



回転軸における温度情報の光テレメータリング に関する研究 (第1報)*

—高速多チャンネル光テレメータシステムの開発—

横山 和宏** 鈴木 孝昌*** 星名 浩樹†

Optical Telemetry of Temperature Information in Rotating Spindle (1st Report)
— Development of High-speed Multichannel Optical Telemetry System —

Kazuhiro YOKOYAMA, Takamasa SUZUKI and Hiroki HOSHINA

An optical telemetry system which measures the temperature of rotating spindle is proposed. The system uses an optical data transmission technique to realize high-speed precise telemetry, which is free from noises due to a slip ring and an electric magnetic field. Moreover, it can measure the temperatures at different eight positions and the data, which are the measuring channel number and the temperature measured at the channel, are transmitted with only two pairs of infrared LED and photo-diode under arbitrary rotational spindle speed by using an asynchronous serial data transmission. An experimental system is made and several fundamental characteristics are examined. The time required for the data transmission is 48 μ s a channel. It is experimentally confirmed that the accuracy in temperature measurement is $\pm 0.2^\circ\text{C}$.

Key words : telemetry, optical transmission, temperature, rotating spindle

1. 緒 言

近年, 生産能率向上がますます必要とされ, 最高回転数が数万~十数万 rpm の転がり軸受式主軸が用いられるようになってきている^{1)~3)}. これら主軸が高速化されると, 軸受部発熱量にもとづく軸受部の焼付きや主軸部の熱膨張にもとづく加工精度の低下を生じる可能性が増加する. さらに, これらの主軸は高速化と十分な動的バランスの要求に対してビルトインモータで駆動される. したがってモータ部の発熱が主軸部の温度上昇を増大させるので, 上記の可能性がさらに増大する.

軸受の焼付きを防止するため, 静止体である外輪やハウジングの温度を監視しながら慎重な慣らし運転を実施するのが一般的である. また, 主軸部熱膨張による加工精度低下を防止するため, 静止体の温度分布にもとづく精度補償も行われている. これらの用途に最も適している温度は, 回転体側の主軸温度である. しかし, 回転体である主軸の温度を測定した例⁴⁾はあまり多くない. これは以下の理由によるものと考えられる. すなわち, 回転軸の温度を測定するためスリップリングや電波を用いる方法がある. しかしスリップリングを用いた測定システムでは, ブラシとスリップリングとの接点における熱発生や抵抗変化および摩擦だけでなく, スリップリングが高価であるといった問題点がある. 電波による伝送においては, 外部の電磁場によるノイズの影響を受けやすく, 複雑な信号処理を必要とするために高価になる.

一方, 光学式データ転送は非接触式であるので, スリップリングによる場合の問題点を解消できるとともに, 外部の電磁場による影響を受けず, さらに安価に実現できるという特徴があ

る. この方法は回転軸側からの切削力の1分力の測定⁵⁾⁶⁾および自動砥石バランス⁷⁾に使われている.

本研究では, 回転中の工作機械主軸部の複数点における温度を回転側で測定してデジタルデータとし, この温度データを光学式データ転送により極めて高速に静止側に伝えるシステムを提案している.

ここでは一例として温度を測定したが, 本システムを様々な物理量の測定と制御に応用することにより, インテリジェント工作機械が可能になると考えられる.

2. システムの構成

2.1 全体的構成と光学素子の配置

本研究で作成した測定システムを図1に示す. 本システムはパソコン(PC), 入出力(I-O)インタフェースボード, 静止ヘッド, 回転ヘッドから成り立っている. まず, PCがI-Oボードを介し測定チャンネルの番号をデータとして与える. この番号は静止ヘッド上の発光素子(LED)から回転ヘッド上の受光素子(PD)へ送られる. このチャンネルの温度が測定され, 温度データが回転ヘッド上のLEDから静止ヘッド上のPDへ送られ, さらにI-Oボードを介してPCへ送られる.

光学素子の配置を図2に示す. 回転ヘッドと静止ヘッドとは互いに向き合っており, その端面にはそれぞれ2個の光学素子(1個のLEDと1個のPD)が配置されている. 両ヘッド上のLEDはいずれも回転ヘッドの回転軸上に配置され, PDはLEDの近傍に配置されている. 静止ヘッド上のLEDから送出される赤外光は放射状に広がり, 同一円周上での光の強度は一定である. これを受光する回転ヘッド上のPDは回転軸を中心とする円周上を移動することになるので, LEDからの信号を主軸の回転速度にかかわらず常に一定の強度でPDに転送できる.

他方, 測定された温度測定データは回転ヘッドの回転軸上のLEDから送出され, 静止ヘッドのPDで受光される. LEDと

*原稿受付 平成7年11月9日

**正会員 新潟大学工学部(新潟市五十嵐2の町8050)

***新潟大学工学部

†学生会員 新潟大学大学院

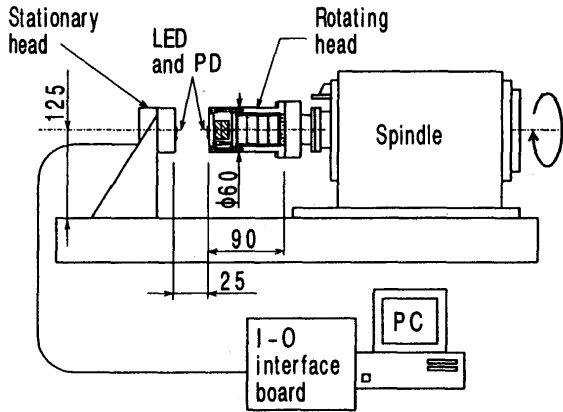


Fig. 1 Optical telemetering system

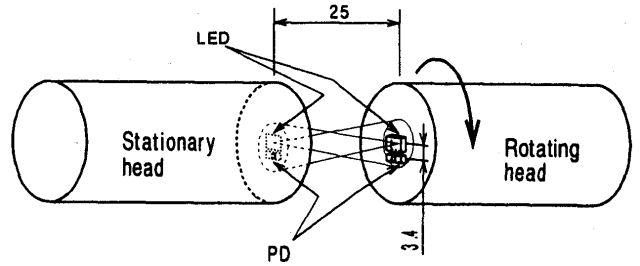
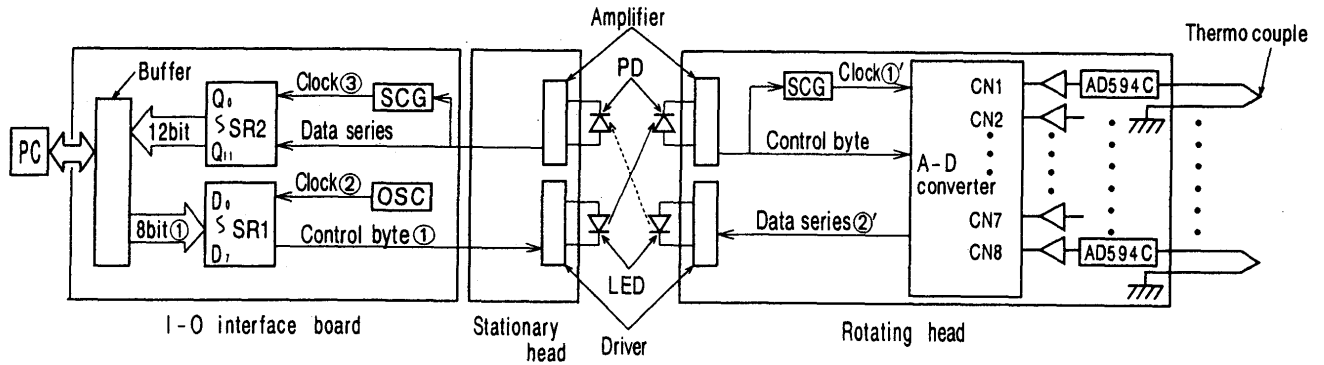


Fig. 2 Arrangement of the optical devices



(a) Stationary side

(b) Rotating side

Fig. 3 Block diagram of electric circuit

PD間の光強度の関係は上記の場合と同一であるので、温度データの転送も主軸の回転速度にかかわらず正確に実行できる。

従って、静止側および回転側のLEDを回転軸上に配置し、その近傍にPDを配置することにより、いかなる主軸回転数においても複数チャンネルから任意のチャンネル番号を指令して測定することが可能になる。なお、PDを回転軸上に配置しても同様である。

2.2 信号処理

図1のシステムにおける信号処理のブロック線図を図3に示す。同図(a)は、静止側回路のブロック線図である。同図(b)は回転ヘッドの信号処理回路のブロック線図で、主に同期クロック発生器(SCG)、8チャンネルA/Dコンバータ、熱電対用の8個のアンブから成り立っており、図3(b)の電気回路とバッテリーが内径45mm、外径60mm、長さ90mmの超々ジュラルミン製(JIS:A7075BE)回転ヘッド内に納められている。

まず、静止側から回転側への測定指令の光学式転送について述べる。図4はデータ転送のタイムチャートである。図3(a)のシフトレジスタ1(SR1)は、測定チャンネルの番号とA/Dコンバータの動作モード仕様を含む8bitパラレルデータをシリアルデータ(コントロールバイト)に変換する。このコントロールバイト(図4(a)-①)は、図4(a)-②に示すクロックに同期して静止ヘッド側LEDから回転ヘッド側PDに転送される。PDによって受信されたコントロールバイトが図3(b)のSCGとA/Dコンバータに供給される。SCGはコントロールバイトのスタートビットを検出し、コントロールバイトに同期したクロックパルス(図4(b)-①)を発生する。A/Dコンバータはこのクロックに同期してコントロールバイトを取り込み、静止側からの指令の転送が完了する。

つぎに、A/Dコンバータは指令されたチャンネルの温度を

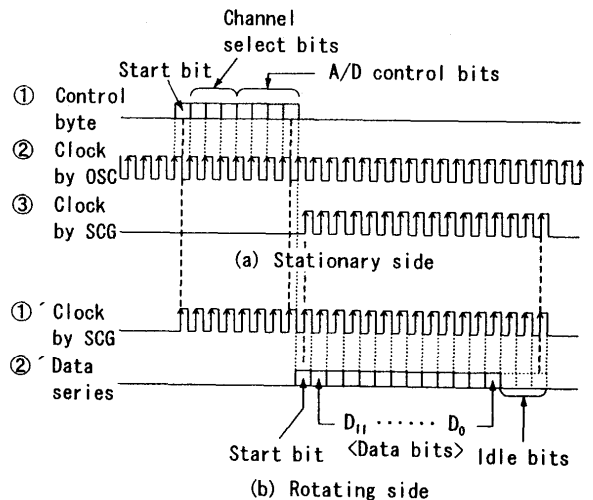


Fig. 4 Time chart of the optical data transmission

12bitシリアルデータ(図4(b)-②)に変換する。このデータはLEDドライバに送られ、以後はコントロールバイト(図4(a)-①)が静止側から回転側に転送された場合と同一の原理により、静止側ヘッドに転送される。静止側では、PDによって受信された温度測定データがI-OインタフェースボードのSCGとSR2に供給される。SCGの働きは回転ヘッドのそれと同じであり、受信シリアルデータ列のスタートビット(図4(b)-②参照)を検出し、このデータ列に同期したクロックパルス(図4(a)-③)を発生する。データ列は発生したクロックによってSR2で12bitパラレルデータに変換されてPCに伝送され、測定データの回転側から静止側への光学式転送が完了する。

なお、測定チャンネルの指令のパラレルからシリアルへの変換および受信温度データのシリアルからパラレルへの変換は

Table 1 Specifications of the system designed

Wave length	880 nm
Total number of channel	8 ch
Transmission rate	500 kBPS
Measurement time	48 μ s/ch
Measurement range	0–100°C

I-Oインタフェースボードで行うよう設計しているの、PCの負担は軽減されている。

2.3 システムの仕様

製作したシステムの仕様を表1に示す。データ送信には、中心波長が880nmの赤外LED(松下電子工業㈱製, LN671)を用いた。このLEDは高速応答(30ns), 高効率といった特長を有している。また、放射角が広い(回転中心線から片側50°)ので、これに対向して設置するPDとの距離を小さくできる結果、LEDの発光強度を小さくして消費電流を低減することができる。一方、受光素子PDには最大感度波長900nmのフォトIC(浜松フォトニクス㈱製, S4810)を用いた。この受光素子は、フォトダイオードと増幅器が1チップに集積化されたもので、高速応答(70ns), 低電圧駆動(2.2V)可能といった特長を有しており、回転ヘッドの小形化に有利である。静止ヘッドおよび回転ヘッド上の光学素子は、外部の可視光によるデータ転送エラーを防止するため、可視光カットフィルタで覆われている。

データ転送クロックの周波数は500kHzで1周期ごとに1ビットを転送するので、転送レートは500kBPSである。1回のデータ転送には総数24bit(図4(a)-①, (b)-②'参照)を用いているので、1回の測定に必要なとする時間は48 μ sである。測定範囲が0~100°Cなので、温度の分解能は0.025°Cと計算される。回転ヘッドの電力は2個の直列に接続したリチウム電池から供給され、電圧は6Vである。使用している熱電対はJタイプ(鉄-コニスタンタン)のもので、零点補償機能付きのモノリシック熱電対増幅器(AD594C, アナログデバイセズ社製)に結線されている。

3. 実験とその結果

3.1 光学素子の応答性

図2の配置で回転ヘッドを静止させた状態で、光学素子の応答特性を測定する。発信器から連続した矩形波をLEDドライバに供給し、PDによって検知された波形を観察した。矩形波のデューティ比は50%である。これはHigh, Lowを交互に繰り返すデジタルデータと等しいので、通信においてはもっとも厳しい状況を作り出していることになる。矩形波の周波数は、本システムで用いるデータ転送クロックの2倍である1000kHzにセットした。これは1000kBPSの転送レートと等しく、応答性に十分に余裕があることを確認するためである。観察結果を図5に示す。上方の波形はLEDに供給される矩形波である。下方の波形はPDによって検知された信号である。検知された信号は全体的に入力矩形波に比べ1.1 μ s遅れている。しかし、両者のパルス幅はよく一致しているので、本システムに用いる非同期データ通信においてデータが正確に転送されることが理解できる。従って上記の光学素子が500kBPSの転送レートでデータを転送する能力を十分有していることが分かる。

3.2 光学素子の相対位置の影響

両ヘッドの相対的な位置関係を図6に示す。 $h=0$ が理想的な

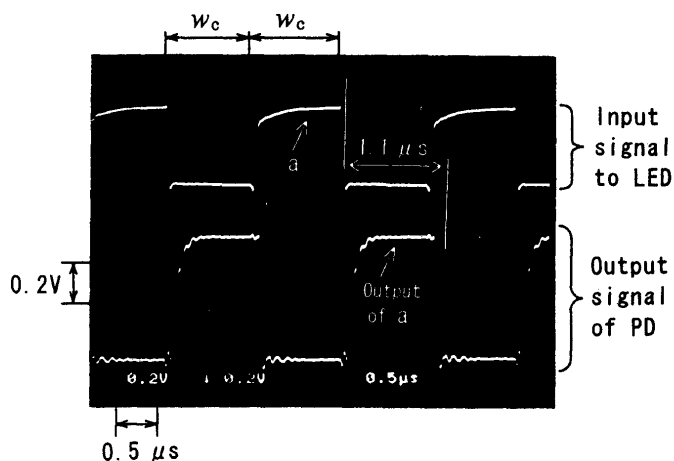


Fig. 5 Response characteristics of the optical devices

状態である。いま $h \neq 0$ の状態、回転ヘッド上のLEDから静止ヘッド上のPDへ温度データを転送する場合について考える。図6において、静止ヘッドの位置が異なる場合には、PDに到達する光の強度が異なる。この光強度が一定レベル以上ではPDの出力がHigh、一定レベル以下ではLowになるように設計しているので(図5参照)、静止ヘッドの位置が適切でないと図5のPDの出力信号の立ち上がり時刻が変動したり立ち上がらなくなることがあり得る。受信データの最初の立ち上がりでスタートビットを認識し、スタートビットの到達から $1.5W_c$ 後に温度データの第一ビット(図4(b)-②'のD11)を読み取り、その後 W_c ごとに引き続いてPDの出力信号を読み取るので、上記パルス幅が大幅に変化したりゼロになると読み取った信号のパターンが送信データと異なり、データの転送が不正になる。

以上の不正は、図6の h および l の大きさにより影響を受けると考えられる。そこで、 h と l の値がデータ転送の成功率に及ぼす影響を実験により検討する。図3(b)のA/Dコンバータの入力として、熱電対出力の代わりに既知の電圧を印加し、光転送された値をPCに記憶する。主軸回転数500rpmの条件下で、1組の h と l に対してそれぞれ80回のデータ転送を行い成功率を求めた。その結果を図7に示す。同図から、 h は-5~+5mmの範囲、 l は17~30mmの範囲において正確に光転送できることが分かる。従って、本研究のシステムにおいては、回転ヘッドと静止ヘッドの位置決めは容易に実現できることがわかる。

3.3 温度・出力電圧の特性

本システムで直接測定され転送される物理量は、熱電対の起電力を増幅した電圧である。熱電対および増幅器を含めた各チャンネルの温度・出力電圧の特性を式(1)で表せるものとする。

$$k\{v(\theta) + c\} = V \quad (1)$$

ただし、

$v(\theta)$: 温度 θ における熱電対特性表で規定されている熱起電力

c, k : オフセット量とゲイン

V : 出力電圧(本研究で測定する電圧)

この特性を以下の要領で同定する。すなわち計8チャンネルの鉄-コニスタンタン熱電対をジュワー氏びん中の温度 θ_1 の水に浸し、各チャンネルの出力電圧 V_1 を本システムの光転送により測定する。温度 θ_1 は別の熱電対を温度用データログ(江藤電気㈱製サーモダックE)に結線し求めた。別の温度 θ_2 においても

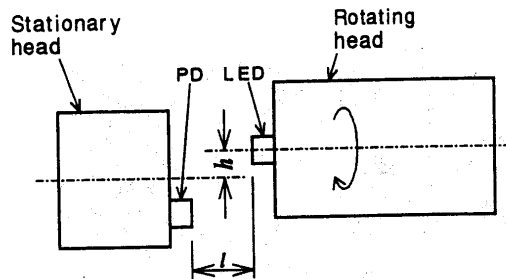
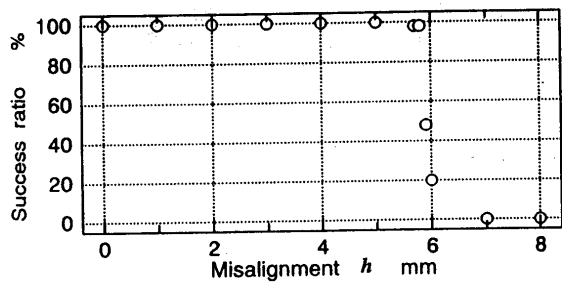
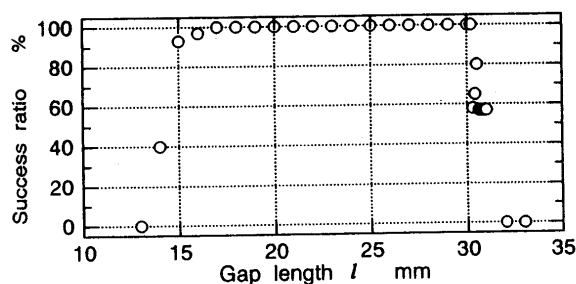


Fig. 6 Relative position between both heads

(a) Influence of misalignment ($l = 25\text{mm}$)(b) Influence of gap length ($h = 0\text{mm}$)Fig. 7 Influence of relative position
(Rotational speed : 500rpm)

同様に出力電圧 V_2 を測定すると、次式が成立する。ここでは議論を単純化するため任意の 1 チャンネルについて考える。

$$k\{v(\theta_1) + c\} = V_1 \quad (2)$$

$$k\{v(\theta_2) + c\} = V_2 \quad (3)$$

式(2), (3)から c , k は次式で求められる。

$$k = \frac{V_1 - V_2}{v(\theta_1) - v(\theta_2)} \quad (4)$$

$$c = \frac{v(\theta_1) \cdot V_2 - v(\theta_2) \cdot V_1}{V_1 - V_2} \quad (5)$$

次に、式(4), (5)を式(1)に代入して得られる式において、 10°C ごとの温度 θ' に対する熱起電力特性 $v(\theta')$ を代入して得られる出力電圧 V' を計算する。0~ 100°C の範囲の (θ' , V') に対し、3 次式を用いて最小 2 乗近似を行う。その結果、出力電圧と温度との関係を示す特性は式(6)のように求められる。

$$\theta = a_3 \cdot V^3 + a_2 \cdot V^2 + a_1 \cdot V + a_0 \quad (6)$$

ただし、 $a_3 \sim a_0$: 各チャンネルの特性式の係数および定数
この式をすべてのチャンネルごとに求めておき、光伝送で得られる出力電圧 V から測定温度 θ を求めることができる。

なお、得られた $a_3 \sim a_0$ の値を表 2 に示す。実験では $\theta_1 = 10^\circ\text{C}$,

Table 2 $a_3 \sim a_0$ in Eq. (6)

	a_3 $^\circ\text{C}/\text{mV}^3$	a_2 $^\circ\text{C}/\text{mV}^2$	a_1 $^\circ\text{C}/\text{mV}$	a_0 $^\circ\text{C}$
CN1	2.21×10^{-11}	-3.60×10^{-7}	0.0255	-1.15
CN2	2.22×10^{-11}	-3.64×10^{-7}	0.0256	-2.16
CN3	2.21×10^{-11}	-3.63×10^{-7}	0.0255	-2.10
CN4	2.21×10^{-11}	-3.60×10^{-7}	0.0255	-0.92
CN5	2.18×10^{-11}	-3.52×10^{-7}	0.0253	0.47
CN6	2.22×10^{-11}	-3.64×10^{-7}	0.0256	-1.59
CN7	2.21×10^{-11}	-3.62×10^{-7}	0.0255	-1.72
CN8	2.21×10^{-11}	-3.64×10^{-7}	0.0255	-2.61

$\theta_2 = 80^\circ\text{C}$ である。近似用のデータ (θ' , V') と特性式(6)による (θ , V) との差は、計 8 個のチャンネルにおいて最大 0.02°C であった。

3.4 回転主軸の温度測定

本研究で提案する測定システムの性能を確認するため、図 1 に示す主軸の温度を測定する。測定位置の詳細を図 8 に示す。回転する主軸の前端面にアクリル製カバーを取り付ける。カバー中心にあけた穴から熱電対(CN1)を前方へ 5mm 突き出し、本研究の測定システムを用いて空気温度を測定する。この測定点のすぐそば(5mm 横)には、サーモダック E(分解能 0.1°C , 測定精度 0.2°C)に結線した別の熱電対を配置し、ほぼ同一位置の空気温度を静止側からも測定する。両者の測定値の一致の程度が、本研究の測定システムの精度を示すことになる。温度を変化させるため、主軸の横方向 100mm に設置したドライヤからの温風を用いる。主軸の回転数は 1000rpm である。

実験の結果を図 9 に示す。ドライヤを用いて 40 秒から 6 分 30 秒までの間加熱を行っている。図 9(a)は CN1 とサーモダックで測定された外気温を示している。両者が良く一致しているので、本研究のテレメータシステムは良好な性能を有していることがわかる。7 分~8 分 30 秒の間を除き両者の差は最大 0.4°C である。

さらに、主軸前端面の 6 本のボルトの間の 6 か所で、半径 42.5mm の位置に熱電対(CN2~CN7)を設置した。主軸が回転している状態では、CN2~CN7 に対する熱源(ベアリングおよびドライヤ)はほとんど同じ温度上昇を生じると考えられるので、CN2~CN7 における測定値の一致度からも本研究の測定システムの精度を確認できる。CN2~CN7 はいずれも主軸に電気的に接触するのを避け、かつ主軸の温度に近い値が得られるように厚さ 0.5mm のシリコンゴムを介し、これとアクリル製カバーとの間に挟み込んで設置している。これは、熱電対の高温接点の主軸に電気的に接触すると、主軸の回転に伴い電磁的ノイズにもとづくと考えられる 1 回転周期の温度変動 (1000rpm で約 4°C) が生じるのを避けるためである。この点への対策は今後の課題とする。CN8 は主軸の貫通穴内部の気温を測定している。

CN2~CN4, CN6 および CN8 での測定温度を図 9(b) に示す。上述したように CN2, CN3, CN4, CN6 の熱電対は回転している主軸端面上の軸対称な位置に取り付けられているので、これらは同一時刻において同一温度を示すものと期待でき、これらの温度の一致度からも本システムの測定精度を明らかにできるものと考えられる。これらの測定点における温度は相互に良く一致している。図 9(b)の 0~4 分におけるこれら温度の最大差は 0.1°C である。4 分以後の温度は全体的に上昇しているものの、一部に不規則に変動している様子が見られる。これと同様な現

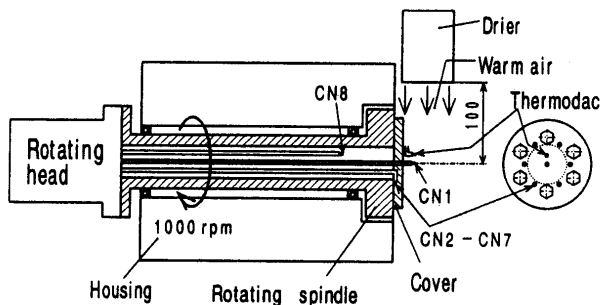


Fig. 8 Measurement position of temperature

象はCN8にも見られ、回転ヘッド内の電源電圧が減少し、動作が不安定になっているものと考えられる。この対策としては乾電池の容量は十分であるので、昇圧回路を付加することにより安定に動作する時間を延長できると考えている。

なお、CN2、CN3、CN4、CN6の温度に比べ、CN5の温度は全体に約0.6℃だけ低く、CN7の温度は約0.3℃だけ高い結果が得られた。これは、3.3節の特性を求める実験における誤差によるものと考えられる。

以上のように、0～4分の間における測定値の相互差から、本研究の測定システムにおける測定精度は±0.2℃であることが明らかになった。

4. 結 論

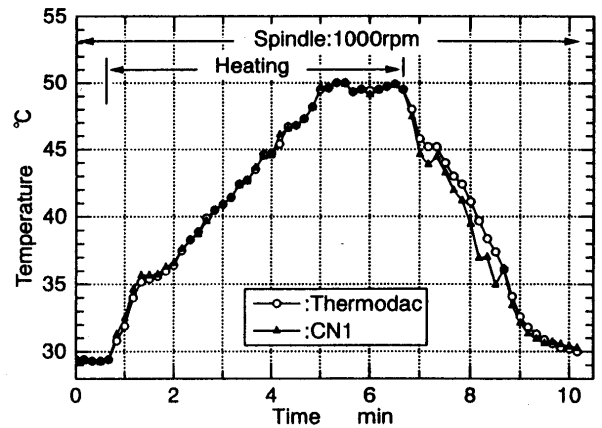
高速で回転する工作機械主軸の温度測定を実現する目的で、小形光テレメータシステムを提案した。本システムは以下の特長を備えている。

- (1) 多チャンネルの温度を高速に測定することが可能であり、さらに測定チャンネルはホストコンピュータにより任意に選択できる。
 - ・測定点の総数は8チャンネルであるが、増設が可能である。
 - ・1チャンネルあたりの測定を48μsで実行できる。
- (2) 光通信は合計2組のLEDとPDで実行できるので、システムを安価で容易に構成できる。
- (3) データがデジタルデータなので、本システムはコンピュータと整合性がよい。
- (4) 光学式データ転送の観点からのみ考えると、本研究で提案するシステムを適用できる主軸回転速度に制限はない。
- (5) 高い回転速度での使用と任意の姿勢の主軸にも適用できるよう、装置を小形化するとともに乾電池を用いている。
- (6) 温度測定には取扱いやすさを考慮して熱電対を用いた。測定温度範囲は0～100℃、温度測定の精度は実験から±0.2℃であった。

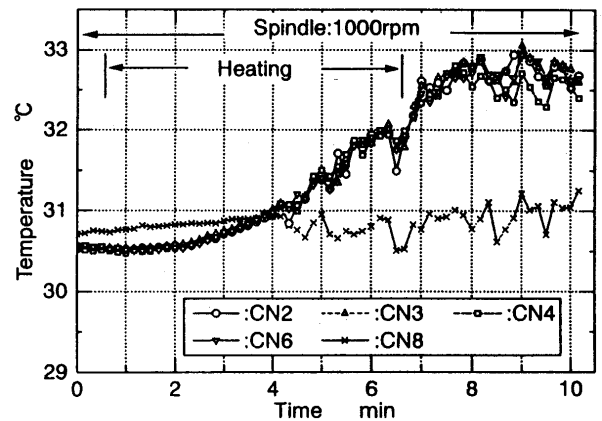
今後、測定可能時間の延長、高温接点の主軸に接触する状態での対策およびより高速の回転における対策が必要である。なお、本システムの光通信技術は、他の様々な物理量の測定にも応用することができる。

謝 辞

本研究の一部はメカトロニクス技術高度化財団の助成により行われたこと、および実験に用いた主軸は日本精工（株）から貸与していただいたことを付記し、感謝の意を表します。また、



(a) Air temperatures by CN1 and Thermodac



(b) Temperatures by CN2～CN8 in rotating spindle

Fig. 9 Results obtained by the telemetering system

バッテリーを提供していただいた松下電池工業㈱、卒研学生として協力いただいた濱島 功君、本多一博君、遠藤 覚君に感謝します。

参 考 文 献

- (1) M. Weck and A. Koch: Spindle-bearing Systems for High-speed Applications in Machine Tools, Ann. CIRP, 42(1), (1993) 445.
- (2) 高速モータスピンドル, 理研製鋼カタログ2T10M88Y.
- (3) 中村晋哉, 垣野義昭, 村松 明, 浦野好市: モータビルトインスピンドルにおけるモータ発熱の影響と軸芯冷却の効果の解析, 精密工学会誌, 60, 7 (1994) 979.
- (4) 是田規之, 陣野和男, 六角 正, 水田桂司, 渡部 健: 工作機械主軸の電子冷却, 精密工学会誌, 60, 5 (1994) 652.
- (5) 池崎八生, 竹内芳美, 坂本正史: 光転送を利用した回転工具の切削抵抗測定, 精密工学会, 48, 12 (1982) 1639.
- (6) 池崎八生, 竹内芳美, 坂本正史: 光転送を利用した回転工具の切削抵抗測定 (第2報), 精密工学会誌, 53, 5 (1987) 755.
- (7) 堀内 毅, 松井 敏: 光信号を利用した自動砥石バランスの開発, 精密工学会誌, 57, 2 (1991) 245.