

Vision par ordinateur

Mise en correspondance stéréoscopique

Frédéric Devernay
avec de nombreux transparents de Richard Szeliski

Stéréoscopie

Étant données deux images ou plus d'une
même scène, calculer une représentation de
la forme 3D de cette scène

Quelles applications possibles ?

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

2

Modélisation de visage

Une paire stéréo = un modèle 3D de visage



[Frédéric Devernay, INRIA]

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

3

Z-keying : mélange réel/synthétique

Takeo Kanade, CMU (Stereo Machine)



05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

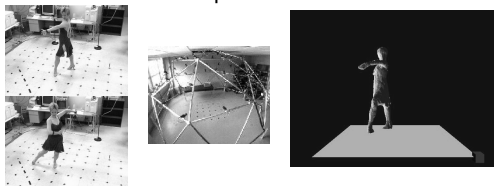
4

Virtualized Reality™

Takeo Kanade, CMU

- plus de 50 flux vidéo simultanés

reconstruction de séquences de modèles 3D



<http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/VirtualizedR/www/VirtualizedR.html>
05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

5

Virtualized Reality™

Takeo Kanade, CMU

- générer autre vidéo



05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

6

Interpolation de vues

Etant donné deux images avec des correspondances, faire du *morphing* entre elles [Chen & Williams, SIGGRAPH'93]



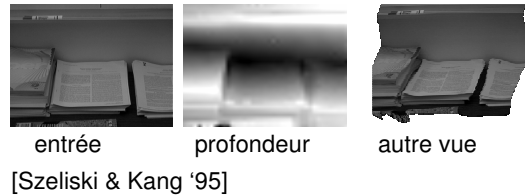
05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

7

Interpolation de vues

Carte de profondeur sous forme de splines



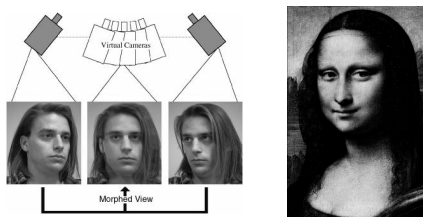
05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

8

View Morphing

Morph between pair of images using epipolar geometry [Seitz & Dyer, SIGGRAPH'96]

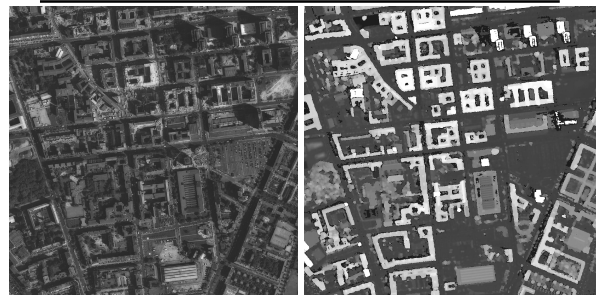


05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

9

Modèles de terrain / ville



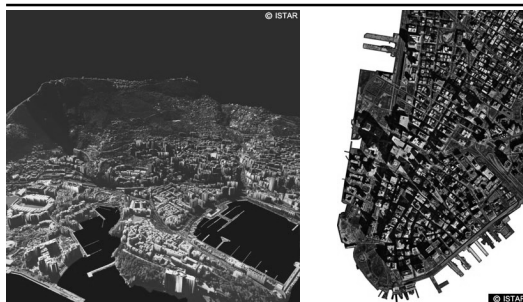
ISTAR, Sophia Antipolis

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

10

Modèles de terrain / ville



ISTAR, Sophia Antipolis

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

11

Autres applications

- Suivi temps réel de personnes (systèmes de Pt. Gray Research and SRI)
- Correction de regard pour la vidéo-conférence [Ott, Lewis, Cox InterChi'93]
- D'autres idées ?

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

12

Mise en correspondance stéréo

Étant données deux images ou plus d'une même scène, calculer une représentation de la forme de cette scène

Quelles représentations possibles ?

- cartes de profondeur
- modèles volumiques
- modèles de surfaces 3D
- superposition de calques

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

13

Mise en correspondance stéréo

Quels algorithmes possibles ?

- mettre en correspondance des "features" (points d'intérêts) et interpoler
- idem avec des contours
- mettre en corresp. des fenêtres de pixels

optimisation:

- mise à jour itérative
- programmation dynamique
- minimisation d'énergie (regularisation, stochastique)
- algorithmes de graphes

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

14

Nous allons voir...

Rectification des images

Critère de mise en correspondance

Algorithmes locaux (agrégation)

Mise à jour itérative

Algorithmes par optimisation :

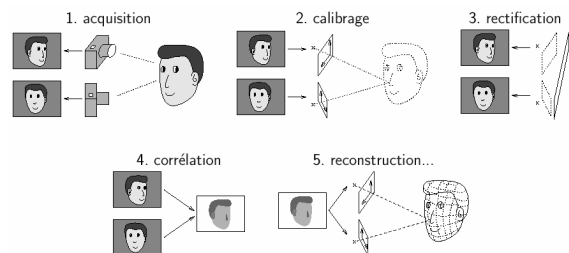
- formulation énergétique
- Champs de Markov
 - champ moyen, stochastique, et algorithmes de graphe

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

15

Étapes de la stéréoscopie

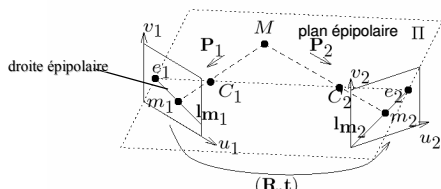


05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

16

Stéréo : géométrie épipolaire



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

L'information sur la géométrie épipolaire est contenue dans la matrice (3x3) fondamentale $\mathbf{F}$, qui permet de faire une reconstruction projective

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

17

Stéréo : géométrie épipolaire

à partir de deux images, on peut calculer $\mathbf{F}$, qui nous donne les droites épipolaires

les droites épipolaires sont la projection du faisceau de plans passant par les centres optiques

Rectification : transformation homographique des images pour que les droites épipolaires soient horizontales

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

18

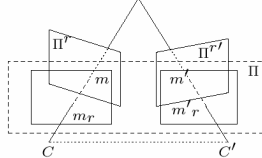
Rectification

Transformation de images pour préparer à la stéréo : les droites épipolaires deviennent horizontales, les points qui se correspondent ont le même y

En 3D : reprojection sur plan // à l'axe joignant les centres optiques

9 D.L. : orientation du plan (1) et params intrinsèques des caméras rectifiées (5+3)

Nécessite calibrage fort



05/12/01

Mise en correspondance stéréoscopique

19

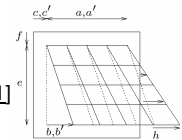
Rectification et calibrage faible

Rectifications compatibles avec F : $F \cong R'^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} R$
Calculer une paire R_0, R'_0 par SVD, puis

$$R \cong \begin{bmatrix} a & b & c \\ 0 & e & f \\ 0 & h & i \end{bmatrix} R_0 \text{ et } R' \cong \begin{bmatrix} a' & b' & c' \\ 0 & e & f \\ 0 & h & i \end{bmatrix} R'_0, \text{ avec } \begin{vmatrix} e & f \\ h & i \end{vmatrix} \neq 0.$$

Interprétation géométrique :

Optimisation par minimisation de la déformation des images [Zhang and Loop, MSR-TR-99-21]

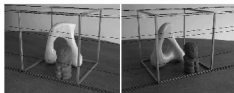


05/12/01

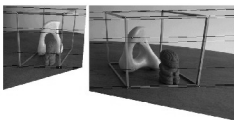
Mise en correspondance stéréoscopique

20

Rectification



(a) Original image pair overlaid with several epipolar lines.



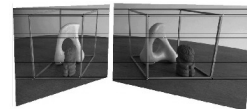
(b) Image pair transformed by the specialized projective mapping H_L and H'_L . Note that the epipolar lines are now parallel to each other in each image.

05/12/01

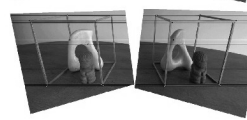
Mise en correspondance stéréoscopique

21

Rectification



(c) Image pair transformed by the similarity H_L and H'_L . Note that the image pair is now rectified (the epipolar lines are horizontally aligned).



(d) Final image rectification after shearing transform H_L and H'_L . Note that the image pair remains rectified, but the horizontal distortion is reduced.

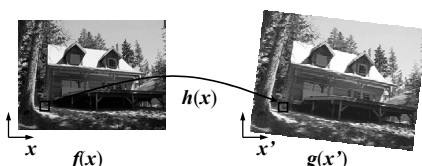
05/12/01

Mise en correspondance stéréoscopique

22

Transformation d'une image

Étant donnée une transformation $x' = h(x)$ et une image source $f(x)$, comment calculer l'image transformée $g(x') = f(h(x))$?



05/12/01

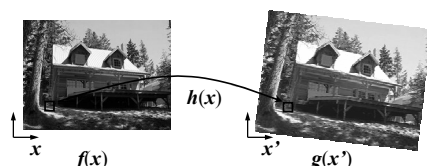
Mise en correspondance stéréoscopique

23

Transformation directe

Envoyer chaque pixel $f(x)$ vers le lieu correspondant $x' = h(x)$ de $g(x')$

- Et si le pixel "tombe" entre deux pixels ?



05/12/01

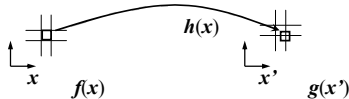
Mise en correspondance stéréoscopique

24

Transformation directe

Envoyer chaque pixel $f(x)$ vers le lieu correspondant $x' = h(x)$ de $g(x')$

- Et si le pixel "tombe" entre deux pixels ?
- Réponse: ajouter la "contribution" à plusieurs pixels, normaliser plus tard (*splatting*)



05/12/01

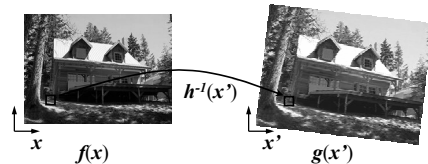
Mise en correspondance
stéréoscopique

25

Transformation inverse

Prendre chaque pixel $g(x')$ du lieu correspondant $x = h^{-1}(x')$ dans $f(x)$

- Et si le pixel "tombe" entre deux pixels ?



05/12/01

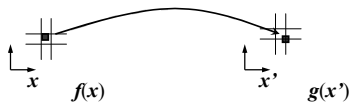
Mise en correspondance
stéréoscopique

26

Transformation inverse

Prendre chaque pixel $g(x')$ du lieu correspondant $x = h^{-1}(x')$ dans $f(x)$

- Et si le pixel "tombe" entre deux pixels ?
- Réponse : rééchantillonner les valeurs à partir de l'image originale *interpolée*



05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

27

Interpolation

Filtres d'interpolation :

- plus proche voisin
- bilinéaire
- bicubique
- sinc / FIR

Nécessaire pour éviter les phénomènes d'aliasing et de moiré



05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

28

Critère de correspondance

Valeurs d'intensité (corrélation)

Images filtrées passe-bande [Jones & Malik 92]

"Coins" [Zhang, ...]

Contours [beaucoup de gens...]

Gradients [Seitz 89; Scharstein 94]

Statistiques sur le rang [Zabih & Woodfill 94]

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

29

Critères de corrélation

SSD (sum of squared differences). d = disparité.

$$c_{x,y}(d) = - \sum_{-l \leq i \leq l; -h \leq j \leq h} (I_1(x+i, y+j) - I_2(x+d+i, y+j))^2$$

Critère normalisé

$$c_{x,y}(d) = - \frac{\sum_{i,j} ((I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1(x,y)) - (I_2(x+d+i, y+j) - \bar{I}_2(x,y)))^2}{\sqrt{\sum_{i,j} (I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1(x,y))^2} \sqrt{\sum_{i,j} (I_2(x+d+i, y+j) - \bar{I}_2(x,y))^2}}$$

Critère normalisé simplifié $I'_1(x+i, y+j) = I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1(x+i, y+j)$

$$I'_2(x+i, y+j) = I_2(x+i, y+j) - \bar{I}_2(x+i, y+j)$$

$$c_{x,y}(d) = - \frac{\sum_{i,j} (I'_1(x+i, y+j) - I'_2(x+d+i, y+j))^2}{\sqrt{\sum_{i,j} I'^2_1(x+i, y+j)^2} \sqrt{\sum_{i,j} I'^2_2(x+d+i, y+j)^2}}$$

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

30

Critères de corrélation

Cross-correlation = cosinus des vecteurs d'intensité

$$c_{x,y}(d) = \frac{\sum_{i,j} (I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1(x,y))(I_2(x+d+i, y+j) - \bar{I}_2(x,y))}{\sqrt{\sum_{i,j} (I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1(x,y))^2} \sqrt{\sum_{i,j} (I_2(x+d+i, y+j) - \bar{I}_2(x,y))^2}}$$

Critère simplifié

$$c_{x,y}(d) = \frac{\sum_{i,j} I'_1(x+i, y+j) I'_2(x+d+i, y+j)}{\sqrt{\sum_{i,j} I'^2_1(x+i, y+j) \sum_{i,j} I'^2_2(x+d+i, y+j)}}$$

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

31

Trouver les correspondances

calculer le critère de correspondance (par ex. corrélation ou Lucas-Kanade) en tous les pixels simultanément

recherche des correspondances sur les droites épipolaires (moins de candidats)



05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

32

Taille de la fenêtre de corrélation

Petit voisinage : plus de détails

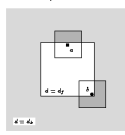
Grand voisinage : moins d'erreurs isolées



w = 3



w = 20



05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

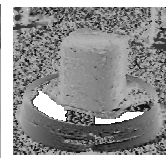
33

Stéréo : modéliser la confiance

Mesure de l'incertitude par le score de corrélation



entrée



disparité



confiance

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

34

Stéréoscopie par corrélation

Calculer les images I'_1, I'_2 , variance(I'_2)

À chaque valeur de la disparité d correspond l'homographie

$$\mathbf{H}_d = \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & d \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{R}$$

À une valeur de d correspond donc un plan 3D : balayer les valeurs de d revient à balayer l'espace par un plan 3D

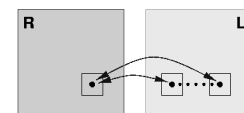
05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

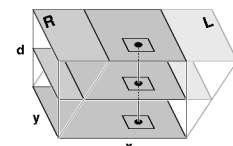
35

Stéréoscopie par corrélation

Réordonnancement des boucles (pixel/disparité)



pour chaque pixel,
pour chaque disparité
calculer le score



pour chaque pixel
calculer le score

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

36

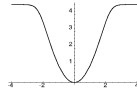
Stéréoscopie par corrélation

- Pour chaque disparité, calculer le coût en chaque pixel

$$E_0(x, y; d) = \rho(I_L(x' + d, y') - I_R(x', y'))$$

Pourquoi une fonction ρ robuste

- occlusions, autres erreurs



On peut également utiliser un autre critère (cosinus)

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

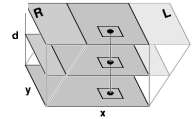
37

Stéréoscopie par corrélation

- Score = moyenne spatiale

$$E(x, y; d) = \sum_{(x', y') \in N(x, y)} E_0(x', y', d)$$

- On utilise une fenêtre carrée (facilement optimisable)



- On peut également utiliser une moyenne pondérée, de la diffusion [non-linéaire]...

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

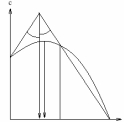
38

Stéréoscopie par corrélation

- Optimisation par fenêtre glissante : complexité indépendante de la taille de la fenêtre de corrélation
- En chaque pixel, meilleur score $\rightarrow$ disparité
- Interpolation sous-pixélique parabolique ou "toit"

$$d = d_0 + \frac{1}{2} \frac{c(d_0 + 1) - c(d_0 - 1)}{(c(d_0) - c(d_0 + 1)) + (c(d_0) - c(d_0 - 1))}$$

$$d = d_0 + \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{c(d_0 + 1) - c(d_0 - 1)}{c(d_0) - c(d_0 + 1)} & \text{si } c(d_0 + 1) > c(d_0 - 1), \\ \frac{1}{2} \frac{c(d_0 + 1) - c(d_0 - 1)}{c(d_0) - c(d_0 - 1)} & \text{si } c(d_0 + 1) < c(d_0 - 1). \end{cases}$$



- Validation par corrélation retour (échange des images)

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

39

Stéréo par corrélation classique

Avantages :

- donne une description détaillée de la surface
- algorithme rapide (fenêtre glissante)
- disparité sous-pixélique et confiance

Limitations :

- petite baseline $\Rightarrow$ estimations bruitées
- échoue dans les zones sans textures
- "bavures" au frontières des occlusions

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

40

Stéréo par corrélation fine

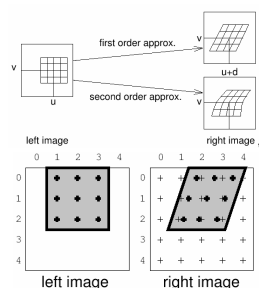
Si la surface n'est pas fronto-parallèle...

On optimise en chaque point des paramètres supplémentaires :

Dérivées de la disparité

- premières (1+2 pars.)
- secondes (1+2+3)

Descente de gradient

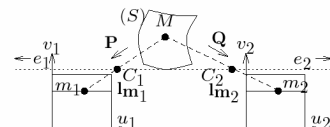


05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

41

Reconstruction



matrices de projection rectifiées : $P = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix}$ et $Q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}$

$$M = (x, y, z, 1), \quad m_1 = PM \cong (u_1, v_1, 1), \quad m_2 = QM \cong (u_2 + d(u_1, v_1), 1).$$

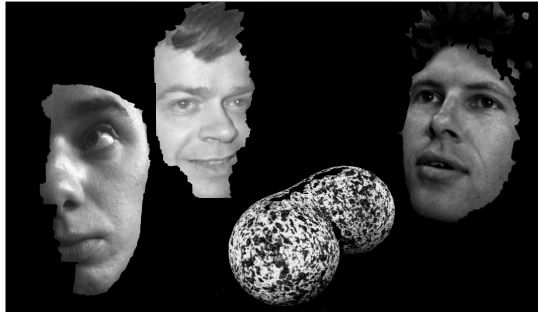
$$\text{donc } \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ q_1 - p_1 \\ p_3 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \cong \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ d(u_1, v_1) \\ 1 \end{pmatrix}.$$

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

42

Quelques résultats



05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

43

Résumé

Applications
Rectification
Critères de corrélation
Algorithmes locaux (par agrégation)
Méthodes surfaciques
 Stéréoscopie par corrélation classique
 Stéréoscopie par corrélation fine

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

44

La suite...

Algorithmes par optimisation

- formulation par minimisation d'énergie
- champs de Markov
- champ moyen ; programmation dynamique ;
- stochastique ; coupes de graphes

Stéréo multi-image
Méthodes volumiques
Méthodes par ensembles de niveau

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

45

Bibliographie

- O. Faugeras, Three-Dimensional Computer Vision: a Geometric Viewpoint, MIT Press, 1993.
- F. Devernay, Vision stéréoscopique et propriétés différentielles des surfaces, Thèse de l'École Polytechnique, 1997.
- R. Szeliski. Stereo algorithms and representations for image-based rendering. In British Machine Vision Conference (BMVC'99), volume 2, pages 314-328, Nottingham, England, September 1999.
- R. Szeliski and R. Zabih. An experimental comparison of stereo algorithms. In International Workshop on Vision Algorithms, pages 1-19, Kerkyra, Greece, September 1999.

05/12/01

Mise en correspondance
stéréoscopique

46