

(MEMS)加速度計の根本問題と ベンチャーによる解決

- 微細加工 + の一例 -

独立行政法人産業技術総合研究所
計測標準研究部門、株ベクトルダイナミクスCTO

梅田 章

株式会社ベクトルダイナミクス
代表取締役 武田 純

ISO規格の加速度計感度定義の不自然さ

- *ISO規格が対象としているのは一軸の加速度計のみ。*
- 主軸感度は、一次元空間で定義。
- 横感度は、三次元空間で定義。

ベクトル空間とかベクトル空間の次元の概念は、ISO規格にはない。*加速度がベクトルであることは、高校生でも知っている。*同じ加速度計について、パラメータが違ふと異なる空間で評価しているが、*物理的に不自然である。*

横方向を決めた時の*横感度の値は不明。*

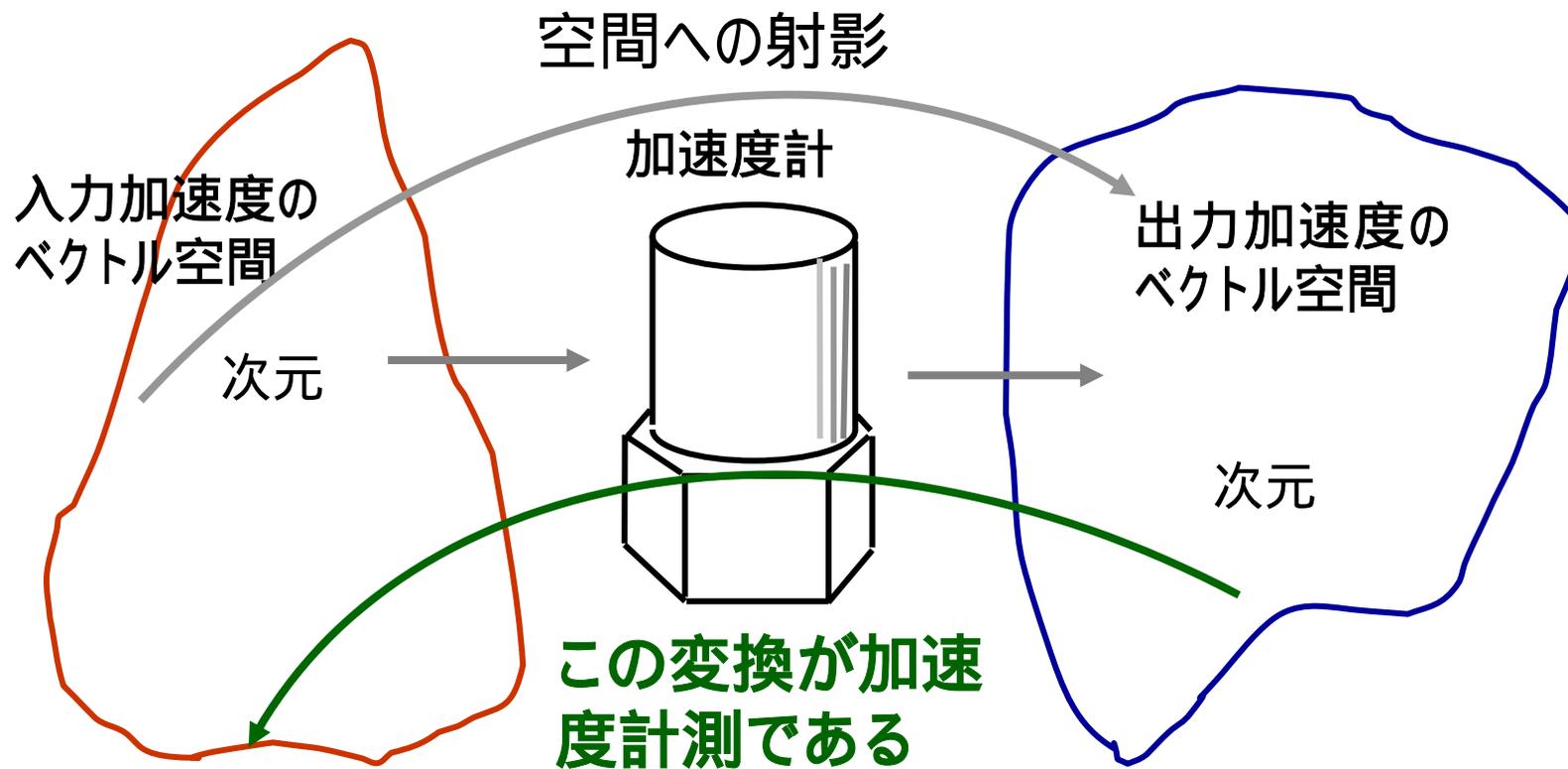
多軸加速度計では、*感度軸上で加速度が作用する場合のみトレサビリティが成立。現実にこの矛盾は無視されている。*

三軸に組んでX成分、Y成分、Z成分が計測できるとする圧電三軸、MEMS多軸加速度計、MEMSジャイロ、複合システムの精度検証は、*現状の技術では不可能。*

原点に戻る必要がある。

半導体加速度センサ規格の基本的考え方

IEC60747-14-4, RDIS・・・**現在日本から提案中**



線形代数学の教えにより:感度はマトリックスである。
加速度を推定するには、感度の逆マトリックスを掛け算する。
線形性も重要。

三軸加速度センサの感度の記述

$$\begin{pmatrix} a_{ox}(\omega)e^{j\omega t} \\ a_{oy}(\omega)e^{j\omega t} \\ a_{oz}(\omega)e^{j\omega t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{x,x}(\omega) & S_{x,y}(\omega) & S_{x,z}(\omega) \\ S_{y,x}(\omega) & S_{y,y}(\omega) & S_{y,z}(\omega) \\ S_{z,x}(\omega) & S_{z,y}(\omega) & S_{z,z}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{ix}(\omega)e^{j\omega t} \\ a_{iy}(\omega)e^{j\omega t} \\ a_{iz}(\omega)e^{j\omega t} \end{pmatrix}$$

横感度

横感度

主軸感度

複素数

出力加速度ベクトル

感度マトリックス

入力加速度ベクトル

感度マトリックスのすべての成分をある振動数の関数として出すことが、その振動数における校正である。

マトリックスを棚上げにして考えるとどうなるか、記号の説明

S_{xx} 入力加速度のX軸成分がX軸出力に及ぼす影響の程度を表す係数

S_{xy} 入力加速度のY軸成分がX軸出力に及ぼす影響の程度を表す係数

S_{xz} 入力加速度のZ軸成分がX軸出力に及ぼす影響の程度を表す係数

S_{yx} 入力加速度のX軸成分がY軸出力に及ぼす影響の程度を表す係数

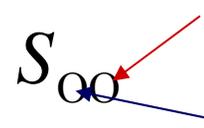
S_{yy} 入力加速度のY軸成分がY軸出力に及ぼす影響の程度を表す係数

S_{yz} 入力加速度のZ軸成分がY軸出力に及ぼす影響の程度を表す係数

S_{zx} 入力加速度のZ軸成分がY軸出力に及ぼす影響の程度を表す係数

S_{zy} 入力加速度のZ軸成分がY軸出力に及ぼす影響の程度を表す係数

S_{zz} 入力加速度のZ軸成分がY軸出力に及ぼす影響の程度を表す係数

S_{oo}  入力軸を表す記号の位置
出力軸を表す記号の位置

加速度計出力のX成分 = S_{xx} * 入力加速度のX成分 + S_{xy} *
入力加速度のY成分 + S_{xz} * 入力加速度のZ成分

加速度計出力のY成分 = S_{yx} * 入力加速度のX成分 + S_{yy} *
入力加速度のY成分 + S_{yz} * 入力加速度のZ成分

加速度計出力のZ成分 = S_{zx} * 入力加速度のX成分 + S_{zy} * 入
力加速度のY成分 + S_{zz} * 入力加速度のZ成分

この数式を線形代数のマトリックスと縦ベクトルの掛け算のルールで書くと

$$\begin{pmatrix} a_{ox} \\ a_{oy} \\ a_{oz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{ix} \\ a_{iy} \\ a_{iz} \end{pmatrix}$$

出力のX成分については

$$a_{ox} = S_{xx} \cdot a_{ix} + S_{xy} \cdot a_{iy} + S_{xz} \cdot a_{iz}$$

感度についてのまとめ

- ✓ 加速度計の感度は、マトリックスでなければならないとするのが、理論にはもっとも忠実ではあるが、**常にというのも現実的ではない。**
- ✓ IEC60747-14-4半導体加速度センサ規格(案)では:(RDIS in Nov. 2007)

加速度計のレベル	加速度計の定義
レベル4 加速度センサ	加速度センサの感度を、マトリックスで定義し、その全ての要素を周波数の関数として決める場合。
レベル3 加速度センサ	加速度センサの感度を、マトリックスで定義し、その対角要素を周波数の関数とし、非対角要素を定数として決める場合。
レベル2 加速度センサ	ある周波数での加速度センサの感度を、マトリックスでは定義するが、狭い周波数帯域で、全ての要素を定数とみなせる場合。
レベル1 加速度センサ	ある周波数での加速度センサの感度を、マトリックスでは定義しない加速度センサ。

多軸化と横感度の重要性(1)

従来の考え方では、横感度が3%であれば、無視する。
無視するということは、マトリックス感度の非対角項を0
とおくことである。

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

この考え方で、(1, 1, 1)の入力加速度ベクトルに対しては、出力は:

$$\sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2} = \sqrt{3} = 1.7321$$

考慮する場合にはどうなるか:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0.03 & 0.03 \\ 0.03 & 1 & 0.03 \\ 0.03 & 0.03 & 1 \end{pmatrix}$$

この考え方で、(1, 1, 1)の入力加速度ベクトルに対しては、出力は:

$$\sqrt{1.06^2 + 1.06^2 + 1.06^2} = \sqrt{3.3708} = 1.8360$$

この場合の誤差は: $\frac{1.8360 - 1.7321}{1.8360} = \frac{0.1039}{1.8360} = 0.05659$

5%上の計測誤差は許されない。3%より大きいのは論理矛盾。

多軸化と横感度の重要性(2)

さらに、6軸の場合

3%の横感度を無視して、(1, 1, 1, 1, 1, 1)の入力に対しては、

$$\sqrt{6} = 2.4495$$

考慮すると、

$$\begin{aligned} & \sqrt{1.15^2 + 1.15^2 + 1.15^2 + 1.15^2 + 1.15^2 + 1.15^2} \\ &= \sqrt{1.3225 \times 6} = \sqrt{7.935} = 2.8169 \end{aligned}$$

この場合の誤差は：
$$\frac{2.8169 - 2.4495}{2.8169} = 0.13042$$

13%の誤差になる。

多軸化を図れば、図るほど、横感度は重要になる。多軸の加速度センサでは、横感度をキチンと評価しないと計測装置にはならない。横感度を小さくする設計よりも、キチンと評価して対策する設計の方が合理性が高い。

応用分野の例

- 自動車(衝突安全、乗り心地改善、カーナビ)
- ゲーム機
- 携帯電話
- 家庭電化製品(洗濯機、ストーブの耐震安全性確保)
- 地震探査、物理探査、地震計、各種耐震性確保
- 鉄道、鉄道車両、道路、高速道路、送電ケーブル、橋、建築構造物耐震性
- エレベータ
- ロボット
- 映像機器(カメラ)
- 防犯
- 宇宙・航空、潜水艦、(ミサイル)
- **人体振動規制、車両乗り心地・・・重要。**

人体振動規制の要点

- 人体に関係するあらゆる機械に関する規制である。
- 全世界に及ぶであろうこと。
- 多軸半導体加速度計の計測値の定量性が、公的に保証されていないと、**罰則を伴う規制**として成立し得ない可能性が高い。
- 価格的に、多軸半導体加速度計の利用は避けられない。従来型圧電加速度計の利用は、価格及び性能上、難しい。
- 市場は、膨大。
- 人体振動の研究では、半導体加速度計を使った計測実験がすでに始まっている。MEMS加速度計の重要性は認識され始めている。



会社概要

- 社名 (株)ベクトル・ダイナミックス
- 設立 2006年2月8日
- 資本金 400万円
- 住所 東京都千代田区内神田3-14-13
- 経営陣
 - 代表取締役CEO 武田 純 (元産総研 SA)
 - 取締役CTO 梅田 章 (産総研)
 - 取締役CFO 高間一政 (元NEC)
 - 監査役 青野 敬吾 (元経産省)
- 事業内容
 - 加速度センサーの試験、校正
 - 高精度加速度センサー用逆マトリクス回路の設計
 - 多軸加速度センサ、慣性センサ向けリファレンスの開発と販売
 - 車載測定装置の設計・開発

抜粋のまとめ

- ✓ 加速度がベクトルである以上、感度をマトリックスで定義することは、数学的には当然である。
- ✓ ISO規格に示されている校正法は、ベクトルとして加速度を計測することに対応していない。ベクトル空間概念が、そこには見られない。
- ✓ 計測精度は、感度マトリックスの逆マトリックスをかける操作により、飛躍的に向上する。
- ✓ 感度マトリックスを導入した加速度計は、既存の応用に高付加価値をもたらす。
- ✓ 多軸半導体加速度計に定量性を持たせるためには、マトリックス感度概念・導入は必須である。
- ✓ 人体振動関連分野でのマトリックス感度加速度計の応用は、有望である。