

MX1A/1B形レーザ変位計について

西原一寛*1) 錦朋範*2)

1. はじめに

FA化の進む昨今、市場において、システム全体の自動化・自律性・協調性を技術的に支える要素としての、インテリジェントセンサに期待される役割は、制御・検査・診断のための適切な情報提供である。

制御における計測対象には、長さ・変位・質量・時間・温度・流量等、多くのものがあり、当社においては、特にFA市場で最も検出ニーズの高い、変位や長さの分野を重視し、既にMG-1000形レーザ測長システム(1987年発売)、そしてMH10形レーザリニアメジャ(1988年発売)を商品化し、移動変位量の超高精度測定や、非接触外径寸法計測を可能にして来た。

しかしながら、これらは測定物体の全領域をカバーするものではなく、FA現場においては、ワーク変位量の直接計測が望まれている。このような市場の要求に答えるべく、本MX1A/1B形レーザ変位計の開発を行なった。

本報では、この製品の動作原理、仕様と特長、および主な性能と各種の留意点について述べる。

2. 動作原理

MX1A/1B形レーザ変位計は基本的には光学式三角測距法を応用している。図1にその測定原理と主な信号処理回路のブロック図を示す。以下、図1に従って本変位計の動作原理を説明する。

LD(半導体レーザ)から放射された光は、投光レンズで小さなスポット状のビームに絞られ、センサ前面から照射される。測定物があると、光は物体表面に当たり、そこで拡散反射する。この拡散反射光を受光レンズが捉え、PSD(位置検出素子)上にスポットを結像する。

PSD(本報では一次元の素子を指す。)とは、ホットダイオードの一種であるが、受光面がライン状で、その両端に出力端子を持つ事の特徴とする位置検出用の素子であ

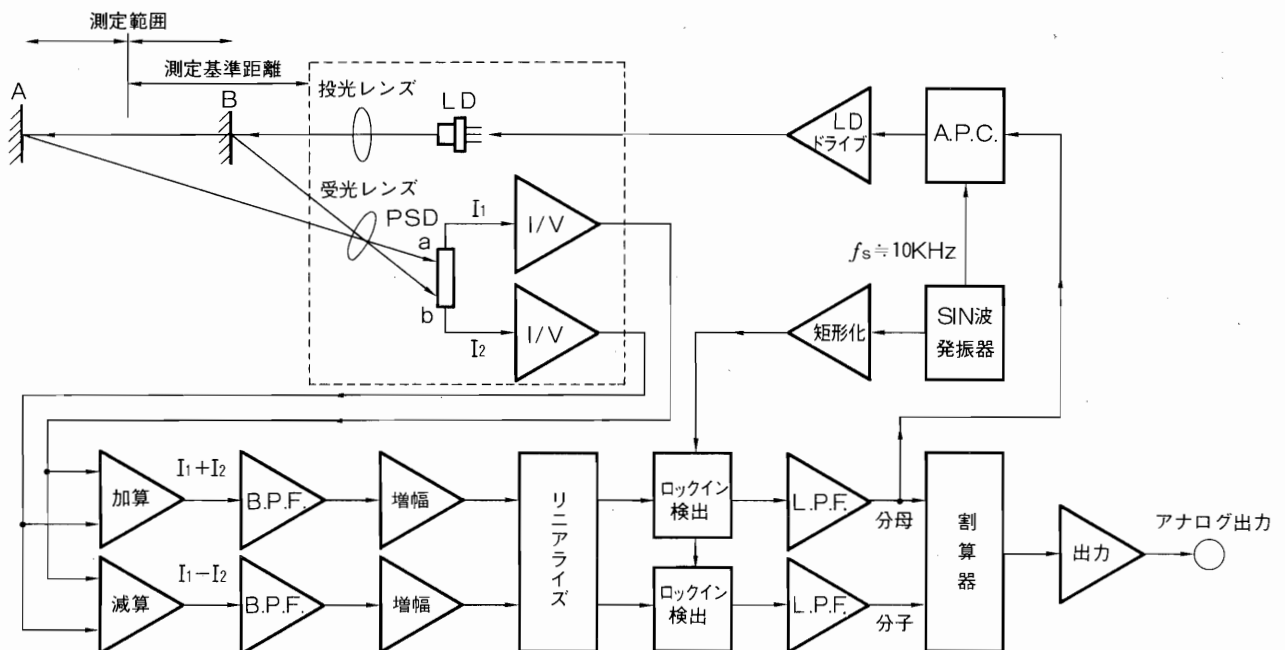


図1. MX1A/1B型レーザ変位計ブロック図

*1) 製品開発センター第6開発グループ

*2) 同上

る。この素子のライン状受光面にスポット光が当たると、そのスポットの重心位置に応じて分割された出力電流 I_1 、 I_2 が流れる。なお、受光量により出力電流量は変化するので、結局、

$$\text{演算： } K(I_1 - I_2)/(I_1 + I_2) \cdots \cdots (1)$$

K；定数

により、PSD上のスポットの位置が検出できる。

スポットの結像位置は、測定物の位置に応じて変化する。例えば、図1において測定物がAからBの位置に移動すると、スポットの像もPSD上でaからbの位置へと移動する。したがって、スポット像の位置変化を上述の様に検出することにより、測定物の変位（移動）量を知ることができる。

実際の回路では、まずPSDの出力電流 I_1 、 I_2 は各々電圧に変換される（I/V変換）。変換された信号は、それぞれ、(1)式の分子と分母に相当する加算・減算が行なわれる。

ところで、レーザ光はS/N比を上げるため10KHz程度のSIN波で振幅変調がかかっている。そのため、次段の変調周波数帯のバンドパスフィルタで検出信号成分のみを取出し、他の外乱光・ノイズ成分をある程度除去できる。この処理信号を適当な大きさに増幅した後、リニアライズ回路に入力する。

基本的には、(1)式の演算によりPSD上のスポットの移動は検出でき、これは測定物の変位に対応している。しかし、両者は正比例の関係にはない。したがって、測定物の変位に正比例したアナログ電圧を出力するためには、特別なリニアライズ回路が必要となる。

リニアライズされた分子・分母に相当する信号は各々、ロックイン検出回路と次段のローパスフィルタで検波され、直流信号に変換される。この時、参照矩形波信号と同周波の検出信号以外のノイズ成分は、ローパスフィルタの遮断周波数以上に周波数シフトされて、ほとんど除去される。

こうして、取り出されたリニアライズ化された分子・分母信号は割算器で(1)式に相当する割算が行なわれ、出力アンプを通して、測定物の変位に正比例したアナログ電圧となって外部に現われる。

測定物の距離や材質によって受光量が変化しても、(1)式の様子に割算を行なっているので理論的には問題無いが、実際は精度を維持できる割算器の入力レンジには限界があり、それによって検出可能な受光量のダイナミックレンジが制限される。そこで、よりダイナミックレンジを拡げるため、オートパワーコントロール（APC）回路を設けた。これは、受光量（分母電圧）の変化に応じて、LDの光量を逆に変化させる為のもので、結果的に大きな受光量変化を、割算器の入力レンジ内に収縮する作用が

ある。

なお、変調波はSIN波発振回路で作られ、ロックイン検出に用いる矩形波参照信号もそのSIN波から生成される。

3. 仕様と特長

主な性能を、表1に示す。

MX1A/1B形レーザ変位計は、アナログ出力と判定出力を装備した基本形（MX1A）と、その機能に加えて、モニタ表示及びアナログ演算機能を備えた高機能形（MX1B）の2機種があり、前途の三角測矩方式の原理に基づく特長と共に、アナログセンサとして必要な多くの機能を備えている。

以下にそれらを列挙すると、

- 1) 光量自動調整機能
LDの光量調整範囲を十分拡大したことで拡散反射光量の違いにかかわらず、安定した測定を可能にした。ただし、拡散反射光量の非常に少ない、鏡面に近い物体や黒色のスポンジ、透明体等の場合は原理上測定不能となる。
- 2) 分解能 $50\mu\text{m}$ 、測定範囲 $\pm 40\text{mm}$
- 3) センサヘッドの小型化
光学系の最適配置を行なうことで、高い分解能、広い測定範囲、センサヘッドの小型・高スペース効率化を同時に実現した。
- 4) 上下限判定出力機能
アナログ出力タイプのセンサの多くは、通例、PC等の入力に取り込まれ、多点分割制御に用いられるが、単にオンラインで上下限判定だけを行なうようなアプリケーションにも対応するために、本機能を装備した。しかも微妙な設定も容易に行なえるように、多回転（25回転）ポリウムを採用した。
- 5) デジタル表示機能
- 6) 厚みや段差の演算機能
MX1B形は、表1に示すような各種の多様な表示機能を有すると共に、演算機能により、容易に厚みや段差の測定を行なう事ができる。なお、そのシステム構成を図2に示す。
- 7) レーザ安全対策
レーザ光に対する各種の安全対策を設けており、これに関しては、5章で詳細を述べる。

4. 主な性能に関して

表1に示した仕様の中で特に重要な性能に関して、実際の測定例を元に、項目別に以下に述べる。

4.1 分解能

分解能はアナログ出力のノイズレベルで定義される。

表1. MX1A/IB形レーザ変位計の主な性能仕様

●性能仕様

項目		形番	MX1A形	MX1B形		
測定アナログ出力機能	測定アナログ出力		±10V(DC)、10mA max.(注1)			
	温度ドリフト		±2mV/℃以下(注2)			
	分解能		50μm=12.5mV(注3)			
	直線性		±100μm±0.5%×変位量(注4)			
演算アナログ入出力機能	演算アナログ入力	—	入力電圧範囲: ±10V(DC) 入力インピーダンス: 約100kΩ(注5)			
	演算アナログ出力	—	±10V(DC)、10mA max. (注6)			
零調設定範囲			±1V(±4mm)(注7)			
応答速度			1msec(FAST)、20msec(SLOW)(10~90%応答)(注8)			
判定出力設定機能	上限設定		多回転ポリウムにて設定			
	下限設定					
判定出力機能	上限判定出力		オープンコレクタ出力(DC30V max. 0.1A/1点 max.)(注9)			
	下限判定出力					
	応差				40mV(NARROW)、200mV(WIDE)(注10)	
	応答性				立上がり、立下がりともに500μsec以下(90%応答)	
イネーブル(同期)入力機能			判定出力を制御する入力(カプラ1点)			
アラーム出力機能			オープンコレクタ出力(DC30V max. 0.1A/1点 max.) (注11)			
アラーム入力機能			—	2台使用時に他のアンプ ユニットからアラーム出 力を取り込みます。		
表示機能(LED)	アラーム表示	DARK	反射光量が小さすぎる時点灯			
		BRIGHT	反射光量が大きすぎる時点灯			
		FAR	測定範囲より遠い位置にある時点灯			
		NEAR	測定範囲より近い位置にある時点灯			
	判定表示	C. OVER	—	演算出力が出力範囲以上 である時点灯		
		ALM IN	—	アラーム入力時に点灯		
	イネーブル表示	UPPER	上限判定出力ON時に点灯			
		LOWER	下限判定出力ON時に点灯			
	電源表示 (2色発光)	ENABLE	イネーブル(同期)入力時に点灯			
		POWER	電源が投入され通電状態にある時緑色に点灯			
	電源表示 (2色発光)	LASER ON	レーザが放射中橙色に点灯			
		MONITOR		切換えスイッチにより、 A. OUT端子から上下限 設定値に応じた電圧を 出力します。	切換えスイッチにより、 7セグメントLEDで測定 値・演算値および設定値 がmm単位で直読できます。 (注12)	
レーザ放射遅延機能			電源投入後約10sec遅延し、レーザを放射			
リモートインタロック機能			電源投入されている状態でレーザ放射の制御が可能			

(注1) 測定物体の変位量に比例(4mm/V)した電圧を出力します。また、アラームが生じた場合は、その時の電圧値を保持(減衰率:20mV/sec以下)します。

(注2) 測定条件
測定物体:白セラミック(正対)
位置:測定基準距離

(注3) 測定アナログ出力ノイズのp-pの変位換算値

測定条件
[応答速度:20msec
測定物体:白セラミック(正対)
温度:25℃
位置:測定基準距離

(注4) 測定条件
測定物体:白セラミック(正対)
温度:25℃

(注5) MX1A形またはMX1B形からの測定アナログ出力を入力します。

(注6) 2台の組合せ使用時に、厚みや段差の演算値に比例(4mm/V)した電圧を出力します。(アラーム時は注1と同様。)厚み(ADD)/段差(SUB)の選択はCALCULATIONスイッチにて行います。演算アナログ出力の温度ドリフト・分解能・直線性は測定アナログ出力の2倍となります。さらに直線性は、±60μm、±0.1%が重畳されます。

●センサヘッド

測定基準距離	90mm(センサヘッド前端より)	
測定範囲	±40mm	
発光源	半導体レーザ(780nm)	
受光素子	位置検出素子(PSD)	
電源表示LED	POWER	通電状態中緑色点灯
	LASER ON	レーザ放射中橙色点灯
筐体材質	Znダイカスト	
保護構造	IP65(IEC Pub529)	
ケーブル長(注)	5mまたは10m	
重量(約)	500g(ケーブル長:5m)	
	800g(ケーブル長:10m)	
外形寸法	18.5W×45.5D×44H	

(注7) 多回転ポリウム(ZERO ADJ.)にて調整が行えます。

(注8) FAST/SLOWの選択はRESPONSEスイッチにて行います。

(注9) 上限(UPPER)は測定値>設定値、下限(LOWER)は測定値<設定値時にそれぞれ独立にONします。

(注10) NARROW/WIDEの選択はHYS-TERESISスイッチにて行います。

(注11) 各アラーム(DARK、BRIGHT、FAR、NEAR、C. OVER、ALM IN)のいずれかが生じた時ONします。

(注12)

●単体使用

スイッチ	MONITOR	CALCULATION
測定出力値	INT	OUT
上下限設定値	INT	UP/LOW

●2台使用

スイッチ	MONITOR	CALCULATION
演算出力値	INT	OUT
演算入力値	EXT	—

なお、MX1B形は上記の各スイッチの位置に関係なく、A. OUT端子からは常に測定アナログ出力が得られます。

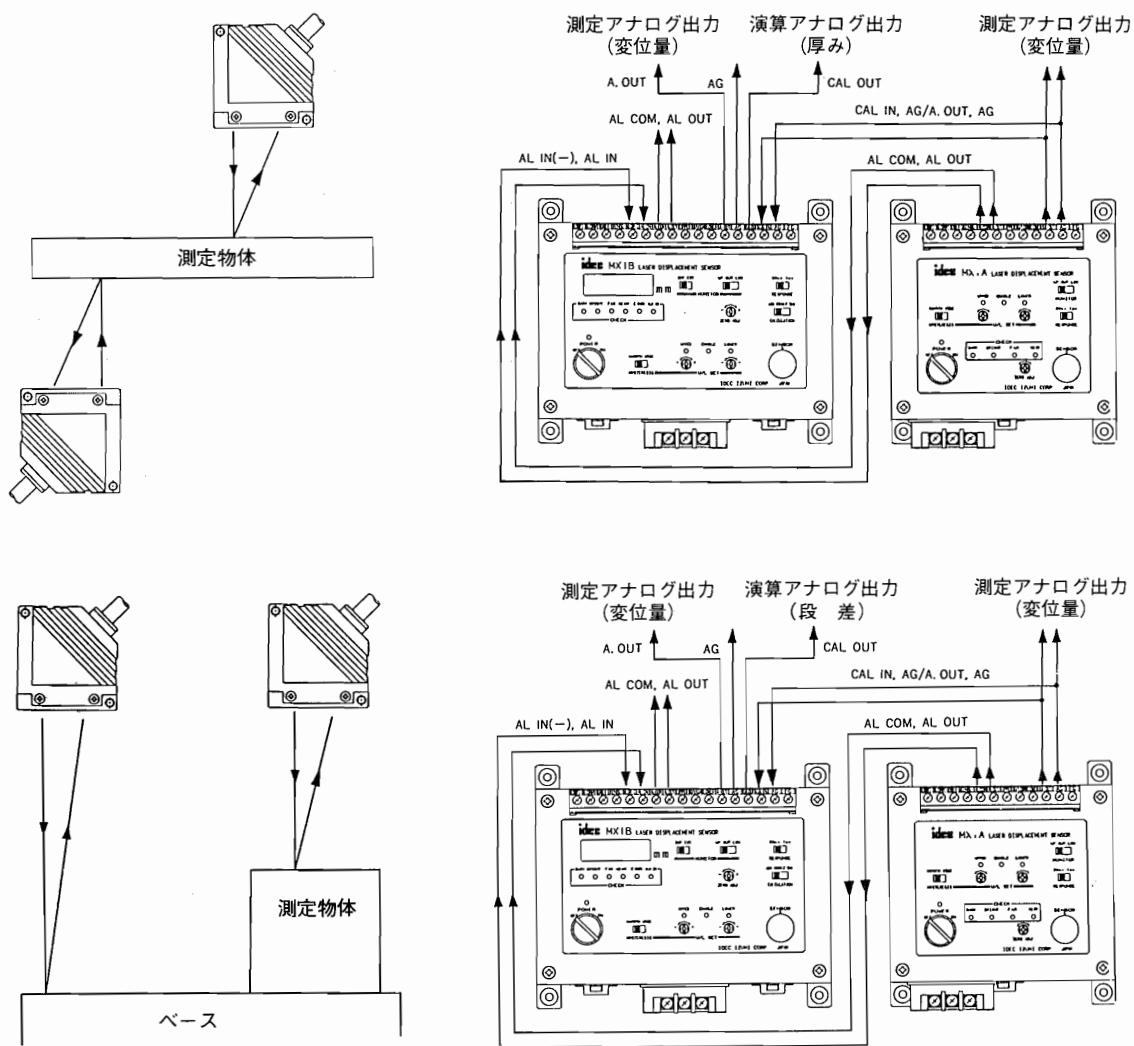


図2. 厚み段差測定システム構成図

回路的に見て、このノイズレベルは、受光部でのノイズに対する、信号（受光量）の大きさでほとんど決まる。受光量は測定距離や測定物の材質・反射率に依存するので、ノイズレベルもそれによって大きく変化する。さらに、ノイズは応答速度にも依存する。これは、出力の周波数帯域幅が、応答速度によって変化するからである。このように、測定条件によってノイズレベルは変化するので、仕様では一定の条件を設けて定量化している。

図3に仕様で定めた条件の下で実際に測定した、出力ノイズの分布（振幅確立密度）を示す。さらに図3では、応答速度1ms時の出力ノイズ分布も同時に示している。

測定例では、応答速度20ms時におけるノイズレベルのp-p値は8.2mVであり、仕様値(12.5mV)を満足していると言える。また、図より出力ノイズの分布の形は、ほぼ正規分布の振幅確立密度関数に近いことがわかる。仕様では余裕を見て、ノイズレベルのp-p値で分解能を表し

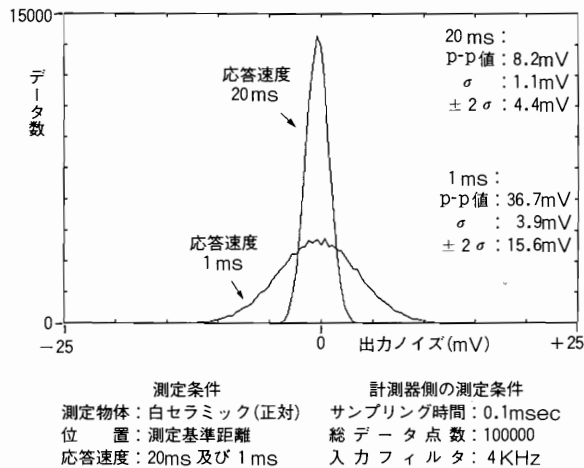


図3. 出力ノイズの分布測定例

ているが、上述のように正規分布に近いことにより、標準偏差(σ)を基本にしても定量的に表すことができる。例えば、分解能をノイズ分布の $\pm 2\sigma$ で表せば、測定例では4.4mVとなるが、データの約95.5%がこれに含まれるので、用途によってはこの表現の方が実用的な場合もある。実際に各種の測定を行なった結果、計測器側の測定条件が図3と同一の場合、p-p値は $\pm 2\sigma$ で表した値の約2倍程度になることがわかった。

なお、図3では応答速度によるノイズ分布の違いも示しているが、1ms時のノイズは20ms時に比べて、約4倍大きくなることがわかる。

図4では、受光量をパラメータにして、測定距離と出力ノイズの関係を実測した結果を示している。測定物体には、白セラミック板と拡散反射率の違う明度紙(明度スケール、JIS Z8721準拠)を使用した。図中のカッコ内の数字は、白セラミック板に対する、各明度紙の受光量の割合を示している。(受光量は測定物体を90mm基準位置に置いて、実際に本センサ部で測定した。)

2.1 直線性

MX1A/1B形レーザ変位計は、先に述べたように、回路的に広いダイナミックレンジを有しているので、受光量の違いにかかわらず測定が可能である。さらに、原理的に結像スポットの重心位置を検出しているため、完全散乱物体であれば、拡散反射率が違っていても、その測定精度は非常に良い。しかし、測定物体が金属等の光沢のある材質の場合は直接反射光成分を含むため、結像スポッ

トの重心位置がシフトし、測定精度に影響を及ぼす。さらに、鏡面に近い光沢の強い物体や透明体では、非常に精度が低下したり、測定不能となったりする。そこで、実際に各種の材料の直線性を測定した結果の一例を示す。

初めに今回、直線性の測定に使用したシステムの構成を図5に示す。全ての機器はGP-IBでホストコンピュータにつながり、そこで制御されている。測定物体はスライドテーブルに固定され、一定の間隔(今回の測定では1mm)で移動(変位)する。テーブルの移動には常に誤差を伴うため、本来基準となるべき変位量が、不確かなものとなる。そこで当社のMG-1000形レーザ測長システ

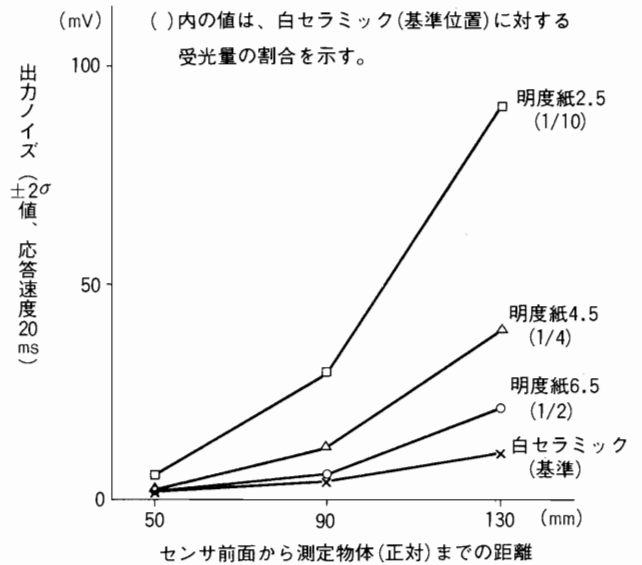


図4. 測定距離と出力ノイズの関係

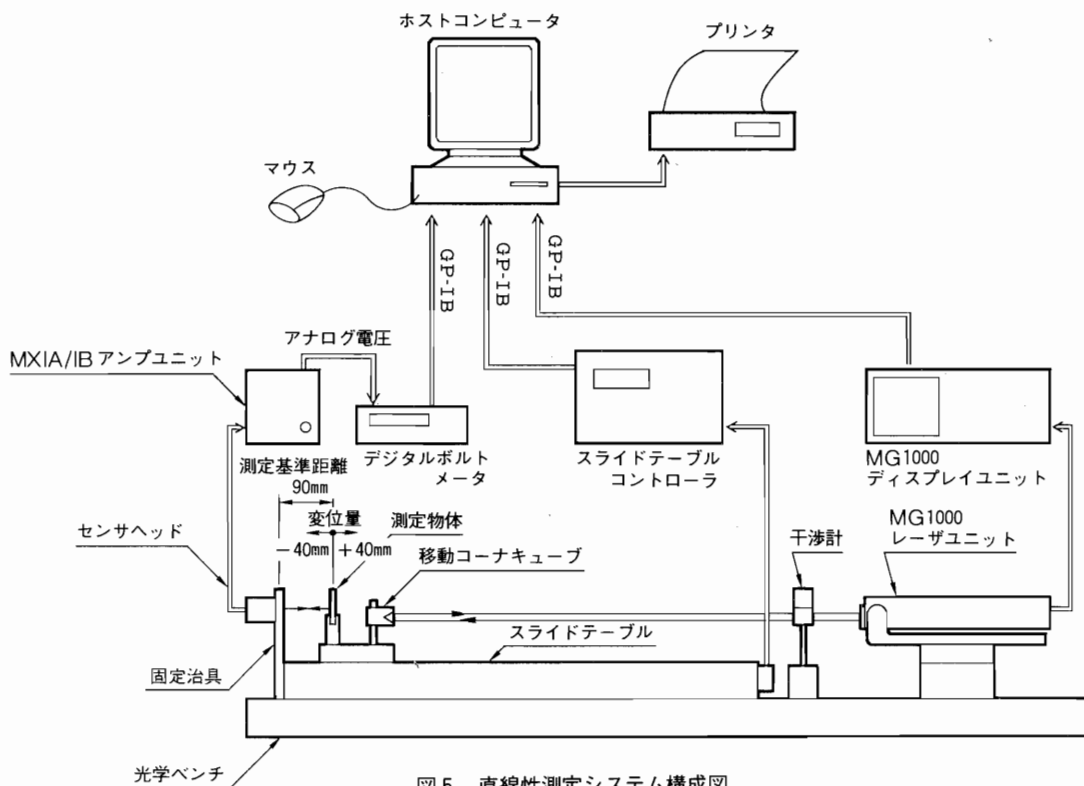


図5. 直線性測定システム構成図

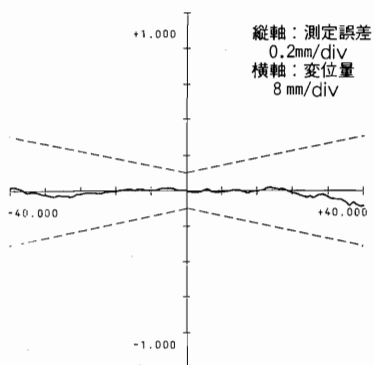


図6. 直線性代表例・白セラミック、正対

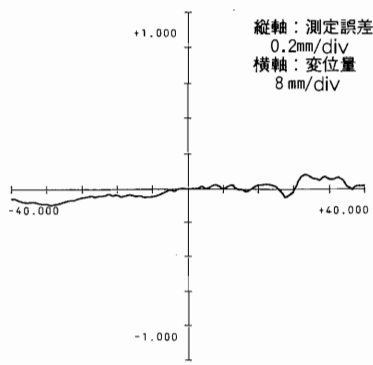


図7. 直線性代表例・明度紙4.5、正対

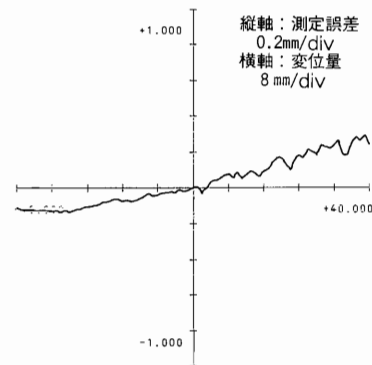


図8. 直線性代表例・明度紙2.5、正対

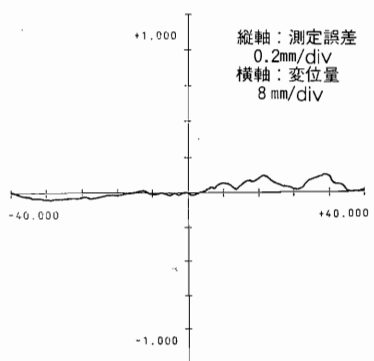


図9. 直線性代表例・ダンボール、正対

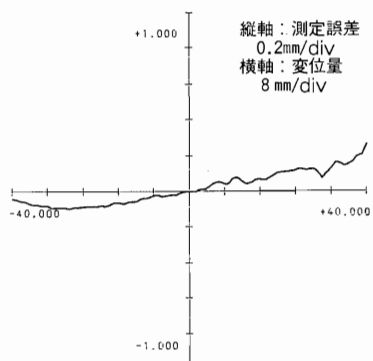


図10. 直線性代表例・ノリル樹脂
(灰色、艶消)、正対

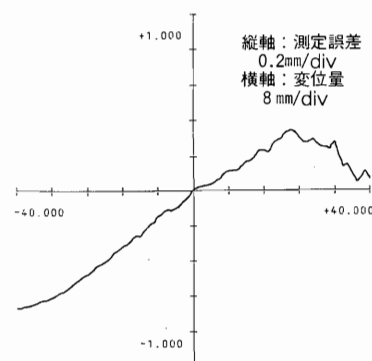


図11. 直線性代表例・白アルマイト板(ヘア
ライン方向がPSDと平行)、正対

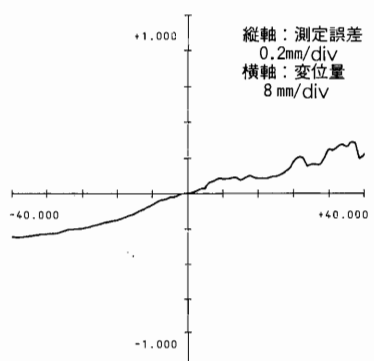


図12. 直線性代表例・黒アルマイト板(ヘア
ライン方向がPSDと平行)、正対

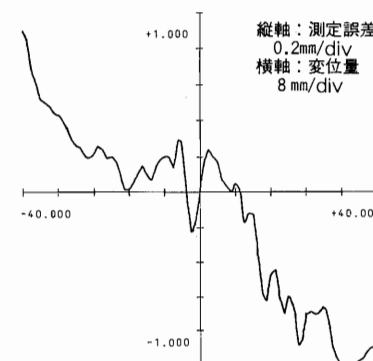


図13. 直線性代表例・圧延鋼板(ユニクロ
メッキ、光沢強)、正対

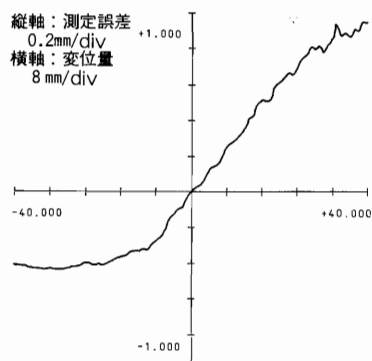


図14. 直線性代表例・半透明樹脂、正対

ムで、テーブルの移動量の絶対値を測定し、ホストコンピュータ側で補正を行なうことにより、恒温・恒湿の室内において0.1 μ m以下の高精度で真の変位量を得ている。一方MX1A/1B形レーザ変位計は測定値をアナログ電圧で出力するので、デジタル電圧計で数値に変換してホストコンピュータに取り込んでいる。

こうして得られた、測定物体の真の変位量とレーザ変位計の測定値を比較・演算し、直線性を求めてグラフ化している。なお、当社のMX1A/1B形レーザ変位計は全て、製造・出荷時に同様のシステムを用いて確実に精度校正を行っている。

図6～図14に正対時の各種測定物体の直線性の代表例

を示す。完全散乱物体として、白セラミック板、明度紙(4.5, 2.5)、ダンボール、ノリル樹脂(灰色、艶消)を選んだ。光沢のある材質としては、白アルマイト板(ヘアライン加工)、黒アルマイト板(ヘアライン加工)を選んだ。さらに測定に不向きな材質として、光沢の強い圧延鋼板(ユニクロメッキ)、半透明樹脂を選び、参考のため測定した。仕様では、白セラミック板測定時に、 $\pm 100\mu\text{m} \pm 0.5\% \times \text{変位量}$ を保証しているが、図6の結果は十分その範囲内にある。図6中、点線が仕様値を表している。

図7、図8は明度スケールを測定した例であるが、白セラミック測定時と同程度の結果が得られ、完全散乱物

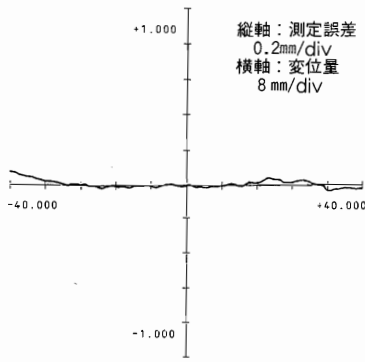


図15. 直線性代表例・白セラミック板、傾斜 x方向 -10°

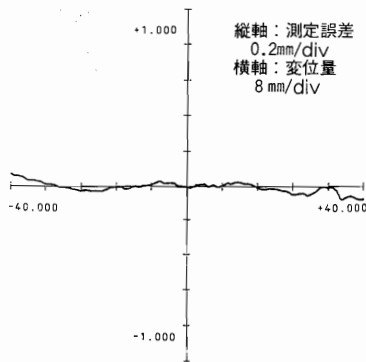


図16. 直線性代表例・ダンボール、傾斜 y方向 $+10^\circ$

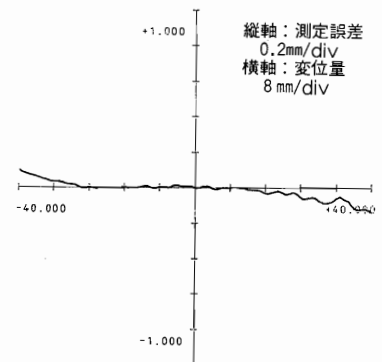


図17. 直線性代表例・ノリル樹脂(灰色、艶消)、傾斜 x方向 $+10^\circ$

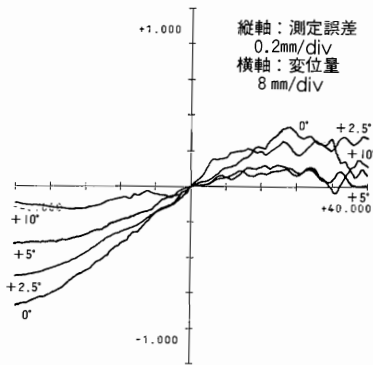


図18. 直線性代表例・白アルミ板(ヘアライン方向がPSDと平行)、傾斜 y方向 $0^\circ, 2.5^\circ, 5^\circ, 10^\circ$

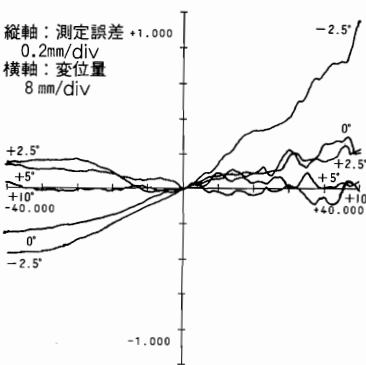


図19. 直線性代表例・黒アルミ板(ヘアライン方向がPSDと平行)、傾斜 x方向 $-2.5^\circ, 0^\circ, +2.5^\circ, 5^\circ, 10^\circ$

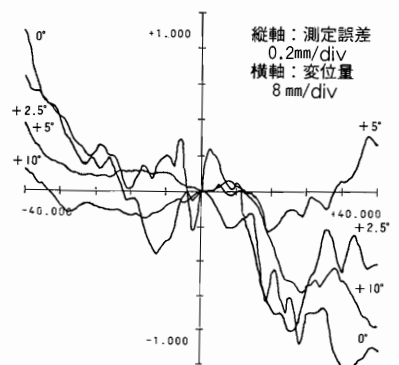


図20. 直線性代表例・圧延鋼板(ユニクロメッキ、光沢強)、傾斜 y方向 $0^\circ, 2.5^\circ, 5^\circ, 10^\circ$

体であれば、ある程度センサ受光量が少なくても直線性はほとんど影響を受けないことが伺える。また、実際のワークでも同様のことが、図9、図10で示される。

図11、図12は光沢のある金属を測定した結果であるが、明度スケール(2.5)等に比べるとセンサ受光量はかなり多いにもかかわらず、直接反射光成分を含んでいるため、精度は低下している。

図13、図14は鏡面体に近い金属、半透明体の測定結果である。測定自体は可能であるが、精度は悪く、そのことは次の傾斜特性の測定でさらに歴然とする。

図15～図20は測定物体を傾けた時の各種の直線性の代表例である。傾斜の方向は図21に示すように、xとyの2方向が考えられる。図15～図17は完全散乱物体の各種方向の傾斜特性の一例であるが、図のように10度程度の傾斜であれば、どの方向に傾けても直線性は全く影響を受けない。実際に各測定物に対して各方向 ± 2.5 度、 ± 5 度、 ± 10 度の傾斜特性を測定したが、図とほぼ同じ結果になった。

光沢のある材質の場合、傾斜により、直線性はかなり変化する。しかもx方向とy方向でその様子は違ってくる。x方向に関しては、PSD側(一側)に測定物体を傾けると直接反射光成分が直にPSDの方向を向くので、測

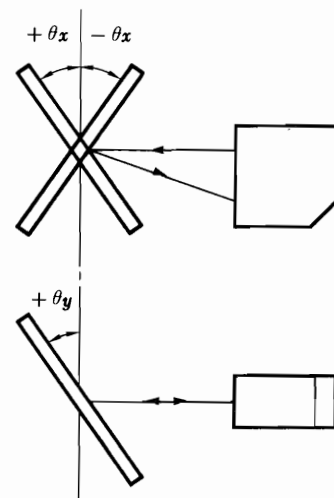


図21. 傾斜方向

定誤差が増大し、測定不能となる。一方LD側(+側)に傾けると逆の理由から、むしろ、正対時よりも直線性は良くなる。ただし受光量は少なくなるため、過度に傾けると測定不能となるので注意を要する。y方向に関しては光学的に対称なので+側、-側共同じて、やはりLD側に傾けた時と同様になる。図18、図19の測定結果に、実際に上記の傾向が表れている。

図20に示すように、測定に不向きな物体の場合はY方向に傾けても直線性はあまり良くならない。

4.3 応答速度

応答速度は測定物体が瞬間的に変位した場合に、出力電圧値が10%から90%まで変化した時間で定義している(ステップ応答)。図22及び、図23に実際に切り替えスイッチを1msと20msに設定した場合の出力応答の一例を示す。測定物体には白セラミック板を用い、ほぼ測定可能な最大幅(80mm)で変位させた。なお、応答速度は変位量には依存しない。

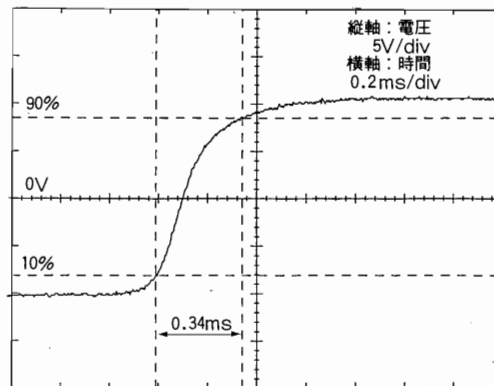


図22. 出力応答特性 1ms

5. 留意点

前章で述べた性能上の特性に加えて、実使用に際しては幾つかの留意すべき項目がある。それらについて以下に述べる。

5.1 レーザ安全対策

レーザはその単色性や集光性といった特長を持っており、FA用センサにも数多く導入されて来ている。ただし、単位面積当たりのエネルギー密度が非常に高いため、使用に際しては相応の注意を払わなければならない。

MX1A/1B形レーザ変位計では、JIS C6802(レーザ製品の放射安全基準)に基づく各種の安全対策が施しており、以下にその作用を述べる。

まず、主制御器として、キースイッチを備えており、鍵は取り外し可能で、しかも鍵が外されている時は、レーザを運転することができない構造となっている。また、リモートインタロック端子(遠隔運動保護端子)を設けてあり、それが開放となっている場合にはレーザの放射は行なわれない。

レーザの放射遅延と放射の表示に関しては、次の機能を設けた。つまり、電源が投入された状態でセンサヘッドとアンプユニット双方のLEDが緑色に点灯し、その約10秒後にレーザが放射され、同時に各表示LEDは橙色に変化する。この表示LEDの緑色の波長(565nm)は、保護眼鏡を使用した状態でも容易に確認することが可能である。

なお設置に際しては、作業者と投光軸間には不透明な遮蔽物体を置く必要があり、被測定物体の直接反射率が高い場合や、ワークが無い状態での背景が鏡面である場合には、それらからの副次反射光にも十分な配慮を要する。

5.2 取り付け角度及び方向

三角測距法においては、図24に示すように測定物体に

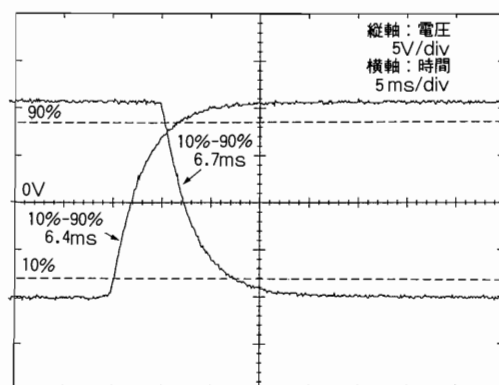


図23. 出力応答特性 20ms

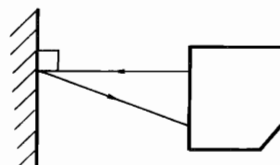


図24. ワークに対するセンサヘッドの正対取り付け

対して垂直に取り付けることを基本としている。前章で述べたように光沢のある測定物体の場合は5~10度程傾けると良い結果が得られる。

また、取り付け方向に関しては、測定物体がセンサに対して横方向から移動する場合、図25のように設置を行なう必要がある。図26は測定物体にコントラスト差がある場合の、設置方向によるアナログ出力の違いを示す一測定例である。

5.3 側面反射による影響

図27に示すような位置に物体があった場合、それによる副次反射光が受光レンズに入光したり、本来必要な反射光を受けることができない場合があるので、このような部分を測定する際には十分注意が必要である。

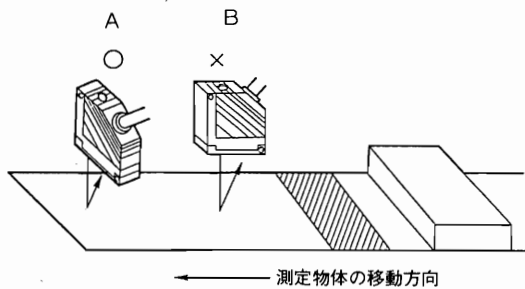


図25. センサヘッドの取付け方向

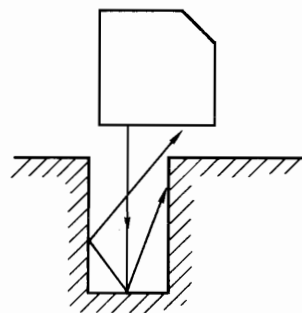


図27. 側面反射による影響

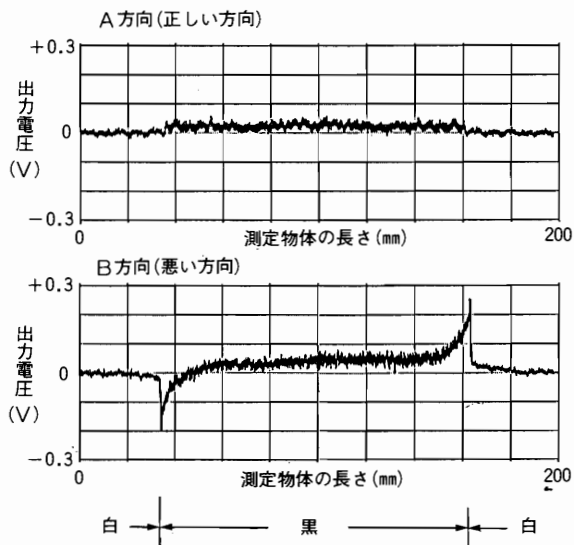


図26. 設置方向によるアナログ出力の違い

5.4 相互干渉

2台以上を同時に使用する場合には、相互干渉を起こす恐れがあるので注意を要する。

5.5 測定環境

一般の光学式センサと同様に投受光面上の水滴や、センサと測定物体間のけむり等の影響を受けるので、保護対策が必要である。

6. おわりに

これまで、当社で開発したMX1A/1B形レーザ変位計について、その機能と実際のワークにおける特性を中心に詳細を述べてきた。

三角測距式変位計では、基本的に散乱反射光を利用しているために、光沢のある測定物体の場合、測定誤差が拡大される傾向にあることは既に述べた通りである。この問題と共に、反射光のスポット位置を検出することから、その光学配置の変動によって生じる温度ドリフトの問題等も今後解決してゆかねばならない課題である。

この種のアナログセンサは今後、制御機器の高機能化と共に、ワークの状態をより正確に知る上で必要不可欠なものとなっており、以後の開発が益々進んでゆくものと考えている。

〈参考文献〉

- JIS Z8721 三属性による色の表示方法
- JIS C6802 レーザ製品の放射安全基準