



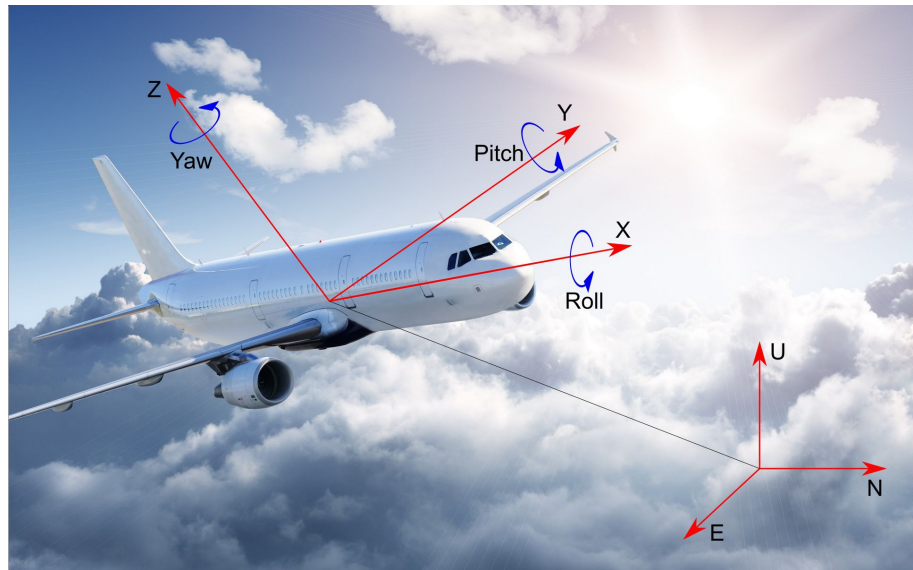
**Він знає, як
працюють інерційні
датчики. А ти?**

Навіщо нам це треба?

Визначення орієнтації пристрою в просторі:

- Локалізація дрону
- Орієнтація літаків
- Написання мобільних застосунків, що керуються рухами телефону
- Шоломи віртуальної реальності
- Визначення положення частин тіла
- Доповнена реальність

Визначення орієнтації тіла в просторі



Щоб визначити орієнтацію тіла в просторі потрібні два чинники:

- Frame of reference
- Rotation representation

Кути roll, pitch, yaw визначають поворот, який потрібно здійснити осям XYZ щоб перейти у вісі ENU.

Інтегрування прискорення відновити швидкість і отримати інформацію про відносне розташування.

Способи подання повороту

$$\vec{r} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \vec{r}' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$$

$$\vec{r} = \hat{A} \vec{r}'$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$$

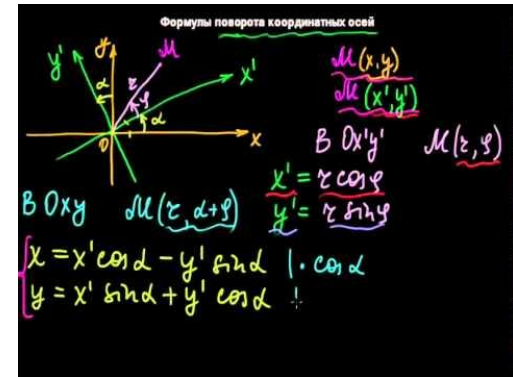
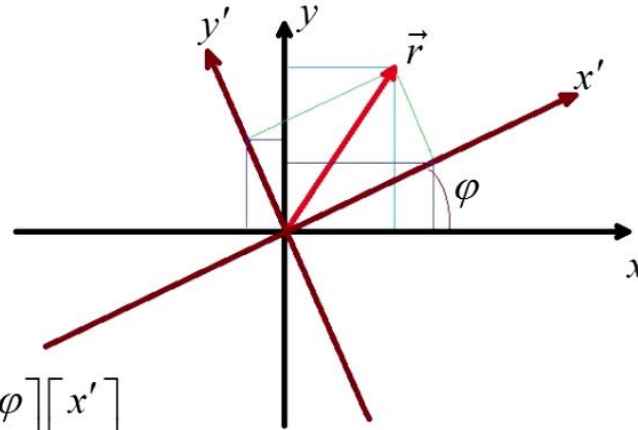
$$\begin{cases} x = a_{11}x' + a_{12}y' \\ y = a_{21}x' + a_{22}y' \end{cases}$$

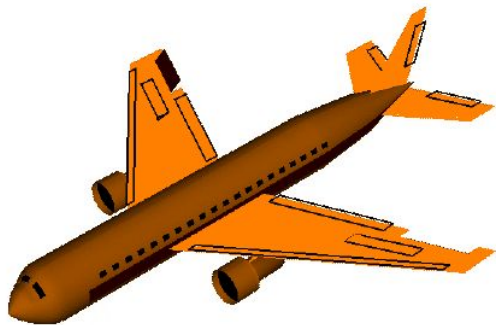
$$\begin{cases} a_{11} = \cos \varphi \\ a_{12} = -\sin \varphi \\ a_{21} = \sin \varphi \\ a_{22} = \cos \varphi \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$$

$$\det \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} = \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi = 1$$

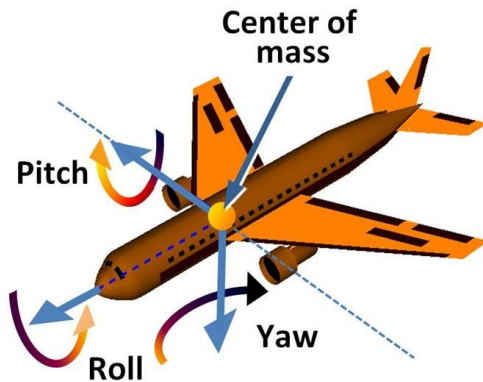
$$\begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$





roll

$$roll = atan\left(\frac{a_Y}{a_Z}\right),$$



pitch

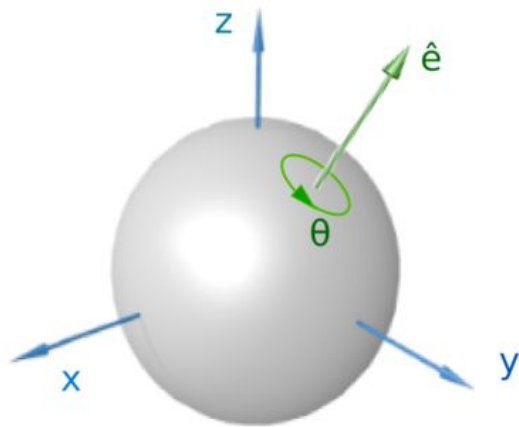
$$pitch = atan\left(\frac{-a_X}{\sqrt{a_Y^2 + a_Z^2}}\right),$$



yaw

$$yaw = atan2\left(\frac{m_E}{m_N}\right),$$

Кватерніони



Для розробника - це перш за все інструмент, що описує дію - поворот навколо осі на заданий кут:

$$[w, x, y, z] = [\cos(\alpha/2), \sin(\alpha/2) * v_x, \sin(\alpha/2) * v_y, \sin(\alpha/2) * v_z]$$

де v - вісь, виражена напрямним вектором;

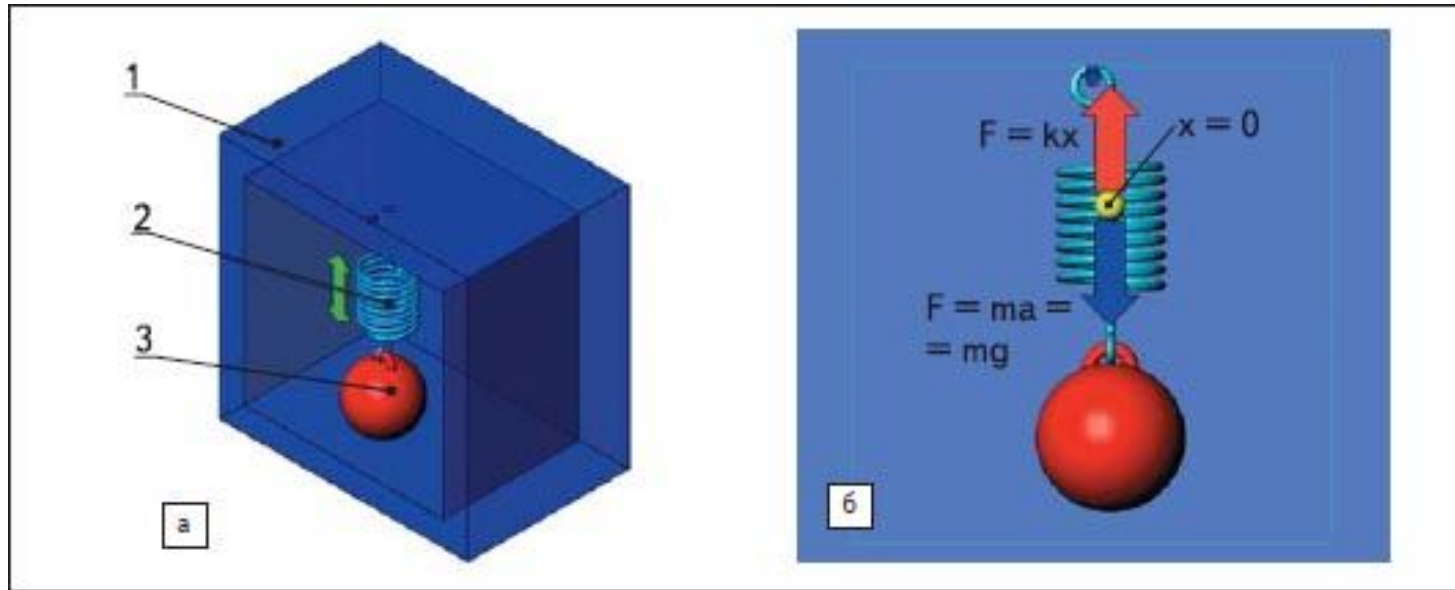
w - компонента, що описує поворот (косинус половини кута).

Наприклад, кватерніон повороту вздовж осі X на 90 градусів має наступні значення своїх компонент: $w = 0,7071$; $x = 0,7071$; $y = 0$; $z = 0$

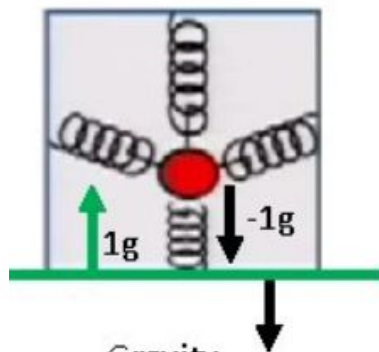
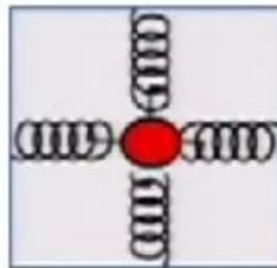
Сенсори. Принципи роботи.

Акселерометр - вимірює прискорення.

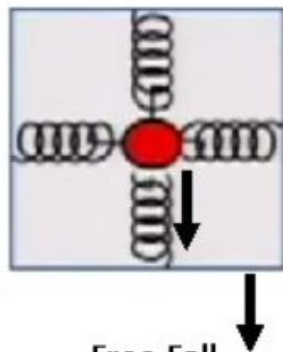
За допомогою нього можна визначити кут повороту тіла, що не переміщується у просторі.



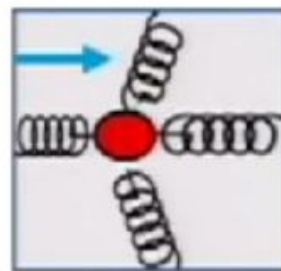
Mass on spring



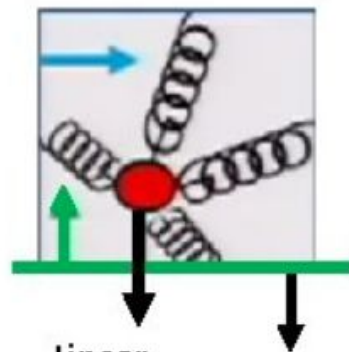
Gravity
 $1g = 9.8m/s^2$



Free Fall



Linear Acceleration

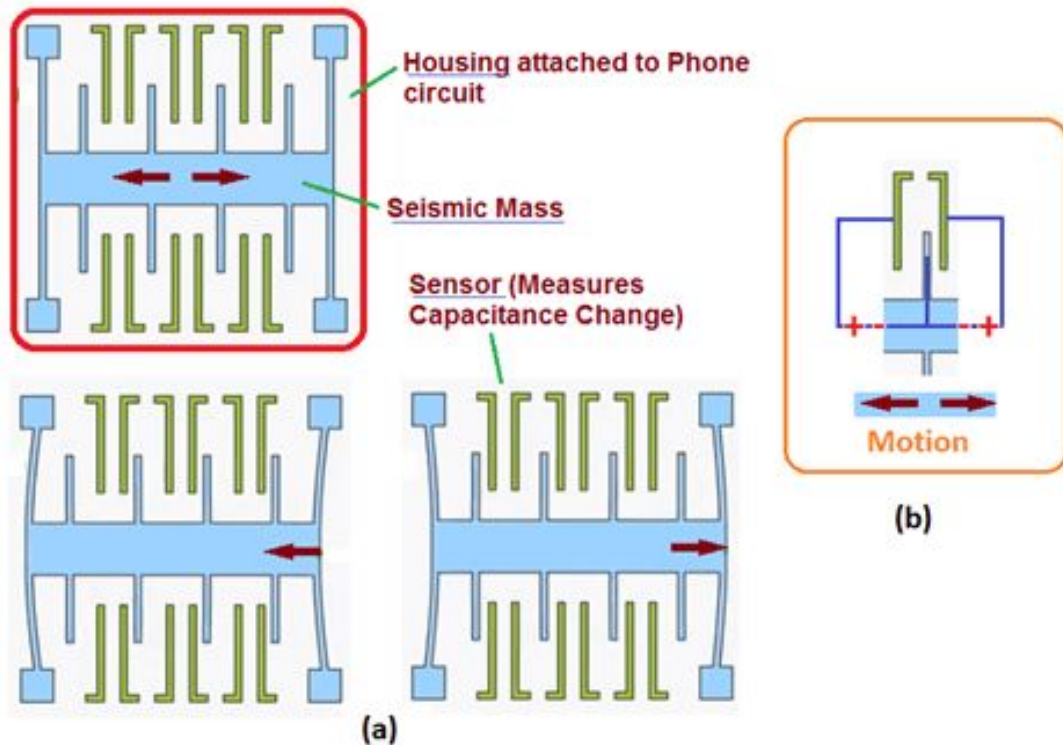


Linear
Acceleration
plus gravity



У наших смартфонах всередині є пружинні акселерометри?

- В електронному акселерометрі груз замінений на інертну масу, всередині маленького чіпа.



—

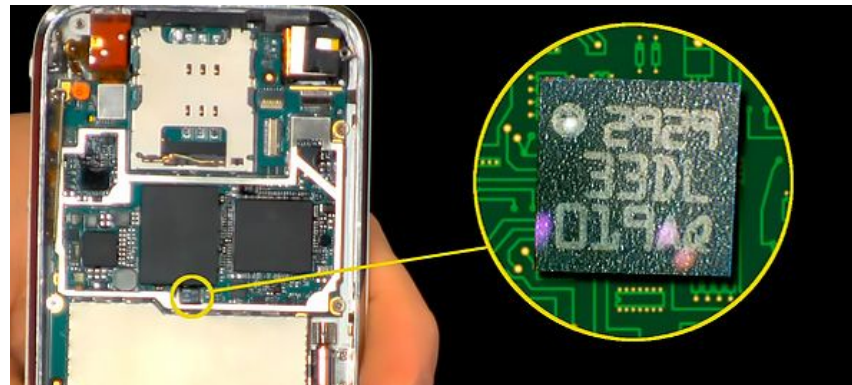
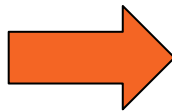
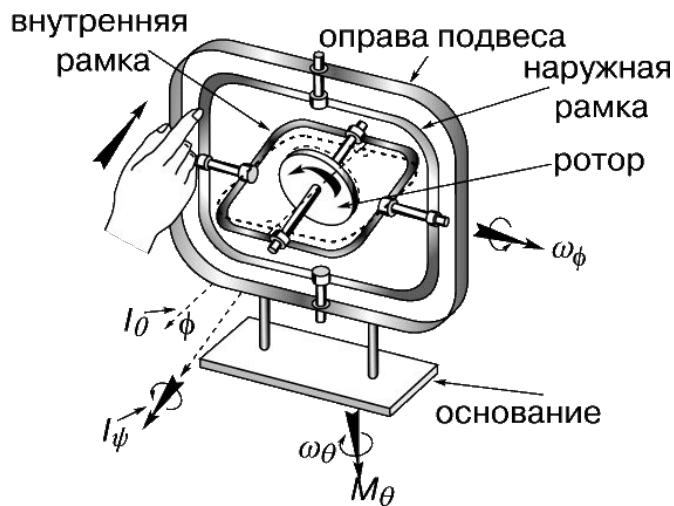
Акселерометр має межі вимірювання $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ і $\pm 16g$

- На будь-яке тіло діє сила тяжіння. У стані спокою сила тяжіння складає $1g = 9,81 \text{ м/с}^2$. При вільному падінні вона дорівнює нулю.

Чим більше прискорення, тим більші покази акселерометра. Якщо система не буде прискорюватися занадто сильно, немає сенсу ставити дуже широкі межі.

Гіроскоп - вимірює кутові швидкості по 3 осям.

Має різні **межі вимірювання**: 250, 500, 1000, 2000 градусів за секунду.
Якщо система є повільною, то не варто виставляти максимальні межі.
Правильно обрані межі впливають на точність вимірів.

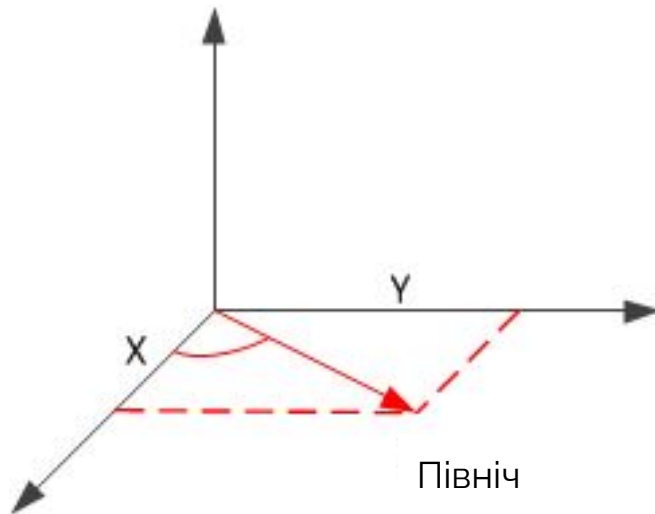


Якщо проінтегрувати кутову швидкість, отримаємо кут повороту.

Магнітометр

- вимірює вектор магнітної індукції.

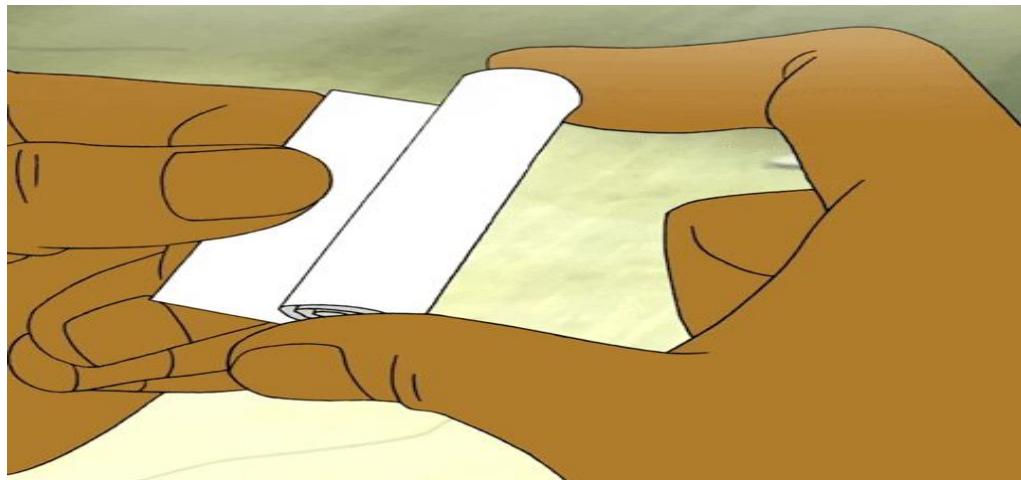
При повороті магнітометра у магнітному полі Землі показання на його трьох осях змінюються. Використовуючи ці дані, можна обчислити і з'ясувати напрямок магнітометра відносно напрямку на магнітний полюс. Зчитавши показання з осей X і Y, можна обчислити кут, який і буде кутом відхилення від напрямку на північ.



Датчик нерухомий, але

Покази гіроскопа $\neq 0$ рад/с

Покази акселерометра $\neq 1g$ ($9,81$ м/с²)



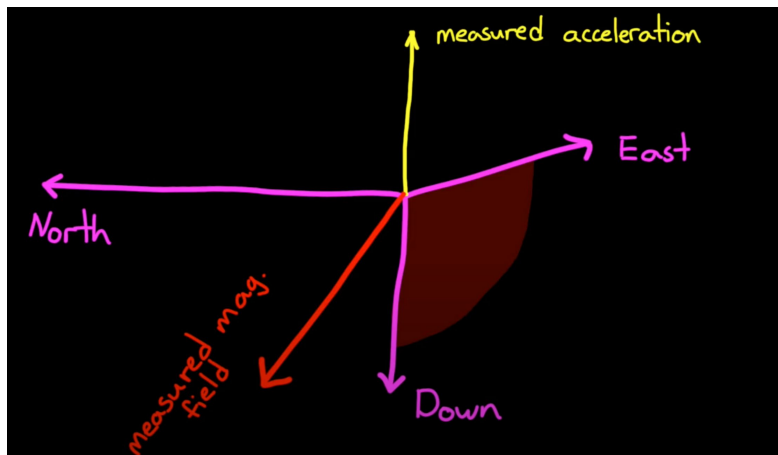
BBC

Calibration

This is important to me!

Комбінація сенсорів

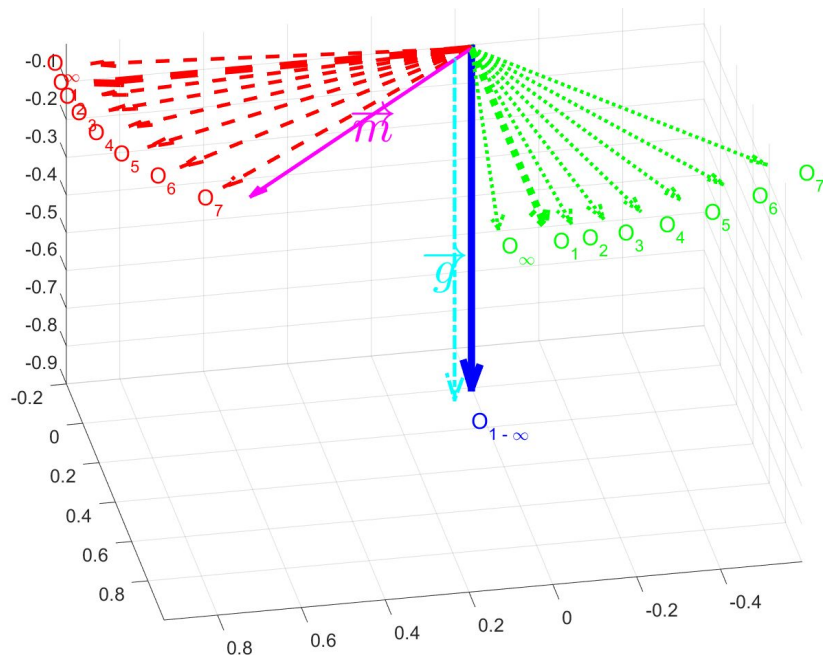
Магнетометер + Акселерометр



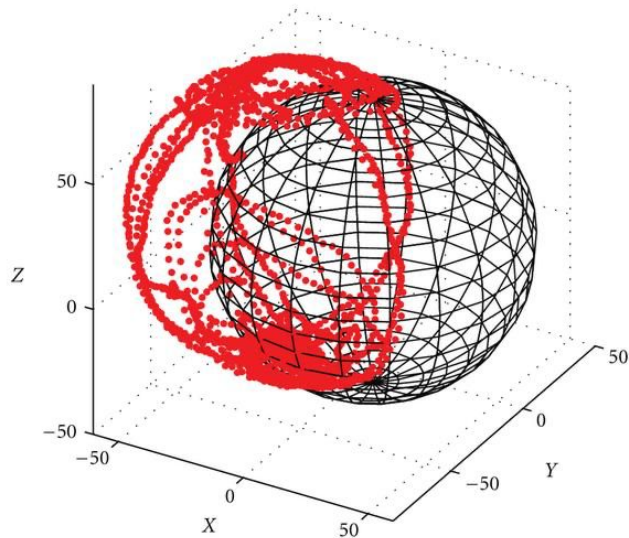
- Дозволяють утворити систему координат (frame of reference)
- East - векторний добуток Down та показників магнітного поля (magnetic field)
- $\text{East} * \text{Down} = \text{North}$

Чому не використовувати поординці?

- Акселерометр:
 - невизначеність щодо кута повороту навколо осі, паралельної напрямку прискорення вільного падіння.
 - Дуже складно відрізнити силу тяжіння від фізичного прискорення датчика.
 - Навіть при повороті датчика, будуть показуватись зміни в прискоренні, якщо акселерометер не в центрі об'єкту, що повертається, а отже й для статично положення використання не завжди пригодно



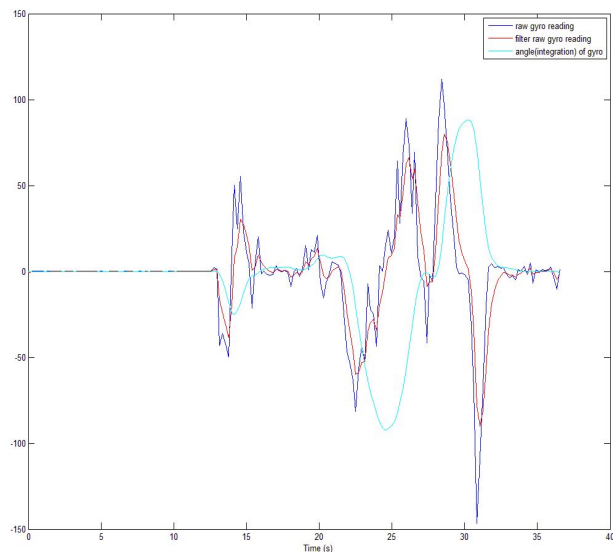
Похибки магнетометра



• AMR measurements (μTesla)
◻ Earth's magnetic field reference

- Hard iron sources - постійні відхилення (спричинені чимось, що генерує своє власне магнітне поле)
- Soft iron sources - зовнішні чинники, що спотворюють магнітне поле.
- Corrected $x = (x - b) * A$, де b - hard iron bias (3, 1) vector; A - soft iron distortion ($3 * 3$) matrix

Використання лише гіроскопа



- Dead reckoning - метод визначення поточного місцезнаходження рухомого об'єкта по вихідним початковим координатам.
- Покази гіроскопа мають “білий шум”.
- Експоненційне зростання похибки внаслідок інтегрування. Процес інтегрування відіграє роль low-pass filter.
- Gyroscope drift
- Потрібно знати початкову орієнтацію, адже гіроскоп вимірює кутову швидкість відносно себе, а не якогось стороннього об'єкту

Inertial Measurement Unit

- Комбінація плюсів двох підходів
 - Похибки уникаються фільтрами
 - Ініціалізувати положення (initialise attitude). Може бути здійснено вручну або визначене з початкових замірів акселерометра та магнетометра
 - Використання замірів магнітного поля та гравітації щоб скорегувати дрефт гіроскопа
-

Фільтри (Orientation filters)

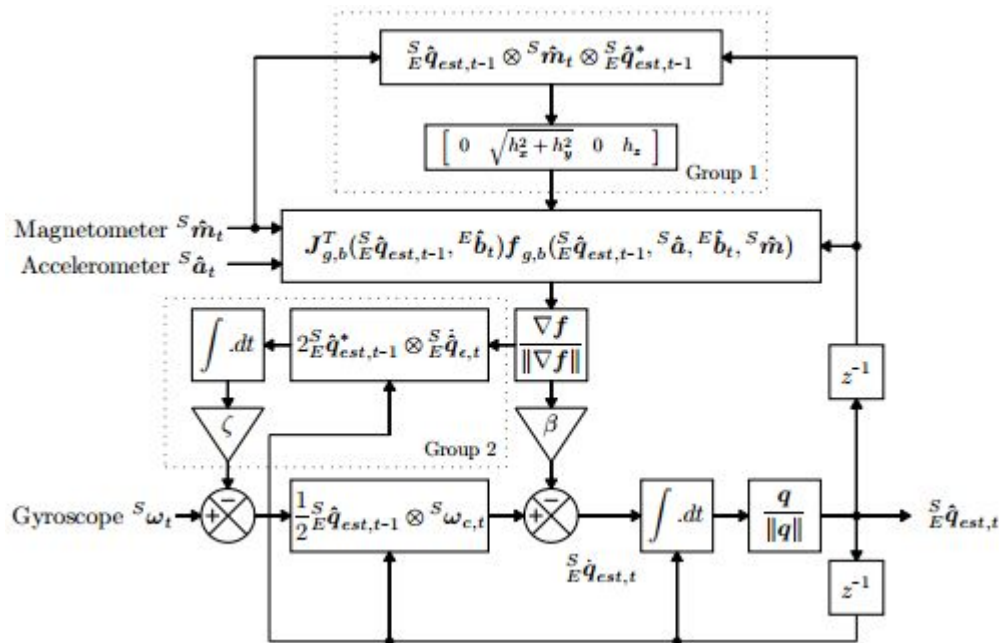
Euler angles (°)	EKF	Madgwick	Mahony	
Roll (static)	0.02	0.03	0.02	• Low-pass filter
Pitch (static)	0.07	0.05	0.05	• Kalman filter
Yaw (static)	0.31	1.92	1.85	• Madgwick filter
Roll (dynamic)	6.64	6.51	6.69	• Mahony filter
Pitch (dynamic)	2.75	3.34	2.85	
Yaw (dynamic)	6.09	7.07	6.92	

RMSE: root mean square error; EKF: Extended Kalman Filter.

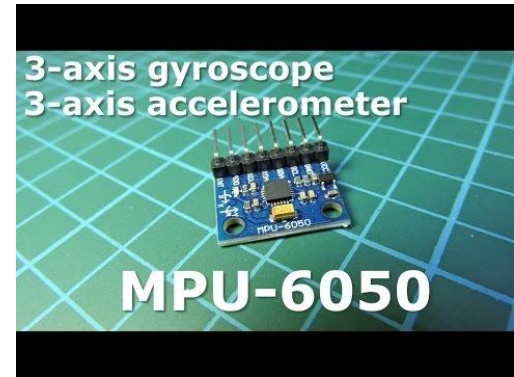
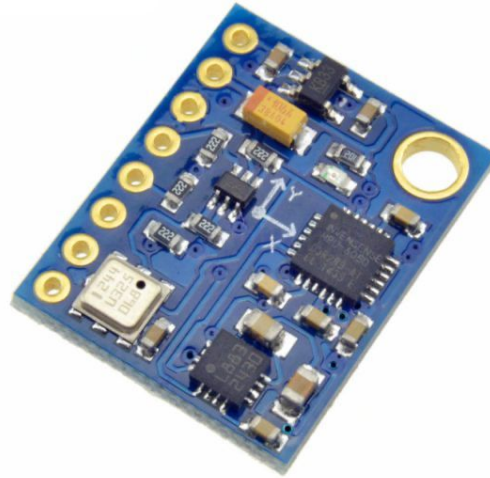
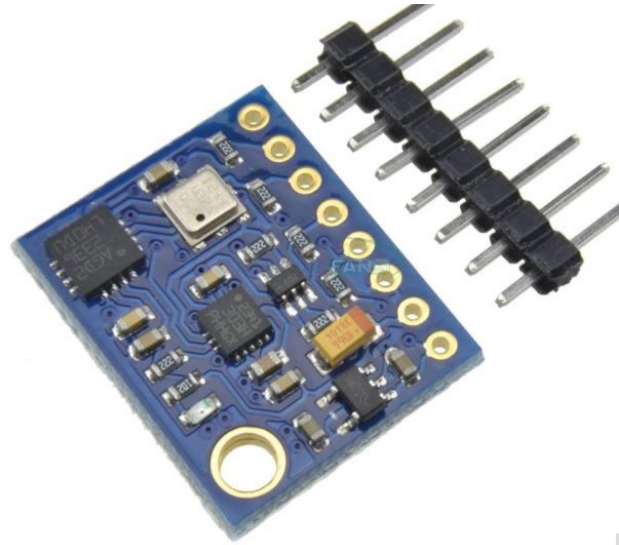
**Коли хтось каже,
що можна
обійтися без
математики**



Madgwick filter



- аналітичні обчислення і оптимізація методом градієнтного спуску;
- компенсація магнітних спотворень і компенсація зсуву нуля гіроскопа в режимі реального часу.
- По суті фільтр Махони втілює хорошо відомий тезис: знання двох неколінеарних векторів в двох різних системах координат дозволяє однозначно відновити взаємну орієнтацію цих систем.



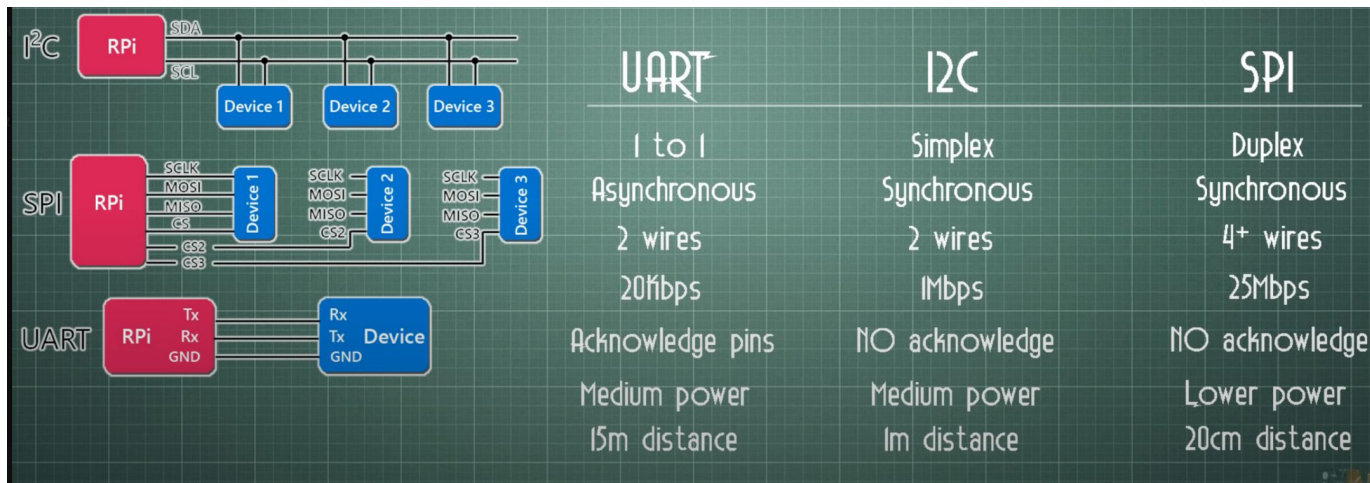
Sensors: gy-89, gy-87 (Зручніший цей, адже до нього підходять бібліотеки від Adafruit)

Коротко повторимо про I2C

I2C послідовна шина даних для зв'язку інтегральних схем - ???

Способи передачі даних:

- Parallel
- Serial
 - Synchronous
 - I2C
 - SPI
 - Asynchronous
 - UART



Code time

Візуалізація

- 2D sensors' values plotting
 - Python Serial module + matplotlib/...
 - Arduino Serial Plotter
 - 3D visualisation
 - Processing (з недавна також підтримує написання коду на python) - 3D візуалізація, що дуже легко робиться, адже в processing є готові графічні примітиви для цього
 - Python's PyGame
 - MatLab
-

Якщо цікаво дізнатись щось більше

- <https://www.youtube.com/watch?v=C7JQ7Rpwn2k> - Чудова лекцію з використання IMU (Google Tech Talk)
 - <https://habr.com/ru/post/438060/> - Пояснення принципів орієнтації в просторі простою мовою
 - <https://habr.com/ru/company/realtrac/blog/302650/> - Перечитати про мотивацію поєднання датчиків
 - <https://habr.com/ru/post/255005/> - Rotation via Quaternion
 - <https://habr.com/ru/post/255661/> - Madgwick filter
-