〔論　　文〕

周期信号の周期解析における解析区間長探索による周期解析手法の一検討

福島　学*，徳富　響*2，宮田　叶斗*2

*日本文理大学工学部情報メディア学科
*2日本文理大学大学院工学研究科環境情報学専攻

An Examination of Period Analysis Method by Exploring Analysis Interval Length in Periodic Signal Analysis

Manabu FUKUSHIMA*, Hibiki TOKUTOMI*2，Kanato MIYATA*2

*Department of Media Technologies, School of Engineering, Nippon Bunri University
*2Department of Environmental Engineering and Applied Information Science,

Abstract

This paper discusses the fundamental yet unresolved issue of periodic signal analysis in engineering. Specifically, it elucidates the following three points：１）The necessity of having an appropriate sample size and analysis interval length for accurate period determination, ２）The method for determining the optimal analysis interval length, and ３）Period analysis under conditions where the sampling theorem is not satisfied, such as obtaining only one sample per period from observed oscillations. These elements are crucial for appropriately converting physical phenomena（Physical）into numerical data（Cyber），which is vital for Cyber Physical Systems（CPS），particularly in ensuring the reliability of big data. Additionally, the validity of the proposed method was verified through empirical experiments using a smartphone, confirming its effectiveness.

キーワード：周期分析，時間分解能，分析区間長，数理解析，実測検証
Keywords ：Period analysis, time resolution, analysis interval length, mathematical analysis, empirical validation

１．はじめに

スマートフォンの普及に伴い，高性能なセンサを内蔵した情報処理装置を手軽に使うことが可能となった。このスマートフォンが搭載するセンサデータを手軽にプログラムから使うための開発環境の１つに MathWorks が提供する MatLab　Mobile[1]がある。この環境を使うことで，スマートフォンに搭載されている，カメラ，マイク，加速度計，ジャイロ，GPS 等のセンサデータを取

得することおよびスマートフォン内でデータ処理を行うこと，クラウドストレージを利用すること，さらにデスクトップパソコン等と連携したシステムを構築することまで可能となっている。また MathWorks が提供する ThingSpeak[2]サービスを利用することで，スマートフォンのデータに基づく解析結果の Web 経由での公開まで同一言語環境で可能となっている。

スマートフォンに搭載されている加速度計は床等に設置した際に歩行等によって生じる微弱な振動を計測出来る精度がある[3]。これは本学工学部複数学科共通開講であるロボットプロジェクトにおける2012年度の取組だけでなく計測用加速度センサとの比較[4]が行われ，さらに微振動を計測する研究でも検証されている[5]。この時のノウハウからコロナ禍における実験系科目を，手元にあるスマートフォンを利用することでリモートでの講義を可能としてきた[6]。

一方，センサで観測されたデータの分析に関しては現在でも工学的に重要な課題となっている。一般に実測では環境条件や機材条件によって計測値に誤差が含まれる。しかし物理現象の数値記述による誤差は，除去可能である。数値記述の誤りはそれが適切であることを前提とするデータサイエンスにおいて分析精度を下げる要因となり場合によっては誤った分析結果を出す危険性がある。

そこで本稿では，工学的に重要な周期解析に関して，一見すると不安定な周期と思われるサンプル値から正しく周期を求める手法について，現実事象（Physical Event）と数値（Cyber）を統合するシステム（CPS:Cyber Physical System）の観点から述べる。

2．現実事象のサンプリング

現実事象（Physical Event）の適切なサンプリングによる数値化は，振幅の数値化に関しては量子化ビット数によりその解像度すなわちダイナミックレンジが決まる。サンプリング定理では，サンプリング周波数の半分をナイキスト周波数といい，それ以下の周波数を扱うことが出来ると言われている。しかし，周期的な孤立スペクトル波が，エイリアジングを生じない上限周波数がナイキスト周波数であり，これは時間の離散化に関する解像度を考える上で必要なことである。

そこでここでは，周期信号の離散化のうち特に時間の数値記述について，サンプリングとそれに基づく周期分析について述べる。

3．サンプリング周期とサンプル値

はじめに，図1上段のように観測している範囲内で4周期となる正弦波をサンプリング周期に応じてサンプルすることを考える。図は横軸に時間を秒で，縦軸に振幅を表す。このことから青線で示した正弦波は4 Hz であり，その周期は1/4秒であることがわかる。図には赤十字マークでサンプル値を示しており，サンプル数が32個であることからサンプリング周波数が32Hz であり，サンプリング周期が1/32秒であることを示している。図1に示すように，正弦波の周波数 f がサンプリング周波数 fs と

$$\mathrm{modulo}\ (fs\ ,\ f) = 0 \tag{1}$$

すなわち，正弦波の周波数 f を法とした時，サンプリング周波数 fs が整数倍となる時，図中緑枠で示した赤十字のサンプル値が繰り返される。このため，正のピーク値を求めると図1に示す通りとなる。正のピーク位置に赤線，中段に正弦波，下段にサンプル値を示す。なお，下段の青線はサンプル値を直線で結んで示している。

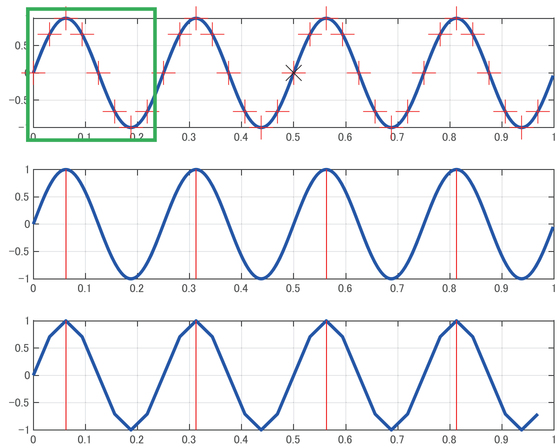

図1　4 Hz の正弦波と32Hz でサンプルした値の関係（上段：時間波形（青線）とサンプル値（赤十字）中段：時間波形と正のピーク位置 下段：サンプル値）

ここで正弦波の周波数を3 Hz にした場合について考える。

図1で考えると，3 Hz は青線が3波となることは容易に想像できる。赤十字を式(1)に基づいて考える。

$$\mathrm{modulo}\ (fs\ ,\ f) = 2 \tag{2}$$

となり，0ではない。これは時計演算で考えると，時計が円を4分割した0時，3時，6時，9時であれば，32回針を動かす時に正弦波の始まりが常に0時になるのに

対し，時計が円を３分割した０時，４時，８時となると正弦波の始まりが０時になるとは限らないことを意味する。すなわち，緑枠に示した最初のサンプル値がその後繰り返さないことを意味する。

これを図で示したものが図２である。図の軸は図１と同じである。図１と図２の違いは，正弦波の周波数ｆだけである。図２は正弦波の隣接する正のピーク値の間に緑矢印，サンプル値の隣接する正のピーク値の間に緑矢印よりも短いものを黒矢印，長いものを橙矢印，で示している。

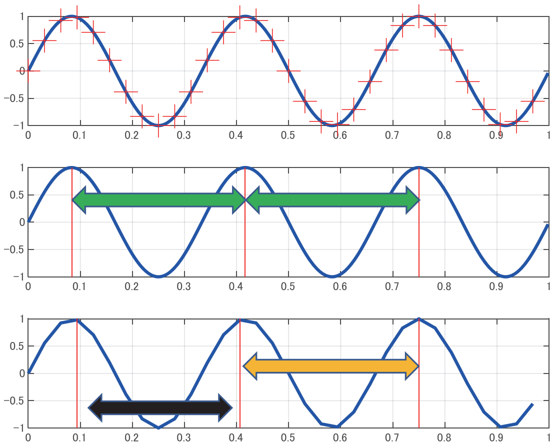

図２　３Hz の正弦波と32Hz でサンプルした値の関係
（上段：時間波形（青線）とサンプル値（赤十字）
中段：時間波形と正のピーク位置
下段：サンプル値）

図２下段の赤線を見ると，上段の赤線と位置がずれていることがわかる。これは式(2)に示した数値現象がサンプリング時に持つ意味である。

これらは，式(1)の条件を満たさなければ波形のピークから周期を求めることが難しいことを示しており，零交差法のように平均操作によって平均値から周期を求める手法が登場した理由も納得のいくものである。

周期を調べる手法の１つであるフーリエ変換で周期を求めた結果を示す。図３にｆ= ４Hz，すなわち図１の波形から求めた振幅スペクトルを示す。上段に青線，下段に赤十字の振幅スペクトルを示す。図の横軸は正規化周波数を示し，縦軸は振幅を示している。正弦波が４Hz の場合，サンプル値も同じ形の繰返しが確認されるので，その周波数特性も同じになると予想される。

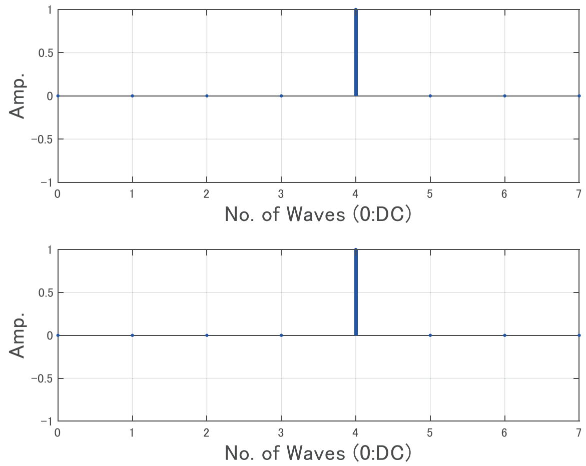

図３　４Hz の正弦波を512Hz（16倍オーバーサンプリングし連続値に見立てた信号）でサンプリングした際の振幅スペクトル（上段）と32Hz でサンプリングした際の振幅スペクトル（下段）

図は，周波数分解能がサンプリング周波数とサンプル個数Ｎにより

$$\triangle f = fs / N \tag{3}$$

で決まることによる違いがあるものの，波の数を横軸とした図では周波数が４Hz であることが確認できる。

次に，ｆ= ３Hz の結果を図４に示す。図の軸は図３と同じである。

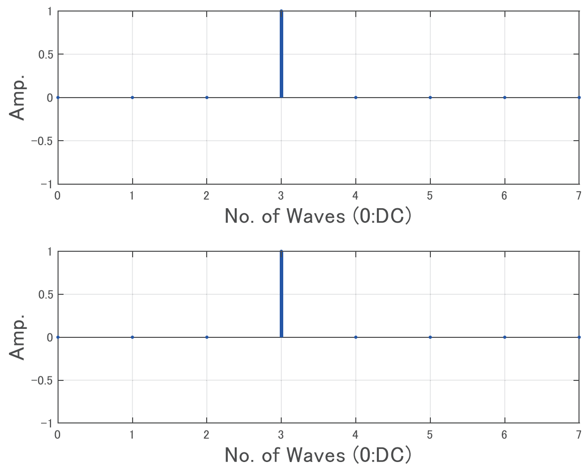

図４　３Hz の正弦波を512Hz（16倍オーバーサンプリングし連続値に見立てた信号）でサンプリングした際の振幅スペクトル（上段）と32Hz でサンプリングした際の振幅スペクトル（下段）

これは，分析区間内に整数個の波数となっており，図１および図２に示すいずれの場合も横軸時刻ｔ= ０からｔ= １に向かって時間がプラスに変化した時（正順）に

$$x(t) = A \sin(2\pi f t) \tag{4}$$

が成立し，横軸時刻 t＝１を t＝０と読み替え，t＝０を t＝－１と読み替え（逆順）ても式(3)が成立するためである。すなわち，波形の先頭から見ても，後部から見ても正弦波であるためである。しかし，振幅スペクトルでは区別がつかないため，図５に図３および図４のスペクトルを示す。図は上段に fs＝４（Hz），下段に fs＝３（Hz）を示し，左側にスペクトル実部（cos 成分），右側にスペクトル虚部（sin 成分）を示す。

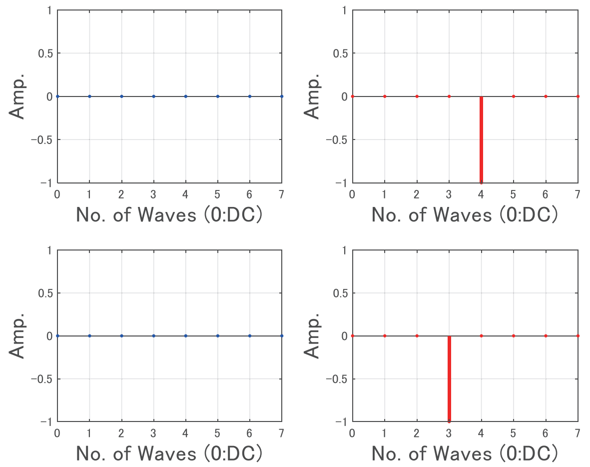

図５　f＝４Hz（上段）および f＝３Hz（下段）のスペクトル実部（左・cos 成分）および虚部（右・sin 成分）

図５は，いずれも正弦波を示す虚部で線スペクトルとなっていることを示している。

しかし，実測において線スペクトルが得られることは少ない。このため零交差法で間隔を求め，その平均操作で間隔を推定することが多い。

ここで，図２について考えると，隣接する正のピーク間隔がずれて見えた原因は，式(2)に示した通り時計演算で考えると波の開始位置とサンプリングのタイミングが重なるかどうかの問題であった。

そこで，解析するサンプル数が正弦波の周期の整数倍でない場合を考える。フーリエ変換はその原理式に示されるように周期積分が大前提である。すなわち，解析するサンプル数が周期の整数倍でない場合，正弦波および余弦波の積分値が０となるという条件を満たさない。フーリエ変換は内積計算であり，直交解析であることからその解は LSE（Least Square Error：最小二乗誤差）が保証されるが，周期ずれによる誤差が見えるはずである。ここでは，解析するサンプル数が３サンプルずれている場合を例として示す。

図６に，図１下段で示した条件において分析サンプル数を３サンプル短く分析した結果を示す。図は上段にサンプル値，中段に振幅スペクトル，下段左にスペクトル実部，下段右にスペクトル虚部を示す。

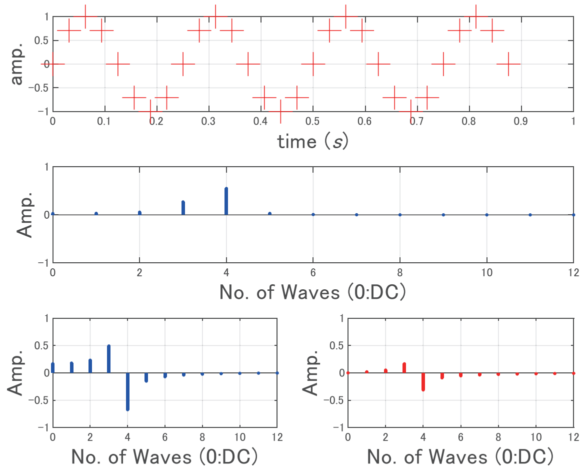

図６　４Hz の正弦波を32Hz でサンプリングし「29＝32－３サンプル」で分析した際のサンプル値（上段）振幅スペクトル（中段）と実数スペクトル（下段左）虚数スペクトル（下段右）

図６上段のサンプル値は図１のサンプル値と同じであるが，分析に使用するサンプル数が３サンプル短くなっていることを示している。信号は式(3)の通り正弦波であるが，先述のように時刻を正順と逆順で考えると波形が偶関数となっていることがわかる。このため，スペクトル虚部（sin 成分・奇関数成分）ではなく，スペクトル実部（cos 成分・偶関数成分）の振幅が大きくなっている。振幅スペクトルの最大値を見ると f＝４Hz であると判断できるが，dB で考えると f＝３Hz が－３dB 程度の差しかないため，無視できない。このような条件でいかに f＝４Hz すなわち T＝１/４s を求めるかを考えることが周期を求める際の課題である。

ここで改めてサンプリング定理を考える。ナイキスト周波数がサンプリング周波数の半分になる理由を考える。

正弦波信号 s(t)は

$$s(t) = A\sin(\omega t) = A\sin(2\pi f\ t) \tag{5}$$

であり，未知パラメータは A および f である。すなわち，２個の未知パラメータを解くには方程式が２つ必要である。すなわち，サンプル値は１周期に２サンプル必要であり，それ以上のサンプルでは未知数よりも方程式の数が多いため No Unique Solution（NUS：唯一解無し）となる。但しこの場合は最も次元数の低い解を選ぶ Minimum Norm Solution（MNS：最小ノルム解法）で解を１つに絞ることができる。これがエイリアジング（真の解はより高い次元であるが MNS により最低次の

解が選ばれること）によって生じる現象である。これを理解した上で図７および図８を見ると，サンプル数が少ないわけではないことがわかる。図６と図７・８を比較すると，図６は波の数４すなわち４Hz に値があるが隣接するサンプルは連続ではなく飛び飛びとなっている。これは式(3)に示した周波数分解能⊿ｆによるものである。

fs＝32Hz において32サンプルで分析（N＝32）をするということは

$$\Delta f = fs \ / \ N = 32 \ / \ 32 = 1 \ \mathrm{Hz} \qquad (6)$$

となる。図６では N＝29＝32－３であり

$$\Delta f = 32 \ / \ 29 = 1.1034 \ \mathrm{Hz} \qquad (7)$$

となる。すなわち，４Hz　は式(5)では４⊿ｆとなるが，式(6)では⊿ｆの整数倍とならない。これが，N が周期にあわないと正しい周期が求められない原因である。

このことから，対象とする信号の周波数ｆが周波数分解能⊿ｆの整数倍で表現できれば良いため，表現できるか否かを調べる方法を考える。

スペクトル F(f)の実数部と虚数部は

$$\begin{aligned} F(f) &= (2/T) \int x(t) \exp(\omega t) \ dt \\ &= (2/T) \int x(t) \{ \cos(\omega t) - i \ \sin(\omega t) \} dt \\ &= (2/T) \int x(t) \cos(\omega t) dt \\ &\quad -i (2/T) \int x(t) \sin(\omega t) dt \\ &= F_R(f) - i \ F_I(f) \end{aligned} \qquad (8)$$

であり，実数は cos（斜辺に対する底辺の比率），虚数が sin（斜辺に対する高さの比率）を表しているため，信号の位相によって値が変化する。一方振幅スペクトル P(f)は

$$\begin{aligned} P(f) &= \mathrm{conj}(F(f)) \ F(f) \\ &= (F_R(f) + i \ F_I(f)) (F_R(f) - i \ F_I(f)) \\ &= F_R^2(f) + F_I^2 \ (f) \end{aligned} \qquad (9)$$

であり，底辺の二乗と高さの二乗の和すなわち斜辺の二乗で式(4)A の２乗値となる。すなわち，N を変化させ線スペクトルに最も近くなる N を求めることで周期が導出できる。そこで，N＝６から50において振幅スペクトルの大きさの変化を調べる。その結果を図７に示す。図は，横軸に N，縦軸に振幅スペクトルの大きさを示す。但し，ここではサンプル総数を32サンプルとし，33サンプルから50サンプルのサンプル値は０として計算する。なお，図にはピーク値に補助線を入れている。

サンプリング周波数 fs＝32（Hz）において，周波数ｆ＝４（Hz）の時，周期 T＝８sample となり，図７のピーク間隔が８sample であることから，スペクトルピークの間隔から周期を求めることが出来ることがわかる。

ここで fs＝３Hz で同じ解析を行うとその結果は図８の通りとなる。

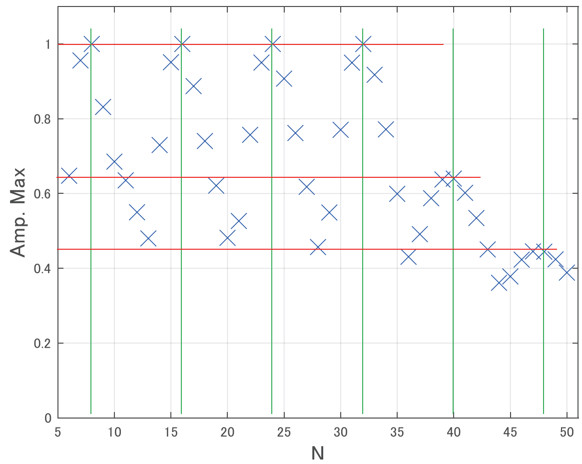

図７　分析に使用するサンプル数 N を６から50に変化させた時の振幅スペクトルピーク値の変化（f＝４Hz，サンプル値の総数は32個とし33サンプル目以降の値は０）

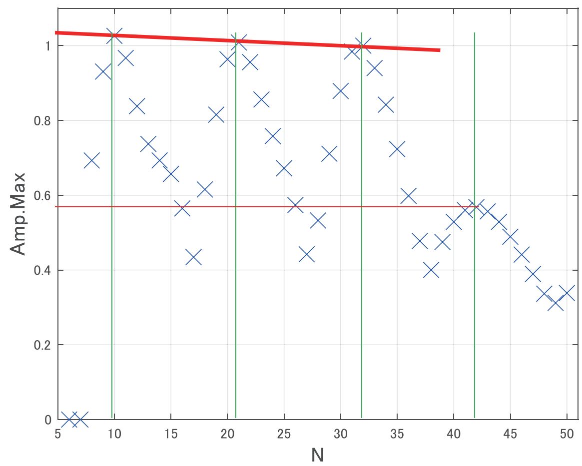

図８　分析に使用するサンプル数（分析区間長）N を６から50に変化させた時の振幅スペクトルピーク値の変化（f＝３Hz，サンプル値の総数は32個とし33サンプル目以降の値は０）

図７ではサンプルが欠落しない32サンプルまでは振幅スペクトルピーク値は１であったが，図８ではピーク値が変化していることがわかる。

ここで１周期のサンプル数を考えると，32サンプルで３波の場合 T＝32/３＝10.666となる。すなわち，N＝32の時のみ正しい値である１となることがわかる。

ここでは正しい値が１であるとわかっているため，N＝32で解析することで正しい周期が求められると判断で

きるが，実際には対象の振幅が未知の条件で分析するので，Ｎが特定できない。

そこで，図８においてＮ＝32が最適な分析に使用するサンプル数（最適分析区間長）であることを判断する方法を考える。

４．ピーク値からの周期分析

図８に示したサンプル値は総数を32個として調べたが，Ｎを変化してもサンプル値が存在するようにサンプル数を増やし，分析区間長ＮをＮ＝６からＮ＝96まで変化させ図８と同様の分析を行った。その結果を図９に示す。図には，図８と同じ形式にピーク位置のマークを赤とし上段に示し，中段に上段に示したピーク位置のみを示し，下段に横軸に示す分析区間長で求めたスペクトルの位相累計値を示す。

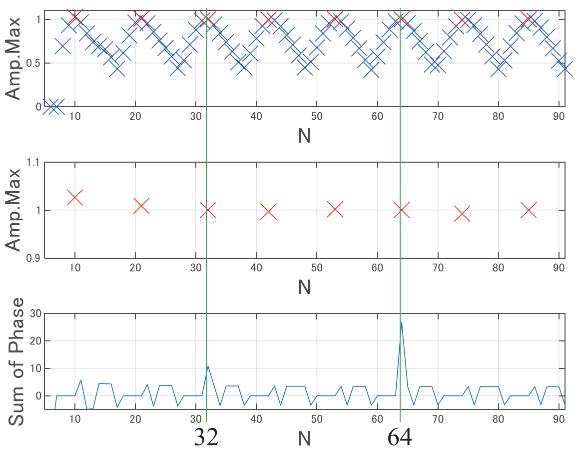

図９　f＝３Hz における分析区間長Ｎを６から96に変化させた時の振幅スペクトルピーク値の変化とピーク値（上段），ピーク値（中段），位相スペクトル累計値

図９はＮ＝32＝ＴおよびＮ＝64＝２Ｔ，で位相累計値がピークとなることを示している。この時，図中段の振幅スペクトルピーク値は１を示しており，その間隔が一定すなわち振幅スペクトルピークの揺らぎも繰り返していることを示している。確認のため，累計前の位相スペクトルを図10に示す。図は上段中央にＮ＝32, 比較としてＮ＝30＝32－２（左），Ｎ＝34＝32＋２（右）も合わせて示す。また下段中央にＮ＝64, Ｎ＝62＝64－２(左)，Ｎ＝66＝64＋２（右）も合わせて示す。

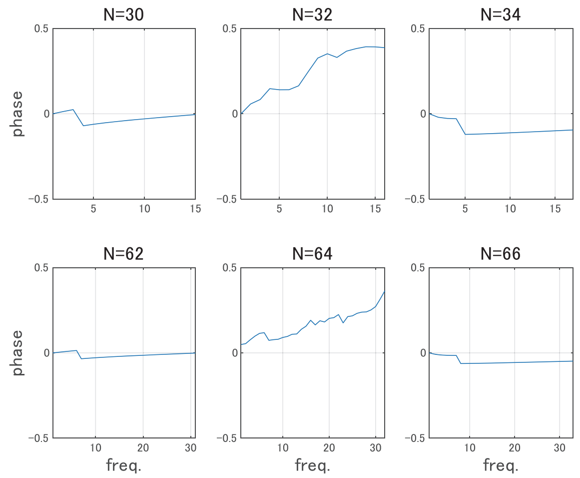

図10　位相累計値がピークとなる分析区間長Ｎ付近の位相スペクトル
上段：N＝30（左），N＝32（中央），N＝34（右）
下段：N＝62（左），N＝64（中央），N＝66（右）

位相スペクトルは図５および図６に示した実部と虚部の比である。このため，線スペクトルに近いほどキャンセル要素が少なくなる。このため，振幅スペクトルのピークと対応して位相累計値も大きくなったものと判断する。

これまでは元データとして図１および図２に赤十字で示したサンプルから周期を求めている。これまで述べてきたことから，最適分析区間長を求め周波数分解能が対象の周波数を数値記述するのに最適なサンプル数となれば周期を正しく求めることが出来ることが明らかとなった。また，その過程で，Ｎを変化させスペクトルのピークを求めると，そのピークがおおよそＴで繰り返しているだけでなく，Ｔの整数倍となる緩やかなうねりを生じることが明らかとなった。

周期を求める目的には，例えばエンジンにおけるスパーク周期や，回転軸に付けた反射板を使い計測した値から周期を求める場合，等がある。これは，図１および図２の赤縦線で示される値からの周期解析となる。

この周期解析が難しい理由は，式(4)に示す通り，周期関数の１つである正弦波で考えると，未知パラメータが振幅の最大値を示す係数Ａと周期Ｔの逆数である周波数 f＝１/Ｔ の２個であるのに対して，１周期以内の観測信号が１つとなるためである。連立方程式では未知パラメータの数と同数の方程式が必要であり，方程式が少ない場合，No Unique Solution（唯一解無し）となる。

ここでは，スパーク信号の計測においても，反射光の計測においても振幅値も計測できるものとして，図９中段の揺らぎから周期を求める方法を検討する。

図11に図１に示した赤縦線のサンプルのみの時間波形（上段）と，その振幅スペクトル（中段），スペクトル実部（下段左）と虚部（下段右）を示す。時間波形は横軸を秒で，他は横軸を周波数で示す。また分析区間長Ｎを図９と同様に変化させ振幅スペクトルピークおよび位相累計値を調べた結果を図12に示す。

図は，累積位相値(下段)のピーク間隔が８サンプル，振幅スペクトルピーク（中段）の周期（同程度の値の変化感覚)も８サンプルであることが分かる。確認のため，中段の振幅スペクトルピークを波形に見立てて振幅スペクトルを求めた結果を図13に示す。

図13より，図12中段に示した波形は，周期24サンプルで繰り返していることを示している。図13の横軸は96サンプルであるため，96/24＝４sampleとなり，これが波形１周期から１サンプルの抽出であることを考えると，この２倍である８sampleが周期であることがわかる。これは，図12緑線の間隔と等しい。さらに，Ｎが８の倍数で位相累積値がピークを繰り返しているのでfs＝32Hzのためｆ ＝ fs/８＝32/８＝４Hz，すなわち，Ｔ＝１/４（s）が元信号の周期でかつ最適分析区間長であることがわかる。

確認のため，同様の解析をfs＝３Hzで実施した結果を示す。この場合，原信号の周期Ｔが32/３sampleであるため，Ｎの最適値は32であり，周期Ｔは32/３＝10.666（s）である。図14に図11と同じく上段に時間波形，中段に振幅スペクトル，下段左にスペクトル実部，下段右にスペクトル虚部を示す。図15に図12と同じく，Ｎを変化させた際のスペクトルピーク値（上段），ピーク値（中段），累積位相値（下段），を示す。図16に図13と同じく，図14中段の振幅スペクトルを示す。

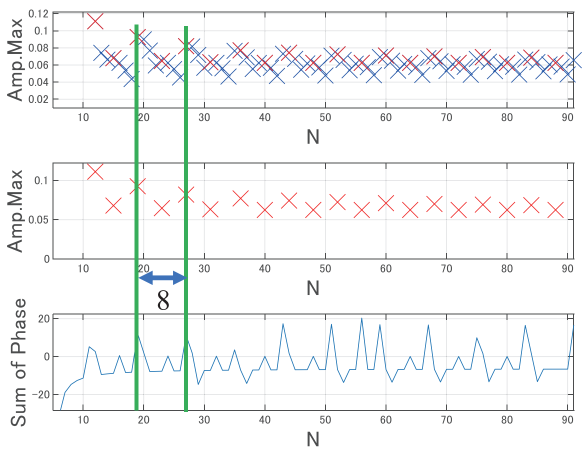

図12　f＝４Hzのピーク値で構成したパルス列において分析区間長Ｎを６から96に変化させた時の振幅スペクトルピーク値の変化とピーク値（上段），ピーク値（中段），位相スペクトル累計値（下段）

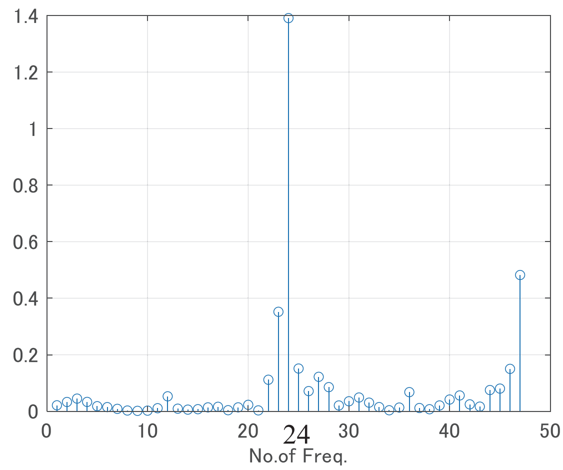

図13　振幅スペクトルピーク値（図12中段）を時間波形に見立てた振幅スペクトル

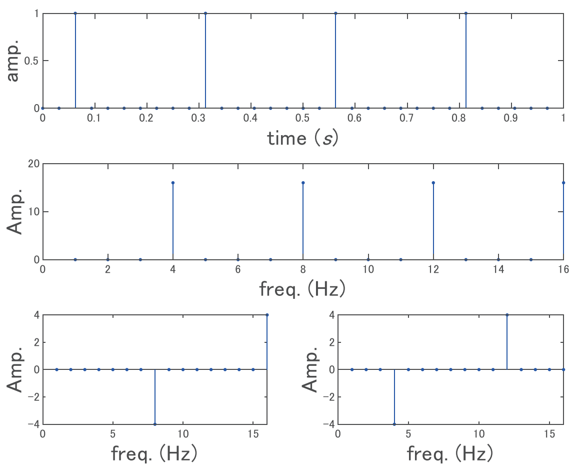

図11　f＝４Hzの正弦波の波形ピーク値を時間波形（上段）と見立てた時の振幅スペクトル（中段）およびスペクトル実部（下段左）とスペクトル虚部（下段右）

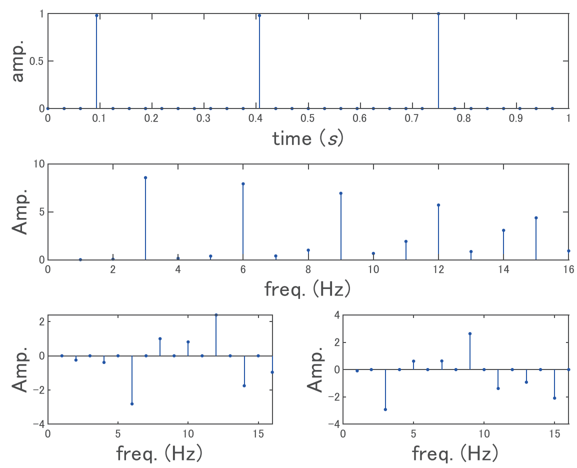

図14　f＝３Hzの正弦波の波形ピーク値を時間波形（上段）と見立てた時の振幅スペクトル（中段）およびスペクトル実部（下段左）とスペクトル虚部（下段右）

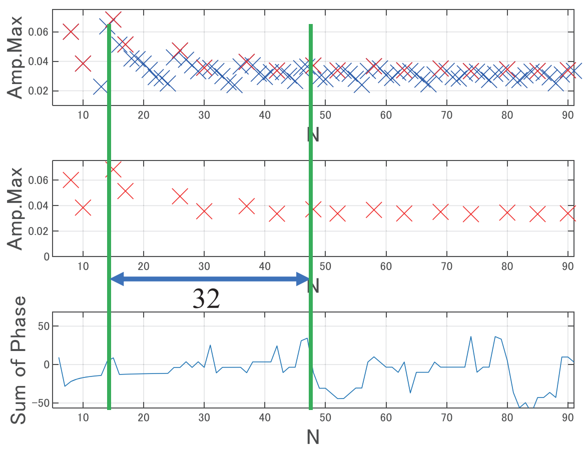

図15　f＝３Hz のピーク値で構成したパルス列において分析区間長 N を６から96に変化させた時の振幅スペクトルピーク値の変化とピーク値（上段），ピーク値（中段），位相スペクトル累計値（下段）

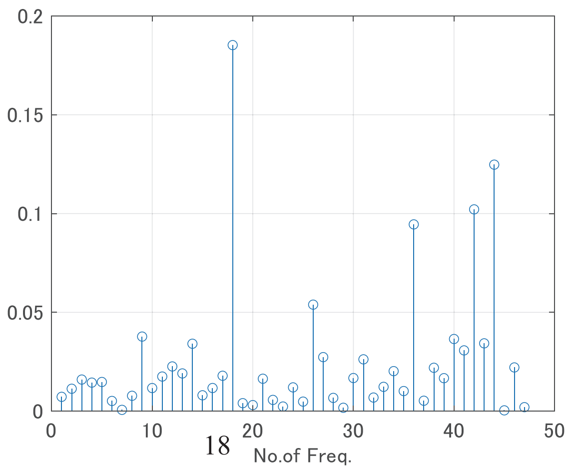

図16　振幅スペクトルピーク値（図15中段）を時間波形に見立てた振幅スペクトル

図16から周期 T＝２(96/18)＝２(5.333)＝10.666(s) となる。これは，f＝３（Hz）の時の周期 T＝32/３に等しい。このことから，T が整数でなくても周期を求められることが確認できた。ここまでは数値シミュレーションの結果である。この推定手法の有用性を検証するため，冒頭で述べたスマートフォンの計測結果を使って周期解析を行う。

５．加速度センサデータ取得プログラムと周期分析

周期解析のため，スマートフォンを図17に示す台座に置き一定周期で天板を３軸それぞれ周期的に揺らす。

スマートフォンには MatLab Mobile で fs＝10Hz で３軸加速度センサにて計測を行う。計測例を図18に示す。図は X 軸（横方向）を青，Y 軸（縦方向）を赤，Z 軸（液晶面に垂直方向）を黒，で示す。図より Z 軸は重力加速度9.8（m/s２）が加わっていることがわかる。X 軸と Y 軸の変化量から計測開始が，X 軸が－cos,Y 軸が sin の開始位置に近いことがわかる。ここでは，数値シミュレーションと比較しやすい Y 軸の数値を使用する。

図18の赤印で示した Y 軸の数値は，約９秒で６回または７回の繰返しが確認できる。このデータにおいて正のピーク値のみを図１の赤線同様にサンプル値とする。このサンプル値を図11から図13と同様の分析を行う。その結果を図19から図21に示す。

図17　一定周期でスマートフォンを揺らす装置

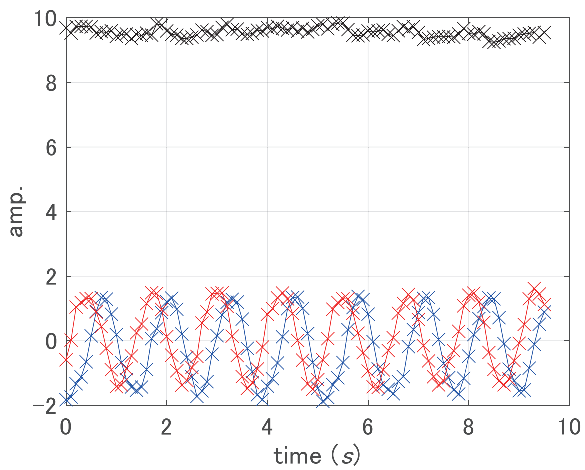

図18　スマートフォンの MatLab　Mobile による内蔵３軸加速度センサ計測例

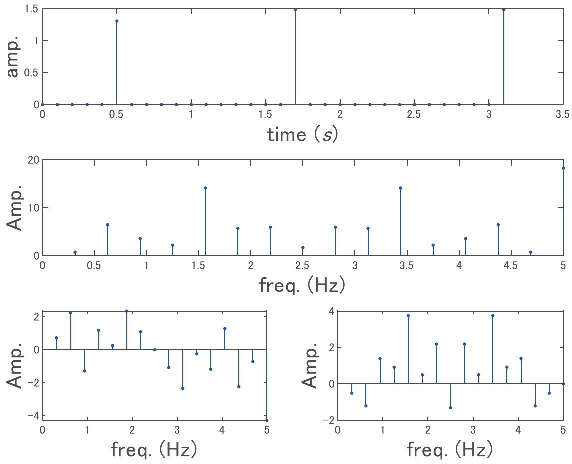

図19　実測Ｙ軸加速度波形のピーク値を時間波形（上段）と見立てた時の振幅スペクトル（中段）およびスペクトル実部（下段左）とスペクトル虚部（下段右）

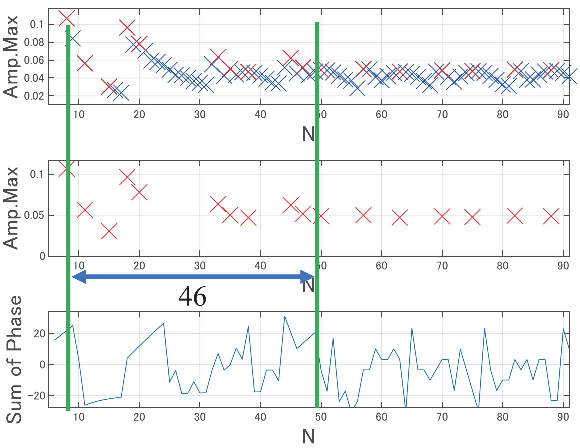

図20　実測Ｙ軸加速度波形の振幅ピーク値で構成したパルス列において分析区間長Ｎを６から96に変化させた時の振幅スペクトルピーク値の変化とピーク値（上段），ピーク値（中段），位相スペクトル累計値（下段）

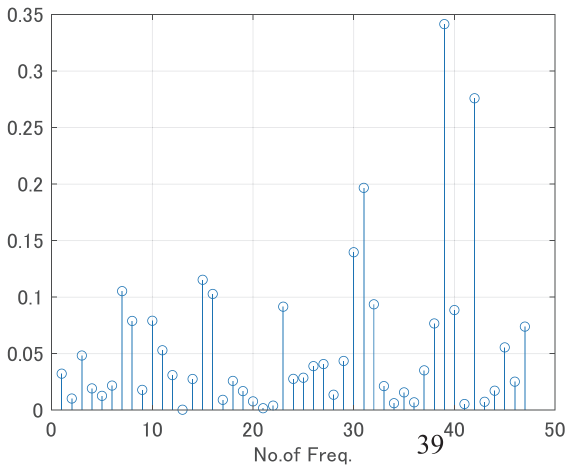

図21　振幅スペクトルピーク値（図15中段）を時間波形に見立てた振幅スペクトル

図21から周期Ｔ＝２（96/39）＝4.923であることがわかる。ここで計算機シミュレーションと実験のサンプリング周波数の違いを補正すると，Ｔ＝4.923（10/32）＝1.5385（s）となる。これは図20に示す最適分析区間長Ｎ＝42に基づいて計算すると，1.5385（96/46）（10/32）＝1.0034≒１となる。このことから推定値が妥当であると判断する。

また，以上のことから，本稿で提案する手法により周期推定が可能であると判断する。

６．おわりに

本稿では，工学の基本でありまた今もって未解決な課題のある周期解析について，

１）対象の周期と分析に使用するサンプル数が適切（最適分析区間長）でなければならないこと，

２）最適分析区間長の求め方，

３）サンプリング定理を満たさないサンプル条件として，１周期につき１サンプルしか得られない観測振動からの周期分析，

の３項目を明らかとした。これは，現実事象（Physical Event）を数値（Cyber）に適切に変換する入口であり，CPS（Cyber Physical System）において，例えばビッグデータのデータ信頼性に関わる重要な項目である。

また提案手法はスマートフォンを使用した実測実験でその有用性を検証し，妥当であることを明らかとした。

なお本稿に示した基礎理論は，日本文理大学・大学院・工学研究科・環境情報専攻で開講されている，数理解析特論Ａの学修内容であり，数値シミュレーションの内容は，システム解析学特論Ａの学修内容であり，実機実験はLSI設計支援学特論Ａの学修内容の一部に基づいて実験計画を策定している。また，ここで対象とした現象は，2023年度日本文理大学「卒業研究・論文合同発表会」で発表された中で未解決課題とされたものである。

参考文献

（１）MatLab mobilehttps://jp.mathworks.com/products/matlab-mobile.html（2024年６月10日アクセス）

（２）Thing Speak https://thingspeak.com/（2024年６月10日アクセス）

（３）福島学，黒岩和治，吉川浩司，杉尾啓多，近藤善隆，西森崇晃，“携帯情報端末を用いたセンシングアルゴリズムの検討”，日本文理大学紀要，第

39巻，第１号，pp42-50, 2011
（４）福島学，武村泰範，星芝貴行，川崎敏之，近藤善隆，安鍾賢，重黒木啓介，“振動センサおよび光学センサによる計測に関する一検討―ロボットプロジェクトにおける取り組み事例報告―”，日本文理大学紀要，第40巻，第１号，pp84-92, 2012
（５）福島学，黒岩和治，近藤善隆，“伝送路特性の周波数振幅包絡に生じる変調分析による距離推定手法を用いた微振動計測の研究”，日本文理大学紀要，第40巻，第１号，pp37-44, 2012
（６）福島学，松永多苗子，稲川直裕，伊藤順次，有吉雄哉，岡崎覚万，藤田造輝，室園昌彦，杉山雄記，野見山翔五，山下涼介，大里一矢，鶴野瑞穂，“ロボットプロジェクト関連科目における遠隔講義実践事例報告”，日本文理大学紀要，第48巻，第２号，pp. 85-94，2020

（2024年６月25日受理）