

## 加速度感測器與電子羅盤的原理介紹

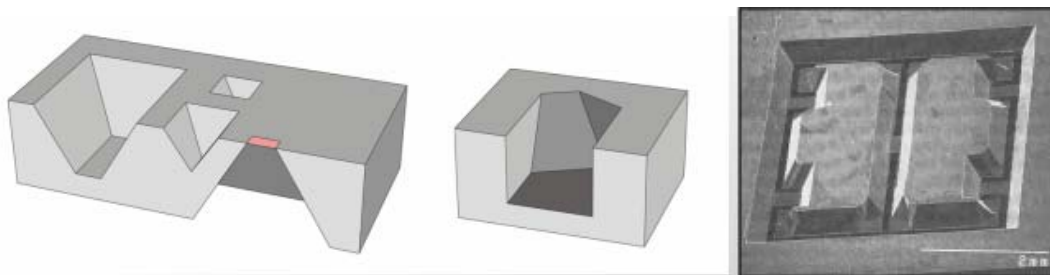
引文：

加速度感測器與電子羅盤這名詞對大家可能比較陌生，但如果提到 G sensor 及 E-compass 在近幾年消費性市場上可說是大大有名，因為任何手持式產品或是人機互動介面都會加入此功能。本文會從工作原理介紹起，並討論兩者搭配及應用。

本文：

在討論 G+M solution (加速度器+地磁感測器解決方案)的應用前，就要先介紹 G sensor 的製程與架構，也必須先了解何謂 MEMS (micro electronic mechanical system 微機械電子系統)，因為 MEMS 技術的演進，包含電容製程的陀螺儀(Gyro)與加速度儀(G sensor)感測器，才能越做越小，小到足以放進講究輕薄短小及功能強大的智慧型手機內。

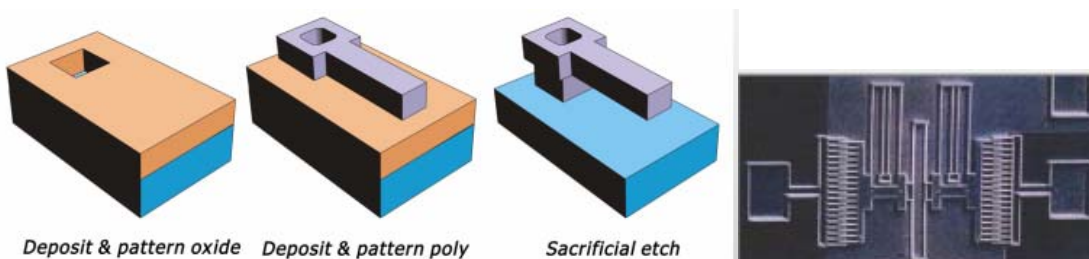
### 1970' s Bulk micromachining



Bulk micromachining structure(圖片提供 Kionix)

使用化學液體對矽晶圓去做蝕刻，當時的技術只能蝕刻簡單的幾何塊狀晶格，且只能做到 2 軸(X 與 Y 軸)，穩定度與解析度也較差。

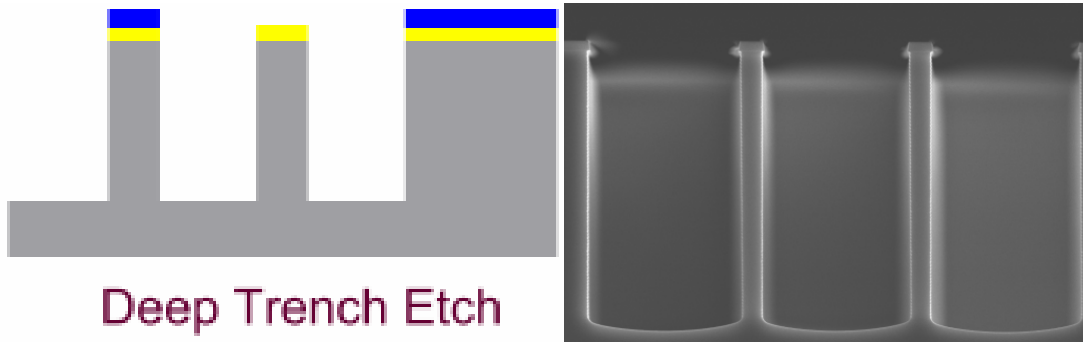
### 1980' s Surface micromachining



Surface micromachining structure(圖片提供 Kionix)

相同是使用化學液體對矽晶圓去做蝕刻，完成了 3D 全方位加速度感測(X, Y, Z 軸)，但是 Z 軸受限於液體蝕刻會受到引力的影響，垂直蝕刻會有表面不平整的問題，使用堆疊蝕刻技術，所以造成 Z 軸穩定度與解析度跟 X, Y 軸相比會比較差，所以總體來看效能還是不佳。

## 1990' s Plasma micromachining

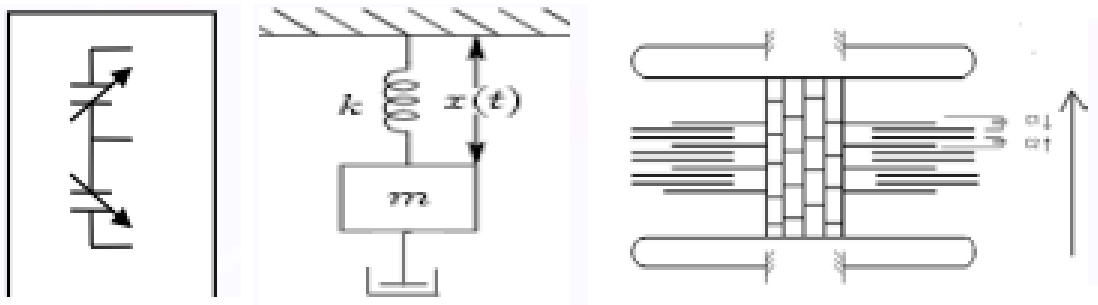


Deep Trench Etch

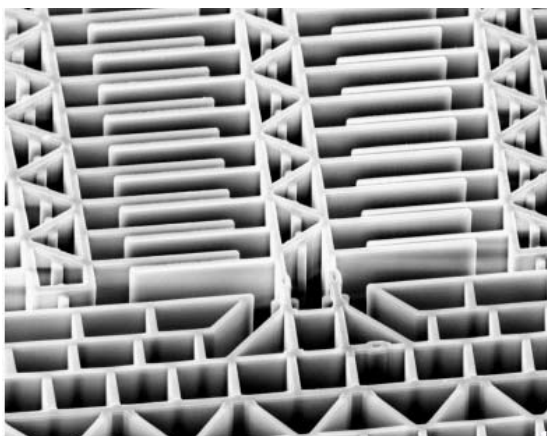
Plasma micromachining structure(圖片提供 Kionix)

MEMS 在 90 年代有重大突破，美商 Kionix 開發出新製程將原本會受到引力影響的電化學液體蝕刻改成電化學氣體蝕刻，不僅改善了電化學液體對 Z 軸垂直蝕刻的難度，也加強了 3 軸晶格的穩定度與精密度，大大減低了自體雜訊比，也成為美國國防部唯一指定加速度感測器(符合軍規)，也在消費性市場打響了知名度。

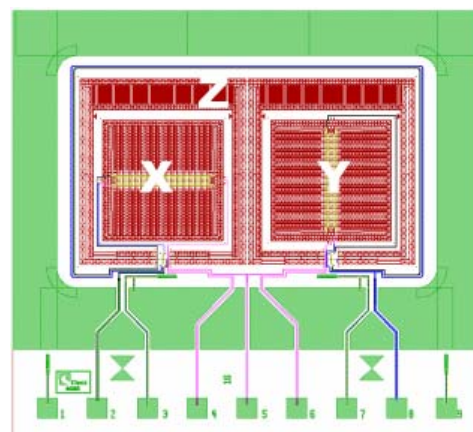
目前業界最常被選用型號，皆為歐美系廠商為主，其內部製程為電容式感測結構，其原理為藉由加速度運動造成內部形狀如梳子狀交錯的電容極板移動，極板中的雜散電容量會有等量的變化，收集此電容變化量後經由放大再交 ASIC 轉換後可得到類比式或數位式輸出。那如何得之 3 軸的方向變化呢?簡單來說只是將相同的結構擺放不同的位置，X 軸擺放橫向，Y 軸擺縱向而 Z 軸擺垂直方向即可。



機械結構內部電容晶格等效電路(圖片提供 Kionix)



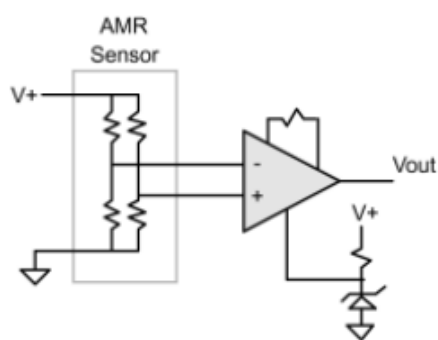
機械結構內部電容晶格(圖片提供 Kionix)



內部晶格 3 軸擺放位置(圖片提供 Kionix)

再來介紹電子羅盤(e-compass)內部的原理結構 非等方性磁性阻抗 AMR(Anisotropic Magnetic Resistance)。此為美商 Honeywell 的專利，磁阻傳感器有多種形式。對於磁阻傳感器最新的增長的市場是用在磁帶和磁帶驅動器中的高密度讀取頭。其它的應用包括車輪速的測量、羅盤方向、車輛檢測等。

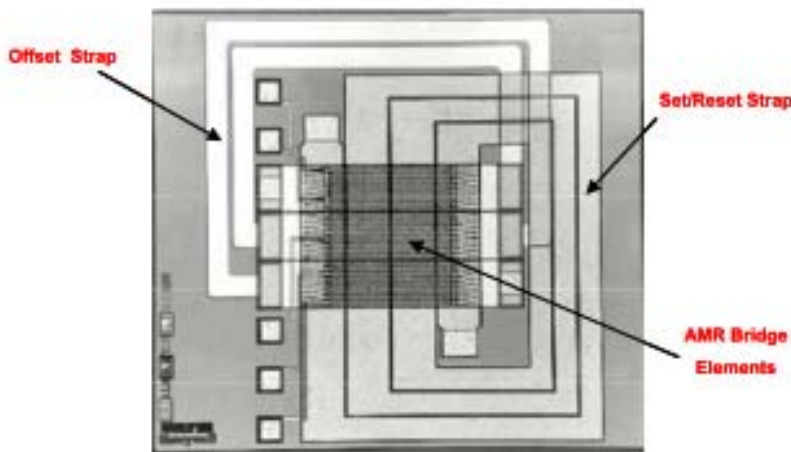
AMR 感測器是其中一種形式，最適合用於地球磁場範圍偵測。可檢測直流靜態磁場，也可以檢測磁場的強度和方向。傳感器的製作過程是將鎳鐵合金薄膜沉積在矽晶體上，形成電阻條狀帶。四個電阻條連接成一個惠斯頓電橋，可以測出沿著單一軸的磁場的強度和方向。磁阻效應的反應是很快的，不會受到諸如線圈和振盪頻率的影響。AMR 傳感器的一個關鍵的優點是可以在矽片上大量生產，與 ASIC 一同封裝。這樣使得磁傳感器可以和其它電路和系統元件組合在一起。



AMR 傳感器電路 (圖片提供 Honeywell)

AMR 傳感器的工作特性有以下幾點：

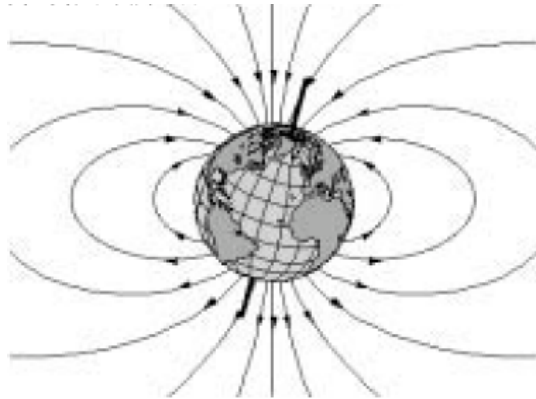
1. 每次測量讀值前，會對內部感測結構做充/放電，保持輸出能夠避免磁飽和
2. 3 軸的輸出規範完全匹配
3. 專門偵測細微磁感量，因為地球磁場為 500 毫高斯左右
4. 內建零點準位取消電路，可減少零點校正的需要
5. 抗磁飽和能力強，可減少被影響的強度
6. AMR 結構可以保持高準確度減少溫度變化影響



AMR 內部動作原理 (圖片提供 Honeywell)

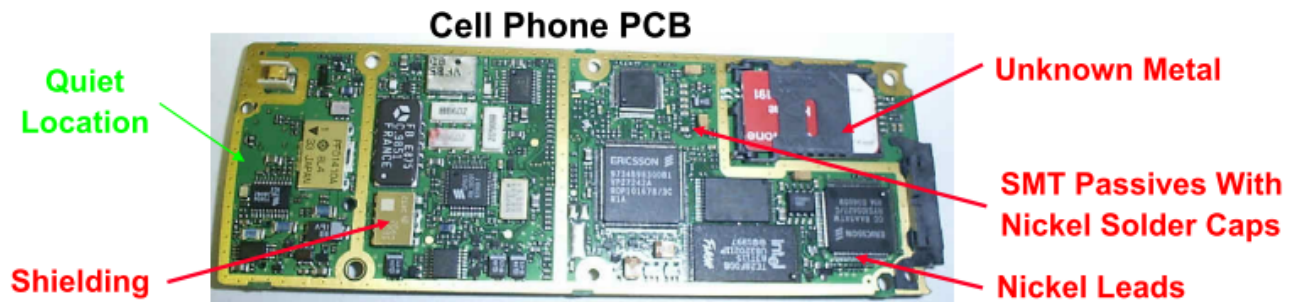
地球磁場的強度為 0.5 至 0.6 高斯，可以簡化成如下圖所示的雙極性磁場，相當於沿著地球中心有一個大磁鐵。磁極相對與地理的兩極存在著一個約 11.5 度的夾角。磁場的南極代表著地理的北極。地磁場方向在北半球指向下，在赤道平行，在南半球指向上。這一全球性的變化被稱作磁傾角 (Dip Angle)，定義為磁場和當地水平面之間的夾角。磁傾角會隨緯度變化來改變，變化範圍為 $\pm 90$  度。

電子羅盤會沿著當地磁場指向決定方向，這個方向通常為當地的磁北。因為磁北和真北不相同，所以磁北和真北通常不在一起的。這一當地的偏差被成作磁偏角(declination angle)。簡單說它是磁北和地理北之間的角度差，表示為偏東的或偏西的方向。



地球磁場可等效為一雙極磁場(圖片提供 Honeywell)

電子羅盤所受到的各種干擾可大致可區分為兩類：



PCB 上的干擾物件(圖片提供 Honeywell)

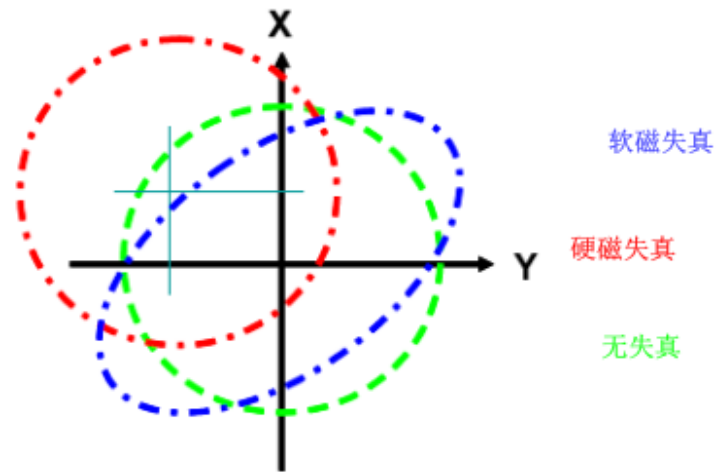
### Hard Iron (硬磁干擾)

固定強度的磁干擾物，例如 sensor 週遭原有的電子零件，例如：喇叭，麥克風，電池，面板，金屬屏蔽...等，會釋放出固定的磁力去影響電子羅盤的讀值。必須做校正去做歸零。

### Soft Iron (軟磁干擾)

會改變強度及方向或是可扭曲磁力線的干擾物，例如：電池的用電量變化，使用者的環境，週遭原有電子零件的干擾，會依精準度的規格去決定是否需要校正。

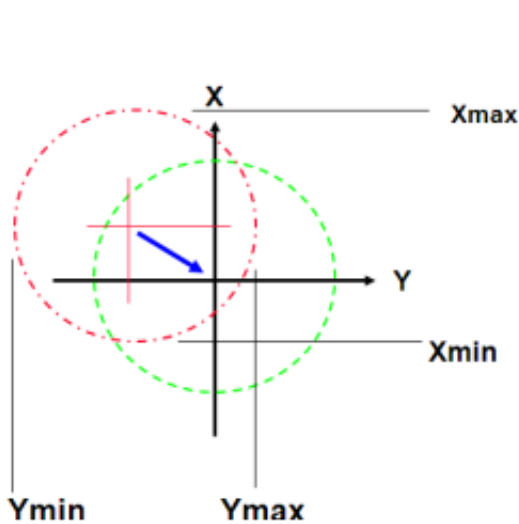




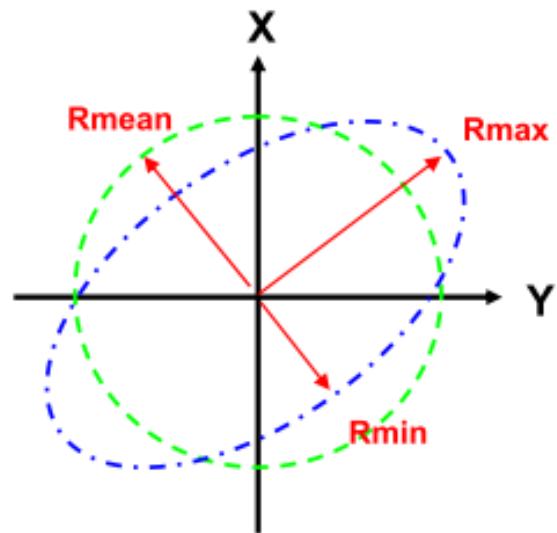
硬磁與軟磁干擾(圖片提供 Honeywell)

### Hard / Soft Iron Calibration (硬磁干擾校正)

最常見也最簡單的校正方式為劃8字型，其目的為得到整個裝置的磁感量最大值與最小值，當求到相對最大與最小值後(因為每個人操作的手勢有所不同)，即可大約找出圓心的偏移量，用套入公式用軟體方式做校正。而產線端可使用治具求得絕對的最大與最小值，在出廠前將整機的磁干擾做歸零的動作。

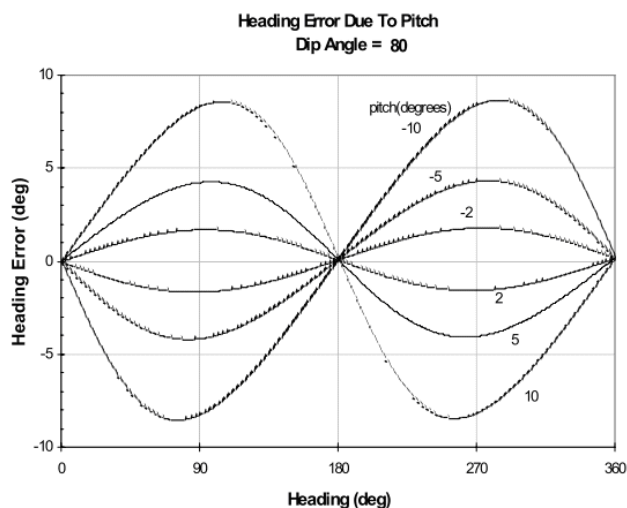


硬磁校正(圖片提供 Honeywell)



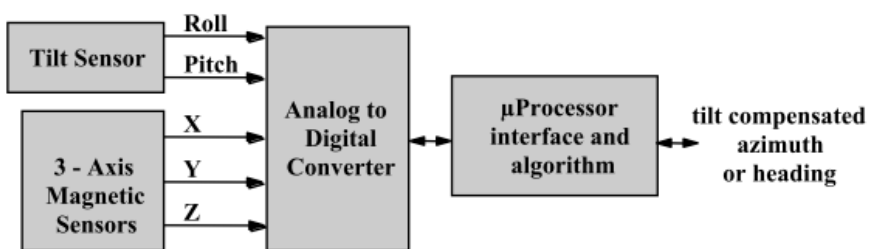
軟磁校正(圖片提供 Honeywell)

近年消費性市場掀起一陣旋風，任何手持式裝置，手機或平板電腦都會加入電子羅盤的功能，可用來搭配 GPS 圖資做導航及方位的辨識。但受限於3軸電子羅盤工作特性，裝置在非水平而有傾角的清況下，每1度傾斜角會造成2度以上的方位角誤差



傾角對方向角的影響 (圖片提供 Honeywell)

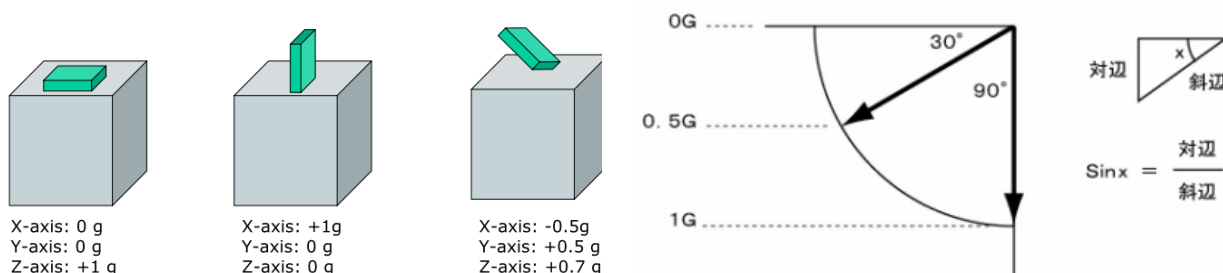
所以 3 軸的電子羅盤必須搭配 3 軸的 G sensor 做傾角補償，如果不想加入 G sensor 的話，那就得保證裝置在使用時永遠是保持水平的狀態。可參考下圖 Mcu 接收到 G sensor 與 compass 的輸出後透過公式即可算出方向角度並做傾角補償。



G+M 架構 (圖片提供 Honeywell)

講到傾角補償，就要先討論傾斜角度的計算。

G sensor 顧名思義就是偵測 g 力的大小及動作方向，而將 G sensor 擺水平時，會有 1g 的地心引力會在 Z 軸，隨著改變裝置的同時 g 值會在不同軸向做變化，就可以知道姿態的變換。也因為這個特性，在 G sensor 靜止時，可以藉由 arcSin/ arcCos 的公式去運算出傾斜角度，這個傾斜角度可以延伸出更多的應用。



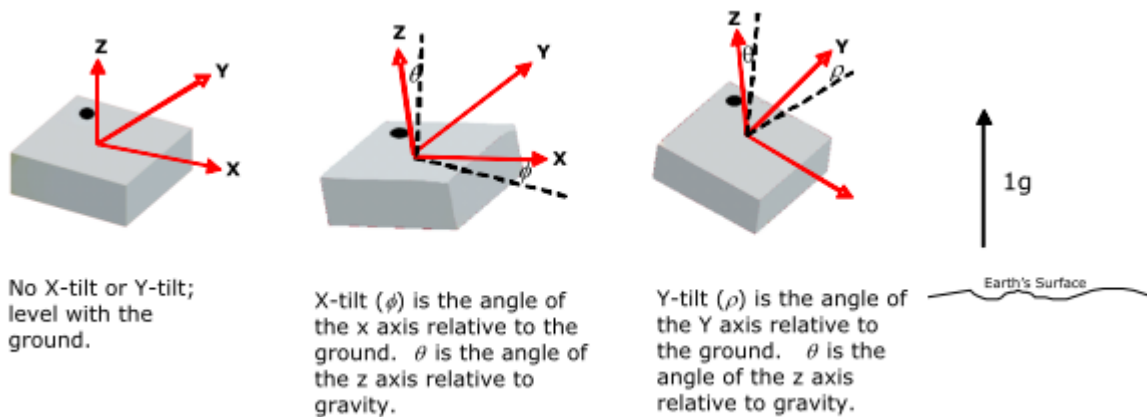
G 值分佈在不同軸向示意圖(圖片提供 Kionix) G 值轉換成角度基本公式(圖片提供 Kionix)

G sensor 雖然可以偵測傾斜角度，但是有個先天的特性，就是 0 度到 60 度時解析度很高(在 12bit ADC 可達到 0.1 度的解析度)，但是在 60 度到 90 度時解析度就會下降(約為 1 到 3 度的變化量)。

X-tilt ( $\phi$ ) in ( $^{\circ}$ )	X-axis		Z-axis	
	Acceleration (g)	Change per $^{\circ}$ of Tilt (mg)	Acceleration (g)	Change per $^{\circ}$ of Tilt (mg)
0	0	17.452	1	-0.152
15	0.259	16.818	0.966	-4.664
30	0.5	15.038	0.866	-8.858
45	0.707	12.233	0.707	-12.448
60	0.866	8.594	0.5	-15.19
75	0.966	4.37	0.259	-16.897
90	1	-0.152	0	-17.452

G 值與角度轉變表(圖片提供 Kionix)

確定 G sensor 在水平狀態，當往 X 軸有傾角變化時相對的 Z 軸也會有變化。同理，Y 軸與 Z 軸也有相同作用。利用兩軸做補償，透過  $\arcsin/\arccos$  反向推導就可達到高解析度。



各軸傾角變化對應圖(圖片提供 Kionix)

電子羅盤方位角的計算方式：

其基本原理為讀取 X 與 Y 軸的輸出，並套入  $\arctan(Y/X)$  的公式中，就可以得到方向角。但是這是在水平的情況下，尚未加入傾斜角度的變異數，得到答案是容易的。

### Algorithm to calculate Azimuth = $\arctan(Y/X)$

- Azimuth(x=0, y<0) = 90
- Azimuth(x=0, y>0) = 270
- Azimuth(x<0) =  $180 - [\arctan(y/x)] \cdot 180/\pi$
- Azimuth(x>0, y<0) =  $- [\arctan(y/x)] \cdot 180/\pi$
- Azimuth(x>0, y>0) =  $360 - [\arctan(y/x)] \cdot 180/\pi$



但是如果把傾斜角度的變數加進去，就會需要用到投射理論將原本 compass 得到的 X 與 Y 及 G sensor 得到的 pitch 與 roll 帶入以下的公式。

$$X' = X * \cos(\phi) + Y * \sin(\theta) * \sin(\phi) - Z * \cos(\theta) * \sin(\phi)$$

$$Y' = Y * \cos(\theta) + Z * \sin(\theta)$$

如此可求得 X' 與 Y' ，再將其帶入原本的公式即可求到經過傾角補償後的值。

如此一來，無論使用者怎麼的去翻動手上的裝置，電子羅盤指針的方向也不會飄忽不定指不清東西南北了。

結論：

電子羅盤與加速度感測器的搭配可說是將兩種物理行為巧妙的結合，也是消費性市場近年來興起的功能，無論是專業登山客所拿戶外用個人導航(Outdoor PND)還是年輕族群人手一台的智慧型手機(Smart Phone)，或是未來最夯的慣性導航(DR)功能，如再搭配上陀螺儀(Gyro)就可以得知位置變化，速度變化和姿態變化及絕對方向。如此一來即可修正 GPS 的誤差得到最準確的結果。總而言之，sensor 是訊號提供者，一切創新的應用還是來自於人，科技始終來自於人性。