Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00220

Received date : 12 July, 2021

Accepted date : 14 September, 2021

J-STAGE Advance Publication date : 30 September, 2021

ホブ盤診断システムのための歯車精度表現手法 (ネットワーク表現を用いたマトリクス画像の表現可能範囲)

河野 邦俊^{*1}, 射場 大輔^{*2}, 瓜生 耕一郎^{*1}, 井上 大暉^{*3}, 森脇 一郎^{*4}

Expression of gear-tooth-flank deviations for Hobbing-Machine-Diagnosis system (Learning-data collection through hobbing simulation and their compression with network representation)

Kunitoshi KAWANO^{*1}, Daisuke IBA^{*2}, Koichiro URIU^{*1}, Hiroki INOUE^{*3} and Ichiro MORIWAKI^{*4}

^{*1} Engineering department, Kashifuji works, LTD.

28 Kamota, Kamitoba, Minami-ku, Kyoto 601-8131, Japan

^{*2,*3,*4} Faculty of Mechanical Engineering, Kyoto Institute of Technology

Goshokaido-chou, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto 606-8585, Japan

Abstract

A hobbled gear has pitch, profile, and helix deviations caused by various factors. However it is hard for even experts to specify which factors cause individual deviations from the measured ones. Therefore, a hobbing-machine-diagnosis system could play a key role in identifying the factors from hobbled-gear deviations. Artificial intelligence for image recognition, which is comparatively easy to use, could be appropriate for the system. Generally, a larger number of training data for artificial intelligence could improve the system accuracy, however, it must take a longer time for learning. Besides, efficient learning requires small image data. Typical gear-deviation diagrams are large images that include unnecessary information for the diagnosis system. Therefore, the image data for training have only information on the correlation coefficients between the deviations of two teeth selected at a time. The present paper describes a method for providing image data for learning. The image is the arrangement of correlation coefficients in rows and columns as a grayscale. This paper also describes the relationship between the image and the hobbing problems; e.g., radial or face runouts. As a result, the image data showed clear characteristics for the difference in the periodicity of the hobbing problem, however, did not show clear characteristics for the difference in the directionality.

Keywords : Hobbing machine, Profile deviation, Helix deviations, Correlation coefficient, Artificial intelligence, Image recognition, Training data

1. 緒 言

ホブ切りされた歯車が有する歯形、歯すじ偏差の原因は多様であり、その原因を特定することは非常に困難である。そのためホブ切りされた歯車に歯形、歯すじ偏差が発生した場合、ホブ切り加工のどこに問題が生じたのか、ホブやワークの取付に原因があるのか、それともホブ盤の静的精度に原因があるのか、ホブ盤の静的精度に原因がある場合それはホブ盤のどの軸に関するものなのか、といった点を特定するためには多くの時間が必要となる。現在、数多くのホブ切りシミュレーションが存在しているが、これらはホブ切りの状態から加工された歯車の歯形、歯すじ偏差を求めるものである。加工された歯車の歯形、歯すじ偏差からホブ切りの状態を求める、いわゆる逆問題を解くことは非常に困難である。

No.21-00220 [DOI: 10.1299/transjsme.21-00220]

^{*1} 正員, (株) カシフジ (〒601-8131 京都府京都市南区上鳥羽鴨田 28)

^{*2} 正員, 京都工芸繊維大学 機械工学系 (〒606-8585 京都府京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

^{*3} 京都工芸繊維大学 (現 日新電機 (株))

^{*4} 正員, フェロー, 京都工芸繊維大学

E-mail of corresponding author: kawano@kashifuji.co.jp

そこで本研究では、ホブ切り加工された歯車の歯形、歯すじ偏差から、ホブ切り工程のどこにこれらの偏差の原因があったのかを画像分析用人工知能を用いて推定する、ホブ盤診断システムの開発を目的としている。人工知能による画像分析は一般的に広く使用されており、機械分野においてもこのような画像分析技術を利用し部品の破損を検知するなどの研究が行われている (Bui et al., 2019)。これら実績のある技術を活用して、システムの効率的な開発を目指す。

本研究では以下の順序でホブ盤診断システムの開発を進めている。

(1) ホブ切りシミュレーションの開発を行う。上述のような人工知能を用いた判別システムの場合、正答をラベル付けした大量のデータを人工知能に学習させておく必要がある (中山, 2015)。しかしそのようなデータを実際のホブ切りで大量に準備するのは困難であるため、ホブ切りシミュレーションを開発し、それを用いてデータの収集を行う。

(2) 歯形偏差、歯すじ偏差の画像データへの変換手法を検討する。画像分析用人工知能を用いるために、歯形偏差および歯すじ偏差を、必要な情報を保持した、より小さな画像データへと変換する必要がある。どのような画像データとすれば効率的かつ判別精度の良好なシステムを構築できるのか検討を行う。

(3) 人工知能を用いて判別テストを行う。シミュレーションにより収集したデータを使用して判別テストを行い、目標とする判別が可能であるのか確認を行う。

(4) 実加工された歯車を使用して判別テストを行う。(3)において学習用のデータと判別テスト用のデータは共にシミュレーションにより収集したデータを用いるが、ここでは判別テスト用のデータとして実加工で作成した歯車を使用して、(3)の場合と同等の判別が行えるかを確認する。

本研究の先行論文では、(1)および(2)について、座標変換を用いたホブ切りシミュレーションの内容と、それにより得られた歯形偏差、歯すじ偏差のデータを画像化する手法について論じた (河野他, 2020)。

ホブ盤診断システムの人工知能について考えた場合、歯車精度の偏差線図を並べて学習用画像データとして使用すると、情報を持たない白色の部分が大部分を占めるなど、画像判別用のデータとして無駄な部分が多い。また、偏差線図の倍率をどのように定めるのか、偏差線図を配置する間隔をどのようにするのかなど、画像化のためには多くのパラメータが必要になり、ある1つの歯車に対応した画像を一意的に定めることが困難である。そのため、別の画像化手法を検討する必要がある。

ホブ切りは歯車の歯溝を創成運動で加工する方法であるため、ホブ切り時の誤差運動は歯形偏差線図および歯すじ偏差線図に特定の周期性を持って現れる。そこで、本研究の先行論文では、歯形および歯すじ偏差線図の周期性の変化を表現するため相関係数に着目し、各歯の歯形、歯すじ偏差線図間の類似程度を相関係数として求めてマトリクス状に並べる方法を提案した。これにより、並べた相関係数を値に応じて色分けして画像とすることで意味のあるデータをより小さな画像として取り出すことが可能となった。また、提案した手法で作成された画像が、ホブ取付偏差やホブ溝数による歯形、歯すじ偏差の変化を表現できることを確認した。

しかし、提案した手法により作成された画像について、ホブ切り状態と出力される画像の関係の詳細な考察は行えていなかった。そこで本論文では、種々のホブ切り状態で加工シミュレーションを行い、ホブ切りされた歯車の偏差を計算する。そして、それらの結果を提案手法で画像化し、ホブ切り状態が画像にどのような特徴を示すのかについて検討する。さらに、画像の特徴とホブ切り状態との関連性を明らかにし、筆者らの提案した手法により得た画像がホブ盤診断システム用人工知能の学習データとして適用可能であるか考察する。

なお、測定歯形の設計歯形および歯すじに対する偏差は、JIS B 1702-1 で“歯形誤差”および“歯すじ誤差”と記載されている (日本産業規格, 2016a)。しかし、JIS B 1702-1 における英語表記が“profile deviation”および“helix deviation”であること、また本論文中で加工運動の目標に対するズレを JIS B 6190-1 に従って“誤差運動”英語では“error motion”と表記しているため (日本産業規格, 2016b) 同じ“誤差”表記の場合混乱を招く可能性があることを考慮し、本論文では測定歯形の設計歯形および歯すじに対する偏差を“歯形偏差”および“歯すじ偏差”と表記している。つまり、本論文中の“偏差”は歯車の歯面形状、“誤差”はホブ切り時の加工運動に関係することを表している。

2. 歯形，歯すじ偏差の相関係数とマトリクス画像による表現方法

各歯の偏差線図に表現される歯形，歯すじ偏差間の内積を用いて相関係数を導出する手法は，先行研究（野田他，2018）（Iba et al., 2019a, 2019b）により解説されているため省略する．導出される相関係数は $-1 \sim 1$ の範囲となり，値が大きいほど偏差線図が類似していることを示す．導出された相関係数を画像化する手法は本研究の先行論文にて解説しているため，ここでは簡単な説明にとどめる．まず，導出された相関係数をマトリクスに配置する．図1にマトリクスに並べる順序を示す．ここで Lp_{ij} は i 番歯と j 番歯間の左歯面歯形偏差の相関係数を， Rp_{ij} は右歯面歯形偏差の相関係数を， Ll_{ij} は左歯面歯すじ偏差の相関係数を， Rl_{ij} は右歯面歯すじ偏差の相関係数をそれぞれ表す．つまり，マトリクスの左半面は歯形偏差の相関関係を，右半面は歯すじの相関関係を表している．なお，同一歯番号が重なるセルは“1”とする．

マトリクスに並べられた相関係数の値により，各々のセルを，相関係数1の場合は白，-1の場合は黒とし，その間を中間色（グレー）で254段階に色分けする．これにより相関係数を画像として表現することができる．この画像を本論文では“マトリクス画像”と称する．

このようにして画像を作成した場合，どの歯を測定開始歯（1番歯）とするのか，また測定が時計回りに進むのか，反時計回りに進むのかによって出力される画像が変化する．これは人工知能を用いた画像判別を行ううえで，判別精度を低下させる原因となる．そこで我々は一つの歯車について，各々の歯を測定開始歯とし，測定を時計回りに進めた場合と反時計回りに進めた場合のマトリクス画像を作成し，それら全てを人工知能に教示する予定である．つまり，一つの歯車に対しその歯数の2倍のマトリクス画像を作成し，それら全てを学習データとする．これにより判別する歯車を測定する際にどの歯を1番歯としても，同じ判別結果になると考えられる．

	1	2	...	$n-1$	n	1	2	...	$n-1$	n
1	1	$Rp_{1,2}$		$Rp_{1,n-1}$	$Rp_{1,n}$	1	$Rl_{1,2}$		$Rl_{1,n-1}$	$Rl_{1,n}$
2	$Lp_{1,2}$	1		$Rp_{2,n-1}$	$Rp_{2,n}$	$Ll_{1,2}$	1		$Rl_{2,n-1}$	$Rl_{2,n}$
3	$Lp_{1,3}$	$Lp_{2,3}$		$Rp_{3,n-1}$	$Rp_{3,n}$	$Ll_{1,3}$	$Ll_{2,3}$		$Rl_{3,n-1}$	$Rl_{3,n}$
$\vdots$										
$n-1$	$Lp_{1,n-1}$	$Lp_{2,n-1}$		1	$Rp_{n-1,n}$	$Ll_{1,n-1}$	$Ll_{2,n-1}$		1	$Rl_{n-1,n}$
n	$Lp_{1,n}$	$Lp_{2,n}$		$Lp_{n-1,n}$	1	$Ll_{1,n}$	$Ll_{2,n}$		$Ll_{n-1,n}$	1

Fig. 1 A method of creating correlation coefficient matrix. “ Lp ” is profile of left flank, “ Rp ” is profile of right flank, “ Ll ” is lead of left flank, and “ Rl ” is lead of right flank. For example, “ $Rp_{3,5}$ ” represents the correlation coefficient between the profile deviations of right flank of tooth number 3 and 5. Each cell is painted in grayscale according to its value. The image obtained by this method is called “matrix image” in this paper.

3. 理想的なホブ切り状態に対するずれ

前述したように，ホブ切りされた歯車に生じる歯形，歯すじ偏差の要因は様々である．多角形誤差や送りマークといった幾何学的に生じるものを除くと，その要因は以下のように分類できる．

- (1) ホブの歯形偏差など，工具そのものの形状精度に起因するもの（日本産業規格，2016c）
- (2) ホブの取付振れなど，ホブやブランクの取付精度に起因するもの
- (3) ホブ主軸とテーブルの同期精度など，ホブ盤自身の精度に起因するもの（日本産業規格，1998）
- (4) 加工負荷による各部の変形や変位に起因するもの

それぞれの例を図2に示す．(2)，(3)，(4)はホブとブランク間の相対的な誤差運動である．これら誤差運動の中で，ホブとブランクの取付精度，およびホブ盤自身の精度に起因する歯車の歯形，歯すじ偏差をシミュレーションにより求めることは可能であるが，各部の変形，変位に起因する歯形，歯すじ偏差を求めることは非常に困難である．それは，ホブ切りが各切れ刃ごとに切削状態の異なる複雑な断続切削であることにより，切削負荷の生じる方向や大きさが刻一刻と変化するためである．つまりホブ切り加工中のある瞬間において，ホブと歯車

間の相対位置が切削負荷により変位する方向およびその量を計算で求めることが困難であるため、機械の変形に起因する歯形・歯すじ偏差を正確に求めることは難しい。

そのため、本研究にて開発を目指しているホブ盤診断システムでは、まず加工負荷による変形、変位の影響を除いた範囲について検証を行う。実際に診断する際には、JIS B 6216 に規定されているように低負荷で仕上ホブ切り加工を行った歯車を使用して診断する。その場合、加工負荷による変形がほとんど発生しない領域での加工であるため、変形に起因する歯車の歯形、歯すじ偏差を無視することが可能となる。加工負荷による変形、変位の影響については、高負荷で実加工された歯車の歯形、歯すじ偏差データを大量に集める必要があり、その収集には多くの時間が必要となる。まずは加工負荷の影響を除いた範囲でシステムを成り立たせた後、収集した実加工データをシステムに追加で学習させ、ホブ盤診断システムをより汎用的なものへ改良する予定である。

本論文では、ホブとブランクの取付精度、及びホブ盤自体の精度による誤差運動に着目した。それぞれ異なる取付振れ、直進軸誤差運動および回転軸誤差運動を有してホブ切り加工された歯車のマトリクス画像が、それぞれ異なった特徴を有する画像となるのか検証を行う。

Fig. 2 Examples of factors of profile and helix deviation in hobbing. Hobbing simulation can calculate the profile and helix deviation of gears caused by (1), (2) and (3), but it is difficult by (4). The hobbing-machine-diagnosis system targets (1), (2) and (3).

4. ホブ切り状態の違いによるマトリクス画像の変化

本論文で使用するホブ盤上の座標系を図3に示す。X軸は工具切込み方向であり、Z軸は加工時の工具送り方向、Y軸は工具のシフト方向である。また、A軸はX軸を回転中心軸とする工具旋回軸である。B軸はY軸を回転中心軸とする工具回転軸、C軸はワークスピンドル回転軸であり、これら2軸は加工中に同期して回転する。

ホブ切り時のホブとブランクの取付振れ、ホブ盤の直進軸誤差運動および回転軸誤差運動は、誤差運動の周期と方向によって分類することができる。例えばホブの取付振れの場合、誤差運動の周期はホブ1回転と等しく、その方向はX軸方向（切込み方向）とZ軸方向（送り方向）の合成である。マトリクス画像がホブ切り時に生じる誤差運動の周期ごと、およびその方向ごとの特徴を有することができれば、マトリクス画像はホブ盤診断システムに与える画像として有効であるといえる。

Fig. 3 Coordinate systems used in hobbing machine. The X-axis is tool cutting detection, the Y-axis is tool shifting detection, the Z-axis is the cutting feed detection, the A-axis is tool swiveling detection, the B-axis is tool rotating detection, the C-axis is gear rotating detection.

4・1 ホブ切り時に生じる誤差運動の周期とマトリクス画像

まず，周期の異なる誤差運動を含む以下の 5 条件でマトリクス画像の比較を行う．それぞれの誤差運動については図 4 にて解説する．

(A)理想的な状態でホブ切りした場合．

(B)ホブの取付振れがある場合（図 4 (B))．誤差運動の周期はホブ（B 軸）1 回転に等しく，その方向は X 軸方向と Z 軸方向の合成である．

(C)ブランクの取付振れがある場合（図 4 (C))．誤差運動の周期は歯車材 1 回転に等しく，その方向は X 軸方向と Y 軸方向の合成である．

(D)ホブと歯車の軸間が軸方向送りと共に広がる場合（図 4 (D))．Z 軸方向送り運動の歯車材回転中心軸に対する X 軸方向平行度偏差であり，本論文では“Z 軸走り偏差”と称する．誤差運動の周期は無限大であり，その方向は X 軸方向である．

(E)上記 (B)，(C)，(D) 全ての誤差運動を有する場合．

ここで，周期の違いのみによるマトリクス画像の変化を調べる場合，本来であれば誤差運動の方向を例えば X 軸方向のみにするなど，全ての条件で同じとすべきである．しかし，現実にはホブ盤上で起こりうる誤差運動で発生頻度の比較的高いものを考えると，誤差運動の方向は同じで周期のみが異なるという組み合わせはほとんど存在しない．そのため今回は，誤差運動の方向に共通して X 軸方向を含むもので，その発生周期が異なるものを選択し，比較を行った．誤差運動の大きさには，実際のホブ切りにて起こりえる量で，かつ歯形偏差もしくは歯すじ偏差に一般的な歯車測定で判別できる程度の変化を及ぼす量として，0.05mm を与えた．

計算に用いる歯車諸元，ホブ諸元，および加工諸元を表 1 に示す．また，得られたマトリクス画像を図 5 に示す．

Fig. 4 Error motions during hobbing used in the simulation. The error motion period of the hob runout is once per hob rotation, gear blank runout is once per blank rotation, Z axis running deviation is an infinite period. In this case, Z axis running deviation is parallelism deviation between Z axis of linear motion and rotation axis of blank.

Table 1 Specifications for the calculation.

	A	B	C	D	E
Gear data					
Normal module	3				
Number of teeth	15				
Normal pressure angle (deg.)	20				
Helix angle (deg.)	30 (RH)				
Prof. shift coefficient	0.8				
Face width (mm)	15				
Hob data					
Outer diameter (mm)	100				
Number of threads	1 (RH)				
Number of flutes	12				
Setting data					
Feed amount (mm/W.rev)	1.0				
Hob runout (mm)	0	0.05	0	0	0.05
Gear blank runout (mm)	0	0	0.05	0	0.05
Z axis running deviation (mm/100mm)	0	0	0	0.05	0.05

Fig.5 Matrix images simulated under conditions where the period of error motion is different. The matrix images have different characteristics depending on the period of error motion.

理想的な状態でホブ切りした (A) のマトリクス画像と他 4 条件のマトリクス画像を比較すると、それぞれの有する誤差運動の種類ごとに異なった特徴を持っていることがわかる。ここで、マトリクス画像の左半分は歯形偏差の相関関係を、右半分は歯すじ偏差の相関関係を表している。ホブ取付振れを有する (B) の場合、マトリクス画像の左半分が白くなっており、歯形偏差の相関係数が全ての歯間で 1 に近い値をとっていることを示す。ブランクの取付振れを有する (C) の場合、白と黒の分布領域が変化しており、相関係数の現れ方に違いがあることがわかる。Z 軸走り偏差を有する (D) の場合、マトリクス画像の右半分が白く変化しており、歯すじ偏差の相関係数が強相関に近づいていることを示している。上記 3 つの運動偏差を全て有す (E) の場合は、ホブ取付振れと歯車材取付振れの特徴を併せ持つマトリクス画像となっている。(E) の画像に Z 軸走り偏差の影響が現れていないのは、それぞれの誤差運動による切込みの変化量が、ホブ取付振れと歯車材取付振れの場合 $50\mu\text{m}$ であるのに対し、Z 軸走り偏差の場合 $7.5\mu\text{m}$ と小さいためだと考えられる。

以上のことから、各歯の歯形・歯すじ偏差から導出した相関係数を基に作成したマトリクス画像は、ホブ切り時に生じた誤差運動の周期の違いを表現できることがわかる。

4・2 ホブ切り時に生じる誤差運動の方向とマトリクス画像

次に、誤差運動の方向が異なる以下の 6 条件でマトリクス画像の比較を行う。

(A) 理想的な状態でホブ切りした場合。

(C) ブランクの取付振れがある場合。誤差運動の周期はブランク 1 回転に等しく、その方向は X 軸方向と Y 軸方向の合成である。

(F) ブランクを取付けた際に端面振れがある場合 (図 6 (F))。誤差運動の周期はブランク 1 回転に等しく、その方向は X 軸方向と Z 軸方向の合成である。

(G) ワークスピンドルが軸方向に変位する場合 (図 6 (G))。誤差運動の周期はブランク 1 回転 (=ワークスピンドル 1 回転) に等しく、その方向は Z 軸方向である。

(H) ワークスピンドルに角度偏差を有する場合 (図 6 (H))。誤差運動の周期はブランク 1 回転に等しく、その方向は C 軸方向である。

(I) 上記 (C), (F), (G), (H) 全ての誤差運動を有する場合。

それぞれの誤差運動について図 6 にて解説する。(C) は 4・1 節で示した例と同一であるため省略する。

Fig. 6 Error motions during hobbing used in the simulation. The period of these error motions is equal to once per blank rotation, but the directions are different.

ここで、(A) および (C) は 4・1 節で示した例と同一である。F は歯切治具とブランクの間に切りくずなどを挟むことにより生じ、ワークスピンドルの回転中心軸（C 軸）に対してブランクの中心軸が傾くことを想定している。(G) はワークスピンドルに組み込まれているスラスト軸受に何らかの問題があるときに生じ、ブランクが姿勢を保ったまま軸方向に変位することを想定している。その周期は問題の内容によりブランク 1 回転に等しい場合と、ブランク 2 回転に等しい場合がある。今回は比較内容の趣旨に基づき、周期がブランク 1 回転に等しい場合について検討する。(H) はワークスピンドルに接続されている減速機内の歯車にピッチ偏差がある場合などに生じる。ここでは最終減速機構としてワークスピンドルに直結されるウォームホイールに、1 回転当たり 1 周期の累積ピッチ偏差がある場合を想定する。そのため誤差運動の周期はブランク 1 回転に等しくなる。

計算に用いる加工諸元を表 2 に示す。ホブ諸元と歯車諸元は表 1 と同じであるため省略する。計算により得られたマトリクス画像を図 7 に示す。

Table 2 Specifications for the calculation. The gear data and the hob data are same as Table 1, so it is omitted.

	A	C	F	G	H	I
Setting data						
Feed amount (mm/W.rev)	1.0					
Gear blank runout (mm)	0	0.05	0	0	0	0.05
Camming of blank (mm)	0	0	0.05	0	0	0.05
Axial slip of blank (mm)	0	0	0	0.05	0	0.05
Deviation of blank rotation angle (°)	0	0	0	0	0.05	0.05

Fig.7 Matrix images simulated under conditions where the direction of error motion is different. The matrix images have slightly different characteristics depending on the direction of the error motion. But these characteristics are not as clear as the matrix images with different period.

上記 6 種の結果を比較すると、理想状態のホブ切り (A) と誤差運動のある 5 種のマトリクス画像の間にははっきりとした違いが見てとれる。ホブ切り時に誤差運動のある 5 種のマトリクス画像間では、白色部（相関係数が正に大きい部分）領域の形状や、白色部と黒色部（相関係数が負に大きい部分）境界の明瞭さに違いがある。例えば (C) と (G) を比較すると白部領域の形状が異なり、(C) と (F) を比較すると画像左半分（歯形偏差側）において (C) の方が白色部と黒色部の境界が明瞭である。しかし、4・1 節の誤差運動の周期が異なる場合と比較すると、明確な違いは少ない。この結果より、各歯面の歯形、歯すじ偏差間の相関係数より得られるマトリクス画像は、誤差運動の周期に対しては感度が高いが、その方向に対しては感度が低いことがわかる。

前述したようにマトリクス画像は各歯面の歯形、歯すじ偏差間の相関係数より求められる。その相関係数は歯形、歯すじ偏差線図をある波形の一部とした際に、各歯間において波形の位相がどの程度ずれているのかを示す指標である。誤差運動の周期が異なる場合、それに伴い歯形、歯すじ偏差の変化する周期、つまり 1 歯毎に波形の位相がどの程度ずれるのかが異なる。これに対し誤差運動の方向は異なるが周期が等しい場合、歯形、歯すじ偏差の大きさは各条件で異なる結果となっても、1 歯毎に波形の位相がずれる割合は全ての条件で等しくなる。そのため歯形、歯すじ偏差の大きさや、歯形偏差と歯すじ偏差のどちらが大きくなるか、といった違いによりマトリクス画像はわずかに変化するものの、画像全体の傾向としては類似のものとなると考えられる。

5. 理想的な状態でホブ切りされた歯車の歯形、歯すじ偏差に対する相関係数

1 つの歯車内で相関係数を計算しマトリクス画像として表現した場合、誤差運動の方向に対する感度が低かった。そこで、誤差運動の方向の変化に対してより感度が高くなるマトリクス画像を探るために、理想的な状態で加工した歯車とホブ切り時にそれぞれの誤差運動を有して加工した歯車との間の相関係数についてもマトリクス画像として表した。

5・1 2 つの歯車間の相関係数を用いたマトリクス画像表現方法

ここでは理想的状態でホブ切りした歯車を“基準歯車”とし、マトリクス画像として表現する歯車を“対象歯車”とする。当然、基準歯車と対象歯車は同一諸元でなければならない。まず、基準歯車のある 1 歯に対して、対象歯車の全歯で相関係数を求める。相関係数の計算方法はこれまでと同一であるため説明を省略する。相関係数は、左歯面歯形偏差、右歯面歯形偏差、左歯面歯すじ偏差、右歯面歯すじ偏差それぞれについて求める。

これら計算した相関係数をマトリクスに配置する方法を図 8 に示す。マトリクスの行には基準歯車の歯番号を、列には対象歯車の歯番号を対応させる。 Lp , Rp , Ll , Rl の意味は図 1 と同一である。例えば “ Lp_{ij} ” の場合、基準歯車の i 番歯と対象歯車の j 番歯の左歯面偏差線図間で求めた相関係数を当てはめる。そして、各セルをその相関係数の値に応じてグレースケールで色分けすることで、マトリクス画像として表現する。

		Tooth number of target gear											
		1	2	...	$n-1$	n	1	2	...	$n-1$	n		
Tooth number of reference gear	1	$Lp_{1,1}$	$Lp_{1,2}$			$Lp_{1,n-1}$	$Lp_{1,n}$	$Rp_{1,1}$	$Rp_{1,2}$			$Rp_{1,n-1}$	$Rp_{1,n}$
	2	$Lp_{2,1}$	$Lp_{2,2}$			$Lp_{2,n-1}$	$Lp_{2,n}$	$Rp_{2,1}$	$Rp_{2,2}$			$Rp_{2,n-1}$	$Rp_{2,n}$
	$\vdots$												
	$n-1$	$Lp_{n-1,1}$	$Lp_{n-1,2}$			$Lp_{n-1,n-1}$	$Lp_{n-1,n}$	$Rp_{n-1,1}$	$Rp_{n-1,2}$			$Rp_{n-1,n-1}$	$Rp_{n-1,n}$
	n	$Lp_{n,1}$	$Lp_{n,2}$			$Lp_{n,n-1}$	$Lp_{n,n}$	$Rp_{n,1}$	$Rp_{n,2}$			$Rp_{n,n-1}$	$Rp_{n,n}$
	1	$Ll_{1,1}$	$Ll_{1,2}$			$Ll_{1,n-1}$	$Ll_{1,n}$	$Rl_{1,1}$	$Rl_{1,2}$			$Rl_{1,n-1}$	$Rl_{1,n}$
	2	$Ll_{2,1}$	$Ll_{2,2}$			$Ll_{2,n-1}$	$Ll_{2,n}$	$Rl_{2,1}$	$Rl_{2,2}$			$Rl_{2,n-1}$	$Rl_{2,n}$
$\vdots$													
$n-1$	$Ll_{n-1,1}$	$Ll_{n-1,2}$			$Ll_{n-1,n-1}$	$Ll_{n-1,n}$	$Rl_{n-1,1}$	$Rl_{n-1,2}$			$Rl_{n-1,n-1}$	$Rl_{n-1,n}$	
n	$Ll_{n,1}$	$Ll_{n,2}$			$Ll_{n,n-1}$	$Ll_{n,n}$	$Rl_{n,1}$	$Rl_{n,2}$			$Rl_{n,n-1}$	$Rl_{n,n}$	

Fig. 8 A method for creating correlation coefficient matrix between a reference gear and a target gear. The reference gear is a hobbled gear with ideal condition. The target gear is a gear to be converted into a matrix image. The row of the matrix represent the tooth number of the reference gear. The column of the matrix represent the tooth number of the target gear. “ Lp ”, “ Rp ”, “ Ll ” and “ Rl ” are same as the explanation in Fig.1. For example, “ $Rp_{3,5}$ ” represents the correlation coefficient between the profile deviations of the right flank of the reference gear tooth number 3 and the target gear tooth number 5.

5・2 理想的な状態でホブ切りされた歯車に対して表現したマトリクス画像の比較

4 章の (A) ～ (H) の諸元の歯車を、理想的な状態でホブ切りされた歯車に対するマトリクス画像として再度表現し、比較を行った。しかし、4 章の結果と同様に、誤差運動の周期の違いに関してはそれぞれ異なる特徴が現れたが、方向の違いについては異なる特徴が現れなかった。代表的な例として、ホブ取付振れを有する (B)、ワークスピンドルの軸方向変位を有する (G)、ワークスピンドルの回転角偏差を有する (H) について図 9 に示す。

このように、相違点がわずかなマトリクス画像に対しても人工知能が正しく判別するのか、今後確認する必要がある。その際、マトリクス画像に相違点が現れるか否かという結果は同じであったが、より情報量の少ない、1 つの歯車から表現した図 7 と同等のマトリクス画像を使用して検証する。

(B) With hob runout

(G) With axial slip of blank

(H) With deviation of blank rotation angle

Fig.9 Examples of matrix image created by the method shown in Fig. 9. Different characteristics appear when the period of error motion is different, such as (B) and (G). However, when the direction of error motion is different like (G) and (H), different characteristics do not appear.

6. 結言

本論文では各歯間の歯形，歯すじ偏差の相関係数から得られるマトリクス画像について，ホブ切り時に生じた誤差運動による歯形，歯すじ偏差への影響を表現できるのか確認した．その結果，以下の知見を得た．

- ・マトリクス画像は，ホブ切り時に生じた誤差運動の周期の違いを明確に表現できる．
- ・マトリクス画像は，ホブ切り時に生じた誤差運動の方向の違いをわずかに表現できる．
- ・マトリクス画像は，ホブ切り時に生じた誤差運動の周期に反応する感度は高く，方向に反応する感度は低い．

今後は，実際に人工知能にマトリクス画像を学習させ，理想的なホブ切り状態に対する種々のずれについて判別できるのか，またそのずれが複数ある場合にそれぞれを判別可能であるのか検証を行う．

文 献

- Bui, K. H., Iba, D., Ishii, Y., Tsutsui, Y., Miura, N., Iizuka, T., Masuda, A., Sone, A. and Moriwaki, I., Vibration-based plastic-gear crack detection system using a convolutional neural network - Robust evaluation and performance improvement by re-learning, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 13, No. 6 (2019), p.19-00315.
- Iba, D., Inoue, H., Noda, H., Kim, M. and Moriwaki, I., Networks of tooth helix deviations of ground and super-finished gears – Phase edges and intensity vertices, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 33 (2019), pp. 5689-5697.
- Iba, D., Noda, H., Inoue, H., Kim, M. and Moriwaki, I., Visualization of phase differences between tooth helix deviations using graph theory, *Forschung im Ingenieurwesen*, Vol. 83 (2019), pp. 529-535.
- 日本産業規格，ホブ盤－精度検査，JIS B 6216:1998 (1998).
- 日本産業規格，円筒歯車－精度等級－第1部：歯車の歯面に関する誤差の定義及び許容値，JIS B 1702-1:2016 (2016a).
- 日本産業規格，工作機械試験方法通則－第1部：幾何精度試験，JIS B 6190-1:2016 (2016b).
- 日本産業規格，歯車用ホブの精度，JIS B 4355:2016 (2016c).
- 河野邦俊，射場大輔，瓜生耕一郎，野田英克，井上大暉，森脇一郎，人工知能を用いたホブ盤診断システム（ホブ切りシミュレーションによる学習データの生成とネットワーク表現によるデータ圧縮），*日本機械学会論文* 文集 (2020)，DOI: 10.1299/transjsme.20-00026.
- 中山英樹，深層畳み込みニューラルネットワークによる画像特徴抽出と転移学習，*信学技報*，Vol.115, No.146 (2015)，pp.55-59.

野田英克, 射場大輔, 金明洙, 森脇一郎, はすば歯車の歯すじ誤差間の相関関係のグラフ, 日本機械学会 2018 年度年次大会講演論文集 (2018), Session ID. S1110305.

References

- Bui, K, H., Iba, D., Ishii, Y., Tsutsui, Y., Miura, N., Iizuka, T., Masuda, A., Sone, A. and Moriwaki, I., Vibration-based plastic-gear crack detection system using a convolutional neural network - Robust evaluation and performance improvement by re-learning, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 13, No. 6 (2019), p.19-00315.
- Iba, D., Inoue, H., Noda, H., Kim, M. and Moriwaki, I., Networks of tooth helix deviations of ground and super-finished gears – Phase edges and intensity vertices, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 33 (2019), pp. 5689-5697.
- Iba, D., Noda, H., Inoue, H., Kim, M. and Moriwaki, I., Visualization of phase differences between tooth helix deviations using graph theory, *Forschung im Ingenieurwesen*, Vol. 83 (2019), pp. 529-535.
- Japanese Standards Association, Gear hobbing machines-Test conditions of the accuracy, JIS B 6216:1998, (1998), (in Japanese).
- Japanese Standards Association, Cylindrical gears-ISO system of flank tolerance classification-Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth, JIS B 1702-1:2016, (2016a), (in Japanese).
- Japanese Standards Association, Test code for machine tools-Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions, JIS B 6190-1:2016 (2016b), (in Japanese).
- Japanese Standards Association, Gear hobs-Accuracy requirements, JIS B 4355:2016 (2016c), (in Japanese).
- Kawano, K., Iba, D., Uriu, K., Noda, H., Inoue, H. and Moriwaki, I., Hobbing-Machine-Diagnosis system with artificial intelligence (Learning-data collection through hobbing simulation and their compression with network representation), *Transactions of the JSME* (2020) (in Japanese), DOI: 10.1299/transjsme.20-00026.
- Nakayama, H., Image feature extraction and transfer learning using deep convolutional neural networks, *IEICE Technical Report*, Vol.115, No.146 (2015), pp.55-59 (in Japanese).
- Noda, K., Iba, D., Kim, M. and Moriwaki, I., Graph of correlation function between helix form deviations of helical gears, *JSME Annual Meeting 2018* (2018), Session ID. S1110305 (in Japanese).