

MPU6886 (データシート和訳)

1.概要

The MPU-6886 is a 6-axis MotionTracking device that combines a 3-axis gyroscope and a 3-axis accelerometer in a small 3 mm x 3 mm x 0.75 mm 24-pin LGA package.

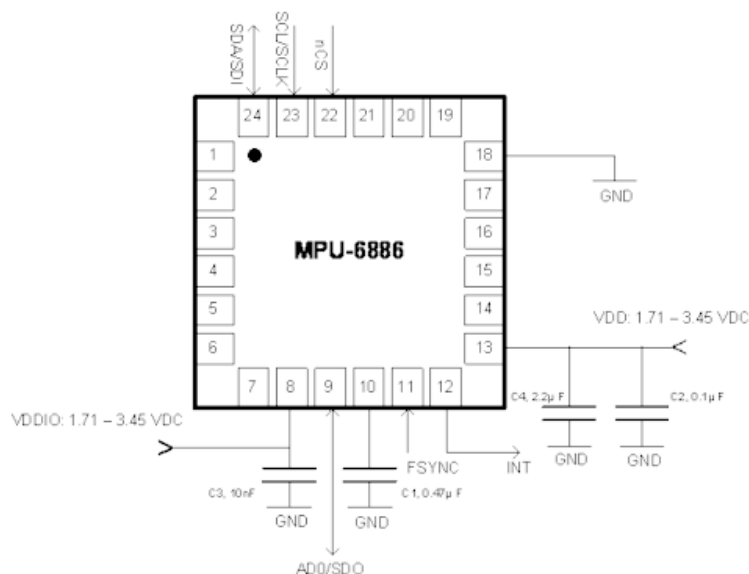
- High performance specs:
 - Gyroscope sensitivity error: $\pm 1\%$
 - Gyroscope noise: ± 4 mdps/ $\sqrt{\text{Hz}}$
 - Accelerometer noise: $100 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Includes 1 kB FIFO to reduce traffic on the serial bus interface, and reduce power consumption by allowing the system processor to burst read sensor data and then go into low-power mode
- EIS FSYNC support

MPU-6886 includes on-chip 16-bit ADC's, programmable digital filters, an embedded temperature sensor, and programmable interrupts. The device features an operating voltage range down to 1.71V. Communication ports include I2C and high speed SPI at 10 MHz.

MPU-6886は、3軸ジャイロスコープと3軸加速度計を小さな3 mm x 3 mm x 0.75 mmの24ピンLGAパッケージに統合した6軸モーショントラッキングデバイスです。

- ハイパフォーマンス仕様:
 - ジャイロスコープのエラー感度: $\pm 1\%$
 - ジャイロスコープのノイズ: ± 4 mdps / $\sqrt{\text{Hz}}$
 - 加速度センサのノイズ: $100 \mu\text{g} / \sqrt{\text{Hz}}$
- 1 kB FIFOを搭載して、シリアルバスインターフェイス上のトラフィックを削減し、システムプロセッサがセンサデータをバーストしてから低電力モードに移行できるようにすることで、消費電力を削減します。
- EIS FSYNCサポート

MPU-6886には、オンチップ16ビットADC、プログラム可能なデジタルフィルタ、組み込み温度センサ、およびプログラム可能な割り込みが含まれています。このデバイスの動作電圧範囲は最低1.71Vです。通信ポートには、10 MHzのI2Cおよび高速SPIが含まれます。



2. センサ

2-1.16ビットADCSと信号処理を備えた3軸MEMSジャイロスコープ

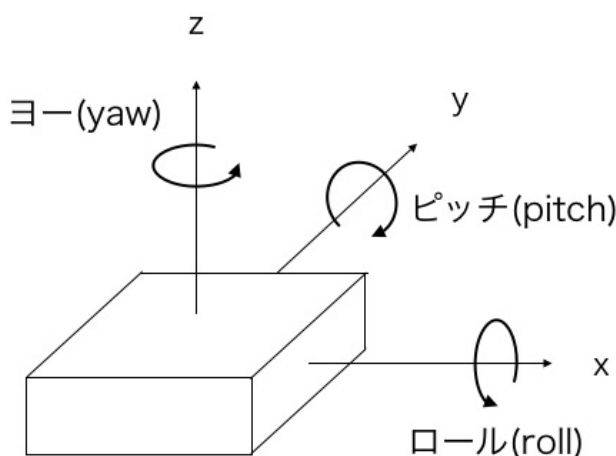
The MPU-6886 consists of three independent vibratory MEMS rate gyroscopes, which detect rotation about the X-, Y-, and Z- Axes. When the gyros are rotated about any of the sense axes, the Coriolis Effect causes a vibration that is detected by a capacitive pickoff. The resulting signal is amplified, demodulated, and filtered to produce a voltage that is proportional to the angular rate. This voltage is digitized using individual on-chip 16-bit Analog-to-Digital Converters (ADCs) to sample each axis. The full-scale range of the gyro sensors may be digitally programmed to ± 250 , ± 500 , ± 1000 , or ± 2000 degrees per second (dps). The ADC sample rate is programmable from 8,000 samples per second, down to 3.9 samples per second, and user-selectable low-pass filters enable a wide range of cut-off frequencies.

MPU6886は3つの独立した振動型MEMSレートジャイロスコープで構成されており、X軸、Y軸、Z軸の回転を検出します。ジャイロのいずれかの軸が回転すると、コリオリの力により振動が発生します。この振動は、静電容量式ピックオフで検出されます。そして振動として得られる信号は増幅、復調、フィルタリングされ、角速度に比例した電圧を生成します。この電圧は、各軸をサンプリングするために個々のオンチップ16ビットADC (Analog-to-Digital Converter) を用いて、デジタル化されます。ジャイロセンサの検出範囲は、 ± 250 、 ± 500 、 ± 1000 、 ± 2000 度/秒 (dps) にプログラムで調整できます。ADC サンプル・レートは毎秒 8,000 サンプルから毎秒 3.9 サンプルまでプログラム可能で、ユーザーが選択可能なローパス・フィルタは幅広いカットオフ周波数を可能にします。

2-2.16ビットADCSとシグナルコンディショニングを備えた3軸MEMS加速度センサ

The MPU-6886's 3-Axis accelerometer uses separate proof masses for each axis. Acceleration along a particular axis induces displacement on the corresponding proof mass, and capacitive sensors detect the displacement differentially. The MPU-6886's architecture reduces the accelerometers' susceptibility to fabrication variations as well as to thermal drift. When the device is placed on a flat surface, it will measure 0g on the X- and Y-axes and +1g on the Z-axis. The accelerometers' scale factor is calibrated at the factory and is nominally independent of supply voltage. Each sensor has a dedicated sigma-delta ADC for providing digital outputs. The full scale range of the digital output can be adjusted to $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, or $\pm 16g$.

MPU-6886の3軸加速度センサは、各軸に別々の加速度計を使用しています。特定の軸に沿って加速すると、対応する加速度計に変位が生じます。そして、変位を静電容量式センサが検出します。MPU-6886のアーキテクチャは、製造上のばらつきや熱ドリフトに対する加速度の感度への影響を低減させます。デバイスが平らな表面に置かれた場合、X軸とY軸で0g、Z軸で+1gの測定を行います。加速度センサのスケールファクタは工場で校正されており、電源電圧に依存しません。各センサはデジタル出力を提供するための専用のシグマデルタADCを持っています。デジタル出力の検出範囲は $\pm 2g$ 、 $\pm 4g$ 、 $\pm 8g$ 、 $\pm 16g$ にプログラムで調整できます。



3.用語解説

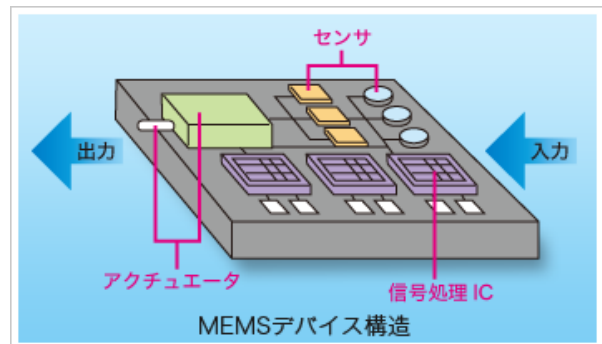
● MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)

- MEMS (メムス)とは「微小な電気機械システム」という意味
- 半導体のシリコン基板・ガラス基板・有機材料などに、機械要素部品のセンサ・アクチュエータ・電子回路などをひとまとめにしたミクロンレベル構造を持つデバイス
- 大きさは、一般的には全長がmm単位で、その部品はμm単位
- 特徴

- 構造が立体的であり、可動部を有する
- 資源や消費エネルギーの節約による低コスト化
- 小型化、省電力化、高機能化、低コスト化が必要な機器には欠かせないデバイス

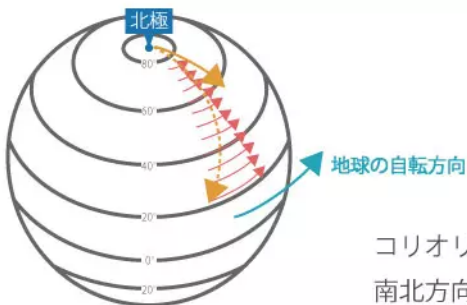
- デバイス

- プリンタヘッド
- デジタルミラーデバイス (DMD)
- 圧力センサ
- HDDのヘッド
- 加速度センサ
- ジャイロ스코プ etc.



● コリオリの力

- 回転座標系上で移動した際に移動方向と垂直な方向に移動速度に比例した大きさで受ける慣性力（見かけ上の力）の一種



コリオリの力は
南北方向に動く物体に働く。

$$\vec{F}_{cor} = -2m \vec{\Omega}_{ext} \times \vec{v} \quad (m = \text{mass})$$

F_{cor} = コリオリの力

m = 質量

Ω_{ext} = 質量に加わっている角速度

v = 質量が移動している速度

● ジャイロセンサ

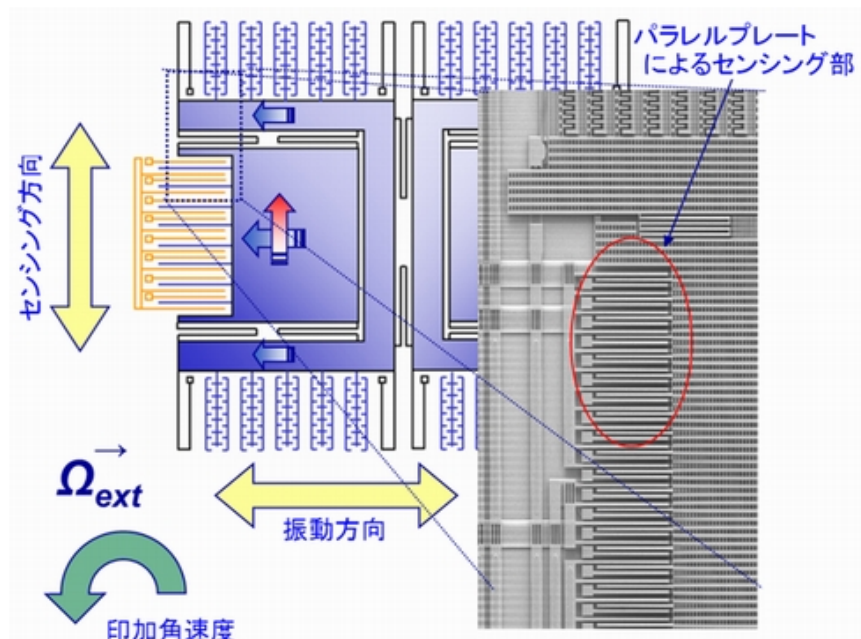
- 回転角速度の測定を実現する慣性センサの一種
- 角速度
 - ある物体の角度が単位時間当たりの変化、物体が回転している速度を表す物理量
- スマホやゲーム機器（手持ち機器のUIとして利用）、デジタルカメラ（手ブレ補正用のブレ検知）、カーナビ（車が曲がったことを検出）などで利用
- 角速度出力はdps (degree per second、°/秒)で表す
- 1秒間に1回転している物体の場合、角速度は360dpsとなる

● 振動型ジャイロスコープ

- 特徴
 - 振動式のジャイロセンサは全てコリオリの力(転向力)を利用して回転を検知する
 - 振動式ジャイロセンサの名前は、MEMS素子を振動させることでコリオリの力の式の v を発生させることから由来
 - コリオリ効果により発生する力は『 $F=m \cdot a$ 』という式からも見て取れるように加速度と比例しており、その検知方法は加速度センサとよく似ている
- 角速度検出原理
 1. MEMS素子を振動させる
 2. MEMS素子の振動している素子に外部から回転(Ω)が加える
 3. その素子にコリオリの力が加わる
 4. そのコリオリの力を検知することで、物体に加わった角速度を逆算
- 種類
 - シリコンを使う静電容量方式
 - 水晶や他の圧電材料を使うピエゾ方式

● 静電容量式ジャイロスコープ

- 櫛歯構造の電極を利用してコリオリの力(加速度)により発生した変位を静電容量の変化として捉えることでその大きさを検出
- 下図にヨー軸の回転(水平面の回転)を検知するジャイロセンサの検出素子部を示す
- 角速度検出原理
 1. 図で示している素子の上下に配置されている青い櫛歯状の電極に交互に電圧を印加することで静電力を発生させる(静電力の向きを入れ替える)
 2. 素子の振動を図の左右方向に発生する
 3. この振動している素子に対して回転運動が加わると、コリオリの力が発生します。
 4. その結果として図の上下方向にコリオリの力が発生する
 5. 発生したコリオリの力を図で示している素子の左右に配置されているオレンジ色の櫛歯電極でのコリオリの力による静電容量の変位によって検知します
 6. 静電容量の変位に一定の電圧を加えて、電流としての信号を出力する
 7. 得られた信号を同じパッケージに搭載された後段の信号処理用ASICで増幅、フィルタリング、同期を取り、角速度として調整した後に出力する



● 加速度センサ

- 加速度の測定を目的とした慣性センサ
- 振動センサと異なり、直流 (DC) の加速度が検出可能であるため、重力を検出することも可能
- 加速度を測定し、適切な信号処理を行うことによって、傾きや動き、振動や衝撃といったさまざまな情報が得られる
- 加速度センサの検出原理

- 古典力学のニュートンの法則によると、物体に働く力は以下の式で表すことができます

$$F = m \times a \quad (1)$$

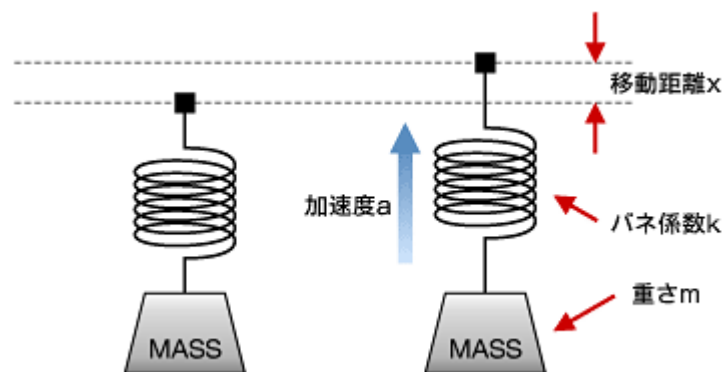
- ここで、Fは重さmの物質に働く力で、aは加速度です。バネと重りで構成されるシステムを考えた場合に、Fは以下の式で表せます。

$$F = k \times x \quad (2)$$

- kはバネ係数でxはバネの伸縮距離です。式(1)と式(2)の連立方程式を解くと加速度aは以下の式のようにになります。

$$a = \frac{k \times x}{m} \quad (3)$$

- 式(3)より、加速度は既知のバネ係数と重さを持った重りの移動距離を計測することで計算が可能であることが分かります。図1は加速度の検出原理を図示したものです。

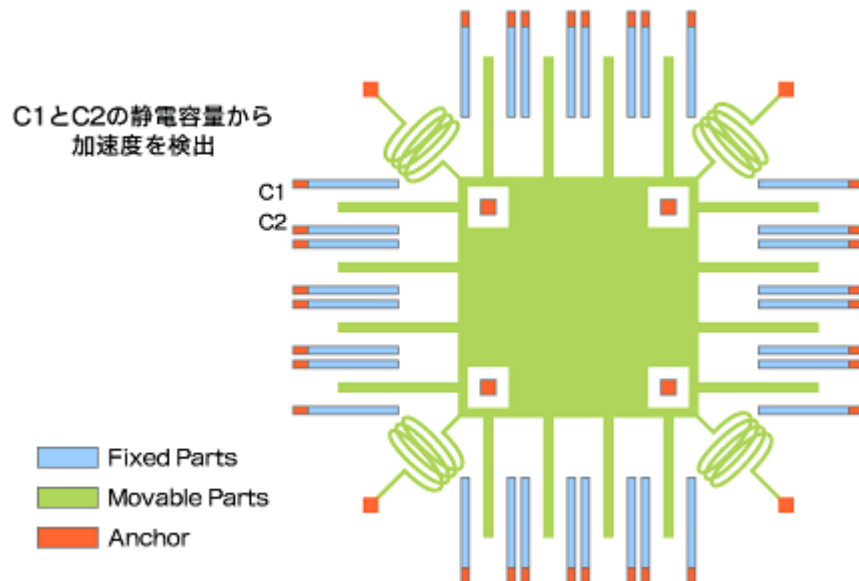


○ 種類

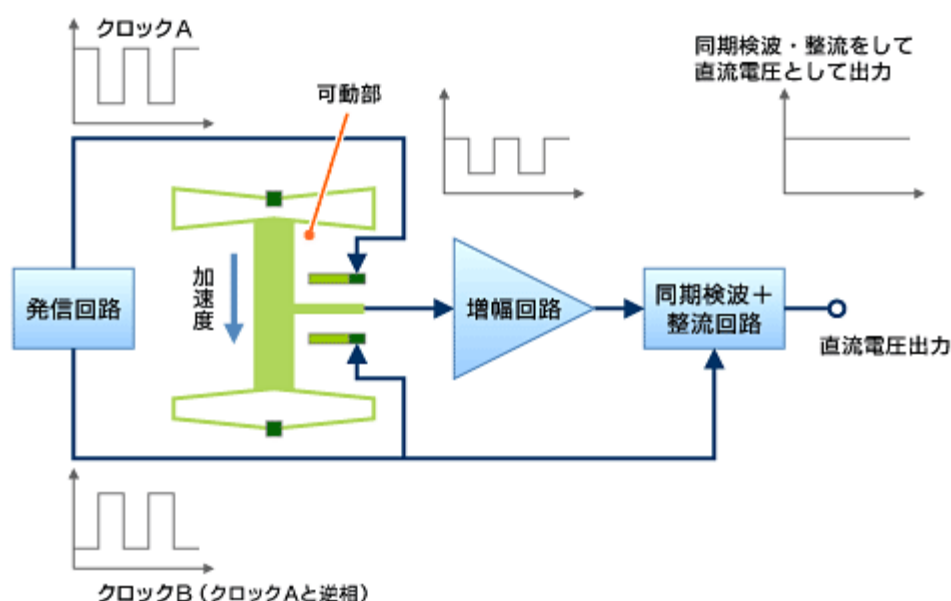
	静電容量検出方式	ピエゾ抵抗方式	熱検知方式
原理	センサ素子可動部と固定部間の容量変化を検出	センサ素子可動部と固定部をつなぐバネ部分に配置したピエゾ抵抗素子により、加速度によってバネ部分に発生した歪みを検出	ヒーターにより筐体内に熱気流を発生させ、加速度による対流の変化を熱抵抗等で検出
特徴	センサ素子部はSiやガラスなどの安定した物質で構成	比較的構造が単純で、素子からの出力が大きい	可動部を持たないので、衝撃に強い。パッケージ容積と特性がトレードオフの関係にある
精度	安定した物質で構成されるので、特に温特に優れる	原理・構造要因により温特の直線性、感度の直線性がやや劣る。共振周波数が低い場合は外部振動による影響がある場合もある	常温ノイズは比較的低いが、感度の温特が低い。原理要因により、測定周波数帯域が狭い(数10Hz)

● 静電容量式加速度センサ

- 静電容量型加速度センサは、式 (3) を利用して、重りの移動距離を計測することによってセンサに加わっている加速度を出力するように設計されている
- 代表的な低G加速度センサの検出素子部の模式図
 - 検出素子部には加速度によって動く可動部(重り)とバネ
 - その動き(移動距離)により静電容量変化を発生させるための櫛歯状電極が形成
 - 可動マスに形成された可動電極1本当たりにつき2本の固定電極(C1,C2)に挟まれる形で電極の単位セルを形成



- 内部信号処理の流れ
 1. 単位セルの2本の固定電極にそれぞれ逆相のクロック信号を印加する
 2. 加速度によって可動電極がどちらかの固定電極に近付いたときに、近付いた固定電極に印加されているクロックと同相の電荷変化(静電容量)が可動電極に発生
 3. この電荷変化を増幅し、同期検波および整流を行う
 4. 可動部の移動距離、つまり加速度に比例した電圧出力を得る



参考文献

- MPU6886データシート
https://m5stack.oss-cn-shenzhen.aliyuncs.com/resource/docs/datasheet/core/MPU-6886-000193%2Bv1.1_GHIC_en.pdf
- MEMSとは
<https://www.jel-robot.co.jp/term/term005.html>
- コリオリの力とは
https://juken-mikata.net/how-to/physics/corioris_force.html
- いまさら聞けないジャイロセンサ入門
<https://ednjapan.com/edn/articles/1406/09/news014.html>
- シリコンジャイロの現状
https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejsmas1995/116/4/116_4_131/_pdf
- いまさら聞けない加速度センサ入門
<https://ednjapan.com/edn/articles/1205/16/news110.html>