www.onera.fr

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Approche de conception conjointe optique/traitement à partir d'un traceur de rayons différentiable.
End-to-end optical/digital design approach based on a differentiable ray tracer.

Référence : **PHY-DOTA-2024-10**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 01/10/2024	**Date limite de candidature :** 15/07/2024

Mots clés :
Conception optique, Traitement d'images, Co-conception, Optimisation

Profil et compétences recherchées :
Conception optique, Programmation (Python, Julia), Traitement d'images

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif [FR] :

La conception conjointe optique/traitement (ou « co-conception ») est aujourd'hui une discipline scientifique dont le développement est indispensable pour améliorer encore les systèmes d'imagerie à l'état de l'art. Il s'agit d'optimiser dans le même temps un système optique et le traitement d'images associé, et ainsi atteindre les performances optimales nécessaires à de nombreuses problématiques [1]. En effet, la très grande majorité des systèmes d'imagerie est maintenant liée à un traitement numérique et doit répondre à des problématiques d'encombrement, de poids et de consommation (contraintes SWaP) toujours plus importantes. C'est par exemple le cas dans le cadre de l'aide à la conduite autonome [2], ou pour l'embarquabilité dans des véhicules ou des drones. Ces systèmes sont par ailleurs voués à se passer de plus en plus d'un utilisateur humain. L'ensemble de ces éléments modifie le critère d'optimisation d'un système d'imagerie, par rapport à ce qui se fait dans un logiciel de conception optique classique. Aujourd'hui, il est nécessaire de développer une stratégie spécifique à la co-conception, via un logiciel dédié, pour relever les défis de demain.

Le développement d'une telle méthode sera d'intérêt direct pour répondre aux questionnements actuels de la communauté internationale, qui s'étendent sur plusieurs domaines. Premièrement, la co-conception est de plus en plus envisagée par Deep Learning (DL) [2-7]. Cette co-conception par DL nécessite généralement un logiciel de tracé de rayons spécifique, fournissant les rayons et leurs dérivées, ou a minima un modèle optique différentiable fin. L'état de l'art en co-conception par DL s'intéresse à l'optimisation d'optiques de plus en plus complexes [7], mais la plupart s'attaque essentiellement à l'utilisation de lames de phase simples, dans le visible, et avec des réseaux peu profonds pour la partie restauration numérique afin de permettre l'optimisation des quelques paramètres optiques. Plusieurs questions se posent par ailleurs : la co-conception par DL est-elle applicable aux systèmes dans l'infrarouge, alors que les bases de données existantes sont moins larges ? Un traitement numérique aussi puissant est-il toujours nécessaire ?
Au contraire, des études sont menées pour trouver le meilleur système optique (i.e. produisant la tache image la plus petite), mais dans ce cas, un traitement numérique n'est pas considéré [8-9]. Quel serait l'impact de l'intégration d'un traitement numérique dans la méthodologie d'optimisation de systèmes optiques complexes ? Quel traitement choisir ?

Les choix effectués préalablement à une co-optimisation (dimensionnement du système optique, architecture du traitement) définissent une « balance » optique/traitement. Comme dans le cas d'une conception optique usuelle, le point de départ (optique et traitement dépendant de l'optique) peut avoir beaucoup d'impact sur le résultat final. Par exemple, en appliquant une démarche de co-conception dans le logiciel de conception optique CodeV, nous avons pu constater que cette méthode a tendance à peu modifier la combinaison optique initiale, de sorte que la combinaison optique finale conserve une structure proche du point de départ [10]. L'objectif global de cette thèse est de proposer une stratégie de co-optimisation adaptée à la balance optique/traitement choisie, dans un logiciel de co-conception dédié. En effet, les logiciels conventionnels ne sont pas compatibles avec tous les traitements envisagés, sachant que des métriques d'optimisation spécifiques doivent être insérées.

Un logiciel ouvert pourrait y remédier, et par ailleurs profiter de la puissance de calcul de machines dédiées. Cette thèse se servira donc du logiciel "FORMIDABLE", traceur de rayons différentiables développé à l'ONERA et sous licence ESCL, comme base pour le développement d'une stratégie de co-optimisation.

Formidable permet de calculer les rayons et leurs dérivées au sein d'un système optique, ce qui lui confère un avantage notable sur la convergence des algorithmes d'optimisation. L'idée sera donc de profiter de Formidable pour créer un logiciel dédié à la co-conception, plutôt que de détourner un logiciel de conception optique conventionnel.

La thèse se structurera autour des trois axes suivants :

- Le développement des outils nécessaires à la co-conception dans le logiciel Formidable. On considérera des algorithmes de complexité croissante répondant à des contraintes sur l'embarquabilité potentielle : déconvolution par un filtre de Wiener moyen, déconvolution par zones [12], restauration adaptée, approche hybride Wiener/DL [13] ;
- La co-optimisation de masques de phase [14-15] dans la pupille d'architectures optiques « simples ». On déterminera si certains sont plus adaptés que d'autres selon la balance optique/traitement choisie (e.g. égalisation de FTM plus ou moins poussée [16]);
- La co-conception de « systèmes complexes », c'est-à-dire possédant un plus grand nombre de surfaces optiques à optimiser hors de la pupille, et éventuellement des surfaces freeform. L'objectif de ce dernier axe est de proposer une stratégie de co-optimisation d'architectures optiques complexes, à associer à chaque traitement. Pour cela, le point de départ optique devra être adapté au traitement envisagé, en s'inspirant des conclusions tirées sur les masques de phase.

A l'issue de cette thèse, une méthodologie et stratégie de co-optimisation de système optiques complexes, adaptées à la balance optique/traitement choisie, auront été proposées. Si le temps le permet, le doctorant pourra réaliser un démonstrateur d'un système complexe optimisé de cette manière.

Références :

[1] D. G. Stork et al., "Theoretical foundations for joint digital-optical analysis of electro-optical imaging systems," Appl. Opt. 47, B64 (2008).

[2] E. Tseng, A. Mosleh, F. Mannan, K. St-Arnaud, A. Sharma, Y. Peng, A. Braun, D. Nowrouzezahrai, J.-F. Lalonde, F. Heide, "Differentiable Compound Optics and Processing Pipeline Optimization for End-to-end Camera Design," ACM Trans. Graphics, 40 (2021) .

[3] G. Wetzstein, A. Ozcan, S. Gigan, S. Fan, D. Englund, M. Soljačić, C. Denz, D. Miller, D. Psaltis, "Inference in artificial intelligence with deep optics and photonics," Nature 588, 39–47 (2020).

[4] Q. Sun, C. Wang, Q. Fu, X. Dun, W. Heidrich, "End-to-end complex lens design with differentiable ray tracing", ACM Trans. Graphics, 40 (2021) .

[5] Z. Li, Q. Hou, Z. Wang, F. Tan, J. Liu, and W. Zhang, "End-to-end learned single lens design using fast differentiable ray tracing," Opt. Lett. 46, 5453-5456 (2021).

[6] D. Piché-Meunier, Y. Hold-Geoffroy, J. Zhang, J.-F. Lalonde, "Lens Parameter Estimation for Realistic Depth of Field Modeling, " ICCV (2023).

[7] X. Yang, Q. Fu, W. Heidrich, "Curriculum Learning for ab initio Deep Learned Refractive Optics," arxiv (2023).

[8] Geoffroi Côté, Jean-François Lalonde, and Simon Thibault, "Deep learning-enabled framework for automatic lens design starting point generation," Opt. Express 29, 3841-3854 (2021).

[9] T. Mayeur, J.-B. Volatier, G. Druart, F. Cau, E. Tartas, A. Durand, "Automatic Method of Exploring the Lanscape of Freeform Dioptric Optical Problems, Working in the Infrared Region," Optics (2023).

[10] A. Fontbonne, H. Sauer, F. Goudail, "Comparison of end-to-end optimization methods of optics and image processing in professional optical system design software", Opt. Express 30(8), 13556-13571 (2022).

[11] A. Halé, P. Trouvé-Peloux, J.-B. Volatier, "End-to-end sensor and neural network design using differential ray tracing," Opt. Express, 29 (21) (2021).

[12] A. Fontbonne, H. Sauer, F. Goudail, "Improved performance of a hybrid optical/digital imaging system with fast piecewise Wiener deconvolution," Opt. Express 30(19), 34343-34361 (2022).

[13] R. Zhang, F. Tan, Q. Hou, Z. Li, Z. Sun, C. Yang, and X. Gao, "End-to-end learned single lens design using improved Wiener deconvolution," Opt. Lett. 48, 522-525 (2023).

[14] F.Diaz, F. Goudail, B. Loiseaux, J.-P. Huignard, "Comparison of depth of focus enhancing pupil masks based on a signal-to-noise ratio criterion after the deconvolution", J. Opt. Soc. Am. A 27, 2123-2131 (2010).

[15] R. Falcón, F. Goudail, C. Kulcsár, H. Sauer, "Performance limits of binary annular phase masks codesigned for depth-of-field extension," Opt. Eng. 56(6) 065104 (2017).

[16] M.-A. Burcklen, H. Sauer, F. Diaz, F. Goudail, "Joint digital-optical design of complex lenses using a surrogate image quality criterion adapted to commercial optical design software," Appl. Opt. 57, 9005-9015 (2018).

Collaborations envisagées :

Ces études seront menées en collaboration avec des partenaires industriels et académiques. En particulier, l'expertise du Laboratoire Charles Fabry (contacts : francois.goudail@institutoptique.fr ; marie-anne.burcklen@institutoptique.fr) permettra l'analyse approfondie des résultats. L'ONERA DTIS (contacts : pauline.trouve@onera.fr ; frederic.champagnat@onera.fr) apportera son expertise en DL. Le partenariat Valley Optics ajoutera un soutien pour l'amélioration du logiciel FORMIDABLE.

Laboratoire d'accueil à l'ONERA :	**Directeur de thèse :**
Département : Optique et Techniques Associées	Nom : François Goudail
Lieu (centre ONERA) : Palaiseau	Laboratoire : Laboratoire Charles Fabry
Contact : Alice Fontbonne	Tél. :
Tél. : 0180386365 Email : alice.fontbonne@onera.fr	Email : francois.goudail@institutoptique.fr

Pour plus d'informations : https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche