S116015

**レーザ光を用いた歯車損傷診断技術の開発
(損傷前歯面状態推定手法の提案)**小島 佑太^{*1}, 田中 英一郎^{*2}, 岡部 一成^{*3}, 堀 淳志^{*1}, 竹辺 仁^{*4}, 和田 諭^{*4}, 根本 良三^{*5}**Development of damage diagnosis of a gear using laser beam
(A proposal of a method of estimating the state on a gear tooth surface before damaged)**Yuta KOJIMA^{*1}, Eiichirou TANAKA^{*2}, Kazunari OKABE^{*3}, Atushi HORI^{*1}, Hitoshi TAKEBE^{*4},
Satoshi WADA^{*4}, Ryoza NEMOTO^{*5}^{*1} Shibaura Institute of Technology, Graduate School of Science and Engineering
Fukasaku 307, Minuma-ku, Saitama-Shi, Saitamaken, 337-8570 Japan

We developed a new diagnostic method by using laser beam. A tooth surface is irradiated by zonal laser beam from an oblique direction, and then the irradiated laser beam line is shifted along the height of the tooth according to gear rotation. The variation of the voltage proportional to laser reflection between initial and present conditions are compared, and it can be grasped condition on the tooth surface such as initial or abnormal abrasion, pitting, etc. We furthermore developed a method of automatic and remote damage diagnosis on a gear tooth surface according to various gear spec by using the angle-distance relation map which made from pre-measured data of a same material and heat-treating, and taking into account the influence of adjacent teeth. The measured data was agreed well with the predicted data made with this method, therefore we can diagnosis the condition of various products automatically.

Key Words : Gear, Damage diagnosis, Laser beam, Gear tooth surface**1. 緒 言**

歯車装置の保守管理の要求が災害の影響により高まっており、製造現場においては、歯車を短時間で検査できる装置の開発要求もある。他機関では、歯車箱や歯車回転軸の振動・騒音を解析する診断方法⁽¹⁾や、レーザ干渉計、画像処理による歯車形状測定⁽²⁾などの研究が行われている。ただし振動・騒音を解析する診断方法は、間接的な情報を利用するため損傷の発見が遅れる可能性があり、レーザ干渉計などによる歯車形状測定に用いる装置は、大型・高価である。そこで筆者らは、安価なレーザセンサを用いて歯面を直接観測することにより、非接触且つ早期発見が可能な損傷診断技術を提案している⁽³⁾。これまで、歯車諸元等から非損傷歯車を計測した際に得られるレーザセンサの計測値を推定し、これを診断時の基準データとする損傷診断手法の研究を行ってきた⁽⁴⁾。しかし、算出した推定値は、実測値を元に補正する必要がある、未計測の歯車には適用できなかった。そこで本研究では、レーザセンサの受光量情報を歯車から取得し、計測対象歯面の隣接歯の影響を考慮した補正により、未計測の歯車でも損傷前の計測値を推定可能とした。本手法によって得た推定値を診断基準とした損傷診断の可能性について検証したので報告する。

2. レーザ光を用いた歯面状態推定手法と自動計測システムの構築

図1に基本原理を示す。筆者らが使用するレーザセンサは、レーザ光が約1[mm]程度の厚さと距離に比例する

^{*1} 学生員, 芝浦工業大学大学院理工学研究科 (〒337-8570 埼玉県さいたま市見沼区深作 307)^{*2} 正員, 芝浦工業大学システム理工学部^{*3} 正員, 三菱重工業株式会社 (〒108-8215 東京都港区港南 2-16-5)^{*4} 非会員, 三菱重工業株式会社^{*5} 正員, 東京都立産業技術高等専門学校 (〒116-0003 東京都荒川区南千住 8-17-1)

E-mail: tanakae@sic.shibaura-it.ac.jp

照射幅を有する回帰型であり、受光量に比例した電圧が出力される。この線状に投影されるレーザ光を歯すじ方向に照射し、歯車を回転させながら照射位置を歯たけ方向に走査すると、レーザセンサは固定で回転する歯車の全歯の片歯面および歯先部にレーザ光を照射できる。レーザ光を軸直角方向に対し傾斜角度を設けて照射しているため、歯面の凹凸で発生した乱反射光がセンサに回帰し、損傷部での乱反射光の増加によるセンサの計測電圧の上昇にて異常を検知する。図2にこの計測原理を用いた診断装置を示す。本装置は、歯面計測用とトリガ用の2つのレーザセンサを備える。加えて装置の制御用にハードウェアの構築とプログラムの導入を行い、自動計測システムを構築した。図3にハードウェアの構成を示す。これにより、歯車の回転角度を変数とする計測値の取得が可能となり、回転速度変動による影響を除去できた他、ウェーブレット解析⁽⁵⁾も容易になった。

Fig. 1 Method of measurement

Fig. 2 Diagnosis system

Fig. 3 Hardware configuration

3. 診断基準データ算出のための歯車を用いた受光量基礎データ生成手法

3・1 診断基準データ算出法

上記の基本原則より、歯車の回転に伴いレーザ光の歯面に対する照射角度・照射距離は変化する。そのため、歯車全周分のレーザセンサの計測電圧の推定値は、歯車の回転角度毎の歯面に対するレーザ光の照射角度・照射距離と、それに応じたレーザセンサの計測電圧より求まる。前者は、歯形曲線の方程式⁽⁴⁾を用いて求めた歯形曲線およびレーザセンサと歯車の幾何学的位置関係より、一意的に求まる。しかし後者は、計測対象の歯車の材質や表面性状によって変化するため、実験的な手法によって方程式を導出する。本論文では、その方程式を受光量基礎データの方程式、それを用いて生成したデータを受光量基礎データ、また、最終的に算出する歯車全周分のレーザセンサの計測電圧の推定値は、本手法では診断時の基準となるため、診断基準データと呼ぶこととする。

3・2 受光量基礎データ生成用計測装置の開発

基礎データの方程式を導出する試料には、診断対象の歯車と材質・表面性状が一致する試料を選定する。こうして得られる受光量基礎データを用いて算出した診断基準データは、原理上、非損傷状態の歯車を計測して得られる計測値と一致する。これまでその試料には、平面形状の金属片を用いていたが、インボリュート曲面で特有の切削痕を有する歯面の表面性状の再現は困難であった。そこで、新たに歯車から受光量基礎データの方程式を導出可能な計測装置を製作した。図4に歯車を組付けた状態の計測装置と装置構成の概略を示す。歯車固定軸とスライダによってx-y軸方向の位置を調整し、歯先円直径 $d = 40 \sim 120$ [mm]の歯車に対して、レーザ光を歯面上

の任意の位置に照射距離 $L_{laser} = 20 \sim 80$ [mm], 照射角度 $\gamma = 0 \sim 90$ [deg]の範囲で照射できる. 照射位置は, 照射角度・照射距離を変化させても z 軸方向を除き一定であり, z 軸方向の移動には, 精度 ± 0.05 [mm]で追従する.

3・3 受光量基礎データ生成例

例として本論文では, 表 1 の平歯車の受光量基礎データ生成手法について述べる. 図 4 の装置を用いて, レーザ光の照射角度・照射距離を変化させたときのレーザセンサの計測電圧を取得する. 計測値は離散値であるから, これを多項式近似して受光量基礎データの方程式を導出する. 照射距離を変数とする計測電圧を V_1 , 照射角度を変数とする計測電圧を V_2 とすると, 診断基準データの計測電圧 V は次式で表される.

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (1)$$

得られた計測値の多項式近似により, 照射距離 L_{laser} から計測電圧 V_1 を求める方程式として次式を得た.

$$V_1 = a_1 L_{laser}^2 + b_1 L_{laser} + c_1 \quad (2)$$

$$a_1 = -0.0000004\gamma^2 + 0.0000249\gamma - 0.0001733 \quad b_1 = 0.0000267\gamma^2 - 0.0016124\gamma - 0.0004443$$

$$c_1 = -0.0003998\gamma^2 + 0.016455\gamma + 1.6498553$$

同様に, 照射角度 γ から計測電圧 V_2 を求める方程式として次式を得た.

$$V_2 = a_2 \gamma^2 + b_2 \gamma + c_2 \quad (3)$$

$$a_2 = -0.000003L_{laser} + 0.000189 \quad b_2 = 0.000329 L_{laser} - 0.022652 \quad c_2 = -0.015907 L_{laser} + 2.016877$$

式 (1) ~ (3) より, 受光量基礎データを生成し, 診断基準データの算出が可能となる.

4. 診断基準データ算出のための補正手法の提案

4・1 計測対象歯面の隣接歯による計測値への影響検証実験

これまでの診断基準データは, レーザ光を照射する計測対象の歯面からの回帰光のみを考慮した値であった. しかし実際には, 計測対象の歯面に隣接する歯の影響を受けていると仮定し, その影響を把握するため, 隣接歯の切除によるレーザセンサの計測値の変化量を測定した. 変化量は, 隣接歯の切除後の計測値と切除前の計測値の差分とし, 図 2 の装置により表 1 の平歯車について 3 歯分取得した.

図 5 に実験結果を示す. 値が非定常なことから, 計測対象の歯面に隣接する歯による影響が明らかになった. その影響は, 歯底から歯先にかけて確認でき, 歯底に近いほど増加する. 切除後の実測値に対する変化量の変化率は, 最大となる基礎円で 67.2 [%], 歯先部で平均 0.7 [%]であった. このことから, 歯底から歯先における隣接歯の影響は, 診断基準データを算出する上で無視できず, 歯先部については, 隣接歯の影響は無いと判断できる. この結果は, レーザセンサと歯車の幾何学的位置関係と歯形形状より妥当であるといえる. したがって, 診断基準データを算出する際には, 歯底から歯先にかけて, 計測対象歯面の隣接歯の影響を考慮する必要がある.

(a) Appearance of the experimental apparatus (Test gear was settled)

(b) Schematic of the experimental apparatus

Fig. 4 The measuring device for the basic data

4・2 計測対象歯面に隣接する歯による影響の補正

実用の歯車の歯は、一部の特殊な用途を除いて連続している。そこで、図5の平均値の曲線から近似関数を生成し、計測対象歯面の隣接歯の影響補正関数とすることで、隣接歯を切除せずにその影響を考慮する手法を提案する。さらに、受光量基礎データの生成に用いた歯車とモジュール・歯数が異なる歯車についても、この補正関数を適用できるように、位相を変数とする歯面部の計測電圧レンジに対する割合で補正関数を導出した。なお補正関数は、ピッチ円を変曲点とする直線近似によって導出し、その位相は、1歯分の回転角度が1位相である。図6に計測対象歯面の隣接歯の影響補正関数を用いて算出した、表1の平歯車の隣接歯の影響曲線を示す。

図7に表1の平歯車について算出したレーザセンサの計測電圧の推定値と実測値を示す。ピッチ円において推定値と実測値は、基本原理より一致するため、ピッチ円における推定値と実測値の差分をオフセットしている。推定値と隣接歯切除後の実測値について、その近似曲線の傾きが歯面部においてほぼ一致したことから、推定値の算出手法が正しいことを確認した。また、隣接歯の影響を考慮した推定値と隣接歯切除前の実測値についても、近似曲線の傾きが歯面部においてほぼ一致した。実測値には、推定値に見られないゆらぎが発生している。これは、表1の歯面が研削等の処理が行われていない切削歯面であり、歯切りによる粗さの不均一性によると考えられる。実測値が基礎円近傍の歯車回転角度5～8[deg]で1[V]程度のほぼ均一な変化をしているが、これはレーザセンサの計測限界であり、実際は推定値の様な変化をすると考えられる。この部分を除外した歯面部での推定値と実測値の電位差は0.01[V]オーダであり、予備実験より0.5[mm]弱の打痕による電位差は0.1[V]オーダであったことから、0.5[mm]弱程度の損傷まで判別可能と考えられ、本手法による損傷診断の可能性が示唆された。

Fig. 5 The difference of measurement voltage before and after cutting adjacent teeth

Fig. 6 Influence curve based on the influence function by adjacent teeth

Table 1 Specifications of test spur gear

Module [mm]	3
Pres. angle [deg]	20
Number of teeth	24
Helix angle [deg]	0
Face width [mm]	35
Material	S45C

Measured value A: Measurement voltage of the gear before cutting adjacent teeth

Measured value B: Measurement voltage of the gear after cutting adjacent teeth

Fig. 7 Comparison of a theoretical value and an actual measurement

5. 未計測歯車の計測値の推定と検証

受光量基礎データの生成に用いたマスタの歯車と材質・表面性状が同等でモジュール・歯数が異なる歯車を 2 種類用意した。表 2 に実験で用いた平歯車の諸元を示す。図 8 に隣接歯の影響の補正関数を用いて補正したレーザセンサの計測電圧の推定値と実測値を示す。ただし、推定値の算出に用いた受光量基礎データの方程式は、マスタ歯車から導出した式 (1) ～ (3) を用いた。歯面部において、補正された推定値と実測値はほぼ一致した。このことから、事前に計測していない歯車であっても隣接歯による影響を考慮することで、非損傷状態の歯面を計測した際に得られるレーザセンサの計測値が推定できたといえる。また推定値は、歯車諸元などの設計値から算出される値であるから、補正後の推定値を診断時の基準データとすることで、歯面の損傷診断だけでなく、歯面性状の評価などが行える可能性がある。

Table 2 Specifications of test spur gears (Material : S45C)

	Test gear 1	Test gear 2	Master gear
Module [mm]	4	5	3
Pres. angle [deg]	20		
Number of teeth	28	20	24
Face width [mm]	40	50	35
Note	Surface quality is equal. (N8 Grade)

Fig. 8 Comparison of a theoretical value and an actual measurement

6. 結 言

レーザセンサの歯面に対する照射角度・照射距離・計測電圧特性である受光量基礎データを歯車から取得し、隣接歯の影響を実験的な手法を用いて求め、診断基準データを補正した。結果、受光量基礎データの生成に用いたマスタの歯車とモジュール・歯数が異なる非損傷状態の歯車について、マスタの受光量基礎データを用いて算出した推定値が歯面部で実測値とほぼ一致した。したがって、個別の歯車について事前計測せずとも診断が行える可能性が示唆された。今後、本手法を様々な諸元の歯車で検証し、その有効性を確認するとともに、歯面以外の損傷診断も可能にするなどして、本手法の汎用性を向上させる研究を進めていく。

文 献

- (1) 宮近他, 高濃度浸炭焼入れ歯車の曲げ疲労損傷の AE 特性, 日本機械学会論文集 C 編, 72-714, (2006), pp. 615-621.
- (2) 藤尾他, CCD イメージセンサを用いたレーザ干渉法による歯車の歯面形状精度の測定, 日本機械学会論文集 C 編, 62-598, (1996), pp. 2422-2430.
- (3) 田中他, レーザ光による歯車歯面損傷診断技術の開発, 日本機械学会論文集 C 編, 73-729, (2007), pp. 1545-1551.
- (4) 大久保他, レーザ光を利用した簡易歯車歯面損傷診断手法の提案, 日本設計工学会平成 22 年度秋季研究発表講演会講演論文集, (2010), pp. 89-92.
- (5) Tanaka et al., Development of gear damage diagnosis using wavelet analysis of the variation of laser reflection, Proceedings of The 4th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, (2010), pp. 179-180.