

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 1 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760066

研究課題名（和文）画像解析を利用した非接触型インテリジェントタイヤシステムの開発

研究課題名（英文）Development of Non-Contact Intelligent Tires using Image Analysis

研究代表者

松崎 亮介（MATSUZAKI RYOSUKE）

東京理科大学 理工学部 機械工学科・講師

研究者番号：20452013

研究成果の概要（和文）：

タイヤのひずみ、および転がり半径を非接触同時計測する手法として、ホイール部に設置した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対象の面外変位と面内ひずみの同時計測が可能なシステムを開発した。実際に、自動車用ラジアルタイヤに適用し、転がり半径と内側の面内ひずみ分布を計測した結果、高い精度で分布計測することが可能であることを実証した。

研究成果の概要（英文）：

We proposed a noncontact concurrent monitoring method for measurements of tire in-plane strain and out-of-plane displacement (rolling radius) by embedding a CCD camera on wheel rim. By combining digital image correlation method and spotlight projection, in-plane and out-of-plane displacement can be obtained from one image taken by a single camera. The proposed system was applied to automobile radial tires and it was proved to be able to measure rolling radius and in-plane strain distribution with high accuracy.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 2010年度 | 800,000   | 240,000 | 1,040,000 |
| 2011年度 | 900,000   | 270,000 | 1,170,000 |
| 総計     | 2,800,000 | 840,000 | 3,640,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械材料・材料力学

キーワード：構造ヘルスマモニタリング，スマートストラクチャ，自動車，ひずみ計測

## 1. 研究開始当初の背景

2007年9月より米国で販売される全ての自動車に対して、タイヤ空気圧監視装置（TPMS）の装着義務化が開始される。この法案化を受けて現在日本でも車両制動制御の向上を目的として、タイヤひずみ計測センサを備えたインテリジェントタイヤの開発

が急務となっている。しかし提案されているセンサは、タイヤにセンサを直接接着する方法であり、長期間の使用により柔軟材料であるゴムからはく離する問題があり難航している。

以上の背景から、タイヤ内部に設置可能な小型・安価・非接触でタイヤの面内面外変形

を全視野計測するシステム構築が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究では、ホイールリムにイメージセンサと複数レーザダイオードを装着し、画像処理診断から非接触でタイヤの3次元変形を全視野計測するシステムを構築する。まずタイヤの面内変形は、取得した画像の特徴ピクセル移動量から2次元ひずみ分布として算出する。さらに複数レーザ光をタイヤ内側表面に照射し、これを参照することで、非接触でタイヤの面外変形を読み取る。

本技術を用いてホイール寿命の10年以上の長期に相当する疲労回数までタイヤ変形計測を実施する。さらにこのデータを用いてブレーキ圧制御を行いABSなどのトラクション制御効率を15%以上向上させることを目的とする。これによりトラクションロスの少ない走行による低燃費車実現を目指す。また走行中のタイヤ状態に関する多くの長期的な技術的情報が得られ、自動車メーカーにフィードバックすることで、タイヤから車両安全を高める新しい基盤の構築を目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 画像解析

本研究では、図1に示す単一 CCD カメラと複数レーザダイオードからなる計測システムに画像解析、スポット光投影法、デジタル画像層間法を組み込み、単一カメラによるタイヤ内部3次元変形計測システムを構築する。

スポット光投影法はレーザ光と撮影方向の間の角度を利用した三角測量法であり、ポイント測定しかできない代わりに、簡便な装置で高精度な面外変位測定が可能な手法である。デジタル画像相関法は面内のパターンの移動量を計算する手法であり、特殊な光源などの外部装置を必要としないため、タイヤ内部のようなセンサの設置空間自体が狭く、また振動などの外部の影響が大きい環境でも問題なく使用することができる。本研究では図2のような画像を CCD カメラによって収録し、スポット光の位置から面外変位を、スポット光以外の部分のランダムパターンから面内変形量を計算する。なお、本研究では画像収録から解析、計算までの全てのプログラムを LabVIEW を用いて作成した。

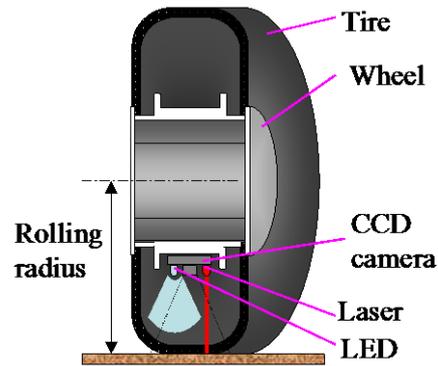


Fig.1 Non-contact 3D deformation measurements for intelligent tires.

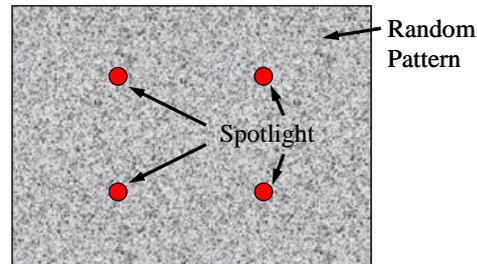


Fig. 2 Schematic diagram of shot image for combinational method using DICM and spotlight projection.

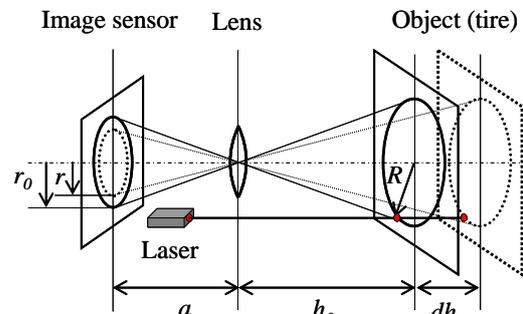


Fig. 3 Relation between locations of spotlight on the object and image sensor.

### (2) スポット光投影法

スポット光投影法の測定原理を図3に示す。レーザを測定対象に照射し、対象上のある地点にスポット光を作成する。スポット光のイメージセンサ上の位置を探索することでスポット光がある位置の面外変位を計算する。幾何光学的な関係から移動後の面外位置  $h$  とスポット光位置  $r$  の位置との間には次のような式が成り立つ。

$$h = h_0 + dh = h_0 \frac{r_0}{r} \quad (1)$$

ここで、 $h_0$  は基準となる面外方向初期位置、 $r_0$  は初期位置における画像上のスポット光位置である。複数のレーザ光を使用することで撮影範囲内の複数点における面外変位を計算し、各点の間を関数で補間することで撮影範囲全体の面外変位を推測する。

### (3) デジタル画像相関法

デジタル画像では、画像情報は画素ごとのデジタル情報（輝度値）によって表すことができる。8 bit のグレースケール画像の場合は、任意の画素は 0 ~ 255 の 256 段階の整数値によって明暗を表現される。デジタル画像相関法はこ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 (ROI: Region Of Interest) 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、相関係数  $R$  が最大となる点を同一点とする。

## 4. 研究成果

### (1) タイヤへの適用

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、その際のタイヤ底面の面外変位、面内ひずみを計測する。試験は図 4 に示すように、タイヤホイール内部に計測ユニット、および面外変位を計測するためのレーザ変位計を設置し、そこに万能試験機で圧縮変位を加えた。計測ユニットはホイールリム部にゴムバンドを用いて固定し、計測ユニットの電源および映像出力ケーブルはホイールリムの一部を切り取り、そこから外部に接続した。よって、今回の実験ではタイヤには高圧空気による内部圧力は負荷していない。そのため、今回の実験では実際に使用されているタイヤとは異なるひずみ・変形が発生する。また、タイヤは梁のように理論的にひずみを計算することが非常に困難なので、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、圧縮時に発生するひずみを計測した。クロスヘッドスピードは 2 mm/min で最大 20 mm の圧縮を加えた。実際の回転タイヤでは撮影範囲が接地したときに画像を撮影するが、今回は静的な変形なので画像撮影間隔は 3sec/画像とした。タイヤ底面にはマッチングがしやすいように、白色スプレーで適当なランダムパターンを描いた。

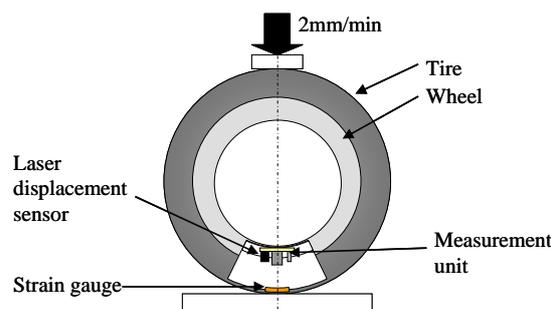


Fig.4 Experimental setup for in-plane strain and out-of-plane displacement measurement of tire.

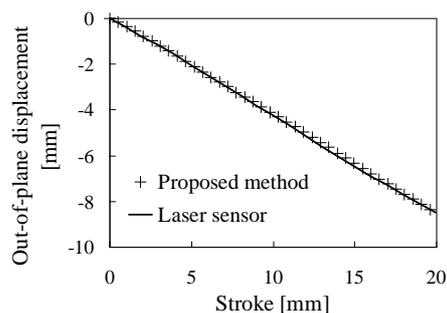


Fig.5 Comparison of proposed method and laser displacement sensor result of out-of-plane displacement of tire.

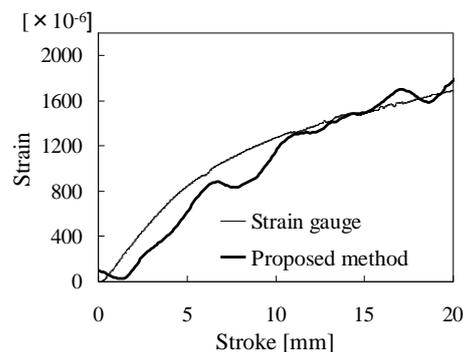


Fig.6 Comparison of proposed method and strain gauge result of in-plane strain of tire.

### (2) 面外変位・面内ひずみ計測結果

計測ユニット - タイヤ底面間の面外方向変位について、レーザ変位計の計測値と開発したシステムによる計測結果の平均値との比較を図 5 に示す。横軸がタイヤの圧縮変位、縦軸が計測された面外変位である。両者の結果に最大で約 0.1 mm の差異が発生しているが、タイヤ底面には元々わずかな凹凸があるために、測定箇所によって結果に違いが出たと考えられる。

タイヤ底面における円周方向ひずみについて、ひずみゲージの計測値と開発したシステムによる計測結果との比較を図 6 に示す。十分な精度で計測ができており、開発したシ

システムはタイヤに有効であることが確認された。

### (3) 面内ひずみ分布計測

タイヤに圧縮荷重が負荷されるとタイヤ底部内表面の中心部で引張、周囲の接地端部で圧縮ひずみが発生する。すなわち、ひずみが引張から圧縮に変化する場所を計測することによって、タイヤの接地面積を直接的に計測することができる。本研究で用いている光学的計測は一度の撮影で撮影範囲内全体のひずみ計測が可能であるので、撮影範囲内におけるタイヤ表面のひずみ分布計測を試みた。

低弾性材料用ひずみゲージで計測したタイヤ圧縮時のひずみ分布変化を図 7 に示す。横軸がタイヤ底面における円周方向座標、縦軸がひずみである。測定点はいずれも引張の範囲内であり、圧縮変位が増大するごとに引張方向にひずみが増大する。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 8 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を実証した。

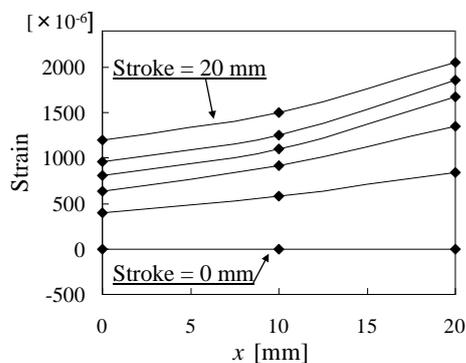
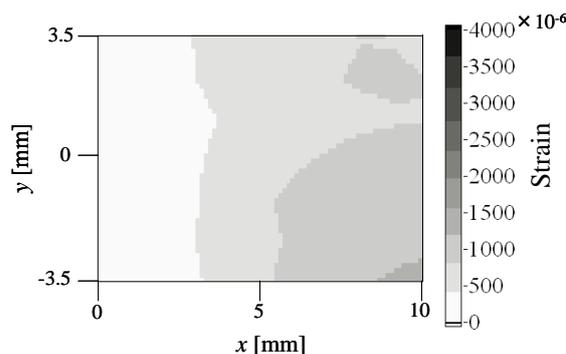
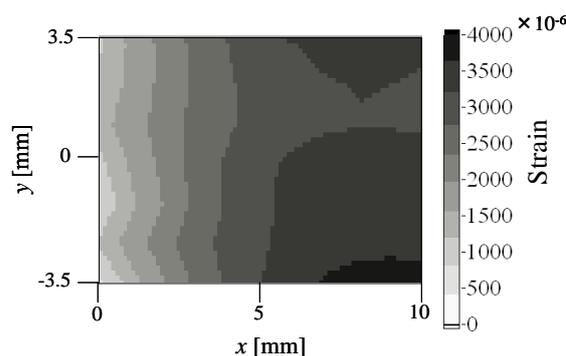


Fig.7 Incremental strain distribution of ground plane of tire measured using strain gauge.



(a) Stroke is 10 mm.



(b) Stroke is 20 mm.

Fig.8 Strain distribution of ground plane of tire measured by combinational method using DICM and spotlight projection.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① R. Matsuzaki, N. Hiraoka, A. Todoroki and Y. Mizutani, Optical 3D deformation measurement utilizing non-planar surface for the development of an “Intelligent Tire”, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 4-4 (2010), pp.520-532. 査読あり
- ② N. Hiraoka, R. Matsuzaki and A. Todoroki, Concurrent monitoring of in-plane strain and out-of-plane displacement of tires using digital Image correlation method, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 3-11 (2009) pp. 1148-1159. 査読あり
- ③ R. Matsuzaki, N. Hiraoka, A. Todoroki and Y. Mizutani, Analysis of applied load estimation using strain for intelligent tires, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 4-10 (2010), pp.1496-1510. 査読あり

[学会発表] (計7件)

- ① 平岡直樹, 松崎亮介, 轟 章, 水谷義弘, 画像解析に基づいた最適制動制御可能なインテリジェントタイヤの開発, 日本機械学会 M&M 材料力学カンファレンス (CD-ROM), (2009.7.24-26), pp.497-499, 札幌コンベンションセンター.
- ② 平岡直樹, 松崎亮介, 轟章, 水谷義弘, 最適制動制御のためのタイヤの三次元画像計測手法の開発, 日本実験力学会 2009 年度年次講演会講演論文集 No.9, pp.279-282, (2009.8.5-7) 拓殖大学.
- ③ 平岡直樹, 松崎亮介, 轟章, 水谷義弘, 路面状態検知のためのタイヤの三次元変形計測手法の開発, 日本機械学会 2009 年度年次大会講演論文集 (6), pp.375-376, (2009.9.13-16), 岩手大学.
- ④ 松崎亮介, 平岡直樹, 轟章, 水谷義弘, 路面状態推定のためのタイヤの三次元変形計測, 日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス (CD-ROM), OS0304 (2011.7.15-18), 九州工業大学.
- ⑤ N. Hiraoka, R. Matsuzaki, A. Todoroki, Concurrent monitoring of in-plane strain and out-of-plane displacement of tires using digital image correlation method, Proceedings of Asia-Pacific Symposium on Measurement of Mass, Force & Torque (APMF2009), pp.145-154, (2009.6.1-4), Tokyo.
- ⑥ R. Matsuzaki, N. Hiraoka, A. Todoroki, Y. Mizutani, Applied Load Estimation from Surface Strain for Intelligent Tire, Proceedings of International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics, OS08-2-5 (2011.9.19-21), Kobe.
- ⑦ K. Kohno, R. Matsuzaki, A. Todoroki, Y. Mizutani, Tire-road friction estimation based on the tire interior surface displacement, 12th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE-12), CD-ROM [SHM-11], (2011.11.9-11), Tokyo.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松崎 亮介 (MATSUZAKI RYOSUKE)

研究者番号 : 20452013