

タッチトリガープローブセンサーの技術革新

要約

1970 年代に発明されたタッチトリガープローブは、時を経て、主要な手段として三次元測定機および工作機械で寸法計測に用いられている。最近では、三次元測定機でスキャニングプローブを使用して複雑な形状を計測したり、プリズマテック形状ワークの特徴を把握したりするのが増えているが、タッチトリガープローブも依然として、ワークのサイズと三次元測定機における位置の検査、そして工作機械上でのワークセットアップおよび工程内制御において大きな役割を果たしている。

本書では、2 種類の主要タッチトリガープローブ技術 (キネマティック方式とストレインゲージ方式) の性能特性について考察し、タッチトリガープローブの進化と開発がメーカーにもたらすメリットに迫る。

キネマティック抵抗プローブ

タッチトリガープローブには、基本的な要素として以下が求められる。

- ・ スタイラスがワークの表面に触れると変位し、そのワークに小さな力を加え、機械が減速する時間を確保してから表面から離れるようにする**弾力性**
- ・ ワークに接触していないスタイラスが機械の主軸に対して必ず同じ位置に戻るようにする**機械的繰り返し精度**
- ・ プローブがどの方向でも常に同じ変位量でトリガーするようにする**電氣的繰り返し精度**

図 1 に示すとおり、原初のタッチトリガープローブは、ロッドと球にばねを組み合わせたキネマティック機構をベースにしている。6 点の接点が構成され、スタイラスの保持部は優れた繰り返し精度で固有の位置に確実に維持される。この機構によってワークに接触したスタイラスが変位し、そして一方で表面から離れているときには、ばねによって確実にリシートする。

ロッド/球は超硬製のため、(ばねの力を受けて材料が弾性的に変形する) 接点の面積が非常に小さい。これらの接点を通じて電気回路が導通し、この回路の抵抗がプローブの電子機器によって測定される。

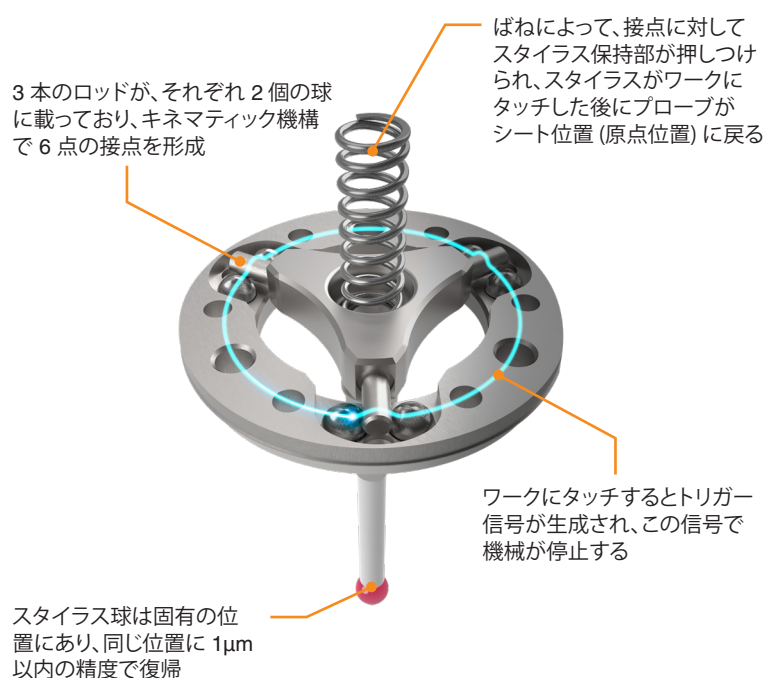


図 1: キネマティック抵抗プローブの構成図

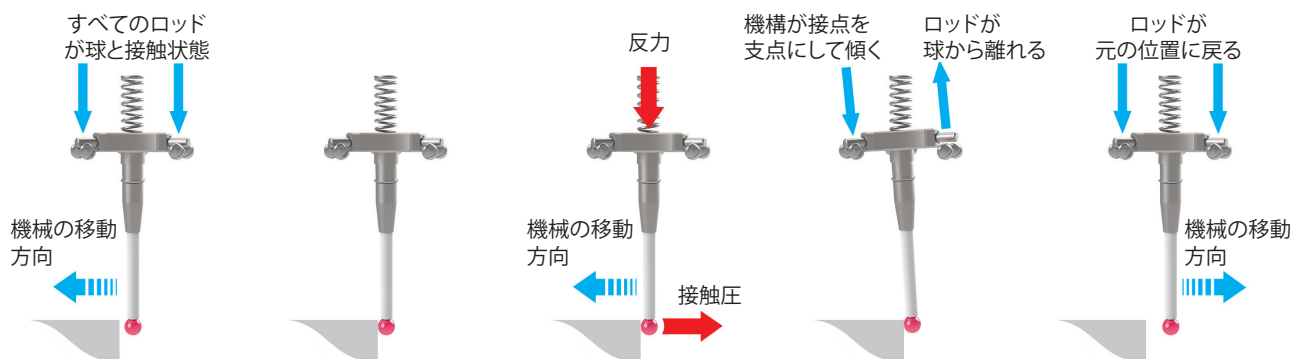


図 2: キネマティック抵抗プローブがトリガーする仕組み

図 2 にトリガーの流れを表す。

1. プローブがワークに向かって移動する。このとき、ばねによってすべてのロッド/球が接触した状態に保たれるため、スタイラスは主軸に対して既知の位置で維持される。
2. スタイラスがワークにタッチする。
3. 機械の動作によってスタイラスがワークにタッチし続け、プローブ機構に力が蓄積し始める。スタイラス先端の接触力により、プローブ機構内の左側の接点付近でプローブ機構にモーメント（ばねによって生じる反作用モーメントと釣り合う）が生じ、同接点を中心にして回転する。これらの力が蓄積すると、スタイラスが変位する（図では例示のための誇張されている）。
4. 最終的に、接触モーメントの増大が反作用モーメントを上回り、機構が左側の接点を中心にして回転し始める。右側の接点が離れて、プローブの電気回路が遮断される。この動作が生じる前に、トリガー信号が生成される（下記の「電気的なイッチング」を参照）。このトリガー信号が生成される瞬間に、そのときの機械位置がラッチされ、減速して表面から離れるよう機械に指令が出される。
5. 機械がワークから離れると、スタイラスがリシート位置に戻る。

電気的なスイッチング

電気回路が接点を通じて形成される。ボールプレートは超硬球から絶縁されており、ロッドもスタイラス保持部から絶縁されている（図 3a 参照）。ボールプレート内には、接点間で電流を流すためのワイヤが組み込まれている。

ばねの荷重を受けて球とロッドが弾性変形し（図 3b 参照）、電流が流れる小さな楕円形のパッチが形成される。各パッチの接触抵抗は、パッチの面積に反比例する。スタイラスがワークにタッチするとスタイラスにかかる力が増大していき、プローブ機構で生成される反作用モーメントによって一部の球/ロッドの力が増大する一方で、他の球/ロッド間の力が減少する。2 点の球/ロッド間の力が減少するに伴ってパッチの面積が小さくなるため、これらの球/ロッド間の抵抗が増大する。6 点のパッチがすべて直列に結ばれた状態では、球/ロッド間の力が最も小さい接点が、プローブ回路の抵抗全体に大きく影響する。

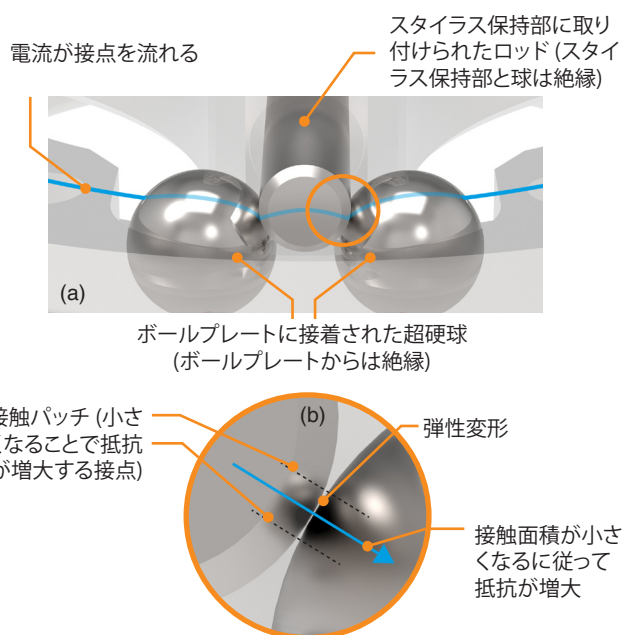


図 3a および図 3b: (a) 接点による電気回路、
(b) 球/ロッド間の接触パッチの拡大図

抵抗がしきい値に達すると、プローブの出力が「トリガー」になる (図 4 参照)。トリガー信号が生成されたときでも球とロッドは接触したままのため、スタイラスが定位置にあり、繰り返し精度の高い計測が可能になる。

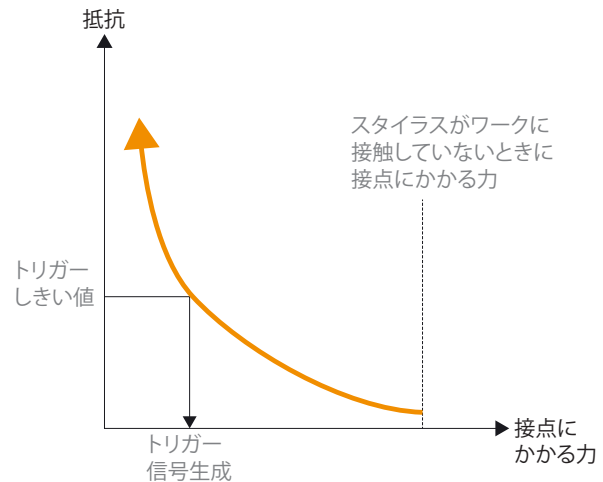


図 4: プローブ回路の抵抗がしきい値を超えるとトリガー信号が生成される

キネマティック抵抗プローブの性能因子

プリトラベル

スタイラスが表面に接触しているとき、力が均衡している。トリガーしきい値に達する前に、この増大する力によってスタイラスがたわむ。機械は依然として移動しているため、プローブがトリガーする前に発生するスタイラスのたわみ量は、トリガー時にラッチされる機械位置に影響する。

トリガー前のこのスタイラスのたわみはプリトラベルと称され、次式に従い、 F_s 、 L およびスタイラスの剛性に依存する (図 5 参照)。

プリトラベル = $F_s \cdot L^3 / 3EI$ (式中、 E はスタイラス軸材質のヤング率で、 I は慣性モーメント)。

ロッドと球が分離する前の力のバランスは次のとおりである。

$$F_c \cdot L = F_s \cdot R$$

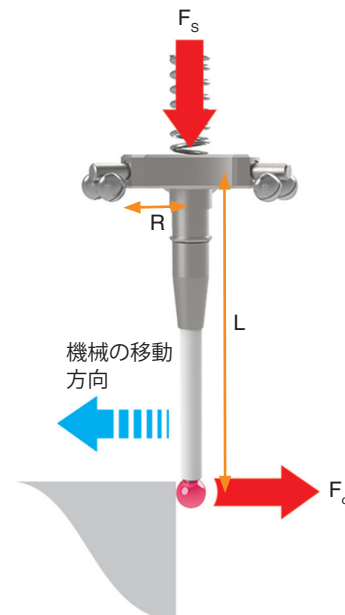


図 5: タッチトリガープローブの力のバランス

プリトラベルバリエーション (方向特性)

キネマティック抵抗プローブでは、接点によって三点支持機構が形成される。つまり、プローブ機構に対する接触力の作用方向によってピボット距離 R が異なるということである。一部のスタイラス (L が不変のスタイラス) では、接触力 F_c が R に比例する。

図 6 に、接触力が接触方向によってどのように変化するかを示す。低測定圧力方向 (F_L) では、ピボット距離 R が高測定圧力方向 (F_H) の約半分になる。図 7a および図 7b にその詳細を示す。 $R_1 > R_2$ のため、 $F_{c1} > F_{c2}$ となる。高測定圧力方向でトリガーしきい値に達するためには、より大きな力が必要になるため、結果的にその方向のプリトラベルが大きくなる。測定圧力のばらつきにより、**プリトラベルバリエーション**または**方向特性**と称する現象が生じる。

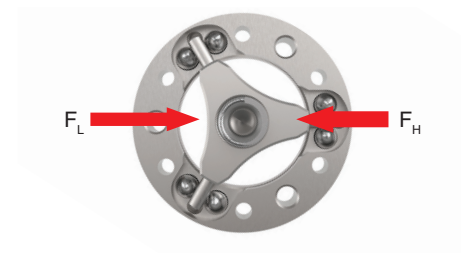


図 6: 高測定圧力方向と低測定圧力方向

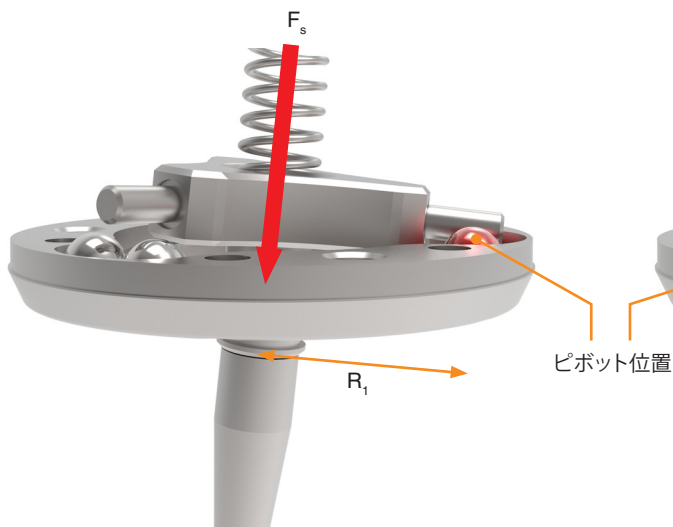


図 7a: ピボット位置がスタイラスの中心線から高測定圧力方向に離れている状況

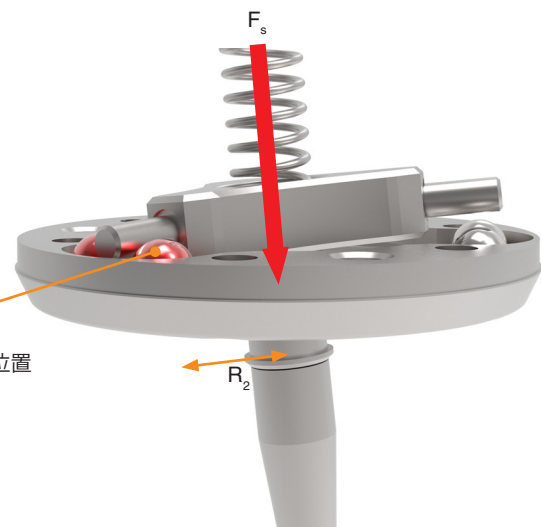


図 7b: ピボット位置がスタイラスの中心線から低測定圧力方向に近い状況

図 8 に、TP6 三次元測定機用キネマティック抵抗タッチトリガープローブの典型的な XY 方向のプリトラベルを示す。高測定圧力の 3 方向を、このプロットのピーク点とみなすことができる。このケースでのプリトラベルバリエーションは約 $3.3\mu\text{m}$ である。

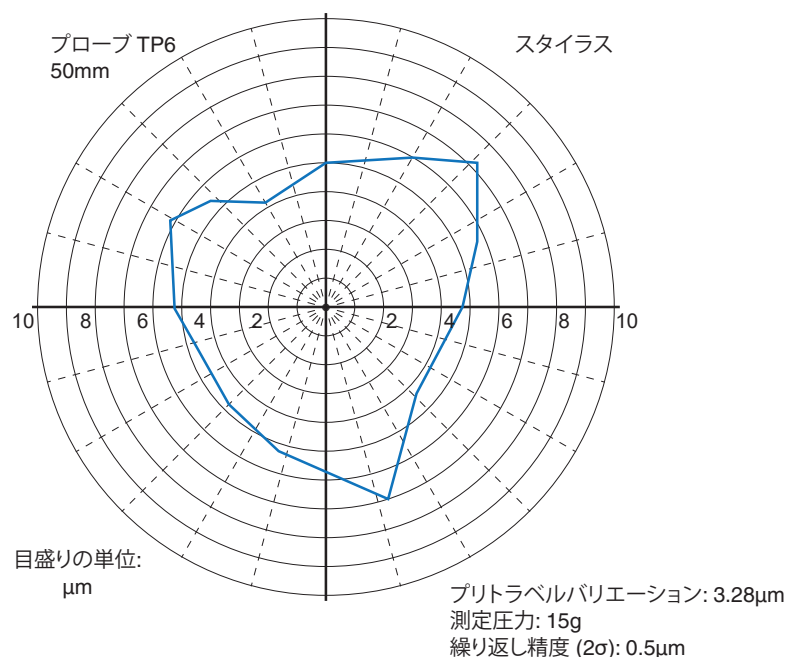


図 8: TP6 三次元測定機用プローブのプリトラベルバリエーション

XYZ 方向のプリトラベルバリエーション

プリトラベルは、XY 平面だけでなく Z 方向にも存在する。Z 方向の場合、プローブのばねを上回る機械効率 (てこ作用) がないことから、接触力はばねの力と同じである (図 9 参照)。そのため、この方向の測定圧力は、XY 平面での測定圧力を大きく上回る。ただし、この方向にトリガーするときはスタイラスが圧縮状態にあるため、その有効剛性ははるかに高く、Z 方向のプリトラベルは XY 平面のプリトラベルを一般に大きく下回る。

キネマティック抵抗プローブは、XY および Z の組合せである 3 次元 (XYZ) でのプリトラベルを示す。複雑な面を計測するにあたっては、この特性が重要となる。

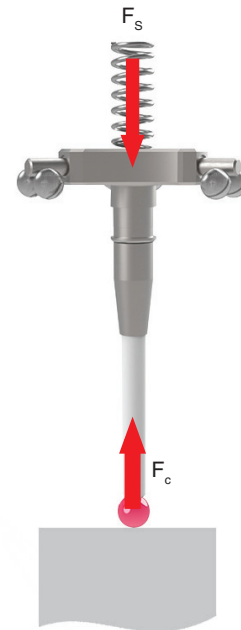


図 9: Z 方向の力の均衡

プローブキャリブレーション

プリトラベルはプローブキャリブレーションによって簡単に補正できるため、プリトラベル自体が誤差のひとつというわけではない。寸法および位置を明確に把握できている基準形状を計測し、当該スタイラスの平均プリトラベルを確定する。一度確定した後は、計測精度に影響を及ぼす主因となるのはプローブの繰り返し精度である (次項参照)。

ただし、いくつかの制限がある。複雑なワークの場合、多数の方向から計測しなければならないことがある。プローブ/スタイラスのプリトラベルバリエーションが十分に小さい場合には、計測への影響を許容できることもあるが、許容できないほど大きい場合は、プローブを方向ごとにキャリブレーションする必要がある。

繰り返し精度

プローブが毎回同じ箇所でトリガーできる能力のことを、繰り返し精度と言う。これはランダム誤差であり、工作機械用のキネマティック抵抗プローブだと、スタイラスの先端における繰り返し誤差が $1.0\mu\text{m}$ (2σ) 以内であることが典型的である。三次元測定機用のキネマティック抵抗プローブは、繰り返し誤差が $0.35\mu\text{m}$ (2σ) 以内であるものが多いが、これらはテスト値であり、必ずしもシステムの繰り返し精度を表してはいないということに留意する必要がある。繰り返し精度は、プローブからトリガー信号が出力されてから機械位置がラッチされるまでの時間のばらつきに現れる。三次元測定機コントローラはプローブ入力を中心に最適化されてきたが、CNC 工作機械は必ずしもそうではない。

工作機械プローブの計測繰り返し精度に影響を及ぼす要因として、以下のものが挙げられる。

- **機械コントローラによるプローブ信号のサンプリング周期** - 三次元測定機ではリアルタイムの割り込みであるのが通常である。CNC 工作機械は、トリガーポイントにおける位置の不確かさを最小限に抑えるための高速スキップ入力が備わっているものもあるが、数ミリ秒ごとにプローブ入力をサンプリングするだけの CNC もある。
- **信号伝達の再現性** - プローブのトリガー信号がコントローラに伝達するのにかかる時間のばらつき。レニショーのオプティカル伝達方式および無線信号伝達方式は、遅延の繰り返し精度が高く、短時間となるように設計されている。

ヒステリシス

ボールねじ機構のバックラッシュと同様、1 回前のプローブトリガーの方向がトリガーのポイントに与える影響はわずかである。XY 平面で計測を行い、次に反対方向に計測を行った場合に、ヒステリシスが最大となる。この影響は、スタイラスの長さや接触力によって大きくなるが、キネマティック機構によってヒステリシスが最小化に抑えられる。そのため、一般にヒステリシスは、プローブの一方向の繰り返し精度を決める小さな要素でしかない。

重要度順に見た性能因子

1. **繰り返し精度**
あらゆるプローブの主要性能要件であり、システム性能に対する基本的な限界を表す。ヒステリシスの影響を受ける。
2. **プリトラベルバリエーション**
計測方向をすべて把握できていれば、キャリブレーションによって取り除くことができる。プリトラベルバリエーションが大きいプローブを不適切な方向で使用すると、計測精度が低下する。キネマティック抵抗プローブでは、スタイラスが長いほど、プリトラベルバリエーションも大きくなる。
3. **ヒステリシス**
キネマティック抵抗プローブでは小さな要因に過ぎない。

ストレインゲージプローブ

キネマティック抵抗プローブ機構の性能上の限界を打ち破ったのがシリコンストレインゲージという検出技術である。近代的な小型エレクトロニクスと、直径わずか 13mm という小型プローブ向けにレニショーが設計したソリッドステートセンサーによって実現した。

キネマティック抵抗プローブと同様にストレインゲージプローブも、キネマティック機構でスタイラスを保持しているが、トリガーを感知する手段としては、ロッド/球を介した抵抗ではなく、キネマティック機構の上に配置したストレインゲージを使用している (図 10 参照)。このストレインゲージによってスタイラスに加わった接触力が測定され、ひずみがしきい値を超えるとトリガー信号が生成される。低圧力での計測が可能であり、またキネマティック機構に依存せずに検知するため、全方向で一貫したプリトラベルバリエーションを示すことができる。

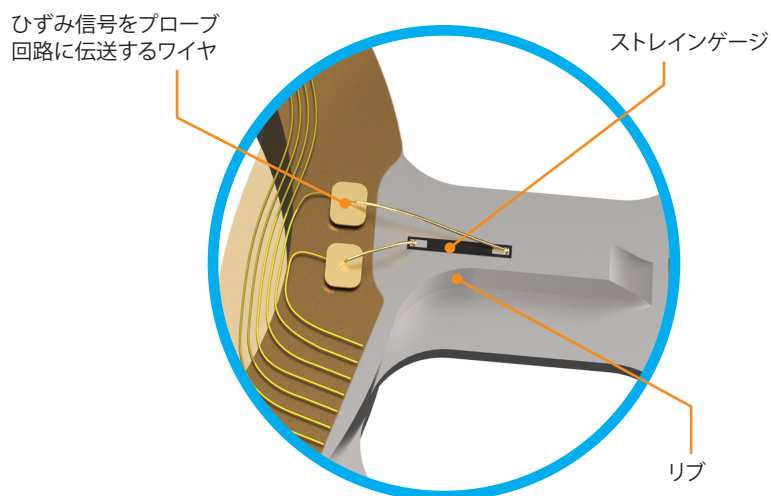


図 10: プローブ内部のリブに取り付けられたストレインゲージ

接触力の測定

図 11 に、ストレインゲージプローブの構造を模式的に示す。小さな接触力で、キネマティック機構 (スタイラスの保持部) はシートしたまま、キネマティック機構を通じてその接触力がプローブ構造に伝達される。薄いリブに取り付けられたストレインゲージ (X、Y、Z 軸で感知するように並べられた 3 点の測定ゲージ) がこの力を検出する。その出力は合計され、いずれかの方向でしきい値を超えると、トリガー信号が生成される。この力のしきい値は概ね数グラムで、同等のキネマティック抵抗プローブの測定圧力を大きく下回っている。

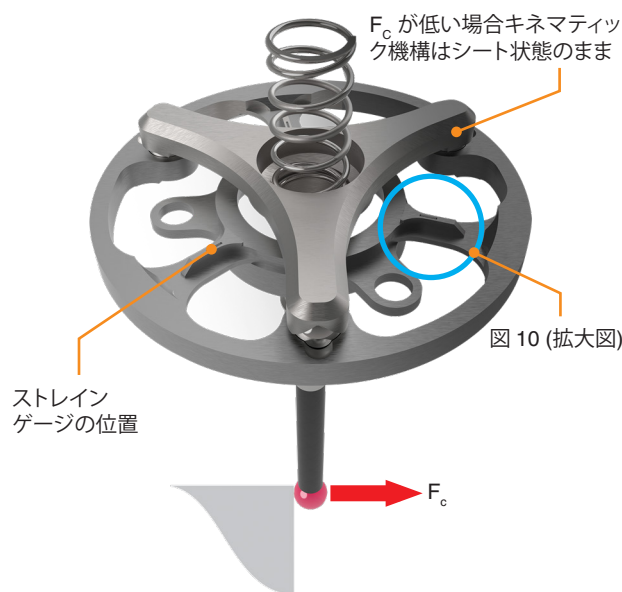


図 11: ストレインゲージプローブの模式図

ストレインゲージは、構造に加わる力に対する感度が非常に高いため、スタイラスがワークに接触していないときにも機械の振動を拾ってしまう。ゲージに加わったひずみがスタイラスの実際の持続的な変位によって生じたものかどうかは、プローブ内部のフィルタリング回路によって判定される。具体的には、力のしきい値を超えた瞬間から、再現性の極めて高い短いディレイが検出回路に加算される。この力が持続し、増大していると、ディレイの後にトリガー信号が出力される。

誤トリガーの除去と繰り返し精度の高い計測

図 12a に、機械の振動によってストレインゲージの出力値に有意なノイズが発生したケースを示す。このケースでは、特定の振動によってしきい値が超過され、固定の長さのディレイが作動する。しかし、力がしきい値未満に下がり、低いレベルに留まっている。そのため、ディレイ経過後に、プローブ側は実際にはトリガーが発生していないと認識し、トリガー信号が生成されない。

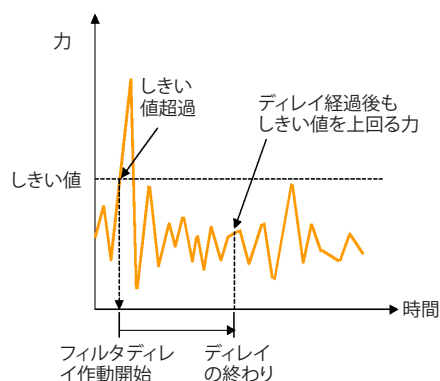


図 12a: ランダムな振動が力のしきい値を超過してもトリガー信号が生成されないケース

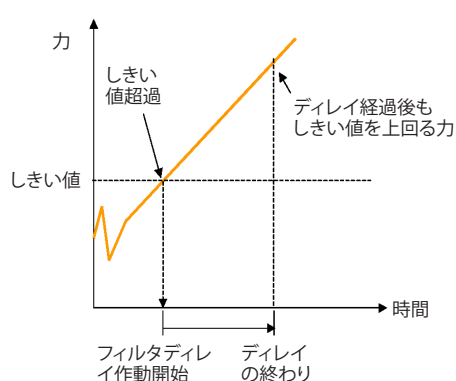


図 12b: プローブトリガーによる持続的な力がしきい値を超過し、ディレイ経過後にトリガー信号が生成されるケース

一方、図 12b は、スタイラスがワークと接触するケースを示している。スタイラスがワークに接触すると、ストレインゲージが接触力を測定する一方でランダムな振動はすぐに減衰する。ストレインゲージが検出している力は増大し続け、ディレイ作動後にしきい値を下回ることがない。ディレイ経過後にトリガー信号が生成される。

ディレイの影響は、プローブのキャリブレーションによって簡単に取り除くことができる。ディレイ中に機械が移動した距離分、スタイラス球の半径が小さいものとして処理される。ディレイ中に機械が定速で動いていれば、計測の繰り返し精度への影響はない。言い換えるなら、プログラム上の送り速度（計測速度）と同じ速度でプローブをキャリブレーションする必要がある。そのため、ストレインゲージプローブは自動三次元測定機や CNC 工作機械にしか適さない。さらには、プログラム上の目標位置（機械がプローブ計測サイクル中に向かう表面の想定位置を超えたポイント）も考慮する必要がある。機械がこの目標位置に向かって移動する際、スタイラスがワークにタッチする前に減速し始めることのないようにしなければならない。そのため、オーバートラベル距離は、予想される表面位置のばらつきと機械の減速プロファイルの両方を考慮する必要がある。

性能上のメリット

図 13 に、円周に 30°ごとに 12 点を取った OMP400 タッチトリガープローブの典型的なプリトラベルバリエーションのプロットを示す。プリトラベルが少なく、全方向にほぼ均一であることがわかる。50mm のスタイラス使用時では、XY 平面におけるプリトラベルバリエーションはわずか $0.34\mu\text{m}$ であり、これは同等のキネマティック抵抗プローブを約 90% 下回る。OMP400 の XYZ のプリトラベルバリエーションは通常、 $1\mu\text{m}$ である。

これらの性能上のメリットは計測精度という点で現れ、特に多くの検出方向が用いられる複雑なワークの場合で顕著である。プリトラベルバリエーションが小さいと、シンプルなプローブキャリブレーションルーチンを使用できる。

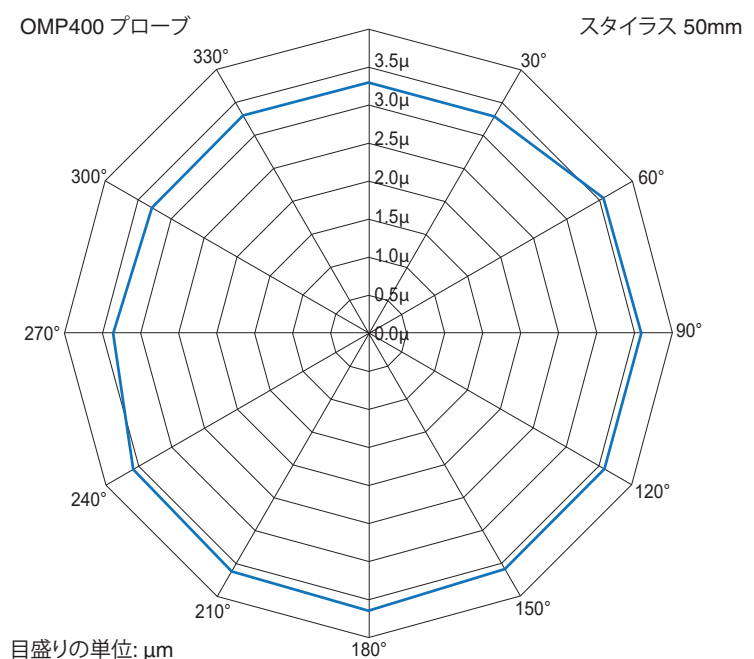


図 13: OMP400 タッチトリガープローブのプリトラベルバリエーション

寿命と信頼性に関するメリット

ストレインゲージプローブのメリットとして、長い動作寿命が挙げられる。キネマティック抵抗プローブの概ね 10 倍以上の寿命が可能である。ストレインゲージプローブでは、キネマティック機構は機械的なリシート性確保だけを目的としており、キネマティック機構の接点の劣化がほとんど生じない。対照的に、キネマティック抵抗プローブは、長年の使用によってリシートの不具合が増える。接点における抵抗は、目には見えない劣化により最終的にトリガーしきい値を下回ることができなくなる。さらに、キネマティックプローブとは異なり、ストレインゲージプローブでは振動による誤トリガーが発生しない。これらの特性から、ストレインゲージプローブは使用頻度が高い用途に適していると言える。

高い自由度

キネマティック抵抗プローブでは、スタイラス長に応じてプリトラベルバリエーションが急激に大きくなる（プリトラベルバリエーションはスタイラス長の3乗に比例）。つまり、使用可能なスタイラスの長さが制限されるということである。エクステンションバーや位置決めヘッドを使用したり、プローブそのものを小型なものにすることで、使用するスタイラスの長さを短く抑えることが多いものの、非常に長いスタイラスを使用せざるを得ない場面も存在する。測定圧力が低く、プリトラベルバリエーションが小さいストレインゲージプローブなら、優れた計測性能を発揮し、長いスタイラスを装着することができる。工作機械用主軸プローブのRMP600の場合、長さ300mmまでのスタイラスを使用可能でありながら、計測性能はほとんど低下しない。

	スタイラス長	
	50mm	100mm
繰り返し精度 全12方向で最大2σ	0.25μm	0.35μm
2D (XY) 方向特性 リングゲージからの最大偏差	±0.25μm	±0.25μm
3D (XYZ) 方向特性 既知の球形状からの最大偏差	±1.00μm	±1.75μm



図 14: OMP600 ストレインゲージプローブ

また、非常に小さなスタイラスを使用して計測しなければならない場合もある。ストレインゲージプローブなら測定圧力が低いため、低剛性のスタイラスを使用することができる。

まとめ

タッチトリガープローブ（キネマティック抵抗プローブおよびストレインゲージプローブ）は、三次元測定機やCNC工作機械で使用される接触式センサーの中で最も広く使用されている形態である。三次元測定機ではスキャニングプローブを使用することが増えている昨今においても、タッチトリガープローブは、多くの製造分野で品質保証と工程内制御に重要な役割を依然として果たし続けている。その設計は、幅広い計測作業のニーズに応えるべく進化を続けており、革新的な検出技術によって性能の向上と動作寿命の長期化、さらなる柔軟性が実現している。

www.renishaw.com/machinetool

 #renishaw

 03-5366-5315

 japan@renishaw.com

© 2025 Renishaw plc. 無断転用禁止。RENISHAW® およびプローブシンボルは、Renishaw plc の登録商標です。レニショー製品の名称および呼称ならびに「apply innovation」マークは、Renishaw plc およびその子会社の商標です。その他のブランド名、製品名または会社名は、各々の所有者の商標です。Renishaw plc. イングランドおよびウェールズにおいて登録。会社登録番号: 1106260。登録事務所: New Mills, Wotton-under-Edge, Glos, GL12 8JR, UK
 本書作成にあたり細心の注意を払っておりますが、レニショーは、法律により認められる範囲で、いかなる保証、条件提示、表明、損害賠償も行いません。

パーツ No.: H-5650-2072-02-A