

Vision stéréoscopique et propriétés différentielles des surfaces

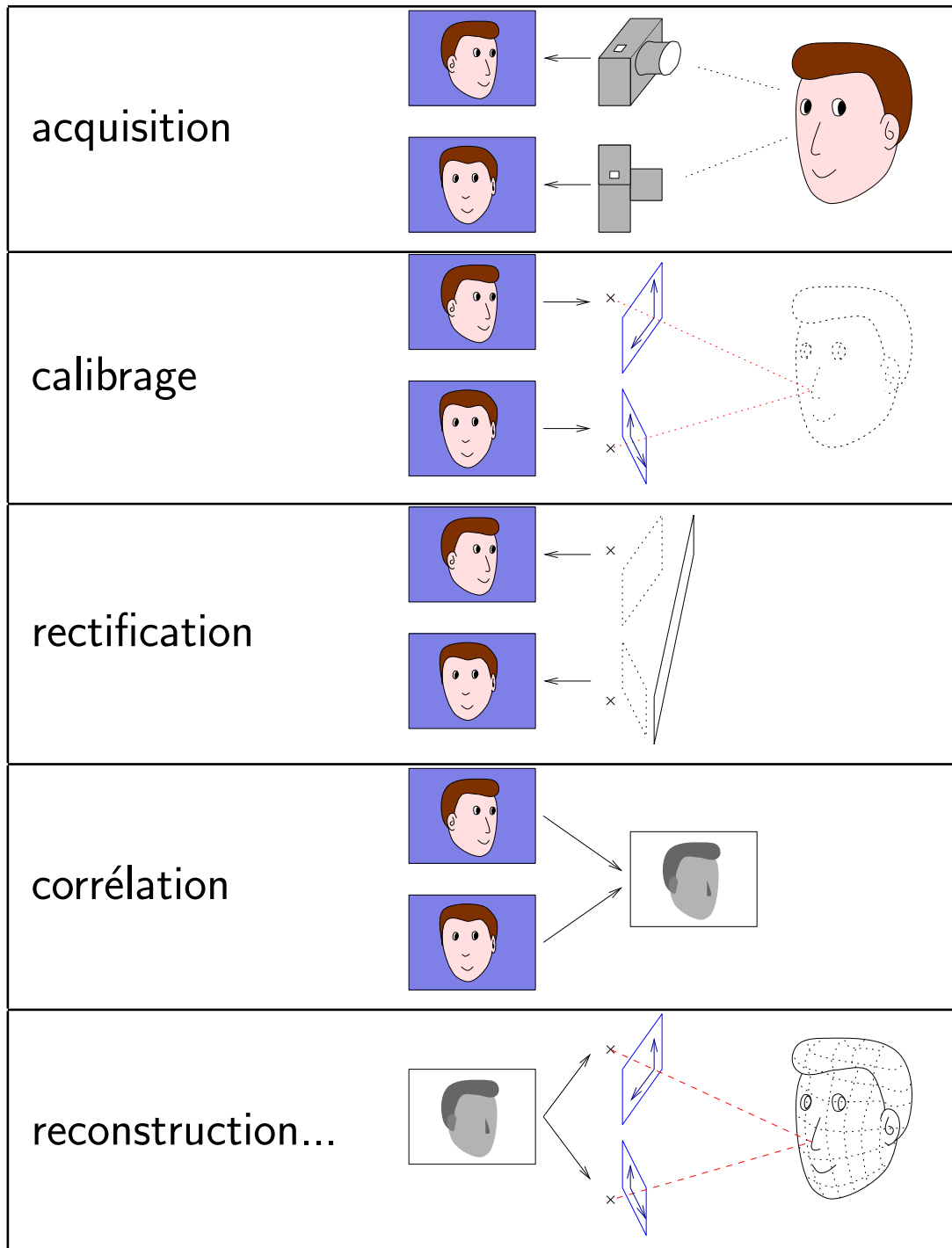
Frédéric Devernay
INRIA Sophia Antipolis
devernay@istar.fr

10 février 1997

Résumé

Plusieurs aspects de la vision stéréoscopique seront abordés, permettant de réaliser une chaîne de numérisation d'objets en 3-D : calibrage des caméras, rectification des images, stéréoscopie par corrélation, et reconstruction 3-D. Les principales avancées concernent la corrélation et la reconstruction.

Étapes de la stéréoscopie



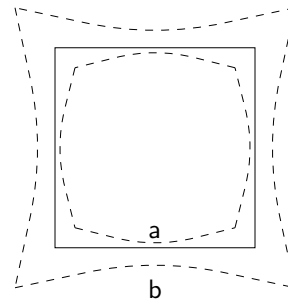
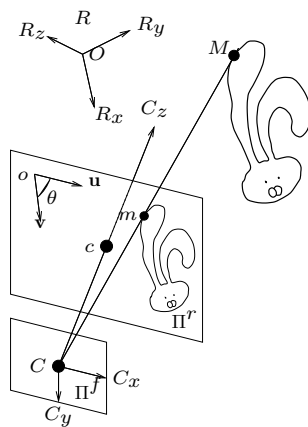
Calibrage

- Déterminer les paramètres de prise de vue.
- Les paramètres dépendent du modèle :
 - sténopé
 - sténopé + distorsion radiale :

$$x_d = x + \delta_x(x^2 + y^2)$$

$$y_d = y + \delta_y(x^2 + y^2)$$

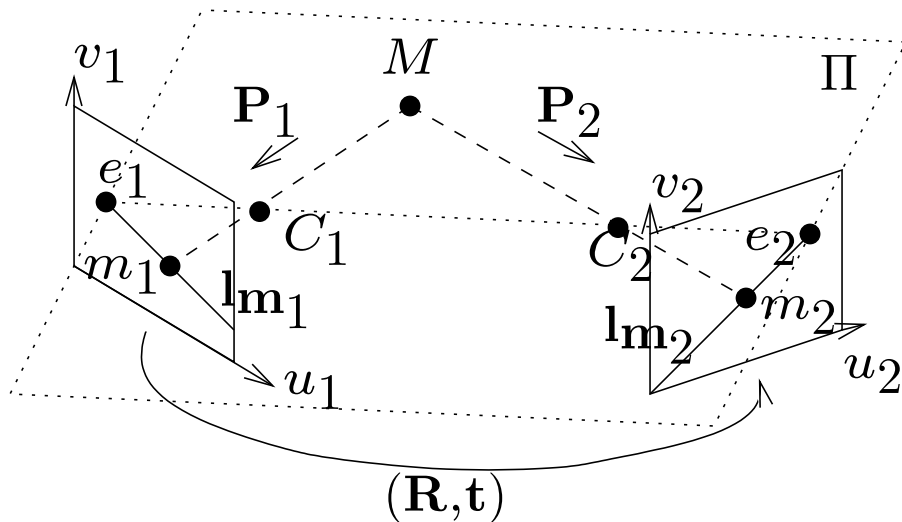
- autres (pushbroom, distorsion complexe, ...)



Calibrage fort (avec une mire): quel que soit le modèle, il existe de nombreuses méthodes (Faugeras & Toscani, Tsai, ...).

Calibrage faible

Consiste à déterminer la *géométrie épipolaire* de deux caméra à partir de deux images de la même scène. Pour le modèle sténopé, cette information est contenue dans la *matrice fondamentale* \mathbf{F} (3×3) :



$$\begin{aligned} \mathbf{m}_1 &= (x_1, y_1, 1) \\ \mathbf{m}_2 &= (x_2, y_2, 1) \end{aligned} \quad \text{et} \quad \mathbf{m}_1^T \mathbf{F}_{12} \mathbf{m}_2 = 0$$

On connaît la géométrie de la scène (c-à-d la reconstruction) à *une transformation projective près* :

$$\alpha \begin{pmatrix} x_{eucl} \\ y_{eucl} \\ z_{eucl} \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{H}_{44}^? \begin{pmatrix} x_{proj} \\ y_{proj} \\ z_{proj} \\ 1 \end{pmatrix}$$

Auto-calibrage

À partir de plusieurs images de la même scène prise avec les mêmes caméras, on peut calculer les paramètres euclidiens des caméras.

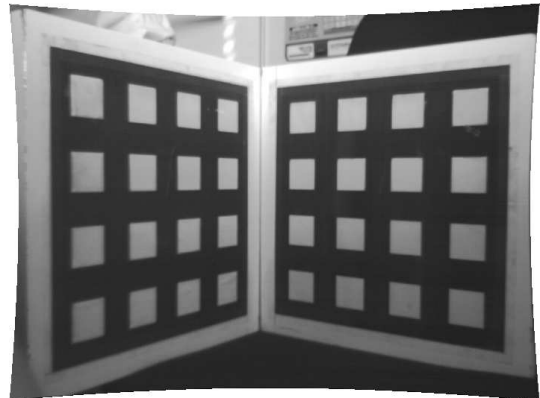
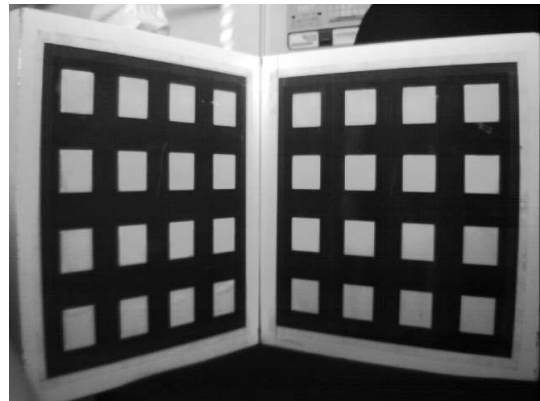
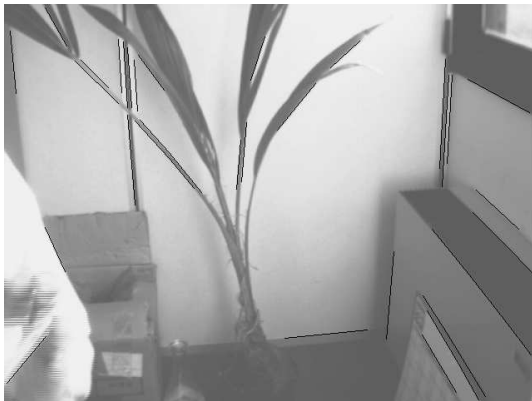
Mais :

- basées sur le modèle sténopé \Rightarrow corriger la distorsion *avant* [DF95] ;
- méthodes à une caméra souvent instables \Rightarrow utiliser les contraintes liées à un *système stéréo* [DF96] ;

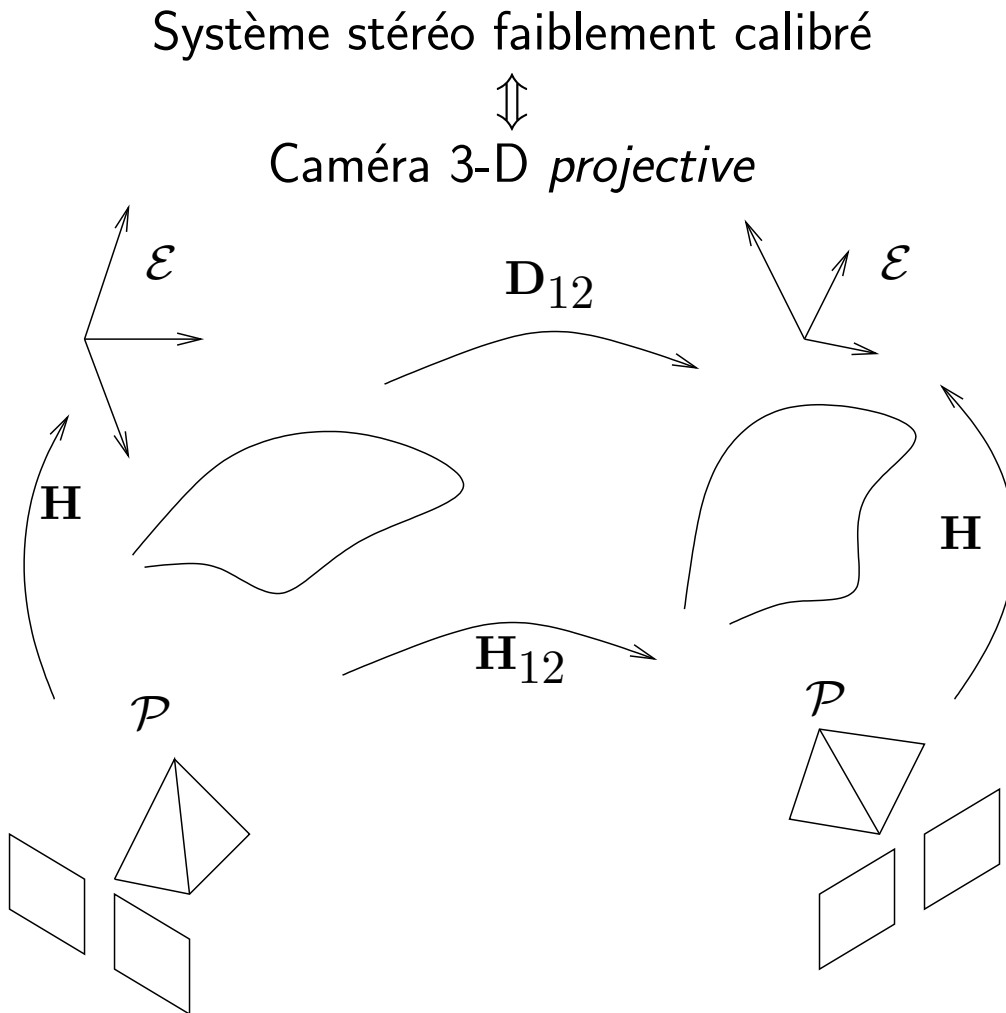
Auto-calibrage de la distorsion

« Une caméra suit un modèle sténopé ssi toute droite de l'espace se projette en une droite de l'image. » [DF95]

On optimise les paramètres d'un modèle de distorsion, indépendant du modèle de caméra, de manière à « redresser » le mieux possible les droites de l'image.



Auto-calibrage stéréoscopique



\mathbf{H} est définie *modulo* un déplacement, et :

$$\hat{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & 0 \\ b & c > 0 & 0 & 0 \\ d & e & f > 0 & 0 \\ g & h & j & 1 \end{bmatrix}$$

Auto-calibrage stéréoscopique (2)

Soient \mathcal{A} et \mathcal{B} deux reconstructions projectives de la même scène ($\mathcal{B} = \mathbf{H}_{12}\mathcal{A}$), \mathbf{H}_{12} se décompose en:

$$\begin{array}{rcl} \mathbf{H}_{12} & = & \lambda \hat{\mathbf{H}}^{-1} \mathbf{D}_{12} \hat{\mathbf{H}} \\ 16 - 3 = 13\text{DL} & & 9 + 6 = 15\text{DL} \end{array}$$

Il reste 2 DL :

1. facteur d'échelle (éliminé par $\hat{\mathbf{H}}_{33} = 1$);
2. $\# \& ! ? \Rightarrow$ il faut une contrainte supplémentaire ($\theta = 0$) ou plus de 2 paires pour retrouver $\hat{\mathbf{H}}$ et \mathbf{D}_{12} à partir de \mathbf{H}_{12} : $13n > 9 + 6n$, si $n \geq 2$.

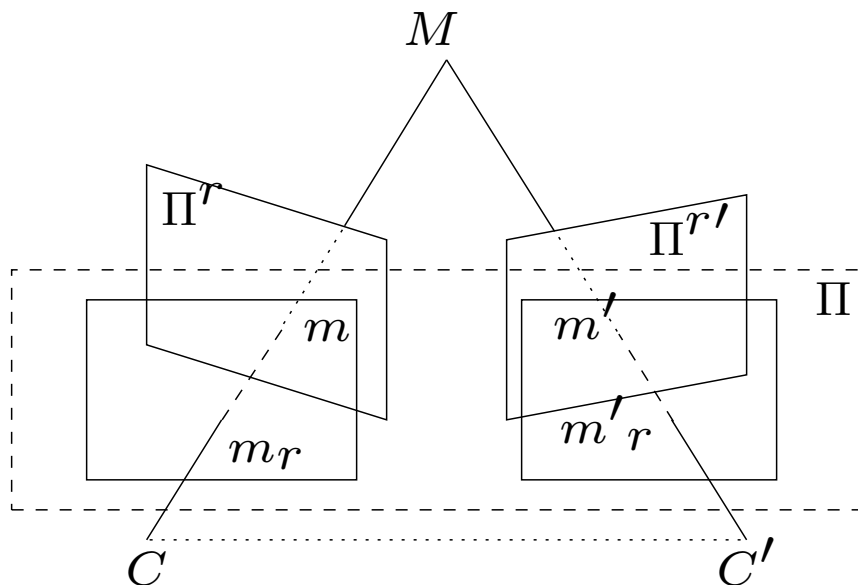
Reconstruction complète: n paires + reconstructions projectives + appariements de points entre paires \rightarrow autocalibrage + reconstruction complète.

On minimise la distance (dans l'espace image + disparité) des appariements entre paires consécutives ($\rightarrow \hat{\mathbf{H}}$ et \mathbf{D}_{ij}), puis entre toutes les paires \Rightarrow pas de pb de repliement.

Rectification

Transformation des images pour préparer à la stéréoscopie : les droites épipolaires deviennent horizontales.

En 3-D : reprojektion sur un plan parallèle à l'axe joignant les centres optiques (calibrage fort).



9 DL : orientation du plan (1) et paramètres intrinsèques des caméras rectifiées (5 + 3, puisque $\alpha_v = \alpha'_v$ et $v_0 = v'_0$).

Rectification (2)

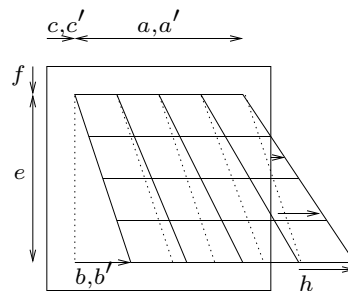
À partir de \mathbf{F} : on calcule *un* jeu de matrices de rectification *compatibles* avec \mathbf{F} , c-à-d :

$$\mathbf{F} \cong \mathbf{R}'^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{R},$$

p.ex. par SVD. Toutes les autres s'en déduisent simplement par

$$\mathbf{R} \cong \begin{bmatrix} a & b & c \\ 0 & e & f \\ 0 & h & i \end{bmatrix} \mathbf{R}_0 \quad \text{et} \quad \mathbf{R}' \cong \begin{bmatrix} a' & b' & c' \\ 0 & e & f \\ 0 & h & i \end{bmatrix} \mathbf{R}'_0,$$

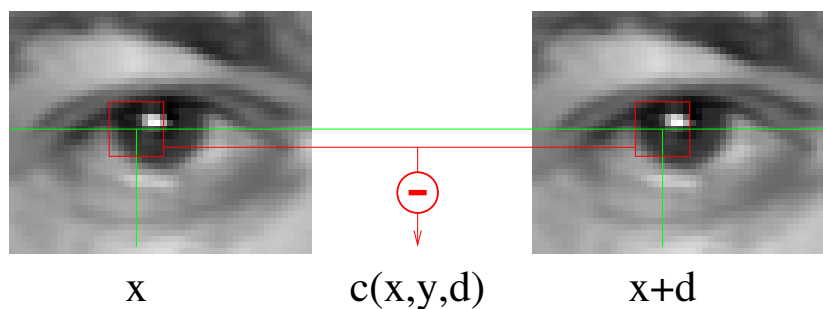
$\begin{vmatrix} e & f \\ h & i \end{vmatrix} \neq 0$. On obtient encore 9 DL :



Et aussi : rectif. /plan, rectif. locale...

Corrélation « classique »

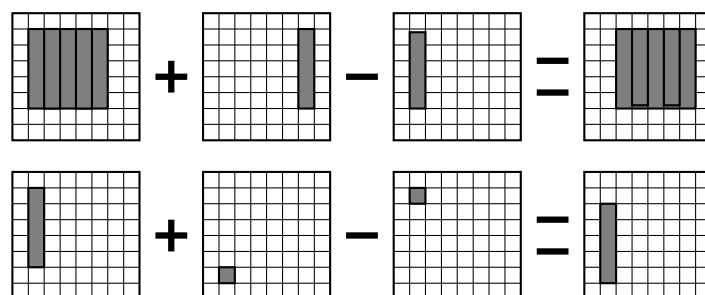
Principe : les régions des images autour de points qui se correspondent sont « semblables » \Rightarrow calculer en tout point de l'image de référence la *disparité* d qui minimise un *critère* $c(x,y,d)$:



Hypothèses : surface lambertienne et fronto-parallèle.

Validation par corrélation retour \Rightarrow moins d'erreurs.

Optimisation \Rightarrow temps d'exécution indépendant de la taille de la fenêtre :

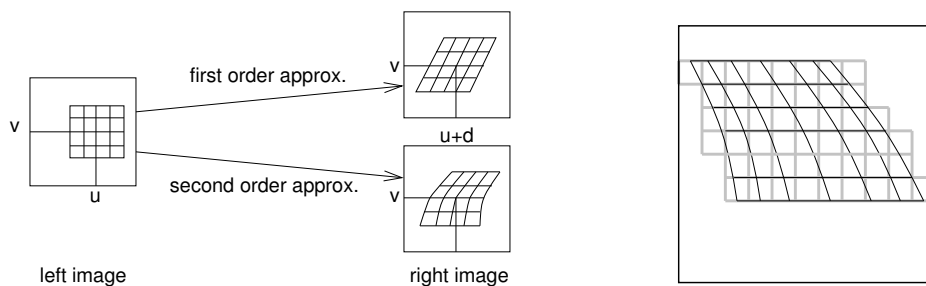


Et aussi: corrélation couleur, parallélisation.

Corrélation fine

Principe : on oublie la contrainte fronto-parallèle. Au premier ordre, au point $(u + \delta_u, v + \delta_v)$ de l'image de référence correspond :

$$\begin{aligned} & (u + d(u,v) + \delta_u + \delta_u \frac{\partial d}{\partial u} + \delta_v \frac{\partial d}{\partial v}, v + \delta_v) \\ & = (u + d(u,v) + \delta_u(1 + \alpha) + \delta_v\beta, v + \delta_v) \end{aligned}$$

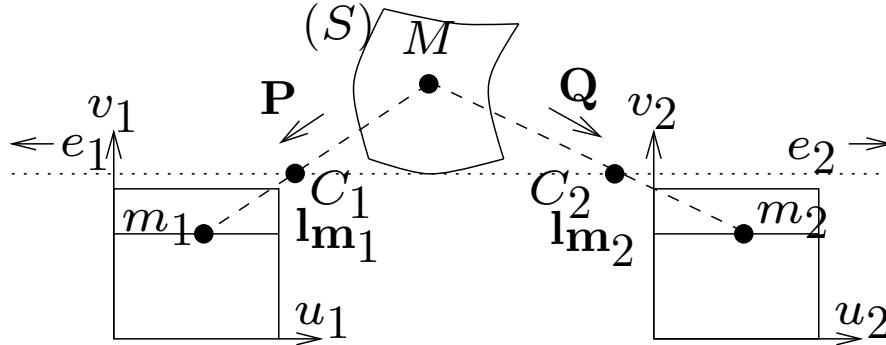


Problème : calcul des intensités en des points de coordonnées non-entières \Rightarrow interpolation linéaire.

Implantation : initialisation par la méthode classique, puis optimisation « brutale » aux moindres carrés (\Rightarrow lent) [DF94].

Les dérivées premières de d sont liées à l'orientation de la surface \Rightarrow on calcule à la fois la position (d) et l'orientation (d_x, d_y) de la surface...

Reconstruction



matrices de projection *rectifiées* :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 \\ \mathbf{p}_2 \\ \mathbf{p}_3 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{p}_2 \\ \mathbf{p}_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M} = (x, y, z, 1), \quad \mathbf{m}_1 = \mathbf{P}\mathbf{M} \cong (u_1, v_1, 1),$$

$$\mathbf{m}_2 = \mathbf{Q}\mathbf{M} \cong (u_1 + d(u_1, v_1), v_1, 1).$$

donc

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 \\ \mathbf{p}_2 \\ \mathbf{q}_1 - \mathbf{p}_1 \\ \mathbf{p}_3 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \cong \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ d(u_1, v_1) \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Reconstruction (2)

Matrice de reconstruction \mathbf{R} :

$$\mathbf{M} \cong \mathbf{R}\mathbf{m}_d, \quad \mathbf{m}_d = (u_1, v_1, d(u_1, v_1), 1)$$

Plan tangent en \mathbf{m}_d , $\mathbf{p}_d = (a, b, c, d)$:

$$(a, b, c, d)^T \cdot (x, y, z, 1) = 0$$
$$\mathbf{p}_d^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{R} \mathbf{m}_d = 0$$

ou encore, puisque $\mathbf{M} = \mathbf{R}\mathbf{m}_d$,

$$(\mathbf{R}^{-T} \mathbf{p}_d)^T \mathbf{M} = 0$$

\Rightarrow plan tangent en \mathbf{M} :

$$\mathbf{p} = \mathbf{R}^{-T} \mathbf{p}_d$$

Quadrique osculatrice en $\mathbf{m}_d \rightsquigarrow$ courbures :

$$\mathbf{m}_d^T \mathbf{Q}_d \mathbf{m}_d = 0$$

Contributions

- auto-calibrage de la distorsion ;
- auto-calibrage stéréo ;
- meilleure compréhension de la rectification ;
- implantations efficaces de la corrélation (classique, couleur, parallélisation) ;
- corrélation fine ;
- matrice de reconstruction : position, normales, courbures ;
- système stéréoscopique à une caméra ;
- extraction de contours sous-pixélique.

À suivre...

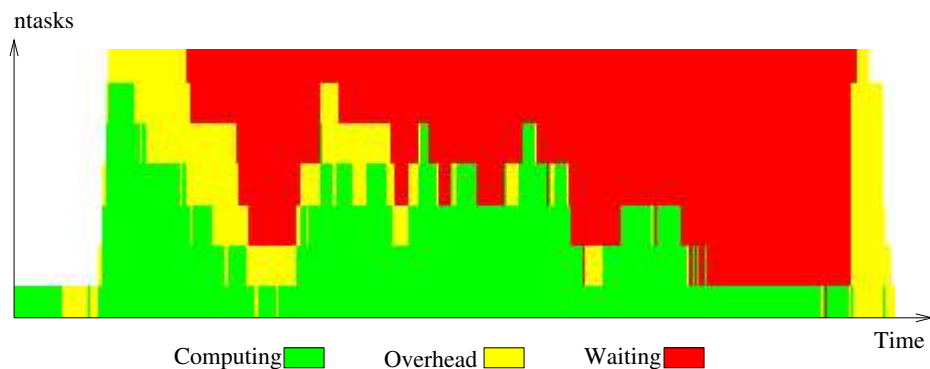
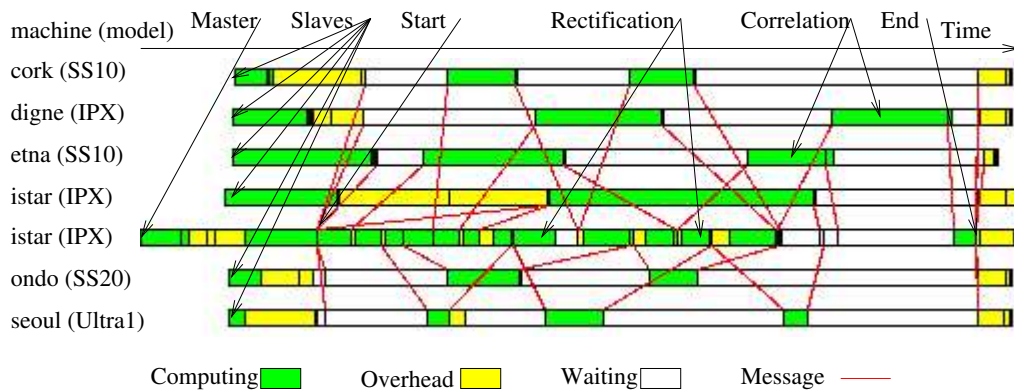
- validation des résultats de la corrélation fine par des objets de géométrie connue (synthétiques ou réels) ;
- construction d'une chaîne complète de numérisation 3-D, il manque :
 - recalage des reconstructions ;
 - fusion ;
 - décimation (simplification).

Références

- [DF94] Frédéric Devernay et Olivier Faugeras, Computing differential properties of 3-D shapes from stereoscopic images without 3-D models, in *Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Seattle, WA, juin 1994, pages 208–213, IEEE.
- [DF95] Frédéric Devernay et Olivier Faugeras, Automatic calibration and removal of distortion from scenes of structured environments, in *Investigative and Trial Image Processing*, Leonid I. Rudin et Simon K. Bramble (édité par), SPIE, San Diego, CA, juillet 1995, *Proceedings of the Proceedings of the International Society for Optical Engineering* volume 2567.
- [DF96] Frédéric Devernay et Olivier Faugeras, From projective to euclidean reconstruction, in *Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, San Francisco, CA, juin 1996, pages 264–269, IEEE.

Corrélation en parallèle sous PVM

- un maître et n esclaves
- maître \longrightarrow esclaves : bandes d'images rectifiées
- esclave \longrightarrow maître : bande de carte de disparité



Corrélation en couleurs

- critère de corrélation dans l'espace RVB ;
- résultats non concluants : il existe *très peu* de situations ambiguës en N&B qui seront résolues par la couleur ;

