

La Robótica: Aspectos Socioeconómicos y su Investigación Básica

Rafael Murrieta Cid
murrieta@cimat.mx

Centro de Investigación en Matemáticas, CIMAT,
Guanajuato México

20 de febrero de 2020

Resumen

En este documento, primero se dará una breve introducción a la disciplina y a la investigación en el campo, después se abordan efectos socioeconómicos de la robótica, por ejemplo, la sustitución de trabajadores humanos por robots, el efecto que tienen los robots sobre el aumento de habilidades y conocimientos en dichos trabajadores, así como el aumento en la productividad que la robótica y la automatización ocasionan. Posteriormente, se describirán hitos en investigación en robótica a nivel mundial. A continuación se describirá una parte de la investigación en robótica que realizamos en el Centro de Investigación en Matemáticas—CIMAT—, que incluye el desarrollo de algoritmos y leyes de control que generan capacidades fundamentales en los robots, y que son aplicables en robótica de servicio y automóviles autónomos. Finalmente se presentará la conclusión del artículo.

Palabras clave: **robótica, empleos, productividad, hitos en robótica, investigación en robótica en CIMAT**

1. Introducción

La robótica es una ciencia multidisciplinaria, que intersecta diversas disciplinas, entre otras la ingeniería eléctrica, la ingeniería mecánica y las ciencias de la computación. Sus fundamentos están en las matemáticas y los algoritmos. Es importante mencionar que la investigación en robótica también es multidisciplinaria. Ella requiere de matemáticas, física, computación e ingenierías. Las matemáticas y la computación teórica aportan teoremas y algoritmos que fundamentan el resto. La física aporta modelado mecánico que es indispensable para confrontar al mundo físico. Finalmente, las ingenierías aportan la tecnología necesaria para implementar las leyes de control y algoritmos en el robot físico. La buena investigación en robótica, primordialmente busca definir claramente sus problemas y entender profundamente sus modelos y soluciones. Resultados formales en la forma de teoremas son esenciales, porque representan los cimientos de todo el resto. Pero igual de importantes son los experimentos en robots físicos que confrontan la realidad física, y la programación de algoritmos en lenguajes computacionales, que vuelven al robot operacional, creando prototipos que potencialmente pueden ser aplicados en diversas actividades productivas.

La meta final de la robótica es crear robots autónomos de usos múltiples, que sean capaces de atender ordenes de alto nivel de un usuario humano, tales como: busca mis llaves, limpia la sala de mi casa, o para un automóvil autónomo—que de hecho es un robot—, llévame al centro de la ciudad de León. La tarea de construir robots autónomos es uno de los desafíos científicos y tecnológicos más retadores a los que se enfrenta la humanidad. Las implicaciones socioeconómicas de los robots autónomos son muy importantes y probablemente cambiarán drásticamente la manera de producir bienes y riquezas en los años por venir. A continuación trataremos brevemente algunos efectos socioeconómicos de la robótica.

2. Efectos socioeconómicos

Los incentivos de usar robots en las industrias son varios, ellos permiten mejorar la calidad de los productos, reduciendo errores de producción. También permiten aumentar la velocidad de la producción. Los beneficios económicos de usar robots, consisten en ahorros en costos de la mano de obra y en mejoras en el proceso de producción, aumentando la calidad del producto y la seguridad del proceso, dando como resultado una mayor productividad. Los robots sustituyen trabajadores humanos en diferentes actividades e industrias. Ejemplos típicos son la industria automotriz y la minera. La Fig. 1¹ presenta un ejemplo de automatización con robots en la industria automotriz. Sin embargo, los robots toman principalmente actividades repetitivas, arduas o peligrosas que requieren pocas habilidades o conocimientos. Así, los robots empujan a los trabajadores a adquirir una mejor educación, más habilidades y conocimientos, de tal forma que el trabajador sea capaz de realizar labores que requieran mayor razonamiento y capacidad de solución de problemas, y en general que tengan un mayor componente cognitivo, tal que no pueda ser realizada por un robot. Según McKinsey [1], las actividades que son más susceptibles a ser remplazadas por robots y sistemas automáticos son las físicas, aquellas que se llevan a cabo en ambientes estructurados y predecibles y las relacionadas a recopilación y análisis de datos. El diario el País presenta un artículo donde indica que para 2030 la robótica eliminará hasta 800 millones de empleos, indicando que los países mas afectados serán Japón, Estados Unidos de América y Alemania; se indica que el impacto en México será menor debido a los bajos sueldos [2]. Según un artículo periodístico en el Financiero [3], existen estudios, donde se prevé que entre 9 y 18 millones de empleos en México serán remplazados por robots para el 2030. Según McKinsey, en un bien conocido estudio [1], los escenarios sugieren que para 2055 la mitad de las actividades laborales actuales pueden ser automatizadas, aunque esto puede ocurrir 20 años antes o después dependiendo de varios factores. Entonces, parece inevitable que esta automatización ocurrirá pero aún no es del todo claro con que velocidad.



Figura 1: Robots automatizando la producción de automóviles. Uno de los mayores éxitos económicos de la robótica industrial se encuentra en la industria automotriz.

Otro estudio realizado por Oxford Economics [4] indica que el número de robots ha aumentado 3 veces en las últimas 3 décadas llegando a la actualidad a 2.25 millones, e indica que este incremento se acelerará llegando a 20 millones para el 2030, donde China, por si sola tendrá 14 millones de robots. También se señala que el uso de los robots ha cambiado, en algunos países, por ejemplo Alemania y Japón, ahora la construcción del tipos de robots que aumenta más rápido, ya no se encuentra en la industria manufacturera y automotriz, su uso se ha desplazado a otras actividades como son el transporte, construcción, mantenimiento y trabajo de oficina y administrativo.

¹Imagen tomada de <https://www.eleconomista.com.mx/opinion/En-riesgo-52-de-empleos-en-Mexico-por-robots-y-automatizacion-20170721-0001.html>.

En la economía del futuro, es muy probable que la naturaleza del trabajo se modifique y los trabajadores tengan que interactuar de cerca con robots. Es por esto que es muy recomendable que las políticas públicas contemplen planes donde se ofrezcan programas que entrenen a los trabajadores para interactuar con máquinas automáticas, y otros que incrementen su educación y sus habilidades de tal manera que sus labores no puedan ser remplazadas por robots.

3. Hitos de la robótica a nivel mundial

Los robots han tenido un gran éxito en la industria, principalmente en sectores de la manufactura e industria automotriz, ahí el tipo de robots más común es el manipulador, los cuales son brazos robóticos. Unimate fue el primer robot industrial, ver Fig 2a². Unimate es un brazo robótico que fue diseñado en 1954 por George Devol. En 1959 un prototipo de Unimate fue instalado en una línea de producción en una planta de fundición de General Motors en Trenton New Jersey.

Otro tipo de robots, diferentes a los brazos manipuladores, son los llamados robots móviles, este tipo de robots no están fijos a una base y pueden desplazarse libremente en el ambiente. El primer robot móvil fue Shakey [5] (ver Fig. 2b³), que fue desarrollado en un proyecto que estuvo activo de 1966 a 1972, en el Centro de Investigación en Inteligencia Artificial del Stanford Research Institute (llamado ahora SRI International). Shakey era capaz de general planes deliberativos, que podía modificar si eventos imprevistos ocurrían, por ejemplo que un obstáculo que no estaba contemplado en su plan original apareciera de repente. El proyecto de investigación que creo a Shakey, generó también métodos fundamentales que son ahora clásicos en robótica, inteligencia artificial y procesamiento de imágenes, por ejemplo el famoso algoritmo A* que permite encontrar eficientemente caminos de mínimo costo en grafos [6], o la aplicación de la transformada de Hough en procesamiento de imágenes [7]. El proyecto de investigación que creo a Shakey es un verdadero ejemplo, de un proyecto multidisciplinario exitoso, que representó un avance en el conocimiento en robótica e inteligencia artificial.



(a) Robot manipulador Unimate. El primer robot maipulador en la historia.



(b) Robot móvil Shakey. El primer robot móvil en el mundo.

Figura 2: Unimate y Shakey dos robots pioneros en el área.

Hitos en robótica más actuales, donde aún se realiza investigación, son por ejemplo el robot Atlas o el “self-driving car” de Google. Atlas es un robot humanoide, ver Fig. 3a⁴, que posee un sistema de control de alto desempeño, que le permite caminar, subir escaleras, realizar saltos y piruetas y que es capaz de manipular y desplazar objetos simples tales como cajas. Atlas fue diseñado y construido por la empresa Boston Dynamics, que es una empresa producto “spin-off” del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT). Si bien el sistema de control de Atlas es excelente, el robot aún no es capaz de realizar ciertas tareas que le permitirían colaborar con humanos, por ejemplo no se puede mover

²Imagen tomada de https://twitter.com/yaskawa_motoman/status/586162266443096064

³Imagen tomada de <https://thenewstack.io/remembering-shakey-first-intelligent-robot/>

⁴Imagen tomada de <https://www.pinterest.com/pin/230528074659993567/>

sin chocar en un ambiente poblado con personas desplazándose, o detectar y seguir a una persona dada de forma robusta. Tampoco es capaz de manipular de forma diestra, equipo complicado como un taladro o una llave de tuercas. Más investigación es necesaria para dotarlo de estas capacidades.

El carro autónomo de Google (ver Fig. 4a⁵), se encuentra ahora gestionado por una compañía de desarrollo de tecnología llamada Waymo LCC, que es subsidiaria de Alphabet Inc, conglomerado que incluye a Google mismo. El carro autónomo de Google tiene sus orígenes en Stanley (ver Fig.4b⁶), el automóvil autónomo desarrollado por Sebastian Thrun, profesor de la Universidad de Stanford y su equipo [8]. Stanley ganó el DARPA Grand Challenge en 2005, célebre carrera de automóviles autónomos, evento donde por primera vez, los automóviles completaron de forma autónoma un recorrido de 212 km. Dicha carrera se realizó en caminos de terracería en el desierto en la frontera entre los estados de Nevada y California. Desde la creación de Stanley, numerosos avances se han alcanzado en automóviles autónomos; en diciembre de 2018 Waymo empezó a ofrecer un servicio de taxis comercial con automóviles autónomos en el área metropolitana de Phoenix, a través de una aplicación informática. Si bien existen muchos progresos, aún hay numerosas limitaciones en los carros autónomos, por ejemplo su operación se degrada en condiciones de clima extremo, son susceptibles a fallas en tráfico de alta densidad o redes de carreteras complicadas, por ejemplo muchas intersecciones o tráfico en ambas direcciones. La mayoría de los carros autónomos tampoco funcionan correctamente en calles o carreteras donde los carriles no están claramente delimitados o donde existen baches. Desafortunadamente, estas condiciones son muy frecuentes en países como México u otros de Latinoamérica. Tampoco son capaces de discernir cuando un humano, por ejemplo un oficial de policía, le hace señales para que se detenga. Amplia investigación debe aún ser realizada para dotar a los automóviles autónomos de estas capacidades y para aumentar la seguridad de sus usuarios.



(a) Robot humanoide Atlas, diseñado y construido por Boston Dynamics.



Derek Demun walks with the aid of his ReWalk exoskeleton. CBS NEWS

(b) Exoesqueleto que permite recuperar la movilidad a personas con capacidades diferentes.

Figura 3: Robots humanoides y exoesqueletos, dos campos de investigación actual en robótica.

Otro tipo de robots, donde se ha realizado importantes avances son los exoesqueletos robóticos. Un exoesqueleto es un esqueleto externo que soporta y protege el cuerpo de un animal. Un exoesqueleto robótico es una maquina usable que se pone como un traje, y que incrementa la fuerza y resistencia del usuario humano. El sistema es dotado de potencia por una combinación de sistemas eléctricos neumáticos y mecánicos. También están dotados de captores, que ya sea perciben directamente el movimiento de las articulaciones o detectan las señales nerviosas que el cerebro envía a los músculos, y hace que los motores del exoesqueleto actúen acorde al movimiento del cuerpo del usuario humano. Este tipo de dispositivo se utilizan para aumentar la fuerza y resistencia del usurario humano, lo que

⁵Imagen tomada de <https://edition.cnn.com/2014/04/28/tech/innovation/google-self-driving-car/index.html>

⁶Imagen tomada de <https://www.smithsonianmag.com/smithsonian-institution/robot-car-stanley-is-on-the-move-87776637/>



(a) El carro autónomo de Google, en 2018 se empezó a ofrecer un servicio de taxis comerciales en Phoenix.



(b) Stanley el robot que ganó el DARPA Grand Challenge en 2005.

Figura 4: Stanley y el “self-driving car” de Google, dos iconos en los automóviles autónomos.

le permite, por ejemplo, cargar objetos de gran peso durante un largo tiempo o desplazarse distancias considerables, lo cual no le fuera posible al usuario sin este dispositivo. Los exoesqueletos también se han usado para devolverle la movilidad a personas que han sufrido de parálisis u otros problemas serios de movilidad, ver Fig. 3b⁷. Existe actualmente mucha investigación en este tipo de dispositivos y los resultados son muy prometedores.

Otro tipo de investigación muy actual en robótica, se realiza en sistemas con múltiples robots. El principal objetivo en este tipo de sistema es repartir la tarea entre varios robots, también se busca aprovechar las diferentes capacidades de robots heterogéneos, ver Fig5⁸. Sin embargo, en este tipo de sistemas se deben investigar métodos para coordinar los movimientos de los robots y distribuir las tareas de sensado y de computo para obtener mejores desempeños. Numerosas aplicaciones para sistemas de múltiples robots son posibles, una de ellas, para un sistema de múltiples robots formado por drones, es la cobertura de sembradíos en agricultura de precisión, para indicar si los cultivos están creciendo adecuadamente, si necesitan más riego o fertilizantes, o si han sido afectados por alguna plaga. Investigación exhaustiva se realiza actualmente en todo el mundo en sistemas con múltiples robots.



Figura 5: Un conjunto de robots heterogéneos, algunos de ellos terrestres otros aéreos, que pueden cooperar para realizar tareas, por ejemplo inspeccionar un campo de cultivo, o explorar un ambiente y construir un mapa de dicho ambiente.

Muchos avances se han conseguido en robótica, pero una prueba clara que aún queda mucho por hacerse, es que aún no es común ver robots en las calles de las ciudades y en los hogares de las personas. Para conseguir que los robots sean útiles en estos contextos, más investigación es necesaria.

⁷ Imagen tomada de <https://www.cbsnews.com/news/robotic-exoskeletons-helping-paraplegics-walk-again/>

⁸ Imagen tomada de <http://www.giannidicaro.com/robotics.html>

4. Investigación en robótica en CIMAT

Uno de los objetivos básicos de la investigación que realizamos en CIMAT, es crear nuevos algoritmos⁹ y técnicas de control que permitan que los robots conviertan especificaciones de alto nivel de tareas humanas en descripciones de bajo nivel de cómo moverse para realizar una tarea. Dichas tareas pueden ser variadas, por ejemplo, determinar cómo moverse para encontrar un objeto, cómo moverse para explorar un ambiente desconocido o cómo moverse para capturar un agente móvil. También buscamos integrar técnicas de planificación de movimientos [9, 10] de robots con métodos de control retroalimentados, por ejemplo control visual [11, 12]. Cada una de estas técnicas tienen ventajas y limitaciones. El control retroalimentado es robusto a la presencia de incertidumbre, dado que recalcula la acción a cada ciclo de control, basado en la información provista por sensores tales como cámaras o telémetros láser. Sin embargo, no está bien adaptado para lidiar con obstáculos que producen restricciones de movimiento y visibilidad. En contraste, los métodos de planificación de movimientos están bien adaptados para lidiar con obstáculos y producen planes deliberativos. Sin embargo típicamente estos métodos no aprovechan totalmente información de retroalimentación provista por sensores. En CIMAT realizamos investigación para fusionar de forma coherente dichos paradigmas, explotando y complementando sus ventajas, para lograr que los robots realicen tareas complejas.

Algunas de las investigaciones recientes más relevantes que hemos realizado o estamos realizando en CIMAT, son las siguientes. En [13], se investiga el problema de confirmar la identidad de un objeto candidato (que se espera sea el blanco buscado, basado en algunas características visuales simples) con un robot móvil equipado con capacidades de sensado visuales, ver Fig. 6a. Proponemos un método cuya principal novedad es que mezcla la localización del robot relativa al objeto candidato y la confirmación de que el objeto candidato es el blanco buscado. Esta metodología dual reduce drásticamente la aparición de falsos positivos. El proceso de confirmación con esta meta dual, es modelado como un Proceso de Decisión de Markov Parcialmente Observable (POMDP) donde los estados son celdas en una partición del espacio de trabajo. El proceso es resuelto usando Programación Dinámica Estocástica con información imperfecta del estado. Un sistema robótico que usa este método fue implementado y se llevaron a cabo experimentos tanto en simulación como en un robot real. Dichos experimentos validan de forma empírica el desempeño del método usando varias métricas y muestran su habilidad para desempeñarse correctamente en diferentes escenarios.

En [14] proponemos un método para la reconstrucción tridimensional (3D) de un objeto, con un robot manipulador móvil equipado con un sensor, ubicado en el efector final del robot, ver Fig. 6b. Este es uno de los primeros métodos que determina la mejor siguiente vista/estado en el espacio de estados. El método también determina los controles que producen una trayectoria libre de colisión para alcanzar un estado, usando los árboles aleatorios de exploración rápida (RRTs). La siguiente mejor vista/estado es seleccionada basándose en la utilidad esperada, generando muestras en el espacio de controles que incluyen una distribución de los errores en los controles acorde a la dinámica del robot. Esto hace robusto al método con respecto a errores de posicionamiento y reduce de manera significativa la tasa de colisión e incrementa la cobertura del objeto a ser reconstruido. Este trabajo se realizó en colaboración con colegas del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE).

El trabajo en [15] se refiere a un juego de persecución/evasión. En persecución/evasión un robot o grupo de robots buscan cazar a otros. En [15], estudiamos el caso donde un evasor se desvía de su política óptima, analizamos como el perseguidor puede tomar ventaja de dicha desviación. En particular analizamos la situación cuando el evasor no utiliza su rapidez máxima potencial, lo cual puede ocurrir en situaciones donde las capacidades del evasor se degradan con el tiempo, por ejemplo fatiga en un animal que intenta evadirse o desgaste de las baterías en un vehículo autónomo. Demostramos matemáticamente que bajo estrategias no anticipativas, una estrategia del perseguidor que usa solo la velocidad instantánea del evasor para decidir su acción, no siempre mejora el tiempo de captura ni garantiza la captura del evasor. En un segundo resultado proponemos leyes de control¹⁰ retroalimentadas que se basan únicamente en la posición del evasor en una imagen tomada con una cámara montada en el perseguidor y que no requieren la reconstrucción del estado del evasor, lo que las vuelve

⁹Un algoritmo es una serie bien establecida de pasos para realizar una tarea.

¹⁰Una ley de control es un modelo que de acuerdo a las entradas del sistema e.g. velocidades, determina el comportamiento del robot.



(a) Búsqueda de objetos, el robot está equipado con una cámara para tomar imágenes del objeto a detectar y un teledetector láser para medir distancia a los obstáculos y evitar colisionar con ellos. Imagen tomada de [13]



(b) Reconstrucción de objetos, un manipulador móvil equipado con un sensor 3D se utiliza para reconstruir objetos de manera autónoma, en la imagen el objeto reconstruido es una silla. Imagen tomada de [14]

Figura 6: Investigación en CIMAT en búsqueda y reconstrucción de objetos en CIMAT.

computacionalmente eficientes y robustas a oclusiones.

El trabajo en [16], se refiere a un sistema robótico complejo formado por un manipulador móvil equipado con una cámara montada en el efector final del brazo. Conceptos relevantes para dichos sistemas, tales como dominancia en tiempo y separabilidad son propuestos. Además se obtienen resultados teóricos fundamentales en técnicas basadas en muestreo, para alcanzar optimalidad global asintótica, con un funcional de costo que integra varios factores, para sistemas dinámicos con restricciones noholonómicas y de visibilidad. Experimentos en un robot manipulador móvil físico son presentados, los cuales validan el modelado teórico. El sistema es capaz de mantener un objeto estático en el campo de vista de la cámara, mientras el robot se mueve de una posición a otra, viajando las trayectorias más cortas en tiempo en un ambiente con obstáculos, ver Fig. 7. Aplicaciones de tales sistemas, son entre otras, supervisión remota de procesos industriales con robots manipuladores móviles.



Figura 7: Un robot manipulador móvil equipado con una cámara en el efector final del brazo, es capaz de mantener un objeto estático (en este experimento una taza sobre una silla) en el campo de vista de la cámara, mientras el robot se mueve de una posición a otra, viajando las trayectorias más cortas en tiempo en un ambiente con obstáculos. Imagen tomada de [16].

Recientemente y gracias a la donación de un automóvil robótico a escala, realizado por el Prof.

Raúl Rojas a CIMAT, hemos comenzado nuestra investigación en automóviles autónomos. Nuestros primeros resultados los presentamos en [17]. En el trabajo presentado en [17], proponemos un método para conducción autónoma de un automóvil, en una carretera de dos sentidos. La metodología es capaz de decidir si es posible rebasar un automóvil en el mismo carril, sin chocar con los automóviles que se mueven en el carril contrario. El método integra planificación y control visual basado en imágenes y se aplica en seguimiento de la carretera y evita colisión con objetos móviles o estáticos. Todos los algoritmos y leyes de control propuestos fueron implementados y se presentan resultados en simulación y experimentos en robot real, un automóvil a escala dotado con una cámara y un télemetro laser, ver Fig. 8a

En la actualidad, y motivados por el trabajo descrito anteriormente, estamos trabajando en generar estilos de conducción confortables para usuarios humanos. La idea principal es que el automóvil no solo debe ser autónomo, sino que la forma en que se conduce debe ser confortable para el humano. Estamos combinando técnicas estadísticas y realidad virtual para encontrar los parámetros (aceleración, distancia a los otros automóviles, etc.) que produzcan diferentes estilos de manejo (e. g. agresivo, conservador o medio). Usando un casco de realidad virtual exponemos a los usuarios humanos a los diferentes estilos de conducción presentados en ambientes simulados, ver Fig. 8b. Estamos realizando encuestas y análisis estadístico para determinar, si los usuarios pueden distinguir los diferentes estilos de conducción y cual prefieren dependiendo del contexto y circunstancias. Esta investigación la estamos realizando en colaboración con colegas del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).



(a) Un automóvil autónomo a escala que evita un obstaculo mientras se mantiene en la pista. Imagen tomada de [17].



(b) Simulaciones utilizadas para determinar estilos de conducción confortables combinando técnicas estadísticas y realidad virtual. Imagen cortesía de Rafael Peralta, estudiante de maestría en CICESE.

Figura 8: Investigación en CIMAT en automóviles autónomos. Una combinación de robótica y realidad virtual

5. Conclusiones

El impacto socioeconómico de los robots a través del tiempo en la sociedad mundial y nacional es innegable. Además, su aumento en número y diversificación de usos es inevitable según estudios recientes. Si bien se han conseguido avances significativos en investigación robótica, existen aún muchos problemas científicos y tecnológicos a resolver, para que los robots puedan cooperar con humanos, para realizar tareas útiles y productivas, y para que su uso se extienda de las fabricas, y ensambladoras a los hogares, oficinas, escuelas y hospitales. También existen preguntas de carácter filosófico y ético a contestar, por ejemplo: ¿Debemos buscar dotar al robot de conciencia, o en su lugar debemos únicamente dotarlo de autonomía, de tal manera que sea útil para obedecer ordenes de alto nivel de

usuarios humanos?

Mucha más investigación en robótica será necesaria en los años futuros. Es en centros de investigación como CIMAT donde algoritmos fundamentales y técnicas de control básicas, se crearán para dotar a los robots de nuevas capacidades, que permitan aumentar la productividad en la industria, y la riqueza y bienestar del país. Además es también en estos centros de investigación donde se formarán recursos humanos de excelencia, que serán los futuros investigadores científicos en centros de investigación y profesores en instituciones de enseñanza. La generación de conocimiento y la formación de recursos humanos de excelencia, son el mayor aporte social que los centros de investigación dan al país. Es por esta razón que los centros de investigación deben ser preservados y apoyados por las políticas públicas y los gobernantes del país.

Referencias

- [1] Mckinsey global institute, Un futuro que funciona: automatización, empleo y productividad, enero, 2017.
- [2] La robótica eliminará hasta 800 millones de empleos en el 2030, artículo en el País. 30 Nov. 2017. Recuperado de, https://elpais.com/economia/2017/11/30/actualidad/1512012918_284848.html
- [3] Robots 'arrebatarían' hasta 18 millones de empleos a mexicanos, 29 de Nov. 2017, artículo en el Financiero. Recuperado de, <https://www.elfinanciero.com.mx/tech/robots-arrebatarian-hasta-18-millones-de-empleos-a-mexicanos>
- [4] Oxford Economics, How robots change the world, what automation means for jobs and productivity, June 2019.
- [5] Benjamin Kuipers, Edward A. Feigenbaum, Peter E. Hart, Nils J. Nilsson, Shakey: From Conception to History. *AI Magazine* 38(1): 88-103, 2017.
- [6] Peter E. Hart, Nils J. Nilsson, Bertram Raphael, A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Trans. Systems Science and Cybernetics* 4(2): 100-107, 1968.
- [7] Richard O. Duda, Peter E. Hart, Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. *Commun. ACM* 15(1): 11-15, 1972.
- [8] Sebastian Thrun, Michael Montemerlo, Hendrik Dahlkamp, David Stavens, Andrei Aron, James Diebel, Philip Fong, John Gale, Morgan Halpenny, Gabriel Hoffmann, Kenny Lau, Celia M. Oakley, Mark Palatucci, Vaughan R. Pratt, Pascal Stang, Sven Strohband, Cedric Dupont, Lars-Erik Jendrossek, Christian Koelen, Charles Markey, Carlo Rummel, Joe van Niekerk, Eric Jensen, Philippe Alessandrini, Gary R. Bradski, Bob Davies, Scott Ettinger, Adrian Kaehler, Ara V. Nefian, Pamela Mahoney, Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge. *J. Field Robotics* 23(9): 661-692, 2006.
- [9] Jean-Claude Latombe, Robot motion planning. Norwell, MA: Kluwer Academic, 1991.
- [10] Steven M. LaValle Planning Algorithms. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [11] Seth Hutchinson, Gregory Hager and Peter Corke, A tutorial on visual servo control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12, 651-670, 1996.
- [12] François Chaumette and Seth Hutchinson, Visual servo control, part I: Basic approaches. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(4), 82-90, 2006.
- [13] Israel Becerra, Luis M. Valentin-Coronado, Rafael Murrieta-Cid and Jean-Claude Latombe, Reliable confirmation of an object identity by a mobile robot: A mixed appearance/localization-driven motion approach. *I. J. Robotics Res.* 35(10), pp. 1207-1233 2016.

- [14] Juan Irving Vasquez-Gomez, Luis Enrique Sucar, Rafael Murrieta-Cid, View/state planning for three-dimensional object reconstruction under uncertainty. *Auton. Robots* 41(1): 89-109, 2017.
- [15] Vladimir Macias, Israel Becerra, Rafael Murrieta-Cid, Hector M. Becerra and Seth Hutchinson, Image Feedback based Optimal Control and the Value of Information in a Differential Game, *Automatica*, Vol 90, pages 271-285, April, 2018.
- [16] Israel Becerra, Heikel Yervilla-Herrera and Rafael Murrieta-Cid, An Experimental Analysis on the Necessary and Sufficient Conditions for the RRT* Applied to Dynamical Systems, *13th International Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics, WAFR 2018*, Mérida México, in press.
- [17] Ramses Reyes and Rafael Murrieta-Cid, An Approach Integrating Planning and Image Based Visual Servo Control for Road Following and Moving Obstacles Avoidance, *International Journal of Control*, pages 1-15, 2019, in press. Available at: <https://doi.org/10.1080/00207179.2018.1562225>