

レンズレスカメラを用いた高精度三次元画像計測

中村友哉*

High Precision 3D Image Measurement Using a Lensless Camera

Tomoya NAKAMURA*

Computational lensless camera is an imaging system based on a lensless optical hardware with a coded mask and computational decoding software. The merit of the lensless camera is not only the thinness of the hardware but also the high flexibility of design of the system. Exploiting this feature, our group proposes the accurate three-dimensional image sensing method, which does not utilize conventional contrast detection processing. A spatial light modulator implements a dynamic coded mask, and it is quickly changed to depth-invariant radial mask to depth-sensitive circular mask. By analyzing correlation of captured two images by the coded-mask pair, the 3D information was obtained more accurately than conventional contrast detection.

1. レンズレスカメラ技術

レンズレスカメラとは、レンズレス光学系による符号化計測と画像再構成処理により構成されるカメラシステムであり、撮像デバイスの薄型及び小型実装を実現する技術として期待されている。概念図を図1、実現例を図2に示す。元々は撮像系の薄型化のために考案された技術であるが、近年はそれだけでなく、符号化光学系及び復号化演算系による設計自由度の高さ、及びその活用による撮像性能及び機能の革新的向上を実現できる点が注目されている。中でも擬似ランダム符号化光学系を用いたレンズレス光学系による三次元撮像は、専用照明や高速センサが不要でありながら小型単一カメラの単一ショットのみで対象の三次元情報を取得できる唯一の手法としてライフサイエンスや検査装置などの領域における関心を集めている[1]。

しかしながら、従来のレンズレス三次元撮像法は本質的にはコントラスト検出法、つまり画像からの焦点ボケ量の推定が基盤であり、推定精度の低さが実応用を妨げる障壁となっている。具体的には、再構成画像に含まれる低コントラスト領域が、焦点ボケに依るものか物体のテクスチャに依るものなのか曖昧であるため、その判別問題を常に精度よく解くことは実環境において困難である。

2. 研究目的及び提案手法

本研究ではレンズレスカメラにおける三次元撮像を、高速性を維持したまま高精度に実現することを目的とする。レンズレス光学系では符号化開口の設計により再構成画像の被写界深度を制御できる。例えば符号化開口を同心円状にすることで再構成画像の被写界深度を浅く[2]、放射状にすることで深く[3]することが可能である。また、符号化開口は液晶を用いて実装することで高速な切り替えが可能である。このことに着目し、本研究では前述の二種の符号を高速に切り替えて被写界深度の異なる同一物体の二枚の符号化画像を取得し、それらから多焦点画像と全焦点画像を再構成し、それらの相関演算を行うことで対象の三次元情報を取得する手法を提案する。概念図を図3に示す。従来手法が一枚画像のコントラストのみから距離を推定するのに対し、

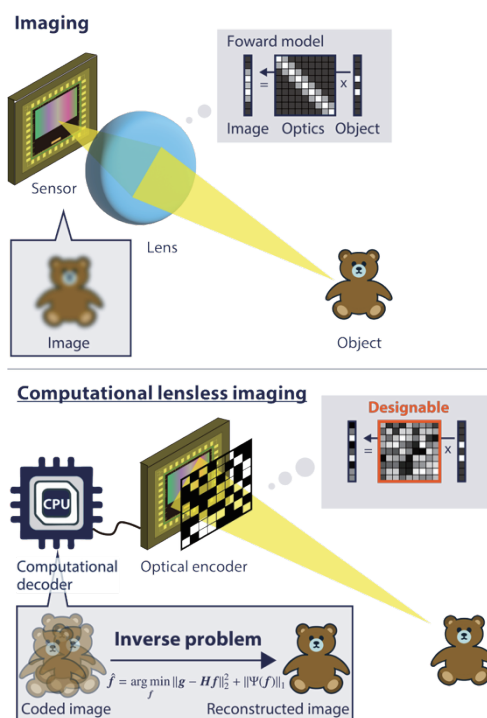


図1 レンズレスカメラ概念図。

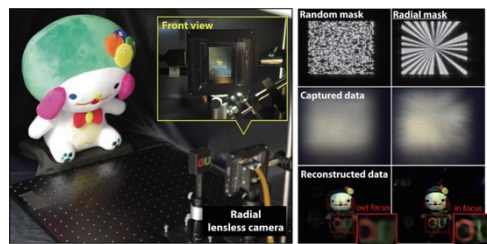


図2 レンズレスカメラ実現例。

2026年2月26日 受理

* 豊田理研スカラー

大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻

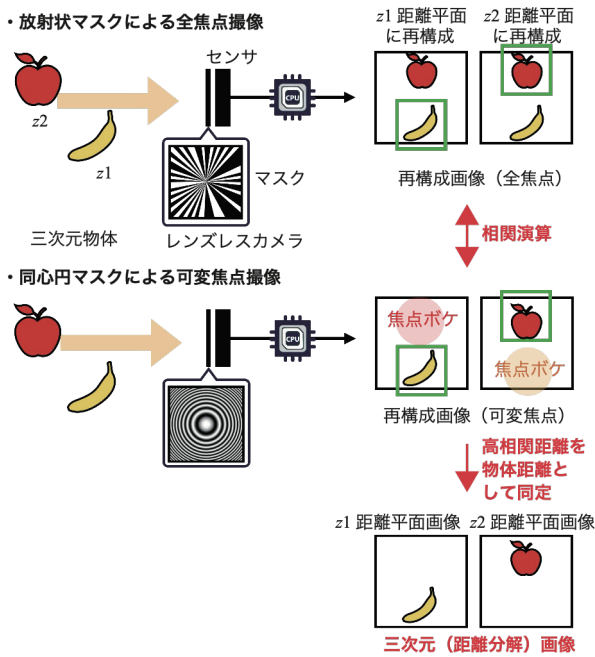


図3 提案するレンズレス三次元撮像法.

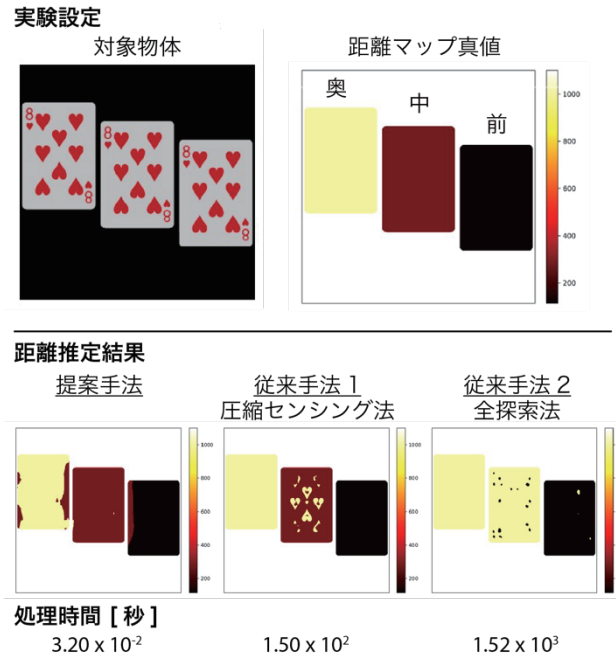


図4 原理実証実験結果.

提案手法では全焦点画像を参照データとしてその相関演算により距離を決定するため、原理的により安定な手法であると言える。また、開口は液晶により高速切り替えが可能であるため、計測の時間分解能の犠牲も最小限であると言える。

3. 実験

実環境下で提案手法の効果を実証するために、レンズレスカメラの実験光学系を構築した。動的符号化開口は液晶型空間光変調器を用いて実装した。カメラの前方にカードを異なる距離に三枚並べ被写体とし、提案手法及び従来手法によるレンズレス撮像及び距離推定処理を実施した。従来手法として、レンズレスカメラと圧縮センシングを組み合わせた三次元画像推定手法[1]、より古典的な既存手法として三次元空間を全探索する手法を実装し、提案手法と比較した。結果を図4に示す。提案手法は三次元空間の探索及び推定を前提としないため、従来手法と比較して4-5桁高速な演算で実現可能であるにも関わらず、従来手法と遜色のない距離推定精度の達成が確認された。特に中央の被写体に着目した場合、従来手法よりも高精度な推定結果の達成が確認された。一方で、他の被写体に関しては従来手法よりも推定精度が悪化した領域も確認された。今後はより高次の画像処理も援用しつつ、演算の高速性も犠牲にしない高精度化アルゴリズムの開発を目指す。

4. 今後の展望

これまでに、基礎的な原理実証実験により実環境下での提案手法の効果を確認できた。今後は符号化開口設計だけでなく他の、高次画像処理も援用することで、さらなる高精度化を目指す。また、より多様なターゲットや撮像環境を用いた統計的な性能評価を実施するとともに、提案手法が有効あるいは無効となる撮像条件がどのようなものかを明らかにする。

REFERENCES

- 1) N. Antipa, G. Kuo, R. Heckel, B. Mildenhall, E. Bostan, R. Ng and L. Waller, *Optica*, **5** (2018) 1.
- 2) T. Shimano, Y. Nakamura, K. Tajima, M. Sao and T. Hoshizawa, *Appl. Opt.*, **57** (2018) 2841.
- 3) J. Neto, T. Nakamura, Y. Makihara and Y. Yagi, *IEEE Trans. Comput. Imaging*, **9** (2023) 857.