



## Robotique Mobile et Collective

16h CM

16h TP

Modalité évaluation :

- De type CC
- Sur contenu des séances de TP

Intervenants :

- P. Gaucher
- N. Monmarché



## Robotique Mobile et Collective

Partie 1 : Introduction à la robotique mobile (2h)

Partie 2 : Architecture de robots mobiles (4h)

- Véhicules roulants
- Robots marcheurs

Partie 3 : Capacité de perception (4h)

- Mise en œuvre de capteurs extéroceptifs

Partie 4 : Planification de trajectoire(2h)

Partie 5 : Architectures de contrôle (2h)

Partie 6 : Robotique collective (N. Monmarché) (2h)

Partie 7 : Mise en œuvre (16h TP)



## Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

- 1.1. Préambule
- 1.2. Historique
- 1.3. Classes de problèmes



## Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

### 1.1. Préambule

- Robot mobile : système mécanique capable de se **déplacer** dans un environnement.

- **Robot mobile autonome** (AMR - Autonomous Mobile Robot)
- Véhicule autonome guidé (AGV – Autonomous Guided Vehicle)

- Un robot est une **machine** équipée de capacités de **perception**, de **décision** et **d'action** qui lui permettent **d'agir de manière autonome** dans son environnement en fonction de la **perception** qu'il en a.

## Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

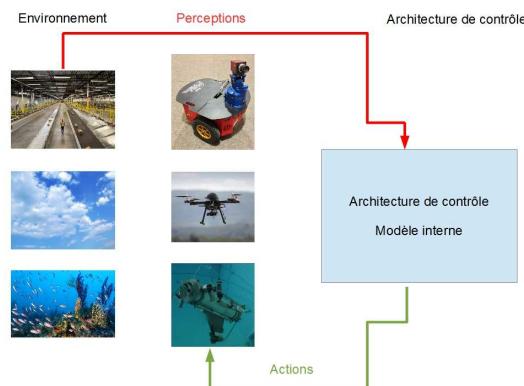
### 1.1. Préambule

- Un robot possède donc :

- Des **capteurs** (extéroceptifs) pour :
  - Percevoir son environnement
  - Se localiser
- Des **capteurs** (proprioceptifs) pour connaître son état
  - Exemple de l'odométrie
- Des **actionneurs** pour se déplacer
- Une **architecture de contrôle** permettant de calculer à partir des données capteurs les commandes à transmettre aux actionneurs afin de réaliser la mission définie

## Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

### 1.1. Préambule



## Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

### 1.2. Historique <http://www.peo60.fr/petite-histoire-des-robots/>

- Introduction du terme robot :

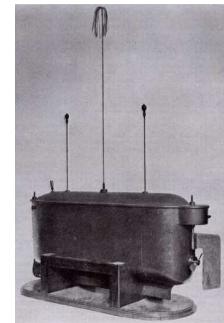
- Karel Capek en 1920
- Pièce de théâtre « Rossum's Universal Robots ».
- Il vient du tchèque 'roboť' ( servitude)

捷克语

- Premier robot mobile : ~ 1890, Nikola Tesla construit un véhicule autonome aquatique télécommandé

尼古拉特斯拉制造了一种遥控水上自行式车辆

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015



7

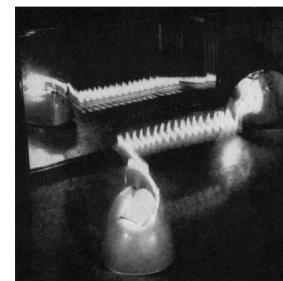
## Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

### 1.2. Historique

- Les débuts de la robotique mobile :

- ~ 1950 Tortue de Gray Walter
- les [tortues de Bristol](#) : Elmer et Elsie (pour EElectro MEchanical Robots, Light Sensitive), du neurophysiologiste William Grey Walter. Ces machines reproduisent le mécanisme de l'apprentissage par acquisition de réflexes conditionnés.
  - Se diriger vers une lumière qui marque un but
  - S'arrêter face à des obstacles
  - Recharger ses batteries lorsqu'il arrive dans sa niche.

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015



8

## Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

### 1.2. Historique

#### - Les débuts de la robotique mobile :

- - **Job le Renard** d'Albert Ducrocq en 1953 (conservé par le Musée des arts et métiers de Paris).
- Ce robot dispose de capteurs qui lui permettent de reconnaître un obstacle à distance. Il est capable d'apprentissage grâce à une "mémoire" à bandes magnétiques. Il ne parle pas, mais communique via deux lampes (1 verte, 1 rouge) qui s'allument au sommet de sa tête.



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

9

## Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

### 1.2. Historique

~ 1960 : Robot "Beast" de l'université John Hopkins

- Se déplacer au centre des couloirs en utilisant des capteurs ultrason
- Chercher des prises électriques (noires sur des murs blanc) en utilisant des photo-diodes et de s'y recharger.

光电二极管



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

10

## Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

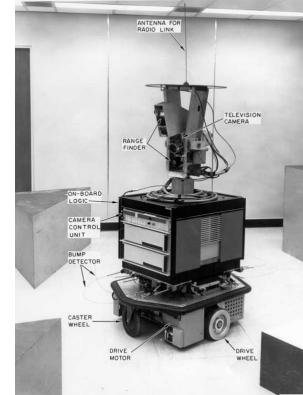
### 1.2. Historique

- 1969 : Université de Stanford

- Robot Shakey : premiers liens avec le domaine de l'IA

- Résultats obtenus :

- Développement de l'algorithme de recherche A\* (pour la planification de trajectoire).
- Transformée de Hough pour l'extraction   
contour d'objet de lignes dans une image.
- Méthode des graphes de visibilité pour trouver le chemin le plus court dans un espace 2D comportant des obstacles.



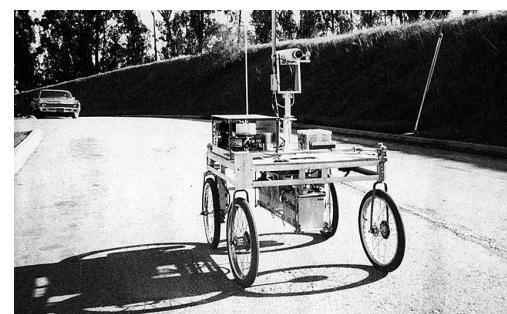

**POLYTECH<sup>®</sup>  
TOURS**  
Département Informatique

## Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

### 1.2. Historique

透視  
[光] 深視, 立體視感

- Stanford Cart dans la fin des années 1970
- premières utilisations de la stéréo-vision pour la détection d'obstacles.
- Modélisation de l'environnement.


 A black and white photograph of the Stanford Cart, a four-wheeled mobile robot. It has a central body with various electronic components and sensors. It is shown driving on a paved surface, casting a long shadow. In the background, there's a low wall and some trees.

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

12

6

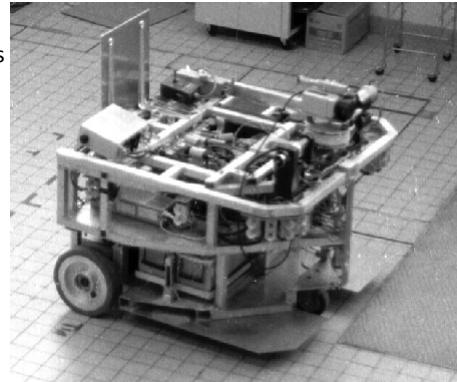
## Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

### 1.2. Historique

- 1977 Hilare LAAS-CNRS
- **Heuristiques Intégrées aux Logiciels Robot Évolutif"**

启发式与软件和自动化集成  
进化机器人

Wheels:	2 driving wheels and a free wheel
Batteries:	24V
Bus:	Multibus
Processors:	4 x Intel 80286
Operating system:	none
Communication:	serial radio modem (9600 bauds)
Sensors:	Odometer, 16 US sensors, a Laser Range Finder
Dimensions (LxWxH):	80cm x 80cm x 60 cm
Weight:	400kg



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

13

## Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

### 1.2. Historique

- 1980 : CMU Rover, Carnegie Mellon University
- Des roues indépendantes
  - Gestion d'un robot omni directionnel  
**全方位**



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

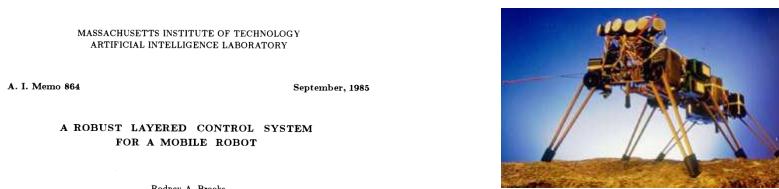
14



Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

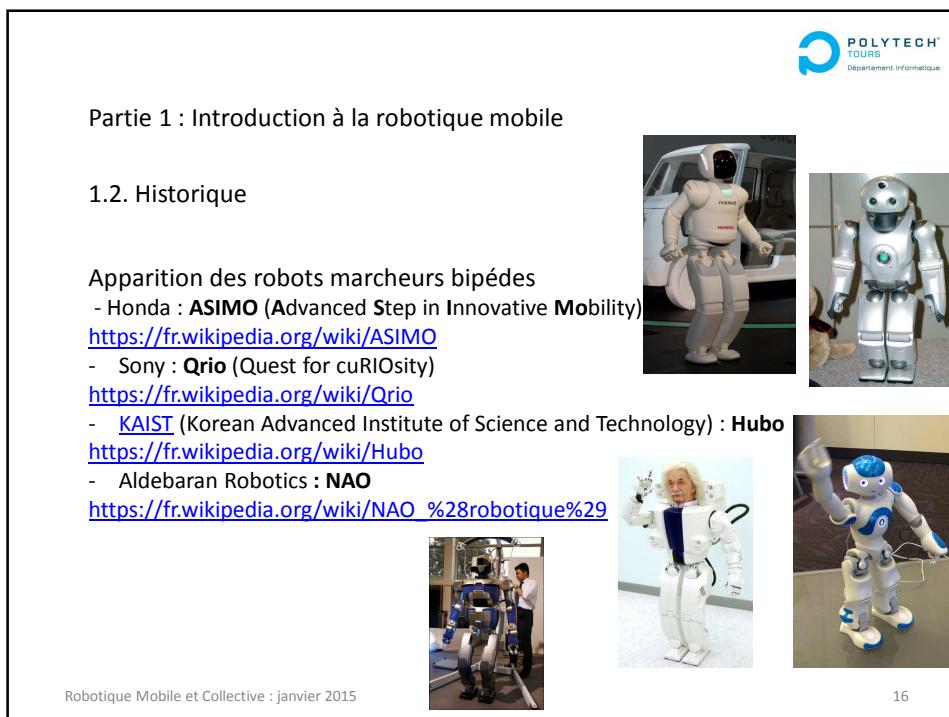
## 1.2. Historique

- 1990 : introduction de la robotique réactive (Rodney Brooks).
    - Conception de robots réactifs
    - Robots de taille plus faible
    - Introduction de l'architecture de subsumption
    - Introduction à la robotique collective
    - Pas de modélisation de l'environnement



Robotique Mobile et Collective : Janvier 2015

15



## Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

### 1.3. Classes de problèmes

#### - 1.3.1. Abstraction d'un robot mobile

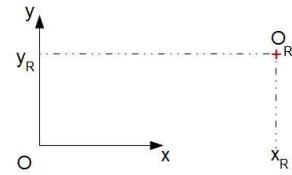
Un robot mobile peut être considéré sous une forme abstraite par un point  $O_R$  dans le plan cartésien.

Soit  $R(O,x,y)$  un repère cartésien

Le robot est alors représenté dans le repère  $R$  par les coordonnées  $(x_R, y_R)$  du point  $O_R \in R^2$ .

Le point  $O_R$  décrit de coordonnées  $(x_R, y_R)$  décrit l'état du robot ou sa configuration.

Le domaine d'action du robot est constitué du plan.



17

## Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

### 1.3. Classes de problèmes

L'ensemble des configurations valides constitue l'espace libre  $C_{free}$  dans lequel le robot peut se mouvoir.

Les configurations non valides constituent l'ensemble  $R^2 - C_{free}$ . Elles correspondent à des **obstacles** ou bien à **des positions** que le robot **ne peut pas occuper**.

Le déplacement du robot correspond à un changement de configuration et caractérise le passage de la configuration atteignable  $(a,b)$  à la configuration atteignable  $(c,d)$ .

## Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

### 1.3. Classes de problèmes

- 1.3.2. Planification de trajectoire (path planning)

Problème 1 : peut on considérer le passage du robot de la configuration (a,b) à la configuration (c,d) en restant dans l'espace atteignable  $C_{free}$ ?

La résolution de ce problème correspond au problème de la **planification de la trajectoire**.

Référence : Algorithme de planification « bug » : Vladimir J. Lumelsky, Alexander A. Stepanov, Path-Planning Strategies for a Point Mobile Automaton Moving Amidst Unknown Obstacles of Arbitrary Shape1, Algorithmica (1987) 2: 403-430

## Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

### 1.3. Classes de problèmes

- 1.3.3. Localisation

Problème 2 : Si le robot possède des capacités de mesures locales sur l'environnement  $C_{free}$ , alors le robot peut être capable de déterminer sa configuration. Il s'agit alors de résoudre un problème de **localisation**.



## Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

### 1.3. Classes de problèmes

- 1.3.4. Perception

Problème 3 : Comment le robot peut il évaluer les portions de l'espace qui ne sont pas atteignables? Cela revient à évaluer l'ensemble  $C_{free}$ , en résolvant un problème de **perception** ou **robot sensing**, par la mise en œuvre de capteurs extéroceptifs.



## Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

### 1.3. Classes de problèmes

- 1.3.5. Cartographie

Problème 4 : Comment un robot mobile peut il déterminer l'ensemble des configurations accessibles  $C_{free}$ , en supposant que ce même robot est capable de déterminer sa position. Il s'agit de résoudre le problème de la **construction de la représentation de l'environnement** du robot sous la forme d'un carte d'environnement (mapping).

Rq : La connaissance de cette carte d'environnement est souvent implicite dans la planification de trajectoires.

## Partie 1 : Introduction à la robotique mobile

### 1.3. Classes de problèmes

#### - 1.3.6. SLAM : Simultaneous Localization And Mapping

Souvent, la connaissance de l'environnement dans lequel le robot évolue n'est pas effective a priori. Il est parfois préférable que ce soit le robot qui construise cette carte.

Problème 5 : Le problème de SLAM permet à un robot de déterminer sa position **et** aussi de construire la carte de son environnement  $C_{free}$ .

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

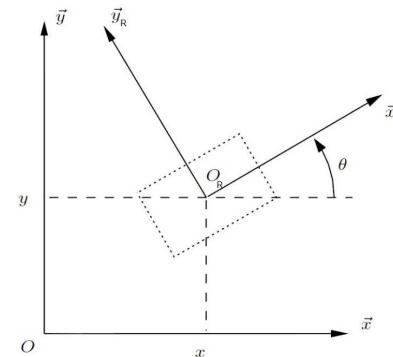
### 2.1. Véhicule roulants

#### 2.1.1. Définitions

Soient les 2 repères orthonormés directs :

$R(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$  : repère de l'environnement

$R(O_R, \vec{x}_R, \vec{y}_R, \vec{z}_R)$  : repère attaché au robot mobile.  $O_R$  constitue un point caractéristique de la plateforme mobile qui dépend de la nature et de la disposition des roues motrices.



La configuration du robot est donnée par le vecteur  $\underline{X} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}, z = 0$

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.1. Définitions

De façon plus générale, la configuration d'un robot mobile est donnée

par un vecteur  $\underline{q} \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix}$  de n coordonnées généralisées, dans l'espace des configurations de dimension n.

- 2.1.2. Roulement sans glissement

- Contexte de la locomotion avec des roues
- Point de contact entre la (les) roue(s) et le sol : pontuel
- Roue : indéformable, de rayon r
- Roulement sans glissement de la roue sur le sol : la vitesse relative de la roue par rapport au sol, au point de contact, est nulle.

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

无滑动滚动机械

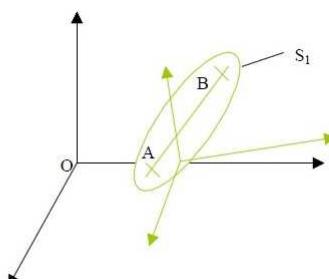
- 2.1.2. Roulement sans glissement

Rappel de mécanique :

Soit un solide S1, en mouvement dans R0 (qui peut être un solide de référence). Les données d'un problème de mécanique nous permettent souvent d'obtenir la vitesse d'un des point A ou B du solide S1. Connaissant par exemple la vitesse du point A, il est possible de déterminer par la relation classique des torseurs le champ de vitesse pour un point quelconque de S1.

En particulier, on peut écrire :

$$\vec{V}_{(B)} = \vec{V}_{(A)} + \vec{BA} \wedge \vec{\Omega}$$



## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

适用于无滑移的滚动运动

Application au mouvement de roulement sans glissement

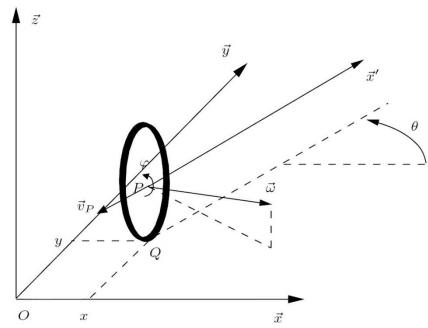
轮对地接触点  
半径为r的 轮子中心  
自转角度

Q : point de contact roue – sol  
P : centre de la roue, de rayon r  
 $\varphi$  : angle de rotation propre de la roue  
 $\theta$  : angle le plan de la roue et plan ( $O, \vec{x}, \vec{y}$ )  
 $\vec{\omega}$  : vecteur vitesse de rotation de la roue

On a :  $\vec{v}_Q = \vec{v}_P + \vec{\omega} \wedge \vec{PQ} = \vec{0}$  [1]

Coordonnées point P :  $\begin{bmatrix} x \\ y \\ r \end{bmatrix}$

Coordonnées point Q :  $\begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix}$



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

27

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

On a :  $\vec{v}_Q = \vec{v}_P + \vec{\omega} \wedge \vec{PQ} = \vec{0}$  [1]

soit :

$$\begin{aligned} \dot{x}\vec{x} + \dot{y}\vec{y} + (\dot{\theta}\vec{z} + \varphi(\sin\theta\vec{x} - \cos\theta\vec{y})) \wedge (-r\vec{z}) &= \vec{0} \\ (\dot{x} + r\dot{\varphi}\cos\theta)\vec{x} + (\dot{y} + r\dot{\varphi}\sin\theta)\vec{y} &= \vec{0} \end{aligned}$$

ce qui conduit aux contraintes scalaires

$$(\dot{x} + r\dot{\varphi}\cos\theta) = 0$$

$$(\dot{y} + r\dot{\varphi}\sin\theta) = 0$$

En faisant apparaître les composantes de vitesses dans le plan de la roue et perpendiculairement à la roue, on obtient :

$$-\dot{x}\sin\theta + \dot{y}\cos\theta = 0 \quad [2]$$

$$\dot{x}\cos\theta + \dot{y}\sin\theta = -r\dot{\varphi} \quad [3]$$

Ce qui traduit la condition que  $\vec{v}_P$  soit dans le plan de la roue et de module  $r\dot{\varphi}$

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

28

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.3. Contraintes non holonomes

Les relations

非完整约束

$$-\dot{x}\sin\theta + \dot{y}\cos\theta = 0 [2]$$

$$\dot{x}\cos\theta + \dot{y}\sin\theta = -r\dot{\phi} [3]$$

décrivent des contraintes non holonomes

Pour le roulement sans glissement, la contrainte non holonome traduit le fait qu'il est impossible de considérer un translation instantanée parallèle à l'axe de la roue.

Plus formellement, une contrainte non holonome est une contrainte non intégrable.

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.3. Contraintes non holonomes

Approche « géométrique » :

La configuration du robot est donnée par le

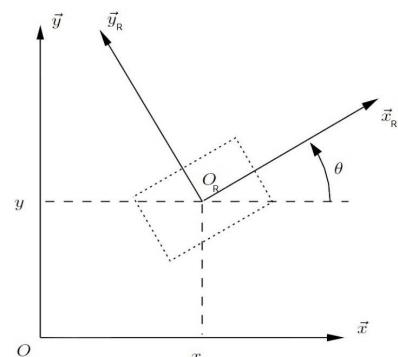
vecteur  $X \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}$

On a donc trois paramètres indépendants

Tx : translation selon  $\vec{x}$

Ty : translation selon  $\vec{y}$

Rz : Rotation autour de l'axe  $\vec{z}$



## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

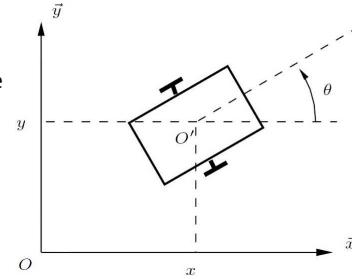
### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.3. Contraintes non holonomes

Exemple : robot char ou unicycle

Les seuls mouvements possibles sont :

- Une translation (avance ou recule)
- Une rotation autour du centre instantanée de rotation
- Les translation parallèle à l'axe des roues n'est pas possible
- On ne dispose alors que de 2 ddl pour faire évoluer la configuration du robot



## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

Les différentes architectures de robots mobiles dépendent du choix des roues et de leurs disposition. On distingue :

- Le robot de type unicycle
- Le robot de type tricycle
- Le robot de type voiture
- Le robot omnidirectionnel

Robot unicycle	<ul style="list-style-type: none"> <li>- non holonome</li> <li>- stable</li> <li>- rotation sur soi-même</li> <li>- complexité mécanique faible</li> </ul>
Robot tricycle	<ul style="list-style-type: none"> <li>- non holonome</li> <li>- peu stable</li> <li>- pas de rotation sur soi-même</li> <li>- complexité mécanique modérée</li> </ul>
Robot voiture	<ul style="list-style-type: none"> <li>- non holonome</li> <li>- stable</li> <li>- pas de rotation sur soi-même</li> <li>- complexité mécanique modérée</li> </ul>
Robot omnidirectionnel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- holonome</li> <li>- stable</li> <li>- rotation sur soi-même</li> <li>- complexité mécanique importante</li> </ul>

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

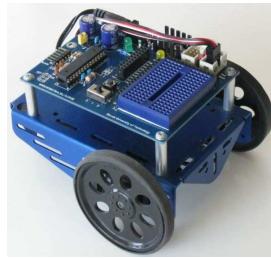
### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Robot de type unicycle : exemples



Hilare



ArduinoBoe\_Bot



Khepera



Pololu

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

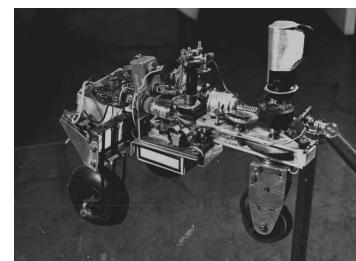
33

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Robot de type tricycle : exemples



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

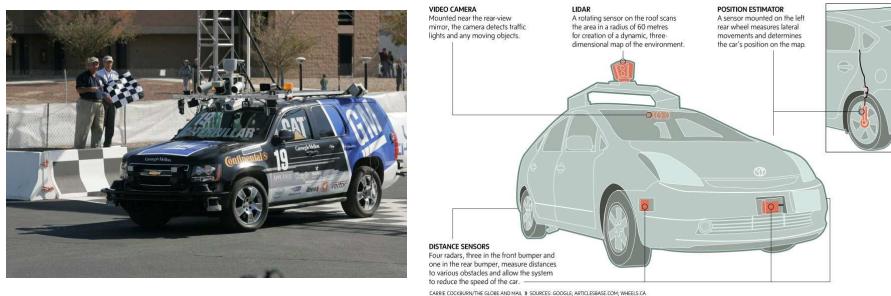
34

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot de type voiture : exemples



Université Carnegie Mellon

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

35

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Robot omnidirectionnel : exemples



Nomadic XR4000



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

36

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Modélisation :

- Porte sur la détermination du Centre de Rotation Instantanée (CIR)
  - Point de vitesse nulle autour duquel le robot tourne
  - Dépend de la configuration des roues du robot
  - Modèle(s) cinématique(s)

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Robot de type unicycle : modélisation

$O_R$  : position du robot

$\theta$  : orientation du robot

$L$  : entre-axe  $\Leftrightarrow$  longueur  $\frac{1}{2}$  essieu

$\omega$  : vitesse de rotation du robot autour de CIR

$\rho$  : rayon de courbure de la trajectoire

$v$  : vecteur vitesse au point  $O_R$

$v_g$  : vecteur vitesse roue gauche

$v_d$  : vecteur vitesse roue droite

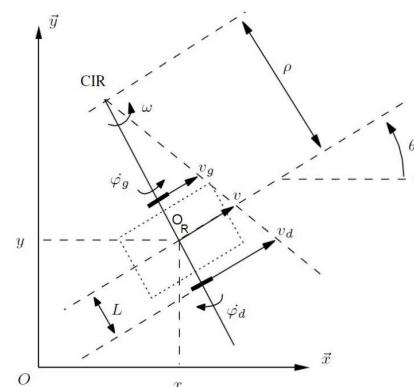
$\dot{\varphi}_g$  : vitesse de rotation roue gauche

$\dot{\varphi}_d$  : vitesse de rotation roue droite

CIR : Centre Instantané de Rotation

旋转半径

旋转中心



## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot de type unicycle : modélisation - CIR

On a  $v_d = (\rho + L)\omega$  (1) et aussi  $v_d = -r\dot{\phi}_d$  (3)

$v_g = (\rho - L)\omega$  (2) et aussi  $v_g = r\dot{\phi}_g$  (4)

- (1)  $\omega = \frac{v_d}{\rho+L}$  ce qui conduit avec (2) à  $\boxed{\rho = L \frac{v_d + v_g}{v_d - v_g}}$  puis depuis (1)

on obtient  $\boxed{\omega = \frac{v_d - v_g}{2L}}$

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot de type unicycle : modélisation - CIR

Remarques : pour  $\boxed{\rho = L \frac{v_d + v_g}{v_d - v_g}}$

- si  $v_d = v_g$  alors le rayon de courbure  $\rho$  de la trajectoire est infini, ce qui signifie que le robot se déplace selon une droite.
- si  $v_d = -v_g$  alors le rayon de courbure  $\rho$  de la trajectoire est nul, ce qui signifie que le robot pivote sur lui-même autour de  $O_R$

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot de type unicycle : modèle cinématique pour la commande

Paramètres :  $v$  vitesse longitudinale du robot en  $O_R$   
:  $\dot{\theta}$  vitesse de rotation du robot en  $O_R$  (caractérise la variation de l'orientation du robot)

On a alors :  $v = \frac{1}{2}(v_d + vg) = \frac{1}{2}r(\dot{\varphi}_g - \dot{\varphi}_d)$  (cf. relations 3 et 4)

et  $\omega = \dot{\theta} = \frac{v_d - vg}{2L} = -r \frac{\dot{\varphi}_d + \dot{\varphi}_a}{2L}$

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot de type unicycle : modèle cinématique pour la commande  
运动学的

Les couples de paramètres  $(v, \omega)$  ou  $(v, \theta)$  et  $(\dot{\varphi}_d, \dot{\varphi}_g)$  sont équivalents  
De façon pratique, les paramètres  $(v, \omega)$  ou  $(v, \theta)$  sont plutôt utilisés. Ce sont les paramètres de commande.

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot de type unicycle : modèle cinématique en posture

La posture ou configuration du robot est donnée par le vecteur de composantes  $\underline{X} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}$ .

En considérant la dérivée du vecteur de configuration, on obtient :

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v\cos\theta \\ v\sin\theta \\ \omega \end{bmatrix} \text{ soit } \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \underline{u} \text{ avec } \underline{u} = [v \quad \omega]$$

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot de type unicycle : modèle cinématique inverse

Soit un robot de type tricycle se déplaçant à la vitesse  $v(t)$  selon la direction

$\theta(t)$ . Son vecteur de configuration est alors  $\underline{X}(t) \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix}$  tq :

$$x(t) = \int_0^t V(t) \cos(\theta(t)) dt$$

$$y(t) = \int_0^t V(t) \sin(\theta(t)) dt$$

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt$$

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot de type unicycle : modèle cinématique inverse

En considérant les expression de  $V(t)$  et  $\omega(t)$  mises en place précédemment,  $V(t) = \frac{1}{2}(v_d(t) + vg(t))$  et  $\omega(t) = \frac{1}{2L}(v_d(t) - vg(t))$  :

$$x(t) = \frac{1}{2} \int_0^t (v_d(t) + vg(t)) \cos(\theta(t)) dt$$

$$y(t) = \frac{1}{2} \int_0^t (v_d(t) + vg(t)) \sin(\theta(t)) dt$$

$$\theta(t) = \frac{1}{2L} \int_0^t (v_d(t) - vg(t)) dt$$

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot de type unicycle : modèle cinématique inverse

Cas 1 :  $v_d(t) = Cte = vd$  et  $v_l(t) = Cte = vl$  et  $v_d \neq v_g$

$$x(t) = \frac{v_d + vg}{2} \int_0^t \cos(\theta(t)) dt$$

$$y(t) = \frac{v_d + vg}{2} \int_0^t \sin(\theta(t)) dt$$

$$\theta(t) = \frac{v_d - vg}{2L} \int_0^t dt$$

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot de type unicycle : modèle cinématique inverse

Cas 1 :  $v_d(t) = Cte = vd$  et  $v_l(t) = Cte = vl$  et  $v_d \neq v_g$

$$x(t) = \frac{v_d + v_g}{2} \int_0^t \cos(\theta(t)) dt$$

$$y(t) = \frac{v_d + v_g}{2} \int_0^t \sin(\theta(t)) dt$$

$$\theta(t) = \frac{v_d - v_g}{2L} \int_0^t dt$$

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot de type unicycle : modèle cinématique inverse

Cas 1 :  $v_d(t) = Cte = vd$  et  $v_l(t) = Cte = vl$  et  $v_d \neq v_g$

$$x(t) = \frac{v_d + v_g}{2} \int_0^t \cos(\theta(t)) dt$$

$$y(t) = \frac{v_d + v_g}{2} \int_0^t \sin(\theta(t)) dt$$

$$\theta(t) = t \frac{v_d - v_g}{2L} + \theta_0$$

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot de type unicycle : modèle cinématique inverse

Cas 1 :  $v_d(t) = Cte = vd$  et  $v_l(t) = Cte = vl$  et  $v_d \neq v_g$

$$\theta(t) = t \frac{v_d - v_g}{2L}$$

$$x(t) = \frac{v_d + vg}{2} \int_0^t \cos\left(t \frac{v_d - vg}{2L}\right) dt$$

$$y(t) = \frac{v_d + vg}{2} \int_0^t \sin\left(t \frac{v_d - vg}{2L}\right) dt$$

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot de type unicycle : modèle cinématique inverse

Cas 1 :  $v_d(t) = Cte = vd$  et  $v_l(t) = Cte = vl$  et  $v_d \neq v_g$

$$\theta(t) = t \frac{v_d - v_g}{2L}$$

$$x(t) = L \frac{v_d + vg}{\frac{v_d - v_g}{2L}} \sin\left(\frac{v_d - vg}{2L}\right) t$$

$$y(t) = -L \frac{v_d + vg}{\frac{v_d - v_g}{2L}} \cos\left(\frac{v_d - vg}{2L}\right) t$$

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot de type unicycle : modèle cinématique inverse

Cas 2 :  $v_d(t) = Cte = vd$  et  $v_l(t) = Cte = vl$  et  $v_d = vg = v$

Le robot se déplace en ligne droite

直线行走

$$\theta(t) = \theta_0 = Cte$$

$$x(t) = x_0 + v \cos \theta_0$$

$$y(t) = y_0 + v \sin \theta_0$$

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot de type unicycle : modèle cinématique inverse

Cas 3 :  $v_d(t) = Cte = vd$  et  $v_l(t) = Cte = vl$  et  $v_d = -vg = v$

Le robot tourne sur lui même

自转

$$\theta(t) = \theta_0 + \frac{vt}{2L}$$

$$x(t) = x_0$$

$$y(t) = y_0$$

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot de type tricycle : modélisation

- Roues arrière motrices,
- Roue avant seulement directrice  
后轮驱动  
前轮转向

$O_R$  : position du robot

$\theta$  : orientation du robot

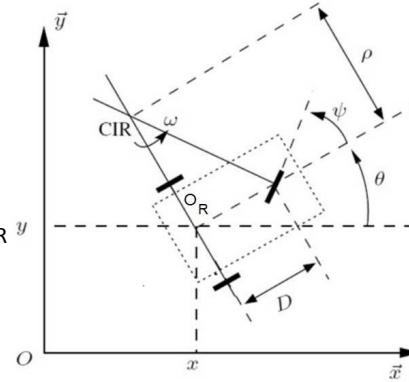
$\omega$  : vitesse de rotation du robot autour de CIR

$\rho$  : rayon de courbure de la trajectoire

$\psi$  : Orientation de la roue directrice

**CIR : Centre Instantané de Rotation**

$V$  : vitesse au point  $O_R$



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

53

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot de type tricycle : modélisation CIR

On a       $\tan \psi = \frac{D}{\rho}$  soit  $\boxed{\rho = \frac{D}{\tan \psi}}$

et       $v = \rho \omega \Rightarrow v = \frac{D \omega}{\tan \psi} \Rightarrow \boxed{\omega = v \frac{\tan \psi}{D}}$

- si  $\psi = 0$  le véhicule se déplace selon une droite
- si  $\psi = \pm \frac{\pi}{2}$  le véhicule pivote autour du point  $O_R$

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

54

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot de type tricycle : modélisation cinématique

Le modèle cinématique est donné par :

$$\dot{x} = v \cos \theta$$

$$\dot{y} = v \sin \theta$$

$$\dot{\theta} = \frac{v}{D} \tan \psi$$

$\dot{\psi} = \eta$  avec  $\eta$  vitesse liée à l'orientation de la roue

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

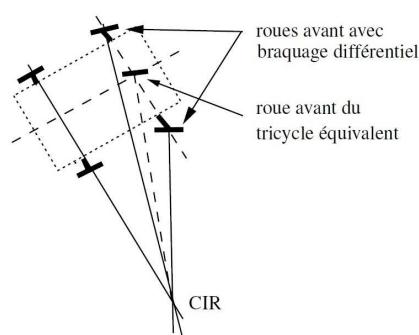
### 2.1. Véhicule roulants

汽车

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot de type voiture : modélisation

Possibilité de se ramener au robot de type tricycle



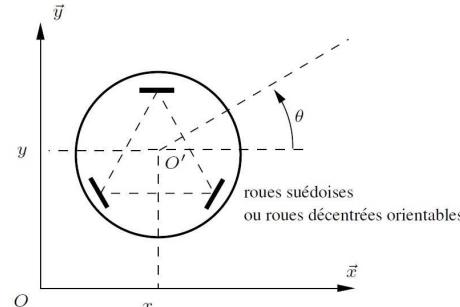
## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.1. Véhicule roulants

- 2.1.4. Classes de robots mobiles

- Le robot omnidirectionnel : modélisation

万向机器人



<https://www.youtube.com/watch?v=TXTo16KKm8Q>

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

57

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.1. Introduction

- Limite des robots roulants :

- La mobilité est assurée tant que les roues restent en contact avec le sol  
一接触地面就要动  
不适合崎岖地面
- Non adaptés aux déplacements sur des terrains accidentés
  - Forêts, exploration spatiale, zone de sinistre,...

- Etude des robots roulants

- Etude des mécanismes pour propulser et diriger le véhicule  
⇒ introduction des robots marcheurs à pattes

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

58

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- Etude des robots à pattes :

- Conception des pattes
- Stratégies de commande des pattes pour permettre les déplacements du robot

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.2. Panorama des robots à pattes

- Monopode



Pogostick



ARL

<https://www.youtube.com/watch?v=XFXj81mvInc>

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

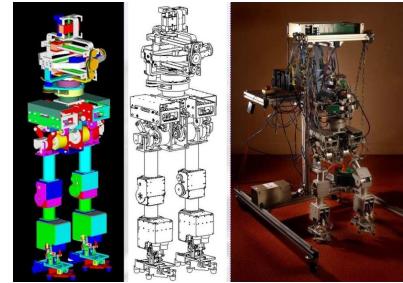
### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.2. Panorama des robots à pattes

- Bipède



Rabbit



Robian\_Liris

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

61

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

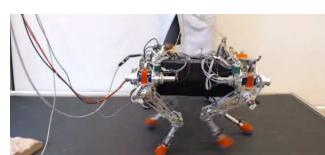
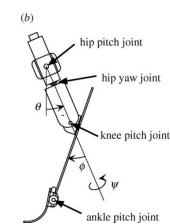
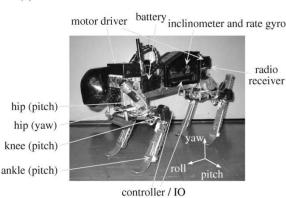
### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.2. Panorama des robots à pattes

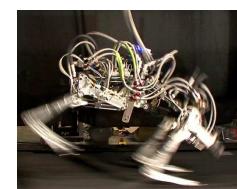
- Multipède

- Quadripode

(a)



ETH\_Zurich



Biologically inspired adaptive walking of a quadruped robot, Hiroshi Kimura, Yasuhiro Fukuoka, Avis H Cohen, Published 15 January 2007.

[https://www.youtube.com/watch?feature=player\\_embedded&v=chPanW0QWhA](https://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=chPanW0QWhA)

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

62

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.2. Panorama des robots à pattes

- Multipède

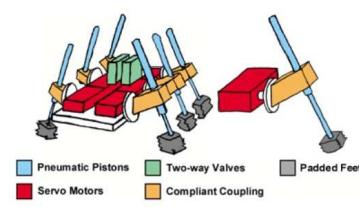
- Hexapode, Octopode,... 六足, 八足



SnakeMonster

Ambler : <https://www.youtube.com/watch?v=yQKTVBH0upQ>

Sprawlitia



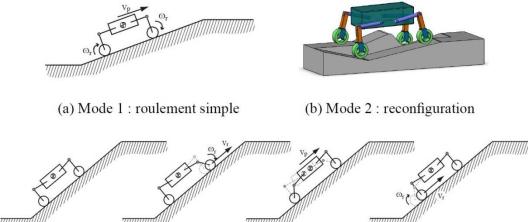
Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.2. Panorama des robots à pattes

- Hybride 混杂的, 杂种的—— 轮子+脚



Christophe Grand, Faïz Ben Amar, Frédéric Plumet et Philippe Bidaud , Optimisation des modes de déplacement d'un robot à locomotion hybrideroue-patte évoluant en milieux naturels, 17 ème Congrès Français de Mécanique Troyes, – septembre 2005 (LRP\_Paris 6)

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

64

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.3. Notion de stabilité
  - Capacité du robot à rester à maintenir sa posture sur ses pattes
  - Deux déclinaisons
    - Stabilité statique
    - Stabilité quasi dynamique
    - Stabilité dynamique
  - Notion supplémentaire : marge de stabilité

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.3. Notion de stabilité
  - Stabilité statique
    - Le robot reste en équilibre lorsque toutes les pattes restent figées (immobiles)
    - Condition de stabilité statique :
      - Le centre de gravité du robot reste à l'intérieur d'une enveloppe convexe définie par un polygone dont les sommets correspondent au point de contact de chacune des pattes avec le sol. Le polygone défini constitue le polygone de sustentation.

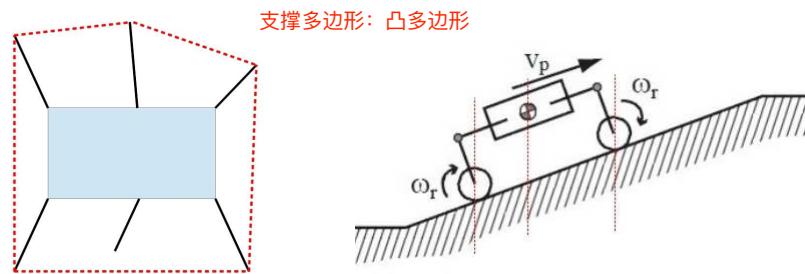
## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.3. Notion de stabilité

- Stabilité statique

- Polygone de sustentation (enveloppe convexe)



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

67

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.3. Notion de stabilité

- Stabilité quasi dynamique

- Caractérisée par des phases où la verticale qui passe par le centre de gravité est située à la limite du polygone de sustentation

- Stabilité dynamique

- Le centre de gravité peut sortir de l'enveloppe convexe du polygone de sustentation.
- Si la commande du robot permet de replacer le centre de gravité dans le polygone de sustentation, on parle de commande dynamique (cas des robots pendulaires, bipèdes).

钟摆的

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

68

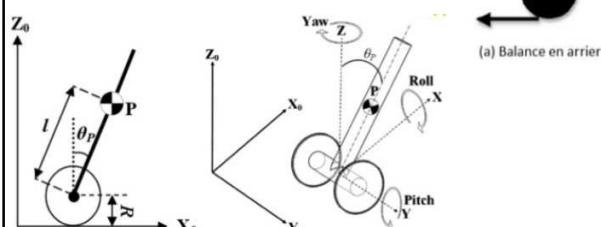
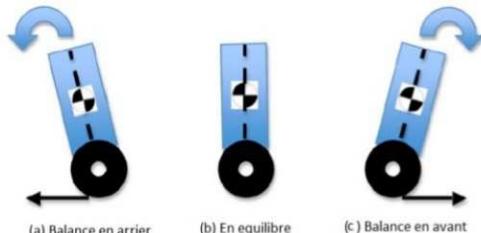
## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.3. Notion de stabilité

- Exemple robot pendulaire

调节轮子和地面的接触点，使得“直立”



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

<https://www.youtube.com/watch?v=A5KtT4GVpx8&feature=youtu.be>

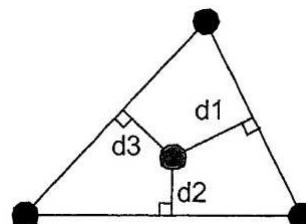
## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.3. Notion de stabilité

- Marge de stabilité : illustration

Marge de stabilité :  $\min(d_1, d_2, d_3)$



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

70

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.4. Nombre de pattes

- 1 patte : robot sauteur

- 2 pattes : humanoïde

- 4, 6 ou 8 pattes : les architectures de robots à pattes les plus utilisées.

- Au moins une patte doit pouvoir bouger librement pour que le robot puisse changer de posture    **至少一条腿必须能够自由移动，以便机器人可以改变姿势**  
=> maintien de la stabilité statique
- Au moins 4 pattes pour assurer la stabilité statique
  - 3 pour définir l'enveloppe convexe qui caractérise le polygone de sustentation
  - 1 pour se déplacer
  - **Le nombre de pattes impacte les capacités de déplacement**

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

71

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

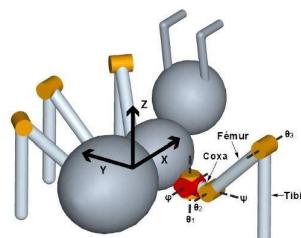
### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.5. Conception des pattes

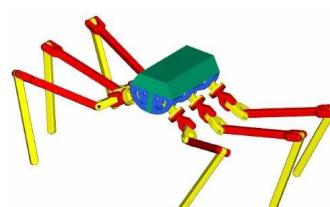
- Le robot est composé d'un corps

- Une patte possède :

- Un point fixe sur le corps du robot
- Un pied considéré comme l'organe terminal



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

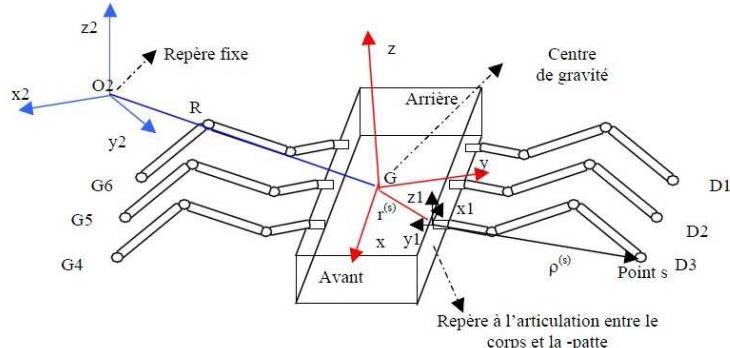


72

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.6. Modélisation d'une patte



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

73

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.5. Conception des pattes
- Une patte peut être considérée comme un bras manipulateur
  - La configuration la plus usuelle : patte à 3 articulations
  - Chaque articulation : rotation ou translation
  - 8 configurations de pattes différentes (RRR) jusqu'à (PPP)

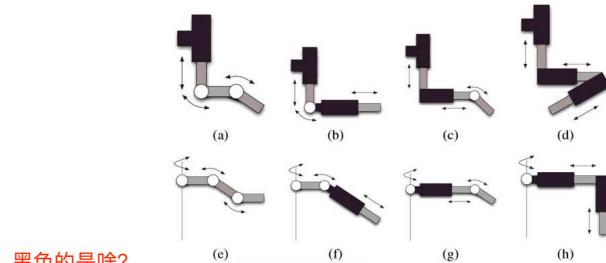
Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

74

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.5. Conception des pattes



黑色的是啥?

Figure 3.18. **Eight three-jointed limbs** based on simple prismatic and rotational joints. Rotational joints are indicated by small circles, and prismatic joints are indicated by two intensity-level rectangles. Designs (a)–(d) utilize prismatic joints at the contact with the robot body, while (e)–(h) utilize rotational joints. The final prismatic joint of design (d) is directed out of the page.

G. Dudek, M. Jenkins, Computational principles of mobile robotics,  
2<sup>nd</sup> Edition, Cambridge University Press, 2010

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

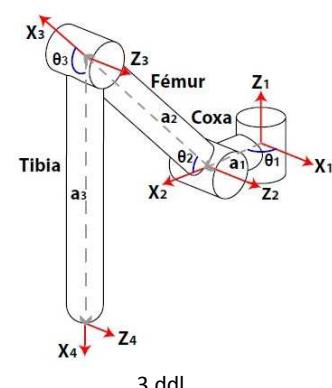
75

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.6. Modélisation des pattes

- Pattes à 2 ddl de type **RR**
  - **Idem structure 3ddl**
  - La première articulation : fixe
- Patte à 3 ddl de type **RRR**
- Modèles direct et inverse
- Modèle cinématique
- Exemple : patte à 2 liaisons RR  
coplanaires  
**共面的**



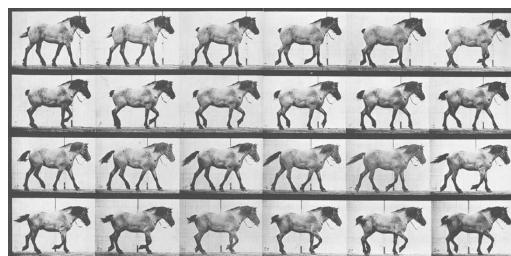
Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

76

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.7. Stratégie de déplacement des pattes
  - Il s'agit de définir la forme ou l'allure du mouvement des pattes (gait) d'un robot
  - Référence historique : Muybridge – photographe
    - Etude de la démarche de systèmes biologiques pour des bipèdes et des quadrupèdes
      - E. Muybridge, *The human figure in motion*, Dover, New York, 1901-1955.
      - E. Muybridge, *Animals in motion*, Dover, New York, 1899-1957.



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

77

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.7. Stratégie de déplacement des pattes
  - La marche (*stride*) d'un robot à pattes :
    - Décomposée en différentes étapes
    - Chaque étape est synchronisée
  - Différentes étapes :
    - Le transfert : la patte n'est pas en contact avec le sol
    - Le soutien (*support*) : la patte est en contact avec le sol
  - De différentes durées :
    - Facteur de marche (*duty factor*) : durée de la phase de soutien
    - Temps de cycle (*cycle time*) : durée d'un cycle complet de déplacement d'une patte

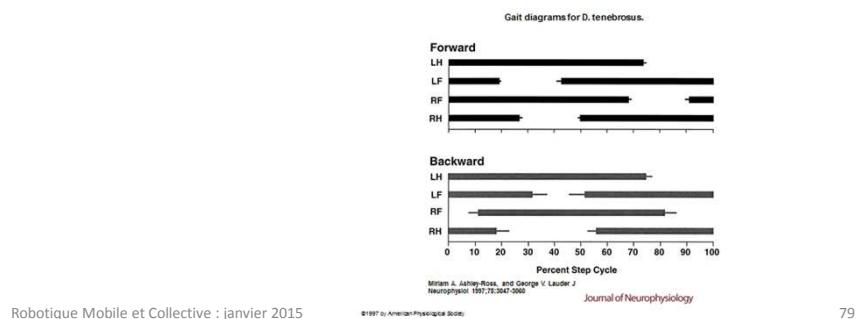
Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

78

## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.7. Stratégie de déplacement des pattes
  - Représentation graphique de la marche (Diagramme de Hildebrand) (exemple de la salamandre)



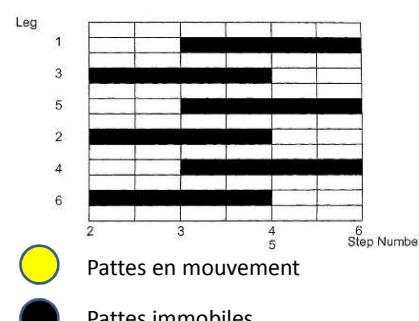
Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

79

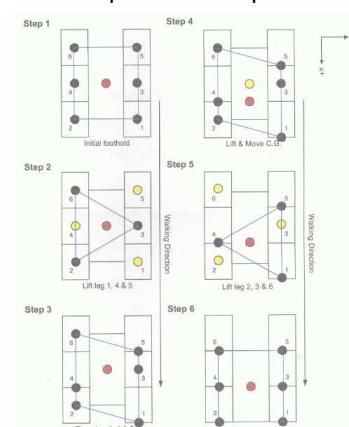
## Partie 2 : Architecture de robots mobiles - Déplacements

### 2.2. Robots mobiles à pattes

- 2.2.7. Stratégie de déplacement des pattes : hexapode – stabilité statique



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015



80

## Partie 3 : Capacité de perception

### 3.1. Introduction

- Perception : capacités à recueillir et traiter des informations qui permettront :
  - Au robot d'**agir** au sein de son environnement
  - Au robot de **réagir** au sein de l'environnement
 => Introduction de capteurs
- Deux classes de capteurs
  - Capteurs **proprioceptifs**
    - Permettent de connaître l'état interne du robot
  - Capteurs **extéroceptifs**
    - Permettent de prélever des informations concernant l'environnement du robot

## Partie 3 : Capacité de perception

### 3.1. Introduction

- 本体感受器：与机器人的相对位置相关联**
- Capteurs proprioceptifs : associés à la localisation relative du robot
  - Capteurs extéroceptifs : associés à la localisation absolue du robot
  - Localisation relative   **外部感知传感器：与机器人的绝对位置相关联，比如GPS**
    - permet au véhicule de naviguer à l'estime (« dead reckoning ») en utilisant uniquement les mesures de ses mouvements propres fournies par ses capteurs proprioceptifs.
  - Localisation absolue :
    - utilise les mesures des capteurs extéroceptifs pour estimer la position du véhicule dans un repère lié à l'environnement. Les capteurs extéroceptifs permettent de **recaler** périodiquement la localisation obtenue par la mesure des mouvements.

### Partie 3 : Capacité de perception

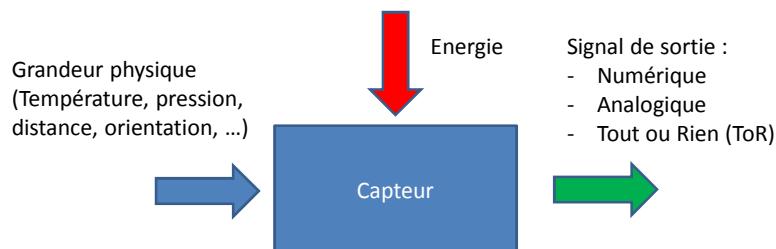
#### 3.1. Introduction

- Capteurs passifs
  - La mesure d'une grandeur est réalisée par réception passive d'un signal (capteur de température, camera,...)
- Capteurs actifs
  - La mesure est réalisée en utilisant une source d'énergie qui interagit avec l'environnement observé (capteurs Ultra Sonore, Infra Rouge,...)

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.1. Introduction

- Mise en œuvre fonctionnelle d'un capteur (1)



POLYTECH' TOURS  
Département Informatique

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.1. Introduction

- Mise en œuvre fonctionnelle d'un capteur (2)

```

graph TD
    A((Système physique en évolution permanente)) --> B[capteur transducteur]
    C((parasites grandeurs d'influence)) --> B
    B --> D[pré-traitement transmission]
    D -- "Amplification, Mise en forme pour transmission." --> E[traitement du signal]
    E -- "Décodage, filtrage, amplification, conversion numérique, traitement informatique" --> F[visualisation du résultat]
    F -- "Voyant, alarme, afficheur, écran d'ordinateur, imprimante" --> G
  
```

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

85

POLYTECH' TOURS  
Département Informatique

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.1. Introduction

- Quelques propriétés caractéristiques des capteurs
  - Etendue de mesure : Valeurs extrêmes pouvant être mesurées par le capteur.
  - Résolution : Plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur.
  - Sensibilité : Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée.
  - Précision : Aptitude du capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie.
  - Rapidité : Temps de réaction du capteur.
  - Linéarité : représente l'écart de sensibilité sur l'étendue de mesure

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

86

### Partie 3 : Capacité de perception

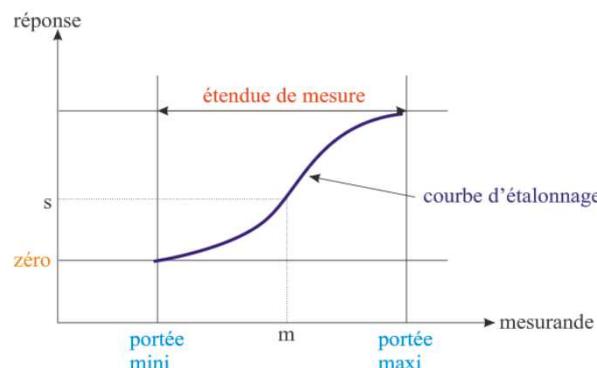
#### 3.1. Introduction

- Quelques propriétés caractéristiques des capteurs
  - Encombrement
  - Coût
  - Poids
  - Puissance consommée
  - Traitement numérique associé
    - Simple : interrupteur (information ToR)
    - Complexe : caméra (traitement d'images, détection de contours,...)

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.1. Introduction

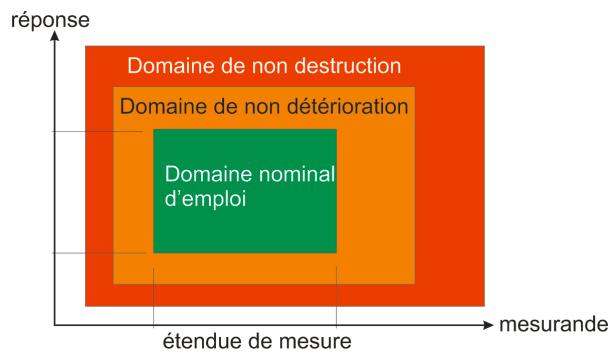
- Quelques propriétés caractéristiques des capteurs



### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.1. Introduction

- Quelques propriétés caractéristiques des capteurs
  - Domaine d'utilisation



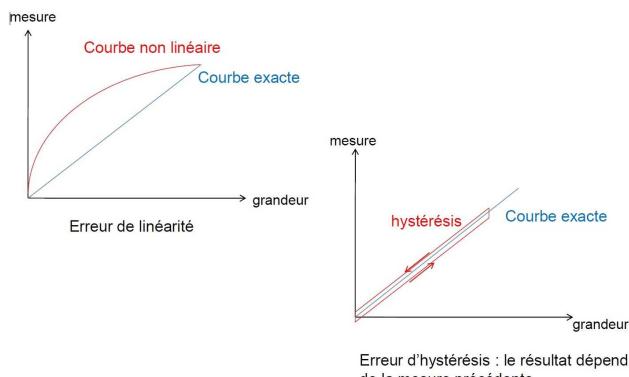
Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

89

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.1. Introduction

- Quelques propriétés caractéristiques des capteurs



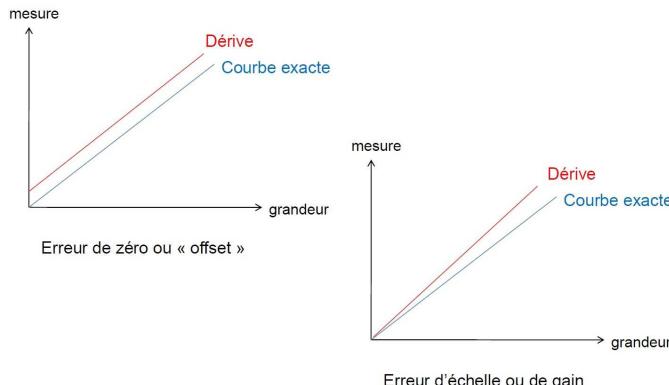
Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

90

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.1. Introduction

- Quelques propriétés caractéristiques des capteurs



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

91

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2. Capteurs en robotique mobile

- 4 classes principales

- Capteurs de distance (range sensor) : retourne une mesure de distance entre les capteurs et les objets présents dans l'environnement (Ex : US, IR, vision,...)
- Capteur de position absolue : retourne la position du robot de façon absolue dans un système de coordonnées de référence (Ex : système GPS)
- Capteurs d'environnement : retournent des mesures qui caractérisent l'environnement (Ex : température ambiante, pression atmosphérique, couleur d'un point particulier de l'environnement,...)
- Capteurs inertIELS : renvoient des informations dérivées
  - Vitesse, accélération (centrale inertIELLE)

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

92

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.1. Capteurs proprioceptifs

##### - Localisation relative

- Odométrie

- Fournit une estimation en temps réel de la position ( $x, y$ ) et du cap  $\theta$  d'un véhicule navigant sur un sol plan, par rapport au repère de référence qui était celui du véhicule dans sa configuration initiale.
- Précision correcte sur de faibles distances.
- Technique basée sur l'intégration des mouvements angulaires élémentaires des roues au moyen de codeurs incrémentaux.
- Sources d'erreurs : imprécision des paramètres géométriques du véhicule (rayon des roues, base du véhicule), ainsi que les phénomènes de glissement et/ou de patinage des roues non pris en compte.

Robotique Mobile et Collective : janvier 2010

93

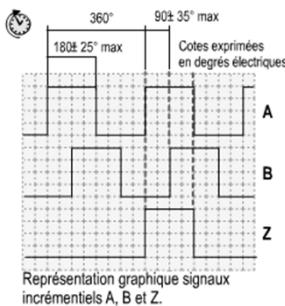
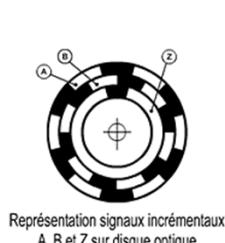
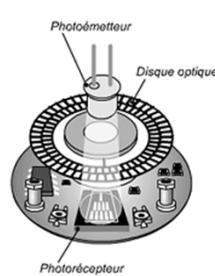
### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.1. Capteurs proprioceptifs

##### - Localisation relative

- Odométrie

- Capteurs associés : codeurs incrémentaux



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

94

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.1. Capteurs proprioceptifs

##### - Localisation relative

- Autres capteurs
  - Accéléromètres : mesure de la force  $F$  à laquelle est soumise une masse pour en déduire son accélération qui, intégrée deux fois, permet d'estimer le déplacement linéaire du véhicule.
  - Capteurs à effet Doppler : Une onde radioélectrique de fréquence  $f$  est émise vers le sol avec une inclinaison par rapport à la direction de déplacement du véhicule. La variation de fréquence entre le signal émis et le signal reçu est proportionnelle à la vitesse du véhicule
  - Gyroscopes : appareils permettant d'effectuer une mesure de la rotation absolue de son boîtier.

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.1. Capteurs proprioceptifs

##### - Localisation relative

- Autres capteurs
  - Gyromètres : Un gyromètre est un gyroscope à un axe. C'est un capteur de vitesse angulaire. L'intégration de cette mesure de vitesse de rotation permet d'obtenir une estimation de l'angle de cap d'un véhicule.
  - Compas Magnétiques : mesure absolue du cap par rapport à la direction du nord géographique. Sensible aux masses magnétiques environnantes.
  - Inclinomètres : mesure des angles d'attitude (tangage et roulis) sur le principe des accéléromètres pendulaires. Sensibles à la gravité terrestre mais aussi à toute accélération extérieure qui leur est appliquée.

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

##### - Localisation absolue : GPS (Global Positioning System)

- Ensemble de 24 satellites
- Répartis sur 6 plans orbitaux tous inclinés d'environ 55 ° sur l'équateur (orbite circulaire de rayon environ 20000 km).
- Chaque satellite envoie des informations permettant de l'identifier et de le localiser.
- Les mesures de plusieurs satellites sont nécessaires pour estimer les coordonnées (longitude, latitude, altitude) du mobile à localiser.
- Précision : ....quelques mètres

### Partie 3 : Capacité de perception

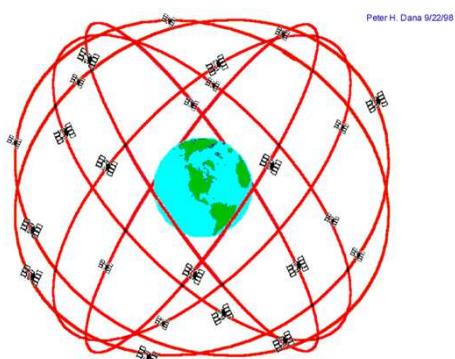
#### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

##### - Localisation absolue

##### GPS (Global Positioning System)

##### Repérage géographique :

- Latitude
- Longitude
- Altitude



### Partie 3 : Capacité de perception

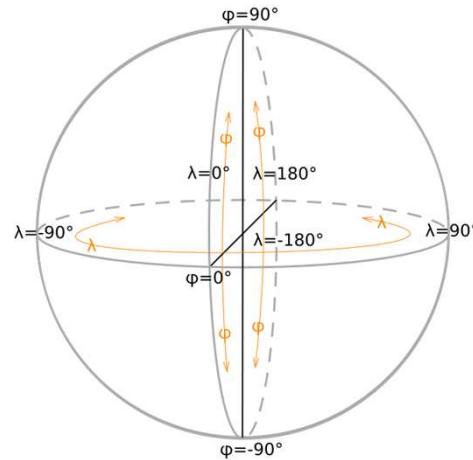
#### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

- Localisation absolue

GPS (Global Positioning System)

Coordonnées géographique

- Latitude
- Longitude
- Altitude



[https://fr.wikipedia.org/wiki/Coordonn%C3%A9es\\_g%C3%A9ographiques](https://fr.wikipedia.org/wiki/Coordonn%C3%A9es_g%C3%A9ographiques)

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

99

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

- Localisation absolue : GPS (Global Positioning System)

Latitude :

- Valeur angulaire
- Exprime le positionnement nord ou sud d'un point sur Terre. D'un point de vue mathématique, la latitude d'un point est l'angle au centre que forme la normale (verticale) en ce point avec le plan équatorial.
- Mesure angulaire s'étendant de 0° à l'équateur à 90° aux pôles.
- Les points de même latitude constituent un cercle approximatif appelé parallèle
- Plus la latitude s'écarte de 0°, plus on s'éloigne du plan de l'équateur

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Coordonn%C3%A9es\\_g%C3%A9ographiques](https://fr.wikipedia.org/wiki/Coordonn%C3%A9es_g%C3%A9ographiques)

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

100

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

##### - Localisation absolue : GPS (Global Positioning System)

Longitude :

- Valeur angulaire
- Exprime le positionnement est ou ouest d'un point sur Terre. En géodésie, c'est l'angle au centre que forme le plan passant par ce point et par l'axe de rotation de la terre avec le plan du méridien de méridien de Greenwich.
- Mesure angulaire avec une étendue de  $-180^\circ$  à  $+180^\circ$ , ou respectivement de  $180^\circ$  ouest à  $180^\circ$  est. Les points de même latitude constituent un cercle approximatif appelé parallèle
- Le méridien usuel de référence est le méridien de Greenwich (qui sert aussi de référence pour les fuseaux horaires).

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

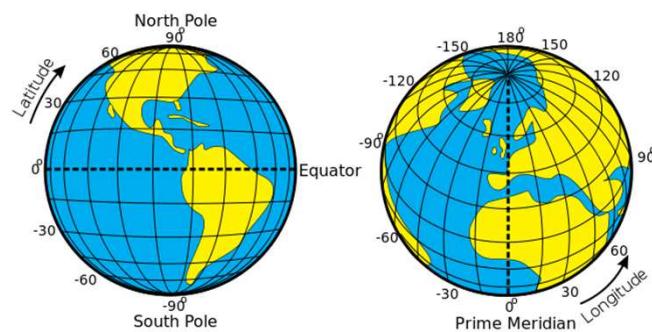
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Coordonnées\\_géographiques](https://fr.wikipedia.org/wiki/Coordonnées_géographiques)

101

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

##### - Localisation absolue : GPS (Global Positioning System)



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Coordonnées\\_géographiques](https://fr.wikipedia.org/wiki/Coordonnées_géographiques)

102



### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

##### - Localisation absolue : GPS (Global Positioning System)

- Expression latitude et longitude
  - Exemple : Polytech Tours : 64 Av Jean Portalis, Tours
    - Latitude : 47.3212619
    - Longitude : 0.7183686
  - ou encore :
    - Latitude : 47° 19' 16.543 '' N
    - Longitude : 0° 43' 6.127'' E

Source : <http://www.cordonnees-gps.fr/>

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

103



### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

##### - Localisation absolue : GPS (Global Positioning System)

- Guidage d'un robot sur une sphère
  - Terre : supposée sphérique
  - Rayon terre : 6370 km ou 6371 km
  - Pour de grande distance ou de grand trajet :
    - Approximation du trajet sur un plan impossible
    - Passage en coordonnées sphériques

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

104

### Partie 3 : Capacité de perception

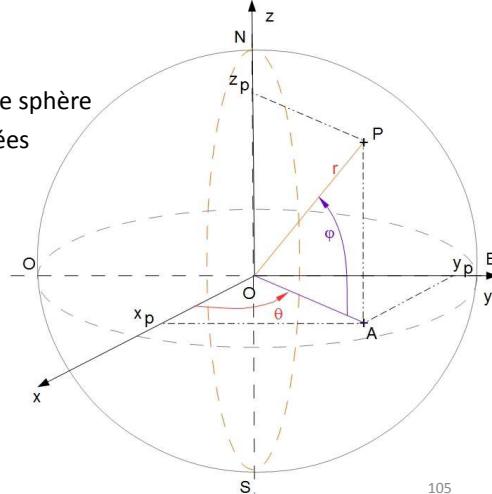
#### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

##### - Localisation absolue : GPS

- Guidage d'un robot sur une sphère
  - Passage en coordonnées sphériques
  - $r$  : rayon terre
  - $\theta$  : longitude
  - $\varphi$  : latitude

$$\begin{aligned} [OA] &= r \cos \varphi \\ x_p &= r \cos \varphi \cos \theta \\ y_p &= r \cos \varphi \sin \theta \\ z_p &= r \sin \varphi \end{aligned}$$

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015



105

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

##### - Localisation absolue : GPS

- En supposant que la variation de latitude, longitude (et du rayon  $r$ ) sont petites, alors on peut assimiler l'environnement du robot à un plan.

- Il est alors possible de calculer la variation de position  $\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}$  en fonction de la variation  $\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \varphi \\ \Delta r \end{bmatrix}$  par  $\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \varphi \\ \Delta r \end{bmatrix}$  où  $J$  est de la forme  $\begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta} & \frac{\partial x}{\partial \varphi} & \frac{\partial x}{\partial r} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta} & \frac{\partial y}{\partial \varphi} & \frac{\partial y}{\partial r} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta} & \frac{\partial z}{\partial \varphi} & \frac{\partial z}{\partial r} \end{bmatrix}$ . On arrive alors :

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

106

## Partie 3 : Capacité de perception



## 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

## - Localisation absolue : GPS

- $$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r \sin \theta \cos \varphi & -r \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \theta \\ r \cos \theta \cos \varphi & -r \sin \varphi \sin \theta & \cos \varphi \sin \theta \\ 0 & r \cos \varphi & \sin \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \varphi \\ \Delta r \end{bmatrix}$$

## • Interprétation de la matrice J

- La matrice J permet de mettre en place un repère cardinal  $\mathcal{R}_1$  représentant les directions (Est, Nord, Altitude) et correspondant à une carte locale du robot
- 1<sup>ère</sup> colonne : direction Est
- 2<sup>ème</sup> colonne : direction Nord
- 3<sup>ème</sup> colonne : altitude

## Partie 3 : Capacité de perception



## 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

## - Localisation absolue : GPS

- $$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r \sin \theta \cos \varphi & -r \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \theta \\ r \cos \theta \cos \varphi & -r \sin \varphi \sin \theta & \cos \varphi \sin \theta \\ 0 & r \cos \varphi & \sin \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \varphi \\ \Delta r \end{bmatrix}$$

## • Interprétation de la matrice J

- En normant les colonnes de la matrice J, il est possible de définir la matrice de passage H du repère  $\mathcal{R}_1$  (carte locale) vers le repère géographique  $\mathcal{R}_0$ .
- On a alors qui s'exprime par :

- $$H = \begin{bmatrix} -\sin \theta & -\sin \varphi \cos \theta & \sin \varphi \sin \theta \\ \cos \theta & -\sin \varphi \sin \theta & \cos \varphi \sin \theta \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \end{bmatrix} \text{ et } H^{-1} = H^t$$

## Partie 3 : Capacité de perception



## 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

## - Localisation absolue : GPS

- Connaissant les composantes d'un vecteur  $\mathbf{v}$  exprimées dans le repère  $\mathcal{R}_1$ , il est possible de calculer les composantes du même vecteur  $\mathbf{v}$  dans le repère  $\mathcal{R}_0$  par la relation :

$$\mathbf{v}/_{\mathcal{R}_0} = \mathbf{H} \mathbf{v}/_{\mathcal{R}_1}$$

- En normant les colonnes de la matrice  $\mathbf{J}$ , il est possible de définir la matrice de passage  $\mathbf{H}$  du repère  $\mathcal{R}_1$  (carte locale) vers le repère géographique  $\mathcal{R}_0(x, y, z)$
- On a alors  $\mathbf{H}$  qui s'exprime par :

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} -\sin \theta & -\sin \varphi \cos \theta & \sin \varphi \sin \theta \\ \cos \theta & -\sin \varphi \sin \theta & \cos \varphi \sin \theta \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \end{bmatrix}$$

## Partie 3 : Capacité de perception



## 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

## - Localisation absolue : GPS

- Application : calcul du vecteur vitesse selon des repères différents
  - Soit un robot mobile  $m$  situé en  $(\theta_m, \varphi_m)$  dont la vitesse de déplacement est  $\mathbf{v}$  par rapport au sol. Ce vecteur est exprimé dans la carte locale du robot, de repère  $\mathcal{R}_m$ .
  - Soit un observateur local  $a$  situé en  $(\theta_a, \varphi_a)$ . Il voit alors le vecteur vitesse du même robot mobile dans son repère local  $\mathcal{R}_a$ .
  - On alors :

$\mathbf{v}/_{\mathcal{R}_m} = \mathbf{H}_m^t \mathbf{v}/_{\mathcal{R}_0}$  et  $\mathbf{v}/_{\mathcal{R}_a} = \mathbf{H}_a^t \mathbf{v}/_{\mathcal{R}_0}$  ( $\mathbf{H}_a$  : pour  $(\theta_a, \varphi_a)$ ) et  
( $\mathbf{H}_m$  : pour  $(\theta_m, \varphi_m)$ ) d'où :

$$\mathbf{v}/_{\mathcal{R}_a} = \mathbf{H}_a^t \mathbf{v}/_{\mathcal{R}_0} \text{ soit } \mathbf{v}/_{\mathcal{R}_a} = \mathbf{H}_a^t \mathbf{H}_m \mathbf{v}/_{\mathcal{R}_m}$$

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

##### - Localisation absolue : GPS

- Passage à une carte locale

- Soit la carte locale du robot mobile m. On cherche alors à exprimer dans le repère  $\mathcal{R}_m$  les coordonnées  $(x_A, y_A, z_A)$  du point A, connaissant ses coordonnées géographiques  $(\theta_A, \varphi_A, r)$  dans le repère  $\mathcal{R}_0$ .
- Si les coordonnées géographiques de la position m du robot mobile et du point A sont proches dans le repère  $\mathcal{R}_0$ , alors :

$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} r \cos \varphi_A \cos(\theta_A - \theta_m) \\ r(\varphi_A - \varphi_m) \\ r - rm \end{bmatrix} \text{ dans le repère } \mathcal{R}_m.$$

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

##### - Localisation absolue : GPS

- Géométrie elliptique : distance entre 2 points
  - Soient 2 points A et B dont les coordonnées géographiques sont respectivement  $(\theta_A, \varphi_A)$  et  $(\theta_B, \varphi_B)$ , on cherche à évaluer la distance entre ces deux points.
  - Deux approches :
    - Orthodromie
    - Loxodromie

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

##### - Localisation absolue : GPS

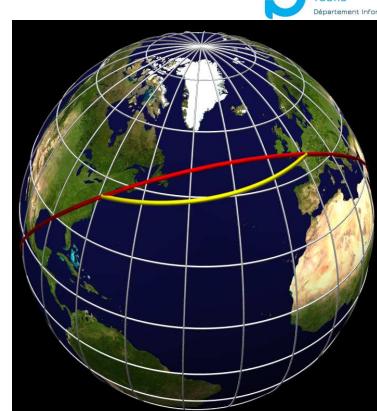
- Géométrie elliptique : distance entre 2 points
  - Orthodromie :
    - « distance » à vol d'oiseau de deux points de la surface terrestre.
    - le chemin le plus court pour aller du point A au point B consiste à suivre le grand cercle passant par ces points.
    - La plus courte distance de A à B, appelée distance orthodromique, est égale à la longueur de l'arc AB sur ce cercle.

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

##### - Localisation absolue : GPS

- Orthodromie :
  - On a alors :



$$d(A,B) = r * \cos^{-1}(\sin \varphi_A \sin \varphi_B + \cos \varphi_A \cos \varphi_B \cos(\theta_B - \theta_A))$$

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

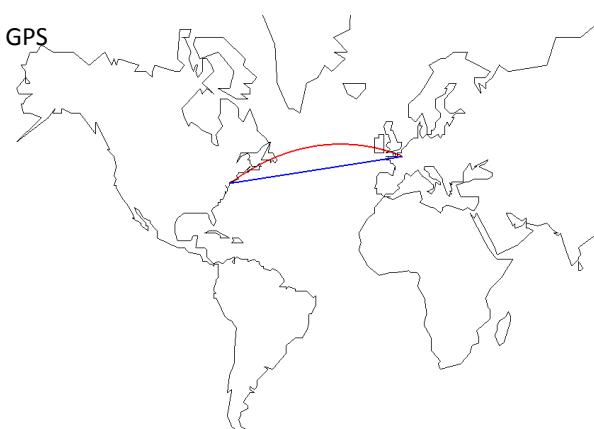
##### - Localisation absolue : GPS

- Géométrie elliptique : distance entre 2 points
  - loxodromie :
    - courbe qui coupe les méridiens d'une sphère sous un angle constant  $\delta$ .
    - Trajectoire suivie par un navire qui suit un cap constant.
    - $d(A,B) = \frac{r(\varphi_B - \varphi_A)}{\cos \delta}$ , où  $\delta$  angle de cap

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

##### - Localisation absolue : GPS



**Partie 3 : Capacité de perception**

### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

- Localisation absolue : Module GPS



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

POLYTECH TOURS  
Département Informatique

COM142

```

$GPGGA,07:47:27,1135643589,2235.25981,N,1135643589,E,0.003,,051011.,A*7C
$GPVTC,1,M,0.003,N,0.005,K,A*25
$GPGGA,031812,00,2235.25981,N,1135643589,E,0.003,,051011.,A*7C
$GPSSA,A,3,28,16,03,07,08,,,...,3,07,2,41,1,90*08
$GPSSV,2,1,07,03,19,050,25,07,68,303,43,08,39,322,47,11,79,125,22*7A
$GPSSV,2,2,07,16,18,059,37,19,,,...,33,28,11304,4*77$GPGL,223.2591,N,1156.4574,E03181.00,AA*64
$GPVNC,031814,00,A,2235.25981,N,1135643582,E,0.028,,051011.,A*72
$GPVTC,1,M,0.022,N,0.041,K,A*26 geographic position information of Seeed Studio
$GPGGA,031814,00,[2235.25981,N,1135643582,E],05,2,41,1,90*08
$GPSSA,A,3,28,16,03,07,08,,,...,3,07,2,41,1,90*08
$GPSSV,2,1,07,03,19,050,25,07,68,303,43,08,39,322,47,11,79,125,22*7A
$GPSSV,2,2,07,16,18,059,37,19,,,...,33,28,11304,4*77$GPGL,223.2591,N,1156.4562,,03184.00.,A*6
$GPVNC,031815,00,A,2235.25884,N,1135643551,E,0.028,,051011.,A*73
$GPVTC,1,M,0.028,N,0.052,K,A*28

```

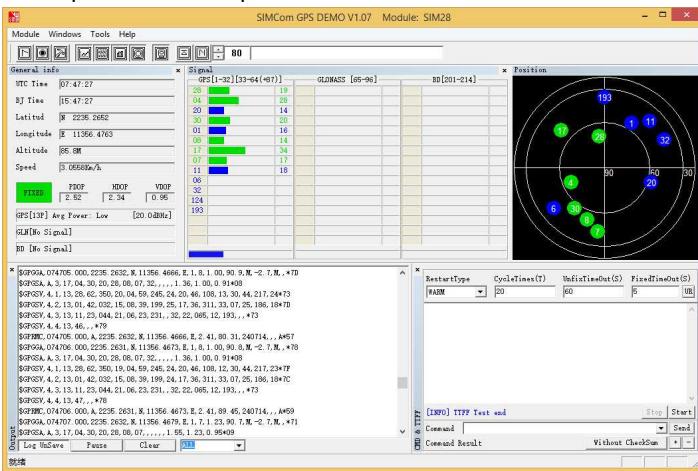
9600 baud

117

**Partie 3 : Capacité de perception**

### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

SIMCom GPS DEMO V1.07 Module: SIM28



POLYTECH TOURS  
Département Informatique

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

118

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

- Capteurs Ultrasonores
  - Ceinture de capteurs ou capteur unique monté sur une tourelle
  - Mesure de distance ou détection d'objets
  - Principe :
    - Un émetteur
    - Un récepteur pouvant être confondu avec le récepteur
    - Emetteur : envoie une impulsion sonore
    - Mesure du temps de vol : t, durée nécessaire à l'impulsion pour faire un aller-retour
    - Distance =  $0.5 * c * t$  où c vitesse de propagation du son dans le milieu ambiant (air)
    - $C = c_0 + 0.6T$ ,  $c_0 = 331\text{m/s}$  et T : température en °C

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

119

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

- Capteurs Ultrasonores
  - La vitesse de propagation du son dépend :
    - De la densité de l'air
    - De l'altitude
    - De la température
    - De l'humidité et de la poussière
  - Gamme de fréquence : 40 à 50kHz
    - Si  $f > 50\text{kHz}$  :
      - Meilleure précision
      - Atténuation plus élevée de l'onde sonore
  - Problème des échos

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

120

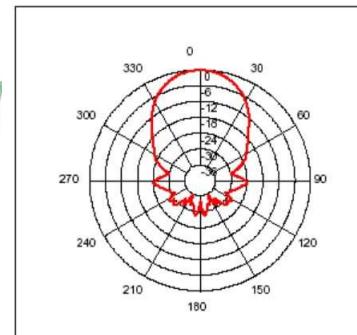
### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.2. Capteurs extéroceptifs

- Capteurs Ultrasonores

- Caractéristiques capteur US : exemple du module SFR05

Specifications	
Frequency	40kHz
Max Range	4 meters
Min Range	3 centimeters
Input Trigger	10uSec minimum, TTL level pulse
Echo Pulse	Positive TTL level signal, proportional to range



1 mesure que toutes les 50 ms

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

121

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
  - Basée sur l'utilisation d'une caméra
    - Caméra CCD ou CMOS
    - Omnidirectionnelle
    - Stéréoscopique



CMUCam5 Pixy

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

- Processeur: NXP LPC4330 - 204 MHz - dual core
- RAM: 264 K bytes
- Flash: 1 M bytes
- Capteur vidéo: Omnivision OV9715 - 1/4" - 1280 x 800 pixels
- Champ de vision de la lentille: 75° horizontal, 47° vertical
- Type de lentille: M12
- Consommation: 140 mA typ.
- Alimentation: Via USB (5 V - Câble non livré) ou entrée (6 V à 9 V)
- Sorties: UART serial, SPI, I2C, USB, digital, analog
- Dimensions: 5,3 x 5,1 x 3,6 cm
- Poids: 27 gr

122

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
  - Basée sur l'utilisation d'une caméra
    - **Caméra CCD ou CMOS**
  - Omnidirectionnelle
  - Stéréoscopique



Camera TTL CMOS

Module size: 32mm x 32mm  
Image sensor: CMOS 1/4 inch  
CMOS Pixels: 0.3M  
Pixel size: 5.6um \* 5.6um  
Output format: Standard JPEG/M-JPEG  
Frame speed: 640\*480 30fps  
Viewing angle: 60 degrees  
Image size: VGA (640\*480), QVGA (320\*240), QQVGA (160\*120)  
Baud rate: Default 38400 Communication: 3.3V TTL (TX, RX, GND)

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

123

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
  - Basée sur l'utilisation d'une caméra
    - Caméra CCD ou CMOS
    - **Omnidirectionnelle**
  - Stéréoscopique



Caméra omnidirectionnelle



124

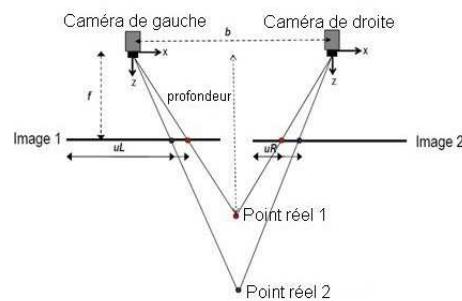
Robotique Mobile et Collective : janvier 2015



### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
  - Basée sur l'utilisation d'une caméra
    - Caméra CCD ou CMOS
    - Omnidirectionnelle
    - **Stéréoscopique**  
透視的



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

125

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
  - Modèle de caméra
    - Modèle sténopé sans distorsion
    - Définition : Un **sténopé** est un dispositif optique très simple permettant d'obtenir un appareil photographique dérivé de la camera obscura. Il s'agit d'un trou de très faible diamètre
    - (cf. <https://fr.wikipedia.org/wiki/St%C3%A9nop%C3%A9>).

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

126

POLYTECH' TOURS  
Département Informatique

Partie 3 : Capacité de perception

3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
- Modèle de caméra

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

127

POLYTECH' TOURS  
Département Informatique

Partie 3 : Capacité de perception

3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
- Modèle de caméra : sténopé sans distorsion

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

128

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
  - Modèle de caméra : sténopé sans distorsion
    - $Rc (Oc, Xc, Yc, Zc)$  : repère de la caméra
    - $Ri (C, Xi, Yi)$  : repère du plan image
    - Distance focale 焦距
    - Dans le repère caméra  $Rc$  :
      - Point P de coordonnées  $(x_c, yc, z_c)$
      - Point image  $P_i$  de coordonnées  $(x_i, yi, f)$
    - Dans le repère image  $Ri$  :
      - Point image  $P_i$  de coordonnées  $(x_i, yi)$

### Partie 3 : Capacité de perception

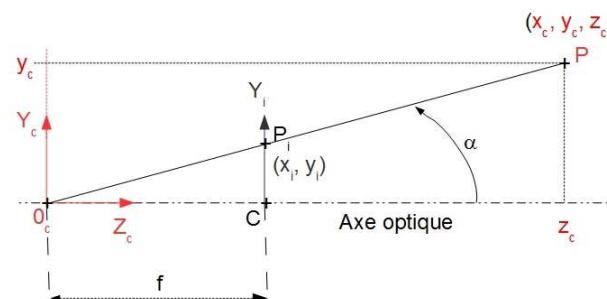
#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
  - Modèle de caméra : sténopé sans distorsion
    - Projection perspective
      - Dans le plan  $(Oc, Yc, Zc)$

$$\tan \alpha = \frac{y_i}{f} = \frac{y_c}{z_c}$$

D'où :

$$y_i = f \frac{y_c}{z_c}$$



### Partie 3 : Capacité de perception

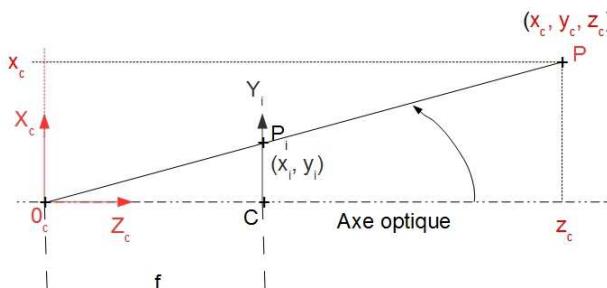
#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
  - Modèle de caméra : sténopé sans distorsion
    - Projection perspective
      - Dans le plan  $(Oc, Xc, Zc)$

$$\tan \beta = \frac{x_i}{f} = \frac{x_c}{z_c}$$

D'où :

$$x_i = f \frac{x_c}{z_c}$$



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

131

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
  - Modèle de caméra : sténopé sans distorsion
    - Le passage du repère caméra au repère image s'exprime par les deux relations :
 
$$x_i = f \frac{x_c}{z_c}$$
 et 
$$y_i = f \frac{y_c}{z_c}$$
- Matrice perspective : passage en coordonnées homogènes
  - Il est possible d'exprimer les expressions des coordonnées  $x_i$  et  $y_i$  en faisant la matrice perspective  $Pp$  telle que :
 
$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fx_c \\ fy_c \\ 1 \end{bmatrix}$$

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

132

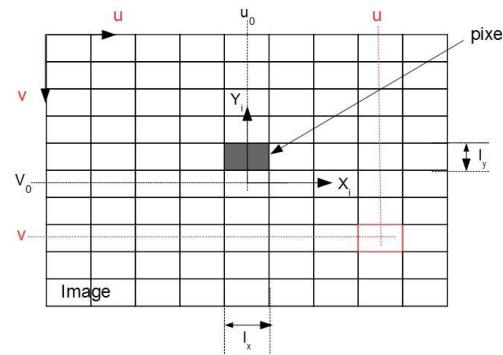
### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision

- Image numérique : il s'agit de passer du plan image à l'image numérique composée de pixels => discréétisation du plan image

- $l_x$  et  $l_y$  : dimensions pixel
- $U_0$  et  $v_0$  : coordonnées image du centre optique
- $(u, v)$  : coordonnées image d'un pixel
- $\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/l_x & 0 & u_0 \\ 0 & -1/l_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix}$



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

133

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision

没有变形的针孔模型：合成

- Modèle sténopé sans distorsion : synthèse

$$\bullet \quad \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fx_c \\ fy_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\bullet \quad \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/l_x & 0 & u_0 \\ 0 & -1/l_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\bullet \quad \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/l_x & 0 & u_0 \\ 0 & -1/l_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix}$$

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

134

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision

- Extraction de cibles visuelles : contours
  - Contour : zone d'une image où l'intensité lumineuse varie rapidement
  - Contour : représentation compacte du contenu d'une image
  - $I(u,v)$  : fonction image du pixel de coordonnées  $(u, v)$
  - Rechercher un contour  $\Leftrightarrow$  rechercher les discontinuité de la fonction image

基于灰度图：  
0-黑  
255-白

彩色图：三个色图叠加  
R-  
G-  
B-

possibilité de passer ob (R,V,B) en N[JG] ? Utilisation d'opérateurs pour calculer une approximation discrète de la dérivée première et seconde de la fonction image  $I(x,y)$

使用算子计算图像函数  $I(x, y)$  的一阶和二阶导数的离散近似

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

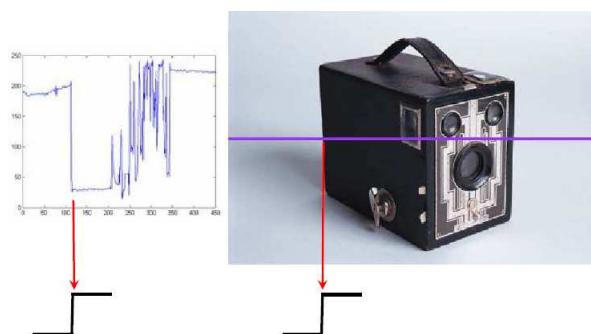
135

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision

- Extraction de cibles visuelles : contours



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

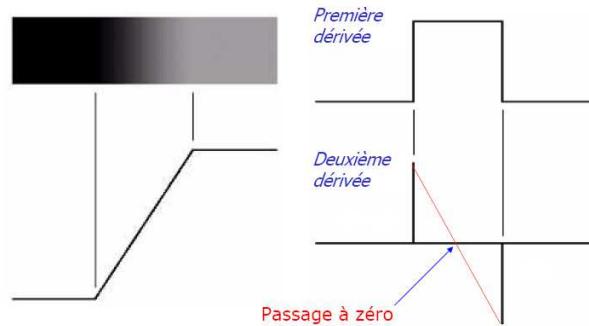
136

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision

- Extraction de cibles visuelles : contours



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

137

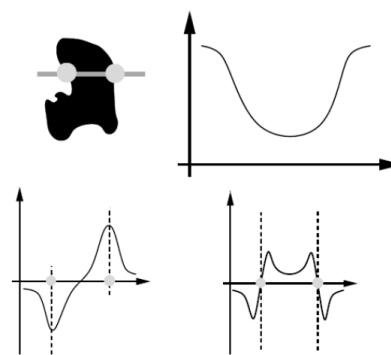
### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision

- Extraction de cibles visuelles : contours

一阶导数的局部极值  
- extréma locaux de la dérivée première  
- passages par zéro de la dérivée seconde

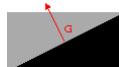


Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

138

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
    - Extraction de cibles visuelles : contours
    - Dérivée première
      - La première dérivée (gradient) de l'image est l'opérateur de base pour mesurer les contours dans l'image.
- 两个变量的函数  
 $\text{grad}(I(u,v)) = \text{vecteur}$
- $\nabla I(u,v) = (G(u), G(v)) = \left( \frac{\partial I(u,v)}{\partial u}, \frac{\partial I(u,v)}{\partial v} \right)$
  - Le gradient peut être représenté en coordonnées polaires par son module et une direction  $\phi$ 
    - Module :  $\sqrt{G^2(u) + G^2(v)}$
    - $\Phi = \arctg \frac{G(v)}{G(u)}$
    - Le gradient est un vecteur perpendiculaire au contour
- 梯度是垂直于轮廓的矢量
- 

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

139

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
  - Extraction de cibles visuelles : contours
  - Dérivée première
    - Approximation par différence finie 有限差分近似
    - Utilisation de masque de convolution
      - Filtre de Sobel

- $h1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  et  $h2 = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$

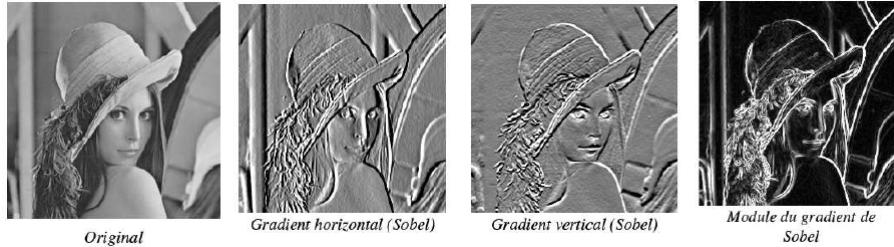
Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

140

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
  - Extraction de cibles visuelles : contours
  - Dérivée première : opérateurs de Sobel



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

141

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
  - Extraction de cibles visuelles : contours
  - Dérivée seconde : Laplacien 拉普拉斯算子
  - $L(u, v) = \frac{\partial^2 I(u, v)}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 I(u, v)}{\partial v^2}$
  - L(u,v) : scalaire 标量
  - Approximation du calcul du Laplacien à l'aide de masque de convolution
  - $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$  ou  $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$

sobel是两个方向分开算，拉普拉斯是直接两个方向都算了

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

142

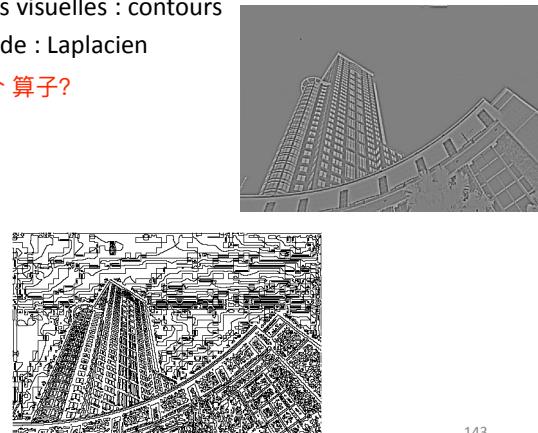
### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision

- Extraction de cibles visuelles : contours
- Dérivée seconde : Laplacien

试试看，这两幅图分别用的哪个 算子？



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

143

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision

- Extraction de cibles visuelles : contours (filtre de Deriche)



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

144

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision

- Extraction de cibles visuelles : contours

预处理:

平均

| 1 1 1 |

| 1 1 1 | \* 1/9

| 1 1 1 |

- **Opérateurs gradient et Laplacien**

- Sensible aux petites variations 对微小变化敏感

- Introduction de mécanismes de lissage avant calcul de dérivée 在计算导数之前引入平滑机制

- Laplacien du gaussien 高斯拉普拉斯算子

- Autres méthodes : filtre de Canny, de Deriche, de Shen - Castan

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision

- Utilisation du flux optique

- Notion définie par J. J. Gibson (1966) (optical flow)

- Caractérise le mouvement apparent d'un objet causé par le mouvement relatif entre un observateur (la caméra) et la scène

- Mouvement observé : mouvement d'expansion

- Flux optique : vecteurs associés à chaque direction de déplacement

- La ligne qui coïncide avec la direction du mouvement est inchangée => définition du centre d'expansion

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
  - Utilisation du flux optique

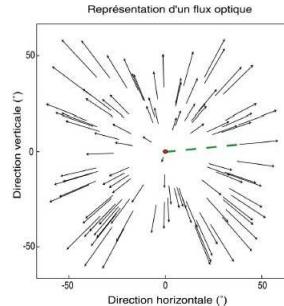


FIG. 1.10 – Représentation d'un flux optique simulant un mouvement vers l'avant. Au centre (en rouge), le foyer d'expansion. Chaque vecteur de mouvement (lignes fléchées, noires) est caractérisé par sa ligne de direction (ligne pointillée, en vert) le reliant au foyer d'expansion. Chacun de ces vecteurs représente le mouvement visuel provoqué par le déplacement de l'observateur.

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

147

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
  - Utilisation du flux optique
  - Formulation temporelle
- Soit la séquence d'images  $I(t, x_1, x_2)$  où le vecteur  $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$  représente les coordonnées d'un pixel.
- L'éclairage du point P observé est supposée constante, ce qui se traduit par  $I(t, x_1, x_2) = I_0$
- Le flux optique à l'instant t et au point  $(x_1, x_2)$  est définie par la vitesse du pixel soit  $\mathbf{v} = (v_1, v_2) = \left( \frac{dx_1}{dt}, \frac{dx_2}{dt} \right)$
- La contrainte d'éclairage constante conduit à définir la contrainte :

$$\frac{\partial I}{\partial t} + \nabla I \frac{d\mathbf{x}}{dt} = 0 \text{ soit } \frac{\partial I}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla I = 0$$

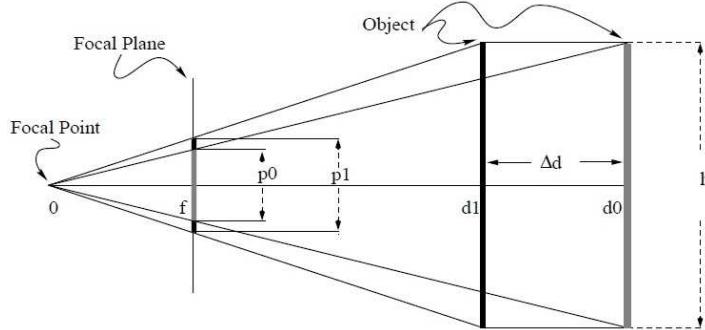
Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

148

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
  - Utilisation du flux optique : approche géométrique



E. Sahin, P. Gaudiano, Visual Looming as a range sensor for mobile robots,  
Fifth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior, Zurich, Switzerland, 1998.  
Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

149

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
  - Utilisation du flux optique
    - visual looming : expansion de la taille de la projection d'un objet
    - Si la taille de la projection croît, alors on se rapproche de l'objet
      - $t = t_0$  :
        - Objet à la distance  $d_0$
        - Dimension projection de l'objet :  $p_0$
      - $t = t_1$  :
        - Objet à la distance  $d_1$
        - Dimension projection de l'objet :  $p_1$

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

150

### Partie 3 : Capacité de perception

#### 3.2.3. Capteurs extéroceptifs

- Vision
  - Utilisation du flux optique
    - Connaissant la valeur du déplacement  $\Delta d = d_1 - d_0$ , il est possible de calculer les distances  $d_1$  et  $d_0$  par :
- Remarques
  - Méthode indépendante des caractéristiques de la caméra
  - Indépendance de la méthode par rapport aux dimensions de l'objet observé
  - Uniquement 2 mesures
  - Sensibilité élevée lorsque  $(p_1 - p_0)$  est petit

### Partie 4 : Planification de trajectoires pour robots mobiles

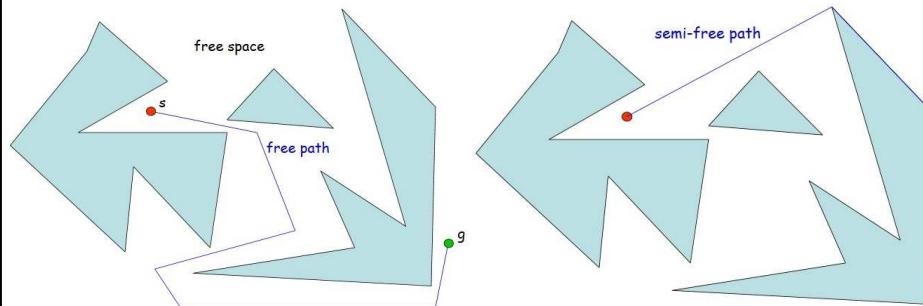
#### 4.1. Planification de trajectoire – Introduction

- Déterminer un chemin dans l'espace des configurations
  - Une configuration de départ ou une position de départ
  - Une configuration d'arrivée ou position d'arrivée
- Le robot ne doit pas rentrer en collision avec un obstacle
- Le mouvement planifié doit être compatible avec les contraintes cinématiques du robot
- Formalisation :
  - $\mathbf{q}_d$  : configuration de départ
  - $\mathbf{q}_a$  : configuration d'arrivée
  - Chemin : courbe reliant de façon continue les 2 configurations  $\mathbf{q}_d$  et  $\mathbf{q}_a$ , tq :
  - Chemin  $\tau : s \in [0, 1] \rightarrow Cfre_e$ 
    - $\tau(0) = qd$  et  $\tau(1) = qa$
    - $\forall (s_1, s_2) \in [0, 1] \lim_{s_2 \rightarrow s_1} d(\tau(s_1), \tau(s_2)) = 0$

## Partie 4 : Planification de trajectoires pour robots mobiles

### 4.1. Planification de trajectoire – Introduction

- Chemin libre (free path) : chemin totalement contenu dans  $C_{free}$
- Chemin semi libre (semi free path) : le robot est autorisé à toucher des obstacles



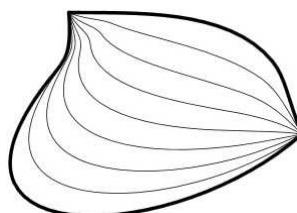
Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

153

## Partie 4 : Planification de trajectoires pour robots mobiles

### 4.1. Planification de trajectoire – Introduction

- Chemins homotopiques :
  - chemins possédant les mêmes points de départ et d'arrivée
  - l'un des chemins peut être déformé de façon continue pour coïncider avec le second.



- Autres contraintes
  - Chemin de longueur minimale
  - Chemin de temps minimal

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

154

## Partie 4 : Planification de trajectoires pour robots mobiles

### 4.1. Planification de trajectoire – Introduction

- Hypothèses usuelles
  - Garantir ou non un chemin sans collision
  - Complétude : garantie de trouver un chemin s'il existe
  - Complexité spatiale ou temporelle
    - Espace de stockage
    - Temps de recherche
- Différentes classes d'algorithmes
  - Dépend de l'espace de recherche
    - Discret
    - Continu

## Partie 4 : Planification de trajectoires pour robots mobiles

### 4.1. Planification de trajectoire – Introduction

- Cas discret :
  - Construire un graphe de représentation de l'environnement
  - Robot : se déplace d'une cellule à une autre (cellules adjacentes)
  - Cellules correspondant à une collision sont retirées de la représentation de l'environnement
  - Planification de trajectoires => trouver un chemin dans le graphe
  - Classe d'algorithmes pour construire le graphe
    - Graphe de visibilité (V\_graph method)
      - Permet de trouver un chemin de longueur minimale
    - Graphes de tangentes (tangent\_graph)
      - Amélioration du graphe de visibilité

## Partie 4 : Planification de trajectoires pour robots mobiles

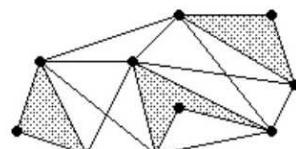
### 4.1. Planification de trajectoire – Approche par graphes

- Cas discret :
  - Graphe de visibilité (V\_graph method)
    - Permet de trouver un chemin de longueur minimale
  - Graphes de tangentes (tangent\_graph)
    - Amélioration du graphe de visibilité

## Partie 4 : Planification de trajectoires pour robots mobiles

### 4.1. Planification de trajectoire – Approche par graphes

- Cas discret :
  - Graphe de visibilité (V\_graph method)
    - Étant donné une scène composée de polygones simples disjoints, le graphe de visibilité de cette scène est le graphe  $(V, E)$  tel que
      - $V$ , ensemble des sommets du graphe, est l'ensemble des sommets des polygones ;
      - $E$ , ensemble des arêtes du graphe, est l'ensemble des paires  $e=(p,q)$  de sommets de  $V$  tels que le segment  $[p,q]$  a une intersection nulle avec l'intérieur des polygones.



## Partie 4 : Planification de trajectoires pour robots mobiles

### 4.1. Planification de trajectoire – Approche par graphes

- Cas discret :

- Graphe de visibilité : Algo naïf
  1. Install all obstacles vertices in VG, plus the start and goal positions
  2. For every pair of nodes  $u, v$  in VG
    3. If segment( $u, v$ ) is an obstacle edge then
    4. insert  $(u, v)$  into VG
    5. else
    6. for every obstacle edge  $e$
    7. if segment( $u, v$ ) intersects  $e$
    8. then goto 2
    9. insert  $(u, v)$  into VG
  10. Search VG using A\*

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

159

## Partie 4 : Planification de trajectoires pour robots mobiles

### 4.1. Planification de trajectoire – Approche par graphe

- Cas discret :

- Graphe de visibilité
  - Recherche du plus court chemin



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

160

## Partie 4 : Planification de trajectoires pour robots mobiles

### 4.2. Algorithme Bug

- Inspiré par le comportement des insectes
- Pas de modèle de l'environnement
- Les obstacles ne sont pas connus a priori
- Informations sur l'environnement :
  - de type local
  - Capteurs de contact
- Robot :
  - Mouvements simples
    - Déplacements en ligne droite vers le but
    - Longe les obstacles
    - S'arrête
  - Famille des algorithmes Bug
    - Bug0, Bug1 et Bug 2 : capteurs tactiles
    - TangentBug, VisBug et DistBug : capteurs de type US ou IR

## Partie 4 : Planification de trajectoires pour robots mobiles

### 4.2. Algorithme Bug

- Bug0

Répéter jusqu'à ce que le but soit atteint

Se déplacer vers le but

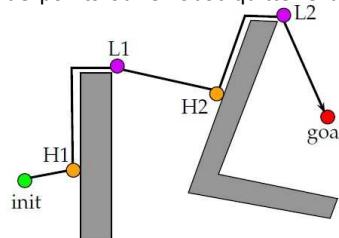
Si les capteurs détectent un obstacle alors :

suivre les bords de l'obstacle

puis quitter le bord de l'obstacle et se diriger de nouveau vers le but

- Le trajet suivi par le robot est constitué d'une succession de points de contact ( $H_i$ ) avec les obstacles et de points où le robot quitte le bord de l'obstacle ( $L_i$ )

- Remarque : algorithme sans mémoire



## Partie 4 : Planification de trajectoires pour robots mobiles

### 4.2. Algorithme Bug

- Bug1

Répéter jusqu'à ce que le but soit atteint

Se déplacer vers le but

Si les capteurs détectent un obstacle alors :

suivre les bords de l'obstacle et se souvenir de la proximité avec le but à atteindre

aller au point le plus proche du but (en suivant l'obstacle) puis continuer vers le but à atteindre

## Partie 4 : Planification de trajectoires pour robots mobiles

### 4.2. Algorithme Bug

- Bug1

#### Bug1 Pseudocode

```

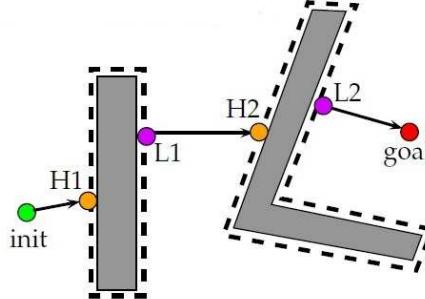
1:  $L_0 \leftarrow \text{init}; i \leftarrow 1$ 
2: loop
3:   repeat move on a straight line from  $L_{i-1}$  to goal
4:   until goal is reached or obstacle is encountered at  $H_i$ 
5:   if goal is reached then exit with success
6:   repeat follow boundary recording point  $L_i$  with shortest distance to goal
7:   until goal is reached or  $H_i$  is re-encountered
8:   if goal is reached then exit with success
9:   follow boundary from  $H_i$  to  $L_i$  along shortest route
10:  if move on straight line from  $L_i$  toward goal moves into obstacle then exit with failure
11:  else  $i \leftarrow i + 1$ 

```

Tapez une équation ici. Partie 4 : Planification de trajectoires pour robots mobiles

#### 4.2. Algorithme

- Bug1



- Lorsque le robot quitte un point de contact pour se diriger vers le but à atteindre, il ne revient jamais de nouveau vers l'obstacle
- Le robot rencontre un nombre fini d'obstacles  
⇒ *Algo Bug1 conduit à une solution en un temps fini*

#### Partie 4 : Planification de trajectoires pour robots mobiles – Bug2

```
repeat until goal is reached
  ■ head toward goal
  ■ if sensor reports contact with an obstacle then
    ■ follow the obstacle until it encounters the m-line again
    ■ leave the obstacle and continue straight toward goal
```

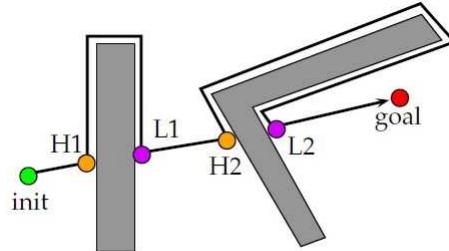
#### Bug2 Pseudocode

```

1:  $L_0 \leftarrow \text{init}; i \leftarrow 1$ 
2: loop
3:   repeat move on a straight line from  $L_{i-1}$  to goal
4:   until goal is reached or obstacle is encountered at  $H_i$ 
5:   if goal is reached then exit with success
6:   repeat follow boundary
7:   until
8:     (a) goal is reached or
9:     (b) m-line is re-encountered at  $Q$  such that  $Q \neq H_i$ ,  $d(Q, \text{goal}) < d(H_i, \text{goal})$ , and
      line  $(Q, \text{goal})$  does not cross the current obstacle at  $Q$  or
10:    (c)  $H_i$  is re-encountered
11:   if goal is reached then exit with success
12:   else if  $H_i$  is re-encountered then exit with failure
13:   else  $L_i \leftarrow Q; i \leftarrow i + 1$ 
```

#### Partie 4 : Planification de trajectoires pour robots mobiles

- 4.2. Algorithme Bug
- Bug2



Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

167

#### Partie 4 : Planification de trajectoires pour robots mobiles

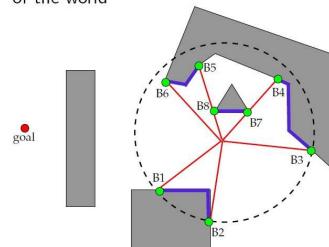
- 4.2. Algorithme Bug

##### TangentBug Algorithm – Idea

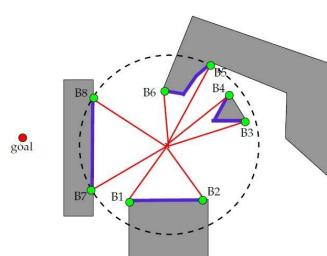
*Ishay Kamon, Elon Romon, and Ehud Rivlin: IJRR (1998) 17:934–953*

TangentBug relies on range sensor  $\rho_R$  to compute endpoints of finite continuous segments on obstacle boundaries

These segments constitute its local model of the world



- TangentBug currently thinks it has unobstructed way to goal



- TangentBug now sees that it can't go straight to the goal. What can it do?
- Choose the point  $B_i$  that minimizes heuristic distance  $d(x, B_i) + d(B_i, \text{goal})$
- What if this distance starts increasing? Then, start following some boundary

Robotique Mobile et Collective : janvier 2015

168