

Analyse Modale Opérationnelle par Caméras d'une Structure de Grande Hauteur

Y. Han¹, G. Cumunel², S. Lo Feudo¹, F. Renaud¹

¹ ISAE-SUPMECA, Laboratoire Quartz - EA7393, Saint-Ouen, France, {yunhyeok.han, franck.renaud, stefania.lofeudo}@isae-supmeca.fr

² Laboratoire Navier, Ecole des Ponts, Univ Gustave Eiffel, CNRS, Marne-la-Vallée, France, gwendal.cumunel@enpc.fr.

Résumé —

Ce papier se concentre sur l'application d'une méthode de mesure utilisant plusieurs caméras pour l'analyse des vibrations d'une structure de grande hauteur (grue à tour). Il présente une approche permettant de mesurer le déplacement 3D d'une grue à l'aide de caméras. La validation de l'approche est effectuée en comparant les résultats à ceux obtenus à partir de données accélérométriques. Les mesures du déplacement 3D obtenues ont ensuite été utilisées pour effectuer une analyse modale opérationnelle à l'aide de la méthode Enhanced Frequency Domain Decomposition afin d'estimer les propriétés dynamiques de la grue pendant son fonctionnement.

Mots clés — Vision par ordinateur ; Mesure de champ ; CIN ; Vibrations ; Analyse modale opérationnelle.

1 Introduction

L'analyse modale opérationnelle (OMA) est une méthode permettant d'estimer les propriétés dynamiques d'une structure dans son état opérationnel lorsqu'une excitation maîtrisée n'est pas possible [1]. Par conséquent, en utilisant l'OMA sur les mesures des vibrations d'une structure, par exemple dans le domaine du génie civil, ses propriétés modales peuvent être extraites et surveillées pendant son fonctionnement. Cependant, la méthode classique de mesure des vibrations utilise des capteurs nécessitant d'être en contact avec la structure, ce qui limite le nombre de capteurs pouvant être installés sur les grandes structures et ne permet pas d'accéder à certaines parties de la structure [2].

Les techniques de mesure basées sur la vision constituent une alternative prometteuse aux capteurs traditionnels dans l'analyse des vibrations d'une structure, permettant des mesures plein champ et sans contact [3]. La corrélation d'images numériques (CIN) est une technique utilisée pour la mesure des vibrations car elle permet de suivre une région d'intérêt. Pour la CIN, la fixation de plusieurs mires sur la structure ou l'utilisation d'un mouchetis sur la surface de la structure améliorent la robustesse et la précision de la mesure [4, 5]. Cependant, la préparation de la structure pour la mesure est un défi pour les structures du génie civil, en particulier lorsqu'elles sont en fonctionnement. En revanche, si les éléments de la structure sur les images contiennent suffisamment d'informations sur la dynamique du système, au niveau des sommets d'arêtes par exemple, il est possible d'utiliser la CIN. Même si de nouvelles approches permettent de mesurer le déplacement 3D d'une structure à partir d'une seule caméra et d'un modèle EF [6], il est courant d'utiliser plusieurs caméras et des techniques de triangulation à cette fin [7]. Ce papier propose d'analyser les vibrations d'une grue en fonctionnement à l'aide d'une méthodologie basée sur les images acquises par plusieurs caméras. Pour cela, les méthodes mises en œuvre afin de mesurer le déplacement 3D par l'intermédiaire de plusieurs caméras sont introduites, notamment la CIN. Ces méthodes sont validées en les comparant avec les données mesurées par un accéléromètre triaxial. Ensuite, en utilisant le déplacement 3D estimé de la grue, une analyse modale opérationnelle est réalisée afin d'obtenir les propriétés dynamiques telles que les déformées modales, les fréquences naturelles et les taux d'amortissement modaux de la grue en fonctionnement.

2 Méthode

2.1 Acquisition et traitement des images

Pour la mesure du déplacement de la grue, l'acquisition des images a été réalisée à l'aide d'un réseau de caméras, composé de 5 caméras. Les caméras ont été placées au deuxième étage du bâtiment historique de ISAE-Supméca, en face de la grue, comme le montre la Figure 1. Les spécifications de l'acquisition des images par les caméras sont présentées dans la Table 1. Deux caméras de 1,2 MP (caméras 1 et 2) et trois caméras haute résolution (caméras 3, 4 et 5) ont été utilisées. La fréquence d'acquisition de toutes les caméras a été fixée à 31,25 Hz, la bande de fréquences d'intérêt pour la grue étant inférieure à 2 Hz. Toutes les caméras ont été synchronisées en positionnant dans le champ de vision commun à toutes les caméras (notamment au sommet de la grue) un panneau LED clignotant [8]. Pour la validation, un accéléromètre triaxial synchronisé avec l'horloge de la caméra (NI myRIO) a été installé au sommet de la grue.

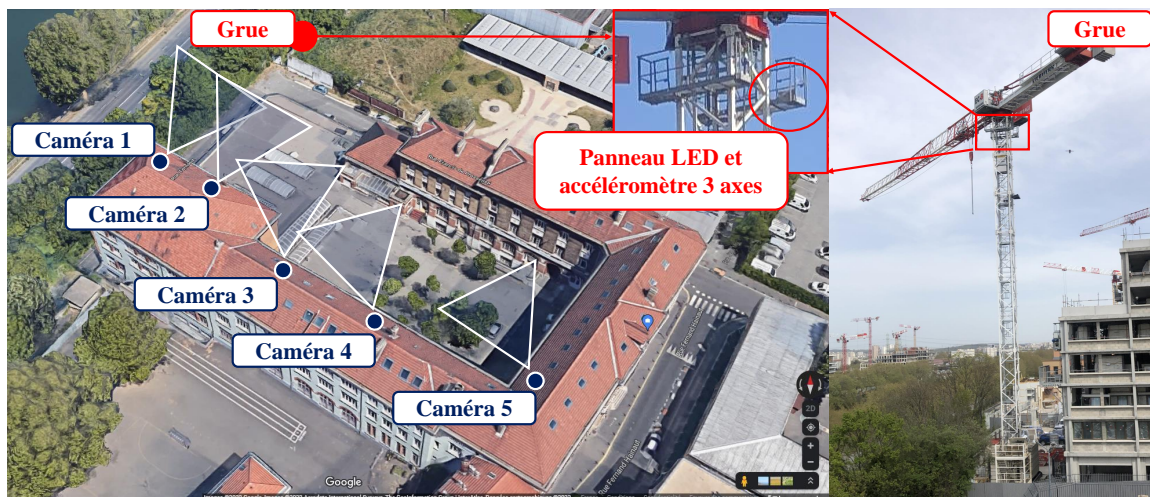


FIGURE 1 – Configuration du système d'acquisition pour la mesure du champ de déplacement vibratoire d'une grue. Positions des caméras à l'intérieur du bâtiment historique de ISAE-Supméca, du panneau LED et de l'accéléromètre au sommet de la grue.

TABLE 1 – Spécifications des caméras utilisées pour la mesure du champ de déplacement vibratoire de la grue.

	Caméra 1	Caméra 2	Caméra 3	Caméra 4	Caméra 5
Caméra Modèle	Basler acA1300-200um	Basler acA1300-200uc	Vieworks vc-12mx	JAI SP-12000	JAI SP-12000
Résolution (px)	1280 × 1024	1280 × 1024	4096 × 3072	4096 × 2572	4096 × 3072
Temps d'exposition	1 ms	2 ms	3 ms	2,5 ms	2,5 ms
Fréquence d'acquisition	31,25 Hz				
Focale objectif	8 mm	12 mm	24 mm	35 mm	35 mm

L'étalonnage des caméras est essentiel pour déterminer les paramètres permettant de projeter des points, défini dans l'espace 3D galiléen, sur le plan 2D de l'image [9]. Pour réaliser la calibration intrinsèque de chaque caméra, nous avons utilisé un damier, comme celui montré dans la Figure 2a, photographié sous différents angles. Cela a permis d'identifier les paramètres intrinsèques de chaque caméra : distance focale, point principal et distorsion. Les sommets d'arêtes du damier, en coordonnées 3D, et les points correspondants, en coordonnées d'image 2D, ont été utilisés pour estimer les paramètres intrinsèques en minimisant l'erreur de re-projection. L'algorithme de calibration utilisé est celui de Zhang [9], disponible dans la bibliothèque open-source OpenCV. Dans un deuxième temps, les paramètres extrinsèques de chaque caméra ont été calculés. Ces derniers représentent la position de la caméra par rapport

à un repère local 3D fixé sur la structure. Neuf points correspondant à des « coins » de la grue ont été sélectionnés sur l'image et leurs coordonnées dans le repère 3D ont été établies à partir de la géométrie de la grue. La calibration extrinsèque a ensuite été effectuée en utilisant la correspondance entre les points 3D et les points projetés en 2D dans la première image acquise par chaque caméra. Enfin, la position de chaque caméra a été estimée dans le repère 3D en minimisant l'erreur de re-projection. La procédure est résumée en Figure 2b.

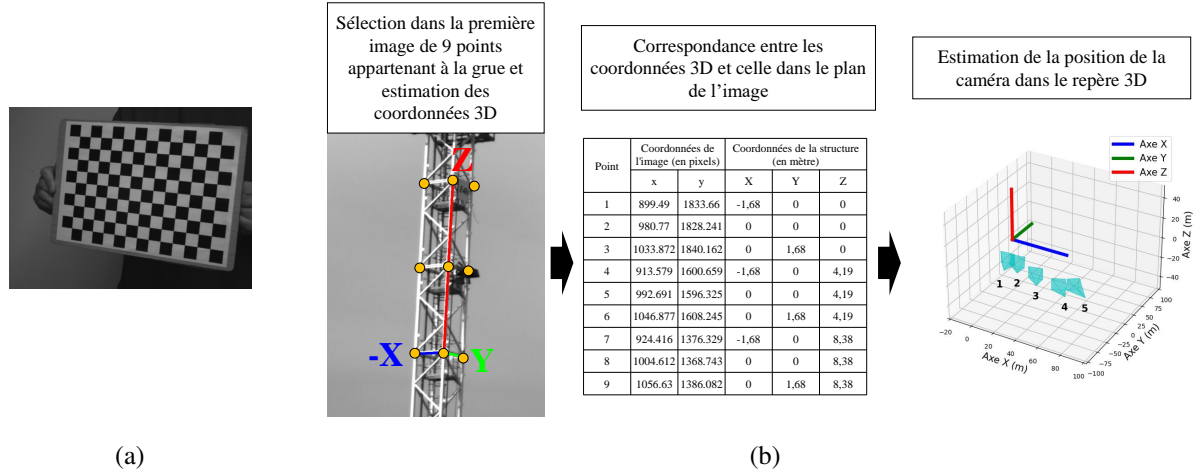


FIGURE 2 – Étalonage des caméras en deux étapes : (a) calibration intrinsèque effectuée à l'aide d'un damier et de la méthode de Zhang [9], (b) calibration extrinsèque (estimation de la position des caméras) effectuée à l'aide de la correspondance entre les coordonnées des points en 3D et en 2D dans le plan de l'image. Les points 3D en unités métriques ont été obtenus en se référant à la géométrie connue de la grue.

La CIN peut être utilisée pour obtenir une correspondance entre les points de l'image de référence et ceux de l'image suivante. Par conséquent, la région d'intérêt (ROI) de référence, définie comme un rectangle, peut être suivie et son déplacement dans l'image, en coordonnées 2D, peut être obtenu. La fonction de transformation présentée dans l'Équation (1), qui représente la déformation de la ROI dans l'image déformée, a été définie comme une fonction de transformation du premier ordre, équivalente à une transformation affine.

$$\begin{aligned}
 x'_i &= x_i + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \\
 y'_j &= y_j + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \\
 \mathbf{p} &= \left[u \quad v \quad \frac{\partial u}{\partial x} \quad \frac{\partial u}{\partial y} \quad \frac{\partial v}{\partial x} \quad \frac{\partial v}{\partial y} \right]
 \end{aligned} \tag{1}$$

où :

- x_i et y_j sont les coordonnées du i -ème et du j -ème point de la ROI dans l'image de référence,
- x'_i et y'_j sont les coordonnées des points dans l'image déformée,
- u et v sont les déplacements de la ROI suivant les directions x et y de l'image,
- \mathbf{p} est le vecteur des paramètres de la fonction de transformation.

Les coordonnées des points (x'_i, y'_j) dans la ROI déformée peuvent être obtenues avec une résolution sous-pixel. Un schéma d'interpolation sous-pixel bi-cubique a été choisi (Équation 2).

$$g(x, y) = \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 \alpha_{mn} x^m y^n \tag{2}$$

où $g(x, y)$ est la valeur interpolée à l'emplacement du sous-pixel (x, y) et α_{mn} est le coefficient de l'interpolation bi-cubique.

Afin d'évaluer la similarité entre la ROI de référence et celle déformée dans les images suivantes, un critère de corrélation a été défini. Étant donné que les critères de corrélation *Zero-Normalized Cross Correlation* (ZNCC) et *Zero-Normalized Sum of Squared Difference* (ZNSSD) offrent la plus grande robustesse au bruit et sont insensibles aux variations d'intensité lumineuse [10], le critère ZNSSD, présenté dans l'Équation 3, est utilisé pour définir la similarité entre les ROIs.

$$C_{ZNSSD}(\mathbf{p}) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x'_i, y'_j) - g_m}{\Delta g} \right]^2$$

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - f_m]^2}$$

$$\Delta g = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j) - g_m]^2}$$
(3)

où :

- $f(x_i, y_j)$ est le niveau de gris du pixel dans l'image de référence,
- f_m est le niveau de gris moyen de la ROI dans l'image de référence,
- $g(x'_i, y'_j)$ est le niveau de gris du pixel dans l'image déformée,
- g_m est le niveau de gris moyen de la ROI déformée et $2M + 1$ est la taille de la ROI.

Un algorithme itératif de corrélation croisée dans le domaine spatial a été utilisé pour estimer le déplacement sous-pixel. La méthode d'itération de Gauss-Newton a été utilisée avec le vecteur de gradient du critère de corrélation et l'approximation de la matrice hessienne pour obtenir la transformation de la ROI. Comme présenté sur la Figure 3, 12 ROIs positionnées sur la structure de la grue sont suivies par toutes les caméras. Le graphique montre le déplacement en coordonnées d'image 2D d'une ROI de référence (ROI 12).

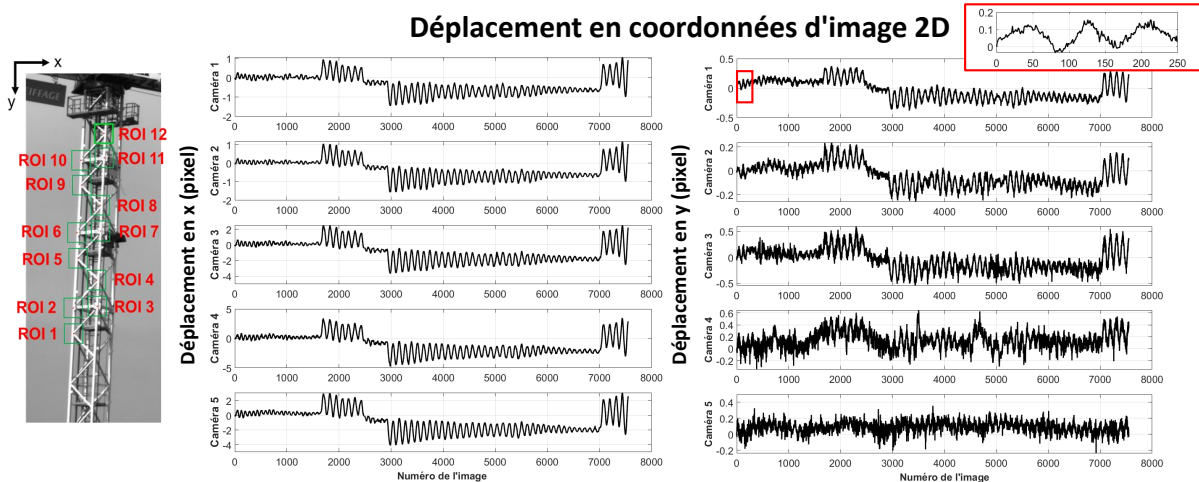


FIGURE 3 – Suivi d'une région d'intérêt (ROI) par CIN et résultats de la ROI 12. Les déplacements de la ROI, en coordonnées d'image 2D, sont présentés pour chaque caméra.

À partir des matrices de projection de chaque caméra, estimées lors de l'étalonnage, et du déplacement des ROIs en coordonnées d'image 2D, obtenu à partir des différentes caméras synchronisées, le déplacement des ROIs en coordonnées structurales 3D peut être reconstruit. Une méthode de triangulation non linéaire a été utilisée pour déterminer la position 3D à l'aide des données de déplacement 2D de chaque caméra. Cette méthode permet de trouver la position en 3D en minimisant l'erreur de re-projection dans l'image [7].

2.2 Analyse modale opérationnelle

La méthode FDD peut être appliquée pour identifier les propriétés modales d'une structure sans connaître l'excitation, en utilisant une méthode de pick-peaking sur la décomposition en valeurs singulières (SVD) de la matrice de densité spectrale de puissance (PSD). Cependant, la FDD classique est limitée lorsqu'il s'agit d'estimer le taux d'amortissement modal. Comme extension, la méthode Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD) peut être considérée pour estimer le taux d'amortissement modal. L'EFDD applique la FFT inverse aux pics de résonance choisis pour transformer la PSD en réponses dans le domaine temporel [11]. Pour l'analyse modale opérationnelle de la grue à tour, les déplacements 3D mesurés dans les 12 ROIs positionnées sur la structure sont utilisés ; l'EFDD est appliquée en utilisant la librairie Python PyOMA [12].

3 Résultats et discussion

3.1 Mesure du déplacement 3D et validation

Le déplacement en 3D de la ROI 12, obtenu à partir de la méthodologie développée, est présenté dans la Figure 4. La grue était en fonctionnement durant le chantier. Nous avons donc pu observer plusieurs états de la structure. Par exemple, la grue vibrait pendant l'état de charge, durant l'intervalle de 50 à 80 secondes. Entre 80 et 95 secondes, il y a eu une phase de déchargement. Ensuite, la structure vibrait sans charge jusqu'à ce qu'elle soit de nouveau chargée à 230 secondes. Une amplitude vibratoire du déplacement d'environ 10 mm est visible sur les axes X et Y du graphique. Cependant, les vibrations sur l'axe Z n'ont pas été clairement identifiées.

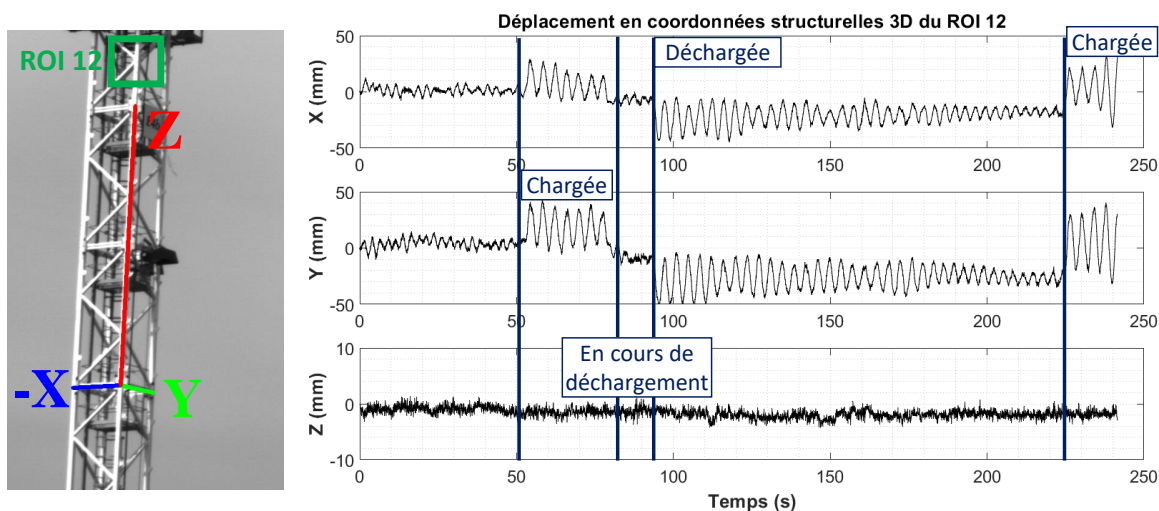


FIGURE 4 – Reconstruction du déplacement en 3D de la grue à l'aide de caméras. Les déplacements en 3D d'une partie de la structure (ROI 12) sont indiqués dans le système de coordonnées rattaché à la grue.

En suivant une ROI positionnée près de l'accéléromètre, la méthode basée sur l'analyse des images a été validée. Étant donné que l'accélération mesurée par l'accéléromètre et le déplacement acquis par la méthode de CIN doivent être comparés, les données d'accélération ont été filtrées, en utilisant un filtre passe-bande avec des fréquences de coupure de 0,2 Hz et 2 Hz, et intégrées numériquement. De la même manière, les données de déplacement ont été filtrées en utilisant le même filtre et dérivées numériquement. Comme le montre la Figure 5, nous pouvons constater une bonne corrélation entre les vitesses obtenues à partir des caméras et de l'accéléromètre suivant les axes X et Y. Cependant, concernant l'axe Z, la vitesse obtenue à partir des caméras par CIN est très bruitée.

3.2 Identification modale de la structure porteuse de la grue

Avec les mesures de déplacement 3D obtenues pour les 12 ROI et en utilisant l'EFDD, les deux premiers modes de la structure porteuse de la grue ont été identifiés. Les résultats sont présentés dans la

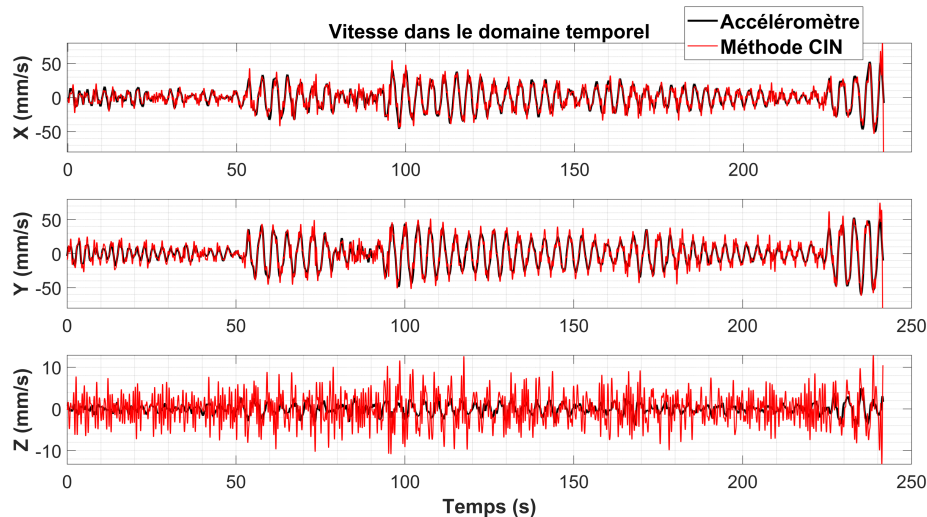
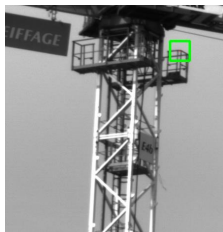


FIGURE 5 – Validation de la mesure de déplacement 3D par CIN avec un accéléromètre triaxial. La ROI à suivre dans les images est sélectionnée au point le plus proche de l'accéléromètre. Les données ont été filtrées et intégrées (ou dérivées) pour être comparées en termes de vitesse.

Table 2. La SVD de la matrice de PSD a permis de sélectionner deux pics, pour des fréquences de 0,26 Hz et 0,72 Hz. Ainsi, les deux premiers modes de flexion de la structure ont été identifiés, comme le montrent les déformées modales. Les taux d'amortissement modaux ont été identifiés et valent respectivement 2,91 % et 1,27 %. Comme la fréquence d'acquisition était de 31,25 Hz, nous n'avons pu identifier que les deux premiers modes de la structure.

TABLE 2 – Résultats de l'analyse modale opérationnelle de la structure porteuse de la grue. Identification des deux premiers modes.

		Mode 1 0,26 Hz	Mode 2 0,72 Hz
		2,91 %	1,27 %
Déformées modales	Vue de face		
	Vue de côté		

4 Conclusion

Les thématiques développées dans cette étude sont le développement et l'application d'une méthode d'analyse d'images afin de mesurer les vibrations des structures de grande hauteur pendant leur fonctionnement.

Tout d'abord, une technique de mesure des vibrations par CIN utilisant plusieurs caméras a été présentée et validée pour l'analyse des vibrations d'une grue en fonctionnement, sans nécessiter la fixation de mires artificielles. Cette méthode offre la possibilité d'obtenir plus de points de mesures sur l'ensemble de la structure qu'en utilisant des accéléromètres. Ensuite, l'utilisation des mesures de déplacement 3D basées sur les images pour estimer les propriétés dynamiques de la grue a été présentée. Cet aspect peut s'avérer pratique pour le contrôle de la santé et la maintenance des structures à grande échelle, permettant une détection précoce des anomalies structurelles.

Remerciements

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Agence Nationale de la Recherche portant la référence ANR-21-CE22-0027 (Projet DynaTimberEyes, AAPG 2021)

Références

- [1] Fahad Bin Zahid, Ong Chao, and Shin Khoo. A review of operational modal analysis techniques for in-service modal identification. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42, 08 2020.
- [2] Yujia Hu, Weigong Guo, Weidong Zhu, and Yongfeng Xu. Local damage detection of membranes based on bayesian operational modal analysis and three-dimensional digital image correlation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 131 :633–648, 2019.
- [3] Mir Abdul Kuddus, Jun Li, Hong Hao, Chao Li, and Kaiming Bi. Target-free vision-based technique for vibration measurements of structures subjected to out-of-plane movements. *Engineering Structures*, 190 :210–222, 2019.
- [4] Yanda Shao, Ling Li, Jun Li, Senjian An, and Hong Hao. Computer vision based target-free 3d vibration displacement measurement of structures. *Engineering Structures*, 246 :113040, 2021.
- [5] Stefania Lo Feudo, Jean-Luc Dion, Franck Renaud, Gaëtan Kerschen, and Jean-Philippe Noël. Video analysis of nonlinear systems with extended Kalman filtering for modal identification. *Nonlinear Dynamics*, 111(14) :13263–13277, 2023.
- [6] Franck Renaud, Stefania Lo Feudo, Jean-Luc Dion, and Adrien Goeller. 3d vibrations reconstruction with only one camera. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 162 :108032, 2022.
- [7] Richard Hartley and Andrew Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, Cambridge, 2 edition, 2004.
- [8] Yunhyeok Han, Stefania Lo Feudo, Gwendal Cumunel, and Franck Renaud. In *paper presented at the IMAC Conference*, pages 4–6, 2023.
- [9] Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11) :1330–1334, 2000.
- [10] Bing Pan, Kemao Qian, Huimin Xie, and Anand Asundi. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement : a review. *Measurement Science and Technology*, 20(6) :062001, apr 2009.
- [11] Rune Brincker, Carlos E Ventura, and Palle Andersen. Damping estimation by frequency domain decomposition. In *Proceedings of IMAC 19 : A conference on structural dynamics : Februar 5-8, 2001, Hyatt Orlando, Kissimmee, Florida, 2001*, pages 698–703. Society for Experimental Mechanics, 2001.
- [12] Dag Pasquale Pasca, Angelo Aloisio, Marco Martino Rosso, and Stefanos Sotiropoulos. Pyoma and pyoma_gui : A python module and software for operational modal analysis. *SoftwareX*, 20 :101216, 2022.