

ズームレンズ付き単眼カメラを用いた絶対スケール3次元計測技術

Absolute-Scale Three-Dimensional Measurement Technology Using Monocular Camera with Zoom Lens

三島 直 MISHIMA Nao 関 晃仁 SEKI Akihito

インフラ点検などの現場では、保全作業の効率化や安全性向上のために、高所や斜面などの危険な場所に近づかないで、対象物のサイズを計測したいというニーズがある。しかし従来は、単眼カメラのような簡易な機器だけでは、相対スケールの3次元計測しかできなかった。

東芝は、ズームレンズやオートフォーカスで撮影した単眼カメラの画像だけから、絶対スケールの計測ができる世界初^(注1)の3次元計測技術を開発した。市販の単眼カメラの多視点画像から求めた相対的な奥行きに、画像に含まれるぼけ情報を組み合わせることで、絶対スケールの3次元計測を可能にした。特殊な機器は不要であり、遠隔から単眼カメラで撮影した数枚の写真だけを用いて、撮影位置や焦点距離などの既知情報がなくても、対象部分のサイズを計測できる。

Toshiba Corporation has developed the world's first technology that can achieve absolute-scale three-dimensional (3D) measurements solely from images taken by a commercially available monocular camera with a zoom lens or with autofocus under different conditions.

Conventionally, images taken by a monocular camera can only be used for relative-scale 3D measurements. However, our newly developed technology makes it possible to provide absolute values by means of relative depth information obtained from images taken by a monocular camera from multiple viewpoints in combination with blur information contained in the captured images. As a result, this technology is expected to be applied to infrastructure inspections in order to facilitate measurements of part sizes for repairs from several images without requiring any prior size information or special devices and without the need for access to dangerous, difficult-to-inspect areas such as high places and inclines.

1. まえがき

社会インフラの長期的な安定稼働のため、インフラ保全の重要性が高まっている。特に国内では、高度経済成長期に整備された道路や、橋、トンネルなどの老朽化が急速に進んでいることに加え、作業員の高齢化や人手不足といった問題があり、安全で効率的なインフラ保全が求められている。

限られた人員や予算で効率的にインフラ保全を実施するには、優先度を付けたメリハリのある保全計画が必要である。優先度の決定には補修対象部分のサイズの計測が有効だが、高所や斜面などの危険な場所では近づくことが難しい。離れた場所から撮影した写真だけでサイズを計測できれば、人が近づく必要がなく、作業を安全で効率的に実施できる。しかし、これまでのカメラや画像認識技術では、相対スケールのサイズの計測しかできなかった。

そこで、ズームレンズ付き単眼カメラの多視点画像から求めた相対的な奥行きに、画像に含まれるぼけ情報を組み合わせ、絶対スケールでの計測が可能な世界初の3次元計測技術(図1)を開発した⁽¹⁾。この技術により、インフラ点検などにおいて、危険な場所に近づかなくても、簡単に補修対象部分のサイズを計測することが可能となり、インフラ保

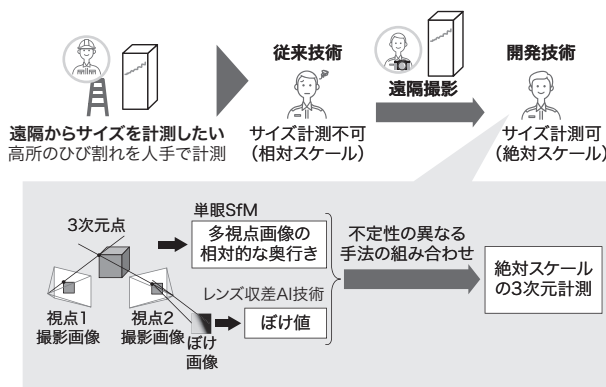


図1. 開発技術の概要

単眼カメラの多視点画像から求めた相対的な奥行きに、画像に含まれるぼけ情報を組み合わせることで、絶対スケールの3次元計測を実現した。

Overview of newly developed technology

全の効率化に貢献できる。

ここでは、開発した3次元計測技術の概要と、複数の実験による評価の結果について述べる。

(注1) 2021年11月時点、当社調べ。

2. 従来技術

単眼カメラによる3次元再構成の技術は、単眼Structure from motion (SfM)として知られている。単眼SfMでは、同一の3次元点が、複数の異なる視点位置で撮影した画像のどこに映り込んでいるかを基にして、3次元点の座標と、それぞれのカメラ位置・向きを同時に求めることができる(図2)。しかし、小さいものを近くで撮影したのか、大きなものを遠くから撮影したのかは、判断できない。そのため、絶対スケールの3次元情報が必要な場合には、ジャイロセンサーで計測したカメラの移動距離や、撮影した視点間の距離などの、サイズに関する情報を別途与える必要がある。この手法を活用して、スマートフォンに、単眼SfMとジャイロセンサーを組み合わせたサイズ計測技術が実装されている例があるが、レンズが小さいため、離れた場所からの撮影では誤差が大きくなるという弱点があった。

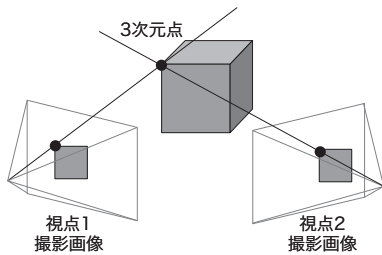


図2. 単眼SfMの原理

3次元点の各視点における画像への映り込みから、カメラ位置と3次元座標を求める。

Principle of monocular structure from motion (SfM)

収差マップ: レンズ収差の距離・位置依存性

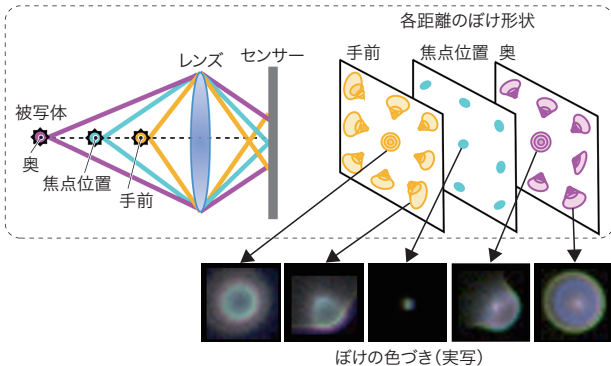


図3. 収差マップ

ぼけの形状は、焦点位置からの距離と、レンズ中央からの位置に依存する。これを基に、レンズ収差AI技術は、単眼カメラの画像1枚から、絶対スケールの奥行きを求める。

Example of aberration map

一方で当社は、レンズ収差によるぼけ形状の違い(図3)を学習することで、単眼カメラで撮影した画像1枚から絶対スケールの奥行きを求めるレンズ収差AI技術を、開発済みである²⁾。画像から取得したぼけ形状を絶対スケールの奥行きに変換するには、レンズの焦点距離の情報が必要である。各レンズ固有の真の焦点距離は不明なため、既知の絶対スケールの奥行きなどを用いて事前に求めておく必要がある。しかし、ズームレンズやオートフォーカスを用いると、撮影時に焦点距離が変化するため、絶対スケールの奥行きが得られない。したがって、屋外での点検のように撮影距離を固定しにくい場面では、適用が難しかった。

3. 開発した絶対スケール3次元計測技術

従来技術の問題点を解決するために、単眼SfMとレンズ収差AI技術という不定性の異なる手法を組み合わせることで、絶対スケールの3次元計測を実現した。2章で述べたとおり、単眼SfMでは絶対スケールが未知であり、レンズ収差AI技術では焦点距離が未知である。これらの未知パラメーターは、二つの測定法から独立に得られるぼけ値の間の誤差を最小にする最適化問題の解として得られることを発見した。

具体的な方法を、図4を用いて説明する。絶対スケールの奥行きとぼけの間には、スケールと焦点距離を未知パラメーターとした関係式(ぼけモデル)が成り立つ。このぼけモデルを用いて、相対的な奥行きをぼけ値に変換する。同

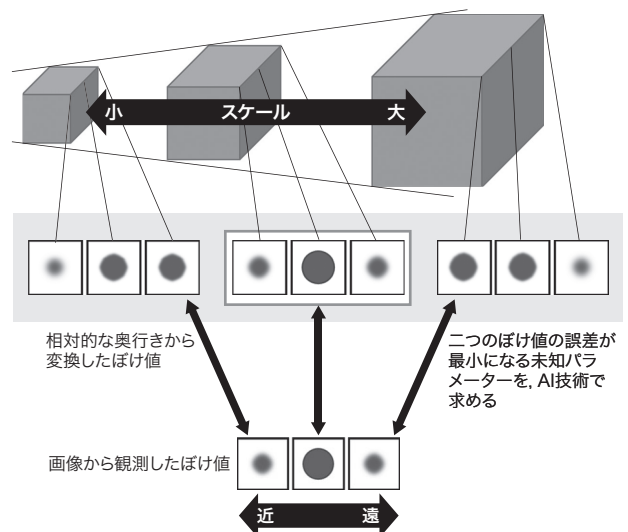


図4. スケール推定メカニズム

相対的な奥行きから変換したぼけ値と、画像から観測したぼけ値の誤差が最小となる未知パラメーターを、AI技術で探索して、絶対スケールと焦点距離を求める。

Mechanism of actual-scale estimation

時に、レンズ収差AI技術を用いて、画像で観測された実際のぼけ値を取得する。変換によるぼけ値と観測によるぼけ値の誤差が最小になる未知パラメーターが、絶対スケールと焦点距離となる。

この未知パラメーター探索問題は、非線形の最適化問題として定式化できる。一般には、非線形最適化問題が複数の局所解を持つ場合には、どこから探索を始めるかによって解が変わるという問題がある。幸いにして、この技術の非線形最適化問題は唯一解であることが証明されており、初期値によらず必ず唯一解が得られる⁽¹⁾。

4. 開発技術の有効性の確認

開発技術の有効性を確認するために、3種類の実験を行った。撮影にはフルサイズのデジタル一眼カメラを使用し、焦点距離24～70mmのズームレンズを装着して、レンズの絞りを2.8とした。

4.1 屋外シーンでのサイズ計測

屋外の11シーンで、サイズを計測したときの誤差（以下、サイズ誤差と略記）を確認した。各シーンで、画面中央に計測対象である被写体を配置して、被写体から5～7m離れた異なる9視点から撮影した。撮影の度に、ズーム倍率を焦点距離24～70mmの範囲でランダムに変更した。被写体のサイズを巻き尺で計測し、それを真値として開発技術による計測値と比べた。サイズ誤差は、式(1)のように定義する。

$$\text{サイズ誤差} = (\text{計測値} - \text{真値}) / \text{真値} \times 100 (\%) \quad (1)$$

開発技術は、単眼SfMとぼけ情報を組み合わせることで、レンズを固定する必要がなく、計測時に焦点距離も推定できる手法である。これに対し、レンズを固定した上で既知の絶対スケール情報を使って事前に焦点距離を求めておく方法でのサイズ誤差が、単眼SfMとレンズ収差AI技術を組み合わせた場合の最良値となる（理想条件）。開発技術と理想条件によるサイズ誤差を比較することで、開発技術を評価する（図5）。

全シーンの平均で、理想条件ではサイズ誤差が約2.5%であるのに対して、開発技術では約3.8%となった。開発技術は、理想条件と比較して大差ないサイズ誤差を示しており、撮影ごとにズーム倍率が変わる難しい条件でも十分な測定精度を持つことが、確認できた。

4.2 ひび割れ長さの計測

ひび割れの長さを計測したときのサイズ誤差について、スマートフォンに標準搭載されているサイズ計測アプリケーション

と比較した。このアプリケーションは、被写体のサイズに関する既知の情報などを使わずに簡単に遠隔からサイズ計測できるという、開発技術と共通の特長を持つ。

ブロック塀に生じたひび割れの長さを巻き尺で計測し、近距離（1.5m）と遠距離（7m）から計測した結果を比較した（図6）。スマートフォンのサイズ計測アプリケーションは、近距離は比較的小さいサイズ誤差で計測できるが、遠距離になるとサイズ誤差が300%以上となり、大きな誤差が生じた。それに対して開発技術は、遠距離でもサイズ誤差が11%程度に抑えられており、計測アプリケーションより良好な結果が得られた。

4.3 コンクリートにできた微細なひび割れの幅の計測

コンクリートにできた2mm以下の微細なひび割れの幅を

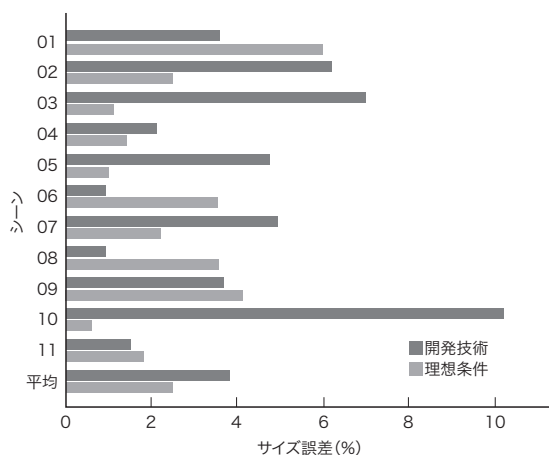
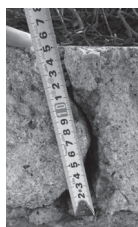


図5. 11の屋外シーンでのサイズ誤差

理想条件のサイズ誤差の平均値約2.5%に対して、開発技術は約3.8%であり、焦点距離を固定しなくても、良好なサイズ誤差で計測できることが分かった。

Results of evaluation of size errors measured at 11 outdoor locations

長さ: 150 mm



計測対象

計測距離	計測手段	計測値 (mm)
近距離 (1.5 m)	計測アプリケーション	190
	開発技術	154
遠距離 (7.0 m)	計測アプリケーション	640
	開発技術	167
接触	巻き尺 (基準値)	150

図6. ひび割れの長さの計測結果の比較

スマートフォンのサイズ計測アプリケーションは、遠距離でサイズ誤差が大きいですが、開発技術は約11%のサイズ誤差で計測できることを確認した。

Comparison of crack lengths measured using smartphone application and newly developed technology

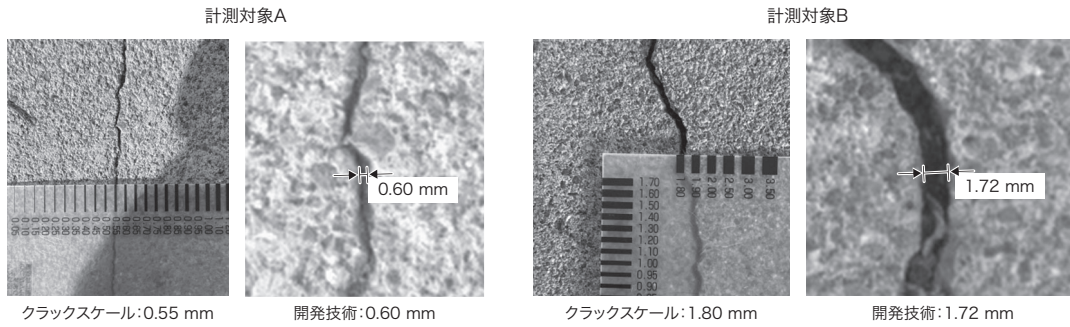


図7. ひび割れの幅の計測結果の比較

開発技術による計測結果は、クラックスケールによる計測結果と0.1 mm以内の違いで、一致した。

Comparison of crack widths measured using crack scale and newly developed technology

計測した(図7)。一般的な保守現場で、細かいひび割れの計測に用いる、クラックスケール(0.05 mm単位)で計測した結果と比較する。

細かい幅を計測するため、ここでは20～30 cmまで計測対象に近づいて撮影した。クラックスケールで0.55 mmと1.8 mmと計測された2種類のひび割れに開発技術を適用したところ、それぞれ0.60 mmと1.72 mmと計測された。どちらの計測対象についても、違いが0.1 mm以下であることを確認した。これは、補修が必要かどうかの判定基準0.1 mm(日本コンクリート工学会のコンクリートひび割れ補修指針による³⁾)を上回る結果が得られた。

クラックスケールの目盛りは0.05 mm単位であり、手作業で計測するため目視での判別は難しく、作業者によるばらつきが生じやすい。開発技術を用いることで、属人的なばらつきを排した計測が期待できる。

スマートフォン標準搭載のサイズ計測アプリケーションは、最小単位がcmであるため、コンクリートひび割れの補修判定には適用できない。

5. あとがき

ズームレンズやオートフォーカスで撮影した単眼カメラの画像だけから、絶対スケールの計測ができる3次元計測技術を開発した。実験の結果、今回開発した技術が、様々な場面で実用的なサイズ誤差で計測できることを確認した。インフラ点検だけでなく、製造や、物流、医療など、カメラを使用してサイズ計測する様々な場面に応用できる。

今後は、様々なカメラやレンズを用いて実証実験を進めるとともに計算処理の高速化を図り、早期の実用化を目指して研究開発を進めていく。

文献

- (1) Mishima, N. et al. "Absolute Scale from Varifocal Monocular Camera through SfM and Defocus Combined". The 32nd British Machine Vision Conference (BMVC 2021). Online Conference, 2021-11, British Machine Vision Association. 2021. <https://www.bmvc2021-virtualconference.com/conference/papers/paper_0287.html>, (accessed 2022-08-29).
- (2) Kashiwagi, M. et al. "Deep Depth from Aberration Map". Proceedings of 2017 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV 2019). Seoul, Korea, 2019-10, IEEE. 2019, p.4070-4079.
- (3) 日本コンクリート工学会.コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2013-. 日本コンクリート工学会, 2013, 483p.



三島 直 MISHIMA Nao
研究開発センター 知能化システム研究所
メディア AI ラボラトリー
日本液晶学会会員
Media AI Lab.



関 晃仁 SEKI Akihito, D.Eng.
研究開発センター 研究企画統括部 企画部
博士(工学)
情報処理学会会員
Research Planning Div.