# تصميم وتنفيذ سطح (ذراع روبوت) ذاتي التوازن مع الأفق لحمل معدات حساسة


بإشراف الدكتور: حسان النداف

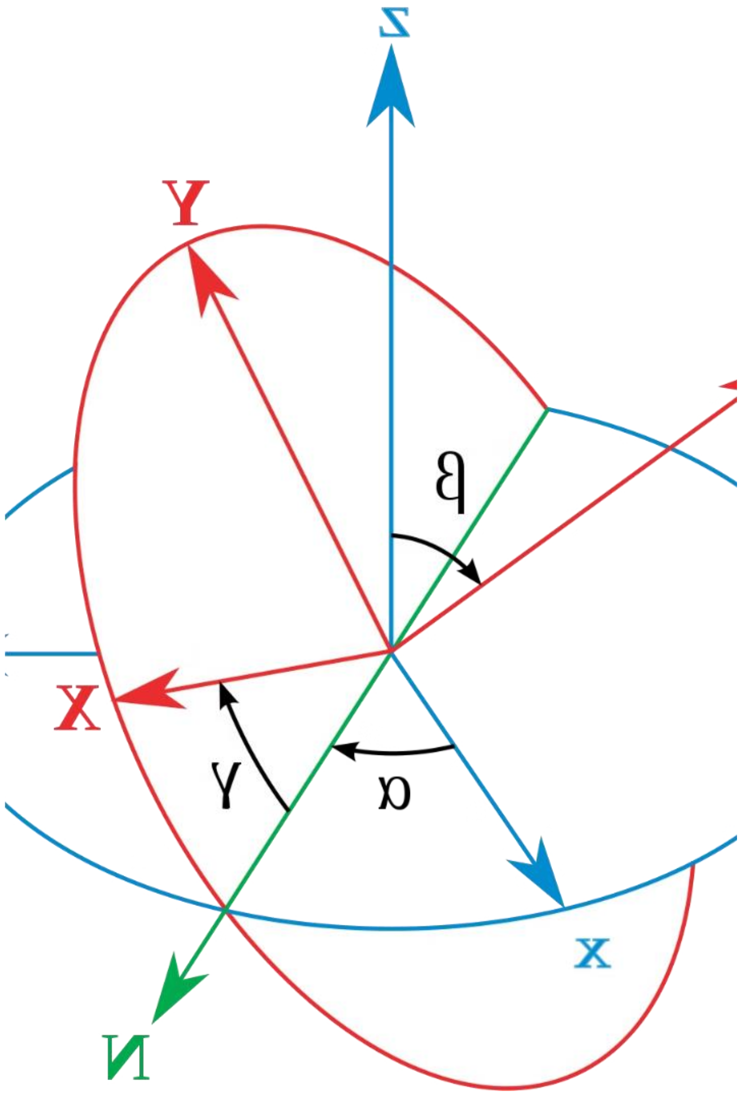
إعداد وتنفيذ:

مصطفى كمال جابي

عمار حاج احمد ضبعان

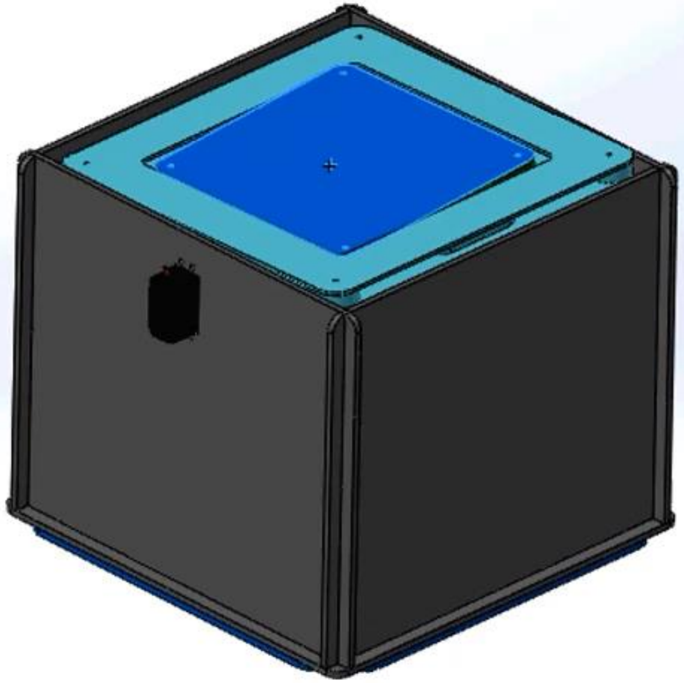
# الاجندة

1. لمحة عن النتيجة المرغوبة
2. مخطط صندوقي شامل لعناصر المشروع
3. مبدأ عمل الMPU6050
4. طرق تقدير زوايا الميلان التقليدية
5. استخدام مرشح كالمان الموسع مع الرباعيات
6. متحكم الPID المستخدم ومشاكله العملية وحلها
7. التطبيقات الحياتية للمشروع



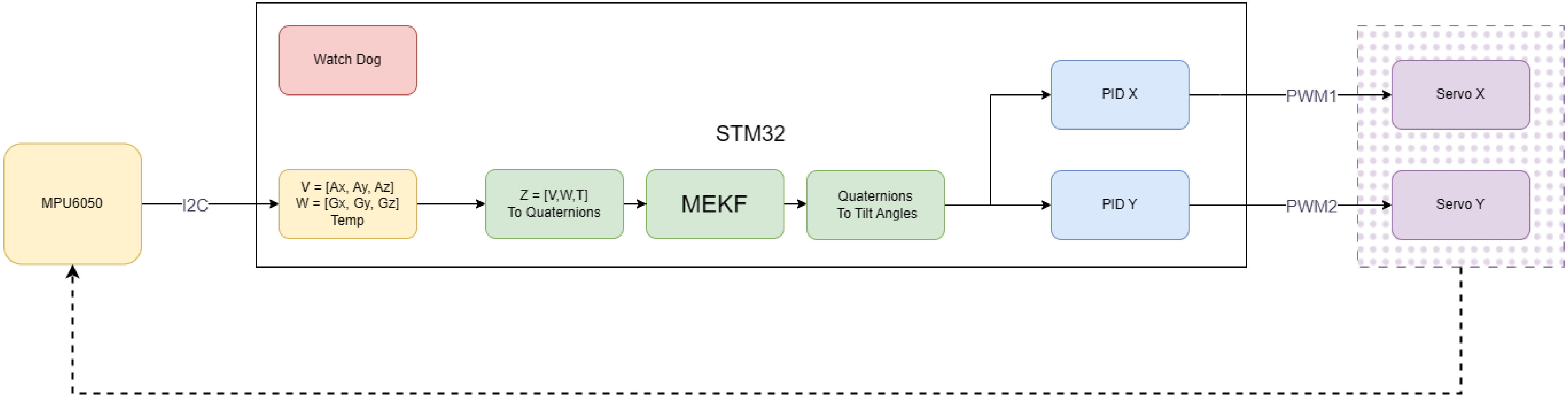
# لمحة عن النتيجة المرادة

1



# مخطط صندوقي

2

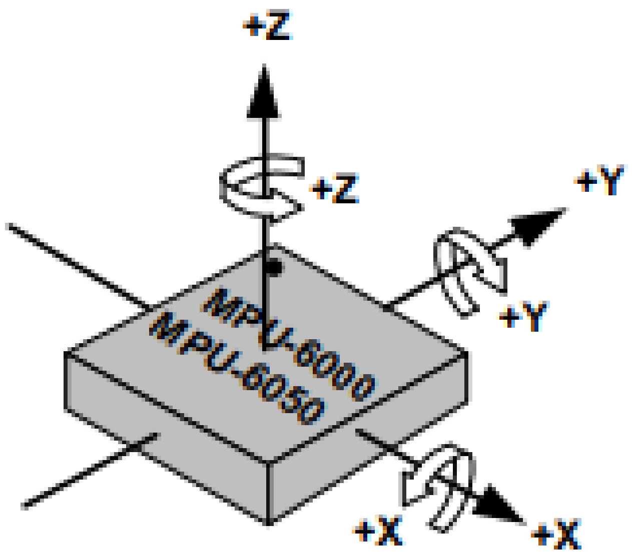


Watch Dog
STM32
MPU6050
I2C
V = [Ax, Ay, Az]
W = [Gx, Gy, Gz]
Temp
Z = [V,W,T]
To Quaternions
MEKF
Quaternions
To Tilt Angles
PID X
PID Y
PWM1
PWM2
Servo X
Servo Y

# مبدأ عمل حساس الـMPU6050

3

# MPU6050




### ثلاث محاور جيروسكوب

يتميز الجهاز بجيرسكوب ثلاثي المحاور مع نطاق قابل للبرمجة من±250 إلى ±2000 درجة/ثانية.

### ثلاث محاور قياس تسارع

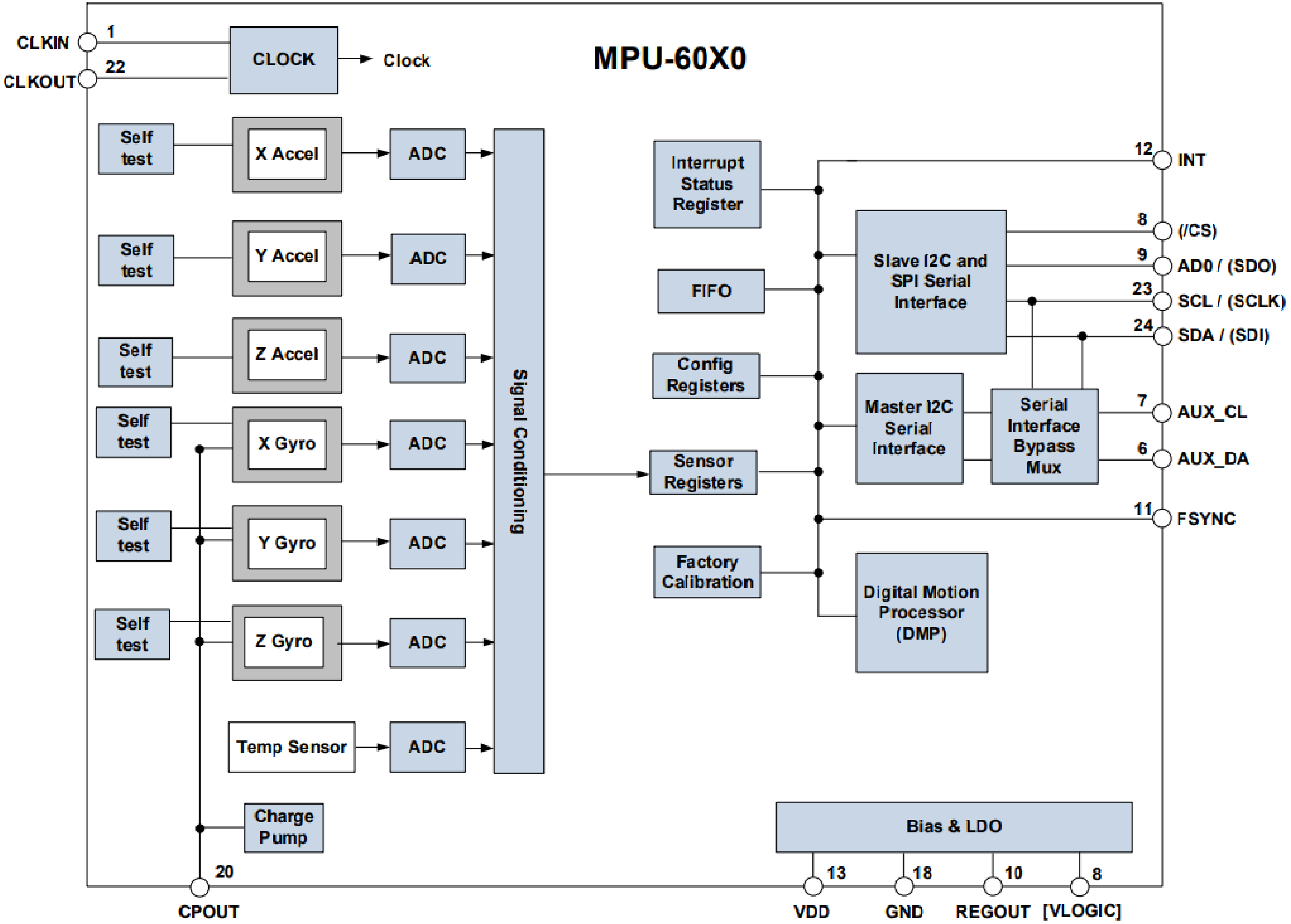
يتميز الجهاز بمقياس تسارع ثلاثي المحاور مع نطاق قابل للبرمجة من ±2g إلى ±16g.

### مرشح رقمي قابل للبرمجة

يتميز الجهاز بمرشحات رقمية قابلة للبرمجة من قبل المستخدم للجيرسكوب، مقياس التسارع ومستشعر درجة الحرارة، مما يسمح بتخصيص الأداء.

### معالج حركة رقمي مدمج DMP

يتميز جهاز MPU-60X0 بوجود معالج حركة رقمي مدمج على الشريحة، والذي يقوم بجمع وتحليل بيانات الجيروسكوب ومقياس التسارع لتوفير إخراج حركة متكامل.



MPU-60X0
CLKIN
1
CLKOUT
22
CLOCK
Clock
Self test
X Accel
Y Accel
Z Accel
X Gyro
Y Gyro
Z Gyro
ADC
Temp Sensor
Charge Pump
Signal Conditioning
Interrupt Status Register
FIFO
Config Registers
Sensor Registers
Factory Calibration
Slave I2C and SPI Serial Interface
Master I2C Serial Interface
Serial Interface Bypass Mux
Digital Motion Processor (DMP)
Bias & LDO
12 INT
8 (/CS)
9 AD0 / (SDO)
23 SCL / (SCLK)
24 SDA / (SDI)
7 AUX_CL
6 AUX_DA
11 FSYNC
20 CPOUT
13 VDD
18 GND
10 REGOUT
8 [VLOGIC]

# مقارنة بين خرجي الحساس

## حساس الجايروسكوب Gyroscope

- **قياس الدوران بدقة عالية:** الجايروسكوب يقيس السرعة الزاوية حول المحاور الثلاثة بدقة عالية، مما يجعله مثالياً لتتبع الحركات الدورانية السريعة.
- **استجابة سريعة:** يمتاز الجايروسكوب باستجابة سريعة للتغيرات في الدوران، مما يجعله مفيداً في التطبيقات التي تتطلب استجابة فورية.
- **انجراف بمرور الوقت:** الجايروسكوب يعاني من الانجراف، وهو تراكم الأخطاء بمرور الوقت، مما يؤدي إلى نتائج غير دقيقة إذا استخدم لوحده على فترات طويلة.
- **حساس للضوضاء:** يمكن أن يكون الجايروسكوب حساساً للضوضاء والاهتزازات، مما قد يؤثر على دقة القياسات.

## حساس التسارع Accelerometer

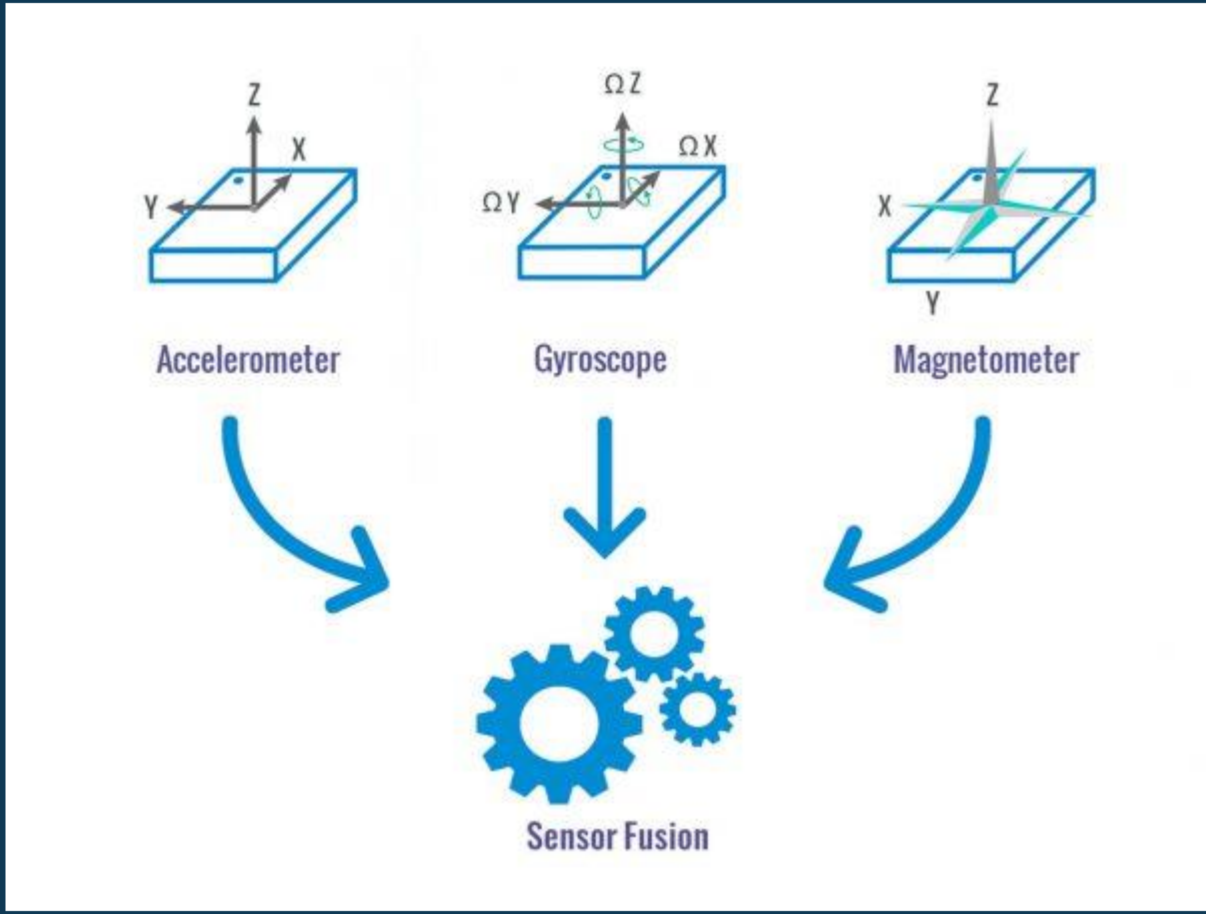
- **قياس التسارع الخطي:** يقيس التسارع الخطي على المحاور الثلاثة، مما يسمح بتحديد الوضعية والتسارع في الفضاء الثلاثي الأبعاد.
- **استقرار طويل المدى:** على عكس الجايروسكوب، حساس التسارع لا يعاني من الانجراف على المدى الطويل، مما يجعله مفيداً لتحديد الاتجاهات.
- **حساس لجميع مركبات التسارع الخارجية:** بالإضافة الى الجاذبية, فإن حساس التسارع يقيس أيضا مركبات التسارع الخارجية المطبقة على جسم الحساس, مما قد يتسبب في تداخل عند قياس الموضع الفعلي.
- **استجابة أقل للحركات الدورانية:** حساس التسارع ليس مفيداً بمفرده في تتبع الحركات الدورانية السريعة، حيث أنه مصمم لقياس التسارع الخطي.

# Sensor Fusion Algorithms

**تصحيح الانجراف:** حساس التسارع يمكنه تصحيح انجراف الجايروسكوب بمرور الوقت، حيث يوفر قياسات طويلة الأمد مستقرة تساعد في معايرة الجايروسكوب.

**تحسين الاستجابة:** الجايروسكوب يمكنه تحسين استجابة النظام للحركات السريعة التي لا يمكن لحساس التسارع تتبعها بدقة.

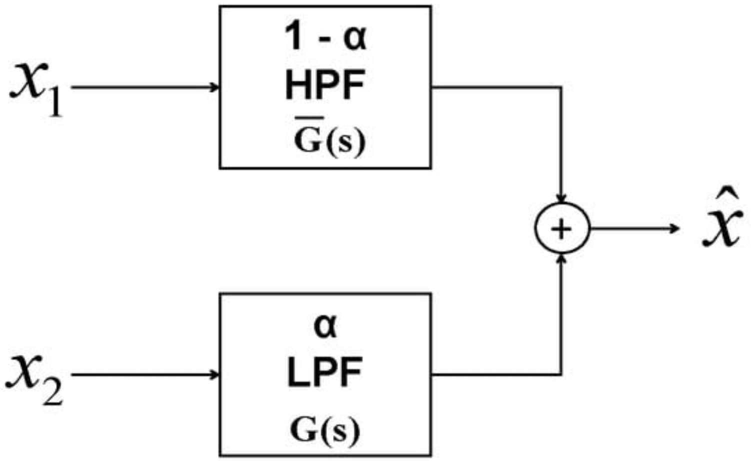
**تحقيق استقرار ودقة أعلى:** من خلال دمج قياسات الجايروسكوب وحساس التسارع، يمكن الحصول على تقديرات دقيقة للوضعية والاتجاه بدون التأثر بالعيوب الفردية لكل حساس.



# طرق تقدير زوايا الميلان التقليدية

4

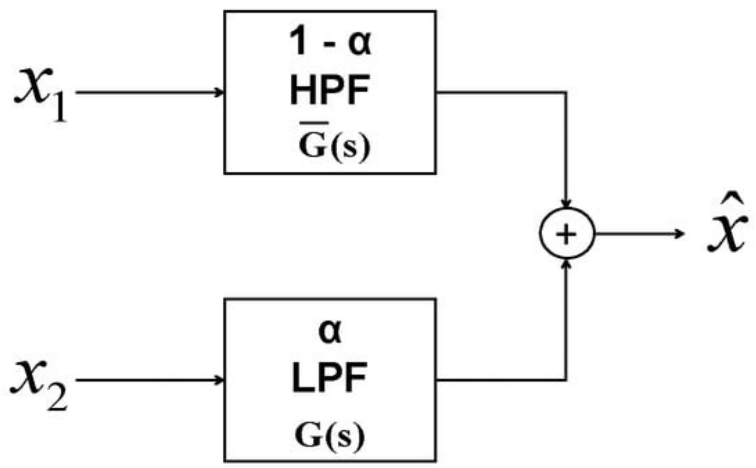
# 1- المرشح التكميلي
# Complementary Filter




المرشح التكميلي يقوم بدمج بيانات الجيروسكوب والتسارع باستخدام معادلة بسيطة تعتمد على زمن العينة (تحديث البيانات) ومعامل مرجح (المرشح التكميلي):

$$angle_{new} = (1-\alpha) \times \left(angle_{old} + angle_{gyro} \times \Delta t\right) + \alpha \times angle_{accel}$$

حيث α هو معامل التصفية (عادة قيمة بين 0 و 1)، و$\Delta t$هو الزمن بين العينات.



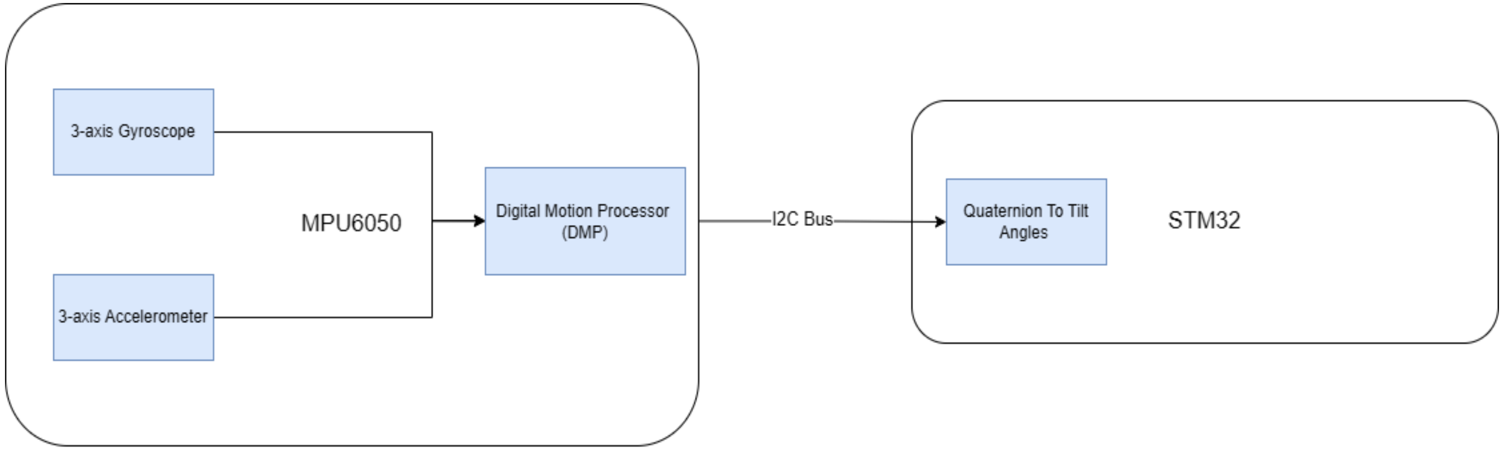

# 1- المرشح التكميلي
# Complementary Filter

**ميزات المرشح التكميلي:**

- **بساطة العلاقات وسرعة الحساب:** حساب الزوايا لا يعتمد على حسابات عديدة ومعقدة مما يزيد من تردد حساب الزوايا ويساهم بمزامنة المتحكم المصغر مع تردد خرج الحساس.

**عيوب المرشح التكميلي:**

- **الحساسية لإعداد المعاملات**: يتطلب المرشح ضبطًا دقيقًا للمعامل α لضمان أداء جيد. إذا كانت القيمة غير مضبوطة بشكل صحيح، قد يؤدي ذلك إلى استجابة غير مناسبة للنظام.
- **الافتراضات البسيطة**: المرشح يعتمد على افتراضات مبسطة وقد لا يكون دقيقًا في الحالات التي تتضمن حركات معقدة وسريعة.
- **عدم التعامل مع الضوضاء بشكل فعال:** لا يتعامل المرشح التكميلي بشكل مثالي مع الضوضاء العالية أو تسارع الحركة غير الثابتة، مما قد يؤثر على دقة النتائج.



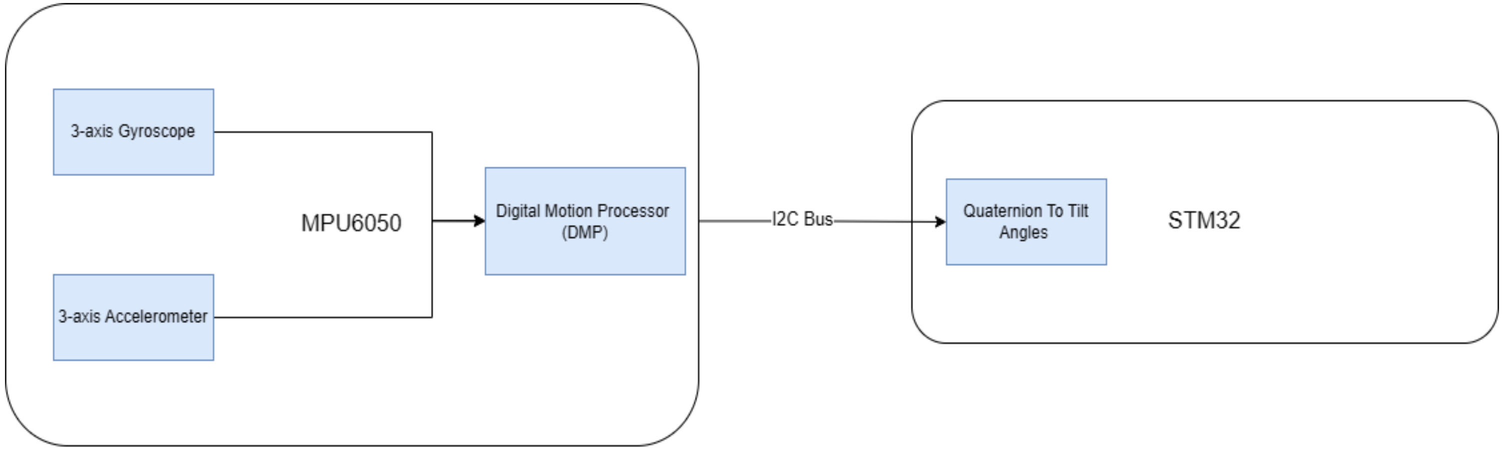

# 2- معالج الحركة الرقمي
# Digital Motion Processor

الـ DMP (Digital Motion Processor) هو معالج حركة رقمي مدمج يوفر وحدة معالجة خاصة تمكنه من تنفيذ خوارزميات معالجة الحركة بشكل مستقل عن وحدة المعالجة المركزية الرئيسية (الميكروكنترولر)، مما يقلل من الحمل على المعالج الرئيسي ويحسن أداء النظام بشكل عام.

**كيفية عمل الـ DMP مع حساس الـ MPU6050:**

- **جمع البيانات:** الـ MPU6050 يجمع بيانات الحركة من الجايروسكوب وحساسات التسارع.
- **معالجة البيانات داخليًا:** الـ DMP يعالج هذه البيانات داخليًا باستخدام خوارزميات متقدمة، مثل خوارزميات دمج المستشعرات (Sensor Fusion) التي تدمج بيانات الجايروسكوب والتسارع لتقدير الحركة بدقة أكبر.
- **توفير النتائج:** بعد المعالجة، يوفر الـ DMP البيانات النهائية على شكل زوايا الميل، معدلات التغير الزاوي، وغيرها من المعلومات المفيدة التي يمكن قراءتها مباشرة من الـ MPU6050 بواسطة الميكروكنترولر.

# 2- معالج الحركة الرقمي
# Digital Motion Processor



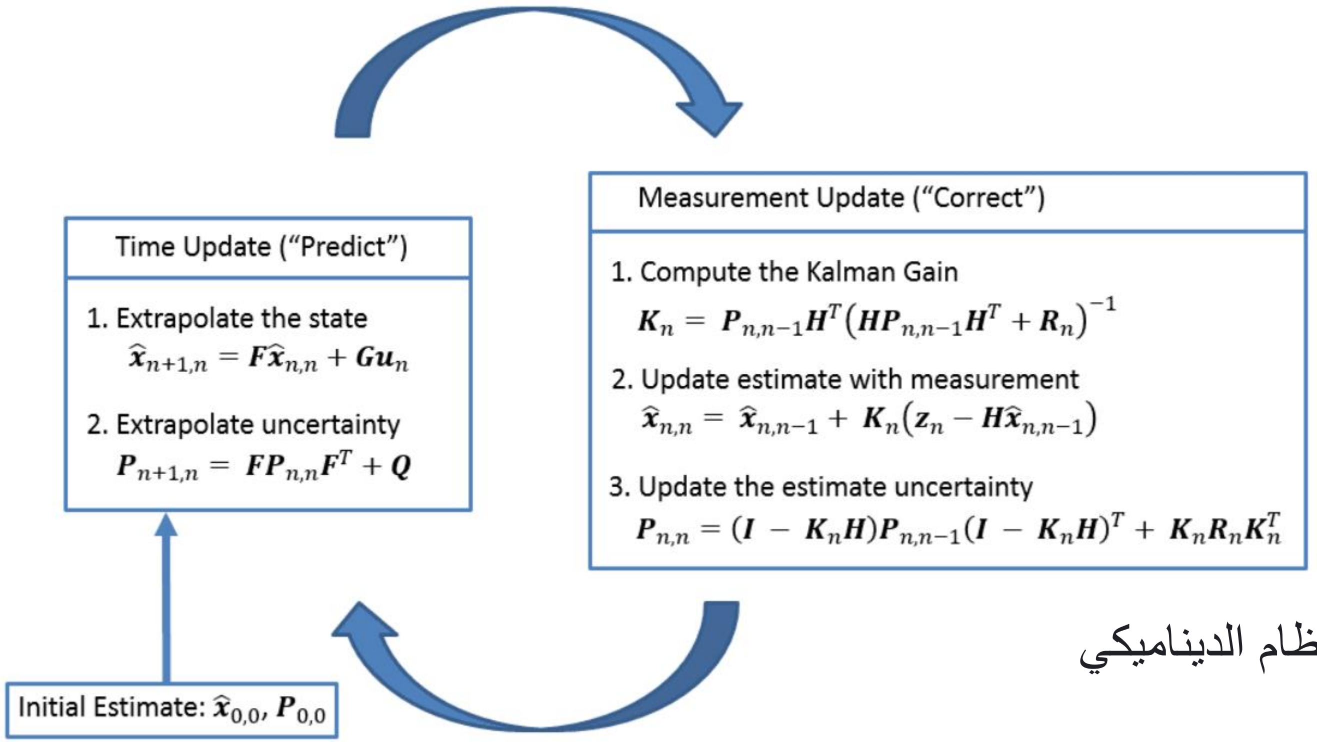

**مزايا استخدام الـ DMP:**

- **تقليل الحمل على المتحكم المصغر:** بتنفيذ الخوارزميات على الـ DMP، يتم تقليل الحمل على وحدة المعالجة المركزية الرئيسية، مما يسمح لها بالتعامل مع مهام أخرى.
- **دقة عالية:** يستخدم الـ DMPخوارزميات متقدمة لدمج البيانات من الجايروسكوب والتسارع، مما يحسن دقة التقديرات ويقلل من الضوضاء والانجراف.

**عيوب استخدام الـ DMP:**

- **عدم المقدرة على تغيير مسجلات الضبط للحساس:** يتطلب استخدام الDMP استخدام مجالات محددة للسرعة والتسارع من قبل المصنع.
- **التعقيد في التهيئة:** تهيئة الـ DMP يمكن أن تكون معقدة وتحتاج إلى إعدادات دقيقة لتحصيل الأداء الأمثل.
- **التكلفة الزمنية للتعلم:** يتطلب استخدام الـ DMP فهمًا جيدًا للـ MPU6050 وطريقة عمله، مما قد يزيد من وقت التعلم والتطوير.
- **اعتماد على الشركة المصنعة:** قد يكون هناك اعتماد كبير على الوثائق والدعم المقدم من الشركة المصنعة للحصول على أداء مثالي.

# 3- مرشح كالمان مع زوايا اويلر
# Kalman Filter

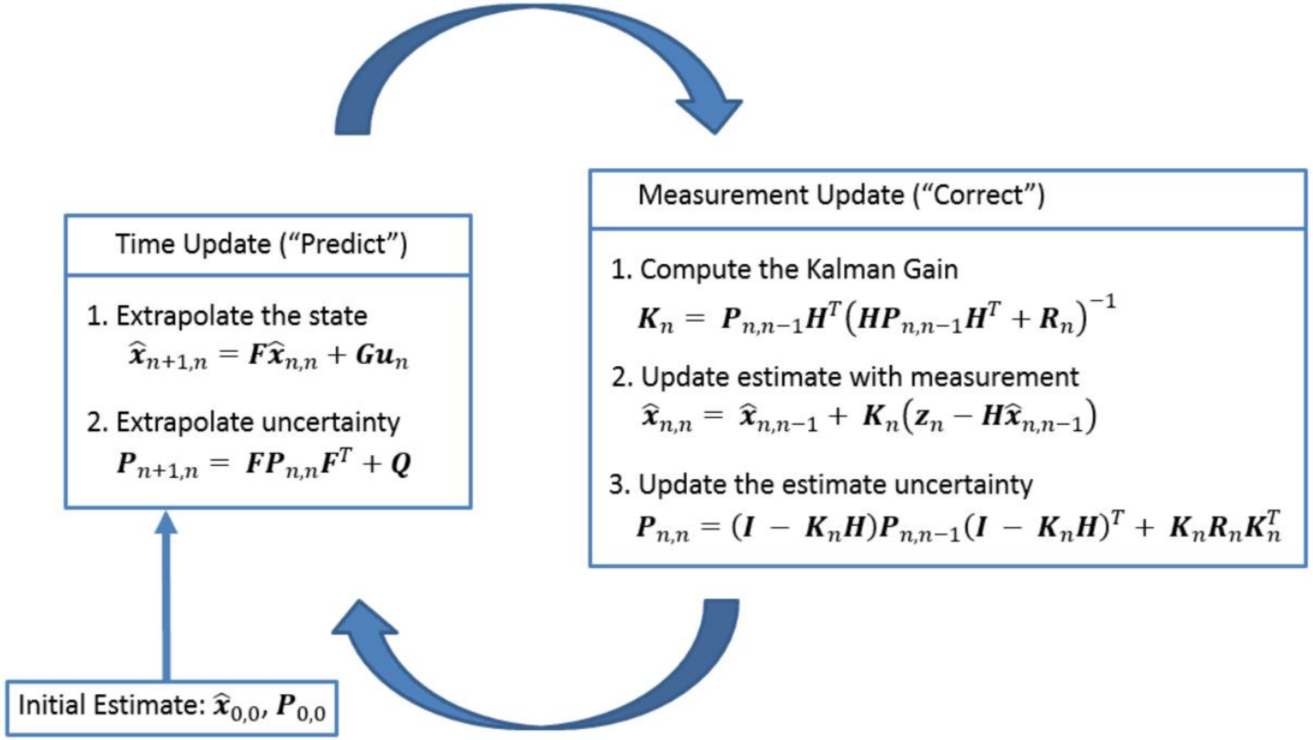



مرشح كالمان هو خوارزمية رياضية تستخدم لتقدير حالات النظام الديناميكي من خلال دمج القياسات من مصادر متعددة وتصفية الضوضاء.

**مزايا مرشح كالمان:**

- **دقة عالية:** يوفر مرشح كالمان تقديرًا دقيقًا لحالة النظام من خلال دمج بيانات متعددة وتقليل الضوضاء.
- **استجابة ديناميكية:** يتكيف مع التغيرات الديناميكية في النظام بشكل فعال.
- **تقليل تأثير الانجراف:** يقلل من تأثير الانجراف في الجيروسكوب من خلال تصحيح التقديرات باستخدام بيانات التسارع.

# 3- مرشح كالمان مع زوايا اويلر
# Kalman Filter



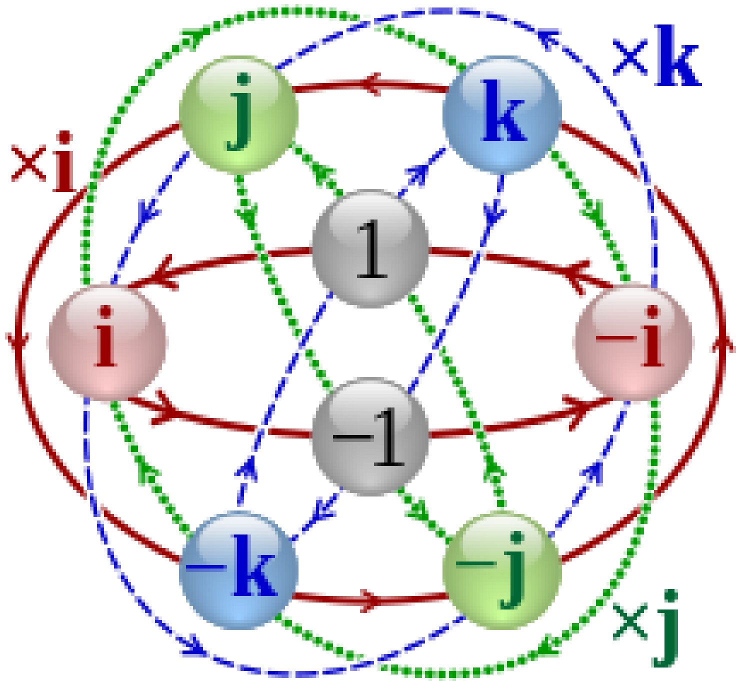

عيوب مرشح كالمان:

- **حسابات مكثفة:** قد تكون الحسابات مكثفة وتتطلب موارد كبيرة، مما قد يكون تحديًا في الأنظمة المدمجة ذات الموارد المحدودة.
- **افتراض خطية النظام:** يفرض مرشح كالمان خطية العلاقة بين دخل وخرج النظام مما يؤدي الى وجود أخطاء في حال تأثير مركبات غير خطية بشكل كبير على خرج النظام.

# مرشح كالمان الموسع باستخدام الرباعيات

5

# الرباعيات
# Quaternions




**الرباعيات:** هي امتداد للأعداد المركبة والتي تستخدم بشكل فعال في تمثيل التدويرات في الفضاء ثلاثي الأبعاد. هذه الأداة الرياضية القوية تتكون من عنصر حقيقي وثلاثة عناصر تخيلية، وتتمتع بخصائص فريدة تجعلها مفيدة في مجالات متنوعة مثل الرؤية الحاسوبية والتحكم الآلي.

تعريف الرباعيات كأشعة:

$$q = q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k$$
$$= (q_0, q_1, q_2, q_3)^T$$
$$= (q_0, \mathbf{q})^{\mathrm{T}}$$

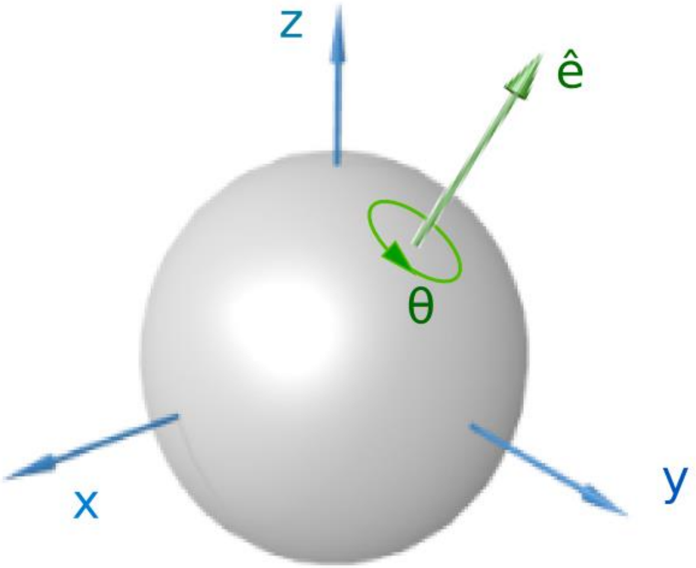
ضرب الرباعيات:

$$\mathbf{p} * \mathbf{q} = \begin{pmatrix} p_0 q_0 - \mathbf{p} \cdot \mathbf{q} \\ p_0 \mathbf{q} + q_0 \mathbf{p} + \mathbf{p} \times \mathbf{q} \end{pmatrix}$$

مقلوب الرباعية:

$$\boldsymbol{q}^{-1} = \frac{1}{|\boldsymbol{q}|^2} \mathbf{q}^* = \frac{1}{|\boldsymbol{q}|^2} (q_0, -\mathbf{q})^T$$

# الرباعيات
# Quaternions




الرباعيات التي تمثل التدويرات تأخذ الشكل:

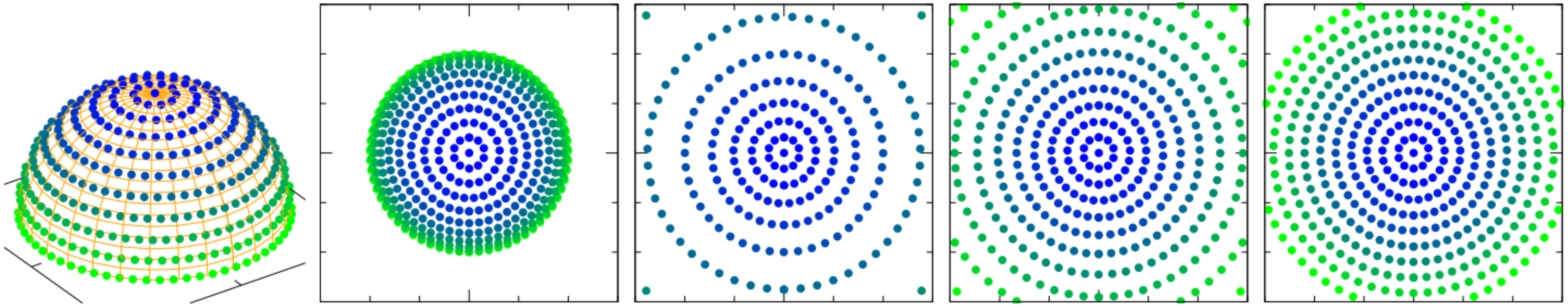
$$\boldsymbol{q} = \left(\cos(\theta/2),\ \hat{\boldsymbol{q}}\sin(\theta/2)\right)^T$$

$$|\boldsymbol{q}|^2 = q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$$

تحويل الى مصفوفة دوران:

$$\mathbf{R}(\boldsymbol{q}) = \begin{pmatrix} 1-2q_2^2-2q_3^2 & 2(q_1q_2-q_3q_0) & 2(q_1q_3+q_2q_0) \\ 2(q_1q_2+q_3q_0) & 1-2q_1^2-2q_3^2 & 2(q_2q_3-q_1q_0) \\ 2(q_1q_3-q_2q_0) & 2(q_2q_3+q_1q_0) & 1-2q_1^2-2q_2^2 \end{pmatrix}$$

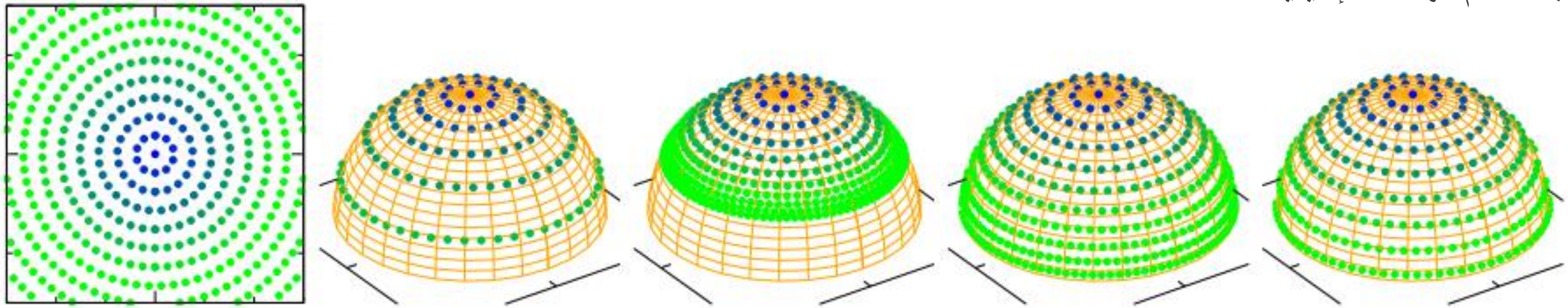
هذا يعني أن الرباعيات التي تصف التدويرات تقع في الكرة الوحدة في $\mathbb{R}^4$.

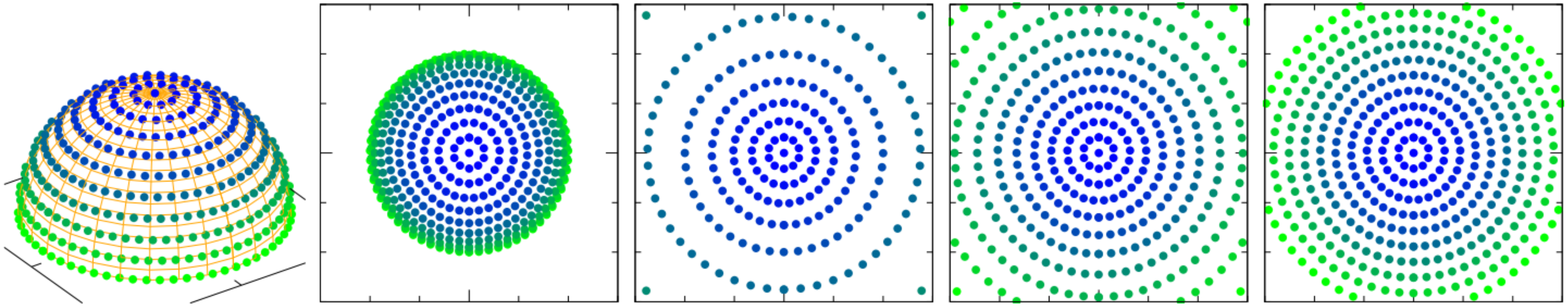


**الـ Chart:**

هو دالة تُستخدم لوصف جزء محلي من الـ Manifold بفضاء إقليدي. في حالة الرباعيات، يمكن استخدام الـ Chart لتحديد وتحليل أجزاء معينة من الـ Manifold الذي تمثله الرباعيات.

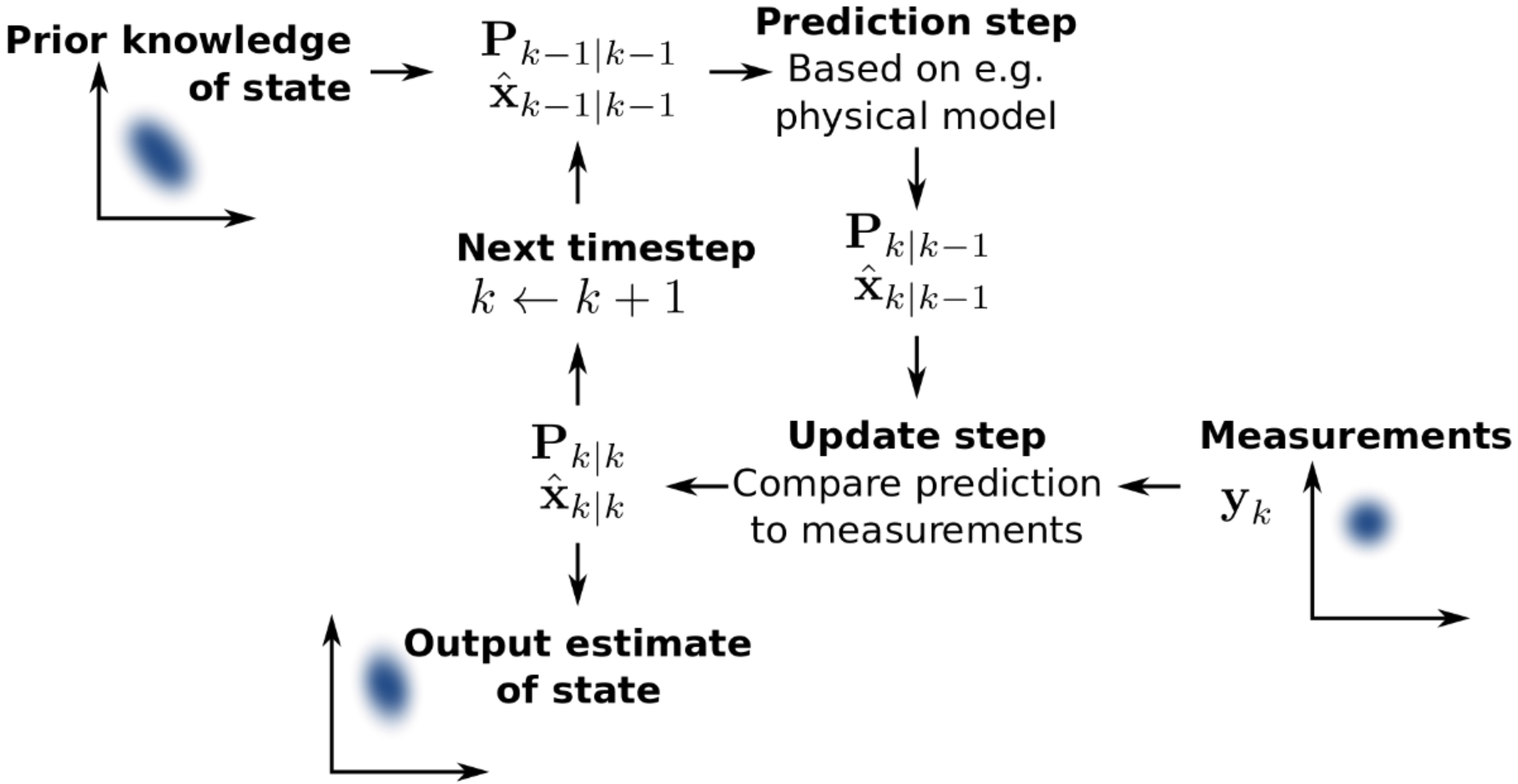
إذا اعتبرنا الـ Manifold هو سطح الكرة (الذي يمكن أن يكون مجموعة جميع الرباعيات ذات الوحدة) فإن الـ Chart هو دالة تربط نقاطًا على سطح الكرة بنقاط في مستوى إقليدي محلي. هذا يساعد في دراسة خصائص الرباعيات وتحليلها ضمن نطاق محلي يمكن التعامل معه باستخدام الهندسة الإقليدية.





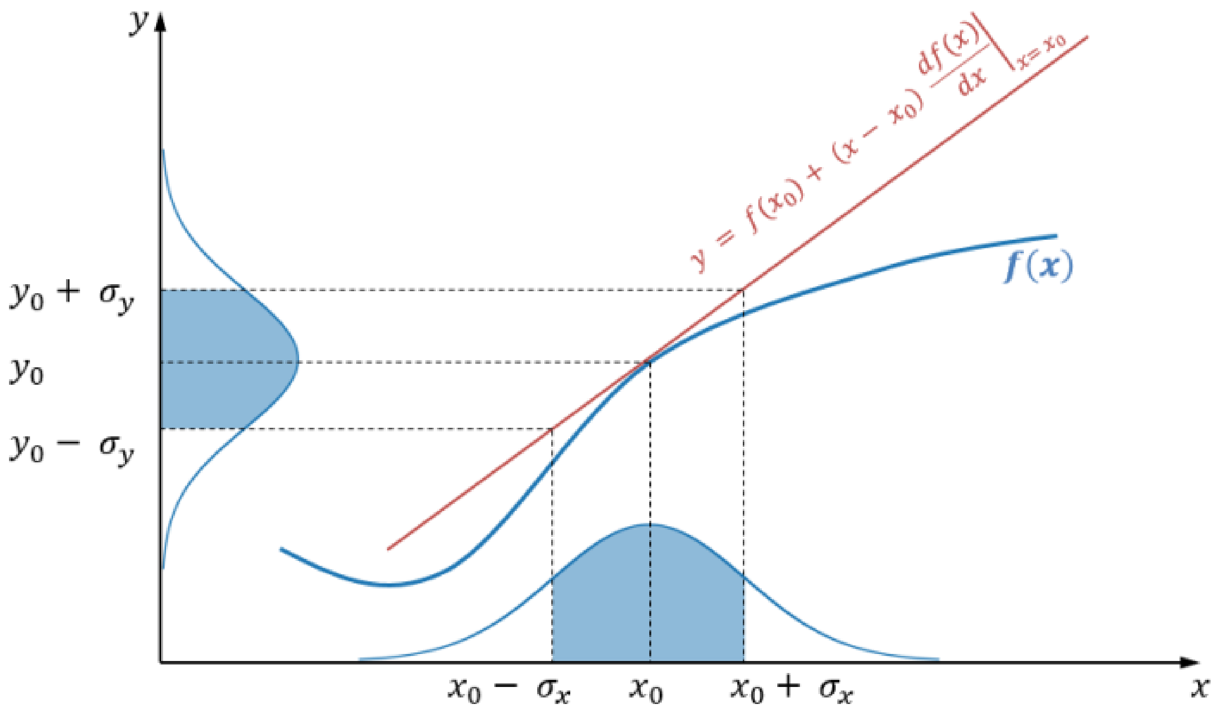
| chart | المجال | الصورة | $\mathbf{e} = \varphi(\mathbf{q})$ | $\mathbf{q} = \varphi^{-1}(\mathbf{e})$ |
|---|---|---|---|---|
| O | $\{\mathbf{q} \in S^3 : q_0 \geq 0\}$ | $\{\mathbf{e} \in \mathbb{R}^3 : \parallel \mathbf{e} \parallel \leq 2\}$ | $2\mathbf{q}$ | $\left(\sqrt{1 - \frac{\parallel \mathbf{e} \parallel^2}{4}}, \frac{\mathbf{e}}{2}\right)$ |
| RP | $\{\mathbf{q} \in S^3 : q_0 > 0\}$ | $\mathbb{R}^3$ | $2\frac{\mathbf{q}}{q_0}$ | $\frac{1}{\sqrt{4 + \parallel \mathbf{e} \parallel^2}}(2, \mathbf{e})$ |
| MRP | $\{\mathbf{q} \in S^3 : q_0 \geq 0\}$ | $\{\mathbf{e} \in \mathbb{R}^3 : \parallel \mathbf{e} \parallel \leq 4\}$ | $4\frac{\mathbf{q}}{1 + q_0}$ | $\frac{1}{\sqrt{16 + \parallel \mathbf{e} \parallel^2}}(16 - \parallel \mathbf{e} \parallel^2, 8\mathbf{e})$ |
| RV | $\{\mathbf{q} \in S^3 : q_0 \geq 0\}$ | $\{\mathbf{e} \in \mathbb{R}^3 : \parallel \mathbf{e} \parallel \leq \pi\}$ | $2\hat{\mathbf{q}} \arcsin(\parallel \mathbf{q} \parallel)$ | $\left(\cos\left(\frac{\parallel \mathbf{e} \parallel}{2}\right), \hat{\mathbf{e}}\sin\left(\frac{\parallel \mathbf{e} \parallel}{2}\right)\right)$ |

# مرشح كالمان
# Kalman Filter



# مرشح كالمان الموسع
# Extended Kalman Filter

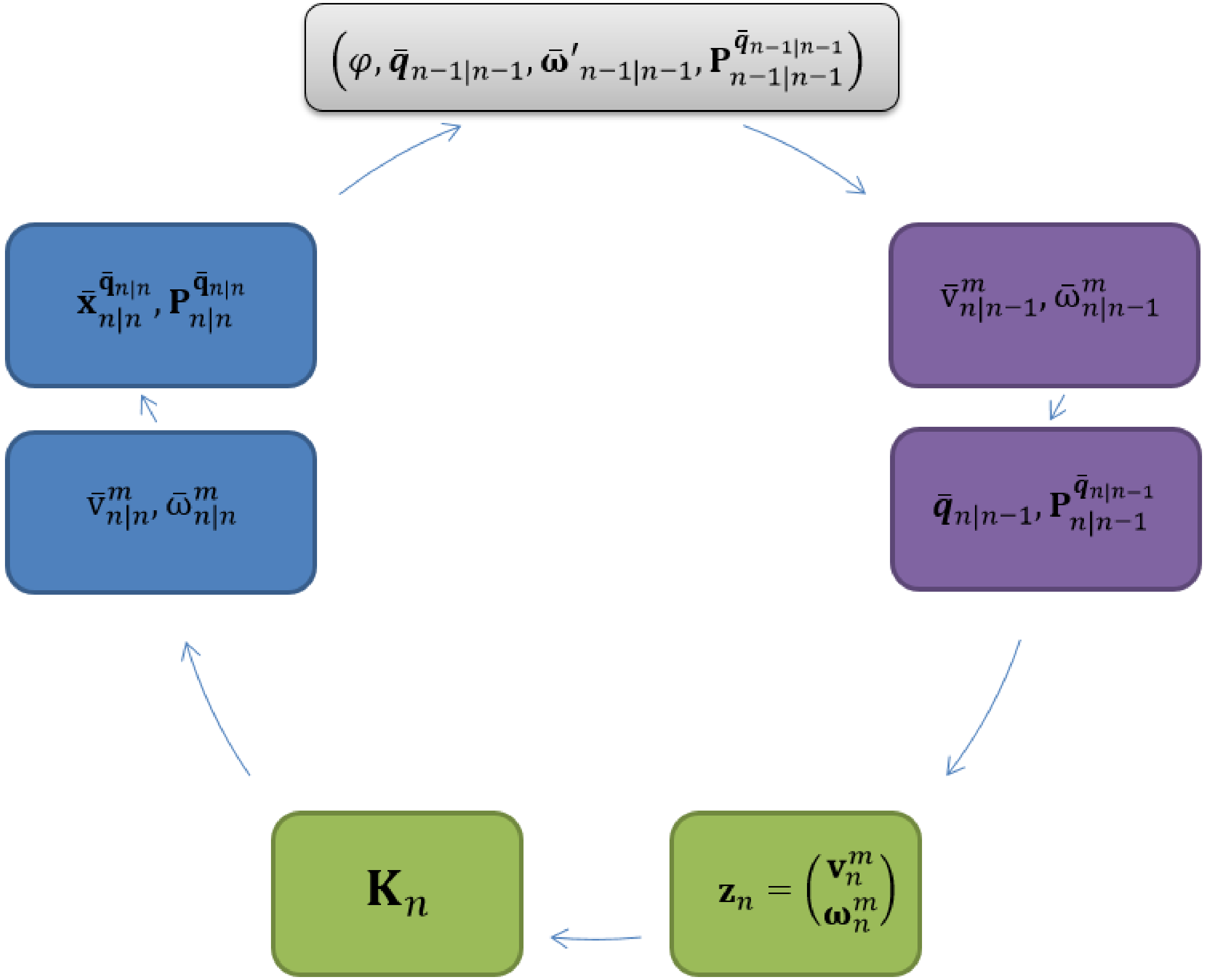
يقوم مرشح كالمان الموسع بعمل تحليل خطي للموديل عند كل نقطة من الزمن. الشكل الاتي يمثل مثال في حالة البعد الواحد. نوجد المماس عند النقطة $x = x_0$ . باستخدام خط المماس يمكننا اسقاط التغاير مع الحفاظ على الميزة الغوصية.



# مرشح كالمان الموسع
# Extended Kalman Filter

| | المعادلة | LKF | EKF |
|---|---|---|---|
| توقع | استنتاج متغيرات الحالة | $\hat{x}_{n+1,n} = F\hat{x}_{n,n}$ | $\hat{x}_{n+1,n} = f\left(\hat{x}_{n,n}\right)$ |
| | استنتاج التباين | $P_{n+1,n} = FP_{n,n}F^T + Q$ | $P_{n+1,n} = \frac{\partial f}{\partial x} P_{n,n} \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^T + Q$ |
| تحديث | مكسب كالمان | $K_n = P_{n,n-1}H^T\left(HP_{n,n-1}H^T + R_n\right)^{-1}$ | $K_n = P_{n,n-1}\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^T \left(\frac{\partial h}{\partial x} P_{n,n-1}\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^T + R_n\right)^{-1}$ |
| | تحديث معادلات الحالة | $\hat{x}_{n,n} = \hat{x}_{n,n-1} + K_n(z_n - H\hat{x}_{n,n-1})$ | $\hat{x}_{n,n} = \hat{x}_{n,n-1} + K_n\left(z_n - h\left(\hat{x}_{n,n-1}\right)\right)$ |
| | تحديث التباين | $P_{n,n} = (I - K_nH)P_{n,n-1}$ | $P_{n,n} = \left(I - K_n\frac{\partial h}{\partial x}\right)P_{n,n-1}\left(I - K_n\frac{\partial h}{\partial x}\right)^T + K_nR_nK_n^T$ |

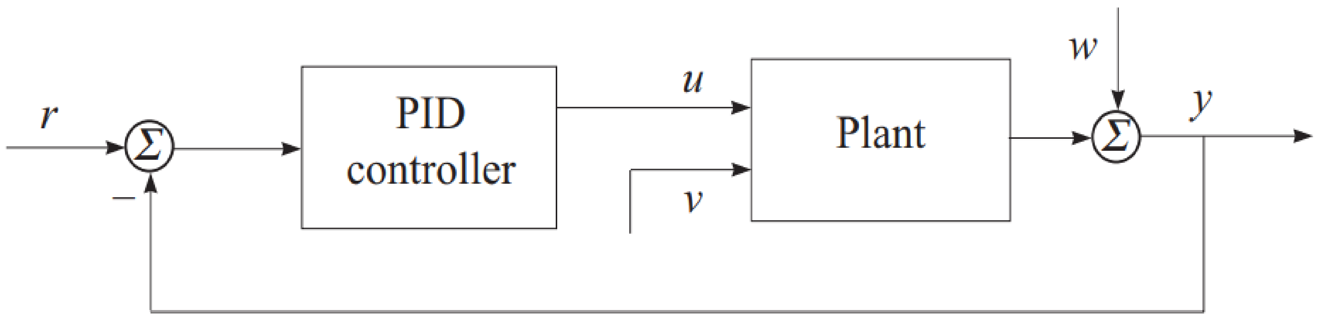
# مرشح كالمان الموسع باستخدام الرباعيات
# Manifold Extended Kalman Filter



# متحكم الPID

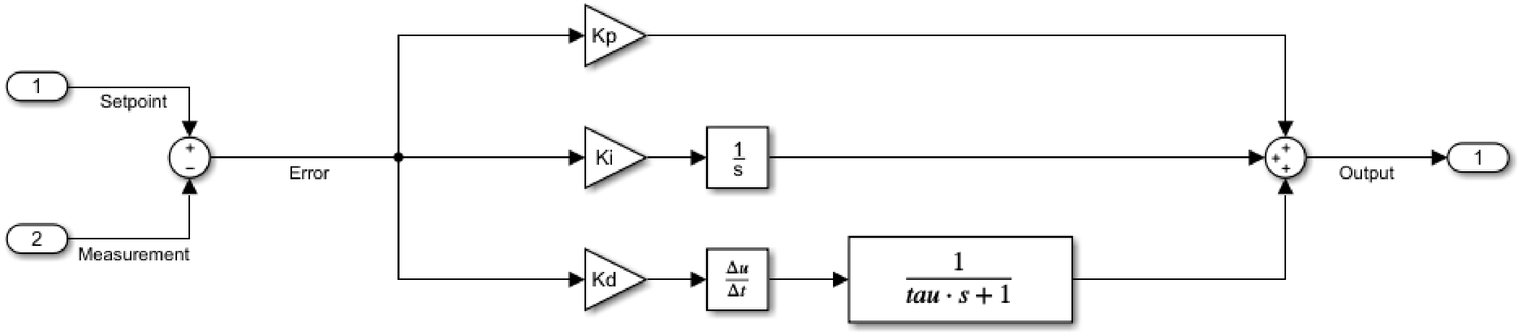
6

# متحكم الـPID



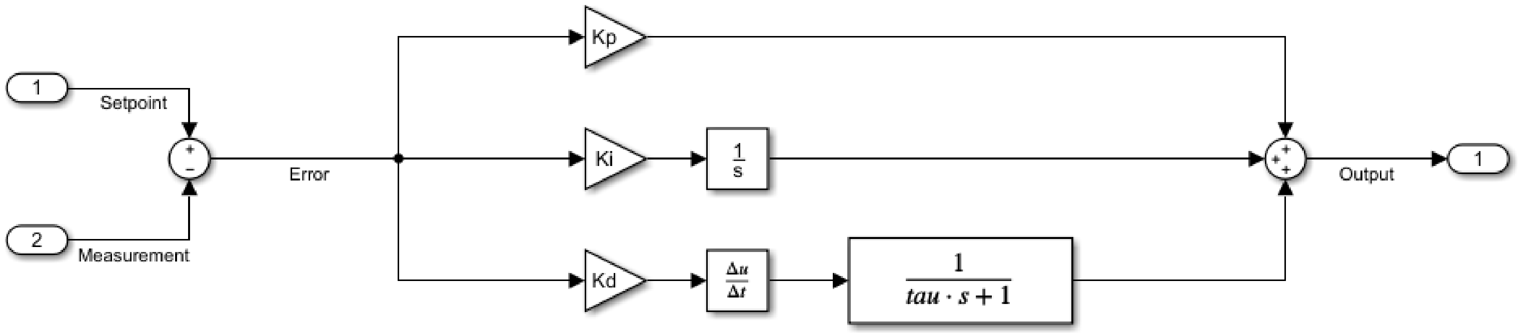

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)d\tau \ + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

# متحكم الـPID




$$G(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d \frac{s}{s\tau + 1}$$

# متحكم الـPID




باستخدام طريقة تحويل Trapezoidal:

$$s = \frac{2}{T}\frac{z-1}{z+1}$$

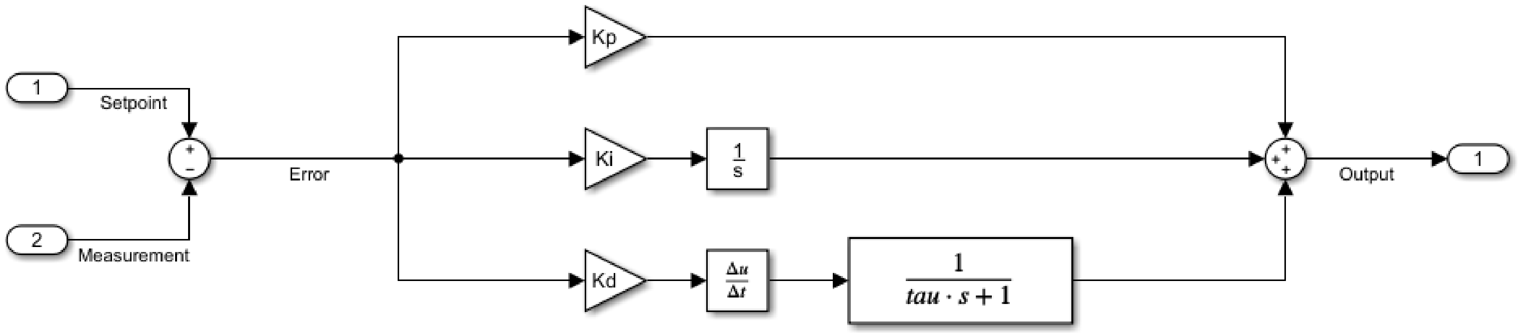
$$p[n] = K_p\, e[n]$$

$$i[n] = \frac{K_i T}{2}\left(e[n] + e[n-1]\right) + i[n-1]$$

$$d[n] = \frac{2K_d}{2\tau + T}\left(e[n] - e[n-1]\right) + \frac{2\tau - T}{2\tau + T}\, d[n-1]$$

$$u[n] = p[n] + i[n] + d[n]$$

# متحكم الـPID

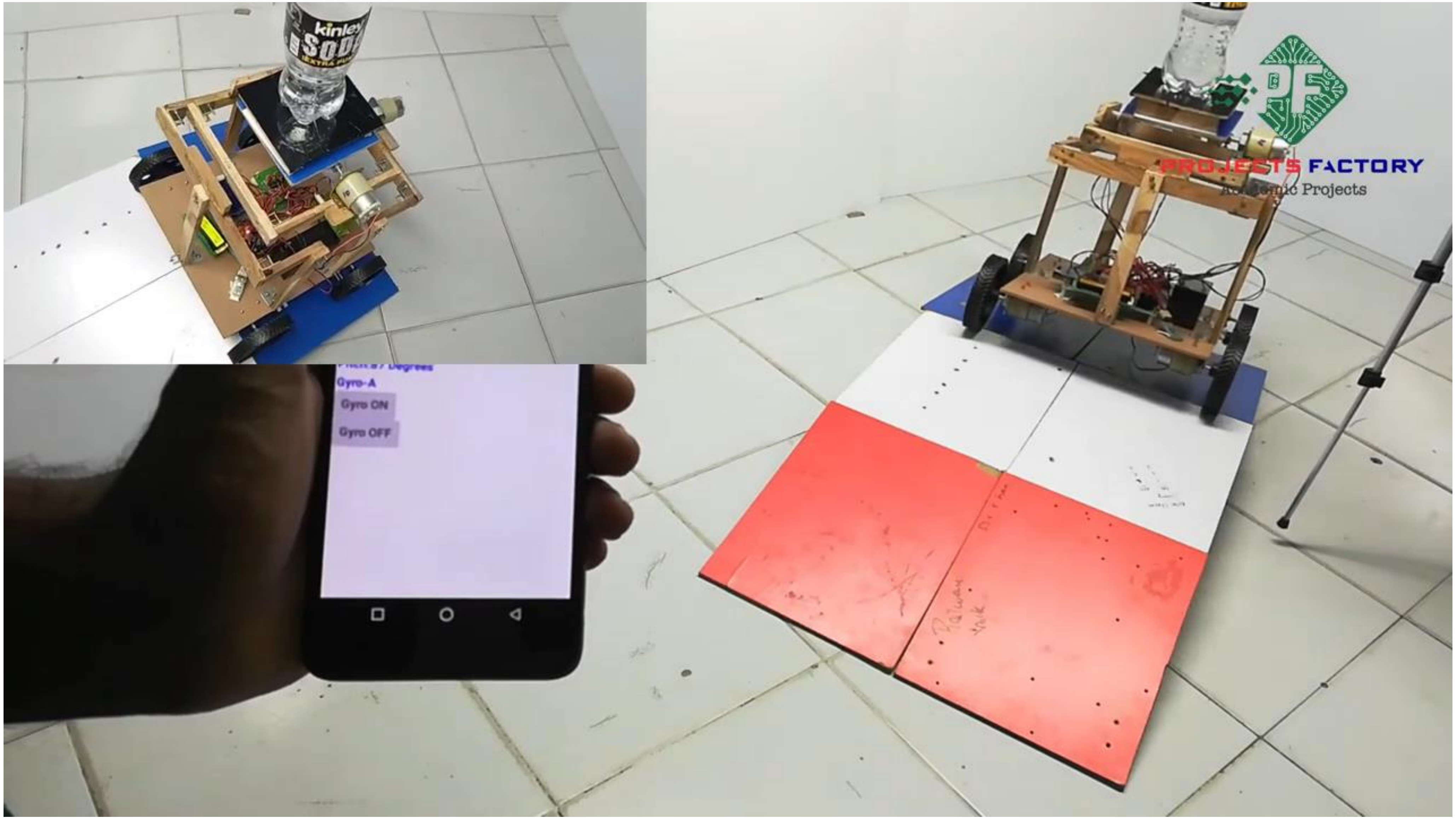



نقاط يجب اخذها بعين الاعتبار عمليا:

- الحد الاشتقاقي يقوم بتوليد نبضة عند تغيير القيمة المرجعية
- الحد الاشتقاقي يقوم بتضخيم الضجيج عالي التردد
- الحد التكاملي يمكن ان يشبع الخرج
- خرج المتحكم غير المحدود يمكن ان يتجاوز الإمكانيات الفيزيائية لاستجابة النظام
- يفضل استخدام زمن تقطيع T بحيث يكون تردد المتحكم اكبر بعشر اضعاف من تردد النظام المتحكم به.

# التطبيقات الحياتية للمشروع

7


kinley
Gyro-A
Gyro ON
Gyro OFF
PROJECTS FACTORY

# شكراً لكم

تم بعونه تعالى
وفضله
2023/2024