論 文-

多重光源画像を利用した3次元情報の画像計測

波部 斉 $^{\uparrow a)}$ 白水 健介 $^{\dagger \dagger}$ 小林 俊彦 $^{\dagger \dagger}$ 松山 隆司 $^{\dagger \dagger \dagger}$

3D Information Measuring using Multiple Illuminations

Hitoshi HABE^{†a)}, Kensuke SHIROUZU^{††}, Toshihiko KOBAYASHI^{††}, and Takashi MATSUYAMA^{†††}

あらまし 画像計測において、単独の画像では得られない情報を補う手法として、多重画像の利用が広く行われている.その中で、本論文では多重光源画像を用いた二種類の画像計測手法を提案する.多重光源画像を用いた従来手法では,正確な形状計測を行うため,表面の反射特性の厳密なモデル化や大掛かりな装置が必要とされており、実環境への適用は容易ではない.それに対し本論文では、精密なモデルを用いず、多重光源画像での明度変化に着目して計測対象の大まかな3次元情報を計測する手法を提案する.まず第一の手法では、光源位置を変化させたときの画素値の変化からトンネル壁面のひび割れを検出する.第二の手法では、鉄道道床でのステレオマッチングの精度を向上させるために、様々な方向から照明を照射した画像を統合して利用する.本論文ではこれらの手法の原理およびアルゴリズムを述べ、実画像を用いた実験でその有効性を示す. キーワード 多重光源画像,画像計測,ひび割れ、鉄道道床、ステレオマッチング

1. まえがき

複数の画像から得られる情報の統合によって,1枚 の画像では得られない情報を獲得し,画像計測を行う 手法が数多く提案されている[1].図1に示すように, 画像の撮像過程には,カメラ,撮影対象物体,物体を 照射する光源,の3者が介在しているため,それぞれ が変化することで,様々な種類の多重画像が得られる.

カメラと撮影対象物体の間の相対的な位置関係が変 化したとき,その変化量が既知であれば,いわゆるス テレオマッチングの問題となる.また,対象物体を取 り囲むように配置したカメラを用い,対象の3次元形 状を計測する手法も提案されている[2].位置関係の 変化が未知の場合は,多重画像中の特徴点群から,対 象の形状を同時に復元する因子分解法[3]が知られて いる.

カメラ自体の内部パラメータについては,例えば

 [†]京都大学大学院工学研究科,京都市 Graduate School of Engineering, Kyoto University, Yoshida-Hommachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8501 Japan
^{††}西日本旅客鉄道株式会社,大阪市 West Japan Railway Company
^{†††}京都大学大学院情報学研究科,京都市 Graduate School of Informatics, Kyoto University, Yoshida-

Hommachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8501 Japan a) E-mail: habe@media.kyoto-u.ac.jp フォーカスを変化させ,画像に生じるボケから対象ま での距離を計測する手法が提案されている[4],[5].

これらに対し本論文では,もう一つの要素である, 物体を照射する光源の位置を変化させて得られる多重 画像(以下,多重光源画像と呼ぶ)に着目し,多重光 源画像による画像計測手法を提案する.

2. で述べるように,多重光源画像を用いた画像計測 としては,照度差ステレオ法[6]や,光パターン投影 による能動ステレオ法[7]などが知られている.前者 は計測対象物体の反射特性をモデル化して多重光源画 像から対象の形状を計測する手法であり,後者は既知 の光パターンを対象物体に投影して,光源とカメラで 三角測量を行うものである.これらの手法を実環境に 適用する場合,照度差ステレオ法では物体の反射特性 を事前に知ることが困難であり,能動ステレオ法では 処理速度の向上を目指すと装置が大掛かりで高価にな ることが問題となる.

これに対し本論文では,計測対象物体の3次元幾何 形状に起因して多重光源画像で起こる明度変化に着目 し,対象の3次元情報を計測する.先行研究の多くは, 正確な形状の計測を目的とするため,様々な特性の精 密なモデル化が必要であり,実環境への適用を困難に していた.後述のとおり,提案手法は壁面のひび割れ の有無や鉄道道床の異常(崩落など)の有無を判断す

電子情報通信学会論文誌 D Vol. Jxx-D No. xx pp. 1-10 xxxx 年 xx 月



図 1 光源・撮影対象物体・カメラの関係 Fig. 1 Light source, object and camera

ることを目的としており,ある程度大まかな3次元情報が得られればよい.本論文はこの適用目的に即した 現実的な解を示したものである.

提案手法の適用分野としては,鉄道の設備保全にお ける画像計測を想定しており,具体的には,トンネル 壁面のひび割れや鉄道線路における道床の異常を検出 する手法を提案する.これらの異常検出は,鉄道の安 全確保のために必要不可欠であるが,現在までは人間 による目視の検査が広く行われており,機械による自 動検査の実現が求められている.

本論文では,多重光源画像を用いた2種類の画像計 測手法を提案する.第一の手法では,トンネル壁面に 生じたひび割れと,それ以外の汚れでは,光源方向が 変化したときの見え方変化が異なることを利用し,ト ンネル壁面のひび割れ検出を行う.第二の手法では, 鉄道線路のバラストに異なった方向から照明を照射し て得られた画像を用いてステレオ画像計測の安定性を 向上させる.

以降,2.において,先行手法を概観し,提案手法の 特徴を明らかにする.ついで,3.において多重光源と 単一のカメラを用いたトンネル壁面のひび割れ検出手 法を述べ,4.において多重光源とステレオカメラを用 いた鉄道線路道床の異常検出手法を述べる.最後に, 5.でまとめと今後の課題を述べる.

2. 多重光源画像を用いた高精度画像計測

2.1 従来研究

本節では,提案手法の位置づけを明らかにするため に従来行われてきた研究を概観する.まず,多重光源 画像を用いた手法について述べ,次いで,本研究でタ スクとする,ひび割れ検出や鉄道道床の異常検出に関 する先行例を示す.

多重光源画像を用いて画像計測の精度を向上させる 手法は,多重光源によって得られる情報の側面から分 類することができる. まず,通常のステレオカメラのうち一方を光源に置き換える能動ステレオ法は,光パターンによって位置 情報を計測対象物体の表面に付加し,ステレオ画像計 測における対応付け問題の解決を容易にした手法であ る[7].能動ステレオ法ではパターン照射に時間がか かってしまうため,2台のステレオカメラにランダム パターンを照射する光源を加え,対応付けの精度向上 とリアルタイム処理の両立を図った手法(パターン投 影ステレオ法)も提案されている[8]~[10].

一方,物体表面の反射モデルと入射光特性が分かれ ば,画像上で観測される反射光強度から物体表面の 法線方向が限定される、複数の照明を用いることで、 法線方向の曖昧性を減少させ,物体の形状を求める 手法が照度差ステレオ (Photometric Stereo) 法であ る[6].照度差ステレオ法では,通常のステレオ法の ように対応付けの問題を解く必要がないことが大き な利点である.拡張したものとしては,鏡面物体の計 測[11] や, 偏光特性を利用して透明物体の計測を行う 手法 [12],物体間の相互反射を検出するもの [13],反 射特性を形状既知の物体から学習する手法[14]~[16] などが提案されている.光源位置を変化させず,カメ ラを動かして得られる多重画像から鏡面反射成分と拡 散反射成分を分離し,表面の反射特性と光源分布を推 定する手法[17]も同様に物体表面の光学特性を利用し たものと言える.

このように,前者は光源を利用して幾何的情報を付加する手法といえ,後者は光学的制約条件を用いて多 重光源画像からの計測を行うものと捉えることができる.

次に,コンクリート壁面のひび割れ検出をタスクと する先行例としては,2値化処理の閾値を対話的に決 定するもの[18],補間によってサブピクセル精度での 検出を可能としたもの[19],[20],Gray-scale Hough 変換を用いたもの[21] などがあげられる.このように, 様々な試みがなされているが,いずれも画像平面上の 特徴に着目したものである.

最後に,鉄道道床の異常計測については,道床面に 設置したマーカをステレオカメラで撮影し,その3次 元位置を計測するものが提案されている[22].

2.2 提案手法とその特長

このような先行研究に対し,本論文では多重光源画 像における対象物体の見え方の変化を利用して計測精 度および安定性の向上を図る手法を提案する.具体的 なタスクとしては,トンネル壁面や鉄道線路道床での

2

異常検出システムを取り上げる.これら設備保全業務 を行う環境は多岐にわたっており,環境のコントロー ルが必要になる精密な画像計測法は適用できない.そ の一方で,壁面や道床の正確な形状を求める必要はな く,ある程度大まかな形状が分かれば異常の有無は判 断できる.また,このような計測手法を実応用に適用 するためには,装置の簡便さや処理速度も非常に重要 な観点となる.このような中で,我々は以下の2種類 の手法を提案する.

第一の手法は壁面のひび割れを検出するための手法 である.一般的にひび割れは画像上で線のように現れ るため,ステレオマッチングでの形状測定は難しい. また,光源位置を変化させてもひび割れ部分の明度は 変化しないことが多いため,照度差ステレオ法の適用 も困難である.提案手法はこれを逆に利用し,ひび割 れ部分以外では光源位置の変化にしたがって明度が変 化するとし,ひび割れの有無を検出する.2.1であげ た先行例はいずれも2次元画像上の処理を行うもので あったが,本手法はトンネル壁面の3次元形状情報を 利用して検出を行う.本手法は先行例と容易に組み合 わせることができ,相補的な動作による精度向上が期 待される.

第二の手法は,鉄道線路道床の異常(崩落など)を 検出するものである.道床に敷き詰められているバラ ストは,一つ一つはランダムな大きさ・形状をしてい るものの,ある程度の範囲で計測を行うために視野を 広くとった画像では,図13のように繰り返しパター ンに近い画像となる.この場合,ステレオマッチング を行うとマッチング結果が不安定となり、形状計測誤 差が増大する.これに対して提案手法では光源位置を 変化させて得た多重光源画像を用いる. - つ-つのバ ラストはランダムな形状をしているため,光源位置変 化にともない陰影の形状もランダムに変化する.それ らを統合することで,対応付けの精度向上が期待でき る.従来の手法では,複数の光源で陰影の影響を除去 するものが多く見られるが,本手法では逆に,陰影を 積極的に利用して精度向上を図るものである、また、 照度差ステレオで必要な対象物体の反射特性の学習 が提案手法では一切必要ない.さらに,撮影対象のバ ラストがある程度のテクスチャを持っているため,パ ターン投影ステレオ法では投影パターンをそのテクス チャ(バラストの大きさ・形状)にあわせて選択する 必要が生じるが,提案手法ではそのような必要はない.



図 2 物体表面での反射 Fig. 2 Reflection on the surface of an object

3. 多重光源画像を用いたひび割れ検出

本節では,トンネル壁面のひび割れを検出する手法 について述べる.

3.1 基本アイデア

2.2 で述べたように,壁面に生じるひび割れ自体の 形状を正確に求めることは困難である.逆に,異常の ないトンネル壁面の形状を保持しておき,計測不可で あった部分や計測結果が既知の壁面形状と大きく異な る部分をひび割れと判断する手法も考えられるが,ト ンネル壁面の汚れやてかりなどにより,ひび割れのな い壁面(正常な壁面)でも形状計測が不安定となるこ とが考えられる.

先に述べたとおり,このような正確な形状計測は 我々の目的に必須ではなく,ひび割れの有無が分かれ ばよい.そこで,提案手法では,正常な壁面での反射 特性を利用し,多重光源画像でその性質がみられるか 否かでひび割れの有無を識別する.

物体表面での反射モデルは,コンピュータビジョン やコンピュータグラフィックスの分野で良く用いられ ている.代表的なものとして,Phong モデル[23] や, Torrance-Sparrow モデル[24] が知られている.この うち Phong モデルを式で示すと,反射光 I は

$$I = k_{\rm a} I_{\rm a} + I_{\rm i} \left(k_{\rm d} \cos \theta + k_{\rm s} \cos^n \phi \right), \tag{1}$$

と書ける(図2).式中で I_a は環境光強度, I_i は光源から直接入射した光の強度を示し, k_a , k_d , k_s はそれぞれ環境光,拡散反射光,鏡面反射光の反射率を示す. また, θ , ϕ は光源とカメラの位置を示す角度である.

式(1)によると、反射面がカメラで観測できると き、光源の位置を変化させると cos θ および cos φ が 変化し、画像の輝度が変化する.それに対し、ひび割 れ部分では入射光がひび割れの中まで届かないため、 光源の位置を変化させても観測画像の輝度は変化しな いものと考えられる.本手法では、この性質を用いて

3



図 3 ひびが入ったコンクリート板 Fig. 3 A concrete board with a crack

トンネル壁面のひび割れ検出を行う.

3.2 アルゴリズム

図4のように,計測対象の壁面に対し,画像撮影用 の固定カメラと光源を配置し,以下の手順で計測を 行う.

(1) 光源の位置を様々に変化させ, N 枚の画像か らなる多重光源画像 I_i (i = 1, ..., N) を得る.

(2) 画像中の位置 (x, y) における画素値 $I_i(x, y)$ の平均 $a(x, y) = \frac{1}{N} \sum_i I_i(x, y)$ および分 散 $v(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i} (I_i(x, y) - a(x, y))^2$ を求める.

(3) 前節で述べたとおり,ひび割れ領域では輝度 値変化が少ないと考えられるため,適当な閾値 T_v, T_a を用いて, $v(x, y) < T_v$ かつ $a(x, y) < T_a$ である領 域をひび割れ領域であると検出する.

(3)において画素値の平均値にも条件を加えてい るのは,輝度が高いトンネル壁面でなんらかの理由で 分散が小さくなり, 誤検出が発生するのを防ぐためで ある.

3.3 実 騎

本手法の有効性を検証するために,(1)トンネル内 環境を模擬した室内での予備実験と(2)トンネル内の 実環境での実験を行った.以下にその結果を述べる.

3.3.1 室内での予備実験

ひびの入ったコンクリート板を用意し,その表面に つや消しペンキとサインペンによる汚れを付加した (図3).コンクリート板とカメラおよび光源を図4の ように設置し,コンクリート板の法線方向を基準とし, カメラの位置を角度 α で示し, 光源の位置を角度 β で示す.なお,鉛直方向の位置関係は図4(b)に示すよ うに光源の俯角が $\gamma = 10$ 度 になるように設置した.

カメラの角度を固定し,光源の角度 β を変化させて 得られた画像において、ペンキ、サインペン、ひび割 れ,コンクリート壁面の領域で求めた平均輝度値を図 5に示す.この結果をみると,ひび割れ領域では常に



図 4 ひび割れ検出実験での機器配置





Fig. 5 Pixel values of captured images

輝度値が小さくなっているのに対し , ペンキやサイン ペンの領域では輝度値が変化している.

カメラの角度の影響を検証するために,カメラの角 度 α を変化させ,それぞれについて光源の角度 β を 変化させた画像の平均輝度値を求めた結果を図6に示 す.図中には (a) ペンキ, (b) ひび割れ, (c) サインペ ン,(d)コンクリート壁面での求めた平均輝度値を示 している.また,それぞれ,同じαで求めた輝度値を 線で結んでいる.図をみると,カメラ角度 α を変化さ せても輝度値変化の傾向は変わらないことがわかる.

論文 / 多重光源画像を利用した3次元情報の画像計測



最後に,図6のデータから求めた画素値の分散 v(x, y)を図7に示す.図7はペンキ,ひび割れ,サ インペン,コンクリート壁面に分けて,カメラ角度 α と分散 v(x, y)の関係を示している.これをみると, ひび割れ領域の分散が他の領域に比べて小さくなって いることが分かる.ひびや汚れのないコンクリート壁 面では,分散が小さい傾向を示しているが,画素値の 平均値に対する条件で誤検出を抑えることができる.

3.3.2 実環境での実験

次に,トンネルの実環境で提案手法の有効性を検証 するための実験を行った.実験はトンネルA(図8(a)) とトンネルB(図8(b))の2箇所で行い,予備実験と 同じようにトンネル壁面に対するカメラ位置と光源位 置を変化させてひび割れ部とそれ以外の輝度値を比較 した.

まず,トンネルAで撮影した画像の輝度値変化を示 す.図9が図6と同様に光源位置を変化させたときの



(5) 1411101 15









画素値の変化を示したものであり,図 10 が図7と同様に分散を求めた結果である.図 10 は,より詳細な 結果を示すために,図9を求めた箇所以外の2箇所で







図 12 画素値の方畝(トノネル B) Fig. 12 Variance of pixel values(Tunnel B)

求まった分散をあわせて示している.トンネルBについても同様の結果を図11と図12に示す.トンネルB での実験では,一部領域につや消しペンキを付加して, 汚れがひどい状態を模擬している.

これらの結果をみると,3.3.1 で示した予備実験と 同様に,輝度値の分散でひび割れの有無が検出でき, カメラの位置はその結果に大きく影響しないことがわ かる.例外となっているのが,図10に太線で示して いる部分であり,ひび割れ領域に近い分散値を示して いる.これは,図8(a)中央部にある直線状の段差(図 中では(A)で示す部分)に相当する.このようにトン ネル壁面に存在する段差はひび割れと同じような見え 方をするため,本手法のような画像計測では検出が難 しい,その形状の解析などを別途行う必要がある.し かし,大部分のデータについては,提案手法によって 正しく識別が可能であり,本手法の基本的有効性が確



図 13 鉄道道床を撮影した画像 Fig.13 Track ballast



図 14 照明をあてて鉄道道床を撮影した画像 Fig. 14 Track ballast under a spot light

認できた.

4. 多重光源画像を用いた道床形状異常検出

本節では,多重光源画像を用いた道床形状異常検出 手法について述べる.

4.1 基本アイデア

鉄道道床をカメラで撮影すると,図13のような画像 が得られる.この画像上には類似した画像パターンが 多く存在しているため,ステレオマッチングの対応づ けに失敗し,形状計測の誤差が増大すると考えられる.

これに対し提案手法では,光源位置を変化させて得 られた複数の画像を統合することで形状計測精度の向 上を図る.鉄道道床に照明を照射すると,図14のよ うに陰影が生じる.このうち,影(Cast Shadow)の 形状は,照明を遮る部分の輪郭(Occluding Contour) と影が落ちる表面の形状,および光源の位置に依存し, 陰(Attached Shadow)の形状は物体表面形状と光源 の位置に依存する.このように,陰影が生じる様子は 表面の形状と光源の位置に依存している.鉄道道床表 面はランダムな形状をしているため,光源の位置を変 化させると,様々なパターンの陰影が生じると考えら れる.提案手法はこの現象を利用し,様々な方向に光





源を設置して得られた画像での相違度計測結果を統合 し,形状計測誤差の低減を図る.

4.2 アルゴリズム

図 15 のように,計測対象の鉄道道床に対し,ステレオカメラと光源を配置し,以下の手順で計測を行う.

(1) 光源の位置を様々に変化させ,N組の画像からなる多重光源画像対 $I_i^{\rm R}, I_i^{\rm L}$ $(i = 1, \dots, N)$ を得る.

(2) I_i^R と I_i^L のどちらか一方の画像中で計測を
行う領域を定め,その中の注目点 (xp, yp) について
以下の処理を行う^(注1).

(3) 点 $(x_{\rm p}, y_{\rm p})$ と他方の画像との相違度 $D_i(d_{\rm x}, d_{\rm y})$ を求める^(注2).ここで, $(d_{\rm x}, d_{\rm y})$ は2枚の 画像の視差であり,あらかじめ定めた範囲で $(d_{\rm x}, d_{\rm y})$ を変化させた上で,すべてのiに対し $D_i(d_{\rm x}, d_{\rm y})$ を 求める.

(4) 各 (d_x, d_y)で,相違度の平均値

$$D_{\rm avg}(d_{\rm x}, \, d_{\rm y}) = \frac{1}{N} \sum_{i} D_{i}(d_{\rm x}, \, d_{\rm y}),$$
 (2)



を求める.

 (5) D_{avg}(d_x, d_y)を最小とする(d^{min}_x, d^{min}_y)を 求め,あらかじめ求めてあるキャリプレーションデー タから得られる奥行きを(x_p, y_p)での観測値とする.
(6) 全ての注目点で求まった観測値と,前もって 計測しておいた奥行きデータを比較し,道床の異常の 有無を判断する.

一枚の画像では相違度に顕著な最小値が見られない ことが考えられるが,光源位置を変えた複数の画像で 求まった相違度を統合することで,最小値を安定して 導出可能になると期待される。

ここで,離れた位置にある3個の光源で RGB それ ぞれの成分を照射するようにし,得られた画像を各成 分に分解すれば,一度の撮影で3枚の画像を同時に得 ることができる.次節に述べる実験では,その考え方 に基づく手法の評価も行う.

4.3 実 験

本手法の有効性を検証するための実験を行う.以降の 実験では $D_i(d_x, d_y)$ は着目位置を中心にする 19×19 のプロックで計算された SSD とした.また,供試画 像はあらかじめ平行化しておき (d_x^{\min}, d_y^{\min}) の探索は 対応する水平線上で1 画素ずつ d_x を変化させて行っ た.また,光源とカメラは図 15 のように設置した.

まず,多重光源画像の枚数,すなわち,光源の個数 と奥行き計測精度との関係を評価した.本実験では3 個の光源を配置し,4.2に示したアルゴリズムで視差 を求めた.画像中の100点について,あらかじめ求め ておいた正しい奥行きと,視差計測結果から求めた奥 行きとの差の平均値を図16に示す.図中には,単色の 光源を3台用いた場合と,前節に述べたように RGB 3色の光源を配置し,撮影したカラー画像を分解して 用いた場合をあわせて示している.RGB 成分の分解

7

⁽注1):計測領域およびその中での注目点の選び方は計測環境などに応じて決定する.

⁽注2): 任意の尺度を相違度とできるが,本論文での実験では相違度と して SSD (Sum of squared difference)を用いた.



図 17 RGB カラー画像から分解した画像 Fig. 17 Decomposed images from a RGB color image

結果を図 17 に示す.図16の横軸は処理に利用した光源の個数を示しており、いずれの光源を用いた場合でも、光源の個数の増加に従って誤差が低減されていることがわかる.

さらに,提案手法の有効性を示すために,水平方向 の視差 d_x の変化に対する $D_{avg}(d_x, d_y)$ (以下,平 均相違度と呼ぶ)の変化の様子を図 18 に示す.図の 横軸が d_x に対応しており,このデータでは $d_x = 505$ で平均相違度が最小となるのが正しい.図の縦軸は, $d_x = 505$ での平均相違度を基準に正規化した値であ る.図をみると,光源数が1のときは $d_x < 550$ で縦 軸が1より小さくなっており,これだけでは最小値の 探索に失敗する.それに対して,光源数を増やすこと によって,先鋭な最小値が見られるようになる.すな わち,多重光源画像を用いることで,ステレオマッチ ングの精度が向上していることが分かる.

5. ま と め

本論文では,多重光源画像を用いた画像計測手法を 提案した.従来の画像計測は,計測対象の特性の精密 なモデル化によってその形状を計測するものがほとん どであったが,実環境への適用を考えたときにはモデ ルの妥当性やモデル生成にかかるコストが問題となる. それに対し提案手法は,計測対象の3次元形状に起因 して多重光源画像に現れる見え方の変化に着目して計 測対象の3次元情報を計測し,壁面のひび割れ検出や 鉄道道床の異常検出を実現する.このように本論文は, 従来あまり例がなかった,計測対象の3次元形状を積





極的に利用した多重光源画像による画像計測を提案したものである.本論文では,具体的な2つのタスクに 焦点をあてたが,その他の応用にも同様の考え方が適 用可能であると期待される.

提案手法はその性質上精密な精度評価を行うことが できないが,実験環境および実環境での評価実験から その有効性が実証された.今後は,最適な光源位置や 光源数を求めるための評価などが課題として挙げら れる.

提案手法の応用分野としては,鉄道における保全業 務の効率化を想定している.現状では,目視による検 査が主流であるが,本手法が人間の判断の助けになる と期待される.保全業務を考えたとき,検出処理は撮 影後オフラインで行っても良いが,画像の撮影は移動 撮影車などを用い,最低でも時速2km程度の速度で 移動しながら行う必要があると考えられる[25].提案 手法は、同一のカメラ位置に対して複数の光源位置で の画像を得る必要がある.4.で述べた道床の異常検出 では,カラー光源によって多重光源画像を一度に撮影 できるが,3.のひび割れ検出では多くの光源位置での 画像が必要になるため,(1)撮影車上でカメラを動か し,壁面に対して相対的に静止させて撮影する,(2) 移動するカメラで撮影した画像間の対応付けをとる, などの対応が必要になる.また,ひび割れ検出に関し ては2.1に示したように画像の見えに基づく手法が数 多く提案されている.提案手法はこれらと異なる情報 を用いて検出を行うため,互いに相補的に働くことが 期待される.統合の手法など,システム構築に向けた 検討も今後の課題となる.

謝辞

本研究の一部は, 文部科学省プロジェクト「知的資 産の電子的な保存・活用を支援するソフトウェア技術 基盤の構築」における研究開発課題「大型有形・無形 文化財の高精度デジタル化ソフトウェアの開発」の補 助を受けた.

献

文

- [1] 松山, 井宮, 久野(編): "コンピュータビジョン: 技術評論 と将来展望", 新技術コミュニケーションズ (1998).
- [2] T. Matsuyama, X. Wu, T. Takai and S. Nobuhara: "Real-time 3d shape reconstruction, dynamic 3d mesh deformation, and high fidelity visualization for 3d video", Computer Vision and Image Understanding, 96, pp. 393–434 (2004).
- [3] C. Tomasi and T. Kanade: "Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method", International Journal of Computer Vision,

9, 2, pp. 137–154 (1992).

- [4] S. Nayar and Y. Nakagawa: "Shape from focus", PAMI, 16, 8, pp. 824–831 (1994).
- [5] N. Asada, H. Fujiwara and T. Matsuyama: "Edge and depth from focus", IJCV, 26, 2, pp. 153–163 (1998).
- [6] R. Woodham: "Photometric method for determining surface orientation from multiple images", OptEng, 19, 1, pp. 139–144 (1980).
- [7] 田村(編): "コンピュータ画像処理", オーム社 (2002).
- [8] 橋本,羽下,鷲見: "低解像度距離画像と濃淡画像を用いた物体移載ロボット用視覚",信学論,J84-D-II,6,pp. 985-993 (2001).
- [9] S. B. Kang, J. Webb, C. Zitnick and T. Kanade: "A multibaseline stereo system with active illumination and real-time image acquisition", Proceedings of the Fifth International Conference on Computer Vision (ICCV '95), pp. 88–93 (1995).
- [10] A. Koschan, V. Rodehorst and K. Spiller: "Color stereo vision using hierarchical block matching and active color illumination", ICPR96, Vol. I, pp. 835– 839 (1996).
- [11] K. Ikeuchi: "Determining surface orientations of specular surfaces by using the photometric stereo method", PAMI, 3, 6, pp. 661–669 (1981).
- [12] D. Miyazaki, M. Kagesawa and K. Ikeuchi: "Transparent surface modeling from a pair of polarization images", IEEE Trans. PAMI, 26, 1, pp. 73–82 (2004).
- [13] 眞鍋, 佐藤, 井口: "光源移動による相互反射の検出", 信学 論 D-II, **J78-D-II**, 1, pp. 86-93 (1995).
- [14] R. J. Woodham: "Gradient and curvature from the photometric-stereo method, including local confidence estimation", J. Opt. Soc. Am. A, **11**, 11, pp. 3050–3068 (1994).
- [15] 河中,岩堀,ロバートJ.,舟橋: "ニューラルネットワーク によるカラー照度差ステレオと仮想画像生成",電子情報 通信学会論文誌, J89-D, 2, pp. 381–392 (2006).
- [16] 富田,金子,本多: "カラー照度差ステレオによる3次元 形状の復元", 情処研報 CVIM,第 1992 巻, pp. 115-120 (1992).
- [17] K. Nishino, Z. Zhang and K. Ikeuchi: "Determining reflectance parameters and illumination distribution from a sparse set of images for view-dependent image synthesis", ICCV, Vol. 1, pp. 599–606 (2001).
- [18] 河村,宮本,中村,佐藤: "対話型遺伝的アルゴリズムに よるデジタル画像からのひび割れ抽出",土木学会論文集, VI-60,742, pp. 115-131 (2003).
- [19] 鵜飼,真部:"広ダイナミックレンジ連続走査画像によるトンネル変状検出画像処理",電子情報通信学会 2005 年総 合大会講演論文集, pp. D-11-128 (2005).
- [20] 伊藤,橋本: "コンクリート表面に発生するひび割れの画像計 測",第 14 回外観検査の自動化ワークショップ VIEW2002, pp. 61-66 (2002).
- [21] 山口,橋本: "Gray-scale hough 変換を用いたコンクリート表面のひび割 れ検出",情処研報 CVIM,第 2004 巻,

pp. 57-64 (2004).

- [22] "鉄道道床変位自動検知システム",三井建設ニュースリリース(http://www.smcon.co.jp/news/0110m_03.html) (2001).
- [23] B. T. Phong: "Illumination for computer generated pictures", Commun. ACM, 18, 6, pp. 311–317 (1975).
- [24] K. Torrance and E. Sparrow: "Theory for off-specular reflection from roughened surfaces", Journal of Optical Society of America, 57, pp. 1105–1114 (1967).
- [25] 藤井: "土木構造物検査に使用する検査機器(4)-トン ネル(2)トンネル覆工表面撮影車 ----",日本鉄道施設協 会協会誌,42,4, pp. 56-59 (2004).

(平成 xx 年 xx 月 xx 日受付)



波部 斉 (正員)

1997 京大・工・電気工学第二卒.1999 同大大学院・工・電子通信工学専攻修士課程 修了.同年三菱電機(株)入社.2002 京都 大学学術情報メディアセンター助手.現在, 同大大学院工学研究科電子工学専攻助手. コンピュータビジョン,3次元映像メディ

アの撮影・伝送・表示に関する研究に従事. IEEE Computer Society,情報処理学会会員



白水 健介

1999 年東京理科大学理工学部土木工学 科卒.同年西日本旅客鉄道株式会社入社. 福岡工務所,技術部を経て現在,神戸新幹 線保線区にて軌道管理業務に従事.



小林 俊彦

1990 年長岡技術科学大学・工・建設工学 課程卒業.1992 年長岡技術科学大学大学 院・工・建設工学専攻修士課程修了.1992 年西日本旅客鉄道株式会社入社.土木学会 会員.

松山隆司(正員)

1976年京大大学院修士課程修了.京大助 手,東北大助教授,岡山大教授を経て1995 年より京大大学院電子通信工学専攻教授. 現在同大学院情報学研究科知能情報学専攻 教授.2002年学術情報メディアセンター 長,京都大学評議員.2005年情報環境機

構長.工博.画像理解,人工知能,分散協調視覚,3次元ビデ

オの研究に従事.最近は「人間と共生する情報システム」の実現に興味を持っている.1980年情報処理学会創立20周年記念 論文賞,1990年人工知能学会論文賞,1993年情報処理学会論 文賞,1994年電子情報通信学会論文賞,1995年第5回国際コ ンピュータビジョン会議 Marr Prize,1996年国際パターン認 識連合 Fellow,1999年電子情報通信学会論文賞,2000年画 像センシングシンポジウム優秀論文賞,2004年FIT優秀論文 賞.情報処理学会元理事. **Abstract** Although an image does not contain enough information with regards to the image measuring, we can perform accurate image measuring methods such as shape-from-X techniques by incorporating multiple images. In this paper, we propose two image measuring methods for the train track maintenance which employ multiple illuminations for improving the precision of measurements. The first method detects a crack on a concrete wall. In the method, we examine the variance of intensities of multiple illumination images. In the latter method, we improve the accuracy of stereo matching by incorporating multiple illumination images. Experimental results show the effectiveness of these methods.

Key words Multiple Illuminations, Image Measuring, Crack, Ballast Track, Stereo Matching,