



Nuages de points et modélisation 3D

François GOULETTE

Jean-Emmanuel DESCHAUD

Tamy BOUBEKEUR

Contact : francois.goulette@mines-paristech.fr

Centre de Robotique
TECH-RESEARCH-ROBOT

Déroulement du cours

- 1/ Perception 3D ; capteurs et étalonnage (FG)
- 2/ Recalage et consolidation (FG)
- 3/ Description locale des courbes et surfaces (FG)
- 4/ Rendu de nuages de points et maillages (TB)
- 5/ Reconstruction de courbes et surfaces (JED)
- 6/ Modélisation et segmentation (FG)

- Séminaire de recherche
- Présentation des projets

2

Centre de Robotique
TECH-RESEARCH-ROBOT

Nuages de points et modélisation 3D

Vue d'ensemble du cours

Outils

- Géométrie différentielle
- Structuration (n-D tree, etc.)
- Descripteurs 3D
- Segmentation sans modèle

Captureurs & étalonnage

Recalage

Nuage de points

Rendu par points

Reconstruction de surfaces

Modélisation et segmentation

Modèle de surface 3D

Rendu polygonal

Visualisation Exploitation

Centre de Robotique
TECH-RESEARCH-ROBOT

Sommaire

- 1/ Introduction
- 2/ Principes de la numérisation de surface
- 3/ Précision et étalonnage
- 4/ Démonstrations de numérisation 3D

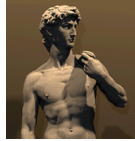
4

Centre de Robotique
TECH-RESEARCH-ROBOT


1.1 Usages de la perception 3D...

Conservation du patrimoine

Statues, objets d'art




David
(Digital Michelangelo)



Vivid 700 (Minolta)

Bâtiments remarquables



Liège - Palais des Princes
GS 100 (MENS)

5

Centre de Robotique
TECH-RESEARCH-ROBOT

Génie civil, mines



Scanner laser
(Faro Focus 3D)



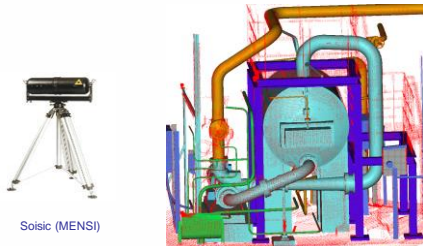
Jusqu'à x100 kpts/s !
Coût scanner faible ~30 k€

6

Centre de Robotique
TECH-RESEARCH-ROBOT

Maintenance de constructions industrielles

Modélisation « Tel Que Construit »
Zone de Centrale Nucléaire (EDF)



Soisic (MENS)

7

Centre de Robotique
MINES ParisTech

Cartographie 3D de villes & de routes

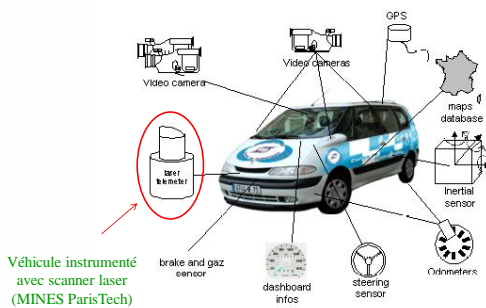


Rue Soufflot, Paris
Points 3D couleur : Données LARA-3D (CAOR)
Gris : MNS (IGN)

8

Centre de Robotique
MINES ParisTech

Aides à la conduite Véhicule autonome



Véhicule instrumenté avec scanner laser (MINES ParisTech)

9

Centre de Robotique
MINES ParisTech

Interfaces interactives



MS Kinect

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



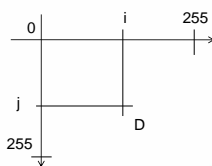
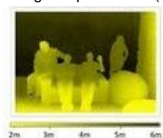
10

Centre de Robotique
MINES ParisTech

1.2 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)



11

Centre de Robotique
MINES ParisTech

Résolution

- L'espace entre les mesures est caractérisé par la résolution
 - Résolution angulaire (angle entre deux visées optiques consécutives)
 - Résolution spatiale (distance entre les points mesurés)

12

Centre de Robotique
MINES ParisTech

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



13

Centre de Robotique
TECHNIQUES DE POINTS

Nuage de points colorisés



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



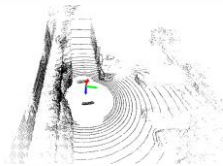
Points 3D colorisés

14

Centre de Robotique
TECHNIQUES DE POINTS

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



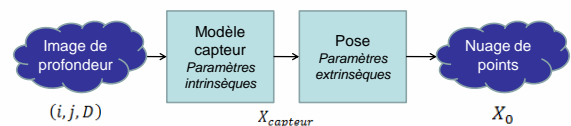
Velodyne 64 et nuage de points

15

Centre de Robotique
TECHNIQUES DE POINTS

De l'image de profondeur au nuage de points (2)

- **Modèle du capteur (optique, géométrie)**
- **Pose (position et orientation) du capteur**
 - Paramètres connus par **étalonnage**.

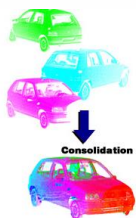


16

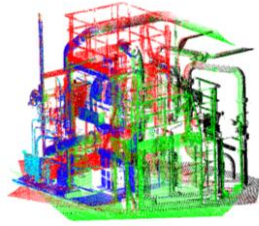
Centre de Robotique
TECHNIQUES DE POINTS

Nuage de points composé

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



Consolidation



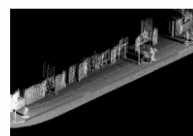
Nuages de points recalés
(couleurs : stations d'origine)

17

Centre de Robotique
TECHNIQUES DE POINTS

Autres représentations...

- **Image d'élévation**
 - Passage d'un nuage de points à une image, selon une direction de projection et le calcul d'une valeur sur l'espace 2D discrétisé – e.g. : h_{max} , h_{min} , h_{mean} , Δh ...



Nuage de points d'une rue

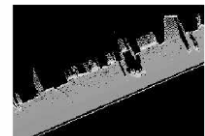


Image de profondeur calculée

18

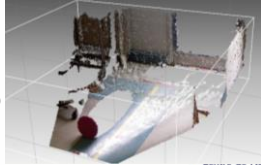
Centre de Robotique
TECHNIQUES DE POINTS

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)



19

Exemples de nuages de points

- Différentes sortes

- Réels, synthétiques, avec ou sans couleur
- Relevés statiques ou mobiles

- Visualiseurs :

- CloudCompare (OpenSource)
- MeshLab (OpenSource)
- RealWorks (commercial, version gratuite de visualisation simple)

20

Sommaire

1/ Introduction

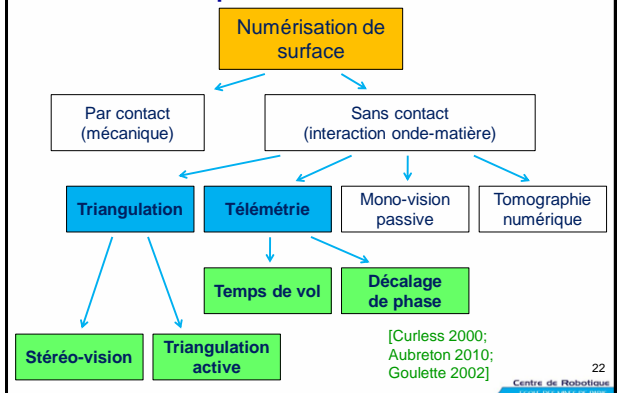
2/ Principes de la numérisation de surface

3/ Précision et étalonnage

4/ Démonstrations de numérisation 3D

21

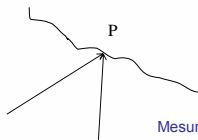
Principes et taxonomie



22

Principe de la triangulation

Utilisé par les géomètres
(théodolites),
les marins...



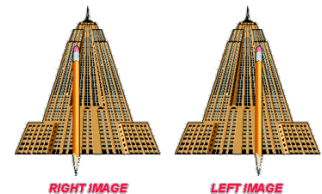
Mesure d'angle,
connaissance des
positions de mesure



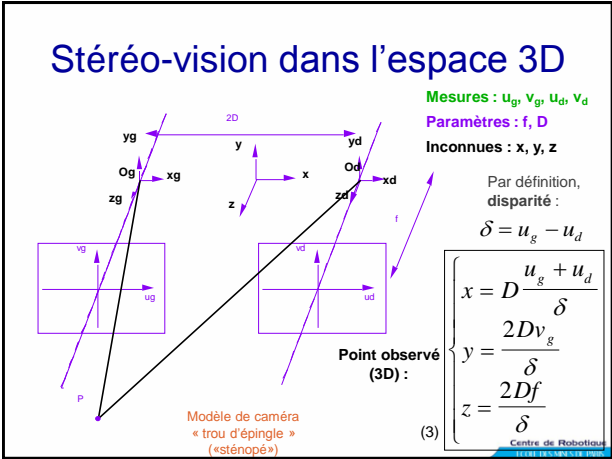
Centre de Robotique
TOUTES LES VISIONS SONT BIEN VUES

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



Centre de Robotique
TOUTES LES VISIONS SONT BIEN VUES



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)

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

Scanner à triangulation laser point

Un double balayage par le laser assure une couverture échantillonnée régulière de la surface

SOISIC (MENS)

Modèle simplifié de triangulation laser point (2D)

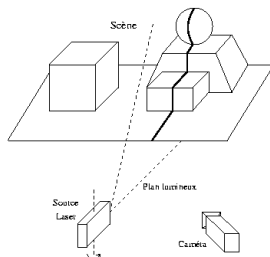
Mesures : θ, u
 Paramètres : f, D
 Inconnues : x, z

Point observé (2D) :

$$\begin{cases} x = D \frac{f \tan \theta + u}{f \tan \theta - u} \\ z = \frac{2Df}{f \tan \theta - u} \end{cases}$$

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
11 rue de la République 41000 Blois

Exemple de profilomètre



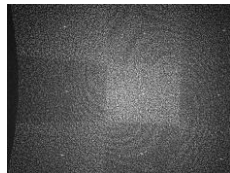
Whole Body Scanner (Cyberware)

Centre de Robotique
11 rue de la République 41000 Blois

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 $\delta_{i,j}$ du point de la scène observé par rapport à l'image d'origine.

33

Centre de Robotique
11 rue de la République 41000 Blois

Disparité « brute » $\delta_{raw_{i,j}}$: corrélation avec des motifs mémorisés à différentes profondeurs, résolution sub-pixellique (1/8) et offset :

$$\delta_{i,j} = \frac{1}{8} (\delta_{off} - \delta_{raw_{i,j}})$$

L'équation de profondeur z reprend la formule de la stéréo-vision :

$$z_{i,j} = \frac{bf}{\delta_{i,j}}$$

Avec :

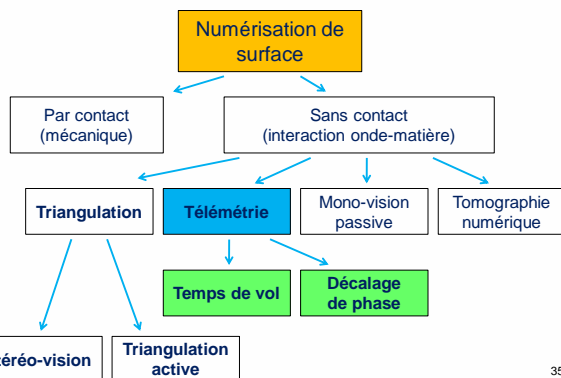
- f : distance focale (caméra IR) ;
- b : base (distance entre projecteur et caméra IR)
($b = 2D$ de l'exemple stéréo-vision)

http://wiki.ros.org/kinect_calibration/technical

34

Centre de Robotique
11 rue de la République 41000 Blois

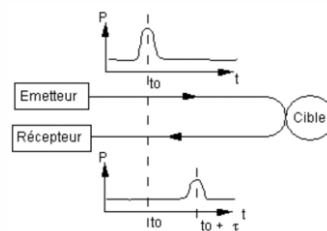
Télémétrie



35

Centre de Robotique
11 rue de la République 41000 Blois

Télémétrie par temps de vol



- Types d'impulsion :
- lumineuse (laser)
 - ultrasonore (SONAR)
 - ondes radio (RADAR)

$$d = \frac{1}{2} v \tau$$

Avec : v : vitesse de l'onde

Rappel : lumière dans le vide :
 $v = c = 3 \times 10^8$ m/s

Centre de Robotique
11 rue de la République 41000 Blois

Résolution

$$\Delta d = \frac{1}{2} v \Delta \tau \Rightarrow \Delta \tau = \frac{2 \Delta d}{v}$$

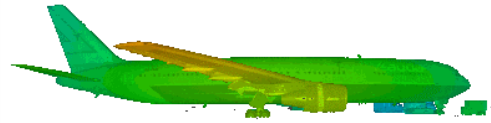
Pour mesurer une distance avec une résolution de 1 mm, avec une impulsion lumineuse dans le vide, il faut être capable de déterminer le temps avec une résolution de :

$$6,7 \times 10^{-12} \text{ s} < 10 \text{ ps}$$

[Grussenmeyer 2011]

37

Un double balayage par le laser assure une couverture échantillonnée régulière de la surface



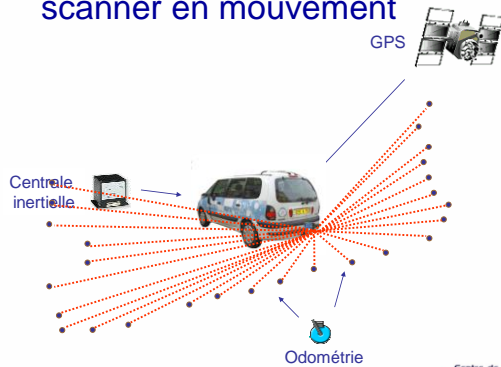
Boeing 767 digitalisé



LMS Z-210 (Rieg)

Centre de Robotique

Relevés laser mobiles scanner en mouvement



Centre de Robotique

Construction du nuage de points Scène urbaine

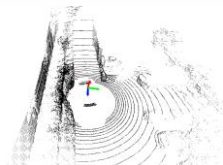


Le nuage de points est géo-référencé

40

Centre de Robotique

Plusieurs scanners à balayage simple simultanés

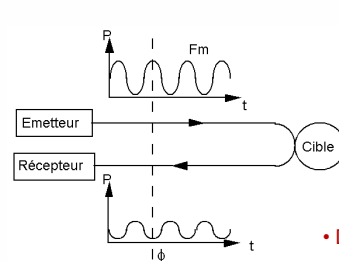


Velodyne 64 et nuage de points :
→ 64 scanners laser
→ Avantage : rapidité (1 M pts/s)

41

Centre de Robotique

Modulation en amplitude (décalage de phase)



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

$$d = \frac{1}{2} v \tau$$

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

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

[Grussenmeyer 2011]

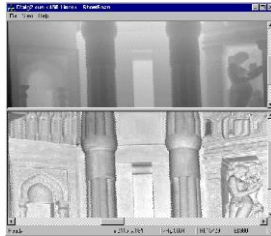
Centre de Robotique

Quelques capteurs à différence de phase

LARA (Zoller+Fröhlich)



Faro Focus 3D



Centre de Robotique

Vitesse d'acquisition

- Mesure point par point : lent
- Procédé parallélisable :



Zcam (3DV Systems) :
Modulation d'amplitude
en fréquence infrarouge,
30 images/s



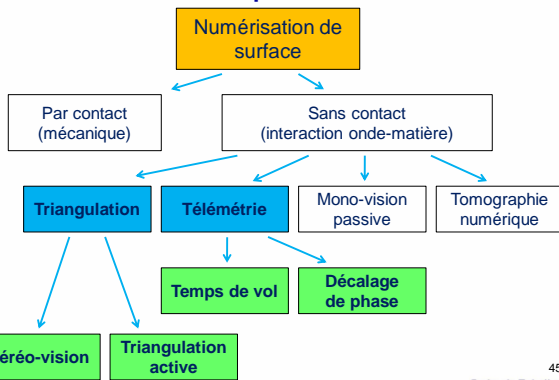
Applications video :



→ Principe de la Kinect II (TOF)

Centre de Robotique

Récapitulatif



45

Centre de Robotique

Sommaire

- 1/ Introduction
- 2/ Principes de la numérisation de surface
- 3/ Précision et étalonnage
- 4/ Démonstrations de numérisation 3D

46

Centre de Robotique

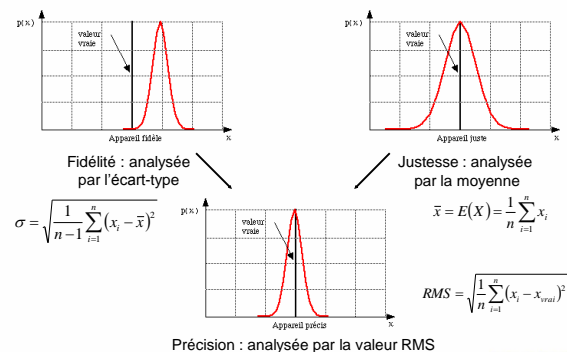
3/ Précision et étalonnage

- Les points 3D sont des mesures géométriques
 - Obtenues par des principes physiques (contact, lumière, etc.) et mécaniques
- Les erreurs systématiques de mesure peuvent être améliorées
 - Par calibrage / étalonnage

47

Centre de Robotique

Précision des mesures



48

Centre de Robotique

Principes de l'étalonnage

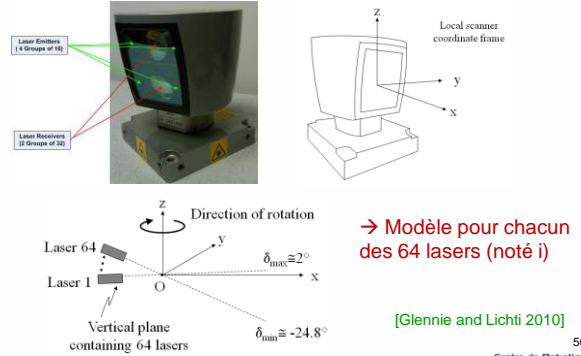
- **Modèle g du capteur (optique, géométrie)**
 - Permet de passer des données brutes capteur B_i aux points 3D X_i
 - Exemple de données brutes : distance, angle de scanning
 - Plusieurs paramètres q :
 - intrinsèques q_{int} ; extrinsèques q_{ext} (position et orientation) du capteur.

$$X_i = g(B_i, q) \quad (1)$$

49

Centre de Robotique
TECHNOLOGIE ET RECHERCHE

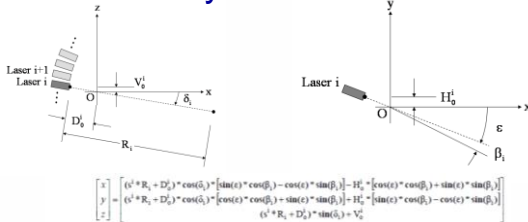
Modélisation d'un Velodyne 64



50

Centre de Robotique
TECHNOLOGIE ET RECHERCHE

Velodyne 64 – laser i



where:

s^i is the distance scale factor for laser i;

D_v^i is the distance offset for laser i;

δ_v^i is the vertical rotation correction for laser i;

β_v^i is the horizontal rotation correction for laser i;

H_v^i is the horizontal offset from scanner frame origin for laser i;

V_v^i is the vertical offset from scanner frame origin for laser i;

R_v^i is the raw distance measurement from laser i;

ϵ is the encoder angle measurement.

Paramètres

Mesures

51

Centre de Robotique
TECHNOLOGIE ET RECHERCHE

Méthode d'étalonnage

- Procédure de détermination précise des paramètres (q_{int} , q_{ext}) d'un capteur
- Basée sur
 - Mesures expérimentales, jeu de données brutes B_i et de points calculés X_i
 - Une référence R (points 3D, modèle) et une métrique (distance euclidienne...)
 - Donne une erreur estimée ϵ_i pour chaque point

$$\epsilon_i = d(X_i, R)$$

52

Centre de Robotique
TECHNOLOGIE ET RECHERCHE

Solution

- **Résolution par Moindres Carrés**
 - Hypothèses sur les bruits de mesure et la métrique utilisée : (loi normale, etc.)
- **Fonction d'erreur à minimiser sur l'espace des paramètres :**

$$f(q) = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 \quad (2)$$

$$f(q) = \sum_{i=1}^n d(g(B_i, q), R)^2 \quad (3)$$

53

Centre de Robotique
TECHNOLOGIE ET RECHERCHE

Exemple : étalonnage d'un système laser-caméra

- **Objectif :**
 - Trouver la transformation rigide entre un scanner à balayage simple et une caméra



Caméra AVT Marlin
et scanner IBEO LD.

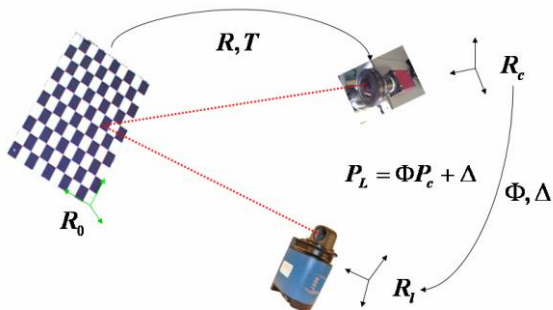


Appareil photo Canon EOS 5D
et scanner SICK LMS 221

54

Centre de Robotique
TECHNOLOGIE ET RECHERCHE

Comment déterminer Φ et Δ ?



Centre de Robotique
TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT

Problème...Comment déterminer Φ et Δ ?

- Mire d'étalonnage « échiquier » ?
 - Les coins peuvent être détectés précisément par la caméra + traitement d'image
 - Mais les points laser ne sont pas nécessairement sur les coins
- Pas de données de référence !

56
Centre de Robotique
TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT

Solution : [Pless and Zhang 2004] mire d'étalonnage plane

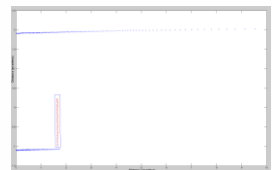
- Utiliser une contrainte :
 - « points laser sur un plan »
 - Mais un seul plan est insuffisant pour lever les indéterminations :
 - déplacer le plan : redondance d'information
- En l'absence de données de référence, on exploite un modèle de référence

57
Centre de Robotique
TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT

Mise en œuvre



- 1/ Plusieurs positions de la mire d'étalonnage
- 2/ Acquisition ligne laser et image caméra
- 3/ Détermination de la pose image dans le repère caméra à partir du motif



- 4/ Extraction manuelle des points laser correspondant au plan
- 5/ Détermination de la fonction d'erreur et résolution itérative
 - Φ et Δ , erreur RMS globale et de reprojection

58
Centre de Robotique
TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT

Utilisation : colorisation de nuages de points



Rue Soufflot à Paris, nuage de points acquis par LARA-3D [Deschaud 2010]

59
Centre de Robotique
TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT

Sommaire

- 1/ Introduction
- 2/ Principes de la numérisation de surface
- 3/ Précision et étalonnage
- 4/ Démonstrations de numérisation 3D

60
Centre de Robotique
TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT

4/ Démonstrations de numérisation 3D

4.1 Acquisition 3D temps réel – Kinect

4.2 Relevé laser & images - Faro Focus

61

Centre de Robotique
TECHNI-RESEARCH-ROBOT

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

62

Centre de Robotique
TECHNI-RESEARCH-ROBOT

Références

- Curless 2000
- Aubreton 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

63

Centre de Robotique
TECHNI-RESEARCH-ROBOT

Annexes

- Autres principes de numérisation 3D
- Equations d'étalonnage de [Pless and Zhang 2004]

64

Centre de Robotique
TECHNI-RESEARCH-ROBOT

Numérisation par contact - exemples



Machine à Mesurer Tridimensionnelle (MMT)
Cyclone (Renishaw)



Bras articulé
MicroScribe-3D

Centre de Robotique
TECHNI-RESEARCH-ROBOT

Modèle complet

- Modèle complet de caméra dans l'espace

$$p \sim K \times (RP + T)$$

K : « matrice fondamentale » [Hartley and A. Zisserman 2000]
R, T : rotation, translation

- Modèle de stéréo-vision étendu
 - Géométrie quelconque
 - Plus de 2 caméras → solution par moindres carrés (sur-contraint)

66

Centre de Robotique
TECHNI-RESEARCH-ROBOT

Mono-vision passive

- Principe :
 - Utilisation de simples images 2D pour obtenir des informations 3D
- Variantes :
 - Shape-from-X (silhouette, shading, focus, texture, motion), etc.

Centre de Robotique
TECHNOLOGIES ET RESEAUX

Contours, shape-from-silhouette

- Un objet est posé sur un socle tournant
- Une caméra prend plusieurs prises de vue de l'objet, après différentes rotations



3Scan (Geometrix)

Centre de Robotique
TECHNOLOGIES ET RESEAUX

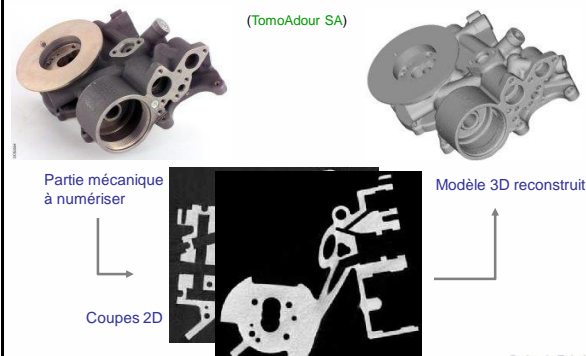
- De chaque vue est extraite la silhouette de l'objet
- L'espace est « sculpté » pour obtenir le volume 3D



Mise en œuvre à l'Ecole des Mines de Paris

Centre de Robotique
TECHNOLOGIES ET RESEAUX

Tomographie numérique (rayons X)



Centre de Robotique
TECHNOLOGIES ET RESEAUX

Combinaison de palpé et photogrammétrie



Système V-Stars,
Geodetic Services Inc.

La photogrammétrie permet de déterminer la pose du palpeur
Avantage : plus de liberté de mouvement pour l'opérateur

Centre de Robotique
TECHNOLOGIES ET RESEAUX

Géo-référencement des mesures laser

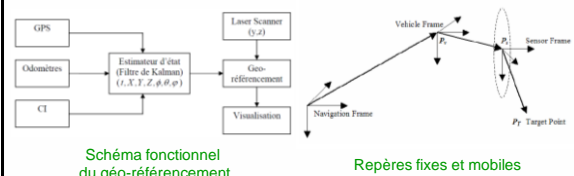


Schéma fonctionnel
du géo-référencement

Repères fixes et mobiles

Mesures laser dans le repère « Monde » :

$$P_T^{Nav} = \mathcal{R}_{Veh}^{Nav} \mathcal{R}_{Scanner}^{Veh} \cdot P_T^{Scanner} + \mathcal{R}_{Veh}^{Nav} \cdot P_s^{Veh} + P_v^{Nav}$$

[Abuhadrous 2005]

72

Centre de Robotique
TECHNOLOGIES ET RESEAUX

Equations – caméra (1) [Pless and Zhang 2004]

- Equations caméra – modèle projectif
 - En utilisant le modèle projectif d'un point P de l'espace dans l'image caméra (p), et en notant (R,T) la rotation / translation du repère « monde » au repère caméra :

$$p \sim K \times (RP + T) \quad (1)$$

K : « matrice fondamentale » [Hartley and A. Zisserman 2000]

Hypothèse : On suppose que les paramètres intrinsèques de la caméra ont déjà été calibrés (méthode classique) [Bouguet 2003]

73

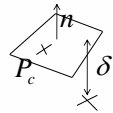
Equations – caméra (2)

- Dans le référentiel caméra
 - On représente un plan Π par sa normale normée n, et la distance δ du centre du repère au plan

$$n^t P_c = \delta$$

- La distance signée d'un point à cette surface vaut :

$$d(P_c, \Pi) = n^t P_c - \delta \quad (2)$$



74

Equations – caméra (3)

- Equation du plan d'étalonnage
 - En considérant (sans perte de généralité) que la mire est un plan $Z=0$ dans le repère « monde », qui suit l'équation (2) ;
 - L'équation (1) du modèle projectif s'applique.
 - En notant R_3 le vecteur de la 3^e colonne de la matrice R, on obtient :

A chercher ! $\rightarrow d \times n = -R_3 \times (R_3^t \times T) \quad (3)$

- D'où on extrait d et n.

- Identification par observation caméra du motif

[Zhang 99]

75

Equations – laser (1)

- La distance d'un point laser, exprimé dans le référentiel caméra, à la mire plane, vérifie l'équation (2) :

$$d(P_c, \Pi) = n^t P_c - \delta$$

- Le passage du repère laser au repère caméra s'écrit :

$$P_l = \Phi P_c + \Delta \quad (4)$$

76

Equations – laser (2)

- La combinaison de (2) et (4) amène à :

$$d(P_l, \Pi) = n^t \Phi^{-1}(P_l - \Delta) - \delta \quad (5)$$

- On cherche Φ et Δ (6 ddl) qui annulent cette distance pour

- toutes les m positions de la mire, plans Π_i représentés par (n_i, δ_i)
- tous les q_i points laser $P_{i,j}$ présents sur un même plan Π_i

77

Fonction d'erreur (Moindres Carrés)

- On établit la fonction d'erreur :

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

$$f(\Phi, \Delta) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{q_m} (n_i^t \Phi^{-1}(P_{i,j} - \Delta) - \delta_i)^2 \quad (5)$$

78

Résolution (1)

- Il n'existe pas de solution analytique connue dans SE^3 .
- Solution itérative proposée par [Pless and Zhang 2004] :

1/ Résolution linéaire

- donnant une valeur approchée de Φ et Δ ;
dans cette solution Φ_1 n'est pas
nécessairement une matrice de rotation

79

Centre de Robotique
UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

Résolution (2)

2/ A partir de Φ_1 détermination d'une matrice de rotation approchée Φ_2 :

- Minimisation de la norme de Frobenius de $(\Phi_2 - \Phi_1)$ sous la contrainte $\Phi_2^T \Phi_2 = I$

3/ Résolution numérique itérative

- La rotation Φ est représentée par la formule de Rodrigues (axe et angle : 3 paramètres)
- Optimisation de type Levenberg-Marquardt
 - Φ_2 et Δ servent de valeur d'initialisation

80

Centre de Robotique
UNIVERSITÉ DE BORDEAUX