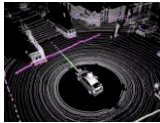




Techniques de numérisation 3D et recalage

François Goulette



Centre de Robotique
ÉCOLE DES MINES DE PARIS

Sommaire

1/ Perception 3D, actualité et concepts

2/ Systèmes de perception 3D

3/ Recalage

2

Centre de Robotique
ÉCOLE DES MINES DE PARIS

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 (MENS)

3

Centre de Robotique
ÉCOLE DES MINES DE PARIS

Génie civil, mines



Scanner laser
(Faro Focus 3D)

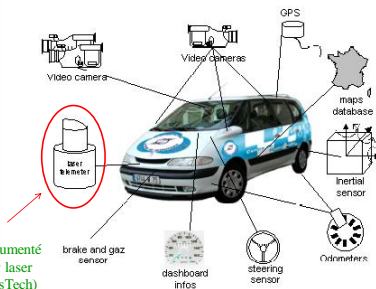


Jusqu'à x100 kpts/s !
Coût scanner faible ~30 k€

4

Centre de Robotique
ÉCOLE DES MINES DE PARIS

Aides à la conduite Conduite automatique



Véhicule instrumenté
avec scanner laser
(MINES ParisTech)

7

Centre de Robotique
ÉCOLE DES MINES DE PARIS

Interfaces interactives



MS Kinect

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



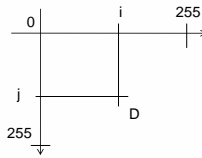
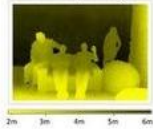
8

Centre de Robotique
ÉCOLE DES MINES DE PARIS

Concepts

- **Image de profondeur (définition) :**
 - Ensemble tramé 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)

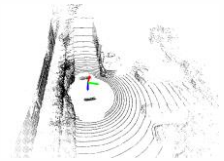


Points 3D colorisés

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

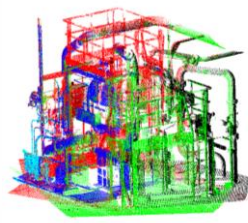
13

Nuage de points composé

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



Consolidation



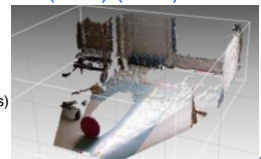
Nuages de points recalés
(couleurs : stations d'origine)

15

Image *RGB-D*

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

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



16

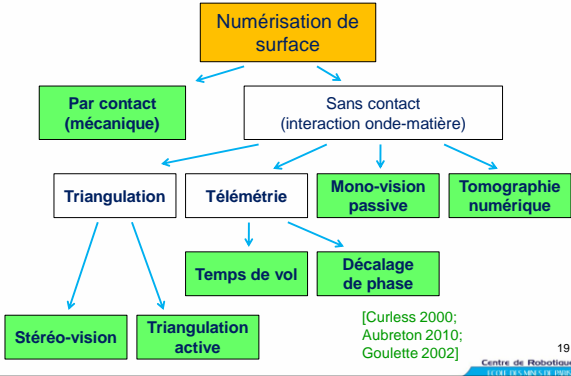
Sommaire

- 1/ Perception 3D, actualité et concepts
- 2/ Systèmes de perception 3D
- 3/ Recalage

Sommaire

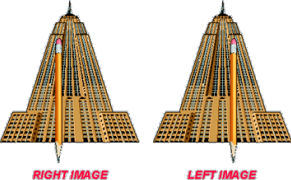
- 1/ Principes de la numérisation de surface
- 2/ Systèmes combinés
- 3/ Etalonnage de systèmes

Principes et taxonomie

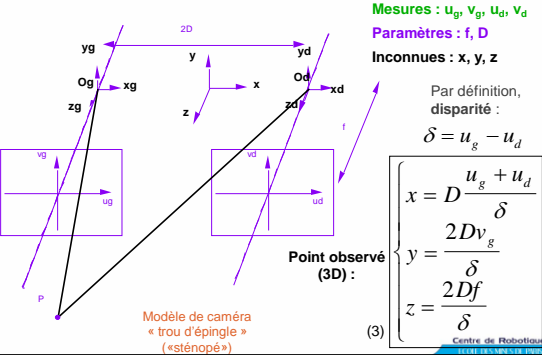


Stéréovision (triangulation passive)

- 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



Stéréo-vision dans l'espace 3D



Intérêts et limitations de la stéréovision

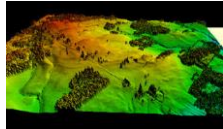
- Avantages :
 - Coordonnées 3D obtenues sans éclairage spécifique (technique de vision passive)
- Inconvénients / limitations :
 - Difficulté de l'appariement des points
 - Méthodes d'appariement automatisé
 - Points caractéristiques : SIFT, SURF
 - Appariement dense

Photogrammétrie

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



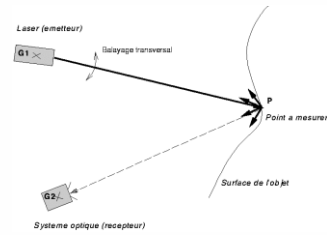
Appareil de restitution photogrammétrique analytique Leica SD 2000, années 1990.



Modèle numérique de surface (MNS)

Centre de Robotique
LEONARDO DA VINCI

Triangulation laser (active)

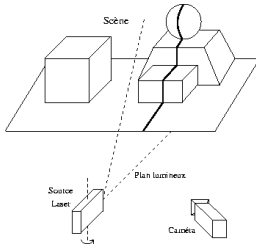


- Un rayon laser est envoyé vers l'objet à mesurer
- La lumière diffusée est observée par une caméra
→ on détermine la profondeur du point

Centre de Robotique
LEONARDO DA VINCI

Triangulation laser ligne, profilométrie

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



Centre de Robotique
LEONARDO DA VINCI

Exemples



Vivid 700 (Minolta)



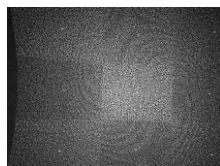
Whole Body Scanner (Cyberware)

Centre de Robotique
LEONARDO DA VINCI

Projection de motifs aléatoires - modèle de la Kinect -



Kinect - sans capot



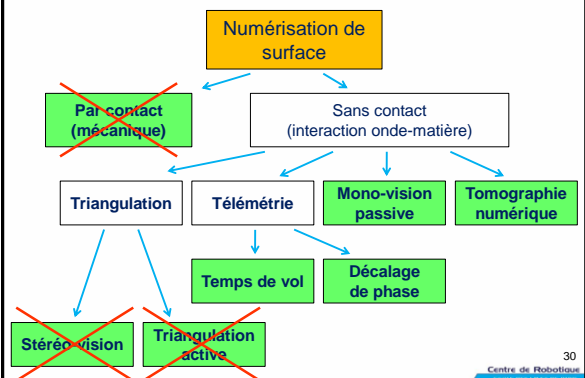
Motif projeté

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

Centre de Robotique
LEONARDO DA VINCI

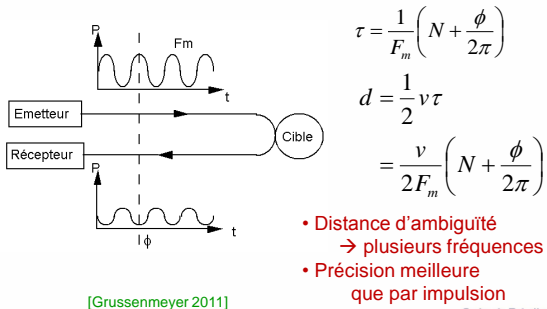
Télémétrie



30

Centre de Robotique
LEONARDO DA VINCI

Modulation en amplitude (décalage de phase)



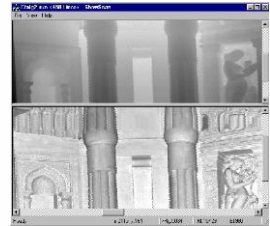
Centre de Robotique
SCHEEREN-ROBOTICS

Quelques capteurs à différence de phase



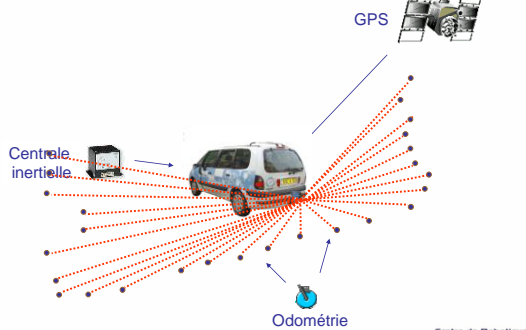
LASAR (Perceptron)

Image obtenue par
LARA (Zoller+Fröhlich) :



Centre de Robotique
SCHEEREN-ROBOTICS

Relevés laser mobiles scanner en mouvement



Construction du nuage de points Scène urbaine



Le nuage de points est géo-référencé en Lambert 2

45

Centre de Robotique
SCHEEREN-ROBOTICS

Exemples de nuages de points

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

48

Centre de Robotique
SCHEEREN-ROBOTICS

Sommaire

1/ Perception 3D, actualité et concepts

2/ Systèmes de perception 3D

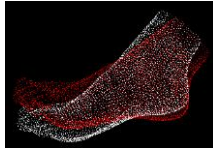
3/ Recalage

49

Centre de Robotique
SCHEEREN-ROBOTICS

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

Centre de Robotique
LEOIL-ES-AM-ET-PRO

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

Centre de Robotique
LEOIL-ES-AM-ET-PRO

Calcul de la transformation (R,T)

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

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

Important : le nombre de points peut varier à chaque itération.
La fonction des moindres carrés est **normalisée**.

52

Centre de Robotique
LEOIL-ES-AM-ET-PRO

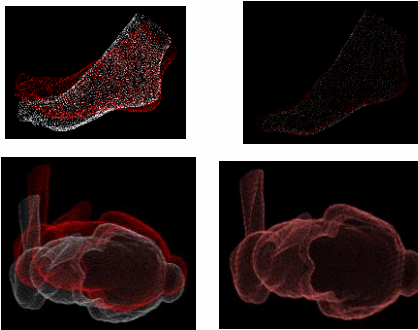
ICP – pseudo-code

- Recalage approximatif (NP, NP')
- Répéter :
 - 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

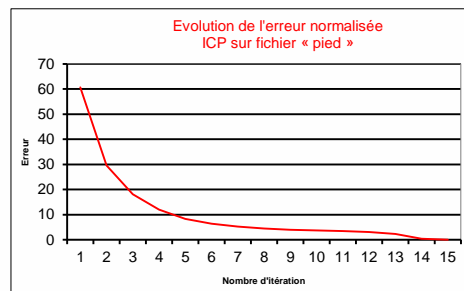
Centre de Robotique
LEOIL-ES-AM-ET-PRO

Résultats



54

Centre de Robotique
LEOIL-ES-AM-ET-PRO



Convergence vers 0 (nuage 1 = nuage 2)

55

Centre de Robotique
LEOIL-ES-AM-ET-PRO

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
 - > 1h pour image Kinect 640x480

Centre de Robotique
ÉCOLE DES MINES DE PARIS

Accélération des calculs

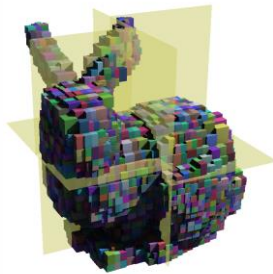
- Sous-échantillonnage :
 - Sous-ensemble de points (N "points de contrôle"), pour l'un des nuages ou les deux.
 - $O(N n_2)$ avec $N \ll n_1$
- Recherche approchée : ANN
 - Méthode approchée de recherche du plus proche voisin : Approximate Nearest Neighbor (ANN) avec kd-tree.
 - $O(n_1 \log n_2)$



Centre de Robotique
ÉCOLE DES MINES DE PARIS

Approximate Nearest Neighbor (ANN)

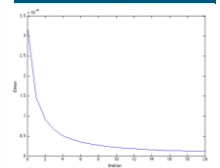
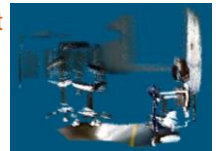
- Principe
 - Pré-calcul d'un kd-tree pour partitionner l'espace
 - Recherche dichotomique avec distance seuil
- Librairie C++ ANN
 - <http://www.cs.umd.edu/~mount/ANN/>



Centre de Robotique
ÉCOLE DES MINES DE PARIS

Résultats d'accélération sur images Kinect

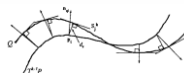
- 68000 points image Kinect
 - ANN seul : ~ 100s par itération
 - ANN + échantillonnage (2000 points) : < 1s
- Stratégie possible :
 - Terminer sans échantillonnage pour recalage fin.



Centre de Robotique
ÉCOLE DES MINES DE PARIS

Variantes d'ICP

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



60

Centre de Robotique
ÉCOLE DES MINES DE PARIS

Solution du calcul de la transformation (R,T)

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

On définit :

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

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

61

Centre de Robotique
ÉCOLE DES MINES DE PARIS

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

Centre de Robotique
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE MESE

Résolution par matrices et SVD

Représentation de la rotation : matrice R

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

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

63

Centre de Robotique
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE MESE

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

Centre de Robotique
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE MESE

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

Centre de Robotique
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE MESE

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 :

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

$$\Rightarrow t = p_m - R p'_m$$

66

Centre de Robotique
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE MESE

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

Centre de Robotique
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE MESE

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 :

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

72

Centre de Robotique
ÉCOLE DES MINES DE PARIS

Détermination de la rotation (7)

Or :

$$W = V^T R U$$

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 : $W = I$

$$W = I \Leftrightarrow V^T R U = I$$

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

$$R = V U^T$$

Puis :

$$t = p_m - R p_m'$$

73

Centre de Robotique
ÉCOLE DES MINES DE PARIS

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 $H = \sum_{i=1}^n q_i q_i^T$
- Décomposer H en valeurs singulières
- Calculer R puis t

$$H = U \Sigma V^T$$

$$R = V U^T \quad t = p_m - R p_m'$$

74

Centre de Robotique
ÉCOLE DES MINES DE PARIS

Reconstruction, résultats

• Video

– KinectFusion:

Real-Time Dynamic 3D Surface
Reconstruction and Interaction,

– SIGGRAPH 2011

75

Centre de Robotique
ÉCOLE DES MINES DE PARIS

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

Centre de Robotique
ÉCOLE DES MINES DE PARIS

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

Centre de Robotique
ÉCOLE DES MINES DE PARIS