

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656062

研究課題名(和文) 電圧比位相変換によるドリフトフリー物理計測

研究課題名(英文) Ratio-to-phase conversion method for drift-free physical measurement.

## 研究代表者

桂 誠 (Katsura, Makoto)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：70304003

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：計測電圧と参照電圧の比を決定する新しい方法として、比/位相変換法を開発した。計測電圧と参照電圧とグラウンドレベルを周期的に順次切り替える事によって生成する階段状の信号を計測すると、ゲインとオフセットのドリフトが簡単に補正できる為、2点校正方法として有用である。階段状信号の位相を計算する事で2点校正を実現させる事ができる。但し、電圧計には固有の時間遅れがあり、そのドリフトが位相に現れてしまう。そこで、3倍高調波を利用してこの時間遅れを補正する事に成功した。また、階段状信号の高調波をキャンセルする事で電圧計(A/D変換器)の非線形性が低減できる事を発見した。

研究成果の概要(英文)：A new method, ratio-to-phase conversion, was developed for determining the ratio of the voltage to be measured (S) and the nominally constant voltage reference (R). A stepwise signal was generated at the carrier frequency ( $f_c$ ) by cyclic switching R, S and the ground level. This signal is found to be useful because the gain and the offset of the voltmeter can be easily corrected as a two-point calibration. We adopt the phase calculation at  $f_c$  as the method to realize such calibration. Third order harmonic is found to be useful to eliminate the effect of the time delay of the voltmeter on the phase. Also, harmonics cancellation in the stepwise signal is proved to be a new method to reduce the non-linearity of the voltmeters.

研究分野：地球物性学

キーワード：ドリフト 電圧計測 高調波 非線形性低減

1. 研究開始当初の背景

ほとんどの物理計測において、物理量に  
 関連した電圧信号を AD 変換する過程が必  
 須である。AD 変換器の低雑音化は、その消  
 費電力・発熱の抑制とトレードオフの関係に  
 ある為、高分解能物理計測では、温度変化  
 や浮遊熱起電力による AD 変換のゲイン、  
 オフセット、非線形性のドリフトを回避す  
 る事が大きな課題である。

このうち、ゲインとオフセットは2点校正  
 という手順によって比較的容易に補正する  
 事ができるので、計測現場で高精度化を図  
 る事ができる。それに比べて、非線形性を校  
 正するには多点校正という手順が必要であり、  
 これは一般的に計測現場で実現する事が難  
 しいとされている。その為、非線形誤差は  
 AD 変換器メーカーによって与えられる最大  
 値や典型値を元に誤差として推測するしか  
 ないのが現状である。

2. 研究の目的

(1) 当初の目的は、電圧比/位相変換という新  
 しい方法論(方法の欄の記述)によってゲ  
 インとオフセットの校正を簡便に行なうシ  
 ステムを開発し、これらのドリフトを抑制す  
 るシステムを構築する事であった。

(2) 具体的には、当時公表されていた最高級  
 機種 of 市販デジタルボルトメータの仕様を  
 超える 100ppb の安定性を持つ電圧比計測シ  
 ステムの構築を目指した。

3. 研究の方法

(1) 参照電圧 (R)、計測電圧 (S)、グランド  
 レベル (G) のスイッチングを電源周波数を

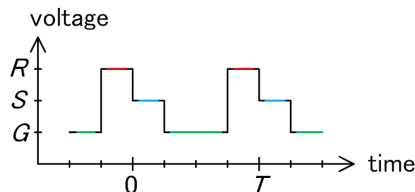


図 1

超える数 100Hz 程度以上で行い、図 1 に示  
 すような階段状の信号を生成する。

この信号を計測し、ゲインとオフセットを  
 補正して電圧比計測を行なうには図の平坦  
 部(上図の緑、赤、青部分)の計測値を元に下  
 式の計算を行えば良い事は容易に分かる。

$$\frac{S}{R} = \frac{\langle f(R) \rangle - \langle f(G) \rangle}{\langle f(S) \rangle - \langle f(G) \rangle} \quad (式 1)$$

但し、 $f$  は AD 変換器の変換関数である。

別の方法として、この信号のフーリエ変換  
 を行い、搬送波周波数( $f_c = 1/T$ )の位相  $\theta_1$  を  
 計算する事によっても電圧比計測は実現す

$$\frac{S}{R} = \tan\left(\frac{\pi}{4} - \theta_1\right) \quad (式 2)$$

る。この方法を電圧比/位相変換と呼ぶ。

両者を比較し、ドリフトの少ない計測方法

を検討する。

(2) 階段状の信号の搬送波の位相から電圧  
 比が得られるという事は非線形性の低減に  
 利用できるというアイデアを発見した。これ  
 は研究開始当初には無かったものであり、挑  
 戦的萌芽研究にふさわしいトピックと考え  
 ている。

(式 2) の位相から得られる電圧比はその  
 ままでは(式 1) の平坦部から計算される値  
 と等価であり、AD 変換器の非線形性 (INL)  
 の影響を受け、両者とも同じ非線形性誤差を  
 含んでいる。しかし、この信号から搬送波周  
 波数( $f_c$ )の高調波を除去できたとすると、AD  
 変換器の INL はもはや非線形性誤差の要因と  
 はならない事が定性的に理解される。そこで、  
 2 倍高調波をキャンセルする実験を行い、部  
 分的な高調波キャンセルでも非線形性誤差  
 が低減するかどうかの実証を行なう。

(3) 上記(1)(2)の為に市販の電子計測器  
 に加えて、信号生成用の独自の電子回路が必  
 要である。アナログ回路については、基板か  
 ら自作し、研究期間や予算の短縮に努めた。  
 また、デジタル回路については、市販の FPGA  
 基板を購入し、Verilog HDL 言語で各種クロ  
 ックを生成した。

(4) 高調波キャンセルによる非線形性誤差  
 低減の定量的理解には、数学的な定式化とそ  
 の定量的解析が必要になる。そこで階段状関  
 数の数学的記述からスタートして、数学的定  
 式化を試みる。数式は手書きでは展開できな  
 い膨大なものになるので、代数計算ソフト  
 (sympy[2]) を利用した。また、解析に必要な  
 パラメータの算出の為に C# によるプログラ  
 ミングも行なった。

4. 研究成果

(1) 搬送波周波数( $f_c$ )の位相による比計測  
 は図 2 の赤線のように 0.2ppm/ 程度の温度  
 ドリフトを呈した。これはゲインとオフセッ

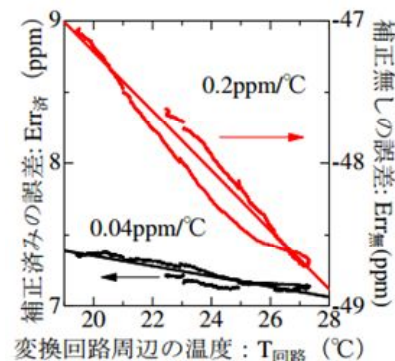


図 2

トのキャンセルに成功した事を意味してお  
 り、位相を元にした電圧比計測が 2 点校正方  
 法として有効である事を示している。図の黒  
 線は更に低い温度係数 (0.04ppm/ ) を示し  
 ているが、これは 3 次高調波(3 $f_c$ )の位相を  
 用いた補正を行なった結果である。これは以  
 下の様に説明できる。

搬送波周波数の位相は実際には回路系の

位相遅れの影響を含むので、式2は以下の様に修正する必要がある。

$$\frac{S}{R} = \tan\left(\frac{\pi}{4} - \theta_1 - \Delta\right) \quad (式 3)$$

一方、回路系の位相特性に位相直線性を仮定すると3次高調波の位相 $\theta_3$ は電圧比と以下の様な関係にある。

$$\frac{S}{R} = \tan\left(-\frac{3\pi}{4} + \theta_3 + 3\Delta\right) \quad (式 4)$$

式3,4から $\Delta$ を消去すると

$$\frac{S}{R} = \tan\left(\frac{\theta_3 - 3\theta_1}{4}\right) \quad (式 5)$$

このように、3次高調波を用いた補正を行なう事で位相遅れの影響を位相直線性の範囲内で消す事ができる。実際、この補正によって温度ドリフトが抑制された事は、ドリフトの主要な原因が位相遅れの温度依存性であった事を意味する。

同様の補正は5次、7次など任意の奇数次高調波の位相を用いて行なう事ができると言えるが、次数が大きくなると位相直線性が損なわれる可能性がある上、信号雑音比が低下するので、1次と3次を用いた今回の方法が最適と考えられる。

以上のように得られた低い温度係数は、AD変換器のゲインドリフトに関わると見られる抵抗器や電圧標準が持つ温度係数(数ppm/)に比べると十分に小さく、精密な物理計測に利用する価値がある。

しかしながら、同様の特性は式1によっても得る事ができた。したがって、残念ながら「電圧比/位相変換によるゼロドリフト計測」という本研究の当初のオリジナリティに本来の有用性は見出せなかった。

(2) 2倍高調波をキャンセルする図3の様なシステムを構築した。参照電圧R、計測電圧S、グランドGをスイッチングして位相反転した二つの階段状信号を生成し、加算器を通して2チャンネル(ch1, ch2)のAD変換器(fs=614.4kHz)で計測する。計測結果はリアルタイムでフーリエ変換し、搬送波周波数(fc=307.2Hz)の位相( $\theta_{1,1}$ ,  $\theta_{1,2}$ )とその2倍高調波の振幅(A<sub>2,1</sub>, A<sub>2,2</sub>)と位相( $\theta_{2,1}$ ,  $\theta_{2,2}$ )を計算する。但し、2番目の添え字がチャンネルを表すとする。それぞれの2倍高調波の振幅が元の0.1%以下になるように、発振器

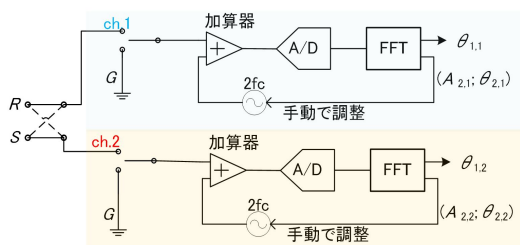


図3

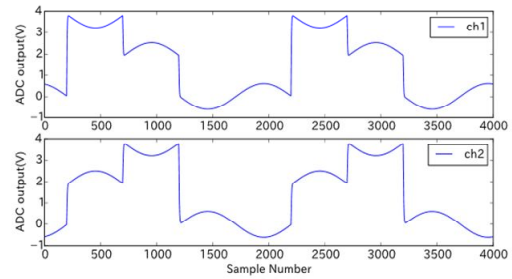


図4

を手動で調整する事によって高調波キャンセルを行なった。その時の代表的な信号形を図4に示す。

二つのチャンネルから得られた搬送周波数の位相差を元に $\theta_1$ を以下の様に定義しなおす。

$$\theta_1 = \frac{\theta_{1,2} - \theta_{1,1}}{2} \quad (式 6)$$

抵抗分圧器を作成してSをスキャンし、高調波キャンセルの有無を切り替えて測定を行なった。得られた結果は図5の様であった。全てのデータ点は2.5秒間の積算平均値であり、4秒毎に更新されている。全てのグラフで横軸は計測開始からの経過時間(分)を示し、赤い領域は2階高調波をキャンセルして

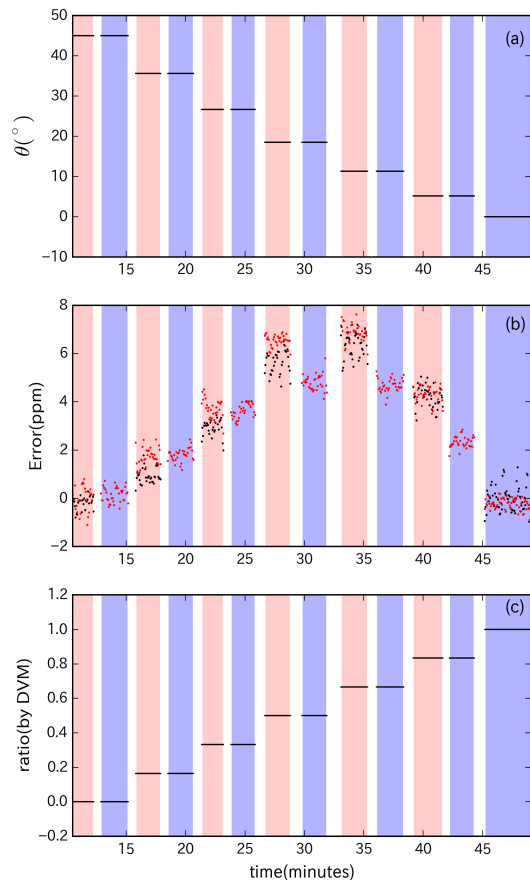


図5

いない時間帯、青い領域はキャンセルしている時間帯を示す。白抜き時間帯はキャンセルの有無を切り替えるのに要した時間帯であり、その区間の不安定なデータは省いている。

図5(c)は抵抗分圧器による比の変化を示しており、デジタルマルチメータ(ADCMT 6581)による実測値である。この装置は二つの電圧比を計測するモードがあり、100ppb以下の非線形性が最近、メーカーによって示されている[1]ので、これを誤差を決定する基準として用いる。図5(a)は式(6)で定義した位相を記している。このスケールでは高調波キャンセルによる変化はわからない。図5(b)は5(a)(c)を元に算出した非線形誤差である。黒い点は式(1)に基づいて平坦部から計算した値である。高調波をキャンセルすると平坦部がなくなる。高調波キャンセルに用いた発振器(NF corp. WF1948)は16ビットの分解能なので、この信号を加算する事で位相の誤差が増大し、このプロット範囲に値が収まらなくなっている。図5(b)の赤い点は式(2)によって計算された比の持つ非線形性誤差である。但し、回路系の持つ時間遅れを補正する為に比が1の時に  $1=0$  となるように位相をずらしている。また、線形な誤差は差し引いている。

2階高調波のキャンセルによって非線形性は数ppm程度低減している事が分かる。

より詳細な解析の為に、区間毎の平均値を計算し図6に示す。縦軸は非線形性誤差を意味している。

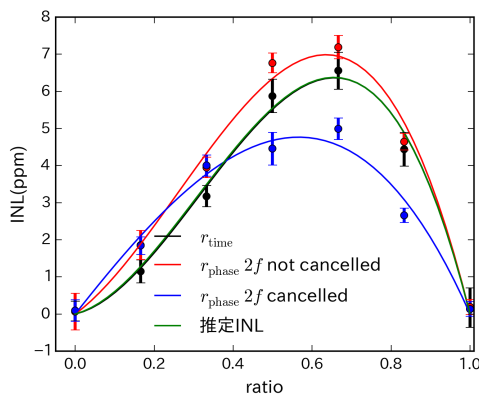


図6

図の誤差バーは2.5秒平均値の区間内の標準偏差を意味しており、区間毎の平均値の持つ誤差を大きめに見積もったものである。(サンプル数の平方根で割っていない。)黒い点と線は式(1)による実測値とその3次関数近似曲線、赤い点と線は式(2)による誤差とその3次関数近似曲線である。両者は殆ど一致しているが、位相による値の方が非線形性誤差がわずかに増加している。この差の原因として、スイッチングノイズの影響が考えられる。式(1)ではスイッチングノイズの影響を受ける段差部分をデータから取り除いてから計算しているが、式(2)はそうではな

い。用いたアナログスイッチ(Maxim MAX4527)は数pC程度の電荷注入を持つ。チャンネル間の電荷注入マッチングが信号電圧に対してわずかな依存性を持つ可能性がデータシートに示されている。これはスイッチングノイズの大きさがSに依存する事を意味している。簡単な為に10pCの注入電荷が搬送波1周期の間に1回だけ回路中に放出されると仮定する。回路内に用いられている100kの抵抗を通る事によって生じるスイッチングノイズの面積は、 $1\mu V \cdot s$ と見積もられるので、これによる位相誤差の大きさは0.1mrad程度となる。しかし、電荷注入の大きさは入力信号の変動にほとんど依存しない回路設計を行なったので、実際にはその1000分の1程度の効果しかないと考えてよい。これは1ppm程度の非線形誤差が生じる可能性を意味している。本実験で示された1ppm程度のずれはそれゆえ、電荷注入によって説明可能である。詳細な解析の為に使用したアナログスイッチの電荷注入を実測する必要があるだろう。現段階では、式1で得られた値の方がより正確にAD変換器の非線形性を表していると考えられる。

図の青い点と線は2階高調波をキャンセルした場合の実測値と3次関数近似曲線である。近似曲線では  $S/R=0.165$  では非線形性がわずかに増大しているように見えるが、実測値としては有意な増大はみられない。 $S/R=0.5$  付近で3ppm程度の非線形性の低減が検出された。

(3) 検出された非線形性低減を定量的に理解するために理論的な定式化を行なった。詳細は省略し、ここでは全体的な概観を示す。

AD変換器の非線形性をGで表す。AD変換器への入力電圧をXとし、参照電圧Rを用いてGを多項式展開する。但し、非線形性の定義として  $X=0, X=R$  で  $G=0$  とする事で以下の様に書く事ができる。

$$G = \sum_{p=2}^{P_{max}} G_p (r - r^p) \quad \left[ r = \frac{X}{R} \right] \quad (式7)$$

同様に、一つまたは複数の高調波をキャンセルした後の非線形性を  $G'$  で表すと、これも同様に展開できる。その展開係数を  $G_{p'}$  と置く。キャンセル後の最大次数はキャンセル前を越える事は無い事が理論的に分かったので、二つの係数間を結ぶ行列Mを定義する事ができる。

$$G'_p = \sum_{p'=2}^{P_{max}} M_{p,p'} G_{p'} \quad (式8)$$

Mはキャンセルする1つまたは複数の高調波の階数を決めれば一意に決まる。Mを具体的に導出する為に数値計算を行なう事は原理的には難しくない。擬似的に時系列データを生成して、実験過程を模擬すれば良いはずである。しかし、得られるMの精度は仮定するサンプリング周波数やアンチエイリアスフィルタの特性に依存するため、一般性を保証

する事が難しい。サンプリング周波数を十分高く設定する事が一般化には望ましいと考えたが、理論的解析によると、例えば 100 階高調波まで考慮しても M は  $p_{max}=7$  に対しては十分に収束しない。そこで、解析的な計算によって M の導出を行なう為、プログラミング言語 python 上で動作する代数計算用ライブラリ sympy[2]を用いて、プログラミングを行なった。参考までに、 $p_{max}=5$  とした時の M を有効数字 4 桁で記しておく。

$$M = \begin{pmatrix} 0.1512 & 0 & -0.2300 & -0.2751 \\ 0 & 0.3634 & 0.2300 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3575 & 0.2751 \\ 0 & 0 & 0 & 0.3319 \end{pmatrix}$$

(式 9)

得られた行列を用いれば、高調波キャンセルによる非線形性の低減量 G から以下の式で元の非線形特性 G を推定する事ができるはずである。

$$G = (E - M)^{-1} \delta G \quad (式 10)$$

実際、図 5 に示した実験結果から、デジタルマルチメータによる正確な電圧比を用いずに推定した非線形特性を図 6 の緑色の線で記す。これは式 1 によって得られた値（黒線）とほぼ一致した。

#### (4) 本研究成果の意義

ここで述べた(2)(3)の成果は本来の研究計画では想定していなかった発見であったので、ここでその意義を記す。

##### 電圧計校正方法としての意義

電圧計測における非線形性誤差を校正する高精度な方法としては、既知の電圧比を発生する電圧源を基準にする多点校正法が広く知られている。国家標準で用いられるジョセフソン素子による方法[3,4]は正確な電圧源であるが、取り扱いが難しく、何より非常に高価である。抵抗分圧器も良く知られているが、抵抗器は温度ドリフト、経時ドリフトする為、自己校正による抵抗比（電圧比）の決定に手間が掛かる。これを自動化した装置も市販されているが、非常に高価である。

より簡便な方法としては既存のデジタルマルチメータと比較する方法がある。これは内蔵されている AD 変換器の線形性を利用している。デルタシグマ型 AD 変換器の校正をするにはより優れた多重積分型の AD 変換器を用いる必要があるが、これは高価であり一般的な計測現場に設置するのは難しい。電圧計の製造現場においても、大量生産された製品をテストするにはコストが問題になる。

今回開発した方法は電圧源の安定性や AD 変換器の線形性に依存していない。高調波キャンセル用に発振器を用いているが、その精度にも依存していない。電圧信号の切り替え性 (switchability) と加法性 (additivity) を

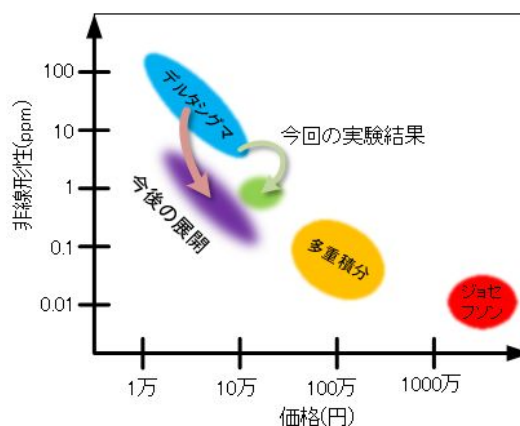


図 7

用いているだけなので、非常に広い適用可能性を持つ校正原理である。

##### 電圧計の実用化の方向性

既存の電圧計の価格と性能を図にまとめた。今回の結果は高性能なデルタシグマ型 AD 変換器を用いて、多重積分型との隙間を埋める様なサブ ppm の電圧計の実現を示唆している。また、今後の展開として、低価格帯を含めたデルタシグマ型の性能改善が期待できる。

光強度を信号として用いる事は分光計測や映像分野で行なわれている。光強度信号も切り替え性と加法性を持つ事から、光検出器の非線形性低減にも本方法が応用できる事が分かる。光検出器の非線形性校正の既存の方法としては、ダブルアパーチャ法[5]が知られているが、校正手順が難しく、安定した光源が必要である為、計測現場では用いにくい。高精度の ND フィルタを用いる方法もあるが、フィルタ特性を維持するのは難しい。現状ではフォトダイオードの線形性を基準にする方法か、PWM で時間平均的な強度制御を行なって校正する方法が一般的である。本研究で得られた方法を応用すれば全く新しい校正方法が実現する。

その他、様々な産業分野における実用化を見込み、特許出願を論文発表に優先して行なった。更に、外国出願 (PCT) の目途が立ったので、研究期間終了後に、論文が出版された。

##### <参考文献>

[1] [http://www.adcmt.com/techinfo/product/catalog\\_document/pdf/catalog\\_6581.pdf](http://www.adcmt.com/techinfo/product/catalog_document/pdf/catalog_6581.pdf)  
 [2] SymPy Development Team (2014). SymPy: Python library for symbolic mathematics URL <http://www.sympy.org>.  
 [3] Brom H E van den, Houtzager E, Rietveld G, Bemmelen R van and Chevtchenko O 2007 Voltage linearity measurements using a binary Josephson system Measurement Science and Technology 18 3316-20  
 [4] Yamamori H, Ishizaki M, Shoji A, Dresselhaus P D and Benz S P 2006 10 V programmable Josephson voltage standard circuits using NbN/TiNx/NbN/TiNx/NbN

double-junction stacks Applied Physics Letters 88 042503  
[5]Clarke F (1972) High accuracy spectrophotometry at the National Physical Laboratory Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A: Physics and Chemistry 76A 375-403  
5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Katsura, M. (2015) Nonlinearity error reduction in signal ratiometry by ratio-to-phase conversion.: Meas. Sci. Technol. 26 125011

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称：計測装置及び計測方法  
発明者：桂 誠  
権利者：国立大学法人大阪大学  
種類：国際特許公開  
番号：W0/2016/006515  
PCT 出願年月日：2015 年 7 月 1 日  
優先権主張：特願 2014-140698  
(出願日：2014 年 7 月 8 日)  
国内外の別： 国外

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

無し

6 . 研究組織

(1)研究代表者

桂 誠 (KATSURA, Makoto)

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：70304003

(2)研究分担者

無し

(3)連携研究者

無し