

ENSTA | **MINES PARIS** | **PSL** | **TELECOM PARIS** | **IP PARIS**

Techniques de numérisation 3D et recalage

François GOULETTE

Contact : francois.goulette@ensta.fr

Site Web : <https://www.caor.minesparis.psl.eu/presentation/cours-mareva-supports-pedagogiques/>

Sommaire

1/ Perception 3D, actualité et concepts

2/ Systèmes de perception 3D

3/ Recalage

2

1/ Perception 3D, actualité et concepts

Conservation du patrimoine

Statues, objets d'art



David
(Digital Michelangelo)



Vivid 700 (Minolta)

Bâtiments remarquables



Liège – Palais des Princes
GS 100 (MENSI)

3

Génie civil, mines



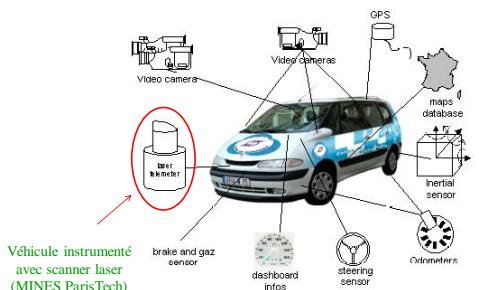
Scanner laser
(Faro Focus 3D)



Jusqu'à x100 kpts/s !
Coût scanner faible ~30 k€

4

Aides à la conduite Conduite automatique



7

Interfaces interactives



MS Kinect

30 images RGB-D par seconde !
Coût Kinect faible ~100 €

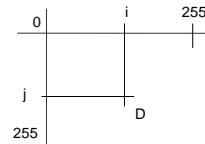


8

Concepts

- **Image de profondeur (définition) :**
 - Ensemble trame de distances à des surfaces d'une scène ou d'un objet
 - Valeurs : distance D (*Depth / Depth Image*)
 - Aussi : Intensité

Image de profondeur (D)



9

Nuage de points

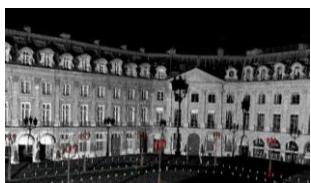
- **Définition :**
 - Ensemble non structuré de points 3D sur des surfaces d'une scène ou d'un objet
 - Valeurs : coordonnées spatiales (X Y Z)
 - Parfois mesures associées : intensité, couleur, etc.

Nuage de points



11

Nuage de points colorisés



Points 3D avec intensité
(niveaux de gris, fausses couleurs)



Points 3D colorisés

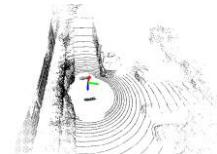
12

De l'image de profondeur au nuage de points

- **Nuage de points « simple »**
 - Expression des coordonnées spatiales (X Y Z) des points d'une image de profondeur



Velodyne 64 et nuage de points



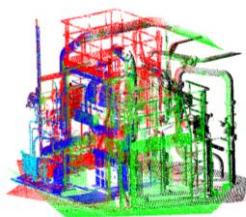
13

Nuage de points composé

- Plusieurs nuages de points simples
 - Acquis depuis différents lieux d'observation (stations)
- Mise en référentiel commun : **Recalage / consolidation**



Nuages de points recalés
(couleurs : stations d'origine)

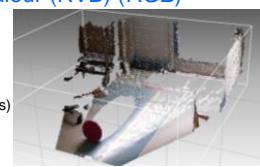


15

Image *RGB-D*

- **Définition**
 - Ensemble trame de distances et de couleurs d'une scène ou d'un objet
 - Combinaison d'une image de profondeur (P) (*Depth D*), et de couleur (RGB) (*RGB*)

Image de profondeur colorisée
-mesurée par Kinect -
(représentée comme nuage de points)



16

Sommaire

1/ Perception 3D, actualité et concepts

2/ Systèmes de perception 3D

3/ Recalage

17

Sommaire

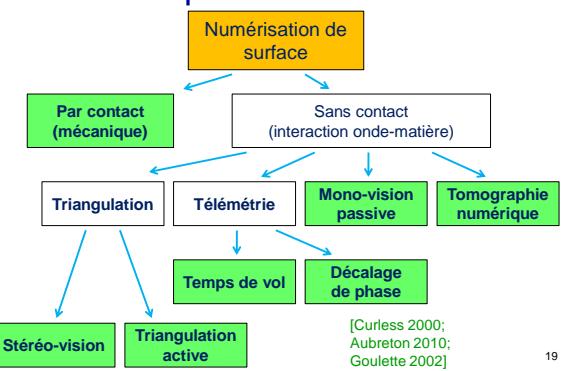
1/ Principes de la numérisation de surface

2/ Systèmes combinés

3/ Etalonnage de systèmes

18

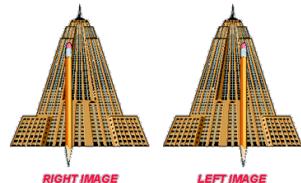
Principes et taxonomie



19

Stéréovision (triangulation passive)

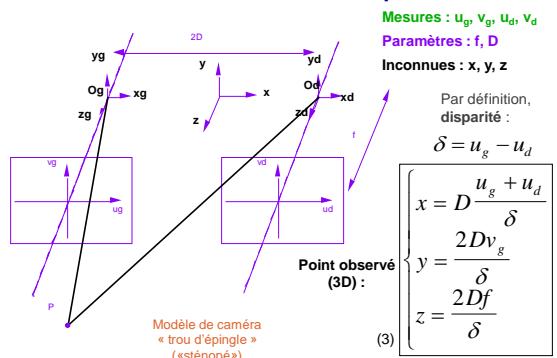
- Vision d'une même scène de deux endroits légèrement décalés l'un par rapport à l'autre
- Principe de la perception du relief chez l'homme



RIGHT IMAGE

LEFT IMAGE

Stéréo-vision dans l'espace 3D



Intérêts et limitations de la stéréovision

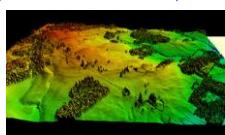
- **Avantages :**
 - Coordonnées 3D obtenues sans éclairage spécifique (technique de vision passive)
- **Inconvénients / limitations :**
 - Difficulté de l'appariement des points
 - Méthodes d'appariement automatisé
 - Points caractéristiques : SIFT, SURF
 - Appariement dense

Photogrammétrie

- Métrie 3D basée sur la stéréo-vision
 - Historiquement : appariement manuel des points dans les images
 - éléments caractéristiques des images : ruptures de contraste, arêtes saillantes, etc.

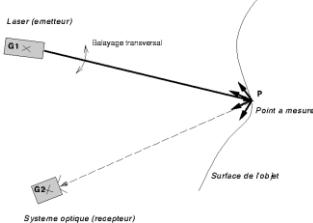


Appareil de restitution photogrammétrique analytique Leica SD 2000, années 1990.



Modèle numérique de surface (MNS)

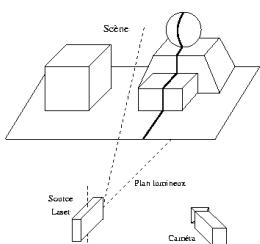
Triangulation laser (active)



- Un rayon laser est envoyé vers l'objet à mesurer
- La lumière diffusée est observée par une caméra
→ on détermine la profondeur du point

Triangulation laser ligne, profilométrie

- Une image saisie donne une ligne de points
- Un unique balayage suffit pour assurer la couverture de la surface
→ rapidité



Exemples



Vivid 700 (Minolta)



Whole Body Scanner (Cyberware)

Projection de motifs aléatoires - modèle de la Kinect -



Kinect – sans capot

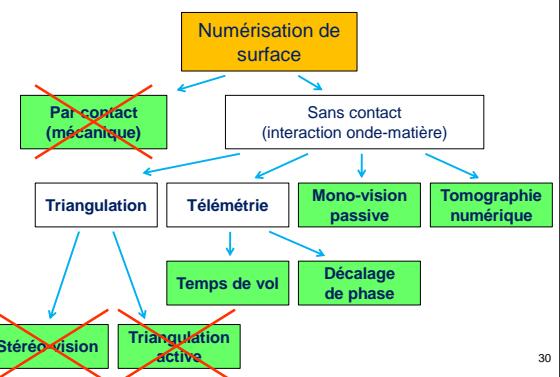


Motif projeté

Pour chaque pixel (i,j) de l'image (capteur IR), on calcule la disparité δ_{ij} du point de la scène observé par rapport à l'image d'origine.

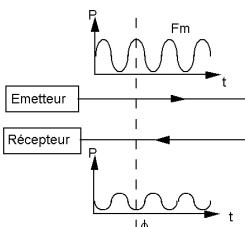
29

Télémétrie



30

Modulation en amplitude (décalage de phase)



[Grussenmeyer 2011]

$$\tau = \frac{1}{F_m} \left(N + \frac{\phi}{2\pi} \right)$$

$$d = \frac{v}{2} \tau$$

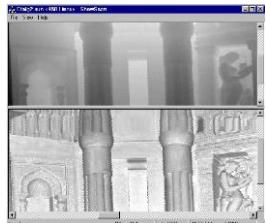
$$= \frac{v}{2F_m} \left(N + \frac{\phi}{2\pi} \right)$$

- Distance d'ambiguïté
→ plusieurs fréquences
- Précision meilleure
que par impulsion

Quelques capteurs à différence de phase

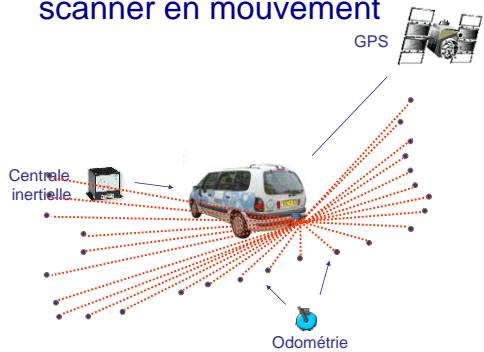


Image obtenue par LARA (Zoller+Fröhlich) :



LASAR (Perceptron)

Relevés laser mobiles scanner en mouvement



Construction du nuage de points Scène urbaine



Le nuage de points est géo-référencé en Lambert 2

45

Exemples de nuages de points

- Différentes sortes
 - Statiques, mobiles
 - Réels, synthétiques
- Visualiseurs :
 - RealWorks (commercial, version gratuite de visualisation simple)
 - CloudCompare (OpenSource)
 - MeshLab (OpenSource)

48

Sommaire

1/ Perception 3D, actualité et concepts

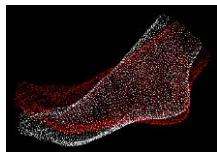
2/ Systèmes de perception 3D

3/ Recalage

49

L'algorithme « Iterative Closest Point »

Deux nuages de points en recouvrement partiel ; légèrement décalés et tournés l'un par rapport à l'autre



ICP : Détermination de la transformation rigide (R, T) entre les deux nuages de points

[Besl and McKay 1992]

50

Association des points

- Association d'un point d'un nuage, au point le plus proche dans l'autre nuage
 - Seuil de distance maximale autorisée
- Résultat (à chaque itération) :
 - Liste de n points associés entre les deux nuages

On note P et P' les deux sous-ensembles de points appariés :

$$P = \{p_i, 1 \leq i \leq n\} \quad P' = \{p'_i, 1 \leq i \leq n\}$$

51

Calcul de la transformation (R, T)

On recherche la transformation (R, t) qui minimise :

$$f(R, t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\vec{p}_i - (R\vec{p}'_i + t)]^2$$

Important : le nombre de points peut varier à chaque itération.

La fonction des moindres carrés est **normalisée**.

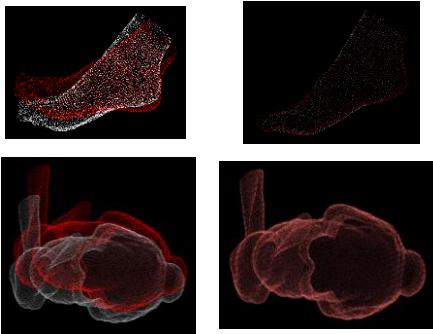
52

ICP – pseudo-code

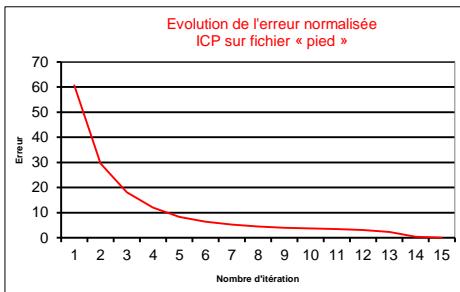
- Recalage approxitatif (NP, NP')
- Repéter :
 - Association de données $\rightarrow (P, P')$
 - Calcul de la transformation (R, T)
 - Application de la transformation au nuage NP'
 - Calcul de la distance entre nuages
- Tant que :
 - (distance normalisée entre nuages > seuil)
 - et (nombre d'itérations < nb_max)

53

Résultats



54



Convergence vers 0 (nuage 1 = nuage 2)

55

Temps de calcul

- Appariement en $O(n_1 n_2)$.
 - Le reste en $O(n_1 + n_2)$.
- Acceptable pour petits nuages de points
 < 1000 points : qqs secondes
- Trop lent pour de gros nuages de points
 $> 1\text{h}$ pour image Kinect 640x480

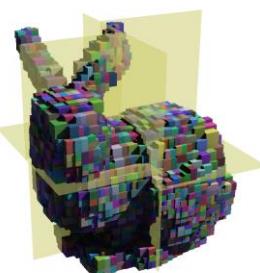
Accélération des calculs

- Sous-échantillonnage :**
 - Sous-ensemble de points (N "points de contrôle"), pour l'un des nuages ou les deux.
 - $O(N n_2)$ avec $N \ll n_1$
- Recherche approchée : ANN**
 - Méthode approchée de recherche du plus proche voisin : Approximate Nearest Neighbor (ANN) avec kd-tree.
 - $O(n_1 \log n_2)$



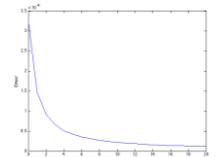
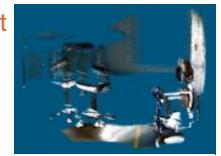
Approximate Nearest Neighbor (ANN)

- Principe**
 - Pré-calcul d'un kd-tree pour partitionner l'espace
 - Recherche dichotomique avec distance seuil
- Librairie C++ ANN**
<http://www.cs.umd.edu/~mount/ANN/>



Résultats d'accélérations sur images Kinect

- 68000 points image Kinect
 - ANN seul : ~ 100 s par itération
 - ANN + échantillonnage (2000 points) : < 1 s
- Stratégie possible :**
 - Terminer sans échantillonnage pour recalage fin.



Variantes d'ICP

- De nombreuses variantes :
 - Robustesse ; rapidité ; précision
- Variantes principales [Rusinkiewicz & Levoy 01]
 - Métrique point à plan (point-to-plane)
 - [Chen & Medioni 91]
 - Echantillonnage régulier
 - Aléatoire ; basé sur les normales...
 - Rejet des points sur arêtes
 - Critères d'appariement, pondération...
 - Prise en compte de la couleur



60

Solution du calcul de la transformation (R,T)

Modélisation de données bruitées.
 Résolution par la Méthode des Moindres Carrés.

On définit :

$$f : \begin{cases} SE^3 \rightarrow \Re^+ \\ (R, t) \mapsto f(R, t) \end{cases}$$

$$f(R, t) = \sum_{i=1}^n \|p_i - (R(p'_i) + t)\|^2$$

61

Calcul de la transformation (R,T)

On cherche :

$$(R, t) = \arg \min_{R,t} f(R, t)$$

Deux solutions analytiques connues suivant la représentation des rotations :

- **Matrices** : décomposition en valeurs singulières SVD
- **Quaternions**

62

Résolution par matrices et SVD

Représentation de la rotation : matrice R

$$R \in SE^3 \rightarrow \begin{cases} R \in M_3(\mathfrak{R}) \\ R^T R = I \end{cases}$$

$$f(R, t) = \sum_{i=1}^n \|p_i - (R \times p'_i + t)\|^2$$

63

Minimum de f

Au minimum de f, s'il existe, on a :

$$\nabla f = 0 \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial f}{\partial R} = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial t} = 0 \end{cases}$$

64

Notations barycentriques

Pour la suite, on note p_m et p'_m les barycentres des jeux de points P et P' :

$$p_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad p'_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p'_i$$

Et Q et Q' les jeux de points translatés autour de leurs barycentres respectifs :

$$\forall i \in \{1, n\}, \begin{cases} q_i = p_i - p_m \\ q'_i = p'_i - p'_m \end{cases}$$

65

Détermination de la translation

On détermine la dérivée de f par rapport à t :

$$\frac{\partial f}{\partial t}(R, t) = -2 \sum_{i=1}^n [p_i - (R \times p'_i + t)]$$

Elle s'annule pour :

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n [p_i - (R \times p'_i + t)] &= 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n p_i = R \times \sum_{i=1}^n p'_i + n \times t \\ &\Rightarrow t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i - R \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p'_i \end{aligned}$$

$$\boxed{\Rightarrow t = p_m - Rp'_m}$$

66

Détermination de la rotation (3)

La fonction à minimiser devient :

$$\begin{aligned} f(R, t_{\min}) &= \sum_{i=1}^n (q_i^T q_i - 2q_i^T R q'_i + q_i^T R q_i) \\ &= \sum_{i=1}^n q_i^T q_i + \sum_{i=1}^n q_i^T q'_i - 2 \sum_{i=1}^n q_i^T R q'_i \end{aligned}$$

Les deux premiers termes ne dépendent pas de R, la rotation R qui minimise f est donc également celle qui maximise :

$$g(R) = \sum_{i=1}^n q_i^T R q'_i$$

69

Détermination de la rotation (4)

La Trace d'un scalaire étant égale à ce scalaire, la fonction g peut s'exprimer sous la forme suivante :



$$g(R) = \sum_{i=1}^n \text{Tr}(q_i^T R q_i)$$

Ceci nous permet d'utiliser une propriété de la Trace :

$$\forall (A, B) \in M_{m,n} \times M_{n,m}, \text{Tr}(A \times B) = \text{Tr}(B \times A)$$

Ce qui donne :

$$g(R) = \sum_{i=1}^n \text{Tr}(R q_i q_i^T)$$

70

Détermination de la rotation (5)

On note H la matrice carrée :

$$H = \sum_{i=1}^n q_i q_i^T$$

La fonction g à maximiser s'écrit alors :

$$g(R) = \text{Tr}(RH)$$

71

Détermination de la rotation (6)

On peut décomposer H en valeurs singulières (théorème spectral) (*Singular Value Decomposition, SVD*) :



$$\exists (U, V, \Sigma) \in M_3(\mathbb{R})^3 / H = U \Sigma V^T$$

Avec :

U, V matrices orthonormales

Σ matrice diagonale positive

Il faut maximiser g qui s'écrit alors :

$$\begin{aligned} g(R) &= \text{Tr}(RU\Sigma V^T) \\ &= \text{Tr}((V^T RU)\Sigma) \end{aligned}$$

72

Détermination de la rotation (7)

Or :

$$W = V^T RU$$

Est une matrice de rotation ($W^T W = I$).

Propriété de la Trace :

Σ étant une matrice diagonale positive, il existe une matrice de rotation W qui maximise $\text{Tr}(W\Sigma)$.

C'est l'identité : $W = I$

$$W = I \Leftrightarrow V^T RU = I$$

Il existe un maximum à g (et donc un minimum à f). Il est obtenu pour :

$$R = VU^T$$

Puis :

$$t = p_m - Rp_m$$

73

Algorithme de résolution par matrices - pseudo-code -

Entrée : Jeux de n points (P, P')

Sortie : matrice de rotation R, vecteur t

- Déterminer les barycentres p_m et p'_m
- Calculer la matrice H $H = \sum_{i=1}^n q_i q_i^T$
- Décomposer H en valeurs singulières $H = U \Sigma V^T$
- Calculer R puis $R = VU^T$ $t = p_m - Rp_m$

$$R = VU^T \quad t = p_m - Rp_m$$

74

Reconstruction, résultats

• Video

- KinectFusion:
Real-Time Dynamic 3D Surface Reconstruction and Interaction,
- SIGGRAPH 2011

75

Références

- T. Landes and P. Grussenmeyer, « Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre », Revue XYZ, 2011
- Numerical Recipes in C
- Besl and McKay, 1992, ICP

76

Références

- Curless 2000
- Aubretton 2010
- Goulette 2002
- Khalil 96
- Hartley and A. Zisserman 2000
- http://wiki.ros.org/kinect_calibration/technical
- Grussenmeyer 2011
- Glennie and Lichti 2010
- Abuhadrous 2005
- Pless and Zhang 2004. Extrinsic Calibration of a Camera and Laser Range Finder (improves camera calibration). IROS 2004.
- Bouguet 2003
- Zhang 99
- Deschaud 2010

77