

École Doctorale STIM  
Sciences et Technologies de l'In-  
formation et Mathématiques

**Spécialité :** Automatique, Robotique, Trai-  
tement du Signal

**Laboratoire :** Laboratoire d'Ingénierie des  
Systèmes Automatisés (LISA EA-4094), Uni-  
versité d'Angers

**Equipe :** Traitement de l'information pour  
les processus physiques complexes

**Imagerie multimodalité appliquée au domaine du végétal :  
Couplage d'un capteur de profondeur à éclairage structuré  
avec une caméra thermographique**

Yann Chéné

Mél : yann.chene@univ-angers.fr

**Résumé :** Un capteur de profondeur placé en vue de dessus permet de segmenter les feuilles d'une plante mono-axiale. D'autres modalités d'imagerie permettent de visualiser la présence de pathogènes à la surface des feuilles des plantes. Le couplage multimodalité d'un capteur de profondeur (séparation des feuilles) avec une autre modalité d'imagerie (détection de pathogènes) doit permettre la détection et la quantification de pathogènes sur plante entière mais aussi pour chaque feuille individuellement. Pour cet article, le capteur de profondeur utilisé est un capteur bas-coût d'introduction récente, la Kinect de Microsoft. Ce capteur de profondeur utilise le principe de l'éclairage structuré. La première partie de cet article expose les principes géométriques et physiques utilisés par les capteurs de profondeur à éclairage structuré. Cette première partie est complétée par la présentation de la technologie et des performances du capteur de profondeur de la Kinect. La deuxième partie de cet article est consacrée à la mise en place d'un capteur multimodalité pour effectuer la détection de pathogènes sur plante entière et sur les feuilles individuelles. Pour cet article, le capteur multimodalité est composé du capteur de profondeur de la Kinect et d'une caméra thermographique. L'utilisation de ce système sans contact peut permettre de remplacer les mesures actuelles intrusives ou destructives.

**Mots clés :** *Capteur de Profondeur, Éclairage structuré, Imagerie multimodalité, Plantes, Pathogènes*

## 1 Introduction

Les capteurs 3D permettent de répondre à des problématiques portant sur l'anatomie des végétaux. Ces capteurs sont utilisés à différentes échelles pour étudier l'architecture des végétaux, leurs compositions internes ou suivre le développement de leurs racines. La Kinect de Microsoft (Fig. 1A), initialement conçue pour le domaine du jeu vidéo, est un capteur 3D de la famille des capteurs RVB-Profondeur. Les capteurs RVB-Profondeur donnent accès à une image RGB ainsi qu'à la profondeur des objets du premier plan de la scène. Le capteur de profondeur de la Kinect utilise le principe de l'éclairage structuré. Il a récemment été utilisé pour segmenter les feuilles de plantes mono-axiales vue de dessus [1].

Le phénotypage consiste à visualiser et quantifier les observables des plantes. Ces observables peuvent être de type anatomique (taille, orientation des feuilles,...) ou physiologique (couleur des feuilles, teneur en eau ou en chlorophylle,...). Des observables anatomiques ont été étudiées à l'aide d'un capteur de profondeur [1]. D'autres modalités d'imagerie, l'imagerie hyperspectrale, la thermographie [2] et la fluorescence de chlorophylle [2], sont utilisées pour l'acquisition de paramètres physiologiques. Une donnée physiologique pour les plantes mono-axiales est la présence de pathogènes, agents infectieux, à la surface des feuilles. L'utilisation d'une caméra

thermographique permet de détecter et quantifier la présence de pathogènes (via une baisse de température) avant même l'apparition des premiers symptômes visuels.

L'association d'un capteur de profondeur et d'une autre modalité d'imagerie ouvre la possibilité d'acquérir les observables physiologiques des plantes non seulement sur plante entière mais aussi pour chaque feuille individuellement. La première partie de cet article expose les principes géométriques et physiques utilisés par les capteurs de profondeur à éclairage structuré. Cette première partie est complétée par la présentation de la technologie et des performances du capteur de profondeur de la Kinect. La seconde partie est consacrée au couplage d'un capteur de profondeur avec une autre modalité d'imagerie pour détecter la présence de pathogènes non seulement sur plante entière mais aussi pour chaque feuille individuellement. La méthode de couplage multimodalité exposée dans cet article est valable quelle que soit la modalité d'imagerie associée au capteur de profondeur. Cette partie est illustrée avec l'exemple d'un capteur multimodalité formé du capteur de profondeur de la Kinect et d'une caméra thermographique. Ce capteur multimodalité est utilisé pour la détection d'un pathogène, la tavelure du pommier. La dernière partie est constituée de la conclusion et des perspectives.

## 2 Le capteur de profondeur à éclairage structuré

Un capteur de profondeur acquiert la carte de profondeur de la scène. Cette carte de profondeur est une image dont la valeur en chaque pixel retranscrit la distance entre le capteur et un point du premier plan de la scène. Un capteur de profondeur à éclairage structuré [3] est composé d'une source extérieure de lumière et d'un capteur de vision. La source de lumière permet de projeter dans la scène un pattern lumineux de forme connue. Le capteur de vision visualise la disposition de ce pattern dans la scène. Les profondeurs des objets du premier plan de la scène sont déduites des déformations du pattern par rapport à sa forme initiale. La profondeur d'un point de l'éclairage structuré est retrouvée par triangulation entre la position du point dans l'éclairage structuré initial et son point image conjugué dans le plan image du capteur de vision. La relation de triangulation entre le point de l'éclairage structuré et son point image conjugué dépend de l'orientation relative entre l'éclairage structuré et le capteur de vision mais aussi de leur écartement et des paramètres intrinsèques du capteur de vision (distance focale, distorsions...). Cette relation est obtenue par calibration du capteur de profondeur. La forme de l'éclairage structuré permet de retrouver les points conjugués dans l'image visualisée par le capteur de vision. L'éclairage structuré peut être composé de lignes de couleurs différentes (séquence de De Bruijn), de la superposition de lignes binaires de tailles variables, de patterns binaires sinusoïdaux déphasés, d'une grille de points binaires (ou formes binaires) remplie suivant une loi pseudo-aléatoire.

Dans le capteur de profondeur de la Kinect, l'éclairage structuré est composé de spots infrarouges qui forment une grille binaire [4]. Cette grille est remplie suivant une loi pseudo-aléatoire de telle sorte que le voisinage de chaque point soit unique. Cette unicité permet de retrouver, sur l'image du capteur de vision (capteur infrarouge), le point conjugué de chaque spot du pattern structuré par un calcul de corrélation. Les caractéristiques de fonctionnement du capteur n'ont pas été officiellement dévoilées par son créateur. Par contre, la technologie utilisée induit des distances minimale et maximale de fonctionnement. En effet, pour des distances inférieures à  $d_{min}$ , la résolution du capteur de vision ne permet pas de séparer les points binaires de la grille, donc la profondeur n'est pas mesurable. La distance  $d_{min}$  est environ égale à 50 cm. La présence d'une distance maximale de mesure est due à l'atténuation des spots infrarouges avec la distance. Pour des distances supérieures à  $d_{max}$ , les spots ne sont plus visibles pour le capteur infrarouge, la profondeur n'est donc plus mesurable. La distance  $d_{max}$  est environ égale à 600 cm. La résolution en profondeur de ce capteur augmente (se dégrade) de façon quadratique avec la profondeur [4]. Pour notre distance de travail (typiquement 100 cm), la résolution en profondeur est de l'ordre de 1 cm.

### 3 Un capteur multimodalité pour la détection de pathogènes

Les pathogènes sont des agents infectieux qui attaquent les feuilles des plantes en les desséchant. Des études biologiques actuelles portent sur l'observation des dynamiques de population des pathogènes à la surface des feuilles des plantes. Ces études ont pour but de créer des espèces de plantes qui résisteront aux attaques des pathogènes. Des modalités d'imagerie comme les capteurs de fluorescence de chlorophylle, de thermographie ou hyperspectrale, permettent de détecter la présence de pathogènes avant même l'apparition des symptômes visuels [2]. Jusqu'à présent, les acquisitions avec ces capteurs sont faites sur feuille unique, soit sur feuille détachée (contrôle destructif), soit à l'aide d'un système d'isolement (contrôle intrusif). Ces acquisitions concernent les feuilles supérieures de plantes mono-axiales. Un capteur de profondeur placé en vue de dessus permet la séparation des feuilles d'une plante mono-axiale. Le couplage d'un capteur de profondeur avec une de ces modalités doit permettre l'observation de la dynamique de population des pathogènes pour chaque feuille individuellement sans destruction ni intrusion.

Pour mettre en place un capteur multimodalité, il faut tout d'abord mettre en place une étape de calibration. Cette étape de calibration va permettre de déterminer les paramètres intrinsèques de chacun des systèmes de vision ainsi que leurs positions relatives. La calibration du capteur multimodalité permet donc de recalibrer spatialement de façon précise les informations apportées par deux capteurs distincts et complémentaires. La méthode de calibration mise en œuvre pour cet article est détaillée dans [5]. Un calcul d'optimisation est effectué pour retrouver les paramètres intrinsèques et extrinsèques du capteur multimodalité. Ce calcul est basé sur plusieurs acquisitions d'un plan associé à un damier de taille connu. Pour chaque acquisition, le plan et donc le damier de calibration doivent avoir une position et une orientation uniques. Le damier de calibration doit être bien contrasté en fonction de l'information délivrée par la modalité physiologique (température, couleur,...). Une fois la calibration effectuée, la carte de profondeur acquise par le capteur de profondeur peut être projetée dans le référentiel de la modalité physiologique en fonction des paramètres calculés. Pour séparer les feuilles, l'algorithme original de segmentation, que nous avons proposé dans [1], est appliqué à la carte de profondeur projetée. La segmentation des feuilles permet d'obtenir des masques pour chacune des feuilles de la plante. Pour finir, ces masques sont appliqués à l'image de la modalité physiologique pour faire la quantification de pathogènes pour chaque feuille individuellement.

Dans cet article, le capteur de profondeur est couplé avec une caméra thermographique. La Fig. 1B illustre cette association. Le pathogène étudié est la tavelure du pommier. Au moment des acquisitions, la présence de ce pathogène n'était pas visible visuellement (Fig. 1C). En thermographie (Fig. 1D), sa présence est mise en contraste par une baisse locale de la température. L'algorithme de segmentation est appliqué à l'image de profondeur (Fig. 1C) du pommier en vue de dessus pour obtenir une image segmentée (Fig. 1F) dans laquelle un numéro est attribué à chaque feuille. Pour finir, l'image thermographique de chaque feuille individuelle est obtenue par application de son masque à l'image thermographique. Fig. 1G, Fig. 1H et Fig. 1I sont respectivement les images thermographiques des feuilles numéros 7, 4 et 3. Ces trois feuilles se trouvent à trois stades différents d'infection. La feuille 7 est saine, la feuille 4 possède les premiers symptômes d'infection et la feuille 3 est totalement infectée. La segmentation de ces feuilles montre la présence de dépassements sur les bords des feuilles (présence de la température du fond ou d'une autre feuille). Ces dépassements, minimes, sont dus aux approximations lors de l'étape de calibration mais aussi à la précision de la Kinect.

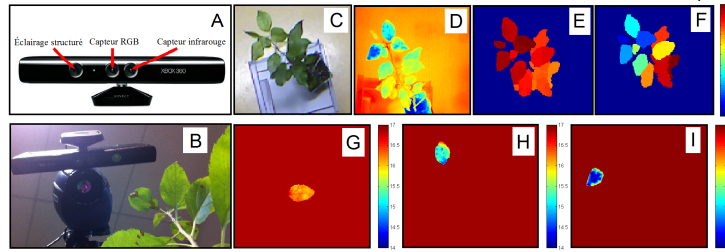


FIGURE 1 – Le capteur multimodalité (B) permet de détecter la présence de pathogènes sur plante entière. Ce capteur est composé d’une caméra thermographique et du capteur de profondeur de la Kinect (A). Il est utilisé pour effectuer l’étude de la dynamique de population de pathogènes (tavelure) sur les feuilles individuelles pour des plantes mono-axiales (pommier). Au moment des acquisitions, la présence de ce pathogène n’était pas visible visuellement (C). Sur l’image thermographique (D), sa présence est mise en contraste par une baisse locale de la température. L’algorithme de segmentation de [1] est appliqué à l’image de profondeur (E) du pommier en vue de dessus pour obtenir une image segmentée (F) dans laquelle un numéro est attribué à chaque feuille. Les images G, H et I sont respectivement les images thermographiques des feuilles numéros 7, 4 et 3. La feuille 7 est saine, la feuille 4 possède les premiers symptômes d’infection et la feuille 3 est totalement infestée.

## 4 Conclusion et perspective

Le système de vision multimodalité, résultat du couplage entre un capteur de profondeur et d’une autre modalité d’imagerie, permet de faire de la détection de pathogènes sur plantes entières. L’utilisation d’un tel système peut, à terme, remplacer les méthodes de quantification actuelles qui présentent un caractère intrusif et destructif. Dans cet article, le capteur multimodalité est composé du capteur de profondeur de la Kinect et d’une caméra thermographique. Les couplages d’un autre capteur de profondeur (scanner 3D à laser, caméra Time Of Flight...) avec un autre capteur physiologique (Caméra hyperspectrale, capteur de fluorescence de chlorophylle...) sont eux aussi possibles. De tels couplages sont soumis à la possibilité de mettre en place un étape de calibration commune. Dans la continuité de cet article, une étude sur l’influence des dépassements de contours devra être effectuée pour valider l’utilisation de ce type de système pour la détection et la quantification automatisées de pathogènes. Si les résultats de cette étude sont positifs, le système de vision multimodalité présenté dans cet article pourra être utilisé pour le suivi de la dynamique de population de pathogènes à l’échelle des feuilles individuelles ou de la plante entière.

## Références

- [1] Y. Chéné, D. Rousseau, P. Lucidarme, J. Bertheloot, P. Morel, E. Belin, F. Chapeau-Blondeau. “On the use of depth camera for 3D phenotyping of entire plants.” *Computers and Electronics in Agriculture*, 82 :122–127, 2012.
- [2] E. Belin, D. Rousseau, T. Bourreau, V. Caffier. “Thermography versus chlorophyll fluorescence imaging for detection and quantification of apple scab.” *Computers and Electronics in Agriculture*, 90 :159–163, 2013.
- [3] J. Geng. “Structured-light 3D surface imaging : a tutorial.” *Advances in Optics and Photonics*, 3 :128–160, 2011.
- [4] K.Khoshelham, S. Elberink. “Accuracy and resolution of Kinect depth data for indoor mapping applications.” *Sensors*, 12 :1437–1454, 2012.
- [5] C. Herrera, J. Kannala, J. Heikkilä. “Joint depth and color camera calibration with distortion correction.” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 34 :2058–2064, 2012.