

Navegación autónoma para un vehículo sin conductor usando el simulador Webots

Luis David Torres Trejo

October 2021

Índice general

1. Introducción	7
1.1. Motivación	7
1.2. Planteamiento del problema	7
1.3. Hipótesis	8
1.4. Objetivos	8
1.5. Descripción del documento	8
2. Antecedentes	9
2.1. Vehículos sin conductor	9
2.2. Simuladores	16
2.3. Conceptos básicos de visión artificial	19
2.4. Máquinas de estados finitas	19
2.5. Trabajo relacionado	19
3. Simulación con Webots	21
3.1. Conceptos básicos del simulador Webots	21
3.2. El formato Open Street Maps	23
3.3. El ambiente de simulación	23
4. Seguimiento de carriles	25
4.1. Espacios de color	25
4.2. Detección de bordes	25
4.3. Transformada Hough	25
4.4. Modelo cinemático del vehículo	25
4.5. Leyes de control	25
5. Evasión de obstáculos	27
5.1. El Filtro de Kalman Extendido	27
5.2. Estimación de velocidad con el EKF	27
5.3. Máquinas de estado finitas	27
5.4. Maniobras de rebase	27

6. Pruebas y resultados	29
6.1. Integración mediante la plataforma ROS	29
6.2. Pruebas de navegación sin obstáculos	29
6.3. Pruebas de navegación con obstáculos	29
7. Discusión	31
7.1. Conclusiones	31
7.2. Trabajo futuro	31

Índice de figuras

3.1. Interfaz de Usuario Webots	22
3.2. Ejemplo de mundo en Webots.	23

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

- Los accidentes viales son causados en su mayoría por errores humanos.
- Los vehículos sin conductor tienen el potencial de disminuir estos accidentes.
- Los problemas de tránsito vehicular se podrían disminuir con vehículos sin conductor pues la toma de decisiones podría ser más planeada.
- El desarrollo de vehículos sin conductor requiere de una instrumentación costosa y el hardware en general es caro y difícil de desarrollar.
- Los simuladores son una buena alternativa en el desarrollo de sistemas de visión artificial y navegación autónoma para vehículos sin conductor.

1.2. Planteamiento del problema

- Se requiere un ambiente simulado con las características suficientes para desarrollar algoritmos de visión artificial y navegación autónoma para vehículos sin conductor.
- Se requiere un sistema de visión artificial capaz de reconocer carriles en una vía así como otros vehículos.
- Se requiere de un conjunto de comportamientos capaces de realizar seguimiento de carriles y rebase de otros vehículos.

1.3. Hipótesis

- El simulador Webots tiene las características necesarias para desarrollar sistemas de visión artificial y Navegación autónoma para vehículos sin conductor.
- Se puede lograr el reconocimiento de carriles en la escena empleando segmentación por color y Transformada Hough.
- Las máquinas de estados son adecuadas para el desarrollo de comportamientos para seguimiento de carriles y rebase.

1.4. Objetivos

- Diseñar un ambiente urbano adecuado para pruebas de navegación autónoma para el simulador Webots.
- Desarrollar un algoritmo de detección de carriles a partir de imágenes RGB.
- Desarrollar un control para seguimiento de carril.
- Desarrollar comportamientos para evasión de obstáculos.
- Integrar todos los módulos empleando el simulador Webots y la plataforma ROS.

1.5. Descripción del documento

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Vehículos sin conductor

Introducción

Vehículo autónomo, automóvil sin conductor, automóvil con conducción automática o vehículo guiado automatizado son algunos de los nombres que hacen referencia al concepto de conducción autónoma. De manera general, un vehículo autónomo se define como cualquier vehículo de pasajeros que es capaz de conducirse por si mismo. Sin embargo, se requiere de un mecanismo de control bien estructurado para llevar a cabo la tarea de conducción autónoma [8].

Existen registros acerca de la historia de los automóviles autónomos donde se indica un comienzo en los Estados Unidos en la primera mitad del siglo XX, al rededor de los años 1920 debido al constante y fuerte aumento de accidentes de tránsito, pues se estima que los transportes motorizados provocaron al menos 200 mil muertes accidentales en aquella época, cabe mencionar que el mayor número de estas defunciones fueron peatones y no conductores.

El error humano fue concebido como la principal causa de dichos accidentes. Sin embargo, el diseño e infraestructura de los autos de la época también fueron factores críticos que influyeron directamente en la forma y gravedad de los percances viales, fue entonces que surgió la idea de sustituir a humanos propensos a errores con tecnología que permitiera un mejor desempeño.

De esta manera se inició el desarrollo de nuevas tecnologías que permitieran un acercamiento hacia la conducción autónoma. Fue así que algunos desarrollos previos tomaron mayor fuerza. Lawrence B. Sperry usó el primer giroscopio estabilizador de avión en junio de 1914, el cual es considerado hasta la actualidad como el primer piloto automático. Otro de los adelantos tecnológicos de la época fueron las ondas de radio, esta nueva ciencia de radioguía se vio comprometida con el control remoto de mecanismos en movimiento a través de ondas de radio. Esta ultima tecnología fue desarrollada, entre otros, por el ejercito de los estados unidos, con el principal objetivo de controlar misiles, barcos y aviones a distancia.

Para el año de 1921 estos trabajos pioneros vieron como resultado el primer vehículo sin conductor. Ingenieros del Radio Air Service presentaron al público un automóvil de 2.5 metros de largo que fue controlado por medio de ondas de radio desde un camión del ejército que conducía 30 metros por detrás del vehículo. En el estricto sentido, no se trataba de un vehículo con conducción autónoma, sino de uno controlado a distancia con el conductor fuera del auto. Una situación que resulta digna de mención es que la historia y los fundamentos de los autos sin conductor esta fuertemente relacionada con el ejército y los avances impulsados por conflictos bélicos.

En la actualidad y de acuerdo con datos de la OMS en promedio suceden 1.24 millones de defunciones relacionadas con accidente viales por año[4]. Una gran parte de estos accidentes son ocasionados por fallos humanos debido a que la cantidad de asistencia que requiere un conductor o usuario potencial es muy demandante, pues se enfrenta a actividades muy desgastantes como tráfico intermitente, tramos largos en carreteras, estar bajo influencia de medicamentos o algún otro agente y cansancio excesivo, son algunos factores que al final terminan con cualquier placer de conducir. En cualquiera de estos casos, la capacidad de un vehículo autónomo abre nuevas oportunidades a una mejor movilidad, tal es el caso de el potencial para optimizar el flujo de tráfico por mencionar un ejemplo.

Aspectos necesarios para un vehículo autónomo

Uno de los principales objetivos de los vehículos autónomos es disminuir el número de accidentes vehiculares, pues ya se han mencionado pruebas evidentes para afirmar que la mayoría de los accidentes automovilísticos son ocasionados en mayor frecuencia por errores humanos. Además, prometen numerosas mejoras para el tráfico vehicular, un aumento en la capacidad de las carreteras y una mejora en el flujo de tráfico debido a tiempos de respuesta más rápidos, también se estima un menor uso de combustible y disminución de emisiones contaminantes como consecuencia de una conducción más previsoras pero sobre todo supervisada por agentes inteligentes.[6]

Una plataforma robusta para un vehículo autónomo es esencial para lograr la operación del mismo en condiciones reales, es decir, en ambientes urbanos típicos como el tráfico. Esta plataforma está formada principalmente por:

Hardware

Es representado por toda la arquitectura física, es decir, sensores que permita reconocer el ambiente y actuadores capaces de interpretar la información procesada de los sensores. Un hardware dedicado a autos autónomos consiste principalmente en tres bloques esenciales.

- **Sensores:** Permiten percibir el entorno y sus movimientos, es normal que para la percepción del ambiente vehículos autónomos hagan uso de imágenes basadas en cámaras estéreo, RGB y RGB-D, además de dispositivos que permitan realizar mediciones de rango, en este escenario son utilizados los sensores RADAR y LIDAR.

Con el fin de estimar el movimiento del vehículo se emplean mediciones de odometría e inercia, estas mediciones son principalmente otorgadas por

sensores GPS.

En el caso de las tecnologías láser como el sensor LIDAR es indispensable realizar una tarea de calibración previa al uso. Para el LIDAR es común usar calibración extrínseca e intrínseca con el fin de mejorar el desempeño del sensor y obtener lecturas más confiables.

- Actuadores: Permiten realizar acciones de control para el vehículo
- Ordenadores: Permiten procesar entradas y generar salidas.

Software

Son todos aquellos módulos lógicos que hacen uso de las entradas obtenidas por medio de sensores y se encargan de procesarlas mediante algoritmos específicos para cada tarea.

Entre las principales tareas que se atienden en un vehículo autónomo destacan:

- Mapeo del ambiente
- Localización
- Planeación de rutas
- Reconocimiento y percepción del ambiente
- Modelado de leyes de control

En cada una de estas tareas se implementan algoritmos específicos[5].

Niveles de autonomía

Conducir un vehículo requiere ejecutar una gran variedad de acciones y toma de decisiones ya sea si el vehículo se encuentra en movimiento constante o bien, detenido en una situación de tráfico. La acción de conducir se puede clasificar en tres diferentes tipos de esfuerzo que realiza el conductor: estratégico, táctico y operativo[7]. De manera general los niveles de autonomía de un vehículo motorizado sin conductor se refieren al nivel de ayuda que provee el sistema de automatización con el que está instrumentado un vehículo autónomo. Es decir, el nivel de autonomía es otorgado según el grado de asistencia que se ofrece en la tarea de conducción dinámica.

El término Tarea de Conducción Dinámica o DDT (Dynamic Driving Task) por sus siglas en inglés es el concepto que se atribuye a la suma de esfuerzos o funciones tácticas y operativas ejecutadas en tiempo real que son necesarias para un vehículo en carretera. Otras subtareas como la selección de destinos, programación de viajes y puntos de referencia están excluidas del concepto de DDT porque pertenecen al grupo de funciones estratégicas. Es importante mencionar que tanto los esfuerzos operativos y tácticos son el conjunto de la acción de operar el vehículo, pues son complementarias[3].

De acuerdo con la clasificación de Michon en 1985 el esfuerzo estratégico implica la planificación del viaje, es decir, decidir cuándo y dónde ir, cómo

viajar, además de la elección de la mejor ruta. El esfuerzo táctico incluye técnicas de maniobra del vehículo durante el trayecto del viaje, esto incluye la toma de decisiones de cómo y cuándo se puede rebasar a otro vehículo, cambiar de carril, mantener una velocidad adecuada, revisión de retrovisores laterales y superiores. La última categoría es el esfuerzo operativo que se refiere a aquellas acciones consideradas innatas o constantes, como es realizar pequeñas correcciones del ángulo de dirección con el volante para mantener el vehículo estable, frenar y acelerar para evitar obstáculos repentinos o eventos peligrosos en la vía de camino[7]. Algunos ejemplos sobre funciones operativas y tácticas son:

- Operativas
 - Control de movimiento lateral del vehículo por medio de la dirección (Steering).
 - Control de movimiento longitudinal del vehículo a través de aceleración y desaceleración.
- Tácticas
 - Planificación de maniobras.
 - Evasión y seguimiento de rutas.
- Operativas y Tácticas
 - Supervisión del ambiente de conducción por medio de detección, reconocimiento y clasificación de objetos.
 - Ejecución de respuesta ante eventos y objetos (OEDR).

La Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) ha desarrollado un estándar que define la escala de niveles de autonomía. Dicha escala determina 6 niveles de autonomía en conducción automática, desde el nivel 0 (Sin Conducción Automática) hasta el nivel 5 (Conducción Automática Completa)[3].

A continuación se enuncian y describen brevemente los 6 niveles propuestos por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE).

- Nivel 0: No Driving Automation

Este nivel indica que el conductor es completamente responsable del control de vehículo, es decir, se encarga de las funciones tácticas y operativas. Aunque los vehículos de nivel 0 pueden contar con características de seguridad que ayuden a los conductores como: advertencias de colisión y punto ciego, frenado automático de emergencia e incluso cámaras de retroceso, se clasifican dentro del nivel 0 porque ninguna de estas características actúan durante un periodo prolongado.
- Nivel 1: Driver Assistance

En el nivel 1 el sistema de conducción automatizado (ADS) comienza a tomar control del vehículo en situaciones muy específicas. Tal es el caso

de las tareas de control de movimiento lateral y longitudinal del vehículo, pero no ambas simultáneamente. Esto quiere decir que se mantiene la expectativa de que el conductor realice el resto de la DDT.

Un ejemplo es el sistema ACC (Adaptative Cruise Speed) que controla la aceleración y el frenado, generalmente en conducciones largas sobre carretera.

- Nivel 2: Partial Driving Automation

A este nivel de autonomía se presentan mejoras en el reconocimiento del entorno que permiten al vehículo realizar acciones más complejas, en el caso del control longitudinal para aceleración y frenado, y en el caso del control lateral ayuda en la corrección de la dirección.

De manera más general, en el nivel 2 se obtiene ayuda por parte de el sistema de conducción automatizado (ADS) para cumplir un porcentaje de la tarea de ejecución de respuesta ante eventos y objetos para completar acciones de control de movimiento lateral y longitudinal con asistencia limitada. Sin embargo, existen algunos eventos ante los cuales el sistema no es capaz de responder. Por lo tanto, el conductor debe de supervisar el desempeño de la asistencia proporcionada con el propósito de completar la conducción dinámica (DDT).

- Nivel 3: Conditional Driving Automation

El nivel 3 es considerado como el punto de entrada a la conducción autónoma, ya que en situaciones muy específicas con cierto tipo de carreteras y condiciones climáticas adecuadas el conductor puede comenzar a desconectarse del acto de conducir.

El desempeño por parte del sistema de conducción automatizado o ADS por sus siglas en inglés es considerablemente mayor pues toma el control de todas las acciones que permiten completar la tarea de conducción dinámica (DDT). En este nivel aún se mantiene la expectativa de que el usuario (conductor) este listo ante las solicitudes que pueda requerir el ADS para retomar el control del vehículo en cualquier momento.

Un ADS de este nivel permite completar un conducción dinámica en condiciones específicas, por ejemplo en condiciones de autopista con velocidad moderada y manejo de frenos. En situaciones de tráfico intermitente el vehículo envía alertas al conductor para que retome el control.

- Nivel 4: High Driving Automation

En este nivel el sistema de conducción automatizado (ADS) es completamente capaz de monitorear el entorno de conducción y ejecutar funciones tácticas y operativas. El vehículo también cuenta con la capacidad de alertar al conductor si es que los límites operativos se sobrepasan, en caso de no encontrar respuesta por parte del conductor el vehículo debe asegurarse automáticamente. En otras palabras, un usuario dentro de un vehículo adaptado con características de nivel 4 es un pasajero que no necesita

responder ante fallas del sistema para el desempeño de una conducción dinámica(DDT).

Un ADS diseñado para el nivel 4 está capacitado para cumplir conducción dinámica hacia adelante y hacia atrás, además de lograr una conducción con riesgo mínimo en caso de que el usuario no pueda retomar el control. El cumplimiento de condiciones de riesgo mínimo en adición con la capacidad de recuperación automática resultan ser la principal diferencia que ofrece el ADS de nivel 4 frente a uno de nivel 3.

Vehículos adaptados con condiciones de nivel 4 son capaces de seguir una ruta predeterminada dentro de regiones geográficas limitadas; por ejemplo: circuitos cerrados, campus escolar o una base militar.

■ Nivel 5: Full Driving Automation

Los vehículos adaptados a nivel 5 son completamente autónomos, es decir, el usuario no necesita supervisar el sistema de conducción automatizado. Esto significa que el ADS puede manejar el vehículo dentro de cualquier carretera en cualquier lugar del mundo bajo las mismas condiciones en las que un humano pueda atender la acción de conducir.

Es decir que no existen restricciones climáticas, geográficas o de horario donde pueda operar el ADS. Sin embargo, esto no significa que un vehículo de estas características pueda actuar en situaciones donde resulte imposible la tarea de conducción dinámica(DDT) incluso para los humanos; por ejemplo en tormentas de nieve, derrumbes o inundaciones. En tales casos el ADS debe de lograr una condición de riesgo mínimo, deteniéndose o esperando a que las condiciones cambien.

Finalmente y a manera de ejemplo, un vehículo de nivel 5 puede ser programado con un punto de inicio y un punto de destino siendo capaz de cubrir el trayecto completo en vías públicas independientemente de las condiciones de tráfico, carretera y o clima.

De manera mas concisa se pueden expresar las acciones de manejo que ejecuta el conductor y el sistema de conducción automatizado según el nivel en el que se encuentre.

A partir del nivel 0 y hasta el nivel 3 se entiende que el conductor tiene mayor grado de responsabilidad sobre el manejo del vehículo. El conductor debe de supervisar constantemente las funciones de apoyo con las que cuente el vehículo, según el nivel. Sin embargo, debe de mantenerse atento para frenar, acelerar y dirigir según sea necesario para mantener la seguridad. Un sistema de conducción automatizado (ADS) de estos niveles cuenta con características que permiten proporcionar asistencia y advertencias momentáneas en el caso del nivel 0 por medio de frenado de emergencia automático (AEB) y advertencia de punto ciego. En los niveles 2 y 3 existen características que ayudan en acciones de control lateral y longitudinal del vehículo, un sistema ACC y centrado de carril son características que se encuentran en un sistema de conducción automatizada de estos niveles[3].

Los niveles 3, 4 y 5 proveen un mayor grado de asistencia hacia el conductor y en consecuencia produce una disminución en las tareas que debe de desempeñar el conductor, pues el conductor solo retoma el control del vehículo si el sistema de conducción automatizado (ADS) lo solicita para el caso de los niveles 3 y 4, en el nivel 5 no se requiere que el conductor se haga cargo de la unidad.

La conducción autónoma es limitada y restringida en los niveles 3 y 4, esto se logra por medio de una mayor percepción del ambiente de conducción, en estos dos casos no es necesaria la presencia del conductor al frente del volante, solo si es solicitado por el ADS. El nivel 5 permite la navegación autónoma de manera completa en cualquier lugar y sin restricciones, el ADS de este sistema esta conformado por una combinación y mejora de cada uno de los componentes usados en niveles inferiores[3].

Nivel de autonomía esperado en este trabajo

En este trabajo se pretende alcanzar un nivel 4 de autonomía, con el fin de lograr este nivel se planea instrumentar un vehículo(simulado en 3D) con sensores que le permitan percibir el ambiente de conducción. LIDAR, cámara RGB y GPS son sensores que ayudarán en la estimación de objetos para resolver acciones de rebase y seguimiento de carriles.

Además se busca desarrollar las leyes de control correspondientes para el desempeño de tareas operativas y tácticas de conducción dinámica (DDT). Es considerado como nivel 4 por las características que posee el sistema de conducción automatizada (ADS), además de que la intervención humana es casi nula, pues al ser un ambiente simulado no se cuentan con esas características. Funciones estratégicas quedan fuera del alcance de este trabajo.

Sensores

LIDAR

Un sensor LIDAR o Light Detection and Ranging por sus siglas en inglés es una tecnología óptica utilizada para detección remota, es decir, permite medir distancia y otras propiedades de un objeto objetivo que es iluminado por un haz de luz, a menudo se hace por medio de pulsos láser. Luz ultravioleta, visible o infrarroja son ejemplos de luz que puede usar un sensor LIDAR para obtener imágenes de los objetivos. Dentro de la gama de objetos que pueden ser detectados por el sensor se encuentran : objetos no metálicos, rocas, compuestos químicos, sólidos, nubes e incluso moléculas individuales[8].

El LIDAR esta diseñado para medir información de rango y proporcionarla al usuario. El principio fundamental de el funcionamiento del LIDAR es emitir un pulso de luz hacia el objetivo y por consecuencia se activa un circuito interno de temporización. Internamente se mide el tiempo que le toma al láser llegar al objetivo y regresar al receptor desde el objetivo, este proceso obtiene la distancia a la que se encuentra el objeto objetivo.

Sin embargo, la información que se presenta al usuario puede no estar en un rango real. Este efecto es causado por diferentes factores que alteran el ambiente. Por ejemplo, el ruido inherente del ambiente puede variaciones inesperadas en sensores de baja escala de hasta 10 centímetros en mediciones de rango, estas variaciones resultan ser perjudiciales en aplicaciones de navegación autónoma o en aplicaciones donde se requiera de una precisión con mayor exactitud[1].

Cámaras RGB
Cámaras Estéreo
Cámaras RGB-D
Sonares
GPS

Comienza por hablar sobre qué es un vehículo sin conductor y qué características tiene. Tal vez menciona un poco de la historia. Sobre definiciones, puedes encontrar información en: <https://core.ac.uk/download/pdf/234677061.pdf> <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-48847-8>

Habla también sobre los niveles de autonomía y da una breve descripción de cada nivel. Enfatiza el nivel que se logrará en este trabajo. https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104/ <https://ieeexplore.ieee.org/document/7490340> https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095741742030628X?casa_token=WTcFlQ-e2BcAAAAA:KSyYhNe1sPvDkBOi1M2H0rrKU_eX9tIiiLX4AAyAJzDQ8ECByLqFc9RDGbl

Luego habla de lo que se necesita para que un vehículo pueda ser autónomo: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6179503/> <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5940562>

Luego hablas de los sensores más comunes que se pueden usar para instrumentar un vehículo sin conductor. Aquí hay una posible lista: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6179503>

- Lidar: Cap 8 de <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/b22159/introduction-laser-science-engineering-travis-taylor>
- Cámaras RGB: Cap 1 de <https://www.pearson.com/us/higher-education/program/Forsyth-Computer-Vision-A-Modern-Approach-2nd-Edition/PGM111082.html> Sec. 3.9 de <https://www.springer.com/gp/book/9783540343196>
- Cámaras estéreo: Cap 1 de <https://www.wiley.com/en-us/An+Introduction+to+3D+Computer+Vision+Techniques+and+Algorithms-p-9781119964476>
- Cámaras RGB-D: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6619001>
- Sonares Sec. 3.6 de <https://www.springer.com/gp/book/9783540343196>

2.2. Simuladores

Por qué y para qué usar simuladores: Cap 7 de <https://link.springer.com/referencework/10.1007%2F978-0-85729-085-4>

- Motores de físicas, ODE y otros
- Bibliotecas para gráficos, OGRE, OpenGL y otros.
- Gazebo y sus características.
- Webots y sus características

El desarrollo de nuevas tecnologías y agentes inteligentes se encuentra en constante crecimiento a nivel mundial y los vehículos autónomos no son la excepción, debido a la creencia de que los vehículos autónomos pueden ayudar e incluso mejorar tareas de conducción dinámica, comodidad y calidad de un viaje. Además, el uso de tecnologías de comunicación abre puertas hacia la generación de nuevos productos y servicios que se basan en la comunicación entre vehículos en un sistema de carretera.

Sistemas inteligentes como ACC, LKA, CA, DN ofrecen mayor eficiencia y confianza en condiciones normales de manejo, en situaciones de tráfico mejora el rendimiento de combustible además de mantener un ambiente seguro. De esta manera el creciente interés en el área de vehículos inteligentes también ha solicitado una mejora en los distintos componentes que requiere, es decir, la necesidad de innovación requiere de más y mejores componentes que instrumenten a un vehículo que pretende ser autónomo. Una gran variedad de sensores, redes de sensores, tecnologías de comunicación, poder de cómputo y controladores requieren de constantes mejoras y actualizaciones en hardware y software[2].

¿Por qué usar simuladores?

El desarrollo sistemas para agentes inteligentes en vehículos autónomos es un proceso muy complejo, debido a que involucra diferentes componentes tecnológicos, en específico componentes electrónicos y mecánicos que en conjunto resultan ser difíciles y costosos de conseguir sino se cuenta con los recursos necesarios.

Esta es la principal razón para considerar el uso de simuladores durante el desarrollo de sistemas dedicados a vehículos autónomos, pues permiten realizar desarrollos de muy bajo costo en escenarios que presentan similitudes con escenarios del mundo real. Otra razón de mucho peso para considerar el uso de simuladores durante el desarrollo es la seguridad y robustez ante fallos pues al usar un ambiente simulado se cuenta con un mayor margen de maniobra ante situaciones catastróficas que en un ambiente real podrían resultar muy perjudiciales.

Bajo este escenario la simulación juega un papel fundamental en la evaluación y validación del desarrollo de sistemas inteligentes en vehículos. Además, visto desde otro punto de vista los simuladores poseen características que permiten observación de diferentes conductas en situaciones viales para la formulación de nuevas políticas que permitan mejorar la movilidad. Convirtiéndose entonces en una herramienta para investigar escenarios futuros[2].

¿Para qué usar simuladores?

Como se mencionó anteriormente, cumplir con las condiciones y elementos necesarios para el desarrollo de sistemas inteligentes en vehículos autónomos está lleno de riesgos, es a largo plazo, costoso y complejo. Es por ello que el uso de simuladores se vuelve esencial en este desarrollo.

De esta manera durante la etapa de desarrollo se buscan cubrir diferentes fases con el fin de lograr la tarea final, como en cualquier proyecto de software se busca minimizar un problema de gran escala en problemas más pequeños y específicos. Es en este caso donde los simuladores ayudan a identificar aspectos para:

- Desarrollar un concepto base, es decir, conceptualizar la idea principal con base en conceptos teóricos, modelos matemáticos.
- Implementar el concepto base con tecnologías que permitan describir el comportamiento esperado.
- Desarrollo completo del sistema y creación de prototipos para la demostración del funcionamiento de los componentes de hardware y software integrados.
- Desarrollo de un producto final con base en prototipos, sin dejar de lado el mantenimiento y actualizaciones.

En el caso específico de vehículos sin conductor se buscan simulaciones que permitan un entorno que se asemeje a las condiciones de conducción vehicular en el mundo real, se distinguen varios tipos de simulación:

- Simulación de Tráfico: Pretende una simulación de todos los sistemas relacionados con el tráfico (control y gestión de tráfico), su propósito es estudiar a los actores involucrados en una red de tráfico (vehículos, conductores, sistemas de tráfico) además de los impactos directos en la eficiencia y seguridad del tráfico.
- Simulación de aplicaciones y vehículos: Es una simulación con mayor detalle de tráfico e involucra más unidades vehiculares en una red de tráfico los cuales son modelados con alta fidelidad, se incluyen simulaciones de hardware y software en bucle (HiL, SiL. El objetivo de esta simulación es el desarrollo de aplicaciones y la evaluación técnica.
- Simulación de comunicación: La necesidad de simular telecomunicaciones surgió con la llegada de sistemas cooperativos, el desarrollo de aplicaciones y evaluación del rendimiento de comunicación entre aplicaciones es el propósito de esta simulación. Es importante mencionar que la simulación de comunicación se puede presentar en diferentes niveles según las necesidades y capacidad de computo disponibles.
- Simulación de conducción: Quizás la más importante de las simulaciones es la representación de un conductor, pues algunas de las funciones no son completamente inteligentes sino que resulta en una cooperación entre conductor y sistema. El objetivo de esta simulación es evaluar el comportamiento de un conductor y el efecto que tiene sobre alguna función específica.

Cada ambiente de simulación tiene sus propias necesidades para modelar y describir la dinámica de los actores presentes. Para simular funciones inteligentes en vehículos se requieren de modelos que describan la dinámica del vehículo, sensores, actuadores, conductores, rendimiento de comunicaciones y unidades de carretera. Según las necesidades, en algunos casos los modelos pueden ser

reemplazados por simuladores dedicados, como el caso de telecomunicaciones a gran escala donde son manejadas por medio de modelos estadísticos[2].

Claramente se puede afirmar que la coherencia entre cada una de las fases de desarrollo de sistemas inteligentes en vehículos es vital con el fin de salvaguardar la portabilidad de resultados. De esta manera se obtiene un marco de trabajo que permite una simulación con diferentes niveles de detalle desde modelos de controladores hasta modelos detallados de sensores y actuadores que al final resultan en un marco que permite realizar procedimientos avanzados de prueba en cada paso de simulación.

2.3. Conceptos básicos de visión artificial

- Imágenes RGB y su representación en memoria
- Modelo de cámara Pinhole
- Espacios de color

2.4. Máquinas de estados finitas

- Definición
- Formas de implementarlas (memorias y en lenguajes imperativos)

2.5. Trabajo relacionado

- Los vehículos Tesla y de Google
- El equipo de FUB
- La categoría AutoModelCar del TMR
- El trabajo hecho en el laboratorio de Biorrobótica

Capítulo 3

Simulación con Webots

3.1. Conceptos básicos del simulador Webots

Webots

Webots es un software multiplataforma y de código abierto que permite la simulación de robots móviles, el ambiente de Webots provee un entorno de desarrollo completo que facilita la programación, modelado y simulación de robots de manera profesional. Este ambiente de desarrollo permite al usuario crear entornos virtuales en 3D con propiedades físicas que son importantes para el comportamiento de los robots, tal es el caso de propiedades como la masa, coeficiente de fricción, articulaciones, entre otros.

Por otra parte se pueden encontrar objetos pasivos y activos también llamados robots móviles, los cuales pueden ser equipados con una gran variedad de sensores y actuadores que contiene Webots, entre los cuales se pueden encontrar, sensores de distancia, motores, cámaras, ruedas, emisores y receptores. En la figura 3.1 se presenta la interfaz de usuario que ofrece Webots.

Además ofrece al usuario la facilidad de programar de manera individual cada robot creado con el fin de lograr el comportamiento deseado para cada uno.

Lenguajes y Sistemas Operativos

Al ser un software de código abierto Webots puede ser usado en diferentes plataformas de escritorio, de esta manera es posible ejecutar el simulador desde plataformas Windows, Linux y macOS, para cada una de estas plataformas se encuentra disponible la documentación correspondiente, además de que cuenta con una comunidad muy activa en cada una de sus variantes. Sin embargo, las distribuciones Linux son las que se encuentran con mayor frecuencia, esto debido a la amplia compatibilidad con la que cuenta Webots con diferentes herramientas en el desarrollo de robots móviles.

Por otra parte, Webot cuenta con soporte de diferentes lenguajes de programación en la creación de programas controladores, entre los lenguajes soportados por el simulador se puede encontrar lenguajes compilados como: C, C++ y Java,

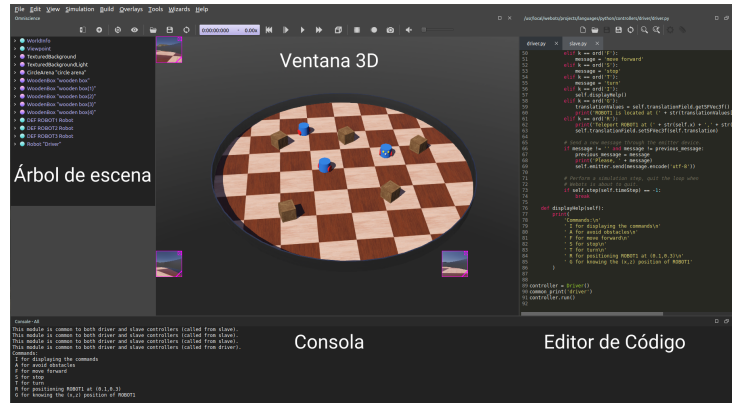


Figura 3.1: Interfaz de Usuario Webots

también permite el uso de lenguajes interpretados como: Python y MATLAB.

Controladores, controladores supervisores y mundos

Para crear una simulación en Webots se requiere de dos elementos principales: un mundo y uno o varios controladores.

Mundo

En Webots un mundo es una representación del ambiente mediante la descripción en 3D de las propiedades de el robot y el entorno en el que se encuentra, es decir, es el conjunto de elementos que junto con el robot forman una escena en 3D la cual es una abstracción del mundo real, con el fin de hacer parecer el ambiente a un ambiente real.

Un mundo especifica la descripción de cada objeto mediante propiedades como: posición, geometría, orientación, apariencia, propiedades físicas (en caso de ser necesarias), etc. Donde cada objeto definido puede contener a su vez un objeto diferente. En la figura 3.2 se observa un ejemplo de un mundo creado en Webots.

Controlador

Un controlador es un programa que permite ejecutar acciones de control para un robot específico en un mundo específico. Dichos controladores pueden ser desarrollados en los diferentes lenguajes de programación soportados por el simulador (C, C++, Java, Python, MATLAB). Para cada uno de estos lenguajes se provee la documentación necesaria.

Una característica importante de los controladores es que un controlador puede ser usado por diferentes robots pero un robot solo puede usar un controlador. Al iniciar una simulación Webots lanza los controladores previamente asignados en cada robot, de manera que, para cada controlador existe un proceso independiente.

Controlador Supervisor

Este tipo de controladores son una variante especial de los controladores tradicionales, la principal diferencia entre ellos es que los controladores supervisores tiene acceso a operaciones privilegiadas. Por ejemplo; el control de simulación

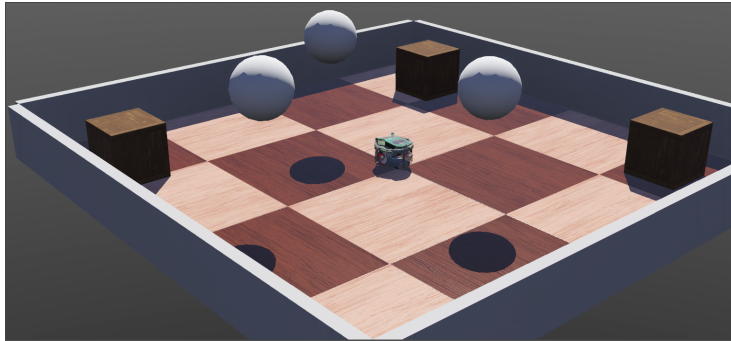


Figura 3.2: Ejemplo de mundo en Webots.

para mover el robot a una posición aleatoria, realizar una captura de vídeo de la simulación, entre otras.

Los supervisores pueden ser escritos de manera similar que los controladores tradicionales en cualquiera de los lenguajes soportados por Webots.

- Lenguajes y sistemas operativos soportados
- Controladores, mundos y controladores supervisores.

3.2. El formato Open Street Maps

- características y specs
- Cómo usarlo con Webots

3.3. El ambiente de simulación

Capítulo 4

Seguimiento de carriles

- 4.1. Espacios de color
- 4.2. Detección de bordes
- 4.3. Transformada Hough
- 4.4. Modelo cinemático del vehículo
- 4.5. Leyes de control

Capítulo 5

Evación de obstáculos

- 5.1. El Filtro de Kalman Extendido
- 5.2. Estimación de velocidad con el EKF
- 5.3. Máquinas de estado finitas
- 5.4. Maniobras de rebase

Capítulo 6

Pruebas y resultados

6.1. Integración mediante la plataforma ROS

- Descripción de cada nodo con los tópicos publicados/suscritos y servicios requeridos/atendidos

6.2. Pruebas de navegación sin obstáculos

6.3. Pruebas de navegación con obstáculos

Capítulo 7

Discusión

7.1. Conclusiones

7.2. Trabajo futuro

Bibliografía

- [1] M. A. Cooper, J. F. Raquet, and R. Patton. Range information characterization of the hokuyo ust-20lx lidar sensor. In *Photonics*, volume 5, page 12. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2018.
- [2] A. Eskandarian. *Handbook of intelligent vehicles*, volume 2. Springer, 2012.
- [3] S. J3016. Surface vehicle recommended practice-taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles. *SAE International*, pages 6–41, 2021.
- [4] B. Lenz. *Autonomous driving: Technical, legal and social aspects*. Springer Open, 2016.
- [5] J. Levinson, J. Askeland, J. Becker, J. Dolson, D. Held, S. Kammel, J. Z. Kolter, D. Langer, O. Pink, V. Pratt, et al. Towards fully autonomous driving: Systems and algorithms. In *2011 IEEE intelligent vehicles symposium (IV)*, pages 163–168. IEEE, 2011.
- [6] T. Luettel, M. Himmelsbach, and H.-J. Wuensche. Autonomous ground vehicles—concepts and a path to the future. *Proceedings of the IEEE*, 100(Special Centennial Issue):1831–1839, 2012.
- [7] J. A. Michon. A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do? In *Human behavior and traffic safety*, pages 485–524. Springer, 1985.
- [8] S. D. Rathod. An autonomous driverless car: an idea to overcome the urban road challenges. *Journal of Information Engineering and Applications*, 3(13):34–38, 2013.