

高分解能・高速測定可能なヘテロダイン測長方式

横山 修子 岡本 炳人*

1. 概論

2周波光源を用いるヘテロダイン測長方式は、単一周波光源を用いた測長方式に比べ、次のような点で優れている。

単一周波数方式で得られる距離情報はDC信号として検出処理されるのに対し、2周波方式ではAC信号として検出処理される。即ち、単一周波数方式では、距離情報が参照レーザ光と反射レーザ光による干渉縞の光の強さとして表現されるのに対し、2周波方式では参照レーザ光と反射レーザ光の2周波間の位相差として表現される。このため2周波方式は交流増幅器で安定した信号処理ができるので、単一周波数方式に比べより少ないパワーでより高いS/N比が達成できる。このことから2周波方式では、簡便な測定において光学系の調整は遙かに簡単に測定可能な信号を出すことができる。

ヘテロダイン干渉計は、それぞれ周波数 $f_1, f_2 (f_1 > f_2)$ を持ち、互いに直交する直線偏光 F_1, F_2 を持つ光源を用い、被測定物の移動によるドップラ効果で引き起こされる光の周波数シフトを利用した干渉計である。以下に簡単にしくみを述べる。光源から出た光は、まず偏光ビームスプリッタにより F_1 と F_2 に分離される。 F_1 のみが被測定物に固定されたコーナキューブに当てられ、その周波数 f_1 は被測定物の移動により周波数シフト Δf を得る。周波数シフトを受けた光 F_1 (freq. $f_1 + \Delta f$) は、偏光子により再び F_2 と重ね合わせられ検知器で取り出される。このとき取り出された信号は、周波数

$$s = f_1 - f_2 + \Delta f$$

を持つビート信号である。一方、周波数シフトを受けない F_1 と F_2 の光を偏光子で重ね合わせ、検出器で取り出した参照用ビート信号の周波数は

$$r = f_1 - f_2$$

であり、 s と r との周波数差 Δf を調べ、これを時間で積分することにより、被測定物の移動量を知るものである。 Δf が正となる方向の被測定物の移動量は、その移動速度に依らず観測可能である。 Δf が負となる方向の被測定物

の移動量は $|\Delta f| \leq r$ である移動速度においては観測が可能であるがこれを越える速度になると、得られるビート信号の周波数 s は0から再び増加していくため移動方向があたかも逆転したような信号となり測定できなくなる。このことから従来のヘテロダイン干渉計は、 r の値で決まる被測定物の移動速度制限を持つ。従来はこの移動速度制限をなるべく大きくするために、内部ビート周波数 r の大きな2周波を持つ光源を選んできた。しかしこのことが一方では、ビート信号の1周期を細分化し、高分解能を得ることを困難にしておき、かつ、内部ビート周波数の大きなレーザを安定して得ることは困難である。

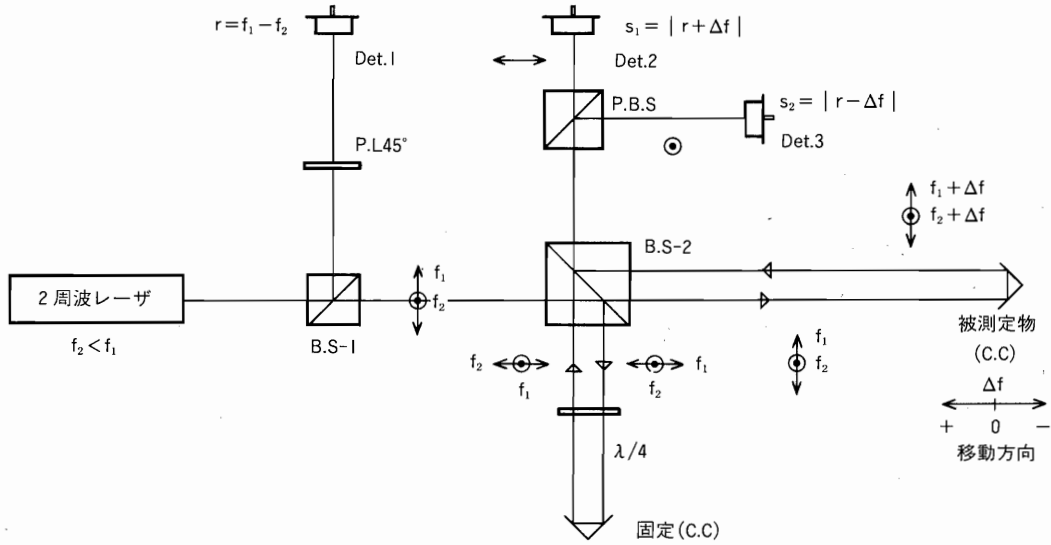
ここでは、内部ビート周波数 r の高い光源を用いず、被測定物の移動速度制限をなくすシステムを開発した。内部ビート周波数の小さな光源を用いているので、高周波技術の必要なく高分解能を得ることができた。尚、本システムで用いた光源は、内部ビート周波数130KHzの周波数安定化Zeeman laserである。

2. 光学系

本システムの光学系は図1に示すようであり、2周波レーザの互いに直交した2つの直線偏光 F_1, F_2 (freq. f_1, f_2) を干渉計の同じパスに通す。 F_1, F_2 の一部をB.S-1(ビームスプリッタ)で取出し、これの干渉光をDet.1(ディテクタ)で検知する。検知されたビート信号 R (freq. r) は参照用の信号として用いる。B.S-1を透過した F_1, F_2 は更にB.S-2でそれぞれ透過光、反射光に分割する。透過光は被測定物に取りつけられたC.C(コーナキューブ)で反射される際、その周波数 f_1, f_2 は被測定物の移動によるドップラ効果で、 Δf の周波数シフトを受ける。また、反射光は $\lambda/4$ 板を2度通過することにより、それぞれの偏光方向を 90° 旋光される。透過光と反射光はB.S-2で再び重ねられ、新たに2つの直交する干渉光 S_1, S_2 (freq. s_1, s_2) が生成される。即ち透過光 F_1 は反射光 F_2 と重ねられ干渉光 S_1

この論文の内容は1990年8月にドイツで開かれたINTERNATIONAL COMMISSION FOR OPTICS主催の第15回Optics in Complex systemsで発表したものを論文にまとめたものである。

*) 研究開発部 チーフリーダー



Δf : 被測定物の移動によるドップラシフト周波数。 s_1 : $f_1 + \Delta f$ と、 f_2 のビート周波数。
 r : 参照用ビート信号の周波数。 s_2 : $f_2 + \Delta f$ と、 f_1 のビート周波数。

図1. 本システムの光学系

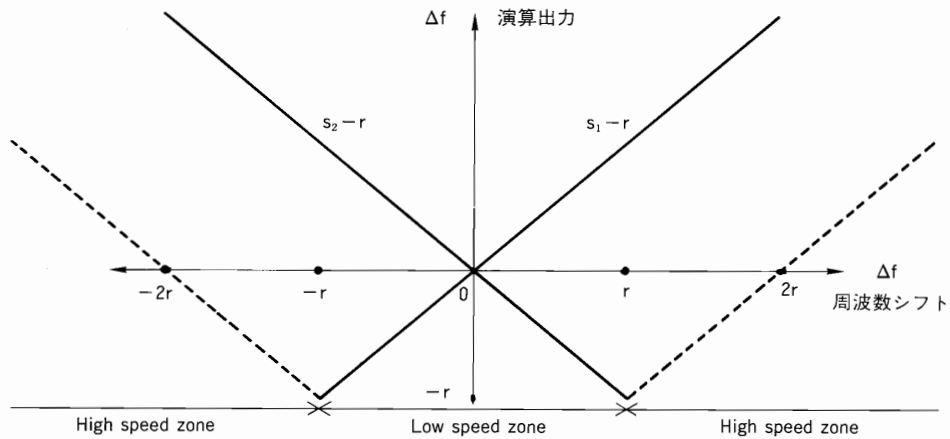


図2. 周波数シフト Δf と $s_1 - r$ 、 $s_2 - r$ の演算出力 Δf

となり、透過光 F_2 は反射光 F_1 と重ねられ干渉光 S_2 となる。
 S_1 、 S_2 は P.B.S (偏光ビームスプリッタ) で分けられた後、それぞれ、Det.2、Det.3 によってビート信号として取り出される。今、 $f_1 > f_2$ とすると、 s_1 、 s_2 、 r は次のようである。

$$s_1 = |r + \Delta f| \dots\dots\dots(1)$$

$$s_2 = |r - \Delta f| \dots\dots\dots(2)$$

$$r = f_1 - f_2 \dots\dots\dots(3)$$

移動速度が小さいとき、即ち $|\Delta f| < r$ の範囲では s_1 、 s_2 は r について共役である。従って Δf は $s_1 - r$ または、 $s_2 - r$ の演算をすることによって求められる。しかし、移動速度が大きくなり $|\Delta f| > r$ になれば Δf が正のとき

$$s_2 - r \neq \Delta f \dots\dots\dots(4)$$

であり、 Δf が負のとき

$$s_1 - r \neq \Delta f \dots\dots\dots(5)$$

となる。従って本システムでは、 Δf が正のときには $s_1 - r$ の演算結果を利用し、 Δf が負のときには $s_2 - r$ の演算結果を利用することにより被測定物の移動速度が大きくなったとしても、その移動距離を知ることができるようにした。

3. 信号処理系

3.1 信号処理の原理

前説に述べた通り被測定物の移動による周波数シフト Δf は、図1の光学系より得られた基準周波数 r を持つ参照用ビート信号 R と2つのビート信号 S_1 、 S_2 (freq. s_1 、 s_2) を入力信号とし、 $s_1 - r$ 、 $s_2 - r$ の演算をすることによって求められる。

周波数シフト Δf と $s_1 - r$ 、 $s_2 - r$ の演算出力の関係は図2

のようである。

ここで、 s_1-r 、 s_2-r は各々独立に同一機能を持つユニットにより算出されるが、その演算結果に関しては以下のように分類し処理する。

1. s_1-r 、 s_2-r のそれぞれ破線で示した領域の出力は、物理的に意味のないものであるので全く使用しない。破線領域のうち正の出力のみ削除を行う。
2. s_1-r の実線で示した領域の出力のうち、正の演算結果は被測定物が $\Delta f > 0$ の方向に単調に運動したときの測定に使用する。
 s_2-r の実線で示した領域の出力のうち、正の演算結果は被測定物が $\Delta f < 0$ の方向に単調に運動したときの測定に使用する。
3. s_1-r 及び s_2-r の実線で示した領域のうち、負の演算結果は被測定物が運動の方向を変えるときに使用する。

3.2 構成と機能の概略

本システムの基本となる演算 s_1-r 、 s_2-r は、それぞれ図3に示す周波数差検出ユニット (Frequency Difference Detector Unit) で行なう。

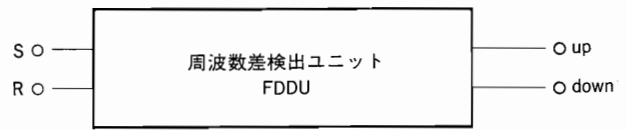


図 3

このユニットは測定信号S(S_1 または S_2)、および参照信号Rを入力信号とし、これらの波形を内蔵のクロックでそれぞれサンプリングすることにより、 $s-r$ の正の周波数差をup端子から出力されるパルス数に、負の周波数差をdown端子から出力されるパルス数にreal timeで変換する。(up端子から出力されるパルスをupパルス、down端子から出力されるパルスをdownパルスと呼ぶ。)

3.1における信号処理の原理で述べた通り、本システムでは全ての範囲に於ける周波数シフト Δf を測定するために、 $\Delta f > 0$ の方向の運動の測定は s_1-r の正の演算結果を利用し、 $\Delta f < 0$ の方向の運動の測定は s_2-r の正の演算結果を利用する。

従って、図3で示したFDDUの1つ (FDDU #1) には入力信号Sに S_1 を用い、その出力であるupパルスをインクリメンタルパルスとして、他方2つ目のFDDU (FDDU #

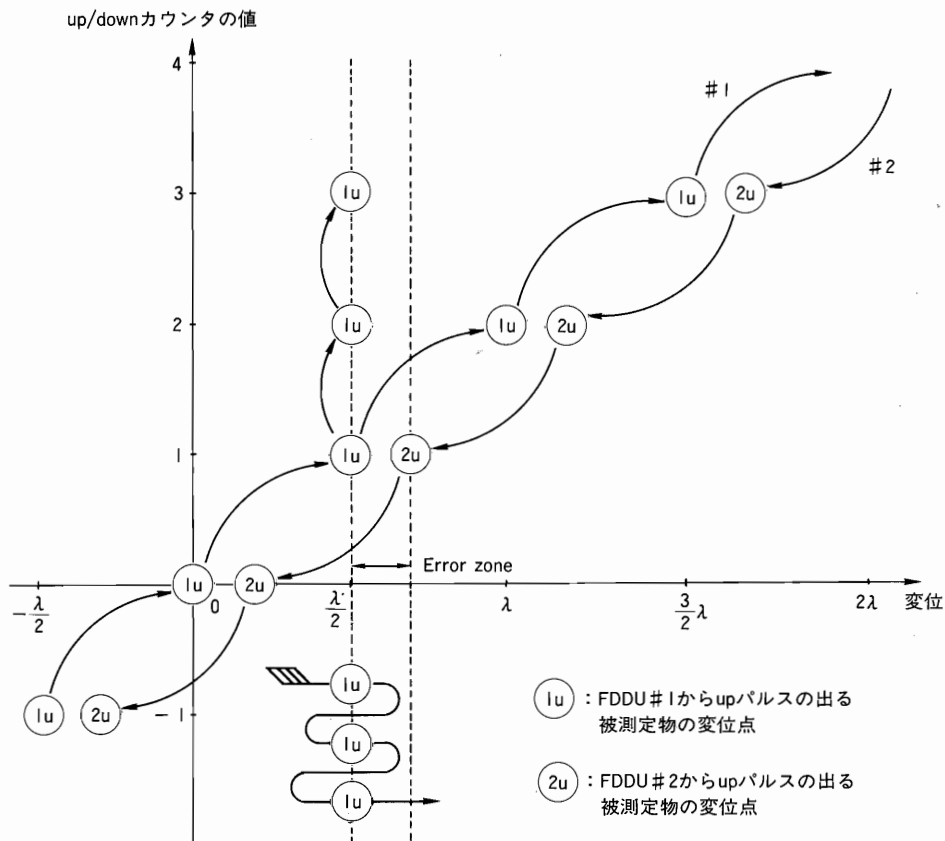


図 4. 被測定物の動きとFDDU #1、#2のupパルス出力および up/downカウンタの値の関係

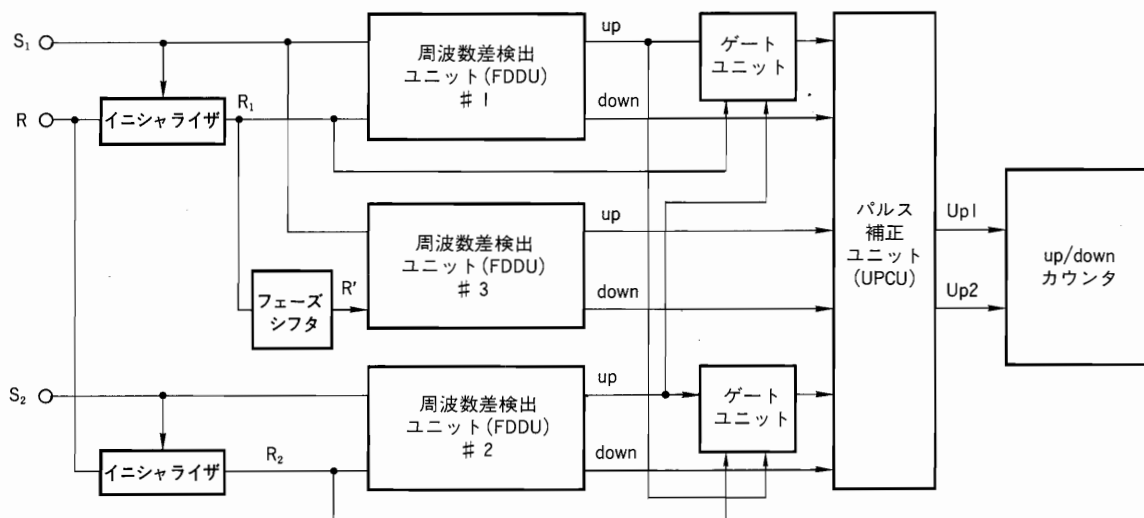


図5. 信号処理系

2) には入力信号SにS₂を用い、その出力であるupパルスをディクリメンタルパルスとして、up/downカウンタに入力すると、その結果カウンタの値は $\Delta f > 0$ の方向の変位を正とする被測定物の変位量を示す。ここで、被測定物の動きとFDDU #1, #2のupパルス出力及びup/downカウンタの値の関係を見ると、例えば図4のようになる。

被測定物が $\Delta f > 0$ の方向に単調な運動をするときは、 $\lambda/2$ の変位ごとにFDDU #1からupパルスが1つ出力される。このときの被測定物の変位点をⓐで記す。一方被測定物が $\Delta f < 0$ の方向に単調な運動をする場合は、やはり $\lambda/2$ の変位ごとにFDDU #2からupパルスが1つ出力される。このときの変位点をⓑで記す。

ここで、本システムの光学系、信号処理系が全て理想的であれば図4の全てのⓐ, ⓑはそれぞれ一致するはずである。しかし、現実にはⓐ, ⓑ間には図に見られるようなずれが生じる。このずれの間隔をError zoneと呼ぶ。

今、被測定物が図4中の曲がった矢のようにError zoneの中で折り返すとする。このときはFDDU #1からのみupパルスが続けて出力され、これがそのままカウントされてしまうため、被測定物はあたかも $\Delta f > 0$ の方向に単調な運動を行っているかのように観測されてしまう。従って、このようなエラーカウントによる誤った観測が行われないようにする工夫が必要である。以上の要請に基づいた信号処理系の構成を図5に示す。

前述したようにs₁-r, s₂-rの演算処理はそれぞれFDDU #1, #2で行なう。更に図4で示したError zoneの幅を小さくするために専用のフェーズシフタを設けた。これをイニシャライザと呼び、その詳細は3.3に述べる。

同じく図4で示したエラーカウントの補正は、フェーズシフタ、FDDU #3、パルス補正ユニット (Up/down Pulse Correcting Unit) の3つのユニットを使って行う。この

うちUPCUはFDDU #1~ #3の出力である3組のup, downパルスを入力とし、Up1, Up2パルスを出力する。Up1パルスはup/downカウンタのインクリメンタル入力となり、Up2パルスはディクリメンタル入力となる。被測定物が単調な運動をするときは、FDDU #1のupパルスはUp1パルスとなり、#2のupパルスはUp2パルスとなる。被測定物が折り返し運動をするときのみUPCUは動作する。

フェーズシフタ、FDDU #3の機構並びに動作に関しては3.4.1で、UPCUの機構並びに動作に関しては3.4.2で述べる。

ゲートユニットは、3.1の1で述べた物理的に意味のない出力領域の正の部分の削除を行う。機構並びに動作に関しては3.5で述べる。

3.3 イニシャライザ

3.2で述べたError zoneの原因として次のようなことが考えられる。

- (1) s₁とRおよびs₂とRの初期位相差(図1の光学系で生成された干渉光をそれぞれ検出器により電気信号に変換した直後の位相差)をそれぞれ $\phi_{s1,R}$, $\phi_{s2,R}$ とすると、

$$|\phi_{s1,R} - \phi_{s2,R}| \neq 0$$

で示される初期位相差誤差が存在する。

- (2) FDDU内で使用されている素子の特性値が、#1, #2の間で異なる。

この内Error zoneの原因として支配的なのは(1)の方である。(1)を引き起こす原因として更に考えられるのは、光学系におけるビームスプリッタ等の光学素子による光学的な位相シフト量のアンバランスおよび、検出器の誤差である。

イニシャライザは、(1)で示した誤差を0に近づけ

るために設けられたユニットである。即ち、測定スタート時に電氣的にRの初期位相を S_1, S_2 の初期位相それぞれに等しくセットすることにより、

$$|\phi_{S_2,R1}| = |\phi_{S_2,R2}| = 0$$

に近づけるユニットである。

3.4 エラーカウント補正機能

エラーカウントの補正は、フェーズシフタ、周波数差検出ユニット(FDDU#3) up/downパルス補正ユニット(UPCU)により行われる。

これらのユニットは被測定物のError zone内での折り返しを認識し、更にup/downカウンタでエラーカウントが行われないう、パルス補正をすることにより誤った観測を防いでいる。

これらのユニットのうち、特にup/downパルス補正ユニットはFDDU#1, #2のupパルス出力と共にdownパルス出力も利用している。従って、これらのユニットで識

別できる折り返し運動は、図2にLow speed zoneとして示した、downパルス出力が物理的意味を持っている速度範囲におけるものである。

ここで、改めてLow speed zoneの被測定物の運動とFDDU#1, #2のupパルスdownパルス出力の関係を見てみると、図6(A), (B)のようになる。即ち、FDDU#1は被測定物が $\Delta f > 0$ の方向に $\lambda/2$ 進む度にupパルスを1つ出力し、また、 $\Delta f < 0$ の方向に $\lambda/2$ 進む度にupパルスが出力されたときの被測定物の変位点と同じ点でdownパルスを1つ出力する。FDDU#2は、これと同様のことをupとdownパルスを入れ替えた格好で行う。

3.4.1 フェーズシフタと周波数差ユニット(FDDU) # 3

被測定物のError zone内での折り返し運動のチェックは、FDDU#1, #2から出力されるup及びdownパルスの出力パターンにより行うが、この出力パターンのチェックは $\lambda/2$ 度にシーケンシャルに並ぶError zone 1つ1つに

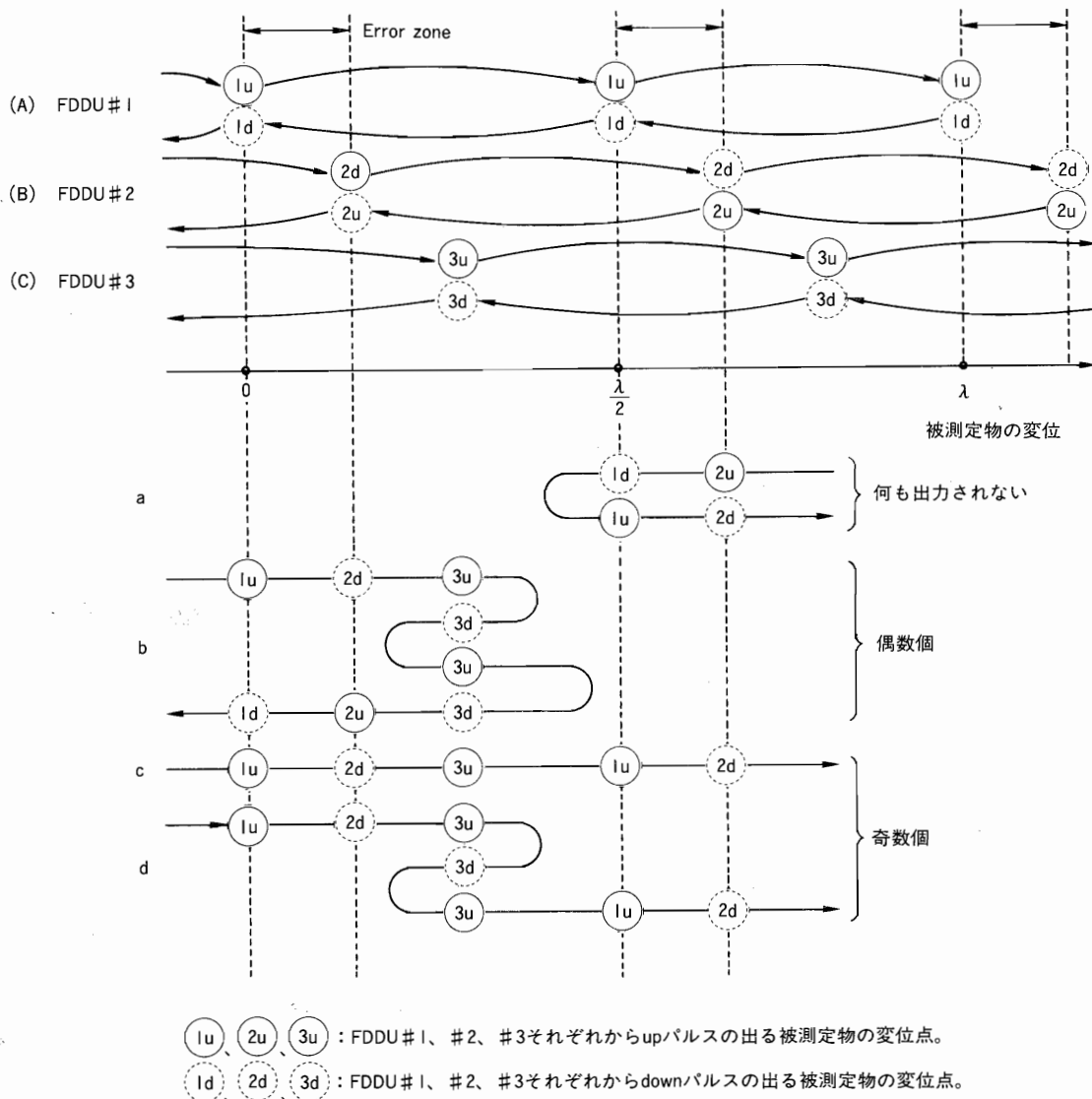


図6. 被測定物の運動とFDDU#1~#3のup、downパルス出力の関係

ついて独立に行う。即ち、この出力パターンの情報は被測定物の動きが1つのError zone周辺の動きから一つ隣のError zone周辺の動きに移るとき、この間で一度resetされる。このresetのtimingをFDDU#3から出力されるupおよびdownパルスを見ることにより決める。

まずフェーズシフタは、 R_1 の位相を半周期遅らせ信号 R' を生成する。FDDU#3はFDDU#1, #2と全く同様に、信号 S_1 と R' の周波数差をupまたはdownパルスで出力する。被測定物の運動とFDDU#1~#3のup, downパルス出力の関係は図6に示す。

被測定物の動きとFDDU#1, #2のup, downパルス出力の関係は既に3.4で述べた通りである。(図6(A), (B)) R_1 より半周期遅れた R' と S_1 を入力とするFDDU#3から、up, downパルスが出力されるときに被測定物の変位点は図6(C)の通り、 R_1 と S_1 を入力とするFDDU#1のup, downパルス出力時の変位点より、ちょうど半周期 $\lambda/4$ だけ遅れる。

今、被測定物が一つのError zone周辺で運動しているとき、その途中ではFDDU#3は何もパルスを出力しないか(図6 a), 合計が偶数個のup, downパルスを続けて出力する(図6 b)。一方、被測定物が一つのError zone周辺の運動から一つ隣のError zone周辺の運動に移るとき、これらの運動の間でFDDU#3は必ず合計が奇数個のup, downパルスを続けて出力する(図6 c, d)。従って、FDDU#3が合計奇数個のup, downパルスを続けて出力したときにFDDU#1, #2のup, downパルス出力パターン情報をup/downパルス補正ユニットにおいてresetする。

3.4.2 up/downパルス補正ユニット(UPCU)

一つのError zone周辺における、被測定物の折り返し運動によるFDDU#1, #2からのup, downパルス出力パターンを調べ、Error zone内の折り返し運動を確認し、更にup/downカウンタでエラーカウントが行われないようパルス補正をするユニットである。

3.4.2.1 一つのError zone周辺における折り返し運動と出力パルスパターンの解析

被測定物が一つのError zoneの内、外で折り返すときのFDDU#1, #2のupおよびdownパルス出力パターン(パルスの時間的位置関係)を解析する。

その前にError zoneの性質について述べる。Error zoneは3.3で既に述べたような理由で発生するものであるので、FDDU#1と#2から出力されるパルスに対応する被測定物の変位点の前後関係および幅は任意であり(図7, (a), (b)), しかもこれらは時間経過と共に刻々変化する可能性がある。従って、被測定物が折り返し運動を行っている間にError zoneの幅が変化したり、#1, #2の出力パルスに対応する変位点の前後関係が入れ換わったりすることもあり得る。*

*例えばイニシャライザの誤差で $|\phi_{S1,R1}| \neq |\phi_{S2,R2}|$

であるとき、誤差の様子が時間的に変化し、その結果 $|\phi_{S1,R1}|$ と $|\phi_{S2,R2}|$ の大小関係が逆転すれば#1, #2の出力パルスに対応する変位点の前後関係が逆転する。

Error zoneの#1, #2出力パルスに対応する変位点の前後関係の変化(これ以後“#1, #2の変位点の変化”と略す)の様子と、そのときの被測定物の折り返し運動によるパルス出力の関係は図8のようである。但し、ここでは Δf が正から負に変わる折り返しのみ考える。

#1, #2の変位点の関係が変わらないとき、Error zoneの内、外での折り返し運動は(a)のようなパルス出力を行う。次に折り返し運動の途中で#1, #2の変位点の関係が逆転した場合を考えよう。まず、被測定物がError zoneの外にいるときに逆転が起こることを考えると、出力パルスは(b)のようになる。更に、被測定物がError zoneの内にいるときに逆転が起こることを考えると、Error zoneと被測定物の相対的な位置関係は複雑に変化する。(c)イ, ロ, ハの左図はこのときの被測定物の基本的な運動に伴うパルス出力を示したものである。(但し#1, #2の変位点の関係は(b)の左図の場合に関してのみ示す)。また、(c)の右図は、それぞれのパルス出力時のError zoneと被測定物の相対的な位置関係を示したものである。右図を見ると、被測定物のどの部分の動きがエラーカウントを引き起こすError zone内の折り返しに当たるかを明確にできる。但し、ロの運動はイまたは、ハのどちらかの運動に等価であるとして処理を行う。

(a), (b), (c)に示した物が被測定物の動きとError zoneの変化の様子の基本的な組合わせであり、その他の動きに関しては、全て以上の基本形の組合わせで説明できる。例えば、被測定物はError zoneの外で折り返し、且つ、被測定物が行き(または帰り)のError zone内にいる間に#1, #2の変位点が逆転するような場合も同様である。この解析は付録に譲る。

以上より被測定物の移動により、 Δf が正から負になるように折り返すときに出力されるパルスパターンは、図9の(a)に示したイ~へ6つのタイプに集約される。また、 Δf が負から正に折り返すときに出力されるパルスパターンは図9の(b)に示したタイプに集約される。

図9において(a)のロ, ニ, (b)のロ, ニがエラーカウントを引き起こすError zone内での折り返し運動で、その他はError zone外での折り返し運動である。

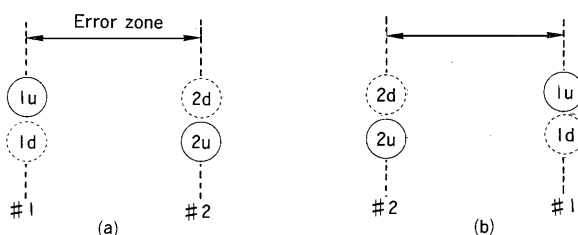
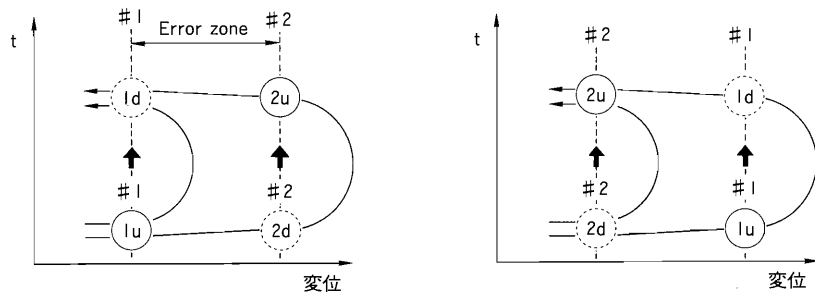
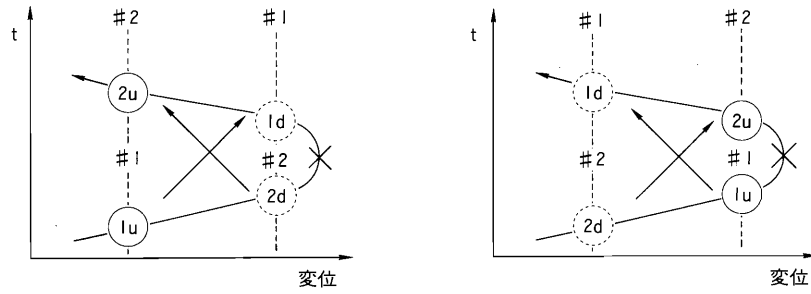


図7. Error zone

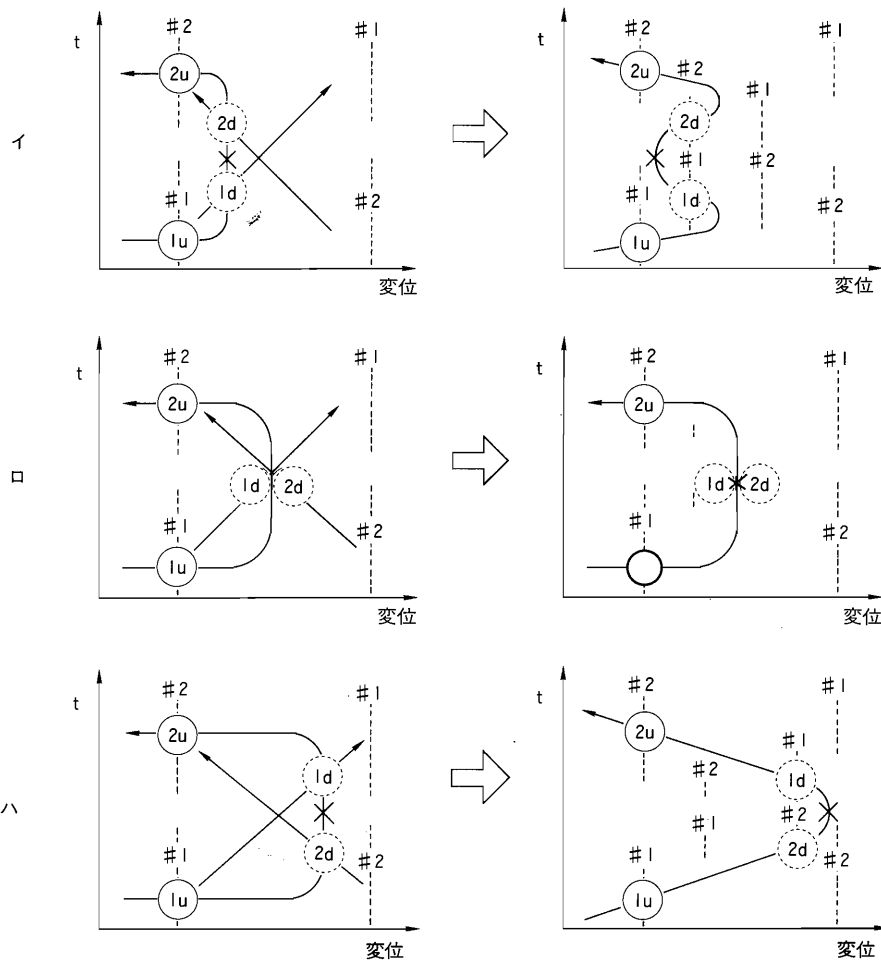


(a) #1、#2の変位点が逆転しない時。



(b) Error zoneの外で折り返し運動をする間に#1、#2の変位点が逆転する時。

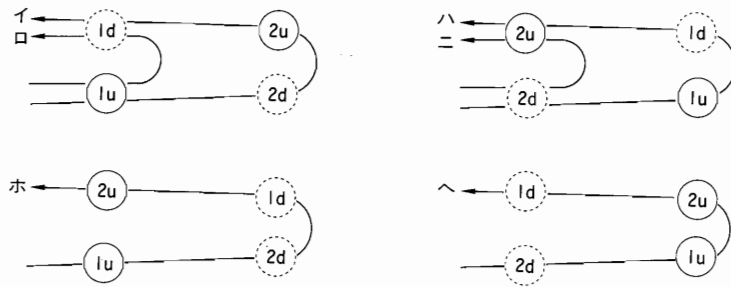
図8-1. #1、#2変位点の変化と被測定物の折り返し運動によるパルス出力の関係。



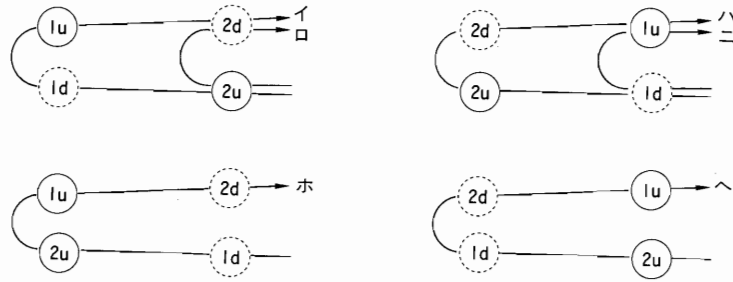
(c) Error zoneの中で折り返し運動をする間に#1、#2の変位点が逆転する時。

×: 被測定物の折り返し運動上で#1、#2の変位点が逆転した点を示す。

図8-2. #1、#2変位点の変化と被測定物の折り返し運動によるパルス出力の関係。



(a)Δfが正から負に折り返す時の出力パルスパターン

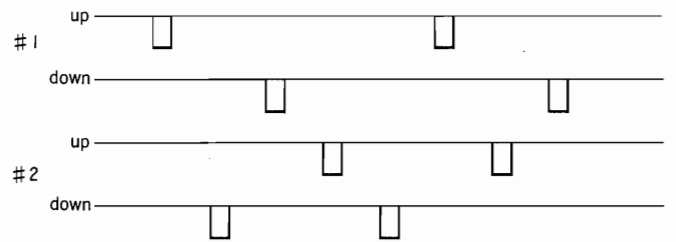


(b)Δfが負から正に折り返す時の出力パルスパターン

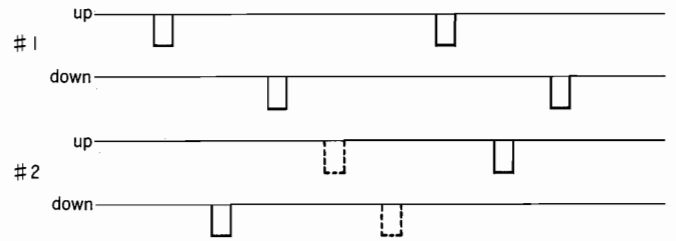
図9. 被測定物の折り返しによる出力パルスパターン

図9に示した被測定物の折り返し運動時の出力パルスパターンより、出力パルスの性質を抽出すると以下のようになる。以下の性質は#1の出力パルスと#2の出力パルスを交換して考えても成り立つので、記号#i, #j(i=1, j=2またはi=2, j=1)を用いて表す。また、以下の性質の理解を助けるために、被測定物のError zone内外で折り返しを続ける運動の一例における出力パルス列を図10に示す。

- (a)周波数差検出ユニット(FDDU)の性質より#iのupパルスとdownパルスは同時に出力されることはない(図10(イ))。
- 被測定物がError zoneの外で折り返すとき。
 - (b)#iのupパルスと#jのdownパルスは互に対応関係にある。両者は時間的に接近して出力されるが、その前後関係は決まらない(図10(イ))。
 - (c)#iのパルスと#jのパルスの中で、その時間関係の明らかであるのは、#iと#jのupパルス同士、またはdownパルス同士であり、その時間的位置関係は次のようである。#iのup(down)パルスはaで示すパルスとbで示すパルス間に必ず出力される。
 - a : #iのup(down)パルスの前に出力される#iのdown(up)パルスに対応する#jのup(down)パルスまたは#3から出力される奇数個のパルス。
 - b : #iのup(down)パルスの後に出力される#iのdown(up)パルスに対応する#jのup(down)パルスまたは#3から出力される奇数個のパルス。(図10(イ))。



(イ) Error zone外での続いた折り返し運動の一例に於ける出力パルス列



(ロ) (イ)の運動がError zone内での折り返しを含む時の出力パルス列

図10 被測定物の折り返し運動と出力パルス列

- 被測定物がError zoneの内折り返すとき。
 - (d)#iのupパルスと#jのdownパルスの対応関係が無くなる。このとき#jに対応するパルス列を持たない#iのみのパルス列は、必ずup-down(down-up)の対の集合になっている。#jの抜けているパルスは単独のupまたはdownパルスであることはない。(図10(ロ))。

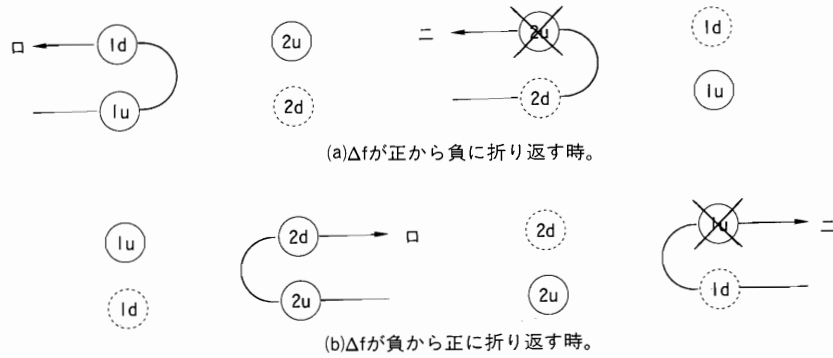


図11. 被測定物のError zone内の折り返しに対するパルス補正

3.4.2.2 Error zone内での折り返しの認識とパルス補正の概略

パルス補正ユニットの機能は先にも述べたように、被測定物のError zone内での折り返しの認識と、この折り返しによるエラーカウントが行われないようにパルス補正をすることである。ユニットの動作説明に入る前に、これらの機能をどのような方法で実現しているか概略を述べる。

まず被測定物のError zone内での折り返しの認識に関しては、#iのupパルスと#jのdownパルスの対応関係の有無で判断する。対応関係がないとき、被測定物はError zone内で折り返している。

次にError zone内での被測定物の折り返しに対するパルス補正は、図11のように行う。図中の運動は、図9よりError zone内での折り返しのみを取り出したものである。

(a), (b)の口の運動では、#iのupパルスをup/downカウンタのUpiパルスとすると共に#iのdownパルスをUpjパルスとする。(但し、Up1パルスはインクリメンタル、Up2はディクリメンタルパルスである。)また、(a), (b)のニの運動では#iのup, downパルス共up/downカウンタに入力しない。即ち Δf が正から負に変化する折り返しでは、FDDU #1からパルスが出力される変位点を持ってインクリメンタルおよびディクリメンタルの境界線とし、逆に Δf が負から正に変化する折り返しではFDDU #2からパルスが出力される変位点を持って境界線とする。これは、折り返しのインクリメンタルおよびディクリメンタルの境界線が折り返す前の運動方向により定まる境界線に従うことを意味する。

3.4.2.3 up/downパルス補正ユニット(UPCU)の動作

3.4.2.2で述べた機能を実現するための本ユニットにおける具体的な処理手順を以下に述べる。

- ① FDDU #iから入力されたパルスが、それぞれ1つ前に入力されたパルスと同じ場合、即ちup, upまたはdown, downと続く場合、被測定物は単調な運動をしているので、#iのupパルスをそのままUpiパルスと

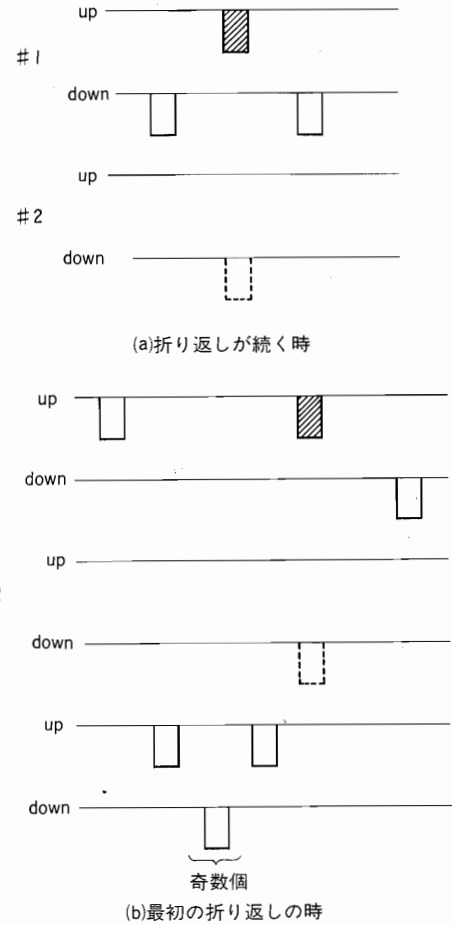


図12. #1のupに対応する#2のdownの存在を調べる。

して出力する。

FDDU #iからの入力が、upからdown(downからup)と変化しているとき、被測定物が折り返し運動をしているので②以下の処理に進む。

- ② 被測定物の折り返しがError zoneの内外いずれで起こっているか調べる。即ち、#iのup(down)パルスと対応する#jのdown(up)パルスが存在するか調べる。このとき3.4.2.1(c)の性質を利用する。即ち、#iのup(down)パルスの前に入力される#iのdown(up)パルス(図12(a))または#3から入力された奇数個のパルス(図12(b))と、#iのup(down)パルスの後に入力され

る#iのdown(up)パルスとの間に、#jのdown(up)パルスが入力されたかどうか調べる

- ③#iのパルスに対応するパルスが#jに存在する場合。即ち、被測定物がError zoneの外で折り返しをする場合#iのパルスがupパルスであれば、これをUpiパルスとして本ユニットから出力し、#iのパルスがdownパルスであれば本ユニットからは何も出力しない。その後再び①の処理を続ける。

- ④#iのup(down)パルスに対応する#jのdown(up)パルスが存在しないとき。即ち被測定物がError zoneの内折り返しをする場合は、3.4.2.1(d)より、これに続くパルスは必ず#jに対応するup(down)パルスを持たない#iのdown(up)パルスである。(図13(a), かつこ内が(b))

従って#iのup(down)パルスに対応する#jのdown(up)パルスが存在しないことが分かった時点で、対応するパルス対を持たない#iのup-down(down-up)パルス対に対して以下の処理を行うことができる。

- ⑤#iのupパルスに対応する#jのdownパルスが存在しないとき、#iのupパルスの本ユニットのUpi出力とすると共に、このupパルスを打ち消すために#iのdownパルスに対応するupパルスを生成し、これを本ユニットのUpj出力とする。(図13(a))

#iのdownパルスに対応する#jのupパルスが存在しないとき、#iの対応するパルス対を持たないdown-upパルス対のupパルスを抹消する。(図13(b))

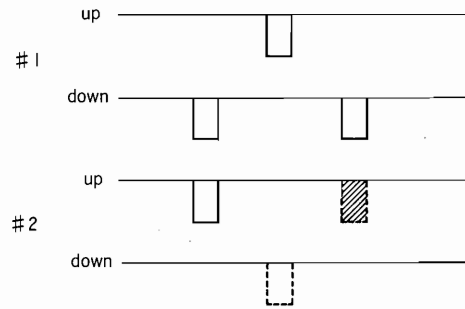
- ⑥⑤で処理されたパルス対の次のパルスから、再び①の処理を続ける。このとき⑤で処理をされたパルス対#iのup-down(down-up)パルス対に対応する#jのdown-up(up-down)パルス対が存在したものととして①の処理を続ける。

3.5 ゲートユニット

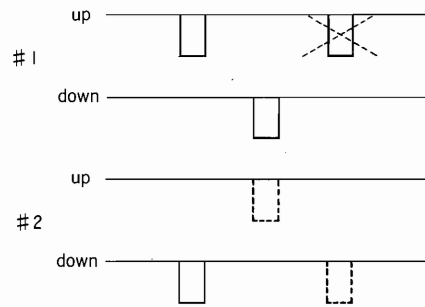
ゲートユニットは、図2に破線で示した物理的に意味のない領域の内、正の出力のみの削除を行う。図2を周波数シフト Δf と周波数差検出ユニットFDDU #1, #2のup, downパルス出力との関係に表し直すと図14のようになる。ここで、ゲートユニットは $|\Delta f|$ が $2r$ を越えて始めて現れるupパルスを削除する。具体的には次のような動作を行う。

被測定物の移動速度が大きくなり、#jのupパルスの周波数が r を越えると#iのupパルスが出力されないようにし、#jのupパルスの周波数が r より小さくなると再び#iのupパルスが出力されるようにする。

ゲートユニットの構成は、図15で示す。この図において、F/Fはupパルスがくることによりoffになり、downパルスがくることによりonになるようなゲート信号を出力する。このゲート信号により物理的に意味のないupパルスの除去を行った。



(a)図12(a)ロに対応するパルス補正
#1の対応するパルス対を持たないup-downパルス対のupパルスをUpiパルスとして、本ユニットの出力とすると共にdownパルスに対応するupパルスを生成し、Up2パルスとして本ユニットから出力する。



(b)図12(b)ニに対応するパルス補正
#1の対応するパルス対を持たないdown-upパルス対のupパルスを抹消する。

図13. パルス補正の実際

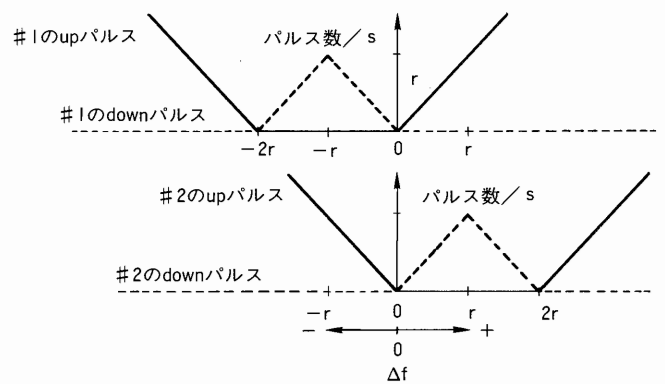


図14. 周波数シフト Δf とFDDU #1, #2, のup/down出力パルスの関係

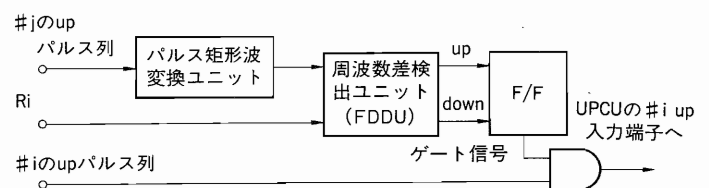


図15. ゲートユニットの構成

〔付 録〕

被測定物はError zoneの外で折り返し、且つ被測定物が行きのError zone内にある間に#1, #2変位点が逆転するときの被測定物の動きに伴う、(イ, ロ)パルス出力を図16の左図に示す。また、それぞれのパルス出力時のError zoneと被測定物の相対的な位置関係を右図に示す。

〔補 足〕

○パルス補正ユニットのブロック図、タイミングチャートの解説

(1)Initialize Signal生成回路

入力信号は、FDDU #1, #2, #3のup, downパルスである。FDDU #3からパルスが奇数個入力された後に、#1, #2のup, downパルスのうちいずれかが最初に入力されたときInitialize Signalとして1つのL(Low)パルスを出力する。Initialize SignalはState flag, 対応関係チェックレジスタの値を初期化する制御信号である。

(2)Gate Signal生成回路

Check SignalをON/OFFするゲート信号を生成する。入力信号は Initialize Signalと#1または#2のup, downパルスであり、Initialize Signalが入力されてからupまたはdownパルスが入力されるまでの間、LであるGate Signalを出力する。

(3)Check Signal生成回路

FDDU #1, #2のup, downパルスの対応関係を調べるtimingを与えるCheck Signalを生成する回路である。入力パルスは、#1または #2のup, downパルスである。入力されるパルスがdown→upに変わったとき、Check SignalはL→H(High)に変わり、upパルスのState flagの値をレジスタに記録することを指令する。入力されるパルスが、up→downに変わったときCheck SignalはH→Lに変わり、downパルスのState flagの値をレジスタに記録することを指令する。

(4)対応関係チェックレジスタ

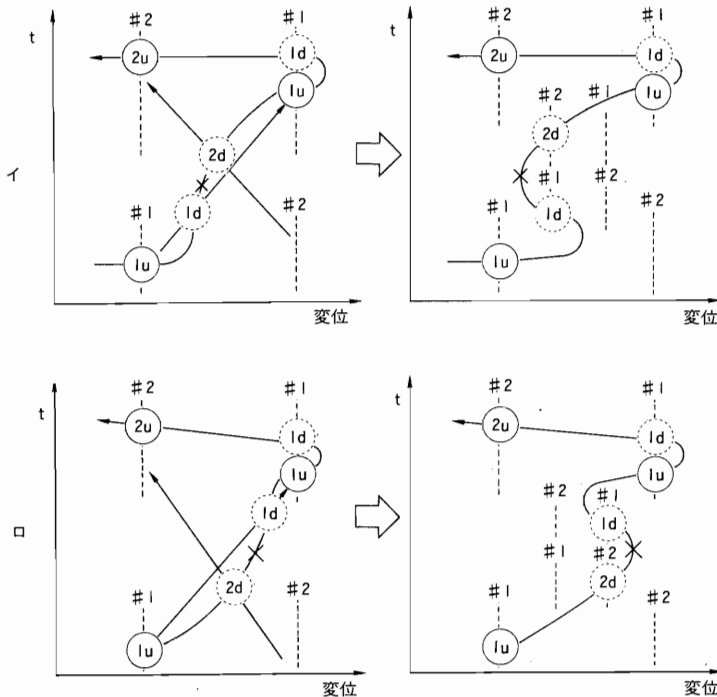
up, downパルスそれぞれについて、1ビットを持つ計2ビットのレジスタである。これの制御信号であるCheck Signalにより、State flagの値がレジスタに転送される。Initialize Signalにより、レジスタの値はHにセットされる。

(5)パルス選別回路

FDDU #1, #2のup, downパルスの対応関係を調べ、その結果によりパルスを選別する。レジスタの値を用いて、表1のようにup, downパルスの選別を行う。

(6)State Flag回路

up, downパルスそれぞれの状態を示すState Flagを設定する回路である。パルス選別回路1, 2で選別された計8種のパルスが入力されるたびに表2のように書き換えられる。



× : 被測定物の折り返し運動上で#1, #2の変位点が逆転した点を示す。

図16. #1, #2 変位点の変化と被測定物の折り返し運動によるパルス出力の関係。

表1. パルス選別回路の入力信号、レジスタの値と出力信号の関係

パルス選別回路 入力信号	レジスタの値	
	H	L
#iのupパルス	up _H パルス Up _i としてパルス補正ユニットより出力する。	Up _L パルス
#iのdownパルス	down _H パルス	down _L パルス Up _j としてパルス補正ユニットより出力する。

但し、(i = 1, j = 2 又は i = 2, j = 1)

表2. State Flag回路の入力パルスとState Flagの関係 (Initialize Signalにより全てのState Flagの値はLにセットされる。)

State Flag 回路入力パルス	State Flag 回路・ i 内の up の Flag	State Flag 回路・ i 内の down の Flag
up _H · i	L	*
up _L · i	*	H
down _H · i	*	L
down _L · i	H	*
up _H · j	H	*
up _L · j	*	L
down _H · j	*	H
down _L · j	L	*

但し、*は前の状態を保持するの意。

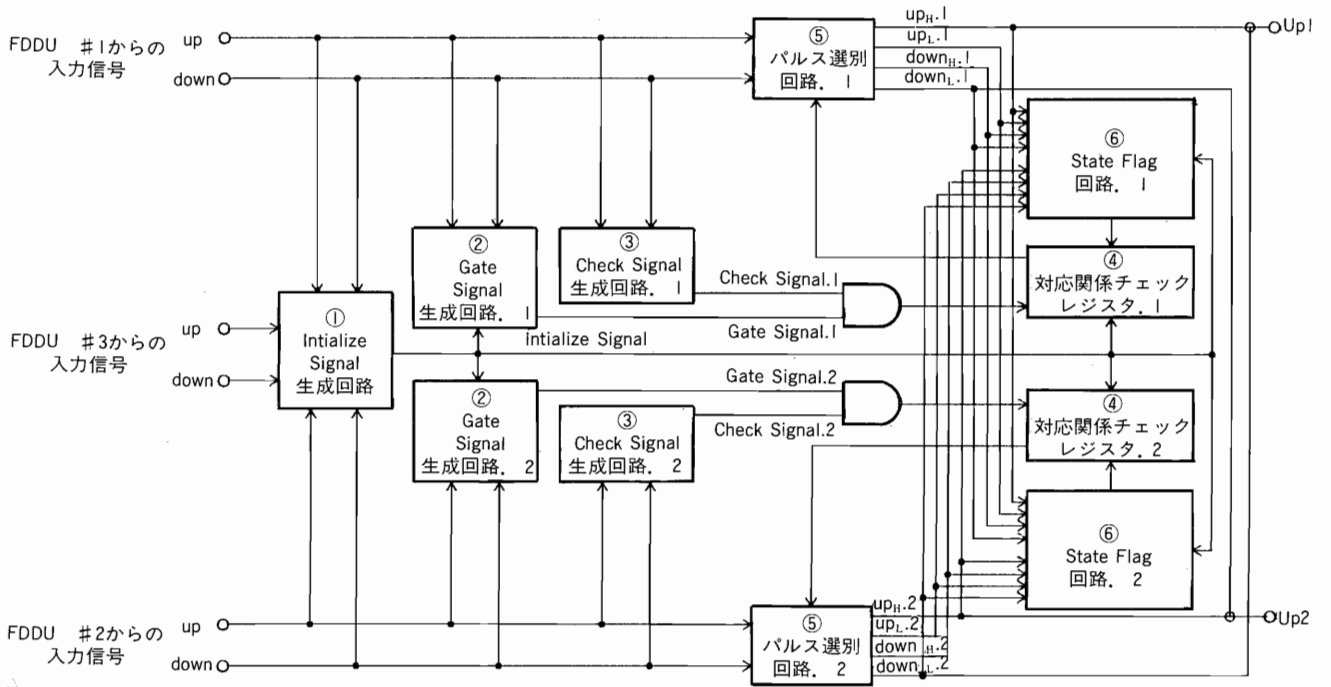


図 補1. パルス補正ユニット ブロック図

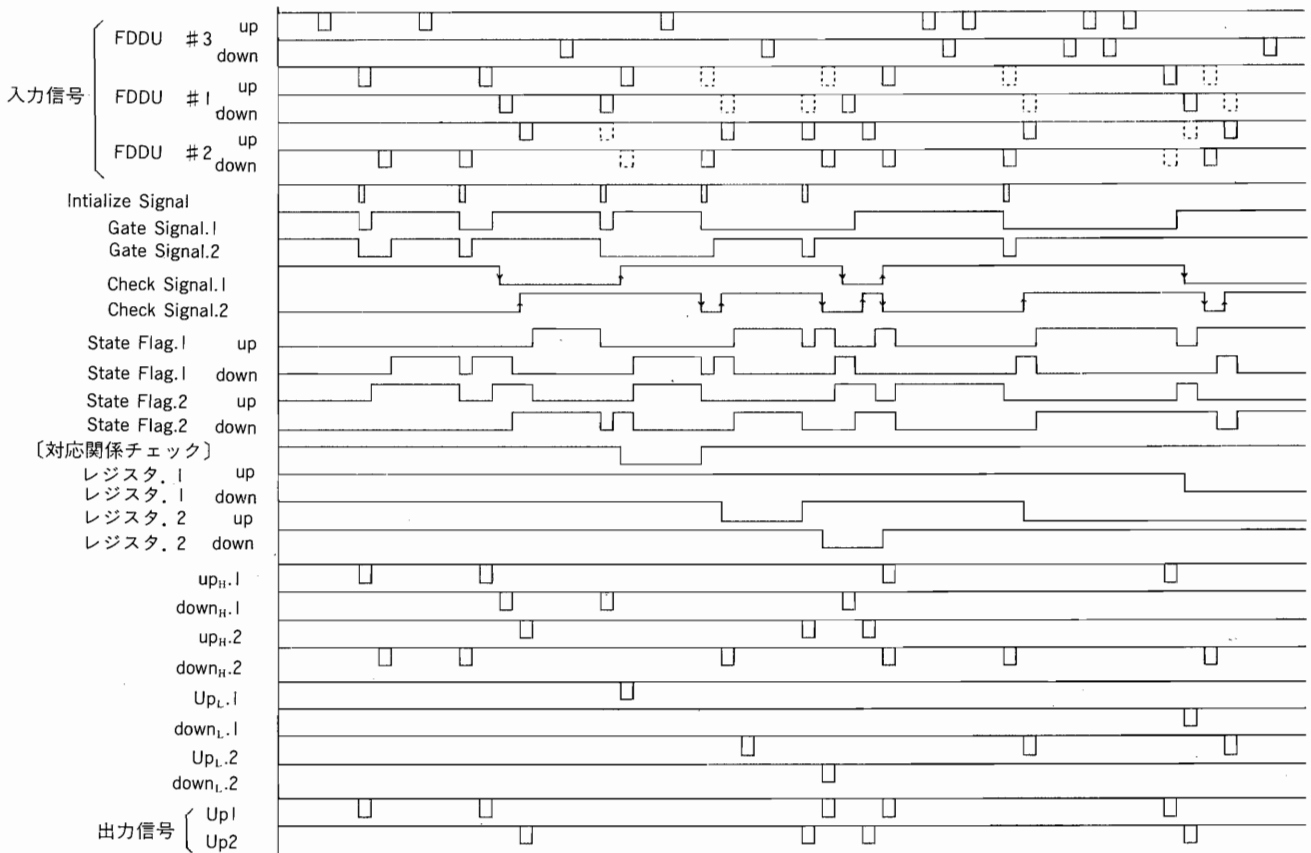


図 補2. タイミングチャート(I)

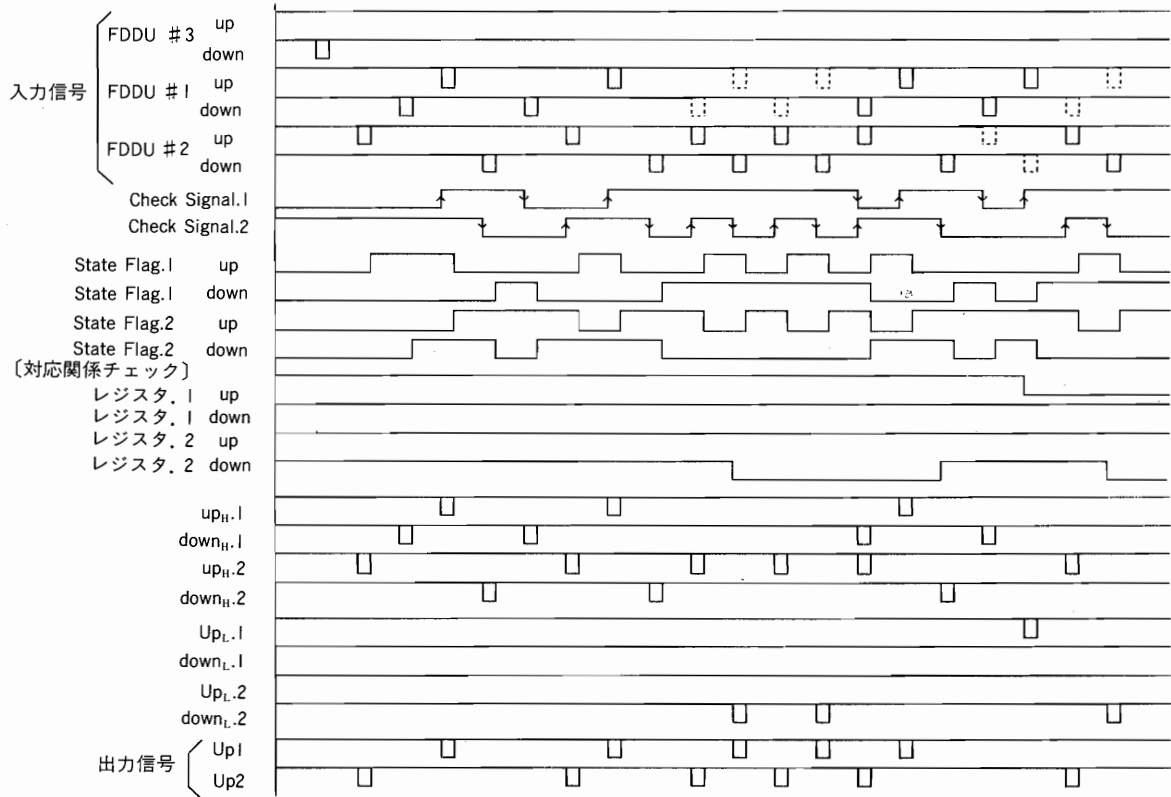


図 補3. タイミングチャート(II)

一度初期化されてから次に初期化される迄の動作の詳細

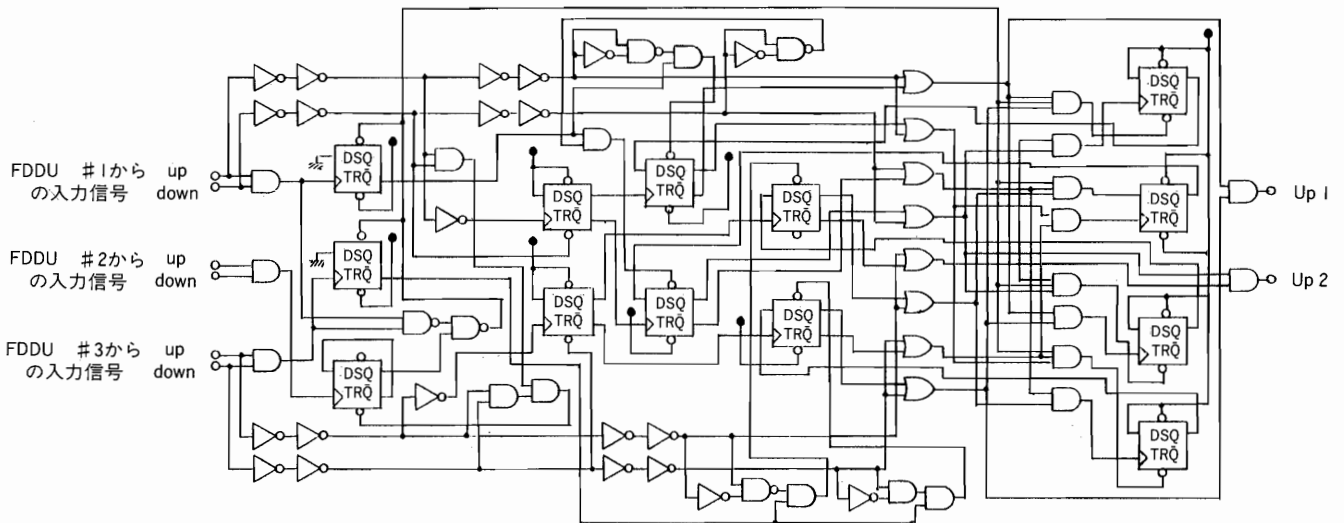


図 補4. パルス補正ユニット回路図

4. 測定の実際及び結果

本システムを用いた測定実際は、まず微小距離を振動しながらゆっくり移動する被測定物を対象に行うことにより、本システムの特徴であるパルス補正の動作を確認する。更に高速で移動する被測定物に対しては、同じ光学系を用い本システムの信号処理系と共に従来のヘテロダイン測長方式の信号処理系による演算を同時に行い、その双方の結果を比べることにより、本システムの信号処理系の結果を検証すると共に、本システムの方式と従来方式の能力を比較する。

微小距離をゆっくり移動する被測定物の変位の測定は、パルスモータ付微動台にコーナキューブをマウントして行い、また高速で移動する被測定物の変位の測定は、X-Yステージにコーナキューブをマウントすることにより行う。ここで使われるパルスモータ付微動台およびX-Yステージは、以下のようなものである。尚、以上の測定実験は、全て空気ばね式除振台上で行われる。

- ・パルスモータ付微動台：構造は図17に示す。1 stepの送りは $0.25\mu\text{m}$ である。
- ・X-Yステージ：ステージの持つ最大速度及び最大加速度は、それぞれ $30\text{m}/\text{min}$ 、 $2.5\text{m}/\text{s}^2$ であり、この範囲内で任意の速度、加速度によりステージを送ることができる。

4.1 パルスモータ付微動台を用いた測定実験

この実験は被測定物の微小変位の測定であるので、変位の詳細を知るため被測定物の移動による測定信号の S_1 と参照信号Rの位相差 $\Delta\theta$ を別に検出する。位相差 $\Delta\theta$ は、 $|\Delta\theta|$ で検出され、この値はup/downカウンタの値が正のときは進み位相を表し、負のときは遅れ位相を表すとする。また、up/downカウンタの値および位相差 $\Delta\theta$ は、いずれもデジタル値で出力されるので、A-D変換器でこれらの値をそれぞれアナログ値に変換しレコーダで記録する。これらの記録はレコーダのペンの都合上、前者の表示は後者の表示より 0.5cm 進んでいる。

パルスモータ付微動台を用いた測定実験は以下の項目に関して行う。

- 1)パルスモータのスイッチをOFFにしてあるとき
- 2)パルスモータのスイッチをONにしたとき
- 3)パルスモータを駆動したとき

パルスモータのスイッチがOFFであるとき図19に示す如くup/downカウンタの値はゆっくり減少し、遅れ位相 $|\Delta\theta|$ は小さな振幅で振動しながらゆっくり増加している。これらの値のゆっくりしたドリフトは、室温の上昇に伴う光学系の熱膨張のためであり小さな

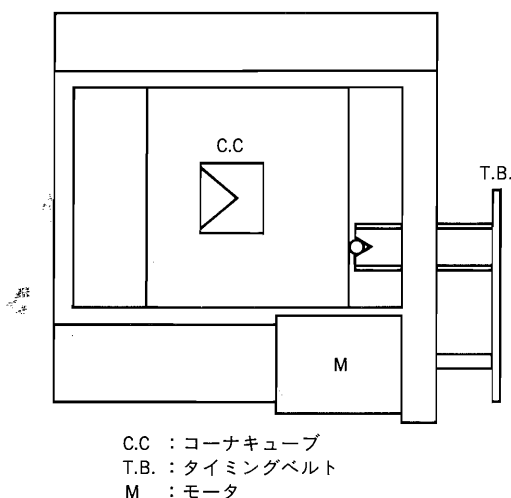


図17. パルスモータ付微動台(横尾精機製)の構造

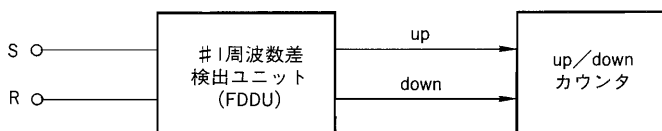


図18. 従来のヘテロダイン測長方式の信号処理系

振幅の振動はバックグラウンドの振動のためである。

図の中央で遅れ位相 $|\Delta\theta|$ は 2π から0に変化しており、これと共にup/downカウンタの値は1だけ減少している。被測定物の小さな振幅の振動は、Error zone内での折り返しを含んでいると考えられるが、図19の結果にはエラーカウントは現れておらず、パルス補正の機能が正しく動作していることを示している。

2)パルスモータのスイッチをONにしたとき

パルスモータのスイッチをONにすると、図20に示す如くup/downカウンタの値は急激に減少し、遅れ位相 $|\Delta\theta|$ も急激な増加を繰り返す。その後パルスモータのスイッチをOFFにすると、up/downカウンタの値は徐々に増加を始め、遅れ位相 $|\Delta\theta|$ も徐々に減少を始める。これは、パルスモータをONにするとモータにバイアス電流が流れ、そのため微動台は急激に熱膨張し、その後モータをOFFにすると微動台は徐々にもとの状態に戻っているためである。

3)パルスモータを駆動したとき

パルスモータは最初 $\Delta f < 0$ の方向に、途中から $\Delta f > 0$ の方向に駆動した。その様子は図16に示す如くである。1 step駆動するたびに $\pi/5$ 周期位相が変化しており、この移動量は約 $0.21\mu\text{m}$ である。定格の1 step駆動の移動量 $0.25\mu\text{m}$ よりやや小さい。また、パルスモータを1 step

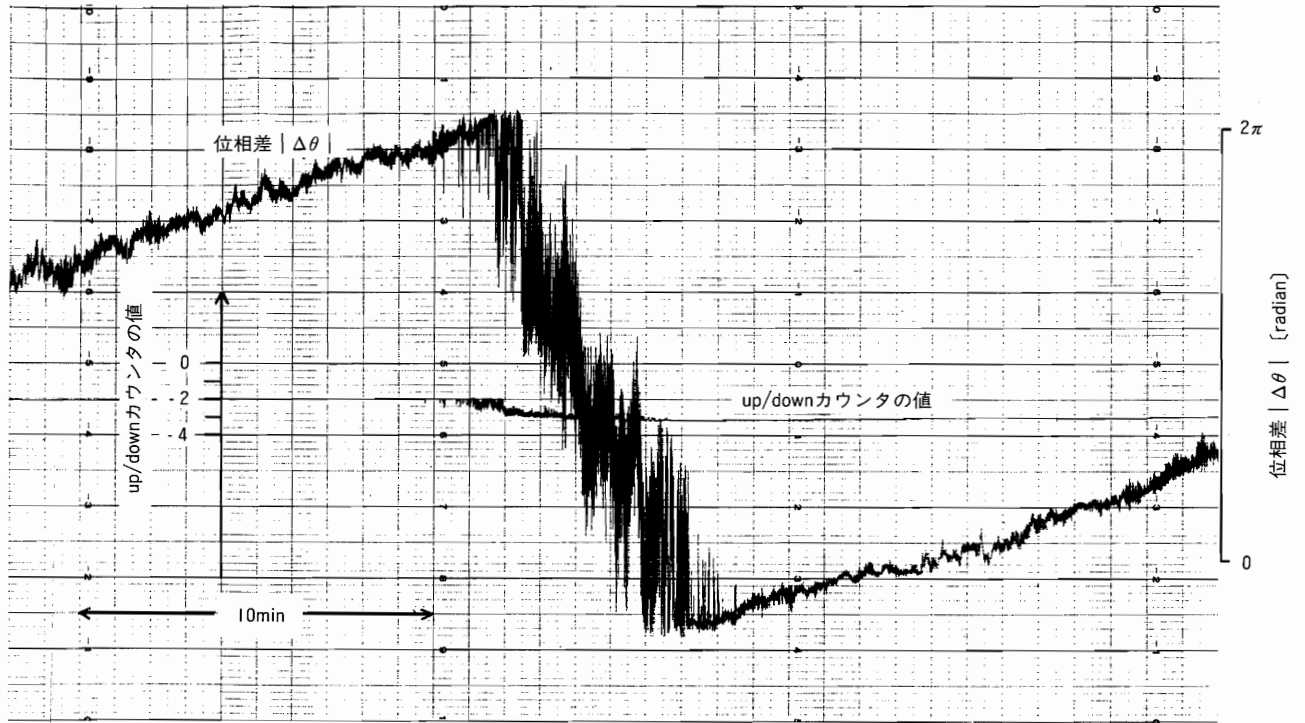


図19. パルスモータのスイッチがOFFの時のup/downカウンタの値, および位相差 $|\Delta\theta|$ の時間変化の様子。

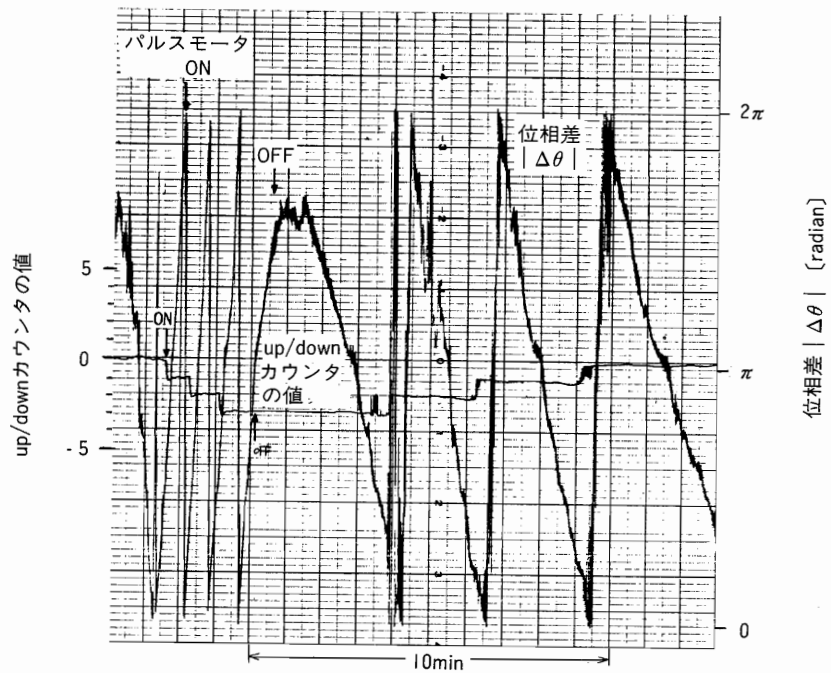


図20. パルスモータのスイッチをONした後, 再びOFFにした時のup/downカウンタの値, および位相差 $|\Delta\theta|$ の時間変化の様子。

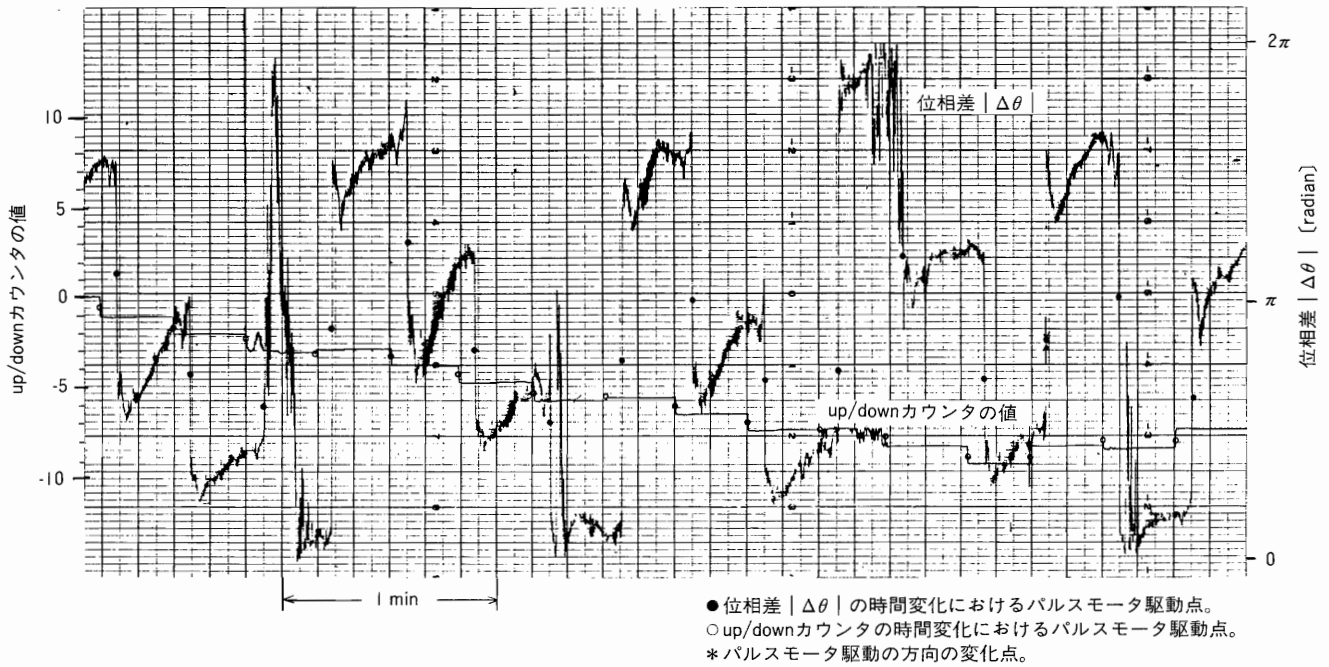


図21. パルスモータを駆動した時のup/downカウンタの値, および位相差 $|\Delta\theta|$ の時間変化の様子。

駆動してから次の駆動をする迄の間も, 位相差 $|\Delta\theta|$ は徐々に増加している。これはモータのバイアス電流や室温の上昇等による微動台の熱膨張のためである。

4.2 X-Yステージを用いた測定実験

X-Yステージを用いた高速で移動する被測定物の測定では, 同じ光学系を用い本システムの信号処理系と従来のヘテロダイン測長方式の演算処理系により同時に演算処理を行った。

従来のヘテロダイン測長方式の信号処理系は図18の通りである。これは, 本システムの光学系から取り出される S_1 または S_2 のいずれか1つの測定信号と参照信号Rを入力信号とし, FDDUによる処理を行った後, upパルスをインクリメンタル, downパルスをディクリメンタルパルスとしてup/downカウンタに入力するものである。従って本システムの信号処理系(図5)における#1 および#2のFDDUの後段に, それぞれ別に新しいup/downカウンタを図18の如く取り付けると, これらのup/downカウンタをそれぞれ S_1 を測定信号とする従来方式の測定結果および S_2 を測定信号とする従来方式の結果を示す。今, 前者を示すカウンタをカウンタ1, 後者を示すカウンタをカウンタ2とする。周波数シフト Δf の変化に対し, カウンタ1, 2の示す値はそれぞれ図2に示した $s_1 - r$, $s_2 - r$ の演算結果である。図より明らかなようにカウンタ1は $\Delta f >$

$-r$ である範囲では正しい変位量を示し, カウンタ2は $\Delta f < r$ である範囲では正しい変位量を示す。

本実験では, 被測定物をさまざまな速度で移動させたとき, UPCUの後段のカウンタ, カウンタ1, 2それぞれが示す値が一致するか否かを観察した。

$|\Delta f| < 130\text{KHz}$ (今回使用したZeeman laserの内部ビート周波数が130KHz)である, 被測定物の移動速度は約2.4m/min以下の速度であり, その速度範囲で被測定物を何度も方向を変えて運動させると, 3つのカウンタはいつも同じ値を示した。この結果は, パルス補正機能の動作の正しさを示すものである。

2.4m/minからステージの速度限界である30m/minまでの任意の移動速度で, $\Delta f > 0$ の方向に被測定物を移動させたとき, UPCU後段のカウンタとカウンタ1の示す値は一致したが, カウンタ2の示す値は前の2つと一致しなかった。また, 同じ範囲の速度で $\Delta f < 0$ の方向に被測定物を移動させると, UPCU後段のカウンタとカウンタ2の示す値は一致したが, カウンタ1の示す値は前の2つと一致しなかった。3.5で述べたように $|\Delta f| > 2r$ の範囲, 即ち本実験において4.8m/min以上の速度では, 物理的意味のないupパルスの出力があるはずであるが, 上の結果はこれらを削除すべくゲートユニットが正しく動作していることを示している。

5. 考察

前節で述べた如くパルスモータ付微動台を用いた測定実験の結果、本システムは被測定物のゆっくりとした動きおよび小さな振幅の振動において正しく動作していることが確認された。また、パルスモータ駆動による微小距離を急激に変位する動きに対しても、本システムは正しく動作していることが確認された。

X-Yステージを用いた測定実験では、内部ビート周波数が130KHzであるZeeman laserを使用した場合、従来方式では2.4m/min以上の移動速度を持つ被測定物の移動量は測定不能であったのに対し、本システムでは同じlaserを用いて2.4m/min以上の移動速度を持つ被測定物の移動量を測定可能であることが確認できた。また、その測定結果の正しさはX-Yステージの速度限界である30m/minの移動速度まで、検証することができた。

今回の実験では、本システムの測定可能な速度限界および加速度限界の観測は行うことができなかったが、理論的にはこれらの限界は本システムの種々のパラメータより見積もることができる。以下の(1)、(2)の項で本システムの測定可能な速度限界および加速度限界を求める。

また、本システムでは、高速で移動する被測定物の変位の測定を、従来方式に比べ低い内部ビート周波数を持つレーザで実現できる。このことは、分解能を上げるときに高周波技術を必要としないという利点を持つが、変位の測定情報の出力のタイミングが遅れるという欠点も持つ。このことを(3)に述べる。更に、本システムの分解能を上げるため、ビートの1周期を分割するときの可能な最小分割について(4)で述べる。

(1)本システムの測定可能な速度限界

本システムでは原理的に被測定物の移動速度制限はないが、現実には周波数差検出ユニット(FDDU)の持つclock信号の周波数により測定可能な上限が決められる。

この上限速度は、clock信号の周波数を f_{ck} 、参照用信号の周波数を r としたとき

$$V_{max} = \lambda/2(f_{ck} - r) \dots\dots\dots(8)$$

で与えられる。

今、 $r=100\text{KHz}$ としたとき $f_{ck}=10\text{MHz}$ であれば測定可能な最大速度は178.2m/minであり、 $f_{ck}=5\text{MHz}$ であれば88.2m/minである。

(2)本システムの測定可能な加速度限界

up/downパルス補正回路(FDDU)、3.4.2.3で述べたように、被測定物が折り返しをするとき、即ちFDDU#iからのパルスがupからdown、またはdownからupに変化するときのみ動作する。一方、既に3.4で述べたようにdownパルスは図2で示したlow speed zoneでのみ意味を持つ。従ってFDDU#iからのパルスがupからdown、またはdown

からupと変化するときのdownパルス生成時の被測定物の速度はlow speed zoneに入っていなければならない。これを満足する最大加速が測定可能な加速度限界である。

FDDU#iの出力パルスがupからdownまたはdownからupと変化するとき最大の移動範囲をもつ被測定物の運動は、片道 $\lambda/2$ の往復運動である。従って本システムの測定可能な最大加速度は、速度0から距離 $\lambda/2$ 進む間に等加速度で速度 $\lambda/2 \times r$ に至るときの加速度であり、

$$a_{max} = \lambda/4 \times r^2 \dots\dots\dots(9)$$

で与えられる。 r が1KHz、10KHz、100KHzのそれぞれにおける測定可能な最大加速度は、以下のようになる。

$$\begin{aligned} r=1\text{KHzの時 } a_{max} &= 0.15\text{m/s}^2 \\ r=10\text{KHzの時 } a_{max} &= 15\text{m/s}^2 \\ r=100\text{KHzの時 } a_{max} &= 1500\text{m/s}^2 \end{aligned}$$

これより、数10KHz以上のビート周波数を持つ光源を使えば、現実の測定におけるたいの加速度はクリアできると考えられる。

(3)光源の内部ビート周波数が低いことに起因する変位の測定情報出力の遅れ

測定ビート信号の周波数シフト(位相シフト)の情報は、測定ビート信号の0 crossing度に更新される。従って、光源の内部ビート周波数 r が低くなると、周波数シフト情報の更新密度が疎になり、被測定物の変位に対する測定情報出力が遅れることになる。

本システムにおいては、参照用ビート信号より周波数が高くなる方の測定ビート信号を選んで信号処理を行うので、周波数シフト情報の更新間隔、即ち測定情報の出力の遅れ t_{div} は、

$$t_{div} = \frac{1}{r + |\Delta f|} \dots\dots\dots(10)$$

である。今、 $r=100\text{KHz}$ とすると周波数シフト情報の最大更新間隔は $\Delta f=0$ のときであるので $10\mu\text{s}$ である。従って、変位の測定情報の出力の時期は、実際の被測定物の変位の時期より最大 $10\mu\text{s}$ 遅れることになる。

(4)本システムの可能な最小分割

本システムの可能な最小分割は、Error zoneの幅と周波数差検出回路(FDDU)で使用されているclock信号の周波数で決められる。後者は、clock信号の周波数がFDDUの可能な最小分割をきめるためである。

本システムの可能な最小分割DIV_{min}は次式で与えられる。

$$\text{DIV}_{min} = W_{err} + \frac{r}{f_{ck}} \times \frac{\lambda}{2} \dots\dots\dots(11)$$

ここにおいて、 W_{err} はError zoneの幅であり、 f_{ck} はFDDUで使用されているclock信号の周波数である。

今後の課題としては30m/min以上の速度、 2.5m/s^2 以上の加速度を持つ被測定物の運動に対する本システムの動作の検証と、被測定物のあらゆる運動に関して他の測長システムとのcross checkが望まれる。

6. 結論

今回、高速で移動する被測定物の変位測定を目的として新方式のヘテロダイン測長システムを考案、試作し、その性能の評価を行った。光源には内部ビート周波数が130KHzであるZeeman laserを用いた。同じ光源を用いた場合、従来の方式では2.4m/min以上の速度で動く被測定物の変位を測定できなかったのに対し、本システムで

は測定に用いたステージの限界速度である30m/minの速度まで、その測定結果が正しいことを検証することができた。

本システムの測定可能な移動速度は、従来方式のように光源の内部ビート周波数による制限を受けない。このため分解能を上げるときに、高周波技術を必要としない低いビート周波数を持つ光源を選ぶことができる。従って本方式により、高速で移動する被測定物の変位測定を高分解能で実現することができる。