

Fundamentos en Robótica

Unidad 4.2

Locomoción y cinemática

Temas

- Manipulación
Interacción con objetos físicos
- Locomoción
Desplazamientos controlados en el medio

Locomoción: medios

- Superficie
 - Campo, calle, casa, escritorio, pared, volcán...
 - Luna, planeta
- Acuáticos
 - ¿Superficie o sumergido, por cuanto tiempo?
- Aéreos
 - Cómo y por cuanto tiempo...
- Espacio
- Anfibios

Vehículos acuáticos



USV-2600, 2009



OpenROV, 2012



Wave Glider, 2012



Honey Badger, 2014

Vehículos aéreos



KOAX-X-240



Cosa de japoneses

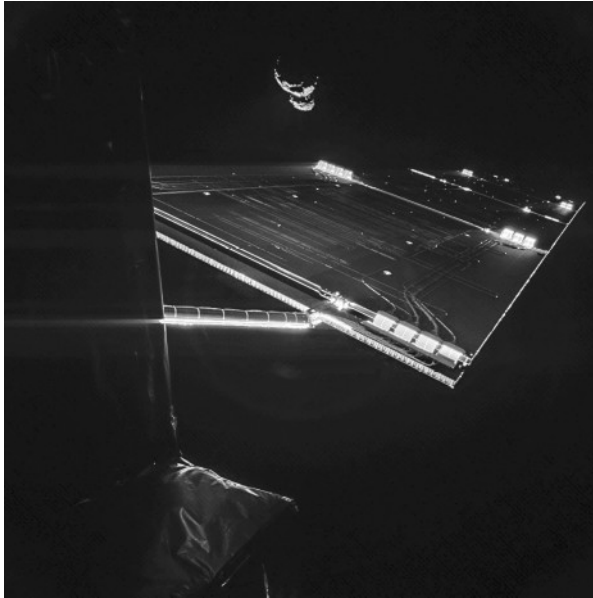


WPI Blimp, 2011

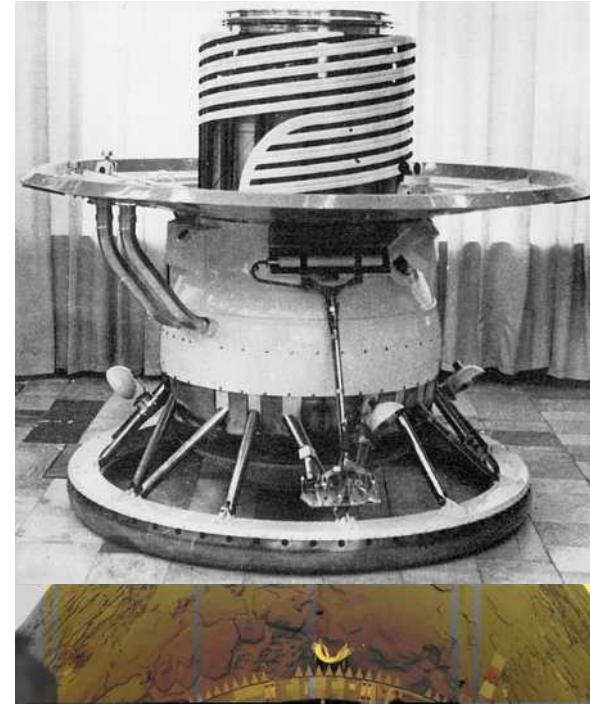


Inspector, 2010

Vehículos espaciales



Rosetta y Philae, 2004



Venera 9, 1975



CubeSat, 2003



Voyager 1, 1977

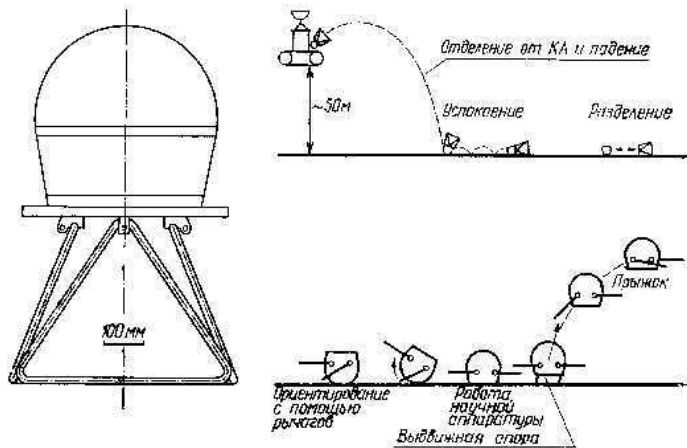
Vehículos de superficie



Yeti, 2013



SPM, 2014



PROP-F, 1988

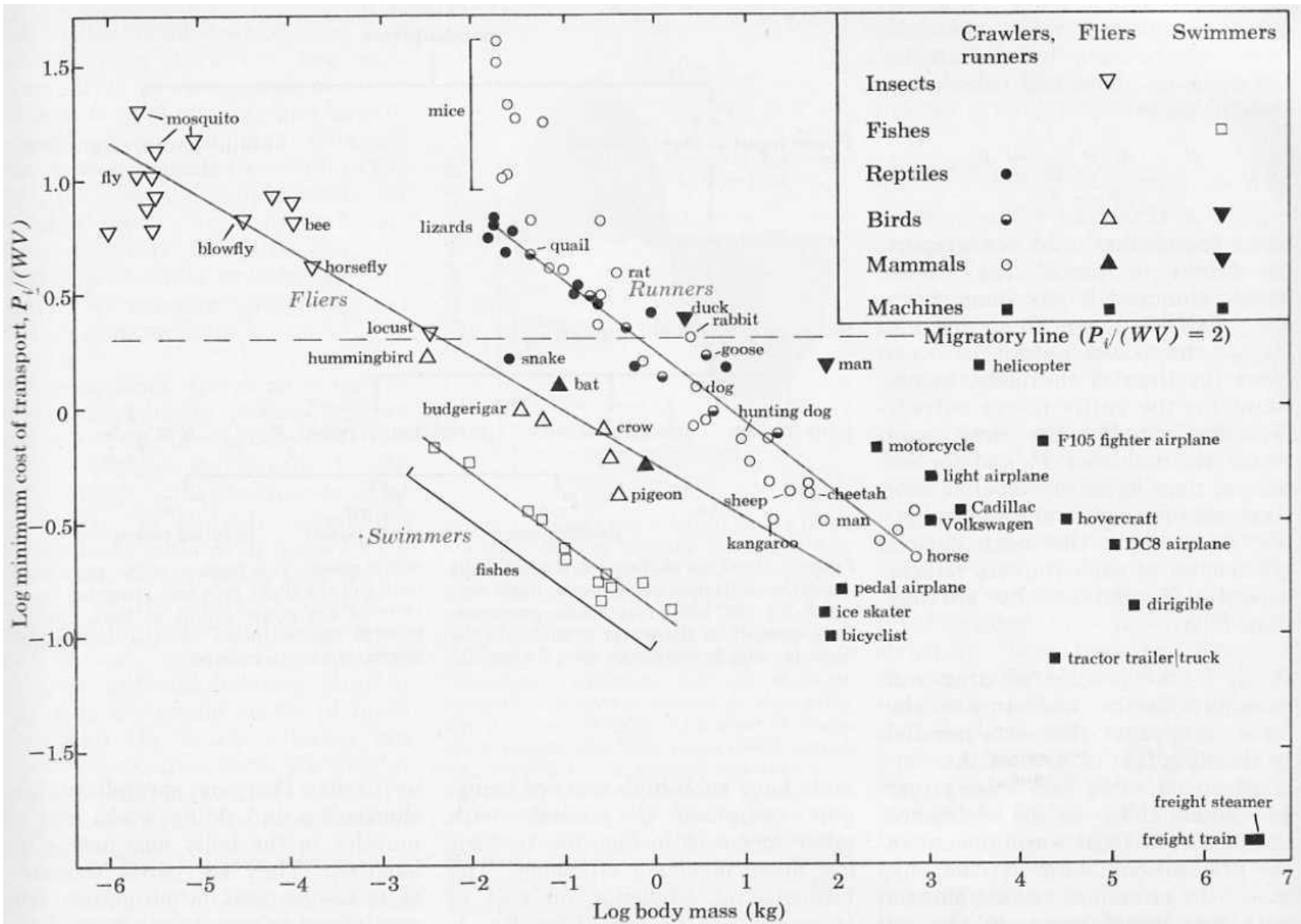


Morphex, 2014

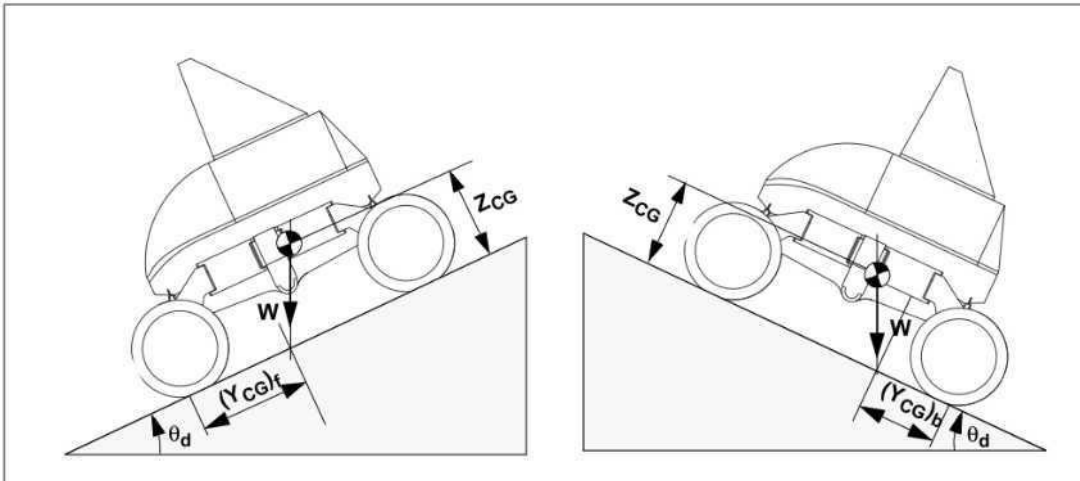
Características de movilidad

- Características del sistema:
 - Forma y dimensiones: relación largo/alto y ancho al girar
 - Volumen ocupado y masa (en particular masas móviles)
 - Eficiencia (al avanzar, girar, y trepar)
- Características del ambiente:
 - Superficie (¿escala o no? ¿asfalto? ¿arena? ¿pasto?)
 - Topografía: pendientes máximas
 - Obstáculos
 - Relación dimensión de robot/dimensión de obstáculo superable
 - Espacio requerido para maniobrar entre obstáculos
- Complejidad

Características de movilidad



Características de movilidad

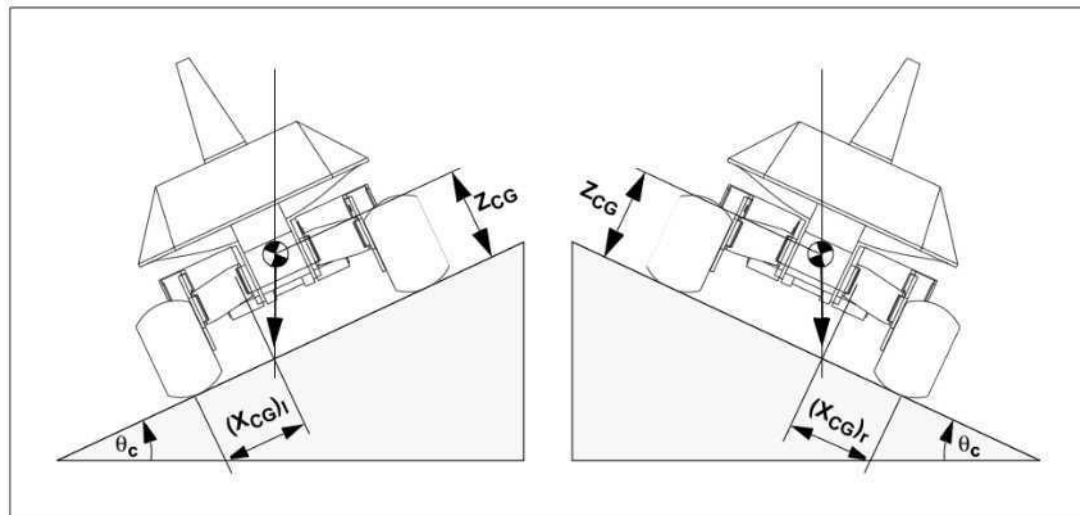


Pendientes:

- Cambian fuerza normales y longitudinales
- Causan variación del reparto del peso
- Peligro de volcar

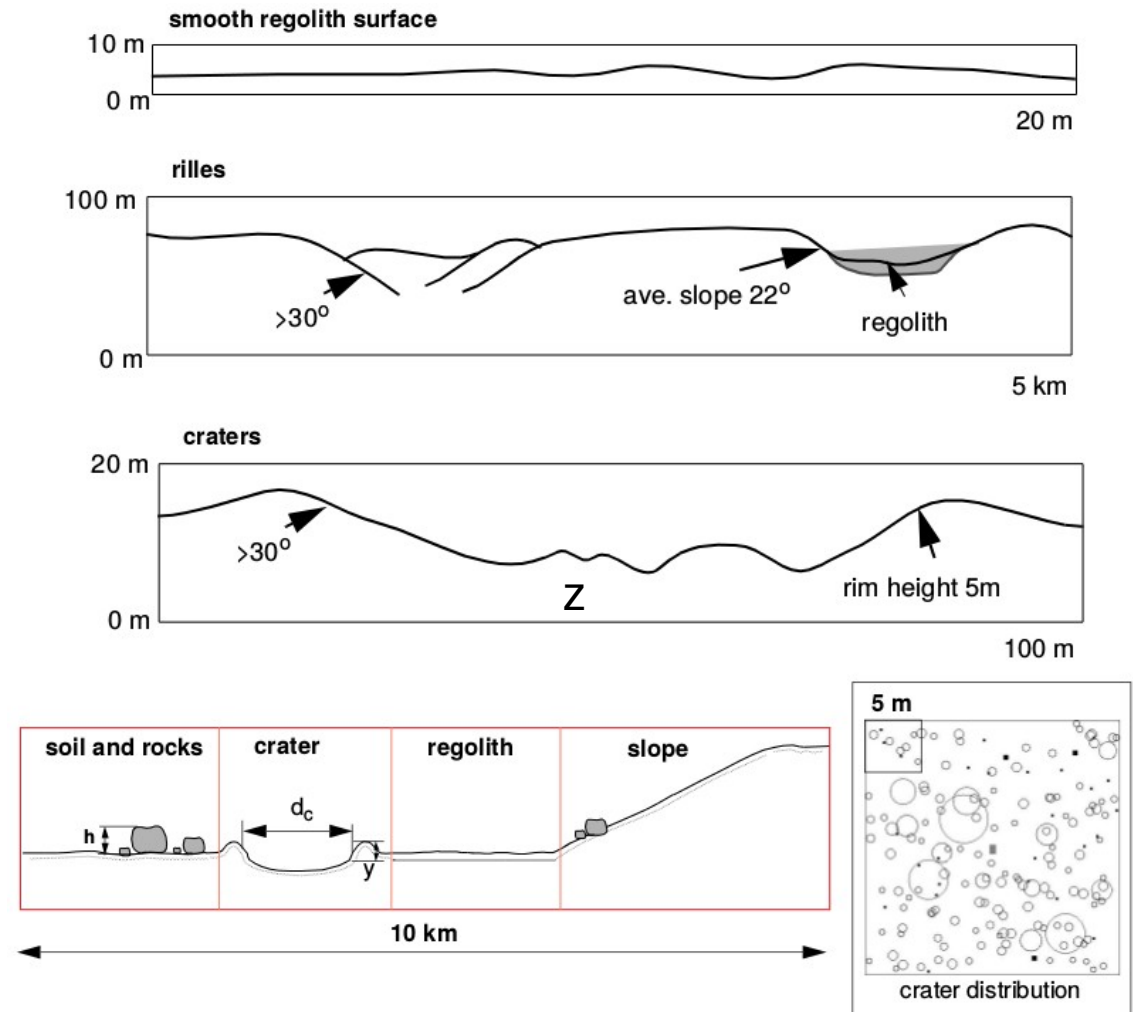
Ideas:

- Desplazar CG activamente
 - Desplazar ruedas respecto del chasis
 - Desplazar carga
- Bajar la altura del CG



Características de movilidad

Ejemplo de superficie de trabajo: perfiles típicos en la luna



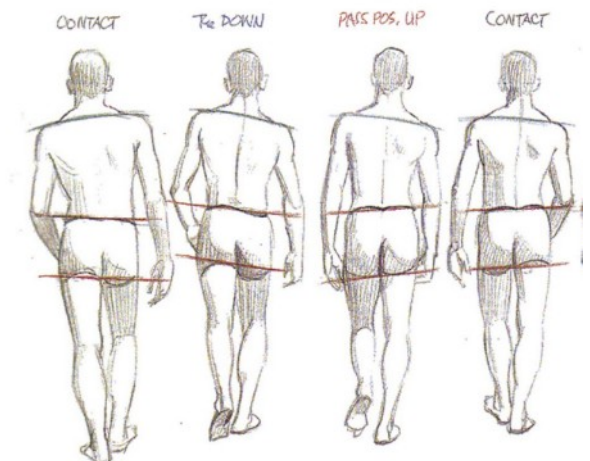
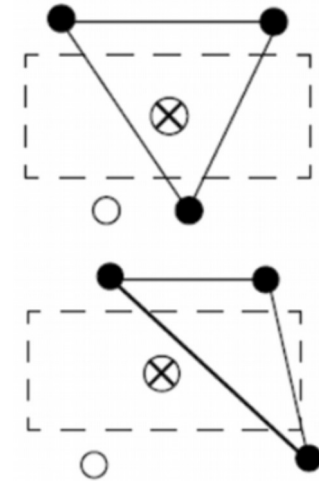
- Boulder height (h) distribution: $25\text{ cm} > h > 50\text{ cm}$, $3\text{-}4/100\text{ m}^2$.
- Crater diameter (d_c) and depth (y) distribution: $1\text{ m} > d_c > 3\text{ m}$, $y \sim 0.2$, $10\text{ craters} / 100\text{ m}^2$, $3\text{ m} > d_c > 5\text{ m}$, $1\text{ crater} / 200\text{ m}^2$.
- Slopes: nominal slope 20° , maximum slope 40° .

Rodar o caminar?

- **Rodar/caminar**: apoyo **contínuo/discreto** a lo largo de la trayectoria.
- La rueda es extremadamente simple de controlar y extremadamente eficiente (donde es aplicable).
- La pierna es más flexible: puede moverse donde se mueve una rueda, y más.
 - Mucho más compleja de construir y controlar, y potencialmente más ineficiente.

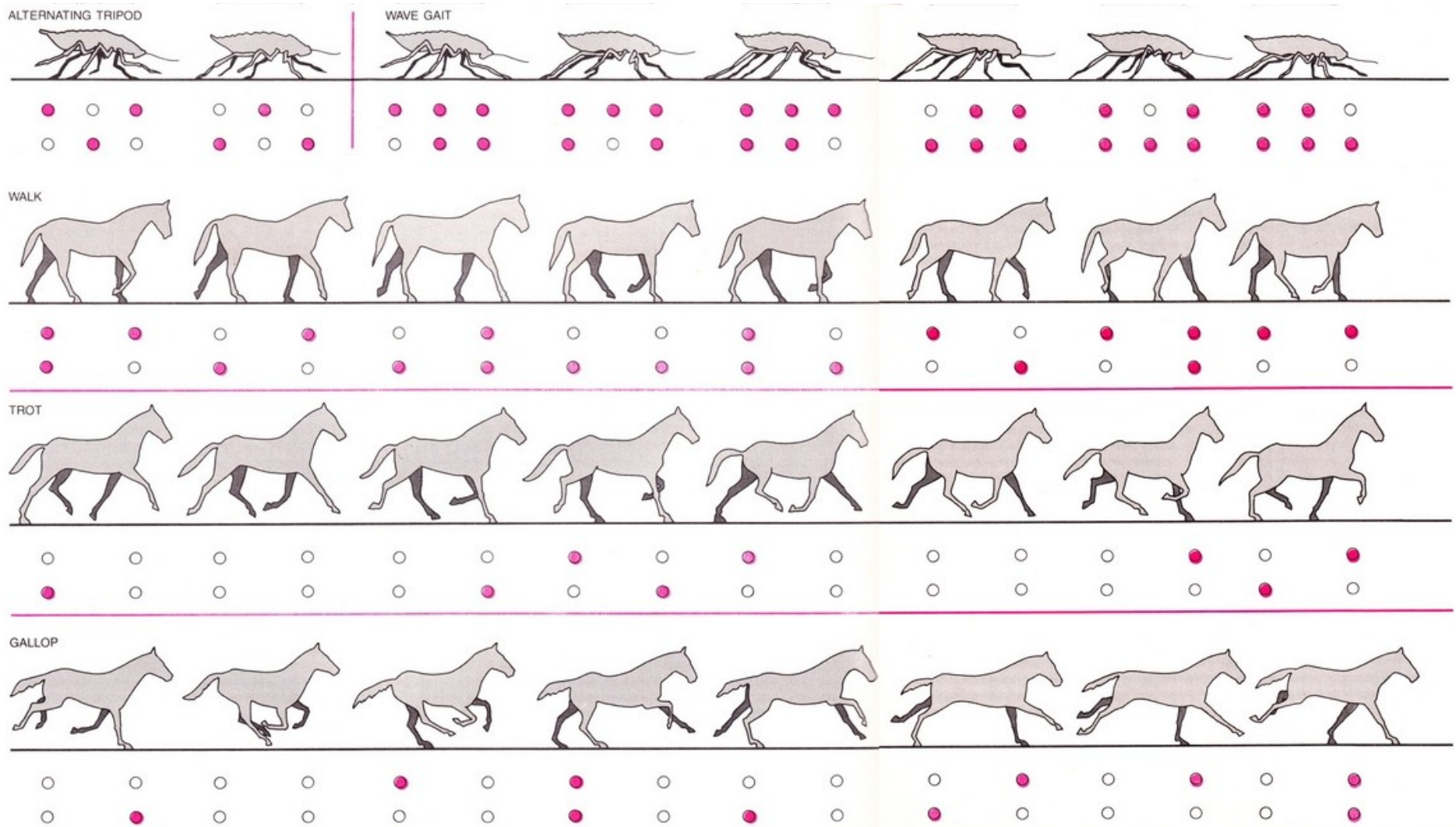
Caminar

- Estable estáticamente
 - Típico en insectos, arácnidos, etc.
 - Apoyos y centro de gravedad
 - Mínimo de 4 patas.
 - Es independiente de la velocidad
(hasta un umbral)
- Estable dinámicamente
 - Usado por cualquier cosa más grande que una lagartija
 - Tiene en cuenta inercia: masas y velocidades implicadas



R. William, *Animation Survival Kit*

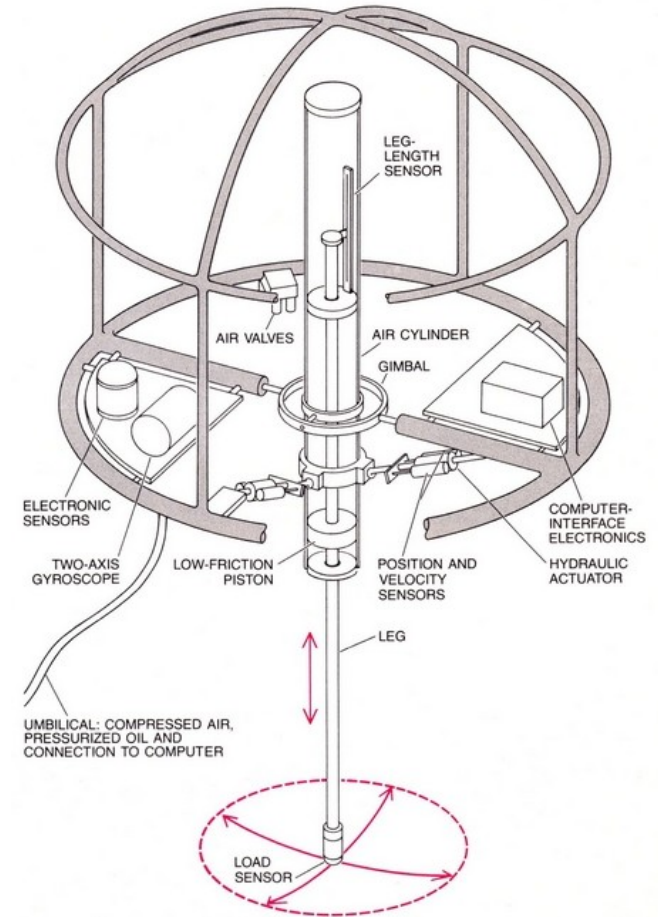
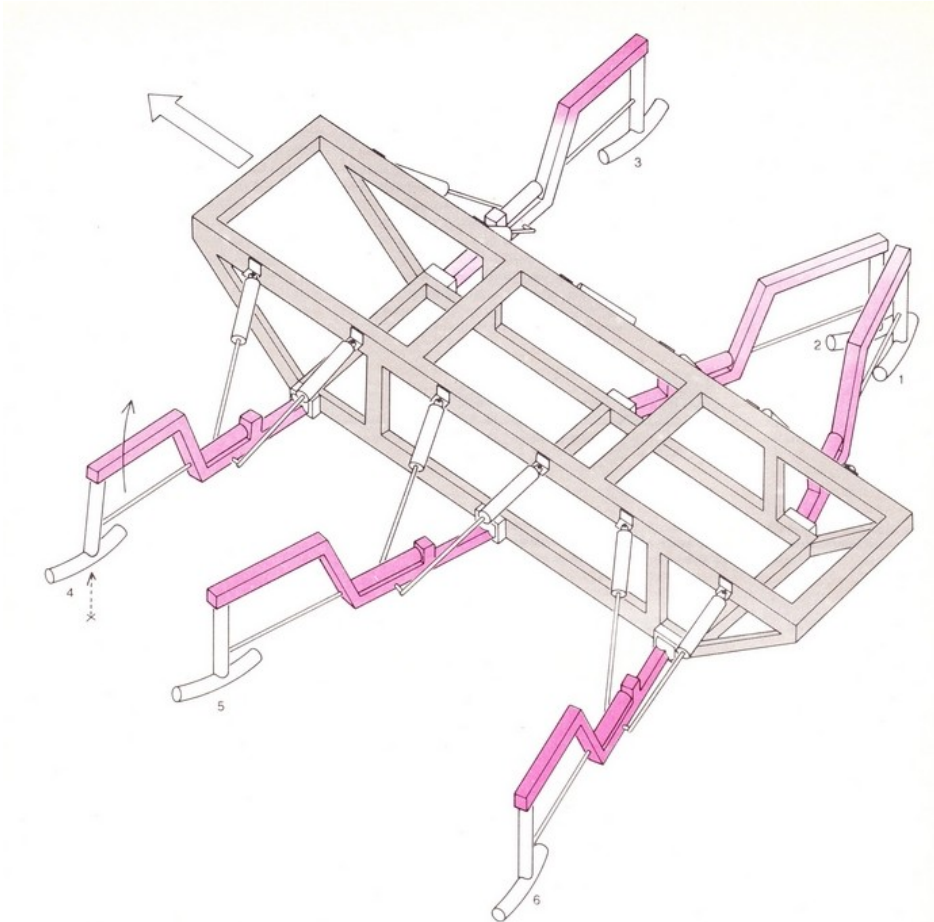
Caminar



¿Cuántas patas?

- < ~30g
 - Insectos: 6 patas
 - Arañas: 8 patas
 - Ciempiés: 30-354
- > 30g
 - Mamíferos, reptiles y anfibios: 4 patas
 - Algunos reptiles evolucionaron a bípedos: aves
 - Algunos luego abandonaron el vuelo...
 - Algunos mamíferos evolucionaron a bípedos
 - Por movilidad: canguros
 - Por otras razones: humanos

Caminar

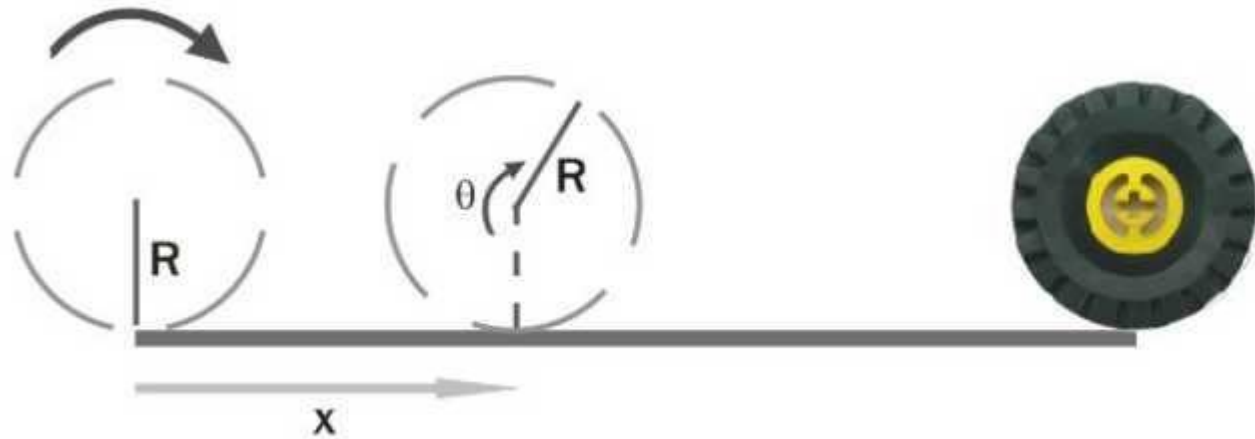


Ruedas



Cinemática de la rueda

Rodadura sin deslizar

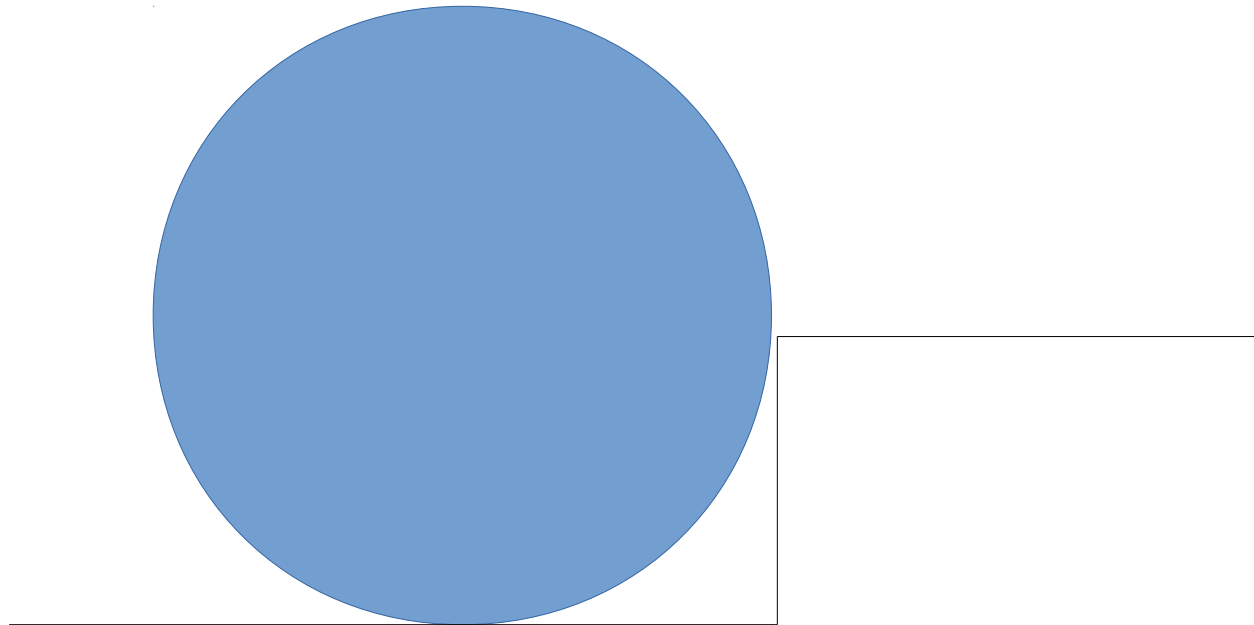


$$x = R \phi$$

$$\phi = \frac{x}{R}$$

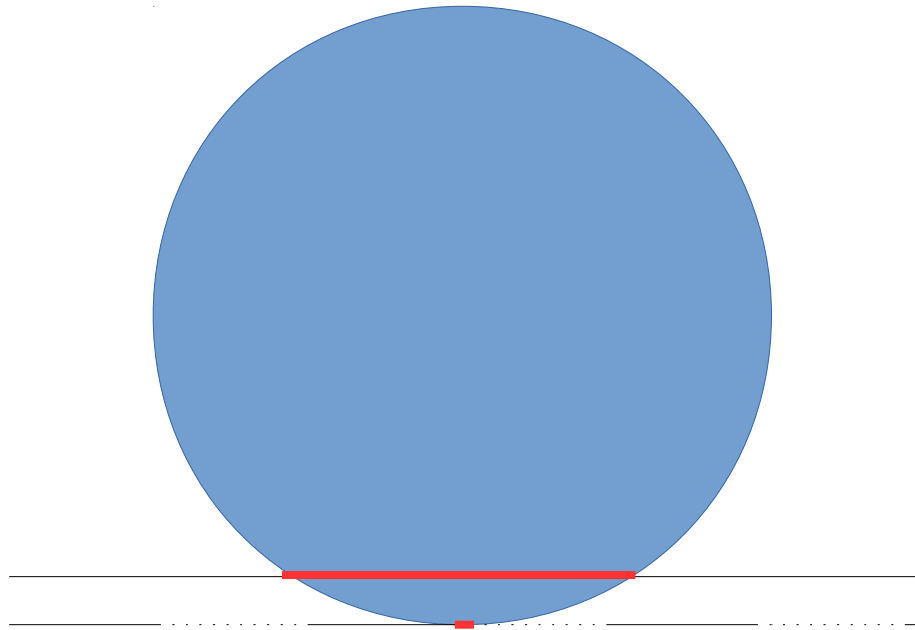
Cinemática de la rueda

Capacidad de superar obstáculos:



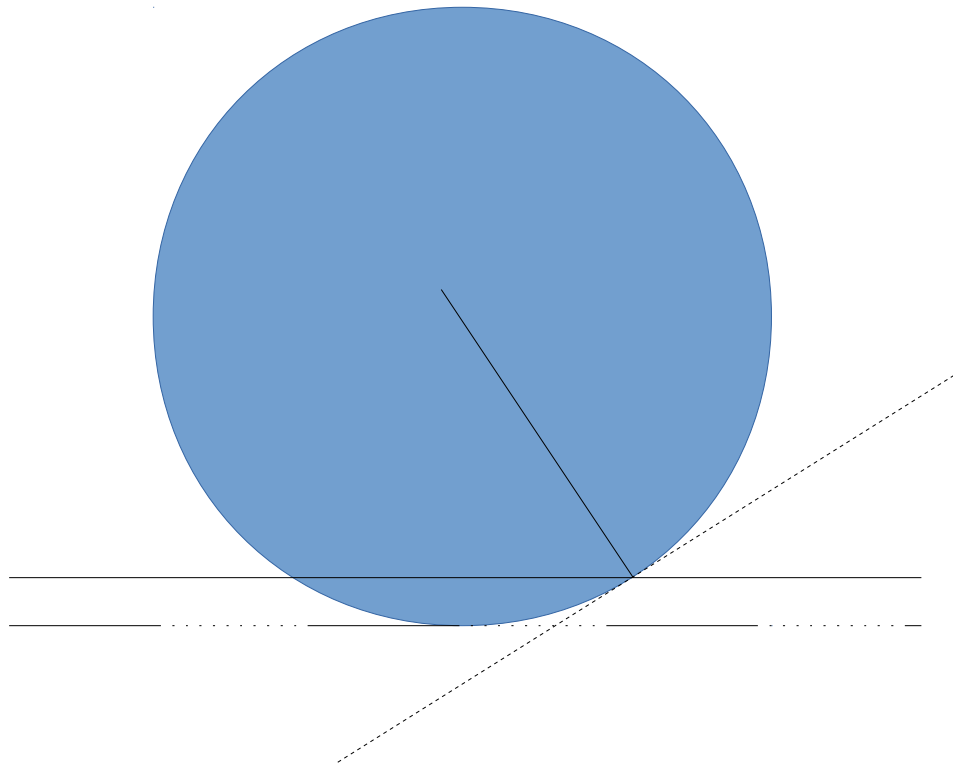
Movilidad: rueda

Presión específica: kg/m^2



Movilidad: rueda

Resistencia a la rodadura: kg



Movilidad: rueda

Menor presión específica

- Mayor resistencia a la rodadura
- Menor capacidad de tracción

Más ruedas

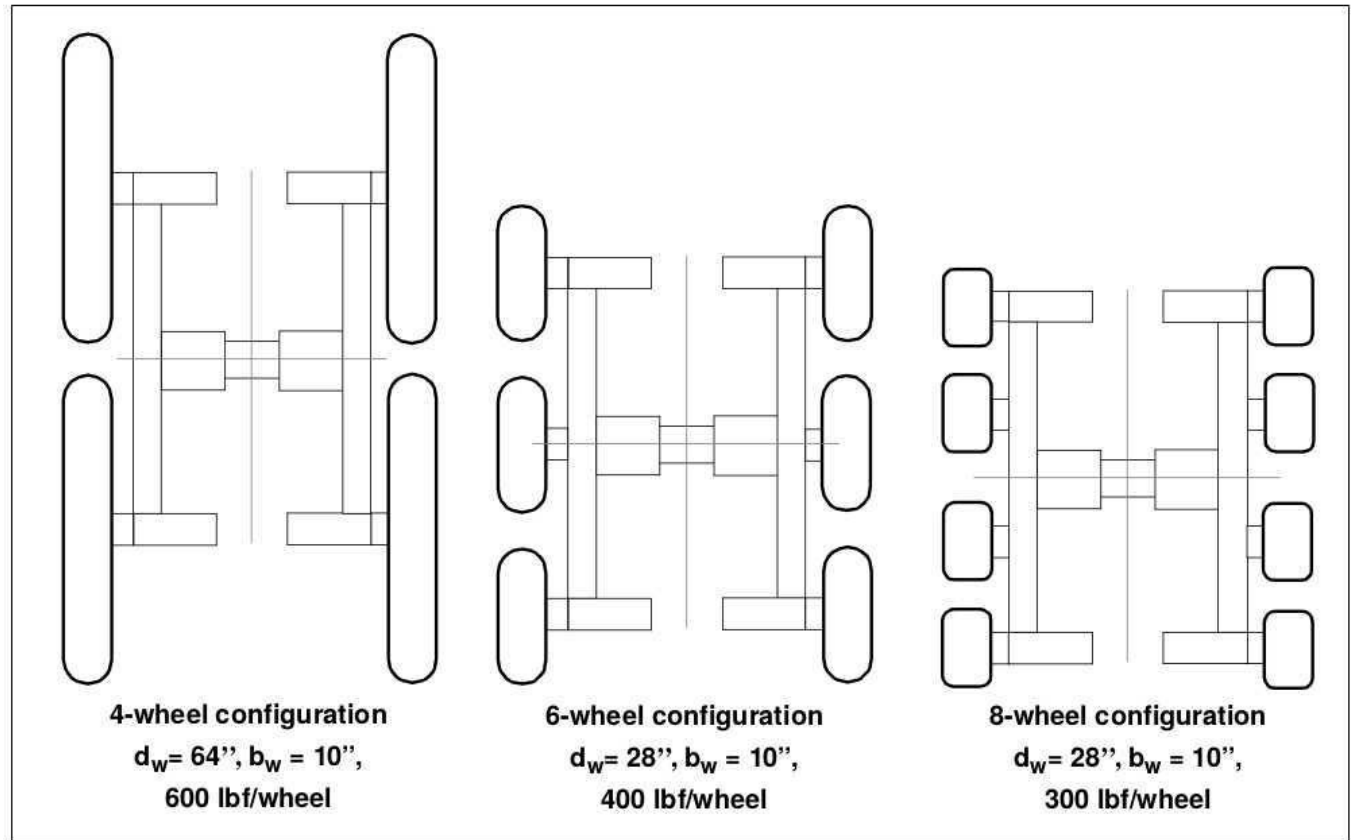
- Menor presión específica
- Ruedas más chicas → Menor superación de obstáculos

Ruedas más grandes

- Más velocidad, menos torque

¿Cuántas ruedas?

Ejemplo: distintas configuraciones para un chasis y un nivel hundimiento dado



DOF y Movilidad

- DOF: Número de coordenadas necesarias para describir posiciones alcanzables
- DDOF: Número de coordenadas en las que el robot puede generar velocidades

$$DDOF \leq DOF$$

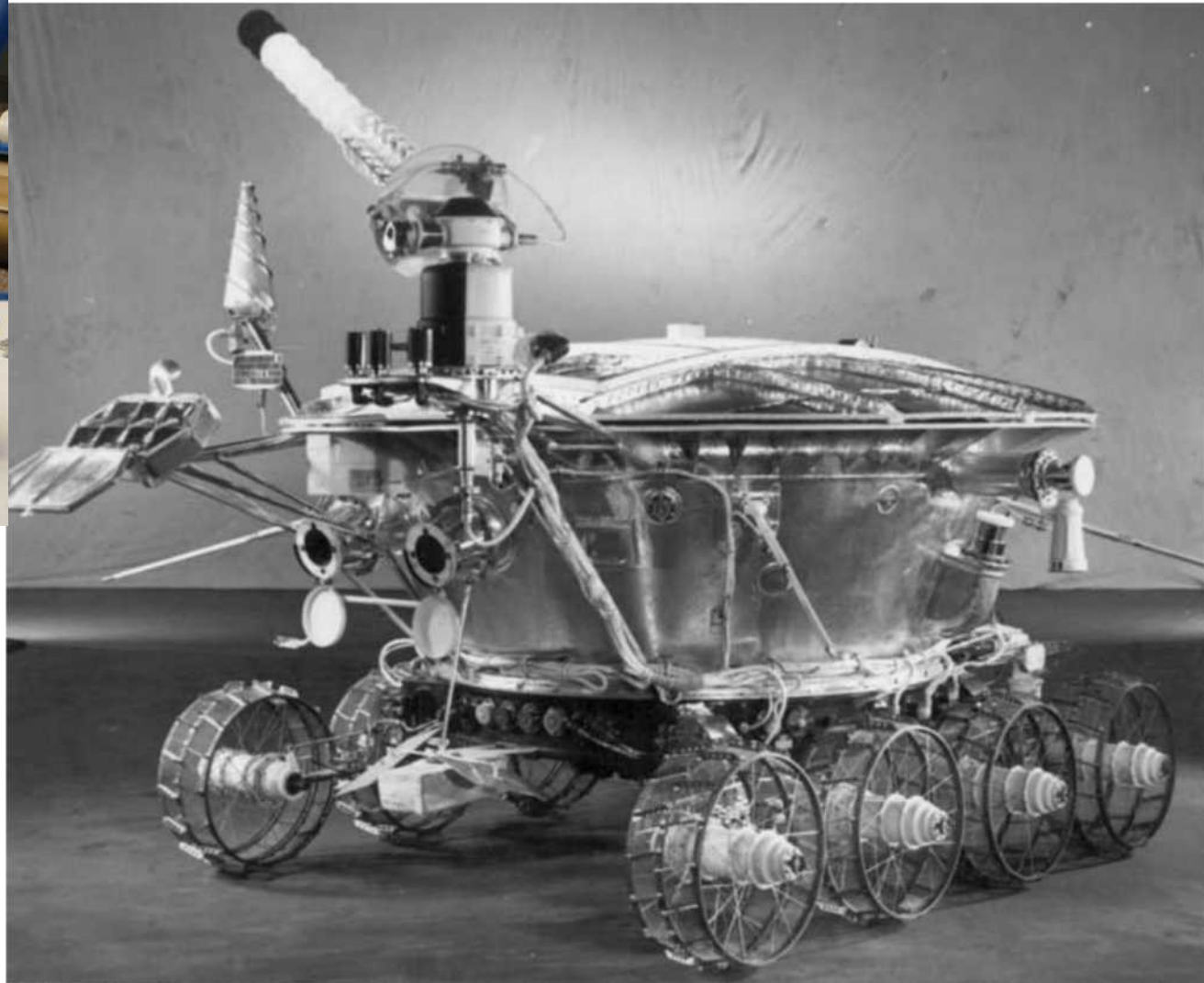
DOF y Movilidad

- Holonómico: el número de grados de libertad controlados coincide con el número total: $DDOF=DOF$
 - Ejemplo: brazo 6DOF, quadcopter
- No holonómico: controla menos DOF que en los que se mueve.
 - Auto, vehículo con orugas
- Hay un balance entre maniobrabilidad y estabilidad

Dirección diferencial



Butiá 2 - 2013



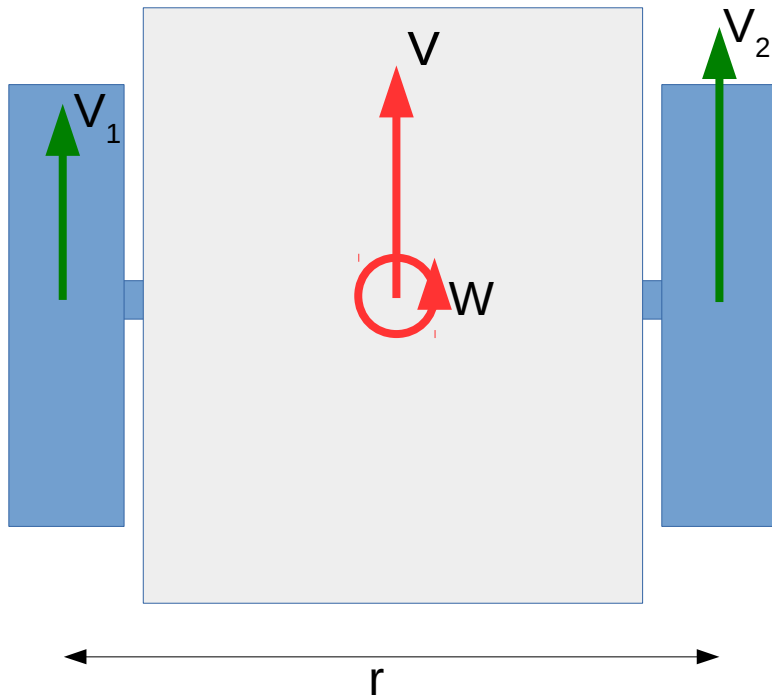
Lunokhod - 1971

Dirección diferencial

- Simplicidad de construcción y robustez
 - Mínimo de piezas móviles.
- Flexibilidad
 - Se adapta fácilmente a distintas geometrías, cantidad de ruedas, etc.
- Simplicidad de control
 - Sólo hay que controlar dos velocidades
- Maniobrabilidad
 - Puede girar sobre si mismo
 - $DOF=3$, $DDOF=2$

Dirección diferencial

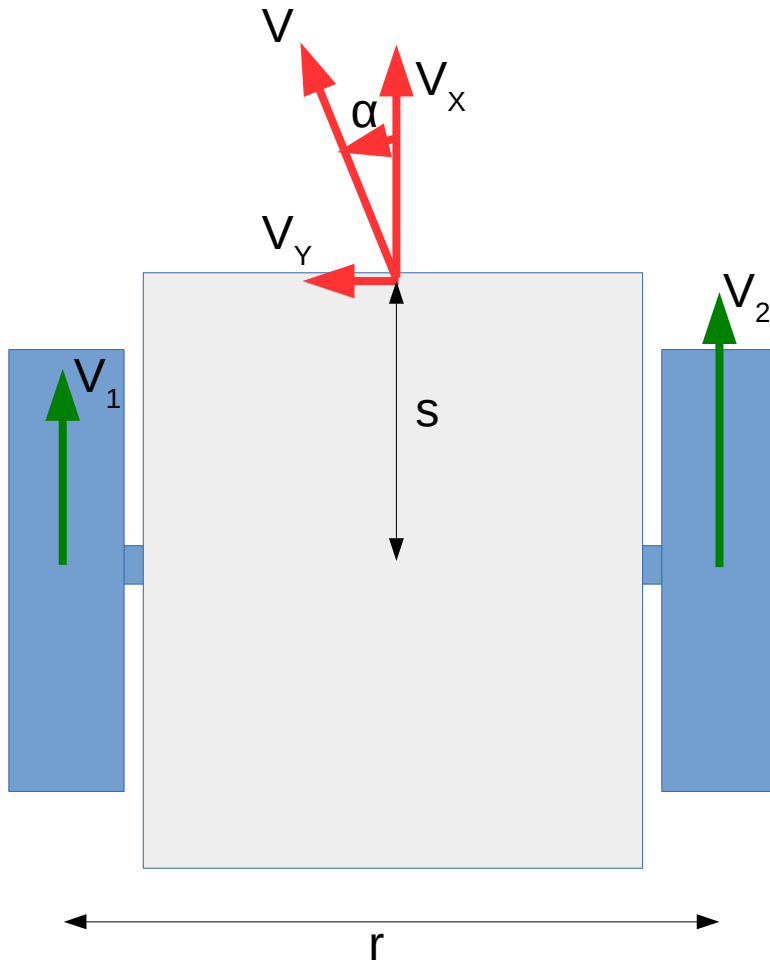
Velocidad lineal + angular



$$(v, \omega) \rightarrow \begin{cases} v = \frac{v_1 + v_2}{2} \\ \omega = \frac{d\phi}{dt} = \frac{v_2 - v_1}{r} \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_1 + v_2 = 2v \\ v_2 - v_1 = r\omega \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v_1 = v - \frac{r}{2}\omega \\ v_2 = v + \frac{r}{2}\omega \end{cases}$$

Dirección diferencial



Vector de velocidad

$$(v, \alpha) \rightarrow \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = v \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{pmatrix}$$

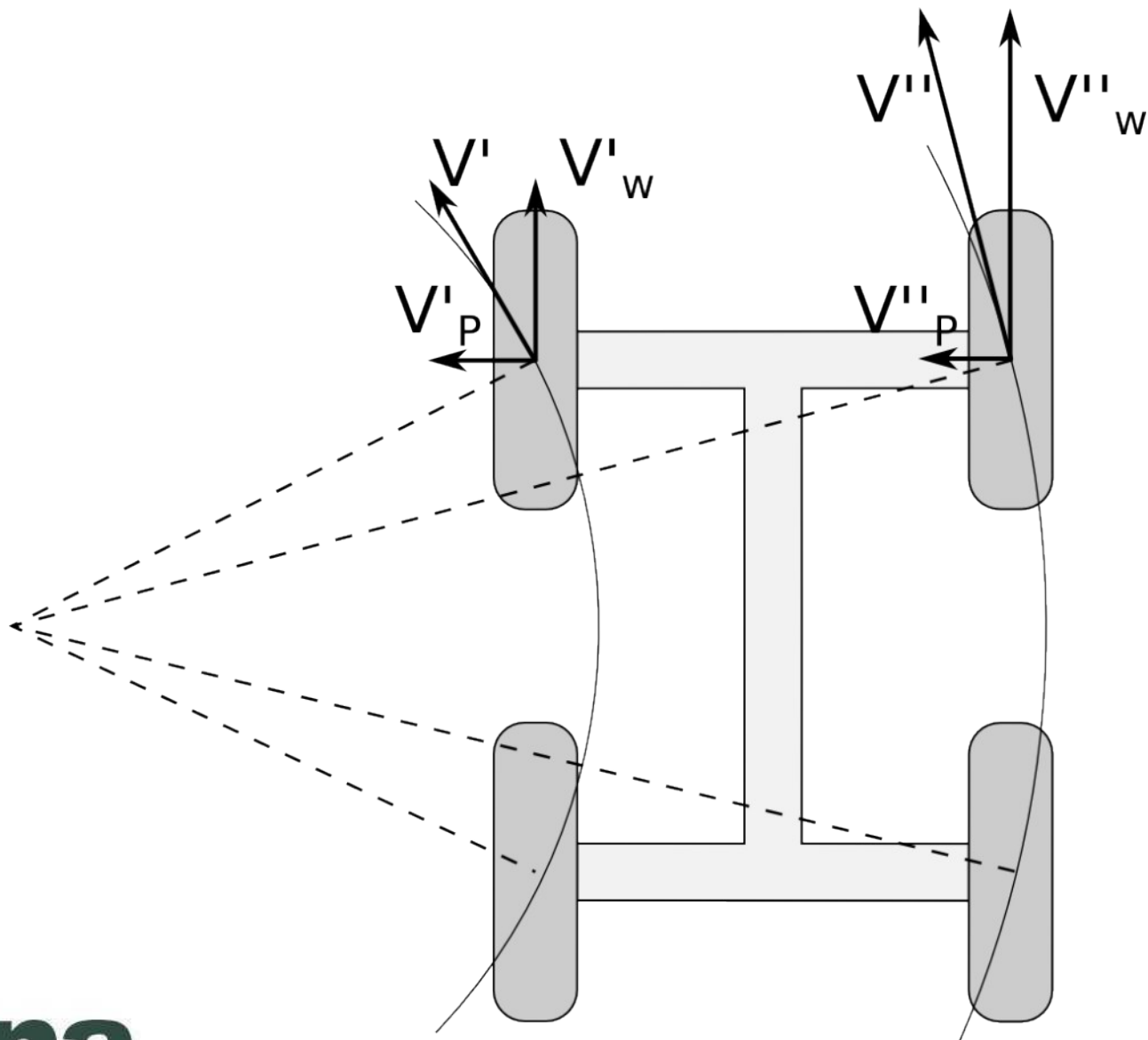
$$\begin{cases} \frac{v_1 + v_2}{2} = v_x \\ r(v_2 - v_1) = s v_y \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_1 = v_x - \frac{s}{2r} v_y \\ v_2 = v_x + \frac{s}{2r} v_y \end{cases}$$

Dirección diferencial

- Funciona particularmente bien con 2 ruedas motrices + rueda loca.
- Con más de 2 ruedas motrices, problemas al girar: ruedas no apuntan en la dirección en la que el robot se mueve. Equivalente a vehículo de orugas.
 - Aumenta consumo energético durante las maniobras
 - Perjudica la precisión
 - Arrastra el suelo
 - Aún así, es una solución excelente por su simplicidad y robustez

Dirección diferencial



Dirección explícita

- Agregar actuadores que permitan orientar las ruedas
 - Mejora el consumo y la precisión de las maniobras
- Si todas las ruedas son orientables, el robot es holonómico
 - Simplifica el control en maniobras complejas
- Aumenta costo y complejidad mecánica
- $DOF=3$, $DDOF=3$

Dirección explícita total



Agribot
2010

Dirección explícita parcial

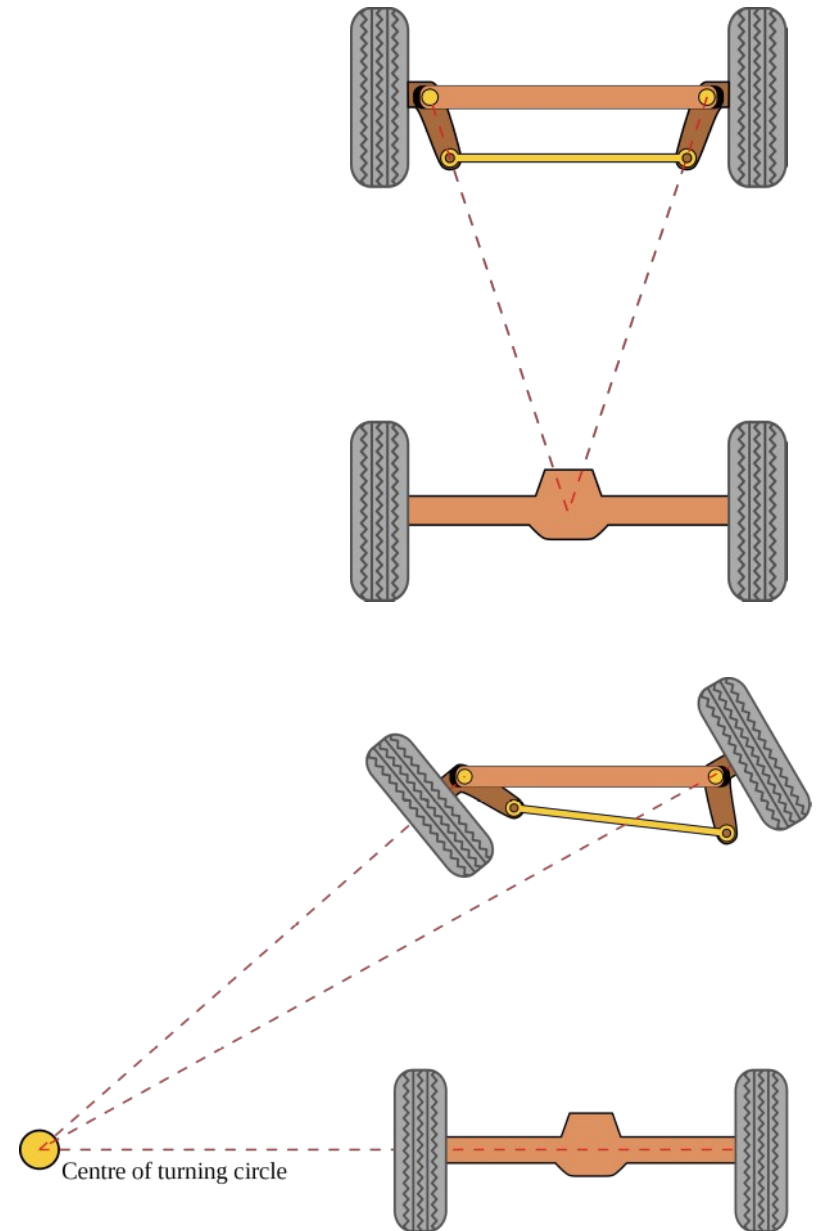


Curiosity
2011

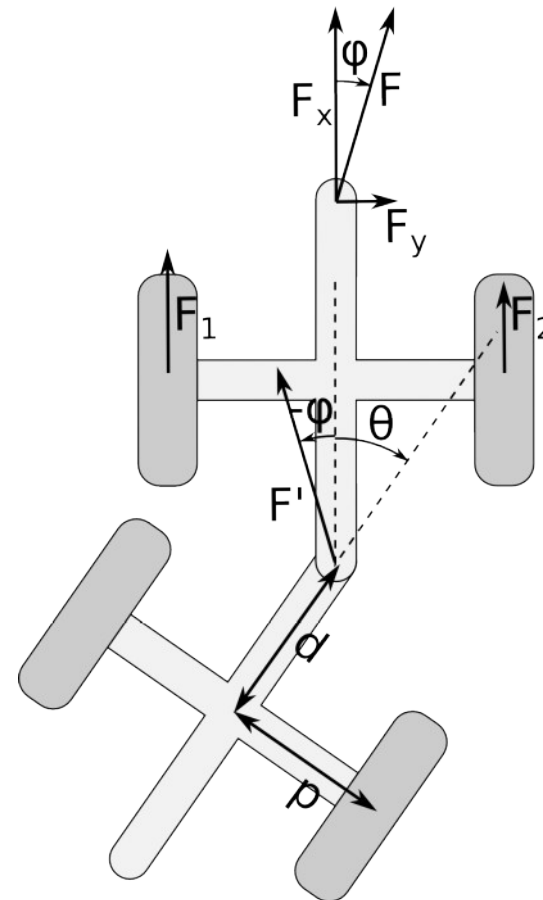
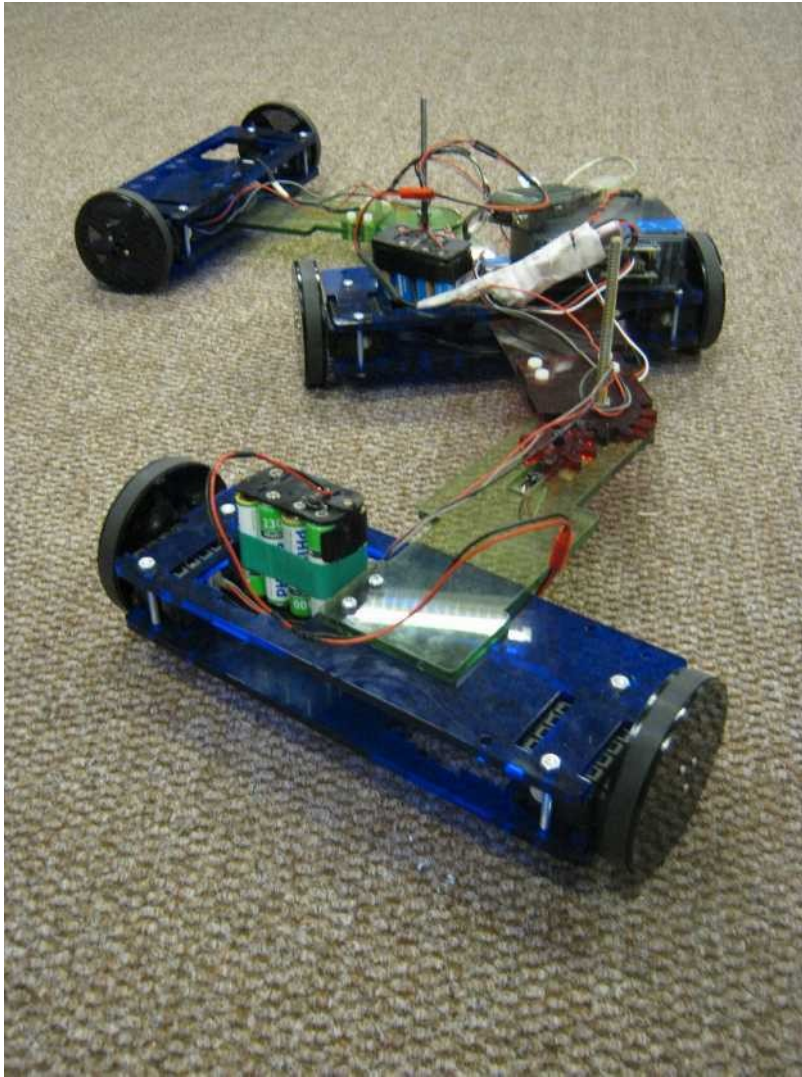
Dirección coordinada

- Vincular mecánicamente ruedas para orientar varias simultáneamente con un único actuador
 - Sacrifica complejidad mecánica a cambio de número de actuadores
 - Muchas variaciones existentes:
 - Sistema Ackerman
 - Chasis articulado
 - Synchro drive, etc.
 - $\text{DOF}=3$, $\text{DDOF}=2$

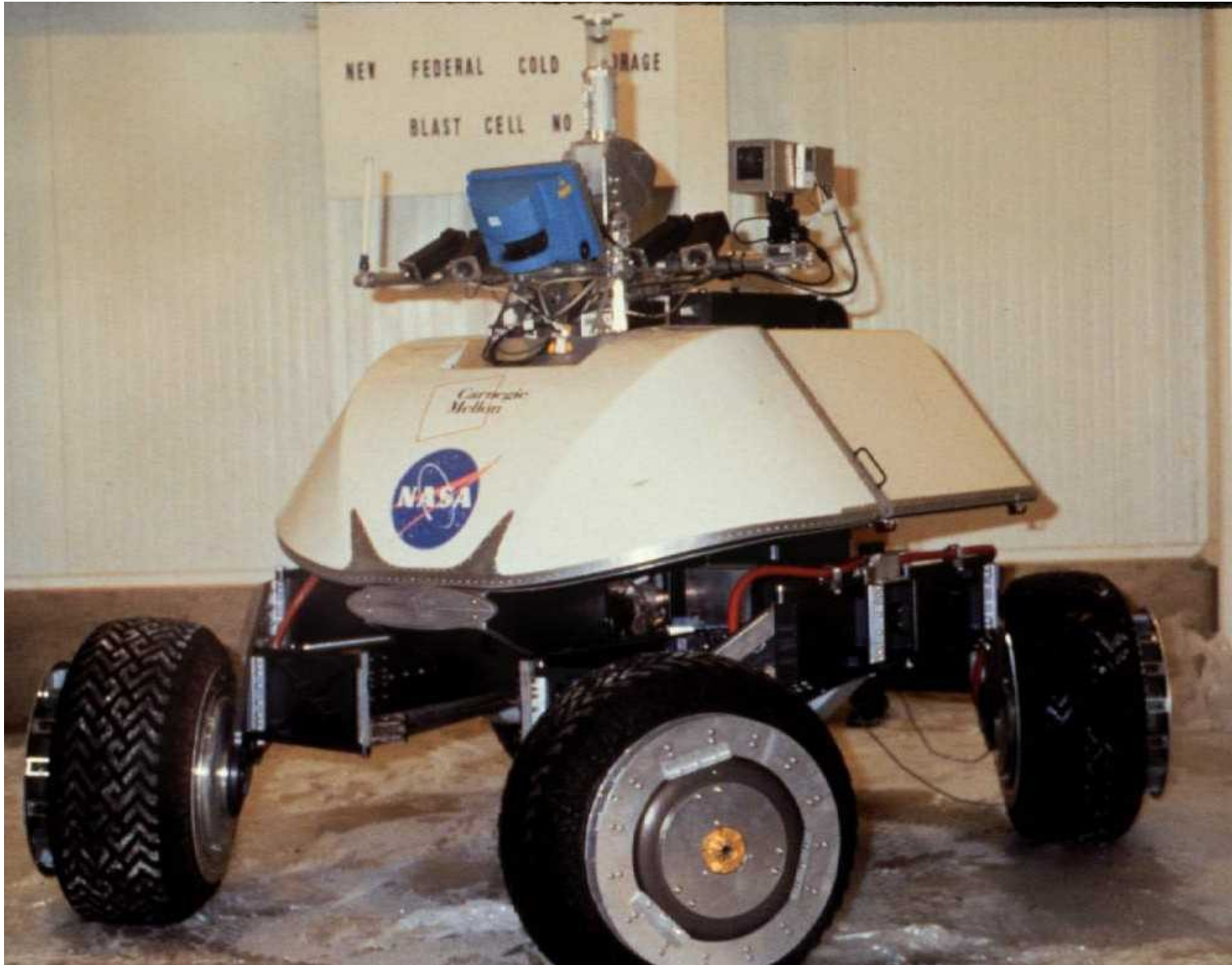
Dirección Ackerman



Dirección coordinada

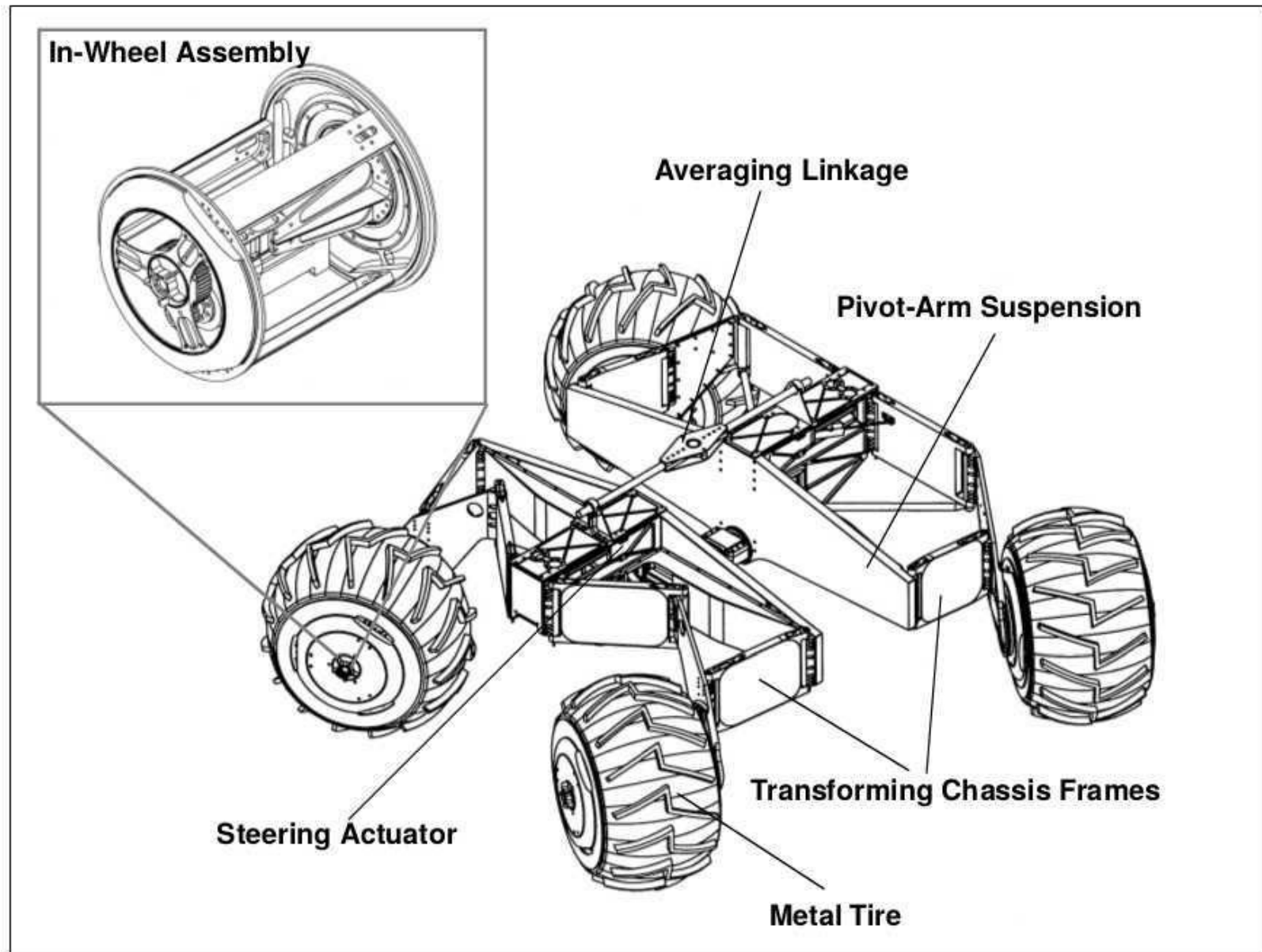


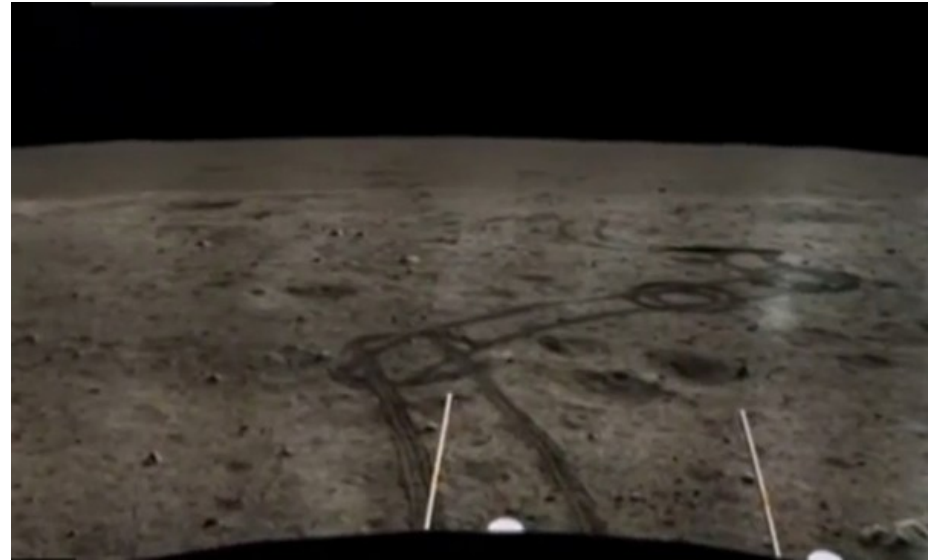
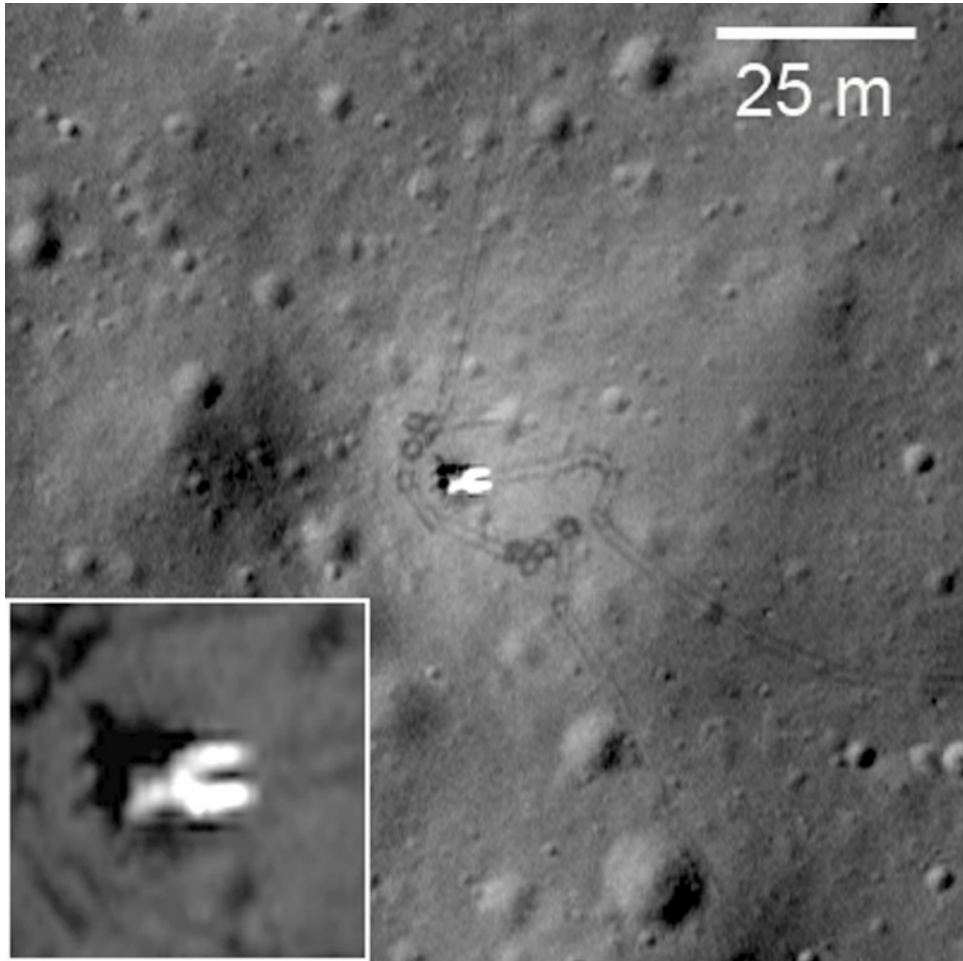
Dirección coordinada



Nomad, 2001

Dirección coordinada





Lunokhod: diferencial



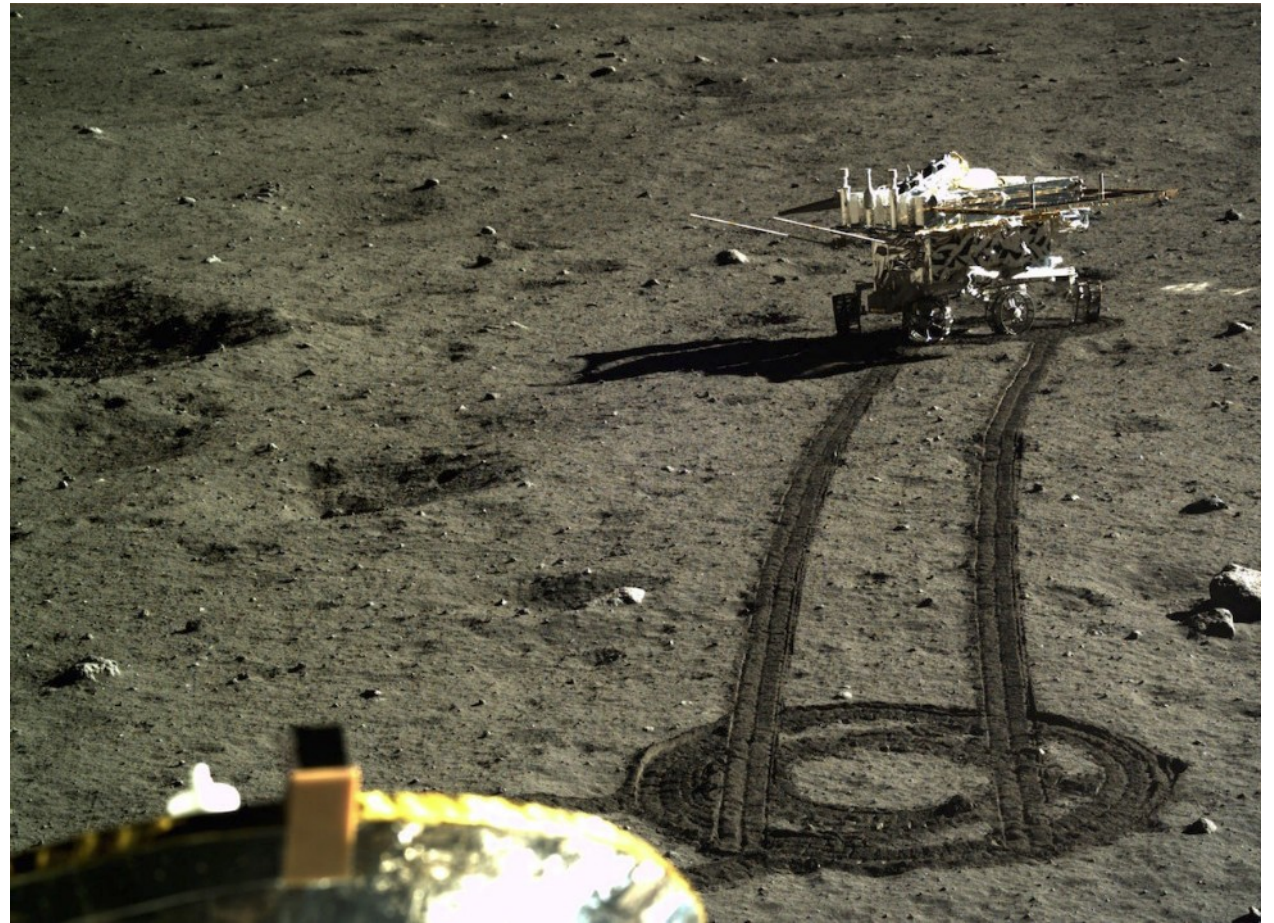
Spirit: explícita parcial



Opportunity: explícita parcial



Moon rover: Ackerman



Yutu: explícita parcial.

Sistemas omnidireccionales

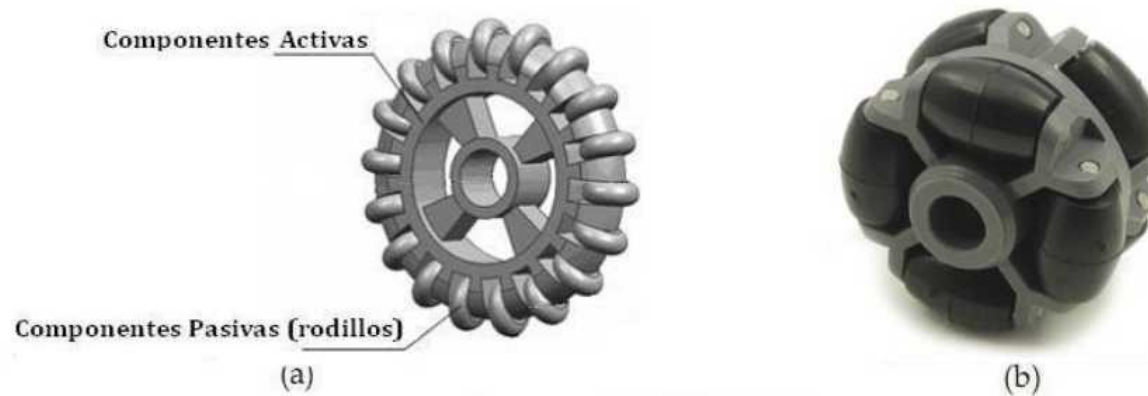
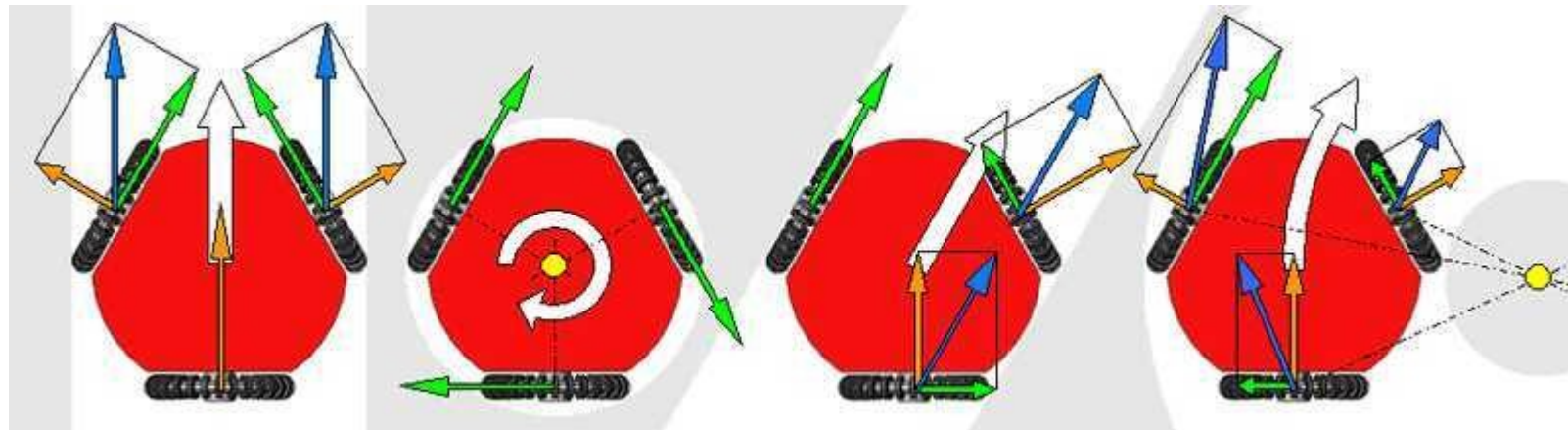
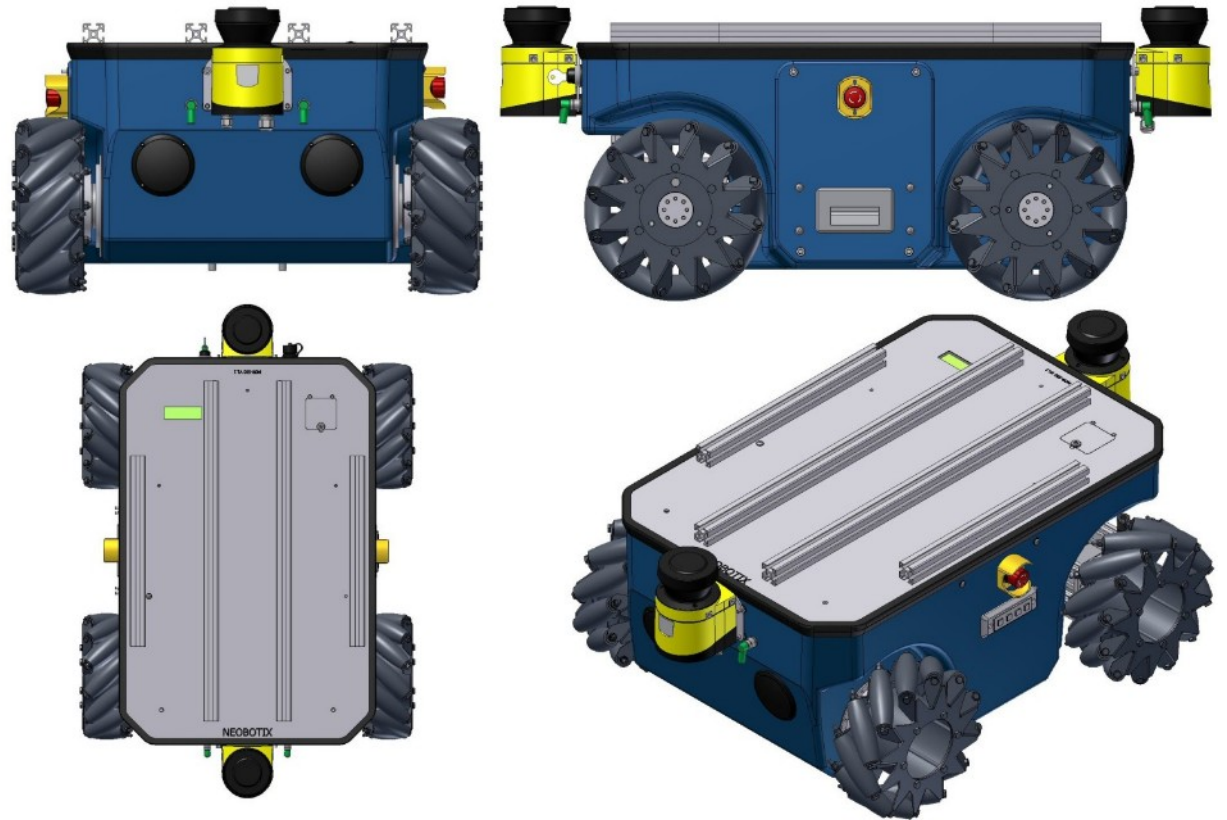


Figura 5: Ruedas Universales. (a) Rueda Simple, (b) Rueda doble[4, 5].



Sistemas omnidireccionales

Meccanum

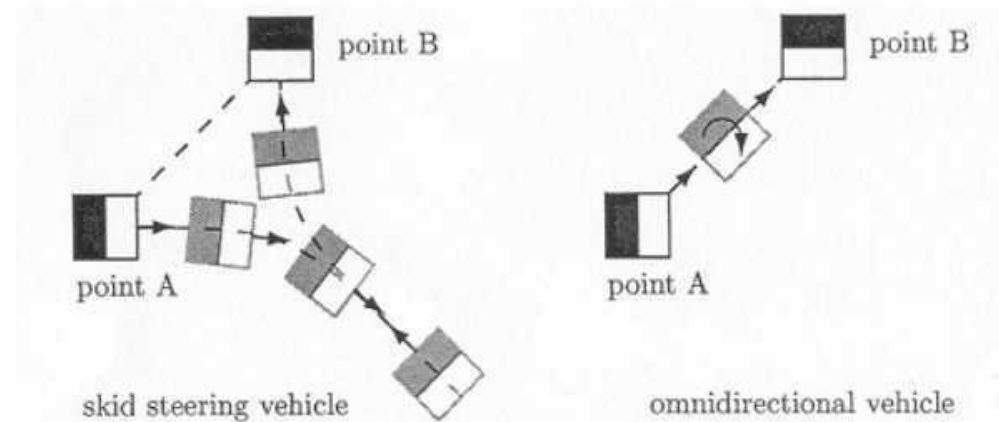


Neobotix MPO-500

Sistemas omnidireccionales

Sistema holonómico: se puede mover en cualquier dirección, combinando con rotaciones sobre si mismo ($DOF=DDOF=CDOF=3$).

- Alta maniobrabilidad, control simple
- Baja capacidad de carga y necesita suelos relativamente firmes (límite: rodillos).
- Puede tener más de 3 ruedas.



Suspensión

- Objetivos:
 - Mantener el peso repartido de forma uniforme en los desniveles: mejora tracción y superación de obstáculos.
 - Reducir los movimientos del CG en los desniveles: mejor eficiencia.
- Dificultades:
 - Agregan componentes e imponen restricciones.
 - Transmitir torque a las ruedas es un problema.

Suspensión

Características:

- Recorrido útil: tamaño de los desniveles superables.
- Eficacia: qué tan bien reparte el peso.
- Masa suspendida: proporción del peso que soporta la suspensión.
- Robustez.
- Cantidad de piezas móviles.
- Puede poseer un componente activo.

Suspensión

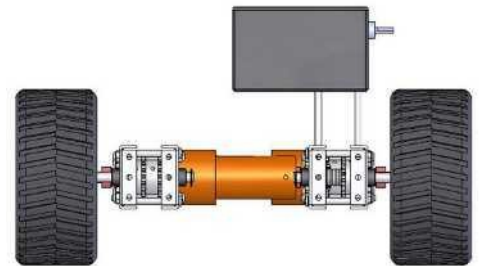
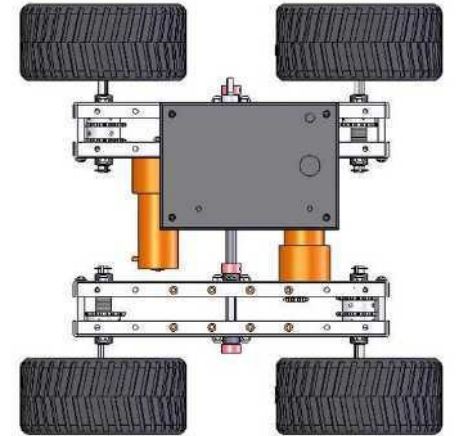
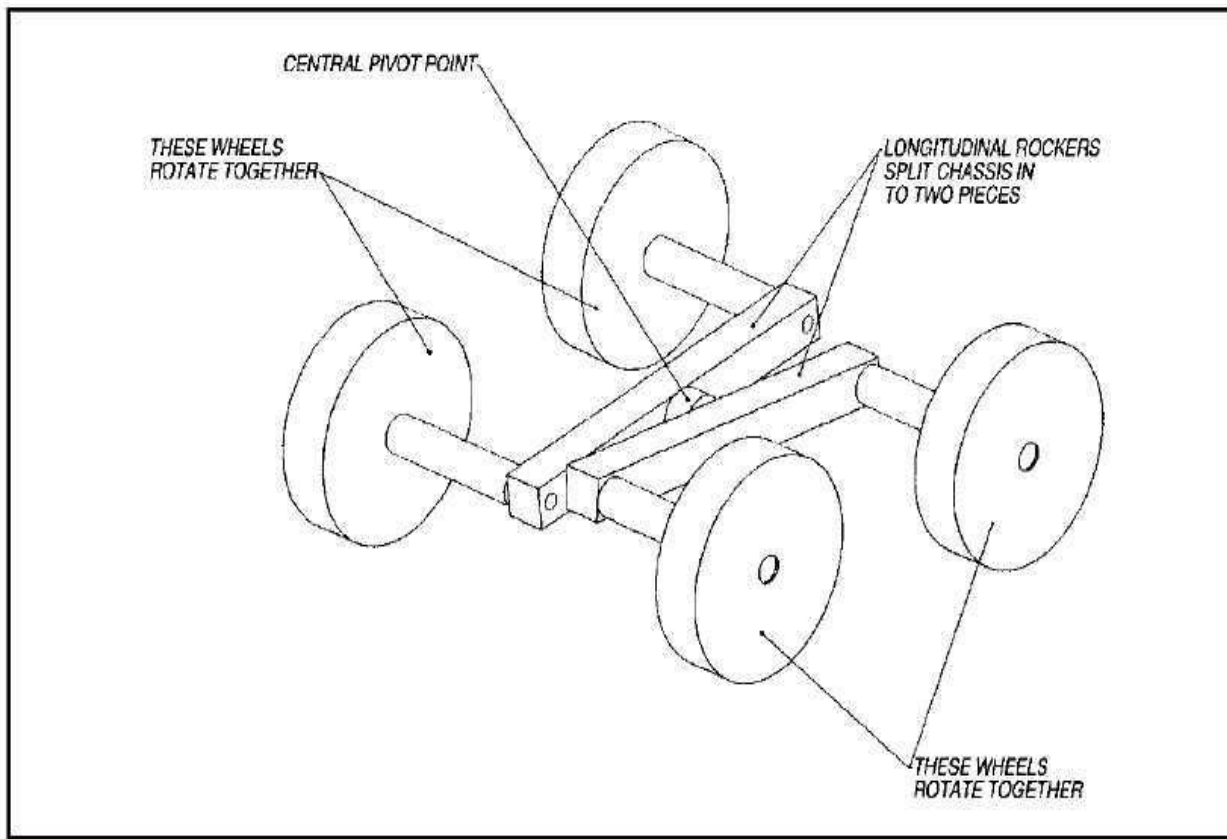
Características relativas a la robótica:

- Suelen ser de baja velocidad (menos de 2m/s es común). Si no, se usan componentes automotrices.
- Adaptadas a control automático.
- No interesa el confort (período de oscilaciones, vibraciones, etc.)
- Usualmente con motores eléctricos.
- Adaptados a un terreno específico.
- No tener suspensión es una solución posible.

Sin suspensión

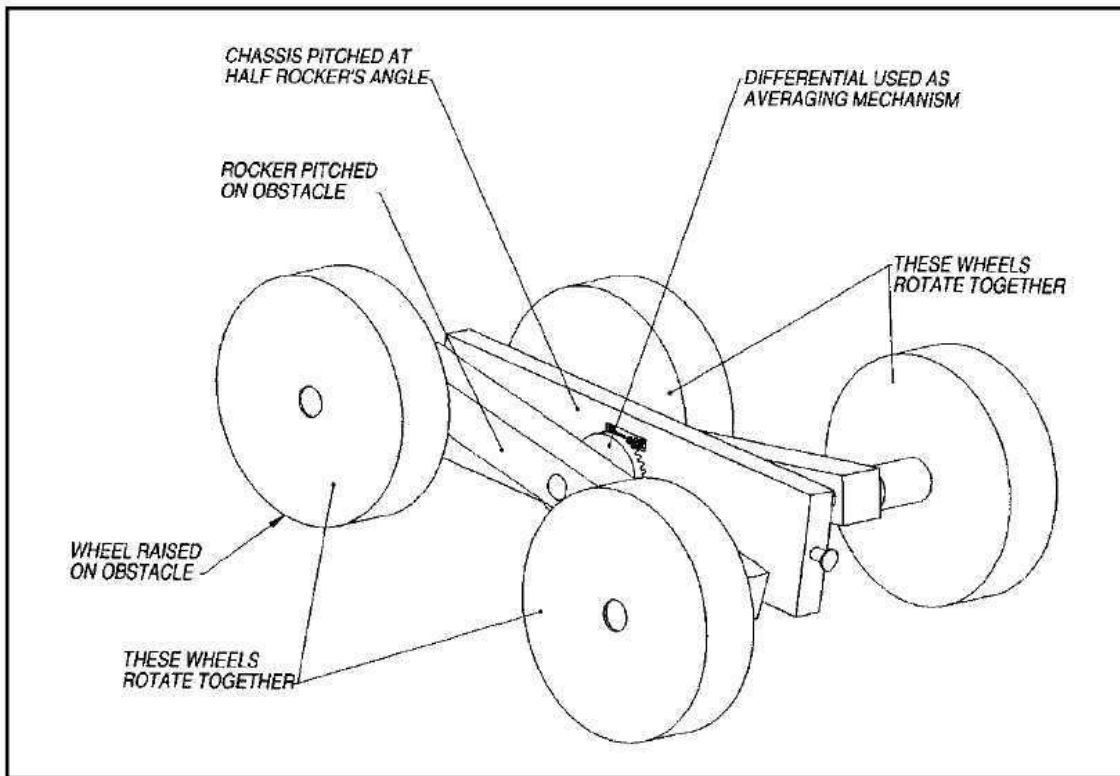
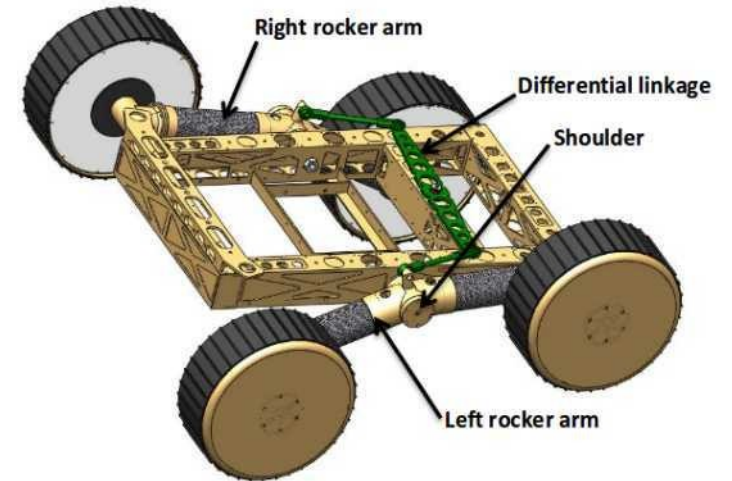


Suspensión

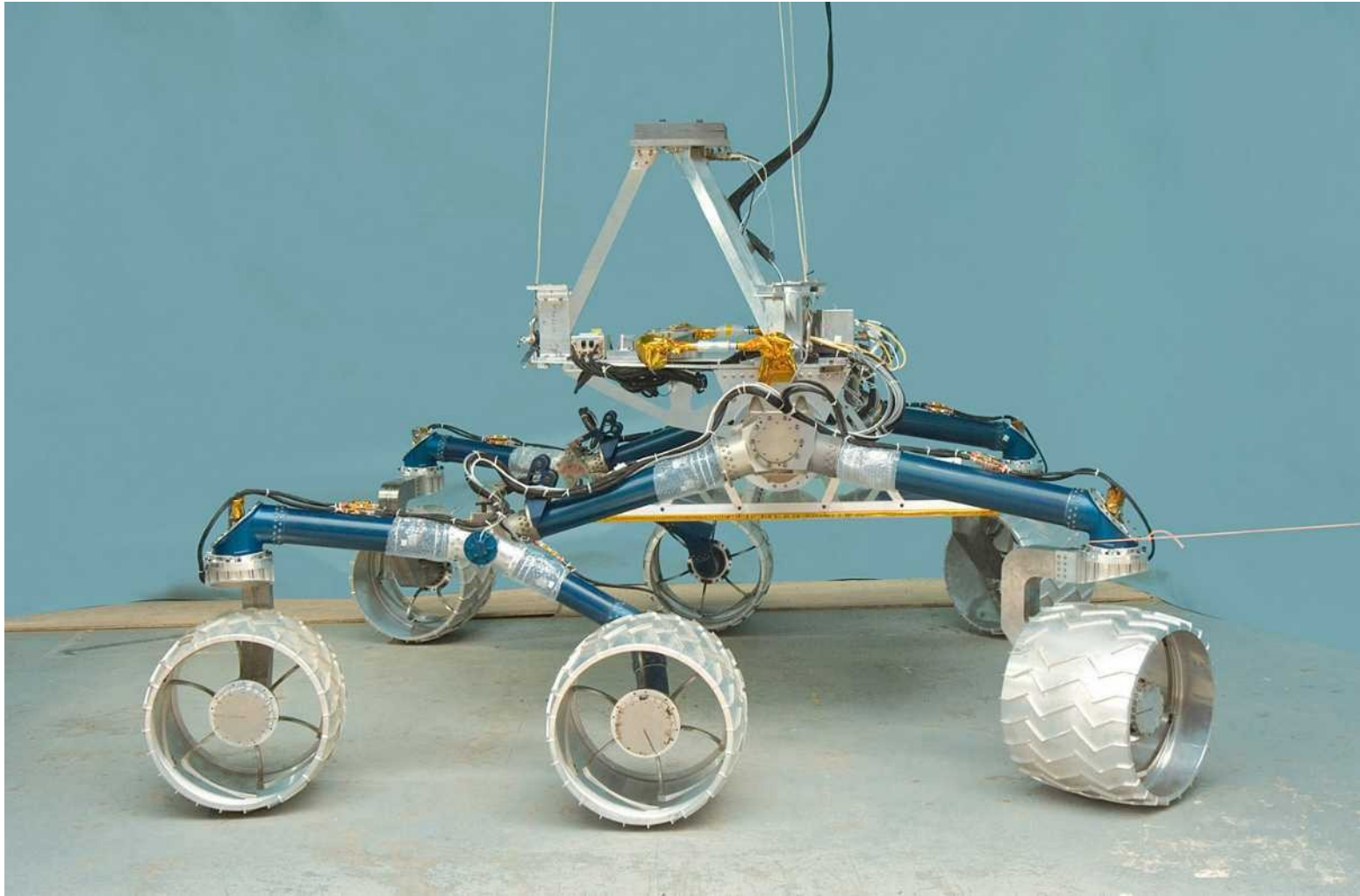


Suspensión

Oryx2

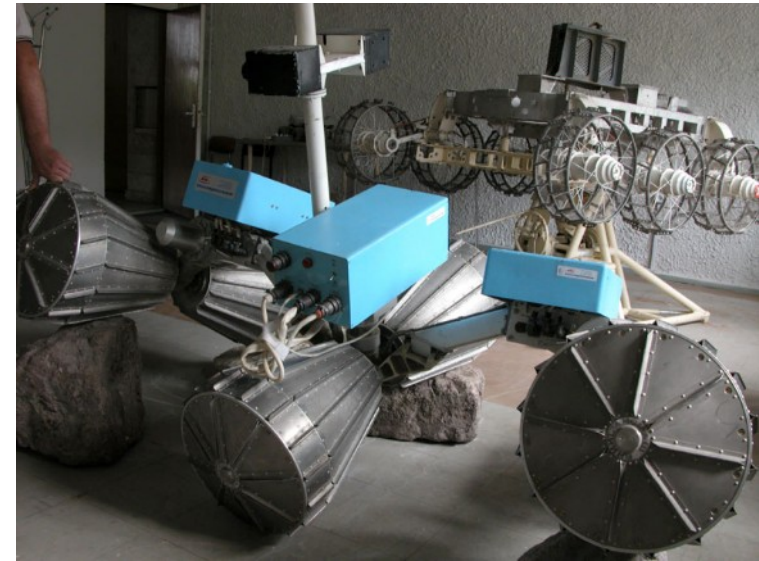
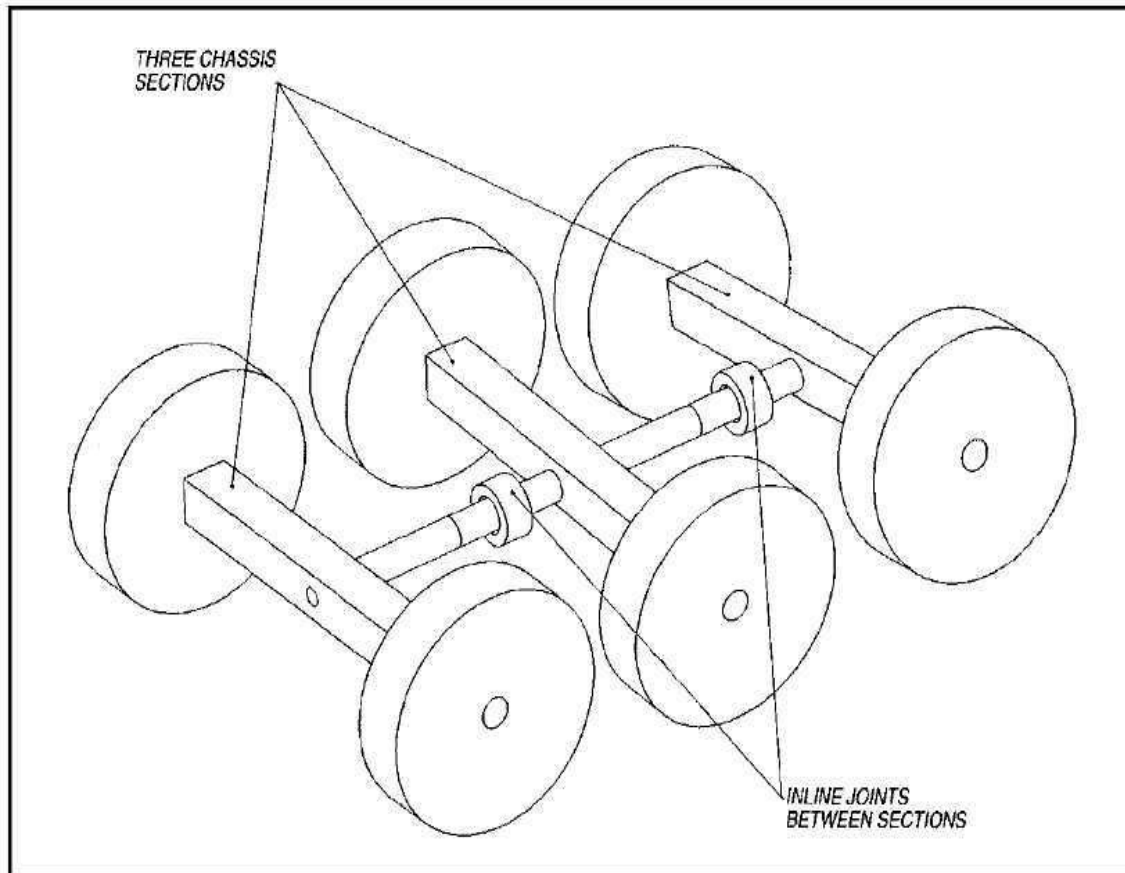


Suspensión

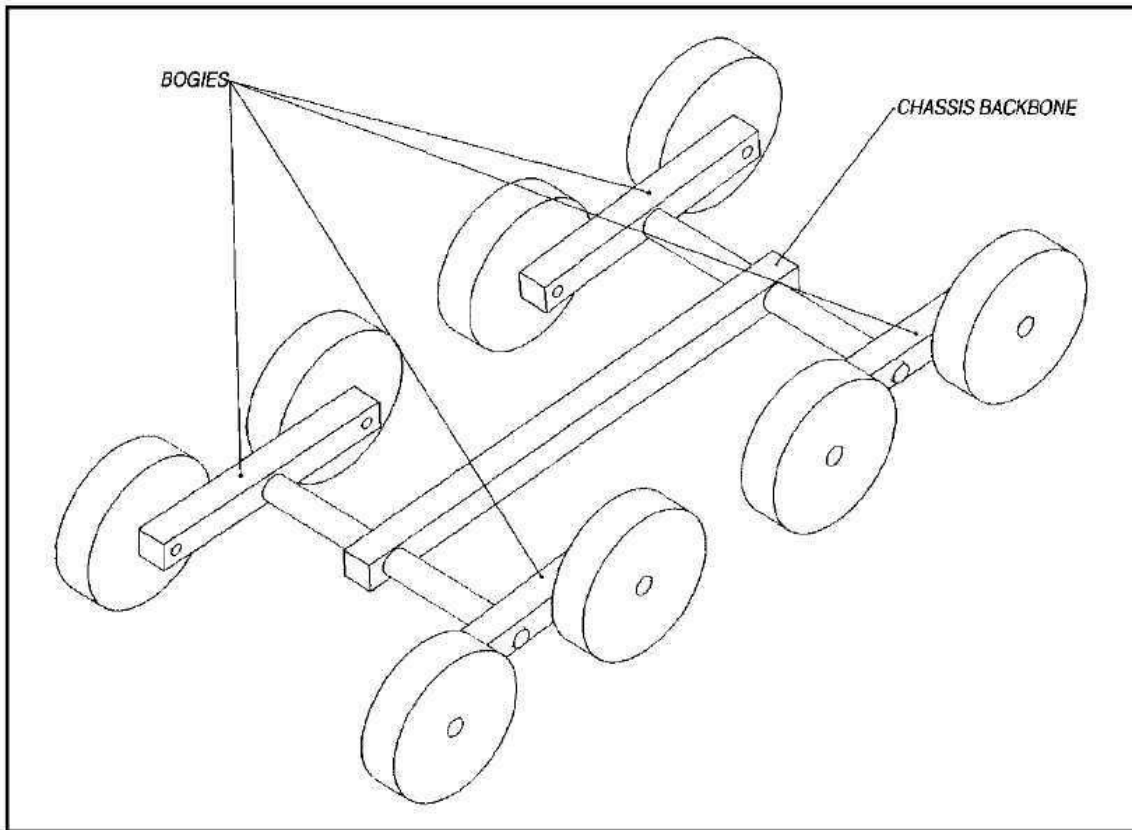


Suspensión

Mir/Lama



Suspensión



Lunokhod

Artemis



Fin.

Referencias

- Cybernetic Zoo
<http://cyberneticzoo.com/>
- Marc H. Raibert, Ivan E. Sutherland, Machines that Walk, 1983
- D. S. Apostolopoulos, Analytical Configuration of Wheeled Robotic Locomotion, 2001
- Paul E. Sandin, Robot Mechanisms and Mechanical Devices Illustrated, McGraw-Hill - 2003