

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



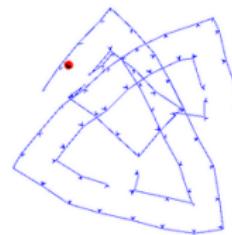
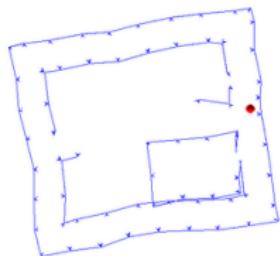
Dificultades

- 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



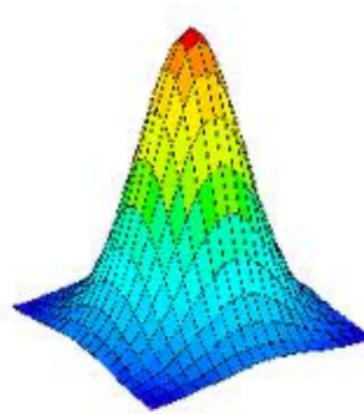
Enfoques

- **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

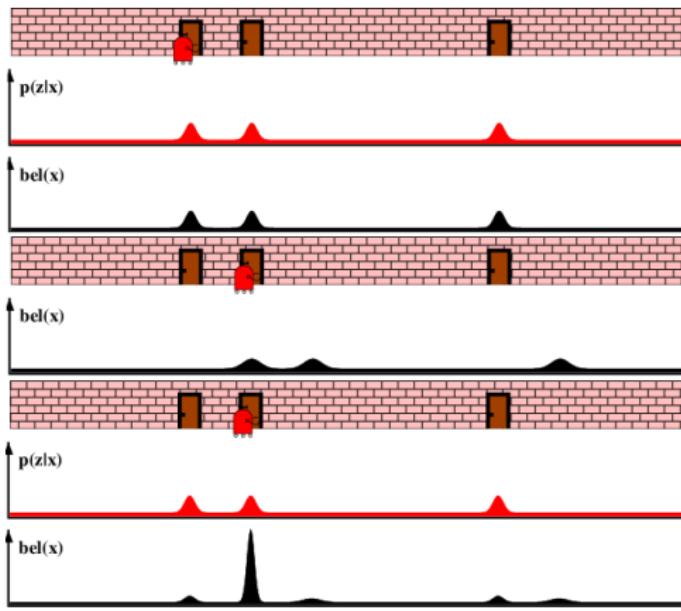
Se estima utilizando:

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

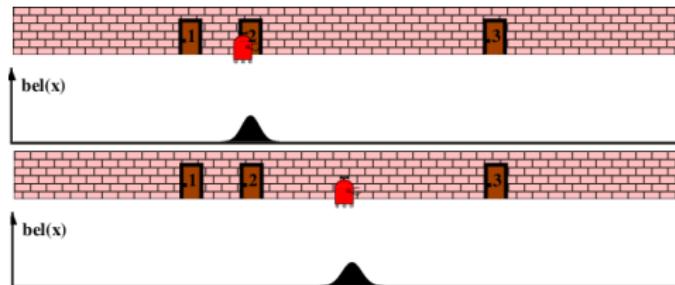
$$p(x_{1:t} | u_{1:t}, z_{1:t})$$



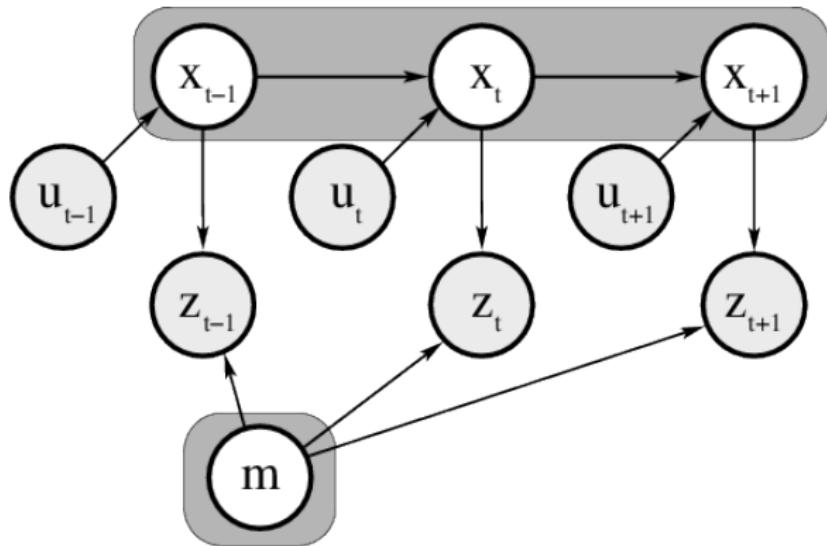
Introducción



Introducción



Red Bayesiana



Filtros de Bayes

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

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

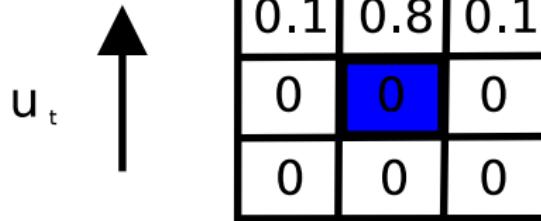
$$bel(x_{1:t}) = p(x_{1:t} | z_{1:t}, u_{1:t})$$



Filtros de Bayes

Modelo de movimiento

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



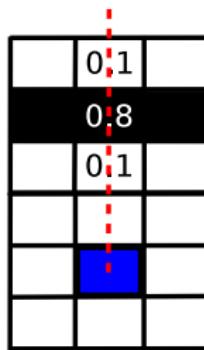
u_t



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

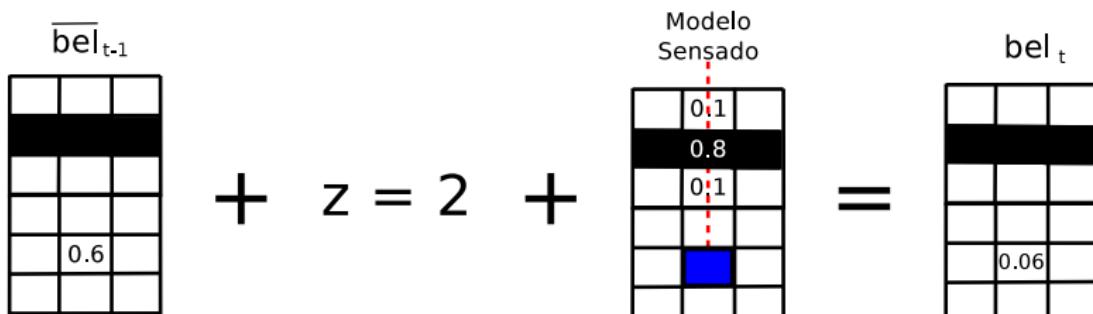
$$\overline{bel}(x_t) = \int p(x_t | u_t, x_{t-1}) \cdot bel(x_{t-1}) dx_{t-1}$$

$$\begin{matrix} bel_{t-1} \\ \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 0.2 & 0.6 & 0.2 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \end{matrix} + \begin{matrix} u_t \uparrow \\ + \end{matrix} + \begin{matrix} u_t \uparrow \\ + \end{matrix} \begin{matrix} \text{Modelo} \\ \text{Movimiento} \\ \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0.1 & 0.8 & 0.1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \end{matrix} = \begin{matrix} \overline{bel}_t \\ \begin{array}{|c|c|c|} \hline & 0.5 & \\ \hline & & \\ \hline & & \\ \hline \end{array} \end{matrix}$$



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

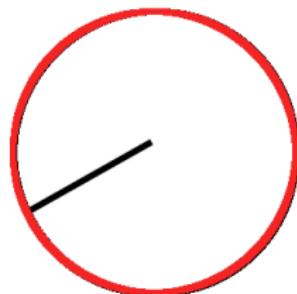
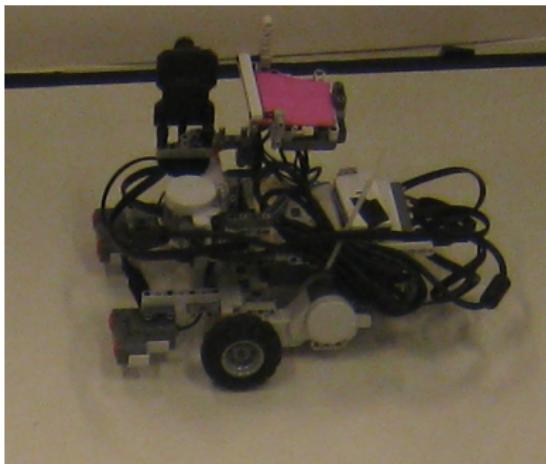


Kalman

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



Partículas



Presentación del trabajo
Presentación del SLAM
Principales técnicas y enfoques
Solución Implementada
Experimentos
Resultados
Finalmente

Enfoques
Probabilísticos

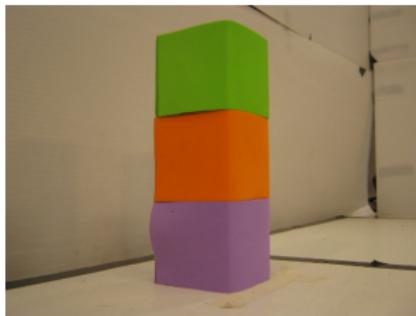
Partículas



Presentación del trabajo
Presentación del SLAM
Principales técnicas y enfoques
Solución Implementada
Experimentos
Resultados
Finalmente

Enfoques
Probabilísticos

Partículas



Presentación del trabajo
Presentación del SLAM
Principales técnicas y enfoques
Solución Implementada
Experimentos
Resultados
Finalmente

Enfoques
Probabilísticos

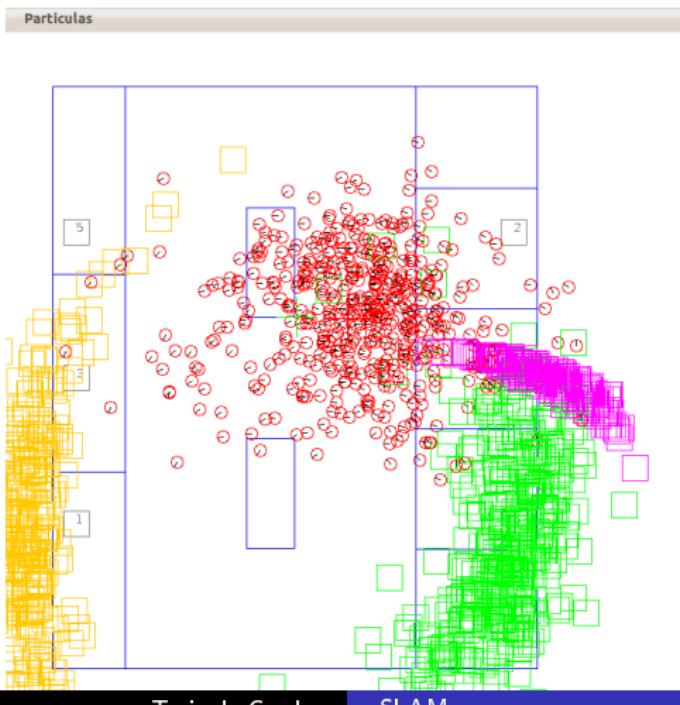
Partículas

Ejemplo localización

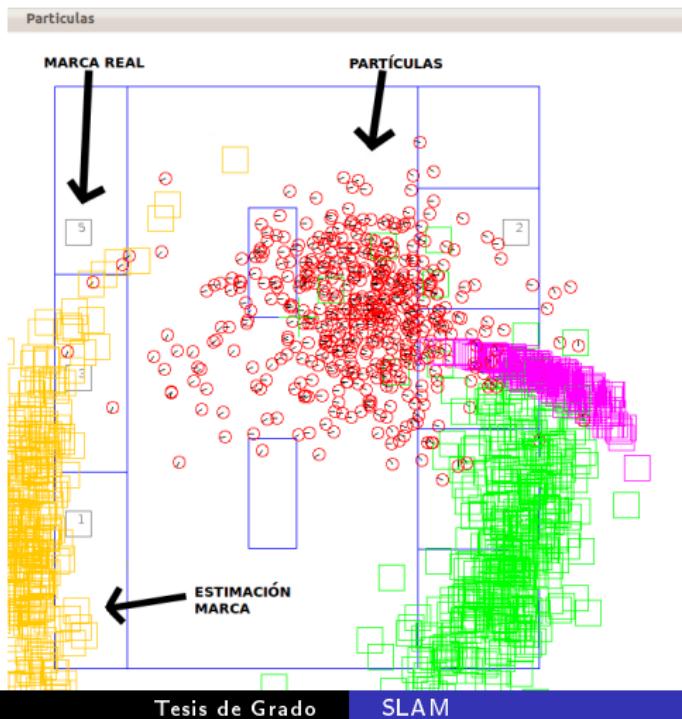
Video...



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

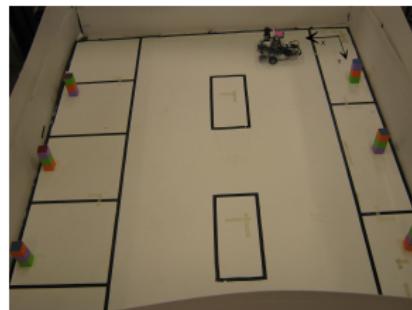
- Rectangular
- Cerrado
- 2.0m. x 2.4m.

- 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

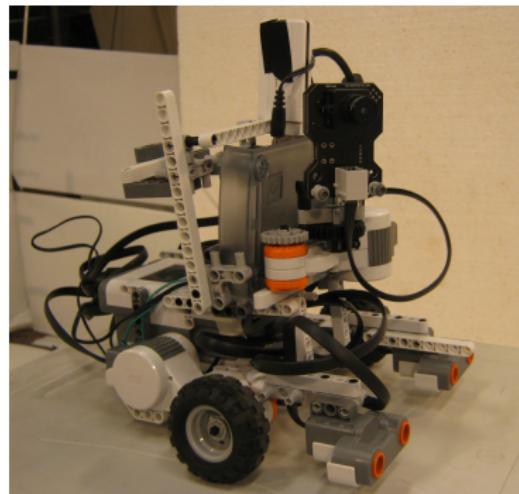
- La solución se compone de tres partes
 - Software
 - Hardware
 - Mecánica

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



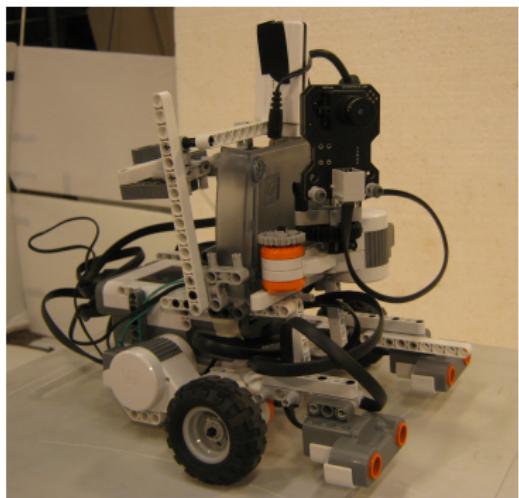
Mecánica

- 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



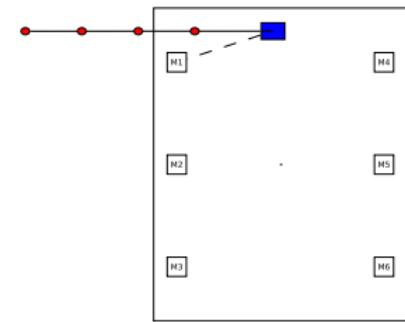
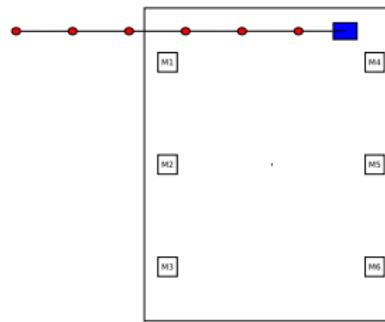
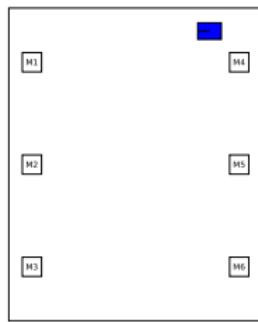
Algoritmo de recorrida

- 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”



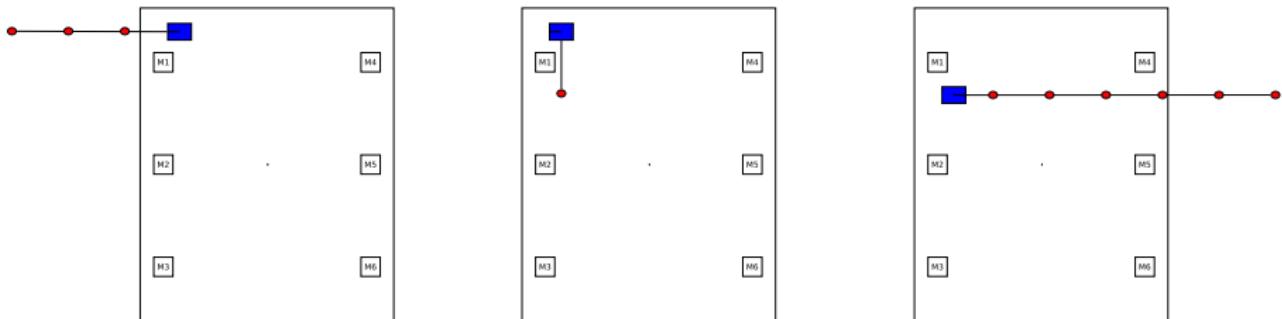
Algoritmo de recorrida

Ejemplo



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

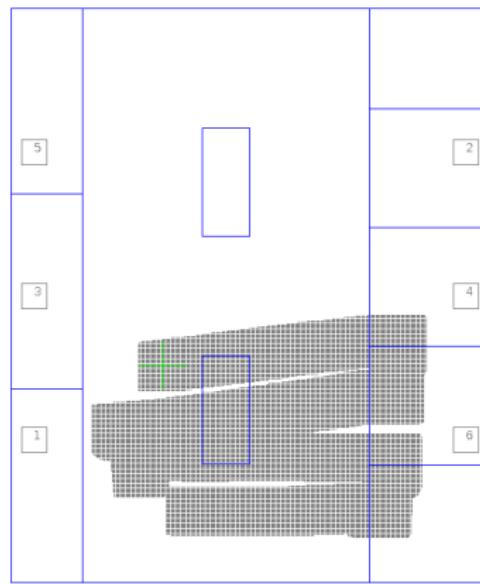
Medida del cubrimiento

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



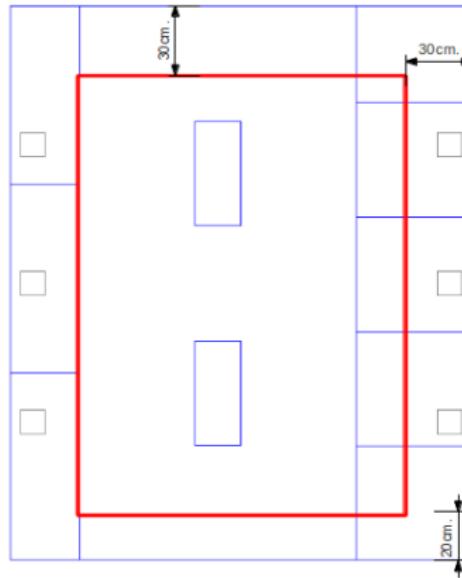
Métricas de rendimiento

Partículas



Métricas de rendimiento

- 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

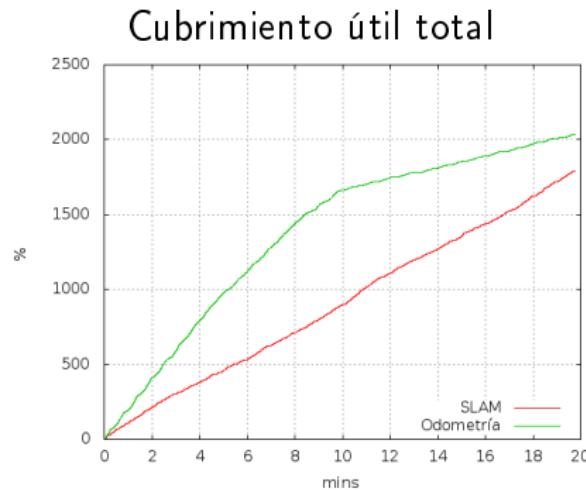
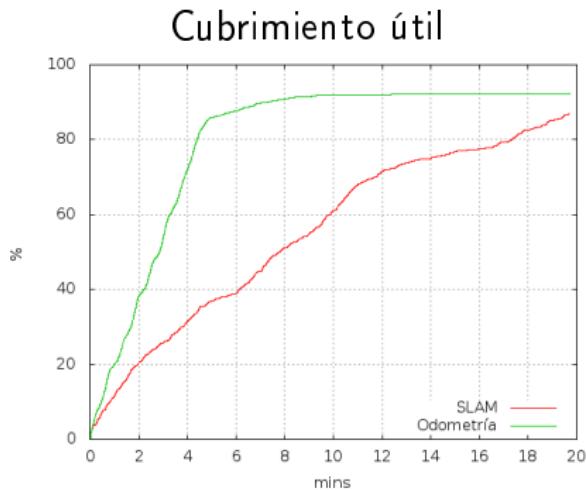
Métrica	Odometría		SLAM	
	Media	Var	Media	Var
Cubrimiento Útil	92,24 %	3,23 %	86,82 %	2,23 %
Cubrimiento Inútil	14,50 %	3,28 %	4,64 %	1,74 %
Cubrimiento Útil Total	2035,92 %	935,82 %	1788,30 %	46,11 %
Ejecuciones con error	4/5	-	0/5	-



Evolución del cubrimiento

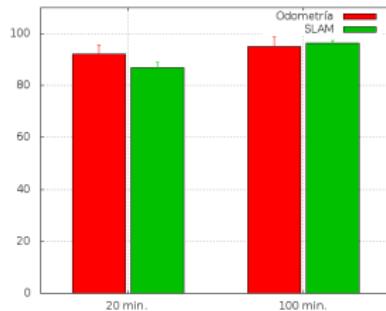
Pruebas de 20 minutos

- Evolución del cubrimiento útil

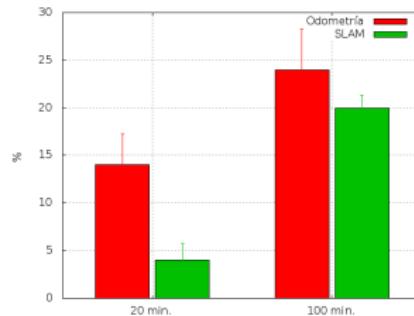


Comparación de resultados

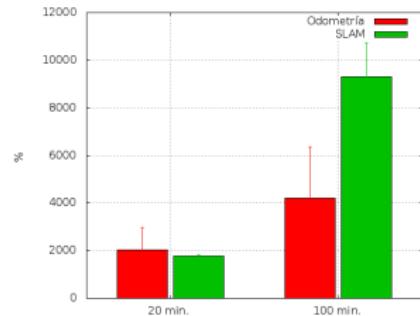
20 minutos vs. 100 minutos



Cubrimiento útil



Cubrimiento inútil

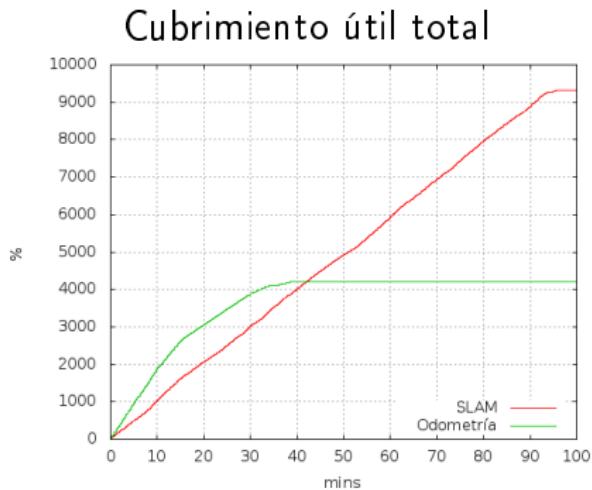
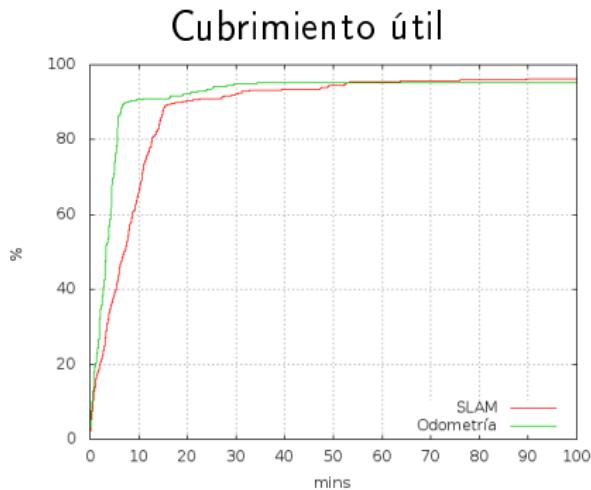


Cubrimiento útil total

Evolución del Cubrimiento

Pruebas de 100 minutos

- Evolución del cubrimiento útil



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

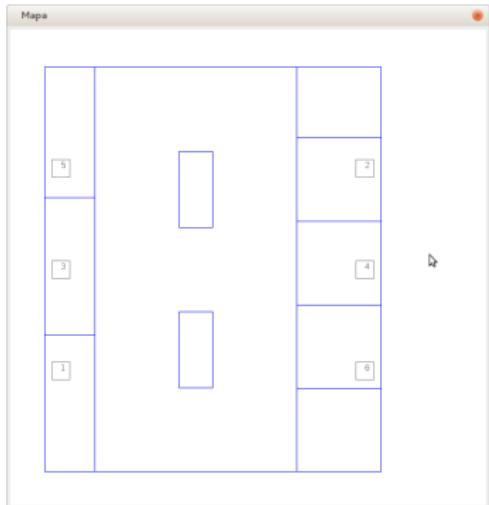


Índice

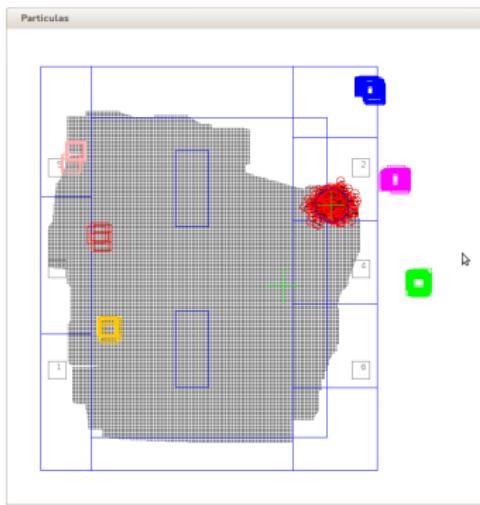
- 1 Presentación del SLAM**
 - Descripción del problema
 - Dificultades del SLAM
- 2 Principales técnicas y enfoques**
 - Enfoques
 - Probabilísticos
- 3 Solución Implementada**
 - Sistema de SLAM
 - Problema a resolver
 - Desarrollo de la solución
 - Parametrización y calibración del sistema
- 4 Experimentos**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



Mapa Generado



Mapa original

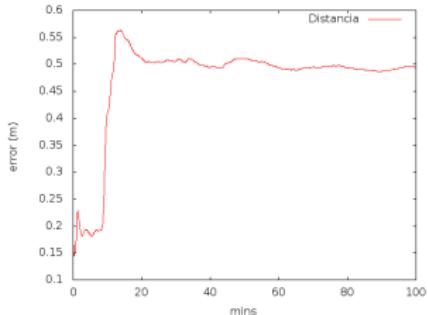


Mapa generado

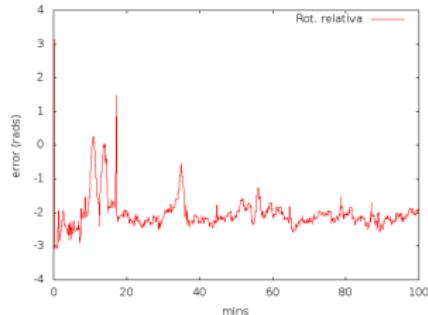


Conclusiones mapa generado

- El mapa generado por el sistema de SLAM se presenta rotado y trasladado
- Se concluye que este tipo de métrica (error RMS) no es adecuada a este contexto



Error distancia



Error rotación



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 relevantes
 - 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



Presentación del trabajo
Presentación del SLAM
Principales técnicas y enfoques
Solución Implementada
Experimentos
Resultados
Finalmente

Demo

Demo



Presentación del trabajo
Presentación del SLAM
Principales técnicas y enfoques
Solución Implementada
Experimentos
Resultados
Finalmente

Gracias

¿Preguntas?

