

Estudio del estado del arte del SLAM e implementación de una plataforma flexible

Tesis de Grado

M. Llofriu F. Andrade

Instituto de Computación
Facultad de Ingeniería
Universidad de la República

Tutores: Msc. Ing. Gonzalo Tejera y Facundo Benavides

Presentación

- Los objetivos del proyecto fueron
 - Estudiar el estado del arte del SLAM
 - Generar una plataforma flexible
- Objetivos adicionales
 - Resolver un problema particular que ponga a prueba al sistema
 - Se decidió resolver el problema del cubrimiento completo de un entorno (se explica más adelante)



Índice

- 1 **Presentación del SLAM**
 - Descripción del problema
 - Dificultades del SLAM
- 2 **Principales técnicas y enfoques**
 - Enfoques
 - Probabilísticos
- 3 **Solución Implementada**
 - Sistema de SLAM
 - Problema a resolver
 - Desarrollo de la solución
 - Parametrización y calibración del sistema
- 4 **Experimentos**
 - Pruebas de cubrimiento
 - Pruebas del mapa generado
- 5 **Resultados**
 - Conclusiones



Índice

- 1 **Presentación del SLAM**
 - Descripción del problema
 - Dificultades del SLAM
- 2 Principales técnicas y enfoques
 - Enfoques
 - Probabilísticos
- 3 Solución Implementada
 - Sistema de SLAM
 - Problema a resolver
 - Desarrollo de la solución
 - Parametrización y calibración del sistema
- 4 Experimentos
 - Pruebas de cubrimiento
 - Pruebas del mapa generado
- 5 Resultados
 - Conclusiones



Introducción

- SLAM: Localización y Armado de Mapas en Simultáneo
- Resolver el problema de
 - *¿Dónde estoy?*
 - *¿Dónde estuve?*
- **Entrada:** Información sensada y noción del movimiento propio
- **Salida:** Una estimación del mapa del entorno y la ubicación del robot en este



Motivación

- Necesidad de robots autónomos
 - Navegar en terrenos desconocidos o inaccesibles
 - Realizar tareas en entornos dinámicos
- Algunos problemas que motivan a los investigadores
 - Exploración espacial
 - Rescate en zonas afectadas por catástrofes
 - Tareas domésticas
 - Automóviles autónomos
 - Tareas agropecuarias
- Problema abierto



Índice

- 1 **Presentación del SLAM**
 - Descripción del problema
 - **Dificultades del SLAM**
- 2 Principales técnicas y enfoques
 - Enfoques
 - Probabilísticos
- 3 Solución Implementada
 - Sistema de SLAM
 - Problema a resolver
 - Desarrollo de la solución
 - Parametrización y calibración del sistema
- 4 Experimentos
 - Pruebas de cubrimiento
 - Pruebas del mapa generado
- 5 Resultados
 - Conclusiones



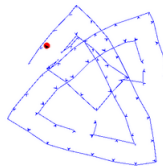
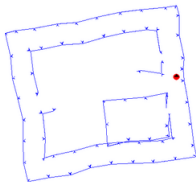
Dificultades

- Sensores
 - Externos (entorno) e internos (odometría)
 - Percepción limitada
 - rango
 - resolución
 - Sensibles a ruido estocástico
 - Sujetos a limitaciones físicas (ej: cámara)
- Movimiento del robot
 - El movimiento efectivo del robot suele diferir del esperado



Dificultades

- Cerrado de ciclos
 - Se debe reconocer un lugar en el cual ya se estuvo antes
 - Diferenciar lugares con propiedades similares



- Manejo de la incertidumbre
- Capacidad de cómputo
 - Gran limitación en el procesamiento de datos
 - Cantidad de información creciente (memoria)
 - El mantenimiento del mapa y la estimación de la posición



Índice

- 1 **Presentación del SLAM**
 - Descripción del problema
 - Dificultades del SLAM
- 2 **Principales técnicas y enfoques**
 - **Enfoques**
 - Probabilísticos
- 3 **Solución Implementada**
 - Sistema de SLAM
 - Problema a resolver
 - Desarrollo de la solución
 - Parametrización y calibración del sistema
- 4 **Experimentos**
 - Pruebas de cubrimiento
 - Pruebas del mapa generado
- 5 **Resultados**
 - Conclusiones



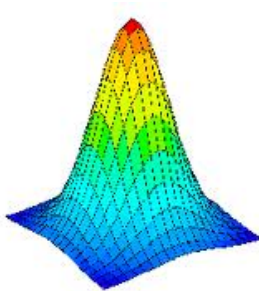
Enfoques

- **Bioinspirados:** buscan resolver el problema de la misma forma que los mamíferos.



Enfoques

- **Probabilísticos:** representan el mapa y la posición como una distribución de probabilidad a estimar.



Índice

- 1 **Presentación del SLAM**
 - Descripción del problema
 - Dificultades del SLAM
- 2 **Principales técnicas y enfoques**
 - Enfoques
 - **Probabilísticos**
- 3 **Solución Implementada**
 - Sistema de SLAM
 - Problema a resolver
 - Desarrollo de la solución
 - Parametrización y calibración del sistema
- 4 **Experimentos**
 - Pruebas de cubrimiento
 - Pruebas del mapa generado
- 5 **Resultados**
 - Conclusiones



Introducción

Se toma la ubicación y mapa como una variable (vectorial) $x_{1:t}$

0	0	0
0.1	0.8	0.1
0	0	0

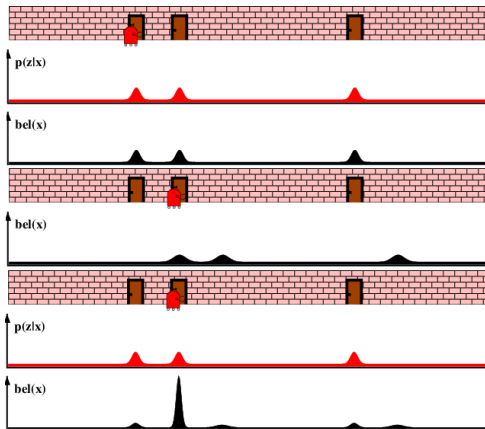
Se estima utilizando:

- La información de movimiento propio $u_{1:t}$
- La información sensada $z_{1:t}$

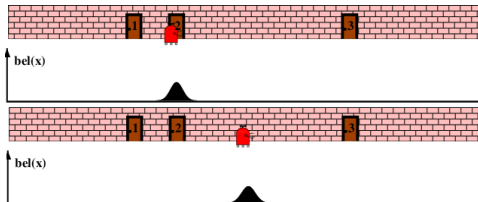
$$p(x_{1:t} | u_{1:t}, z_{1:t})$$



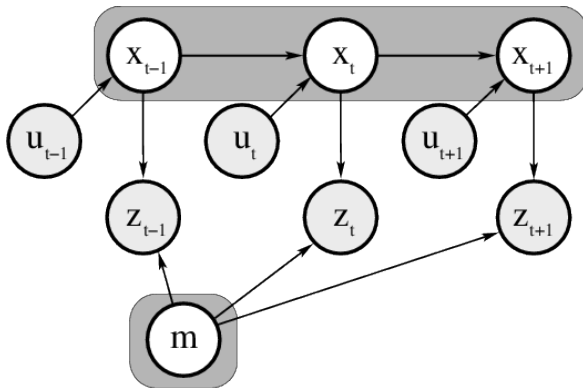
Introducción



Introducción



Red Bayesiana



Filtros de Bayes

Buscan estimar esta evolución con dos ecuaciones recursivas
Pero primero... notación

$$\overline{bel}(x_{1:t}) = p(x_{1:t} | z_{1:t-1}, u_{1:t})$$

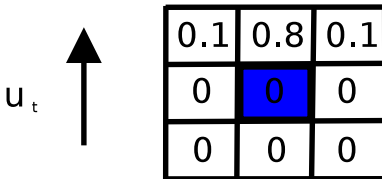
$$bel(x_{1:t}) = p(x_{1:t} | z_{1:t}, u_{1:t})$$



Filtros de Bayes

Modelo de movimiento

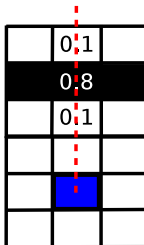
$$p(x_t | u_t, x_{t-1})$$



Filtros de Bayes

Modelo de sensado

$$p(z_t | x_t)$$



Filtros de Bayes

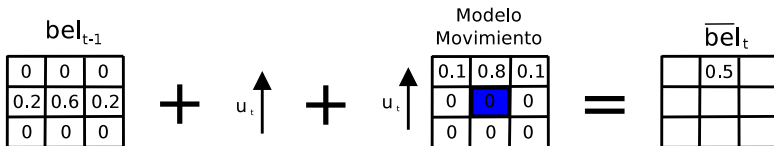
$$\overline{bel}(x_t) = \int p(x_t | u_t, x_{t-1}) \cdot bel(x_{t-1}) dx_{t-1}$$

$$bel(x_t) = \eta p(z_t | x_t) \overline{bel}(x_t)$$



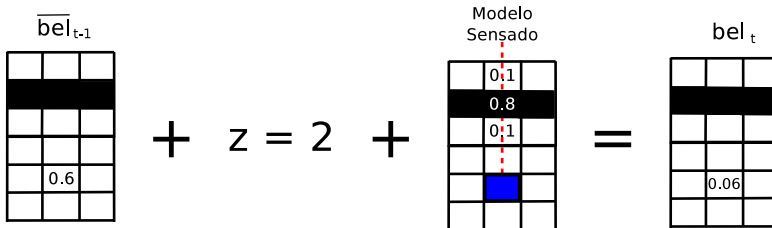
Filtros de Bayes

$$\overline{bel}(x_t) = \int p(x_t | u_t, x_{t-1}) \cdot bel(x_{t-1}) dx_{t-1}$$



Filtros de Bayes

$$bel(x_t) = \eta p(z_t|x_t)\overline{bel}(x_t)$$



Principales técnicas

- Filtros de Kalman
- Filtros de Partículas
- Optimización sobre grafos

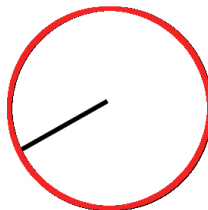
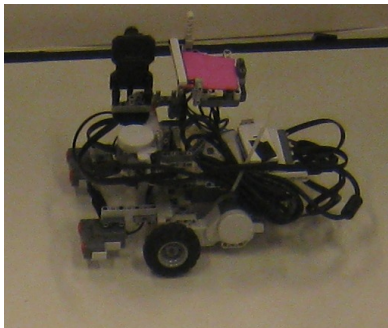


Kalman

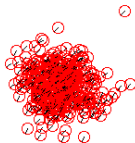
- Todas las distribuciones son gaussianas
- Los modelos son lineales
- Manipulación de parámetros
- Principal contra
 - Unimodales



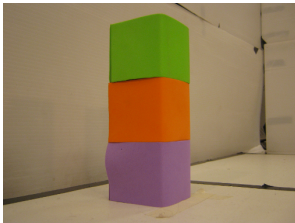
Partículas



Partículas



Partículas



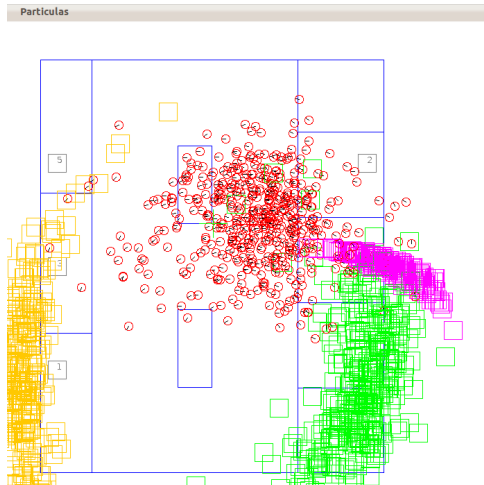
Partículas

Ejemplo localización

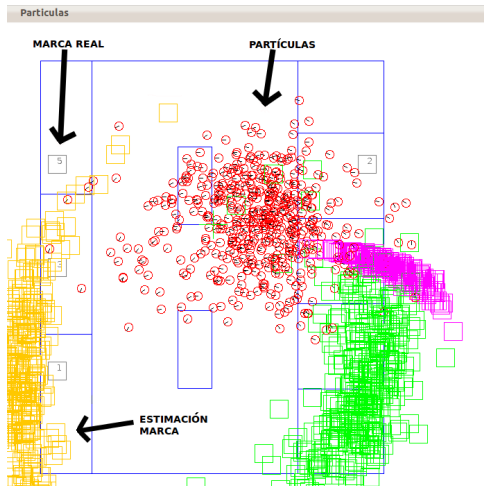
Video...



Partículas



Partículas



Índice

- 1 **Presentación del SLAM**
 - Descripción del problema
 - Dificultades del SLAM
- 2 **Principales técnicas y enfoques**
 - Enfoques
 - Probabilísticos
- 3 **Solución Implementada**
 - **Sistema de SLAM**
 - Problema a resolver
 - Desarrollo de la solución
 - Parametrización y calibración del sistema
- 4 **Experimentos**
 - Pruebas de cubrimiento
 - Pruebas del mapa generado
- 5 **Resultados**
 - Conclusiones



Presentación

Las principales componentes del software son:

- Modelo de Sensado
- Modelo de Movimiento
- Núcleo del SLAM

Otros aspectos importantes

- Arquitectura



Modelo de Sensado

- Utiliza la estimación de la distancia y el ángulo relativo a una marca observada
- Calcula la probabilidad de sensado como una gaussiana centrada en la marca
- Se implementó una variación con convoluciones



Modelo de Movimiento

- Contempla dos fuentes de ruido
 - Ruido gaussiano relacionado al desplazamiento lineal
 - Ruido gaussiano relacionado a la rotación
- La dispersión de las partículas es proporcional al valor de cada parámetro
- Este modelo refleja el error real cometido por el robot en sus movimientos



Núcleo del SLAM

Compuesto por dos componentes principales

- Sistema de Partículas
 - Proceso de Update / Resampling
- Mapa y Filtros de Kalman



Núcleo del SLAM

Sistema de Partículas

- Encapsula las siguientes funcionalidades
 - Actualización basado en la observación (update)
 - Estimación del movimiento (predict)
- Cada partícula mantiene
 - Un estimado de su posición utilizando tres coordenadas (x, y, θ)
 - 6 Filtros de Kalman que son estimadores de cada una de las marcas existentes



Núcleo del SLAM

Proceso de Update / Resampling

- Realiza resampling selectivo
 - Introduce un parámetro al sistema (parámetro de resampling)
- Optimizado para consumir poca memoria



Núcleo del SLAM

Mapa y Filtros de Kalman

- Se mantiene un Mapa del entorno formado por seis marcas
- Cada marca es un Filtro de Kalman modelado de la siguiente manera
 - Un vector con la posición (x,y) de la marca
 - Una matriz de covarianza asociada al error de la estimación en la posición de la marca



Arquitectura

Características

- Plataforma flexible con módulos intercambiables
 - Interacción a través de interfaces
- Ejecución embebida en el robot
 - El sistema implementado se ejecuta completamente en el robot
- Desacoplamiento
 - El sistema de SLAM no interfiere con la navegación del robot



Arquitectura

Características

- Depuración
 - Comunicación de los comandos y determinadas variables del robot a la PC que permita la reproducción de experimentos de forma de analizar las corridas del robot
- Facilitar la investigación
 - Parametrización del sistema que permita simplificar los proceso de optimización



Índice

- 1 **Presentación del SLAM**
 - Descripción del problema
 - Dificultades del SLAM
- 2 **Principales técnicas y enfoques**
 - Enfoques
 - Probabilísticos
- 3 **Solución Implementada**
 - Sistema de SLAM
 - **Problema a resolver**
 - Desarrollo de la solución
 - Parametrización y calibración del sistema
- 4 **Experimentos**
 - Pruebas de cubrimiento
 - Pruebas del mapa generado
- 5 **Resultados**
 - Conclusiones



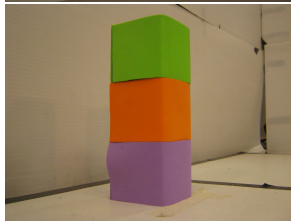
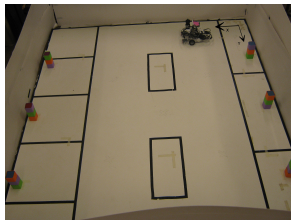
Descripción

Se busca solucionar el problema general de encontrar objetos que están distribuidos en el entorno en forma aleatoria y que pueden ser sensados únicamente a corta distancia.



Entorno, Marcas e Iluminación

- Entorno
 - Rectangular
 - Cerrado
 - 2.0m. x 2.4m.
- Marcas
 - Columnas de tres colores
 - Goma eva
 - Distintas permutaciones generan marcas diferentes
- Iluminación
 - Combinación de luz fluorescente con luz infrarroja



Índice

- 1 **Presentación del SLAM**
 - Descripción del problema
 - Dificultades del SLAM
- 2 **Principales técnicas y enfoques**
 - Enfoques
 - Probabilísticos
- 3 **Solución Implementada**
 - Sistema de SLAM
 - Problema a resolver
 - **Desarrollo de la solución**
 - Parametrización y calibración del sistema
- 4 **Experimentos**
 - Pruebas de cubrimiento
 - Pruebas del mapa generado
- 5 **Resultados**
 - Conclusiones



Introducción

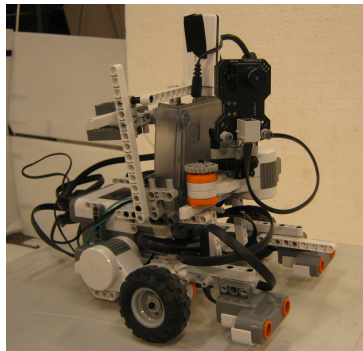
- La solución se compone de tres partes
 - Software
 - Hardware
 - Mecánica

Nos enfocamos principalmente en el Software, en particular en el algoritmo del SLAM



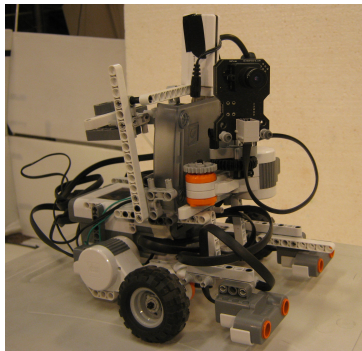
Mecánica

- Robot móvil
- Forma de carrito
- Tracción en el eje
(independiente en cada rueda)
- Rueda loca como apoyo
- Construcción a partir del kit
LEGO NXT V2.0



Hardware

- Ladrillo LEGO NTX V2.0
- Placa Computadora Fox Board
- 2 sensores de Ultrasonido
 - Utilizados para evitar obstáculos
- 1 Cámara
 - Ubicada sobre un motor, de forma de tener un mayor ángulo de visión
- 3 motores del kit LEGO NTX
 - Dos para movilidad



Uso del SLAM

Información de sensado

- Compuesto por dos capas bien diferenciadas
 - Detección de las marcas
 - Necesario debido al ruido de la cámara utilizada
 - Se busca disminuir los falsos positivos y los falsos negativos
 - Estimación de la ubicación de las marcas
 - La distancia se estima mediante modelos polinómicos
 - Se utiliza la coordenada y del píxel más bajo
 - Para el ángulo se utiliza la coordenada x del centro de la marca



Uso del SLAM

Información de movimiento

- Se realizó una integración con la API de LeJOS
- Reportes asincrónicos de los movimientos realizados



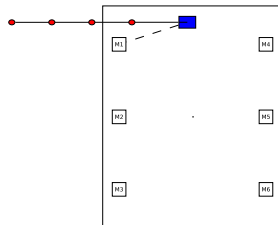
Algoritmo de recorrida

- Algoritmo en alto nivel que busca realizar una recorrida completa del escenario (sin conocer sus dimensiones)
- Basado en comportamientos que compiten entre sí
- Modelo del mundo compartido
- Recorre el entorno formando “S”



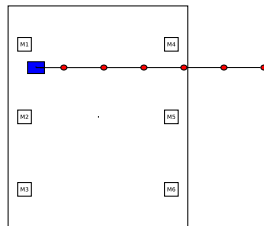
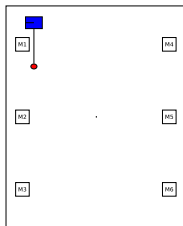
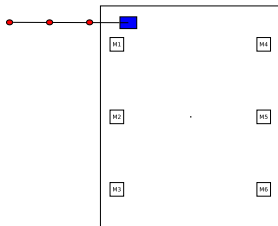
Tesis de Grado

SLAM



Algoritmo de recorrida

Ejemplo



Índice

- 1 **Presentación del SLAM**
 - Descripción del problema
 - Dificultades del SLAM
- 2 **Principales técnicas y enfoques**
 - Enfoques
 - Probabilísticos
- 3 **Solución Implementada**
 - Sistema de SLAM
 - Problema a resolver
 - Desarrollo de la solución
 - **Parametrización y calibración del sistema**
- 4 **Experimentos**
 - Pruebas de cubrimiento
 - Pruebas del mapa generado
- 5 **Resultados**
 - Conclusiones



Parametrización

Parámetros Principales del Sistema

- Modelo de movimiento
 - Reflejan errores cometidos por el robot al desplazarse
 - Se utilizan dos parámetros
 - Error en el desplazamiento
 - Error en el giro
- Modelo de sensado
 - Refleja la confianza en la estimación de la marca sensada
 - Se utiliza un solo parámetro
- Resampling
 - Permite al sistema hace resampling cuando realmente eso aporta información al mismo
 - Se utiliza un sólo parámetro



Calibración usando Algoritmos Genéticos

- Conjuntos de datos de SLAM pre-grabados
- Individuos:

Despl. Lineal	Despl. Angular	M. de Sensado	Resampling
---------------	----------------	---------------	------------

- Fitness: error cometido en la estimación de la posición en los conjuntos de datos
- Calibración del genético
- Ejecución del genético
- Utilización del cluster de Fing



Calibración usando Algoritmos Genéticos

Resultados

- Calibración no intuitiva de SLAM
- Error promedio en la estimación de aprox. 20 cm. en testing
- Calibraciones diferentes con similares errores cometidos - trabajos futuros



Índice

- 1 **Presentación del SLAM**
 - Descripción del problema
 - Dificultades del SLAM
- 2 **Principales técnicas y enfoques**
 - Enfoques
 - Probabilísticos
- 3 **Solución Implementada**
 - Sistema de SLAM
 - Problema a resolver
 - Desarrollo de la solución
 - Parametrización y calibración del sistema
- 4 **Experimentos**
 - **Pruebas de cubrimiento**
 - Pruebas del mapa generado
- 5 **Resultados**
 - Conclusiones



Preparación

- Se implementó un sistema que integra la información de odometría para poder comparar el sistema de SLAM implementado
- Se utilizó el sistema de visión global Doraemon para tener una referencia real de la posición del robot
- Ambos sistemas realizaron la misma recorrida



Metodología

- Se eligió un punto de partida fijo
- Se realizaron ejecuciones con cada sistema
 - 5 ejecuciones de 20 minutos
 - 5 ejecuciones de 100 minutos
- Terminación de las pruebas
 - Tiempo de ejecución
 - Abandono del escenario



Metodología

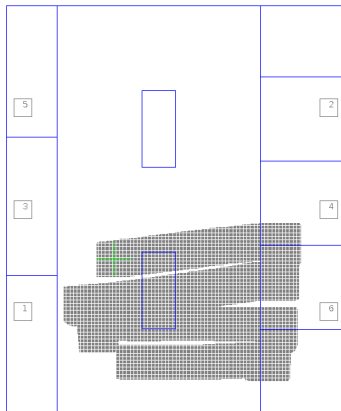
Medida del cubrimiento

- Se toma al escenario como una grilla con precisión de medio centímetro
- Cubrimos las celdas próximas a la posición brindada por Doraemon

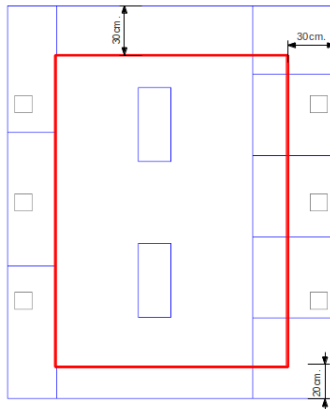


Métricas de rendimiento

Partículas



- Cubrimiento útil
 - Zona interior del entorno
- Cubrimiento inútil
 - Zona fuera del entorno
- Cubrimiento útil total
 - Casillas visitadas dentro de la zona útil, incluye repetidas



Resultados

Pruebas de 20 minutos

Métrica	Odometría		SLAM	
	Media	Var	Media	Var
Cubrimiento Útil	92,24 %	3,23 %	86,82 %	2,23 %
Cubrimiento Inútil	14,50 %	3,28 %	4,64 %	1,74 %
Cubrimiento Útil Total	2035,92 %	935,82 %	1788,30 %	46,11 %
Ejecuciones con error	4/5	-	0/5	-

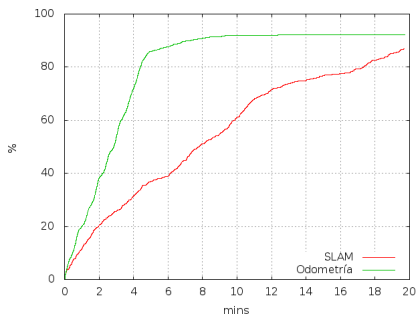


Evolución del cubrimiento

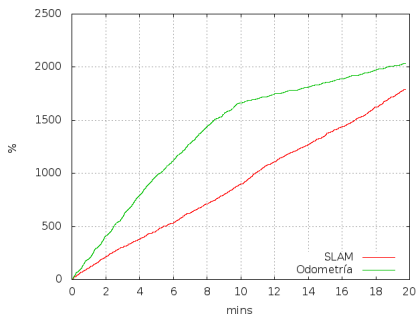
Pruebas de 20 minutos

- Evolución del cubrimiento útil

Cubrimiento útil

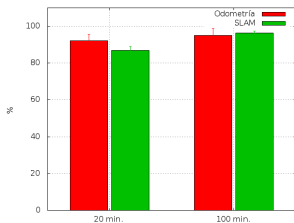


Cubrimiento útil total

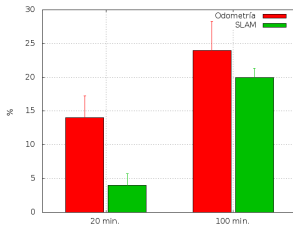


Comparación de resultados

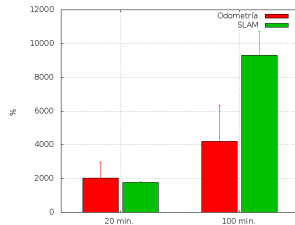
20 minutos vs. 100 minutos



Cubrimiento útil



Cubrimiento inútil



Cubrimiento útil total

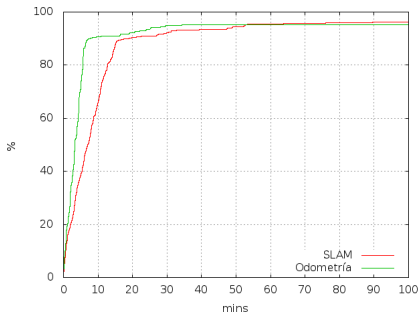


Evolución del Cubrimiento

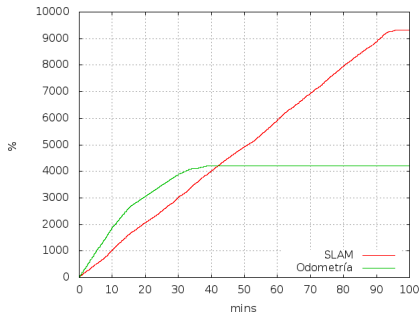
Pruebas de 100 minutos

- Evolución del cubrimiento útil

Cubrimiento útil



Cubrimiento útil total



Conclusiones pruebas

- Pruebas de 20 minutos
 - Odometría es más eficiente
 - SLAM tiene retrasos debido al tiempo necesario para estabilizar la cámara
 - La corrección del error del SLAM permite mantener al robot en la zona útil
 - El SLAM presenta mayor robustez debido a la corrección
- Pruebas de 100 minutos
 - SLAM demostró mayor eficacia, precisión y robustez frente a odometría



Índice

- 1 **Presentación del SLAM**
 - Descripción del problema
 - Dificultades del SLAM
- 2 **Principales técnicas y enfoques**
 - Enfoques
 - Probabilísticos
- 3 **Solución Implementada**
 - Sistema de SLAM
 - Problema a resolver
 - Desarrollo de la solución
 - Parametrización y calibración del sistema
- 4 **Experimentos**
 - Pruebas de cubrimiento
 - Pruebas del mapa generado
- 5 **Resultados**
 - Conclusiones



Índice

- 1 **Presentación del SLAM**
 - Descripción del problema
 - Dificultades del SLAM
- 2 **Principales técnicas y enfoques**
 - Enfoques
 - Probabilísticos
- 3 **Solución Implementada**
 - Sistema de SLAM
 - Problema a resolver
 - Desarrollo de la solución
 - Parametrización y calibración del sistema
- 4 **Experimentos**
 - Pruebas de cubrimiento
 - Pruebas del mapa generado
- 5 **Resultados**
 - Conclusiones



Conclusiones

- Efectivo desarrollo de un sistema robótico autónomo que realiza SLAM
 - Filtro de partículas + Kalman (FastSlam)
 - Basado en marcas
 - Parametrizado
 - Depurable
 - OnBoard
- Se resuelve el problema de cubrimiento en un entorno controlado
- Plataforma flexible con componentes bien definidas
 - Modelo de sensado
 - Modelo de movimiento
 - Núcleo del SLAM



Conclusiones

- Calibración con Algoritmos Evolutivos
- Contribución a la plataforma de LeJOS (pendiente de publicar)
- Aportes sin precedentes relevados
 - Modelo de sensado con convolución
 - Detección de marcas usando modelos bayesianos
- Interiorización de conocimientos del SLAM



Trabajos futuros

- Rigidez del mapa final
- Modelo de sensado y cámara
- Pruebas Adicionales
- Algoritmo evolutivo
- Llevar sistema a mayor escala
- Probar el rendimiento del modelo con convolución
- Integración con otros proyectos de grado: VisRob2, Salimoo



Demo

Demo



Gracias

¿Preguntas?

