

Robotique mobile et navigation

M2 IARF-AuRo

Ce cours est une introduction aux thèmes suivants :

- Modèles cinématiques de robots à roues
- Systèmes et principes de localisation statique
- Planification de trajectoires : du 2D aux systèmes de grande dimension
- Problématique du mouvement en robotique humanoïde

Michel TAÏX (taix@laas.fr)

UPS-FSI / LAAS-CNRS
Equipe Gepetto



aculté
ciences
et
ngénierie

Robotique mobile et navigation

Note à l'attention des étudiants

Les transparents ne sont qu'un support de cours, ils comprennent seulement le **minimum** d'information et ne dispensent pas la prise de notes personnelles, bien au contraire. Certaines parties du cours et les exemples seront complétés lors des séances. De nombreuses figures et exemples sont issus de la bibliographie suivante que je conseille à ceux qui veulent aller au delà de ce cours introductif.

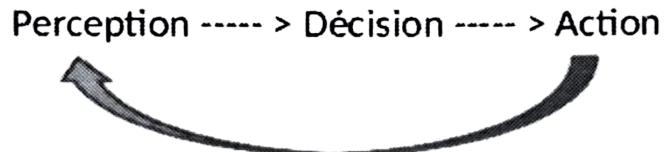
- La robotique Mobile, J.P Laumond et all (Collectif), Hermès, Traité IC2, 2000.
- Computational Principles of Mobile Robotics, G. Dudek et M. Jenkin, Cambridge Univ. Press, 2000.
- Autonomous Mobile Robots, R.Siegwart et I. Nourbakhsh, The MIT Press, 2004.
- Mobile Robotics, A. Kelly, Cambridge University Press, 2013.
- Principles of Robot Motion, H. Choset et all (Collectif), The MIT , 2005.
- Robot Motion Planning, J.C. Latombe, Kluwer Academic Publishers, 1991.
- Sensors for Mobile Robots, H.R. Everett, CRC Press, 1995.
- Motion Planning for Humanoid Robots, K. Harada & all, Springer, 2010
- Introduction to Humanoid Robotics, S. Kajita, Springer, 2014

Définitions

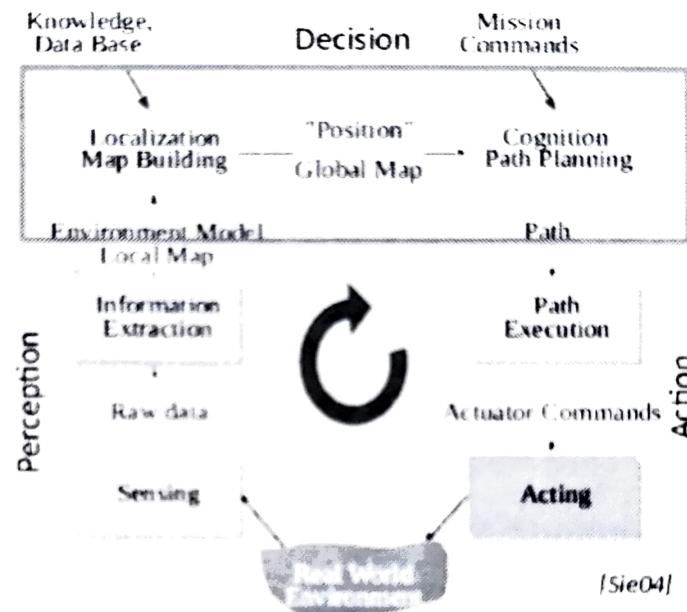
- Robotique mobile (RM) => déplacement dans un environnement W
- W = modèle connu/inconnu, exact/imprécision ?
- But : déplacement pour exécuter une tache

RM : engin mobile capable de se déplacer de manière (+ ou -) autonome en percevant son environnement, en disposant de capacité décisionnelle pour s'adapter (+ ou -) à la tache en agissant sur son environnement

- Problématique différente des robots manipulateurs ?
- Forte interaction avec l'environnement W
- Comportement du robot non explicitement programmé



Généralités



Déplacement

- Connaître placement (position/orientation) => localisation/reconnaissance
- Calculer une trajectoire => évitement de collision, placement des pattes,...
- Contrôle d'exécution : événement asynchrone => aspects décisionnels (IA) pour contrôler l'exécution de la tâche robotique

Généralités

Intérêts

- Réduction des coûts : moindre frais d'emplois/uniformisation des coûts de maintenance
- Augmentation de la productivité : temps de travail, rapidité
- Augmentation de la qualité
- Accessibilité : permet d'accéder à des zones inaccessibles à cause de contraintes environnementales (chimique,...) ou de distances (spatial,...)

Exemples



A black and white photograph of a white mobile robot with a camera mounted on top, operating in an outdoor industrial environment. The robot is shown from a side-on perspective, moving across a surface.

A black and white photograph of a person wearing a white protective suit and mask, standing next to a white mobile robot. The robot is positioned on a surface, and the person is gesturing towards it.

A black and white photograph of a white mobile robot with a camera mounted on top, operating in an outdoor industrial environment. The robot is shown from a side-on perspective, moving across a surface.

Domaines applicatifs

- Manutention lourde (chargement/déchargement), Nettoyage industriel, Inspection des zones à risques, Assistance aux personnes, Exploration, Surveillance...
- ...application potentielle possible à tous types de véhicule

Domaines en forte croissance

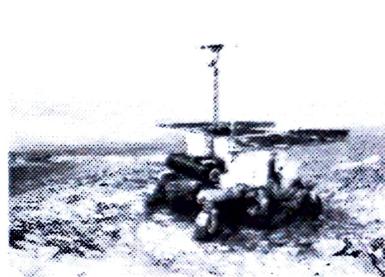
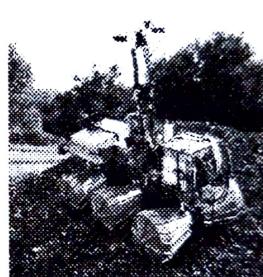
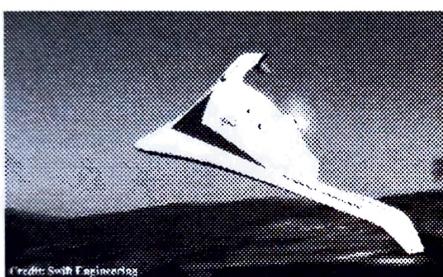
- Logistique
- Usine 4.0
- Véhicule autonome
- Agriculture

Autonomie fonction de la tâche

- RM filoguidés (manutention)
- RM télé-opérés (intervention)
- RM autonomes ou semi-autonomes

Généralités - Constituants

- Système de locomotion
- Capteurs / Actionneurs
- Architecture informatique / Système de communication
- Énergie

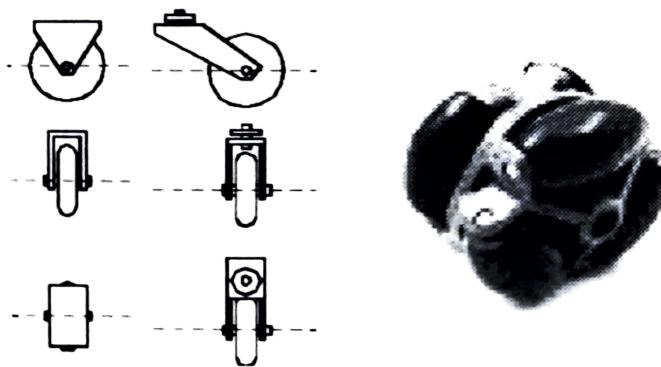


Système de locomotion

- Interaction physique (forces d'interaction) entre le véhicule et l'environnement : stabilité (nbre de points de contact, stabilité statique/dynamique,....), type de contact (ponctuel, friction,....), type d'environnement (solide,)
- Structure mécanique : bio inspiré / pattes/ roues /chenilles
- Solutions différentes \implies performances différentes (vitesse, franchissement, manœuvre)

Types de roues

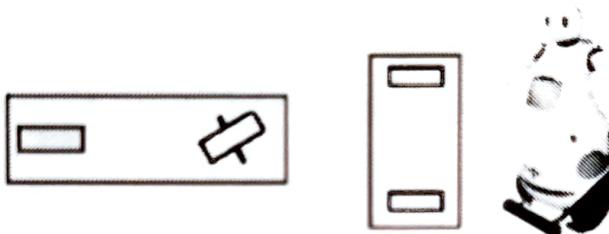
- Les roues sont les plus appropriées pour bouger une plateforme dans la majorité des applications
- Nombre de roues minimum pour stabilité = 3
- Si nombre de roues est $> 3 \Rightarrow$ suspension
- Plusieurs types de roues :
 - Standard : 2 dof
 - Castor : 2 dof
 - Suédoise, *omniwheel*



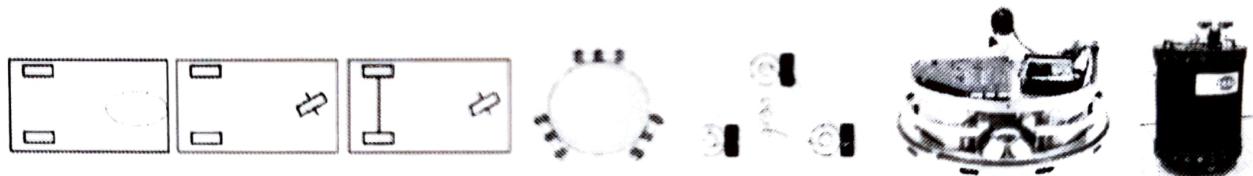
Robots à roues

Différents Arrangements de roues

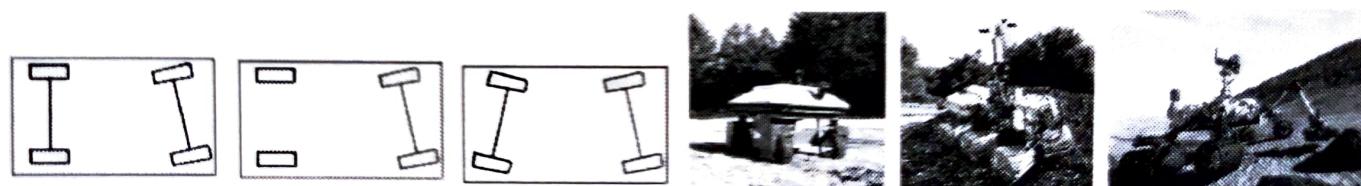
- Deux roues



- Trois roues

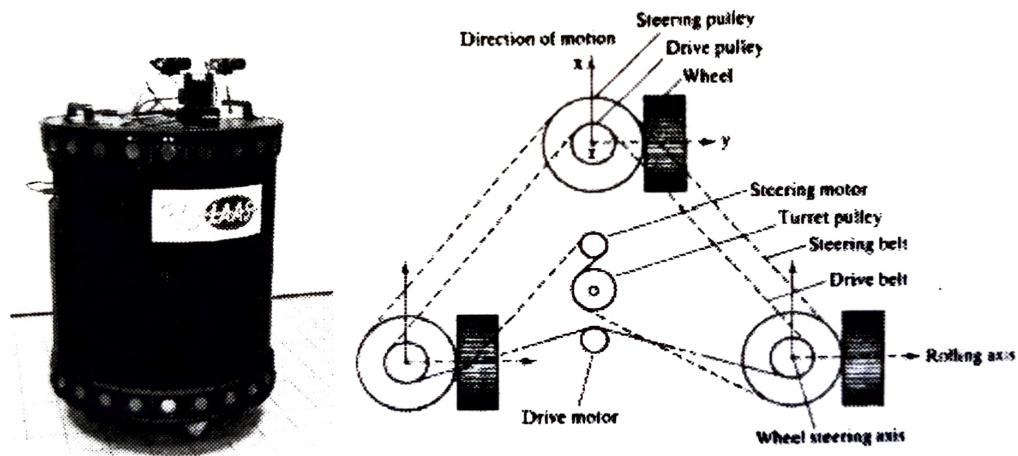


- Quatre roues... ou plus



Exemple de robot mobile à roues de type Synchro Drive

- Plateforme omnidirectionnelle :
- Découplage de la commande entre orientation et translation
- Mécanisme de 3 ou 4 roues qui tournent à la même vitesse pour translation et
- Orientation simultanée de la direction des roues



II - Modèle cinématique de RM à roues

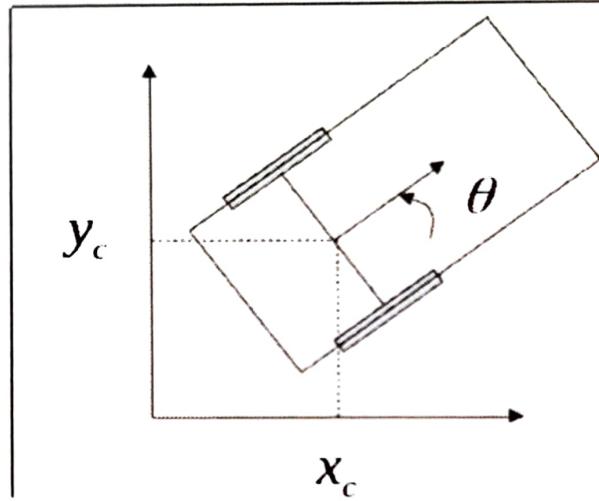
- Le modèle cinématique fait correspondre la vitesse du robot avec la vitesse de ses roues.
- Le modèle dynamique fait correspondre le couple des moteurs au niveau des roues avec l'accélération du robot. Nous ignorerons la dynamique dans ce chapitre.
- Intérêt d'un modèle géométrique ?

Hypothèses

- Robot est constitué d'un corps rigide
- Contact roue/sol ponctuel et Sol plat
- Roues indéformables et de rayon constant
- **Roulement sans glissement**

Plateforme de type *Differential-Drive*, unicycle

- 2 roues motrices indépendantes, actionnées chacune par un moteur
- 1 roue folle, libre



Roulement / glissement ?

Roulement sans glissement

Contrainte de roulement sans glissement :

- Un solide S1 roule sans glisser sur un solide S2 si la vitesse de glissement du premier par rapport au second est nulle.
- Considérons une roue avec 1 point fixe en contact avec le sol

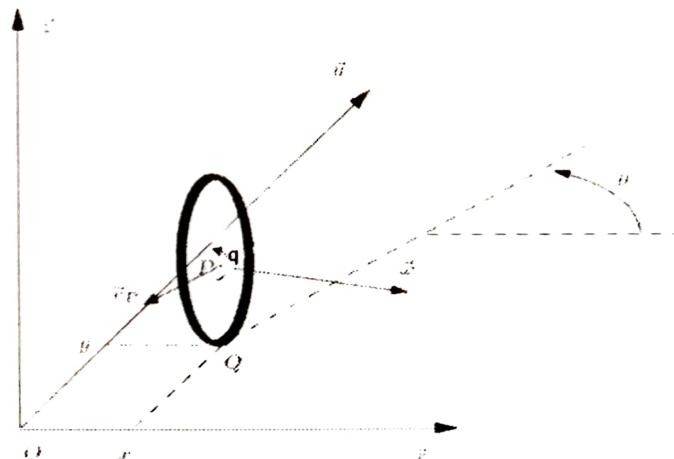


- $V_{1/2} = V_{I_1/R} - V_{I_2/R} = 0$ On obtient lors du mouvement rectiligne de la roue :
 $\dot{x} + r\dot{q} = 0$

Pour un système avec n roues (libre, castor, standard,...) on peut montrer qu'on obtient des équations du type : : $J_1 T \dot{\mathbf{X}} - J_2 \dot{q} = 0$

Contrainte de roulement sans glissement : roue sur un plan

- Configuration de la roue : $= (x, y, \theta, q)$
- Vitesse relative de la roue au point de contact $V_Q = V_P + \omega \times \vec{PQ} = 0$
- $P = (x, y, r)^T$, $Q = (x, y, 0)^T$ et $\omega = (\sin(\theta).\dot{q}, \cos(\theta).\dot{q}, 0)^T$ donne :
 $\dot{x} + r \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{q} = 0$
 $\dot{y} + r \cdot \sin(\theta) \cdot \dot{q} = 0$



- Composantes de la vitesse dans le plan de la roue et dans le plan :
 $-\dot{x} \cdot \sin(\theta) + \dot{y} \cdot \cos(\theta) = 0$ et $\dot{x} \cdot \cos(\theta) + \dot{y} \cdot \sin(\theta) = -r \cdot \dot{q}$

Contrainte non holonôme

Le système est soumis à une contrainte holonome si les coordonnées $x_j, j = 1, \dots, n$, vérifient une équation de liaison de la forme $f(x_1, \dots, x_n, t) = 0$. Le système peut être soumis simultanément à $c \leq n$ contraintes holonomes indépendantes.

Exemple : bras manipulateurs

Contrainte non-holonomie

Une contrainte est dite non holonome si elle ne peut pas s'écrire sous la forme $f(x_1, \dots, x_n, t) = 0$.

- soit la forme différentielle est non intégrable,
- soit elle s'exprime par une inégalité,
- soit elle fait intervenir les vitesses.

Question :

La contrainte non holonome $F(q, \dot{q}, t) = 0$ est-elle non intégrable ?

Théorème de Frobenius

Contrainte non holonome

Soit un système de configuration q , de dimension n , soumis à un ensemble de contraintes indépendantes s'écrivant sous la forme : $A^T(q) \cdot \dot{q} = 0$

Soit $B(q)$ matrice de rang plein m orthogonale à $A(q)$. ($A^T(q) \cdot B(q) = 0$)

Soit l'algèbre de Lie de dimension p (avec $m \leq p \leq n$) engendrée par les colonnes de $B(q)$ et leurs crochets de Lie successifs à condition qu'ils augmentent la dimension de l'algèbre.

alors $(n - p)$ contraintes sont intégrables

Exemple de la roue

Ecrire la matrice $A(q)$

Vérifier que $B(q)$ est bien une matrice orthogonale à $A(q)$

$$[b_1(q), b_2(q)] = (\sin(\theta), -\cos(\theta) 0 0)^T$$

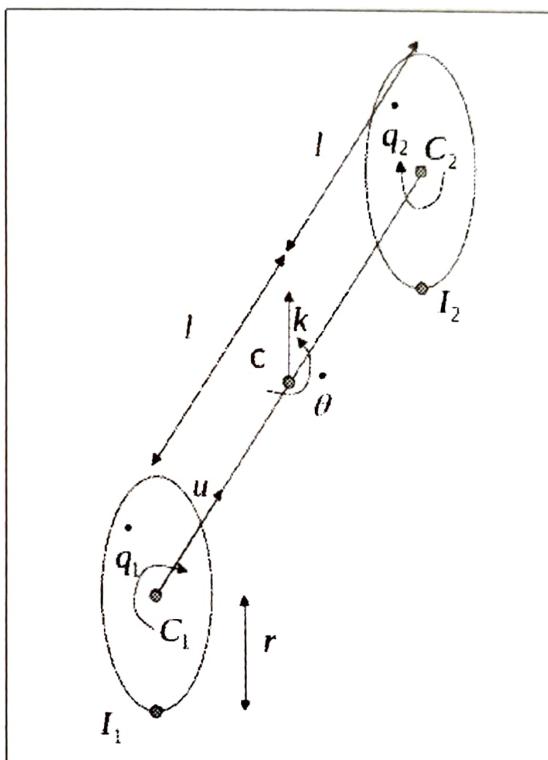
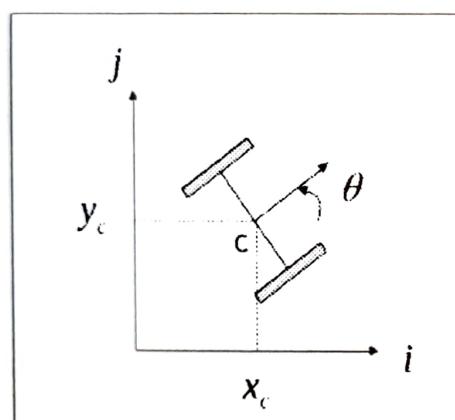
$$[b_1, [b_1(q), b_2(q)]] = 0$$

$$[b_2(q), b_2(q)] = (\cos(\theta), \sin(\theta) 0 0)^T$$

$b_1(q), b_2(q), [b_1(q), b_2(q)]$ et $[b_2(q), [b_1(q), b_2(q)]]$ engendrent une algèbre de Lie de dimension 4, égale à la dimension de $q \implies$ contraintes non intégrables.

Modèle cinématique pour un unicycle (differential-drive)

Unicycle : robot actionné par deux roues motorisées indépendantes et un certain nombre de roues folles pour assurer sa stabilité.



- $V_{I_1} = V_C + \omega \times \vec{C}I_1$ et $V_{I_2} = V_C + \omega \times \vec{C}I_2$
- $\omega_1 = \dot{\theta} \cdot \vec{k} + \dot{q}_1 \cdot \vec{u}$ et $\omega_2 = \dot{\theta} \cdot \vec{k} + \dot{q}_2 \cdot \vec{u}$ avec $\vec{u} = (-\sin(\theta) \cos(\theta) 0)^T$

Modèle cinématique pour un unicycle

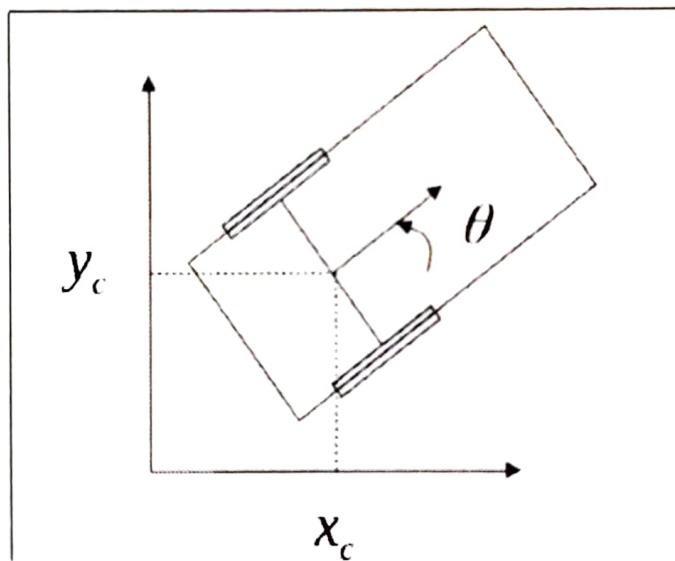
$$\left\{ \begin{array}{lcl} \dot{x}_c - r \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{q}_1 + l \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{q}_2 & = 0 \\ \dot{y}_c - r \cdot \sin(\theta) \cdot \dot{q}_1 + l \cdot \sin(\theta) \cdot \dot{q}_2 & = 0 \\ l \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{q}_1 - l \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{q}_2 & = 0 \\ \dot{x}_c - r \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{q}_1 + l \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{q}_2 & = 0 \\ \dot{y}_c - r \cdot \sin(\theta) \cdot \dot{q}_1 + l \cdot \sin(\theta) \cdot \dot{q}_2 & = 0 \\ l \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{q}_1 - l \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{q}_2 & = 0 \end{array} \right.$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \frac{r}{2} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta) \\ \frac{1}{l} & \frac{1}{l} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{pmatrix}$$

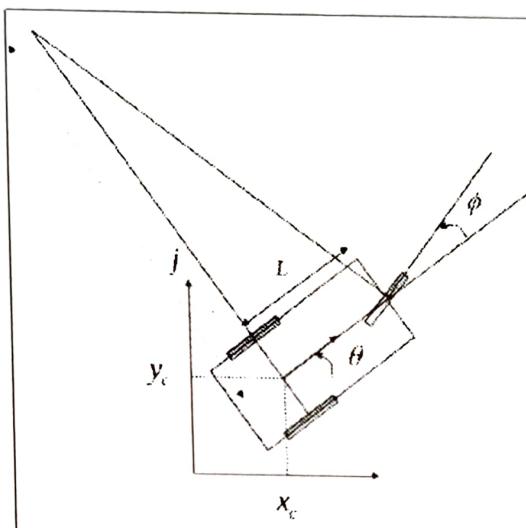
$$\begin{pmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_c \\ \omega \end{pmatrix} = B(X_C) \cdot U$$

Contrainte non-holonomie ?

Calcul de la vitesse d'un point quelconque du robot = ?



Modèle cinématique pour RM de type voiture



$$\begin{pmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ \frac{1}{L} \cdot \tan(\phi) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = B(X_C) \cdot U$$

avec $-\phi_{max} \leq \phi \leq \phi_{max}$

$$r_{min} = \frac{L}{\tan(\phi_{max})}$$