

## 電荷結合素子 (CCD) を用いた直径測定の研究

Measurement of Diameter Using Charge Coupled Device

竹 佐 和 彦\*・佐 藤 壽 芳\*

Kazuhiko TAKESA and Hisayoshi SATO

## 記号と略号

$D$ : 測定対象の直径  
 $D_\mu$ : マイクロメータによる直径測定値  
 $D_c$ : 本研究測定装置による直径測定値  
 $l$ : レンズから測定対象中心までの距離  
 $\Delta D$ :  $D_c - D_\mu$   
 $x$ : レンズ視野からみる対象のさしわたし長さ  
 $x'$ : 結像面上に投影される  $x$  の長さ  
 $\bar{x}$ :  $x'$  を加重平均して求める  $x'$  の推定値  
 $\Delta x$ : カメラを移動する時に生ずる  $x'$  の変化分  
 $m$ : レンズの結像倍率  
 $\Delta m$ : 実測された  $m$  の平均値からの差  
 $f$ : レンズの焦点距離  
 $s$ :  $x$  の測られる位置からレンズまでの距離  
 $s'$ : レンズから結像面までの距離  
 $\phi_v$ : CCD ビデオ信号  
 $\phi_{th}$ :  $\phi_v$  に対して設定する閾値  
 $t_i$ :  $i=1, 2$ ,  $\phi_v$  にみられる測定対象像端部の傾斜に対応する時間  
 $B_t$ :  $t_1 + t_2$  に対応するクロックパルス計数値  
 $B_{th}$ :  $B_t$  に対して設定する  
 $C_f$ :  $B_{th}$  と  $B_t$  の差  
 $K_L$ : カメラの移動距離  
 $N$ : 回転速度  
 $e$ : 偏心, 静的なふれまわりの最大値, 最小値の差を  $D$  で除した量  
 $F$ : レンズの絞り  
CCD: 電荷結合素子  
Charge Coupled Device  
CPU: マイクロコンピュータ演算処理部  
Central Processing Unit  
CRT: ブラウン管表示装置  
Cathode Ray Tube  
PPI: プログラム可能パラレルインターフェース

## Programmable Peripheral Interface

APU: 演算用大規模集積回路

Arithmetic Processing Unit

DMA: 記憶装置直接書きこみ

Direct Memory Access

RAM: 読出し書き込み可能メモリ

Random Access Memory

## 1. ま え が き

機械部品の直径は, 機械加工における基本的な精度測定の対象である。したがって, 古くから測定装置の開発が試みられ, ノギス, マイクロメータ等, 技術的に成熟した器具が生産現場に必要な欠くべからざるものとして用いられているのはもちろん, 摩擦車のような機械要素を利用した装置<sup>1)</sup>や, 最近ではレーザー, 光電変換素子等, 光学的, 電氣的構成の装置の開発が試みられている<sup>2), 3), 4)</sup>。

実際の装置は, 通常加工物に近く, 切屑, 切削油剤等が飛散する, 雰囲気として厳しい環境の場所に設置されるから, 実用上は, 装置の性能が満足すべきものであることに加え, このような環境を克服し, さらに, 小型かつ, 信頼性, 操作性に秀れたものであることが要求される。これらの条件を満たして実用に供されているものは必ずしも多くはなく,<sup>5), 6), 7)</sup> これらを含めて, 生産加工現場で広く用いられるためには, 相対的, 絶対的な測定精度の改善, 測定の高速度化, 装置の小型化等, 性能の向上をはかる試みが今後とも必要である。

本研究では, 光電変換をおこなう素子が一次元に配列され, 従来は素子の長さが十分小さくなかったことから, 主として形状認識のみに用いられてきた CCD を, 長さ測定に用いることを検討した。すなわち, CCD をスクリーン相当の面上にもつ固定焦点式の簡単なカメラを構成し, レンズ視野からみた部材の CCD 上の結像長さをデータとして, マイクロコンピュータによって直径を算出する, 小型, 簡便な測定装置として, その性能を検討した。この際, カメラを移動させながら CCD 上の結像長さのデータを取りこみ, 自動的に焦点位置の結像長さを検出するアルゴリズムを作成し, 焦点合わせの自動化をはかった直径計測ができるようにした。

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

## 研究速報

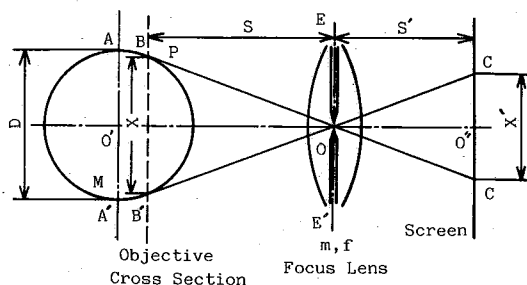


図1 直径計測の原理

## 2. 測定原理

図1のように、直径を測定すべき対象Aに対して十分に絞りを小さくしたレンズ系を配置し、Aの直径位置よりレンズ面側にある $x$ の像を、このレンズ系を通して結像面に結ばせるものとする。すなわち、結像面には、対象物の直径 $D$ ではなく、これよりレンズ系に対して前面にあるレンズ視野からみた部材の像が結ばれることになる。幾何光学の関係から図1に示される諸量間の関係を求めると、まず対象のさしわたしとその結像長さの関係が

$$x' = mx \quad (1)$$

と表わせる。また、 $D$ と $x$ との間には、

$$D = \frac{x}{s} \sqrt{s^2 + \left(\frac{x}{2}\right)^2} = x \sqrt{1 + \left(\frac{x}{2s}\right)^2} \quad (2)$$

が成り立つ。一方

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

$$s' = ms \quad (4)$$

なる関係があり、これより

$$s = \left(1 + \frac{1}{m}\right)f \quad (5)$$

が導かれる。(5)を(2)に代入して、

$$D = x \sqrt{1 + \left(\frac{mx}{2(1+m)f}\right)^2} \quad (6)$$

となり、さらに(1)を用いることにより、

$$D = \frac{x'}{m} \sqrt{1 + \left(\frac{x'}{2(1+m)f}\right)^2} \quad (7)$$

として $D$ が求められる。すなわち、 $m, f$ を既知として $x'$ を計測することにより、測定対象の所要の直径が求められることとなる。

## 3. 装置の構成

CCDはフェアチャイルド製122-DCでピクセル数1728、1個あたりの長さは $13.0 \mu\text{m}$ である。またレンズには、ニッコール標準レンズ、 $F=50 \text{ mm}$ ,  $f=1.4$ を使用し、固定焦点カメラを構成した。図1でみるように、

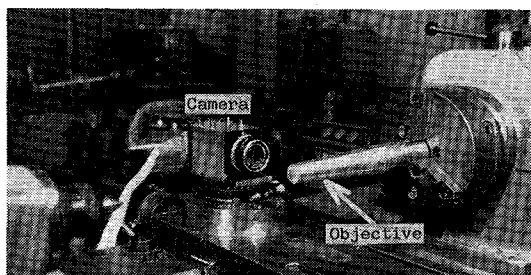


図2 施盤上のCCDカメラの配置

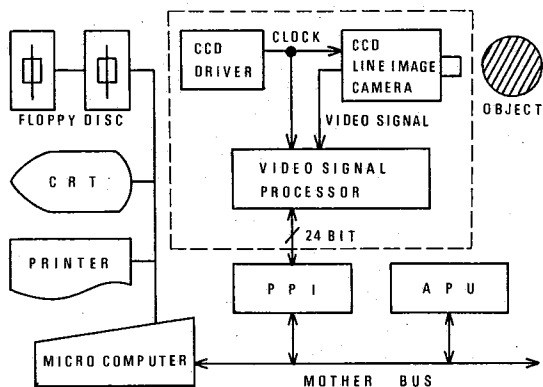


図3 計測システムの構成

この装置では絞りを絞った状態でレンズの中心部のみを使うことができるから、実用に供する場合、レンズ系はさらに小型にすることが可能と考えられる。図2はこのカメラを測定対象の被削材をねらって、旋盤工具台上にいた所を示している。図において手前右側に、蛍光灯を被削材と直交する方向におき、逆光状態で被削材が暗部として撮像されるようにしている。これによって背景と被写体は強いコントラストを作り、ビデオ信号には被削材の色や反射率には関係のない白黒像がえられることとなる。

図3はCCDの出力を処理回路を通した後マイクロコンピュータにとりこみ、(7)の演算とこの演算の平均化とをおこなう計測システムについて、ブロック図として示したものである。

マイクロコンピュータシステムは、NEC製PC-8000とその周辺装置を用いている。図中PPI, APUには、

PPI: 8255 AC-5

APU: AM 9511 A-4

を用いている。これらの回路系は、それぞれボードとして構成されており、PC-8000の拡張ユニットとに挿入することにより、バスを通してCPUに接続される。PPIによってビデオ信号処理回路からの24ビットパラレル出力をCPUにとりこんだ後、APUによって(7)等の数式

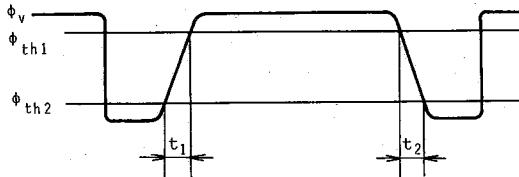
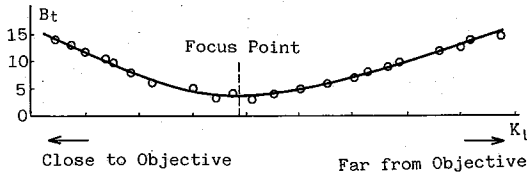
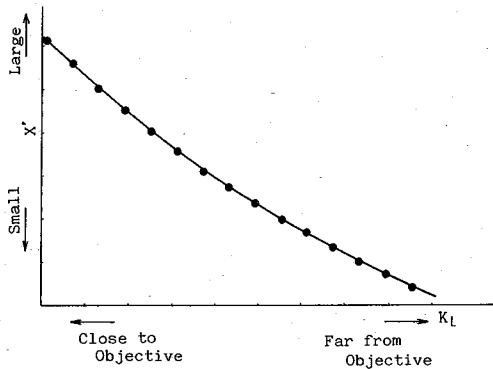


図4 CCDの出力信号

図5  $B_t$  と  $K_L$  の関係図6  $x'$  と  $K_L$  の関係

の浮動小数点演算を実行している。APUを用いたことにより、CPUにおけるソフトウェア処理の場合よりも10ないし20倍の高速処理が可能となり、計算結果の平均化とこれによる測定精度の向上を容易にしている。このような過程で測定された直径値は、CRTを制御するRAMに直接その値をかきこむDMA方式によって、CRTへの高速の表示が可能となるようにした。

CCDの出力信号は図4にみる形となる。中央部で $\phi_0$ がハイレベルとなった部分が測定対象の像であり、 $t_1$ ,  $t_2$ 部分の勾配が最も急峻になる合焦点時に、ハイレベル部分の長さを、この部分にあたる素子の個数とその単位長さから求めれば、 $x'$ が求められることになる。本研究では、2つの閾域 $\phi_{th1}$ ,  $\phi_{th2}$ にたいして $t_1$ ,  $t_2$ を求める回路を2.5 MHzのクロック周波数にたいして自製している。しかし、実際には波形の観察のみから $t_1+t_2$ が最小となる位置を正確に把握することは容易でなく、以下にのべる方法をもって合焦点時の $x'$ を求めている。

図5はカメラを測定対象に対して移動させた時の $B_t$ の性質を調べたものである。 $B_t$ が小となった所を焦点が

あった位置としうが、その付近では移動距離に対するパルス計数値の変化が小さく、そのゆらぎが相対的に大きく測定されるおそれがある。したがって、単純に $B_t$ が最小値となる位置を求めるのでは誤差が大きくなるため、 $B_t$ を求めることはせず、これを介して加重平均として $x'$ を計算する方法をとった。

まず $B_t$ の代わりに

$$C_f = \begin{cases} B_{th} - B_t : B_{th} > B_t \\ 0 : B_{th} \leq B_t \end{cases} \quad (10)$$

なる $C_f$ を設定する。 $B_{th}$ はソフトウェア中で設定され、図5の特性にもとづき、焦点の調節に際しカメラが移動する範囲を限定し、これを越えた範囲ではデータを取りこまれないようにしている。

図6は $x'$ についてカメラを移動させた時の性質を調べたものであり、測定対象からカメラを遠ざける時 $x'$ は一樣に減少することが示されている。図5と図6の性質をあわせて考慮し、

$$\bar{x}' = \frac{\sum C_f x'}{\sum C_f} \quad (11)$$

によって、焦点が合つて $C_f$ が大となる時の $x'$ に重みをつけて $\bar{x}'$ を求め、焦点が合った時の $x'$ を試みている。実際の測定では、 $x'$ の特性が一樣でない場合もおこりうることに配慮し、 $\Delta x$ を導入して

$$\bar{x}' = \frac{\sum C_f x' \Delta x}{\sum C_f \Delta x} \quad (12)$$

によって計算をすすめている。以上のアルゴリズムの設定により、カメラを移動させながら焦点が合った時の値として、 $\bar{x}'$ を安定して、高速に、かつ信頼性高く求めることを可能とした。

#### 4. 測定と考察

直径が既知の対象を測定すれば、(7)は $m$ を求める関係として用いられる。図7に示す試験片を対象に

$$B_{th} = 8$$

としてこれを試みた結果、平均値として

$$m = 0.289$$

と設定できることが示された。図8はこれに基づき、本研究の手法による基点合わせによって直径を測定し、その精度を $\Delta D$ によって示したものである。平均値は誤差零の近傍に一樣に分布している。測定に用いているデータ個数は10個であるが、標準偏差が大きく、ノイズの影響をうけているとみられる場合を除くと、平均値の誤差を0.05%以内に止めている。

実用性を考える時、この相対誤差では十分とは言えないが、平均値処理をおこなった結果として、CCDの解像度1/1728 (0.06%)より高い精度がえられていることを

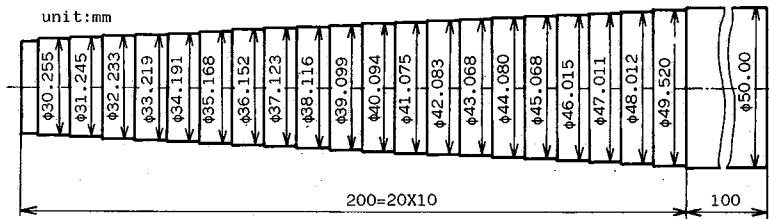


図 7 直径測定試験片の寸法

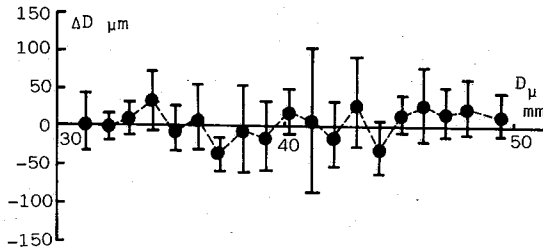


図 8 自動焦点合わせによる直径測定精度

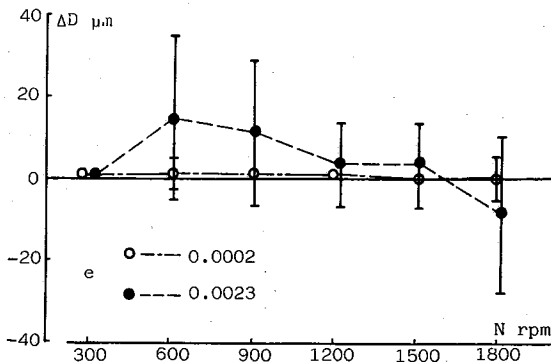


図 9 対象が回転時の測定

考慮すれば, CCD を長さ測定法に用いることに展望を与えたものと言える。素子長さを短くする等 CCD 性能向上は現在でも進められているから, さらに測定精度を向上しうること期待される。

図 9 は  $D=40$  mm の場合に, カメラを焦点が合った位置に固定し, 対象部材を回転させた状態で直径を測定した時の測定精度を  $\Delta D$  によって示している。回転中の測定であることを考慮し, データは 128 個ととりこみを増して処理している。偏心  $e$  は部材にマイクロメータをあてて静的に回転させ, ふれの最大値と最小値の差を直径で除した値としている。

$e$  が十分小さい時, 回転数にかかわらず平均値はマイ

クロメータ測定値に一致し, 標準偏差もまた非常に小さい値となっており, その精度はカメラを移動させ自動焦点合わせによって求めた場合よりよくなっている。 $e$  が大きくなると振れ回りが大きくなり, その分直径測定に誤差が生じると考えられるが, 図 9 の結果もこれを裏付けている。ちなみに  $e=0.0002$  の場合, 振れ振幅は  $8 \mu\text{m}$  であり, 精度のよい機械であれば, これ以下に振れを抑えることは十分可能であるから, 回転中の対象の非接触直径測定に対する本測定装置の実用性が十分に示されたと言える。

## 5. む す び

CCD を組みこんだ固定焦点カメラ, マイクロコンピュータからなる光学式の非接触直径測定装置を開発し, 自動焦点合わせによる直径測定, 被削材が回転中の直径測定等を試み, 30 ないし 50 mm の直径測定に対し, 相対誤差を 0.05 % 程度には止めることを明らかにし, CCD を用いた測定法としては従来にない測定精度の実現が可能であることを示した。

終わりに, Fairchild 社 M. Baudin 氏から CCD の供与を受けたことが本研究の契機ともなったことを記し, 心から感謝する。また, 本所, 谷泰弘助教授からは有益な御討議をいただいた。同じく, 大堀真敬助手, 鈴木美佐子事務官, 尾高広昭技官からは種々の助力を得た。記して謝意を表する。

(1983 年 11 月 17 日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 小尾, 佐田: 精密機械, 43-1, 昭 52, 61
- 2) 竹山, 高田: 精密機械, 43-3, 昭 52, 343
- 3) 白石: 精密機械, 45-2, 昭 54, 208
- 4) A. Novak: Annals CIRP, 30-1, 1981, 473
- 5) 武野: 機械技術, 28-8, 昭 55-7, 87
- 6) 沢辺: 塑性加工学会誌, 24-264, 昭 58-1, 8
- 7) E. G. Loewen: Annals CIRP, 29-2, 1980, 513