

Titre de la thèse : Optimisation multi-objectifs de l'acquisition et de la modélisation de l'apparence des surfaces complexes par approches d'IA

Laboratoire d'accueil : ImViA (Imagerie et Vision Artificielle)

Spécialité du doctorat préparé : Informatique

Mots-clefs / Keywords : Apparence visuelle, Imagerie RTI, Optimisation multi-objectifs

Descriptif détaillé de la thèse

L'apparence visuelle d'une surface est le résultat de processus d'une grande complexité. D'une part il y a des phénomènes multi-physiques qui concernent l'interaction entre la surface observée et son environnement lumineux. D'autre part, les mécanismes psychovisuels intrinsèques au système visuel humain. Or, la maîtrise de l'apparence est un défi un enjeu important dans de nombreux domaines tels que l'industrie, notamment dans l'industrie du luxe, du cosmétique, de l'emballage, de l'aéronautique ou de l'automobile mais aussi des domaines culturels (patrimoine culturel numérique) ou les industries créatives où les besoins en termes de numérisation de l'apparence sont croissants.

Plusieurs méthodes ont été mises en œuvre afin de prendre en compte cet enjeu de la maîtrise de l'apparence des surfaces. L'approche la plus fréquente consiste à opérer une ou plusieurs étapes de contrôle de la qualité d'aspect des surfaces, en mettant en œuvre une analyse sensorielle visuo-tactile. Cette approche sensorielle est toujours aujourd'hui la référence en industrie même si elle est intrinsèquement et inévitablement subjective car elle réalise par un contrôleur humain rendant le résultat difficilement répétable et/ou reproductible comme défini dans la Figure 1. L'approche instrumentale, qui vise à mettre en œuvre une mesure physique d'un ou plusieurs attributs agissant sur l'apparence des surfaces (rugosité avec ou sans contact, réflectance, brillance, etc.) est une autre façon de tenter de répondre à cet enjeu. L'idée de mettre en œuvre une numérisation de l'apparence des surfaces permet d'envisager la possibilité de pouvoir quantifier objectivement les attributs d'apparence et in fine, permettre le pilotage fonctionnel des processus de fabrication (dans le cadre industriel) ou la restauration/la sauvegarde des surfaces (dans le cadre du patrimoine) et de finition de surfaces.

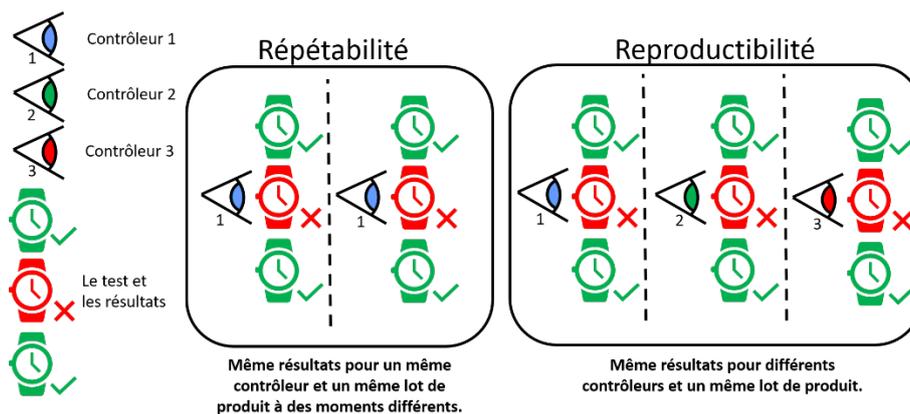


Figure 1. Répétabilité et reproductibilité lors du contrôle visuel

Une de ces approches dites instrumentales est basée sur une technique d'imagerie qui se focalise sur la numérisation de la réflectance. La réflectance d'un point de surface peut être définie comme étant la proportion de lumière réfléchi par un point d'une surface relativement à une référence (souvent point blanc lambertien). Généralement, la réflectance peut être décrite par deux

composantes principales : la composante angulaire et la composante spectrale. La première exprime la relation géométrique entre la source d'illumination, la surface observée et l'observateur/caméra. Quant à la deuxième, elle est liée à réflexion en fonction des longueurs d'onde. C'est en changeant la position spatiale de la source d'éclairage et en filtrant la lumière réfléchie selon les longueurs d'onde qu'on peut mesurer ces deux composantes.

La technique d'imagerie appelée Reflectance Transformation Imaging (RTI), permettant de mesurer la composant angulaire a connu un développement important dans le domaine du patrimoine culturel et se déploie progressivement dans le domaine industriel. La technique RTI est analogue à la manière dont l'humain inspecte instinctivement une surface. En effet, ce dernier, comme le font les contrôleurs humains lors d'une analyse sensorielle, fait miroiter la surface sous son environnement lumineux en effectuant des rotations de la surface changeant alors l'angle d'éclairage.

Du point de vue mise en œuvre, La technique RTI consiste en une caméra fixe orthogonale à la surface et un éclairage orienté vers la surface dont on fait varier la position (*theta*, *phi*) tout en restant à distance fixe de l'objet d'étude tel que montré dans les exemples de la Figure 2. Pour certains angles d'éclairage, des images sont acquises. On mesure alors en chaque image la réflectance angulaire locale de la surface. Ainsi à partir d'une acquisition RTI on obtient un lot d'images, comme illustré dans la Figure 2, qui permettront de reconstruire la scène avec une source de lumière virtuelle pour aider au contrôle visuel de la surface.

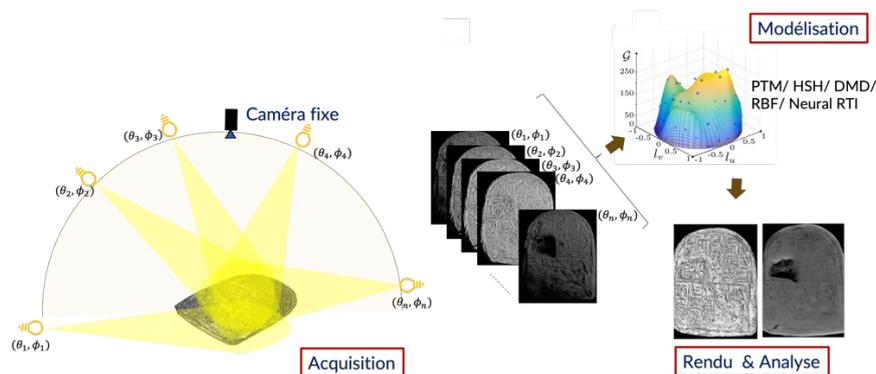


Figure 2. Pipeline de l'acquisition et d'exploitation des données RTI

Problématiques

RTI est une technique d'imagerie multimodale produisant de grandes quantités de données complexes, notamment lorsqu'elle est combinée à d'autres modalités d'imagerie (Multi-spectral, Photostéréométrie, variation de focus, etc.). Malgré de nombreuses recherches et avancées pour rendre l'acquisition, le traitement et l'analyse des données plus robuste et utile à l'utilisateur final, la technique RTI présente encore des limites.

En effet, les acquisitions RTI sont souvent réalisées en lumière blanche et les images enregistrées sont soit en niveau de gris soit en couleur (lorsqu'une caméra couleur est utilisée). Étant donné les limitations liées à l'information de l'intensité et l'information couleur, il est de plus en plus recour à des acquisitions multispectrales combinées avec une acquisition RTI. Se pose alors le problème de modélisation conjointe des informations spectrale et angulaires et leur exploitation aussi bien pour optimiser l'acquisition que pour les traitement subséquents (construction de la saillance, rendu, etc).

Par ailleurs, un paramètre important d'une acquisition RTI concerne les positions d'éclairage pour lesquelles on va acquérir des images. Ces positions sont généralement réparties de manière uniforme dans l'espace θ et ϕ et leur nombre est, selon le dispositif d'acquisition, soit fixe soit laissé à l'appréciation de l'opérateur qui effectue l'acquisition. Plusieurs problèmes sont alors soulevés par ces choix de paramètres. Premièrement, la disposition uniforme des angles d'éclairage n'est pas forcément adaptée à toutes les surfaces étudiées. **Chaque surface, voire chaque point dans le cas de multi-matériaux, possède ses propres propriétés** surfaciques, interagissant différemment avec l'environnement lumineux. La disposition uniforme des angles d'éclairage permet d'avoir un aperçu du comportement *moyen* de la surface mais ne permet pas d'avoir une mesure adaptée et optimisée à celle-ci. Deuxièmement, le nombre de positions d'éclairage influe beaucoup sur le temps d'acquisition. Or, certains domaines, tels que ceux de l'industrie, demande des temps de mesure très courts afin de répondre aux besoins de contrôle qualité en production où la vitesse est un critère primordial. Il serait ainsi important de réduire le temps de cycle d'acquisition des images RTI en **optimisant le nombre et la distribution spatiale des positions d'éclairage** tout en gardant la même qualité de données fournie à l'utilisateur final.

Approche

Les avancées dans le domaine de l'apprentissage automatique, en particulier les techniques basées sur les réseaux de neurones, ont révolutionné l'imagerie numérique, y compris l'imagerie non conventionnelle. Ces méthodes ont démontré leur pertinence et performance dans une variété de tâches telles que la segmentation, la détection, la localisation et le suivi, dans des domaines d'application divers tels que la médecine, la télédétection, le contrôle qualité et la bio-mécanique. Elles remplacent souvent des modèles analytiques exhaustifs, parfois complexes, par des modèles implicites construits à partir de données expérimentales labélisées complètement ou partiellement. Ces approches sont privilégiées lorsque les données d'entraînement sont disponibles et sont même indispensables lorsque les phénomènes sous-jacents sont complexes, caractérisés par une forte non-linéarité et/ou l'absence de modèles analytiques complets. C'est particulièrement le cas pour les applications de caractérisation de l'apparence en lien avec la perception visuelle, où les processus cognitifs sont complexes et multiphysiques.

Le travail de recherche portera sur l'optimisation multi-objectif du processus d'acquisition RTI spectrale pour le rendre rapide et adaptatif. La rapidité serait la conséquence d'une acquisition continue et l'adaptabilité implique de déterminer le nombre optimal de directions d'éclairage ainsi que leur répartition spatiale (chemin d'éclairage) pour chaque matériau ou type de surface. Pour cela nous investiguerons deux approches : la première est une approche supervisée ou semi-supervisée qui consiste en la création et l'entraînement d'un réseau de neurones profond sur des données réelles et simulées sur plusieurs matériaux permettant de déterminer les directions d'éclairage critiques.

En complément, une approche plus exploratoire intégrera les capacités des modèles d'IA générative à apprendre une représentation implicite de la BRDF à partir d'un échantillonnage partiel. Ces modèles permettront de généraliser la modélisation de l'apparence à de nouveaux matériaux avec peu de données, en inférant des comportements photométriques plausibles. L'IA générative jouera également un rôle dans la simulation et l'évaluation de scénarios d'acquisition, permettant de tester virtuellement différentes configurations sans avoir recours à une acquisition physique systématique.

La deuxième approche sera inspirée des techniques récentes en reconstruction 3D permettant l'estimation de poses et le rendu réaliste d'objets 3D à partir de quelques positions. Elle visera à reconstruire implicitement l'information spatiale et spectrale à partir de vues d'éclairage limitées, en utilisant des architectures de réseaux de neurones modifiées pour intégrer des contraintes physiques liées aux propriétés de réflexion des surfaces. Ces modèles pourraient, à terme, produire un rendu interactif temps réel de la réponse spectrale sous illumination variable.

Profil demandé / Applicant profile

Être titulaire d'un Master 2 ou équivalent en vision par ordinateur, Image et intelligence artificielle. Avoir des connaissances en imagerie de l'apparence et modèles physiques et graphiques associés. Avoir des connaissances solides en programmation et architectures de réseaux de neurones.

Équipe d'accueil

Le/la candidat(e) travaillera en collaboration avec les membres du thème MultiAspeX de l'équipe CORES. Au sein de MultiAspeX, plusieurs projets d'envergure sont en cours : A titre d'exemples le projet européen Horizon Europe intitulé CHEMINOVA (<https://cheminova.eu>) le projet ANR23 PRCE intitulé RTI4.0 et le projet Maturation industrielle intitulé RTI-Bot, etc.).

Le/La candidate retenu aura à sa disposition différents systèmes d'acquisition RTI-Spectrales, à base de dôme et de bras robotisé avec les logiciels associés de pilotage, traitement et rendu.

Financement : MESRI Etablissement

Dossier à envoyer pour le **20 mai 2025**

Début du contrat : 1^{er} Octobre 2025

Salaires mensuel brut : 2200€ (à partir du 1^{er} janvier 2026 : 2300€ brut)

Direction de la thèse :

Mansouri Alamin alamin.mansouri@ube.fr

Applicants are invited to submit their application to the PhD supervisors.

Application must contain the following documents:

- CV
- Lettre de Motivation
- exemple d'article ou projet effectué dans le cadre du cursus master
- Relevés de notes du master2 ou équivalent
- Au moins une lettre de recommandation ou coordonnées d'une personne référente.

Thesis title: Multi-objective optimization of complex surface appearance acquisition and modeling by AI approaches

Host Laboratory: ImViA (Imagerie et Vision Artificielle)

Speciality: Computer Science

Keywords : Visual appearance, RTI, Multi-objective Optimisation

Thesis subject detail :

The visual appearance of a surface is the result of highly complex processes. On the one hand, there are multi-physical phenomena concerning the interaction between the observed surface and its luminous environment. On the other, there are the psychovisual mechanisms intrinsic to the human visual system. The mastery of appearance is a major challenge in many fields, such as industry, particularly in the luxury goods, cosmetics, packaging, aeronautics and automotive sectors, but also in cultural fields (digital cultural heritage) and the creative industries, where the need to digitize appearance is growing.

Several methods have been implemented to address the challenge of controlling surface appearance. The most common approach is to carry out one or more stages of surface appearance quality control, using visual-tactile sensory analysis. This sensory approach is still the industry standard today, even if it is intrinsically and inevitably subjective, as it is carried out by a human controller, making the result difficult to repeat and/or reproduce, as defined in Figure 1. The instrumental approach, which aims to implement a physical measurement of one or more attributes acting on the appearance of surfaces (roughness with or without contact, reflectance, gloss, etc.) is another way of attempting to meet this challenge. The idea of digitizing the appearance of surfaces raises the possibility of objectively quantifying appearance attributes and, ultimately, enabling the functional control of manufacturing processes (in the industrial context) or the restoration/safeguarding of surfaces (in the heritage context) and surface finishing.

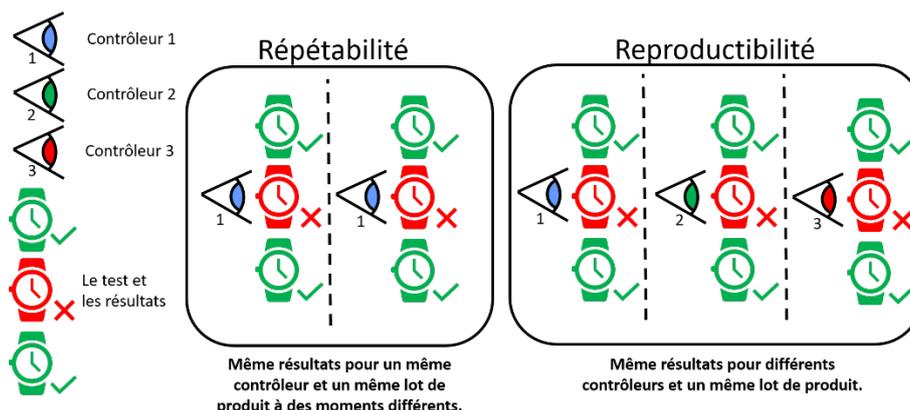


Figure 1. Repeatability and reproducibility during visual inspection

One of these so-called instrumental approaches is based on an imaging technique that focuses on digitizing reflectance. The reflectance of a surface point can be defined as the proportion of light reflected by a surface point relative to a reference (often a Lambertian white point). Generally speaking, reflectance can be described by two main components: the angular component and the spectral component. The former expresses the geometric relationship between the illumination source, the observed surface and the

observer/camera. The second is related to reflection as a function of wavelength. By changing the spatial position of the illumination source and filtering the reflected light according to wavelength, these two components can be measured.

The imaging technique known as Reflectance Transformation Imaging (RTI), which measures the angular component, has undergone significant development in the field of cultural heritage and is gradually being deployed in the industrial sector. The RTI technique is analogous to the way humans instinctively inspect a surface. As human controllers do when performing a sensory analysis, they shimmer the surface under its lighting environment by rotating the surface, thus changing the angle of illumination.

From an implementation point of view, the RTI technique consists of a fixed camera orthogonal to the surface and lighting directed at the surface, whose position (θ , ϕ) is varied while remaining at a fixed distance from the object of study, as shown in the examples in Figure 2. For certain illumination angles, images are acquired. In each image, the local angular reflectance of the surface is measured. Thus, from an RTI acquisition, a batch of images is obtained, as shown in Figure 2, which can be used to reconstruct the scene with a virtual light source to aid visual inspection of the surface.

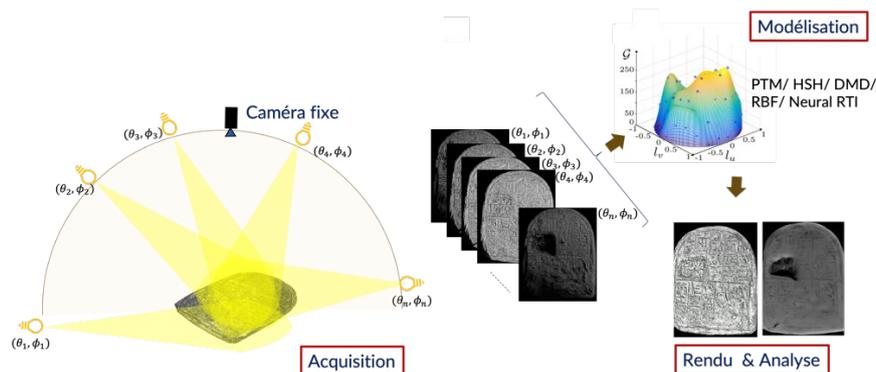


Figure 2. RTI data acquisition and processing pipeline

Challenges

RTI is a multimodal imaging technique producing large quantities of complex data, especially when combined with other imaging modalities (Multi-spectral, Photostereometry, focus variation, etc.). Despite a great deal of research and progress in making data acquisition, processing and analysis more robust and useful to the end-user, the RTI technique still has its limitations.

Indeed, RTI acquisitions are often performed in white light, and the images recorded are either grayscale or color (when a color camera is used). Given the limitations of both intensity and color information, multispectral acquisition combined with RTI acquisition is becoming increasingly popular. This raises the problem of modeling spectral and angular information together, and using them to optimize both acquisition and subsequent processing (highlight construction, rendering, etc.).

In addition, an important parameter of RTI acquisition concerns the illumination positions for which images are to be acquired. These positions are generally uniformly distributed in theta and phi space and, depending on the acquisition device, their number is either fixed or left to the discretion of the operator performing the acquisition. This choice of parameters raises a number of issues. Firstly, the uniform arrangement of illumination angles is not necessarily suitable for all the surfaces studied. Each surface, or even each point in the case of multi-materials, has its own surface properties, interacting differently with the lighting environment. The uniform arrangement of illumination angles provides an overview of the average behavior of the surface, but does not enable a measurement to be adapted and optimized for it. Secondly, the number of lighting positions has a major influence on acquisition time. However, certain fields, such as industry, require very short measurement times to meet the needs of quality control in production, where speed is a prime criterion. It is therefore important to reduce RTI image acquisition cycle times by optimizing the number and spatial distribution of lighting positions, while maintaining the same data quality for the end user.

Approach

Advances in machine learning, in particular neural network-based techniques, have revolutionized digital imaging, including unconventional imaging. These methods have demonstrated their relevance and performance in a variety of tasks such as segmentation, detection, localization and tracking, in diverse application domains such as medicine, remote sensing, quality control and bio-mechanics. They often replace exhaustive, sometimes complex analytical models with implicit models built from fully or partially labeled experimental data. These approaches are preferred when training data are available, and are even indispensable when the underlying phenomena are complex, characterized by high non-linearity and/or the absence of complete analytical models. This is particularly the case for appearance characterization applications related to visual perception, where cognitive processes are complex and multiphysical.

The research work will focus on the multi-objective optimization of the spectral RTI acquisition process to make it fast and adaptive. Speed would be the consequence of continuous acquisition, while adaptability implies determining the optimal number of illumination directions and their spatial distribution (illumination path) for each material or surface type. The first is a supervised or semi-supervised approach involving the creation and training of a deep neural network on real and simulated data from several materials, to determine the critical lighting directions.

As a complement, a more exploratory approach will integrate the capabilities of generative AI models to learn an implicit representation of BRDF from partial sampling. These models will make it possible to generalize appearance modeling to new materials with little data, by inferring plausible photometric behaviors. Generative AI will also play a role in the simulation and evaluation of acquisition scenarios, enabling different configurations to be tested virtually without the need for systematic physical acquisition.

The second approach will be inspired by recent techniques in 3D reconstruction, enabling poses to be estimated and 3D objects to be rendered realistically from a few positions. It will aim to implicitly reconstruct spatial and spectral information from limited illumination views, using neural network architectures modified to incorporate physical constraints linked to surface reflection properties. These models could ultimately produce real-time interactive rendering of spectral response under variable illumination.

Applicant profile

Master's degree or equivalent in computer vision, imaging and artificial intelligence.

Knowledge of appearance imaging and associated physical and graphical models.

Solid knowledge of programming and neural network architectures.

Hosting team

The candidate will work in collaboration with members of the MultiAspeX theme of the CORES team. Within MultiAspex, several large-scale projects are underway: for example, the European Horizon Europe project entitled CHEMINOVA (<https://cheminova.eu>), the ANR23 PRCE project entitled RTI4.0 and the Industrial Maturation project entitled RTI-Bot, etc.).

The successful candidate will have at his/her disposal various RTI-Spectral acquisition systems, based on a dome and a robotic arm, with associated control, processing and rendering software.

Funding : MESRI Etablissement

Application is due **on May 20, 2025**

Contrat start: Octobre 1st 2025

Goss Monthly Salary : 2200€ (2300€ gross after January 2026)

Direction de la thèse :

Mansouri Alamin alamin.mansouri@ube.fr

Applicants are invited to submit their application to the PhD supervisors.

Application must contain the following documents:

- CV
- Cover letter
- example of article or projects carried out on master degree
- Master2 ou equivalent transcripts
- At least one recommendation letter or coordinates of a reference.