

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.988

September 2017

画像処理技術を用いた道路橋の 常時監視システム開発に関する研究

白戸 真大・星隈 順一・玉越 隆史・大城 温・窪田 光作・
石尾真理・宮原 史・岡田 紗也加・中邨 亮太

Study on constantly monitoring system of road bridge using image processing technology

Masahiro SHIRATO, Junichi HOSHIKUMA, Takashi TAMAKOSHI, Nodoka OSHIRO, Kohsaku KUBOTA,
Mari ISHIO, Fumi MIYAHARA, Sayaka OKADA, Ryota NAKAMURA

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

画像処理技術を用いた道路橋の 常時監視システム開発に関する研究

白戸 真大 *

星隈 順一 **

玉越 隆史 ***

大城 温 ****

窪田 光作 *****

石尾 真理 *****

宮原 史 *****

岡田 紗也加 *****

中邨 亮太 *****

概要

道路橋において、供用の安全性に関わるような重大な異常等が発生した場合、いかに短い時間で道路管理者が異常を認識できるかが二次災害の防止の観点から重要となる。

本研究は、供用安全性に関わる事象の発生に特化して、経済的かつ効果的に常時監視を行うために、道路橋に複数設置したターゲットをカメラ等にて連続的に撮影した画像から、道路橋の変状の発生を検知する手法の実現性を検討したものである。常時監視の費用対効果を考えて、一般的な道路管理体制に対して極力新たなインフラの整備を行わないで監視体制が構築できるよう、交通の安全と円滑化を目的に設置された視線誘導灯など現地にすでに設置されているものをターゲットとし、この変位を一般的な道路監視カメラで、24 時間 365 日の連続監視するときの検知精度や適用条件について検討し、常時監視システムの設計を行った。

本報告書では、設計した常時監視システムを実際に設置、運用するにあたって、対象とした変状や変位の種類を検知するための各機器の要求性能を提案し、実際に常時監視システムを運用するにあたり事前に現地で確認しておくべきキャリブレーション項目を取りまとめた。

キーワード：常時監視、道路橋の変状、画像処理

* 橋梁研究室長

** 元橋梁研究室長
現在：熊本地震復旧対策研究室長

*** 元橋梁研究室長
現在：土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ上席研究員

**** 元橋梁研究室 主任研究官
現在：道路交通研究部 道路環境研究室 主任研究官

***** 元橋梁研究室 主任研究官
現在：関東地方整備局 関東技術事務所（関東維持管理技術センター）総括構造物維持管理官

***** 元橋梁研究室 研究官
現在：企画部 国際研究推進室 研究官

***** 橋梁研究室 研究官

***** 元橋梁研究室 研究員

***** 橋梁研究室 交流研究員

Study on continuous monitoring system of road bridge using image processing technology

Masahiro SHIRATO	*
Junichi HOSHIKUMA	**
Takashi TAMAKOSHI	***
Nodoka OSHIRO	****
Kohsaku KUBOTA	*****
Mari ISHIO	*****
Fumi MIYAHARA	*****
Sayaka OKADA	*****
Ryota NAKAMURA	*****

Synopsis

In the case of a serious abnormality related to the service of road bridge, it is important to recognize the abnormality in no time to prevent secondary disaster.

This research focuses economical and effective monitoring for abnormal events that can result in stopping traffic.

Taking into consideration the cost effectiveness of constant monitoring, we attempted to construct a monitoring system that requires installation of new facilities as little as possible to a general road management system. Cameras are already used to manage road traffic at many points and the present study proposes a new monitoring idea taking advantage of such existing cameras.

Experiments are conducted to examine the detection accuracy with different conditions when monitoring the displacement occurring on the road bridge with a general road surveillance camera.

This report proposes the required performance of the equipment for operating the designed constant monitoring system and compile the calibration items that should be confirmed locally.

Key Words: Monitoring, Deformation of road bridge, Image processing

- | | |
|-------|--|
| * | Head, Bridge and Structures Division, Road Structures Department, NILIM |
| ** | Head, Kumamoto Earthquake Recovery Division, Research Center for Infrastructure Management, NILIM |
| *** | Head, Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research, PWRI |
| **** | Senior Researcher, Road Environment Division, Road Traffic Department, NILIM |
| ***** | Chief Officer for Structure Maintenance Management, Kanto Technology Development Office, Kanto Regional Development Bureau |
| ***** | Researcher, International Research and Promotion Division, Planning and Research Administration Department, NILIM |
| ***** | Researcher, Bridge and Structures Division, Road Structures Department, NILIM |
| ***** | Research Engineer, Bridge and Structures Division, Road Structures Department, NILIM |
| ***** | Guest Research Engineer, Bridge and Structures Division, Road Structures Department, NILIM |

目次

1. 研究概要	1
1.1 はじめに	1
1.2 本研究の概要.....	2
2. 常時監視の対象とすべき事象の抽出と変位量の設定.....	3
3. 常時監視システムの要求性能の提案.....	5
3.1 常時監視システムの概要.....	5
3.2 カメラの要求性能.....	14
3.3 ターゲットの要求性能.....	32
3.4 カメラとターゲットの設置方法の検討.....	41
3.5 画像処理方法の検討.....	48
4. 現地キャリブレーション項目に関する実験と キャリブレーション方法の提案.....	54
4.1 現地キャリブレーション項目の抽出.....	54
4.2 模擬実験	55
4.3 供用中の橋梁に対する検証実験.....	63
5. まとめ	85

1. 研究概要

1.1 はじめに

道路橋の維持管理では、日常的に行われる道路パトロールや期間を定めて数年毎に行われる定期点検や災害発生後など、主に間欠的に現地の情報を取得する方法によって異常の発生や損傷状況などの把握が行われている。しかし、損傷や異常が発生する時と現地にて外観を把握する時が一致する可能性は低く、間欠に行う状態監視では、損傷や異常を道路管理者が認識できるまでに相応の時間を要することとなる。道路橋の場合、基本的には24時間自由な通行を可能としていることから、地震や洪水による被災、船舶・車両の衝突による部材の破断のように道路橋の構造や供用の安全性に関わるような重大な異常等が発生した場合（図-1.1.1）に、いかに短い時間で道路管理者が異常を認識できるかが、二次災害の防止の観点から極めて重要な課題といえる。

このような突発的な異常の早期検知のために、道路橋の状態を常時モニタリングすることが考えられ、これまでも様々な取り組みが行われてきている。しかし、使用目的や目的に応じた要求性能が明確ではないままで異常の検知を求めても、膨大な延長となる道路全体を監視するためのコストが高価になり得ることが課題として考えられる。

以上を踏まえて、本研究では、一般的な道路橋に対する供用安全性に関わる事象の発生への対応という目的に特化して、経済的で効果的な常時監視システムの実現性について研究を行った。本報告書では、設計した常時監視システムを実際に設置、運用するにあたって、対象とした変状や変位の種類を検知するための各機器の要求性能を提案し、実際に常時監視システムを運用するにあたり事前に現地で確認しておくべきキャリブレーション項目を取りまとめた。

なお、別途公表されている「国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告 社会資本の予防保全的管理のための点検・監視技術の開発（平成27年12月）第7章 位置計測による構造物の監視・変状探知手法の開発」（以降、国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告と称す）では、主に常時監視の対象とすべき変状や変位量の設定、常時監視システム手法の検討や選定、常時監視システムの設計に着目して取りまとめているので、そちらをあわせて参考にされたい。



図-1.1.1 突発的に道路橋の供用安全性に重大な支障が生じた事例

1.2 本研究の概要

本研究では、近年の大規模地震による被災事例の分析結果から、道路橋の構造や供用の安全性に関わる突発的で致命的な変状の特定を行うとともに、その変状を常時監視カメラの画像を用いて迅速かつ簡便に検出するシステムの仕様について研究を行っている。前述の国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告（平成 27 年 12 月）にまとめているとおり、取り扱っている常時監視システムは、地震等の発生直後に道路管理者が被災状況の把握、応急復旧等の対応に利用することを想定しており、その性能目標を以下のように設定した。

- ・橋梁の突発的・致命的変状を、迅速、簡便に検知することができる。
- ・常時監視の対象箇所は、桁端部（橋台背面を含む）や掛け違い部とし、検知する変位量は 50mm 以上とする。
- ・新たなインフラ整備をできるだけ伴わないよう既存のカメラを活用できるものとする。

想定する常時監視システムの基本仕様を図-1.2.1 に示す。遠隔地（例：国道事務所等）においても、カメラにより、橋台背面の段差や橋桁のズレ等を迅速に検知、変位量を判定し、速やかな応急復旧等の対応を可能にすることを目的としている。

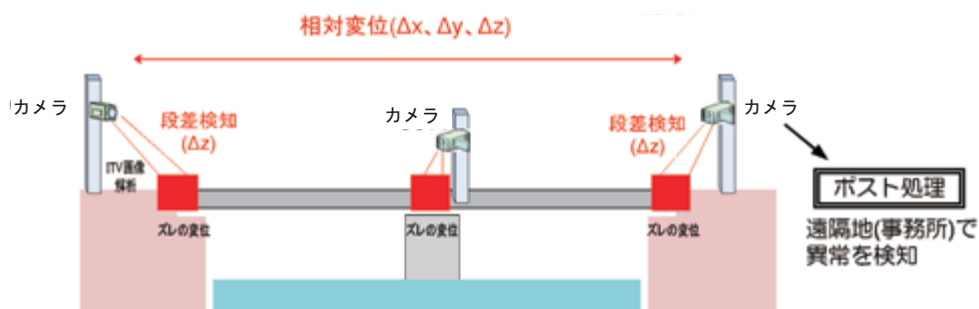


図-1.2.1 常時監視システムの基本仕様

2. 常時監視の対象とすべき事象の抽出と変位量の設定

本章では、別途公表されている国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告（平成 27 年 12 月）に基づき、既往の災害事例から、道路構造物の異常に着目して、供用安全性に支障を及ぼし、かつ、二次災害防止等の観点などから災害発生後できるだけ早期に認識することが特に望ましいと考えられる事象と、その事象が生じた場合に認識すべき変位量をレビューする。

(1) 自然災害による道路構造物の異常の調査

国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告（平成 27 年 12 月）では、近年の自然災害によって道路橋に異常が発生したことに起因して供用安全性が阻害された事例について調査を行い、常時監視の対象とすべき事象の抽出が試みられている。調査対象は、平成 23 年に発生した東日本大震災による被害である。常時監視の対象とすべき損傷箇所と変位量を把握するため、東日本大震災後に東北地方整備局が震度 6 弱以上の 11 路線の橋梁を対象に行った緊急橋梁点検結果を用いて橋梁の被災状況が調査されている。

(2) 常時監視の対象とすべき事象と変位量

東日本大震災における被災状況の調査の結果、道路橋では橋台背面や桁端部の掛違い部に損傷が発生したものが最も多く、規制期間が長いところでは段差が 50 mm 以上生じていることが多かった。

橋台背面（桁の掛違い部も含む）の損傷は、橋台背面盛土の沈下だけではなく主桁の損傷や支承の破壊などの供用性に支障をきたす損傷に起因する場合も多いと考えられる。以上のことから、常時監視の対象とするべき事象として、桁端部や掛違い部の段差等の変位が挙げられる。

桁端部や掛違い部の段差等の変位は表-2.1.1 に示す通り、段差や横ずれ、開きが挙げられるためこれらを捉えることが目標となる。このとき、監視対象とすべき変位量も被災事例に基づけば 50 mm を超えているかどうかを捉えることが目標となる。

表-2.1.1 常時監視の対象とした事象

監視対象 監視箇所	監視対象
橋台背面部及び桁端部 掛違い部	橋台背面部：橋台背面の盛土の沈下量 桁端部：橋台～橋梁間の段差
掛違い部	掛違い部：橋梁～橋梁間の段差
桁端部、掛違い部	桁端部：橋台～橋梁間の横方向への変位量 掛違い部：橋梁～橋梁間の横方向へ横ずれ、開き

3. 常時監視システムの要求性能

前述のとおり、本常時監視システムは道路管理用に配備しているカメラや監視用のターゲット等を用いて道路橋の桁端部（橋台背面含む）及び掛違い部における車両の通行に支障をきたす異常を判定するものである。

本章では、監視目標として設定した道路橋の橋台背面や掛違い部の変位量(50 mm以上)を検出するために必要なカメラの要求性能（3.2章）、ターゲットの要求性能（3.3章）、カメラとターゲットの配置方法（3.4章）、画像処理の方法（3.5章）を検討する。

3.1 常時監視システムの概要

3.1.1 常時監視システムの主要機器

国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告（平成27年12月）に基づいた本常時監視システムで使用する主要機器一覧を表-3.1.1に示す。

表-3.1.1 常時監視システムの主要機器一覧

No.	機器名称	数量	設置場所
1	監視カメラ装置（カメラ）	1 式	道路橋現地
2	ターゲットセット（自発光式視線誘導標）	3 台以上/箇所	
3	橋台の背面沈下ターゲット（自発光式道路鋸）	3 台以上/箇所	
4	画像処理装置	1 台	事務所
5	処理結果蓄積警報出力装置	1 台	

3.1.2 カメラの設置方法に関して留意すべき事項

常時監視システムでは桁端部や掛違い部に発生する段差等の変位をカメラによって取得した画像上で面的に捉える必要があるので、図-3.1.1に示すように橋梁端部付近にカメラを配置し、橋梁の掛違い部に設置したターゲット同士の相対変位を測定する事が、橋梁の変状量を計測するのに良い方法と考えられる。

カメラは、設置目的や現地の条件を踏まえつつ任意の高さに設置されるが、歩道部を通行する歩行者や自転車が接触したり、意図的な悪戯がされにくい高さに設置することが望まれる。なお、「道路構造令（昭和45年10月29日政令第320号）」第12条では建築限界が設定されており、車道の上方に路面から4.5mの空間を確保しなければならないとされている。

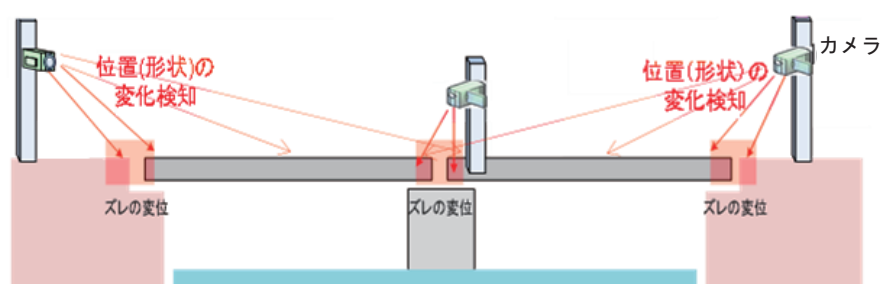


図-3.1.1 常時監視システムにおけるカメラの配置

3.1.3 カメラ及びターゲット配置の概要

カメラは道路橋の掛違い部、桁端部を監視できる位置に、桁端部における異常の発生をカメラとターゲットの間の相対距離の変化により感知するため、掛違い部を4個のターゲットで挟むように配置する。図-3.1.2に、カメラ及びターゲットの設置イメージ図を示す。

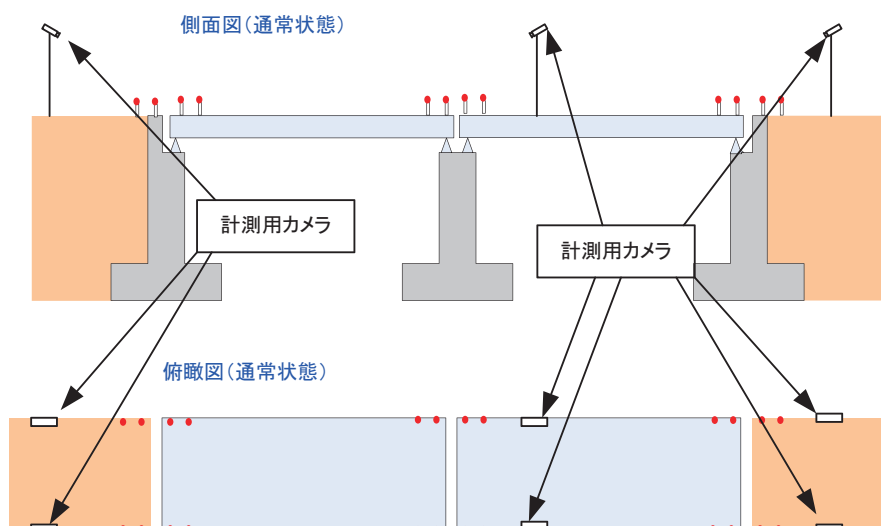


図-3.1.2 カメラ及びターゲットの設置方法イメージ図

図-3.1.3～図-3.1.5 に、開き・段差、横ずれ、橋台背面沈下の際のターゲット変位状況のイメージ図を示す。

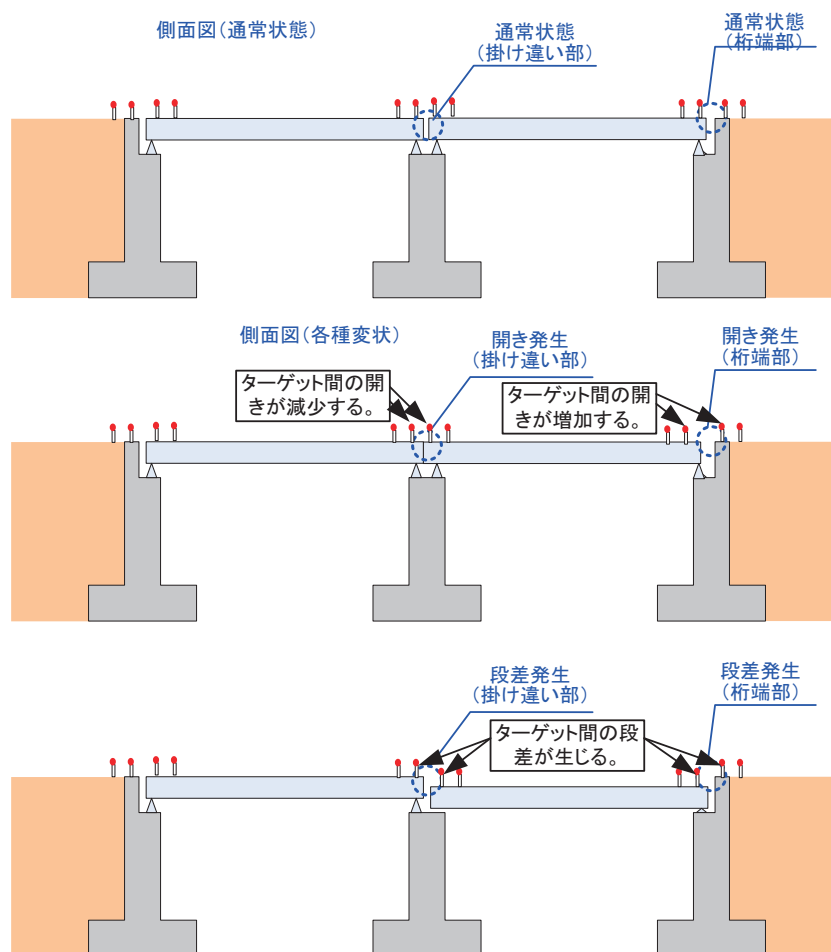


図-3.1.3 開き、段差発生時のターゲットの変位状況イメージ図

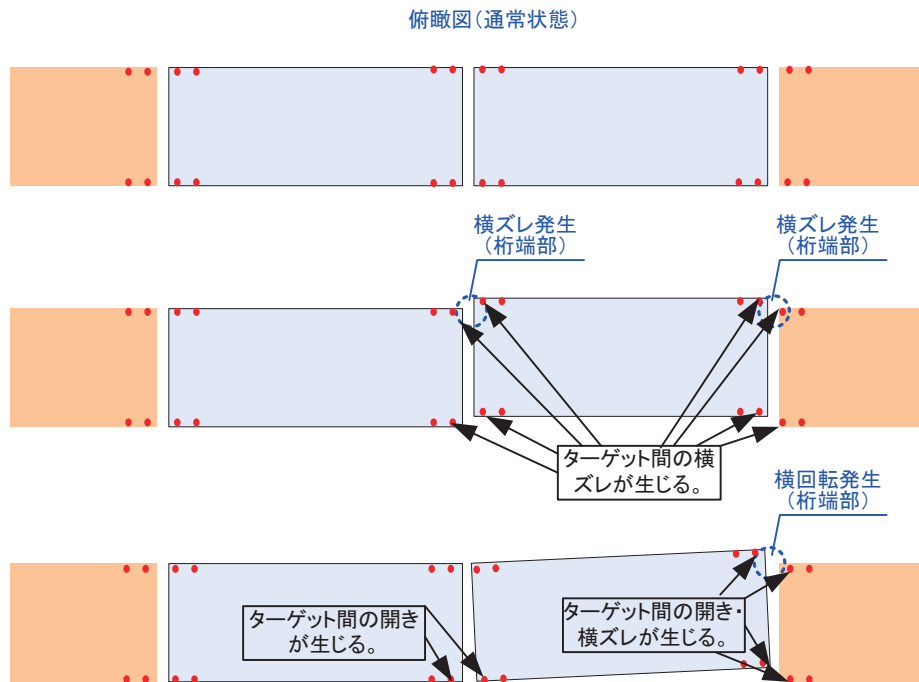


図-3.1.4 横ずれ発生時のターゲットの変位状況イメージ図

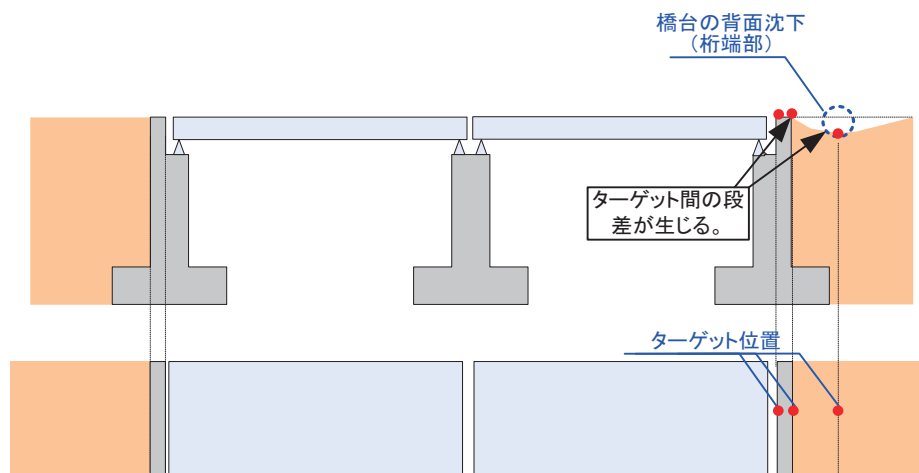


図-3.1.5 橋台の背面沈下発生時のターゲットの変位状況イメージ図

3.1.4 画像処理システムの概要

カメラは、道路状況を監視するために設置されているため、予め設定されている（プリセット設定されている）撮影範囲は常時監視システムに必要な撮影範囲と比較して広いことが想定される。

必要な撮影範囲外も監視する場合、ターゲットと異なる構造物の変状や通行人等の動きが写り込むなど、常時監視に不要な情報まで捉えてしまい画像処理時間の増大や誤作動の発生が懸念される。

そこで、画像内にある対象物（ターゲット）の位置検出や物体数のカウントに用いられるテンプレートマッチング法が有効であると考えた。テンプレートマッチング法では、画像の中から特定の形状（パターン）を予め初期画像として登録し、その初期画像と相関値が最も高い領域を抽出することができる。

また、道路照明の設置状況が現場ごとに異なり、現場によっては夜間の明るさの条件によりターゲットを検出できない場合があると考えられる。そのため、ターゲットは自発光するものを用いることで夜間でも道路橋の状況を監視できるようにするのが良い。ターゲットが常時発光している場合と点滅している場合では、画像の処理方法が異なるので、以降に処理方法を取りまとめた。

また、夜間は車の照明によってハレーションが発生し、検知精度が大きく変化することで道路橋の状況を観測することができなくなる場合があると考えられる。これについては、現地でのキャリブレーション項目とすべきと考え、**第4章**にて検証実験を実施し、キャリブレーションの必要性を検証した。

(1) 画像処理のアルゴリズム

既存の道路管理用カメラとしての役割を妨げず、橋梁の変位を検知することを目標とし、テンプレートマッチング法を適用した画像処理システムのアルゴリズムの例を図-3.1.6に示す。

このアルゴリズムを実施するにあたり、予めテンプレート画像およびサーチエリアを登録する必要がある。また、撮影した画像を元にターゲットの実際の変位量を計算できるようパラメータの調整をする必要がある。

アルゴリズムの処理工程は、以下の通りである。

【1】テンプレート画像データの読み込み

予め設定したテンプレート画像を読み込む。

【2】対象画像の読み込み

カメラで撮影した画像を読み込む。

【3】サーチエリアの画像の切り出し

ターゲットが点灯時、消灯時の画像の切り出しを行う。詳細については、後述（2）参照のこと。

【4】相関値の計算

サーチエリアを対象に、ターゲットの座標検出を行う。

【5】サーチエリアの画像の切り出し終了

サーチエリアが無くなるまで【3】および【4】を繰り返し行う。

【6】最大相関値の検索

カメラで撮影した画像中で、最もテンプレート画像と相関値が高かった場所を特定する。

【7】サブピクセルの処理

相関値を2次曲線で近似し、ターゲットの設置位置を小数点1桁の精度で推定するサブピクセル処理を行う。詳細は3.5.2参照。

【8】ターゲットの座標検出有無の判定

ターゲットの座標検出状況を判定する。ターゲットの座標が検出されなかった場合、【2】に戻り、再度ターゲットの座標検出を試みる。

【8】までの処理を終えたら、ターゲットの変位量を計算し、変位量が警戒値を超過しなかった場合、【1】に戻る。変位量が警戒値を超えた場合は警報を出力する。

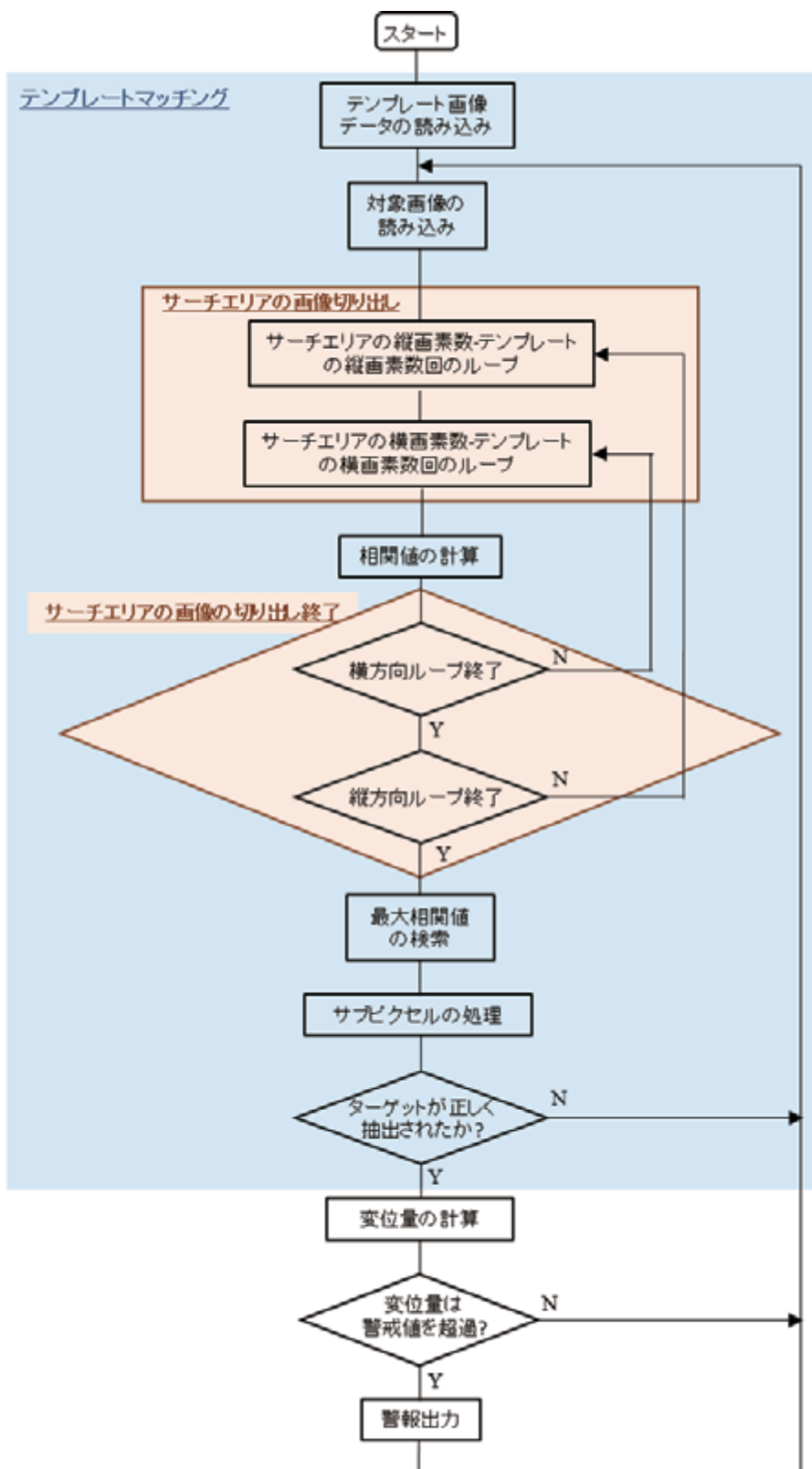


図-3.1.6 画像処理のアルゴリズムの例

(2) サーチエリアの画像の切り出し

サーチエリアの切り出しは、ターゲットが常時発光（または常時消灯）している状態と、点滅している場合とでは処理の方法が異なる。ここでは、それぞれの処理方法について記述する。

1) ターゲットが点滅していない場合

ターゲットが道路の区画線のような自発光せずに構造物固有の形状や色彩で識別できるもの、自発光するが点滅せずに常時点灯するもの等を使用する場合、以下の手順で処理を行う。

- i) 1 枚の画像を読み込む。
- ii) 取り込んだ画像を対象に、サーチエリアの画像の切り出しを行う。

2) ターゲットが点滅している場合

点滅するターゲットを使用する場合、差分処理を行う必要がある。差分処理の手順は以下の通りである。

- i) 連続する 3 枚の画像を読み込む。
- ii) 3 枚の画像の 1 枚目と 2 枚目の組、2 枚目の組と 3 枚目の組の差分処理を行い、2 枚の差分画像を表す。
- iii) 2 枚の差分画像を対象に、サーチエリアの画像の切り出しをする。

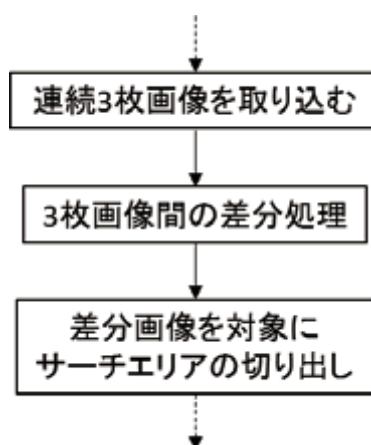


図-3.1.7 差分処理フロー

差分処理によるターゲットの抽出については、点滅しているターゲットの画像の差分データを利用して行う。

ターゲットが点滅する事によるサンプリング周期のずれを防止するため、連続 3 枚の画像を取得する。ターゲットが点滅していることを利用し、点灯と消灯の画像の差分処理を行い、ターゲットを強調する。

ターゲットの点滅周期とカメラのサンプリング周期との間には誤差があるため、運用上、同期処理を行わないのがよい。画像のサンプリングのタイミングにより、連続で取り込んだ画像は同時に消灯または点灯している場合があり、画像の差分処理ではターゲットを正しく抽出することができないことがある。

この課題を解決するため、カメラのサンプリング周期はターゲットの点灯周期を1割程度短くして連続3枚の画像を取り込むことにより、3枚画像の中に、1と2の組、2と3の組の画像には、最低一組は点灯または消灯画像を含むようにする。

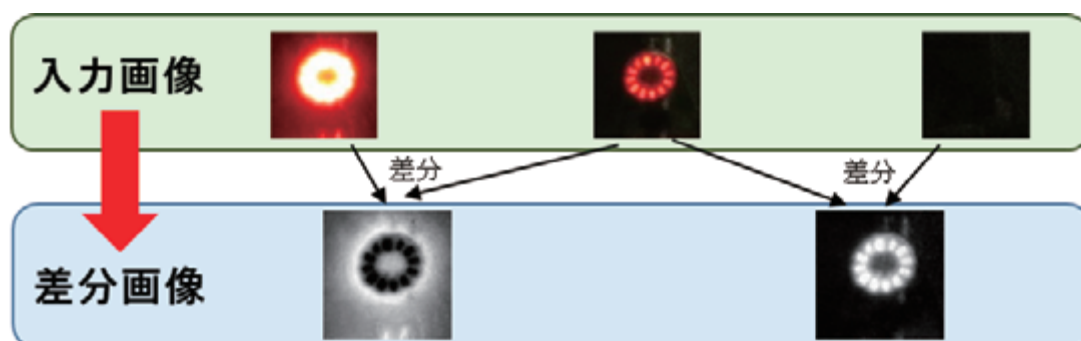


図-3.1.8 中型赤色ターゲット差分処理

3.2 カメラの要求性能

3.1 に示したカメラの配置方法を踏まえ、まずカメラで取得する画像のパラメータと道路橋の各変位（開き、横ずれ、段差）との関係を整理した。そのために、まずはカメラと正対した面の検出精度を整理し、次にカメラの各種パラメータと橋梁の各方向変状の関係式を整理した。更にそれらの関係式から、カメラによる変位の検知精度の分析とカメラに要求される解像度を検討した。

3.2.1 カメラ面と正対した面の検出精度について

画像上でずれを検出する場合、1px（ピクセル：画素）以上の変化がないと確実に変位（開き、横ずれ、段差）を検出することができない。ここでは、カメラのレンズと正対した監視範囲について、カメラ画像上の 1px に対応する幅を計算する。

図-3.2.1 のように、画面上で 1px に対応する XY 方向のターゲットの物理移動量は、画像の焦点距離（ f ）（あるいは画角）と画面の XY 方向の px 数（ P_x 、 P_y ）、物体までの距離（ Z ）と関係する。

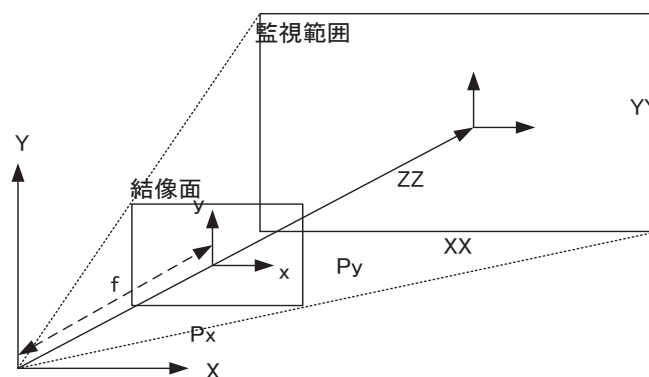


図-3.2.1 カメラの透視モデル

- ・ カメラの焦点距離 : f
- ・ カメラの監視範囲（横方向） : XX
- ・ カメラの監視範囲（縦方向） : YY
- ・ カメラの監視面までの距離 : Z
- ・ 画像の px 数 : $P_x \times P_y$

この場合の実空間の点 (X、Y、Z) の画面上の投影座標 (x、y) は下式で表せる。

$$x = f \frac{X}{Z}, y = f \frac{Y}{Z} \quad (3.1)$$

また、監視範囲において、1px の X 方向と Y 方向の幅 ΔX 、 ΔY はそれぞれ下式で表される。

$$\Delta X = \frac{XX}{P_x}, \Delta Y = \frac{YY}{P_y} \quad (3.2)$$

一方、カメラ画像は 3 次元空間の物体を 2 次元に投影した像である。カメラの投影線上で物体を移動する場合、カメラの画像から、その他の条件 (物体のサイズ等) がない場合、その物体の移動量を判定することはできず、ターゲットの奥行き方向 (Z) の検知は困難である。

なお、対象物のサイズは一定で回転せず、XY 方向へ移動しない条件の場合には、対象物のサイズの変化で奥行き方向 (Z) を推定することができる。

この場合、図-3.2.2 により、1px に対する奥行き方向の幅の ΔZ は次式であらわせる。

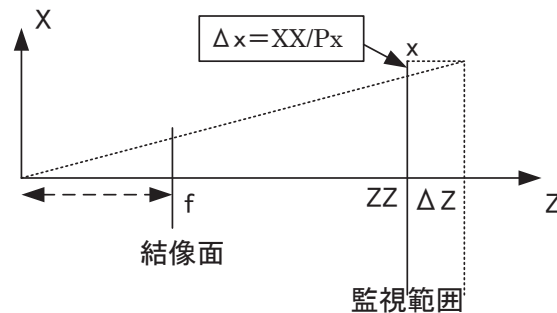


図-3.2.2 カメラの 1 画素の奥方向の幅のモデル

$\frac{\Delta Z}{\Delta X} = \frac{ZZ}{x}$ を変形して整理すると、

$$\Delta Z = \frac{ZZ}{x} \Delta X = \frac{ZZ \times XX}{x \times Px} \quad (3.3)$$

上記の式では、通常、 $ZZ > x$ であるため、 ΔZ は ΔX より大きいことが分かる。更に、カメラの光軸（レンズの対称軸） Z 軸の付近では、分母の x が小さくなり、 ΔZ は非常に大きくなる。

このように、一カ所のカメラから取得する画像によって変位を検知するとターゲットとカメラの位置関係が前後（遠近）へ変化する場合と、上下左右方向への変化する場合とでは変位の検知精度が異なる。

そのため、変位が生じる方向（開き、横ずれ、段差）ごとに検出精度が異なることに留意する必要がある。

3.2.2 カメラの画角、設置高さと各方向変状の関係の整理

2章に示したように本研究の監視対象とした桁端部や掛違い部の変位は、開き・横ずれ・段差である。図-3.2.3に、掛違い部に段差が発生した際のイメージ図を示す。

図-3.1.2に示したように道路管理カメラで監視を行う場合、3.2.1に示したように監視の対象がカメラやレンズと必ずしも正対しているとは限らない。

そこで、カメラの画角や設置高さと各変状（開き・横ずれ・段差）の画像上での関係の整理を行った。

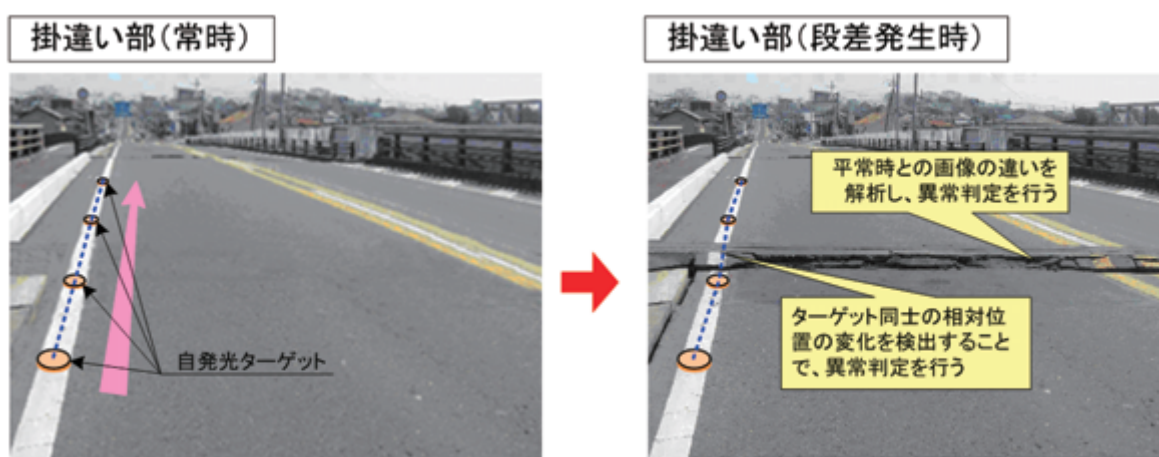
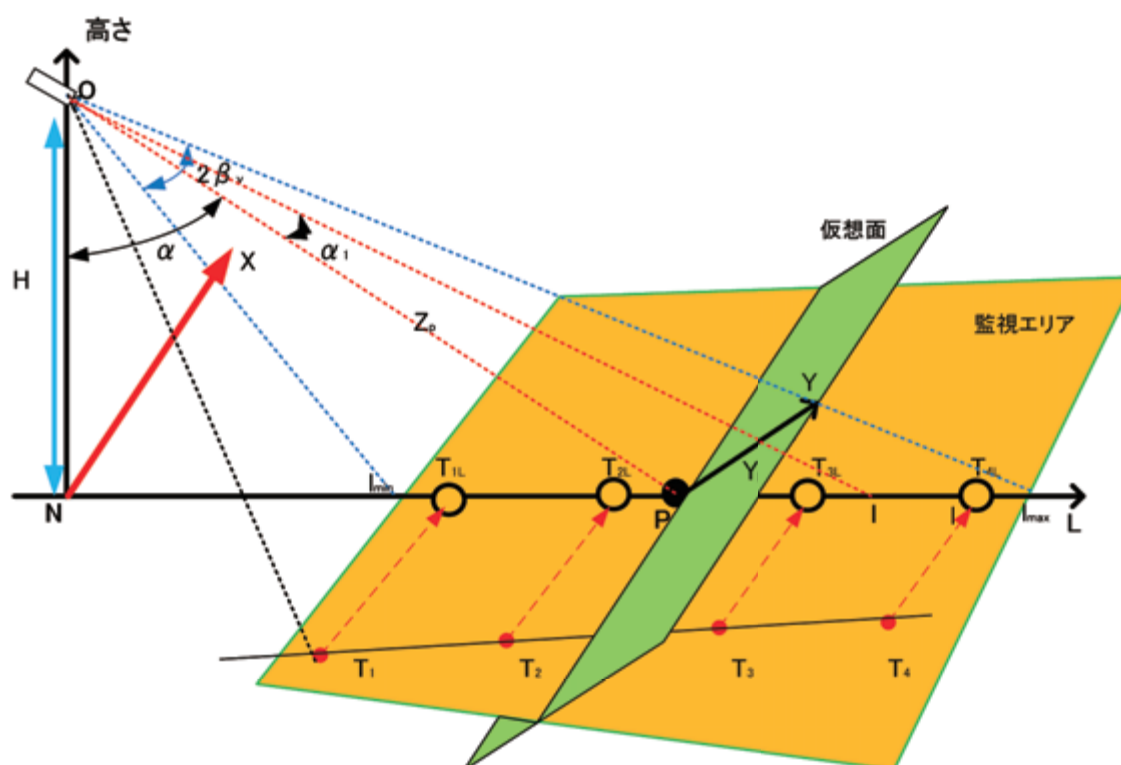


図-3.2.3 道路管理カメラを利用する場合の撮影イメージ

開き方向（L 方向）と画面の縦方向（Y 方向）の立体的なイメージは図-3.2.4 のようになる。

投影中心（カメラの設置点）	: O
地面鉛直点	: N
レンズの光心から結像面に下ろした垂線の地面との交差点	: P



ONP の 3 点から構成した平面（中心面と称する）は地平面と直交している。カメラが画像としてとらえている仮想面は中心面（ONP）上にあり、点 P から仮想面の縦方向を Y 方向とし、中心面（ONP）と路面との交差線をしとする。

ここでは、L 線上の点と画面 Y 方向の関係を整理する。

18

設置高さ：H

ターゲットの投影点： $T_{1L} \sim T_{4L}$

N～P 点間の距離（離隔距離）： L_p

ターゲットの間隔： T_L

カメラの設置角度： α

カメラの画角： $2\beta_y$

カメラのY方向のpx： P_y

中心面と地面と交差している直線上の任意点1とした場合、カメラの結像面と平行している仮想面上のY軸の距離（ Y_1 ）、 $\angle P01$ （ α_1 ）は以下の式の関係になっている。

$$\tan \alpha_1 = \frac{Y_1}{Z_p}, \quad \tan \alpha = \frac{L_p}{H}, \quad \tan(\alpha + \alpha_1) = \frac{l}{H} \quad (3.4)$$

式(3.4)より、 Y_1 を求めることができる。

$$\frac{l}{H} = \frac{\tan(\alpha) + \tan(\alpha_1)}{1 - \tan(\alpha)\tan(\alpha_1)} = \frac{\frac{Y_1}{Z_p} + \frac{L_p}{H}}{1 - \frac{Y_1}{Z_p} \frac{L_p}{H}} = \frac{Y_1 H + L_p Z_p}{Z_p H - Y_1 L_p} \quad (3.5)$$

$$l(Z_p H - Y_1 L_p) = H(Y_1 H + L_p Z_p) \quad (3.6)$$

$$H^2 Y_1 + l Y_1 L_p = l Z_p H - H L_p Z_p \quad (3.7)$$

上式から、開き方向（L方向）と画面の縦方向（Y方向）との関係式；

$$Y_1 = \frac{l Z_p H - H L_p Z_p}{H^2 + l L_p} \quad (3.8)$$

または、

$$l = \frac{H^2 Y_1 + H L_p Z_p}{Z_p H - Y_1 L_p} \quad (3.9)$$

式(3.8)において、 Y_1 と l は変数であり、 l に対する微分を行うと、下式になる。

$$Y_1' = \frac{Z_p H(H^2 + l L_p) - (l Z_p H - H L_p Z_p)L_p}{(H^2 + l L_p)^2} \quad (3.10)$$

$$\Delta l = \frac{(H^2 + l L_p)^2 \Delta Y_1}{Z_p H(H^2 + l L_p) - (l Z_p H - H L_p Z_p)L_p} \quad (3.11)$$

式(3.10)より、 l は無限大になると、 Y_1' は0になり、 $Y_\infty = \frac{Z_p H}{L_p}$ は消失点になる。

カメラの画角 ($2\beta_y$) から、画面上で撮影できる範囲を以下のように求められる。

$$Y_{lmin} = Z_P \tan(-\beta_y) \text{ から、}$$

$$l_{min} = \frac{H^2 Z_P \tan(-\beta_y) + HL_P Z_P}{Z_P H - Z_P \tan(-\beta_y) L_P} = \frac{L_P - H \tan(\beta_y)}{1 + \tan(\beta_y) L_P / H} \quad (3.12)$$

$$Y_{lmax} = Z_P \tan(\beta_y) \text{ から、}$$

$$l_{max} = \frac{H^2 Z_P \tan(\beta_y) + HL_P Z_P}{Z_P H - Z_P \tan(\beta_y) L_P} = \frac{L_P + H \tan(\beta_y)}{1 - \tan(\beta_y) L_P / H} \quad (3.13)$$

カメラの Y 方向の px (P_y) から、1px に対応する Y 方向の距離 (ΔY) は以下の式で表せる。

$$\Delta Y = \frac{(Y_{lmax} - Y_{lmin})}{P_y} = \frac{2Z_P \tan(\beta_y)}{P_y} \text{ から}$$

開き方向のみ変状した場合、1px の L 方向の変位量 (Δl) は以下の式になる。

$$\Delta l = \frac{2Z_P (H^2 + lL_P)^2 \tan(\beta_y)}{[Z_P H (H^2 + lL_P) - (lZ_P H - HL_P Z_P) L_P] P_y} \quad (3.14)$$

(B) 横ずれの変状量 (ΔX) と画面の横方向の画素数との関係の整理

監視エリア (カメラで撮影可能な路面範囲) は、カメラの設置角度 (α) が L 方向に向かって変化するに従い変動するため、監視可能な横方向 (X 方向) の幅 ($-X_l, X_l$) はカメラの設置角度 (α) の L 線上の任意の点 l に依存する。

ここでは、($-X_l, X_l$) と l の関係を整理する。

計算条件は、以下の通りとする。

設置高さ : H

N~P 点間の距離 (離隔距離) : L_P

カメラの設置角度 : α

カメラの画角 : $2\beta_x$

カメラの X 方向の px : P_x

$$\frac{\Delta l}{\Delta h} = \frac{(l+\Delta l)}{H} \rightarrow \Delta l H = l \Delta h + \Delta l \Delta h \quad (3.19)$$

式(3.19)より、

$$\Delta l = \frac{l \Delta h}{H - \Delta h} \quad (3.20)$$

または、

$$\Delta h = \frac{H \Delta l}{l + \Delta l} \quad (3.21)$$

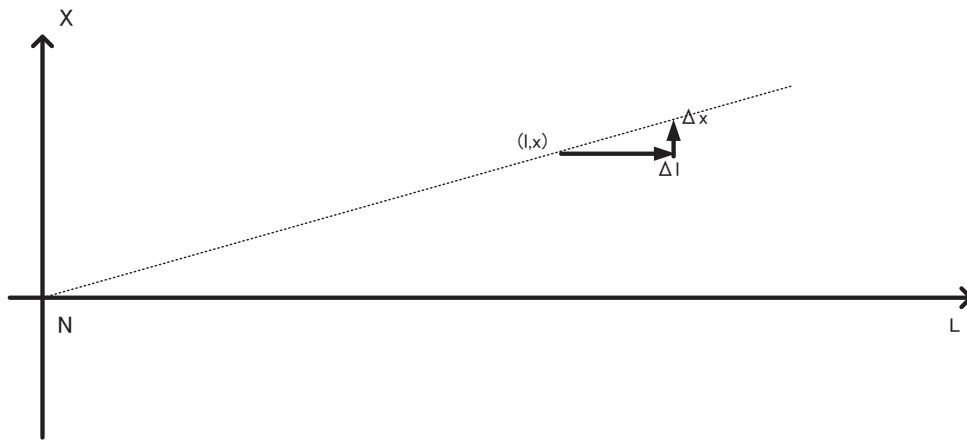


図-3.2.8 監視エリア平面への投影イメージ

$$\frac{\Delta x}{\Delta l} = \frac{1}{x} \rightarrow \Delta x = \frac{1}{x} \Delta l \quad (3.22)$$

$$\Delta x = \frac{l^2 \Delta h}{x(H - \Delta h)} \quad (3.23)$$

または

$$\Delta l = \frac{x}{l} \Delta x \quad (3.24)$$

以上の関係式をカメラにより変状を検知するときの要求画素数の検討に用いた。

3.2.3 カメラによる変状の検知精度

ここでは、一般的な道路監視用のカメラの設置条件の時に検出可能な変位量（開き、横ずれ、段差）を整理した。

(1) カメラによる変状の検知精度の計算方法

カメラに取得した画像により変位を検出する場合、カメラの画面上で 1px 以上の移動が生じなければ変位を抽出することはできない。そのため、開き、横ずれ、段差方向の移動に対し 1px に相当する移動量を計算し、検出可能な移動量を試算した。

試算条件は表-3.2.1 の通りで、ターゲット $T_1 \sim T_4$ は L 線上（以下、 $T_1 \sim T_4$ とする）に設置されており、それぞれの設置間隔を 1m と仮定した。

表-3.2.2 に、この条件で開き方向、横方向、高さ方向の動きをカメラの 1px 以上検出できる $T_1 \sim T_4$ のターゲットの移動距離を試算した結果を示す。この条件であればいずれのターゲットも 50 mm (0.05m) 以上の移動は検知できることが分かる。

表-3.2.1 試算の条件

パラメータ		値(単位)	備考
設置高さ	H	5.00 (m)	設定値①
離隔距離	Lp	5.00 (m)	設定値②
0～P 点間の距離	Zp	7.07 (m)	①②から計算値
カメラの設置角度 ATAN(Lp/H)	α	45.01 (°)	①②から計算値
カメラの水平画角	$2\beta_x$	44.00 (°)	設定値③
	$\tan(\beta_x)$	0.40	③からの計算値
カメラの設置角度 ATAN(Lp/H)	$2\beta_y$	30.00 (°)	設定値④
	$\tan(\beta_y)$	0.27	④からの計算値
ターゲット間距離	Tl	1.00 (m)	設定値⑤
画面上の最近点距離	lmin	2.89 (m)	式(3.12)
画面上の最遠点距離	lmax	8.66 (m)	式(3.13)
	Ymax	1.89 (m)	$Y_{lmax} = Z_p \tan(\beta)$
画面の垂直方向 px 数	Py	480.00 (px)	設定値⑤
	ΔY	0.00789 (m)	式(3.2)
画面の水平方向 px 数	Px	680.00 (px)	設定値⑥

表-3.2.2 画面上の 1px に対応する各方向の移動距離の試算結果

	開き方向 m/px	横方向 m/px	高さ方向 m/px
T1	0.0085	0.0074	0.0114
T2	0.0106	0.0082	0.0111
T3	0.0117	0.0086	0.0111
T4	0.0141	0.0095	0.0113
備考	式(3.11)	式(3.16)	式(3.21)

図-3.2.9～図-3.2.11 に、各ターゲットが移動したときに橋梁の掛違い部 C 点に生じる変位を整理した。

常時監視の対象となる C 点の変位は T2 と T3 の移動距離の合計値となる。

常時監視の対象となる C 点の開き方向の変位：

$$(\Delta l_{T2} + \Delta l_{T3}) \times 2 \quad (3.25)$$

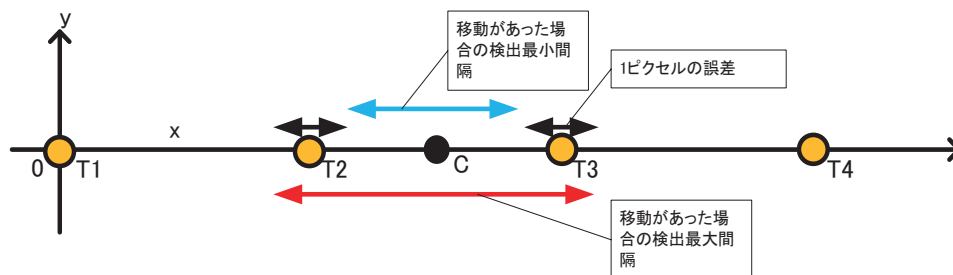


図-3.2.9 開き方向の C 点の変位

一方、横ずれ、段差方向については、図-3.2.10 に示すように、T2、T3 が移動した場合の常時監視の対象となる C 点の変位は T2、T3 の移動量の 1.5 倍に増幅される。

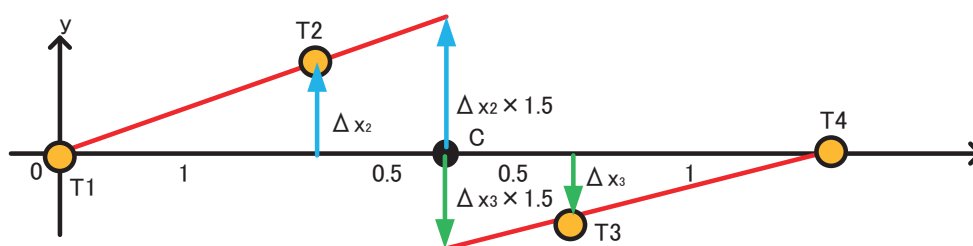


図-3.2.10 横ずれ、段差方向の C 点の変位 (T2、T3 が移動した場合)

また、図-3.2.11 に示すように、T1、T4 が移動した場合の常時監視の対象となる C 点の変位は T1、T4 の移動量の 0.5 倍になる。

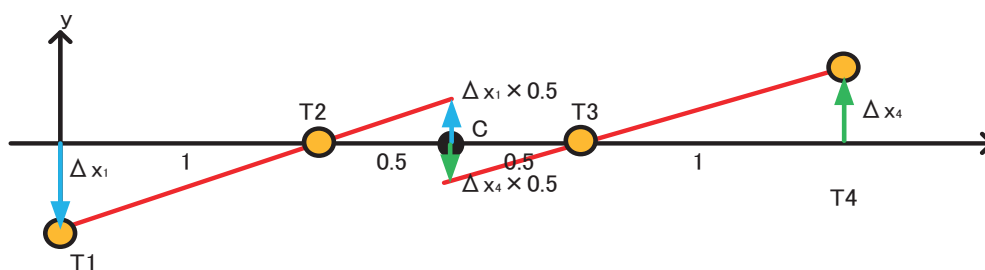


図-3.2.11 T1、T4 が移動した場合の C 点の変位

このため、ターゲットの各点を等間隔で設置した場合、横ずれ、段差方向の C 点の変位は以下の式で表せる。

横ずれ：

$$\Delta x_{T1} + (\Delta x_{T2} + \Delta x_{T3}) \times 3 + \Delta x_{T4} \quad (3.26)$$

段差方向：

$$\Delta h_{T1} + (\Delta h_{T2} + \Delta h_{T3}) \times 3 + \Delta h_{T4} \quad (3.27)$$

また、横ずれ方向、段差方向の C 点の変位は T2、T3 間の間隔は短いほど、小さくなり、間隔が 0 の場合にその値が最小になり、それぞれ $(\Delta x_{T2} + \Delta x_{T3}) \times 2$ 、 $(\Delta h_{T2} + \Delta h_{T3}) \times 2$ になる。

横ずれ：

$$(\Delta x_{T2} + \Delta x_{T3}) \times 2 \quad (3.28)$$

段差方向：

$$(\Delta h_{T2} + \Delta h_{T3}) \times 2 \quad (3.29)$$

(2) カメラの設置高さと検出可能な変位の関係

表-3.2.1 のパラメータのうち、カメラの設置高さのみ変更した場合のカメラの画像により検出可能な各方向の変位（開き、横ずれ、段差の変位）を図-3.2.12（画角 44° の場合：標準画角の場合）および図-3.2.13（画角 22° の場合：ズームした場合）に示す。カメラの設置高さと道路管理用カメラにより検出可能な変位の関係について整理すると以下の通りとなる。

- (ア) N-P 間の距離（離隔距離）が一定以内の場合は、検出が困難な変位は段差である。
カメラの設置位置が高いほど段差方向の検出可能な変位の値が大きくなり、他の変位と比べて小さな変位が検出できない。
- (イ) カメラの設置高さが 5m、標準画角（図-3.2.12）の場合、離隔距離が 5m 以内であれば通常の道路管理カメラにより対象とした開き、横ずれ、段差の変位量（50 mm）を検出可能である。設置高さが高くなるにつれ、その影響度合いはまちまちであるが、いずれの場合も小さな変位を検知できなくなる傾向にある。
- (ウ) カメラをズームした場合（画角 22°：図-3.2.13）、カメラとターゲット間の間隔は 9m 以内の場合は、対象とした開き、横ずれ、段差の変位量（50 mm）を計測することが可能である。開き方向については、20m まで計測可能である。
- (エ) 図-3.2.12 と図-3.2.13 を比較すると、カメラの画角が小さいほど、小さな変位を検出できることから常時監視には有効であることが分かる。

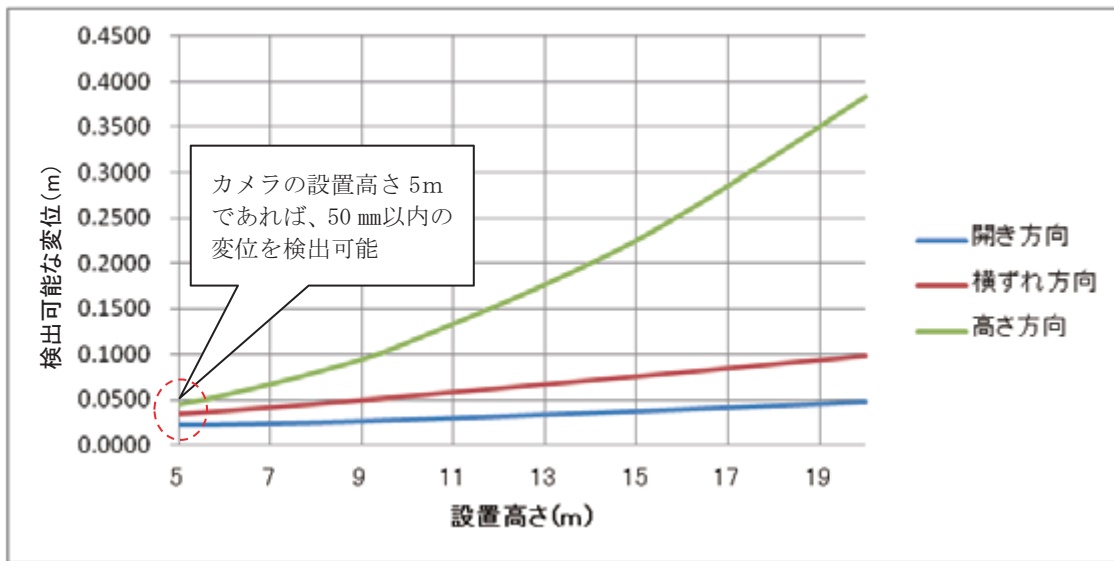


図-3.2.12 カメラの設置高さと道路管理用カメラの検出可能な変位（横方向画角 44°：標準画角）

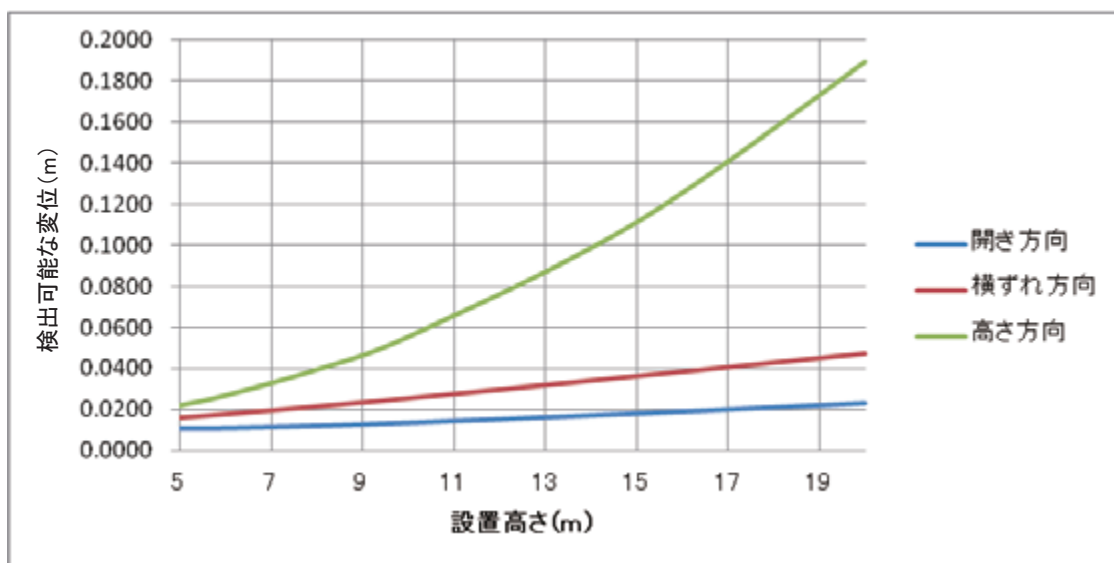


図-3.2.13 カメラの設置高さと道路管理用カメラで検出可能な変位（横方向画角 22°：ズームした場合）

(3) N-P 点間の距離（離隔距離）と検出可能な変位の関係

表-3.2.1 のパラメータのうち、N-P 点間の距離（離隔距離）のみ変更した場合の道路管理用カメラで計測可能な各方向の変位（開き、横ずれ、段差の変位）を図-3.2.14 および図-3.2.15 に示す。離隔距離と道路管理用カメラの計測可能な変位について整理した結果を以下に示す。

- (ア) N-P 点間の距離が短い場合は、段差方向の検出可能な変位が最も大きくなり、他の変位と比べて小さな変位が検出できない。一方、離隔距離が長い場合（約 10m 以上）は、開き方向の検出可能な変位が大きくなる。
- (イ) カメラの画角は小さいほど、小さな変位を検出できるため、常時監視には有効であることが分かる。

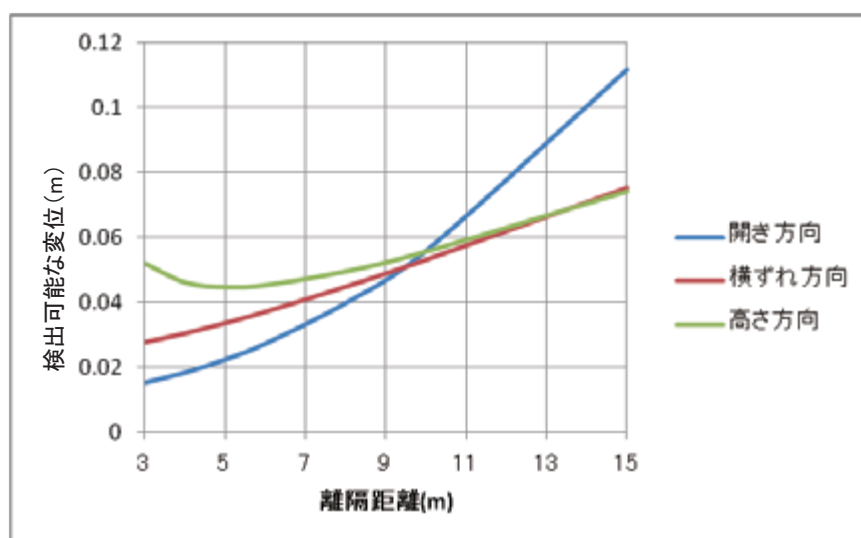


図-3.2.14 離隔距離と道路管理用カメラで検出可能な変位（横方向画角 44°）

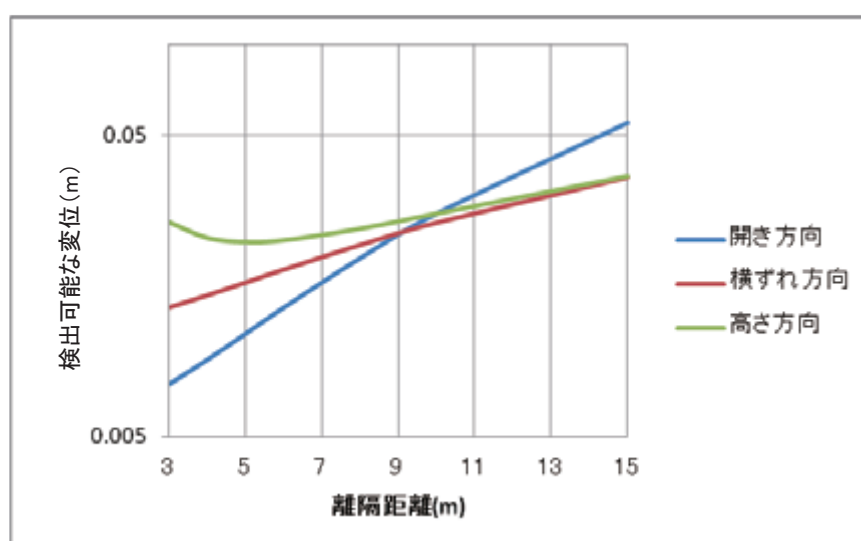


図-3.2.15 離隔距離と道路管理用カメラで検出可能な変位（横方向画角 22°）

3.2.4 カメラに要求される解像度

(1) カメラの設置高さとターゲットまでの離隔距離・カメラに要求される解像度の関係

桁端部に設置したターゲットの変位を抽出するためには、カメラで取得した画像上で1px 以上の変化が必要となる。そこで、開きや横ずれ、段差といった50mmの変位を検出するため、3.2.2～3.2.3の内容を踏まえ、カメラの設置高さと監視ターゲットまでの離隔距離に応じたカメラに要求される解像度を計算した。

計算条件は、表-3.2.1の試算結果から以下の通りとする。

カメラの水平画角：44°

カメラの垂直画角：30°

ターゲットの設置間隔：1.00m

段差、横ずれ、開きの3方向における50mm以上の変位を検出するためのカメラの要求画素数を表-3.2.3および図-3.2.16に示す。

表-3.2.3 各種条件のカメラの要求画素数（段差、横ずれ、開き）

離隔距離 (m)	設置高さ(m)							
	6(m)		8(m)		10(m)		15(m)	
	横	縦	横	縦	横	縦	横	縦
5	702	527	1039	779	1450	1087	2935	2201
10	779	584	951	713	1170	877	1888	1416
15	1253	940	1112	834	1257	943	1748	1311
20	2082	1562	1675	1256	1464	1098	1811	1358
25	3192	2394	2525	1894	2110	1582	1976	1482
30	4468	3351	3565	2674	2886	2164	2220	1665
40	7930	5948	5953	4464	4936	3702	3502	2627
50	12238	9178	9248	6936	7536	5652	5336	4002
60	17635	13227	13402	10052	10583	7937	7453	5590
80	31200	23400	23627	17720	18900	14175	12912	9684
100	48402	36302	37024	27768	29236	21927	20173	15129

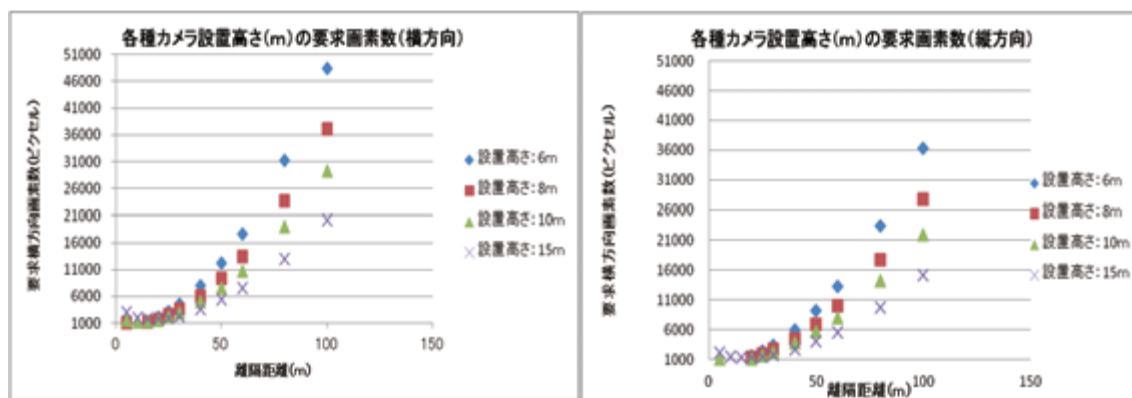


図-3.2.16 各種条件のカメラの要求画素数（段差、横ずれ、開き）

（左図：横方向画素数、右図：縦方向画素数）

表-3.2.3 に示した通り、離隔距離が大きくなるにつれ、開き方向の変位がカメラの光軸（レンズの対称軸）に対して平行になるため、要求画素数が急激に増加する。

なお、既存のカメラを有効に利用するため、開き方向を監視対象外とし、段差、横ずれのみ監視する場合、カメラの要求画素数は表-3.2.4 および図-3.2.17 のようになる。

表-3.2.4 各種条件のカメラの要求画素数（段差、横ずれ）

離隔距離 (m)	設置高さ(m)							
	6(m)		8(m)		10(m)		15(m)	
	横	縦	横	縦	横	縦	横	縦
5	702	527	1039	779	1450	1087	2935	2201
10	785	589	949	712	1170	877	1888	1416
15	1057	792	1126	845	1257	943	1748	1311
20	1370	1028	1401	1050	1464	1098	1811	1358
25	1664	1248	1713	1285	1751	1313	1975	1481
30	1989	1492	2060	1545	2064	1548	2219	1665
40	2648	1986	2640	1980	2711	2033	2776	2082
50	3313	2484	3292	2469	3297	2473	3402	2552
60	3929	2947	4028	3021	3952	2964	4116	3087
80	5250	3937	5286	3964	5276	3957	5379	4034
100	6589	4942	6589	4942	6610	4958	6610	4958

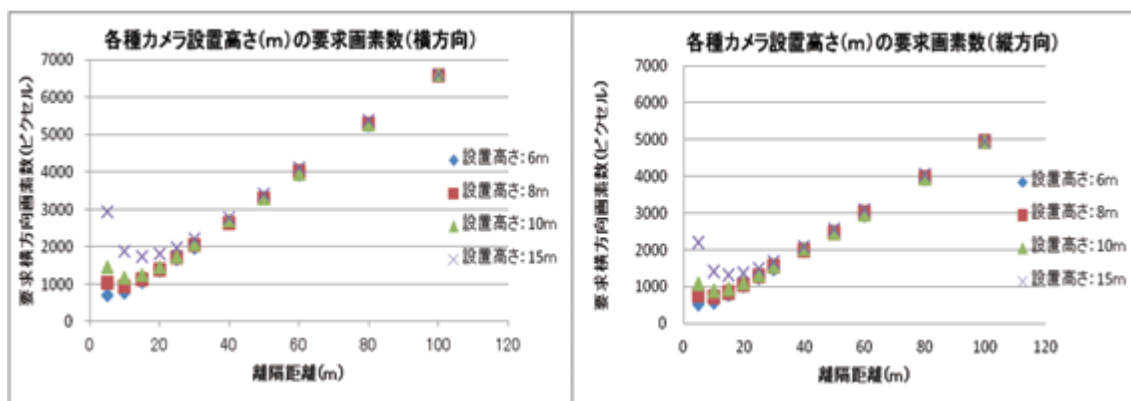


図-3.2.17 各種条件のカメラの要求画素数（段差、横ずれ）

（左図：横方向画素数、右図：縦方向画素数）

(2) 画角とカメラに要求される解像度の関係

前項では、カメラの水平画角を標準画角の 44° とし、カメラに要求される横方向の画素数を求めた。

常時監視システムを運用するにあたっては、カメラの画角を任意に変更することも考えられるため、ここでは変更した画角とカメラの要求画素数の関係を整理した。

画角を標準の 44° ($2\beta_x$) から θ に変更したときのカメラに要求される横方向の画素数は式 (3.30) で算出できる。

$$\text{要求横方向画素数} = \text{標準画角時の要求横方向画素数} \times \frac{\tan(\theta/2)}{\tan(44^\circ/2)} \quad (3.30)$$

画角 θ が小さくなるにつれ、要求横方向画素数も減少する。画角は縦横方向が同時に変化するため、上記と同比率で要求横・縦方向の画素数は減少する。

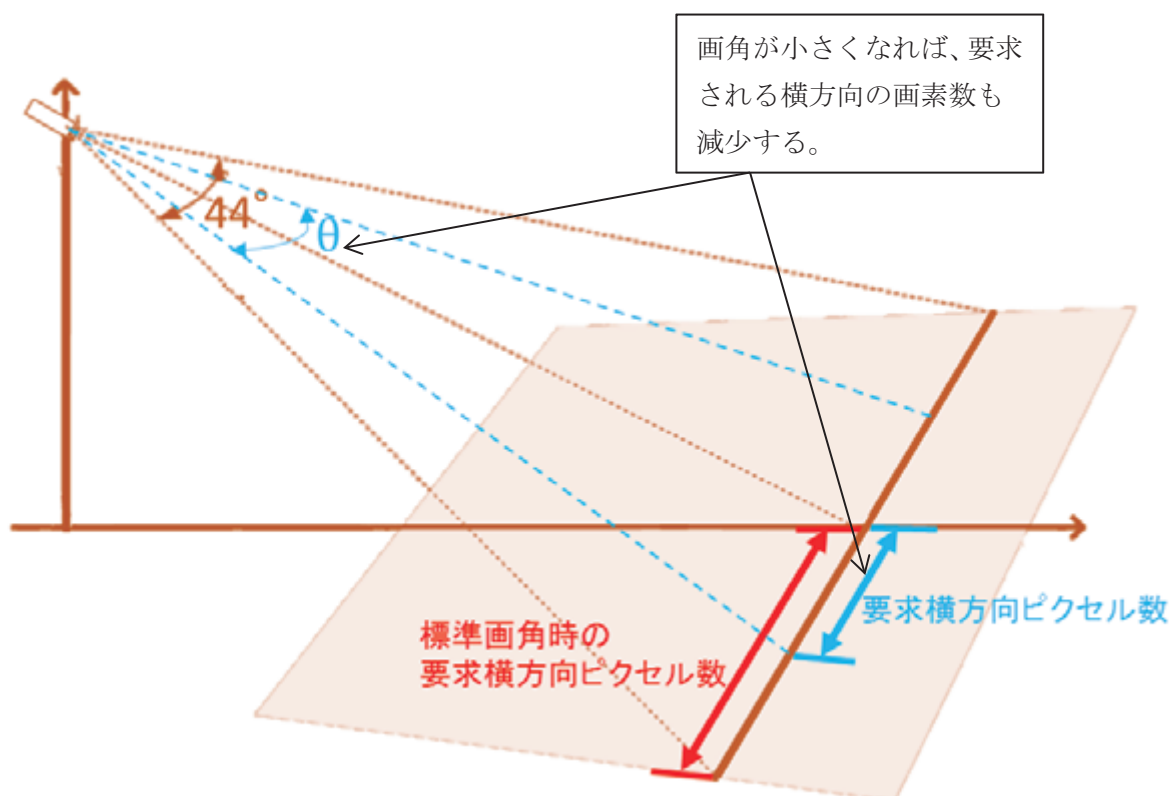


図-3.2.18 要求される横方向の画素数イメージ

3.3 ターゲットの要求性能

本項では、常時監視システムに適したターゲットの条件（形状、大きさ、色彩、輝度等）整理を行った。

3.3.1 ターゲットの形状及び大きさの条件

(1) ターゲットの形状条件

道路橋の監視用カメラは風等の影響を受け、回転や設置条件が変化することが考えられる。その影響を最小限にするため、どの角度から撮影しても認識でき、形状がばらつかないよう正円であることが望ましいと考えた。

(2) ターゲットの大きさ条件

現場で利用するターゲットは設置するスペースの関係上、サイズは小さい方が有利である。しかし、画像処理をする上では画面上で変位を認識しやすくするようターゲットのサイズが大きい方が有利である。

(3) ターゲットの形状および大きさの検証

(1)、(2)の妥当性を確認するため、ビデオカメラを用いてターゲットを実際に撮影し、その画像を元にターゲットの形状と大きさの検証を行い、ターゲットの形状の妥当性と変位の検出に必要なターゲットの大きさについて検討した。

ターゲットは地面に設置し、カメラは地面から1.5mの高さのところに設置した。表-3.3.1に、実験装置の諸元を示す。

表-3.3.1 実験装置諸元（左：ビデオカメラ、右：ターゲット）

ハイビジョンビデオカメラ		赤色ターゲット	
撮影素子	1/2.88 型 "Exmor R" CMOS センサ	写真	
撮影画素数	1980×1088 または 1440×1080		
焦点距離	f=3.8-38.0mm (35mm 換算) f=26.0-260.0mm (16:9 時) f=31.8-318.0mm (4:3 時)		
ズーム	光学 10 倍	照明	LED
		ターゲット直径	240mm

図-3.3.1 に、撮影した画像を示す。

離隔距離が 30m の場合（図-3.3.1 の上段）、ターゲットの中心部は画面上で 5px 程度確認できれば認識可能である。ターゲットの輪郭は 20px 程度以上確認することができれば認識可能である。

一方、離隔距離が 50m の場合（図-3.3.1 の下段）、ターゲットが画面上に存在することは認識できるものの、中心部と輪郭、輪郭と背景の区別が 30m の場合と比べて認識しにくくなった。

この検証から、カメラで取得した画像によりターゲットを認識するためには、5～20px 程度認識できる大きさのターゲットを使用するのが良いと考えられる。

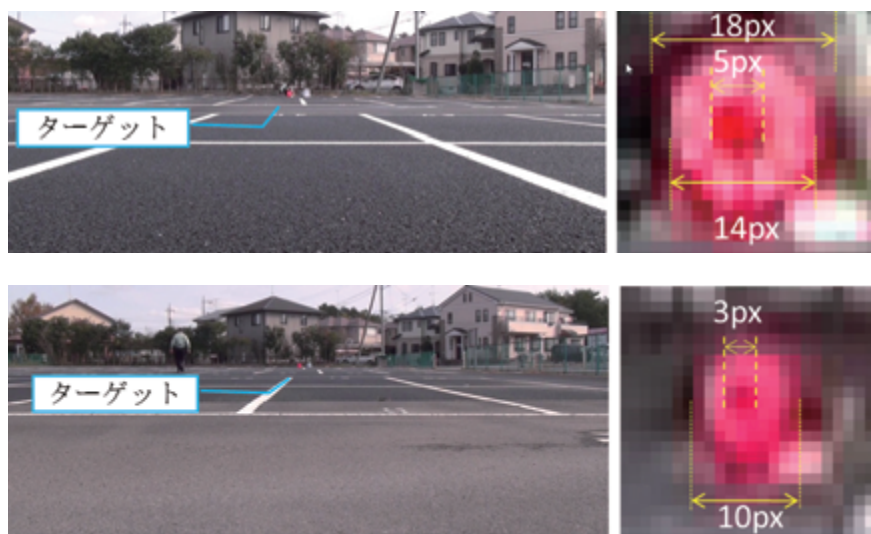


図-3.3.1 ビデオカメラによる自発光ターゲットの実写（上：30m先、下：50m先）

①ターゲットの形状について

本検証では、正円のターゲットを用いた。実験で得られた画像をズームすると画素が粗くなるが、円形の形状を捉えることができている、背景との区別もしやすいと考えられることから正円のターゲットを用いる妥当性を確認できた。

②ターゲットの大きさについて

既設の道路管理用カメラを利用した場合のカメラ画像 1px に相当する距離を表-3.2.1 の試算条件をもとに算出した結果を表-3.3.2 に示す。

画像処理によりターゲットを抽出するための最小限のサイズは、ターゲットの設置高さと離隔距離に応じて変動するが、実験の結果からターゲットのサイズは 1px を認識するために整理した表-3.3.2 の数値の 5～20 倍程度のサイズとすることが望ましいと考えた。

例えば、道路管理用カメラ（画素数 640×480px）を採用し、カメラ設置高さは 10m、離隔距離は 30m とした場合、ターゲットのサイズは表-3.3.3 に示す大きさが良いと考えられる。

一方、カメラの画角は一定で画素数が増加する場合、変位を検出できる精度が上がる。例えば、同じ離隔距離でハイビジョンビデオカメラ（画素数 1440×1080px）を用いる場合は、必要なターゲットのサイズは道路管理用カメラの半分程度になる。デジタルカメラ（画素数 4608×3456px）の場合、必要なターゲットのサイズは道路管理用の 1/7 程度となる。

このようにターゲットのサイズは、カメラの高さやターゲットの離隔距離、カメラの画角、使用するカメラの画素数によって適宜決定するのがよいと考えられる。

表-3.3.2 各種条件のカメラの1pxに対応する物理距離（道路管理用カメラの試算）

離隔距離 (m)	カメラの設置高さ											
	6m			8m			10m			15m		
	開き方向 (m)	横方向 (m)	高さ方向 (m)	開き方向 (m)	横方向 (m)	高さ方向 (m)	開き方向 (m)	横方向 (m)	高さ方向 (m)	開き方向 (m)	横方向 (m)	高さ方向 (m)
5	0.0118	0.0101	0.0135	0.0128	0.0121	0.0194	0.0142	0.0143	0.0270	0.0188	0.0201	0.053495
10	0.0262	0.0150	0.0153	0.0236	0.0164	0.0184	0.0229	0.0181	0.0223	0.0246	0.0229	0.035853
15	0.0500	0.0207	0.0196	0.0414	0.0217	0.0216	0.0371	0.0230	0.0243	0.0012	0.0034	0.247016
20	0.0830	0.0267	0.0245	0.0661	0.0275	0.0260	0.0569	0.0285	0.0280	0.0473	0.0318	0.034924
25	0.1253	0.0328	0.0296	0.0979	0.0334	0.0309	0.0823	0.0343	0.0325	0.0642	0.0371	0.038034
30	0.1769	0.0389	0.0349	0.1366	0.0395	0.0360	0.1133	0.0402	0.0373	0.0848	0.0426	0.041951
40	0.3081	0.0514	0.0456	0.2350	0.0518	0.0464	0.1920	0.0524	0.0475	0.1373	0.0542	0.050994
50	0.4765	0.0639	0.0564	0.3612	0.0642	0.0571	0.2930	0.0647	0.0580	0.2046	0.0662	0.060841
60	0.6820	0.0764	0.0672	0.5154	0.0767	0.0679	0.4164	0.0771	0.0686	0.2869	0.0784	0.071083
80	1.2048	0.1016	0.0887	0.9075	0.1018	0.0895	0.7300	0.1021	0.0901	0.4960	0.1031	0.092138
100	1.8764	0.1268	0.1102	1.4112	0.1269	0.1111	1.1330	0.1272	0.1118	0.7646	0.127956	0.113542

表-3.2.1 の試算条件を基に、試算した結果である。主な条件は以下の通りである。

カメラの水平方向画素数：640px、カメラの垂直方向画素数：480px、カメラの水平画角：44°、カメラの垂直画角：30°

表-3.3.3 ターゲットのサイズ（カメラ設置高さは10m、離隔距離は30m）

	道路管理用 カメラ	ハイビジョン ビデオカメラ	デジタル カメラ
画素数 (px)	640×480	1440×1080	4608×3456
路面に立てる場合 (m)	0.2～0.8	0.1～0.4	0.03～0.12
路面に書き込んだ場合 (m)	0.68～2.7	0.34～1.4	0.1～0.4

3.3.2 ターゲットの色彩条件

カメラによりターゲットを確実に撮影するため、カメラの感度に合わせターゲットの色彩を選定する必要がある。

カメラの撮像素子には CCD (Charged-coupled devices) や CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) が用いられている。

CCD を用いたカメラの分光感度特性の一例を、図-3.3.2 に示す。図に示すとおり、赤色に最も感度が高い傾向にある。

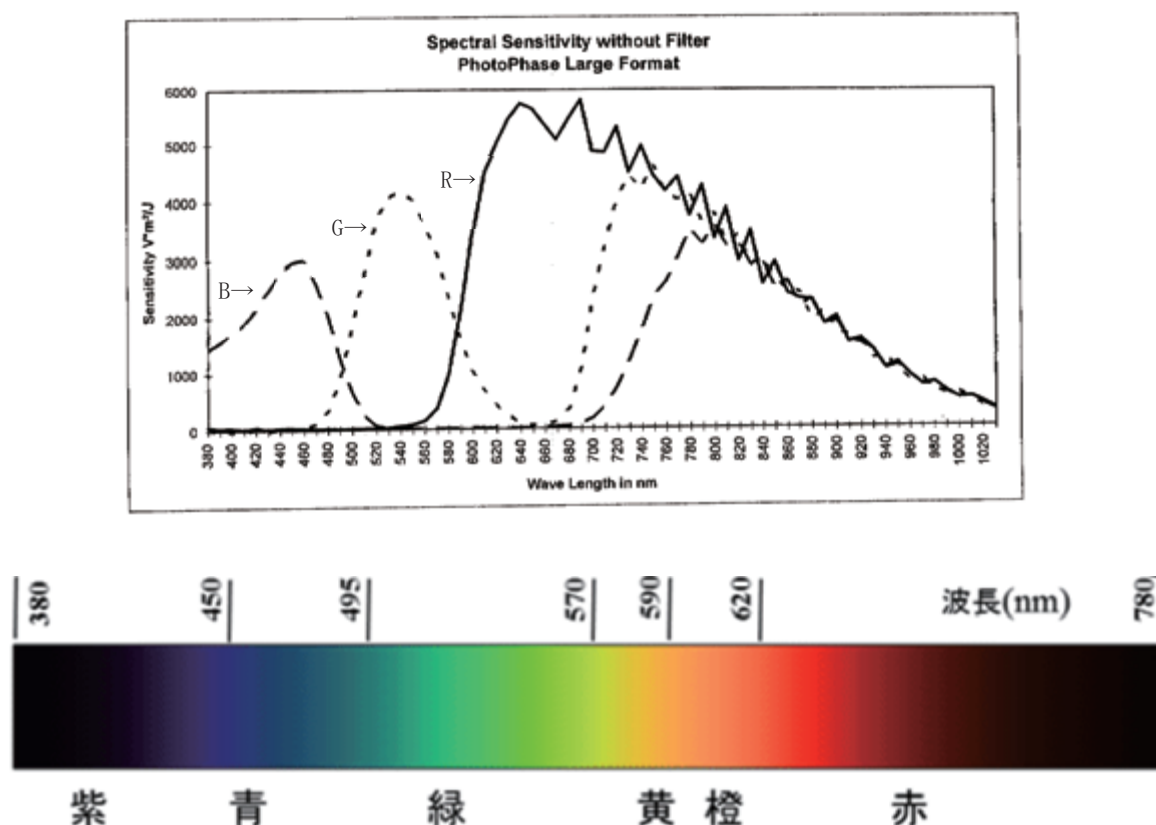


図-3.3.2 カメラ (CCD) の分光感度特性

グラフ出典：TOOLSTAR BASLER ace シリーズ

平成 29 年 1 月 23 日確認 <http://www.tobunken.go.jp/~ccr/pdf/37/pdf/03713.pdf>

画像出典：国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

平成 29 年 1 月 23 日確認 http://www.naro.affrc.go.jp/flower/kiso/color_shikiso/

前述のように、カメラの撮影素子には CCD の他に CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) が使用されることがある。

ここでは、撮影素子に CMOS を使用したカメラを用いて、ターゲットを撮影し、色彩の感度を比較検証した。撮影に使用したカメラ及びターゲットを、表-3.3.4 及び図-3.3.3 に示す。

表-3.3.4 ハイビジョンビデオカメラの仕様

撮影素子	1/2.88 型 "Exmor R" CMOS センサ
撮影画素数	1980×1088 または 1440×1080
F 値	F1.8-3.4
焦点距離	f=3.8-38.0mm (35mm 換算) f=26.0-260.0mm (16:9 時) f=31.8-318.0mm (4:3 時)
ズーム	光学 10 倍 (デジタル 120 倍) エクステンデッド 17 倍
最低被写体照度	6lux (スタンダード時)
ナイトショット	ナイトショットライト内蔵



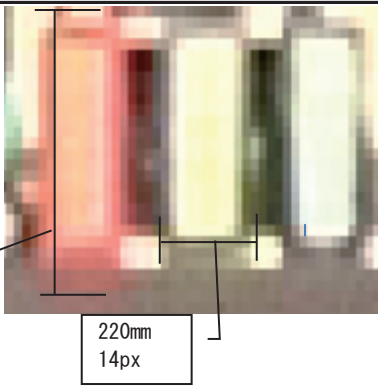
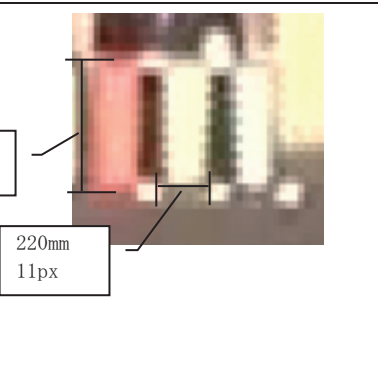
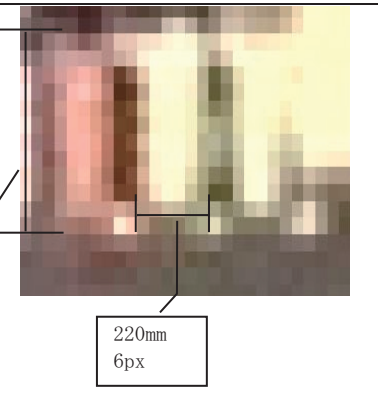
図-3.3.3 撮影に用いたターゲット (450mm×250mm)

カメラを地面から約 1.5m の高さに設置し、ターゲットとカメラ間の距離を 30m、40m、60m と変え撮影を行った。各距離の画像撮影結果を表-3.3.5 に示す。

図-3.3.4 に示すように、撮影距離が遠くなるにつれ、ターゲットの色成分が鮮明でなくなるが、赤成分は他の色成分に比べ認識しやすいことが分かった。

以上より、CCD 及び CMOS のいずれを用いても赤色のターゲットを用いる方がターゲットを鮮明に認識しやすいことが分かった。

表-3.3.5 各離隔距離の画像撮影結果（ハイビジョンビデオカメラ）

距離	元画像	拡大画像
30m		
40m		
60m		

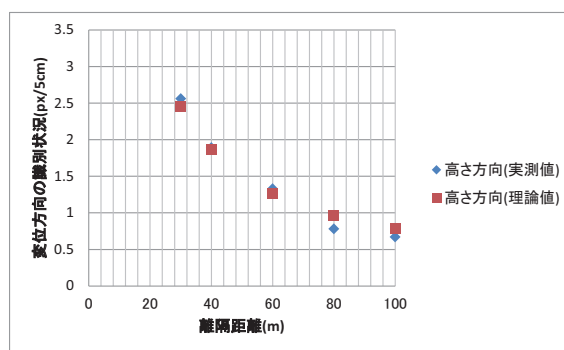
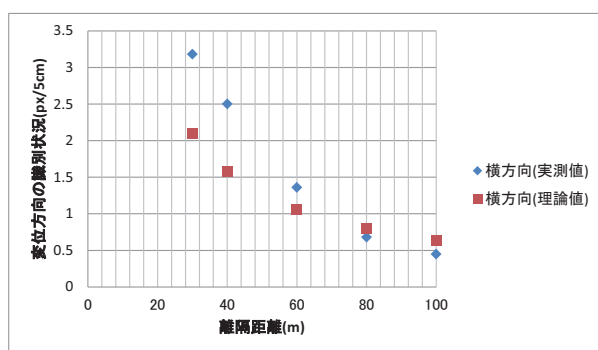


図-3.3.4 離隔距離と各変位方向の識別状況の関係（ハイビジョンビデオカメラ）

表-3.3.6 理論値の計算条件（ハイビジョンビデオカメラ）

設置高さ	H	1m
カメラの水平画角	$2\beta_x$	59°
カメラの垂直画角	$2\beta_y$	41°
画面の水平方向画素数	Px	1440px
画面の垂直方向画素数	Py	1088px

画像処理によりターゲットを抽出するためには、ターゲットと背景の色を出来るだけ顕著に区別することが望ましい。昼間は太陽光の影響で、ターゲット自身が白色に近づくことが想定されるが、この場合はターゲットの背景を黒色系にすると、ターゲットと区別しやすくなると考えられる。また、夜間はターゲットが確実に撮影できるよう、自発光するものが有効であると考えられる。

以上のことから、ターゲット本体はカメラで認識しやすい赤色でかつ発光でき、ターゲットの背景は黒にすることが望ましい。

3.3.3 ターゲットの輝度条件

太陽光がない夜間でも撮影できるよう、ターゲットには自発光するものを使用することが望ましい。ターゲットの照明には、消費電力が比較的少ないLEDを使用したものが主流であるため、LEDを用いたターゲットを採用する。LEDを点灯させる方法としては、一般的には以下の2つの方法が採用されている。

(A) 駆動電流を調整する方式

電源にLEDの順方向電圧を加えるとLEDが点灯する。LEDの点灯時の駆動電流を変更することで、LEDの輝度を变化させる事が可能な方式。

(B) 高周波駆動による方式

人間の視覚が認識できない短い時間周期の点滅を繰り返し、見かけ上、一定の明るさを得る方式。

高周波駆動による方式をターゲットに採用すると、CCDカメラに撮影されるターゲットの明るさに時間的なバラつきが生じてしまう恐れがため、テンプレートマッチングを実施する上で十分な相関値が得られないことが懸念される。

そのため、本検討のターゲットの照明には、駆動電流を变化させ点灯させる（A）の方式を採用することが望ましい。

3.3.4 ターゲットの条件のまとめ

以上の検討により画像処理におけるターゲットの要求性能を以下のように提案する。

- ・カメラの回転等、設置条件の影響を最小限にするため、形状は正円であることが望ましい。
- ・ターゲットの大きさは、カメラの設置高さや離隔距離、カメラの画素数等の条件を踏まえ適宜検討し、カメラで5～20px程度以上検出できるようにする。
- ・CCD 及び CMOS で認識しやすく、遠距離撮影でも色がより鮮明に確認しやすいため、ターゲット本体の色は赤が望ましい。
- ・画像処理によりターゲットを抽出するためには、ターゲットと背景の色が出来るだけ明確に区別できることが望ましい。
- ・夜間にもターゲットを撮影できるよう自発光できるターゲットを使用するのが望ましい。

以上のことを考慮すると、常時監視システムに使用するターゲットは、図-3.3.5に示すように、円形の自発光体に、光を反射しないエッジを取り付けたものとするのが望ましいと考えられる。

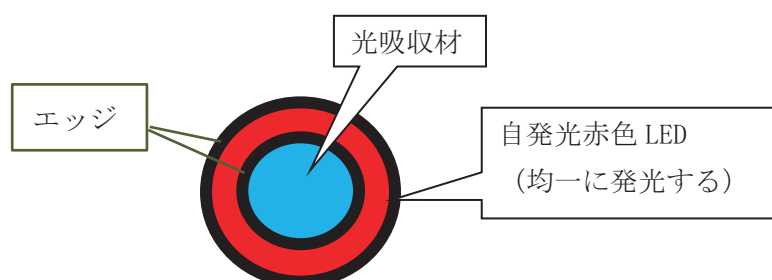


図-3.3.5 常時監視に適したターゲットの形状・色彩の例

3.4 カメラとターゲットの設置方法の検討

3.4.1 カメラの設置方法

(1) 画像の出力方法

ビデオカメラでは、動く物体を撮影する場合、人間の視覚に合わせ、動きのなめらかさを確保するため、カメラの画像の走査方式はインターレース^{3.1)}（飛び越し走査）を採用する場合が多い。

インターレースとは、画像をディスプレイやテレビ等の映像出力機器に表示する走査方式の一種である。図-3.4.1のように、1枚の画像を横方向に複数に分割した線成分を走査線という。図-3.4.2、図-3.4.3のように、上から1, 3, 5, 7, 9・・・の順に一つ飛ばしで走査線を表示し、一番下まで行った後、再び上から2, 4, 6, 8, 10・・・の順で残りの部分を表示する方式である。受信側が奇数の走査線と偶数の走査線を交互に映し出すことで、人の視覚上は、実際には走査線が映し出されていない箇所には、直前に映し出された走査線の残像が見えるため、2回に分けて表示させた画像は、1枚の画像のように見える。

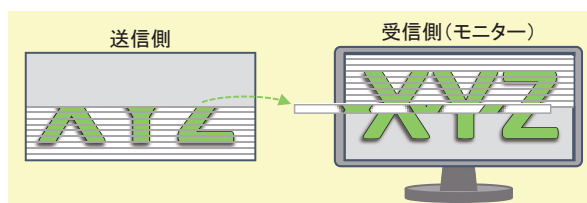


図-3.4.1 画像走査のイメージ

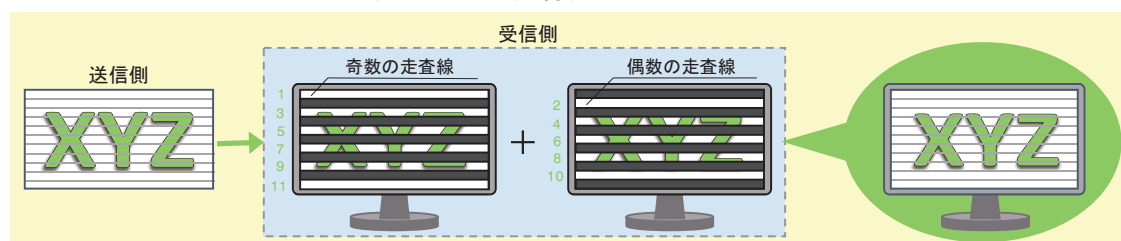
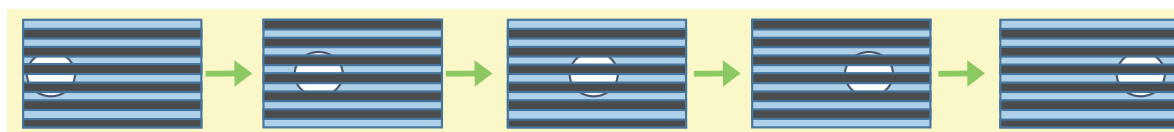


図-3.4.2 インターレースの仕組み



※本図は、<http://www.toa.co.jp/miru2/column/column6.htm> を参考に国総研で作成

図-3.4.3 インターレースによる動画の例

インターレースは、1枚の画像を2回に分けて表示され人の視覚上では映像がなめらかに見えるカメラの走査方式である。一方で、走査線を交互に映し出しているため、画像の奇数ラインと偶数ラインの時間的なずれで画像の連続性が悪くなるため、画像解析に悪影響を与える。このようなインターレースの特徴から、一般的にX方向のカメラの分解能はY方向より高くなっている。

(2) カメラの設置方法の検討

常時監視システムの検出対象は道路橋の桁端部や掛違い部の変位である。対象としている桁端部の変状の内、車の通行への影響の大きさは路面の連続性の観点から段差、接続部の開き、横ずれの順と考えられる。

(1) に示した画像の出力方法を踏まえると、道路利用者への影響の大きい順で、段差、接続部の開き方向の道路の変状を高精度に検知するためには、図-3.4.4のように、橋軸直角方向から掛違い部を監視するようにカメラを設置することが有効である。

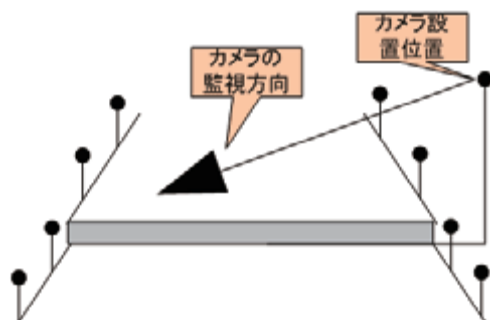


図-3.4.4 カメラ設置位置（橋軸直角方向に監視する場合）

一方で、橋梁掛違い部の変状の検知に特化するように橋軸直角方向から監視するようカメラを設置すると、通常の道路監視の観点では不利となる。また、橋梁の両脇が用地外の場合や河川や海上、山岳部である場合は、カメラの設置が困難なことが考えられるため、橋梁の架橋状況に応じて監視方向を決定する必要がある。

以上のことから、本研究では、通常の橋軸方向を監視するようにカメラを設置することを前提に以降の検討を実施した。

また、段差方向の変状を高精度に検出するためには、カメラの最も感度の高い横方向を段差方向と同方向（カメラを 90° 回転した状態）にする必要がある。また、段差の変状の検出精度を高くするためには、カメラを出来るだけ段差の動き方向と正対して高さ 0m の位置に設置するのがよい。

一方で、カメラの設置高さが低くなると、通行車両等の遮蔽の影響を受けやすくなる。

また、カメラを 90° 回転して設定した場合、 90° 回転して出力された画像は確認しづらく道路管理の上で支障が生じ可能性がある。

そこで、カメラの設置方法は、橋軸方向を監視するように、また、カメラの設置高さも通行車両等の遮蔽の影響が少ない高さに設置するものとした上で、カメラを 90° 回転させて設置し、現場で撮影された画像を専用ソフトを利用して自動で 90° 回転させることとした。

(3) カメラの設置方法のまとめ

以上を踏まえ、本研究におけるカメラの設置方法として以下の提案を行う。

- (ア) 段差だけに特化するのではなく、通常の道路監視もしやすくするためカメラは通常の角度で設置する。
- (イ) 事務所にて、常時監視システム用に通常のテレビの向きを 90° 回転して設置する。
- (ウ) 専用ソフトを利用し、現場で撮影された画像を自動で 90° 回転させる。

なお、横ずれと開きの変状をほぼ同程度の精度で検出するためには、カメラの離隔距離とカメラの高さは同程度にすることが望ましい。

3.4.2 ターゲットの設置方法

(1) カメラが固定されている場合

カメラが固定されており設置角度、画角が一定の場合、ターゲットのある時点の画像上の位置 $(x1, y1)$ と元の位置 $(x0, y0)$ との差分で、橋梁の変位を計測することが可能である。例えば、図-3.4.5 に示した段差発生の場合は、ターゲットは上方向へ移動し、 $y1$ は $y0$ より大きくなることになる。

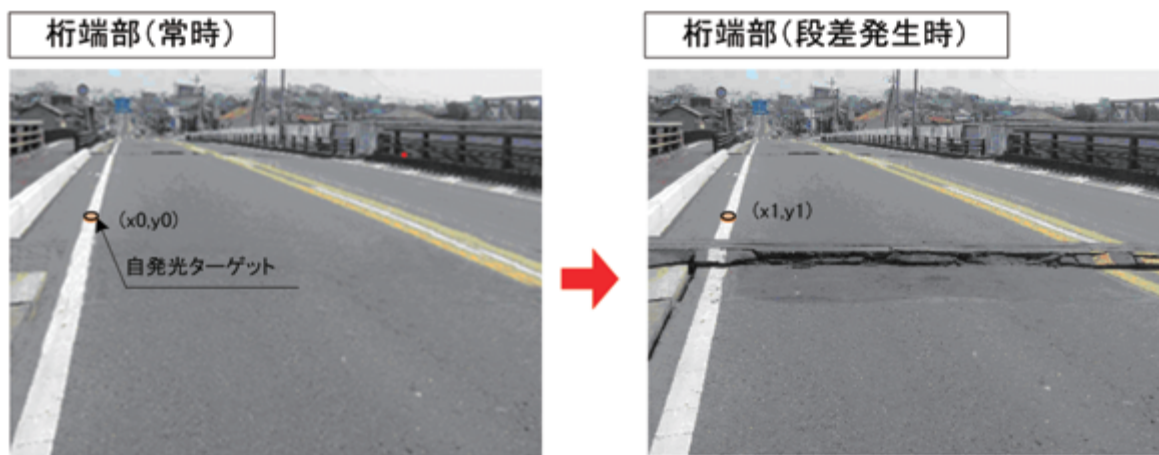


図-3.4.5 カメラが固定の場合の変状の検出方法

注：各画像は本検討の説明に用いるため加工している。

(2) 振動や風等の影響でカメラの設置角度が変動する場合

カメラの設置角度は振動、風等の影響で変動する可能性がある。その場合、図-3.4.6 に示したように監視対象の桁端部に変位が発生しなくても、カメラの設置角度の変動により誤認が生じる可能性がある。

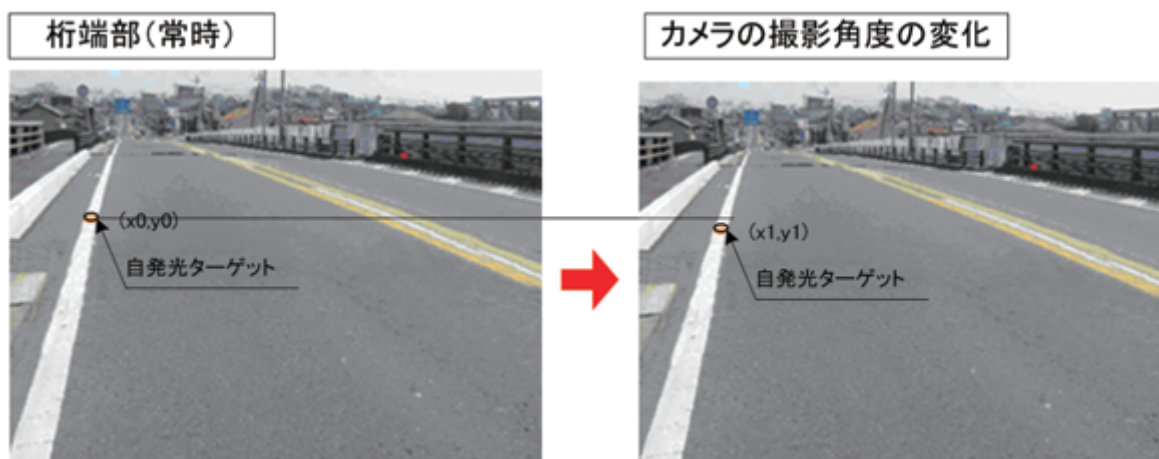


図-3.4.6 カメラの撮影角度を上げた場合

注：各画像は本検討の説明に用いるため加工している。

この課題を解決するために、変位が発生すると予想される箇所の両側に、それぞれターゲットを設置し、ターゲット間の相対位置のずれを元に変状発生の有無を判定する手法を採用し、図-3.4.7のように、ターゲット間の相対変位 $(\Delta x_0, \Delta y_0)$ と $(\Delta x_1, \Delta y_1)$ の差を用い、ターゲットの変位量を求めることとした。

図-3.4.7の上段に示すように、カメラの画角が変化した場合、ターゲット間の実際の相対変位 $(\Delta x_0, \Delta y_0)$ と $(\Delta x_1, \Delta y_1)$ は変わらない。一方、下段に示すように、変状が発生した場合は、ターゲット間の相対変位 $(\Delta x_0, \Delta y_0)$ と $(\Delta x_1, \Delta y_1)$ は変化する。相対変位の変化量を計測することにより、カメラの設置角度の変動による誤認を防ぐことができる。

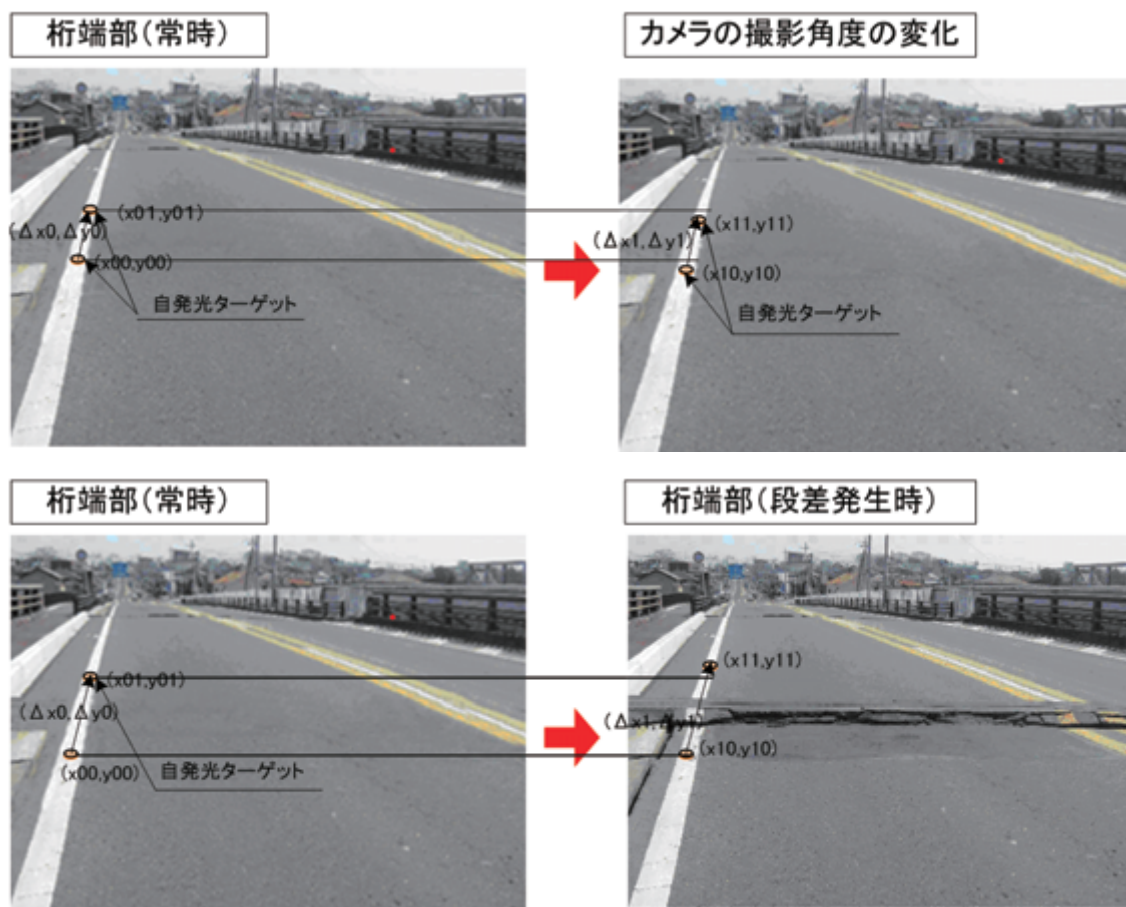


図-3.4.7 カメラの撮影角度が変動した場合のイメージ図

注：各画像は本検討の説明に用いるため加工している。

(3) 回転やズームによりカメラの設置角度が変動する場合

道路管理カメラは道路管理が主目的であるため、振動や風等の影響だけでなく、運用時にカメラの回転やズーム操作を行うことにより、カメラの設置角度が変動することもある。道路管理用カメラにはプリセット機能があるが、プリセットの精度は必ずしも高くない。そのため、画像上のターゲット位置はカメラの回転やズームによって変化し、道路橋に異常が生じていなくてもターゲット間の距離が変化すると誤認されることが想定される。

このような場合には、変状が予想される道路橋の桁端部や掛違い部の両側に、図-3.4.8 および図-3.4.9 のようにターゲットを配置し、カメラからみて変位が生じる箇所より手前の2つのターゲットの相対位置が一定であることを利用し、回転やズーム等によりカメラの設置角度が変わっても道路橋の変位を監視できる。

具体的には、カメラからみて手前のターゲットの位置関係が一定であることを利用し、そのベクトルの大きさ、向きを基準にカメラの回転角度、ズーム率の補正を行う。

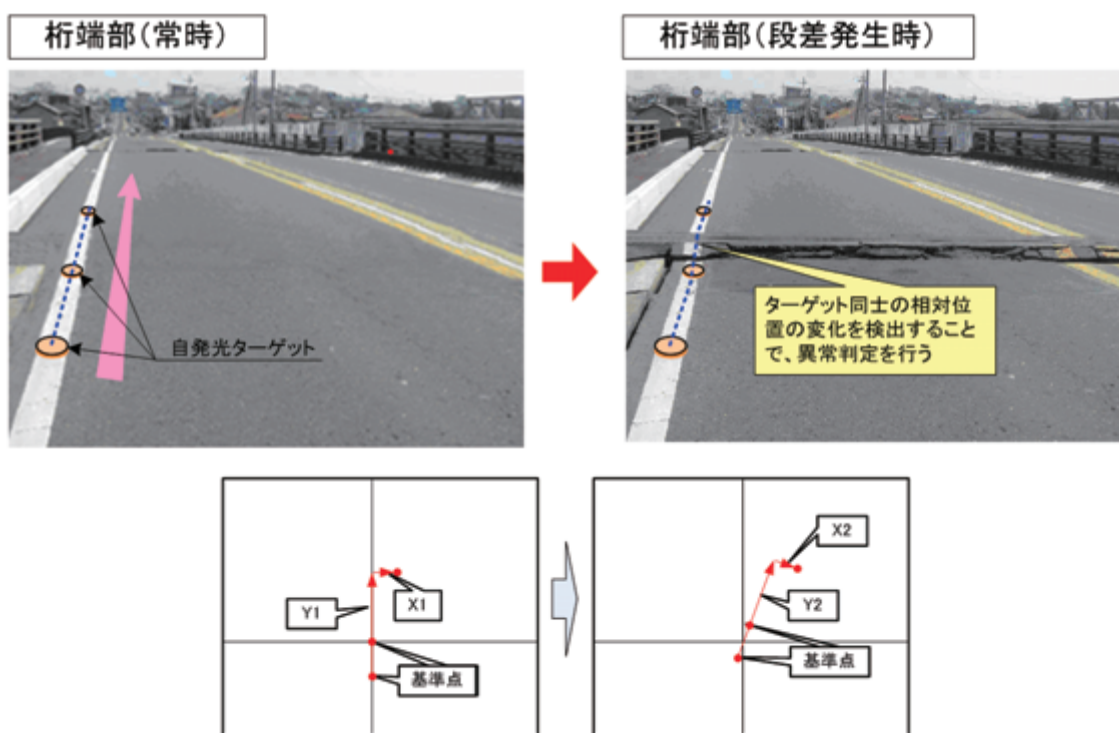


図-3.4.8 位置特定のイメージ（基準点2点の場合）

注：各画像は本検討の説明に用いるため加工している。

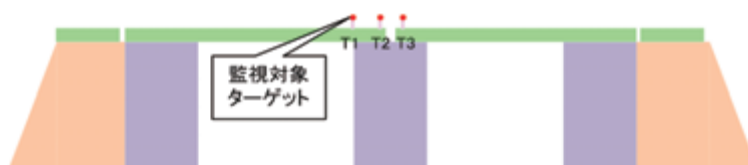


図-3.4.9 ターゲットの配置のイメージ

ただし、ここでのカメラの回転・ズームの補正処理は、それぞれのターゲットの位置が正確に抽出されていることを前提としている。ズームや回転によって処理範囲外になることや地震等の被害を受けターゲットが変形した場合は抽出できないこともある。

後述するテンプレートマッチングを採用した場合、カメラのズーム率が大きく変化した際にはテンプレートを再登録する必要がある。そのため、この方法で補正できるのはカメラのプリセットで元の位置に戻る時のカメラの機械的な精度誤差によるズーム率の差や回転角度のずれの範囲に限定される。

3.5 画像の処理方法の検討

3.5.1 テンプレートマッチングの適用性

画像処理によるターゲットの抽出精度には、画像上の物体の明るさ、色、輪郭の鮮明さが影響する。表-3.5.1①、②のように、晴れの場合、太陽光が強くなり画面全体が白くなる傾向があり、また、ターゲットの影は鮮明に写り、影の形状・位置は時間とともに変化する。太陽光によりターゲットが白くなり、自発光のターゲットの光と区別がつきにくくなることで昼間（特に太陽にあたる場合）にはカメラにターゲットを鮮明に写すことが難しい。

表-3.5.1 ターゲット撮影例



太陽光の影響による取得画像の明るさの変動に対応可能な方法として、テンプレートマッチングを採用することが有効であると考えた。テンプレートマッチングとは、入力画像の中から指定した画像“テンプレート”との相関値を取り、位置を検出する方法である^{3.2)}。

テンプレートマッチングでは、予め収集したサンプル画像を利用して、それぞれのターゲットのテンプレートを登録する。サンプル画像から、ターゲットの代表的な画像を選定しテンプレートとする画像を登録する。本研究では、サーチ時に背景の影響を受けないようにするため、テンプレートに背景画像を含まないように出来るだけ画像を拡大して登録した。また、ターゲットが点滅する場合、点灯時と消灯時の形状が画像上で大きく異なるため複数テンプレートを採用することとした。



図-3.5.1 テンプレートの登録（右：サンプル画像、左：テンプレート画像）

画像処理の負荷及び誤認識を減らすため、サンプル画像を利用して、それぞれのターゲットの検索範囲“サーチエリア”を登録することとする。画像上のターゲットの移動範囲を想定し、ターゲットの移動可能範囲をサーチエリアとして登録する。赤色表示灯を採用する場合は、夜間と昼間の明るさに違いが生じることから、異なるテンプレートを採用する必要がある。特に夜間は、ターゲットのハレーションやヘッドライトの照射により、ターゲットの輪郭が見えなくなり、相関値が低下する可能性がある。

テンプレートマッチングには、SSD(Sum of Squared Difference)やSAD(Sum of Absolute Difference)、正規化相互相関(NCC: Normalized Cross-Correlation)、相互相関係数(ZNCC: Zero-means Normalized Cross-Correlation)などの方式がある。本研究では、これらの手法のうち、一般的に入力画像の明るさの変動に強く太陽光や車の照明など影響を比較的に受けにくいと考えられる正規化相互相関を採用した。

正規化相互相関【NCC: Normalized Cross-Correlation】

正規化相互相関値は、テンプレートと画像との類似度尺度であり、以下の式によって求めることが出来る。

$$S_{NCC}(d_x, d_y) = \frac{\sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{m-1} \{g(d_x + i, d_y + j)f(i, j)\}}{\sqrt{\sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{m-1} (g(d_x + i, d_y + j))^2} \sqrt{\sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{m-1} (f(i, j))^2}} \quad (3.31)$$

ただし、

$S_{NCC}(d_x, d_y)$: 入力画像の (d_x, d_y) 座標を基準点とした時の正規化相互相関値

$g(i, j)$: 入力画像の輝度または RGB いずれかの輝度

$f(i, j)$: テンプレート画像の輝度または RGB いずれかの輝度

m : テンプレート画像の横サイズ

n : テンプレート画像の縦のサイズ

※ $g(i, j)$ 、 $f(i, j)$ について、輝度の別（画像、RGB）は同一のものとする。

この式は、試算した2つの画像が似ているほど、正規化相互相関値は1に近づくことを示している。

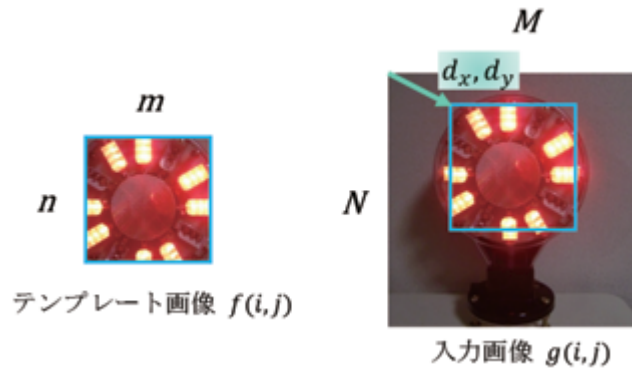


図-3.5.2 正規化相互相関の定義値

正規化相互相関によるテンプレートマッチングでは、式(3.31)を用いて、テンプレート上の画素と入力画像のサーチエリア内でそれぞれの計算対象の画素間のそれぞれの色の明るさ（または、それぞれの色の合計）の差を基に相関値の演算を行う。照明のライトがターゲット背面より照射された場合、ターゲットの明るさは相対的に弱くなるため、画像から抽出することは困難になる。そのため、車が通過する間、ターゲットの抽出ができない場合が考えられるため、一定時間内であれば警報の出力を行わないことで対応することとした。

また、テンプレートマッチングの結果はサーチエリア内で最も大きい相関値を出力し、その相関値から変状の発生有無を判断することとした。



図-3.5.3 相関値の計算方法のイメージ

（左：サーチエリア 中：画像内の相関値を計算 右：相関値が最大である箇所を検知）

3.5.2 サブピクセルの処理

カメラの画素の単位は px であるが、対象物の座標を求めるときその検出精度は 1 px となる。これに対し、正規化相互相関では、近傍の相関値を使用した計算により、座標の 1 px 以下の値（サブピクセル）も出力することができる。以下に、相関値の計算からサブピクセルの処理を行う手順について示す。

- (1) サーチエリア内で、テンプレートを横方向に 1px 単位で移動しながら、テンプレートと計測画像との相関値を計算する。1 行の相関値を計算終了後、次の行の相関値を計算する。
- (2) 相関値のピーク値とその上下・左右の値から、相関値を 2 次曲線で近似し、ターゲットの設置位置を小数点 1 ケタまでの精度で推定する。

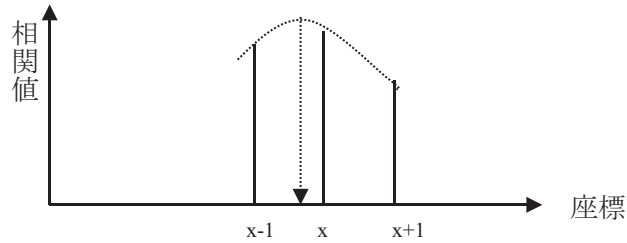


図-3.5.4 サブピクセルの処理による位置の特定イメージ

抽出した相関値の最大点 (P_x) の X 方向の座標は x とし、その左右座標の相関値は P_{x-1} 、 P_{x+1} とすると、

$$P_{x-1} = A(x-1-B)^2 + C \quad (3.32)$$

$$P_x = A(x-B)^2 + C \quad (3.33)$$

$$P_{x+1} = A(x+1-B)^2 + C \quad (3.34)$$

上の式から、2 次曲線のピーク時の X 方向の座標は B になり、 B は以下の式で表せる。

$$X_{max} = B = x + \frac{P_{x+1} - P_{x-1}}{2(P_x - P_{x-1} - P_{x+1})} \quad (3.35)$$

3.5.3 ターゲットの画像座標からの変位量の計算方法

ここでは、3.5.2 の検討内容を踏まえ、ターゲットの画像上の変位量の計算方法を記載する。

管理開始時の初期画像のターゲット座標を「計測初めのターゲット座標」、その後の画像から検出したターゲットの座標を「計測時のターゲット座標」として、変位計測用ターゲットの変位量を求める。

カメラの撮影角度、ズームの変化に対応するため、ターゲット変位抽出には複数のターゲットを利用する。ターゲット T_1 、 T_2 間の位置は一定であり、ターゲット T_3 の相対変位量を計測することにより、ターゲットの変位量を計測する。

ターゲットの画像座標から変位量の計算手順を以下に示す。

- ① 各ターゲットの基準位置 (T_{10} (X_{10}, Y_{10}), T_{20} (X_{20}, Y_{20}), T_{30} (X_{30}, Y_{30})) を初期設定として登録する。
- ② 処理対象画像の撮影までの期間に、カメラの回転、ズーム等の変更が発生し、計測初めと計測時の状態に誤差が生じたものとする。
- ③ 計測時の T_{10} の画像上の座標を T_{11} (X_{11}, Y_{11}) とする。 (X_{11}, Y_{11}) を (X_{10}, Y_{10}) になるように画像座標の平行移動を行い、平行移動後の画像上の座標を (T_{11} (X_{10}, Y_{10}), T_{21} (X_{21}, Y_{21}), T_{31} (X_{31}, Y_{31})) とする。
- ④ T_{10} と T_{20} 間を接続し、距離 R は一定で、 T_{21} の T_{11} に対する計測初めの相対極座標を (R_{20}, ρ_{20}) (基準値)、計測時の相対極座標を (R_{21}, ρ_{21}) (カメラの回転、ズーム等変更後の推定画像座標) とする。
- ⑤ T_{10} に対する T_{30} の相対極座標を (R_{30}, ρ_{30}) (基準値)、計測時の座標を T_{31}' (X_{31}', Y_{31}') とした時、 T_{10} に対する T_{31}' の相対極座標を (R_{31}', ρ_{31}') (カメラの回転、ズーム等変更後の推定画像座標) とする。
- ⑥ T_{30} は動いた後の画像上の座標を T_{31} (X_{31}, Y_{31}) (カメラの回転、ズーム等変更後の実測画像座標) とし、 T_{10} に対する相対極座標を (R_{31}, ρ_{31}) とする。以上の時に、画像上の変位量を計算する。

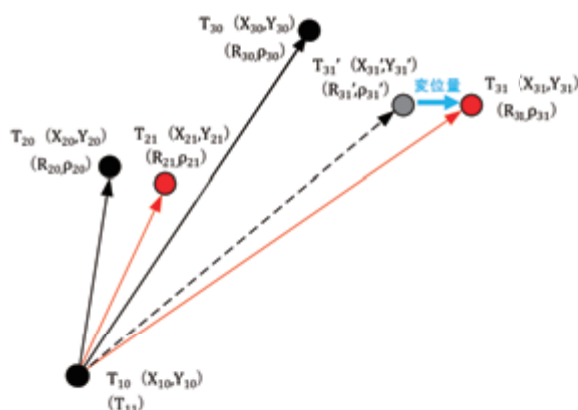


図-3.5.5 複数ターゲットによる相対変位量の抽出イメージ

上記の条件で、

$$R_{31}' = R_{30} \frac{R_{21}}{R_{20}} \quad (3.36)$$

$$\rho_{31}' = \rho_{30} + \rho_{21} - \rho_{20} \quad (3.37)$$

このため、 T_{30} の画面上の推定変位量 Δx_3 と Δy_3 は下式で表せる。

$$\Delta x_3 = R_{31} \times \cos \rho_{31} - R_{31}' \times \cos \rho_{31}' \quad (3.38)$$

$$\Delta y_3 = R_{31} \times \sin \rho_{31} - R_{31}' \times \sin \rho_{31}' \quad (3.39)$$

になる。ここで、

$$R_{20} = \sqrt{(X_{20} - X_{10})^2 + (Y_{20} - Y_{10})^2} ; \rho_{20} = \tan^{-1} \left(\frac{Y_{20} - Y_{10}}{X_{20} - X_{10}} \right) \quad (3.40)$$

$$R_{30} = \sqrt{(X_{30} - X_{10})^2 + (Y_{30} - Y_{10})^2} ; \rho_{30} = \tan^{-1} \left(\frac{Y_{30} - Y_{10}}{X_{30} - X_{10}} \right) \quad (3.41)$$

$$R_{21} = \sqrt{(X_{21} - X_{11})^2 + (Y_{21} - Y_{11})^2} ; \rho_{21} = \tan^{-1} \left(\frac{Y_{21} - Y_{11}}{X_{21} - X_{11}} \right) \quad (3.42)$$

$$R_{31} = \sqrt{(X_{31} - X_{11})^2 + (Y_{31} - Y_{11})^2} ; \rho_{31} = \tan^{-1} \left(\frac{Y_{31} - Y_{11}}{X_{31} - X_{11}} \right) \quad (3.43)$$

である。

T_{30} の計測移動量 ΔX_3 と ΔY_3 および ΔZ_3 は下式で表せる。

$$\Delta X_3 = \Delta x_3 \times A_X + \Delta y_3 \times B_X \quad (3.44)$$

$$\Delta Y_3 = \Delta x_3 \times A_Y + \Delta y_3 \times B_Y \quad (3.45)$$

$$\Delta Z_3 = \Delta x_3 \times A_Z + \Delta y_3 \times B_Z \quad (3.46)$$

ここで、 A_X 、 B_X 、 A_Y 、 B_Y 、 A_Z 、 B_Z は、(初期設定時の T_{30} の画像上の 1px の変位量) / (px の実測値) になる。 T_{30} の 1px の変位量は、その設置場所とカメラの画角に依存する。

参考文献

- 3.1) スカイジャパンライフ株式会社：映像部 インターレース方式とプログレッシブ方式の違いは？
平成 29 年 1 月 23 日確認 <http://eizo-bu.com/question/scan.php>
- 3.2) 中京大学 橋本学：第 19 回 画像センシングシンポジウム チュートリアル講演会 テンプレート
トマッチングの魅力 ～物体検出・位置決めの定番技術～
平成 29 年 1 月 23 日確認 <http://isl.sist.chukyo-u.ac.jp/Members/members.html>

4. 現地キャリブレーション項目に関する実験と

キャリブレーション方法の提案

4.1 現地キャリブレーション項目の抽出

常時監視システムを実際に現地にて運用するにあたり、システムや機器の条件だけではなく、監視の対象となる道路橋の条件や通行車両等の影響にも配慮する必要がある。

橋梁の橋面は通行する車両や人などにより、監視ターゲットが遮蔽され確認できなくなることがあること、また夜間には車両のヘッドライトの影響を受け、画面上でターゲットと背景の区別がつきにくくなることによりターゲットの監視精度が低下することなどが想定され、その影響度合いは時刻や車両や人の交通量などにより橋梁ごとに異なる。また、カメラやターゲットの設置可能な位置も橋梁ごとに異なる。

そのため、常時監視システムを運用するにあたっては、推奨されるシステムの仕様と要求性能を示すのみではなく、個別の橋梁ごとにこれらの障害物等の影響を検証し、事前に目標とする変位を検知できるか確認するのが良いと考えた。

これらの常時監視に影響を与えると考えられる事象の影響度合いは、前述のとおり監視対象となる道路橋の条件等が1橋ごとに異なると考えられるため必ずしも机上で把握できるものではない。そこで、これらの事象の影響度合いについては実際に監視対象となる道路橋を用いて常時監視の運用前に現地にてキャリブレーションすることが望ましい。

本章では、常時監視の障害となり得る事象に対して、キャリブレーションを行うべき項目をあげる。また、そのキャリブレーション項目に対して、開発した常時監視システムを用いて検証実験を実施することで、画像処理への影響を確認し、現地キャリブレーションの必要性を検証した。

表-4.1.1に、現地にてキャリブレーションすべきと考えた項目を示す。

表-4.1.1 現地キャリブレーション項目一覧

項目	概要
変状の検出精度	想定している変状（開き、段差、横ずれ）に対して、どの程度の検出精度を有しているのかを検証
影や遮蔽物による影響	車や通行人によってターゲットが影に隠れること、ターゲットが遮蔽されることによる画像処理への影響の検証
ヘッドライトの直射・逆光の影響	夜間に車のヘッドライトがターゲットに当たることによる画像処理への影響の検証
風の影響	風の影響によりカメラ位置や向きが変化した場合の影響を検証
日照条件の変化による影響	日照条件（昼間と夜間）の違いによる画像処理への影響を検証
懐中電灯等ターゲットと同等の発光物の影響	自転車や懐中電灯等が画像に写り込むことによる画像処理への影響を検証
画像をリサイズした際の影響	ビデオ画像を利用し、道路管理用のカメラの画像と同じサイズにリサイズした場合の影響を検証

検証実験は、①簡易的に橋梁への設置を模擬した模擬実験と、②供用中の橋梁に対して実施した検証実験の2回実施した。常時監視システムの運用にあたっては、本実験方法を参考にキャリブレーションを実施し、本常時監視システムの現場への適用性を確認された。

4.2 模擬実験

模擬実験では影や遮蔽物による影響とヘッドライトの直射・逆光の影響を検証した。

【影や遮蔽物による影響の検証】

車や通行人によってターゲットに影がかかる状況や、ターゲットが遮蔽される状況における画像処理への影響の検証を行った。本検証では、これらの状況を傘を用いてターゲット上に影を発生させることやターゲットを遮蔽することで再現し、撮影した画像に対しテンプレートマッチングを行うことで、これらの事象の影響度合いを確認した。

【ヘッドライトの影響の検証】

夜間に車のヘッドライトがターゲット、カメラへ照射された状況を想定し、画像処理への影響を検証した。これらの状況をターゲットにヘッドライトを直射させること、また、ターゲットの背面からヘッドライトを当て逆光の状況を作りだすことで再現し、撮影した画像に対しテンプレートマッチングを行い、これらの事象の影響度合いを検証した。

また、車両のヘッドライトにはローライトとハイライトがあるため、これらの影響度合いの検証も実施した。

(1) 実験場所および装置の配置

カメラ及びターゲットの配置については、3章の分析を踏まえ、図-4.2.1および図-4.2.2に示すように配置した。道路管理カメラの通常の設定高さが6m～10mであることから、本実験のカメラの設置高さは8mとし、監視対象物までの水平方向の直線距離（カメラからP点までの距離）は12mとした。



図-4.2.1 実験場所の写真

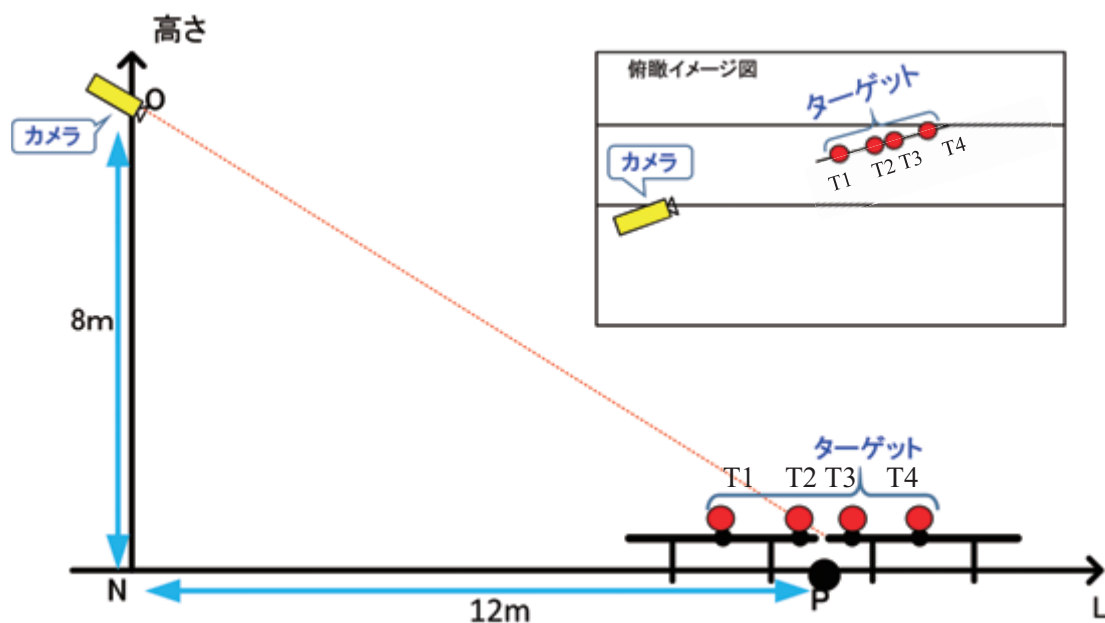


図-4.2.2 実験場所の断面イメージ

本検証においては、障害物の影響を確認することが目的であるため、橋梁端部にターゲットを設けるのではなく、単管バリケードにターゲットを設置し実験を実施した。

単管バリケードは、橋面に設置されている防護柵を想定しており、図-4.2.3のようにバリケード上部にターゲットを設けた。また、桁端部をイメージし2つで1組みの単管バリケードを用意し、カメラからみて前方のバリケードは移動させず、後方のバリケードを移動、角度の変更を行うことで道路橋の変状を模擬することとした。

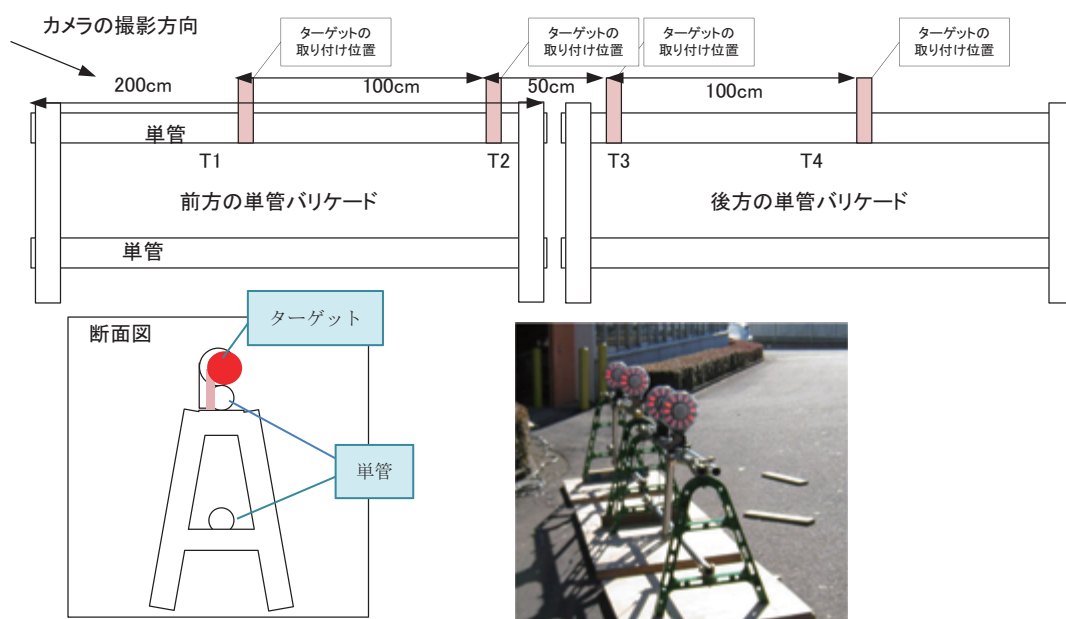


図-4.2.3 ターゲットの配置イメージ

(2) 撮影機器およびターゲット

表-4.2.1 に、本検証実験で使用した撮影機器およびターゲットを示す。

図-4.2.4 に、これらの撮影機器及びターゲットを用いて撮影した画像と画像処理のイメージを示す。

これらの撮影機器やターゲットを用いて、テンプレートマッチングを行い、設定した条件（影や遮蔽物、ヘッドライトの影響を検証するという条件）におけるターゲットの抽出精度を検証した。

表-4.2.1 検証実験に使用した撮影機材及びターゲット

	デジタルカメラ		赤色ターゲット
撮影素子	1/2.3 型高感度 CMOS (裏面照射型)	写真	
撮影画素数	約 1680 万画素	照明	LED
F 値	F2.7 (W) -5.9 (T)	ターゲット 直径	240mm
焦点距離	f=4.3-21.5mm 35mm 換算値(静止画 4:3 時) f=24-120mm		
ズーム	光学 5 倍		

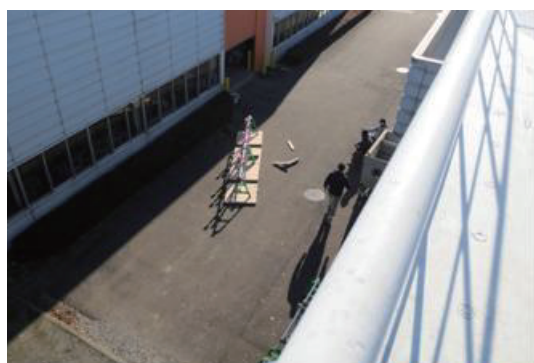


図-4.2.4 撮影画像および画像処理のイメージ（左：撮影画像、右：画像処理の様子）

(3) 実験結果

テンプレートマッチングを行うにあたり、予め T1～T4 の 4 つターゲットに対し、テンプレート画像をそれぞれ登録した。また、撮影画像の中から、それぞれのターゲットが動くと思われた範囲をサーチエリアとして登録した。

それぞれのサーチエリア内に、登録したテンプレート画像と相関値が最大となる箇所の検索を行った。計算上の相関値は 0～1 の値になっているが、以降では、評価しやすくするため、相関値を 100 倍にした値を示す。

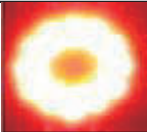
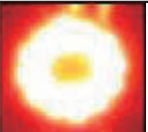
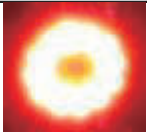
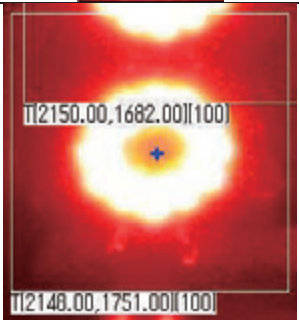
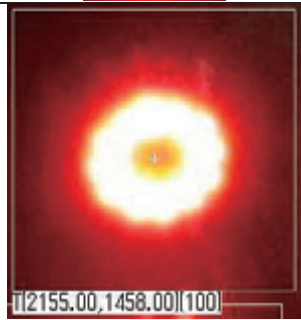
テンプレートマッチング法を用いて実施した画像処理の例(昼間および夜間)を表-4.2.2 および表-4.2.3 示す。

表-4.2.2 および表-4.2.3 から、影や遮蔽物の影響がない場合は、予め登録したテンプレート画像とターゲット画像の相関値が高く、昼間・夜間とも精度よく常時監視可能であることが分かる。

表-4.2.2 昼間のテンプレート画像および画像処理の例

	T1	T2	T3	T4
テンプレート (昼間)				
入力画像				
【相関値×100】	【99】	【100】	【100】	【100】

表-4.2.3 夜間のテンプレート画像および画像処理の例

	T1	T3	T4
テンプレート (夜間)			
入力画像			
【相関値×100】	【100】	【100】	【100】

(4) 影や遮蔽物による影響の検証

ターゲットに影がかかること、およびターゲットが遮蔽されることの影響を検証した結果を表-4.2.4 および表-4.2.5 に示す。

まず、単管バリケードを用いた本検証実験における橋梁の掛違い部であり、変状の発生を想定している T2、T3 に対して昼間に影をかけた時、T1 の相関値が低下した。これは、T2、T3 に与えた影が、ターゲット T1 の背景にまで影が伸びたことにより、テンプレート画像との間に相違が発生した事が原因であると考えられる。一方で、T2、T3 については、背景の変化が少なかったため、T1 に比べ相関値が低下しなかったと考えられる。

次に、T3 と同様に変位が生じる恐れがある道路橋側のターゲットを想定した T4 に影を発生させたとき、T3 の相関値が低下した。これも T4 にかけた影が T3 の背景を変化させたことが原因であると考えられる。T2、T3 に影をかけたときの T2 や T3 の相関値と比較して、T4 に影をかけると T4 の相関値は大幅に低下した。これは、T4 本体が影にかかった事に加え、影により T4 の背景となっている単管パイプの反射が抑えられたことが原因と考えられる。T3 も同様の原因で影の影響が直接ターゲットにおよばなくとも単管パイプの反射が抑えられたことにより相関値が低下したものと考えられる。

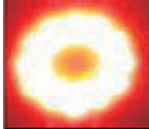
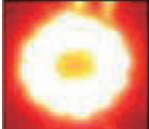
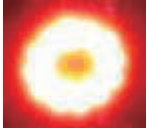
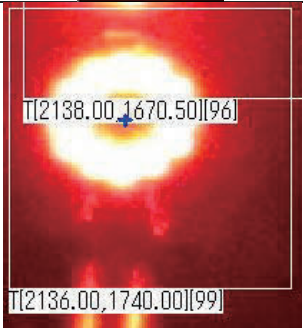
昼間に道路橋において変位が生じることを想定している T3、T4 とカメラの間に遮蔽物を設置したとき、T3 および T4 の相関値が低下した。この時、遮蔽していない T1 および T2 の相関値も低下した。この理由は、単管パイプの反射が抑えられ、背景が変化したことが原因と考えられる。

これに対して、夜間に T3、T4 に遮蔽物を設置した時は T3、T4 の相関値が低下するのは昼間と同様の傾向であったが、T1 の相関値は昼間に検証実験をした結果と異なり高い数値となった。この理由は、夜間ではもともと登録したテンプレート画像においてターゲットの背景が暗く、T3、T4 が遮蔽されても T1 の背景に影響を与えなかったためと考えられる。

表-4.2.4 影および遮蔽物による影響の検証（昼間）

	T1	T2	T3	T4
テンプレート (昼間)				
T2,T3 に影				
【相関値×100】	【77】	【86】	【83】	【92】
T4 に影				
【相関値×100】	【90】	【91】	【64】	【49】
T3,T4 を遮蔽				
【相関値×100】	【75】	【72】	【51】	【49】

表-4. 2. 5 遮蔽物による影響の検証（夜間）

	T1	T3	T4
テンプレート (夜間)			
T3,T4 を 遮蔽			
【相関値×100】	【99】	【7】	【8】

(5) ヘッドライトの影響の検証

夜間において、車両のヘッドライトが画像処理に与える影響を検証した。

車両のヘッドライトがターゲットに当たるケースは、ターゲットの正面から直射する場合と反対に背面からヘッドライトが当たり逆光となる場合が考えられる。また、車両のヘッドライトにはローライトとハイライトがあり、ヘッドライトの当たり方によりターゲットの検出精度に影響を及ぼす可能性があると考えた。そこで、ヘッドライトを直射したケース、逆光となったケースの検証実験を行い、それぞれに対してヘッドライトをローライト、ハイライトを切り替えて画像処理に与える影響を検証した。

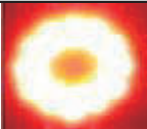
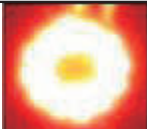
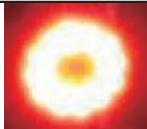
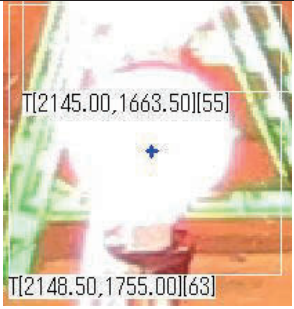
車両のヘッドライトが画像処理に及ぼす影響の検証を行った結果を、表-4. 2. 6 に示す。

ターゲットにヘッドライトを直射した場合、ローライト、ハイライトともにターゲット中央部は自発光しないにもかかわらず、画面上で発光しているかのように映った。また、ヘッドライトを直射させた場合においてはローライト、ハイライトの違いによる相関値の違いはみられなかった。

これに対し、ターゲットに逆光となるようヘッドライトを照射したとき、撮影されたターゲットは、発光部と中央部の発光しない部位が明確になり、ターゲットの発光部の形状が鮮明に映し出されている。また、ヘッドライトのローライト、ハイライトの違いでは、ハイライトの方がローライトの場合に比べターゲットの背景の変化が大きかったため相関値が低下したものと考えられる。

表-4. 2. 6 に示した相関値から、ターゲットにヘッドライトを直射したときに比べ、逆光になるよう照射したときの方が、相関値が高い傾向にあった。また、逆光になるように照射した場合はローライトの方が相関値が高かった。これは、ハイライトによる強い光により、画像上にハレーションが発生しやすい傾向にあったためであると考えられる。

表-4.2.6 ヘッドライトの影響の検証

	T1	T3	T4
テンプレート (夜間)			
ローライト を T1 から T4 方向に 照射 (直射)	 【相関値×100】 【68】	 【85】	 【82】
ハイライト を T1 から T4 方向に 照射 (直射)	 【相関値×100】 【63】	 【81】	 【80】
ローライト を T4 から T1 方向に 照射 (逆光)	 【相関値×100】 【95】	 【95】	 【95】
ハイライト を T4 から T1 方向に 照射 (逆光)	 【相関値×100】 【78】	 【88】	 【79】

(6) まとめ

検証実験から得られた知見は、以下の通りである。

- ①ターゲットに通常の影響（通行車等の影）がかかる程度ではテンプレートマッチングにおける相関値の低下はほとんどなく、常時監視システムへの影響は少ない。
- ②影や反射物の影響により、ターゲットの背景に変化がある場合は相関値が低下し、常時監視システムへの影響が大きい。したがって、ターゲットの背景に光を反射する物がある場合は、ターゲットの周りに遮蔽材を付けるのがよい。遮蔽材の色は、ターゲットの色彩と差異を付けることが望ましい。
- ③ターゲットにヘッドライトを直射させたときに比べ、逆光になるよう照射したときの方が相関値は高く、ヘッドライトを直射させた場合は常時監視システムに与える影響が大きい。このことから、ターゲットとカメラの設置に当たっては、カメラが車両進行方向に対して相対するよう（カメラが車両の正面側を撮影できるよう）に設置し、ヘッドライトがターゲットに対して逆光になるように設置するのがよいと考えられる。
- ④本検証では、ヘッドライトがターゲットに対して逆光になるよう、カメラやターゲットを設置した場合、ヘッドライトがローライトの方が相関値は高く、ハイライトの方が相関値は低くなった。ヘッドライトのローライト、ハイライトの影響はターゲットの設置高にもよると考えられるため、実橋において常時監視システムの運用するに当たってはその影響を事前に把握することが望ましい。

本検証実験では、影や遮蔽物、ヘッドライトの影響により相関値が下がる場合があり、これらが少なからず常時監視システムに適用するテンプレートマッチングに影響することが分かった。

そのため、本常時監視システムを用いる場合には現地にて影や遮蔽物、ヘッドライトの影響をキャリブレーションして、必要な精度を確保できることを予め把握する必要性が確認された。

4.3 供用中の橋梁に対する検証実験

4.2に加え、供用中の橋梁に対して、4.1で挙げたキャリブレーション項目が常時監視システムに与える影響の検証を行った。

4.3.1 検証実験概要

ここでは4.1の検討内容を踏まえ、以下の項目について検証を行った。

以下の(1)については、開発した常時監視システムが設計どおり運用可能か検証するための基本ケースとして位置付けている。また、(2)～(6)については、一般的な橋梁の供用環境下で想定される常時監視に支障を与えられと考えられる項目として検証を実施した。

- (1) 変状量の検出精度の検証
- (2) 風の影響の検証
- (3) 日照条件の変化による影響の検証
- (4) ヘッドライトの逆光・直射の影響の検証
- (5) ターゲットと同程度の発光物の影響の検証
- (6) 画像をリサイズした際の影響の検証

4.3.2 検証実験の条件

検証に使用した装置および実験条件について記載する。

(1) 撮影機材

本実験では、表-4.3.1に示す撮影機材を用いて実験を実施した。

表-4.3.1 実験で使用した撮影機材

	ハイビジョンビデオカメラ	デジタルカメラ
撮影素子	1/2.88 型 "Exmor R" CMOS センサ	1/2.3 型高感度 CMOS (裏面照射型)
撮影画素数	1980×1088 または 1440×1080	約 1680 万画素
F 値	F1.8-3.4	F2.7(W) -5.9(T)
焦点距離	f=3.8-38.0mm (35mm 換算) f=26.0-260.0mm (16:9 時) f=31.8-318.0mm (4:3 時)	f=4.3-21.5mm 35mm 換算値(静止画 4:3 時) f=24-120mm
ズーム	光学 10 倍 (デジタル 120 倍) エクステンデッド 17 倍	光学 5 倍
最低被写体照度	6lux (スタンダード時)	—
ナイトショット	ナイトショットライト内蔵	—

(2) ターゲット

表-4.3.2 に、本実験で使用したターゲットを示す。

表-4.3.2 実験で使したターゲット

	小型ターゲット
写真	
照明	LED
ターゲット直径	90mm
設置場所	高欄

(3) 実験装置の配置

本実験で使用した橋梁は、図-4.3.1、図-4.3.2 に示す橋長 40m 程度の単純鋼鈑桁の桁端部である。



図-4.3.1 実験対象橋梁（側面写真）

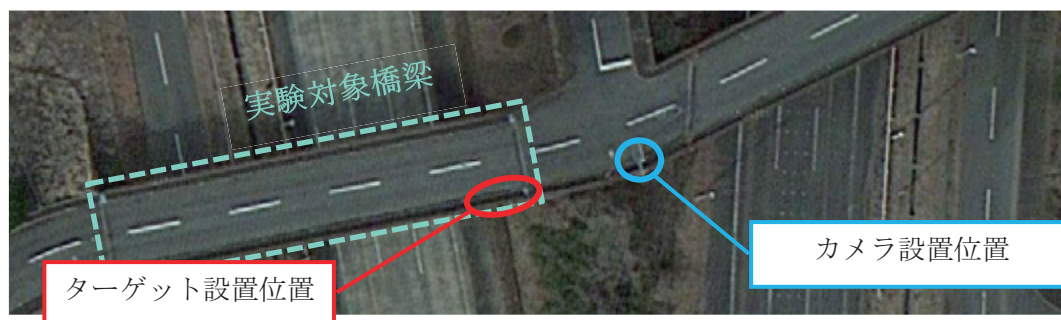


図-4.3.2 実験対象橋梁（俯瞰写真）

道路管理カメラの通常の設定高さは6m～10mであることを考慮し、本実験では、既設の道路標識の柱を利用して高さ5.7m及び7mのところにビデオカメラを設置し、通常の道路管理用カメラの設置範囲内で、本実験の計測対象ターゲットをカバーできる位置を選定した。カメラの設置場所及びターゲットの設置場所は図-4.3.3及び図-4.3.4に示す。

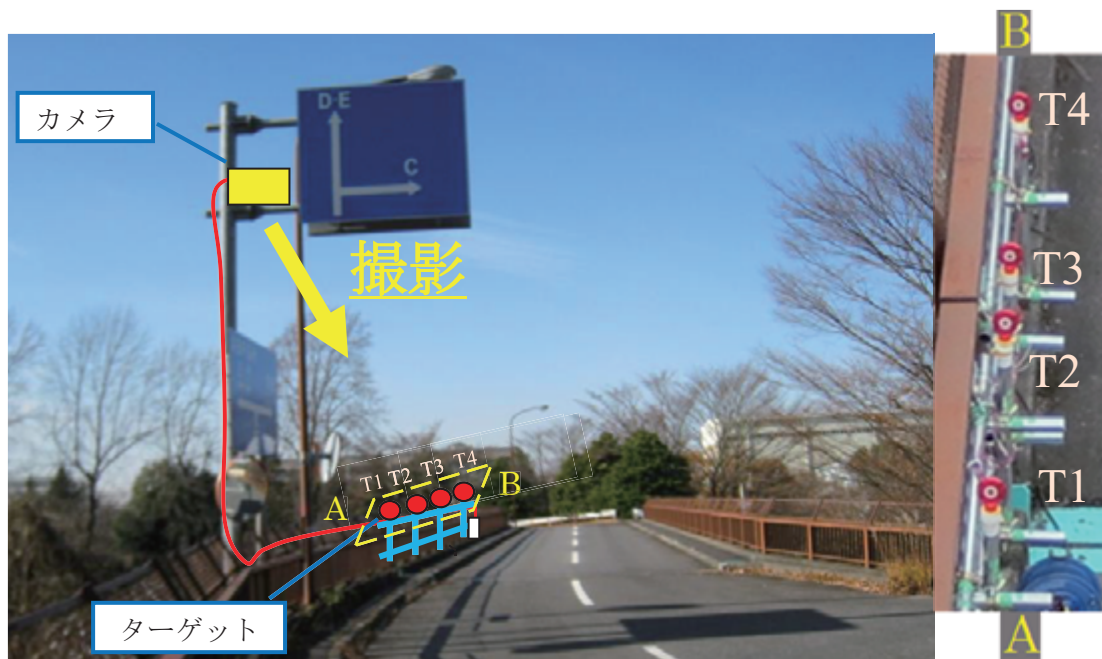


図-4.3.3 各装置の配置（左：装置の配置概要、右：カメラでターゲットを撮影した画像）

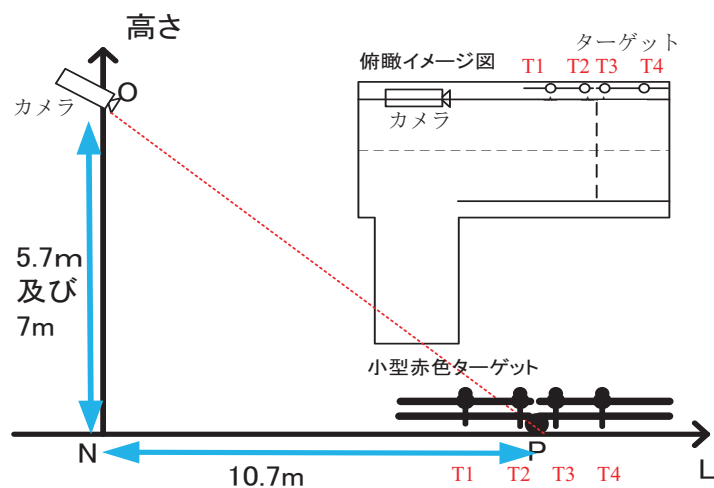


図-4.3.4 実験装置の配置

(4) ターゲットによる橋梁の変状の再現

小型ターゲットを用いて、掛け違い部や桁端部を開き、段差、横ずれが発生した場合を想定した検証を行った。実際に橋梁に開きや段差等が発生させることは出来ないため、図-4.3.6に示すように、高欄にパイプを設置し、ターゲットをずらすことで再現をした。

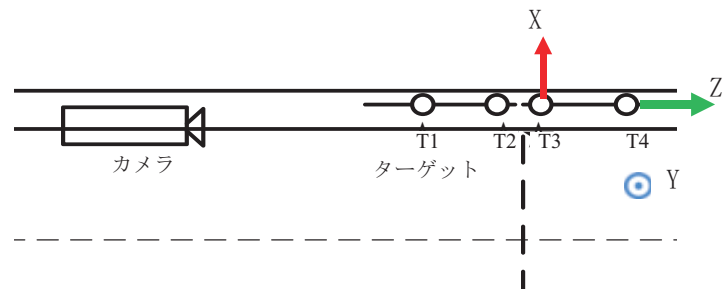


図-4.3.5 ターゲットの配置イメージ（平面図）

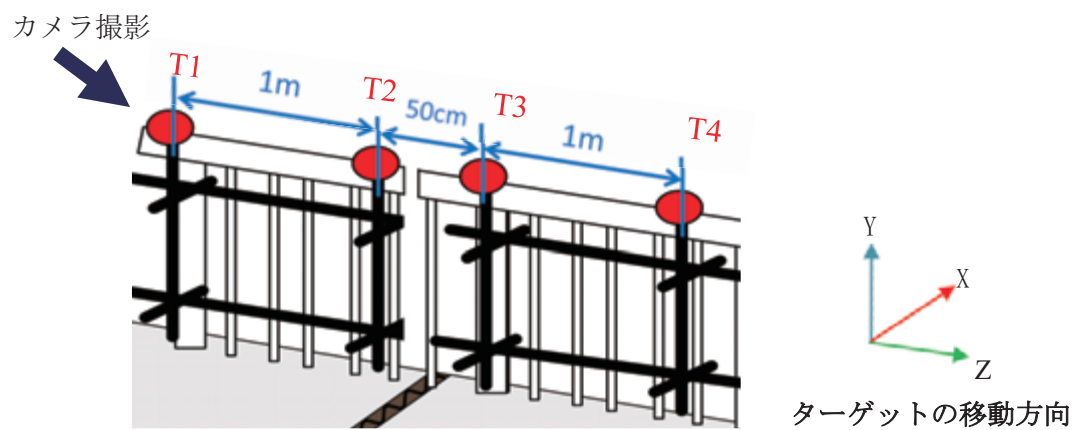


図-4.3.6 ターゲットの設置イメージ

表-4.3.3 および表-4.3.4 に、橋梁において本検討で想定する変状と、本検証におけるターゲットの移動距離を示す。本検証では、T1、T2 の位置は固定し、橋梁に設置した T3、T4 を移動させた。

表-4.3.3 監視箇所と監視対象

想定する変状	実橋のターゲットの変位状況
開き	ターゲット (T1, T2) と (T3, T4) 間の幅 (Z方向) の距離の変化
段差	ターゲット (T1, T2) と (T3, T4) 間の高さ (Y方向) の距離の変化
横ずれ	ターゲット (T1, T2) と (T3, T4) 間の横方向 (X方向) の距離の変化
橋床の回転	ターゲット (T1, T2) と (T3, T4) 間の幅 (Z方向) ・横方向 (X方向) の距離の変化

表-4.3.4 実験ケース

番号	ずれ種類	$\Delta x3$ (cm)	$\Delta x4$ (cm)	$\Delta y3$ (cm)	$\Delta y4$ (cm)	$\Delta z3$ (cm)	$\Delta z4$ (cm)
1	基準	0	0	0	0	0	0
2	横ずれ・回転	-5	0	0	0	0	0
3	横ずれ	-5	-5	0	0	0	0
4	高さ・不等	0	0	-5	0	0	0
5	高さ	0	0	-5	-5	0	0
6	高さ	0	0	5	5	0	0
7	開き	0	0	0	0	5	5
8	開き	0	0	0	0	10	10

注：移動方向については図-4.3.5の矢印方向を参照。T1、T2の位置は固定した。

4.3.3 実証実験結果

(1) 変状量の検出精度の検証

開発した常時監視システムが想定したとおり、変状を検知可能か確認するための基本ケースとして、小型赤色ターゲットを移動させ、ターゲットの移動を確認できるか検証した。

ターゲットを撮影した画像は、図-4.3.7に示す通りで、カメラの設置高は5.7mとした。

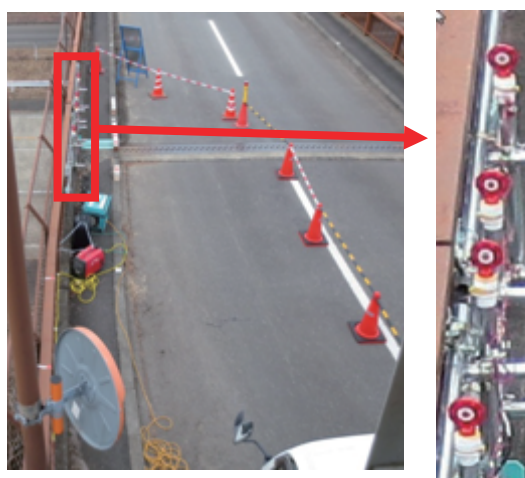
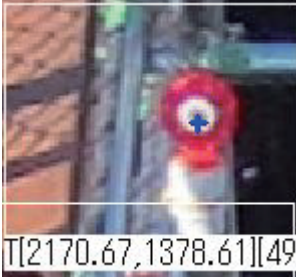


図-4.3.7 ターゲット撮影画像（右図は、左図の赤枠部を拡大した画像である）

表-4.3.5に、画像処理による検出精度を整理した。検証実験の結果、橋の横ずれ、段差、開きのうち検知精度が最も低いのは開きであった。

表-4.3.5 画像処理による検出精度の検証

	T1	T3	T4
テンプレート			
入力画像	 T[2139.00,1574.02][99]	 T[2157.00,1379.04][99]	 T[2165.02,1275.02][100]
【相関値×100】	【99】	【99】	【100】
T3をX方向に -5cm 移動させ たとき	 T[2140.20,1572.87][85]	 T[2170.67,1378.61][49]	 T[2166.31,1274.57][88]
【相関値×100】	【85】	【49】	【88】

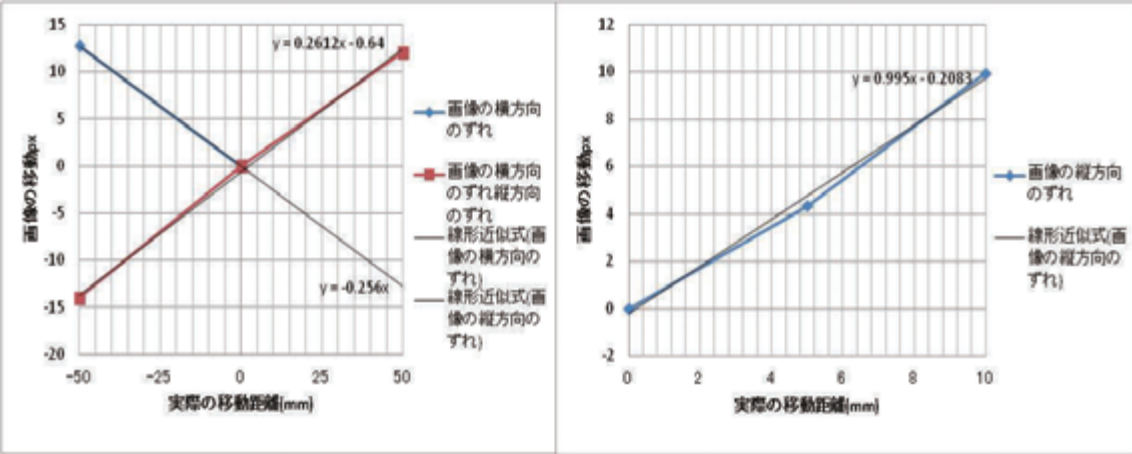


図-4.3.8 小型ターゲットT3の移動距離と画像ピクセル数のT1に対する相対変化

(2) 風の影響の検証

本実験中に、風の影響によりカメラの向き（撮影方向）がずれ、ターゲット T1、T3 の画像上の座標が変化した。ターゲットの画像上の変化量は、30px 程度（横方向）であった。

この変化量はターゲットの移動量として誤認識される恐れがあるため、T1 を基準点として T3 の相対変位量を補正した結果、図-4.3.10 に示すように、カメラのずれによるターゲットの変化量が 1px 未満となり、誤判定を防止することができた。

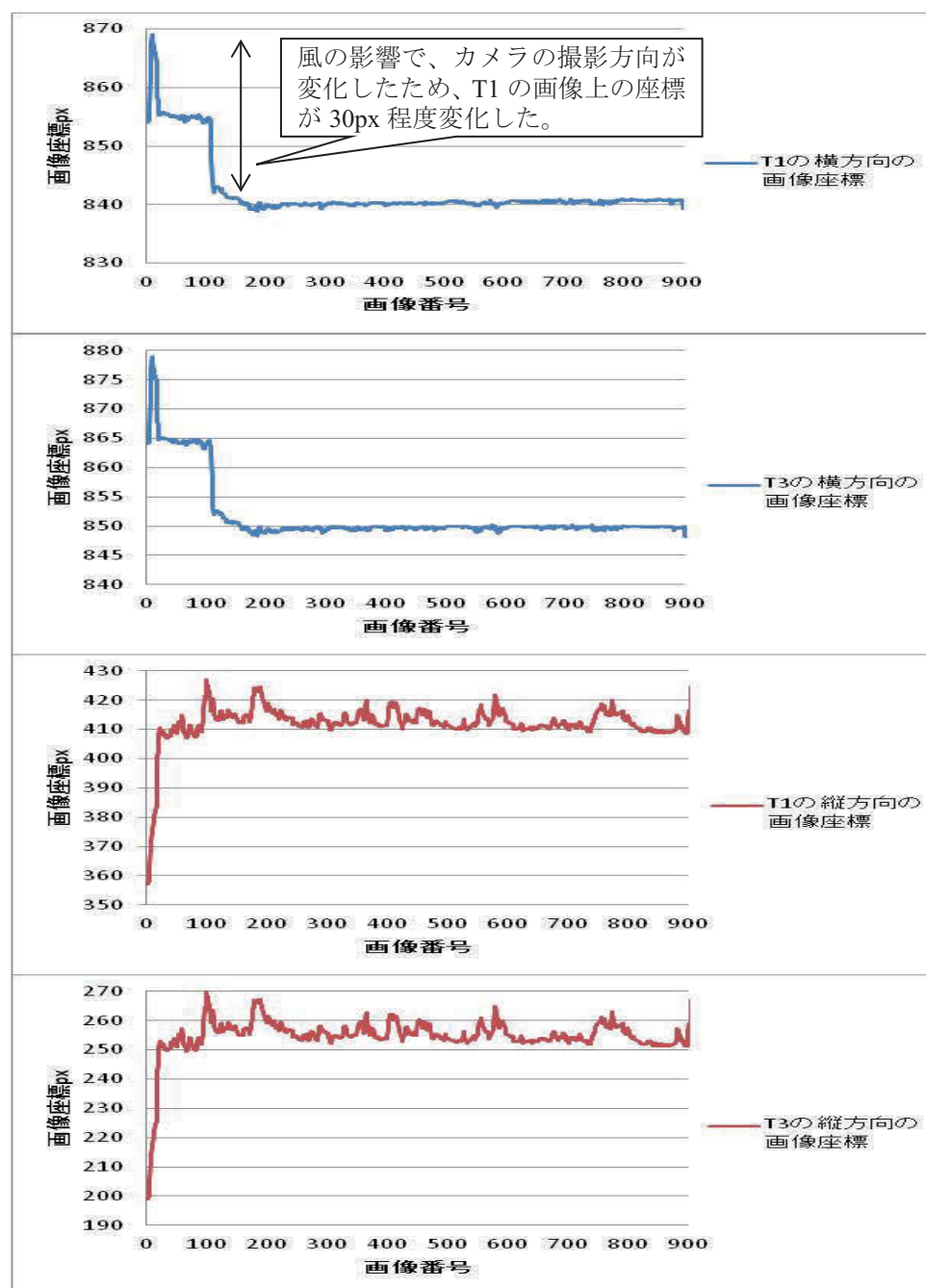


図-4.3.9 風の影響によるターゲットの画像上の変位（例として T1, T3）

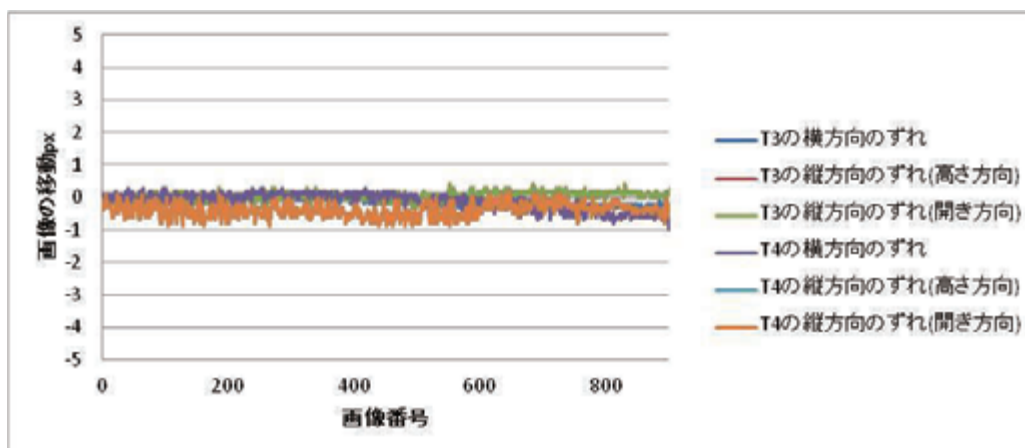


図-4. 3. 10 ベクトル法による補正結果

風による影響時の撮影画像例及び抽出結果例を以下に示す。



図-4. 3. 11 風によるカメラの角度のずれ

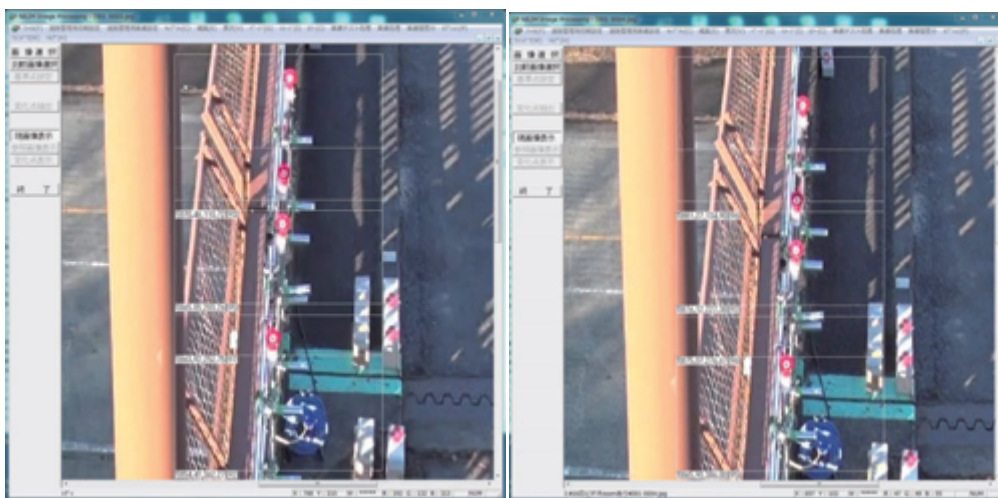


図-4. 3. 12 テンプレート法による抽出結果

(3) 日照条件の変化による影響の検証

日照条件の変化による影響を検証するため、実験当日の昼間から夜間（12：00～20：00）にかけて、ビデオカメラによる撮影を行い、画像処理を行った。カメラの設置高は7mであり、ターゲットまでの距離は10.7mである。なお、撮影日の天候は曇りのち雨だった。図-4. 3. 13～図4. 3. 15に、実験状況を示す。

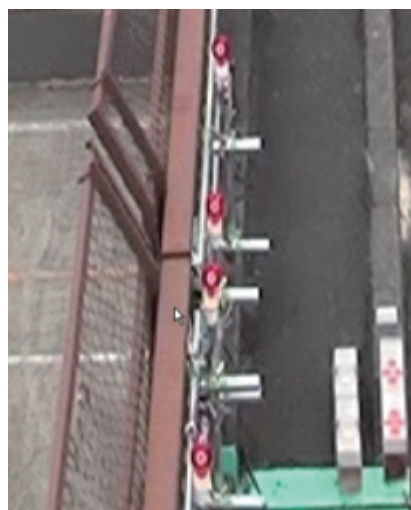


図-4. 3. 13 実験状況写真（昼間：曇り時）



図-4. 3. 14 実験状況写真（昼間：雨天時）

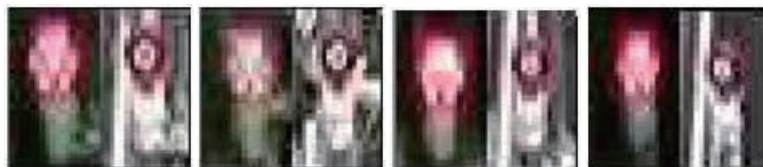


図-4. 3. 15 登録したテンプレート（左からT1、T2、T3、T4である）

実際のターゲットの移動量とビデオ画像から取得した画像上の移動量の変化を図-4. 3. 16に示す。グラフ内に黒線で示した近似式により、ターゲットが50mm移動した場合、画像上は2.5px以上の動きがあり、今回の実験環境下において50mmの変位を検出することが可能であることを確認した。

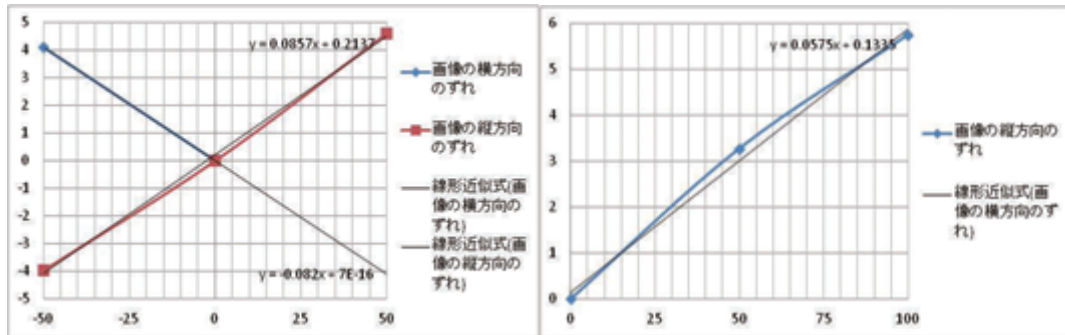


図-4.3.16 移動距離と画像のピクセル数の変化のグラフ

対象とした画像は、ビデオカメラで取得した動画から10秒1枚の間隔で抽出した画像とした。

12時から20時までの画像を利用し、以下のようにテンプレートを2パターン設定し、自動処理を行った。

- (A) 昼間撮影した代表的な画像3枚をテンプレートとして設定
- (B) 昼間撮影した代表的な画像3枚、夜間撮影した代表的な画像2枚をテンプレートとして設定

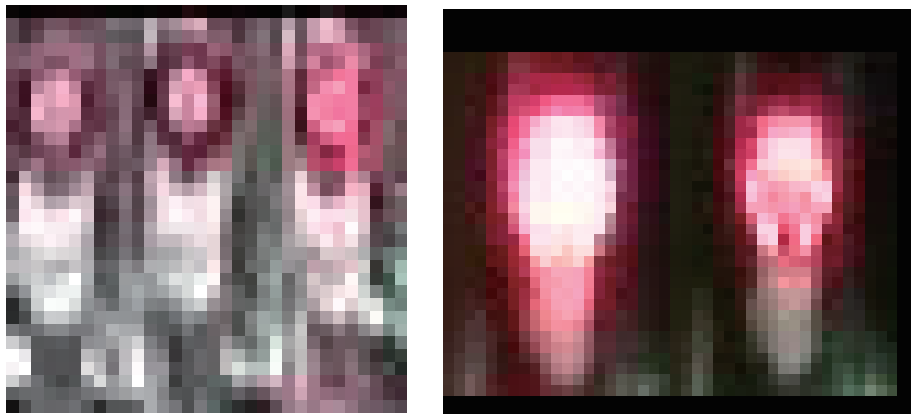


図-4.3.17 テンプレート画像（左：昼間撮影、右：夜間撮影）

(A) 昼間撮影した代表的な画像3枚をテンプレートとして設定したケース

検証実験当日は、17:00頃から暗くなり始めターゲットを点灯させた。ターゲットが点灯した場合、ターゲットの特徴は登録済みの昼間のテンプレートの特徴と大きく異なるため、昼間の点灯中のテンプレートを1枚追加して3枚の画像を登録した。

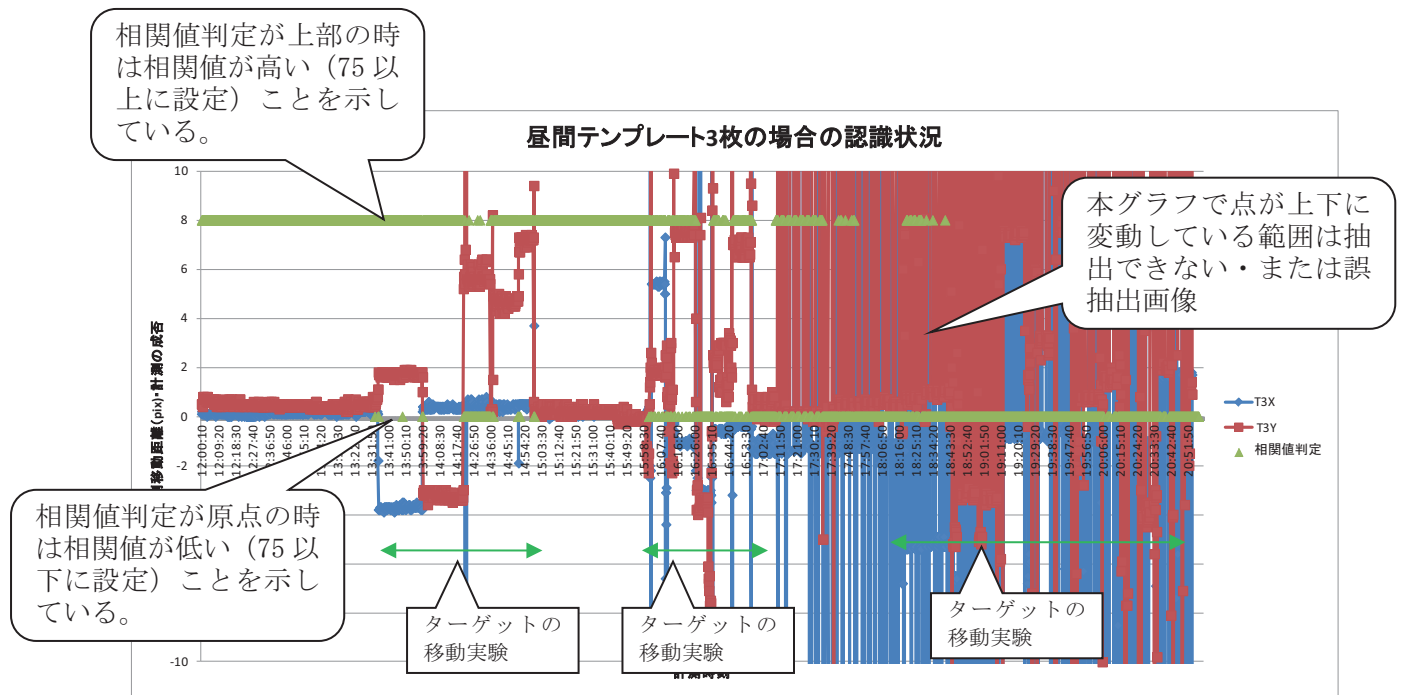


図-4. 3. 18 常時監視システムの処理結果 (テンプレートは昼の3枚)

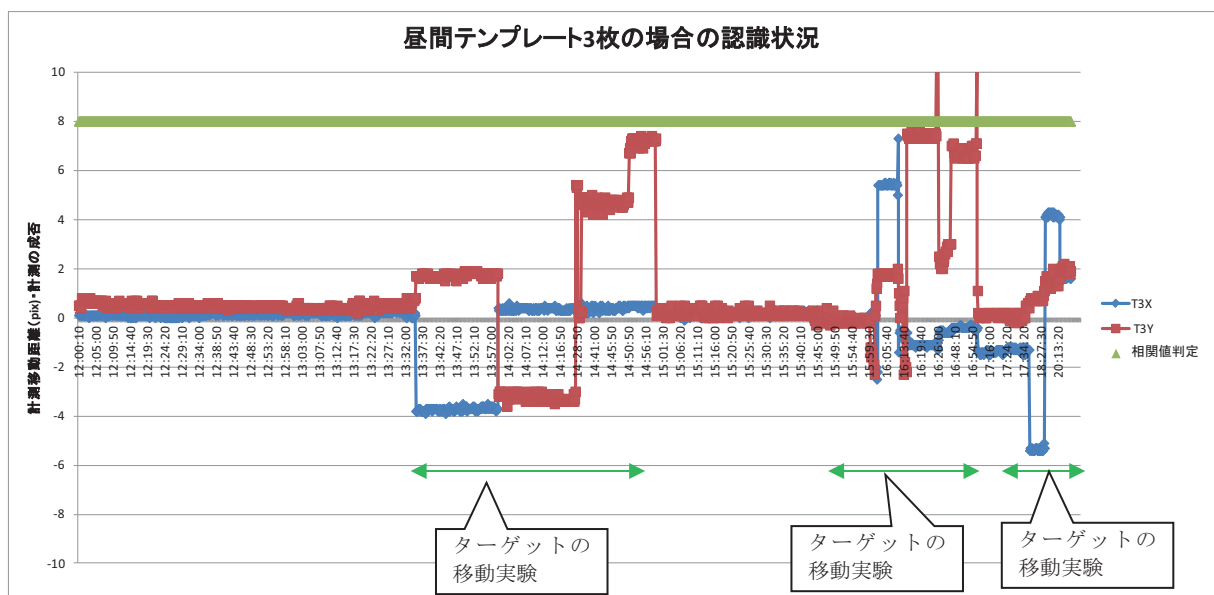


図-4. 3. 19 誤認識した画像を取り除いた場合の処理結果 (テンプレートは昼の3枚)

(B) 昼間撮影した代表的な画像3枚、夜間撮影した代表的な画像2枚をテンプレートとして設定したケース

昼間のテンプレート画像を3枚、夜間テンプレート2枚を採用した場合の処理結果を以下に示す。夜間テンプレートによる誤認識を減らすため、ターゲットのみではなく背景も含め広くした範囲を夜間のテンプレートとして登録した。

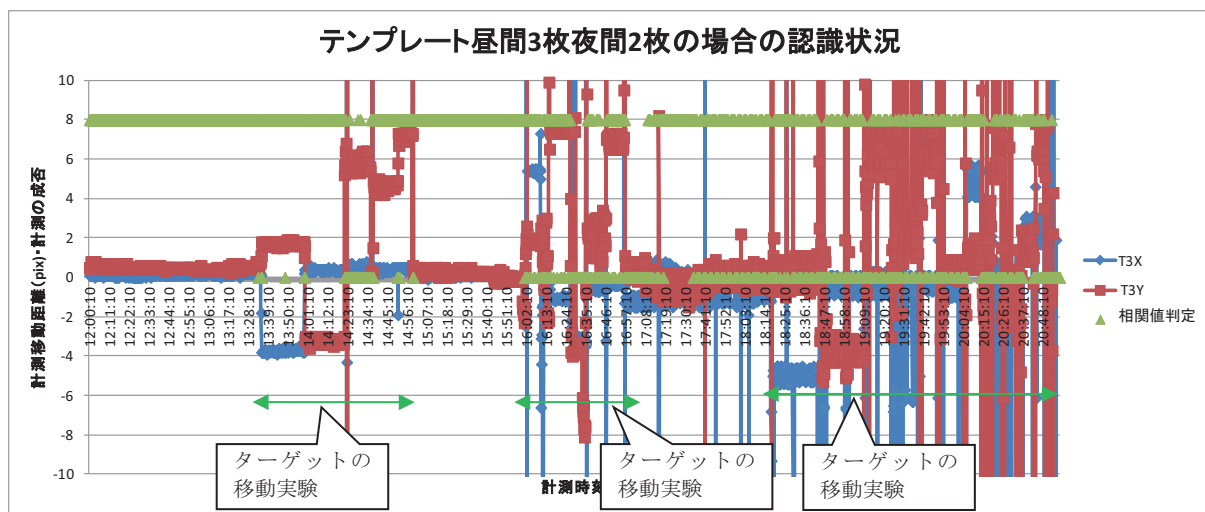


図-4. 3. 20 常時監視システムの処理結果(テンプレートは昼:3枚 夜:2枚)

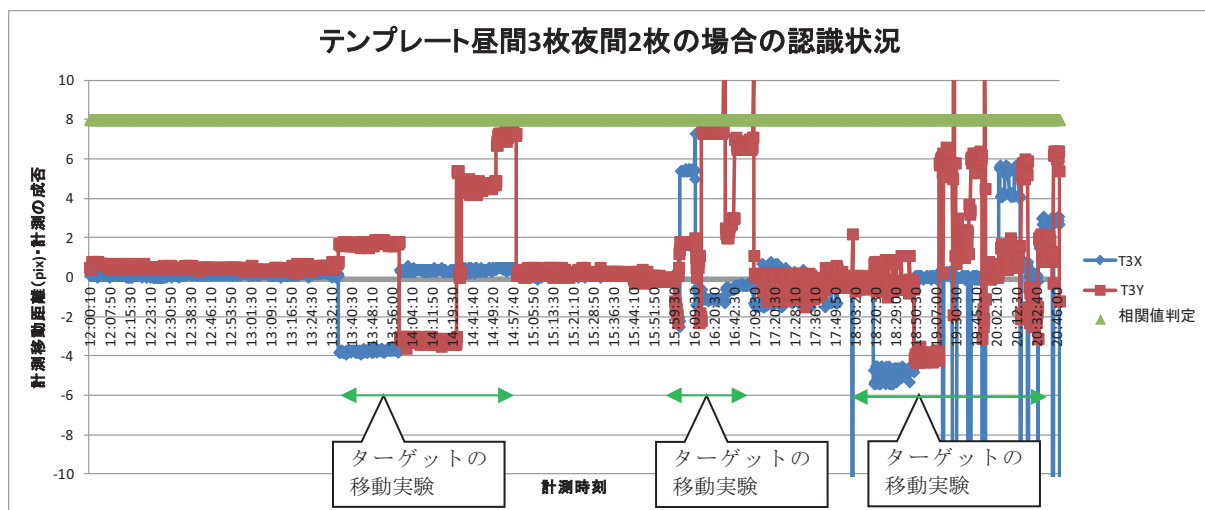


図-4. 3. 21 誤認識した画像を取り除いた場合の処理結果(テンプレートは昼:3枚 夜:2枚)

(A) (B) の結果から、以下のことを確認した。

- ・図-4. 3. 18 と図-4. 3. 20 を比較すると、夜間のテンプレートを追加することで夜間の誤認識が大きく減少し、夜間のテンプレートを追加することが有効であることが確認された。
- ・図-4. 3. 19 及び図-4. 3. 21 は、図-4. 3. 18 と図-4. 3. 20 の誤認識した画像を取り除いた処理結果である。本研究では、誤認識の定義を相関値 75 以下のものとして処理を行った。誤認識した画像を取り除いた場合においても、表-4. 3. 3 や表-4. 3. 4 に示したターゲットの移動を捉えることができており、また、グラフ上でターゲットの移動を判定することも容易となった。そのため、画像処理においては、誤認識した画像を取り除いた上でターゲットの移動（橋の変状）を確認するのが良い。

(4) ヘッドライトの影響の検証

夜間ヘッドライトの影響を検証するため、図-4.3.22のように車を通行させ、ターゲットにヘッドライトを直射させた場合、逆光を照査させた場合の映像を撮影する

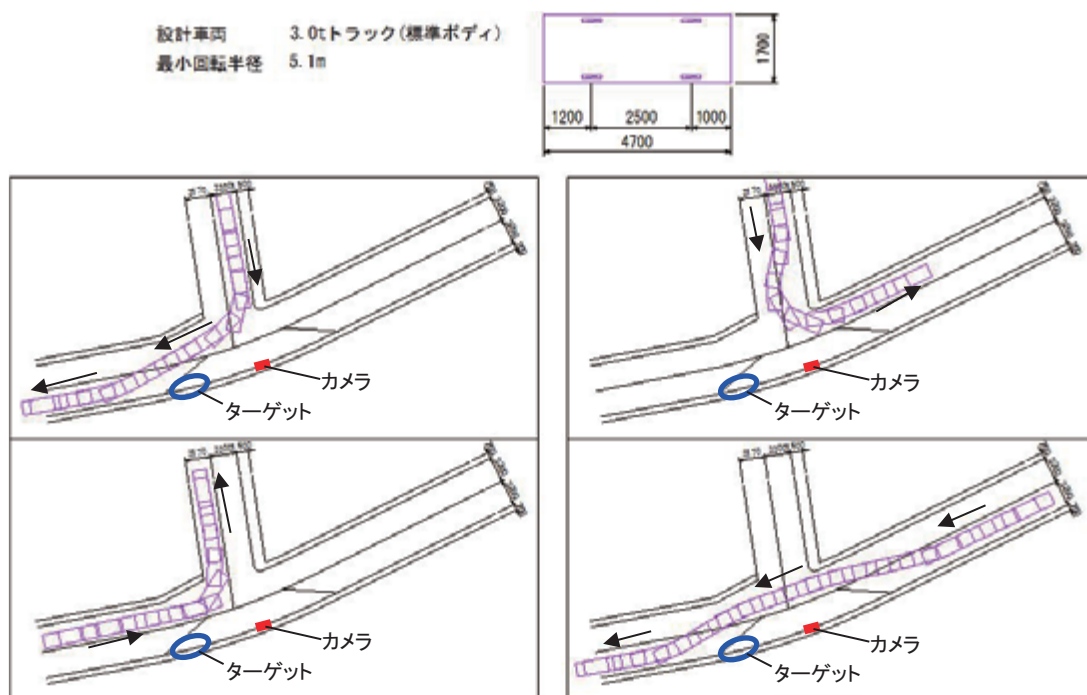


図-4.3.22 車両の走行軌跡図

実験当日の夜間のビデオ画像を利用し、ヘッドライトの逆光・直射の影響を検証した。その結果を図-4.3.23～4.3.24に示す。ビデオ画像の計測条件時のカメラの設置高は5.7mであり、ターゲットまでの距離は10.7mである。

図-4.3.23は、19:12からの30分間の映像を1秒1枚の間隔で抽出した画像を対象に処理した結果である。ターゲットが点滅していることから、ターゲットが消灯している時には、ターゲットの位置を抽出できないため、グラフ上でターゲットT3のX,Yの値が上下し変化している。図-4.3.24は、ターゲットの抽出結果からすべてのターゲットの相関値が75以上の場合の画像に絞った結果のグラフである。抽出したターゲットT3のX,Yの相対移動量は安定していることを確認できた。

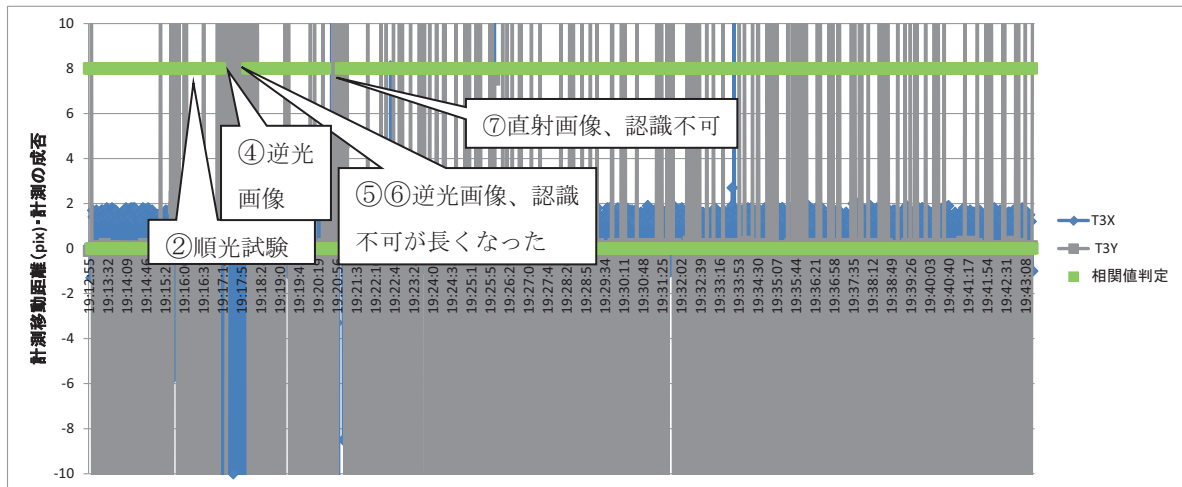


図-4. 3. 23 常時監視システムの処理結果

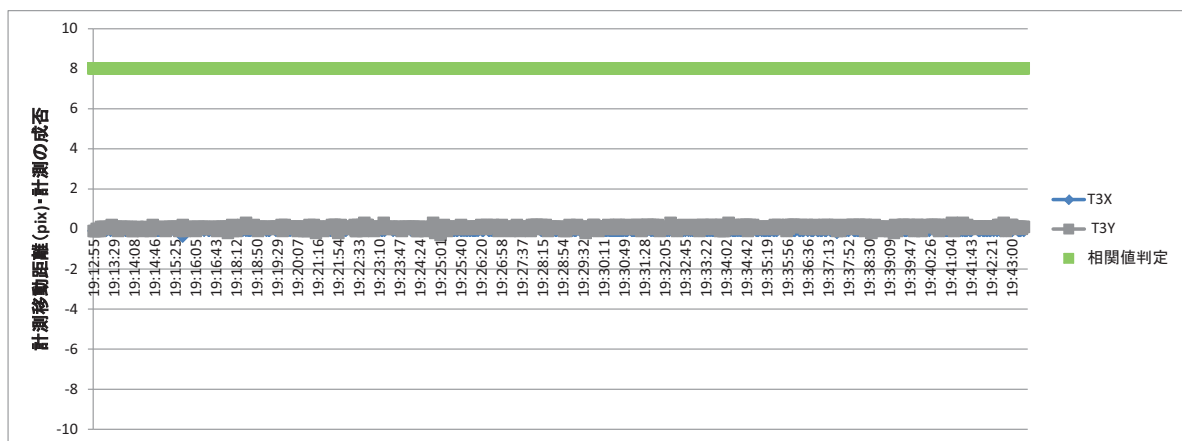
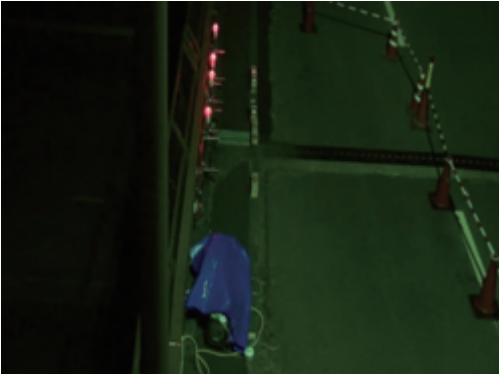
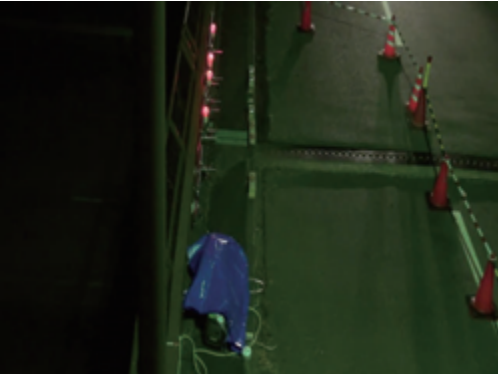


図-4. 3. 24 誤認識した画像を取り除いた場合の処理結果

表-4.3.6 ヘッドライトの逆光・直射の影響実験時の主な画像一覧

①通常の夜間画像 (19:13:02) 認識可能 	②順光画像 (19:15:42) 認識可能 
③通常の夜間画像 (19:15:49) 認識可能 	④逆光画像 (19:16:42) 認識可能 
⑤逆光画像 (19:17:23) 認識不可 	⑥逆光画像 (19:17:56) 認識不可 
⑦直射画像 (19:20:37) 認識不可 	

ヘッドライトの逆光・直射の影響実験の結果、以下のことを確認した。

- ①ヘッドライトの影響で、ターゲットが認識できない場合があることを確認した。特にヘッドライト直射時に、ターゲットを認識しにくくなることを確認した。
- ②表-4.3.6の【⑤逆光画像(19:17:23)認識不可】では、画像上のターゲットの形状変化は少なかったが、ターゲットを認識できなかった。この理由は、ヘッドライトの影響により背景が大きく変化していることが原因であると考えられる。
- ③夜間にターゲットを認識しやすくするため、点滅時のターゲットと背景を区別できるようにテンプレート画像の範囲を広く設定した。しかし、テンプレート画像の範囲を広くしたことによりヘッドライトの直射時だけでなく、背景の変化の影響も受けやすくなり認識ができなくなる場合があることを確認した。

以上のことから、ヘッドライトの逆光・直射の影響の対策として、以下のことが考えられる。

- ①背景の変化の影響を最小限にするため、ターゲットに背景遮蔽パネルを付加する。
- ②発生頻度の高い逆光画像を対象としたテンプレートを追加する。

(5) ターゲットと同程度の発光物の影響の検証

ターゲットと同程度の発光物の影響を確認するため、通行人が懐中電灯を発光させターゲット付近を通行したときの影響を検証した。ビデオ画像の計測時のカメラの設置高は5.7m、ターゲットまでの距離は10.7mとした。

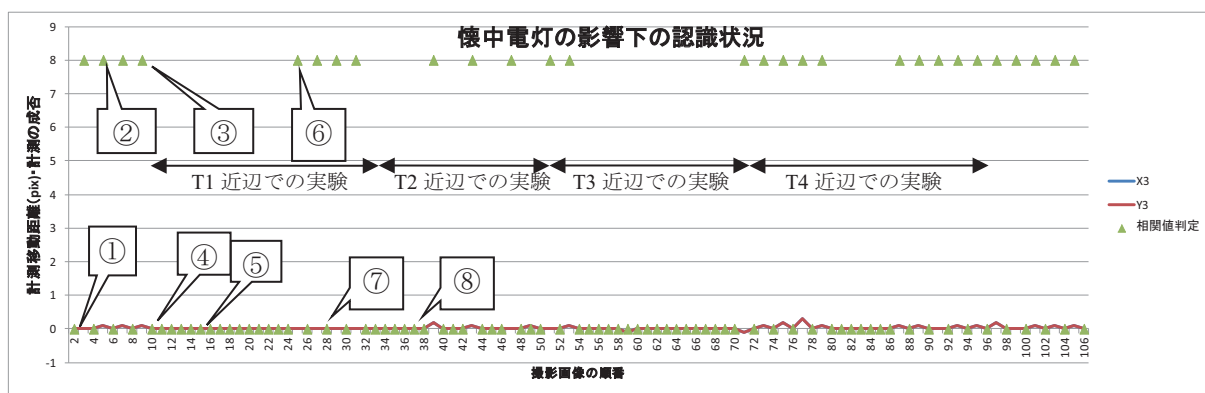


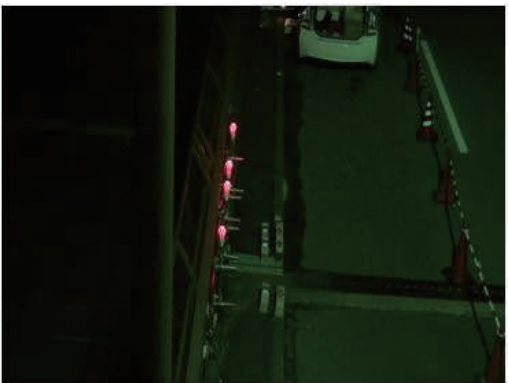
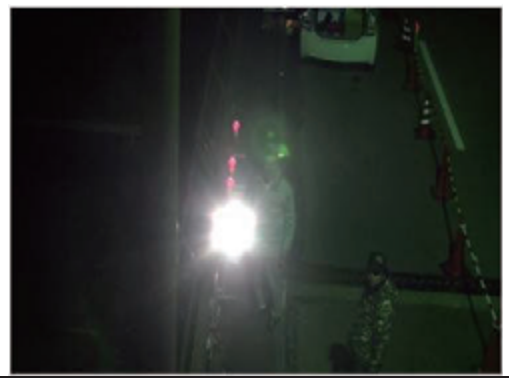
図-4.3.25 懐中電灯の影響時の計測結果グラフ

図-4.3.25に、懐中電灯の影響を計測した結果を、表-4.3.7に、実験中の代表画像を示す。図-4.3.25中の①～⑧は、表-4.3.7に示した画像と対応しており、①、④、⑤、⑦、⑧はターゲットが認識できなかったこと、②、③、⑥はターゲットを認識できたことを示している。

図-4.3.25および表-4.3.7より、以下のことがわかった。

- ・ターゲットと同程度の発光物として用いた懐中電灯は常時点灯しており、ターゲットは点滅している。表-4.3.7③より、ターゲットと異なる形状の発光物が画像上に移り込んだ状態でもハレーションが生じなければ誤認識されなかった。
- ・表-4.3.7⑤⑧より、懐中電灯によるハレーションが発生した場合、認識不可になっていることを確認した。

表-4.3.7 懐中電灯による影響の検証実験時の代表画像

①ターゲットの消灯時は認識できない 	②点灯時認識可能 
③懐中電灯の影響はなく、認識可能 	④ターゲットを一部隠れのため、認識不可 
⑤ハレーションが発生し、認識不可 	⑥発光パターンが異なるため影響なし 
⑦消灯時認識不可 	⑧ハレーションが発生し、認識不可 

(6) リサイズした場合の実験結果

図-4. 3. 26に、ビデオ画像を利用し道路管理用カメラの画像と同じサイズ（640×480）にリサイズした画像を示す。

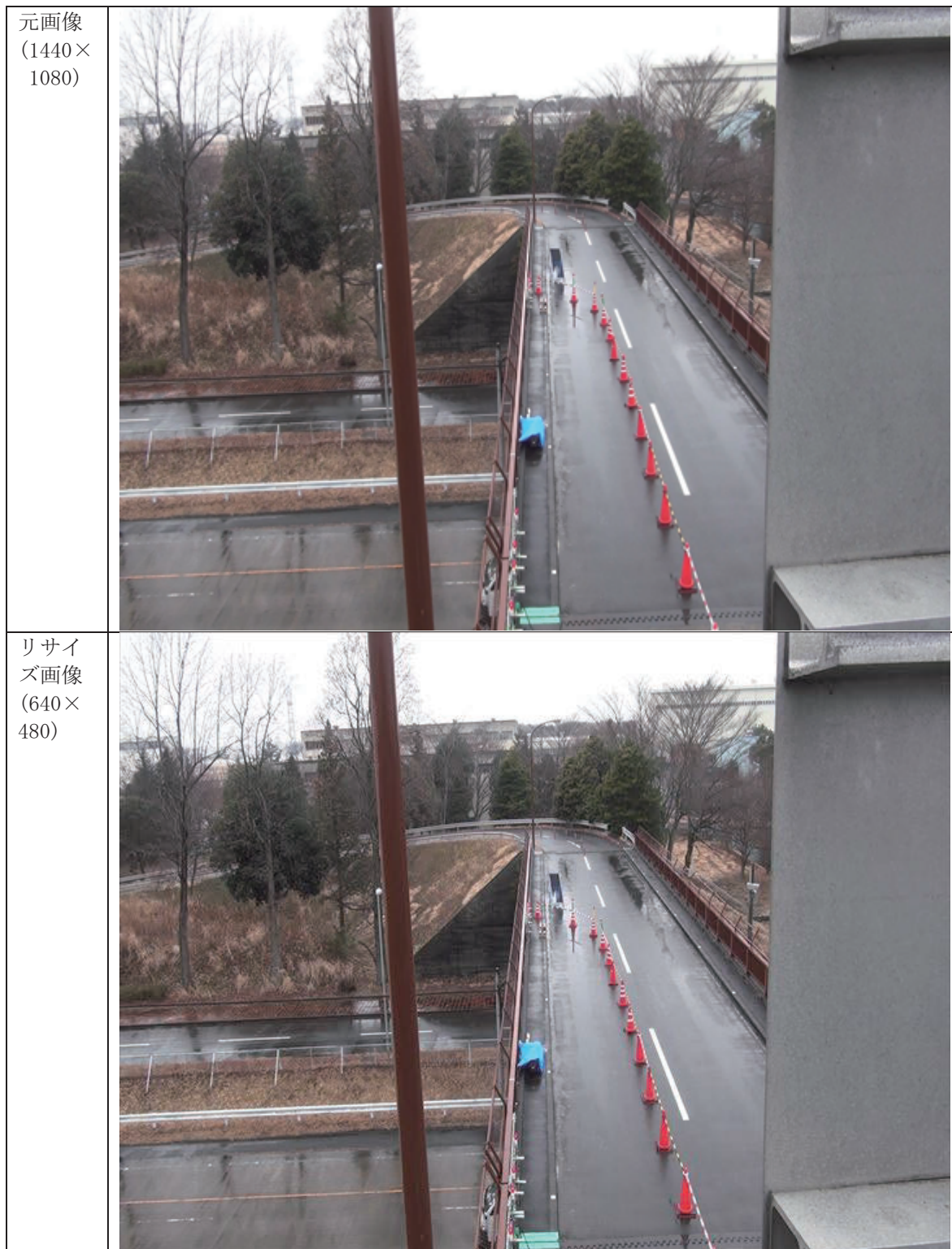


図-4. 3. 26 道路管理用カメラの画像と同じサイズにリサイズした画像

また、ターゲット部分の拡大図を図-4.3.27に示す。

図-4.3.27より、道路管理用カメラの画像と同じサイズにした場合は、ターゲットの横方向画素数は3ピクセル程度になる。

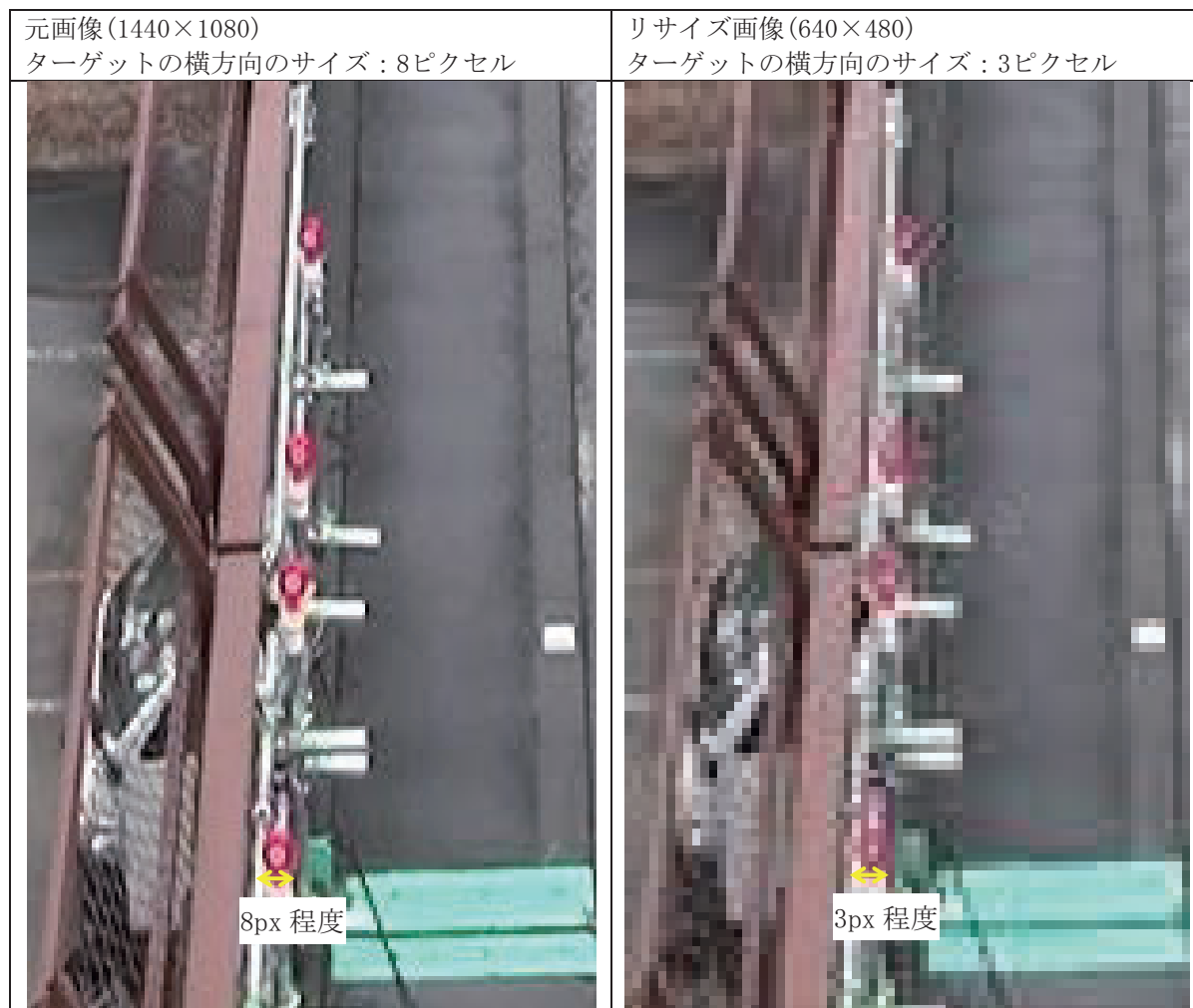


図-4.3.27 道路管理用カメラの画像と同じサイズにリサイズした拡大画像

リサイズした画像を処理した結果を図-4.3.28に示す。ここではT3に着目した結果を示しているが、リサイズした画像を用いても50mmの移動を検出することができていることが分かる。本検証結果から、以下のことがいえる。

- ・リサイズした画像を用いてもターゲットの動きを一定程度把握することができることを確認した。ただし、50mmの移動量に対し、検出した画像上の移動量は2ピクセル未満であるため、要求精度（50mm）の検出はできないと考えられる。
 - ・テンプレートのサイズが小さい画像をリサイズしたため、ターゲットの形状や色彩といった特徴が把握しづらくなり、ターゲットの移動を正確に捉えられない可能性がある。
- 今回リサイズした画素程度のカメラを用いて実用化する際には、ターゲットのサイズを大きくすることが有効である。

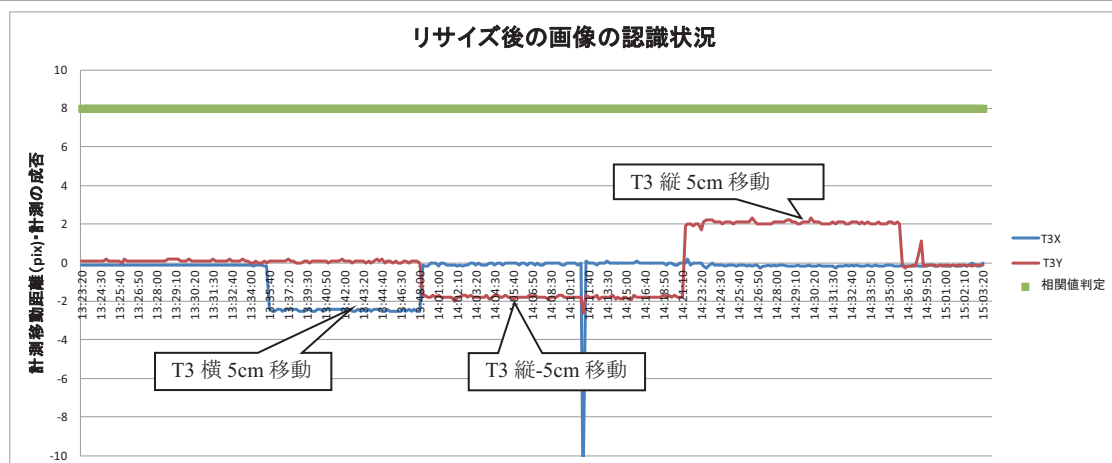
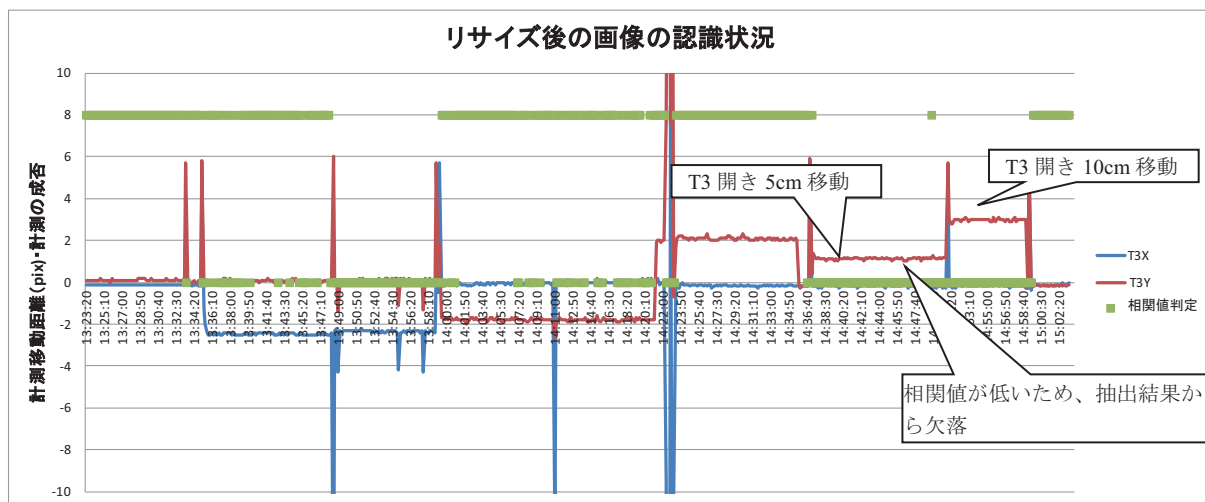


図-4. 3. 28 リサイズした画像の処理結果(上図：全データ 下図：抽出できた画像)

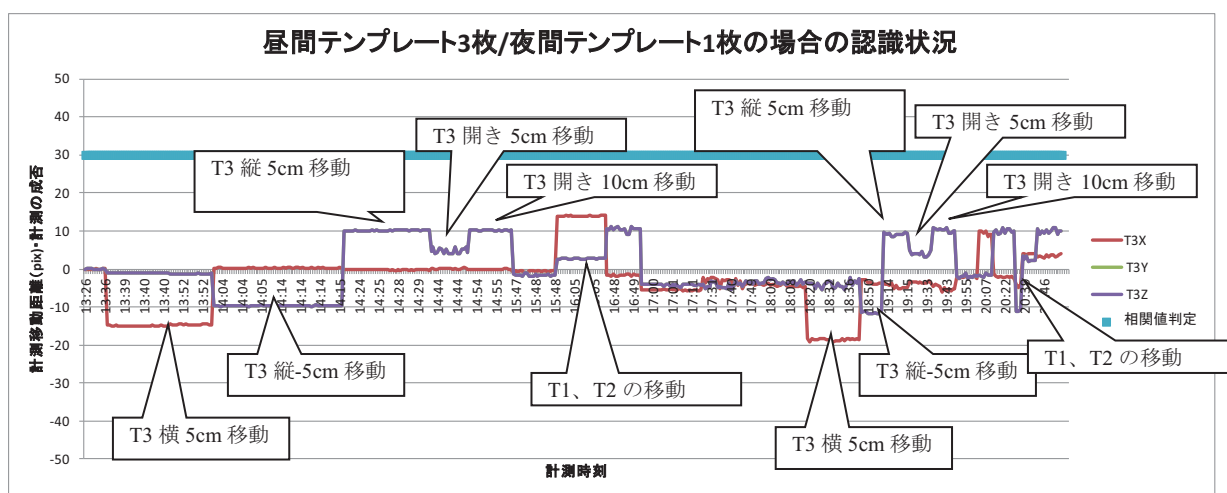


図-4. 3. 29 デジタルカメラの撮影画像の処理結果(ターゲットを抽出できた画像のみ)

4.3.4 供用中の橋梁に対する検証実験結果のまとめ

供用中の橋梁に対する検証実験の結果は以下の通りである。

- ① ターゲットを正確に認識できれば、変状を認識可能な距離は、机上検討の結果と同等となった。
- ② ターゲット抽出時に使用しているベクトル法による補正の結果、風等によりカメラの設置角度が変更されてもその影響を補正することができることを確認した。
- ③ テンプレートマッチング法による画像処理手法では、各種天候の条件に合わせ、適切にテンプレートを追加することにより、ターゲットの抽出精度が向上することを確認した。
- ④ ターゲット周辺の明るさの条件（昼間、夜間など）によって、画像上のターゲットのサイズが見かけ上異なる。背景に比べてターゲットが明るい場合はターゲットが大きく映る傾向がある。一方、背景に比べてターゲットが暗い場合はターゲットが小さく映る傾向がある。この影響を無くするためには、自発光ターゲットの周辺に背景を遮蔽する枠を付けるのが有効である。
- ⑤ 夜間のターゲットの点灯の周期とカメラの撮影周期によって、消灯している状態を連続で撮影してしまい相関値が低くなる場合があるため、カメラの撮影周期をターゲットの点灯周期と比べて1割程度短くするなどの対策をすることが望ましい。
- ⑥ 本研究における常時監視システムでは、同じ画面上で全てのターゲットを抽出する必要がある、夜間でもすべてのターゲットを抽出するには、4つのターゲットを同時に点灯させる必要がある。

5. まとめ

本研究では、道路橋において供用の安全性に関わるような重大な異常等が発生した場合に、短い時間で道路管理者が異常を認識し、二次災害を防止すること、突発的な異常を早期に検知することを目的としている。

そこで本報告書では、国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告(平成 27 年 12 月)に基づき、常時監視システムを実際に設置、運用するにあたって対象とした変状や変位の種類を検知するための各機器の要求性能を提案し、実際に常時監視システムを運用するにあたり事前に現地で確認しておくべきキャリブレーション項目を取りまとめた。

概要は以下のとおりである。

(1) 常時監視の対象とする事象と変位量

近年の自然災害(地震)による道路橋の損傷事例から以下の事象と変位量を常時監視の対象とする。

- ・常時監視に対象とすべき事象は桁端部の段差等の変状(開き、横ずれ、段差)
- ・対象とすべき変位量は 50 mm

(2) 常時監視システムの要求性能

常時監視システムの開発にあたっては、経済性にも配慮し国土交通省が道路管理用に配備している既存のカメラと道路安全用の視線誘導灯(ターゲット)を用いることで新たなインフラ整備を行わず監視体制を構築することを前提にしている(もともと使用されている視線誘導灯を用いるので、不要な視線誘導もしないように配慮した)。

①カメラの要求性能

画像処理により、橋梁の変位を抽出するためには画像上で 1px 以上の移動を確認できる必要がある。

カメラや監視の対象としたターゲットの設置位置やその関係は、橋梁ごとにことなることが予想されるため、以下の条件下においてカメラの設置高さやカメラとターゲットの離隔距離に応じて、50 mm以上の開き、横ずれ、段差を抽出するためのカメラの要求画素数を表-5.1.1 に示す。

カメラの水平画角：44°

カメラの垂直画角：30°

ターゲットの設置間隔：1.00m

表-5.1.1 カメラの要求画素数

(カメラの水平画角:44°、カメラの垂直画角:30°、ターゲットの設置間隔:1.00mの場合)

離隔距離 (m)	設置高さ(m)							
	6(m)		8(m)		10(m)		15(m)	
	横	縦	横	縦	横	縦	横	縦
5	702	527	1039	779	1450	1087	2935	2201
10	779	584	951	713	1170	877	1888	1416
15	1253	940	1112	834	1257	943	1748	1311
20	2082	1562	1675	1256	1464	1098	1811	1358
25	3192	2394	2525	1894	2110	1582	1976	1482
30	4468	3351	3565	2674	2886	2164	2220	1665
40	7930	5948	5953	4464	4936	3702	3502	2627
50	12238	9178	9248	6936	7536	5652	5336	4002
60	17635	13227	13402	10052	10583	7937	7453	5590
80	31200	23400	23627	17720	18900	14175	12912	9684
100	48402	36302	37024	27768	29236	21927	20173	15129

②ターゲットの要求性能

画像処理により、精度よくターゲットを検出するために、ターゲットに要求される性能を以下に示す。

- ・カメラの回転等、設置条件の影響を最小限にするため、形状は正円であることが望ましい。
- ・CCDカメラの感度が最も高く、遠距離撮影でも色成分がより鮮明に確認しやすくなるため、ターゲットの発光部の色彩は赤が望ましい。
- ・画像処理によりターゲットを抽出するためには、ターゲットと背景の色が出来るだけ明確に区別できることが望ましい。
- ・夜間にもターゲットを撮影できるよう自発光できるターゲットを使用するのが望ましい。
- ・ターゲットの大きさは、カメラの設置高さや離隔距離、カメラの画素数等の条件を踏まえ適宜検討するのが良く、例えばカメラの設置高さが10m、カメラとターゲットとの離隔距離が30mの場合には表-5.1.2に示すようなターゲットのサイズが要求される。

表-5.1.2 要求されるターゲットのサイズ

(カメラ設置高さが10m、離隔距離が30mの場合)

	道路管理用 カメラ	ハイビジョン ビデオカメラ	デジタル カメラ
画素数 (px)	640×480	1440×1080	4608×3456
路面に立てる場合 (m)	0.2～0.8	0.1～0.4	0.03～0.12
路面に書き込んだ場合 (m)	0.68～2.7	0.34～1.4	0.1～0.4

(3) 現地におけるキャリブレーション項目

橋梁の橋面は通行する車両や人などにより、監視ターゲットが遮蔽され確認できなくなる場合があること、また夜間には車両のヘッドライトの影響を受け、画面上でターゲットと背景の区別が付きにくくなることによりターゲットの監視精度が低下することなどが予測され、その影響度合いは時刻や車両や人の交通量などにより橋梁ごとに異なる。また、カメラやターゲットの設置可能な位置も橋梁ごとに異なる。

これらのことから、常時監視システムの運用に当たっては、監視の支障となる事象の影響度合いを事前に確認し、道路橋ごとに各条件下で必要となる監視精度を確保できるよう対策、工夫することが望ましい。

本研究では、これらの支障となると考えられるいくつかの事象に対して、現地で実施すべきキャリブレーション項目を挙げ、その影響を確認するための検証実験を実施した。

本研究で検証したキャリブレーション項目は以下のとおりである。

- 1) 変状量の検知精度（基本ケース：設計通りの検知ができるかの検証）
- 2) 影や遮蔽物による影響
- 3) ヘッドライトの直射・逆光の影響
- 4) 風の影響
- 5) 日照条件の変化による影響
- 6) ターゲットと同程度の発光物の影響
- 7) リサイズした場合の影響

本研究で検証しなかったが、例えば積雪地の雪の影響などもキャリブレーション項目として想定される。常時監視システムの運用にあたっては現地の状況を踏まえ、適切にキャリブレーション項目を設定し、その影響を把握するのが良いと考えられる。

国土技術政策総合研究所資料
TECHNICAL NOTE of NILIM
No.988 September 2017

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国土技術政策総合研究所 企画部 研究評価・推進課
〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地 電話 029-864-2675