[計測自動制御学会論文集
Vol. 29, No. 4, 385/394 (1993)]

張力差動形トルクセンサを用いたタイミングベルトの自己故障診断†

白井達也*・金子　真*

Self-Failure Diagnosis for Timing Belt Transmission System Using Tension Differential-Type Torque Sensor

Tatsuya SHIRAI* and Makoto KANEKO*

Power transmission systems with timing belt are often used in various machines because of their simple mechanism and easy treatment. However, the diagnosis for those transmission system has not fully established. This paper discusses self-failure diagnosis for a timing belt transmission system using tension-differential-type torque sensor (TDT sensor). A tension pulley is usually incorporated into a part of the transmission system, so that the system can maintain a proper tension during operation. Since such a tension pulley receives force directly from the timing belt, it is expected that the diagnosis of the timing belt can be done with much high S/N ratio and thus with high reliability. Based on this idea, the authors designed a TDT sensor available for a timing belt application, and explored a diagnosis algorithm detectable not only for a timing belt with V-crack but also for a timing belt with blinding at a tooth. Through a number of experiments, we verified the effectiveness of the proposed algorithm and also found an interesting behavior of the sensor signals which is not expected.

Key Words: diagnosis, timing belt, tension-differential-type torque sensor, V-crack, tension pulley

1. まえがき

送風機や自動車のエンジンまわりには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]なども開発されている．

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み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，異常時にはすばやく何ら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にもいくつか研究[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．

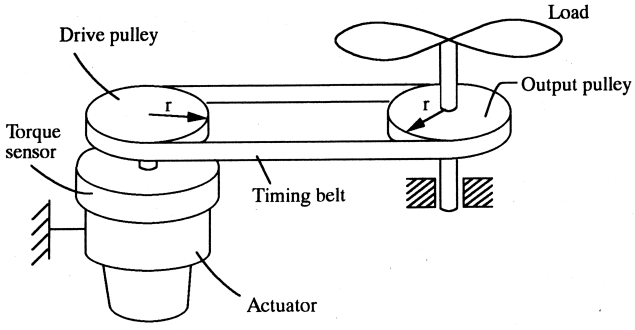
本論文の狙いは，ベルト伝達系によく利用されているテンションプーリ兼用形の簡単なセンシング機構を新たに考案し，信号処理技術を駆使してベルトの異常を検出することにある．この方法の利点は，ベルトの異常部がテンションプーリ部を通過するごとに，センサ部に直接インパルス力を与えるため，異常信号とノイズを分離しやすい点である．

2. 問題の設定

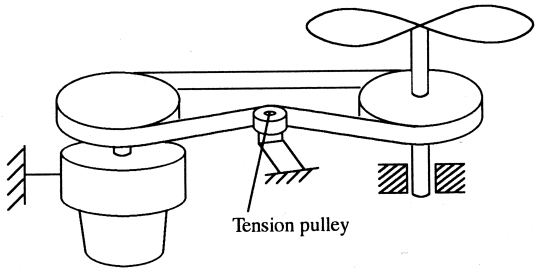
Fig. 1(a)のようなベルト駆動系を考えてみよう．簡単のため，駆動プーリと被駆動プーリの半径は等しいとする．いま，アクチュエータの出力軸にトルクセンサが取り付けられているものとし，系は定常状態で回転しているものと仮定する．この場合，トルクセンサで検出され得る変動成分としては，大きく以下の三つが考えられる．

† 第31回計測自動制御学会学術講演会で発表 (1992・7)
* 九州工業大学情報工学部　飯塚市大字川津 680-4
* Kyushu Institute of Technology, Iizuka
(Received May 8, 1992)
(Revised October 14, 1992)

TR 0004/93/2904-0385 © 1992 SICE



(a) Without tension pulley



(b) With tension pulley

Fig. 1 Timing belt driving system

(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，ベルトの歯の目詰まり，ベルトに発生したキズなどが考えられる．また(iii)の例としては，負荷の変動(たと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からベルトの異常を検出することである．したがって，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けば，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，静止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異常診断を行う．以下，断りがない限り，故障箇所は 1 ヵ所，そして故障要因は同時に二つ以上重ならないことを前提とする．

3. 提案する異常検出法

3.1 センシング機構

2 章で述べたテンションプーリ機構をセンサにする着想であるが，Fig.1(b)のように，ベルトに働く張力を単純に測定する構成では不都合が生じる．このままの片もちの構成では，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かかる．常にモーメントがかかった状態で，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．

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．**Fig. 2**(a),(b)に構造とモデルをそれぞれ示す．

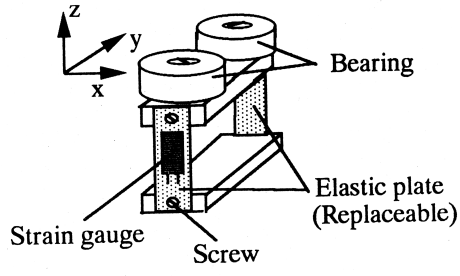
駆動プーリ両端に作用するタイミングベルトの張力 T_1, T_2 と，駆動プーリに生じるトルク τ との間に(1)式の関係が成り立つ．

$$\tau = r(T_1 - T_2) \tag{1}$$

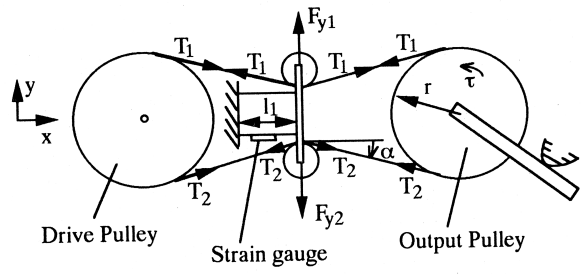
またこの張力 T_1, T_2 とテンションプーリに働く力 F_{y1}, F_{y2} との間には(2)式の関係が成り立つ．

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

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



(a) Structure of TDT sensor



(b) Model of TDT sensor

Fig. 2 TDT sensor

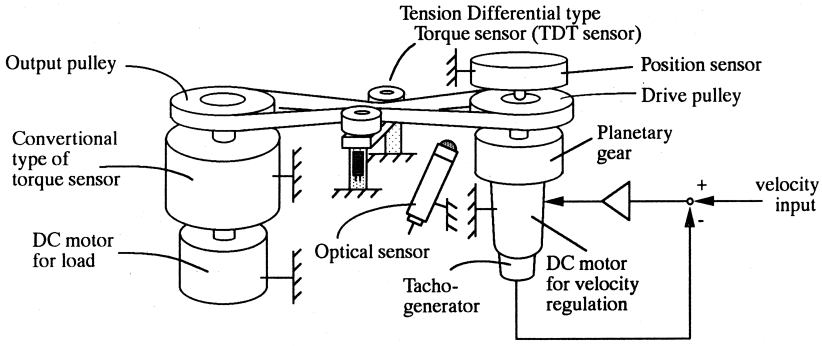
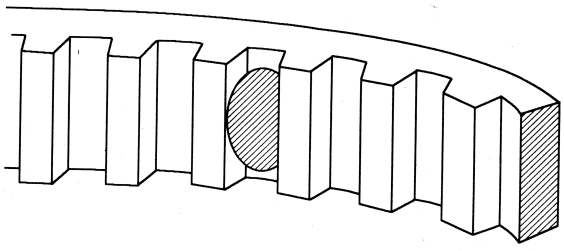
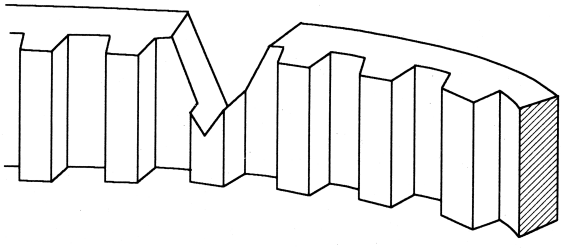


Fig. 3　Experimental equipment



（a）　Blinding at a tooth



（b）　V-crack

Fig. 4　Schematic views of timing belt with problematic damage

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

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．

$$M=k_2\tau \qquad (4)$$

$$k_2=\frac{2k_1}{r}\sin\alpha:\ \text{Constant}$$

TDT センサは以上のように，プーリ両端のベルトの張力差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，アクティブレンジを広くとることができる．さらにその構造はテンションプーリも兼ねる．本 TDT センサの静特性は，すでに十分な線形性が確認されている(詳細については文献6)～8)を参照されたい)．

Fig. 3 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，入力用速度制御 DC モータ，負荷調整用の DC モータ，そしてポテンショメータ，光電スイッチ，TDT センサおよび比較用の従来形動トルクセンサのセンサ群により構成される．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．

3.2　ベルトの異常により発生するトルク変動

ベルト回転周期のトルク変動が生じる原因は，**Fig. 4** (a), (b)のように，大きく二つ考えられる．

(1)　ベルトの目詰まりによる噛み合せ不良

たと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せの不良を生ずる．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．しかし噛み合せ不良時は，ベルト1回転中の2回の噛み合せ開始・終了点，**Fig. 5**(a)～(d)の計4カ所で，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．

(2)　裂傷

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いき，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. 6**(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せ不良時は **Fig. 7**(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．

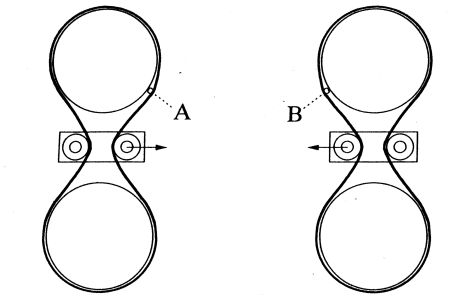
3.3　故障診断アルゴリズム

今回筆者らが提案するベルトの自己故障診断法は，大きく，

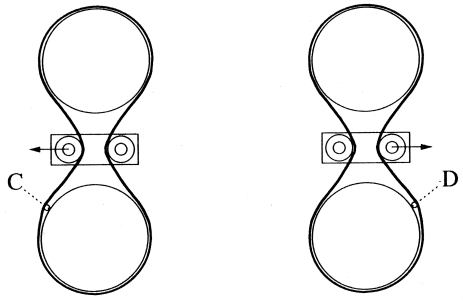
(1)　正常状態と故障状態の判定

(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

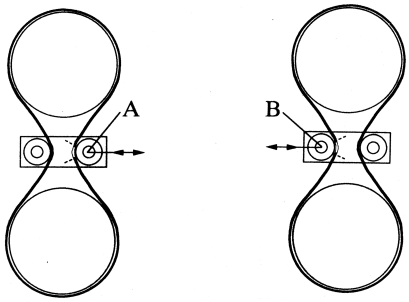


（a） Point A （b） Point B



（c） Point C （d） Point D

Fig. 5 Four different phases for the timing belt with blinding at a tooth



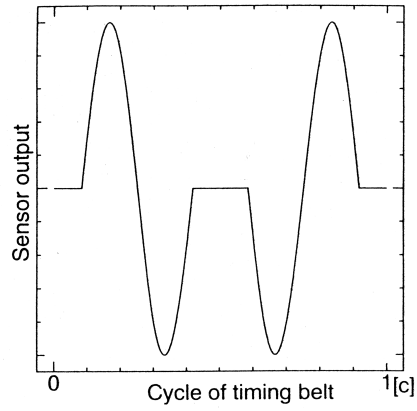
（a） Point A （b） Point B

Fig. 6 Sensor hitting points for the timing belt with V-crack

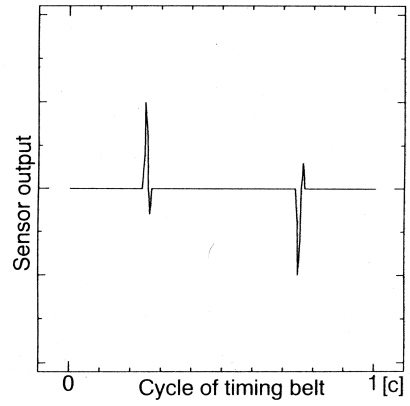
つ(2)で故障原因が目詰まり，もしくはV字切り込みの発生であると判定されて，はじめてベルトが故障を起こしていると断定される．

(1) 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1周期分だけではなく3周期分とすることにする．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．また，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ので，最低2周期は必要である．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，負荷変動が記録波形に重畳する．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，ここでは加算平均法を用いる．加算平均法とは，たとえば $s_1(\theta), s_2(\theta), s_3(\theta), \cdots, s_M(\theta)$ と M 個の波形に対して(5)式の演算を行うことで，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．以下，この波形 $m(\theta)$ を特徴波形と呼ぶ．



（a） Timing belt with blinding at a tooth



（b） Timing belt with V-crack

Fig. 7 Supposed fluctuation signal

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

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．(6)式のように，特徴波形 $m(\theta)$ の平均値 Average からの偏差 $\Delta m(\theta)$ を求め，(7)式の絶対値処理を施して負側の成分を正の側へ折り返し，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．

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

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

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

ここで，故障/非故障の判定基準となる経験値 A_s を導入する．経験値 A_s はベルト故障の兆候を表わす変動成分と，それ以外の変動成分とを区別するための正の値である．経験値 A_s を越える変動はベルト故障の兆候と解釈される．A_s は，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．A_s 決定の目安は，予備実験を行うことで，おおよそつけられる．実験により得られる絶対値波形 $\Delta M(\theta)$ の，一周期中での最大値を A_{max} とする．経験値 A_s は，たとえば，正常なベルトを取り付けた状態で得られる最大値 A_{max} より大きくする必要がある．また，正常なベルトのみではなく，実際に故障の生じたベルトを用いて得られる A_{max} も参考にすることで，信頼性を高めることができる．この経験値 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えられる．正規化処理を施した絶対値波形は，ベルトの回転周期に依存した変動成分のみを含む．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，一周期中の A_s を越える割合が大きくなる．これがある割合に達したときに故障と判定する．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 $m(\theta)$ の採取からやり直す．

(2)　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対してシュミットトリガをかけてOn/Offの2値化を行う．ここでい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．ノイズの乗った波形をOn/Offに2値化する際に，ある値 A_{SH} より大きければOn，小さければOffとするとチャタリングを起こすことがあるためである．

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，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，しきい値を振幅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利用した場合，微少ノイズの影響を受けやすい．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のパラメータに用いる．ただし，経験的にわかる経験値 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．

以上のシュミットトリガの規則を(8)式のように表わし，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，しきい値パラメータ α_{on}, α_{off} は0～1かつ $\alpha_{off}\leqq\alpha_{on}$ の任意の値である．

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

$$A_{on}=A_{max}\times\alpha_{on}$$

$$A_{off}=A_{max}\times\alpha_{off}$$

シュミットトリガのしきい値パラメータ α_{on}, α_{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，α_{on}, α_{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} を変化させる範囲を考える．絶対値波形 $\Delta M(\theta)$ のピークの高さは各周期ごと，加算平均ごとに変動する．たとえば，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 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．つぎに α_{off} を変化させる範囲について考える．α_{off} を α_{on} より大きくすることは無意味であるため，ここでは α_{off} は0から α_{on} まで変化させることにする．

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 α_{on}, α_{off} の組合せより得られる2値化波形 $B(\theta)$ のうち，以下の二つの故障原因判定規則を満たす組合せが存在したとき，故障原因を断定できる．一つめの規則は，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．

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 $\pm\varepsilon$ としたとき，パルス P_{ij} が

$$P_{1,j}-\epsilon \leq P_{i,j} \leq P_{1,j}+\epsilon (i \in \{2,3\}, j \in \{1,\cdots,\Phi\}) \quad (9)$$

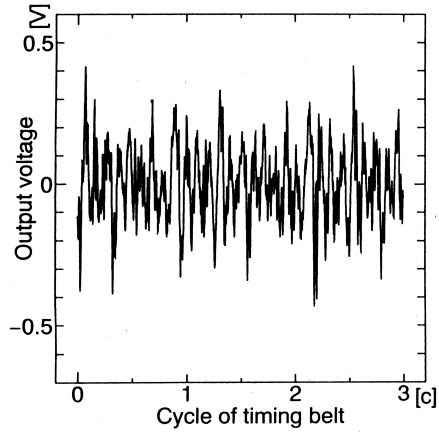
の関係を満たすならば，規則 1 により仮定した故障原因が生じていると断定する．ここで ε は $\varepsilon \fallingdotseq 0$ の微小値である．$P_{i,j}$ は，i 周期目の波形の j 番目のパルスが立ち上がる位相 $(0\sim 2\pi)$ を表わす．

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パラメータ $\alpha_{on}, \alpha_{off}$ の値が不適当であった場合の誤認識を抑えることができる．

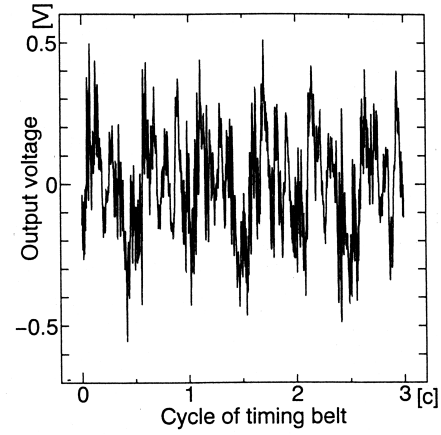
3.4 実験による評価結果

ここでは実際に 3.1 節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/長さ 327 mm 幅 6 mm，プーリは 44 歯/直径 40 mm である．ベルトは 3 本用意した．1 本は，そのまま正常なベルトとして使用した．もう 1 本は，二つの歯間に異物を挟み込み，接着剤で固着して噛み合せ不良とした．そして残り 1 本は，裂傷発生の初期段階を想定し，カッターナイフを用いて幅 6 mm のベルトの側面より，深さ 2 mm 程度の V 字型の切り込みを入れた．これは全幅に対して，約 3 割に相当するが，このように 3 割程度の V 字切り込みが入っても，ベルトは本来の動力伝達機能を十分果たすことを付記しておきたい．つまり，ここで不良が検出できれば，実用上，十分利用できることになる．各トルクセンサの出力はアンプ(DPM-601 A)で増幅，A/D 変換器(AD 12-16 TA(98))を用いて ±5 V のレンジを 12 bit 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．

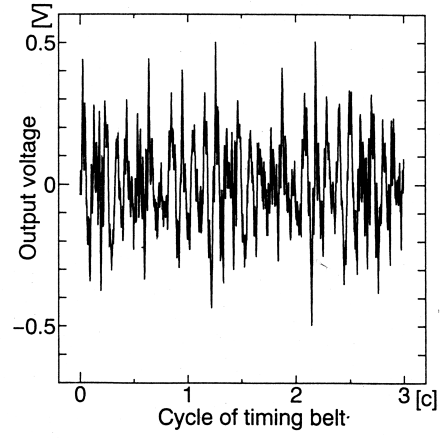
Fig. 8(a)～(c)は，それぞれベルト 3 回転分の TDT センサ生波形である．データ点数は 3072 点，ベルトの回転数は 70 rpm である．(a)は正常時，(b)は目詰まりによる噛み合せ不良時，(c)は V 字切り込み発生時の生波形である．ここで，(a)正常時と(c)V 字切り込み発生時の生波形の間に違いはほとんどなく，生波形から区別できない点に注目されたい．**Fig. 9**(a)～(c)は，それぞれ Fig. 8 のような生波形を 50 回分採取し，(5)式のように加算平均して得た特徴波形である．(a)が正常時，(b)が目詰まりによる噛み合せ不良時，(c)が V 字切り込み発生時の特徴波形である．Fig. 8 の生波形では区別できなかった(a)正常時と(c)V 字切り込み発生時の波形とが，加算平均を行うことにより，Fig. 9(a)，(c)のように区別できるようになる点が特に重要である．ここで，(b)の噛み合せ不良時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 章で考察する．Fig. 9 の特徴波形に(6)，(7)式の正規化処理を施した結果が，



(a) Normal timing belt

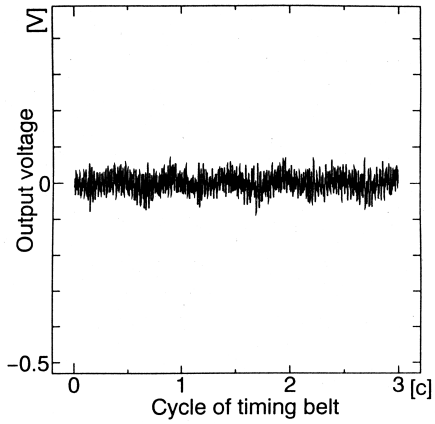


(b) Timing belt with blinding at a tooth

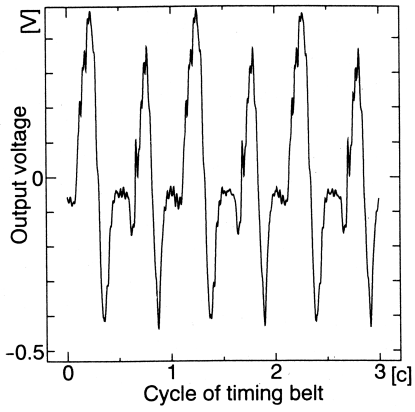


(c) Timing belt with V-crack

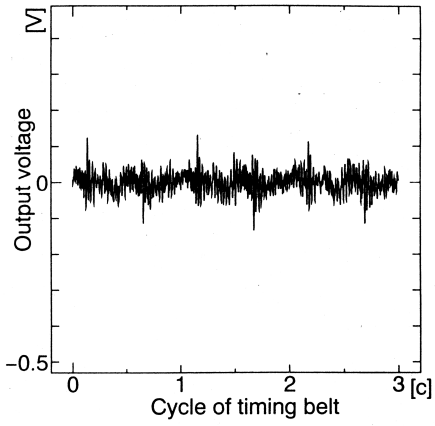
Fig. 8 Source data



（a） Normal timing belt

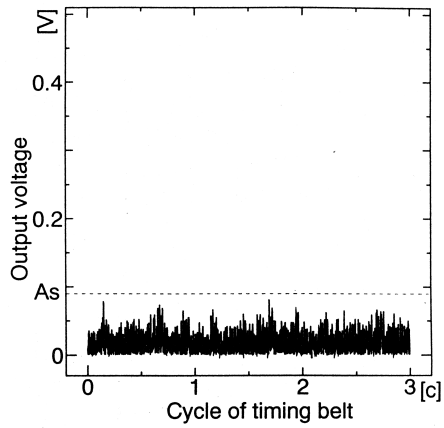


（b） Timing belt with blinding at a tooth

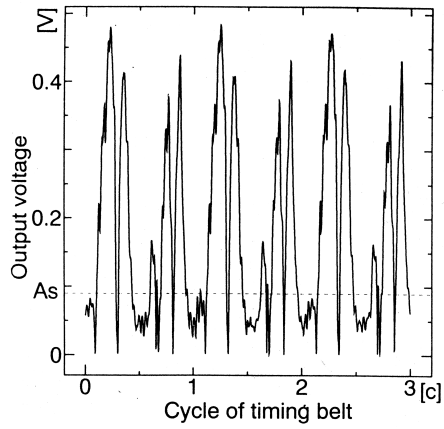


（c） Timing belt with V-crack

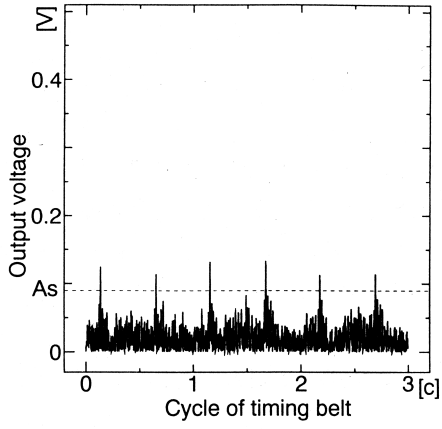
Fig. 9 $m(\theta)$



（a） Normal timing belt



（b） Timing belt with blinding at a tooth

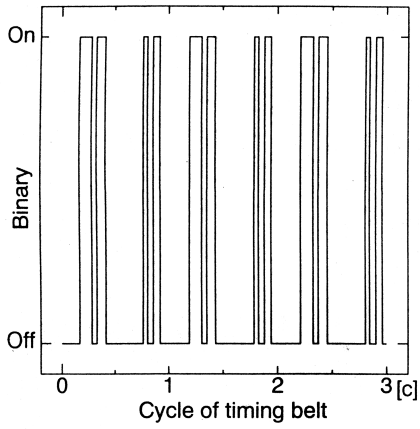


（c） Timing belt with V-crack

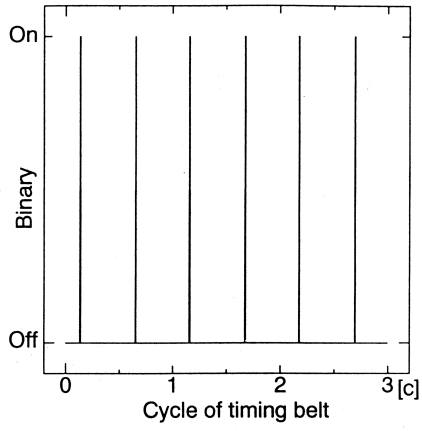
Fig. 10 $\Delta M(\theta)$

Fig. 10（a）～（c）である．（b）噛み合せ不良時と（c）V字切り込み発生時の波形が，経験値 A_s を越えている点に注目されたい．つまり異常ありと判断される．

Fig. 10（b），（c）の絶対値波形 $\Delta M(\theta)$ に（8）式の2値化処理を施した2値化波形 $B(\theta)$ が，**Fig. 11** の（a），（b）である．（a）が噛み合せ不良時，（b）がV字切り込み発生時である．この2値化処理のヒステリシス特性は（a），（b）ともに，しきい値パラメータ $\alpha_{on}=0.7$，$\alpha_{off}=0.3$ である．噛み合せ不良時は1周期に4回，V字切り込み発生時は1周期に2回の規則的なパルスが記録される．ここで，この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より得られた絶対値波形 $\Delta M(\theta)$ に対し，3.3章（2）で述べた，しきい値調整法を利用した故障原因判定処理を行った結果が **Fig. 12**（a），（b）である．しきい値パラメータ α_{on}, α_{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

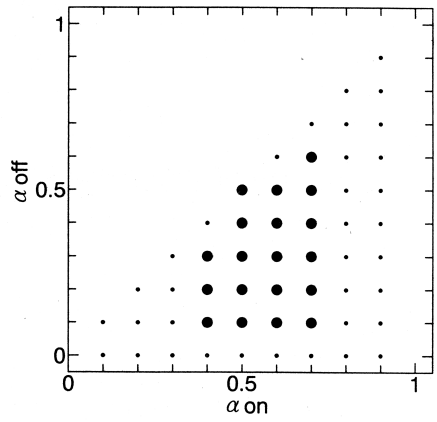


(a) Timing belt with blinding at a tooth

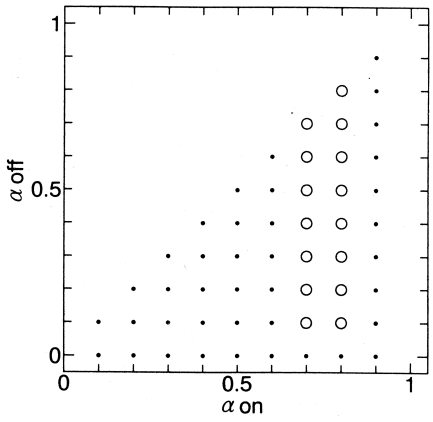


(b) Timing belt with V-crack

Fig. 11 $B(\theta)$



(a) Timing belt with blinding at a tooth



(b) Timing belt with V-crack

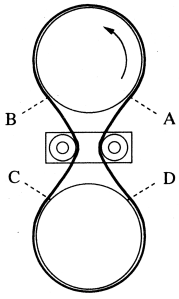
Fig. 12 Threshold-level-map

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．目詰まりしたベルトの●になる 2 値化波形より逆算した規則 2 の ε は，$(0.0410\sim0.0439)\times2\pi$．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，$(0.0391\sim0.0400)\times2\pi$ である．よって，ε はおよそ $0.05\times2\pi$ 程度で良いと思われる．

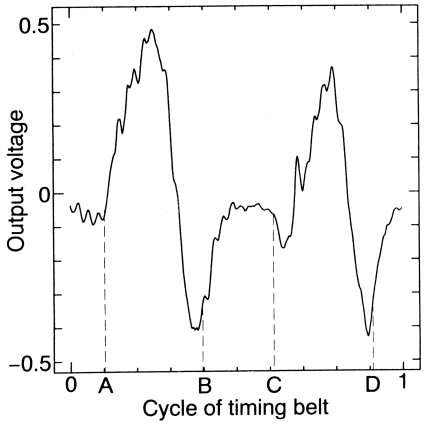
4. 考　　察

Fig. 7(a) と Fig. 9(b) からわかるように，噛み合せ不良のベルトを使用した場合の出力波形は，実際に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. 13**(a)，(b) は，噛み合せ不良時のプーリとベルトの噛み合せ不良点の位置関係，および特徴波形 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．予想どおりならば，Fig. 7(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．たとえば，Fig. 13 の A 点の位置に噛み合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と，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. 13(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

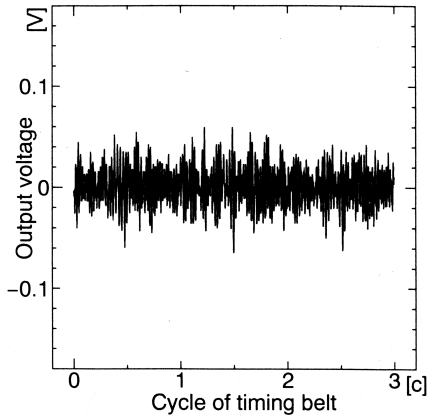


（a） Four different points

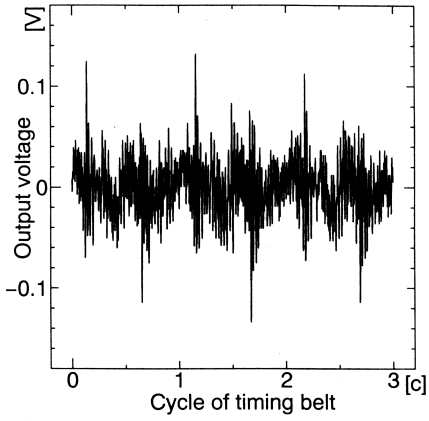


（b） Sensor output

Fig. 13 Behavior during 1 cycle of timing belt with blinding at a tooth



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



（b） $m(\theta)$ of TDT sensor

Fig. 14 Compare $m(\theta)$ with TDT sensor output and conventional sensor output

が急変する原因となる．ただし，噛み合せ不良部が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．つぎに，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．

つぎに，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3.2節で考察したとおりである．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. 13(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ほう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．以上が噛み合せ不良時の挙動に対する定性的な説明である．

2章の問題の設定の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出力波形を比較した．**Fig. 14**(a)，(b)がその波形である．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，ほとんどトルクの変動が捉えられないのに対し，(b)のテンションプーリを兼用した本TDTセンサはV字切り込みの発生を捉えることができている．この点から従来形の動トルクセンサによる方式よりも，今回提案したテンションプーリ兼用TDTセンサ方式のほうがベルトの故障診断の用途に適しているといえる．

傷など故障の程度によって，一周期につねに4または2回のパルスが検出されるとは限らない．ノイズの影響なども考えられる．故障か否かの判定はたとえば100回検査を行って95回故障と認定されたら警報を発するなどの工夫が実際には必要であると考えられる．

最後に本手法の利点をまとめる．

（i） 簡単なセンシング機構，かつ安価に構成できる

（ii） 高速な処理装置を要さない

(i)については，2章でも述べたが，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センサを使用

することで,計測と診断の二つの役をこなせる点である.(ii)については,従来の故障診断は主にスペクトル解析をリアルタイムに行うために高速度の FFT アナライザなどを用いてオンラインで計測を行うのに対し,本手法では光センサなど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の違いである.

5. 結　　論

筆者らは,テンションプーリ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,センサが静止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自己故障診断法を提案し,その効果を確かめた.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わかった.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わかった.

今回提案した異常検出法の手続きのうち 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ーリの故障診断も可能であると思われる.これらについては続報においてまとめる予定である.

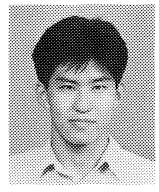
最後に,本研究で用いた実験装置を製作して頂いた(株)ハーモニックドライブ・システムの千葉次朗取締役,笠原政勝開発本部長および辻村純氏に深く感謝いたします.

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, 1067/1089 (1986)
2) 豊田利夫：設備診断技術の動向, 電学論 D, **107**-5, p 570 (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., **199**, p 285 (1985)
5) E. Cortina: Pattern Recognition Techniques Applied to Diagnostics, SAE Mid-Year Meeting, May, p 18 (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, p 62 (1989)
7) M. Kaneko, K. Yokoi, K. Tanie: On a New Torque Sensor for Tendon Drive Fingers, IEEE Transactions on Robotics and Automation, p 501 (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, p 305 (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)

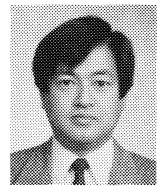
[著 者 紹 介]

白 井 達 也 (学生会員)



1989 年, 木更津工業高等専門学校電子制御工学科卒業. 同年九州工業大学情報工学部知能情報工学科編入. 91 年同大学大学院情報工学研究科情報システム専攻入学, 93 年 3 月同専攻修了. 同年(株)ソニーに入社. 現在に至る.

金 子　　真 (正会員)



1981 年, 東京大学大学院工学系研究科機械工学専門課程修了. 同年通産省工業技術院機械技術研究所入所. 90 年九州工業大学情報工学部機械システム工学科助教授, 現在に至る. ロボットハンド, アクティブセンシング, コンプライアンス制御, 触覚センサの研究に従事(工学博士).