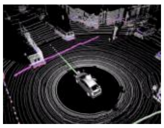
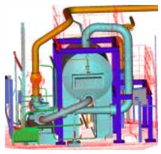
Techniques de numérisation 3D et recalage

François Goulette

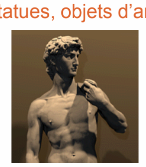




Sommaire

1/ Perception 3D, actualité et concepts

Conservation du patrimoine

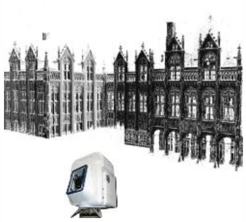
Statues, objets d'art



David
(Digital MichelAngelo)

Vivid 700 (Minolta)

Bâtiments remarquables



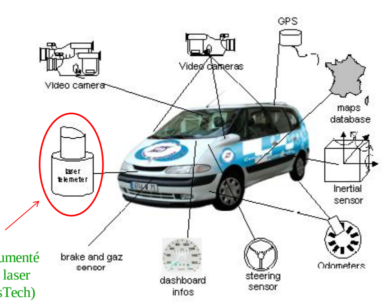
Liège – Palais des Princes
GS 100 (MENSI)

Génie civil, mines

Scanner laser
(Faro Focus 3D)

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

Aides à la conduite
Conduite automatique



Véhicule instrumenté
avec scanner laser
(MINES ParisTech)

Interfaces interactives

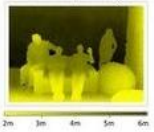
MS Kinect

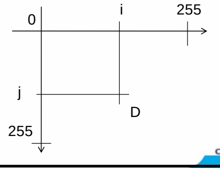
30 images RGB-D par seconde !
Coût Kinect faible ~100 €

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

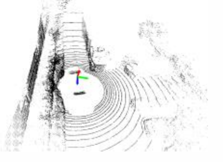
Points 3D avec intensité
(niveaux de gris, fausses couleurs)

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

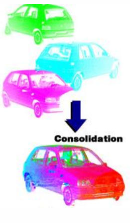


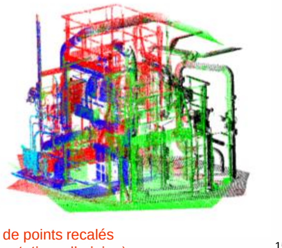
Velodyne 64 et nuage de points

13

Nuage de points composé

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





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

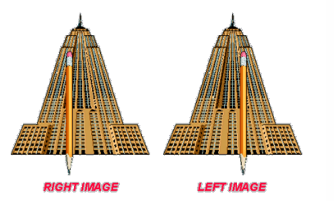
Principes et taxonomie

- 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

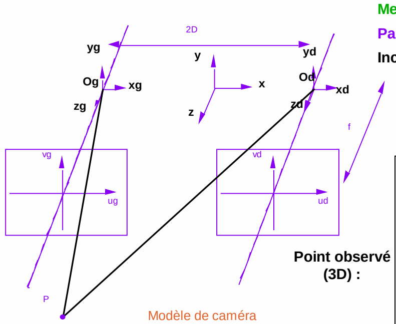
[Curless 2000; Aubreton 2010; Goulette 2002]

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



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

Mesures : u_g, v_g, u_d, v_d

Paramètres : f, D

Inconnues : x, y, z

Par définition, **disparité** :

$$\delta = u_g - u_d$$

Point observé (3D) :

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

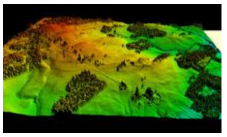
Intérêts et limitations de la stéréovision

- 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.

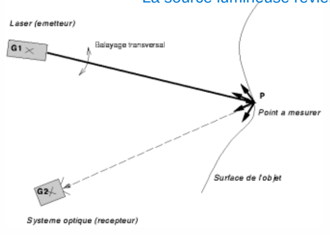
Appareil de restitution photogrammétrique analytique Leica SD 2000, années 1990.



Modèle numérique de surface (MNS)

Triangulation laser (active)

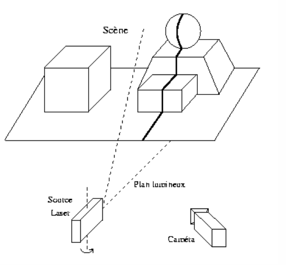
La source lumineuse reviens au capteur



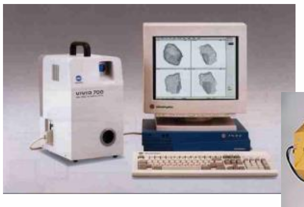
- Un rayon laser est envoyé vers l'objet à mesurer
- La lumière diffusée est observée par une caméra
  → on détermine la profondeur du point

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

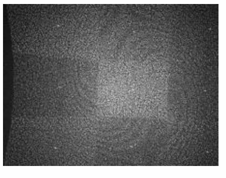


Vivid 700 (Minolta)

Whole Body Scanner (Cyberware

Projection de motifs aléatoires - modèle de la Kinect -

Kinect – sans capot



Motif projeté

On envoie un motif aleatoire connu depuis la Kinect, avec la decalage, il calcule la disparite

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.

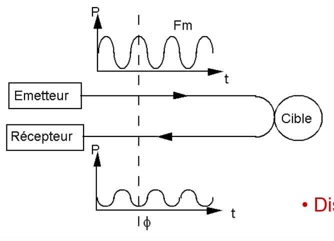
Télémétrie

Numérisation de surface

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

Aller-retourne tout droit

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

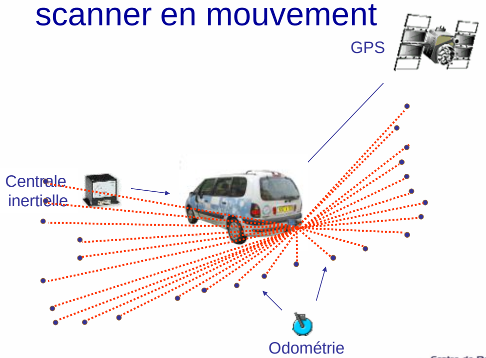
[Grussenmeyer 2011]

Quelques capteurs à différence de phase

LASAR (Perceptron)

Image obtenue par LARA (Zoller+Fröhlich) :

Relevés laser mobiles scanner en mouvement



Construction du nuage de points Scène urbaine

Le nuage de points est géo-référencé en Lambert 2

Exemples de nuages de points

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

Sommaire

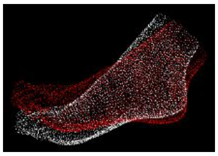
1/ Perception 3D, actualité et concepts

2/ Systèmes de perception 3D

3/ Recalage

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]

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 :

$$P=\{p_i, 1 \le i \le n\} \qquad P'=\{p'_i, 1 \le i \le n\}$$

Calcul de la transformation (R,T)

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

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

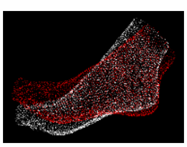
Important : le nombre de points peut varier à chaque itération.
La fonction des moindres carrés est normalisée.

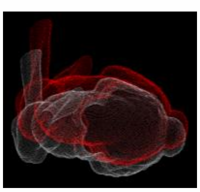
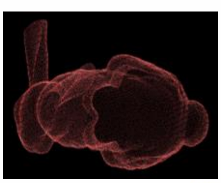
ICP – pseudo-code

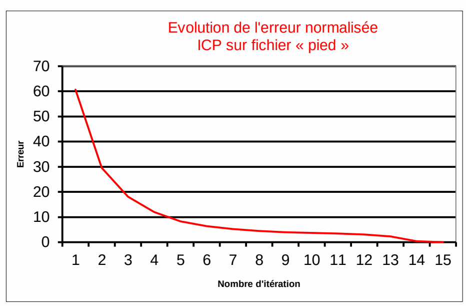
- Recalage approximatif (NP, NP’)
- Repéter :
  - Association de données →(P, P’)
  - Calcul de la transformation (R,T)
  - Application de la transformation au nuage NP’
  - Calcul de la distance entre nuages
- Tant que :

  (distance normalisée entre nuages > seuil) et (nombre d’itérations < nb_max)

Résultats





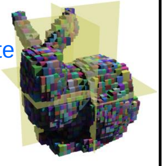
Convergence vers 0 (nuage 1 = nuage 2)

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

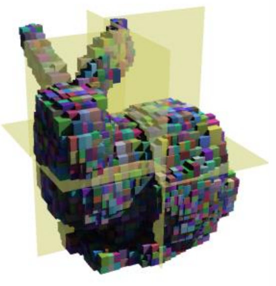
Accélération des calculs

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



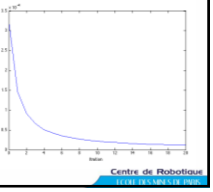
Approximate Nearest Neighbor (ANN)

- 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/



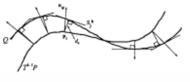
Résultats d’accélérations sur images Kinect

- 68000 points image Kinect
  - ANN seul : ~ 100s par itération
  - ANN + échantillonnage (2000 points) : < 1s
- 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 :

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

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

Como calculo la mejor rotacion y la mejor translacion para hacer el dacalage

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

Centre de Robotique

Résolution par matrices et SVD

Représentation de la rotation : matrice R

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

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

63

Centre de Robotique

Minimum de f

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

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

64

Centre de Robotique

Notations barycentriques

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

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

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

Détermination de la translation

On détermine la dérivée de f par rapport à t :

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

Elle s'annule pour :

$$\sum_{i=1}^{n}\left[p_i - (R \times p'_i + t)\right] = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^{n} p_i = R \times \sum_{i=1}^{n} p'_i + n \times t$$

$$\Rightarrow t = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} p_i - R \times \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} p'_i$$

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

66

Centre de Robotique

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 :

$$g(R) = Tr(RH)$$

71

Centre de Robotique

Détermination de la rotation (6)

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

Astuce !

$$\exists (U,V,\Sigma) \in M_3(\Re)^3 \,/\, H = U\Sigma V^T$$

Avec :
U, V matrices orthonormales
Σ matrice diagonale positive

Il faut maximiser g qui s'écrit alors :

$$g(R) = Tr\left(RU\Sigma V^T\right)$$
$$= Tr\left(\left(V^T RU\right)\Sigma\right)$$

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 Tr(WΣ).
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 :

$$\boxed{R = VU^T}$$ Puis : $$\boxed{t = p_m - Rp'_m}$$

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 $\quad H = \sum_{i=1}^{n} q'_i q_i^T$
- Décomposer H en valeurs singulières $\quad H = U\Sigma V^T$
- Calculer R puis t

$$R = VU^T \qquad t = p_m - Rp'_m$$

Reconstruction, résultats

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

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