

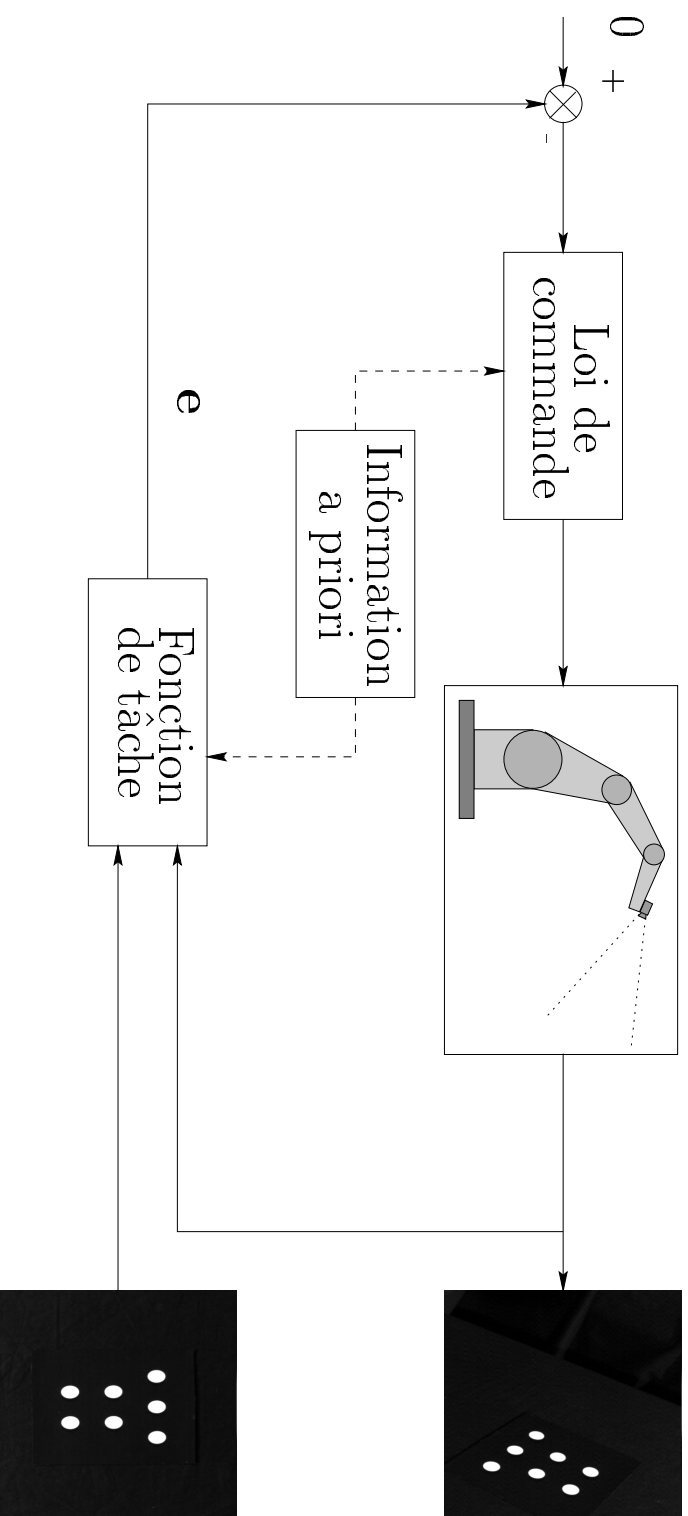
**Contributions à la modélisation et à la commande en  
asservissement visuel**

**Ezio MALLIS**

# Plan

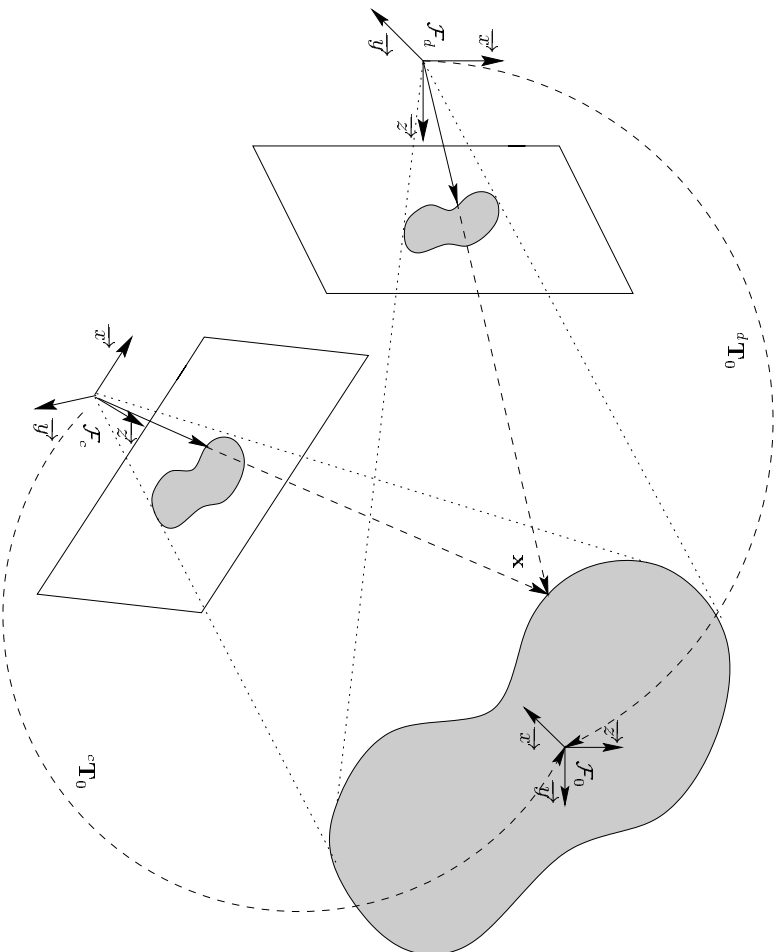
- **Introduction** ;
- Reconstruction Projective et Euclidienne ;
- Asservissement visuel mono-caméra ;
- Asservissement visuel multi-caméras ;
- Conclusion et Perspectives.

## Principe de l'asservissement visuel



- Caméra embarquée sur un robot manipulateur ;
- Informations visuelles : centres de gravité des points ;
- Objectif : positionner l'effecteur du robot ;
- Régulation à zéro d'une fonction de tâche [Samson Le Borgne Espiau 91] ;

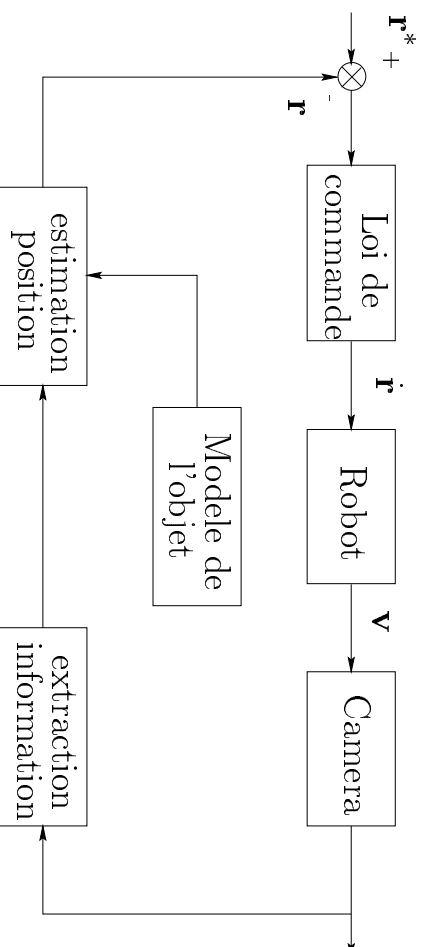
## Asservissement visuel 3D



### Principe

- contrôle direct dans l'espace cartésien : [Martinet 96] [Wilson 96] [Daucher 97] ;
- reconstruction de la position 3D  $\mathbf{r}$  : [Lowe 91] [Dementhon 95] ;
- au moins 5 points dans chaque image ;
- $\mathbf{e} = \mathbf{f}(\mathbf{r} - \mathbf{r}^*)$ .

## Asservissement visuel 3D (suite)



### Avantages

- Contrôle découplé ;
- Pas de singularités ;
- Contrôle dans l'espace cartésien.

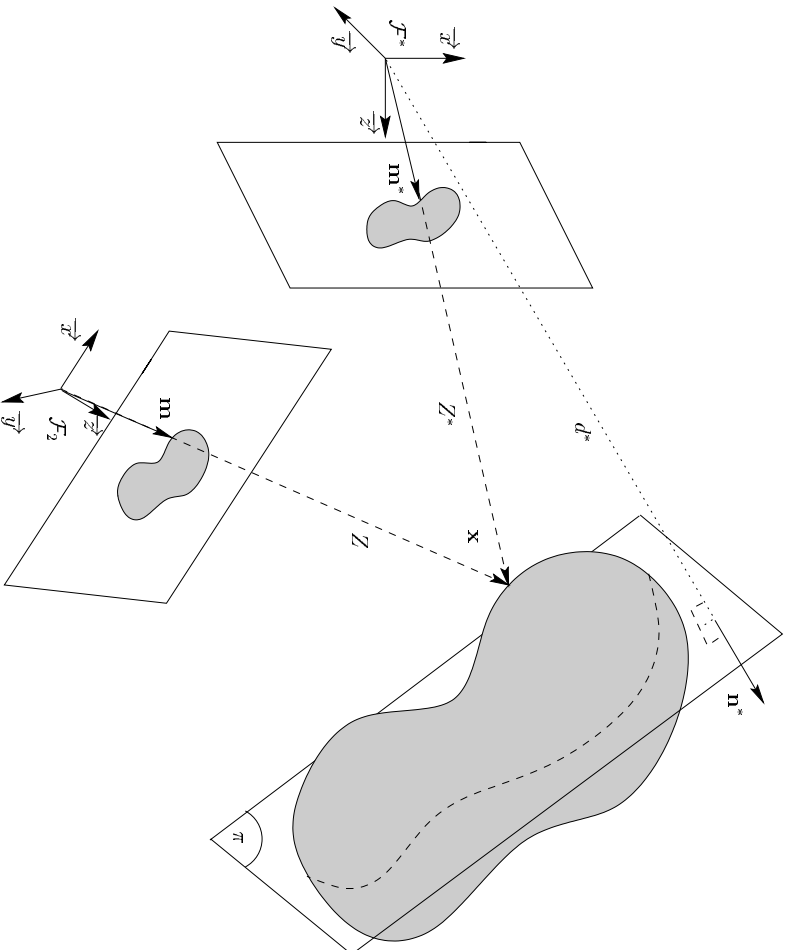
### Inconvénients

- Problèmes si grand déplacement ;
- Domaine de robustesse inconnu ;
- Pas de contrôle dans l'image ;
- Nécessite le modèle de l'objet ;
- Plus sensible aux erreurs.

## Plan

- Introduction ;
- **Reconstruction Projective et Euclidienne** ;
- Asservissement visuel mono-caméra ;
- Asservissement visuel multi-caméras ;
- Conclusion et Perspectives.

# Reconstruction à partir de deux vues d'un objet statique



## Reconstruction projective

- Matrice Fondamentale :

$$\mathbf{F} = \mathbf{A}^{-T} [\mathbf{t}]_{\times} \mathbf{R} \mathbf{A}^{-1}$$

- Matrice de Collinéation :

$$\mathbf{G} = \mathbf{A} (\mathbf{R} + \mathbf{t} \frac{\mathbf{n}^{*T}}{d^*}) \mathbf{A}^{-1}$$

## Reconstruction euclidienne

- Matrice Essentielle :

$$\mathbf{E} = [\mathbf{t}]_{\times} \mathbf{R}$$

- Matrice d'Homographie :

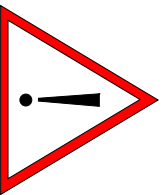
$$\mathbf{H} = (\mathbf{R} + \mathbf{t} \frac{\mathbf{n}^{*T}}{d^*})$$

## Quelle matrice estimer ?

**Matrice Essentielle :  $\mathbf{E} = [\mathbf{t}]_{\times} \mathbf{R}$**

[Longuet-Higgins81] [Deriche Zhang Luong Faugeras 94] [Hartley97]

- Relative à tous les points de l'objet ;
- Pas toujours définie :
  - si l'objet observée est plan ;
  - si  $\mathbf{t} = 0$ , rotation pure :  $\mathbf{E} = \mathbf{0}$ .



Un des objectifs de l'asservissement visuel est d'obtenir  $\mathbf{t} = \mathbf{0}$

**Matrice d'Homographie :  $\mathbf{H} = \mathbf{R} + \mathbf{t} \frac{\mathbf{n}^{*T}}{d^*}$**

[Couapel94] [Boufama95]

- Relative à un plan (virtuel) de l'objet ;
- Toujours définie :
  - si l'objet est plan ;
  - si rotation pure :  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_{\infty} = \mathbf{R}$ .



## Reconstruction Euclidienne à partir de la matrice d'homographie

- Extraction de  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{t}/d^*$  et  $\mathbf{n}^*$  [Faugeras 88] ;
- Deux couples de solutions possibles ( $\mathbf{R}_1, \mathbf{t}_1/d_1^*$  et  $\mathbf{n}_1^*$ ) et ( $\mathbf{R}_2, \mathbf{t}_2/d_2^*$  et  $\mathbf{n}_2^*$ ) :
  - si objet plan  $\Rightarrow$  connaissance à priori ;
  - si objet non plan  $\Rightarrow$  deuxième homographie ;
- Coordonnées métriques d'un point :

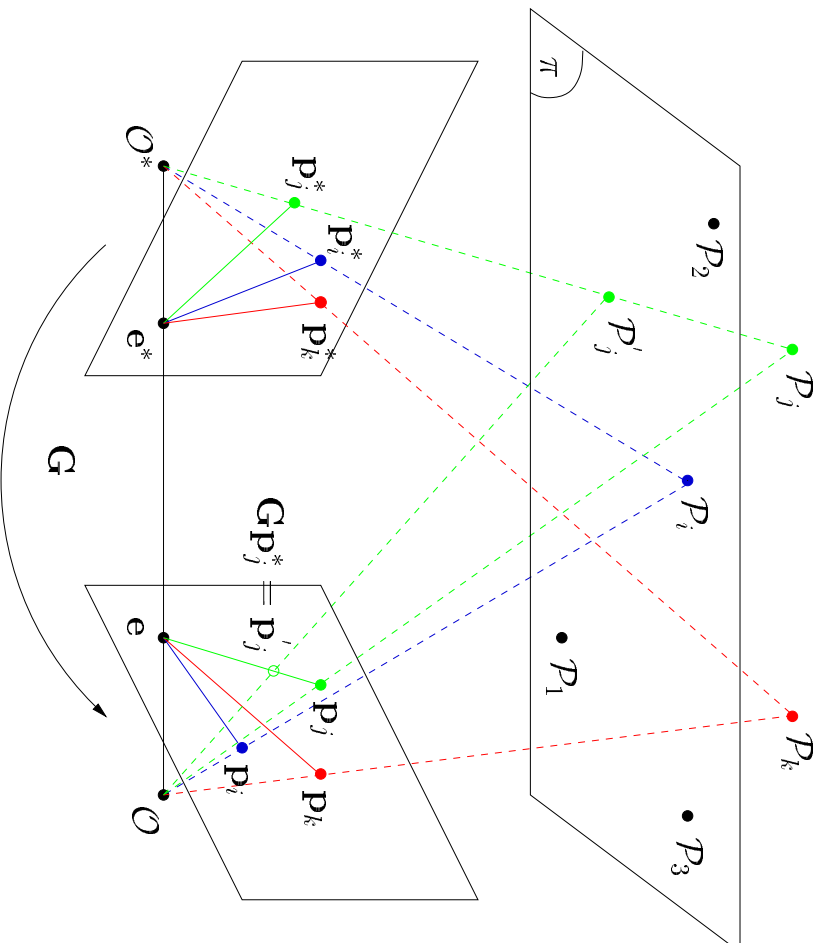
$$\mathbf{m} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{p}$$

- Profondeur d'un point à un facteur d'échelle :

$$\frac{Z}{d^*} = \frac{1 + \mathbf{n}^{*T}\mathbf{R}\frac{\mathbf{t}}{d^*}}{\mathbf{n}^T\mathbf{m}}$$

- Axe de rotation  $\mathbf{u}$  et angle de rotation  $\theta$  ;
- Si  $\hat{\mathbf{A}}$  à la place de  $\mathbf{A}$  :  $\hat{\mathbf{m}} = \hat{\mathbf{A}}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{m} = \delta\mathbf{A}\mathbf{m}$ .

## Estimation d'une matrice de collinéation



- Droite épipolaire ;

$$\mathbf{l}_j = [\mathbf{p}_j]_{\times} \mathbf{G} \mathbf{p}_j^*$$

- Trois points alignés  $\rightarrow$  matrice fondamentale :

$$\mathbf{p}_j^T \underbrace{[\mathbf{e}]_{\times} \mathbf{G}}_{\mathbf{F}} \mathbf{p}_j^* = 0$$

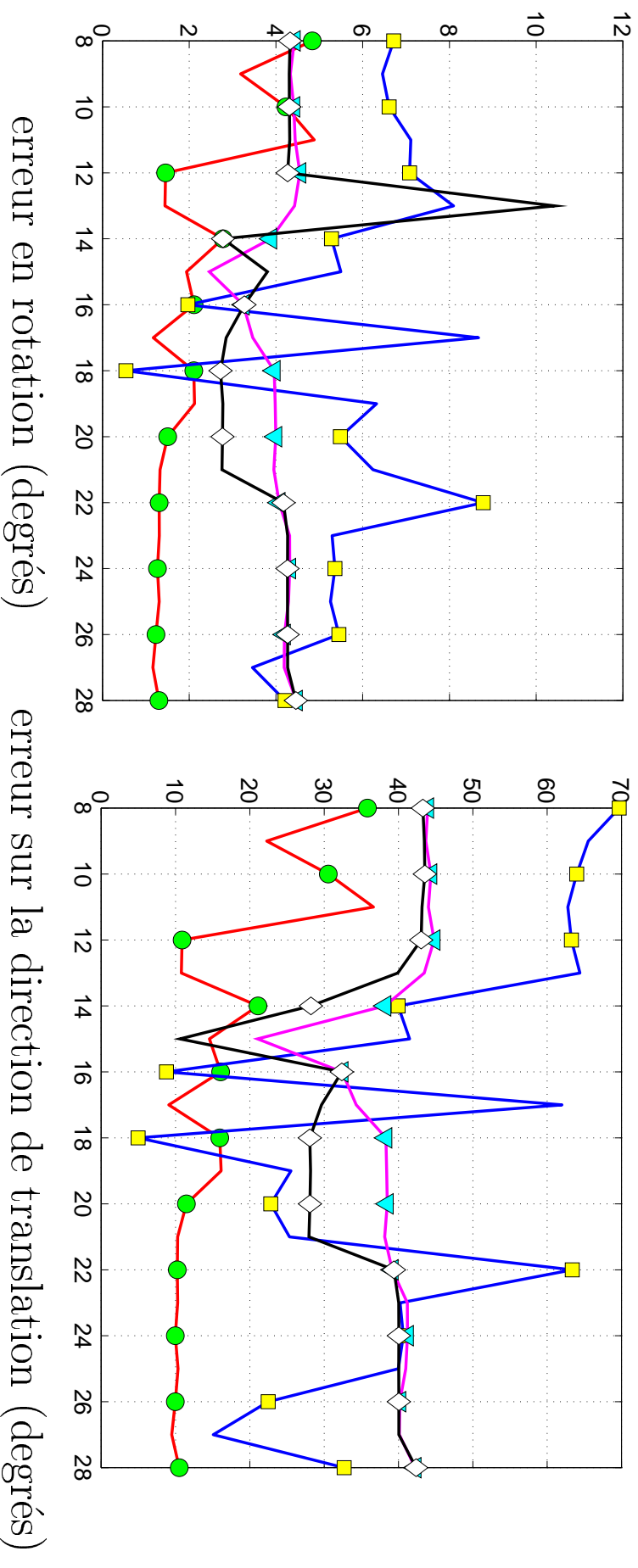
- Trois droites concurrentes  $\rightarrow$  collinéation :

$$\left| \begin{array}{ccc} [\mathbf{p}_i]_{\times} \mathbf{G} \mathbf{p}_i^* & [\mathbf{p}_j]_{\times} \mathbf{G} \mathbf{p}_j^* & [\mathbf{p}_k]_{\times} \mathbf{G} \mathbf{p}_k^* \\ \mathbf{l}_i & \mathbf{l}_j & \mathbf{l}_k \end{array} \right| = 0$$

## Algorithme “linéaire”

- Changement de coordonnées projectives à partir de  $\mathcal{P}_1$ ,  $\mathcal{P}_2$  et  $\mathcal{P}_3$  :
  - indique quelle matrice de collinéation estimer ;
  - normalise les données ;
  - simplifie les calculs car dans le nouveau repère  $\tilde{\mathbf{G}} = \text{diag}(\tilde{g}_u, \tilde{g}_v, \tilde{g}_w)$ .
- On obtient un système homogène polynomial du troisième degré ;
- Linéarisation et solution du système linéaire ;
- Réintroduction des contraintes non linéaires sur les éléments de  $\tilde{\mathbf{G}}$ .

## Résultats expérimentaux



- Méthode proposée
- ▲ [Longuet-Higgins 81] et [Hartley 97]
- ◇ [Deriche Zhang Luong Faugeras 94]
- [Boufama Mohr 95]

# Plan

- Introduction ;
- Reconstruction Projective et Euclidienne ;
- Asservissement visuel mono-caméra ;
- Asservissement visuel multi-caméras ;
- Conclusion et Perspectives.

## Asservissement visuel mono-caméra

### Asservissement visuel 2D $\frac{1}{2}$

- Fonction de tâche découplée :  $\mathbf{e} = (\mathbf{e}_v, \mathbf{e}_w)$  ;
- Erreur 2D d'un point et rapport des profondeurs pour la translation :

$$\mathbf{e}_v = \begin{bmatrix} (x - x^*) & (y - y^*) & \ln\left(\frac{Z}{Z^*}\right) \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{e}_w = \mathbf{u}\theta$$

## Jacobien de la tâche

$$\frac{de}{dt} = \underbrace{\begin{bmatrix} L_v & L_{(v,\omega)} \\ 0 & L_\omega \end{bmatrix}}_{\mathbf{L}} \underbrace{\begin{bmatrix} W_v & W_{(v,\omega)} \\ 0 & W_\omega \end{bmatrix}}_{\mathbf{W}} \frac{dr}{dt}$$

• Matrice jacobienne **triangulaire et sans singularités** dans l'espace de travail.

•  $\mathbf{L}$  dépend de  $d^*$  et  $\mathbf{A}$  ( $\det(\mathbf{L}) = \frac{1}{Z^3 \operatorname{sinc}^2(\frac{\theta}{2})}$ ) :

$$\mathbf{L}_v = d^* \frac{Z}{d^*} \begin{bmatrix} -1 & 0 & x \\ 0 & -1 & y \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_\omega = \mathbf{I} - \frac{\theta}{2} [\mathbf{u}]_{\times} + \left( 1 - \frac{\operatorname{sinc}(\theta)}{\operatorname{sinc}^2(\frac{\theta}{2})} \right) [\mathbf{u}]_{\times}^2$$

•  $\mathbf{W}$  dépend de  ${}^c\mathbf{R}_e$  et  ${}^c\mathbf{t}_e$  ( $\det(\mathbf{W}) = 1$ ) :

$$\mathbf{W}_v = {}^c\mathbf{R}_e, \quad \mathbf{W}_{(v,\omega)} = [{}^c\mathbf{t}_e]_{\times} {}^c\mathbf{R}_e, \quad \mathbf{W}_\omega = {}^c\mathbf{R}_e$$

## Loi de commande proportionnelle

- Décroissance exponentielle de la fonction de tâche :

$$\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \mathbf{e}$$

- Loi de commande :

$$\dot{\mathbf{r}} = -\lambda \underbrace{\begin{bmatrix} \widehat{\mathbf{W}}_v^{-1} & -\widehat{\mathbf{W}}_v^{-1} \widehat{\mathbf{W}}_{(v,\omega)} \widehat{\mathbf{W}}_\omega^{-1} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\widehat{\mathbf{W}}^{-1}} \underbrace{\begin{bmatrix} \widehat{\mathbf{L}}_v^{-1} & -\widehat{\mathbf{L}}_v^{-1} \widehat{\mathbf{L}}_{(v,\omega)} \widehat{\mathbf{L}}_\omega^{-1} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\widehat{\mathbf{L}}^{-1}} \widehat{\mathbf{e}}$$

- En pratique, estimations ou approximations (par exemple  $d^*$  inconnu) ;
- On souhaite que la loi de commande soit robuste aux erreurs sur tous les paramètres.

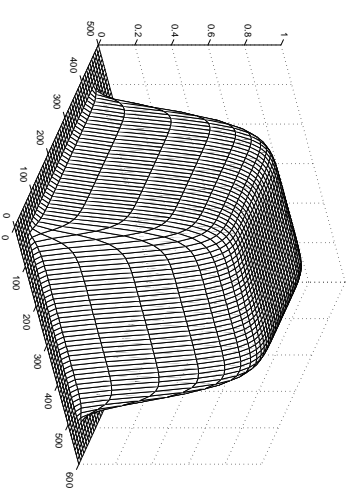


## Loi de commande robuste

- Décroissance exponentielle de la fonction de tâche mais vitesse variable :

$$\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \mathbf{D}(\mathbf{e}) \quad \mathbf{e} = -\lambda \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{D}_v & 0 \\ 0 & \mathbf{D}_w \end{bmatrix}}_{\text{diagonale}} \mathbf{e}$$

- Exemple :  $\mathbf{D}_w = \mathbf{I} f_u f_v$  (avec  $f$  fonction en “cloche”)



- Prise en compte de la contrainte  $\mathbf{e} \in \mathcal{S}$  (l'objet doit rester dans l'image) ;
- Conditions de robustesse plus larges que pour la loi proportionnelle.

## Boucle fermée et analyse de la stabilité

- fonction de tâche estimée :

$$\hat{\mathbf{e}} = \mathbf{E} \mathbf{e} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}(\delta\mathbf{A})_v & 0 \\ 0 & \mathbf{E}(\delta\mathbf{A})_w \end{bmatrix} \mathbf{e}$$

- système en boucle fermée :

$$\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \mathbf{Q}(\mathbf{e}) \mathbf{e}$$

- équation différentielle contrainte par  $\mathbf{e} \in \mathcal{S}$ .

- condition suffisante pour la décroissance de la norme de la fonction de tâche :

$$\mathbf{Q}(\mathbf{e}) > 0$$

- analyse de la stabilité en deux étapes :

- robustesse aux erreurs sur  $d^*$  et  $\mathbf{A}$  ( $\widehat{\mathbf{W}} = \mathbf{W}$ ) :

$$\mathbf{Q}(\mathbf{e}) = \mathbf{L} \widehat{\mathbf{L}}^{-1} \mathbf{E} \mathbf{D}$$

- robustesse aux erreurs sur  $d^*$ ,  $\mathbf{A}$ ,  ${}^c\mathbf{R}_e$  et  ${}^c\mathbf{t}_e$  :

$$\mathbf{Q}(\mathbf{e}) = \mathbf{L} \mathbf{W} \widehat{\mathbf{W}}^{-1} \widehat{\mathbf{L}}^{-1} \mathbf{E} \mathbf{D}$$

## Synthèse des conditions de stabilité

	erreurs caméra		erreurs caméra+effecteur	
	Proportionnelle	Robuste	Proportionnelle	Robuste
Asservissement Visuel 2D $\frac{1}{2}$				
Stabilité asymptotique locale	CNS	CNS	CS	CS
Stabilité asymptotique globale	CS	CN+S		CS

### Domaine de robustesse assez large, par exemple :

- CNS Stabilité asymptotique locale :  $\frac{\hat{\alpha}_u}{\alpha_u} > 0$ ,  $\frac{\hat{\alpha}_v}{\alpha_v} > 0$  et  $\frac{\hat{d}^*}{d^*} > 0$  ;
- CS Stabilité asymptotique globale dépend de plusieurs paramètres. Si  $d^* = 50cm$  :
  - $\hat{d}^*$  est la seule inconnue :  $12cm < \hat{d}^* < 211cm$  ;
  - $\hat{d}^*$  inconnue, erreur de 50 % sur les rapports mètres/pixels :  $30cm < \hat{d}^* < 63cm$ .

## Résultats expérimentaux : cible plane

- Robot AFMA de l'IRISA ;
- Grand déplacement initial de la caméra ;
- Commande proportionnelle ;
- Dans ce cas les asservissement visuels 2D et 3D ne convergent pas ;
- Vidéo.

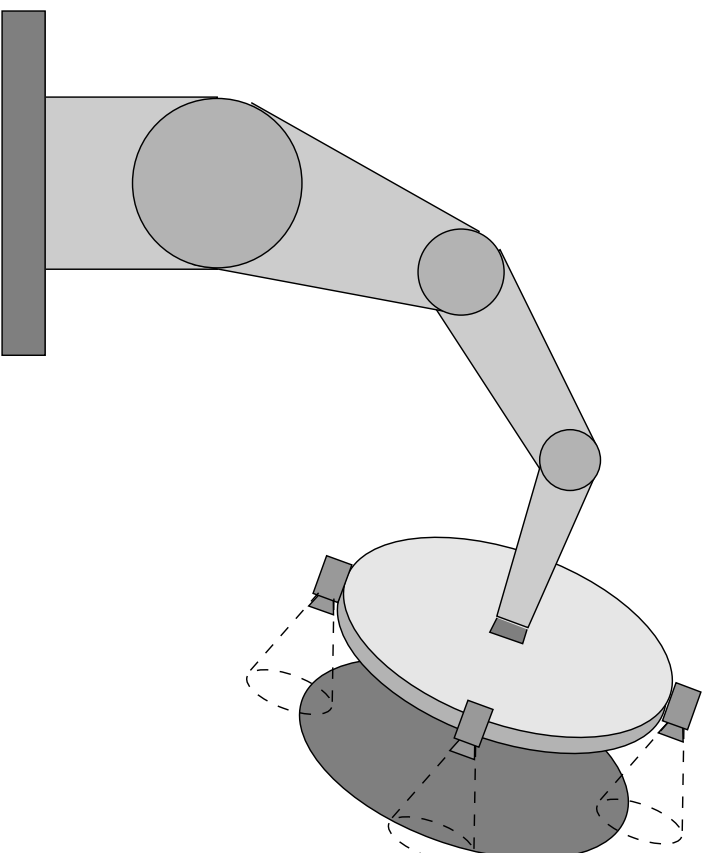
## Comparaison expérimentale entre les schémas d'asservissement

- Information nécessaire pour la modélisation :  $2D\frac{1}{2} > 2D > 3D$  ;
- Performance (temps de calcul) :  $2D > 2D\frac{1}{2} \approx 3D$  ;
- Sensibilité au bruit de mesure :  $2D > 3D > 2D\frac{1}{2}$  ;
- Comportement dynamique :  $2D\frac{1}{2} > 2D > 3D$  ;
- Robustesse aux erreurs de calibration :  $2D\frac{1}{2} > 2D > 3D$ .

## Plan

- Introduction ;
- Reconstruction Projective et Euclidienne ;
- Asservissement visuel mono-caméra ;
- Asservissement visuel multi-caméras ;
- Conclusion et Perspectives.

## Asservissement visuel multi-caméras



Pose d'un couvercle de grande taille à l'entrée du circuit primaire d'un générateur de vapeur :

- Avec une seule caméra : effet de levier ;
- Avec plusieurs caméras : cadre de la stéréo [Hager 95] [Cipolla Hollinghurst 97] [Ruf Horaud 98] impossible.

## Définition de la fonction de tâche, commande et stabilité

- fonction de tâche combinaison linéaire des fonctions de tâches relatives à chaque caméra :

$$\mathbf{e} = \sum_{i=1}^N \kappa_i \mathbf{e}_i$$

- loi de commande combinaison linéaire des lois de commande relatives à chaque caméra :

$$\mathbf{r} = -\lambda \hat{\mathbf{e}} = -\lambda \sum_{i=1}^N \kappa_i \hat{\mathbf{e}}_i = \sum_{i=1}^N \kappa_i \mathbf{r}_i$$

- condition de stabilité du système complet :

$$\sum_{i=1}^N \kappa_i \hat{\mathbf{W}}_i^{-1} \hat{\mathbf{L}}_i^{*+} \mathbf{L}_i \mathbf{W}_i > 0$$

- système complet est stable si chaque sous-système est stable :

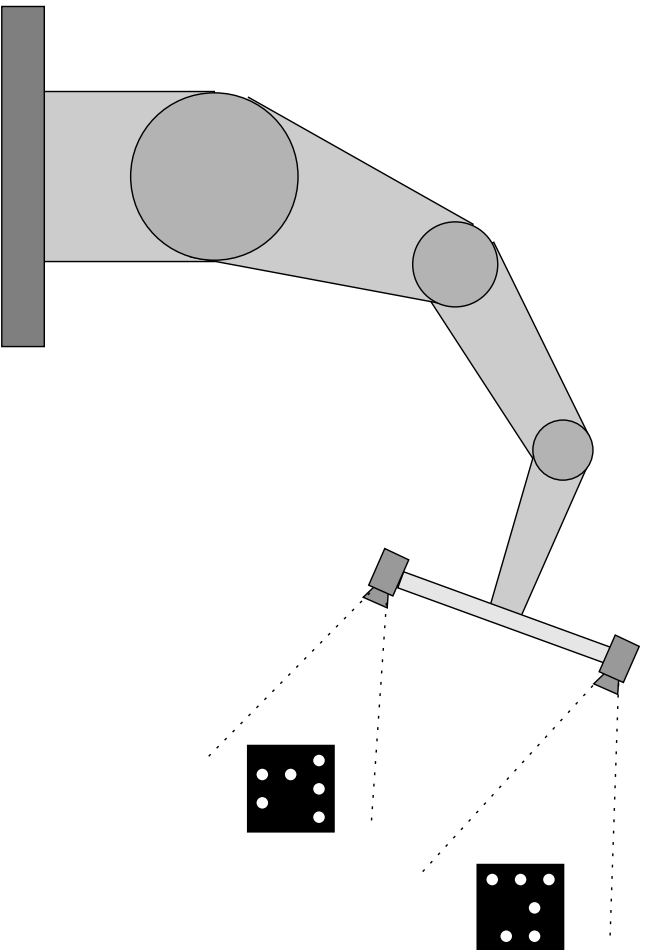
$$\hat{\mathbf{W}}_i^{-1} \hat{\mathbf{L}}_i^{*+} \mathbf{L}_i \mathbf{W}_i > 0 \quad \forall i = \{1, 2, 3, \dots, N\}$$



## Résultats expérimentaux

### Système démonstratif

- Robot PA10 de la DER-EDF ;
- Barre de 50 cm, 2kg ;
- Deux caméras Panasonic ( $f = 6mm$ ) ;
- Deux cibles différentes ;
- Acquisition asynchrone (retard 40 ms) ;
- Fréquence exécution algorithme 12 Hz ;
- Carte Edixia IA2000 ;
- Asservissements visuels 2D et 2D 1/2 ;
- Amélioration (par rapport à une seule caméra) de la norme de l'erreur en translation de 1mm ;



## Plan

- Introduction ;
- Reconstruction Projective et Euclidienne ;
- Asservissement visuel mono-caméra ;
- Asservissement visuel multi-caméras ;
- Conclusion et Perspectives.

## Conclusion

- Reconstruction projective et euclidienne ;
  - reconstruction plus stable à partir d'une matrice d'homographie ;
  - algorithme d'estimation à la cadence vidéo.
- Modélisation ;
  - **choix d'une représentation minimale et sans singularité ;**
  - **découplage de la rotation et de la translation.**
- Commande et analyse de la stabilité ;
  - lois de commande simples ;
  - démonstrations de la robustesse des lois de commande.
- Expérimentations ;
  - algorithmes validés sur le robot de l'IRISA et de la DER-EDF ;
  - comparaison expérimentale d'un très grand nombre de méthodes.

## Perspectives

- Mise en correspondance automatique ;
  - objets réels ;
  - grands déplacements de la caméra.
- Reconstruction projective ;
  - estimation de l'homographie du plan de l'infini ;
  - adaptation en ligne des paramètres.
- Planification de trajectoire ;
  - travailler aux petites erreurs ;
  - évitement des singularités et minima locaux en asservissement visuel 2D.
- Réduction de la sensibilité au bruit à la convergence :
  - amélioration de l'estimation de la matrice d'homographie ;
  - enchaînement de tâches  $2D\frac{1}{2} \rightarrow 2D$ .