



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electronique
Electronique des systèmes embarqués

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Rahmouni Abdelbaki
Dahnon taha
Le : 4 Juin 2025

Conception et réalisation d'un Drone autonome pour l'acquisition des images d'un champ agricole sur une trajectoire pré programmée

Jury :

Dr.	Terghini ouarda	MCA	Université de Biskra	Président
Dr.	Debilou Abderrazek	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Barkat Aicha	MAA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2024 - 2025



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electronique
Electronique des systèmes embarqués

Réf. :

Conception et réalisation d'un Drone autonome pour l'acquisition des images d'un champ agricole sur une trajectoire pré programmée

Le : 4 Juin 2025

Présenté par :

Rahmouni abdelbaki
Dahnon taha

Avis favorable de l'encadreur :

Abderrazak Debilou

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

شكر وعرفان

الحمد لله حمدا كثيرا طيبا مباركا فيه

والصلاة والسلام على أشرف المرسلين وصحبه الكرام.

وانطلاقا من باب الشكر من لم يشكر الناس لم يشكر الله نتقدم بخالص الشكر

والتقدير للأستاذ المشرف "محمد الرزاق ديبلو" على إرشاداته وتوجيهاته التي قدمها

لنا، كما اتقدم بجزيل الشكر والثناء إلى كل يد رافقتنا في هذا العمل سواء من

قريب أو من بعيد والشكر موصول إلى كل أوليائنا الذين سمرروا على تقديم لنا كل

الظروف الملائمة لإنجاز هذا العمل

كما لا ننسى أن نشكر جميع الأساتذة والموظفين الذين قدموا لنا يد المساعدة

وأساتذة كلية العلوم والتكنولوجيا الذين تتلمذنا على أيديهم واخذنا منهم الكثير

فهرس المحتويات

I.....	فهرس المحتويات
V.....	الملخص
VI.....	قائمة الجداول
VII.....	قائمة الاشكال
XI.....	قائمة المختصرات
1.....	مقدمة عامة

الفصل الأول: الطائرة المسيرة وديناميكيته

3.....	المقدمة
3.....	1 الطائرة المسيرة (UAV)
3.....	1-1 تعريف الطائرة المسيرة (UAV)
3.....	2-1 نبذة تاريخية عن تطور الطائرات المسيرة
5.....	3-1 تصنيفات الطائرات المسيرة
5.....	1-3-1 حسب الحجم والوزن
7.....	2-3-1 حسب أنواع الاجنحة
9.....	3-3-1 حسب سعة حمولتها
10.....	4-3-1 حسب مدى ومدة الطيران
11.....	5-3-1 حسب مصادر الطاقة
11.....	6-3-1 حسب نوع المحرك
12.....	2 الطائرة المسيرة رباعية المراوح

12	1-2	تعريف الطائرة المسيرة رباعية المراوح.....
13	2-2	الديناميكية الحركية للطائرة الرباعية:
15		الخاتمة.....

الفصل الثاني: الأجهزة المستخدمة

17		المقدمة.....
17	1	المحرك بدون فرشاة (Brushless)
20	2	المتحكم في السرعة (ESC)
20	3	المتحكم الدقيق STM32F103C8T6.....
21	4	المستشعرات.....
21	1-4	مستشعر التسارع والجيروسكوب.....
22	2-4	مستشعر الضغط BMP280.....
23	3-4	مستشعر المجال المغناطيسي QMC5883L.....
24	5	البطارية (LIPO)
24	6	المراوح.....
25	7	وحدة الارسال والاستقبال اللاسلكية +nRF24L01.....
26	8	الكاميرا.....
26	1-8	كاميرات التقليدية (RGB).....
26	2-8	كاميرات متعددة الطيف (Multispectral).....
29		الخاتمة.....

الفصل الثالث: تصميم البرامج لقيادة الطائرة بدون طيار

31.....	المقدمة
31.....	1 مخطط عام للبرامج:
32.....	2 التعريف بـ <i>STM32 cube IDE</i> (البيئة التطويرية المدمجة)
32.....	3 تصميم برنامج القيادة
34.....	4 برمجة برنامج القيادة
34.....	1-4 إعداد وحدة التحكم الدقيق
39.....	2-4 إعداد المستشعرات
42.....	3-4 قراءة البيانات ومعايرتها
50.....	4-4 حساب الزوايا
52.....	5-4 دمج المستشعرات
56.....	6-4 المتحكم التناسبي-التكاملي-التفاضلي (PID)
59.....	5 برمجة وحدة الارسال والاستقبال اللاسلكية +nRF24L01
60.....	الخاتمة

الفصل الرابع: برمجة المسار

62.....	المقدمة
62.....	1 تعريف المسار المبرمج
62.....	2 تخطيط المسارات
62.....	1-2 تخطيط مسار عام تخطيط مسار عام (Global)
62.....	2-2 تخطيط مسار محلي تخطيط مسار محلي (local trajectory)
62.....	3 التخطيط التقليدي

63.....	1-3 خوارزمية منحني دويبينز (Dubins curve)
63.....	4 برمجة المسار
64.....	1-4 مسار الحقول المستطيلة
68.....	2-4 مسار الحقول الدائرية
71.....	5 تحديات تطبيق المسار المبرمج
71.....	1-5 بطارية
71.....	2-5 دقة أجهزة الاستشعار
72.....	الخاتمة
73.....	خاتمة عامة
74.....	المراجع

الملخص

الهدف من هذا المشروع هو تصميم وتنفيذ طائرة مسيرة تلتقط صوراً لحقل زراعي وفق مسار محدد مسبقاً. لقد قمنا بتطوير البرمجيات اللازمة لقيادة الطائرة، بما في ذلك تهيئة المستشعرات ودمج بياناتها باستخدام خوارزميات دمج المستشعرات، بالإضافة إلى تطبيق خوارزميات التحكم (PID) لتحسين استقرار النظام باستخدام STM32F103C8T6 بلغة البرمجة C علاوة على ذلك، قمنا بتطوير معادلات المسار المبرمج ومحاكاتها باستخدام ماتلاب.

Abstract

The objective of this project is to design and implement a drone that captures images of an agricultural field following a predefined flight path. We have developed the necessary software for drone control, including sensor configuration and data fusion using sensor fusion algorithms, as well as implementing PID control algorithms to enhance system stability using STM32F103C8T6 with the C programming language. Additionally, we have developed path planning equations and simulated them using MATLAB.

قائمة الجداول

الفصل الاول

جدول 1-1: تصنيف الطائرة مسيرة حسب الحجم والوزن..... 6

الفصل الثاني

جدول 3-1: سجل 26-26 MPU6050- registre 39

جدول 3-2: قيم عرض النطاق الترددي للجيرسكوب والتسارع وقيم DLPF_CFG الخاصة بها..... 39

جدول 3-3: قيم سلم الجيرسكوب وقيم FS_SEL الخاصة بها..... 39

جدول 3-4: قيم سلم التسارع وقيم AFS_SEL الخاصة بها..... 39

جدول 3-5: سجل 28-28 MPU6050- registre 39

جدول 3-6: سجل 27-27 MPU6050- registre 39

جدول 3-7: سجل التحكم 1-1 Control Register 40

جدول 3-8: وصف سجل 0xF4 (BMP280) 41

جدول 3-9: قيم OSRS_t 41

جدول 3-10: قيم OSRS_p 41

جدول 3-11: قيم mode 41

جدول 3-12: وصف سجل 0xF5 (BMP280) 42

جدول 3-13: سجلات قيم التسارع للمحاور الثلاثة..... 42

جدول 3-14: سجلات قيم الجيرسكوب للمحاور الثلاثة..... 44

جدول 3-15: سجلات قيم الثابتة لـ BMP280 46

جدول 3-16: تأثير قيم PID على خرج النظام..... 58

قائمة الاشكال

الفصل الاول

- الشكل 1-1: أسطول من المناطيد بدون طيار للجيش النمساوي 3
- الشكل 2-1: Aerial Target 4
- الشكل 3-1: Kettering Bug 4
- الشكل 4-1: DJI Phantom 5
- الشكل 5-1: parrot ar. Drone 5
- الشكل 6-1: طائرة سداسية المراوح Hexacopter 7
- الشكل 7-1: طائرة رباعية المراوح Quadcopter 7
- الشكل 8-1: طائرة بدون طيار ذات أجنحة ثابتة 8
- الشكل 9-1: طائرة هليكوبتر بدون طيار 8
- الشكل 10-1: طائرة مسيرة هجينة 9
- الشكل 11-1: طائرة مسيرة تحمل اثقال كبيرة 10
- الشكل 12-1: محرك ذو فرشاة **Brushed** 12
- الشكل 13-1: محرك بدون فرشاة **Brushless** 12
- الشكل 14-1: تركيب X و + للمسيرة رباعية المراوح 13
- الشكل 15-1: إطار 450 للطائرة الرباعية 13
- الشكل 16-1: مواضع تركيب المحركات 13
- الشكل 17-1: الديناميكية الحركية للطائرة الرباعية 14

الفصل الثاني

- الشكل 1-2: المخطط الصندوقي لطائرة المسيرة 17
- الشكل 2-2: تسلسل تشغيل محرك تيار مستمر BLDC أحادي الطور 18
- الشكل 3-2: تسلسل تشغيل محرك تيار مستمر BLDC ثلاثي الطور 19

- 19..... الشكل 2-4: محركات X2208 Brushless
- 20..... الشكل 2-5: الشكل 21: دائرة ESC مبسطة.
- 20..... الشكل 2-6: fly color 40a esc
- 21..... الشكل 2-7: blue pill stm32f103c8t6
- 21..... الشكل 2-8: MPU6050
- 22..... الشكل 2-9: نظام كهروميكانيكي دقيق لمستشعر التسارع
- 22..... الشكل 2-10: نظام كهروميكانيكي دقيق للجيرسكوب
- 23..... الشكل 2-11: نظام كهروميكانيكي دقيق لمستشعر الضغط
- 23..... الشكل 2-12: BMP280
- 24..... الشكل 2-13: QMC5883L
- 24 الشكل 2-14: بطارية LiPo 14.8V 4S
- 25..... الشكل 2-15: مروحتين 1045
- 25..... الشكل 2-16: وحدة nRF24L01+
- 26..... الشكل 2-17: مصفوفة ألوان من نوع Bayer BGGR
- 26..... الشكل 2-18: نطاق الطيفي للكاميرا RGB
- 27..... الشكل 2-19: الفرق بين النطاقات الطيفية للكاميرات (التقليدية، متعددة الاطيف، فائقة الطيف)
- 27..... الشكل 2-20: صورة افتراضية لطائرة مسيرة تقوم بفحص الحقل الزراعي
- 28..... الشكل 2-21: صورة توضح نتائج التصوير بالكاميرا متعددة الأطياف
- 29..... الشكل 2-22: صورة توضح مؤشر NDVI
- 29..... الشكل 2-23: صورة باستخدام مؤشر NDVI

الفصل الثالث

- 31..... الشكل 3-1: المخطط العام للبرنامج
- 32..... الشكل 3-2: شعار STM32cubeIDE
- 33..... الشكل 3-3: ديناميكية الحركة للطائرة المسيرة ذات أربع مراوح

- الشكل 3-4: المخطط الصندوقي للحلقة المفتوحة للطائرة المسيرة.....33
- الشكل 3-5: المخطط العام للحلقة المغلقة للطائرة المسيرة.....34
- الشكل 3-6: صورة توضيحية لكيفية إعداد نواة النظام.....35
- الشكل 3-7: صورة توضح كيفية إعداد الساعة (clock)35
- الشكل 3-8: صورة توضح كيفية إعداد المؤقت 1.....36
- الشكل 3-9: صورة توضح كيفية إعداد المؤقت 1.....36
- الشكل 3-10: صورة توضح كيفية إعداد المؤقت 2 من اجل توليد إشارة PWM.....37
- الشكل 3-11: صورة توضح كيفية إعداد البرتوكول I2C.....37
- الشكل 3-12: صورة توضح كيفية إعداد البرتوكول SPI.....38
- الشكل 3-13: صورة توضح كيفية إعداد البرتوكول UART.....38
- الشكل 3-14: قيم التسارع بعد وقبل المعايرة للمحورين X وY.....44
- الشكل 3-15: قيم التسارع بعد وقبل المعايرة للمحور Z.....44
- الشكل 3-16: قيم الجيروسكوب بعد وقبل المعايرة للمحور Z.....46
- الشكل 3-17: قيم الجيروسكوب بعد وقبل المعايرة للمحور X.....46
- الشكل 3-18: قيم الجيروسكوب بعد وقبل المعايرة للمحور Y.....46
- الشكل 3-19: قياسات زاوية الدوران على المحور (Roll) x والمحور (Pitch) y باستخدام مستشعر التسارع.....50
- الشكل 3-20: ميل المجال المغناطيسي في العالم.....51
- الشكل 3-21: قياسات زاوية الدوران على المحور (Yaw) z باستخدام مستشعر المجال المغناطيسي QMC.....52
- الشكل 3-22: قياس زوايا باستخدام الجيروسكوب.....52
- الشكل 3-23: مخطط العام للمرشح التكميلي.....53
- الشكل 3-24: مخطط المرشح التكميلي لحساب الزاوية باستخدام مستشعر التسارع والجيروسكوب.....54
- الشكل 3-25: مخطط المرشح التكميلي لحساب الزاوية باستخدام مستشعر التسارع والجيروسكوب في المجال المتقطع.....54
- الشكل 3-26: تقدير زاوية الدوران على المحور (Pitch) y باستخدام المرشح التكميلي.....55
- الشكل 3-27: تقدير زاوية الدوران على المحور (Roll) x باستخدام المرشح التكميلي.....55

- الشكل 3-28: تقدير زاوية الدوران على المحور (Yaw) Z باستخدام المرشح التكميلي.....55
- الشكل 3-29: المخطط الأساسي للتحكم PID.....56
- الشكل 3-30: تأثير معامل التناسبي على خرج النظام.....57
- الشكل 3-31: تأثير معامل التكامل على خرج النظام.....57
- الشكل 3-32: تأثير معامل التفاضل على خرج النظام.....58

الفصل الرابع

- الشكل 4-1: رسم توضيحي لمسار دوبينز بسيط.....63
- الشكل 4-2: رسم توضيحي لمسار دوبينز مركب.....63
- الشكل 4-3: الحقول الدائرية.....64
- الشكل 4-4: الحقول المستطيلة.....64
- الشكل 4-5: تخطيط المسار للحقول المستطيلة.....64
- الشكل 4-6: تخطيط المسار للحقول المستطيلة باستخدام منحني دوبينز.....64
- الشكل 4-7: اتجاه الطائرة لمسار الحقل المستطيل.....66
- الشكل 4-8: سرعة الطائرة على الاتجاهين X و Y بالنسبة للزمن لمسار الحقل المستطيل.....66
- الشكل 4-9: موضع الطائرة بالنسبة للزمن لمسار الحقل المستطيل.....67
- الشكل 4-10: الدور الأول للمسار.....67
- الشكل 4-11: محاكاة المسار المبرمج لحقل مستطيل.....68
- الشكل 4-12: تخطيط المسار الدائري.....68
- الشكل 4-13: اتجاه الطائرة لمسار الحقل الدائري.....69
- الشكل 4-14: سرعة الطائرة على الاتجاهين X و Y بالنسبة للزمن لمسار الحقل الدائري.....69
- الشكل 4-15: موضع الطائرة بالنسبة للزمن لمسار الحقل الدائري.....70
- الشكل 4-16: المسار الدائري.....70
- الشكل 4-17: محاكاة المسار المبرمج لحقل الدائري.....71

قائمة المختصرات

UAV: Unmanned aerial vehicle

ESC: Electrical Speed Controller

CW: Counter ClockWise

CCW: ClockWise

BLDC: Bruushless Direct Current

PWM: Pulse width Modulation

ADC: Analog Digital Converter

CAN: Control Area Network

I2C: Inter-Integrated Circuit

SPI: Serial Peripheral Interface

UASRT: Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter

USB: Universal Serial Bus

DMA: Direct Memory Access

IMU: Inertial Measurement Unit

MEMS: Micro Electromechanical systems

GPS: Global Positioning System

LiPo: Lithium Polymer

IDE: Integrated Development Environment

GCC: GNU Compiler Collection

SWV: Serial Wire Viewer

PID: Proportional-Integral-Derivative

HSE: High Speed Clock

LQR: Liner Quadratic Regulator

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

NIR: Near-Infra-Red

مقدمة عامة

نظرا لاهتمام البلاد بالتنمية الاقتصادية وتحقيق الاكتفاء الذاتي ودفع بعجلة الاقتصاد وازدهار البلاد، والاهتمام بالقطاع الفلاحي،" أكد رئيس الجمهورية عبد المجيد تبون، خلال اجتماع مجلس الوزراء عام 2022، إرادته السياسية القوية في إحداث ثورة بقطاع الفلاحة، وذلك من خلال جملة التعليمات والقرارات التي أعلنها، أبرزها إخراج القطاع من الطابع الاجتماعي التقليدي إلى القطاع العلمي وفق نظرة عصرية، والحث على إنشاء الشركات الناشئة والمؤسسات المصغرة" (الشروق-أحمد قرطي-03/10/2022).

يواجه الكثير من الفلاحين والمزارعين من صعوبة مراقبة الحقول والمحاصيل الزراعية نظرا لاتساعها وشاسعتها، مما يؤثر على انتاجهم وجودة محاصيلهم، بسبب اعتمادهم على الطرق التقليدية في مراقبة المحاصيل (الفحص اليدوي)، مما يجعلهم عرضة للأخطاء البشرية ويزيد من الوقت المستغرق في جمع البيانات الدقيقة حول حالة المحاصيل، مما يجعل من الصعب اتخاذ قرارات مستنيرة بشأن الري، التسميد، ومكافحة الآفات وعدم توفر المعلومات في الوقت الحقيقي يمكن أن يؤدي إلى تفشي الأمراض أو الآفات دون أن يتم اكتشافها في الوقت المناسب، وعدم استخدام العديد من المزارع التكنولوجيا الحديثة مثل أنظمة الاستشعار عن بعد والطائرات بدون طيار، التي يمكن أن توفر معلومات دقيقة وسريعة حول صحة المحاصيل يؤدي عدم الاهتمام بالتقنيات والتكنولوجيا الحديثة إلى انخفاض الإنتاجية وزيادة التكاليف.

لذلك تطرقنا الى فكرة تصميم طائرة بدون طيار تسيير في مسار مبرمج مسبقا تقوم بجمع الصور اللازمة لجمع البيانات المطلوبة لتحديد المناطق التي يتسرب فيها ماء السقي، وتحديد صحة المحاصيل.

سنقوم في هاته المذكرة بالتطرق الى نبذة تاريخية للطائرات المسيرة ومن ثم نتعرف على ديناميكية الحركة لطائرة الرباعية، مع ذكر الأجهزة والعناصر الالكترونية المستعملة، ومن ثم نتطرق الى كيفية برمجة برنامج التحكم بالطائرة، بعد ذلك نقوم ببرمجة الطائرة على السير على مسار مبرمج، وفي الأخير تتم إضافة الكاميرا للطائرة من اجل التقاط الصور وجمع البيانات اللازمة.

➤ الفصل الأول: الطائرة المسيرة(UAV)

سنطرق الى تعريف الطائرة المسيرة ونبذة تاريخية عنها ونتناول تصنيفاتها حسب معايير معينة ومن ثم نتعرف على ديناميكيتها

➤ الفصل الثاني: الأجهزة المستخدمة

سنطرق لتعريف وشرح الأجهزة المستخدمة في الطائرة المسيرة مثل المحرك بدون فرشاة ووحدة التحكم الدقيق والمستشعرات التي تساعد في استقرار الطائرة.

➤ الفصل الثالث: تصميم البرامج لقيادة الطائرة

يتناول المخطط العام للبرمجة، التعريف بالبيئة التطويرية، وطرق تصميم برامج القيادة التي تشمل إعداد وحدة التحكم والمستشعرات، قراءة البيانات ومعايرتها، حساب الزوايا، دمج المستشعرات، واستخدام خوارزمية التحكم (PID) .

➤ الفصل الرابع: برمجة المسار

يشمل تعريف المسار المبرمج وبرمجته ليناسب الحقول المستطيلة والدائرية.

الفصل الأول: الطائفة المسيحية وديناميكيته

المقدمة:

يهدف هذا الفصل الى تقديم تعريف عام لطائرة مسيرة وكذا نبذة تاريخية عن مختلف التطورات التي شهدتها مع تقديم مختلف التطورات التي شهدتها، مع تقديم مختلف أنواعها. سنتطرق خلال هذا الفصل الى شرح مفصل لديناميكية الطائرة المسيرة.

يسمح هذا العرض بفهم خصائص نظام الطائرة لتصميم نظام القيادة () مناسب ومتلائم مع خصائص الطائرة.

1 الطائرة المسيرة (UAV):

1-1 تعريف الطائرة المسيرة (UAV):

تُعرف الطائرة المسيرة، أو ما يُعرف باللغة الإنجليزية بـ (UAV) Unmanned Aerial Vehicle، بأنها طائرة تعمل بدون وجود طيار على متنها. يمكن التحكم في هذه الطائرات عن بُعد بواسطة مشغل بشري، أو يمكنها الطيران بشكل مستقل باستخدام أنظمة تحكم ذاتية مدمجة.

2-1 نبذة تاريخية عن تطور الطائرات المسيرة:

ظهرت الطائرات بدون طيار (UAVs) منذ أواخر القرن الثامن عشر، عندما رفع الاخوان مونتجولفييه مجموعة متنوعة من الماشية في مناطيد بدون طيار، استُخدمت الطائرات بدون طيار لأول مرة كسلاح حرب عام 1849 عندما أطلق الجيش النمساوي أسطولاً من المناطيد بدون طيار المحملة بالمتفجرات فوق مدينة البندقية لمعاينة مواطنيها على تمردهم. على الرغم من أن أيّاً من هذين الحداث لم يستخدم ما نعتبره اليوم تقنية "طائرات بدون طيار"، إلا أنهما بشرا بقدم اتجاه حديث: نشر طائرات بدون طيار للقيام بأعمال لا يستطيع البشر - أو لا يريدون - القيام بها [1].

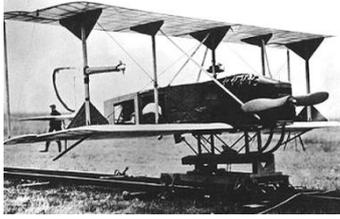


الشكل 1-1: أسطول من المناطيد بدون طيار للجيش النمساوي

(المصدر: blogspot.com, 2020)

في بريطانيا عام 1916 بدأ المهندس "آرتشيبالد لو" تطوير طائرة قابلة للتحكم عبر أمواج الراديو لتصبح هدفاً لتدريب قوات المدفعية وقد سميت Aerial Target [2].

في القاعدة العسكرية "أفور" في الثاني من يوليو عام 1917 تمكن الفرنسي "ماكس بوشيه" من تصنيع أول طائرة بدون طيار التي تم إطلاق عليها اسم Voisin 150 HP، وقد حلقت لمسافة 500 متر. تم صناعة خلال الحرب العالمية الأولى بسبب الحاجة إلى تنفيذ مهام الاستطلاع دون تعريض حياة الطيارين للخطر [2].



الشكل 1-3: Kettering Bug

(المصدر: pulse.mail.ru, 2022)



الشكل 1-2: Aerial Target

(المصدر: youuav.com, 2020).

في عام 1918 تم تطوير نموذج أولي لطائرة طوربيد بدون طيار Kettering Bug لكنه لم يستخدم ميدانيا [3].

ثم قاموا بتطوير طائرات أخرى بين 1934 و 1938 في المملكة المتحدة والولايات المتحدة (عبارة عن أهداف جوية) مثل Target Radioplane RP-1 [4]، وفي عام 1941 حصلت البحرية الأمريكية على نموذج جديد باسم Target Drone Denny (TDD-1) [5].

لكن القفزة الحقيقية كانت أثناء الحرب العالمية الثانية، حيث تقدمت ألمانيا بداية من سنة 1938، في تطوير طائرات موجهة عن بعد، ثم تطورت الطائرات بدون طيار مع التقدم التكنولوجي حتى أصبحت قادرة على أداء مهام الاستطلاع والمراقبة وحتى القضاء على أهداف إستراتيجية، وشهدت تطورا ملحوظا في حروب كوريا وفيتنام، ثم الحرب الباردة في خضم السباق الشرقي الغربي نحو التسليح [6].

بدأت الولايات المتحدة أيضًا برنامج الطائرات بدون طيار الرائد عام 1980 لبناء طائرة بدون طيار منخفضة التكلفة لعمليات الأسطول. وأدى مشروع مشترك بين الولايات المتحدة وإسرائيل عام 1986 إلى تطوير طائرة RQ2 بايونير، وهي طائرة استطلاع متوسطة الحجم. وخلال هذه الفترة أيضًا، بدأ مطورو الطائرات بدون طيار بالتركيز على مصادر طاقة بديلة للطائرات بدون طيار. ومن أبرز هذه المصادر الطاقة الشمسية [6].

تستخدم الآن الطائرات المسيرة في عدة تطبيقات مدنية في شتى المجالات مثل النقل، والبحث العلمي، والتصوير، والمراقبة، والبحث عن المفقودين والإنقاذ، ومراقبة النشاط الإشعاعي بعد الحوادث النووية، والاتصالات، والزراعة ومراقبة المحاصيل وغيرها.

على مدار العقد الماضي، شهد السوق دخول العديد من الطائرات الصغيرة بدون طيار، مثل DJI Phantom و Parrot AR Drone، والتي تميزت بتكلفتها المنخفضة وخفة وزنها. في القرن العشرين، لعب البحث العسكري دورًا رئيسيًا في ظهور ابتكارات تكنولوجية انتشرت على نطاق واسع. فقد أسهمت أقمار الاستطلاع في تشغيل نظام GPS، كما طور الباحثون العسكريون بروتوكولات تبادل البيانات التي أصبحت أساس الإنترنت. تندرج الطائرات بدون طيار ضمن هذه الفئة، إذ صُممت في البداية لأغراض الاستطلاع، وكان تطويرها للاستخدامات شبه العسكرية والتجارية يجري غالبًا بعيدًا عن الأنظار العامة [2].



الشكل 1-5: parrot ar. Drone



الشكل 1-4: DJI Phantom

(المصدر: www.techpowerup.com) .(المصدر: www.dronedoctor.co.uk,2017).

أجازت الولايات المتحدة الأمريكية لأول مرة تخطيط طائرة من دون طيار لاستخدام تجاري عبر السماح بأن ترسل مجموعة بي بي طائرة إلى ألاسكا، كما أعلنت السلطات أمس الثلاثاء (10 حزيران/ يونيو 2014). وتم إرسال الطائرة التي أنتجتها شركة ايروفايرونمنت البريطانية لجمع معلومات من الجو لمنشآتھا في المنطقة والطرق والأجهزة، حسب بيان صادر عن إدارة الطيران الفدرالي [7].

شرعت اليابان في تصنيع نموذج الطائرات المسيرة للركاب سنة 2018 [8]، في أوائل الألفية الجديدة، طلبت وكالة الاستخبارات المركزية الأمريكية (CIA) تسليح الطائرات المسيرة بصواريخ لاستخدامها في القصف، مما شكل بداية دمج الذكاء الاصطناعي في عمليات الطائرات المسيرة، تطورت هذه التقنية لتشمل أسراب الطائرات المسيرة التي تعمل بالذكاء الاصطناعي، حيث يمكنها التواصل فيما بينها وتبادل المعلومات لتحقيق أهداف مشتركة، مثل الاستطلاع والهجوم المنسق [9].

3-1 تصنيفات الطائرات المسيرة:

هناك العديد من التصنيفات التي تصنف حسبها أنواع الطائرات بدون طيار حيث تنقسم بناءً على القدرات التشغيلية وديناميكية الطيران والشكل الخارجي ونوع الاستخدام.

1-3-1 حسب الحجم والوزن:

➤ طائرات بدون طيار صغيرة جداً (نانو)

يمكن أن يكون حجم هذه الطائرات المسيرة صغيراً بحجم حشرة، ويمكن وضعها بسهولة في راحة اليد، بأبعاد تتراوح بين 1 و50 سم. ويفضل صغر حجمها وتصميم أجنحتها، تستطيع هذه الطائرات النانوية التحليق في مساحات ضيقة للغاية، ولا يسهل اكتشافها، وتستخدمها أجهزة الاستخبارات بشكل رئيسي لجمع المعلومات عن الأشخاص والأشياء.

➤ طائرات بدون طيار صغيرة

طائرات صغيرة بدون طيار أكبر قليلاً من الطائرات الصغيرة جداً، يتراوح طولها بين 50 سم ومترين. عادةً ما تكون أجنحة هذه الطائرات ثابتة، ويمكن رفعها بسهولة بواسطة الذراع وإلقاؤها في الهواء. يمكن استخدامها لفحص المعدات الداخلية (مثل واقيات المراوح، والأقفاص)، ولكنها تُستخدم غالباً في الهواء الطلق لأغراض الترفيه والتصوير، مثل إدارة حركة المرور.

➤ طائرات بدون طيار متوسطة الحجم

الطائرات المسيرة متوسطة الحجم أكبر وأثقل من الطائرات المسيرة الأصغر، حيث تتجاوز أبعادها مترين ويصل وزنها إلى 200 كيلوغرام. ويتطلب رفعها شخصين، وهي تُستخدم غالبًا في التطبيقات الاحترافية والتصوير الفوتوغرافي للهواة.

➤ طائرات بدون طيار كبيرة

تُضاهي الطائرات المسيرة الكبيرة في حجمها الطائرات الأصغر، وتُستخدم أساسًا للأغراض العسكرية كالمراقبة والتخطيط الاستراتيجي. وبفضل تقنياتها المتطورة، تُحل محل الطائرات المقاتلة، مما يُتيح كشفًا سريعًا للعدو وقدرات قتالية. كما أنها مُصممة للتطبيقات المدنية، مثل توصيل الطلبات بالطائرات المسيرة أو صناعة الأفلام [10].

النوع	الطول	قطر المروحة	وزن	الاستخدام
طائرات بدون طيار الصغيرة جدًا	150 مم (15 سم، 6 بوصات) أو أقل	51 مم (2 بوصة) أو أقل	200 جرام (0.2 كجم، 0.44 رطل) أو أقل	المراقبة العسكرية
طائرات بدون طيار الصغيرة	حتى 300 مم (12 بوصة)	76-152 ملم (3-6 بوصات)	200-1000 جرام (0.44-2.2 رطل)	عمليات تفتيش المعدات الداخلية الترفيه والتصوير الفوتوغرافي
طائرات بدون طيار متوسطة الحجم	300-1200 مم (12 بوصة - 4 أقدام)	150-640 ملم (6-25 بوصة)	1-20 كجم (2.2-44 رطلاً)	التطبيقات المهنية التصوير الفوتوغرافي للهواة
طائرات بدون طيار كبيرة	120 سم (4 أقدام) وما فوق	64 سم (25 بوصة) وما فوق	20 كجم (44 رطلاً) وما فوق	قدرات الكشف عن العدو ومكافحته

الجدول 1-1: تصنيف الطائرة مسيرة حسب الحجم والوزن

(المصدر: <https://www.jouav.com>)

1-3-2 حسب أنواع الاجنحة:

➤ طائرات بدون طيار متعددة المراوح:

الطائرات متعددة المراوح هي أكثر أنواع الطائرات استخدامًا في الأغراض الترفيهية والمهنية. حجمها الصغير وتحكمها الممتاز يجعلانها الخيار الأمثل للتصوير الجوي.

تميز هذه الطائرات بتنوع كبير، إذ تتيح تركيب جميع أنواع الكاميرات لأداء مهام مختلفة. وهي طائرات تخلق بسهولة وتُقلع عموديًا، مما يزيد من مرونتها.

ويوجد عدة أنواع من الطائرات المسيرة متعددة المراوح منها:

- الرباعية (Quadcopter): تحتوي على أربعة مراوح، وهي الأكثر شيوعًا في الاستخدامات المدنية.
- السداسية (Hexacopter): تحتوي على ستة مراوح، مما يوفر استقرارًا أكبر وقدرة على حمل أحمال أثقل.
- الثمانية (Octocopter): تحتوي على ثمانية مراوح، وتستخدم عادةً في التطبيقات الاحترافية التي تتطلب قدرة تحمل عالية.

توفر الطائرات متعددة المراوح تحكمًا أفضل أثناء الطيران، مما يجعلها مثالية للمناورات الدقيقة، يمكن لهذه الطائرات التحرك لأعلى ولأسفل بشكل عمودي، بالإضافة إلى الحركة للأمام والخلف والجانبين، مما يجعلها مناسبة للطيران بالقرب من المباني، يمكن للطائرات متعددة المراوح الإقلاع والهبوط في مساحات صغيرة، مما يزيد من مرونتها في الاستخدامات الحضرية.



الشكل 1-7: طائرة رباعية المراوح Quadcopter (المصدر: droidmen.com, 2023)



الشكل 1-6: طائرة سداسية المراوح Hexacopter (المصدر: dir.indiamart.com, 2018)

تُستخدم بشكل واسع في التصوير الفوتوغرافي والفيديو، حيث يمكنها التقاط صور من زوايا يصعب الوصول إليها، وتُستخدم أيضًا في مراقبة المواقع، مثل مراقبة المحاصيل في الزراعة أو المراقبة الأمنية في المناطق الحضرية، كما تُستخدم في عمليات البحث والإنقاذ، حيث يمكنها الوصول إلى المناطق النائية أو الخطرة.

ومع ذلك، فإن الطائرات متعددة المراوح تعاني من وقت طيران قصير، حيث يتراوح عادة بين 20 إلى 40 دقيقة فقط، وذلك بسبب استهلاك الطاقة العالي اللازم للحفاظ على الرفع. هذا يجعلها غير مناسبة للمشاريع التي تتطلب تغطية مساحات واسعة في رحلة واحدة، وكذلك على الرغم من قدرتها على حمل بعض المعدات، إلا أن سعة الحمولة للطائرات متعددة المراوح أقل مقارنة بالطائرات ذات الأجنحة الثابتة، ومن سلبياتها أيضًا أنها أكثر عرضة للتأثر بالرياح وظروف الطقس السيئة، مما قد يؤثر على استقرارها وأدائها أثناء الطيران.

➤ طائرات بدون طيار ذات أجنحة ثابتة:

هي طائرات تعتمد على الأجنحة الثابتة على هيكل صلب يشبه الطائرات التقليدية، مما يسمح لها بالطيران بشكل مستمر إلى الأمام، هذا التصميم يجعلها أكثر كفاءة في استهلاك الطاقة مقارنة بالطائرات متعددة المراوح، حيث يمكنها تغطية مسافات أطول باستخدام طاقة أقل.

يمكن للطائرات ذات الأجنحة الثابتة أن تبقى في الهواء لفترات طويلة، تصل إلى عدة ساعات، مما يجعلها مثالية للمهام التي تتطلب تغطية مساحات واسعة، تستهلك هذه الطائرات طاقة أقل مقارنة بالطائرات متعددة المراوح بفضل تصميمها الديناميكي الهوائي، مما يزيد من فعاليتها في المهام الطويلة، ويمكنها حمل أحمال كبيرة مما يجعلها مناسبة للمهام التي تحتاج قدرة حمولة مثل نقل المعدات الثقيلة أو استخدام أجهزة استشعار متقدمة.



الشكل 1-8: طائرة بدون طيار ذات أجنحة ثابتة
(المصدر: pentapostagma.gr, 2018)

ولكن على الرغم من ذلك لا تستطيع الطائرات ذات الأجنحة الثابتة التحويم في مكانها، مما يجعلها أقل ملاءمة للمهام التي تتطلب دقة عالية في الحركة مثل التصوير القريب أو الفحص التفصيلي، ومن سلبياتها أنها تحتاج إلى مساحة أكبر للإقلاع والهبوط، مما قد يحد من استخدامها في المناطق الضيقة أو المزدحمة.

➤ طائرات هليكوبتر بدون طيار ذات مروحة واحد:

تتميز الطائرات المسيرة أحادية الدوار بقوة ومتانة، وتشبه في بنيتها وتصميمها طائرات هليكوبتر الفعلية، حيث تحتوي على دوار واحد فقط لتوفير الطاقة، بالإضافة إلى ذيل للتحكم في الاتجاه والاستقرار. وبجمعها مزايا الطائرات المسيرة الصغيرة متعددة الدورات والطائرات المسيرة أحادية الدوار، فهي أكثر ملاءمة لحمل حمولات أكبر والطيران بكفاءة أعلى من الطائرات متعددة الدورات. تستخدم الطائرات أحادية الدوار عادةً محركات غازية بدلاً من البطاريات، مما يزيد بشكل كبير من مدة طيرانها.



الشكل 1-9: طائرة هليكوبتر بدون طيار
(المصدر: cavok.com.br, 2018)

إلا أن هذه الطائرات المسيرة تكون أكبر حجمًا وأكثر تعقيدًا من أنواع أخرى من الطائرات المسيرة. هذا يعني أنها أعلى ثمنًا وأصعب في التحكم كما أن شفراتها الأكبر قد تجعلها أكثر خطورة.

➤ طائرات بدون طيار هجينة:

تعتبر الطائرات بدون طيار الهجينة نوعًا متقدمًا من الطائرات المسيرة، حيث تجمع بين مزايا الطائرات متعددة المرواح والطائرات ذات الأجنحة الثابتة تجمع هذه الطائرات بين المدى الطويل ومدة الطيران للطائرات بدون طيار ثابتة الأجنحة، وقدرة الإقلاع العمودي للطائرات متعددة المرواح، مما يُعني عن عيوب الطائرات بدون طيار ثابتة الأجنحة التي تتطلب مساحات واسعة للإقلاع والهبوط، صُممت هذه الطائرات لرسم الخرائط، وفحص خطوط الكهرباء، والمراقبة، والزراعة، وعمليات الإنقاذ.



الشكل 1-10: طائرة مسيرة هجينة
(المصدر: manualslib.com, 2019)

إلا أن هذه الطائرات يتطلب تصميمها لتقنيات متقدمة، مما قد يزيد من تكاليف الإنتاج والصيانة، وقد يتطلب تشغيل الطائرات الهجينة مهارات خاصة، مما قد يزيد من الحاجة إلى تدريب خاص للمستهلكين (<https://www.jouav.com>).

1-3-3 حسب سعة حمولتها:

يعتمد الوزن الذي تستطيع الطائرة بدون طيار حمله على قوة المحرك، وقوة الرفع التي تولدها المروحة في الظروف الجوية العادية. سنقسم الطائرات بدون طيار إلى أربع فئات بناءً على وزن الحمولة التي تستطيع حملها.

➤ طائرات بدون طيار ذات الوزن الخفيف جداً:

وتسمى هذه الطائرات عادة بالطائرات بدون طيار النانوية، والتي يصل وزنها إلى 11 جراماً (0.011 كجم) ولا يمكنها حمل سوى حمولات تتراوح من 4 جرام إلى 100 جرام (0.004 إلى 0.1 كجم).

➤ طائرات بدون طيار خفيفة الوزن:

تشير الطائرات بدون طيار خفيفة الوزن إلى طائرات بدون طيار صغيرة يبلغ متوسط وزنها 200-1000 جرام (0.2-1 كجم)، ويبلغ متوسط سعة حمولتها ما بين 150-270 جرام (0.15-0.27 كجم).

➤ طائرات بدون طيار متوسطة الوزن:

نشير هنا إلى طائرات بدون طيار متوسطة الحجم يتراوح وزنها بين 1 و600 كجم (2.20 و1323 رطلاً). وتُقسم عموماً إلى فئتين: طائرات بدون طيار تجارية وطائرات بدون طيار عسكرية.

تتراوح سعة حمولة الطائرات المسيرة متوسطة الوزن، المخصصة للاستخدامات التجارية والاستهلاكية، بين 400 و1460 جراماً (0.4-1.46 كجم). ومن الأمثلة على الطائرات المسيرة المخصصة للاستخدامات التجارية طائرة JOUAV CW-15، القادرة على حمل حمولات متنوعة تصل إلى 3 كجم.

تتمتع الطائرات العسكرية بدون طيار متوسطة الوزن بقدرة حمولة تتراوح بين 40 كجم (88 رطلاً) و150 كجم (331 رطلاً).

➤ طائرات بدون طيار ذات رفع ثقيل:

طائرات النقل الثقيل هي طائرات كبيرة، وخاصةً طائرات عسكرية، مع نسبة ضعيفة منها تُستخدم للتوصيل ورسم الخرائط عالية الدقة. يتجاوز وزن هذه الطائرات 160 كجم، ويتجاوز وزن بعضها 1000 كجم. ويمكن أن تصل حمولتها إلى 550 كجم فأكثر [10].



الشكل 1-11: طائرة مسيرة تحمل ائقال كبيرة
(المصدر: blog.faradars.org,2023)

4-3-1 حسب مدى ومدة الطيران:

➤ طائرات بدون طيار قريبة المدى جدًا:

تستطيع الطائرات المسيرة ذات المدى القريب جدًا أن تحلق على بُعد 5 كيلومترات من جهاز التحكم، بمتوسط وقت طيران ساعة واحدة! تُستخدم هذه الطائرات بشكل رئيسي لأغراض ترفيهية.

➤ طائرات بدون طيار قريبة المدى:

تستطيع الطائرات المسيرة قصيرة المدى التحليق حتى مسافة 50 كيلومترًا من جهاز التحكم، والبقاء في الجو لمدة تتراوح بين ساعة وست ساعات. ولأنها قادرة على التحليق على ارتفاعات عالية جدًا، تُستخدم غالبًا في الطائرات المسيرة العسكرية لأغراض المراقبة.

➤ طائرات بدون طيار قصيرة المدى:

الطائرات المسيرة قصيرة المدى هي طائرات يمكنها التحليق حتى مسافة 150 كيلومترًا من جهاز التحكم. بفضل بطارياتها القوية جدًا، يمكنها البقاء في الجو لمدة تتراوح بين 8 و12 ساعة، وتُستخدم عادةً لأغراض القتال والمراقبة.

➤ طائرات بدون طيار متوسطة المدى:

هذه الطائرات المسيرة قادرة على التحليق لمسافة 400 ميل (644 كيلومترًا). ويمكنها التحليق على ارتفاعات تتراوح بين 12,000 و30,000 قدم لأكثر من 24 ساعة. تُستخدم هذه الطائرات عادةً للقتال والمراقبة.

JOUAV CW-30^E باعتبارها طائرة بدون طيار ذات مدة طويلة للطيران ومدى طويل، تتمتع بمدى تحكم يصل إلى 200 كيلومتر ووقت طيران طويل يصل إلى 10 ساعات، والتي يتم استخدامها على نطاق واسع في المراقبة ورسم الخرائط على مناطق واسعة.

➤ طائرات بدون طيار طويلة المدى:

تتفوق الطائرات المسيرة بعيدة المدى، المعروفة أيضًا باسم طائرات التحمل، تقنيًا ووظيفيًا على هذه الطائرات الأخرى. وتشير التقديرات إلى أنها تستطيع قطع مسافة تزيد عن 400 ميل (644 كيلومترًا) (ويصل بعضها إلى مئات الآلاف من الأميال المربعة) دون انقطاع إشارتها. ورغم أن استخدامها يُركز في المقام الأول على المراقبة العسكرية والتجسس، إلا أن المحترفين يستخدمونها أيضًا لتتبع أنماط الطقس والجيولوجيا ورسم الخرائط الجغرافية [10].

1-3-5 حسب مصادر الطاقة:

➤ وقود الطائرات التقليدي:

يُستخدم وقود الطائرات بشكل رئيسي في الطائرات بدون طيار الكبيرة ذات الأجنحة الثابتة. ومن الأمثلة على هذه الطائرات طائرة بريداتور "Predator" العسكرية. تُستخدم هذه الطائرة بكثرة من قبل الجيش الأمريكي، ويمكن تزويدها بعدد من أجهزة الاستشعار المختلفة، بالإضافة إلى الصواريخ وأنواع أخرى من الذخيرة.

➤ البطاريات:

تُستخدم خلايا البطاريات بشكل رئيسي في الطائرات بدون طيار متعددة الدورات الأصغر حجمًا. تتميز هذه الطائرات بمدى قصير وتتطلب وقت تشغيل أقل من الطائرات التي تعمل بالوقود. غالبًا ما تُستخدم هذه الطائرات لأغراض ترفيهية، مما يجعلها أكثر عملية لتشغيلها على خلية بطارية قابلة لإعادة الشحن.

➤ خلايا الوقود:

خلية الوقود هي جهاز كهروكيميائي يحول الطاقة الكيميائية من الوقود مباشرةً إلى طاقة كهربائية. نظرًا لقلة تحويلات الطاقة الحرارية والميكانيكية، يُعد هذا التحويل فعالًا وصديقًا للبيئة. نادرًا ما تُستخدم خلايا الوقود حاليًا في الطائرات بدون طيار. لا يُمكن تجهيز سوى الطائرات بدون طيار ثابتة الأجنحة بمثل هذه الخلية نظرًا لوزنها الثقيل نسبيًا. من أهم مزايا استخدام خلية الوقود قدرة الطائرات بدون طيار على الطيران لمسافات أطول دون الحاجة إلى إعادة شحن. على سبيل المثال، تتمتع طائرة ستوكر بدون طيار التي تستخدم خلية وقود بمدة طيران 8 ساعات بدلاً من ساعتين.

➤ الخلايا الشمسية:

تُعتبر الطائرات بدون طيار التي تستخدم الخلايا الشمسية نادرة في صناعة الطائرات بدون طيار الحالية. الطائرات بدون طيار التي تستخدم الخلايا الشمسية هي في الغالب طائرات بدون طيار ثابتة الأجنحة. نظرًا لانخفاض كفاءة الخلايا الشمسية الحالية، عادةً ما تكون هذه الخلايا مناسبة للعديد من الطائرات بدون طيار متعددة الدورات. ومع ذلك، فإن الخلايا الشمسية مناسبة لطائرات أورنيثوبتر الصغيرة. جذبت الطائرات بدون طيار التي تعمل بالخلايا الشمسية اهتمامًا إعلاميًا كبيرًا عندما أبرمت كل من جوجل وفيسبوك صفقات مع مصنعي هذه الطائرات. كان هدفهم هو السماح للطائرات بدون طيار التي تعمل بالطاقة الشمسية بالتحليق في الغلاف الجوي بشكل دائم [11].

1-3-6 حسب نوع المحرك:

➤ محركات الطائرات بدون طيار ذات الفرشاة (Brushed):

المحركات ذات الفرشاة هي نوع المحركات المستخدم في معظم الطائرات بدون طيار الترفيهية. ورغم أنها أرخص، إلا أنها تتطلب صيانة أكثر من المحركات عديمة الفرشاة. يتصل المحرك بترس صغير يُدير ترسًا كبيرًا يُحرك بدوره المحرك. يُسمى هذا "مُخَفِّض السرعة" لأنه بفضل هذين الترسين، تُخَفِّض أقصى طاقة يُمكن أن يُوفِّرها المحرك. سيساعدنا هذا في تشغيل الطائرة بدون طيار وسيُطيل عمرها الافتراضي لأننا لن نُرهق المحرك بأقصى طاقته في أي وقت.



الشكل 1-12: محرك ذو فرشاة **Brushed**

(المصدر: robu.in, 2017)

➤ محركات الطائرات بدون طيار بدون فرشاة (**Brushless**):

الميزة الرئيسية لهذه المحركات هي عدم وجود فرش ملامسة للدوار، مما يقلل من صيانتها ويجعل تشغيلها فعالاً وذو كفاءة عالية. علاوة على ذلك، تتمتع هذه المحركات بطاقة أعلى بكثير من المحركات ذات الفرش/بدون فرش (50-70 كم/ساعة مقارنة بـ 150-200 كم/ساعة للمحركات بدون فرش).



الشكل 1-13: محرك بدون فرشاة **Brushless**

(المصدر: indiamart.com, 2020)

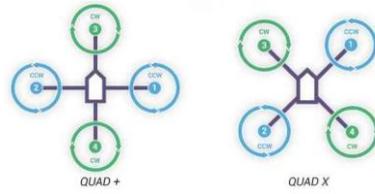
ومع ذلك، تعمل هذه الأنواع من محركات الطائرات بدون طيار بشكل أساسي بالتناوب، لذلك يجب أن يكون لكل محرك وحدة تحكم إلكترونية في السرعة (ESC) خاصة به. وحدة التحكم الإلكترونية في السرعة (ESC) أو المتغيرات الإلكترونية التي يمكنها تحديد سرعة دوران المحرك الخالي من الفرشاة [10].

2 الطائرة المسيرة رباعية المراوح:

1-2 تعريف الطائرة المسيرة رباعية المراوح:

الطائرات المسيرة رباعية المراوح، والمعروفة أيضاً باسم الكوادكوبتر، هي نوع من الطائرات بدون طيار (UAV) التي تعتمد على أربعة مراوح لتوليد الرفع والتحكم في الطيران. تتميز هذه الطائرات بتصميمها البسيط والفعال، مما يجعلها شائعة في العديد من التطبيقات [12].

تمتلك أربع أذرع كل واحدة متصلة بمحرك للطيران والتوازن والتوجيه، يوجد نوعين من تركيب للطائرة الرباعية المراوح (شكل X أو +).



الشكل 1-14: تركيب X و + للمسيّرة رباعية المراوح

(المصدر: ardupilot.org, 2023)

2-2 الديناميكية الحركية للطائرة الرباعية:

لقد اخترنا في مشروعنا هذا التركيب على الشكل X لتوفره لدينا (إطار 450)، سوف نتحدث عن ديناميكية الحركية للطائرة الرباعية، كيفية الإقلاع، ارتفاع، هبوط، تحويم، الاتجاه الى الامام والخلف، التحرك الى اليمين والشمال، الدوران الطائرة على نفسها.

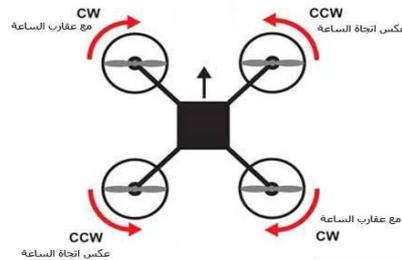


الشكل 1-15: إطار 450 للطائرة الرباعية

(المصدر: desertcart.co.za, 2022)

يعتمد مبدأ عمل الطائرة الرباعية بشكل أساسي على زيادة أو تقليل سرعة المحركات لتوجيه الطائرة المسيّرة يتم تركيب أربع محركات كل محركين يدوران في الاتجاه المعاكس للمحركين الاخرين اما في اتجاه عقارب الساعة (CW) او عكس عقارب الساعة (CCW)، كما هو موضح في الشكل 1-16، توضع المحركات الأربعة على مسافات متساوية من مركز جسم الطائرة.

يحتوي كل محرك على شفرة تناسب اتجاه الدوران حيث يتم التمييز بينهما بحرف R التي توضع فوق الشفرة التي تناسب عكس عقارب الساعة.



الشكل 1-16: مواضع تركيب المحركات

(المصدر: indiamart.com)

➤ حركات الصعود والهبوط:

يتم اقلاع الطائرة وارتفاعها عن طريق زيادة سرعة المحركات الأربعة مما يؤدي الى زيادة قوة الدفع لتصبح أكبر من قوة الثقل، للنزول الطائرة يتم تخفيض سرعة المحركات الأربعة مما يؤدي الى إنقاص قوة الدفع لتصبح أقل من قوة الثقل، ولكي تحوم الطائرة يجب ان تكون سرعة المحركات قادرة على توليد قوة دفع مساوية لقوة الثقل.

➤ التحرك الى الامام والخلف:

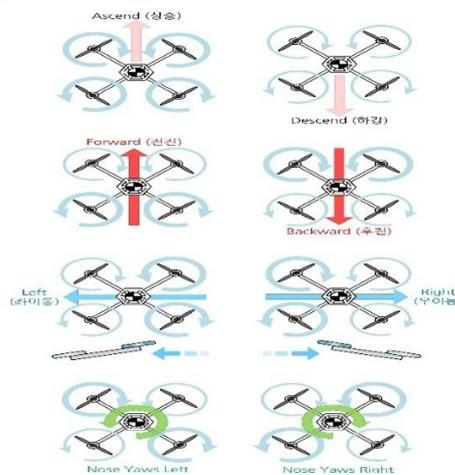
يتم التحرك الى الامام او الرجوع الى الخلف عن طريق التحكم في سرعة المحركات، بحيث انه إذا أردنا التحرك الى الامام قمنا بتخفيض سرعة المحركات الامامية وزيادة سرعة المحركات الخلفية مما يؤدي الى دوران الطائر حول المحور Y ناشئا زاوية انحدار (Roll)، هذا الميل يؤدي الى التقدم الى الامام كلما زادت زاوية الانحدار زادت سرعة التحرك الى الامام، وللتحرك للخلف يتم زيادة سرعة المحركات الامامية وتخفيض سرعة المحركات الخلفية.

➤ التحرك الى اليمين والشمال:

يتم التحرك الى اليمين او التحرك الى اليسار عن طريق التحكم في سرعة المحركات، بحيث انه إذا أردنا التحرك الى اليمين قمنا بتخفيض سرعة المحركات التي في الجهة اليمنى وزيادة سرعة المحركات التي في الجهة اليسرى مما يؤدي الى دوران الطائر حول المحور X ناشئا زاوية التدحرج (Pitch)، هذا الميل يؤدي الى التحرك الى اليمين كلما زادت زاوية التدحرج زادت سرعة التحرك الى اليمين، وللتحرك لليسار يتم زيادة سرعة المحركات التي في الجهة اليمنى وتخفيض سرعة المحركات التي في الجهة اليسرى.

➤ الالتفاف:

للقيام بالالتفاف اما باتجاه عقارب الساعة ام عكس عقارب، يتم زيادة سرعة المحركين اللذان يدوران في نفس الاتجاه وتخفيض سرعة الاخرين، تسمى زاوية الدوران بزاوية اللف (Yaw)، لدوران في اتجاه عقارب الساعة يتم زيادة سرعة المحركين اللذان يدوران في عكس اتجاه عقارب الساعة وتخفيض سرعة المحركين اللذان يدوران في اتجاه عقارب الساعة ليدوران في عكس اتجاه عقارب الساعة تقوم بعكس العملية.



الشكل 1-17: الديناميكية الحركية للطائرة الرباعية

(المصدر: <https://tr.pinterest.com>, 2021)

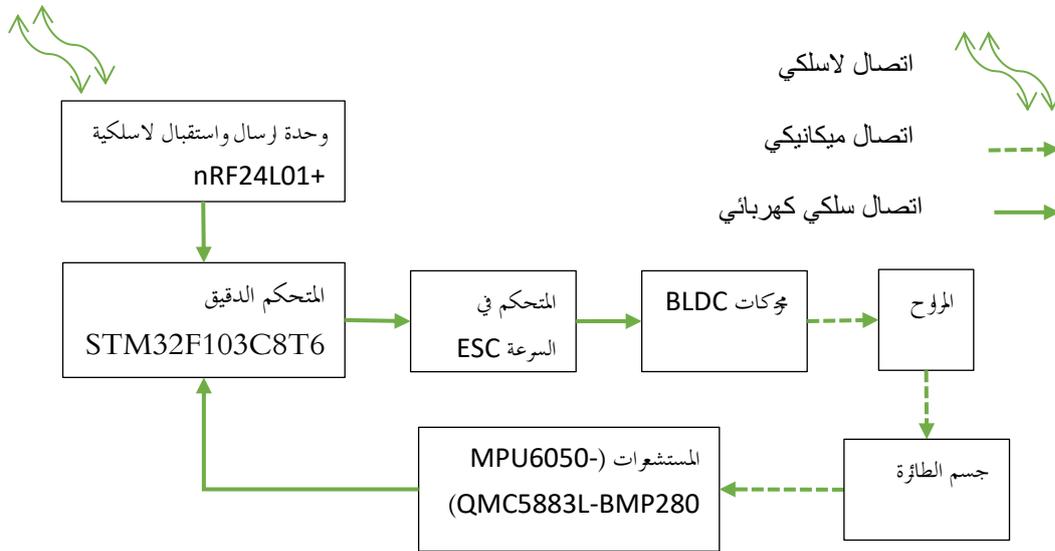
الختام:

مما سبق يوجد أنواع عدة من الطائرات المسيرة كل نوع خاص لاداء مهام معينة، اما في هذا المشروع تم استخدام طائرة رباعية المراوح، لانها متوفرة على شكل طقم أدوات يمكن تركيبه وتزويده بالنظام الالكتروني الذي يهدف هذا المشروع الى تصميمه وتطويره باستخدام المتحكم الدقيق المناسب.

الفصل الثاني: أجهزة المستخدمة

المقدمة:

سنتناول خلال هذا الفصل نظرة عامة حول المشروع مع تقديم التوضيحات اللازمة لمختلف الأجزاء المكونة للنظام.



الشكل 1-2: المخطط الصندوقي لطائرة المسيرة.

1 المحرك بدون فرشاة (Brushless):

هي نوع من المحركات الكهربائية التي تعمل على التيار المستمر وتستخدم التبديل الإلكتروني بدلاً من الفرش الميكانيكية، المعروفة باسم (BLDC).

يُنجز محرك BLDC عملية التبديل إلكترونياً باستخدام تغذية راجعة لموضع الدوار لتحديد وقت تبديل التيار، عادةً ما تتضمن التغذية الراجعة مُلحَقًا بمستشعر للمغناطيس أو مُشَفِّر دوار.

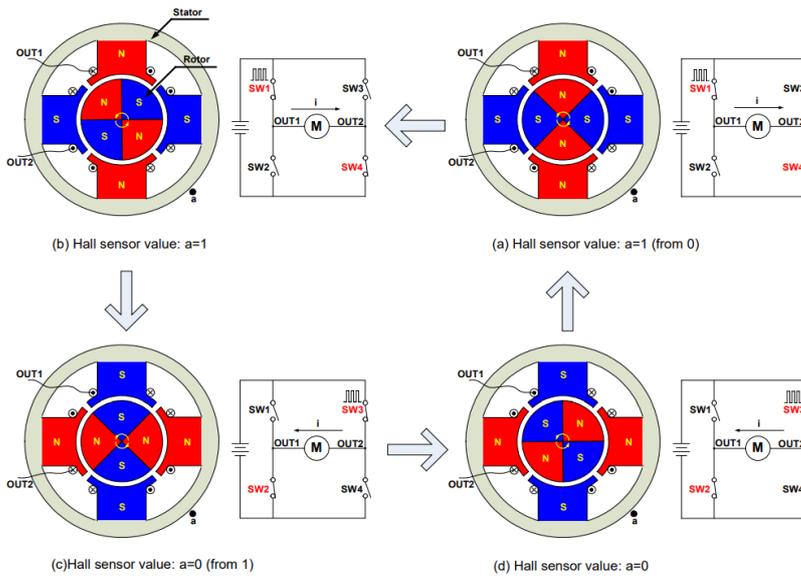
تعمل ملفات الجزء الثابت بالتزامن مع مغناطيسات دائمة على الدوار لتوليد كثافة تدفق شبه موحدة في الفجوة الهوائية. يسمح هذا بتشغيل ملفات الجزء الثابت بجهد تيار مستمر ثابت (ومن هنا جاء اسم "تيار مستمر بدون فرش")، والذي ينتقل ببساطة من ملف ثابت إلى آخر لتوليد شكل موجة جهد متردد ذي شكل شبه منحرف.

يتميز المحرك BLDC بكفاءة العالية حيث يتمتع بكفاءة تتراوح بين 85% إلى 90%، مما يجعلها أكثر فعالية من المحركات التقليدية ذات الفرش، ويتميز أيضاً بعمر طويل نظراً لعدم وجود فرش تتآكل، فإن هذه المحركات تحتاج إلى صيانة أقل وتتمتع بعمر افتراضي أطول، وتوفر أيضاً تحكماً دقيقاً في السرعة والعزم، مما يجعلها مثالية للاستخدام في التطبيقات التي تتطلب دقة عالية مثل الطائرات بدون طيار، الروبوتات، والأجهزة المنزلية [13].

يوجد نوعين من محركات BLDC أحدهما احادي الطور والآخر ثلاثي الطور ولقد استخدمنا في مشروعنا المحرك ثلاثي الطور.

➤ محرك BLDC احادي الطور:

يتم تشغيل المحرك باستخدام دائرة قيادة تتبع تسلسل معين لتشغيل محرك تيار مستمر أحادي الطور (BLDC).



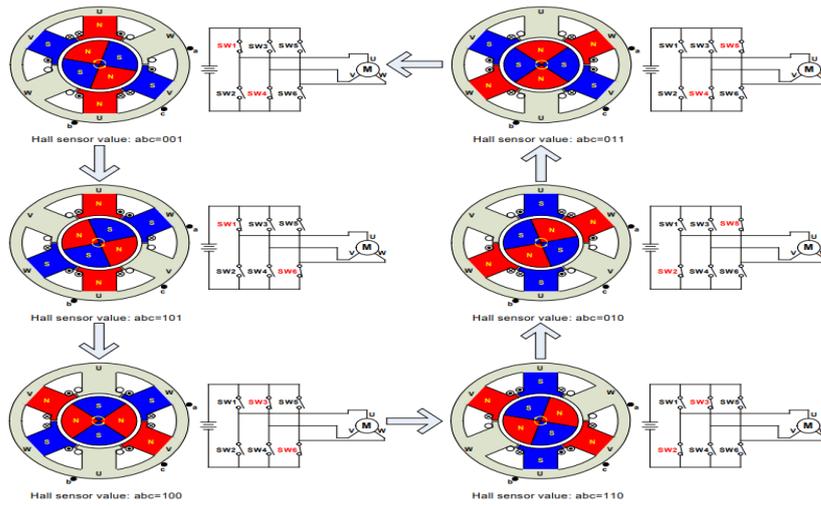
الشكل 2-2: تسلسل تشغيل محرك تيار مستمر BLDC أحادي الطور

(المصدر: Jian & Yangwei , 2011,p14).

تُشكل المغناطيسات الدائمة الجزء الدوار وتقع داخل الجزء الثابت. يُركَّب مستشعر موضع المغناطيسي ("a") على الجزء الثابت الخارجي، مما يُؤلِّد جهد خرج يتناسب مع شدة المجال المغناطيسي (بافتراض أن المستشعر يصبح عاليًا عند مرور القطب الشمالي للجزء الدوار، وينخفض عند مرور القطب الجنوبي للجزء الدوار). يشتغل SW1 و SW4 عندما يكون خرج مستشعر المجال المغناطيسي عاليًا، كما هو موضح في الشكل (a) و (b). في هذه المرحلة، يتدفق تيار المحرك عبر ملفات الجزء الثابت من OUT1 إلى OUT2، ويُؤلِّد أقطابًا كهرومغناطيسية متبادلة للجزء الثابت. تُسبب القوة المغناطيسية الناتجة عن المجال المغناطيسي للجزء الدوار والمجال الكهرومغناطيسي للجزء الثابت دوران الجزء الدوار. بعد أن تصل إشارة الدوار إلى 180 درجة، ينعكس جهد خرج هول نظرًا لقربه من القطب الجنوبي. ثم يعمل SW2 و SW3 مع انعكاس التيار من OUT2 إلى OUT1، كما هو موضح في الشكل (c) و (d). تُحفز الأقطاب المغناطيسية المتقابلة للجزء الثابت الدوار على مواصلة الدوران في نفس الاتجاه [13].

➤ محرك BLDC ثلاثي الطور:

يتطلب محرك BLDC ثلاثي الطور ثلاث مستشعرات للمجال المغناطيسي لاكتشاف موضع الدوار. بناءً على الموضع الفيزيائي لمستشعرات المغناطيسية، يوجد نوعان من المخرجات: انزياح طور بمقدار 60 درجة وانزياح طور بمقدار 120 درجة. يمكن تحديد تسلسل الاتصال الدقيق من خلال دمج إشارات مستشعرات المغناطيسية الثلاثة.



الشكل 2-3: تسلسل تشغيل محرك تيار مستمر BLDC ثلاثي الطور

(المصدر: (Jian & Yangwei , 2011,p16).

يوضح الشكل تسلسل التبديل لدائرة تشغيل محرك BLDC ثلاثي الطور للدوران عكس اتجاه عقارب الساعة. تُركَّب ثلاث مستشعرات هول - "a" و"b" و"c" - على الجزء الثابت بفواصل زمنية مقدارها 120 درجة، بينما تكون اللفات ثلاثية الطور في وضعية تشكيل نجمي. لكل دوران بمقدار 60 درجة، يُغيَّر أحد مستشعرات المغناطيسية حالته؛ ويستغرق الأمر ست خطوات لإكمال دورة كهربائية كاملة. في الوضع المتزامن، يُحدَّث تبديل تيار الطور كل 60 درجة. في كل خطوة، يكون أحد طرفي المحرك مرفوعًا إلى الأعلى، وطرفًا آخر مرفوعًا إلى الأسفل، بينما يبقى الطرف الثالث عائمًا. تسمح عناصر التحكم الفردية في الحركات العالية والمنخفضة بتشغيل عالي، ومنخفض، وعائم عند كل طرف محرك.

ومع ذلك، قد لا تُعادل دورة إشارة واحدة دورة ميكانيكية كاملة. يُحدد عدد دورات الإشارة اللازمة لإكمال دورة ميكانيكية بعدد أزواج أقطاب الدوار. يتطلب كل زوج من أقطاب الدوار دورة إشارة واحدة في دورة ميكانيكية واحدة. لذا، فإن عدد دورات الإشارة يساوي عدد أزواج أقطاب الدوار [13].

ولقد استعملنا في مشروعنا محرك ثلاثي الطور X2208 ذو قدرة 2000KV من طرف شركة SKYRC، ومن أجل التحكم في سرعة المحرك يجب إضافة دائرة قيادة المعروفة باسم (ESC).

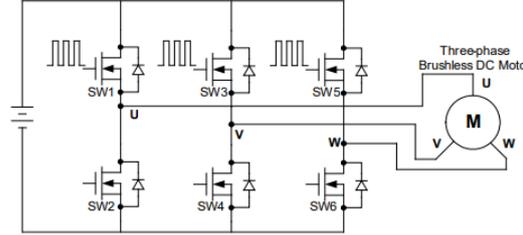


الشكل 2-4: محركات X2208 Brushless

(المصدر: (www.skyrc.com/X2208_Motor,2025).

2 المتحكم في السرعة (ESC):

هو عبارة عن دائرة إلكترونية تقوم بالتحكم بالسرعة المحرك باستخدام إشارة تعديل عرض النبضة (PWM)، ويتم ذلك باستخدام ترانزستورات ذات قدرة عالية تربط بطريقة الموضحة في الشكل التالي، بحيث تسمح بإنشاء إشارة ثلاثية الطور.



الشكل 2-5: دائرة ESC مبسطة.

(Jian & Yangwei , 2011,p13).

يوجد نوعين من المتحكم في السرعة (ESC) نوع يحتوي على دائرة خفض الجهد مثل الذي لدينا وصنف لا يحتوي على دائرة خفض الجهد، وعند اختيار المتحكم في السرعة (ESC) يتم مراعاة التيار الأعظمي وجهد الادخال.

للتحكم في سرعة المحرك يجب ارسال اشارة تعديل عرض النبضة (PWM) مناسبة ويتم ذلك باستخدام المتحكم الدقيق وسوف نستعمل المتحكم STM32F103C8T6.

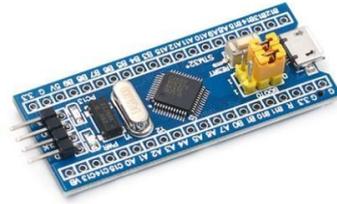


الشكل 2-6: fly color 40a esc

(المصدر: hobbyporter.com,2017)

3 المتحكم الدقيق STM32F103C8T6:

يوجد أكثر من تسعة اقسام تنقسم اليها المتحكمات STM 32 منها (F0,F1,F3,L0,L1)، ينتمي المتحكم المستخدم الى عائلة F1 ذو وحدة معالجة مركزية ARM Cortex M3 32bit، المخصص للأنظمة المدججة [14].



الشكل 2-7: Blue pill stm32f103c8t6

(المصدر: (zhuanlan.zhihu.com,2023

يتصف المتحكم الدقيق STM32F103C8T6 بسرعة تصل الى 72MHz كحد اقصى، يحتوي على مؤقت نظام systimer، ويحتوي على اثنين من المحولات التناظرية الرقمية ADC يحتوي كل محول على عشرة قنوات بالإضافة الى القناة خاصة بمستشعر الحرارة في المحول التناظري الرقمي ADC1، ويحتوي على 4 مؤقتات 16bit، بالإضافة الى المؤقت RTC، ويحتوي على بروتوكولات الاتصال (CAN,2-I2C,2-SPI,3-UASRT,USB)، كما يحتوي على أكثر من 27 منفذ، مع ذاكرة الوصول العشوائي بسعة 20KB وذاكرة من نوع Flash بسعة 64KB، ويحتوي على وحدة الوصول المباشر للذاكرة DMA [15].

4 المستشعرات

من اجل التحكم في الطائرة المسيرة وتحديد القيم المناسبة لسرعات المحرك، يتم استخدام المستشعرات من اجل التغذية الراجعة لتحديد قيم الأخطاء والتقليل منها.

1-4 مستشعر التسارع والجيرسكوب MPU6050:

يتم استخدام مستشعر التسارع لقياس التسارع الذي يمكننا من حساب الزوايا باستخدام المبادئ الأساسية للهندسة في الفضاء، ويتم أيضا حساب الزوايا باستخدام الجيرسكوب عن طريق حساب التكامل لقيم معدل السرعة.

يعتبر المستشعر MPU6050 وحدة قياس بالقصور الذاتي (IMU) تتضمن جيرسكوب ثلاثي المحاور ومقياس تسارع ثلاثي المحاور X,Y,Z، ويمكنه قياس درجة الحرارة.



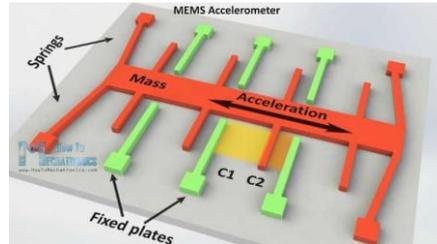
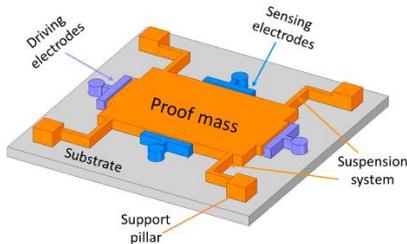
الشكل 2-8: MPU6050

(المصدر: (how2electronics.com,2023

تتميز وحدة MPU بثلاثة محولات تناظرية رقمية (ADCs) بدقة 16 بت لرقمنة مخرجات الجيرسكوب ومخرجات مقياس التسارع. ولتتبع دقيق للحركات السريعة والبطيئة، تتميز الأجزاء بنطاق جيرسكوب كامل قابل للبرمجة من قبل المستخدم،

يتراوح بين $250 \pm$ ، $500 \pm$ ، $1000 \pm$ ، و $2000 \pm$ درجة/ثانية (dps) ، ونطاق تسارع كامل قابل للبرمجة من قبل المستخدم، يتراوح بين $g2 \pm$ ، $g4 \pm$ ، $g8 \pm$ ، و $g16 \pm$ [16].

المستشعر MPU6050 عبارة عن نظام كهروميكانيكي دقيق microelectric mechanical system (MEMS)، يتم قراءة البيانات باستخدام بروتوكول الاتصال I2C وبتردد 400KHz كحد أقصى، او استخدام البرتوكول SPI بتردد 20MHz كحد أقصى ولقد استعملنا بروتوكول الاتصال I2C، يتم تشغيله على جهد يتراوح بين 2.375V و 3.46V [16].



الشكل 2-10: نظام كهروميكانيكي دقيق للجيرسكوب (المصدر: mdi.com, 2022)

الشكل 2-9: نظام كهروميكانيكي دقيق لمستشعر التسارع (المصدر: files.codingninjas.in, 2024)

2-4 مستشعر الضغط BMP280:

يتم استخدام مستشعر الضغط BMP280 لحساب الارتفاع ويتم ذلك من خلال قياس الضغط الجوي، لان كلما ارتفعنا في السماء انخفض الضغط وبقياس النسبة بين الضغطين يتم استنتاج الارتفاع، ويتم ذلك باستخدام المعادلة التالية:

$$\text{altitude} = 44330 \left(1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0.190294} \right) \dots\dots\dots 1-2 \text{ المعادلة}$$

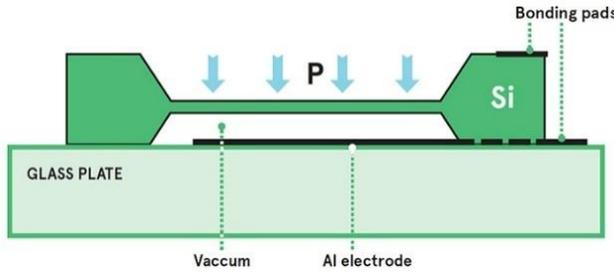
حيث يمثل:

P الضغط المقاس.

P₀ الضغط على مستوى البحر.

Altitude الارتفاع.

يعتمد BMP280 على تقنية مستشعر الضغط المقاومة للضغط الكهرو إجهادي المثبتة والتي تتميز بمتانة عالية ودقة عالية وخطية واستقرار طويل الأمد، ويعتبر نظام كهروميكانيكي دقيق microelectric mechanical system (MEMS).



الشكل 2-11: نظام كهروميكانيكي دقيق لمستشعر الضغط

(المصدر: avnet.com, 2019)

صمم خصيصاً للتطبيقات المحمولة. توجد وحدة المستشعر في عبوة صغيرة الحجم للغاية ذات غطاء معدني مكون من 8 دبابيس بحجم 2.0×2.5 مم وارتفاع العبوة 0.95 مم. تسمح أبعادها الصغيرة واستهلاكها المنخفض للطاقة البالغ 2.7 ميكرو أمبير عند 1 هرتز باستخدامها في الأجهزة التي تعمل بالبطاريات مثل الهواتف المحمولة ووحدات GPS أو الساعات [17].

يمكنه حساب الضغط في مجال من 300 hPa الى 1100 hPa والذي يكافئ قياس الارتفاع بالنسبة لسطح البحر من 500- الى 9000 متر ويتميز الخطأ النسبي المقدر بـ 0.12hPa المكافئ لـ 1 متر، يستعمل في تحسين نظام الملاحة GPS والتنبؤ بالطقس وتحسين مؤشر السرعة العمودية (الى الاعلى)، تتم قراءة البيانات منه باستخدام الاتصال I2C ويتردد 400KHz كحد اقصى ويشغل بجهد 1.71 V كحد أدنى [17].



الشكل 2-12: BMP280

(المصدر: smartkits.com.br, 2018)

3-4 مستشعر المجال المغناطيسي QMC5883L:

يقوم المستشعر QMC5883L بقياس شدة المجال المغناطيسي في ثلاث محاور X, Y, Z، هو عبارة عن مستشعرات مغناطيسية مدمجة مع دائرة متكاملة لتحديد حالة الإشارة، مُصممة لتطبيقات عالية الدقة مثل البوصلة والملاحة والألعاب في الطائرات بدون طيار والروبوتات والأجهزة المحمولة والشخصية [18].

يتميز بحجم $3 \times 3 \times 0.9$ mm³ يحتوي على محول تناظري رقمي بسعة 16bits مع سعة مجال القياس من 8- Gauss الى +8 Gauss تتم قراءة بياناته باستخدام الاتصال I2C ويتردد 400KHz كحد اقصى (Qst, 2016).



الشكل 2-13: QMC5883L

(المصدر: ecadio.com, 2014)

ملاحظة:

عند شراء المستشعر الموضح في الصورة تجد انه مكتوب عليه HMC5883L لكنه في الحقيقة هو QMC5883L.

5 البطارية (LIPO):

بطارية LiPo هي اختصار لكلمة ليثيوم بوليمر، بفضل تغليفها المرن وخفيف الوزن يتم استخدام هذا النوع من البطاريات عادة في التطبيقات التي تتطلب مصدر طاقة صغير الحجم وعالي الكثافة. عادةً ما يكون جهدها 3.7 فولت، ولكن يمكن أن تصل إلى 4.2 فولت عندما يتم شحنها بالكامل، توجد في البطارية الواحدة أكثر من خلية وفي مشروعنا استخدمنا بطارية 4 خلايا [19].

يمتاز هذا النوع من البطاريات بخفة الوزن ويمكن تصنيعه بأي حجم أو شكل تقريبًا، تمتاز أيضًا بكثافة طاقة عالية حيث تستطيع تخزين المزيد من الطاقة مقارنة بأنواع البطاريات الأخرى، ولكن تعتبر أكثر عرضة للتلف بسبب الصدمات المادية والشحن الزائد، ولديها أقصر عدد القليل لدورات الشحن مقارنة بأنواع البطاريات الأخرى [20].



الشكل 2-14: بطارية LiPo 14.8V 4S

6 المراوح:

تعتبر مراوح الدرون من العناصر الأساسية التي تؤثر بشكل كبير على أداء الطائرات المسيرة حيث تتميز كل مروحة على أخرى بـ:

➤ **الطول القطر:** يؤثر قطر المروحة بشكل مباشر على قوة الدفع وكفاءة الطيران حيث تُنتج المراوح الأكبر قوة رفع أكبر، وهو أمر مفيد للطائرات بدون طيار ذات الرفع الثقيل، ولكنها غالبًا ما تتطلب محركات أقوى وقد تُقلل من القدرة

على المناورة. على العكس، تتميز المراوح الأصغر بخفة وزنها وسرعة استجابتها، مما يجعلها مثالية لطائرات السباق أو التطبيقات التي تتطلب مناورة عالية [21].

➤ **الزاوية:** تلعب زاوية ميل الشفرة، دورًا هامًا فكلما زادت زاوية الميل، زادت كمية الهواء المزاحة في كل دورة، مما يزيد السرعة والدفع، ولكن غالبًا ما يكون ذلك على حساب الكفاءة وزيادة استهلاك الطاقة، كما يمكن تمثيلها بعلبة مغير السرعة للسيار، الزوايا الصغيرة تمثل سرعات الأولى في السيارة والزوايا الكبيرة تمثل السرعات الأخيرة [22].

➤ **عدد الشفرات:** عادةً ما تكون المراوح ذات عدد شفرات قليل أكثر كفاءة في استهلاك الطاقة، بينما توفر المراوح ذات عدد شفرات كثيرة تحكما أفضل وسلاسة في الطيران [21].

يتم كتابة رقم فوق الشفرة يحمل طول القطر وزاوية الميل كمثال 1045 حيث 10 طول القطر بالإنش و45 زاوية الميل.



الشكل 2-15: مروحتين 1045.

(المصدر: amazon.sa, 2023)

7 وحدة الارسال والاستقبال اللاسلكية +nRF24L01:

هي وحدة ارسال واستقبال تستخدم أمواج الراديو بتردد 2.4GHz وبسرعة نقل بيانات 1Mbits/s، 2Mbits/s يصل مداها الى 1KM يمكن ان تصل الى 23KM في حالة إضافة بعض التعديلات عليها. تحتوي على 6 قنوات للإرسال والاستقبال.

يتم التواصل بينها وبين المتحكم الدقيق باستخدام بروتوكول الاتصال SPI وبسرعة تصل الى 10Mbits/s كحد اقصى.



الشكل 2-16: وحدة +nRF24L01.

(المصدر: techdelivers.com, 2022)

8 الكاميرا:

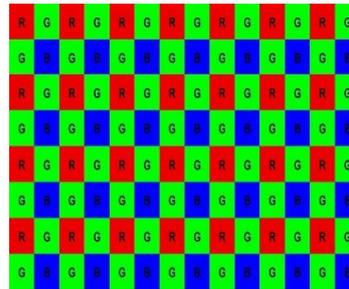
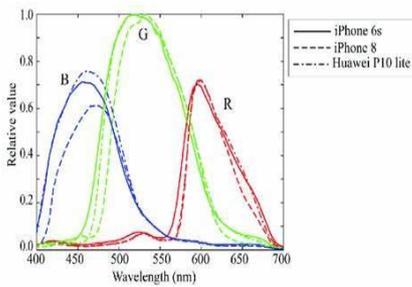
يتم إضافة كاميرا لجمع البيانات اللازمة لتحقيق الهدف المطلوب الذي هو فحص الحقول الزراعية، ويوجد مجموعة متنوعة من الكاميرات لمراقبة الحقول وتحسين الإنتاجية.

وهاته بعض الأنواع المستعملة:

1-8 كاميرات التقليدية (RGB):

صممت هذه الكاميرات خصيصا لالتقاط الضوء المرئي، تستخدم نظام الألوان RGB (الأحمر، الأخضر، الأزرق) لالتقاط الصور الملونة، تتكون الكاميرا من بكسلات كل بكسل يتحسس شدة الإضاءة لكل لون من ألوان الثلاثة.

تعمل الكاميرات RGB من خلال استخدام مصفوفة ألوان (Color Filter Array) من نوع Bayer، حيث يتم تقسيم الضوء إلى مكوناته الأساسية الثلاثة لكي يتم التقاط شدة إضاءة لكل لون (الأحمر، الأخضر، الأزرق)، ومن ثم يتم جمع القيم لتحصل على الصورة النهائية، تعتبر الكاميرات RGB مثالية للتطبيقات التي تتطلب دقة عالية في الألوان [23].



الشكل 2-18: نطاق الطيفي للكاميرا RGB

الشكل 2-17: مصفوفة ألوان من نوع Bayer BGGR

(المصدر: researchgate.net, 2023)

(المصدر: www.technexion.com, 2025).

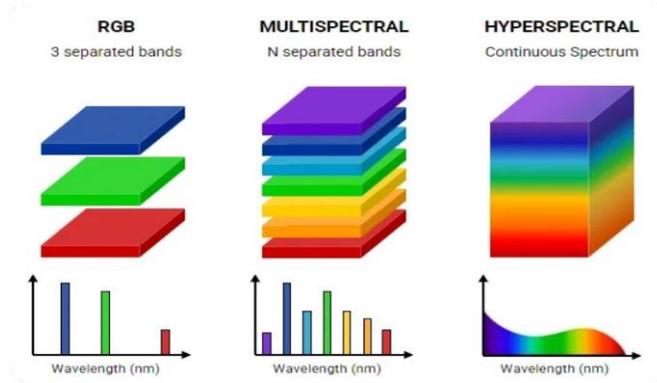
وتستخدم في تحليل صحة المحاصيل من خلال مراقبة تغيرات اللون في أوراق النباتات وتحديد مناطق التي تعاني من نقص المياه، وتستخدم في تقييم رطوبة التربة وتحديد احتياجات الري، من خلال تحليل الألوان المختلفة للتربة.

2-8 كاميرات متعددة الطيف (Multispectral):

الكاميرات متعددة الأطياف هي أجهزة تصوير تلتقط بيانات الصور في عدد كبير من القنوات الطيف الكهرومغناطيسي، مما يسمح لها بجمع معلومات تفصيلية حول المواد والأجسام التي تقوم بتصويرها.

تختلف هاته الكاميرات عن الكاميرات التقليدية (RGB) التي تحتوي على ثلاث أطياف (أحمر، أخضر، أزرق) اللازمة لالتقاط الضوء المرئي، على عكس كاميرات متعددة الأطياف التي تستشعر الاطياف في نطاقات أوسع تشمل الأشعة تحت الحمراء والأشعة فوق البنفسجية.

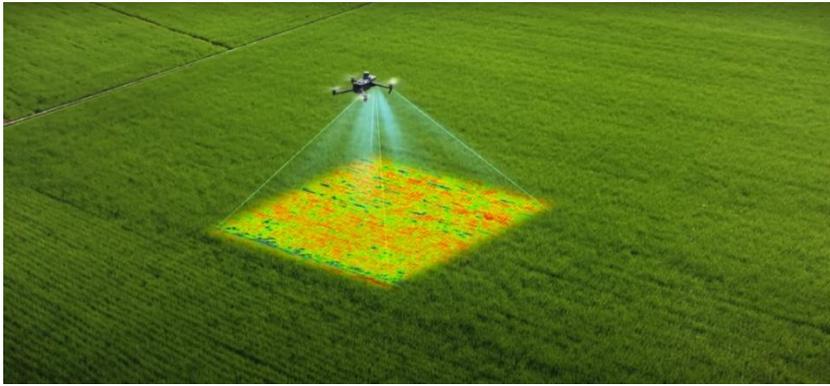
تتراوح الأطوال الموجية التي يمكن أن تغطيها الكاميرات متعددة الأطياف عادةً بين 400 نانومتر (الأزرق) و1000 نانومتر (الأشعة تحت الحمراء القريبة). ومع ذلك، يمكن أن تشمل بعض الكاميرات نطاقات أوسع، تصل إلى عدة مئات من الأطوال الموجية، مما يجعلها قادرة على التقاط تفاصيل دقيقة حول الخصائص الطيفية للمواد [24].



الشكل 2-19: الفرق بين النطاقات الطيفية لكاميرات (التقليدية، متعددة الاطياف، فائقة الطيف)

(المصدر: nireos.com,2020)

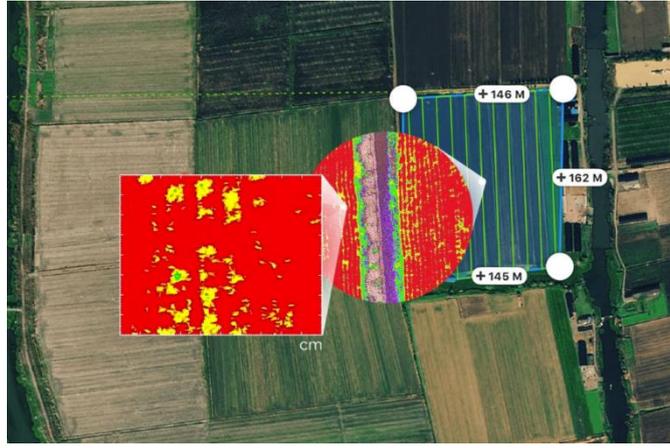
يتم استخدام هاته الكاميرات في مجالات عديدة متخصصة مثل المراقبة البيئية (تحليل جودة المياه)، الكشف عن الحرائق، التطبيقات الصناعية (فحص وتحليل المواد)، التطبيقات العسكرية، الفنون والتراث، الزراعة المجال الذي سنقوم بتطبيق فيه المشروع عبر دمج الكاميرا في طائرة مسيرة لفحص والمراقبة المحاصيل والحقول.



الشكل 2-20: صورة افتراضية لطائرة مسيرة تقوم بفحص الحقل الزراعي

(المصدر: https://feds.group,2024)

تعتبر الكاميرات متعددة الأطياف أدوات حيوية في الزراعة الحديثة، حيث توفر معلومات دقيقة حول صحة المحاصيل وظروف التربة، حيث يتم تحليل الانعكاسات الطيفية للنباتات مما يمكننا من الكشف عن الأمراض، والآفات، ونقص العناصر الغذائية قبل ظهور الأعراض المرئية، مما يسمح بالتدخل المبكر، وتساهم في تحديد مناطق الإجهاد المائي من خلال قياس مستويات الرطوبة في التربة، مما يساعد المزارعين في ضبط جداول السقي مما يحسن في استخدام الموارد ويقلل كمية هدر المياه، وتقييم خصائص التربة، مثل محتوى المغذيات والرطوبة. هذا يساعد المزارعين في تحسين استراتيجيات التسميد والري، مما يؤدي إلى زيادة الإنتاجية، ويتم أيضا تحديد المناطق المصابة بالآفات مما يساعد المزارعين في تحسين استراتيجيات التسميد والري [25].



الشكل 2-21: صورة توضح نتائج التصوير بالكاميرا متعددة الأطياف

(المصدر: <https://feds.group>, 2024)

ويتم ذلك كله باستخدام مؤشرات الغطاء النباتي مثل مؤشر الغطاء النباتي المتباين (Normalized Difference Vegetation Index) يقيس الغطاء النباتي عن طريق قياس الفرق بين الأشعة تحت الحمراء القريبة (التي تعكسها النباتات بقوة) والضوء الأحمر (الذي تمتصه النباتات).

باستخدام العلاقة التالية:

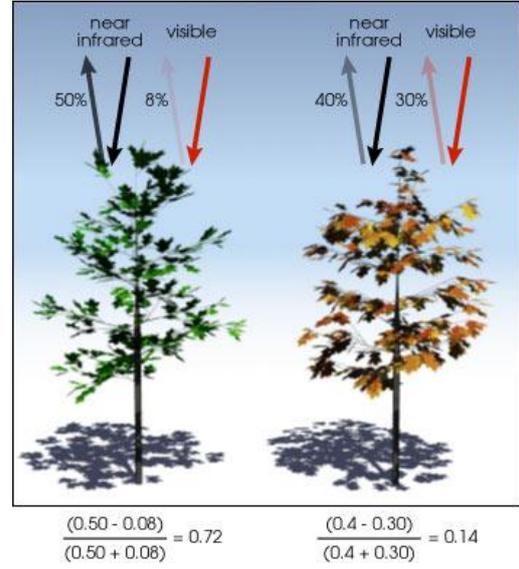
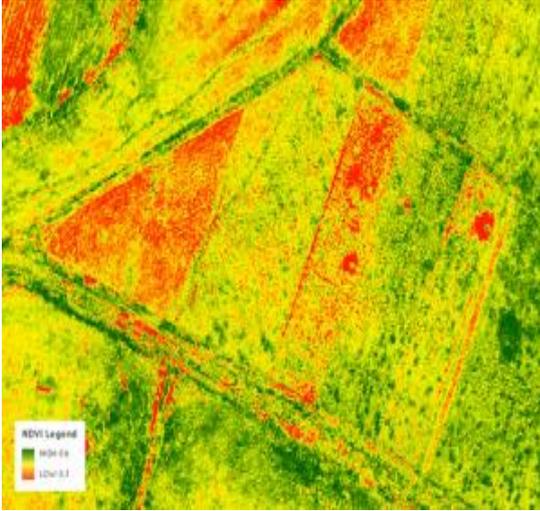
$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} \dots \dots \dots \text{المعادلة 2-2}$$

NIR: الأشعة تحت الحمراء القريبة، التي تعكسها النباتات الصحية بشكل أكبر.

RED: الأشعة الحمراء، التي تمتصها النباتات بشكل أكبر.

نتيجة هذه الصيغة تُولّد قيمة تتراوح بين -1 و+1. إذا كان لديك انعكاس منخفض (أو قيم منخفضة) في القناة الحمراء وانعكاس مرتفع في قناة الأشعة تحت الحمراء القريبة، فسيؤدي ذلك إلى قيمة عالية لمؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI). والعكس صحيح.

تعكس النباتات السليمة كمية أكبر من الأشعة تحت الحمراء القريبة (NIR) والضوء الأخضر مقارنةً بالأطوال الموجية الأخرى. لكنها تمتص كمية أكبر من الضوء الأحمر والأزرق، لهذا السبب ترى أعيننا النباتات باللون الأخضر. لو استطعنا رؤية الأشعة تحت الحمراء القريبة، لكان ذلك واضح في لون النباتات [26].



الشكل 2-23: صورة باستخدام مؤشر NDVI

الشكل 2-22: صورة توضح مؤشر NDVI

(المصدر: <https://gisgeography.com>, 2019). (المصدر: adenilsongiovanini.com.br, 2012)

بشكل عام، يُعد مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI) طريقةً موحدةً لقياس صحة الغطاء النباتي. فعندما تكون قيم مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي مرتفعة، يكون الغطاء النباتي أكثر صحة.

الخاتمة:

طبقاً لدفتر الشروط هذا المشروع الذي يحدد خصائص إنجازته قمنا من خلال هذا الفصل بعرض مختلف مكوناته مع نبذة عامة على كيفية تشغيله.

الفصل الثالث: تصميم البرامج لقيادة الطائرة بدون طيار

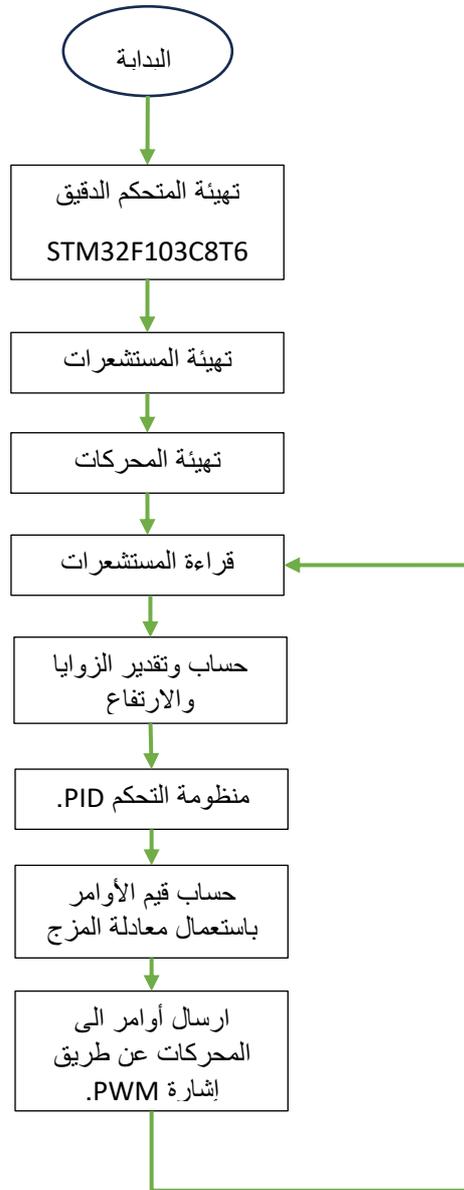
المقدمة:

بناءً على الفصل السابق سنقوم في هذا الفصل بتقديم مختلف برامج التحكم والمراقبة للطائرة المسيّرة. سنستخدم المتحكم STM32F103C8T6 لبرمجة نظام الطائرة ويتم ذلك باستعمال البيئة التطويرية الخاصة بالشركة المنتجة له .STMMicroelectronics

قبل تقديم مختلف البرامج سنقوم بعرض نبذة عن البيئة التطويرية STM32CubeIDE.

1 مخطط عام للبرامج:

يمثل هذا المخطط الشكل العام للبرنامج:



الشكل 3-1: المخطط العام للبرنامج

2 التعرف بـ *STM32 cube IDE* (البيئة التطويرية المدمجة):

هو منصة تطوير متقدمة للغتين ++C/C، تقوم بـ:

➤ إعداد التوصيلات الطرفية.

➤ إنشاء البرامج.

➤ التحويل البرمجي C/C++.

➤ تصحيح أخطاء وحدات التحكم الدقيق ووحدات المعالج الدقيق.

يعتمد على إطار عمل Eclipse[®]/CDT وأداة المساعدة للتطوير البرمجي GCC وأداة تصحيح الأخطاء GDB،

وتدعم أيضا دمج الإضافات الموجودة في Eclipse[®] IDE لإكمال ميزات البيئة.

تم دمج فيه وظائف برنامج STM32CubeIDE، من إعداد المشروع وتكوينه، حيث بعد تعيين اللوحة او نوع المتحكم الدقيق او المعالج، يمكن انشاء المشروع وتوليد الكود البرمجي وتهيئته، مع إمكانية تغيير الإعدادات دون التأثير على البرنامج مما يتيح سهولة التعامل.

يتضمن أدوات التي تقدم معلومات عن حالة المشروع ومتطلبات الذاكرة، كما يقوم بعرض سجلات وحدة المعالج المركزية، وحالة الذاكرات بأنواعها (Flash، RAM)، وسجلات الوصلات الطرفية، مع ميزة مراقبة المتغيرات وخاصة SWV التي تساعد في تصحيح الأخطاء [27].



الشكل 3-2: شعار STM32cubeIDE

(المصدر: 2015, blog.csdn.net).

3 تصميم برنامج القيادة:

كما تحدثنا في الفصل الأول عن ديناميكية الطيران، عن كيفية التحرك في الاتجاهات الستة ودوران الطائرة حول نفسها في اتجاه عقارب الساعة وعكس عقارب الساعة، يمكن ان نعبر عنها في أربع معادلات كل معادلة خاصة بمحرك.

$$\text{المعادلة 1-3} \quad M1 = \text{THRUST}_{\text{cmd}} + \text{YAW}_{\text{cmd}} + \text{PITCH}_{\text{cmd}} + \text{ROLL}_{\text{cmd}} \dots$$

$$\text{المعادلة 2-3} \quad M2 = \text{THRUST}_{\text{cmd}} - \text{YAW}_{\text{cmd}} + \text{PITCH}_{\text{cmd}} - \text{ROLL}_{\text{cmd}} \dots$$

المعادلة 3-3 $M3 = THRUST_{cmd} + YAW_{cmd} - PITCH_{cmd} - ROLL_{cmd}$

المعادلة 4-3 $M4 = THRUST_{cmd} + YAW_{cmd} - PITCH_{cmd} + ROLL_{cmd}$

حيث تمثل

$THRUST_{cmd}$ قيمة امر الارتفاع.

YAW_{cmd} قيمة امر الالتفاف.

$PITCH_{cmd}$ قيمة امر الانقلاب الدوران على محور Y .

$ROLL_{cmd}$ قيمة امر التدحرج الدوران على محور X .

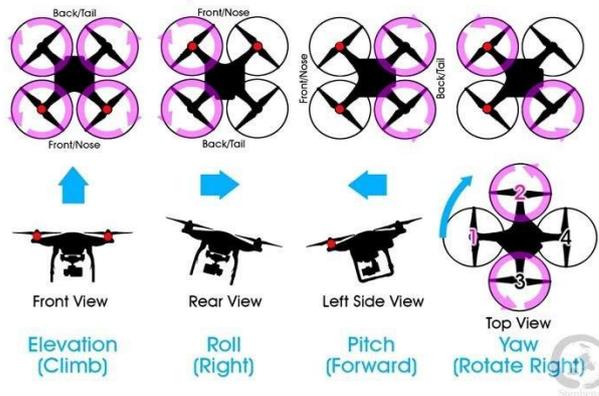
$M1, M2, M3, M4$ قيم إشارة تعديل عرض النبضة PWM المرسله لكل محرك حيث

$M1, M2$ تمثل قيم المحركات الموضوعه في الخلف و $M3, M4$ في الامام.

$M1, M4$ تمثل قيم المحركات الموضوعه في اليسار و $M3, M2$ في اليمين.

والوثيقة التالية توضح الصورة:

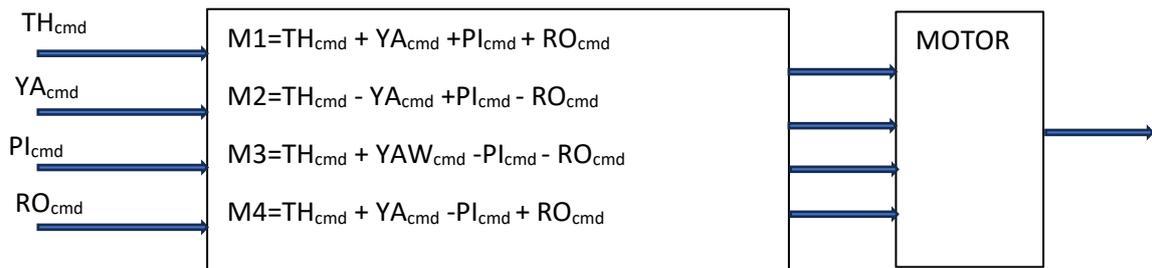
Quadcopter Axes & Motions



الشكل 3-3: ديناميكية الحركة للطائرة المسيرة ذات أربع مراوح.

(المصدر : <https://tr.pinterest.com>)

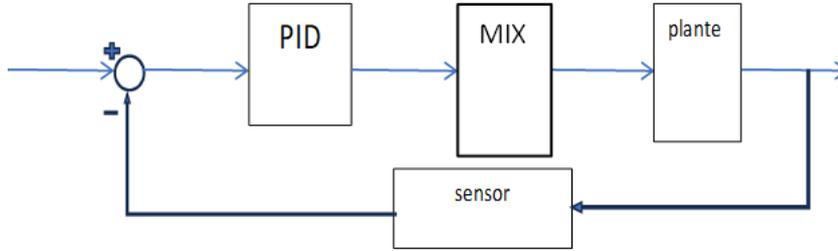
ويمكن تمثيل المخطط التحكم كما يلي:



الشكل 3-4: المخطط الصندوقي للحلقة المفتوحة للطائرة المسيرة

ولكن قيادة الطائرة بهذه الطريقة صعب وفيه مشاكل عدة منها، الذهاب الى أقصى اليمين او اليسار، بسبب عدم تماثل المحركات، حيث يكون أحد المحركات أسرع من الآخر، والأخر ابطئ، ولحل هاته المشكل يتم استخدام التغذية الراجعة feedback مع خوارزميات التحكم.

ويمكن تمثيل المخطط التحكم كما يلي:



الشكل 3-5: المخطط العام للحلقة المغلقة للطائرة المسيرة

وتكمن صعوبة برمجة الطائرة في مشكلتين رئيسيتين، وهما:

- معالجة الإشارة وتقدير قيم الزوايا والارتفاع وغير ذلك من المقادير.
- إيجاد قيم المتحكم التناسبي - التفاضلي - التكاملي (PID).

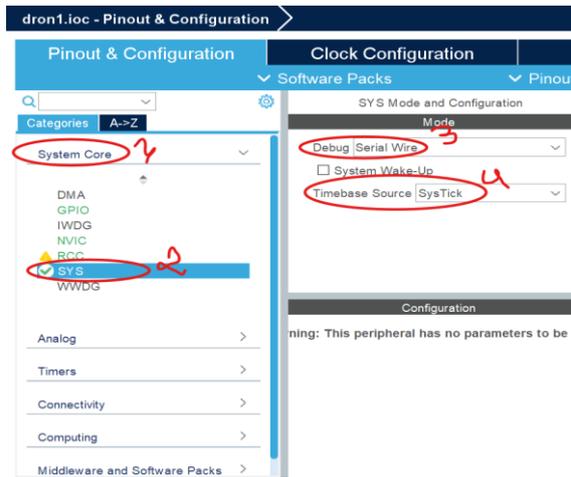
4 برمجة برنامج القيادة:

1-4 إعداد وحدة التحكم الدقيق:

1-1-4 إعداد نواة النظام:

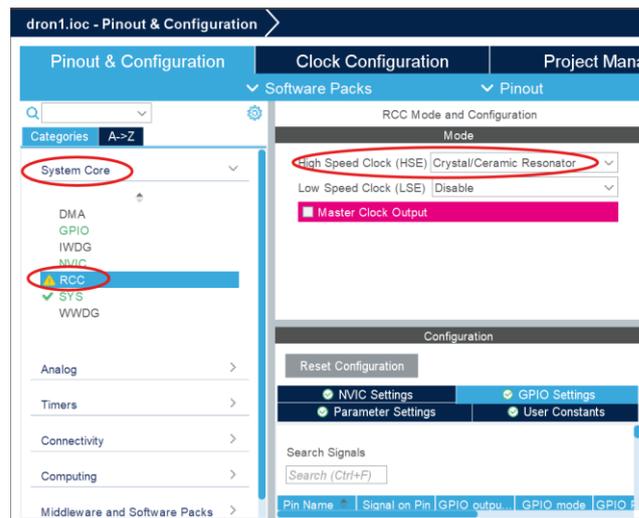
نقوم أولاً بضبط وضع النظام عن طريق إعداد مصحح الأخطاء (debug) على وضع الأسلاك التسلسلية (serial wire) من خلال اختيار نواة النظام ومن ثم النظام.





الشكل 3-6: صورة توضيحية لكيفية إعداد نواة النظام

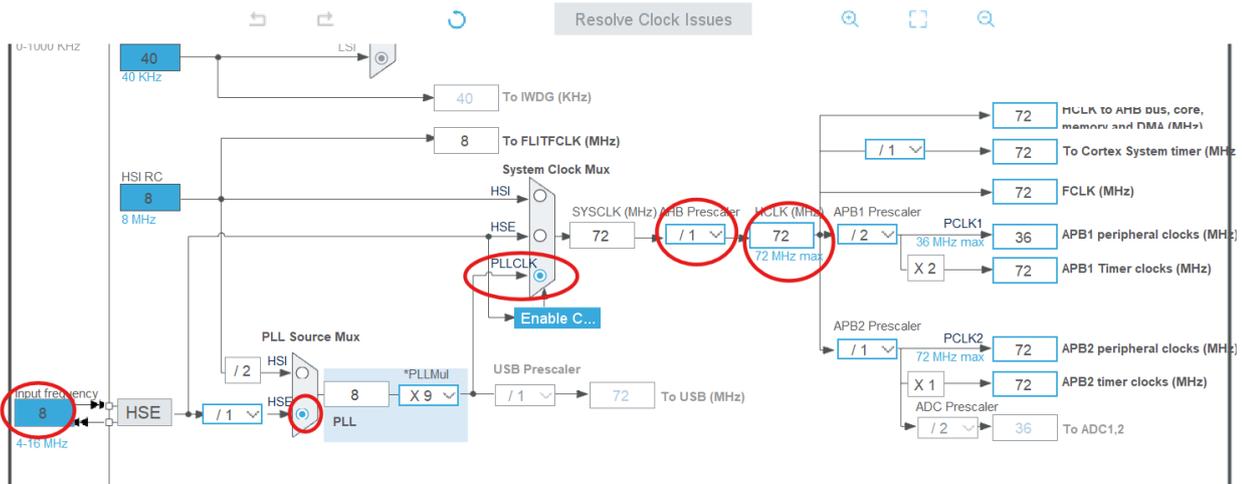
ثانياً إعداد الساعة (clock)، نقوم باختيار نواة النظام، ومن ثم تعيين (RCC)، نقوم بتعيين HSE واختيار crystal/ceramic ومن ثم نقوم بإعداد تردد الساعة على 72MHz، أقصى تردد للمتحكم.



الشكل 3-7: صورة توضح كيفية إعداد الساعة (clock)



ومن ثم نقوم باختيار تردد كريستال 8MHz ومن ثم نقوم بإتباع الخطوات الموضحة في الصورة التالية:

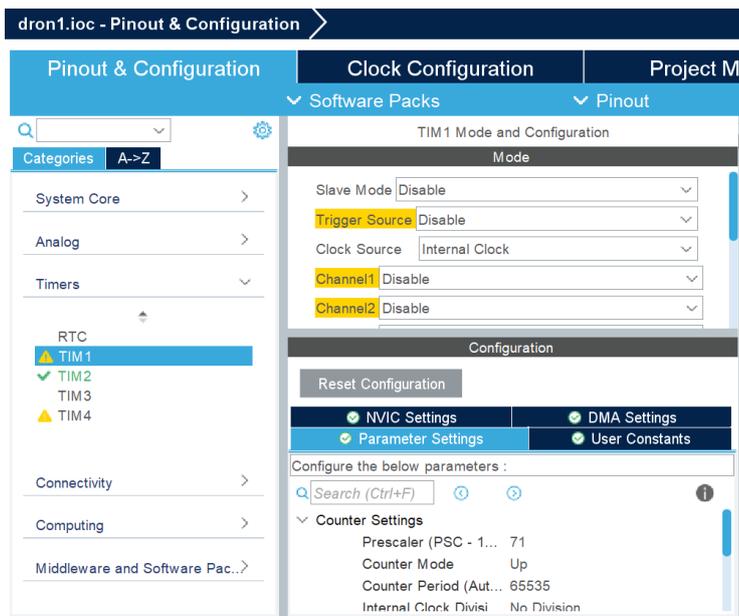


الشكل 3-8: صورة توضح كيفية ضبط تردد الساعة على اعلى تردد

4-1-2 إعداد المؤقتات (TIMER):

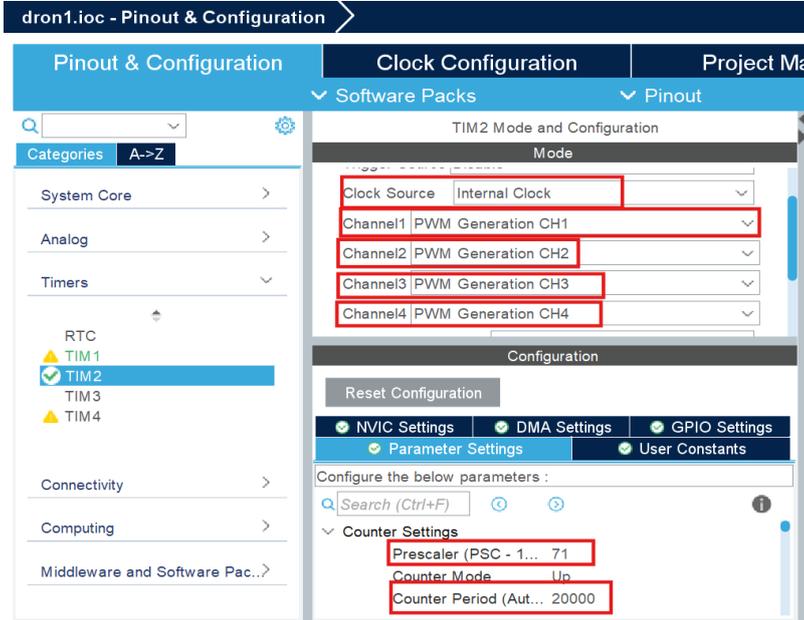
سوف نقوم بإعداد المؤقتين الأول خاص بحساب مدة تنفيذ البرنامج لحساب زمن التقطيع (sample time) والثاني خاص بال PWM من اجل التحكم في سرعة المحركات.

-نقوم أولاً بتعيين المؤقت 1 (TIM1) ومن ثم نحدد تردد الساعة على قيمة 1MHz عن طريق قسمة تردد ساعة وحدة المعالجة على 72 وذلك بإدخال قيمة 71 ومن ثم نقوم بتعيين قيمة عداد الدور (Counter Period) على اقصى قيمة 65535.



الشكل 3-9: صورة توضح كيفية اعداد المؤقت 1

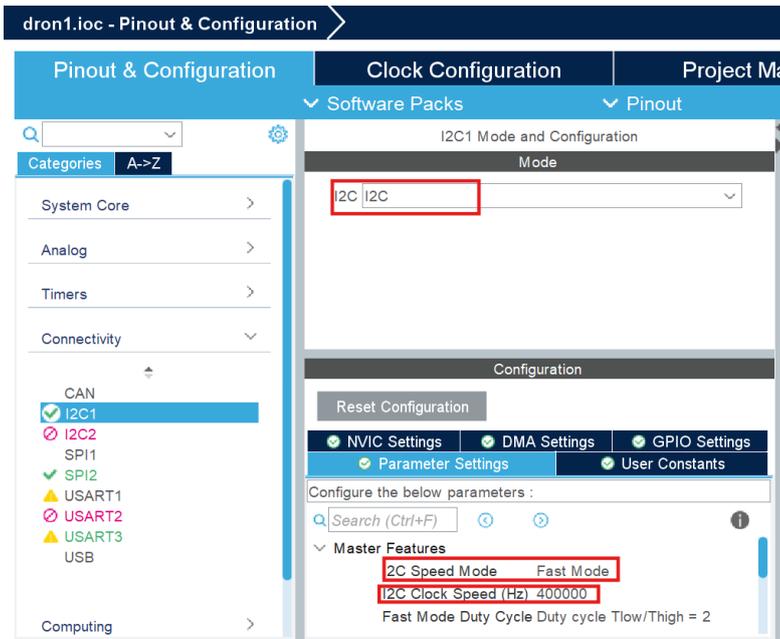
-ثانياً نقوم بتعيين المؤقت 2 (TIM2) ومن ثم نحدد تردد الساعة على قيمة 1MHz ومن ثم نقوم بتعيين قيمة عداد الدور (Counter Period) على قيمة 20000 من اجل الحصول على تردد 50Hz من اجل التحكم في المحرك بإشارة PWM بطول نبضة يتراوح بين 1ms و 2ms التي تقابل القيمتين 1000 و 2000.



الشكل 3-10: صورة توضح كيفية اعداد المؤقت 2 من اجل توليد إشارة PWM.

3-1-4 إعداد I2C:

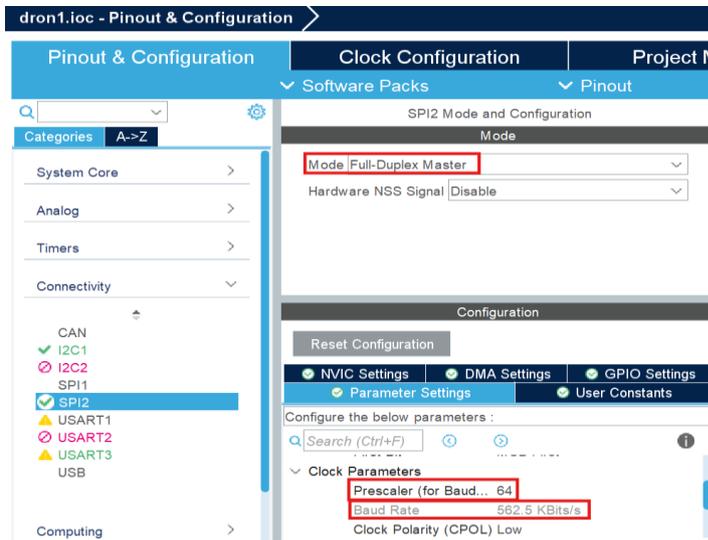
نقوم بإعداد I2C على وضع FAST MODE الذي يشتغل على تردد 400KHz.



الشكل 3-11: صورة توضح كيفية اعداد البرتوكول I2C.

4-1-4 إعداد SPI:

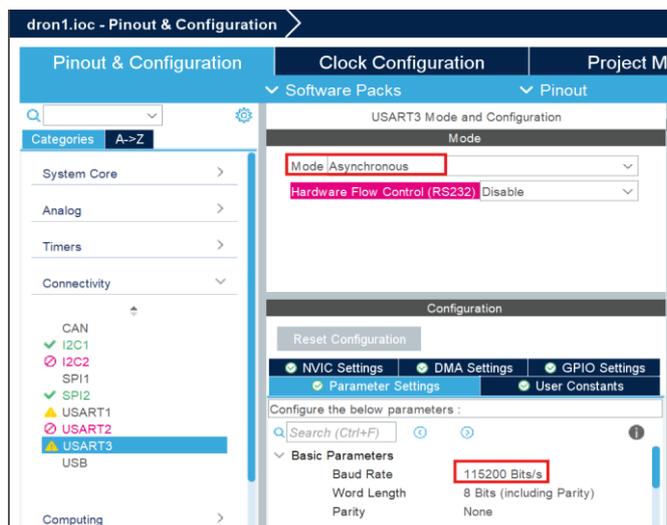
نقوم بإعداد SPI على وضع FULL-Duplex Master بسرعة 562.5 Kbits/s.



الشكل 3-12: صورة توضح كيفية إعداد البرتوكول SPI.

4-1-5 إعداد UART3:

نقوم باختيار الوضع الغير متزامن بسرعة 115200 bits/s.



الشكل 3-13: صورة توضح كيفية إعداد البرتوكول UART.

2-4 إعداد المستشعرات:

1-2-4 إعداد MPU6050:

نقوم بكتابة قيمة 4 في سجل رقم 26 (registre) لتحديد الخصائص الموضحة في الجدول التالي:

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
1A	26	-	-	EXT_SYNC_SET[2:0]			DLPF_CFG[2:0]		

الجدول 1-3: سجل 26-26 MPU6050- registre

(المصدر: Inven, 2013)

DLPF_CFG	Accelerometer (Fs = 1kHz)		Gyroscope		
	Bandwidth (Hz)	Delay (ms)	Bandwidth (Hz)	Delay (ms)	Fs (kHz)
0	260	0	256	0.98	8
1	184	2.0	188	1.9	1
2	94	3.0	98	2.8	1
3	44	4.9	42	4.8	1
4	21	8.5	20	8.3	1
5	10	13.8	10	13.4	1
6	5	19.0	5	18.6	1
7	RESERVED		RESERVED		8

الجدول 2-3: قيم عرض النطاق الترددي للجيرسكوب والتسارع وقيم DLPF_CFG الخاصة بها

(المصدر: Inven, 2013)

نقوم بكتابة قيمة 8 في كل من سجل 27 REG_GYRO_CONFIG و REG_ACCEL_CONFIG 28 حسب الجداول التالية:

AFS_SEL	Full Scale Range
0	± 2g
1	± 4g
2	± 8g
3	± 16g

FS_SEL	Full Scale Range
0	± 250 °/s
1	± 500 °/s
2	± 1000 °/s
3	± 2000 °/s

الجدول 3-3: قيم سلم الجيرسكوب و FS_SEL الخاصة بها

الجدول 4-3: قيم سلم التسارع و AFS_SEL الخاصة بها

(المصدر: Inven, 2013).

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
1C	28	XA_ST	YA_ST	ZA_ST	AFS_SEL[1:0]		-		

الجدول 5-3: سجل 28-28 MPU6050- registre

(المصدر: Inven, 2013)

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
1B	27	XG_ST	YG_ST	ZG_ST	FS_SEL[1:0]		-		

الجدول 6-3: سجل 27-27 MPU6050- registre

(المصدر: Inven, 2013)

```

void mpu_init()
{
    uint8_t data1;
    if(HAL_I2C_IsDeviceReady(&hi2c1, Device_add<<1, 1, 1000)==HAL_OK)
    {
        for(int i=0;i<15;i++)
        {
            HAL_GPIO_TogglePin(GPIOC, GPIO_PIN_13);
            HAL_Delay(100);
        }
    }

    //////////////////////////////////////
    data1=FS_GYRO_500;
    HAL_I2C_Mem_Write(&hi2c1, Device_add<<1, REG_GYRO_CONFIG, 1,
&data1, 1, 1000);
    data1=FS_ACC_4G;
    HAL_I2C_Mem_Write(&hi2c1, Device_add<<1, REG_ACCEL_CONFIG , 1,
&data1 , 1, 1000);
    data1=0;
    HAL_I2C_Mem_Write(&hi2c1, Device_add<<1, REG_POWER_CONFIG , 1,
&data1, 1, 1000);
    data1=4;
    HAL_I2C_Mem_Write(&hi2c1, Device_add<<1, REG_CONFIG , 1, &data1, 1,
1000);
}
    
```

2-2-4 إعداد QMC5883L :

نكتب القيمة 1 في سجل SET/RESET رقم 11 و من ثم كتابة قيمة 0xD1 في سجل Control Register1 من اجل تعيين الخصائص المبينة في الجدول الآتي:

Addr	7	6	5	4	3	2	1	0
09H	OSR[1:0]		RNG[1:0]		ODR[1:0]		MODE[1:0]	
Reg.	Definition		00	01	10	11		
Mode	Mode Control		Standby	Continuous	Reserve	Reserve		
ODR	Output Data Rate		10Hz	50Hz	100Hz	200Hz		
RNG	Full Scale		2G	8G	Reserve	Reserve		
OSR	Over Sample Ratio		512	256	128	64		

الجدول 7-3: سجل التحكم 1-1 Control Register1

(المصدر: Qst,2016)

```

void HMC_init()
{
    uint8_t data_hmc;
    data_hmc=0x01;
    if(HAL_I2C_Mem_Write(&hi2c1,HMCadd , SRR, 1, &data_hmc, 1,
1000)==HAL_OK)
    {
    
```

```

for(uint8_t i=0;i<10;i++)
{
    HAL_GPIO_TogglePin(GPIOC, GPIO_PIN_13);
    HAL_Delay(200);
}
data_hmc=0x1D;
HAL_I2C_Mem_Write(&hi2c1,HMCadd, CR1, 1, &data_hmc, 1, 1000);
}
    
```

3-2-4 إعدادات BMP280:

نقوم أولاً بإعادة الضبط من خلال كتابة قيمة 0xB6 في السجل 0 (RESET) XE0 ومن ثم قراءة السجل 0xD0 (ID)، فإذا تمت قراءة القيمة 0x58 فهذا يعني عملية إعادة الضبط قد تمت بنجاح. ومن ثم نقوم بكتابة القيمة 0x57 في السجل 0xF4 (ctrl_meas) الصور التالية توضح الهدف من ذلك.

Register 0xF4 "ctrl_meas"	Name	Description
Bit 7, 6, 5	osrs_t[2:0]	Controls oversampling of temperature data. See chapter 3.3.2 for details.
Bit 4, 3, 2	osrs_p[2:0]	Controls oversampling of pressure data. See chapter 3.3.1 for details.
Bit 1, 0	mode[1:0]	Controls the power mode of the device. See chapter 3.6 for details.

الجدول 3-8: وصف سجل 0xF4 (BMP280)

(المصدر: Bosch,2018)

osrs_p[2:0]	Pressure oversampling	osrs_t[2:0]	Temperature oversampling
000	Skipped (output set to 0x80000)	000	Skipped (output set to 0x80000)
001	oversampling x1	001	oversampling x1
010	oversampling x2	010	oversampling x2
011	oversampling x4	011	oversampling x4
100	oversampling x8	100	oversampling x8
101, Others	oversampling x16	101, 110, 111	oversampling x16

الجدول 3-9: قيم osrs_t

(المصدر: Bosch,2018)

الجدول 3-10: قيم osrs_p

(المصدر: Bosch,2018)

mode[1:0]	Mode
00	Sleep mode
01 and 10	Forced mode
11	Normal mode

الجدول 3-11: قيم mode

(المصدر: Bosch,2018)

ومن ثم نقوم بكتابة القيمة 0x14 في السجل (config) 0xF5 لتحديد خصائص المرشح (filter).

Register 0xF5 "config"	Name	Description
Bit 7, 6, 5	t_sb[2:0]	Controls inactive duration t _{standby} in normal mode. See chapter 3.6.3 for details.
Bit 4, 3, 2	filter[2:0]	Controls the time constant of the IIR filter. See chapter 3.3.3 for details.
Bit 0	spi3w_en[0]	Enables 3-wire SPI interface when set to '1'. See chapter 5.3 for details.

الجدول 3-12: وصف سجل 0xF5 (BMP280)

(المصدر: Bosch, 2018)

```
void BMPInit()
{
    if(HAL_I2C_IsDeviceReady(&hi2c1, 0x76<<1, 1, 1000)==HAL_OK)
    {
        for(int i=0;i<30;i++)
        {
            HAL_GPIO_TogglePin(GPIOC, GPIO_PIN_13);
            HAL_Delay(150);
        }

        Calib();
        uint8_t data;
        data=0xB6;
        if(HAL_I2C_Mem_Write(&hi2c1, 0x76<<1, 0xE0, 1, &data, 1, 1000)==HAL_OK)
        {
            HAL_I2C_Mem_Read(&hi2c1, (0x76<<1)+1, 0xD0, 1, &data, 1, 1000);
            if(data==0x58)
            {
                for(int i=0;i<10;i++)
                {
                    HAL_GPIO_TogglePin(GPIOC, GPIO_PIN_13);
                    HAL_Delay(100);
                }
            }
        }
        data=0b01010111;
        HAL_I2C_Mem_Write(&hi2c1, 0x76<<1, 0xF4, 1, &data, 1, 1000);
        data=0b00010100;
        HAL_I2C_Mem_Write(&hi2c1, 0x76<<1, 0xF5, 1, &data, 1, 1000);
    }
}
```

3-4 قراءة البيانات ومعايرتها:

1-3-4 قراءة قيم التسارع ومعايرتها من mpu6050:

نقوم بقراءة البيانات باستخدام بروتوكول الاتصال I2C من السجل 59 الى غاية السجل 64 كما هو موضح في الجدول:

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
3B	59								ACCEL_XOUT[15:8]
3C	60								ACCEL_XOUT[7:0]
3D	61								ACCEL_YOUT[15:8]
3E	62								ACCEL_YOUT[7:0]
3F	63								ACCEL_ZOUT[15:8]
40	64								ACCEL_ZOUT[7:0]

الجدول 3-13: سجلات قيم التسارع للمحاور الثلاثة (المصدر: Inven, 2013)

يتم قراءتها باستخدام طريقتين الأولى عن طريق الانتظار حتى إتمام القراءة او فوات الوقت المحدد (polling)، والثانية باستخدام المقاطعة.

الطريقة الأولى:

```
HAL_I2C_Mem_Read(&hi2c1, (Device_add<<1)+1, REG_DATA_ACC , 1, data, 6,
;1000)
```

الطريقة الثانية:

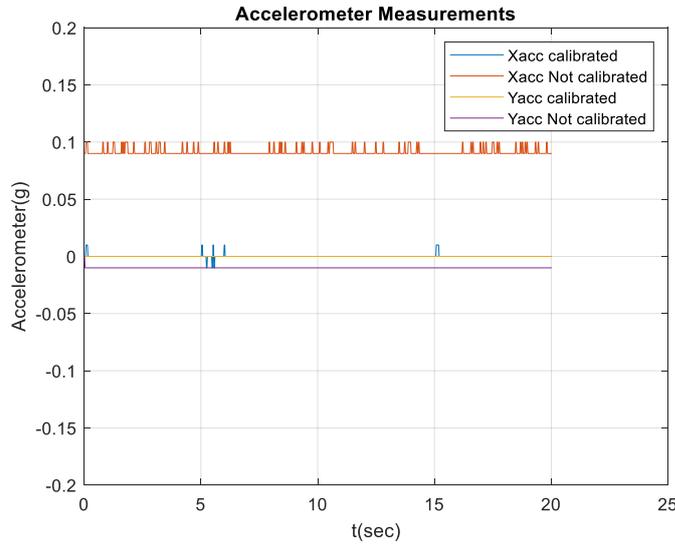
```
;HAL_I2C_Mem_Read_IT(&hi2c1, (Device_add<<1)+1 , REG_DATA_ACC, 1, data, 6)
```

ومن ثم يتم جمع كل سجلين خاصين باتجاه معين معا، مع قسمتهما على ثابت معين حسب السلم الذي تم اعداده مسبقا كما هو موضح في الكود البرمجي التالي:

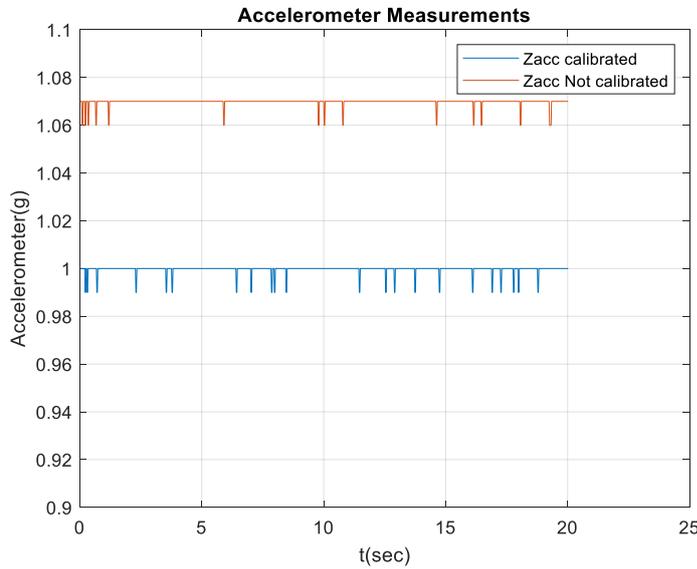
```
float XACC_READ ()
{
    return ((float) ((int16_t) ((data[0]<<8) |data[1])) / (float) LSB_4G);
}
float YACC_READ ()
{
    return ((float) ((int16_t) ((data[2]<<8) |data[3])) / (float) LSB_4G);
}
float ZACC_READ ()
{
    return ((float) ((int16_t) ((data[4]<<8) |data[5])) / (float) LSB_4G);
}
```

بعد المعايرة نقوم بإضافة القيم الزائدة او الناقصة.

```
float XACC_READ ()
{
    return ((float) ((int16_t) ((data[0]<<8) |data[1])) / (float) LSB_4G) -
0.09f;
}
float YACC_READ ()
{
    return
((float) ((int16_t) ((data[2]<<8) |data[3])) / (float) LSB_4G)+0.011f;
}
float ZACC_READ ()
{
    return ((float) ((int16_t) ((data[4]<<8) |data[5])) / (float) LSB_4G) -
0.07f;
}
```



الشكل 3-14: قيم التسارع بعد وقبل المعايرة للمحورين X و Y



الشكل 3-15: قيم التسارع بعد وقبل المعايرة للمحور Z

2-3-4 قراءة قيم الجيروسكوب ومعايرتها من *mpu6050*:

نقوم بقراءة البيانات باستخدام بروتوكول الاتصال I2C من السجل 67 الى غاية السجل 72 كما هو موضح في الجدول:

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
43	67	GYRO_XOUT[15:8]							
44	68	GYRO_XOUT[7:0]							
45	69	GYRO_YOUT[15:8]							
46	70	GYRO_YOUT[7:0]							
47	71	GYRO_ZOUT[15:8]							
48	72	GYRO_ZOUT[7:0]							

الجدول 3-14: سجلات قيم الجيروسكوب للمحاور الثلاثة

(المصدر: Inven, 2013)

يتم ايضا قراءتها باستخدام طريقتين الأولى عن طريق الانتظار حتى إتمام القراءة او فوات الوقت المحدد (polling)، والثانية باستخدام المقاطعة (Interruption).

الطريقة الأولى:

```
HAL_I2C_Mem_Read(&hi2c1, (Device_add<<1)+1, REG_DATA_GYRO , 1, data2, 6,
;1000)
```

الطريقة الثانية:

```
;HAL_I2C_Mem_Read_IT(&hi2c1, (Device_add<<1)+1,REG_DATA_GYRO , 1, data2, 6)
```

ومن ثم يتم جمع كل سجلين خاصين باتجاه معين معا، مع قسمتهما على ثابت معين حسب السلم الذي تم اعداده مسبقا كما هو موضح في الكود البرمجي التالي:

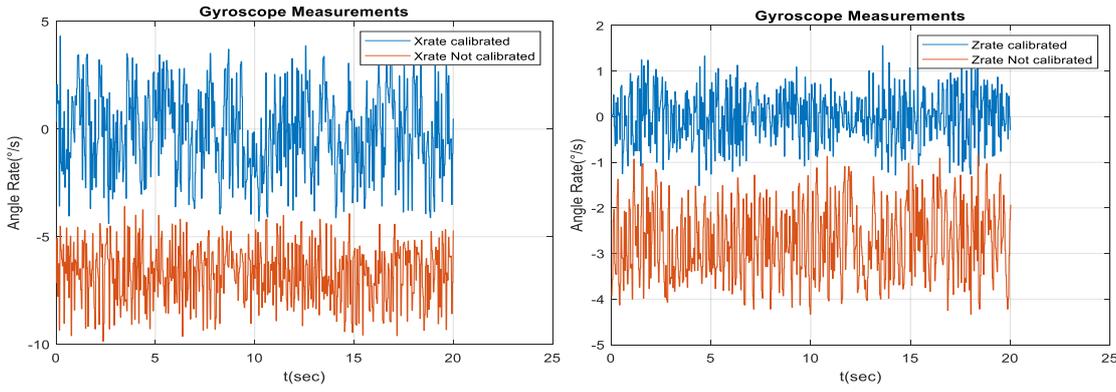
```
float XGYRO_READ ()
{
    return (float) ((int16_t) ((data2[0]<<8) |data2[1]))/LSB_500;
}
float YGYRO_READ ()
{
    return (float) ((int16_t) ((data2[2]<<8) |data2[3]))/LSB_500;
}
float ZGYRO_READ ()
{
    return (float) ((int16_t) ((data2[4]<<8) |data2[5]))/LSB_500;
}
```

ويتم معايرة القياسات عن طريق جمع عدد كبير من البيانات ومن ثم يتم قسمتها على عدد البيانات، ومن ثم يتم طرحها من القيمة المقاسة.

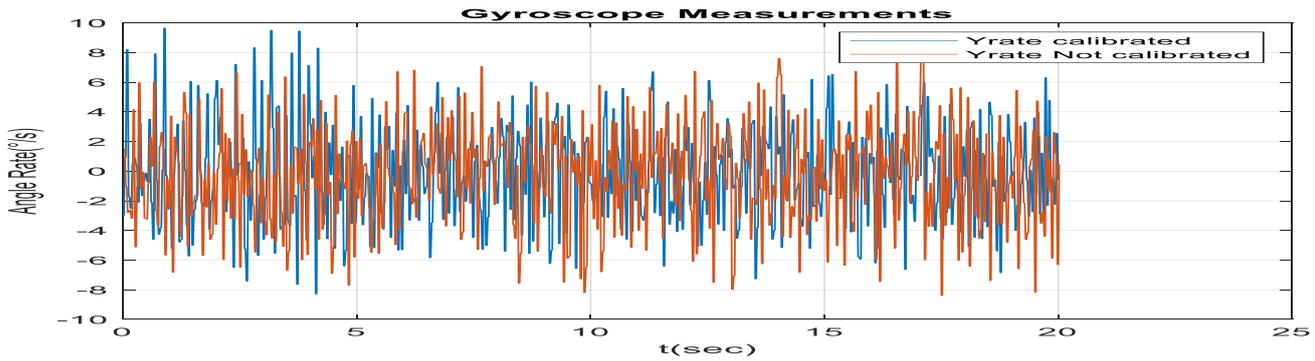
```
for(int i=0;i<2000;i++)
{
    readgyro ();

    rateCalibx+=XGYRO_READ ();
    rateCaliby+=YGYRO_READ ();
    rateCalibz+=ZGYRO_READ ();

}
rateCalibx/=2000.0f;
rateCaliby/=2000.0f;
rateCalibz/=2000.0f;
Xrate=XGYRO_READ ()-rateCalibx;
Yrate=YGYRO_READ ()-rateCaliby;
Zrate=ZGYRO_READ ()-rateCalibz;
```



الشكل 3-16: قيم الجيروسكوب بعد وقبل المعايرة للمحور Z الشكل 3-17: قيم الجيروسكوب بعد وقبل المعايرة للمحور X



الشكل 3-18: قيم الجيروسكوب بعد وقبل المعايرة للمحور Y

3-3-4 قراءة قيم درجة الحرارة والضغط من BMP280 لحساب الارتفاع:

نقوم أولاً بقراءة البيانات المسجلة والخاصة بكل مستشعر باستخدام البروتوكول I2C من السجل 0x88 الى السجل 0xF9 كما هو موضح:

Register Address LSB / MSB	Register content	Data type
0x88 / 0x89	dig_T1	unsigned short
0x8A / 0x8B	dig_T2	signed short
0x8C / 0x8D	dig_T3	signed short
0x8E / 0x8F	dig_P1	unsigned short
0x90 / 0x91	dig_P2	signed short
0x92 / 0x93	dig_P3	signed short
0x94 / 0x95	dig_P4	signed short
0x96 / 0x97	dig_P5	signed short
0x98 / 0x99	dig_P6	signed short
0x9A / 0x9B	dig_P7	signed short
0x9C / 0x9D	dig_P8	signed short
0x9E / 0x9F	dig_P9	signed short
0xA0 / 0xA1	reserved	reserved

الجدول 3-15: سجلات قيم الثابتة لـ BMP280

(المصدر: Bosch, 2018)

باستخدام البرنامج التالي:

```
void Calib()
{
    uint8_t calib[24];
    HAL_I2C_Mem_Read(&hi2c1, (0x76<<1)+1, 0x88, 1, calib, 24, 1000);
    T1=(calib[1]<<8) | calib[0];
    T2=(calib[3]<<8) | calib[2];
    T3=(calib[5]<<8) | calib[4];
    P1=(calib[7]<<8) | calib[6];
    P2=(calib[9]<<8) | calib[8];
    P3=(calib[11]<<8) | calib[10];
    P4=(calib[13]<<8) | calib[12];
    P5=(calib[15]<<8) | calib[14];
    P6=(calib[17]<<8) | calib[16];
    P7=(calib[19]<<8) | calib[18];
    P8=(calib[21]<<8) | calib[20];
    P9=(calib[23]<<8) | calib[22];
}
```

ومن ثم قراءة بيانات درجة الحرارة من السجل 0xFA الى السجل 0xFC, وبيانات الضغط من السجل 0xF7 الى السجل 0xF9 وذلك بطريقتين، طريقة الانتظار (polling)، واستخدام المقاطعة (Interruption).

```
void dig_temp_IT()
{
    HAL_I2C_Mem_Read_IT(&hi2c1, (0x76<<1)+1, 0xFA, 1, TE, 3);
}
void dig_temp()
{
    HAL_I2C_Mem_Read(&hi2c1, (0x76<<1)+1, 0xFA, 1, TE, 3, 1000);
}
void dig_pressure()
{
    HAL_I2C_Mem_Read(&hi2c1, (0x76<<1)+1, 0xF7, 1, PR, 3, 1000);
}
void dig_pressure_IT()
{
    HAL_I2C_Mem_Read_IT(&hi2c1, (0x76<<1)+1, 0xF7, 1, PR, 3);
}
```

ومن ثم يتم حساب درجة الحرارة باستخدام الخوارزمية التالية:

```
int32_t temp()
{
    int32_t tem, var1, var2;
    te=(TE[0]<<12) | (TE[1]<<4) | TE[2]>>4;
    var1=(((te>>3) - ((int32_t)T1<<1)) * ((int32_t)T2))>>11;
    var2=(((te>>4) - ((int32_t)T1)) * ((te>>4) -
    ((int32_t)T1))>>12) * ((int32_t)T3)>>14;
    t_fine=var1+var2;
    tem=(t_fine*5+128)>>8;
    return tem;
}
```

ويتم حساب الضغط باستخدام الخوارزمية التالية:

```
uint32_t pressure ()
{
    int64_t Press, var1, var2;
    pr= (PR[0]<<12) | (PR[1]<<4) | PR[2]>>4;
    var1= ((int64_t)t_fine)-128000;
    var2=var1*var1*(int64_t)P6;
    var2+= ((var1*(int64_t)P5)<<17);
    var2+= (((int64_t)P4)<<35);
    var1= ((var1*var1*(int64_t)P3)>>8) + ((var1*(int64_t)P2)<<12);
    var1= (((((int64_t)1)<<47)+var1)) * ((int64_t)P1)>>33;
    if (var1==0)
        return 0;
    Press=1048576-pr;
    Press= (((Press<<31)-var2) *3125) /var1;
    var1= (((int64_t)P9) * (Press>>13) * (Press>>13)) >>25;
    var2= (((int64_t)P8) *Press)>>19;
    Press= ((Press+var1+var2)>>8) + (((int64_t)P7)<<4);
    return (uint32_t)Press;
}
```

ومن ثم يتم حساب الارتفاع بتطبيق العلاقة التالية:

$$P_0 = \frac{P}{\left(1 - \frac{\text{altitude}}{44330}\right)^{5.255}} \dots\dots\dots \text{المعادلة 3-5}$$

$$\text{altitude} = 44330 \left(1 - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0.190294}\right) \dots\dots\dots \text{المعادلة 3-6}$$

حيث:

P هو الضغط المقاس.

P₀ هو قيمة الضغط عند سطح البحر.

وذلك باستخدام الكود التالي:

```
float altitude(float P0)
{
    float h;
    float P;
    temp ();
    P=pressure () /256.0f;
    h=P/P0;
    h=powf (h, 0.190294f) ;
    h=1.0f-h;
    h*=44330;
    return h;
}
```

4-3-4 قراءة قيم المجال المغناطيسي من QMC5883L:

نقوم أولاً بقراءة السجل رقم 6 (Status Register) للتأكد من انه جاهز لقراءة البيانات منه، ومن ثم نقوم بقراءة البيانات من السجل 0x00 الى السجل 0x50 التي تمثل قيم المحاور الثلاثة للمستشعر المغناطيسي وذلك بإحدى الطريقتين (polling) او (Interruption).

وهذا هو الكود البرمجي:

```
uint8_t HMC_ready()
{
    uint8_t data_hmc;
    HAL_I2C_Mem_Read(&hi2c1, HMCadd, SR, 1, &data_hmc, 1,1000);
    return data_hmc;
}

void read_mag()
{
    HAL_I2C_Mem_Read(&hi2c1, (HMCadd)+1, XLSB, 1, D_HMC, 6,1000);
}

void read_mag_IT()
{
    HAL_I2C_Mem_Read_IT(&hi2c1, (HMCadd)+1, XLSB, 1, D_HMC, 6);
}
```

ومن ثم يتم جمع كل سجلين خاصين باتجاه معين معا، مع قسمتهما على ثابت معين حسب السلم الذي تم اعداده مسبقا كما هو موضح في الكود البرمجي التالي:

```
float HMC_xm()
{
    int16_t xm;
    xm=(int16_t) D_HMC[1]<<8|D_HMC[0];
    return (float)((xm/3000.0f));
}

float HMC_ym()
{
    int16_t ym;
    ym=(int16_t) D_HMC[3]<<8|D_HMC[2];
    return (float)((ym/3000.0f));
}

float HMC_zm()
{
    int16_t zm;
    zm=(int16_t) D_HMC[5]<<8|D_HMC[4];
    return (float)((zm/3000.0f));
}
```

ومن ثم تتم معايرته تجريبيا ليكون الكود هكذا:

```
float HMC_xm()
{
    int16_t xm;
    xm=(int16_t) D_HMC[1]<<8|D_HMC[0];
    return (float)((xm/3000.0f)-0.2f);
}

float HMC_ym()
{
    int16_t ym;
    ym=(int16_t) D_HMC[3]<<8|D_HMC[2];
    return (float)((ym/3000.0f)+0.02f);
}

float HMC_zm()
{

```

```
int16_t zm;
zm=(int16_t)D_HMC[5]<<8|D_HMC[4];
return (float)((zm/3000.0f)+0.05f);
}
```

4-4 حساب الزوايا:

1-4-4 حساب الزاوية حول محور (Roll) x باستخدام قيم التسارع:

يتم حسابها بتطبيق العلاقة التالية:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y_{acc}}{\sqrt{x_{acc}^2+z_{acc}^2}} \dots\dots\dots \text{المعادلة 7-3}$$

وهذا الكود البرمجي الخاص بها:

```
roll=(atan2f(ya,sqrtf(xa*xa+za*za))*180.0f/3.14f)
```

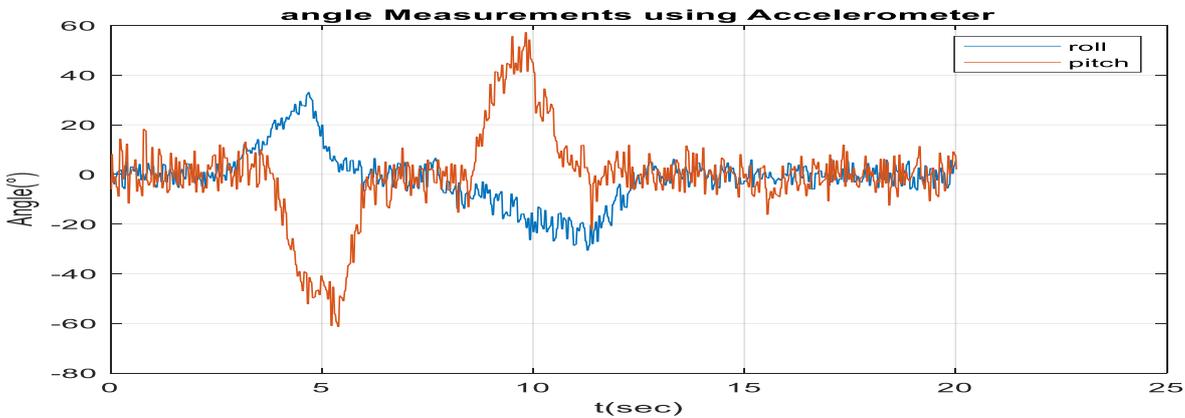
2-4-4 حساب الزاوية حول محور (Pitch) y باستخدام قيم التسارع:

يتم حسابها بتطبيق العلاقة التالية:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{-x_{acc}}{\sqrt{y_{acc}^2+z_{acc}^2}} \dots\dots\dots \text{المعادلة 8-3}$$

وهذا الكود البرمجي الخاص بها:

```
pitch=(atan2f(-xa,sqrtf(ya*ya+za*za))*180.0f/3.14f)
```



الشكل 3-19: قياسات زاوية الدوران على المحور (Roll) x والمحور (Pitch) y باستخدام مستشعر التسارع.

3-4-4 حساب الزاوية حول محور (yaw) z باستخدام قيم المجال المغناطيسي:

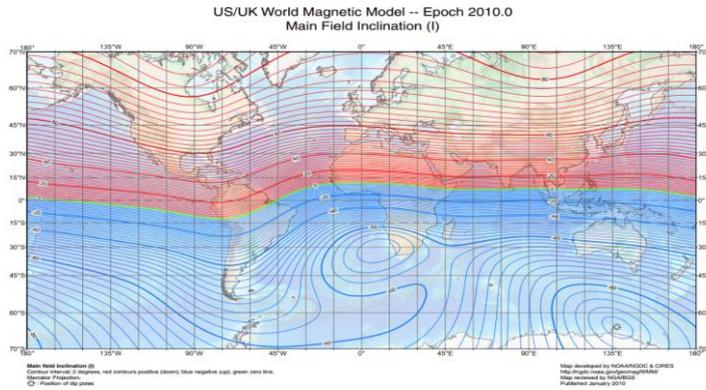
يتم حسابها بتطبيق العلاقة التالية:

$$\omega = \tan^{-1} \frac{y_m}{x_m} \dots\dots\dots \text{المعادلة 9-3}$$

وهذا الكود البرمجي الخاص بها:

```
yaw=atan2f(x,y)*180.0f/3.14f ;
```

إلا انه يوجد مشكل في تغير قيمة الزاوية عند الدوران حول المحور X او Y وذلك لأنه يستشعر المجال المغناطيسي في الاتجاهات الثلاثة ويوجد انحراف في المجال المغناطيسي للأرض حسب الوثيقة الآتية:



الشكل 3-20: ميل المجال المغناطيسي في العالم

(المصدر: www.ncei.noaa.gov, 2010)

ولحل هاته المشكلة نقوم بعملية الضرب الشعاعي مع اتجاه الجاذبية

$$\vec{E} = \vec{B} \times \vec{g} \dots\dots\dots \text{المعادلة 3-10}$$

$$\vec{N} = \vec{g} \times \vec{E} \dots\dots\dots \text{المعادلة 3-11}$$

حيث:

\vec{B} تمثل شعاع المجال المغناطيسي.

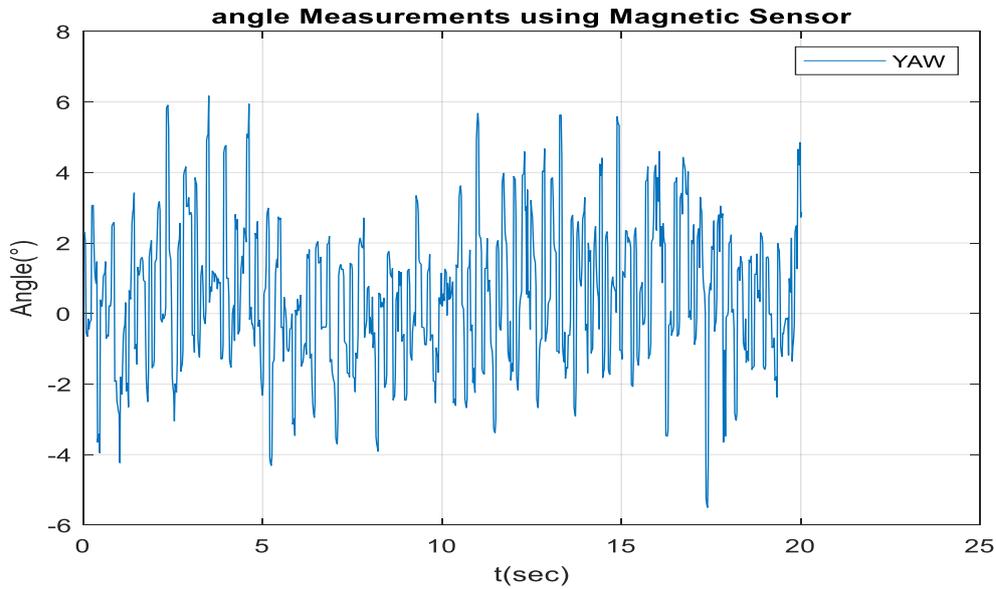
\vec{g} يمثل شعاع الجاذبية الأرضية.

\vec{E} يمثل اتجاه الشرق.

\vec{N} يمثل اتجاه الشمال.

لينتج لنا في الأخير هذا الكود البرمجي.

```
ii=xm*za+zm*ya;
jj=-ym*za-zm*xa;
kk[0]=ym*ya;
kk[1]=-xm*xa;
XX=sqrtf(ii*ii+kk[1]*kk[1]);
YY=sqrtf(jj*jj+kk[0]*kk[0]);
yaw=atan2f(YY,XX)*180.0f/3.14f;
```

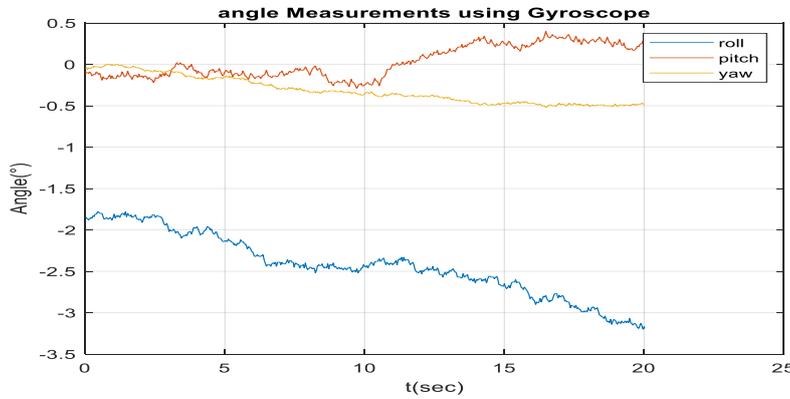


الشكل 3-21: قياسات زاوية الدوران على المحور Z (Yaw) باستخدام مستشعر المجال المغناطيسي QMC.

4-4-4 حساب الزوايا حول محور X(Roll) ومحور Y(Pitch) ومحور Z(Yaw) باستخدام قيم الجيروسكوب:

يتم حساب الزوايا عن طريق حساب التكامل كما هو موضح في الكود.

```
anglex+=Xrate*T;
angley+=Yrate*T;
anglez+=Zrate*T;
```



الشكل 3-22: قياس زاويا باستخدام الجيروسكوب

- ❖ نلاحظ ان الزوايا المقاسة باستخدام التسارع تتأثر بالاهتزازات ولا تتراكم الاخطاء فيها.
- ❖ نلاحظ ان الزوايا المقاسة باستخدام الجيروسكوب لديها خطأ تراكمي يتسبب في الانحراف عن القيمة الحقيقية لكنها لا تتأثر بالاهتزازات.

لذا سندمج إيجابيات حساس التسارع مع الجيروسكوب، باستخدام خوارزميات دمج المستشعرات (sensor fusion).

5-4 دمج المستشعرات:

يعتبر دمج المستشعرات منهجية حسابية تهدف الى تقديم معلومات أفضل وأكثر دقة عن النظام من ان يقدمه كل جهاز استشعار بمفرده، عن طريق دمج قياسات أجهزة الاستشعار المتعددة.

تستخدم خوارزميات دمج المستشعرات في العديد من المجالات على سبيل المثال:

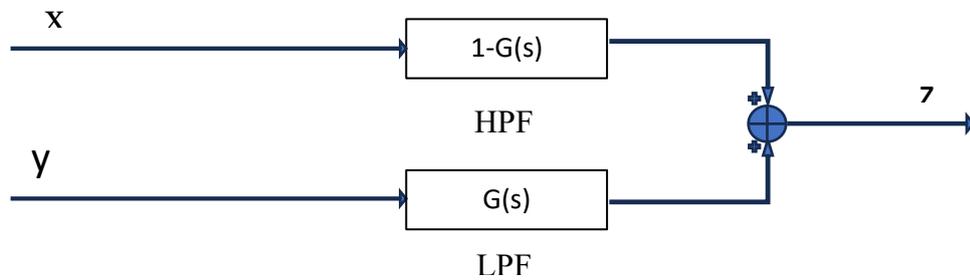
- السيارات ذاتية القيادة.
 - الملاحة الجوية والبحرية.
 - تحديد المواقع في الروبوتات.
 - التحكم في الطائرات بدون طيار.
 - تحليل الإشارات الحيوية في مجال الهندسة الطبية الحيوية.
- يوجد العديد من المرشحات التي تستخدم في دمج المستشعرات منها:

- كالمان (Kalman Filter).
- فلتر بيسياني (Bayesian Filter).
- مادجويك (Madgwick Filter).
- ماهوني (Mahony Filter).
- المرشح التكميلي (Complementary Filter).

ويختلف كل أحد عن الآخر من حيث مجال التطبيق والتعقيد والدقة [28].

4-5-1 المرشح التكميلي (Complementary Filter):

لا يعتمد المرشح التكميلي على الوصف الإحصائي للبيانات مثل مرشح كالمان، لكن يعتمد على تحليل بسيط في المجال الترددي من اجل الحصول المرشح. تتم العملية عن طريق اخذ جزء من البيانات من المستشعر الأول وجزء من المستشعر الثاني باستخدام المرشح الترددي فإذا اعتبرنا ان $G(s)$ هو المرشح الأول فإن $[G(s)-1]$ هو المرشح المكمل له [29].



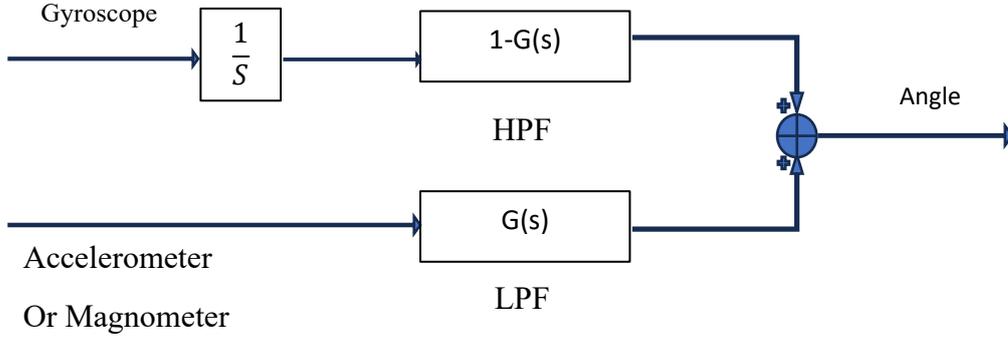
الشكل 3-23: المخطط العام المرشح التكميلي

(المصدر: WALTER & HIGGINS, 1975)

HPF: high pass filter مرشح تمرير العالي.

LPF: low pass filter مرشح تمرير المنخفض.

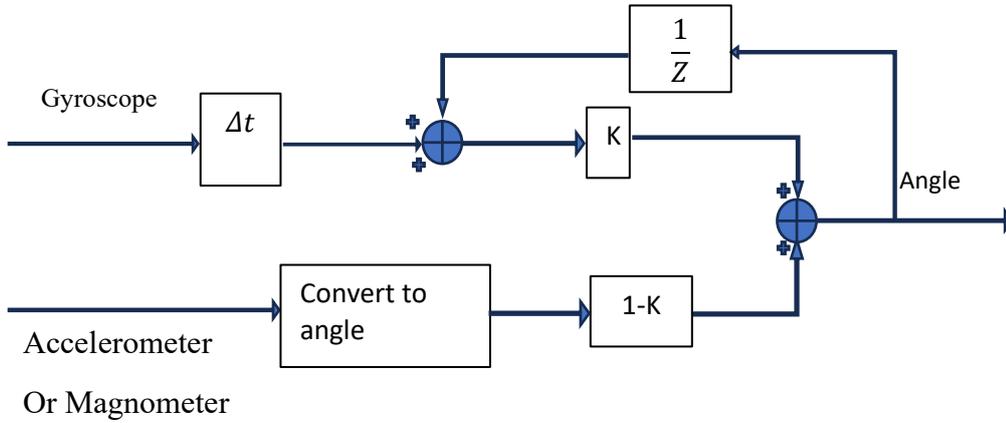
ولتقدير الزوايا باستخدام الجيروسكوب ومستشعر التسارع نقوم بمكاملة قياسات الجيروسكوب ومن ثم نقوم بتمريرها الى مرشح الترددات العالية، نقوم بترشيح قياسات مستشعر التسارع بمرشح ترددات منخفضة، لكي يتم جمعها في الاخير.



الشكل 3-24: مخطط المرشح التكميلي لحساب الزاوية باستخدام مستشعر التسارع والجيروسكوب

(المصدر: WALTER&HIGGINS, 1975)

ويتم تحويله الى المجال الرقمي ليكون مناسباً لتطبيقه في المتحكم.



الشكل 3-25: مخطط المرشح التكميلي لحساب الزاوية باستخدام مستشعر التسارع والجيروسكوب في المجال المتقطع

يتم تحديد قيم المعامل K تجريبياً الى غاية الوصول الى النتيجة المقبولة.

تكتب في المعادلة التالية:

$$\text{angle} = \text{angle}_{\text{acc}} \times (1-K) + (\text{gyro} \times \Delta t + \text{angle} \times Z^{-1}) \times K \dots\dots\dots 12-3 \text{ المعادلة}$$

حيث تمثل:

$\text{angle}_{\text{acc}}$ الزاوية المقاسة باستخدام مستشعر التسارع.

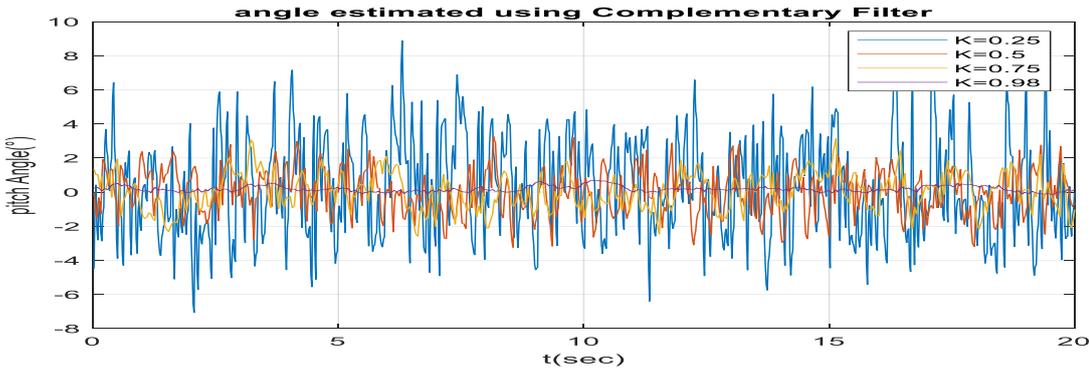
Angle الزاوية المقدرة باستخدام المرشح التكميلي.

gyro قيمة السرعة الزاوية المقاسة باستخدام الجيروسكوب.

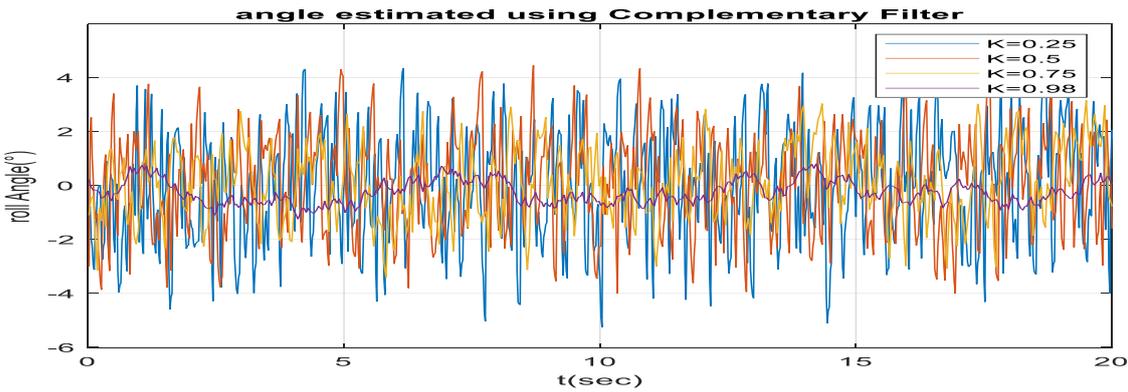
Δt زمن التقطيع sample time.

وتتم برمجتها هكذا:

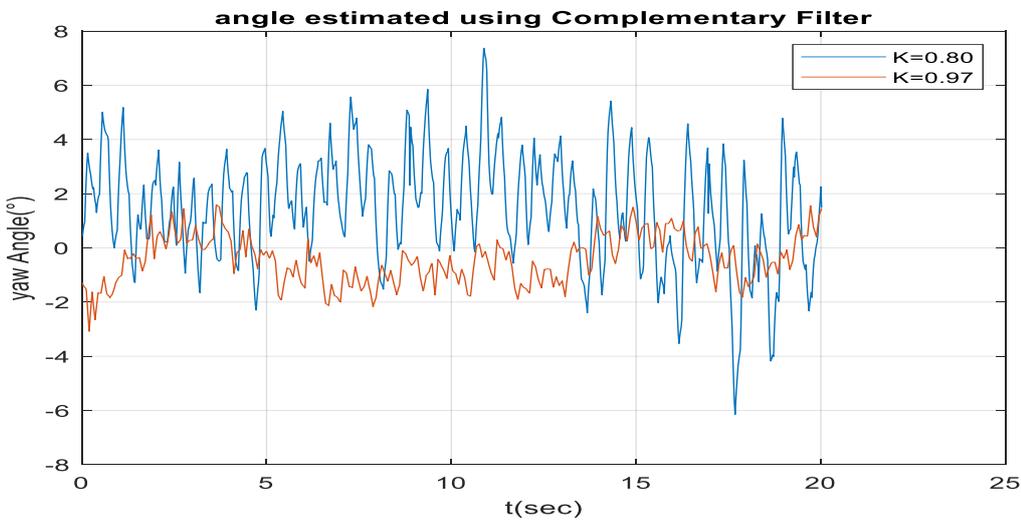
```
angle=angleacc*(1-K)+K*(anglegyro*T+angle);
```



الشكل 3-26: تقدير زاوية الدوران على المحور (Pitch) y باستخدام المرشح التكميلي



الشكل 3-27: تقدير زاوية الدوران على المحور (Roll) x باستخدام المرشح التكميلي



الشكل 3-28: تقدير زاوية الدوران على المحور (Yaw) z باستخدام المرشح التكميلي

ملاحظة: جميع القياسات السابقة في هذا الفصل هي قياسات الحقيقية تم قراءتها من المتحكم STM32F103C8T6 وعرضها باستخدام برنامج ماتلاب، تم ذلك باستخدام البروتوكول UART.

6-4 المتحكم التناسبي-التكاملي-التفاضلي (PID):

يتطلب انجاز الطائرة المسيرة قدرة جيدة على التحكم لكي تستقر وتتبع مسارها بشكل جيد وتتلاءم مع الظروف البيئية المتغيرة من هبوب الرياح، ويتم ذلك من خلال التحكم في سرعة دوران المحركات الذي بدوره يتحكم في زوايا الدوران (roll, pitch, yaw) ومقدار الارتفاع ويتم ذلك باستخدام خوارزمية من خوارزميات التحكم المتعددة، مثل المتحكم التناسبي-التكاملي-التفاضلي (PID) و LQR [30].

1-6-4 مفهوم المتحكم التناسبي-التكاملي-التفاضلي (PID):

يعد المتحكم PID من أكثر خوارزميات التحكم شيوعا والأكثر استعمالا، وهو عبارة عن عملية تصحيح الخطاء الموجود بين القيمة المقاسة والقيمة المطلوبة حيث يتمثل في ثلاث معاملات تناسب P، تكامل I، تفاضل D.

$$u(t) = \left(Kp \times e(t) + Ki \times \int_0^t e(\tau) d\tau + Kd \frac{de(t)}{dt} \right) \dots\dots\dots 13-3 \text{ المعادلة}$$

حيث تمثل:

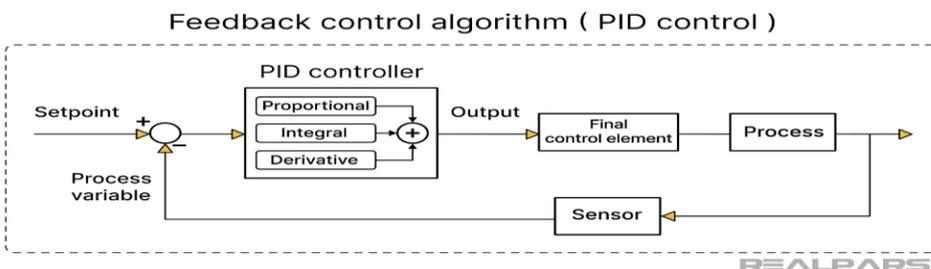
Kp قيمة معامل تناسب.

Ki قيمة معامل التكامل.

Kd قيمة معامل التفاضل.

e(t) قيمة الخطاء اللحظي.

u(t) قيمة الامر المطلوب لتصحيح الخطاء.

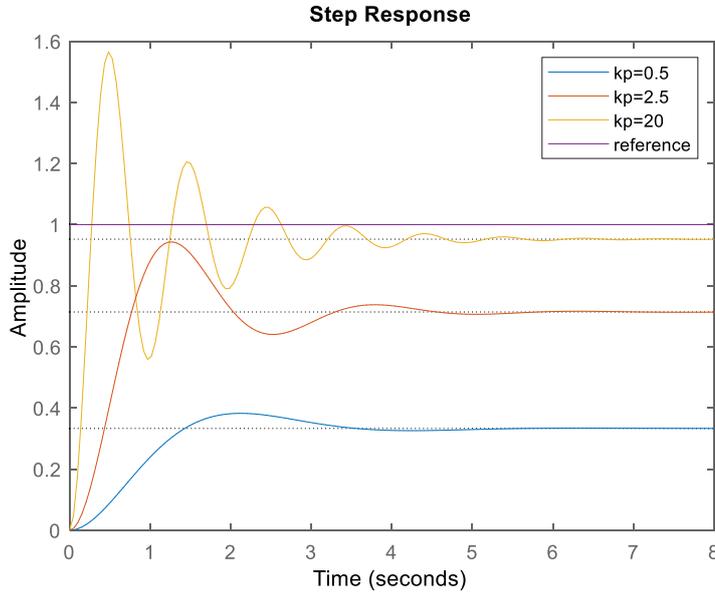


الشكل 3-29: المخطط الأساسي للمتحكم PID

(المصدر: realpars.com, 2018)

2-6-4 معامل التناسبي P:

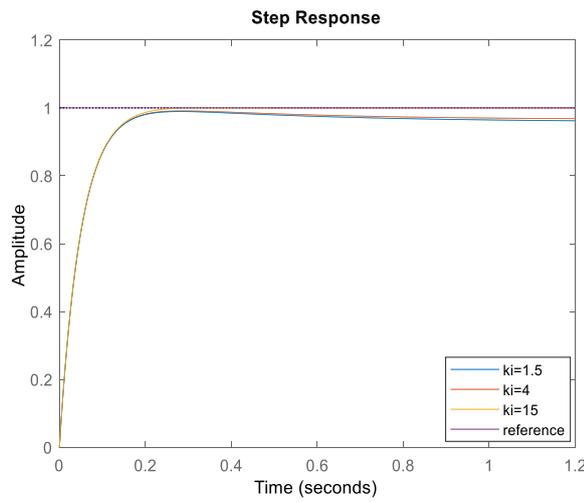
هو عبارة عن معامل تضخيم للخطأ الحالي، كلما ازدادت قيمة P تزداد قيمة التجاوز overshoot وتزداد أيضا سرعة الاستجابة، وتتناقص قيمة خطأ الاستقرار Steady State Error.



الشكل 3-30: تأثير معامل التناسبي على خرج النظام

3-6-4 معامل التكامل I:

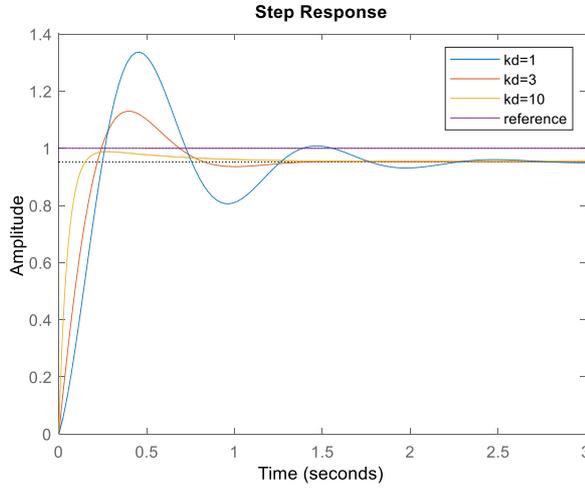
هو عبارة عن معامل تضخيم لتراكمات الأخطاء السابقة، كلما ازدادت قيمة I يتناقص خطأ الاستقرار بدقة عالية، ويبطئ سرعة الاستجابة.



الشكل 3-31: تأثير معامل التكامل على خرج النظام

4-6-4 معامل التفاضلي D:

هو عبارة عن معامل تضخيم للأخطاء المستقبلية (التغير في الخطاء)، كلما ازدادت قيمة D تتناقص نسبة التجاوز وسرعة الاستجابة لكنه لا يؤثر على خطأ الاستقرار.



الشكل 3-32: تأثير معامل التفاضل على خرج النظام

يتلخص تأثير قيم PID على خرج النظام في الجدول التالي:

	Overshoot التجاوز	Rise + Settling time زمن الاستجابة والاستقرار	Steady State Error خطأ الاستقرار
K_p ↑	تزيد احتمالية التجاوز ↑	يسرع الاستجابة ↓	يقلل من خطأ الاستقرار ↓
K_d ↑	يقلل من نسبة التجاوز ↓	يسرع الاستجابة ↓	لا يؤثر على مقدار خطأ الاستقرار
K_i ↑	يزيد من نسبة التجاوز ↑	يبطئ الاستجابة ↑	يصفر الخطأ - يصل لدقة أكبر ↓

جدول 3-16: تأثير قيم PID على خرج النظام

(المصدر: وليد عيسى, 2021)

5-6-4 برمجة المتحكم PID:

يتم كتابة معادلة المتحكم PID بصيغة ملائمة للأنظمة الرقمية لكي تتمكن من برمجتها لتصبح هكذا:

$$u(Tn) = Kp * e(Tn) + Ki * \sum_0^n (e(Tn) * T) + Kd * \frac{e(Tn) - e(T(n-1))}{T} \dots\dots\dots 14-3$$

.T:sample time

الذي يتم برمجته بهذا الكود:

```
float T, Eroll=0, Epitch=0, Eyaw=0, Ealtitude=0;
float
PIDroll[3]={0,0,0}, PIDpitch[3]={0,0,0}, PIDyaw[3]={0,0,0}, PIDaltitude[3]={0,
0,0};
void PID(float E, float kp, float ki, float kd, float PIDX[3])
{
    PIDX[1] += E * T;
```

```

    PIDX[0]=kp*E+ki*PIDX[1]+kd*((E -PIDX[2])/T);
    PIDX[2]=E;
}

PID(Eroll,(float)valP/10.0, valI/1000.0, valD/1000.0,PIDroll);
PID(Epitch,0.0, 0.00, 0.00,PIDpitch);
PID(Eyaw,0.0, 0.00, 0.00,PIDyaw);
PID(Ealtitude,0.0, 0.00, 0.00,PIDaltitude);
T=(float) HAL_TIM_GET_COUNTER(&htim1)/1000000.0f;

```

ليتم ارسال الأوامر بعد مزجها عن طريق معادلة المزج كالتالي:

```

m1=(updo+lr+frba+rt);
m2=(updo-lr+frba-rt);
m3=(updo-lr-frba+rt);
m4=(updo+lr-frba-rt);

```

ومن بعدها يتم توليد إشارة PWM اللازمة لتشغيل المحرك.

```

HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim2,TIM_CHANNEL_1,m1);
HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim2,TIM_CHANNEL_2,m2);
HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim2,TIM_CHANNEL_3,m3);
HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim2,TIM_CHANNEL_4,m4);

```

ولكن قبل تشغيل المحركات تتم معايرتها عن طريق ارسال نبضة إشارة PWM بأدنى عرض الذي يمثل نسبة 5% أي بعرض 1ms لمدة 5 ثواني واثناء ذلك يتم اصدار رنات تنتهي برنة طويلة تدل على انتهاءه المعايرة ويتم ذلك باستخدام الكود البرمجي التالي:

```

HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim2,TIM_CHANNEL_1,1000);
HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim2,TIM_CHANNEL_2,1000);
HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim2,TIM_CHANNEL_3,1000);
HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim2,TIM_CHANNEL_4,1000);
HAL_Delay(5000);

```

5 برمجة وحدة الارسال والاستقبال اللاسلكية +nRF24L01:

سنستخدم في هذا المشروع وحدة +nRF24L01 من اجل ارسال أوامر الانطلاق والايقاف ولتدخل السريع في حالة الطوارئ.

تتم برمجة +nRF24L01 كوحدة ارسال باستخدام الكود التالي:

أولا نقوم بتهيئته عن طريق الكود التالي:

```

nRF24_Init();
nRF24_TxMode(add, 100);

```

حيث يمثل add عنوان وحدة الارسال والاستقبال.

ومن ثم يتم الارسال باستخدام الدالة الارسال التي قمت ببرمجتها.

```

nRF24_Send(data_Tx);

```

وتتم برمجة +nRF24L01 كوحدة استقبال باستخدام الكود التالي:

أولا نقوم بتهيئته عن طريق الكود التالي:

```
nRF24_Init();
nRF24_RxMode(add, 100, 1);
```

يتم ادخال قيمة عنوان ويمثل رقم 1 رقم القناة.

الخلاصة:

لقد قمنا بإنجاز البرامج التالية:

- ✓ تهيئة المتحكم الدقيق والمستشعرات.
- ✓ برمجة وحدة الارسال والاستقبال اللاسلكية+nRF24L01 .
- ✓ قراءة البيانات من المستشعرات.
- ✓ قياس وتقدير قيم الزوايا.
- ✓ منظومة التحكم PID.

لقد أنجزت هذه البرامج بنجاح الا ان قيم منظومة التحكم PID تحتاج الى تدقيق عملي أكثر من اجل ضمان استقرار جيد للنظام.

الفصل الرابع: برمجة المسار

مقدمة:

ان توفير الغذاء وتحقيق الاكتفاء الذاتي مرهون بمدى تحكمنا وتمكننا في استعمال وتطوير الوسائل التكنولوجية الحديثة المتاحة واستغلالها في المجال الزراعي والفلاحي.

تعتبر هاته المذكرة مساهمة في استغلال وسائل التكنولوجيا الحديثة كالطائرة المسيرة والرؤية الحاسوبية لمراقبة الحقول الزراعية الامر الذي يوفر للمزارعين معلومات دقيقة حول محاصيلهم الزراعية لاتخاذ القرارات المناسبة في الوقت المناسب.

الهدف من هذا الفصل هو برمجة مسار الطائرة المسيرة لتقوم بالتقاط صور يمكن تحليلها بالحاسوب لتحديد الأماكن الغير مسقية وتوفير المعلومات عن صحة المحاصيل ولأغراض أخرى متنوعة.

1. تعريف المسار المبرمج:

المسار المبرمج هو خطة محددة مسبقاً تحدد كيفية تحرك الطائرة المسيرة عبر الفضاء. يتضمن ذلك تحديد النقاط التي يجب أن تمر بها الطائرة، والارتفاعات، والسرعات، والاتجاهات. يتم برمجة هذه المسارات باستخدام برمجيات متخصصة، مما يسمح للطائرات بالتحليق بشكل مستقل دون الحاجة إلى تدخل بشري مستمر [30].

2. تخطيط المسارات:

يتطلب تخطيط مسار الطائرات بدون طيار تصميم مسارات دقيقة تأخذ في الاعتبار العوامل البيئية، مثل التضاريس والعقبات. يتم استخدام خوارزميات لتحسين المسارات وضمان الوصول إلى الأهداف بكفاءة.

يتم تقسيم خوارزميات تخطيط المسارات الى نوعين اثنين:

1-2 تخطيط مسار عام (Global):

تنتمي هاته الخوارزمية الى خوارزميات البرمجة الثابتة حيث يتم التركيز على تطوير أفضل مسار من نقطة البداية الى نقطة النهاية، مع اخذ بالاعتبار البيئة المحيطة وتجنب العوائق الثابتة ويحتوي على نوعين:

➤ التخطيط التقليدي.

➤ التخطيط بالذكاء الاصطناعي.

2-2 تخطيط مسار محلي (local trajectory):

تنتمي هاته الخوارزمية الى خوارزميات البرمجة الديناميكية، حيث تجمع الطائرة بيانات الموقع والعوائق الموجودة في الوقت الفعلي باستخدام أجهزة الاستشعار، ومن ثم تحدد المسار الأمثل بين نقطة البداية والنهاية وتحتوي على العديد من الخوارزميات [32].

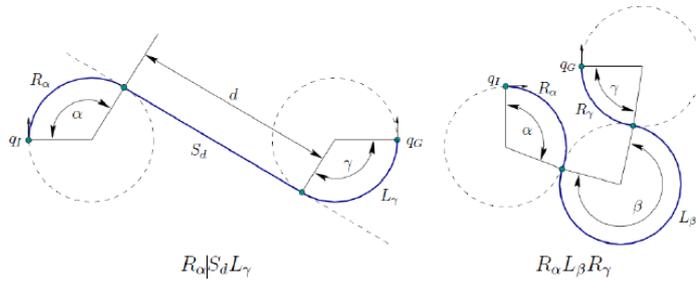
3 التخطيط التقليدي:

يوجد عدة خوارزميات تستخدم لهذا النوع من التخطيط منها:

1-3 خوارزمية منحنى دوينز (Dubins curve):

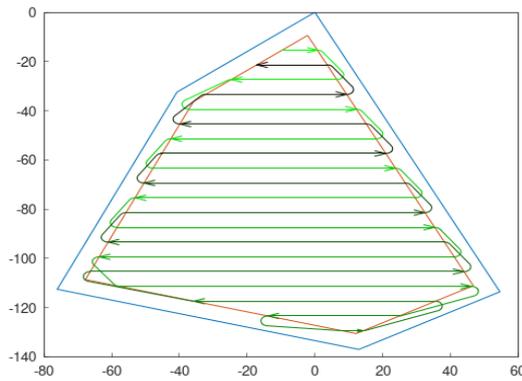
منحنيات دوبينز هي مسارات هندسية تُستخدم لتحديد أقصر طريق بين نقطتين في المستوى الإقليدي وهي عبارة عن مزيج بين قوس منحني إلى اليسار أو اليمين أو خط مستقيم ويمكن تشكيل اتجاهات مثل (RSR, RSL, LSR) حيث أن R تعني انحناء إلى اليمين و S تعني خط مستقيم و L تعني انحناء نحو اليسار، مع قيود على الانحناء واتجاه الحركة. تم تطوير هذا المفهوم بواسطة ليستر إيلي دوبينز، ويُستخدم بشكل واسع في مجالات الروبوتات، الطائرات بدون طيار، والمركبات ذاتية القيادة.

يتم استخدام مسار دوبينز بشكل شائع في مجالات الروبوتات المتنقلة ونظرية التحكم لتحديد المسارات المثلى للروبوتات، ويستخدم أيضاً في المركبات ذاتية القيادة لضمان التنقل السلس في البيئات الحضرية، ويستخدم أيضاً في موضوعنا الذي هو الطائرات بدون طيار حيث تُساعد في تخطيط المسارات الجوية بكفاءة [32].



الشكل 4-1: رسم توضيحي لمسار دوبينز بسيط

(المصدر: researchgate.net, 2019)



الشكل 4-2: رسم توضيحي لمسار دوبينز مركب

(المصدر: fields2cover.github.io, 2022)

4 برمجة المسار:

تأتي الحقول الزراعية بأشكال مختلفة منها:

الحقول المستطيلة: الأكثر شيوعاً، تُستخدم في الزراعة التقليدية وتسمح بسهولة استخدام الآلات الزراعية.

الحقول الدائرية: تُستخدم في أنظمة الري المحوري، حيث تدور الرشاشات حول نقطة مركزية لتوزيع المياه بالتساوي.



الشكل 4-4: الحقول المستطيلة.

الشكل 4-3: الحقول الدائرية

(المصدر: agriculture.com,2023) (المصدر: potatogrower.com,2013).

1-4 مسار الحقول المستطيلة:

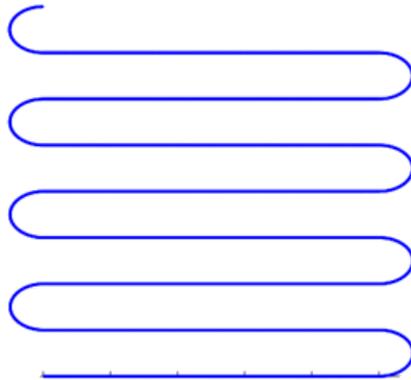
لمراقبة الحقول المستطيلة يتم الاعتماد على التخطيط المسار التالي:



الشكل 4-5: تخطيط المسار للحقول المستطيلة

(المصدر: Dora,2024,p20).

وباستخدام منحني دوبيينز باستخدام تركيبتين (RSL,LSR) ليصبح بهذا الشكل:



الشكل 4-6 تخطيط المسار للحقول المستطيلة باستخدام منحني دوبيينز

ويتم تطبيق ذلك باستخدام المعادلة التالية:

المعادلة 1-4..... $V_x = V \cos(YAW)$

المعادلة 2-4..... $V_y = V \sin(YAW)$

$Y\dot{A}W = u$المعادلة 3-4

حيث V تمثل سرعة الطائرة.

V_x يمثل السرعة على الاتجاه X .

V_y يمثل السرعة على الاتجاه Y .

YAW اتجاه الطائرة.

u يمثل معدل تغير الاتجاه.

ولإنشاء المسار المراد تنفيذه يجب تعريف دالة السرعة ودالة اتجاه الطائرة حسب المسار المطلوب.

$V(t) = V_0$المعادلة 4-4

$$YAW(t) = \begin{cases} 0, & t \in [0, T[\\ \frac{(t-T) \times \pi}{T_0}, & t \in [T, T + T_0[\\ \pi, & t \in [T + T_0, 2T + T_0[\\ \pi - \frac{(t-(2T+T_0)) \times \pi}{T_0}, & t \in [2T + T_0, 2T + 2T_0[\end{cases} \dots\dots\dots \text{المعادلة 5-4}$$

ويمكن تكرار العملية حسب عرض الحقل بحيث:

$n = W/w_0$المعادلة 6-4

$w_0 = \overline{V_y}/2T_0$المعادلة 7-4

حيث W يمثل عرض الحقل

w_0 يمثل العرض في الدور الواحد

$\overline{V_y}$ يمثل السرعة المتوسطة في الاتجاه y اثناء الدوران

T_0 يمثل الزمن المستغرق للقيام بنصف دورة

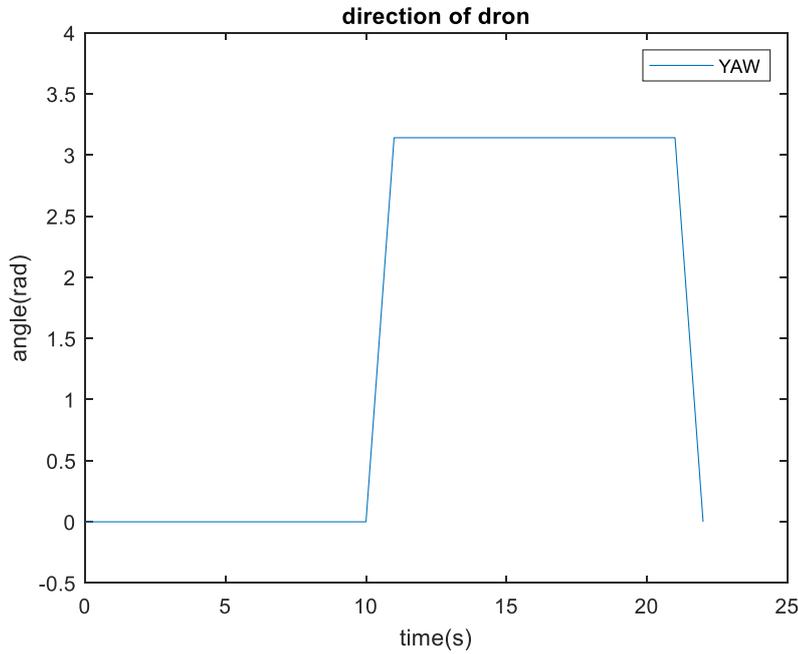
n يمثل عدد التكرارات

T يمثل الزمن المستغرق للسير في المسار المستقيم

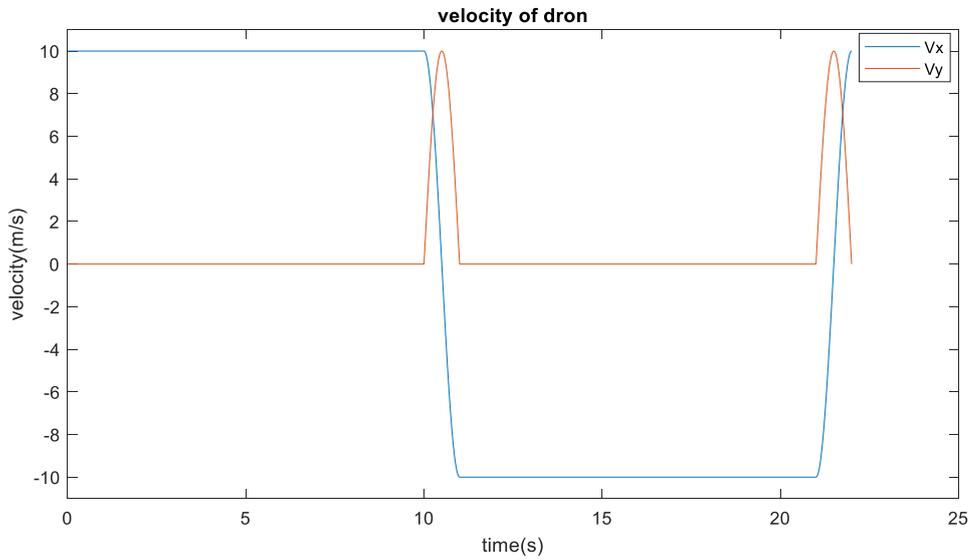
لتصبح معادلة سرعة المسار هكذا

$$V_x(t) = \begin{cases} V_0, & t \in [0, T[\\ V_0 \cos(YAW(t)), & t \in [T, T + T_0[\\ -V_0, & t \in [T + T_0, 2T + T_0[\\ V_0 \cos(YAW(t)), & t \in [2T + T_0, 2T + 2T_0[\end{cases} \dots\dots\dots \text{المعادلة 8-4}$$

$$V_y(t) = \begin{cases} 0, & t \in [0, T[\\ V_0 \sin(YAW(t)), & t \in [T, T + T_0[\\ 0, & t \in [T + T_0, 2T + T_0[\\ V_0 \sin(YAW(t)), & t \in [2T + T_0, 2T + 2T_0[\end{cases} \dots\dots\dots \text{المعادلة 9-4}$$



الشكل 4-7: اتجاه الطائرة لمسار الحقل المستطيل



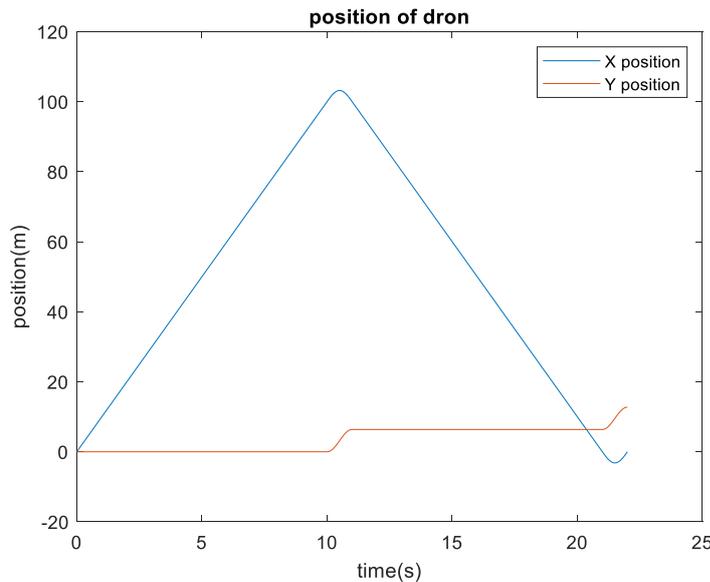
الشكل 4-8: سرعة الطائرة على الاتجاهين X و Y بالنسبة للزمن لمسار الحقل المستطيل.

$$V = V_0 = 1 \dots\dots\dots \text{المعادلة 10-4}$$

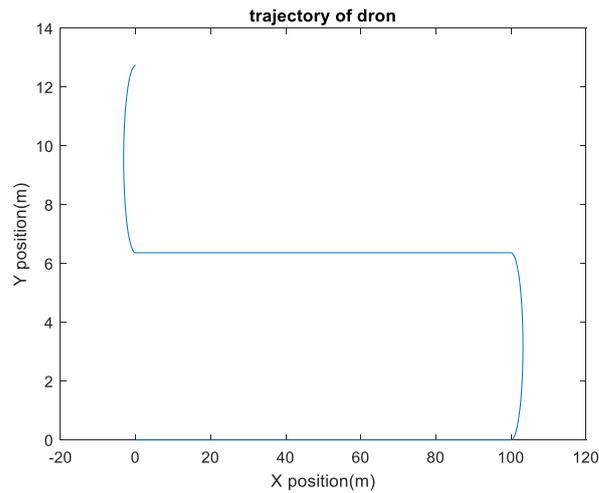
ولإيجاد معادلة الموضع للمسار نقوم بمكاملة معادلة السرعة.

$$X(t) = \begin{cases} V_0 \times t, & t \in [0, T[\\ \frac{V_0 \times T_0}{\pi} \sin(YAW(t)) + V_0 T, & t \in [T, T + T_0[\\ V_0 T - V_0 \times t, & t \in [T + T_0, 2T + T_0[\\ -\frac{V_0 \times T_0}{\pi} \sin(YAW(t)), & t \in [2T + T_0, 2T + 2T_0[\end{cases} \dots\dots\dots 11-4 \text{ المعادلة}$$

$$Y(t) = \begin{cases} 0, & t \in [0, T[\\ \frac{V_0 T_0}{\pi} - \frac{V_0 T_0}{\pi} \cos(YAW(t)), & t \in [T, T + T_0[\\ \frac{2V_0 T_0}{\pi}, & t \in [T + T_0, 2T + T_0[\\ \frac{3V_0 T_0}{\pi} + \frac{V_0 T_0}{\pi} \cos(YAW(t)), & t \in [2T + T_0, 2T + 2T_0[\end{cases} \dots\dots\dots 12-4 \text{ المعادلة}$$



الشكل 4-9: موضع الطائرة بالنسبة للزمن لمسار الحقل المستطيل



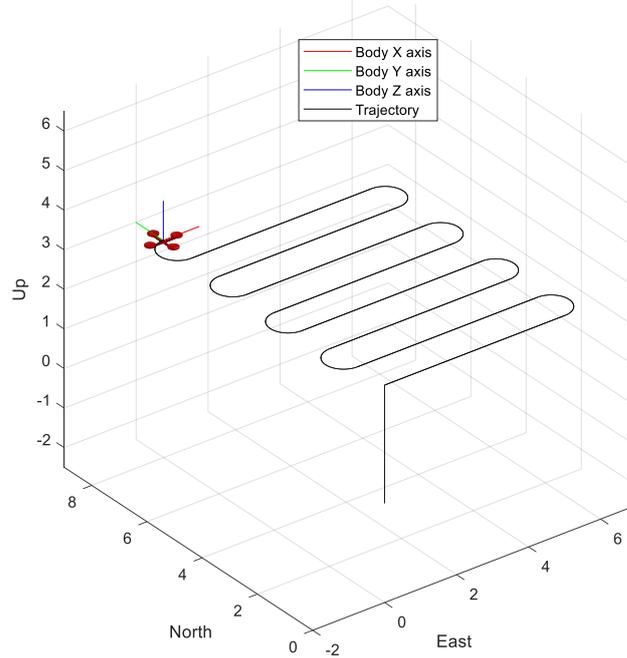
الشكل 4-10: الدور الأول للمسار

حيث يتم اختيار قيمة T حسب طول الحقل باستخدام العلاقة التالية:

$$T = L/V_0 \dots\dots\dots 13-4 \text{ المعادلة}$$

L يمثل طول الحقل.

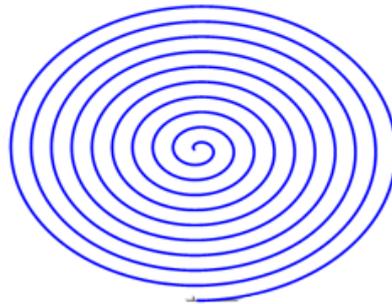
وباستخدام برنامج ماتلاب تمت محاكاة مسار الخاص بالحقول المستطيلة.



الشكل 4-11: محاكاة المسار المبرمج لحقل مستطيل.

2-4 مسار الحقول الدائرية:

لمراقبة الحقول الدائرية يتم الاعتماد على التخطيط المسار التالي:



الشكل 4-12: تخطيط المسار الدائري

ولإنشاء المسار المراد تنفيذه يجب تعريف دالة السرعة ودالة اتجاه الطائرة حسب المسار المطلوب.

$$V(t) = V_0 - V_1 \times t \dots\dots\dots 14-4 \text{ المعادلة}$$

$$YAW(t) = \frac{2\pi t}{T_0} \dots\dots\dots 15-4 \text{ المعادلة}$$

حيث T_0 هي المدة المستغرقة لإتمام الطائرة دورة كاملة حول نفسها.

V_0 هي السرعة الابتدائية.

V_1 مقدار تناقص السرعة.

لتصبح معادلة سرعة المسار هكذا

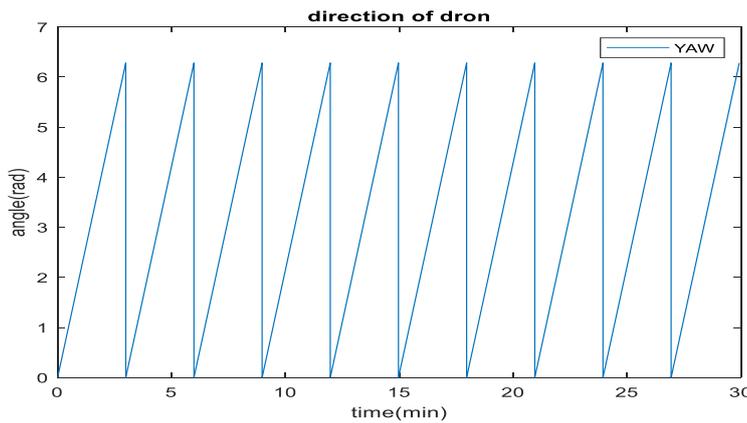
$$V_x(t) = (V_0 - V_1 \times t) \cos(YAW(t)) \dots \dots \dots \text{المعادلة 16-4}$$

$$V_y(t) = (V_0 - V_1 \times t) \sin(YAW(t)) \dots \dots \dots \text{المعادلة 17-4}$$

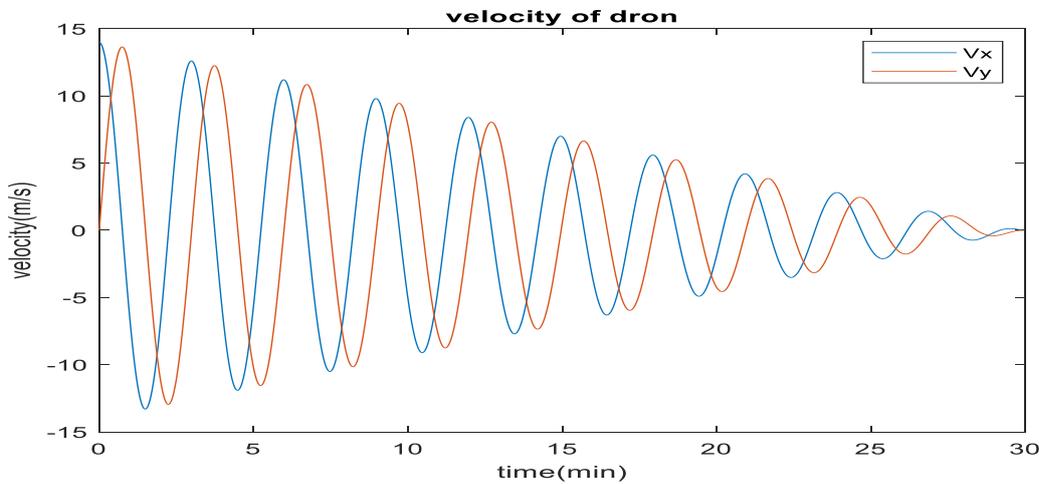
ولإيجاد معادلة الموضع للمسار نقوم بمعاملة معادلة السرعة.

$$X(t) = \frac{(V_0 - V_1 t) T_0}{2\pi} \sin(YAW(t)) - \frac{V_1 T_0^2}{4\pi^2} \cos(YAW(t)) + \frac{V_1 T_0^2}{4\pi^2} \dots \dots \dots \text{المعادلة 18-4}$$

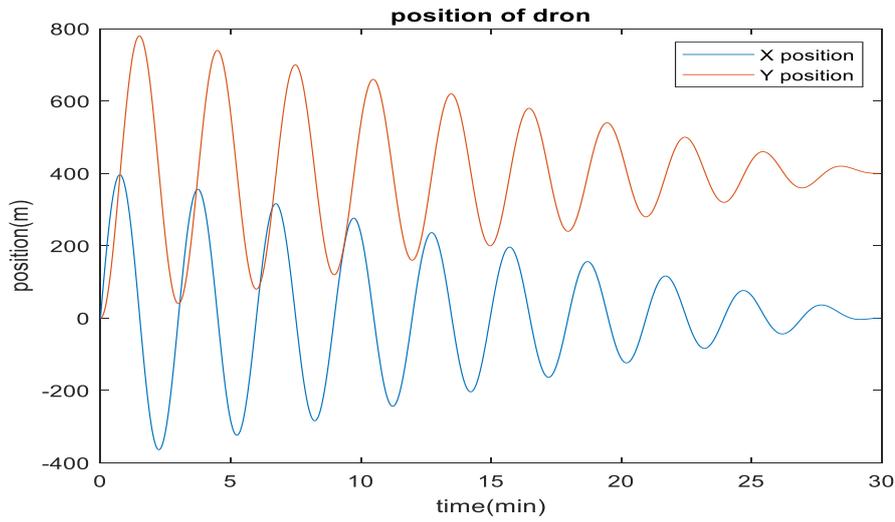
$$Y(t) = \frac{(V_1 t - V_0) T_0}{2\pi} \cos(YAW(t)) - \frac{V_1 T_0^2}{4\pi^2} \sin(YAW(t)) + \frac{V_0 T_0}{2\pi} \dots \dots \dots \text{المعادلة 19-4}$$



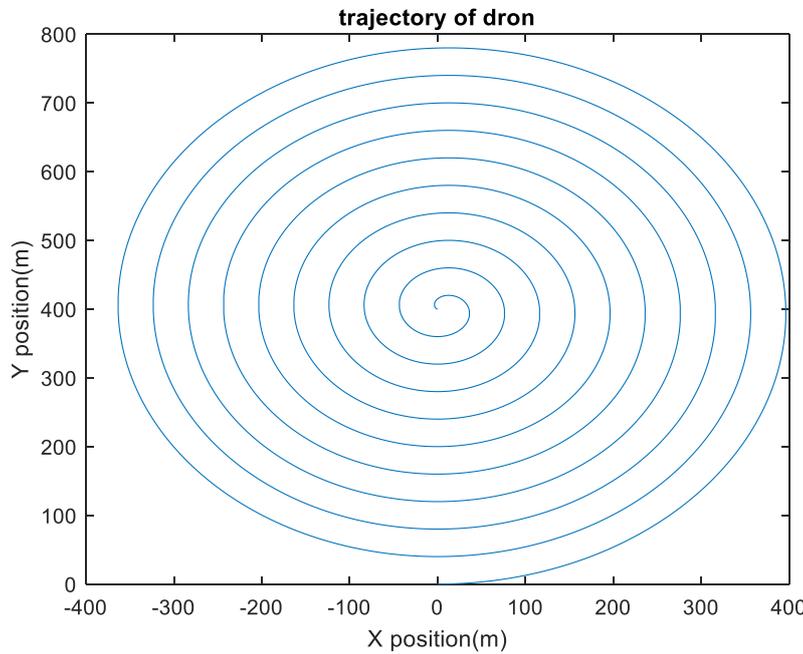
الشكل 4-13: اتجاه الطائرة لمسار الحقل الدائري.



الشكل 4-14: سرعة الطائرة على الاتجاهين X و Y بالنسبة للزمن لمسار الحقل الدائري.



الشكل 4-15: موضع الطائرة بالنسبة للزمن لمسار الحقل الدائري



الشكل 4-16: المسار الدائري

حيث يتم اختيار قيمة T_0 حسب طول قطر الحقل والسرعة الابتدائية باستخدام العلاقة التالية:

$$T_0 = \frac{D \times \pi}{V_0} \dots \dots \dots \text{المعادلة 4-20}$$

حيث D يمثل قطر الحقل.

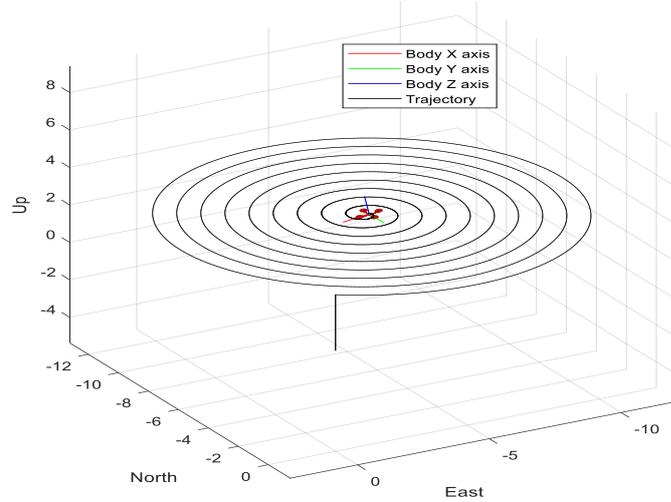
ويتم حساب الزمن المستغرق للعملية T بالعلاقة التالية:

$$T = T_0 \times m \dots \dots \dots \text{المعادلة 4-21}$$

حيث m يمثل عدد الدورات.

ويتم حساب V_1 بالعلاقة التالية:

$$V_1 = \frac{V_0}{T} \dots \dots \dots \text{المعادلة 4-22}$$



الشكل 4-17: محاكاة المسار المبرمج لحقل الدائري.

5 تحديات تطبيق المسار المبرمج:

1-5 البطارية:

تعتبر سعة وكثافة البطارية من اهم الأشياء التي يجب مراعاتها اثناء صناعة طائرة مسيرة في مسار مبرمج، ان لم تكن البطارية كافية لتوفير الطاقة فإنها تضطر الى الغاء السير في المسار من اجل الشحن او تخصيص محطات لتبديل البطاريات مما يزيد من التكلفة، لحل المشكلة يتم إضافة لوحات شمسية، ومراقبة جيدة للبطارية [30].

2-5 دقة أجهزة الاستشعار:

تساعد أجهزة الاستشعار على جمع البيانات اللازمة للقيام بالتغذية الراجعة وتقليل من نسبة الخطأ، فاذا كانت أجهزة الاستشعار دقيقة وجيدة فان التحكم سيكون جيدا، فاذا كانت أجهزة الاستشعار بها مشاكل مثل ما حدث معنا مع GPS لديه مشكل في التواصل مع الأقمار الصناعية (كثير الانقطاع بالقمر الصناعي)، ويوجد مشاكل أخرى في وحدة IMU وهي الخطأ التراكمي عند حساب السرعة الموضع.

حل تلك المشاكل يجب استعمال GPS جيد ودمج قياساته مع قياسات وحدة IMU باستخدام احدى خوارزميات دمج المستشعرات.

الخاتمة:

لتحديد المسار الطائرة المسيرة عن طريق البرمجة لابد من تحديد مخطط المناسب لتقوم الطائرة بأخذ الصور المطلوبة لجمع المعلومات اللازمة.

بتعريف نوعين من المسارات كافية لتطبيق في اغلبية الحقول الزراعية الشاسعة هنالك المسار الدائري والمسار غير الدائري.

قمنا بنمذجة المسار بالمعادلات الرياضية وقمنا بمحاكاتها باستخدام برنامج ماتلاب لكلا النوعين مسار الدائري بالنسبة للحقول الدائرية والمسار الأفعواني بالنسبة للحقول الغير الدائرية.

خاتمة عامة

في ختام هذا المشروع، تم استخدام طائرة رباعية المراوح كأداة رئيسية لتحقيق الأهداف المحددة، حيث تم تجهيزها بنظام إلكتروني متكامل يتضمن المتحكم الدقيق والمستشعرات اللازمة. لقد تم إنجاز مجموعة من البرامج الأساسية التي تشمل تهيئة المتحكم الدقيق، قراءة البيانات من المستشعرات، قياس الزوايا، وتطبيق نظام التحكم PID. على الرغم من النجاح في تطوير هذه البرامج، إلا أن هناك حاجة لمزيد من التدقيق العملي لقيم نظام التحكم PID لضمان استقرار النظام.

تم تحديد مسارات الطائرة المسيرة بشكل دقيق، حيث استخدمنا نوعين من المسارات: الدائري وغير الدائري، مما يتيح للطائرة التقاط الصور اللازمة لمسح الحقول الزراعية بكفاءة. قمنا بنمذجة هذه المسارات باستخدام المعادلات الرياضية التي قمنا بتطويرها ومحاكاتها عبر برنامج ماتلاب، مما يعكس القدرة على تطبيق هذه الحلول في مختلف البيئات الزراعية.

في طريق إنجاز المشروع تعرضنا الى عدة مشاكل منها كثرة انقطاع وحدة الاتصال nRF24101 بسبب استخدامه للبروتوكول الاتصال SPI الذي يتميز بتردد عالي في نقل البيانات مما يؤدي الى تأثره بالمجال الكهرومغناطيسي الناتج عن المحركات، ومن الصعوبات التي وجهتها صعوبة في التجريب وتحديد قيم الPID بسبب عدم وجود أماكن وأدوات خاصة لتجريب الطائرة المسيرة وتقليل المخاطر.

تعتبر الكاميرات المستخدمة، سواء كانت RGB لمراقبة السقي أو متعددة الأطياف لكشف الأمراض، أدوات فعالة لجمع المعلومات الضرورية. إن هذا المشروع لا يساهم فقط في تحسين إدارة الموارد الزراعية، بل يعكس أيضاً الابتكار في استخدام التكنولوجيا الحديثة في الزراعة، مما يفتح آفاقاً جديدة لتحسين الإنتاجية والاستدامة في هذا القطاع الحيوي.

وانصح كل من سوف يقوم بإنجاز او إتمام هذا المشروع باختيار مستشعرات ذات دقة عالية وتوفير أدوات مساعدة لتجريب وتحسين الاستقرار الطائرة المسيرة كما انصح باختيار محركات مناسبة للهيكل والمراوح التي تتناسب مع المحركات.

المراجع

- [1]: <https://www.axon.com/resources/history-of-drones>
- [2]: ALOUI, Abdelghafour (2020). Realization of Quadcopter. University of Mohamed Khaidar- Biskra.
- [3]: <https://www.nationalmuseum.af.mil/Visit/Museum-Exhibits>
- [4] : <https://www.militaryfactory.com/aircraft>
- [5] : <https://www.ctie.monash.edu.au/hargrave>
- [6] : <https://interestingengineering.com/innovation>
- [7] : <https://www.dw.com/ar>
- [8] : <https://www.nippon.com/ar/currents>
- [9] : <https://aawsat.com/%D8%AA%D9%83%D9%86%D9%88%D9%84%D9%88%D8%AC%D9%8A%D8%A7/4976481>
- [10] : <https://www.jouav.com/blog/drone-types.html>
- [11] : Bas, V. Huub, N. Geert, B. Bart, C (2016). Drone Technology: Types, Payloads, Applications, Frequency Spectrum Issues and Future Developments.
- [12]: <https://www.t-drones.com/blog/quadcopter-drones.html>
- [13]: Zhao, J. Yu, Y (2011). Brushless DC Motor Fundamentals Application Note.
- [14]: حسام، عرفة (2018). مدخل لمتحكمات STM32.
- [15] : Hachia, amdjed (2024). Plateforme apprentissage des system embarque. University of Mohamed Khaidar- Biskra.
- [16]: Inven Sense (2013). MPU-6000 and MPU-6050 Register MAP and Descriptions revision 4.2.
- [17]: Bosch Sensortec (2018). BMP280 Digital Pressure Sensor.
- [18]: Qst (2016). 3-Axis Magnetic Sensor QMC5883L.
- [19] : <https://www.pkenergy.com/ar/news/what-is-a-lipo-battery>

- [20] : <https://www.rogershobbycenter.com/lipoguide>
- [21] : <https://abelhijazi.com/2020/04/05/fpv-propellers>
- [22] : <https://oscarliang.com/propellers>
- [23]:<https://www.technexion.com/resources>
- [24]: Cao, X and aouther (2016). Computational Snapshot Multispectral Cameras. IEEE Signal Processing Magazine.
- [25]: <https://feds.group/sustainable>
- [26]: <https://gisgeography.com/ndvi-normalized-difference-vegetation-index>
- [27]: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>
- [28] : <https://www.youtube.com/watch?v=whSw42XddsU>
- [29]: WALTER T. HIGGINS, JR. (1975). A Comparison of Complementary and Kalman Filtering. IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS.
- [30]: Dora Novak (2024). Drone(s) trajectory optimization for mapping missions. Université Paris Saclay.
- [31] : Sadallah, Nassim. Babou, Ouahiba (2018). Planification de trajectoires pour un véhicule aérien autonome (UAV). Université Mouloud MAMMERY de Tizi-Ouzou.
- [32] : Yang, Y. ; Xiong, X. ; Yan, Y (2023). UAV Formation Trajectory Planning Algorithms: A Review.