

レーザー光を利用した微細工具の先端位置検出

Position Sensing of Micro Tool Edge by Means of Laser Optics

80717051 中澤昌明 (Masaaki Nakazawa)

Supervisor: 青山藤詞郎 (Tojiro Aoyama)

1. 緒論

ガラスのマイクロエンドミル加工や超精密加工において、加工開始位置を高精度に決定する工程は、作業者の技術・技能に依存するところが多く時間が掛かり、自動化が求められている。本研究では、ガラスのマイクロ加工における、レーザーによる工具・工作物間の接触検出法を提案し、これを応用した自動位置決めシステムを開発した。実験によりサブマイクロオーダーの工具先端の位置決めが可能であることを確認したのでここで報告する。

2. レーザーを利用した工具の先端位置検出法

2.1. 微細工具先端の接触検出法

媒質1 (屈折率 n_1) から媒質2 (屈折率 n_2) に光を伝播させると、光は2つの媒質の界面で進行方向を変える屈折・反射の現象を起こし、それぞれ両媒質内を伝播する。入射角 θ_1 と屈折角 θ_2 は以下の式によって表すことができる。

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

このスネルの法則 (図1) において、入射角と屈折角は比例関係にあるが、入射角 θ_1 が臨界角度 $\theta_{critical}$ に達するとき、 $\theta_2 > 90^\circ$ となり媒質2に光は透過せず、全ての入射光は界面で反射する全反射を生じる。本研究では全反射と屈折を利用した微細工具先端の接触位置検出法を提案した。

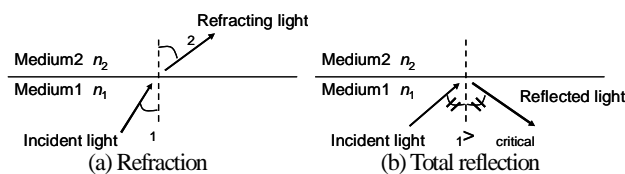


Fig.1 Snell's law

ガラス表面でレーザー光を全反射させ、その全反射点内においてマイクロボールエンドミルによる切削を行ったときの、加工面から漏れる光の様子を図2に示す。加工面には回転するエンドミルの形状が転写され、その位置によってレーザー光の入射角が変化する。レーザーを入射角度 θ_1 でガラス表面において全反射させたとき、入射角度 θ_2 の位置のように臨界角度 $\theta_{critical}$ より入射角度が小さくなる位置で光は屈折する。このように、全反射点内のガラス表面で微小でも切削が行われると光が漏れ出し、その光を測定することでマイクロエンドミルとガラス表面の接触を高精度に検出できると考えた。

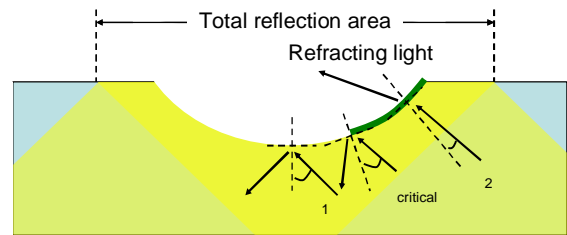
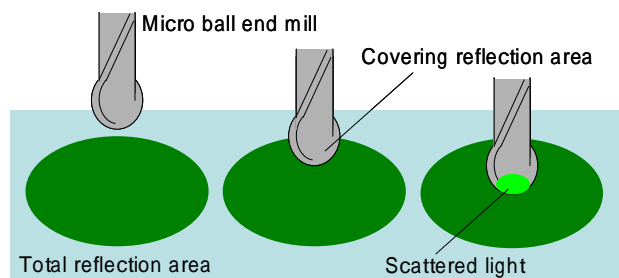


Fig.2 Generation of refracting light from cutting mark

2.2. 接触前の工具先端位置検出法

短時間で高精度の接触検出を行うためには、工具を遠方からガラス表面近傍までの間は速やかに移動させる必要がある。遠方から全反射点に向かってマイクロエンドミルを近づけていくときの全反射点近傍の様子を図3に示す。(a)では全反射点全体が見えているが、(b)の位置まで工具が近付くと、工具が全反射点を部分的に隠す。さらに工具をガラス表面に近づけると、(c)に示すように工具の先端が全反射点から僅かに漏れる光を散乱する。図4に(a)~(c)の各領域で検出した光の強度を示す。この光の強度の変化を観察することで、遠方からガラス表面近傍まで工具を移動させることができるかと推測される。工具の移動間隔を $50\mu\text{m}$ として実験したところ、領域(c)の検出位置はガラス表面から $100 \sim 200\mu\text{m}$ の範囲であることを確認した。



(a) Far position (b) Transient position (c) Near position

Fig.3 Influence of micro tool position on total reflection area

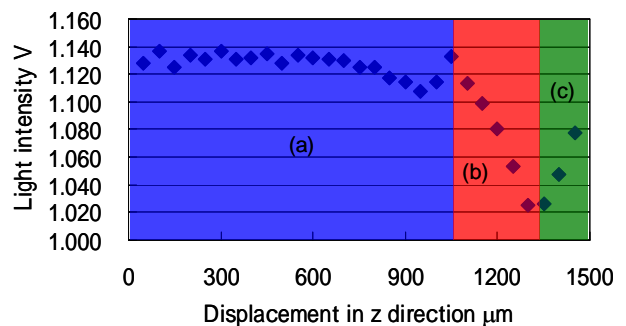


Fig.4 Behavior of light intensity on total reflection area

2.3. 接触検出アルゴリズム

提案した工具接触位置検出法を実現するためのアルゴリズムを示す。式2は光量の急激な変化を検出するための指標で、分子が現在の測定した光量と過去の光量の平均値の差で、分母は分子の平均値である。検出される光量を示す電圧値を v とした。

$$index = \frac{v_i - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{v_j}{i-1}}{\sum_{k=1}^{i-1} \left(\frac{v_k - \sum_{j=1}^{k-1} \frac{v_j}{k-1}}{i-1} \right)} \quad (2)$$

index は 図2 で示した工具とガラス表面の接触による光量の急激な増加や、図4 で示した領域 (a)~(b) の遷移における光量の急激な減少を検出することに利用できる。また、図4の領域 (b)~(c) の遷移は、散乱光による光量の増加を確認することで検出する。図5に接触検出アルゴリズムを示す。Process Aは図4の領域 (b) の急激な光量の変化を検出する工程と工具とガラス表面の接触を検出する工程に用いた。index の値が α を越えたとき、“光量の急激な変化が生じた” と定義した。本研究では予備実験結果より α の値を4と決定した。Process Bは図4の領域 (c) における散乱光による光量の増加の検出工程である。

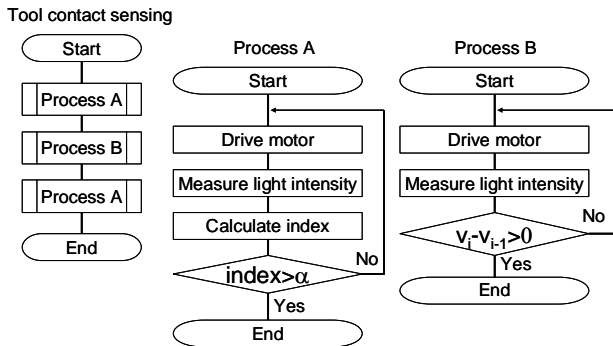


Fig.5 Algorithm of tool contact sensing

3. レーザーを利用した工具の先端位置検出システム

マイクロエンドミルとガラスの接触検出を行うための専用治具を図6に示す。治具内に組み込んだ台形型プリズムに斜め下方からレーザーを入射することで、工作物であるガラス板表面でレーザーを全反射させることができる⁽¹⁾。図7にこの治具を搭載し、上述したアルゴリズムにより工具先端位置検出を行うシステムの構成を示す。全反射点に進入する際にマイクロエンドミルが散乱する光の検出には、フォトダイオードを用いた。

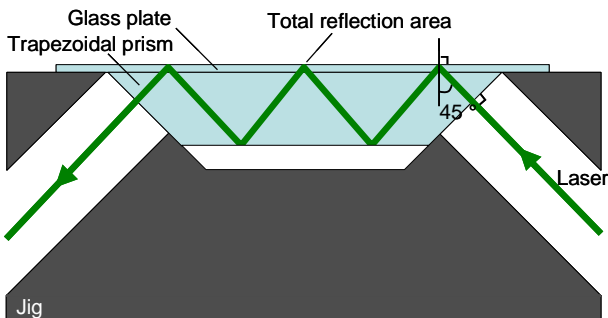


Fig.6 Jig generating total reflection of laser

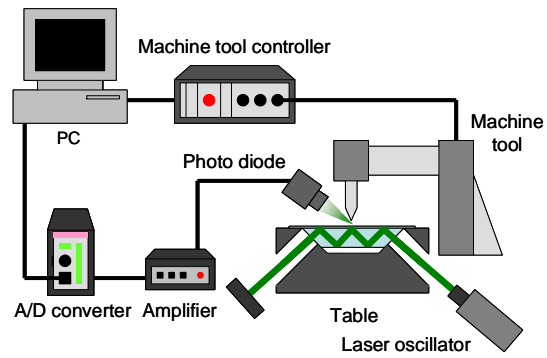


Fig.7 Tool contact sensing system

4. 接触検出実験

工具をガラス表面から十分離れた位置に置き、ガラス表面近傍まではモーター移動分解能を $50\mu\text{m}$ に、ガラス表面近傍から接触位置までは移動分解能を $1\mu\text{m}$ に設定し、開発したシステムにより接触検出実験を行った。表1に移動分解能と接触検出時の切削痕の深さを示す。全ての切削痕の深さが移動分解能以下となった。また、工具を移動させる間隔を1秒に設定し、ガラス表面から約 2.5mm 離れた位置から実験を開始した際に、接触検出するまでに要した時間は約3.8分であった。

Table.1 Depth of cutting mark in tool contact sensing experiment

Driving resolution	No. 1	No. 2	No. 3
$1\mu\text{m}$	$0.408\mu\text{m}$	$0.431\mu\text{m}$	$0.188\mu\text{m}$
$0.096\mu\text{m}$	$0.047\mu\text{m}$	$0.029\mu\text{m}$	$0.060\mu\text{m}$

さらに、接触検出の精度を評価するために、モーター移動分解能を $0.096\mu\text{m}$ に設定し、上記と同様の接触検出実験を行った。表1に示したように、サブマイクロオーダーでの接触検知が可能であることを確認した。図8に接触検出工程における光量とindexの挙動を示す。indexにより接触時の光量増加を検出可能であることがわかる。

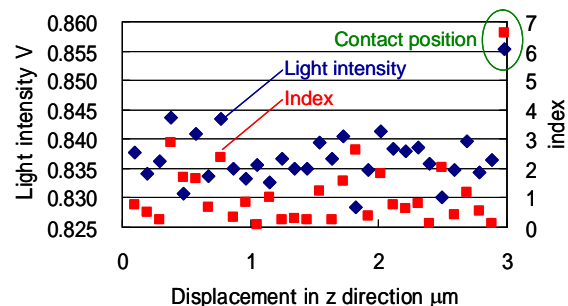


Fig.8 Behavior of light intensity and index

5. 結論

ガラスのマイクロ加工における、工具・工作物間の自動接触検出システムを開発し、性能を評価した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 開発した接触検出アルゴリズムの有効性が示された。
- (2) 開発した自動接触検知システムにより、サブマイクロオーダーの精度で接触位置を検出することができ、検出に要する時間は数分単位であることがわかった。

参考文献

- (1) S. Takahashi, et al.: Development of an Evanescent Light Measurement System for Si Wafer Microdefect Detection, Key Engineering Materials Vols. 295-296, p15-p20, 2005