

ALBERTO DÍAZ ÁLVAREZ

MODELADO DE COMPOR- TAMIENTO DE CONDUCTO- TORES CON TÉCNICAS DE INTELIGENCIA COMPU- TACIONAL

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Alberto Díaz Álvarez

Modelado de comportamiento de conductores con técnicas de Inteligencia Computacional

Tesis doctoral, 21 de julio de 2016

Revisores: Rev1, Rev2 y Rev3

Supervisores: Dr. Francisco Serradilla García y Dr. Felipe Jiménez Alonso

Instituto Universitario de Investigación del Automóvil

Universidad Politécnica de Madrid

Campus Sur UPM, Carretera de Valencia (A-3), km7

28031 Madrid

Este documento esta realizado bajo licencia **Creative Commons “Reconocimiento-CompartirIgual 3.0 España”** .



Para Davi.

Índice general

1	<i>Introducción</i>	15
2	<i>Simuladores de tráfico y sistemas multiagente</i>	21
3	<i>Inteligencia Computacional</i>	25
4	<i>Modelos de comportamiento</i>	31
5	<i>Conclusiones</i>	35

Siglas

ADAS Advanced Driver Assistance System. [33](#)

AI Artificial Intelligence. [15](#), [25–28](#)

CEP Complex Event Processing. [34](#)

CI Computational Intelligence. [15](#), [16](#), [19](#), [25](#), [27](#), [28](#)

HC Hard-Computing. [28](#)

ITS Intelligent Transport System. [16](#)

IvCA Intra-vehicular Context Awareness. [34](#)

MAS Multi-Agent System. [18](#)

NDS Naturalistic driving study. [32](#)

SC Soft-Computing. [28](#)

TORCS The Simulated Car Racing Championship. [34](#)

Índice de figuras

- 1.1. Desde el comienzo de la revolución industrial, el uso masivo de combustibles fósiles y el crecimiento de la población propició un aumento desproporcionado de CO_2 a la atmósfera que continua todavía hoy. La gráfica muestra cómo ambos valores parecen estar correlacionados. Fuente: Environmental Defense Fund (edf.org). 17
- 1.2. Último censo de conductores segmentado por edades. Fuente: Dirección General de Tráfico (dgt.es). 19
- 3.1. Objetivos que persigue la Artificial Intelligence. Las filas diferencian si lo que se persigue es pensamiento o comportamiento mientras que las columnas separan si se persigue la inteligencia entendida como la humana o como el ideal de inteligencia (inteligencia racional). 27
- 4.1. Esta es una figura de mierda (porque no se ve lo que se quiere mostrar) pero que me demuestra que con cuatro imágenes me pongo en las 40 páginas sin pestañear. La idea es cambiarla por otra más como la figura 2 de [[Michon, 1985](#)]. Con algún que otro color bonito a poder ser. 31

Índice de cuadros

- 1.1. Línea temporal de los principales hitos en la AI. Actualmente la AI está ofreciendo resultados muy prometedores áreas como la conducción autónoma, el procesamiento del lenguaje natural o el análisis de sentimiento entre muchos otros. 15

Capítulo 1

Introducción

Es un hecho que la **Inteligencia Artificial (AI, Artificial Intelligence)** como área de conocimiento ha experimentado un creciente interés en los últimos años. Esto no siempre ha sido así, ya que después de un nacimiento muy esperanzador, con mucho optimismo, le siguieron unas épocas de apenas avance (ver cuadro 1.1). Sin embargo, en la actualidad es muy difícil encontrar un campo que no se beneficie directamente de sus técnicas.

Una de sus razones es su carácter multidisciplinar ya que, si bien se la define como área perteneciente al campo de la informática, es transversal a muy diferentes campos, como pueden ser por ejemplo la biología, neurología o la psicología, entre otros.

Dentro del área de la inteligencia artificial es común diferenciar dos tipos de aproximaciones a la hora de hablar de cómo representar el conocimiento:

- **AI clásica.** Postula que el conocimiento como tal es reducible a un conjunto de símbolos junto con operadores para su manipulación. A este tipo de técnicas y soluciones, que basan su funcionamiento en modelos analíticos, se las denominan también *Hard Computing*, y no suelen tolerar factores como la imprecisión y la incertidumbre (e.g. cálculo simbólico o análisis numérico). Se la suele denominar también *AI simbólica*.
- **Inteligencia Computacional (CI, Computational Intelligence).** En ésta el conocimiento se alcanza por aproximación. Los esfuerzos se centran en la simulación de los elementos de bajo nivel que subyacen a los comportamientos inteligentes (e.g. redes neuronales artificiales) esperando que de éstos surja la solución de forma espontánea. A este tipo de técnicas se las conoce también como *Soft Computing*¹, conjunto de soluciones para trabajar sobre información incompleta, imprecisa o con ruido. Se la conoce también como *AI subsimbólica*

El límite entre ambos conjuntos no está perfectamente definido, máxime si tenemos en cuenta las diferentes terminologías exis-

Cuadro 1.1: Línea temporal de los principales hitos en la AI. Actualmente la AI está ofreciendo resultados muy prometedores áreas como la conducción autónoma, el procesamiento del lenguaje natural o el análisis de sentimiento entre muchos otros.

	Conferencia de Dartmouth. Nace el campo de la AI. Se destinan muchos recursos debido al potencial del nuevo campo..
1956 . . .	No llegan los resultados esperados. Se suspenden financiaciones y se deja de investigar en muchas áreas (<i>AI Winter</i>).
1974 . . .	Aparecen los sistemas expertos. Muy prometedores. Acaparan la práctica totalidad de la investigación en AI..
1980 . . .	De nuevo los resultados no son lo esperado y vuelve a disminuir el trabajo en AI..
1987 . . .	La mejora de las prestaciones, la ubicuidad de los ordenadores y nuevos conceptos (e.g. agentes) hacen que la investigación en el área vuelva a crecer. Se replantea el concepto de AI..
1990 . . .	Se retoman investigaciones relacionadas con el aprendizaje profundo. Aumenta la investigación en el área de las redes neuronales y redes bayesianas..
2000 . . .	Conferencia de Dartmouth. Se analizan los avances y se debate sobre la AI a 50 años vista. Crece la expectación y el interés en el campo.
2006 . . .	Crece el interés en el aprendizaje automático debido a los resultados obtenidos y el aumento de las fuentes de datos.
2007 . . .	

¹ Veremos no obstante en el capítulo 3 que no es del todo cierto.

tentes, las sinergias entre distintas técnicas dentro del área y los diferentes puntos de vista sobre éstas por parte de los autores. Sin embargo, una de las principales diferencias de ambos paradigmas es el punto de vista a la hora de solucionar problemas. Mientras que en el primer caso es prácticamente impensable una aproximación diferente a la *top-down*², en el segundo los problemas se resuelven utilizando el paradigma contrario, *bottom-up*³. Revisaremos las diferencias entre conceptos de diferentes autores en el capítulo 3

Uno de los campos de aplicación es el de los **Sistemas Inteligentes de Transporte (ITSs, Intelligent Transport Systems)**. Éstos se definen como un conjunto de aplicaciones orientadas a gestionar el transporte en todos sus aspectos y granularidades (e.g. conducción eficiente, diseño de automóviles, gestión del tráfico o señalización en redes de carreteras) para hacerlos más eficientes y seguros. El interés es tal que en el año 2010 se publicó la directiva 2010/40/UE (ver [par, 2010]) donde se estableció el marco de implantación de los ITS en la Unión Europea⁴.

En el caso concreto del comportamiento al volante, es interesante la evaluación de los conductores para conocer su manera de actuar en determinados escenarios, y poder extraer información de éstos que nos permitan, por ejemplo, detectar qué factores pueden afectar más o menos a determinados indicadores (e.g. el consumo estimado para una ruta en concreto). Sin embargo, la evaluación en distintos escenarios puede no ser interesante debido a limitaciones existentes, como pueden ser, por ejemplo, el tiempo, el dinero o la peligrosidad del escenario.

Los simuladores de tráfico son una solución para muchas de estas limitaciones, pero suelen basar su funcionamiento en conductores y vehículos (normalmente concebidos como una única entidad) basándose en modelos de conductor que responden a funciones más o menos complejas, además con pocas o ningunas opciones de personalización. Esto provoca que dichos modelos se adapten poco al modelo de un conductor en concreto.

Esta tesis pretende explorar el tema de la generación de modelos de conductor para simuladores que respondan al comportamiento de conductores reales usando, para ello, técnicas pertenecientes al campo de la CI.

Concretamente pretende desarrollar un método para el análisis de la eficiencia de los conductores realizando, para ello, un modelo del perfil de conducción a partir de técnicas de la CI y aplicándolo a un entorno multiagente de simulación. Así, una vez configurado el entorno multiagente, se podrán estudiar aspectos generales como la evolución del tráfico con determinados perfiles o particulares como el estilo de conducción o el impacto de los sistemas de asistencia.

² En una aproximación *top-down* se define el algoritmo que resuelve el problema y se ejecuta para que éste nos lleve a la solución exacta.

³ En una aproximación *bottom-up* la solución “aprende” a resolverse dado el problema, sin necesidad de plantear un algoritmo, llevándonos a soluciones no necesariamente exactas pero sí lo suficientemente buenas para ser aceptadas.

⁴ En esta directiva, los ITS se definen como *aplicaciones avanzadas que, sin incluir la inteligencia como tal, proporcionan servicios innovadores en relación con los diferentes modos de transporte y la gestión del tráfico y permiten a los distintos usuarios estar mejor informados y hacer un uso más seguro, más coordinado y «más inteligente» de las redes de transporte.*

Motivación

Los conceptos introducidos al comienzo del capítulo obedecen a una *necesidad* (aquí como eufemismo de problema) de la sociedad en la que vivimos, y que afecta tanto a nuestra generación como afectará a las venideras: la eficiencia en la conducción. Dado que es imprescindible saber que existe un problema para arreglarlo, nada mejor que puntualizar algunos hechos de sobra conocidos:

- En el año 2014, el número de vehículos a nivel mundial asciende a más de 1,200 millones, con una tendencia creciente [OICA, 2015]. Reducir en un pequeño porcentaje el consumo durante la conducción evita la emisión de toneladas de gases considerados nocivos para el medio ambiente y el ser humano⁵.
- Debemos abandonar los combustibles fósiles antes de que éstos nos abandonen a nosotros. Si bien es cierto que existen diferentes puntos de vista acerca de cuándo se agotarán las reservas de petróleo, también lo es que los combustibles fósiles son recursos **finitos**. Lo más probable es que no se llegue a agotar debido a la ley de la oferta y la demanda, pero hay que recordar que el petróleo se usa como base para la producción de otros muchos tipos de productos, como por ejemplo la vaselina, el asfalto o los plásticos.
- Independientemente del momento en el que se agoten los recursos, hay que hacer notar que la emisión de gases está correlacionada con el aumento de la temperatura del planeta, hecho que se ilustra en la figura 1.1. De seguir con el ritmo de consumo actual, se teme llegar a un punto de no retorno con consecuencias catastróficas para la vida en el planeta.
- Algo más cercano, y aun así íntimamente relacionado. La conducción eficiente afecta directamente a factores correlacionados con el número de accidentes de tráfico. Un factor de sobra conocido es el de la velocidad, factor relacionado no sólo con el número sino con la gravedad de los accidentes [Imprialou et al., 2016]. Otros indicadores son las aceleraciones, deceleraciones y maniobras de cambio de dirección, cuya frecuencia es inversamente proporcional a la eficiencia en la conducción y directamente proporcional a la agresividad, falta de seguridad y accidentes ([Dingus et al., 2006] y [Lerner et al., 2010]).

Estos hechos son solo algunos que ponen de manifiesto la necesidad de centrarse en el problema de cómo hacer de la conducción una actividad más eficiente y segura.

La **conducción eficiente** o *eco-driving* es definida como la aplicación de una serie de reglas de conducción con el objetivo de reducir el consumo de combustible, independientemente del tipo (e.g. electricidad, gasolina, gas natural, ...).

⁵ Uno puede argumentar que el parque automovilístico se recicla con nuevos vehículos eléctricos categorizados “de consumo o”. La triste realidad es que estos vehículos consumen la electricidad generada actualmente de una mayoría de centrales de combustibles fósiles y nucleares. Además, mientras que en países desarrollados el crecimiento ha sido en torno al 4-7 %, en países subdesarrollados, donde no existe aun infraestructura para la recarga de vehículos eléctricos, dicho crecimiento ha superado el 120 %.

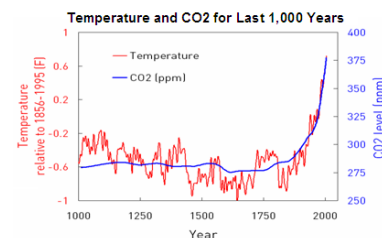


Figura 1.1: Desde el comienzo de la revolución industrial, el uso masivo de combustibles fósiles y el crecimiento de la población propició un aumento desproporcionado de CO₂ a la atmósfera que continúa todavía hoy. La gráfica muestra cómo ambos valores parecen estar correlacionados. Fuente: Environmental Defense Fund (edf.org).

Ser capaces de identificar o al menos estimar qué conductores son considerados como no eficientes es importante debido a que, de esta manera, se pueden identificar los hábitos recurrentes en este tipo de perfil y adecuar la formación para eliminar dichos hábitos. Más aún teniendo en cuenta la relación existente entre la peligrosidad y algunas conductas agresivas. Un ejemplo donde la identificación de perfiles no eficientes pueden tener impacto claro económico y social es el de las empresas cuya actividad se basa en el transporte de mercancías o de personas.

Sin embargo, identificar la conducta de un conductor no es fácil, dado que su comportamiento se ve condicionado por numerosos factores como el estado de la ruta, el del tráfico o el estado físico o anímico. Además, la ambigüedad de las situaciones dificulta todavía más la identificación. Por ejemplo, un conductor puede ser clasificado en un momento como agresivo o no eficiente en una situación únicamente porque su comportamiento ha sido condicionado por las malas reacciones por parte de los demás conductores.

El análisis de todos los posibles casos es una tarea prácticamente imposible. Por ello, las simulaciones pueden dar una estimación de los posibles resultados de un estudio en el mundo real. Las simulaciones con [Sistemas Multi-Agentes \(MASs, Multi-Agent Systems\)](#) representan a los conductores como agentes permitiendo la evaluación del comportamiento tanto individual como general del sistema en base a sus individuos a través de iteraciones discretas de tiempo.

Si dichos agentes son obtenidos mediante la modelización de conductores a partir de sus datos reales, su comportamiento en la simulación podría ser considerado como fuente de datos para condiciones de tráfico y/o rutas no contempladas en el mundo real. De esta forma, se dispondría de un marco de trabajo para la comparación de diferentes conductores sin necesidad de exponerlos a todos y cada uno de los posibles eventos posibles. También sería factible evaluar sistemas de asistencia evitando los problemas de no comparabilidad de condiciones del entorno entre pruebas.

Demostrar que la evaluación de un modelo del conductor en entornos simulados es equivalente a la evaluación de conductores en entornos reales implica que se pueden comparar dos conductores usando un criterio objetivo, es decir, sin depender del estado del resto de factores a la hora de realizar la prueba de campo. Dicho de otro modo, implicaría que es posible comparar la eficiencia de dos conductores independientemente del estado del tráfico e, incluso, sobre rutas diferentes.

Objetivos

El objetivo de esta tesis doctoral es la de demostrar la hipótesis [1](#), quedando dicha demostración dentro de los límites impuestos por

los supuestos y restricciones indicados más adelante.

Hipótesis 1 (H1): *La aplicación de técnicas pertenecientes al campo de la CI con datos extraídos de un entorno de micro-simulación permitirá modelar, de manera fiel a la realidad, el comportamiento de conductores reales.*

Por tanto, el objetivo de la tesis es el de simular el comportamiento de conductores en entornos de micro-simulación a partir de su comportamiento en entornos reales usando técnicas de CI. Para ello se consideran los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar y aplicar técnicas de la CI sobre el área de la conducción.
- Implementar métodos de generación de modelos personalizados a partir de datos de conductores.
- Aplicar modelos de conductores a entornos de simulación multi-agente.
- Validar los modelos de conductor contra conductores reales.
- Estudiar la efectividad de sistemas de asistencia encaminados a mejorar la eficiencia y analizar el comportamiento de conductor.

Supuestos

- Se supone que el comportamiento de un conductor es el comportamiento en línea y el comportamiento de cambio de carril⁶.
- Los datos de los que extraer el comportamiento se corresponderán con lecturas realizadas durante el día, con buena visibilidad y sin lluvia.
- El tipo de vehículo sobre el que modelar el comportamiento será el de un utilitario.
- El conductor a modelar pertenecerá al grupo más representativo de conductores. Esto se corresponde con varón de 35 a 39 años (ver figura 1.2).

Restricciones

- La resolución máxima del modelo creado es de 1Hz.
- En el caso de los modelos que hacen uso de redes neuronales artificiales, no se pueden explicar las razones del comportamiento inferido.

⁶ Son conocidos en la literatura como *car-following* y *lane-changing* respectivamente. Entraremos en detalle sobre ambos conceptos en el capítulo [Modelos de comportamiento](#)

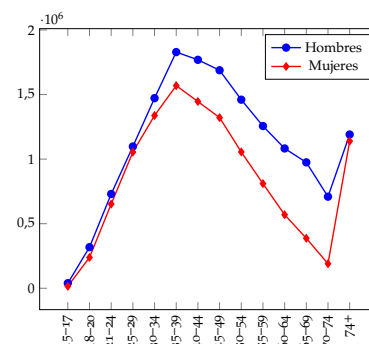


Figura 1.2: Último censo de conductores segmentado por edades. Fuente: Dirección General de Tráfico ([dgt.es](#)).

Estructura de la tesis

La tesis está estructurada de la siguiente manera:

En los capítulos 2, 3 y 4 se expone la revisión realizada del estado de la cuestión donde se explica en qué punto se encuentra la literatura de los temas en los que se apoya la presente tesis.

En el capítulo XXX se explica el método seguido para la confirmación de la hipótesis describiendo además las instrumentaciones, los conjuntos de datos obtenidos, las técnicas utilizadas y las aplicaciones desarrolladas.

Por último en el capítulo 5 se exponen los resultados y las conclusiones extraídas de la tesis. Además, tras las conclusiones se indican una serie de posibles líneas futuras de trabajo consideradas interesantes tras la realización de la tesis.

Capítulo 2

Simuladores de tráfico y sistemas multiagente

Se pretende desarrollar un método para el análisis de la eficiencia de los conductores, realizando para ello un modelo del perfil de conducción a partir de técnicas de Inteligencia Computacional y aplicándolo en un entorno multiagente de donde obtener el resto de parámetros. Así, una vez configurado el entorno multiagente, se podrá simular el tráfico y el comportamiento de los conductores dentro de éste cuando su marcha está condicionada por factores como el tráfico, semáforos, etcétera.

Es para ello necesario un análisis previo del estado de la cuestión en torno a varios conceptos y su relación: la inteligencia computacional y sus técnicas, agentes y sistemas multiagente y por último, modelos de conductor y simuladores de tráfico. Esta sección se encarga de recoger el resultado de la revisión de la literatura en estos temas y sirve de base para el desarrollo de la tesis.

Simulación de tráfico

El tráfico es un sistema cuyo funcionamiento depende de multitud de factores con una organización caótica. Debido a esto, obtener modelos exactos es una tarea prácticamente imposible y es por ello que la mayoría del trabajo cuyo objetivo es la predicción se realice en base a simuladores.

Hoy en día la oferta de simuladores de tráfico existente es amplia. NO SÉ QUÉ COJONES PONER AQUÍ DE QUE SE OFERTAN CON DIFERENTES LICENCIAS, TANTO ABIERTAS COMO CERRADAS.

A lo mejor aquí hay que especificar que hablando de simuladores de tráfico, sólo vamos a centrarnos en temas de simulación de vehículos utilitarios (coches o como cojones se llamen), sin entrar en detalles de simulación de otro tipo de vehículos o de peatones.

Dentro de simulación de tráfico que no es directamente simulación de coches, se puede hablar (para nombrar y hacer un par de

párrafos con referencias) de la simulación para la evaluación de sistemas de señalización inteligentes [Jin et al., 2016], estimación de emisiones [Quassdorff et al., 2016]

He encontrado un simulador que es relativamente reciente y que puede merecer la pena mencionar (más párrafos, yuhu!). es el X10, y creo que tiene que ver con algo de IBM, y algo también de inteligencia porque hablan de preferencias para el conductor en temas de ruta, velocidad y no se qué hostias. Dejo aquí los enlaces: <http://x10.sourceforge.net/documentation/presentations/X10DayTokyo2015/x10daytokyo15-mizuta.pdf>, http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6365068&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6365068, <http://informs-sim.org/wsc12papers/includes/files/pos148.pdf>, https://www.researchgate.net/profile/Tsuyoshi_Ide2/publication/236173272_X10-based_massive_parallel_large-scale_traffic_flow_simulation/links/00b4951b89905784a7000000.pdf

AQUÍ ESTARÍA MUY BIEN UNA IMAGEN COMO LA QUE APARECE EN [Krajzewicz et al., 2002] SOBRE LOS DIFERENTES SIMULADORES.

Microsimulación vs. macrosimulación

Los dos puntos de vista principales a la hora de abordar un modelo de flujo de tráfico son los micromodelos y los macromodelos. Cuando se trabaja con simulaciones, dependiendo de con qué modelo se trabaje hablamos entonces de microsimulaciones y macrosimulaciones, o simplemente simulaciones *micro* y *macro* respectivamente. Sus características son las siguientes:

- **Micromodelos.** Su objetivo es estudiar desde un punto de vista de granularidad fina (e.g. vehículos o peatones) las micropropiedades del flujo de tráfico (e.g. cambio de carril, aproximaciones a vehículos delanteros o adelantamientos) para evaluar su comportamiento. Tiene dos principales ventajas, la posibilidad de estudiar el tráfico como un todo a partir de sus elementos más simples (ofreciendo una representación más fiel de este) y la posibilidad de estudiar cada elemento por separado. Sin embargo, la principal desventaja de este tipo de modelos es que cada elemento de la simulación requiere de cómputo y por tanto simulaciones con alto contenido de elementos pueden llegar a ser inviables.
- **Macromodelos.** Este tipo de modelos centran su esfuerzo en estudiar el flujo de tráfico como un todo, explorando sus macropropiedades (e.g. evolución del tráfico, efectos onda, velocidad media o flujo en vías). Su ventaja principal es que a nivel macroscópico permiten estudiar propiedades que a nivel microscópico

requeriría una cantidad ingente de recursos. Sin embargo, es imposible obtener información precisa de un elemento en particular del tráfico.

Aunque esta es la categorización típica de modelos, en la literatura aparecen otros tipos de modelo con granularidades que pueden considerarse no pertenecientes a ninguno de estos dos conjuntos.

Por ejemplo, los **sub-micromodelos** (**TODO!** buscar referencia) donde la granularidad baja hasta el punto que los elementos tóxicos del modelo son las propias partes del vehículo o los conductores.

Otro ejemplo son los **mesomodelos**[Munoz et al., 2001][Casas et al., 2011] donde se trata de amortiguar los problemas interentes a la complejidad en los micromodelos y a la falta de resolución en los macromodelos (**TODO!** añadir una figura para el modelo citado en [Munoz et al., 2001], donde se hace uso de ventanas en al vía para analizar el comportamiento micro, dejando el modelo fuera de esa ventana en la granularidad macro).

Simulación discreta vs. continua

La discretización aquí se refiere tanto a tiempo como a espacio.

Si hablamos de tiempo, en general las simulaciones de tiempo continuo trabajan sobre macrosimulación, por lo que es de menor interés para nosotros que los simuladores discretos de tiempo, donde se cuantifica el tiempo de la simulación, generalmente a una frecuencia de 1Hz.

Si hablamos de espacio, nos interesan más los simuladores continuos, ya que los discretos pierden demasiado detalle, y nos interesa más el comportamiento en cada instante t que la colocación relativa aproximada de los vehículos en cada instante t (cuantificado o no)

Comparativa de simuladores

En este apartado se facilita la comparativa realizada para la elección de simulador sobre el que basar los escenarios a plantear en las simulaciones de los modelos de conductor.

Quizá se pudea hablar del “SMARTTEST” project: <http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest/>

Simuladores de pago:

Quadstone paramics (microscopic) VISSUM (macroscopic) VIS-SIM (microscopic) AIMSUN

Simuladores gratuitos:

Matsim SUMO (microscopic) Repast MAINSIM Synchro

Ni puta idea:

CUBE SATURN PARAMICS TRANSIMS

En definitiva, el simulador que más se adapta a nuestras necesidades y el que se usará como simulador base en el desarrollo de esta tesis será SUMO¹ (*Simulation of Urban MObility*). Funciona como simulación de tiempo discreto variable (siendo el mínimo 1ms.) en un escenario espacial continuo.

Sistemas multiagente

¹ Para más información acerca de su funcionamiento, los artículos [Krajzewicz et al., 2002], [Behrisch et al., 2011] y [Krajzewicz et al., 2012] ofrecen suficiente información sobre su arquitectura, su funcionamiento y sus últimas actualizaciones, aunque el proyecto ha evolucionado bastante desde la última publicación.

Capítulo 3

Inteligencia Computacional

El comportamiento de una persona se ve influenciado por una gran cantidad de variables. Identificar las relaciones entre éstas es en la mayoría de las ocasiones una tarea que va de lo muy difícil a lo imposible, más aún si añadimos que éstas son muy numerosas y pueden llegar a ser imposibles de cuantificar o incluso de detectar.

La CI engloba un conjunto de técnicas que facilitan enormemente estas tareas. En este capítulo se ofrece una perspectiva de la literatura actual sobre las técnicas de la inteligencia computacional que son de interés para esta tesis.

Inteligencia Artificial vs. Inteligencia Computacional

¿Qué es la CI? Para entender el significado de éste término tenemos que entender cómo ha evolucionado el término AI a lo largo de los años.

El primer concepto a introducir es el de "conexionismo". Se puede considerar a Santiago Ramón y Cajal como el principal precursor de esta idea por sus trabajos acerca de la estructura de las neuronas y su conexión (e.g. [y Cajal, 1888] y [Ramón and Cajal, 1904]). Otros prefieren citar el trabajo de Donald Hebb acerca de la Teoría del aprendizaje [Hebb, 1968] como el primer trabajo sobre este tema. Independientemente, en el conexionismo se considera que la mente y el conocimiento surgen de redes formadas por unidades sencillas interconectadas (e.g. neuronas).

Por otro lado, en 1950, Alan Turing publicó un artículo que comenzaba con la frase "Can machines think?"¹ [Turing, 1950]. Se puede considerar este momento como el punto donde se estableció el objetivo a largo plazo del campo de la AI, ya que en el artículo Turing propuso un método para determinar si una máquina era capaz de pensar o no. Sin embargo, no fue hasta 1956 en la Conferencia de Dartmouth [McCarthy et al., 1956] donde John McCarthy acuñó el término AI a la vez que presentó el tema de la conferencia: "¿puede una máquina pensar?"².

¹ Es aquí donde introduce el Test de Turing como método para probar si una máquina es capaz de exhibir un comportamiento inteligente similar al de un ser humano. El funcionamiento es el siguiente: hay tres participantes, dos humanos y una máquina, todos separados entre sí pero pudiendo intercambiarse mensajes de texto. Uno de los humanos le hace preguntas al otro humano y a la máquina, y éstos le responden. Si el humano que hace las preguntas no es capaz de discernir qué respuestas vienen de la máquina y qué respuestas del otro humano se puede concluir que la máquina es inteligente.

² Hay que destacar que el propio concepto de "pensar" es en sí un tema controvertido en el propio ser humano: ¿pensar es algo inherentemente biológico? ¿surge de la mente? Tanto si sí como si no, ¿de qué forma lo hace?. El experimento mental de la habitación china (ver [Preston and Bishop, 2002]) propuesto por John Searle nace precisamente para rebatir la validez del Test de Turing. En esencia trata de un Test de Turing donde la máquina ha aprendido a hablar chino y es reemplazada por una persona que no sabe nada del idioma pero que va equipada con un listado de correspondencias del tipo cada vez que entra esta secuencia de ideogramas, devuelve esta secuencia de ideogramas". Cuando una persona le manda mensajes en chino, esta otra responde, pero ¿podemos decir que dicha persona sabe chino? Evidentemente no. Entonces, cómo podemos asegurar que la máquina ha "aprendido" chino. Y lo que es más intrigante, si la máquina es capaz de realizar una acción sin entender lo que hace y por qué lo hace, ¿qué garantías tenemos de que el humano sí es capaz? Si los ordenadores operan sobre símbolos sin comprender el verdadero contenido de éstos, ¿hasta qué punto los humanos lo hacen de forma diferente

En este punto la investigación en AI recibió muchísima atención por parte de investigadores y gobiernos, lo que se tradujo en financiación. Los estudios estaban dominados por aquellos relacionados con la idea del conexionismo hasta que aproximadamente en 1969 se publicó el libro *Perceptrons* [Minsky and Papert, 1969] de Marvin Minsky y Seymour Papert donde se expusieron las limitaciones de los modelos de redes neuronales desarrollados hasta la fecha. El impacto fue tal que se abandonó prácticamente por completo el campo de conexionismo, y por tanto una gran parte de la investigación en la AI. Es lo que se conoce como *AI Winter*³.

Debido al *AI Winter*, el conexionismo no estuvo presente en la literatura científica durante prácticamente dos décadas. Fue en 1980 cuando apareció un nuevo concepto dentro de la AI que aca- paró el interés por el campo de nuevo y que se considera como el primer caso de éxito dentro del campo: los Sistemas Exper- tos [Russell et al., 2003]. A finales de la década, sin embargo, em- pezaron a resurgir los enfoques conexionistas, en gran parte por el surgimiento de nuevas formas de entrenamiento de redes multi- capa o por el concepto de funciones de activación no lineales (e.g. trabajos como [Rumelhart et al., 1985] o [Cybenko, 1989]). En este momento los sistemas expertos empezaron a perder interés⁴ frente al nuevo avance del conexionismo.

Frente al avance del conexionismo, algunas voces se alzaron con- tra lo que se consideraba como “el enfoque incorrecto” de la AI⁵. Mientras que el enfoque clásico de la AI postulaba que la mente operaba de la misma manera que una máquina de Turing, es decir, mediante operaciones sobre un lenguaje de símbolos, el enfoque del conexionismo postulaba que la mente, el comportamiento inteligente emergía de modelos a más bajo nivel. Además, otras técnicas no pertenecientes al conexionismo pero sí alienadas a éste debido a su enfoque de comportamiento emergente y aproximación (e.g. lógica difusa o algoritmos genéticos) ganaban popularidad y alimenta- ban el éxito de este tipo de técnicas que no cumplían el ideal de la aproximación exacta y simbólica de la AI.

Esto provocó una explosión de terminologías para diferenciar las investigaciones de la propia ?? clásica. Por un lado, se evitaba el conflicto nombrando el trabajo con un término más acorde con el comportamiento o técnica utilizada. Por otro, se separaba de las connotaciones negativas de “promesas incumplidas” que el término había adquirido con el paso de los años.

Lo verdaderamente interesante es ver la evolución de la litera- tura, y por tanto de los objetivos de la AI durante estos años. En el nacimiento del campo, se buscan literalmente máquinas que pien- sen como humanos, aunque en el conexionismo se habla de algo más general como lo es la mente. Con el paso de los años y los con- tinuos choques con la realidad, la literatura gira hacia la búsqueda de conductas y comportamientos inteligentes, sin necesidad de que

³ Indicar que también hubo otros factores como los económi- cos, la crisis del software, etcétera. [https://en.wikipedia.org/wiki/AI_winter#Lasting_eff](https://en.wikipedia.org/wiki/AI_winter#Lasting_effect)

⁴ A esta década se la conoce como segundo *AI Winter* dado que la inves- tigación sobre Sistemas Expertos se empieza a abandonar. Sin embargo no fue un abandono tan acusado como el del primer *AI Winter*.

⁵ Es comprensible ya que el método clásico produce modelos fáciles de interpretar mientras que el enfoque conexionista produce modelos cuyo funcionamiento en general no es del todo deducible.

Thinking Humanly "The exciting new effort to make computers think ... <i>machines with minds</i> , in the full and literal sense." (Haugeland, 1985) "[The automation of] activities that we associate with human thinking, activities such as decision-making, problem solving, learning .. ." (Hellman, 1978)	Thinking Rationally "The study of mental faculties through the use of computational models." (Charniak and McDermott, 1985) "The study of the computations that make it possible to perceive, reason, and <i>act</i> ." (Winston, 1992)
Acting Humanly "The art of creating machines that perform functions that require intelligence when performed by people." (Kurzweil, 1990) "The study of how to make computers do things at which, at the moment, people are better." (Rich and Knight, 1991)	Acting Rationally "Computational Intelligence is the study of the design of intelligent agents." (Poole <i>et al</i> , 1998) "AI ... is concerned with intelligent behavior in artifacts." (Nilsson, 1998)

Figura 3.1: Objetivos que persigue la Artificial Intelligence. Las filas diferencian si lo que se persigue es pensamiento o comportamiento mientras que las columnas separan si se persigue la inteligencia entendida como la humana o como el ideal de inteligencia (inteligencia racional).

cubran todos los aspectos que hacen de un ser un ente inteligente. Es más, en el momento en que la cantidad de diferente terminología empieza a elevarse, se pone de manifiesto que existen diferentes puntos de vista para el mismo campo. En [Russell et al., 2003], tras un análisis de las definiciones existentes en la literatura por parte de diferentes autores, se hace énfasis en este hecho mostrando los diferentes puntos de vista a la hora de hablar de lo que es la AI (estos son sistemas que piensan como humanos, que actúan como humanos, que piensan racionalmente y que actúan racionalmente).

Volviendo al tema de la terminología, muchas de las diferentes técnicas se fueron agrupando dentro de diferentes áreas. Una de ellas es la conocida como Computational Intelligence. Dado que persigue el mismo objetivo a largo plazo y que surge de la propia AI parece lógico mantenerla como un subconjunto y no como un nuevo campo del conocimiento humano. La principal diferencia es la generalización de esa disputa o diferentes puntos de vista, la AI clásica y los métodos no clásicos.

Podemos definir la CI como la rama de la AI que explora la búsqueda de conocimiento a partir del aprendizaje a partir de datos experimentales. A diferencia de la aproximación clásica de la AI, buscan aproximaciones a las soluciones y no las soluciones exactas *per se*. Esto es debido a la necesidad de otros puntos de vista en resolución de problemas cuando éstos son muy complejos, cuando los datos están incompletos o contienen ruido o cuando no pueden ser traducidos al lenguaje binario.

Se puede fijar el año 1994 como el que el término CI nace como área, coincidiendo con el cambio de nombre del *IEEE Neural Networks Council* a *IEEE Computational Intelligence Society*⁶. Poco antes, en 1993, Bob Marks en su trabajo [Bezdek, 1993] presentó las que él consideraba diferencias fundamentales entre la AI y la CI para posteriormente resumirlas en la siguiente frase.

⁶ <http://cis.ieee.org/>.

“Neural networks, genetic algorithms, fuzzy systems, evolutionary programming, and artificial life are the building blocks of CI.”

Durante estos años ganaba popularidad el concepto del **Soft-Computing (SC)**. Éste engloba las técnicas que buscan resolver problemas que manejan información incompleta o con ruido. Debido a que el conjunto de técnicas definidas como consituyentes del **SC** son las mismas que las de la **CI** algunos autores consideran el **SC** como la rama que ocupa estas técnicas mientras que otros consideran ambos términos equivalentes. Nosotros consideramos que el **SC** es un punto de vista de la computación más que de la **AI** en contraposición con el **Hard-Computing (HC)**, y que la **CI** hace uso de métodos del **SC**.

TODO! Aquí dibujo de una taxonomía donde así: (inteligencia (clásica (hard computing)) (computacional (soft computing (lógica difusa, computación evolutiva, redes neuronales))))

.AI ranges from machines truly capable of thinking to search algorithms used to play board gamesIt has applications in nearly every way we use computers in society.The term artificial intelligence was first coined by John McCarthy in 1956 when he held the first academic conference on the subject¿Puede una máquina pensar?. Is the problem simply that we haven't focused enough resources on basic research, as is seen in the AI winter section, or is the complexity of AI one that we haven't yet come to grasp yet? (And instead, like in the case of computer Chess, we focus on much more specialized problems rather than understanding the notion of 'understanding' in a problem domain.)"

Inteligencia computacional: habilidad de un ordenador de aprender una tarea específica a partir de datos u observaciones experimentales (esto es sacado de la wikipedia. Hay que buscar más definiciones en la literatura). Destacar **tarea específica y a partir de datos experimentales**.

Algunos autores lo consideran sinónimo de Soft Computing, pero no como no hay definición comúnmente aceptada, pues na.

La cosa es que hay procesos matemáticos muy complejos, con mucha interdependencia entre variables y factores que hacen que los problemas sean muy difíciles de modelar, más aún cuando el problema en su naturaleza es estocástico (poner algún ejemplo de algo en la naturaleza que se comporte de forma estocástica [Siddique and Adeli, 2013]).

But generally, computational intelligence is a set of nature-inspired computational methodologies and approaches to address complex real-world problems to which mathematical or traditional modelling can be useless for a few reasons: the processes might be too complex for mathematical reasoning, it might contain some

uncertainties during the process, or the process might simply be stochastic in nature.[1] Indeed, many real-life problems cannot be translated into binary language (unique values of 0 and 1) for computers to process it. Computational Intelligence therefore provides solutions for such problems.

Inteligencia computacional

Qué es la inteligencia artificial. Qué es la inteligencia computacional. Diferencias entre inteligencia artificial clásica e inteligencia computacional. Diferentes puntos de vista (soft computing, machine learning, ...) Técnicas de entrenamiento de modelos: supervisado, no supervisado, semisupervisado, refuerzo, ... Técnicas de funcionamiento: online y offline Técnicas de la inteligencia computacional usadas en esta tesis (redes neuronales artificiales (perceptrón multicapa, recurrentes y lstm), lógica difusa y computación evolutiva) ¿Qué técnicas se usan actualmente y sobre qué problemas? Detección de patrones de eficiencia y agresividad de subyacen en los comportamientos de éstos? Estudio de la efectividad de los sistemas de asistencia para mejorar la eficiencia de conducción Estudio de los sistemas de asistencia para analizar el comportamiento del conductor.

Capítulo 4

Modelos de comportamiento

¿A qué nos referimos cuando hablamos del comportamiento? Según el diccionario de la real academia, “comportamiento” se define como *manera de comportarse*, siendo “comportar” *actual de una manera determinada*. Sin embargo, no queda claro qué factores constituyen el comportamiento al volante.

Atendiendo a la literatura, **TODO!** un par de párrafos para hablar de comportamiento

¿Cómo se define el comportamiento de un conductor?

En [Michon, 1985] describen la conducción como una tarea separada en 3 niveles jerárquicos, el de estrategia, el de maniobra y el de control. En la figura 4.1. se ve mejor.

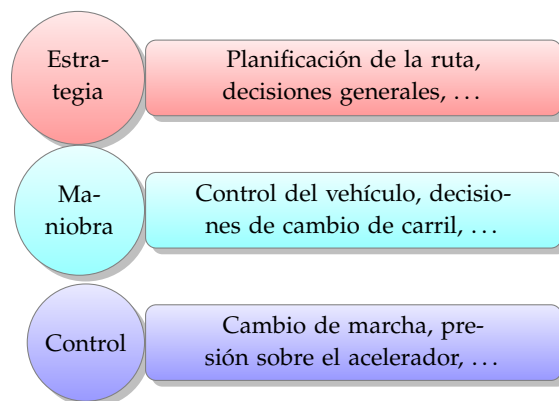


Figura 4.1: Esta es una figura de mierda (porque no se ve lo que se quiere mostrar) pero que me demuestra que con cuatro imágenes me pongo en las 40 páginas sin pestañear. La idea es cambiarla por otra más como la figura 2 de [Michon, 1985]. Con algún que otro color bonito a poder ser.

SUMO usa (al menos así lo indican en el paper del 2002) el modelo Gipps[Krajzewicz et al., 2002]. No sé si ellos han hecho una extensión del modelo o están referenciando la extensión y ellos sólo la implementan. En el paper del 2012 citan que el modelo car-following que usan por defecto es el desarrollado por Stefan Krauß[Jin et al., 2016], debido a su simplicidad y su velocidad de ejecución.

El modelo ha probado ser válido, pero tiene algunos defectos, por lo que existe un API para implementar otros modelos. En la ac-

tualidad están incluidos en el sistema los modelos IDM[Treiber et al., 2000] (*Intelligent Driver Model*), el modelo de tres fases de Kerner[Kerner et al., 2008] y el modelo de Wiedemann[Wiedemann, 1974].

La práctica totalidad de modelos para el comportamiento de conductores en tráfico se basan en una estructura jerárquica de control[Michon, 1985]. Por lo que veo este paper es de 1985, así que afirmar eso 30 años después es una barrabasada. Hay que buscar algo más para apoyar eso o para indicarlo como una anécdota.

En el paper [Al-Shihabi and Mourant, 2001] describen un framework para la modelización de comportamiento de conductores dentro de simuladores.

En [Tang et al., 2014] los autores proponen un modelo de car following teniendo en cuenta comunicación entre vehículos.

TODO! Hoy he descubierto que hay una cosa que se llama naturalistic traffic study o naturalistic traffic observation (*Estudio Naturalista de Conducción (NDS, Naturalistic driving study)*) que es un estudio naturalístico, es decir, observar en el mundo real con detalle y extraer datos de ello. A lo mejor hablando así queda como más profesional :D.

Los NDS basan su funcionamiento en la captura masiva de datos de conducción, normalmente involucrando una gran cantidad de sensores, para analizar el comportamiento del conductor, las características del vehículo, la vía, etcétera. La cantidad de sensores y la velocidad de captura hacen que la tarea de analizar y extraer conclusiones sea una tarea prácticamente imposible para un humano, por lo que es necesario el uso de técnicas de análisis de datos que suelen recaer en los campos de la estadística y del aprendizaje automático.

En [Sekizawa et al., 2007] describen modelos supervisados offline para capturar el comportamiento del conductor basados en auto-regresión a trozos. Más adelante lo extienden en [Terada et al., 2010], aunque los datos de entrenamiento son extraídos directamente de simulaciones, no del “mundo realTM”.

En [Bando et al., 2013] describen otro modelo no supervisado offline basado en un modelo bayesiano no paramétrico para la clusterización, combinado con un LDA (Latent Dirichlet Allocation, sea lo que sea esto) para la clusterización a más alto nivel. (**TODO!** ¿este método usa datos reales?)

Estos trabajos ([Sekizawa et al., 2007], [Terada et al., 2010] y [Bando et al., 2013]) tienen la desventaja de ser computacionalmente muy costosos y con poca precisión en el caso de variar mucho los escenarios de entrenamiento y de test.

En [Maye et al., 2011] se presenta un modelo online donde se infiere el comportamiento del conductor haciendo uso de una

IMU (Intertial Measurement Unit) y una cámara. Primero de la IMU se sacan datos que se separan en fragmentos para luego relacionarlos con las imágenes obtenidas de la cámara. (**TODO!** ¿Hacia dónde mira la cámara?). Los modelos propuestos en [Johnson and Trivedi, 2011] y [Van Ly et al., 2013] también se apoyan en el funcionamiento de clasificar las segmentaciones de una IMU, pero con técnicas distintas y sin cámara (**TODO!** Que digo yo, ¿qué clasifican exactamente? es más, dependiendo de qué clasifican, para qué vale la camarita del [Maye et al., 2011]?). Además hacen uso de señales externas y umbrales de activación para hacer más efectiva la clasificación (**TODO!** corroborar).

En el artículo [Bender et al., 2015] se usa también un modelo no supervisado online con una aproximación bayesiana para identificar los puntos de cambio sin depender de parámetros externos (e.g. umbrales o señales). Se basa también en (1) segmentar los datos de conducción y (2) asignar estos datos a clases que se corresponde n con comportamientos de conducción. Tiene la ventaja de ser más eficiente y rubusto que los anteriores.

La idea de estos métodos desde el [Sekizawa et al., 2007] hasta el [Bender et al., 2015] creo que es el de un sistema que traduzca datos en crudo a datos de más alto nivel. Esto es debido a que la cantidad de datos que se pueden generar en un sólo coche (no digamos ya una flota de ellos) es tan grande que para determinados sistemas disponer de información de más alto nivel haría más sencillo su desempeño (por ejemplo, Sistema Avanzado de Ayuda a la Conducción (ADAS, Advanced Driver Assistance System) que funcionasen con datos de “adelantando” que sus valores de giro, aceleración en una ventana temporal).

En [Satzoda et al., 2013], haciendo uso de la información combinada de bus CAN, cámaras, GPS e información digitalizada el mapa donde se circula se determina una amplio abanico de información crítica en diferentes condiciones de la carretera. La información que sacan es: número de cambios de carril a la derecha, a la izquierda, tiempo en autopista y carretera urbana, distancia recorrida, velocidades medias en autopista y urbano, paradas, giros a la derecha, a la izquierda, incorporaciones y salidas de autopsta, tiempo gastado en un sólo carril, curvas a la izquierda, curvas a la derecha y distancia media al carril central

En [Al-Shihabi and Mourant, 2001] describen un framework para la modelización de comportamiento de conductores dentro de simuladores. Se basa en cuatro unidades de funcionamiento interconectadas, la de percepción (percibe el entorno en términos locales y globales), la de emoción (cómo responde emocionalmete al entorno), la de decision-making (investiga posibles acciones que podrían servir a las necesidades del módulo emocional) y la de decision-implementation (intenta implementar las decisiones cuando emergen condiciones de tráfico lo suficientemente seguras

para llevarlas a cabo). Tengo que volver a leerlo después de hacer una primera introducción en el tema de agentes, porque me parece poner nombrecitos a un tipo de agente que funciona de esa misma manera, pero lo mismo no.

En [Terroso-Sáenz et al., 2015] analizan lo que ellos denominan el concepto del Reconocimiento el Entorno Intravehicular (IvCA, Intra-vehicular Context Awareness), lo que viene a ser el contexto definido **dentro** del vehículo, llegando a intentar predecir no sólo el número de ocupantes (ese es un problema sobradamente superado) sino la tipología o clase de ocupante (e.g. niños, adultos, ... **TODO!** buscar cuáles son las tipologías). Para ello hacen uso de un Proceso Complejo de Eventos (CEP, Complex Event Processing)¹ para procesar los datos de los diferentes sensores del vehículo y así detectar y analizar patrones característicos.

El artículo [Muñoz et al., 2010] es muy interesante ya que para la competición 2010 *Simulated Car Racing Championship* desarrollaron un controlador no para minimizar el tiempo en realizar las carreras, sino para hacerlo lo más parecido posible a cómo se comporta un humano. Para ello hicieron uso de redes neuronales para calcular trayectorias y de un proceso de aprendizaje a partir de información extraída de un conductor real en el simulador *The Simulated Car Racing Championship* (TORCS).

Aunque TORCS es usado como entorno de simulación en diversos concursos e investigaciones, se trata de un juego, y es que los juegos son un sandbox perfecto como entorno de simulación, ya que presentan una abstracción del dominio sobre el que trabajar. Otros trabajos en esta línea (entrenamiento de redes neuronales en este simulador) son los de [Munoz et al., 2009] y [Van Hoorn et al., 2009], el primero entrenando perceptrones multicapa (**TODO!** verificar) con un backpropagation haciendo uso de un dataset proporcionado por un bot y otro haciendo uso de un algoritmo evolutivo multiobjetivo para optimizar la red de acuerdo a un conjunto de datos proporcionado por un conductor real. Sin embargo, este tipo de modelos se encuentran más cercanos al nivel de control que al nivel de maniobra descritos en la figura 4.1.

En [Van Ly et al., 2013] hacen uso de los sensores de inercia de un coche (a saber qué coche tienen) para construir un perfil de conductor. Concluyen que frenar y girar caracterizan mejor a los conductores frente a acelerar.

¹ Un CEP es un método por el cual se lee un flujo de información compuesta de flujos de distintas fuentes (de ahí el *complex*) para detectar eventos o patrones que pueden indicar la presencia de situaciones a analizar lo más rápido posible.

Capítulo 5

Conclusiones

¿Pierde rendimiento el sistema cuando se aplican los modelos a escenarios significativamente diferentes de los escenarios de test?
Si sí, un trabajo futuro y algo para escribir en conclusiones sería hablar de este defecto y de cómo subsanarlo.

Aportaciones

Futuras líneas de investigación

¿A lo mejor se podría tirar por el campo de las V2X desde esta tesis?

¿Entrar en el tema de la mesosimulación?

Bibliografía

- [par, 2010] (2010). Directive 2010/40/eu of the european parliament and of the council of 7 july 2010 on the framework for the deployment of intelligent transport systems in the field of road transport and for interfaces with other modes of transport text with eea relevance. *Official Journal of the European Union*, 50:207.
- [Al-Shihabi and Mourant, 2001] Al-Shihabi, T. and Mourant, R. R. (2001). A framework for modeling human-like driving behaviors for autonomous vehicles in driving simulators. In *Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents*, pages 286–291. ACM.
- [Bando et al., 2013] Bando, T., Takenaka, K., Nagasaka, S., and Taniguchi, T. (2013). Unsupervised drive topic finding from driving behavioral data. In *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013 IEEE*, pages 177–182. IEEE.
- [Behrisch et al., 2011] Behrisch, M., Bieker, L., Erdmann, J., and Krajzewicz, D. (2011). Sumo—simulation of urban mobility: an overview. In *Proceedings of SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*. ThinkMind.
- [Bender et al., 2015] Bender, A., Agamennoni, G., Ward, J. R., Worrall, S., and Nebot, E. M. (2015). An unsupervised approach for inferring driver behavior from naturalistic driving data. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(6):3325–3336.
- [Bezdek, 1993] Bezdek, J. C. (1993). Intelligence: Computational versus artificial. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 4(5):737.
- [Casas et al., 2011] Casas, J., Perarnau, J., and Torday, A. (2011). The need to combine different traffic modelling levels for effectively tackling large-scale projects adding a hybrid meso/micro approach. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 20:251–262.
- [Cybenko, 1989] Cybenko, G. (1989). Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of control, signals and systems*, 2(4):303–314.
- [Dingus et al., 2006] Dingus, T. A., Klauer, S. G., Neale, V. L., Petersen, A., Lee, S., Sudweeks, J., Perez, M., Hankey, J., Ramsey,

- D., Gupta, S., et al. (2006). The 100-car naturalistic driving study, phase ii-results of the 100-car field experiment. Technical report.
- [Hebb, 1968] Hebb, D. (1968). o.(1949) the organization of behavior.
- [Imprialou et al., 2016] Imprialou, M.-I. M., Quddus, M., Pitfield, D. E., and Lord, D. (2016). Re-visiting crash–speed relations-hips: A new perspective in crash modelling. *Accident Analysis & Prevention*, 86:173–185.
- [Jin et al., 2016] Jin, J., Ma, X., Koskinen, K., Rychlik, M., and Kosonen, I. (2016). Evaluation of fuzzy intelligent traffic signal control (fits) system using traffic simulation. In *Transportation Research Board 95th Annual Meeting*, number 16-4359.
- [Johnson and Trivedi, 2011] Johnson, D. A. and Trivedi, M. M. (2011). Driving style recognition using a smartphone as a sensor platform. In *2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 1609–1615. IEEE.
- [Kerner et al., 2008] Kerner, B., Klenov, S., and Brakemeier, A. (2008). Testbed for wireless vehicle communication: A simulation approach based on three-phase traffic theory. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2008 IEEE*, pages 180–185. IEEE.
- [Krajzewicz et al., 2012] Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M., and Bieker, L. (2012). Recent development and applications of sumo–simulation of urban mobility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 5(3&4).
- [Krajzewicz et al., 2002] Krajzewicz, D., Hertkorn, G., Rössel, C., and Wagner, P. (2002). Sumo (simulation of urban mobility)-an open-source traffic simulation. In *Proceedings of the 4th Middle East Symposium on Simulation and Modelling (MESM20002)*, pages 183–187.
- [Lerner et al., 2010] Lerner, N., Jenness, J., Singer, J., Klauer, S., Lee, S., Donath, M., Manser, M., and Ward, N. (2010). An exploration of vehicle-based monitoring of novice teen drivers. *Final Report. NHTSA, Report No. DOT HS, 811:333*.
- [Maye et al., 2011] Maye, J., Triebel, R., Spinello, L., and Siegwart, R. (2011). Bayesian on-line learning of driving behaviors. In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pages 4341–4346. IEEE.
- [McCarthy et al., 1956] McCarthy, J., Minsky, M., Rochester, N., and Shannon, C. (1956). Dartmouth conference. In *Dartmouth Summer Research Conference on Artificial Intelligence*.
- [Michon, 1985] Michon, J. A. (1985). 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.

- [Minsky and Papert, 1969] Minsky, M. and Papert, S. (1969). Perceptrons.
- [Munoz et al., 2009] Munoz, J., Gutierrez, G., and Sanchis, A. (2009). Controller for torcs created by imitation. In *2009 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games*, pages 271–278. IEEE.
- [Muñoz et al., 2010] Muñoz, J., Gutierrez, G., and Sanchis, A. (2010). A human-like torcs controller for the simulated car racing championship. In *Proceedings of the 2010 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games*, pages 473–480. IEEE.
- [Munoz et al., 2001] Munoz, L., Gomes, G., Yi, J., Toy, C., Horowitz, R., and Alvarez, L. (2001). Integrated meso-microscale traffic simulation of hierarchical ahs control architectures. In *Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE*, pages 82–87. IEEE.
- [OICA, 2015] OICA (2015). Motorization rate 2014 – worldwide.
- [Preston and Bishop, 2002] Preston, J. and Bishop, M. (2002). Views into the chinese room: New essays on searle and artificial intelligence.
- [Quaassdorff et al., 2016] Quaassdorff, C., Borge, R., Pérez, J., Lumberras, J., de la Paz, D., and de Andrés, J. M. (2016). Microscale traffic simulation and emission estimation in a heavily trafficked roundabout in madrid (spain). *Science of The Total Environment*, 566:416–427.
- [Ramón and Cajal, 1904] Ramón, S. and Cajal, S. (1904). *Textura del Sistema Nervioso del Hombre y de los Vertebrados*, volume 2. Madrid Nicolas Moya.
- [Rumelhart et al., 1985] Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., and Williams, R. J. (1985). Learning internal representations by error propagation. Technical report, DTIC Document.
- [Russell et al., 2003] Russell, S. J., Norvig, P., Canny, J. F., Malik, J. M., and Edwards, D. D. (2003). *Artificial intelligence: a modern approach*, volume 2. Prentice hall Upper Saddle River.
- [Satzoda et al., 2013] Satzoda, R., Martin, S., Van Ly, M., Gunaratne, P., and Trivedi, M. M. (2013). Towards automated drive analysis: A multimodal synergistic approach. In *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*, pages 1912–1916. IEEE.
- [Sekizawa et al., 2007] Sekizawa, S., Inagaki, S., Suzuki, T., Hayakawa, S., Tsuchida, N., Tsuda, T., and Fujinami, H. (2007). Modeling and recognition of driving behavior based on stochastic switched arx model. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8(4):593–606.

- [Siddique and Adeli, 2013] Siddique, N. and Adeli, H. (2013). *Computational intelligence: synergies of fuzzy logic, neural networks and evolutionary computing*. John Wiley & Sons.
- [Tang et al., 2014] Tang, T., Shi, W., Shang, H., and Wang, Y. (2014). A new car-following model with consideration of inter-vehicle communication. *Nonlinear dynamics*, 76(4):2017–2023.
- [Terada et al., 2010] Terada, R., Okuda, H., Suzuki, T., Isaji, K., and Tsuru, N. (2010). Multi-scale driving behavior modeling using hierarchical pwarx model. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2010 13th International IEEE Conference on*, pages 1638–1644. IEEE.
- [Terroso-Sáenz et al., 2015] Terroso-Sáenz, F., Valdés-Vela, M., Campuzano, F., Botia, J. A., and Skarmeta-Gómez, A. F. (2015). A complex event processing approach to perceive the vehicular context. *Information Fusion*, 21:187–209.
- [Treiber et al., 2000] Treiber, M., Hennecke, A., and Helbing, D. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical review E*, 62(2):1805.
- [Turing, 1950] Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59(236):433–460.
- [Van Hoorn et al., 2009] Van Hoorn, N., Togelius, J., Wierstra, D., and Schmidhuber, J. (2009). Robust player imitation using multiobjective evolution. In *2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pages 652–659. IEEE.
- [Van Ly et al., 2013] Van Ly, M., Martin, S., and Trivedi, M. M. (2013). Driver classification and driving style recognition using inertial sensors. In *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013 IEEE*, pages 1040–1045. IEEE.
- [Wiedemann, 1974] Wiedemann, R. (1974). Simulation des strassenverkehrsflusses.
- [y Cajal, 1888] y Cajal, S. R. (1888). *Estructura de los centros nerviosos de las aves*.

Acerca del código fuente

La presente tesis lleva consigo numerosas horas de programación, lo que implica varios miles de líneas de código. Sin embargo, esta nota existiría aún con sólo unas pocas decenas. Se ha decidido no proveer de forma impresa el código fuente y en su lugar distribuirlo en formato electrónico, una forma más manejable para su consulta y a la vez respetuosa con el medio ambiente. No obstante sí es posible que existan pequeños fragmentos de código para apoyar explicaciones. En caso de necesitar los fuentes y no ser capaces de conseguirlos, se puede contactar directamente conmigo, el autor, en .

Cómo citar esta tesis

Si deseas citar esta tesis, lo primero gracias. Me alegro de que te sirva para tu investigación. Si lo deseas, incluye el siguiente código en bibtex:

TODO A ver cómo coño meto en el paquete listings caracteres acentuados...