

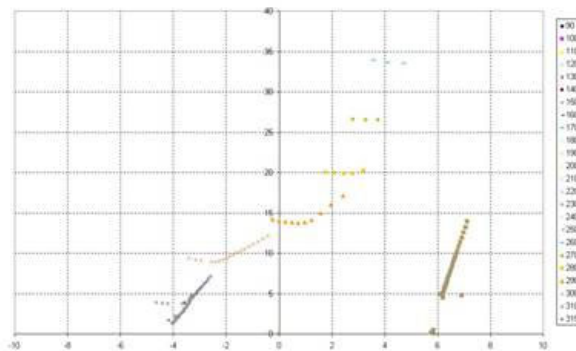
# Sensores y algoritmos de percepción mediante LiDAR

**Felipe Jiménez Alonso**

Catedrático de Universidad  
Director de la Unidad de Sistemas Inteligentes en Vehículos  
Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA)  
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)  
e mail: felipe.jimenez@upm.es

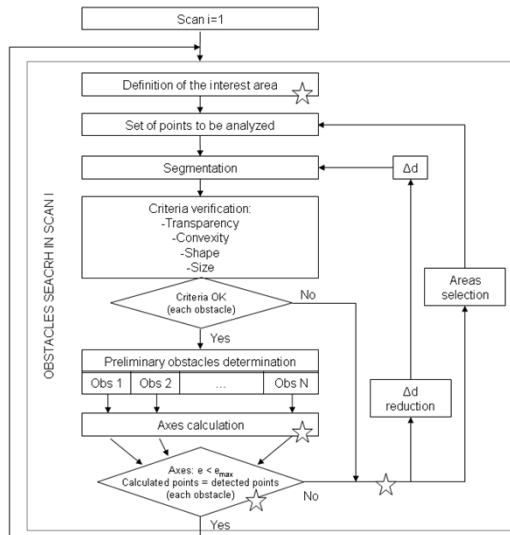
## Detección con LIDAR 2D

- ⇒ Algoritmos de detección de obstáculos
- ⇒ Algoritmos de identificación de obstáculos
- ⇒ Algoritmos de caracterización de cinemática de los obstáculos



# Detección con LIDAR 2D

## METODOLOGÍA



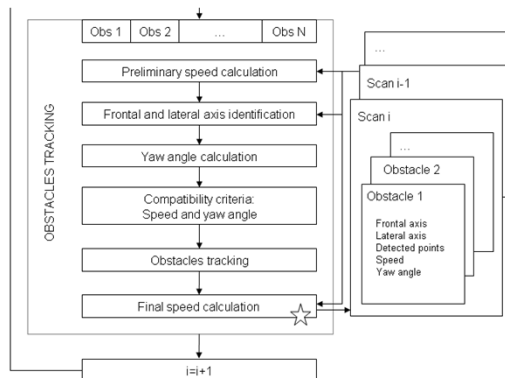
Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

3

# Detección con LIDAR 2D

## METODOLOGÍA



Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

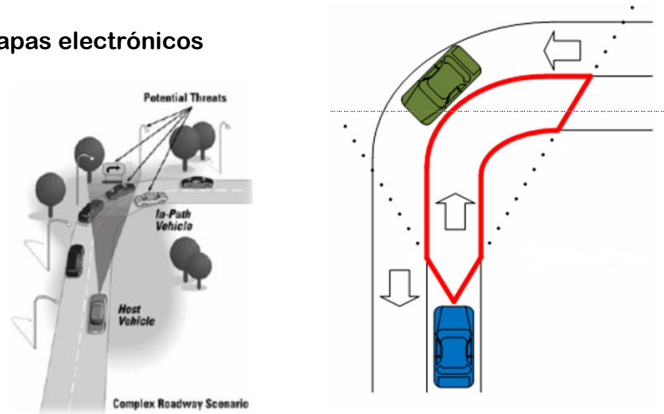
4

# Detección con LIDAR 2D

## DEFINICIÓN DE LA ZONA DE INTERÉS

Para el filtrado de "obstáculos" que no lo son

GPS + Mapas electrónicos



# Detección con LIDAR 2D

## SEGMENTACIÓN DE OBSTÁCULOS

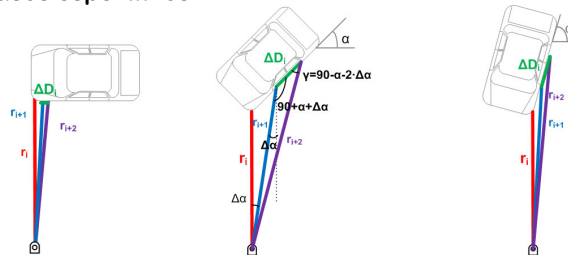
Criterio estándar

$$\Delta d(r_i, r_{i+1}) = s_0 + s_1 \cdot \min(r_i, r_{i+1}) \quad s_{1 \min} = \sqrt{2 - 2 \cos \Delta \alpha}$$

Criterio avanzado

$$\Delta d = s_0 + s_1 \cdot d + s_2 \cdot v$$

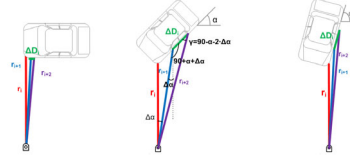
Problema en casos específicos



# Detección con LIDAR 2D

## SEGMENTACIÓN DE OBSTÁCULOS

Problema en casos específicos



$$\Delta D_{n \text{ side } 1} = \sqrt{r^2 \cdot \left( 1 + \frac{\cos^2(\alpha + (n-1) \cdot \Delta\alpha)}{\cos^2(\alpha + n \cdot \Delta\alpha)} - 2 \cdot \frac{\cos(\alpha + (n-1) \cdot \Delta\alpha)}{\cos(\alpha + n \cdot \Delta\alpha)} \cdot \cos \Delta\alpha \right)}$$

$$r_n = r_{n-1} \cdot \frac{\cos(\alpha + (n-2) \cdot \Delta\alpha)}{\cos(\alpha + (n-1) \cdot \Delta\alpha)}$$

$$\Delta D_{n \text{ side } 2} = \sqrt{r^2 \cdot \left( 1 + \frac{\sin^2(\alpha + (n-1) \cdot \Delta\alpha)}{\sin^2(\alpha + n \cdot \Delta\alpha)} - 2 \cdot \frac{\sin(\alpha + (n-1) \cdot \Delta\alpha)}{\sin(\alpha + n \cdot \Delta\alpha)} \cdot \cos \Delta\alpha \right)}$$

$$r_n = r_{n-1} \cdot \frac{\sin(\alpha + (n-2) \cdot \Delta\alpha)}{\sin(\alpha + (n-1) \cdot \Delta\alpha)}$$

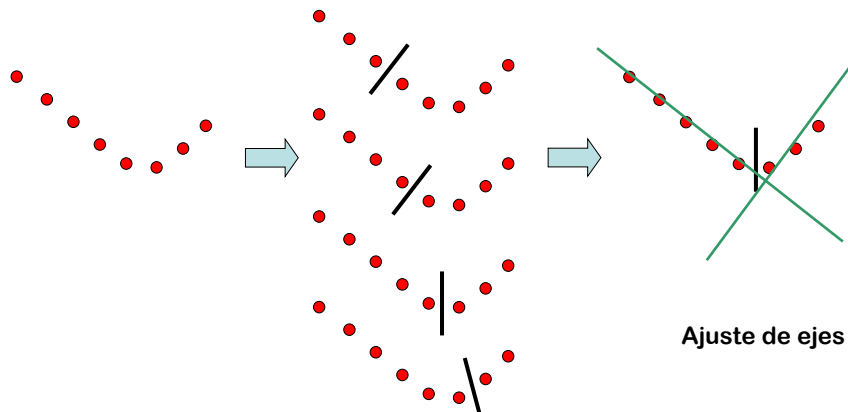
Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

7

# Detección con LIDAR 2D

## CALCULO DE EJES



Identificación de laterales

Ajuste de ejes

Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

8

# Detección con LIDAR 2D

## CALCULO DE EJES

Planteamiento del problema de minimización de errores cuadráticos

$$r_1 \equiv y = mx + b \quad r_2 \equiv y = \frac{-1}{m}x + c$$

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} (y_i - mx_i - b)^2 + \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} \left( y_i + \frac{1}{m}x_i - c \right)^2$$

Solución

$$m^4 \left[ n_2 \sum_{i=1}^{n_2} \left( -x_i^2 + \frac{1}{n_1} \sum_{j=1}^{n_1} x_j x_j \right) \right] + m^3 \left[ n_2 \sum_{i=1}^{n_2} \left( x_i y_i - \frac{1}{n_1} x_i \sum_{j=1}^{n_1} y_j \right) \right] + m \left[ n_1 \sum_{i=1}^{n_1} \left( x_i y_i - \frac{1}{n_2} x_i \sum_{j=1}^{n_2} y_j \right) \right] + n_1 \sum_{i=1}^{n_1} \left( x_i^2 - \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} x_j x_j \right) = 0$$

$$b = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} (y_i - mx_i) \quad c = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} \left( y_i + \frac{1}{m}x_i \right)$$

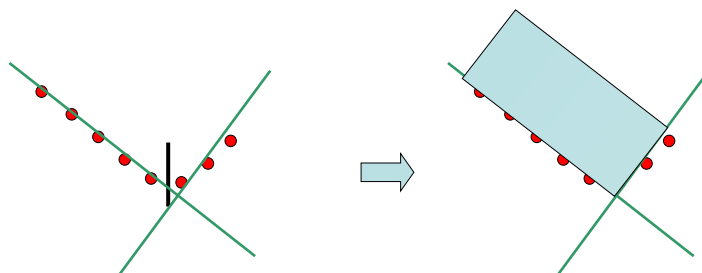
Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

9

# Detección con LIDAR 2D

## CALCULO DE EJES



Identificación del obstáculo

Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

10

# Detección con LIDAR 2D

## ENSAYOS



Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

# Detección con LIDAR 2D

## ENSAYOS

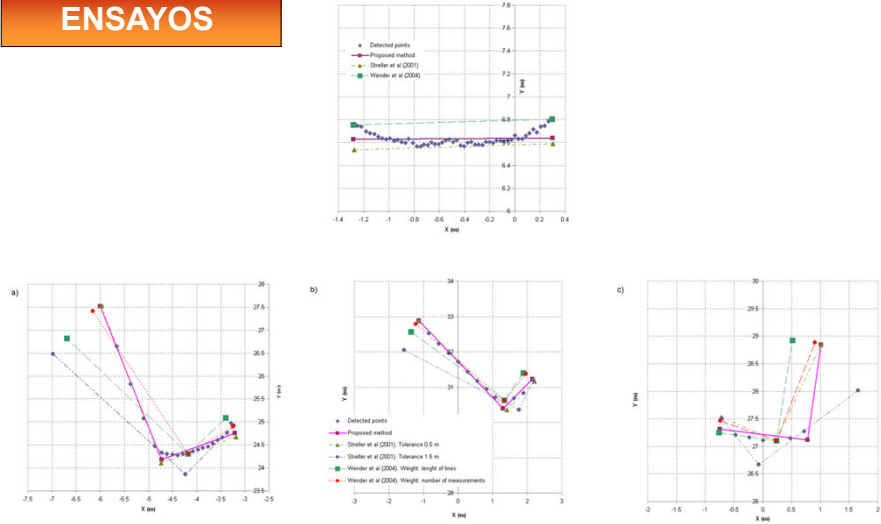


Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

# Detección con LIDAR 2D

## ENSAYOS

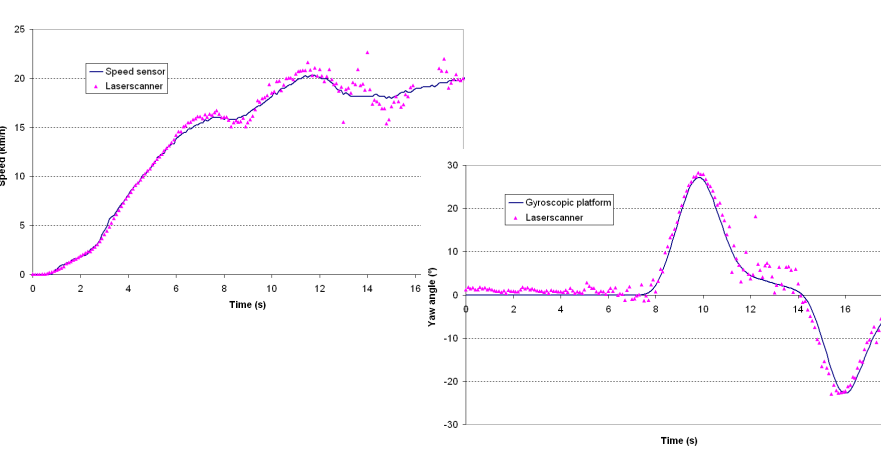


Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

# Detección con LIDAR 2D

## ENSAYOS



Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

# Detección con LIDAR 3D

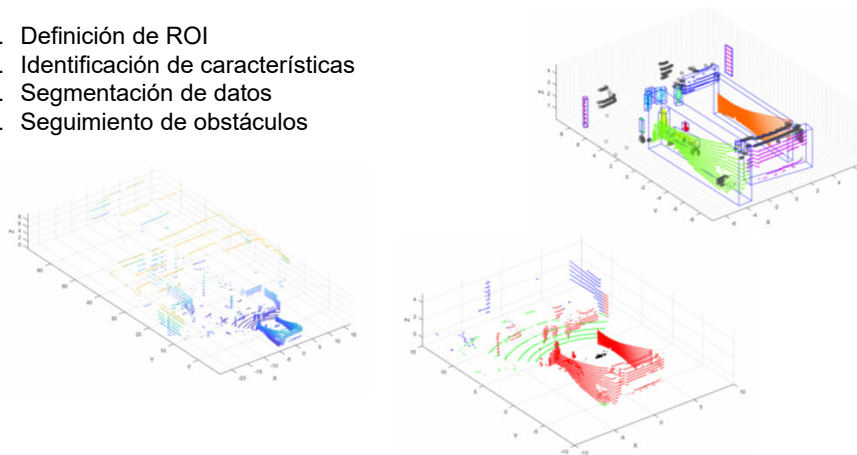
## METODOLOGÍA



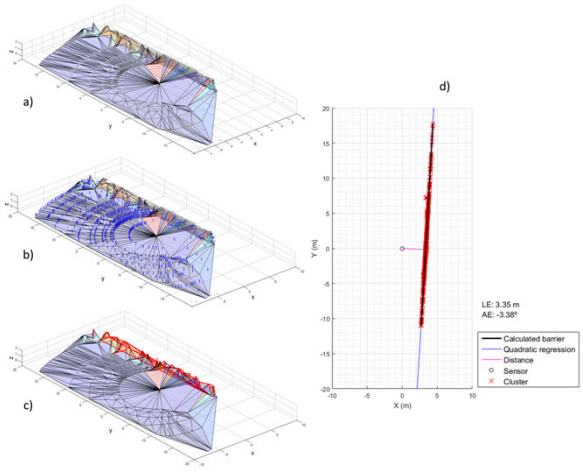
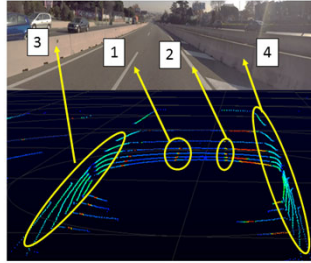
# Detección con LIDAR 3D

## METODOLOGÍA

1. Definición de ROI
2. Identificación de características
3. Segmentación de datos
4. Seguimiento de obstáculos



# Detección con LIDAR 3D

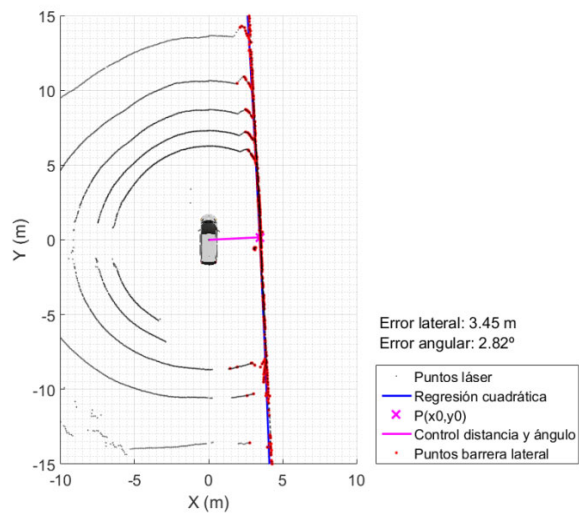


Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

17

# Detección con LIDAR 3D



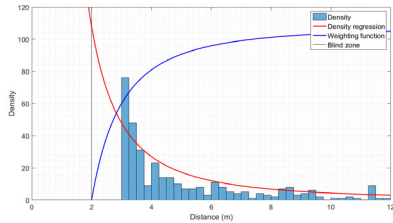
Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

18

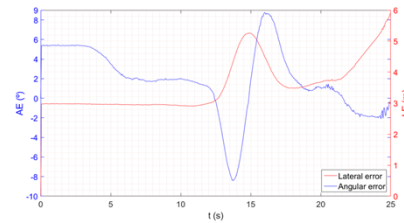
# Detección con LIDAR 3D

## CORRECCIÓN DE RELEVANCIA DE PUNTOS DETECTADOS MEDIANTE FUNCIÓN DE PESO

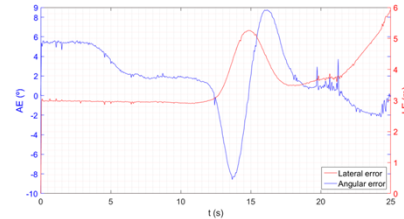


$$\text{densidad} = \frac{A}{d^2}$$

### SIN FUNCIÓN DE PESO



### CON FUNCIÓN DE PESO

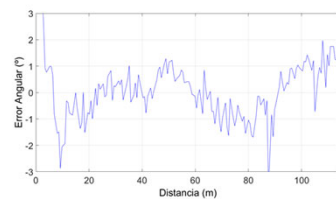


Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

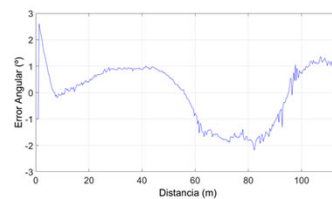
Felipe Jiménez Alonso

# Detección con LIDAR 3D

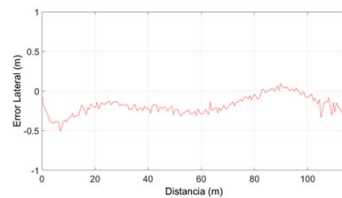
## COMPARACIÓN CON POSICIONAMIENTO MEDIANTE GPS



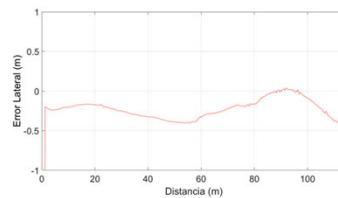
a) GPS Error Angular



b) Láser Error Angular



c) GPS Error Lateral



d) Láser Error Lateral

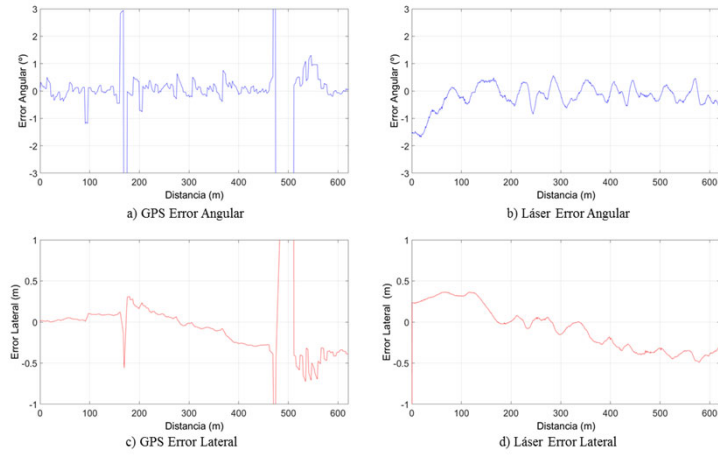
Ensayos en pista

Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

# Detección con LIDAR 3D

## COMPARACIÓN CON POSICIONAMIENTO MEDIANTE GPS



Ensayos en BUS-VAO (A6)

Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

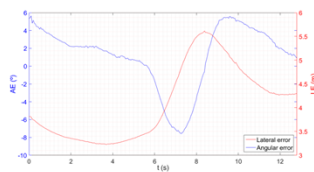
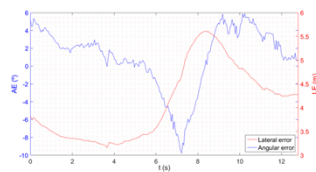
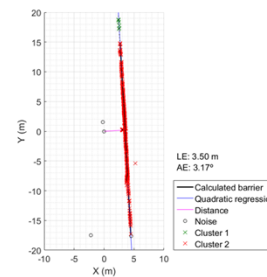
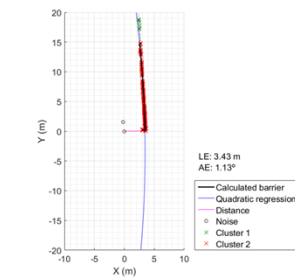
Felipe Jiménez Alonso

21

# Detección con LIDAR 3D

## DETECCIÓN EN SENTIDO DE MARCHA

## DETECCIÓN EN AMBOS SENTIDOS



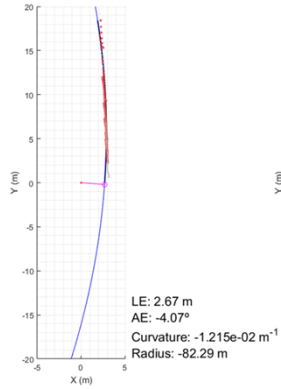
Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

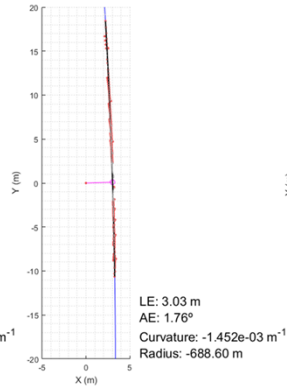
22

# Detección con LIDAR 3D

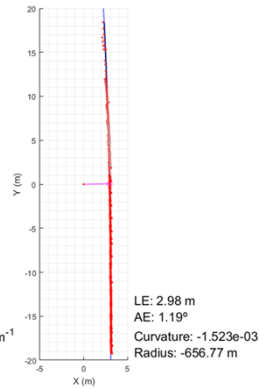
## DETECCIÓN EN SENTIDO DE MARCHA



## DETECCIÓN EN AMBOS SENTIDOS



## EXTRAPOLACIÓN



# Detección con LIDAR 3D

## DETECCIÓN EN ESCENARIOS OFF-ROAD

Caraffi et al (2007)

Visión artificial

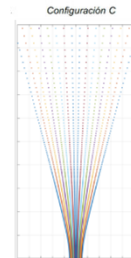
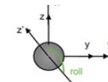
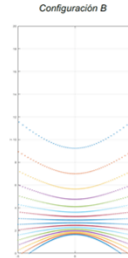
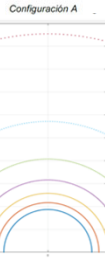
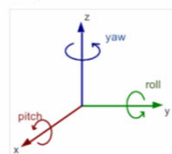
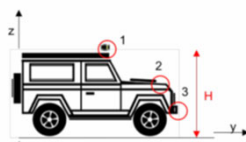
Larson y Trivedi (2011)

Análisis geométrico

Shang et al (2016)

Fusión 2 LiDAR

### Colocación del sensor



# Detección con LIDAR 3D

## DETECCIÓN EN ESCENARIOS OFF-ROAD

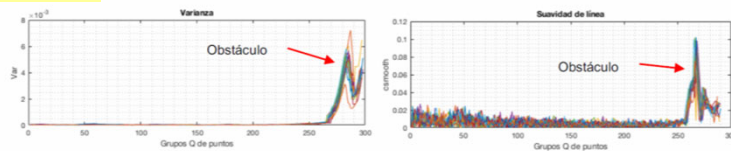
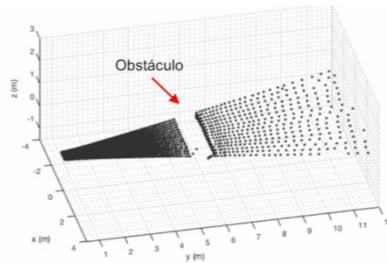
### Criterios de filtrado

#### 1. Definición de candidatos

- Varianza
- Suavidad

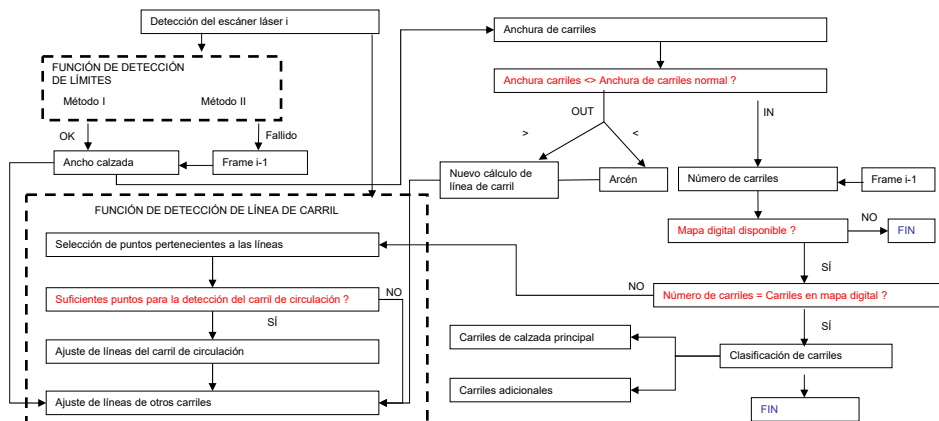
$$suavidad\ capa = \frac{\|\sum(Q_{centro} - Q_i)\|}{S \cdot \|Q_{centro}\|}$$

Zhang y Singh (2014)



# Detección con LIDAR 3D

## CARACTERIZACIÓN TRANSVERSAL DE LA RUTA



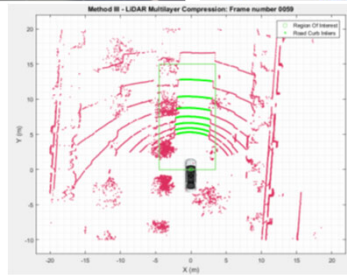
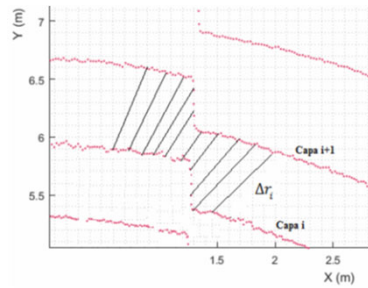
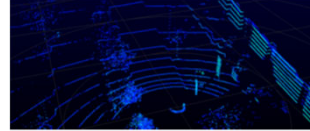
# Detección con LIDAR 3D

## CARACTERIZACIÓN TRANSVERSAL DE LA RUTA

### Determinación de límites de la calzada

Método I

Método II Hata et al (2014)



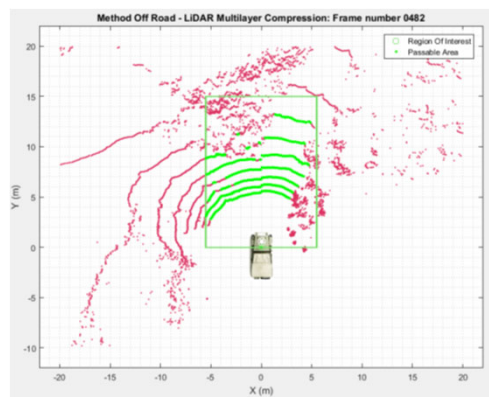
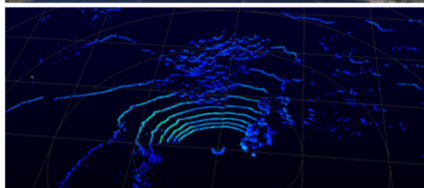
94%

# Detección con LIDAR 3D

## CARACTERIZACIÓN TRANSVERSAL DE LA RUTA

### Determinación de límites de la calzada

Método II

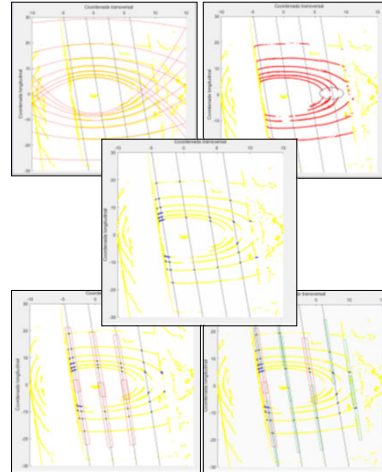


# Detección con LIDAR 3D

## CARACTERIZACIÓN TRANSVERSAL DE LA RUTA

### Determinación de carriles

1. Ajuste de curvas de intersección con suelo y filtrado
2. Filtro por reflectividad
3. Consideraciones geométricas para eliminar falsos puntos
4. Delimitación de zonas de carriles a partir de puntos detectados
5. Delimitación de zonas de carriles a partir de puntos aislados
6. Ajuste de líneas



# Detección con LIDAR 3D

## PERCEPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DESDE LA INFRAESTRUCTURA

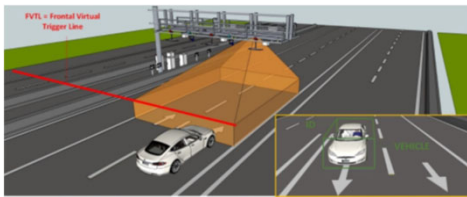
### APLICACIÓN PARA PEAJE FREE-FLOW

#### LiDAR vs. Cámaras:

- Mayor inmunidad frente a cambios de luminosidad (amanecer, anochecer, luces de los vehículos, etc)
- Gran precisión en la detección de la posición del vehículo
- Posibilidad de medición de las dimensiones de los vehículos con gran precisión y su volumen.
- Posibilidad de clasificación basada en características físicas como su silueta, elementos característicos, etc.
- Gran precisión en la detección de velocidad
- Las soluciones suelen ser más sencillas, al menos si se emplea tecnología 3D
- Sencillez de instalación y calibración

# Detección con LIDAR 3D

## PERCEPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DESDE LA INFRAESTRUCTURA



Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

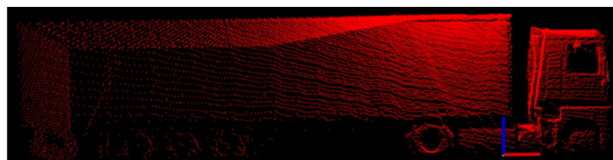
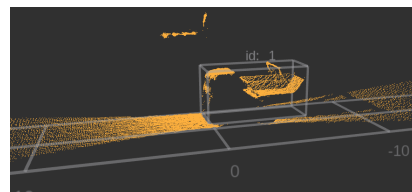
Felipe Jiménez Alonso

# Detección con LIDAR 3D

## PERCEPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DESDE LA INFRAESTRUCTURA

### ACCIONES EN PEAJE FREE FLOW

- Detección - clusterización
- Triggerización para la captura de imagen.
- Características: clasificación y velocidad del vehículo



Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

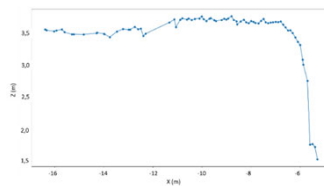
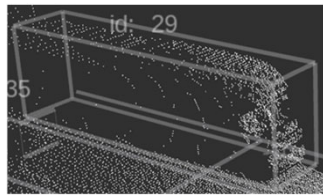
Felipe Jiménez Alonso

# Detección con LIDAR 3D

## PERCEPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DESDE LA INFRAESTRUCTURA

### CLASIFICACIÓN

- Vehicle Length (VL)
- Vehicle Height (VH)
- Front Vehicle Height (FVH) y Rear Vehicle Height (RVH)
- Front Number of Points (FNP) y Rear Number of Points (RNP)
- Side Window (SW)

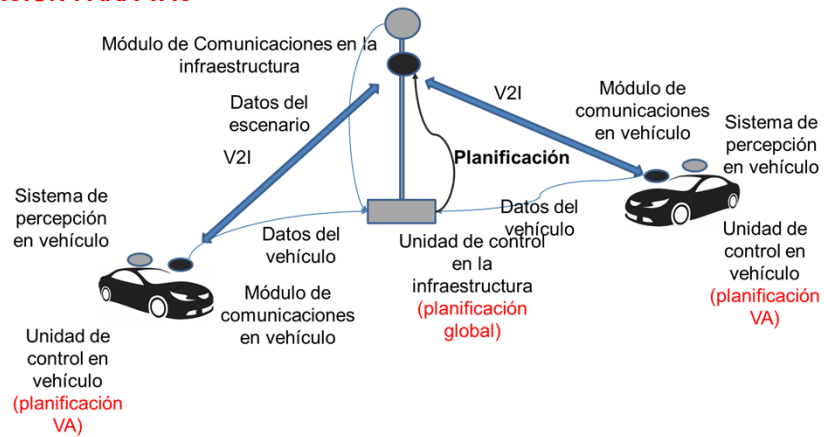


# Detección con LIDAR 3D

## PERCEPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DESDE LA INFRAESTRUCTURA

### APLICACIÓN PARA VAC

Sistema de percepción en la infraestructura



# SLAM

---

## DEFINICIÓN DE SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)

- Se trata de construir o actualizar el mapa de un entorno a priori no conocido por el vehículo
- El vehículo ha de situarse en dicho mapa simultáneamente, estimando los 6 grados de libertad (gdl) de la trayectoria
- Utilizado en robótica y en vehículos autónomos

# SLAM

---

## APLICACIONES EN CONDUCCIÓN AUTÓNOMA

- Percepción del entorno en tiempo real
- Apoyo y mejora de la precisión en una navegación autónoma guiada por GPS
- Generación de mapas electrónicos (digital maps)
- Calcular trayectoria seguida cuando no se recibe señal GPS
- Control de vehículos en entornos exigentes con poca información del entorno
- Aumentar densidad de información obtenida por los sensores
- Coche autónomo STANLEY ganó la DARPA Grand Challenge e incluyó un sistema de SLAM. Actualmente así lo hace también el coche de Google

# SLAM

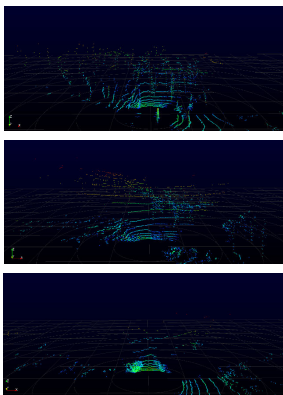
## TÉCNICAS DE SLAM:

- SLAM por GPS/INS: Utilizando los datos de una IMU para obtener los 6 gdl de la trayectoria. Giróscopos, acelerómetros, IMU, brújulas, magnetómetros, etc.
- Visual SLAM: Haciendo uso de sensores como cámaras, stereo-visión, láser 2D, LiDAR 3D. – **Odometría visual**

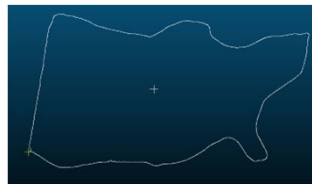
# SLAM

## Entradas

$$O = \{1, 2, \dots, t\}$$

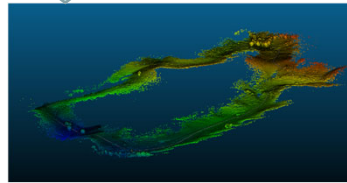


## Salidas



Trayectoria:  
Estimación de los 6 gdl

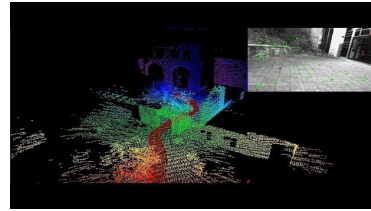
Mapa:  
Traslación y orientación  
de la información  
obtenida por sensor



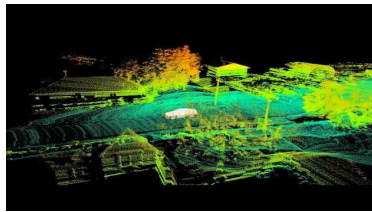
# SLAM



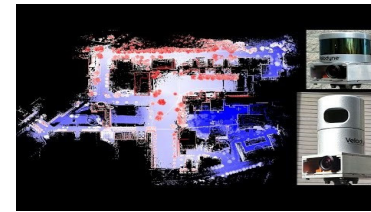
*Circulación coche autónomo en entorno urbano*



*Fusión sensorial de sensor LiDAR y visión artificial*



*Comparación datos en crudo del sensor y densidad obtenida con SLAM*



*Construcción en tiempo real del mapa del entorno utilizando cámaras junto a LiDAR*

[www.dibotics.com/](http://www.dibotics.com/)

Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

39

# SLAM

## PRÓXIMOS RETOS

- Realizar mapas de largo recorrido
- Menor dependencia de fusión sensorial
- Minimizar deriva en la trayectoria seguida por el vehículo
- Actualizar mapas en tiempo real
- Utilizar información obtenida por SLAM para completar modelo del entorno
- Obtener información de los sensores en los coches autónomos para tener un mapa actualizado a través de la red. Vehículo conectado.

Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso

40



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
INSTITUTO UNIVERSITARIO DE INVESTIGACIÓN DEL AUTOMÓVIL  
ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE PROFESIONALES DE AUTOMOCIÓN



# Sensores y algoritmos de percepción mediante LiDAR

**Felipe Jiménez Alonso**

Catedrático de Universidad  
Director de la Unidad de Sistemas Inteligentes en Vehículos  
Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA)  
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)  
e mail: felipe.jimenez@upm.es

Curso de Especialización en AUTOMATIZACIÓN DE VEHÍCULOS  
(Aplicación y oportunidades en el Sector Transporte)

Felipe Jiménez Alonso