

レーザー光による実時間表面あらさ 測定装置の試作について

On a Development of Surface Roughness Sensor with Laser Beam

三井 公之・佐藤 壽芳
Kimiyuki MITSUI and Hisayoshi SATO

1. ま え が き

切削加工において、精度の向上は、加工能率の向上と並んで最も重要なものである。特に近年機械加工の高度の自動化を促進するために研究がすすめられている工作機械の適応制御においても、高精度、高能率加工を行うことは重要な目標となっている。

工作物の精度は一般に寸法精度、形状精度、表面あらさに代表される。表面あらさに注目した場合、これを切削時に実時間で測定することが可能となれば、工具の損傷、加工状態の急変、びびり振動の発生を検知し、精度の維持に必要な処置を行なえること、また一定の表面あらさを維持しながら加工能率を大とするような制御系を構成できることになり、より高能率、高精度の機械加工を自動的にこなす手段が提供されることとなる。

一方切削時に生ずる自励振動が、表面あらさに悪影響を及ぼすことはいうまでもないが、定常的な加工状態においても強制振動によって励起される工具と被削材間の相対的な変動が表面あらさに影響を及ぼすことについて指摘されている^{1)~3)}。表面あらさの実時間測定が可能となれば、工作機械の振動と同時に測定することにより、これらの間の伝達特性を定量的に把握することも可能となり加工精度向上に寄与しうると考えられる。

以上にのべた表面あらさの実時間測定の必要性にしたがい、レーザー光を用いた表面あらさの測定装置を試作し、基本的な特性を調べた結果について述べる。

2. 測定原理及び回路

工作物表面に光を当て、反射光をスクリーンで受けて観察すると、一般にレーザースペックルパターンと呼ばれるランダムな図形の反射光が得られる^{4),5)}。入射光の直径(ビーム径)を変化させると、それとともなってスペックルパターンも変化する。ビーム径を表面波形の波長より十分細く絞れば、反射像はランダムな図形とならず、スポット状になる。この場合、反射スポットの位置は光の入射点での表面の傾き角により決まるから、反射スポットの位置を測定することにより表面の傾き角を知

り、さらに表面あらさを求めることができる。

表面あらさを一次元的に表示して $y=f(x)$ と書く。受光面として半径 R の円周を選び、反射スポット中心位置の入射光軸からの距離を S とし、入射光、反射光のなす角度を α と表わせば、光の正反射の法則から次式が導かれる。

$$\tan \alpha = \frac{-2f'(x)}{1-2f'(x)^2} \quad (1)$$

ここで、 $f'(x)=dy/dx$ で表面の傾きである。上式より α を用いて $f'(x)$ を表わすことが可能である。表面の傾きは通常あまり大きなものではないから $f'(x)^2 \ll 1$ としてよい。 $\tan \alpha \approx \alpha$ なる近似を行なって (1) は次のように書ける。

$$\alpha = -2f'(x) \quad (2)$$

α が求めれば、反射スポット位置 S に関しては

$$S = R\alpha = -2Rf'(x) \quad (3)$$

となる。表面形状は $f'(x)$ を x について積分することにより得られる。すなわち

$$y = \int f'(x) dx = \int \frac{-S}{2R} dx \quad (3)$$

インプロセスで表面あらさを測定する場合に対応して、表面が速さ v で x 軸の負の方向に移動する場合を考えると $x=vt$ となるから、(4)は時間についての積分に変換される。

$$y = v \int \frac{-S}{2R} dt \quad (5)$$

したがって、反射スポット位置を逐次測定することができれば(5)により表面波形を求めることが可能となる。反射スポット位置 S を測定する方法としては、ITV、フォトランジスタ等の使用が考えられるが、本研究で

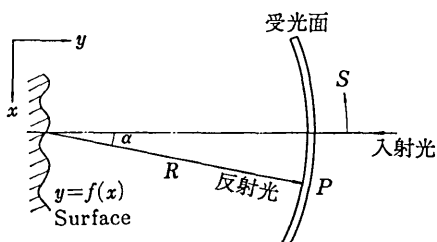


図1 測定原理説明図

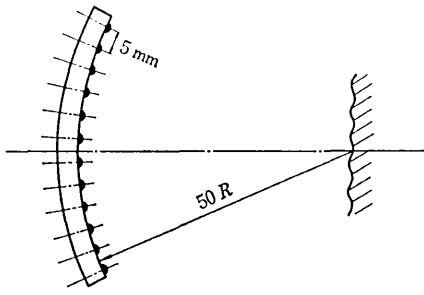


図 2 受光素子を 12 個もつセンサー

はインプロセスあらし測定装置の基礎的な開発をおこなうという見地から、フォトトランジスタを素子として受光面上に配置し \$S\$ を検出する方法によった。測定回路はフォトトランジスタを各々 2 個, 6 個, 12 個もつものを試作し, それぞれの段階に応じた実験を行なったが, ここではフォトトランジスタを 12 個もつ測定回路についてのみ述べる。

フォトトランジスタを 12 個もつ測定回路の制作にあたって次のような点に留意した。まず実際の加工物表面あらしの測定を行なうにあたって充分なものとするため, 受光素子の数を 12 個としたこと, 反射光が複数個の受光素子に同時に入射することが考えられるため, こ

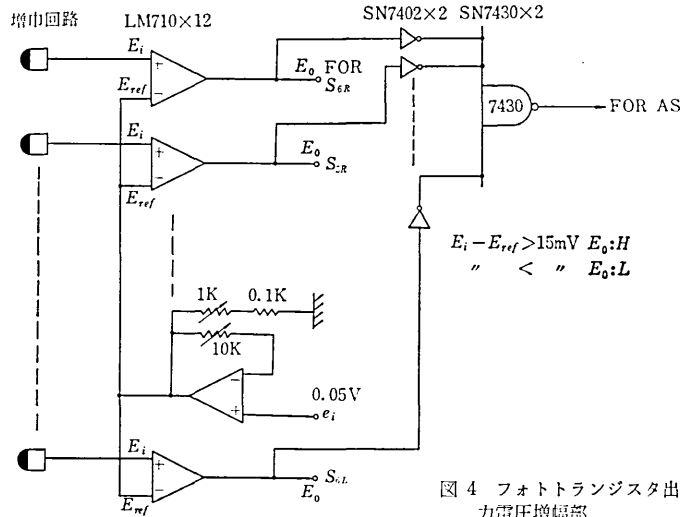


図 4 フォトトランジスタ出力電圧増幅部

のような場合にも誤動作しないこと, また配線量が少なくなるよう簡単な回路構成としたことである。

測定装置の受光部は図 2 のようにフォトトランジスタの指向性を考慮して半径 50 mm の円周上に 12 個のフォトトランジスタを 1 次元的に並べたものとし, 測定回路は図 3, 図 4 に示すようなものである。

図 4 の回路について説明する。まず, フォトトランジスタが受光すると出力パルスが生ずる。この出力パルスは反射光により生ずるが, これはレーザー発振器の出力の大小, 加工物表面の反射率, 表面あらしの程度により変化し, また測定場所における自然光の影響も受ける。このような状況変化に対応させるために, あるレファレ

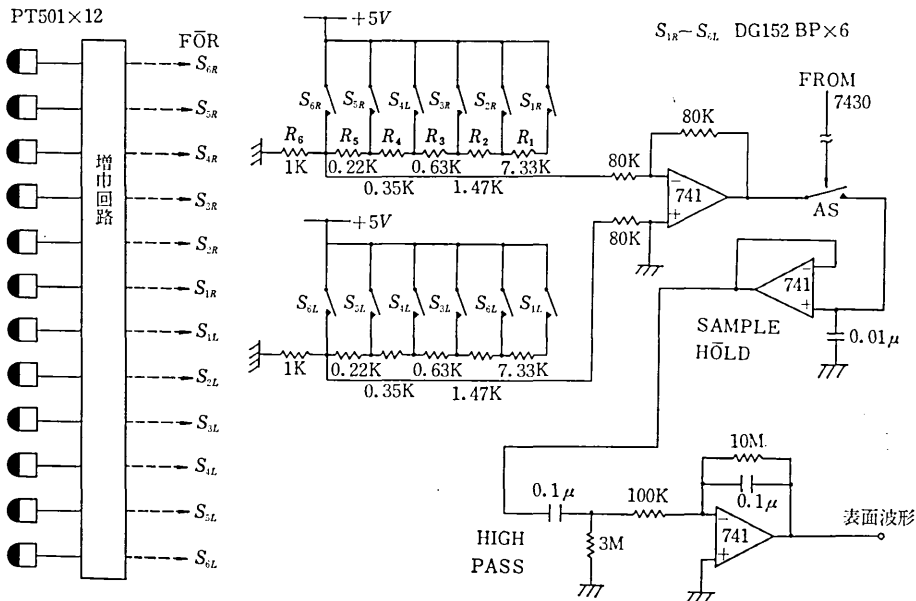


図 3 受光素子を 12 個もつ装置の回路

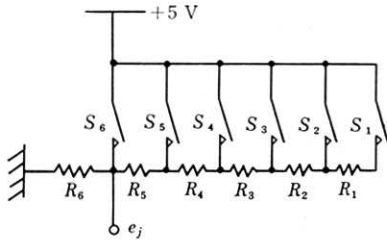


図5 スイッチ回路

ンス電圧とフォトトランジスタの出力電圧をコンパレータで比較することにより、対応する受光素子が反射光を受光したかどうかを判断するようにした。

ある素子が受光した場合、コンパレータからの出力により対応するアナログスイッチが操作され、受光した素子に対応した電圧が演算増幅器の入力となる。演算増幅器の出力はサンプルホールド回路を経由して積分器に至り、ここで積分されて表面波形信号が得られる。サンプルホールド回路と積分器の間に置かれたハイパスフィルターは、測定表面、受光部の光軸合せの誤差により生ずる傾き角信号中の直流分を遮断するためのものである。なおこのハイパスフィルターの遮断周波数は 0.5 Hz、積分器の時定数は 0.01 s とした。

図3の回路のうち、各アナログスイッチが操作された場合の出力電圧は、対応する受光素子の光軸からの距離に比例するように定める必要がある。図5においてスイッチ $S_1 \sim S_5$ の各々が閉じた場合の出力電圧をそれぞれ $e_1 \sim e_6$ とすれば

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= \frac{E_0 R_6}{R_1 + R_2 + \dots + R_6} \\ e_2 &= \frac{E_0 R_6}{R_2 + R_3 + \dots + R_6} \\ e_3 &\dots\dots \\ &\vdots \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

と与えられる。 $e_1 \sim e_6$ を次のような電圧となるようにする。

$$\begin{aligned} e_1 &= 0.46 \text{ V}, \quad e_2 = 1.36 \text{ V}, \quad e_3 = 2.27 \text{ V} \\ e_4 &= 3.18 \text{ V}, \quad e_5 = 4.1 \text{ V}, \quad e_6 = 5.0 \text{ V} \end{aligned}$$

抵抗 $R_1 \sim R_6$ の値は、(6)より次のように計算される。

$$\begin{aligned} R_1 &= 7.33 \text{ k}\Omega, \quad R_2 = 1.46 \text{ k}\Omega, \quad R_3 = 0.63 \text{ k}\Omega \\ R_4 &= 0.35 \text{ k}\Omega, \quad R_5 = 0.22 \text{ k}\Omega, \quad R_6 = 1.0 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

3. 動作実験

前節で述べた測定装置の動作特性を確認するためにビジグラフのガルバノメーターを用いた実験を行った。図6(a)において、レーザー発振器から出力されたレーザービームをガルバノメーターの鏡に直接入射させ、反射光を図2に示したセンサーで受ける。ガルバノメーターには周波数発振器からの正弦波を信号として与えて鏡を

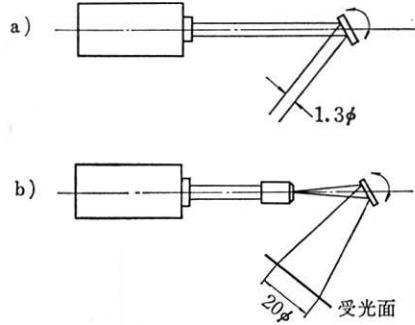


図6 ガルバノメーターによる動作実験 a) 収束光 b) 拡大光

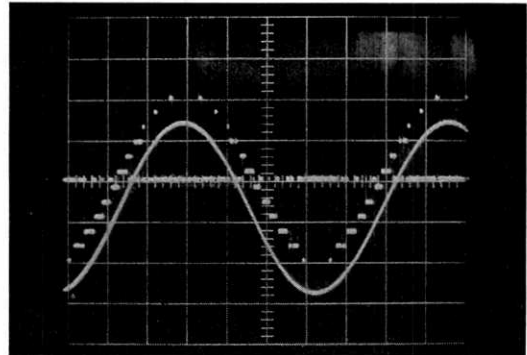


図7-a ガルバノメーターによる動作実験結果(収束光)

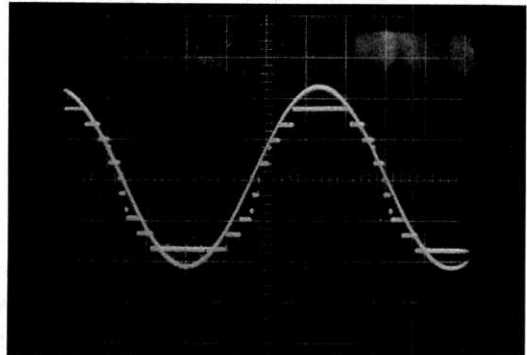


図7-b ガルバノメーターによる動作実験結果(拡大光)

振らせ、センサーはその反射スポット位置を検出し、位置の変化に対応した信号をオシロスコープにより観測する。図6(b)は複数の受光素子が同時に受光した場合にも回路が正常に動作することを確認するための実験である。すなわち、レーザー発振器から出力されたレーザービームをコリメーターにより拡大してガルバノメーターの鏡に入射させ、受光面上で直径約 20 φ のビームスポットを得た。

実験結果については、ガルバノメーターへの入力信号と、装置の出力である傾き角信号とをオシロスコープで同時に観測し、写真撮影した。図6(a)に対応するものを図7-aに、(b)に対応するものを図7-bに示した。図

より明らかなように、複数の受光素子に同時に光が当たる場合においても、回路は正常に動作していることを確認できる。図3の回路の特性によりこのような場合、光軸から遠い位置のフォトトランジスタに対応する電圧が出力されるために、装置の出力波形は正弦波から多少形がずれているのがわかる。

4. びびり振動波形の測定

つぎに実際の切削表面のあらさ測定の一例として、真鍮の丸棒を突っ切りバイトで切削した際に生じた、表面のびびりマークの測定を行った結果についてのべる。測定は切削後被削材を施盤から取りはずし、被削材回転装置により低速回転して行なった。

図8、図9は、被削材の駆動速度を 0.628 mm/s として表面の傾き角に対応する信号を測定し、ビジグラフで記録した結果を示す。びびりマークの状態は場所により

表 1 びびりマークの波長

測定場所	本装置により測定した波長 (mm)	顕微鏡観察による波長 (mm)
1	0.43~0.5	約 0.5
2	0.25~0.44	約 0.35

異なるので、図8に対応するところを測定箇所1、図9に対応するところを測定箇所2とした。ビジグラフチャートより読み取って計算したびびりマークの波長と、切削表面を直接顕微鏡で観察して求めた波長との比較を表1に掲げる。なおビジグラフチャートの送り速度は 200 mm/s である。

つぎに被削材の駆動速度を 10 mm/S として、表面波形信号をビジグラフで記録したものが図10である。この実験では測定の再現性を評価するために、被削材の同一円周上で繰り返し測定した。1,2,3,4の番号で示した各波形はそれぞれ被削材の1回転に対応しており、A、

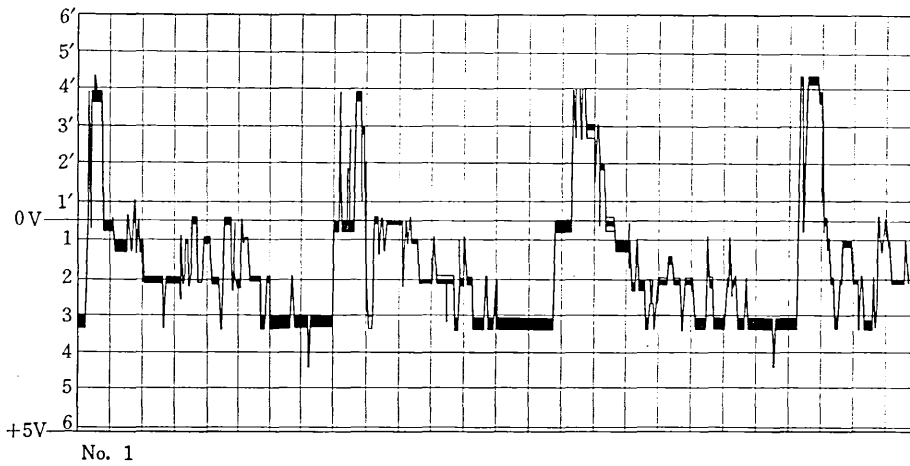


図 8 びびり振動波形の傾き角測定例 (測定場所 1)

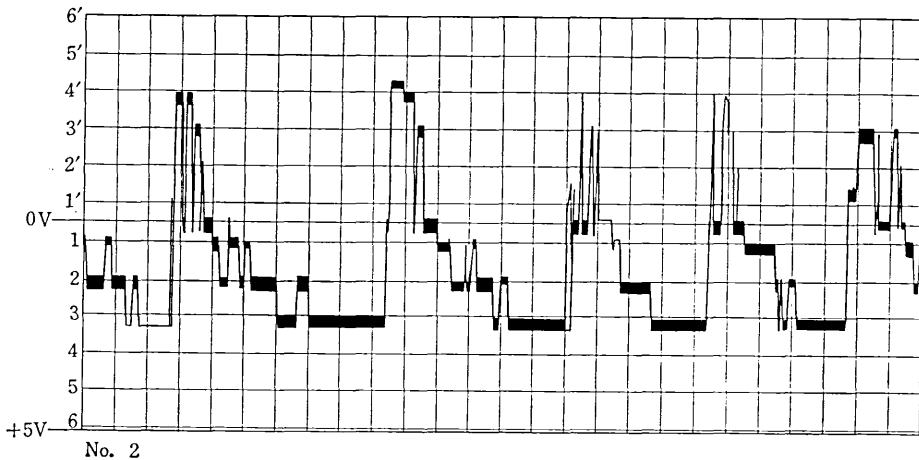


図 9 びびり振動波形の傾き角測定例 (測定場所 2)

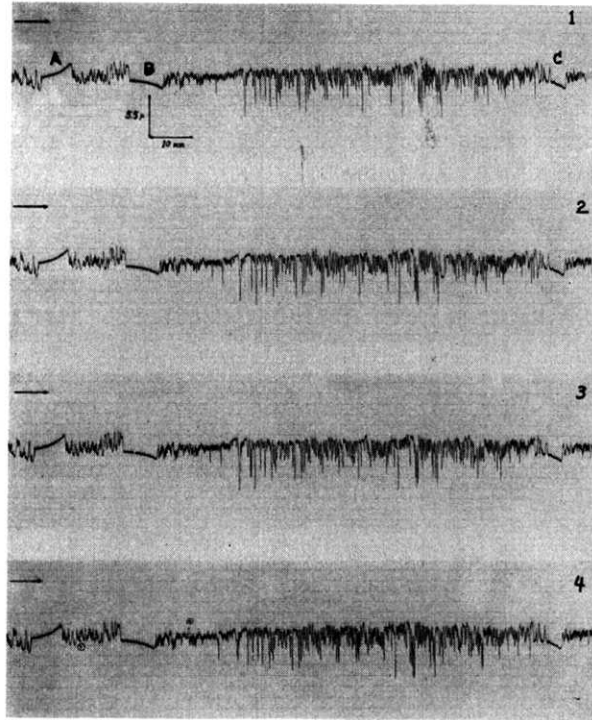


図 10 びびり振動波形測定例 (1, 2, 3, 4 は被削材の 1 回転に対応)

Bで示される部分の曲線は被削材の表面に目印としてはりつけたビニールテープにより生じたものである。各波形は良い一致を示し再現性のあることがわかる。若干異っている個所もみられるがその理由としては、被削材駆動速度の変動、駆動モーターによる振動の影響等を挙げることができる。

5. ま と め

本研究ではレーザー光を細く絞って被削材表面にあて、表面の微細な傾き角を検知することによる表面あらさのインプロセス測定装置を試作し、基本的な特性を調べた。

制作した試作装置は 3 種類で、順次実験を行なった結果、表面あらさ試験片のように表面の波形の整ったものに対して、またびびり振動波面のようにあらさの程度が比較的大きなものに対しては、有効に動作することをたしかめた。しかし、ビームが十分細く絞られていない現状では、実際の切削表面にレーザー光を照射した場合、反射像はスポット状にならず散乱してしまう。したがって実際の表面あらさを測定するためには、レンズ系に検討を加え反射像がスポット状になる程度にビーム径を絞る必要がある。

測定回路の周波数応答特性については、ビジグラフのガルバノメーターを利用して 1 kHz 程度までの作動を確認した。しかし円周方向のあらさの波長を 30μ と仮定

し、これを 3 m/s の速度でインプロセス測定する場合には 100 kHz 以上の応答特性をもつことが必要であり、そのためには、応答速度の高い受光素子を用いるとともに、回路的にも検討を加える必要がある。終りに、鈴木浩平講師をはじめとする佐藤研の諸氏の数々の助力に感謝いたします。さらに本研究は以下の研究費の一部を用いて行ったことを付記し、関係各位に感謝いたします。

昭和 47 年度本所選定研究、工作機械の振動防止と精度に関する研究、昭和 48 年度一般研究 (C)、レーザー光を利用した加工物表面粗さ測定に関する。日本機械学会による工作機械の自動保守システムに関する研究。

(1974 年 5 月 23 日受理)

参 考 文 献

- 1) 佐田ほか：切削加工における振動と表面あらさへの関連工作機械の剛性および切削性能の向上に関する研究分科会研究成果報告書 (機械学会)
- 2) 安井ほか：工作機械振動と仕上面あらさについて、MTV 分科会 G-1 資料 1973.3 (機械学会) 同上、ページ
- 3) H. SATO, and N.H. Cook: An Experimental Study of Machine Tool Vibration Surface Finish, Material Proc. Lab., Dept. of Mech. Eng., MIT. (1966-7)
- 4) L.I. Goldfischer: Autocorrelation Function and Power Spectral Density of Laser-Produced Speckle Patterns J. Opt. Soc. Am, 55-3 (1965) 247
- 5) R.B. Crane: Use of a Laser-Produced Speckle Pattern to Determine Surface Roughness, J. Opt. Soc. Am, 60-12, (1970), 1658