



ROBOTIQUE

-ELE4203-

Cours #10: Vision artificielle: techniques et applications (partie 2)

Enseignant: Jean-Philippe Roberge



Cours #10

- ◆ Présentation du *robot de la semaine*

- ◆ *La main robotique ultra-rapide*

- ◆ Retour sur les notions du cours #9:

- ◆ Pourquoi est-ce que la vision est importante en robotique?

- ◆ Introduction et discussion sur la manière de représenter une image

- ◆ Introduction à différentes techniques de traitement d'images

- ◆ Le rôle de l'éclairage

Cours #10

- ◆ Retour sur les notions du cours #9 (suite)
 - ◆ Notions de traitement de bas niveau
 - ◆ Relations entre pixels: voisinage et distance
 - ◆ Correction d'histogramme (nb pixels / niveau d'intensité)
 - ◆ Étirement, décalage, inversion, seuillage, etc...
 - ◆ Seuillage automatique à l'aide d'Otsu
 - ◆ Traitement du bruit de type poivre et sel
 - ◆ Application de masque

Cours #10

- ◆ Cours #10: Traitement de haut niveau
 - ◆ Segmentation en régions
 - ◆ Classification des objets
 - ◆ Méthode des moments
 - ◆ Comparaison avec un patron et corrélation
 - ◆ Analyse des contours
 - ◆ Transformation de Hough

Cours #10

- ◆ **Cours #10: Traitement de haut niveau (suite)**

- ◆ Modélisation de la caméra

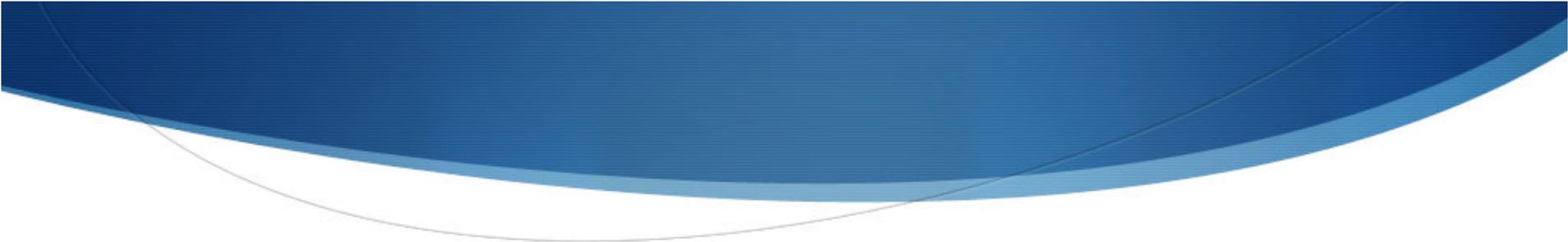
- ◆ Modèle de projection orthogonale

- ◆ Modèle du trou d'épingle

- ◆ **Présentation d'un intérêt:**

- ◆ Robots chirurgicaux

- ◆ **Exercices**



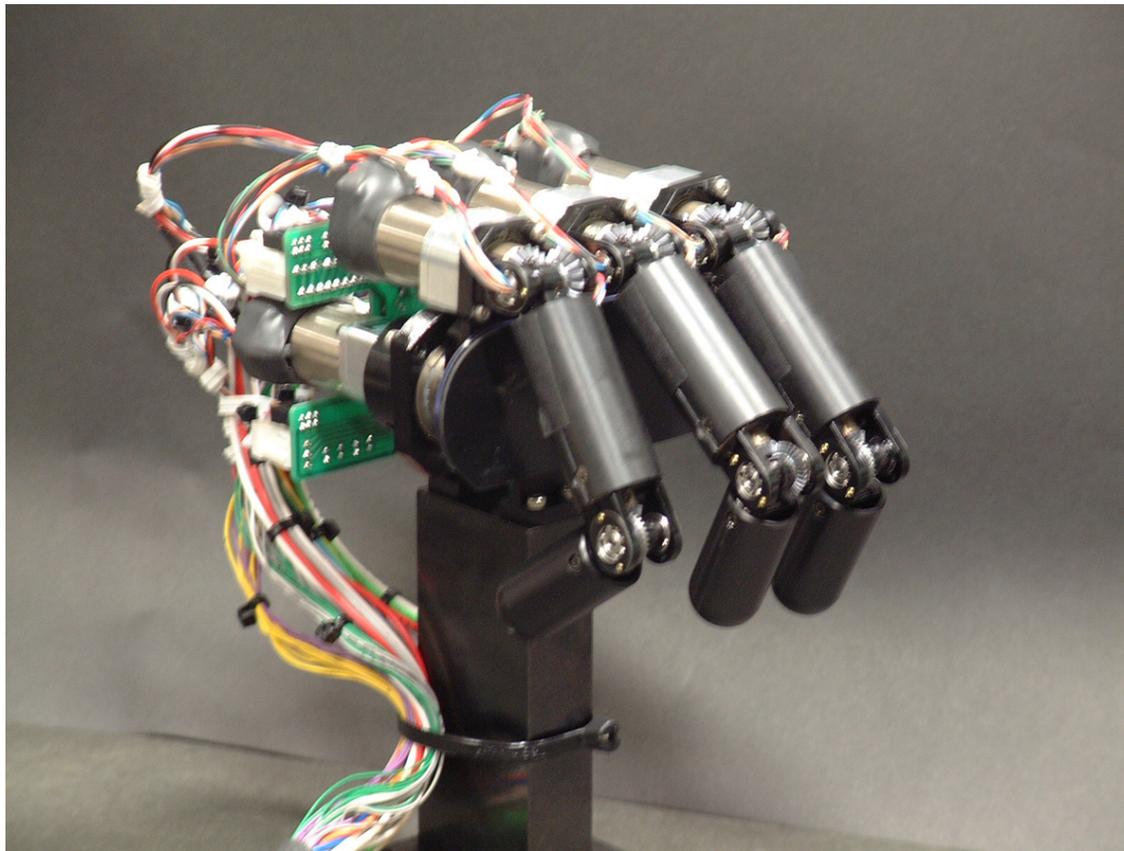
Présentation du robot de la semaine:

Ishikawa Komuro Lab's high-speed robot hand

Cours #10

Robot de la semaine

Il s'agit plutôt de l'*outil* de la semaine:



C:\Users\
e\Desktop\High-Sr

Bref retour sur le cours #9 (1)

Introduction à la vision

- ◆ **En général, pourquoi ayons-nous recours à la vision artificielle?**
 - ◆ En général on peut noter deux grandes catégories d'applications:
 - ◆ L'amélioration de l'information pictorale pour l'interprétation des images par les humains.
 - ◆ Le traitement des données d'image pour le stockage, la transmission et/ou la représentation de l'environnement pour des systèmes autonomes.

“One picture is worth more than ten thousand words”.

- ◆ **Pourquoi enseigner la vision artificielle dans un cours de robotique?**
 - ◆ Lorsqu'un robot interagit avec l'environnement, ce dernier doit être capable de percevoir son environnement.
 - ◆ La vision artificielle au sens large constitue l'un des moyens de perception des plus puissants qu'il existe actuellement.
- ◆ **Dans ce cours, nous présenterons une introduction à quelques techniques inhérentes au traitement d'images.**

Bref retour sur le cours #9 (2)

Introduction à la vision

- ◆ Tout d'abord, qu'est-ce que le traitement d'image?



- ◆ Tout d'abord, qu'est-ce que le traitement d'image?

- ◆ Une image (représentée en tons de gris) peut être définie comme une fonction multivariable :

$$I(x, y)$$

- ◆ Où x et y sont simplement les coordonnées (planaires) de chaque élément qui constitue l'image, et l'amplitude de I pour chaque paire (x, y) est l'*intensité* ou le *niveau de gris* de l'image à ce point.

Bref retour sur le cours #9 (3)

Introduction à la vision

◆ Autres notions:

- ◆ Effet de la résolution:



résolution originale



pixel 2× original



pixel 4× original



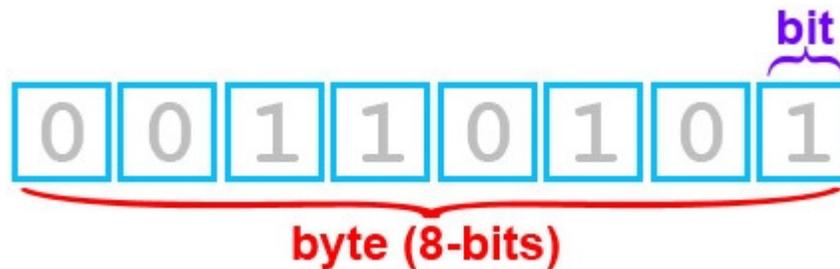
pixel 8× original

Bref retour sur le cours #9 (4)

Introduction à la vision

◆ Autres notions (suite):

- ◆ L'intensité de l'image *réelle* sera donc discrétisée en surface, étant donnée que celle-ci sera constituée de pixels.
- ◆ L'intensité sera aussi discrétisée par sa représentation en bits (nombre binaire).



Souvent, on considérera une image numérique en tons de gris représentés en 1-byte (8 bits): $2^8 = 256$ niveaux de représentation de gris possibles (0 à 255).

| Decimal pattern (Hex Value) | Binary numbers |
|-----------------------------|----------------|
| 0 | 0 |
| 1 | 1 |
| 2 | 10 |
| 3 | 11 |
| 4 | 100 |
| 5 | 101 |
| 6 | 110 |
| 7 | 111 |
| 8 | 1000 |
| 9 | 1001 |
| 10 - (A) | 1010 |
| 11 - (B) | 1011 |
| 12 - (C) | 1100 |
| 13 - (D) | 1101 |
| 14 - (E) | 1110 |
| 15 - (F) | 1111 |
| 16 - (10) | 10000 |

Bref retour sur le cours #9 (5)

Introduction à la vision

◆ Autres notions (suite):

◆ Effet du nombre de bits:

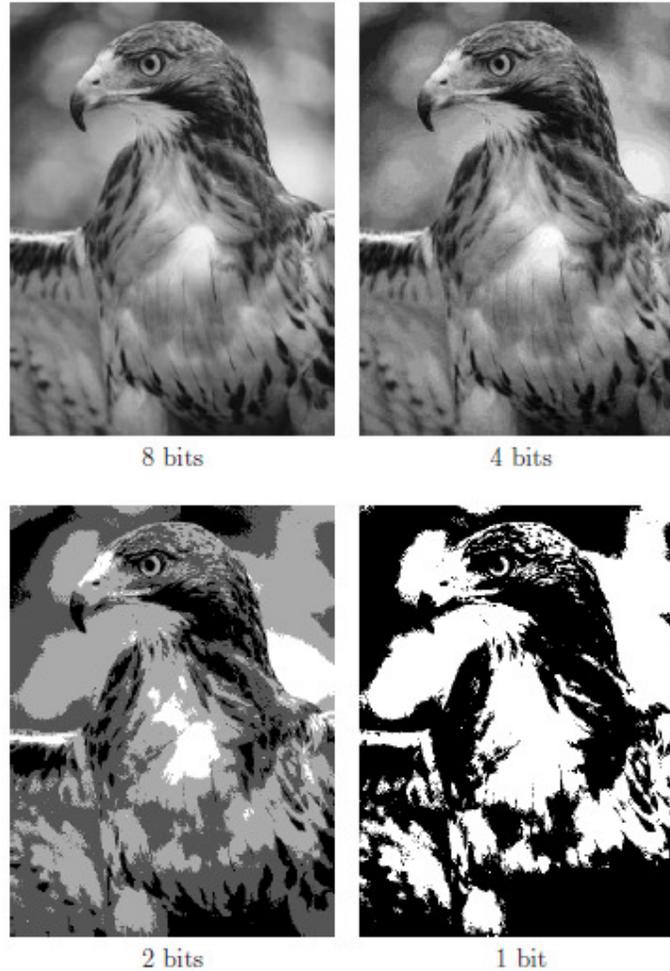


FIG. 1.3 – Influence du nombre de bits pour les niveaux de gris

Bref retour sur le cours #9 (6)

Éclairage

Éclairage:

- ◆ Dépendamment des opérations que vous désirez effectuer, vous devrez choisir un **éclairage** approprié. Ici, on présente quatre techniques d'éclairage:
 - ◆ L'éclairage **diffus** utilisé pour les objets lisses ayant des surfaces régulières
 - ◆ L'éclairage **direct** utilisé souvent pour détecter des défauts de surface.

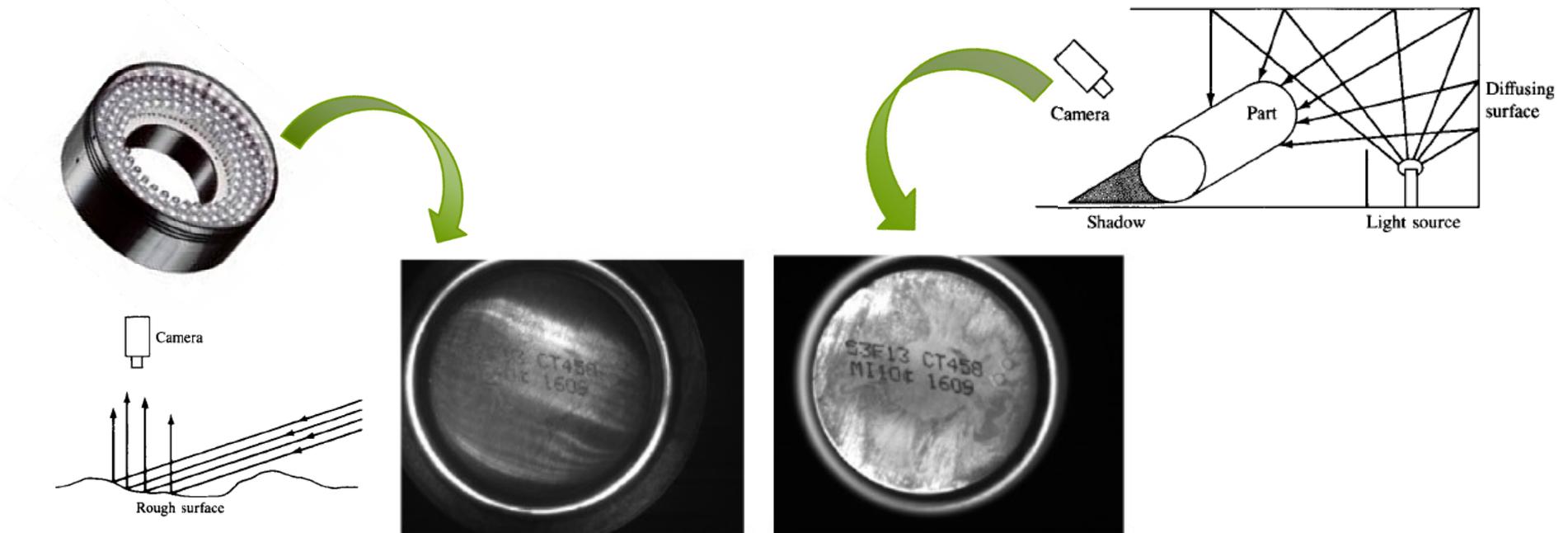


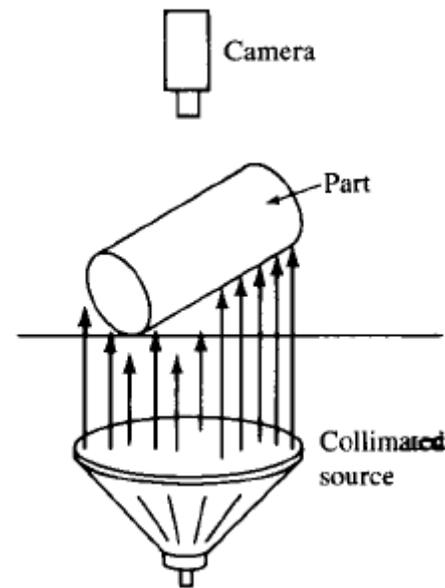
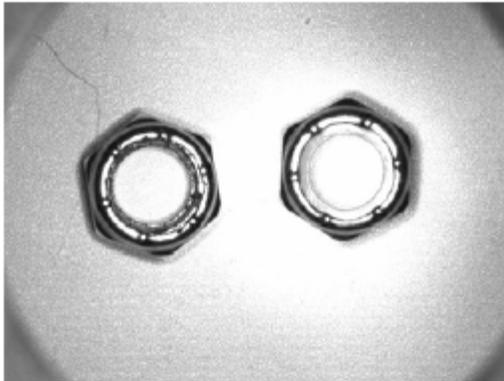
Fig. 6 – Bottom of a soda can. Left: illuminated with a bright field ring light, but shows poor contrast, uneven lighting, and specular reflections. Right: imaged with diffuse light, creating an even background allowing the code to be read.

Bref retour sur le cours #9 (7)

Éclairage

◆ Éclairage (suite):

- ◆ Dépendamment des opérations que vous désirez effectuer, vous devrez choisir un éclairage approprié. Ici, on présente quatre techniques d'éclairage:
 - ◆ L'éclairage **arrière** qui permet de bien générer des images en noir et blanc

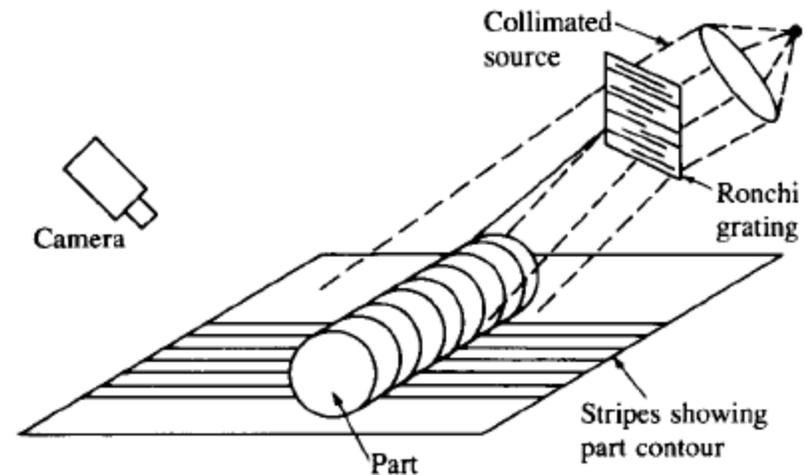
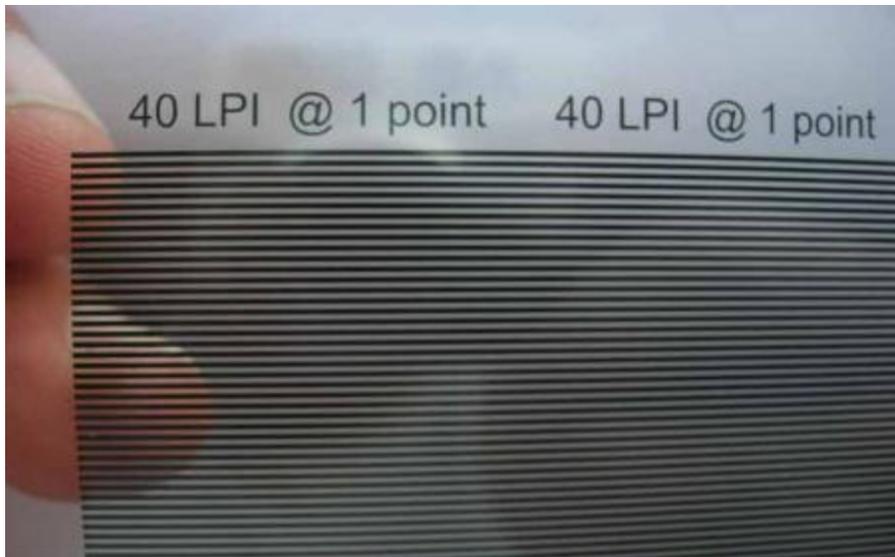


Bref retour sur le cours #9 (8)

Éclairage

◆ Éclairage (suite):

- ◆ Dépendamment des opérations que vous désirez effectuer, vous devrez choisir un éclairage approprié. Ici, on présente quatre techniques d'éclairage:
 - ◆ L'éclairage **structuré** par bande ou par grille. La déformation du patron permet d'identifier les caractéristiques de l'objet.

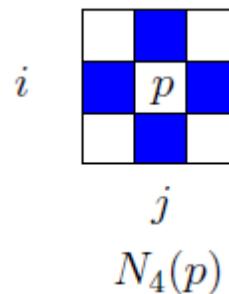


Bref retour sur le cours #9 (9)

Relations entre les pixels

- Avant d'entrer dans le coeur du traitement de bas niveau, commençons tout d'abord par étudier deux des caractéristiques que possèdent les pixels entre eux: le voisinage et la distance.
- Voisinage:
 - Un pixel p possède 4 voisins horizontaux et verticaux, appelés les 4-voisins de p et notés N_4 :

$$(i + 1, j) \quad (i - 1, j) \quad (i, j + 1) \quad (i, j - 1)$$



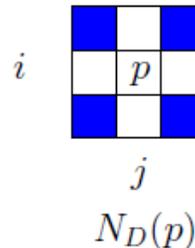
Bref retour sur le cours #9 (10)

Relations entre les pixels

◆ Voisinage:

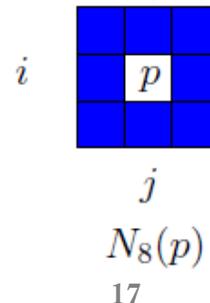
- ◆ Le pixel p possède aussi 4 voisins diagonaux, notés N_D :

$$(i + 1, j + 1) \quad (i + 1, j - 1) \quad (i - 1, j + 1) \quad (i - 1, j - 1)$$



- ◆ On peut aussi parler des 8 voisins de p , constitué des 4-voisins de p en plus des voisins diagonaux de p :

$$N_8(p) = N_4(p) \cup N_D(p)$$



Bref retour sur le cours #9 (11)

Relations entre les pixels

Distance entre les pixels:

Considérons les pixels p , q et z de coordonnées (i, j) , (s, t) et (u, v) respectivement, nous appelons D une fonction de distance si:

1. $D(p, q) \geq 0$ avec $D(p, q) = 0$ ssi $p = q$
2. $D(p, q) = D(q, p)$
3. $D(p, z) \leq D(p, q) + D(q, z)$

Distance euclidienne:

$$D_e(p, q) = \sqrt{(i - s)^2 + (j - t)^2}$$

Dans le domaine
des $D_e \leq 3$:

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & & & 3 & & \\
 & & & & \sqrt{8} & \sqrt{5} & 2 & \sqrt{5} & \sqrt{8} \\
 & & & & \sqrt{5} & \sqrt{2} & 1 & \sqrt{2} & \sqrt{5} \\
 3 & 2 & 1 & 0 & 1 & 2 & 3 & & \\
 & & & & \sqrt{5} & \sqrt{2} & 1 & \sqrt{2} & \sqrt{5} \\
 & & & & \sqrt{8} & \sqrt{5} & 2 & \sqrt{5} & \sqrt{8} \\
 & & & & 3 & & & &
 \end{array}$$

Bref retour sur le cours #9 (12)

Relations entre les pixels

- Distance entre les pixels (suite):

- La distance D_4 ou *city-blocks* est donnée par:

$$D_4(p, q) = |i - s| + |j - t|$$

Dans le domaine
des $D_4 \leq 2$:

$$\begin{array}{ccccc} & & 2 & & \\ & & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 0 & 1 & 2 \\ & & 2 & 1 & 2 \\ & & & & 2 \end{array}$$

- La distance D_8 ou *chess-board* est donnée par:

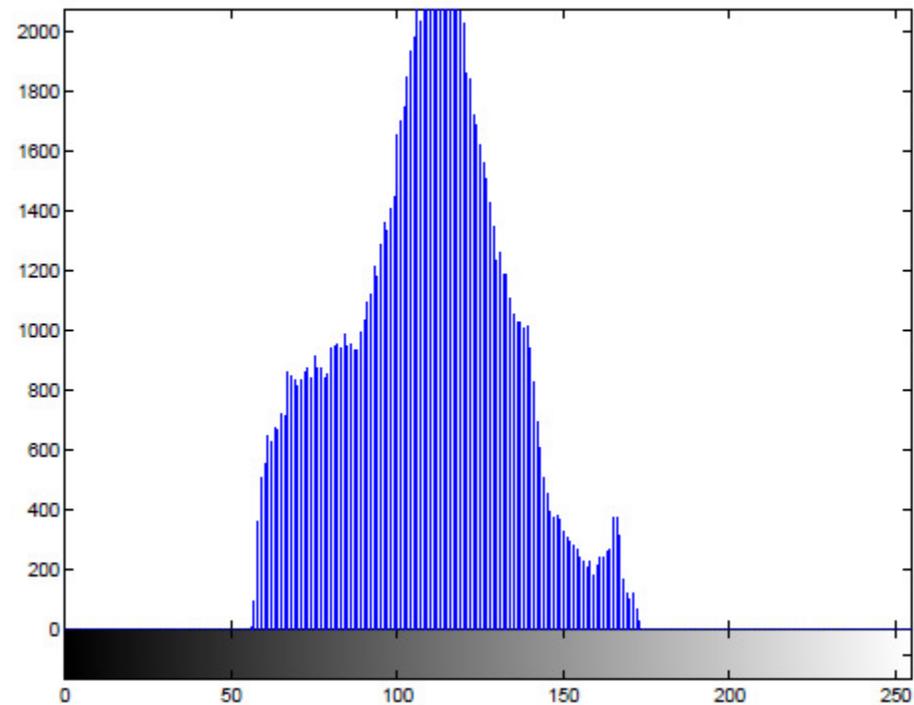
$$D_8(p, q) = \max(|i - s|, |j - t|)$$

Dans le domaine
des $D_8 \leq 2$:

$$\begin{array}{ccccc} 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 0 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{array}$$

Bref retour sur le cours #9 (13) Correction d'histogramme

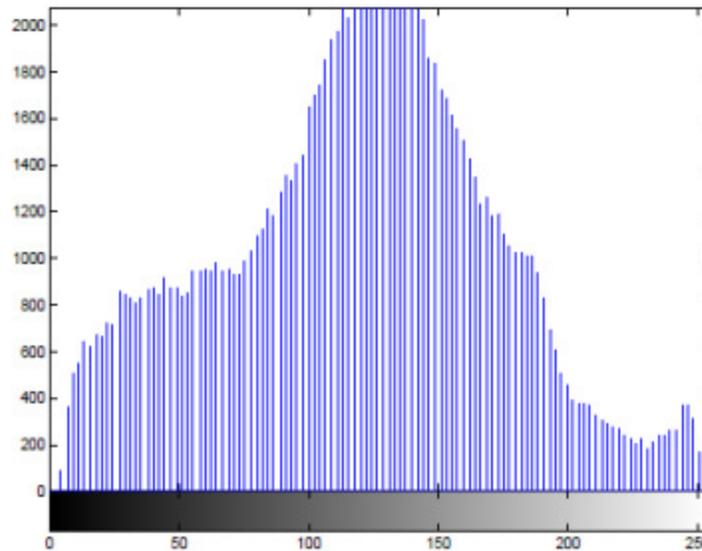
- ◆ Considérez la paire image-histogramme suivante:



- ◆ Il y a peu de nuances au niveau des tons de gris et cela se voit autant au niveau de l'histogramme qu'au niveau de l'image.

Bref retour sur le cours #9 (14) Correction d'histogramme

- Il est possible de retrouver une image plus claire en augmentant le contraste:



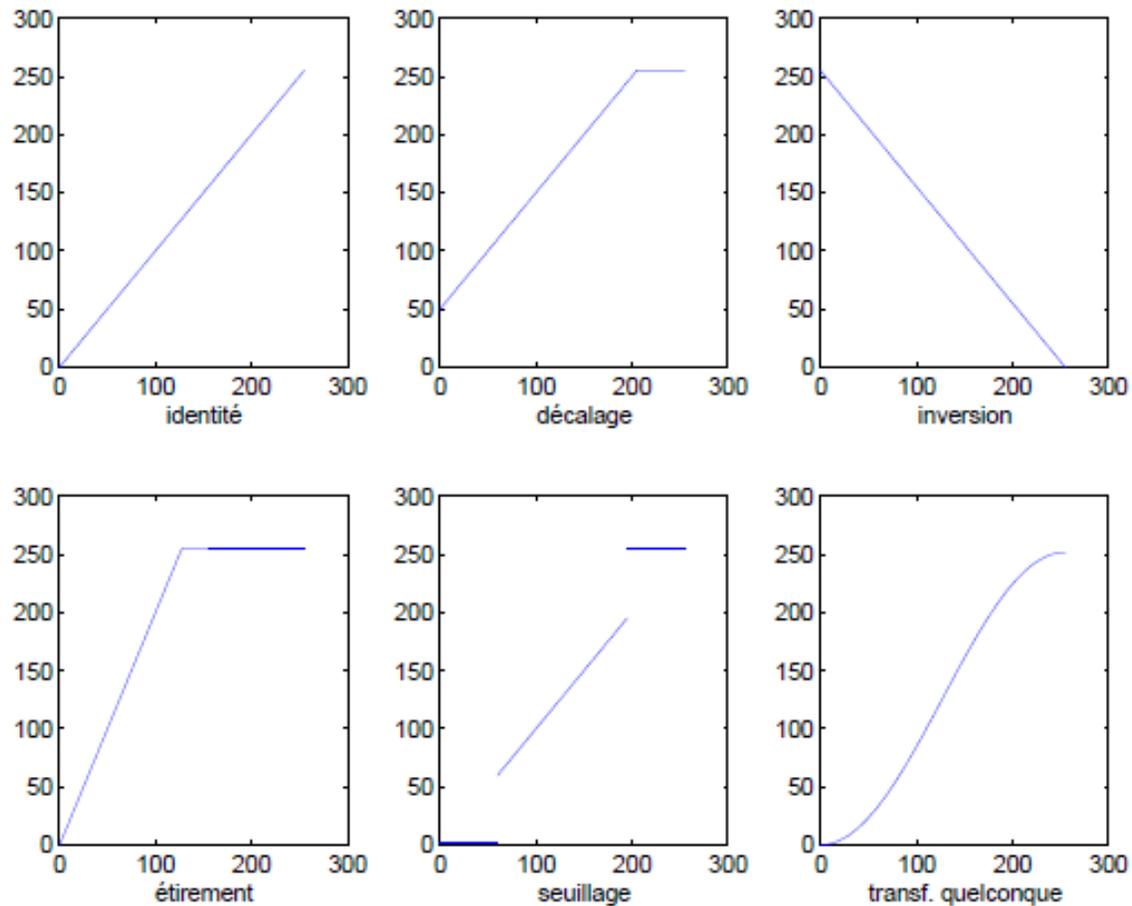
- Il suffit d'effectuer une *transformation* afin d'augmenter le contraste. Dans ce cas-ci, il s'agissait d'un *décalage* et d'un *étirement* qui se traduisent par:

$$I' = (I - 55) \frac{255}{170 - 55}$$

Bref retour sur le cours #9 (15)

Correction d'histogramme

- Autres types de transformation d'histogramme:



Bref retour sur le cours #9 (16)

Correction d'histogramme : seuillage

◆ Seuillage par histogramme

◆ Considérons cette image et son histogramme:

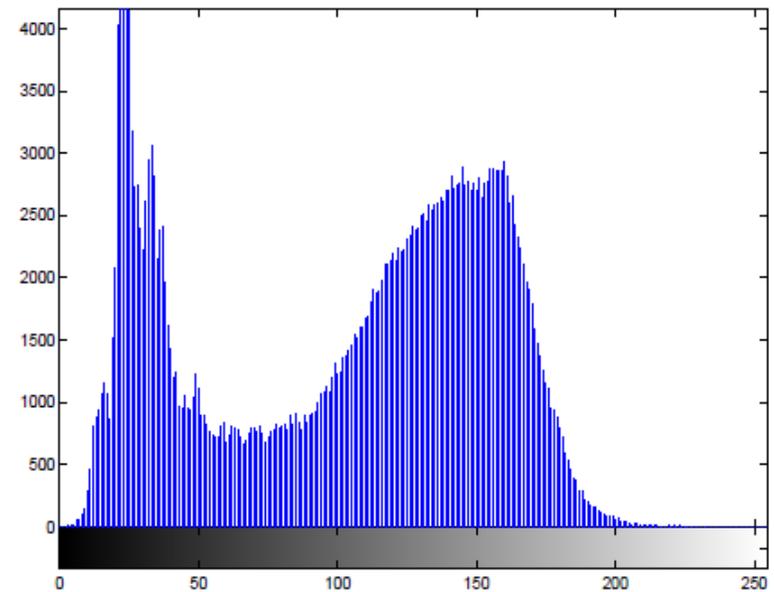


FIG. 2.8 – Histogramme d'une image avant le seuillage

◆ On observe que la distribution d'intensité possède deux modes!

Bref retour sur le cours #9 (17)

Correction d'histogramme: La méthode d'Otsu

- “L'idée derrière la méthode d'Otsu est de trouver un seuil t créant deux groupes dont les variances pondérées sont les plus petites possible.”

- Donc on veut minimiser ceci:

$$\sigma_w^2(t) = q_1(t) \sigma_1^2(t) + q_2(t) \sigma_2^2(t)$$

- Avec:

$$q_1(t) = \sum_{i=1}^t P(i) \quad q_2(t) = \sum_{i=t+1}^I P(i) = 1 - q_1(t)$$

- On pourrait donc utiliser simplement ces équations et trouver la valeur de t qui minimise la variance $\sigma_w^2(t)$ de manière itérative.
- Il existe tout de même une manière plus efficace.

Bref retour sur le cours #9 (18)

Correction d'histogramme: La méthode d'Otsu

- En effet, puisque Otsu a démontré que minimiser:

$$\sigma_w^2(t) = q_1(t)\sigma_1^2(t) + q_2(t)\sigma_2^2(t)$$

- Revient à maximiser:

$$\sigma_b^2 = q_1(t)[1 - q_1(t)][\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2$$

- Avec $\mu_1(t)$ la moyenne du groupe 1 et $\mu_2(t)$ la moyenne du groupe 2:

$$\mu_1(t) = \frac{\sum_{i=0}^t iP(i)}{q_1(t)}$$
$$\mu_2(t) = \frac{\sum_{i=t+1}^{255} iP(i)}{q_2(t)}$$

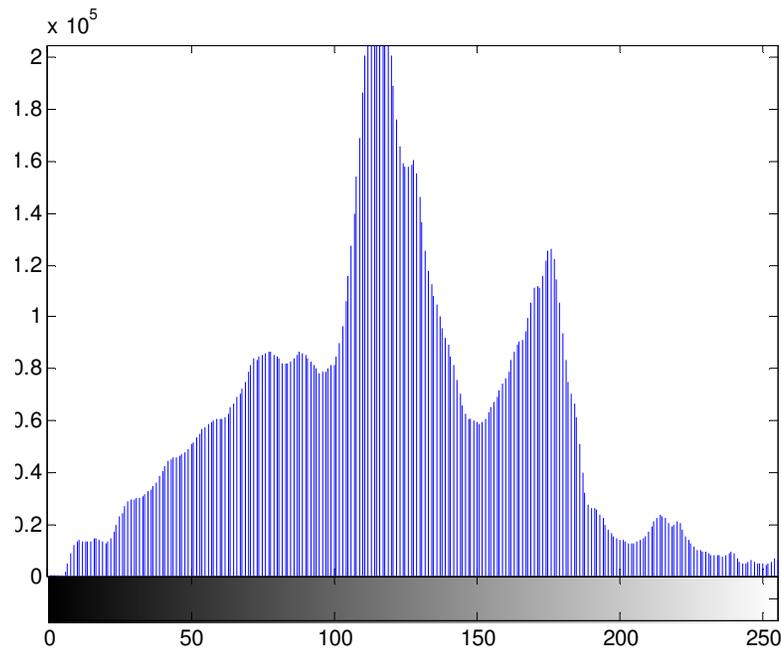
Bref retour sur le cours #9 (19) Correction d'histogramme: seuillage

- ◆ Dans certains cas, le seuillage peut donner de très bons résultats:



Bref retour sur le cours #9 (20) Correction d'histogramme: seuillage

- Alors que d'autres fois, les résultats peuvent être plus compliqués à interpréter:



Bref retour sur le cours #9

Correction d'histogramme: La méthode d'Otsu (3)

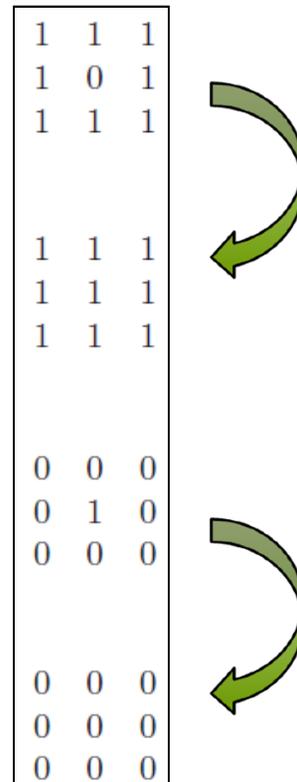


FIG. 2.10 – Image binaire après seuillage : méthode de Otsu

Bref retour sur le cours #9 (21) Traitement du bruit poivre et sel

- On peut réussir ceci à l'aide de masques d'opérateurs logique basés sur les voisins N_4 ou N_8 :

$$I'(i, j) = I(i, j) + [I(i, j + 1) \cdot I(i - 1, j) \cdot I(i + 1, j) \cdot I(i, j - 1)]$$



Bref retour sur le cours #9 (22)

Application de masques

- ◆ Nous venons d'introduire la notion de *masque* pour traiter les images affectée de bruit de type poivre et sel.
- ◆ Un masque est un opérateur sur l'intensité I d'un pixel p permettant de calculer une nouvelle intensité I' en fonction de l'intensité de p et de ses voisins. Un masque peut être de dimension $n \times n$.
- ◆ Forme général d'un masque (ici, 3x3):

$$\begin{aligned} I'(i, j) = & w_1 I(i-1, j+1) + w_2 I(i, j+1) + w_3 I(i+1, j+1) \\ & + w_4 I(i-1, j) + w_5 I(i, j) + w_6 I(i+1, j) \\ & + w_7 I(i-1, j-1) + w_8 I(i, j-1) + w_9 I(i, j+1) \end{aligned}$$

| | | |
|-------|-------|-------|
| w_1 | w_2 | w_3 |
| w_4 | w_5 | w_6 |
| w_7 | w_8 | w_9 |

Bref retour sur le cours #9 (23)

Application de masques

◆ Détection d'arrêtes par gradient:

- ◆ Pour détecter les arrêtes dans une image, on peut dériver partiellement l'intensité en x et en y en utilisant un filtre approprié:

$$\left(\frac{\partial I}{\partial x}\right) \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}$$

- ◆ Cependant, le filtre ci-dessus sera très sensible au bruit, on peut donc utiliser la moyenne des gradients:

$$\left(\frac{\partial I}{\partial x}\right) \quad \longrightarrow \quad \text{ou} \quad \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline -2 & 0 & 2 \\ \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}$$

- ◆ Remarque:

- ◆ On a qu'a transposer ces gradients pour obtenir l'information dans le sens

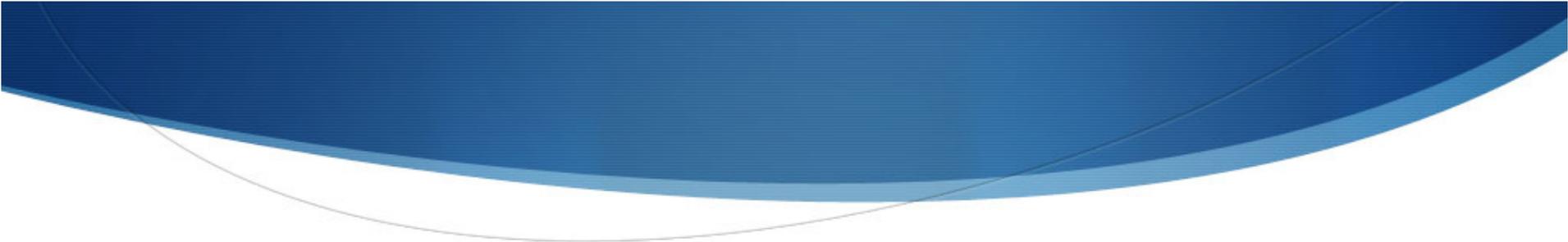
horizontal: $\left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)$

Bref retour sur le cours #9 (24)

Application de masques

- Le gradient total et sa direction sont donnés par:

$$|\nabla I| = \sqrt{\frac{\partial I^2}{\partial x} + \frac{\partial I^2}{\partial y}}$$
$$\theta = \text{atan2} \left(\frac{\partial I}{\partial y}, \frac{\partial I}{\partial x} \right)$$



Cours #10

- Vision (partie 2)-

Cours #10

Traitement de haut niveau

◆ *Rappel:*

◆ Traitement de bas niveau:

- ◆ Cela consiste au conditionnement de l'image brute afin d'accomplir le traitement de haut niveau avec succès.
- ◆ Concrètement, il s'agit de filtrer, de réduire le bruit, d'améliorer le contraste, d'utiliser des méthodes de correction basées sur l'histogramme, de seuiller l'image, etc...

◆ Le traitement de haut niveau:

- ◆ Il s'agit de segmenter, d'identifier les formes dans l'image, de reconnaître des patrons
- ◆ Par exemple, dans un contexte industriel, on peut s'intéresser à reconnaître la forme d'une pièce de production afin de la saisir à l'aide d'un robot manipulateur.

◆ *Une telle tâche de préhension basée sur la vision par ordinateur nécessite la connaissance de la position et de l'orientation de la pièce (pose)!*

Cours #10

Traitement de haut niveau – Segmentation en régions (1)

◆ *Qu'est-ce que la segmentation?*

- ◆ La segmentation d'une image est une opération de *traitement d'image* qui a pour but de rassembler les pixels qui possèdent entre eux une ou plusieurs caractéristiques communes.

◆ **Remarque:** C'est un processus inné pour l'être humain, mais loin d'être trivial en vision artificielle!

◆ Comment l'être humain distingue-t-il les différents objets composant une scène?

- ◆ Ainsi, l'image est partitionnée en régions, et ce partitionnement peut s'effectuer selon plusieurs méthodes différentes, entres autres:
 - ◆ Segmentation basée sur l'intensité (Couleurs, niveaux de gris, noir et blanc)
 - ◆ Segmentation basée sur les contours
 - ◆ Segmentation basée sur la classification des pixels par seuillage
 - ◆ Une combinaison de ces trois méthodes...

Cours #10

Traitement de haut niveau – Segmentation en régions (2)

- Par exemple, après avoir effectué un traitement de bas niveau et un seuillage, une image est représentée par la carte de pixels suivante:

```
0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
1 1 0 0 0 1 1 0 0 0
1 1 0 0 1 1 1 1 0 0
1 1 0 0 1 1 1 1 0 0
0 1 0 0 0 1 1 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
0 0 1 1 1 0 0 1 1 0
0 1 1 1 1 1 0 1 1 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

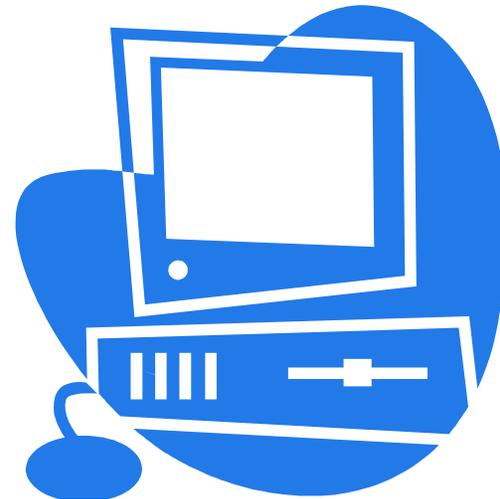
FIG. 3.1 – Image binaire après seuillage

```
0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
1 1 0 0 0 2 2 0 0 0
1 1 0 0 2 2 2 2 0 0
1 1 0 0 2 2 2 2 0 0
0 1 0 0 0 2 2 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 3 0 0 0 0 0 0
0 0 3 3 3 0 0 4 4 0
0 3 3 3 3 3 0 4 4 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

FIG. 3.2 – Résultat de la *segmentation* en régions d'une image binaire après seuillage

- L'algorithme de segmentation (ici basé sur la classification par seuillage des pixels) partitionne l'image en régions auxquelles nous attribuons une étiquette de 1 à n (où n = le nombre de régions)

Exemple de segmentation d'une image basée sur la classification des pixels par seuillage dans Matlab.



Cours #10

Traitement de haut niveau – Classification (1)

- Classification VS Segmentation:

- Segmentation*: Regroupement de pixels qui possèdent entre eux des caractéristiques similaires (Contours, intensité, etc...) sans utiliser d'information contextuelle.

- Classification*: Classification des régions d'une image basée sur la reconnaissance de formes ou de caractéristiques communes basée sur l'information contextuelle.

- Une analogie possible pour comprendre le principe de classification est le *traitement des mots*.

- Un certain mot peut avoir plusieurs significations différentes, son interprétation nécessite qu'on connaisse le contexte:

Joe *lit* un livre.

Cours #10

Classification – Méthode des moments (1)

- La première méthode de classification que nous étudierons sera la *méthode des moments*.
- C'est une méthode très répandue (Industrie, jeux vidéos, films).

- Introduisons d'abord ce qu'est, mathématiquement, un moment d'ordre (p+q) :**

$$M_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q I(x, y) dx dy$$

- Puisque nous sommes dans le domaine discret, les deux intégrales seront remplacées par des sommations (approximation rectangulaire de l'intégration), donc en pratique:

$$m_{pq} = \sum_i \sum_j i^p j^q I(i, j)$$

Cours #10

Classification – Méthode des moments (2)

$$m_{pq} = \sum_i \sum_j i^p j^q I(i, j)$$

- ◆ **Concrètement, à quoi servent les moments?**
 - ◆ Les moments sont des fonctions définies sur l'image qui résument plusieurs informations sur la forme, la grosseur et l'orientation des objets de l'image.
- ◆ **Par exemple, en noir et blanc, m_{00} est l'aire de l'objet (en pixels):**

$$m_{00} = \sum_i \sum_j I(i, j)$$

Cours #10

Classification – Méthode des moments (3)

- ◆ Aussi, les moments d'ordre 1 sont particulièrement intéressants...:

$$m_{10} = \sum_i \sum_j i^p I(i, j)$$

$$m_{01} = \sum_i \sum_j j^q I(i, j)$$

- ◆ ... entres autres puisqu'ils permettent de calculer le *centre de masse* (\bar{x}, \bar{y}) :

$$\bar{i} = \frac{\sum_i \sum_j i^p I(i, j)}{\sum_i \sum_j I(i, j)} = \frac{m_{10}}{m_{00}}$$

$$\bar{j} = \frac{\sum_i \sum_j j^q I(i, j)}{\sum_i \sum_j I(i, j)} = \frac{m_{01}}{m_{00}}$$

Cours #10

Classification – Méthode des moments (4)

- ◆ Aussi, les moments d'ordre 2 sont une analogie du moments d'inertie en dynamique:

$$m_{20} = \sum_i \sum_j i^2 I(i, j)$$

$$m_{02} = \sum_i \sum_j j^2 I(i, j)$$

Rappel, moment d'inertie:

$$J = \sum_i r_i^2 m_i$$

- ◆ Aussi, les moments centraux sont définis par:

$$\mu_{pq} = \sum_i \sum_j (i - \bar{i})^p (j - \bar{j})^q I(i, j)$$

- ◆ Rappel:

$$\bar{i} = \frac{\sum_i \sum_j i^p I(i, j)}{\sum_i \sum_j I(i, j)} = \frac{m_{10}}{m_{00}}$$

$$\bar{j} = \frac{\sum_i \sum_j j^q I(i, j)}{\sum_i \sum_j I(i, j)} = \frac{m_{01}}{m_{00}}$$

Cours #10

Classification – Méthode des moments (5)

$$\mu_{pq} = \sum_i \sum_j (i - \bar{i})^p (j - \bar{j})^q I(i, j)$$

◆ Le moment central normalisé:

$$\frac{\mu_{pq}}{(\mu_{00})^\gamma}$$

◆ Avec

$$\gamma = \frac{(p+q)}{2} + 1$$

Cours #10

Classification – Méthode des moments (6)

- Il existe des moments *invariants* c'est-à-dire des moments qui possèdent des valeurs invariantes vis-à-vis certaines transformations telles que la translation, la rotation et le changement d'échelle.
- Nous présentons ici des moments invariants d'ordre 2 et 3 pour lesquels *Hu* a démontré qu'ils étaient invariants vis-à-vis les translations, les rotations et les changements d'échelle:

$$\phi_1 = \eta_{20} + \eta_{02}$$

$$\phi_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2$$

$$\phi_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2$$

$$\phi_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2$$

$$\phi_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2]$$

$$\phi_6 = (\eta_{20} - \eta_{02})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03})$$

$$\phi_7 = (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ + (3\eta_{12} - \eta_{30})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2]$$

Cours #10

Classification – Méthode des moments (7)

◆ L'ensemble des moments invariants de Hu :

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \eta_{20} + \eta_{02} \\ \phi_2 &= (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2 \\ \phi_3 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2 \\ \phi_4 &= (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \\ \phi_5 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ &\quad + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ \phi_6 &= (\eta_{20} - \eta_{02})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}) \\ \phi_7 &= (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ &\quad + (3\eta_{12} - \eta_{30})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2]\end{aligned}$$

◆ Remarques:

- ◆ Le premier de ces moments invariants est analogue au moment d'inertie, tel que mentionné plus tôt.
- ◆ Les six premiers moments invariants sont aussi invariant en réflexion, il est donc nécessaire d'utiliser le 7^{ième} si l'on souhaite détecter les images miroirs.

Cours #10

Classification – Méthode des moments (8)

- ◆ Donc, pour chacun des objets que l'on peut retrouver dans une image, on peut calculer la valeur des ϕ_i . Après la segmentation en régions et pour les objets détectés (ici un objet est considéré comme le groupe de pixels ayant la même étiquette), on peut calculer les valeur des ϕ_i et faire une recherche par comparaison avec les ϕ_i des objets de notre base de données.
- ◆ De plus, une fois la pièce localisée, nous pouvons calculer l'angle de l'axe principal à l'aide de l'équation:

$$\theta = \frac{1}{2} \text{atan2}(2\mu_{11}, \mu_{20} - \mu_{02})$$

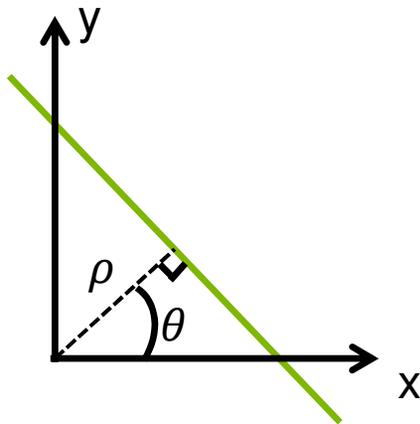
L'axe principale est l'axe autour duquel le moment d'inertie (c'est plutôt le moment d'ordre 2) est minimal.

Cours #10

Classification – Méthode des moments (9)

Démontrons-le:

$$\theta = \frac{1}{2} \operatorname{atan2}(2\mu_{11}, \mu_{20} - \mu_{02})$$



Une droite peut être paramétrisée par (θ, ρ) :

$$x \cos(\theta) + y \sin(\theta) = \rho$$

Cours #10

Démonstration de l'orientation de l'axe principal (1)

- ◆ Ce qu'il faut démontrer:

$$\theta = \frac{1}{2} \text{atan2}(2\mu_{11}, \mu_{20} - \mu_{02})$$

- ◆ Le moment d'inertie d'un objet constituant une image autour d'un axe est donné par:

$$\xi = \sum_i \sum_j d^2(i, j) I(i, j)$$

- ◆ Où $d(i, j)$ est la distance minimum entre le pixel (i, j) et l'axe. En utilisant la paramétrisation:

$$x \cos(\theta) + y \sin(\theta) - \rho = 0$$

- ◆ La distance minimum entre un pixel et l'axe est simplement:

$$i \cos(\theta) + j \sin(\theta) - \rho = 0$$

Cours #10

Démonstration de l'orientation de l'axe principal (2)

- On obtient donc le *moment d'inertie*:

$$\xi = \sum_i \sum_j (i \cos(\theta) + j \sin(\theta) - \rho)^2 I(i, j)$$

- C'est ce que nous souhaitons minimiser:

$$\min_{\theta, \rho} \xi = \sum_i \sum_j (i \cos(\theta) + j \sin(\theta) - \rho)^2 I(i, j)$$

- Dérivons partiellement par rapport à ρ pour trouver le minimum.

$$\begin{aligned} \frac{d\xi}{d\rho} &= \frac{d}{d\rho} \sum_i \sum_j (i \cos(\theta) + j \sin(\theta) - \rho)^2 I(i, j) \\ &= -2 \cos(\theta) \sum_i \sum_j i I(i, j) - 2 \sin(\theta) \sum_i \sum_j j I(i, j) + 2\rho \sum_i \sum_j I(i, j) \\ &= -2 \cos(\theta) m_{10} - 2 \sin(\theta) m_{01} + 2\rho m_{00} \end{aligned}$$

Cours #10

Démonstration de l'orientation de l'axe principal (3)

- Étant donné ce dernier résultat:

$$\frac{d\xi}{d\rho} = -2 \cos(\theta) m_{10} - 2 \sin(\theta) m_{01} + 2\rho m_{00}$$

- Et aussi:

$$\bar{i} = \frac{\sum_i \sum_j i^p I(i, j)}{\sum_i \sum_j I(i, j)} = \frac{m_{10}}{m_{00}} \Rightarrow m_{10} = \bar{i} m_{00} \quad \bar{j} = \frac{\sum_i \sum_j j^q I(i, j)}{\sum_i \sum_j I(i, j)} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \Rightarrow m_{01} = \bar{j} m_{00}$$

- On substitue:

$$\begin{aligned} \frac{d\xi}{d\rho} &= -2 \cos(\theta) \bar{i} m_{00} - 2 \sin(\theta) \bar{j} m_{00} + 2\rho m_{00} \\ &= -2m_{00} (\bar{i} \cos(\theta) + \bar{j} \sin(\theta) - \rho) \end{aligned}$$

Cours #10

Démonstration de l'orientation de l'axe principal (4)

- En posant la dérivée égale à 0 pour trouver le minimum:

$$\frac{d\xi}{d\rho} = -2m_{00} (\bar{i} \cos(\theta) + \bar{j} \sin(\theta) - \rho) = 0$$

- On obtient:

$$\bar{i} \cos(\theta) + \bar{j} \sin(\theta) - \rho = 0$$

- On constate donc sans grande surprise que l'axe qui minimise le moment d'inertie passe par le centre de masse (\bar{i}, \bar{j}) . Pour la suite des démarches, effectuons un changement de coordonnées:

$$i' = i - \bar{i} \quad j' = j - \bar{j}$$

- Le moment d'inertie, en effectuant ce changement, devient:

$$\xi = \sum_i \sum_j (i' \cos(\theta) + j' \sin(\theta))^2 I(i, j)$$

Cours #10

Démonstration de l'orientation de l'axe principal (5)

$$\xi = \sum_i \sum_j (i' \cos(\theta) + j' \sin(\theta))^2 I(i, j)$$

- En développant cette dernière équation:

$$\begin{aligned} \xi &= \cos^2 \theta \sum_{i,j} (i')^2 I(i, j) + 2 \cos \theta \sin \theta \sum_{i,j} (i' j') I(i, j) + \sin^2 \theta \sum_{i,j} (j')^2 I(i, j) \\ &= \mu_{20} \cos^2 \theta + 2\mu_{11} \cos \theta \sin \theta + \mu_{02} \sin^2 \theta \end{aligned}$$

- Et en utilisant les identités trigonométriques:

$$\cos^2 \theta = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\theta \quad \sin^2 \theta = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\theta \quad \cos \theta \sin \theta = \frac{1}{2} \sin 2\theta$$

- Le moment d'inertie devient:

$$\xi = \frac{1}{2} (\mu_{20} + \mu_{02}) + \frac{1}{2} (\mu_{20} - \mu_{02}) \cos 2\theta + \mu_{11} \sin 2\theta$$

Cours #10

Démonstration de l'orientation de l'axe principal (6)

$$\xi = \frac{1}{2}(\mu_{20} + \mu_{02}) + \frac{1}{2}(\mu_{20} - \mu_{02})\cos 2\theta + \mu_{11}\sin 2\theta$$

- Il est alors facile de dériver le moment d'inertie par rapport à θ :

$$\frac{d}{d\theta}\xi = -(\mu_{20} - \mu_{02})\sin 2\theta + 2\mu_{11}\cos 2\theta$$

- En posant cette dérivée partielle égale à 0:

$$(\mu_{20} - \mu_{02})\sin 2\theta = 2\mu_{11}\cos 2\theta$$

$$\frac{\sin 2\theta}{\cos 2\theta} = \frac{2\mu_{11}}{(\mu_{20} - \mu_{02})}$$

- Donc,

$$\theta = \frac{1}{2}\text{atan2}(2\mu_{11}, \mu_{20} - \mu_{02}) \quad \text{ou} \quad \theta = \frac{1}{2}\text{atan2}(-2\mu_{11}, \mu_{02} - \mu_{20})$$

Cours #10

Méthode des moments – Exemple (1)

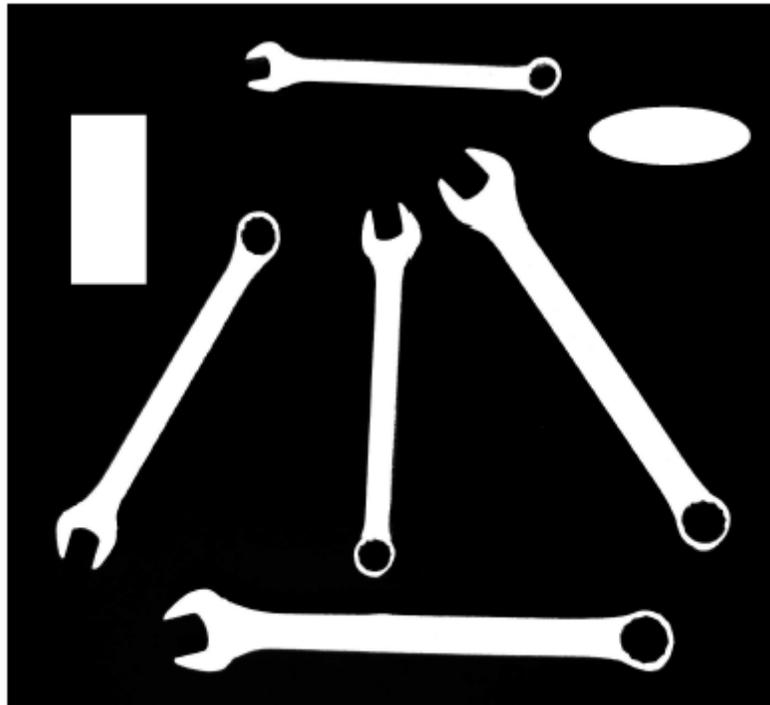


FIG. 3.3 – Image à segmenter

| Rég. | m_{00} | m_{01} | m_{10} | i | j |
|------|----------|----------|-----------|------|------|
| 1 | 52293 | 17688137 | 45465470 | 869 | 338 |
| 2 | 60386 | 13224534 | 25815015 | 428 | 219 |
| 3 | 89826 | 77133504 | 123668343 | 1377 | 859 |
| 4 | 34572 | 29069217 | 5273140 | 153 | 841 |
| 5 | 44648 | 36795755 | 36255969 | 812 | 824 |
| 6 | 79322 | 99015344 | 57640842 | 727 | 1248 |
| 7 | 35724 | 51656904 | 10377822 | 291 | 1446 |

| Rég. | η_{02} | η_{20} | η_{11} | ϕ_1 | ϕ_2 | $\theta(^{\circ})$ |
|------|-------------|-------------|-------------|----------|----------|--------------------|
| 1 | 0.3002 | 0.8431 | -0.4903 | 1.1433 | 1.2564 | -30.5 |
| 2 | 0.0376 | 0.1848 | 0 | 0.2224 | 0.0217 | 0 |
| 3 | 1.0662 | 0.0121 | 0.0264 | 1.0783 | 1.1138 | 88.6 |
| 4 | 1.1121 | 0.0132 | 0.0437 | 1.1253 | 1.2153 | 87.7 |
| 5 | 0.0140 | 1.1315 | -0.0567 | 1.1455 | 1.2615 | -2.9 |
| 6 | 0.3157 | 0.6851 | 0.4527 | 1.0008 | 0.9562 | 33.9 |
| 7 | 0.2206 | 0.0287 | 0 | 0.2493 | 0.0368 | 90.0 |

Cours #10

Méthode des moments – Exemple (2)

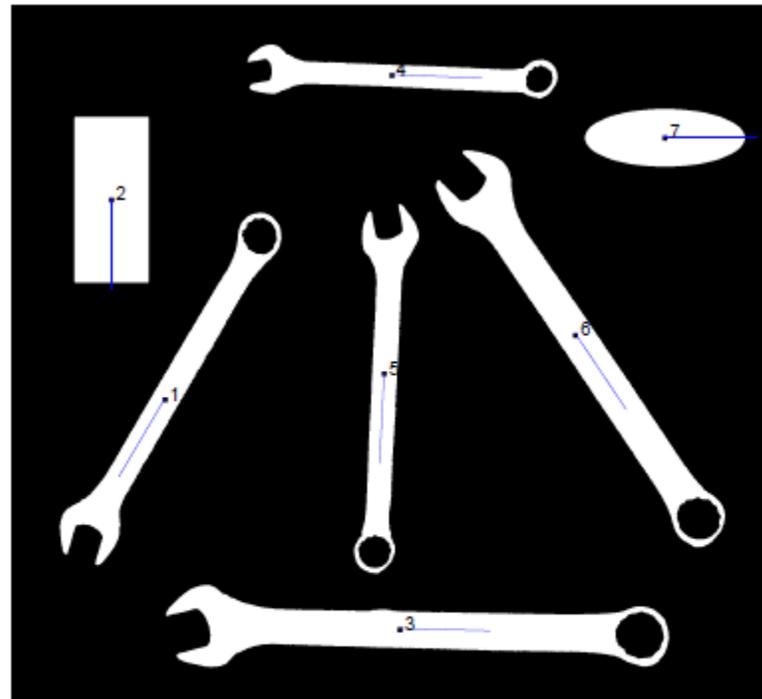


FIG. 3.4 – Image après segmentation et application des moments

Comparaison avec un patron et corrélation (1)

- Une autre méthode pour classer les différents objets d'une image consiste simplement à comparer un à un les objets d'une image avec un (ou plusieurs) patron(s). Le patron est une image $m_0 \times n_0$ dont l'intensité des pixels est donnée par $T_i(k,j)$ où i désigne l'objet considéré.
- Pour quantifier la qualité de l'appariement entre l'objet de l'image et le patron, on utilise un indicateur de performance. Par exemple:

$$p_i(x, y) = \sum_{k=1}^{m_0} \sum_{j=1}^{n_0} |I(x+k, y+j) - T_i(k, j)| \geq 0$$

- À partir de chaque pixel (x,y) de l'image, on vérifie ainsi la corrélation avec le patron en parcourant une surface $m_0 \times n_0$.
- Avantages:** -Facile à implémenter, s'applique autant pour les images noirs et blancs que pour les tons de gris.
- Désavantages:** -Sensible à l'intensité moyenne, problèmes si l'intensité est à un facteur d'échelle différent.

Cours #10

Comparaison avec un patron et corrélation (2)

- Donc remédier à ce dernier désavantage, on peut normaliser l'indicateur de performance en fonction de l'intensité moyenne. Pour ce faire, considérons les normes suivantes:

$$\|T_i\| = \left[\sum_{k=1}^{m0} \sum_{j=1}^{n0} T_i^2(k, j) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\|I_{x,y}\| = \left[\sum_{k=1}^{m0} \sum_{j=1}^{n0} I^2(k + x, j + y) \right]^{\frac{1}{2}}$$

- On peut alors définir l'indice de corrélation normalisé:

$$\sigma_i(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^{m0} \sum_{j=1}^{n0} I(k + x, j + y) T_i(k, j)}{\|T_i\| \cdot \|I_{x,y}\|} \quad \text{où } 0 \leq \sigma_i(x, y) \leq 1$$

- Ici, plus le patron et l'objet de l'image seront corrélés, plus l'indicateur de corrélation sera près de 1. Un patron et une pièce identique, mais d'intensité d'échelles différentes résulteront quand même en un indice de corrélation égale à 1.

Cours #10

Comparaison avec un patron et corrélation (2)

- Donc remédier à ce dernier désavantage, on peut normaliser l'indicateur de performance en fonction de l'intensité moyenne. Pour ce faire, considérons les normes suivantes:

$$\|T_i\| = \left[\sum_{k=1}^{m0} \sum_{j=1}^{n0} T_i^2(k, j) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\|I_{x,y}\| = \left[\sum_{k=1}^{m0} \sum_{j=1}^{n0} I^2(k + x, j + y) \right]^{\frac{1}{2}}$$

- On peut alors définir l'indice de corrélation normalisé:

$$\sigma_i(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^{m0} \sum_{j=1}^{n0} I(k + x, j + y) T_i(k, j)}{\|T_i\| \cdot \|I_{x,y}\|} \quad \text{où } 0 \leq \sigma_i(x, y) \leq 1$$

- Ici, plus le patron et l'objet de l'image seront corrélés, plus l'indicateur de corrélation sera près de 1. Un patron et une pièce identique, mais d'intensité d'échelles différentes résulteront quand même en un indice de corrélation égale à 1.

Cours #10

Analyse des contours: transformation de Hough (1)

- ◆ Comme nous avons vu au dernier cours, il est possible de détecter les contours d'un objet (arrêtes) à l'aide de plusieurs outils, par exemple, en utilisant un masque gradient suivi d'un seuillage.
 - ◆ Ceci implique cependant le choix d'un seuil approprié!
 - ◆ Un seuil trop petit génèrera une grande quantité d'arrêtes dont un bon nombre seront des fausses arrêtes.
 - ◆ Un seuil trop grand aura comme conséquence une partie de certaines arrêtes, ou encore, de perdre complètement certaines arrêtes.
- ◆ **Rappel**: l'éclairage, dans ce contexte en particulier mais aussi dans tous les contextes de vision artificielle, revêt une importance primordial.
- ◆ Les techniques qui suivent supposent que nous sommes en présence d'image dont les contours sont bien définis.!

Cours #10

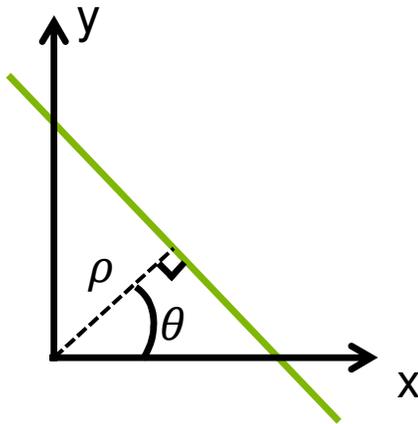
Analyse des contours: transformation de Hough (2)

- ◆ Considérons tout d'abord la recherche de segments de droite dans une image.

- ◆ Une droite, comme nous avons vu précédemment peut être paramétrisée:

$$x \cos \theta + y \sin \theta = d$$

- ◆ Où θ est l'angle de la droite et d la distance entre l'origine et le point d'interception perpendiculaire à la droite.



- ◆ Comme l'image est de dimension finie et que $0 \leq \theta \leq 2\pi$, on peut simplement discrétiser les paramètres θ et d pour former un tableau 2D.
- ◆ Pour chaque combinaison, on vérifie chaque pixel égale à 1 de l'image pour savoir s'il appartient à la droite et, le cas échéant, on enregistre son vote.
- ◆ Les cellules du tableau qui possèdent le plus grand nombre de votes caractérisent les droites qui pourraient potentiellement se trouver dans l'image.

Cours #10

Analyse des contours: transformation de Hough (3)

- Il est possible de rechercher un cercle de façon similaire en utilisant l'équation:

$$(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2 = R^2$$

- On discrétise l'espace des paramètres (R, c_x, c_y) et on obtient un tableau 3D, le principe est alors le même:
 - Pour chacun des éléments du tableau, on enregistre le nombre de votes, c'est-à-dire le nombre de pixels à 1 appartenant au cercle correspondant à ces valeurs de paramètres.
 - On peut donc identifier les cercles (ou les portions de cercles) dans l'image de cette façon.

Cours #10

Modèle de la caméra (1)

- ◆ “*Le but ultime d’un système robotique est de manipuler les objets situés dans son environnement atteignable*” – Spong & al. : Robot Modeling and Control
- ◆ Évidemment, dans le contexte de la vision par ordinateur, il faut pour pouvoir accomplir cette tâche, connaître la position et l’orientation des objets que le robot doit manipuler.
 - ◆ Pour y arriver, nous avons besoin d’un modèle de caméra ainsi que d’une procédure de calibration (étalonnage).
 - ◆ Dans cet optique nous verrons deux approches différentes:
 - 1) Le **modèle de projection orthogonal** et;
 - 2) Le **modèle de la caméra trou d’épingle**

Cours #10

Modèle de la caméra – Projection orthogonale (1)

- Le modèle de projection orthogonale est le modèle le plus simple que nous pouvons utiliser pour retrouver la pose d'un objet en particulier, par rapport à un repère de référence.
- La condition par contre pour utiliser un tel modèle est que les objets soient tous situés dans un plan **parallèle** au plan image.

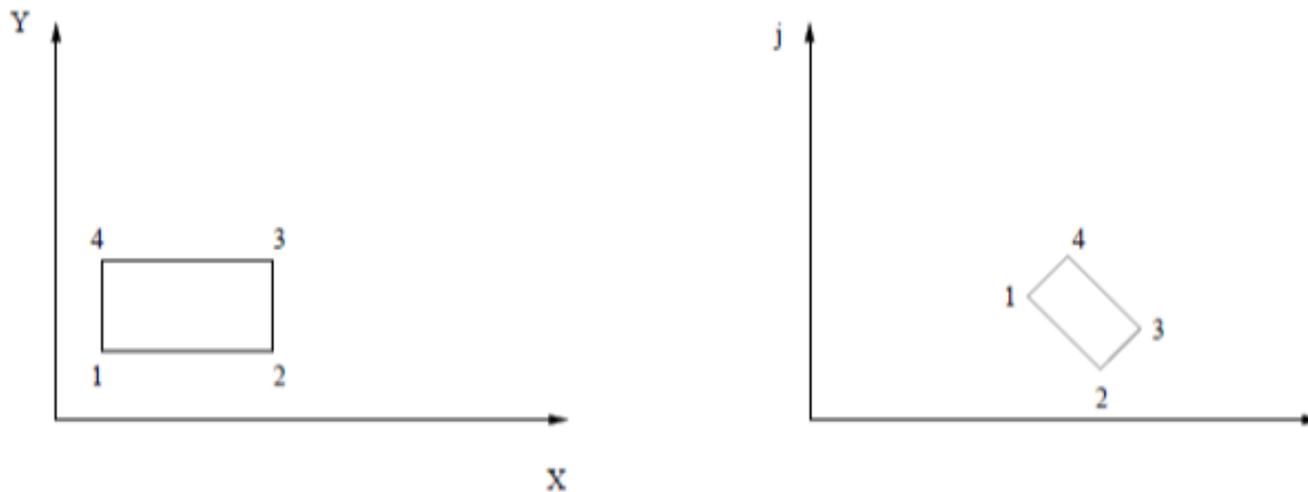
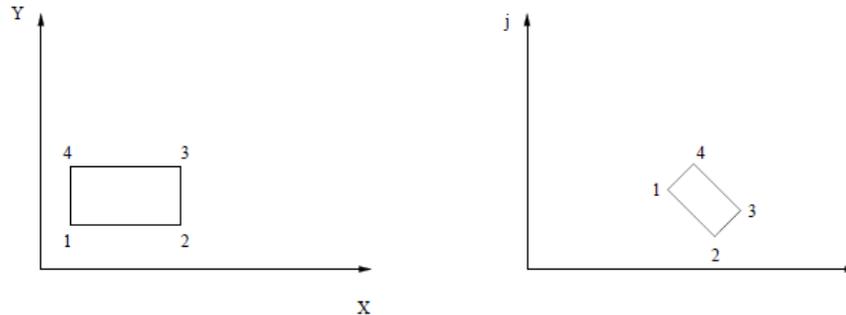


FIG. 3.5 – Objet et sa projection orthogonale

Cours #10

Modèle de la caméra – Projection orthogonale (2)



- ◆ Dans cette situation, l'objet de l'image est celui du monde réelle ayant subi une **homothétie**, une **rotation** et une **translation**. Ainsi, la transformation entre un point (x,y) et un point (i,j) est donnée par:

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \cos(\theta) & -E \sin(\theta) & a \\ E \sin(\theta) & E \cos(\theta) & b \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

- ◆ Où E, θ, a et b sont des paramètres à déterminer.

Cours #10

Modèle de la caméra – Projection orthogonale (3)

- En utilisant simplement les substitutions $c=E*\cos(\theta)$ et $d=E*\sin(\theta)$:

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \cos(\theta) & -E \sin(\theta) & a \\ E \sin(\theta) & E \cos(\theta) & b \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad \longrightarrow \quad \begin{bmatrix} i \\ j \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & -d & a \\ d & c & b \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$
$$i = cx - dy + a$$
$$j = dx + cy + b$$

- Pour un point (x_k, y_k) nous mesurons (i_k, j_k) , on peut donc ré-écrire ces équations en fonction des inconnues a, b, c et d :

$$\begin{bmatrix} i_k \\ j_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_k & -y_k \\ 0 & 1 & y_k & x_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}$$

- Comme il y a 4 inconnues, il faudra 2 points pour déterminer a, b, c et d . Pour plus de deux points, on peut améliorer notre précision dans la mesure en utilisant une solution des moindres carrés.

Cours #10

Modèle de la caméra – Projection orthogonale (4)

- Comme il y a 4 inconnues, il faudra 2 points pour déterminer a,b,c et d. Pour plus de deux points, on peut améliorer notre précision dans la mesure en utilisant une solution des moindres carrés (voir notes de cours).
- Une fois les paramètres a,b,c et d identifiés:

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \cos(\theta) & -E \sin(\theta) & a \\ E \sin(\theta) & E \cos(\theta) & b \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad \longrightarrow \quad \begin{bmatrix} i \\ j \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & -d & a \\ d & c & b \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$
$$i = cx - dy + a$$
$$j = dx + cy + b$$

- On a simplement qu'à résoudre:

| | | |
|-------------------------------|---------------|----------------------|
| $E = \sqrt{c^2 + d^2}$ | \Rightarrow | homothétie |
| $\theta = \text{atan2}(d, c)$ | \Rightarrow | Angle de la rotation |
| a | \Rightarrow | Translation en x |
| b | \Rightarrow | Translation en y |

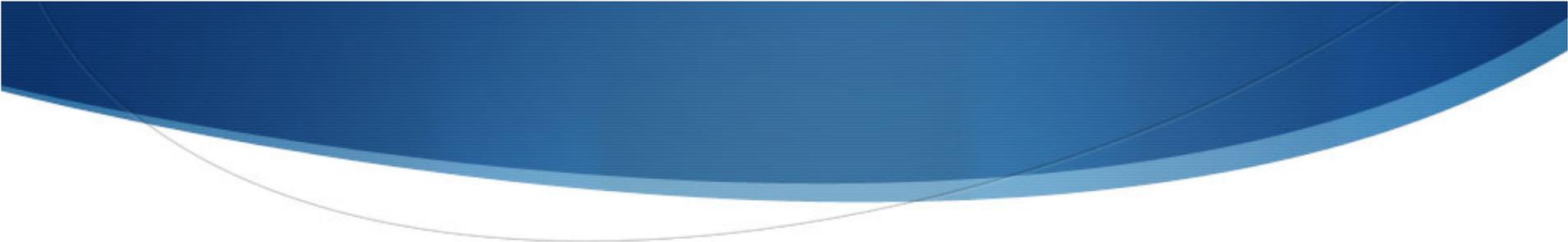
Cours #10

Modèle de la caméra – Projection orthogonale (5)

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \cos(\theta) & -E \sin(\theta) & a \\ E \sin(\theta) & E \cos(\theta) & b \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad \longrightarrow \quad \begin{bmatrix} i \\ j \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & -d & a \\ d & c & b \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$
$$i = cx - dy + a$$
$$j = dx + cy + b$$

- ◆ Finalement, pour retrouver les coordonnées réelles (x,y) il faut calculer l'inverse de la matrice de transformation homogène (de l'homothétie + rotation + translation). Les coordonnées réelles sont alors données par:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos(\theta)}{E} & \frac{\sin(\theta)}{E} & -\frac{\sin(\theta)b + \cos(\theta)a}{E} \\ -\frac{\sin(\theta)}{E} & \frac{\cos(\theta)}{E} & \frac{\sin(\theta)a - \cos(\theta)b}{E} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ j \\ 1 \end{bmatrix}$$



Présentation d'un intérêt : Robots chirurgicaux

**Basé entres autres sur les articles:

-3D Force Control for Robotic-Assisted Beating Heart Surgery Based on Viscoelastic Tissue Model (Chao Liu, Pedro Moreira, Nabil Zemiti and Philippe Pognet), 2011.

-Development of an integrated torque sensor-motor module for haptic feedback in teleoperated robot-assisted surgery, Seunghwan and al., 2009.

Robot chirurgical (1)

- Les robots chirurgicaux sont des appareils semi-autonomes:



- Leurs buts sont multiples, entres autres:
 - Minimiser les dommages causés par une opération invasive nécessaire.
 - Améliorer les capacités du chirurgien
 - Facilité la tenue des opérations en permettant entres autres d'effectuer les opérations à distances.

Robot chirurgical (2)

◆ Petit historique (quelques dates)...

- ◆ **1988**, en Allemagne, le Dr. Friedrich-Wilhelm Mohr utilise le système robotique chirurgical DaVinci et accomplit la toute première pontage aorto-coronarien!
- ◆ **1999**, d'autres chirurgiens accomplissent le même exploit aux États-Unis.
- ◆ **2006**, c'est la première opération non-assistée, c'est-à-dire 100% par intelligence artificielle. L'opération était une intervention pour corriger un problème d'arythmie cardiaque dont souffrait une patiente de 34 ans. La base de données du robot contenait quelques 10000 opérations similaires et la chirurgie fut qualifiée de "meilleure qu'une chirurgie typique effectuée par un chirurgien moyen".
- ◆ **2007**: première micro-chirurgie neurologique
- ◆ **2009**: Mise sur pieds de méthodes officielles pour former et encadrer des employés sur les robots DaVinci pour l'oncologie gynécologique
- ◆ **2009**: Première transplantation de rein complètement robotisé et non assistée.

Robot chirurgical (3)

- ◆ Quelques robots médicaux populaires:



Da Vinci

En 2009 aux États-Unis, 60% des interventions au niveau de la prostate ont eu recours au robot Da Vinci.

Robot chirurgical (4)

◆ Quelques robots médicaux populaires:



Permet de traiter des tumeurs, cancéreuses ou non, dans tout le corps, notamment le cerveau, le rachis, le poumon, la prostate, le foie et le pancréas.

Robot chirurgical (5)

- ◆ Quelques robots médicaux populaires:



Pour les interventions principalement sur la boîte crânienne.

Robot chirurgical (5)

◆ Quelques robots médicaux populaires:



Pour les troubles cardiaques nécessitant une opération de très grande précision.

Robot chirurgical (6)

- ◆ Les chirurgies cardiaques doivent faire face au problème difficile de composer avec un coeur qui bat lors de certaines interventions délicates.
 - ◆ **Malgré certains outils de stabilisation mécanique, le problème reste entier et les chirurgies sont extrêmement difficiles à accomplir.**
- ◆ De plus en plus, les chirurgiens ont recours à la robotique afin de les assister en augmentant entre autres leur précision et leur confort.
 - ◆ Dans l'évolution de la robotique en chirurgie, un aspect important est le contrôle de force!
- ◆ *“In this work, we present a three-dimensional force control method for robotic-assisted beating heart surgery taking into consideration of the viscoelastic interaction property”*
- ◆ **La recherche dont il est question se penche sur le problème du contrôle de force 3D lorsque la chirurgie s'effectue sur un coeur qui bat, tout en considérant les propriétés visco-élastiques du corps (coeur) avec lequel le robot est en contact.

Robot chirurgical (7)

- Différents modèles du contact visco-élastique:

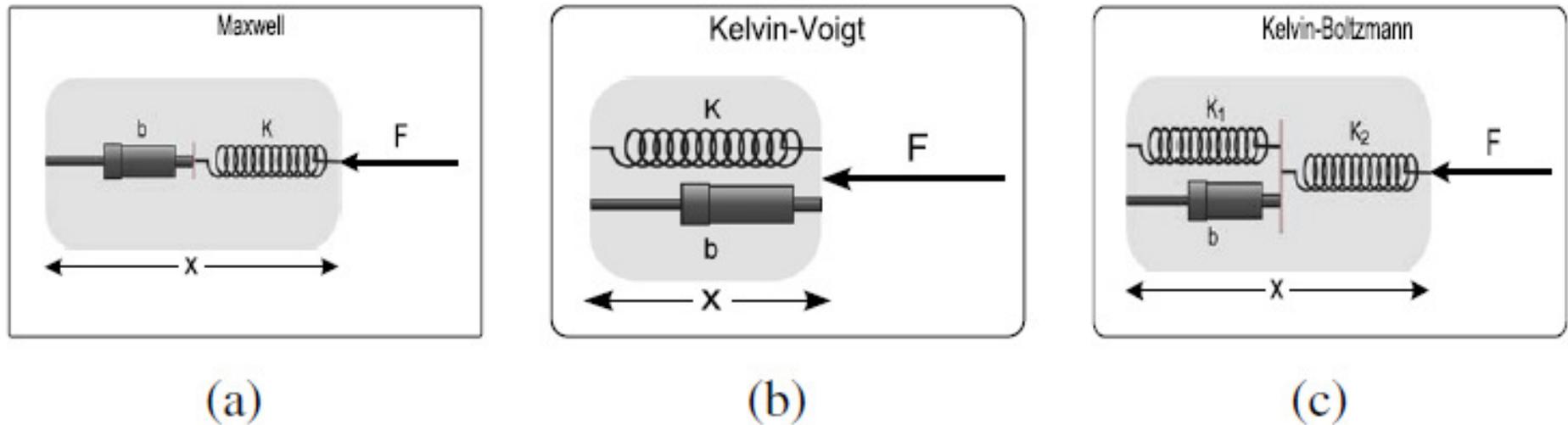


Fig. 1. Linear Viscoelastic Models

$$F(t) = k \frac{dx(t)}{dt} - \alpha \frac{dF(t)}{dt}$$

$$F(t) = b \frac{dx(t)}{dt} + kx(t)$$

$$F(t) = \gamma x(t) + \beta \dot{x}(t) - \alpha \dot{F}(t)$$

Robot chirurgical (8)

- ◆ Banc de test: Robot D2M2 (5 degrés de liberté, “direct-drive”) + pièce de boeuf pour l’aspect visco-élastique.



Fig. 2. *In vitro* relaxation test using D2M2 robot

Robot chirurgical (9)

◆ Dynamique du système:

A. System Dynamics

The dynamic equation of the robot in the Cartesian space in contact with an environment is given by [15]:

$$M_{x_r}(x_r)\ddot{x}_r + C_{x_r}(\dot{x}_r, x_r)\dot{x}_r + g_{x_r}(x_r) = F_a - F_e \quad (5)$$

$C_{x_r}(\dot{x}_r, x_r)\dot{x}_r$ represents the vector of Coriolis and centripetal forces, $g_{x_r}(x_r)$ is the gravity term. F_a denotes the end-effector force due to joint actuation and F_e is the interaction forces due to contact with the environment.

B. Force Control Design and Stability Analysis

In the well-defined operating room (OR) environment, it is possible to obtain precise information of the system dynamics through careful pre-calibration. And with the available force feedback signal F_e obtained through the force sensor, the nonlinear dynamic system (5) could be decoupled by designing the robot force F_a as

$$F_a = F_e + \hat{M}_{x_r}(x_r)u + \hat{C}_{x_r}(\dot{x}_r, x_r)\dot{x}_r + \hat{g}_{x_r}(x_r) \quad (6)$$

where $\hat{M}_{x_r}(x_r)$, $\hat{C}_{x_r}(\dot{x}_r, x_r)$ and $\hat{g}_{x_r}(x_r)$ are respectively the estimation of F_e , $M_{x_r}(x_r)$, $C_{x_r}(\dot{x}_r, x_r)$ and $g_{x_r}(x_r)$ and u represents the auxiliary control signal. Hence the desired decoupled system could be expressed as

$$\ddot{x}_r = u. \quad (7)$$

Robot chirurgical (10)

Le contrôleur:

Then we get the auxiliary control input u in another form as

$$u = \frac{a_2}{\alpha\beta} F_e - \ddot{x}_h - \frac{\gamma a_2}{\alpha\beta} (x_r + x_h) - \left(\frac{\gamma}{\beta} + \frac{a_2}{\alpha} \right) (\dot{x}_r + \dot{x}_h) - \frac{a_1}{\beta} \Delta F. \quad (16)$$

Le coeur:

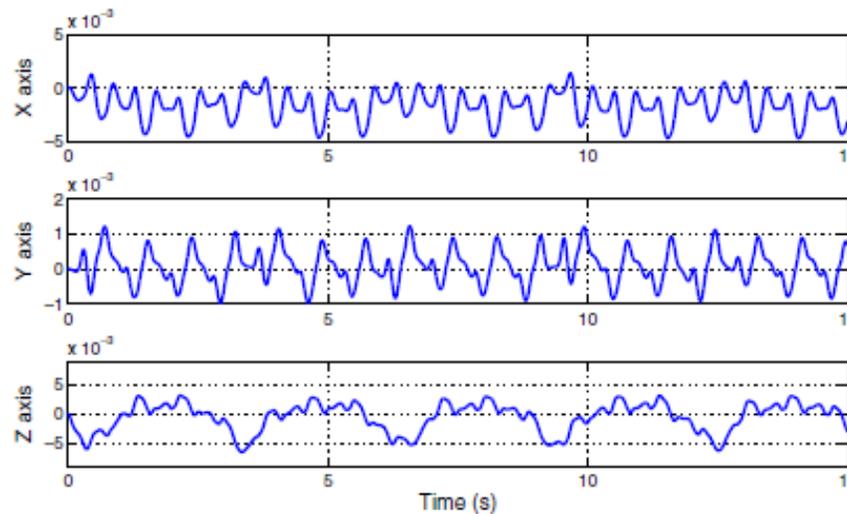


Fig. 5. 3D heart motion

Robot chirurgical (11)

◆ Résultats obtenus en simulations:

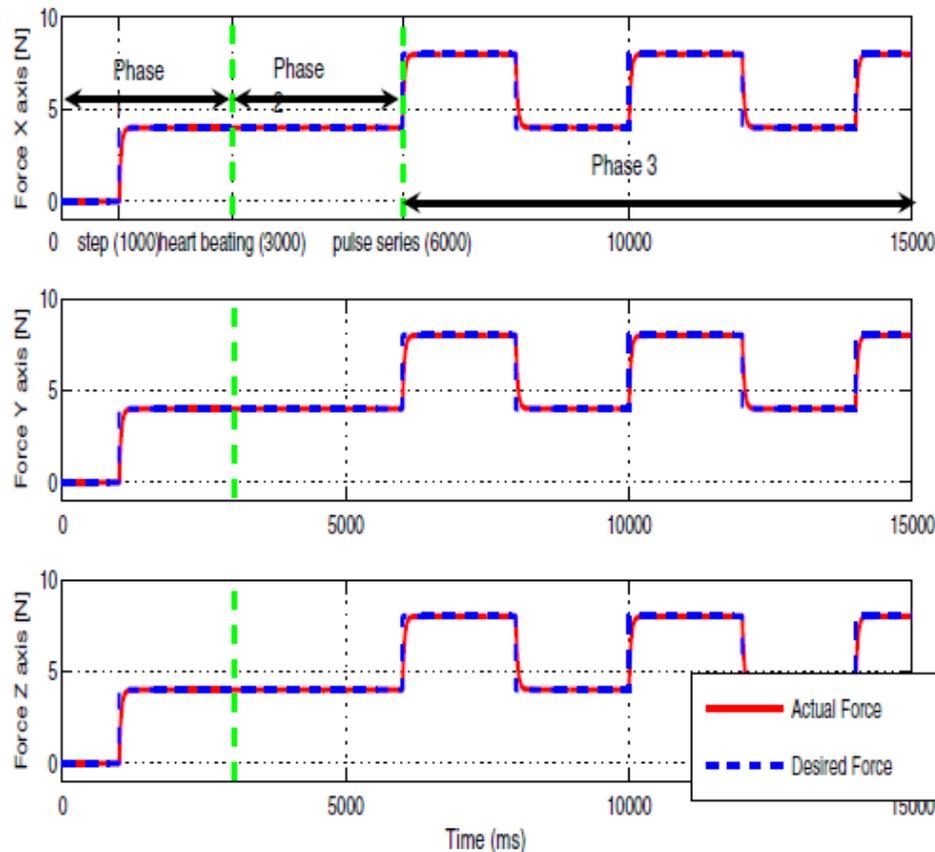


Fig. 6. Force Tracking Performance for X, Y, Z axis

V. CONCLUSIONS AND FUTURE WORKS

This paper presents the work of force control design for robotic-assisted beating heart surgery based on viscoelastic interaction model. To the best of our knowledge, this is the first attempt to perform robot force control on the beating heart using a realistic biological tissue interaction model. The viscoelastic model is chosen and evaluated through *in vitro* experiments. The stability of developed control method is analyzed rigorously by theory. Simulation studies based on real robotic system setup are conducted to confirm the effectiveness the developed control method and show its robustness against measurement disturbance and model uncertainties. For future works, first the developed control method is to be implemented for *in vitro* experiments in lab tests which are currently undergoing. Then the method will be further improved by including real-time heart motion modeling techniques. In the end, it is planned to carry out *in vivo* experiments to test its feasibility and find out potential constraints for practical clinical applications.

Robot chirurgical (12)

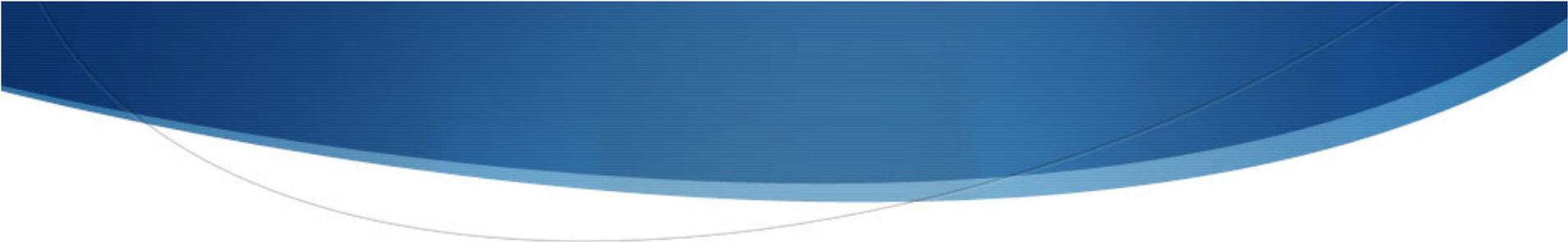
◆ Présentation du robot Da Vinci:



C:\Users\
je\Desktop\Roboti



C:\Users\
je\Desktop\Da Vin



Exercices

Exercices (1)

Question 4 (1 point)

Quel est l'avantage d'utiliser des splines cubiques pour les trajectoires désirées dans la commande des robots manipulateurs ?

Exercices (2)

Question 2 (1 point)

Pour le traitement d'une image bruitée, on vous suggère d'utiliser le masque suivant

| | | |
|-----|-----|-----|
| 0.1 | 0.2 | 0.1 |
| 0.2 | 0.3 | 0.2 |
| 0.1 | 0.2 | 0.1 |

Est-ce que ce masque est adéquat ?

Si non, comment devrait on le modifier pour qu'il ait l'effet souhaité ?

Exercices (3)

Question 7 (1 point)

Un cercle est approximé par

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |

Calculer ϕ_1 et ϕ_2 et comparer avec la valeur théorique sachant que pour l'ellipse de demi-axes (a, b) , on a

$$\phi_1 = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{b}{a} + \frac{a}{b} \right)$$

$$\phi_2 = \left(\frac{1}{4\pi} \right)^2 \left(\frac{b}{a} - \frac{a}{b} \right)^2$$

Exercices (4)

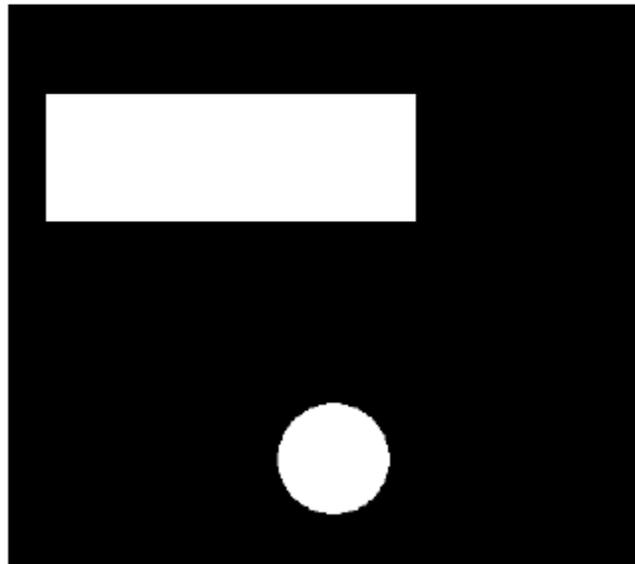
Question 8 (1 point)

Après seuillage, on obtient l'image ci-dessous. On calcule les valeurs suivantes :

Objet 1 : $\phi_1 = 0.1592$ et $\phi_2 = 0$

Objet 2 : $\phi_1 = 0.2778$ et $\phi_2 = 0.5926$

Identifier l'objet 1 et l'objet 2. Justifier votre réponse.



Références

- ◆ [1] *Absolute Beginner's Guide to Building Robots*, Gareth Branwyn, 2003
- ◆ [2] http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-software/10_stats_you_should_know_about_robots Notes de cours (ELE3202) – Richard Gourdeau & John Thistle
- ◆ [3] <http://www.geekologie.com/2008/12/thats-it-im-moving-robotic-sta.php>
- ◆ [4] *Robot Modeling and Control*, Mark W. Spong et al., 2006.
- ◆ [5] Notes de cours (Manipulateurs) - ELE4203, Richard Gourdeau, juillet 2012.