



CONTRÔLE DE DÉFAUTS D'ASPECT ET DE QUALITÉ DE SURFACE

► La solution par la déflectométrie



► Par Yves SURREL, directeur R&D chez Techlab, surrel@techlab.fr.

Caractériser les défauts d'aspect d'une surface est un problème qui concerne une très grande variété de secteurs industriels, depuis l'automobile ou l'aéronautique (aspect de la carrosserie ou du fuselage) jusqu'à la papeterie ou l'industrie du cuir, en passant par la cosmétologie (les rides sont aussi un défaut d'aspect !) Les contrôles actuels reposent la plupart du temps sur des opérateurs qui réalisent un contrôle visuel ou tactile, avec les coûts et le manque de répétitivité que cela entraîne. La déflectométrie est une technique optique sans contact qui permet de mettre en place un contrôle automatisé, robuste et rapide.

Qu'est-ce qu'un défaut d'aspect ?

La première question à laquelle il faut répondre si l'on veut remplacer par un système de mesure un contrôle visuel ou tactile, donc basé sur des sensations, est de déterminer le bon *mesurande*, c'est-à-dire la grandeur physique qui va permettre de caractériser quantitativement la perception des défauts. Nous proposons une définition très précise de ce qu'est un défaut d'aspect :

« Un défaut d'aspect est une zone où la composante haute fréquence de la courbure locale de la surface dépasse un certain seuil. »

2 mots clés apparaissent dans cette définition : courbure et fréquence.

Nous expliquons ci-dessous l'importance de ces notions, dans le cas des surfaces réfléchissantes. Nous évoquons en fin d'article le cas des surfaces transparentes.

Courbure

Le premier élément essentiel qui va permettre de caractériser un défaut de surface est effectivement la courbure locale de la surface. Pour l'expliquer, il faut d'abord analyser comment un défaut se manifeste dans l'image perçue par l'œil. Un exemple bien connu dans la vie courante est illustré sur la figure 1. Un premier point important est que le défaut de surface, le défaut de planéité des vitres sur cet exemple, se traduit par une déformation de l'image de l'environnement. L'œil, ou plus exactement le système corticovisuel, interprète les déformations de l'image comme "anormales", ce qui résulte d'une impression de défaut.

Il est facile d'expliquer pourquoi un défaut de planéité entraîne une défor-

mation de l'image vue. Pour cela, le plus simple est de considérer le trajet inverse de la lumière, c'est-à-dire d'imaginer un "lancer de rayon" partant de l'œil. Lorsque ce rayon rencontre une surface réfléchissante, sa direction de propagation est modifiée selon la loi de la réflexion de Descartes (figure 2) qui stipule que l'angle de réflexion r est égal à l'angle d'incidence i .

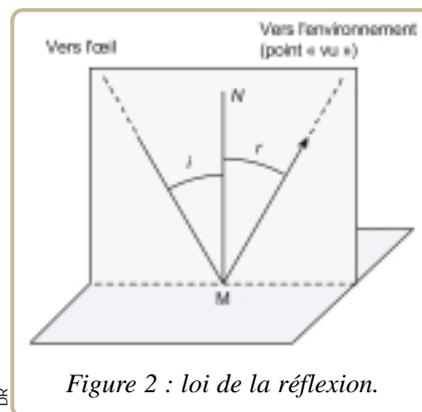


Figure 2 : loi de la réflexion.

Donc la direction du rayon réfléchi dépend de la direction de la normale N au point d'incidence M . Si la direction de la normale change entre 2 points voisins, le point vu dans l'environnement va se déplacer, d'autant plus que le changement de direction de la normale est important et que ce point est loin.

Une variation de la direction de la normale est équivalente à une variation de la pente locale. Si la surface est décrite



Figure 1 : réflexion de l'environnement sur un immeuble vitré.

(1) Yves Surrel est professeur titulaire de la chaire d'instrumentation au Conservatoire national des arts et métiers. Actuellement en disponibilité, il poursuit son activité de transfert de technologie en tant que directeur de la recherche et du développement dans la société Techlab.

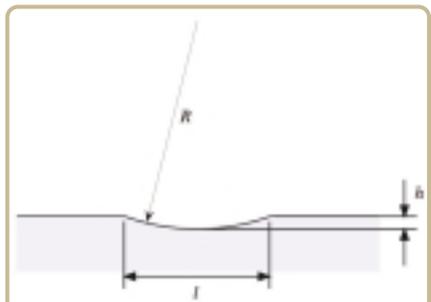
par la fonction altitude $z = f(x,y)$ dans un repère donné (x,y) , les 2 composantes de la pente sont les dérivées partielles $\partial z/\partial x$ et $\partial z/\partial y$. Une variation de pente d'un point à un autre est décrite par les dérivées secondes $\partial^2 z/\partial x^2$, $\partial^2 z/\partial y^2$ et $\partial^2 z/\partial x \partial y$. Les 2 premiers termes sont les courbures locales de la surface, suivant x et suivant y , le troisième s'appelle la torsion, dont nous ne parlerons pas plus ici dans la mesure où l'information de courbure est suffisante pour la caractérisation des défauts. Pour bien comprendre la notion de courbure, il suffit de savoir qu'elle est égale à l'inverse du *rayon de courbure* local, rayon du cercle tangent localement à la surface (cercle osculateur) :

$$\text{Courbure (m}^{-1}\text{)} = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{1}{R_x} = \frac{1}{\text{Rayon de courbure (m)}}$$

Les défauts de planéité et, en général, tous les accidents de forme correspondant à des défauts sont accompagnés de variations de la pente locale se traduisant par des valeurs notables de la courbure. Une première idée pourrait donc être de caractériser les défauts par leur courbure. Il faut en fait rajouter une autre notion, celle de composante haute fréquence. Mais avant cela, on peut approfondir les liens entre courbure, extension et profondeur d'un défaut.

Courbure, extension, profondeur

Raisonnement en courbure est inhabituel, et une valeur de courbure exprimée dans son unité (m^{-1} , l'inverse du mètre) parle peu à l'imagination. Il est alors pratique de raisonner sur un défaut modèle correspondant à un enfoncement de forme parfaitement sphérique, décrit bien sûr par son rayon de courbure R mais également par sa largeur l et sa profondeur h (figure 3).



DR Figure 3 : défaut sphérique modèle.

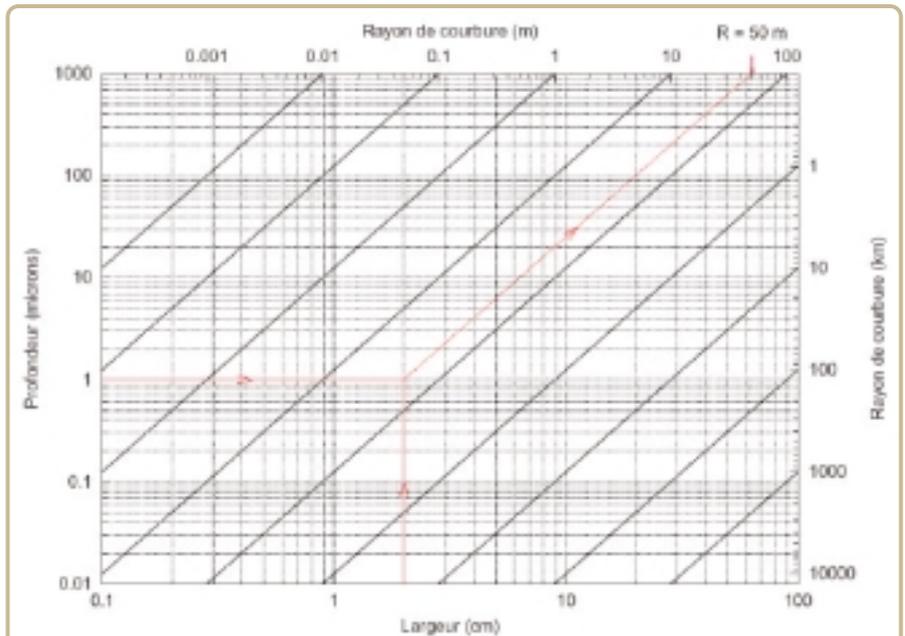


Figure 4 : relation entre l'extension, la profondeur et le rayon de courbure.

La relation mathématique existant entre ces différentes grandeurs est $h = l^2/8R$. Cette relation peut être mise sous la forme de l'abaque représenté sur la figure 4. Cet abaque illustre bien le fait que le rayon de courbure (ou la courbure) "encapsule" en quelque sorte les 2 notions de largeur et de profondeur. En effet, on sait bien que la gravité d'un défaut est non seulement liée à sa profondeur, mais également à son extension, ce qui amène les praticiens à raisonner sur ces 2 grandeurs simultanément. Utiliser la notion de courbure rend cela inutile, puisqu'elle tient compte automatiquement des 2 aspects, et devient une mesure intrinsèque de la gravité d'un défaut.

Sur l'abaque, l'échelle de gravité croissante des défauts va du coin en bas à droite (faible profondeur et grande extension) vers le coin en haut à gauche (grande profondeur, faible extension). On voit qu'il s'agit de la diagonale correspondant aux rayons de courbure décroissants, donc aux courbures croissantes.

Composante haute fréquence

Dans ce qui précède, il a été fait allusion à la déformation "anormale" que l'œil et le cerveau peuvent identifier sur une image. Qu'est-ce qui va permettre à un



DR Figure 5 : aile de voiture en composite.

système de mesure automatisé de faire le même tri, et de séparer le normal de l'anormal ? L'approche que nous proposons n'a évidemment pas la complexité des opérations faites de manière inconsciente par un observateur qui ressentira une impression de qualité ou de non-qualité. Néanmoins, en pratique, cette approche s'est révélée suffisante dans la grande majorité des cas. Elle consiste à travailler sur la composante haute fréquence de la courbure. Dans la plupart des cas pratiques, la surface à contrôler n'est pas plane (figure 5), et une première déformation de l'image de l'environnement est causée par le galbe propre de la pièce. Cela ne choque évidemment pas l'observateur, habitué à cet effet. Ce qui attirera son attention, ce sont les déformations "rapides", c'est-à-dire variant sur une courte distance

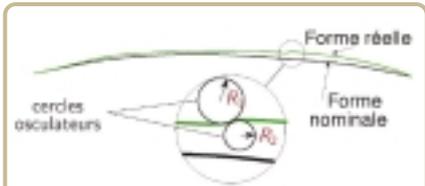


Figure 6 : écart de forme basse fréquence et défaut haute fréquence.

(figure 6). Cela correspond exactement à la notion de composante haute fréquence, isolée en pratique à l'aide d'outils classiques de traitement du signal que nous ne détaillerons pas ici. Un filtrage fréquentiel convenablement réalisé permet également de s'affranchir de la question qui se pose lorsque l'on cherche à soustraire des profils polynomiaux à

des coupes ou à des mesures unidirectionnelles : quel est le degré du polynôme qui élimine le galbe et garde les défauts ?

La déflectométrie

Principe

Il est illustré sur la figure 7. Un écran affiche une mire constituée d'un motif périodique horizontal à profil sinusoidal. Cet écran va jouer le rôle de "règle graduée" permettant de connaître l'ordonnée des points source lumineux. Cette ordonnée est en effet proportionnelle à la phase de la sinusoïde constituant le profil des traits. Une technique désormais classique, le décalage de phase, permet d'évaluer pour chaque pixel du capteur d'image la phase du point émetteur, donc sa position verticale. De la même manière, l'affichage d'une mire à période horizontale permet de mesurer l'abscisse des points émetteurs. De façon imagée, la mesure de phase fournit le vernier de la graduation de l'écran, vernier permettant d'évaluer couramment entre 1/500 et 1/100 de la période des franges. Connaissant la disposition géométrique des éléments (positions relatives de la caméra, de la pièce et de la mire), il est possible de modéliser la trajectoire des rayons lumineux dans l'espace et donc d'avoir accès en tout point de la pièce à la direction de la normale. Cela permet de mesurer le champ des pentes locales, et par dérivation le champ des courbures locales. Il ne faut pas confondre cette technique avec la mesure de forme par projection de franges (appelée aussi "lumière structurée"), dont la résolution de mesure est le plus souvent insuffisante pour détecter des défauts d'aspect souvent dans le domaine de 1 à 10 µm de profondeur.

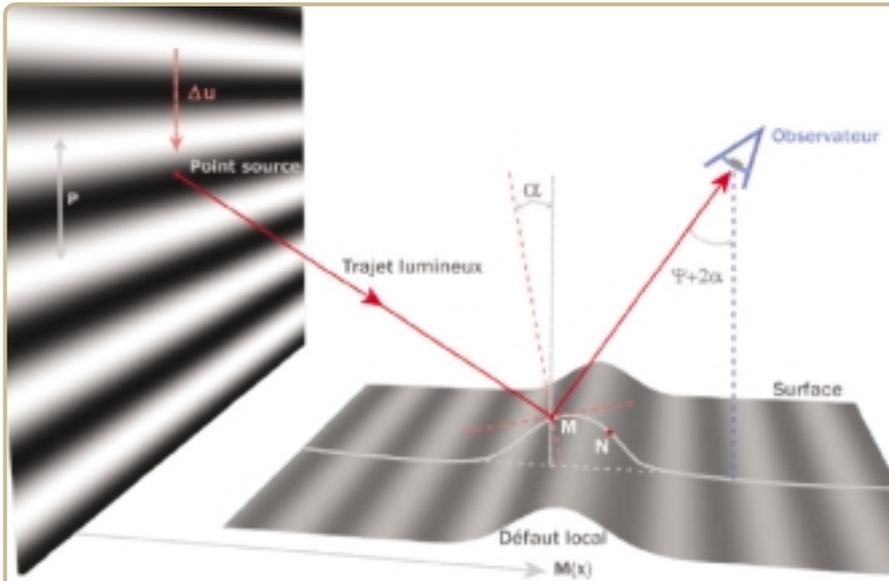


Figure 7 : principe de la déflectométrie ; il ne s'agit pas de projection de franges, mais d'observation par réflexion.

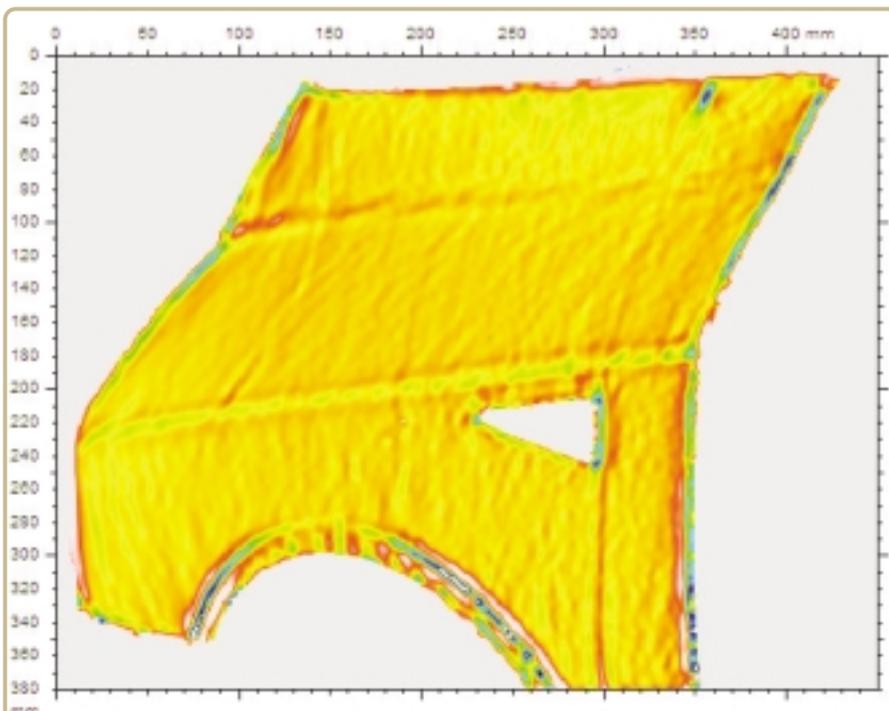


Figure 8 : carte de courbures de l'aile représentée figure 5, avec une trace de cale verticale bien visible en bas à droite.

Une vision industrielle de nouvelle génération

Le décalage de phase mentionné plus haut consiste à faire défiler régulièrement (donc à déphaser) le motif de la grille. Chaque pixel de la caméra d'observation voit donc un signal modulé à une fréquence connue dont le logiciel évalue la phase. Cela correspond exactement à une *détection synchrone*, dont

la principale caractéristique est une *très grande immunité au bruit*, à la lumière ambiante dans le cas présent. Une solution de mesure basée sur cette technologie est donc particulièrement adaptée à une mise en œuvre industrielle. Le problème principal rencontré en vision industrielle, l'homogénéité et la stabilité de l'éclairage, est ici *totale*ment évité. Tenant compte également du fait qu'à chaque pixel correspond la mesure d'une grandeur physique bien identifiée, on peut parler de véritable "vision industrielle de nouvelle génération".

Applications

Un résultat de mesure déflectométrique se représente typiquement sous la forme d'une carte de la composante haute fré-

quence de la courbure. Les figures 8 à 11 montrent quelques exemples d'application sur des matériaux variés. La figure 12 illustre la possibilité d'intégrer le champ de pentes au lieu de le dériver, pour accéder à la cartographie des altitudes. La résolution obtenue est remarquable pour une technique non interférométrique, sur un champ aussi large.

La figure 13 illustre une application de la déflectométrie en transmission à travers un vitrage. La déviation des rayons lumineux est alors causée par l'effet de lentille local engendré par les défauts de planéité des surfaces du vitrage. On obtient la carte de ces défauts exprimés en millidioptries, la dioptrie (symbole ∂ , $1\partial = 1 \text{ m}^{-1}$) étant l'unité de puissance optique, l'inverse de la distance focale. Outre la puissance optique,

on obtient également la cartographie de l'astigmatisme généré par les défauts. Dans cette application, la grille qui sert de mire est peu déformée, ce qui permet d'éliminer le besoin de la décaler temporellement (on parle alors de décalage de phase spatial). La mesure se fait alors à partir d'une seule prise de vue.

Conclusion

La caractérisation de la qualité de surface est maintenant possible de manière robuste et rapide, et bien sûr sans contact. Cela s'explique :

- par l'identification du mesurande pertinent (composante haute fréquence de la courbure locale) ;
- par l'utilisation d'une technologie immune à la lumière ambiante, évitant tous les écueils de la vision industrielle classique.

Les utilisateurs ne s'y trompent pas, et l'approche présentée dans cet article commence à devenir la norme dans de nombreux secteurs industriels (automobile, vitrages, etc.) Le prochain domaine appelé à être révolutionné par la déflectométrie est celui de la mesure de rugosité, dans lequel des résultats très probants ont déjà été obtenus.



Figure 9 : aide à la finition de moule d'injection grâce à une mesure de courbures.

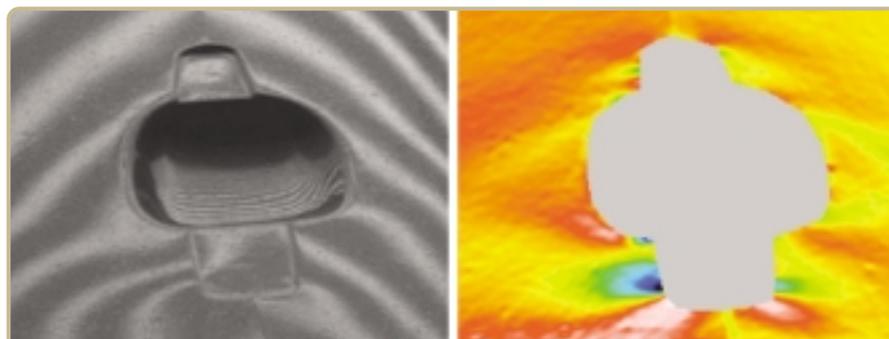


Figure 10 : "oreilles de Mickey" apparaissant autour du logement de la poignée sur une portière emboutie.

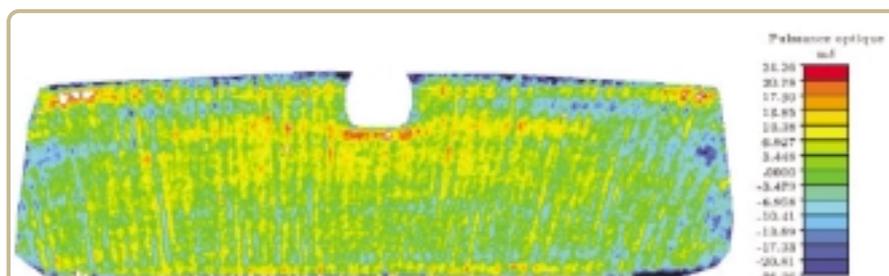


Figure 13 : mesure de la qualité optique d'un pare-brise.



Figure 11 : surface d'un cédérom.

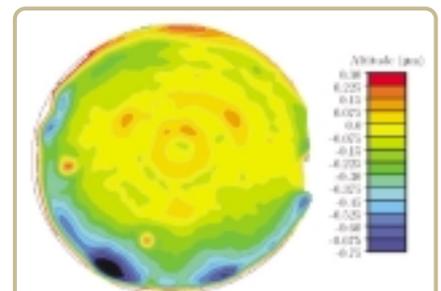


Figure 12 : planéité d'un wafer de 200 mm maintenu par dépression.