

ALBERTO DÍAZ ÁLVAREZ

MODELADO DE COMPORTAMIENTO DE CONDUCTORES CON TÉCNICAS DE IA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Copyright © 2016 Alberto Díaz Álvarez

Modelado de comportamiento de conductores con técnicas de IA

Tesis doctoral, 17 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

Licensed under the Apache License, Version 2.0 (the “License”); you may not use this file except in compliance with the License. You may obtain a copy of the License at <http://www.apache.org/licenses/LICENSE-2.0>. Unless required by applicable law or agreed to in writing, software distributed under the License is distributed on an “AS IS” BASIS, WITHOUT WARRANTIES OR CONDITIONS OF ANY KIND, either express or implied. See the License for the specific language governing permissions and limitations under the License.

Índice general

Introducción 13

Estado de la cuestión 19

Conclusiones 23

Índice de figuras

Índice de cuadros

*Sí sé a quién dedicárselo. Lo que no sé es
cómo.*

Introducción

Es un hecho que la Inteligencia Artificial¹ (IA o AI del inglés *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 (1956) le siguieron unas épocas de apenas avance (incluso hay una época denominada AI Winter (explicarla mejor)). Sin embargo, en la actualidad es muy difícil encontrar un campo que no se beneficie directamente de la aplicación de técnicas pertenecientes o nacidas en dicho área.

Esto es debido a su característica 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. [Quizá por aquí se podría hacer una referencia al russel y norvig sobre la separación en los cuatro cuadrantes, aunque quizá mejor en el related work].

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

- **Inteligencia artificial clásica** o *simbólica*. 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).
- **Inteligencia computacional** o *subsimbólica*. 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*, conjunto de soluciones para trabajar sobre información incompleta, imprecisa o con ruido.

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

¹ A pesar de existir casi tantas definiciones como autores, podemos definir la inteligencia artificial como el *área que estudia el comportamiento inteligente exhibido en máquinas*.

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 la forma de solucionar problemas. Mientras que en el primer caso es prácticamente impensable una aproximación diferente a la *top-down* (i.e. se representa la solución, se define el algoritmo y éste lleva a la solución exacta), en el segundo los problemas se resuelven utilizando el paradigma contrario, *bottom-up* (i.e. la solución ^aaprende.^a resolverse dado el problema, sin necesidad de plantear un algoritmo y generando soluciones no necesariamente exactas pero sí lo suficientemente buenas). Revisaremos las diferencias entre conceptos de diferentes autores en el capítulo

Uno de los campos de aplicación es el de los sistemas de transporte inteligentes (ITS, del inglés *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 en tal que en el año 2010 se publicó la directiva 2010/40/UE[par, 2010] donde se estableció el marco de implantación de los ITS en la Unión Europea².

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 estos que nos permiten, 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 el tiempo, el dinero o la peligrosidad del escenario.

Los simuladores de tráfico³ 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 entrar en el tema de la generación de modelos de conductor para simuladores que respondan al comportamiento de conductores en concreto usando, para ello, técnicas pertenecientes al campo de la Inteligencia Computacional.

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 Inteligencia Computacional y aplicándolo a un entorno multiagente de simulación. Así, una vez configurado el entorno multiagente, se podrá simular el tráfico y estudiar aspectos como el estilo de conducción o el impacto de

² 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.*

³ Concretamente los *micro-simuladores*, donde los conductores y/o vehículos son modelados como agentes independientes. Existe otra categoría dentro de la simulación de tráfico, denominada *macro-simuladores*, que conciben el tráfico como un fluido. Aún así, veremos este concepto más en detalle en el capítulo [Estado de la cuestión](#).

los sistemas de asistencia.

Motivación

Los conceptos introducidos al comienzo del capítulo obedecen a una *necesidad* (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 introducir primero algunos hechos conocidos:

- En el año 2014, el número de vehículos a nivel mundial asciende a más de 1,200 millones[des Constructeurs d'Automobiles (OICA), 2015], con una tendencia ascendente. 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 humano⁴
- Debemos abandonar los combustibles fósiles antes de que éstos nos abandonen a nosotros. Aunque existen diferentes puntos de vista acerca de cuándo se agotarán las reservas de petróleo, lo cierto 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 muchos y muy diferentes 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. 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

⁴ Uno puede argumentar que el parque automovilístico se recicla con nuevos vehículos eléctricos categorizados "de consumo 0". 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 %.

el consumo de carburante (en el caso de coches de combustión) o de electricidad (en el caso de coches eléctricos).

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 multiagente⁵ 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 a partir de 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 ruta 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 posible 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 es posible la comparación de 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.

⁵ Los sistemas multiagente (SMA o MAS del inglés *Multi-Agent Systems*) son aquellos sistemas compuestos por diversos elementos denominados agentes, los cuales cooperan sobre un entorno para, normalmente, llegar a una solución.

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 Inteligencia Computacional con datos extraídos de un entorno de micro-simulación permitirá modelar, de manera fiel a la realidad, el comportamiento de los conductores pertenecientes a los grupos más representativos.*

TODO! Joder, acabo de encontrar un paper donde se indica la diferencia de comportamiento en función de la clase social. Cuando más alta, menos ética. Lo mismo hay que indicarlo también a la hora de decir lo de "grupos más representativos").

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 Inteligencia Computacional. Para ello se consideran los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar y aplicar técnicas de la Inteligencia Computacional (e.g. sub-simbólica) 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.

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

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.

Resultados

Estructura de la tesis

La tesis está estructurada de la siguiente manera:

- **Estado de la cuestión.** Revisión 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.

Estado de la cuestión

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[Quaassdorff 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/00b4951b89905784a70000.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 discertización 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 SUMO[Krajzewicz et al., 2002][Behrisch et al., 2011][Krajzewicz et al., 2012]

(*Simulation of Urban MObility*). Funciona como simulación de tiempo discreto variable (siendo el mínimo 1ms.) en un escenario espacial continuo.

Modelos de conductor

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 actualidad 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.

Sistemas multiagente

Inteligencia computacional

Qué es la inteligencia artificial. Diferencias entre inteligencia artificial clásica e inteligencia computacional. Diferentes puntos de vista (soft computing, machine learning, ...) 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.

Conclusiones

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.
- [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.
- [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.
- [des Constructeurs d’Automobiles (OICA), 2015] des Constructeurs d’Automobiles (OICA), O. I. (2015). Motorization rate 2014 – worldwide.
- [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.
- [Imprialou et al., 2016] Imprialou, M.-I. M., Quddus, M., Pitfield, D. E., and Lord, D. (2016). Re-visiting crash–speed relationships: 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.

- [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*.
- [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.
- [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.
- [Quaassdorff et al., 2016] Quaassdorff, C., Borge, R., Pérez, J., Lumbreras, 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.
- [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.
- [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.
- [Wiedemann, 1974] Wiedemann, R. (1974). Simulation des strassenverkehrsflusses.

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...