Réalisation d'un photo-uranotomographe à imagerie numérique

L. Michel, M. Andersen
LESO-PB / EPFL / CH-1015 Lausanne

Abstract

A well knowledge of daylight deposit is an essential element to evaluate daylighting performances of building, as well as the development of new daylighting systems. The measurement of luminance repartition on the sky vault is carrying out by the mean of a sky scanner. Such device is commercialised and lack of different things:

- sizeable duration of measurement: from 30s to several minutes
- no flexibility of measurement: it can scan the hemisphere by only one distribution (145 zones of Tregenza/CIE [1])
- low dynamic measurement: the circumrsolar is exclude of the measurement

A new type of sky scanner based on digital image techniques is developed to bypass problems of existing device. The object of this paper is to present the development of a video sky scanner and to illustrate how it is put into operation.

Résumé

La connaissance approfondie du gisement lumineux extérieur est un élément essentiel pour l'évaluation des performances lumineuses de bâtiments, ainsi que le développement de nouveaux systèmes d'éclairage naturel. La mesure de la distribution de luminances sur la voûte céleste se pratique grâce à un photo-uranotomographe. De tels scanners de ciel sont commercialisés et souffrent des défauts suivants:

- durée de la mesure importante: 30s. à plusieurs minutes
- manque de souplesse de la mesure: ils ne permettent de balayer l'hémisphère que selon une seule répartition (145 zones de Tregenza/CIE [1])
- faible dynamique de mesure: la zone circumsolaire est exclue de la mesure

Un nouveau type de photo-uranotomographe basé sur la technique d'imagerie numérique a été développé afin de contourner les défauts des dispositifs existants. L'objet de cette contribution est de présenter le développement d'un photo-uranotomographe à imagerie numérique et d'en illustrer sa mise en service.

1 Introduction

Le photo-uranotomographe est un dispositif permettant la mesure de la distribution de la luminance sur la voûte céleste. Les scanners de ciel commercialisés ou sous forme de prototypes sont basés sur différentes approches:

- unique capteur monté sur deux axes motorisés (PRC Krochmann, EKO MS-300L)
- multiples capteurs visant chacun une partie du ciel (University of Michigan, University of Sydney, Universität-GH Paderborn)
- imagerie numérique (Fukuyama University [2])

C'est cette dernière approche qui est à la base du nouveau développement présenté dans cet article. L'utilisation des caméras CCD en photométrie montrant l'intérêt de cette technologie est répandue (ergonomie de la vision [3], sécurité routière [4], goniophotométrie[5] [6]).

2 Principe de fonctionnement

Un luminancemètre en général, ou un scanner de ciel en particulier, basé sur l'imagerie numérique comporte les éléments suivants:

- optique: elle permet de projeter la scène à mesurer sur le détecteur
- filtres: ils calibrent la réponse spectrale du détecteur
- détecteur: la technologie du CCD est, pour l'instant, la plus répandue et la plus performante
- électronique d'amplification du signal du détecteur
- électronique de numérisation du signal amplifié
- logiciel de commande, d'acquisition et de traitement de l'image: fait partie, avec un ordinateur, de l'unité de contrôle

Caméra vidéo digitale

Les critères techniques pour choisir une caméra vidéo sont nombreux (voir tableau 1). Il est essentiel d'apporter un très grand soin à leur évaluation par rapport au marché du moment. Notre choix s'est porté sur la caméra digitale CF 8/1 DX C_{air} (~11'250 Euro) de la marque KAPPA[1].

Paramètres	Commentaires	Caméra KAPPA CF 8/1 DXC_{air} (CCD ½ pouce : Sony ICX039BLA)
couleur ou noir et blanc	▪ N&B: simple, meilleur marché et plus rapide pour le traitement du signal. ▪ couleur: permet de faire des mesures en colorimétrie	noir et blanc
digitale ou analogique	la solution digitale permet d'avoir la numérisation le plus tôt possible afin d'éviter la perte ou la distorsion du signal.	digitale
rapport signal/bruit	ce rapport doit être maximisé afin d'augmenter la qualité de la mesure finale	> 50 dB
résolution de la numérisation	indique le nombre de niveaux de gris de l'image	8bit (256 niveaux)
refroidissement du capteur CCD	permet de limiter le bruit thermique	à air par effet Peltier
courbe gamma gains temps d'intégration	paramètres devant être contrôlés par l'utilisateur. Les fonctions du type AGC (Auto Gain Control) AIT (Automatic Integration Time) ne permettent pas de calibrer le signal vidéo	paramètres contrôlable par l'ordinateur: ▪ gamma 1ou 0.45 ▪ gain: 26dB ▪ temps d'intégration: 1/10000e sec- à plusieurs heures
sensibilité du signal aux conditions extérieures	l'influence de la température, l'humidité ou tout autre facteur extérieur doit être réduite. essentiels pour la qualités des résultats, ils ne sont que rarement indiqués par le fabriquant.	après une mise à jour de l'électronique par le fabricant, on a vérifié que ces paramètres extérieurs n'influencent que très peu la caméra
résolution du capteur	le nombre de pixels et le type d'optique déterminent la résolution spatiale du dispositif	▪ nb de pixels effectifs: 752(H)×582(V) ▪ taille d'un pixel: 8.6(H)×8.3(V)[µm] ▪ taille du capteur: ½"
boîtier	taille, poids et type de monture de l'optique	▪ monture: c-mount ▪ taille: 60×190×70[mm] ▪ poids: ~944 [g]

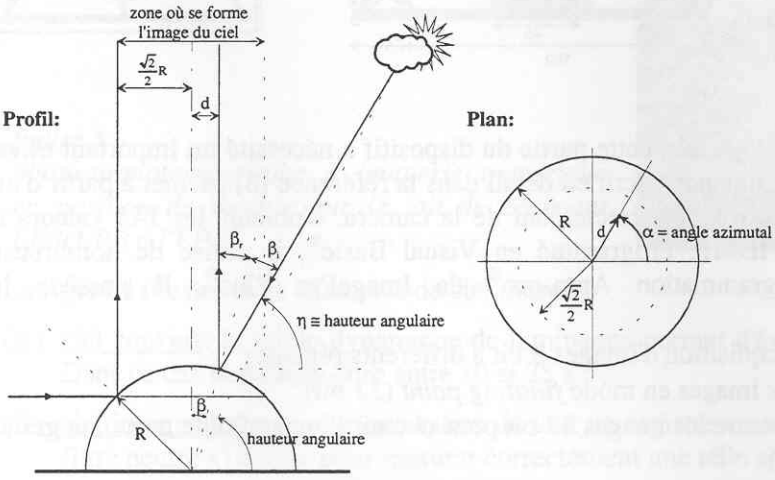
tableau 1: récapitulatif des principales données techniques pour le choix d'une caméra vidéo.

[1] KAPPA opto-electronics GmbH / Kleines Feld 6 / D-37130 Gleichen / http://www.kappa.de

Optique de projection

Afin d'obtenir un scanner de ciel, il est indispensable de visualiser l'hémisphère céleste dans son ensemble. Il est donc nécessaire de disposer d'une optique capable d'effectuer une projection de l'ensemble de l'hémisphère sur un plan. Aucun fournisseur d'objectifs pour caméra vidéo CCD ½" (12.7 mm) n'a dans sa gamme de produits une telle optique: la plus grande ouverture horizontale est de 116° pour une distance focale de 2.6 mm. C'est pourquoi la solution du *Globoscope* mis au point par G. Pleijel en 1954 [7] a été choisie.

Le miroir du *Globoscope* est constitué, dans notre cas, d'une bille de roulement en acier de 40 mm de diamètre (roulements des roues de camion). Cet article répandu (~10 Euro) offre la possibilité de faire une déposition d'une couche mince d'argent ou d'aluminium, afin d'améliorer les propriétés optiques. Le principe optique du miroir sphérique est expliqué à la figure 1.



Notation adoptée:

- d distance radiale sur l'image [mm]
- R rayon de la sphère [mm]
- η hauteur angulaire d'un objet par rapport au miroir [radian]
- α angle azimutal d'un objet [radian]
- β_r, β_i angle d'incidence, resp. de réflexion, entre le rayon et la normale au miroir [radian]
- β angle entre la normale au point de réflexion et la verticale [radian]

figure 1: schéma de principe de la réflexion sur un miroir sphérique

Comme les objets mesurés sont très éloignés par rapport à la taille de la sphère (diam.: 40 mm) on peut, sans autre, considérer que la hauteur angulaire de l'objet par rapport au sol est égal à η.

L'angle azimutal de l'objet correspond directement à celui de son image et la relation entre la distance radiale d sur l'image et la hauteur angulaire η peut s'écrire:

$$d = R \cdot \sin\frac{\frac{\pi}{2} - \eta}{2} \quad \text{et inversement} \quad \eta = \frac{\pi}{2} - 2 \cdot \mathrm{ArcSin}\frac{d}{R}$$

L'image de la voûte céleste réfléchie sur le miroir sphérique est projetée sur le capteur CCD à travers un télé objectif (focale: 108 mm). Cela permet de placer la caméra à bonne distance de la bille limitant ainsi l'importance de son propre reflet sur l'image.

Structure mécanique

Une structure mécanique pyramidale a été conçue de façon à ce que le miroir sphérique soit contenu dans son champ de vision de la caméra (voir figure 2). La taille des trois montants a été réduite au maximum pour diminuer leur impact sur l'image. Le tout est revêtu de peinture noire matte pour limiter les réflexions parasites. Dans ce même but, un masque constitué d'un fond noir mat en nid d'abeilles, permet de supprimer tout rayonnement provenant des directions sous l'horizon. Le miroir sphérique est posé sur un support qui a la possibilité d'être aligné avec la caméra. Pouvant légèrement brouiller l'image, les vibrations provoquées par le vent sont supprimées grâce à l'installation de haubans.

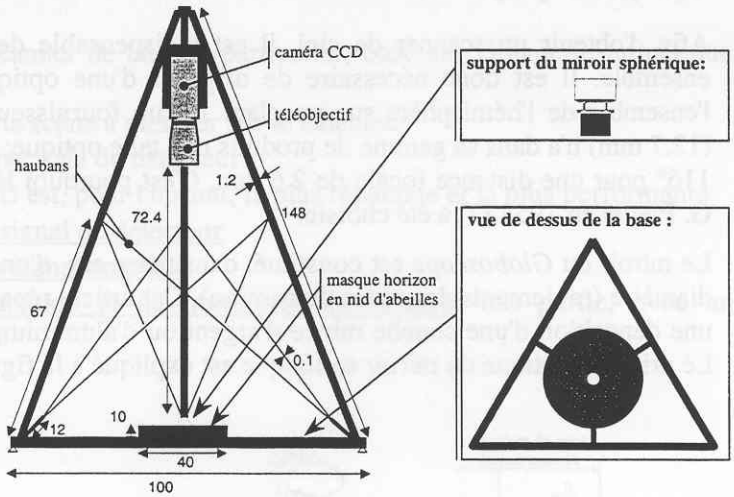


figure 2:
schéma de la structure mécanique du photo-uranotomographe (dimensions en [cm])

Unité de contrôle

Sous forme d'un ordinateur muni de logiciels, cette partie du dispositif a nécessité un important travail de développement. Le logiciel de commande décrit en détail dans la référence [8] permet à partir d'une série d'images 8bit, non calibrées provenant directement de la caméra, d'obtenir les 145 valeurs de luminance selon le protocole de l'IDMP. Programmé en Visual Basic®, il utilise de nombreuses commandes du langage de programmation Auto-pro® de ImagePro Plus®. Il possède les caractéristiques suivantes:

- gestion automatique de l'acquisition d'images 8 bit à différents réglages
- calibrage en luminance des images en mode *floating point* (32 bit)
- opérations mathématiques entre les images 32 bit pour obtenir l'image finale avec une grande dynamique (jusqu'à 75 dB)
- analyse de zones d'intérêt sur une image pour déterminer les 145 valeurs de luminance

3 Calibrage du dispositif

Afin de rendre opérationnel le dispositif, trois procédures de calibrage doivent être effectuées.

géométrique

Cette procédure permet de repérer sur l'image les zones d'intérêt à l'intérieur desquelles on évalue la moyenne des luminances. L'obstruction de la structure ainsi que celle de haubans doit être rejetée. Le taux de recouvrement de l'hémisphère vaut 86% et 91% dans le cas où les haubans ne sont pas installés. A titre de comparaison, le taux de recouvrement pour la répartition de P.R Tregenza [1] pour 145 zones de 11° vaut 67% et celui de la mesure du scanner PRC Krochmann à (145 zones de 8°) descend à 35%. Pour la mesure de ciels fortement hétérogènes, il est important de maximiser le taux de recouvrement afin de mieux représenter la distribution de luminance. En effet, si, par exemple, un pic de luminance se trouve entre deux zones de mesure, la luminance moyenne totale sera sous-estimée.

spectral

Afin d'obtenir des mesures photométriques de bonne qualité, il est nécessaire d'ajuster au mieux la sensibilité spectrale du dispositif à la courbe V(λ) de sensibilité standardisée de l'œil humain. On détermine l'épaisseur des filtres adéquats par la procédure décrite en détail dans la référence [9].

photométrique

Il s'agit de déterminer la correspondance entre le niveau de gris de l'image (8 bit = 256 niveaux) provenant de la caméra et la luminance [cd/m^2] du ciel. Selon les réglages de la caméra on peut obtenir les courbes de calibrage couvrant chacune une dynamique d'environ 10dB pour atteindre une gamme de sensibilité totale de 75dB. Afin de pouvoir mesurer la luminance du soleil sans saturer la caméra, il est nécessaire d'installer un filtre atténuateur neutre supplémentaire et d'augmenter le nombre d'images acquises par mesure.

4 Mise en service et validation

Placé horizontalement et correctement orienté dans un site dont l'horizon est bien dégagé, le scanner de ciel vidéo est prêt pour la mesure (voir figure 3).

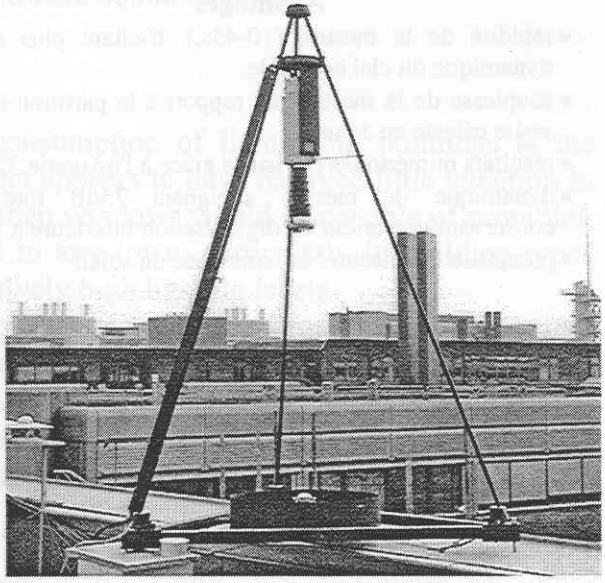


figure 3: photo-uranotomographe à imagerie numérique en position de mesure sur le toit du bâtiment LESO-PB à l'EPFL

La figure 4 illustre trois exemples de ciel mesuré:

(A) ciel couvert: la faible dynamique de luminance permet d'éviter au recourt d'un filtre atténuateur. Dans ce cas la mesure dure entre 10 et 25 s

(B) ciel intermédiaire-serein: saturation de tout un registre vertical du capteur CCD l'installation d'un filtre neutre s'impose pour mesurer correctement une telle situation

(C) ciel serein: un filtre neutre a été installé afin de mesurer toute la dynamique de luminance sans problème de saturation. Pour la région opposée en azimut au soleil, on remarque des reflets dus aux inter-réflexions parasites.

Si on compare les mesures de luminance obtenues conjointement par le scanner de ciel vidéo et celui, commercialisé de "PRC Krochmann", on relève des différences relatives de ±2.1% par ciel couvert et de ±3.2% par ciel intermédiaire. Pour le ciel serein, les inter-réflexions dans l'objectif peuvent conduire à une surestimation de la luminance le la région opposée en azimut au soleil d'un facteur deux. Les autres régions du ciel serein qui ne sont pas influencées par ce phénomène présentent une différence relative du même ordre de grandeur que les ciels couvert ou intermédiaire

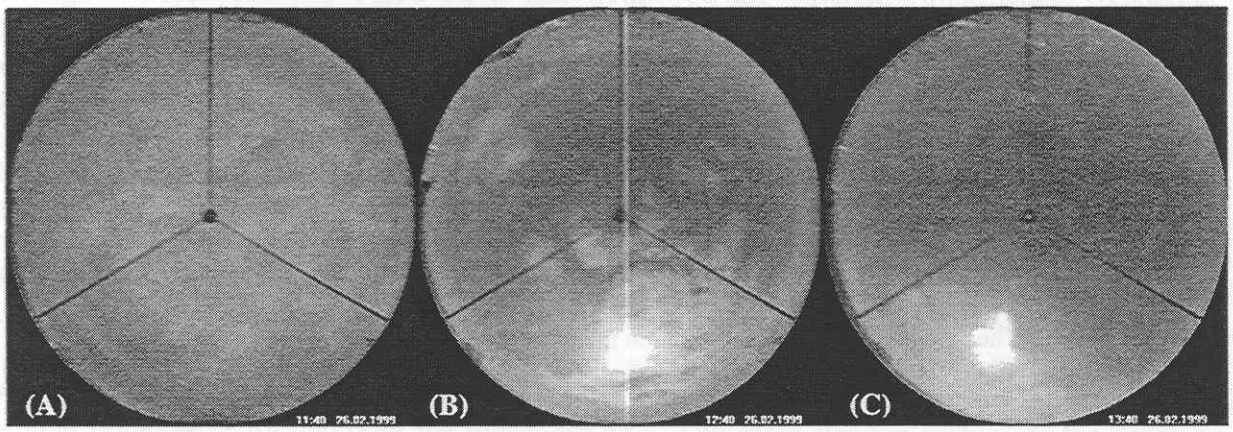


figure 4: exemple d'images acquises pour la mesure d'un ciel couvert (A) intermédiaire-serein avec phénomène de saturation (B) et serein (C) avec filtre neutre atténuateur

5 Bilan et perspectives

Pour conclure, on dresse ici une liste des avantages et désavantages du scanner de ciel vidéo:

Avantages	Désavantages
• rapidité de la mesure (10-45s.), d'autant plus si la dynamique du ciel est faible • souplesse de la mesure par rapport à la partition de la voûte céleste en zones • résultats numériques et visuels grâce à l'imagerie 32bit • dynamique de mesure atteignant 75dB tout en conservant une erreur de digitalisation inférieure à 1% • possibilité de mesurer la luminance du soleil	• encombrement relativement important • sensibilité aux intempéries: le vent bouge la structure et la pluie peut endommager la caméra et le miroir sphérique • surévaluation de la luminance lors des mesures avec rayonnement direct obstruction du champs de vision par la structure (particulièrement le zénith qui est souvent considéré comme zone de référence)

Ce scanner de ciel vidéo offre donc des performances très intéressantes et encourageantes. La figure 5 propose une esquisse de solution qui permettrait d'améliorer les points suivants:

- plus compact et mieux transportable
- réduit l'impact du masque dû à la structure à une seule région au Nord
- libère le zénith afin de pouvoir le mesurer

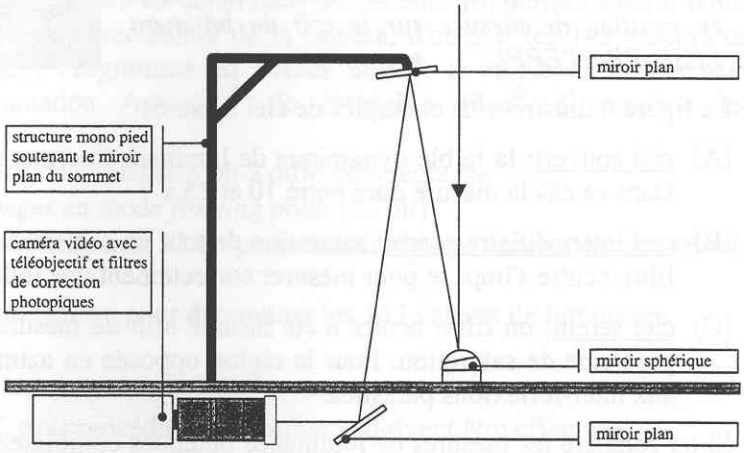


figure 5: schéma d'une proposition de solution pour améliorer le scanner de ciel vidéo avec réflexion sur miroir sphérique

Bibliographie

[1] P.R. Tregenza, "Subdivision of the sky hemisphere for luminance measurements", Lighting Research and Technology, Vol.: 19 pp. 13-14, 1987

[2] Y. Uetani, M. Navvab et K. Matsuura, "Cloud cover measurement using colour video images", *Proc. of* Lux Europa 1993: the 7th European Lighting Conference, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, pp. 614-621, 4-7 april 1993

[3] M.S. Rea et M.J. Ouellette, "Relative visual performance: A basis for application", Lighting Research and Technology, Vol.: 23 (3), pp. 135-144, 1991

[4] C. Brusque, "Development of visual noise metrics for urban scenes", *Proc. of* Lux Europa 1993: the 7th European Lighting Conference, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, pp. 102-109, 4-7 april 1993

[5] I. Lewin, R. Laird et J. Young, "Video photometry for quality control", Lighting Design + Application, Vol.: 22 (1), pp. 16-20, 1992

[6] J.-L. Scartezzini, R. Compagnon, C. Roecker et L. Michel, "Bidirectional photogoniometer for advanced glazing materials based on digital imaging technics", Lighting Research and Technology, Vol.: 29 (4), pp. 197-205, 1997

[7] G. Pleijel, "The computation of natural radiation in architecture and town planning", Stockholm, 1954

[8] L. Michel, "Méthode expérimentale d'évaluation des performances lumineuses de bâtiments", Architecture, LESO-PB / EPFL, Lausanne, 1999

[9] M. Andersen, "Dispositif de mesure de la distribution de luminance du ciel basé sur des techniques d'imagerie numérique: développement et validation expérimentale", Mémoire du travail pratique de diplôme, EPFL, Lausanne, février 1998