A detailed 3D rendering of a Mars rover, likely a Curiosity rover, positioned on the reddish, rocky terrain of Mars. The rover is equipped with solar panels, a camera mast, and six large, treaded wheels. The background shows a vast, hazy landscape with rolling hills under a pale, orange sky.

AUTONOMY FOR ROBOTIC PLANETARY EXPLORATION MISSIONS: PERCEPTION AND NAVIGATION FOR AUTONOMOUS ROVERS

Raúl Correal

Marzo, 2017

Motivación

- Colaboración entre UCM y empresa TCPSI.
- 2 proyectos:
 - AUTOROVER: estudio de autonomía basada en imágenes para rovers de exploración planetaria. Convocatoria publica 2259/2007 (BOCM 272 del 15/11/2007), referencia: 04-AEC0800-000035/2008.
 - Visión estereoscópica para Auto-rover: estudio de autonomía basada en imágenes. PRE/998/2008 (BOE 11/04/2008), Ministerio de presidencia, referencia: SAE-20081093.
- Investigación iniciada en TCPSI y continuada en UCM (Facultad de Informática).
- Capacidades de navegación autónoma para exploración espacial robótica.
- **Motivación:** necesidad de la ESA para su futura misión Exomars.

Antecedentes e identificación de problemas

- Exploración espacial robótica: crítico, reducir dependencia humana (costes)-> autonomía local.
- Necesidad de simulación y entorno de soporte. Pruebas. Desde fases iniciales.
- Apenas existen entornos que soporten estos desarrollos y además no están disponibles.
- Tampoco existen librerías ni trabajos previos (código) disponibles en las que basarse para el desarrollo de una estrategia de navegación autónoma (compleja).
- Algunos algoritmos stereo publicados no funcionan bien con imágenes reales

Contenido

1. Exploración espacial robótica. Autonomía.
2. Entorno de soporte al desarrollo.
3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación.
4. Percepción: filtros de imagen para reconstrucción 3D del entorno.
5. Conclusiones y trabajos futuros

1. Exploración espacial robótica. Autonomía

Operación del vehículo explorador (rover):

- Dominio muy crítico. Situaciones inesperadas. Imposibilidad de intervención humana.
- Restricciones en comunicaciones. Teleoperación no es una opción.
- Misiones cada vez más demandantes y complejas: mayores distancia a recorrer.

Autonomía:

- Autonomía a bordo de los vehículos exploradores. Toma de decisiones.
- Minimizar dependencia de operadores humanos.
- Incrementa el retorno científico de la misión. Reducir costes de operación.
- Navegación autónoma: de las tareas más críticas de una misión.
- Foco de este trabajo: navegación autónoma de vehículos robóticos para exploración planetaria.

Contenido

1. Exploración espacial robótica. Autonomía.
2. Entorno de soporte al desarrollo.
3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación.
4. Percepción: filtros de imagen para reconstrucción 3D del entorno.
5. Conclusiones y trabajos futuros

2. Entorno de soporte al desarrollo

Introducción:

- Proceso complejo: percepción del entorno, planificación de trayectorias, navegación y control.
- Instalaciones e infraestructura para desarrollar y probar todo: vehículo, terreno, etc.
- NASA / ESA: réplica de superficie planetaria indoors y vehículo (no disponible en las primeras fases).
- Desplazamientos del equipo (desierto). Muy costoso.
- Alternativa asumible -> réplica de infraestructuras y condiciones operacionales en simulación.



Correal, R.; Pajares, G. (2010). Framework for Simulation and Rover' Visual-Based Autonomous Navigation in Natural Terrains. 7th Workshop RoboCity2030-II, October, 2010, Madrid, Spain.

Correal, R.; Pajares, G. (2011a). Modeling, simulation and onboard autonomy software for robotic exploration on planetary environments. International Conference on DATA Systems In Aerospace (DASIA), 17-20 Mayo, 2011, Malta.

2. Entorno de soporte al desarrollo

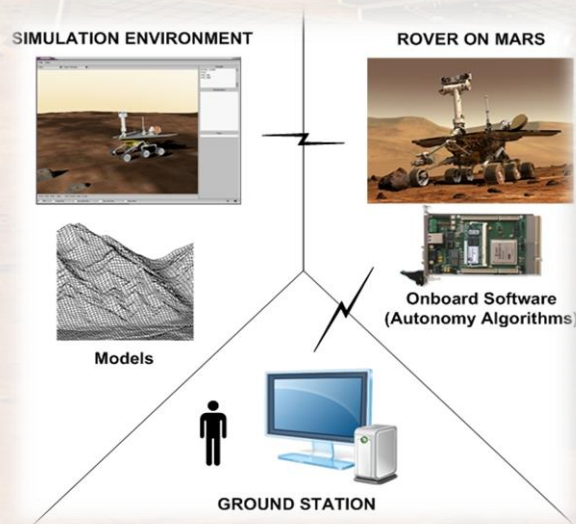
Acceso a un entorno de soporte:

- 3 posibilidades: 1) Entorno existente, 2) Crear entorno desde cero, 3) Integración de paquetes.
 - 1) Entorno existente -> muy pocas. Propietarias de agencias espaciales. No disponibles (JPL).
 - 2) Crear entorno desde cero -> muy adaptado, pero gran complejidad, esfuerzo y coste (no es el objetivo).
 - 3) Integración de paquetes -> Interfaces, adaptaciones y extensiones. Balance esfuerzo/funcionalidad.

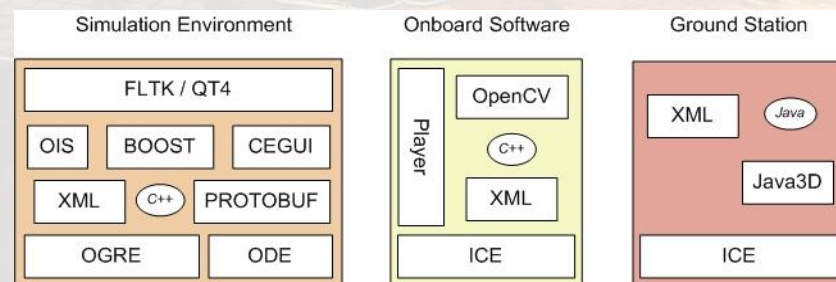
2. Entorno de soporte al desarrollo

Diseño del entorno de soporte:

- 3 subsistemas: 1) Entorno de simulación, 2) Centro de control, 3) Sistema de navegación



Integración de paquetes y componentes



2. Entorno de soporte al desarrollo

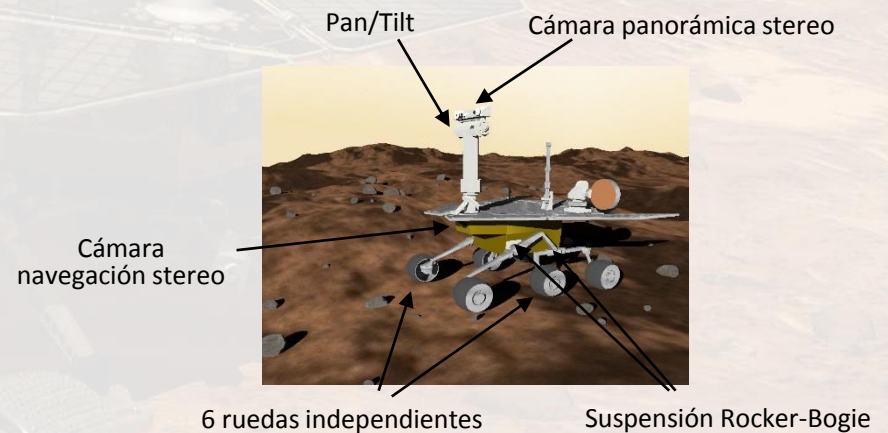
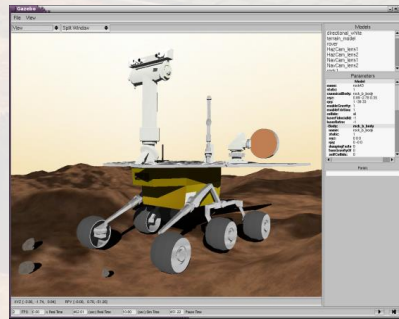
Entorno de simulación:

- Gazebo usado como motor base de simulación.
- Creación de modelos: 1) vehículo (sensores y actuadores), 2) terreno y 3) condiciones operacionales.

2. Entorno de soporte al desarrollo

Entorno de simulación:

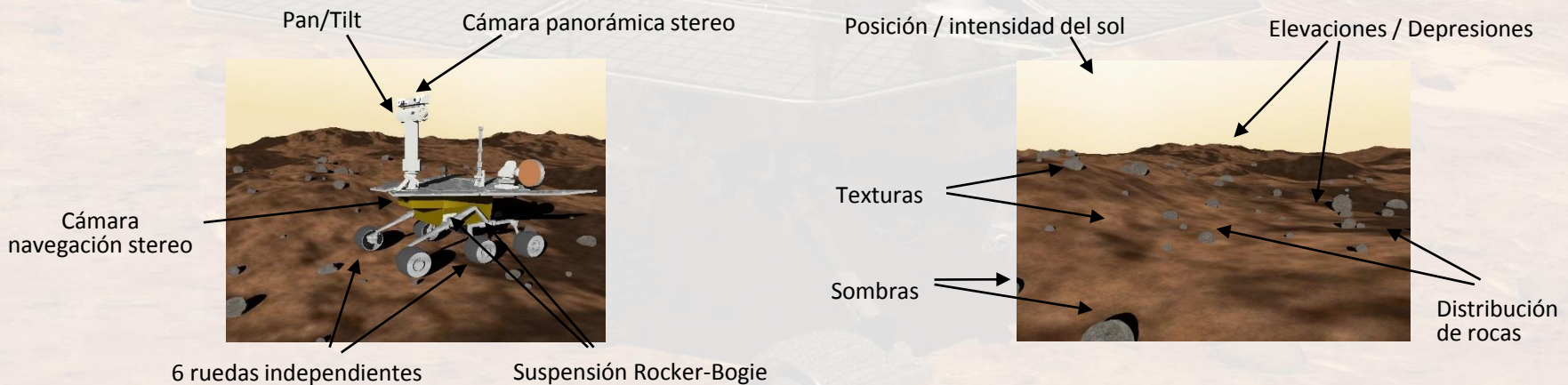
- Gazebo usado como motor base de simulación.
- Creación de modelos: 1) vehículo (sensores y actuadores), 2) terreno y 3) condiciones operacionales.



2. Entorno de soporte al desarrollo

Entorno de simulación:

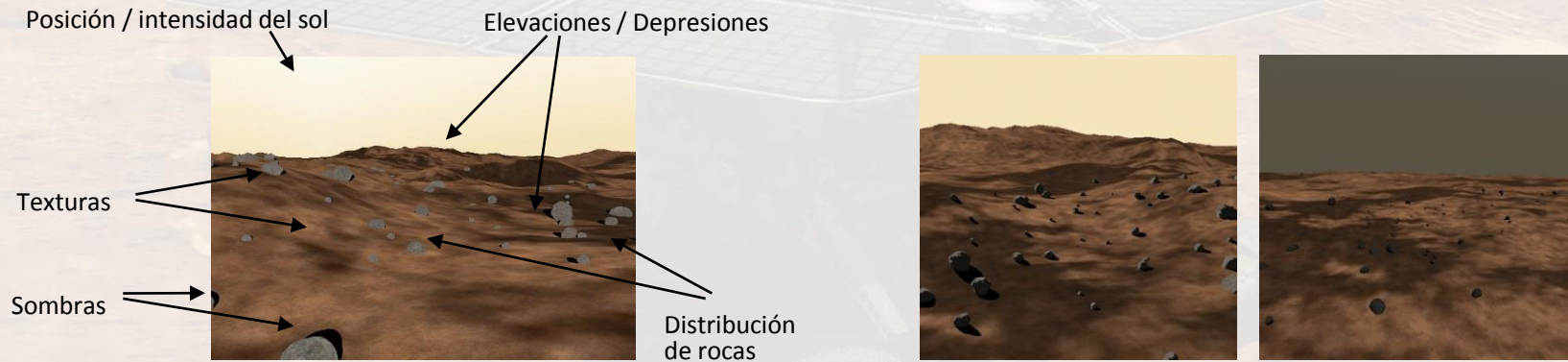
- Gazebo usado como motor base de simulación.
- Creación de modelos: 1) vehículo (sensores y actuadores), 2) terreno y 3) condiciones operacionales.



2. Entorno de soporte al desarrollo

Entorno de simulación:

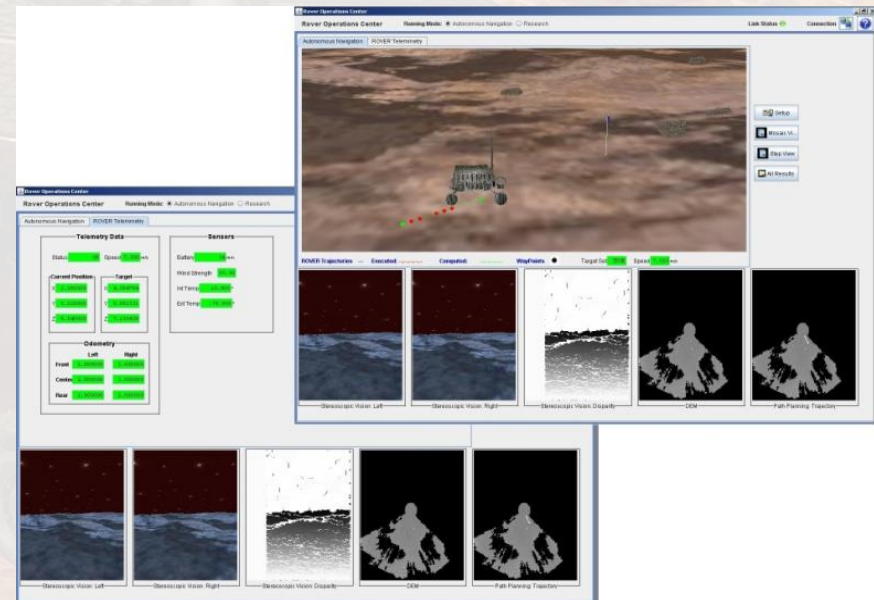
- Gazebo usado como motor base de simulación.
- Creación de modelos: 1) vehículo (sensores y actuadores), 2) terreno y 3) condiciones operacionales.



2. Entorno de soporte al desarrollo

Centro de control:

- Visualización, monitorización y depuración.
- Recibe datos de telemetría. Permite comandar al vehículo.
- 2 modos: 1) operación, 2) depuración.
- Almacena datos para análisis posterior.



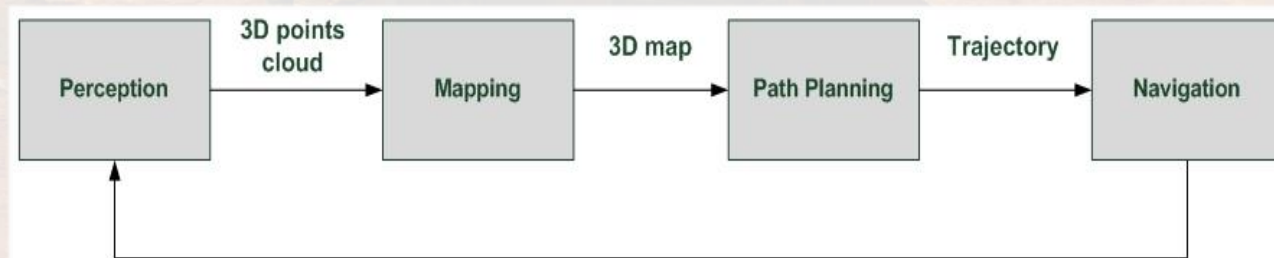
Contenido

1. Exploración espacial robótica. Autonomía.
2. Entorno de soporte al desarrollo.
3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación.
4. Percepción: filtros de imagen para reconstrucción 3D del entorno.
5. Conclusiones y trabajos futuros

3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Estrategia de navegación:

- Autonomía local. Toma de decisiones. Minimizar dependencia humana. Comunicaciones.
- Diseño basado en NASA/JPL (MER), pero desarrollado desde cero (no hay trabajos previos disponibles).
- Ciclos de navegación.



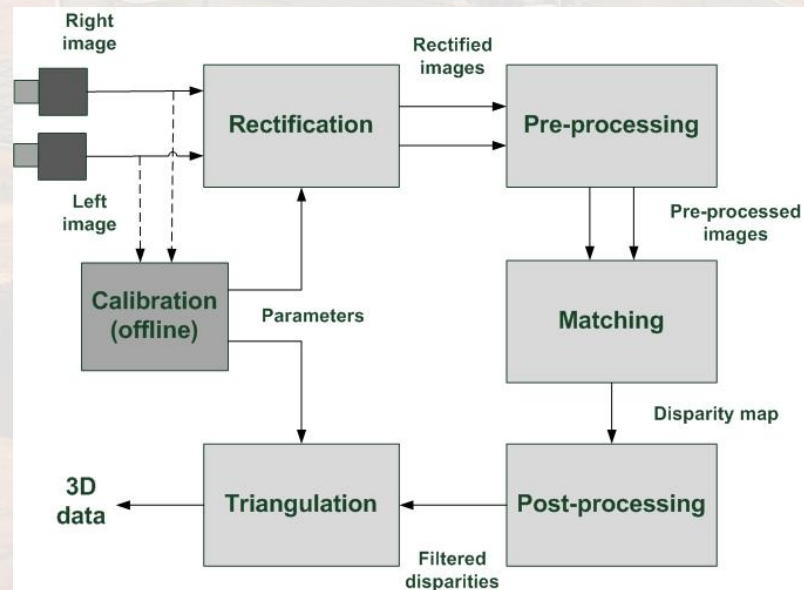
Correal, R.; Pajares, G. (2011b). Onboard Autonomous Navigation Architecture for a Planetary Surface Exploration Rover and Functional Validation Using Open-Source Tools. ESA International Conference on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation (ASTRA 2008), ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, pp 1-8.

Correal, R.; Pajares, G.; Ruz, J.J. (2014b). Autonomy for Ground-level Robotic Space Exploration: Framework, Simulation, Architecture, Algorithms and Experiments. ROBOTICA Journal. June 2014, pp. 1–32. doi: 10.1017/S0263574714001428.

3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Percepción:

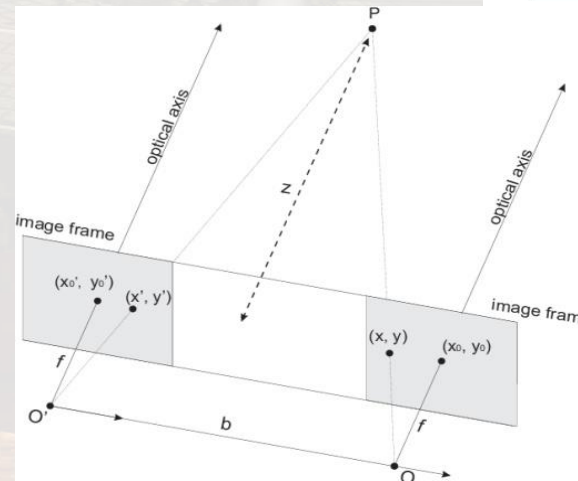
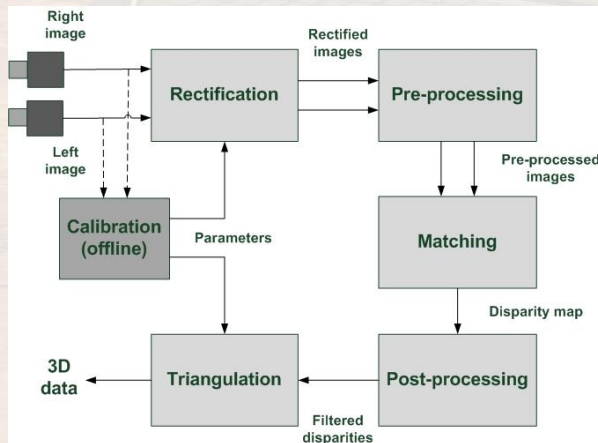
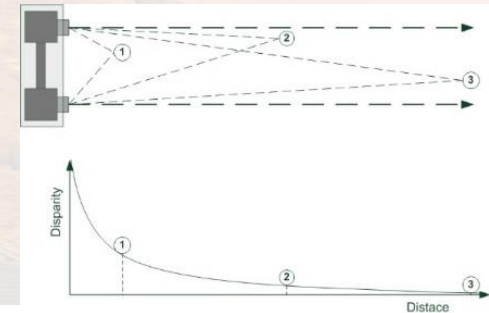
- Basada en visión estereoscópica. Reconstrucción 3D del terreno.



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Percepción:

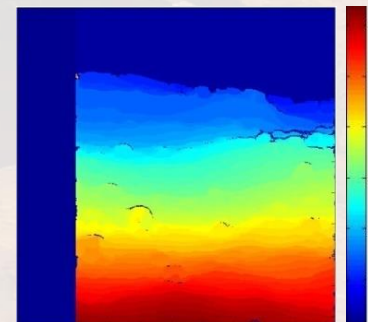
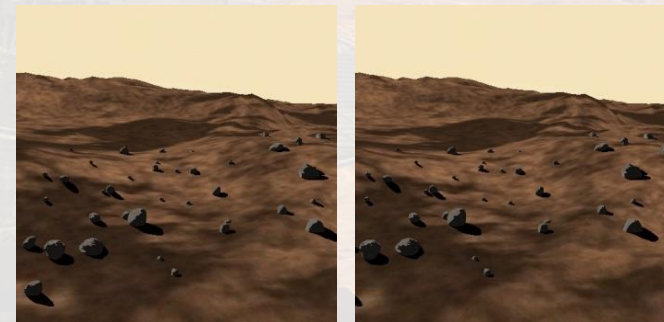
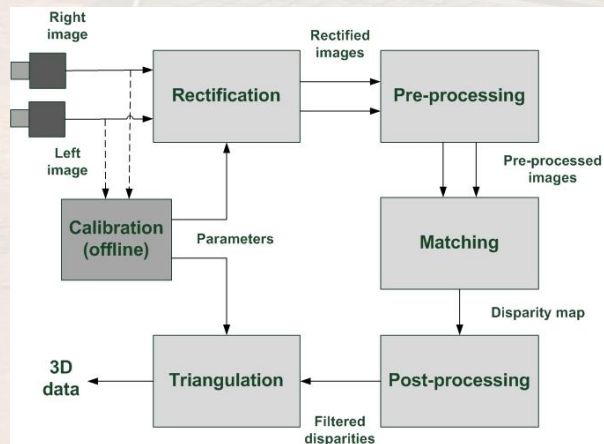
- Basada en visión estereoscópica. Reconstrucción 3D del terreno.



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Percepción:

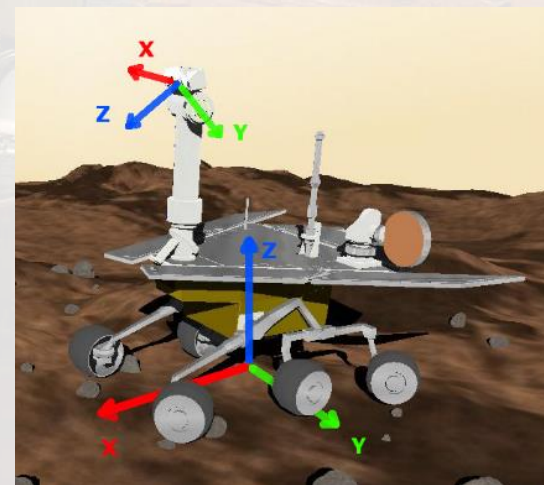
- Basada en visión estereoscópica. Reconstrucción 3D del terreno.



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Construcción del mapa:

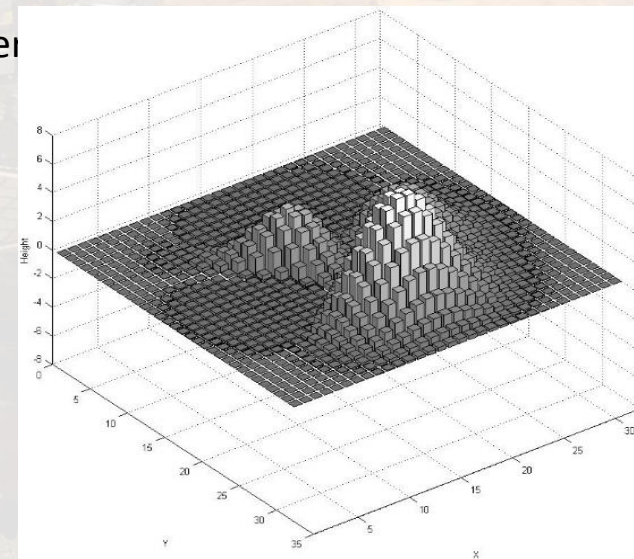
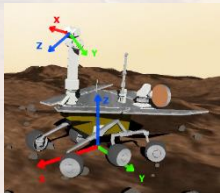
- Reproyección de la nube de puntos 3D y cambio de sistemas de referencia.
- Mapa de alturas: vista cenital, centrado en el rover.
- Interpolación.
- Fusión de mapas. Mapa local y global.



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Construcción del mapa:

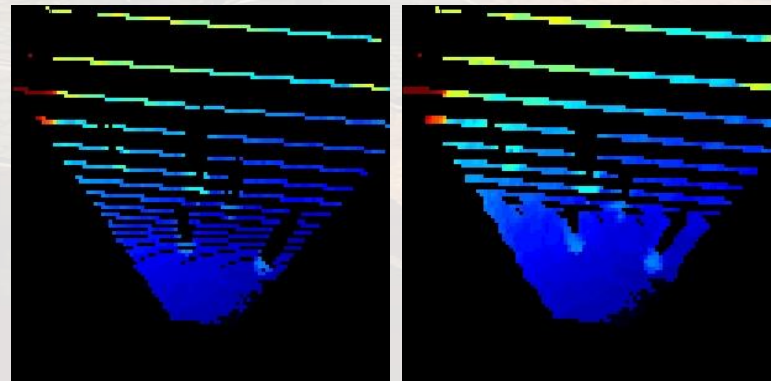
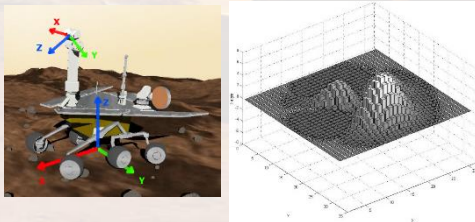
- Reproyección de la nube de puntos 3D y cambio de sistemas de referencia.
- Mapa de alturas: vista cenital, centrado en el rover
- Interpolación.
- Fusión de mapas. Mapa local y global.



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Construcción del mapa:

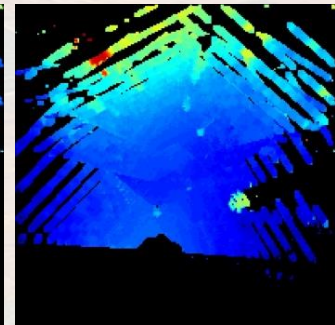
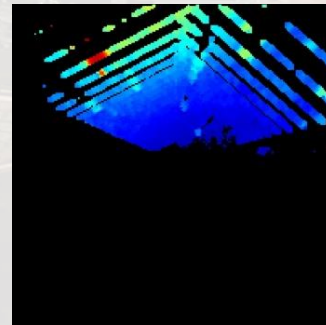
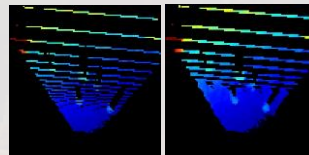
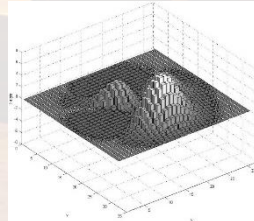
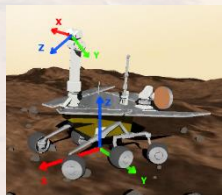
- Reproyección de la nube de puntos 3D y cambio de sistemas de referencia.
- Mapa de alturas: vista cenital, centrado en el rover.
- Interpolación.
- Fusión de mapas. Mapa local y global.



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Construcción del mapa:

- Reproyección de la nube de puntos 3D y cambio de sistemas de referencia.
- Mapa de alturas: vista cenital, centrado en el rover.
- Interpolación.
- Fusión de mapas. Mapa local y global.



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Planificación de trayectorias:

- Factores / restricciones:
 - No hay información a priori disponible.
 - El mapa se va construyendo progresivamente una vez el vehículo aterriza en el planeta.
 - El mapa construido en cada ciclo no es completo, existen zonas desconocidas.
 - El destino puede quedar fuera de los límites del mapa.
 - El entorno no puede representarse de forma binaria (ocupado/libre).
 - El vehículo no es puntual, ni holonómico.
 - No existe ningún sistema de posicionamiento global (GPS).

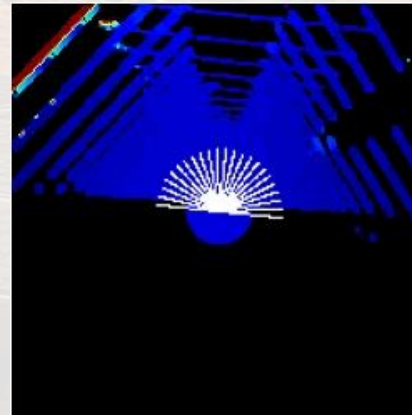
3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Planificación de trayectorias:

- Estrategia exploratoria.
- Cálculo de caminos candidatos.

Caminos candidatos

Caminos rectos

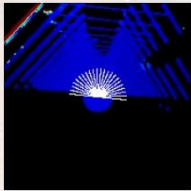


Parámetros
configurables

3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

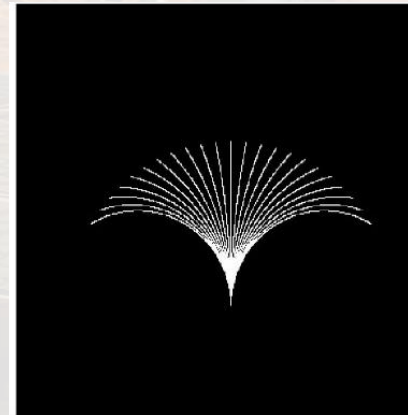
Planificación de trayectorias:

- Estrategia exploratoria.
- Cálculo de caminos candidatos.



Caminos candidatos

Arcos

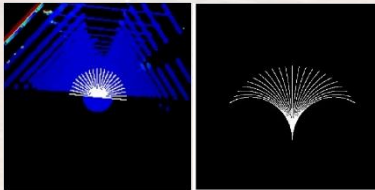


Parámetros
configurables

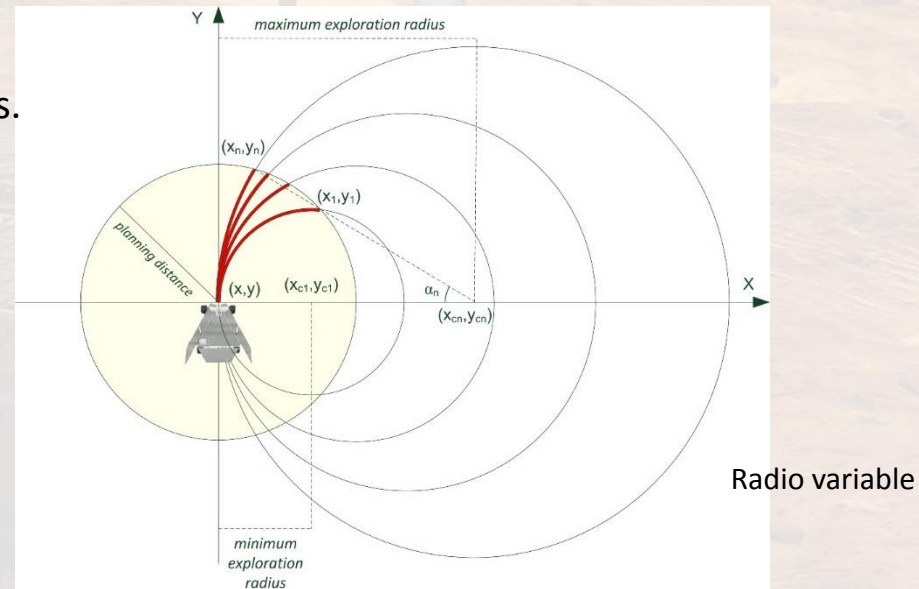
3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Planificación de trayectorias:

- Estrategia exploratoria.
- Cálculo de caminos candidatos.



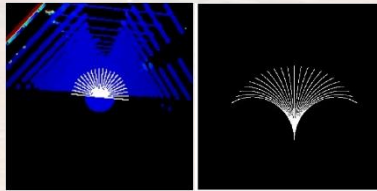
Caminos candidatos



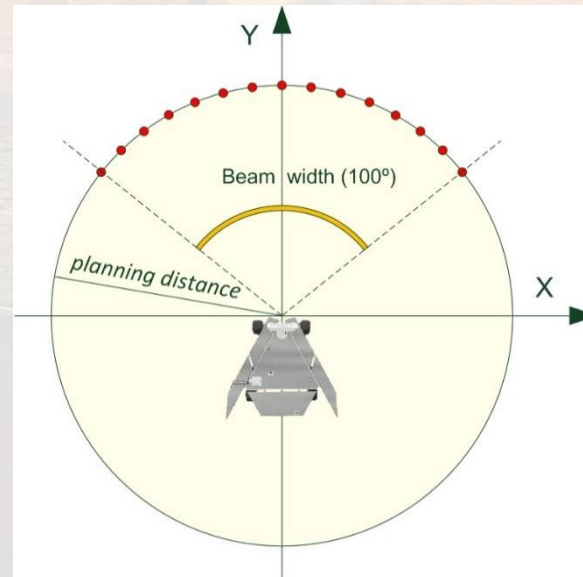
3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Planificación de trayectorias:

- Estrategia exploratoria.
- Cálculo de caminos candidatos.



Caminos candidatos

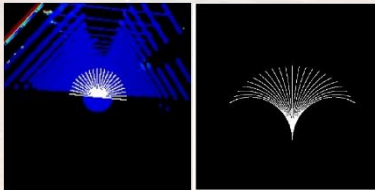


Puntos equidistantes

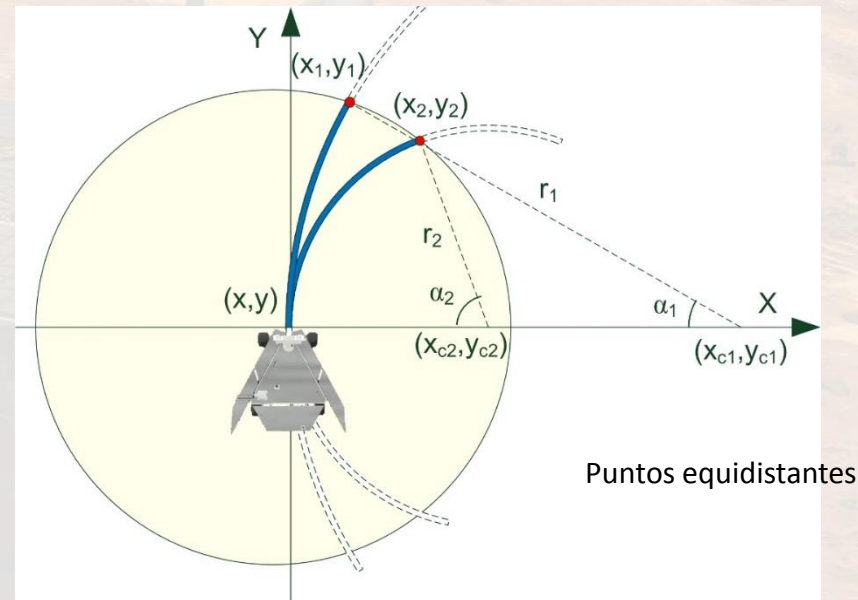
3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Planificación de trayectorias:

- Estrategia exploratoria.
- Cálculo de caminos candidatos.



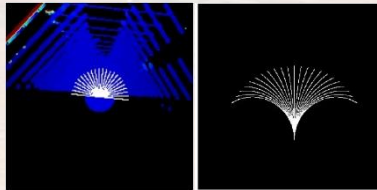
Caminos candidatos



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

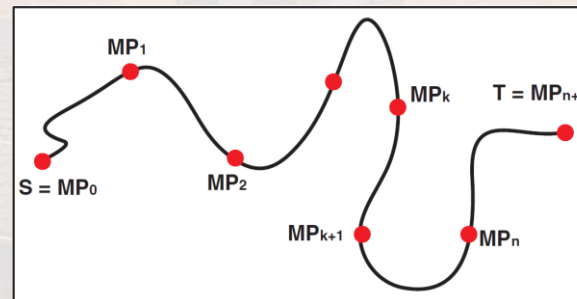
Planificación de trayectorias:

- Estrategia exploratoria.
- Cálculo de caminos candidatos.



Caminos candidatos

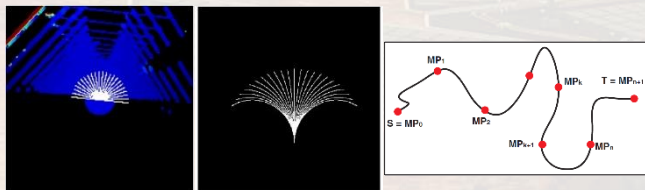
Splines



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

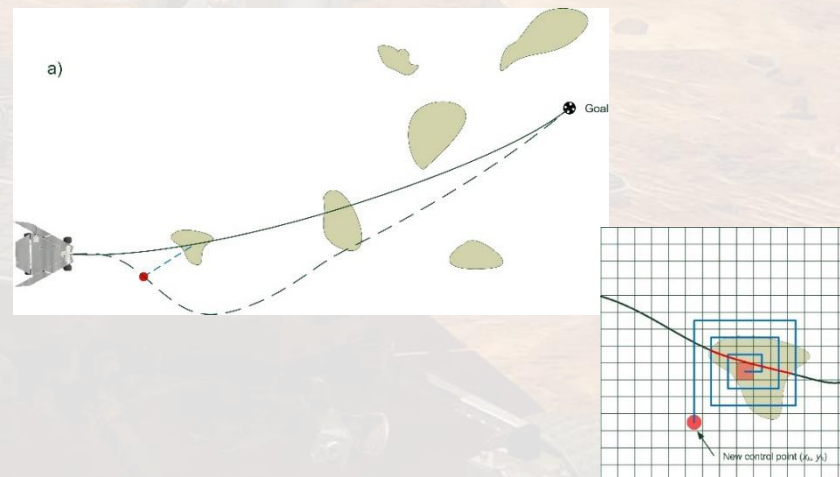
Planificación de trayectorias:

- Estrategia exploratoria.
- Cálculo de caminos candidatos.



Caminos candidatos

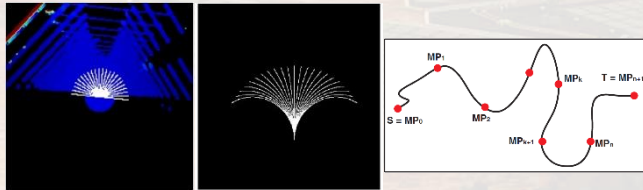
Splines



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

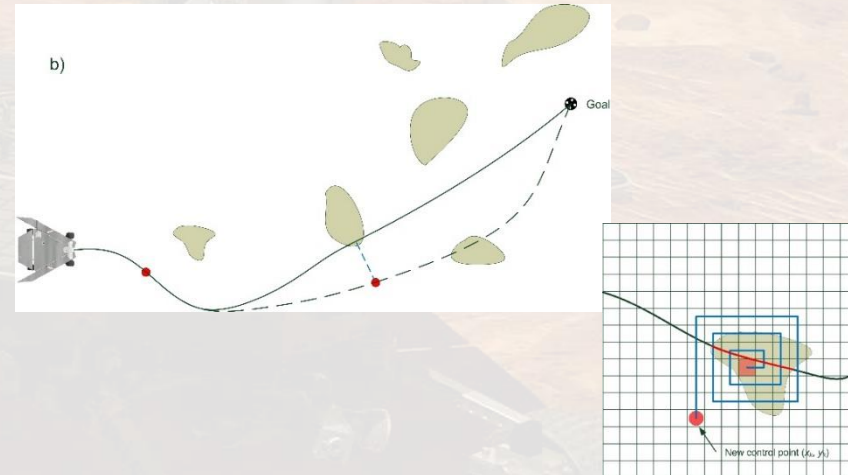
Planificación de trayectorias:

- Estrategia exploratoria.
- Cálculo de caminos candidatos.



Caminos candidatos

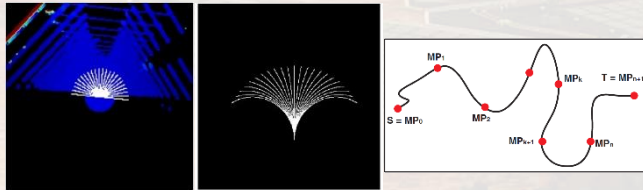
Splines



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

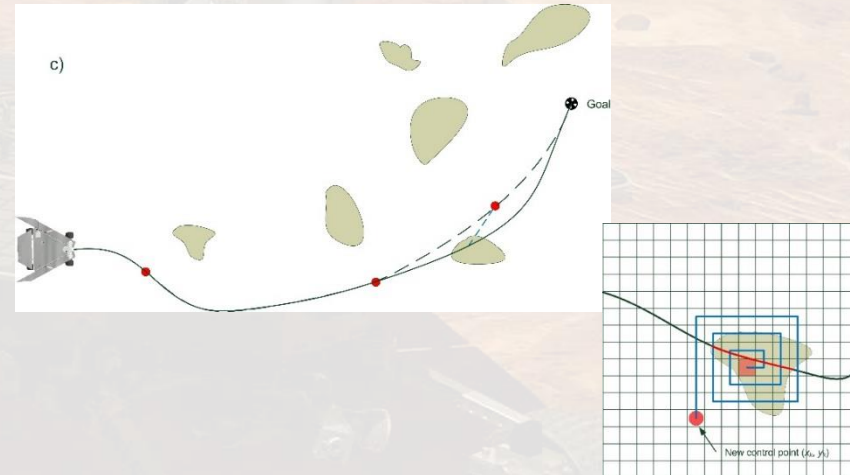
Planificación de trayectorias:

- Estrategia exploratoria.
- Cálculo de caminos candidatos.



Caminos candidatos

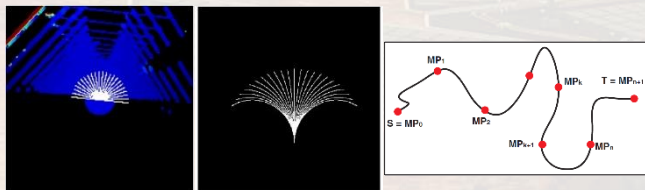
Splines



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

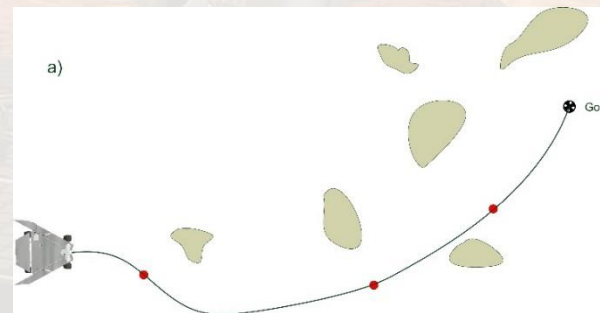
Planificación de trayectorias:

- Estrategia exploratoria.
- Cálculo de caminos candidatos.



Caminos candidatos

Splines

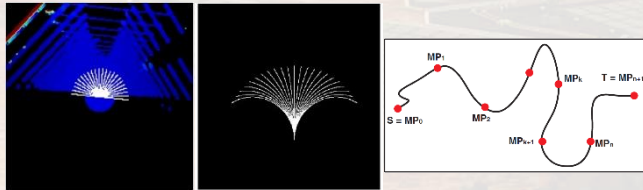


Suavizado

3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

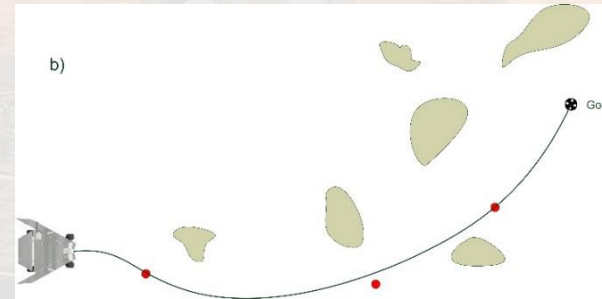
Planificación de trayectorias:

- Estrategia exploratoria.
- Cálculo de caminos candidatos.



Caminos candidatos

Splines



Suavizado

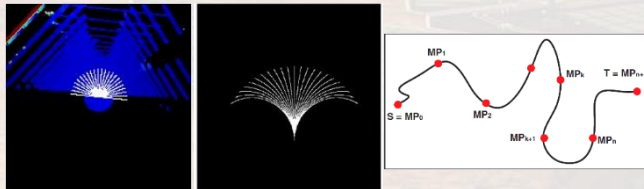
3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Planificación de trayectorias:

- Estrategia exploratoria.
- Cálculo de caminos candidatos.

Caminos candidatos

Selección de caminos



Menor desviación

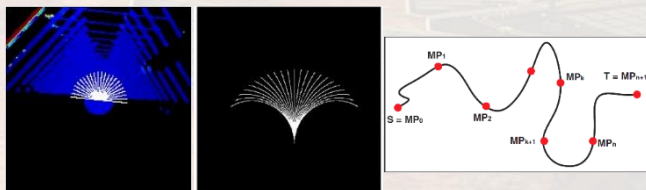
Menor distancia desde el extremo

Camino único

3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Planificación de trayectorias:

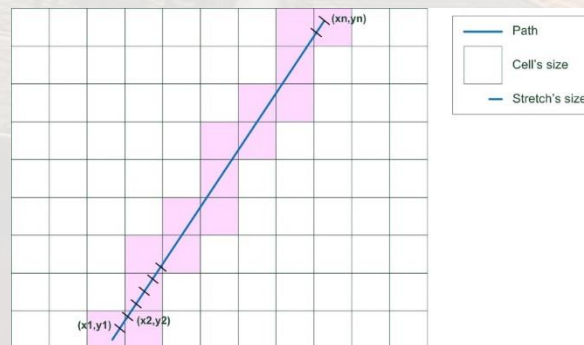
- Estrategia exploratoria.
- Cálculo de caminos candidatos.



Caminos candidatos

Determinar celdas atravesadas

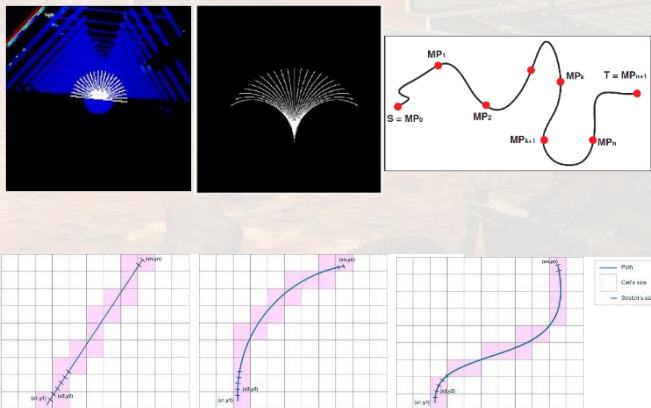
Caminos rectos



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

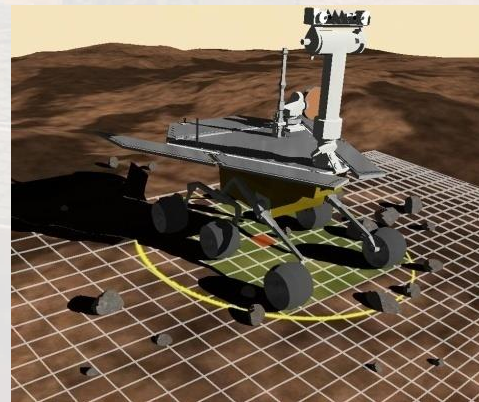
Planificación de trayectorias:

- Estrategia exploratoria.
- Cálculo de caminos candidatos.



Caminos candidatos

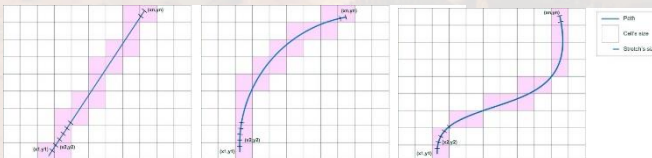
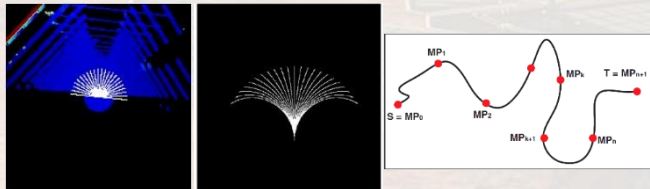
Evaluar seguridad del camino



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

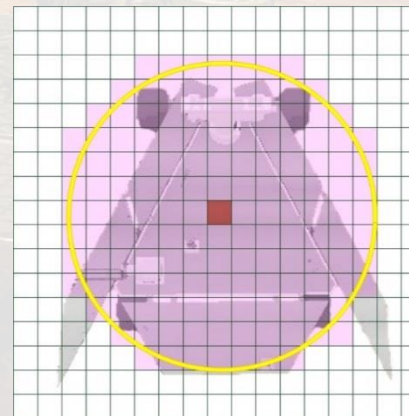
Planificación de trayectorias:

- Estrategia exploratoria.
- Cálculo de caminos candidatos.



Caminos candidatos

Evaluar seguridad del camino

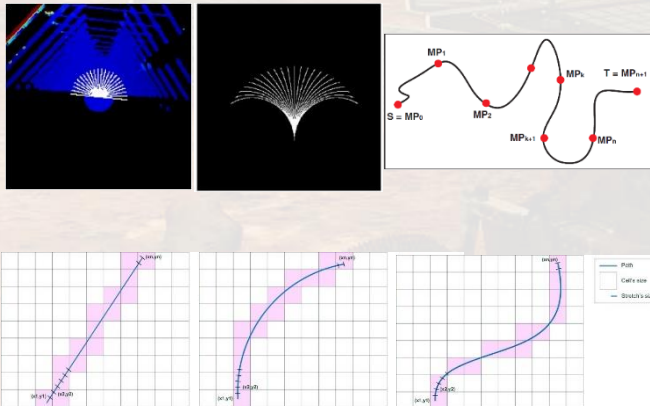


1. Excesivo escalón

3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

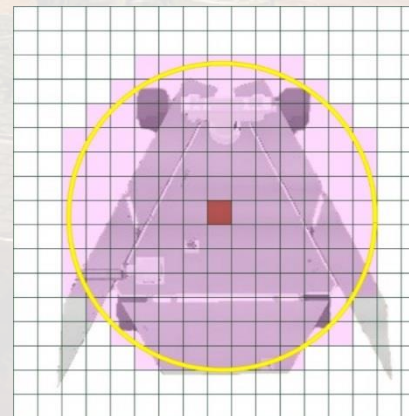
Planificación de trayectorias:

- Estrategia exploratoria.
- Cálculo de caminos candidatos.



Caminos candidatos

Evaluar seguridad del camino

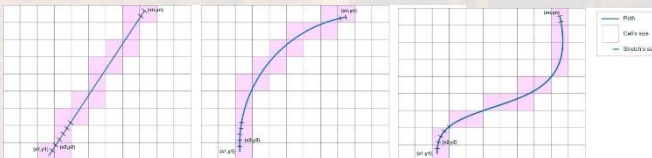
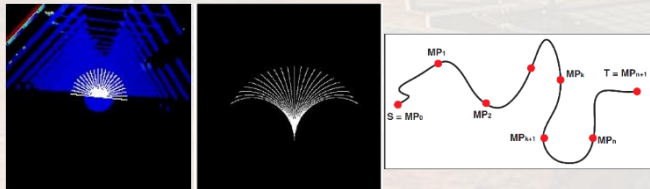


2. Excesiva rugosidad

3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

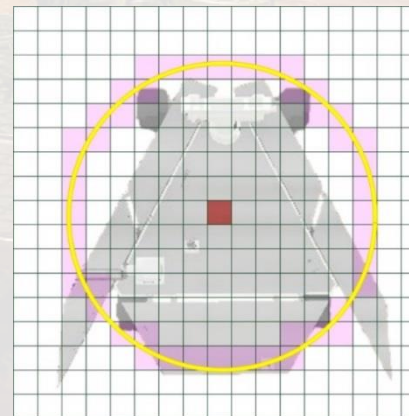
Planificación de trayectorias:

- Estrategia exploratoria.
- Cálculo de caminos candidatos.



Caminos candidatos

Evaluar seguridad del camino



3. Excesiva inclinación

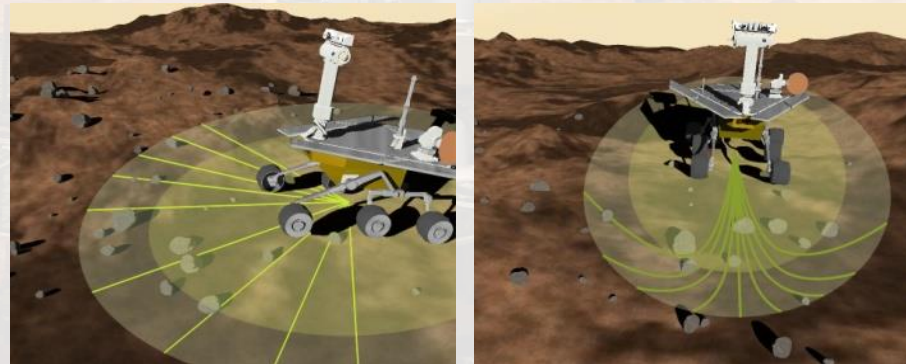
3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Navegación:

- Locomoción.
- Control.
- Estimación de localización.

Locomoción

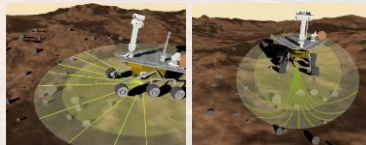
Distancia de planificación y de navegación



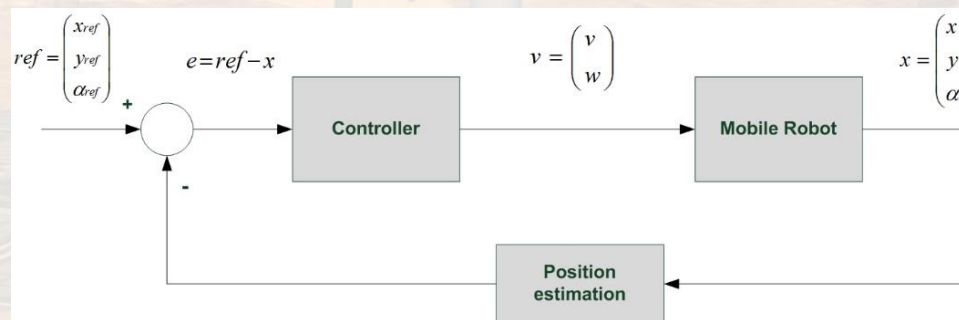
3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Navegación:

- Locomoción.
- Control.
- Estimación de localización.



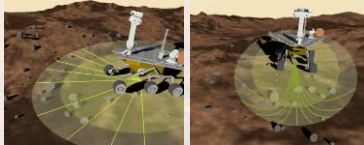
Control



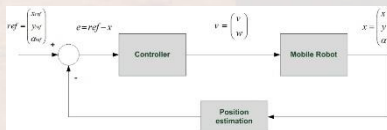
3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Navegación:

- Locomoción.
- Control.
- Estimación de localización.



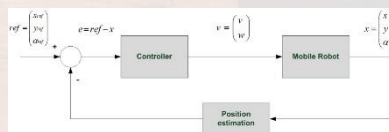
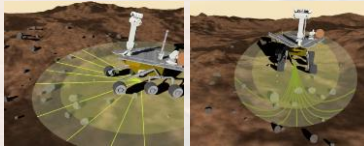
Control
Trayectorias rectas



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

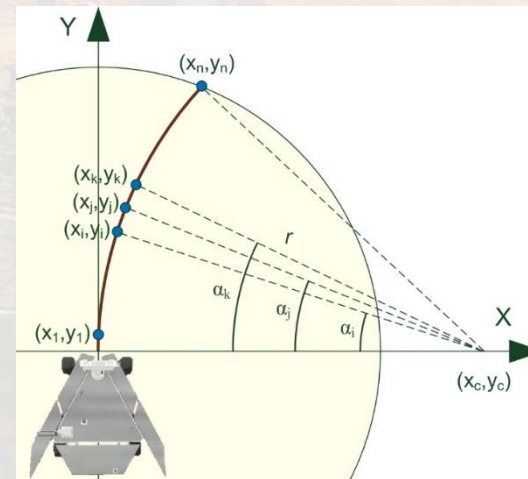
Navegación:

- Locomoción.
- Control.
- Estimación de localización.



Control

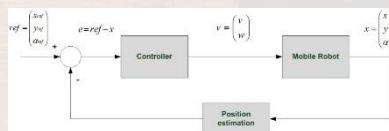
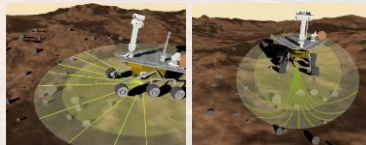
Arcos



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

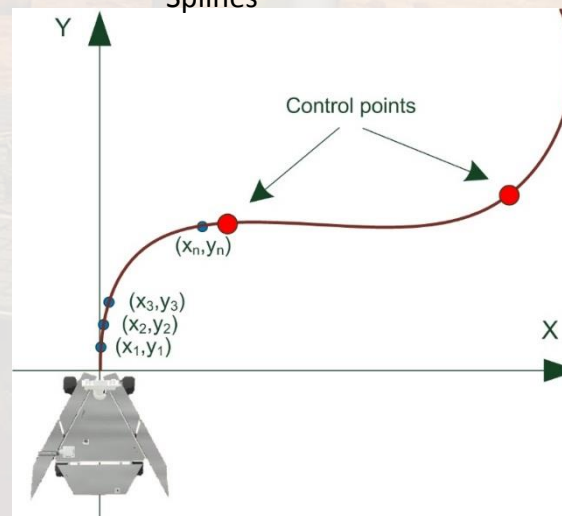
Navegación:

- Locomoción.
- Control.
- Estimación de localización.



Control

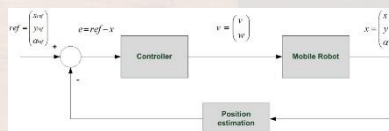
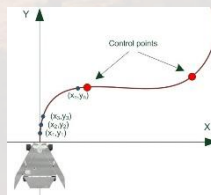
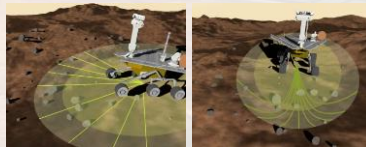
Splines



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

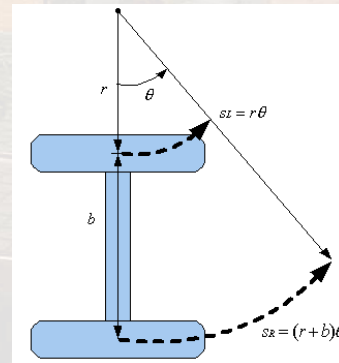
Navegación:

- Locomoción.
- Control.
- Estimación de localización.



Estimación de localización

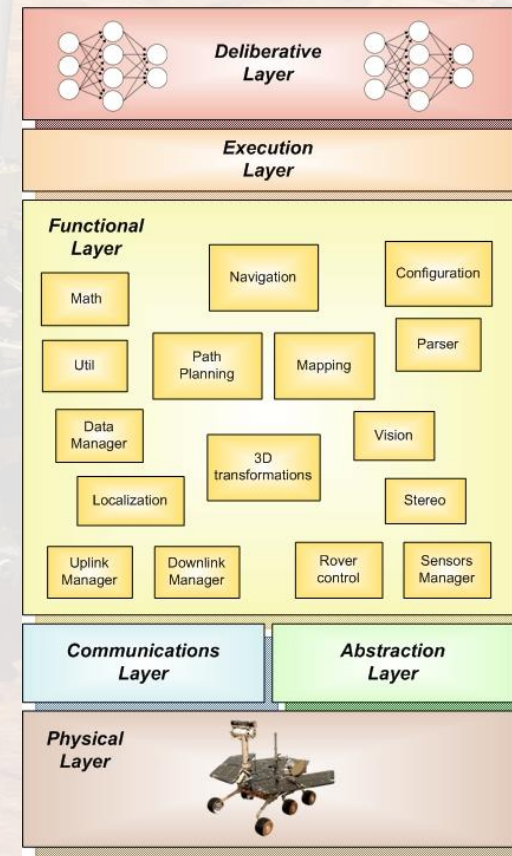
Cinemática diferencial



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Diseño de la arquitectura del software de control:

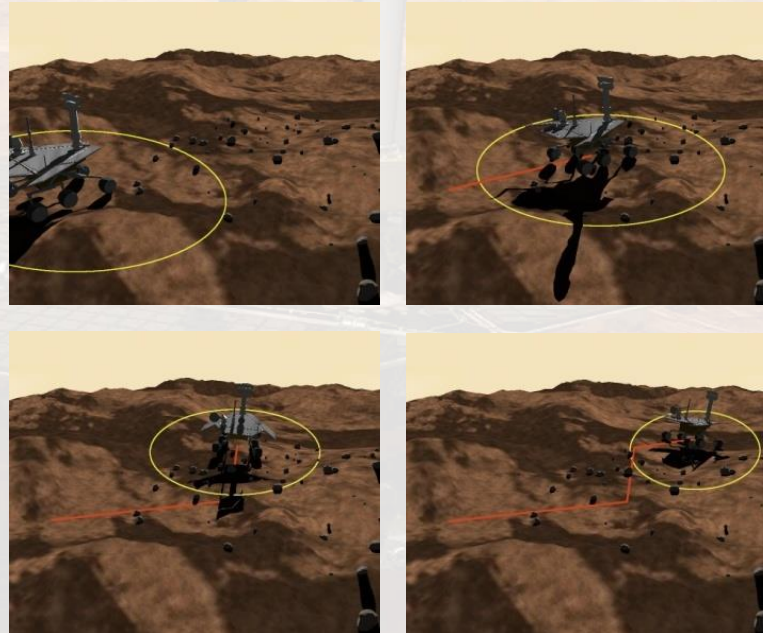
- Estructurar el código. Multi-capa (jerárquica).
- Modular.
- Mantenibilidad / escalabilidad / reusabilidad.
- Plataforma de investigación.



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Pruebas y validación:

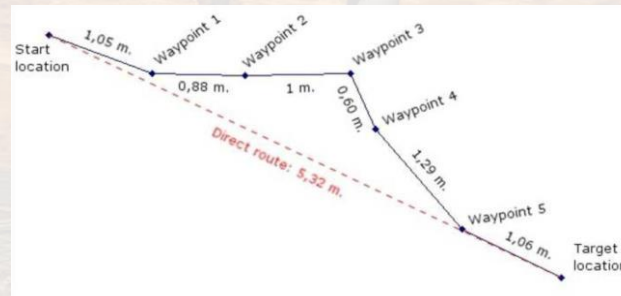
- Simulación.



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Pruebas y validación:

- Simulación.



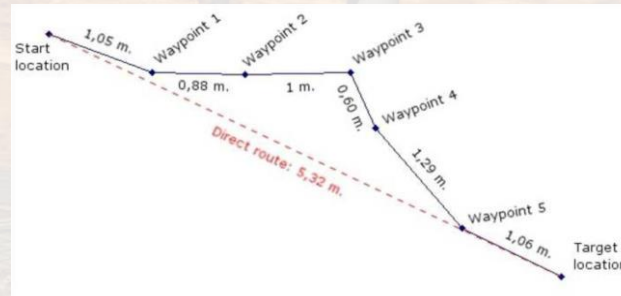
- 6 ciclos
- 9:29 min.
- 5,88 m.
- v. nominal -> 5 cm/s
- Pan/Tilt -> 28-30 s.

Cycle	Total time (s)	Comp. time (s)	Nav. time (s)	Turn (rad)	Distance (m)
1	85	52	33	0.29 (9s)	1.05
2	79	46	33	-0.43 (12s)	0.88
3	68	47	21	0 (0 s)	1.00
4	118	62	55	1.29 (40s)	0.60
5	105	63	41	-0.43 (12s)	1.29
6	114	78	35	-0.43 (12s)	1.06
	9:29	5:48	3:38		5.88

3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Pruebas y validación:

- Simulación.



- 6 ciclos
- 9:29 min.
- 5,88 m.
- v. nominal -> 5 cm/s
- Pan/Tilt -> 28-30 s.

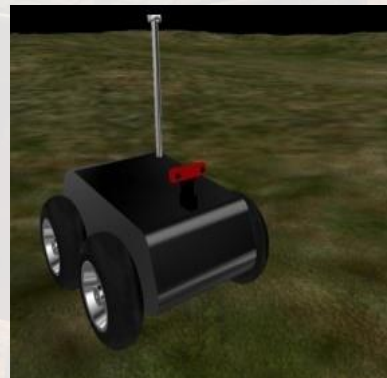
Function	Computing time (ms)
Stereo matching	410-480
Disparity filtering	90-130
Computing 3D points	430-470
Reprojection	210-320
Height map construction	70-90
Height map interpolation	< 10
Height map update	< 10
Merge height maps	< 10
Path planning process	40-50

Cycle	Total time (s)	Comp. time (s)	Nav. time (s)	Turn (rad)	Distance (m)
1	85	52	33	0.29 (9s)	1.05
2	79	46	33	-0.43 (12s)	0.88
3	68	47	21	0 (0 s)	1.00
4	118	62	55	1.29 (40s)	0.60
5	105	63	41	-0.43 (12s)	1.29
6	114	78	35	-0.43 (12s)	1.06
	9:29	5:48	3:38		5.88

3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Pruebas y validación:

- Pruebas de campo.

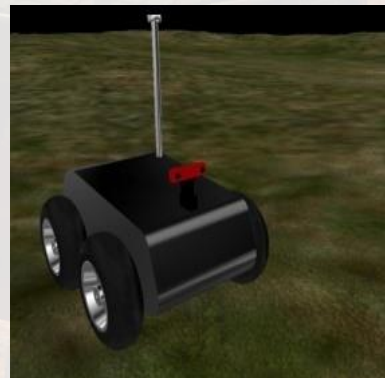


3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Pruebas y validación:

- Pruebas de campo.

Function	Computing time
Stereo matching	29.25-29.45 s
Disparity filtering	1.02-1.16 s
Computing 3D points	3.66-3.85 s
Reprojection	2.15-2.95 ms
Height map construction	460-560 ms
Height map interpolation	120-130 ms
Height map updating	< 10 ms
Merge height maps	< 10 ms
Path planning process	440-610 ms



3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación

Pruebas y validación:

- Pruebas de campo.

Function	Computing time
Stereo matching	29.25-29.45 s
Disparity filtering	1.02-1.16 s
Computing 3D points	3.66-3.85 s
Reprojection	2.15-2.95 ms
Height map construction	460-560 ms
Height map interpolation	120-130 ms
Height map updating	< 10 ms
Merge height maps	< 10 ms
Path planning process	440-610 ms



- Tiempos de proceso similares a HW representativo de vuelo
- Aceleración (resolución de imágenes, paralelización).
- **Validación funcional**

Contenido

1. Exploración espacial robótica. Autonomía.
2. Entorno de soporte al desarrollo.
3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación.
4. Percepción: filtros de imagen para reconstrucción 3D del entorno.
5. Conclusiones y trabajos futuros

5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Antecedentes:

- Percepción clave para reconstrucción, mapeado y posterior navegación.
- **Problema:** funcionamiento de algoritmos con imágenes concretas (reales).
- **Objetivo:** tratar de optimizar más aún los resultados.
- **Suposición de intensidad constante -> a menudo no se cumple.**
- **Estrategia:** aparte del proceso estéreo, tratamientos previos y posteriores de las imágenes.
Corrección automática y coordinada de las imágenes.
- Filtros y procesos existentes pero no aplicados habitualmente a pares estéreo.

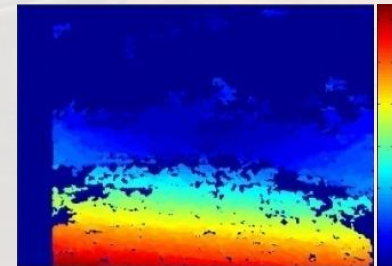
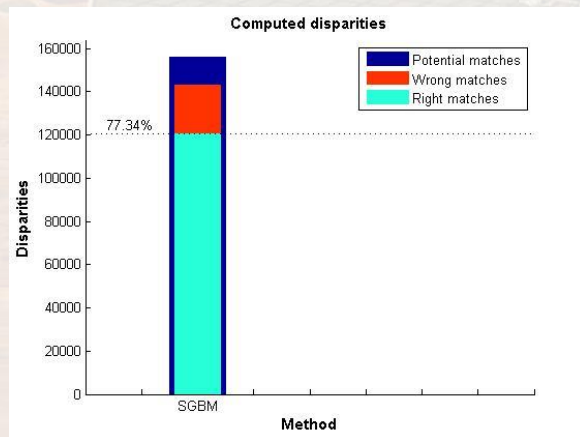
5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Correspondencia de histogramas:

- Técnica relativa: ecualización de histogramas -> para una imagen.
- Los histogramas del par de imágenes pueden variar significativamente.
- **Estrategia:** ecualizar el histograma de una imagen con el de la otra. Hacer corresponder las distribuciones de probabilidad (intensidades).

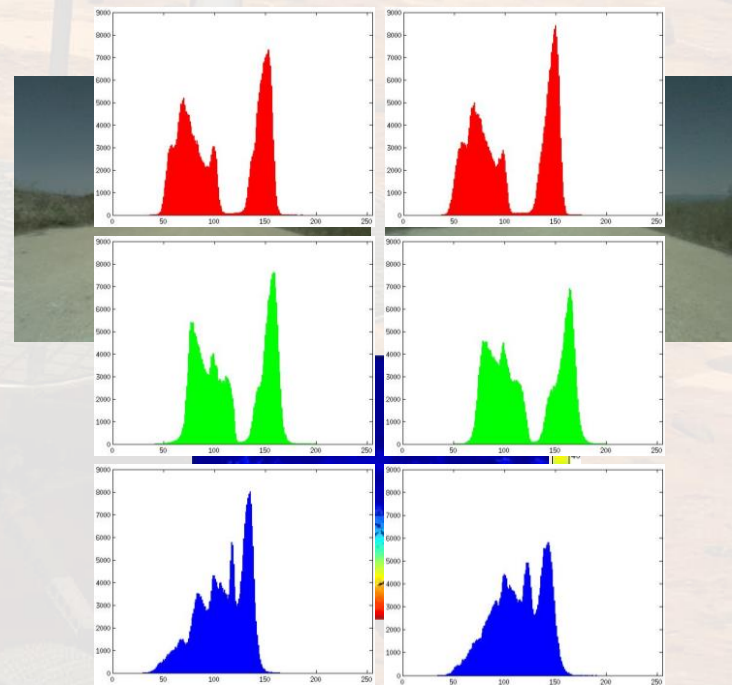
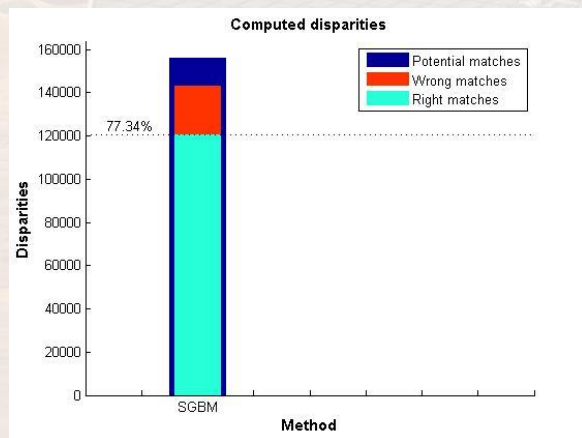
5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Correspondencia de histogramas:



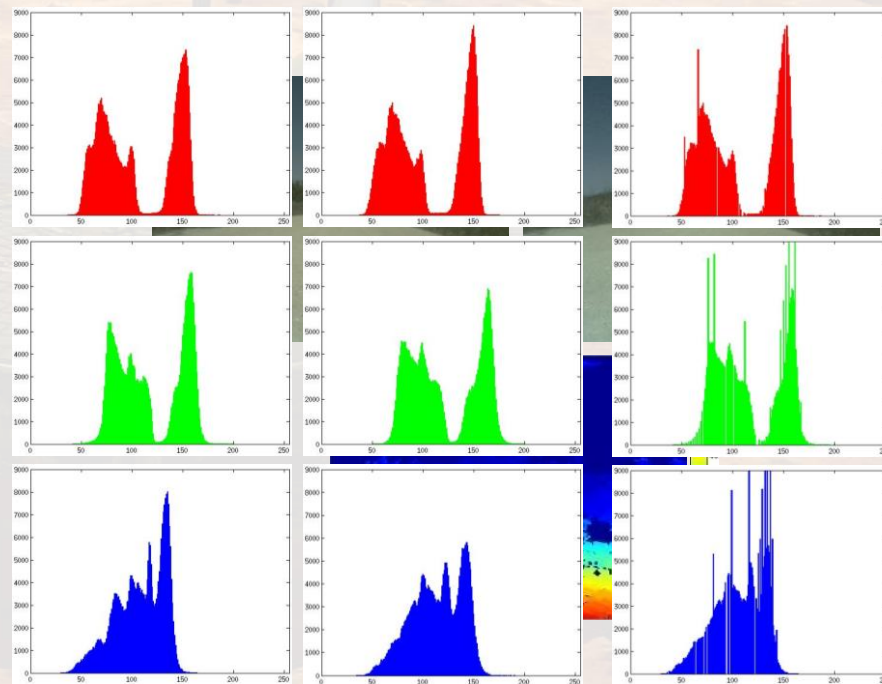
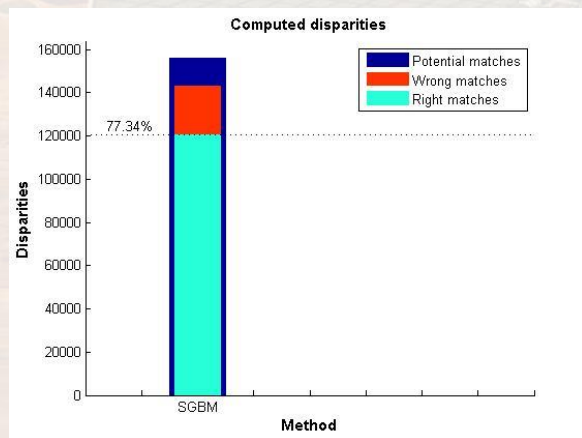
5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Correspondencia de histogramas:



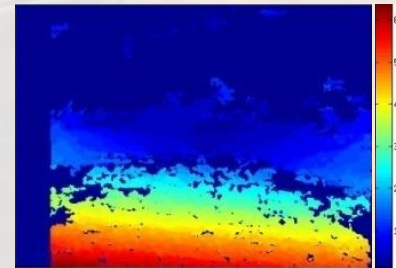
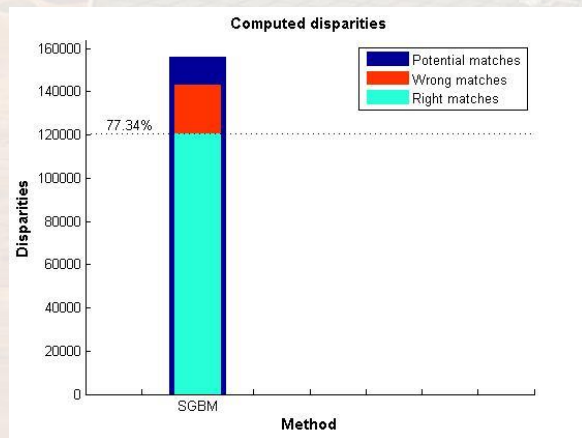
5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Correspondencia de histogramas:



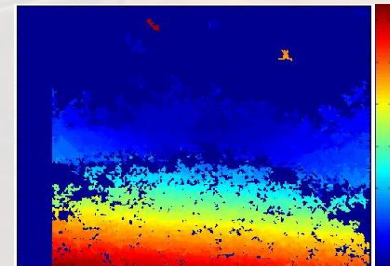
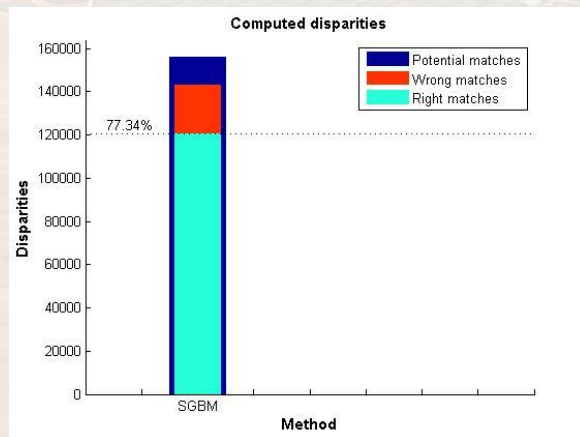
5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Correspondencia de histogramas:



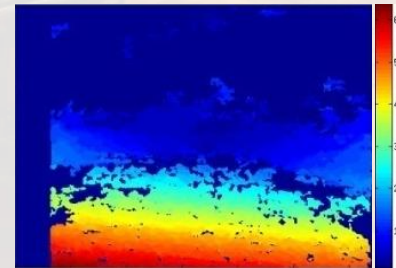
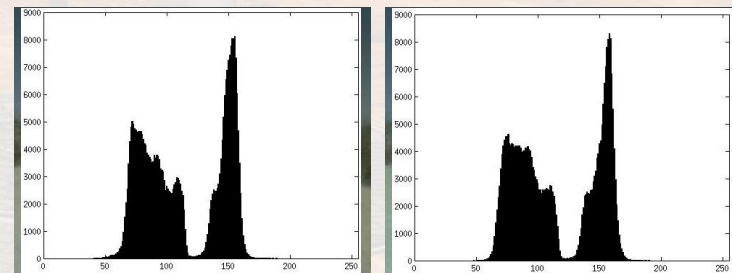
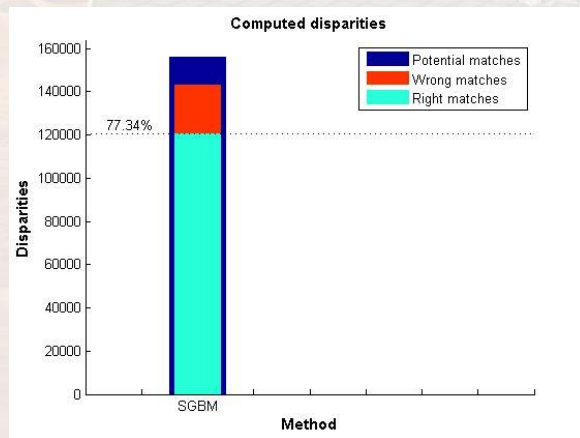
5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Correspondencia de histogramas:



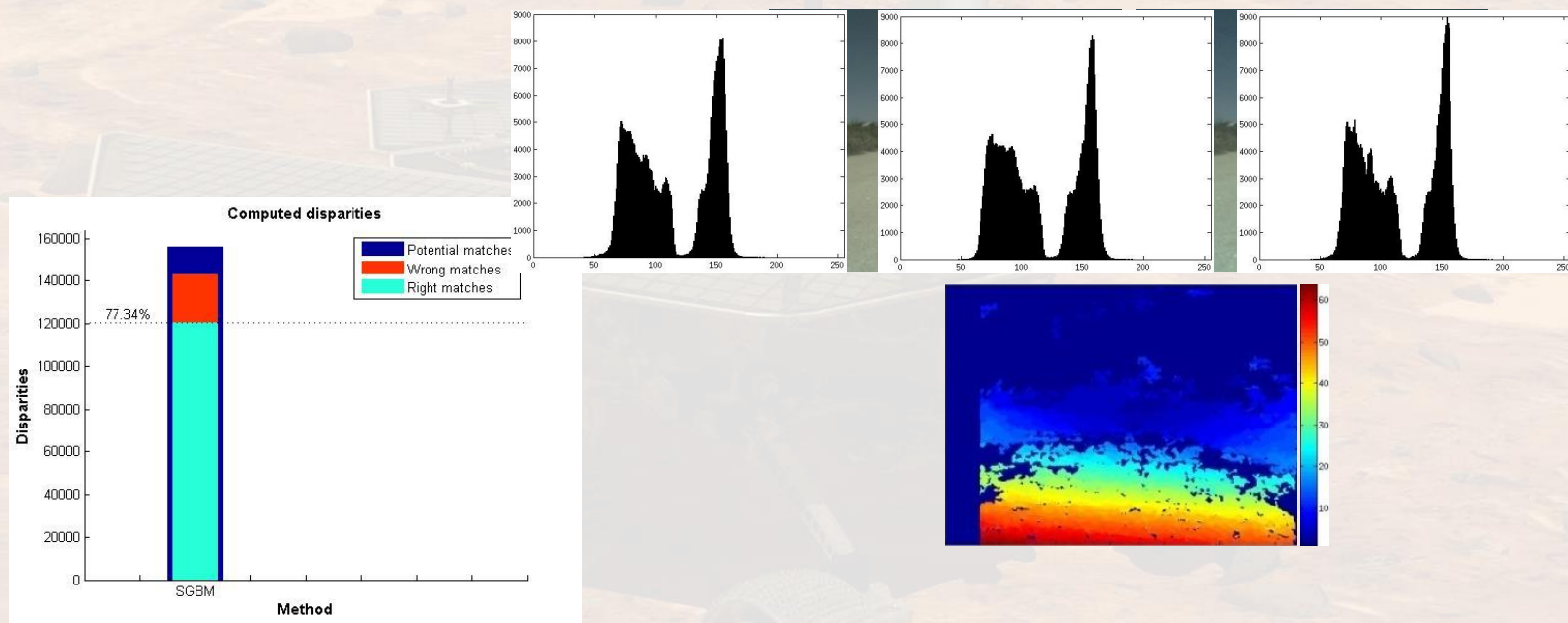
5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Correspondencia de histogramas:



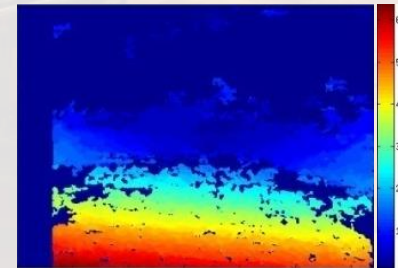
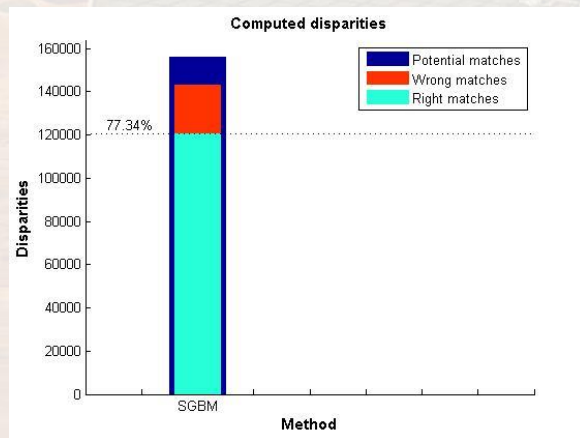
5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Correspondencia de histogramas:



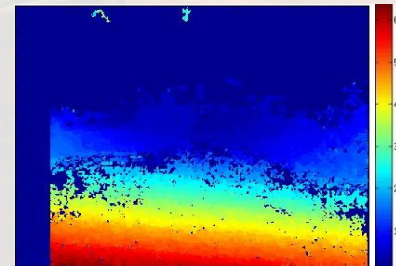
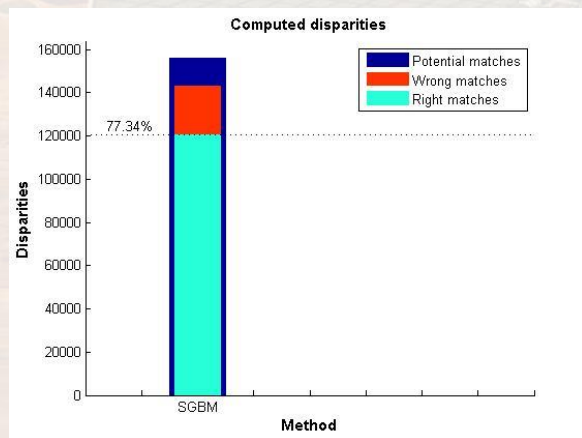
5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Correspondencia de histogramas:



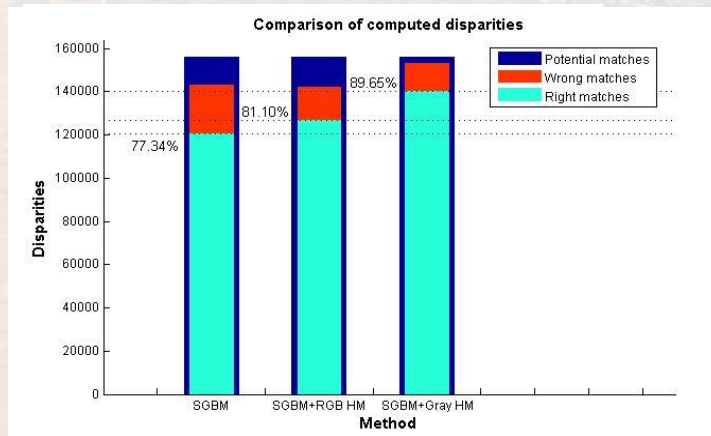
5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Correspondencia de histogramas:



5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Correspondencia de histogramas:



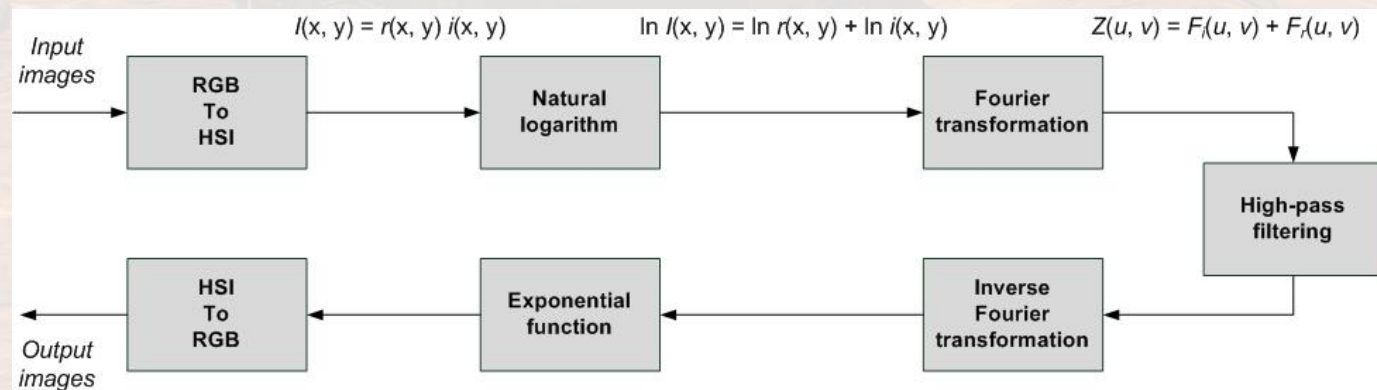
Stereo matching algorithm	Original Images	Histogram Matching (RGB)	Histogram Matching (Gray)
Total image's pixels	307,200	307,200	307,200
Potential matches	156,111	156,111	156,111
Matches found	143,296	141,993	153,305
Right matches (%)	77.34%	81.1%	89.65%
Wrong matches	22,558	15,385	13,350
Missed matches (%)	22.66%	18.9%	10.35%



5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

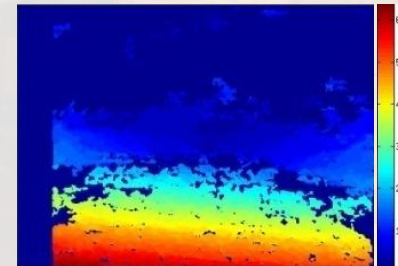
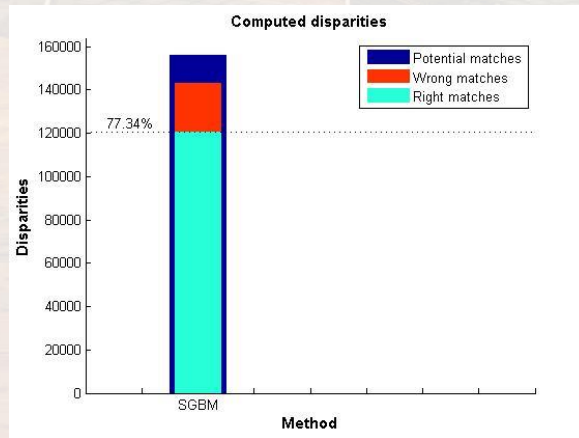
Filtrado homomórfico:

- Imágenes, 2 componentes: 1) reflectancia (naturaleza del objeto) e 2) iluminación (luz en la escena).
- **Estrategia:** eliminar la componente de iluminación y mantener la reflectancia. Maximizar la similitud de los niveles espectrales del par estéreo.
- **Proceso:**



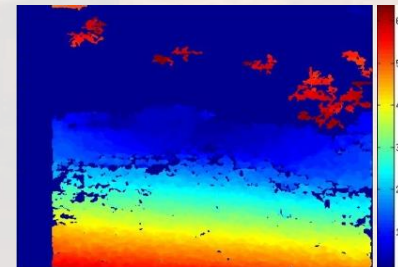
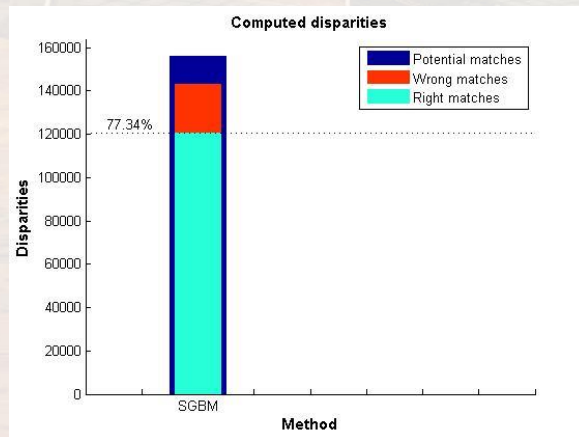
5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Filtrado homomórfico:



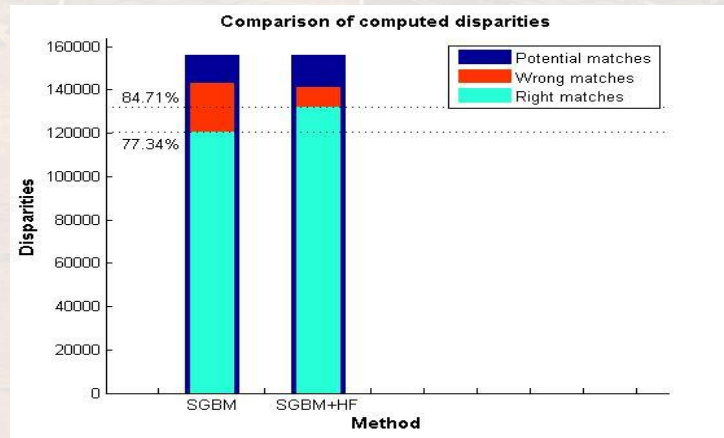
5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Filtrado homomórfico:

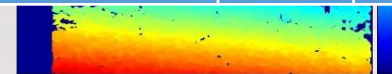


5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Filtrado homomórfico:

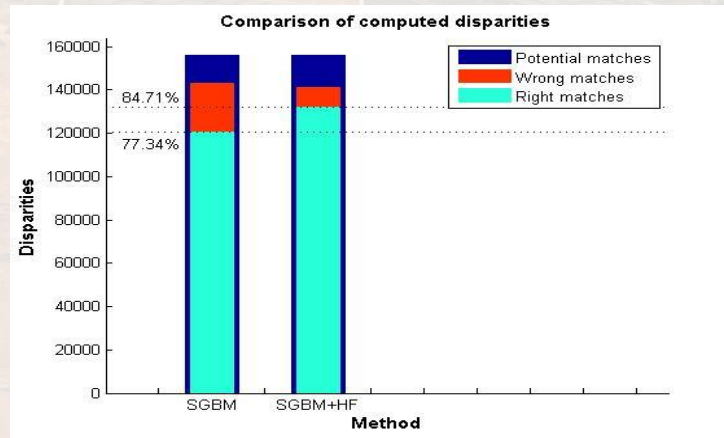


Stereo matching algorithm	Original Images	Homomorphic Filtering
Total image's pixels	307,200	307,200
Potential matches	156,111	156,111
Matches found	143,296	141,200
Right matches (%)	120,738 77.34%	132,235 84.71%
Wrong matches	22,558	8,965
Missed matches (%)	35,373 22.66%	23,876 15.29%

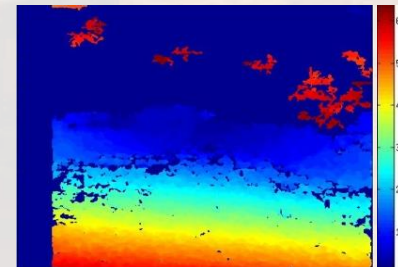


5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Filtrado homomórfico:



Stereo matching algorithm	Original Images	Homomorphic Filtering
Total image's pixels	307,200	307,200
Potential matches	156,111	156,111
Matches found	143,296	141,200
Right matches (%)	120,738 77.34%	132,235 84.71%
Wrong matches	22,558	8,965
Missed matches (%)	35,373 22.66%	23,876 15.29%



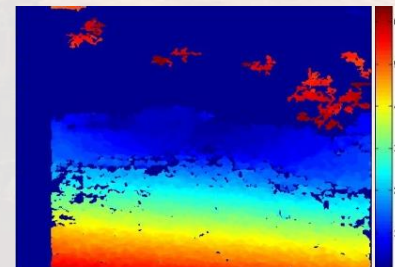
5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Filtrado por clusters:

- Proceso de filtrado posterior (sobre los resultados).
- **Estrategia:** principio de continuidad espacial. Agrupar píxeles aislados del resto (terreno).
- **Proceso:** 1) detectar clusters, 2) filtrarlos acorde a parámetros configurados.

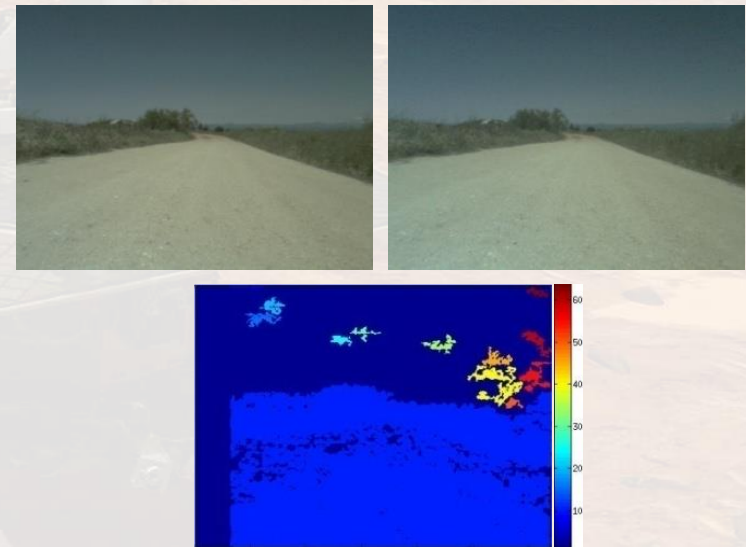
5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Filtrado por clusters:



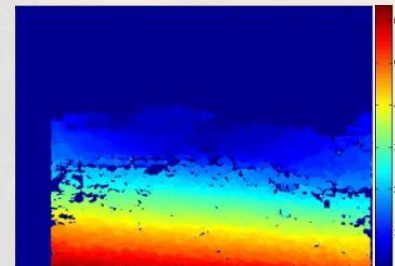
5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Filtrado por clusters:



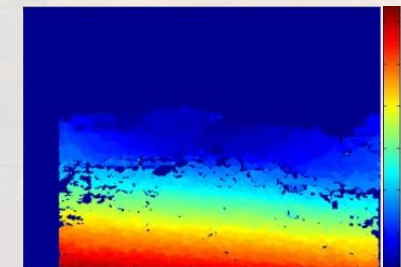
5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Filtrado por clusters:



5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

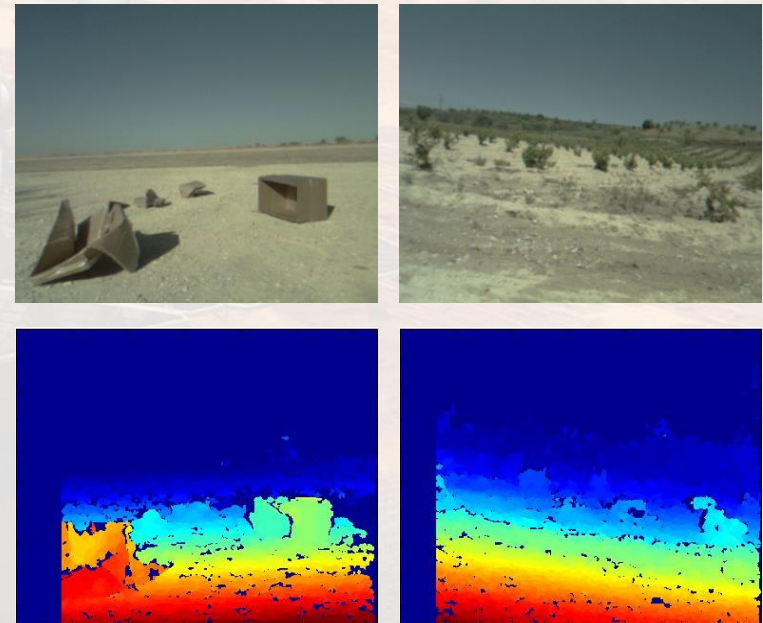
Filtrado por clusters:



Stereo matching algorithm	Original Images	Homomorphic Filtering	Clustering Filter
Total image's pixels	307,200	307,200	307,200
Potential matches	156,111	156,111	156,111
Matches found	143,296	141,200	135,086
Right matches (%)	120,738 77.34%	132,235 84.71%	131,862 84.47%
Wrong matches	22,558	8,965	3,224
Missed matches (%)	35,373 22.66%	23,876 15.29%	24,249 15.53%

5. Filtros de imagen y sistema experto para reconstrucción 3D del entorno

Filtrado por clusters:



Stereo matching algorithm	Original Images	Homomorphic Filtering	Clustering Filter
Total image's pixels	307,200	307,200	307,200
Potential matches	156,111	156,111	156,111
Matches found	143,296	141,200	135,086
Right matches (%)	120,738 77.34%	132,235 84.71%	131,862 84.47%
Wrong matches	22,558	8,965	3,224
Missed matches (%)	35,373 22.66%	23,876 15.29%	24,249 15.53%

Contenido

1. Exploración espacial robótica. Autonomía.
2. Entorno de soporte al desarrollo.
3. Autonomía para rovers de exploración planetaria: arquitectura y navegación.
4. Percepción: filtros de imagen para reconstrucción 3D del entorno.
5. Conclusiones y trabajos futuros

6. Conclusiones y trabajos futuros (1/3)

Conclusiones:

- Se demuestra que la integración de paquetes, con adaptaciones y extensiones, hace posible la creación de un entorno de trabajo para soportar desarrollos de autonomía en robótica espacial.
- El entorno de trabajo construido a propósito ha resultado clave para el desarrollo y validación.
- La estrategia de autonomía ha sido validada funcionalmente, tanto en simulación como en real.
- **Nuevas estrategias de path planning suponen un avance con respecto a enfoques anteriores.**
- La arquitectura multicapa ha sido clave como plataforma de investigación y operación.
- La estrategia de navegación requiere recursos acordes a actuales misiones y hardware de vuelo.

6. Conclusiones y trabajos futuros (2/3)

- Se ha confirmado la percepción como el proceso clave, tanto en funcionalidad como para optimizaciones.
- **Los filtros y procesos de imagen desarrollados mejoran significativamente el proceso de percepción: incrementan correspondencias y disminuyen errores -> reconstrucción 3D.**
- El trabajo desarrollado sirve de partida para dar respuesta a futuras necesidades de ESA.
- El trabajo desarrollado es altamente portable a otras aplicaciones similares terrestres: navegación por entornos naturales, agricultura, rescate, vigilancia, etc.

6. Conclusiones y trabajos futuros (3/3)

Trabajos futuros:

- Sofisticación del entorno de soporte: centro de control y entorno de simulación (modelos, funcionalidad).
- Estrategia de navegación. Algoritmos de percepción, path planning, mapeado, control, etc. -> plataforma base para futuros trabajos de investigación.
- Filtros y procesos de imagen que mejoren la percepción y disminuyan errores.
- Robustecer los desarrollos para aplicación a misiones futuras y adaptación a otras aplicaciones.

Publicaciones

PUBLICACIONES EN REVISTAS INDEXADAS:

- Correal, R.; Pajares, G.; Ruz, J. J. (2013). **Mejora del Proceso de Correspondencia en Imágenes Estereoscópicas Mediante Filtrado Homomórfico y Agrupaciones de Disparidad**. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, vol. 10, issue 2, pp 178-184, doi: 10.1016/j.riai.2013.03.008.
- Correal, R.; Pajares, G.; Ruz, J.J. (2014a). **Automatic Expert System for 3D Terrain Reconstruction Based on Stereo Vision and Histogram Matching**. Expert Systems with Applications, no. 41, pp. 2043-2051, doi: 10.1016/j.eswa.2013.09.003.
- Correal, R.; Pajares, G.; Ruz, J.J. (2014b). **Autonomy for Ground-level Robotic Space Exploration: Framework, Simulation, Architecture, Algorithms and Experiments**. ROBOTICA Journal. June 2014, pp. 1–32. doi: 10.1017/S0263574714001428.


PUBLICACIONES EN CONGRESOS Y CONFERENCIAS:

- Odwyer, A.; Correal, R. (2008). **Experiences in Producing a Preliminary Navigation OBSW Prototype for the Exomars Rover Based on EDRES**. ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation (ASTRA), ESA/ESTEC, November 11-14, 2008, Noordwijk, The Netherlands.
- Correal, R.; Pajares, G. (2010). **Framework for Simulation and Rover' Visual-Based Autonomous Navigation in Natural Terrains**. 7th Workshop RoboCity2030-II, October, 2010, Madrid, Spain.
- Correal, R.; Pajares, G. (2011a). **Modeling, simulation and onboard autonomy software for robotic exploration on planetary environments**. International Conference on DATA Systems In Aerospace (DASIA), 17-20 Mayo, 2011, Malta, pp. 1-21.
- Correal, R.; Pajares, G. (2011b). **Onboard Autonomous Navigation Architecture for a Planetary Surface Exploration Rover and Functional Validation Using Open-Source Tools**. ESA International Conference on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation (ASTRA 2008), ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, pp 1-8.

Publicaciones

SEMINARIOS:

- Conferencia en la Facultad de Informática de la Universidad Complutense de Madrid (Noviembre 2009), titulada “**Computer Vision for Planetary Exploration Rovers**”.
- Conferencia en la Facultad de Informática de la Universidad Rey Juan Carlos (Octubre 2010), titulada “**Framework for Simulation and Rover' Visual-Based Autonomous Navigation in Natural Terrains**”, en el marco de 7th workshop de RoboCity2030-II-CM.
- Conferencia en la Facultad de Informática de la Universidad Complutense de Madrid (Noviembre 2010), titulada “**Computer Vision in Space and Planetary Environments**”.
- Conferencia en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid (Abril 2011), titulada “**Unmanned Vehicles' Autonomous Navigation for Space Exploration Missions**”.
- Conferencia en Malta (Mayo 2011), titulada “**Modeling, simulation and onboard autonomy software for robotic exploration on planetary environments**”, en el marco de la conferencia internacional DASIA (DATA Systems In Aerospace).
- Conferencia en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid (Mayo 2012), titulada “**Unmanned Vehicles' Autonomous Navigation for Space Exploration Missions**”.
- Conferencia en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid (Abril 2015), titulada “**Unmanned Vehicles' Autonomous Navigation for Space Exploration Missions**”.
- Conferencia en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid (Abril 2016), titulada “**Unmanned Vehicles' Autonomous Navigation for Space Exploration Missions**”.

A detailed rendering of a Mars rover, likely a Curiosity rover, positioned on the reddish, rocky terrain of Mars. The rover is equipped with solar panels, a camera mast, and six large, treaded wheels. The background shows a vast, hazy landscape with rolling hills under a pale sky.

AUTONOMY FOR ROBOTIC PLANETARY EXPLORATION MISSIONS: PERCEPTION AND NAVIGATION FOR AUTONOMOUS ROVERS

Muchas gracias por su atención

Raúl Correal

Marzo, 2017