検出器の精度と分解能を改善するためのゲイン調整方法

正 員 ゴドレー ル イヴァン*

Gain Tuning Method to Improve Sensor's Accuracy and Resolution

Ivan Godler*, Member

Sensing of physical quantities is often accompanied by generation of periodic error signals. Especially in the case of rotary type sensors, periodic error signals are difficult to be avoided. In this paper, we present a method to compensate periodic error signals by gain tuning in multiple pick-up sensors. A mathematical model of the periodic error signal and a method to compensate the error is presented. It is shown that gain adjustment in a minimum of three pick-ups is needed to compensate any frequency component of the error signal. Minimum number of pick-ups needed to compensate multiple frequency components of the error signal is also derived. The method is successfully demonstrated on simulated and experimental examples, where one and two frequency components of the error signal are successfully compensated. Reduced periodic error increases the sensors accuracy and allow higher resolution for digital sensors.

キーワード：計測，周期誤差，リップル，補償，分解能

Keywords: instrumentation, periodic error, ripple, compensation, resolution

1. はじめに

回転運動や直線運動に関する物理量，すなわち，位置，速度，加速度，力，トルクなどの高精度な検出は計測および制御技術の応用において重要な役割を果たしている。しかしながら，特に回転運動の場合には，検出器の原理によっては異なるが，周期的な誤差信号が発生することが多くある。たとえば，回転軸の角度，速度または伝達トルクを検出するときには，検出ピックアップを軸に向かって1ヶ所に設置すると，検出器の感度が軸とのギャップに依存する場合には，軸の偏心があれば，軸の回転とともに周期的な誤差信号が発生する。このような誤差信号を補償するためには，軸を中心として対称に同一の検出ピックアップを2ヶ所に設置し，2つの誤差信号が逆位相になることを利用し，誤差信号の相殺を図ることが一般的な方法である。ところが，検出ピックアップの特性が完全に一致することではなく，設置位置にも誤差があり，または，軸の真円度の誤差や軸受けの影響などが加わると，理想的な状況にはならない。結果的に，誤差信号の完全な相殺が達成できなくなる。このような場合には誤差信号をさらに補償するためには，機械

的な精度を上げ，高価な製造工程を導入せざるをえない。

一般的に，検出器における誤差信号の原因は多種であるが，温度変化や時間の経過にともなう検出器の特性変動によるものもあり，検出器が装着される装置の動作や検出器自体の動作によるものもある。また，検出器の製造工程において発生する寸法的な誤差による周期的な誤差信号の発生が数多くある。例えば，上述の軸偏心に伴う周期的な誤差信号，または，回転型パルスエンコーダのスリットディスクの偏心や面振れ，スリットの幅およびピッチの誤差などの影響のために，1回転における様々な周期をもつ誤差信号が発生し，検出器の目標精度や目標分解能を得ることが困難になる。

著者らは波動歯車減速装置におけるトルク検出の研究を行い，周期的な誤差信号の発生問題に直面した⁽¹⁾⁽²⁾。ほかにも，たとえば磁歪式ヘッドを用いるトルク検出⁽³⁾，光学式回転型角加速度検出器⁽⁴⁾などにも周期的な誤差信号の発生が著しい。周期的な誤差信号を補償する方法として，カルマンフィルタの応用が提案されているが⁽⁵⁾，計算量が多く，実用上に問題がある。形状計測分野においては，真円度の測定方法として3点法が知られており，3つの検出ピックアップの使用により真円度の測定から軸の偏心に起因する誤差の成分を除去する方法がある⁽⁷⁾⁽⁸⁾。この3点法と本論文で提案する補償方法に共通点があるが，任意の周波数成分の補償が可能であることや複数の検出ピックアップを用いて任意の複数の周波数成分を同時に補償できることは

* 北九州市立大学 国際環境工学部
〒808-0135 北九州市若松区ひびきの 1-1
University of Kitakyushu, Faculty of Environmental Engineering,
1-1 Hibikino, Wakamatsu, Kitakyushu 808-0135

図1 回転型検出器のモデル

Fig. 1. Model of a rotary type sensor.

本論文の新しい考案である。

回転型パルスエンコーダやリニアスケールの精度と分解能（てい倍）を上げるためには正確な正弦波信号の発生が重要である。検出用信号以外の周波数成分を除去するために、特殊なマスク⁽⁶⁾などが提案されているが、本論文の目的は、検出に用いる以外の周期的な誤差信号を補償するための計算量または機械的な高精度を必要としない簡単な補償方法を提案することである。本方法では低価格の複数検出ピックアップを用いて、それぞれの検出ピックアップの信号の増幅度を独立に調整し、周期的な誤差信号を補償する。期待する効果は、検出用信号の精度を向上し、検出器の絶対的な精度と可能な分解能を改善することである。

本論文の2.章では誤差信号の数学的モデルを構築し、3.章ではこのモデルから導く補償方法を説明する。4.章では最低必要な検出ピックアップの数および調整係数の計算方法を示し、5.章ではシミュレーションおよび実験の結果を紹介する。

2. 誤差信号の数学的モデル

検出器の出力に周期的な誤差が重畳される代表的な例は、回転型検出器において軸の偏心があるものである。図1に示すように、たとえば、回転軸の伝達トルクを非接触的に検出するような例を容易に想像できる。

一般的に、偏心のために発生する誤差信号を補償する目的で2つの検出ピックアップを軸を中心に対称に配置するが、ここでは、検出器のモデルを一般的にするため、 n 個の検出ピックアップが角度間隔 $\Delta\beta$ で配置されると仮定し、それぞれの検出ピックアップにおける異なった配置角度誤差 ψ_j が存在すると仮定する。このようなモデルにおいて、回転軸の回転角度 β を独立変数とし、 j 番目の検出ピックアップから出力される誤差信号 e_j をつぎのようにモデル化できる。

$$e_j = \sum_{i=1}^N a_{ij} \cos \{f_i [\beta - (j-1)\Delta\beta - \psi_{ij}]\} \cdots (1)$$

このモデルを用いて、軸の偏心だけではなく、軸の真円度誤差や軸受けの影響など、パルスエンコーダの場合にはスリットの精度などを考慮し、 N 周波数成分（添字 i ）を含む誤差信号のモデル化ができる。ここでは、 f_i はそれぞ

れの周波数成分の周波数であり、 a_{ij} と ψ_{ij} はそれぞれのピックアップおよび周波数成分における異なった振幅および位相角度である。

このモデルを以下の解析に用いるので、表現を簡単にするため、位相に関する部分をつぎのように1つの位相角度 ϕ_{ij} にまとめる。

$$\phi_{ij} = f_i [(j-1)\Delta\beta + \psi_{ij}] \cdots \cdots (2)$$

すなわち、 ϕ_{ij} は各検出ピックアップ j における各周波数成分 i の位相角度である。

周波数 f_i は回転型検出器の場合には無次元（period/revolution）であるが、直動型検出器の場合には β 、 $\Delta\beta$ と ϕ_{ij} が距離になるので、 f_i の単位をrad/mにする。

複数の検出ピックアップで構成される検出器の最終的な出力は全検出ピックアップからの信号の和である。誤差信号もこれにしたがい、(1)式と(2)式を考慮し、検出器から得られる誤差信号 h はつぎである。

$$h = \sum_{j=1}^M e_j = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij} \cos (f_i \beta - \phi_{ij}) \cdots \cdots (3)$$

ここで、 h は補償すべき誤差信号の数学的モデルである。

3. 誤差信号の補償方法

上記の誤差信号の数学的モデルを用いて、誤差信号の補償を検討する。すなわち、(3)式において誤差信号 h がゼロになるための条件を調べる。

$$h = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij} \cos (f_i \beta - \phi_{ij}) = 0 \cdots \cdots (4)$$

(4)式に $\cos(f_i \beta - \phi_{ij}) = \cos \phi_{ij} \cos f_i \beta + \sin \phi_{ij} \sin f_i \beta$ を適用すると、つぎの式が得られる。

$$h = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij} (\cos \phi_{ij} \cos f_i \beta + \sin \phi_{ij} \sin f_i \beta) = 0 \cdots \cdots (5)$$

ここで、誤差信号 h が正弦波と余弦波の成分（アンダーラインの部分）に分離されることが興味深い結果である。この結果は誤差信号 h のフーリエ級数展開にほかならないが、フーリエ係数は $a_{ij} \cos \phi_{ij}$ および $a_{ij} \sin \phi_{ij}$ となる。すなわち、誤差信号の各周波数成分の振幅 a_{ij} および位相角度 ϕ_{ij} は全体の誤差信号の正弦波と余弦波成分の振幅のみに影響を与えることが重要な結果である。

正弦波成分と余弦波成分の和が独立パラメータ β によらずゼロになるための条件は、それぞれの振幅がゼロになることである。したがって、(5)式において目標の $h=0$ を達成するためには、つぎの連立方程式を満たす必要がある。

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^M a_{ij} \cos \phi_{ij} &= 0 \\ \sum_{j=1}^M a_{ij} \sin \phi_{ij} &= 0 \end{aligned} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \cdots \cdots (6)$$

この連立方程式を満たすためには位相角度 ϕ_{ij} または振幅 a_{ij} を調整すればよい。そこで、製造工程で組立てられて完成された検出器においては位相の調整より振幅の調整が一般的にしやすいので、誤差信号の補償方法として、振幅 a_{ij} の調整を提案する。

4. 最低必要な検出ピックアップの数

前章では、誤差信号を補償するために検出ピックアップからの信号の振幅をそれぞれ調整することを提案した。検出ピックアップに独立した振幅調整（増幅度、ゲイン、感度調整などとも言える）を加える必要がある。そこで、簡単な増幅の場合には1つの検出ピックアップから得られるすべての周波数成分に同じ増幅度係数が乗算されることに注意する必要がある。すなわち、振幅 a_{ij} に調整係数 k_j を加えることになる。これを連立方程式 (6) に考慮すると、つぎの行列形式で表した線形同次連立方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} a_{ij} \cos \phi_{ij} \\ a_{ij} \sin \phi_{ij} \end{bmatrix}_{(2N \times M)} \begin{Bmatrix} k_j \end{Bmatrix}_{(M)} = \mathbf{0} \dots\dots\dots (7)$$

この連立方程式の解として調整係数 k_j を求めるとき、ゼロでない解が存在するための条件は次式である。

$$M \geq 2N + 1 \dots\dots\dots (8)$$

この条件は補償する誤差信号の周波数成分の数 N と必要な検出ピックアップの数 M との関係を表している。すなわち、誤差信号の特定な周波数成分 N を補償するためには、最低必要な検出ピックアップ数 M_{min} はつぎである。

$$M_{min} = 2N + 1 \dots\dots\dots (9)$$

誤差信号のうち1つの周波数成分だけを補償するためには最低3つの検出ピックアップが必要である（真円度の測定方法で利用）。2つ以上の周波数成分を同時に補償するためには最低5つ以上の検出ピックアップが必要であることは (9) 式でわかる。なお、1つまたは複数の周波数成分を同時に補償するときには、低い周波数成分から順に周波数成分を補償する必要はなく、振幅がもっとも高い、または別の基準で選択した任意の周波数成分を選び、その成分だけを補償することができる。これについては、5章の補償例で示す。

同次連立方程式 (7) の解を求めるときには、自明でない解が無数に存在する。検出ピックアップが最低必要な数のときでも、無数の解が存在する。この無数の解の内から1つの特定な解を選択するためには、1つの調整係数を事前に設定する必要がある。そこで、1つの調整係数を1に設定し、残りの $N - 1$ の係数を演算する。調整係数の求め方については以下に簡単に説明する。

4・1 振幅調整係数の求め方 まず、検出器の複数ピックアップからそれぞれの誤差を含む信号を取得し、それぞれの信号のフーリエ変換を行う。得られた周波数スペクトルから補償する予定の N 周波数成分を選択し、それぞ

れの振幅 a_{ij} と位相角度 ϕ_{ij} を抽出する。これらのデータを用いて同次連立方程式 (7) を構成する。調整係数を事前に決定する検出ピックアップを1つ選び、たとえば、 p 番目の検出ピックアップの調整係数を事前に1にし、 $k_p = 1$ とする。残りの $N - 1$ の調整係数を求めるためには、連立方程式 (7) をつぎのように変形する。

$$\begin{bmatrix} a_{ij} \cos \phi_{ij} \\ a_{ij} \sin \phi_{ij} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_j \end{Bmatrix}_{(j \neq p)} = - \begin{Bmatrix} a_{ip} \cos \phi_{ip} \\ a_{ip} \sin \phi_{ip} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

すなわち、式の左辺の係数行列から p 番目の列を逆符号で方程式の右辺に移動させ、非同次連立方程式を構成する。

(10) 式の解は、左辺の行列が正規であるときに逆行列で求められる。全周波数成分の位相が π の整数倍で異なるときのみに、行列が正則でなくなる。このときには、周波数成分をベクトルで表すと、共線ベクトルになり、調整係数を連立方程式の解で求められないが、誤差信号の補償は簡単な成分の振幅の差で実現できる。一方、周波数成分が共線ベクトルにならない場合には必ず連立方程式の解が存在し、解が求められる。

事前に決定する調整係数の選択によって解が異なり、検出器全体の増幅度が変わることになる。そこで、全体増幅度を調整前のレベルにあわせるため、最後に調整係数のスケーリングを行う。調整前の係数はすべて1である前提から、スケーリング係数 C をつぎのように求められる。

$$C = \frac{M}{\sum_{j=1}^M k_j} \dots\dots\dots (11)$$

一意の調整係数の解 K_j はつぎである。

$$K_j = C k_j \quad (j = 1, 2, \dots, M) \dots\dots\dots (12)$$

上記の計算方法とは別に、適正なコンピュータプログラムを用いて、誤差信号の振幅が最小になるように検出ピックアップの増幅度を探索する手法も考えられる⁽⁹⁾。この場合にはフーリエ変換、誤差信号の振幅および位相の抽出や連立方程式の解を求める必要がなく、たとえば、誤差信号の最大値だけを観察しながら与えられた条件に合う調整係数を求めればよい。コンピュータを使う探索のためには多少の演算時間が必要だが、高度な演算方式を用いずに良好な結果を得ることがメリットである。さらに、手動でゲイン調整を行うことも考えられるが、3つのピックアップ以上になると非常に困難になる。

5. 補償の具体的な例

この章では周期的な誤差信号の1つおよび2つの周波数成分を補償するシミュレーションおよび実験例をそれぞれ示す。

5・1 1つの周波数成分を補償するシミュレーションの例 一般的に、検出器における周期的な誤差信号に複数

図2 3つのピックアップからのリップル信号
およびこれらの合計

Fig.2. Ripple signals from three pick-ups and their sum.

図3 3つのピックアップ合計信号の周波数
スペクトル

Fig.3. Frequency spectrum of a sum signal from three pick-ups.

の周波数成分が含まれているが、場合によっては、1つの周波数成分がほかの成分より極端に大きい⁽¹⁾⁽²⁾、または、特定の周波数成分の影響のために制御系における機械的な共振が発生するなどの特殊な問題があるので、1つの周波数成分だけを補償する必要がある場合が考えられる。

誤差信号の1つの周波数成分 ($N = 1$) を補償するためには、最低必要な検出ピックアップの数は $M_{min} = 3$ である。検出ピックアップは図1に示したように配置し、たとえば、それぞれの検出ピックアップから得られる誤差信号 e_1, e_2, e_3 とこれらの合計信号 h は図2に示すようになる。理解しやすくするためには、誤差信号の振幅を mV の電圧とし、それぞれの振幅と位相は適当に選んだ。合計信号 h の周波数スペクトルを図3に示す。3つの周波数成分 $f_1 = 1, f_2 = 3.4, f_3 = 7.2$ (それぞれ period/rev.) の誤差信号が存在し、それぞれの振幅は $a_1 = 1.13$ mV, $a_2 = 2.66$ mV, $a_3 = 0.22$ mV である。ここで、2つの周波数成分 f_2 と f_3 は1回転に対して整数倍の周波数または周期を持たないようにしたのは、機械的な伝達系内に検出器が組み込まれ、減速機や軸受けなどの影響のために複数の回転にわたる周期をもつ誤差信号が発生する可能性があり、また、直動型検出器の場合には製造工程によって基本周期の整数倍の周期を持たない誤差信号が発生する可能性があるためである。このような場合にも本方法が有効であることを示す目的でもある。

3つの検出ピックアップを用いて、検出器の出力に残った誤差信号 h の成分の内から1つだけは完全に補償できる。

図4 (a) 調整前後の3つのピックアップ合計信号、(b) 調整後のこの周波数スペクトル

Fig.4. (a) Total periodic error signal from three pick-ups before and after compensation and (b) its frequency spectrum after compensation.

ここでは、さらに本方法の一般性を示し、周波数をもっとも低い成分ではなく、振幅が最も高い $f_2 = 3.4$ period/rev. 成分を補償することにする。したがって、(10) 式においては $i = 2, j = 1, 2, 3$ となる。それぞれの検出ピックアップからの信号のフーリエ変換から得られたデータはつぎである。

$$a_{21} = 10.3 \text{ mV}, \quad a_{22} = 10.8 \text{ mV}, \quad a_{23} = 9.4 \text{ mV} \\ \phi_{21} = -2.04^\circ, \quad \phi_{22} = -92.48^\circ, \quad \phi_{23} = 159.74^\circ$$

ここで、調整係数 $k_1 = 1$ を事前設定し、前章で述べた計算方法を用いて、 $k_2 = 0.313, k_3 = 1.151$ の解を求める。ところが、 $k_2 = 1$ を選択すると、 $k_1 = 3.193, k_3 = 3.675$ となり、全体のゲインが大きくなる。したがって、全体増幅度を調整前のレベルに戻すためには、全検出ピックアップの調整係数のスケーリングを行い、つぎの一意の解を得る。

$$K_1 = 1.218, \quad K_2 = 0.381, \quad K_3 = 1.401$$

この結果を各検出ピックアップの出力に適用し、図4に示すように、誤差信号の成分 f_2 を完全に補償できる。同時に、周波数成分 $f_1 = 1$ period/rev. の振幅が若干小さくなり、周波数成分 $f_3 = 7.2$ period/rev. の振幅は多少大きくなり、目立つようになった。

1つの周波数成分だけではなく、全周波数成分にわたって誤差を最小にする方法も考えられる。このような場合には、ピックアップの数に関係なく、コンピュータを用いて適正なアルゴリズムを利用し、全周波数成分にわたって誤差信号の振幅が最小になるように係数を求めることが考えられる⁽⁹⁾。

図5 (a) 5つのピックアップからの合計信号，
(b) この周波数スペクトル

Fig.5. (a) Sum signal from five pick-ups and
(b) its frequency spectrum.

図6 2つの周波数成分を補償した (a) 5つの
ピックアップからの合計信号，(b) この周波数
スペクトル

Fig.6. (a) Sum signal from five pick-ups and (b)
its frequency spectrum after compensation of two
frequency components.

5.2 2つの周波数成分を同時に補償する実験の例 家城ら⁽⁶⁾は光学式エンコーダにおける複数の周波数成分を同時に補償するための特殊なマスクを提案しているが、マスクは光学式センサにしか使用できない制限があり、マスクの高精度が要求されるなどの問題もある。ここで提案する方法がより一般的かつ低価格のものであると考えられる。

本方法を用いて2つの周波数成分を完全に補償するために、最低5つの検出ピックアップが必要である。提案した方法を実験で検証するため、1000スリットの金属ディスクと5個の光学式ピックアップ（光電子SG-214）を1台の角度センサ（光学式エンコーダ）として試作し、フライホイール駆動で一定の速度で回転させた。5つ検出ピックアップの出力合計信号およびその周波数スペクトルは図5に示す。検出に用いる周波数成分1,000 period/rev以外にこれの2倍および3倍の周波数成分が目立つ。この2つの周波数成分は検出用波形の歪の原因になり、検出器の精度の低下や可能な分解能（ ± 1 倍）の制限の要因となる。それぞれの成分の振幅を図5に示したが、検出に用いる信号に比べて、誤差信号の振幅が小さく、2%にも及ばない。

前節で示した1つの周波数成分補償と同様に、フーリエ変換と連立方程式の解を用いて、最後にはスケーリングを行った結果はつぎである。

$$K_1 = 2.12, \quad K_2 = 4.31, \quad K_3 = 3.37, \\ K_4 = 21.1, \quad K_5 = -25.9$$

ここで興味深い結果は、負の符号をもつ調整係数が現れたことである。すなわち、状況に応じて、検出ピックアップから逆位相の信号が必要になることもありえる。

調整後の5つの検出ピックアップから得られた合計信号

およびその周波数スペクトルを図6に示す。周波数スペクトルを調整前に比べると、2倍および3倍の周波数成分の振幅が著しく低減された。補償した誤差は小さいため、図6(a)に示した波形の高精度化は肉眼で確認できない。誤差成分の補償によるセンサの高精度化または可能でない倍の改善などに関する評価は今後の課題として残っているが、周波数スペクトルを見る限り、提案した誤差補償方法は有効であると言える。

5.3 ノイズと補償方法の実現に関する考察 検出器内においては多種のノイズが発生するので、本補償方法とノイズの関係を考察する。

本補償方法を用いて、補償する誤差信号の独立変数は時間ではなく、検出器の角度または距離であるので、時間領域のノイズと分離してフーリエ変換ができる。具体的に、誤差信号を記録するときに、時間領域のノイズに比べて独立変数を極端に低速で変化させると、低域通過フィルタを用いて、主に高い周波数領域に存在する時間領域のノイズを信号から取り除くことができる。一方、ノイズが本方法に用いる独立変数の関数であるとすれば、補償の対象となり、誤差信号とともに補償される。なお、時間の経過とともに検出器の誤差が変動しないことは前提である。

補償方法の実現に関しては、調整係数を有限語長のマイクロプロセッサによって演算するおよび実現するときには、量子化誤差のために補償効果が衰えるなどの問題がある。したがって、実現のときには、ハードウェアの分解能および誤差信号を記録するときのサンプリングレートなどに関し十分な注意が必要である。

6. おわりに

本論文では検出器における周期的な誤差信号の補償方法を提案した。複数の低価格検出ピックアップで検出器を構成し、それぞれの検出ピックアップからの信号の振幅を調整することにより、誤差信号の完全な補償が可能であることを示した。

誤差信号の1つの周波数成分を補償するためには最低3つの検出ピックアップが必要である。真円度測定用の3点法と共通点があるが、任意の複数の周波数成分を同時に補償することは本論文の新しい考案である。複数の周波数成分を同時に補償するために必要な検出ピックアップの数を求め、1つおよび2つの周波数成分を補償するシミュレーションおよび実験の例を示した。

提案した補償方法は回転型、直動型検出器にも適用でき、補償する誤差信号の周波数は回転角度の整数倍でなくてもよいことは本方法の利点である。実現はハードウェアでもソフトウェアでも可能であるので、実用性の高い方法であると考えられる。計算機を用いて調整係数を求めることができるので、検出器の較正を行うときに自動的にゲインの調整が可能である。

本論文では特定の周波数成分を完全に補償する課題を中心に述べてきたが、全周波数成分にわたって誤差を最小にする最適化調整も可能である。

誤差信号の補償により検出器の絶対精度を改善するとともに、パルスエンコーダのようなデジタル出力センサの場合には高精度の正弦波を可能にするため、高い倍率、すなわち、高い分解能が得られる効果も期待できる。

(平成15年3月10日受付、平成15年8月11日再受付)

(1990-12)

- (8) 奥山栄樹・守時 一:「3点法による真円度形状測定と軸の回転精度測定に関する一考察」, 精密工学誌, 65, 9, pp.1312-1318 (1999-9)
- (9) I. Godler: "A Method to Compensate Periodic Errors by Gain Tuning in Instrumentation", *IEEE T. Instrumentation and Measurement*, Vol.51, No.1, pp.37-42 (2002)

Ivan Godler (正員) 1962年生。1986年 Ljubljana 大学卒業。

1991年九州工業大学大学院工学研究科設計生産工学専攻博士前期課程修了, 1995年同大学博士後期課程修了。1991年(株)ハーモニックドライブシステムズに入社。1998年1月から2001年3月まで九州大学大学院システム情報科学研究院助教授。現在、北九州市立大学国際環境工学部情報メディア工学科助教授。計測、制御に関する研

究に従事。

文 献

- (1) M. Hashimoto and I. Godler: "Built-in High Accuracy Torque Sensing for Harmonic Drive Gears", *J. RSJ*, Vol.15, No.5, pp.802-806 (1997-5) (in Japanese)
橋本 稔・ゴドレール:「ハーモニックドライブ内蔵型トルクセンサの高精度化」, 日本ロボット学誌, 15, 5, pp.802-806 (1997-5)
- (2) I. Godler, T. Ninomiya, and M. Horiuchi: "Ripple Compensation for Torque Sensors Built into Harmonic Drives", *IEEE T. Instrumentation and Measurement*, Vol.50, No.1, pp.117-133 (2001-1)
- (3) 古賀文隆・吉田浩二・笹田一郎:「磁気ひずみ効果型トルクセンサのための鋼軸の特性評価」, 電学論 A, 117, 2, p.148 (1997-2)
- (4) I. Godler, A. Akahane, T. Maruyama, and T. Yamashita: "Angular Acceleration Sensor Composed of two Discs and Optical Pick-Up", *T. SICE*, Vol.31, No.8, pp.928-990 (1995)
- (5) H.D. Taghirad and P.R. Belanger: "Intelligent Built-in Torque Sensor for Harmonic Drive Systems", *IEEE T. Instrumentation and Measurement*, Vol.48, No.6, pp.1201-1207 (1999)
- (6) A. Ieki, K. Matsui, M. Nashiki, and K. Hane: "Reduction of Higher Order Signal Distortion in Optical Encoder using Modulated Pitch Grating", *J. JSPE*, Vol.66, No.7, pp.1087-1092 (2000-7) (in Japanese)
家城 淳・松井圭司・梨木政行・羽根一博:「変調周期の回折格子を用いた光学式エンコーダ」, 精密工学誌, 66, 7, pp.1087-1092 (2000-7)
- (7) 加藤秀雄・野村雄二郎・中野嘉邦:「3点法に基づく机上真円度測定法の改良とn点法への拡張」, 精密工学誌, 56, 12, pp.2303-2308