

Desarrollo de sistema móvil para la generación de nubes de puntos basado en técnicas **SLAM**

Alexandre Filgueira Lago

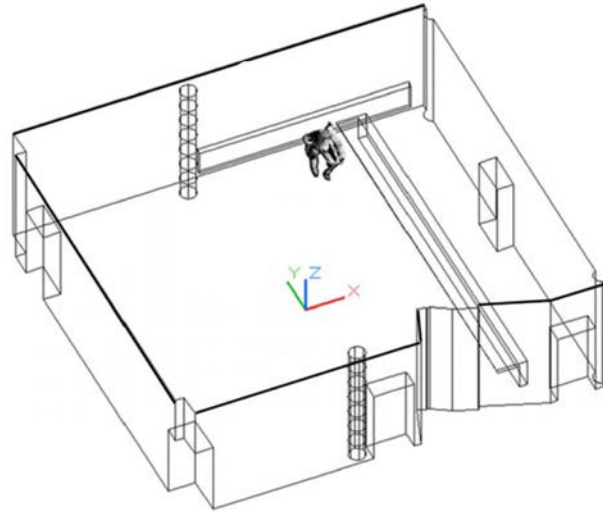
Universidad de Vigo

Directores: Pedro Arias Sánchez (Universidad de Vigo)

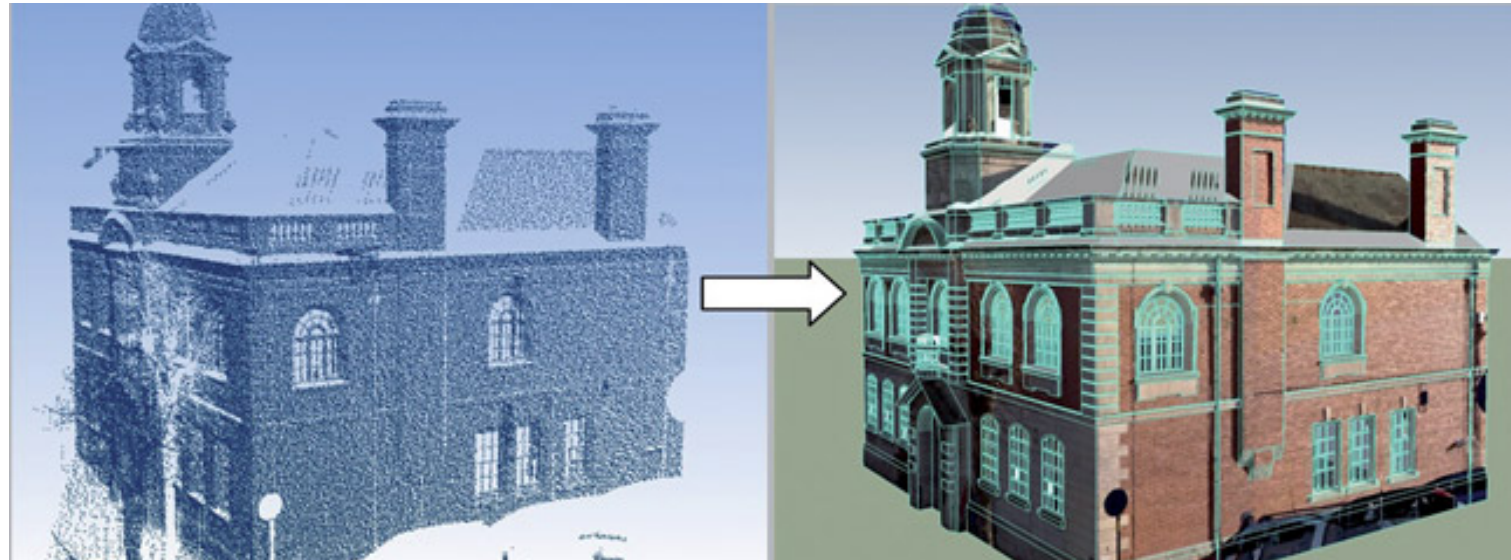
Susana Lagüela López (Universidad de Salamanca)



1. **Conceptos previos**
2. Sistema Adquisición
3. PTM-SLAM
 1. Algoritmo
 2. Casos Estudio
 3. Parámetros
4. Conclusiones



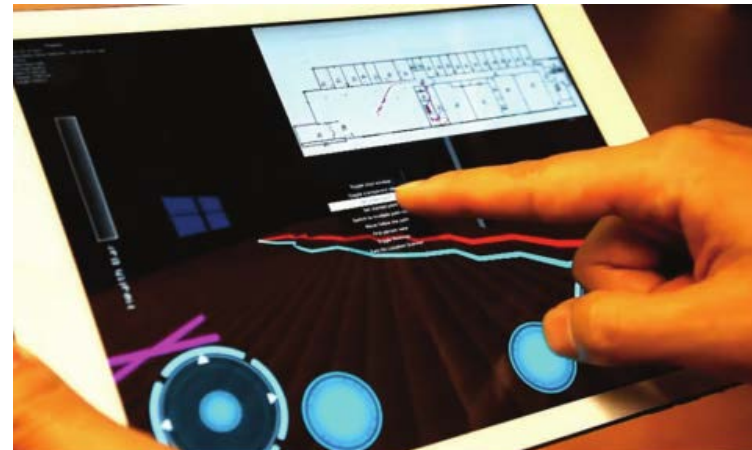
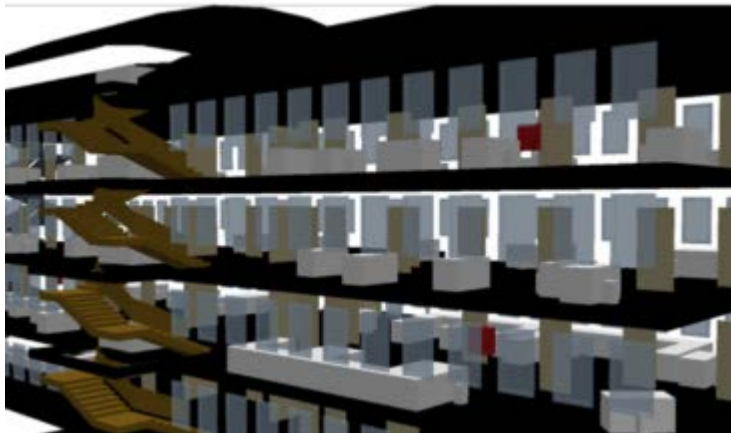
- **Adquisición**
 - Láser escáner 3D + imagen (opcional).
- **Registro**
 - Uso de dianas artificiales durante la adquisición -> Semi-Automático.
 - Seleccionando puntos en común entre nubes -> Manual.
- **Modelaje**
 - Reconocimiento de planos. (A. Budroni, J. Boehm)
 - Conexión y fusión de cuboides (K. Khoshelham, L. Díaz-Vilariño)
 - Extracción de huecos (M. Previtali, L. Barazzetti, R. Brumana, M. Scaioni)



Aplicaciones

- Reformas.
 - Cálculos estructurales.
 - Recorridos virtuales.
 - Otros muchos.
- **Implantación de sistemas de posicionamiento y navegación en interiores.** (G. Brown, C. Nagel, S. Zlatanova, T.H. Kolbe)
 - Evacuación en casos de emergencias. (H. Tashakkori, A. Rajabifard, M. Kalantari)
 - Guía en exposiciones, centros comerciales, etc. (A.G. Pateli, G.M. Giaglis, D.D. Spinellis)
 - Servicios de vigilancia automatizada.
 - Gestión de desplazamientos de personas con movilidad reducida. (J.C. Garcia, M. Marron, P.F. Amaral, T. Bastos, S. Palazuelos, J.L. Martin, et al.)

1. **Conceptos previos**
2. Sistema Adquisición
3. PTM-SLAM
 1. Algoritmo
 2. Casos Estudio
 3. Parámetros
4. Conclusiones



Alexandre Filgueira Lago

Sistemas de adquisición

- Láser escáner Terrestre 3D.
- Sistemas móviles de exteriores.
 - Vehículos equipados con láseres, sensores GNSS, cámaras, etc.
- **Sistemas móviles de interiores** (Indor Mobile Mapping Systems [IMMS])
Divididos según el tipo de plataforma que empleen:
 - Rodante.(Trimble)
 - Mochila.(Leica)
 - Manual.(Zebedee)

1. **Conceptos previos**
2. Sistema Adquisición
3. PTM-SLAM
 1. Algoritmo
 2. Casos Estudio
 3. Parámetros
4. Conclusiones



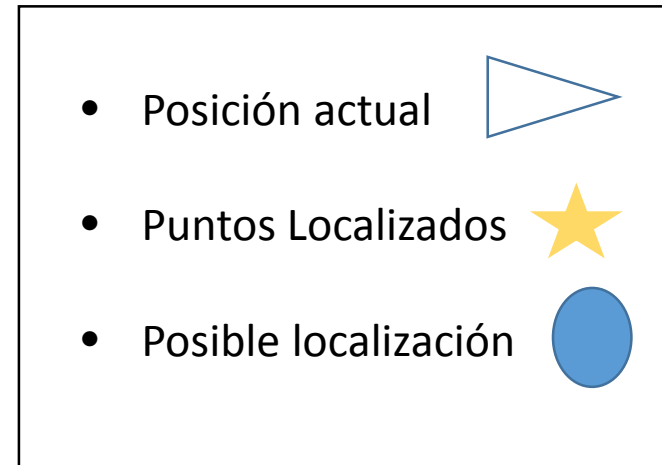
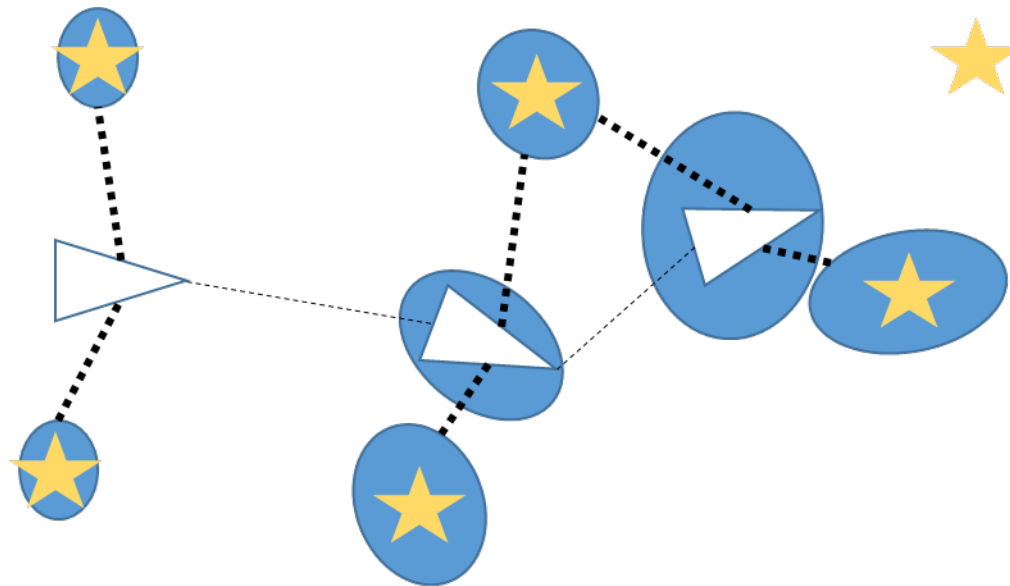
Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)

Técnica empleada para construir un mapa de un entorno desconocido, a la vez que se calcula la posición en el mismo.

Algunos métodos empleados:

- Uso de cálculos estadísticos para aproximar la posición del sistema. (K. Murphy)
- Gráfico de estados que permite repartir el error a lo largo de toda la trayectoria, minimizando el error final. (S. Thrun)
- Estimación de la trayectoria mediante el empleo de filtros de partículas. (M. Montemerlo, S. Thrun, D. Koller, B. Wegbreit)

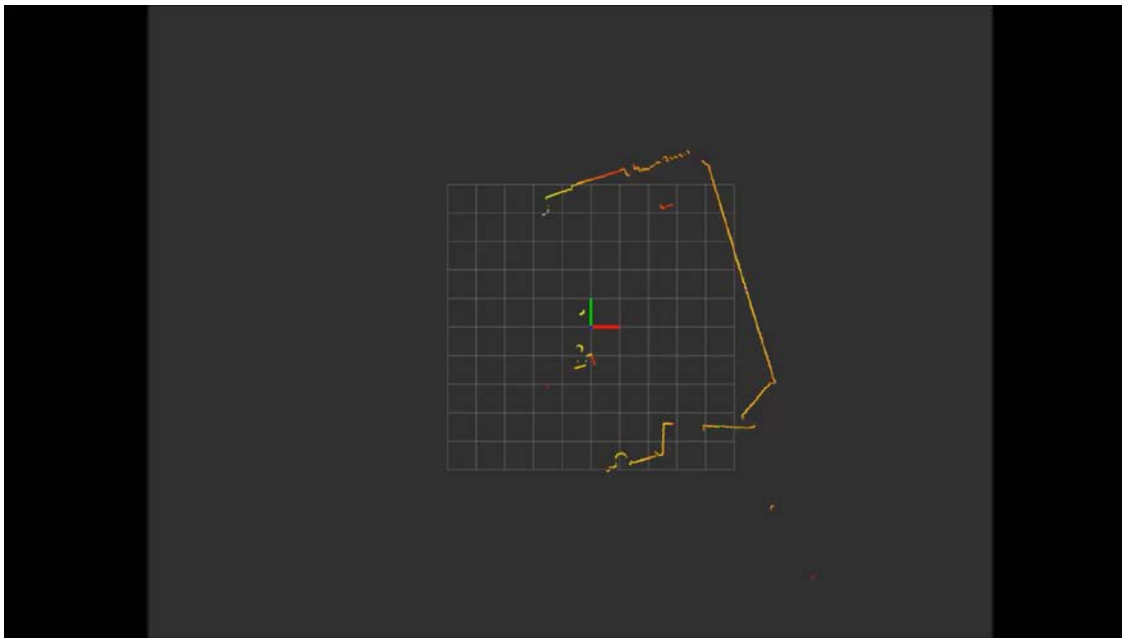
1. **Conceptos previos**
2. Sistema Adquisición
3. PTM-SLAM
 1. Algoritmo
 2. Casos Estudio
 3. Parámetros
4. Conclusiones



Sistema de adquisición

- Sistema móvil de interiores.
- Plataforma tipo rodante.
- LiDAR 2D (Hokuyo UTM-30LX-EW).
 - Alcance hasta 30m
 - Cobertura de 270°
 - Resolución angular de 0,25°
 - Precisión 30mm
 - Velocidad 2400rpm = 40rev/s
 - *El láser entrega un conjunto de distancias
- Batería externa de 12V.
- PC portátil.

1. Conceptos previos
2. **Sistema Adquisición**
3. PTM-SLAM
 1. Algoritmo
 2. Casos Estudio
 3. Parámetros
4. Conclusiones



Probabilistic Template Matching SLAM (PTM-SLAM) - Conceptos principales

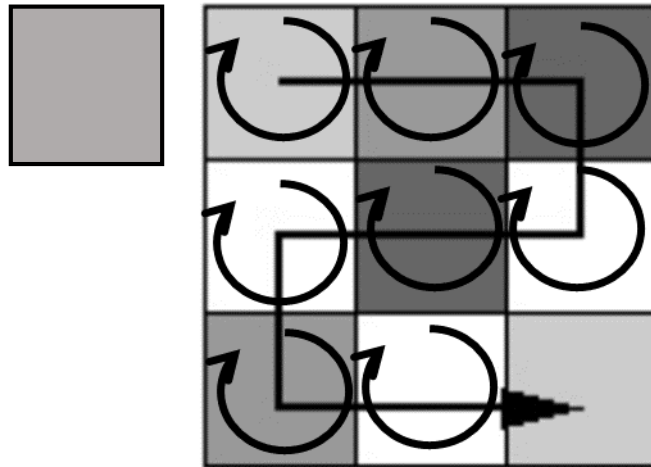
- **Técnicas de algoritmos SLAM**

- Uso de mapas de celdas o rejillas de ocupación similares a los presentados por (Elfes y H.P. Moravec).
- Celdas bidimensionales.
- Almacenan su propia probabilidad de ocupación, valores entre 0 (libre) y 1 (ocupada).

- **Técnicas de procesamiento de imágenes**

- Template Matching: Técnica empleada para buscar pequeñas partes de una imagen en si misma.
- Nuestro método emplea transformadas de rotación y translación de la imagen a buscar sobre el modelo.

1. Conceptos previos
2. Sistema Adquisición
3. **PTM-SLAM**
 1. Algoritmo
 2. Casos Estudio
 3. Parámetros
4. Conclusiones



$$p_{ocupada}(C_{(x,y),t}) = \rho\left(\frac{ocupada}{obs(t)}, data(t-1)\right) \quad (\text{Ec.1})$$

Probabilistic Template Matching SLAM (PTM-SLAM) - Descripción del algoritmo

Inicialización:

- Generación de 2 mapas de celdas -> **GridMapBase** (0,5m de lado) + **GridMapBaseFine** (0,05m de lado).
- Cada celda inicializada con un valor de 0,5(estado desconocido).
- Lectura de una revolución del láser y cálculo de la celda en la que se posiciona cada uno de los puntos medidos.
 - Teniendo en cuenta la caracterización del láser llevada a cabo por (P. Demski, M. Mikulski, R. Koterak).
- Actualización del valor de ocupación de cada celda cuando contenga un nuevo punto usando Ec.2.
 - Valor de $P(data|occ(t)) = 0,9$
 - Se consideran celdas ocupadas aquellas con un valor superior al valor de la celda con valor máximo menos un 5%

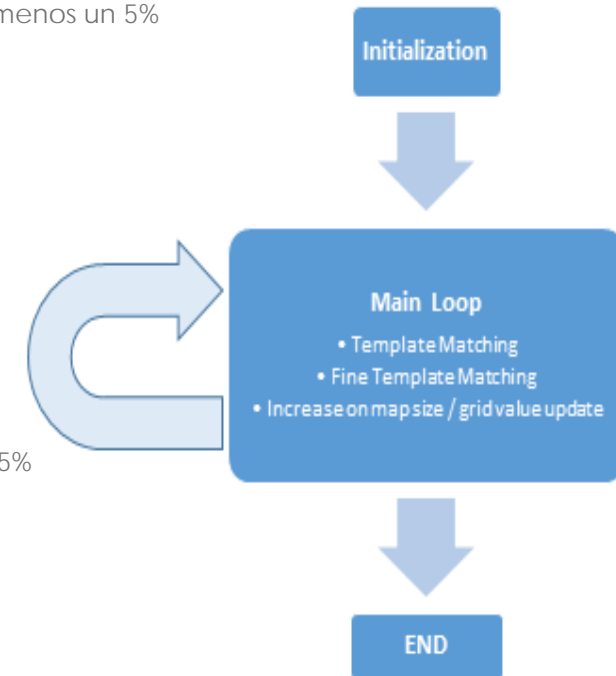
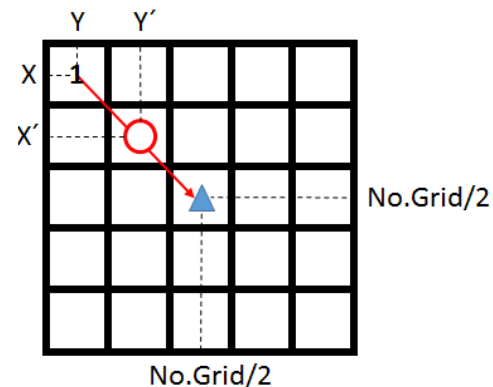


1. Conceptos previos
2. Sistema Adquisición
3. PTM-SLAM
 1. Algoritmo
 2. Casos Estudio
 3. Parámetros
4. Conclusiones

$$P(occ|data(t)) = \frac{P_{occ(t-1)} * P(data|occ(t))}{P_{occ(t-1)} * P(data|occ(t)) + P_{notocc(t-1)} * P(data|notocc(t))} \quad (Ec.2)$$

Probabilidad de celda ocupada en (t-1): $P_{occ(t-1)}$
 $P(data|occ(t))$ Fiabilidad de la medida en (t): 0,9 ; 0,1
 $P_{notocc(t-1)} : P_{notocc(t-1)} = 1 - P_{occ(t-1)}$
 $P(data|notocc(t)) : 0,2$

- Cálculo de todas las celdas que se interponen entre el láser y la celda que contiene a cada punto.
- Actualización del valor de ocupación de cada una de estas celdas usando Ec.2.
 - Valor de $P(data|occ(t)) = 0,1$
 - Se consideran celdas libres aquellas con un valor inferior al valor de la celda con valor mínimo más un 5%



Probabilistic Template Matching SLAM (PTM-SLAM) - Descripción del algoritmo

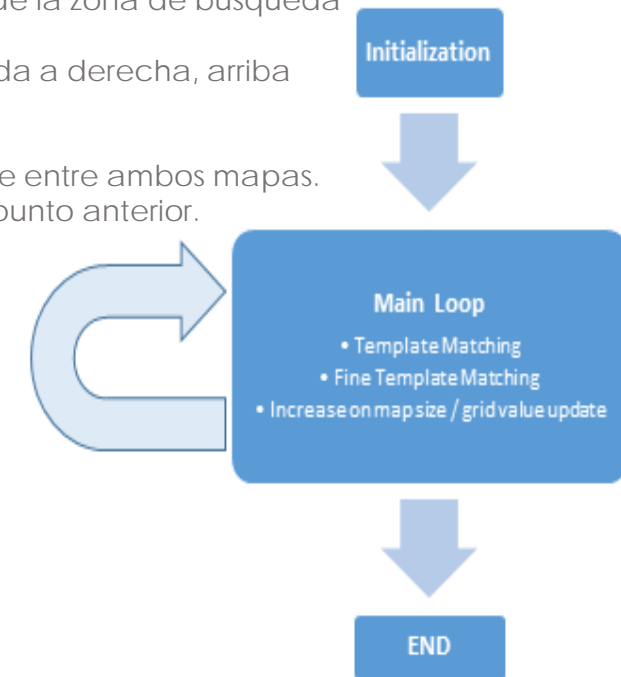
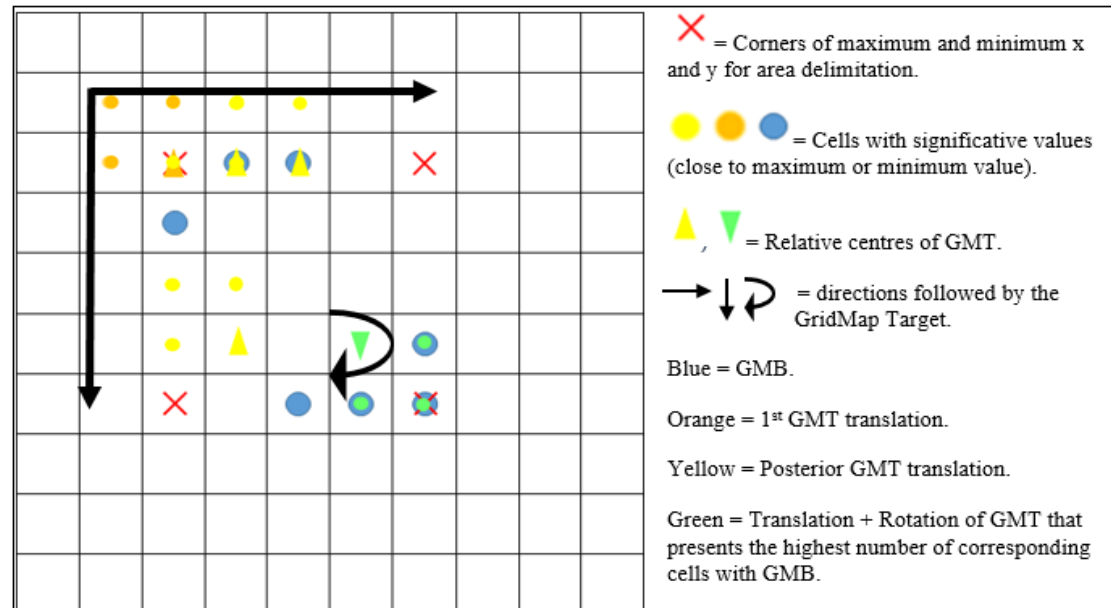
Bucle Principal (Main Loop):

- Repetición de los pasos del apartado Inicialización pero generando los mapas de celdas **GridMapTarget** y **GridMapTargetFine**.

- **Algoritmo Template Matching**

- Cálculo de la zona de búsqueda delimitada por las coordenadas extremas del último escaneo y la última posición calculada del sistema en **GridMapBase** (que es el mapa donde almacenamos los resultados).
- Posicionamiento del centro de **GridMapTarget** en la coordenada máxima superior izquierda de la zona de búsqueda sobre **GridMapBase**.
- Traslado de **GridMapTarget** por todas las celdas pertenecientes al área de búsqueda. Izquierda a derecha, arriba abajo.
- En cada nueva celda se realizan 18 rotaciones de 20°.
- En cada paso se cuantifica cuantas celdas ocupadas y libres se superponen respectivamente entre ambos mapas.
- Al terminar el proceso se almacena la transformación que obtiene un mayor resultado en el punto anterior.

1. Conceptos previos
2. Sistema Adquisición
3. PTM-SLAM
 1. **Algoritmo**
 2. Casos Estudio
 3. Parámetros
4. Conclusiones



Probabilistic Template Matching SLAM (PTM-SLAM) - Descripción del algoritmo

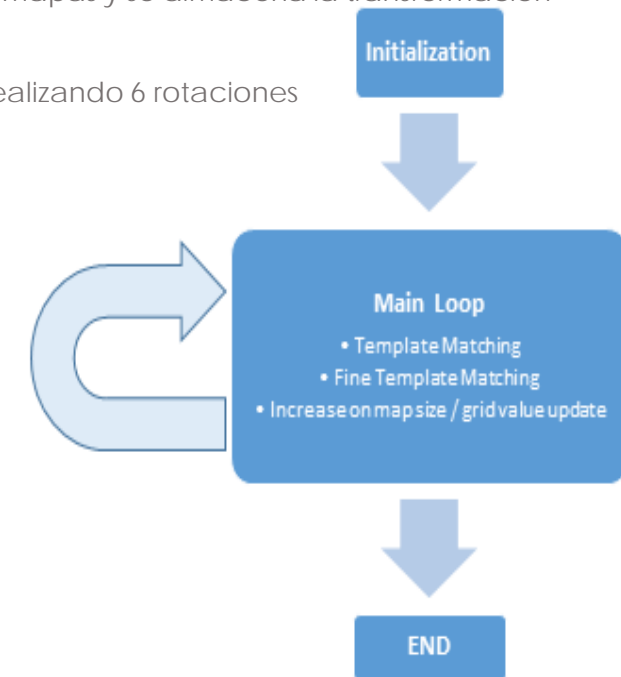
Bucle Principal (Main Loop):

- **Algoritmo Fine Template Matching**

- Se aplica la transformación almacenada en el punto anterior a **GridMapTargetFine**.
- La zona de búsqueda de **GridMapTargetFine** sobre **GridMapBaseFine** se delimita en un +-5% de los extremos del propio **GridMapTargetFine**.
- Traslado de **GridMapTargetFine** por todas las celdas pertenecientes al área de búsqueda. Izquierda a derecha, arriba abajo.
- En cada nueva celda se realizan 18 rotaciones de 2°, 9 en sentido horario y 9 anti horario, también se realizan los cálculos sin rotar.
- De forma similar a lo explicado para el algoritmo **Algoritmo Template Matching** se superponen los mapas y se almacena la transformación con un mayor número de coincidencias de celdas ocupada-ocupada libre-libre.
- Repetición de todo el proceso delimitando la zona de búsqueda a +-3% de la posición actual y realizando 6 rotaciones de 0,5° más un cálculo sin rotar en cada celda.
- Almacena el valor de esta última transformación acumulado con las 2 anteriores.

- **Algoritmo Increase on map size / grid value update**

- Se aplica el total de las transformaciones a **GridMapTarget** y **GridMapTargetFine**.
- Se superponen **GridMapTarget** y **GridMapTargetFine** con **GridMapBase** y **GridMapBaseFine**.
- Recorre **GridMapTarget** y **GridMapTargetFine**, si la celda tiene un valor distinto a 0,5 se aplica Ec.2 utilizando el valor de la celda como $P(data|occ(x))$ y actualizando la celda de **GridMapBase** o **GridMapBaseFine** correspondiente.
- Almacena la posición y orientación del sistema actual tras realizar la última transformación a la posición anterior.



1. Conceptos previos
2. Sistema Adquisición
3. PTM-SLAM
 1. **Algoritmo**
 2. Casos Estudio
 3. Parámetros
4. Conclusiones

Probabilistic Template Matching SLAM (PTM-SLAM) – Casos de estudio

Caso Estudio 1: Pasillo curvado con alto porcentaje de cristalerías, aprox. 34m.

Caso Estudio 2: Pasillo recto con alta repetitividad de características, aprox. 55m.

Caso Estudio 3: Exterior con pared a un solo lado, aprox. 80m.

Sistemas de comparación:

- Nube 2D procesada mediante Hector-SLAM. (S. Kohlbrecher, J. Meyer, T. Graber, K. Petersen, U. Klingauf, O. Von Stryk)
- Nubes 3D obtenidas con el Láser Escáner terrestre FARO Focus 3D.

1. Conceptos previos
2. Sistema Adquisición
3. PTM-SLAM
 1. Algoritmo
 2. **Casos Estudio**
 3. Parámetros
4. Conclusiones

Map resolution	0.1m-0.8m (0.5 m)
Map resolution fine	0.01m-0.08m (0.05 m)
Map size	1000-100 (200)
Map size fine	10000-1000 (2000)
Laser max dist.	20 m
Update factor free	Valor min + 3%-20% (5%)
Update factor occupied	Valor max - 3%-20% (5%)
Map multi resolution levels	2
º rotaciones	20º
º rotaciones fine	2º+0.5º

Map resolution	0.03 m
Map size	8000
Laser max dist.	20 m
Update factor free	0.4
Update factor occupied	0.7
Map multi resolution levels	3

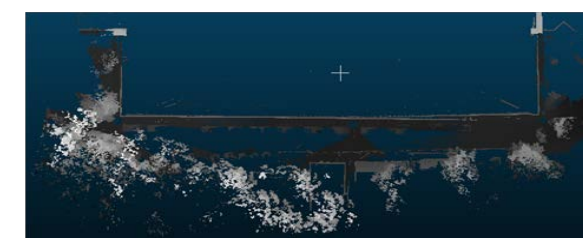
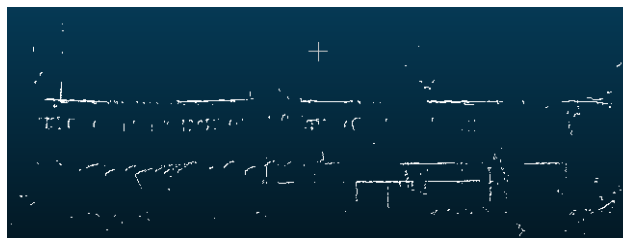
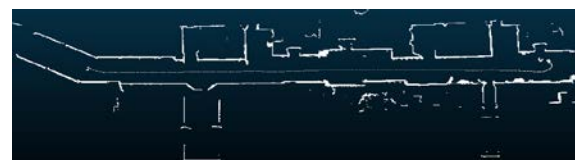
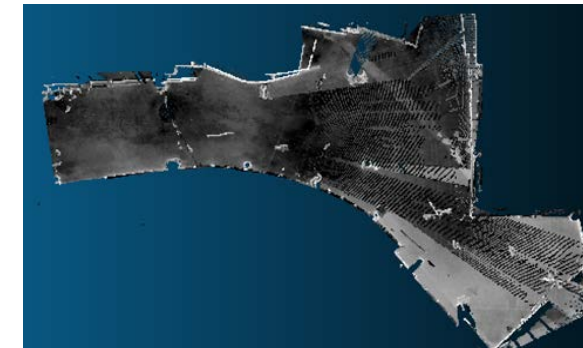
	Interiores < 10m	Exteriores < 20m	Interiores > 10m
Tamaño Escaneo	5120x2134	5120x2134	8192x3414
Millones de ptos.	10.9	10.9	28
Distancia entre Puntos a 10m (mm)	12.272	12.272	7.670
Resolución	1/8	1/8	1/5
Calidad	3x	4x	4x

Probabilistic Template Matching SLAM (PTM-SLAM) – Casos de estudio

1. Conceptos previos
2. Sistema Adquisición
3. PTM-SLAM
 1. Algoritmo
 - 2. Casos Estudio**
 3. Parámetros
4. Conclusiones

PTM-SLAM		Hector-SLAM	FARO Focus 3D		
	Nº. Scans registrados	Tiempo procesado total (s)	Tiempo procesado total (s)	Nº. Scans registrados	Tiempo total (s)*
Caso Estudio 1	10	11.53	Tiempo real	3	1500 aprox.
Caso Estudio 2	15	18.2	Tiempo real	3	1500 aprox.
Caso Estudio 3	7	7.21	Tiempo real	3	1500 aprox.

*Contabilizando tiempo de adquisición más tiempo de registros

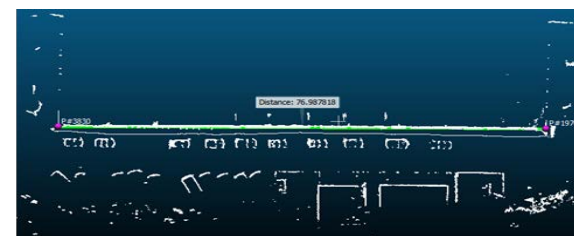
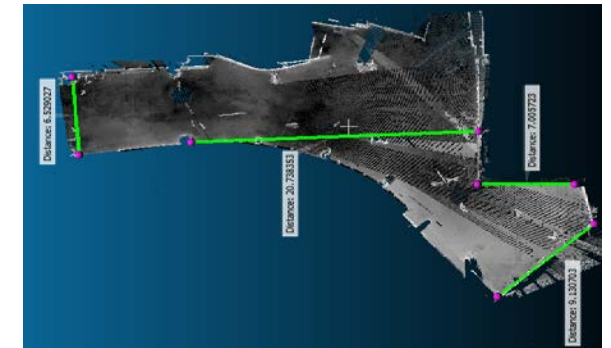
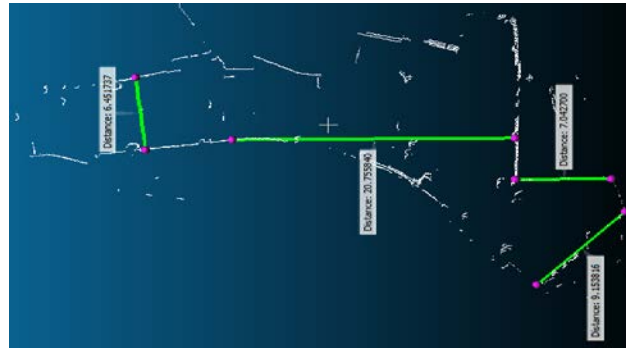


Probabilistic Template Matching SLAM (PTM-SLAM) – Casos de estudio

Medidas

1. Conceptos previos
2. Sistema Adquisición
3. PTM-SLAM
 1. Algoritmo
 2. **Casos Estudio**
 3. Parámetros
4. Conclusiones

- Caso Estudio 1: 4 mediciones, incluyen ancho y largo nube y zonas acristaladas.
- Caso Estudio 2: 7 mediciones, incluyendo ancho y largo de la nube, ventanas y accesos.
- Caso Estudio 3: 1 medición de la longitud total de la nube.



Probabilistic Template Matching SLAM (PTM-SLAM) – Casos de estudio

1. Conceptos previos
2. Sistema Adquisición
3. PTM-SLAM
 1. Algoritmo
 - 2. Casos Estudio**
 3. Parámetros
4. Conclusiones

CASE STUDY 1							
Meas.	FARO	HECTOR	PTM	$\frac{\text{ERROR HECTOR} = \text{ABS}(\text{FARO}-\text{HECTOR})}{\text{ERROR}+100/\text{FARO}}$	$\frac{\text{ERROR PTM} = \text{ABS}(\text{FARO} - \text{PTM})}{\text{ERROR}+100/\text{FARO}}$	$\frac{\text{ERROR PTM} = \text{ABS}(\text{FARO} - \text{PTM})}{\text{ERROR}+100/\text{FARO}}$	$\frac{\text{ERROR PTM} = \text{ABS}(\text{FARO} - \text{PTM})}{\text{ERROR}+100/\text{FARO}}$
Corridor width	6,53	6,51	6,45	0,02	0,31	0,08	1,23
Corridor length	20,74	20,74	20,76	0,00	0,00	0,02	0,10
Office	7,00	7,28	7,04	0,28	4,00	0,04	0,57
Hall	9,13	9,08	9,15	0,05	0,55	0,02	0,22
MEAN					1,21		0,53

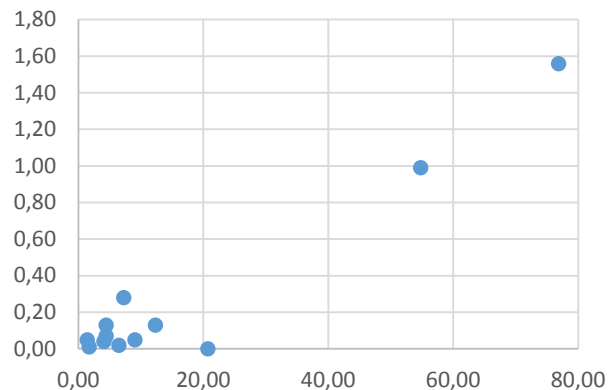
CASE STUDY 2							
Meas.	FARO	HECTOR	PTM	$\frac{\text{ERROR HECTOR} = \text{ABS}(\text{FARO}-\text{HECTOR})}{\text{ERROR}+100/\text{FARO}}$	$\frac{\text{ERROR PTM} = \text{ABS}(\text{FARO} - \text{PTM})}{\text{ERROR}+100/\text{FARO}}$	$\frac{\text{ERROR PTM} = \text{ABS}(\text{FARO} - \text{PTM})}{\text{ERROR}+100/\text{FARO}}$	$\frac{\text{ERROR PTM} = \text{ABS}(\text{FARO} - \text{PTM})}{\text{ERROR}+100/\text{FARO}}$
Corridor 1 Width	4,35	4,48	4,37	0,13	2,99	0,02	0,46
Corridor 2 Width	4,06	4,10	4,09	0,04	0,99	0,03	0,74
Corridor 4 Width	4,53	4,46	4,52	0,07	1,55	0,01	0,22
Entrance 1	1,72	1,73	1,71	0,01	0,58	0,01	0,58
Entrance 5	1,39	1,44	1,40	0,05	3,60	0,01	0,72
Room 2	12,22	12,35	12,30	0,13	1,06	0,08	0,65
Corridor 1 Length	55,79	54,80	54,73	0,99	1,77	1,06	1,90
MEAN					1,79		0,75

CASE STUDY 3							
Meas.	FARO	HECTOR	PTM	$\frac{\text{ERROR HECTOR} = \text{ABS}(\text{FARO}-\text{HECTOR})}{\text{ERROR}+100/\text{FARO}}$	$\frac{\text{ERROR PTM} = \text{ABS}(\text{FARO} - \text{PTM})}{\text{ERROR}+100/\text{FARO}}$	$\frac{\text{ERROR PTM} = \text{ABS}(\text{FARO} - \text{PTM})}{\text{ERROR}+100/\text{FARO}}$	$\frac{\text{ERROR PTM} = \text{ABS}(\text{FARO} - \text{PTM})}{\text{ERROR}+100/\text{FARO}}$
Corridor length	78,45	76,99	77,46	1,46	1,86	0,99	1,26

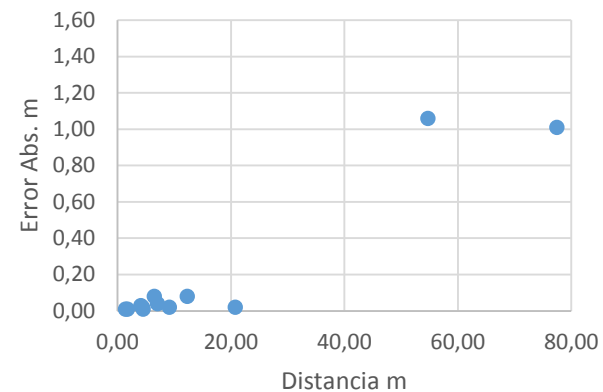
Probabilistic Template Matching SLAM (PTM-SLAM) – Casos de estudio

1. Conceptos previos
2. Sistema Adquisición
3. PTM-SLAM
 1. Algoritmo
 - 2. Casos Estudio**
 3. Parámetros
4. Conclusiones

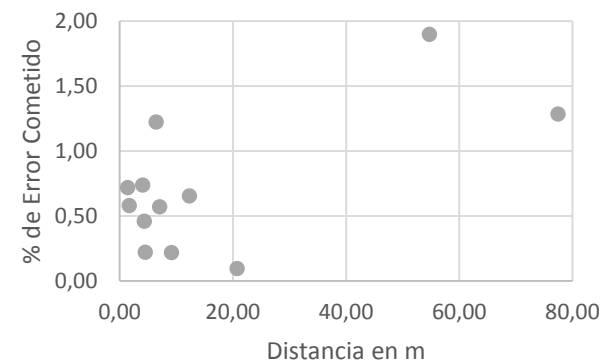
Disp. Error Abs Hector



Dispersión Error Abs PTM-SLAM



Dispersión Error % PTM-SLAM

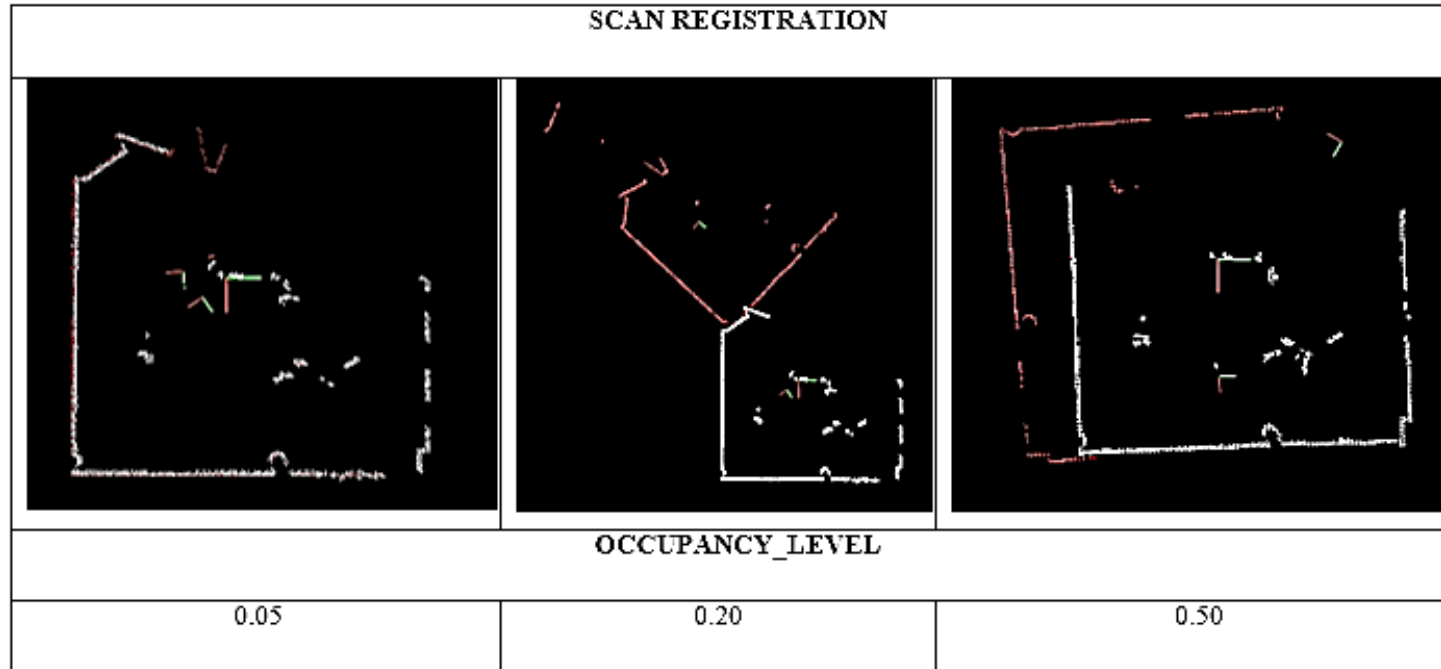


	HECTOR	PTM
Media Total	1,60 %	0,72 %
Mediana Total	1,30 %	0,62 %
Desviación Típica Total	1,31 %	0,52 %
Varianza Total	1,71 %	0,23 %

Probabilistic Template Matching SLAM (PTM-SLAM) – Selección de parámetros

Selección del nivel de ocupación

1. Conceptos previos
2. Sistema Adquisición
3. PTM-SLAM
 1. Algoritmo
 2. Casos Estudio
 - 3. Parámetros**
4. Conclusiones



```

for (j = y_min_GMB; j < y_max_GMB; j++)
    if (GMB(i,j) & GMT''(i,j) > (vMax - 0.05*vMax))
        cont++;
    elseif (GMB(i,j) & GMT''(i,j) < (vMin + 0.05*vMin))
        cont++;
    end
end
end
    
```

PseudoCódigo utilizado en los algoritmos de Template Matching

Probabilistic Template Matching SLAM (PTM-SLAM) – Selección de parámetros

Selección de la **resolución espacial**

1. Conceptos previos
2. Sistema Adquisición
3. PTM-SLAM
 1. Algoritmo
 2. Casos Estudio
 - 3. Parámetros**
4. Conclusiones

- Tamaño de mapa fijo por limitaciones de memoria y algoritmos empleados.
 - Tamaño limitado a 100m de lado ya que cubre la mayor parte de estructuras a escanear.
- Tamaño de celdas fijo.
 - Tamaño en algoritmos Template Matching: 0,5m definido por los objetos pertinentes del entorno.
 - Tamaño de algoritmos Template Matching Fine: 0,05m para procesar características de pequeño tamaño, limitado por la resolución del láser.
- Distancia máxima a recorrer = $\sqrt{100^2 + 100^2} = 141,42\text{metros}$
- Número de celdas:
 - Template Matching = $\frac{100}{0,5} = 200$
 - Template Matching Fine = $\frac{100}{0,05} = 2000$

Probabilistic Template Matching SLAM (PTM-SLAM) – Selección de parámetros

Cálculo de los **escaneos seleccionados** para el procesado.

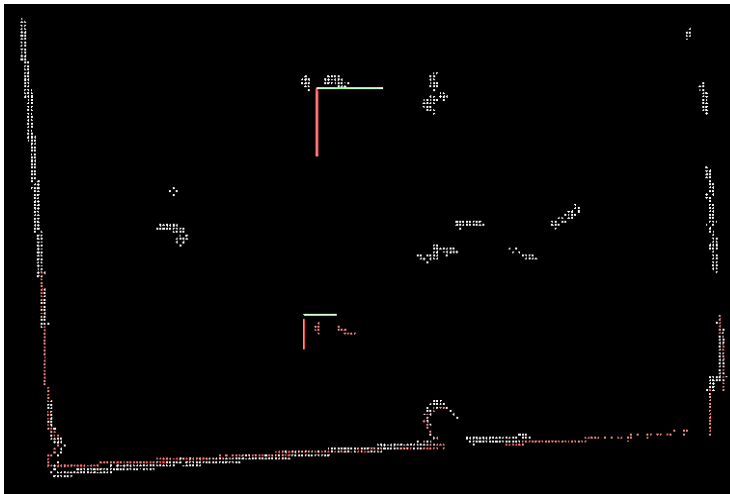
Tiempo de procesado

- Pc utilizado: Intel CORE i7-3610QM CPU @ 2.30GHz; RAM 8.00 GB
- Con una regresión de $R^2 = 0.9986$ la caracterización del tiempo / N° escaneos se considera lineal.
- El tiempo medio empleando la (Ec.3) es de 1,2171 segundos por escaneo.
- El láser trabaja a 25ms/scan, procesando todos se necesitarían $40 * 1,2171 = 48,7s$ por cada segundo empleado durante la adquisición.

$$\frac{\sum \left(\frac{\text{tiempo}_{\text{procesado}}}{\text{Scans}} \right)}{\text{No. Total Scans}} \quad (\text{Ec.3})$$

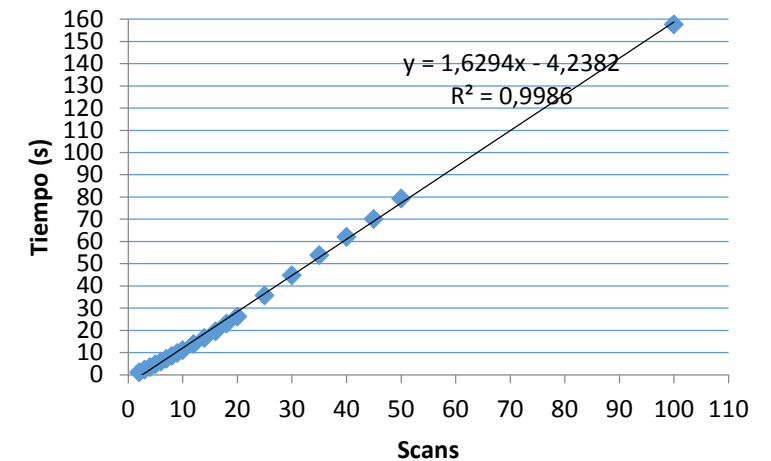
Similitud entre escaneos

- Parecido entre dos conjuntos de puntos a registrar.
- PTM-SLAM requiere una similitud mínima de 45%-55%.
- Distancia máxima entre escaneos fijada en 4,5m para cumplir similitud.
- Velocidad media operativo = 4 km/h.
- Según (Ec.4) es necesario seleccionar un escaneo cada 4,05s.



$$\frac{4.5m}{\frac{4Km}{h} * \frac{1000m}{3600s}} = \frac{4.5m}{1.111m/s} = 4.05s \quad (\text{Ec.4})$$

Progresión tiempo-escaneos procesados



1. Conceptos previos
2. Sistema Adquisición
3. PTM-SLAM
 1. Algoritmo
 2. Casos Estudio
 - 3. Parámetros**
4. Conclusiones

Probabilistic Template Matching SLAM (PTM-SLAM) – Conclusiones

- Presentado sistema de adquisición junto con nuevo método de SLAM denominado PTM-SLAM.
- Uso de algoritmos Template Matching empleando datos LiDAR con técnicas de SLAM.
- Metodología validada mediante 3 casos de estudio y comparada con otros 2 métodos.
- **PTM-SLAM crea mapas 2D y posiciona el sistema en los mismos con un error menor al 1%.**
- **PTM-SLAM trabaja con escaneos de baja similitud entre ellos.**

Mejoras:

- Reducción de tiempo de procesado empleando técnicas de filtrado de puntos.
- Simplificación del método de selección de los escaneos automatizando el proceso.
- Uso del algoritmo en otros tipos de sistemas como vehículos o mochilas junto con otros sensores.

1. Conceptos previos
2. Sistema Adquisición
3. PTM-SLAM
 1. Algoritmo
 2. Casos Estudio
 3. Parámetros
4. **Conclusiones**

Desarrollo de sistema móvil para la generación de nubes de puntos basado en técnicas **SLAM**

Gracias por su atención

Alexandre Filgueira Lago

Universidad de Vigo

Directores: Pedro Arias Sánchez (Universidad de Vigo)

Susana Lagüela López (Universidad de Salamanca)

