

自在継手の駆動音による状態認識*

水野達吏^{*1}, 大滝英征^{*2}
石川義雄^{*2} 西郷宗玄^{*3}Estimating the Condition of a Rotating Shaft Driven
through a Universal Joint by a SoundMichihito MIZUNO, Hideyuki OHTAKI,
Yoshio ISHIKAWA, and Muneharu SAIGO

It is necessary to derive a proper method of estimating the change of angular velocity or the change of crossing angle of a rotating shaft which is driven through a universal joint. From our experiments, a rotating shaft which is driven through a universal joint has a tendency to produce a metallic sound of high frequencies, when in an abnormal state. Then we investigate the new method of estimating the condition of a rotating shaft by analyzing the distribution of frequencies of a sound due to the angular velocity variation.

Key Words: Machine Element, Universal Joint, Sound, Frequency, Shaft, Angular Velocity Variation

1. 緒言

現在、メカトロニック機器を始めとする各種装置の動力伝達軸系には小形、軽量化に対する要請から自在継手を用いる場合が多い。しかし、藤井⁽¹⁾⁽²⁾も指摘しているように自在継手において伝達軸系に折曲げ角を付けると中間軸の角速度が駆動軸の回転角度ごとに変化するため自在継手に周期的に変動する荷重を発生させる。この荷重は回転数の変動、折曲げ角の変動によって大きな影響を受け、したがって、この変動荷重によって発生する振動および音響を極力抑制しなくては装置全体の安定的駆動に対する信頼性を損なうこととなる。

著者の一人である西郷⁽³⁾⁽⁴⁾とか太田⁽⁵⁾らは、この振動について理論解析を行い、安定駆動のための寸法諸元などについて有用な知見を得ている。しかし少し見方を変え、駆動軸系の安定的な駆動を期すために、駆動状況をいち早く検知し、回転数の変動、折曲げ角の変動を修正する方法も検討の余地がある。

自在継手は、最も頻繁に使用される折曲げ角 10° 前後で軸系中に必然的に使用されるスプラインなどにも変動力を与え、回転数変動、軸の折曲げ角変動に対してかなり鋭敏な音響的变化をもたらすことを著者らは見いだした。そこで、本報告ではこの音響的变化を検知し、自在継手の駆動状況を評価できないものかどうかの基礎的な検討を行った。

2. 自在継手の駆動音による状態認識

後述する自在継手における駆動音の特徴を勘案すると、すでに周知の波形処理法に若干工夫を加えるだけで駆動状態を評価できる。すなわち駆動状態の識別処理は、まず種々な駆動状態における音を周波数分布の形でパターンとして記憶しておく。次に識別しようとする音を取り込んで、それを周波数成分に分解し、記憶しておいた各パターンとの類似性を比較する。そして最も強い類似性を示したパターンを現在の駆動状態として認識する。

次にパターンとの類似の比較の方法であるが、統計学において、二つの変数の間にどの程度の類似性があるかを定量的に表すものとして、周知の相関係数が用いられる。この考え方を周波数領域において適用すると、二つのスペクトル間の類似性が定量的に推察され

* 昭和63年9月30日 北陸信越支部信越地方講演会において講演、原稿受付 昭和63年3月22日。

^{*1} 学生員、埼玉大学工学部 (〒338 浦和市下久保255)。

^{*2} 正員、埼玉大学工学部。

^{*3} 正員、工業技術院機械技術研究所 (〒305 つくば市並木1-2)。

る。

すなわち N 個の点から成るパターンスペクトルの周波数成分を f , 識別しようとする音の周波数成分を g とおくと

$$f = (f_1, f_2, f_3, \dots, f_N)$$

$$g = (g_1, g_2, g_3, \dots, g_N)$$

となり, f と g は N 次元のベクトルとして表現されることになる。二つの N 次元ベクトル間の相関係数 ρ は内積を利用して, 次のように表すことができる。

$$\rho = \frac{(f, g)}{\|f\| \cdot \|g\|}$$

ここで $\langle f, g \rangle$, $\|f\|$, $\|g\|$ をベクトルの成分で表すと

$$\rho = \frac{\sum_{k=1}^N f_k g_k}{\sqrt{\left(\sum_{k=1}^N f_k^2\right) \cdot \left(\sum_{k=1}^N g_k^2\right)}}$$

となる, これは二つのベクトル間の角度を θ としたときの $\cos \theta$ に相当するもので ρ は -1 から 1 までの値をとることになる。つまり ρ の値が 1 に近いほどベクトル間の成分比, すなわちスペクトル間の成分比が似ているということを表している。

ゆえに, 識別しようとする音のスペクトルと各パターンとの相関係数を計算して, その中で最も 1 に近い相関係数を示したパターンを選ぶことにより現在の駆動状態を識別することができる。

相関係数はベクトル間の成分比の類似について識別するものである。しかし, 図 1 に示したベクトル g, h のようにベクトル f に対する成分比が似ていて, 成分の大きさが異なるベクトルのような場合, 相関係数だけで識別することは不可能である。そこで二つのベクトルの類似を調べるもう一つの方法としてベクトル間の距離による識別を加える。つまり二つのベクトルの成分比と成分の大きさが同じならばベクトル間

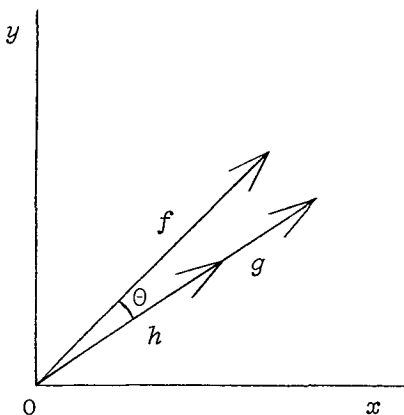


図 1 成分比が似ていて大きさが異なるスペクトル

の距離は零になるはずである。すなわちこの距離が小さいほど二つのベクトルは似ていると判断できるはずである。この距離のことをここでは誤差距離 σ と名づけておく。

誤差距離 σ はベクトルの成分を用いて表すと

$$\sigma = \|f - g\| = \sqrt{\sum_{k=1}^N (f_k - g_k)^2}$$

となる。

この相関係数と誤差距離の二つのパラメータによりパターン認識を行い駆動状態の識別を試みるものである。

3. 実験装置

図 2 は駆動音による状態認識をするために, 実験で用いたシステムの概略図である。音響信号の検出部は, マイクロホン, アンプ, ローパス回路から成っており, ここから得られた音響信号を A-D 変換器を介してパーソナルコンピュータに取り込む。パーソナルコンピュータに取り込まれた信号をフーリエ変換プログラムを用いてスペクトルに分解しその変化を上述したパターン認識により識別する。

図 3 は, 識別の対象とした自在継手を含む回転軸系である。自在継手には, 図 4 のようなものを使用した。この回転軸系の軸をトルク一定の状態で回転させたときの, 回転数の変化による音響信号の変化, また自在継手の折曲げ角度の変化による自在継手部の音響信号の変化について識別が可能かどうか検討する。

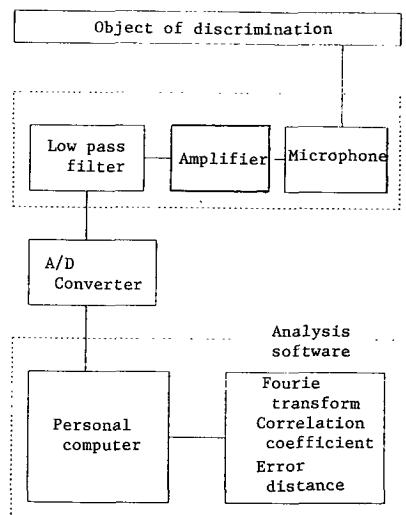


図 2 自在継手の駆動状態認識のための実験装置

4. 自在継手の放射音響の評価

機械の駆動状態を駆動音から識別しようとする場合、機械がそれぞれの駆動状態においてどのような音を出しているのか、あらかじめ知っておく必要がある。これは監視システムを構築するような場合の重要

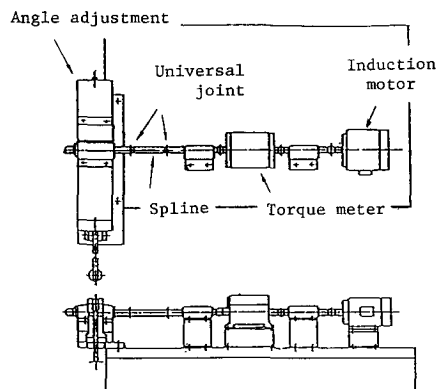


図3 自在継手を用いた動力伝達軸系

な手がかりと成り得るからである。

そこで、実験の対象物として使用する回転軸系の種々の状態における音を測定し、解析することとした。自在継手の発する音を中心に収録するために、単一指向性の可動コイル形マイクロホンを使用し、自在継手の上方30 cmの位置に接近させて設置した。さらにアンプのマイク入力感度を下げて、他の部分の発する音を拾わないようにした。このような環境で各状態における自在継手の音を収録して解析した。

図5は自在継手の折曲げ角が 0° で回転数を変化さ

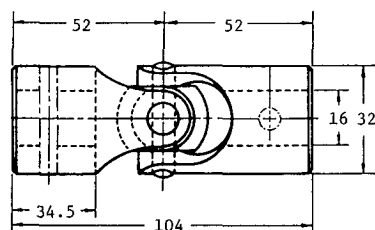
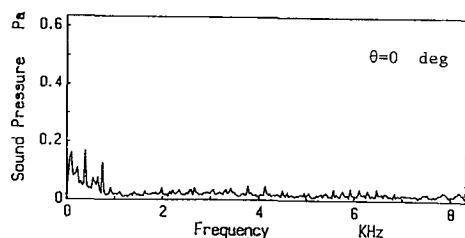
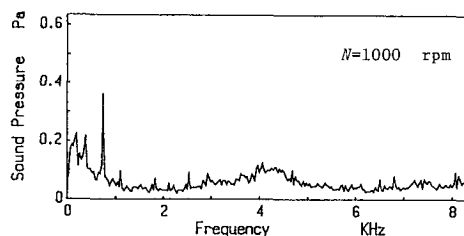
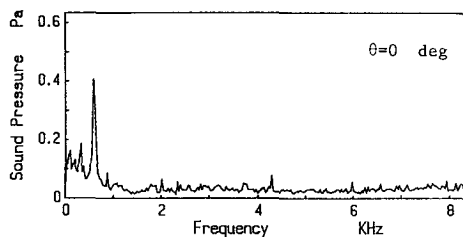


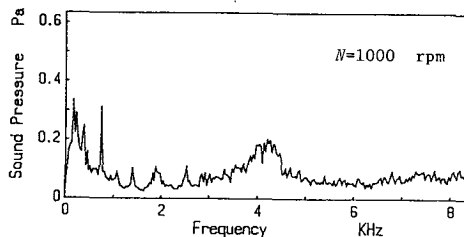
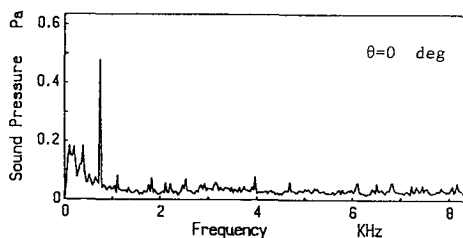
図4 実験に用いた自在継手



(a) 回転数 500 rpm

(a) 折曲げ角 10° 

(b) 回転数 800 rpm

(b) 折曲げ角 15° 

(c) 回転数 1000 rpm

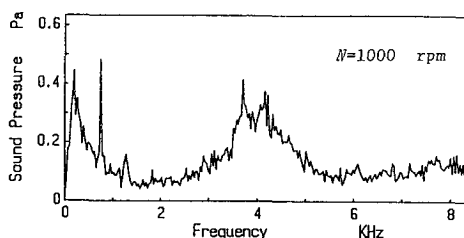
(c) 折曲げ角 20°

図5 周波数成分の回転数による影響

図6 周波数成分の軸折曲げ角による影響

せたときの放射音響の周波数成分である。これを見ると、回転に起因すると思われるスペクトルのピークが現れているが、それ以外は目だった変化は見られない。

図6は回転数が一定で折曲げ角を変化させたときの放射音響の周波数成分を例示したものである。これを見ると、3 kHz から 5 kHz にかけてのスペクトルが折曲げ角度の増加に伴って、大きくなっているのがわかる。とりわけ継手として最も頻繁に利用される 10° 前後ではその増加の程度が大となる。このスペクトルが大きくなる周波数帯域は軸の回転に起因して生じると考えられる周波数帯域に比べ大きく、自在継手を用い、折曲げ角を付けた軸系に特徴的なものと考えられる。そこでこの周波数領域におけるスペクトルの変化などを検知すれば駆動状態の把握を行い得ることがうかがい知れる。

ここでは自在継手の放射音響の変化に関する上記の実験結果を基にして、自在継手の折曲げ角と回転数の

変化を識別する方法を著者なりにいくつか構築し、その中から適切なものを選定することとした。

まず、最も簡単で一般的な方法として音響信号を 1 回だけ取り込んだうえで、相関係数だけで識別する評価法を作成してみた。これを評価システム A とする。

次に取り込んだ音響信号には周囲環境の音、駆動状態のわずかな変動による不安定さがあると考えられる。そこで、その不安定さによる影響を極力小さくするため、音響信号を複数回取り込み、その平均のスペクトルを求めた。実験では 3 回の平均のスペクトルを入力信号とする評価法を作成した。なおこの場合にも識別には相関係数のみを用いることとした。これを評価システム B とする。

最後に相関係数と誤差距離の二つを利用して識別する評価法について検討した。まずあらかじめ取り込んだ周波数分布との相関係数が 1 に近い順に三つのパターンを選び出し、1 に近いほうから順に点数をつけ 3、

表 1 あらかじめパターンとして登録しておく駆動状態

Angular velocity of rotating shaft N rpm	500, 800, 1000 1200
Crossing angle of rotating shafts θ deg	0, 10, 15, 20

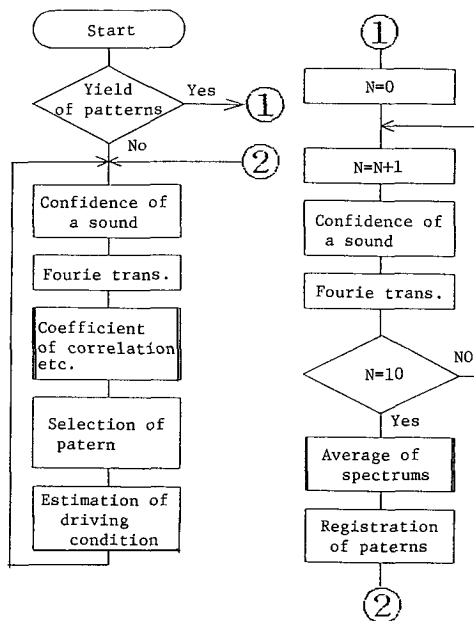
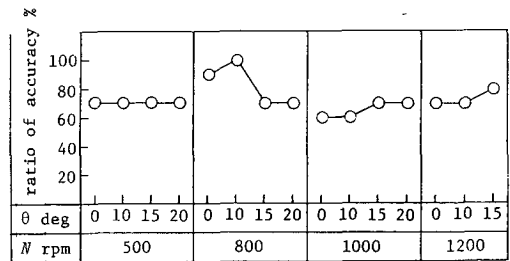
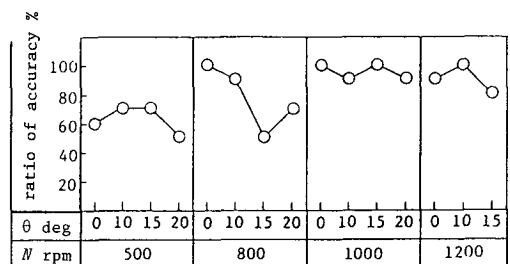


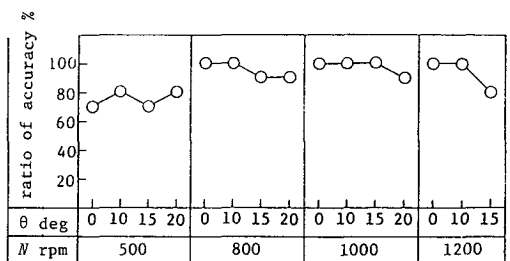
図 7 状態識別のためのフローチャート



(a) 評価法 A



(b) 評価法 B



(c) 評価法 C

図 8 駆動状態の識別判定結果

2, 1点と与える。次に誤差距離に対しても零に近い順に三つパターンを選び, 零に近いほうから順に3, 2, 1点と点数を与える。そして選出された各パターンの点数を総計し, 最高点を得たパターンを現在の駆動状態として判断する。もし最高点を得るパターンが複数選出された場合には, 取り込んだ音響信号の音圧とあらかじめ取り込んであった各パターンの音圧とを計算, 比較していちばん近い値をとるパターンを選定する。なお, 音圧は, 全スペクトル成分の和を求めることにより算出する。これは厳密さという点では問題はあるが, 特別な装置を必要としないことと, 比較によるパターン認識においては, 数値の絶対値としての精度はそれほど重要ではないのでこの方法を採用した。これを評価法Cとする。

各評価法の識別能力を検討するために, 前述の装置を使って識別実験を行った。実験の方法は, 図7に示すようにあらかじめ設定した各状態において音響信号を10回取り込み, その平均のスペクトルをパターンとして登録しておく, 次に各状態において識別を行い, 正解率を求めてみた。

なお, 実験に使用した各状態は表1に示したとおりである。

図8は各評価法における識別結果を示したものである。

図8(a)より評価法Aでは全体的に識別率は低く, 十分な成果が得られなかった。それに対して評価法Bでは図8(b)の結果のように折曲げ角 10° より小さい場合までは的確に識別できるようである。しかし折曲げ角が実際の駆動系で最も頻繁に使用されている 10° 以上となると, 識別率がかなり落ちる。これは回転数に起因するスペクトルに比較し, 軸の折曲げによって生じる3 kHzから5 kHzにおけるスペクトルが大き

な影響を持つようになるためである。そこで折曲げ角が大きい場合に回転数変化が識別できたり, 逆に回転数一定とした場合に折曲げ角の変動を識別できる評価法が必要となる。著者らが行った評価法Cによると図8(c)の結果よりもわかるようにそれが平均89%という高率での識別率が達成できることがうかがい知れる。

以上より相関係数のみでパターンを識別するよりは誤差距離, 音圧などの複数のパラメータを併用するほうが正確な識別が可能となる。

5. 結 言

情報キャリアとしての音の有用性は, その情報量の豊富さからも近年, 注目されており, 音声入力や音声認識などの分野では研究が進み, 実用段階にまできている。そこで, この音による認識を機械工学分野に適用することが提案され, 歯車, 軸受を対象に検討されてきている。

本研究では, 自在継手が各方面に利用されているにもかかわらず, 駆動上種々の問題をかかえていることを勘案し自在継手の駆動状況を, パターン認識手法を用い識別する手法を導いた。具体的には音圧とパワースペクトル成分とをパラメータとして採用し識別方法を構築しこれによって駆動状況の認識を試みた。その結果相関係数, 誤差距離の併用によってかなり正確に駆動状態を識別できることがわかった。

文 献

- (1) 藤井, 機論, 22-115 (昭31), 178.
- (2) 藤井, 機論, 22-119 (昭31), 489.
- (3) 西郷, 機論, 49-442, C (昭58), 921.
- (4) 西郷, 機論, 50-455, C (昭59), 1158.
- (5) 太田, 機論, 50-449, C (昭59), 101.