

## タッチトリガプローブの精度に関する研究\*

大 矢 誠\*<sup>1</sup>

## A Study of the Accuracy of Touch-Trigger Probe

Makoto OHYA

A touch-trigger probe is widely used as a position-detecting device for coordinate measuring machines. There are a few problems to be solved concerning the accuracy of the probe. One is that the sensitivity periodically changes because of the directional quality of the measuring force; also, the detected position fluctuates corresponding to the contact speed and the moving direction of the probe. These are considered to be systematic error components. As for measurements performed in the XY-plane, these errors can be conveniently compensated by probe ball diameter correction. The correction value and its direction, however, must be estimated taking the contact direction angle into consideration. Therefore, errors due to the touch-trigger probe are hardly compensated in the case of accurate measurement that involves various directional approaches of the probe, for example, complicated curved surface. In this study, the directional quality of measuring force is investigated. It is indicated that the sensitivity of the probe is caused mainly by the deformation of the probe stylus due to measuring force. The relationship between the deformation and the contact direction angle is obtained. The experiments show that the effects of the directional quality can be nearly eliminated by the correction proposed.

**Key Words:** Measurement, Accuracy, Sensor, Touch-Trigger Probe, Measuring Force, Directional Quality, Coordinate Measuring Machine

## 1. 結 言

電気接点を利用したオンオフ式のタッチセンサは、三次元測定機やマシニングセンタにおける位置検出用センサとして広く使用されている。一般には Renishaw 社製のタッチトリガプローブに代表される形式のものが広く普及している。このプローブは構造が単純で簡便に使用でき、各種形状の測定に対するはん用性があり、さらに測定能率も高いという長所を持っている<sup>(1)</sup>。しかし、測定精度に関しては、接触点の検出感度に方向性があること、プローブが被測定物に近接する方向や速度によって検出位置が異なることなど、改善すべき点も見られる。

近年、測定機本体の精度向上に伴って、プローブに起因する誤差は三次元測定機の誤差要因のなかでも大きな部分を占め、無視できない場合がある。そのために、測定力を低減化したプローブや変位量を検出する形式のアナログ式プローブなどが開発されている<sup>(2)</sup>。一方、繰返し誤差として扱われているタッチプローブの誤差要因にも系統的な性質を示すものがあり、これを補正することができれば精度改善につながるものと

思われる。

タッチプローブの測定力には構造に起因した方向性があるために、接触検出時のプローブスタイラスの変形量に変動が生ずる。一般には、この変形量を含めた不感量を考え、補正ボール径を用いることによってこれを平均的に補正している<sup>(3)</sup>。この補正方法は簡便で有効な方法ではあるが、プローブ移動を水平面内で行うことを前提としたものである。補正量と補正方向はプローブの近接方向によって異なるものであるから、種々の近接方向からの測定値を同時に処理する必要のある形状、たとえばある種の歯車歯面や自由曲面形状などについてはこの方法では対応できない。

不感量はほぼ測定力に比例するものと考えられるが、スタイラスの形状や寸法によっては、あるいはプローブを水平に保持して使用する場合などには、安定した測定を行うために測定力を大きくする必要がある。その際には、不感量は大きくなり、方向性も強く現れる。そこで、測定力とタッチプローブの感度の関係について検討し、不感量を測定力と測定方向の関数として表すことを試みた。また、測定実験によって不感量がほぼスタイラスの変形によることを検証し、その影響を除去できることを確認した。

\* 原稿受付 平成4年9月24日。

\*<sup>1</sup> 正員、新潟大学工学部 (〒950-21 新潟市五十嵐 2-8050)。

2. タッチプローブの特性

2-1 タッチプローブの構造 検討対象としたタッチプローブの構造を図1に、その仕様を表1に示す。プローブ本体（ハウジング）の3箇所各2本ずつ計6本のピン（または鋼球）が電氣的に絶縁された状態で固定されている。スタイラスは、3本のピンを固定したホルダと一体になっている。このピンの各々がハウジング上の6本のピンと接触してスタイラス部は静止している。このとき、6箇所の接点を含むトリガ信号発生用回路は閉じている。プローブボールが被測定物と接触してスタイラスが変位すると6箇所の接点のうちの一つが開いてトリガ信号が発生し、そのときの座標値が読取られる。

測定力は、スタイラス部を定位置に保持し、プローブボールと被測定面との安定な接触を実現し、また接触解除後にスタイラス部を定位置へ復帰させるために必要なものである。測定力はスタイラス上部をばねで押付けることによって与えられ、その大きさは調整することができる。

2-2 近接方向による測定力の変化 タッチプローブを垂直姿勢で使用する場合、水平面内では120度周期で測定力が変化する。そのために位置検出感度に方向性が生ずると考えられる。近接方向と測定力の関係は、図2に示した単純化したプローブ構造から知ることができる。

タッチプローブを水平面内で移動し、被測定面の法線方向に一定速度で近接させる場合について考えてみる。図2の力  $F_a$  の方向を基準位置として方位角  $\theta$  をとることとする。近接方向  $\theta$  が  $-60^\circ$  から  $60^\circ$  の範囲では2箇所の接点位置 (A, B) を支点として接点Cが

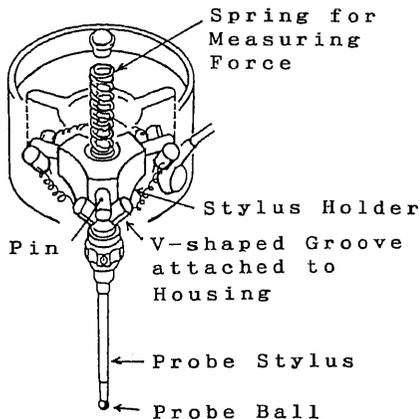


図1 タッチトリガプローブの構造

開く。また、 $\theta$  が  $60^\circ$  ( $-60^\circ$ ) のときには接点A (B) を支点として他の接点のいずれかが開くことによってトリガ信号が発生するものと考えてよい。このとき、プローブボールにかかる測定力  $F$  とばね力  $F_0$  の関係は

$$F = \frac{F_0}{(2L/r) \cos \theta} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $-60^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$

となり、120度周期で同様の関係が成り立つ。水平面内での測定力の最小値  $F_a$ 、最大値  $F_b$  は

$$\left. \begin{aligned} F_a &= (\tau/2L)F_0 \\ F_b &= (\tau/L)F_0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

となるので、その比は1:2である。

次に、図3に示すように被測定面の法線が天頂角  $\phi$  の方向にあり、この方向から接触が行われる場合につ

表1 タッチプローブの仕様 (Renishaw TP1)

Standard Measuring Contact Force	0.15~0.25N(Radial) 0.60 N(Axial)
Measuring Direction	All Direction
Repeatability ( $\sigma$ )	1.0 $\mu$ m
Overtravel	$\pm 20$ mm (Radial) 8 mm (Axial)
Approach Speed	100 mm/sec
Measuring Stylus	$\phi 4 \times 42$ mm
Probe Body Diameter	46 mm
Weight	250 g

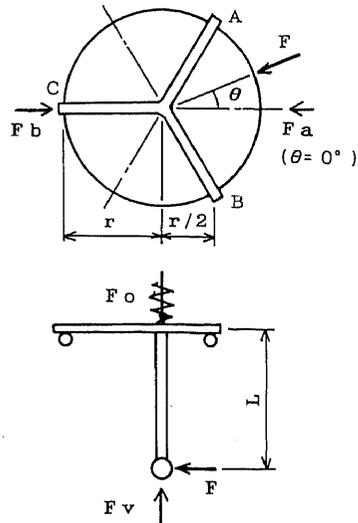


図2 近接方向  $\theta$  と測定力の関係

いて考える。被測定物の形状によって、 $\phi$  は零から 90 度以上まで変化する可能性がある。プローブボールには法線  $\phi$  の方向に力  $F$  が作用し、その垂直方向成分はばね力  $F_0$  を減ずるように働き、接点の開閉は水平方向成分によって成されるものと考えられる。この場合には

$$F = \frac{F_0}{(2L/r) \sin \phi \cos \theta + \cos \phi} \dots\dots\dots(3)$$

となる。 $\phi=0^\circ$  に対応する測定力  $F_v$  は  $F_0$  に等しく、このとき測定力は最大となるが、圧縮による変形量は曲げによる変形量に比べて無視できる大きさである。

測定時にはプローブボールにかかる測定力  $F$  によってスタイラスに弾性変形が生ずる。この力がばね力と拮抗した時点でトリガ信号が発生するので、式(3)に示す力  $F$  によるスタイラスの変形量がほぼ不感量に相当すると考えられる。スタイラスの曲げ変形には力  $F$  の水平方向成分が寄与するので、不感量  $\delta$  と近接方向  $\theta, \phi$  との関係を表すことができる。

$$\delta = \frac{C \sin \phi}{(2L/r) \sin \phi \cos \theta + \cos \phi} \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $r, L$  はプローブ構造によって決る定数である。また、係数  $C$  はスタイラスの変形以外の要因も含むものであるが、ばね力にほぼ比例するものと考えてよい。

2.3 補正ボール径 不感量を考慮した補正ボール径を求めるために、一般には図4に示す方法が用いられている<sup>(3)</sup>。すなわち、呼び寸法  $L$  のブロックゲージの内寸法、外寸法をプローブボール径 ( $d$ ) および不感量 ( $\delta$ ) を含めて測定し、両者の平均値を補正ボール径とする方法である。

図5は、ばね力を 0.6 N(60 gf, 図2の  $F_v$  に相当する値の実測値) とし、測定面の方向を 10 度ずつ変えた場合の測定例である。縦軸は、内側寸法については実測値からゲージとボール径の呼び寸法の差 ( $L-d$ ) を

差引いたものを、外側寸法については実測値からゲージとボール径の呼び寸法の和 ( $L+d$ ) を差引いたものを誤差としてとっている。また、図中の計算値は式(4)によるものであり、係数  $C$  の値は後述の式(5)から定めた値を用いた。したがって、不感量を考慮しない場合にはこれが測定誤差となり、内側、外側でそれぞれ  $4.8 \sim 8.5 \mu\text{m}$  および  $-4.6 \sim -8.5 \mu\text{m}$  の範囲に分布する。また、それぞれの測定位置での内、外寸法の実測値から補正ボール径を求めてみると、測定位置すなわちブロックゲージの置き方によって最大約  $4 \mu\text{m}$  の差が生ずる。

三次元測定機で測定される形状の多くは平行平面間の距離、円筒の内外径などであり、プローブの近接方向すなわち被測定面の法線は水平面内にあることが多い。このような場合であれば、適正な補正ボール径を用いることによって不感量の平均値はほぼ相殺され、方向による変化約  $\pm 2 \mu\text{m}$  が誤差として残ることになる。しかし、プローブの近接が水平面以外の種々の方向で行われる場合には、補正ボール径の値は水平面内で求めた値と異なるものになるはずである。

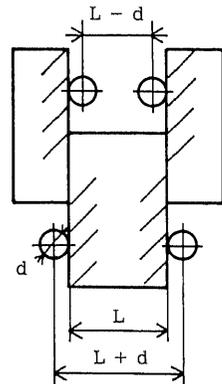


図4 補正ボール径の測定方法

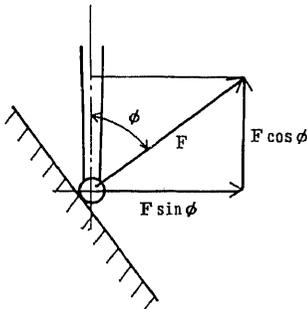


図3 近接方向  $\phi$  と測定力の関係

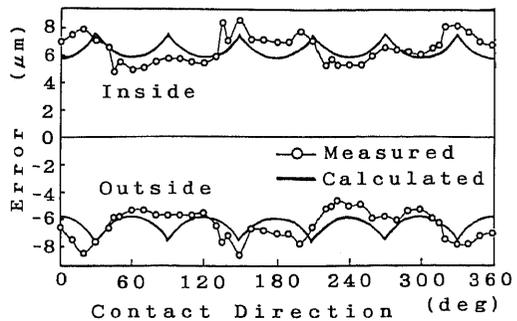


図5 面間距離の測定誤差

3. 測定実験

3.1 タッチプローブの繰返し性 測定力と近接方向のほか、被測定物への近接速度も系統的な誤差要因と考えられる。図6は、プローブ移動速度を変えて一定位置の座標を測定し、一定速度(0.26 mm/sec)での検出値を基準にとり他の移動速度での検出値との差を誤差として示したものである。ばね力は0.2, 0.5, 0.7 Nの3通りについて測定を行っている。この結果、近接速度が大きくなるに従って誤差が大きくなり検出位置がプローブ移動方向に偏ることが確認できた。この変化はほぼ速度に比例していることから、プローブが被測定物に接触してから接点が開いて座標値が保持されるまでの時間遅れに關係するものと考えられる。また、この傾向は測定力が小さいときに拡大されることもわかる。さらに、近接方向( $\theta$ )によっても異なる変化を示していた。実験に用いたマニュアル操作形の三次元測定機では正確な速度制御は困難であるので、できるだけ一定速度となるように測定を行い、その影響は繰返し誤差として扱うことにした。

表2は、プローブを一定速度でX, Y両軸のそれぞれ正, 負の方向に移動させ、同一位置を測定した場合の座標値のばらつきを標準偏差で示したものである。プローブは、図2の $\theta=0$ の軸をY軸負の方向と一致させてある。近接方向 $\theta$ が0, 60度でのばらつき( $\sigma_y$ )はほぼ等しく、 $\theta$ が30度でのばらつき( $\sigma_x$ )はこれら

表2 測定方向による繰返し精度の違い

Measuring Direction	$\theta$ (deg)	$\sigma_x$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_y$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_z$ ( $\mu\text{m}$ )
Y+	60	0.23	0.37	0.01
Y-	0	0.21	0.39	0.07
X+	30	0.47	0.17	0.04
X-	30	0.43	0.16	0.11

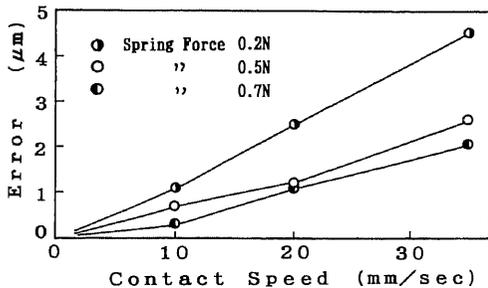


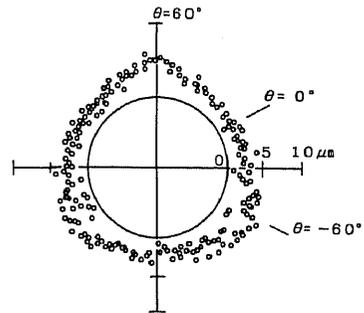
図6 近接速度による検出位置の変化

に比べてやや大きくなる。また、被測定面を軸(プローブ移動方向)直角から徐々に傾けていくと、傾きが20度を越えるあたりからばらつきが大きくなる。特に近接方向 $\theta$ が0度以外でその傾向が顕著であった。

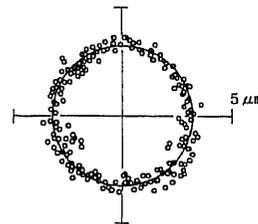
3.2 不感量の検出 不感量の影響因子として測定力と近接方向を取上げ、いくつかの測定結果を式(4)と比較してみた。タッチプローブの移動方向が水平面内であれば、リングゲージやプラグゲージを測定対象として不感量を知ることができる。また、2.3節に記したように、ブロックゲージの面間寸法の測定にもその影響が現れる。 $\phi$ 方向の不感量を観測する簡単な手段としては精密鋼球の測定が考えられる。

3.2.1 円筒測定 図7(a)は直径50mmのリングゲージの約200点の座標を測定して最小二乗法によって円筒形状をあてはめ、ゲージおよびプローブボール径の呼び値を基準として半径方向の誤差を求めた結果である。ばね力は約0.9Nと推奨値よりも大きく設定してあるが、リングゲージの半径は呼び寸法より約5 $\mu\text{m}$ 大きくなり、近接方向による方向性も顕著に現れている。式(4)の不感量を補正すると、同じ測定値の誤差は図7(b)のようになる。先に見られた方向による変化はほぼ解消し、平均半径は呼び寸法と一致する。

ばね力を変化させて同一径のリングゲージを測定して最小二乗法によって円筒を定め、その半径値とゲー



(a) 不感量を補正しない場合



(b) 不感量を補正した場合

図7 リングゲージの測定誤差分布

ジの呼び値の差を半径誤差として図8に示す。測定力を考慮しない場合には実測値は呼び値よりも大きくなり、その誤差は測定力に比例して増加する。また、2種類のスタイラスの曲げ剛性の違いが直線の傾きに現れている。同じ測定値を不感量を考慮して整理すると、半径誤差はほぼ $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内に収まる結果が得られた。

プラグゲージでは、近接方向( $\theta$ )による不感量の変化が後述の球測定の場合と同様の形状になり、外側からの測定であるから半径誤差は負の値となるが、補正の効果はリングゲージの場合と同様であった。また、これらの結果と後述の球測定の結果から、式(4)に含まれる係数 $C$ をばね力 $F_0$ の関数として定めた。その結果、測定に用いた2種のスタイラスでは $C(\mu\text{m})$ と $F_0(\text{N})$ の関係は次式のようにになった。

$$\left. \begin{aligned} C &= 2.4F_0 + 1.3 & (\phi 4 \text{ スタイラス}) \\ C &= 2.7F_0 + 1.2 & (\phi 2 \text{ スタイラス}) \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

**3.2.2 面間寸法の測定** 図5に示したブロックゲージの面間寸法の測定結果についても、呼び寸法からの偏差と近接方向による変化が見られた。この場合には、180度位相の異なる2方向のスタイラス変形量が加算されるから、誤差は拡大される。また、変化の周期は60度になる。

先に定めた係数 $C$ およびばね力の実測値(0.6 N)を用いて式(4)より各方向の不感量を算出して図中に実線で記入してある。測定値と計算値を比較してみると、ばらつきはあるが変化の傾向はよく一致している。また、補正ボール径は $\theta$ が15度の位置での内寸法、外寸法の測定値より求めた場合に適正な値になることがわかる。

**3.2.3 球測定** 近接方向 $\phi$ の影響を見るために直径20 mmの精密鋼球の測定を行った。図9は、緯度(図3の角度 $\phi$ の余角に相当する)の異なる6断面で各36点の座標を測定し、最小二乗法によって球形状

をあてはめた場合の誤差を各断面ごとに示したものである。方向性の影響は緯度の低い部分で大きく現れ、緯度が高くなるに従って小さくなることが確認できる。この測定例は標準的なばね力よりもかなり大きい場合の例(1.1 N)であるが、球半径は呼び寸法よりも7  $\mu\text{m}$ 小さくなる。図中の太い実線は不感量の計算値を示している。これを補正すれば $\theta, \phi$ 方向ともに方向性はほぼ解消する。

ばね力を変化させて同一の精密鋼球を測定した場合の半径誤差を図10に示す。円筒測定と同様に半径誤差が測定力に比例して変化すること、およびスタイラスの曲げ剛性により直線の傾きが異なることがわかる。ただし、その傾きは円筒の場合に比べて約8%増加している。また、不感量補正後の半径誤差のばらつきが円筒測定に比較してやや大きく、 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ の範囲に分布し、測定力に対してやや右下がりの有意の傾向が見られた。

不感量を補正しない場合には、半径誤差とともに球中心の $Z$ 座標にも誤差が生ずる。図11は、不感量の補正なしに求めた球中心の $Z$ 座標から補正した場合の値を差引いたものを縦軸にとり、測定力との関係を示している。

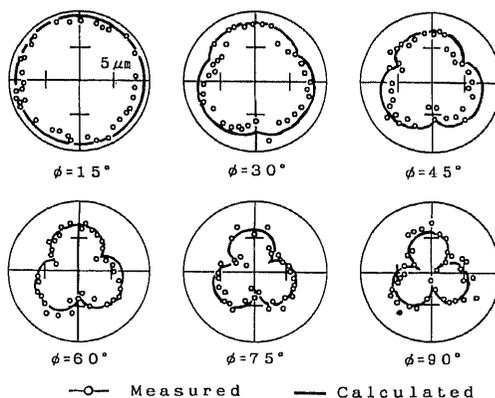


図9 球測定における測定誤差分布

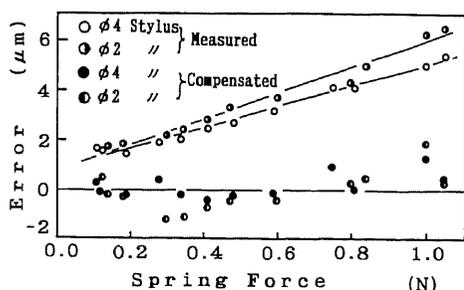


図8 ばね力とリングゲージの半径誤差の関係

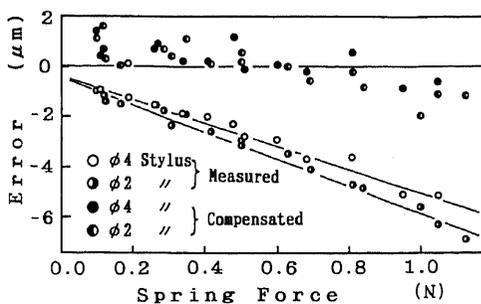


図10 ばね力と球の半径誤差の関係

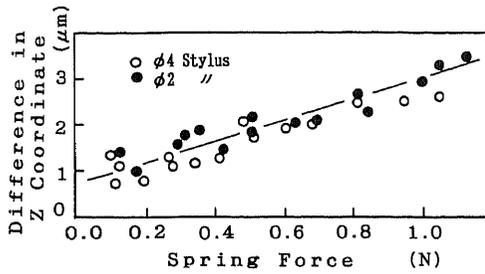


図 11 ばね力と球中心の Z 座標の関係

示したものである。球形では半球部分しか測定できず、スタイラスの変形量が  $\phi$  によって異なるので、中心の Z 座標に誤差が生ずるものと考えてよい。実測によれば、ばね力 0.1~1.1 N について Z 座標が約 2.5  $\mu\text{m}$  変化する。なお、X および Y 座標にはその影響は現れない。

3.2.4 プローブの姿勢の影響 タッチプローブは一般には垂直方向に保持して使用されるが、被測定物の形状によってはその姿勢を変える場合もある。そこで、プローブの保持姿勢の影響を知るために、スタイラスが水平になるよう保持し、リングゲージおよび鋼球を測定して垂直姿勢の場合と比較してみた。

この場合には、スタイラス部の自重を考慮する必要があるが、測定の結果、半径誤差の変化および  $\theta$ ,  $\phi$  方向の残差の分布ともに姿勢の影響はほとんど見られなかった。ただし、水平姿勢ではスタイラスを安定に定位置に復帰させるためにばね力を約 0.4 N (40 gf) 以上にする必要があった。

#### 4. 結 論

タッチプローブの不感量に関する検討と測定実験の結果、以下のことがわかった。

(1) タッチプローブの不感量とその方向性は、測定力によって生ずるスタイラスの変形が最も大きな原因である。測定対象としたプローブでは、推奨される測定力での変形量は平均約 4  $\mu\text{m}$ 、方向による変化が  $\pm 1 \mu\text{m}$  程度である。ただし、一般的な使用状況では補正ボール径を用いることによって不感量の平均値はほぼ取除くことができ、近接方向による変化分だけが誤差として残る。

(2) 測定力によるスタイラス変形量を近接方向  $\theta$ ,  $\phi$  の関数として表現することができる。これを補正することによって、円筒形状、平行平面間距離など近接方向  $\theta$  によって異なるスタイラス変形量の影響を排除できる。また、 $\phi$  方向の影響が現れる球測定についても補正は有効である。したがって、被測定面の法線が測定位置によって変化するような形状については、プローブ近接方向およびばね力を考慮した補正を行うことによって、より正確な測定が可能になるものと考えられる。

(3) タッチプローブの近接速度が系統誤差の大きな要因であることを確認した。測定力が小さいときにその影響が大きくなる。正確な測定のためには、近接速度を一定に保つことが特に重要である。

#### 文 献

- (1) 福井, 機械と工具, 12(1986), 91.
- (2) 佐久間・中村, 精密工学会誌, 52-4(1986), 19.
- (3) 川崎, みつとよ技報, 24(1982), 51.