

光リニアスケール教材の開発

小山職業能力開発短期大学校

前田 晃穂・谷口 忠勝*

A Development on Instructional Instruments for Photo-Linear Scale

Teruho MAEDA, Tadakatsu TANIGUCHI

要約

制御技術科などにおいて、最近のME関連機器に組み込まれている測長システムを理解させることは重要であるが、実際に用いられているシステムはきわめて複雑で理解しにくい。測長システムの一例であるマイケルソン干渉形の原理的な測定法では、被測定体の鏡面に干渉を起す光を照射し、位相を90度移した2種類の光干渉信号を得、干渉回数の計測により長さを、また、信号位相から被測定体の移動方向をそれぞれ判定している。測定分解能を十分に低くすれば干渉光量に換えてスリットを透過する光量の変化を利用することが可能である。

そこで、本稿で示す教材では測長原理や装置構成の理解を助けることを目的として、光透過形のスケールによって電子的に測定する手法を採用した。さらに、開発した教材を製作実習課題として利用できるように工夫し、測長器製作実習を通じて効果的な指導を行う他に、制御機器へ位置センサとして組み込むことによりME機器製作実習に利用する。

I はじめに

制御技術の分野において位置検出や測長システムはきわめて重要である。特にNC工作機械の位置決めや検出においては多くの測定手法⁽¹⁾がとられており、インプロセス計測やフィードバック制御技術により機械の信頼性を高めている。しかし、教育訓練の場において実際の機器を教材として利用して測定原理や動作の仕組みを学習者に理解させるには機構が単純ではなく、また、適切な教材が見あたらない。

本稿では、実際のME機器に利用されているリニアスケールを例に取り上げ、これを教材化した。教材化にあたっては、

- (1) 動作原理は実際の機器に使用されている測定原理に基づくこと
- (2) 製作課題となり得るように製作費用や製作時間を軽減すること
- (3) 低水準な技術力である程度理解でき、かつ、より高水準な技術の修得に導き得ること

などを開発の条件にした。

つまり、加工の精度や信頼性を向上することなど実用上の諸観点以外は実際のME機器に採用されている

ものと理論的に相違がないようにし、教材使用により先端技術の基礎を指導できるように配慮した。

光リニアスケールは、国内の各メーカーで製造され販売されている。基本的には光の明暗の回数を計測する方法であり、測定の分解能を向上させるために、モアレ法を併用したり、更にモアレ縞の変化による明暗の変動を電氣的に細かく分解し、1縞の1/50~1/100の変化を読みとっている(ホロスケール：ミットヨの商品名、モアレスケール：東京精密の商品名)。

同様に磁性材にSNを磁氣的に順序よく書き込み、この回数を読みとって移動距離を測定する方法(マグネスケール：ソニーの商品名)もある。何れにしても各メーカーによって方法は異なるが、測定の分解能を向上させるための手法を開発研究し、商品化をはかっている。

本稿では、光透過形リニアスケール教材の基本的な構成とその教材化を中心に論じ、あわせてマイケルソン型のレーザ(He-Neガスレーザ)干渉測長教材を紹介する。

II 長さの測定原理

1. 光透過形リニアスケール

光が透過できる素材に縞模様を等間隔に付け、「遮断する・透過する」が交互に現われるスリットスケール（以降スケールと記す）を用意する。このスケールを2枚重ね光を透過させる。一方を固定し他方を移動させると、両者を透過した光はスケールの移動度合に応じて明暗が生じ、明暗する回数を数えればスリットの数に対応した移動量が測定できる。したがって、被測定体にあわせてスケールを移動させれば移動量は明暗の回数として計測できる。ただし、この計測方法のみではスケールの移動方向は一方方向でなければならない。移動した方向が判断できないからである。

図1に測長原理を示す。光センサにスリットとレンズを取り付け、移動スケールを透過した光を集光して電気信号に変換する。先述の問題を解決するために光センサを2組用い、両者をスケールからみて移動方向に対して非対象に配置する。すなわち、スリットのピッチをPとすると、

$$L = (n + 1/4) \cdot P, \quad n \text{ は整数} \quad \dots\dots\dots (1)$$

の間隔で配置する。この場合、各光センサの出力信号は相互に1/4Pだけ位相がずれる（90度の位相差があるといえる）。したがって、どちらの信号が先に明（または暗）を示すかによってスケールの移動方向を判断できる。

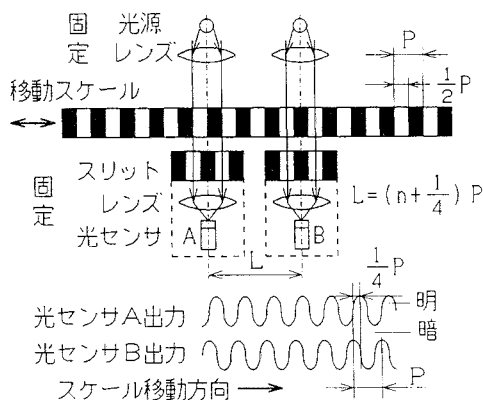


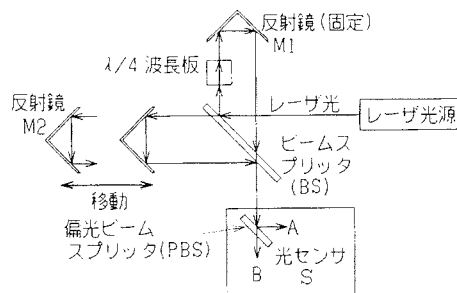
図1 光リニアスケールの測長法

このスケールの分解能はPの値により定まる（小さければ高分解能）。また、精度はスリットをどの程度正確に刻むかにより定まる。スケールの製作法が実用品か教材かの主たる相違点であり、教材としてミリメートル単位で作ったとしても実際のスケール（マイクロメートルμm単位）と比較して測定原理を理解する上でまったく問題にならない。

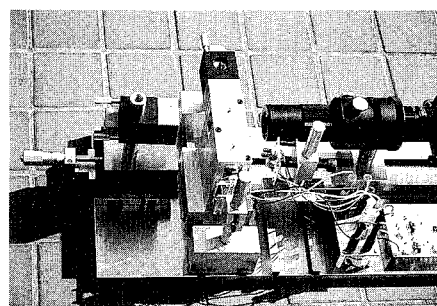
なお、高分解能にする方法としてPの値を小さくすると共に、光センサに固定したスリットを移動スケールに対して傾けて設定してモアレ縞を発生させるようにする方法などがある。

2. レーザ干渉式測長

コヒーレントな光であるレーザー（He-Neガスレーザー）を用いても前項の明暗信号を得ることができる。図2(A)に概要（マイケルソン形干渉計に基づく）を示す。光源から出たレーザーはビームスプリッタ（BS）によって二つの光路に分離され、固定された反射鏡M1と移動する反射鏡M2（被測定体に取り付けてある）それぞれで反射してBSに戻る。さらに、BSで合成されて光センサSに入力する。二つの光路差によってSでは干渉が起き、明暗を意味する信号を検出できる。M2は移動するので、移動量がレーザーの波長λに対応して（λ/2を単位として）明暗信号を得ることができる。



(A) レーザ干渉式測長機構



(B) 教材試作例

図2 レーザ干渉式測長法

同図(A)のM1へ向かう光路途上にλ/4の波長板を挿入し、BSで合成した光を偏光ビームスプリッタ（PBS）を介して二つに分離し、個別に光センサA、Bに導くことにより90度位相がずれた明暗信号を得ることができる。同図(B)に教材として試作した例を示す。左端にマイクロメータ移動台に載せた反射鏡M2を置いた他、同図(A)に示したように各部が配置してある。米国ヒューレットパッカード（HP）社が特許を持つ

ていた市販の測長用干渉計では、測定精度を上げるため、二周波ゼーマンレーザを用い、光ヘテロダイン方式によりビートを発生させ、この周波数から移動体の速度を求め、この速度変化をカウントすることにより変位を測定している。これは現在の技術のなかで、時間の計測精度が他の単位に比べ最も高いことに負っている。また現在では、国内外の各メーカーもこの方式を多く採用しているのが実状である。本報告では、教材化の目的のため、最も基本的な基準の干渉縞と変位に応答する移動干渉縞との位相差を測定する干渉式方法を採用している。

3. 明暗信号の計測

光センサ出力信号を適切に増幅してパルス信号に変換し、パルス信号を計数回路において計数する。パルス変換において、さらに、計数信号と移動方向を意味する増減 (UP/DOWN) 信号とに変換する。これはパルス変換を行った 2 信号 (信号A・Bと呼ぶ) 間で、どちらが先に発生したかを判断すればよく、図3に示すD形フリップフロップ (以降D形FFと記す) を用いて行う。この増減信号と計数信号とにより測定のためのスケール移動に応じて計数値が増減するように計数回路を構成する。計数器には UP/DOWN COUNTER (以降増減計数器と記す) を用いる。

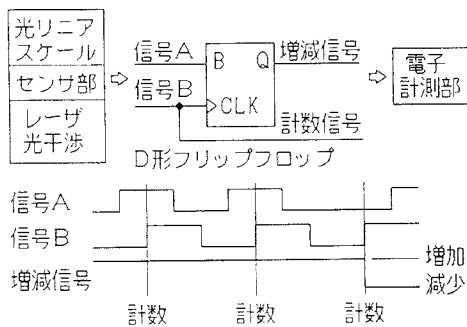


図3 計数信号と増減信号

計数した値は表示回路によって表示するか、またはマイクロコンピュータ (以降マイコンと記す) やパーソナルコンピュータ (以降パソコンと記す) に接続して計測制御演習に利用する。計数値は長さを意味するが、スケールの縞模様作り方によっては実際の長さに変換する必要がある。縞模様ピッチをP、計数値をNとすれば計測長Tは、 $T=N \times P$ になる。

図4に電子計測部の概略構成を示す。測定速度が十分に遅い場合 (スケールの移動速度が遅い場合) には計数制御回路の出力である計数信号と増減信号とを直接パソコンに入力し、プログラムによって計測部を実

現することが可能である。

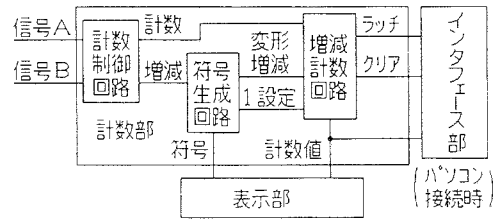


図4 電子計測部の概略構成

III 光リニアスケールの製作

本教材は製作実習として使用できるように配慮した。製作に当たっては、加工技術をそれほど修得していない学生に対して行うことを前提としており、加工精度によって動作の良否があまり影響しない構造を選んだ。

1. 光リニアスケールの構造

移動スケールをスライドさせるための溝をもった構造物 (スケールハウスと呼ぶ) を製作した。すなわち、光源⁽³⁾・レンズ (キノ・メスグリオ社製平凸レンズ、直径10mm、焦点距離15mm)・スリット・光センサ⁽²⁾を固定して取り付け得るように箱形の構造にし、光源と光センサとの途中に移動スケールがスライドできるようにした。スケールハウスの主要部品図を図5に示す。底板・天板に溝を彫り、移動・固定の両スケールを支えるようにした。また、側面板には光源やレンズ、光センサを取り付ける穴を2個あけた。加工の容易さを考慮して10mmのアルミ板を用いた。機械加工 (フライス盤加工) 精度はそれほど要求しなかった。

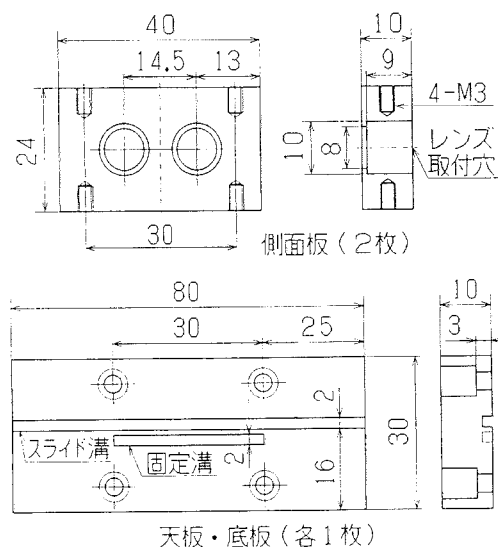


図5 スケールハウスの主要部品図

スリットは、OHPフィルムにレーザープリンタ（分解能は300ドット／インチ）を用いて縞模様を印刷して製作し、ピッチを2mmにとった。これを透明アクリル板に張り付けてスケールにした。固定スケールは、2個の光センサ間で移動スケールに対して0.5mm（1式を参照）ずれるように作成した。

2. 光センサ部の構成と波形変換

すでに示したように移動・固定両スケールを透過した光を光センサ⁽²⁾で受光し電気信号に換えた。この光センサは増幅器を内蔵しているが増幅度の設定や波形変換を用意するためにさらに1段の直流増幅器を設置し後にTTL論理波形に変換した。

光センサ部の概略構成を図6に、詳細を付図1に示す。光源には赤外線レーザーダイオード⁽³⁾（シャープ製、LT022MC, 0.78 μ m）を用いた。発光量を安定にする駆動用集積回路⁽⁴⁾（以降ICと記す）を用い、高精度なリニアスケールにも耐え得るように回路を設計した。しかし、実験結果では低精度な場合は豆電球を用いても光センサは反応する。

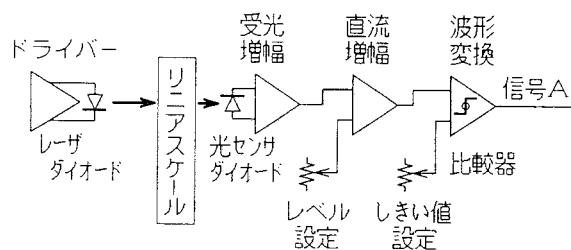


図6 光センサ部の概略構成（1信号分）

直流増幅器では直流レベルの設定を行い、レベルシフトを行ってTTL信号への波形変換を容易にした。また、波形変換回路では比較電圧（しきい値電圧）を設定可能にし、明暗のほぼ中間の電圧に調整した。比較にはヒステリシス特性を持たせ、比較動作時に発生する波形の乱れ（チャタリング）を防止した。

製作にはフォトリソ加工法を用い、プリント基板に部品を実装した。レーザー発光ダイオード、光センサダイオードやその周辺回路を直接機構部に取り付け得るように部品実装を行った。外観を図7に示す。手前が光センサ、奥が発光用のプリント基板であり、中央がスケールの機構部である。

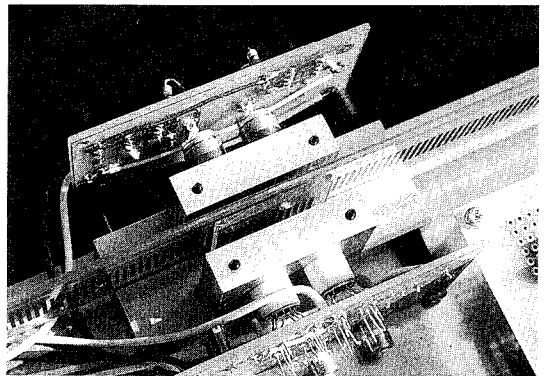


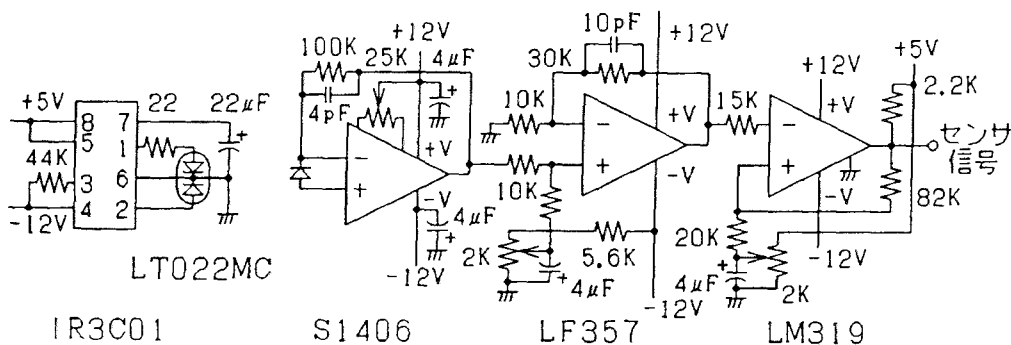
図7 光センサ部の外観

IV 計数部の製作

計数部は論理集積回路（以降ICと記す、SN74 LSシリーズ⁽⁵⁾）を用いて構成している。光センサ部で得た明暗信号から明暗の回数を計数するが、この部位は光センサ部がリニアスケール透過形であり、レーザー干渉形であれば基本的に同一である。

1. 計数信号からの論理誤りの除去

光センサ部で得られた二つの変換信号A・Bについて、信号自身に雑音が混入していない場合であっても計数動作を正しくできない場合がある。II.3で示した方法により計数信号と増減信号とに変換したと仮定する。スケールの移動の仕方によっては正しく動作できない。図8(A)に示すように、変換信号Aが立ち上がった後に信号Bが立ち上がり、信号Aが立ち下がる前に信号Bが立ち下がる場合である。これはスケール



付図1 光発光・センサ部の概略回路（1信号出力分）

のある縞模様が全部移動する前に向きを変えて戻った場合に発生する。縞模様1縞分だけ完全に移動していないので、この場合には計数してはならない。スケール精度を上げて行くと、スケールが外部振動に反応してビビリ振動を起す（逆に、ビビリ振動を問題にするほどにスケール精度を上げる）ことが原因であり、この現象を考慮して計数・増減信号を生成する必要がある。

図8(B)は信号A・Bを各2進数の桁に対応させて各信号の変化の状況を示したものである。丸記号で表現してあるものが状態、矢印は遷移を意味する。例えば、状態0（信号A・B共に0）→状態1（信号Aのみ1）→状態3（信号A・B共に1）→状態2（信号Bのみ1）→状態0のように遷移する。

ある状態から次の状態に遷移する時に計数値が増加するように計数し、次の状態から戻る場合に減少計数することによって論理的に先述の問題を解決できる。ここでは、状態1から状態3へ遷移する時に増加計数し、逆に、状態3から状態1に遷移する時に減少計数する。

図8(C)に計数制御回路を示す。図3の回路（状態3への遷移検出回路）と比較して信号Bの立ち下がりを検出するためのD形FF（状態1への戻り遷移検出）D2とSR形FF（出力は増減信号）U、単安定マルチバイブレータ（以降単安定マルチと記す、出力は計数信号）Mなどを加えた。D1が1ならUを1に、D2

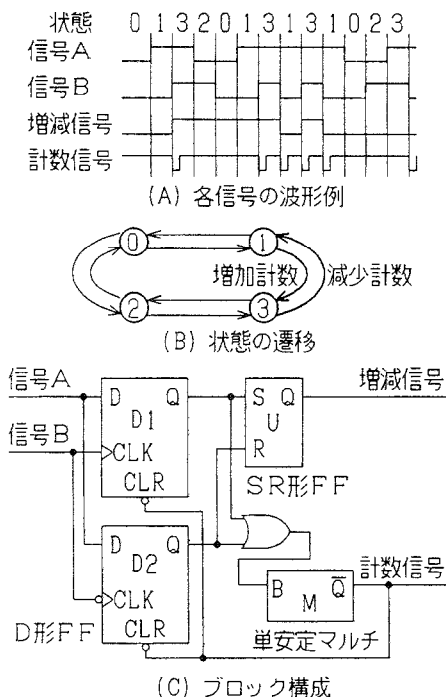


図8 計数制御回路の動作原理

が1ならUを0にする。同時にD1・D2いずれからもMを1にし、Mによって両者を0に戻す。Mは設定時間（約0.5μ秒）経過後に0に戻る。

2. 符号の発生方法

長さ（計数値）を表示する場合は基準位置に対して右向きに計ったか左向きかを符号で示す（例えば左向きに計ると負符号）ことが多い。ここでは、増減計数器の桁上げ（実際には桁下げ）信号と増減信号とを用いて符号（負状態）信号と変形増減信号とを生成する。

図9(A)に計数値の変化と符号の関係を示す。論理的には-2、-3、…の変化は減少計数であるが、負符号を別に考えると増加計数といえる。したがって、負符号が1か否かによって増減信号を反転して変形増減信号にし、増減計数器に加える必要がある。図9(B)に符号生成回路の概略を示す。負符号を記憶するD形FFについて、増減計数器の桁上げと増減信号が減少状態であることにより1にし、同じく桁上げと増加状態にあることにより0にする。このD形FFの出力（1ならば負）と増減信号とで排他論理和をとり変形増減信号を得る。

なお、計数器からの桁上げ信号を単安定マルチで整形する。この整形した信号を用い、図9(A)で示したように桁上げ発生時に計数器の内容を1に設定する。

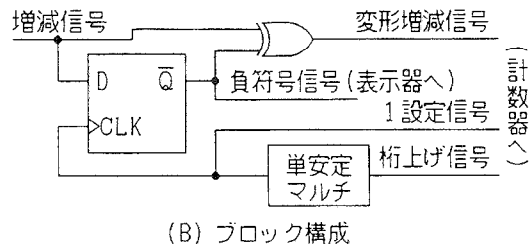
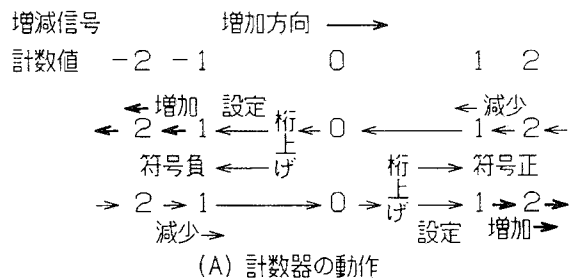
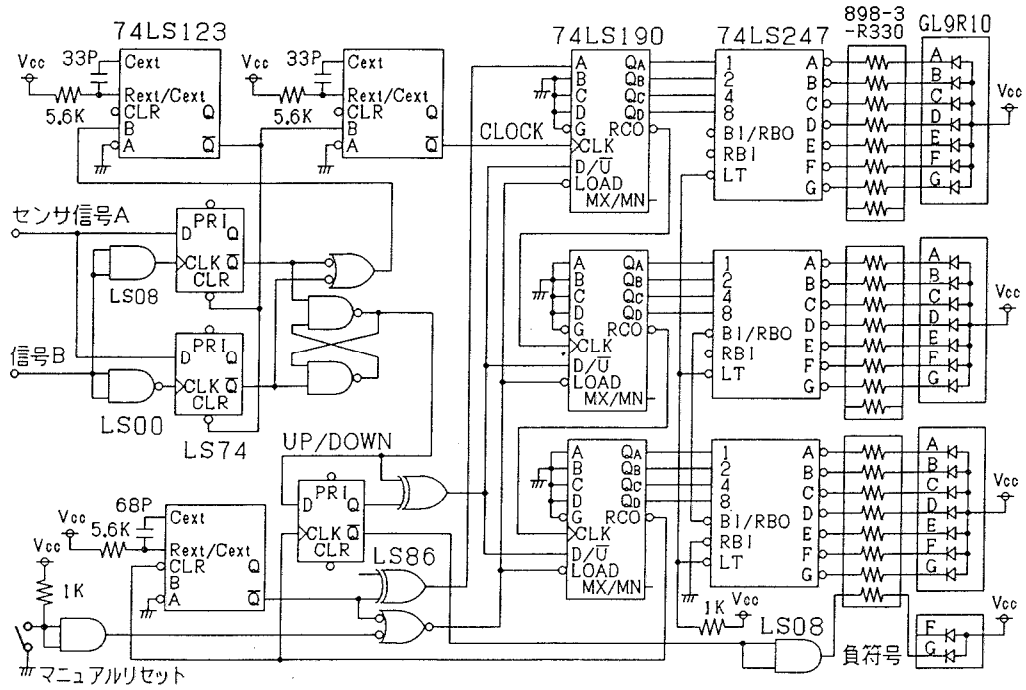


図9 符号生成回路の動作原理

3. 計数と表示

表示を考慮して計数には10進増減計数器IC(SN74LS190)を用いる。計数器の内容のリセット(0にする)にはLOAD信号端子を用いた。最下位桁について、桁上げ信号を接続して1設定(桁上げ時)か0設定(リセット時)かが切り替わるようにした。



付図2 計測表示回路

他のすべての桁は0を設定 (LOAD) する。

これら計数器の出力を7セグメントデコーダ・ドライバに接続し、LED (発光ダイオード) に接続して計数内容を表示した。回路の概略を付図2に示す。

この部位の製作はワイヤラッピングにより行った。

4. パソコンインタフェース

パソコンなど数値演算器ALUを有する装置に接続することを考察する。この場合には計数速度によって計数部をハードウェアで構成するか否かを判断する。手でリニアスケールを操作する場合は信号A・Bを直接パソコンに接続して計数すればよい。論理誤りの除去や計数・表示など計測に必要な機能はすべてプログラムによってALUで実現できる。信号A・Bの周期が100μ秒以下になるとプログラムでは実現し難く、計数器が必要になる。

レーザー干渉計測長については信号周期が1μ秒以下になり得るので計数部をハードウェアで実現し、さらに、パソコンの処理を簡単にするために2進増減計数器 IC (SN 74LS697) を用いて構成した。このICはデータラッチレジスタとバスドライバとを内蔵している。また、パソコンの機能から判断して負符号発生や表示機能はプログラムで対応した。

パソコン側には汎用のインタフェース IC (例えばIntel18255) を用いてTTL信号基準で接続する方法が簡単であり、この方法を用いた。ただし、接続回線数を軽減するために、計数器の内容読み出しは8ビットを

単位 (1桁) とし、読み出し桁を指定してパソコンに入力する方法をとった。図10にパソコン接続のための計数部を中心とした構成を示す。IV.1で述べた計数・増減信号を用いて計数する。パソコンにより計数器内容のクリアやラッチを行い、読み出し桁を指定する。8ビット i 桁目 (i=0 は最下位桁) の読み出し値を C_i とすれば計数値Nは、

$$N = \sum C_i \times 256^i \dots\dots\dots (2)$$

で求める。ただし、計数器内容は2の補数形の2進数であるので、最上位桁の最上位ビットが1の場合であって、パソコン内数値の桁数 (バイト数) が読み出し桁数と一致しない場合、読み出し桁数を超えるバイトのすべてのビットは1にする必要がある。

なお、計数値にレーザー半波長 (約0.31μm) を乗じることによりμm単位の長さに換算した。

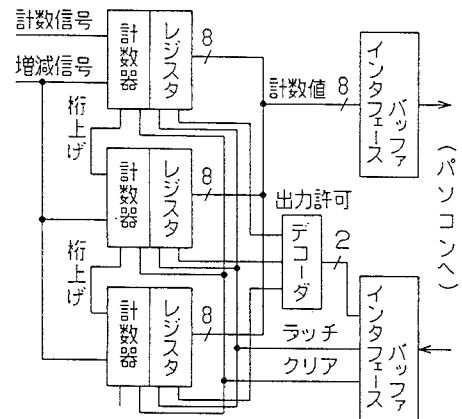


図10 パソコン接続時の計数部の概略構成

V 製作結果と考察

光リニアスケール測長装置の外観を図11に示す。写真の下側が電子回路部であり、左から、波形変換、論理誤り除去、計数部の各プリント基板である。上側が縞模様スケール及び光センサ部であり、縞模様スケールには特別の移動（駆動）装置は付けていない。

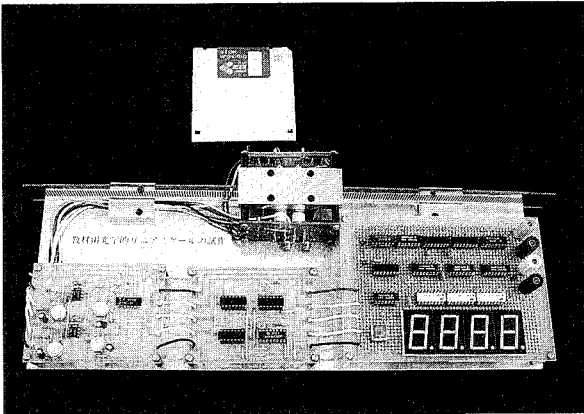


図11 試作した光リニアスケールの外観

1. 計測方式について

ここではスケールの移動をパルス信号に変換し計数する方式を用いた。スケールを移動体（例えばNC加工機械における移動刃物台やベッドなど）に結びつけることにより移動体の位置測定に用いることができる。移動するための駆動源としてモータを用いることが多く、モータの回転角度をロータリーエンコーダなどによって計測する方法がある。この方法では回転角と移動量とが正確に対応している必要があり、送り機構の誤差を無視できる必要がある。教材として送り機構を高精度に実現する（製作する）ことが比較的困難であり測長方式としては好ましくない。

この教材ではME機器に組み込む位置センサとして、仕組みの理解を助けることも目的の一つである。このために位置センサとしては移動体に簡便に取り付け得ることが好ましい。本稿では透過形の縞模様スケールを用いたが取付を考慮すれば反射形が適する場合もある。この場合は縞模様スケールを移動体に張り付け、光を照射し、反射を受光するが、安定に反射するように移動体の機械振動（ブレ）を少なくする工夫が必要である。

2. 機構設計と機械加工について

製作課題として用いる場合に製作者（学習者）に求める機械加工精度を把握する必要がある。本教材では加工精度を0.1mm程度に見積った。測長精度を向上さ

せるには、

- A) 縞模様スケールの移動ブレの軽減法と加工精度の向上法
- B) 光センサの取り付け方法と精度の向上法
- C) スケール縞模様の精度向上法

などを検討することが必要である。この内、C)が最も問題である。写真技術を用いて縮小して製作したとしても特別な装置を用いない限り縞模様ピッチは0.1mmが平易に製作できる限界と考える。

したがって、縞模様の加工精度に見合わせて他の項目を検討すればよい。おおむね縞模様ピッチの1/4程度の精度でそれぞれが実現できればよい。

3. 電子回路設計と電子工作について

ここでの回路設計にあたってはレーザー測長を主体にして1m/秒で移動する物体を μm 単位で測長することを条件にした。試作の手間を省くために同一回路を光リニアスケールにも用いたが、リニアスケールに対してはこの仕様は過剰である。10kHz（1m/秒の移動体を0.1mmの分解能で測長する）程度の周波数帯域をもつ光センサや増幅器で充分であり、この仕様ならば安価な電子部品を使用できる。

また、計数部を中心とした論理回路をTTL-IC用いて実現したために一部ワイヤラッピング法を用いざるを得なかった。半田付け結線法を用いなかった理由は、半田付け技能は十分に修得させ難く、半田付け不良による回路誤動作が発生する可能性が高いからである。もし大規模IC（LSI）を利用するならば結線数を減少でき、この問題は解決できて実装も小形化できる。

LSIとしてFPGA⁶⁾（Field Programmable Gate Array）は適当と考える。論理回路CAD⁶⁾を用い、設計した回路をFPGAに埋め込むことが可能である⁷⁾。この場合には、信号A・BをFPGAに加える、計数結果を取り出す、ための結線を実現すればよく、他の回路実現のための結線はすべてFPGA内部で実現する。したがって、プリント基板実装が容易になる。ただし、この方式を採用した場合、製作者に論理回路CADを学習させることが新たに必要になる。

4. カリキュラムの展開について

本教材は製作しながら原理や仕組みを理解しようとする教育訓練技法の実践のためのものである。装置実現を介して総合的な技能技術の理解と、これを支える各技術分野の修得・理解とを効果的に求めようと意図している。この教材を使用した指導に前後して各技術

分野の指導を行う必要がある。例えば、製作に必要な時間は機械・電子あわせて70時間程度と考えるが、逆に、この時間以下で製作できるように加工に関する基礎教育訓練を済ませておく方が好ましい。

一般に制御技術に関していえば、学習内容が抽象的であって総合的な要素が強い。したがって、実験実習を通じて具体的なイメージを描き得るようにカリキュラムを展開する必要がある。抽象度のより高い学習内容はこの教材の製作実習実施後に、製作技術の学習は以前に展開する。原理や理論に関する学習は既に製作してある教材を用いれば比較的早い段階から繰り返し学習できる。基本的には各教科目を有機的に結合するための道具として本教材を開発した。

なお、設計に関する学習時間は少なく設定されている。この教材のすべてについて設計する能力を養うには学習時間が少な過ぎる。指導者が実習実施以前に設計し試作し、指導方法を含めて検討しておく必要がある。

VI おわりに

我々は、教材化を目的に光リニアスケールを製作した。開発した装置は測長結果を表示できるが、同時にパソコンに接続してプログラムで処理することも試みた。マイコンへの接続とME機器化、すなわち、移動体制御を意識した位置センサ化については今後の課題である。

レーザ干渉による精密測長教材の開発も試みた。電子装置としてはリニアスケールと同様のものを用いた。この詳細については稿を改めたい。

なお、本研究の一部は平成元年度指定研究により行った。

謝 辞

本教材は卒業研究を通じて試作した。関係者に感謝する。また学生の製作指導にあたって本短大北・大久保両講師の協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- (1) 高田、前田：高精度測定、大河出版、1986年、p115 - 121 工作機械の直線運動の精度測定
- (2) シャープ社：ホットダイオードLT 022MCデータシート
- (3) 浜松ホトニクス社：ホットセンサS 1406データシート
- (4) シャープ社：定光出力ドライバIR 3 C 01データシート

ト

- (5) 米国 Texas instrument 社：TTL-IC データマニュアル
- (6) 米国 XILIX 社：LCA ユーザーズマニュアル
同：XACT ユーザーズガイド
- (7) 谷口忠勝：CADを用いた論理回路設計トレーナーの開発、技能と技術、VOL.28、NO.2、1993年3月、p66 - 71