レーザ光を用いた簡易歯車歯面損傷診断* (はすば・転位歯車への適用)

田中 英一郎^{*1}, 岡部 一成^{*2}, 小島 佑太^{*3}, 永村 和照^{*4}
池条 清隆^{*5}, 竹辺 仁^{*6}, 和田 諭^{*6}, 吉見 裕樹^{*7}, 根本 良三^{*8}

Simplified Damage Diagnosis on a Gear Tooth Surface Using a Laser Beam (Application to a Helical and/or Profile Shifted Gear)

Eiichirou TANAKA^{*1}, Kazunari OKABE, Yuta KOJIMA, Kazuteru NAGAMURA,
Kiyotaka IKEJO, Hitoshi TAKEBE, Satoshi WADA, Hiroki YOSHIMI and Ryoza NEMOTO

^{*1} Shibaura Institute of Technology, 307 Fukasaku, Minuma-ku, Saitama, 337-8570 Japan

We have developed a method to diagnose damage using a laser beam. Our method can be explained as follows: First, a tooth surface is irradiated by a zonal laser beam from an oblique direction, and then the irradiated laser beam line is shifted along the surface of the tooth according to gear revolution. The variations of the laser reflection between the initial and the present conditions are compared. And then it can estimate the condition on the tooth surface such as initial or abnormal abrasion, pitting, spalling, etc. To apply this method for a helical gear, the arm for setting the laser sensor was assumed as the special closed-loop serial-linkage, and the structure of the arm was proposed. By using these proposals, the data calculated from laser reflection and measured with caliper were compared. As a result, we could diagnose the helical and/or profile shifted gear as well as a spur gear, and the difference was up to 8 [%].

Key Words : Gear, Damage Diagnosis, Laser Beam, Helical Gear, Profile Shifted Gear

1. 緒 言

歯車歯面の状況を把握するために、各種計測技術が開発されている。これまで、レーザ干渉計を用いて歯面形状を計測する手法⁽¹⁾、画像処理を用いた研究⁽²⁾等が行われている。ただしこれらは、比較的高額な装置を準備する必要がある。また、実際に使用している歯車装置内の歯車や、量産歯車の歯面状況を容易に確認できる技術が求められている。これに対し、レーザレンジセンサのような2次元平面の断面で表される凹凸を計測可能なセンサを使用すれば、歯面形状が容易に計測できる。しかし、2次元計測用のセンサを使用すると、同一平面内でもその情報に時間差があること、1次元計測用のセンサよりもコストがかかることから、筆者らは1次元計測用のセンサ1つで簡易にかつ可能な限り高精度に歯面状況を把握できる手法の開発を進めている⁽³⁾⁽⁴⁾。既報⁽³⁾では、ピッチング疲労試験を行い、ノギスによる計測結果との比較による精度検証を行った。さらに、潤滑下での本手法の診断精度および再現性を確認した⁽⁴⁾。本論文では、これまでに提案した手法を用いる際のセンサの具体的設定方法、さらに、転位歯車・はすば歯車にも適用する方法について示し、本研究の性能目標である、打痕等による1[mm]程度の傷の検出について、妥当性の検証を行ったので報告する。

* 原稿受付 2012年8月30日

^{*1} 正員, 芝浦工業大学システム理工学部 (〒337-8570 埼玉県さいたま市見沼区深作 307)

^{*2} 正員, 三菱重工業

^{*3} 学生員, 芝浦工業大学大学院工学研究科

^{*4} 正員, フェロー, 広島大学大学院工学研究院

^{*5} 正員, 広島大学大学院工学研究院

^{*6} 三菱重工業

^{*7} 芝浦工業大学システム理工学部

^{*8} 正員, 東京都立産業技術高等専門学校

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

2. 簡易歯面状況計測の原理とセンサ設置方法

筆者らが使用するレーザセンサは、レーザ光が約 1 [mm]程度の厚さを持ち、距離に比例して一定角度で照射幅を有する回帰型（キーエンス製 LV-H42, アンプ LV-51M）である。レーザ光の照射機と受光機が一体化したものであり、アンプ（キーエンス製 LV-51M）よ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移動させると、センサ自体は固定したままで回転する歯車の全歯の片歯面および歯先を照射することができる。図 1(a)に基本原理を示す。センサは回転方向に対し傾斜角度を設けて照射すると、歯面が滑らかな場合は正反射し入射角と等しい反射角で入射側とは反対方向に光が進む。しかし歯面に凹凸があり乱反射した場合、入射側にも光は回帰しその反射量に応じて出力される電圧の上昇にて異常を検知する。歯車回転が定速であれば、もしくは歯車回転角度を計測していれば、位相より異常個所の歯たけ方向位置を特定できる。また、図 1(b)のように、インボリュート歯車の基礎円の接線方向からレーザ光を照射すると、軸方向から見た場合、歯面に対して常に垂直になるが、現実的には隣り合う歯の影響があり、歯面に対しある程度の傾斜を持つこととなる。歯たけ方向の位置 x を求めるためには、図 2 のようにインボリュートの開始点から歯車が回転した角度 θ を式(1)に代入し、これより測定点までの半径 R を求める。次に式(2)に R の値を代入すると、基礎円から歯たけ方向への位置 x が算出できる⁽³⁾。

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 = \text{inv}(\cos^{-1}(r_b/R)) + \cos^{-1}(r/R) - \cos^{-1}(r/r_b), \quad (1)$$

$$x = r_b \tan^2(\cos^{-1}(r_b/R)) / 2. \quad (2)$$

ただし、基礎円半径を r_b とする。また、歯先円半径を r_k 、ピッチ円半径を r_0 、歯先幅中心角を ζ_k 、転位係数を χ 、工具圧力角を α_0 、歯数を z としたとき、図 2 の θ_1 が

$$\text{inv}(\cos^{-1}(r_b/r_k)) < \theta_1 < \text{inv}(\cos^{-1}(r_b/r_k)) + \zeta_k, \quad \zeta_k = (\pi + 4\chi \tan \alpha_0) / z - 2(\text{inv} \alpha_k - \text{inv} \alpha_0), \quad \alpha_k = \cos^{-1}(r_0 \cos \alpha_0 / r_k) \quad (3)$$

の間はレーザ光は歯先を照射しており、 $R = r_k$ の一定値を取るので、歯車回転角 θ の計測値から θ_1 を算出し、歯先であっても異常診断とその場所の特定が可能である。また本手法は、転位歯車でも同様に適用可能である。

Fig. 1 The principle to measure the gear tooth surface by using laser beam reflection

しかし、この手法を用いるためには、レーザ光の傾斜角度、レーザセンサと対象歯車との距離、図2の半径 r の大きさの設定、歯車の回転角度変化の把握が重要である。まず、軸方向に対する入射角度は、できるだけ反射量を受けられるよう軸方向に対し垂直方向に近く、かつ正常の歯面での反射光が回帰しない範囲で実験的に検討した。その結果、傷に対する反応が比較的顕著に確認できる角度として、図3のように、歯幅中心のピッチ点をレーザ光の中心が軸垂直方向から約20[deg]で照射し、かつセンサに近い方のレーザ光の端が歯面の端に一致するようレーザセンサの距離を設定した。ただし、このレーザセンサの適切な照射距離が定められており、対象歯車との距離はおよそ40-70[mm]程度に収まることを前提とする。このとき、レーザ幅が10-20[mm]程度になるので、歯車の歯幅 b が20[mm]以上有する場合は、診断を複数回に分けて、センサを歯車軸方向にスライドさせて作業することとした。

次に、レーザ光を接線とし歯車中心と同心円の半径 r [mm]の基準を決定した。 $r=0$ のとき、レーザ光は両歯面、歯先、歯底の全てを照射することが可能だが、歯面に対しての入射角が極めて小さくなり、異常を検知するのが困難になる。そのため、可能な限り r を大きく取することを考える必要があり、理想では歯面に対し常に軸方向から見て垂直を維持できる方向である。このとき、歯車軸方向から見てレーザ光が基礎円の接線、すなわち $r=r_b$ である。しかし、大きく取りすぎると前述のように隣り合う歯の影響を受けて照射できない。そこで、図4(a)のように、照射したい歯の基礎円上のインボリュート曲線の開始点と、1つ手前の歯の歯先の角（もしくはセミトップピング部）を結んだ線上にレーザ光を設定したときの r の値を最小値 $r_{\min}$ 、また、図4(b)のようにTif(True Involute Form)径の歯面が生成される点と、1つ手前の歯の歯先の角（もしくはセミトップピング部）を結んだ線上にレーザ光を設定したときの r の値を最大値 $r_{\max}$ とすることを提案する。

図4に示すように、基礎円上のインボリュート曲線の開始点から歯先の角（もしくはセミトップピング部）までの角度を θ_α 、基礎円上歯みぞ中心角を η 、レーザ光を接線に垂線として下ろす円の半径 r と基礎円半径の間の角を θ_β 、基礎円上のインボリュート曲線の開始点から歯面の開始点であるTif径までの角度 θ_γ とすると、これらの総和 θ_{total} は、式(4)のように表すことができる。

$$\theta_{total} = \theta_\alpha + \eta + \theta_\beta + \theta_\gamma, \quad \eta = (\pi - 4\chi \tan \alpha_0) / z - 2\text{inv} \alpha_0 \quad (4)$$

ただし、 $\theta_{total} = \cos^{-1}(r/r_k)$ 、 $\theta_\alpha = \text{inv}(\cos^{-1}(r_b/r_k))$ 、また $r = r_{\min}$ のとき $\theta_\beta = \cos^{-1}(r_{\min}/r_b)$ および $\theta_\gamma = 0$ 、 $r = r_{\max}$ のとき $\theta_\beta = \cos^{-1}(r_{\max}/r_{\text{tif}})$ および $\theta_\gamma = \text{inv}(\cos^{-1}(r_b/r_{\text{tif}}))$ である。これより $r_{\min}$ 、 $r_{\max}$ が算出でき、センサの高さを設定できる。

Fig. 2 The geometrical relation of angles between the laser beam and normal directions of irradiated points on a gear tooth surface

Fig. 3 The setting angle of the laser sensor

Fig. 4 The range of the radius of the circle whose tangent line is defined as a laser beam

3. はすば歯車に対応した損傷診断手法の開発

3・1 レーザセンサ設置用アームの自由度の検討

はすば歯車に本手法を適用する場合も、前節で述べた歯面とレーザ光との関係を用いる。レーザ光は歯すじ方向に沿って投影され、歯直角の歯たけ方向に照射点が移動するためには、ねじれ角を考慮してセンサを3次元空間上に設置する必要がある。そこで、レーザセンサをシリアルリンク状のアームに取り付け、アームが歯車軸の固定されている部材に設置されていると仮定する。前節の軸直角に対する角度を $20 [\text{deg}]$ とすることと、レーザ光を接線とする歯車軸中心の円の半径 r が $r_{\min} \leq r \leq r_{\max}$ の関係を維持するよう、センサの位置および姿勢を一意に定める必要がある。そのときにアームが必要な節（リンク）と対偶（関節）の数を算出する。

まず、レーザセンサおよびレーザ光は、仮想的な1つの節とする。また、基礎円上の歯幅中心から歯車固定部材上のアームの取り付け部の根元までを1つの固定節とする。レーザ光は、基礎円上の歯面の始まりに相当する線に沿って照射されていると仮定する。実際には、その線は基礎円筒上の弦巻線であるが、本レーザセンサに適した照射距離のときのレーザ光の線幅はおよそ $15-20 [\text{mm}]$ 程度であり、その直径がその5倍程度あればほぼ直線と近似することができる。また、照射されている基礎円上の歯幅中心を仮想的な対偶として、単節および1自由度対偶からなる閉ループ状の空間多角形を検討する（図5）。基礎円上歯幅中心での仮想対偶の位置・姿勢を1つに定めるためには、この空間多角形は自由度 $F=0$ でなければならない。節の数を N とすると、固定節以外の節の持ちうる自由度は、 $6(N-1)$ である。一方、1自由度の対偶の数を P_1 とすると、1自由度対偶により機構が拘束される自由度は $(6-1)P_1$ である。よって、リンク機構全体の自由度 F は、次のように示される。

$$F = 6(N-1) - (6-1)P_1 \quad (5)$$

単節1自由度対偶からなるシリアルリンクの閉ループの場合、 $P_1 = N$ となる。また、 $F=0$ を式(5)に代入すると $N=6$ となる。つまり、レーザセンサを先端に備えたアームは、センサ1、歯車1を引いた、4つの単節からなる5自由度シリアルリンクで構成する必要がある。

3・2 はすば歯車に適用可能な歯車歯面異常診断用装置の試作機の製作

前節の検討を基に、卓上旋盤（株式会社メカニクス、FL200E）を流用し、はすば歯車に適用可能な歯車歯面異常装置の試作機を製作した（図6）。旋盤は、様々な形の回転物を爪で把持することが可能であり、バイトを固定するテーブルがすでに x, y 方向のリニアガイドと z 軸回りの回転機能を有しているため、テーブルにさらに2自由度付加するだけで5自由度のアームを容易に構成することができる。図6のように、テーブルよりL字のアンクルで延長し、上下方向の並進機能、さらに回転機能を加え、その先端に診断用センサを取り付け、センサ設

置用アームを製作した。また、チャックに反射シールを貼り、1回転1パルスのトリガ信号を同時取得可能とした。

本卓上旋盤を用いて歯車を回転させ、レーザ反射光の計測の試運転を行ったところ、卓上旋盤に使用されているモータはスロット式のものであったため、1歯当たりの取得データ数を増やそうと低速に歯車を回転させるとコギングが発生し、正確な計測ができなくなった。そこで、使用されていたモータと等しい定格出力 150W のスロットレス DC サーボモータ (Maxon, RE40) を用い、かつ連続最大トルクでチャックの回転数 1000 [rpm] を出力できるようにギヤヘッド (1/3.5) およびタイミングベルト (18/34) にて減速した。さらに、角度変化の値を正確に計測するため、モータ端部に光学式エンコーダ (Maxon, HEDS5540, 500 [pulse/rev]) を取り付けた。これにより、歯車 1 回転あたり、パルス数は $500 \times 3.5 \times 34 / 18 = 3306$ [pulse/rev]、さらにこれを 4 通倍すると、エンコーダによる信号は 13222 [1/rev] となり、例えば本卓上旋盤で装着しうる程度の歯車の大きさである直径 100 [mm]、モジュール $m=1$ [mm] 程度の歯車でも、1 歯当たり 100 以上の分解能を有する。したがって、回転角度に対応した反射光の計測データとして扱えるため、異なる回転速度でも角度変化による電圧の変化として比較可能となった。

Fig. 5 Closed-loop serial-linkage for setting the laser sensor

Fig. 6 Prototype of the diagnosis apparatus for a helical gear

3・3 はずば歯車適用時のセンサの位置・姿勢決定法

はずば歯車に適用する場合、歯直角方向から見て相当平歯車として平歯車と同様の診断方法を行うこととする。そのためには、ねじれ角に対応してレーザセンサの位置および姿勢を決定する必要があるが、診断対象とする歯面の歯たけ方向に高くなるにつれて、言い換えれば、半径が大きくなるにつれてねじれ角は大きくなっていく。そのため、照射角度および照射距離は歯すじ方向の位置によって変化するので、照射方向によっては、歯面の中で歯車回転によって照射されない領域が発生する。よって、右ねじれの場合は、図6のように右斜め20 [deg]から、左ねじれの場合は左斜め20 [deg]から照射することとする。また、基礎円上のインボリュート曲線の開始点を軸方向に結んだ線は、前述のように弦巻線状の曲線であるが、その線上に沿ってレーザ光が照射され、かつ、そのときにレーザ光の中心が基礎円筒上の歯幅の中心と一致しており、また、レーザ光のセンサと近い方の端がレーザ光の端と一致していることとして、レーザ光と歯車との関係を設定した。ただし、レーザ光は平面状に一定の角度で距離に比例してその幅が広がることとし、レーザ光の照射点から基礎円筒上の歯幅中心点までをレーザ光の照射距離と定義する。歯車の歯幅 b は一度の計測範囲が 15-20 [mm] がレーザの性能に最適しており、これ以上の歯幅のときは、複数回に分けて軸方向に計測位置をずらすこととする。この設定条件を、計測対象の歯車の諸元に応じて満たすには、歯車と計測用センサの位置および姿勢の関係を定義する必要がある。そこでまず、前述の診断装置の試作機を基に、数式モデル化を行った。主な各記号は以下および図7のとおりとする。また、診断装置の試作機を数式モデル化するにあたり、平面図および側面図をあわせて図8,9に示す。

Fig. 7 Calculation model for the prototype of the diagnosis apparatus

Fig. 8 Top view of the calculation model

Fig. 9 Side view of the calculation model

ここで、各記号を以下のように定義する.

$B: \mathbf{p}_0 = \{0, 0, 0\}^T$ を原点とし, $\mathbf{x}_0 = \{1, 0, 0\}^T, \mathbf{y}_0 = \{0, 1, 0\}^T, \mathbf{z}_0 = \{0, 0, 1\}^T$ を単位ベクトルとする基準座標系

$C_1: \mathbf{p}_1 \in \mathbb{R}^3$ を原点とし, ${}^B R_{C1} = [{}^B \mathbf{x}_1 \ {}^B \mathbf{y}_1 \ {}^B \mathbf{z}_1] \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ を座標回転行列とする, y 軸方向スライダを有するリンク 1 の座標系,

$C_2: \mathbf{p}_2 \in \mathbb{R}^3$ を原点とし, ${}^{C1} R_{C2} = [{}^{C1} \mathbf{x}_2 \ {}^{C1} \mathbf{y}_2 \ {}^{C1} \mathbf{z}_2] \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ を座標回転行列とする, x 軸方向スライダを有するリンク 2 の座標系,

$C_3: \mathbf{p}_3 \in \mathbb{R}^3$ を原点とし, ${}^{C2} R_{C3} = [{}^{C2} \mathbf{x}_3 \ {}^{C2} \mathbf{y}_3 \ {}^{C2} \mathbf{z}_3] \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ を座標回転行列とする, z 軸回りに回転軸を有し, かつ, 先端に z 軸方向スライダを有するリンク 3 の座標系,

$C_4: \mathbf{p}_4 \in \mathbb{R}^3$ を原点とし, ${}^{C3} R_{C4} = [{}^{C3} \mathbf{x}_4 \ {}^{C3} \mathbf{y}_4 \ {}^{C3} \mathbf{z}_4] \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ を座標回転行列とする, y 軸回りに回転軸を有するレーザセンサの座標系,

C_5 : レーザ照射口 $\mathbf{p}_5 \in \mathbb{R}^3$ を原点とし, ${}^{C4} R_{C5} = [{}^{C4} \mathbf{x}_5 \ {}^{C4} \mathbf{y}_5 \ {}^{C4} \mathbf{z}_5] \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ を座標回転行列, レーザ光の中心軸を $-y$ 軸, レーザ光が生成する平面の法線を z 軸とする座標系,

C_6 : 歯車回転中心を原点とし, ${}^B R_{C6} = [{}^B \mathbf{x}_6 \ {}^B \mathbf{y}_6 \ {}^B \mathbf{z}_6] \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ を座標回転行列とする, 計測対象歯車の座標系,

C_7 : レーザ照射点とする基礎円上の計測対象歯幅の中心 $\mathbf{p}_7$ を原点とし, ${}^{C6} R_{C7} = [{}^{C6} \mathbf{x}_7 \ {}^{C6} \mathbf{y}_7 \ {}^{C6} \mathbf{z}_7] \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ を座標回転行列とする, 歯すじ方向の歯面開始線 (厳密には弦巻線だが, ここでは基礎円の歯幅中心を通る直線) 上に y 軸が存在し, x 軸回りに基礎円筒ねじれ角分だけ回転している座標系,

$\mathbf{p}_8 \in \mathbb{R}^3$: 歯すじ方向の歯面開始線上の, レーザ光入射方向側の計測可能端と, 計測可能な歯幅の端と一致させた点.

l_1 : $\mathbf{p}_1$ と $\mathbf{p}_2$ の間の $-y_1$ 方向の距離, スライダ型リンク 1, 2 の位置関係によって値は変化する.

l_2 : $\mathbf{p}_2$ と $\mathbf{p}_3$ の間の x_2 方向の距離, スライダ型リンク 1, 2 の位置関係によって値は変化する.

l_3 : $\mathbf{p}_2$ と $\mathbf{p}_3$ の間の z_2 方向の距離, 一定値.

l_4 : $\mathbf{p}_3$ と $\mathbf{p}_4$ の間の x_3 方向の距離, 一定値.

l_5 : $\mathbf{p}_3$ と $\mathbf{p}_4$ の間の z_3 方向の距離, スライダ型リンク 3 とレーザセンサとの位置関係によって値は変化する.

l_6 : $\mathbf{p}_4$ と $\mathbf{p}_5$ の間の $-x_4$ 方向の距離, 一定値.

l_7 : $\mathbf{p}_1$ と $\mathbf{p}_6$ の間の $-y_1$ 方向の距離, 一定値.

l_8 : $\mathbf{p}_1$ と $\mathbf{p}_6$ の間の z_1 方向の距離, 一定値.

l_{laser} : $\mathbf{p}_5$ と $\mathbf{p}_7$ の間の $-y_5$ 方向のレーザ照射距離, $l_{laser} = |\mathbf{p}_5 - \mathbf{p}_7|$.

θ_1 : $\mathbf{p}_3$ 上で z_3 軸回りに回転する角度, $\theta_1 = 90 - 20 = 70$ [deg], 経験により決定.

θ_2 : $\mathbf{p}_4$ 上で x_4 軸回りに回転する角度, θ_2 はレーザ光が歯すじ方向に一致するよう値を変化させる必要がある,

θ_3 : $\mathbf{p}_6$ 上で y_6 軸回りに回転する角度, $\theta_3 = \cos^{-1}(r/r_b)$. r が決定すると定まる.

θ_4 : $\mathbf{p}_7$ 上で x_7 軸回りに回転する角度, すなわち基礎円筒ねじれ角.

θ_{laser} : レーザ光の広がり角度, $\theta_{laser} = 6.5$ [deg], レーザ光の中心軸を基準として片側に広がる角度の大きさ.

以上の9つの距離と3つの角度の変数のうち、 $l_1, l_2, l_5, l_{laser}, \theta_2$ の5つの値は歯車の諸元やレーザ光の適正な照射距離範囲、上記試作機の構造より決定される、次の3つの幾何学的条件から5つの条件式を生成し、方程式を解いてこれらの未知数を算出する。

幾何学的条件は以下の3つである。

- 1) 座標系 C_5 の xy 平面上にレーザ光の平面が存在する。また、この平面上に座標系 C_7 の y 軸ベクトルが存在する。すなわち、座標系 C_5 の z 軸ベクトル ${}^B\mathbf{z}_5$ と座標系 C_7 の y 軸ベクトル ${}^B\mathbf{y}_7$ が垂直である。
- 2) 基準座標系 B からレーザセンサを介して生成した同次変換行列 ${}^BT_{C5}$ を用いて算出した C_7 の原点 $\mathbf{p}_7$ と、基準座標系 B から歯車を介して生成した同次変換行列 ${}^BT_{C7}$ を用いて算出した C_7 の原点 $\mathbf{p}_7$ は等しい。
- 3) レーザ光を照射すべき距離 l_{laser} 、つまり $\mathbf{p}_5$ と $\mathbf{p}_7$ の間の $-y_5$ 方向距離は、レーザ光の中心軸の先端が $\mathbf{p}_7$ と一致し、かつレーザ光の入射側の端が歯幅 b の端 (図7では $\mathbf{p}_8$) に一致するよう定めるとすると、レーザ光の広がり角度 θ_{laser} と歯すじ方向 (y_7 方向) の歯幅との関係からその最小値 (最短距離) が定まる。

まず、基準座標系 B から見た座標系 C_5 の z 軸ベクトル ${}^B\mathbf{z}_5$ および座標系 C_7 の y 軸ベクトル ${}^B\mathbf{y}_7$ は、

$$\begin{Bmatrix} {}^B\mathbf{z}_5 \\ 1 \end{Bmatrix} = {}^BT_{C5} \begin{Bmatrix} {}^{C5}\mathbf{z}_5 \\ 1 \end{Bmatrix} \in \mathbb{R}^4, \quad \begin{Bmatrix} {}^B\mathbf{y}_7 \\ 1 \end{Bmatrix} = {}^BT_{C7} \begin{Bmatrix} {}^{C7}\mathbf{y}_7 \\ 1 \end{Bmatrix} \in \mathbb{R}^4, \quad {}^BT_{C5} = {}^BT_{C1} {}^{C1}T_{C2} {}^{C2}T_{C3} {}^{C3}T_{C4} {}^{C4}T_{C5} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}, \quad {}^BT_{C7} = {}^BT_{C6} {}^{C6}T_{C7} \in \mathbb{R}^{4 \times 4},$$

とあらわすことができる。ただし、 ${}^{C5}\mathbf{z}_5 = \{0, 0, 1\}^T$, ${}^{C7}\mathbf{y}_7 = \{0, 1, 0\}^T$ である。ここで、各同次変換行列を今回の試作機のモデルである図7に基づいて生成する。基準座標系 B が座標系 C_1 と等しいとすると、

$$\begin{aligned} {}^BT_{C1} &= \left[\begin{array}{c|c} {}^BR_{C1} & {}^B\mathbf{p}_1 \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] = I \in \mathbb{R}^{4 \times 4}, \quad {}^{C1}T_{C2} = \left[\begin{array}{c|c} {}^{C1}R_{C2} & {}^{C1}\mathbf{p}_2 \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} I & \begin{Bmatrix} 0 \\ -l_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \in \mathbb{R}^{4 \times 4}, \\ {}^{C2}T_{C3} &= \left[\begin{array}{c|c} {}^{C2}R_{C3} & {}^{C2}\mathbf{p}_3 \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} R(z, -\theta_1) & \begin{Bmatrix} l_2 \\ 0 \\ l_3 \end{Bmatrix} \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \in \mathbb{R}^{4 \times 4}, \quad {}^{C3}T_{C4} = \left[\begin{array}{c|c} {}^{C3}R_{C4} & {}^{C3}\mathbf{p}_4 \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} R(y, -\theta_2) & \begin{Bmatrix} l_4 \\ 0 \\ l_5 \end{Bmatrix} \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \in \mathbb{R}^{4 \times 4}, \\ {}^{C4}T_{C5} &= \left[\begin{array}{c|c} {}^{C4}R_{C5} & {}^{C4}\mathbf{p}_5 \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} I & \begin{Bmatrix} 0 \\ -l_6 \\ 0 \end{Bmatrix} \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \in \mathbb{R}^{4 \times 4}, \quad {}^BT_{C6} = \left[\begin{array}{c|c} {}^BR_{C6} & {}^B\mathbf{p}_6 \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} R(y, -\theta_3) & \begin{Bmatrix} 0 \\ -l_7 \\ l_8 \end{Bmatrix} \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \in \mathbb{R}^{4 \times 4}, \\ {}^{C6}T_{C7} &= \left[\begin{array}{c|c} {}^{C6}R_{C7} & {}^{C6}\mathbf{p}_7 \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} R(x, -\theta_4) & \begin{Bmatrix} r_b \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \in \mathbb{R}^{4 \times 4}.\end{aligned}$$

ただし、 $R(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$, $R(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$, $R(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ とする。

よって、同次変換行列 ${}^BT_{C5}$, ${}^BT_{C7}$ は、

$${}^BT_{C7} = \left[\begin{array}{c|c} {}^BR_{C7} & {}^B\mathbf{p}_7 \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \in \mathbb{R}^{4 \times 4}, \quad {}^BR_{C7} = R(y, -\theta_3)R(x, -\theta_4) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, \quad {}^B\mathbf{p}_7 = \begin{Bmatrix} 0 \\ -l_7 \\ l_8 \end{Bmatrix} + R(y, -\theta_3) \begin{Bmatrix} r_b \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \in \mathbb{R}^3,$$

$${}^B T_{C5} = \left[\begin{array}{c|c} {}^B R_{C5} & {}^B \mathbf{p}_5 \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \in \mathbb{R}^{4 \times 4}, \quad {}^B R_{C5} = R(z, -\theta_1) R(y, -\theta_2) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, \quad {}^B \mathbf{p}_5 = \begin{Bmatrix} l_2 \\ -l_1 \\ l_3 \end{Bmatrix} + R(z, -\theta_1) \begin{Bmatrix} l_4 \\ 0 \\ l_5 \end{Bmatrix} + R(z, -\theta_1) R(y, -\theta_2) \begin{Bmatrix} 0 \\ -l_6 \\ 0 \end{Bmatrix} \in \mathbb{R}^3,$$

となる．以上より，座標系 C_5 の z 軸ベクトル ${}^B \mathbf{z}_5$ と座標系 C_7 の y 軸ベクトル ${}^B \mathbf{y}_7$ は，

$${}^B \mathbf{z}_5 = {}^B R_{C5} {}^{C5} \mathbf{z}_5 = R(z, -\theta_1) R(y, -\theta_2) {}^{C5} \mathbf{z}_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & -\sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\cos \theta_1 \sin \theta_2 \\ \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\ \cos \theta_2 \end{Bmatrix},$$

$${}^B \mathbf{y}_7 = {}^B R_{C7} {}^{C7} \mathbf{y}_7 = R(y, -\theta_3) R(x, -\theta_4) {}^{C7} \mathbf{y}_7 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & -\sin \theta_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_4 & \sin \theta_4 \\ 0 & -\sin \theta_4 & \cos \theta_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sin \theta_3 \sin \theta_4 \\ \cos \theta_4 \\ -\cos \theta_3 \sin \theta_4 \end{Bmatrix},$$

となる．条件 1) より，内積 ${}^B \mathbf{z}_5^T {}^B \mathbf{y}_7 = 0$ であることから，

$$\begin{aligned} {}^B \mathbf{z}_5^T {}^B \mathbf{y}_7 &= \begin{Bmatrix} -\cos \theta_1 \sin \theta_2 & \sin \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \sin \theta_3 \sin \theta_4 \\ \cos \theta_4 \\ -\cos \theta_3 \sin \theta_4 \end{Bmatrix} \\ &= -\cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_4 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_4 - \cos \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_4 = 0, \end{aligned}$$

すなわち，

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \theta_3 \sin \theta_4}{\sin \theta_1 \cos \theta_4 - \cos \theta_1 \sin \theta_3 \cos \theta_4} \right), \quad (6)$$

より算出することができる．

次に，座標系 C_7 の原点 $\mathbf{p}_7$ について求める．まず，座標系 C_5 からみた $\mathbf{p}_7$ を，基準座標系 B からみたとき，

$$\begin{Bmatrix} {}^B \mathbf{p}_7 \\ 1 \end{Bmatrix} = {}^B T_{C5} \begin{Bmatrix} {}^{C5} \mathbf{p}_7 \\ 1 \end{Bmatrix} \in \mathbb{R}^4, \quad {}^{C5} \mathbf{p}_7 = \{0 \quad -l_{\text{laser}} \quad 0\}^T,$$

とあらわすことができる．よって，

$${}^B \mathbf{p}_7 = {}^B \mathbf{p}_5 + {}^B R_{C5} {}^{C5} \mathbf{p}_7 = \begin{Bmatrix} l_2 \\ -l_1 \\ l_3 \end{Bmatrix} + R(z, -\theta_1) \begin{Bmatrix} l_4 \\ 0 \\ l_5 \end{Bmatrix} + R(z, -\theta_1) R(y, -\theta_2) \begin{Bmatrix} 0 \\ -l_6 - l_{\text{laser}} \\ 0 \end{Bmatrix} \in \mathbb{R}^3.$$

一方，歯車を介して生成した同次変換行列 ${}^B T_{C7}$ を用いて，基準座標系 B からみた $\mathbf{p}_7$ をあらわすと，上記より

$${}^B \mathbf{p}_7 = \begin{Bmatrix} 0 \\ -l_7 \\ l_8 \end{Bmatrix} + R(y, -\theta_3) \begin{Bmatrix} r_b \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \in \mathbb{R}^3,$$

となる．ここで条件 2) よりこれらは等しいとして，

$${}^B \mathbf{p}_7 = \begin{Bmatrix} l_2 \\ -l_1 \\ l_3 \end{Bmatrix} + R(z, -\theta_1) \begin{Bmatrix} l_4 \\ 0 \\ l_5 \end{Bmatrix} + R(z, -\theta_1) R(y, -\theta_2) \begin{Bmatrix} 0 \\ -l_6 - l_{laser} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -l_7 \\ l_8 \end{Bmatrix} + R(y, -\theta_3) \begin{Bmatrix} r_b \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \in \mathbb{R}^3.$$

これより,

$$\begin{aligned} {}^B \mathbf{p}_7 &= \begin{Bmatrix} l_2 \\ -l_1 \\ l_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} l_4 \\ 0 \\ l_5 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & -\sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ -l_6 - l_{laser} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -l_7 \\ l_8 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & -\sin \theta_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_b \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} l_2 + l_4 \cos \theta_1 - (l_6 + l_{laser}) \sin \theta_1 \\ -l_1 - l_4 \sin \theta_1 - (l_6 + l_{laser}) \cos \theta_1 \\ l_3 + l_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_b \cos \theta_3 \\ -l_7 \\ l_8 + r_b \sin \theta_3 \end{Bmatrix}. \end{aligned}$$

よって,

$$\begin{Bmatrix} l_2 \\ l_1 \\ l_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -l_4 \cos \theta_1 + (l_6 + l_{laser}) \sin \theta_1 + r_b \cos \theta_3 \\ -l_4 \sin \theta_1 - (l_6 + l_{laser}) \cos \theta_1 + l_7 \\ -l_3 + l_8 + r_b \sin \theta_3 \end{Bmatrix}, \quad (7)$$

とあらわすことができる.

さらに, 条件 3) より, l_{laser} を算出する式を生成する. 図 10 のように, $\mathbf{p}_8$ からレーザ光の中心線に垂線を下ろした点を $\mathbf{p}_9$ とすると, l_{laser} は $\mathbf{p}_5$ と $\mathbf{p}_9$ の距離と $\mathbf{p}_7$ と $\mathbf{p}_9$ の距離との合計, $|\mathbf{p}_5 - \mathbf{p}_9| + |\mathbf{p}_7 - \mathbf{p}_9|$ で算出される. 座標系 C_5 からみた $\mathbf{p}_8$ を ${}^{C_5} \mathbf{p}_8 = \{ {}^{C_5} x_{p8}, {}^{C_5} y_{p8}, {}^{C_5} z_{p8} \}^T$ とすると, l_{laser} は次のようにあらわすことができる.

$$l_{laser} = |\mathbf{p}_5 - \mathbf{p}_7| = |\mathbf{p}_5 - \mathbf{p}_9| + |\mathbf{p}_7 - \mathbf{p}_9| = |{}^{C_5} y_{p8}| + \sqrt{\left(\frac{b}{2 \cos \theta_4} \right)^2 - {}^{C_5} x_{p8}^2}.$$

$\mathbf{p}_8$ と $\mathbf{p}_9$ の距離は, 座標系 C_5 からみた $\mathbf{p}_8$ の x 座標, すなわち ${}^{C_5} x_{p8}$ である. また, ${}^{C_5} y_{p8}$ は, レーザ光の広がり角度 θ_{laser} によって ${}^{C_5} x_{p8}$ より決定されるものとし,

$$l_{laser} = |{}^{C_5} x_{p8}| \cdot \cot \theta_{laser} + \sqrt{\left(\frac{b}{2 \cos \theta_4} \right)^2 - {}^{C_5} x_{p8}^2}, \quad (8)$$

と定義する. ここで, ${}^{C_5} \mathbf{p}_8$ の x 成分である ${}^{C_5} x_{p8}$ を導出する. $\mathbf{p}_8$ は, 座標系 C_7 の原点 $\mathbf{p}_7$ から y 軸, すなわち $\mathbf{y}_7$ 方向に $\frac{b}{2 \cos \theta_4}$ だけ進んだ位置にあることから, 2 点間のベクトルを座標系 C_5 から見ると,

$${}^{C_5} \mathbf{p}_8 - {}^{C_5} \mathbf{p}_7 = {}^{C_5} R_{C_7} ({}^{C_7} \mathbf{p}_8 - {}^{C_7} \mathbf{p}_7) = \frac{b}{2 \cos \theta_4} {}^{C_5} R_{C_7} {}^{C_7} \mathbf{y}_7 \in \mathbb{R}^3, \quad {}^{C_7} \mathbf{y}_7 = \{0 \quad 1 \quad 0\}^T,$$

となる. ここで, ${}^{C_5} R_{C_7} = {}^{C_5} R_B {}^B R_{C_7} = {}^B R_{C_5}^T {}^B R_{C_7} = R(y, \theta_2) R(z, \theta_1) R(y, -\theta_3) R(x, -\theta_4) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, ${}^{C_5} \mathbf{p}_7 = \{0 \quad -l_{laser} \quad 0\}^T$ より, ${}^{C_5} \mathbf{p}_8$ の各成分は次のようにあらわすことができる.

Fig. 10 Relation between a laser beam and helical gear

$$\begin{aligned}
 {}^{C5}p_8 &= \begin{Bmatrix} {}^{C5}x_{p8} \\ {}^{C5}y_{p8} \\ {}^{C5}z_{p8} \end{Bmatrix} = \frac{b}{2 \cos \theta_4} R(y, \theta_2) R(z, \theta_1) R(y, -\theta_3) R(x, -\theta_4) \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} + {}^{C5}p_7 \\
 &= \frac{b}{2 \cos \theta_4} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & -\sin \theta_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_4 & \sin \theta_4 \\ 0 & -\sin \theta_4 & \cos \theta_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ -l_{laser} \\ 0 \end{Bmatrix} \\
 &= \frac{b}{2 \cos \theta_4} \begin{Bmatrix} \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_4 - \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_4 - \sin \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_4 \\ \sin \theta_1 \sin \theta_3 \sin \theta_4 + \cos \theta_1 \cos \theta_4 \\ -\cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_4 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_4 - \cos \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_4 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ -l_{laser} \\ 0 \end{Bmatrix}.
 \end{aligned}$$

よって ${}^{C5}x_{p8}$ は,

$${}^{C5}x_{p8} = \frac{b}{2 \cos \theta_4} \{ \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_4 - \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_4 - \sin \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_4 \},$$

となり、この値を式(8)に代入することにより、 l_{laser} を算出することができる。

以上より、式(6)(7)(8)から連立方程式を生成し、未知数 $l_1, l_2, l_5, l_{laser}, \theta_2$ の5つの値を決定することにより、上記試作機におけるレーザセンサの位置姿勢を歯車に応じて設定することが可能となった。

4. はすば歯車の損傷診断検証実験

4・1 レーザセンサ設置位置および姿勢の算出

はすば歯車の歯面に損傷を故意に与え、前章にて導出した方程式を用いて決定したレーザセンサの位置および姿勢にて歯面状態を計測し、損傷位置と大きさの結果を比較し、本手法の妥当性を検証する。検証に使用する歯車の諸元を表1に示す。この歯車の諸元に基づき、上記診断用試作機にセンサを設定するために必要な各値を導出する。

Table 1 Specifications of the test helical gear

Tooth profile	Full depth tooth
Module m_n [mm]	3.0
Pressure angle α_n [deg]	20
Number of teeth z	33
Face width b [mm]	16
Helix angle β_0 [deg]	16, Right
Base circle diameter d_b [mm]	96.32
Addendum modification χ_n [mm]	0.810
Grade	N8

装置の構造寸法より, $l_3=90$ [mm], $l_4=85$ [mm], $l_6=30$ [mm], $l_7=334.7$ [mm], $l_8=80$ [mm], 前述の経験値より $\theta_1=70$ [deg]とした. また, $\tan\beta_g=\tan\beta_0\cos\alpha_t$, $\tan\alpha_t=\tan\alpha_n\cos\beta_0$ より, $\beta_g=\theta_4=\tan^{-1}(\tan\beta_0\cos\alpha_t)=15.1$ [deg]となった. $\theta_{laser}=6.5$ [deg]である. θ_3 は, r が決定すると定まるため, r_{min} , r_{max} の値を求める. このはすば歯車の基礎円上歯みぞ幅中心角を η_b とすると, $r=r_{min}$ のとき

$$\begin{aligned}\theta_{total} &= \theta_\alpha + \eta_b + \theta_\beta \\ &= \text{inv}(\cos^{-1}(r_b / r_k)) + (\pi - 4\chi_n \tan\alpha_n)/z - 2\text{inv}\alpha_t + \cos^{-1}(r_{min} / r_b) \\ &= \cos^{-1}(r_{min} / r_k)\end{aligned}$$

$r=r_{max}$ のとき

$$\begin{aligned}\theta_{total} &= \theta_\alpha + \eta_b + \theta_\beta + \theta_\gamma \\ &= \text{inv}(\cos^{-1}(r_b / r_k)) + (\pi - 4\chi_n \tan\alpha_n)/z - 2\text{inv}\alpha_t + \cos^{-1}(r_{max} / r_{if}) + \text{inv}(\cos^{-1}(r_b / r_{if})) \\ &= \cos^{-1}(r_{max} / r_k)\end{aligned}$$

となる. $\chi_t \tan\alpha_t = \chi_n \tan\alpha_n$, $r_k = (z + 2(1 + \chi_t))m_t/2$ より, 歯先円半径 $r_k = 57.2$ [mm], Tif径 $r_{if} = 50.2$ [mm]をそれぞれ代入し, 各方程式を解くと, $r_{min} \doteq 27.1$ [mm], $r_{max} \doteq 34.8$ [mm]となった. これより $r=30$ [mm]とした. これまで, r の値は経験的にピッチ円半径の6割程度として定めていたが, この歯車のピッチ円半径の6割は30.9 [mm]であり, 妥当な設定方法であったといえる. よって $\theta_3 = \cos^{-1}(r/r_b) = 51.5$ [deg]とした.

以上の結果を式(6)(7)(8)に代入し, $l_1 \doteq 221.9$ [mm], $l_2 \doteq 91.4$ [mm], $l_5 \doteq 27.7$ [mm], $l_{laser} \doteq 66.3$ [mm], $\theta_2 \doteq 14.1$ [deg]を算出し, 装置の設定を行った. また, アーム位置の設定を確認する方法として, 計測前に一度歯車を回し, その時に照射したレーザ光の端が歯底照射時に歯車の端と概ね一致していることをみるとよい.

4・2 はすば歯車を対象とした計測および損傷位置特定方法

図11に, 歯面上の各点とそれと計測結果との対応例を図13に示す. ①は基礎円上の歯形曲線開始点, ②は照射開始点, ③は歯面開始点, ④はピッチ点, ⑤は歯先開始点, ⑥は歯先中心点, ⑦は歯先終了点である. 反射光量に比例した電圧値は, 歯先のセミトップングに照射したとき最も卓越することがわかっている. レーザ光が約0.7 [mm]ほど厚さを有するため矩形波にはならないが, このときのピークをトリガとして歯先開始点⑤の位置と定義する. そして, 基礎円上のインボリュート曲線の開始点を図13のように θ_{f1} より逆算し, この位置を基準として, 式(1)(2)を用いて歯面の照射位置を特定する. ただし, 歯先に照射している場合は, 歯先幅中心角 ζ_k を最大として, 歯先照射分の回転角度から照射位置を特定する必要がある. 図12のようにインボリュート曲線の開始点から歯先の終わりまでの歯車回転角度 θ_e を示す.

Fig. 11 Shift of the irradiated points

Fig. 12 Rotation angle of the irradiated tooth tip

Fig. 13 Example of the measured data corresponding to each irradiated point

$$\theta_e = \theta_{f1} + \theta_{f2} + \zeta_k, \theta_{f1} = \text{inv}(\cos^{-1}(r_b/r_k)), \theta_{f2} = \cos^{-1}(r/r_k) - \cos^{-1}(r/r_b).$$

また、図 13 の結果では、歯先の終り⑦が、次の歯の歯形曲線開始点①よりも後に、歯面開始点③よりも前にあることから、前述の r の設定が適切に行われていることが確認できる。

4・3 はずば歯車損傷診断実験

表 1 の歯車を図 6 に示す診断装置試作機に取り付け、計測を行った。回転速度は 250 [rpm]、計測時のサンプリング周波数は 40 [kHz]、16 [bit]AD 変換ボードを使用した。損傷診断方法は以下のとおりである。まず、あらかじめ損傷前の状態でレーザ反射光の計測を行った後、歯面にセンタポンチでへこんだ傷をつけ、その損傷部の大きさをノギス（手動式、最小読み取り値 5/100 [mm]）で直接計測する。次に再度レーザ反射光の計測を行い、そのデータと損傷前のデータを比較し、値が変化した範囲とその位置から、前節の手法によって損傷部の大きさと位置を計算する。そして直接ノギスで計測した値と計算結果とを比較した。

損傷前後の計測結果と、その違いから損傷範囲を読み取り、式(2)を用いて歯たけ方向の位置と大きさに換算した結果、およびそれらを直接ノギスで計測した値の1例を図14に示す。まず、歯先のセミトッピング部から傷の中心までの距離と傷の歯たけ方向の大きさをノギスで計測したところ、それぞれ2.30 [mm]、0.65 [mm]であった。これに対し、計測結果から算出した値は、2.29 [mm]、0.67 [mm]であり、その差は0.02 [mm]以内であった。同様に、他の4か所に本研究の目標性能である打痕の検出を想定した約1 [mm]程度の傷を付け、その大きさを実測と計算で比較した結果を表2に示す。両者の差は0.08 [mm]以内、すなわち8 [%]以内であり、本論文で提案するレーザセンサの設置方法および計算方法は妥当であるといえる。

Fig. 14 Example of the measured data and comparison between calculated and measured results

Table 2 Results of comparison of damaged length between measured and calculated data

Unit: mm

Tooth surface	A	B	C	D
Measurements with a caliper	1.00	1.10	1.00	1.10
Calculated data from experiment	0.92	1.18	0.97	1.08
Difference	-0.08	0.08	-0.03	-0.02

5. 結 言

数万円程度のレーザーセンサ1つで、はすば・転位歯車にも対応可能な簡易型歯車歯面損傷診断装置の実現可能性を検討し、センサ設置法および損傷位置と損傷長さの算出方法について提案した。打痕等による1 [mm]程度の傷の検出を性能目標とし、転位したはすば歯車に約1 [mm]程度傷を付け、損傷位置と損傷長さを損傷前後のレーザー反射光計測結果より計算し、ノギスでの実測と比較したところ、測定差0.08 [mm]程度で特定することができ、目標を達成した。今後、この計算を自動化し、様々な方面での実用化を図る。

謝 辞

本研究は、元芝浦工業大学大学院大久保一弘氏、田淵淳也氏のご協力により行われました。また、三豊科学技術振興協会研究助成および精密測定技術振興財団助成を受けて行われました。厚く御礼申し上げます。

文 献

- (1) 藤尾博重・久保愛三・方素平・尾山一文・谷田貝豊彦・斎藤義昭・鈴木充男, “CCD イメージセンサを用いたレーザー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, Vol. 62, No. 598 (1996), pp. 2422-2430.
- (2) Nagata, M., Hirogaki, T., Aoyama, E., Iida, T., Uenishi, Y., Matsubara, M., Usui, Y., “Optimization of Method for Application of Tooth Contact Evaluation Using Infrared Ray Imagery (Inspection of Gears)”, *Proc. of the JSME International Conference on Motion and Power Transmissions (MPT2009-Sendai)*, pp. 169-174.
- (3) 田中英一郎・永村和照・池条清隆・根本良三・杉山達郎, “レーザー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, Vol. 73, No. 729 (2007), pp. 1545-1551.
- (4) Tanaka, E., Nagamura, K., Ikejo, K., Nemoto, R., “In Situ Diagnosis of a Gear-Tooth Surface Damage Using Laser Scattering”, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 5, No. 3 (2011), pp. 199-213.