Commande par vision

CHAPITRE 3 – COMMANDE PAR VISION

JACQUES.GANGLOFF@UNISTRA.FR

Plan du cours

Commande cinématique

- Commande cinématique 3D
- Commande cinématique 2D
- Stabilité

Commande dynamique

- Modélisation du robot
- Modélisation de la mesure et de la commande
- Cas 2D
- Cas 3D

Commande cinématique

Principe

Les effets de l'échantillonnage sont négligés

Les retards liés au temps de transfert de l'image et à son traitement sont négligés

Le modèle dynamique du robot est simplifié : la fonction de transfert entre consignes de vitesses articulaires et mesures de vitesses articulaires est égale à 1

Ces hypothèses sont uniquement valables pour un mouvement très lent du robot

Commande cinématique

Commande cinématique 3D

Soit e le vecteur des erreurs de pose :

$$e = p^* - p$$

avec p^* la pose désirée et p la pose courante.

Soit L_p le Jacobien analytique du robot : $\dot{e} = L_p \dot{q}$

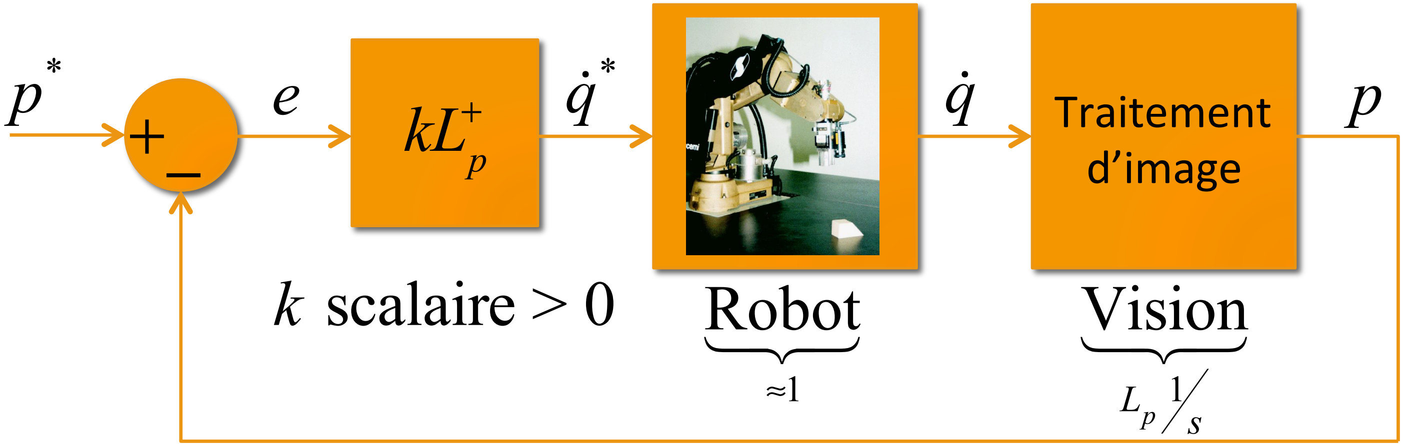
avec q les coordonnées articulaires du robot.

L'algorithme de vision fournit une mesure de p estimée à partir de coordonnées de primitives extraites de l'image et d'un modèle de la scène.

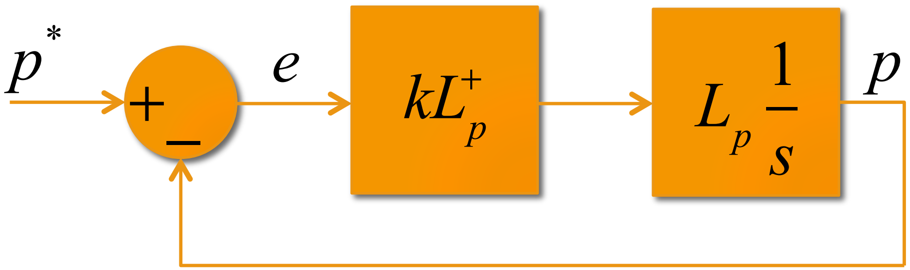
Commande cinématique

Commande cinématique 3D

Schéma-bloc :



Qui peut se mettre sous la forme :



D'où : $P(s) = \dfrac{kL_p L_p^+}{sI + kL_p L_p^+} P^*(s)$

Commande cinématique

Commande cinématique 3D

En supposant que L_p est inversible : $L_p^+ = L_p^{-1}$

$$\text{D'où : } P(s) = \frac{1}{1+k^{-1}s} P^*(s)$$

C'est une fonction de transfert du premier ordre de constante de temps k^{-1} et de gain statique 1.

La convergence de p vers p^* est donc exponentielle et k règle la vitesse de convergence.

En théorie, ce système est stable qq soit $k>0$.

Dans la pratique ce n'est évidemment pas le cas.

Commande cinématique

Commande cinématique 2D

Soit e le vecteur des erreurs de coordonnées de primitives :

$$e = F^* - F$$

avec F^* la pose désirée et F la pose courante.

Soit L_F la matrice d'interaction : $\dot{F} = L_F C_c$

avec C_c le torseur cinématique de la caméra.

L'algorithme de vision fournit une mesure de F.

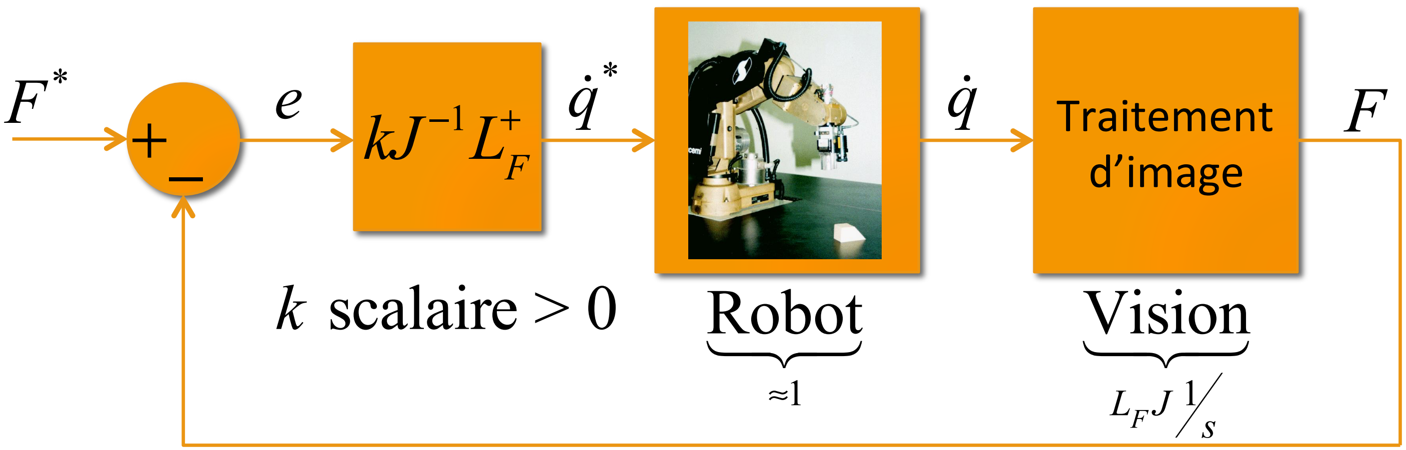
Soit J le Jacobien géométrique du robot exprimé dans le repère caméra :

$$C_c = J\dot{q} \Rightarrow \dot{F} = L_F J\dot{q}$$

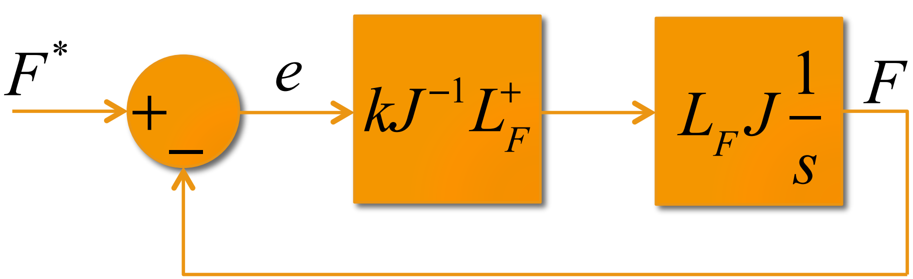
Commande cinématique

Commande cinématique 2D

Schéma-bloc :



Qui peut se mettre sous la forme :



$$\Rightarrow F(s) = \frac{kJL_F L_F^+ J^{-1}}{sI + kJL_F L_F^+ J^{-1}} F^*(s)$$

Commande cinématique

Commande cinématique 2D

En supposant que L_F est inversible : $L_F^+ = L_F^{-1}$

$$\text{D'où : } F(s) = \frac{1}{1 + k^{-1}s} F^*(s)$$

C'est une fonction de transfert du premier ordre de constante de temps k^{-1} et de gain statique 1.

La convergence de F vers F^* est donc exponentielle et k règle la vitesse de convergence.

En théorie, ce système est stable qq soit $k>0$.

Dans la pratique ce n'est évidemment pas le cas.

Commande cinématique

Commande cinématique 2D : exemple

Soit une commande par vision réalisant un suivi d'une cible constituée de 3 points avec une configuration caméra embarquée.

On apprend la consigne F^* en amenant la caméra à la position désirée par rapport à l'objet.

Dans cette position les points de l'objet sont tous à une distance approximative de Z^* le long de l'axe optique.

Soit L_F la matrice d'interaction calculée en utilisant les primitives courantes F.

Commande cinématique

Commande cinématique 2D : exemple

On a (voir chapitre 2) :

$$L_F = \begin{pmatrix} -\frac{G_x}{Z^*} & 0 & \frac{x_1}{Z^*} & \frac{x_1 y_1}{G_y} & -\frac{G_x^2 + x_1^2}{G_x} & \frac{y_1 G_x}{G_y} \\ 0 & -\frac{G_y}{Z^*} & \frac{y_1}{Z^*} & \frac{G_y^2 + y_1^2}{G_y} & -\frac{x_1 y_1}{G_x} & -\frac{x_1 G_y}{G_x} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{G_x}{Z^*} & 0 & \frac{x_3}{Z^*} & \frac{x_3 y_3}{G_y} & -\frac{G_x^2 + x_3^2}{G_x} & \frac{y_3 G_x}{G_y} \\ 0 & -\frac{G_y}{Z^*} & \frac{y_3}{Z^*} & \frac{G_y^2 + y_3^2}{G_y} & -\frac{x_n y_3}{G_x} & -\frac{x_3 G_y}{G_x} \end{pmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \vdots \\ x_3 \\ y_3 \end{bmatrix}$$

Commande cinématique

Commande cinématique 2D : exemple

En toute rigueur L_F devrait être calculée en utilisant les profondeurs Z_i de chaque point de la cible (voir expression exacte de L_F au chapitre 2).

En substituant aux Z_i une valeur approchée Z^* on commet une erreur de gain sur les translations de la boucle de vision. En théorie, cette erreur ne compromet pas la stabilité.

La matrice L_F est de dimension 3×3. A moins d'être dans une configuration singulière (deux points confondus dans l'image par exemple), elle est inversible.

Commande cinématique

Commande cinématique 2D : exercice

Pour l'exemple traité, calculer $F(t)$, l'expression en fonction du temps des coordonnées de F sachant qu'à $t=0$ les coordonnées initiales sont égales à :

$$ {}^{0}F = \begin{bmatrix} {}^{0}x_1 & {}^{0}y_1 & \cdots & {}^{0}x_3 & {}^{0}y_3 \end{bmatrix}^T $$

Quelle trajectoire décrit les 3 points dans l'image ?

Est-ce que la trajectoire est la même avec 4 points ?

Commande cinématique

Commande cinématique 2D : exercice

On a :

avec $\Gamma(t)$ un échelon unitaire. La solution de cette équation différentielle du premier ordre est :

En posant :

$$F^* = \begin{bmatrix} {}^*x_1 & {}^*y_1 & \cdots & {}^*x_3 & {}^*y_3 \end{bmatrix}^T$$

Commande cinématique

Commande cinématique 2D : exercice

On obtient :

Commande cinématique

Commande cinématique 2D : exercice

On obtient :

Commande cinématique

Commande cinématique 2D : exercice

Dans le cas où on a plus de 3 points :

avec :

or :

Les trajectoires ne sont pas des droites dans l'image.

Commande cinématique

Stabilité

3D :

$L_p L_p^+$ doit être symétrique définie positive

$\Rightarrow$ ses valeurs propres sont réelles positives

$\Rightarrow$ les pôles de la FTBF sont réels négatifs

2D :

$J L_F L_F^+ J^{-1}$ doit être symétrique définie positive

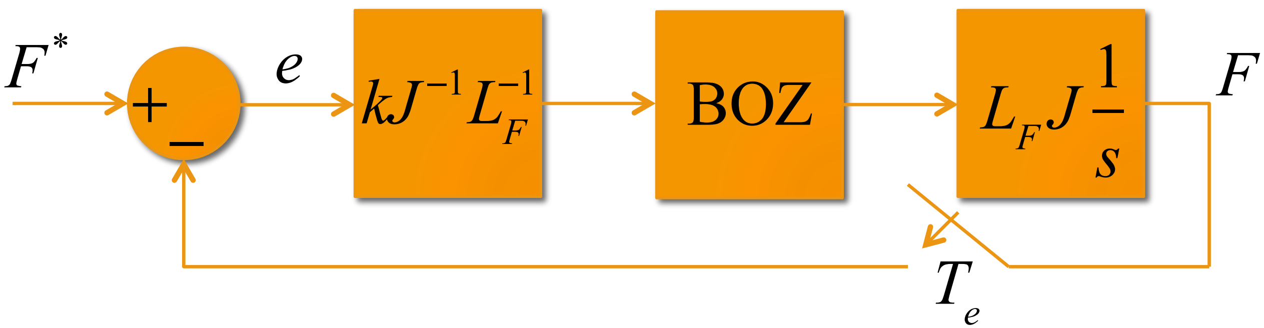
Valable en théorie quelque soit k positif.

Commande cinématique

Effet de l'échantillonnage

Prenons le cas d'une commande 2D avec : $L_F^+ = L_F^{-1}$

Dans ce cas, en tenant compte de l'échantillonnage :



On a (association BOZ + système continu) :

Commande cinématique

Effet de l'échantillonnage

D'où :

On obtient donc pour la FTBF :

Commande cinématique

Effet de l'échantillonnage

La FTBF est stable à condition que le pôle $(1\text{-}kT_e)$ soit à l'intérieur du cercle unité. Soit :

$$-1 < 1 - kT_e < 1 \Leftrightarrow -2 < -kT_e < 0 \Leftrightarrow 0 < k < \frac{2}{T_e}$$

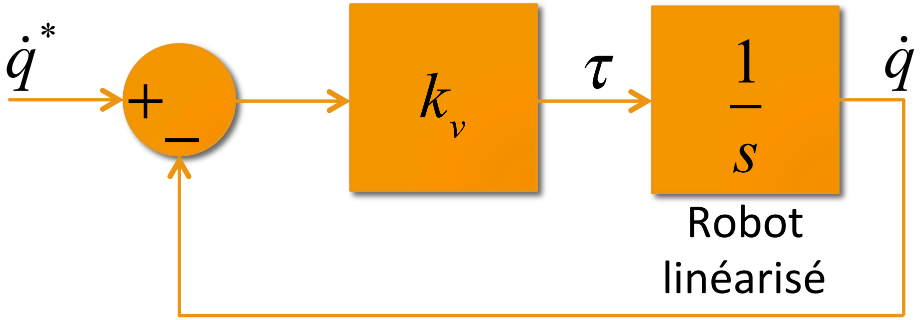
Donc si par exemple la fréquence de la caméra est de $25Hz$, le gain maximum sera de 50. Cela, sans même tenir compte des inévitables retards et des dynamiques mécaniques du robot.

Conclusion : les hypothèses de la commande cinématique sont très restrictives.

Commande dynamique

Modélisation du robot

Soit un robot commandé par découplage non linéaire (voir chapitre 5 du cours de robotique) :



Comme la fréquence de la commande numérique du robot est habituellement très supérieure à celle de la boucle de vision, on considère que celle-ci est continue.

Commande dynamique

Modélisation du robot

On obtient donc la FT du robot linéarisé commandé en vitesse :

$$Q(s) = \frac{k_v}{s + k_v} Q^*(s)$$

Le gain k_v permet de régler la constante de temps de cet asservissement.

Le fait d'asservir la vitesse articulaire permet aussi d'être plus robuste aux erreurs de modélisation qui affectent le découplage non linéaire.

Commande dynamique

Modélisation de la mesure et de la commande

On considère que la durée d'ouverture de la caméra correspond à la période d'une image. Dans ce cas (voir fin du chapitre 1), la fonction de transfert de la caméra est :

$$\frac{1+z^{-1}}{2}$$

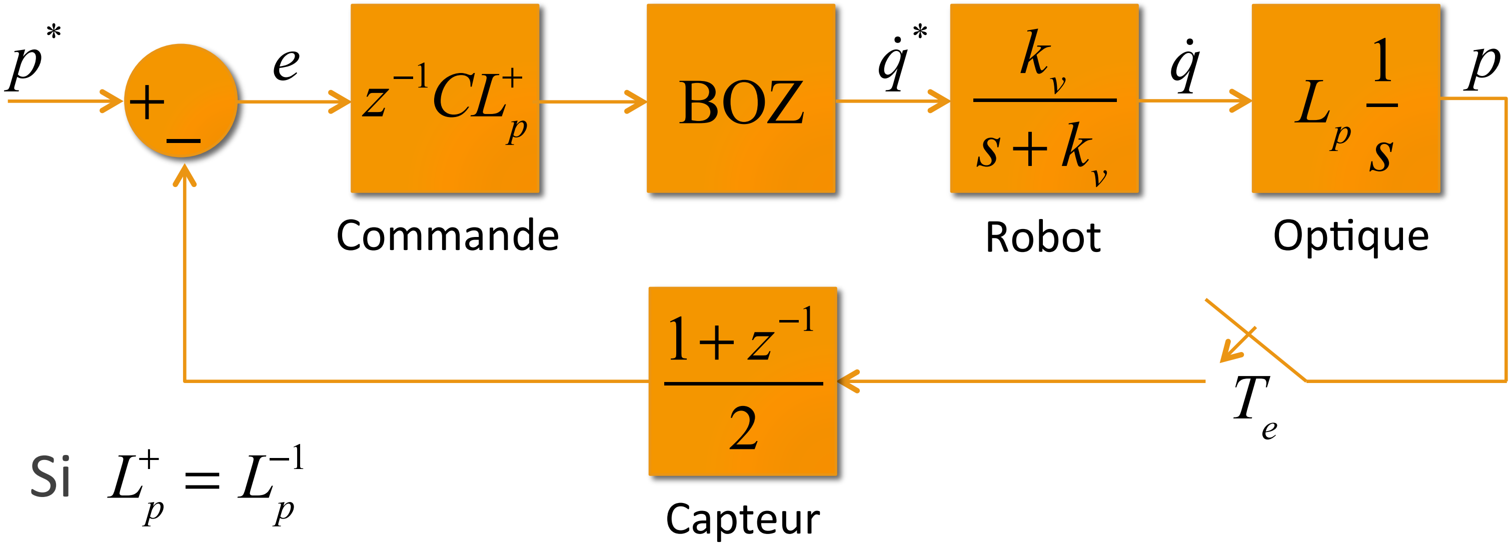
Si on suppose une architecture de traitement de type « à la volée » ou « parallèle », le traitement d'image et le calcul de la commande engendrent un retard pur d'au moins une période modélisé par :

$$z^{-1}$$

Commande dynamique

Cas 3D

On a :



Si $L_p^+ = L_p^{-1}$

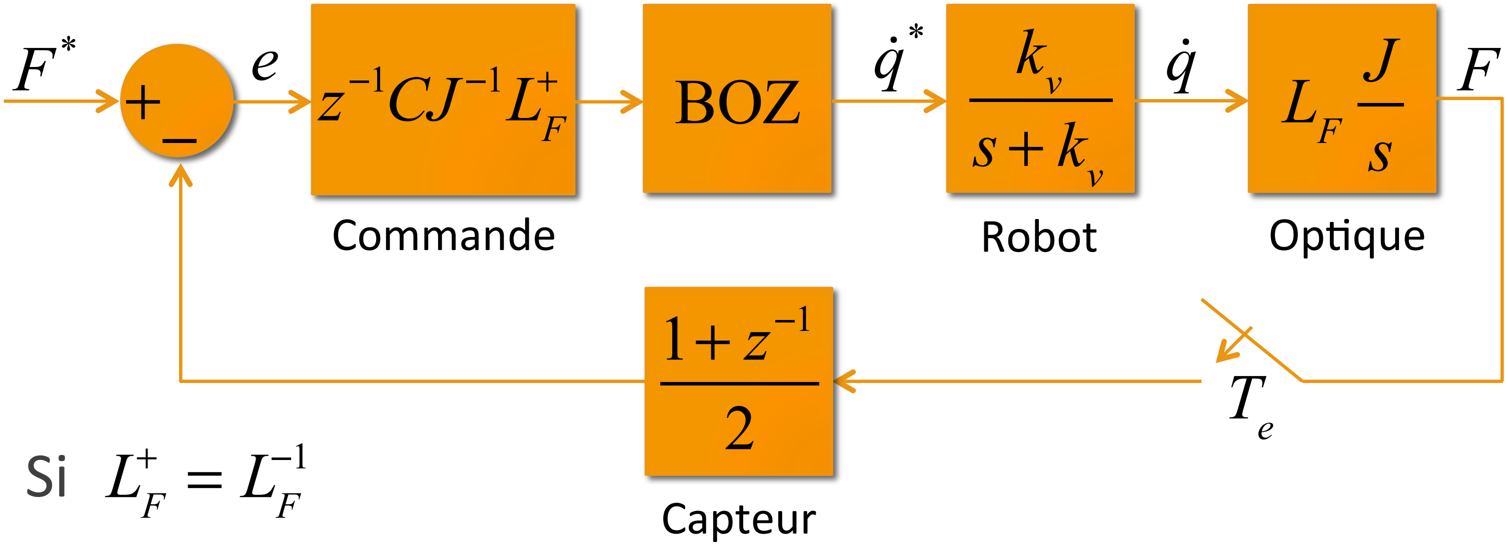
Alors :

$$P(z) = \frac{CG(z)}{1+CG(z)} P^*(z) \text{ avec } G(z) = 0.5z^{-1}\left(1-z^{-2}\right) Z\left\{\frac{k_v}{s^2\left(s+k_v\right)}\right\}$$

Commande dynamique

Cas 2D

On a :



Si $L_F^+ = L_F^{-1}$

Alors :

$$F(z) = \frac{CG(z)}{1+CG(z)} F^*(z) \text{ avec } G(z) = 0.5z^{-1}\left(1-z^{-2}\right)Z\left\{\frac{k_v}{s^2\left(s+k_v\right)}\right\}$$

Commande dynamique

Conclusions

Lorsque la dimension du vecteur de mesure est égale à celle du vecteur de commande, le système est découplé et tous les termes ont la même fonction de transfert.

Lorsque le système est découplé, il se ramène à plusieurs système SISO linéaires qui peuvent être asservis avec le même correcteur série $C(z)$.

Le correcteur peut être plus complexe qu'un simple gain (comme dans le cas cinématique) et peut être synthétisé à partir du modèle dynamique de la FTBO (placement de pôles, RST, commande prédictive, …).