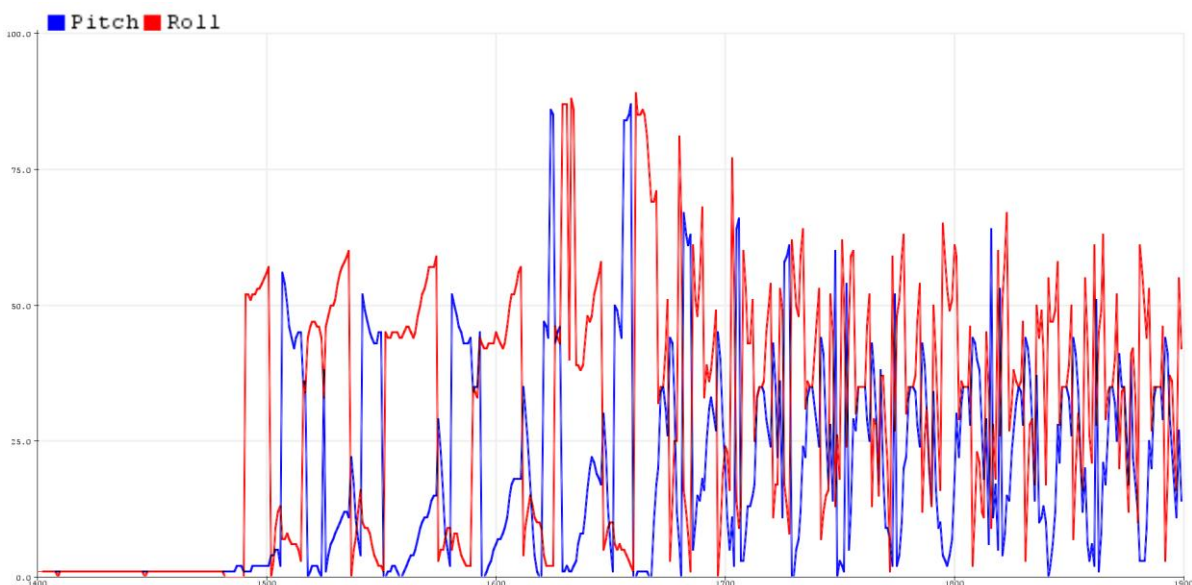
$$\phi_{roll} = \arctan \left( \frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}} \right) \quad (3-2)$$

اما برای محاسبه زاویه yaw به ژيروسکوپ نیاز است. البته باید به این نکته توجه داشت که زوایای حاصل از روابط بالا بر حسب رادیان هستند و برای آن که به درجه تبدیل شوند، باید در  $180/\pi$  ضرب شوند. این زوایا به دلیل آن که شتاب‌سنج هر دو شتاب استاتیکی و دینامیک را اندازه می‌گیرد در حالتی که IMU ساکن است و حرکت نمی‌کند معتبر هستند. چون شتاب‌سنج نویز زیادی دارد، توسط ژيروسکوپ نیز زاویه‌ها محاسبه می‌شوند و با فیلتری مناسب جهت حذف نویز و دیگر مسائل، زاویه‌های خروجی دو سنسور باهم ترکیب می‌شوند. می‌دانیم توسط ژيروسکوپ می‌توان سرعت زاویه‌ای بر حسب درجه بر ثانیه در سه محور را اندازه گرفت. پس از محاسبه‌ی مقدار سرعت زاویه‌ای، در صورتی که هر اندازه‌گیری مثلاً 1ms طول بکشد، خواهیم داشت:

$$\text{angle} = \frac{\omega}{1000} \quad (3-3)$$

شتاب‌سنج در محاسبه‌ی زوایا اشکالاتی نیز دارد:

۱. نویز زیادی روی زوایای محاسبه شده توسط شتاب‌سنج است.
  ۲. در صورتی که سنسور را بدون تغییر زاویه در حالتی که روی سطح افقی است به سمت جلو و عقب و چپ و راست حرکت دهیم مقدار زاویه تغییر می‌کند.
- اما مزیت محاسبه زوایا توسط شتاب‌سنج آن است که سنسور را در هر زاویه‌ای روشن کنیم، همان زاویه را در خروجی نشان خواهد داد.



شکل ۳-۶: زوایای رول و پیچ محاسبه شده از داده‌های شتاب‌سنج بر حسب درجه، در ابتدا سنسور ثابت بوده و به تدریج سرعت چرخش پدال بیشتر شده است. نمودار آبی مربوط به زاویه پیچ و قرمز رول.

### ۵-۱-۳- محاسبه زوایا با استفاده از داده‌های سنسور ژيروسکوپ

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد؛ اگر مقادیر خام اندازه‌گیری شده توسط ژيروسکوپ بر ۱۳۱ تقسیم شوند، در هر سه محور سرعت زاویه‌ای بر حسب درجه بر ثانیه به دست خواهد آمد. Pitch به معنای دوران حول محور Xها، roll به معنای دوران حول محور Yها و yaw هم به معنای دوران حول محور Zهاست. در شکل ۵-۳: نحوه قرارگیری محورها در شتاب‌سنج این مفاهیم به‌خوبی مشخص شده است.

تا اینجا با استفاده از ژيروسکوپ، سرعت‌های زاویه‌ای دوران یک جسم را حول هر سه محور به دست آوردیم. اکنون اگر زمان بین دو اندازه‌گیری متوالی سرعت‌های زاویه‌ای را داشته باشیم جابه‌جایی زاویه‌ای هم به دست می‌آید. با ذخیره کردن این مقدار و اضافه کردن مقدار محاسبه‌شده‌ی جدید به آن، می‌توان به مقدار زاویه‌ی جدیدی که سنسور در آن قرار گرفته است دست‌یافت. برای این کار کافی است که سرعت زاویه‌ای (بر حسب درجه بر ثانیه) در زمان بین اندازه‌گیری سرعت‌ها (بر حسب ثانیه) ضرب شود تا جابه‌جایی زاویه‌ای (تغییرات زاویه) را هم در هر محور به دست آید. برای این کار از معادلات زیر استفاده می‌کنیم که بر اساس اطلاعات برگه مشخصات فنی نوشته شده‌اند.

$$a_{pitch} = v_{pitch} * 0.047$$

$$a_{roll} = v_{roll} * 0.047$$

$$a_{yaw} = v_{yaw} * 0.047$$

$a_{pitch}$  به معنای جابه‌جایی زاویه‌ای حول محور Xها،  $a_{roll}$  جابه‌جایی زاویه‌ای حول محور Yها و  $a_{yaw}$  جابه‌جایی زاویه‌ای حول محور Zهاست.  $v_{pitch}$  و  $v_{roll}$  و  $v_{yaw}$  سرعت‌های زاویه‌ای هستند.

در نهایت نیز جابه‌جایی کل را با فرمول‌های زیر ذخیره می‌کنیم. این فرمول‌ها به‌سادگی بیان می‌کنند جابه‌جایی کل در هر محور برابر است با مجموع جابه‌جایی تا کنون و جابه‌جایی جدید.

$$pitch = pitch + a_{pitch}$$

$$roll = roll + a_{roll}$$

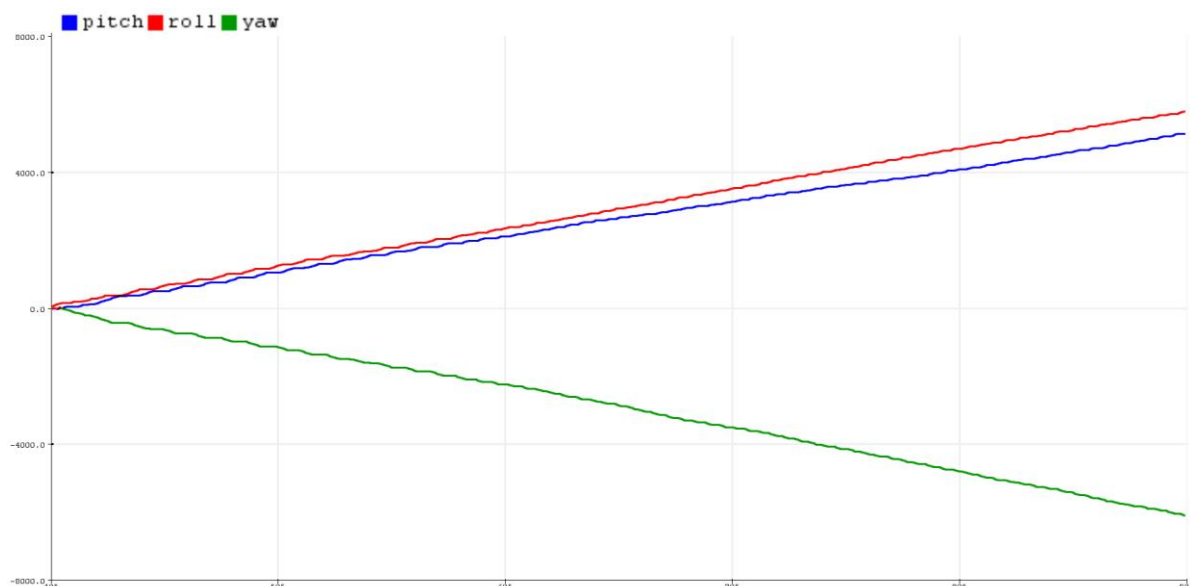
$$yaw = yaw + a_{yaw}$$

ژیروسکوپ در محاسبه‌ی زوایا اشکالاتی نیز دارد:

۱. اگر سنسور را در حالت افقی قرار دهیم، هر سه خروجی را ۰ مشاهده خواهیم کرد. حال اگر سنسور را در جهات مختلف بچرخانیم و مجدداً آن را به صورت افقی قرار دهیم، زوایا دیگر به ۰ برنمی‌گردند. این نشان‌دهنده‌ی پدیده‌ی drift در ژیروسکوپ است.
۲. سنسور در هر حالتی که روشن شود با هر زاویه‌ای نسبت به زمین، زوایا را ۰ نشان می‌دهد. این به این مسئله برمی‌گردد که ژیروسکوپ جابه‌جایی زاویه‌ای را می‌سنجد و مادامی که سنسور حرکت داده نشده، جابه‌جایی زاویه‌ای صفر است.

اما حسن ژیروسکوپ در محاسبه زوایا آن است که نویز بسیار کمی دارد و داده‌ها دقیق هستند.

شکل ۷-۳: زوایای رول و پیچ و یاو محاسبه شده از داده‌های ژیروسکوپ بر حسب درجه، نمودار آبی مربوط به زاویه پیچ، قرمز مربوط به رول و سبز مربوط به یاو. سکوپ بر حسب درجه را نشان می‌دهد. علت صعودی اکید بودن زوایای محاسبه شده این است که با وجود دریافت در شتاب و سرعت زاویه‌ای محاسبه شده، مقدار جابجایی‌ای که در هر لحظه با زاویه قبلی جمع می‌شود، هیچ‌گاه صفر نیست، در نتیجه نمودار اکیدا صعودی می‌شود.



شکل ۷-۳: زوایای رول و پیچ و یاو محاسبه شده از داده‌های ژیروسکوپ بر حسب درجه، نمودار آبی مربوط به زاویه پیچ، قرمز مربوط به رول و سبز مربوط به یاو.

#### ۳-۱-۶- لزوم استفاده از فیلتر کالمن

در طی انجام مراحل پیش‌پردازش، متوجه نویزی بودن داده‌های IMU شده‌ایم. این مشکل به دلیل ساختار MEMS داخلی بسیار حساس و همچنین وابستگی به انواع شرایط محیطی مانند دما، گرانش یا نوسانات ولتاژ تغذیه ایجاد می‌شود [۷]. با توجه به این ویژگی ذاتی، جابه‌جایی زاویه‌ای محاسبه شده در طول دوچرخه‌سواری بسیار غیرقابل اعتماد هستند. برای رفع این مشکل فیلتر کالمن به‌عنوان یک مرحله پس‌پردازش اطلاعات برای بهبود نتایج اندازه‌گیری‌های نهایی به کار گرفته شد. درباره این مرحله در فصل آتی توضیحات بیشتری خواهیم داد.



## فصل ۴ - نحوه فیلتر اطلاعات

### ۴-۱- فیلتر کالمن<sup>۱</sup>

در سال ۱۹۶۰ رادولف کالمن<sup>۲</sup> مقاله مشهورش<sup>۳</sup> را انتشار داد که در آن یک راه حل بازگشتی برای مشکلات فیلترینگ خطی داده‌های گسسته بیان کرد. از آن زمان به بعد، به دلیل بخش عظیمی از پیشرفت‌ها در محاسبات دیجیتالی، فیلتر کالمن موضوع بسیاری از تحقیقات بوده است [۸].

فیلتر کالمن که به عنوان تخمین خطی مرتبه دوم نیز از آن یاد می‌شود، الگوریتمی است که حالت یک سیستم پویا را با استفاده از مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌های شامل خطا در طول زمان برآورد می‌کند. این فیلتر معمولاً تخمین دقیق‌تری را نسبت به تخمین بر مبنای یک اندازه‌گیری واحد را بر مبنای تخمین توزیع احتمال مشترکی از یک متغیر تصادفی در یک مقطع زمانی ارائه می‌کند. فیلتر کالمن کاربردهای بسیاری در علم و فناوری مانند مسیریابی و پایش وسایل نقلیه، به خصوص هواپیما و فضاپیماها دارد. فیلتر کالمن مفاهیم گسترده‌ای را در زمینه سری‌های زمانی، پردازش سیگنال و اقتصادسنجی مطرح می‌کند. این فیلتر از مفاهیم پایه در زمینه برنامه‌ریزی و پایش ربات‌ها و همچنین مدل‌سازی سیستم عصبی محسوب می‌شود. بر اساس تأخیر زمانی میان ارسال فرامین و دریافت پاسخ آن‌ها، استفاده از فیلتر کالمن در تخمین حالات مختلف سیستم را ممکن می‌سازد. این الگوریتم در دو گام اجرا می‌شود. در گام پیش‌بینی، فیلتر کالمن تخمینی از وضعیت فعلی متغیرها را در شرایط عدم قطعیت ارائه می‌کند. زمانی که نتیجه اندازه‌گیری بعدی به دست آید، تخمین قبلی با میانگین وزن‌دار آپدیت می‌شود. به این ترتیب که وزن اطلاعاتی که دارای

<sup>1</sup> Kalman Filter

<sup>2</sup> Rudolf E. Kálmán

<sup>3</sup> A new approach to linear filtering and prediction problems

قطعیت بیشتری هستند، بیشتر خواهد بود. الگوریتم بازگشتی است و با استفاده از ورودی‌های جدید و حالات محاسبه‌شده‌ی قبلی به‌صورت بی‌درنگ اجرا می‌شود. درمورد ورودی‌های فیلتر کالمن نمی‌توان بیان کرد که تمام خطاها گوسی هستند. اما در عمل فیلتر برآوردهای احتمالاتی را با فرض توزیع طبیعی داشتن انجام می‌دهد.

#### ۴-۱-۱- مدل‌سازی و معادلات

فیلتر کالمن گسسته<sup>۱</sup> (DKF) از یک مدل بازگشتی فضای حالت استفاده می‌کند که بر اساس اطلاعات سنسور، با عدم قطعیت‌های متفاوت به‌روز می‌شود. نسخه اولیه فیلتر کالمن برای مسئله تخمین حالت سیستم خطی تصادفی زیر توسعه داده شد:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \quad (۴-۱)$$

$$y_k = Cx_k + v_k \quad (۴-۲)$$

در معادله بالا،  $u \in R^p$  بردار ورودی<sup>۲</sup>،  $y \in R^m$  مقدار اندازه‌گیری شده<sup>۳</sup>،  $A_{n \times n}$  ماتریس حالت<sup>۴</sup>،  $B_{n \times p}$  ماتریس ورودی و  $C_{m \times n}$  ماتریس خروجی است.

متغیرهای تصادفی  $w$ ،  $v$  به ترتیب نویز اندازه‌گیری<sup>۵</sup> و نویز فرایند<sup>۶</sup> را نشان می‌دهند. آن‌ها با توزیع گاوسی سفید<sup>۷</sup>، با میانگین صفر و ماتریس کوواریانس ثابت  $R$ ،  $Q$  مستقل فرض می‌شوند.

هدف کلی یافتن تخمین بهینه  $\hat{x}_k$  بردار حالت داخلی  $x_k$  است. تابع هزینه خطا<sup>۸</sup> به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$e_k = x_k - \hat{x}_k \quad (۴-۳)$$

<sup>۱</sup> Discrete Kalman filter

<sup>۲</sup> Input vector

<sup>۳</sup> Measured output

<sup>۴</sup> State matrix

<sup>۵</sup> Measurement noise

<sup>۶</sup> Process noise

<sup>۷</sup> Gaussian white noise

<sup>۸</sup> Error cost function

$$P_k = E[e_k e_k^T] \quad (۴-۴)$$

$P_k$  میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> است که باید به حداقل برسد. با فرض اینکه تخمین قبلی<sup>۲</sup>  $\hat{x}_k$ ،  $\hat{x}_k'$  نامیده شود، معادله بهروزرسانی برای تخمین جدید به صورت زیر ارائه می شود:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k' + K_k(y_k - C\hat{x}_k') \quad (۴-۵)$$

جایی که در آن  $K_k$  بهره کالمن<sup>۳</sup> است و عبارت داخل پرانتز سمت راست را نوآوری یا باقیمانده اندازه گیری<sup>۴</sup> می نامند. با جایگزینی معادله ۸ و معادله ۶ در معادله ۷، بهره بهینه کالمن به صورت زیر محاسبه می شود:

$$K_k = P_k' C^T (C P_k' C^T + R)^{-1} \quad (۴-۶)$$

$$P_k = (I - K_k C) P_k' \quad (۴-۷)$$

جایی که  $P_k'$  تخمین قبلی  $P_k$  است. معادله ۱۰ معادله بهروزرسانی برای ماتریس کوواریانس خطا با بهره بهینه است. سه معادله آخر را می توان برای برآورد متغیر حالت پیشینی  $\hat{x}_{k+1}'$  و ماتریس کوواریانس  $P_{k+1}'$  به صورت زیر استفاده کرد:

$$\hat{x}_{k+1}' = A\hat{x}_k + Bu_k \quad (۴-۸)$$

$$P_{k+1}' = AP_k A^T + Q \quad (۴-۹)$$

نسخه عمومی DKF دارای پنج معادله اصلی است، دو معادله در بهروزرسانی زمان یا پیش بینی<sup>۵</sup> (معادله ۱۱ و ۱۲) و سه مورد در بهروزرسانی یا تصحیح اندازه گیری<sup>۶</sup> (معادله ۸، ۹ و ۱۰).

<sup>۱</sup> Mean squared error

<sup>۲</sup> Prior estimate

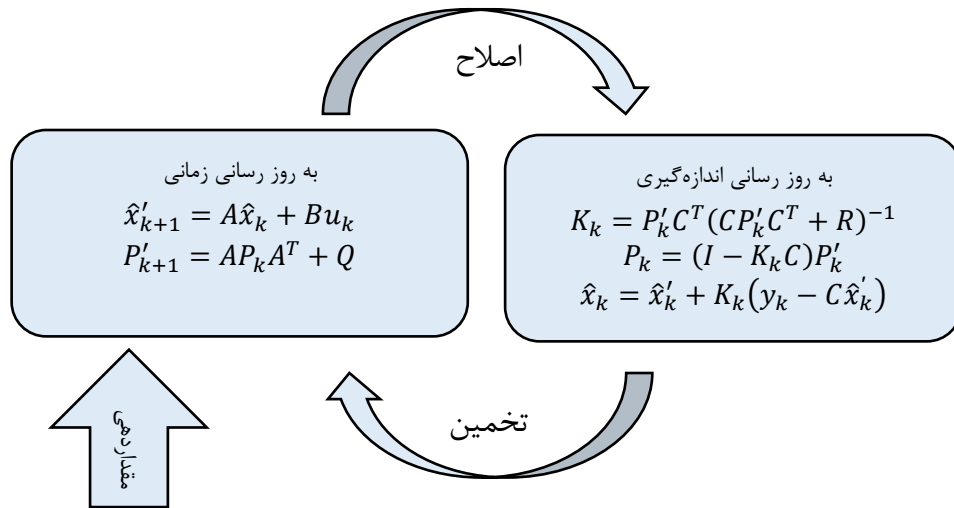
<sup>۳</sup> Kalman gain

<sup>۴</sup> Innovation or measurement residual

<sup>۵</sup> Time update or prediction

<sup>۶</sup> Measurement update or correction

معادلات به‌روزرسانی زمان مسئول پیش‌بینی (در زمان) برآوردهای کوواریانس وضعیت فعلی و خطا برای به‌دست‌آوردن تخمین‌های پیش‌بینی برای مرحله زمانی بعدی هستند. معادلات به‌روزرسانی اندازه‌گیری مسئول بازخورد هستند. معادلات به‌روزرسانی زمان را می‌توان به‌عنوان معادلات پیش‌بینی‌کننده نیز در نظر گرفت، درحالی‌که معادلات به‌روزرسانی اندازه‌گیری را می‌توان به‌عنوان معادلات تصحیح‌کننده در نظر گرفت.



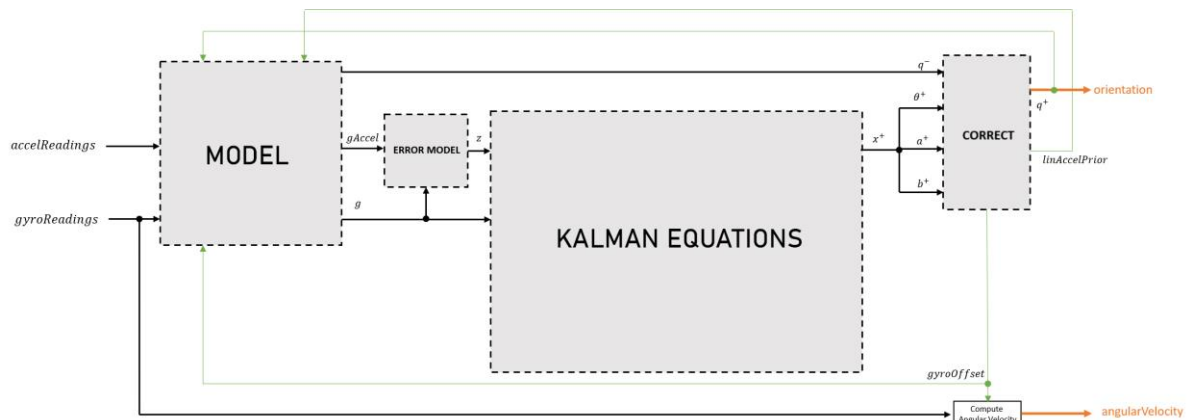
شکل ۴-۱: الگوریتم فیلتر کالمن

هدف نهایی فرایند فیلتر کردن، یافتن بهترین تخمین از وضعیت داخلی<sup>۱</sup> است. مدل ریاضی سیستم فیزیکی، یعنی ماتریس‌های  $A$ ،  $B$ ،  $C$  در معادلات ۴ و ۵، به‌عنوان دانش قبلی در نظر گرفته می‌شوند. همچنین بردارهای ورودی و خروجی از نظر فیزیکی قابل اندازه‌گیری هستند. در هر مرحله زمانی، تخمین حالت پیش‌بینی بعدی با استفاده از تخمین حالت بهینه قبلی و مدل فیزیکی شناخته شده محاسبه می‌شود. این مرحله پیش‌بینی نامیده می‌شود، زیرا اولین حدس را برای بردار حالت داخلی ارائه می‌دهد. در مرحله تصحیح، برآورد حالت پیش‌بینی تصحیح شده توسط بردار خروجی اندازه‌گیری شده فیزیکی تجدیدنظر می‌شود.

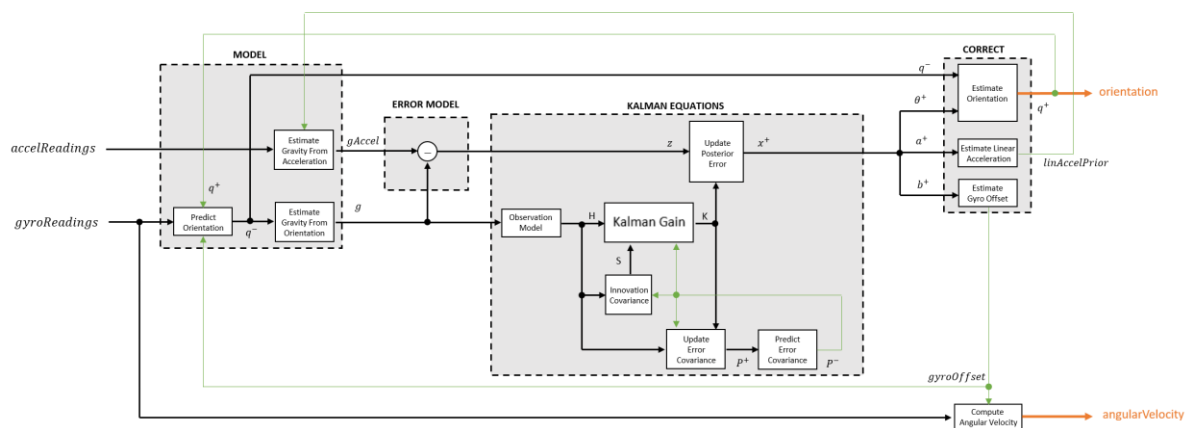
<sup>1</sup> Internal state

## ۴-۱-۲- نحوه عملکرد

همان طور که در شکل ۲-۴: بلوک دیاگرام سیستم فیلتر کالمن برای ژيروسکوپ و شتابسنج نشان داده شده است، پس از دریافت داده‌های سنسور شتابسنج، مدل مناسب برای استفاده از فیلتر کالمن معرفی شده است. سپس مدل مناسب برای ارور نیز تخمین زده شد. اکنون از معادلات کالمن‌ای که پیش‌تر به تفصیل توضیح داده شد استفاده کرده و پس از به‌روزرسانی مقادیر، با استفاده از مدل اولیه و معادلات کالمن، فرایند اصلاح نیز انجام می‌شود و سرعت زاویه‌ای به دست می‌آید.



شکل ۲-۴: بلوک دیاگرام سیستم فیلتر کالمن برای ژيروسکوپ و شتابسنج [۹]



شکل ۳-۴: جزئیات بلوک دیاگرام سیستم فیلتر کالمن برای ژيروسکوپ و شتابسنج [۹]

#### ۴-۱-۳- پیاده‌سازی

با توجه به مواردی که پیش‌تر نیز به آن‌ها اشاره شد، به طور خلاصه می‌توان گفت که فقط در کوتاه‌مدت می‌توان به ژيروسکوپ اعتماد کرد، درحالی‌که در طولانی مدت فقط می‌توان به شتاب‌سنج اعتماد کرد. یک راه بسیار آسان برای مقابله با این موضوع استفاده از یک فیلتر مکمل است که اساساً فقط از یک فیلتر پایین‌گذر دیجیتال روی شتاب‌سنج و فیلتر دیجیتالی بالاگذر روی خوانش ژيروسکوپ تشکیل شده است، اما فیلتر مکمل به اندازه فیلتر کالمن دقیق نیست.

فیلتر کالمن با تولید یک تخمین آماری بهینه از وضعیت سیستم بر اساس اندازه‌گیری‌ها عمل می‌کند. برای انجام این کار باید نویز ورودی فیلتر به نام نویز اندازه‌گیری و همچنین نویز خود سیستم به نام نویز فرایند را بشناسید. برای انجام این کار، نویز باید به صورت گاوسی توزیع شود و میانگین صفر داشته باشد، خوشبختانه اکثر نویزهای تصادفی این ویژگی را دارند.

#### • شرح نمادهای استفاده شده

$\hat{x}_{k|k-1}$ : حالت قبلی<sup>۱</sup>، که که حالت تخمینی قبلی بر اساس حالت قبلی و تخمین حالات قبل از آن است.

$\hat{x}_{k|k-1}$ : حالت پیشین<sup>۲</sup>، که تخمین ماتریس حالت در زمان جاری بر اساس وضعیت قبلی سیستم و برآورد حالت‌های قبل از آن است.

$\hat{x}_{k|k}$ : آخرین حالت، حالت پسین<sup>۳</sup> نامیده می‌شود: این تخمین وضعیت کنونی با استفاده از مشاهدات تا زمان فعلی است.

مشکل این است که خود وضعیت سیستم پنهان است و فقط از طریق مشاهده  $Z_k$  قابل مشاهده است. به این مدل مارکوف پنهان<sup>۴</sup> نیز می‌گویند.

<sup>1</sup> Previous state

<sup>2</sup> Priori state

<sup>3</sup> Posteriori state

<sup>4</sup> Hidden Markov model

کلاه روی  $\hat{x}$  به این معنی است که این حالت، یک تخمین از وضعیت است. بر خلاف  $x$  منفرد که به معنای وضعیت واقعی است، همان وضعیتی که سعی در تخمین آن داریم. بنابراین، نماد حالت در زمان  $k$  به صورت زیر است:

$$\hat{x}_k$$

وضعیت سیستم<sup>۱</sup> در زمان  $K$  با معادله زیر مشخص می شود:

$$x_k = Fx_{k-1} + Bu_k + w_k \quad (4-10)$$

که در آن  $x_k$  ماتریس وضعیت سیستم است که توسط معادله زیر تعریف می شود:

$$x_k = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix}_k \quad (4-11)$$

خروجی سیستم بر اساس اندازه گیری های شتاب سنج و ژيروسکوپ، زاویه  $\theta$  و بایاس سنسور خواهد بود. این بدان معناست که می توان با کم کردن بایاس از اندازه گیری ژيروسکوپ، نرخ واقعی و صحیح را به دست آورد.

ماتریس  $F$ ، ماتریس انتقال حالت<sup>۲</sup> است که به حالت قبلی اعمال می شود.

$$F = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

ورودی کنترلی در این بخش،  $u_k$  خواهد بود. در این معادله اندازه گیری ژيروسکوپ بر حسب درجه بر ثانیه

خواهد بود، که به آن  $\dot{\theta}$  نیز می گویند. معادلات حالت طبق زیر بازنویسی می شود:

$$x_k = Fx_{k-1} + B\dot{\theta}_k + w_k \quad (4-13)$$

ماتریس  $B$ ، مدل ورودی کنترلی است که طبق زیر تعریف می شود:

$$B = \begin{bmatrix} \Delta t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

<sup>1</sup> System state

<sup>2</sup> State transition model

هنگامی که نرخ  $\theta$  در زمان  $\Delta t$  ضرب می‌شود، زاویه  $\theta$  به دست می‌آید و از آنجایی که نمی‌توان بایاس را مستقیماً بر اساس نرخ محاسبه کرد، درایه پایینی ماتریس برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

$w_k$  نویز فرایند است که به صورت گاوسی با میانگین صفر و با کوواریانس  $Q$  به زمان  $k$  توزیع می‌شود:

$$w_k \sim N(0, Q_k) \quad (4-15)$$

$Q_k$  ماتریس کوواریانس نویز فرایند و در این مورد ماتریس کوواریانس تخمین حالت شتاب‌سنج و بایاس است. ماتریس نهایی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q_k = \begin{bmatrix} Q_\theta & 0 \\ 0 & Q_{\dot{\theta}_b} \end{bmatrix} \Delta t \quad (4-16)$$

ماتریس کوواریانس  $Q_k$  به زمان فعلی  $k$  بستگی دارد، بنابراین واریانس شتاب‌سنج  $Q_\theta$  و واریانس بایاس  $Q_{\dot{\theta}_b}$  در زمان دلتا  $\Delta t$  ضرب می‌شود. در واقع نویز فرایند هرچه زمان طولانی‌تری از آخرین به‌روزرسانی وضعیت می‌گذرد، بیشتر می‌شود.

اکنون نگاهی به مشاهده یا اندازه‌گیری  $z_k$  حالت واقعی  $x_k$  خواهیم داشت.  $z_k$  از مجموع حالت فعلی  $x_k$  ضرب در ماتریس  $H$  به اضافه نویز اندازه‌گیری  $v_k$  به دست می‌آید:

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (4-17)$$

$H$  مدل رویت نامیده می‌شود و برای نگاشت فضای حالت واقعی در فضای رویت شده استفاده می‌شود. از آنجایی که اندازه‌گیری در این مرحله فقط اندازه‌گیری حاصل از شتاب‌سنج است،  $H$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H = [1 \quad 0] \quad (4-18)$$

<sup>1</sup> Observation or Measurement



نویز اندازه‌گیری نیز همانطور که پیش‌تر گفته شد باید به‌صورت گاوسی با میانگین صفر و  $R$  به‌عنوان کوواریانس توزیع شود:

$$v_k \sim N(0, R) \quad (۴-۱۹)$$

اما از آن‌جایی که  $R$  یک ماتریس نیست، نویز اندازه‌گیری فقط با واریانس اندازه‌گیری برابر است، زیرا کوواریانس همان متغیر برابر با واریانس است. اکنون می‌توانیم  $R$  را به این صورت تعریف کنیم:

$$R = E[v_k v_k^T] = \text{var}(v_k) \quad (۴-۲۰)$$

فرض می‌شود که نویز اندازه‌گیری یکسان است و به زمان  $k$  بستگی ندارد:

$$\text{var}(v_k) = \text{var}(v) \quad (۴-۲۱)$$

باید به این نکته توجه داشت که اگر واریانس نویز اندازه‌گیری  $\text{var}(v)$  خیلی بالا تنظیم شود، فیلتر بسیار کند پاسخ می‌دهد؛ زیرا فیلتر کمتر به اندازه‌گیری‌های جدید اعتماد می‌کند، اما اگر خیلی کوچک باشد، ممکن است اندازه‌گیری دچار فراجش<sup>۱</sup> بالا شود و نویز زیادی داشته باشد؛ زیرا فیلتر بیش از حد به اندازه‌گیری‌های شتاب‌سنج اعتماد می‌کند.

## • معادلات فیلتر کالمن

### پیش‌بینی:

در دو معادله اول، وضعیت فعلی و ماتریس کوواریانس خطا را در زمان  $k$  پیش‌بینی می‌شود. ابتدا فیلتر سعی می‌کند وضعیت فعلی را بر اساس تمام حالت‌های قبلی و اندازه‌گیری ژيروسکوپ تخمین بزند:

$$\hat{x}_{k|k-1} = F\hat{x}_{k-1|k-1} + B\dot{\theta}_k \quad (۴-۲۲)$$

<sup>۱</sup> Overshoot

مرحله بعدی این است که ماتریس کوواریانس خطای پیشینی  $P_{k|k-1}$  بر اساس ماتریس کوواریانس خطای قبلی  $P_{k-1|k-1}$  بازنویسی شود:

$$P_{k|k-1} = F P_{k-1|k-1} F^T + Q_k \quad (4-23)$$

این ماتریس برای سنجش میزان اعتماد به مقادیر فعلی وضعیت تخمین‌زده استفاده می‌شود. هر چه کوچک‌تر باشد، بیشتر به وضعیت تخمینی فعلی اعتماد داریم. درک اصل معادله بالا در واقع بسیار آسان است، زیرا کاملاً واضح است که کوواریانس خطا با گذشت زمان از آخرین باری که تخمین حالت به‌روز شده افزایش می‌یابد، بنابراین ماتریس کوواریانس خطا را در مدل انتقال حالت  $F$  و ترانهاد آن ضرب و سپس نویز فرایند  $Q_k$  را به آن اضافه کردیم.

ماتریس کوواریانس خطا  $P$  در مورد ما یک ماتریس  $2 \times 2$  است:

$$P = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix}$$

به‌روزرسانی:

قدم اول این است که تفاوت بین اندازه‌گیری  $z_k$  و حالت پیشینی  $\hat{x}_{k|k-1}$  محاسبه شود، به این فرایند نوآوری نیز می‌گویند:

$$\tilde{y}_k = z_k - H \hat{x}_{k|k-1} \quad (4-24)$$

مدل مشاهده  $H$  برای نگاشت<sup>1</sup> حالت پیشینی که اندازه‌گیری شتاب‌سنج است استفاده می‌شود، بنابراین نوآوری یک ماتریس نیست.

$$\tilde{y}_k = [\tilde{y}]_k \quad (4-25)$$

مرحله بعدی محاسبه کوواریانس نوآوری است:

$$S_k = H P_{k|k-1} H^T + R \quad (4-26)$$

---

<sup>1</sup> Map

و ماتریس کوواریانس  $P_{k|k-1}$  این مقدار نشان می‌دهد بر اساس ماتریس کوواریانس خطای پیشینی برای نگاشت ماتریس  $H$  تا چه اندازه می‌توان به اندازه‌گیری اعتماد کرد. مدل مشاهده  $R$  اندازه‌گیری کوواریانس خطای پیشینی در فضای مشاهده شده استفاده می‌شود. هر چه مقدار نویز اندازه‌گیری بزرگ‌تر باشد، مقدار  $S$  بزرگ‌تر است، به این معنی که به اندازه‌گیری ورودی آن قدر نمی‌شود اعتماد کرد. در این مورد  $S$  یک ماتریس نیست و به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$S_k = [S]_k \quad (۴-۲۷)$$

مرحله بعدی محاسبه بهره کالمن است. بهره کالمن برای نشان دادن میزان اعتماد به نوآوری استفاده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_k = P_{k|k-1} H^T S_k^{-1} \quad (۴-۲۸)$$

دیده می‌شود که اگر به نوآوری اعتماد نشود، کوواریانس نوآوری  $S$  بالا خواهد بود و اگر به تخمین حالت اعتماد شود، ماتریس کوواریانس خطا  $P$  کوچک خواهد بود، بنابراین بهره کالمن کوچک خواهد شد و بالعکس. فرض می‌کنیم که وضعیت ابتدایی در هنگام راه‌اندازی مشخص و برابر صفر است، بنابراین ماتریس کوواریانس خطا مطابق زیر مقداردهی اولیه می‌شود:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

بهره کالمن یک ماتریس  $1 \times 2$  است:

$$K = \begin{bmatrix} K_0 \\ K_1 \end{bmatrix} \quad (۴-۲۹)$$

اکنون می‌توان برآورد پسینی وضعیت فعلی را به روز کرد:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \tilde{y}_k \quad (۴-۳۰)$$

نوآوری  $\tilde{y}_k$  تفاوت بین اندازه‌گیری  $z_k$  و حالت پیشینی تخمینی  $\hat{x}_{k|k-1}$  است، بنابراین نوآوری می‌تواند مثبت یا منفی باشد.

آخرین کاری که باید انجام شود این است که ماتریس کوواریانس خطای پسینی را به روز کنیم:

$$P_{k|k} = (I - K_k H) P_{k|k-1} \quad (4-31)$$

جایی که  $I$  ماتریس شناسایی<sup>۱</sup> نامیده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

کاری که فیلتر انجام می‌دهد این است که اساساً ماتریس کوواریانس خطا را بر اساس میزان خطای تخمین خود تصحیح می‌کند.

## ۴-۲- فیلتر مکمل<sup>۲</sup>

### ۴-۲-۱- ترکیب حسگرها<sup>۳</sup>

به ترکیب داده‌های حس شده از چند حسگر مختلف گفته می‌شود. این کار به منظور کاهش عدم قطعیت<sup>۴</sup> استفاده از حسگرهای تکی انجام می‌شود. داده‌های مورد استفاده از حسگرهای یکسان نیست. ترکیب حسگرها گاهی با نام ترکیب داده‌ها نیز شناخته می‌شود. ترکیب حسگرها موجب دستیابی به نتایج دقیق‌تر، کامل‌تر و قابل‌اعتمادتر نسبت به قبل می‌شود. [۱۰] یکی از پایه‌های اساسی برای کنترل سیستم، تخمین وضعیت در محیط بر مبنای اطلاعات سنسور است.

اهمیت ترکیب اطلاعات:

- استفاده از داده‌های چند سنسور، از لحاظ آماری باعث کاهش خطا می‌شود.
- استفاده از چندین منبع اطلاعاتی مختلف باعث کامل‌تر شدن اطلاعات می‌شود و در نتیجه امکان تصمیم‌گیری بهتر و سریع‌تر فراهم می‌شود.
- استفاده از ترکیب حسگرها، باعث افزایش تنومندی<sup>۵</sup> سیستم می‌شود.

<sup>1</sup> Identity matrix

<sup>2</sup> Complementary filter

<sup>3</sup> Sensor Fusion

<sup>4</sup> Uncertainty

<sup>5</sup> Robustness

#### ۴-۲-۲- ترکیب اطلاعات شتاب‌سنج و ژيروسکوپ

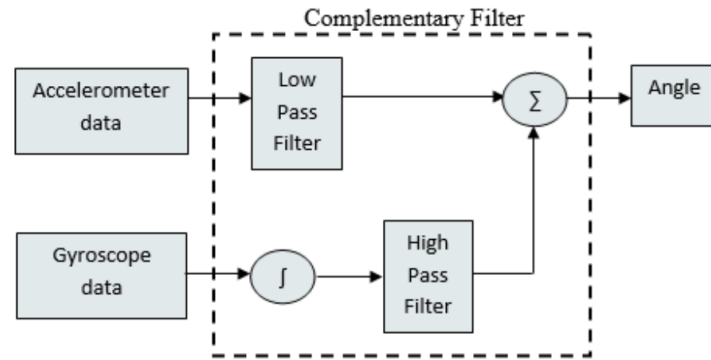
یکی از ساده‌ترین راه‌ها برای ترکیب اطلاعات استفاده از فیلتر مکمل است. این فیلتر به شکلی طراحی شده است که جنبه‌های مثبت یک سنسور، نقاط ضعف سنسور دیگر را پوشش می‌دهند. در حقیقت واژه مکمل نیز نشان‌دهنده همین مورد است.

به دست آوردن موقعیت زاویه‌ای با استفاده از هر کدام از سنسورهای شتاب‌سنج و یا ژيروسکوپ امکان‌پذیر است. اما هر دو این سنسورها ایرادهای بزرگی دارند که استفاده از داده‌های آن‌ها را به تنهایی و بدون حضور فیلتر غیرممکن می‌سازد. روش فیلتر مکمل ابتدایی‌ترین روش برای ترکیب داده‌های شتاب‌سنج و ژيروسکوپ است. این فیلتر در کوتاه‌مدت از داده‌های ژيروسکوپ استفاده می‌کند، چرا که به نیروهای خارجی حساس نبوده و بسیار دقیق می‌باشد. همچنین به دلیل این که داده‌های شتاب‌سنج در بلندمدت معتبر بوده و دچار انحراف نمی‌شود، در بلندمدت از داده‌های شتاب‌سنج استفاده می‌کند. این فیلتر شامل یک فیلتر پایین‌گذر به منظور تضعیف نوسانات کوتاه‌مدت شتاب‌سنج و همچنین یک فیلتر بالاگذر به منظور خنثی کردن تأثیرات ناشی از انحرافات زاویه ژيروسکوپ می‌باشد. در این مقاله از فیلتر مکمل برای مقایسه بین نتیجه حاصل از این فیلتر و فیلتر کالمن استفاده شده است.

شکل ۴-۴: بلوک دیاگرام سیستم فیلتر مکمل برای ژيروسکوپ و شتاب‌سنج، تخمین زاویه با استفاده از دو ورودی شتاب‌سنج و ژيروسکوپ را نشان می‌دهد. فیلتر پایین‌گذر سیگنال‌های فرکانس بالا را هنگامی که شتاب‌سنج وضعیت ارتعاش را حس می‌کند فیلتر می‌کند. از ورودی ژيروسکوپ انتگرال گرفته می‌شود تا قبل از وارد شدن به فیلتر بالاگذر، یک زاویه نگرش<sup>۱</sup> به دست آید تا اثر دریفت<sup>۲</sup> را خنثی کند. هر دو فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر به طور همزمان کار می‌کنند، سپس هر دو سیگنال با هم جمع می‌شوند.

<sup>۱</sup> Attitude angle

<sup>۲</sup> Drift



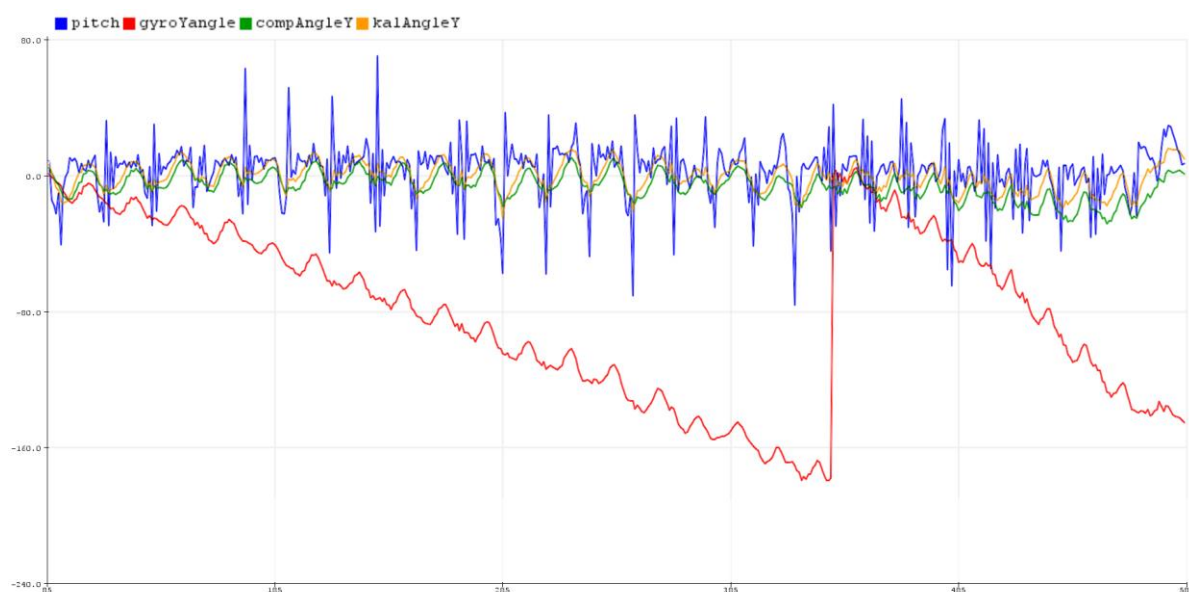
شکل ۴-۴: بلوک دیاگرام سیستم فیلتر مکمل برای ژيروسکوپ و شتاب‌سنج [۱۱]

معادله‌ای که در فیلتر مکمل استفاده می‌شود، به صورت زیر است.  $a$  یک مقدار ثابت است که با استفاده از آزمون و خطا می‌توان به بهترین مقدار آن دست یافت. در این پروژه، پس از سعی و خطاهای متوالی، این ضریب برابر ۰.۹۳ در نظر گرفته شده است:

$$\text{Angle} = a \times (\text{angle} + \text{gyro} \times dt) + (1-a) \times (\text{accelerometer}) \quad (4-32)$$

## ۴-۲-۳- نتایج

شکل زیر، نتیجه حاصل از فیلتر کردن داده‌های ورودی، توسط دو فیلتر کالمن و فیلتر مکمل است. در شکل زیر، محور عمودی نشان‌دهنده زاویه، محور افقی زمان بر حسب یک صدم ثانیه است. نمودار آبی رنگ زاویه به دست آمده از سنسور شتاب‌سنج، نمودار قرمز رنگ زاویه محاسبه شده توسط ژيروسکوپ و نمودار سبز زاویه محاسبه شده توسط فیلتر مکمل از ترکیب دو سنسور و نمودار زرد رنگ، حاصل محاسبه زوایا با استفاده از فیلتر کالمن است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، داده‌ی به دست آمده از شتاب‌سنج بسیار نویزی و داده حاصل از ژيروسکوپ، دارای دریفت است. اما داده فیلتر شده، زاویه پدال را حین حرکت مشخص می‌کند و نویز شتاب‌سنج و دریفت ژيروسکوپ اثری روی آن ندارد. هر پیک یا قله روی نمودار، به معنای بالا بودن پدال در یک چرخش است و بالعکس، هر دره آن نشان‌دهنده گذر پدال از پایین‌ترین نقطه است.



شکل ۴-۵: نتایج نهایی فیلتر کردن داده‌ها

همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، نتایج حاصل‌شده از فیلتر کالمن از دقت بیشتری نسبت به فیلتر مکمل برخوردار هستند. جهش یکباره نمودار زاویه محاسبه شده توسط ژيروسکوپ نیز، به دلیل وجود یک حلقه کنترلی در برنامه است، که در صورتی که زاویه بیش از ۱۸۰ درجه شود، مجدداً به ۰ برمی‌گردد تا از دریفت زیادی جلوگیری شود.

لزوم استفاده از فیلتر کالمن در این پروژه آنجایی مشخص می‌شود که اگر نمودار آبی رنگ که مربوط به اندازه‌گیری‌های شتاب‌سنج است بررسی شود، دیده می‌شود در هر سیکل به علت نویز بالا ممکن است نمودار چندین بار از صفر گذر کرده باشد. این موضوع در سنجش سرعت ما خطا ایجاد می‌کند.

#### ۴-۲-۴- انجام آزمون عملکردی

در نهایت، با توجه به بخش دیگر این پروژه که بخش واقعیت مجازی است، داده‌ای که ارسال می‌شود، تندی چرخش پدال است، که برای به‌دست‌آوردن این مورد، کافی است تعداد دفعاتی که زاویه پدال به ۰ رسیده است از فیلتر کالمن به دست آورده شود و این عدد را بر ۲ تقسیم کنیم تا تعداد دور به دست آید. این مقدار، با استفاده از بلوتوث به برد رزبری پای<sup>۱</sup> که برای بخش واقعیت مجازی استفاده می‌شود ارسال خواهد شد. در بخش واقعیت مجازی، تصاویری از مسیرهای گوناگون کشورهای مختلف وجود دارد که با انتخاب کشور در منوی دستگاه و سپس انتخاب یکی از مسیرهای موجود، می‌توان از دستگاه استفاده کرد.



شکل ۴-۶: منوی انتخاب کشور

<sup>1</sup> Raspberry Pi





شکل ۷-۴: انجام آزمون عملکردی پروژه

در انجام آزمون عملکردی، با توجه به این که هنوز دوچرخه ثابتی خریداری نشده بود، نتوانستیم با استفاده از انکودر، سرعت و زاویه دقیق را به دست آوریم تا با مقادیر به دست آمده مقایسه کنیم، اما صحت اطلاعات به دست آمده با شمارش تعداد دور به صورت چشمی مورد تایید قرار گرفت. در آینده نزدیک، آزمون عملکردی دقیق برای بررسی صحت زاویه‌ی خروجی انجام خواهد گرفت.

## فصل ۵- نتایج و پیشنهادات

### ۵-۱- نتایج

در فصل‌های پیش، با چالش موجود دوچرخه‌های توان‌بخشی آشنا شدیم و راه‌حلی برای نوآوری در این زمینه ارائه کردیم. تعریف اصلی مسئله در این پروژه، طراحی پدال‌های هوشمند بود تا سرعت چرخش پدال حین کار دوچرخه‌سواری اندازه‌گیری شود. ما نمی‌توانستیم هیچ سنسوری را روی بدنه دوچرخه نصب کنیم، زیرا سخت‌افزار این پروژه باید قابلیت جابه‌جایی و نصب روی هر دوچرخه ثابتی را دارا می‌بود. این مقاله بر روی اندازه‌گیری سرعت پدال متمرکز بود. کاربرد IMU برای اندازه‌گیری جابه‌جایی زاویه‌ای، پس از پردازش توسط فیلتر کالمن، ارائه شد.

در فیلتر کالمن برای محاسبه زاویه پدال، از دو اندازه‌گیری نویزی سنسور شتاب‌سنج و ژيروسکوپ استفاده شد. مشتقات جابه‌جایی زاویه‌ای، از دو منبع مجزا (شتاب‌سنج و ژيروسکوپ)، برای محاسبه تخمین دقیق‌تر ترکیب شدند. با وجود دامنه شتاب زیاد در طول کار دوچرخه‌سواری، دقت زاویه محاسبه شده قابل اعتماد بود. در ادامه این پروژه، برای روش محک‌زدن صحت اطلاعات به‌دست‌آمده، از انکودرهای نوری که مرجع دقیقی برای سنجش درست بودن زاویه محاسبه شده است استفاده خواهد شد.

درحالی‌که دوچرخه‌سواری در سرعت‌های پایین‌تر منجر به دقت بهتری می‌شد، ضرایب فیلتر  $(Q, R)$  به حداقل تنظیم نیاز داشتند تا دقت مشابهی را در سرعت‌های بالاتر پدال‌زنی ارائه کنند. زمان همگرایی گذرا فیلتر کالمن، در ۵ ثانیه اول آزمایش، ریشه در فرآیند سازگاری فیلتر دارد. این زمان گذرا را می‌توان در آینده به طور قابل توجهی با استفاده از دانش پیشین از آزمایشات قبلی و با سعی و خطا کاهش داد.

## ۵-۲- پیشنهادات

در آینده نزدیک، می‌توان برای کاربردهای پزشکی، سیستم را طوری ارتقا داد تا درمانگر بتواند تمرین‌های بیمار را در زمان واقعی سفارشی‌سازی کند و در طول تمرین در حال انجام، مداخله و روند درمان بیمار را کنترل کند.

همچنین می‌توان با استفاده از دو سنسور جدا و دو دیسک گردان جدا برای پدال، بیمارهایی با آسیب‌های مچ پا و عدم تقارن در اندام تحتانی حرکتی را شناسایی و تمرینات مربوطه را برای آن‌ها تجویز کرد. در ادامه ارتقای پزشکی این پروژه، با ترکیب این سیستم با برخی سنسورهای بیولوژیک مانند سنجش ضربان قلب، می‌توان تمرینات را توسط مربی فیزیوتراپ شخصی‌تر کرد و یا حتی با یک حلقه کنترلی، نظارتی بر درست انجام شدن تمرینات داشت و در صورتی که شخص قادر به انجام تمرینات به‌درستی نبود، تمرینات جایگزین ارائه شود.

چنانچه در ادامه این پروژه در سال‌های آتی، از فناوری عینک واقعیت مجازی استفاده شود، احساسی که به کاربر منتقل خواهد شد بسیار بهتر خواهد بود. همچنین در صورت اضافه‌شدن مسیرهای ۳ بعدی بیشتر که قابلیت کنترل جهت حرکت نیز به کاربر داده شود، جذابیت استفاده از این دستگاه دوچندان خواهد شد.

## ۵-۳- چالش‌ها

در طول این پروژه، برخی چالش‌هایی وجود داشت که برای آینده می‌توان روی راه‌حل آن‌ها تمرکز کرد. به طور مثال، هنگام دوچرخه‌سواری، پدال همواره در راستای افق قرار نمی‌گیرد و گاهی با بیشتر شدن فشار پاشنه پا، به عقب و با بیشتر شدن فشار پنجه به جلو خم می‌شود. در این صورت، محورهای داخل سنسور نیز زاویه خواهند گرفت و داده‌های ما صحت خود را از دست می‌دهند.

- می‌توان با استفاده از فیلترهای مناسب و یا تکرار آزمایش‌ها، الگوی این تغییرات را به دست آورد و اثر این اتفاق را هرچه کمتر کرد.
- همچنین برای افزایش دقت، می‌توان از یک سنسور سوم سنجش مغناطیسی نیز در کنار شتاب‌سنج وژیروسکوپ استفاده کرد.
- در استفاده از فیلتر کالمن، داده‌ی ژيروسکوپ حاوی دریافت زیادی بود. در صورتی که بتوان این مقدار دریافت را مدل‌سازی کرد، و سپس از روش‌های کنترلی برای حذف دریافت و اغتشاش استفاده کرد، به نتایج بهتری خواهیم رسید.
- همچنین اگر بتوان از فیلتر کالمن تطبیقی استفاده کرد تا با هر اندازه‌گیری مقدار کوواریانس نیز تغییر کند، فیلتر بسیار بهتر عمل خواهد کرد.

## پیوست أ- محاسبات پیاده‌سازی فیلتر کالمن

• قدم اول:

$$\begin{aligned}
 \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} &= \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} + \mathbf{B}\dot{\theta}_k & (۵-۱) \\
 \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix}_{k|k-1} &= \begin{bmatrix} 1 & -\Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix}_{k-1|k-1} + \begin{bmatrix} \Delta t \\ 0 \end{bmatrix} \dot{\theta}_k \\
 &= \begin{bmatrix} \theta - \dot{\theta}_b \Delta t \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix}_{k-1|k-1} + \begin{bmatrix} \Delta t \\ 0 \end{bmatrix} \dot{\theta}_k \\
 &= \begin{bmatrix} \theta - \dot{\theta}_b \Delta t + \dot{\theta} \Delta t \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \theta + \Delta t(\dot{\theta} - \dot{\theta}_b) \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

• قدم دوم:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{P}_{k|k-1} &= \mathbf{F}\mathbf{P}_{k-1|k-1}\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}_k & (۵-۲) \\
 \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix}_{k|k-1} &= \begin{bmatrix} 1 & -\Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix}_{k-1|k-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\Delta t & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_\theta & 0 \\ 0 & Q_{\dot{\theta}_b} \end{bmatrix} \Delta t \\
 &= \begin{bmatrix} P_{00} - \Delta t P_{10} & P_{01} - \Delta t P_{11} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix}_{k-1|k-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\Delta t & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_\theta & 0 \\ 0 & Q_{\dot{\theta}_b} \end{bmatrix} \Delta t \\
 &= \begin{bmatrix} P_{00} - \Delta t P_{10} - \Delta t(P_{01} - \Delta t P_{11}) & P_{01} - \Delta t P_{11} \\ P_{10} - \Delta t P_{11} & P_{11} \end{bmatrix}_{k-1|k-1} + \begin{bmatrix} Q_\theta & 0 \\ 0 & Q_{\dot{\theta}_b} \end{bmatrix} \Delta t \\
 &= \begin{bmatrix} P_{00} - \Delta t P_{10} - \Delta t(P_{01} - \Delta t P_{11}) + Q_\theta \Delta t & P_{01} - \Delta t P_{11} \\ P_{10} - \Delta t P_{11} & P_{11} + Q_{\dot{\theta}_b} \Delta t \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} P_{00} + \Delta t(\Delta t P_{11} - P_{01} - P_{10} + Q_\theta) & P_{01} - \Delta t P_{11} \\ P_{10} - \Delta t P_{11} & P_{11} + Q_{\dot{\theta}_b} \Delta t \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

• قدم سوم:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{y}}_k &= \mathbf{z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \\ &= \mathbf{z}_k - [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix}_{k|k-1} = \mathbf{z}_k - \theta_{k|k-1}\end{aligned}\quad (5-3)$$

• قدم چهارم:

$$\begin{aligned}\mathbf{S}_k &= \mathbf{H}\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}^T + \mathbf{R} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix}_{k|k-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R} \\ &= P_{00k|k-1} + R = P_{00k|k-1} + \text{var}(v)\end{aligned}\quad (5-4)$$

• قدم پنجم:

$$\begin{aligned}\mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}^T\mathbf{S}_k^{-1} \\ \begin{bmatrix} K_0 \\ K_1 \end{bmatrix}_k &= \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix}_{k|k-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{S}_k^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} P_{00} \\ P_{10} \end{bmatrix}_{k|k-1} \mathbf{S}_k^{-1} = \frac{\begin{bmatrix} P_{00} \\ P_{10} \end{bmatrix}_{k|k-1}}{\mathbf{S}_k}\end{aligned}\quad (5-5)$$

• قدم ششم:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}_{k|k} &= \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k\tilde{\mathbf{y}}_k \\ \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix}_{k|k} &= \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix}_{k|k-1} + \begin{bmatrix} K_0 \\ K_1 \end{bmatrix}_k \tilde{\mathbf{y}}_k \\ &= \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix}_{k|k-1} + \begin{bmatrix} K_0 & \tilde{\mathbf{y}} \\ K_1 & \tilde{\mathbf{y}} \end{bmatrix}_k\end{aligned}\quad (5-6)$$

• قدم هفتم:

$$\mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H})\mathbf{P}_{k|k-1}\quad (5-7)$$

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix}_{k|k} &= \left( \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_0 \\ K_1 \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix}_{k|k-1} \\ &= \left( \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_0 & 0 \\ K_1 & 0 \end{bmatrix}_k \right) \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix}_{k|k-1} = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix}_{k|k-1} - \begin{bmatrix} K_0 & P_{00} & K_0 & P_{01} \\ K_1 & P_{00} & K_1 & P_{01} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

## فهرست مراجع ها

- [1] Germany Triathlon 2022, virtual bike <https://telewebion.com/episode/0x287652a>. Sep 2022.
- [2] First stationary bicycle,. . <https://en.wikipedia.org/wiki/Gymnasticon>. Sep 2022
- [3] L. S. P. R. P. K. M. a. V. P. N. J. Hancock, "Clinical efficacy and prognostic indicators for lower limb pedalling exercise early after stroke: study protocol for a pilot randomised controlled trial,," *Trials*, vol. 12, p. 68, 2011.
- [4] Rehabilitation Bike, <https://mediniom.com/blog/rehabilitation-bike>. Sep 2022.
- [5] Virtual cycling racing at home, <https://www.bike-components.de/en/accessories/indoor-cycling-training/virtual-cycling-racing-at-home/>. Sep 2022.
- [6] A. Al Mamun, M. S. J. K. Polash and F. M. Alamgir, "Flex Sensor Based Hand Glove for Deaf and Mute People," *International Journal of Computer Networks and Communications Security*, p. 40, 2017.
- [7] J. R. V. a. Y. Kim, "Noise in microelectromechanical system," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 46, pp. 1558-1565, 1999.
- [8] D. Simon, "Kalman Filtering," *Embedded Systems Programming*, vol. 14, pp. 72-79, 2001.
- [9] imufilter in MATLAB, <https://ch.mathworks.com/help/nav/ref/imufilter-system-object.html>. Sep 2022.
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/Sensor\\_fusion](https://en.wikipedia.org/wiki/Sensor_fusion). Sep 2022.
- [11] N. A. Nur Hazliza Ariffin, "MEMS GYROSCOPE AND ACCELEROMETER BASED," *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 12, p. 6519, 2017.
- [12] Using Kalman Filter for IMU, <http://blog.tkjelectronics.dk/2012/09/a-practical-approach-to-kalman-filter-and-how-to-implement-it/>. Sep 2022.

## پیوست ب - واژه‌نامه فارسی - انگلیسی

Equivalent English	واژه فارسی
Offset	آفست
Altium Designer	آلتیوم دیزاینر
measurement residual	باقیمانده اندازه‌گیری
Input vector	بردار ورودی
Kalman gain	بهره کالمن
prediction	پیش‌بینی
Error cost function	تابع هزینه خطا
Prior estimate	تخمین قبلی
Sensor Fusion	ترکیب حسگرها
Correction	تصحیح اندازه‌گیری
Robustness	تنومندی
Posteriori state	حالت پسین
Priori state	حالت پیشین
Previous state	حالت قبلی
raw	داده خام
Rehabilitation Bike	دوچرخه توان‌بخشی
Euler angles	زاویه اویلر
Gyroscope	ژیروسکوپ
Solidworks	سالی‌دورکس

Equivalent English	واژه فارسی
Overshoot	فراجهش
Kalman Filter	فیلتر کالمن
Discrete Kalman filter	فیلتر کالمن گسسته
Complementary filter	فیلتر مکمل
Calibration	کالیبراسیون
Quaternion	کواترنیون
State transition model	ماتریس انتقال حالت
Rotation matrix	ماتریس چرخش
State matrix	ماتریس حالت
Hidden Markov model	مدل مارکوف پنهان
Observation	مشاهده
Mean squared error	میانگین مربعات خطا
Map	نگاشت
Innovation	نوآوری
Measurement noise	نویز اندازه‌گیری
Process noise	نویز فرایند
Internal state	وضعیت داخلی
System state	وضعیت سیستم
Interrupt	وقفه



Accelerometer	شتاب سنج
Identity	شناسایی

Schematic	شماتیک
Uncertainty	عدم قطعیت

## **Abstract**

This project is defined in line with the use of stationary bicycles for the rehabilitation activities of patients. In this project, suitable hardware based on accelerometers available in the market is designed and implemented. By processing the received data, we obtain the rotational speed of the fixed bicycle pedal with the help of the Kalman filter using the accelerometer data. According to the noise in the accelerometer data and the three-dimensional nature of the movement, it is necessary to test a suitable model for use in the desired Kalman filter. The data that the accelerometer gives us is linear and angular acceleration in three directions, and by using a suitable filter and processing, we want to obtain the number of rotations of the rotating disk that is perpendicular to the ground. The speed estimation result will also be evaluated at this stage using another speedometer. Also, by using the two buttons that are placed on the bicycle handle, we inform the software system of the person's desired direction of movement, so that in the continuation of this project, by simulating the desired direction of movement of the cyclist, a suitable simulator environment will be transferred to the person at the same time using the available cycling videos.



**K. N. Toosi University of Technology**  
**Faculty of Electrical Engineering**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the**  
**Degree of Bachelor of Science (B.Sc.)**  
**in Electrical Engineering - Control**

Design and implementation of fixed bicycle pedal speedometer based on acceleration data  
using Kalman Filter

**By:**

Reyhaneh Hadipour Mollasaraei

**Supervisor:**

Prof. Hamid D. Taghirad

**Advisor:**

Dr. Mohammad Motaharifar

Summer 2022