OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Extended-Depth-of-Field Lensless Imaging via Optical Design and Physics-Constrained Reconstruction
Author(s)	Cunha Santos A. V. Silva Neto, Jose Reinaldo
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105826
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

Form 3

Abstract of Thesis

Name	(Cunha Santos A V Silva Neto Jose Reinaldo)
Title	Extended-Depth-of-Field Lensless Imaging via Optical Design and Physics-Constrained Reconstruction (光学設計と物理制約付き再構成による被写界深度拡張レンズレスイメージング)

Abstract of Thesis

Lensless cameras replace conventional lenses with thin coded masks placed near the sensor, enabling compact imaging systems. However, the resulting measurements arise from ill-posed operators whose point spread functions vary with depth and lateral translations, making reconstruction highly sensitive to model mismatch. Existing methods typically address this either through (1) explicit depth modeling, using multi-plane 3D formulations, dense calibration, and slow iterative solvers or through (2) supervised deep networks trained on lensed ground-truth data or simulated volumetric scenes. While effective in controlled settings, these strategies impose heavy calibration or computational demands and often generalize poorly to real-world scenes, limiting the practicality of current lensless systems.

This thesis aims to move lensless cameras toward practical all-in-focus 2D imaging, by jointly designing depth-robust coded masks and self-supervised reconstruction algorithms. The contributions span three main components.

First, we investigate restricted-aperture radial coded masks as a means to extend DOF while preserving a simple 2D shift-invariant convolution model. By comparing radial and non-radial masks in simulation and prototype-camera experiments with planar, dual-depth, and transparent-object scenes, we show that radial patterns in general reduce PSF depth dependence and already provide a clear EDoF advantage over conventional non-radial designs. Within this radial family, we introduce a radial shape parameterization and optimize the mask pattern to achieve a more broadband modulation response than handcrafted or randomly generated radial masks. As a result, the optimized radial mask simultaneously offers extended DOF and higher reconstruction quality across spatial frequencies, while remaining compatible with standard 2D deconvolution.

Second, we generalize to full-aperture radial masks that extend beyond the sensor area to improve light efficiency and support wider depth of field. Using a new printed-mask prototype, we experimentally characterize PSF depth dependence and spatial shift-variance for both restricted- and full-aperture designs. This analysis reveals a trade-off: full-aperture masks improve depth robustness but introduce strong shift-variance, as different regions of the mask are projected onto the sensor. To address this, we propose an artificially extended PSF model, constructed by upsampling a centrally calibrated PSF to approximate the uncropped optical PSF. This enables an approximate shift-invariant forward model for full-aperture masks, implemented as a large-PSF convolution followed by cropping. Experiments with MNIST digits, QR codes, planar face images, and continuous-depth scenes demonstrate that this approximation supports all-in-focus lensless imaging while benefiting from increased light throughput.

Third, we explore self-supervised neural reconstruction as an alternative to supervised training. Instead of training on paired lensless-lensed images or on simulated data, we train reconstruction networks using only lensless measurements and a known forward model, by minimizing the discrepancy between measured sensor data and simulated measurements generated from the network output. We instantiate this idea with a standalone UNet and two convex-neural hybrid architectures that combine a Wiener or few-step ADMM deconvolution with a denoising UNet. Experiments on simulated and prototype-camera FFHQ datasets show that these self-supervised models can match or approach the perceptual quality of more expensive iterative methods, while reducing inference time to a few milliseconds per image and avoiding brightness/color biases potentially induced by

lensed targets.

Collectively, these results demonstrate that depth-robust radial mask designs, extended-PSF modeling, and self-supervised neural priors form a coherent pathway toward practical, all-in-focus lensless imaging systems that do not rely on restrictive supervised approaches.

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名	（José Reinaldo Cunha Santos A. V. Silva Neto）		
	（職）		氏　名
論文審査担当者	主 査	教授	中島悠太
	副 査	教授	浦西友樹
	副 査	教授	長原一
	副 査	特任教授	八木康史（大阪大学D3センター・名誉教授）
	副 査	准教授	中村友哉（大阪大学基礎工学研究科）

論文審査の結果の要旨

レンズを薄型の符号化マスク（coded mask）で代替することにより、レンズレスカメラは極めて薄型・軽量に構成し得るため、狭隘空間における撮像に適した有望な方式である。しかしながら、当該方式はカメラ近傍における被写界深度の狭小さ、光利用効率の低さといった制約を有し、さらに再構成アルゴリズムについても、反復最適化に基づく手法は計算量が大きく低速である。これに対して、深層学習を利用して観測画像から再構成画像を生成するアプローチも提案されている。このアプローチは、学習時に用いた教師信号（観測画像・再構成画像のペア）への依存が大きいことが知られている。本学位論文は、これらの課題を体系的に解決し、レンズレスカメラを実用可能性へと近づけることを目的とする。

第3章では、放射状符号化マスクを利用した被写界深度の拡張について論じている。単純なレンズレスカメラシステムでは、すべての撮影対象がカメラに対して特定の奥行きに存在するものと仮定して、単一のPoint Spread Function (PSF)を利用して、逆畳み込み問題を反復最適化アルゴリズムによって解くことで再構成画像を得る。このアプローチは3次元シーンの撮影には適さないことから、対象シーンの3次元モデルを利用してPSFを調整するなどの拡張が考えられるものの、3次元モデルは容易には得られない。本学位論文では、PSFが拡大縮小に対して不変であれば、観測画像が撮影対象からの距離に影響を受けにくいことに着目し、カメラの開口部に放射状符号化マスクを利用するアプローチを提案する。加えて、放射状符号化マスクをパラメトリックに表現し、そのパラメータを最適化することにより、再構成品質を向上させる手法も合わせて提案している。この手法は、レンズレスカメラシステムの可能性を拡張するものであり、学術的に価値の高いものである。

第4章では、第3章の放射状符号化マスクの考え方を拡張し、放射状符号化マスクがカメラセンサの開口全域を覆う光学設計にすることで、PSFの距離不変性をさらに向上しつつ、高い光利用効率を達成している。一方で、この構成では撮影対象がセンサ面と水平方向に移動する場合にPSFの変化が生じるが、これに対処するための画像再構成アルゴリズムの改善についても提案している。結果として、レンズレスカメラシステムとしては広範囲な1cmから50cmにおよぶ被写界深度において、実質的に全域合焦を達成可能となる。これは従来のレンズを利用するカメラシステムでは実現が困難な特性であり、レンズレスカメラシステムの実用性を押し上げる意味を持つ。

第5章では、教師あり学習に依拠することなく、レンズレス画像を高速かつ頑健に再構成する方法を論じる。具体的には、レンズレス再構成を雑音を含む線形逆問題として定式化し、再構成手法を（i）古典的なモデルベース手法、（ii）教師あり学習に基づく手法、（iii）教師なし／自己教師ありアプローチ、の三つの系統に分類して概観する。これらの整理を踏まえ、本学位論文では、レンズレス計測値と既知の順問題モデル（フォワードモデル）のみを用いて再構成ネットワークを最適化する自己教師あり学習スキームを提案する。提案損失は、実測された観測画像と、ネットワーク出力をレンズレスカメラシステムの順方向モデルに通すことで得られる観測画像とを比較することにより、レンズを用いるカメラシステムからの画像の教師信号を必要とすることなく、再構成モデルを学習する。これは、レンズレスカメラシステムの再構成アルゴリズムを大きく変えうるものであると言える。

以上の通り、本学位論文はレンズレスカメラシステムの実用性を大きく押し広げており、情報科学分野に大きく寄与するものである。このことから、博士（情報科学）の学位論文として価値のあるものと認める。