

Modélisation du contrôle par vision artificielle sur des produits en défilement continu

Modelisation of Artificial Vision Inspection of Continuously Moving Products

par F. TRUCHETET, H. JENDER, P. GORRIA, M. PAINDAVOINE

Université de Bourgogne, Laboratoire GERE
12 rue de la Fonderie, 71200 Le Creusot

Résumé

Une modélisation théorique de l'acquisition et du traitement du signal est proposée pour le problème du contrôle par vision artificielle de produits en défilement continu. L'hypothèse d'un traitement basé sur le calcul du gradient et d'un défilement à vitesse constante conduit à la mise en évidence d'un filtrage passe bande suivi d'un échantillonnage du signal détecté par la caméra. Les influences du temps d'acquisition, de la résolution, de la vitesse de défilement et de la taille du défaut à détecter sur la dispersion des résultats et sur le rapport signal sur bruit sont déterminées. Il apparaît qu'un compromis doit être admis pour le choix optimal des paramètres. Une vérification expérimentale des résultats obtenus est proposée; elle s'appuie sur un système de contrôle en ligne de tubes métalliques mis au point au laboratoire.

Mots clés : Contrôle qualité, détection de défauts, produits défilants.

Abstract

A theoretical model of the acquisition and of the signal processing problem is proposed in the case of artificial vision inspection of continuously moving products. In the hypothesis of constant speed and gradient based processing, the model leads to band pass type filtering followed by sampling. Acquisition period, resolution, moving speed and defect size influences on detection scattering and signal to noise ratio are estimated. It appears that an arbitration must be admitted for the parameters optimal choice. An experimental testing based on an on-line inspection system for metallic tubes created in our laboratory is described.

Key words : Visual inspection, defect detection, moving products.

1. Introduction

Le contrôle de produits en défilement continu est un problème couramment rencontré en contrôle qualité industriel; on peut citer, parmi les productions continues ou semi continues (produits de grande longueur), les produits métalliques longs : feuillard, tube, fil, les produits textiles : fil, tissu, les produits de l'industrie du bois : planches, plaques agglomérées, les produits de l'industrie du papier, les produits de l'industrie photographique : film, papier, ... La vision artificielle permet d'envisager pour ces productions un contrôle d'aspect temps réel, c'est à dire qui respecte et suit la cadence de production.

Ce type de contrôle pose un certain nombre de problèmes spécifiques liés à la vitesse de translation du matériel à contrôler devant la caméra. La durée de la phase d'exposition de la surface sensible, la période et les instants d'échantillonnage sont les paramètres principaux qu'il convient d'optimiser en fonction de

la vitesse de défilement, de la taille des défauts à détecter et des contraintes d'éclairage de la scène. Nous nous proposons, dans le contexte d'un choix technologique réaliste, d'examiner les aspects théoriques de ces divers points; nous illustrerons les résultats obtenus par des mesures effectuées sur un système de contrôle de tubes métalliques réalisé au laboratoire.

Le système de prise de vue doit faciliter la maîtrise du temps et de l'instant d'exposition; cette contrainte est particulièrement bien prise en compte dans le cas de l'emploi de caméra CCD linéaire. C'est le système que nous choisirons, ce choix n'est d'ailleurs pas très original pour ce type de contrôle⁴. Ces caméras présentent un autre avantage : la zone visée est moins étendue que pour une caméra matricielle et il est donc plus facile d'assurer un éclairage correct et homogène de la scène, en particulier si la surface à contrôler n'est pas plane. La constitution de l'image 2D est assurée par le défilement de l'objet.

Le contrôle porte sur l'aspect du produit et on peut admettre que, en général, son but est de détecter des défauts se traduisant par un

contraste local avec le fond de l'image; nous supposons donc que le paramètre de base à extraire est du type gradient, cette supposition est conforme avec la contrainte de temps réel qui limite la complexité admissible du traitement. Nous allons donc examiner l'influence du défilement sur la mesure du gradient dans le sens du déplacement. Nous verrons, en particulier, que l'effet de filtrage passe-bas introduit par le filé transforme l'opérateur gradient en un filtre passe-bande favorable à la détection de défaut sur une image bruitée. Nous constaterons par contre l'influence néfaste de l'échantillonnage sur la dispersion des résultats et nous déterminerons les performances que l'on peut attendre en fonction de la vitesse de défilement, du temps d'acquisition et de la résolution spatiale.

2. Modélisation de l'acquisition

La modélisation est effectuée pour le calcul du gradient longitudinal (sens du défilement); nous supposons que le temps d'exposition τ est égal à la période d'échantillonnage d'une ligne image ce qui correspond au mode de fonctionnement le plus simple pour la caméra. Nous noterons :

- v la vitesse de défilement du produit,
- p la dimension longitudinale de la tache correspondant à un pixel de l'image (figure 1),
- $s(x)$ la luminance du point observé à l'abscisse x du produit défilant,
- $y(k)$ le signal de sortie de la caméra à l'instant d'échantillonnage $k\tau$

Le calcul portera plus particulièrement sur le cas où la perturbation apportée par le défilement est importante, c'est à dire quand $p < v\tau$. Le choix de p est limité en général par les contraintes de résolution transversale et la vitesse de défilement est fixée par la cadence de production; le seul paramètre qui peut être réglé dans une certaine mesure est donc le temps d'intégration τ , sa limite inférieure étant fixée par la quantité de lumière disponible, par le temps de calcul qui doit suivre la cadence d'acquisition et aussi par le temps minimum de balayage des pixels.

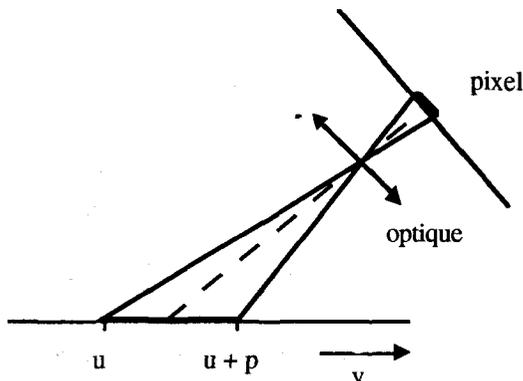


Figure 1.

La puissance lumineuse reçue à l'instant t sera proportionnelle à

$$L(u) = \int_u^{u+p} s(x) dx \quad (1)$$

avec $u = vt$ (l'origine des temps est choisie de telle sorte que l'origine des abscisses coïncide avec le début de la tache observée à $t = 0$).

Le signal de sortie de la caméra, pour le pixel considéré à l'instant d'échantillonnage $k\tau$ sera proportionnel à :

$$y(k) = \int_{(k-1)v\tau}^{kv\tau} \left[\int_u^{u+p} s(x) dx \right] \frac{du}{v} \quad (2)$$

Montrons que $y(k)$ peut s'exprimer comme un produit de convolution simple :

Si on note $h(x)$ la fonction qui vaut 1 de $-p$ à 0 et 0 partout ailleurs, alors l'intégrale (1) peut s'écrire :

$L(u) = h * s(u)$ si $*$ désigne le produit de convolution. Soit :

$$L(u) = \int_u^{u+p} h(u-x) s(x) dx \quad (3)$$

Si on note $f(x)$ la fonction qui vaut $1/v$ de 0 à $v\tau$ et 0 partout ailleurs, l'intégrale (2) peut s'écrire : $y(k) = f * L(kv\tau)$; soit :

$$y(k) = \int_{(k-1)v\tau}^{kv\tau} f(kv\tau - u) L(u) du \quad (4)$$

De sorte que $y(k) = f * h * s(kv\tau)$; on note $r(x)$ la fonction $r(x) = f * h(x)$ et en définitive :

$$y(k) = r * s(kv\tau) \quad (5)$$

Le calcul de la fonction $r(x)$, dans le cas où $p < v\tau$, conduit au résultat représenté par la figure 2.

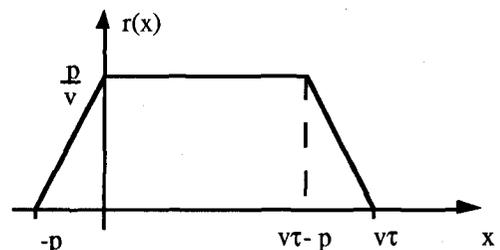


Figure 2.

Il est clair que $r(x)$ est la réponse impulsionnelle d'un filtre passe-bas caractéristique de l'effet de filé dû au défilement du produit pendant le temps d'acquisition.

Si on s'intéresse au gradient, c'est à dire à la fonction

$z(k) = y(k) - y(k+1)$, l'opération s'écrira :

$$z(k) = r * s(kv\tau) - r^+ * s(kv\tau) \text{ avec } r^+(x) = r(x + v\tau)$$

En posant $g = r - r^+$, il vient (6) :

$$z(k) = g * s(kv\tau) \quad (6)$$

où si $p < v\tau$ l'opérateur g a la forme donnée par la figure 3. Dans les cas où $p > v\tau$ les résultats sont obtenus de la même façon et conduisent à des réponses impulsionnelles un peu différentes.

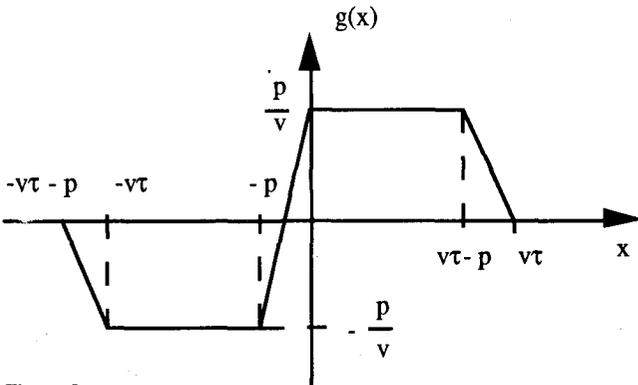


Figure 3.

On peut montrer que la transformée de Fourier de $g(x)$ pour $p > v\tau$ s'écrit :

$$\hat{g}(\omega) = -2je^{j\pi p} \frac{\sin \frac{\omega}{2} p \sin \frac{\omega}{2} v\tau}{(\frac{\omega}{2})^2 v} \quad (7)$$

ce qui correspond à la fonction de transfert d'un filtre passe-bande (en négligeant les lobes secondaires); la fonction est également du même type pour les autres cas.

Le calcul du gradient longitudinal donnera donc la réponse échantillonnée aux instants $kv\tau$ (avec k entier) du filtre g à la luminance du produit contrôlé. Ce type de filtrage peut être considéré comme une version grossière du détecteur de contour optimal de Canny^{2,3} (dérivé de gaussienne). Il associe un filtrage passe-bas qui permet de réduire l'influence du bruit à un filtrage passe-haut qui détecte les variations rapides du signal. Il n'est évidemment pas question ici de filtre optimal mais on peut cependant rechercher les paramètres p et τ qui conduisent à la détection la plus efficace en présence de bruit pour une vitesse de défilement v donnée.

Pour ce faire, nous allons déterminer la réponse du filtre en cas de défaut « idéal », c'est à dire d'un échelon de luminance, en fonction de la position de ce défaut par rapport à l'instant d'échantillonnage; puis nous déterminerons un rapport signal sur bruit de détection en comparant la puissance du signal maximum détecté en moyenne avec la puissance détectée en présence d'un bruit blanc.

Le défaut étant le signal $s(x)$ constitué d'un échelon unité débutant à l'abscisse X_0 , la réponse sera la valeur de $z(k)$ (équation 6) calculée à l'instant d'échantillonnage $k = 0$:

$$z(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(x) g(kv\tau - x) dx \quad (8)$$

donc :

$$z(0) = \int_{X_0}^{+\infty} g(-x) dx \quad (9)$$

Le résultat du calcul dans le cas où $p < v\tau$ est donné dans la figure 4 sur laquelle les parties courbes sont des arcs de paraboles se raccordant tangentiellement aux parties linéaires. Les résultats dans les autres cas sont du même type : combinaisons d'arcs de paraboles et de parties linéaires.

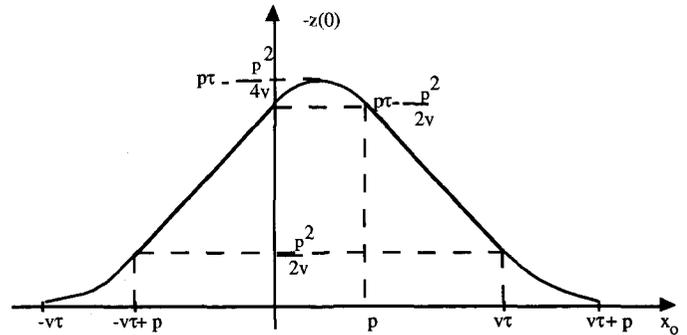


Figure 4 : amplitude détectée à l'instant d'échantillonnage 0 en fonction de la position du défaut (équation 9).

2.1. Dispersion

Il est clair que si un échelon débutant en $x_0 < 0$ induit une réponse à l'instant 0, il en suscite également à des instants d'échantillonnage précédents, de même que pour x_0 supérieur à 0 la réponse aux instants d'échantillonnage suivants ne sera pas nulle. En général un contour engendrera donc une réponse multiple. Si on ne considère que la réponse maximum, il suffit pour l'instant d'échantillonnage 0 de ne prendre en compte que les contours situés en x_0 tel que : $-v\tau + p < 2x_0 < v\tau + p$. Dans ces conditions, la dispersion des amplitudes détectées pour un même contour sera donnée par $\Delta = z(0)_{max}/z(0)_{min}$. On trouvera en annexe 1 les résultats complets pour tous les cas possibles.

La courbe de la figure 5 les résume en donnant Δ en fonction de τ .

On constate que pour $p < v\tau$, Δ peut donc varier entre 1,5 et 2 (3,5 dB à 6 dB) en augmentant si τ augmente et que Δ s'annule pour $p > 3v\tau$.

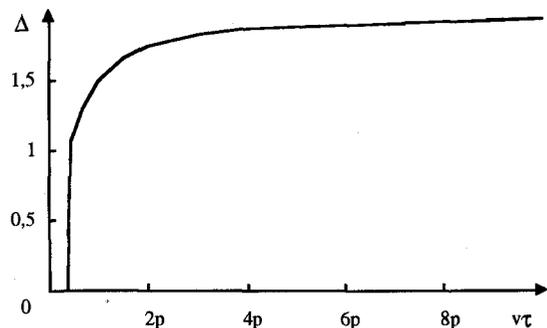


Figure 5 : dispersion en fonction de $v\tau$.

2.2. Rapport signal sur bruit

Si on suppose que la répartition de x_0 est aléatoire, de probabilité d'occurrence $P(x = x_0) = \frac{1}{v\tau}$ constante, l'amplitude maximum moyenne détectée pour un contour sera S donnée par :

$$S = \frac{2}{v\tau} \int_{\frac{p-v\tau}{2}}^{\frac{p}{2}} |z(0)| dx_0 \quad (10)$$

Les résultats pour les différents cas sont donnés en annexe 2.

En présence d'un processus aléatoire (bruit) blanc centré de variance σ^2 , la puissance du processus en sortie du filtre sera :

$$P = \sigma^2 \int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{g}(v)|^2 dv$$

d'où en appliquant la formule de Parseval :

$$P = \sigma^2 \int_{-\infty}^{+\infty} |g(x)|^2 dx \quad (11)$$

L'amplitude détectée après échantillonnage formera donc une suite aléatoire centrée qui aura la même loi de probabilité en amplitude et dont la fonction d'autocorrélation sera l'échantillonnée de celle du processus continu¹. De telle sorte que la puissance de la suite numérique sera identique à celle du processus continu, cette puissance notée B est donnée par les relations données en annexe 3 obtenues par évaluation de l'équation 11 dans les différents cas.

Le rapport puissance de signal sur puissance de bruit (RSB) pour un signal d'amplitude S_0 calculé à partir des résultats précédents suit la courbe de la figure 6 ($d = \infty$). Les expressions littérales sont données en annexe 4.

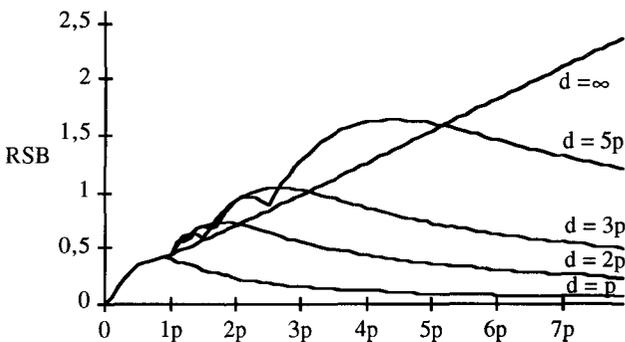


Figure 6 : RSB en fonction de $v\tau$ pour un signal en échelon. (le niveau de référence des ordonnées correspond à $S_0^2 = \frac{\sigma^2}{p}$)

On constate que pour $p < v\tau$, le RSB est approximativement proportionnel à $v\tau$.

Ce résultat peut faire penser que les meilleures performances seront obtenues pour un temps d'intégration τ très grand. Il faut cependant noter que dans ce modèle le défaut est sans limite : il s'étend de x_0 à l'infini. Pour avoir un résultat plus réaliste nous devons considérer un défaut d'étendue finie qui est la somme d'un

échelon positif débutant en x_0 et d'un échelon négatif de même amplitude débutant en $x_0 + d$, d étant la taille du défaut.

Le filtre étant linéaire, le signal détecté est la différence entre les réponses à ces deux échelons. Par le jeu des réponses multiples il apparaît que si $d > v\tau + p$ l'amplitude maximum moyenne détectée est approximativement la même que pour un défaut d'étendue infinie, et que dans le cas contraire la réponse est inférieure et tendra vers 0 si d tend vers 0. Le calcul explicite de la variation de la réponse en fonction de l'étendue du défaut est un peu lourd et nous avons préféré faire appel au calcul numérique. Les courbes de la figure 7 donnent RSB en fonction de d . On constate après un maximum au voisinage de $v\tau + p$ que la réponse est constante à une ondulation près (période $v\tau$ et amplitude 2 dB). La réponse en fonction de $v\tau$ pour diverses valeurs de d est précisée sur la courbe 6. Le rapport RSB est maximum pour $v\tau$ légèrement supérieur à $d - p$.

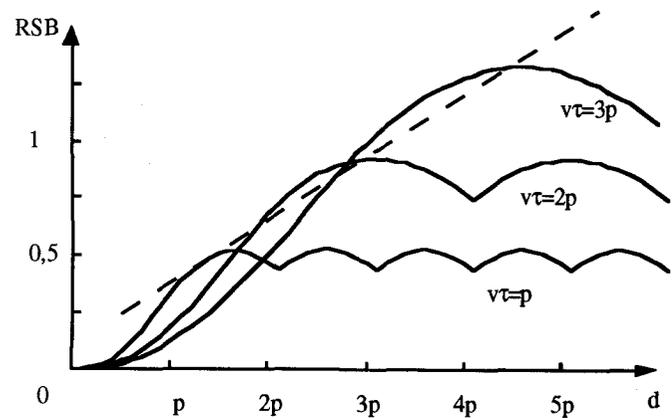


Figure 7 : RSB en fonction de la taille du défaut pour différentes valeur de $v\tau$ (le niveau de référence est identique à celui de la figure 6)

2.3. Conclusion

Ces calculs font apparaître une certaine dispersion des détections due à l'échantillonnage dès que le temps d'acquisition dépasse $\frac{p}{3v}$, cette dispersion n'excède cependant jamais 6 dB. Il faut signaler que, en toute rigueur, la prise en compte de la longueur finie des défauts conduirait à une légère diminution de la dispersion.

On constate d'autre part que le meilleur rapport signal sur bruit (RSB) est obtenu pour une taille de défaut un peu supérieur à $v\tau + p$ et qu'il existe une valeur optimale de $v\tau$ pour un RSB qui varie avec la taille minimum du défaut à détecter. Le RSB obtenu avec cette valeur optimum croît approximativement linéairement avec la taille du défaut minimum (droite en pointillé sur la figure 7). La recherche du RSB maximum conduirait donc à choisir le pixel le plus petit possible par rapport au défaut et donc un rapport $\frac{v\tau}{p}$ grand ce qui est contradictoire avec la contrainte liée à la dispersion. Un compromis doit donc en général être choisi.

3. Vérification expérimentale

3.1. Système de contrôle de tubes métalliques

Les considérations précédentes ont été suscitées par un travail mené au laboratoire GERE sur un problème industriel de contrôle qualité temps réel proposé par la société Valinox; ce travail concerne plus précisément la détection de défauts d'aspect sur des tubes métalliques défilant à des vitesses inférieures ou égales à 1 m/s. Ce contrôle doit être effectué en ligne donc en temps réel.

La présence de défauts de relief et de teinte nous a conduit, après essais, à adopter une solution utilisant en même temps deux géométries de prise de vue : une série de 4 capteurs en incidence quasi normale (1) et une série de 6 capteurs en incidence rasante (2). L'éclairage est assuré par un tube fluorescent torique standard (3). Les caméras sont de type linéaire et ont une résolution de 256 pixels, le balayage de l'image étant obtenu par le déplacement du tube. Les 10 caméras sont gérées par deux microordinateurs de types PC 486 (4) par l'intermédiaire de cartes d'acquisition développées au laboratoire.

Ces cartes d'acquisition permettent d'assurer le stockage et le tri des pixels durant le traitement. Les mémoires sont de type FIFO ce qui autorise un traitement par l'unité centrale en temps masqué. Le tri consiste à sélectionner, parmi les 256 pixels de chaque ligne, 100 pixels de telle sorte que l'image du tube occupe toute la ligne quelque soit le diamètre de la pièce en cours de contrôle (zoom logiciel). La répartition des pixels choisis sur la ligne n'est pas uniforme; elle est déterminée afin de compenser la variation de résolution liée au décentrement du point visé : un défaut en bord de tube apparaît plus petit, nous augmentons donc la densité des pixels utiles sur les bords de l'image.

Un bâti automatisé (5) permet d'assurer les divers positionnements (éclairage, caméras) lors des changements de diamètres de tubes en particulier. La figure 8 donne une idée schématique du dispositif.

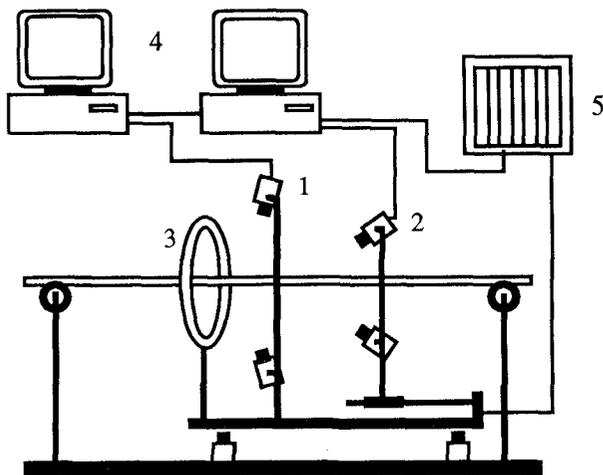


Figure 8 : système de contrôle de tubes métalliques au défilé.

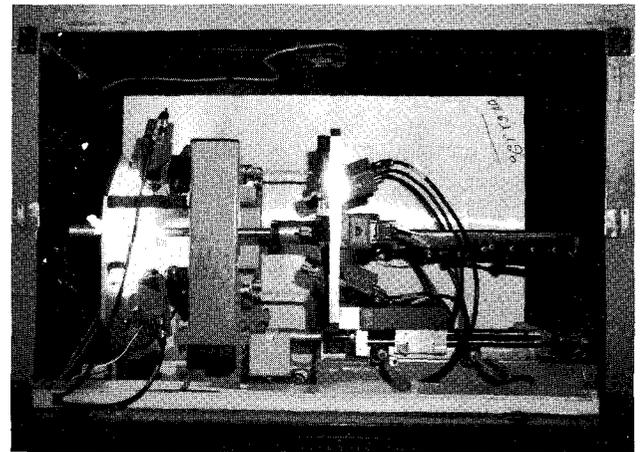


Figure 9 : vue générale de la machine de contrôle par vision artificielle.

Le système a fait l'objet d'un dépôt de brevet⁷ et est décrit plus en détail dans la thèse de H. Jender^{5,6}. La figure 10 montre des exemples de défauts choisis parmi des cas réels et illustre la complémentarité des deux groupes de caméras 1 et 2. Ces défauts sont essentiellement des ruptures de la texture longitudinale des tubes, nous utilisons donc comme paramètre de base un gradient longitudinal et les conditions de mesure sont très proches de celles prises comme modèle dans l'étude théorique.

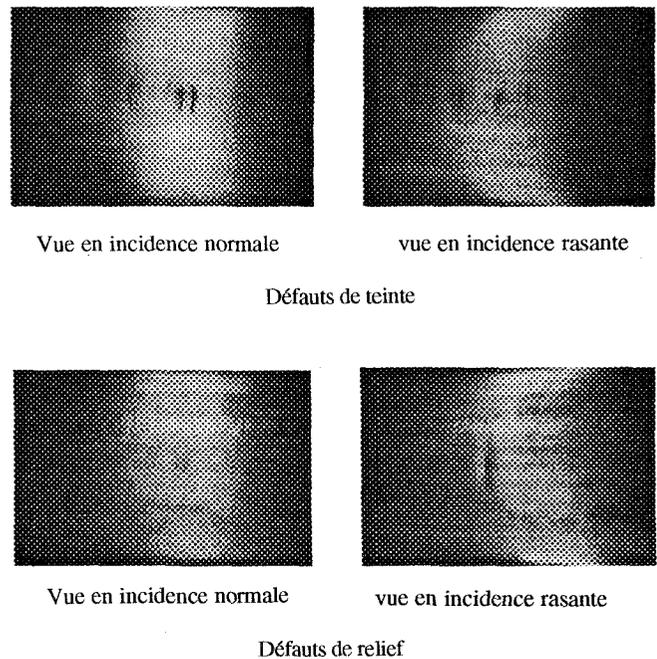


Figure 10 : exemples de défauts réels.

3.2. Mesures

Des contraintes diverses, liées entre autre au problème du temps réel, n'ont pas permis un choix optimal des paramètres. La dimension transversale minimum des défauts et des considérations liées au diamètre variable des tubes nous ont amenés à une dimension

longitudinale du pixel de : $p = 0,2 \text{ mm}$ pour les caméras en incidence normale et de : $p = 0,4 \text{ mm}$ pour les caméras en incidence rasante. Le temps d'acquisition a été fixé en tenant compte du fait que la vitesse de défilement pouvait varier entre 0,5 m/s et 1 m/s et à la suite d'un compromis entre la dispersion admissible, le rapport signal sur bruit souhaité et le temps de traitement nécessaire. Les valeurs retenues sont : $600 \mu\text{s}$ pour les caméras verticales et 1,2 ms pour les caméras inclinées, de telle sorte que le rapport $\frac{v\tau}{p}$ soit conservé. La taille des défauts à détecter est de l'ordre de 1 mm. Le tableau 1 résume les conditions obtenues. Si on admet que l'optimum pour le rapport signal sur bruit est atteint pour d voisin de $v\tau + p$, conformément à l'étude théorique, on constate que les choix effectués correspondent à un bon compromis du point de vue du RSB.

Tableau 1

	$v(m/s)$	$\frac{v\tau}{p}$	$v\tau + p$ (mm)	RSB thé. (dB)	RSB exp.	Δ thé. (dB)	Δ exp. (dB)
caméras	1	3	0,9	0	0	5,25	4,9
verticales	0,5	1,5	0,5	-5	-6	4,45	4
caméras	1	3	1,6	0	0	5,25	5,5
inclinées	0,5	1,5	1	-1,2	-2,5	4,45	4,6

L'étude expérimentale a été menée dans les conditions normales d'exploitation sur un défaut étalon (trou de 1 mm de diamètre); les courbes de la figure 11 donnent des exemples de résultats obtenus pour les deux vitesses extrêmes considérées. On observe une couverture régulière de tout le pourtour du tube et une dispersion de l'ordre de 4 à 5 dB. Les résultats complets sont rassemblés dans le tableau 1. Les mesures ont porté sur au moins 30 passages du défaut sous chaque caméra, la position du défaut dans le champ étant aléatoire. Les valeurs expérimentales retenues pour la dispersion sont les valeurs maximum relevées pour la caméra présentant la dispersion la plus grande. La figure 12(a) montre une série de mesures pour la caméra inclinée n°2, l'angle α est défini par la figure 12(b).

Il n'est pas possible de comparer les RSB pour les deux groupes de caméras car le niveau de bruit détecté dépend fortement de l'incidence de la prise de vue, c'est pourquoi nous avons

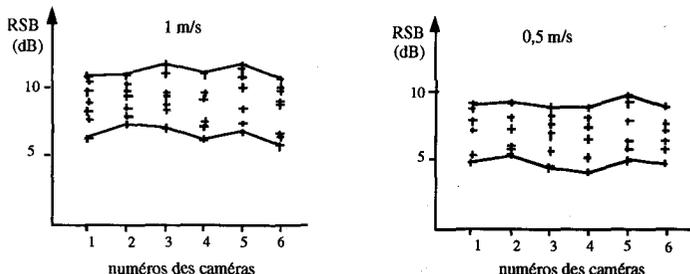


Figure 11 : résultats expérimentaux pour les caméras inclinées.

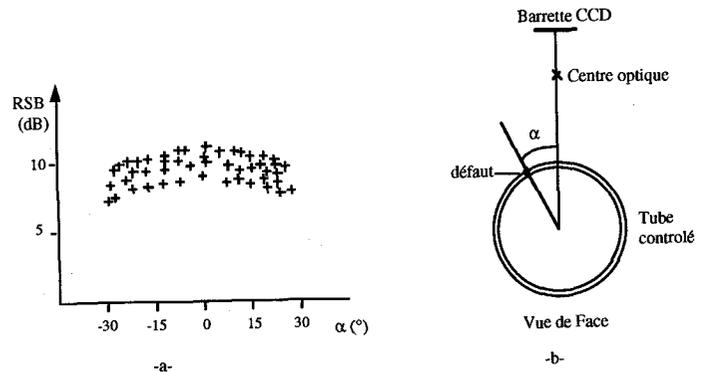


Figure 12 : a) rapport signal sur bruit en fonction de la position angulaire α du défaut pour la caméra inclinée numéro 2 - b) définition de l'angle α .

référéncé les deux groupes de résultats indépendamment l'un de l'autre et arbitrairement. L'accord entre résultats théoriques et expérimentaux en ce qui concerne la dispersion est très bon malgré le fait que la théorie devrait être légèrement corrigée pour tenir compte de la longueur finie du défaut. Ceci est probablement dû au fait qu'il y a d'autres sources de dispersion comme par exemple les défauts d'éclairage et, comme le montre la figure 12, la distorsion géométrique des images induites par la courbure des tubes (ce dernier effet est d'ailleurs corrigé en partie par une pondération automatique des mesures).

3.3. Conclusion sur le choix des paramètres

On caractérise souvent (voir⁸ par exemple) les performances d'un système de détection de défaut, par une courbe représentant le taux de fausses alarmes (FA) en fonction du taux de non détection (ND), courbe paramétrée par les réglages des paramètres (seuil par exemple). FA et ND sont définis par :

$$FA = \frac{\text{nombre de fausses détections}}{\text{nombre d'essais}}$$

$$ND = 1 - \frac{\text{nombre de bonnes détections}}{\text{nombre de défauts}}$$

L'allure de cette courbe est en général semblable à celles de la figure 13. Le choix du compromis idéal entre FA et ND est fait sur cette courbe en fonction des priorités imposées par l'industriel.

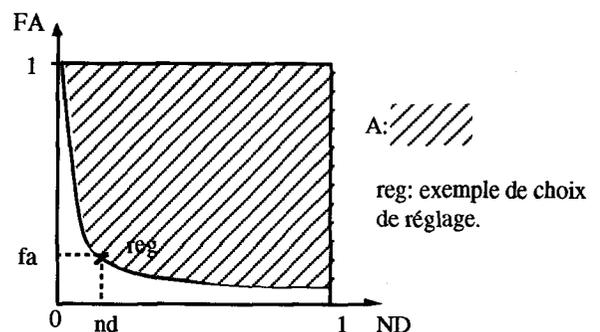


Figure 13 : exemple de courbe FA en fonction de ND .

Mais de façon générale, on peut dire que plus le système est performant plus la courbe est proche des axes $FA = 0, ND = 0$, et on peut retenir comme critère de performance la surface A comprise entre la courbe et les axes $FA = 1, ND = 1 : A = 1$ pour un système parfait, $A = 0$ pour un système inutile.

Les influences de la dispersion et du rapport signal sur bruit du paramètre de détection des défauts sur le critère de performance dépendent du processus de fabrication qui est contrôlé et surtout de la façon dont sont générés les défauts. En effet si les défauts correspondent uniquement à l'amplification accidentelle de perturbations induites par le processus normal, il y aura une répartition statistique assez uniforme de la taille des défauts. Or la dispersion des détections crée une zone d'incertitude dans la décision autour du seuil fixé et l'existence de défauts de taille voisine de ce seuil va impliquer une augmentation de FA et de ND . La dispersion devra donc être réduite au maximum pour obtenir un S maximum. Si par contre les phénomènes conduisant aux défauts sont accidentels, l'histogramme de la taille des perturbations sera nettement bimodal et l'écartement entre les modes permettra de chiffrer la dispersion tolérable sans détérioration du critère performance du système. L'accent dans ce cas pourra être mis sur l'obtention du meilleur rapport signal sur bruit pour diminuer A .

Dans le cas traité ici (contrôle des tubes métalliques) nous sommes plutôt dans la deuxième configuration ce qui nous a permis de tolérer une dispersion assez grande afin d'obtenir la sensibilité nécessaire compte tenu du système d'éclairage utilisé. Les performances obtenues sont données en détail par Jender⁶.

Il faut signaler, pour terminer, que le système de contrôle en ligne est actuellement installé à l'usine Valinox des Laumes et fonctionne conformément au cahier des charges.

4. Conclusion

Nous avons par un modèle simple déterminé l'influence du temps d'acquisition, de la vitesse de défilement, de la résolution et de la taille des défauts sur les performances de base d'un système de contrôle qualité par vision artificielle de produit défilant à vitesse constante.

Nous avons montré, en particulier, que la dispersion induite par l'échantillonnage pouvait atteindre 6 dB pour les temps d'intégration longs qui correspondent aux meilleures valeurs du rapport signal sur bruit, ce qui indique que le choix des paramètres sera dans tous les cas le résultat d'un compromis. Le choix intuitif naturel : $v\tau = p = d$ n'est d'ailleurs pas, en général, le meilleur.

Il faut rappeler enfin que d'autres considérations contraignent souvent fortement le choix des paramètres, comme par exemple, les temps de calcul, les conditions d'éclairage, le flou optique lié à la géométrie des produits, ..., et qu'il n'est malheureusement pas toujours possible d'effectuer le compromis uniquement sur les critères liés aux performances.

La modélisation proposée peut être généralisée à des traitements différents (type de filtrage) ou à d'autres techniques d'acquisition (capteur).

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Messieurs Cnudde et Gérard de la société Valinox et Monsieur Ngô du groupe Vallourec (C.E.V.) pour leur aide précieuse tout au long de l'étude expérimentale et en particulier dans la phase de mesures sur site.

5. Annexes

5.1. Dispersion des amplitudes maximum détectées en fonction de la durée d'intégration :

Pour

$$\begin{aligned}
 p < v\tau & \text{ on a } \Delta = 2 - \frac{p}{2v\tau} \\
 v\tau < p < 2v\tau & \Delta = \frac{2p}{v\tau - 1 + 6\frac{p}{v\tau} - \left(\frac{p}{v\tau}\right)^2} \\
 2v\tau < p < 3v\tau & \Delta = \frac{8}{-1 + 6\frac{p}{v\tau} - \left(\frac{p}{v\tau}\right)^2} \\
 3v\tau < p & \Delta = 1
 \end{aligned}$$

5.2. Amplitude moyenne maximum détectée :

$$\begin{aligned}
 p < v\tau & S = \frac{p\tau}{4} \left(3 - \frac{p^2}{3v^2\tau^2}\right) \\
 v\tau < p < 3v\tau & S = \frac{p\tau}{24} \left(27 - \frac{3v\tau}{p} - \frac{9p}{v\tau} + \frac{p^2}{v^2\tau^2}\right) \\
 3v\tau < p & S = p\tau \frac{v\tau}{p}
 \end{aligned}$$

5.3. Puissance de bruit détectée :

$$\begin{aligned}
 p < v\tau & B = \sigma^2 \frac{2p^2\tau}{v} \left(1 - \frac{p}{2v\tau}\right) \\
 v\tau < p < 2v\tau & B = \sigma^2 \frac{2p^2\tau}{v} \left(-1 + 2\frac{v\tau}{p} + \frac{p}{6v\tau} - \frac{2}{3}\left(\frac{v\tau}{p}\right)^2\right) \\
 2v\tau < p & B = \sigma^2 \frac{4p^2\tau}{3v} \left(\frac{v\tau}{p}\right)^2
 \end{aligned}$$

5.4. Rapport signal sur bruit pour un signal en échelon :

$$p < v\tau \quad RSB = \frac{S_0^2 v\tau}{\sigma^2 32} \frac{(3 - \frac{p^2}{3v^2\tau^2})^2}{1 - \frac{p}{2v\tau}}$$

$$v\tau < p < 2v\tau \quad RSB = \frac{S_0^2 v\tau}{\sigma^2 1152} \frac{(27 - 3\frac{v\tau}{p} - 9\frac{p}{v\tau} + \frac{p^2}{v^2\tau^2})^2}{-1 + 2\frac{v\tau}{p} + \frac{p}{6v\tau} - \frac{2}{3}\frac{v^2\tau^2}{p^2}}$$

$$2v\tau < p < 3v\tau \quad RSB = \frac{S_0^2 v\tau}{\sigma^2 768} (-3 + 27\frac{p}{v\tau} - 9\frac{p^2}{v^2\tau^2} + \frac{p^3}{v^3\tau^3})^2$$

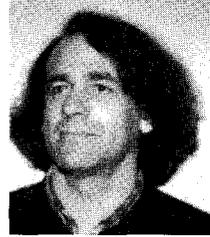
$$3v\tau < p \quad RSB = \frac{S_0^2 3}{\sigma^2 4} v\tau$$

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. BELLANGER, « Traitement numérique du signal », Masson, 1987.
- [2] J. CANNY, « A computational approach to edge detection », *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol., PAMI-8, N° 6, pp. 679-698, Nov., 1986.
- [3] R. DERICHE, « Using Canny's criteria to derive a recursively implemented optimal edge detector », *Inter. Jour. of Vision*, pp. 167-187, Boston, 1987.
- [4] J.P. DAZELLE, « Contribution à la conception d'un système de vision pour le contrôle de matériaux continus en défilement : Application à l'optimisation de la découpe en temps réel de bandes de bois contenant des défauts », thèse de docteur ingénieur, Université de Caen, Sept. 1987.
- [5] H. JENDER, F. TRUCHETET, M. PAINDAVOINE, P. GORRIA, J. PORTRAT, P.A. NGO, P. GÉRARD, « Contrôle automatique en temps réel par traitement d'images de l'état de surface de tubes métalliques », *Colloque Matériaux : science et industrie*, Paris, Juin 1992.
- [6] H. JENDER, « Contrôle temps réel par vision artificielle de tubes métalliques en défilement continu », thèse Université de Bourgogne, Juin 1993.
- [7] P. GORRIA, H. JENDER, M. PAINDAVOINE, F. TRUCHETET, P. GÉRARD, P.A. NGO, « Dispositif et procédé de détection au défilé de défauts de surface sur des produits longs métalliques », Brevet Valinox, N° 92-06987, Juin 1992.
- [8] M. DARBOUX, A. FALUT, J.L. JACQUOT, C. DOCHE, « An automated system for submicrometer defect detection on patterned wafers », SPIE vol.

1138, *Optical Microlithography and Metrology for Microcircuit Fabrication*, pp. 172, 177, 1989.

LES AUTEURS



F. TRUCHETET est né à Dijon en 1951 et après une thèse de 3ème cycle sur la spectroscopie hertzienne a travaillé 2 ans à Thomson-CSF au sein de la division télécommunication. Maître assistant puis maître de conférence à l'I.U.T. du Creusot, il a continué ses travaux sur l'étude des formes de raies d'absorption moléculaire avant de s'orienter vers le traitement d'image. Dans le cadre général du contrôle qualité temps réel par vision artificielle il s'intéresse plus particulièrement aux traitements bas niveau par filtrage, transformées en ondelettes et modélisation markovienne.

H. JENDER a obtenu un DEA de physique à l'Université de Bourgogne en 1990 et prépare actuellement une thèse de doctorat. Ses travaux portent essentiellement sur le contrôle qualité en temps réel par vision artificielle et sur l'analyse de texture.

P. GORRIA est Ingénieur de l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers (1980) et Docteur d'Université (1984). Actuellement Maître de Conférences à l'I.U.T. du Creusot, il a contribué au démarrage d'une activité de recherche en traitement d'images au Laboratoire GERE de l'I.U.T. du Creusot. Membre du GdR 134 groupe GT8 du GRECO, il dirige des travaux de recherche portant sur la détection de défauts par vision artificielle.

Après une thèse de troisième cycle en traitement du Signal et des Images soutenue à l'Université de Montpellier en 1982, M. PAINDAVOINE a travaillé à la Société FAIRCHILD (caméras CCD) avant de rejoindre l'Université de Bourgogne (I.U.T. du Creusot) en 1985 en qualité de maître de conférence où il a initié une activité de recherche en traitement d'images au sein du laboratoire GERE. Depuis 1992, il est professeur à l'École d'ingénieur FIRST de l'Université de Bourgogne et poursuit des recherches en architecture de systèmes de traitement d'images temps réel.

Manuscrit reçu le 6 mars 1993.