Nuages de points et modélisation 3D

François GOULETTE
Jean-Emmanuel DESCHAUD
Tamy BOUBEKEUR

Contact : francois.goulette@mines-paristech.fr

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)
7/ Apprent. profond et nuage de points 3D (JED)
- Séminaire de recherche

- Présentation des projets

Nuages de points et modélisation 3D
Vue d'ensemble du cours

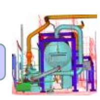
Outils
- Géométrie différentielle
- Structuration (k-D tree, etc.)
- Descripteurs 3D
- Segmentation sans modèle

Capteurs & étalonnage → Nuage de points ← Recalage

Nuage de points → Rendu par points

Nuage de points → Modèle de surface 3D (Reconstruction de surfaces ; Modélisation et segmentation)

Modèle de surface 3D → Rendu polygonal



Visualisation Exploitation

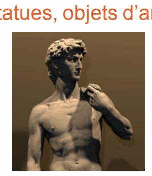
Sommaire

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

1.1 Usages de la perception 3D…

Conservation du patrimoine

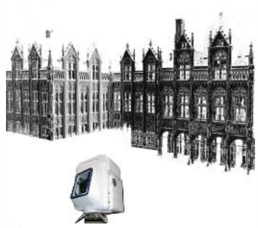
Statues, objets d'art



David
(Digital MichelAngelo)

Vivid 700 (Minolta)

Bâtiments remarquables



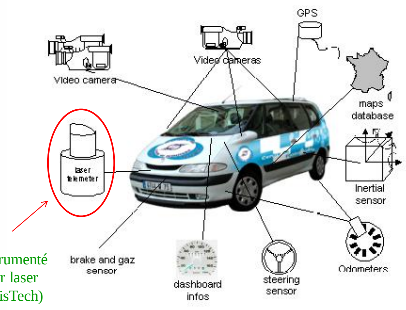
Liège – Palais des Princes
GS 100 (MENSI)

Génie civil, mines

Scanner laser
(Faro Focus 3D)

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

Aides à la conduite
Véhicule autonome



Véhicule instrumenté
avec scanner laser
(MINES ParisTech)

Interfaces interactives

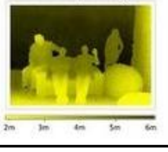
MS Kinect

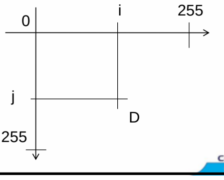
30 images RGB-D par seconde !
Coût Kinect faible ~100 €

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)

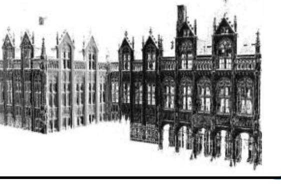




Nuage de points

- 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



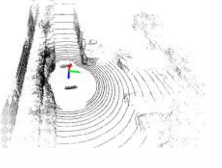
Nuage de points colorisés

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

Points 3D colorisés

De l'image de profondeur au nuage de points

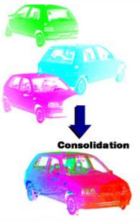
- Nuage de points « simple »
  - Expression des coordonnées spatiales (X Y Z) des points d'une image de profondeur

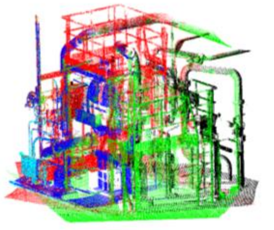


Velodyne 64 et nuage de points

Nuage de points composé

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

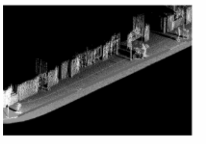




Nuages de points recalés
(couleurs : stations d'origine)

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

→

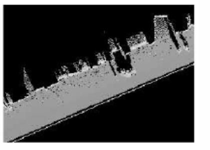
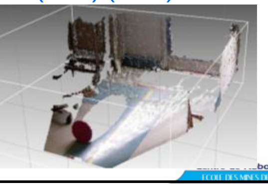


Image de profondeur calculée

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)



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)

Sommaire

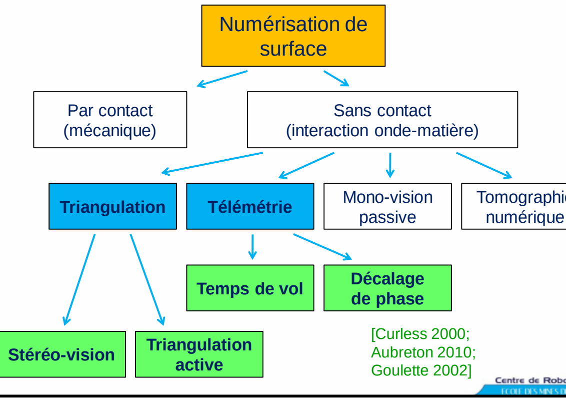
1/ Introduction

2/ Principes de la numérisation de surface

3/ Précision et étalonnage

4/ Démonstrations de numérisation 3D

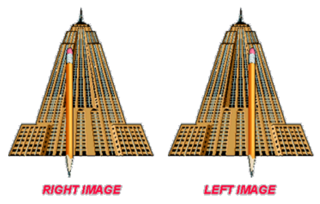
Principes et taxonomie



[Curless 2000; Aubreton 2010; Goulette 2002]

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

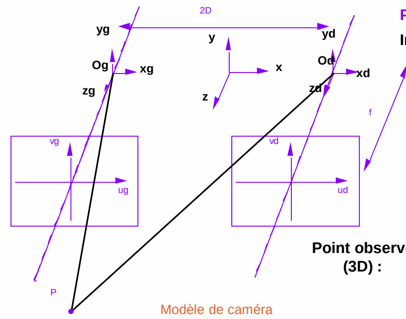


Stéréo-vision dans l'espace 3D

Mesures : u_g, v_g, u_d, v_d

Paramètres : f, D

Inconnues : x, y, z



Modèle de caméra « trou d'épingle » («sténopé»)

Par définition, **disparité** :

$$\delta = u_g - u_d$$

Point observé (3D) :

$$\begin{cases} x = D\dfrac{u_g + u_d}{\delta} \\ y = \dfrac{2Dv_g}{\delta} \\ z = \dfrac{2Df}{\delta} \end{cases} \quad (3)$$

Centre de Robotique
ECOLE DES MINES DE PARIS

Intérêts et limitations de la stéréovision

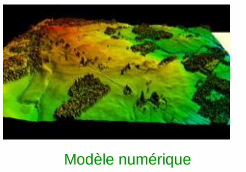
- Avantages :
  - Coordonnées 3D obtenues sans éclairage spécifique (technique de vision passive)
- Inconvénients / limitations :
  - Difficulté de l'appariement des points
  - Méthodes d'appariement automatisé
    - Points caractéristiques : SIFT, SURF
    - Appariement dense

Centre de Robotique
ECOLE DES MINES DE PARIS

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.

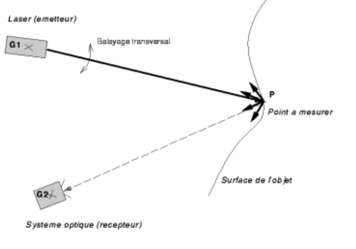
Appareil de restitution photogrammétrique analytique Leica SD 2000, années 1990.



Modèle numérique de surface (MNS)

Centre de Robotique
ECOLE DES MINES DE PARIS

Triangulation laser (active)

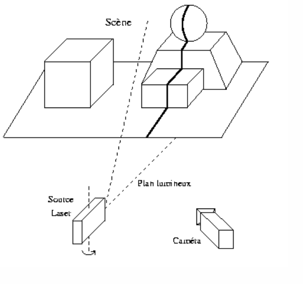


- Un rayon laser est envoyé vers l'objet à mesurer
- La lumière diffusée est observée par une caméra
  → on détermine la profondeur du point

Centre de Robotique
ECOLE DES MINES DE PARIS

Triangulation laser ligne, profilométrie

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



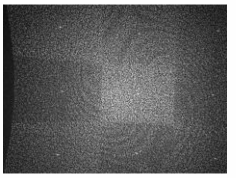
Centre de Robotique
ECOLE DES MINES DE PARIS

Exemple de profilomètre

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

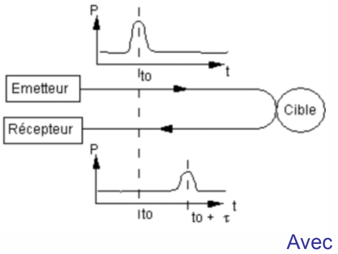
33

Télémétrie

- Numérisation de surface
  - Par contact (mécanique)
  - Sans contact (interaction onde-matière)
    - **Triangulation**
      - **Stéréo-vision**
      - **Triangulation active**
    - **Télémétrie**
      - **Temps de vol**
      - **Décalage de phase**
    - Mono-vision passive
    - Tomographie numérique

35

Télémétrie par temps de vol



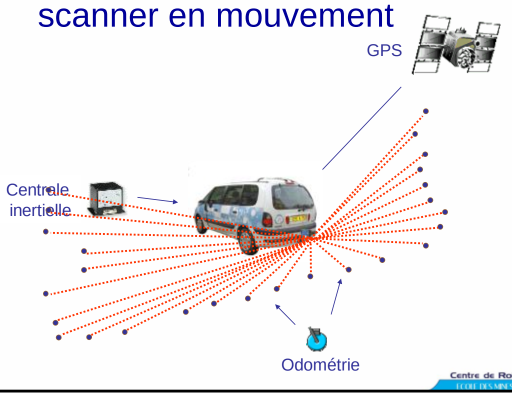
Types d'impulsion :
- lumineuse (laser)
- ultrasonore (SONAR)
- ondes radio (RADAR)

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

Avec : v : vitesse de l'onde

Rappel : lumière dans le vide : v = c = 3x10^{8} m/s

Relevés laser mobiles scanner en mouvement

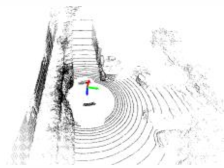


Construction du nuage de points Scène urbaine

Le nuage de points est géo-référencé

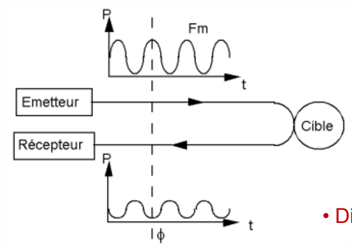
40

Plusieurs scanners à balayage simple simultanés



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

Modulation en amplitude (décalage de phase)



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

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

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

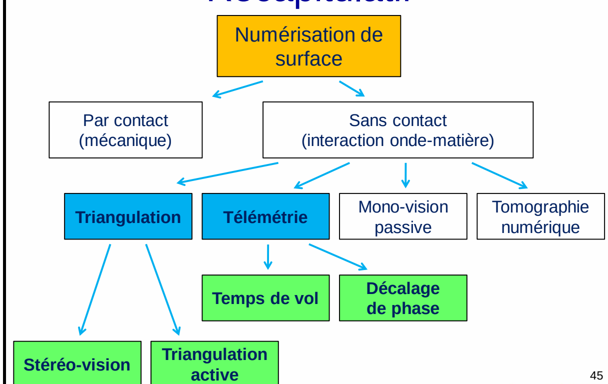
[Grussenmeyer 2011]

Quelques capteurs à différence de phase

LARA (Zoller+Fröhlich)

Faro Focus 3D

Récapitulatif



Sommaire

1/ Introduction

2/ Principes de la numérisation de surface

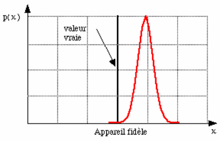
3/ Précision et étalonnage

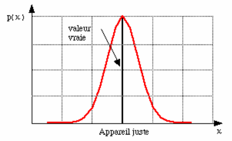
4/ Démonstrations de numérisation 3D

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

Précision des mesures

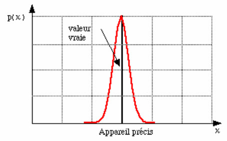




Fidélité : analysée par l'écart-type

Justesse : analysée par la moyenne

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$$



$$\bar{x} = E(X) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_{vrai})^2}$$

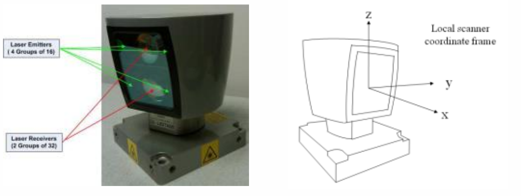
Précision : analysée par la valeur RMS

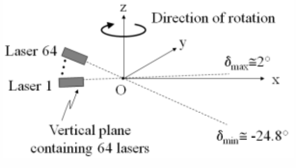
Principes de l'étalonnage

- 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.

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

Modélisation d'un Velodyne 64

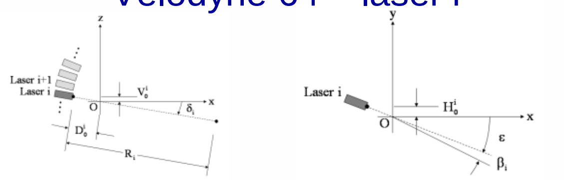




→ Modèle pour chacun des 64 lasers (noté i)

[Glennie and Lichti 2010]

Velodyne 64 – laser i



$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (s^i * R_i + D_o^i) * \cos(\delta_i) * [\sin(\varepsilon) * \cos(\beta_i) - \cos(\varepsilon) * \sin(\beta_i)] - H_o^i * [\cos(\varepsilon) * \cos(\beta_i) + \sin(\varepsilon) * \sin(\beta_i)] \\ (s^i * R_i + D_o^i) * \cos(\delta_i) * [\cos(\varepsilon) * \cos(\beta_i) + \sin(\varepsilon) * \sin(\beta_i)] + H_o^i * [\sin(\varepsilon) * \cos(\beta_i) - \cos(\varepsilon) * \sin(\beta_i)] \\ (s^i * R_i + D_o^i) * \sin(\delta_i) + V_o^i \end{bmatrix}$$

where:

s^i is the distance scale factor for laser i;
D_o^i is the distance offset for laser i;
δ_i is the vertical rotation correction for laser i;
β_i is the horizontal rotation correction for laser i;
H_o^i is the horizontal offset from scanner frame origin for laser i;
V_o^i is the vertical offset from scanner frame origin for laser i;
} Paramètres

R_i is the raw distance measurement from laser i;
ε is the encoder angle measurement.
} Mesures

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

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

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 :

$$f(q) = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^2 \qquad (2)$$

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

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

Utilisation : colorisation de nuages de points

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

Sommaire

1/ Introduction

2/ Principes de la numérisation de surface

3/ Précision et étalonnage

4/ Démonstrations de numérisation 3D

4/ Démonstrations de numérisation 3D

4.1 Acquisition 3D temps réel – Kinect

4.2 Relevé laser & images - Faro Focus

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

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

Annexes

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

64

Numérisation par contact - exemples

Machine à Mesurer Tridimensionnelle (MMT) Cyclone (Renishaw)

Bras articulé MicroScribe-3D

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

Mono-vision passive

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

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

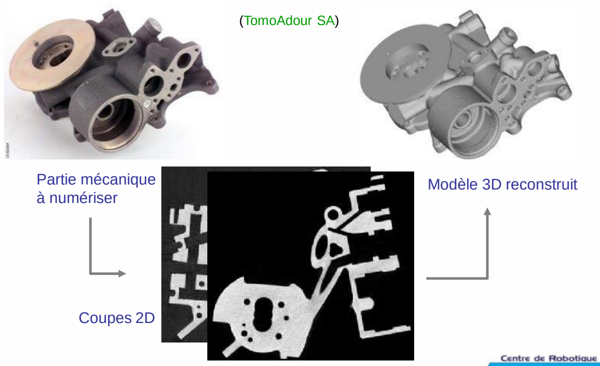
3Scan (Geometrix)

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

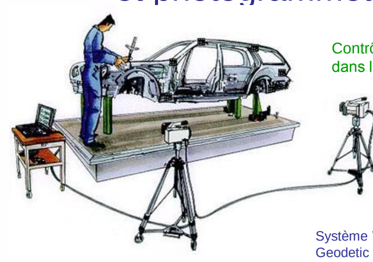
Mise en œuvre à l 'Ecole des Mines de Paris

Tomographie numérique (rayons X)

(TomoAdour SA)



Combinaison de palpage et photogrammétrie



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

Géo-référencement des mesures laser

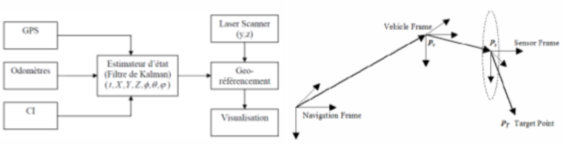


Schéma fonctionnel du géo-référencement

Repères fixes et mobiles

Mesures laser dans le repère « Monde » :

$$P_T^{Nav} = \Re_{Veh}^{Nav}\Re_{Scanner}^{Veh}\cdot P_T^{Scanner} + \Re_{Veh}^{Nav}\cdot P_s^{Veh} + P_v^{Nav}$$

[Abuhadrous 2005]

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 :

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

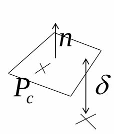
K : « matrice fondamentale » [Hartley and A. Zisserman 2000]

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

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 :

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

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 ! →
$$d \times n = -R_3 \times \left(R_3^T \times T\right) \qquad (3)$$

  - D'où on extrait d et n.
    - Identification par observation caméra du motif [Zhang 99]

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 :

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

Equations – laser (2)

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

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

- 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

Fonction d'erreur (Moindres Carrés)

- On établit la fonction d'erreur :

$$f : \begin{cases} SE^3 \to \Re^+ \\ (\Phi,\Delta) \mapsto f(\Phi,\Delta) \end{cases}$$

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

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

Résolution (2)

2/ A partir de Φ_1 détermination d'une matrice de rotation approchée Φ_2 :
  - Minimisation de la norme de Frobenius de (Φ_2 - Φ_1) sous la contrainte $\Phi_2^T\Phi_2 = I$

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