平面研削における研削砥石の接触予知* (研削油剤に照射したレーザ反射強度による方法)

由井 明 紀^{*1}, 元 谷 征 樹^{*2}
北 嶋 孝 之^{*3}, 奥 山 繁 樹^{*1}

Prediction of Contact between Grinding Wheel and Workpiece (Detection of Reflected Laser Intensity from Grinding Fluid)

Akinori YUI^{*4}, Seiki MOTOTANI,
Takayuki KITAJIMA and Shigeki OKUYAMA

^{*4} Department of Mechanical Systems Engineering, National Defense Academy,
1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka-shi, Kanagawa, 239-8686 Japan

Automatic prediction of contact between a grinding wheel and a workpiece has been required from production engineers. The appearance of a trailing flow of grinding fluid, which passes through the clearance between the grinding wheel and the workpiece, will change from transparent to white as the clearance decreases. Since the reflected intensity of diffused laser beam from the trailing flow will depend on the degree of transparency of grinding fluid, the intensity change can be used for the estimation of the clearance and the prediction of contact. Firstly, the effects of grinding wheel peripheral speed, grain volume percentage, grain size and grinding fluid flow rate on the intensity of the defused laser beam are investigated experimentally. As a results, higher wheel speed, lower grain volume percentage, larger grain size and higher flow rate causes higher intensity. Secondly, the estimation of the clearance using the diffused laser detection and the prediction of contact between the grinding wheel and the work piece are demonstrated. An automatic wheel-approach system using the prediction system has been satisfactory developed.

Key Words: Surface Grinding Machine, Grinding Wheel, Prediction of Contact, Reflected Laser Intensity, Grinding Fluid

1. 結 論

精密研削加工において、高速回転している研削砥石を工作物に近づける作業には細心の神経が必要とされ、熟練技能者にとっても容易ではない。特に、平面研削盤においては研削砥石と工作物の接触点が見にくいいため、円筒研削盤などの場合よりもこの接近作業がさらに困難となっている。例えば、 1500min^{-1} で回転中の外径355mmの研削砥石を約5mm離れた位置から15秒以内でどこまで工作物に接近できるか5人の作業者が各6回試行したところ、平均0.35mmであった。

精密研削加工を行う場合、研削砥石の切込み量はミクロンあるいはサブミクロンのオーダーで行われ、1回の切込み量が数ミクロンでも大き過ぎると、工作物にダメージを与えてしまう。

また、加工の対象となる工作物の寸法は一定ではないので、工作物を交換する度に研削砥石を位置決めする必要がある。さらに、研削砥石の外径寸法はソーリング・ドレッシングそして摩耗により時々刻々と変化するため、砥石接近作業の自動化は容易でない。

CNC研削盤による同一寸法部品の繰り返し加工においては、前加工寸法のばらつきを予め見越して、加工点から一定量離れた安全な位置まで研削砥石を高速位置決めし、次に研削加工と同一条件で徐々に切り込んで行く⁽¹⁾ため、エアークット時間が長くなる。

一方、多品種少量生産に用いられる汎用研削盤においては、作業者が研削砥石と工作物の距離を目視により観察しながら砥石切込みハンドルを回して、その都度研削砥石を工作物に近づける作業を行う必要がある。

そこで、研削砥石が工作物に接触する位置を検知する装置の実用化に対する要望は高く、古くから研究されている^{(2)~(4)}。例えば、AEセンサによる接触点の検出が試みられて製品化された例⁽⁵⁾もある。しかし、AEセンサは研削砥石が工作物に接触するまで

* 原稿受付 2002年7月9日。

^{*1} 正員、防衛大学校機械システム工学科(〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)。

^{*2} 防衛大学校理工学研究科学生。

^{*3} 防衛大学校機械システム工学科。

E-mail: yui@nda.ac.jp

は信号が出力されず、接触位置を検知できても予知することはできない。このため、研削砥石の工作物への高速接近を制御するシステムの開発には至っていない。

本報では、研削砥石と工作物の間隙を通過した研削油剤に半導体レーザを照射して、乱反射するレーザの強度を測定することにより、研削砥石と工作物の距離を予知することを試みる。さらに、予知した結果を研削盤にフィードバックすることにより研削砥石の自動位置決めを行う。また、本装置をCNC平面研削盤に搭載し、繰り返し位置決め性能の評価を行った結果を報告する。

2. レーザ反射強度を利用した研削砥石と工作物間隔の測定原理

高速回転中の研削砥石が工作物に接近すると、研削砥石に連れ回った空気が研削油剤に混入する。このため、研削砥石と工作物の隙間を通過した研削油剤は図1に示すように白濁する。また、研削砥石と工作物の距離が狭くなればなるほど白濁の程度が大きくなる。

一方、半導体レーザを研削油剤に照射し、乱反射したレーザの強度 $I(\text{digit})$ を測定することにより、研削油剤の状態を知ることができる。すなわち、白濁した研削油剤の I は透明な研削油剤の場合と比較して高くなることから、研削砥石と工作物の距離 Δy を検知できる可能性がある。

そこで先ず、ターゲットの色の变化あるいはターゲットとレーザセンサの距離が I に及ぼす影響を基礎的に把握する。次に、レーザセンサを平面研削盤のテーブル上に固定し、研削砥石と工作物の隙間を通過した直後の研削油剤にレーザを照射し、 I の変化より Δy の検知を試みる。

3. 測定装置および設置方法

3.1 半導体レーザ測定装置 レーザセンサには、波長 $\lambda = 650\text{nm}$ 、出力 3mW の長距離エリア反射型半導体レーザ（キーエンス製 LV-H42）を使用した。このレーザは図2に示すように 15° の広がりを持って線状に照射され、広範囲のデータを平均化して検出することができる。なお、検出器のダイナミックレンジは $0 \sim 4095\text{digit}$ であり、 0digit は反射光を検出できない場合、 4095digit は白色ターゲットに対して 25mm 以下の距離から垂直照射した時の反射強度に相当している。測定系の座標系は図のように定義し、以下、この座標系に従って実験結果を示す。

図3に色の異なる6種類のビニールテープをターゲットとして 20mm の距離から垂直にレーザを照射した際の I を測定した結果を示す。白色、黄色、赤色、水色、緑色、黒色の順に I は低くなっている。すなわち、光の吸収が少ない白色ターゲットの場合は I の値が高くなるので、研削油剤が白濁するほど I が高くなることが予想される。

Δy に対して I の変化が大きいと、 Δy の測定分解能が高くなる。したがって、より正確な接触予知を行う

Fig1. Appearance of the grinding fluid containing air bubbles

Fig.2 Detection of reflected laser intensity, I , from grinding fluid

Fig.3 Effects of target-color change on reflected laser intensity, I

うためには I の変化が大きくなる条件を探す必要がある。

3.2 レーザの照射角度 θ_x と反射強度 I の関係

図4に白色紙をターゲットとして照射したレーザの照射角度 θ_x と I の関係を示す。垂直方向 ($\theta_x = 0^\circ$) から照射した場合にはレーザとターゲットの直線距離が 20 ~ 30mm で最大 4095digit を受光する。20mm 以上ではどの領域でも θ_x が小さい方が測定感度は高いが、本報では、レーザセンサと砥石カバーの干渉を考慮して、 θ_x を 30° に設定する。

図5に白濁した研削油剤に $\theta_x = 30^\circ$ でレーザを照射した際の、レーザセンサとターゲットの垂直距離 (Y 軸方向) と I の関係を示す。距離が短くなると I の値は高くなり、約 50mm で最大値を示す。しかし、これより接近し過ぎると逆に低くなる。これは、使用した半導体レーザの照射窓と受光窓の位置が約 10mm オフセットしていることに起因する。研削油剤の飛散によるレーザセンサの汚れを考慮して、本実験における設置距離は 80mm に設定する。

3.3 レーザの照射位置 L_x と反射強度 I の関係

図6に X 軸方向のレーザ照射位置と I の関係を示す。砥石周速度 32m/s で回転中の研削砥石と工作物 (FC200) の隙間を通過した流量 5L/min の研削油剤をターゲットとして $\theta_x = 30^\circ$ で 80mm の距離からレーザを照射した。

図2に示したように、レーザの照射位置は研削砥石の中心直下を原点として、 $-X$ 方向 (研削油剤の下流方向) へ L_x mm 移動させた。 L_x が -120 mm より大きい (研削砥石に近い) 場合はレーザセンサが砥石カバーと干渉する。一方、研削点から距離を離し過ぎて L_x が工作物の長さを越えると、本システムでは測定できない。また、 L_x が $-120 \sim -200$ mm の範囲では I の値に殆ど差はない。そこで、本実験では L_x を -120 mm に設定する。

3.4 研削砥石と工作物間隔 ΔY の設定方法

実験に使用した研削盤は、上下送り $0.1\mu\text{m}$ の分解能を持つ CNC 平面研削盤 (岡本工作機械製 PSG-63EX) である。 ΔY を正確に設定するため、工作物を実機にて研削仕上げした後 3 回スパークアウト研削した位置を原点として、砥石位置表示値 (研削盤の送り軸に装着したロータリーエンコーダ出力) を 0mm に設定した。以下、 ΔY の値は研削盤の砥石位置表示値より読みとる。

4. 実験結果

4.1 研削砥石と工作物の距離 ΔY がレーザ反射強度 I に及ぼす影響

図7に ΔY が I に及ぼす影響の

測定例を示す。各実験条件における研削砥石表面の性状をそろえるために、実験開始前に単石ダイヤモンドツールを用いてリード 0.2mm/rev の精密ドレッシングを行った。 ΔY の減少に伴って I は徐々に高くなり、 $\Delta Y = 0$ mm 近傍で急激に高くなっている。すなわち、この領域では ΔY の測定分解能が高くなる。以下、表

Fig.4 Effects of laser sensor incidence angle, θ_x , on strength of reflected laser intensity, I

(Wheel speed: 32m/s, θ_x : 30° , Grinding fluid flow rate: 5L/min, Grinding wheel: C/GC80H14V)

Fig.5 Effects of the distance between laser sensor and target, ΔY , on strength of reflected laser intensity, I

(Wheel speed: 32m/s, Grinding fluid flow rate: 5L/min, Grinding wheel: C/GC80H14V)

Fig.6 Effects of horizontal distance between grinding wheel center and laser irradiation point, L_x , on strength of reflected laser intensity, I

1に示す実験条件を基本として、各パラメータを変化させ、 $\angle Y$ と I の関係について実験的に検討する。

4.2 砥石周速度がレーザ反射強度 I に及ぼす影響

図8に各砥石周速度における $\angle Y$ が I に及ぼす影響を示す。砥石周速度が高い方が I の値は高くなり、特に $\angle Y$ が0.5mm以下に接近した場合にはその影響が顕著になる。

これは、砥石周速度が高くなるほど単位時間あたりの気泡の巻き込み量が多くなるとともに、気泡が微細化してレーザを乱反射しやすくするためと考えられる。したがって、本実験の範囲内では、砥石周速度が高い方が $\angle Y$ の測定分解能が高くなる。

4.3 砥石粒度がレーザ反射強度 I に及ぼす影響

図9に研削砥石の粒度を変えた場合の $\angle Y$ が I に及ぼす影響を示す。 $\angle Y$ が0.25mm以下では、粒度が小さい粗粒砥石における I の値が急激に高くなり、 $\angle Y$ の測定分解能が高くなる。一方、粒度が#400細粒砥石の場合には $\angle Y$ に対して I の値は殆ど変化せず $\angle Y$ の測定分解能は極端に低下する。

そこで、光学式デジタル顕微鏡（キーエンス製 VH-6300）により研削砥石表面を観察した結果を図10に示す。粒度#60の研削砥石では各砥粒間に気孔が散在する。すなわち、体積の大きな気孔は少ないが気孔の総数が多い。一方、粒度#400の場合、各気孔の体積は大きいとその総数は少なくなり、砥粒は結合材中に埋もれている。

すなわち、粒度が小さい研削砥石は研削油剤の攪拌能力が高いが、大きい場合には数少ない気孔による攪拌が行われるのみで、大気中の空気を混入しにくく、 I の変化が小さいものと思われる。研削砥石中に小さな気孔を均一に分散させることができれば粒度が大きい微粒砥石での測定分解能が向上する可能性がある。

Fig7. Effects of distance between grinding wheel and workpiece, $\angle Y$, on strength of reflected laser intensity, I

4.4 砥粒率がレーザ反射強度 I に及ぼす影響

図11に、研削砥石の砥粒率を変えた場合の $\angle Y$ が I に及ぼす影響を示す。砥粒率34%の多孔質研削砥石(14V)と砥粒率48%の一般研削砥石(8V)を用いて実験を行った。特に、 $\angle Y$ が0.5mm以下では、砥粒率が低い（気孔率が高い）多孔質研削砥石を用いた方が研削油剤は白濁しやすく、 I は大きい。したがって、砥粒率が低い多孔質研削砥石を用いた方が $\angle Y$ の測定分解能が高くなる。

Fig.8 Effects of wheel peripheral speed on strength of reflected laser intensity, I

Table1 Fundamental parameters for experiments

Grinding fluid	Type W2-1 (50 times dilution)
Grinding fluid flow rate	5L/min
Angle of laser irradiation, θ_x	30°
Position of laser target, L_x	-120mm
Distance between laser irradiate and target	80mm
Clearance between grinding wheel and workpiece, $\angle Y$	0-5mm
Peripheral speed of grinding wheel	32m/s
Grinding wheel	C/GC80I14V $\phi 350 \times 38$
Workpiece	FC200 (5.1 μ mRy)

Fig.9 Effects of grain size on strength of reflected laser intensity, I

4.5 研削油剤の流量がレーザ反射強度 I に及ぼす影響

図 12 に研削油剤流量が I に及ぼす影響を示す。 $\angle Y$ が約 2~3mm の範囲では研削油剤の流量が多い方が I の変化率は高くなる。この領域では、研削油剤流量が多い (20L/min) と液膜が厚くなるために研削砥石と研削油剤が十分に接触して気泡を発生するが、流量が少ない場合 (5L/min) には白濁は始まらない。

$\angle Y$ が約 1mm 以下の領域においては、流量が多い場合には既に白濁して反射率は飽和状態になっているため I の変化は小さいが、流量が少ない場合は I の値は急激に高くなり、 $\angle Y$ の測定分解能は高くなる。

以上の実験の結果、測定条件の設定を適切に行えば、 I を検出することで $\angle Y$ を比較的高精度に測定できる可能性のあることがわかった。そこで、本システムを砥石接触予知に応用し、研削砥石の自動位置決めを試みることにする。

5. CNC研削盤への適用

レーザセンサを平面研削盤のテーブル上に取付けたシステムにより、砥石接触予知の実機テストを行う。本システムは、レーザセンサのコントローラから出力される I により設定されるトリガ信号を CNC 制御装置に直接入力することにより、研削砥石の接近動作を制御しようとするものである。このため、先ずトリガレベルの設定方法について検討し、次いで本装置による自動位置決め実験を行う。

5.1 トリガレベルの設定 図 13 に研削砥石を一定の接近速度 V_f で工作物に接近させた時の $\angle Y$ に対する I の変化を示す。出力波形には相当量のノイズを含んでいるため、 I にあるトリガレベルを設定しても実際に停止したときの間隔 $\angle Y$ にはばらつきが出る。極低速で研削砥石を接近させる場合には、入力信号を平滑化させることで、このばらつきを減らすことは可能であるが、高速で接近させる場合は特にばらつきの影響が大きくなることが予測される。

さらに、トリガ信号の発生後、研削砥石の送りが停止するまでは時間遅れがあることから、トリガレベルは送り速度によって変化させる必要がある。そこで以下、トリガレベルを段階的に変化させ、位置決め実験を行うことにする。

5.2 研削砥石の自動位置決め実験 本実験では、回転中の研削砥石をジョグ連続送りにより工作物に高速接近させる。研削砥石と工作物の間隙が狭くなると

Fig.10 Photograph of grinding wheel surfaces

Fig.11 Effects of grain volume on strength of reflected laser intensity, I

Fig.12 Effects of grinding fluid flow rate on strength of reflected laser intensity, I

Fig.13 Example of detected laser intensity, I , on $\angle Y$

研削油剤が白濁して I の値が次第に高くなる。設定したトリガレベルを超えるとレーザセンサから CNC 研削盤に対して信号が出力され、CNC 研削盤はフィードホールド状態になり高速接近を停止する。本実験では、表 1 の条件で V_y とトリガレベルを変化させて研削砥石の位置決め精度を測定した。

図 14 に位置決め精度の測定結果を示す。 V_y を変えることにより、 ΔY のばらつきが変化する。例えば、トリガレベル一定の条件で、 V_y が 100mm/min の場合 0.3~0.4mm の位置決め精度のばらつきがあるが、5mm/min ではそのばらつきが 0.02mm 程度になる。さらに、 V_y が速い場合には、停止信号出力後の時間遅れに起因する研削砥石移動量も大きくなり、オーバーシュートが発生する。このため、研削砥石を工作物に最接近させることができるトリガレベルは V_y によっても変化している。高速接近の場合は接近時間を短くできるが停止位置のばらつきが大きい。逆に、接近速度を遅くすると停止位置は 30 μ m 程度に設定できるが、位置決めに時間を要する。

そこで、研削砥石の接近に伴い設定したトリガレベルを超えると自動的に V_y を低速に切り換え、さらにトリガレベルを段階的に高くして ΔY の値をできるだけ小さくする自動位置決め制御を行う。繰り返し位置決め精度のシミュレーション結果は図 15 のようになる。本システムを CNC 平面研削盤に搭載することにより、研削砥石は 100mm/min でトリガレベル 150digit に達するまで接近し、速度とトリガレベルを順次切り換えて 5mm/min、トリガレベル 350digit に設定することにより 10~30 μ m の範囲で位置決めが可能である。なお、これより高いトリガレベルに設定した場合、さらに砥石を接近できるが、図 13 に示す信号のばらつきによって砥石が工作物に衝突するおそれが生ずる。

工作物から 5mm の距離から初速 100mm/min にて、このシステムにより研削砥石が自動停止するまでに要する時間は 3.2~3.7 秒であり、熟練技能者よりも短時間である。

6. 結 言

- (1) 高速回転している研削砥石が工作物に接近した際に、その隙間を通過する研削油剤は白濁する。
- (2) 研削油剤に照射したレーザ散乱光の反射強度 I を測定することにより、研削砥石と工作物の距離 ΔY を予知することができる。
- (3) I は、レーザセンサとターゲットの距離、ターゲットの色、レーザの照射角度 θ_x の影響を受けるが、X 軸方向の照射位置 L_x の影響は小さい。

Fig.14 Effects of wheel approach speed, V_y , on repeatability of automatic positioning clearance, ΔY

Fig.15 Automatic positioning by detection of reflected laser intensity, I , and wheel approach speed, V_y , control

- (4) 研削油剤の供給量、砥石周速度、研削砥石の粒度、研削砥石の砥粒率が ΔY の検出感度に及ぼす影響を明らかにした。
- (5) 本装置を平面研削盤に組み込んで、研削砥石の位置決めを行った結果、 V_y が遅い方が高精度且つ信頼性の高い位置決めを実現できた。
- (6) V_y を高速から低速に多段階に推移させて位置決めシミュレーションを行った結果、3.2~3.7 秒の短時間で $\Delta Y=10\sim30\mu$ m の範囲に位置決めができる。

本研究の遂行にあたり、多大なご支援をいただきました(株)岡本工作機械製作所に心より御礼申し上げます。

[参考文献]

- (1) 研削盤のエキスパート, 大河出版, (1972).
- (2) Charles A. Bates; Keeping your ear to the grinding stone, American Machinist, (1997), pp.52-56.
- (3) Rectification integree chez Ferrari, Mach Mod, 909, (1987), pp31-32.
- (4) 安井, 稲崎, 由井; CBN ホイール用高機能ドレッシングシステムの開発, 日本機械学会講演論文集, Vol.72, (1995), pp.399-400.
- (5) (株)岡本工作機械製作所 GRIND-X カタログ.