三次元変形を含むタイヤの画像解析による非接触面内ひずみ分布計測

Noncontact monitoring of in-plane strain distribution of tire including 3D deformation using image processing

○ 平岡 直樹 (東工大院)

Naoki HIRAOKA, Graduate Student of Tokyo Institute of Technology

松崎 亮介 (東工大)

轟 章 (東工大)

Ryosuke MATSUZAKI, Tokyo Institute of Technology

Akira TODOROKI, Tokyo Institute of Technology

Key Words: Intelligent tire, Digital image correlation, Spotlight projection, Image processing, Noncontact measurement

路面状態検知のため、走行中のタイヤのひずみ分布・転がり半径を計測するインテリジェントタイヤの開発が期待されている。そこでホイール部に取り付けたカメラの画像撮影によって、三次元的な変形を含むタイヤ内面のひずみ分布を非接触で計測するシステムを開発した。このシステムは、タイヤの転がり半径をスポット光投影法で計測し、デジタル画像相関法で計測した面内変形量を補正することで、一台のカメラ、一度の撮影でタイヤの二次元ひずみ分布計測を可能とした。開発した計測システムをタイヤ圧縮試験に適用し、タイヤ接地面の二次元ひずみ分布が計測可能であることを実証した。

1. 緒言

近年、自動車の ABS の性能向上や路面状態の検知などを目的として、タイヤと路面との摩擦係数やスリップ率を計測するインテリジェントタイヤの開発が期待されている。摩擦係数を知るためにはタイヤに負荷されている荷重、すなわちタイヤのひずみ分布を計測する必要がある、スリップ率を知るためには転がり半径の計測が必要となる⁽¹⁾。しかし、ひずみゲージなどの接着型センサを用いた場合、柔軟材料であるタイヤゴムとの弾性率の差異により、センサがタイヤゴムから剥離するという問題がある。

そこで、本研究ではタイヤ内部のホイールリム部に小型 CCD カメラを 1 台設置し、撮影したタイヤ内部底面の画像から、デジタル画像相関法とスポット光投影法を用いてタイヤの面内ひずみ分布を計測するシステムを提案する。この手法は非接触計測であるため弾性率の差異に起因する問題を回避でき、また光学的な計測のため撮影範囲に対して全視野的な分布計測が可能となる。

タイヤのように測定対象が三次元的な変形を含む場合、面外変位が存在することで対象とカメラの間の撮影距離が変化し、それに伴って撮影画像が画像中心点を対象点として拡大・縮小されるため単一カメラでは表面ひずみを測定することができない⁽²⁾。よって、本手法では、スポット光投影法を使用して対象とカメラ間の距離を計測し、その面外方向の位置情報を用いてデジタル画像相関法で求めた面内変形量を修正することで、対象の表面ひずみ分布を計測する。

タイヤの圧縮試験に対して開発した計測方法を適用し、同手法により三次元変形を含むタイヤ接地面の面内ひずみ分布の計測が可能であるかということを実験的に検証する。

2. 三次元測定法

2-1 計測原理 カメラの撮影画像は二次元情報であるため、画像撮影のみでカメラ軸方向の変位を含む三次元変形を計測することは不可能である。そこで本研究では、計測ユニット上に複数

のレーザダイオードを設置し、レーザ光を使用した三角測量法であるスポット光投影法でカメラ軸方向の変形を計測しつつ、デジタル画像相関法で面内の変形量を計測する。デジタル画像相関法とは、画像のデジタル情報を用いて変形前後の画像における同一領域の探索を行う手法である。変形前の画像から任意の領域を取り出し、その領域が変形後の画像上でどこに移動したかを探索することで、画像の面内変形量を計算することができる。このとき、変形前後の領域を比較して、式(1)にある相関係数 R が最大となる点を同一点とする。

$$R(u, v) = \frac{\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m \{ (F(x, y) - \bar{F}) (G(x+u, y+v) - \bar{G}) \}}{\sqrt{\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m (F(x, y) - \bar{F})^2} \sqrt{\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m (G(x+u, y+v) - \bar{G})^2}} \quad (1)$$

ここで、 F 、 G はそれぞれ変形前後の画像から切り取った領域の輝度値であり、 $\bar{F}$ 、 $\bar{G}$ は各領域の平均輝度値、 u 、 v がそれぞれ x 、 y 方向の領域の移動量、 n 、 m が領域の x 、 y 方向の大きさである。画像内の面内変形量から、撮影距離の変化に起因する変形量を差し引くことで、正確な測定対象表面の面内変形量を求める。得られた変形量の微分値を計算し、ひずみを求める。

2-2 計算方法 カメラ軸方向の変形計測には 8 個のレーザダイオードを使用する (図 1)。撮影範囲全体のひずみ分布を計測するためには、同じ範囲内のカメラ軸方向の変形量を計測する必要がある。スポット光投影法は点計測でありスポット光がある箇所の変形量しか計測できないため、撮影画像内の複数点の計測値から範囲全体の変形量を平面で近似し、測定点以外の変形量を推定する。その後、パターンマッチングを撮影画像全体に適用し、撮影範囲内の面内変形量を測定する。面内変形量の微分がひずみとなるが、測定データから直接数値微分を実行するとノイズが大きくなるという問題があるため、計測した面内変形量を多項式関数で近似し、その微分からひずみを計算する。

3. タイヤ圧縮試験

3-1 実験方法 実験装置の概略図を図2に示す。市販ラジアルタイヤ（タイヤ幅 185 mm, 扁平率 65%, リム径 14 インチ）に対し圧縮試験を実施し、その際のタイヤ接地部の面内ひずみを画像撮影によって計測する。図のようにタイヤホイールリム部にレーザダイオードおよび CCD カメラから構成される計測ユニットを設置し、タイヤに万能試験機で圧縮変位を加えた。圧縮速度は 2mm/min で最大 20mm の圧縮変位を加えた。撮影時には万能試験機は一時停止させている。電源等のケーブルを取り出すためにホイール部に穴を開けたので、タイヤに高圧は負荷されていない。また結果比較のため、タイヤ底面に低弾性材料用ひずみゲージ（KYOWA KFML 5-350-C1）を貼付し、撮影範囲内におけるタイヤ圧縮時に発生する周方向ひずみ分布を計測した。

3-2 実験結果と考察 まず、低弾性材料用ひずみゲージで計測した圧縮時のタイヤ底面に発生するひずみ変化分布を図3に示す。横軸がタイヤ底面の中心からの周方向位置、縦軸が初期状態からのひずみの変化量である。測定範囲内では、全体的に引張のひずみが増大していることが分かる。タイヤは荷重負荷時に接地中心部で引張、接地端部で圧縮ひずみが発生

Fig.1 Diagram of out-of-plane displacement measurement using spotlight projection.

Fig.2 Experimental setup of tire compression for in-plane strain distribution measurement.

Fig.3 Incremental strain distribution of ground plane of compression tire measured using strain gauge.

するため、この結果は妥当である。 $x=0$ mm のタイヤ中央付近では変化量が小さいが、これはタイヤに圧力が負荷されておらず初期状態で相当の変形がすでに発生しているため、圧縮変位が負荷されてもあまりひずみが増大する余地がないからである。

開発したシステムで計測した圧縮変位 10, 20 mm における円周方向ひずみ分布を図4に示す。横軸がタイヤ底面における円周方向座標、縦軸がタイヤ幅方向座標である。ひずみの絶対値はやや異なるが、ひずみゲージで計測したときと同様の分布傾向が計測できていることが分かる。

(a) Stroke is 10mm.

(a) Stroke is 20mm.

Fig.4 Strain distribution of ground plane of compression tire measured by combinational method using DICM and spotlight projection.

4. 結論

タイヤのひずみ分布を非接触計測する手法として、カメラの画像撮影による計測法を提案した。スポット光投影法とデジタル画像相関法を組み合わせることで、一台のカメラによる一度の撮影で三次元変形を含む対象のひずみ分布計測が可能なシステムを開発した。タイヤの圧縮試験に開発したシステムを適用することで、タイヤ接地面に発生した二次元的なひずみ分布を計測できることを実証した。

参考文献

- (1) Ryosuke Matsuzaki, Akira Todoroki, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 2-2, 2008, 269-280, doi: 10.1299/jmmp.2.269.
- (2) C. J. Tay, C. Quan, Y. H. Huang, Y. Fu, *Optics Communications*, Vol. 251, Issues 1-3, 2005, 23-36