

# Universidad de Alcalá

## Escuela Politécnica Superior

**Grado en Ingeniería Informática**

### **Trabajo Fin de Grado**

Algoritmos de detección de objetos 3D basados en LiDAR:  
comparación entre técnicas PCL clásicas y Deep Learning

**Autor:** Javier de la Peña

**Tutores:** Luis Miguel Bergasa y Carlos Gómez Huélamo

2021



# UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

## ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

**Grado en Ingeniería Informática**

**Trabajo Fin de Grado**

**Algoritmos de detección de objetos 3D basados en LiDAR:  
comparación entre técnicas PCL clásicas y Deep Learning**

Autor: Javier de la Peña

Directores: Luis Miguel Bergasa y Carlos Gómez Huélamo

**Tribunal:**

**Presidente:** Felipe Espinosa Zapata

**Vocal 1º:** Fernando Naranjo Vega

**Vocal 2º:** Rafael Barea Navarro

Calificación: .....

Fecha: .....



**A nuestros alumnos pasados, presentes y futuros...**

*“Empieza haciendo lo necesario, luego haz lo posible y de pronto empezarás a hacer lo imposible.”*

Francisco de Asís



# Agradecimientos

*A todos los que la presente vieron y entendieron.*

Inicio de las Leyes Orgánicas. Juan Carlos I

Este trabajo es el fruto de muchas horas de trabajo, tanto de los autores últimos de los ficheros de la distribución como de todos los que en mayor o menor medida han participado en él a lo largo de su proceso de gestación.

Mención especial merece Manuel Ocaña, el autor de la primera versión de las plantillas de proyectos fin de carrera y tesis doctorales usadas en el Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá, con contribuciones de Jesús Nuevo, Pedro Revenga, Fernando Herránz y Noelia Hernández.

En la versión actual, la mayor parte de las definiciones de estilos de partida proceden de la tesis doctoral de Roberto Barra-Chicote, con lo que gracias muy especiales para él.

También damos las gracias a Manuel Villaverde, David Casillas, Jesús Pablo Martínez, José Francisco Velasco Cerpa que nos han proporcionado secciones completas y ejemplos puntuales de sus proyectos fin de carrera.

Finalmente, hay incontables contribuyentes a esta plantilla, la mayoría encontrados gracias a la magia del buscador de Google. Hemos intentado referenciar los más importantes en los fuentes de la plantilla, aunque seguro que hemos omitido alguno. Desde aquí les damos las gracias a todos ellos por compartir su saber con el mundo.





# Resumen

Este documento ha sido generado con una plantilla para memorias de trabajos fin de carrera, fin de máster, fin de grado y tesis doctorales. Está especialmente pensado para su uso en la Universidad de Alcalá, pero debería ser fácilmente extensible y adaptable a otros casos de uso. En su contenido se incluyen las instrucciones generales para usarlo, así como algunos ejemplos de elementos que pueden ser de utilidad. Si tenéis problemas, sugerencias o comentarios sobre el mismo, dirigidlas por favor a Javier de la Peña <[j.pena@edu.uah.es](mailto:j.pena@edu.uah.es)>.

**Palabras clave:** Plantillas de trabajos fin de carrera/máster/grado y tesis doctorales, L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, soporte de español e inglés, generación automática.



# Abstract

This document has been generated with a template for Bsc and Msc Thesis (trabajos fin de carrera, fin de máster, fin de grado) and PhD. Thesis, specially thought for its use in Universidad de Alcalá, although it should be easily extended and adapted for other use cases. In its content we include general instructions of use, and some example of elements than can be useful. If you have problemas, suggestions or comments on the template, please forward them to Javier de la Peña <[j.pena@edu.uah.es](mailto:j.pena@edu.uah.es)>.

**Keywords:** Bsc., Msc. and PhD. Thesis template, L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, English/Spanish support, automatic generation.



# Índice general

Resumen	ix
Abstract	xi
Índice general	xiii
Índice de figuras	xvii
Índice de tablas	xix
Índice de listados de código fuente	xxi
Índice de algoritmos	xxiii
Lista de acrónimos	xxiii
Lista de símbolos	xxiii
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Sistemas de conducción autónomos . . . . .	1
1.2 Sistemas de percepción . . . . .	1
1.2.1 Principales sensores para la percepción en vehículos autónomos . . . . .	1
1.2.1.1 Cámara . . . . .	1
1.2.1.2 Radar . . . . .	1
1.2.1.3 LiDAR . . . . .	1
1.2.2 Sistemas de detección . . . . .	1
1.2.3 Sistemas de seguimiento . . . . .	1
1.2.4 Fusión sensorial . . . . .	1
<b>2 Propuesta de trabajo</b>	<b>3</b>

<b>3</b>	<b>Sistemas clásicos de percepción con LiDAR</b>	<b>5</b>
3.1	Voxelización . . . . .	5
3.2	Ransac-3D . . . . .	5
3.3	KD-tree . . . . .	5
3.4	Filtrado posterior a la detección . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Sistemas de percepción con LiDAR basados en Deep Learning</b>	<b>7</b>
4.1	Principales datasets . . . . .	7
4.1.1	Kitti . . . . .	7
4.1.2	Waymo . . . . .	7
4.1.3	nuScenes . . . . .	7
4.1.3.1	nuScenes-devkit . . . . .	7
4.1.4	Comparativa entre los diferentes datasets . . . . .	7
4.2	Estado del arte en detección utilizando LiDAR . . . . .	7
4.2.1	PointPillars . . . . .	7
4.2.2	SECOND . . . . .	7
4.2.3	PointRCNN . . . . .	7
4.2.4	PV-RCNN . . . . .	7
4.2.5	CBGS . . . . .	7
4.3	OpenPCDet . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Desarrollo realizado</b>	<b>9</b>
5.1	Estado del proyecto T4AC . . . . .	9
5.1.1	ROS . . . . .	9
5.1.2	Docker . . . . .	9
5.2	Implementación en CARLA . . . . .	9
5.2.1	CARLA . . . . .	9
5.2.2	Funcionamiento del LiDAR en CARLA . . . . .	9
5.2.3	Tratado de datos . . . . .	9
5.3	Fusión sensorial . . . . .	9
5.4	Vehículo del proyecto T4AC . . . . .	9
5.5	Implementación sobre el vehículo T4AC . . . . .	9
<b>6</b>	<b>ad-devkit</b>	<b>11</b>
6.1	Estado del arte en evaluación de vehículos autónomos . . . . .	11
6.2	Obtención del ground truth . . . . .	11
6.3	Evaluación de los modelos . . . . .	11

<b>7</b>	<b>Resultados obtenidos</b>	<b>13</b>
7.1	Análisis cuantitativo en Kitty . . . . .	13
7.2	Análisis cuantitativo en nuScenes . . . . .	13
7.3	Análisis cualitativo del modelo clásico en CARLA . . . . .	13
7.4	Análisis cualitativo de CBGS en CARLA . . . . .	13
7.4.1	Comparativa con PointPillars en CARLA . . . . .	13
7.5	Análisis cuantitativo de CBGS en CARLA . . . . .	13
7.6	Análisis cualitativo de CBGS sobre el vehículo T4AC . . . . .	13
7.6.1	Comparativa con PointPillars sobre el vehículo T4AC . . . . .	13
<b>8</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>15</b>
8.1	Modelos estudiados . . . . .	15
8.2	Comparativas adicionales . . . . .	15
8.2.1	Ajuste de modelos basados en Kitty a nuScenes . . . . .	15
8.2.2	Número de PCL de entrada en modelos evaluados sobre nuScenes . . . . .	15
8.2.3	Tamaño del voxel en modelos basados en redes neuronales . . . . .	15
8.3	Futuros trabajos . . . . .	15
	<b>Bibliografía</b>	<b>17</b>
<b>A</b>	<b>Herramientas y recursos</b>	<b>19</b>





# Índice de figuras



# Índice de tablas



# Índice de listados de código fuente



# Índice de algoritmos





# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Sistemas de conducción autónomos

### 1.2 Sistemas de percepción

#### 1.2.1 Principales sensores para la percepción en vehículos autónomos

##### 1.2.1.1 Cámara

##### 1.2.1.2 Radar

##### 1.2.1.3 LiDAR

#### 1.2.2 Sistemas de detección

#### 1.2.3 Sistemas de seguimiento

#### 1.2.4 Fusión sensorial



## Capítulo 2

# Propuesta de trabajo



## Capítulo 3

# Sistemas clásicos de percepción con LiDAR

### 3.1 Voxelización

### 3.2 Ransac-3D

### 3.3 KD-tree

### 3.4 Filtrado posterior a la detección



## Capítulo 4

# Sistemas de percepción con LiDAR basados en Deep Learning

### 4.1 Principales datasets

#### 4.1.1 Kitti

#### 4.1.2 Waymo

#### 4.1.3 nuScenes

##### 4.1.3.1 nuScenes-devkit

#### 4.1.4 Comparativa entre los diferentes datasets

### 4.2 Estado del arte en detección utilizando LiDAR

#### 4.2.1 PointPillars

#### 4.2.2 SECOND

#### 4.2.3 PointRCNN

#### 4.2.4 PV-RCNN

#### 4.2.5 CBGS

### 4.3 OpenPCDet





# Capítulo 5

## Desarrollo realizado

### 5.1 Estado del proyecto T4AC

#### 5.1.1 ROS

#### 5.1.2 Docker

### 5.2 Implementación en CARLA

#### 5.2.1 CARLA

#### 5.2.2 Funcionamiento del LiDAR en CARLA

#### 5.2.3 Tratado de datos

### 5.3 Fusión sensorial

### 5.4 Vehículo del proyecto T4AC

### 5.5 Implementación sobre el vehículo T4AC



## Capítulo 6

### ad-devkit

6.1 Estado del arte en evaluación de vehículos autónomos

6.2 Obtención del ground truth

6.3 Evaluación de los modelos



## Capítulo 7

# Resultados obtenidos

7.1 Análisis cuantitativo en Kitty

7.2 Análisis cuantitativo en nuScenes

7.3 Análisis cualitativo del modelo clásico en CARLA

7.4 Análisis cualitativo de CBGS en CARLA

7.4.1 Comparativa con PointPillars en CARLA

7.5 Análisis cuantitativo de CBGS en CARLA

7.6 Análisis cualitativo de CBGS sobre el vehículo T4AC

7.6.1 Comparativa con PointPillars sobre el vehículo T4AC



## Capítulo 8

# Conclusiones

### 8.1 Modelos estudiados

### 8.2 Comparativas adicionales

#### 8.2.1 Ajuste de modelos basados en Kitti a nuScenes

#### 8.2.2 Número de PCL de entrada en modelos evaluados sobre nuScenes

#### 8.2.3 Tamaño del voxel en modelos basados en redes neuronales

### 8.3 Futuros trabajos





# Bibliografía

- [1] “Información sobre gnu/linux en wikipedia,” <http://es.wikipedia.org/wiki/GNU/Linux> [Último acceso 1/noviembre/2013].
- [2] “Página de la aplicación emacs,” <http://savannah.gnu.org/projects/emacs/> [Último acceso 1/noviembre/2013].
- [3] “Página de la aplicación kdevelop,” <http://www.kdevelop.org> [Último acceso 1/noviembre/2013].
- [4] L. Lamport, *LaTeX: A Document Preparation System, 2nd edition*. Addison Wesley Professional, 1994.
- [5] “Página de la aplicación octave,” <http://www.octave.org> [Último acceso 1/noviembre/2013].
- [6] “Página de la aplicación cvs,” <http://savannah.nongnu.org/projects/cvs/> [Último acceso 1/noviembre/2013].
- [7] “Página de la aplicación gcc,” <http://savannah.gnu.org/projects/gcc/> [Último acceso 1/noviembre/2013].
- [8] “Página de la aplicación make,” <http://savannah.gnu.org/projects/make/> [Último acceso 1/noviembre/2013].



# Apéndice A

## Herramientas y recursos

Las herramientas necesarias para la elaboración del proyecto han sido:

- PC compatible
- Sistema operativo GNU/Linux [1]
- Entorno de desarrollo Emacs [2]
- Entorno de desarrollo KDevelop [3]
- Procesador de textos L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X [4]
- Lenguaje de procesamiento matemático Octave [5]
- Control de versiones CVS [6]
- Compilador C/C++ gcc [7]
- Gestor de compilaciones make [8]





Universidad de Alcalá  
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR



Universidad  
de Alcalá