

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560578

研究課題名(和文)高精度3次元画像変位計測を用いた橋梁の変形モニタリング

研究課題名(英文)Monitoring of Bridge Displacement with Image Correlation Method

研究代表者

新津 靖(Niitsu, Yasushi)

東京電機大学・情報環境学部・教授

研究者番号：70143659

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、橋梁に代表される実大構造物の変形モニタリングの可能性を追求することであり、具体的には、計測手法および解析コードの開発を行い、さらに実大の橋梁の計測およびモニタリングを実施する。得られた結果は橋梁の強度計算や劣化診断のために提供することを目的とする。平成23～25年度において、(1) パターン認識による高精度・高分解能変位計測法の開発、(2) 実物構造物(鉄橋)の高精度2次元変位計測、(3) 高速度カメラ画像のリアルタイム2次元解析、(4) 橋梁の長期変形モニタリング、の4項目を実施した。3つの道路橋と1つの鉄道橋の変位を画像計測で計測した。長期モニタリング装置は開発中である。

研究成果の概要(英文)：The real-time displacement measuring system with digital image correlation method was developed and the displacements of three road-bridges and a railway-bridge were measured under traffic loaded state. The 2D movement of 32x32 partial image could be traced with better than 0.05-pixel resolution by image correlation method. The displacement measurement of the bridge was carried out at the interval of 50 times in a second. In the measured bridge selection, Sakae-Bridge was chosen as a big sample and on a small bridge as a small one. The high-speed camera with 1280x1024x8bits resolution power was used in the measurement. The displacement of bridges caused by the traffic load could be detected with enough resolution power.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：橋梁 変位計測 モニタリング 画像処理

1. 研究開始当初の背景

戦後 60 年以上が過ぎ、高度成長期にその多くが建設されてきた社会インフラ、特に鉄橋や高速道路橋、トンネルなどの劣化が、近年問題視され始めている。社会インフラはその建設に数百兆円以上の膨大な費用を費やしており、今後、本格的に必要となる補強工事や建て替えにも膨大な費用がかかる見通しである。そのため、建造物の劣化や強度の診断技術の開発は、非常に重要な技術と考えられている。特に、実験室での分析や非破壊検査などではなく、実際に使用されている建造物の保全センシング技術の開発が期待されている。それも簡便でかつ信頼性の高い技術が要求されている。

橋梁の健全性を評価する方法としては、橋梁がトラフィックの負荷に対してどのように応答するか、あるいは変形するかを精密に測定できれば、その劣化状況を把握するデータとなりうる。大きな建造物の変形を計測方法として画像計測が有望視されているが、研究代表者らの見積もりでも、測定対象物の模様やコーナー部など映像の特徴的構造を 20 分の 1 画素以上の分解能でその位置や移動量を計測できることがわかっている。図 1 は精密なアクチュエータで微小に画像を変位させ、それを 32×32 の部分画像をデジタル画像相関法を用いて追跡した結果である。見た目には全く動いていない 0.1 ピクセル以下の動きも捉えることができています。この画像相関法をリアルタイムで実行できれば、橋梁の振動変位を捉えることができる。画像相関法には種々の方法が提案されており、100 分の 1 ピクセルの精度があると主張しているものもある。しかしながら多くの方法は計算量が多くリアルタイム処理に向かない。研究代表者らが採用する平均差の正規化相互相関と 9 ポイント曲面補間法は比較的計算量が少なく済む上、20 分の 1 ピクセル以上の計測分解能が期待できる。このような観点から、画像処理ソフトウェアの開発経験が豊富な研究代表者が、リアルタイムで部分画像の精密追跡を可能にする処理系を構築し、橋梁の変形モニタリングに応用することを計画した。

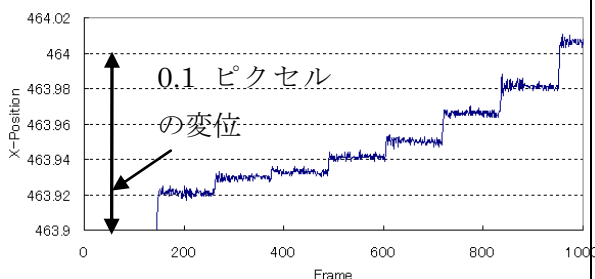


図 1 画像相関法による特徴部分画像の追跡結果（階段状に与えた微小変位を捉えることができています。0.5mm:2 回→1.0mm:2 回→2.0mm:2 回→3.0mm:1 回のステップ変位の計測結果である。1.0mm は約 100 分の 1 ピクセルに相当する）

2. 研究の目的

本研究ではこれらインフラ建造物の変形挙動を稼働状態で精密に計測する技術を開発する。さらに、実際に風や地震などによる建造物の応答を計測し、橋梁に代表されるインフラ建造物の健全性評価および劣化診断の可能性を探る。精密変位計測には、研究代表者が地震シミュレーション実験の計測で使用している画像を用いた高精度 3 次元座標計測を改良して用いる。

3. 研究の方法

研究代表者は、世界最大の振動実験装置(地震シミュレータ:兵庫耐震工学センター)のための 3 次元精密画像計測技術を開発し、現在までに、多くの振動実験の 3 次元計測を手がけてきた。本研究では、その経験を生かして、実大建造物の 3 次元変形を精密に計測し長期間記録する技術を開発する。さらに、鉄道橋を対象に実際に 3 次元計測を行い、電車の通過や風、地震などにより鉄橋に加わる負荷と変形の関係进行调查する。その成果を元に、本技術が社会インフラの健全性評価のためのセンシング技術の一つとして採用されるよう改良を重ねていき、将来的には建造物の補強や建て替えの必要性の有無、余寿命の評価、劣化箇所の同定などに欠かせない計測技術にすることが目的である。本研究の着想に至った経緯は、兵庫耐震工学センターでの 3 次元変位計測を行う中で JR 東日本の研究者らより東北地方の鉄橋の地震被災状況の計測に、研究代表者が開発した高精度 3 次元計測が使いたいという依頼があったことである。さらに、現在、三重大、東大、文化財保護局、防災科研と研究代表者が共同研究を行っている「五重塔の変形モニタリング計測」の経験があり、機材が準備できれば鉄橋のモニタリングを行いたいと考えており本研究を計画した。このように本研究は、実建造物を対象とした計測技術の研究であり、日本だけでなく海外からも注目される研究である。特に米国では、橋梁の崩落やメンテナンスが社会問題化しており、兵庫耐震工学センターにおける計測技術や健全性評価に高い関心を持っている。

橋梁に代表される剛構造の建造物の風や地震などによる変形をモニタリングするために以下の 4 項目の開発と実験研究を行った。平成 25 年から予定していた第 4 項目のモニタリングを長期間行う計画については、現在小型コンピュータを使った画像計測システムを開発中であり、太陽電池と蓄電池を電源とする変位モニタリング装置として、長期間モニタリングを実施する計画である。第 2 項目の短時間の計測では、道路橋と鉄道橋について、車や電車の重量負荷による変形・振動を計測し、橋の変形の特徴を捉えることに成功した。

(1) パターン認識による高精度・高分解能変位計測法の開発

(2) 実物構造物(鉄橋)の高精度疑似 3 次元変位計測

(3) 高速度カメラ画像のリアルタイム 3 次元解析

(4) 実物構造物(鉄橋およびコンクリート橋)の変形モニタリング

3. 1 デジタル画像相関法

デジタル画像相関法は、変形前の任意の部分画像領域を取出してその輝度値分布を記憶しておき、変形後の画像の中から最も相関関係がある部分画像領域を探索する方法である。ここでは、画像相関の評価値として Eq.(1) に示す平均差の正規化相互相関を用いた。実際の処理では Eq.(1) を展開して 1 パスで相関値が得られるようにプログラムしている。

$$C(u,v) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i+u, j+v) - \bar{I}) \times (I_t(i, j) - \bar{I}_t)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i+u, j+v) - \bar{I})^2 \times \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_t(i, j) - \bar{I}_t)^2}}$$

(1)

ここで、 $I_t(x, y)$ は変形前の部分画像 (サイズは $M \times N$) の輝度値、 $I(x, y)$ は変形後の全画像の輝度値である。 \bar{I}_t 、 \bar{I} はそれぞれ計算領域の平均値を意味する。ここでは I_t をテンプレートと呼ぶことにする。よって、 $C(u, v)$ はテンプレートと (u, v) 座標位置の変形後部分画像の相関値となる。計測ではテンプレートのサイズ $M \times N$ を 32×32 とし、 $C(u, v)$ は前回の計算結果の極大点周り $(-8, -8) \sim (7, 7)$ の 256 点について計算しその最大点を変位位置とする。この相関値の極大点はデジタル座標であるため、本研究では極大点とその周り 8 座標点の合計 9 座標点の相関値を最小二乗法により二次曲面近似し、極大点の推定値をサブピクセルで求めている。具体的には Eq. (2) の係数 $a_1 \sim a_6$ を 9 点の相関値から求め、Eq. (3) でサブピクセル変位量を求める方法である。

$$S(x, y) = a_1 x^2 + a_2 y^2 + a_3 xy + a_4 x + a_5 y + a_6$$

(2)

$$u = \frac{1}{4a_1 a_2 - a_3^2} (-2a_2 a_4 + a_3 a_5)$$

$$v = \frac{1}{4a_1 a_2 - a_3^2} (-2a_1 a_5 + a_3 a_4)$$

(3)

この方法ではピクセルロッキングと呼ばれる構造的誤差の発生が報告されているが、そのレベルは ± 0.05 ピクセル以下の場合がほとんどであり、本方法によるサブピクセル推定値の精度は 0.05 ピクセル以上あると期待できることが示された。

種々の画像パターンについて 3 種類の画像相関式でパターンを追跡して変位を計測した。図 2 は実験に使用した種々のパターンと実験中の写真である。12 種類のパターンの中

央付近の同一点を 2 種類のサブピクセル計算法と 2 種類の画像相関計算式の 4 種の追跡法で比較した。結果は図 3 に示されている。縦軸はアクチュエータの移動量との差の標準偏差である。小さいほど正確に追跡できていることを示している。研究代表者が提唱する平均差の正規化相互相関に曲面近似を組み合わせた方法が精度がよいことがわかる。この結果は日本機械学会で発表している。

3. 2 橋梁の変位計測法

橋梁では橋梁下部に複雑な梁の構造が見られる。このため、図 4 に示すように橋脚から岸から橋梁下部を撮影して変位を計測する。画像上の変位を mm 単位の実際の変位に換算する方法は計測点付近の既知の長さの 2 点間を画像上のピクセル値で計測し、Eq. (4) の簡単な換算式で求めた。実際の計測ではカメラの仰角が 10 度以下であり、縦方向変位とカメラの光軸が垂直ではない。しかし、この角度が 10 度でも、その影響は 2% 以下であり、ここでは仰角の影響は無視した。

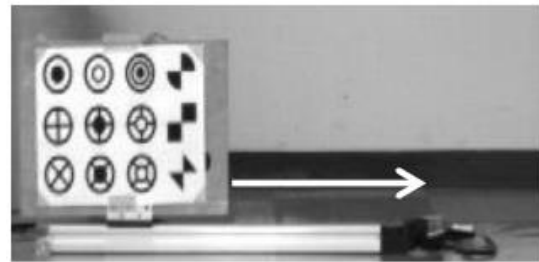
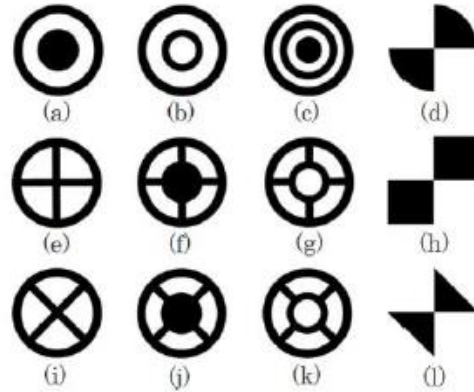


図 2 種々の画像パターン (上) についてのサブピクセル分解能の部分画像追跡実験の写真。

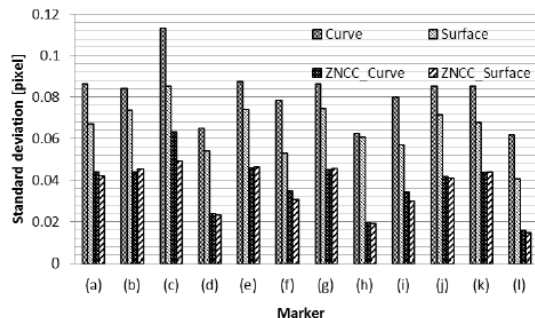


図 3 画像追跡の精度評価結果

$$(\delta x_i, \delta y_i) = \alpha_i (u_i - u_{i0}, v_i - v_{i0}) \quad (4)$$

$$\alpha_i = \frac{|r_{ia} - r_{ib}|}{|p_{ia} - p_{ib}|}$$

Eq. (4)の係数は画像上で選択した追跡点のそれぞれに個別に決定する必要がある。現地での変位計測はピクセル単位で行い、その計測データから後処理で実際の変位を計算した。基準点の画像上の間隔は保存画像から手作業で測り、基準点間距離の実測は、三次元測器(ソキア製トータルステーション)を用いて行った。

4. 研究成果

計測システムの性能と計測方法の検証の

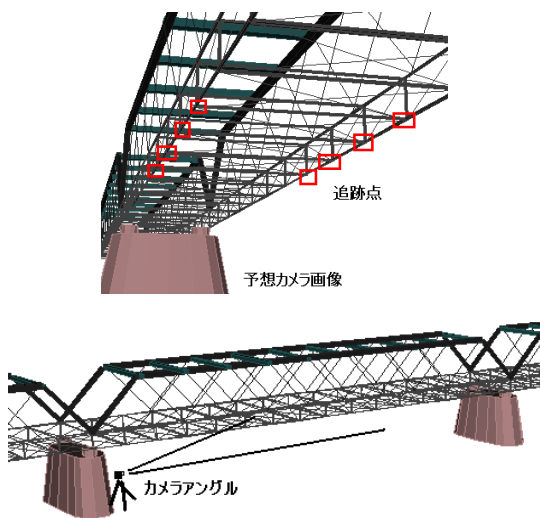


図4 橋梁の変位計測法: 橋梁の下から特徴点の変位を画像から計測する。



(a) Sakae Bridge



(b) Small bridge

図5 計測対象の250m級の橋(a)と100m級の小型の橋(b)

ために選んだ自動車橋を図5に示す。これ以外にも図5(a)と同様に利根川に架かる大型道路橋1件と鉄道橋1件を選んで計測した。ここでは、図5に示した2件の計測結果を中心を示す。

4.1 計測システム

図6に開発した計測システムを示す。バッテリー駆動のポータブルなコンピュータと高速度カメラだけの簡素な装置である。コンピュータには画像入力ボードが実装されており、高速度カメラの映像をリアルタイムで処理することができる。装置の使用は以下の通りである。

- ・解像度: 1280x1024x8bits, 1/2inch CCD
- ・サンプリング速度: 50 samples/second
- ・解析コンピュータ: Core2Duo 3.0GHz

高速度カメラの性能は上記解像度で200 frame/秒の撮影ができるが、リアルタイムで画像相関による部分画像の変位を計算するため、そのオーバーヘッドのためサンプリング速度を50分の1秒ごとにしている。この条件で32x32の部分画像を8か所同時に追跡できる。各追跡画像について現在の位置の前後8x8の領域について変位位置を計算している。全面を検索しないためリアルタイムの追跡が可能となった。50分の1秒ごとに512回のEq.(1)の相互相関計算と8回のEq.(2), (3)の最小二乗法によるサブピクセル変位計算を行っている。計算量は約0.4GFlopsに相当する。研究計画にGPUを利用した高速演算コードの開発があり、実際にCUDAコンパイラによるGPUコードを開発し、100倍以上の高速処理を実現している。しかしながら、図6のCPUには実装できない。

4.2 大型および小型の道路橋の計測結果

図5に計測対象の橋梁を示す。(a)は利根川に、(b)は利根川の支流に架かる橋で、どちらも建設後40年を経た古い橋である。実際の計測では橋の下の岸側にカメラを設置し計測している。レンズは焦点距離75mmの望遠レンズを使用した。

図7に2つの橋のカメラ設置位置の写真を示す。写真中の枠は、計測用カメラで観察している領域である。(a)の栄橋ではカメラを縦置きに設置した。計測中のコンピュータ画面を図8に示す。ただし、数字や丸印は後に編集で付け加えたものである。(a)では、特



図6 開発した計測システム

微的な部分画像を No.1~No.4 の4点と、対岸の様様に1点の計5点を追跡点として設定した。基準長さとしては、No.1~No.4と同じ距離にある決められた2つのボルト間の距離とし、3次元測器で測定した。(b)の橋については中央の梁の幅が450mmと固定であるため、この距離を基準長さとし、No.1~No.3の3点について計測した。図9に特徴的な計測結果を示す。計測は30分以上連続して行っており、その中の一部である。図9(a)は160~200秒の時刻に中速でトラックが手前から奥に向かって走ったときの変位分布である。最大で約10mmの変位が生じている。No.1, No.2の計測点は橋脚間のほぼ中央にあり、変位が大きく、No.4は橋中央の橋脚に近い位置の計測点であるため、変位は中央の約6割程度であることがわかる。高速走行ではないので、ほぼ同時に4点は変位している。図9(b)は小さい橋の変位分布である。22~30秒の時刻に中型のトラックが高速で向こう側から手前に走行したときの変位分布である。中央に橋脚の向こうから橋にトラックがかかると細かい振動が手間の橋梁に発生しており、トラックが中央の橋脚を過ぎると若干手前が遅れるように変位している。(a)と(b)の変換係数は、

$$(a) \alpha(\text{No.1}): 2.01, \quad \alpha(\text{No.4}): 3.71$$

$$(b) \alpha(\text{No.1}): 0.412, \quad \alpha(\text{No.3}): 0.648$$

であった。(b)の計測はより精密にできることがわかる。図9(b)にあるように0.1mm以上の分解能で計測できていることがわかる。



(a) Sakae bridge

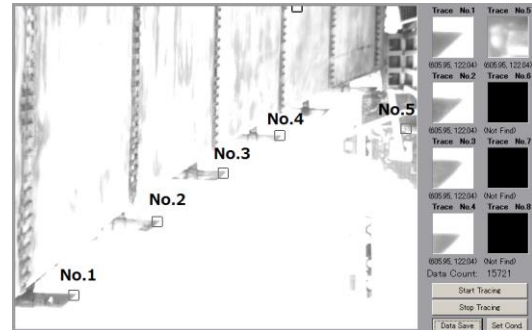


(b) Small bridge

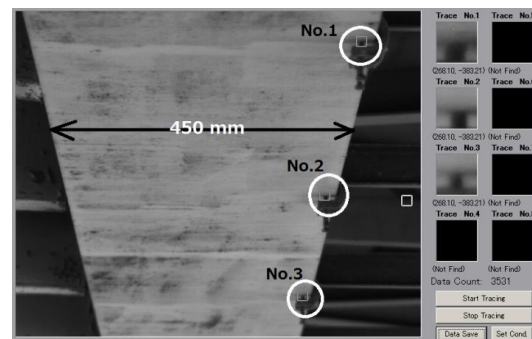
図7 橋梁下部の計測領域、(a)ではカメラを縦に設置している。

20分の1ピクセルの精度と分解能が実現できている仮定すると、図9(b)の場合、0.03mm以上の精度で計測できていることになる。

図10は、図8(a)の対岸の変位である。距離が約250mあるため空気のゆらぎなどにより±0.1ピクセル程度の不規則な雑音が観察される。対岸の壁は固定していると考えられ

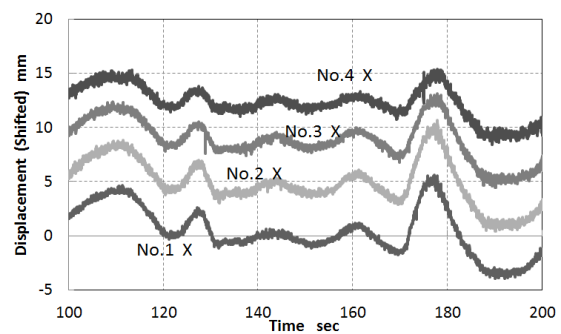


(a) Sakae bridge

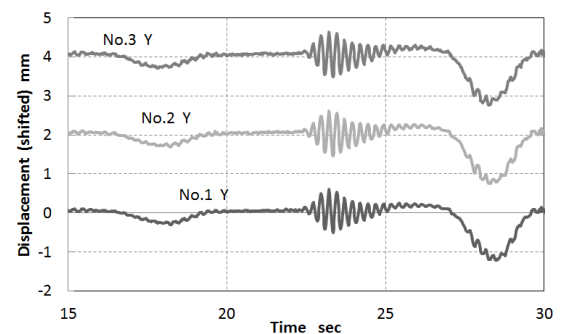


(b) Small bridge

図8 計測時のコンピュータ画面



(a) Sakae bridge



(b) Small bridge

図9 変位計測結果：(a)トラックが中速で通過したときの変位分布、(b)小型トラックが高速で通過したときの変位分布。

るので、この変位はゆらぎによる雑音とカメラの振動や移動・回転によるものと考えられる。もちろん、電気的な雑音も考えられる。カメラの移動や回転が生じるような環境では、不動点を設定し、その点に対して相対的に位置を計測する必要がある。しかし、今回はそのような処理はしなかった。

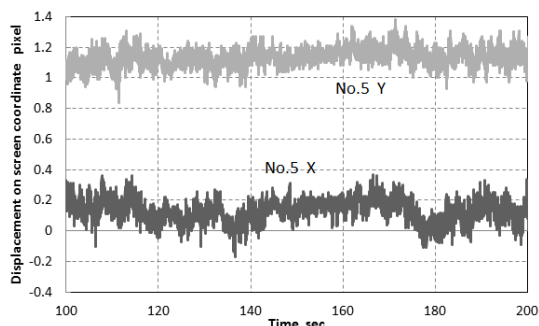


図10 図8 (a)のNo.5対岸の変位計測結果

4. 3 長期変形モニタリング

本研究の大きな目的に長期の橋梁の変形モニタリングを可能にすることである。長期とは年単位の期間、連続してモニタリングすることも考えている。研究目的にも述べたように現在、五重塔の変形を昼夜モニタリングしている。長期の画像計測では昼よ夜の環境の違いや、電源が問題となる。

そこで、2013年度初めからLED光源をマーカーとする計測システムの開発を開始した。現在も開発中であり、長期のモニタリングについてはまだ実現していない。開発中の装置は、橋梁の支承部分の変位（橋桁の変位）をモニタリングするための画像計測系（小型コンピュータ：ラズベリーパイ使用）である。平成26年7月の完成（現在調整中）を目指しており、完成後は京都大学工学部高橋准教授を協力して計測実験を進めていく。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者には下線）

〔雑誌論文〕（計 2件）

- (1) Yasushi NIITSU, Takaaki IIZUKA and Kenta YASUOKA: Real-Time 2D Displacement Measurement of Four Points LED Markers with One Camera Image, Journal of the Japan Society for Experimental Mechanics, 査読有, Vol. 13, No. 2, (2014-07)
- (2) 箕輪親宏, 松田一樹, 新津靖, 花里利一: 重要文化財法華経寺五重塔の地震風応答観測とその考察, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第692号, pp. 1787-1796, (2013-10)

〔学会発表〕（計 12件）（内国際会議 6件）

- (1) Yasushi Niitsu, Takaaki Iizuka and Osamu Furuya; Real Time Displacement Measurement of Lattice Pattern using High Speed Camera, 2013 Int. Conf. on Signal-Image Tech. & Internet-Based Sys. IEEE, pp. 1-6, DVD-ROM, (2013-12-2), Kyoto

- (2) Takaaki IIZUKA and Yasushi NIITSU; Measurement Accuracy of Light Marker Position on Camera Image, 8th ISEM Special Issue of J. of Jap. Soc. for Exp. Mech., p. 148, (2013-11-4), Sendai
- (3) Yasushi NIITSU, Takaaki, IIZUKA, Kenta YASUOKA; Real-Time Pseudo-3D Displacement Measurement of Four Points LED Markers with One Camera Image, 8th ISEM Special Issue of J. of Jap. Soc. for Exp. Mech., p. 174, (2013-11-4), Sendai
- (4) 新津靖, 飯塚 嵩明; 画像相関法を用いた橋梁のリアルタイム変位計測, 日本実験力学学会年次講演会, 日本実験力学学会講演論文集, No. 13, pp. 13-16, (2013-8-20), 秋田
- (5) Takaaki Iizuka and Yasushi Niitsu, "PRECISION EVALUATION OF ILLUMINATED MARKER POSITIONING WITH IMAGE PROCESSING", Proc. 15th Int. Conf. Exp. Mech. (Univ. of Porto), pp. 1195-1196, (2012-7-25), Portugal
- (6) 新津靖, 飯塚嵩明, 安岡賢太, 古屋治, "リアルタイム画像処理による格子ラインの二次元変位計測", 日本実験力学学会 2012年度年次講演会, No. 12-123, pp. 1-4, (2012-7-14), 豊橋
- (7) 飯塚嵩明, 新津靖, "画像相関法におけるサブピクセル推定の特性評価", 日本実験力学学会 2012年度年次講演会, No. 12-110, pp. 1-4, (2012-7-14), 豊橋
- (8) 吉水貴浩, 新津靖, 飯塚嵩明, 宮澤厚史, "デジタル画像相関法を用いた橋梁の微小変位計測", ひずみ測定と強度評価シンポ, No. 43, pp. 65-68, (2012-1-23), 東京
- (9) 石塚敦, 飯塚嵩明, 新津靖, "デジタル画像相関法を用いた部分画像の精密位置測定", ひずみ測定と強度評価シンポジウム, No. 43, pp. 61-64, (2012-1-23), 東京
- (10) 飯塚嵩明, 濱野健太郎, 新津靖, "LEDマーカーを用いた精密画像変位計測のための誤差評価", ひずみ測定と強度評価シンポ, No. 43, pp. 145-150, (2012-1-23), 東京
- (11) Yasushi NIITSU, Takaaki IIZUKA and Tadashi MIKOSHIBA, "Theory of Pseudo 3D Position Measurement with One Camera Image" Int. Conf. on Advanced Tech. in Exp. Mech., No. 11-203, p. 155, (2011-9-20), Kobe
- (12) T. IIZUKA and Y. NIITSU, "High Resolution Measurement of Luminous Marker Position by Image Processing", Int. Conf. on Advanced Technology in Exp. Mech., No. 11-203, p. 156, (2011-9-21), Kobe

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
新津 靖 (NIITSU, Yasushi)
東京電機大学・情報環境学部・教授
研究者番号：70143659