

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12490

研究課題名（和文）画像処理技術によるのり面構造物の3次元亀裂変位検出システムの開発

研究課題名（英文）Displacement detection system for structural health monitoring utilizing image-sensing technology

研究代表者

小泉 圭吾 (Koizumi, Keigo)

大阪大学・工学研究科 ・助教

研究者番号：10362667

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：供用から50年以上が経過した構造物の劣化診断は現在の社会インフラを維持管理していく上で喫緊の課題であり、その対策が求められている。一方で、老朽化が進む構造物に対し、対策の優先度が高くても早急に対策工を実施できない場合もあり、そのような構造物に対しては安全性を担保するためにも適切な診断技術の導入が必要であると考えられる。そこで本研究ではこの課題を解決するための手法として、画像処理技術に着目し、診断技術としてニーズの高い変位計測に焦点をあて、非接触かつ複数点の同時診断が可能な亀裂変位検出システムを開発した。

研究成果の概要（英文）：Structural health monitoring of civil structures that have been in service for more than 50 years is an urgent issue, and sufficient countermeasures are required. Even if the priority for implementation of a countermeasure is high in an aging civil structure, these countermeasures cannot be implemented because of economical constraints. To address this issue, structural health monitoring technology should be innovated to ensure safety against aging civil structures. To solve this problem, a non-contact displacement detection system that can monitor multiple points is developed utilizing orientation code matching, an image-sensing technology.

研究分野：地盤工学

キーワード：画像処理技術 健全度診断 地表面変位

### 1. 研究開始当初の背景と研究

供用から50年以上が経過した土構造物の風化・劣化診断は現在の社会インフラを維持管理していく上で喫緊の課題であり、その対策が求められている。一方で、老朽化が進む構造物に対し、対策の優先度が高くても早急に対策工を実施できない場合もあり、そのような構造物に対しては安全性を担保するためにも適切な診断技術の導入が必要であると考え。これに対し、当グループではIoT技術を用いた斜面監視システムの開発を進めており、現在、実用化を前提とした開発および実証実験を行っている。一方、これまでに開発してきたシステムは、土構造物そのものにセンサを設置して診断するタイプのものであり、対象構造物を離れた場所から診断したい、あるいは対象構造物の複数箇所を同時かつ安価に計測したい、といったニーズには対応できていないという課題があった。そこで本申請研究ではこの課題を解決するための手法として、画像処理技術に着目し、診断技術としてニーズの高い変位計測に焦点をあて、非接触かつ複数点の同時診断が可能なシステム開発に取り組むこととした。

### 2. 研究の目的

本申請研究では、背景で述べた課題に基づき、画像処理技術を応用することで、土構造物の亀裂や変位を離れた場所から複数点同時に測定できる亀裂変位検出システム(Visual-M3)の開発を行うことを目的とした。なお、本報告で述べる土構造物とは、のり面構造物のことを指し、先ずは降雨に伴うのり面の亀裂、変位を計測するためのシステム開発について焦点を当てた。

### 3. 研究の方法

Visual-M3 開発ための手順を以下に示す。

#### (1) システム開発

##### ①システム構成

本研究において開発・評価を行う画像処理技術を用いた変位検出システムは、小型ノートPC、CCDカメラ、望遠レンズにより構成される(図1)。本システムでは、測定対象となる構造物表面に、特別な計測用ターゲットを設置すること無く、予め存在する構造物そのもののテクスチャーをCCDカメラにより捉え、これらの特徴点の時間的な変位を構造物の変位として検出することが可能である。対象構造物の映像は、8ビットグレースケールのCCDカメラにより撮影され、毎秒1~60フレームのフレームレートでPCへ送信される。撮影された映像は、PC上で画像処理が行われ、リアルタイムに変位へと変換され、同PC上に時間履歴として保存されるため、動画を保存するための大容量のハードディスク等を必要としない点が特長である。

##### ②変位検出アルゴリズム(OCM)

本研究では、CCDカメラの視線上の障害物



図1 システム構成

や、日照条件の変化による照明変化などの環境ノイズの多い現場計測において、より安定した、高精度の測定を実現するための変位検出アルゴリズムであるOCM(オリエンテーション・コード・マッチング)<sup>1)</sup>の実装を行った。本アルゴリズムは、画像の座標軸上の水平方向を起点として、ピクセルを取り囲む周囲のピクセルから得られる濃度の配向角をコード化したものであり、画像上のテクスチャーの模様や、対象となる物体の形そのものを特徴として抽出することが可能である。そのため、撮影環境の変化によって引き起こされる画像全体の不均一な輝度変化や、部分的な陰影等の影響を受けにくいのが特長である。

##### ③サブピクセル処理

実際の現場計測では、大気ゆらぎにより生じる不均一な光の屈折率や、量子化時における画像解像度の限界値に起因する画像ノイズ等による計測誤差を無視することはできない。そこで本研究では、計測精度の向上を図るために、サブピクセルレベルでの処理を可能とするOCMアルゴリズムの開発・実装を行った。本手法を利用することにより、ピクセル間の配向角を補間し、サブピクセルレベルでのOCMアルゴリズムの処理が可能となる。

#### (2) システムの動作検証

##### ①無降雨条件下における計測精度検証

一般的に、のり面構造物の地表面変位は伸縮計や傾斜計などの計測機器を用いて行われ、これらは0.1mm~1mm単位の計測精度を有している。そのためOCMによる計測においても同程度、またはそれ以上の検出精度を確保する必要がある。ここでは、図2に示すハイトゲージを使って変位を発生させ、無降雨条件下における各画素幅の計測精度を検証する。

なお、画像処理技術による計測精度の機械誤差は距離に関係なく、撮影された画像の1

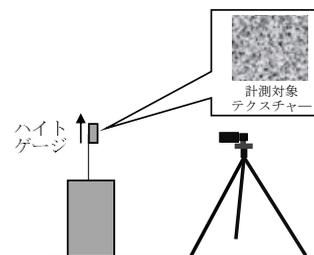


図2 無降雨条件下における計測精度検証

ピクセル当たりの画素幅にのみ依存する。これは計測精度が計測間距離に依存する光波測距儀と異なる点である。つまり、本システムの場合、カメラ解像度とレンズの望遠性能を変更すれば、求められる計測精度に必要な画素幅を確保することが可能なため、機械誤差の検証に限っていえば、屋内、屋外に関係なく同条件での精度評価を行うことが出来る。

#### ②降雨条件下における計測精度検証

実現場での計測においては、様々な環境因子が計測精度に影響を与える可能性が考えられる。その中でも、本申請研究で対象とする亀裂や変位計測については、降雨時に発生する可能性が高いことから、降雨が計測精度に及ぼす影響を評価しておく必要がある。ここでは、降雨によって対象構造物とカメラ間に落下中の雨滴が映り込むことによる計測誤差や、雨滴が対象構造物に付着することによる計測誤差などを想定し、図3に示すように、過去に国内で観測された最大降雨強度以上の降雨条件下(180mm/h)において、ハイトゲージを使って変位を発生させ、各画素幅の計測精度を検証する。

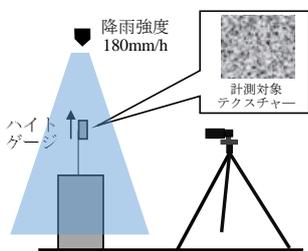


図3 降雨条件下における計測精度検証

#### ③模型斜面を用いた計測精度の検証

ここでは、実験棟内に製作した模型斜面をのり面と見立てて、開発したシステムの計測精度、および対象となる構造物のテクスチャが計測精度に及ぼす影響について検証を行う。具体的には、降雨による表層崩壊を模擬した崩壊実験を行い、異なる画素幅で設定した複数のカメラを用いてOCMによる地表面変位の計測を行う。ここで、室内にある模型斜面で動作検証を行った理由は、実現場と異なり降雨以外の計測精度に及ぼす様々な因子(例えば、振動、大気揺らぎ、等)を取り除き、対象とする因子のみに絞込んだ検証が行える点にある。

#### ④3次元計測に関する考え方の修正

現在、現場で利用されている伸縮計や傾斜計による亀裂、変位計測の基準値は斜面平面状に発生する1次元ないし2次元の変位を対象としたものであり、沈下方向の変位は考慮されていない。これは亀裂や変位が主として、斜面のせん断変形によって生じるため、変形や崩壊に起因する変位は鉛直下方向よりも斜面下向きに大きく出るのである。このこ

とは、斜面下向きの変位を捉えることが重要であることを示していると同時に、鉛直下向きに発生する僅かな変位を精度よく計測することの難しさを示している。そこで本研究では、管理基準値が定まっている伸縮計で測定している平面変位に合わせることで、当初予定していたステレオ法による3次元化を行わず、射影変換処理によって、斜面表面の2次元変位を多点で捉えることができる仕様を開発方針を修正することとした。

#### 4. 研究成果

##### (1) 亀裂変位検出システム (Visual-M3)

図4に開発したシステムの計測画面を示す。変位検出には、計測と同時に行うリアルタイムモードと、録画された画像を後から解析する事後解析モードの選択が可能である。フレームレートはカメラの使用に合わせて任意に設定可能であり、その他、画面上でのスケール合わせ機能、ローパスフィルター機能を実装し、計測後、すぐにデータの考察が行えるようシステムを構築した。また、対象物に対し、複数点のテンプレートを任意のサイズで設定することが可能であり、それらの変位は画面上でリアルタイムに表示されると同時に、CSV形式でPC上に記録される。

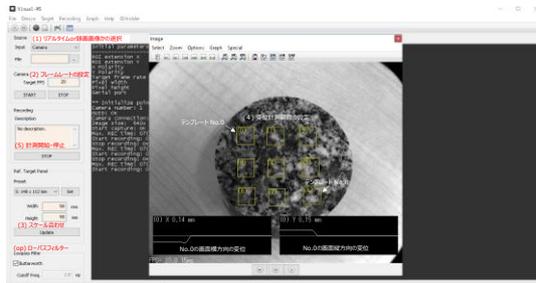


図4 亀裂変位検出システム (Visual-M3)

##### (2) 計測精度

ここで述べる計測誤差とは、計測データが正規分布に従う前提で、基準値と計測データの平均値の差の絶対値に $3\sigma$ を加えた値とした。一方、要求精度は3. (2) ①に示される0.1mmに設定したため、この精度を保証するためには、計測値と真値の差が $\pm 0.05\text{mm}$ より小さければよい。ハイトゲージの器差が $\pm 0.02\text{mm}$ であることを考慮すると、計測誤差が $\pm 0.03\text{mm}$ 以内であれば、99.7%の確率で要求精度を満たしていると判断できる。

表1は無降雨条件下において、0.10mmの変位を発生させた際の、画素幅ごとの計測誤差を示している。この表より、画素幅0.7を除けばp値が0.05以上であるため正規分布に従う。画素幅0.2から0.6は計測誤差が0.01~0.03mmでほぼ一定であることから、無降雨条件下においては、画素幅0.6までは要求仕様である0.1mm単位での計測が可能であると考えられる。

表2は180mm/hの降雨条件下において、0.10mmの変位を発生させた際の、画素幅ごとの計測誤差を示している。この表より、何れ

の画素幅においても p 値が 0.05 以上であるため正規分布に従う。一方、計測誤差に着目すると、画素幅 0.5 は計測誤差が±0.08 であるため要求精度を満たしていない。従って降雨条件下においては、画素幅 0.4 までが要求精度を満たす仕様であるといえる。

表 1 無降雨条件下における変位計測精度

| 画素幅<br>(mm/pixel) | 平均値 (mm) | 3σ (mm) | 計測誤差 (mm) | データ数 | Shapiro-Wilk検定 |       |
|-------------------|----------|---------|-----------|------|----------------|-------|
|                   |          |         |           |      | W              | p値    |
| 0.2               | 0.10     | 0.00    | 0.00      | 483  | 0.997          | 0.464 |
| 0.3               | 0.09     | 0.01    | 0.02      | 500  | 0.997          | 0.089 |
| 0.4               | 0.09     | 0.01    | 0.02      | 500  | 0.995          | 0.106 |
| 0.5               | 0.10     | 0.01    | 0.01      | 500  | 0.997          | 0.529 |
| 0.6               | 0.09     | 0.02    | 0.03      | 500  | 0.997          | 0.482 |
| 0.7               | 0.08     | 0.04    | 0.06      | 500  | 0.969          | 0.000 |

表 2 降雨条件下における変位計測精度

| 画素幅<br>(mm/pixel) | 平均値 (mm) | 3σ (mm) | 計測誤差 (mm) | データ数 | Shapiro-Wilk検定 |       |
|-------------------|----------|---------|-----------|------|----------------|-------|
|                   |          |         |           |      | W              | p値    |
| 0.2               | 0.11     | 0.02    | 0.03      | 500  | 0.997          | 0.997 |
| 0.3               | 0.08     | 0.01    | 0.03      | 500  | 0.975          | 0.369 |
| 0.4               | 0.08     | 0.01    | 0.03      | 500  | 0.995          | 0.102 |
| 0.5               | 0.14     | 0.04    | 0.08      | 500  | 0.994          | 0.058 |

### (3) 散水条件下における斜面上での変位計測精度

図 5 に実験概要を示す。図中の朱枠は変位計測位置を示しており、その内、黒四角は計測精度検証に用いたテクスチャーのパターン（基準パターンとする）、朱枠のみは斜面表面自体をテクスチャーとしたパターンを示している。画素幅は 0.3mm/pixel、フレームレートは 10fps、散水強度は 160mm とし、斜面が崩壊するまでの各テンプレートの変位を計測した。

図 6 は実験開始から終了までの変位の時系列変化を、図 7 には各計測地点において変位が生じ始める時間帯を拡大して示す。いずれの計測地点においても、微小変位の発生から崩壊に至るまでの挙動を 0.1mm 単位の変位が検出できる精度で計測できていることがわかる。B, D, E は地表面をテンプレートにしたが、B は両隣にある基準パターンと同様の

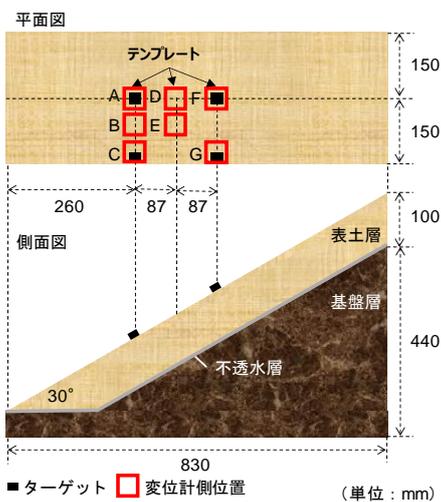


図 5 模型斜面実験概要

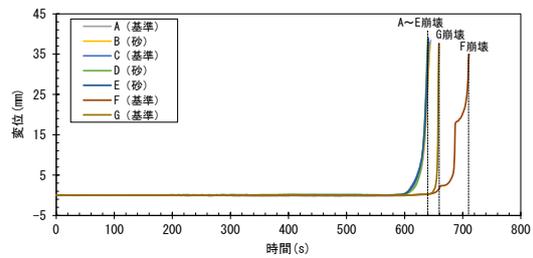


図 6 変位の時系列変化

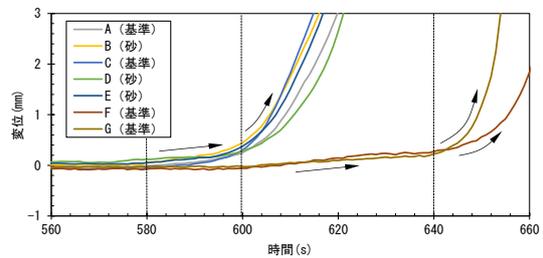


図 7 変位の時系列変化（一部拡大）

挙動を捉えることができている。また、D, E においては、亀裂位置より下の土塊が一体となって変位したと考え、A, C と同様の挙動を示していることは妥当である。以上、斜面における多地点の変位が降雨条件下においても精度よく計測できていることから、本システムの基本的な要求仕様は満たされているものと考え

### (4) 屋外における本システムの動作検証

図 8 は斜面にて本システムの動作検証を行った一例である。ここでは対象斜面の 4 箇所にテンプレートを設け、60fps のリアルタイム計測を行った。実斜面の場合、屋内試験と異なり対象範囲が広がるが、レンズの広角機能やカメラの解像度を適切に設定することで、必要な計測精度を得ることが可能である。一方、長期運用には、屋外防水用のネットワークカメラ等を利用した計測システムの構築が必要となる。



図 8 屋外現場での動作検証の一例

### (5) IoT 技術との融合

図 9 は、現在開発を進めている IoT 斜面監視システムに屋外用ネットワークカメラを

実装することで、Visual-M3による屋外での斜面変位監視が可能なシステムを構築した。このシステムはIoT技術を用いてカメラ画像や雨量、土中の水分量といった情報を無線によってクラウド上に集約し、WEB画面上で斜面崩壊を監視するというものである。今後の課題としては、本申請研究の成果を基に、Visual-M3の実用化に向けた検討を進めていく点が挙げられる。

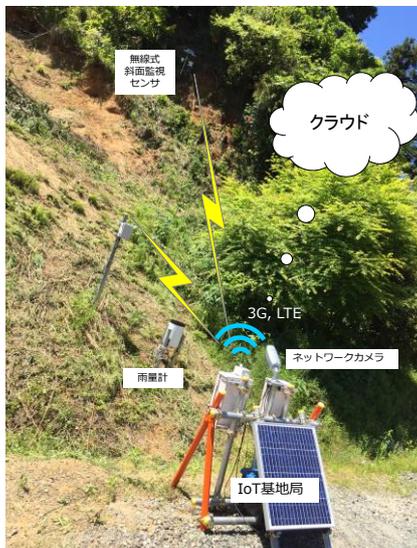


図9 IoT斜面監視システムと Visual-M3の融合

(6) 本システムの他用途への適用事例

図10, 11は本システムを用いて電車通過時の橋桁の鉛直変位を計測した事例である。この図より、橋桁の変位がミリ精度以上で計測できていることが確認できる。このことから、離れた場所から変位を測定するという目的であれば、鋼橋等、他のインフラ構造物の健全度診断への応用も期待できる。



図10 電車通過時の橋梁と Visual-M3

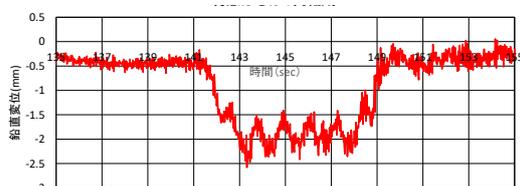


図11 Visual-M3による橋桁の変位計測事例

参考文献

1) F. Ullah and S. Kaneko : Using orientation codes for rotation-invariant template matching, Pattern Recognition, Vol. 37, No. 2, pp. 201–209, 2004.

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9件)

- ① 小泉圭吾, 櫻谷慶治, 小田和広, 福田芳雄, Maria Q. Feng, 竹本将 : 降雨時の表層崩壊に対する高速道通行規制基準の高度化に向けた基礎的研究, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol. 73, No. 1, pp. 93-105, 2017. 査読有  
<http://doi.org/10.2208/jscejge.73.93>
- ② 福田芳雄, 小泉圭吾, 山本健史, 小橋俊也, 小田和広, 櫻谷慶治, Maria Q. Feng : 画像センシング技術を用いた斜面変形計測に関する実験的研究, 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム論文集, pp. 243-248, 2016. 査読有
- ③ 小泉圭吾, 櫻谷慶治, 小田和広, 他 : 模型斜面を用いた疑似飽和体積含水率と斜面変形に関する研究, 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム論文集, pp. 237-242, 2016. 査読有
- ④ 櫻谷慶治, 濱沖俊史, 田山聡, 小泉圭吾 : 無線センサネットワークを活用した複合型斜面監視システムの開発, Vol. 65, No. 1, pp. 48-49, 2016. 査読有
- ⑤ 小泉圭吾, 櫻谷慶治, 小田和広, 福田芳雄, 他 : 模型斜面実験結果に基づく交通規制基準の改善に関する基礎的研究, 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム論文集, pp. 187-190, 2015. 査読有

〔学会発表〕(計19件)

- ① 小泉圭吾 : 体積含水率を用いた斜面変形予測に関する実験的研究, 第51回地盤工学研究発表会, 2016/9/13-2016/9/15, 岡山大学(岡山県・岡山市)
- ② 小泉圭吾 : IoT-WSNによる斜面崩壊予測と監視技術および自治体向け防災アプリケーションの提案, 予防技術について, 第3回「震災対策技術展」大阪, 2016/6/3, グランフロント大阪コングレコンベンションセンター(大阪府・大阪市)
- ③ 小泉圭吾 : 斜面崩壊の予測と監視, 予防技術について, 第2回「震災対策技術展」大阪, 2015/6/5, グランフロント大阪コングレコンベンションセンター(大阪府・大阪市)
- ④ 小泉圭吾 : 豪雨時ののり面監視と予防技術, 維持管理フォーラム2015, 2015/11/30, 大阪府立大学 I-site なんば(大阪府・大阪市)
- ⑤ 小泉圭吾 : 予防保全を目的とした新たな

のり面管理技術, 地盤に触れて基礎知識  
を学ぶ, 2015/6/18, 大阪市立大学梅田  
サテライト (大阪府・大阪市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小泉圭吾 (Koizumi Keigo)  
大阪大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号 : 10362667

### (4) 研究協力者

福田芳雄 (Fukuda Yoshio)  
Maria Q. Feng (Maria Q. Feng)