

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（自発光式道路鏡）	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。

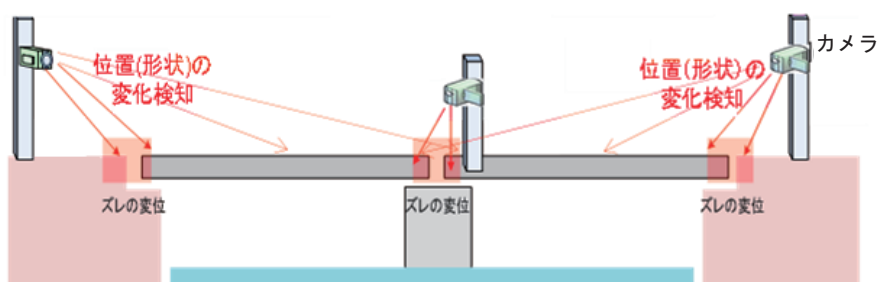


図-3.1.1 常時監視システムにおけるカメラの配置

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。

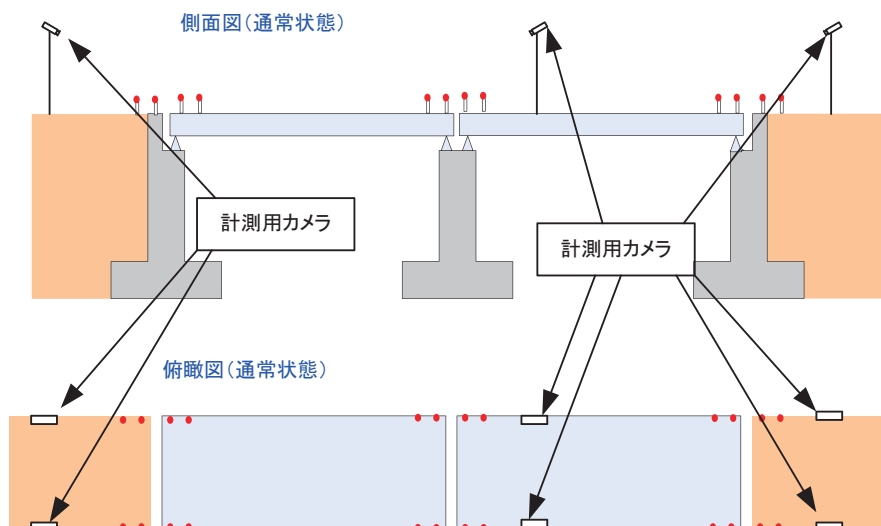


図-3.1.2 カメラ及びターゲットの設置方法イメージ図

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。

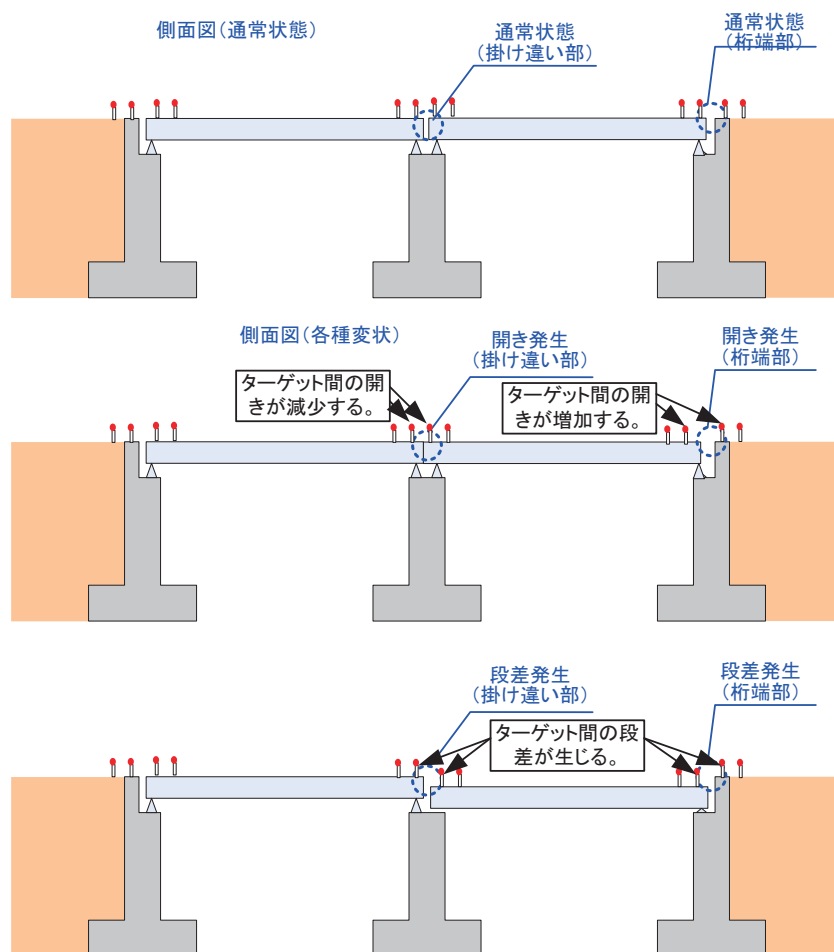


図-3.1.3 開き、段差発生時のターゲットの変位状況イメージ図

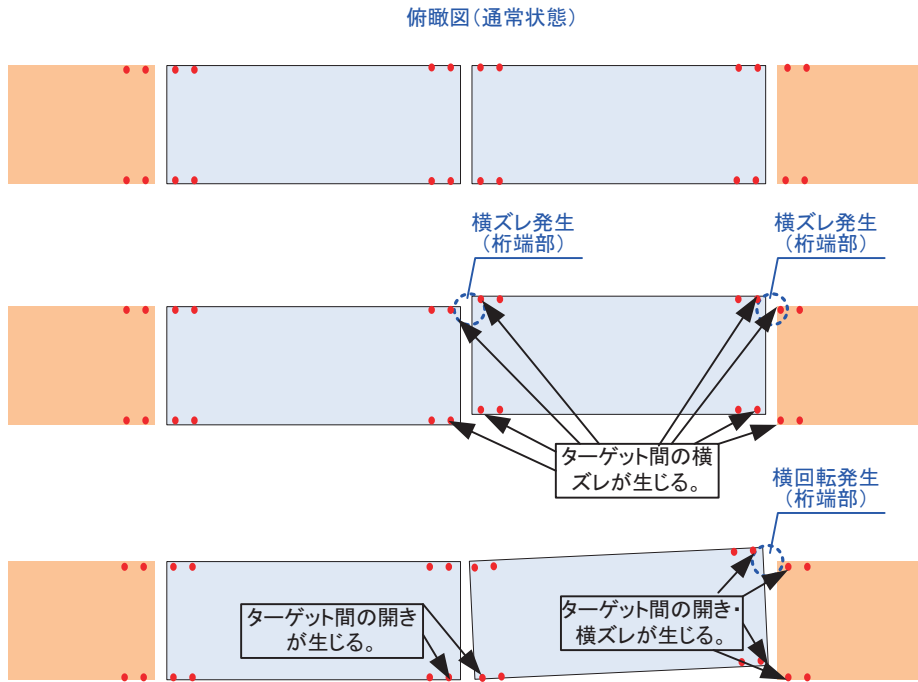


図-3.1.4 横ずれ発生時のターゲットの変位状況イメージ図

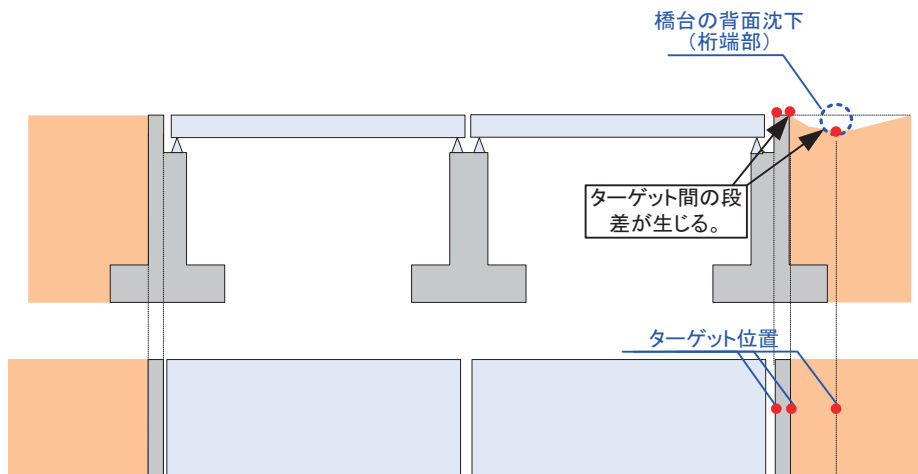


図-3.1.5 橋台の背面沈下発生時のターゲットの変位状況イメージ図

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に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。

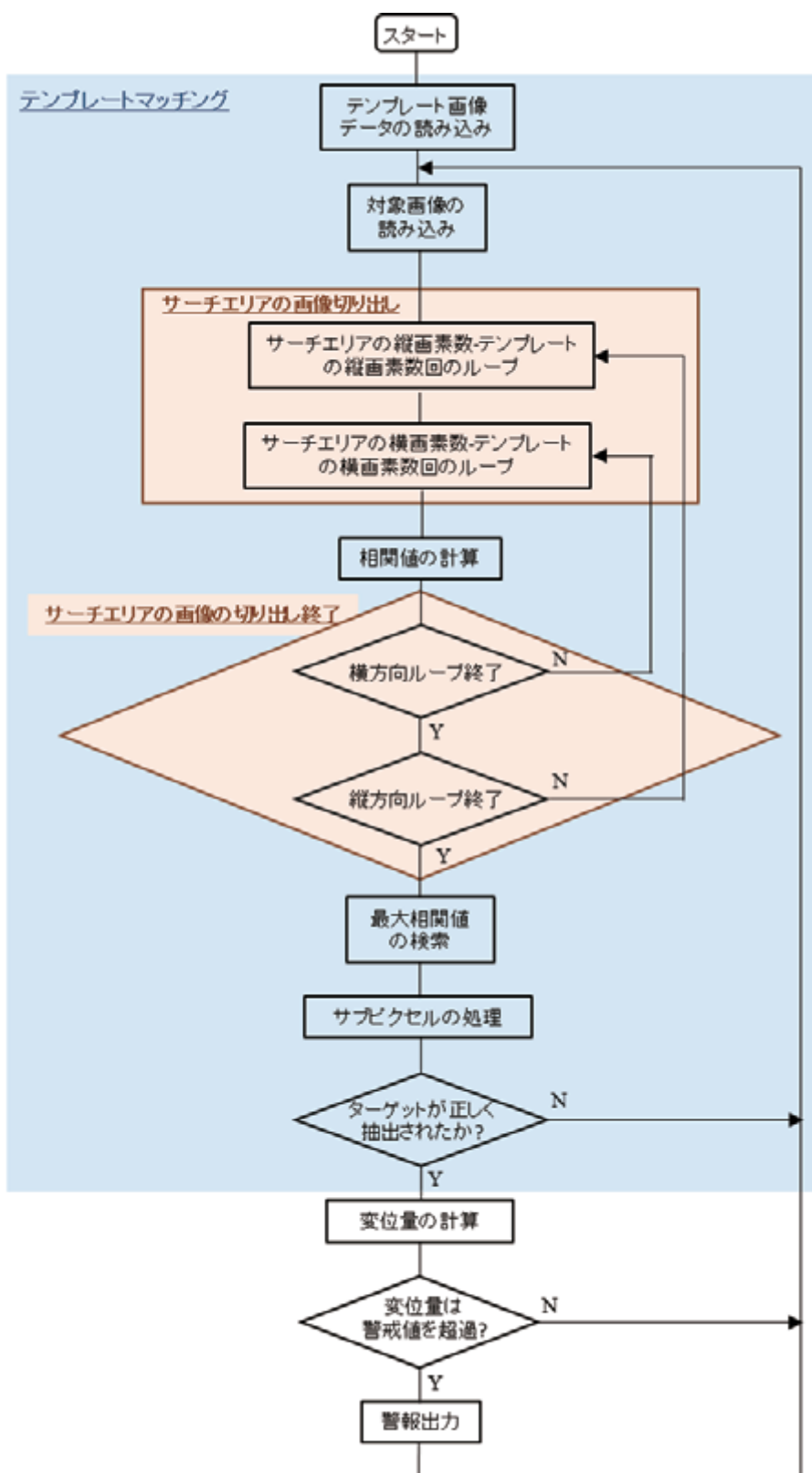


図-3.1.6 画像処理のアルゴリズムの例

(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。

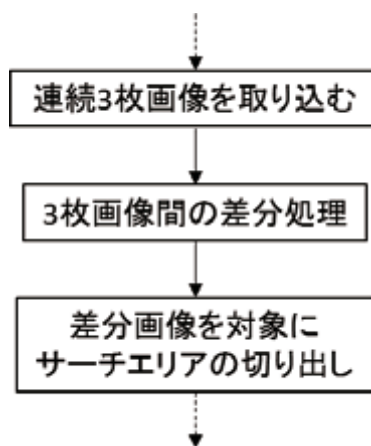


図-3.1.7 差分処理フロー

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。

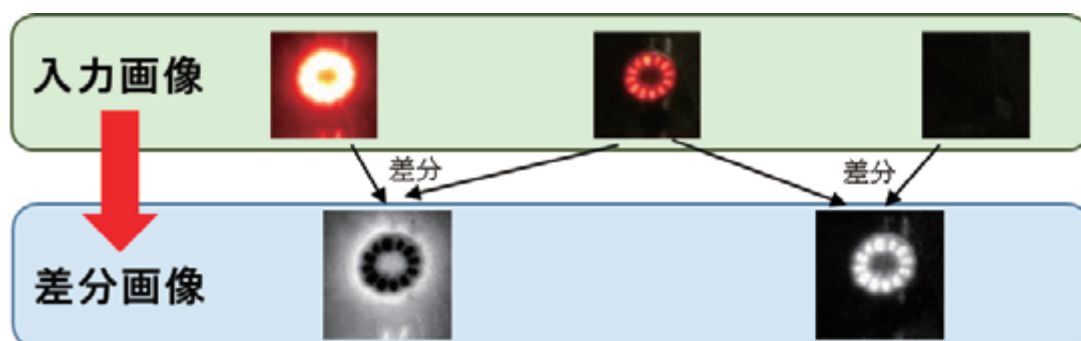


図-3.1.8 中型赤色ターゲット差分処理

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。

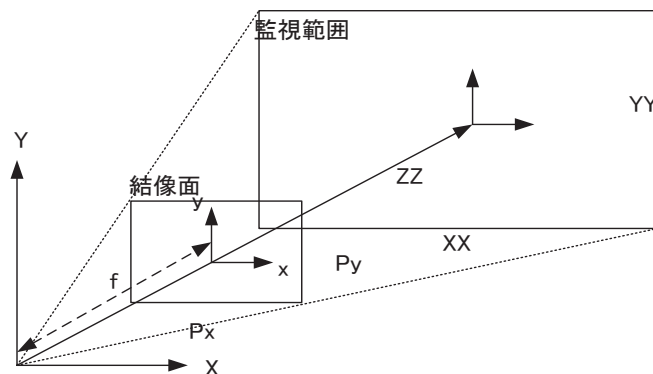


図-3.2.1 カメラの透視モデル

- ・ 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。

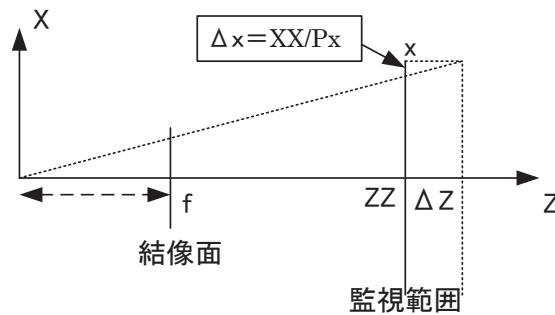


図-3.2.2 カメラの 1 画素の奥方向の幅のモデル

$\frac{\Delta Z}{\Delta X} = \frac{ZZ}{x}$ 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。

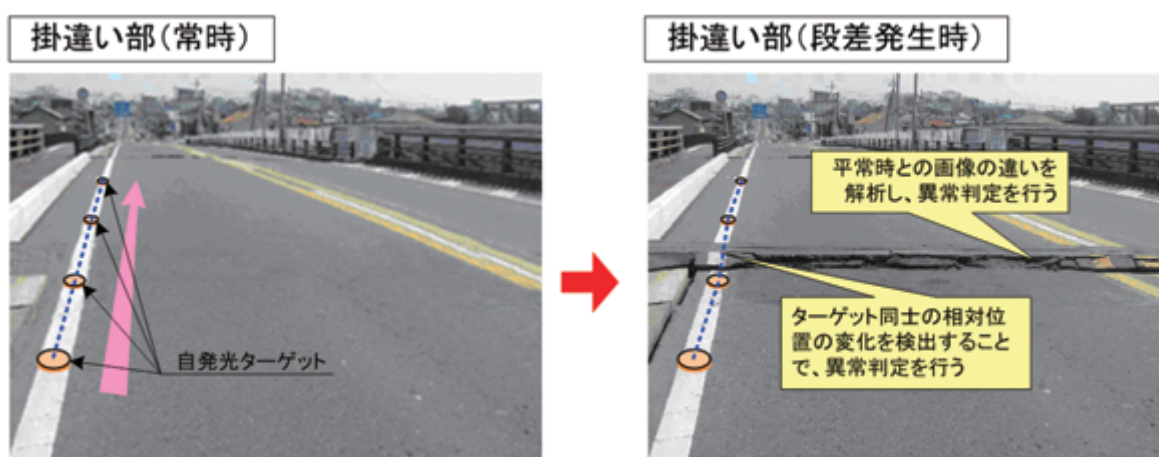


図-3.2.3 道路管理カメラを利用する場合の撮影イメージ

(1) 開き方向 (L 方向) と画面の縦方向 (Y 方向) との関係の整理

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。

計算条件は以下の通りである。

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

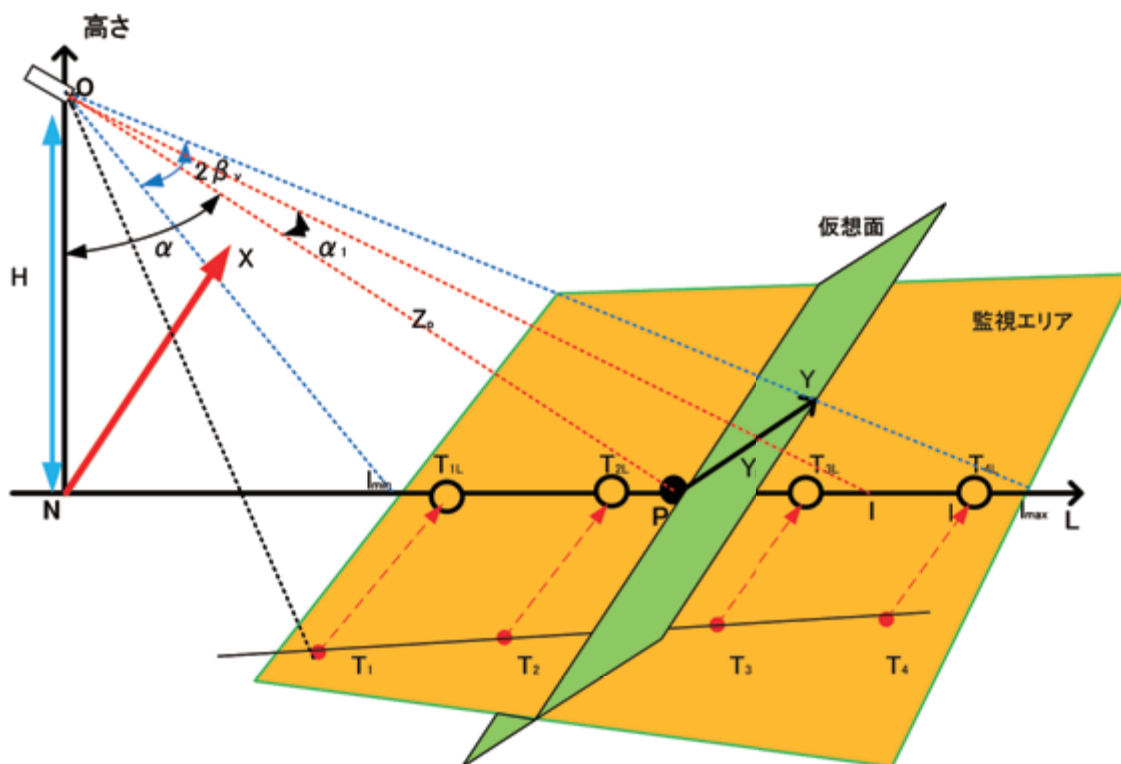


図-3.2.4 L 方向の投影イメージ

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 L とする。

N 点を原点とすると、図-3.2.4 のように、監視エリア (カメラで撮影可能な路面範囲) 内の路面の開き方向 (L 方向) のずれは、画面上の Y 方向に依存し、X 方向と独立しているため、画面上の任意点の L 方向の動きは、その点が地平面でも L 方向に移動したことを意味している。

ここでは、L 線上の点と画面 Y 方向の関係を整理する。

ターゲットは検知対象の変位が予想される部分 (掛違い部) も含め一直線状に設置されていると仮定し、L に投影した各点の位置などの条件は以下の通りとする。

設置高さ : H
 ターゲットの投影点 : T_{1L} ~ 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 : 2β_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 (Y₁)、∠P01 (α₁) 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、Y₁を求めることができる。

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

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

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

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、Y₁ 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、Y₁' は 0 になり、Y_∞ = $\frac{Z_p H}{L_p}$ 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 ($-X_1, X_1$) 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、($-X_1, X_1$) 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、

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

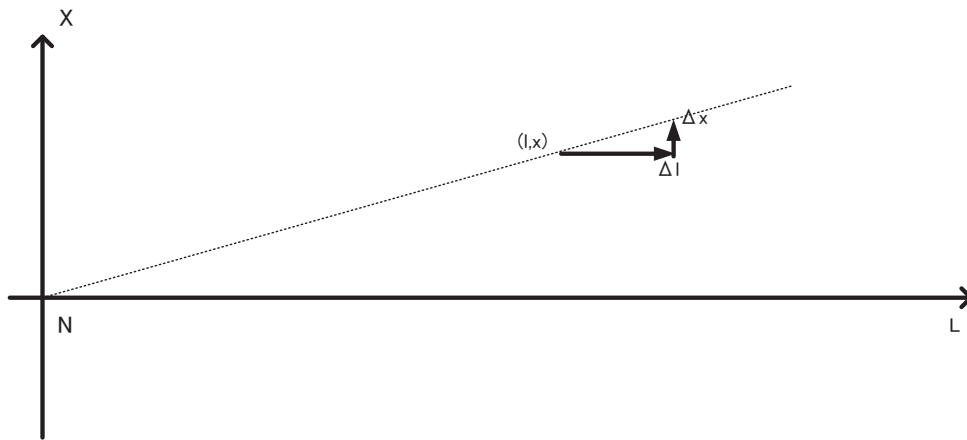


図-3.2.8 監視エリア平面への投影イメージ

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

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

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：

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

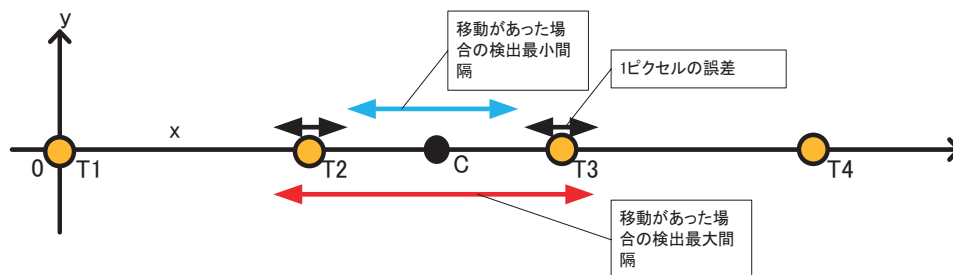


図-3.2.9 開き方向のC点の変位

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。

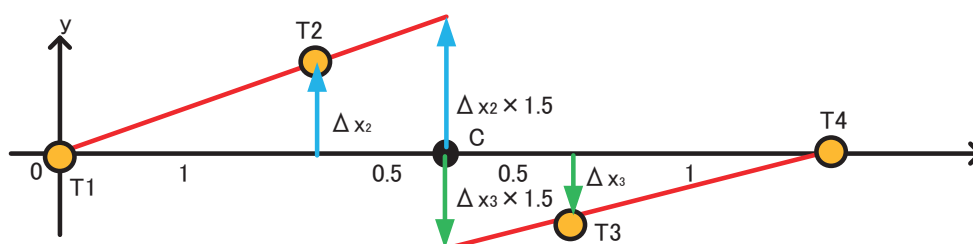


図-3.2.10 横ずれ、段差方向のC点の変位 (T2、T3が移動した場合)

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。

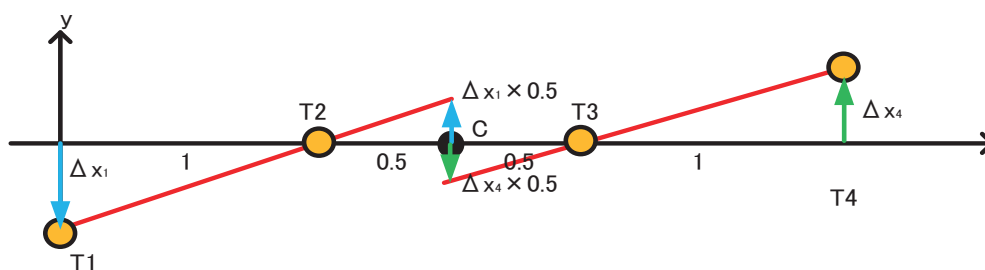


図-3.2.11 T1、T4が移動した場合のC点の変位

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。

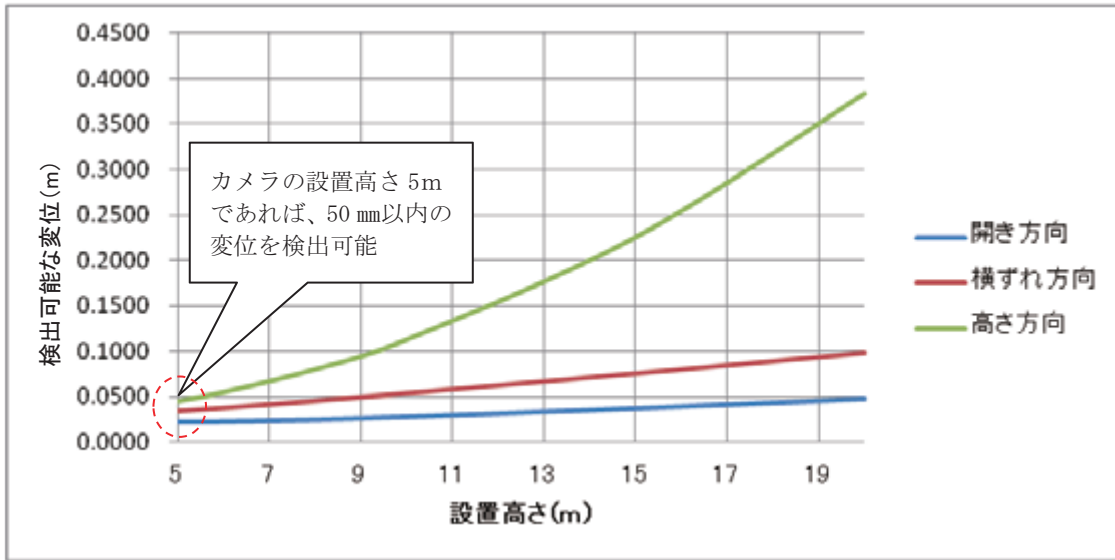


図-3.2.12 カメラの設置高ささと道路管理用カメラの検出可能な変位（横方向画角 44° : 標準画角）

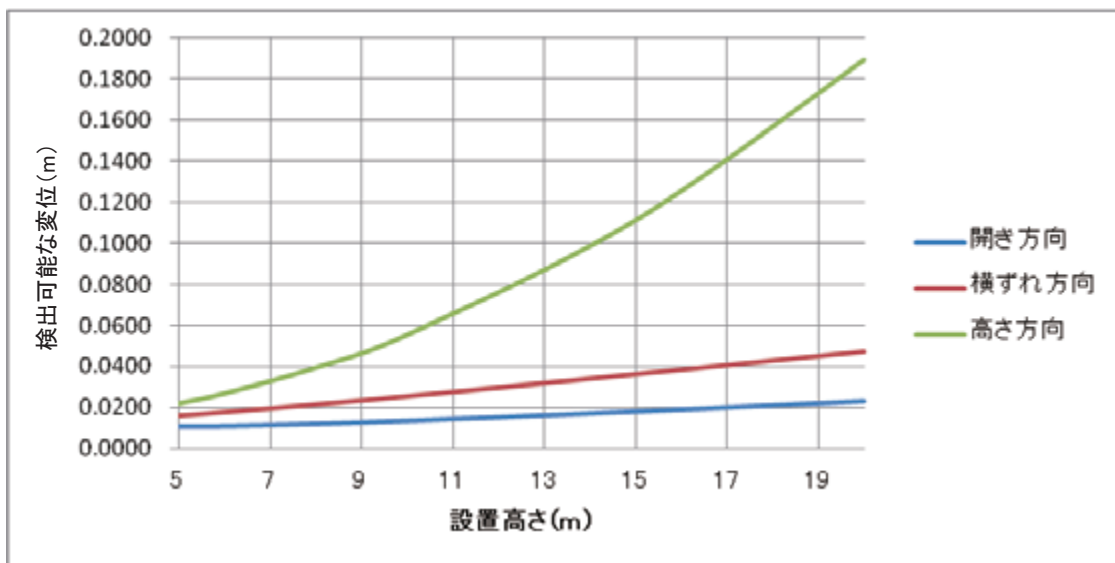


図-3.2.13 カメラの設置高ささと道路管理用カメラで検出可能な変位（横方向画角 22° : ズームした場合）

(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を検出できない。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。

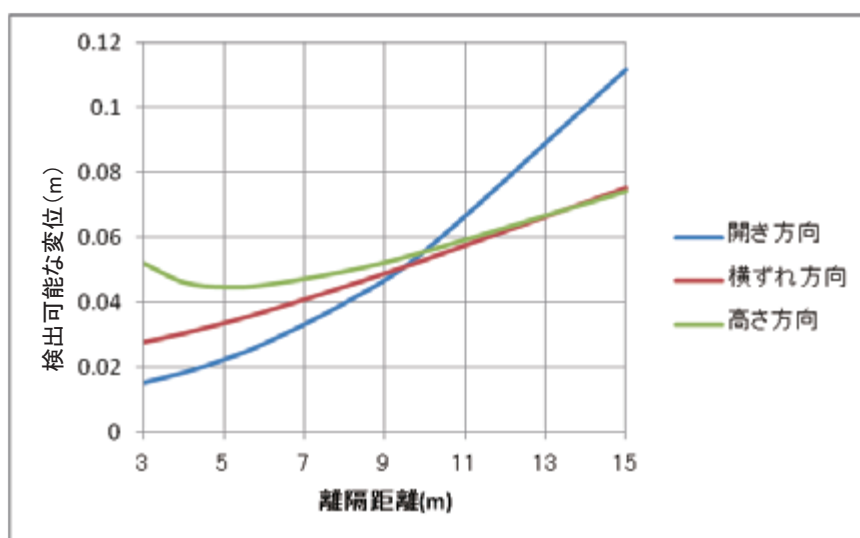


図-3.2.14 離隔距離と道路管理用カメラで検出可能な変位（横方向画角 44°）

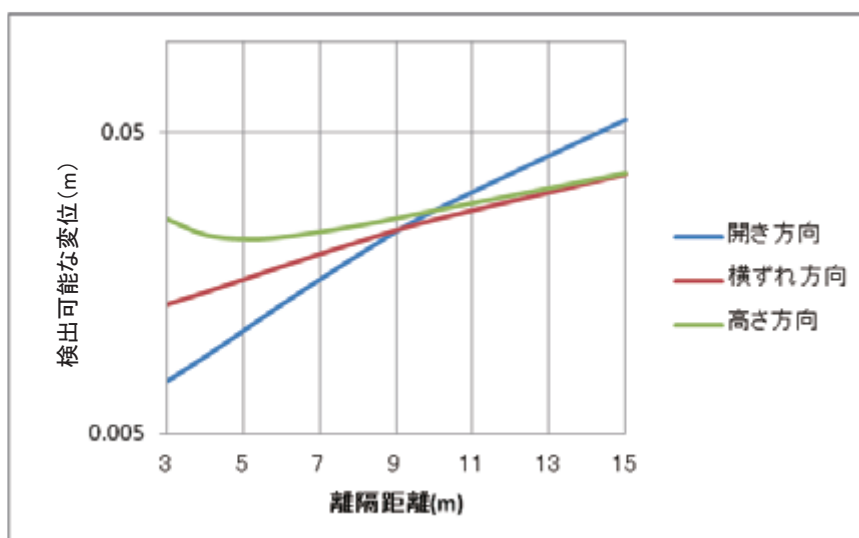


図-3.2.15 離隔距離と道路管理用カメラで検出可能な変位（横方向画角 22°）

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 50 mm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

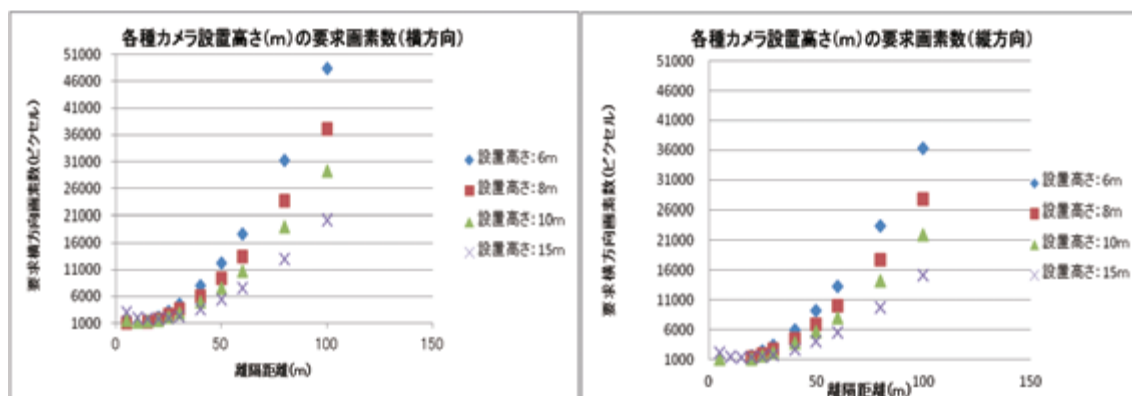


図-3.2.16 各種条件のカメラの要求画素数（段差、横ずれ、開き）
（左図：横方向画素数、右図：縦方向画素数）

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

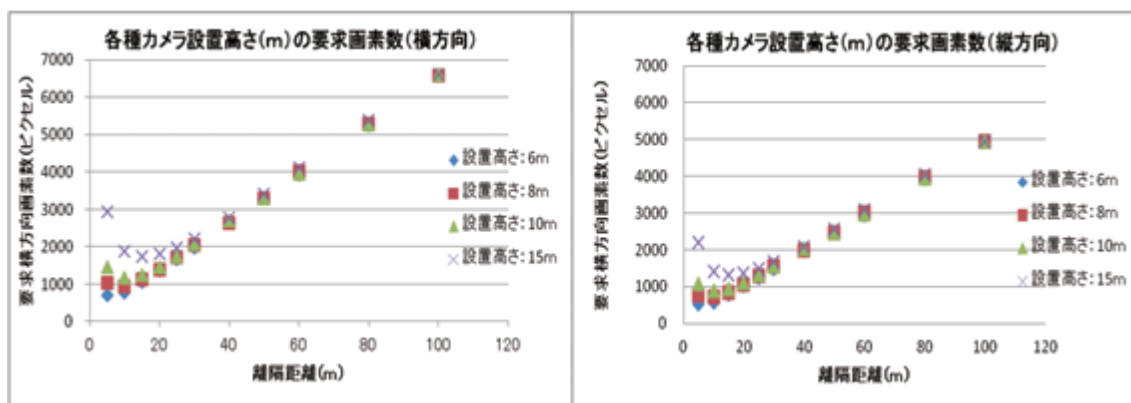


図-3.2.17 各種条件のカメラの要求画素数（段差、横ずれ）

（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。

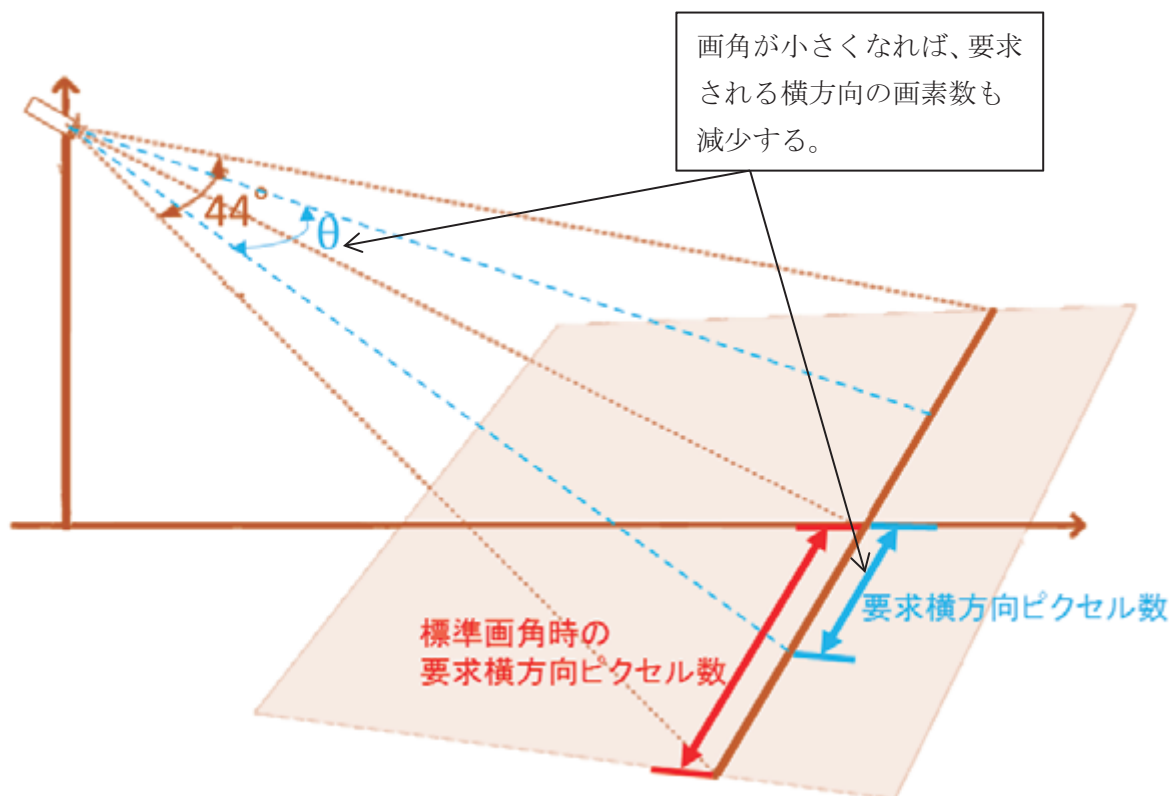


図-3.2.18 要求される横方向の画素数イメージ

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。

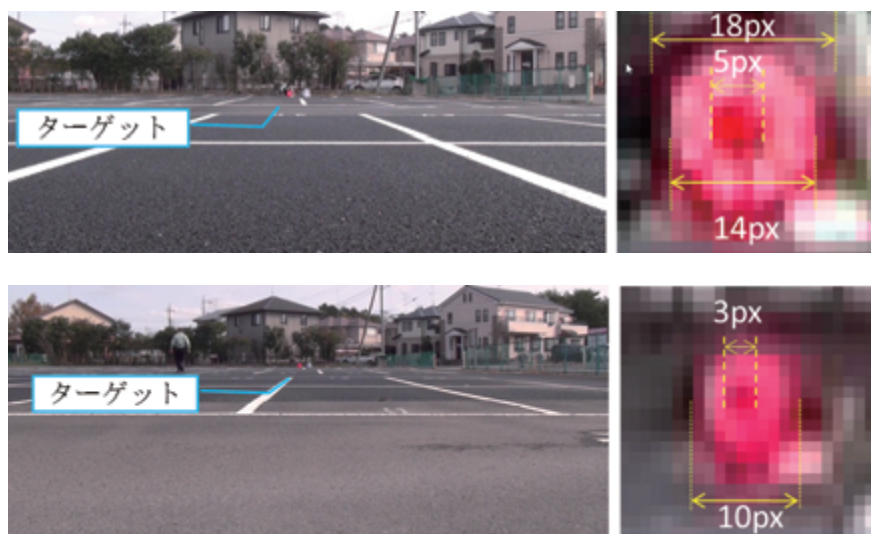


図-3.3.1 ビデオカメラによる自発光ターゲットの実写（上：30m先、下：50m先）

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おり、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。

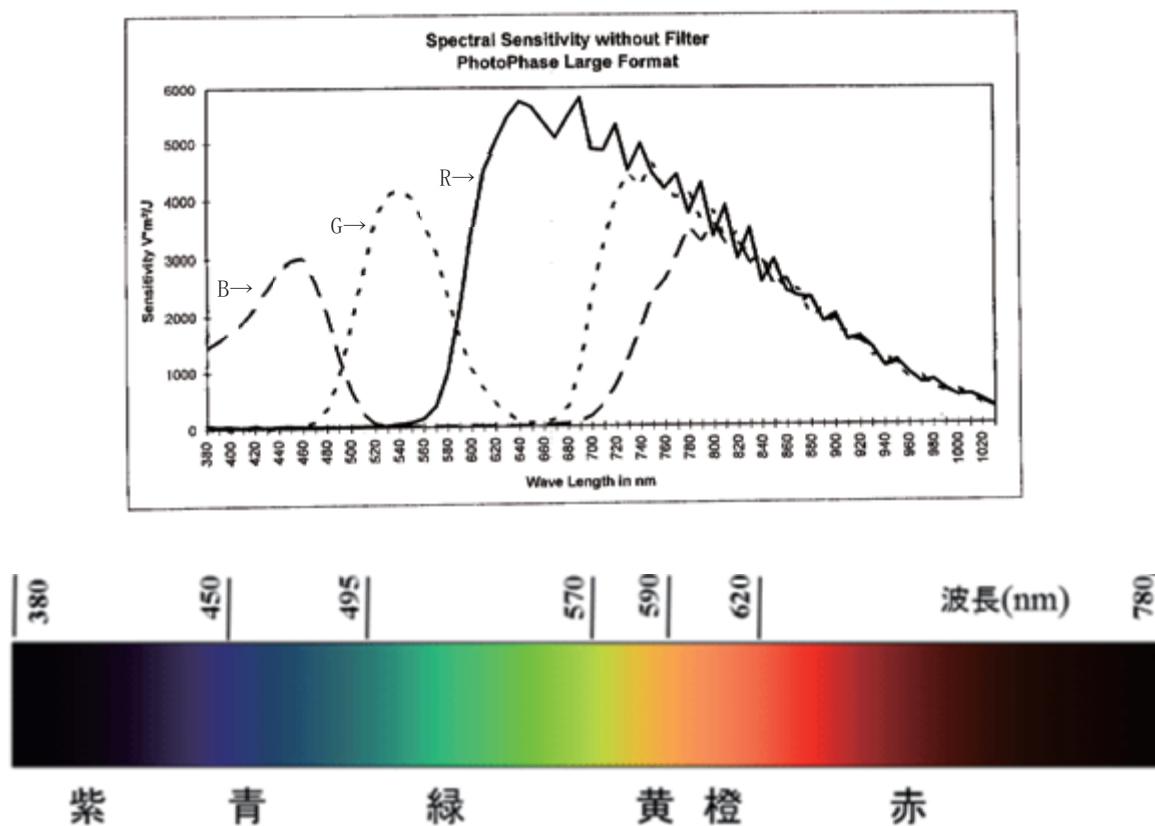


図-3.3.2 カメラ (CCD) の分光感度特性

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




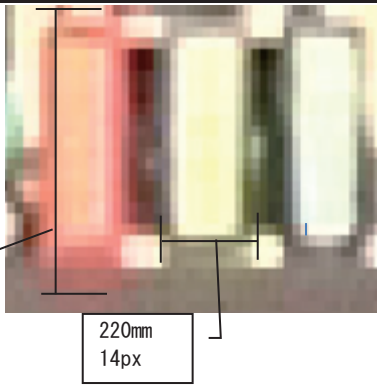

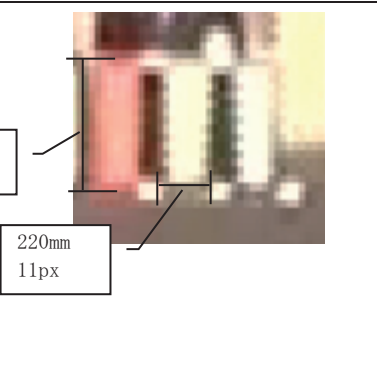

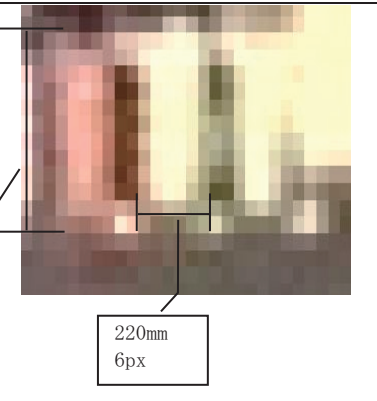
図-3.3.3 撮影に用いたターゲット (450mm×250mm)

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		

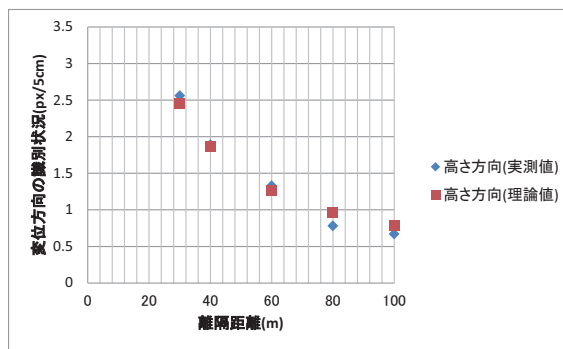
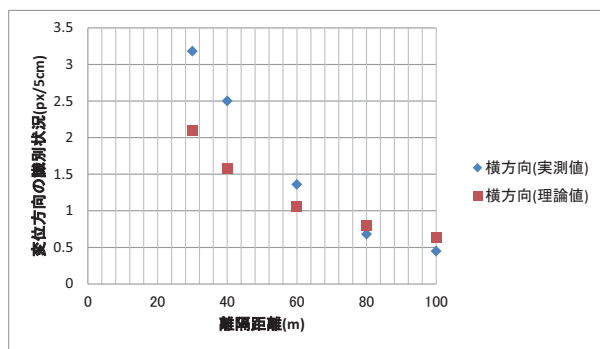


図-3.3.4 離隔距離と各変位方向の識別状況の関係（ハイビジョンビデオカメラ）

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の輝度を変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、駆動電流を変化させ点灯させる(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。

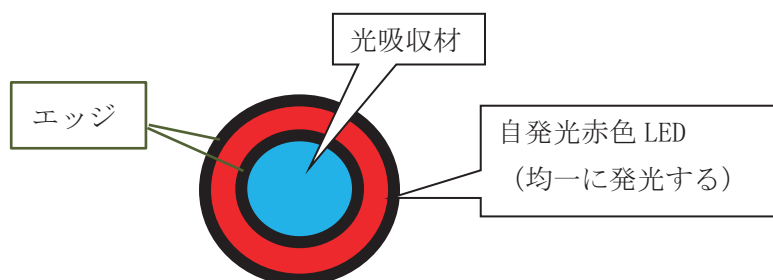


図-3.3.5 常時監視に適したターゲットの形状・色彩の例

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...の順の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。

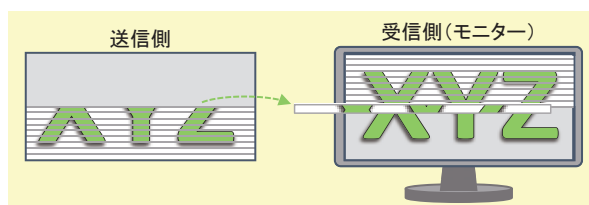


図-3.4.1 画像走査のイメージ

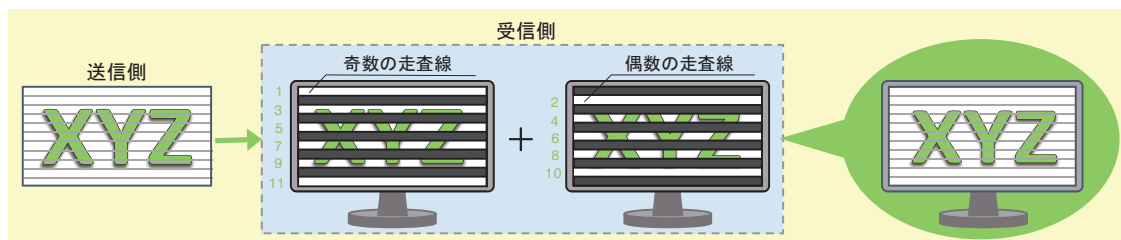
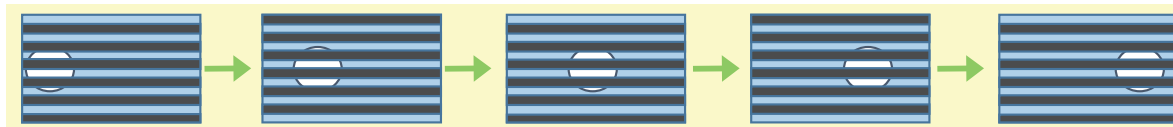


図-3.4.2 インターレースの仕組み



※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。

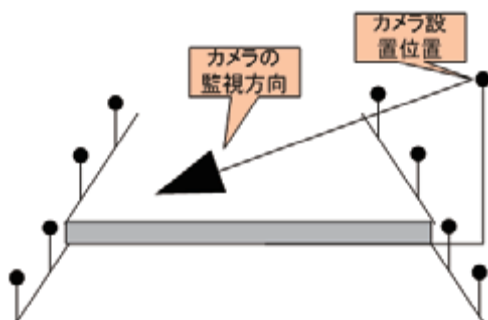


図-3.4.4 カメラ設置位置（橋軸直角方向に監視する場合）

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 (x_1, y_1) と元の位置 (x_0, y_0) 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、 y_1 は y_0 より大きくなることになる。

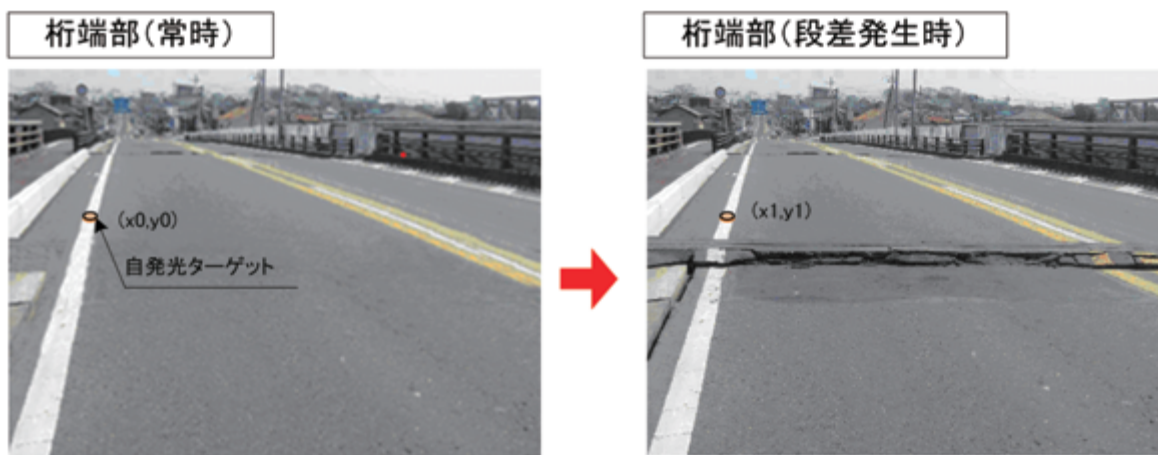


図-3.4.5 カメラが固定の場合の変状の検出方法

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。

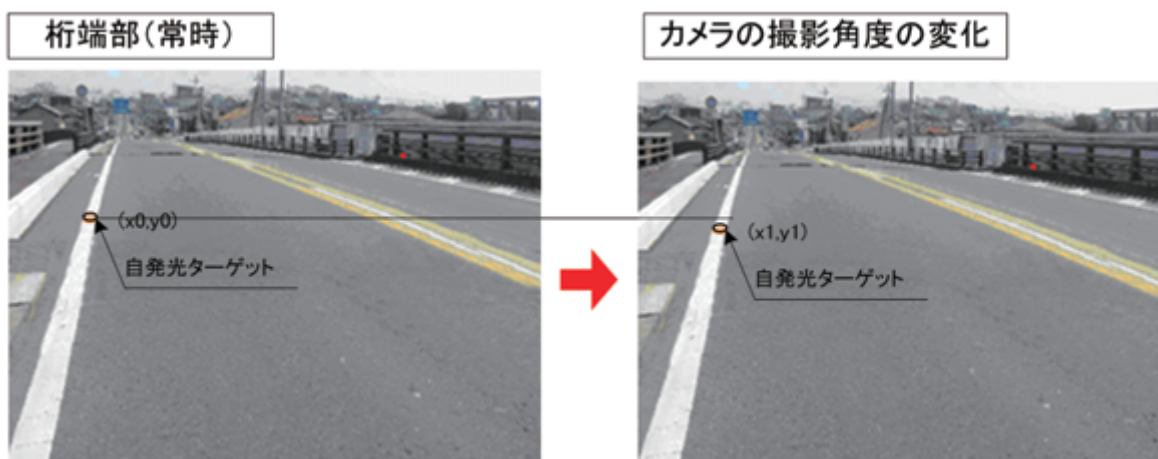


図-3.4.6 カメラの撮影角度を上げた場合

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。

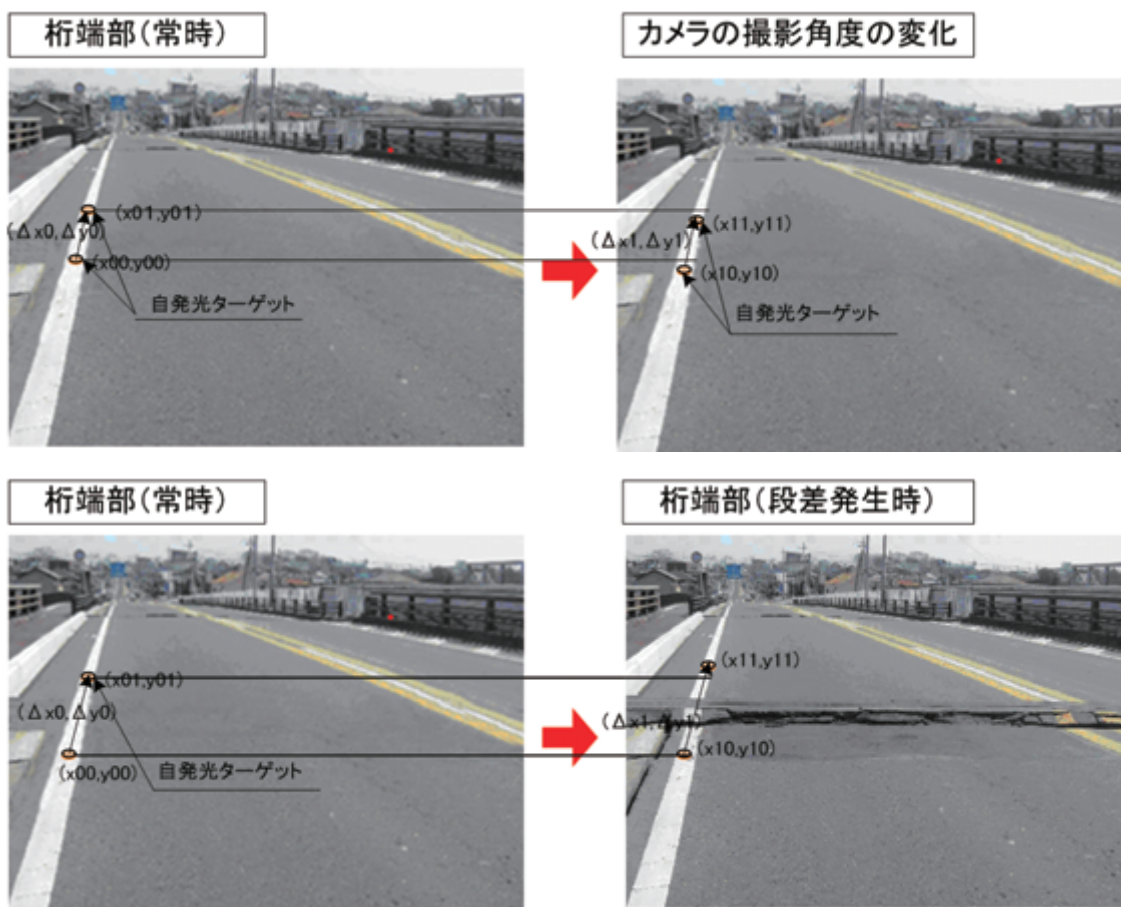


図-3.4.7 カメラの撮影角度が変動した場合のイメージ図

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考えられる。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。

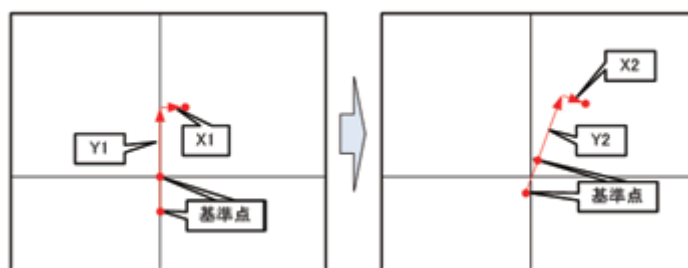
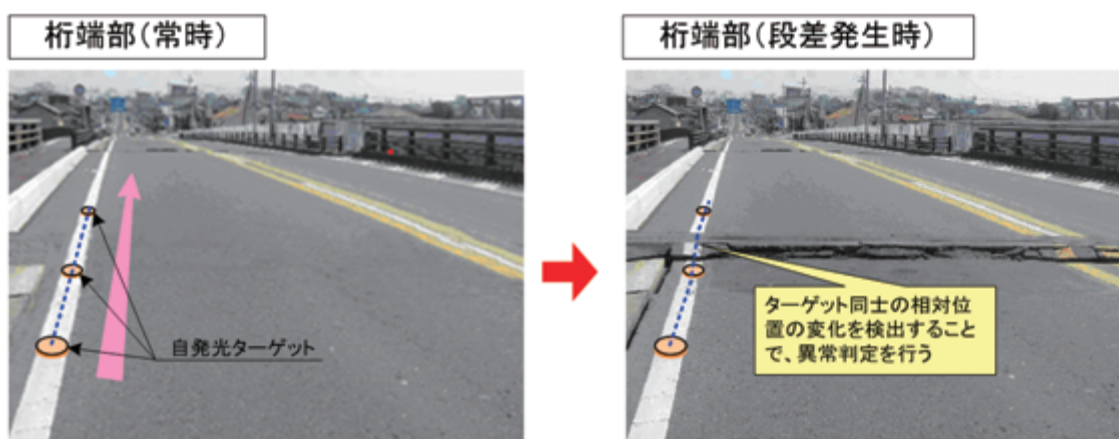


図-3.4.8 位置特定のイメージ (基準点2点の場合)

注：各画像は本検討の説明に用いるため加工している。

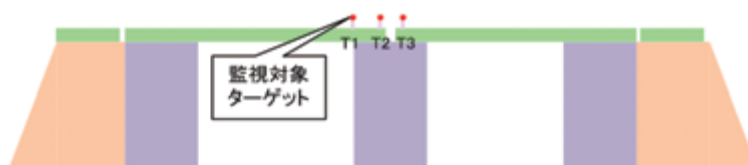


図-3.4.9 ターゲットの配置のイメージ

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できる。

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

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。

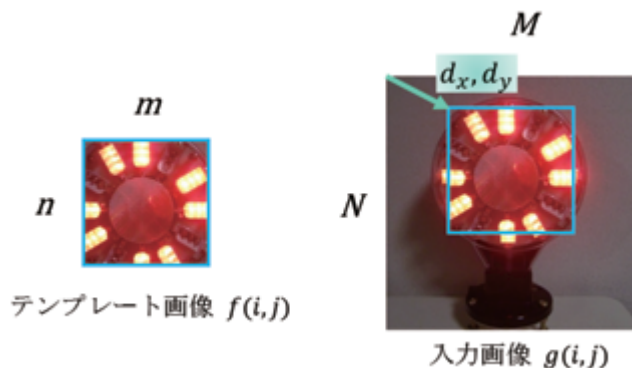


図-3.5.2 正規化相互相関の定義値

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。

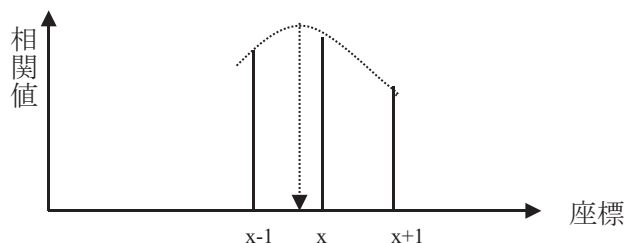


図-3.5.4 サブピクセルの処理による位置の特定イメージ

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。

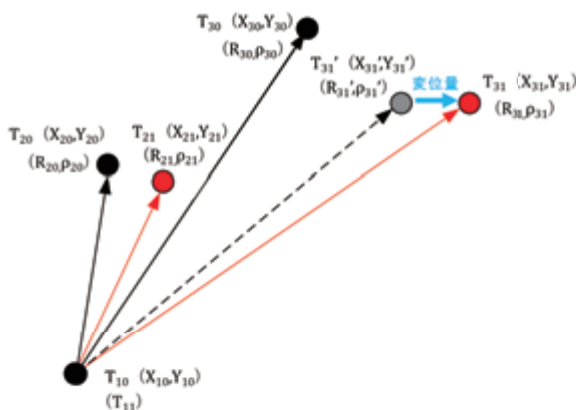


図-3.5.5 複数ターゲットによる相対変位量の抽出イメージ

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・位置決め定番技術～
平成 29 年 1 月 23 日確認 <http://isl.sist.chukyo-u.ac.jp/Members/members.html>