

平成4年度 修士論文
「張力差動形トルクセンサを用いた
ベルトの故障診断に関する研究」

平成5年2月12日提出
九州工業大学大学院情報工学研究科
情報システム専攻
氏名 白井達也
研究指導教官 金子真 

目次

要約	1
1 まえがき	2
2 問題の設定	2
3 提案する故障診断法	4
3.1 センシング機構	4
3.2 実験装置	6
3.3 故障診断	7
3.3.1 ベルト故障要因の分類	7
3.3.2 正常状態と故障状態の判定	10
3.3.3 故障原因の判定	12
4 考察	16
4.1 噛み合せ不良時の挙動について	16
4.2 TDT センサ出力の周波数解析	17
4.2.1 負荷固有の影響	18
4.2.2 TDT センサ固有の影響	18
4.2.3 ベルト固有の影響	19
4.3 ベルト系の故障診断における TDT センサの長所について	24
4.3.1 張力差よりトルクを測定する利点	24
4.3.2 従来形動トルクセンサに対する TDT センサの優位性	26
5 結論	26
6 謝辞	27
参考文献	28

要約

送風機や自動車のエンジンまわりの動力伝達系の一部に、タイミングベルト(以下、単にベルトと呼ぶ)が利用される場合が多い。このようなベルト駆動系では、その過酷な利用によって、ベルトが切れてしまう場合がある。そのため送風機の場合では、ベルトの状態が定期的に点検されるが、それでも点検時に破断寸前の状態になっていることが見つかったりすることがよくある。このため、ベルトの状態を絶えずモニタリングしていて、異常時には素早く何等かの信号を発するようなセンシングシステムの開発が望まれている。ベアリング、歯車系、回転機械の故障診断技術に関しては、これまでもいくつか研究 [2]-[5] があり、一応の成果を挙げているものの、ベルト系の故障診断を目的とした研究はほとんど行われていない。

本研究では、ベルト伝達系によく利用されているテンションプーリを兼ねる簡単なトルクセンシング機構として張力差動形トルクセンサ (Tension Differential type Torque センサ:以下 TDT センサと略) を新たに考案し、信号処理技術を駆使することで、センサ出力よりベルトの異常を検出する。この方法の利点は、ベルトの異常部がテンションプーリ部を通過する毎に、センサ部に直接影響を与えるため、異常信号とノイズを分離しやすい点である。また、このセンシング機構は、本来、動トルクセンサとしても十分な性能を併せ持っているため、故障診断以外の目的にも広く応用が可能である。

1 まえがき

送風機や自動車のエンジンまわりの動力伝達系の一部にタイミングベルト (以下、単にベルトと呼ぶ) が利用される場合が多い。ベルトを利用することの利点は、独立に設計されたアクチュエータ部と被駆動部を比較的容易に連結できる、駆動・従動プーリの径を変えることにより低減速機構を兼用できる、取り付け誤差をベルトのコンプライアンスで吸収できる、軽量である、などを挙げることができる。また、最近では、ベルト・プーリ駆動系の機構的特徴をうまく利用した無段変速器 [1] など開発されている。

このようなベルト駆動系では、その過酷な利用によって、ベルトが切れてしまう場合がある。そのため送風機の場合では、ベルトの状態が定期的に点検されるが、それでも点検時に、破断寸前の状態になっているのが見つかったりすることがよくある。このため、ベルトの状態を絶えずモニタリングしておいて、異常時には素早く何等かの信号を発するようなセンシングシステムの開発が望まれている。ベアリング、歯車系、回転機械の故障診断技術に関しては、これまでもいくつか研究 [2]-[5] があり、一応の成果を挙げているものの、ベルト系の故障診断を目的とした研究はほとんど行われていない。

本論文の狙いは、ベルト伝達系によく利用されているテンションプーリ兼用形の簡単なセンシング機構、張力差動形トルクセンサ、を新たに考案し、信号処理技術を駆使してベルトの異常を検出することにある。この方法の利点は、ベルトの異常部がテンションプーリ部を通過する毎に、センサ部に直接インパルス力を与えるため、異常信号とノイズを分離しやすい点である。また、このセンシング機構は、本来、動トルクセンサとしても十分な性能を併せ持っているため、故障診断以外の目的にも広く利用が可能である。

2 問題の設定

Fig.1(a) のようなベルト駆動系を考えてみよう。簡単のため、駆動プーリと被駆動プーリの半径は等しいとする。いま、アクチュエータの出力軸にトルクセンサが取り付けられているものとし、系は定常状態で回転しているものと仮定する。この場合、トルクセンサで検出され得る変動成分としては、大きく以下の三つが考えられる。

- (i) アクチュエータの回転数に関連した周波数成分を有する変動成分。
- (ii) ベルトの回転数に関連した周波数成分を有する変動成分。
- (iii) 特別な周波数成分をもたない変動成分。

(i) の例としては、プーリの取り付け誤差やアクチュエータの異常などが考えられる。また (ii) の例としては、ベルト自身の剛性の不均一さなどに加え、ベルトの歯の目詰まり、ベルトに発生したキズなど故障が原因である場合が含まれる。そして (iii) の例としては、負荷の変動 (例えば風が吹き始めた) などが考えられる。

本研究で対象とするのは、(ii) のベルトの回転数に関連した周波数成分より構成される変動成分であり、この変動波形に現れる特徴よりベルトの異常を検出することが、本研究の目的である。従って、この目的からすれば、Fig.1(a) のように動トルクセンサを設置しておくことで、一応の目的は達成可能である。ところが、一般に動トルクセンサは高価で、この

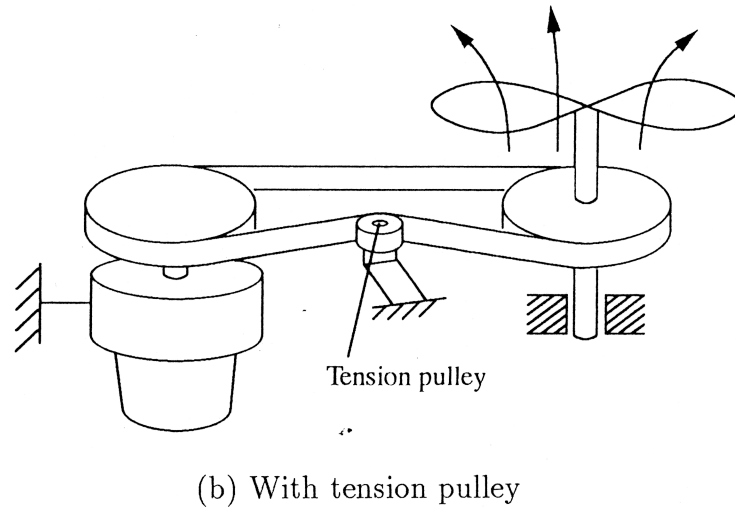
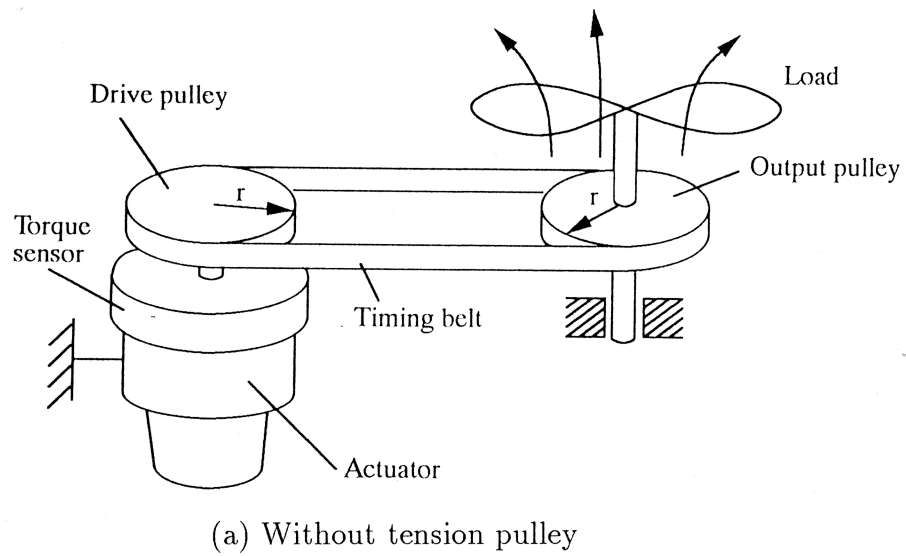


Fig.1 Timing belt driving system

目的のためだけに取り付けるのは、賢明な方法とは思えない。しかも、この方式では、ベルトの異常は軸トルク変動として間接的に測定されるに過ぎない。一方、ベルト駆動系の場合、十分なベルト張力を維持するため、通常 Fig.1(b) のように駆動系の一部にテンションプーリが挿入される場合が多い。本研究では、ベルトの異常部が直接接触するテンションプーリ部に着目し、この機構を発展させて、絶対系から直接、動トルクが測定可能なセンシング系を考案し、これを用いてベルトの故障診断を行う。

3 提案する故障診断法

3.1 センシング機構

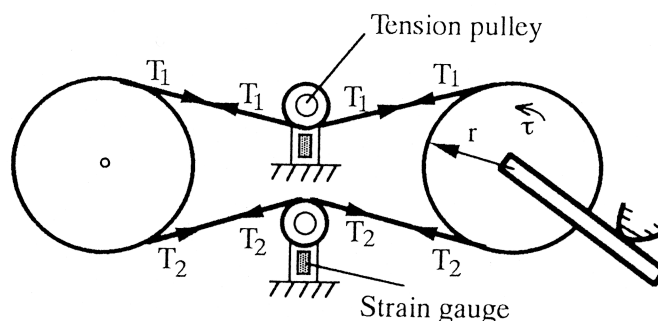


Fig.2 Torque sensor system using tension sensor

2章で述べたテンションプリー機構をトルクセンサに応用する着想であるが、Fig.2のように、ベルトに働く絶対的な張力 T_1, T_2 を単純に張力センサで測定する構成で一応実現可能である。しかしこの張力センサによる構成では、負荷トルクが0の状態でもセンサ部にオフセットとしてモーメントが作用する。常にモーメントが作用した状態で、そのトルク値を中心にアクティブレンジが設定されるため、レンジ幅が大きく取れない。また初期張力を変えるとオフセットが移動してしまうので、いちいち調整をせねばならない、センサ及びアンプが張力 T_1, T_2 の2つについてそれぞれ必要である、などの欠点が挙げられる。

以上の欠点を取り除く目的で筆者らはワイヤで駆動されるロボットハンドの指関節に設置され、一応の効果が認められている張力差動形トルクセンサ [6, 7] (Tension Differential type Torque センサ:以下 TDT センサと略) をタイミングベルト用に改良した無限回転形の TDT センサを開発した。Fig.3 (a) (b) に構造とモデルをそれぞれ示す。

TDT センサは Fig.3(a) のように、タイミングベルトを挟み込む2つのテンションプリー、そしてテンションプリーを固定する固定板、その固定板を絶対系に固定する2枚の平行バネより構成される。この平行バネに歪みゲージを貼り、歪みセンサを構成する。

TDT センサの原理を Fig.3(b) に示すモデルを用いて説明する。駆動プリー両端に作用するタイミングベルトの張力 T_1, T_2 と、駆動プリーに生じるトルク τ との間に (1) 式の関係が成り立つ。

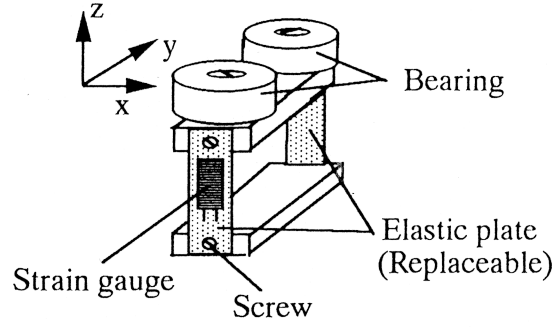
$$\tau = r(T_1 - T_2) \quad (1)$$

またこの張力 T_1, T_2 とテンションプリーに働く力 F_{y1}, F_{y2} との間には (2) 式の関係が成り立つ。

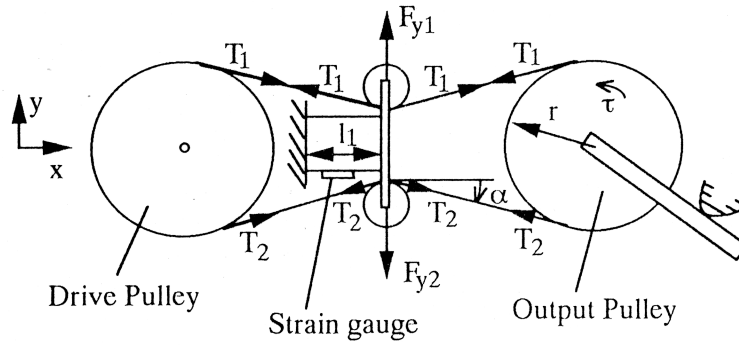
$$\begin{cases} F_{y1} = 2T_1 \sin \alpha \\ F_{y2} = 2T_2 \sin \alpha \end{cases} \quad (2)$$

この力 F_{y1} と F_{y2} により、歪センサには (3) 式で表される曲げモーメントが生じる。

$$M = k_1(F_{y1} - F_{y2}) \quad (3)$$



(a) Structure of TDT sensor



(b) Model of TDT sensor

Fig.3 TDT sensor

ここで、 k_1 はセンサの幾何学的形状に依存する定数である。以上の(1)~(3)式より(4)式が求まる。これより、歪ゲージ出力がトルクに比例することがわかる。

$$\begin{aligned} M &= k_2 \tau \\ k_2 &= \frac{2k_1}{r} \sin \alpha : \text{Constant} \end{aligned} \quad (4)$$

TDT センサは以上のように、プーリ両端のベルトの張力差 ($T_1 - T_2$) を測定することで負荷トルクを求めるため、オフセットが存在しないので初期張力に依存せず、そしてアクティブレンジを広くとることができる。更にその構造はテンションプーリも兼ねる(詳細については4.3.1章の実験結果および文献[6, 7, 8]を参照)。

実際に実験に使用した TDT センサの構造を説明する。テンションプーリには、外径 $\phi 22\text{mm}$ 内径 $\phi 7\text{mm}$ の JIS 単列深溝玉軸受 (627ZZ) をそのまま用いる。これを厚さ 2mm のスペーサで浮かせ、 $\phi 7\text{mm}$ のボルトで固定板にネジ止めする。平行バネには、 $32 \times 10\text{mm}$ 厚さ 0.5mm の真鍮板を使用する。真鍮板の枚数を変えることで、容易に TDT センサの剛性を変更することが可能である(詳しくは4.2.2章参照)。今回は左右2枚ずつ重ねて使用した。そして、左右の平行バネの外側に2枚ずつ、計4枚の歪みゲージ(東京測器研究所:FLA-1-11 $120 \pm 0.3\Omega$) を瞬間接着剤を用いて貼り付け、歪みセンサを構成する。

3.2 実験装置

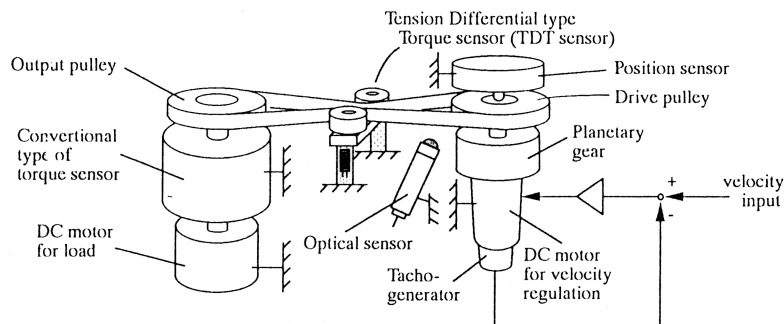


Fig.4 Experimental equipment

Fig.4が今回の実験システムの構成である。本実験システムは無限回転形の TDT センサを中心に配置した基本的なプーリ・ベルトシステムである。ベルトを介して駆動プーリ、出力プーリ(共に 44 歯 ϕ 40mm)が駆動される。

駆動プーリの接続された駆動軸には、速度制御 DC サーボモータが接続され、パーソナルコンピュータ (EPSON:PC386VR) より D/A コンバータ (CONTEC:DA12-16(98)) を介して出力される速度指令に従って動作する。また、出力プーリの接続される従動軸には、負荷として DC モータが接続されている。センサ群は、駆動軸にポテンショメータ、従動軸に比較用の従来形動トルクセンサ (共和電業:TP-5KCE)、そして絶対系に TDT センサと光電スイッチ (KEYENCE:FS2-60) が設置されている。光電スイッチはベルトの原点をとるのに利用し、ベルトの回転位相とトルク変動の関係を得るのに主要な役割を果たす。

TDT センサおよび従来形動トルクセンサのセンサ出力は動歪み測定器 (共和電業:DPM-601A) で増幅、A/D 変換器 (CONTEC:AD12-16TA(98)) を用いて $\pm 5V$ のレンジを 12bit に量子化してパーソナルコンピュータに入力する。信号処理はこのパーソナルコンピュータ上でソフトウェアを用いて行う。

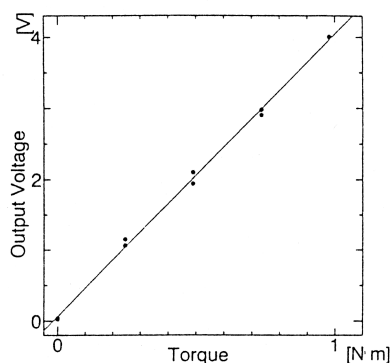
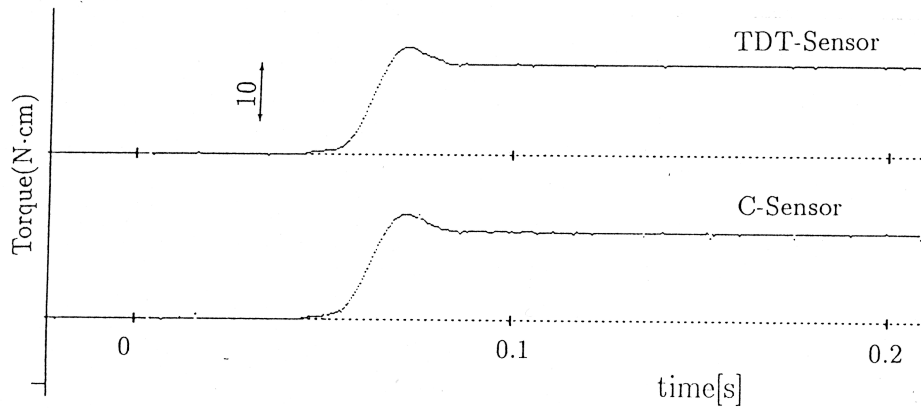
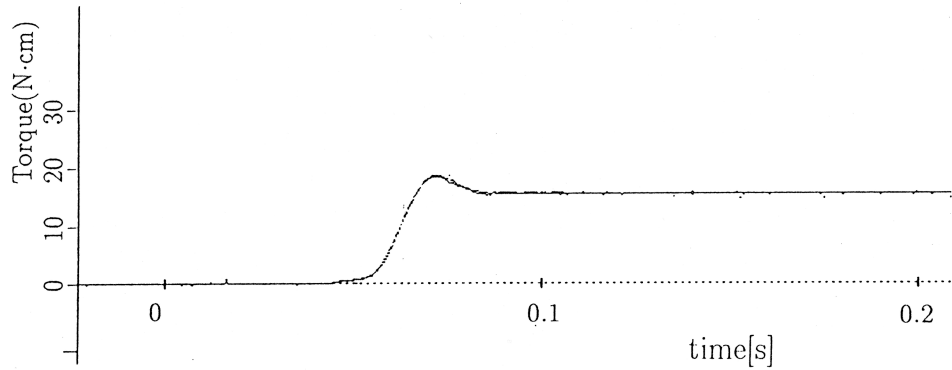


Fig.5 Static characteristic of TDT sensor

本実験装置を用いて得られた TDT センサの静特性を Fig.5に、動特性を Fig.6に示す。Fig.5の静特性は、速度制御 DC サーボモータの接続された駆動軸を機構的に回転できない



(a) Step responses of TDT sensor and Conventional sensor



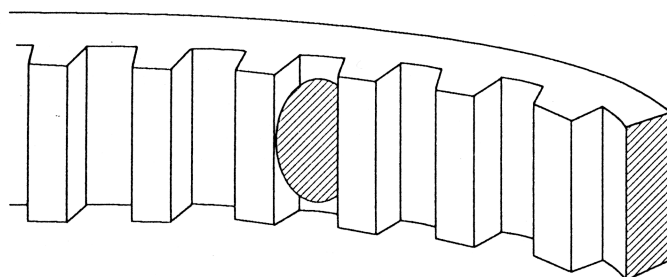
(b) Step responses of both sensor

Fig.6 Dynamic characteristic of TDT sensor

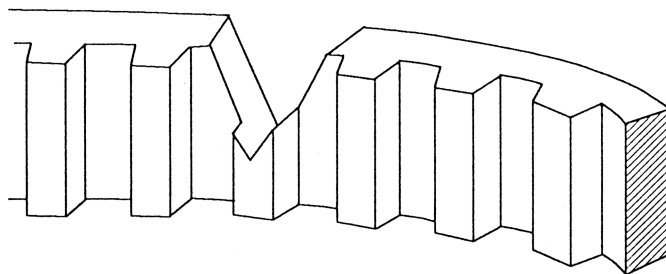
ように固定した状態で、出力プーリの接続された従動軸に静的に印加したトルクと、その時の TDT センサ出力の関係を求めたものである。Fig.6の動特性は、静特性と同様に駆動軸を機構的に固定した状態で、従動軸に接続した負荷としての DC モータをステップ状に励起した際の、(a)TDT センサ (上)、比較用に取り付けた従来形の動トルクセンサ (下) の出力波形、そして、(b) それぞれを比較した結果、である。この静特性/動特性の実験結果より、本 TDT センサは十分な線形性を持ち、かつ非常に小さなヒステリシスしか存在しないことが分かる。また、従来形の動トルクセンサと同等の動特性を持つことも分かる。

3.3 故障診断

3.3.1 ベルト故障要因の分類



(a) Timing belt with blinding at a tooth



(b) Timing belt with V-crack

Fig.7 Two types of abnormal timing belt

故障診断法の説明に入る前に、まずベルトの故障要因を分類し、その影響を考察する。ベルトの故障要因は、大きく2つ Fig.7(a)(b) のように分けられる。まず一つは、ベルトの歯側のみに異常が生じた場合、例えば目詰まりが生じて噛み合せ不良が生じたなどと、もう一つ、異常がベルトの背側にまで及んだ場合、例えば裂傷が生じたなど、である。

ベルトの目詰まりは、例えば外界から紛れ込んできた物体を噛み込んだり、自分自身の歯が折れて巻き込まれたりする状態である。これは結果的にプーリとの噛み合わせ不良を生ずる。この故障要因はベルト内側に発生するため、テンションプーリに異常部位が直接接触しない。しかし噛み合わせ不良時は、ベルト1回転中の2回の噛み合わせ開始・終了点、Fig.8 (a) (b) (c) (d) の計4ヶ所で、ベルトの経路長変化による矢印向きの力がテンションプーリに働くと考えられる。そしてもう一方の裂傷は、もっとも未然に防ぐべき故障であるベルト切断の成長段階である。ベルト側面よりV字形の切れ込みが成長して行き、最後には破断する。この故障要因はベルト側面に発生するため、テンションプーリに異常部位が直接接触する。異常部位は、ベルト1回転中に2回、Fig.9 (a) (b) の位置でテンションプーリに接触し、振動を引き起こす。以上の理由より、目詰まりによる噛み合わせ不良時

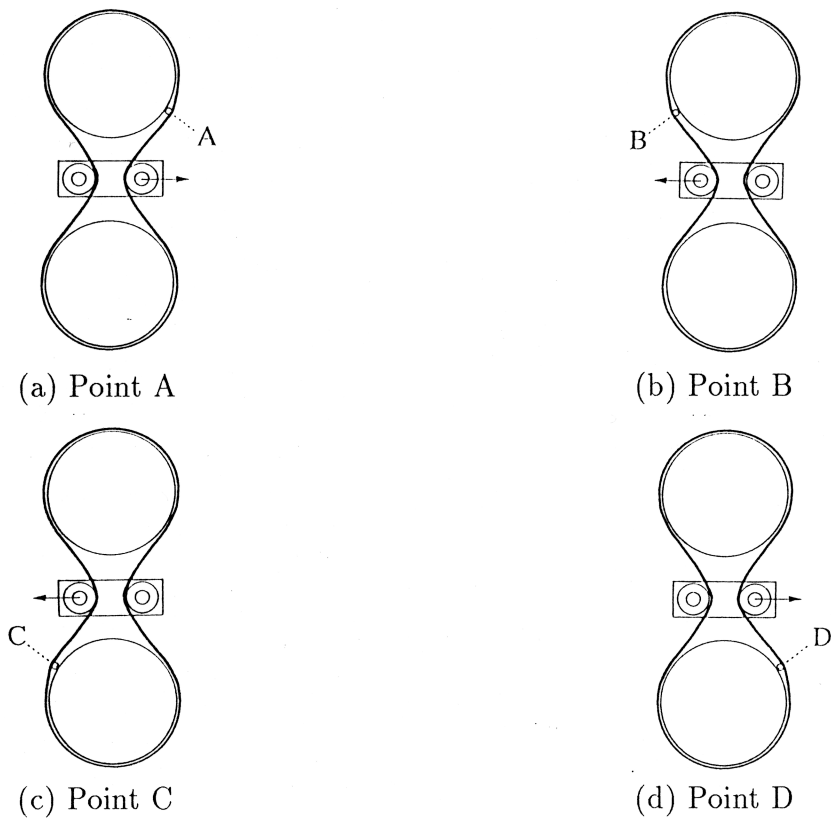


Fig.8 Four different phases for the timing belt with blinding at a tooth

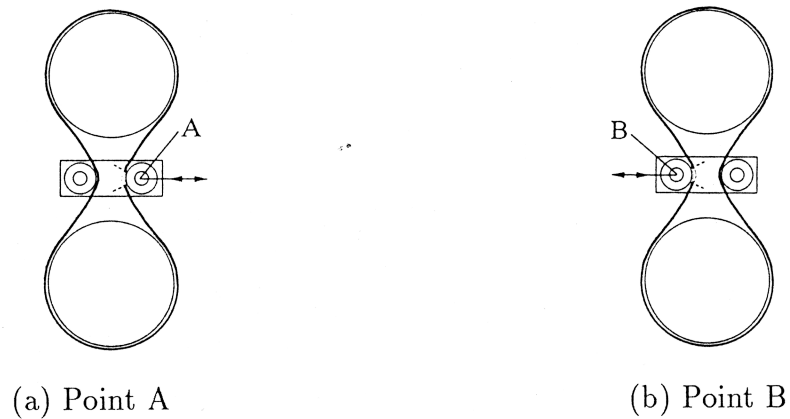
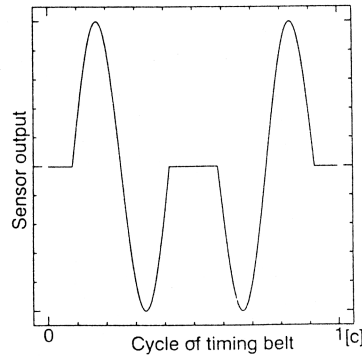


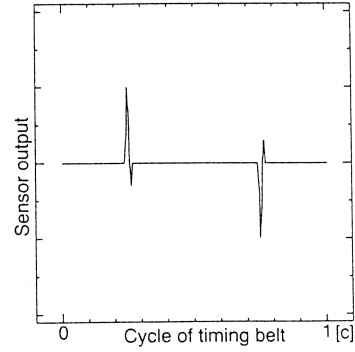
Fig.9 Sensor hitting points for the timing belt with V-crack

は Fig.10 (a) のような、そして V 字切り込み発生時は (b) のような波形が得られると考えられる。

次章では、これらベルト故障要因の考察に基づき、故障診断法の説明を行なう。ここでは実際に 3.2 章で説明した実験装置を用いて記録したデータを示しながら説明する。実験に使用したベルトは 109 歯 327mm、プーリは 44 歯 $\phi 40\text{mm}$ である。正常なベルトと歯間に異物が挟まった (噛み合わせ不良) ベルトと V 字切り込みを入れた (裂傷) ベルトの 3 本を用



(a) Timing belt with blinding at a tooth



(b) Timing belt with V-clack

Fig.10 Supposed fluctuation signal

意して実験を行った。

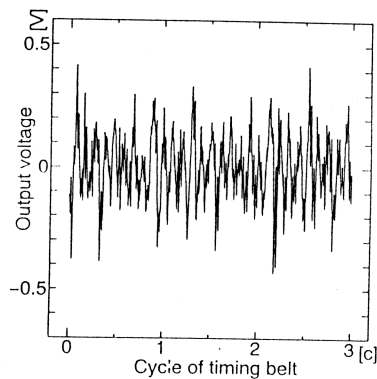
今回我々が提案するベルトの故障診断法は、大きく、

- (1) 正常状態と故障状態の判定
- (2) 故障原因の判定

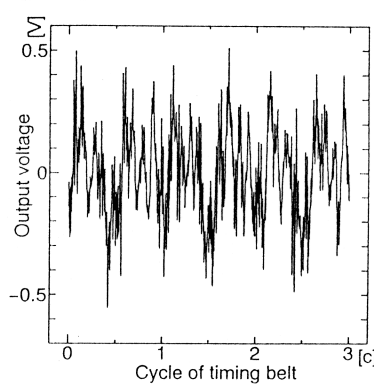
の2段階に分けられる。(1)で故障ありと判断され、かつ(2)で故障原因が目詰まり、もしくはV字切り込みの発生であると判定されて、はじめてベルトが故障を起こしていると断定する。

3.3.2 正常状態と故障状態の判定

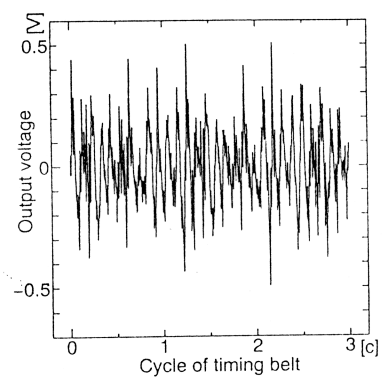
まずは、正確なベルト周期の波形を得ることである。ここでは余裕を見込んでベルト1周期単位だけではなく3周期単位で記録する。ベルトの1回転の開始と終了は光センサなどで検出することができるが、その応答性によっては前後の信号を取りこぼすことが考えられるためである。また、観測されたトルク変動が突発的なものではなく、周期的であることを確認する意味もある。



(a) Normal timing belt



(b) Timing belt with blinding at a tooth



(c) Timing belt with V-crack

Fig.11 Source data

一定負荷状態での波形をとれば、異常がない限り一定波形となり、正常信号と異常信号を区別しやすい。ところが実際には、変動する負荷状態で測定しているものとして異常検出法を確立しないと一般性が失われてしまう。実働トルクを測定している場合、どうしても負荷変動が記録波形に重畳する。Fig.11(a)(b)(c) は、それぞれベルト 3 回転分のセンサ信号生波形である。データ点数は 3072 点、ベルトの回転数は 70rpm である。(a) が正常時の生波形、(b) が目詰まりによる噛み合わせ不良時の生波形、(c) が V 字切り込みによる裂傷時の生波形である。このように、負荷変動が重畳した波形から故障要因を判別することは、非常に困難である。この負荷変動を取り除いて、周期的に現れる変動成分のみを抽出するために、本故障診断法では加算平均法¹を用いる。

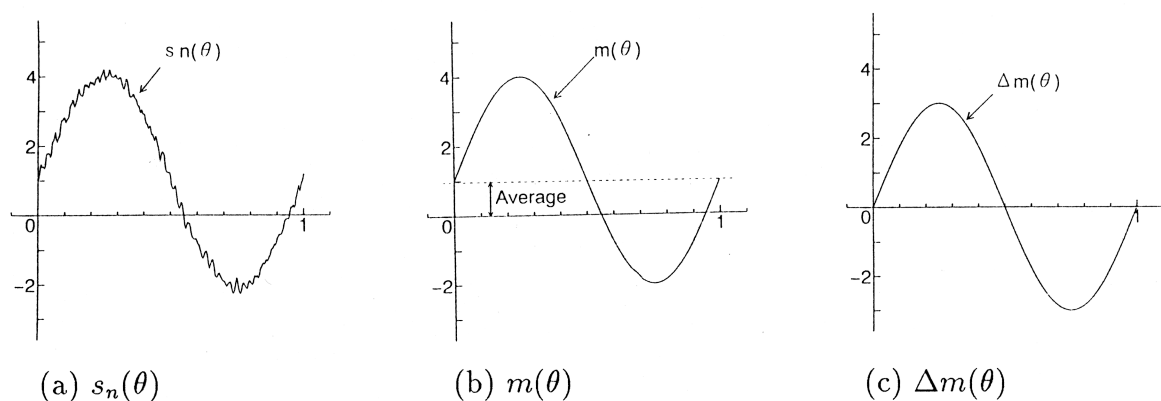


Fig.12 Averaging

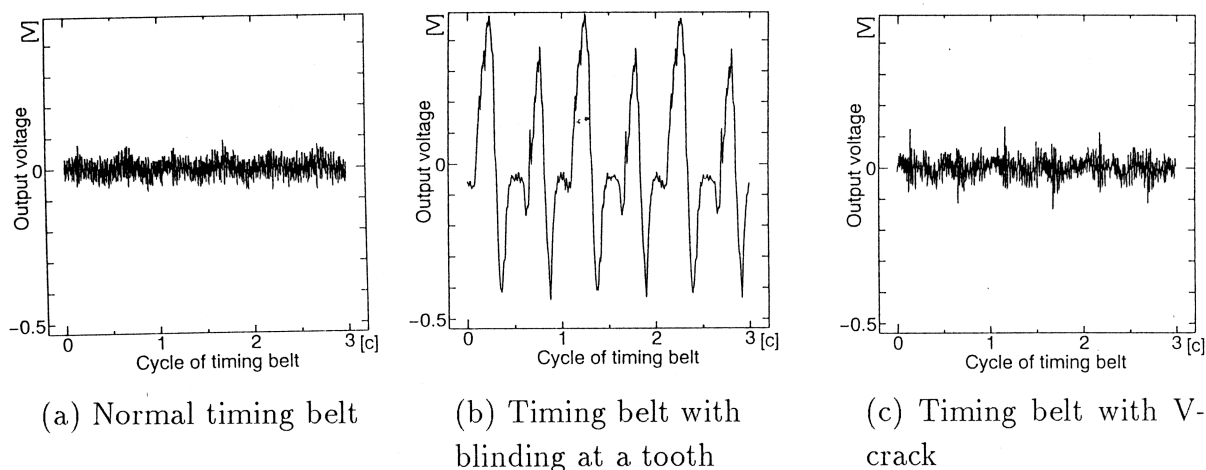


Fig.13 $\Delta m(\theta)$

加算平均法とは、例えば Fig.12(a) のような繰返し波形にそれぞれノイズが重畳した M 個の波形、 $s_1(\theta), s_2(\theta), s_3(\theta), \dots, s_M(\theta)$ に対して、(5) 式の演算を行うことで (b) のように周期依存性のないノイズを圧縮する一般的な手法である。さらに (6) 式より得られる (c) の

¹同期加算法、平均応答法とも言う

ような、加算平均された波形 $m(\theta)$ の平均値 *Average* からの偏差 $\Delta m(\theta)$ を本論文では特徴波形と呼ぶ。

$$m(\theta) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M s_i(\theta) \quad (0 \leq \theta \leq 2\pi) \quad (5)$$

$$\Delta m(\theta) = m(\theta) - \text{Average} \quad (6)$$

$$\text{Average} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} m(\theta)$$

Fig.13は、それぞれベルト 3 回転分の生波形 50 回分を加算平均して得た特徴波形である。(a) が正常時の特徴波形、(b) が目詰まりによる噛み合わせ不良時の特徴波形、(c) が V 字切り込みの裂傷時の特徴波形である。ここで、(b) の目詰まりの波形は先に予測した波形と異なるが、この理由については 4.1 章で考察する。

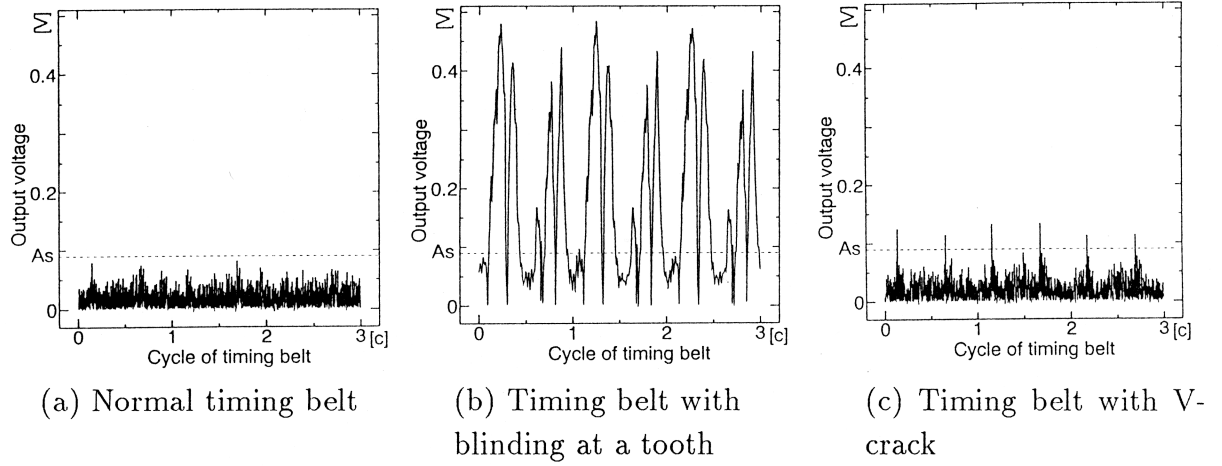


Fig.14 $\Delta M(\theta)$

つぎは、変動成分の特徴的な凹凸を強調するための正規化処理である。先に求めた特徴波形 $\Delta m(\theta)$ に (7) 式の絶対値処理を施して負側の成分を正側へ折り返し、絶対値波形 $\Delta M(\theta)$ を求める。この処理により、ベルトの位相と変動の大きさの関係が求まる。

$$\Delta M(\theta) = \begin{cases} \Delta m(\theta) & , \text{ if } \Delta m(\theta) \geq 0 \\ -\Delta m(\theta) & , \text{ if } \Delta m(\theta) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

先の加算平均された波形に絶対値処理を施した結果が、それぞれ Fig.14 の (a) (b) (c) である。

ここで経験値 A_s を定義 1 のように定義する。

[定義] 1 (経験値 A_s)

A_s は変動成分とノイズを区別するための絶対値である。 A_s を越えない変動はノイズと解釈する。 A_s は、正常なベルトで得られる絶対値波形 $\Delta M(\theta)$ の最大値 A_{max} より大きな絶対値である。

この絶対値 A_s を変えることで、本故障診断法の正常/故障判定の感度が変わえられる。正常な状態では、ほとんど A_s を越えることがないのに対し、故障が進むにつれて一周期に対する A_s を越える位相の総和の割合が大きくなる。これがある割合に達した時に故障と判定する。その割合は経験的な値であり、作業条件やベルト駆動系の構成によって変化する値である。もし故障の可能性ありと判定された場合は以下の故障原因判定処理を行う。正常と判定された場合は、新しい特徴波形 $\Delta m(\theta)$ の採取からやり直す。

3.3.3 故障原因の判定

ベルトに異常が生じた場合、毎周回のほぼ同位相に変動波形が重畳するはずである。この変動現象を定性的に扱うために、先の正規化された波形にシュミットトリガをかけて On/Off の 2 値化する。ここで言うシュミットトリガは、電子回路で用いられているのと同じ原理である。

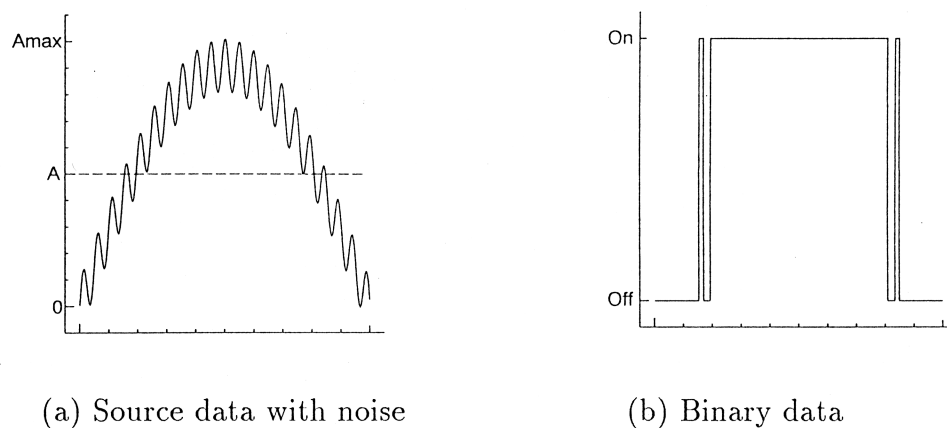
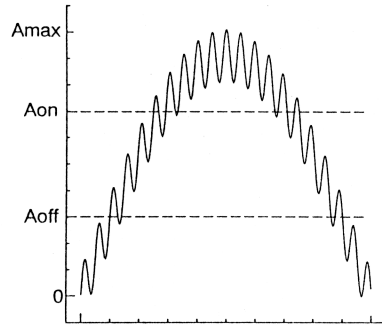


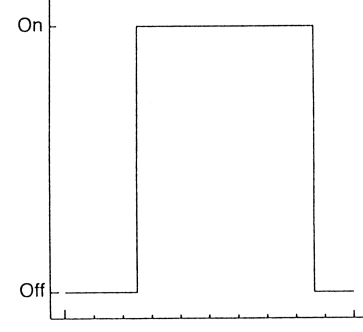
Fig.15 Chattering

例えば、Fig.15(a) のようにノイズの乗った波形を On/Off に 2 値化する場合に、ある値 A より大きければ On、小さければ Off という規則を用いると、(b) のように境界値 A 近辺でチャタリングを起こすことが考えられるためである。それに対して、Off から On になるには A_{on} より大きくならねばならず、On から Off になるには A_{off} より小さくならねばならないという規則を用いる。例えば先と同じように、Fig.16(a) のような波形を与えられても、(b) のようにチャタリングを起こすことなく 2 値化できる。

このシュミットトリガのしきい値をどのように選定するかは、汎用的な異常検出法を確立する上で重要である。一般的に、絶対的な振幅値 A_{on} , A_{off} をしきい値とする方法や、そのときどきの波形の最大振幅 A_{max} に対する割合 α_{on} , α_{off} をしきい値とする方法などがよく用いられる。特徴的な変動成分の振幅が回転数に依存すると考えられるので、しきい値を絶対的な値で指定すると回転数に対するロバスト性が低くなる。一方、最大振幅に対する割合だけを採用した場合、微小ノイズの影響を受け易い。本手法では、回転数に対するロバスト性を高めるために最大振幅に対する割合をしきい値に用いる。ただし、経験的に分かる経験値 A_s を越えないうちは常に Off とすることで、ノイズと特徴的な変動成分との差別化を図っている。



(a) Source data with noise



(b) Binary data

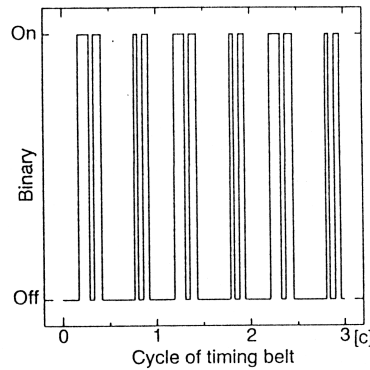
Fig.16 Schmidt trigger

以上のシュミットトリガの規則を具体的に説明する。得られた絶対値波形 $\Delta M(\theta)$ の最大振幅を A_{max} とすると、2値化状態値は、 $A_{max} \times \alpha_{on}$ を越えて Off から On へ、 $A_{max} \times \alpha_{off}$ を切って On から Off へと遷移する。ただし経験値 A_s を越えない間は常に Off である。ここで、しきい値 $\alpha_{on}, \alpha_{off}$ は0~1 かつ $\alpha_{off} \leq \alpha_{on}$ の任意の値である。先の絶対値処理波形 $\Delta M(\theta)$ に(8)式の2値化処理を施した波形 $B(\theta)$ が、それぞれ Fig.17の (a) (b) (c) である。ただし、この処理のヒステリシス特性は (a) (b) (c) ともに、 $\alpha_{on} = 0.7, \alpha_{off} = 0.3$ である。

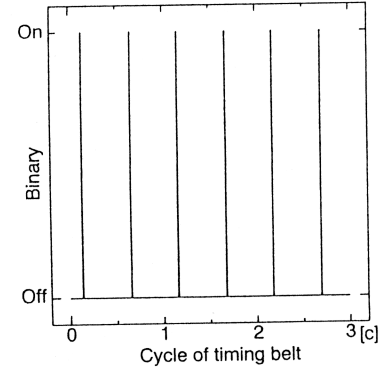
$$B(\theta) = \begin{cases} Off \rightarrow On, & \text{if } \Delta M(\theta) > A_{on} \text{ and } \Delta M(\theta) > A_s \\ On \rightarrow Off, & \text{if } \Delta M(\theta) < A_{off} \text{ or } \Delta M(\theta) \leq A_s \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} A_{on} &= A_{max} \times \alpha_{on} \\ A_{off} &= A_{max} \times \alpha_{off} \end{aligned}$$

目詰まりの場合は1周期に4回、V字切り込みの場合は1周期に2回の規則的なパルスが記録されるのが特徴である。



(a) Timing belt with blinding at a tooth



(b) Timing belt with V-crack

Fig.17 $B(\theta)$

シュミットトリガのしきい値 $\alpha_{on}, \alpha_{off}$ は環境に左右される値であり、一意に値を決めることができない。本手法では、 $\alpha_{on}, \alpha_{off}$ を規則的に変化させることで、逆にノイズや環境の変化に対するロバスト性を高める、しきい値調整法を考案した。まず α_{on} を変化させる範

図を考える。絶対値波形 $\Delta M(\theta)$ のピークの高さは各周期毎、加算平均毎に変動する。例えば、V字切り込み発生時の変動成分は継続位相幅が狭い上にS/N比が低いため、加算平均を行うたびに大きさが変動する。また、ノイズが偶然に A_s を越えてしまうことも考えられる。そこでノイズより大きく、全ての意味ある変動成分の頂点よりも小さくなるしきい値 α_{on} を探すために、 α_{on} を1から0の範囲で変化させる。ただし、 $A_{max} \times \alpha_{on}$ が A_s より小さくなるような α_{on} や、 $\alpha_{on} = 1$ は無意味である。次に α_{off} を変化させる範囲について考える。故障に起因する特徴的な変動は振動であることが多い。つまり、異常現象の発生する位相近辺で0を中心に正/負に振動する。このような波形に絶対値処理を施すと、異常現象の発生位相近辺で $\Delta M(\theta)$ が0になる公算が高い。それに対し、変動が正もしくは負に偏っている波形の絶対値波形 $\Delta M(\theta)$ では、定常状態で振幅が0に戻らないことも考えられる。従って、 α_{off} は初期値0から α_{on} まで変化させる必要がある。

最後に、このしきい値調整法を利用した故障原因判定法を具体的に説明する。 α_{on} を1から一定量下げるたびに α_{off} を0から α_{on} まで変化させる。そしてまた α_{on} を一定量下げ、これを $A_{max} \times \alpha_{on}$ が A_s より大きい間は繰り返す。その各 $\alpha_{on}, \alpha_{off}$ の組み合わせより得られる2値化波形 $B(\theta)$ のうち、以下の2つの故障原因判定規則を満たす組み合わせが存在したとき、故障原因を断定できる。一つ目の規則は、パルス数と故障原因の関係に基づいた規則である。

[故障原因判定規則] 1 (故障原因とパルス数の関係)

1. 故障原因と1周期中のパルス数 Φ の間に以下の関係がある。

目詰まりによる噛み合わせ不良 $\leftrightarrow \Phi = 4$

V字切り込みなどの裂傷 $\leftrightarrow \Phi = 2$

2. サンプリングした全周期 (今回は3周期) において 1. が成り立つ。

そしてもう一方の規則は、そのパルスの出現が周期的であることを確かめるための規則である。ノイズや負荷変動の影響により偶然に発生するパルスは周期的でないのに対し、故障によって発生するパルスは毎周回のほぼ同じ位相に現れるはずである。本規則は、各周回のパルス出現位相が、規定の範囲内にあるか否かを調べる規則である。一度に採取する波形を3周期分とした場合に、1周期目のパルス列と2周期目のパルス列、1周期目のパルス列と3周期目のパルス列とを比較・評価している。

[故障原因判定規則] 2 (パルス出現の周期性)

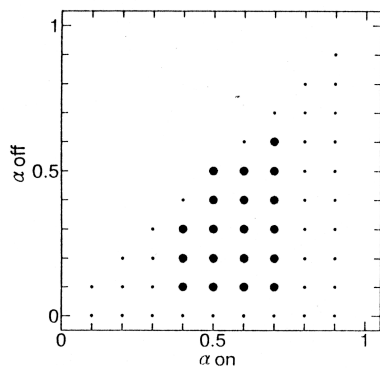
許される誤差を $\pm\epsilon$ としたとき、パルス $P_{i,j}$ が

$$P_{1,j} - \epsilon \leq P_{i,j} \leq P_{1,j} + \epsilon \quad (i \in \{2, 3\}, j \in \{1, \dots, \Phi\})$$

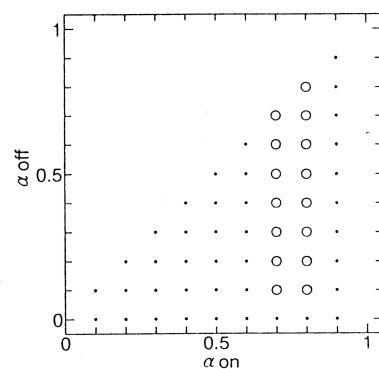
の関係を満たすならば、規則 1により仮定した故障原因が生じていると断定する。ここで $\epsilon \simeq 0$ の微小値である。 $P_{i,j}$ は、 i 周期目の波形の j 番目のパルスが立ち上がる位相($0 \sim 2\pi$)を表す。

実際にこの故障原因判定処理を目詰まりしたベルト、およびV字切り込みの発生したベルトの絶対値波形 $\Delta M(\theta)$ に対して行い、求めたしきい値レベルマップがFig.18 (a) (b)である。しきい値 $\alpha_{on}, \alpha_{off}$ の変化量は0.1ずつ、 α_{on} は初期値0.9から0.1まで、そして各 α_{on} に

対して α_{off} を初期値0から α_{on} まで変化させた。規則1を満たし、 $\Phi = 4$ の場合は●、 $\Phi = 2$ の場合は○、規則1を満たさなかった場合は・である。また、目詰まりしたベルトの●になる2値化波形より逆算した ϵ が $(0.0410 \sim 0.0439) \times 2\pi$ 、V字切り込みの発生したベルトの○になる2値化波形より逆算した ϵ が $(0.0391 \sim 0.0400) \times 2\pi$ であるので、 ϵ は $0.05 \times 2\pi$ 程度で良いと思われる。



(a) Timing belt with blinding at a tooth



(b) Timing belt with V-crack

Fig.18 Threshold-level-map

このようにパルスの数と、その周期性を考慮に入れることで、ノイズや2値化処理のしきい値 $\alpha_{on}, \alpha_{off}$ の値が不適當であった場合の誤認識を抑えることができる。

4 考察

4.1 噛み合わせ不良時の挙動について

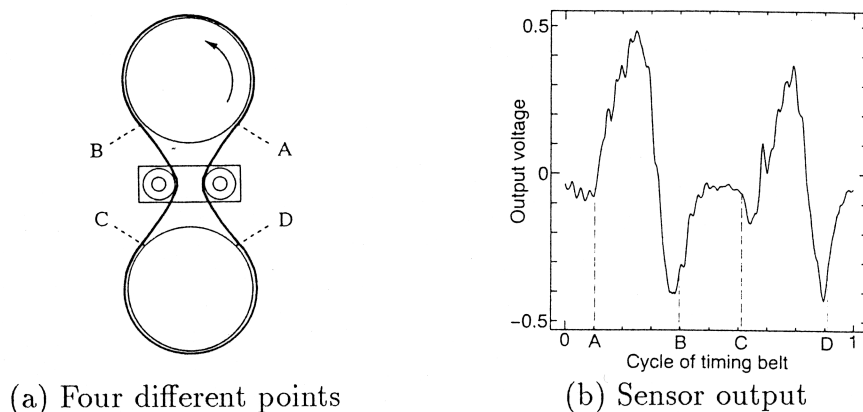


Fig.19 Behavior during 1 cycle of timing belt with blinding at a tooth

Fig.10 (a) と Fig.13 (b) から分かるように、噛み合わせ不良のベルトを使用した場合の出力波形は、予想した波形と異なってしまった。はじめにこの原因について考察する。Fig.19 (a) (b) は、噛み合わせ不良時のプーリとベルトの噛み合わせ不良点の位置関係、およびセンサ波形 1 周期分である。先の予想は、目詰まりした部位とプーリの歯が噛み合う際の経路長変化によって TDT センサに生じるモーメントの変動現象が支配的であると考えてのものであった。予想通りならば、Fig.10 (a) のように 1 周期中で正トルク→負トルク→負トルク→正トルクと変動するはずが、得られた波形は正トルク→負トルク→正トルク→負トルクと繰り返す。つまり実際には経路長変化による影響よりも、ずっと大きい何か別の影響が現れている。この原因はサーボ系の特性を考慮することで、比較的うまく説明できる。ここでは、サーボ系の特性、経路長変化がトルクセンサ出力に及ぼす影響についてそれぞれ独立に考察してみよう。

はじめに、サーボ系の特性の影響について調べてみる。例えば、Fig.19 (a) の A 点の位置に噛み合わせ不良部が来た場合、DC サーボモータは一瞬回り難くなる。サーボ系は速度制御形であるため、回転速度が落ちようとする、サーボ回路は大きな正電圧を DC サーボモータに加える。このとき、出力軸に大きな正のトルクが生じ、これが Fig.19 (b) の A 点を少し過ぎたあたりの正トルクとなって観察される。一方、DC サーボモータが正トルクを発生し続けると、やがて負荷を含めた回転系を加速するようになり、今度は回転速度が上がろうとする。このため、サーボ回路は回転速度を下げようとして負電圧を DC サーボモータに加え始め、これが正から負にトルクが急変する原因となる。ただし、噛み合わせ不良部が B 点に近付くと、再び回り難くなるため、サーボ系はモータに再び正電圧を加え始める。負側のオーバーシュートが正側に比べて小さくなる理由はこのためであろう。次に、不良部位が C 点にくるまではさほど目だったトルク変動はない。不良部位が C 点にくると再び回り難くなり、トルクセンサ出力の挙動は A 点と同様に説明できる。また不良部位が D 点にきた場合は B 点と同様である。

次に、経路長がトルクセンサ出力に及ぼす影響について考察してみよう。この場合の影響は3.3.1章で考察した通りである。すなわちA点、D点で正側のトルクが発生し、B点、C点で負側のトルクが発生するはずである。Fig.19 (b)の実験結果においてこの効果が顕著に現れない理由は、先のサーボ系の特性に基づく影響の方がはるかに大きいためであろう。ただB点、D点での出力の違いはほとんど認識できないが、A点、C点の波形を比較してみると、A点、C点において、それぞれ正および負のトルクが重畳しているという見方もできる。以上が噛み合わせ不良時の挙動に対する定性的な説明である。

4.2 TDT センサ出力の周波数解析

TDT センサの出力信号波形を解析し、ベルト故障の兆候を捉えるために、大きく分けて2つのアプローチが考えられる。一つは、本論で行なっている時間領域での解析、そしてもう一つが、これより考察する周波数領域での解析である。周波数領域での解析を行うためには、リアルタイムに入力したTDT センサからのトルク変動を時間領域 $f(t)$ から周波数領域 $F(\tau)$ へと変換する必要がある。一般に、この変換をフーリエ変換と呼び、特にデジタル信号に対して行うとき、DFT(Discrete Fourier Transform:離散的フーリエ変換)と呼ぶ。このDFTを行う手法には様々なものが存在するが、その中でもCooleyとTukeyによって1965年に提案されたFFT(Fast Fourier Transform:高速フーリエ変換)は、最も高速で効率が良いため、広く一般的に用いられている。

FFTアナライザ(小野測器:CF-250)は、この時間領域から周波数領域へのフーリエ変換をハードウェア的に実現したものである。TDT センサからのトルク変動は、動歪み測定器(DPM-601A)によって電気信号に変換される。この電気信号をFFTアナライザに入力し、リアルタイム波形及びFFTパワースペクトル分布を求めることで、負荷トルクなどの重畳したTDT センサ生波形を解析してみよう。

TDT センサの信号波形には、

- 負荷固有の影響
- TDT センサ固有の影響
- ベルト固有の影響

による変動成分が線形に重畳していると考えられる。実験条件を適当に変えることにより得られる、それぞれのスペクトル分布の差異より、周波数領域での挙動が解析できる。ベルトの回転周期は、パワースペクトルの周波数とベルトの回転周波数との関係を等価にするために1秒(1Hz)とする。まず、負荷の変更は実験装置の従動軸に取り付けてあるDCモータによって行う。負荷あり(弱)、負荷あり(中)、負荷あり(強)、負荷なしの4つの状況を用意することで、負荷固有の影響が調べられる。また、TDT センサを構成する平行バネ(3.1章参照)の枚数を左右それぞれ1,2,3枚と変えることでセンサ剛性を変化させ、TDT センサ固有の影響が調べられる。そして、ベルトも本文中と同じく、正常なベルト、目詰まりを起こしたベルト、V字切り込みを入れたベルトの計3本を用意することで影響が調べられる。

4.2.1 負荷固有の影響

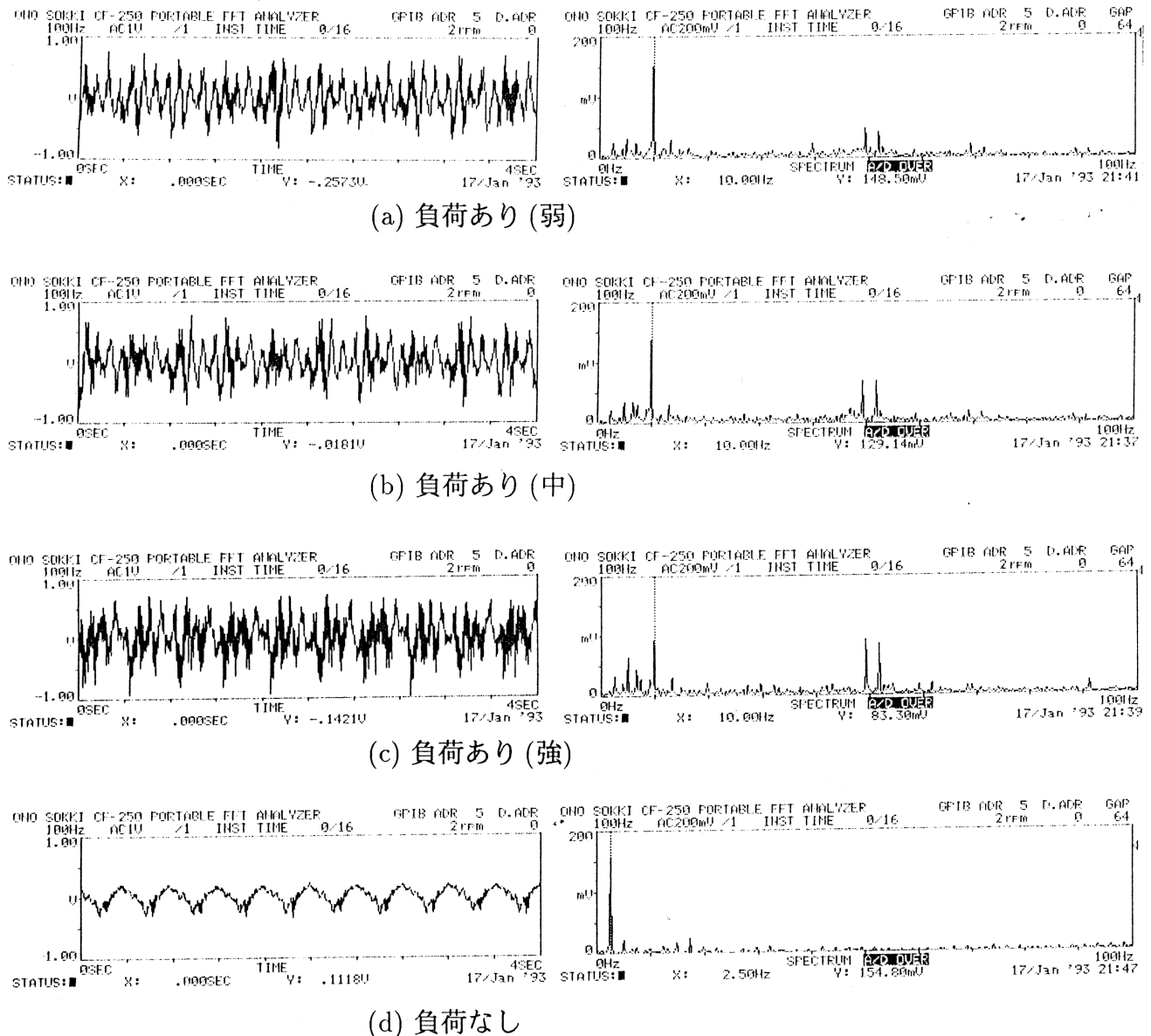
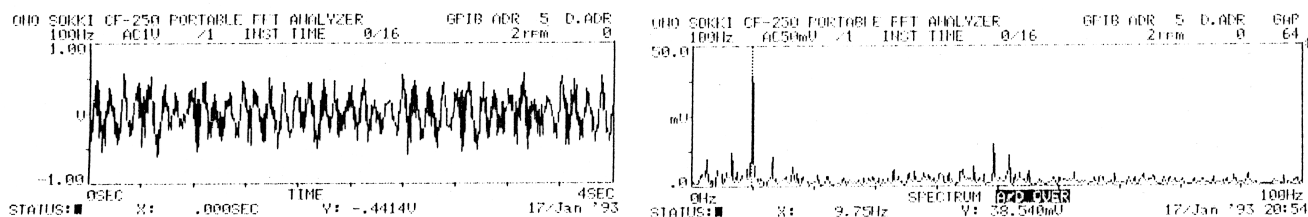
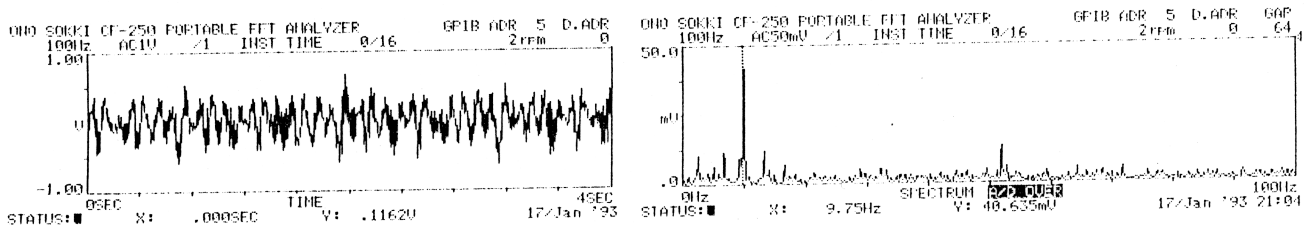


Fig.20 Real-time data / Spectrum data(Normal Timing belt)

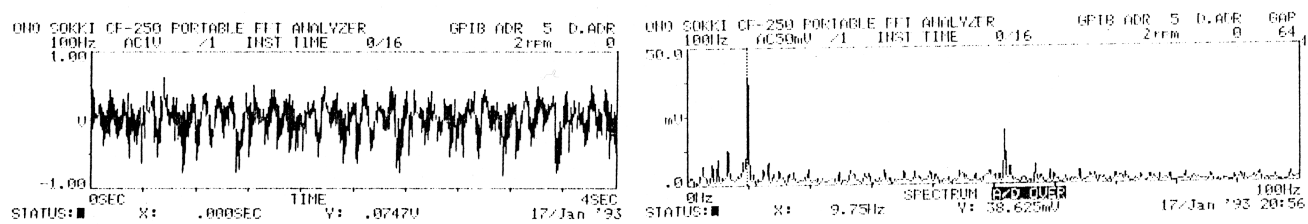
Fig.20は正常なベルトを、Fig.21は目詰まりの生じたベルトを、Fig.22はV字切り込みの生じたベルトを用いた場合の時系列波形およびパワースペクトルである。(a)は負荷あり(弱)、(b)は負荷あり(中)、(c)は負荷あり(強)、(d)は負荷なし、である。時系列データの横軸は時間、フルスケールで4秒、つまりベルト4周期分である。パワースペクトル分布の横軸は周波数、フルスケールで100Hzである。それぞれのベルトでの(a)-(c)と(d)とを比較して明かに分かるように、10Hzおよび50Hz近傍にあった支配的なスペクトルが負荷を取り外すことで無くなり、代わりに2.5Hz近傍のスペクトルが支配的になる。10Hzおよび50Hz近傍のスペクトルについて考察してみよう。ベルトは109歯、プーリは44歯、



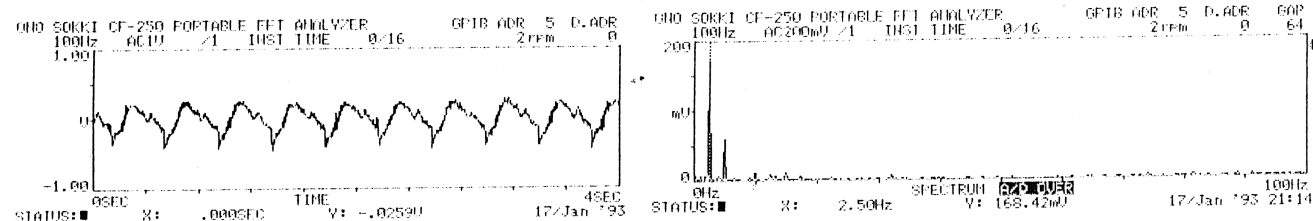
(a) 負荷あり (弱)



(b) 負荷あり (中)



(c) 負荷あり (強)



(d) 負荷なし

Fig.21 Real-time data / Spectrum data(Timing belt with blinding at a tooth)

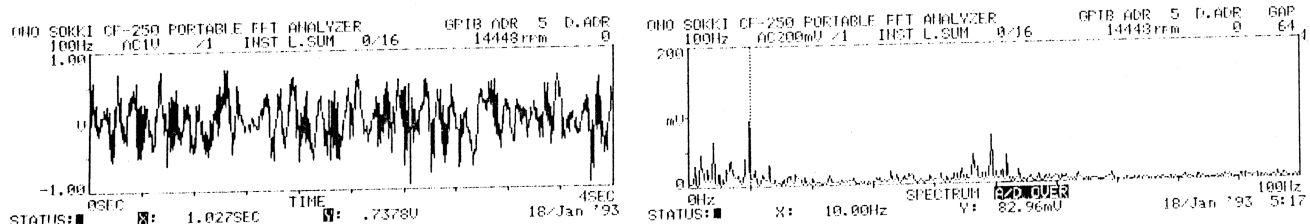
つまりタイミングベルトが1回転する間に、プーリは約2.5回転する。従動軸に負荷として取り付けられたDCモータは4つの極を持ち、21のスロットを持つ。つまり、

$$\frac{109}{44} \times 4 = 9.91[Hz]$$

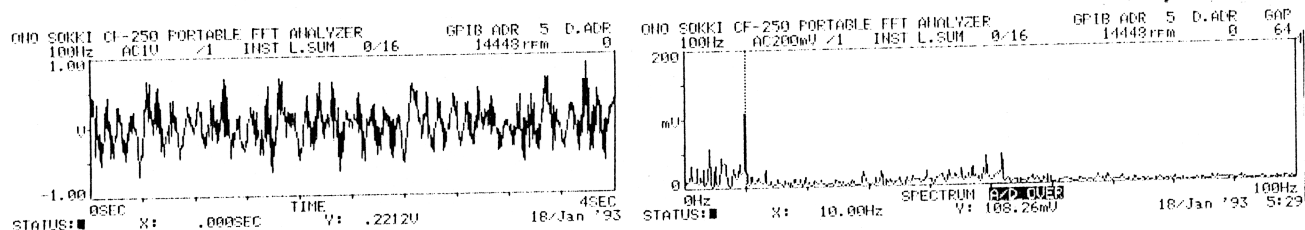
となり、これはほぼ10Hzに等しい。また、

$$\frac{109}{44} \times 21 = 52.0[Hz]$$

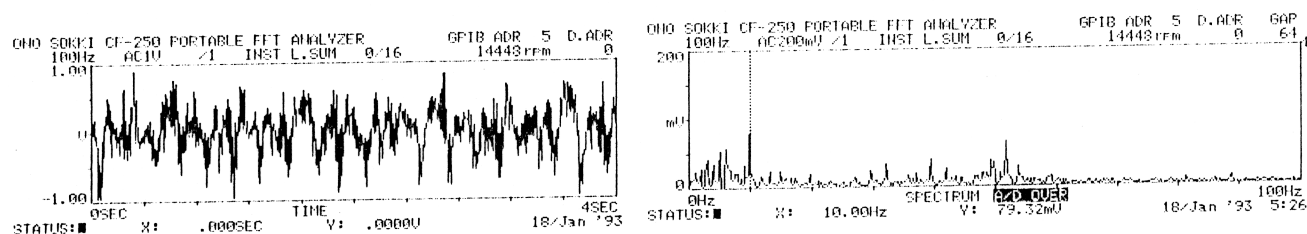
これもおよそ50Hzとなる。負荷のDCモータを取り外すことで消えることから、この10Hzおよび50Hz近傍のスペクトルが、負荷であるDCモータの影響であると考えられる。



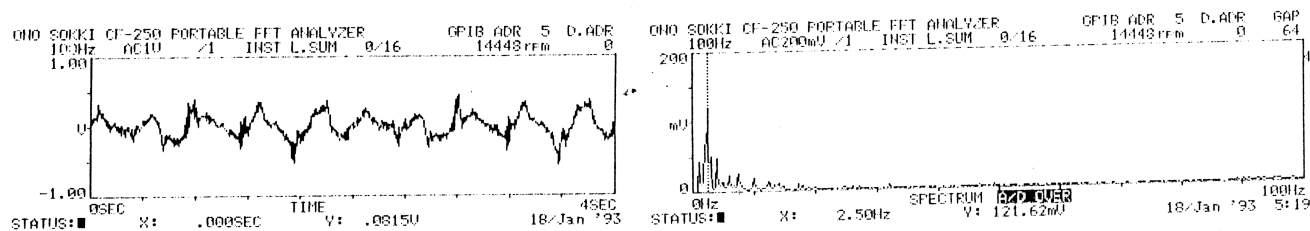
(a) 負荷あり (弱)



(b) 負荷あり (中)



(c) 負荷あり (強)



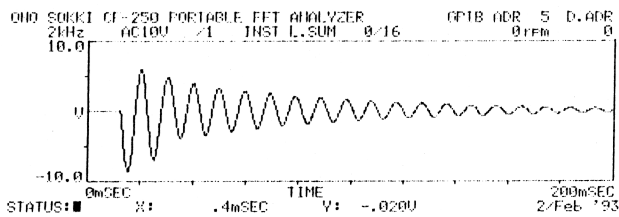
(d) 負荷なし

Fig.22 Real-time data / Spectrum data(Timing belt with V-crack)

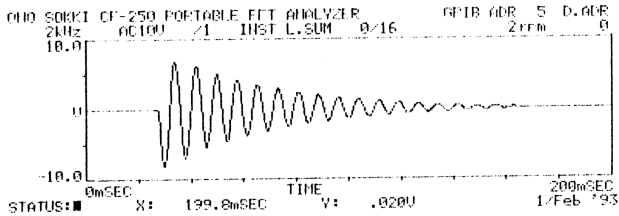
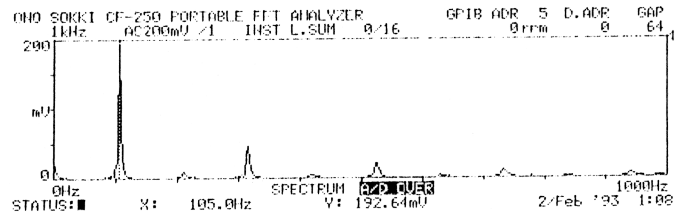
また、各 (d) 負荷なしでの支配的な成分は 2.5Hz で、これはプーリの回転周期とほぼ一致する。つまり、プーリの歪み、回転中心誤差など、負荷以外のプーリ周期の要因による変動も外乱として重畳しており、この変動も無視できないことが同時に分かる。

4.2.2 TDT センサ固有の影響

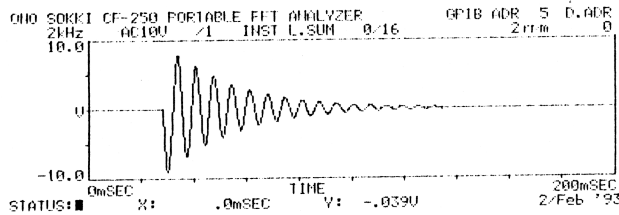
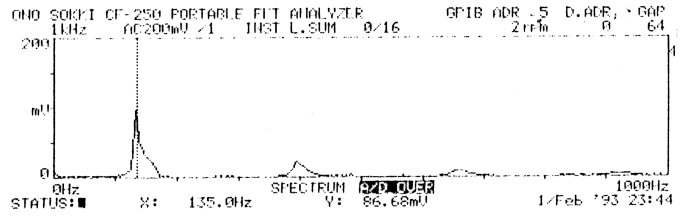
Fig.23は、TDT センサの剛性の変化と固有周波数の関係を示したものである。(a) は平行バネを左右 1 枚ずつ、(b) は 2 枚ずつ、(c) は 3 枚ずつにした時のセンサ波形 (左側) とパワースペクトル (右側) である。実験方法は、上記指定枚数のバネよりなる TDT センサを



(a) A pair of 1 spring



(b) A pair of 2 springs



(c) A pair of 3 springs

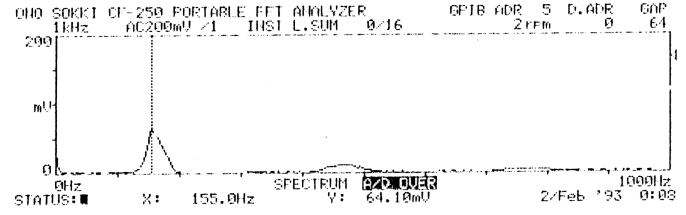
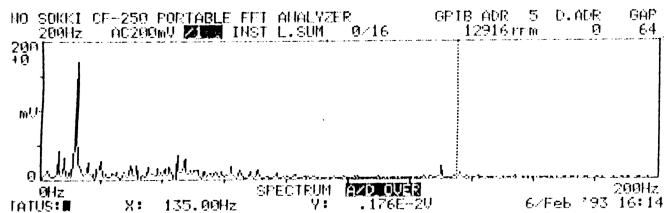


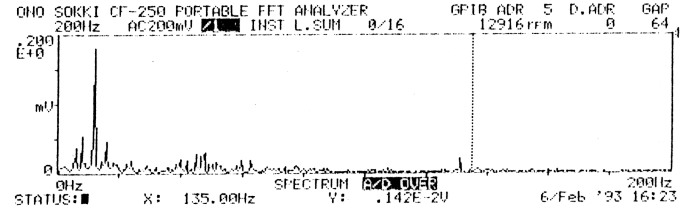
Fig.23 Natural frequency of TDT sensor

実験装置にセットした状態で、TDT センサをハンマーで軽く叩いた際の挙動を FFT アナライザによって記録したものである。この実験結果より、バネの枚数が1,2,3 枚と増すのに従って、固有振動数も 105,135,155Hz と増加していくのが分かる。

TDT センサーの固有周波数は、以上のようにおよそ 105 ~ 155Hz である。Fig.24は、正常なベルトと V 字切り込みの発生したベルトの 0 ~ 200Hz のパワースペクトルである。どちらにも 125Hz にピークが見られる。ベルトを回転中にセンサを軽くハンマーで叩くと、



(a) Normal timing belt



(b) Timing belt with V-crack

Fig.24 Effect of natural frequency

125Hz を中心にスペクトル分布が変化することからも、このピークが TDT センサの固有振動であると言える。

4.2.3 ベルト固有の影響

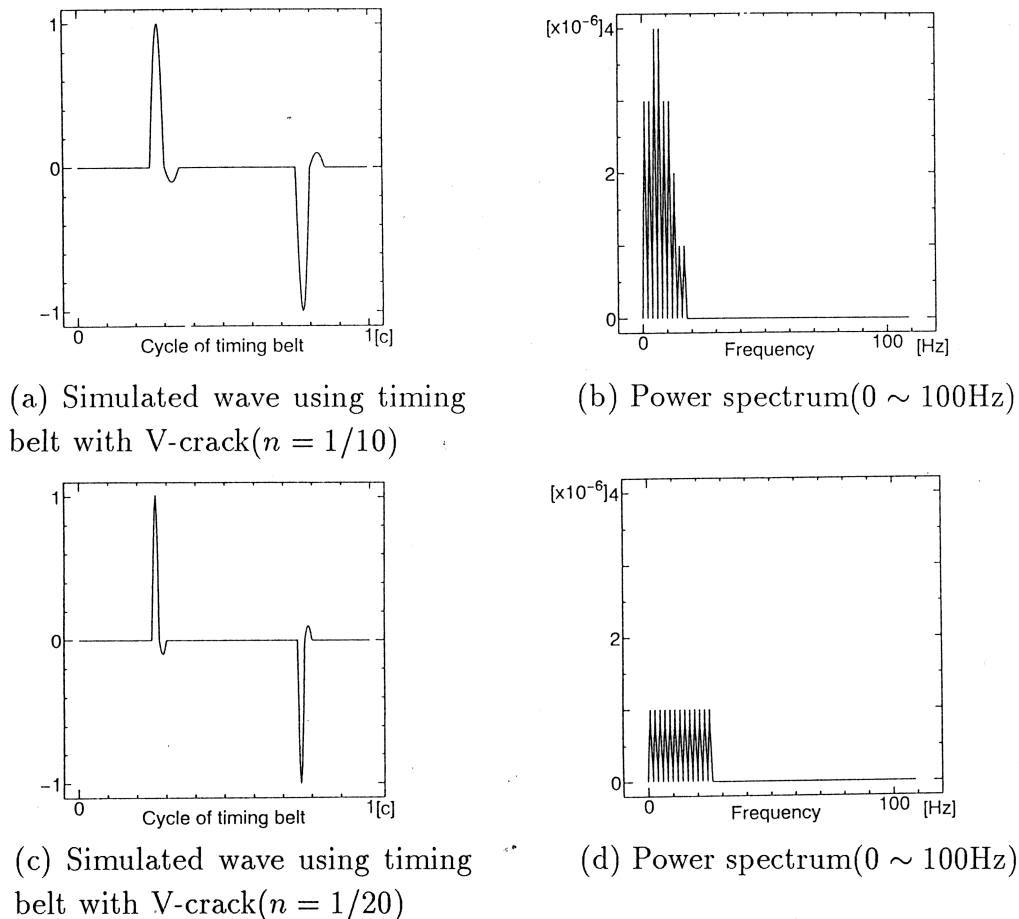


Fig.25 Effect of V-crack on power spectrum

2.5Hz, 10Hz, 50Hz, 125Hz 近傍のスペクトルのピークはこのように説明できた。それ以外のスペクトル成分がベルトの故障要因によるものとなるが、Fig.20, Fig.21, Fig.22のスペクトル分布の差異に基づくベルト故障要因の識別は、やはり困難である。この理由について、V字切り込みの発生したベルトによって生じる影響を例に考察してみよう。Fig.25(a)はV字切り込み発生時に発生すると思われる変動をパーソナルコンピュータ上で計算により作り出したものである。(b)はそのパワースペクトル分布(0 ~ 100Hz)である。この変動のパルス幅 n は、全周期を 1sec とするとそのおよそ $1/10$ 、 $n = 1/10\text{sec}$ である。さて、この変動のパルス幅 n の変化が、パワースペクトル分布にどのような影響を与えるのであろう。(c)は(a)のパルス幅 n を半分の $n = 1/20\text{sec}$ にした波形、そして(d)がそのパワースペクトル分布である。このようにパルス幅 n が $1/2$ になると、そのピーク値は $(1/2)^2$ 、つまり $1/4$ になる。本実験装置において、ベルトのV字切り込み部位とTDTセンサの接触によって生じるパルスの継続時間 n は、TDTセンサの固有振動に依存すると考えられる。

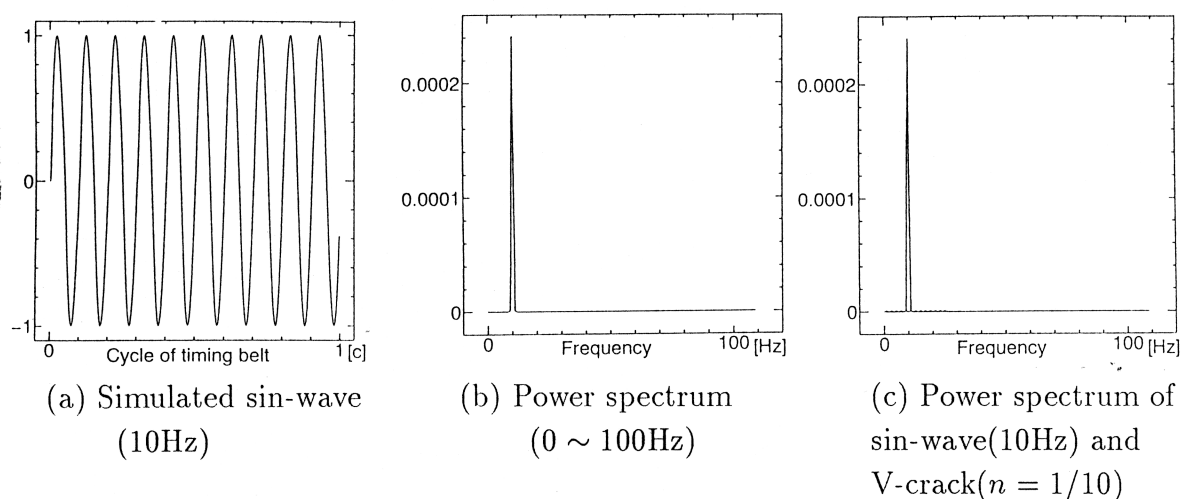


Fig.26 Effect of sin-wave(10Hz) on power spectrum

先の Fig.23 に示す固有振動の挙動を参考にして考えるに、TDT センサに対して V 字切り込みによる衝撃が加えられた場合、その継続時間 n は、

$$n = \frac{1}{135\text{Hz}} = 7.41\text{msec}$$

およそ $n = 1/120\text{sec}$ 、すなわち Fig.25(a) の $1/12$ 、となるであろう。よってそのピーク値は $(1/12)^2 = 1/144$ と、さらに小さくなるはずである。Fig.26(a) は 10Hz で繰り返す正弦波状の波形をシミュレートしたものである。(b) はそのパワースペクトル (0 ~ 100Hz) である。そして (c) は、(b) に先の Fig.25(a) のパワースペクトル (b) を合成したものである。非常に微小な変動が 0 ~ 30Hz に分布している。これが V 字切り込みの発生したベルトの影響である。Fig.25 と Fig.26 の縦軸はオーダーがおよそ 100 倍違う。実はこの 10Hz の正弦波状の変動は、負荷である DC モータの影響をシミュレートしたものである。それに対して、V 字切り込みの発生によって生じる変動が例え同じ振幅を持っていたとしても、その周波数領域でのオーダーは Fig.26(c) にあるように 100 倍異なるのである。以上の理由より、V 字切り込みの発生したベルトによるインパルス状の変動が、周期的に発生する負荷変動などに重畳したとして、その影響を周波数領域から読み取ることが如何に困難であるかが分かる。

4.3 ベルト系の故障診断における TDT センサの長所について

本故障診断法の利点をまとめと、

- (i) 簡単なセンシング機構、かつ安価に構成できる
- (ii) 高価な処理装置を要さない

が挙げられる。

(i) については、3.1 章で説明したように、TDT センサは非常に簡単な部品によってシンプルに構成されており、保守も容易である。さらに、その構成要素の一つである平行バネ

の枚数を変えることで、容易にセンサ剛性を変更可能である(4.2.2章参照)。また、その動作原理より、

- 張力差よりトルクを測定するため、初期張力に依存せず広いレンジを持つ
- センサが直にベルトに接し、その構造はテンションプーリも兼ねる

などの特徴が挙げられる。これらの2つの特徴について、実験結果に基づき考察する。また、テンションプーリ機構を兼用するトルクセンサである TDT センサは、計測と診断の2つの役をこなせる点も重要である。

(ii) については、従来の故障診断が、スペクトル解析をリアルタイムに高速度の FFT アナライザ等を用いてオンラインで解析を行うのに対し、本手法では光センサ等を用いて分離したベルト周期の信号波形を間欠的に採取し、時間領域で処理することによる違いである。本故障診断を行なうのに実際に必要なシステムは、TDT センサのセンサ出力を入力する1チャンネルの A/D 変換器と、光センサのトリガを入力する1チャンネルのデジタルインプットと、例えば $3072 (= 1024 \text{ 点} \times 3 \text{ 周期})$ 点の特徴波形を得るために、加算平均用のバッファ $12\text{KB} (= 3072 \times 4\text{byte})$ を含め、およそ 18KB 程度、多くて 64KB 以下の RAM 容量を持つマイクロコンピュータシステムで充分であろう。

4.3.1 張力差よりトルクを測定する利点

ベルトにかかる張力 T_1, T_2 より軸にかかるトルク τ が求まることは、3.1章の TDT センサの原理で導かれている。3.1章で提案した Fig.2の機構を用いることでベルトの張力 T_1, T_2 を個別に測定可能である。しかし、同時に不都合が存在することも同章中にて述べている。それに対して張力差を測定する本 TDT センサの長所を実験データを用いて提示する。

Table.1 Comparison of offset voltage

Weight(kgf)	Tension sensor(V)	TDTsensor(V)
0.5	0.00	0.00
1.5	2.16	-0.28
2.5	4.67	0.52

TDT センサの構造は3.1章の Fig.3(a)にある通りである。この2つのテンションプーリのうち1つを取り去ると、張力差ではなく、張力を測定する張力センサにもなる。3.2章で説明した実験装置を用いて、このプーリを2つ付けた TDT センサ、プーリを1つ付けた張力センサの二つの状態で動トルクを測定し、比較した結果が、Fig.27である。負荷は共に従動軸に取り付けられた同一の DC モータである。(a)-1,2 は初期張力を 0.5kg 、(b)-1,2 は 1.5kg 、(c)-1,2 は 2.5kg とした時の張力センサと TDT センサのセンサ生波形である。各センサ出力のオフセットは Table.1の通りである。

Fig.27より、ベルトの初期張力が増減するのに応じて張力センサ出力 ((a)-1,(b)-1,(c)-1) のゲインが増減するのに対し、TDT センサ出力 ((a)-2,(b)-2,(c)-2) はベルトの初期張力に依存しないことが分かる。また、Table.1より明かなように、張力センサのオフセットが印加される初期張力と共に増加するのに対し、TDT センサのオフセットは0を基準にほぼ変

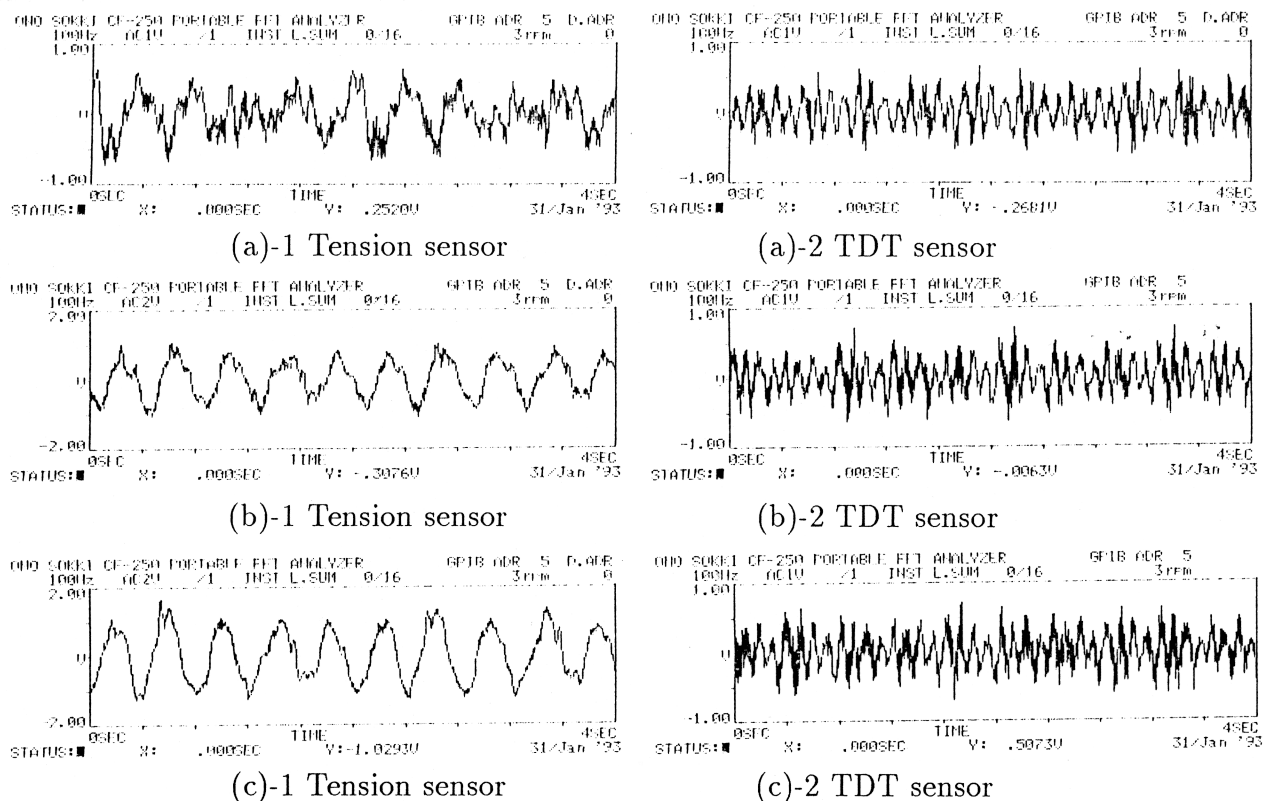
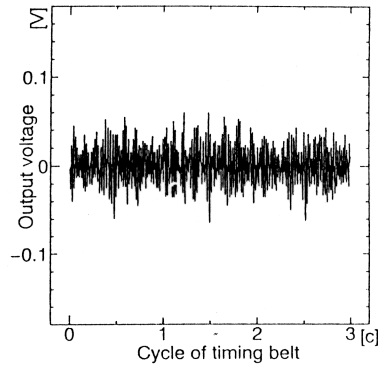


Fig.27 Comparison between TDT sensor and Tension sensor

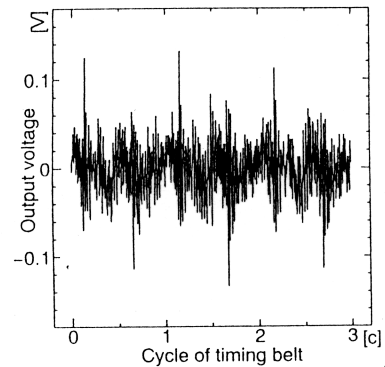
化しない。このように、張力センサの諸特性が初期張力に大きく依存してしまっているのに対し、TDT センサはゲインの変化も少なく、オフセットが存在しないためアクティブレンジが広く持てる、などの特徴も併せ持っていることが分かる。

4.3.2 従来形動トルクセンサに対する TDT センサの優位性

2章 Fig.1 (a) (b) のように、従来形の動トルクセンサのみを用いた場合と、テンションプーリ兼用トルクセンサである TDT センサを用いた場合の特徴波形 $\Delta m(\theta)$ を比較した。Fig.28 (a) (b) がその特徴波形である。ベルトは V 字切り込みを入れたものを使用した。(a) の従来形の動トルクセンサのみで計測した場合、ほとんど特徴的な変動が捉えられない。それに対して、(b) のテンションプーリを兼用した本 TDT センサは、センサがベルトに直に接しているという長所が生かされ、V 字切り込みの発生の兆候を捉えることができる。この点からも、従来形の動トルクセンサによる方式より、今回提案した TDT センサ方式の方がベルトの故障診断の用途に適していると言える。



(a) $\Delta m(\theta)$ of conventional sensor



(b) $\Delta m(\theta)$ of TDT sensor

Fig.28 Data comparison between TDT sensor and conventional sensor outputs

5 結論

筆者らは、テンションプリー機構を兼用したトルクセンサである無限回転形 TDT センサを開発し、センサが絶対系から直接ベルトに接しているという特徴を生かしたタイミングベルトの故障診断法を提案し、その効果を確認めた。V 字切り込みが原因の場合、従来形のセンサを用いたのでは、ほとんど検出できないような場合でも、TDT センサを用いると明確に特徴的な変動が分離できることが分かった。また、しきい値を変化させるためのしきい値調整法と、そのときに得られるしきい値レベルマップと故障原因判定規則に基づき故障原因を推定する故障原因判定法を提案し、その有効性を確認した。また、ベルトの目詰まりによる噛み合わせ不良が原因の場合、予想に反した興味深い波形が得られることが分かった。

今回提案した故障診断法の手続きのうち 2 値化するまでの処理は、コンピュータなど大がかりな装置の代わりにフィルタや整流回路などの電子回路で実現できるものと考えられる。また今回の実験はベルトの故障診断であったが、ほぼ同じ原理を用いてプリーの故障診断も可能であると思われる。

6 謝辞

本研究で用いた実験装置を製作して頂いた(株)ハーモニックドライブ・システム社の千葉次朗取締役、笠原政勝開発本部長および辻村純氏に深く感謝いたします。また、測定機器や書籍などを気前良く貸して下さった豊田研究室の方々に感謝します。そして共に徹夜を繰り返した研究室員一同、ごくろうさま。最後に、本研究に着手する機会と、研究内容を発展させる手掛かりを示唆して下さい下さった金子助教授に、最高の感謝の意を捧げます。

参考文献

- [1] 機械システム設計便覧編集委員会編：JIS に基づく機械システム設計便覧，日本規格協会，p1067/1089 (1986)
- [2] 豊田：設備診断技術の動向，電学論 D, **107**-5, p570 (1987)
- [3] M.J Neale et. al. : A Guide to the Condition Monitoring of Machinery, Dept. of Industry of UK Government (1979)
- [4] P.D. Mcfadden et. al. : A Signal Processing for Detecting Local Defects in a Gears, Proc. Int. Mech Eng., vol.199, p285 (1985)
- [5] E. Cortina : Pattern Recognition Techniques Applied to Diagnostics, SAE Mid-Year Meeting, May,p18 (1970)
- [6] 金子, 横井, 鈴木, 谷江：プーリ・ワイヤ駆動系におけるトルクセンシングとトルク制御，日本ロボット学会誌 **7**-1, p62 (1989)
- [7] M.Kaneko, K.Yokoi, K.Tanie : On a New Torque Sensor for Tendon Drive Fingers, IEEE Transactions on robotics and automation, p501 (1990)
- [8] 佐野, 古荘：コンプライアンス制御機能を有する4足歩行システムの動的制御，第8回日本ロボット学会学術講演会，p305 (1990)
- [9] 雨宮好文監修, 佐藤幸男：信号処理入門，オーム社 (1987)
- [10] 三上直樹：ディジタル信号処理入門，CQ 出版社 (1989)
- [11] 南 茂夫：科学計測のための波形データ処理，CQ 出版社 (1986)