

Localisation de fréquences de vibration d'une bande en mouvement à l'aide de la vision à lumière structurée

Vibration frequencies location of a moving web with a structured light vision system

Christophe Delimal¹

Christophe Doignon¹

Dominique Knittel¹

¹ Equipe de Recherche Technologique en Enroulement

Université Louis Pasteur de Strasbourg
christophe.doignon@ensps.u-strasbg.fr

Résumé

Les phénomènes de vibrations émanant des systèmes d'enroulement de bandes ont un impact économique important dans l'industrie du transport de bande flexible. Parmi les sources de perturbations, les vibrations hors-plan d'une bande élastique en mouvement sont réputées pour être les principales causes limitant la vitesse d'enroulement. Motivés pour appréhender ces phénomènes, nous décrivons dans cet article une méthode de détection de vibrations hors-plan de bandes en mouvement à l'aide d'une caméra et de motifs laser. Nous proposons une technique permettant d'estimer les propriétés vibratoires d'une bande flexible, sans contact et durant la phase d'enroulement. A notre connaissance, c'est la première fois qu'une technique employant un système de vision est proposée pour caractériser les vibrations d'une bande en mouvement.

A l'aide d'une représentation Plückerienne des droites laser projetées sur la bande et d'une reconstruction 3-D partielle de ces droites, la méthode proposée permet de localiser la fréquence de vibration forcée et les deux premiers modes de vibrations libres. Des mesures expérimentales ont été menées sur un système d'enroulement de tissu. Les fréquences de vibrations sont obtenues grâce à l'analyse des variations de la hauteur relative entre chaque section de bande et le plan image. Elles ont été comparées à celles provenant d'une jauge de contrainte placée à proximité et comparées également à celles issues d'un modèle basé sur des cordes vibrantes en mouvement.

Mots Clef

Reconstruction 3-D de droites, lumière structurée, vibrations de bande, systèmes d'enroulement.

Abstract

Web vibrations phenomena which occur in winding/unwinding systems have a knock-on economical effect for the numerous firms which utilize these equipments. Among many sources of disturbances, out-of-plane vibrations of a moving web are well-known to be the most limiting factors for the velocity in the transport industry of flexible web. To tackle this problem, we address in this paper a method for the detection of out-of-plane web vibrations by means of a single camera and a laser stripe lines pattern device. The new technique we proposed for the estimation of out-of-plane web vibration properties, without contact with the web and during the winding process is the main contribution of this work. As far as we know, this is the first time a technique is proposed to evaluate the vibrations of a moving web with a camera.

Thanks to the Plückerian line representation and a partial 3-D line reconstruction, the vibration frequencies are estimated by means of the frequential analysis of the relative height variations of any web cross-section with respect to the image plane. Experiments have been conducted on a winding plant for elastic fabric and the relative heights have been estimated all along an image sequence. The most significant frequencies have been extracted (forced and the first two modes of free vibrations) and compared to those provided by a strain gauge and also from those computed with a simple elastic string model, in motion.

Keywords

3-D line reconstruction, structured light system, web vibrations, winding systems.

1 Introduction

Dans l'industrie du transport de bandes, le principal objectif est d'augmenter autant que possible la vitesse de transport tout en contrôlant la tension de la bande. Cependant des perturbations limitent fortement cette vitesse. C'est le cas notamment de la variation de l'excentricité et de la non-circularité des rouleaux, du glissement de bandes sur les rouleaux, des variations de température, des variations du couple des moteurs... qui sont tous des facteurs qui limitent la performance. Etant donné qu'il existe un couplage important entre la vitesse et la tension de bande du aux propriétés élastiques de celle-ci, les perturbations de vitesse sont transmises à la tension de bandes et peuvent provoquer des plis voire des cassures [13, 21]. Lorsqu'une cassure survient, c'est toute la ligne d'enroulement qui est stoppée et la bobine partiellement enroulée est alors inutilisable. En moyenne, pour l'industrie du transport et d'enroulement de papier, cela représente un arrêt de la production d'environ 30 minutes et par conséquent une perte très importante. Les microphones sont souvent employés dans ce domaine pour mesurer localement les vibrations. Cependant, il est bien connu que leur efficacité est fortement réduite quand la bande est en mouvement. Dans le but de réduire ces effets vibratoires, des travaux récents en modélisation, en commande et en vision par ordinateur appliqués aux systèmes d'enroulement ont donné des résultats prometteurs [12, 16] et l'utilisation du traitement et de l'analyse des images numériques pour l'inspection et la supervision des phases d'enroulement est en train d'émerger [4, 8, 20].

L'application sous-jacente à ce travail est la caractérisation des propriétés vibratoires dans les systèmes d'enroulement et de déroulement. Pour l'heure, nous nous sommes focalisés sur les vibrations dites hors-plan ("out-of-plane"). Ce type de vibrations tend à faire sortir la surface de la bande de son plan idéal de défilement. Dans ce contexte, nous présentons une technique innovante permettant de détecter et de localiser les fréquences de vibrations par l'emploi d'une caméra et de la lumière structurée. Cette dernière consiste en la projection de plans laser et permet de structurer la bande qui généralement ne présente pas de texture facilement décelable à l'échelle macroscopique.

Cet article est organisé de la manière suivante. Dans la section suivante, nous rappelons brièvement les pré-requis de géométrie permettant de modéliser le système de vision employé. Les hypothèses émises sur le comportement dynamique de la bande ainsi que la caractérisation et la reconstruction 3-D sont décrites dans une troisième partie. Dans une quatrième partie, l'analyse des résultats expérimentaux provenant des mesures effectuées sur un système d'enroulement permet de mettre en évidence les fréquences de vibrations par l'analyse des variations d'une hauteur relative, issue d'une reconstruction de droites. Dans cette même partie, une étude comparative est menée avec les fréquences théoriques issues d'un modèle et celles

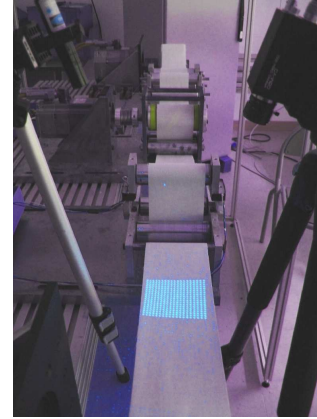


FIG. 1 – Durant la phase d'enroulement, les plans laser (à gauche) sont projetés sur la surface de la bande (au centre) formant des segments quasiment rectilignes qui sont capturés par une camera (à droite).

provenant d'un capteur de tension. Nous terminons par une conclusion sur la technique de mesures proposée, quant à sa précision dans le domaine fréquentiel et sa rapidité. Enfin, nous donnons quelques perspectives envisagées pour la poursuite de ce travail.

2 Caractérisation géométrique du système de vision

2.1 Modélisation

La géométrie du système de vision à lumière structurée est abordée dans cette partie. En premier lieu, sur la base de la projection perspective [6], le modèle sténopé est employé pour l'établissement des relations géométriques entre un point 3-D, \mathbf{M} , situé sur la surface de la bande et sa projection, \mathbf{m}^c , dans le plan image de la caméra. Si les points sont représentés par leurs coordonnées homogènes, cette projection centrale sans distortion peut s'exprimer sous la forme d'une matrice (3×4) réelle P^c (matrice caméra), telle que :

$$\mathbf{m}^c \equiv P^c \mathbf{M} \quad (1)$$

Pour une droite L dans l'espace 3-D, la représentation Plückerienne permet de rendre compte de ses 4 degrés de liberté, et donc sans définir une origine sur la droite. Cette représentation facilite d'autre part les relations mathématiques lors d'un changement de repère, ce qui permet de formuler commodément les déplacements d'ensemble de droites [1]. Étant donné deux points quelconques distincts \mathbf{A} et \mathbf{B} représentés par leurs coordonnées homogènes, la matrice L de Plücker est construite pour représenter la droite L qui les joint par la relation :

$$L = \mathbf{AB}^T - \mathbf{BA}^T \quad (2)$$

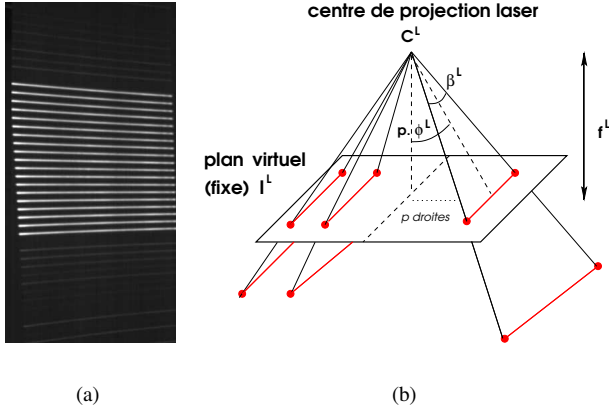


FIG. 2 – (a) La projection dans l’image des plans laser projetés sur la bande. - (b) La projection des plans laser sur la bande structure celle-ci. Une image (laser) fixe est définie par l’angle d’ouverture des droites, β^L , l’inter-angle, ϕ^L , et un plan (virtuel) orthogonal à l’axe optique de la source laser C^L analogue à un centre de projection et situé par une distance f^L analogue à une distance focale.

De cette représentation 3-D, l’image I^c par projection perspective de la droite L est définie par :

$$[I^c]_{\times} = P^c L (P^c)^T \quad (3)$$

Un modèle géométrique similaire est proposé pour les plans laser que nous employons car il s’agit de rayons émanant d’une seule source ponctuelle et possédant également une lentille. Des modèles géométriques ont déjà été proposés par le passé, la plupart d’entre eux étaient basés sur la projection orthogonale (projection parallèle) étant donné qu’il s’agissait de projecteurs disposés loin de la scène et avec une faible inclinaison [19]. Cependant, la projection perspective est un modèle mathématique mieux adapté pour rendre compte d’une orientation quelconque de l’axe optique du module laser vis-à-vis de la scène sur laquelle sont projetés les éléments structurant [11]. Pour ce faire, un plan virtuel perpendiculaire à l’axe optique du module laser est défini à une distance f^L (analogue à une longueur focale) de la source C^L (analogue à un centre de projection) et une image est alors construite avec les intersections des rayons laser et de ce plan (voir figure 2-b). L’angle d’ouverture des droites β^L et l’inter-angle ϕ^L (entre plans) sont généralement fournis par le fabricant ou peuvent être identifiés (indirectement) par une procédure de calibration.

D’une manière similaire à l’expression des paramètres intrinsèques d’une caméra, une matrice des paramètres intrinsèques K^L est définie. Sa structure permet de définir plus génériquement une matrice laser P^L analogue à la matrice P^c pour la caméra, de la manière suivante :

$$P^L = \underbrace{\begin{bmatrix} f^L & 0 & 0 \\ 0 & f^L & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{K^L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Des techniques permettant de calibrer un système de vision à lumière structurée existent et peuvent être mises en oeuvre ici (voir [2, 7, 10, 17] par exemple). L’image (fixe) I^L par projection perspective de la droite L sur le plan virtuel est définie par l’expression $[I^L]_{\times} = P^L L (P^L)^T$ et le système global doit être perçu comme un système stéréo, bien que l’une des deux vues soit une vue fixe [11]. Par conséquent, l’intersection du plan laser $\pi^L = (P^L)^T I^L$ et du plan d’interprétation $\pi^c = (P^c)^T I^c$ fournit un moyen de reconstruire la droite L , à condition que les matrices P^c et P^L soient exprimées dans un même référentiel. Pour cela, la connaissance de la matrice fondamentale F est nécessaire afin d’estimer l’orientation et la direction de la ligne de base. En effet, les solutions possibles pour la matrice de rotation R entre les repères caméra et laser et la direction du vecteur t entre les centres de projection C^c et C^L sont données par $(K^L)^T F K^c = [t]_{\times} R$. En exprimant par exemple les matrices caméra et laser dans un référentiel lié à la caméra, d’origine en son centre de projection, celles-ci peuvent être exprimées de la façon suivante

$$P^c = K^c [I \mid 0] \quad \text{et} \quad P^L = K^L [R \mid t] \quad (5)$$

lorsque la matrice fondamentale est elle-même définie par la relation $m^L F m^c = 0$ entre un point m^L du plan image laser fixe et son correspondant m^c dans le plan image de la caméra. Comme cela a été montré dans le cas de la reconstruction de points [14], lorsque les matrices de calibration K^c et K^L sont connues, la reconstruction 3-D des droites est également effectuée à une transformation de similarité près.

2.2 A propos de l’estimation de F

Il n’est pas dans notre intention de détailler ici l’estimation de la matrice fondamentale, mais simplement d’indiquer brièvement la démarche pratique que nous avons adoptée [3]. Il est bien connu qu’avec un système de vision classique, deux vues sont insuffisantes pour contraindre la reconstruction de droites dans l’espace, et par là permettre d’estimer les caractéristiques projectives intrinsèques au système de vision. Cependant, en utilisant le fait qu’il s’agit d’un système à projection structurée de segments de droites, nous avons entrepris de mettre en oeuvre une méthode basée sur le calcul d’homographies de plans (parallaxe virtuel) [15].

Dans un premier temps, un plan (noté π_1^s par la suite) est placé devant le système de vision, permettant ainsi de projeter les plans laser π^L issus des segments de droites I^L (et qui dépendent des paramètres β^L et ϕ^L). La caméra perçoit l’image I^c de ces segments de droites.

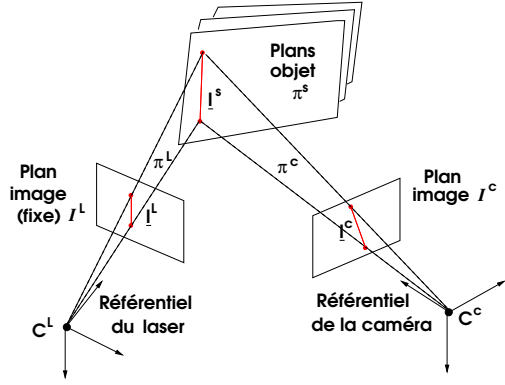


FIG. 3 – Définition des repères du système de vision à lumière structurée. La matrice fondamentale est estimée par un ensemble d’homographies de plans à l’aide des segments de droites en correspondance.

Les extrémités des segments nous servent à estimer une homographie H_{s_1} entre le plan image I^c et le plan laser I^L induite par le plan π_1^s (voir la figure 3). Dans un deuxième temps, une autre configuration du plan objet (π_2^s) est choisie afin d’estimer une autre homographie H_{s_2} (en évitant les configurations amenant à une homographie dégénérée). Ce plan a été déplacé plusieurs fois pour permettre de calculer plusieurs homographies $H_{s_1}, H_{s_2}, \dots, H_{s_N}$ ainsi induites par autant de plans et qui vérifient toutes la relation de disparité $\mathbf{m}^L = H_{s_i} \mathbf{m}^c + \rho_i \mathbf{e}^L$ où apparaît l’épipole \mathbf{e}^L comme seul paramètre projectif intrinsèque (indépendant du plan π^s). Par conséquent, l’homologie $H_{ij} = H_{s_j}^{-1} H_{s_i}$ est une transformation de l’image I^c vers elle-même qui conserve l’épipole \mathbf{e}^c et qui peut être déterminé par $H_{ij} \mathbf{e}^c = \mathbf{e}^c$, ($i = 1, j = 2, \dots, N$). Les N configurations du plan objet sont ainsi utilisées pour obtenir un système surdéterminé. Il en va de même pour la matrice fondamentale qui peut être retrouvée par la suite par la relation $F = [\mathbf{e}^L]_{\times} H_{s_i}$, avec $\mathbf{e}^L = H_{s_i} \mathbf{e}^c$.

2.3 La hauteur relative

L’équation (2) permet de définir la matrice L à un facteur d’échelle près. De manière générale, Les coordonnées homogènes de points \mathbf{A} et \mathbf{B} de l’espace physique peuvent être telles que $\mathbf{A} = (\mathbf{a}^T, \rho_a)^T$ et $\mathbf{B} = (\mathbf{b}^T, \rho_b)^T$ où \mathbf{a}, \mathbf{b} sont des vecteurs de dimension 3 et ρ_a et ρ_b sont des scalaires. L’expression de la matrice L de Plücker est alors :

$$L = \begin{bmatrix} \mathbf{ab}^T - \mathbf{ba}^T & \rho_b \mathbf{a} - \rho_a \mathbf{b} \\ \rho_a \mathbf{b}^T - \rho_b \mathbf{a}^T & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{w}]_{\times} & -\mathbf{v} \\ \mathbf{v}^T & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

où $\mathbf{v} = \rho_a \mathbf{b} - \rho_b \mathbf{a}$ et $[\mathbf{w}]_{\times} = \mathbf{ab}^T - \mathbf{ba}^T$. Comme les points et les plans sont duaux dans l’espace 3-D, la matrice duale L^* de Plücker peut tout aussi représenter la droite L en considérant l’intersection de deux plans. Elle s’exprime

de la façon suivante :

$$L^* = \begin{bmatrix} [\mathbf{v}]_{\times} & -\mathbf{w} \\ \mathbf{w}^T & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

L’obtention de L^* à partir de L se fait par une règle simple ([9], page 52) et l’une et l’autre des représentations seront employées par la suite. Ces deux matrices (4×4) sont anti-symétriques et singulières, de rang 2 précisément et la valeur de ce rang exprime la contrainte d’orthogonalité existant entre les vecteurs \mathbf{v} et \mathbf{w} . Graphiquement, L et L^* sont construites à partir d’un vecteur directeur \mathbf{v} et d’un vecteur \mathbf{w} orthogonal à \mathbf{v} et orthogonal à un vecteur formé par un point quelconque de la droite et et par l’origine du repère (le centre de projection, C , ici). \mathbf{w} est le vecteur normal au plan d’interprétation ou ”pull-back plane” formé par la droite L et le centre C . Par un simple calcul du polynôme caractéristique de la matrice de Plücker, on peut facilement montrer que les valeurs propres de L sont de la forme $\{\pm i \lambda_1, 0, 0\}$ avec :

$$\lambda_1 = \sqrt{\mathbf{v}^T \mathbf{v} + \mathbf{w}^T \mathbf{w}} \quad (8)$$

et λ_1 peut donc être choisi arbitrairement (mais non nul) pour normaliser la matrice. Ainsi, en considérant la matrice L' représentant la droite L' construite à partir des deux points $\mathbf{A}' = (h \mathbf{a}^T, \rho_a)^T$ et $\mathbf{B}' = (h \mathbf{b}^T, \rho_b)^T$ et par conséquent parallèle à L , on a :

$$L' = \begin{bmatrix} [\mathbf{w}']_{\times} & -\mathbf{v}' \\ \mathbf{v}'^T & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h^2 [\mathbf{w}]_{\times} & -h \mathbf{v} \\ h \mathbf{v}^T & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

pour laquelle le module des valeurs propres non nulles est :

$$\lambda'_1 = \sqrt{h^2 \mathbf{v}^T \mathbf{v} + h^4 \mathbf{w}^T \mathbf{w}} \quad (10)$$

Le scalaire h peut être vu comme une *hauteur relative* entre L et L' . Cette hauteur relative correspond au rapport $\sqrt{\mathbf{w}'^T \mathbf{w}' / \mathbf{w}^T \mathbf{w}}$ lorsque les normalisations de L et de L' sont obtenues avec des vecteurs \mathbf{v} et \mathbf{v}' unitaires. Ce rapport vaut plus généralement

$$h = \sqrt{\left(\frac{\mathbf{w}'^T \mathbf{w}'}{\mathbf{w}^T \mathbf{w}} \right) \cdot \left(\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{v}}{\mathbf{v}'^T \mathbf{v}'} \right)} \quad (11)$$

lorsque les matrices ne sont pas normalisées.

3 Reconstruction 3-D

Nous allons dans un premier temps justifier l’utilisation d’une reconstruction 3-D des droites. Durant une séquence d’images acquise lors d’une phase d’enroulement, une modification des projections dans l’image correspondant au glissement des plans laser projetés sur la bande d’enroulement fournit déjà des informations sur les vibrations de bandes, sans toutefois indiquer de quel type de vibrations il s’agit. En effet, une modification dans l’image (déplacement ou déformation) est générée aussi bien par

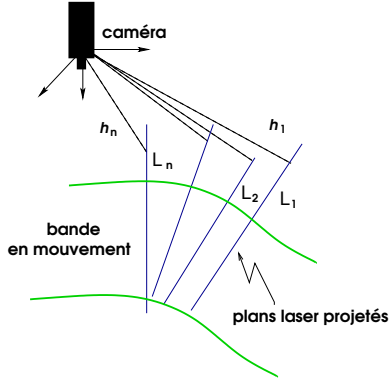


FIG. 4 – Hauteurs relatives, h_j , entre le centre de projection C^c et la droite $\{L_j | j = 1, \dots, n\}$ (intersection du plan laser π_j^L et la surface de la bande).

des vibrations transversales, longitudinales que par des vibrations "hors-plan". En pratique, on constate que les vibrations longitudinales et transversales tendent plutôt à déformer les projections dans l'image qu'à les déplacer en modifiant le profil de la section de la bande [5]. Les vibrations "hors-plan" vont déplacer significativement la surface de la bande amenant, localement, à modifier l'orientation et la hauteur d'une section entière de la bande par rapport à un référentiel. Par conséquent, une modification de l'orientation de la section va engendrer une modification de la distribution de la tension au sein de la section de la bande (analogue à une torsion), une variation de hauteur de bande va modifier l'amplitude moyenne de la tension de bande sur toute la section et fortement limiter la vitesse de transport [16]. Afin de dissocier ces deux causes de vibrations "hors-plan" qui toutes les deux provoquent un déplacement dans le plan image, la reconstruction s'impose. A une variation du paramètre h , correspondra une variation de hauteur de la section de la bande, à une variation de la direction du vecteur \mathbf{v} correspondra une variation de l'orientation de la section de la bande.

Pour parvenir à une reconstruction des sections de bandes induites par les projections des plans laser, et après l'identification de la matrice laser P^L , plusieurs hypothèses ont été faites, à savoir :

1. les n plans laser sont projetés sur les sections de bandes perpendiculairement à la direction de transport,
2. la section de bande est supposée localement rectiligne. Cela semble une hypothèse forte mais en pratique, nous avons estimé, à l'aide de la projection d'une grille de points laser, que l'erreur de rectilinéarité était bien inférieure à l'amplitude des vibrations "hors-plan" [5].
3. les images sont supposées avoir été corrigées de la distorsion radiale.

Comme déjà mentionné au paragraphe 2.1, l'intersection du plan laser $\pi_i^L = (P^L)^T \mathbf{l}_i^L$ et du plan d'interprétation $\pi_i^c = (P^c)^T \mathbf{l}_i^c$ fournit un moyen de reconstruire la droite L_i dans l'espace, comme la projection sur la surface de la bande d'un plan laser (voir figure 4). Par conséquent, la matrice duale de Plücker de la droite L_i est retrouvée par la relation suivante :

$$\begin{aligned} L_i^* &= \pi_i^L (\pi_i^c)^T - \pi_i^c (\pi_i^L)^T \\ &= (P^L)^T \mathbf{l}_i^L (\mathbf{l}_i^c)^T P^c - (P^c)^T \mathbf{l}_i^c (\mathbf{l}_i^L)^T P^L \end{aligned} \quad (12)$$

et par la suite, la hauteur relative h_i est calculée selon l'équation (11). Pour une même section de bande, l'évolution $h_i(t)$ de ce paramètre au cours du temps peut être observée par la prise en compte d'un grand nombre d'images.

4 Resultats expérimentaux

4.1 Equipement et validation expérimentale

Des expériences ont été conduites sur un système d'enroulement/déroulement ayant trois moteurs répartis respectivement sur un rouleau tracteur, un rouleau enrouleur et un rouleau dérouleur. Ces deux derniers ayant un rôle symétrique lors d'une phase d'enroulement (voir la figure 9). Pour les mesures, la vitesse de transport de la bande est de $V = 100$ m/min et la tension nominale de $T = 10$ N. Le système de vision consiste en une caméra CCIR JAI CV-M50 qui délivre 50 images par seconde à la résolution de (512×286) en mode non-entrelacé. La caméra est connectée à une carte d'acquisition/numérisation PC-Vision d'Imaging Technology dans un PC et fonctionne sous linux en mode "master bus". Deux modules optique d'Opton Laser, l'un projetant une matrice de (19×19) spots, l'autre projetant 19 plans laser et connectés à une source laser (émettant avec une longueur d'onde de 670 nm) ont été alternativement utilisés et placés au-dessus de la bande (voir figures 1 et 2). Un excitateur (composé d'une bande de papier) a été placé dans la bobine enroulée afin de créer artificiellement une non-circularité. Durant la phase d'enroulement, une séquence de 3000 images (60 secondes) a été acquise et stockée en mémoire RAM.

Sur la figure 5, les résultats correspondant à la hauteur relative estimée $h_1(t)$ entre le plan image et le premier plan laser projeté sur la surface de la bande a été reporté durant une séquence de 8 secondes (la bobine est en train d'être enroulée, puis la valeur moyenne diminue). Plus de 200 pixels en moyenne sont utilisés, après binarisation et application de la labélisation (composantes connexes), pour déterminer très précisément les paramètres de chaque droite \mathbf{l}_i^c dans l'image. La convolution des variations de la hauteur relative avec un filtre passe-bas de Butterworth d'une fréquence de coupure $f_c = 3$ Hz permet de localiser le pic principal de cette vibration forcée à la fréquence de 1.95 Hz. Une valeur identique a été mesurée par ailleurs

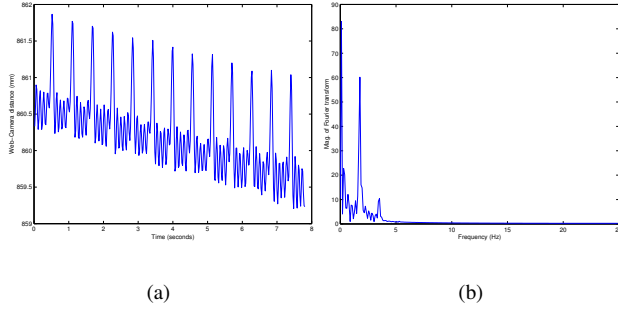


FIG. 5 – (a) : Résultats correspondant à la hauteur relative estimée entre le plan image et une droite reconstruite dans l'espace, durant une séquence de 8 secondes. - (b) : spectre du signal en (a) (auquel a été soustrait la moyenne) et convolué avec un filtre passe-bas de Butterworth d'une fréquence de coupure $f_c = 3$ Hz. Le pic principal (correspondant à la fréquence de l'excitateur) est localisé à la fréquence de $f = 1.95$ Hz.

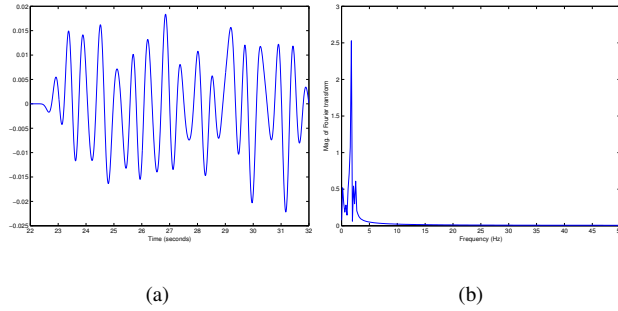


FIG. 6 – (a) : Tension de la bande, provenant d'une jauge de contrainte, convoluée à l'aide d'un filtre de Butterworth ($f_c = 3$ Hz) et reportée sur 10 secondes. - (b) : spectre du signal en (a). Le pic principal de ce spectre se trouve également être à la fréquence de 1.95 Hz. La mesure de tension placée à proximité du rouleau tracteur confirme la mesure obtenue avec le système de vision.

à l'aide d'un capteur de tension piézoélectrique placé à proximité du rouleau tracteur (voir figure 6).

4.2 Comparaison avec un modèle de cordes vibrantes

Dans ce paragraphe, nous rappelons les formules permettant de calculer les fréquences propres d'une corde vibrante en mouvement et soumise à une tension constante et uniforme. Ce modèle monodimensionnel simple nous permet de comparer les valeurs des fréquences propres avec celles mesurées avec le système de vision à lumière structurée, entre deux perturbations de l'excitateur. Pour une longueur de corde de $L = 1.378$ m (entre le rouleau tracteur et le rouleau enrouleur), d'une densité linéique $\rho_l = 0.01375$

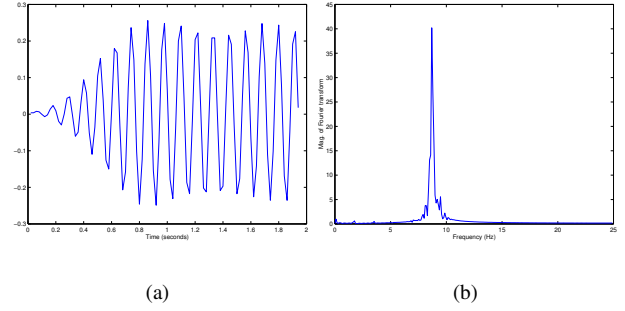


FIG. 7 – (a) : signal correspondant à la variation de hauteur relative convolué avec un filtre elliptique passe-bande ($f_c = [6, 12]$ Hz) et reporté pour deux secondes. - (b) : Ce mode est localisé précisément à la valeur de 8.79 Hz, car le pic principal du spectre obtenu est étroit.

kg/m, soumise à une tension longitudinale de $T = 10$ N à une extrémité, le déplacement $y(x = L, t) = A_0 \cos(\omega t)$ "hors-plan" qui est produit à l'autre extrémité est régit par l'équation de propagation :

$$(V^2 - c^2) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + 2V \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (13)$$

ω est la pulsation quasi-harmonique de l'excitateur (durant deux perturbations de l'excitateur, $\omega \approx cte$). V est la vitesse de transport ($V = 1,666$ m/s) et $c = \sqrt{T/\rho_l} \approx 27$ m/s est la vitesse de propagation de l'onde. On en déduit l'expression pour la fréquence du n^{ieme} mode :

$$f_n = n \frac{c}{2L} \left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right) \quad (14)$$

On obtient alors $f_1 \approx 9.18$ Hz pour le premier mode et $f_2 \approx 18.36$ Hz pour le deuxième mode. Le déplacement $y(x = L, t)$ provoqué par la vibration est supposé avoir lieu intégralement au sein d'un plan vertical, c'est-à-dire que la corde est supposée être uniformément élastique afin de transmettre les vibrations exclusivement dans la direction de sa longueur. Ce modèle est satisfaisant tant que le rapport {largeur de bande}/{longueur de bande entre deux rouleaux successifs} reste faible.

En pratique, on constate que les deux fréquences de vibrations libres, obtenues respectivement à l'aide d'un filtre elliptique passe-bande ($f_c = [6, 12]$ Hz) et d'un filtre passe-haut ($f_c = 12$ Hz) appliqués au signal de variation de la hauteur sont de 8.79 Hz pour le premier mode et de 17.5 Hz pour le deuxième mode. Les autres modes se trouvent en dehors de la bande passante du système de vision. Comme on peut le voir sur la figure 7, le premier mode est bien localisé (erreur de localisation fréquentielle inférieure à 5 % alors que le second mode, dont le spectre est étendu, est grossièrement localisé (figure 8).

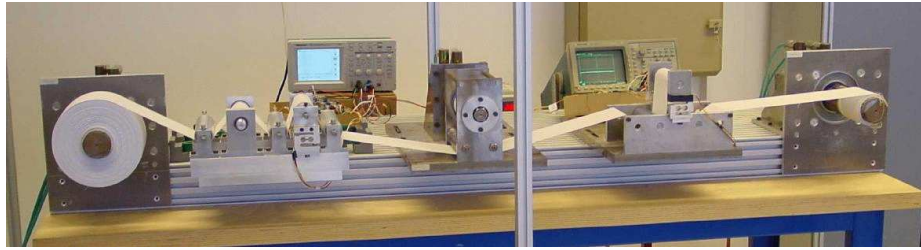


FIG. 9 – Le système expérimental d'enroulement. Pour les mesures, le moteur du rouleau de droite a été déplacé largement vers la droite afin d'obtenir une longueur de bande libre de $L = 1.378$ m entre les rouleaux et mettre ainsi en évidence les vibrations de la bande.

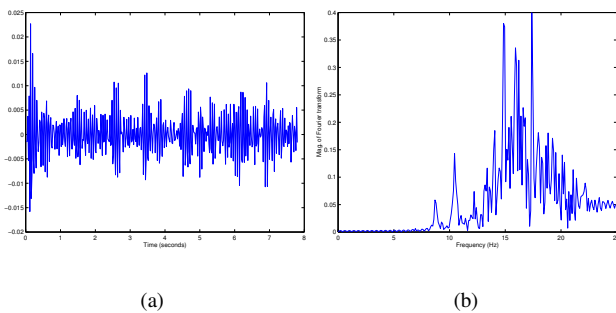


FIG. 8 – (a) : signal correspondant à la variation de la hauteur relative convolué avec un filtre passe-haut ($f_c = 12$ Hz). - (b) : spectre du signal en (a). Le pic principal est étendu. Cependant, le deuxième mode correspondant au centre du pic est grossièrement localisé à la valeur de 17.5 Hz.

5 Conclusion

Cet article présente une technique de mesure des fréquences de vibrations "hors-plan" de bande flexible, en mouvement, à l'aide d'un système de vision qui consiste en une caméra et un module laser de projection de plans structurant. Sous l'hypothèse vérifiée expérimentalement [5] que la section de bande reste rectiligne et par le biais d'une reconstruction 3-D de droites, nous avons vu qu'il était possible de détecter tant les vibrations forcées que les premiers modes de vibrations libres par l'estimation d'une hauteur relative facilement calculable à partir des paramètres de la représentation de Plücker. En particulier, le premier mode de vibration libre a été localisé avec une précision meilleure que 5 %. Le second mode a été localisé, moins finement cependant, en dépit des très faibles amplitudes que ce mode de vibration engendre sur la bande et par conséquent dans l'image de la caméra. L'avantage majeur de cette technique innovante est d'être une alternative aux méthodes existantes pour la détection de vibrations dans ce domaine, notamment celles qui emploient des microphones et qui souffrent d'un manque de fiabilité reconnue dès que la bande est en mouvement et sont par ailleurs sensibles à toutes les sources acoustiques dans le domaine 0 – 100 Hz. A notre connaissance,

il s'agit de la première fois qu'une technique utilisant une caméra est développée et proposée pour détecter les vibrations de bandes en mouvement. La mise en évidence et l'évaluation des fréquences de vibrations libres constitue l'aspect le plus significatif de cette technique, car ce type de vibrations contient des informations relatives à la dynamique interne de la bande. En cela, la technique proposée est pertinente pour effectuer/contrôler les réglages de consigne de tension en fonction de la vitesse de transport souhaitée. La validation expérimentale a été réalisée sur un système d'enroulement possédant trois moteurs (figure 9) et les fréquences de vibrations obtenues avec le système de vision ont été comparées à celles produites par une jauge de contrainte située à proximité et également comparées à celles provenant d'un modèle simple de cordes vibrantes en mouvement. Cependant et vis-à-vis des autres capteurs pré-cités et employés fréquemment dans les systèmes d'enroulement de bandes, les systèmes de vision nécessitent filtrage et calculs numériques pour l'extraction de l'information vidéo pertinente et présentent de ce fait une bande passante limitée. Il y aura donc lieu d'employer par la suite des caméras rapides. Ainsi, si l'ensemble des traitements peut se faire en temps réduits (≤ 10 ms, actuellement ≈ 20 ms), cette technique de mesure sans contact avec la bande, non ponctuelle et fiable (un grand nombre de pixels sont utilisés pour extraire, de manière robuste, chaque droite de l'image) est prometteuse.

Il est fréquent d'observer un décalage latéral d'une bande flexible durant la phase d'enroulement. Cela provient essentiellement d'une distribution non uniforme de la tension due à un alignement imparfait entre des rouleaux successifs. L'estimation du déport latéral de la bande, à l'aide de la vision, est envisagée très prochainement mais, du fait des propriétés élastiques de la bande, cela n'est possible que si la hauteur de la bande est estimée simultanément. Par ailleurs et d'un strict point de vue théorique, la caractérisation géométrique de la hauteur relative que nous avons employée et qui est issue d'une reconstruction de droites est à approfondir (invariance vis-à-vis d'un groupe de transformations) et à rapprocher des travaux déjà entrepris dans ce domaine comme, par exemple, ceux d'Amnon Shashua sur la structure affine relative émanant de deux vues perspectives [18].

6 Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le ministère de la Recherche et de la Technologie ainsi que la Région Alsace pour leur soutien à travers le financement du projet intitulé "Enroulement et transport de bandes flexibles à hautes vitesses" (ERT n°8, Contrat 01B-0395).

Références

- [1] A. Bartoli and P. Sturm. The 3d line motion matrix and alignment of line reconstructions. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 287–292, Hawaii, USA, 2001.
- [2] C.W. Chu, S. Hwang, and S.K. Jung. Calibration-free approach to 3-d reconstruction using light stripe projections on a cube frame. In *Proceeding of the Third IEEE Int. Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pages 13–19, Quebec City, QC, Canada, Juin 2001.
- [3] C. Delimal. Détection par vision des vibrations et des défauts d'une bande d'enroulement à l'aide de la lumière structurée. In *Mémoire de DEA*, Université Louis Pasteur, Strasbourg, Juillet 2004.
- [4] C. Doignon and D. Knittel. Detection of non-circularity and eccentricity of a rolling winder by artificial vision. *Eurasip journal on Applied Signal Processing*, 7 :714–727, Juillet 2002.
- [5] C. Doignon and D. Knittel. A structured light vision system for out-of-plane vibrations estimation of a moving web. In *Workshop on Applications of Computer Vision, in conjunction with the European Conference on Computer Vision*, Prague, République Tchèque, 11-16 mai 2004.
- [6] R.O. Duda and P.E. Hart. *Pattern Classification and Scene Analysis*. Wiley interscience publication, 1973.
- [7] D. Fofi, J. Salvi, and M. Mouaddib. Uncalibrated vision based on structured light. In *Proceedings of the IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Seoul, Korea, Mai 2001.
- [8] B. Gueldenberg and E.G. Welp. Quantitative analysis of nip-induced tension by use of digital image processing. In *Proceedings of the International Conference on Web Handling*, Stillwater, Oklahoma, USA, 1999. J.K. Good edition, Oklahoma State University.
- [9] R. Hartley and A. Zisserman. *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge Univ. Press, 2000.
- [10] D.Q. Huynh, R.A. Owens, and P.E. Hartmann. Calibrating a structured light stripe system : A novel approach. *International Journal of Computer Vision*, 33(1) :73–86, 1999.
- [11] R. Klette, S. Karstein, and A. Koschan. *Computer Vision : Three Dimensional Data from Images*. Springer-Verlag, 1998.
- [12] H. Koc, D. Knittel, M. De Mathelin, and G. Abba. Modeling and robust control of winding for elastic web. *IEEE Trans. on Control System Technology*, 10(2) :197–208, Avril 2002.
- [13] A.V. Lakshmikumar and J.A. Wickert. Edge buckling of imperfectly guided webs. *Trans. on ASME Journal of Vibration and Acoustics*, 120 :346–352, Avril 1998.
- [14] H.C. Longuet-Higgins. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. *Nature*, 293 :133–135, Septembre 1981.
- [15] Q.T. Luong. *Matrice fondamentale et autocalibration en vision par ordinateur*. Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud, Orsay, France, Décembre 1992.
- [16] K.N. Reid and K.C. Lin. Control of longitudinal tension in multi-span web transport systems during start-up. In *Proceedings of the International Conference on Web Handling*, pages 77–95, Stillwater, Oklahoma, USA, Juin 1993. J.K. Good edition, Oklahoma State University.
- [17] G. Sansoni, M. Carocci, and R. Rodella. Calibration and performance evaluation of a 3-d imaging sensor based on the projection of structured light. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, 49 :628–636, Juin 2000.
- [18] A. Shashua and N. Navab. Relative affine structure : Theory and application to 3-d reconstruction from perspective views. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision Pattern Recognition*, pages 483–489, Seattle, WA, USA, Juin 1994.
- [19] N. Shrikhande and G. Stockman. Surface orientation from a projected grid. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(6) :650–655, 1989.
- [20] R. Stojanovic, P. Mitropulos, C. Koulamas, Y. Karayiannis, S. Koubias, and G. Papadopoulos. Real-time vision-based system for textile fabric inspection. *Real-Time Imaging*, 7(6) :507–518, 2001.
- [21] W. Wolferrmann. Compensation of disturbances in the web force caused by a non-circular running winder. In *Proceedings of the International Conference on Web Handling*, Stillwater, Oklahoma, USA, 1999. J.K. Good edition, Oklahoma State University.