



ワンチップ・マイクロコントローラを用いた回転軸温度情報の光学式非接触データ伝送システムの研究 (第2報)*

— 測定精度 —

永井 豊** 横山 和宏*** 鈴木 孝昌† 小寺 岳彦**

Optical & Non-contact Data-transmission System of Rotating Spindle Temperature
by Adopting One-chip Micro-controller (2nd Report)

— Measurement Accuracy —

Yutaka NAGAI, Kazuhiro YOKOYAMA, Takamasa SUZUKI and Takehiko KODERA

This paper deals with the measurement accuracy superior than $0.05\sim 0.1^{\circ}\text{C}$ for $0\sim 50^{\circ}\text{C}$ range of the developed data-transmission system. To realize the measurement accuracy best, it is necessary to satisfy several conditions; namely the calibration of the system should be carried out under several different temperatures or more and under sufficiently insulated condition, the output of all channels should be compensated based upon the temperature of electric circuit board and the warm-up operation for electric parts is needed.

Key words: optical system, data-transmission, rotating spindle, temperature, micro-controller, accuracy, calibration, compensation, thermo-couple.

1. 緒 言

回転体の物理量を静止体側に取り出す方法として、従来使われてきたスリップリングを用いる方法には、リングとブラシ間の抵抗変化に基づくノイズが存在したり、リングとブラシの摩耗やこれに基づく適用回転速度の制限という問題点があった。また、電波によるテレメータには、外部の電磁波によるノイズの影響を受けやすく複雑な信号処理をする必要があるため高価になるという問題点があった。

これらの問題点を解決するため、回転体の温度を熱電対とアンプで直流電圧として、これを A/D 変換したデジタルデータを発光ダイオード LED に入力することによって、デジタルデータを光信号として回転体から静止体側に送信する光テレメータシステムを開発した。このシステムでは、センサである熱電対から LED までの回転体側に設置する電気回路が小さいほど実用化が容易になる。最初の光テレメータシステム^{1)~3)}は回転ヘッドが、外径 65mm、全長 180mm と大きかった。このシステムを高回転速度の回転体にも適用できるように回転ヘッドの小型化を達成する基礎段階として、ワンチップ・マイクロコントローラを採用した光テレメータシステム⁴⁾についても報告した。

これら一連の研究において、軸受温度のモニタリングなどのように温度測定が主目的の場合は文献⁴⁾のシステムでも大きな問題はないと考えられる。しかし、温度情報から熱膨張量を推定する場合には、寸法が 1m を越える長い対象物であることも十分予想されるので、温度の測定精度を可能な限り高精度にしておくことが熱膨張量の推定精度を確保する上で、重要で

ある。

そこで、本研究では、温度測定の高精度化を達成するための校正実験の方法および得られた測定精度について報告する。なお、本研究では、固体の表面温度を測定することを想定しているので、センサとして熱電対を用いている。これは、熱電対を数十マイクロメータの薄さに押しつぶし、固体表面に直接押し付けて使用できるという形状への適応性、およびその結果実現できる被測定表面温度とセンサ温度との温度差を小さく維持できるという特長に注目するからである。

2. 温度測定システムの校正

2.1 校正実験

図1と表1に、本研究のシステムの構成と仕様を示す。このシステムは、回転ヘッド、静止ヘッド、シリアル・パラレル変換ボード、PCにより構成されている。温度センサとして、鉄・コンスタンタン熱電対を8チャンネル用い、熱電対の出力を、専用アンプ AD594 およびプリアンプを経由して、A/D変換器に入力している。ワンチップ・マイクロコントローラ PIC16F84 の指令にもとづく A/D 変換により得られた温度データ(mV 値)を LED に入力し、温度データを光学式に送信する。これを静止ヘッド上の PD で受信し、シリアル・パラレル変換ボードを経由して、プリンタポートから PC に入力した後、デジタル・フィルタリングと温度への換算を行う。回転ヘッドにおける消費電力は非接触式で給電している。

使用した AD594 は鉄・コンスタンタン用の専用アンプであり、基準接点補償機能を有しているが、精度は $\pm 1^{\circ}\text{C}$ と表示⁵⁾されている。例えば、長さ 1m の鋼(熱膨張係数 $12 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$)の熱膨張量を温度上昇から推定する場合を想定すると、 0.1°C の温度測定誤差は、 $1.2 \mu\text{m}$ の熱膨張量推定誤差に相当する。したがって、マイクロメータ・オーダの熱膨張量推定を目標とすれば、温度測定精度は 0.1°C を満足させる必要がある。

* 原稿受付 平成 14 年 12 月 27 日

** 学生会員 新潟大学大学院自然科学研究科(新潟市五十嵐 2 の町)

*** 正会員 新潟大学大学院自然科学研究科

† 新潟大学工学部

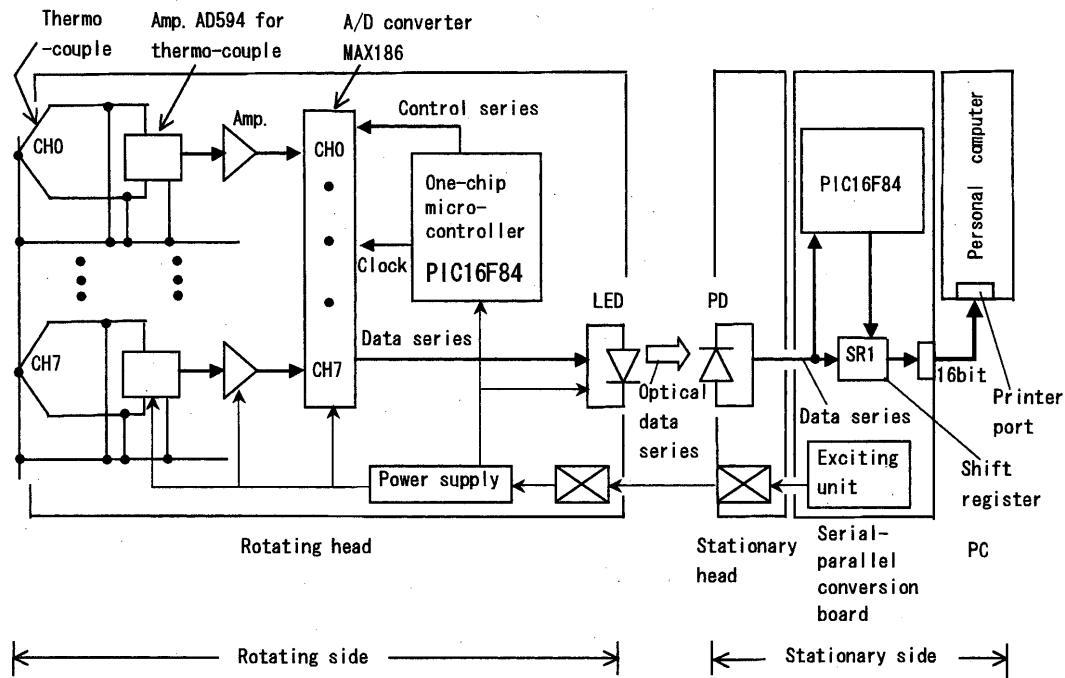


Fig.1 Optical & non-contact telemeter system by adopting one-chip micro-controller

Table 1 Specification of the developed system

| | | |
|------------------------------------|---|--------|
| Range | 0~50°C | |
| Transmission rate | 6,200 data/s (for only 1 channel) | |
| | 8ch x 700 data/s | |
| A/D converter | 8ch, 12bit 1 LSB = 0.0122°C | |
| Accuracy | Max. difference in temperature among 7 channels* | 0.10°C |
| | Max. difference in temperature change among 7 channels* | 0.05°C |
| Power supply | Non-contact supply or Battery | |
| Power consumption in rotating head | 5V x (6.5~8) mA | |

*One channel is used to measure the electric circuit board temperature for accuracy improvement

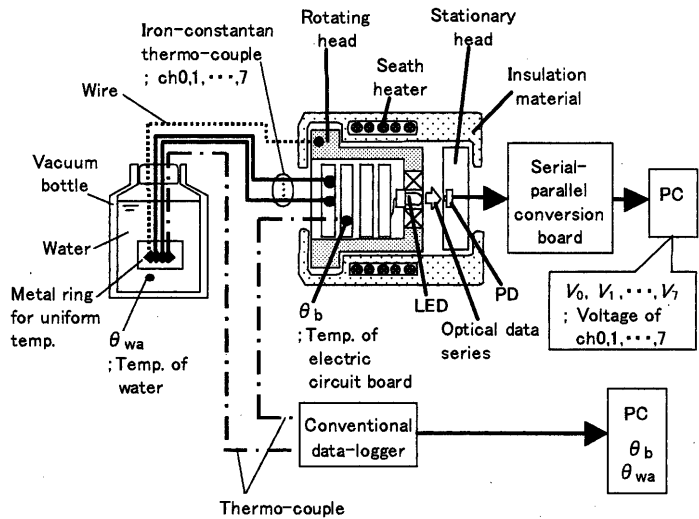


Fig.2 Calibration of the system

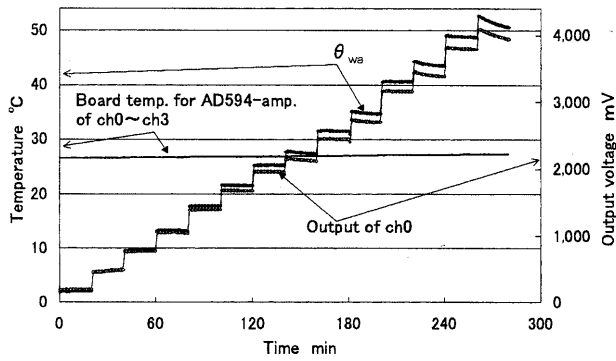
そこで、図2の要領でシステムの校正実験を行う。2重ガラスの中を真空にした魔法瓶(以下にジュワー氏瓶と称す。)に水を満たし、その水中に金属製リング周上にほぼ均等な位置に計8チャンネルの鉄・コンスタンタン熱電対をはんだ付けして配置する。熱電対の他端は回転ヘッドの各チャンネルに結線するので、水温に相当する出力電圧が本研究のシステムによりパソコンに入力される。同時に水温を測定するため、市販のデータログ用の熱電対も、上記のリングにはんだ付けしている。良好な断熱条件を満たすジュワー氏瓶の水中で、金属製リングに熱電対をはんだ付けしているのは、9個の高温接点の温度をより均一にするためである。

0~50°Cの温度範囲において、0.05°C程度の測定精度を実現するため、図2中のヒータをOFFとした状態で、約5°Cごとに異なる温度の水を満したジュワー氏瓶中に熱電対を保持し、

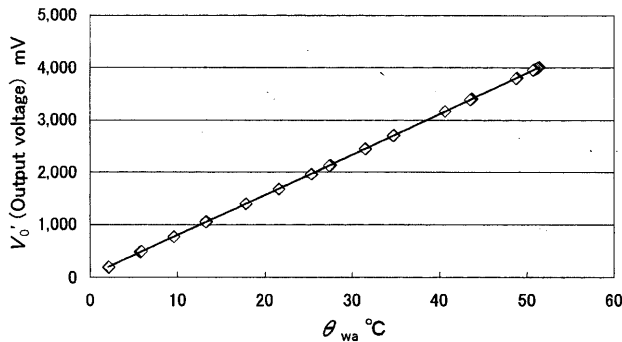
水の温度 θ_{wa} と出力電圧 V_i を測定する。 θ_{wa} は、データログを用いて測定する。 V_i は本研究のシステムの出力電圧である。測定結果の例を図3に示す。同図(a)の約5°Cごとの各段階において、20分間にわたり1分ごとに測定し、温度が安定する後半の10データを用いて校正を行う。このデータの中、ch0の出力電圧と水温の関係を図3(b)に例示する。なお、この実験を開始する前に、本研究のデータ伝送システムの電源をONにし、十分なウォーミングアップを行っている。

2.2 電気回路基板温度の効果

使用した熱電対用アンプAD594は、AD594を搭載した基板の温度にもとづいた、基準接点補償機能を内蔵している。しかし、この機能は0.05°C程度の高精度を目標とする本研究のシステムにおいては十分なものではない。しかも、実用の環境を考慮すれば、回転ヘッド内の電気回路基板温度が変化



(a) Output V_o' by the present system and water temperature θ_{wa}



(b) Relation between V_o' and θ_{wa}

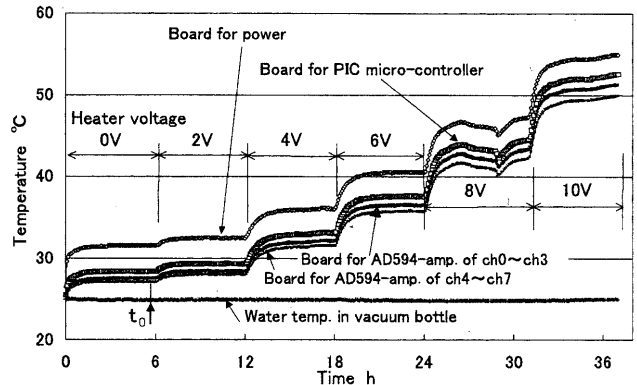
Fig. 3 Example of calibration experiment

することも容易に予想できるので、基板温度が本研究のシステムの出力に及ぼす効果を詳細に検討し、基準接点補償機能を補完することが必要である。

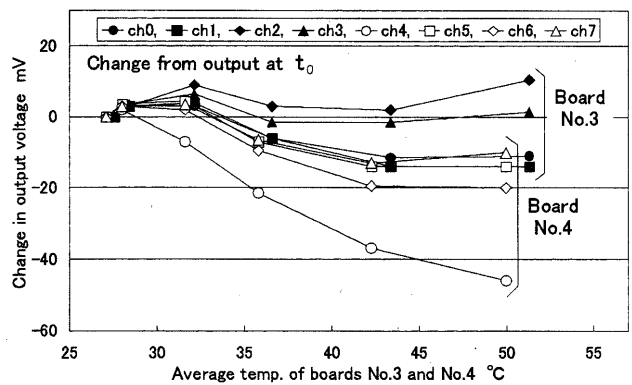
そこで、図 2 に示すように電気回路基板を収納した回転ヘッド全体を十分な断熱材で覆い、ほぼ均一に加熱できるように配置したヒータへの供給電圧を上昇させることにより、基板温度を段階的に上昇させ、温度が十分安定した状態において、基板温度と本研究のシステムの ch0~ch7 の出力を測定した。この実験では、長時間の実験中の水温変化を小さくするため、ジュワー氏瓶中の水温は室温とし、さらにジュワー氏瓶を保温バッグに収納している。使用したマイコン PIC16F84 と A/D 変換器 MAX186 の正常動作温度が 0~+70°C に制限されているので、基板温度が 60°C 以下であるよう注意した。

基板の温度変化を図 4(a) に示す。図 4(a) の 0~6 時間において、ヒータへの電圧が 0V であるにもかかわらず各部が温度上昇しているのは、静止ヘッドから回転ヘッドへの電磁誘導による非接触給電に伴い、回転ヘッド内の受電用コイルに 20kHz の交番電流が流れることによるものである。そのため、受電用コイルに最も近い電源基板の温度が高く、ついで、これに近いマイコン PIC 搭載基板の温度が上昇している。熱電対用アンプ AD594 を搭載している基板、したがって、熱電対線をはんだ付けする基板は、上記の温度上昇と交番電流によるノイズの影響を避けるため電源基板から遠くに配置しているので、温度上昇は最も小さいことがわかる。

図 4(a) の 0~6 時間の終期近くの定常状態における出力電圧を基準とし、その後の 6 時間ごとの終期近くの各チャンネルの出力電圧との差を求め、図 4(b) に示す。ここで、図 4(a) の 0 時間における出力電圧を基準にしなかったのは、各パーツのウォーミングアップの影響を避け、電気回路基板温度の効果



(a) Temperature of electric circuit board in rotating head



(b) Influence on the output

(;before compensation for change in θ_{wa} in Fig. 2)

Fig. 4 Experiment of board heating and its influence on the output of the developed system

(;Non-contact power supply system from the end face of rotating head)

を明らかにするためである。

2.3 温度への換算式の決定と適用

校正実験で得られた図 3 の結果をもとに、本研究のシステムの出力電圧から温度への換算式を決定する。実験前に十分なウォーミングアップを行っているが、図 3(a) の実験では、AD594 アンプを搭載した電気回路基板温度 θ_b は 26.6°C から 27.3°C に変化した。この影響が図 3(a) に例示した出力電圧 V_i' に含まれているので、これを補正する必要がある。

また、本研究のシステムの出力電圧 V_i' への電気回路基板温度 θ_b の効果を求めた図 4 の実験においては、図 4(a) に示すジュワー氏瓶中の水温 θ_{wa} が 24.7~25°C の範囲でゆっくりと変化していた。この水温変化の影響が図 4(b) の出力電圧に含まれているので、これについても補正する必要がある。

長時間の実験において、上記の基板温度 θ_b の変化および水温 θ_{wa} の変化をゼロとすることは、現実には極めて困難であるので、これらの影響を補正し、出力電圧から温度への換算式を決定するため、図 5 のフローチャートにより収束演算を行う。すなわち、図 5 中の式(1)のように、まず図 4 の基板加熱実験中の水温変化がなかったものと仮定して、式(2)の値を求めプロットし、式(3)により直線近似する。ここで、基板温度の基準を 25°C としている。次に、図 3(a) の校正実験における電気回路基板温度 θ_b が基準温度と異なる影響は式(3)の係数 e_{bi} で評価できるので、式(4)右辺第 2 項により、この影響を補正する。したがって、式(4) V_i は基板温度 θ_b が基準温度 25°C の状態の出力電圧である。この値をプロットし、式(5)により近似

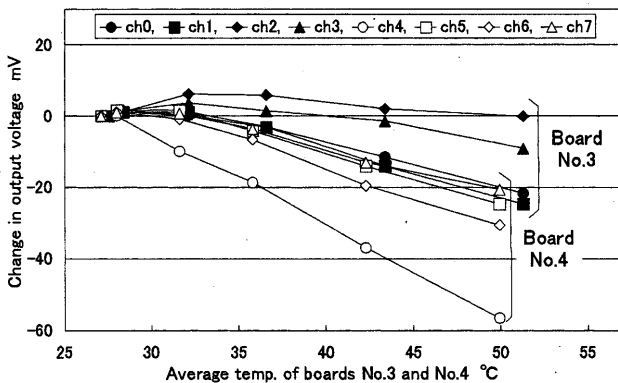
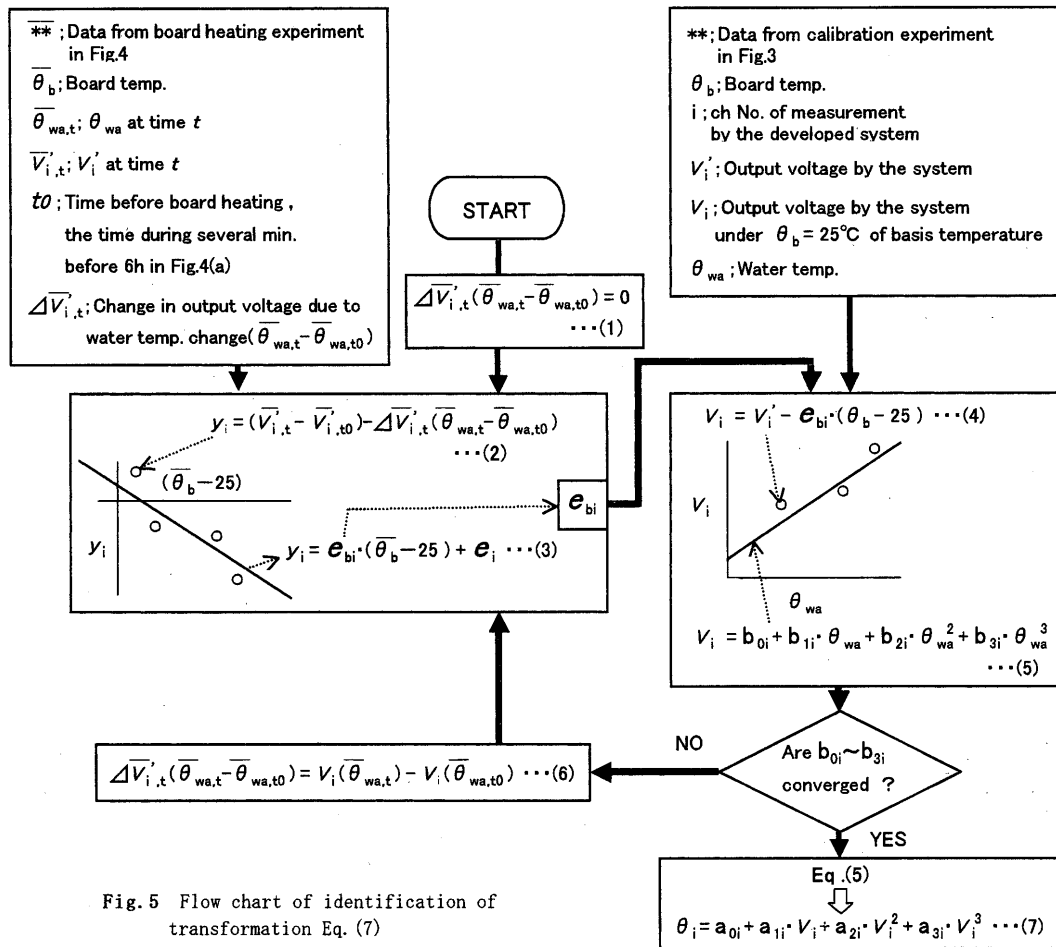


Fig. 6 Influence of board temperature on the output of the optical data-transmission system developed (after compensation for change in θ_{wa} in Fig. 2, non-contact power supply system from the end

Table 2 Characteristics of the optical telemeter system

| e_{bi} mV/°C | Eq. (7) |
|----------------|---|
| ch0 -0.9422 | $\theta_0 = -0.5550 + 0.0132703 V_0 - 7.189E-08 V_0^2 - 1.59E-12 V_0^3$ |
| ch1 -1.0947 | $\theta_1 = 0.5201 + 0.0132326 V_1 - 6.129E-08 V_1^2 - 3.29E-12 V_1^3$ |
| ch2 -0.0544 | $\theta_2 = 0.2457 + 0.0132540 V_2 - 6.584E-08 V_2^2 - 2.97E-12 V_2^3$ |
| ch3 -0.4010 | $\theta_3 = 0.0559 + 0.0133241 V_3 - 8.555E-08 V_3^2 - 0.06E-12 V_3^3$ |
| ch4 -2.5260 | (channel for board temp. measurement) $\theta_4 = -0.1620 + 0.0133262 V_4 - 10.207E-08 V_4^2 + 2.44E-12 V_4^3$ |
| ch5 -1.1569 | $\theta_5 = -0.1830 + 0.0132604 V_5 - 8.009E-08 V_5^2 - 0.79E-12 V_5^3$ |
| ch6 -1.4250 | $\theta_6 = -0.0004 + 0.0132634 V_6 - 7.844E-08 V_6^2 - 0.98E-12 V_6^3$ |
| ch7 -0.9766 | $\theta_7 = -0.1849 + 0.0132641 V_7 - 7.027E-08 V_7^2 - 2.31E-12 V_7^3$ |

する。式(5)の係数が収束していなければ、式(6)を用いて、式(2)の右辺第2項を計算する。以後、式(5)の係数が収束するまで同様のプロセスを繰り返す。最後に、式(5)の形を変換し、出力電圧から温度を求める式(7)を得る。なお、文献⁶⁾では、 $-210 \sim +760^\circ\text{C}$ の範囲で7次式で補間しているが、本研究では $0 \sim +50^\circ\text{C}$ の適用範囲で十分な精度が得られることを確認し、式(5)を3次式とした。

式(7)が決定した段階での基板温度の効果を図6に、測定電圧から温度への換算式(7)を表2に示す。図6から、アンプAD594にも個体差があり、基準接点補償機能の補完が必要な

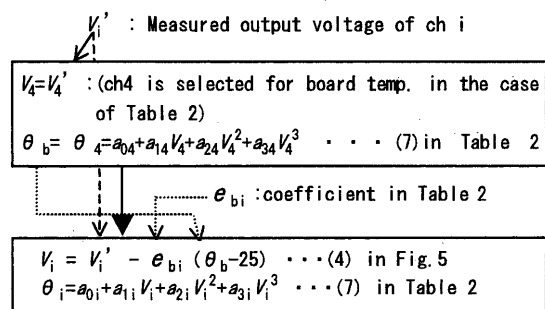
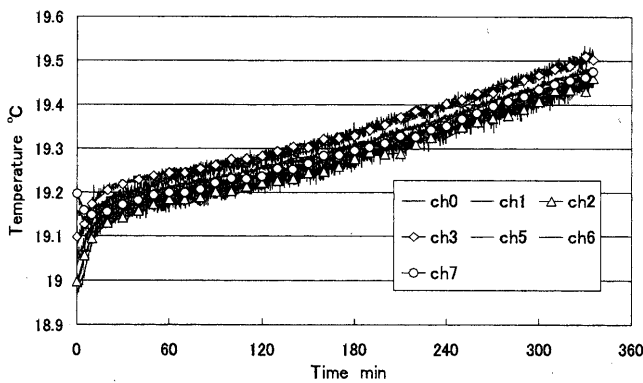
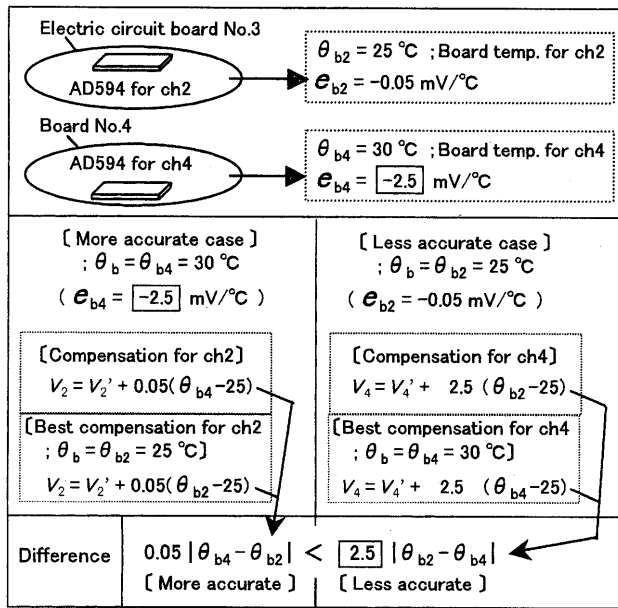


Fig. 7 Conversion flow-chart to temperature

Table 3 Selection law of the channel for board temperature measurement



(a) Temperature measured by the developed system

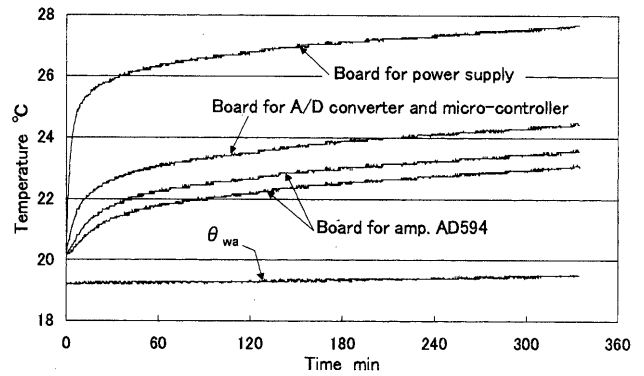
ことがわかる。この例では、ch4 の場合に基板温度 θ_b が変化すると出力電圧したがって測定温度への影響が最も大きい。表 2 から、式(7)右辺の一次の項が温度の精度に大きな影響があることがわかる。電圧 V_i が 0~4.095mV であることを考慮して、各項の係数の有効桁を決定している。

本研究のシステムを適用し、リアルタイムで実行する温度測定のプロフローチャートを図 7 に示す。図 7 の例では、まず、基板温度測定用チャンネルの出力電圧 V_4' から式(7)により基板温度 θ_b に換算する。つぎに、この基板温度 θ_b と各チャンネルの出力電圧 V_i' を用いて、図 7 中の V_i を計算する。この V_i を式(7)に代入して θ_i を計算する。

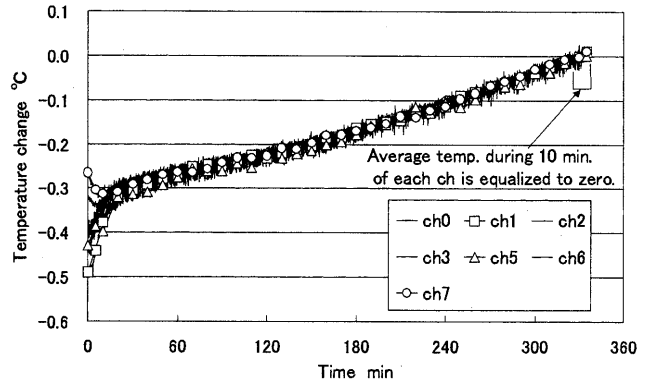
3. システムの測定精度

3.1 基板温度測定用チャンネルの選定方針

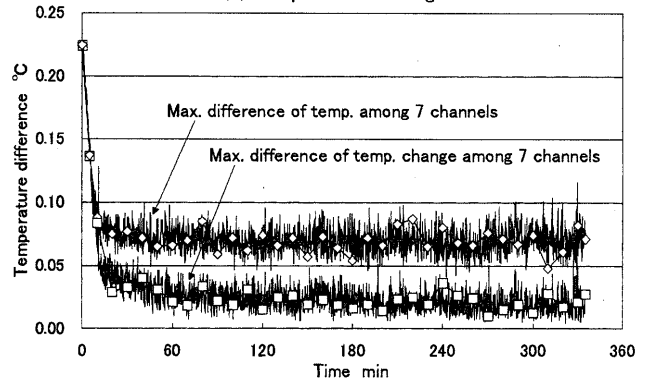
図 7 のフローチャートに従って、式(4)のように基板温度 θ_b に対する補正を行う。基板温度測定用に 8 チャンネルのうちの 1 チャンネルを選定する。このチャンネルの基板温度は、アンプ AD594 の 1 番ピンと 14 番ピンを電気的に導通させることにより、得られる。しかし、この基板温度は、同じ基板上の他のチャンネル用 AD594 位置の基板温度と異なる可能性がある。また、AD594 を搭載した別の 1 枚の基板温度と異なる



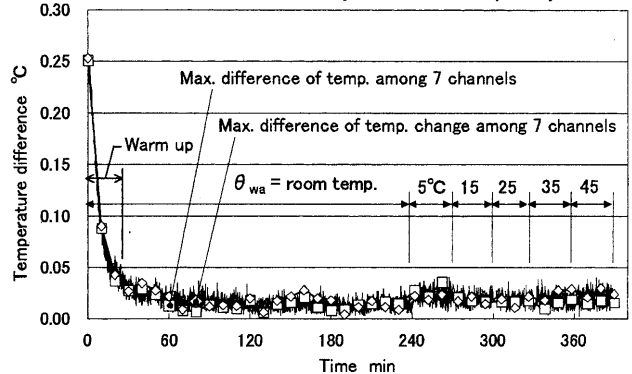
(b) Temperature of electric circuit board in rotating head



(c) Temperature change



(d) Measurement accuracy of the developed system



(e) Measurement accuracy in an example of the best system

Fig. 8 Measurement accuracy of the developed system, which is driven by non-contact power supply

る可能性もある。これらを考慮して、高い測定精度を達成するには、基板温度測定用のチャンネルとして、図 6 の中から近似直線の勾配 e_{bi} の絶対値が最も大きいチャンネル（この例では ch4）を選定する。これは、基板温度に対する実際の補正

量と最良の補正量との差が最も小さくなるように選定することを意味する。

すなわち、表3に具体例を示す。ch4の基板温度 θ_{b4} を用いて補正するので、ch4については最良の補正が行われる。しかし、表3左側に示すように、 θ_{b4} を用いてch2の V_d に対して行う補正量と、 θ_{b2} を用いる場合に得られるはずの最良の補正量との差は、表3の最下行の左側に示す式で表わされる。他方、表3右側の場合は、ch2を基板温度測定用のチャンネルとする場合である。ch2の基板温度 θ_{b2} を用いて補正するので、ch2については最良の補正が行われる。しかし、表3右側に示すように、 θ_{b2} を用いてch4の V_d に対して行う補正量と、 θ_{b4} を用いる場合に得られるはずの最良の補正量との差は、表3の最下行の右側に示す式で表わされる。これらの式を比較すると、表3の左側が補正の精度が良いと考えられる。したがって、図6の近似直線の勾配 e_{bi} の絶対値が最も大きいチャンネルを基板温度測定用に選定する。

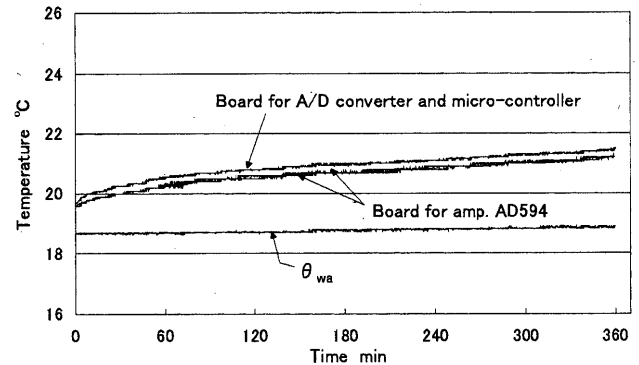
3.2 非接触給電式システムの測定精度

以上の検討にもとづいて調整した本研究のシステムの測定精度を明らかにするため、ジュワー氏瓶中の水温を長時間にわたり測定した。図8に非接触給電式システムの結果を示す。ch4は基板温度測定に使用しているので、合計7チャンネル分の温度を示している。図8(a)のように、非接触給電の開始から20分ほどの間は、チャンネルにより指示温度が増加あるいは減少するなどその傾向が異なっている。これは、アンプAD594などの電子部品のウォーミングアップおよび非接触給電時の20kHzの交番電流による電気回路基板の温度上昇(図8(b)参照)を含む回転ヘッドのウォーミングアップ特性によるものと考えられる。図8(a)において、ける7チャンネル間の各時刻における最大差を求め、温度の最大差として同図(d)中に示す。約20分のウォーミングアップ期間を除き、 0.1°C 以内の測定精度が得られていることがわかる。

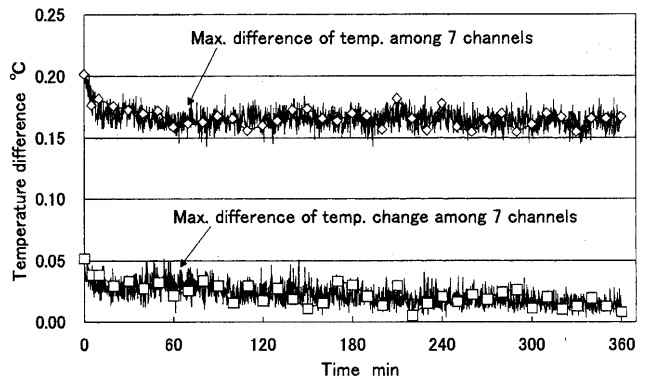
つぎに、ウォーミングアップ終了時の温度をもとに、それ以後の温度上昇に注目する方法により測定精度を検討する。ある状態からの各部の温度変化により熱変形が決まるという因果関係があるので、この方法を検討する意味があると考えられる。ここでは、図8(a)の20分において、7チャンネル間の温度を一致させる代わりに、測定終了前10分間の各チャンネルの平均温度が一致するように測定温度を上下にスライドさせた結果を図8(c)に示す。この状態で7チャンネル間の各時刻における最大差を求め、温度変化の最大差として図8(d)中に示す。約20分のウォーミングアップ期間を除けば、 0.05°C 以内の測定精度が得られていることがわかる。0~50°Cの測定レンジに対し、使用したA/D変換器(MAX186)は12bitであるので、 0.05°C はおおよそ4LSB(Least Significant Bit)に相当する。

以上の検討において、同時に測定した市販データログによる θ_{wa} との差を取り上げなかったのは、熱電対を用いる場合、データログによる測定精度は $\pm 0.2^\circ\text{C}$ (分解能 0.1°C)であり、本研究のシステムの精度より大きいので、基準値として採用することが不適切と考えたからである。

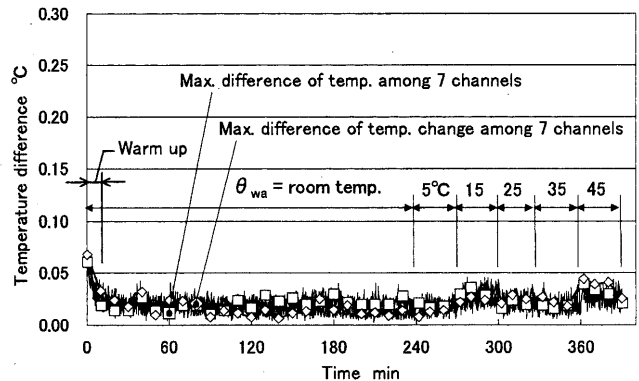
図8(e)には、上記と同様なシステムで測定精度が最も良い場合の例を示す。図中に示すように、水温は室温の場合および 5°C から 45°C までの数段階について測定している。合計7チャンネル間の温度の最大差および温度変化の最大差のいずれにおいても、ウォーミングアップ後は 0.04°C の測定精度が得



(a) Temperature of electric circuit board in rotating head



(b) Measurement accuracy of the developed system



(c) Measurement accuracy in an example of the best system

Fig. 9 Measurement accuracy of the developed system, which is driven by battery

られている。

3.3 バッテリー式システムの測定精度

回転ヘッド内の電気回路の電源として、コイン型小形バッテリー(二酸化マンガンリチウム二次電池,90mAh,3V×3個(直列)×2系列(並列))を用いた場合の結果を図9に示す。図8の場合に比べると、図9(a)に見られるように、電気回路基板の温度上昇が小さいので、ウォーミングアップ期間が短い。電源部を除くと、電気回路は同一仕様であるので、基本的には同一性能が期待できるが、図9(a)の温度の最大差は図8(d)の場合に比べ大きいので、回転ヘッドごとに個体差が存在することがわかる。しかし、図9(b)中の温度変化の最大差については、図8(d)とほぼ同一の測定精度が得られていることがわかる。なお、このシステムでは約30時間の連続測定が可能であった。

図9(c)には、バッテリー式システムで測定精度が最も良い場合

の例を示す。ウォーミングアップ期間が短く、温度の最大差および温度変化の最大差のいずれも 0.04°C の測定精度が得られている。

3.4 校正および適用時の留意事項

図 2 のように、本研究のシステムの熱電対高温接点および市販データロガの熱電対高温接点を金属製リングにはんだ付けして用いている。この状態でデータロガを動作させるとその影響が本研究のシステムに現れるので、本研究のシステムによるデータのサンプリング時にはデータロガの電源を OFF とするのが良い。

また、熱電対の高温接点付近やアンプ AD594 へのはんだ付け部近くでの熱電対線の変形が一時的な出力変化を生じるので、例えば振動しないよう固定方法に注意する必要がある。さらに、熱電対線をアンプ AD594 のピンに直接はんだ付けするのが良い。

4. 結 言

回転軸の温度をデジタル化し、この値を LED と PD を用いて光学式に伝送するシステムについて、測定精度を検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) $0\sim 50^{\circ}\text{C}$ の測定範囲において、7 チャンネル間の温度の最大差 0.1°C 以内、温度変化の最大差 0.05°C 以内を得ることができた。残りの 1 チャンネルは基板温度測定に用いている。

- (2) 最良の場合、7 チャンネル間の温度の最大差および温度変化の最大差が 0.04°C 以内を得ることが可能である。
- (3) 非接触給電式のシステムとバッテリー式システムの測定精度はほぼ同等である。

謝 辞

本研究の一部は、メカトロニクス技術高度化財団ならびにファナック FA ロボット財団の研究助成を得て行われました。ここに記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 横山和宏, 鈴木孝昌, 星名浩: 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リングの開発), 精密工学会誌, **62**, 7(1996)1009.
- 2) 横山和宏, 遠藤覚, 鈴木孝昌: 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 2 報 計測可能時間の延長・熱電対高温接点が軸に導通している場合の計測), 精密工学会誌, **64**, 9(1998)1355.
- 3) 横山和宏, 遠藤覚, 鈴木孝昌, 松平雄策: 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 3 報 主軸の熱膨張・熱変位のオンライン推定), 精密工学会誌, **65**, 1(1999)150.
- 4) 横山和宏, 鈴木孝昌, 小林滋, 松平雄策, 永井豊: ワンチップ・マイクロコントローラを用いた回転軸温度情報の光学式非接触データ伝送システムの研究 (第 1 報 小型化, 小電力化および回路構成), 精密工学会誌, **67**, 12(2001)2037.
- 5) アナログデバイセズ社: リニア・データブック (1997~1998) 15-11.
- 6) 日本機械学会: 伝熱工学資料改訂第 4 版 (1987) 292.