
Architecture des Robots Mobiles

Conception d'un Robot

Mise en œuvre d'une architecture mécanique

- Adaptée à l'environnement
- Support d'une Architecture Electronique

Mise en œuvre d'une architecture électronique

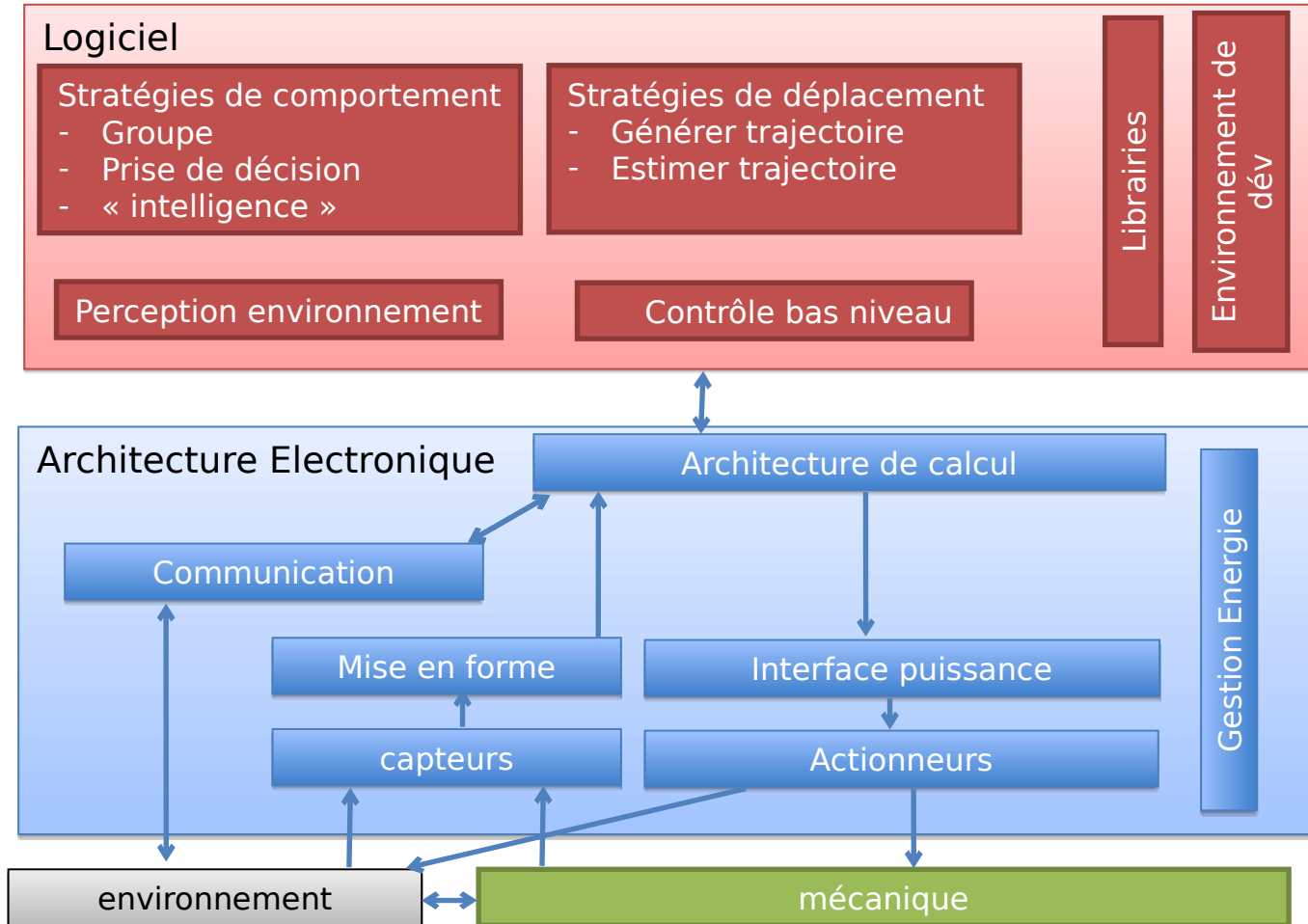
- Capable de contrôler l'architecture mécanique
- Capable de percevoir l'environnement
- Capable de fournir l'énergie
- Le plus souvent programmable
- Souvent capable de communiquer

Mise en œuvre d'une architecture Logicielle

- Définissant les comportements élémentaires,
- Définissant le comportement « intelligent » :
comprendre l'environnement, construire une
stratégie pour atteindre un but

Concevoir un robot nécessite la maîtrise de nombreux domaines de compétences :
Mathématique, Physique, Mécanique, Electronique, Automatique, Informatique, ...

Architecture d'un Robot



Plateforme Mobile d'un Robot Mobile

Se mouvoir dans un environnement

Etre adapté à :

- Type environnement : eau, air, sol
- Caractéristiques du contact : taille/forme du chemin, angle de contact, glissement ...
- Stabilité : nombre de points de contact, centre de gravité, inclinaison,...

Mécanismes
biologique du
déplacement



Les robots : Mimétisme/Innovation



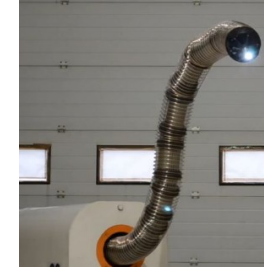
Festo BionicOpter



EZTH Zurich - *Vertigo*



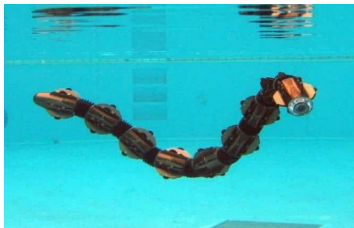
Boston Dynamics - *Atlas*



OC Robotic



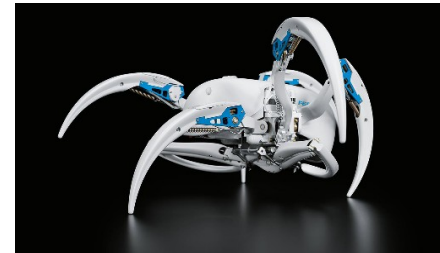
Navia



Kongsberg



MIT Research



Festo



Festo

Robots Terrestres à Pattes

Le nombre de pattes peu varier

- Bipède : 2 contacts au sol, problème de stabilité. Synchronisation des mouvements pour maîtriser la position du point de gravité
- 3 pattes : minimum pour assurer une bonne stabilité au repos
- 4 et plus : permet de garder toujours trois points de contacts au sol, mouvement plus complexe, architecture plus complexe.

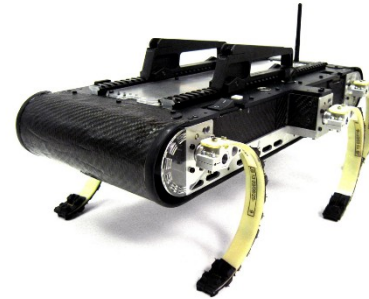
Les pattes peuvent posséder ou non des articulations

Avantages

- Adapté aux terrains accidentés, non plans
- Permet de surmonter des obstacles
- Selon nombre de pattes/articulation, permet de contrôler l'inclinaison

Inconvénients

- Complexité
- Énergie : une partie importante de l'énergie peut être utilisée pour supporter le poids du robot



Robots terrestres à chenilles

- Contact au sol important
- Bien adapté au sol accidentés, sol mou
- Rotation par différentiel des chenilles
- Efficace sur terrain difficile, beaucoup de pertes d'énergie par frottement au sol
- Rotation peu précise dépendante de l'adhérence au sol



Robot démineur

Robots terrestres à Roues

- Le plus répandu
- Architecture relativement simple
- Efficace au niveau énergétique
- Généralement conçus pour avoir toutes les roues en contact simultanément



Robot 6 roues motrices CHASRP-2



Sonde Mars perseverance -NASA

Types de roues



Roue simple



Roue à pivot



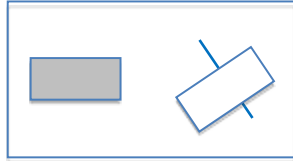
Roue sphérique



Roue omnidirectionnelle

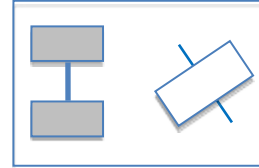
Configurations de robots à 2-3 roues

1 roue motrice arrière, 1 roue directrice avant



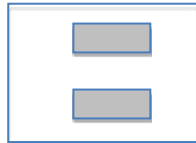
Yamaha

2 roues motrices connectées en différentiel, 1 roue directrice



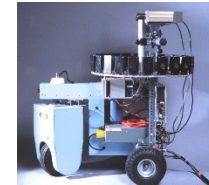
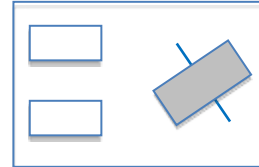
Robot tondeuse

2 roues motrices en différentiel, centre gravité entre les roues



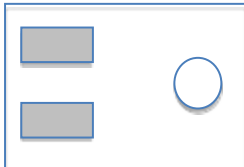
Robot Lego

2 roues libre AR
1 roue motrice directrice AV



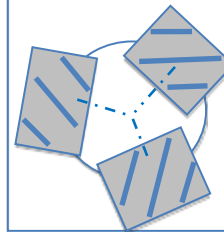
Carnegie Mellon University
Neptune

2 roues motrices en différentiel, 1 roue omnidirectionnelle libre



Immersive robotics, B.A.R.Y.L

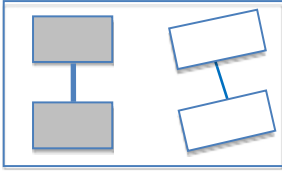
3 roues omnidirectionnelles en triangle



Robot Rovio

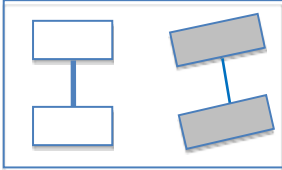
Configuration de robots à roues (2)

2 roues motrices connectées AR
2 roues directrices liées AV



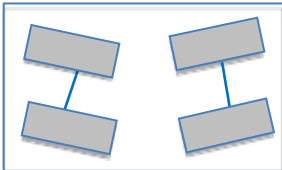
Renault
4CV

2 roues libres connectées AR
2 roues motrices et directrices liées AV



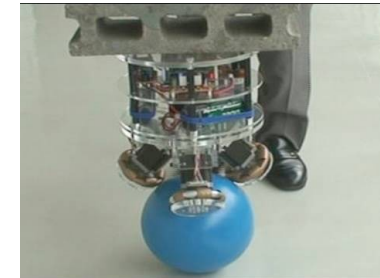
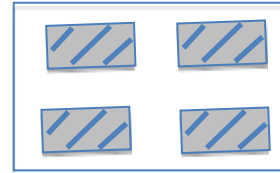
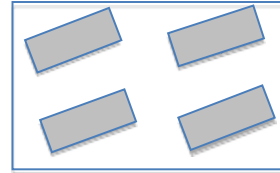
Renault
Zoe autonome

2 roues libres connectées AR
2 roues motrices et directrices liées AV



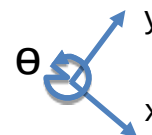
INRIA
Cycab

Et d'autres ...



Holonomie

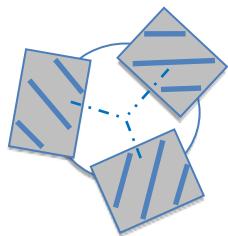
- Robot sur un plan = 3 degrés de liberté
- un système est **holonome** lorsque le nombre de degré de liberté contrôlable est égal au nombre total de degrés de liberté



Exemple plateforme Holonome

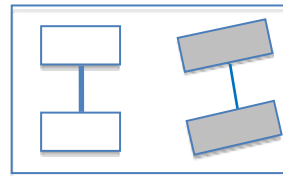


Plateforme différentielle



Plateforme omnidirectionnelle

Exemple Plateforme Non holonome

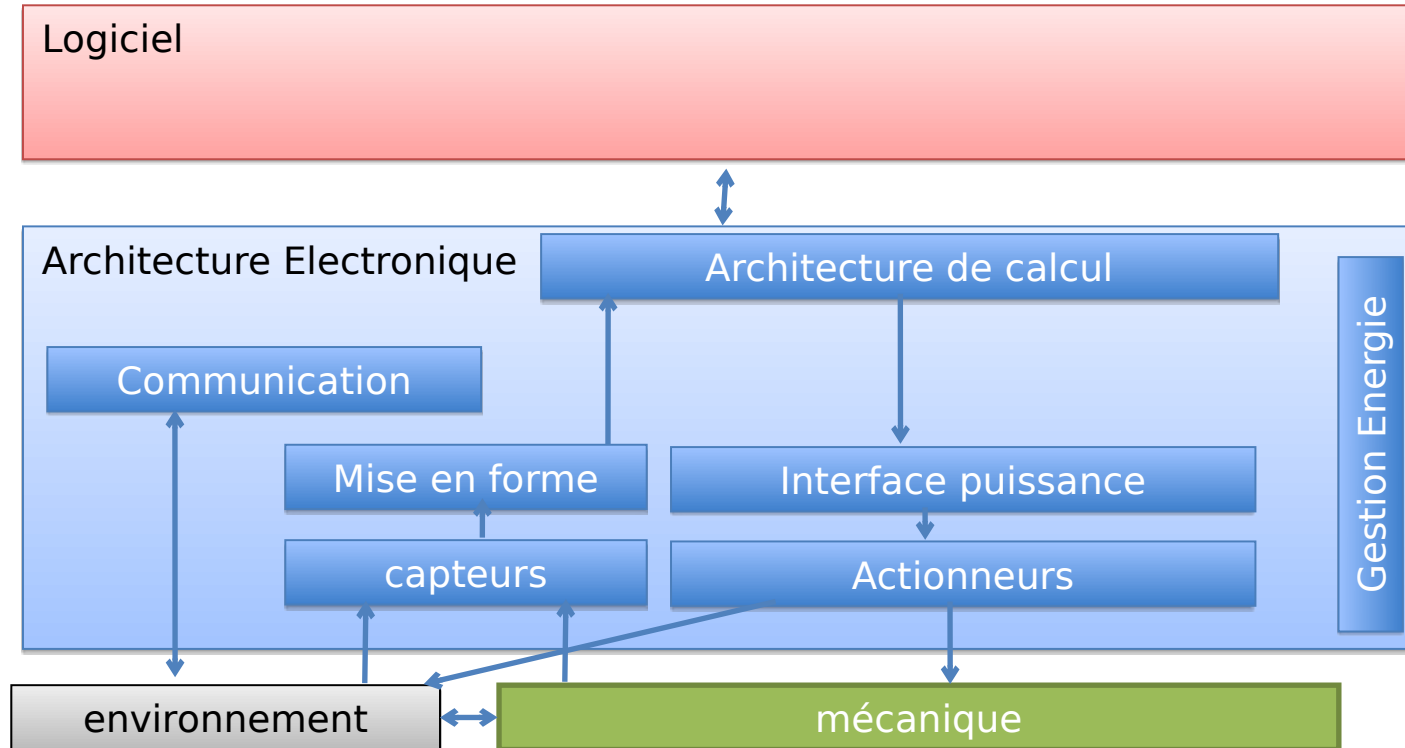


Plateforme type voiture

Nécessite des manœuvres
pour la rotation

Plateforme Electronique d'un Robot

Architecture Electronique Embarquée



Les capteurs

Rôle : produire une tension en relation avec une grandeur physique à mesurer

Capteur Proprioceptif

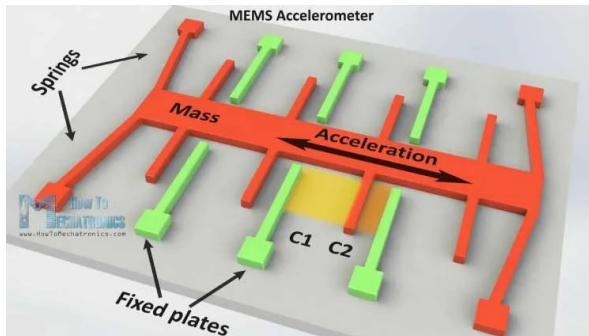
- Fournissent une information sur l'état interne du robot (position ou vitesse des roues, charge de la batterie,...)
- Avantage : faible dépendances des conditions environnementales, simplicité
- Inconvénient : L'information se dégrade au cours du temps (intégration d'une erreur)
- Ex : accéléromètre, odométrie

Capteur Extéroceptif

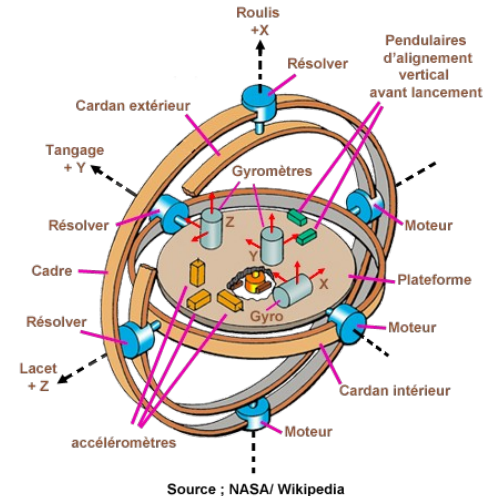
- Fournissent une information sur l'environnement (cartographie, température,...)
- Avantage : lien fort avec l'environnement, point de repère sans intégration
- Inconvénient : variabilité de perception (ex: luminosité, vitesse, humidité,...)
- Ex : GPS, télémètre à ultrasons

Capteurs de type Inertiel

- Boussole : direction du nord magnétique, nécessite de prendre en compte l'inclinaison => utilisation du magnétomètre plus pertinente
- Magnétomètre 3 axes : composantes 3d du champ magnétique terrestre
- Inclinomètre : inclinaison par rapport à l'horizontale
- Accéléromètre : mesure d'une accélération selon 1 ou plusieurs axes
- Gyromètre : mesure d'une vitesse angulaire



Source howtomechatronics.com



Capteurs odométriques

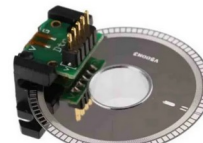
- Estimation de la trajectoire d'un mobile à roue sur sol plan à partir de sa position initiale
- Principe : intégration des mouvements angulaires des roues
- Utilise des codeurs incrémentaux



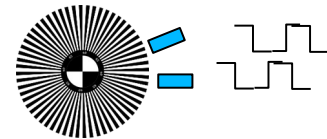
Codeurs
Megatron



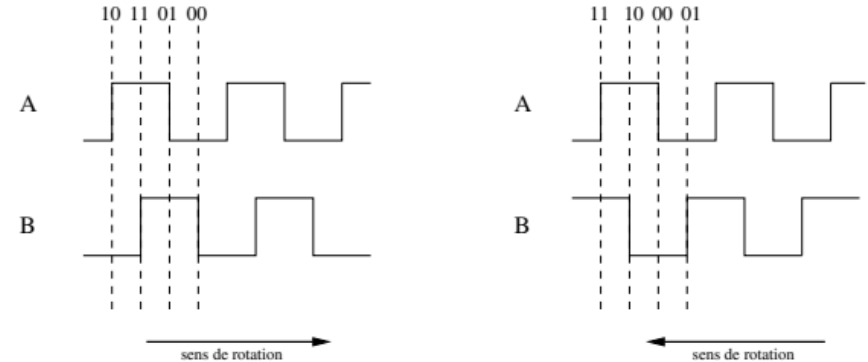
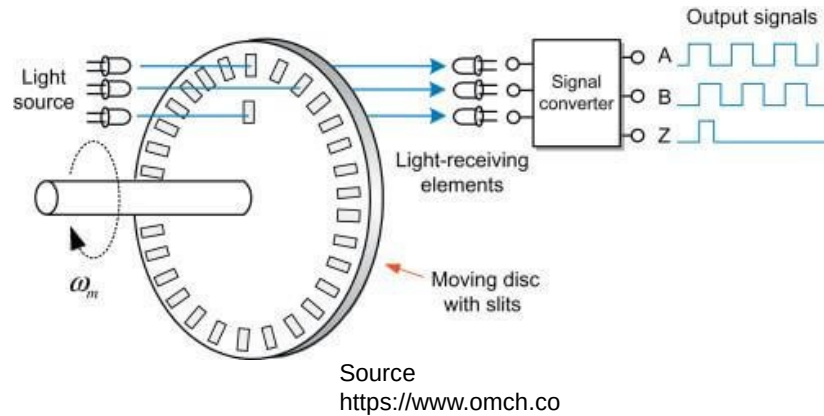
Codeur
Posital



Codeur
Broadcom



Codeurs incrémentaux



Mise en œuvre décodage signaux quadrature

- Matériel : HCTL-2020 (14Mhz 8/12/16bits sortie //) ,LS7366R (40Mhz 8/16/24/32 bits sortie SPI)
- FPGA
- Microcontrôleur : QED, implémentation manuelle

2 algos

- Détection de séquences :
 - $2 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 0 \Rightarrow +1$
 - $3 \rightarrow 2 \rightarrow 0 \rightarrow 1 \Rightarrow -1$
- Détection de front sur Interruption
 - Sur Front montant A : Si B=0 $\Rightarrow +1$, Si B=1 $\Rightarrow -1$
 - Sur Front montant B : Si A=0 $\Rightarrow -1$, Si A=1 $\Rightarrow +1$

Codeurs Absolus



Disque codé avec code Gray

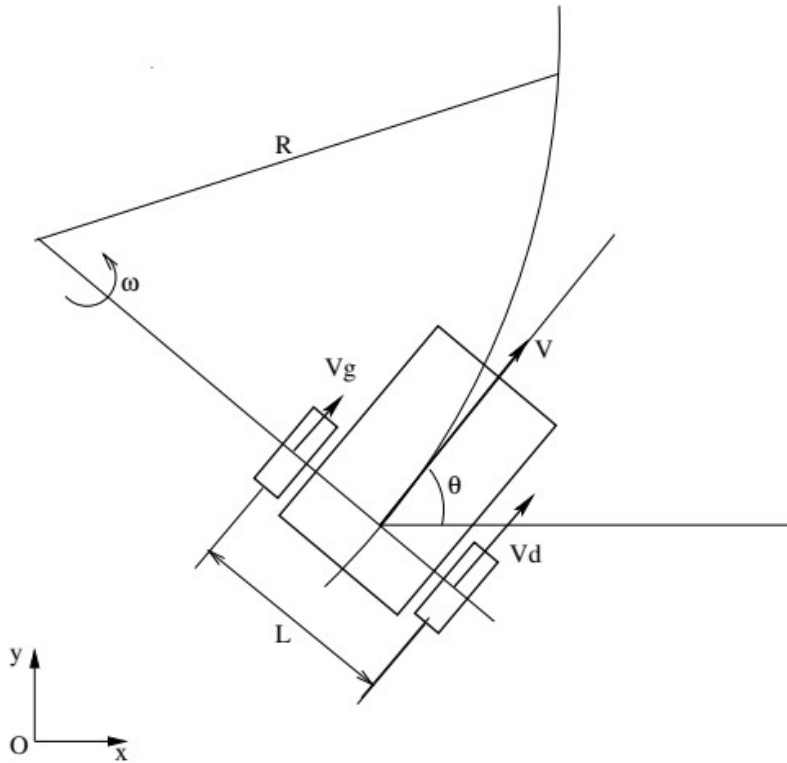
Décimal	Code Gray	Codage binaire
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0011	0010
3	0010	0011
4	0110	0100
5	0111	0101
6	0101	0110
7	0100	0111
8	1100	1000
9	1101	1001
10	1111	1010
11	1110	1011
12	1010	1100
13	1011	1101
14	1001	1110
15	1000	1111

- Lecture directe de la position, même après coupure d'alimentation
- Interfaces : Parallèle, Can, Modbus, ...

Source SEW-USOCOME

Odométrie Modèle Inverse

Cas d'un robot 2 roues motrices différentielles



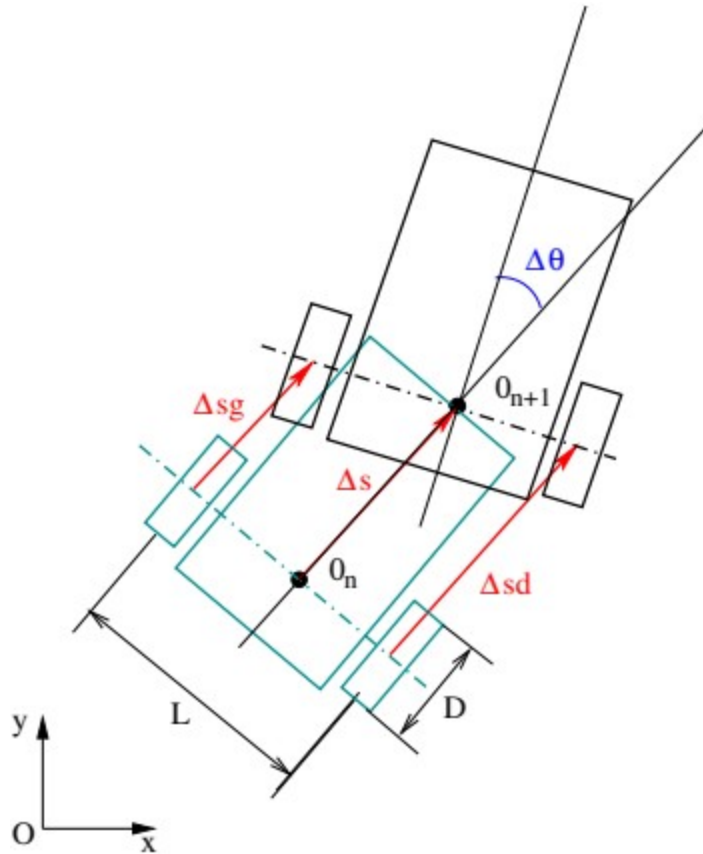
A partir des distances parcourues par chacune
Des roues il est possible de déterminer le
Déplacement et le rayon de courbure de la trajectoire

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}, V = R \frac{d\theta}{dt} \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{V}{R}$$

On peut montrer que $V = \frac{V_g + V_d}{2}$

et que $R = \frac{L}{2} \cdot \frac{V_g + V_d}{V_g - V_d}$

Calcul Odométrie

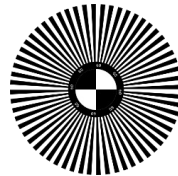


On suppose que entre 2 mesures le déplacement est faible
 => il est possible d'approximer les arcs de cercle de déplacement
 par des droites

On peut montrer que $\Delta s = \frac{\Delta sg + \Delta sd}{2}$ et que $\Delta \theta = \frac{\Delta sd - \Delta sg}{L}$

Ainsi on peut en déduire que

$$\begin{cases} \theta_{i+1} = \theta_i + \Delta \theta \\ x_{i+1} = x_i + \Delta s \cdot \cos \theta_i \\ y_{i+1} = y_i + \Delta s \cdot \sin \theta_i \end{cases}$$



$$\Delta s_{g/d} = C_m \cdot N_{g/d}$$

$$C_m = \frac{\pi \cdot D}{n C_c}$$

D = diamètre de la roue

N = nombre de tops odométrie entre 2 positions

C_c = résolution du capteur (nb tops par tour)

n = rapport de réduction

Odométrie caractéristiques

- Estimation d'une position
- Bonne précision sur faible distance, qualité dépend du contact pneu sol, variation diamètre roue, modèle du véhicule ...
- ! Choix résolution = nombre de tops par tours = précision
- ! Choix fréquence d'échantillonnage
 - => Charge de calcul
 - => gestion Overflow
 - => vitesse du robot : supposée constante entre 2 échantillons

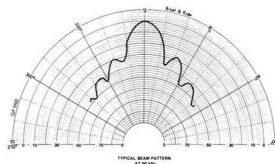
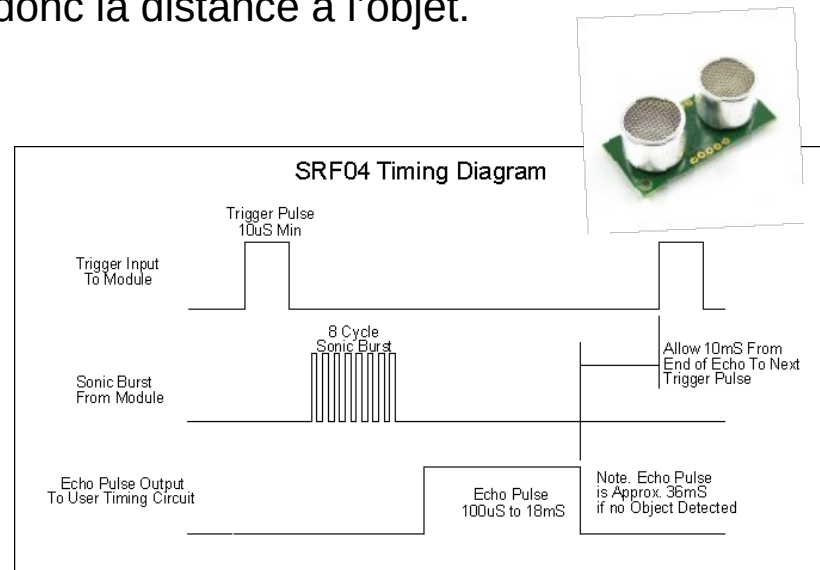
Capteur type télémètre

Principe :

une onde émise est réfléchiée par un objet distant. La mesure du temps de vol de l'onde réfléchiée par la source permet de connaître la distance parcourue par l'onde et donc la distance à l'objet.

Type Ultrasons

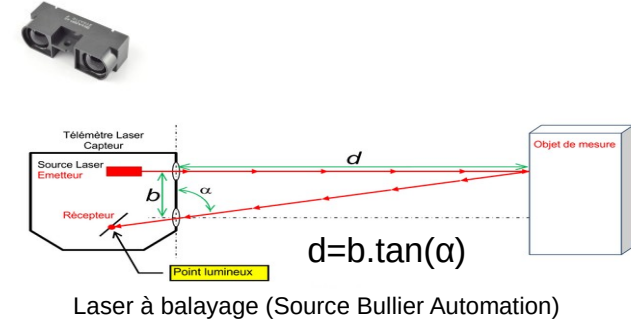
- L'onde émise est un signal ultrasonore (~40Khz)
- Vitesse dans l'air 340m/s, 1500m/s dans l'eau
- portée restreinte, sensible au rayonnement infrarouge, difficulté de détecter des vitres et des obstacles noirs mat, peu coûteux, faible encombrement
- $0,5\text{cm} < \text{distance} < 1\text{m}$
- ! consommation entre 25-50mA (sortie I/O 20-40ma)
- Distance min ~2-3cm, max ~5m (pour la robotique)
- Cône de détection 30° (SRF04)
- Sensible pression et autre capteurs, vitesse de déplacement, texture et forme de l'obstacle



Capteur type télémètre (2)

Type Infrarouge

- Mesure de l'angle de réflexion d'un faisceau infrarouge
- portée restreinte, sensible au rayonnement infrarouge, difficulté de détecter des vitres et des obstacles noirs mat, peu coûteux, faible encombrement
- $0,5\text{cm} < \text{distance} < 1\text{m}$



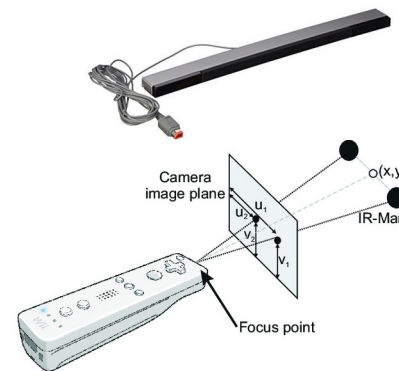
Laser :

- 2 types de mesures d'estimation de la distance : mesure du déphasage du signal réfléchi avec le signal émis, mesure de l'angle du faisceau réfléchi
- 1D réflexion d'1 point, 2D faisceau laser en rotation pour balayer un plan, 3D plusieurs faisceaux (généralement entre 16 et 128) pour balayer l'espace
- bonne résolution angulaire, mesure 10 hertz à qq100 hz, problème avec objets transparents, coûteux et relativement encombrant
- Portée : du mètre au kilomètre selon applications
- $\sim 50\text{€} < \text{Coût} < \sim 10\,000\text{€}$



Capteur type Caméra

- Capteur extéroceptif
- Nécessite souvent un traitement des données coûteux, sensible à la luminosité
- Plusieurs types :
 - Simples
 - Stéréoscopiques
 - Panoramiques : Rotation d'une caméra, plusieurs caméras, objectif fisheye, Miroir convexe



Capteurs autres types

- Contact : interrupteur, détection d'obstacle
- Balises (Beacon wifi, bluetooth),
- GPS : positionnement, plutôt extérieur
- Radar dopplers et optiques : souris ordinateur
-

Interface capteurs

Capteurs analogiques : mise en forme + ADC

Capteurs numériques :

- Adaptation des niveaux peut être nécessaire
- Capteur tout ou rien : entrée logique simple
- Capteur « intelligent » : bus de communication I2C, SPI, RS232, bus CAN,...

Protections galvaniques parfois nécessaires pour protéger les entrées du calculateur

Alimentation, consommation

Actionneurs : moteurs

- Rôle : produire un mouvement/action à partir d'un signal électrique

Moteur Courant Continu : Simple à contrôler, couple fonction de la tension appliquée

Moteur Brushless : meilleur rendement que le moteur à courant continu, plus cher, plus complexe à contrôler, nécessite une carte spécifique, plus petit

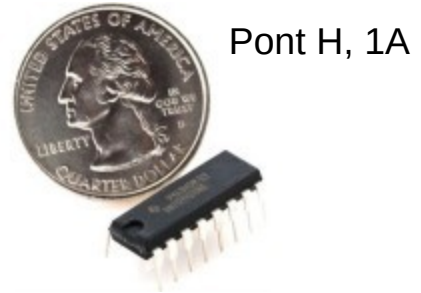
Moteur Pas à Pas : couple assez important, positionnement précis, nécessite une gestion particulière des signaux de contrôle

Choix d'un moteur : couple, vitesse de rotation, encombrement, tension et courant d'alimentation. Peut intégrer un réducteur, un capteur odométrique ou tachymétrique



Interface puissance

- Les E/S des microcontrôleurs ne peuvent pas délivrer de courant > quelques mA
- La génération de signaux de commande peut être coûteuse en temps processeur
- En cas de défaillance logicielle, il est parfois nécessaire d'avoir des mécanismes de coupure d'alimentation des moteurs
nécessité d'interfaces de puissance
 - Composants intégrés, cartes interfaces,
 - peuvent intégrer des protections (thermique, courant)
 - Entrée : PWM, signaux enable, communication série



Brushless 1A



2 moteurs DC 2A



moteur pas à pas USB

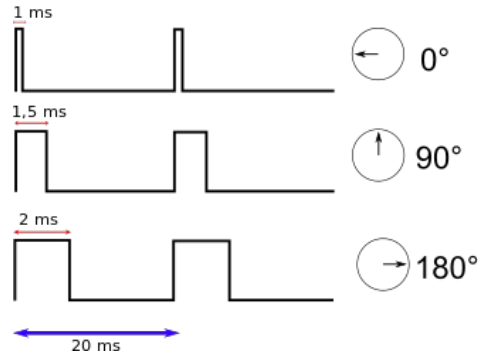


2DC, 160A, 60V

Cas des servomoteurs

Moteur + interface de puissance + asservissement (généralement position)

Servomoteur de modélisme



Servomoteur spécifique



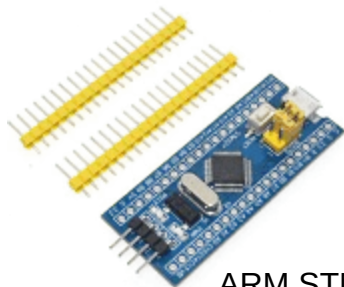
Dynamixel
Contrôle vitesse, couple, position
PWM, liaison série, chaînage possible

Architecture de calcul

- Architecture monoprocesseur
- Architecture multiprocesseur
 - Associer microcontrôleur (gestion capteurs et actionneurs) carte processeur (puissance calcul)
 - Nécessite mise en place de communication : interface bus série, bus CAN, SPI, USB. Protocole de com à prévoir
- Choix d'une architecture : puissance de calcul, nombre et complexité capteurs actionneurs, coûts, encombrement, environnement de dev, standard, ...



Raspberry Pi



ARM STM32



PIC 18F



TI MSP432



PC industriel embarqué

Gestion énergie

- Alimentation autonome par batteries
- Prévoir accès et gestion recharge
- Surveiller décharge
- Nécessaire par fois de séparer l'alimentation des calculateurs de celle des moteurs
- Alimentation de différents éléments : tensions, puissances => conversion, stabilisation
- Choix : encombrement, prix, tension, capacité, durée vie, dangerosité



Batterie NiMH 7,2V 5Ah



Lipo 11,1v 2,6Ah

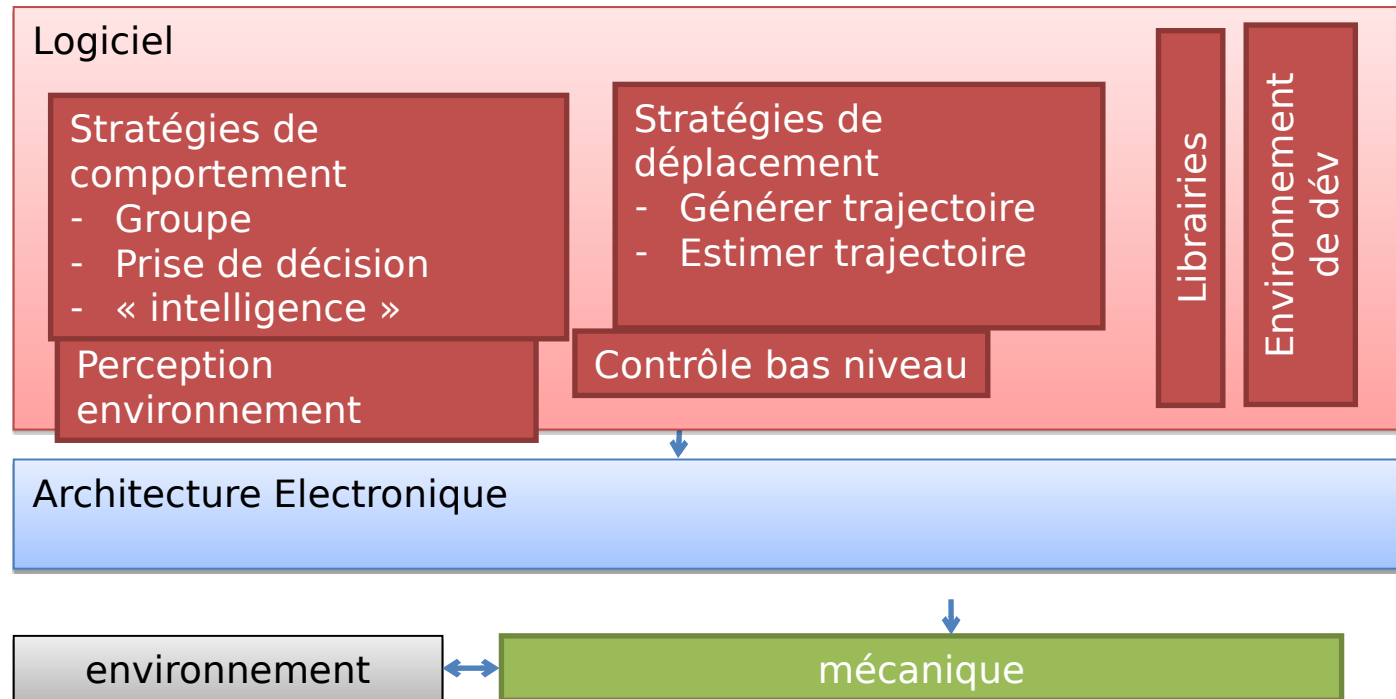


Plomb 12V, 12Ah



Li-ion AA 3,7V,0,8Ah

Plateforme Logicielle d'un Robot Mobile

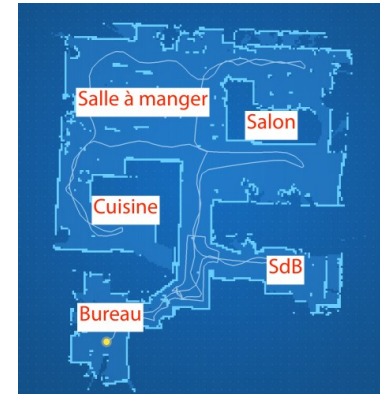


Perception environnement

- Détection d'obstacles
- Cartographie d'environnement
- Capteurs utilisés principalement extéroceptifs: caméra, lidar, télémètres



Image LIDAR automobile



Cartographie robot aspirateur

Stratégie de déplacement : localisation

- Estimer position/trajectoire
- Capteur proprioceptifs précis à cours terme => recalage réguliers avec des informations de capteurs extéroceptifs
- Fusion de données => filtrage adaptatif Kalmann, ...
- Ex : centrale inertielle
 - Accéléromètres trois axes + gyromètres 3 axes + boussole
 - Peut aussi utiliser un GPS

Accéléromètre 3 axes
Gyromètre 3 axes
Magnétomètre
Baromètre
Interface I2C



Module GPS

localisation

- Problématique très importante dans la conception du robot
- Localisation par le robot ou externe au robot (nécessite une infrastructure)
- Localisation Indoor/outdoor
- Recalage par balises radio, optique,...

Stratégie de déplacement : génération trajectoire

- Navigation semi-autonome : suivi ligne (optique, magnétique)
- Évitement d'obstacles
- Environnement connu/inconnu
- Exploration aléatoire
- Path planning : définir un chemin, doit prendre en compte les trajectoires possibles du mobile (holonomie), les obstacles et espaces non navigables

Contrôle bas niveau

- Mise en œuvre des comportements élémentaires du robot : avancer, tourner,...
- Algorithmes d'asservissement : PID, asservissement vitesse, position
- Exécuté sur les calculateurs gérant les actionneurs, parfois intégrés dans l'actionneur (servomoteur)
- Le comportement haut niveau « intelligent » du robot s'appuie sur ces fonctions « reflexes »

Comportement « intelligent »

- Prise de décision en fonction de l'environnement
- Collaboration
- Mise en œuvre de scénarios définis à l'avance
- Peut recourir à de l'apprentissage et IA

Environnement de développement

- Simulateurs
- Librairies, drivers
- OS
- Langages

Ex : ROS, OPENCV, myrobotlab

Bibliographie

- Introduction to mobile Autonomous Robots, Roland Illah R.SIEGWART, NOURBAKSH,
- Robotique mobile, David Filliat, CNRS
- <https://www.robots.ieee.org>,
- <https://www.robotshop.com>,
- Robotique mobile Autonome Comportementale, cours , Pierre Mallet CNRS,
- <https://www.gdr-robotique.org>,
- Robotique pratique, Fabrice Le Bars, ENSTA Bretagne