



Vision 3D pour la réalité augmentée

- Malik MALLEM

LSC
Laboratoire Systèmes Complexes
40, rue du Pelvoux
91020 Evry Cedex

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

1



Plan de Présentation

- ◆ Introduction à la réalité augmentée
- ◆ Calibration de capteurs
- ◆ Modélisation géométrique
- ◆ Traitement d'images
- ◆ Recalage
- ◆ Reconnaissance & appariement

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

2



Réalité Augmentée

- **Définition** : Améliorer, compléter, restaurer, prédire la réalité par ordinateur.
- **Objectif** : Procurer des assistances sensorielles à l'utilisateur dans son monde réel.
- **Recherche** : Lever le verrou de la mise en conformité en temps réel des mondes réel et virtuel et proposer de nouvelles interfaces homme-application multi sensorielles et naturelles.

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

3



Quelques projets de RA

- Projets génériques
 - **Sutherland** : [Sutherland, 1968] - US - Casque semi-transparents+robot
 - (faisabilité de la RA)
 - **AR2Hockey** : [Ohshira et al., 1998]-Japon- i-glasses+Polhemus
 - (jeu de hockey sur table - le palet est virtuel)
 - **CAMELOT** : [Broll et al., 2000] -Germany - Sony LDII100 +2caméras
 - (RA collaborative autour d'une table - objets virtuels associés
 - à des objets réels)
 - **iMAGIS**: [Grasset et Gascuel, 2001] - France - i-glasses +Flock of birds
 - (RA collaborative autour d'une table - objets virtuels associés
 - à des objets réels)

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

4



Quelques projets de RA - suite

- **Projets de maintenance industrielle**
- **KARMA** : [Feiner et al., 1993 et 1996]-US- Casque mono+US
 - (montage - démontage de pièces)
- **Boeing** : [Neunmann et Majoros, 1998] -US- cibles codées
 - (montage des faisceaux de câbles électriques dans les avions),
- **ARVIKA** : [Arvika, url 1999]- Germany- cibles codées
 - (Conception et maintenance industrielle) <http://www.arvika.de>
- **ARTESAS** : [Arvika, url 2004]- Germany- markerless
 - (Conception et maintenance industrielle)
- **starmate** : [Schwald et de Laval, 2003]-(ZGDV+EADS)
 - (maintenance sur des systèmes mécaniques complexes).
- **AMRA** : [Didier et al., 2005]-France
 - (maintenance industrielle ferroviaire)

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

5



Quelques projets de RA - suite

- **Quelques liens et références:**
- <http://www.se.rit.edu/~jrv/research/ar/>
- [Sutherland, 1968] I. Sutherland (1968). A head-mounted three dimensional display. Dans Proceedings of the Fall Joint Computer Conference, pages 757-764, Washington DC. Thompson Books.
- [Ohshira et al., 1998] T. Ohshira, K. Satoh, H. Yamamoto, et H. Tamura (1998). Ar2hockey : A case study of collaborative augmented reality. Dans Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS'98), pages 268-275, Atlanta.
- [Broll et al., 2000] W. Broll, E. Meier, et T. Shardt (2000). The virtual round table : a collaborative augmented multi-user environment. Dans Proceedings of ACM Collaborative Virtual Environments, pages 39-46, San Francisco. ACM.
- [Grasset et Gascuel, 2001] R. Grasset et J.-D. Gascuel (2001). Environnement de réalité augmentée collaboratif : Manipulation d'objets réels et virtuels. Dans AFIG '01 (Actes des 14èmes journées de l'AFIG), pages 101-112.
- [Feiner et al., 1993] S. Feiner, B. MacIntyre, et D. Seligmann (1993). Knowledge-based augmented reality. Communications of the ACM, 36(7) :52-62.

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

6





Quelques projets de RA - suite

- **Quelques liens et références:**
- [Neumann et Majoros, 1998] U. Neumann et A. Majoros (1998). Cognitive, performance and system issues for augmented reality applications in manufacturing and maintenance. Dans Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS'98), pages 4-11, Atlanta.
- IEEE.
- [Arvika, url] Arvika augmented reality for development, production and servicing. <http://www.arvika.de>.
- [Schwald et de Laval, 2003] B. Schwald et B. de Laval (2003). An augmented reality system for training and assistance to maintenance in the industrial context. Dans Proc. 11th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision'2003 (WSCG).
- [Didier et al., 2005] J.-Y. Didier, D. Roussel, M. Mallem, S. Otmene, S. Naudet, Q.-C. Pham, S. Bourgeois, C. Mégard, C. Leroux, et A. Hocquard (2005). Amra : Augmented reality assistance in train maintenance tasks. Dans Workshop on Industrial Augmented Reality (ISMAR'05), Vienne, Autriche.

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

7



Problématiques traitées au LSC

- **Maintenance industrielle**
- **Télé robotique**

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

8



Projet AMRA

Projet RNTL 2002-2004:

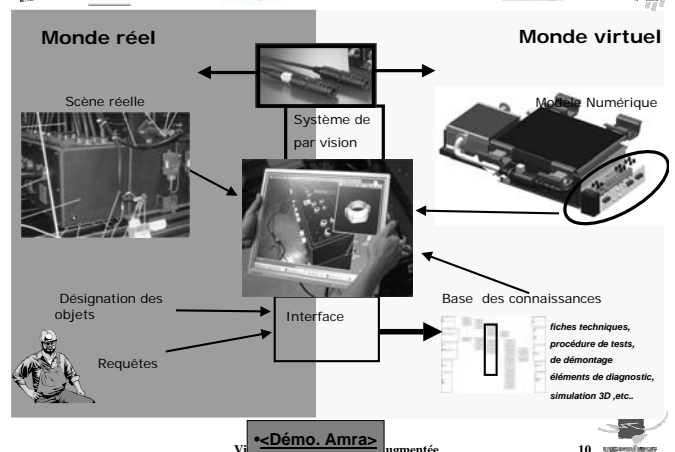
Assistance à la Maintenance en Réalité Augmentée : AMRA
Partenaires : ALSTOM TRANSPORT, CEA SRSI/LCEI, ActiCM

Objectif : assistance en ligne aux agents de maintenance : documentation de maintenance, films de démontages, informations issues du train ...

Recherche : Mise en correspondance des points de vues réel et virtuel dans le contexte d'une réalité augmentée en **sur site réel** et l'étude de nouvelles modalités d'interaction Homme - application.

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

9

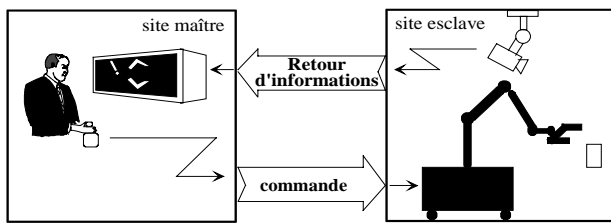


Vision 3D pour la Réalité Augmentée

10



Télé robotique



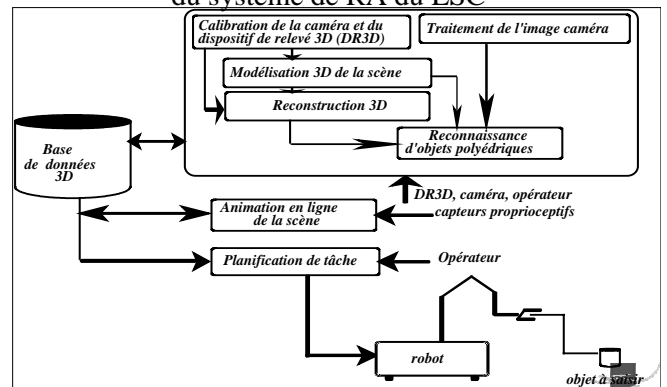
- * **Tâches complexes**
- * **Site esclave éloigné**
- ➔ **Vision indirecte : Nécessité d'assurances de l'opérateur à la perception et à la commande : Système de Réalité Augmentée**

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

11



Architecture fonctionnelle du système de RA du LSC

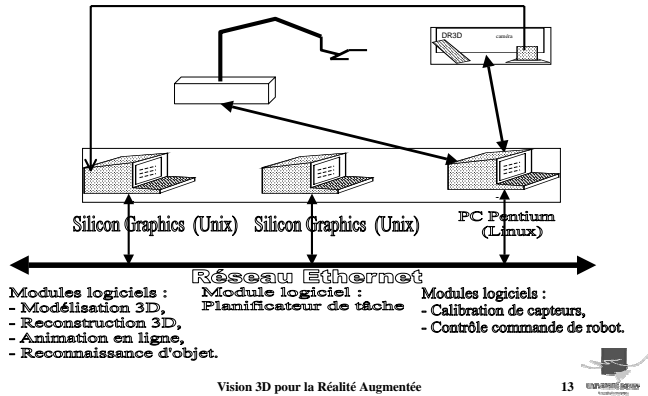


Vision 3D pour la Réalité Augmentée

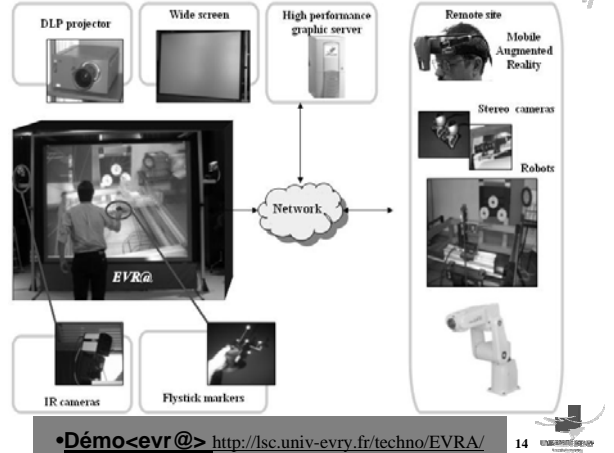
12



Architecture matérielle du système de RA du LSC



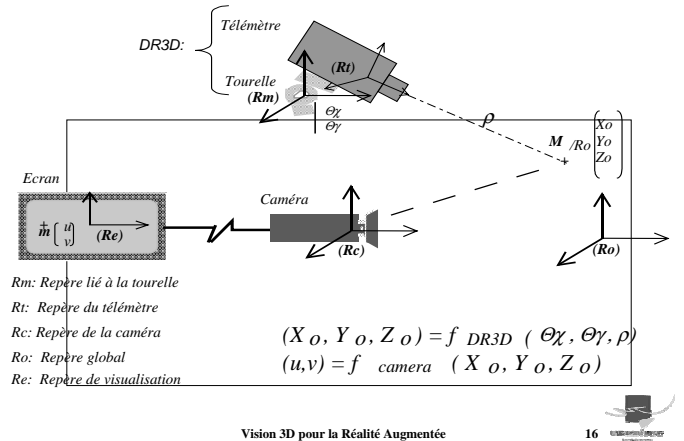
EVRA@ Platform



Plan de Présentation

- ◆ Introduction à la réalité augmentée
 - ◆ Calibration de capteurs
 - ◆ Modélisation géométrique
 - ◆ Traitement d'images
 - ◆ Recalage
 - ◆ Reconnaissance & appariement
- Page number: 15

Capteur mixte : Caméra+Télémetre



Calibration d'un dispositif

Objectif : - DR3D → relevé 3D
 si dispositif = - caméra → superposition d'images
 - robot → calibration automatique de caméra

Pré-condition :

Points d'apprentissage

Post-condition :

Paramètres du modèle du dispositif

Page number: 17

Calibration du DR3D : Paramètres externes

Résolution : Méthode des moindres carrés avec contraintes de norme et d'orthogonalité [Thèse Chekhar 1994].

$$\begin{pmatrix} X_1^0 & X_2^0 & - & - & X_N^0 \\ Y_1^0 & Y_2^0 & - & - & Y_N^0 \\ Z_1^0 & Z_2^0 & - & - & Z_N^0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1^m & X_2^m & - & - & X_N^m \\ Y_1^m & Y_2^m & - & - & Y_N^m \\ Z_1^m & Z_2^m & - & - & Z_N^m \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{Critere} = \text{Min} [\| A \cdot r + B \cdot t \|^2 + \lambda (\| r \|^2)]$$

A et B : matrices de mesures,

r et t : paramètres d'orientation et de position du DR3D

Page number: 18

Calibration de Caméra

- **Identification du modèle sténopé linéaire (sans distorsions) : Optimisation au sens des moindres carrés [Thèse Loukil 1993] :**

$$\tilde{p} = H \cdot c$$

$$c = (c_{11}, c_{12}, c_{13}, \dots, c_{33})^t$$

où \tilde{p} est l'échantillon des N points images mesurés, et H , la matrice de mesures ($2N$ lignes, 11 colonnes)

Le vecteur c est identifié en minimisant le critère suivant :

$$\text{Critere} = \text{Min} \|(H \cdot \hat{c} - \tilde{p})\|^2$$

Calibration de Caméra

- **Filtrage de Kalman (Bruit de mesures) [Thèse Loukil 1993]**

$$p_i = H_i \cdot c + w_i$$

w_i : vecteur bruit d'observation de matrice de variance-covariance W_i
Le critère à minimiser par le processus du filtrage de Kalman est:

$$\text{Critere} = \text{Min}_c \left[\sum_{i=1}^N (p_i - H_i \cdot c)^T \cdot W_i^{-1} \cdot (p_i - H_i \cdot c) \right]$$

où : N est le nombre de points de mesure.

Calibration de Caméra

- **Identification du modèle sténopé non linéaire (avec distorsion radiale) [TSAI 87], [Thèse Triboulet 1996] :**

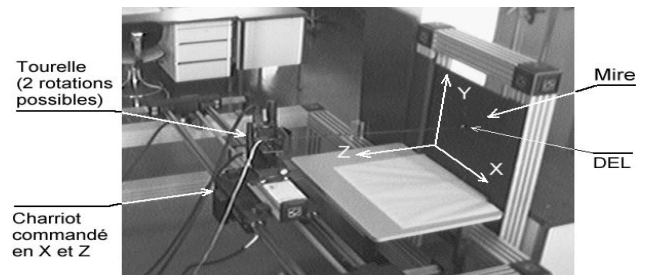
$$\begin{cases} u = u_0 + k_u \cdot \frac{Xc}{Zc} + k_u \cdot k_d \cdot \frac{Xc}{Zc} \cdot \frac{(Xc^2 + Yc^2)}{Zc^2} & k_u = k_i \cdot f \\ v = v_0 + k_v \cdot \frac{Yc}{Zc} + k_v \cdot k_d \cdot \frac{Yc}{Zc} \cdot \frac{(Xc^2 + Yc^2)}{Zc^2} & k_v = k_j \cdot f \end{cases}$$

k_d est le facteur de distorsion radiale.

- **Méthode d'optimisation de Levenberg-Marquart.**

$$\text{Critere} = \text{Min} \left[\sum_{i=1}^N [(\tilde{u}_i - \hat{u}_i)^2 + (\tilde{v}_i - \hat{v}_i)^2] \right]$$

Banc de Calibration



- ☞ Calibration manuelle : montage, temps, précision,
- ☞ Calibration automatique basée sur celle du robot

Calibration automatique de Caméra

Conditions expérimentales :

- Caméra CCD :- focale 25 mm, définition: 756x581 photoéléments.
- Caméra à tube :- focale 25 mm.
- Distance caméra-plans de calibration : 1-2 mètres.
- Définition de la carte graphique : 768x576 pixels.
- Robot à 4 d.d.l. (PPRR) ($\Delta\theta=1/100^\circ$, $\Delta X=1/10$ mm).

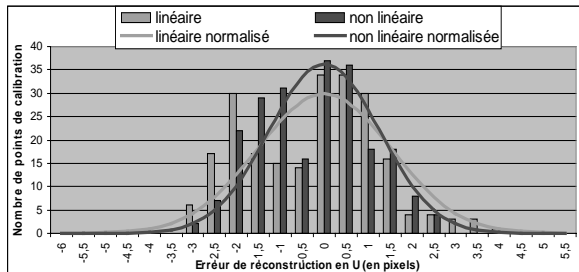
Calibration automatique de Caméra

Protocole expérimental :

- 1 - Calibration du mini robot / à la mire.
- 2 - Pré calibration de la caméra → le champ visuel de la caméra.
- 3 - Calibration automatique de la caméra.



Résultats avec une caméra à tube

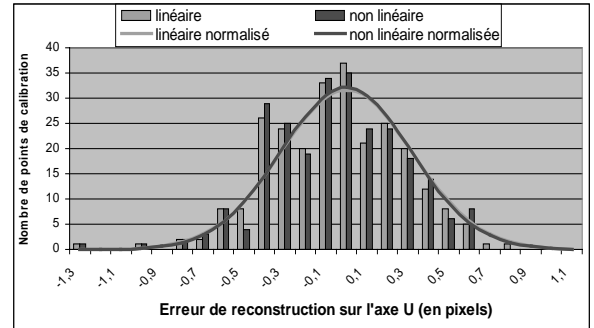


Vision 3D pour la Réalité Augmentée

25



Résultats avec une caméra CCD



Vision 3D pour la Réalité Augmentée

26



Calibration automatique de Caméra : Apports



- *Evaluation rapide et précise de modèles de caméra .*
- *Non utilisation d'un objet étalon.*
- *Calibration automatique si caméra en mouvement.*

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

27



Plan de Présentation



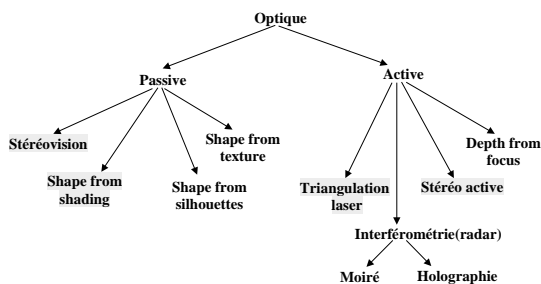
- ◆ Introduction à la réalité augmentée
- ◆ Calibration de capteurs
- ◆ Modélisation géométrique
- ◆ Traitement d'images
- ◆ Recalage
- ◆ Reconnaissance & appariement

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

28



Systèmes optiques d'acquisition de la scène 3D



Vision 3D pour la Réalité Augmentée

29



Relevé 3D

[Thèse Camille NZI 1995]



Objectif : Permettre au robot de poursuivre sa tâche

Pré-conditions :

- Calibrer les capteurs/environnement du robot,
- communiquer au système la classe d'objet à modéliser,
- télé commander les capteurs pour effectuer les mesures.

Post-condition :

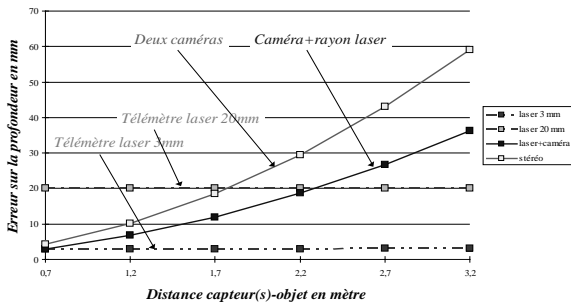
Compléter la connaissance(BD3D) du robot sur son environnement.

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

30

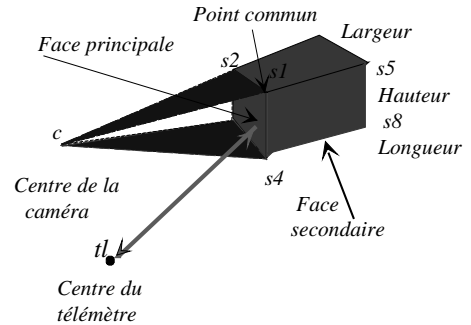


Choix du capteur de relevé 3D



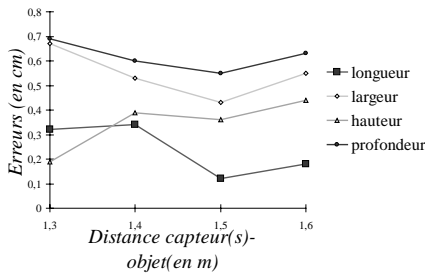
Vision 3D pour la Réalité Augmentée

Modélisation de volume englobant polyédrique



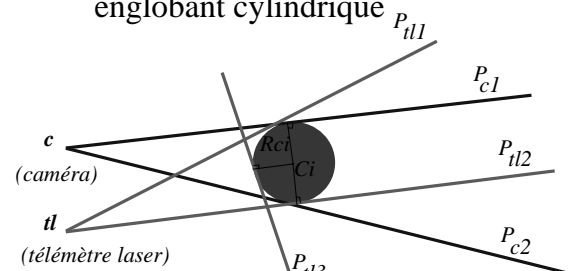
Vision 3D pour la Réalité Augmentée

Modélisation de volume englobant polyédrique : Évaluation



Vision 3D pour la Réalité Augmentée

Modélisation de volume englobant cylindrique



3 méthodes développées :

- Plans tangents(Caméra + Télémètre) : P_{c1} , P_{c2} et P_{tl3} .

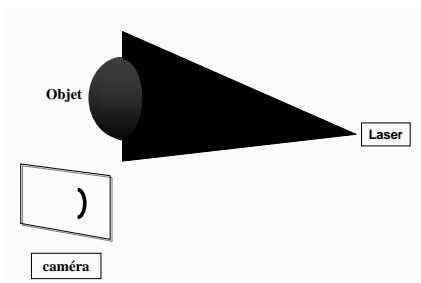
- Plans tangents(Télémètre seul) : P_{tl1} , P_{tl2} et P_{tl3} .

- Plans bissecteurs(Caméra+Télémètre):

$P_{mc} = P_{c1} \cap P_{c2}$ et $P_{mtl} = P_{tl1} \cap P_{tl2}$

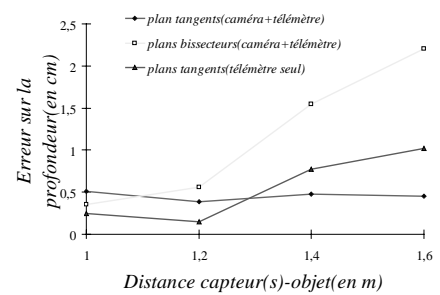
Vision 3D pour la Réalité Augmentée

Balayage laser



Vision 3D pour la Réalité Augmentée

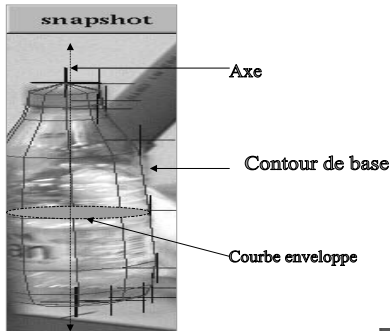
Modélisation de volume englobant cylindrique : Évaluation



Vision 3D pour la Réalité Augmentée



Modélisation de volume englobant d'objet à symétrie de révolution



Vision 3D pour la Réalité Augmentée

37



Modélisation 3D : Apports

- Permettre de compléter, en ligne, la connaissance (BD3D) sur son environnement.

- Permettre à la tâche du robot de se poursuivre.

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

38



Plan de Présentation

- ◆ Introduction à la réalité augmentée
- ◆ Calibration de capteurs
- ◆ Modélisation géométrique
- ◆ traitement d'images
- ◆ Recalage
- ◆ Reconnaissance & appariement

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

39



Traitement d'image

- ❶ points de contour
- ❷ segments de droite
- ❸ modèle 2D

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

40



Traitement d'image

1 - points de contour

- ☞ détection de contour (Sobel)
- ☞ amincissement de contour (maxima locaux)
- ☞ suivi de contour (Hystérésis)

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

41



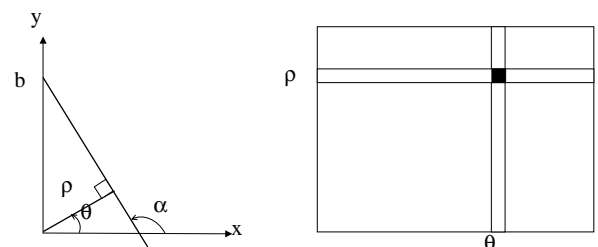
Traitement d'image

- ❷ extraction de segments : Transformée de Hough : principe

un segment



un point



$$\rho = b \cdot \sin \theta = x \cdot \sin \theta + y \cdot \cos \theta$$

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

42

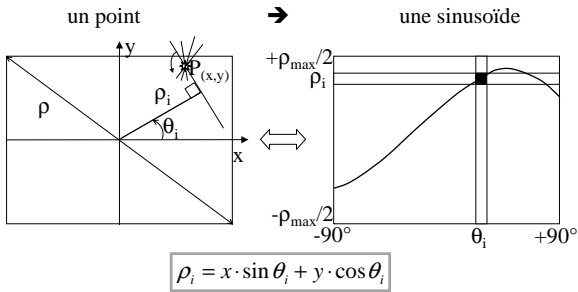




Traitement d'image



② extraction de segments : Transformée de Hough : principe



⊗ Mais : effet de dispersion des points sur plusieurs segments



Traitement d'image



extraction de segments : Transformée de Hough

⊙ L'idée est d'utiliser une tolérance sur l'angle de contour

Algorithme:

- ① voter (nb de points) pour toutes les cellules
- ② déterminer la cellule à vote maximal ← le segment courant
- ③ retrait des points appartenant au segment courant
- ④ test d'arrêt, sinon retourner à ①

↗ La tolérance permet d'obtenir un meilleur résultat mais risque de confondre les segments très proches
 ⊕ le critère de *contraste* est faiblement dépendant de la taille de l'image et le nombre de segments

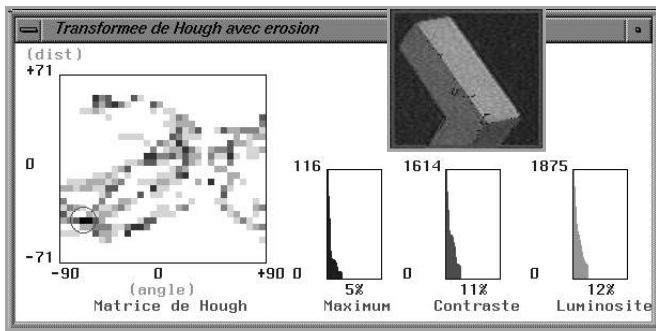
$$\text{contraste} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (v_i - \text{moyenne})^2} / N$$



Traitement d'image



extraction de segments : Transformée de Hough



Plan de Présentation



- ◆ Introduction à la réalité augmentée
- ◆ Calibration de capteurs
- ◆ Modélisation géométrique
- ◆ Traitement d'images
- ◆ Recalage
- ◆ Reconnaissance & appariement



Recalage 3D



Objectif :

Mise en correspondance des mondes réel et virtuel
 → Désigner/agir le monde virtuel équivaut à désigner/agir dans le monde réel.

Pré-conditions :

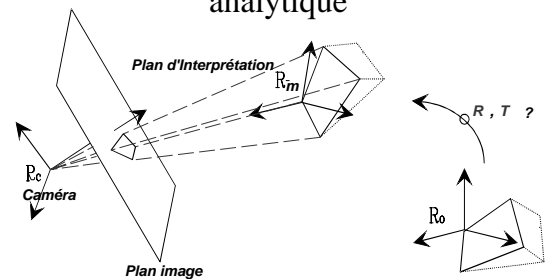
- Calibrer les capteurs/environnement du robot,
- modéliser les objets à reconstruire,
- effectuer l'appariement 2D-3D ou 3D-3D.

Post-condition :

Mise à jour de la BD3D conformément au monde réel.

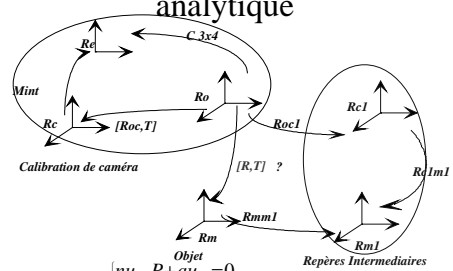


Recalage Polyédrique : Méthode analytique



Approche utilisée: Calculer Rotation (R) et Translation (T)
 R?
 . 3 angles → 3 équations non linéaires (Résolution difficile)
 . 2 angles en définissant des repères intermédiaires [Dhôme 89]

Recalage Polyédrique : Méthode analytique

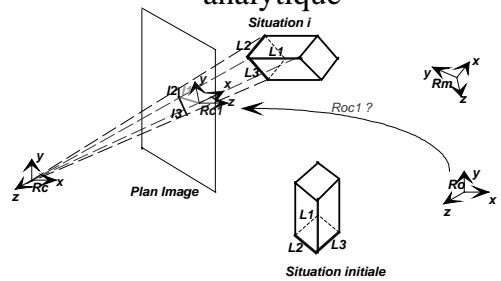


La calibration de Caméra \rightarrow

$$\begin{cases} nu_{ij} \cdot P + au_{ij} = 0 \\ nv_{ij} \cdot P + av_{ij} = 0 \end{cases}$$

Pour $(i=1..3)$ % pour arêtes 3D L_i
 Pour $(j=1,2)$ % pour sommets des segments 2D li , nu_{ij} x nv_{ij} est le rayon lumineux passant par P

Recalage Polyédrique: Méthode analytique

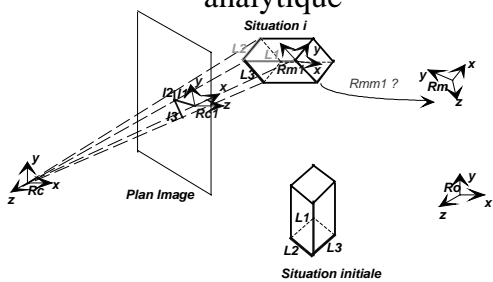


Définition de $Rc1$:

$$Rod = \left(\vec{nu}_{11} \times \vec{nv}_{11}, \vec{N}_1, (\vec{nu}_{11} \times \vec{nv}_{11}) \times \vec{N}_1 \right);$$

$$\vec{N}_1 = (\vec{nu}_{12} \times \vec{nv}_{12}) \times (\vec{nu}_{12} \times \vec{nv}_{12})$$

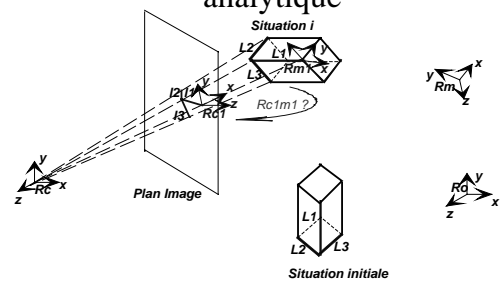
Recalage Polyédrique: Méthode analytique



Définition de $Rm1$:

$$Rmm1 = \left\{ \vec{V}_1, (\vec{V}_1 \times \vec{V}_2) \times \vec{V}_1, \vec{V}_1 \times \vec{V}_2 \right\}$$

Recalage Polyédrique: Méthode analytique



Les axes X de $(Rc1)$ et $(Rm1) \in$ au plan d'interprétation de $l1$,
 L'axe Y de $(Rc1)$ est le vecteur normal du plan d'interprétation de $l1$.

Donc : rotation $(\vec{y}_{c1}, \theta_y) \Rightarrow \vec{x}_{c1} // \vec{x}_{m1}$
 rotation $(\vec{x}_{c1}, \theta_x) \Rightarrow \vec{y}_{c1} // \vec{y}_{m1}$

Recalage Polyédrique: Méthode analytique

Détermination de $[Rc1m1] = R(\theta_x, \theta_y)$

$$\vec{N}_{i(Rc1)} \cdot \vec{V}_{i(Rc1)} = 0 \quad (i=1..3)$$

$$\Leftrightarrow [Rc1o] \cdot \vec{N}_{i(Ro)} \cdot [Rc1m1] \cdot Rm1 \cdot \vec{V}_{i(Rm)} = 0 \quad (1)$$

- $Rm1 \cdot \vec{V}_1$ est invariant en fonction de θ_x .
- Aussi, l'équation donnée par $V1$ n'est pas utilisée pour le calcul de θ_x .
- $V2$ et $V3$ sont utilisés. Ils doivent être différents et non parallèles à $L1$.
- (1) \Leftrightarrow Polynôme de degré 8.
- Résolution par le calcul des valeurs propres de la matrice Compagnon.

$$R = Rom = Roc1 \cdot Rc1m1 \cdot Rm1m$$

Détermination de $[T]: [T]$ est la translation de (Ro) à (Rm) .

$$\vec{N}_{/Rc} \cdot (T + Rcm \cdot M / Rm) = 0$$

$$\Leftrightarrow \vec{N}_{/Ro} \cdot (T + Rom \cdot M - C / Ro) = 0$$

- Résolution d'un système linéaire.

Recalage: Méthode numérique basée sur les sommets

Formulation mathématique:
 $\forall i \in E, P_i = C_i + \rho_i \vec{V}_i$ est le rayon visuel passant par le centre optique C_i et de vecteur directeur \vec{V}_i ,
 où P_i : sommets d'un objet O

soit : $|P_i - P_j|^2 = d_{ij}^2$
 où: d_{ij} est la distance connue entre 2 sommets visibles de l'objet O,

d'où:
 $|C_j - C_i + \rho_j \vec{V}_j - \rho_i \vec{V}_i|^2 = d_{ij}^2$
 $\Leftrightarrow \rho^2 i + \rho^2 j + \alpha_i \cdot \rho_i \rho_j + \beta_i \cdot \rho_i + \gamma_i \cdot \rho_j + \delta_{i,j} = 0$

où $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_{i,j}$ sont des coefficients dépendant des C_i et \vec{V}_i
 Résolution par la méthode de Levenberg - Marquart, le critère d'erreur à optimiser est:

$$\min C = \sum_{i,j} \left(|C_j - C_i + \rho_j \vec{V}_j - \rho_i \vec{V}_i|^2 - d_{ij}^2 \right)^2$$

Recalage : Méthode numérique Faible amplitude

R. T ?

La calibration de caméra donne :

$$\begin{cases} nu \cdot P + au = 0 \\ nv \cdot P + av = 0 \end{cases}$$

Après dérivation (cas de faible amplitude):

$$\begin{cases} dnu \cdot P + nu \cdot dP + dau = 0 \\ dnv \cdot P + nv \cdot dP + dav = 0 \end{cases}$$

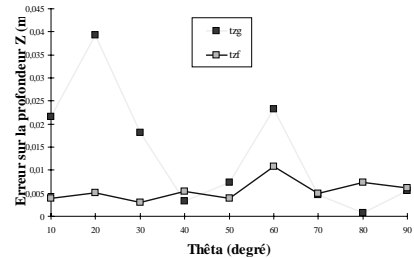
La substitution de dP, et le produit mixte de vecteurs

$$\begin{cases} nuT + (P \times nu) \cdot R + dnu \cdot P + dau = 0 \\ nvT + (P \times nv) \cdot R + dnv \cdot P + dav = 0 \end{cases}$$

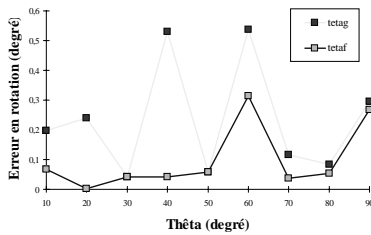
donne:

Le système $AX = B$ où $X = (tx, ty, tz, Rx, Ry, Rz)^T$ est résolu par une méthode numérique.

Recalage : Méthodes analytique et numérique (Résultats)



Recalage : Méthodes analytique et numérique (Résultats)



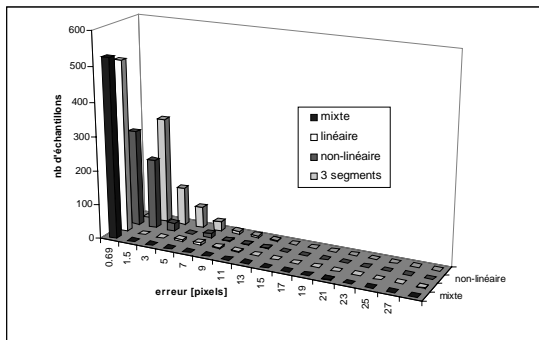
Recalage mixte

◆ procédure mixte : algorithme

1. Appliquer la méthode des trois segments
2. Utiliser la méthode linéaire pour affiner le recalage,
 - si le critère d'erreur est suffisamment petit : le résultat est considéré bon, fin
 - sinon : position singulière, continuer
3. Appliquer la méthode non-linéaire,
 - si elle ne converge pas : pas de solution, fin
 - sinon : sauver le résultat, continuer
4. Appliquer à nouveau la méthode linéaire,
 - si le critère d'erreur est suffisamment petit : le résultat est considéré bon, fin
 - sinon : pas de solution, fin

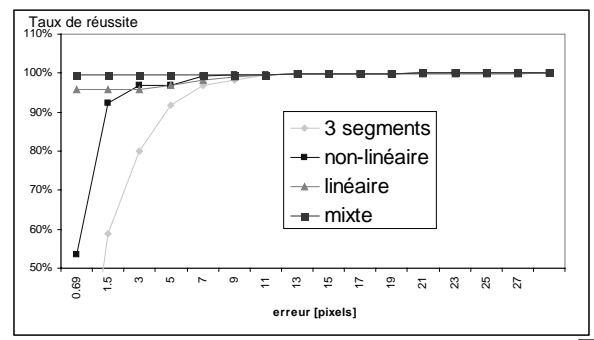
Recalage mixte

◆ procédure mixte : résultat



Recalage mixte

◆ procédure mixte : résultat



Recalage - méthode numérique 2

• Définition du problème

$$\begin{cases} p_i = (x_i, y_i, z_i), i=1, \dots, n \quad n \geq 3 \\ q_i = (x'_i, y'_i, z'_i) \end{cases}$$

$$q_i = R \cdot p_i + T$$

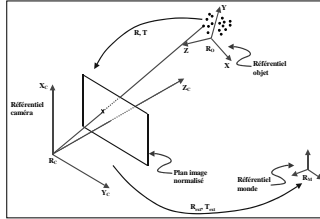
où

$$R = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{pmatrix} \text{ tel que } R'R = I \quad \text{et } T = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix}$$

- (R_c) le repère lié à la caméra.
- (R_o) le repère lié à l'objet représentant la position courante.
- (R_M) le repère monde (de la scène).

Et soit $m_i = (u_i, v_i, 1)$ les points image qui correspondent aux projections de p_i dans le plan image normalisé :

$$m_i = \frac{1}{f_i} (R_c \cdot p_i + T_c)$$



← Colinéarité dans l'espace image

Recalage - méthode numérique 2

Colinéarité dans l'espace de l'objet

$$R \cdot p_i + T = V_i (R_o \cdot p_i + T_o) \quad \text{où } V_i = \frac{m_i \cdot m_i^T}{m_i^T \cdot m_i}$$

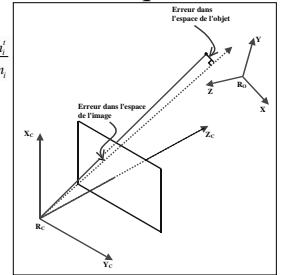
Recalage 3D

Trouver R et T qui minimisent une certaine forme d'accumulation d'erreurs (tel que la sommation des carrés des erreurs) de l'une des deux équations de colinéarité.

$$Q = \sum_{i=1}^n \left[\left(\hat{u}_i - \frac{r_1^T \cdot p_i + t_x}{r_3^T \cdot p_i + t_z} \right)^2 + \left(\hat{v}_i - \frac{r_2^T \cdot p_i + t_y}{r_3^T \cdot p_i + t_z} \right)^2 \right]$$

où $\hat{m}_i = (\hat{u}_i, \hat{v}_i, 1)$ sont les points image observés.

- Méthodes classiques
 - Gauss-Newton [Haralick et Shapiro, 1993]
 - Levenberg-Marquardt



Recalage - méthode numérique 2

• Algorithme de l'itération Orthogonale (IO) [Lu et Hager, 2000] - s'applique au recalage 3D/3D

Problème de l'orientation absolue	Algorithme IO
Soient $\{p_i\}$ et $\{q_i\}$ les deux ensembles de points mis en correspondance	Erreur de colinéarité dans l'espace de l'objet
Critère $q_i = R \cdot p_i + T$ (1)	$e_i = (I - \hat{V}_i)(R \cdot p_i + T)$ où $\hat{V}_i = \frac{\hat{m}_i \cdot \hat{m}_i^T}{\hat{m}_i^T \cdot \hat{m}_i}$
$\min_R \sum_{i=1}^n \ R \cdot p_i + T - q_i\ ^2$ tel que $R \cdot R^T = I$	Critère à minimiser
Soient $\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i$ et $\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$	$E(R, T) = \sum_{i=1}^n \ e_i\ ^2 = \sum_{i=1}^n \ (I - \hat{V}_i)(R \cdot p_i + T)\ ^2$ (5)
On définit alors : $p_i' = p_i - \bar{p}$ et $q_i' = q_i - \bar{q}$ et $M = \sum_{i=1}^n q_i' \cdot p_i'^T$	Translation optimale
[Horn et al 1988] démontre que si R^* et T^* minimisent le critère ci-dessus alors elles satisfont :	$T(R) = \frac{1}{n} (I - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{V}_i) \sum_{i=1}^n (\hat{V}_i - I) R \cdot p_i$
$R^* = \arg \max_R \text{trace}(R^T M)$ (2)	Ayant la translation optimale, on définit :
$T^* = \bar{q} - R^* \cdot \bar{p}$ (3)	$q(R) = \hat{V}_i (R \cdot p_i + T(R))$ et $\bar{q}(R) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i(R)$
Soit (U, Σ, V) la décomposition en valeurs singulières de la matrice M , tel que $U^T M V = \Sigma$	L'équation (5) peut s'écrire comme suit :
La solution du critère est donnée par :	$E(R) = \sum_{i=1}^n \ R \cdot p_i + T(R) - q_i\ ^2$
$R^* = V U^T$ (4)	Problème !
	$M(R) = \sum_{i=1}^n q_i(R) \cdot p_i'^T$
	où $p_i' = p_i - \bar{p}$ et $q_i(R) = q_i - \bar{q}(R)$ dépend de R.

Recalage - méthode numérique 2

La matrice R peut être calculée itérativement :

Soit $R^{(k)}$ l'estimée d'ordre k de R, alors :

$$T^{(k)} = T(R^{(k)}) \quad \text{et} \quad q_i^{(k)} = R^{(k)} \cdot p_i + T^{(k)}$$

L'estimée suivante $R^{(k+1)}$ est déterminée en résolvant le problème de l'orientation absolue suivant :

$$R^{(k+1)} = \arg \min_R \sum_{i=1}^n \|R \cdot p_i + T - \hat{V}_i q_i^{(k)}\|^2 = \arg \max_R \text{tr}(R^T M(R^{(k)}))$$

Nous calculons ensuite l'estimée (k+1) de la translation T, tel que :

$$T^{(k+1)} = T(R^{(k+1)})$$

Répéter le processus itératif jusqu'à ce que le critère devient inférieur ou égale au seuil d'erreur tolérée.

Avantage → initialisation

Transformation rigide

$$A = A_{\text{rot}} \cdot A_{\text{trans}}$$

$$A_{\text{rot}} = \begin{pmatrix} R_{11} & T_{11} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad A_{\text{trans}} = \begin{pmatrix} R^T & T^T \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Plan de Présentation

- ◆ Introduction à la réalité augmentée
- ◆ Calibration de capteurs
- ◆ Modélisation géométrique
- ◆ Traitement d'images
- ◆ Recalage
- ◆ Reconnaissance & appariement

Reconnaissance

Objectif :

Identifier monde réel

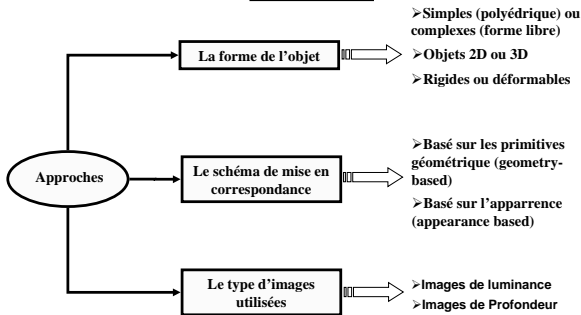
Pré-conditions :

- modéliser les objets à reconnaître,
- effectuer l'appariement 2D-2D, 2D-3D ou 3D-3D.

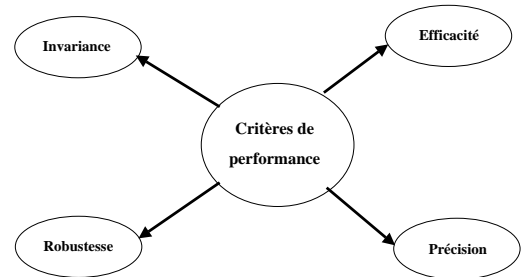
Post-condition :

Désigner/agir sur le monde virtuel équivalent à désigner/agir dans le monde réel.

Etat de l'art sur les systèmes de reconnaissance d'objets 3D



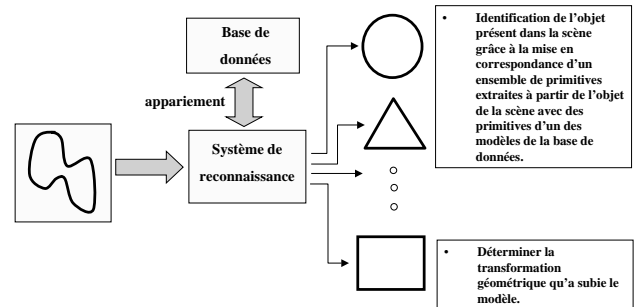
Reconnaissance : Critères de performance



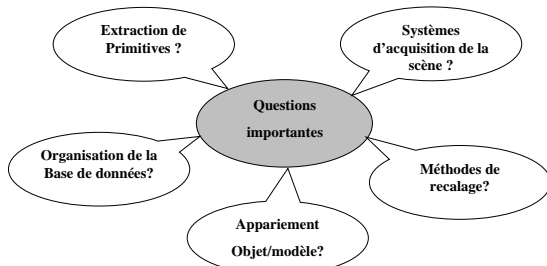
Méthodes basées sur l'apparence - approche 2D

- **Principe**
Représenter l'objet de la scène par un ensemble de ses images prises à partir de plusieurs points de vue et avec toutes les directions d'illumination possibles.
Comparer les nouvelles images avec celles stockées en mémoire
- **Avantage**
Éviter le problème d'extraction et d'appariement de primitives en définissant à l'avance plusieurs apparences possible de l'objet, permettant ainsi son identification
- **Inconvénients**
Manque d'efficacité pour traiter les problèmes d'occlusion
Nombre infini d'apparences possibles
Échantillonnage de l'espace des apparences
- **Travaux** [Murase et Nayar, 1995]

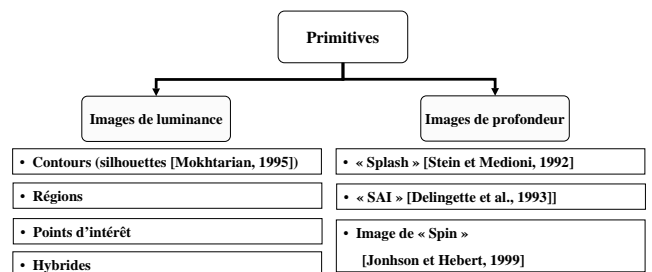
Méthodes basées sur la connaissance a priori d'un modèle 3D de l'objet



Reconnaissance : Critères de choix



Reconnaissance : Critères de choix



Mise en correspondance objet/modèle

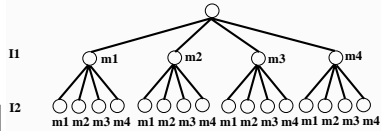
• Arbres d'interprétation [Grimson et Lozano-Pérez, 1987]

✓ Les nœuds représentent les paires d'appariements entre les primitives image et les primitives modèle

✓ Chaque niveau de l'arbre représente tous les appariements possibles entre une primitive image I_i et une primitive modèle m_j .

✓ L'arbre représente l'espace de recherche complet.

✓ Interprétation → trouver un chemin en profondeur dans cet arbre.



Problème ⇒ L'espace de recherche est très grand (complexité exponentielle).

Solution ⇒ Élaguer la recherche dans l'arbre d'interprétation en utilisant des contraintes géométriques.

Contraintes unaires : propriétés individuelles des primitives (t.q longueur, orientation d'une droite).

Contraintes binaires : propriétés d'une paire de primitives (t.q distance/angle entre deux droites).

Mise en correspondance objet/modèle

• Prédiction/Vérification d'hypothèses

[Huttenlocher et Ullman, 1987], [Ayache et Faugeras, 1990]

➔ Segmentation et structuration de l'image.

➔ Appariement hypothétique entre n primitives du modèle et n primitives de l'image.

➔ Calcul de la transformation correspondante.

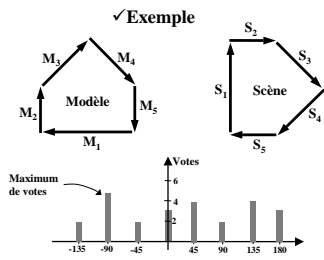
➔ Vérification par projection du reste des primitives du modèle

• Mise en correspondance objet/modèle

• Transformée de Hough généralisée

✓ Etapes

- ✓ Discrétiser l'espace des transformations possibles.
- ✓ Pour chaque appariement hypothétique de primitives, calculer la transformation qui permet d'aligner les primitives appariées.
- ✓ Attribuer un vote à la cellule du tableau associée à la transformation correspondante
- ✓ Parcourir le tableau afin de déterminer la cellule qui a reçu le plus de suffrage.



S'il existe une transformation pouvant aligner un grand nombre de primitives image et modèle, alors cette transformation va recevoir un grand nombre de vote.

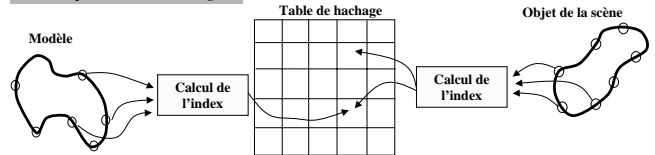
Idée principale

• Mise en correspondance objet/modèle

• Hachage géométrique [Lamdan et Wolfson, 1988]

Phase de pré-traitement (hors ligne)

Phase de reconnaissance (en ligne)



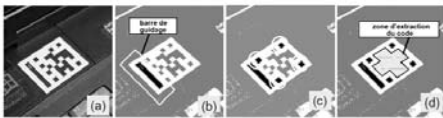
➤ Les primitives du modèles sont utilisées pour indexer la base de données.

➤ L'index ainsi calculé doit être invariant à la pose de l'objet et au changement de point de vue.

✓ Les cellules indexées de la table de hachage contiennent des entrées faisant références aux modèles ainsi que des informations permettant d'effectuer le recalage.

➤ Les primitives extraites de l'objet de la scène sont utilisées pour indexer la base de données, les modèles listés dans la cellule indexée représentent les modèles candidats (hypothèses).

Reconnaissance basée marqueur



•Cybercode [Rekimoto et Ayatsuka, 2000].

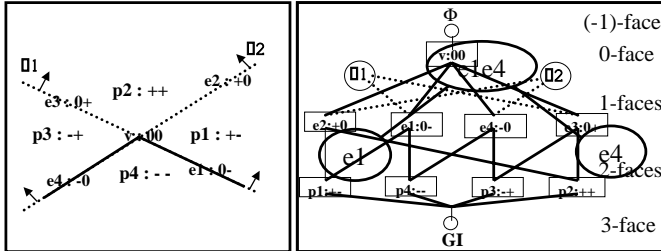
Reconnaissance basée marqueur



•ARToolkit [Kato et al., 2000] [Kato et Billinghurst, 1999]

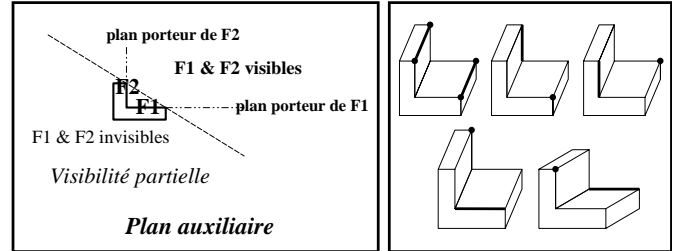
Reconnaissance basée « Markerless »
 ◆ **Graphe d'aspects (pré requis)**

Méthode analytique : cas CONVEXE [Edelsbrunner 86]
 graphe d'incidence ou $A(h_1, h_2) \rightarrow GA$

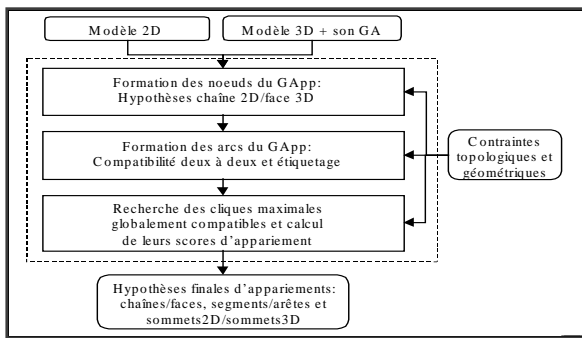


Reconnaissance basée « Markerless »
 ◆ **Graphe d'aspects (pré requis)**

Méthode analytique : cas concave
 plans auxiliaires utiles



Reconnaissance basée « Markerless »
 ◆ **approche par graphe : principe** [Pampagnin et Devy 91]

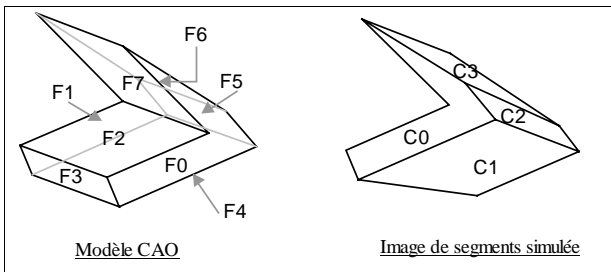


Reconnaissance basée « Markerless »
 ◆ **approche par graphe : formation de noeuds**

- ☞ critère de contour
- ☞ critère de convexité
- ☞ critère de parallélisme
- ☞ critère de colinéarité
- ☞ mise en correspondance segments-arêtes

Reconnaissance basée « Markerless »
 ◆ **approche par graphe : exemple**

☞ **formation de noeuds**



Reconnaissance basée « Markerless »
 ◆ **approche par graphe : exemple**

☞ **formation de noeuds**

		Faces							
		F ₀	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇
Chaînes	C ₀	N ₀	≠						
	C ₁			N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆
	C ₂			N ₇	N ₈	N ₉	N ₁₀	N ₁₁	N ₁₂
	C ₃			N ₁₃	N ₁₄	N ₁₅	N ₁₆	N ₁₇	N ₁₈

Symboles	N _x	Nœud	☐	Critère de contour ou de convexité non-satisfait	≠	Parallélisme non-satisfait
----------	----------------	------	---	--	---	----------------------------



Reconnaissance basée « Markerless »

◆ approche par graphe : **formation des arcs**



- ☞ critère logique
- ☞ critère de visibilité
- ☞ critère de connexité
- ☞ critère d'invariance projective

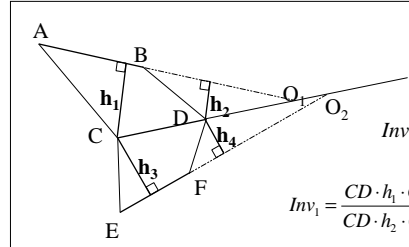


Reconnaissance basée « Markerless »

◆ approche par graphe : **formation des arcs**



☞ critère d'invariance projective



$$Inv_1 = \frac{S_{ABD} S_{EFC}}{S_{ABC} S_{EFD}} = \frac{S_{A'B'D'} S_{E'F'C'}}{S_{A'B'C'} S_{E'F'D'}}$$

$$Inv_1 = \frac{CD \cdot h_1 \cdot CD \cdot h_3}{CD \cdot h_2 \cdot CD \cdot h_4} = \frac{h_1 \cdot h_3}{h_2 \cdot h_4} = \frac{CO_1 \cdot DO_2}{DO_1 \cdot CO_2}$$



Reconnaissance basée « Markerless »

◆ approche par graphe : **exemple**



☞ formation de arcs

		Nœuds du GApp									
Arcs du GApp	N ₀										
	C	N ₁									
	C	L	N ₂								
	A ₁	L	L	N ₃							
	C	L	L	L	N ₄						
	C	L	L	L	L	N ₅					
	C	L	L	L	L	L	N ₆				
	C	L	A ₈	V	C	C	A ₂₄	N ₇			
	C	A ₄	L	A ₁₂	V	C	C	L	N ₈		

L Incohérence Logique
 V Incohérence de Visibilité
 C Incohérence de Connexité
 A_x Arc cohérent en L, V, C et vérifiant également l'invariance géométrique



Reconnaissance basée « Markerless »

◆ approche par graphe : **exemple**



☞ formation de arcs

	C	V	A ₉	L	A ₁₆	C	C	L	L	N ₉									
A ₂	C	V	A ₁₃	L	A ₁₉	C	L	L	L	N ₁₀									
C	C	C	C	A ₁₇	L	A ₂₅	L	L	L	L	N ₁₁								
C	A ₅	C	C	C	A ₂₀	L	L	L	L	L	N ₁₂								
C	L	C	V	A ₁₈	A ₂₁	C	L	A ₃₀	V	C	C	A ₃₈	N ₁₃						
C	C	L	C	V	A ₂₂	A ₂₆	A ₂₈	L	A ₃₂	V	C	C	L	N ₁₄					
C	V	C	L	C	A ₂₃	A ₂₇	V	A ₃₁	L	A ₃₄	C	C	L	L	N ₁₅				
C	A ₆	V	C	L	C	V	C	V	A ₃₃	L	A ₃₆	V	L	L	L	N ₁₆			
A ₃	A ₇	A ₁₀	A ₁₄	C	L	C	C	C	C	A ₃₅	L	A ₃₉	L	L	L	L	N ₁₇		
C	C	A ₁₁	A ₁₅	V	C	L	A ₂₉	C	C	V	A ₃₇	L	L	L	L	L	L	N ₁₈	



Reconnaissance basée « Markerless »

◆ approche par graphe : **recherche des cliques maxi**



- ☞ critère logique
- ☞ critère de visibilité
- ☞ critère de connexité



Reconnaissance basée « Markerless »

◆ approche par graphe : **exemple**



☞ recherche des cliques maxi

		Taille de la clique						
		2	3	4				
Score	8	10			N ₉ N ₁₆ N ₁₀ N ₁₅ , etc.			
	16		5		N ₁ N ₁₂ N ₁₇ N ₂ N ₇ N ₁₈ N ₅ N ₁₂ N ₁₃ N ₅ N ₁₀ N ₁₅			
	46			1	N ₆ N ₇ N ₁₄ N ₀ N ₃ N ₁₀ N ₁₇			
	total	10	5	1	16			



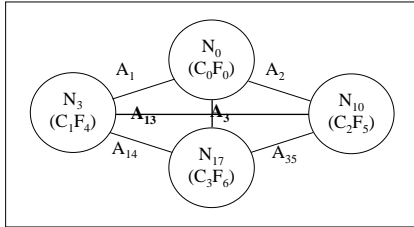


Reconnaissance basée « Markerless »

◆ approche par graphe : **exemple**



☞ recherche des cliques maxi



meilleure hypothèse



Reconnaissance basée « Markerless »

◆ approche par graphe : **complexité**



☞ nœuds

$$O(C \cdot N \cdot F)$$

☞ arcs

$$O(C^2 \cdot N \cdot F^2)$$

☞ cliques

$$O(C^2 \times N \times F^2)$$

⊕ dominante

$$O(C^2 \times N \times F^2)$$

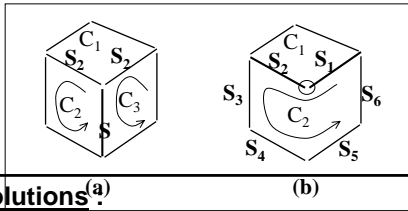


Appariement



◆ approche par graphe : **problème**

⊗ Chaînes manquantes (défauts TI)



2 solutions^(a)

☞ analyse approfondie des chaînes
☞ appariement dans un niveau plus bas

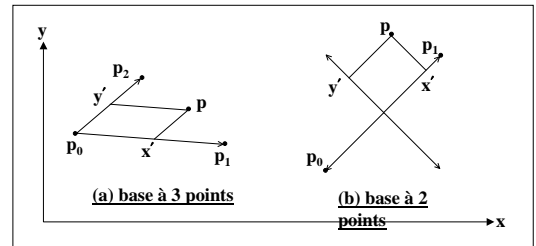


Appariement



◆ approche par Hachage Géométrique : **principe**

☞ Propriétés d'invariance géométrique



$$x' = a \cdot (p_1 - p_0) \quad y' = b \cdot (p_2 - p_0)$$

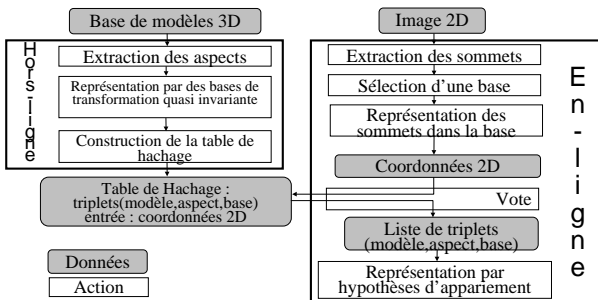


Appariement



◆ approche par Hachage Géométrique : **principe**

☞ Description de la méthode



Appariement

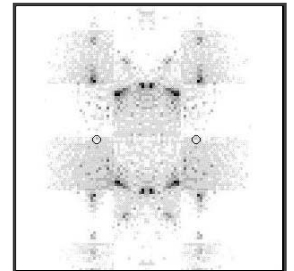


◆ approche par HG : **table de hachage**

☞ Dans chaque cellule une liste de triplets :
(modèle, aspect, base) est construite

$$t(\text{TabH}) = 4 \cdot \left(n + a \cdot b \cdot \sum_{j=1}^m nb_sommets_j \right) \text{ en octets}$$

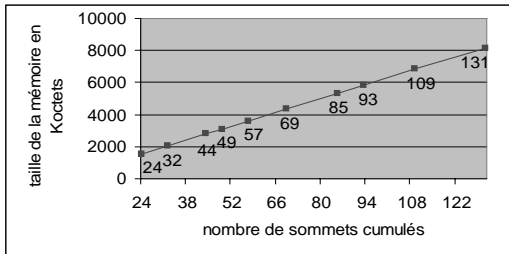
L'encombrement mémoire est alors linéairement dépendant du nombre de modèles 3D traités et de leur complexité moyenne (nb_sommets)



Appariement

- ◆ approche par HG : table de hachage

☞ Test de tables de hachage contenant 1-10 modèles



Appariement

- ◆ approche par HG : vote et mise en correspondance

☞ Complexité en-ligne $O(\text{points_image}^3 \times \text{nb_triplets})$

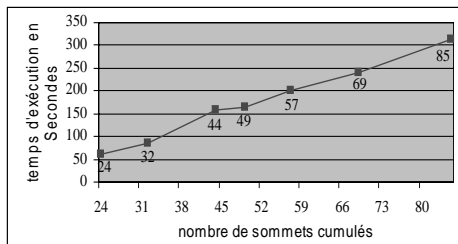
☞ Grâce à l'enregistrement de toutes les bases hors-ligne →

$$O(\text{nb_triplets})$$

Appariement

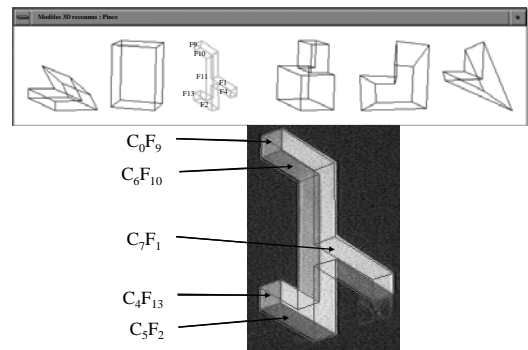
- ◆ approche par HG : vote et mise en correspondance

☞ Test du temps de reconnaissance en-ligne



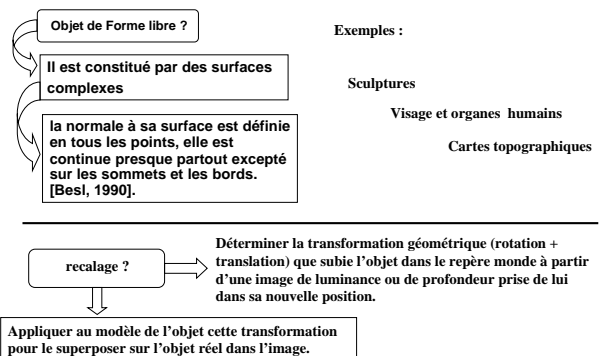
Mise en correspondance

- ◆ validation

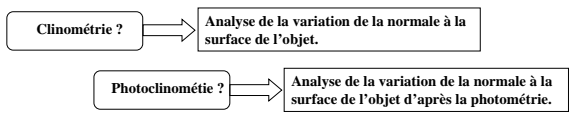
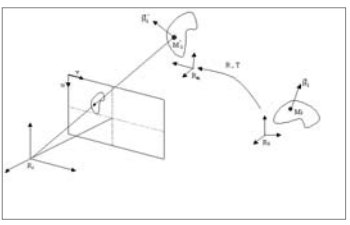


Démo. Suivi. Objet polyédrique

Objet de forme libre



Objet de forme libre – suite



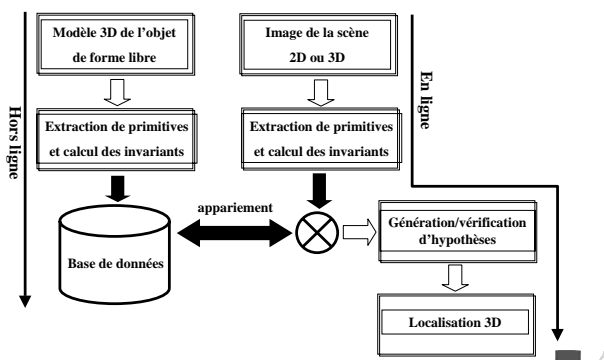
Objet de forme libre - Problématique

Mettre en œuvre des techniques de recalage automatique qui exploitent la seule information clinométrique de l'objet de forme libre afin de le localiser dans son environnement de travail quel que soit le mouvement qu'il subit.

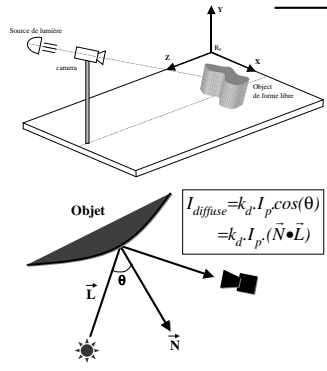
Difficultés

- Comment extraire l'information clinométrique? Mettre en œuvre un système d'acquisition adéquat
- Comment exploiter cette information afin de recalibrer l'objet sur son image ? - Définir les primitives à exploiter
 - Mettre en œuvre des algorithmes de mise en correspondance modèle/objet

Description Générale des approches élaborées



Approche photoclino-métrique



✓ Hypothèses de base

- ✓ Source de lumière directionnelle.
- ✓ Modèle de réflexion diffuse.
- ✓ Modèle géométrique → polygones maillés.



```

#verts
v -1.000000 0.130000 5.800000
v -1.000000 0.130000 5.110000
v -1.000000 0.170000 5.110000
v -0.950000 0.430000 5.610000
v -0.600000 0.430000 4.350000

#normals
vn 0.876291 0.132770 0.463327
vn 0.827341 0.242765 0.516382
vn 0.819523 0.123972 0.372972
vn 0.519292 0.877319 0.821129
vn 0.224243 0.861935 0.454734

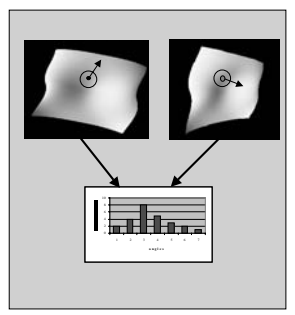
#faces
f 1 2 3
f 4 3 2
f 2 5 4
f 4 5 7
  
```

Recalage statique par clinométrie

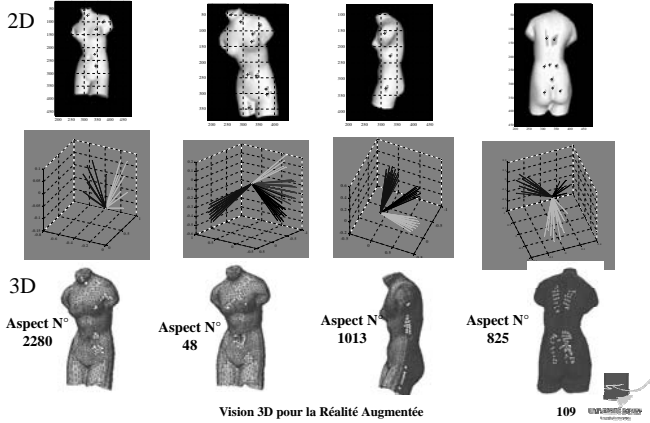
- **Hypothèses et définitions :**
 - Objet connu.
 - Un objet de forme libre (« free form object ») est un objet constitué par des surfaces complexes.
 - La normale à sa surface est définie en tous les points, elle est continue et varie d'une manière arbitraire (sculptures, visage et organes humains, cartes topographiques,...).
 - La clinométrie est la mesure des variations de la normale à la surface de l'objet.

Pourquoi la clinométrie?

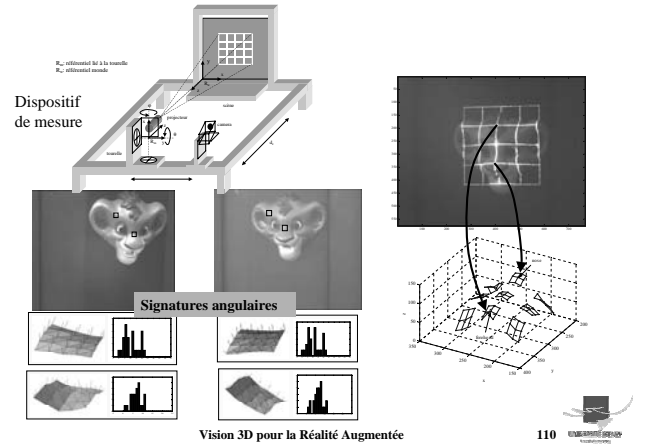
- Les variations de la normale à la surface d'un objet de forme libre est une caractéristique intrinsèque de cette surface, elles peuvent être utilisées pour identifier différentes portions de surfaces (patches) de l'objet.
- De plus, ces variations constituent un invariant géométrique et donc peuvent être utilisées pour appairer (matching) l'objet avec son modèle.



Recalage 2D/3D : Approche photométrique

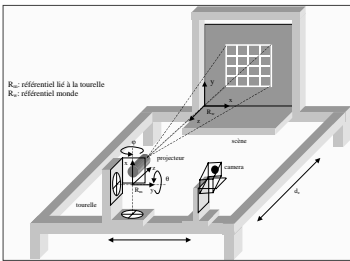


Recalage 3D/3D: Approche clinométrique



✓ Système de vision

• Capteur stéréo actif 3D



- constitué d'un projecteur de grille laser + une caméra CCD.
- primitives artificielles: facilement détectable dans l'image.
- le problème d'appariement est plus facile à résoudre.
- le temps de calculs moindres, s'apprête mieux aux applications en temps réel.

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

111

• Calibration du système de vision

• Calibration de la caméra

$$\begin{bmatrix} s.u \\ s.v \\ s \end{bmatrix} = M_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

- On utilise la grille projetée comme mire de calibration.

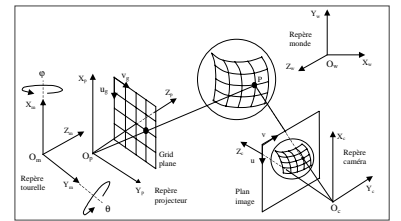
• Calibration du projecteur

pour $\varphi = \theta = 0$

$$\begin{bmatrix} t.u_g \\ t.v_g \\ t \end{bmatrix} = M_p \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

pour $\varphi \neq \theta = 0$

- seul les paramètres intrinsèques restent inchangés :



$$M_p = I_p \cdot A_p \quad \text{et} \quad A_p = \begin{pmatrix} R_{3x3} & T_{3x1} \\ 0_{1x3} & 1 \end{pmatrix}$$

- Lorsque la tourelle effectue deux rotations simultanées, θ et φ
 $R = (R_\varphi \cdot R_\theta) R$ et $T = C_{m/w} \cdot ([R_\varphi \cdot R_\theta] \cdot O_{p/m})$
- la matrice de projection du projecteur laser après rotation :

$$M_p = I_p \cdot (A_p)^{-1}$$

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

112

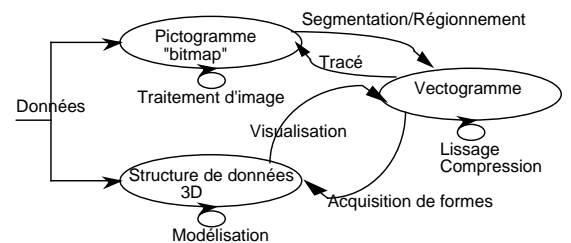
Plan de Présentation

- ◆ Introduction à la réalité augmentée
- ◆ Calibration de capteurs
- ◆ Modélisation géométrique
- ◆ Traitement d'images
- ◆ Recalage
- ◆ Reconnaissance & appariement
- ◆ Modélisation informatique de la scène

Vision 3D pour la Réalité Augmentée

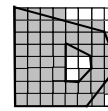
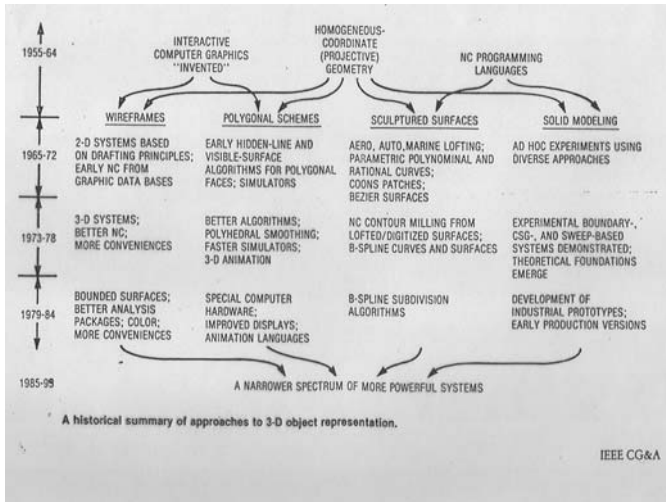
113

Transformations de l'image

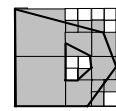


Vision 3D pour la Réalité Augmentée

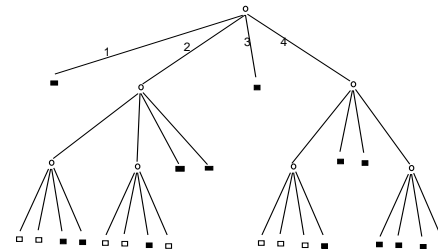
114



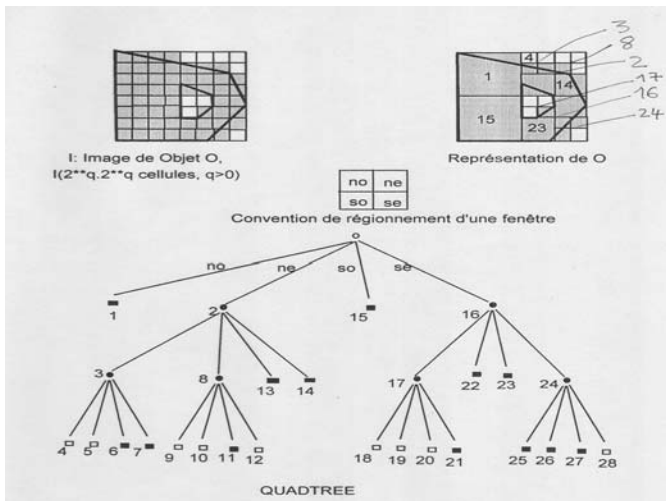
Quadtree



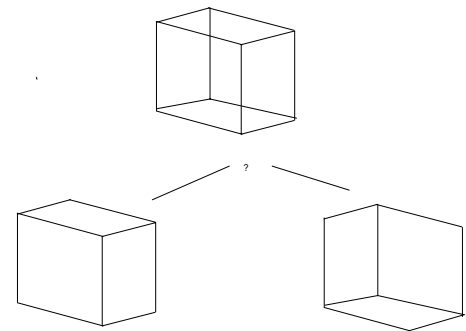
1	2
3	4



Vision 3D pour la Réalité Augmentée



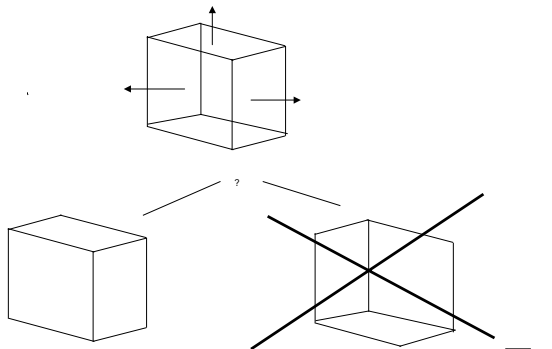
Modèle fil de fer



Vision 3D pour la Réalité Augmentée



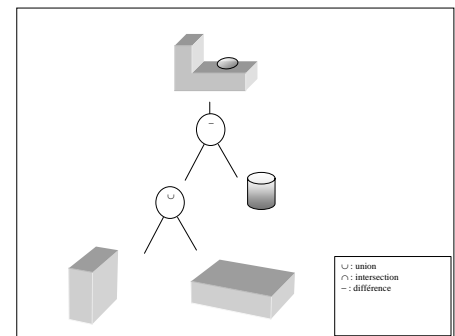
Modèle surfacique



Vision 3D pour la Réalité Augmentée

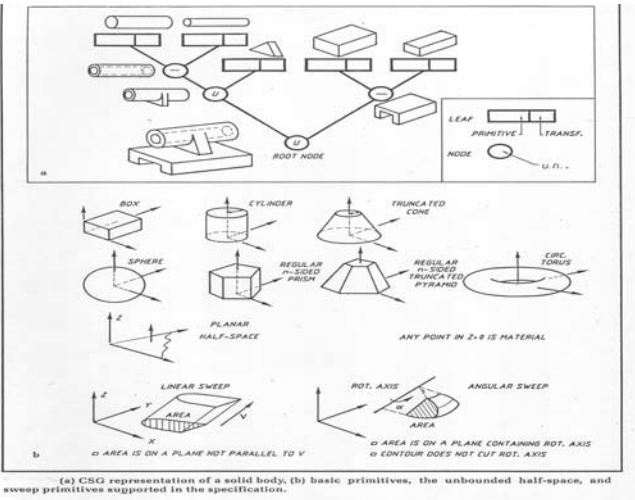


Modèle arbre de construction (CSG)

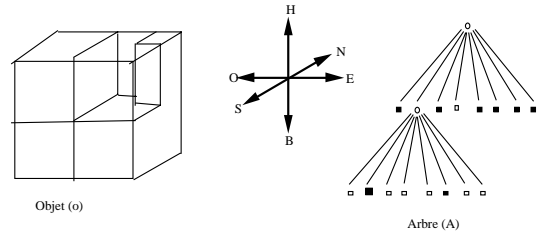


Vision 3D pour la Réalité Augmentée



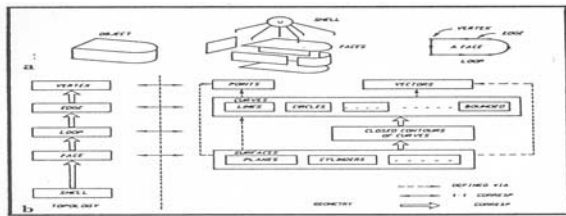


Modélisation par octree



Informiquement, un octet n'est pas représenté sous la forme d'un arbre mais par une liste. La liste de l'arbre A est :

G (N G(B G B B N B B) N B N N N N)

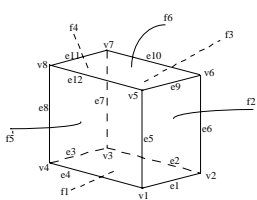


Comparaison des modèles

critères modèles	le modèle représente un objet cohérent	la représentation est unique et non ambiguë	le modèle possède un modèleur adapté	le modèle permet les calculs géométriques	l'élimination des parties cachées est réalisable	
Fil de fer	non	non	tous le sont	non	non	
Surfacique	non	non	tous le sont	non	oui peut être interactive	
V O L U M I Q U E	CSG	oui	non	oui	non	oui mais non-interactive
	Octree	oui	oui	non	oui de façon interactive	oui
	Brep	oui	oui	oui mais non-ergonomique	oui mais complexe	oui peut être interactive



Modeleur 3D, 3D



Construction (de haut en bas)

Faces extrêmes f6 et f1
 mvsl(f6,v1)
 mev(v1,v2,e1)
 mev(v2,v3,e2)
 mev(v3,v4,e3)
 mef(v1,v4,f6,f1,e4)

Faces latérales
 mev(v1,v5,e5)
 mev(v2,v6,e6)
 mev(v3,v7,e7)
 mev(v4,v8,e8)

mef(v5,v6,f6,f2,e9)
 mef(v6,v7,f6,f3,e10)
 mef(v7,v8,f6,f4,e11)
 mef(v8,v5,f6,f5,e12)

Destruction (de bas en haut)

kvsf()
 kev(e1,v2)
 kev(e2,v3)
 kev(e3,v4)
 kef(e4,f1)

kev(e5,v5)
 kev(e6,v6)
 kev(e7,v7)
 kev(e8,v8)

kef(e9,f2)
 kef(e10,f3)
 kef(e11,f4)
 kef(e12,f5)

La relation d'Euler est constamment vérifiée.

